



TESIS DOCTORAL

**ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LOS
ESTÍMULOS VESTIBULARES EN LA
TELEOPERACIÓN DE VEHÍCULOS DESDE
PUESTOS MULTISENSORIALES**

Jesús Ortiz Sánchez-Lafuente

Área de Ingeniería e Infraestructuras de los Transportes
Departamento de Ingeniería Mecánica
Universidad de Zaragoza

Junio de 2008

ÁREA DE INGENIERÍA E INFRAESTRUCTURAS DE LOS TRANSPORTES

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA

TESIS DOCTORAL

**ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LOS ESTÍMULOS
VESTIBULARES EN LA TELEOPERACIÓN DE
VEHÍCULOS DESDE PUESTOS MULTISENSORIALES**

Autor

Jesús Ortiz Sánchez-Lafuente

Ingeniero Industrial

Director

Mario Vicente Maza Frechín

Doctor Ingeniero Industrial

Zaragoza, 2008

Agradecimientos

En primer lugar quiero darle las gracias a mi director, Mario Maza, ya que sin él nunca hubiera realizado esta tesis. Primero porque fue él el que me animó a hacer el doctorado y segundo porque me ha prestado toda su ayuda y medios disponibles para realizar la tesis.

Quiero dedicar un agradecimiento especial a Jean-Guy Fontaine, ya que es el artífice de muchos de los conceptos sobre los que se basa esta Tesis. Sus ideas son los cimientos de todo lo que viene a continuación.

A Santiago Baselga, ya que gracias a él comencé a trabajar en investigación en la Universidad de Zaragoza.

A Ramón Del Cacho, que es capaz de construir cualquier máquina que se pueda imaginar.

A todo el Departamento de Ingeniería e Infraestructura de los Transportes de la Universidad de Zaragoza, que han sido mis compañeros durante más de tres años.

Y por último, a todas las personas que me han ido ayudando durante todo el camino.

Gracias.

Resumen

Existen muchas aplicaciones en las que el operador no puede estar en el lugar en el que trabaja el vehículo o máquina móvil. Por esta razón se ha desarrollado la teleoperación que, como su nombre indica, consiste en realizar la conducción a distancia del vehículo.

La teleoperación puede ser usada en aplicaciones en las que existe un riesgo físico para el operador, como por ejemplo en tareas de desactivación de explosivos o exploración de entornos desconocidos/hostiles con vehículos instrumentados, etc.

En otras ocasiones, aunque la aplicación no sea peligrosa para el operador, puede resultar más eficaz el uso de un vehículo teleoperado, como por ejemplo en tareas de vigilancia, en las que una sola persona puede realizar trabajos en diversos puestos alejados unos de otros.

En la teleoperación de vehículos es muy importante la información con la que se provee al conductor remoto, ya que no se encuentra en el lugar de los hechos y no tiene acceso directo a toda la información del proceso.

En esta tesis se pretende mejorar la destreza en la teleoperación de vehículos mediante el uso de puestos de conducción multisensoriales, para así aproximarse aún más al concepto de telepresencia. Estos puestos multisensoriales están formados por una plataforma de movimiento y un sistema de audio/video y proveen al operador de abundantes estímulos que mejoran su percepción de la evolución del vehículo y la sensación de telepresencia.

En la primera parte de la tesis se introducen los términos de teleoperación de vehículos y telepresencia y se presentan los objetivos y el alcance de la tesis.

La segunda parte de la tesis describe el estado del arte de la teleoperación de vehículos con una descripción de los sistemas actuales clasificados según las aplicaciones. También se analiza el sistema de percepción humano que incluye el sistema vestibular, ocular y auditivo. Este análisis es importante, ya que a partir de los modelos matemáticos ya existentes de la percepción humana podemos realizar una comparación objetiva de las diversas arquitecturas de plataformas de movimiento mediante el programa Matlab-Simulink.

En la tercera parte se describe el desarrollo de diversos vehículos teleoperados (alta velocidad, baja velocidad ...), las pruebas realizadas y el análisis de los resultados obtenidos. Estas tecnologías fueron desarrolladas en el proyecto europeo *TeleDrive* (Vehicle Teleoperation System for Application to Entertainment Research and Remote Interventions IST-2002-57451), en el que se realizó un sistema completo de teleoperación de vehículos mediante el uso de puestos multisensoriales dotados de plataformas móviles.

Abstract

There are lots of applications where the operator cannot be in the same place where a vehicle or machine is working. For this reason, teleoperation has been developed, to make possible to operate remotely a vehicle.

Teleoperation can be used in applications where there is a risk for the operator, for example in explosives defusing or unknown/dangerous environment explorations with ROVs (Remotely Operated Vehicles), etc.

In other occasions, although the application is not dangerous for the operator, it can be much more efficient to use a ROV, for example in surveillance, because using this system one single person can oversee different distance points.

In vehicle teleoperation it is very important the information exchanged between the ROV and the remote operator, because he is not in the place where the job is being developed and he has no access to all the information about the process.

The objective of this thesis is to develop the technical knowledge to improve the dexterousness in vehicle teleoperation by means of the use of multisensorial driving posts, to try to approximate to the concept of telepresence. This multisensorial post is composed by a motion base and an audio/video system to give the operator enough stimuli to improve the perception in teleoperation and increasing the telepresence sensation.

In the first part of this thesis the terms of vehicle teleoperation and telepresence will be presented and the main objectives and the scope of this thesis as well.

The second part of this thesis will describe the vehicle teleoperation state of the art with a description of the current systems classified according to their application. The human perception system is analyzed as well, including the vestibular, ocular and audition systems. This is a very important analysis, because from the existent human perception mathematical models we can make an objective comparison between different motion base architectures using Matlab-Simulink.

In the third part it is described the development of several ROVs (high and low speed), tests made and the analysis of the obtained results. All these technologies were developed in the European project *TeleDrive* (Vehicle Teleoperation System for Application to Entertainment Research and Remote Interventions IST-2002-57451), where a full vehicle teleoperation system was developed using multisensorial driving posts with motion bases.

Índice general

I. Tesis	1
1. Introducción	1
1.1. ¿Qué es la teleoperación y la telepresencia?.....	1
1.2. La importancia de la información.....	2
1.3. Motivación de la tesis.....	3
1.4. Objetivos y alcance de la tesis.....	3
1.5. Estructura de la tesis.....	4
2. Teleoperación y telepresencia: Estado del arte	5
2.1. Introducción.....	5
2.2. Aplicaciones de la teleoperación.....	6
2.2.1. Tareas peligrosas.....	6
2.2.1.1. TEDAX y EOD.....	6
2.2.2. Exploración.....	8
2.2.2.1. Exploración del espacio.....	9
2.2.2.2. Exploración del océano.....	16
2.2.2.3. Exploración de las pirámides.....	20
2.2.3. Supervisión y vigilancia.....	21
2.2.4. Entretenimiento.....	23
2.3. Telepresencia como mejora de la teleoperación.....	24
2.3.1. Introducción.....	24
2.3.2. Vídeo.....	24
2.3.2.1. Monitor.....	25
2.3.2.2. Proyector.....	26
2.3.2.3. Casco/gafas de realidad virtual.....	27
2.3.3. Audio.....	27

2.3.3.1.	Micrófono omnidireccional y altavoces/auriculares.....	27
2.3.3.2.	Sonidos binaurales.....	28
2.3.3.3.	Holofonía.....	28
2.3.3.4.	Sonido envolvente.....	29
2.3.4.	Movimiento.....	29
2.4.	Interacción entre el mundo real y el mundo virtual.....	30
2.4.1.	Introducción.....	30
2.4.2.	Sistemas de transmisión de datos y vídeo.....	30
2.4.3.	Realidad aumentada.....	32
2.4.4.	Sistemas hápticos.....	33
2.5.	Sistema de percepción humano.....	34
2.5.1.	Introducción.....	34
2.5.2.	Sistema vestibular.....	35
2.5.2.1.	Introducción.....	35
2.5.2.2.	Rotación.....	35
2.5.2.3.	Traslación.....	39
2.5.3.	Visión.....	42
2.5.4.	Sonido.....	44
2.5.5.	Otros.....	45
2.6.	Plataformas de movimiento.....	46
2.6.1.	Introducción y estado del arte.....	46
2.6.2.	Simulación del movimiento.....	47
2.6.2.1.	Introducción.....	47
2.6.2.2.	Sistemas de coordenadas.....	48
2.6.2.3.	Matrices de transformación.....	50
2.6.2.4.	Cálculo de la velocidad angular.....	52
2.6.2.5.	Simulación de la velocidad angular.....	53
2.6.2.6.	Simulación de la fuerza específica.....	53
2.6.3.	Estrategia de control.....	54
2.6.3.1.	Introducción.....	54
2.6.3.2.	Simulación de la velocidad angular.....	55
2.6.3.3.	Simulación de la fuerza específica de alta frecuencia.....	56
2.6.3.4.	Simulación de la fuerza específica de baja frecuencia.....	57
2.6.4.	Simulación con Matlab/Simulink.....	61
2.6.4.1.	Datos de entrada.....	63
2.6.4.2.	Simulación de la fuerza específica.....	64
2.6.4.3.	Cálculo de la rotación de la plataforma.....	66
2.6.4.4.	Cálculo de los desplazamientos de la plataforma.....	67
2.6.4.5.	Cálculo de la percepción de movimiento.....	67

2.6.4.6. Interfaz gráfico de usuario.....	69
2.6.5. Plataforma hexápoda “Stewart”.....	73
2.6.5.1. Introducción.....	73
2.6.5.2. Historia de la plataforma hexápoda.....	73
2.6.5.3. Arquitectura y características técnicas.....	81
2.6.5.4. Análisis con MatLab.....	82
2.6.6. Plataforma esférica.....	83
2.6.6.1. Introducción.....	83
2.6.6.2. Arquitectura y características técnicas.....	84
2.6.6.3. Análisis con MatLab.....	90
2.6.7. Plataforma de paralelogramos.....	91
2.6.7.1. Introducción.....	91
2.6.7.2. Arquitectura y características técnicas.....	91
2.6.7.3. Análisis con MatLab.....	94
2.6.8. Plataformas sobre raíles.....	95
2.6.8.1. Introducción.....	95
2.6.8.2. Arquitectura y características técnicas.....	96
2.6.8.3. Análisis con MatLab.....	96
2.6.9. Análisis de los resultados obtenidos.....	97
2.6.9.1. Introducción.....	97
2.6.9.2. Caso 1: “Aceleración – Frenada”.....	98
2.6.9.3. Caso 2: “Slalom”.....	109
2.6.9.4. Caso 3: “Baches”.....	121
2.6.9.5. Conclusiones.....	132

3. Desarrollo y pruebas de un sistema integrado de teleoperación/telepresencia

133

3.1. Introducción.....	133
3.2. Funcionamiento del sistema.....	134
3.2.1. Introducción.....	134
3.2.2. Vehículo teleoperado.....	136
3.2.2.1. Vehículo terrestre.....	137
3.2.2.2. Vehículo submarino.....	140
3.2.3. Estación de control central.....	142
3.2.4. Estación de control remoto.....	145
3.2.5. Showroom.....	146
3.3. Sistemas de comunicación.....	148
3.3.1. Introducción.....	148

3.3.2. Programa Teledrive.....	149
3.3.3. Vídeo.....	152
3.3.4. Controles sensores y otros datos.....	154
3.3.5. Vehículo terrestre.....	155
3.3.5.1. Comandos de movimiento.....	155
3.3.5.2. Transmisión de datos.....	157
3.3.5.3. Transmisión de audio y vídeo.....	159
3.3.6. Vehículo submarino.....	160
3.3.6.1. Comandos de movimiento.....	160
3.3.6.2. Transmisión de datos.....	161
3.3.6.3. Transmisión de vídeo.....	162
3.3.6.4. Módulo de realidad aumentada.....	162
3.4. Ensayos realizados.....	164
3.4.1. Prueba de teleoperación desde grandes distancias.....	164
3.4.2. Prueba del mini-submarino teleoperado en Oceanopolis.....	166
3.4.3. Prueba del sistema de visión estereoscópica.....	168
3.4.4. Prueba del sistema completo.....	168
3.5. Conclusiones.....	171

4. Desarrollo y pruebas de un vehículo teleoperado de media velocidad

173

4.1. Introducción.....	173
4.2. Objetivos y funciones del vehículo.....	173
4.3. Diseño del vehículo teleoperado.....	175
4.3.1. Introducción.....	175
4.3.2. Vehículo base.....	176
4.3.3. Sistemas adicionales de teleoperación.....	176
4.3.4. Sistema de comunicaciones.....	179
4.3.5. Interfaz de control.....	181
4.4. Ajustes del sistema.....	183
4.5. Ensayos realizados.....	184
4.5.1. Pruebas en la Universidad de Zaragoza.....	184
4.5.2. Pruebas en pista.....	184
4.6. Conclusiones.....	186

5. Conclusiones y futuros trabajos

187

5.1. Conclusiones generales.....	187
5.2. Contribuciones originales de esta tesis.....	188

5.3. El futuro de la teleoperación y telepresencia.....	189
5.4. Líneas futuras de investigación.....	189

II. Anexos

A. Artículos y publicaciones 191

A.1. Artículos de revista.....	191
A.2. Congresos Internacionales.....	241
A.3. Congresos Nacionales.....	261

B. Notas de prensa 273

B.1. "Quand l'oeil de Dieu joue du robot depuis le Népal". Le Berry Republicain. Miércoles 5 de noviembre de 2003.....	274
B.2. "La universidad crea una cabina virtual que simula un vehículo". 20 minutos Zaragoza. Viernes 29 de octubre de 2004.....	275
B.3. "Vehículos teleoperados para los parques de ocio". Heraldo de Aragón. Martes 16 de noviembre de 2004.....	276
B.4. "Teledrive, entre lo real y lo virtual". Diario del Alto Aragón. Domingo 26 de diciembre de 2004.....	277
B.5. "Realidad virtual para todos los sentidos". El Periódico de Aragón. Jueves 2 de junio de 2005.....	278
B.6. "Un coche para salvar vidas". El Periódico de Aragón. Lunes 29 de agosto de 2005.....	279
B.7. "Vehículos teleoperados, vigilancia sin riesgos". Heraldo de Aragón. Martes 28 de marzo de 2006.....	280
B.8. "Un viaje virtual gracias a la teleoperación". El Periódico de Aragón. Jueves 30 de marzo de 2006.....	281

C. Software desarrollado 283

C.1. Proyecto <i>Teledrive</i>	283
C.1.1. Programa Teledrive.....	283
C.1.2. Programa Transmitter.....	284
C.1.3. Programa Receiver.....	285
C.1.4. Programa de control de las plataformas.....	285
C.2. Proyecto " <i>Desarrollo de un vehículo teleoperado</i> "......	287
C.2.1. Interfaz de control.....	287

Índice de figuras

2.1. Posición idónea para manejar un vehículo teleoperado de desactivación de explosivos.....	8
2.2. Exploración de la pirámide de Keops.....	21
2.3. Sistemas de transmisión de datos.....	31
2.4. Uso combinado de varios sistemas de transmisión.....	32
2.5. Esquema del oído humano.....	35
2.6. Esquema de los canales semicirculares del oído interno.....	36
2.7. Diagrama de Bode del modelo de percepción del cabeceo.....	38
2.8. Diagrama de Bode del modelo de percepción del balanceo.....	39
2.9. Diagrama de Bode del modelo de percepción del guiñado.....	39
2.10. Diagrama de Bode del modelo de percepción de la fuerza específica.....	42
2.11. Esquema del ojo humano.....	43
2.12. Percepción especial del sonido.....	44
2.13. Esquema de la simulación del movimiento.....	48
2.14. Esquema de los sistemas de coordenadas utilizados.....	49
2.15. Simulación de la velocidad angular.....	56
2.16. Simulación de la fuerza específica de alta frecuencia.....	57
2.17. Método 1 para simular la fuerza específica de baja frecuencia.....	58
2.18. Método 2 para simular la fuerza específica de baja frecuencia.....	60
2.19. Diagrama de bloques usado en Simulink.....	62
2.20. Escalado y filtro paso alto de la velocidad angular.....	63
2.21. Bloque de escalado de la fuerza específica.....	64
2.22. Filtro paso bajo para simular la fuerza específica de baja frecuencia.....	65
2.23. Filtro paso alto para simular la fuerza específica de alta frecuencia.....	65
2.24. Bloque de cálculo de la matriz E_s	66
2.25. Bloque de cálculo de la matriz S_s	67
2.26. Bloque de Simulink de percepción de la fuerza específica.....	68

2.27. Bloque de Simulink de percepción de la velocidad angular en el eje X.....	68
2.28. Bloque de Simulink de percepción de la velocidad angular en el eje Y.....	68
2.29. Bloque de Simulink de percepción de la velocidad angular en el eje Z.....	68
2.30. Pantalla principal del interfaz gráfico de usuario.....	69
2.31. Pantalla de selección de los archivos de datos.....	70
2.32. Pantalla de resultados.....	71
2.33. Representación gráfica de la simulación de la plataforma esférica.....	72
2.34. Representación gráfica de la simulación de la plataforma Stewart.....	72
2.35. Representación gráfica de la simulación de la plataforma sobre raíles.....	73
2.36. Posiblemente el primer mecanismo de paralelogramos, patentado en 1931 (Patente EE.UU. N ^o 1.789.680).....	74
2.37. El primer diseño de un robot industrial de paralelogramos, patentado en 1942 (Patente EE.UU. N ^o 2.286.571).....	75
2.38. Dibujo esquemático de la auténtica plataforma Stewart (ImechE proceedings, 1965-1966).....	78
2.39. Extracto de la primera patente de la plataforma hexápoda con geometría octaédrica registrada en 1967 (Patente EE.UU. No ^o 3.295.224).....	79
2.40. Esquema de la plataforma hexápoda.....	81
2.41. Esquema de la plataforma esférica con los ejes del sistema de referencia. .	85
2.42. Datos de entrada.....	99
2.43. Grados de libertad de la plataforma.....	100
2.44. Datos de entrada y datos simulados por la plataforma.....	101
2.45. Percepción del movimiento real y del simulado por la plataforma.....	102
2.46. Grados de libertad de la plataforma.....	103
2.47. Datos de entrada y datos simulados por la plataforma.....	104
2.48. Percepción del movimiento real y del simulado por la plataforma.....	105
2.49. Grados de libertad de la plataforma.....	106
2.50. Datos de entrada y datos simulados por la plataforma.....	107
2.51. Percepción del movimiento real y del simulado por la plataforma.....	108
2.52. Percepción de la fuerza específica longitudinal F_x	109
2.53. Datos de entrada.....	110
2.54. Grados de libertad de la plataforma.....	112
2.55. Datos de entrada y datos simulados por la plataforma.....	113
2.56. Percepción del movimiento real y del simulado por la plataforma.....	114
2.57. Grados de libertad de la plataforma.....	115
2.58. Datos de entrada y datos simulados por la plataforma.....	116
2.59. Percepción del movimiento real y del simulado por la plataforma.....	117
2.60. Grados de libertad de la plataforma.....	118
2.61. Datos de entrada y datos simulados por la plataforma.....	119

2.62. Percepción del movimiento real y del simulado por la plataforma.....	120
2.63. Percepción de la fuerza específica lateral.....	121
2.64. Datos de entrada.....	122
2.65. Grados de libertad de la plataforma.....	123
2.66. Datos de entrada y datos simulados por la plataforma.....	124
2.67. Percepción del movimiento real y del simulado por la plataforma.....	125
2.68. Grados de libertad de la plataforma.....	126
2.69. Datos de entrada y datos simulados por la plataforma.....	127
2.70. Percepción del movimiento real y del simulado por la plataforma.....	128
2.71. Grados de libertad de la plataforma.....	129
2.72. Datos de entrada y datos simulados por la plataforma.....	130
2.73. Percepción del movimiento real y del simulado por la plataforma.....	131
3.1. Esquema de teleoperación del proyecto TeleDrive.....	134
3.2. Esquema de las comunicaciones en TeleDrive.....	135
3.3. Ensayo sin puesto multisensorial y con visión directa.....	143
3.4. Ensayo de operación remota a través de Internet y sin puesto multisensorial.....	144
3.5. Ensayo de teleoperación remota a través de Internet y con puesto multisensorial.....	145
3.6. Esquema de comunicaciones de los programas del proyecto TeleDrive....	148
3.7. Proceso completo de transmisión de vídeo en el proyecto TeleDrive.....	152
3.8. Esquema de la unidad emisora DTRII.....	155
3.9. Esquema de la unidad receptora DTRII.....	156
3.10. Esquema interno de las estaciones esclava y maestra.....	158
3.11. Conexiones externas de las unidades esclava y maestro.....	159
3.12. Detalles de las funciones de los botones del Pad de control.....	160
3.13. Esquema del proceso de creación de la vista de realidad aumentada.....	163
4.1. Esquema del ensayo.....	174
4.2. Esquema del pedal del acelerador.....	178
4.3. Esquema del pedal de freno.....	178
4.4. Esquema de comunicaciones entre el ordenador de control y el autómatas del vehículo teleoperado.....	180
B.1. Esquema del programa de control de las plataformas.....	286

Índice de imágenes

2.1	Robots teleoperados de desactivación de explosivos.....	7
2.2.	Un marine de los EE.UU. en Iraq con un robot de desactivación de explosivos.....	8
2.3.	Vista de Marte desde el Lander Viking 2.....	11
2.4.	del vehículo teleoperado Sojourner.....	12
2.5.	Fotografía del vehículo Sojourner y MER (Mars Exploration Rover).....	13
2.6.	Fotografía del buque ruso Keldysh.....	18
2.7.	Fotografía del sumergible MIR.....	19
2.8.	Fotografía de uno de los X-bot durante la exploración.....	19
2.9.	Fotografía del MIR 1 con los dos X-bot.....	20
2.10.	Vehículo teleoperado R-Gator.....	22
2.11.	Unidad de control fija y portátil de R-Gator.....	22
2.12.	Selector de modo manual/teleoperado.....	23
2.13.	Vehículo teleoperado Rovio de WowWee.....	23
2.14.	Cabeza de maniquí Neumann KU-100 para grabaciones binaurales.....	28
2.15	Plataforma de Gough original de 1954.....	76
2.16.	Plataforma de Gogh en la actualidad.....	76
2.17.	Un sistema típico MAST.....	77
2.18.	El primer simulador basado en la plataforma hexápoda de geometría octaédrica de mediados de los 60.....	79
2.19.	Klaus Cappel explicando la plataforma hexápoda de geometría octaédrica a los dirigentes del instituto Franklin a mediados de los 60.....	80
2.20.	Sistema de rotación para el movimiento de cabeceo.....	86
2.21.	Sistema de rotación para el movimiento de balanceo.....	86
2.22.	Sistema de rotación para el movimiento de guiñado.....	87
2.23.	Sistema de traslación para el movimiento de desplazamiento vertical.....	88
2.24.	Primera versión de la plataforma esférica con sistema de guías para	

generar el desplazamiento vertical.....	88
2.25. Modificación de la plataforma esférica original con sistema de tijera para generar el desplazamiento vertical.....	89
2.26. Sistema de paralelogramos para general el movimiento de cabeceo.....	92
2.27. Plataforma de paralelogramos sin cabina.....	93
2.28. Plataforma de paralelogramos con la cabina montada.....	93
3.1. Vehículo teleoperado terrestre.....	137
3.2. Control remoto del vehículo teleoperado terrestre.....	139
3.3. Adaptador para usar el control remoto mediante un ordenador.....	139
3.4. Mini-submarino teleoperado con el maletín de control.....	140
3.5. Caja de sensores inerciales embarcadas en el mini-submarino.....	141
3.6. Sistema de visión estereoscópica usado en el mini-submarino.....	141
3.7. Adaptador del mando de control para su uso con un ordenador.....	143
3.8. Plataforma esférica usada como estación de control central.....	144
3.9. Cabina y plataforma usadas en el showroom del proyecto <i>TeleDrive</i>	147
3.10. Captura de la pantalla principal del programa <i>Teledrive</i>	149
3.11. Mando del control del vehículo terrestre con sujeción a la cintura.....	155
3.12. Unidad receptora montada en el vehículo teleoperado.....	156
3.13. Estaciones esclava (izquierda) y maestra (derecha) del sistema STTA/VR.	158
3.14. Detalle de la cámara del vehículo.....	159
3.15. Cámara del vehículo, emisor y receptor.....	160
3.16. Mini-submarino y el rollo de cable para la transmisión de datos.....	161
3.17. Caja de sensores y el cable de comunicación.....	161
3.18. Imagen del adaptador del mando de control usado en la prueba.....	165
3.19. Imagen del vehículo teleoperado terrestre durante la prueba.....	165
3.20. Imágenes de las pruebas realizadas en Marsella.....	166
3.21. Capturas del módulo de realidad aumentada.....	167
3.22. El mini-submarino durante los ensayos en Oceanopolis	167
3.23. Sistema de visión estereoscópica usado en el mini-submarino.....	168
3.24. Obstáculo usado en las pruebas.....	169
3.25. Teleoperador del vehículo montado en la plataforma esférica.....	169
4.1. Vehículo Aixam Mega chasis cabina usado como base.....	176
4.2. Actuadores del freno y del acelerador.....	177
4.3. Autómata que controla el vehículo teleoperado.....	177
4.4. Parachoques especial montado en el vehículo teleoperado.....	179
4.5. Maletín de control.....	181
4.6. Operador con el maletín de control.....	182
4.7. Interfaz gráfico para conducir del vehículo teleoperado.....	182

4.8. Vehículo teleoperado.....185

Índice de tablas

2.1. Características del buque ruso Keldysh.....	17
2.2. Características de los RIHB.....	17
2.3. Características de los MIR.....	18
2.4. Características de los X-bot.....	18
2.5. Valores de los parámetros del modelo de percepción de velocidad angular...	38
2.6. Valores de los parámetros del modelo de percepción de la fuerza específica..	41
2.7. Características de los ejes de la plataforma hexápoda.....	82
2.8. Parámetros de simulación de la plataforma hexápoda.....	83
2.9. Características de los ejes de la plataforma esférica.....	85
2.10. Características generales de la plataforma esférica.....	89
2.11. Parámetros de simulación de la plataforma esférica.....	91
2.12. Características de los ejes de la plataforma de paralelogramos.....	92
2.13. Características generales de la plataforma esférica.....	94
2.14. Parámetros de simulación de la plataforma de paralelogramos.....	95
2.15. Parámetros de simulación de la plataforma sobre raíles.....	97
3.1. Características técnicas del sistema RF.....	157
3.2. Destreza observada del operador en diferentes maniobras.....	170
4.1. Destreza observada del operador en diferentes maniobras.....	184

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. ¿Qué es la teleoperación y la telepresencia?

En el transcurso de esta tesis se emplean numerosas veces los términos *teleoperación*, *telepresencia* y *teleexistencia*. Por ello es conveniente empezar definiéndolos y diferenciándolos para una correcta comprensión del texto.

Etimológicamente la palabra *Teleoperación* significa operar a distancia. Se podría definir como la acción de operar una máquina a distancia. En el caso de esta tesis la teleoperación se reduce al campo de los vehículos, por lo que a partir de ahora el término *teleoperación* se referirá a la *teleoperación de vehículos*.

El término *teleoperación* solo establece que el operador (la persona que opera el vehículo) y el vehículo no están en el mismo sitio, pero no indica nada acerca del tipo de información que se transmite entre ellos. Para ello, es necesario incorporar dos términos más: *Telepresencia* y *teleexistencia*.

Etimológicamente *telepresencia* significa estar presente en un lugar lejano. Como es físicamente imposible estar presente en un lugar lejano, se recurre a “engañar” al sistema de percepción humano para transmitirle a la persona la sensación de “estar presente en un lugar lejano”. En el capítulo 2 de esta tesis se describe detalladamente el sistema de percepción humano, centrándose fundamentalmente en tres tipos de estímulos: *visión*, *sonido* y *movimiento*. La reproducción o generación de *visión* y *sonido* son ampliamente utilizados desde hace mucho tiempo por lo que se ha recurrido a la utilización de las técnicas existentes. Sin embargo, para la reproducción o generación del movimiento se han utilizado plataformas de movimiento, por lo que en el capítulo 2 de esta tesis se ha realizado un exhaustivo análisis de las tecnologías existentes incluyendo la novedosa arquitectura llamada “plataforma esférica” diseñada especialmente para la simulación de movimiento de un vehículo terrestre.

El término *teleexistencia* va un poco más lejos que los dos anteriores, ya que no solo implica “estar presente en un lugar lejano” sino *existir* en un lugar lejano. Este término engloba a los dos anteriores de forma que no solo se está presente (*telepresencia*) sino que además se puede interactuar con el entorno (*teleoperación*).

La teleoperación se usa en las aplicaciones en las que el operador no puede estar en el lugar donde se desarrolla el trabajo o acción, ya sea por la peligrosidad o distancia excesiva. Así pues no se considerará *teleoperación* a las acciones de un operador por medio de una máquina. La imposibilidad de que el operador esté donde se desarrolla la acción está implícita en el término *teleoperación*.

1.2. La importancia de la información

En todas las aplicaciones de teleoperación es muy importante establecer correctamente la información que se transmite entre el vehículo teleoperado y el operador. El operador debe de disponer de la mayor cantidad de información posible, pero teniendo en cuenta los límites en la capacidad de percepción. Es decir, corremos el riesgo de saturar un canal de percepción con demasiada información. Tradicionalmente se usan tres canales de percepción: Vista, oído y tacto.

Mediante la vista podemos percibir las imágenes de las cámaras del vehículo teleoperado e información adicional en forma de realidad aumentada con información textual, numérica, indicadores, etc. Sin embargo un exceso de información visual podría despistar al operador.

Usando sonidos podemos transmitir información al operador, ya sea con sonidos reales del entorno de operación o artificiales. Por ejemplo podemos informar al operador de la proximidad de un objeto mediante un pitido. Este sistema se usa en los planeadores de vuelo sin motor, en los que el indicador de altitud emite un pitido que varía de frecuencia según se gana o se pierde altura.

En las aplicaciones de teleoperación se usan también interfaces hápticos con fuerza de retorno. Como en los sistemas visuales y sonoros, estos interfaces pueden ser usados para transmitir información real, como fuerzas de contacto, o para transmitir información abstracta. Por ejemplo una vibración de amplitud proporcional a la radiación ambiente.

Resumiendo, podemos usar la vista, el oído o el tacto para transmitir información real del entorno de operación e información adicional que no tiene por qué corresponder con la naturaleza del canal de percepción. Pero cada uno de estos canales tienen un límite de capacidad. El operador no puede estar atento a demasiados indicadores visuales, no puede escuchar más de una indicación sonora y solo puede percibir fuerza y vibración a través de los controles.

En esta tesis se propone añadir un nuevo canal de percepción que es el sistema vestibular. De esta manera podemos proveer al operador de más información sin saturar ninguno de los otros canales de percepción. De igual manera que en los casos anteriores podemos usar este canal con información real o artificial. Real, como por ejemplo las aceleraciones captadas mediante un sensor situado en un vehículo teleoperado. Y artificial, como fuerzas intermoleculares en la exploración de un nanomundo.

1.3. Motivación de la tesis

En la Universidad de Zaragoza se han realizado numerosos proyectos sobre simuladores de conducción y teleoperación de vehículos, en los que se ha acumulado una gran experiencia y se han cosechado grandes éxitos y reconocimientos.

En el campo de los simuladores de conducción se han desarrollado dos novedosas arquitecturas de plataformas generadoras de movimiento (*Simusys* [51] e *Innova* [16]). Ambas plataformas se han analizado en el capítulo 2 de esta tesis, así como la clásica plataforma *hexápoda* [9, 53], para intentar tener una comparación objetiva desde el punto de vista del sistema de percepción humano.

En el proyecto “*Desarrollo de un vehículo teleoperado*”, se desarrolló un sistema de teleoperación para vehículos a media velocidad. Se utilizó un sistema de comunicación combinado con un novedoso sistema de seguridad “a prueba de fallos”. El vehículo desarrollado en este proyecto se ha usado en varias pruebas reales con lo que queda demostrado que es una tecnología madura.

El siguiente paso natural consiste en la unión de ambas tecnologías, es decir, añadir estímulos vestibulares en la teleoperación de vehículos mediante el uso de plataformas generadoras de movimiento. Este concepto es la motivación de esta tesis y del proyecto europeo *TeleDrive* [58]. En este proyecto se desarrolló un sistema completo de teleoperación de vehículos terrestres y acuáticos, así como una red de comunicación entre los diversos elementos que componen la red de teleoperación/telepresencia. La tecnología desarrollada en este proyecto tiene numerosas utilidades y mediante los ensayos realizados se ha demostrado que es una tecnología factible y que se pueden desarrollar elementos concretos para su aplicación práctica en aplicaciones reales.

1.4. Objetivos y alcance de la tesis

Los objetivos de esta tesis quedan resumidos en la siguiente lista:

1. Recopilar información acerca del estado actual de la teleoperación de vehículos para analizar las tecnologías existentes en este campo.
2. Realizar un análisis objetivo de las diferentes arquitecturas de plataformas generadoras de movimiento, desde el punto de vista del sistema de percepción humano, para explicar la influencia de los estímulos vestibulares en la teleoperación de vehículos.
3. Desarrollar la cadena de control del un vehículo teleoperado, aplicable a cualquier vehículo (proyectos *Teledrive* y “*Desarrollo de un vehículo Teleoperado*”), incluyendo: puesto de teleoperación multisensorial montado sobre una plataforma generadora de movimiento, módulo de comunicación por radio frecuencia, PLC del control local del vehículo y actuadores de los mandos del vehículo.
4. Desarrollar el software necesario para la lectura y procesado de los datos de los sensores y cámaras embarcados en el vehículo teleoperado.

5. Desarrollar el software de comunicación a través de Internet para la transmisión de los datos de los sensores y cámaras embarcados en el vehículo para teleoperación a grandes distancias.
6. Desarrollar todos los componentes de la cadena de comunicación y control para gestionar el movimiento de la plataforma generadora de movimiento y permitir la reproducción simultánea de la imagen y sonidos capturados por las cámaras embarcadas en el vehículo.
7. Realizar ensayos de teleoperación (proyectos *Teledrive* y “*Desarrollo de un vehículo Teleoperado*”) de los vehículos desarrollados para comprobar la eficiencia de la cadena de control y analizar la influencia de los estímulos vestibulares en la destreza del operador.

1.5. Estructura de la tesis

Para poder describir correctamente cada uno de los aspectos de la teleoperación es necesario mostrar primero el estado del arte actual. En el capítulo 2 de esta Tesis se explica detalladamente cada uno de los aspectos ligados a la teleoperación, las aplicaciones en las que se usa la teleoperación de vehículos actualmente y de qué manera se puede usar una interacción bidireccional entre el operador remoto y el mundo real para mejorar la teleoperación.

Como ya se ha dicho anteriormente, para poder llevar a cabo la telepresencia, tenemos que engañar al sistema de percepción humano. En el capítulo 2 de esta tesis se realiza un análisis de la percepción de los diversos estímulos poniendo especial énfasis en el sistema vestibular. A partir de este análisis es posible mejorar los sistemas hápticos para una mayor inmersión en las operaciones de telepresencia.

Actualmente el sistema más efectivo para estimular el sistema vestibular humano es el uso de plataformas móviles. En el capítulo 2 se explican, se analizan y se comparan las arquitecturas más comunes, incluyendo las plataformas esféricas y de paralelogramos y sus respectivas variaciones sobre raíles. Para poder comparar las plataformas de la forma más objetiva posible, se ha recurrido a un análisis teórico desde el punto de vista del sistema de percepción humano, usando como herramienta un programa realizado en la aplicación comercial *MatLab/Simulink*.

En los capítulos 4 y 5 se describen los dos proyectos de teleoperación de vehículos en los que he participado y que han motivado esta tesis: El proyecto europeo *Teledrive* y el proyecto nacional “*Desarrollo de un vehículo teleoperado*”. En el primero se desarrolló un sistema integrado de teleoperación/telepresencia y el en segundo un vehículo teleoperado a media velocidad.

Como conclusión del trabajo realizado y como resumen de la información presentada en la tesis, se realiza un análisis de los resultados obtenidos y una breve exposición de mis líneas de investigación actuales referentes no solo a la teleoperación y plataformas de movimiento sino también a humanoides, interfaces hápticos y el estudio del sistema cognitivo humano.

CAPÍTULO 2

TELEOPERACIÓN Y TELEPRESENCIA: Estado del Arte

2.1. Introducción

La teleoperación puede suponer una importante mejora en numerosos campos. Donde más se ha desarrollado la teleoperación ha sido en aplicaciones en las que puede existir un peligro para el operador. Por ejemplo en equipos de desactivación de explosivos [12, 47], extinción de incendios, toma de muestras en lugares peligrosos, etc. En todos estos casos la teleoperación no solo es importante, sino que resulta necesaria.

También es ámbito de aplicación de la teleoperación aplicaciones de supervisión [39]. Mediante el uso de la teleoperación una sola persona puede supervisar e interactuar en varios escenarios separados. De esta forma un solo operador puede manejar varias máquinas en sitios diferentes sin moverse del sitio.

Otro caso en el que se ha utilizado ampliamente la teleoperación es en la exploración de Marte [40]. Los vehículos *Sojourner*, *Spirit* y *Opportunity* fueron llevados en diversas misiones de la NASA a Marte y mediante la teleoperación llevaron a cabo tareas de extracción de muestras y toma de datos.

Cada aplicación tiene sus propios intereses, de forma que cada una de ellas desarrolla un aspecto diferente de la teleoperación. En unas es más importante el sistema de manipulación, como por ejemplo el brazo articulado en sistemas de desactivación de explosivos, y en otras el sistema de toma de datos, como en el caso de las misiones de Marte de la NASA.

También conviene distinguir entre teleoperación a corta distancia y a larga distancia. En las aplicaciones de corta distancia se puede emplear la visión directa

para manejar el vehículo teleoperado, sin embargo en las aplicaciones de larga distancia, obviamente, se hace necesario el uso de un sistema de navegación que puede consistir en un sistema de visión o en un sistema de localización.

Hay que puntualizar, que hay otro tipo de aplicaciones que no se consideran teleoperación, pero que si que se realizan por medio de una máquina. Se pueden emplear herramientas de precisión para realizar un trabajo que una persona sería incapaz. Por ejemplo, en el caso del uso de robots de precisión para realizar intervenciones quirúrgicas, no es considerado teleoperación, porque el médico está presente durante la intervención. Simplemente utiliza la máquina como medio. Si que se consideraría teleoperación en el caso en el que el médico estuviera realizando la misma tarea desde un lugar alejado. Pero esta situación no es deseable ya que por razones de seguridad es conveniente que el médico esté presente durante la intervención.

2.2. Aplicaciones de la teleoperación

2.2.1. Tareas peligrosas

La teleoperación resulta especialmente interesante en la realización de tareas peligrosas. De esta manera se elimina el riesgo de dañar al operador. Dependiendo de la aplicación en particular el operador remoto puede manejar el vehículo o máquina teleoperada mediante visión directa o mediante sistemas de cámaras.

Los robots de desarticulación de explosivos son el mejor ejemplo de vehículos teleoperados usados en tareas peligrosas. Mediante su uso no solo se eliminan los riesgos personales, sino que, debido a su gran precisión, pueden realizar estas tareas de una forma más segura.

2.2.1.1. TEDAX y EOD

Los Técnicos Especialistas en Desactivación de Artefactos Explosivos (TEDAX) son los especialistas que forman parte de las unidades del mismo nombre que existen en los cuerpos policiales y militares, cuya actividad es la neutralización, desactivación e intervención de artefactos explosivos no reglamentarios y, en el caso de las fuerzas armadas, también de los reglamentarios (municiones). Su misión principal es la de salvar vidas y evitar daños materiales. A nivel militar, y a raíz de la entrada de España en la OTAN, la denominación TEDAX se sustituyó por la denominación internacional EOD (del inglés Explosive Ordnance Disposal - Desactivación de Municiones y Artefactos Explosivos Improvisados).

Los TEDAX de los Cuerpos y Fuerzas de Seguridad del Estado y los EOD de las Fuerzas armadas se han convertido en pieza clave en la lucha antiterrorista, cada cual en su ámbito de competencia. Para el desempeño de su función cuentan con el apoyo de alta tecnología de diseño específico, como robots teleoperados, trajes especiales de alta protección anti-exposición, etc.

En España existen unidades TEDAX en la Guardia Civil, en el Cuerpo Nacional de Policía y en algunas Policías Autonómicas, y existen Unidades EOD en el Ejército de Tierra, en el Ejército del Aire y en la Armada. A nivel nacional, la actividad de las unidades TEDAX ha sido fundamental desde su creación en 1975, debido a la intensa actividad de grupos terroristas como ETA. Fuera del territorio nacional, las unidades EOD se han convertido en piezas esenciales en las operaciones internacionales que las Fuerzas Armadas Españolas llevan a cabo por todo el mundo.

Debido a la peligrosidad de las tareas de desactivación de explosivos se debe de mantener siempre una distancia de seguridad. Por esta razón, la teleoperación de estos vehículos se realiza en dos fases. En la primera se procede a la aproximación del robot y en la segunda se inicia la manipulación y desactivación propiamente dicha.



Imagen 2.1. Robots teleoperados de desactivación de explosivos

Dentro de las unidades TEDAX, la persona encargada del manejo de los robots de desactivación de explosivos debe de estar adiestrada específicamente para esta tarea. El uso de estos robots especiales se suele realizar con visión directa, por lo que existen unos protocolos para evitar errores de percepción del movimiento.

El operador debe situarse siempre detrás del vehículo teleoperado mirando siempre en la dirección del movimiento, de forma que su posición, y por lo tanto la percepción del movimiento, sea similar a la que tendría si estuviera situado dentro del vehículo. En la figura 2.1 podemos ver la posición idónea para manejar un vehículo teleoperado

mediante visión directa.

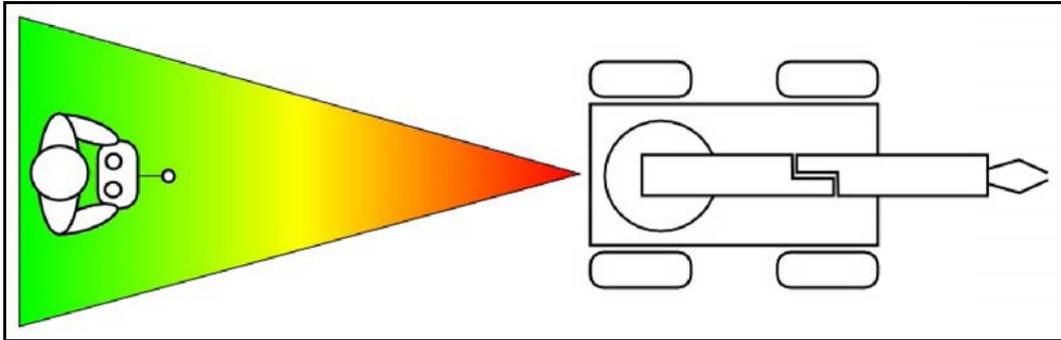


Figura 2.1. Posición idónea para manejar un vehículo teleoperado de desactivación de explosivos

En la siguiente imagen vemos un robot de desactivación de explosivos del equipo EOD del ejército de EE.UU. usado en Iraq.



Imagen 2.2. Un marine de los EE.UU. en Iraq con un robot de desactivación de explosivos

2.2.2. Exploración

El hombre siempre ha deseado conocer que es lo que hay más allá del horizonte. Siempre existe una persona dispuesta a jugarse la vida para llegar más lejos que cualquier otro. Por poner algún ejemplo histórico, Cristóbal Colon llegó a América por primera vez el 12 de octubre de 1492 impulsado por la idea de encontrar una ruta más rápida para llegar a la India. Robert Peary (6 de mayo de 1856 - 20 de febrero de 1920) se convirtió el 6 de abril de 1909 en la primera persona en llegar al polo norte. El 29 de 1953 el neozelandés Sir. Edmund Percival Hillary (20 de julio de 1919) y el sherpa Tenzing Norgay (15 de mayo de 1914 - 9 de mayo de 1986) llegaron a la cima

del Everest, la montaña más alta del mundo. Neil Alden Armstrong (5 de agosto de 1930) astronauta de la NASA, fue el primer ser humano en pisar la Luna el día 20 de julio de 1969.

Estos son solo algunos ejemplos, pero la historia de la humanidad está plagada de ellos. Los nombres más relevantes son aquellos que lo lograron, pero existen muchos otros que murieron intentándolo. A medida que el hombre va evolucionando vamos mejorando las técnicas de exploración y hemos aprendido a evitar al máximo posible los riesgos humanos. Y aquí es donde entra en juego precisamente la teleoperación de vehículos. Un vehículo teleoperado, especialmente diseñado y construido para ello, puede acceder a lugares recónditos y peligrosos, anulando así los riesgos personales de la exploración.

Existen básicamente dos razones para usar la teleoperación en tareas de exploración. La primera es evitar el riesgo que supone para una persona adentrarse en un terreno desconocido. Y la segunda es que una persona no pueda estar físicamente en el lugar de exploración.

A continuación se detallan algunos ejemplos reales del uso de vehículos teleoperados en el campo de la exploración.

2.2.2.1. Exploración del espacio

En la exploración del espacio es muy importante el uso de naves no tripuladas. Las condiciones que existen en el espacio son totalmente diferentes a las de la superficie de la Tierra, por lo que el riesgo de enviar a una persona al espacio no está solamente en los peligros inherentes a cualquier viaje de exploración, sino a factores totalmente desconocidos.

Antes de enviar a un astronauta al espacio se debe de realizar una exploración completa con naves no tripuladas, e incluso naves tripuladas por animales.

La antigua unión soviética fue pionera en la carrera espacial y enviaron el primer satélite al espacio, el *Sputnik 1*, el 4 de octubre de 1957. Con el *Sputnik 2* enviaron al primer ser vivo al espacio, la perra Laika. Sin embargo los planes de la misión no contemplaban un retorno seguro, por lo que Laika se convirtió en la primer víctima del espacio. Con el *Sputnik 5* se enviaron animales y plantas y se recuperaron todos sanos y salvos. El 12 de abril de 1961, Yuri Gagarin se convirtió en el primer ser humano en viajar al espacio, a bordo de la nave *Vostok 1*.

Por su parte, la NASA llevó a cabo los proyectos *Mercury*, *Gémini* y *Apollo* con la finalidad de poner al hombre en la luna. En el primer proyecto se comprobó que un ser humano podía sobrevivir en el espacio exterior. El Programa *Gémini* fue concebido para probar las técnicas necesarias para el Programa *Apollo*, cuyas misiones eran mucho más complejas. Se prepararon las maniobras que más tarde se usarían en el programa *Apollo*.

El Programa *Apollo* logró su meta con el *Apollo 11* que aterrizó con Neil Armstrong y Edwin E. Aldrin en la superficie de la Luna el 20 de julio de 1969 y los devolvió a la Tierra el 24 de julio.

Aparte de los hitos conseguidos por la NASA, ha habido muchas misiones no

tripuladas promovidas por la agencia espacial. En 1962 el *Mariner 2* fue la primera nave espacial en hacer un sobrevuelo cercano a otro planeta, en este caso Venus. Los programas *Ranger*, *Surveyor* y *Lunar Orbiter* eran esenciales para evaluar las condiciones lunares antes de intentar el vuelo tripulado del programa *Apollo*. Quizá las misiones no tripuladas más impresionantes fueron los programas *Pioneer 10*, *Pioneer 11*, *Voyager 1* y *Voyager 2*, misiones que visitaron Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno y enviaron impresionantes imágenes en color de todos ellos y la mayoría de sus satélites.

En 1968, se proyectó la misión *Viking* a Marte. Las dos sondas gemelas 1 y 2 se dividían cada una en un *orbiter* y un *lander*. Este último descendería a la superficie marciana para realizar varios experimentos entre los que destacaban tres experimentos biológicos (inicialmente eran cuatro, pero fueron reducidos a tres). La ventana de lanzamiento elegida fue la de 1973, pero un recorte presupuestario impidió su lanzamiento, que se pospuso hasta 1975.

El nombre inicial de la misión era *Voyager* (viajero) pero se creyó que era mejor reservarlo a las sondas que surcarían algunos años después el sistema solar exterior. Se eligió el nombre *Viking* (vikingo) en recuerdo de Leif Erikson que llegó hacia el año 1.000 a las costas canadienses.

El proyecto fue muy caro y en unos tiempos en los que el presupuesto de la NASA era más amplio debido al programa *Apollo*. Costó 3.500 millones de dólares, involucrando a 10.000 personas.

El cohete elegido para los lanzamientos fue inicialmente el *Saturno I*, pero la NASA decidió entonces que no había suficientes misiones para la línea de producción de este cohete. La segunda opción el enorme *Saturno V* resultaba muy caro y además su capacidad de carga era de algo más de 30 toneladas, bastante más de lo que necesitaba la misión y fue rechazado por el congreso en 1967.

A pesar de la guerra de Vietnam todavía coleando y el programa *Apollo* absorbiendo gran cantidad de recursos, el tremendo éxito del *Mariner 9* abrió grandes expectativas para la exploración. El programa rebautizado como *Viking* consiguió fondos suficientes y se eligió la ventana de lanzamiento de 1975. Es cierto que algo tuvo que ver en la financiación del proyecto la rivalidad de las dos superpotencias en conseguir un aterrizaje en Marte con éxito. Los soviéticos estaban desesperados en conseguirlo, lo intentaron en 1971, 1973 y 1975 con sonoros fracasos, por lo que se abrió ahora la carrera por Marte.

En el terreno puramente técnico se escogió un módulo de descenso de tres patas parecido al módulo lunar, existían algunas razones que aprobaban esta decisión pero se confió en un diseño probado. Los costes se dispararon al aumentar hasta un 16% la inflación por la crisis del petróleo y un 25% en el sector aeroespacial. Se desarrolló una nueva configuración del vector Titán 3-Centaur, un lanzador potente dado el considerable peso de los vehículos, unos 3.400 kg cada uno entre *orbiter* y *lander*.

Otro de los problemas fue incluir en un exiguo espacio de 1 pie cúbico (unos 28 litros de volumen) los experimentos biológicos, que fueron encargados a la empresa TRW, que finalmente resolvió este reto tecnológico, altamente complejo, no sin antes cuadruplicar el coste inicialmente presupuestado. El 20 de agosto y el 9 de septiembre

de 1975 el *Viking I* y el *Viking II* fueron lanzados con éxito.

Los *Lander* (aterrizadores) estuvieron alimentados eléctricamente por Generadores Termoeléctricos de Radioisótopos (RTG), lo que alargó su vida útil prevista en un mínimo de 90 días, hasta el 13 de noviembre de 1982, en el caso del *Lander 1* y hasta el 11 de abril de 1980 en el caso del segundo *Lander*.

Los cuatro experimentos biológicos fueron reducidos a tres, en detrimento del centrado en la dispersión de la luz. Los tres experimentos restantes se adecuaron a lo que se creía se podía encontrar como "vida". Descubrimientos posteriores en nuestro planeta han revisado los resultados que se obtendrían después. La misión *Viking* se dio por concluida en 1983. Los *orbiters* captaron 47.000 fotografías y los *lander* un total de 1.400.

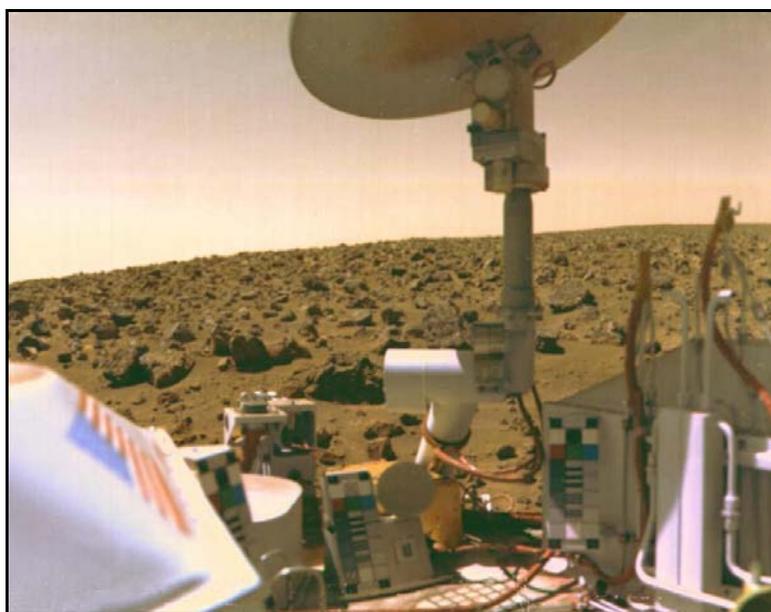


Imagen 2.3. Vista de Marte desde el Lander Viking 2

La misión *Mars Pathfinder* fue la primera en enviar un vehículo teleoperado de exploración a otro planeta. Fue lanzada el 4 de diciembre de 1996 a bordo de un cohete *Delta*, un mes después del lanzamiento del *Mars Global Surveyor* y luego de 7 meses de viaje llegó a Marte el 4 de julio de 1997. El sitio de aterrizaje es *Ares Vallis* en una región llamada *Chryse Planitia*. Durante el viaje la nave realizó cuatro correcciones de vuelo: el 10 de enero, 3 de febrero, 6 de mayo y 25 de junio. El *lander* se abrió exponiendo al *Rover* llamado *Sojourner* que realizaría diferentes experimentos en la superficie marciana.

Esta misión llevó un conjunto de instrumentos científicos para analizar la atmósfera marciana, el clima, geología y la composición de las rocas y el suelo. El proyecto fue el segundo del programa *Discovery* de la NASA. La misión fue dirigida por el *Jet Propulsion Laboratory* (JPL), una división del Instituto de Tecnología de California ("CalTech"), responsable del Programa de Exploración a Marte de la NASA.

En 2003 Estados Unidos envió con éxito al *Spirit* y al *Opportunity* (dentro de la misión *Mars Exploration Rover*), que realizan exploraciones de la superficie y

mediciones de las condiciones atmosféricas que han podido confirmar nuevamente la teoría de la enorme cantidad de agua que existió en Marte y que existe en forma de hielo ahora. En resumen, los robots estadounidenses descubrieron que efectivamente hubo un ambiente habitable en el planeta rojo.

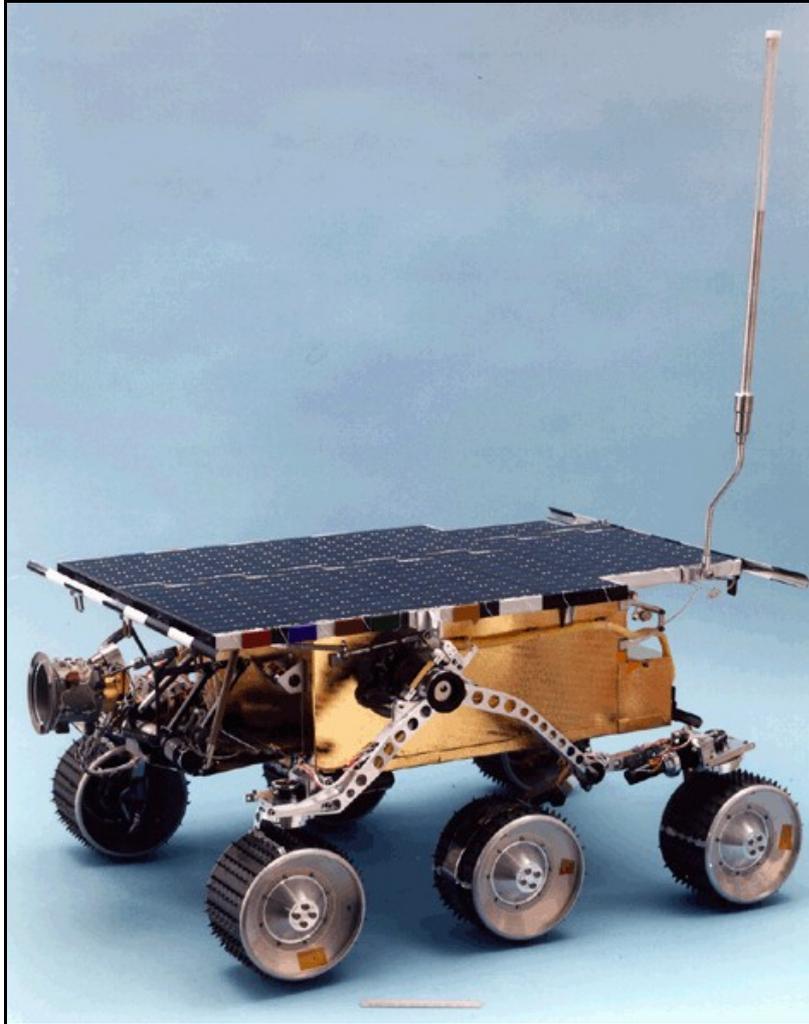


Imagen 2.4. Imagen del vehículo teleoperado *Sojourner*

En la imagen 2.5 se pueden ver el vehículo teleoperado *Sojourner* y el vehículo teleoperado de la misión MER (*Mars Exploration Rover*). Como se puede observar la filosofía de ambos vehículos es parecida, el modelo usado en la misión MER a una escala mayor y con diferente instrumentación. En la misión MER se usaron dos vehículos gemelos (*Spirit* y *Opportunity*) depositados en lados opuestos de Marte.

Los *Rover* usados en la misión MER tienen 6 ruedas montadas en una suspensión tipo mecedora que garantiza que las 6 ruedas estará en contacto con el suelo al moverse sobre terreno escabroso. El diseño mecedora garantiza que el cuerpo del *Rover* solamente se mueva la mitad del rango de movimiento que las “patas” y ruedas puedan experimentar sin este sistema de suspensión. Este mismo diseño permite que el *Rover* supere obstáculos (tales como rocas) o a través de depresiones mayores que el diámetro de la rueda (250 mm). Cada rueda tiene también “tacos” los cuales

proporcionan agarre para escalar en arena suave o para pasar sobre rocas. Cada rueda tiene su propio motor. Las dos ruedas frontales y las dos traseras también tienen motores individuales de dirección (uno cada una). La capacidad de dirección permite al *Rover* dar un giro total de 360 grados y virajes cerrados. El *Rover* está diseñado para soportar una inclinación de 45 grados en cualquier dirección sin volcar. Sin embargo, el *Rover* está programado por medio de sus “límites de protección de fallas” de su programa de evasión de peligros para evitar exceder inclinaciones que excedan los 30 grados durante sus travesías.



Imagen 2.5. Fotografía del vehículo Sojourner y MER (Mars Exploration Rover)

Cada *Rover* tiene la habilidad de girar una de sus ruedas delanteras para pulverizar el terreno y está diseñado para permanecer quieto cuando está girando la rueda excavadora.

El *Rover* tiene una velocidad máxima en superficie plana de 50 mm/s. Sin embargo, para garantizar un movimiento seguro, el *Rover* está equipado con un programa de evasión de peligros que hace que el *Rover* se detenga y vuelva a evaluar su ubicación cada dos segundos. Por lo tanto, el *Rover* logra una velocidad promedio de 10 mm/s. El *Rover* está programado para moverse por casi 10 segundos, detenerse por 20 segundos para observar y entender el terreno al cual ha entrado, antes de moverse hacia adelante nuevamente por otros 10 segundos.

El *Rover* usa paneles solares como principal fuente de energía. Cuando los paneles solares están totalmente iluminados, generan aproximadamente 140 vatios hasta para 4 horas por día marciano. El *Rover* necesita aproximadamente 100 vatios para impulsarse. El sistema de energía del *Rover* incluye dos baterías recargables de ion litio con un peso de 7,15 kg cada una, que proporcionan energía al *Rover* en ausencia de luz solar. En comparación, la futura misión del Laboratorio Científico Marciano utilizará generadores termoeléctricos de radioisótopos (GTR) que durarán aproximadamente un año marciano para proporcionar energía a su gran cantidad de instrumentos. Se están considerando paneles solares para las misiones del LCM, pero los GTRs dan mayor versatilidad al trabajo en ambientes oscuros y altas latitudes en

donde la energía solar no es un método eficiente para generar energía.

Se pensaba que para el sol 90 de la misión, la capacidad de los paneles solares para general energía eléctrica se reduciría a aproximadamente 50 vatios. Esto se debe a la acumulación de polvo sobre los paneles así como el cambio de estación. Sin embargo, casi dos años terrestres después, la generación de energía eléctrica oscila entre 300 vatios por hora y 900 vatios por hora por sol, dependiendo de la acumulación de polvo. Han ocurrido eventos de limpieza (probablemente el viento) más frecuentemente de lo que la NASA había anticipado, conservando los paneles solares relativamente libres de polvo extendiendo la vida de la misión.

Los *Rover* corren un sistema operativo incrustado en un CPU de 20 Mhz RAD6000 protegido contra la radiación con 128 MB de memoria DRAM con detección y corrección de errores y 3 MB de EEPROM. Los *Rovers* también cuentan con 256 MB de memoria *flash*. Para poder sobrevivir durante las diferentes fases de la misión, los “órganos vitales” del *Rover* no deben exceder temperaturas extremas de -40 °C a +40 °C. Por la noche los *Rovers* son calentados por 8 unidades calentadoras de radioisótopos (RHU) los cuales generan 1 W cada uno de energía térmica proveniente de la desintegración de radioisótopos, junto con calentadores eléctricos que funcionan únicamente cuando es necesario. Se utiliza una capa de oro pulverizado y otra capa de aerogel como aislante.

El *Rover* cuenta con dos antenas, una de ganancia baja y otra de ganancia alta. La antena de ganancia baja es omnidireccional y transmite datos a una velocidad baja a la antenas en tierra de la Red del Espacio Profundo (Deep Space Network). La antena de alta ganancia es direccional y movable y puede transmitir datos a una velocidad mucho mayor.

Los *Rovers* también son capaces de subir información a otras naves en órbita alrededor de Marte, utilizando los *orbiters Mars Odyssey* y *Mars Global Surveyor* como mensajeros que pueden retransmitir los datos de los *Rovers* a la Tierra. Los *orbiters* también pueden enviar mensajes a los *Rovers*. Los beneficios que se obtienen al utilizarlos incluyen el que están más cerca de los *Rovers* que las antenas de la Red del Espacio Profundo (DSN) en la Tierra y que los *orbiters* casi siempre tienen a la Tierra en su campo visual que los *Rovers* en el suelo marciano. Las señales de radio hacia y desde los *Rovers* se mandan por los *orbiters* utilizando antenas UHF, las cuales tienen un menor alcance que las antenas de baja y alta ganancia. Una antena UHF se encuentra en el *Rover* y otra en un pétalo del vehículo de aterrizaje para ayudar a recabar información durante la fase crítica de amartizaje.

Las imágenes se almacenan y envían a la Tierra utilizando un programa de cómputo denominado ICER para todas las imágenes comprimidas con pérdida de datos. Todas las cámaras del MER producen imágenes de 1024 pixels por 1024 pixels a 12 bits por pixel.

Las imágenes para navegación, miniaturas y muchos otros tipos, se comprimen a aproximadamente 1 bit/pixel y se utilizan promedios de bit más pequeños (menores que 0,5 bit/pixel) en ciertas longitudes de onda de imágenes panorámicas multicolores.

La misión MER, con un total de 18 cámaras en dos *Rovers*, depende fuertemente en el formato para compresión de archivos de imágenes con base en ondulaciones ICER el cual permite el envío de imágenes a la tierra durante sus operaciones.

La misión MER está contribuyendo significativamente al avance de la tecnología para la compresión de imágenes para misiones del espacio profundo utilizando compresores de imágenes que proporcionan sustancialmente mayor compresión efectiva que el obtenido en misiones previas.

El compresor de imágenes ICER fue diseñado para cumplir las necesidades específicas de aplicaciones para el espacio profundo. ICER tiene como base las ondículas y produce compresión progresiva, proporcionando compresión sin pérdida y con pérdida de datos, e incorpora un esquema para la contención de errores con el objeto de limitar los efectos de la pérdida de datos en el canal del espacio profundo. ICER sobrepasa por mucho el compresor de imágenes JPEG utilizado en la misión *Mars Pathfinder* y proporciona una compresión sin pérdida de datos más efectiva que el compresor REICE utilizado en esa misión.

El Rover está dotado de una gran cantidad de instrumentos científicos. En el *Ensamblaje del Mástil Pancam* se encuentran:

- ▶ Cámara panorámica (PanCam), para determinar la mineralogía, textura y estructura del terreno local.
- ▶ El espejo del Espectrómetro Miniatura por Emisión Termal (*Mini-TES*), de la Universidad Estatal de Arizona, para identificar rocas y suelos importantes que merezcan ser examinados y para determinar los procesos que formaron las rocas marcianas. Vea el artículo principal del *Mini-TES*.

Las cámaras montadas en el mástil se encuentran a 1,5 metros de altura. Un motor para todo el *Ensamblaje del Mástil Pancam* mueve las cámaras y el *Mini-TES* 360° en el plano horizontal. Un motor independiente para elevación puede apuntar las cámaras 90° sobre el horizonte y 90° por debajo del horizonte. Un tercer motor para permitir la elevación del espejo del *Mini-TES*, le permite apuntarlo 30° sobre el horizonte y 50° por debajo del horizonte.

El mástil también lleva dos cámaras monocromáticas para navegación y en el chasis del *Rover* se encuentran cuatro cámaras monocromáticas para detectar obstáculos (dos al frente y dos en la parte trasera).

El brazo del *Rover* (también llamado el Dispositivo para el Despliegue de Instrumentos) contiene lo siguiente:

- ▶ Espectrómetro Mössbauer (MB) MIMOS II, desarrollado por el Dr. Gstar Klingelhfer de la Universidad Johannes Gutenberg en Mainz, Alemania, el cual se utiliza para investigaciones de primer plano de la mineralogía de rocas y suelos que contienen hierro.
- ▶ Espectrómetro de Rayos X a base de partículas Alfa (APXS), desarrollado por el Instituto de Química Max Planck en Mainz, Alemania, el cual es utilizado para análisis de primer plano de la abundancia de elementos que componen las rocas y suelos.
- ▶ Imanes, para atraer partículas de polvo magnéticas, desarrollado por Jens

Martin Knudse y su grupo en el Instituto Niels Bohr, Copenhague. El espectrómetro Mössbauer y el espectrómetro de Rayos X a base de partículas Alfa analizarán las partículas atraídas y ayudarán a determinar el porcentaje de partículas magnéticas y partículas no-magnéticas y la composición de minerales magnéticos en el polvo suspendido en el aire y en las rocas que hayan sido pulverizadas por la herramienta para abrasión de rocas. También cuenta con imanes en la cubierta frontal del Rover, los cuales son estudiados extensamente por el espectrómetro Mössbauer.

- ▶ Cámara para imágenes microscópicas (MI), para obtener imágenes de primer plano de alta resolución de rocas y suelos.
- ▶ Herramienta para Abrasión de Rocas (RAT), para remover la superficie gastada de las rocas y exponer material fresco para que sea examinado por los instrumentos de abordo.

El brazo robótico es capaz de colocar los instrumentos directamente contra la roca o suelos que sean considerados interesantes.

En la exploración de Marte se está haciendo un uso extraordinario de la teleoperación de vehículos. Debido a la gran distancia que separa la Tierra de Marte, este tipo de teleoperación tiene unas características muy particulares, sobretodo por los desfases de tiempo totalmente insalvables. Para la transmisión de datos e imágenes se usan como intermediarios las sondas existentes en la órbita y el módulo de amortizaje.

Para intentar evitar al máximo posible las incidencias de los enormes retrasos en las transmisiones el *Rover* no es manejado directamente por un operador, sino que se le indica la posición a la que debe de ir y él solo es capaz, gracias a sus aparatos de visión y medida, calcular la trayectoria que debe de seguir. Este proceso se lleva a cabo con extrema precaución, ya que cualquier fallo puede estropear los sensibles instrumentos del *Rover* y dejarlo inoperativo.

2.2.2.2. Exploración del océano

El hombre conoce mejor la superficie de la Luna que el fondo marino. Existen grandes regiones abisales totalmente inexploradas en las que podría haber miles de especies de animales totalmente desconocidas. Las fosas marinas pueden alcanzar profundidades de más de 10 kilómetros. Por ejemplo la Fosa Challenger o de las Marianas, situada en el Océano Pacífico, tiene una profundidad de 11.032,75 metros. A esta profundidad la presión es de unos 1.086 bares.

El 23 de enero de 1960, se descendió por primera y única vez, usando un batiscafo llamado Trieste, invención de Auguste Piccard, el cual era capitaneado por Jacques Piccard, hijo del primero. Los sistemas de a bordo indicaban una profundidad de 11.521 m, que después fue revisada y resultó ser de 11.033 metros.

Debido a la complejidad y peligrosidad de las actividades submarinas, a menudo se

utilizan minisubmarinos teleoperados [3, 4, 23]. Pueden ser empleados en numerosas aplicaciones como por ejemplo:

- ▶ Búsqueda y recuperación de restos de barcos naufragados
- ▶ Búsqueda y recuperación de restos de aviones accidentados en el mar
- ▶ Estudios científicos del fondo del mar
- ▶ Enterramiento y reparación de cables de comunicaciones submarinos
- ▶ Soporte en operaciones de extracción de gas y petróleo en estaciones marinas

James Cameron, para la realización de su famosa película *Titanic*, llevó a cabo una exploración del auténtico trasatlántico. Para llegar a la zona del naufragio usó el *Keldysh*, el buque de exploración más grande del mundo. Este buque opera en cooperación con los sumergibles MIR y sus exploradores X-bot operados a control remoto. Las tareas de exploración del naufragio no son nada fáciles, ya que se encuentra a una profundidad de 4000 metros.

<p>Nombre del buque: Akademik Mstislav Keldysh. El barco recibe este nombre en honor del pionero del programa espacial ruso Mstislav Vsevolodovich Keldysh.</p> <p>Dueño: Academia Rusa de Ciencias.</p> <p>Longitud: 122 metros.</p> <p>Pasajeros: Hasta 129.</p> <p>Características: 17 laboratorios científicos, salón, biblioteca y sala de ejercicios.</p> <p>Carga principal: Los sumergibles MIR 1 y 2 y sus exploradores X-bot operados a control remoto.</p>

Tabla 2.1. Características del buque ruso Keldysh

El buque *Keldysh* lleva además dos botes hinchables RHIB cuya tarea es asistir en el hundimiento y reflote de los sumergibles. Durante la operación el RHIB aloja el cable de alimentación del MIR. La señal de emisión es enviada a través de microondas desde los RHIB hasta la sala de control en el *Keldysh*, que puede viajar hasta 1,6 km a través del agua.

<p>Longitud: 8,5 metros.</p> <p>Pasajeros: Hasta 5.</p> <p>Potencia: Dos motores fueraborda gemelos de 250 caballos de fuerza.</p> <p>Carga principal: Una bobina que contiene 5486 metros de cable de fibra óptica blindada.</p>

Tabla 2.2. Características de los RHIB



Imagen 2.6. Fotografía del buque ruso Keldysh

Los sumergibles MIR son capaces de llevar a una persona a grandes profundidades. Por dentro son pequeños y funcionales, ya que solo el piloto tiene asiento y los dos asistentes solo una alfombra de espuma. Los tres ocupantes llevan un traje antillamas ya que se encuentran en una atmósfera de 100% oxígeno, similar a la de una nave espacial. Los MIR pueden estar sumergidos hasta 14 horas seguidas.

Operador: Instituto de Oceanografía Shirshov, Rusia.

Longitud: 8 metros.

Ancho: 3,65 metros.

Peso: 18 toneladas.

Profundidad máxima de inmersión: 6096 metros.

Pasajeros: Tres.

Equipamiento principal: Brazos robot y hasta dos X-bot

Tabla 2.3. Características de los MIR

Diseñador/constructor: Phoenix International.

Dimensiones: 24 pulgadas de largo, 13 de ancho y 13 de alto.

Propulsión: Tres motores de empuje eléctrico.

Reserva de potencia: 16 baterías de ion-litio con de 8 a 10 horas de autonomía.

Cámaras a bordo: Dos cámaras color Insite Pacific Aurora. Una montada en posición fija y la otra con rotación arriba/abajo con un arco de 180 grados.

Tabla 2.4. Características de los X-bot



Imagen 2.7. Fotografía del sumergible MIR



Imagen 2.8. Fotografía de uno de los X-bot durante la exploración

Dentro de los avances tecnológicos más relevantes para esta expedición están los cuatro exploradores sin tripulación, altamente maniobrables, llamados X-bot, capaces de alcanzar los 7000 metros de profundidad. Son los vehículos de penetración de naufragios en océano profundo más pequeños jamás construidos. Cada MIR lleva hasta dos X-bot en jaulas de cable montadas en la proa. Los X-bot son conducidos por el control remoto desde el interior de los sumergibles. Cada X-bot está atado a su MIR madre por un cable de fibra óptica de 550 metros que provee al piloto de imágenes de vídeo provenientes de sus cámaras.

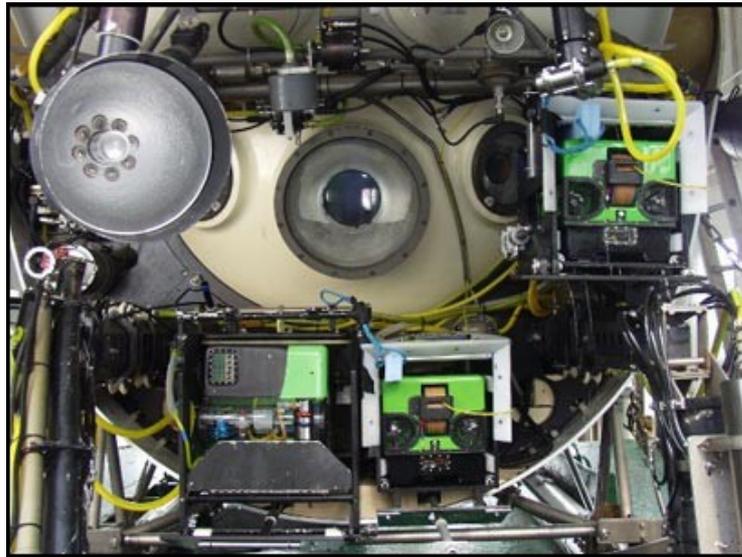


Imagen 2.9. Fotografía del MIR 1 con los dos X-bot

2.2.2.3. Exploración de las pirámides

La pirámide de Keops es una de las maravillas del mundo, pero todavía se siguen sin conocer los grandes misterios que encierra. Existe un estrecho pasadizo que sube desde la *Cámara de la Reina* de unos 60 metros de longitud. En 1993, un arqueólogo alemán envió un robot con una cámara de fibra óptica pero después de recorrer el pasadizo se topó con una puerta de piedra caliza.

En el año 2001 se inició un proyecto para intentar averiguar que es lo que hay detrás de esa puerta. Dicho proyecto fue llevado a cabo por investigadores del *Consejo Egipcio de Antigüedades*, la firma *iRobot* y *National Geographic*.

Para esta exploración se construyó un robot teleoperado específicamente para esta tarea. Este robot está dotado de un sistema de movimiento oruga de altura ajustable, un taladro para perforar la puerta desconocida y un sistema de visión consistente en una cámara y un cable de fibra óptica. En la siguiente imagen se puede ver un esquema de la operación.

El robot teleoperado realizó la tarea con éxito recorriendo los 65 metros de pasadizo. El taladro abrió un orificio en la puerta de piedra caliza del compartimiento, y la cámara de fibra óptica reveló la existencia de una nueva puerta de piedra que no había sido vista en más de 4.000 años.

Aunque no se llegó a encontrar la tan deseada cámara situada detrás de la puerta, la misión se consideró como un éxito desde el punto de vista técnico, ya que el robot teleoperado llevó a cabo su tarea perfectamente.

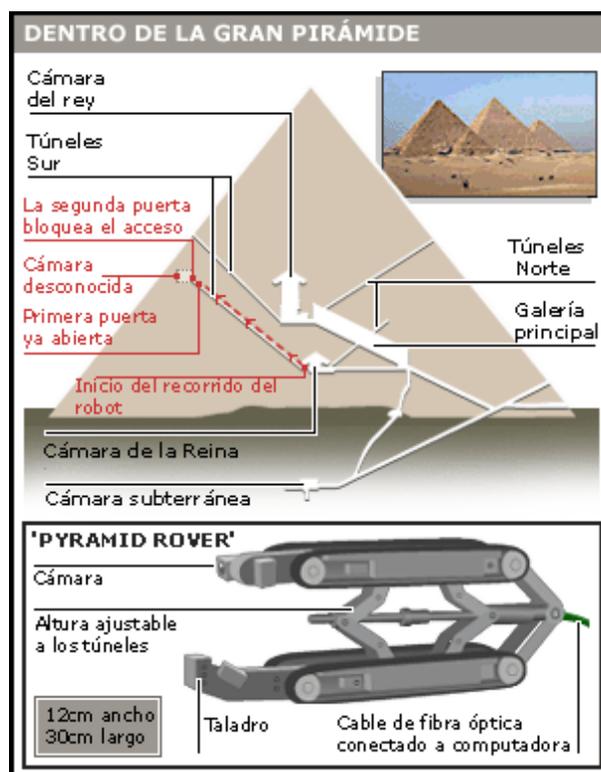


Figura 2.2. Exploración de la pirámide de Keops

2.2.3. Supervisión y vigilancia

Las tareas de supervisión y vigilancia son repetitivas y peligrosas. Por esta razón el uso de robots en este campo está muy extendido [39, 66]. La mayor parte de estos robots funcionan de modo autónomo realizando trayectos preestablecidos y guiados por señales GPS o balizas. En este caso nuestro interés reside solamente en aquellos que pueden ser manejados por un operador. En la mayoría de los casos estos robots poseen un modo mixto de funcionamiento, de forma que puede pasar del modo automático al modo manual cuando la persona que está supervisando lo requiere.

Generalmente la tarea del robot es de detección, pero no de acción. Es decir, el robot se encarga de detectar intrusos o anomalías, y simplemente avisa a la persona encargada para actuar en consecuencia al evento. Llevan sistemas de cámaras y a veces un sistema de audio para avisar al posible intruso.

A modo de ejemplo, la empresa iRobot fabrica robots de desactivación de explosivos, de supervisión y vigilancia y de reconocimiento del terreno. En concreto el modelo *John Deere R-Gator* es un vehículo terrestre convertido en vehículo teleoperado para aplicaciones militares.

R-Gator permite realizar una exploración del terreno. Utiliza un sistema de navegación GPS y un sistema para evitar automáticamente los obstáculos por medio de un sistema de cámaras frontales con un campo de visión de unos 20 metros.



Imagen 2.10. Vehículo teleoperado R-Gator

Dispone de una unidad de control remoto para monitorizar el sistema y teleoperar el vehículo en caso necesario. Hay dos versiones de esta unidad de control: una fija y otra portátil.



Imagen 2.11. Unidad de control fija y portátil de R-Gator

R-Gatort también permite la conducción como un vehículo normal. De esta manera resulta más versátil, ya que posee en total tres modos de funcionamiento: Autónomo, teleoperado y manual.



Imagen 2.12. Selector de modo manual/teleoperado

2.2.4. Entretenimiento

Existen gran cantidad de vehículos a radio-control en el mercado, pero solo recientemente han aparecido algunos de estos vehículos que podrían considerarse como vehículos teleoperados. Son robots teleoperados de bajo coste lanzados al mercado como juguetes, pero que tienen en algunos casos grandes capacidades.



Imagen 2.13. Vehículo teleoperado Rovio de WowWee

La empresa de juguetes *WowWee* comercializa numerosos robots de diferentes características, la mayoría de ellos humanoides o con forma de animal. Recientemente ha presentado un nuevo modelo (en la redacción de esta tesis todavía no ha salido al mercado) llamado *Rovio*.

Este mini-vehículo teleoperado mide unos 20 centímetros de largo y puede ser controlado desde cualquier dispositivo dotado de comunicación WiFi (teléfonos móviles, ordenadores, PDAs, etc). Lleva como equipamiento de serie una cámara web móvil con resolución VGA (640x480 pixels) y micrófono y es capaz de realizar un *streaming* a través de la red. Lleva también un sistema de navegación (similar al GPS, pero de funcionamiento local) y posicionamiento que le permite evitar obstáculos.

2.3. Telepresencia como mejora de la teleoperación

2.3.1. Introducción

En las tareas de teleoperación la información que reciba el operador del entorno distante es muy importante. Cuando una persona opera un vehículo no teleoperado recibe muchísima más información de la que es consciente. Tiene visión completa y directa de todo lo que ocurre a su alrededor, recibe el sonido de todo lo que le rodea, movimiento del vehículo, etc. Cada dato que percibe puede suponer información importante. El movimiento del vehículo, un traqueteo, podría significar un fallo o un error en la operación, que el operador puede corregir a tiempo. Por esta razón es importante proporcionar al operador de un vehículo teleoperado toda la información posible.

Mediante la telepresencia somos capaces de darle al operador remoto toda esta información, no solo dotando al vehículo teleoperado de sistemas de visión, sonido y captura de movimiento, sino usando un puesto de teleoperación que sea capaz de reproducir toda esta información [4, 7, 12, 32-35, 38, 42, 54, 56].

Como se ha visto anteriormente los sistemas actualmente utilizados en la teleoperación poseen los sistemas mínimos que permiten al teleoperador realizar las tareas. Normalmente incluyen un sistema más o menos complejo de control y un sistema de visión en los casos en los casos en los que no se puede utilizar la visión directa.

A continuación se explican en profundidad los sistemas de captura y reproducción de vídeo, audio y movimiento existentes que son o pueden ser usados en aplicaciones de teleoperación/telepresencia.

2.3.2. Vídeo

Como hemos visto anteriormente en algunos casos es posible usar visión directa en la teleoperación. Sin embargo en la mayoría de los casos no es posible o no es conveniente. Por ejemplo en la desactivación de explosivos el protocolo del manejo del

vehículo teleoperado establece que el operador debe de situarse detrás del robot mirando en la misma dirección del movimiento. Esto se hace así para no incurrir en errores de percepción del movimiento del vehículo teleoperado.

Por esta razón es muy conveniente disponer de una cámara en el vehículo teleoperado de forma que podemos tener una perspectiva en primera persona. Se pueden usar cámaras fijas o cámaras móviles, para aumentar el campo de visión.

En el caso de los X-bot (mini-submarinos teleoperados de exploración) con los que van equipados los sumergibles MIR del buque ruso de exploración *Keldish*, llevan dos cámaras, una fija y otra móvil, con rotación arriba/abajo. La cámara fija sirve para tener una visión general del ambiente, siempre con una posición fija relativa al mini-submarino. De esta manera siempre se puede usar esta cámara para la teleoperación sin correr riesgos de errores de referencias. La cámara móvil se usa para aumentar el campo de visión, de forma que no hace falta mover el mini-submarino para fijarse en un detalle determinado.

Los vehículos teleoperados usados en la misión MER de la NASA disponen de 9 cámaras cada uno, pero tienen una utilidad más amplia. Estos vehículos no se pueden teleoperar directamente ya que tenemos un retardo totalmente insalvable. Se les indica la posición de destino y ellos navegan hasta esa posición. Por esta razón son necesarias tantas cámaras, ya que las usan para calcular la estrategia de movimiento. Estas imágenes son enviadas, a través de los satélites marcianos en órbita, a la central de la NASA para saber la localización del vehículo. Una vez que se reciben las imágenes se escoge cuidadosamente el nuevo destino y se espera a que el vehículo haya llegado a su posición, unos 10 minutos más tarde.

Las imágenes recogidas por las cámaras del vehículo teleoperado pueden ser reproducidas de múltiples maneras. A continuación se explican detalladamente los sistemas más comúnmente utilizados.

2.3.2.1. Monitor

Por lo general se usan sistemas de reproducción de vídeo basados en monitores ya que resulta mucho más sencillo, y en la mayoría de los casos suficiente. Actualmente la calidad, precio y dimensiones de las pantallas planas de plasma las hacen especialmente adecuadas para este uso. Antes de la existencia de este tipo de pantallas si se quería disponer de una imagen de gran tamaño se debía recurrir a proyectores o sistemas multimonitor que complicaban terriblemente el proceso.

Por lo general, para mostrar imágenes de menos de 40 pulgadas se usan monitores LCD y para el resto ya se tienen que usar pantallas de plasma. Actualmente está en desarrollo una nueva tecnología llamada OLED con la que se consiguen pantallas realmente planas y un contraste excelente mediante el uso de leds para la retroiluminación, en vez del sistema tradicional usado en las pantallas TFT. La pantalla de plasma mas grande en la actualidad tiene 103 pulgadas de diagonal, pero para dimensiones tan grandes es conveniente el uso de proyectores (aproximadamente a partir de 60 pulgadas).

Un punto aparte es la reproducción de imágenes estereoscópicas. Si usamos un monitor para la reproducción de vídeo se pueden usar dos sistemas: gafas con filtros de color y gafas con *shutter*. Existen varias variaciones del primer sistema, pero básicamente consiste en reproducir la imagen del ojo izquierdo mediante un canal de color y la del ojo derecho con otro, por ejemplo rojo y azul respectivamente. El operador lleva puestas unas gafas con un filtro de color diferente en cada ojo, de forma que con cada ojo ve una imagen diferente, generando así la sensación tridimensional. Este sistema suele tener problemas, ya que siempre existe una “sombra” en la imagen correspondiente al tercer canal de color. Además se pierde contraste, ya que no vemos con cada ojo todo el espectro de color.

El segundo sistema consiste en alternar las imágenes de los dos ojos. El operador lleva puestas unas gafas con obturadores sincronizadas con el monitor. Este sistema produce mejores resultados desde el punto de vista del color y contraste, pero perdemos cuadros por segundo lo que puede producir animaciones poco fluidas. También pueden existir problemas de sincronización o desfase.

Hay algunos prototipos de pantallas con sistema 3D incorporado, mediante superficies con micro-relieve, pero actualmente esta tecnología está muy poco desarrollada.

2.3.2.2. Proyector

Los proyectores se han usado durante mucho tiempo para simuladores de vuelo y conducción ya que se consiguen grandes dimensiones. También se pueden usar combinados para aumentar la superficie y unir cada una de las imágenes mediante *blending*, que consiste en aplicar un degradado en el borde de cada proyección para producir una transición suave entre dos imágenes.

Uno de los inconvenientes del uso de proyectores son las sombras. Si realizamos una proyección directa (desde el mismo lado del operador) tenemos que poner especial cuidado en no introducir ningún objeto, ni el operador, entre la pantalla y el proyector. En el caso de que no se pueda evitar esto se debe recurrir a la retroproyección, es decir, proyectar la imagen desde detrás de la pantalla. La pantalla que se utiliza tiene que tener las características oportunas para cada tipo de proyección. Existen incluso pantallas que son capaces de reproducir la imagen proyectada a ambos lados con una intensidad del 50% en cada uno.

Otro inconveniente es que requieren cierto mantenimiento ya que las bombillas, además de ser realmente caras, son bastante frágiles. Si se quieren usar proyectores en una plataforma de movimiento se debe elegir un modelo que sea capaz de soportar las vibraciones a las que será sometido.

Como en el caso de los monitores, podemos usar un sistema de reproducción de imágenes tridimensionales. Podemos usar los dos sistemas anteriormente nombrados y además un tercero mediante el uso de cristales polarizados. Con este sistema proyectamos las imágenes de los proyectores a través de cristales polarizados sobre una pantalla cromada capaz de reflejar la luz sin variar la polarización. El operador

debe llevar unas gafas con cristales polarizados, de forma que cada ojo ve solamente la imagen correspondiente. Por lo general este sistema funciona bastante bien aunque se pierde intensidad en las imágenes debido a la polarización de la luz.

2.3.2.3. Casco/gafas de realidad virtual

Los cascos o gafas de realidad virtual son dispositivos que van montados en la cabeza del operador, por lo que el grado de realismo puede llegar a ser excelente. Hay modelos bastante económicos, destinados al mercado del entretenimiento, que poseen características bastante bajas, referentes a la resolución máxima y reproducción de colores. En aplicaciones de telepresencia conviene usar modelos profesionales que normalmente incluyen la posibilidad de reproducción de imágenes estereoscópicas, es decir, diferente imagen en el ojo derecho y en el izquierdo, para reproducir imágenes tridimensionales. Esto constituye una gran ventaja respecto a los sistemas anteriores ya que la reproducción de imágenes estereoscópicas es perfecta. Aunque añade un inconveniente según el punto de vista. Las imágenes se reproducen siempre según una posición relativa a la cabeza del operador. Para solucionar esto se debe usar un capturador (*tracker*) de la posición de la cabeza del operador.

La eficiencia de este sistema depende mucho de la calidad del casco. Por lo general los de mayor tamaño poseen mejores sistemas de vídeo, aunque son más invasivos, debido al excesivo peso. Las gafas son más ligeras, pero se ajustan peor a la cabeza del operador, por lo que la visibilidad de las imágenes puede verse seriamente reducida.

2.3.3. Audio

Actualmente no hay muchas aplicaciones de teleoperación en las que se requiera disponer de captura y reproducción de audio. El sonido suele emplearse como sistema auxiliar para informar al operador de sucesos. Mediante el uso de pitidos o alarmas se puede informar al operador de un peligro o información más precisa, como la proximidad de un objeto.

En el caso de grabación y reproducción del sonido ambiente del entorno de teleoperación existen diversos sistemas que pueden ser usados, de diferente realismo y complejidad.

2.3.3.1. Micrófono omnidireccional y altavoces/auriculares

Mediante el uso de un micrófono omnidireccional podemos grabar el sonido ambiente del entorno de teleoperación. Con este tipo de micrófonos podemos captar sonidos en todas las direcciones, pero no podremos diferenciarlos ya que no tendremos información de la dirección de cada uno. Cuando se reproduzcan parecerán provenir todos del mismo sitio. Con este sistema no podemos reproducir sonidos

tridimensionales, pero para la gran mayoría de las aplicaciones será suficiente.

2.3.3.2. Sonidos binaurales

El sistema anterior se puede mejorar en gran medida usando un sistema de sonido binaural. Mediante este sistema grabamos el sonido desde dos posiciones diferentes para tener información de la direccionalidad del sonido [60].

Para grabar los sonidos se puede emplear una cabeza de maniquí especialmente diseñada para este propósito. Se fabrica con materiales de propiedades acústicas muy parecidas a las de la cabeza humana y se añaden todos los detalles morfológicos como pabellones auditivos y órganos internos del oído. Se puede incluir también el torso para captar el efecto de reflexión del sonido en los hombros.

Este sistema produce sonidos mucho más reales y se puede percibir la lateralidad del sonido. Para reproducir estos sonidos se pueden usar cascos o altavoces estéreos.



Imagen 2.14. Cabeza de maniquí Neumann KU-100 para grabaciones binaurales

2.3.3.3. Holofonía

Este sistema es una mejora del sistema anterior ya que permite reproducir totalmente un sonido con percepción espacial. Este sistema funciona mediante auriculares, aunque existen también altavoces que son capaces de reproducir este efecto.

El sistema de grabación es similar al anterior, pero aplica un algoritmo de filtrado usando una señal de interferencia de referencia. Con este sistema no solo se puede diferenciar la lateralidad del sonido (izquierda/derecha) sino también la dirección

(delante/detrás y arriba/abajo).

Este sistema sin duda es el que consigue más realismo, pero nunca se ha usado en sistemas en tiempo real, solamente en grabaciones en diferido. Para aplicaciones en las que se quiera conseguir un alto grado de inmersión, este sería el sistema a utilizar.

2.3.3.4. Sonido envolvente

Existen numerosos sistemas de sonido envolvente usados generalmente con sonidos pregrabados con un proscoproceso, por lo que no pueden usarse generalmente para telepresencia. Es muy difícil y costoso crear un sistema de grabación tridimensional ya que se deberían de incluir en el vehículo teleoperado micrófonos direccionales y realizar posteriormente un procesado para generar los sonidos de cada uno de los altavoces.

El sistema más común, usado en sistemas “home cinema”, es el *Dolby Surround* con sistema de 5.1, 7.1 y 9.1, que son 4, 6 u 8 altavoces colocados alrededor del oyente más un altavoz central y un *subbuffer* para la reproducción de los sonidos graves. Hay otros sistemas como el *THX* de características similares.

2.3.4. Movimiento

La simulación del movimiento del vehículo teleoperado en la estación de control, por ejemplo mediante el uso de una plataforma móvil o asiento activo, ha sido escasamente llevado a la práctica. Este concepto se ha llevado a cabo en diversos proyectos de investigación como *Teledimos* [57] y *Teledrive* [58]. Este último proyecto está extensamente explicado en el capítulo 4 de este tesis.

Existen numerosas soluciones para simular el movimiento del vehículo teleoperado. Dependiendo del tamaño, capacidad y prestaciones del sistema utilizado hablamos de plataforma de movimiento o de asiento activo. En el apartado 2.6 de este capítulo se explican detalladamente las características de las arquitecturas de bases móviles más utilizadas.

I) Plataforma de movimiento

- ▶ Capacidad: Entre 1 y 5 personas. Aunque se pueden hacer modelos de mayor capacidad, para las aplicaciones de teleoperación no es necesario.
- ▶ Sistema de vídeo: Sistema completo consistente en una pantalla de gran tamaño o un sistema de proyectores.
- ▶ Sistema de audio: Altavoces externos estéreo o sistema de sonido envolvente.
- ▶ Sistema de movimiento: De 4 a 6 grados de libertad con gran rango de movimiento.

II) Asiento activo

- ▶ Capacidad: 1 persona.
- ▶ Sistema de vídeo: Sistema reducido consistente en una pantalla pequeña o un casco/gafas de realidad virtual.
- ▶ Sistema de audio: Auriculares o altavoces externos estéreo.
- ▶ Sistema de movimiento: Plataforma de 4 a 6 grados de libertad de reducidas dimensiones y normalmente con menos rango de movimiento.

2.4. Interacción entre el mundo real y el mundo virtual

2.4.1. Introducción

Para una correcta teleoperación se debe de establecer un canal de comunicación entre el operador remoto y el vehículo teleoperado. No solo es importante la cantidad de información, sino la calidad de la misma y el retardo.

2.4.2. Sistemas de transmisión de datos y vídeo

Los sistemas de transmisión de vídeo tienen que cumplir unos requisitos mínimos para que puedan ser utilizados en la teleoperación.

Primero, la calidad debe ser la suficiente para que el operador remoto pueda trabajar cómodamente. Este requisito depende mucho de la aplicación, ya que por ejemplo en tareas de exploración será suficiente con que se distinga el campo de operaciones y que se puedan identificar los elementos importantes. Sin embargo en una tarea de precisión como puede ser la identificación de un material es necesario emplear sistemas de vídeo de mayor calidad.

Y segundo, el retardo debe ser mínimo para asegurar la sincronización del operador remoto y el vehículo teleoperado. Sin embargo en la exploración de Marte, el retraso en las comunicaciones es totalmente insalvable y todo el proceso de teleoperación debe de adaptarse a esta característica particular.

El retardo en las comunicaciones depende obviamente del sistema de transmisión, pero sobretodo de la distancia de teleoperación. Para salvar grandes distancias se hace indispensable el uso de algún tipo de repetidor o el uso de varios medios diferentes de comunicación conjuntamente, que pueden añadir retrasos en las comunicaciones. Por ejemplo se puede usar un sistema de radio frecuencia para la comunicación cercana con el vehículo teleoperado y un sistema de comunicación por satélite para enviar la información a mayor distancia.

Sin duda la evolución de Internet es una gran ayuda para las tareas de teleoperación. Si mediante un ordenador conectado a Internet se puede manejar una

máquina, esta máquina podría ser manejada desde cualquier otro ordenador conectado a Internet en cualquier parte del mundo.

En la siguiente tabla se resumen los sistemas de transmisión comúnmente usados en teleoperación:

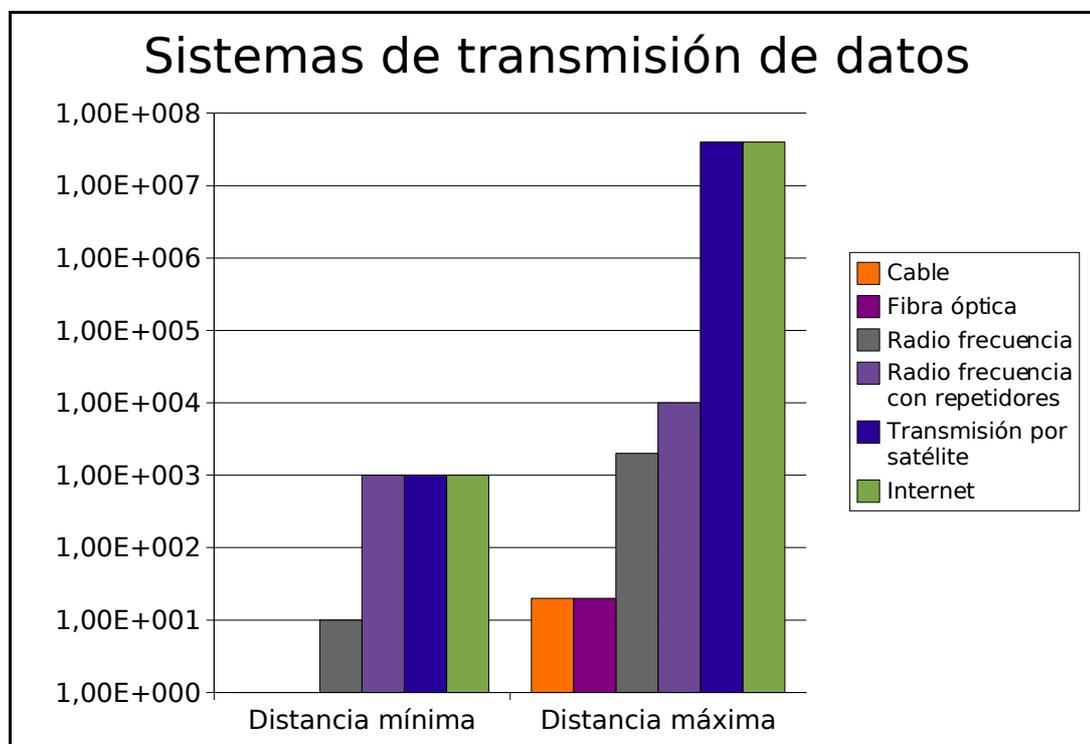


Figura 2.3. Sistemas de transmisión de datos

Los sistemas con comunicación directa, como puedan ser por cable o fibra óptica, se utilizan únicamente si el vehículo teleoperado está cerca del operador y si el uso de éstos no interfieren en el proceso. Cuando la distancia de teleoperación no es demasiada se utilizan sistemas de radiofrecuencia analógicos o digitales. Existe una gran variedad de sistemas de transmisión por radio frecuencia, y cada uno tiene sus particularidades referentes a la distancia máxima e interferencias. Típicamente, en los sistemas de transmisión digitales, la velocidad de transferencia depende de la distancia máxima, por lo que se suele llegar a un compromiso en función de la aplicación.

Para aumentar la distancia de teleoperación se suele recurrir al uso de repetidores. Es simplifica bastante el proceso, ya que usando el mismo sistema se puede ampliar considerablemente el campo de aplicación. Aunque esta técnica tiene sus límites e inconvenientes. Primero, al añadir un repetidor se añade un retraso en la cadena de transmisión. Cada elemento que se interpone entre el vehículo teleoperado y el operador añade un retraso. Y segundo, hace falta disponer de una infraestructura fija para situar los repetidores, por lo que es necesario colocarlos estratégicamente antes de comenzar la tarea de teleoperación. En algunas aplicaciones esto es completamente inviable.

Para tener una cobertura global se recurre a las comunicaciones por satélite o por Internet. El uso del satélite tiene la gran ventaja de que es una comunicación casi

directa en cualquier parte del mundo. Solo es necesario disponer de un sistema de antenas en el transmisor (operador remoto) y receptor (vehículo teleoperado). El gran inconveniente es que es una tecnología muy cara y depende siempre del uso de tecnología de terceros (la red de satélites). Por poner un ejemplo, los satélites de la red GPS, al tener un origen militar, añaden un offset de posición variable, de forma que podemos conocer con gran exactitud diferentes posiciones relativas, pero no absolutas.

La gran ventaja de las comunicaciones por Internet es que tenemos una cobertura casi global a un coste bastante bajo. Si el vehículo teleoperado está controlado por un ordenador conectado a Internet, podemos controlar ese vehículo desde cualquier otro ordenador conectado a Internet en cualquier parte del mundo. En la actualidad las conexiones a Internet son lo suficientemente rápidas para permitir su uso en aplicaciones de teleoperación.

No obstante, la mejor opción es el uso de un sistema combinado de comunicaciones. Por ejemplo en la siguiente figura se muestra un sistema teórico de transmisión usando diversos sistemas de transmisión combinados:

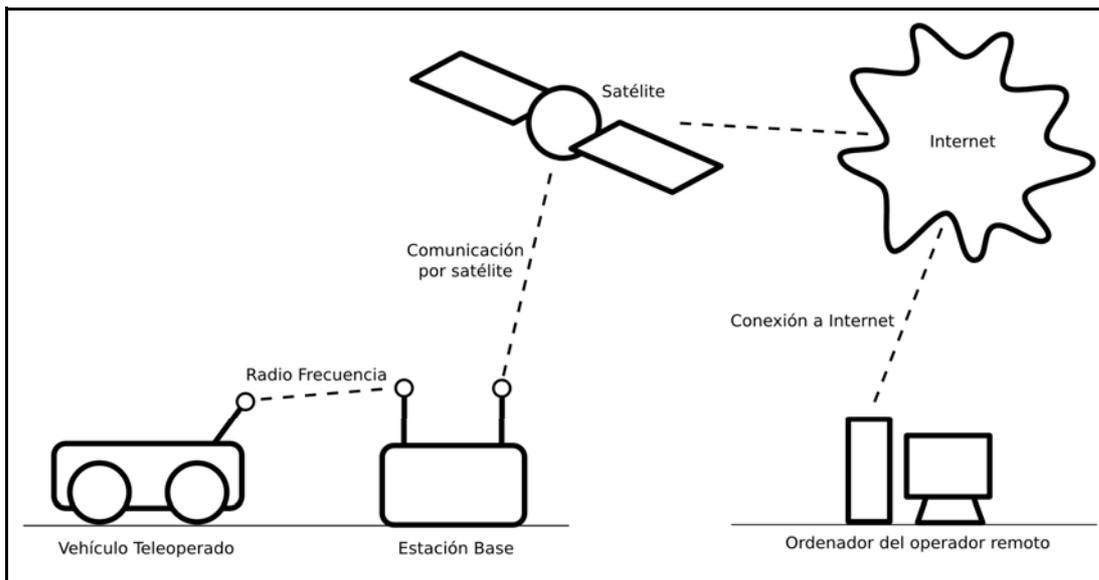


Figura 2.4. Uso combinado de varios sistemas de transmisión

2.4.3. Realidad aumentada

La realidad aumentada consiste en añadir información relevante a una imagen real [5, 38, 65]. Se utiliza en gran variedad de campos, pero en aplicaciones de teleoperación resulta especialmente útil. Con la realidad aumentada podemos completar la información que recibe el operador, ya que con el vídeo del vehículo teleoperado podría no ser suficiente.

Por ejemplo en los mini-submarinos teleoperados *Gnom* se hace uso de la realidad aumentada añadiendo información útil, como por ejemplo brújula e inclinación. En el proyecto europeo *TeleDrive* se desarrolló un completo sistema de realidad aumentada de forma que era posible mostrar objetos conocidos del entorno sobrepuestos en el

visor.

2.4.4. Sistemas hápticos

Para una correcta teleoperación el operador remoto debe de tener a su disposición todos los controles necesarios para manejar la máquina teleoperada. Al conjunto de controles con los que interactúa el operador se le llama sistema háptico [12, 42].

Un sistema háptico simple está formado por un mando ergonómico mediante el cual el operador remoto envía las consignas de movimiento al vehículo teleoperado. Para una correcta operación, el control debe de ser intuitivo sin dar lugar a equívocos direccionales. Es decir, si el mando dispone de un movimiento izquierda/derecha, debe de corresponder con la respuesta izquierda/derecha del vehículo teleoperado, de igual manera que con el movimiento delante/atrás.

Existen diversos tipos de mandos para controlar un vehículo. El mando más usado es el denominado *joystick* que consiste en un control vertical con dos o más grados de libertad y que se sujeta con la mano entera. La mayor ventaja que tiene el *joystick* es que es bastante intuitivo y permite un gran control. Con una sola mano podemos controlar básicamente dos variables independientes. Existen además *joysticks* con más grados de libertad, pero su funcionamiento deja de ser tan intuitivo y resulta complicado independizar los movimientos.

Otro mando similar es el *Stick*, pero de menor tamaño y se maneja solo con un dedo. Estos mandos disponen únicamente de uno o dos grados de libertad y no tienen botones. Se suelen usar combinados, para tener una mayor precisión.

Existen otros tipos de mandos adaptados específicamente a la aplicación en particular. Se pueden usar mandos de rueda para controlar la dirección del vehículo o un sistema de gatillo progresivo para el control del acelerador. Otros mandos usados son por ejemplo palancas, botones, selectores y conmutadores.

En un mismo sistema háptico pueden estar incluidos varios mandos de diversas características para ser usados simultáneamente o no. Por ejemplo el interfaz puede incluir un *Stick* para controlar el movimiento delante/atras y otro *Stick* para girar izquierda/derecha. Estos dos mandos deberán de ser usados en combinación para controlar el movimiento del vehículo teleoperado. Además se pueden incluir diversos selectores o botones para usar otras funciones del vehículo, como el control del sistema de iluminación, movimiento de cámara, etc.

Si el vehículo teleoperado tiene un análogo con control manual, se puede reproducir todo el interfaz del vehículo en el puesto de teleoperación. Por ejemplo volante y pedales en el caso de un vehículo terrestre o palanca de mandos como en un submarino.

Los sistemas hápticos más complejos incluyen fuerza de retorno de forma que el operador dispone de información adicional durante la teleoperación. Esta fuerza de retorno puede ser real o simulada. La fuerza de retorno real se usa cuando disponemos de sensores en el vehículo teleoperado y podemos usar esta información en el interfaz del operador remoto. Esta es sin duda la opción más deseada, ya que el

operador remoto dispone de otra entrada de información adicional, pero no siempre disponemos de esta información. Muchas veces se recurre al uso de una fuerza de retorno simulada, o simplemente aproximada. En la gran mayoría de los casos la fuerza de retorno consiste en un sistema muelle-amortiguador, ya que por una parte es un sistema muy simple, y por otra nos proporciona dos grandes ventajas. La primera es el retorno automático a cero, que representa una primera medida de seguridad. Y la segunda es que el operador es capaz de saber, a través del tacto, la magnitud del movimiento que está transmitiendo al control.

2.5. Sistema de percepción humano

2.5.1. Introducción

Como ya se ha explicado en capítulos anteriores, la telepresencia y teleexistencia se basan transmitir al operador la sensación de estar en el lugar remoto en el que se llevan a cabo las tareas. Para ello es necesario conocer cómo funciona el sistema de percepción humano y así poder desarrollar las herramientas necesarias para poder transmitir fielmente las sensaciones.

El cuerpo humano posee todo tipo de sistemas de percepción para poder interactuar con el entorno que le rodea. Todos los estímulos percibidos por los diversos órganos son procesados por el sistema neurálgico central. El estudio del procesado e interpretación de los datos por el cerebro queda fuera del alcance de esta tesis. Este capítulo se centra en cómo se perciben los estímulos, sin entrar en detalles del proceso.

En esta tesis se pone especial énfasis en el uso de plataformas de movimiento para la estimulación vestibular, por lo que en este capítulo el sistema vestibular será el más ampliamente evaluado. También se analizarán, de una forma más general, el sistema de visión y audición, así como otros tipos de sistemas de percepción sensoriales.

El sistema de percepción humano presenta ciertas superposiciones de estímulos. Por ejemplo gracias al sistema vestibular somos capaces de conocer la posición, pero también el sistema de visión, gracias a la visión estereoscópica, es capaz de esto. Esto permite al cuerpo humano adaptarse en caso de una carencia de alguno de los sentidos. Cuando se produce algún defecto en el sistema vestibular el cuerpo reacciona y es capaz de contrarrestar esta carencia mediante el sistema de visión. Al existir estas superposiciones hay que poner especial cuidado en la simulación, ya que al proporcionar estímulos artificiales tenemos que estar seguros de que éstos sean congruentes, ya que sino se pueden producir malestares. Con las primeras plataformas de movimiento se empezó a estudiar la incidencia del uso de plataformas de movimiento en diversos parámetros biomédicos y el efecto llamado *motion sickness* [19, 43, 62].

2.5.2. Sistema vestibular

2.5.2.1. Introducción

El sistema vestibular humano está localizado en el oído interno. Cada uno de los oídos (izquierdo y derecho) posee los mismos órganos de percepción de movimiento: canales semicirculares y *otolitos*. Los canales semicirculares son capaces de captar la velocidad angular en los tres ejes espaciales, y los *otolitos* perciben las fuerzas específicas.

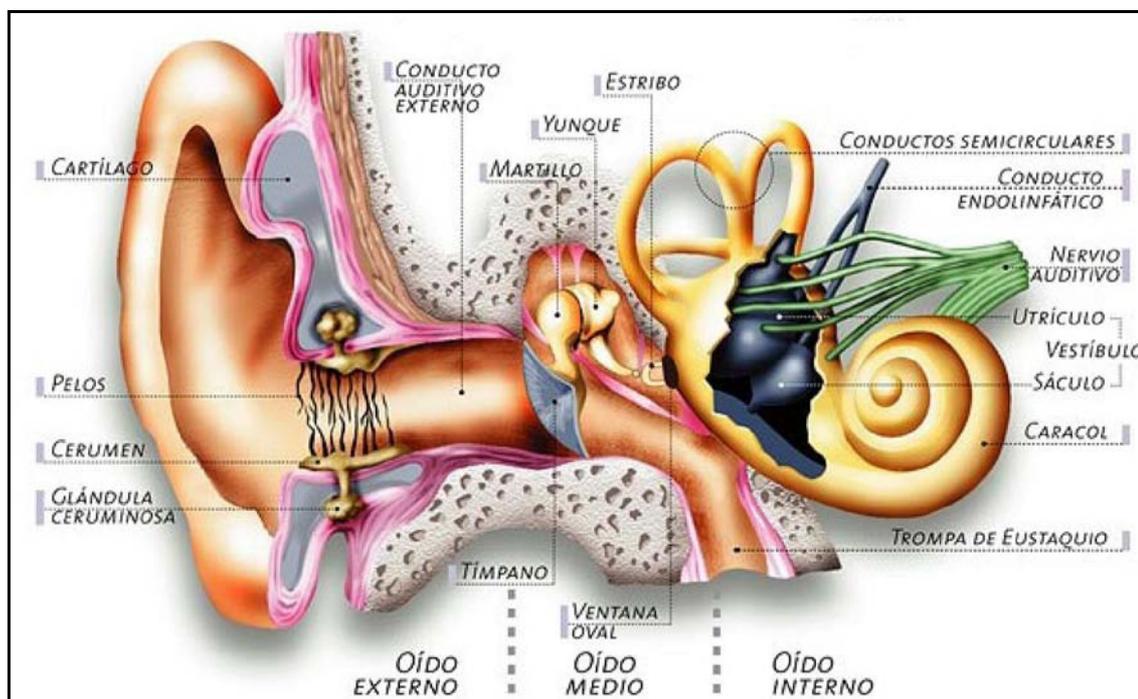


Figura 2.5. Esquema del oído humano

Estos sistemas han sido ampliamente estudiados y se han desarrollado modelos matemáticos para modelizar el funcionamiento [11]. Gracias a estos modelos somos capaces de analizar objetivamente la eficiencia de un sistema de estimulación vestibular, como son las plataformas de movimiento.

En este apartado se va a analizar simplemente el sistema de percepción, y en los próximos apartados se explicará como se emplea esta información para conseguir sistemas de estimulación vestibulares eficaces.

2.5.2.2. Rotación

Los órganos encargados de percibir la rotación son los canales semicirculares. En su disposición anatómica, están dispuestos de manera tal que cada uno de ellos coincide con uno de los tres planos espaciales, de esta manera podemos percibir la velocidad angular en los tres ejes.

El conducto semicircular externo o lateral, tiene una inclinación aproximada de $30''$ con respecto al plano horizontal. Los conductos anterior y posterior cortan el plano del conducto lateral en $90''$ y entre ambos forman también un ángulo de $90''$. En la figura 2.6 se puede ver la disposición especial de los conductos semicirculares.

Los conductos están conectados por sus extremos con el utrículo, pero en uno de ellos hay una dilatación que se conoce con el nombre de ampolla. El conducto externo y anterior tienen su ampolla en el arco anterior, mientras que el posterior la tiene en el posterior. Es en dicho sector donde se encuentran las células sensoriales que le dan valor funcional a éste sistema.

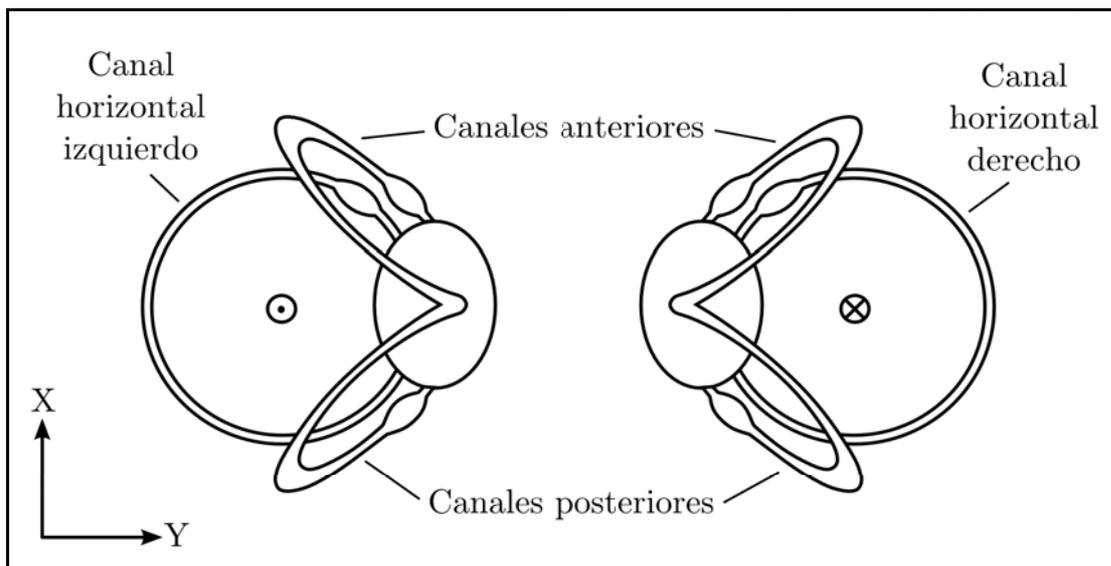


Figura 2.6. Esquema de los canales semicirculares del oído interno

Hay dos tipos de células sensoriales. Las tipo I son células con forma de botellón adelgazadas en su parte superior donde en el borde libre, se hallan cilias de distintos grosores que se dirigen hacia el espacio endolinfático.

Las células tipo II son de forma cilíndrica y también tienen cilias, aunque no se han encontrado diferencias funcionales entre ambos tipos de células.

Las células I y II están bañadas en el espacio endolinfático por una sustancia gelatinosa que las hace formar un cuerpo en conjunto.

Existe una cilia mas gruesa que las demás llamada kinocilio que está ubicada en uno de los extremos de la célula, y las otras cilias al lado. La orientación depende del conducto que encuentre; así en el conducto externo, los kinocilios esta ubicados del lado utricular y en los conductos anterior y posterior, en sentido inverso.

Las células, en ausencia de movimiento ciliar, provocan una descarga eléctrica basal. Cuando hay desplazamiento de la endolinfa y hace movilizar las cilias hacia el kinocilio, la descarga basal aumenta. Cuando tiene una dirección contraria, disminuye.

Las cilias y la sustancia gelatinosa forman la llamada cresta vestibular que se encuentra implantada a la ampolla, y cuyo borde libre esta en contacto con la endolinfa y se desplaza con la corriente endolinfática. Cuando dicha corriente es ampulípeto (hacia la ampolla), en el conducto externo la descarga basal aumenta,

mientras que en los conductos anterior y posterior disminuye, ya que el kinocilio mira hacia el canal.

Cuando hay movimiento de la cabeza hacia la izquierda, en el conducto externo izquierdo habrá un desplazamiento ampulípeto con desviación de la cresta hacia el utrículo, mientras que en el derecho habrá un movimiento inverso (ampulífugo). A consecuencia de ésto, habrá un aumento de la descarga basal en el lado izquierdo y una disminución en el derecho. Por lo tanto cuando hay un movimiento de la cabeza, hay un aparato que aumenta sus descargas y otro que las disminuye.

Las descargas de los receptores vestibulares, son capaces de modificar el tono muscular y de los ojos. La disminución de la descarga provoca una desviación del eje corporal y de los ojos hacia ese lado.

El diámetro interno de los canales semicirculares es de unos 0.2 mm y el círculo que forman tiene un diámetro de unos 6 mm.

Para el rango de frecuencias que nos interesa en nuestro caso, el modelo de *Young et al.* [63] resulta el más adecuado. Mediante este modelo somos capaces de conocer aproximadamente la percepción de la velocidad angular. Este modelo utiliza la misma función de transferencia para cada uno de los tres canales, pero con valores de los parámetros diferentes.

$$\frac{\hat{\omega}}{\omega} = \frac{T_1 \cdot T_a \cdot s^2}{(T_1 \cdot s + 1) \cdot (T_s \cdot s + 1) \cdot (T_a \cdot s + 1)}$$

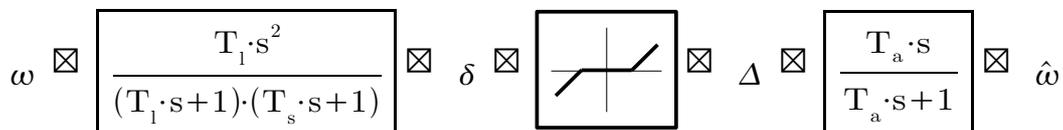
Donde:

- ω es la velocidad angular de entrada del eje correspondiente y
- $\hat{\omega}$ es la velocidad angular percibida

Este modelo también incluye el comportamiento de la cúpula que añade un recorrido muerto δ_{TH} a la flexión de la cúpula como sugieren [64] y [43].

$$\begin{aligned} \Delta = 0 & \quad \text{para} \quad |\delta| \leq \delta_{TH} \\ \Delta = \delta - \text{signo}(\delta) \cdot \delta_{TH} & \quad \text{para} \quad |\delta| > \delta_{TH} \end{aligned}$$

Representando el modelo completo mediante un diagrama de bloques sería lo siguiente:



Diversos estudios han servido para conocer los valores medios de los parámetros de este modelo, representados en la siguiente tabla:

	Cabaceo (respecto al eje y)	Balaceo (respecto al eje x)	Guiñado (respecto al eje z)
T_1 (s)	5.3	6.1	10.2
T_s (s)	0.1	0.1	0.1
T_a (s)	30	30	30
\boxtimes_H (rad/s)	3.6	3.0	2.6

Tabla 2.5. Valores de los parámetros del modelo de percepción de velocidad angular

Representado gráficamente mediante diagramas de Bode la respuesta en frecuencia de este modelo con los valores de la tabla anterior son los siguientes:

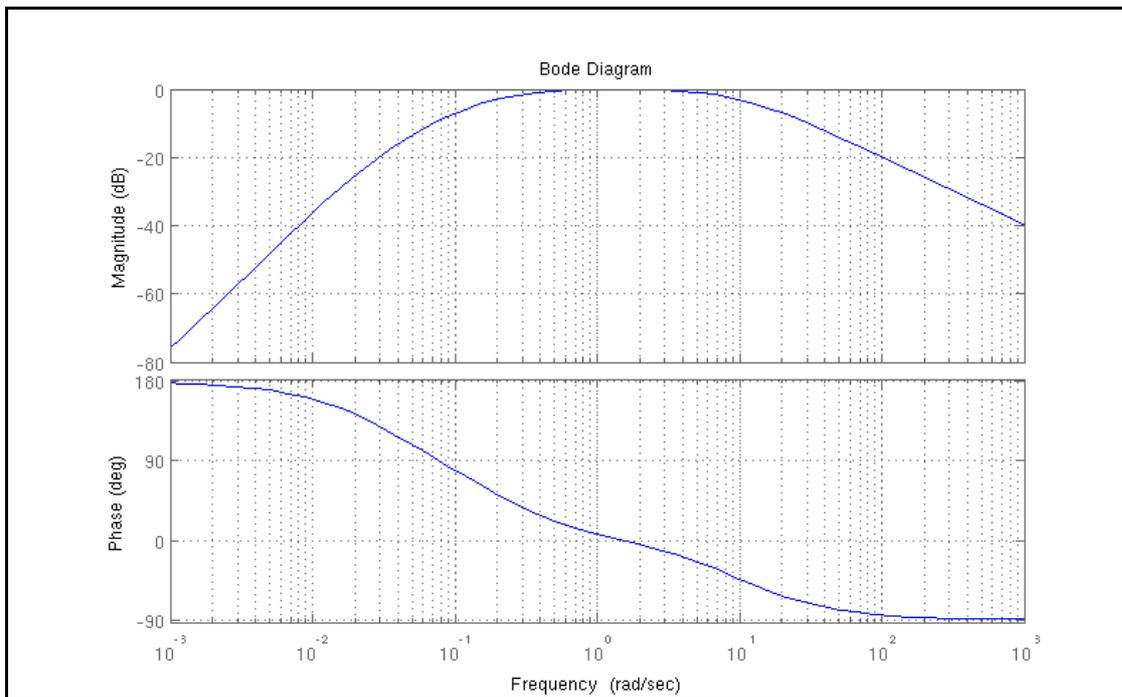


Figura 2.7. Diagrama de Bode del modelo de percepción del cabeceo

Se puede observar como el oído humano es un buen sensor de velocidad angular entre los 0.2 y 10 radianes por segundo, con una amplitud tendiente a cero a bajas frecuencias.

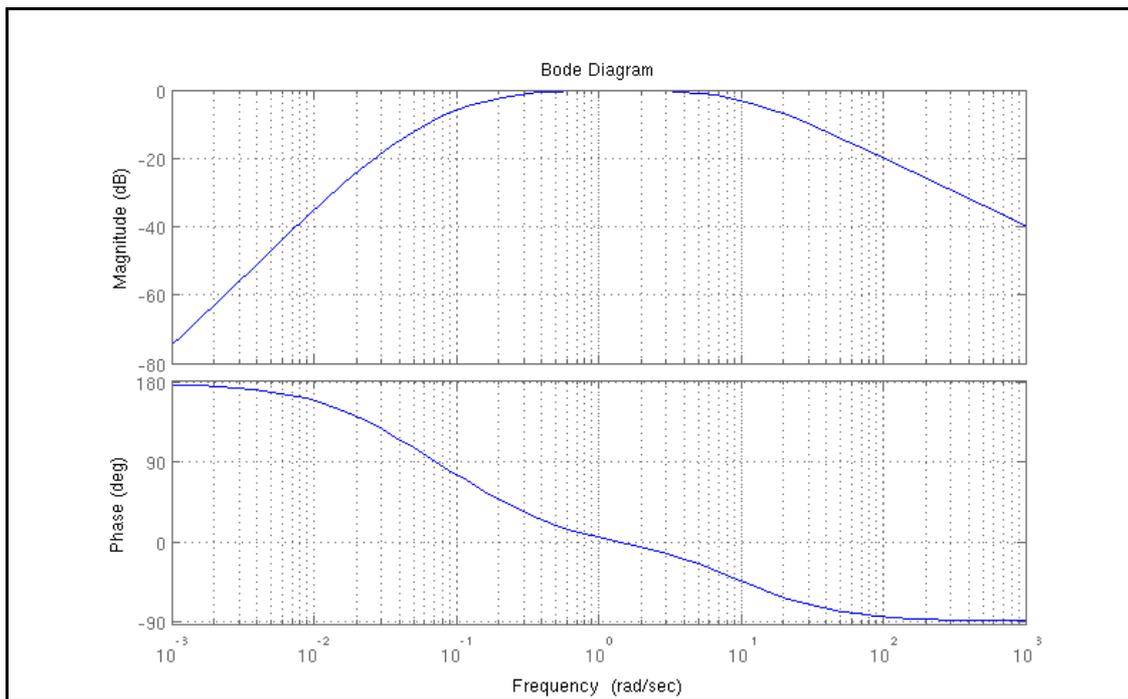


Figura 2.8. Diagrama de Bode del modelo de percepción del balanceo

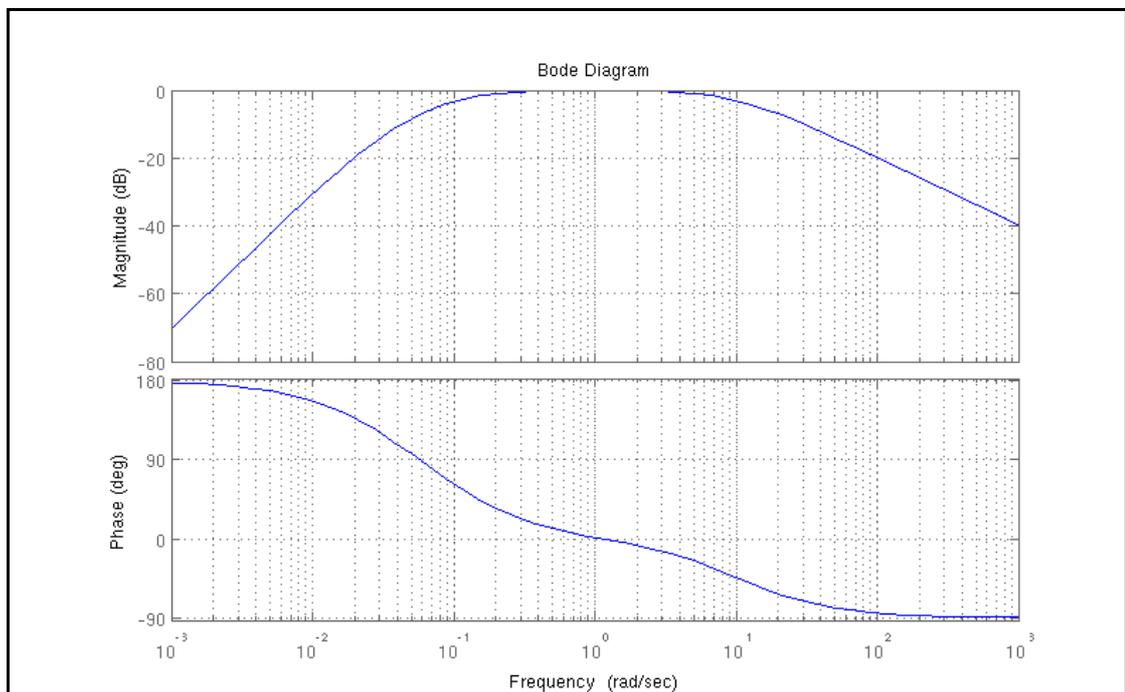


Figura 2.9. Diagrama de Bode del modelo de percepción del guiñada

2.5.2.3. Traslación

En el sistema vestibular también existen sensores para captar los movimiento de traslación y están situados en la misma estructura que los canales semicirculares.

Dentro del utrículo, la cavidad en donde se conectan los conductos semicirculares, en el plano horizontal se ubica la mácula donde se sitúan las células sensoriales. Estas son semejantes a las de las ampollas con cilias y kinocilio y misma actividad eléctrica.

En el sáculo, la mácula esta ubicada en un plano vertical y las células tienen la misma actividad.

Las cilias, también están inmersas en una sustancia gelatinosa que soporta concreciones calcáreas: los otolitos, los que ejercen su acción gravitacional sobre el conjunto de cilios y sustancia gelatinosa.

Los otolitos captan la aceleración lineal: Si es hacia adelante, su estímulo provocará descenso de los ojos, mientras que si es hacia atrás, ascenso.

En síntesis, captan los movimientos de aceleración y desaceleración, pero también, dada la disposición de los otolitos que están en el utrículo, detectan las variaciones de inclinación en relación a la horizontalidad.

Matemáticamente se puede decir que el sistema vestibular percibe el movimiento de traslación mediante fuerzas específicas. La fuerza específica \vec{f} es la aceleración lineal inercial \vec{y} menos la aceleración de la gravedad \vec{g} . La fórmula que relaciona la aceleración lineal y la fuerza específica es la siguiente:

$$\vec{f} = \vec{y} - \vec{g}$$

Dicho de otra manera, el sistema de percepción humano capta constantemente la aceleración de la gravedad, y por lo tanto no es capaz de notar la diferencia entre una fuerza específica debida a una inclinación (fuerza específica causada por la aceleración de la gravedad) o a una aceleración lineal [52]. Este hecho pudiera parecer irrelevante, pero para la simulación del movimiento es algo crucial, ya que nos servimos de la aceleración de la gravedad para simular aceleraciones lineales. Obviamente también podemos simular aceleraciones lineales directamente. La forma en la que realizaremos la simulación de estas aceleraciones está explicada extensamente más adelante en este capítulo.

En estado de reposo, los otolitos están en posición vertical y cuando se induce una fuerza específica, los otolitos se inclinan produciendo una señal proporcional a la deformación. La base de los otolitos está ligeramente curvada formando la parte situada en la parte delantera unos 20 grados respecto a la horizontal.

De igual manera que con la percepción de la velocidad angular, para las fuerzas específicas disponemos del modelo de *Young and Meiry* [63]. Mediante este modelo podemos conocer aproximadamente la percepción de las fuerzas específicas. Al igual que el modelo para la percepción de las velocidades angulares, se usa la misma función de transferencia para cada uno de los ejes, pero con valores de los parámetros diferentes.

$$\frac{\hat{f}}{f} = \frac{K \cdot (T_a \cdot s + 1)}{(T_1 \cdot s + 1) \cdot (T_s \cdot s + 1)}$$

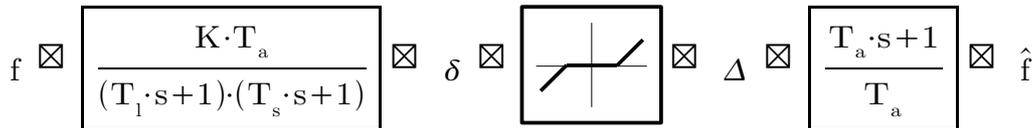
Donde:

- ▶ f es la fuerza específica de entrada del eje correspondiente y
- ▶ \hat{f} es la fuerza específica percibida

Este modelo también incluye, como en el caso de la percepción de las velocidades angulares, un recorrido muerto δ_{TH} :

$$\begin{aligned} \Delta = 0 & \quad \text{para} \quad |\delta| \leq \delta_{TH} \\ \Delta = \delta - \text{signo}(\delta) \cdot \delta_{TH} & \quad \text{para} \quad |\delta| > \delta_{TH} \end{aligned}$$

Representando el modelo completo mediante un diagrama de bloques sería lo siguiente:



Diversos estudios [13, 37] han servido para conocer los valores medios de los parámetros de este modelo, representados en la siguiente tabla:

	Longitudinal (respecto al eje x)	Lateral (respecto al eje y)	Vertical (respecto al eje z)
T_1 (s)	5.33	5.33	5.33
T_s (s)	0.66	0.66	0.66
T_a (s)	13.2	13.2	13.2
K	0.4	0.4	0.4
δ_{TH} (rad/s)	0.17	0.17	0.28

Tabla 2.6. Valores de los parámetros del modelo de percepción de la fuerza específica

Los valores del recorrido muerto δ_{TH} han sido determinados en [43]. En estos experimentos, a los sujetos se les inducía una aceleración con forma de escalón y debían de indicar el momento en el percibían la aceleración máxima. Con estos valores de tiempo se pudo estimar el valor del parámetro de recorrido muerto.

Representado gráficamente mediante el diagrama de Bode la respuesta en frecuencia de este modelo con los valores de la tabla anterior son los siguientes:

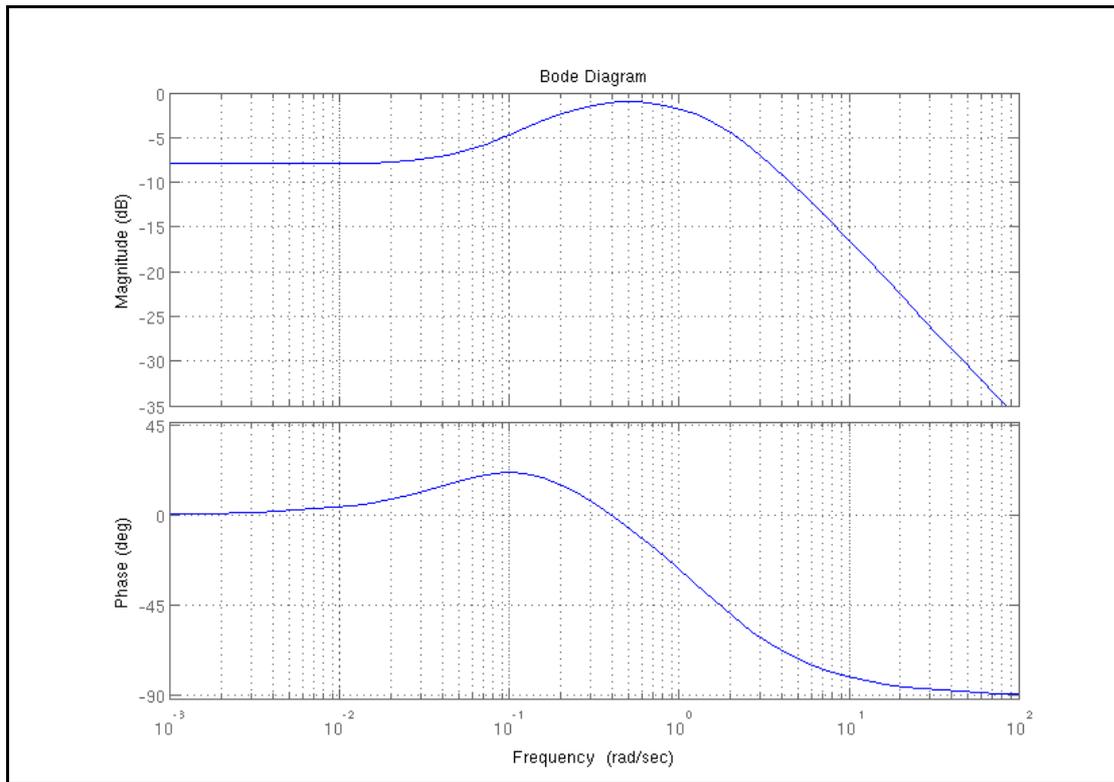


Figura 2.10. Diagrama de Bode del modelo de percepción de la fuerza específica

Se puede ver en la gráfica de amplitud, que el sistema es un buen sensor de fuerza específica para el rango de frecuencias de 0.2 a 2 radianes por segundo. Tiene una amplitud residual para los valores constantes, ya que percibimos la aceleración de la gravedad en ausencia de aceleraciones lineales. Esto es así, para poder percibir la inclinación de la cabeza.

2.5.3. Visión

El hecho de que la mayoría de los animales dotados de sistema de visión posean dos ojos no es casual, sino que gracias a la visión estereoscópica tenemos percepción de profundidad. Esto nos permite reforzar la captación de la posición realizada por el sistema vestibular.

Por regla general los animales depredadores tienen los ojos situados en la parte frontal de la cabeza para poder tener una mejor percepción espacial de los objetos cercanos, y por lo tanto una mayor precisión. Sin embargo los animales no depredadores tienen los ojos situados a los lados de la cabeza, por lo que no son capaces de enfocar objetos cercanos, pero tienen un mayor campo de visión. Existen sin embargo otras configuraciones oculares adaptadas según la necesidad. Por ejemplo el camaleón posee un movimiento independiente de cada ojo, por lo que no percibe una sola imagen con percepción de la profundidad, sino que percibe dos imágenes independientes.

En la siguiente figura está representado el ojo humano con los elementos más importantes:

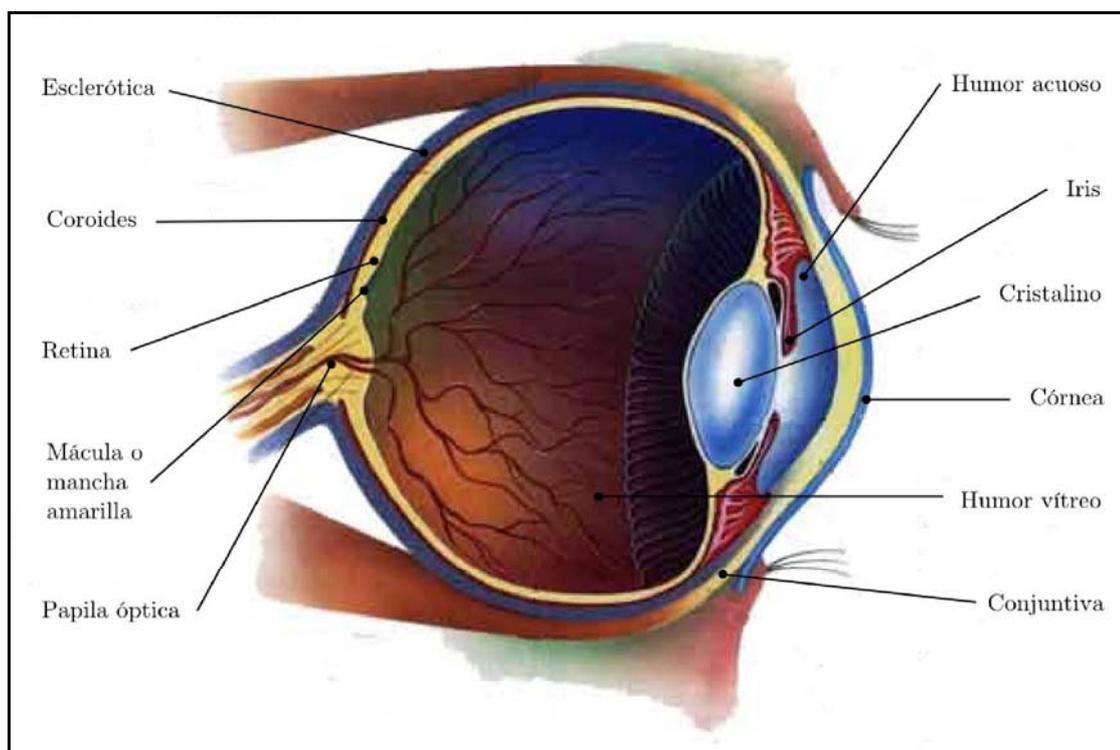


Figura 2.11. Esquema del ojo humano

Los ojos son, después del cerebro, el órgano más complejo del cuerpo humano. El cristalino se encarga de enfocar las imágenes percibidas en un punto concreto de la retina llamado fovea, situado en la mácula lútea. En el ojo humano tiene un diámetro de 1.5 mm. El iris mediante la dilatación y contracción permite mayor o menor entrada de la luz en el globo ocular según las condiciones de iluminación externas.

La retina es la parte en la que inciden los rayos de luz y posee dos tipos de sensores: conos y bastones.

Los bastones reciben las impresiones luminosas incoloras. Se concentran en la periferia de la retina, siendo los bastones el principal componente de la visión periférica. Los bastones son los responsables de la visión acromática (escala de grises). Están adaptados para poca luz, ya que con mucha colapsan y se bloquean. Los bastones, al poseer una mayor sensibilidad a la luz, son los causantes de la visión nocturna.

Los conos reciben las impresiones luminosas de color. Existen tres tipos diferentes de conos (rojo, verde y azul), cada uno sintonizado para absorber la luz en una banda espectral angosta. Requieren mucha luz para funcionar, por lo que en condiciones de penumbra, el ojo humano, no es capaz de distinguir los colores.

No todos los sistemas de visión de los animales son iguales. Algunos pájaros no poseen bastones, por lo que no son capaces de distinguir tonos de grises, y por lo general, no ven en la penumbra. Los perros y otros cánidos no poseen conos, por lo que no son capaces de distinguir los colores. Muchos animales, debido a la dependencia del sistema de visión para sobrevivir, poseen mayor densidad de sensores de luz en la retina, por lo que tienen una mayor resolución de imagen y son capaces de distinguir objetos a grandes distancias. Esta característica es común en casi todas

las aves rapaces.

También posee un sistema muscular para orientar el globo ocular. Los sistemas musculares de ambos ojos deben actuar sincronizadamente para una correcta visión. Este sistema muscular está conectado, a través del cerebro, al sistema vestibular, de forma que al percibir una rotación, los ojos se mueven automáticamente para intentar mantener en la misma posición el punto de enfoque.

Por ejemplo, al dar vueltas según el eje vertical, los ojos se fijan en un punto, lo siguen y luego saltan a otro punto. Esto produce un movimiento oscilante de los ojos llamado nistagmo. Cuando el sujeto deja de dar vueltas, el sistema vestibular todavía está percibiendo movimiento de rotación, ya que el líquido endolinfático no se ha detenido por completo y el nistagmo continúa. Esto produce en el sujeto una sensación de mareo.

2.5.4. Sonido

El sistema auditivo está localizado en el oído, el cual consta de tres partes: oído externo, medio e interno. En el oído interno, como ya se ha dicho anteriormente, también está localizado el aparato vestibular, ya que comparten órganos y terminales nerviosas (nervio auditivo). En la imagen 2.12 se puede ver un esquema del oído.

En el oído externo está el pabellón auditivo, cuya misión es mejorar la eficiencia de la percepción del sonido, en el oído medio está el conducto auditivo y en el oído interno están los órganos de percepción del sonido (tímpano, estribo, martillo y yunque). La característica más importante de la percepción del sonido es, al igual que en el sistema de visión, la localización espacial. Aunque en el caso del sonido es menos crítica ya que en escenarios reales es más común tener interferencias que desvirtúan la localización de la fuente del sonido. Por esta razón el sistema de percepción humano no suele tomar como referencia el sonido para estimar la posición.

Al igual que el sistema ocular, al tener dos sistemas auditivos, somos capaces de localizar un sonido en el espacio. El cerebro es capaz de percibir un pequeño retardo entre los dos oídos, y de esta manera reconocer la dirección del sonido. En la siguiente figura podemos ver dos fuentes emisoras de sonido en diferente posición relativa respecto al observador.

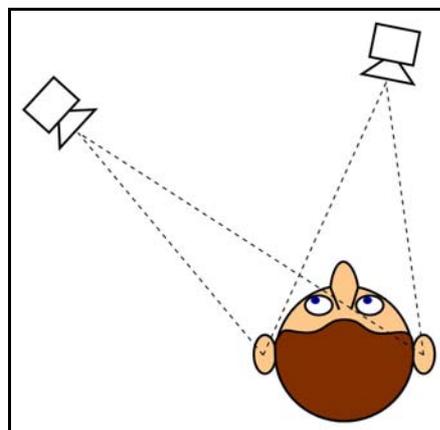


Figura 2.12. Percepción espacial del sonido

Por ejemplo, en la fuente sonora situada a la izquierda del operador, la distancia entre la fuente y el oído izquierdo es menor que entre la fuente y el oído derecho. El cerebro es capaz de captar este pequeño desfase y reconocer que la fuente sonora está situada a la izquierda. En la otra fuente sonora representada en la figura anterior la distancia entre la fuente y los dos oídos es similar, por lo que el operador percibirá una fuente casi centrada.

Por lo general, para las interfaces multisensoriales para teleoperación que incluyen sonido, no se suele emplear un sistema de reproducción de sonido tridimensional, ya que la localización espacial de la fuente del sonido no es importante para las tareas a realizar. En la actualidad la gama media de tarjetas de sonido, dedicadas o integradas, para ordenadores personales poseen capacidad de reproducir sonido en tres dimensiones mediante sistemas de 4 o más altavoces. Por lo que el uso de este sistema es simplemente de conveniencia dependiendo de la aplicación de teleoperación más que de complejidad técnica.

Además de la localización espacial, debido al efecto *Doppler*, se puede reconocer la velocidad de la fuente sonora. Este efecto, llamado así por Christian Andreas Doppler, consiste en la variación de la longitud de onda en función de la velocidad de la fuente sonora y de la velocidad del receptor. En general este efecto se puede aplicar a cualquier tipo de onda. En el caso de la luz, para apreciar este efecto hacen falta elevadísimas velocidades relativas, por lo que en teleoperación de vehículos no tiene ninguna influencia.

La fórmula general del efecto Doppler, para emisor y receptor en movimiento, es la siguiente:

$$f' = f \cdot \left(\frac{v \pm v_o}{v \mp v_s} \right)$$

Donde:

- f' frecuencia captada por el receptor;
- f frecuencia emitida;
- v velocidad de la onda en el medio. En el caso del sonido en el aire 343 m/s;
- v_o velocidad del receptor;
- v_s velocidad del emisor.

2.5.5. Otros

Los sistemas principales de percepción se completan con el resto de los sistemas del cuerpo humano. Por ejemplo el cerebelo, a través de los órganos propioceptores, se encarga de conocer la posición relativa de todos los miembros del cuerpo, de forma

que el cerebro es capaz de reconocer la posición de la cabeza y por ende, la posición del sistema vestibular. De esta forma, aunque una persona esté en posición erguida pero con la cabeza ladeada, no tiene la sensación de movimiento lateral, ya que el cerebro corrige los estímulos del sistema vestibular mediante la información del cerebelo.

La percepción del tacto también influye en la sensación de movimiento. Intuitivamente, cuando una persona va en un coche con una aceleración lineal positiva, siente la presión del asiento. Mediante el uso de plataformas móviles no solo estamos estimulando el sistema vestibular, sino también el tacto, con lo que resulta un sistema congruente [11, 37]. En el caso de que se pudiera estimular directamente el oído interno para forzar la sensación de movimiento, la percepción no sería completa, ya que perderíamos la estimulación del tacto.

Yendo un poco más lejos en telepresencia podemos simular el resto de los sentidos mediante olores, variaciones en la temperatura y en la humedad. Por ejemplo en sistemas de extinción de incendios remotos la búsqueda de focos calientes se podría mejorar mediante el uso de sistemas de radiación de calor en la plataforma multisensorial. De esta manera el teleoperador podría localizar más rápidamente los puntos críticos. Aunque no solo habría que adaptar la interfaz de teleoperación, sino también el vehículo teleoperado en sí, para que pudiera recoger los datos referentes a la temperatura del entorno.

Los bomberos poseen trajes especiales que les protegen del fuego y del calor. Sin embargo una protección excesiva al calor hace que no sepan con certeza si se encuentran en una zona segura o peligrosa. Por esta razón suelen incorporar alguna zona con menor protección para saber el riesgo al que están expuestos. Este y otros ejemplos hacen considerar el uso de otros estímulos en teleoperación para mejorar el proceso.

2.6. Plataformas de movimiento

2.6.1. Introducción y estado del arte

Las plataformas móviles se empezaron a usar en los años 80 en simuladores de vuelo. El Departamento de Ingeniería de la Universidad de Victoria llevó a cabo en esos años diversos ensayos para analizar la influencia del movimiento en los simuladores de vuelo y cuantificar la percepción del mismo [48, 49]. La conclusión principal fue que el uso del movimiento en simuladores de vuelo tenía un efecto positivo en la percepción de los pilotos del entorno de simulación.

Existen multitud de plataformas de movimiento en un gran rango de coste y tamaño. Desde sistemas de movimiento de 2 ejes para juegos recreativos hasta simuladores de 6 grados de libertad para simuladores de vuelo militares [2, 18, 22, 24-30, 45, 50, 61]. También existe una gran variación en el tamaño, si se trata de un simulador para una sola persona o una plataforma para un grupo de personas, en el

caso de sistemas recreativos. En resumidas cuentas, se han desarrollado muchas variedades de plataformas de movimiento para adaptarlas a una aplicación en concreto.

Una de las plataformas más utilizadas en la actualidad es la plataforma hexápoda [8, 9] o *Stewart* [53]. Se trata de una plataforma de 6 grados de libertad con una baja complejidad mecánica y gran escalabilidad en el tamaño.

En la Universidad de Zaragoza, a través de diversos proyectos de investigación, se han desarrollado dos arquitecturas de plataformas de movimiento de 4 grados de libertad especialmente adaptadas a la simulación de vehículos. Estas son la plataforma esférica y la plataforma de paralelogramos desarrolladas en el proyecto *Simusys* [51] y *Innova* [16] respectivamente.

Aunque hay una gran variedad de arquitecturas diferentes, todas ellas se basan en los mismos principios de funcionamiento que veremos a continuación.

2.6.2. Simulación del movimiento

2.6.2.1. Introducción

En la mayoría de las aplicaciones una plataforma de movimiento no es capaz, debido a limitaciones mecánicas, de reproducir exactamente el movimiento del vehículo teleoperado o simulado. Por ello se recurre a simular el movimiento y, de esta manera, engañar a la persona montada sobre la plataforma para que perciba lo mismo que percibiría en el vehículo real [6, 14, 48, 49].

Para elaborar los algoritmos de control de la plataformas se ponen en práctica los modelos de percepción mostrados en el apartado 5 de este capítulo. Teniendo en cuenta las características particulares del sistema vestibular humano es posible simular un movimiento en una plataforma y conseguir un alto grado de realismo.

Como se ha visto anteriormente, el sistema de percepción humano es capaz de captar velocidades angulares y fuerzas específicas en los tres ejes. Idealmente una plataforma móvil simularía directamente estos parámetros, pero en general las plataformas de movimiento no pueden generar estas aceleraciones lineales debido a las limitaciones de desplazamiento. De forma que una plataforma de movimiento solo es capaz de simular directamente las velocidad angulares y aceleraciones lineales de media/alta frecuencia. Las aceleraciones lineales de baja frecuencia (aceleraciones mantenidas) se simulan mediante la inclinación de la plataforma, ya que al percibir las aceleraciones lineales a través de las fuerzas específicas, podemos usar la fuerza de la gravedad para inducir esta sensación. Pero solo podemos hacer uso de la gravedad en el caso de las aceleraciones lineales longitudinales y laterales, pero no verticales. A continuación se puede ver esquemáticamente este proceso:

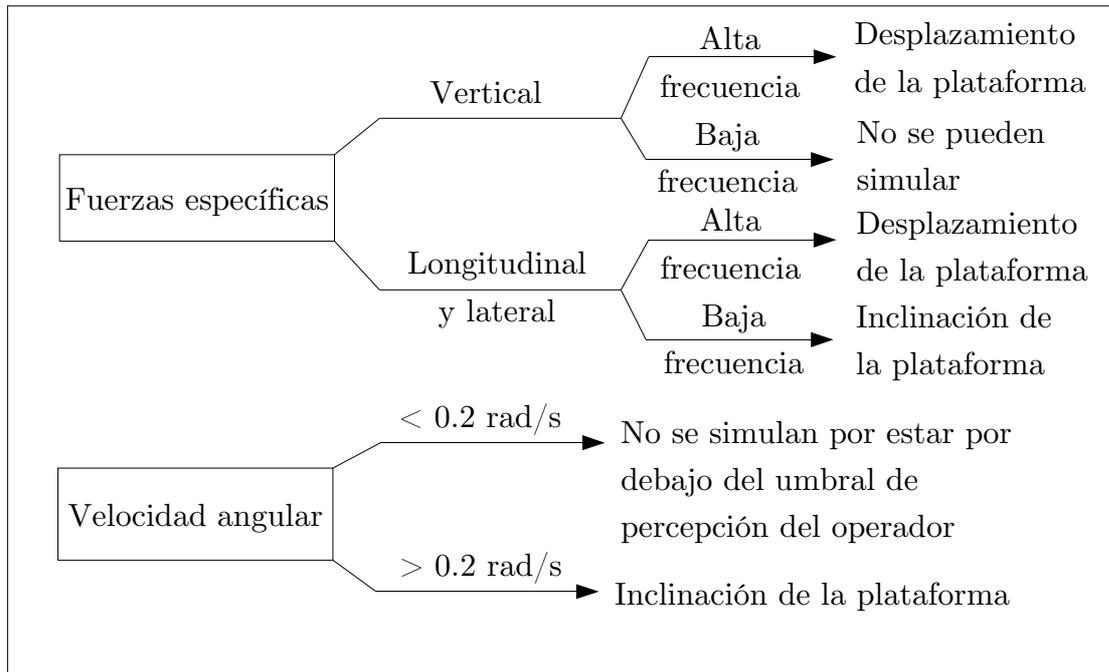


Figura 2.13. Esquema de la simulación del movimiento

Cuando se simulan las aceleraciones lineales de baja frecuencia mediante la inclinación de la plataforma, el movimiento se debe de llevar a cabo por debajo del umbral de la percepción, para no introducir movimientos “extraños”. De la misma manera se debe de poner atención en que la inclinación de la plataforma no introduzca aceleraciones lineales. Este efecto se anula si la cabeza de la persona montada en la plataforma se sitúa en el centro de rotación de la plataforma. Dependiendo de la arquitectura de la plataforma, esto no es siempre posible, por lo que habrá que limitar la velocidad angular máxima para amortiguar este efecto.

2.6.2.2. Sistemas de coordenadas

Antes de explicar detalladamente el sistema de control empleado, vamos a definir los sistemas de coordenadas usados durante el proceso. Todos los sistemas de coordenadas descritos a continuación se definen dextrógiros positivos.

III) Sistema de coordenadas fijo

El sistema de coordenadas $S_f = X_f Y_f Z_f$ es la referencia fija respecto al suelo con el eje Z_f alineado respecto al vector de la gravedad ($-\vec{g}$).

IV) Sistema de coordenadas relativo al vehículo

El sistema de coordenadas $S_c = X_c Y_c Z_c$ tiene su origen en el centro del gravedad del vehículo, con el eje X según la dirección longitudinal hacia delante, el eje Y según la dirección lateral hacia la izquierda y el eje Z vertical y hacia arriba. En la siguiente figura está representado este sistema de coordenadas:

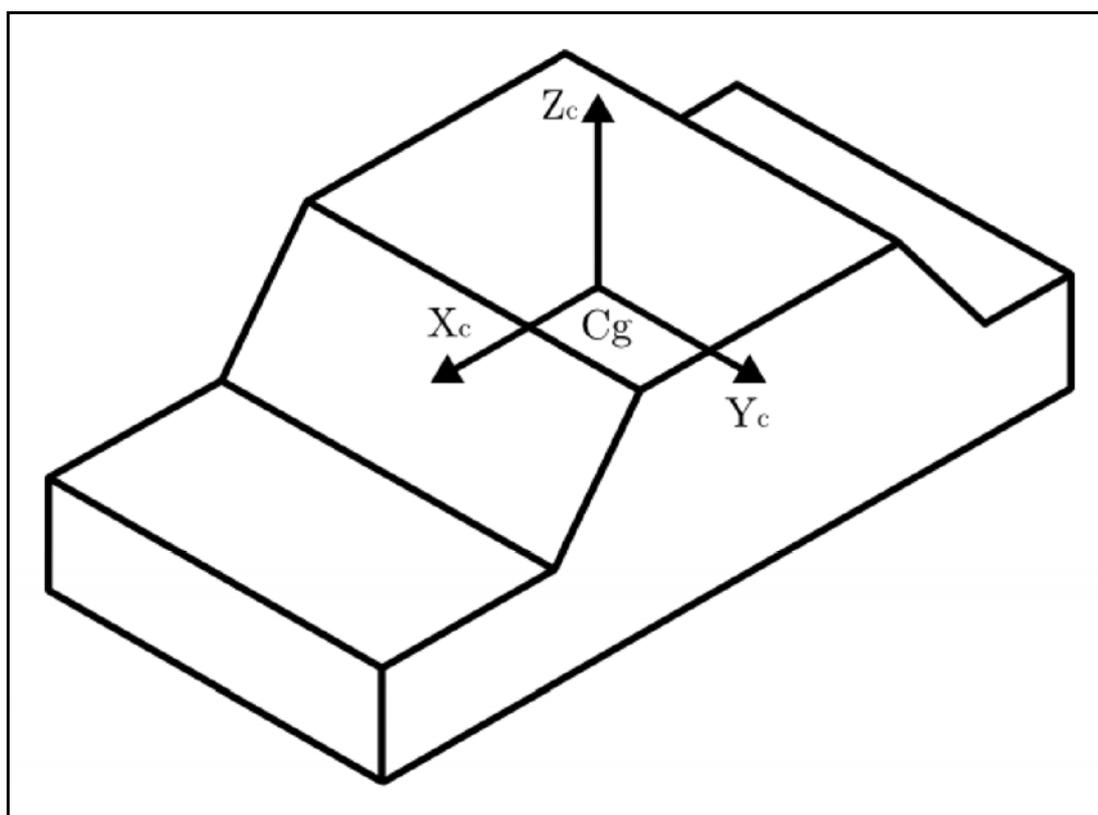


Figura 2.14. Esquema de los sistemas de coordenadas utilizados

V) Sistema de coordenadas relativo al asiento del conductor

El sistema de coordenadas $S_{pc} = X_{pc} Y_{pc} Z_{pc}$ está centrado en el asiento del conductor y es paralelo al sistema de coordenadas S_c del vehículo.

VI) Sistema de coordenadas relativo a la cabeza del conductor

El sistema de coordenadas $S_{cpc} = X_{cpc} Y_{cpc} Z_{cpc}$ es paralelo al sistema de coordenadas S_c del vehículo y está centrado en la cabeza del conductor, concretamente en el punto medio entre los dos sistemas vestibulares izquierdo y derecho.

VII) Sistema de coordenadas relativo al asiento de la plataforma

Este sistema de coordenadas $S_s = X_s Y_s Z_s$ es equivalente al sistema de coordenadas S_{dc} del vehículo, pero fijado a la plataforma.

VIII) Sistema de coordenadas relativo a la cabeza del operador de la plataforma

Al igual que el sistema de coordenadas S_{cpc} del vehículo, el sistema de coordenadas $S_{cps} = X_{cps} Y_{cps} Z_{cps}$ está centrado en la cabeza del operador, en el punto medio de los sistemas vestibulares izquierdo y derecho, pero es paralelo al sistema de coordenadas de la plataforma S_s .

2.6.2.3. Matrices de transformación

I) Para el vehículo. De S_f a S_c

La transformación entre el sistema de coordenadas fijo S_f y el sistema de coordenadas relativo al vehículo S_c lo realizamos a través de los tres ángulos de Euler (ψ , θ y ϕ) de la siguiente manera:

$$X_f Y_f Z_f \xrightarrow[Z_f=Z_1]{\text{Guiñado}(\psi)} X_1 Y_1 Z_1 \xrightarrow[Y_1=Y_2]{\text{Cabeceo}(\theta)} X_2 Y_2 Z_2 \xrightarrow[X_2=X_c]{\text{Balanceo}(\phi)} X_c Y_c Z_c$$

Las matrices de cambio de coordenadas entre cada uno de los sistemas son las siguientes:

$$S_\psi = \begin{pmatrix} \cos(\psi) & -\text{sen}(\psi) & 0 \\ \text{sen}(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{por lo tanto:} \quad [\vec{v}]_{S_f} = S_\psi \cdot [\vec{v}]_{S_1}$$

$$S_\theta = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & 0 & \text{sen}(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\text{sen}(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{pmatrix} \quad \text{por lo tanto:} \quad [\vec{v}]_{S_1} = S_\theta \cdot [\vec{v}]_{S_2}$$

$$S_\phi = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi) & -\text{sen}(\phi) \\ 0 & \text{sen}(\phi) & \cos(\phi) \end{pmatrix} \quad \text{por lo tanto:} \quad [\vec{v}]_{S_2} = S_\phi \cdot [\vec{v}]_{S_c}$$

Así pues, la matriz de cambio de coordenada entre S_f y S_c se puede calcular a partir de la tres matrices precedentes. Para simplificar la notación a partir de ahora se usarán s y c para denominar las funciones seno y coseno respectivamente.

$$S = S_\psi \cdot S_\theta \cdot S_\phi = \begin{pmatrix} c\psi \cdot c\theta & -s\psi \cdot c\theta + c\psi \cdot s\theta \cdot s\phi & s\psi \cdot s\theta + c\psi \cdot s\theta \cdot c\phi \\ s\psi \cdot c\theta & c\psi \cdot c\theta + s\psi \cdot s\theta \cdot s\phi & -c\psi \cdot s\phi + s\psi \cdot s\theta \cdot c\phi \\ -s\theta & c\theta \cdot c\phi & c\theta \cdot c\phi \end{pmatrix} \Rightarrow [\vec{v}]_{S_f} = S \cdot [\vec{v}]_{S_c}$$

Ya que se trata de una matriz de transformación homogénea, la inversa es equivalente a la transpuesta. De esta manera para realizar la transformación inversa, de S_c a S_f usaremos la siguiente matriz:

$$S^{-1} = S^T = \begin{pmatrix} c\psi \cdot c\theta & s\psi \cdot c\theta & -s\theta \\ -s\psi \cdot c\theta + c\psi \cdot s\theta \cdot s\phi & c\psi \cdot c\theta + s\psi \cdot s\theta \cdot s\phi & c\theta \cdot c\phi \\ s\psi \cdot s\theta + c\psi \cdot s\theta \cdot c\phi & -c\psi \cdot s\theta + s\psi \cdot s\theta \cdot c\phi & c\theta \cdot c\phi \end{pmatrix} \Rightarrow [\vec{v}]_{S_c} = S^{-1} \cdot [\vec{v}]_{S_f}$$

II) Para el simulador. De S_f a S_s

De la misma manera que en caso del vehículo, la transformación entre el sistema de coordenadas fijo S_f y el sistema de coordenadas relativo al simulador S_s se realiza a través de los tres ángulos de Euler (ψ_s , θ_s y ϕ_s) de la siguiente manera:

$$X_f Y_f Z_f \xrightarrow[Z_f=Z_1]{\text{Guiñado}(\psi_s)} X_1 Y_1 Z_1 \xrightarrow[Y_1=Y_2]{\text{Cabeceo}(\theta_s)} X_2 Y_2 Z_2 \xrightarrow[X_2=X_s]{\text{Balanceo}(\phi_s)} X_s Y_s Z_s$$

Las matrices de cambio de coordenadas entre cada uno de los sistemas son las siguientes:

$$S_{\psi_s} = \begin{pmatrix} \cos(\psi_s) & -\text{sen}(\psi_s) & 0 \\ \text{sen}(\psi_s) & \cos(\psi_s) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \text{por lo tanto:} \quad [\vec{v}]_{S_f} = S_{\psi_s} \cdot [\vec{v}]_{S_1}$$

$$S_{\theta_s} = \begin{pmatrix} \cos(\theta_s) & 0 & \text{sen}(\theta_s) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\text{sen}(\theta_s) & 0 & \cos(\theta_s) \end{pmatrix} \quad \text{por lo tanto:} \quad [\vec{v}]_{S_1} = S_{\theta_s} \cdot [\vec{v}]_{S_2}$$

$$S_{\phi_s} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi_s) & -\text{sen}(\phi_s) \\ 0 & \text{sen}(\phi_s) & \cos(\phi_s) \end{pmatrix} \quad \text{por lo tanto:} \quad [\vec{v}]_{S_2} = S_{\phi_s} \cdot [\vec{v}]_{S_s}$$

Así pues, la matriz de cambio de coordenada entre S_f y S_s se puede calcular a partir de las tres matrices precedentes.

$$S_s = S_{\psi_s} \cdot S_{\theta_s} \cdot S_{\phi_s} = \begin{pmatrix} c\psi_s \cdot c\theta_s & -s\psi_s \cdot c\theta_s + c\psi_s \cdot s\theta_s \cdot s\phi_s & s\psi_s \cdot s\theta_s + c\psi_s \cdot s\theta_s \cdot c\phi_s \\ s\psi_s \cdot c\theta_s & c\psi_s \cdot c\theta_s + s\psi_s \cdot s\theta_s \cdot s\phi_s & -c\psi_s \cdot s\theta_s + s\psi_s \cdot s\theta_s \cdot c\phi_s \\ -s\theta_s & c\theta_s \cdot c\phi_s & c\theta_s \cdot c\phi_s \end{pmatrix} \Rightarrow [\vec{v}]_{S_f} = S_s \cdot [\vec{v}]_{S_s}$$

Ya que se trata de una matriz de transformación homogénea, la inversa es equivalente a la transpuesta. De esta manera para realizar la transformación inversa, de S_s a S_f usaremos la siguiente matriz:

$$S_s^{-1} = S_s^T = \begin{pmatrix} c\psi_s \cdot c\theta_s & s\psi_s \cdot c\theta_s & -s\theta_s \\ -s\psi_s \cdot c\theta_s + c\psi_s \cdot s\theta_s \cdot s\phi_s & c\psi_s \cdot c\theta_s + s\psi_s \cdot s\theta_s \cdot s\phi_s & c\theta_s \cdot c\phi_s \\ s\psi_s \cdot s\theta_s + c\psi_s \cdot s\theta_s \cdot c\phi_s & -c\psi_s \cdot s\phi_s + s\psi_s \cdot s\theta_s \cdot c\phi_s & c\theta_s \cdot c\phi_s \end{pmatrix} \Rightarrow$$

$$[\vec{v}]_{S_s} = S_s^{-1} \cdot [\vec{v}]_{S_f}$$

2.6.2.4. Cálculo de la velocidad angular

La relación entre las componentes de la velocidad angular relativas al simulador en el marco de referencia S_s y la derivada respecto al tiempo de los ángulos de Euler de posición de la plataforma respecto al sistema de referencia S_f es la siguiente:

$$[\vec{\Omega}_{ABS}(\text{sim})]_{S_s} = \dot{\phi}_s \cdot [\vec{x}_1] + \dot{\theta}_s \cdot [\vec{y}_2] + \dot{\psi}_s \cdot [\vec{z}_s]$$

Teniendo en cuenta que:

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = S_{\psi_s} \cdot \begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{cases} x_2 = x_s \cdot \cos(\psi_s) - y_s \cdot \text{sen}(\psi_s) \\ y_2 = x_s \cdot \text{sen}(\psi_s) + y_s \cdot \cos(\psi_s) \\ z_2 = z_s \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = S_{\theta_s} \cdot \begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{cases} x_1 = x_2 \cdot c\theta_s + z_2 \cdot s\theta_s = x_s \cdot c\theta_s \cdot c\psi_s - y_s \cdot c\theta_s \cdot s\psi_s + z_s \cdot s\theta_s \\ y_1 = y_2 = x_s \cdot s\psi_s + y_s \cdot c\psi_s \\ z_1 = -x_2 \cdot s\theta_s + z_2 \cdot c\theta_s \end{cases}$$

Sustituyendo en la ecuación anterior obtenemos lo siguiente:

$$[\vec{\Omega}_{ABS}(\text{sim})]_{S_s} = \dot{\phi}_s \cdot [\vec{x}_1] + \dot{\theta}_s \cdot [\vec{y}_2] + \dot{\psi}_s \cdot [\vec{z}_s] = \dot{\phi}_s \cdot \begin{bmatrix} c\theta_s \cdot c\psi_s \\ -c\theta_s \cdot s\psi_s \\ s\theta_s \end{bmatrix} + \dot{\theta}_s \cdot \begin{bmatrix} s\psi_s \\ c\psi_s \\ 0 \end{bmatrix} + \dot{\psi}_s \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Escribiéndolo en forma matricial se puede expresar de la siguiente manera:

$$[\vec{\Omega}_{ABS}(\text{sim})]_{S_s} = \begin{bmatrix} c\theta_s \cdot c\psi_s & s\psi_s & 0 \\ -c\theta_s \cdot s\psi_s & c\psi_s & 0 \\ s\theta_s & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\phi}_s \\ \dot{\theta}_s \\ \dot{\psi}_s \end{bmatrix} \quad \text{con} \quad E_s = \begin{bmatrix} c\theta_s \cdot c\psi_s & s\psi_s & 0 \\ -c\theta_s \cdot s\psi_s & c\psi_s & 0 \\ s\theta_s & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2.6.2.5. Simulación de la velocidad angular

En el caso de la simulación de la velocidad angular, solamente tenemos que intentar igualar la velocidad angular de la plataforma según el sistema de referencia S_s a la velocidad angular del vehículo respecto al sistema de referencia S_c o S_{pc} . De esta manera la velocidad angular percibida por el conductor del vehículo real (fijo respecto a la referencia S_{pc}) será la misma que la percibida por el operador montado sobre la plataforma (fijo respecto a la referencia S_s).

$$[\vec{\Omega}_{ABS}(\text{vehículo})]_{S_c} = [\vec{\Omega}_{ABS}(\text{vehículo})]_{S_{pc}} = [\vec{\Omega}_{ABS}(\text{plataforma})]_{S_s}$$

2.6.2.6. Simulación de la fuerza específica

Como hemos visto anteriormente el sistema de percepción humano capta la aceleración lineal a través de la fuerza específica. Esta fuerza se calcula como la diferencia entre la aceleración inercial y la aceleración de la gravedad.

$$[\vec{f}] = [\vec{y}] - [\vec{g}]$$

En el caso de usar acelerómetros embarcados en el vehículo, éstos miden directamente la fuerza específica de la siguiente manera:

$$[\vec{y}_{ABS}(\text{CG})_{vh}]_{S_c} = \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{bmatrix} (\text{Valores medidos}) \Rightarrow$$

$$[\vec{y}_{ABS}(\text{P})]_{S_c} = [\vec{y}_{ABS}(\text{CG})_{vh}]_{S_c} + [\vec{\Omega}_{ABS}(\text{vh})]_{S_c} \times [\vec{\Omega}_{ABS}(\text{vh})]_{S_c} \times [\vec{R}]_{S_c} + [\dot{\vec{\Omega}}_{ABS}(\text{vh})]_{S_c} \times [\vec{R}]_{S_c}$$

Donde:

$$[\vec{R}] = [\overline{\text{CG P}}] \quad \text{posición de la cabeza del conductor respecto al centro de gravedad del vehículo;}$$

- (CG)_{vh} referente al centro de gravedad del vehículo;
 (vh) referente al marco del vehículo;
 (P) referente al asiento del conductor del vehículo.

Como vemos en la fórmula anterior la aceleración lineal en el centro de gravedad del vehículo (CG)_{vh}, en la que están situados los sensores, no es igual a la del asiento del conductor del vehículo (P).

Sin embargo en el caso de las velocidades angulares si que son iguales, por lo que usaremos como entrada de nuestro sistema las variables $\left[\vec{\Omega}_{ABS}(vh) \right]_S$ y $\left[\vec{\gamma}_{ABS}(P) \right]_S$.

2.6.3. Estrategia de control

2.6.3.1. Introducción

Para realizar una simulación del movimiento de una forma eficiente debemos de intentar reproducir en la plataforma tanto la fuerza específica como la velocidad angular [52], esto es:

$$\left[\vec{f}(\text{Conductor vehículo}) \right]_{S_{cpc}} = \left[\vec{f}(\text{Conductor plataforma}) \right]_{S_{cps}}$$

Es decir, la fuerza específica en el centro del sistema S_{cpc} (cabeza del conductor del vehículo) expresada en las coordenadas S_{cpc} debe ser igual a la fuerza específica del sistema S_{cps} (cabeza del conductor de la plataforma) expresada en las coordenadas S_{cps} .

$$\left[\vec{\Omega}_{ABS}(\text{Conductor vehículo}) \right]_{S_{cpc}} = \left[\vec{\Omega}_{ABS}(\text{Conductor plataforma}) \right]_{S_{cps}}$$

Es decir, la velocidad angular del conductor del vehículo expresada en las coordenadas S_{cpc} debe ser igual a la velocidad angular del conductor de la plataforma expresada en las coordenadas S_{cps} .

Si conseguimos, mediante un correcto control de la plataforma, reproducir estas variables, la sensación de movimiento en el vehículo y en la plataforma será la misma.

Para conseguir esto seguimos los siguientes pasos:

- ▶ Elegir los puntos de referencia en el vehículo y en el simuladores;
- ▶ Obtener los valores de velocidad angular y fuerza específica en esos puntos. Si fuera necesario se procedería a realizar una conversión mediante un cambio de coordenadas;
- ▶ Utilizar los valores registrados y convertidos como entrada del control de la

plataforma, de forma que consigamos reproducir tanto la velocidad angular como la fuerza específica.

Por lo general se procede a situar la caja de sensores en el centro de gravedad del vehículo. En el caso de la velocidad angular no hace falta realizar ninguna conversión, ya que ésta no depende de la posición sino solamente del marco de referencia. En este caso el sistema S_c es paralelo al sistema S_{cdc} . De forma que:

$$\left[\vec{\Omega}_{ABS}(\text{Conductor vehículo}) \right]_{S_c} = \left[\vec{\Omega}_{ABS}(\text{Conductor plataforma}) \right]_{S_s}$$

Teniendo en cuenta que los valores medidos en el vehículo son los siguientes:

$$\left[\vec{\Omega}_{ABS}(\text{vehículo}) \right]_{S_c} = \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix}_{S_c}$$

Para la fuerza específica es diferente ya que el valor de la misma cambia dependiendo de la posición, de forma que tendremos que hacer una conversión según hemos visto en el apartado anterior para obtener los siguiente:

$$\left[\vec{f}_{vehículo}(P) \right]_{S_c} = \left[\vec{f}_{plataforma} \right]_{S_s}$$

La fuerza específica del vehículo respecto al punto P (asiento del conductor del vehículo) la calculamos a partir de la aceleración inercial medida en el vehículo de la siguiente manera:

$$\left[\vec{f}_{vehículo}(P) \right]_{S_c} = \left[\vec{y}_{ABS}(P) \right]_{S_c} - \left[\vec{g} \right]_{S_c}$$

Sabiendo que los valores medidos en el vehículo son los siguientes:

$$\left[\vec{y}_{ABS}(GC) \right]_{S_c} = \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{bmatrix}_{S_c}$$

2.6.3.2. Simulación de la velocidad angular

Como hemos visto anteriormente la velocidad angular se simula directamente con velocidad angular de la plataforma. De forma que el algoritmo de simulación debe de calcular los tres ángulos de Euler de la plataforma que produzcan esta velocidad

angular. También tenemos que tener en cuenta que usamos la inclinación de la plataforma para simular la fuerza específica de baja frecuencia. Así pues la forma de simular la velocidad angular de la carrocería será la siguiente:

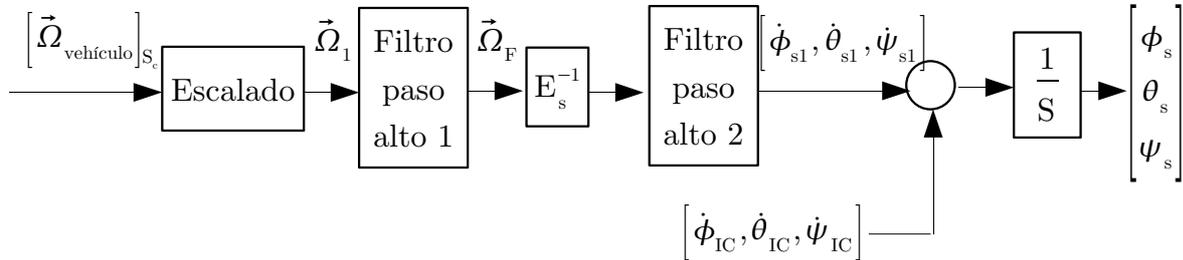


Figura 2.15. Simulación de la velocidad angular

El primer tratamiento que se hace a los datos es aplicarles un factor de escala. Mediante este factor podremos ajustar el comportamiento de los algoritmos según la plataforma que vayamos a utilizar.

Como se ha visto anteriormente, el sistema de percepción humano no es capaz de captar las velocidades angulares por debajo de 0.2 rad/s, por lo que aplicamos un filtro paso alto para eliminar las bajas frecuencias. Es decir que no simularemos velocidades angulares mantenidas.

El bloque E_s^{-1} convierte la velocidad angular expresada en la referencia S_s en derivadas de los ángulos de Euler.

El filtro paso alto 2 se aplica para mantener los ángulos de la plataforma dentro de los límites. Este filtro produce el retorno a cero de los ángulos de la plataforma, siempre a una velocidad angular por debajo del umbral de percepción de 0.2 rad/s.

Con esto obtenemos las derivadas de los ángulos de Euler ($\dot{\phi}_{s1}$, $\dot{\theta}_{s1}$ y $\dot{\psi}_{s1}$) de la plataforma a partir de la velocidad angular del vehículo. A estos valores debemos de añadir la velocidad angular calculada a partir de la fuerza específica de baja frecuencia ($\dot{\phi}_{IC}$, $\dot{\theta}_{IC}$ y $\dot{\psi}_{IC}$). En el apartado 2.6.3.4 veremos como se calculan estos valores.

Y por último integramos las velocidades angulares para calcular los ángulos de Euler de la plataforma ϕ_s , θ_s y ψ_s .

2.6.3.3. Simulación de la fuerza específica de alta frecuencia

Con las plataformas de 6 grados de libertad simulamos las aceleraciones de alta frecuencia mediante desplazamiento de la plataforma. Para las plataformas de 4 grados de libertad, que veremos en capítulos sucesivos, no disponemos de desplazamiento horizontal, por lo que este algoritmo se aplicará solamente para el cálculo del movimiento vertical.

El valor de entrada es la fuerza específica en el punto P (asiento del conductor) según la referencia S_c . A estos valores se les aplica un escalado para poder ajustar el comportamiento del algoritmo según la plataforma.

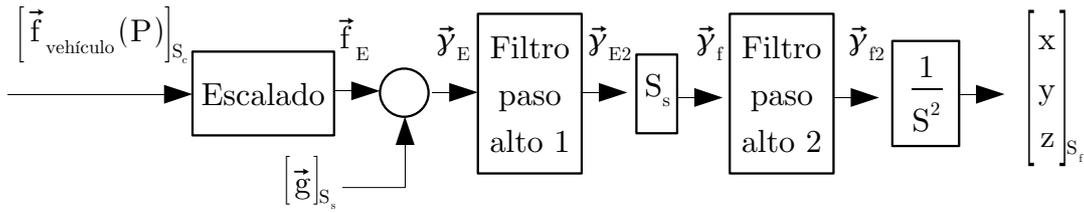


Figura 2.16. Simulación de la fuerza específica de alta frecuencia

Para pasar de fuerza específica a aceleración lineal sumamos el valor de la aceleración de la gravedad expresada en el sistema de referencia S_s , el mismo sistema de referencia en el que está expresada la fuerza específica \vec{f}_E . El cálculo de la aceleración de la gravedad en este sistema lo realizamos de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} \vec{g} \end{bmatrix}_{S_s} = S_s^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix}_{S_f} = g \cdot \begin{bmatrix} \text{sen}(\phi_s) \cdot \text{sen}(\psi_s) - \text{cos}(\phi_s) \cdot \text{sen}(\theta_s) \cdot \text{cos}(\psi_s) \\ \text{sen}(\phi_s) \cdot \text{cos}(\psi_s) + \text{cos}(\phi_s) \cdot \text{sen}(\theta_s) \cdot \text{sen}(\psi_s) \\ \text{cos}(\phi_s) \cdot \text{cos}(\theta_s) \cdot \text{cos}(\psi_s) \end{bmatrix}$$

Una vez que hemos calculado la aceleración inercial aplicamos un filtro paso alto para eliminar la componente de baja frecuencia que se simulará mediante la inclinación de la plataforma.

Después de transformar la aceleración mediante la matriz S_s para expresarla en coordenadas fijas S_f aplicamos otro filtro paso alto. Se trata de un filtro inercial que produce el retorno a cero de los desplazamientos de la plataforma.

Y por último calculamos el desplazamiento de la plataforma (x, y, z) en el sistema fijo S_f integrando dos veces el valor de la aceleración anteriormente calculado.

2.6.3.4. Simulación de la fuerza específica de baja frecuencia

La fuerza específica de baja frecuencia en los ejes X_s y Y_s la simulamos mediante la inclinación de la plataforma haciendo uso de la aceleración de la gravedad. Sin embargo no podemos simular la fuerza específica de baja frecuencia en el eje Z_s .

Estas bajas frecuencias (aceleraciones mantenidas) no se pueden simular mediante el desplazamiento de la plataforma, ya que sobrepasaríamos fácilmente los rangos de desplazamiento de la misma.

Para calcular la inclinación de la plataforma a partir de la fuerza específica de baja frecuencia se pueden emplear dos métodos que explicamos a continuación:

I) Método 1

En este método calculamos los ángulos de Euler ϕ_{IC} y θ_{IC} , correspondientes a la inclinación de la plataforma, directamente a partir del valor de la fuerza específica sin tener en cuenta la velocidad angular. Según hemos visto en el apartado 2.6.3.2 calculamos los ángulos de Euler a partir de la velocidad angular del vehículo, ϕ_{s1} ,

θ_{s1} y ψ_{s1} . Para calcular los ángulos finales de la plataforma basta con sumar las dos componentes:

$$\phi_s = \phi_{IC} + \phi_{s1}$$

$$\theta_s = \theta_{IC} + \theta_{s1}$$

$$\psi_s = \psi_{s1}$$

Para calcular los ángulos ϕ_{IC} y θ_{IC} procederemos de la siguiente manera:

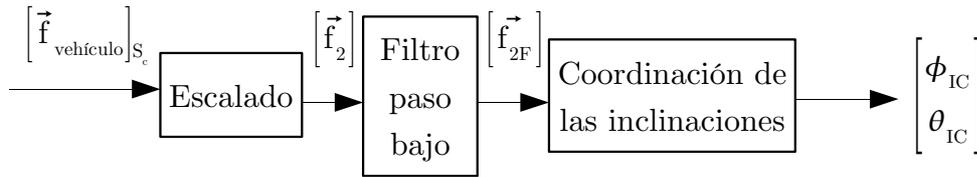


Figura 2.17. Método 1 para simular la fuerza específica de baja frecuencia

A la fuerza específica del vehículo le aplicamos primero un escalado, como en los casos anteriores, para ajustar el comportamiento de los algoritmos al tipo de plataforma. Después aplicamos un filtro paso bajo para eliminar la componente de alta frecuencia que, como hemos visto en el apartado anterior, la simularemos mediante desplazamientos de la plataforma. Y por último, a partir del valor ya tratado de la fuerza específica calculamos la inclinación de la plataforma y θ_{IC} .

En ausencia de movimiento de rotación, la percepción de la fuerza específica en la plataforma es la siguiente:

$$\begin{aligned} \left[\vec{f}_{\text{plataforma}} \right]_{S_s} &= - \left[\vec{g} \right]_{S_s} = - S_s^{-1} \cdot \left[\vec{g} \right]_{S_r} = g \cdot \begin{bmatrix} \text{sen}(\phi_s) \cdot \text{sen}(\psi_s) - \text{cos}(\phi_s) \cdot \text{sen}(\theta_s) \cdot \text{cos}(\psi_s) \\ \text{sen}(\phi_s) \cdot \text{cos}(\psi_s) + \text{cos}(\phi_s) \cdot \text{sen}(\theta_s) \cdot \text{sen}(\psi_s) \\ \text{cos}(\phi_s) \cdot \text{cos}(\theta_s) \cdot \text{cos}(\psi_s) \end{bmatrix} \Rightarrow \\ \Rightarrow \left| \left[\vec{f}_{\text{plataforma}} \right]_{S_s} \right| &= g \end{aligned}$$

Los ángulos de la plataforma en este caso son:

$$\phi_{s1} = 0 \Rightarrow \phi_s = \phi_{IC}$$

$$\theta_{s1} = 0 \Rightarrow \theta_s = \theta_{IC}$$

$$\psi_{s1} = 0 \Rightarrow \psi_s = 0$$

Sustituyendo estos valores en la expresión anterior de la percepción de la fuerza específica en la plataforma obtenemos lo siguiente:

$$\left[\vec{f}_{\text{plataforma}} \right]_{S_s} = g \cdot \begin{bmatrix} -\cos(\phi_{IC}) \cdot \text{sen}(\theta_{IC}) \\ \text{sen}(\phi_{IC}) \\ \cos(\phi_{IC}) \cdot \cos(\theta_{IC}) \end{bmatrix}$$

Dado que solo podemos simular mediante la inclinación de la plataforma una fuerza específica de módulo g , debemos de reescalar la fuerza específica $\left| \vec{f}_{2F} \right|$.

$$\left[\vec{f}_{\text{plataforma}} \right]_{S_s} = g \cdot \frac{\left[\vec{f}_{2F} \right]_{S_s}}{\left[\left| \vec{f}_{2F} \right| \right]_{S_s}}$$

Igualando esta expresión con la fórmula anterior podemos despejar el valor de los ángulos que debe de tomar la plataforma para simular la fuerza específica deseada.

$$\left[\vec{f}_{\text{plataforma}} \right]_{S_s} = g \cdot \frac{\left[\vec{f}_{2F} \right]_{S_s}}{\left[\left| \vec{f}_{2F} \right| \right]_{S_s}} = \frac{g}{\left[\left| \vec{f}_{2F} \right| \right]_{S_s}} \cdot \begin{bmatrix} f_{x_{2f}} \\ f_{y_{2f}} \\ f_{z_{2f}} \end{bmatrix} = g \cdot \begin{bmatrix} -\cos(\phi_{IC}) \cdot \text{sen}(\theta_{IC}) \\ \text{sen}(\phi_{IC}) \\ \cos(\phi_{IC}) \cdot \cos(\theta_{IC}) \end{bmatrix} \Rightarrow$$

Dividiendo la primera y la tercera componente podemos despejar el valor del ángulo θ_{IC} :

$$\frac{f_{x_{2f}}}{f_{z_{2f}}} = -\tan(\theta_{IC}) \Rightarrow \theta_{IC} = -\arctan\left(\frac{f_{x_{2f}}}{f_{z_{2f}}}\right)$$

De igual manera, dividiendo la segunda y la tercera componente, y sustituyendo el valor de θ_{IC} anteriormente calculado obtenemos el valor del ángulo ϕ_{IC} :

$$\frac{f_{y_{2f}}}{f_{z_{2f}}} = \frac{\tan(\phi_{IC})}{\cos(\theta_{IC})} \Rightarrow \phi_{IC} = \arctan\left(\cos(\theta_{IC}) \cdot \frac{f_{y_{2f}}}{f_{z_{2f}}}\right)$$

En el caso de bajas aceleraciones podemos aplicar la simplificación de pequeños ángulos $\text{sen}(x) \simeq x$ y $\cos(x) \simeq 1$. También en este caso podemos aproximar el valor de la fuerza específica vertical a la gravedad, $f_{z_{2f}} \simeq g$. Aplicando estas aproximaciones obtenemos lo siguiente:

$$\phi_{IC} \simeq \frac{f_{y_{2f}}}{g}$$

$$\theta_{IC} \simeq -\frac{fx_{2f}}{g}$$

Esta es la formulación más simple para el cálculo de la inclinación de la plataforma.

II) Método 2

Otra manera de simular la fuerza específica de baja frecuencia a través de la inclinación de la plataforma, es calcular una velocidad angular $\vec{\omega}_{IC}$ de baja frecuencia que tienda a alinear el vector de la fuerza específica \vec{f}_E y el vector de la gravedad $-\vec{g}$, mediante el uso del producto vectorial. Esquemáticamente el método es el siguiente:

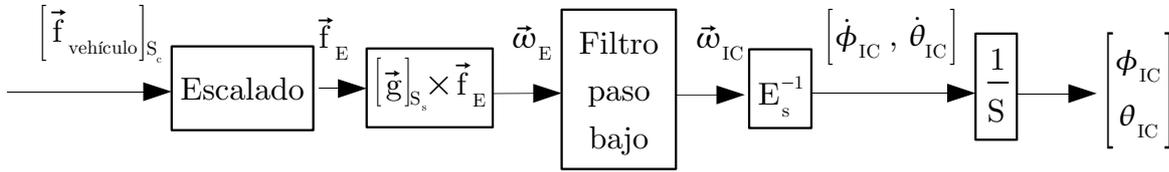


Figura 2.18. Método 2 para simular la fuerza específica de baja frecuencia

Viendo más en detalle el cálculo de la velocidad angular $\vec{\omega}_E$, podemos observar como el producto vectorial entre el vector de la fuerza específica y el vector de la gravedad nos da como resultado otro vector que es perpendicular a ambos:

$$\vec{r} = \vec{g} \times \vec{f}_E \Rightarrow \begin{cases} \vec{r} \perp \vec{g} \\ \vec{r} \perp \vec{f}_E \end{cases}$$

El módulo del vector \vec{r} tiende a cero a medida que los vectores \vec{f}_E y \vec{g} se van alineando. Por lo que la posición deseada nunca se alcanzará. La velocidad angular $\vec{\omega}_E$ es proporcional al valor de \vec{r} y tenderá por tanto a alinear ambos vectores.

Podemos calcular el valor de este vector de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} [\vec{r}]_{S_s} &= [\vec{g}]_{S_s} \times [\vec{f}_E]_{S_s} = g \cdot \begin{bmatrix} \sin(\phi_s) \cdot \sin(\psi_s) - \cos(\phi_s) \cdot \sin(\theta_s) \cdot \cos(\psi_s) \\ \sin(\phi_s) \cdot \cos(\psi_s) + \cos(\phi_s) \cdot \sin(\theta_s) \cdot \sin(\psi_s) \\ \cos(\phi_s) \cdot \cos(\psi_s) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} fx_E \\ fy_E \\ fz_E \end{bmatrix} \Rightarrow \\ [\vec{r}]_{S_s} &= g \cdot \begin{bmatrix} fz_E \cdot (c\phi_s \cdot s\theta_s \cdot s\psi_s + s\phi_s \cdot c\psi_s) - fy_E \cdot (c\phi_s \cdot c\theta_s) \\ fx_E \cdot (c\phi_s \cdot c\theta_s) - fz_E \cdot (s\phi_s \cdot s\psi_s - c\phi_s \cdot s\theta_s \cdot c\psi_s) \\ fy_E \cdot (s\phi_s \cdot s\psi_s - c\phi_s \cdot s\theta_s \cdot c\psi_s) - fx_E \cdot (c\phi_s \cdot s\theta_s \cdot s\psi_s + s\phi_s \cdot c\psi_s) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Una vez calculado el vector $\vec{\omega}_E$ aplicamos un filtro paso bajo para eliminar las altas frecuencias que las simularemos mediante el desplazamiento de la plataforma. Después transformamos el resultado con la matriz E_s^{-1} , que como hemos visto anteriormente transforma la velocidad angular en las coordenadas S_s en las derivadas de los ángulos de Euler de inclinación de la plataforma $\dot{\phi}_{IC}$ y $\dot{\theta}_{IC}$. Y finalmente para obtener la inclinación de la plataforma integramos estos valores.

2.6.4. Simulación con MatLab/Simulink

Para poder llevar a cabo un análisis objetivo de cada una de las plataformas se ha recurrido a la simulación mediante el programa *MatLab/Simulink*. Se ha programado el sistema completo de control para las diversas arquitecturas de plataformas móviles y, mediante los modelos matemáticos de percepción, se ha analizado la eficiencia en la simulación de la sensación del movimiento de la persona sentada en la plataforma.

Una vez analizada la validez de este modelo realizado con *Matlab/Simulink* se ha portado a C++ para usarlo con una plataforma real para poder comprobar mediante métodos experimentales, y no solo teóricos, la eficacia de este esquema de control. En este caso el análisis de la plataforma se realiza de una manera más subjetiva ya que depende de la persona sentada en la plataforma.

En la figura 2.19 está representado el diagrama de bloques de *simulink* con el que se simulan las plataformas, incluyendo los bloques referentes a la percepción del movimiento usados para la comparación de las prestaciones de las diferentes arquitecturas de plataformas.

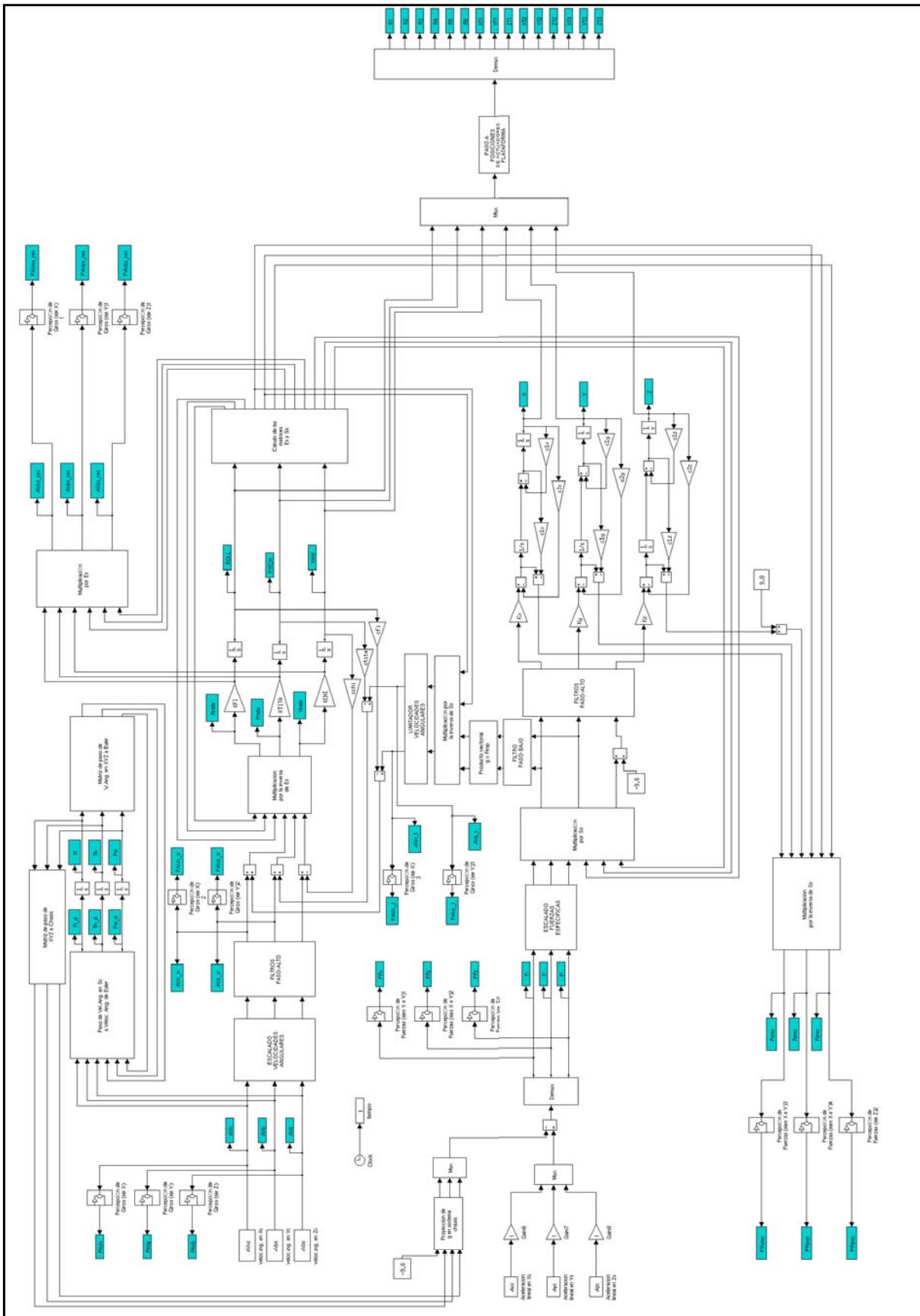


Figura 2.19. Diagrama de bloques usado en Simulink

2.6.4.1. Datos de entrada

I) Velocidad angular del vehículo

Las tres componentes de la velocidad angular del vehículo usada en *Simulink* se han denominado $Avxc$, $Avyc$ y $Avzc$. Antes de introducir estas tres variables en el cálculo general se escalan y se procesan usando un filtro paso alto.

El primer bloque de escalado es necesario para ajustar el comportamiento de la plataforma a una aplicación en concreto. Es decir, escalando la velocidad angular de entrada podemos acentuar o suavizar la sensación de movimiento.

El filtrado paso alto se usa ya que, como hemos visto anteriormente en este capítulo, el sistema vestibular no es capaz de percibir velocidad angular por debajo de un umbral de unos 0.2 rad/s. Mediante es filtro eliminamos las frecuencias que están por debajo de este valor.

El bloque usado para esto es el siguiente:

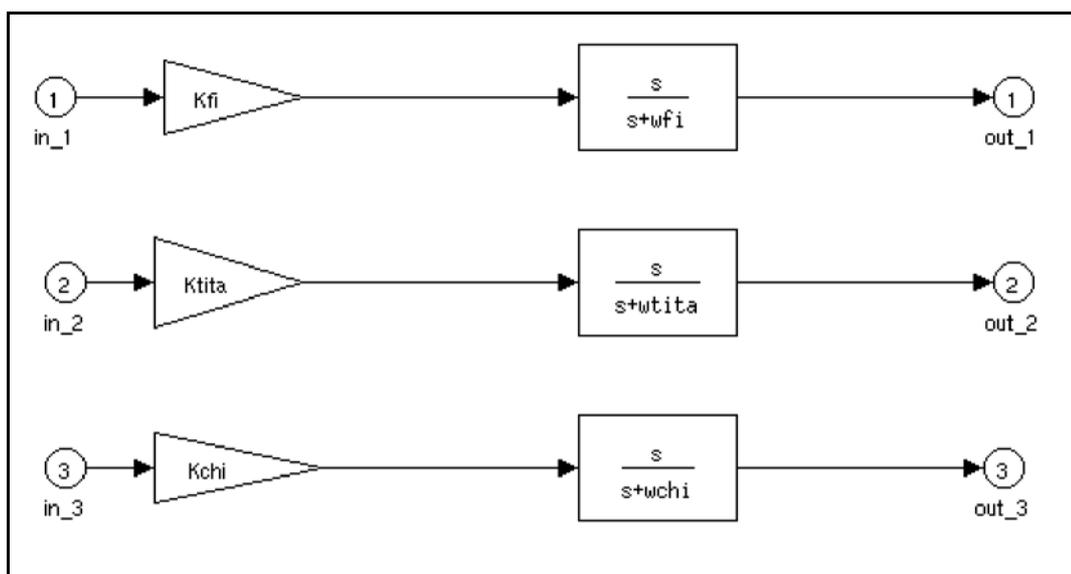


Figura 2.20. Escalado y filtro paso alto de la velocidad angular

Los parámetros wfi , $wtita$ y $wchi$ tienen un valor de 0.2 que coincide con el umbral de percepción anteriormente nombrado. Los parámetros Kfi , $Ktita$ y $Kchi$ dependen de la plataforma y de la aplicación.

II) Fuerza específica en el vehículo

Para la simulación de la fuerza específica en el vehículo podemos usar dos tipos de entradas: la aceleración lineal o directamente la fuerza específica.

En simuladores de conducción es más corriente usar la aceleración lineal ya que es un dato al que se puede acceder directamente. En este caso debemos de calcular la fuerza específica añadiendo el vector de la aceleración de la gravedad proyectado en los ejes del vehículo S_c .

Sin embargo al usar una plataforma de movimiento con un vehículo teleoperado el dato disponible es directamente la fuerza específica ya que la información proviene de los sensores.

En el bloque de *Simulink* usamos como entrada al sistema la aceleración lineal ya que es más general. En el caso de usar directamente como entrada el valor de la fuerza específica simplemente hay que cambiar el punto de entrada, pero el resto del sistema seguiría funcionando de la misma manera.

Los componentes de la aceleración lineal de entrada se han denominado A_{xc} , A_{yc} y A_{zc} y los de la fuerza específica F_x , F_y y F_z . Ambos están expresados en coordenadas del vehículo S_c .

De igual manera que en el caso de la velocidad angular, la fuerza específica se escala para poder ajustar el comportamiento de la plataforma. El bloque empleado para ello es el siguiente:

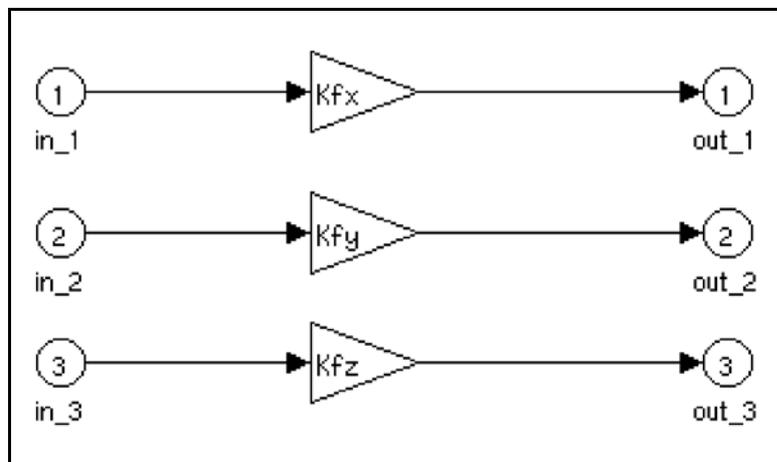


Figura 2.21. Bloque de escalado de la fuerza específica

2.6.4.2. Simulación de la fuerza específica

Antes de separar los componentes de baja frecuencia de los de alta frecuencia debemos de transformar la fuerza específica en coordenadas de la plataforma S_f . Para ello usamos la matriz S_s que calcularemos a partir de los ángulos de la plataforma.

Como hemos visto anteriormente la fuerza específica de baja frecuencia la simulamos mediante inclinación de la plataforma. Para separar este componente usamos un filtro paso bajo de segundo orden. Este filtro tiene tres parámetros K_{icx} , w_{icx} y g_{icx} (para el eje Y se usan parámetros análogos). Mediante el primer parámetro podemos cambiar la amplitud del filtro para modificar la influencia de la fuerza específica en el cálculo de la inclinación de la plataforma. Los otros dos parámetros modifican la frecuencia de corte del filtro.

Hay que recordar que la fuerza específica de baja frecuencia en el eje Z no la podemos simular.

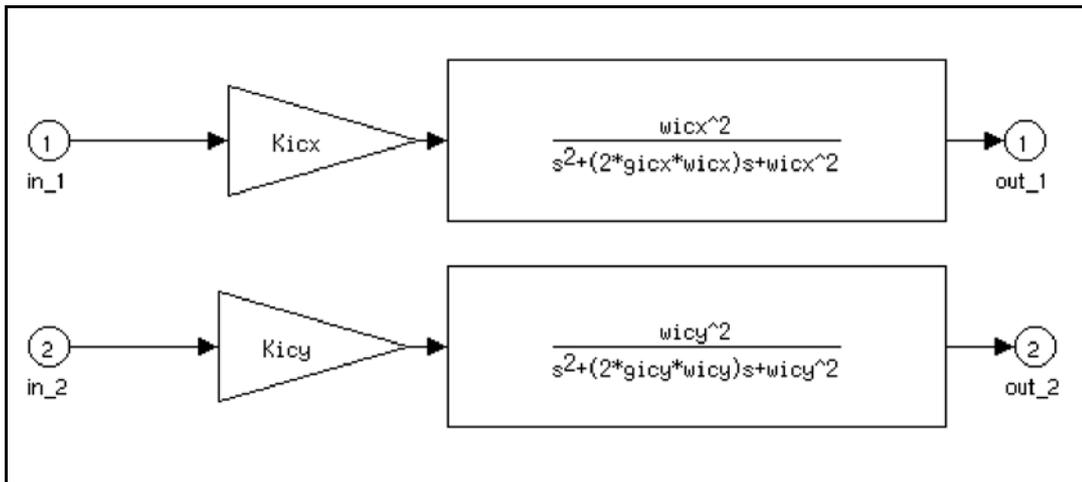


Figura 2.22. Filtro paso bajo para simular la fuerza específica de baja frecuencia

Para calcular la velocidad angular, que debemos de usar para simular esta fuerza específica de baja frecuencia, hacemos el producto vectorial por el vector de la gravedad expresado en las mismas coordenadas S_f .

$$\begin{bmatrix} \vec{g} \end{bmatrix}_{S_f} \times \begin{bmatrix} \vec{f}_{esp} \end{bmatrix}_{S_f} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix}_{S_f} \times \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ 0 \end{bmatrix}_{S_f} = \begin{bmatrix} F_y \cdot g \\ -F_x \cdot g \\ 0 \end{bmatrix}_{S_f}$$

Los componentes de alta frecuencia de la fuerza específica los simularemos mediante desplazamientos de la plataforma. Para obtener estos componentes usamos un filtro paso alto de primer orden para los ejes X e Y y un filtro de tercer orden para el eje Z.

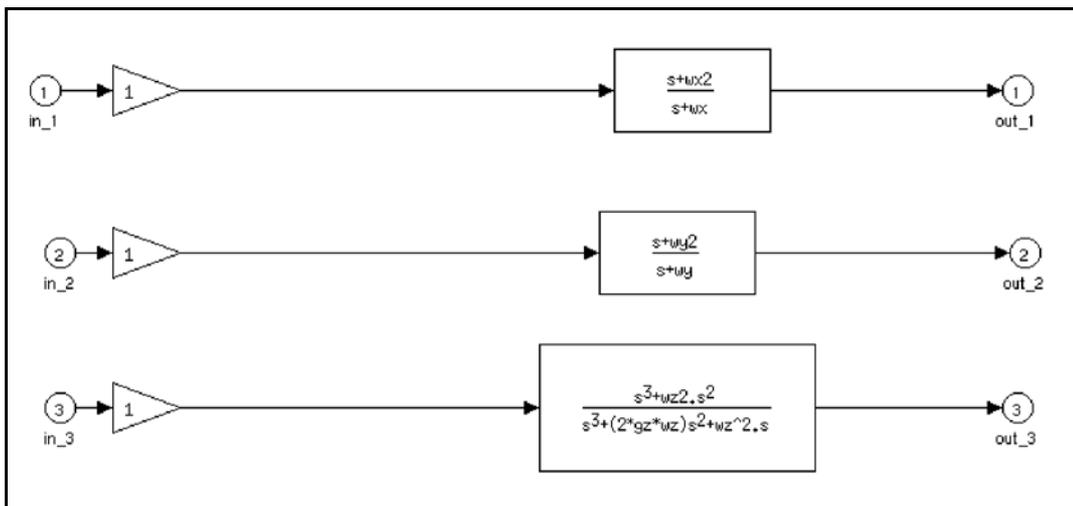


Figura 2.23. Filtro paso alto para simular la fuerza específica de alta frecuencia

Los parámetros w_x y w_x2 (e igualmente para el eje Y) influyen en la frecuencia de corte, al igual que los parámetros w_z , w_z2 y g_z para el eje Z.

2.6.4.3. Cálculo de la rotación de la plataforma

En el cálculo de la rotación de la plataforma intervienen dos factores. Primero la velocidad angular que queremos simular y segundo la inclinación de la plataforma para simular la fuerza específica de baja frecuencia.

Como hemos visto antes, en la simulación de la fuerza específica, obtenemos como resultado la velocidad angular que tenemos que dar a la plataforma. De esta manera es mucho más sencillo combinar ambos efectos ya que solo debemos sumar los dos componentes.

Una vez sumados ambos componentes debemos de realizar una transformación mediante la matriz E_s como hemos visto en el apartado 2.6.2.3.

En este bloque usamos tres constantes KFI , $KTITA$ y $KCHI$ que pueden valer 1 o 0 según queramos simular o no usando la rotación de la plataforma.

Después realizamos una integración para calcular los tres ángulos de la plataforma $ROLL$, $PITCH$ y YAW (se mantiene la denominación en inglés del balanceo, cabeceo y guiado) a partir de la velocidad angular.

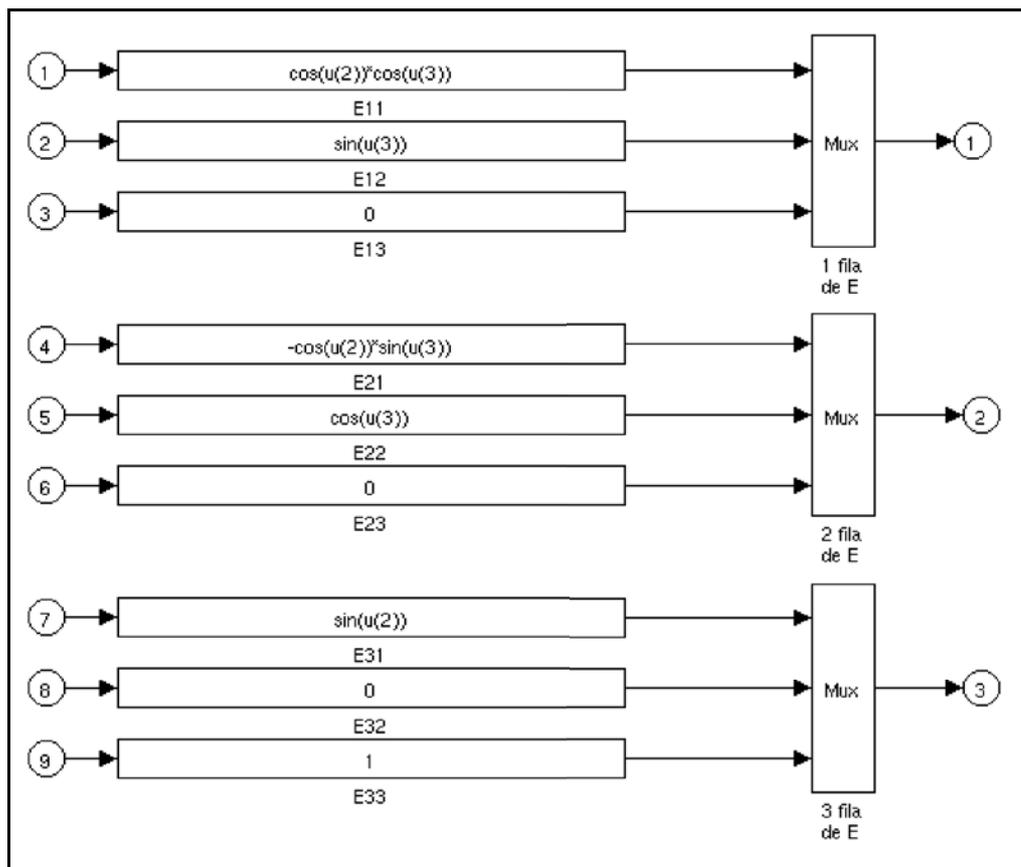


Figura 2.24. Bloque de cálculo de la matriz E_s

Usamos también una realimentación negativa para añadir el efecto de retorno. Para ello usamos los parámetros cfi , $ctita$ y $cchi$. Por ejemplo para plataformas con poco rango de giro usaremos valores altos de estos parámetros para no llegar a los límites de movimiento. El efecto de estos parámetros sobre la simulación de la fuerza

específica de baja frecuencia es totalmente inapreciable.

Una vez que hemos calculado los tres ángulos de la plataforma calculamos las matrices E_s y S_s .

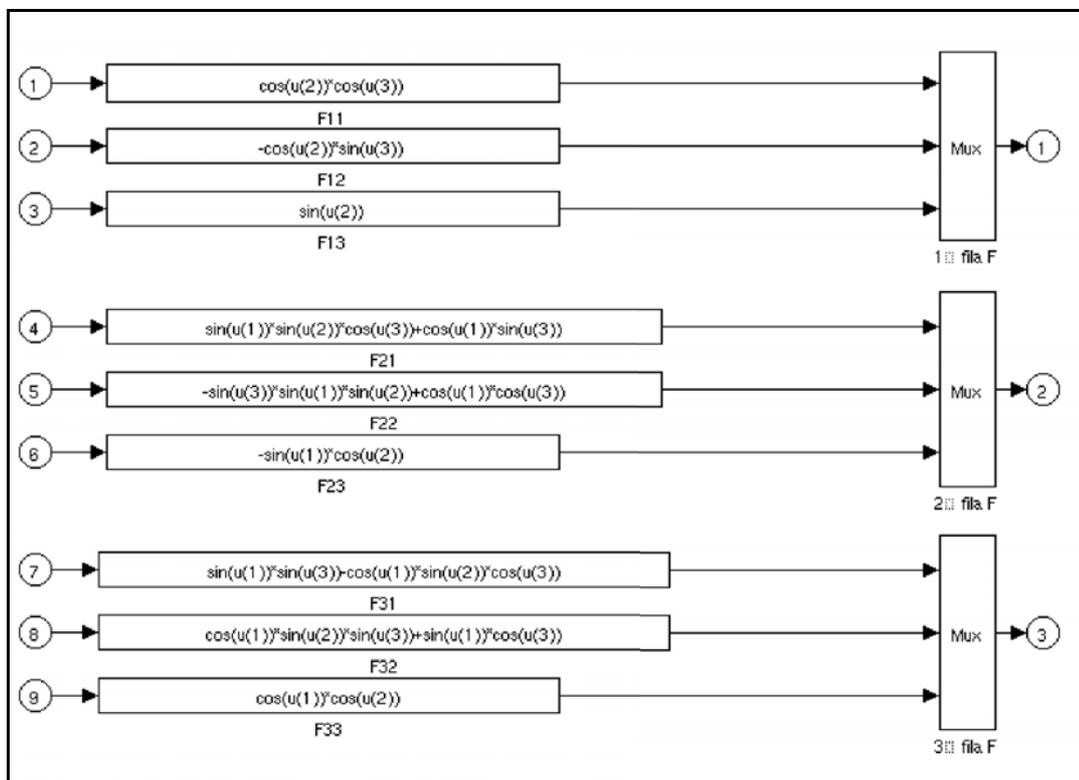


Figura 2.25. Bloque de cálculo de la matriz S_s

2.6.4.4. Cálculo de los desplazamientos de la plataforma

El desplazamiento de la plataforma X , Y y Z lo calculamos a partir de la fuerza específica de alta frecuencia. Para limitar los valores usamos primero un factor de escala y una realimentación negativa tanto en velocidad como en posición. Para este factor de escala usamos los parámetros K_x , K_y y K_z y para la realimentación usamos los parámetros $c1x$, $c1y$ y $c1z$ para el primer orden y $c2x$, $c2y$ y $c2z$ para el segundo orden.

Para plataformas con poco rango de desplazamiento deberemos de usar valores altos de realimentación. Y para las plataformas que no tengan ese grado de libertad hacemos el factor de escala igual a cero.

2.6.4.5. Cálculo de la percepción de movimiento

Para poder comparar la sensación de movimiento en la plataforma móvil y en el vehículo real usamos los modelos matemáticos de percepción humanos explicados en el apartado 2.5.2 de este capítulo.

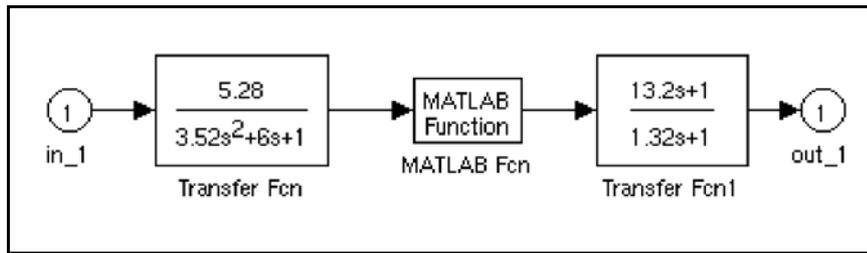


Figura 2.26. Bloque de Simulink de percepción de la fuerza específica

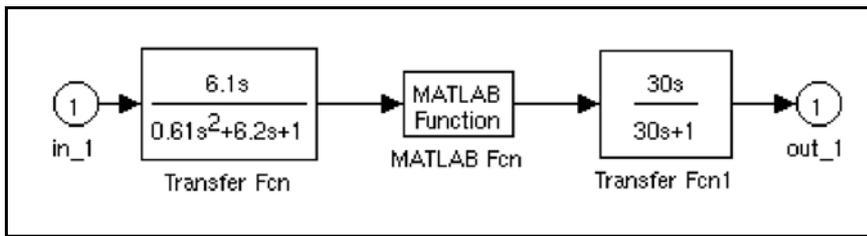


Figura 2.27. Bloque de Simulink de percepción de la velocidad angular en el eje X

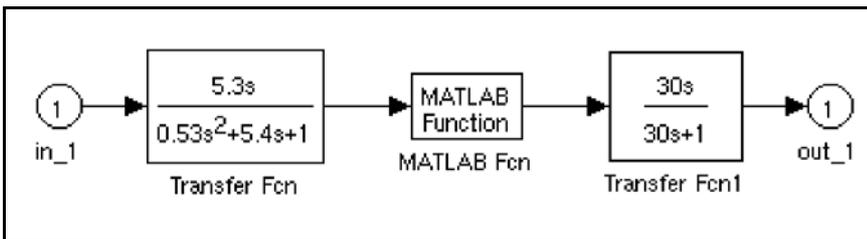


Figura 2.28. Bloque de Simulink de percepción de la velocidad angular en el eje Y

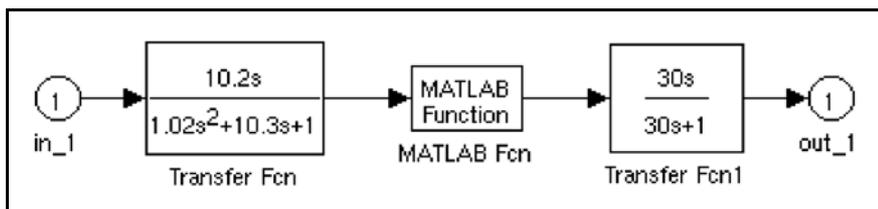


Figura 2.29. Bloque de Simulink de percepción de la velocidad angular en el eje Z

Para conocer cual es la percepción de la fuerza específica real, aplicamos el filtro de la figura 2.26 a las variables F_x , F_y y F_z y obteniendo PF_x , PF_y y PF_z . Para calcular la fuerza específica a la que está sometido el operador de la plataforma usamos los ángulos y la aceleración lineal de la plataforma. Primero convertimos la aceleración lineal en fuerza específica añadiendo la aceleración de la gravedad y después transformamos este vector usando la inversa de la matriz S_s . Con esto obtenemos los tres componentes F_{xrec} , F_{yrec} y F_{zrec} de la fuerza específica sobre la plataforma. De igual manera que en el caso de la fuerza específica de entrada, estas variables las convertimos a percepción mediante el filtro de la figura 2.26 obteniendo PF_{xrec} , PF_{yrec} y PF_{zrec} .

En el caso de la percepción de la velocidad angular hacemos el mismo proceso con

las variables de entrada AV_x , AV_y y AV_z y, usando los filtros de las figuras 2.27, 2.28, y 2.29, calculamos la percepción de la velocidad angular real en los tres ejes PAV_x , PAV_y y PAV_z . La velocidad angular de la plataforma la transformamos mediante la matriz E_s para obtener los componentes en el sistema de coordenadas del operador AV_{xs_rec} , AV_{ys_rec} y AV_{zs_rec} . De igual manera, estos valores los filtramos según las figuras 2.27, 2.28 y 2.29 para obtener la percepción de la velocidad angular sobre la plataforma PAV_{xs_rec} , PAV_{ys_rec} y PAV_{zs_rec} .

2.6.4.6. Interfaz gráfico de usuario

Para poder introducir los parámetros de las plataformas y datos de entrada y poder visualizar fácilmente los resultados se ha realizado un interfaz gráfico de usuario sencillo.

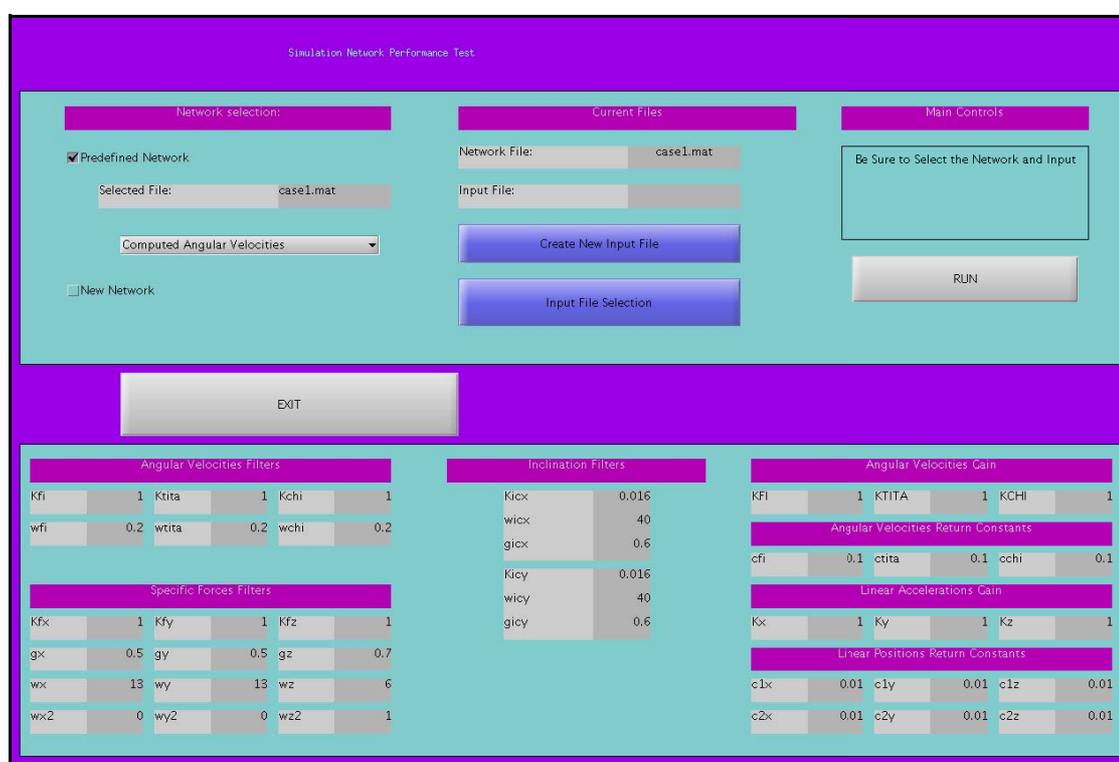


Figura 2.30. Pantalla principal del interfaz gráfico de usuario

En la parte inferior de la pantalla (ver figura 2.30) se pueden introducir todos los parámetros de la red de simulación. Para hacer más cómodo el proceso es posible cargar y guardar todos estos parámetros. En la parte superior izquierda podemos seleccionar en el menú desplegable la opción *SAVED NETWORK* para cargar todos los parámetros de la red de un archivo.

Para la introducción de los datos de simulación igualmente podemos usar dos métodos. Primero podemos cargar un archivo con todos los datos de simulación mediante la opción *Input File Selection* Y segundo podemos generar un nuevo archivo de datos de simulación a partir de los ficheros generados por la aplicación *Carsim* seleccionando la opción *Create New Input File*

Crear fichero de entrada a partir de los ficheros del Carsim

Seleccionar archivo de Vel. Ang. Xc : AVxc

2D: Cargar Az Aceptar

Seleccionar archivo de Vel. Ang. Yc : AVyc

Seleccionar archivo de Vel. Ang. Zc : AVzc

2D: Cargar Az Aceptar

Seleccionar archivo de Acc. Xc : Ax

2D: Cargar Az Aceptar

Seleccionar archivo de Acc. Yc : Ay

2D: Cargar Az Aceptar

Seleccionar archivo de Acc. Zc : Az

GUARDAR FICHERO DE ENTRADAS

VOLVER

Figura 2.31. Pantalla de selección de los archivos de datos

Como podemos ver en la figura anterior debemos seleccionar cada archivo de datos de *Carsim* por separado y podemos guardar el fichero de datos para poder cargarlo después más fácilmente usando la opción **GUARDAR FICHERO DE ENTRADAS**

Una vez introducidos los parámetros de la plataforma y los datos de entrada simplemente pulsamos el botón **UN** y se realiza la simulación de la plataforma. Una vez que se termina la simulación aparecen los botones de visualización de resultados pulsando **esults**. En esta pantalla (ver figura 2.31) podemos seleccionar diferentes tipos de gráficas:

- ▶ **Input and Output data** En estas gráficas podemos ver cual es la velocidad angular y la fuerza específica en cada uno de los ejes en el vehículo real y en la plataforma.
- ▶ **Actuators Signal** Aquí podemos visualizar los seis grados de libertad de la plataforma. Estos valores son los que se tienen que enviar a la plataforma para la simulación del movimiento.
- ▶ **Vehicle and Simulator Euler Angles** En esta pantalla se muestran los tres ángulos de Euler y su derivada tanto del vehículo real como de la plataforma.
- ▶ **Angular Velocities Components** Estas gráficas muestran los dos componentes de la inclinación de la plataforma. El primer componente generado a partir de la

velocidad angular y el segundo a partir de la fuerza específica de baja frecuencia.

- ▶ *Input and Output Human Perception* Estas son las gráficas más interesantes ya que son las que permiten comparar de una forma objetiva la eficiencia de la simulación. Aquí podemos comparar la percepción en el vehículo real y en la plataforma.
- ▶ *Angular Velocity Human Perception* Con estas gráficas podemos ver como influye la simulación de la fuerza específica de baja frecuencia en la percepción de la velocidad angular.

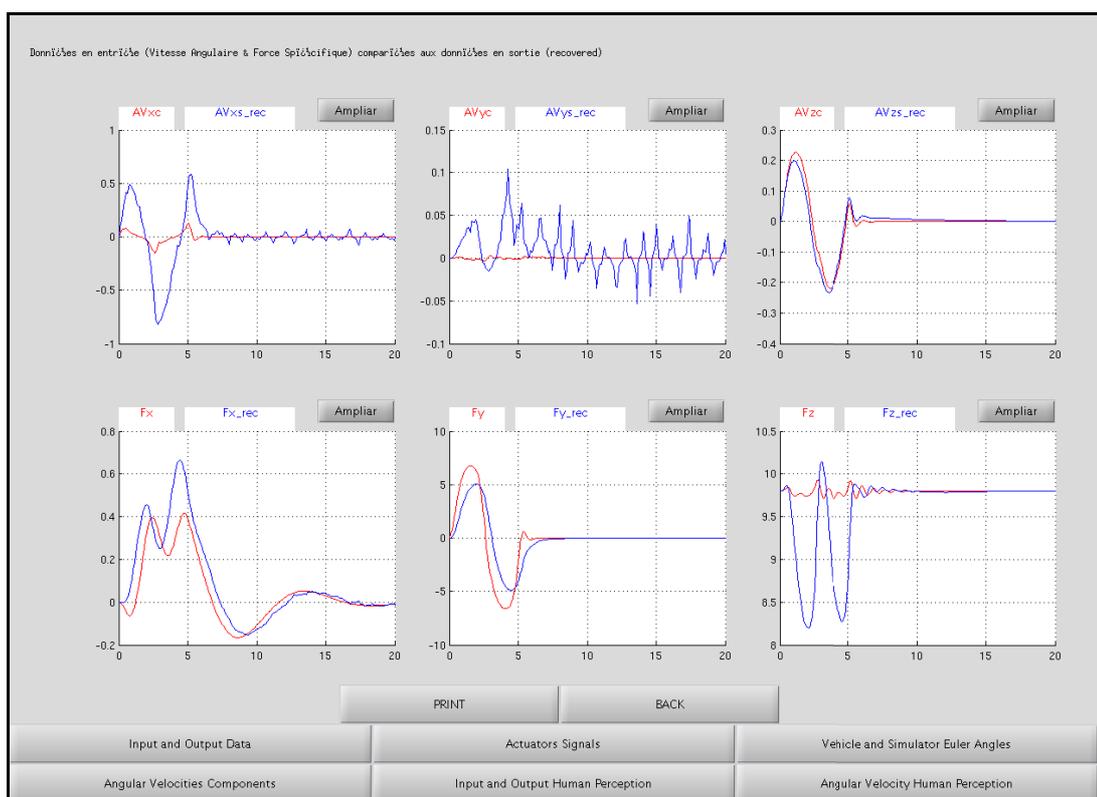


Figura 2.32. Pantalla de resultados

También podemos visualizar una animación en tres dimensiones de cada una de las plataformas. Para ello pulsamos el botón correspondiente de la pantalla principal: *Spherical Platform Animation* *Stewart Platform Animation* y *Overrail Platform Animation*

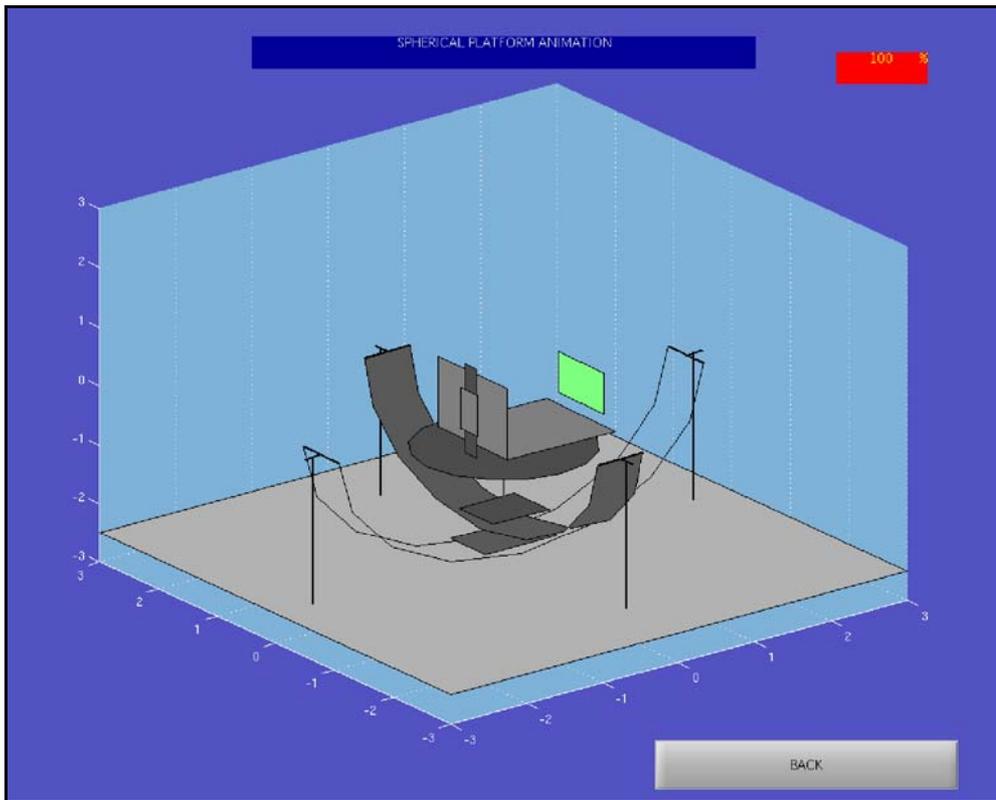


Figura 2.33. Representación gráfica de la simulación de la plataforma esférica

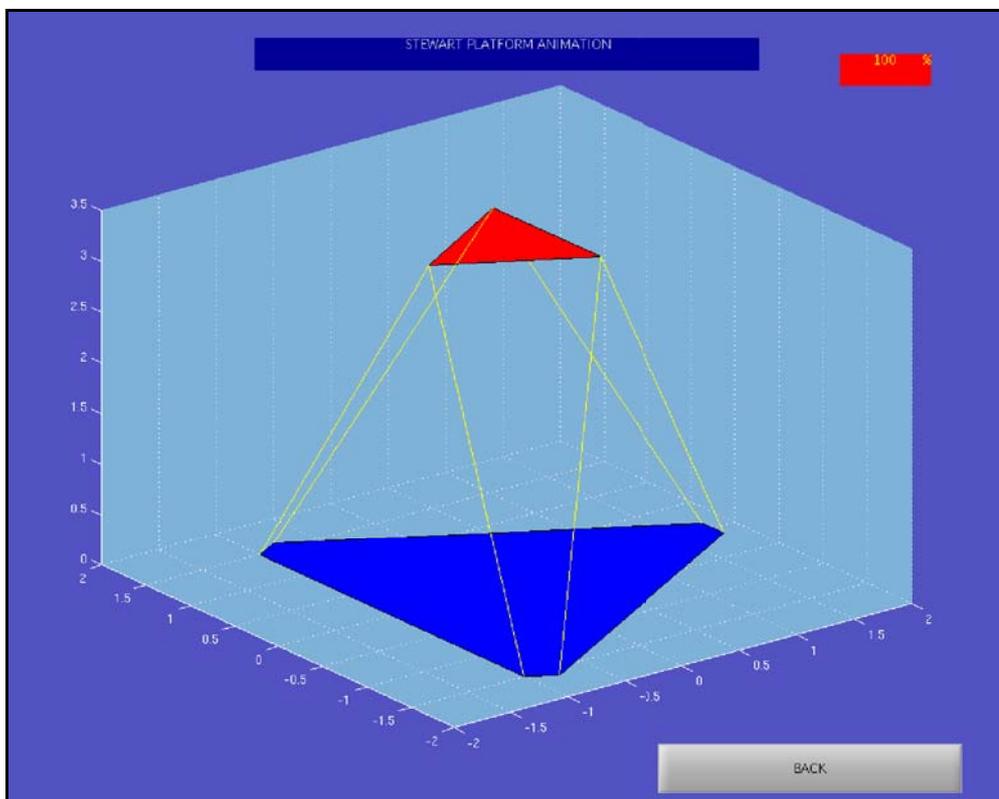


Figura 2.34. Representación gráfica de la simulación de la plataforma Stewart

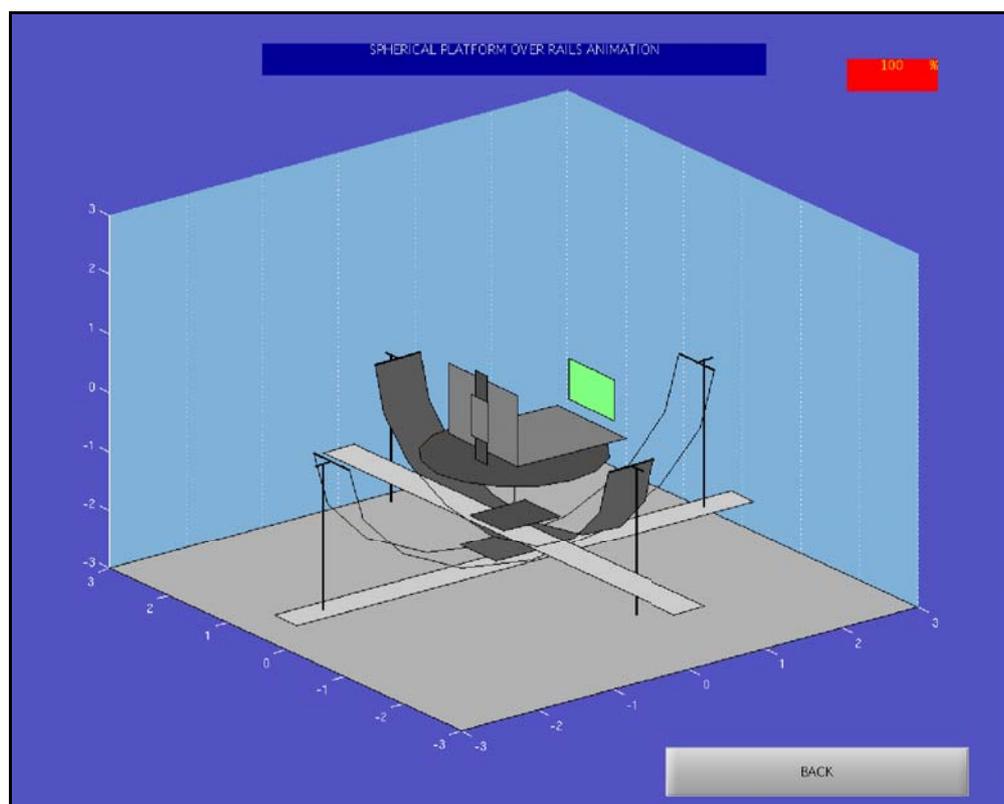


Figura 2.35. Representación gráfica de la simulación de la plataforma sobre raíles

2.6.5. Plataforma hexápoda \boxtimes Stewart \boxtimes

2.6.5.1. Introducción

La plataforma hexápoda es una de las plataformas móviles más usadas y su desarrollo está ligado al de los simuladores de vuelo. En la actualidad se usa, no solo en simuladores de vuelo y conducción, sino también en otras aplicaciones de posicionamiento en las que se necesitan 6 grados de libertad [17, 44].

En los siguientes apartados se presenta una breve historia de esta plataforma, sus características técnicas generales, las características particulares del modelo del que dispone la Universidad de Zaragoza y un análisis con el programa de *Matlab* anteriormente descrito.

2.6.5.2. Historia de la plataforma hexápoda

La investigación y desarrollo de la plataforma hexápoda está ligada al de los robots de paralelogramos hasta tal punto que es difícil conocer cuál es el origen exacto de ambos [15, 20]. Los trabajos teóricos relacionados con los mecanismos de paralelogramos, y particularmente las plataformas hexápodas, datan de varios siglos

atrás cuando los geómetras ingleses y franceses estaban obsesionados con el poliedro. El profesor Mandref Husty fue el primero en encontrar un método analítico para calcular las 40 soluciones del problema de la cinemática directa de la plataforma hexápoda. Y el curioso Doctor Jean-Pierre Merlet fue el autor del primer libro sobre robots de paralelogramos. A finales de los años 50 Gough [9] construyó la primera plataforma hexápoda. Siguiendo la cadena de publicaciones para encontrar el origen de los robots de paralelogramos se llega a una única publicación del señor Stewart [53]. De esta manera la plataforma hexápoda es conocida como plataforma “Stewart” [21, 46].

Sin embargo las primeras ideas sobre la construcción de una plataforma de movimiento para la industria del entretenimiento pertenecen a un gran visionario. James E. Gwinnett diseñó uno de los primeros dispositivos de este tipo en una patente de 1928. Este dispositivo ya estaba basado en un sistema de paralelogramos. Esto resulta bastante increíble ya que todavía faltaban unos cuantos años para la primera película con sonido y más tarde a color y ya había gente pensando en plataformas de movimiento.

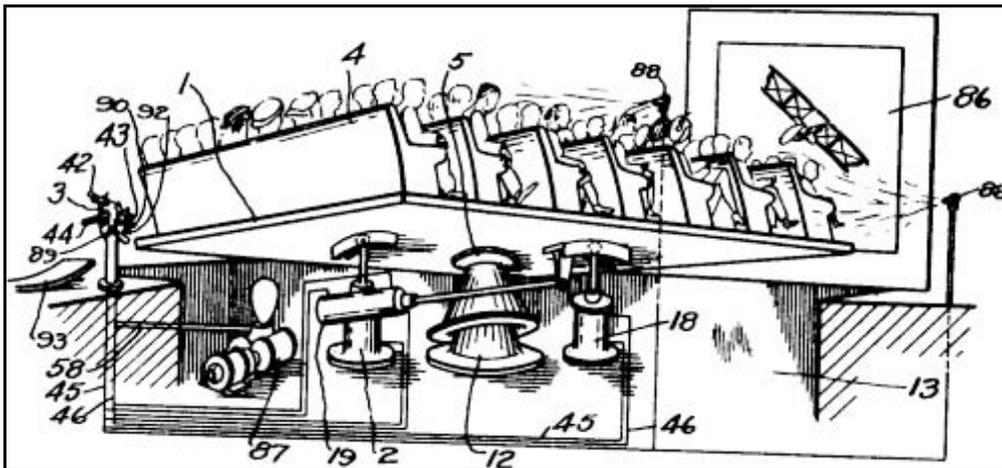


Figura 2.36. Posiblemente el primer mecanismo de paralelogramos, patentado en 1931 (Patente EE.UU. Nº 1.789.680)

No se conoce en realidad si este fue el primer diseño de una plataforma de varios grados de libertad, ni si se llegó a construir algún prototipo. Pero lo que queda claro es que Jame Gwinnett estaba muy adelantado a su tiempo y la industria no estaba preparada para la complejidad de su invento.

Una década después y solo 17 años después de que el término “robot” fuera acuñado, Williard L.V. Pollard diseñó un nuevo robot para automatizar la pintura con spray. Este robot fue considerado el primer robot industrial. Este invento tiene 5 grados de libertad con tres brazos. En este robot, tres brazos cercanos pivotan mediante motores fijos a la base y tres brazos lejanos está conectados a los tres primeros mediante una unión universal. Dos de los tres brazos alejados están conectados al tercero mediante uniones de bola, mientras que lel cabezal está conectado al tercer brazo lejano mediante una junta universal. De esta manera, los

tres motores determinan la posición del cabezal, mientras que su orientación está controlada mediante otros dos motores sujetos a la base que transmiten el movimiento mediante cables. Este robot, sin embargo, nunca fue construido.

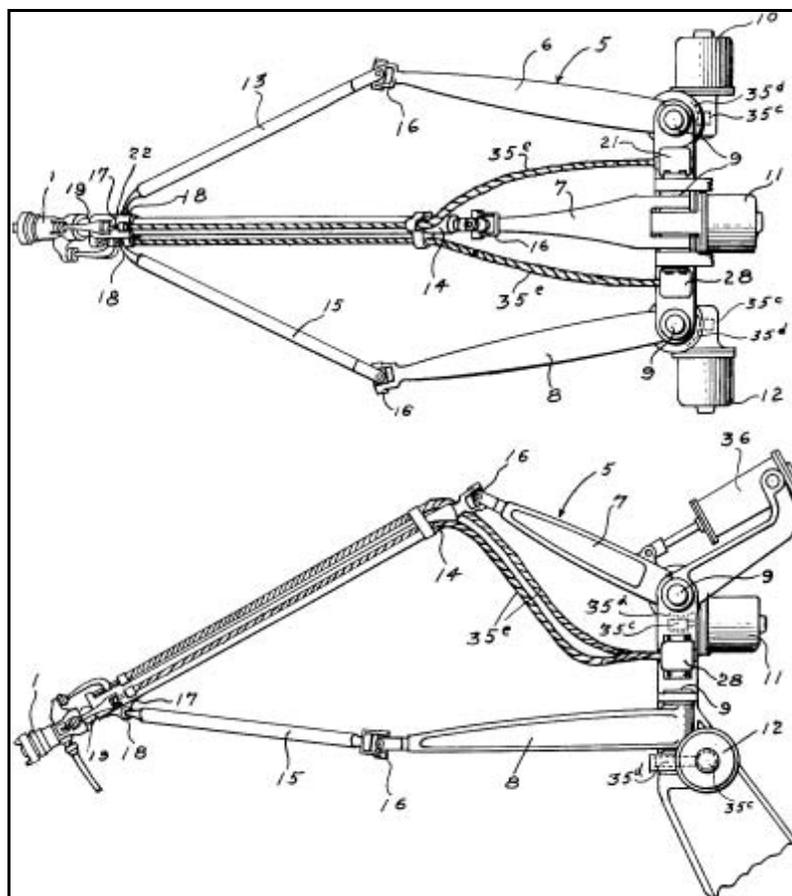


Figura 2.37. El primer diseño de un robot industrial de paralelogramos, patentado en 1942 (Patente EE.UU. Nº 2.286.571)

El primer robot industrial sin embargo fue construido por el hijo de Williard L.V. Pollard, Williard L.G. Pollard Jr. El 29 de octubre de 1934 presentó la patente de un nuevo robot industrial de pintura a spray. Esta patente tenía dos partes: la primera el sistema eléctrico de control y la segunda el manipulador mecánico. El sistema de control consistía en cintas perforadas, en las que la densidad del agujero era directamente proporcional a la velocidad de cada motor. El manipulador mecánico era un robot de paralelogramos basado en el pantógrafo accionado por dos motores sujetos a la base. La compañía DeVilbiss consiguió la licencia de la patente en 1937 y en 1941 completó el primer prototipo bajo la dirección de Harold Roselund. En 1944 Roselund patentó un nuevo robot de pintura, que en este caso no era un robot de paralelogramos, pero usaba el sistema de control de Pollard Jr.

La última patente de Williard L.G. Pollard Jr. data de 1995 que representa un robot de paralelogramos de trípode con actuadores de tornillo sin fin.

Unos cuantos años después, en 1947, en el otro lado del atlántico, se inventó un

nuevo sistema de paralelogramos. Se trata del más famoso, el que cambió la industria y el que ha sido replicado miles de veces, la plataforma hexápoda con actuadores de longitud variables en forma de octaedro.

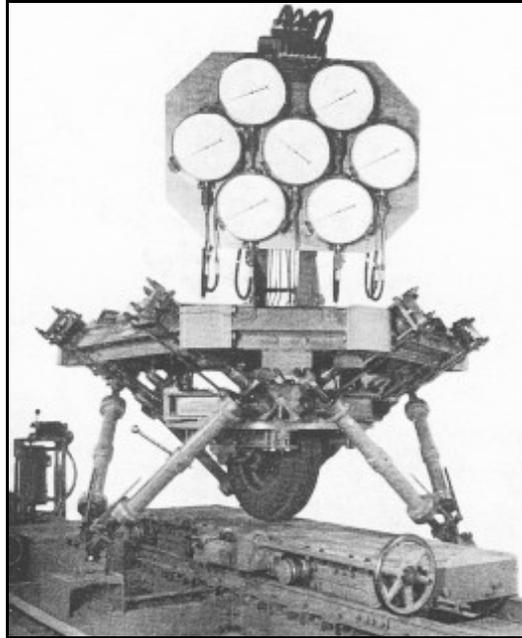


Imagen 2.15. Plataforma de Gough original de 1954



Imagen 2.16. Plataforma de Gough en la actualidad

El doctor Eric Gough, la persona que construyó la primera plataforma hexápoda en forma de octaedro, era un reconocido ingeniero de vehículos de la compañía Dunlop Robber Co. en Birmingham, Inglaterra. Nació en Smethwick, Staffordshire, Inglaterra el 16 de octubre de 1906. Entró a formar parte de esta compañía a los veinte años y obtuvo su doctorado en 1967 en la Universidad de Londres, el cual lo realizó basándose en el trabajo que realizaba en la compañía.

La máquina universal para probar neumáticos fue inventada para resolver los problemas de las cargas sobre los neumáticos en los aterrizajes. Se necesitaba una máquina universal para generar cargas combinadas. Pero esta máquina no se diseñó desde cero, ya que en esa época ya se conocían los sistemas hexápodos. De hecho ya existían desde hacía tiempo sistemas con tres actuadores verticales y tres horizontales. Estos sistemas fueron ampliamente utilizados y son conocidos con el acrónimo MAST (del inglés “Multi-Axis Simulation -o Shake- Table”). Estos sistemas todavía siguen fabricándose. De hecho colaboré en un proyecto en la realización de un modelo de cinemática inversa y directa con *matlab* de una versión reforzada de esta plataforma con 8 actuadores (dos de ellos pasivos).



Imagen 2.17. Un sistema típico MAST

La novedad de la plataforma de Gough fue la disposición de los seis actuadores. Eric Gough necesitaba grandes rangos de movimiento, por lo que seleccionó la disposición simétrica formando un octaedro. Esta máquina fue construida a principios de los años 50 y era totalmente operacional en 1954. Aunque el diseño original usaba juntas universales comunes en la base y en la base móvil, los extremos fueron finalmente sujetados por separado. En las primeras versiones los actuadores eran ajustados manualmente mediante un mecanismo de tornillo sin fin. Una segunda plataforma hexápoda móvil estaba montada debajo de la base móvil e incorporaba las células de carga. Para realizar la conversión y los ajustes debido a la posición se usaban tablas precalculadas. Una década más tarde, esta máquina fue mejorada mediante la incorporación de motores con control digital y un sistema electrónico para registrar los datos de las células de carga.

De acuerdo con el señor Mike Beeson de Dunlop Tyres, quien ocasionalmente

trabajó con su colega el doctor Gough, esta plataforma jugó un papel muy importante en el nacimiento de la ciencia de los neumáticos. Desafortunadamente el doctor Eric Gough murió en diciembre de 1973 justo cuando la plataforma hexápoda de geometría octaédrica comenzaba a hacerse popular.

La plataforma de Gough continuó operativa en la factoría de Dunlop hasta el final del milenio. Después de la fusión entre Dunlop y Goodyear en el año 1998/1999, la factoría fue cerrada. En un intento de salvar de la quema sus máquinas favoritas, Mike Beeson contactó con Sam Evans del museo de la ciencia e industria británico y acordaron transportar la máquina justo dos días antes de la demolición de la fábrica. Después de haber estado en funcionamiento casi medio siglo, la primera plataforma hexápoda de geometría octaédrica fue transportada desde Fort Dunlop el 9 de agosto de 2001 hasta el museo de la ciencia de Wroughton cerca de Swindon a unos 120 Km al oeste de Londres.

En 1965 el famoso artículo de Stewart apareció en los *proceedings* del ImechE Inglés [53]. En ese artículo Stewart describe una plataforma de movimiento de seis grados de libertad para su uso como simulador de vuelo. El sistema de paralelogramos propuesto, sin embargo, es diferente de la plataforma de geometría octaédrica, que frecuentemente es referida como plataforma Stewart. En los mismos *proceedings*, el artículo de Stewart va seguido de una discusión entre diferentes científicos e ingenieros, entre los cuales estaba el doctor Gough quien recordaba la existencia de su plataforma de ensayo de neumáticos.

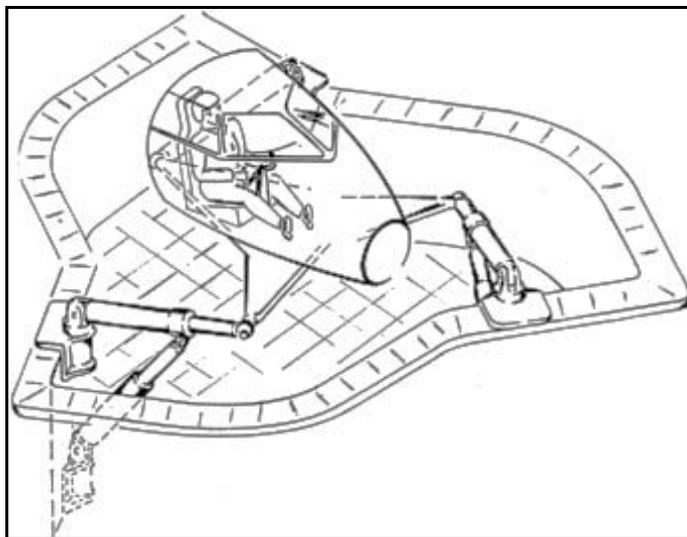


Figura 2.38. Dibujo esquemático de la auténtica plataforma Stewart (*ImechE proceedings*, 1965-1966)

No cabe la menor duda de que el excelente artículo de Stewart tuvo un gran impacto en el desarrollo posterior de la cinemática de paralelogramos. Se hicieron numerosas sugerencias para el uso de las plataformas hexápodas, muchas de las cuales eran predicciones bastante precisas sobre el futuro. Desafortunadamente nada más se sabe de Stewart, pero quizás fue él el verdadero precursor de los simuladores de vuelo.

Volviendo a América, el ingeniero estadounidense Klaus Cappel se enfrentó a serios problemas. En 1962 su compañía, los laboratorios de investigación Franklin de Philadelphia, le encargó mejorar los sistemas de vibración de seis grados de libertad basados en plataformas hexápodos. Incorporó cuatro actuadores verticales al MAST para reducir los requerimientos debido a la reacción de las masas. Sin embargo esta geometría presentaba un problema de redundancia lo que provocaba un complejo sistema de control con fuerzas antagónicas que podían producir daños en la mesa. Finalmente Cappel llegó a la misma geometría que la propuesta por el doctor Gough.

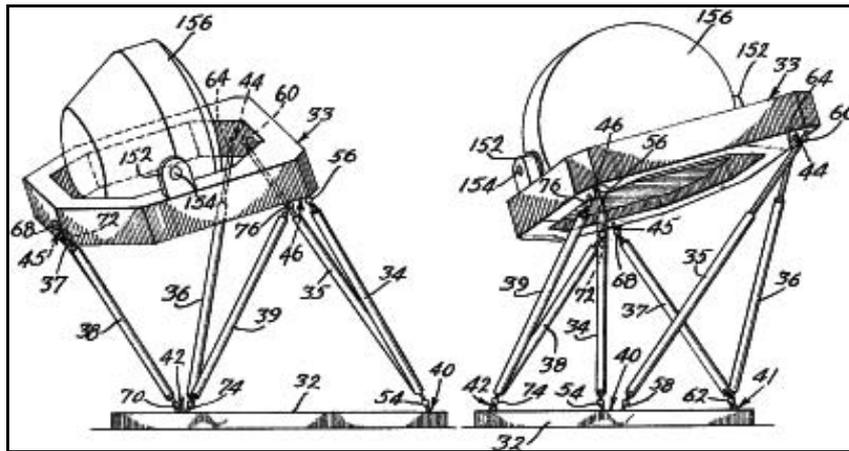


Figura 2.39. Extracto de la primera patente de la plataforma hexápoda con geometría octaédrica registrada en 1967 (Patente EE.UU. Noº 3.295.224)

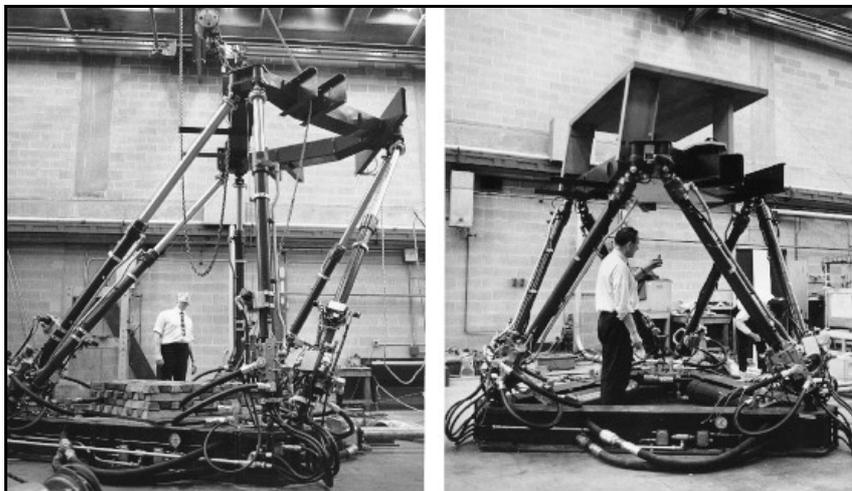


Imagen 2.18. El primer simulador basado en la plataforma hexápoda de geometría octaédrica de mediados de los 60

Era difícil de creer que esta revelación viniera del otro lado del océano. Pero en 1971 la oficina de patentes de EE.UU. le dio la patente a Klaus Cappel por este invento y su uso como simulador de movimiento. La patente fue tramitada el 7 de diciembre de 1964, y en ese momento Cappel no estaba al corriente del invento de Gough ni del artículo de Stewart que no había sido publicado aún. De hecho, la aplicación de la patente y la idea del simulador de movimiento resultaron del interés de la oficina de la división *Sikorsky Aircraft* de *United Technologies* para el diseño de

un simulador de helicóptero de seis grados de libertad. Y por tanto, el primer simulador de vuelo basado en una plataforma hexápoda de geometría octaédrica.

La primera licencia fue concedida a finales de los años 60 a *Link*, entonces uno de los primeros fabricantes de simuladores de vuelo. La primera infracción ocurrió a principios de los años 70 por CAE, el líder de los simuladores de vuelo. Finalmente la ley falló a favor de Instituto Franklin resultando en una penalización y una licencia. Más tarde otras compañías entraron en el mercado y tuvieron que aceptar la patente de Cappel. Mientras tanto, otros dos simuladores de movimiento fueron construidos directamente por el instituto Franklin. El primero era un simulador de helicóptero para *Rock Island Arsenal*. El segundo fue un simulador de conducción vendido a Daimler-Benz y que fue posteriormente montado sobre raíles.

Klaus Cappel ha desarrollado otros sistema cinemáticos para ensayos de vibración. Ha trabajado como supervisor técnico para *Team Corporation*, una empresa de fabricación de equipamiento vibratorio, y co-inventor de la cinemática de paralelogramos CUBE. El diseñador con más experiencia en plataformas hexápodas todavía trabaja en este campo, pero son pocos los que sacan provecho de un inestimable experiencia.



Imagen 2.19. Klaus Cappel explicando la plataforma hexápoda de geometría octaédrica a los dirigentes del instituto Franklin a mediados de los 60

De acuerdo con Cappel, la respuesta inicial al nuevo concepto de la plataforma hexápoda fue inesperadamente negativo durante muchos años antes de que llegara la aceptación generalizada. Y para entonces el nombre de Klaus Cappel ya se había olvidado. Más de tres décadas después, todavía se fabrican plataformas hexápodas de geometría octaédrica, generalmente para simuladores de movimiento. Todavía hay compañías que copian mecánicamente el diseño original sin tener nociones de singularidades o cinemática directa. Hay incluso una anécdota de una compañía que fabricó un simulador de movimiento y cuando finalmente lo pusieron en marcha tiró las paredes del hangar.

Podría decirse que estos tres ingenieros, el doctor Gough, Klaus Cappel y Stewart

contribuyeron de alguna manera a la creación, desarrollo y generalización de la plataforma hexápoda. El doctor Gough fue el primero en inventar y construir la plataforma, después Klaus Cappel la patentó y la licenció para simuladores de vuelo y Stewart accidentalmente llevó el concepto de la plataforma de Gough, otra vez, a los simuladores de vuelo. Sin embargo cabe recordar que ya funcionaban anteriormente plataformas hexápodas de geometría no octaédrica.

2.6.5.3. Arquitectura y características técnicas

La plataforma hexápoda tiene 6 grados de libertad que se controlan mediante 6 actuadores idénticos. Está formada por dos triángulos rígidos situados en posición horizontal. Uno de los triángulos es la base y está fijado al suelo, y el otro, situado por encima a cierta distancia de la base, es el móvil solidario con la cabina del simulador. Cada uno de los vértices de los triángulos están unidos por los seis actuadores lineales formando un octaedro. En la figura 2.41 podemos ver un esquema de esta plataforma.

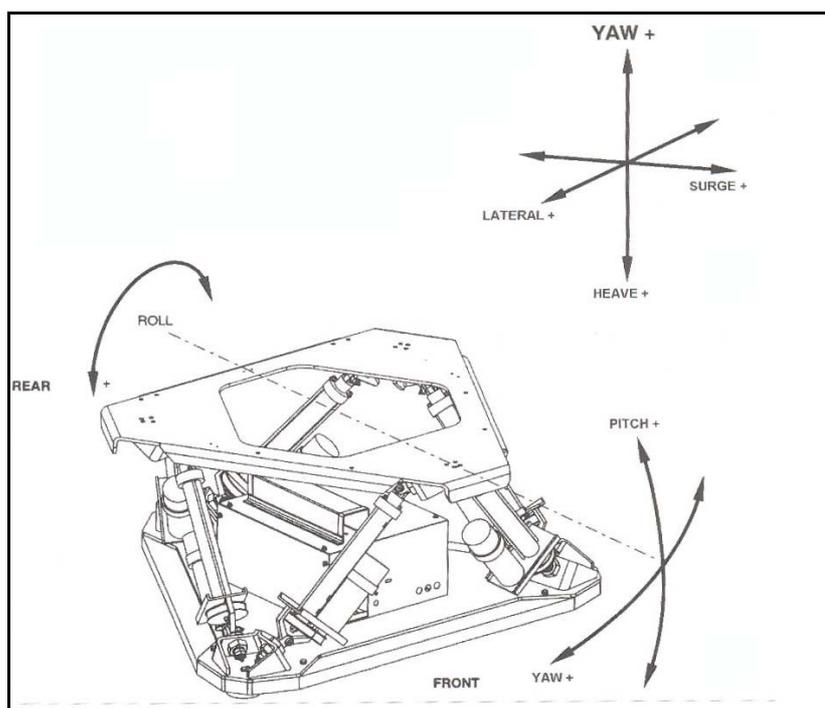


Figura 2.40. Esquema de la plataforma hexápoda

El conjunto de los seis actuadores proporcionan al triángulo móvil seis grados de libertad. Esta es una de las grandes ventajas de esta arquitectura de plataforma, ya que es una mecánica relativamente simple. Sin embargo esto conlleva resolver las complejas ecuaciones de cinemática directa [41, 46]. Cada movimiento de cada grado de libertad se lleva a cabo mediante el movimiento de los 6 actuadores en conjunto. Otra desventaja son los rangos de movimiento, ya que todos los grados de libertad están relacionados entre sí. Es decir, si se desea llevar al límite uno de los grados de libertad los demás quedarán reducidos considerablemente.

Otra ventaja derivada de la propia geometría es que los actuadores funcionan en

paralelo, por lo que la carga de la plataforma queda distribuida entre todos ellos. Gracias a esto se necesitan actuadores menos potentes y la plataforma es más compacta.

La relación entre la longitud de los actuadores y la dimensión del triángulo superior e inferior condiciona los rangos de movimiento de la plataforma.

Las ventajas e inconvenientes de esta plataforma son los siguientes:

Ventajas

- ▶ 6 grados de libertad
- ▶ Simplicidad mecánica
- ▶ Geometría compacta
- ▶ Actuadores en paralelo (disminuye el trabajo de cada uno de ellos)

Inconvenientes

- ▶ Control complejo
- ▶ Poco rango de movimiento
- ▶ Las juntas trabajan constantemente en fricción

La Universidad de Zaragoza dispone de una plataforma hexápoda fabricada por Moog con una capacidad de 2200 N. Los rangos de movimiento de esta plataforma están resumidas en la siguiente tabla.

Grado de libertad	Rango máximo	Velocidad máxima	Aceleración máxima
Cabeceo	$\pm 21^\circ$	30 °/s	500 °/s ²
Balanceo	$\pm 22^\circ$	30 °/s	500 °/s ²
Guiñado	$\pm 23^\circ$	40 °/s	400 °/s ²
X	± 254 mm	0,5 m/s	6 m/s ²
Y	± 254 mm	0,5 m/s	6 m/s ²
Z	± 177 mm	0,3 m/s	5 m/s ²

Tabla 2.7. Características de los ejes de la plataforma hexápoda

2.6.5.4. Análisis con MatLab

Para simular y analizar la plataforma hexápoda con la aplicación realizada en Matlab/Simulink se han empleado los siguientes parámetros:

Ganancia de aceleración lineal					
Kx	1,0	Ky	1,0	Kz	1,0
Ganancia de velocidad angular					
Kfi	1,0	Ktita	1,0	Kchi	1,0
Filtro paso alto de velocidad angular					
kfi	1,0	ktita	1,0	kchi	1,0
wfi	0,2	wtita	0,2	wchi	0,2
Filtro paso alto de fuerza específica					
Kfx	0,7	Kfy	0,7	Kfz	1,0
gx	0,5	gy	0,5	gz	0,7
wx	0,5	wy	0,5	wz	6,0
wx2	0,0	wy2	0,0	wz2	1,0
Filtro paso bajo de fuerza específica					
kicx	0,017	kicy	0,017		
wicx	40,0	wicy	40,0		
gicx	0,6	gicy	0,6		
Retorno de velocidad angular					
cfi	0,01	ctita	0,01	cchi	0,01
Retorno de posiciones lineales					
c1x	2,0	c1y	2,0	c1z	2,0
c2x	3,0	c2y	3,0	c2z	3,0

Tabla 2.8. Parámetros de simulación de la plataforma hexápoda

2.6.6. Plataforma esférica “Simusys”

2.6.6.1. Introducción

La plataforma esférica es una base de movimiento de 4 grados de libertad especialmente efectiva en simuladores de conducción. Una de sus mayores virtudes es que está diseñada para que el centro de rotación de los tres ejes coincida con la

cabeza de la persona sentada en la plataforma. Al contrario que en la plataforma esférica, cada uno de los 4 grados de libertad son independientes entre si, por lo que el control de la plataforma resulta más sencillo y efectivo. Sin embargo los ejes de movimiento funcionan en serie (cabeceo, balanceo, guiñado y desplazamiento vertical, en ese orden) por lo que cada uno de estos ejes debe de soportar la inercia de la plataforma más la de los ejes precedentes. En el siguiente apartado se explica detalladamente el funcionamiento de cada uno de los ejes.

Esta plataforma se desarrolló en el proyecto europeo *Simusys* [51], aunque la idea nació en un proyecto anterior llamado *Actiseat* [1]. En este proyecto se desarrolló un simulador de conducción completo basado en esta nueva arquitectura de plataforma móvil. Este simulador se desarrolló con carácter general para su uso para entrenamiento de conductores, investigación y entretenimiento. El proyecto *Simusys* “*Innovative High-Performance Motion Simulation System for Entertainment, Research and Training Applications*” fue desarrollado bajo el programa CRAFT-IST de la Comisión Europea, N. 1999 – 56418.

Este proyecto se llevó a cabo para intentar mejorar la sensación de movimiento de los simuladores de conducción. Tradicionalmente los simuladores de conducción usan plataformas hexápodos de 6 grados de libertad y ponen especial énfasis en el apartado gráfico de la simulación. Como hemos visto anteriormente el tamaño de la plataforma hexápoda y sus relaciones geométricas condicionan los rangos de movimiento. Por esta razón se suele optar por usar plataformas más compactas y con menos rango de movimiento y reforzar la parte gráfica del simulador, dejando en segundo plano la simulación del movimiento.

Además de este primer prototipo se han construido 2 plataformas con el mismo sistema pero con ligeras variaciones. Cada versión fue construida conociendo de antemano la aplicación en la que se iba a utilizar, de forma que se optimizaron las características más importantes. Por ejemplo en la segunda versión de esta plataforma constituye un simulador de camión realizado para la Universidad de Zaragoza, por lo que la inclinación máxima de cabeceo y balanceo fueron limitados, ya que no era necesario simular grandes aceleraciones. Y en la tercera y última versión (hasta la fecha) de esta plataforma, desarrollada para el “Istituto Italiano di Tecnologia”, al tener una aplicación de carácter general, se volvieron a utilizar guías con más recorrido. El sistema de control también ha sido renovado completamente y se ha recurrido al mismo sistema usado con la plataforma de paralelogramos, de la que se hablará en el siguiente apartado.

Como se puede ver, la plataforma esférica está en proceso de desarrollo, y así como la primera unidad era puramente un prototipo, con cada nueva versión se van mejorando diferentes aspectos que la acercan a una plataforma comercial.

2.6.6.2. Arquitectura y características técnicas

Los 4 grados de libertad de esta plataforma son cabeceo, balanceo, guiñado y movimiento vertical.

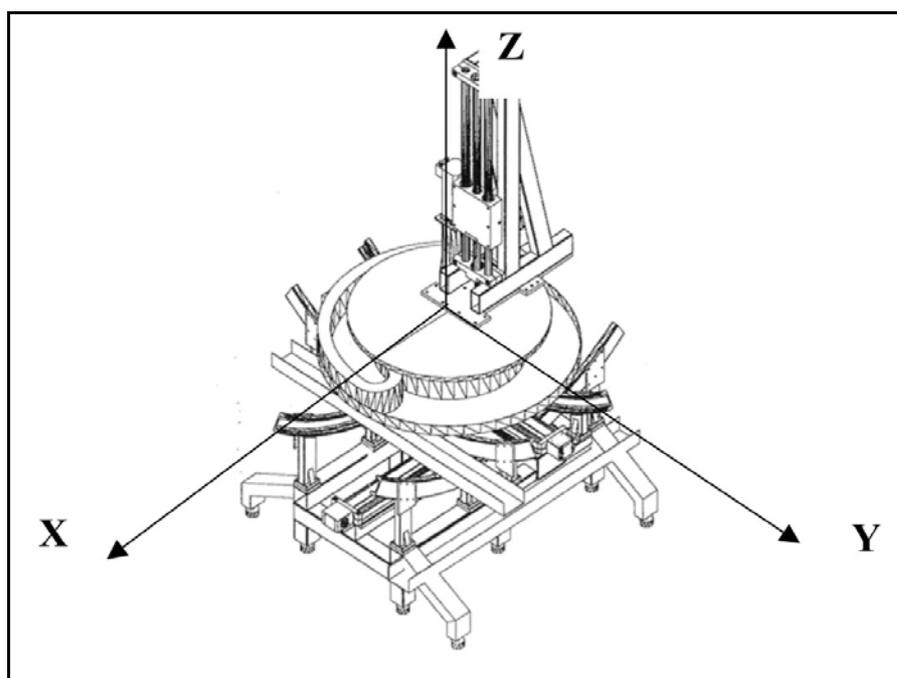


Figura 2.41. Esquema de la plataforma esférica con los ejes del sistema de referencia

Grados de libertad

- Cabeceo. Rotación entorno al eje Y
- Balanceo. Rotación entorno al eje X
- Guiñado. Rotación entorno al eje Z
- Desplazamiento vertical según el eje Z

El centro de rotación de los tres primeros ejes está situado en la cabeza del conductor. Gracias a esto se eliminan aceleraciones artificiales que empeoran la sensación de movimiento a bordo de la plataforma.

En la siguiente tabla podemos ver las características principales de cada uno de los ejes de esta plataforma:

Grado de libertad	Rango máximo	Velocidad máxima	Aceleración máxima
Cabeceo	$\pm 35^\circ$	20 °/s	100 °/s ²
Balanceo	$\pm 35^\circ$	20 °/s	100 °/s ²
Guiñado	$\pm 170^\circ$	60 °/s	40 °/s ²
Z	± 300 mm	0,8 m/s	4 m/s ²

Tabla 2.9. Características de los ejes de la plataforma esférica

I) Movimiento de cabeceo

Para el movimiento de cabeceo se usa un primer par de raíles fijados a la base de la plataforma. Estos raíles permiten al carro inferior describir un movimiento circular con centro en el órgano vestibular del conductor.



Imagen 2.20. Sistema de rotación para el movimiento de cabeceo

En la fotografía anterior se pueden ver los raíles y el actuador lineal encargado de realizar el movimiento de cabeceo. Este actuador lineal está compuesto por un servomotor que mueve el carro secundario por medio de una correa dentada. Este carro, que tiene un movimiento de translación, es solidario al carro inferior por medio de unos amortiguadores. De esta manera el carro inferior efectúa la rotación por los carriles.

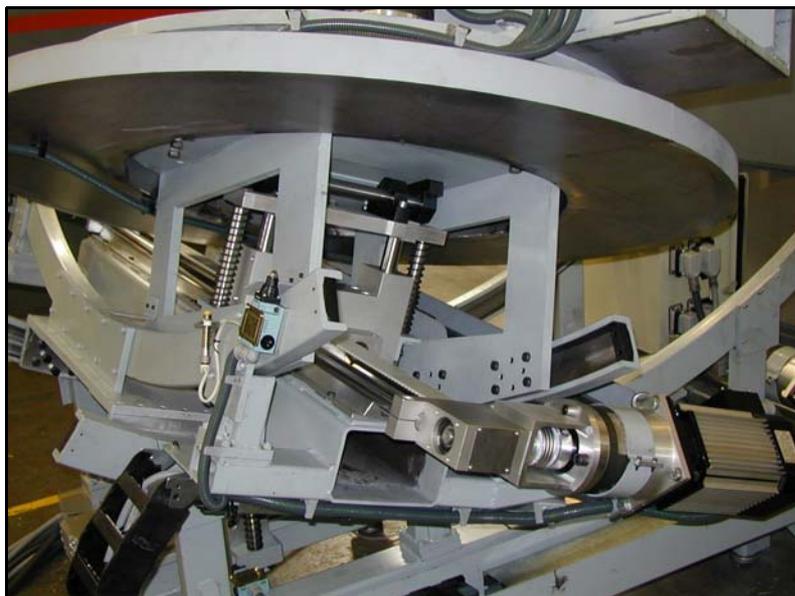


Imagen 2.21. Sistema de rotación para el movimiento de balanceo

II) Movimiento de balanceo

Un segundo par de raíles y un segundo actuador lineal están montados sobre el carro inferior y en posición perpendicular respecto a los raíles de cabeceo (ver imagen 2.20). Estos raíles permiten al carro superior describir un movimiento circular, procediendo el movimiento de balanceo, siempre con centro en el órgano vestibular del conductor. El funcionamiento de este mecanismo es totalmente análogo al de cabeceo.

III) Movimiento de guiñado

Sobre el carro superior está montada una plataforma que puede girar respecto a su eje vertical. En las siguientes imágenes se puede apreciar el mecanismo que permite la rotación de esta plataforma. El servomotor actúa sobre el piñón visible en la imagen y el movimiento se transmite de esta manera a la corona dentada solidaria a la plataforma.

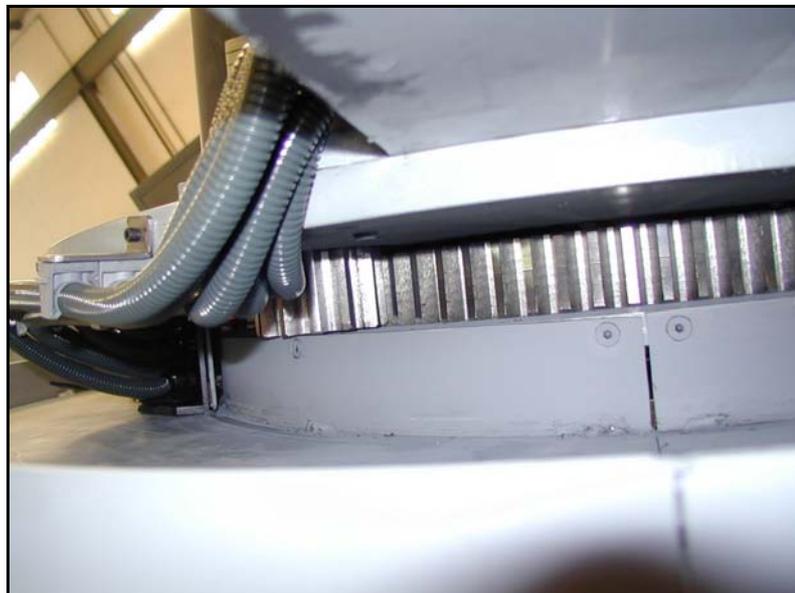


Imagen 2.22. Sistema de rotación para el movimiento de guiñada

IV) Desplazamiento vertical

Las aceleraciones verticales se reproducen directamente por medio de desplazamientos. En este caso se han usado dos sistemas para generar este desplazamiento. En la primera plataforma se usó un sistema de guías verticales accionadas mediante un actuador de tornillo sin fin para transformar el movimiento de rotación del servomotor en translación vertical.

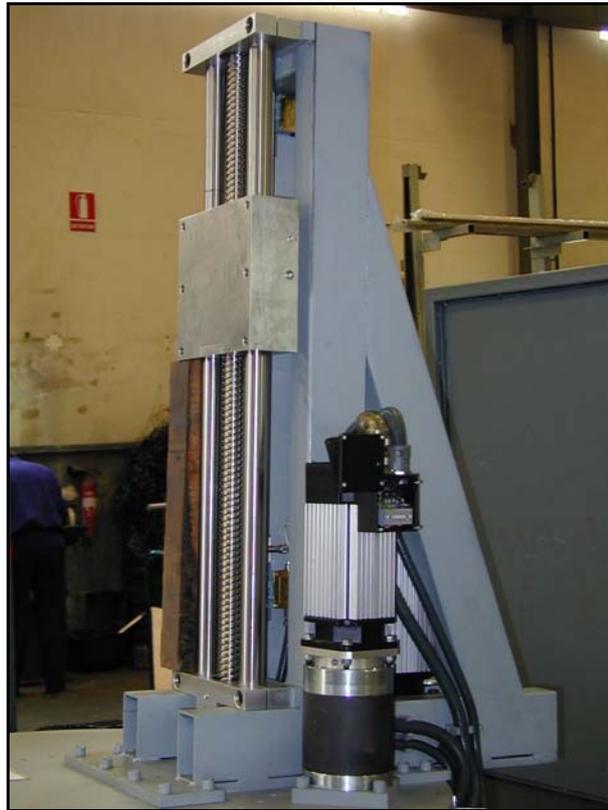


Imagen 2.23. Sistema de traslación para el movimiento de desplazamiento vertical

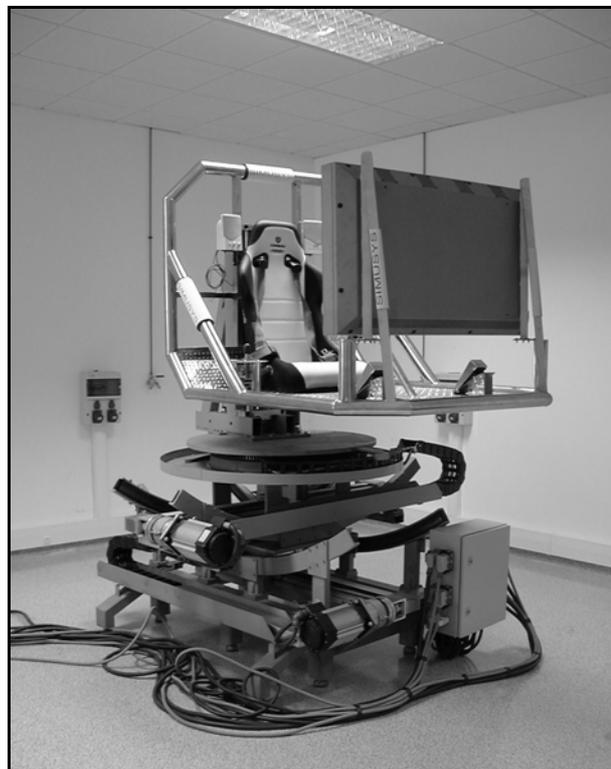


Imagen 2.24. Primera versión de la plataforma esférica con sistema de guías para generar el desplazamiento vertical

Sin embargo este sistema dejaba la cabina en voladizo y se producían oscilaciones en la misma. Por lo que se cambió por un sistema de tijeras. En este nuevo sistema el servomotor, también mediante un sistema de tornillo sin fin, varía la distancia entre los extremos de la tijera produciendo el movimiento vertical.



Imagen 2.25. Modificación de la plataforma esférica original con sistema de tijera para generar el desplazamiento vertical

Otras características de esta plataforma son:

Carga máxima: 1000 Kg

Peso: 600 Kg

Dimensiones (aproximadas): 2,5 x 2,5 x 1 m

Potencia nominal: 220 VAC 1500 W (Máxima 3600W)

Sistema de control: Analógico, puerto serie o *Ehternet*

Tabla 2.10. Características generales de la plataforma esférica

Para el análisis de esta arquitectura de plataforma se han utilizado las características del primer y tercer modelo, ya que son análogas y superiores a la del segundo.

Resumiendo, las ventajas e inconvenientes de esta plataforma son los siguientes:

Ventajas

- Centro de rotación situado en la cabeza del conductor
- Mayor rango de movimiento
- Control simple
- Desplazamiento de los ejes sin fricción

Inconvenientes

- Solo 4 grados de libertad
- Ejes de movimiento en serie (mayor carga para cada uno de ellos)

2.6.6.3. Análisis con MatLab

Para simular y analizar la plataforma hexápoda con la aplicación realizada en Matlab/Simulink se han empleado los siguientes parámetros:

Ganancia de aceleración lineal					
Kx	0,0	Ky	0,0	Kz	1,0
Ganancia de velocidad angular					
Kfi	1,0	Ktita	1,0	Kchi	1,0
Filtro paso alto de velocidad angular					
kfi	1,0	ktita	1,0	kchi	1,0
wfi	0,2	wtita	0,2	wchi	0,2
Filtro paso alto de fuerza específica					
Kfx	1,0	Kfy	1,0	Kfz	1,0
gx	0,5	gy	0,5	gz	0,7
wx	0,5	wy	0,5	wz	6,0
wx2	0,0	wy2	0,0	wz2	1,0
Filtro paso bajo de fuerza específica					
kicx	0,017	kicy	0,017		
wicx	40,0	wicy	40,0		
gicx	0,6	gicy	0,6		
Retorno de velocidad angular					
cfi	0,01	ctita	0,01	cchi	0,01

Retorno de posiciones lineales					
c1x	2,0	c1y	2,0	c1z	2,0
c2x	3,0	c2y	3,0	c2z	3,0

Tabla 2.11. Parámetros de simulación de la plataforma esférica

2.6.7. Plataforma de paralelogramos

2.6.7.1. Introducción

La plataforma de paralelogramos, al igual que la plataforma esférica, es una base de movimiento de 4 grados de libertad. La diferencia entre ambas estriba en el sistema utilizado para el cabeceo y balanceo. Para generar este movimiento se ha usado un sistema de paralelogramos, lo que le da el nombre a esta arquitectura de plataforma. Existen otros sistemas similares para generar el movimiento de rotación [59].

Esta plataforma fue desarrollada en el programa *INNOVA Aragón* [16] en el que se desarrolló un simulador de conducción usando esta arquitectura de plataforma móvil. La plataforma construida fue el primer y último prototipo hasta el momento. El sistema de control empleado fue el mismo del tercer prototipo de la plataforma esférica que está actualmente funcionando en el *Istituto Italiano di Tecnologia*. Este sistema de control se introdujo por primera vez en la plataforma de paralelogramos y ha sido mejorado en la plataforma esférica del *IIT*.

2.6.7.2. Arquitectura y características técnicas

Los 4 grados de libertad, al igual que en la plataforma esférica, son: cabeceo, balanceo, guiñado y movimiento vertical. El sistema de referencia es el mismo al usando con la plataforma esférica.

Grados de libertad

- Cabeceo. Rotación entorno al eje Y
- Balanceo. Rotación entorno al eje X
- Guiñado. Rotación entorno al eje Z
- Desplazamiento vertical según el eje Z

A diferencia de la plataforma esférica el movimiento de giro no es tan preciso y el centro de rotación no es un punto exacto, aunque la variación es mínima.

En la siguiente tabla podemos ver las características principales de cada uno de los ejes de esta plataforma:

Grado de libertad	Rango máximo	Velocidad máxima	Aceleración máxima
Cabeceo	$\pm 18^\circ$	20 °/s	100 °/s ²
Balanceo	$\pm 18^\circ$	20 °/s	100 °/s ²
Guiñado	$\pm 170^\circ$	60 °/s	40 °/s ²
Z	± 300 mm	1 m/s	4 m/s ²

Tabla 2.12. Características de los ejes de la plataforma de paralelogramos

I) Movimiento de cabeceo

El movimiento de cabeceo se genera mediante un trapecioide articulado. En la imagen 2.26 se pueden ver los paralelogramos y el actuador lineal encargado de realizar el movimiento de cabeceo. Este actuador lineal está compuesto por un servomotor que mueve el carro secundario por medio de un tornillo sin fin. Este carro, que tiene un movimiento de translación, es solidario al carro inferior por medio de unos amortiguadores. De esta manera el carro inferior efectúa la rotación gracias al cambio de geometría del trapecioide articulado.



Imagen 2.26. Sistema de paralelogramos para general el movimiento de cabeceo

II) Movimiento de balanceo

El funcionamiento del movimiento de balanceo es análogo al movimiento de cabeceo. En la parte central de la imagen 2.26 se puede observar el sistema de paralelogramos que generan el movimiento de balanceo.



Imagen 2.27. Plataforma de paralelogramos sin cabina

III) Movimiento de guiñado

El sistema de guiñado es el mismo que en la plataforma esférica. Se puede observar también en la imagen 2.28 el servomotor encargado de realizar este movimiento.



Imagen 2.28. Plataforma de paralelogramos con la cabina montada

IV) Desplazamiento vertical

En esta plataforma se usó un sistema de tijeras para generar el movimiento vertical. Es el mismo sistema usado en la plataforma esférica. En la imagen 2.27 se puede observar el sistema empleado.

Otras características de esta plataforma son:

<p>Carga máxima: 1200 Kg</p> <p>Peso: 500 Kg</p> <p>Dimensiones (aproximadas): 2 x 2 x 1 m</p> <p>Potencia nominal: 220 VAC 1500 W (Máxima 3600W)</p> <p>Sistema de control: Analógico, puerto serie o <i>Ehternet</i></p>

Tabla 2.13. Características generales de la plataforma esférica

Resumiendo, las ventajas e inconvenientes de esta plataforma son los siguientes:

Ventajas

- Control simple
- Desplazamiento de los ejes sin fricción
- Robusta
- Compacta

Inconvenientes

- Solo 4 grados de libertad
- Ejes de movimiento en serie (mayor carga para cada uno de ellos)

En comparación con la plataforma esférica y hexápoda algunas características están situadas en un punto medio. Por ejemplo tiene menor rango de movimiento que la plataforma esférica pero más que la plataforma hexápoda. Es más compacta y robusta que la plataforma esférica, pero al igual que esta tiene los ejes en serie, lo que representa un inconveniente respecto a la plataforma hexápoda. El centro de rotación no es tan preciso como en la plataforma esférica, pero está más centrado que en la plataforma hexápoda.

2.6.7.3. Análisis con MatLab

Para simular y analizar la plataforma hexápoda con la aplicación realizada en Matlab/Simulink se han empleado los siguientes parámetros:

Ganancia de aceleración lineal					
Kx	0,0	Ky	0,0	Kz	1,0
Ganancia de velocidad angular					
Kfi	1,0	Ktita	1,0	Kchi	1,0
Filtro paso alto de velocidad angular					
kfi	1,0	ktita	1,0	kchi	1,0
wfi	0,2	wtita	0,2	wchi	0,2
Filtro paso alto de fuerza específica					
Kfx	1,0	Kfy	1,0	Kfz	1,0
gx	0,5	gy	0,5	gz	0,7
wx	0,5	wy	0,5	wz	6,0
wx2	0,0	wy2	0,0	wz2	1,0
Filtro paso bajo de fuerza específica					
kicx	0,017	kicy	0,017		
wicx	40,0	wicy	40,0		
gicx	0,6	gicy	0,6		
Retorno de velocidad angular					
cfi	0,01	ctita	0,01	cchi	0,01
Retorno de posiciones lineales					
c1x	2,0	c1y	2,0	c1z	2,0
c2x	3,0	c2y	3,0	c2z	3,0

Tabla 2.14. Parámetros de simulación de la plataforma de paralelogramos

2.6.8. Plataformas sobre raíles

2.6.8.1. Introducción

La deficiencia más aparente de las plataformas esférica y de paralelogramos es la falta de desplazamientos longitudinales y laterales. El uso conjunto de un sistema de raíles con una de estas plataformas proporcionaría una solución realmente eficiente, desde el punto de vista de reproducción del movimiento. Sería un sistema completo de

6 grados de libertad con bastante rango de movimiento en cada uno de los ejes. La plataforma hexápoda ya posee ella misma los 6 grados de libertad, pero como se ha visto anteriormente, el poco rango de desplazamiento longitudinal y lateral, no consiguen mejorar mucho la sensación de movimiento respecto a las plataformas esférica y de paralelogramos, añadiendo únicamente una mejor respuesta respecto a las aceleraciones lineales de alta frecuencia.

Por esta razón, se pueden encontrar diversos simuladores basados en la plataforma hexápoda que poseen un sistema de raíles. En estos sistemas casi todas las aceleraciones lineales se simulan mediante desplazamientos.

No se ha llegado a construir nunca un simulador de este tipo con una plataforma esférica o de paralelogramos, por lo que el análisis posterior en estos casos es puramente teórico. Tampoco se ha podido trabajar directamente con un sistema con plataforma hexápoda montada sobre raíles.

2.6.8.2. Arquitectura y características técnicas

El mayor inconveniente técnico para la construcción de este tipo de plataformas es la carga lateral y longitudinal a la que está sometida la plataforma que va montada sobre los raíles a causa de las aceleraciones lineales introducidas. El sistema de movimiento de la plataforma debe de ser capaz de absorber todas esas fuerzas inerciales, por lo que es necesario construir un sistema bastante robusto.

Las ventajas e inconvenientes de esta plataforma son los siguientes:

Ventajas

- ▶ 6 grados de libertad

Alto rango de movimiento

Inconvenientes

- ▶ Ocupa mucho espacio
- ▶ Elevado precio
- ▶ Complejidad mecánica
- ▶ Control complejo

2.6.8.3. Análisis con MatLab

Para simular y analizar la plataforma hexápoda con la aplicación realizada en Matlab/Simulink se han empleado los siguientes parámetros:

Ganancia de aceleración lineal					
Kx	0,0	Ky	0,0	Kz	1,0
Ganancia de velocidad angular					
Kfi	1,0	Ktita	1,0	Kchi	1,0
Filtro paso alto de velocidad angular					
kfi	1,0	ktita	1,0	kchi	1,0
wfi	0,2	wtita	0,2	wchi	0,2
Filtro paso alto de fuerza específica					
Kfx	1,0	Kfy	1,0	Kfz	1,0
gx	0,5	gy	0,5	gz	0,7
wx	0,5	wy	0,5	wz	6,0
wx2	0,0	wy2	0,0	wz2	1,0
Filtro paso bajo de fuerza específica					
kicx	0,017	kicy	0,017		
wicx	40,0	wicy	40,0		
gicx	0,6	gicy	0,6		
Retorno de velocidad angular					
cfi	0,01	ctita	0,01	cchi	0,01
Retorno de posiciones lineales					
c1x	0,2	c1y	0,2	c1z	2,0
c2x	0,1	c2y	0,1	c2z	3,0

Tabla 2.15. Parámetros de simulación de la plataforma sobre raíles

2.6.9. Análisis de los resultados obtenidos

2.6.9.1. Introducción

Una vez que hemos analizado por separado cada una de estas arquitecturas, vamos a realizar una comparación desde el punto de vista de percepción humano. Para ello se van a analizar tres casos típicos para ver el comportamiento de cada plataforma en diferentes condiciones. El primero, para poder realizar una comparación de la

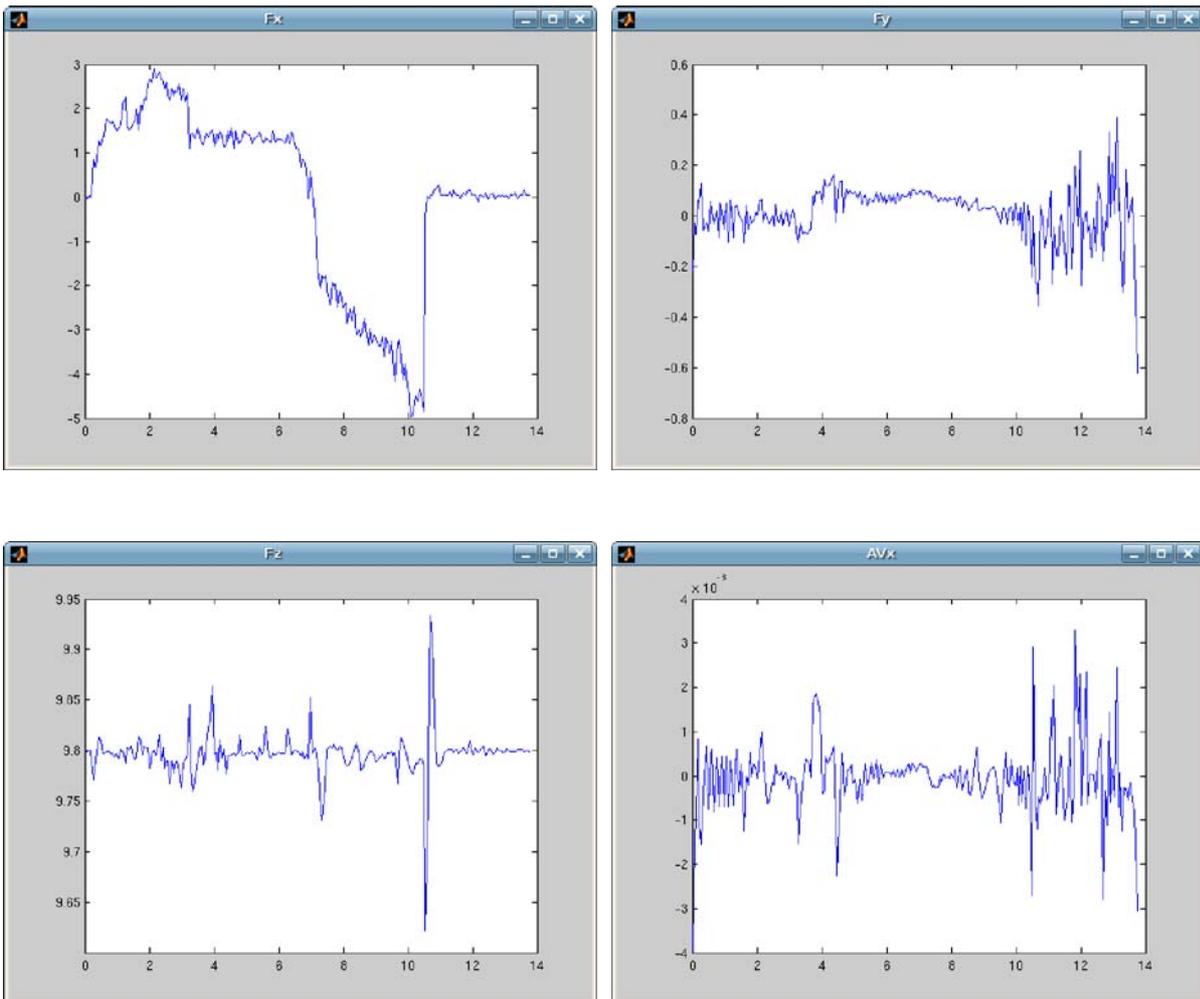
respuesta frente a las aceleraciones longitudinales, es un caso de aceleración y frenada. El segundo, para analizar la respuesta de las aceleraciones laterales, es un caso de *slalom*. Y el tercero, para comparar la eficiencia en la simulación de las aceleraciones verticales, es un circuito con baches de diferente amplitud.

Los datos usados como entrada están extraídos del simulador de conducción de camiones desarrollado en la Universidad de Zaragoza. No se tratan pues de datos totalmente sintéticos, sino de datos simulados, por lo que son bastante parecidos a los obtenidos de un vehículo real.

2.6.9.2. Caso 1: *Aceleración y frenada*

En este caso se empieza con el vehículo parado y se acelera hasta llegar a cierta velocidad y finalmente se frena bruscamente hasta la total detención del vehículo. En este caso la aceleración longitudinal es la señal dominante.

Los datos de entrada son los siguientes:



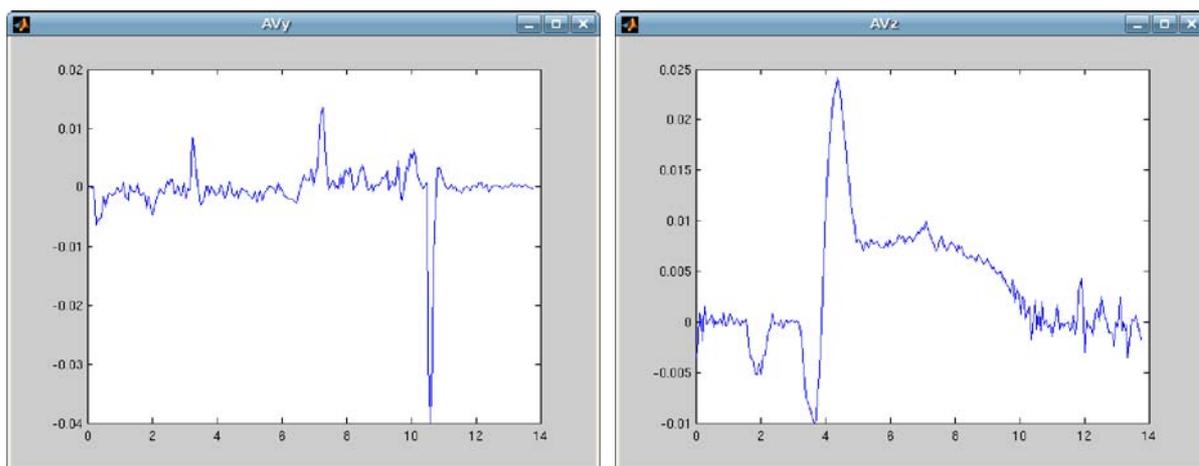
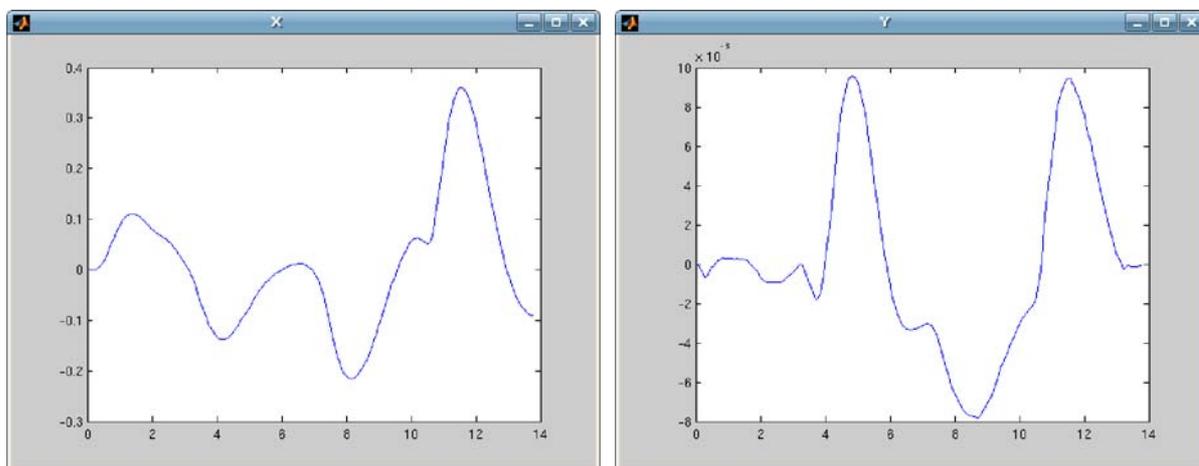


Figura 2.42. Datos de entrada

Para las tres arquitecturas de plataformas analizadas obtenemos los siguientes resultados:

I) Plataforma hexápoda:

Las siguientes gráficas representan los seis grados de libertad de la plataforma hexápoda resultantes de la simulación de los datos de entrada.



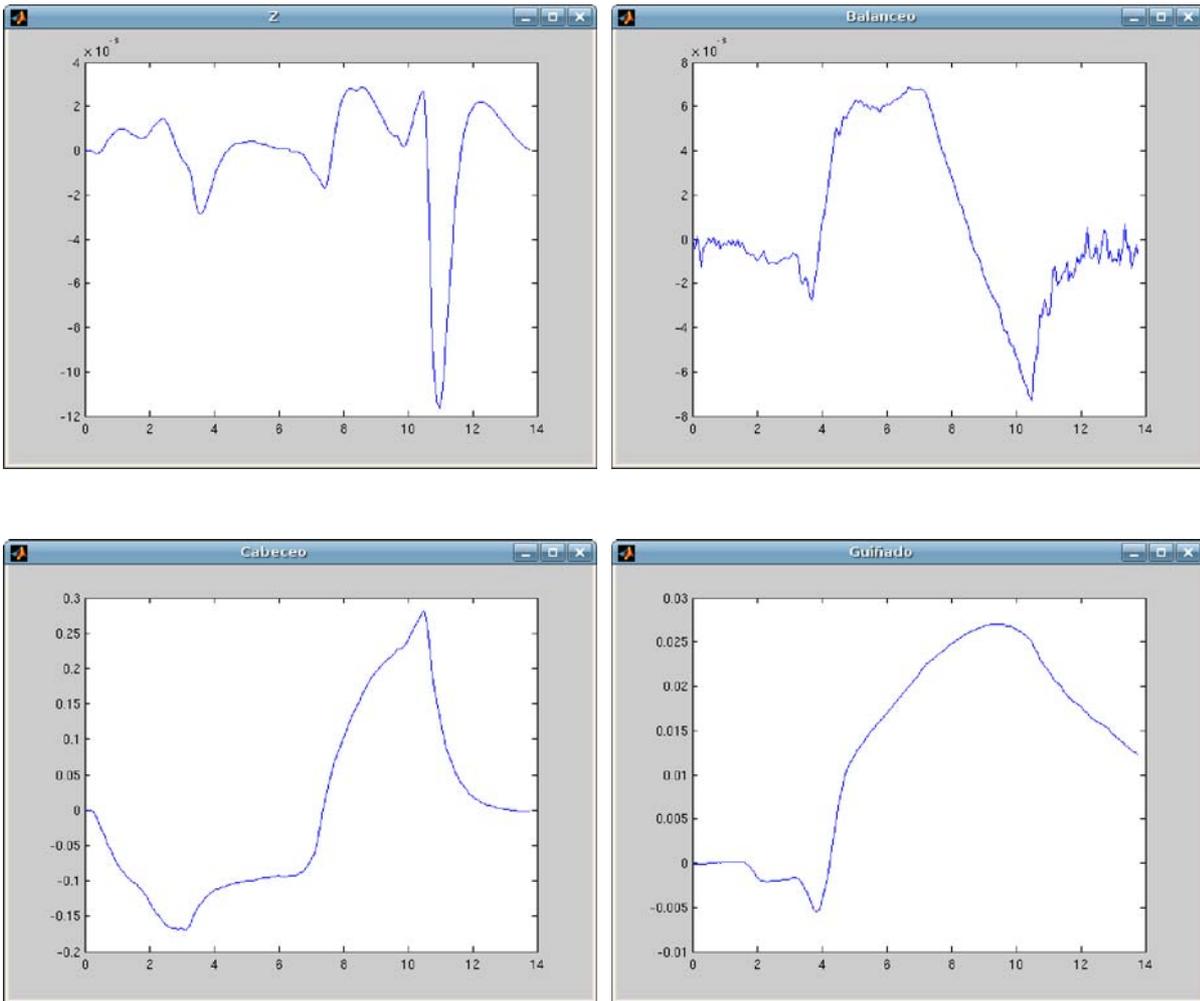
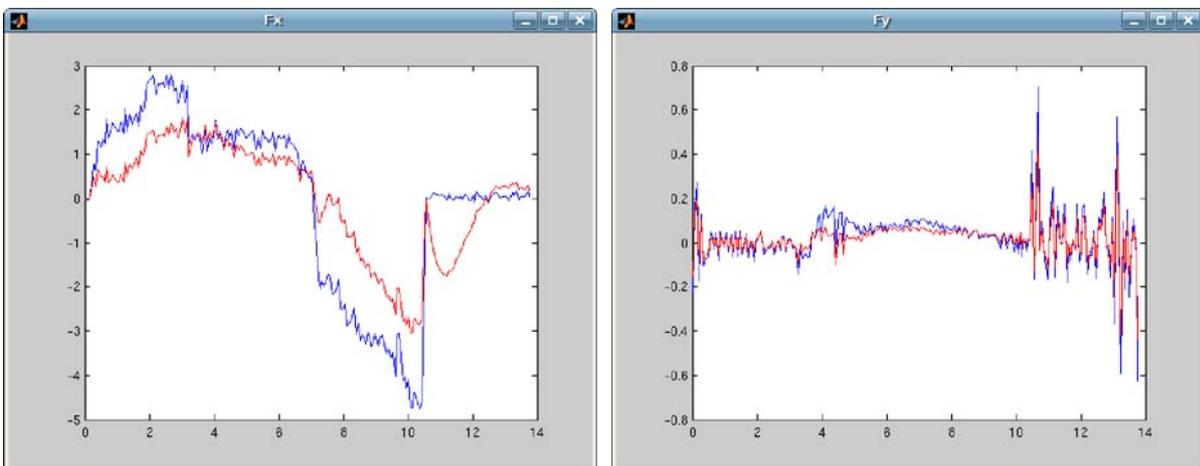


Figura 2.43. Grados de libertad de la plataforma

En las siguientes gráficas están representadas las variables de entrada y las variables simuladas. La línea azul corresponde con la variable de entrada y la roja con la variable simulada por la plataforma.



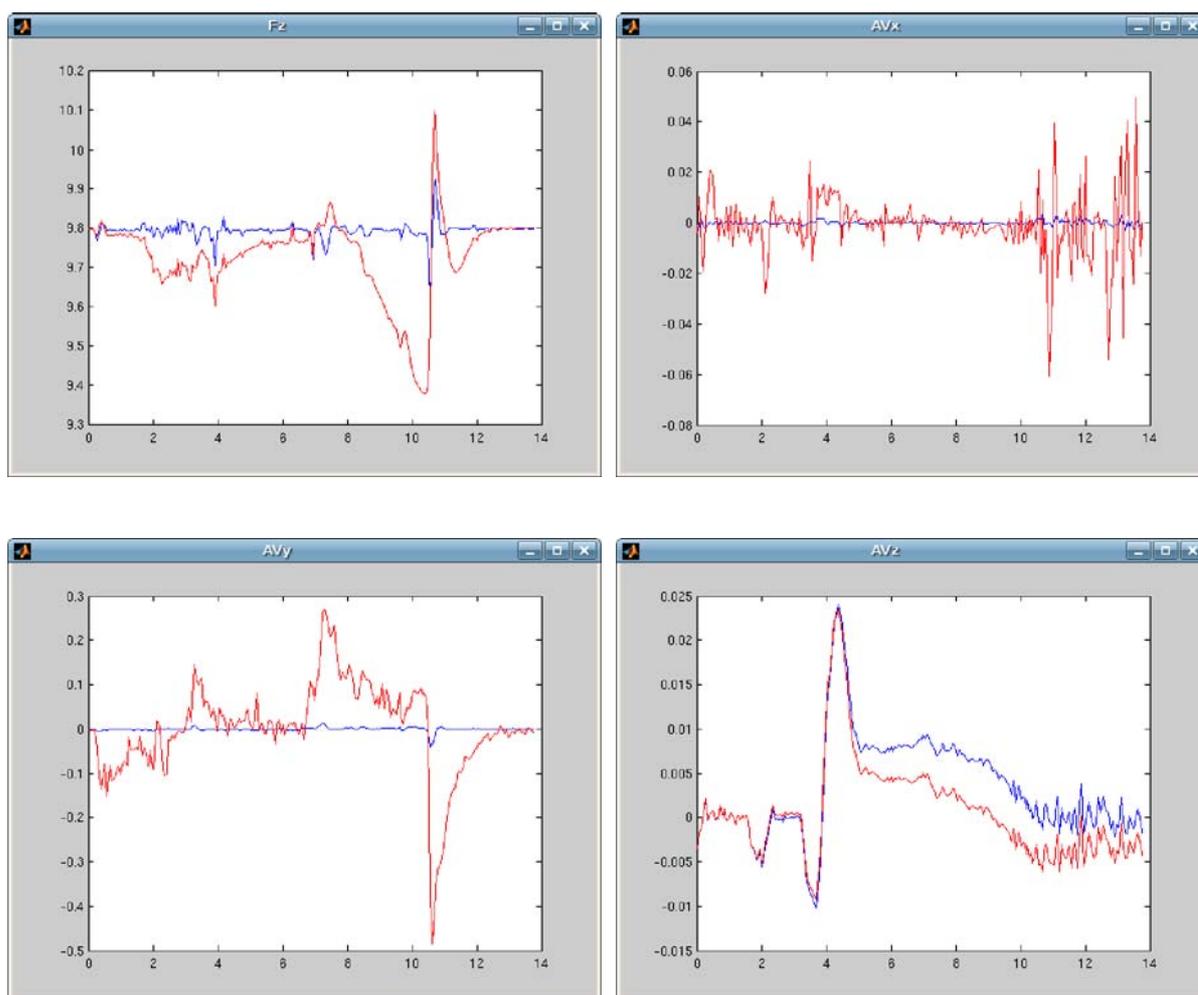


Figura 2.44. Datos de entrada y datos simulados por la plataforma

A continuación está representada la percepción de movimiento para cada una de las variables anteriores. La línea azul corresponde con la variable de entrada y la roja con la variable simulada por la plataforma.

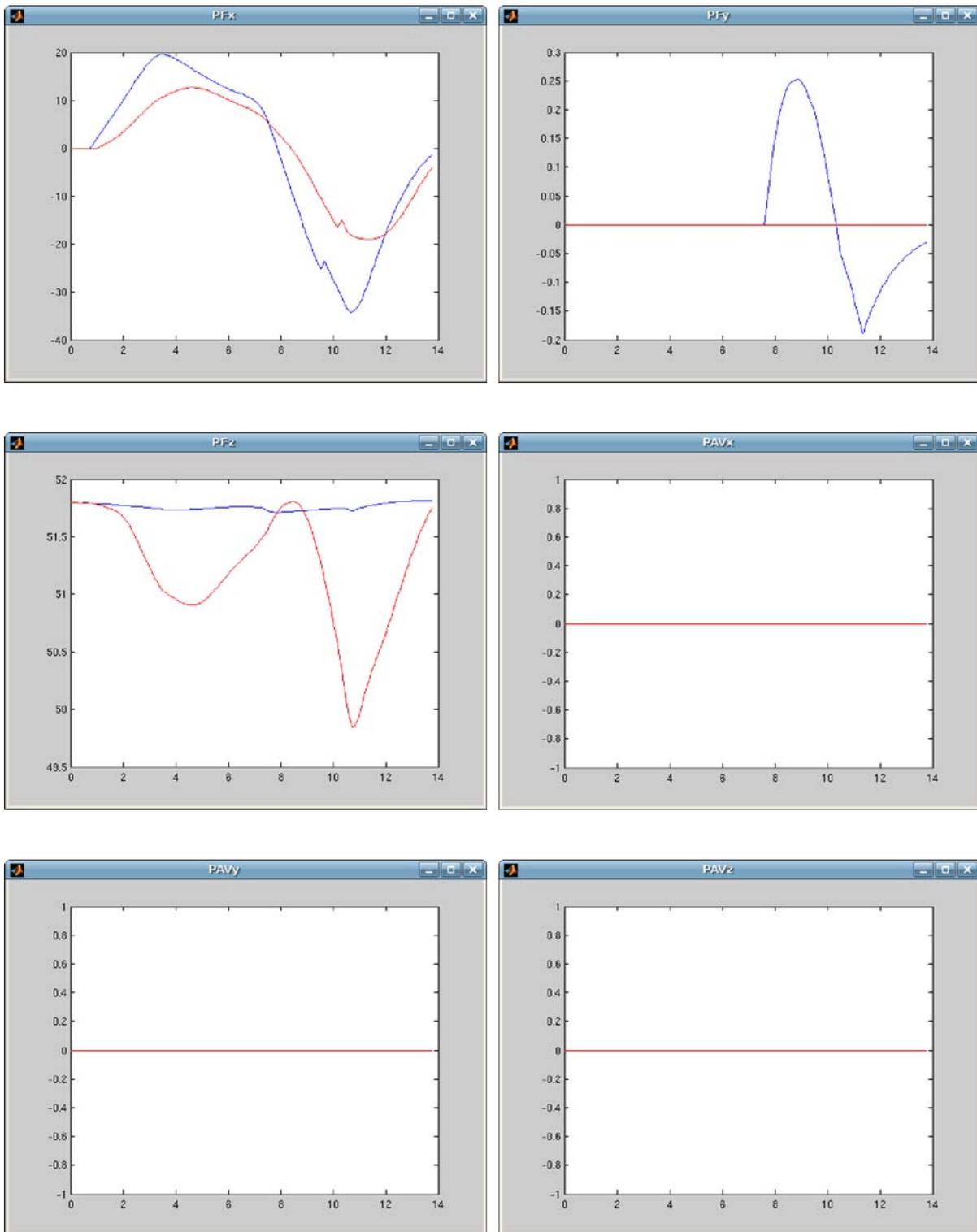


Figura 2.45. Percepción del movimiento real y del simulado por la plataforma

II) Plataforma esférica/paralelogramos:

Como hemos visto anteriormente, la plataforma esférica y la plataforma de paralelogramos tienen características similares, por lo que el análisis lo realizaremos conjuntamente.

Las siguientes gráficas representan los seis grados de libertad de la plataforma esférica/paralelogramos resultantes de la simulación de los datos de entrada.

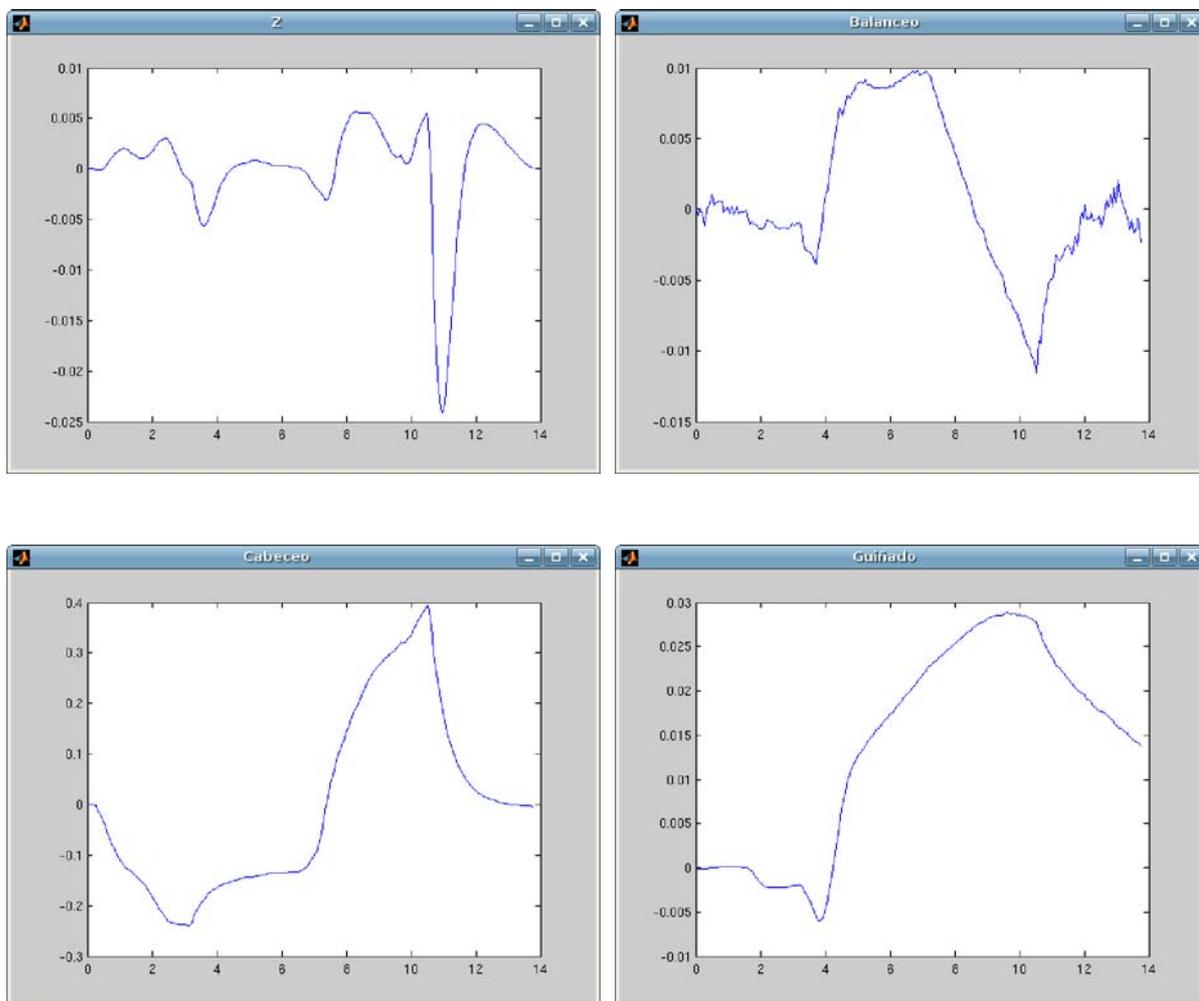


Figura 2.46. Grados de libertad de la plataforma

En las siguientes gráficas están representadas las variables de entrada y las variables simuladas. La línea azul corresponde con la variable de entrada y la roja con la variable simulada por la plataforma.

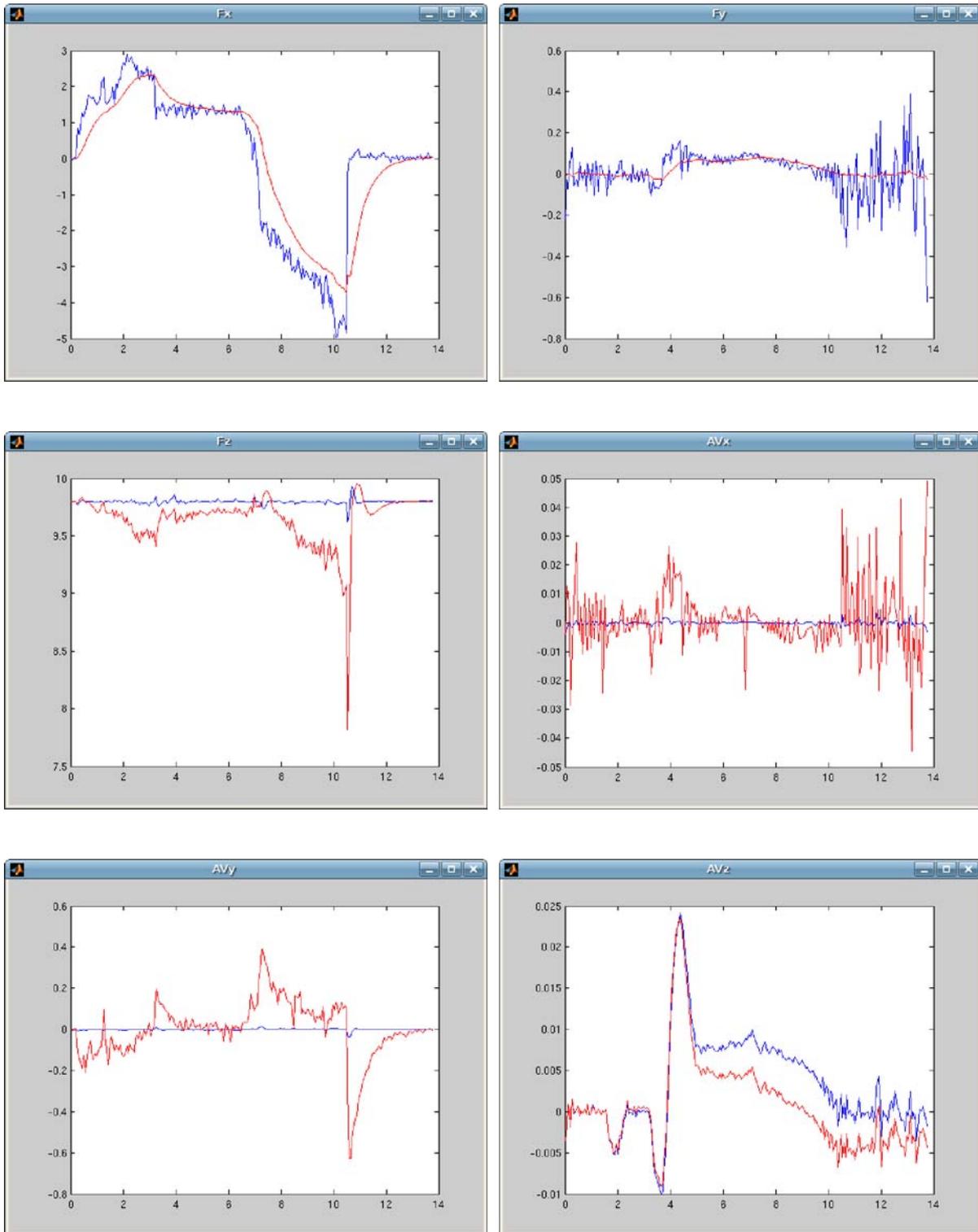


Figura 2.47. Datos de entrada y datos simulados por la plataforma

A continuación está representada la percepción de movimiento para cada uno de las variables anteriores. La línea azul corresponde con la variable de entrada y la roja con la variable simulada por la plataforma.

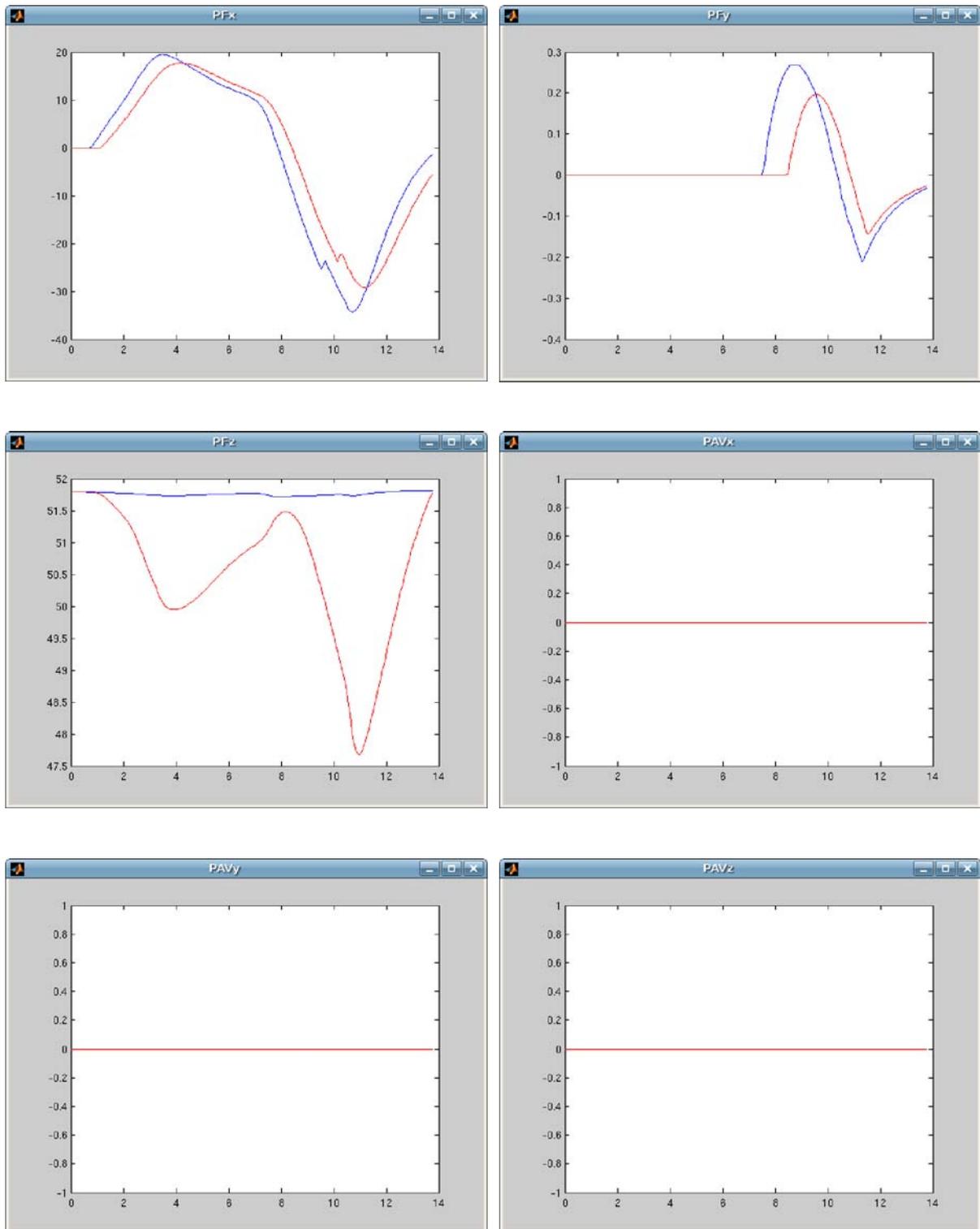


Figura 2.48. Percepción del movimiento real y del simulado por la plataforma

III) Plataforma sobre raíles:

Las siguientes gráficas representan los seis grados de libertad de la plataforma

sobre railes resultantes de la simulación de los datos de entrada.

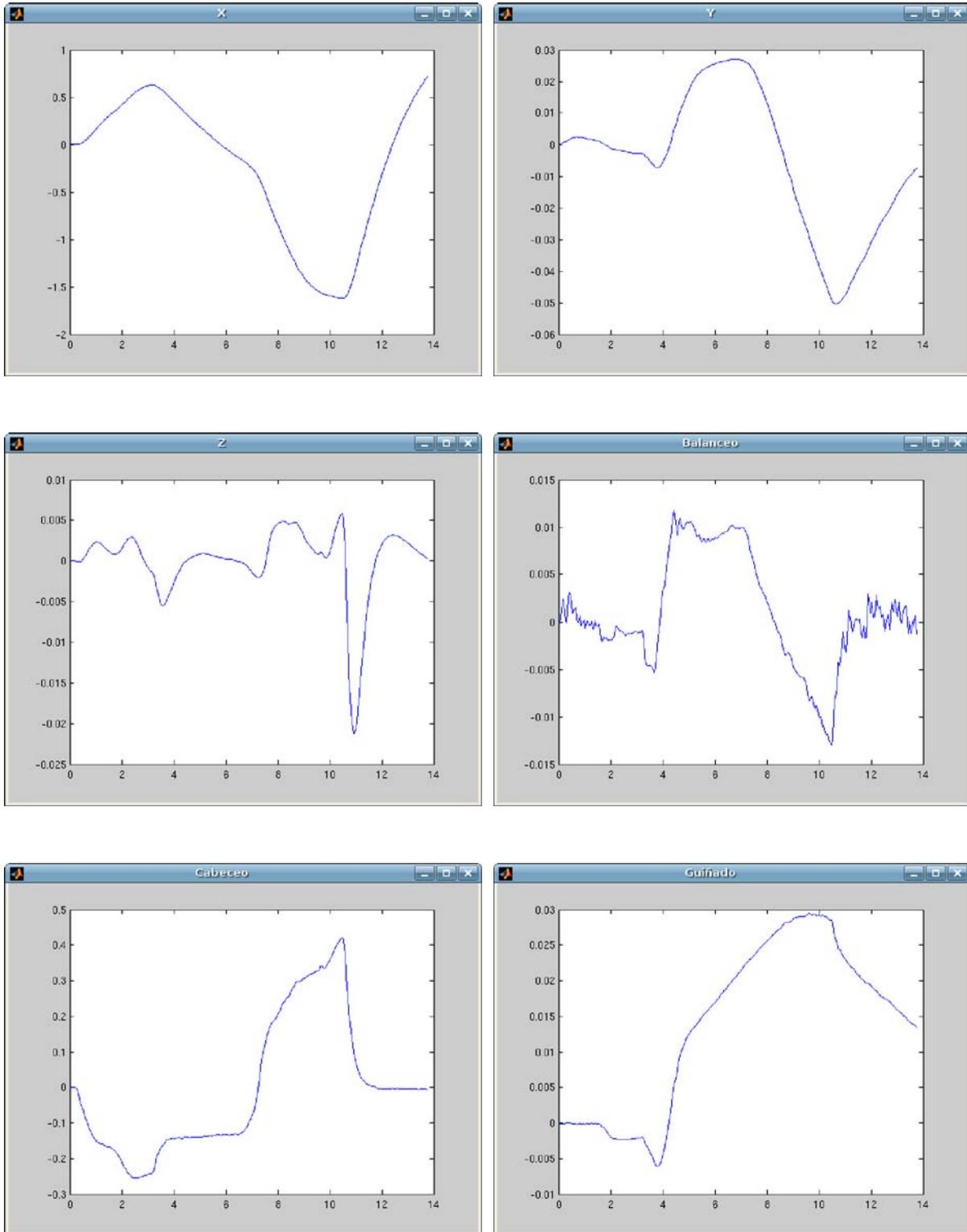


Figura 2.49. Grados de libertad de la plataforma

En las siguientes gráficas están representadas las variables de entrada y las variables simuladas. La línea azul corresponde con la variable de entrada y la roja con la variable simulada por la plataforma.

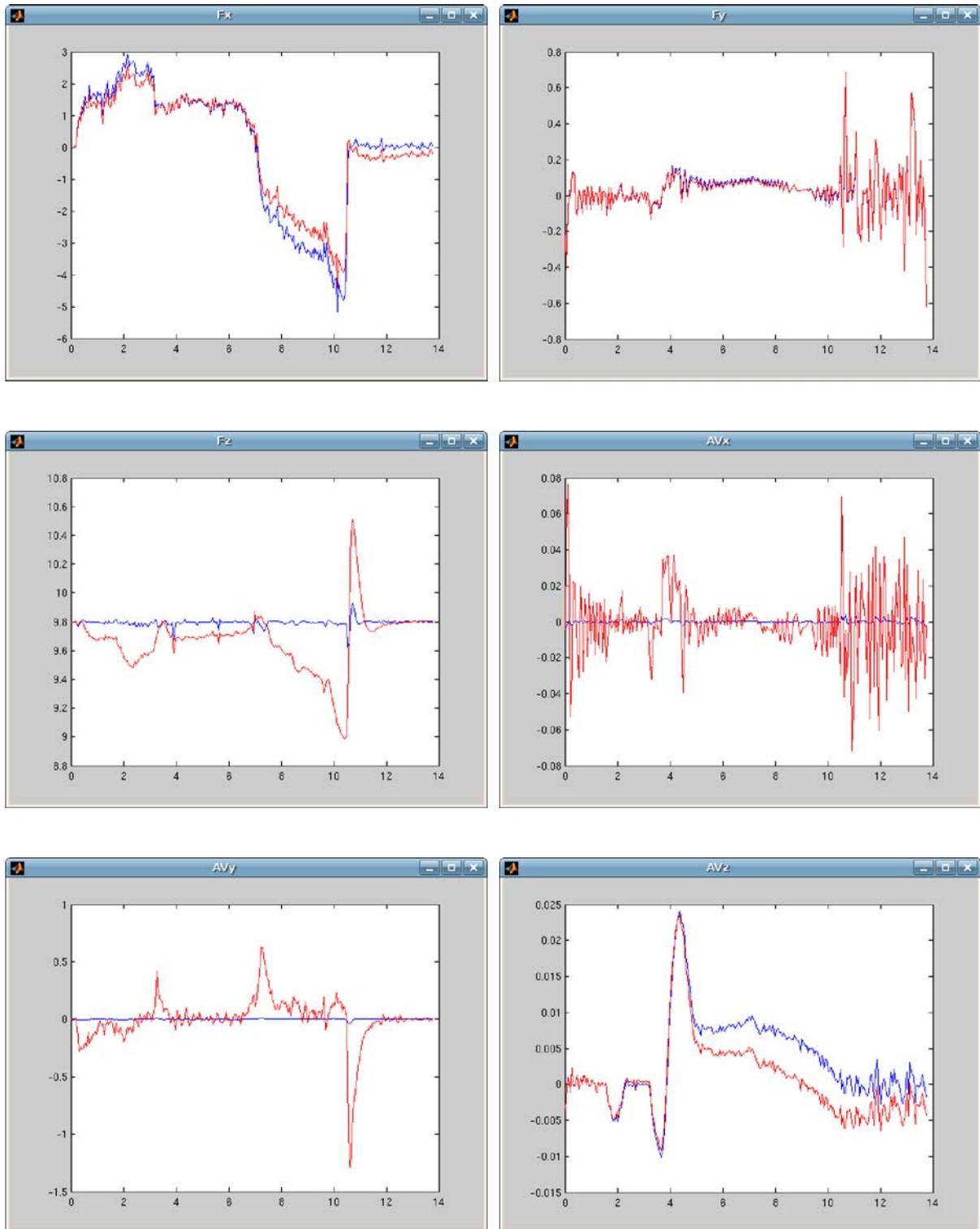


Figura 2.50. Datos de entrada y datos simulados por la plataforma

A continuación está representada la percepción de movimiento para cada uno de

las variables anteriores. La línea azul corresponde con la variable de entrada y la roja con la variable simulada por la plataforma.

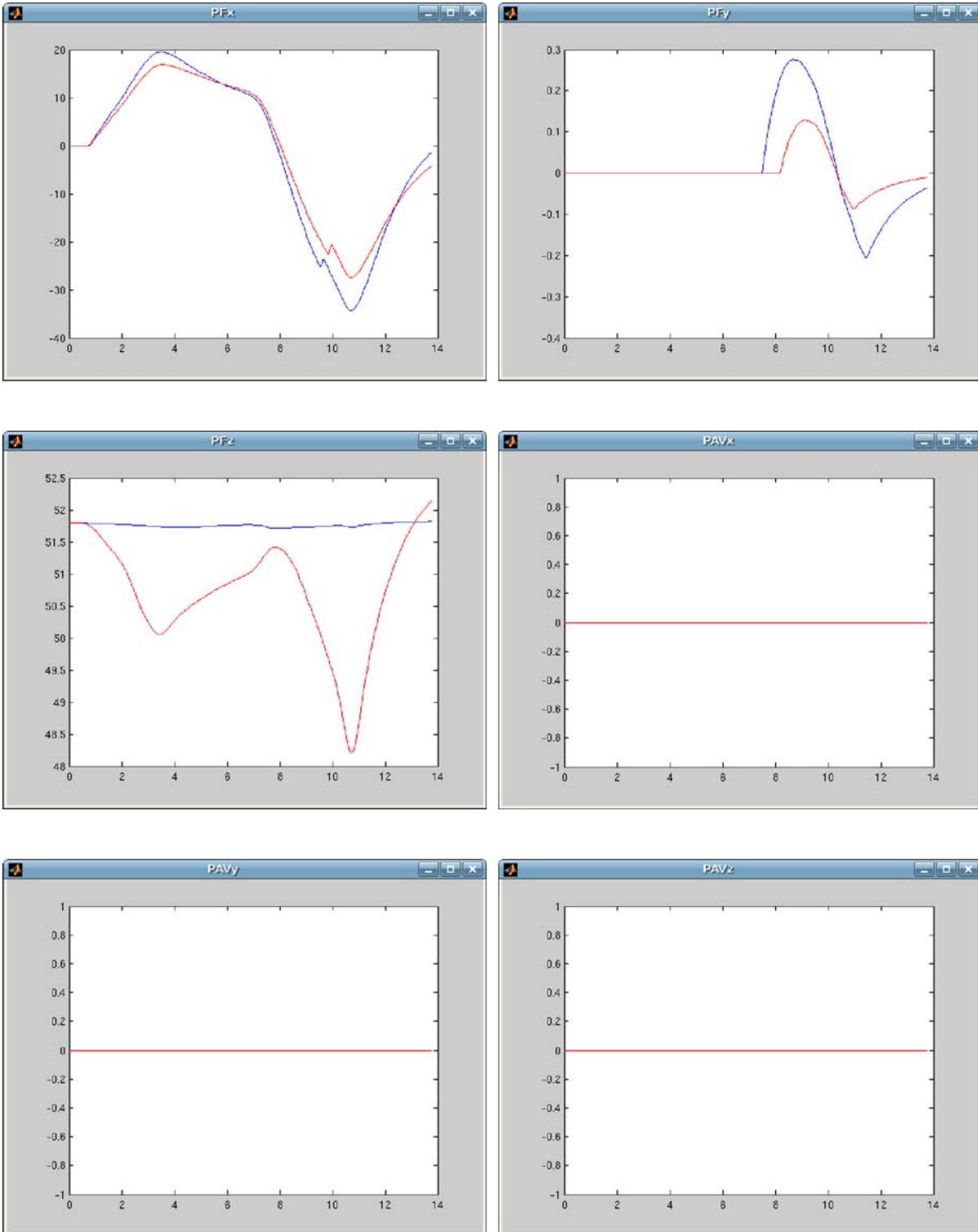


Figura 2.51. Percepción del movimiento real y del simulado por la plataforma

Conclusiones:

Como se ha dicho anteriormente las plataformas móviles no reproducen sino que simulan el movimiento del vehículo. Por esta razón la comparación entre las diferentes arquitecturas se debe de hacer respecto a la percepción del movimiento, no respecto al movimiento en sí de la plataforma.

De las gráficas anteriores podemos extraer dos conclusiones. La primera es que la velocidad angular de esta simulación queda por debajo del umbral de percepción, como se puede ver en todas las gráficas de percepción de la velocidad angular. Y no solo esto, sino que la rotación de la plataforma usada para simular las aceleraciones lineales de baja frecuencia se realiza correctamente ya que no estamos induciendo ninguna velocidad angular anómala.

Y segundo, en relación a la comparación de las plataformas, podemos ver como la plataforma sobre raíles posee ventajas sobre las otras dos arquitecturas. La plataforma hexápoda no es capaz de reproducir grandes aceleraciones mantenidas y la plataforma esférica/paralelogramos, al no disponer de desplazamiento horizontal, no puede reproducir las aceleraciones de alta frecuencia, por lo que aparece un retraso en la percepción del movimiento. A continuación se representa la percepción de la fuerza específica longitudinal F_x según los datos de entrada y en la simulación de las tres plataformas. La gráfica de la percepción según los datos de entrada está representada en azul, en la plataforma hexápoda en rojo, en la plataforma esférica/paralelogramos en verde y en la plataforma sobre raíles en negro.

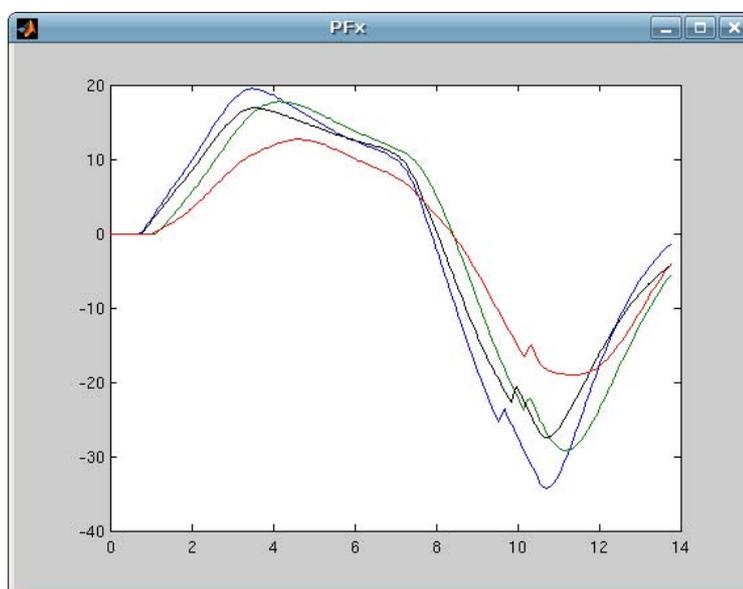


Figura 2.52. Percepción de la fuerza específica longitudinal F_x

2.6.9.3. Caso 2: “Slalom”

En este caso se empieza con el vehículo parado y se acelera hasta llegar a cierta

velocidad, después se realizan varios giros alternativos izquierda/derecha y finalmente se frena. Aunque en este caso también existe una aceleración y una frenada, la parte característica es la aceleración lateral.

Los datos de entrada son los siguientes:

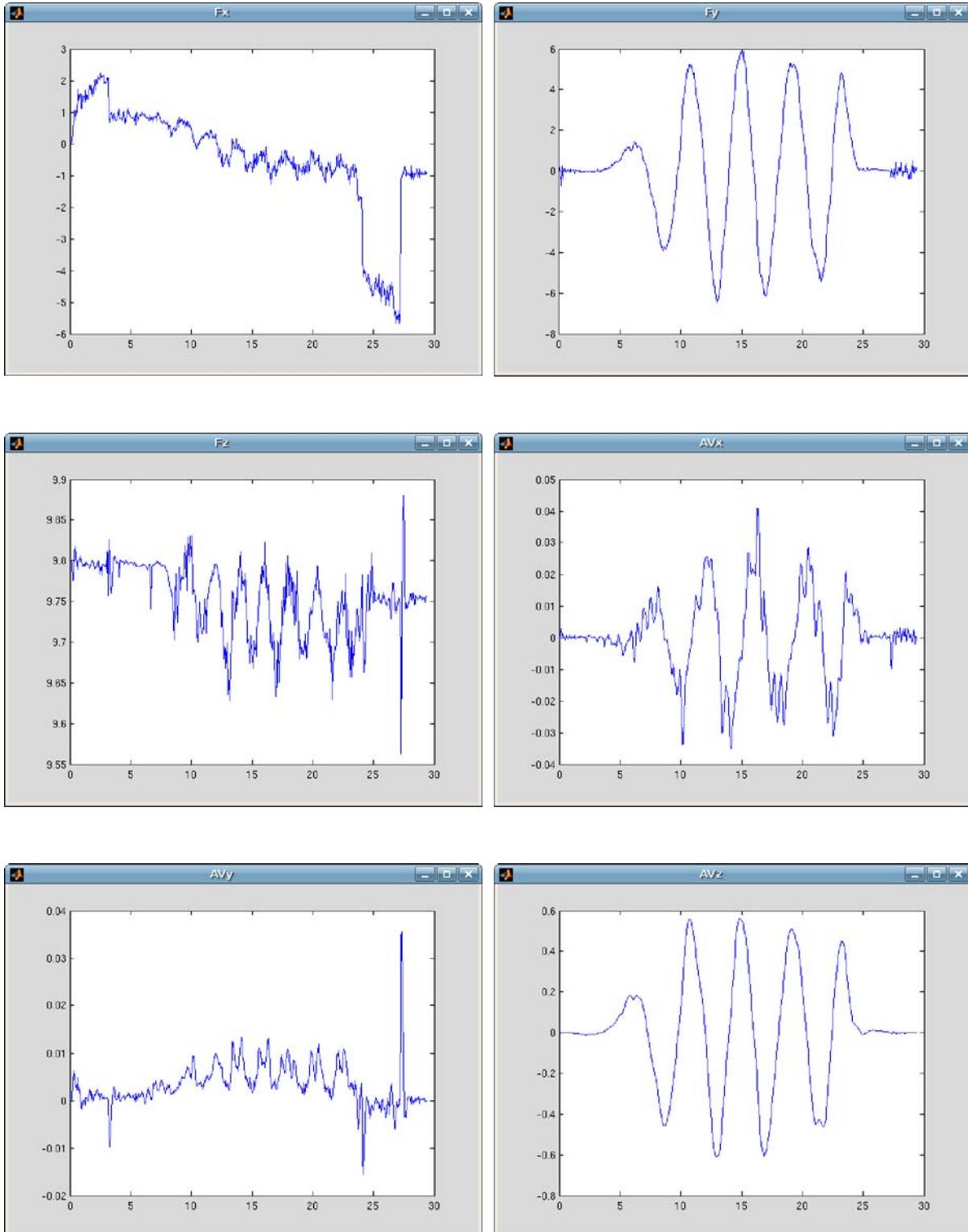
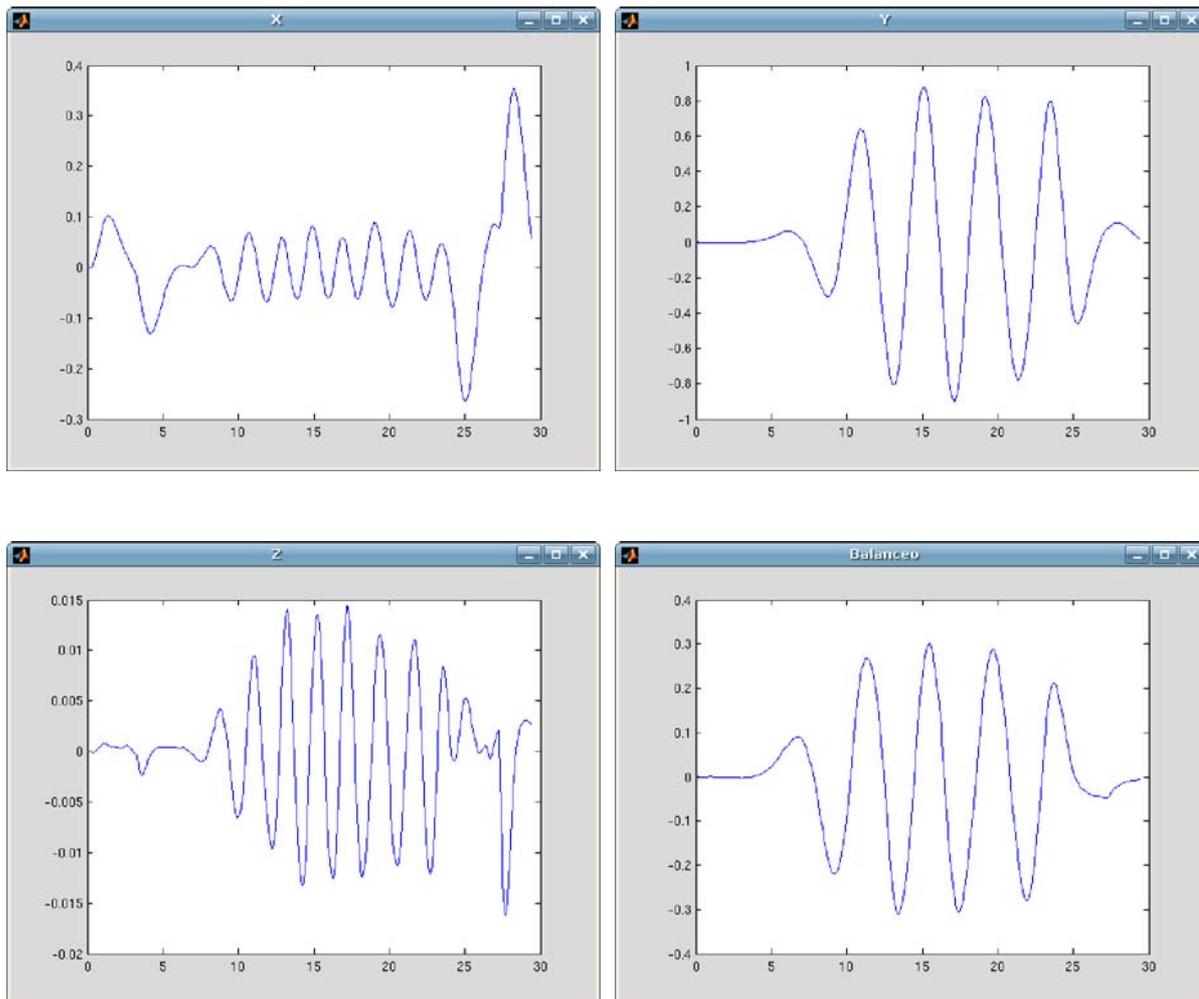


Figura 2.53. Datos de entrada

Para las tres arquitecturas de plataformas analizadas obtenemos los siguientes resultados:

I) Plataforma hexápoda:

Las siguientes gráficas representan los seis grados de libertad de la plataforma hexápoda resultantes de la simulación de los datos de entrada.



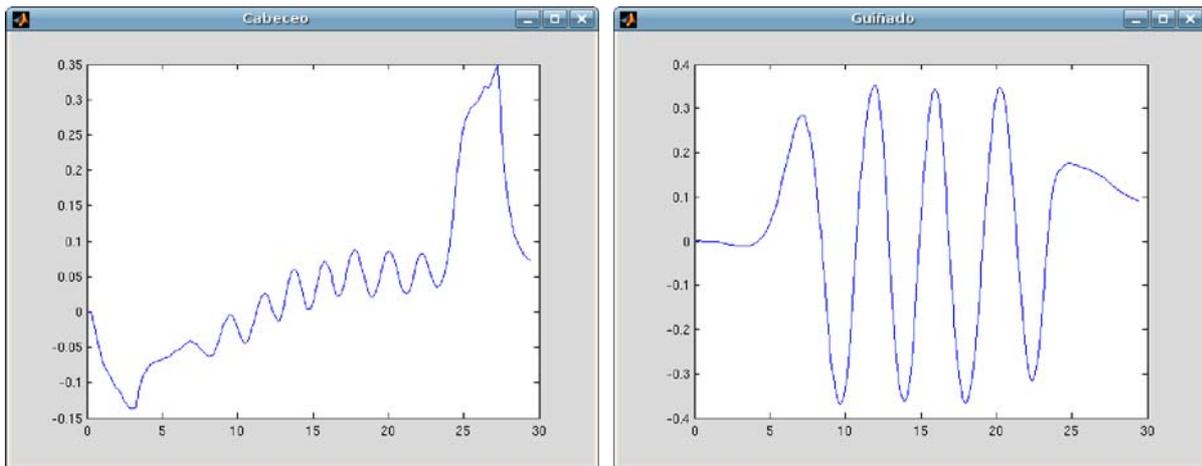
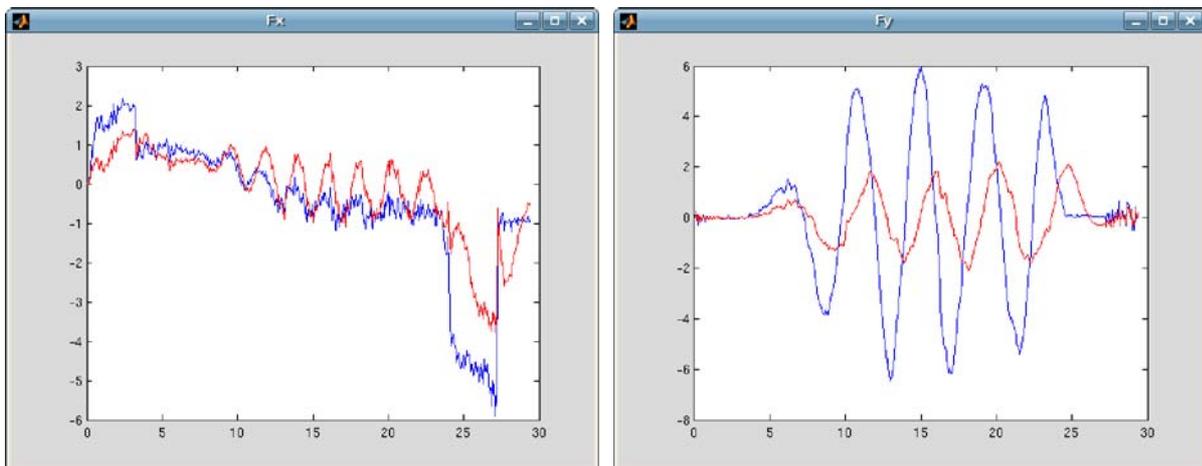


Figura 2.54. Grados de libertad de la plataforma

En las siguientes gráficas están representadas las variables de entrada y las variables simuladas. La línea azul corresponde con la variable de entrada y la roja con la variable simulada por la plataforma.



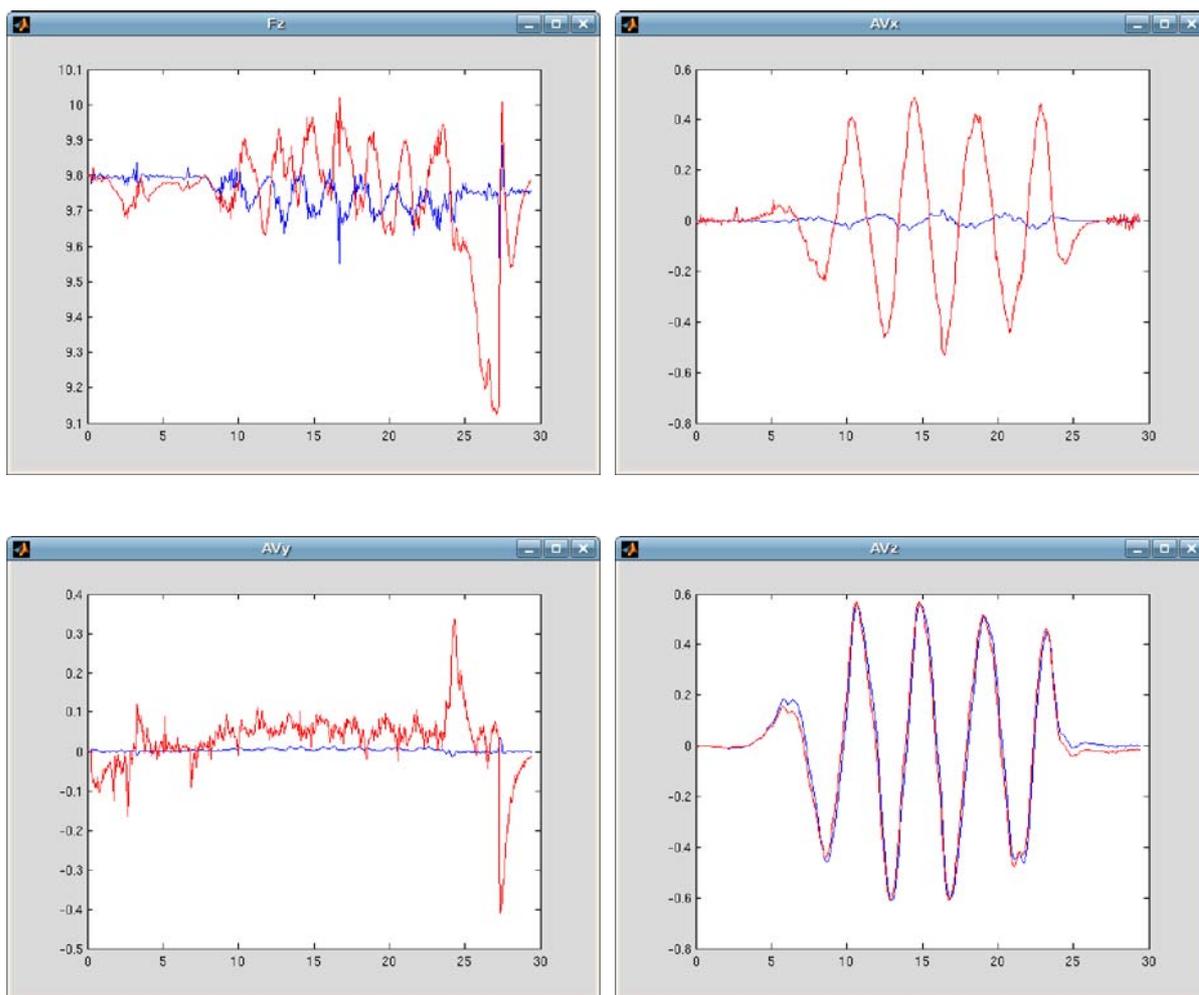


Figura 2.55. Datos de entrada y datos simulados por la plataforma

A continuación está representada la percepción de movimiento para cada una de las variables anteriores. La línea azul corresponde con la variable de entrada y la roja con la variable simulada por la plataforma.

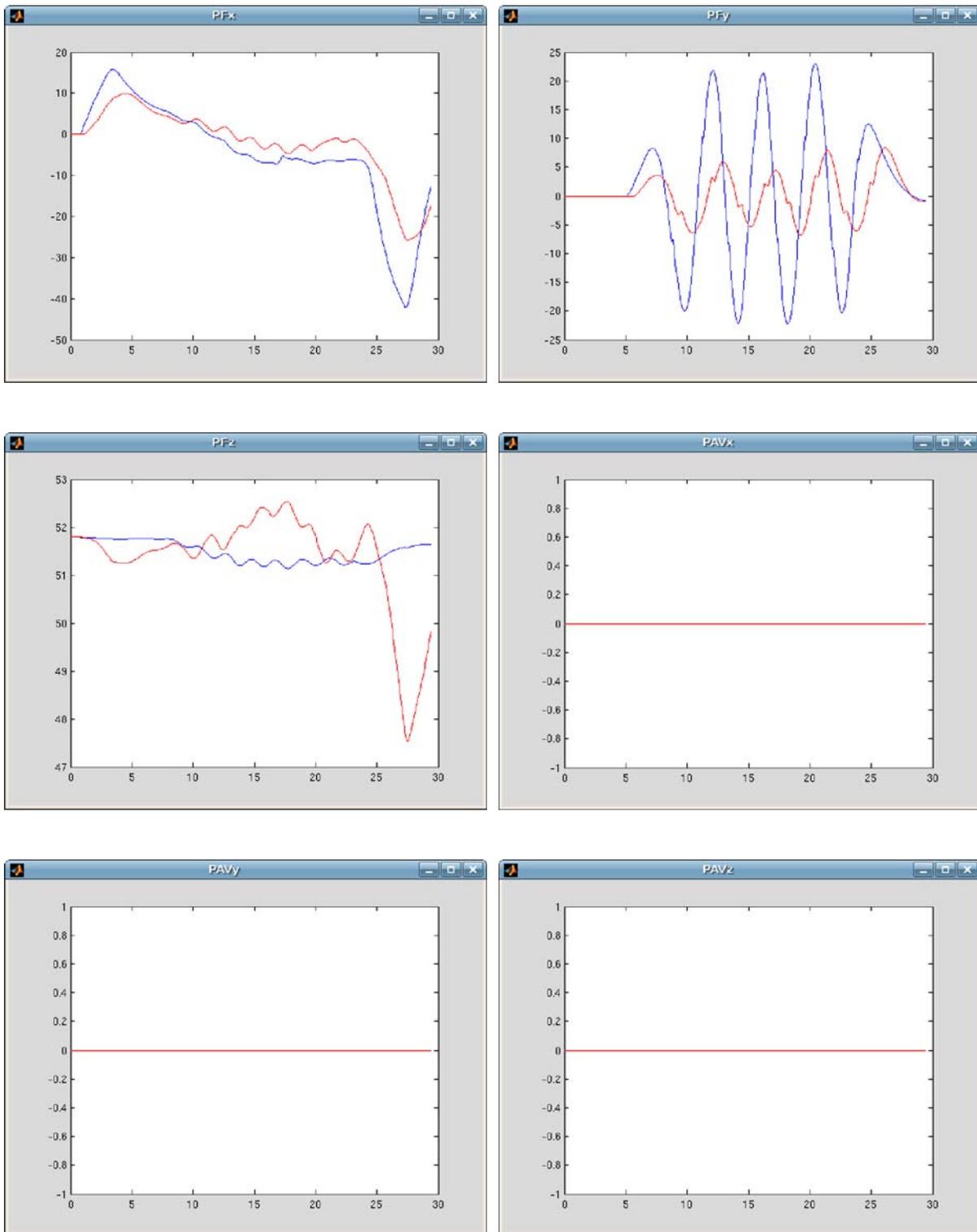


Figura 2.56. Percepción del movimiento real y del simulado por la plataforma

II) Plataforma esférica/paralelogramos:

Como hemos visto anteriormente, la plataforma esférica y la plataforma de paralelogramos tienen características similares, por lo que el análisis lo realizaremos conjuntamente.

Las siguientes gráficas representan los seis grados de libertad de la plataforma esférica/paralelogramos resultantes de la simulación de los datos de entrada.

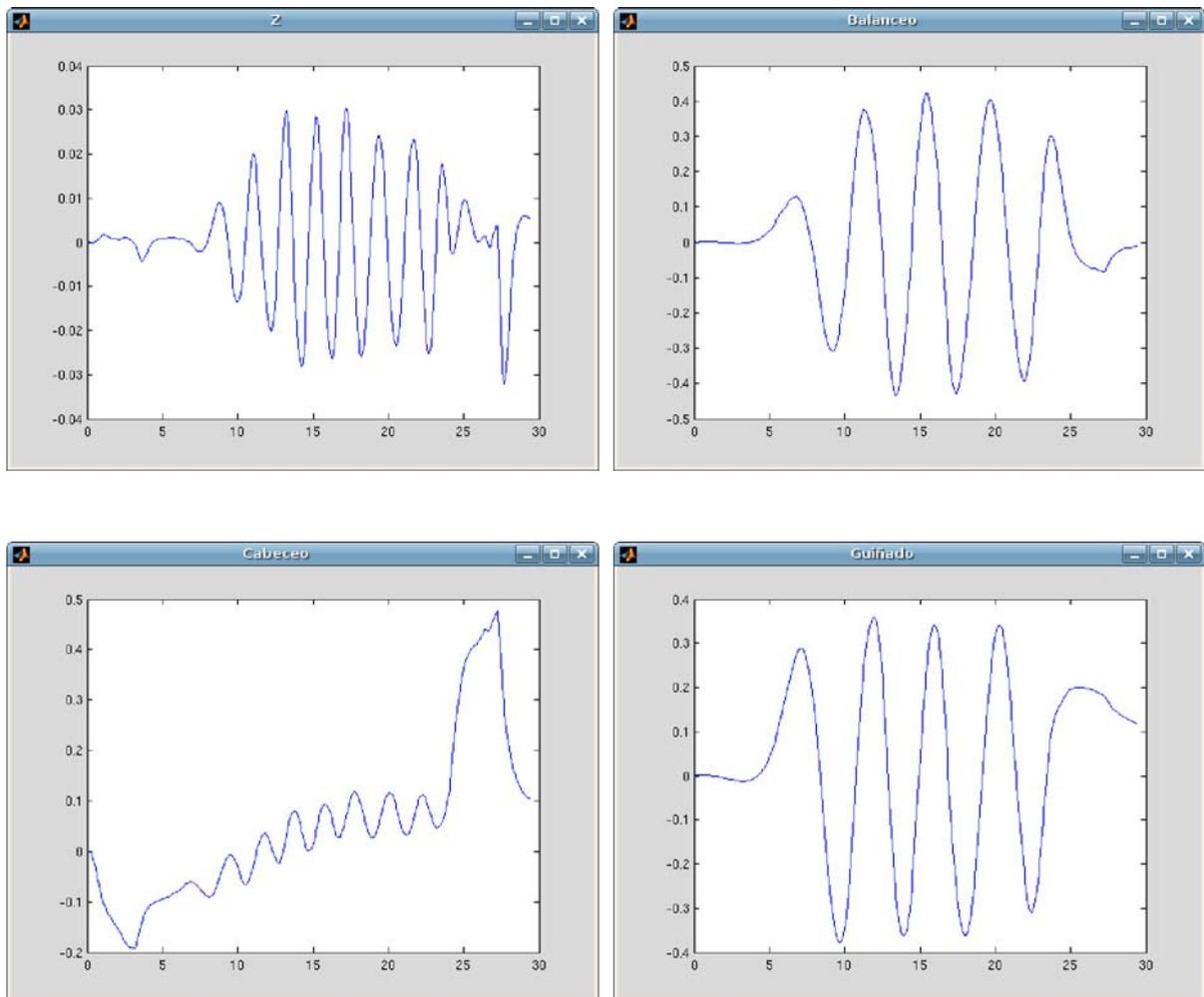


Figura 2.57. Grados de libertad de la plataforma

En las siguientes gráficas están representadas las variables de entrada y las variables simuladas. La línea azul corresponde con la variable de entrada y la roja con la variable simulada por la plataforma.

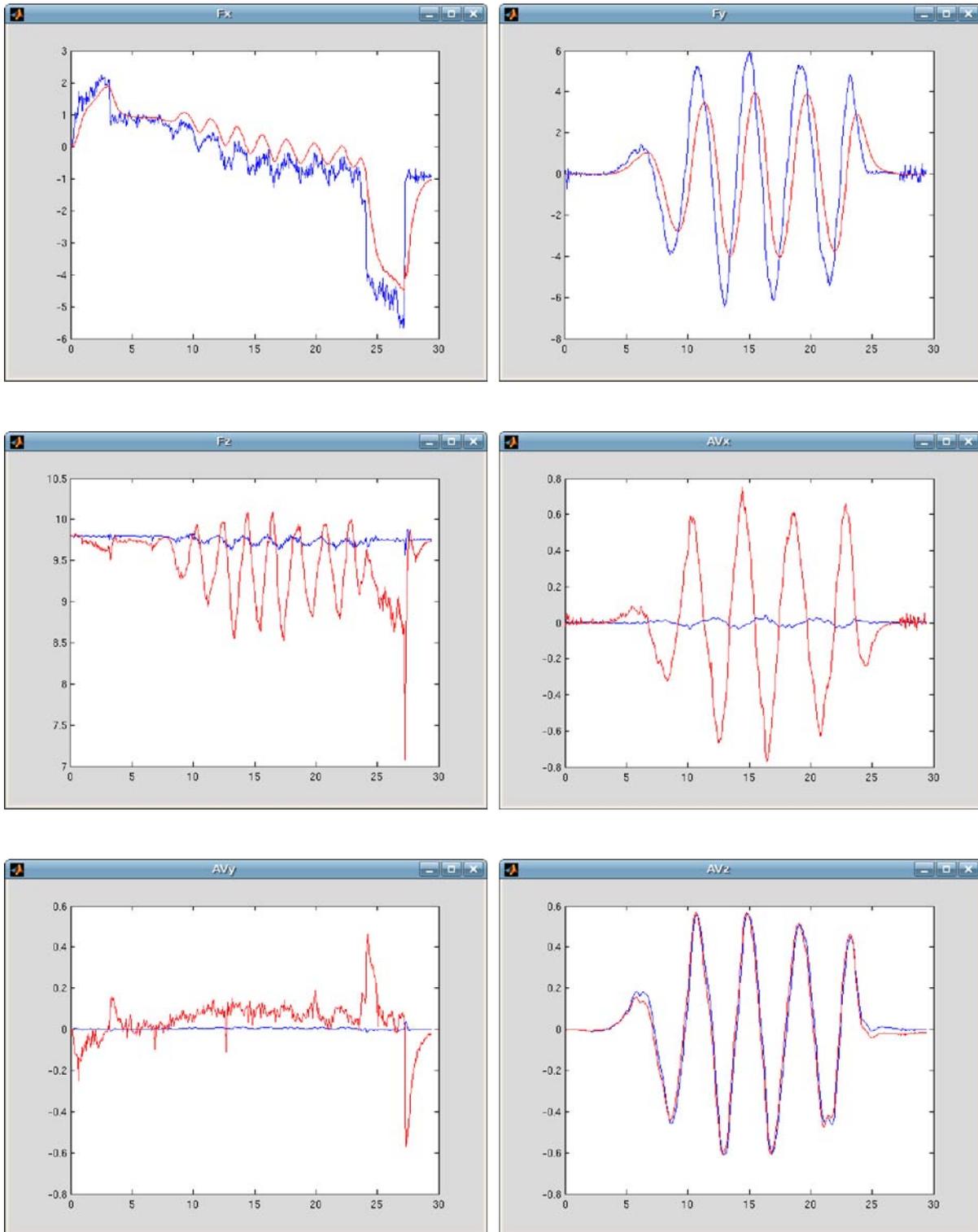


Figura 2.58. Datos de entrada y datos simulados por la plataforma

A continuación está representada la percepción de movimiento para cada una de las variables anteriores. La línea azul corresponde con la variable de entrada y la roja con la variable simulada por la plataforma.

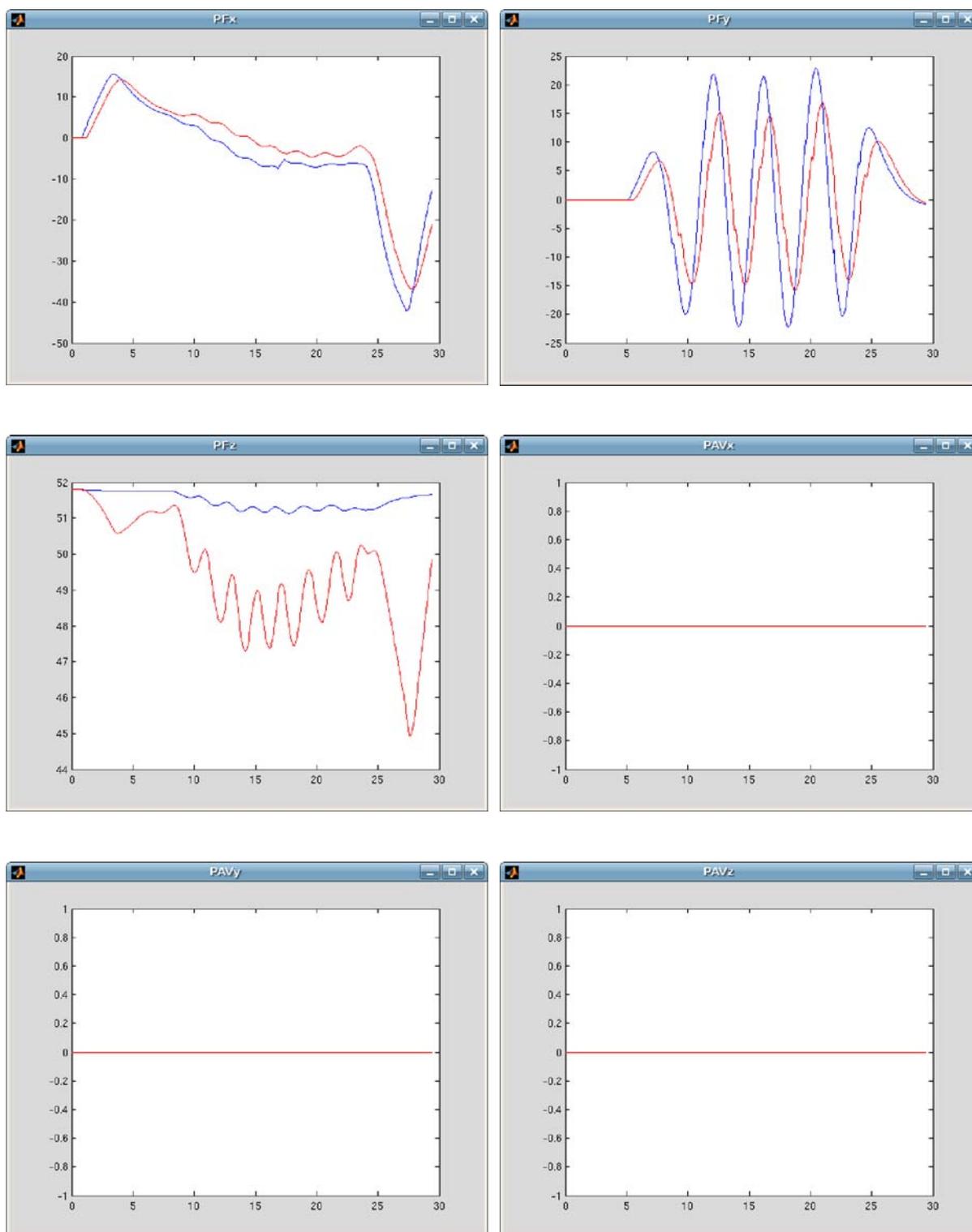


Figura 2.59. Percepción del movimiento real y del simulado por la plataforma

III) Plataforma sobre raíles:

Las siguientes gráficas representan los seis grados de libertad de la plataforma

sobre railes resultantes de la simulación de los datos de entrada.

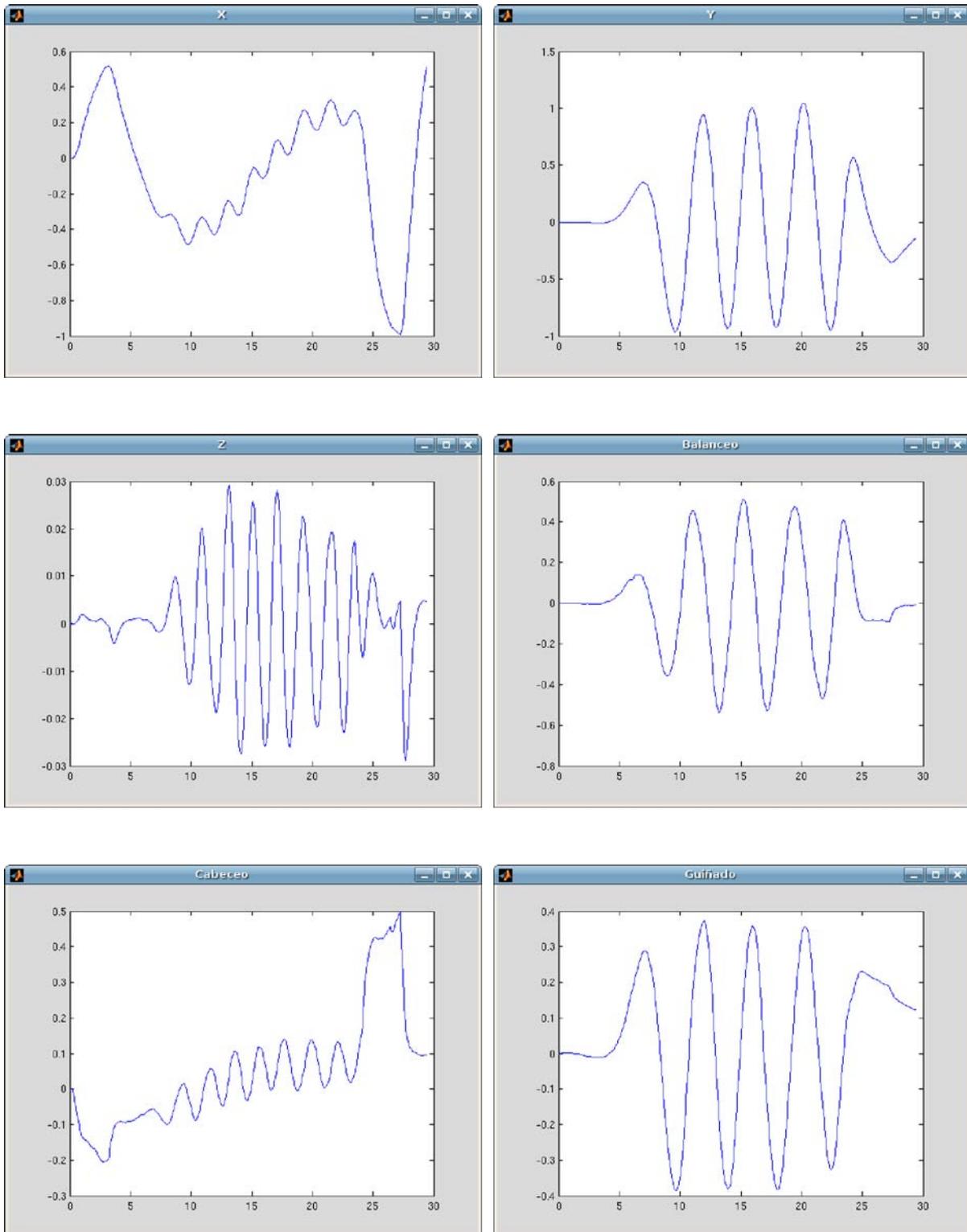


Figura 2.60. Grados de libertad de la plataforma

En las siguientes gráficas están representadas las variables de entrada y las variables simuladas. La línea azul corresponde con la variable de entrada y la roja con la variable simulada por la plataforma.

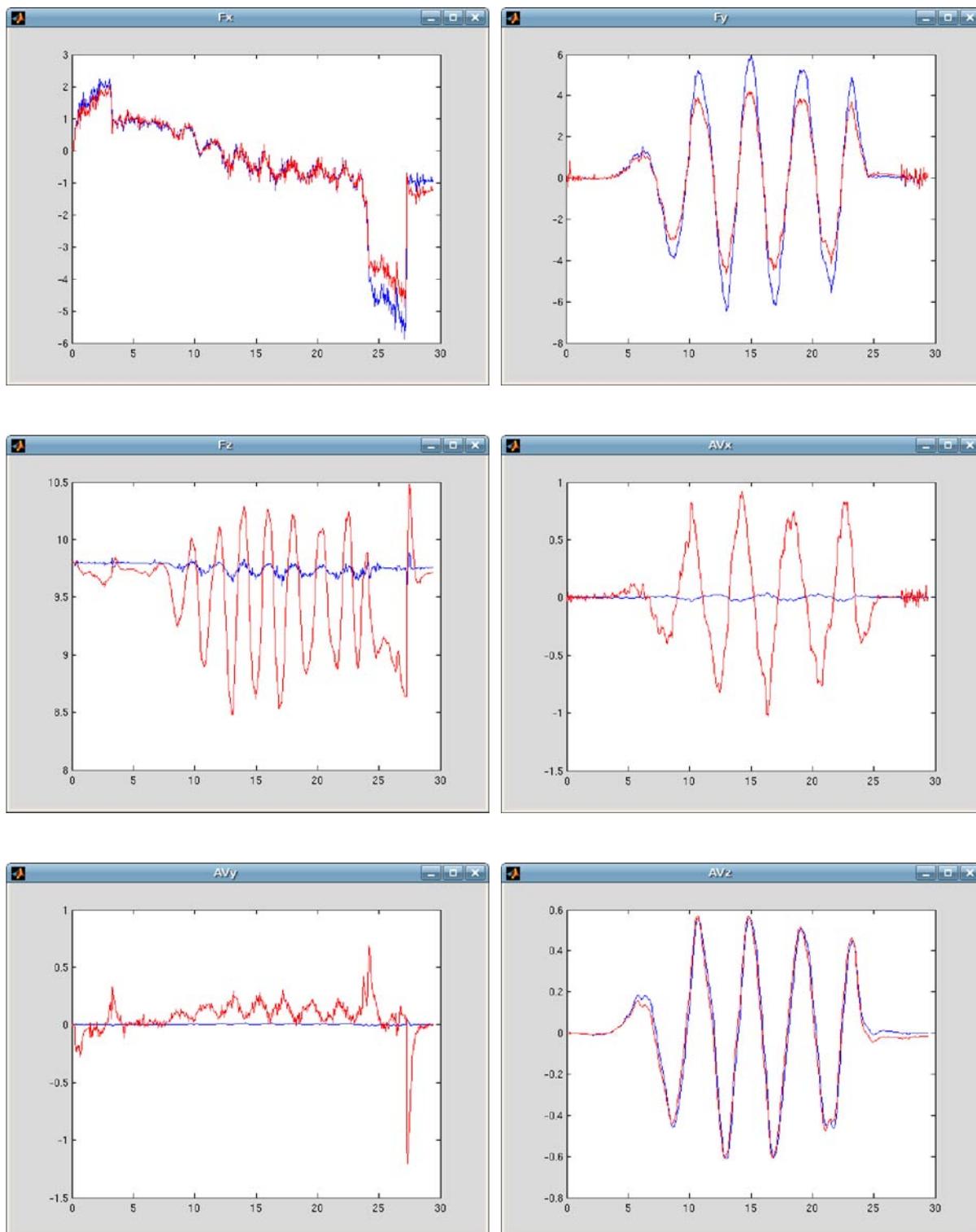


Figura 2.61. Datos de entrada y datos simulados por la plataforma

A continuación está representada la percepción de movimiento para cada una de las variables anteriores. La línea azul corresponde con la variable de entrada y la roja con la variable simulada por la plataforma.

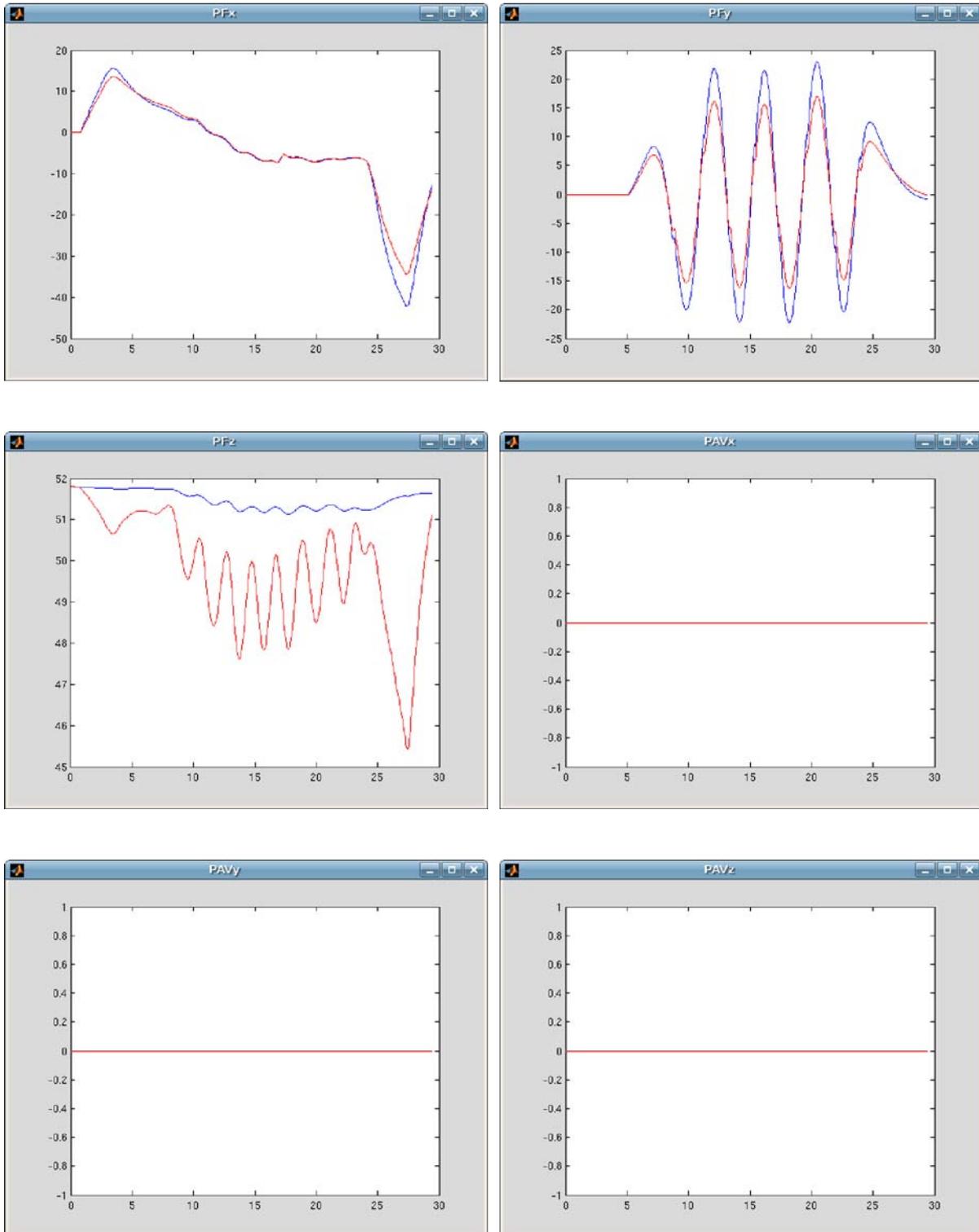


Figura 2.62. Percepción del movimiento real y del simulado por la plataforma

Conclusiones:

Como en el caso anterior la velocidad angular de esta simulación queda por debajo del umbral de percepción, por lo que las gráficas de percepción de la velocidad angular son nulas.

De la misma manera, la plataforma sobre raíles demuestra sus ventajas frente a las otras dos arquitecturas. En este caso se puede apreciar en la percepción de la fuerza específica lateral F_y . La gráfica de la percepción según los datos de entrada está representada en azul, en la plataforma hexápoda en rojo, en la plataforma esférica/paralelogramos en verde y en la plataforma sobre raíles en negro.

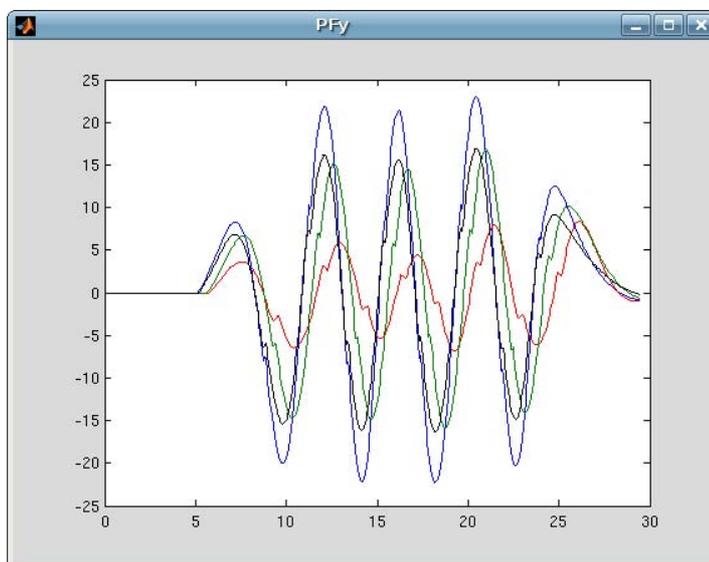


Figura 2.63. Percepción de la fuerza específica lateral

2.6.9.4. Caso 3: “Baches”

En este caso se empieza con el vehículo parado y se acelera hasta llegar a cierta velocidad, se pasa por una zona de baches y finalmente se frena bruscamente hasta la total detención del vehículo. En este caso la aceleración vertical es la señal dominante.

Los datos de entrada son los siguientes:

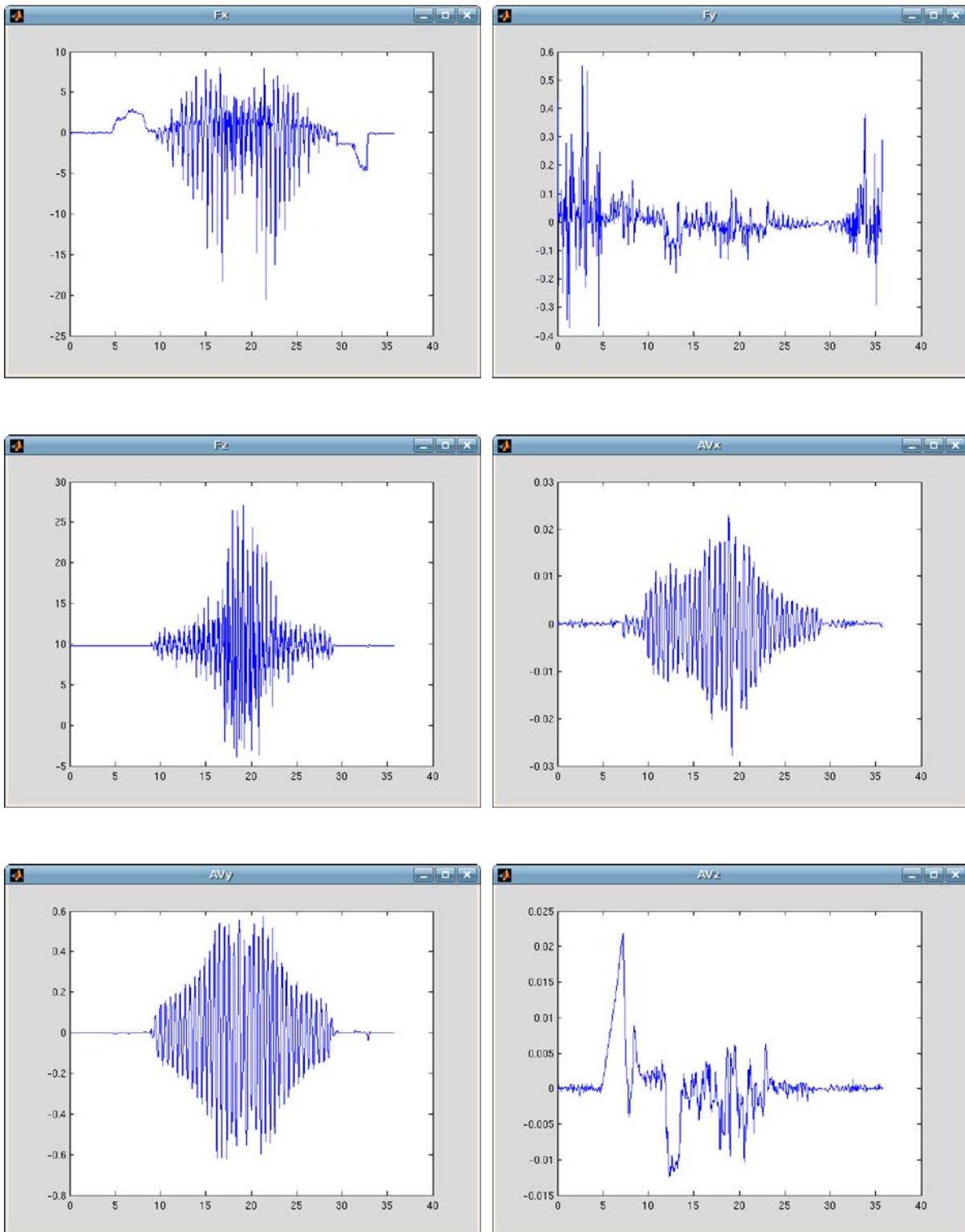


Figura 2.64. Datos de entrada

Para las tres arquitecturas de plataformas analizadas obtenemos los siguientes resultados:

I) Plataforma hexápoda:

Las siguientes gráficas representan los seis grados de libertad de la plataforma hexápoda resultantes de la simulación de los datos de entrada.

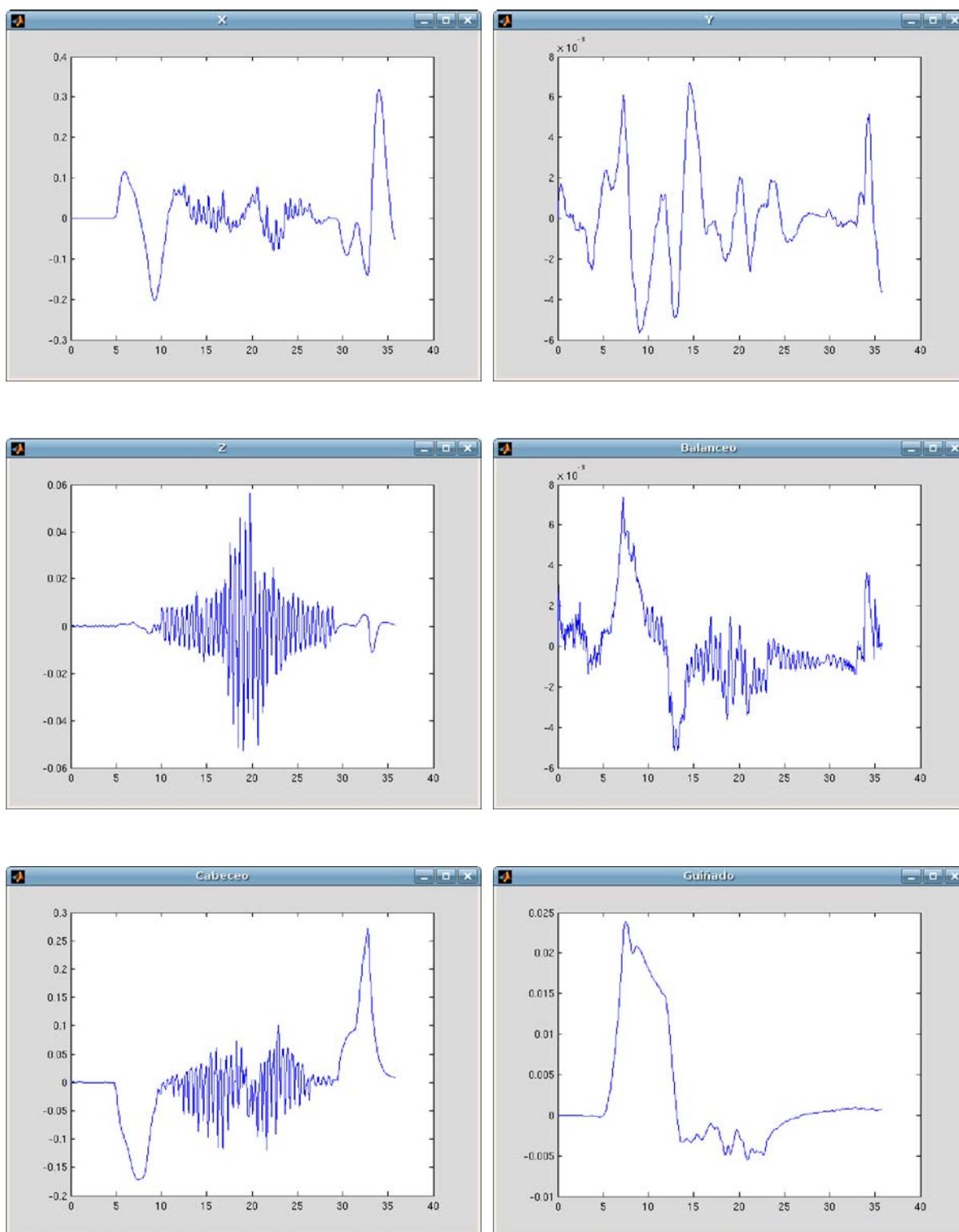


Figura 2.65. Grados de libertad de la plataforma

En las siguientes gráficas están representadas las variables de entrada y las variables simuladas. La línea azul corresponde con la variable de entrada y la roja con la variable simulada por la plataforma.

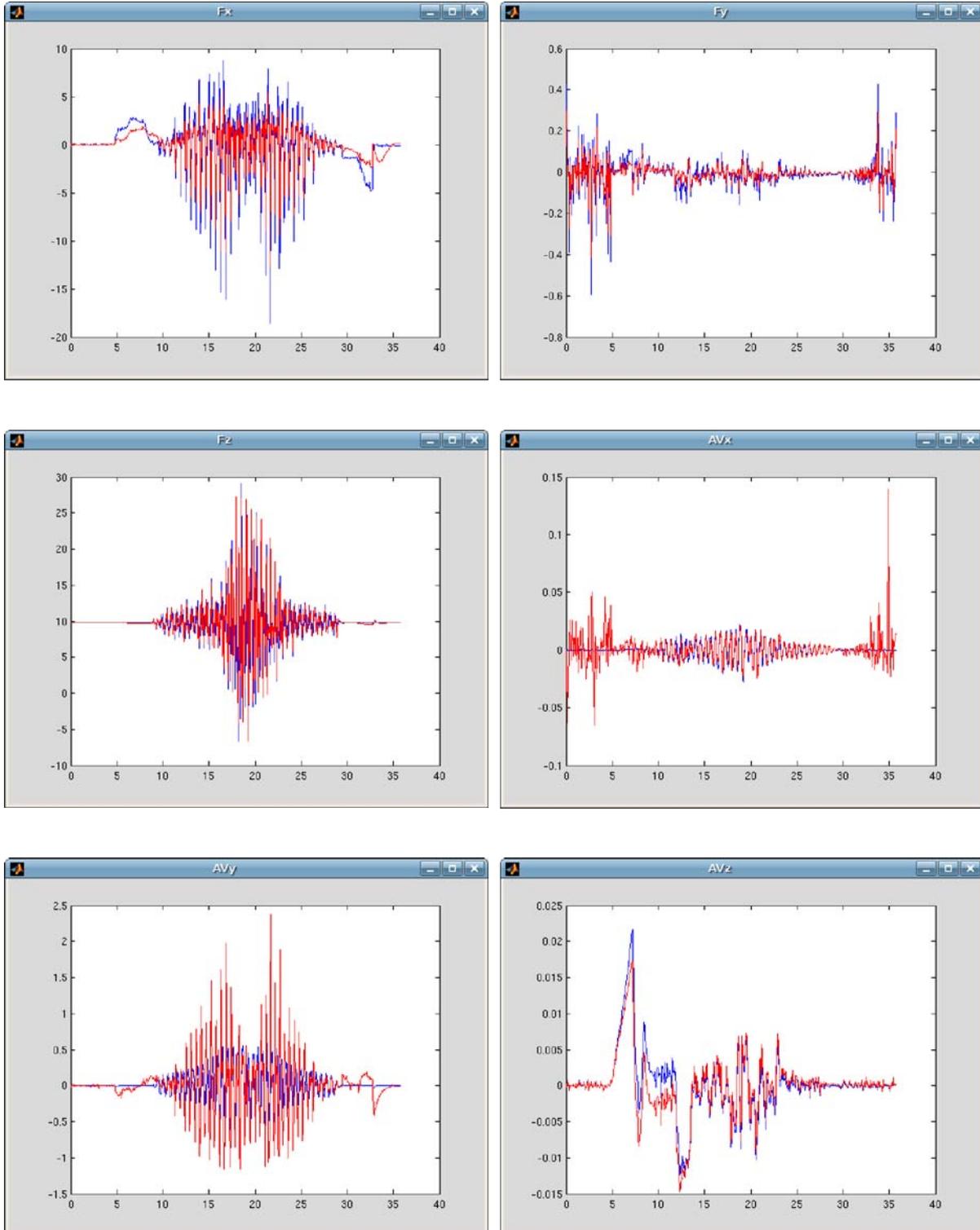


Figura 2.66. Datos de entrada y datos simulados por la plataforma

A continuación está representada la percepción de movimiento para cada una de las variables anteriores. La línea azul corresponde con la variable de entrada y la roja con la variable simulada por la plataforma.

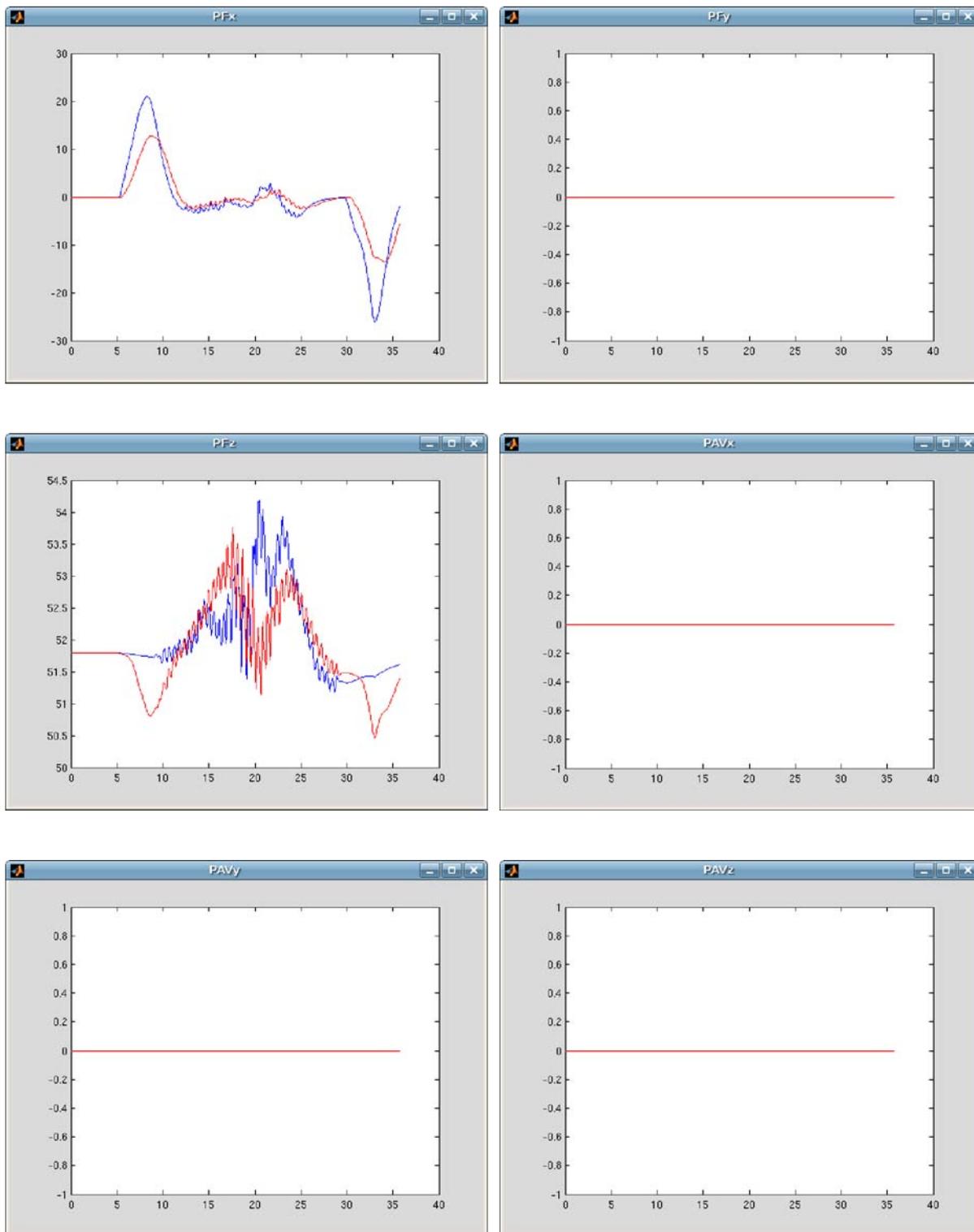


Figura 2.67. Percepción del movimiento real y del simulado por la plataforma

II) Plataforma esférica/paralelogramos:

Como hemos visto anteriormente, la plataforma esférica y la plataforma de paralelogramos tienen características similares, por lo que el análisis lo realizaremos conjuntamente.

Las siguientes gráficas representan los seis grados de libertad de la plataforma esférica/paralelogramos resultantes de la simulación de los datos de entrada.

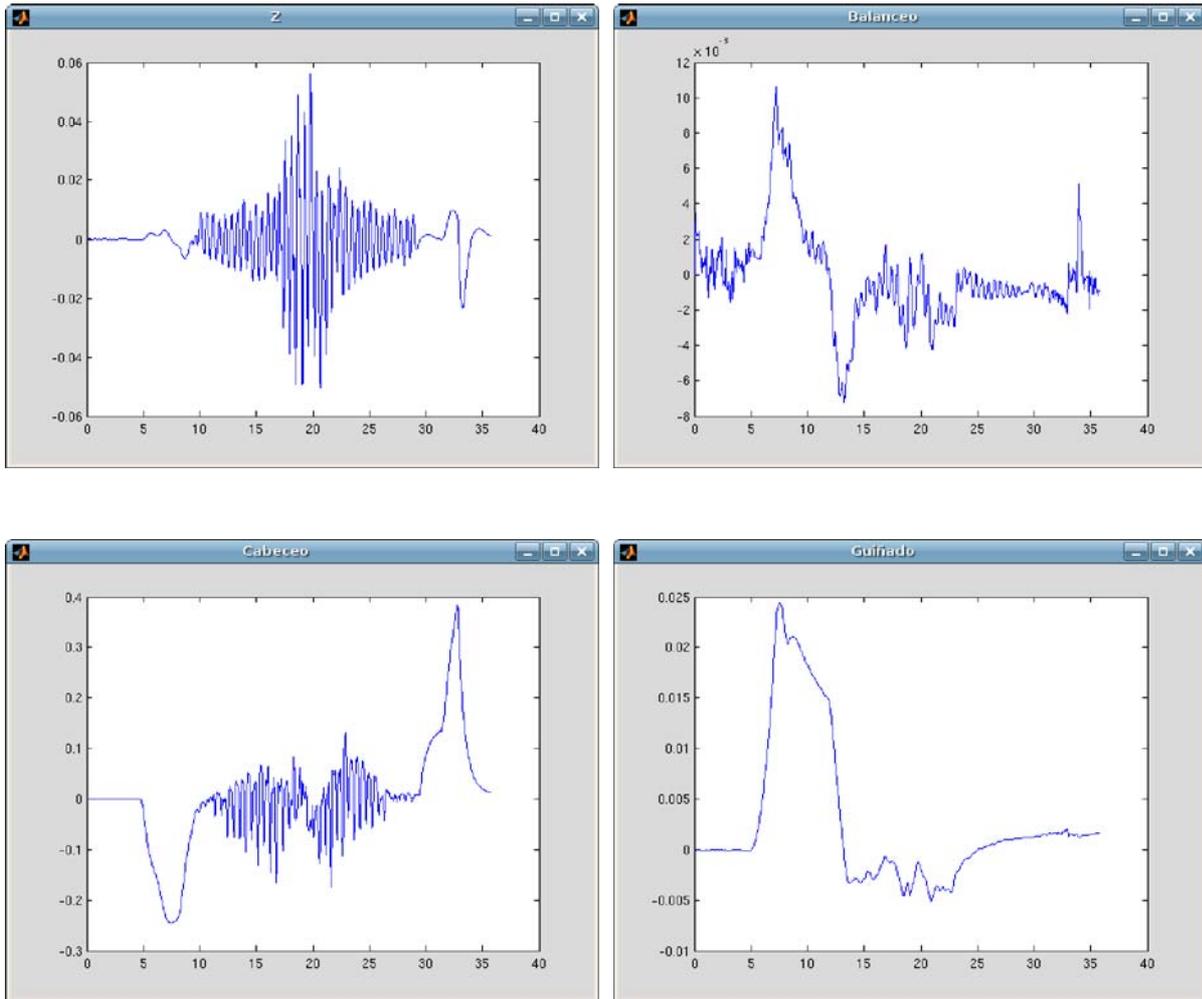


Figura 2.68. Grados de libertad de la plataforma

En las siguientes gráficas están representadas las variables de entrada y las variables simuladas. La línea azul corresponde con la variable de entrada y la roja con la variable simulada por la plataforma.

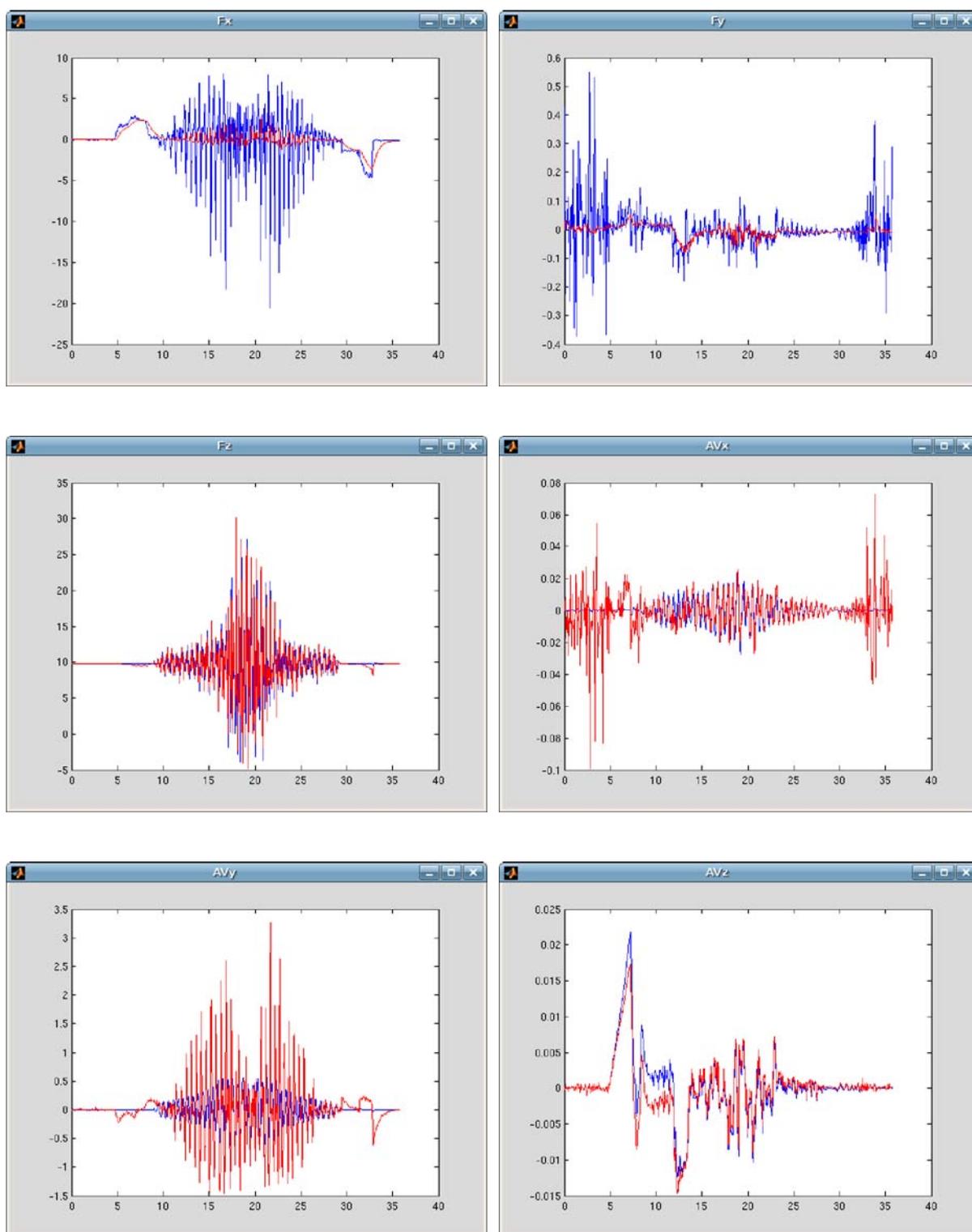


Figura 2.69. Datos de entrada y datos simulados por la plataforma

A continuación está representada la percepción de movimiento para cada uno de las variables anteriores. La línea azul corresponde con la variable de entrada y la roja con la variable simulada por la plataforma.

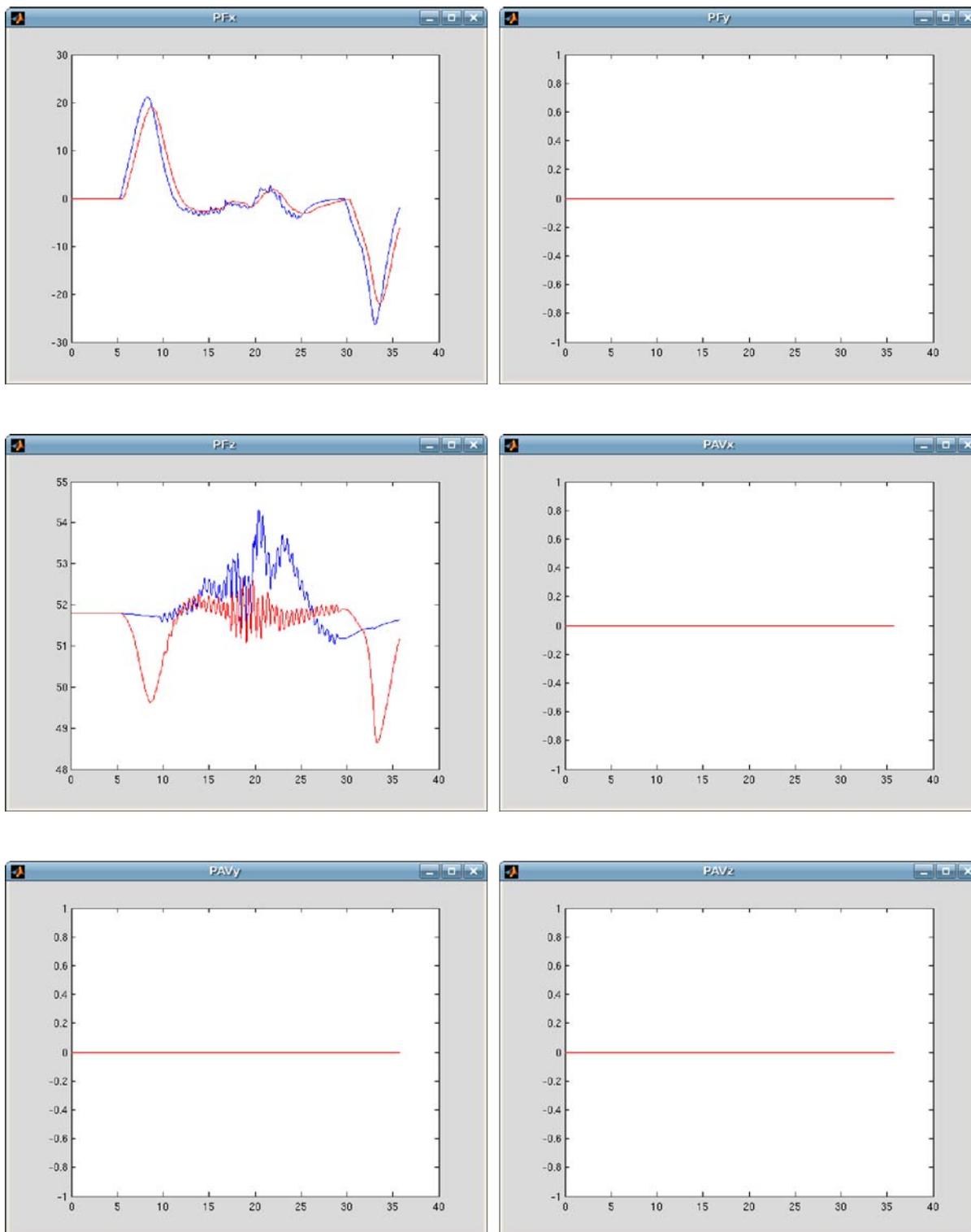


Figura 2.70. Percepción del movimiento real y del simulado por la plataforma

III) Plataforma sobre raíles:

Las siguientes gráficas representan los seis grados de libertad de la plataforma

sobre raíles resultantes de la simulación de los datos de entrada.

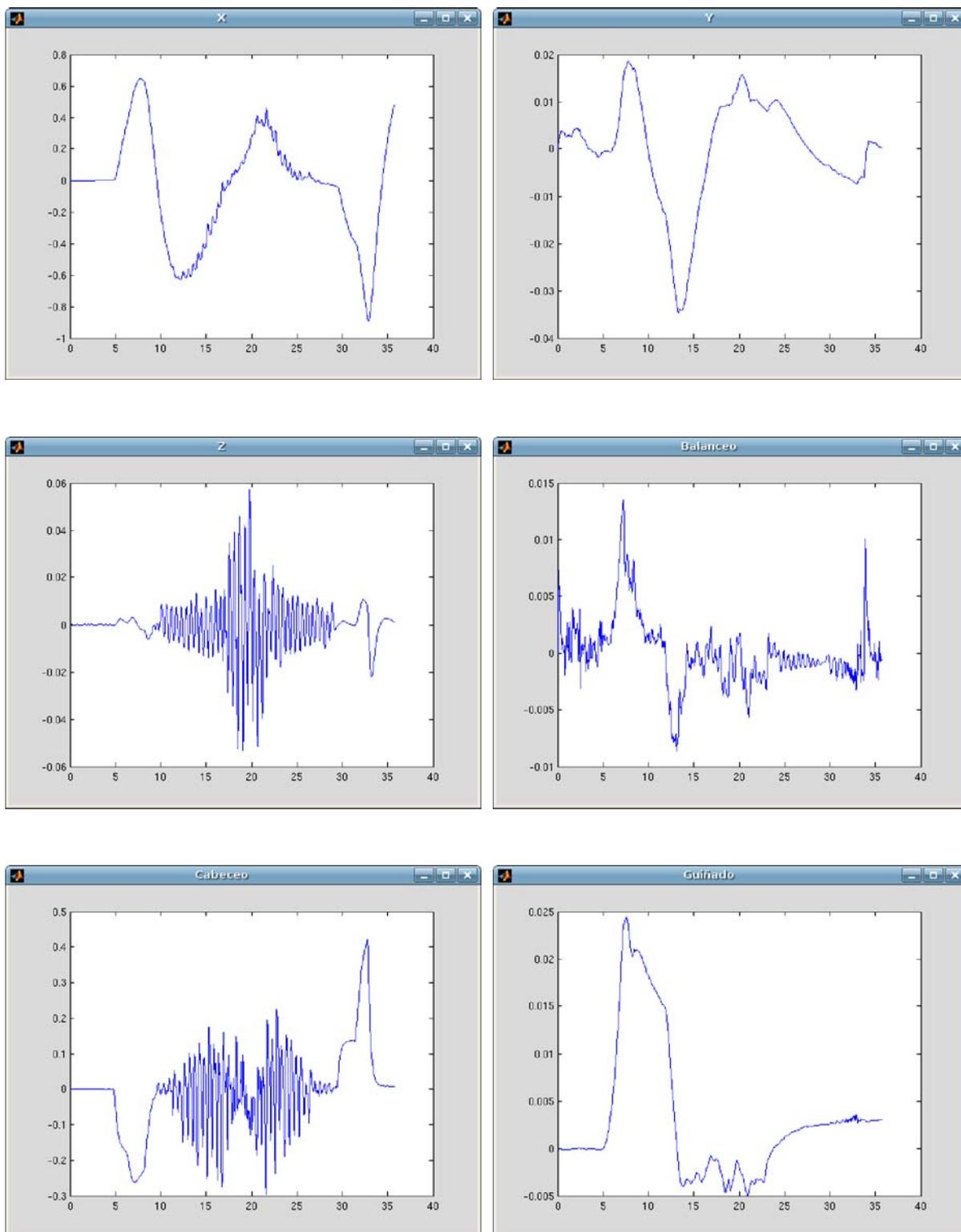


Figura 2.71. Grados de libertad de la plataforma

En las siguientes gráficas están representadas las variables de entrada y las variables simuladas. La línea azul corresponde con la variable de entrada y la roja con la variable simulada por la plataforma.

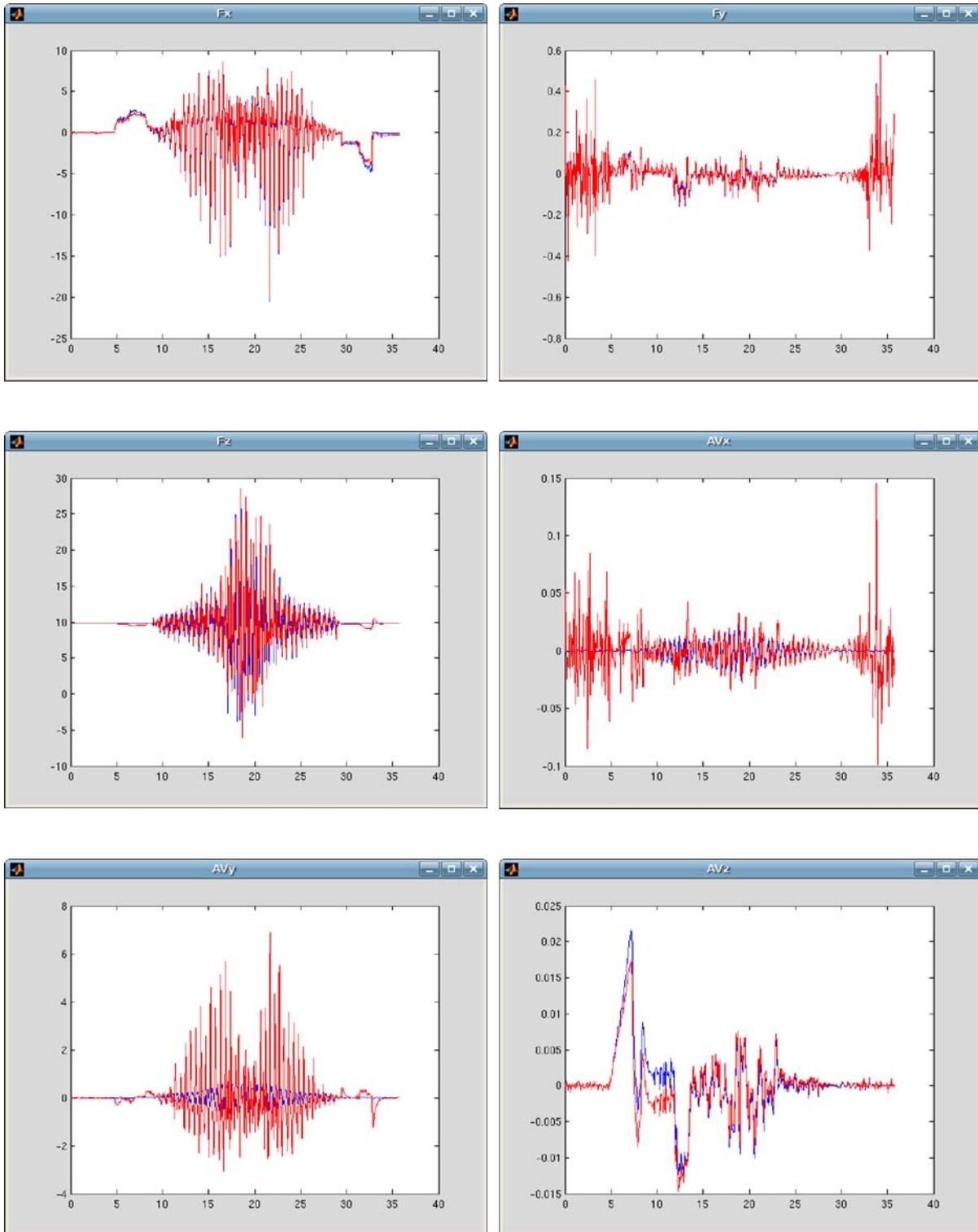


Figura 2.72. Datos de entrada y datos simulados por la plataforma

A continuación está representada la percepción de movimiento para cada una de

las variables anteriores. La línea azul corresponde con la variable de entrada y la roja con la variable simulada por la plataforma.

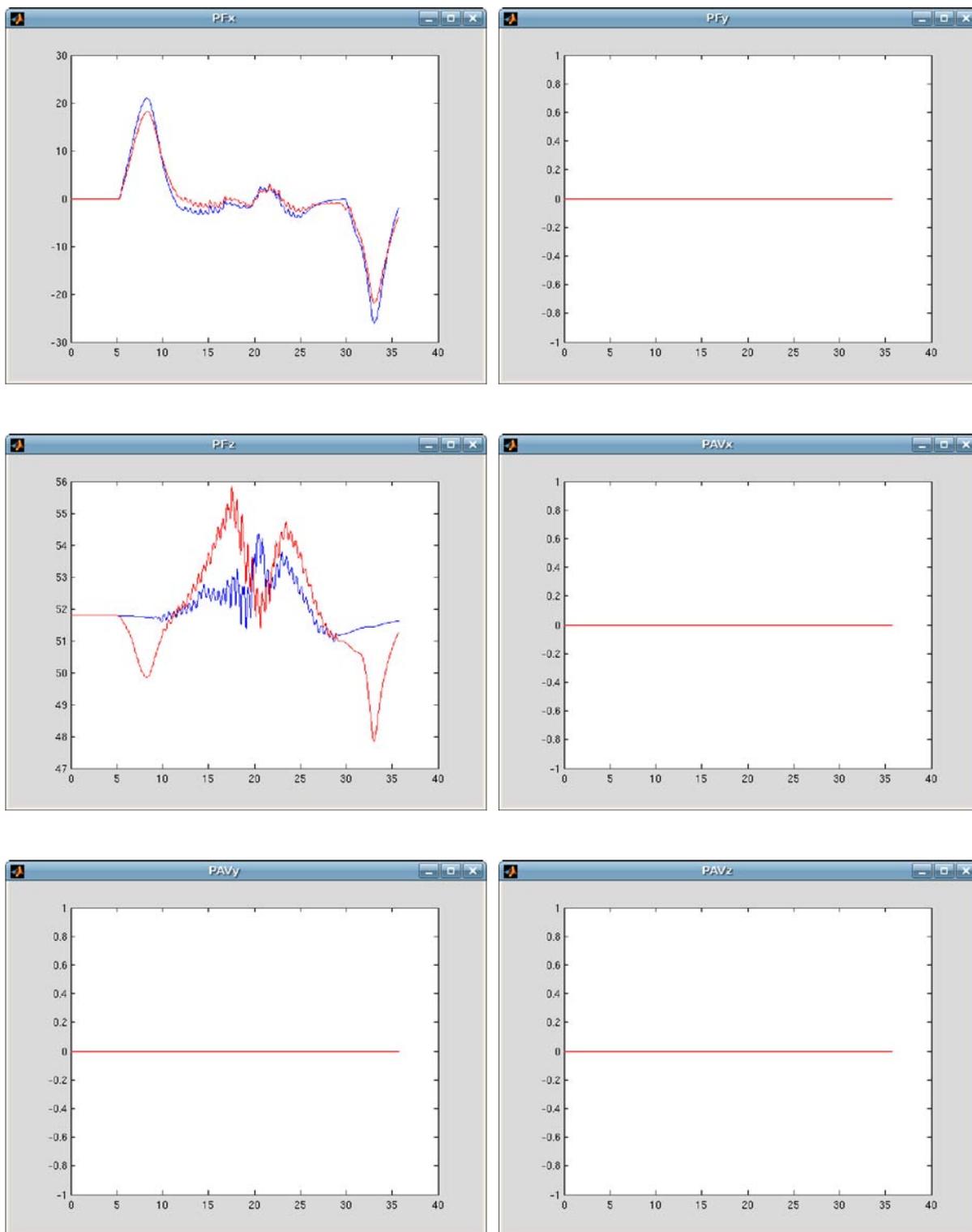


Figura 2.73. Percepción del movimiento real y del simulado por la plataforma

Conclusiones:

En este caso la aceleración vertical es la característica más importante. Las tres arquitecturas de plataformas nos dan un comportamiento similar respecto a la fuerza específica vertical y no se podría decir cual es capaz de simular mejor en este aspecto.

2.6.9.5. Conclusiones

Cada uno de los tres casos anteriores refleja el comportamiento de cada plataforma en diversas simulaciones. Sin lugar a dudas la plataforma esférica o de paralelogramos sobre raíles presenta ventajas respecto a las otras dos arquitecturas. Por una parte la carencia de dos grados de libertad de las plataformas esférica y de paralelogramos hace que pierdan rapidez frente a aceleraciones bruscas, por lo que se puede producir cierta sensación de retraso en el movimiento. La plataforma hexápoda sin embargo, aunque posee los 6 grados de libertad, el rango de estos resulta escaso. Es capaz de realizar una buena simulación para pequeñas aceleraciones, pero no resulta tan eficiente en altas aceleraciones.

Sin embargo la adición de raíles a la plataforma esférica o de paralelogramos presenta grandes complejidades no solo técnicas, sino de espacio. Hace falta bastante espacio para poder construir raíles realmente efectivos, ya que un sistema de raíles demasiado corto no mejoraría sustancialmente la simulación y sin embargo su construcción seguiría siendo igual de complicada.

Como conclusión podría decirse que para aplicaciones relativamente sencillas en las que no intervengan grandes aceleraciones, la plataforma hexápoda, debido a su simplicidad técnica y asentamiento en el mercado de simuladores, sería la mejor opción. Sin embargo si se requiere simular altas aceleraciones, la plataforma esférica o de paralelogramos son capaces de simularlas sin perder eficacia respecto a la plataforma hexápoda. Y para aplicaciones en las que se quiera conseguir un mayor grado de realismo se tendría que recurrir a una plataforma sobre raíles.

CAPÍTULO 3

DESARROLLO Y PRUEBAS DE UN SISTEMA INTEGRADO DE TELEOPERACIÓN/TELEPRESENCIA

3.1. Introducción

El proyecto *TeleDrive* [58] ha sido clave para el desarrollo de esta tesis. En este proyecto, financiado por la Comunidad Europea bajo el programa IST, se desarrolló un sistema eficiente de teleoperación para su uso en intervenciones remotas, entretenimiento e investigación, llevándose a la práctica los conceptos de teleoperación y telepresencia explicados en los capítulos anteriores.

En las aplicaciones actuales de teleoperación el puesto en el que trabaja el operador remoto, llamado estación central de control, es relativamente sencillo, reduciéndose a dos elementos fundamentales: sistema de visión y sistema de control. En el proyecto *TeleDrive* se amplió la capacidad y eficiencia de la estación central de control añadiendo estímulos vestibulares mediante el uso de plataformas móviles. De esta manera el operador remoto posee más información del ambiente remoto y puede llevar a cabo las tareas de una forma más natural y eficiente. En otras palabras, en el proyecto *TeleDrive* se puso en práctica el concepto de telepresencia.

Además del gran avance que supuso el uso de plataformas móviles en la teleoperación de vehículos, se desarrolló completamente una red de teleoperación a través de Internet, añadiendo al esquema clásico de teleoperación operador-vehículo el supervisor remoto y los pasajeros virtuales.

3.2. Funcionamiento del sistema

3.2.1. Introducción

El esquema de teleoperación desarrollado en este proyecto es un sistema complejo formado por varios subsistemas que interactúan entre sí.

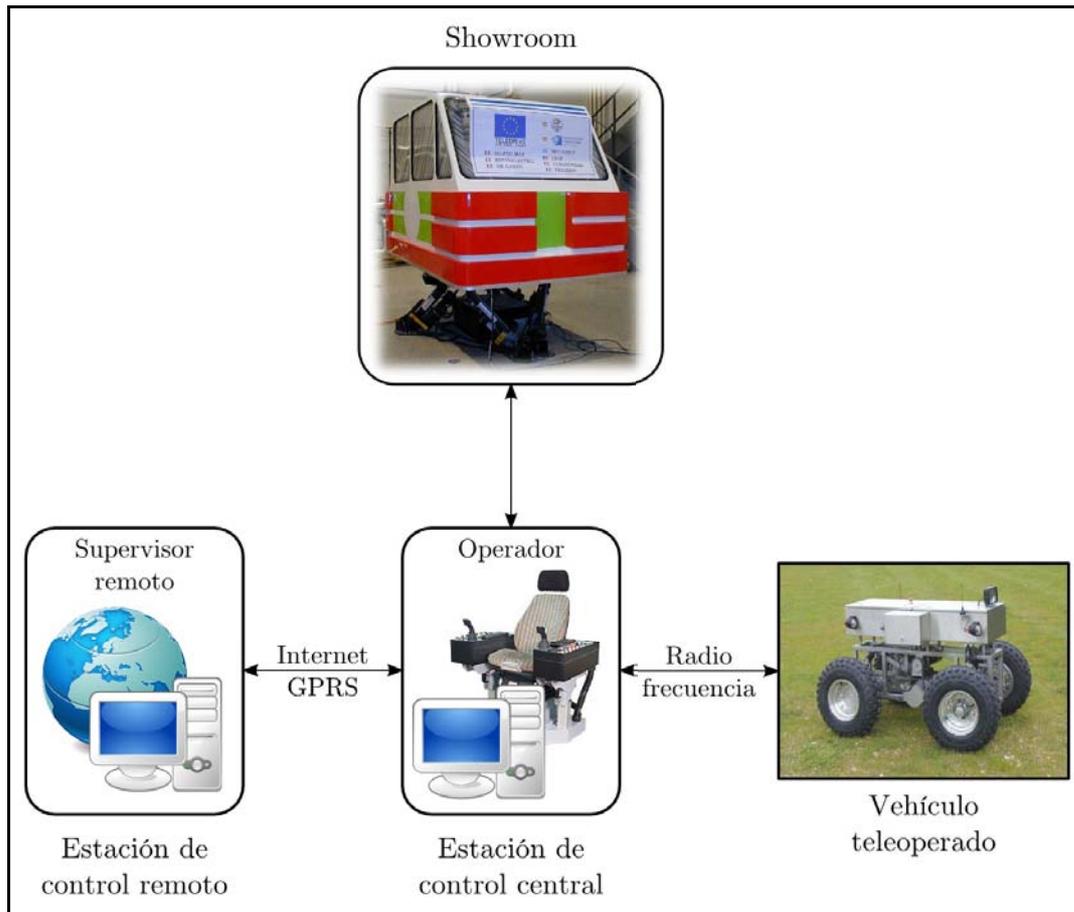


Figura 3.1. Esquema de teleoperación del proyecto TeleDrive

El *operador* es la persona que controla el vehículo teleoperado desde un puesto multisensorial situado en la *estación de control central*. Este puesto multisensorial está montado sobre una plataforma de movimiento, que provee los estímulos vestibulares, y está dotado de un sistema de vídeo mediante el cual el operador es capaz de ver las imágenes capturadas por las cámaras embarcadas en el vehículo teleoperado. De esta manera el operador siente el movimiento del vehículo teleoperado a la vez que recibe las imágenes capturadas por este, aumentando de esta manera, no solo la sensación de telepresencia, sino también la precisión en la manipulación del vehículo teleoperado.

El *supervisor remoto*, situado en la *estación de control remoto*, es la persona que controla la operación de los instrumentos y herramientas montados en el vehículo teleoperado, o bien simplemente recibe información de sensores y cámaras del

vehículo teleoperado para comprobar la seguridad del proceso (por ejemplo en aplicaciones recreativas).

El principal propósito de la estación de control remoto es la implementación de un puesto desde el cual se pueda realizar una supervisión de los subsistemas para garantizar la seguridad de la operación.

Los *pasajeros virtuales* están situados en una cabina llamada *Showroom* (en español significa literalmente *sala de muestras*, pero en este caso he preferido mantener la denominación original en inglés). Esta cabina está montada en una plataforma, de mayor tamaño y diferentes especificaciones que la usada en la estación de control central. De igual manera que en el caso de la estación de control central, se reciben tanto las imágenes como la información del movimiento del vehículo teleoperado, pero en este caso es una telepresencia pasiva. Es decir, que los pasajeros virtuales no intervienen en el proceso de teleoperación, son meros espectadores.

Esquemáticamente el intercambio de información entre los diversos subsistemas es el siguiente:

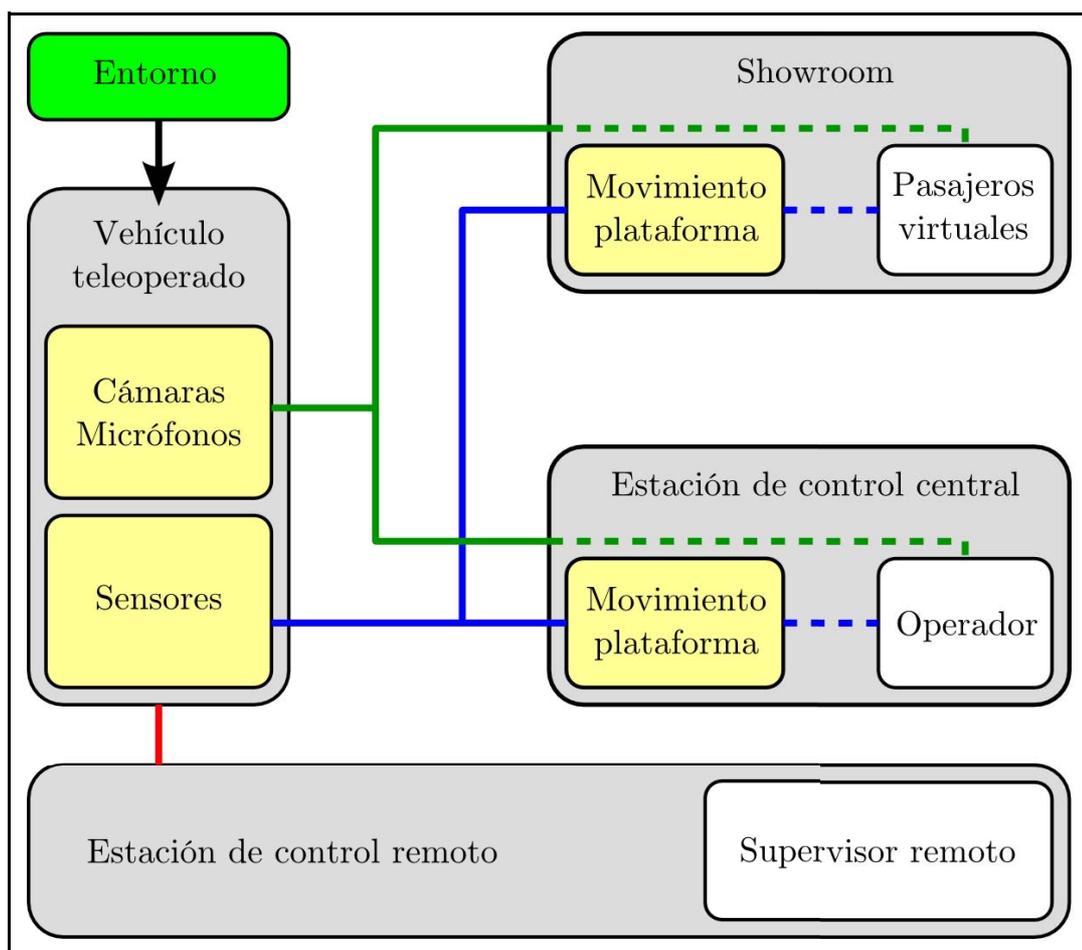


Figura 3.2. Esquema de las comunicaciones en TeleDrive

El vehículo teleoperado recoge información del entorno (audio y vídeo) y del movimiento y se la manda tanto a la estación de control central, como al *showroom*. De esta manera el operador y los pasajeros virtuales disponen de información visual y

auditiva de todo el proceso y, mediante la información de los sensores del vehículo, se simula el movimiento del vehículo teleoperado mediante una plataforma móvil.

El tratamiento y conversión de los datos de los sensores a movimiento de la plataforma se realiza de la forma mostrada en el capítulo anterior, y debe ser adaptada según el tipo de plataforma y vehículo teleoperado. Por esta razón los datos de los sensores se mandan tal cual a la estación de control central y al *showroom* y en cada uno de ellos se realizan los cálculos oportunos. En el caso del operador, los datos de vídeo, audio y movimiento del vehículo deben de llegar en tiempo real, ya que la eficiencia de la teleoperación depende en gran parte de la sincronización de la información. Es decir, es igual de importante la sincronización de todos los datos como que lleguen con el menor retraso posible. En la mayoría de las aplicaciones tendremos que procesar las señales de los sensores y cuanto más complejo sea este proceso mayor retraso induciremos. Por esta razón hay que llegar a un compromiso entre retraso y calidad del procesado.

Sin embargo en el caso del *showroom* tenemos más margen de trabajo, ya que en este caso es una telepresencia pasiva. La única condición es que los datos de vídeo y audio vayan sincronizados con el movimiento. Es decir, en caso necesario podemos aplicar un retraso voluntario o incluso reproducir datos grabados de sesiones anteriores.

Conviene hacer una aclaración al respecto. Existen numerosos sistemas de viajes virtuales en parques temáticos y ferias basados en plataformas de 2 o 3 grados de libertad en los que se sincroniza el movimiento de la cabina con el vídeo que se está reproduciendo. Estos movimientos no están capturados a la vez que el vídeo, sino que son movimientos creados manualmente a partir de las imágenes. Por lo que el *showroom* del proyecto *TeleDrive* no es un mero sistema de entretenimiento como son estas plataformas móviles.

La estación de control remoto recibe toda la información del vehículo, no solo la información que se transmite a la estación central de control y al *showroom*, sino también información adicional que pudiera tener el vehículo. En este caso, la calidad de la información es importante, pero es todavía más la cantidad de información disponible, ya que la tarea del supervisor remoto es comprobar que el proceso de teleoperación se está llevando a cabo correctamente.

La forma en la que se transmiten todos estos datos depende de la aplicación en particular y la situación física de cada uno de los subsistemas de teleoperación. Más adelante se explican los sistemas usados en el proyecto *TeleDrive*.

3.2.2. Vehículo teleoperado

Para su completa integración con el esquema de teleoperación *TeleDrive* el vehículo teleoperado debe de disponer de los elementos necesarios:

- Sistema de vídeo. El equipamiento mínimo es una cámara frontal para tener imágenes subjetivas desde el punto de vista del vehículo. Dependiendo de la aplicación podría ser necesario usar más cámaras (estáticas o móviles) para tener visión periférica.

- ▶ Sistema de navegación inercial. El vehículo debe de disponer de los sensores necesarios para capturar el movimiento. Esto es necesario para poder controlar tanto la plataforma del operador como la plataforma del *showroom*. El sistema suele estar formado por un acelerómetro triaxial, un girómetro triaxial y dos inclinómetros, aunque el cálculo del movimiento de las plataformas móviles se puede adaptar según la información disponible. Como mínimo el sistema inercial debería de contar con un acelerómetro triaxial.
- ▶ Sistema de transmisión por radio frecuencia. Este sistema debe de incluir la transmisión de las consignas de movimiento, transmisión de vídeo y transmisión de los datos capturados por el sistema de navegación inercial. Estas tres transmisiones pueden realizarse de manera independiente o combinados. Como veremos en apartados sucesivos, el vehículo terrestre usado en el proyecto *TeleDrive* usa sistemas independientes, debido a su diseño modular.

Además el vehículo teleoperado puede disponer de otros sistemas/sensores adicionales para proveer con más información al operador o al supervisor remoto.

A continuación se especifican los detalles de los vehículos teleoperados usados en el proyecto *TeleDrive*.

3.2.2.1. Vehículo terrestre

En el proyecto *TeleDrive* se usó un vehículo diseñado y construido específicamente como vehículo teleoperado. A continuación vemos una fotografía del vehículo.



Imagen 3.1. Vehículo teleoperado terrestre

Las características principales de este vehículo son la siguientes:

- ▶ Motor eléctrico.
- ▶ Tracción a las cuatro ruedas mediante tres diferenciales.
- ▶ Dirección en las ruedas delanteras mediante un actuador eléctrico.
- ▶ Suspensión independiente de cuadrilátero articulado con sistema muelle-amortiguador.
- ▶ Luz frontal. En la parte delantera dispone de un foco de luz para situaciones de baja visibilidad.

- ▶ Cámara frontal. También en la parte delantera está emplazada la cámara del vehículo con un sistema de transmisión independiente.
- ▶ Bocina.

Para la tracción del vehículo se ha recurrido al uso de un motor paso a paso, de forma que recibe directamente las consignas de velocidad. Por esta razón el vehículo no dispone de sistema de frenado, sino que el propio motor realiza esta función. Esta características tiene ventajas e inconvenientes.

Ventajas:

- ▶ Simplicidad mecánica, ya que eliminamos el sistema de frenado del vehículo. Esta simplificación es importante, ya que no solo eliminamos los propios frenos sino todos los sistemas auxiliares.
- ▶ Control más sencillo, ya que solo tenemos que controlar la velocidad del motor. No tenemos que controlar los frenos, por lo que evitamos malas interacciones entre el sistema de aceleración y frenado.
- ▶ Mayor control del vehículo. Por ejemplo en una rampa no existe el problema de que el vehículo “se vaya hacia atrás”. En un sistema tradicional de acelerador y freno se deben de sincronizar para evitar este efecto.
- ▶ Control del operador más sencillo. Por lo dicho anteriormente, ya que con este sistema podemos usar un simple *stick* para mover el vehículo. Cuando el *stick* se acciona hacia delante el vehículo irá hacia delante y viceversa, independientemente de si el vehículo está en rampa o no. En un sistema de acelerador y freno deberíamos de tener dos mandos independientes para el acelerador y el freno, o usar un sistema de control más complejo.

Inconvenientes:

- ▶ Mayor consumo, ya que si detenemos el vehículo en una rampa, al no disponer de frenos, los motores estarán siempre trabajando para mantenerlo parado.
- ▶ No existe el freno de emergencia. En caso de fallo en la comunicación, corte de alimentación, etc, no podemos detener el vehículo.

El diseño de este vehículo es totalmente modular ya que posee sistemas independientes de transmisión de datos para los controles, cámara y sensores. El sistema de comunicación está formado por tres partes:

- ▶ Sistema de radiofrecuencia principal para el control del vehículo. Incluye el control de aceleración/frenado, dirección, bocina y faro delantero. Estos controles se manejan mediante el control remoto.
- ▶ Sistema de transmisión de vídeo. Para esta comunicación se usó un sistema de transmisión sencillo. Este sistema funciona bien en espacios abiertos y pequeños obstáculos, pero pierde calidad a grandes distancias y con interposición de paredes y otros obstáculos voluminosos.

- ▶ Sistema de transmisión de datos analógico/digital. Una de las grandes ventajas de este vehículo es que es totalmente ampliable y configurable, ya que dispone de un sistema de transmisión de datos analógicos y digitales.

Para controlar este vehículo se usa un control remoto estándar.



Imagen 3.2. Control remoto del vehículo teleoperado terrestre

Como se puede observar en la fotografía anterior este mando está adaptado para ser usado directamente por una persona. Para poder realizar ensayos de teleoperación remota se construyó un adaptador de forma que pudiera ser usado mediante un ordenador:



Imagen 3.3. Adaptador para usar el control remoto mediante un ordenador

Este mando dispone de numerosos controles:

- ▶ Llave de corriente. Esta llave enciende y apaga el mando.
- ▶ Botón de emergencia. En caso de emergencia se puede accionar este botón.
- ▶ *Stick* de dirección. Mediante este mando se controla la dirección del vehículo. Se realiza un control de posición, por lo que al liberar el mando, la dirección vuelve automáticamente al punto central.
- ▶ *Stick* de marcha. Con este mando se controla el movimiento del vehículo. Recordemos que este vehículo usa un motor paso a paso controlado en velocidad, por lo que la posición de este mando es proporcional a la velocidad del motor. En la posición neutra el vehículo tendrá una velocidad cero, en la posición más avanzada el vehículo se moverá hacia delante a la velocidad

máxima que pueda alcanzar y en su posición más retrasada el vehículo se moverá hacia atrás a la velocidad máxima que pueda. Por ejemplo el vehículo se moverá siempre a la misma velocidad (salvo llegar al límite de potencia del motor en una rampa muy pronunciada) a una misma posición de este mando, independientemente de que esté en rampa, ascendente o descendente.

- ▶ Botón de luz. Con este pulsador se controla el foco delantero.
- ▶ Botón de bocina. Con este botón se acciona la bocina del vehículo.

3.2.2.2. Vehículo submarino

El consorcio que formaba este proyecto hizo un análisis de mercado para encontrar un mini-submarino adaptado a los requerimientos de este proyecto. El modelo que más se ajustaba a estos requerimientos fue el *GNOM*, un mini-submarino de unos 30 cm de longitud que está preparado para poder añadir sensores a bordo.

Este mini-submarino teleoperado está fabricado por *eco-line France*. El conjunto consiste en dos maletines, uno con el mini-submarino y el cable de comunicación y otro con el equipo de superficie.



Imagen 3.4. Mini-submarino teleoperado con el maletín de control

Este mini-submarino teleoperado se controla a través del equipo de superficie que incluye las baterías, el sistema de vídeo y el *pad* de control. Están conectados entre sí por un cable de 2 mm de diámetro y de 80 metros longitud (aunque hay versión de 150 metros) que permite un amplio rango de operación. En aplicaciones submarinas se emplea en la mayoría de los casos comunicaciones por cable, ya que en este medio no se pueden usar sistemas de radio frecuencia. Y ya que se usa un cable para las comunicaciones se eliminan las baterías del mini-submarino y se transmite la energía

mediante este mismo cable.

Las características técnicas básicas de este mini-submarino son la siguientes:

- ▶ Dimensión total: 2,5 dm³
- ▶ Profundidad de operación máxima: 100m
- ▶ Requerimientos de potencia: 220 VAC, 12 VCC 75 W
- ▶ Velocidad máxima: 1 m/s de avance y retroceso y 0.5 m/s en ascenso y descenso.
- ▶ Luz: 20 LEDs blancos que garantizan una visión de dos a tres metros en agua clara y de noche.
- ▶ Sistema de propulsión: Dos horizontales (avance, retroceso y giro) y dos verticales (ascenso, descenso y cabeceo).
- ▶ Sistema de vídeo: Cámara a color con resolución de 330 o 460 líneas con una sensibilidad de 1 lux. Esta cámara posee dos grados de libertad de movimiento controlados desde el equipo de superficie.



Imagen 3.5. Caja de sensores inerciales embarcadas en el mini-submarino



Imagen 3.6. Sistema de visión estereoscópica usado en el mini-submarino

Para poder usar este mini-submarino en el proyecto *TeleDrive* se le añadió una caja con sensores inerciales que incluye un acelerómetro triaxial. Además se incorporó un sistema de visión estereoscópica consistente en una caja hermética con dos cámaras.

3.2.3. Estación de control central

El *operador* es la persona que controla el vehículo teleoperado desde un puesto multisensorial situado en la *estación de control central*. Esta persona debe estar adiestrada para la teleoperación de vehículos. Desde esta estación se controla directamente el vehículo teleoperado, generalmente mediante una comunicación por radiofrecuencia, y se transmite toda la información necesaria a la estación de control remoto y al *showroom*.

El puesto multisensorial desde el que trabaja el operador posee las siguientes características:

- ▶ Interfaz de controles. El puesto de teleoperación debe de disponer de los controles necesarios para manejar el vehículo teleoperado. Se pueden usar desde controles tipo *joystick* hasta controles más complejos con fuerza de retorno.
- ▶ Sistema de audio y vídeo. Debe disponer al menos de una pantalla o proyector para que el operador pueda ver las imágenes captadas por las cámaras del vehículo teleoperado.
- ▶ Plataforma móvil o asiento activo. Para que el puesto multisensorial pueda simular el movimiento del vehículo teleoperado, debe de estar montado sobre una plataforma móvil o asiento activo. La diferencia entre ambos es solamente de tamaño y capacidad. En el caso de tratarse de un único operador se puede usar un asiento activo.

El propósito de este puesto multisensorial es dotar al operador de la mayor cantidad de información posible, siempre dentro de los márgenes de percepción. Mediante el uso de una plataforma móvil o un asiento activo proveemos al operador de información acerca del movimiento del vehículo teleoperado. Esta información se podría transmitir mediante información visual o mediante el interfaz háptico, pero podríamos saturar el canal de percepción.

Podríamos sobreimprimir gráficas tridimensionales con la posición e inclinación del vehículo teleoperado sobre las imágenes que recibimos de las cámaras. Pero en este caso el operador tendría que mirar la imagen de la cámara y los gráficos añadidos, por lo que se perdería atención sobre uno de ellos.

Otra opción sería añadir una fuerza sobre el mando de control proporcional a la inclinación del vehículo, pero esto podría interferir con el control del vehículo disminuyendo la precisión en la tarea de teleoperación.

Por esta razón en este proyecto se recurre directamente a simular el movimiento del vehículo teleoperado mediante una plataforma móvil o asiento activo. Reproducimos la información del vehículo teleoperado en su correspondiente canal de percepción.

En el proyecto *TeleDrive* se llevaron a cabo tres tipos de ensayos según la situación del operador. En los ensayos más sencillos el operador manejaba el vehículo directamente mediante el mando por radio frecuencia y mediante visión directa. En esta caso no existe puesto de teleoperación ya que el operador iba de pie siguiendo al vehículo teleoperado.

Esquemáticamente vemos como el operador maneja el vehículo a corta distancia sin hacer uso de un puesto multisensorial y mediante visión directa:

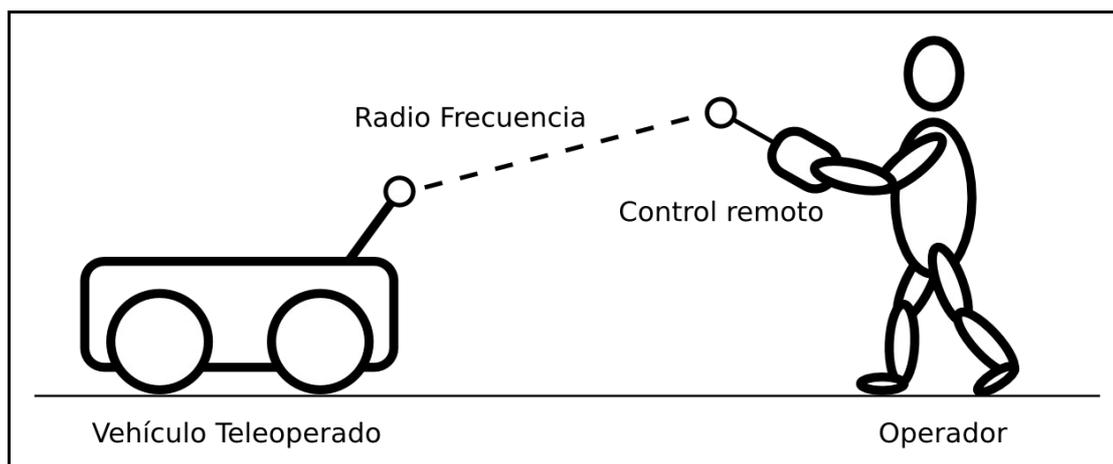


Figura 3.3. Ensayo sin puesto multisensorial y con visión directa

También se llevaron a cabo ensayos de operación a grandes distancias. Para ello se adaptó el mando por radio frecuencia para su uso mediante un ordenador conectado a Internet. Mediante un software programado especialmente para estos ensayos se podía manejar el vehículo desde cualquier ordenador conectado a Internet mediante un *joystick* estándar para PC. Este software también se encargaba de la transmisión de vídeo por Internet con un mínimo de retraso. En este caso el puesto de teleoperación era simplemente un PC conectado a Internet sin plataforma móvil.



Imagen 3.7. Adaptador del mando de control para su uso con un ordenador

En este caso el control remoto se encuentra cerca del vehículo teleoperado, pero mediante el uso de Internet, podemos manejar este control a grandes distancias. En este caso el operador no estaría tampoco situado en un puesto multisensorial.

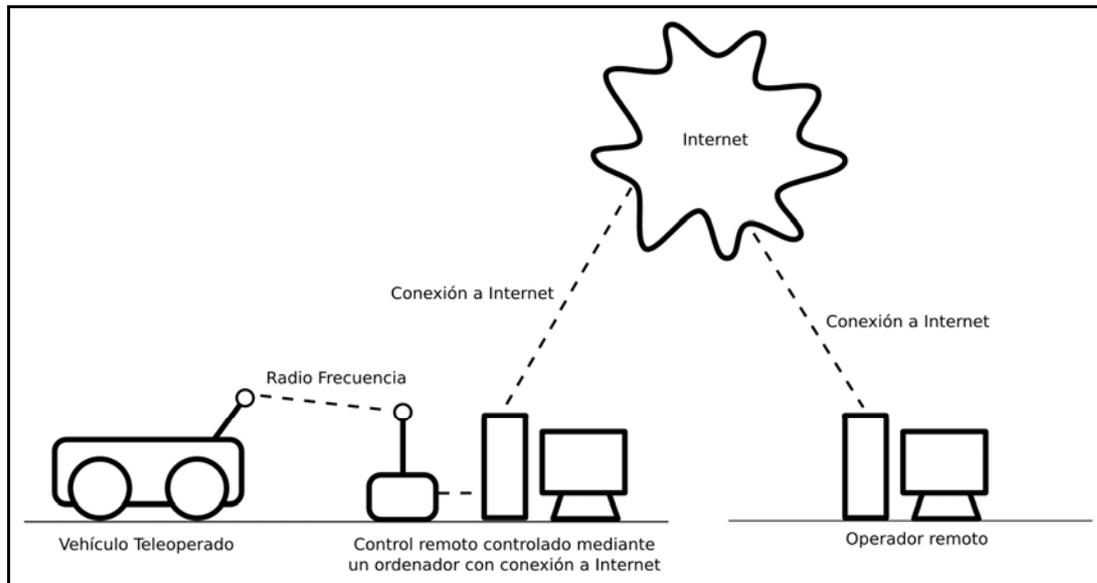


Figura 3.4. Ensayo de operación remota a través de Internet y sin puesto multisensorial

Por último, se realizaron ensayos controlando el vehículo desde un puesto de conducción sobre una plataforma esférica. Este puesto está dotado de los controles básicos de un vehículo: volante, acelerador, freno y palanca de cambio. También dispone de una pantalla para la visualización de la imágenes del vehículo teleoperado.



Imagen 3.8. Plataforma esférica usada como estación de control central

Este sería el ensayo completo con el operador situado en un puesto multisensorial. En este caso, dado que los experimentos se llevaron a cabo en la Universidad de Zaragoza, el puesto de conducción del operador no estaba realmente alejado del vehículo teleoperado, pero se realizó toda la comunicación a través de Internet, por lo que se demostró que era tecnológicamente viable.

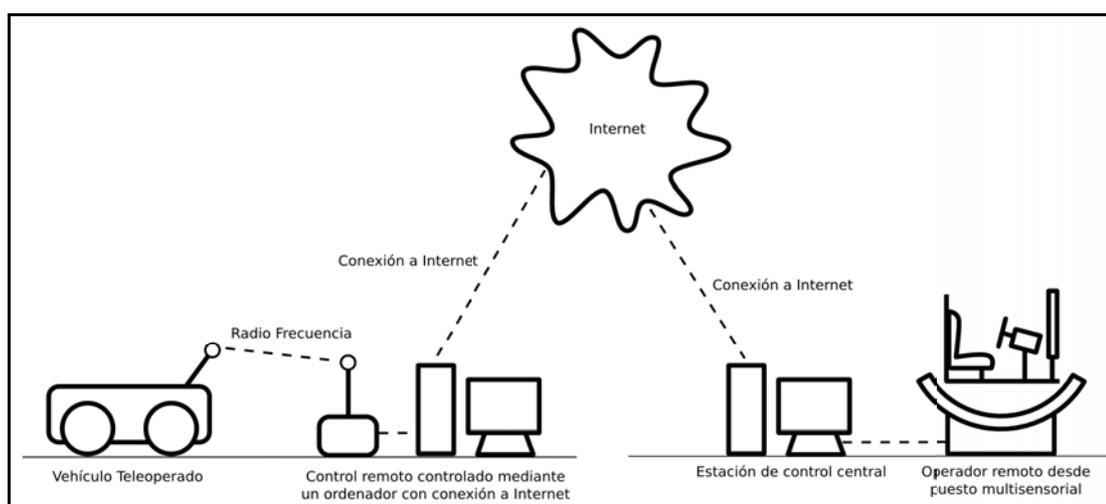


Figura 3.5. Ensayo de teleoperación remota a través de Internet y con puesto multisensorial

Las características de la plataforma esférica usada en este proyecto están ampliamente explicadas en el capítulo 2 de esta tesis.

3.2.4. Estación de control remoto

La *estación de control remoto* recibe toda la información acerca del proceso de teleoperación para comprobar el correcto funcionamiento de todos los sistemas. El *supervisor remoto*, situado en esta sala, es la persona encargada de esta tarea y debe de estar cualificado para reconocer los posibles fallos y actuar en caso necesario. El operador del vehículo está centrado en la propia tarea de teleoperación, de forma que en operaciones de alta complejidad puede ser necesario el uso de una persona que supervise el proceso y los equipos. El supervisor remoto está en contacto con el operador para darle indicaciones en caso necesario.

A la estación de control remoto le llega la siguiente información:

- ▶ Imágenes del vehículo. Puede recibir no solo la imagen de la cámara usada en el proceso de teleoperación (la imagen que recibe el operador), sino también otras cámaras embarcadas en el vehículo o cámaras ambientales que captan el entorno de teleoperación.
- ▶ Sensores del vehículo. Recibe información adicional a través de los sensores del vehículo. Estos sensores incluyen tanto el sistema inercial para el cálculo del movimiento de las plataformas móviles, como otros sensores de mantenimiento predictivo como pueden ser sensores de temperatura o tensión.

Además el supervisor remoto debe de estar en contacto con la estación de control central para darle indicaciones al operador en caso necesario.

En el proyecto *TeleDrive* todas las transmisiones a larga distancia se realizaron a través de Internet, por lo que cualquier ordenador conectado a esta red puede ser utilizado a modo de estación de control remoto. Se realizaron primeramente ensayos con conexiones locales para comprobar la viabilidad del sistema. Más tarde, en los mismos ensayos de teleoperación remota, se hizo uso de un auténtico supervisor remoto situado a gran distancia de la zona de ensayos. Para aumentar la información del supervisor remoto se dispuso de una cámara ambiental, además de la propia cámara del vehículo. De esta forma el supervisor remoto fue capaz de ver todo el proceso con una perspectiva en tercera persona.

3.2.5. Showroom

El *showroom* tiene muchos elementos en común con la estación de control central, pero con un objetivo muy distinto. El *showroom* está pensado para telepresencia pasiva, es decir, telepresencia sin teleoperación. Los pasajeros virtuales, situados en el *showroom*, no interfieren en el proceso de teleoperación. El uso del *showroom* está orientado al entretenimiento, aunque hay que matizar este aspecto. Se podría usar en salas recreativas para viajes virtuales, pero en este caso, al contrario que el resto los sistemas existentes, el movimiento de la plataforma estaría calculado a partir de datos reales. Además se puede reproducir tanto el vídeo como el movimiento en tiempo real, en el mismo momento (o con un pequeño retraso introducido por razones de seguridad) en el que se está realizando la teleoperación. Este sería un uso estrictamente recreativo, aunque puede usarse también con otros fines más técnicos

El *showroom* tiene las siguientes características:

- ▶ Plataforma móvil de gran capacidad. Para aumentar la eficacia del *showroom* la plataforma debe tener capacidad para mover una cabina con varias personas. Tampoco conviene usar una cabina demasiado grande, ya que una plataforma demasiado grande pierde efectividad y el coste puede resultar demasiado elevado. Entre 4 y 6 personas se consideraría suficiente.
- ▶ Cabina para los pasajeros virtuales. La cabina y la plataforma tienen que estar acordes con el número de pasajeros virtuales. Una propiedad importante de esta cabina es que esté completamente cerrada para aumentar la inmersión de los pasajeros, o en su defecto en un ambiente totalmente a oscuras. De esta manera los pasajeros no tienen ninguna referencia fija fuera de la cabina y se aumenta la eficacia de la simulación del movimiento.
- ▶ Vídeo y audio. En la cabina va montado un sistema de vídeo y audio que permita reproducir todo lo que capta el vehículo teleoperado. En este caso se usa exclusivamente la cámara subjetiva del vehículo. En determinados casos se podría usar una pantalla con proyector sujetos al suelo en vez de a la cabina, pero debido al gran tamaño de esta, no sería el mejor sistema.

Un aspecto importante es que el control de la plataforma del *showroom* no puede interferir en la tarea de teleoperación, por lo que se debe de realizar un control totalmente independiente.

Como ya se ha dicho antes, en este caso lo más importante en la sincronización del

vídeo y del audio con el movimiento de la plataforma. Que vayan sincronizados en tiempo real con el proceso de teleoperación es menos importante. Por esta razón tenemos más margen de trabajo que en el caso de la estación de control central. Para aumentar la seguridad del sistema podemos usar los datos con un retraso y así podemos realizar un análisis preventivo antes de enviar los datos a la plataforma. Y no solo por razones de seguridad, sino que tenemos mas tiempo para procesar y mejorar la calidad de los datos enviados al *showroom*.

En el proyecto *TeleDrive* se usó una plataforma Stewart y una cabina con capacidad para 5 personas con sistema de audio/vídeo. Como se puede ver en las fotos sucesivas esta cabina dispone también de controles, aunque para este proyecto no se usaron.



Imagen 3.9. Cabina y plataforma usadas en el showroom del proyecto *TeleDrive*

Estás son las características del *showroom* empleado en el proyecto *TeleDrive*:

- ▶ Plataforma hexápoda. Para este proyecto se usó una plataforma de 6 grados de libertad con una capacidad de carga de 2000 Kg. El control de esta plataforma se realiza mediante comunicación *Ethernet*, por lo que resulta bastante versátil ya que se puede usar cualquier ordenador con tarjeta de red para controlar la plataforma.
- ▶ Cabina en fibra de vidrio con capacidad para 5 personas. Esta cabina dispone de dos asientos delanteros y tres traseros con dos puertas laterales. Este mismo modelo de cabina es usada en parques temáticos, por lo que, aunque fabricada de propio para la Universidad de Zaragoza, es un modelo comercial y por lo tanto probado y perfectamente funcional.
- ▶ Pantalla de plasma de 40 pulgadas y dos altavoces. La pantalla cubre gran parte de la zona frontal de la cabina y permite una buena visión desde cualquiera de los asientos de la cabina. El sistema de audio, aunque sencillo, cubre perfectamente las necesidades.

3.3. Sistemas de comunicación

3.3.1. Introducción

Para el proyecto *TeleDrive* se desarrollaron diversos programas de comunicación que incluyen programas de transmisión de vídeo y de datos relativos a los controles y a los sensores embarcados en los vehículos teleoperados.

Como hemos visto antes, en este proyecto se usaron dos vehículos teleoperados diferentes (un vehículo terrestre y un mini-submarino) por lo que cada uno necesita un software específico. Sin embargo para aumentar la eficacia del sistema y reducir los ensayos, se realizó un software modular, de forma que se pudiera adaptar a cada situación según los requerimientos.

El núcleo de los sistemas de comunicación en este proyecto consiste en un sencillo programa llamado *Teledrive* que se comunica con los demás programas de comunicación de vídeo y de datos. Así pues, es posible cambiar, modificar o mejorar los programas de comunicación de vídeo y datos sin necesidad de cambiar todo el sistema.

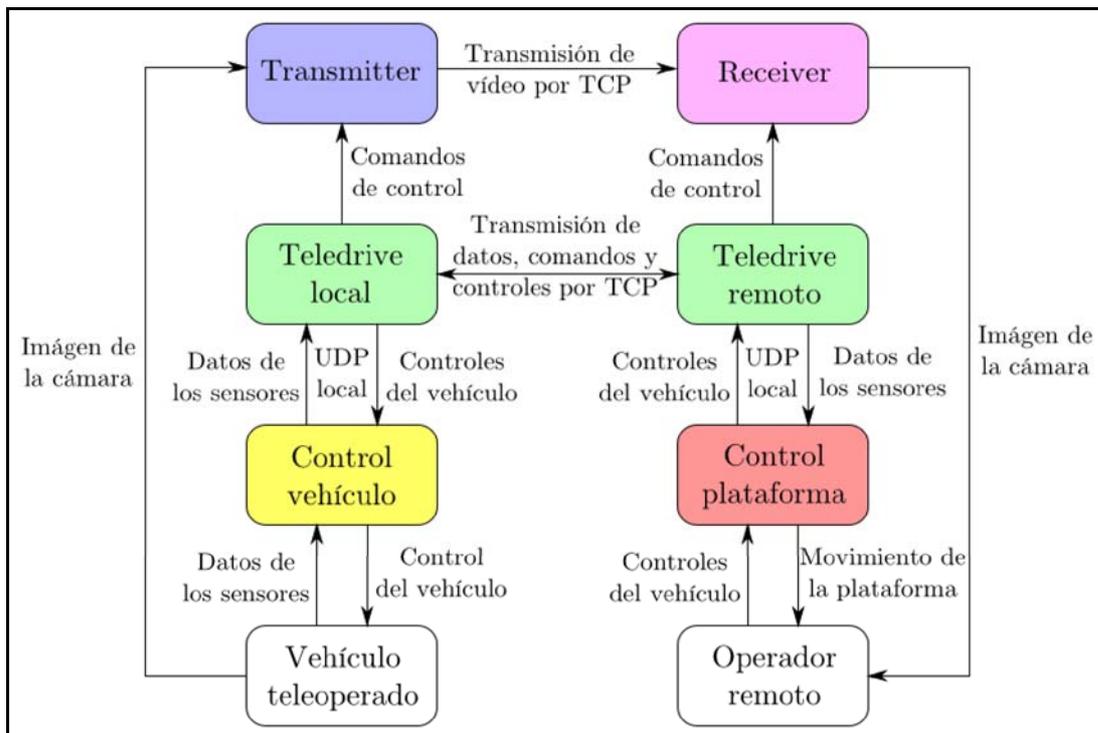


Figura 3.6. Esquema de comunicaciones de los programas del proyecto *TeleDrive*

En la figura anterior, los bloques de la izquierda están en el lado local, junto con el vehículo teleoperado, y los bloques de la derecha están en el lado remoto, con el operador del vehículo.

Como podemos observar el programa *Teledrive* (tanto local como remoto son el mismo programa pero configurado según el caso) se encarga de transmitir casi toda la

información, pero la transmisión de la imágenes se realiza mediante otra conexión entre el programa *Transmitter* y *Receiver*.

La comunicación entre el programa *Teledrive* y el vehículo teleoperado se realiza a través de otra aplicación hecha específicamente para este fin. Es decir, que podemos usar diferentes vehículo teleoperados (en el caso del proyecto *TeleDrive*, un vehículo terrestre y un mini-submarino) cambiando simplemente esta aplicación. De esta manera el sistema es más robusto, ya que las comunicaciones básicas siguen siendo las mismas y ya están depuradas.

De igual manera, en el caso del operador, se usa un programa intermedio adaptado según las condiciones. Por ejemplo podemos controlar diversos tipos de plataformas móviles cambiando solamente este programa. En el caso del proyecto *TeleDrive* se usaron dos plataformas móviles diferentes, una plataforma hexápoda para el *Showroom* y una plataforma esférica para la estación de control central.

3.3.2. Programa *Teledrive*

El programa *Teledrive* se encarga de la comunicación básica entre el ordenador conectado al vehículo teleoperado y el ordenador del operador remoto. Una vez que se establece comunicación con este programa se pueden abrir independientemente el programa de transmisión de vídeo y el programa de transmisión de datos, encargado de transmitir tanto los datos recogidos por los sensores del vehículo teleoperado, como los controles del vehículo.

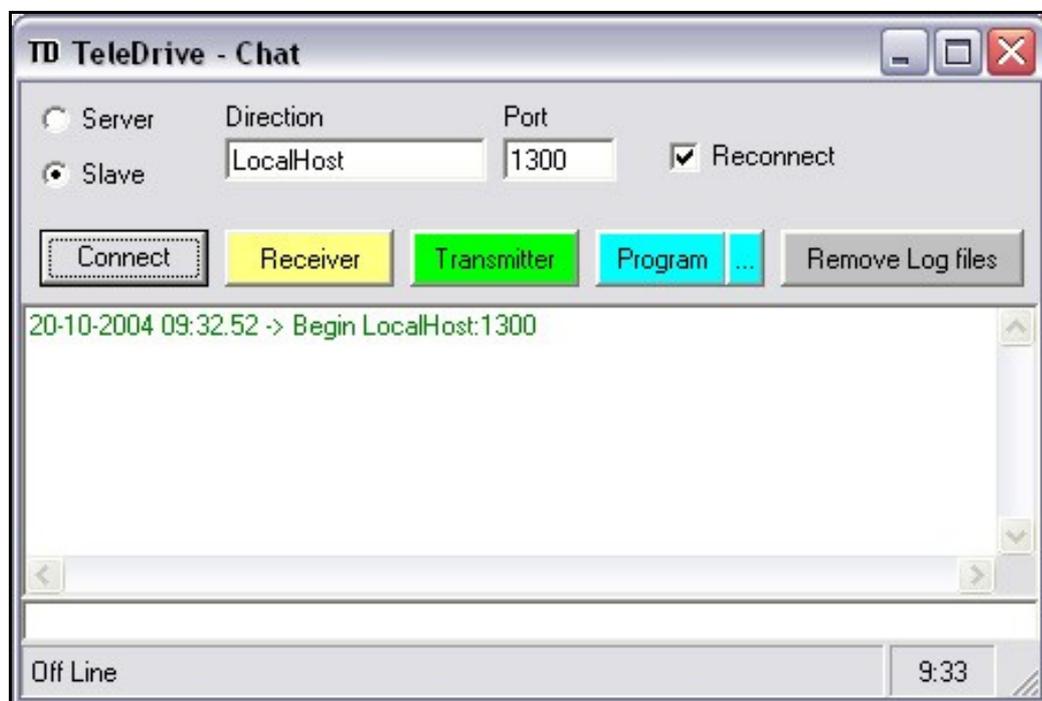


Imagen 3.10. Captura de la pantalla principal del programa *Teledrive*

Para intentar evitar al máximo posible la dependencia de otros sistemas de comunicación, este programa dispone de un sencillo protocolo de mensajería instantánea de forma que el operador que está situado al lado del vehículo

teleoperado puede comunicarse con el operador remoto. Esta transmisión se realiza mediante el protocolo TCP/IP.

Este programa usa una comunicación punto a punto, por lo que debemos de configurarlo como servidor o cliente (ver imagen 3,10). El operador del vehículo debe de ponerse de acuerdo con el operador o supervisor remoto. Este sistema de comunicación funcionará siempre que uno de los dos extremos posea una dirección IP pública o al menos acceso a una IP pública con el puerto de comunicación abierto para permitir conexiones externas. Como podemos ver se puede configurar la dirección remota de conexión (solo en el caso de configurar el programa como cliente) y el puerto de comunicación.

Con este programa se pueden lanzar los programas de transmisión de vídeo y otras comunicaciones. Si el operador local y remoto han establecido una comunicación mediante este programa pueden abrir automáticamente los programas remotamente. Es decir, si el operador local abre el programa de transmisión de vídeo, en el ordenador del operador remoto se abrirá automáticamente el programa de recepción de vídeo y se iniciará la transmisión. Lo mismo ocurre con el programa de transmisión de datos.

Para un mayor control del proceso todos los sucesos ocurridos durante la ejecución de este programa se muestran en la pantalla central y se registran en un archivo con formato RTF (“Ritch Text File”) indicando fecha, hora, tipo de evento y otros datos útiles. Para una mejor comprensión de los datos mostrados se usa una codificación por colores según el tipo de evento. Esta misma ventana sirve para enviarse, como se ha dicho antes, mensajes de texto entre el operador remoto y local.

Resumiendo, la pantalla central muestra la siguiente información con la correspondiente codificación de colores:

- ▶ Inicio/Finalización del programa (verde oscuro)
- ▶ Inicio/Finalización de la conexión (verde claro)
- ▶ Lanzamiento del programa *Receiver* o *Transmitter* (azul claro si es lanzamiento local o rojo claro si es lanzamiento remoto)
- ▶ Lanzamiento del programa de transmisión de datos (azul claro si es lanzamiento local o rojo claro si es lanzamiento remoto)
- ▶ Mensajes de texto entre operadores (azul oscuro si es un mensaje de entrada o rojo oscuro si es de envío)
- ▶ Comandos con los datos de los controles y sensores del vehículo teleoperado. Estos datos no siempre se muestran por pantalla o se guardan en el archivo de registro. Existe una opción, como veremos a continuación, para ver o no estos datos. Esta propiedad es especialmente útil por motivos de depuración de los programas, para controlar visualmente y en tiempo real los datos que se están transmitiendo el vehículo teleoperado y el operador.

El formato de los datos que se intercambian los programas *Teledrive* local y remoto es el siguiente:

- ▶ Mensajes de texto:

```
mensaje_de_texto 0x10 0x13
```

- ▶ Comandos:

```
$ comando datos 0x10 0x13
```

El programa *Teledrive* no realiza ninguna acción ante un mensaje de texto y simplemente lo muestra por pantalla. Sin embargo para cada comando realiza una acción. Como podemos ver, se usan los caracteres de fin de línea (0x10) y retorno de carro (0x13) para indicar el final del paquete de datos. Por lo que el resto de los datos tienen que estar en formato texto y no en formato binario.

A continuación vemos la lista de comandos y la sintaxis de cada uno de ellos:

- ▶ Comando *Abrir programa Transmitter*:

```
$ T modo direccion_remota : puerto 0x10 0x13
```

El valor de modo puede ser 0 o 1 según sea servidor o cliente. Este valor se selecciona automáticamente según el modo de funcionamiento del programa *Teledrive*.

La dirección remota, es la dirección IP del programa que manda la petición.

- ▶ Comando *Abrir programa Receiver*:

```
$ R modo direccion_remota : puerto 0x10 0x13
```

Los parámetros de este comando son equivalentes al anterior caso.

- ▶ Comando *Abrir programa de control*:

```
$ P 0x10 0x13
```

Este comando no necesita parámetros, ya que la comunicación se establece en modo local.

- ▶ Comando de transmisión de datos:

```
$ C visible datos 0x10 0x13
```

El valor de *visible* puede ser 0 o 1 dependiendo de si los datos se mostrarán o no en la pantalla del *Teledrive*.

Los datos pueden ser de cualquier tipo, dependiendo del programa de comunicación usado, pero siempre en formato texto.

Siempre que se muestren estos datos en la pantalla del programa *Teledrive* se indica si son comandos en entrada o salida de la siguiente manera:

- ▶ Comando en entrada:

```
comm<comando
```

- ▶ Comando en salida:

```
comm>comando
```

Para los mensajes de texto se usa un sistema parecido anteponiendo el carácter < o > según si es un mensaje de entrada o de salida.

Como se ha visto, la diferencia fundamental entre los mensajes de texto y los comandos reside en el primer carácter. Por lo que se pueden mandar comandos directamente a través de la entrada de teclado. De esta manera es posible realizar comprobaciones a mano de cada uno de los comandos.

3.3.3. Vídeo

La transmisión de vídeo la realizan dos programas llamados *Transmitter* y *Receiver*. El protocolo de comunicación de estos programas es independiente del programa *Teledrive*, aunque como hemos visto antes, se pueden ejecutar a través de este.

En un principio se pensó en usar el mismo programa de transmisión de vídeo para la transmisión de los controles del vehículo, pero al final se decidió separar las tareas y controlarlo todo desde el programa *Teledrive*. Este sistema es más versátil ya que dependiendo del vehículo teleoperado puede cambiar el sistema empleado para enviar y recibir los controles. De esta manera solamente hay que seleccionar el programa de transmisión de controles deseado sin necesidad de cambiar los programas de transmisión de vídeo.

La captura del vídeo proveniente del vehículo teleoperado se realiza usando las funciones API (Interfaz de Programación de Aplicaciones) de Windows de forma que se puede usar cualquier dispositivo estándar, como puede ser una cámara Web o una capturadora de vídeo con conexión USB.

La transmisión de los datos de vídeo se transmiten mediante un sencillo protocolo de comunicación sobre TCP/IP, que envía las imágenes capturadas usando el compresor JPEG. El proceso completo de transmisión de vídeo usado en el proyecto *TeleDrive* es el siguiente:

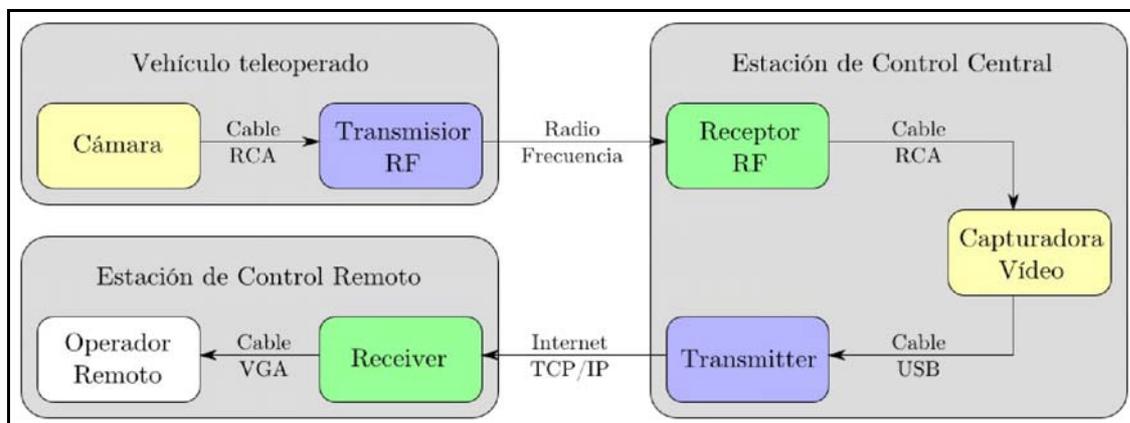


Figura 3.7. Proceso completo de transmisión de vídeo en el proyecto *TeleDrive*

Para la transmisión de vídeo a través de Internet se pueden usar dos sistemas: Flujo de datos (*Streaming* en inglés) o cuadro a cuadro.

I) Flujo de datos:

En este método se emplean sistemas de compresión de vídeo usando información de varios cuadros consecutivos. La transmisión se realiza mediante un flujo de datos continuo entre el emisor y el receptor. El transmisor lee varios cuadros de la fuente de vídeo y empieza a comprimir y a enviar los datos al receptor. El receptor va almacenando los datos que recibe en un *Buffer* y cuando tiene suficiente información la descomprime y la muestra.

Al hacer uso de varios cuadros se alcanzan mayores niveles de compresión obteniendo mejor calidad de vídeo y menores requerimientos de ancho de banda. Dependiendo de la aplicación se puede llegar a un compromiso entre ambos aspectos.

Como cada cuadro depende de los demás se hace necesario el uso de un *buffer* en la recepción. Esto introduce un desfase que dependerá del tamaño del *buffer*. Este tamaño dependerá de la velocidad de comunicación, y deberá ser lo suficientemente grande como para permitir una visualización del vídeo continua.

Además un error en la transmisión, como la recepción de datos incorrectos, puede producir artefactos en varias imágenes consecutivas.

Para ajustar este sistema se manejan dos variables, la calidad de imagen y el tamaño del *buffer*. La primera se ajusta según la velocidad media de transmisión de datos dejando un margen para los errores de transmisión. Y la segunda se ajusta según las fluctuaciones que velocidad que puedan existir. Si la velocidad de transmisión es muy constante se pueden usar tamaños pequeños del *buffer* disminuyendo de esta forma el desfase. Si el tamaño del *buffer* es muy pequeño, cualquier error o retraso en la transmisión nos dará errores en la imagen.

Como resumen estas son las ventajas e inconvenientes de este sistema de transmisión de vídeo.

Ventajas:

- ▶ Mayor calidad de imagen.
- ▶ Menor requerimiento de ancho de banda.

Inconvenientes:

- ▶ Mayor complejidad debido al propio compresor de vídeo.
- ▶ Mayor desfase.
- ▶ Mayor sensibilidad de la calidad de la transmisión.

II) Cuadro a cuadro:

Este sistema es más sencillo ya que se tratan las imágenes por separado. Una vez

capturado un cuadro del vídeo se comprime (en el caso del proyecto *TeleDrive* usando el compresor JPEG) y se envía al receptor. Una vez que se ha recibido confirmación de la recepción se procede con el siguiente cuadro.

Al usar únicamente información de un cuadro se consiguen niveles menores de compresión. En este caso solo debemos de configurar un parámetro que es la calidad de la imagen. A mayor calidad de la imagen necesitaremos mayor tiempo para transmitirla y por lo tanto obtendremos una menor tasa de cuadros por segundo.

Además los errores en la transmisión solo afectan a un cuadro a la vez, ya que cada cuadro es totalmente independiente.

El desfase en este sistema es el tiempo de compresión y transmisión de la imagen.

Resumiendo estas son las ventajas e inconvenientes:

Ventajas:

- Menor complejidad en la compresión
- Menor desfase.
- Menor sensibilidad de la calidad de la transmisión.

Inconvenientes:

- Menor calidad de imagen.
- Mayor requerimiento de ancho de banda.

Como hemos dicho anteriormente, el desfase en la teleoperación es muy importante, por lo que el segundo método tiene una gran ventaja frente al primero. Sin embargo tiene mayores requerimientos de ancho de banda. En la actualidad las conexiones a Internet, y en concreto las usadas en el proyecto *TeleDrive*, son suficientemente rápidas como para usar el sistema de transmisión cuadro a cuadro, por lo que finalmente se implementó el sistema de vídeo usando el segundo sistema.

3.3.4. Controles, sensores y otros datos

En el proyecto *TeleDrive* para la transmisión de otros datos como son los controles del vehículo y información de los sensores, se usa un programa específico según la aplicación. La transmisión de estos datos entre el vehículo y el operador se realiza a través de Internet usando la comunicación del programa *Teledrive*. Esto se hace así ya que el volumen de datos, en comparación con la transmisión de vídeo, es pequeña y de esta manera los datos pueden ser monitorizados a través del programa *Teledrive*.

Para simplificar el proceso de programación de este programa se realizó una librería de comunicación con el programa *Teledrive* en forma de controlador *dll* de Windows, de forma que puede usarse en gran cantidad de lenguajes de programación. En el proyecto *TeleDrive* se realizaron estos programas en C++ ya que resultan más rápidos y sencillos y en este caso no era necesario un interfaz gráfico complejo.

Para cada aplicación hace falta realizar dos programas, uno de comunicación con el vehículo teleoperado y otro de comunicación con el operador, aunque pueden ser perfectamente reutilizables si se usan sistemas similares. En el proyecto *TeleDrive* se hizo un programa para el vehículo terrestre y otro para el mini-submarino y un programa de control para cada una de las plataformas utilizadas: plataforma esférica y plataforma hexápoda.

3.3.5. Vehículo terrestre

Este vehículo está diseñado de forma modular y posee sistemas independientes de transmisión de datos para los controles de movimiento, datos y audio/vídeo. A continuación se explican detalladamente los sistemas de transmisión de datos entre el vehículo teleoperado terrestre y la estación de control central.

3.3.5.1. Comandos de movimiento

El vehículo terrestre utilizado en el proyecto *TeleDrive* se controla mediante un mando de control que se sujeta a la cintura y está manejado por el operador del vehículo. Esta unidad es un emisor de radiofrecuencia DTRII.

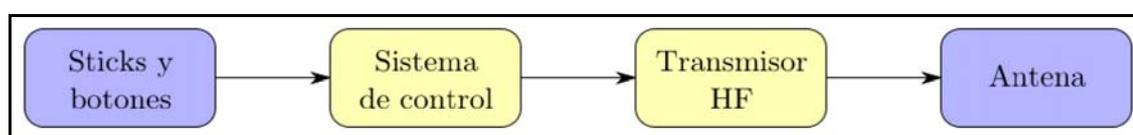


Figura 3.8. Esquema de la unidad emisora DTRII



Imagen 3.11. Mando del control del vehículo terrestre con sujeción a la cintura

La unidad receptora está situada en el vehículo. Es una unidad DTRII compuesta por un receptor de alta frecuencia y un sistema de control. Su propósito es enviar la información recibida al control de potencia y dirección del vehículo.

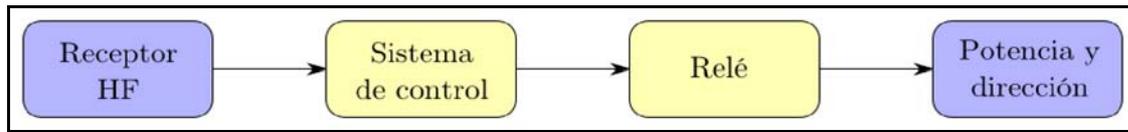


Figura 3.9. Esquema de la unidad receptora DTRII

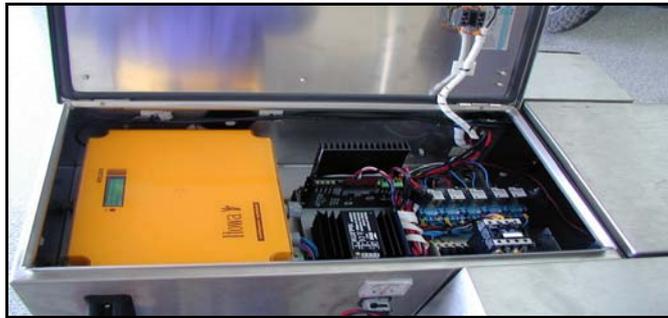


Imagen 3.12. Unidad receptora montada en el vehículo teleoperado

Las características técnicas de este sistema de transmisión por radiofrecuencia son las siguientes:

Emisor

Potencia de salida	0,2 a 2 W a 12 Vcc
Atenuación de armónicos	Mejor de 70 db
Emisiones no esenciales	En el espectro hasta 1000 Mhz menor de 2 nW
Estabilidad de frecuencia	Mejor de 2 Khz (-10 a 55 °C)
Consumo	800 mA
Control de frecuencia	Por cristal
Frecuencia de trabajo	406,425 a 460,550 y 411,425 a 411,550 MHz
Canalización	12 canales espaciados 25 Khz según UN-77, BOE 1.1.90

Receptor

Sistema de recepción	Doble conversión de 21,4 MHz y 455 KHz
Sensibilidad	0,7 μV (fem) para 12 db sinad
Rechazo de frecuencia imagen	Mejor de 65 db
Protección contra intermodulación	Mejor de 80 db
Sensibilidad canal adyacente	65 db
Estabilidad de frecuencia	Mejor de 2 Khz (-10 a 55 °C)
Consumo	100 mA
Frecuencia y canalización	406,425 a 460,550 y 411,425 a 411,550 Mhz con

canalización de 25 Khz según UN-77, BOE 1.1.90

Generales	
Alimentación	220 Vac y bajo pedido 12 o 24 Vcc
Margen de trabajo	20% de la tensión nominal
Temperatura de trabajo	Entre -10 y 55 °C
Humedad de trabajo	20 al 85%
Presentación y medidas	Caja metálica no estanca para montaje en armario. Dimensiones: 281,5x166x80 mm. Peso: 2,65 Kg
Conectores	2 salidas RS232 tipo D9. Conector antena coaxial tipo N
Modulación	
Codificación	FFSK (Fast Frecuencie Shift Keying)
Velocidad de transmisión	1200 BAUDS MARK(0) = 1200 SPACE(1) = 1800
Máximo de estaciones por frecuencia	1024
Frecuencias de 0 a 1	1800 y 1200 Hz respectivamente
Probabilidad de error en bit (P_E)	7×10^{-4} para SNR = 12 db – 1×10^{-8} para SNR = 20 db
Velocidad enlace RS232	110 hasta 38400 BAUDS configurable por el usuario
Codificación	RS232 con DTR, CTS, X ON – X OFF
Compatibilidad electrónica	Cumple con las normas CISPR

Tabla 3.1. Características técnicas del sistema RF

3.3.5.2. Transmisión de datos

Este vehículo teleoperado está equipado con un acelerómetro triaxial, sensor de velocidad angular en los tres ejes e inclinómetro de dos ejes. Toda esta información se envía mediante un sistema *full-duplex* de radiofrecuencia (STTA/VR) formado por dos unidades:

- Estación esclava, embarcada en el vehículo teleoperado y conectada a los sensores.
- Estación maestra, situada en la estación de control central.

Este sistema es capaz de transmitir hasta 16 canales analógicos y 16 señales digitales a una distancia máxima de 130 metros.



Imagen 3.13. Estaciones esclava (izquierda) y maestra (derecha) del sistema STTA/VR

Este equipo de comunicación fue desarrollado expresamente para este vehículo teleoperado pensando siempre en la flexibilidad del sistema. Por ejemplo para el proyecto *Teledrive* no se llegaron a usar todos los canales de transmisión analógica disponibles. Sin embargo la arquitectura del vehículo permite añadir sensorización extra y usar este equipo de transmisión para enviar los datos.

Internamente ambas estaciones poseen en mismo esquema mostrado a continuación:

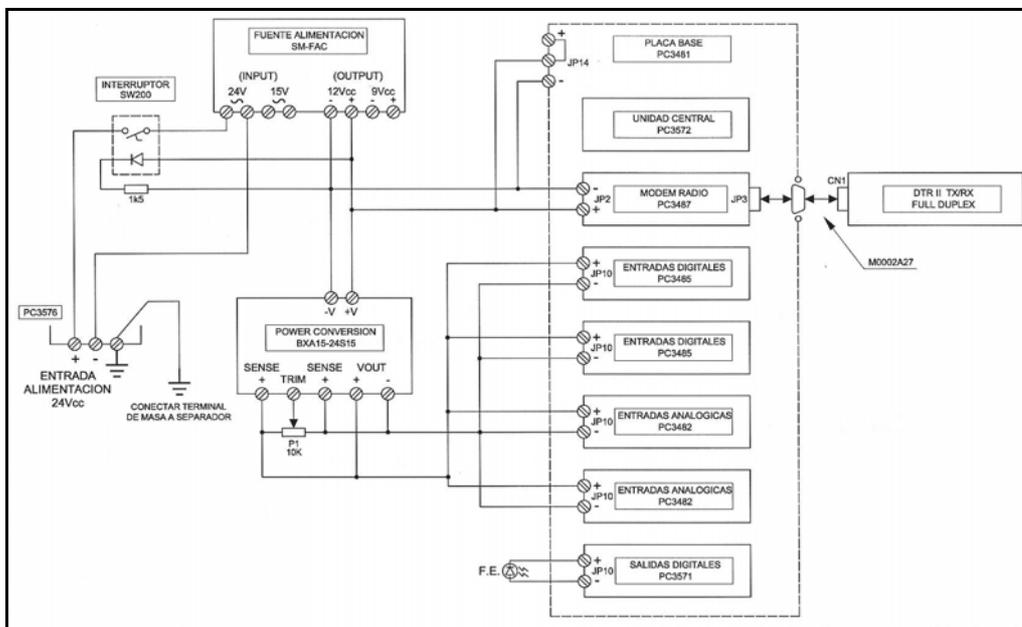


Figura 3.10. Esquema interno de las estaciones esclava y maestra

Y externamente ambas unidades poseen conectores para los diversos canales analógicos y digitales según la siguiente figura:

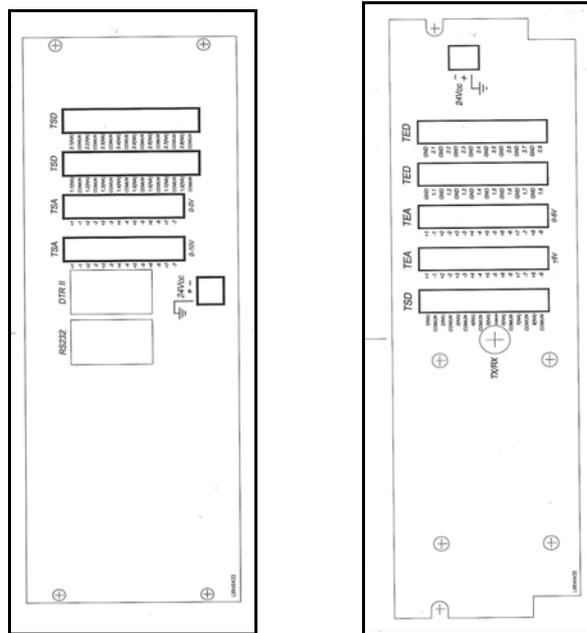


Figura 3.11. Conexiones externas de las unidades esclava y maestro

3.3.5.3. Transmisión de audio y vídeo

El vehículo teleoperado está equipado por una cámara a color con sensor CCD F1.2/4mm.



Imagen 3.14. Detalle de la cámara del vehículo

La transmisión de audio y vídeo se realiza mediante un sistema inalámbrico A/V Sender de 2,4 GHz de 130 metros de rango.



Imagen 3.15. Cámara del vehículo, emisor y receptor

3.3.6. Vehículo submarino

Todas las comunicaciones entre el mini-submarino y la estación de control central se realizan a través del equipo de superficie, que como hemos visto antes, están conectados mediante un cable de 80 metros. A continuación se detallan cada uno de los sistemas y equipamientos del mini-submarino.

3.3.6.1. Comandos de movimiento

Este vehículo se controla, a través del equipo de superficie, mediante un *Pad* comercial (de Sony Playstation).

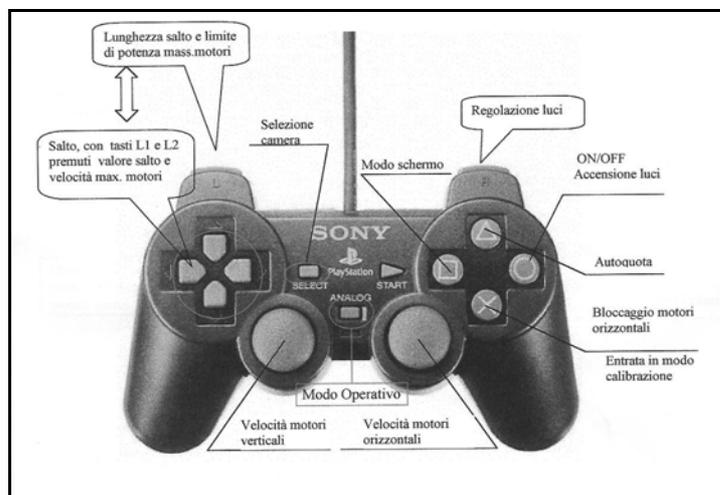


Figura 3.12. Detalles de las funciones de los botones del Pad de control

3.3.6.2. Transmisión de datos

La transmisión de datos está dividida en dos partes. Por una parte los sensores de navegación del mini-submarino, instalados de serie, y por otra parte los sensores inerciales para el control de las plataformas



Imagen 3.16. Mini-submarino y el rollo de cable para la transmisión de datos

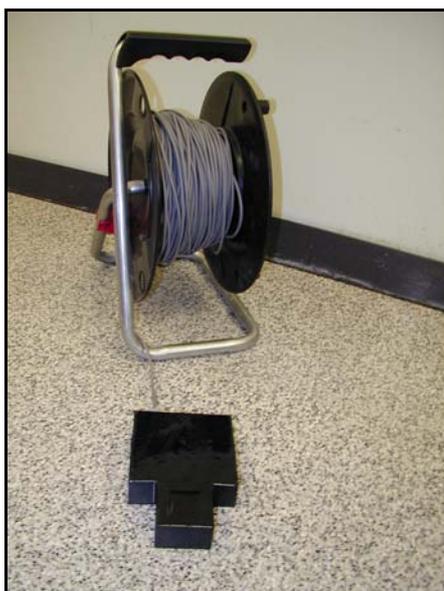


Imagen 3.17. Caja de sensores y el cable de comunicación

El equipamiento de serie consiste en una brújula y un sensor de profundidad que se transmiten a través del equipo de superficie. El equipo de superficie se conecta a un ordenador mediante un cable usando el protocolo RS232 con las siguientes

características:

- ▶ Velocidad de comunicación: 9600 baudios
- ▶ Tamaño del byte: 8 bits
- ▶ Bits de parada: 1 bit
- ▶ Paridad: Ninguna
- ▶ Tamaño de los paquetes: 32 bytes

La caja de sensores inerciales, compuesta por un acelerómetro triaxial, un sensor de velocidad angular de tres ejes y un inclinómetro de dos ejes, usa su propio cable de comunicación. En este caso la transmisión de datos también se realiza por cable, al igual que el control y la transmisión de los datos de los sensores del mini-submarino.

3.3.6.3. Transmisión de vídeo

La transmisión del vídeo se realiza mediante el mismo cable usado para la transmisión de los controles y los datos. Las imágenes son recibidas y visualizadas en la pantalla del equipo de superficie, pero pueden ser duplicadas y reproducidas en otro sistema de vídeo.

3.3.6.4. Módulo de realidad aumentada

Se desarrolló específicamente para este proyecto un módulo de realidad aumentada para mostrar información visual generada a partir de los sensores del vehículo teleoperado. Esta información se muestra sobreimpresa en la imagen de vídeo real para ayudar al operador a navegar en el escenario de teleoperación. Este sistema de realidad aumentada se desarrolló y se probó con el mini-submarino, pero es fácilmente extensible para usarlo con cualquier otro vehículo teleoperado. En la figura 3.13 se muestra como está organizado este sistema.

Esta información visual se genera a partir de:

- ▶ Información de los sensores: Sensor de posición (GPS o posición estimada), sensores de orientación (brújula y sensores inerciales) y información del movimiento de la cámara (cabeceo y balanceo)
- ▶ Consignas del operador: orientación, cabeceo, altitud y movimiento de la cámara.
- ▶ Otra información disponible:
 - ▶ Terreno
 - ▶ Geometría 3D del vehículo y equipamiento
 - ▶ Objetos conocidos del entorno de teleoperación
- ▶ Información de la misión: Por ejemplo mejor ruta o zonas de riesgo a evitar

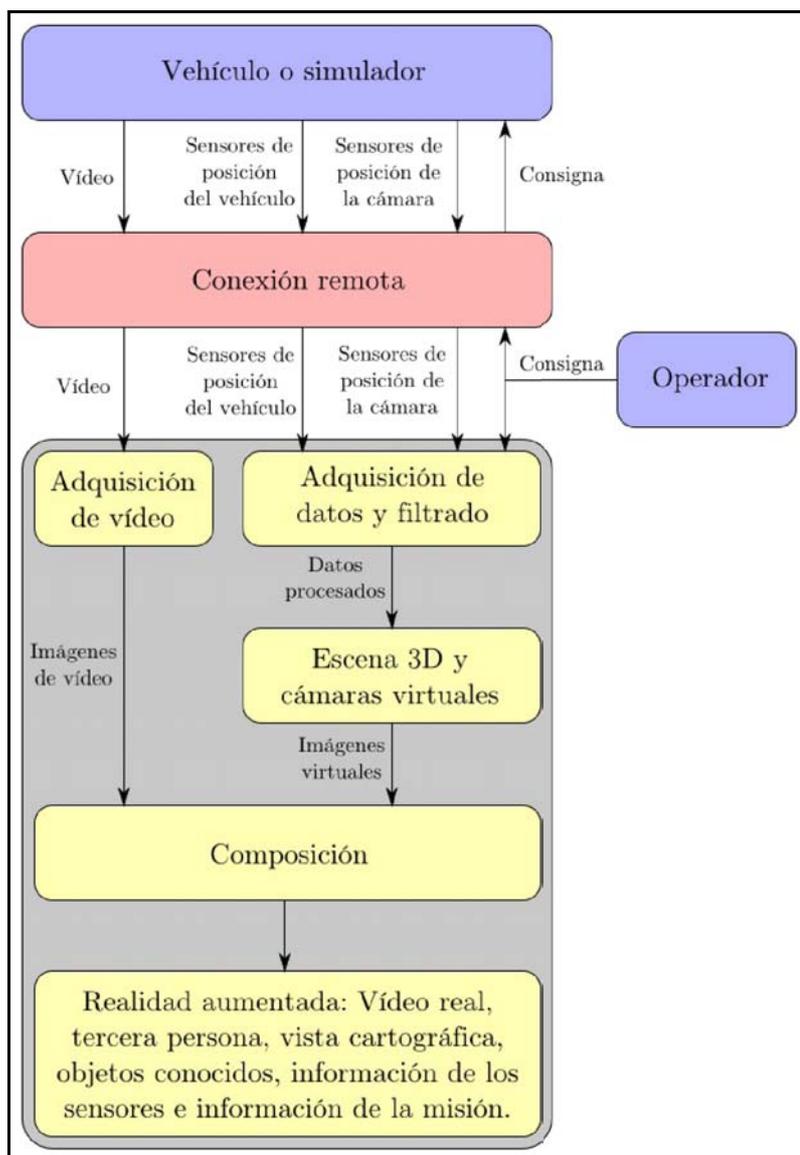


Figura 3.13. Esquema del proceso de creación de la vista de realidad aumentada

El módulo de realidad aumentada genera una imagen sintética del entorno conocido y del estado del vehículo teleoperado. Esta vista contiene:

- ▶ Imagen de la cámara del vehículo teleoperado mostrada como fondo de la imagen principal
- ▶ Valor de los datos de los sensores:
 - ▶ Longitud y latitud (mostrado como texto)
 - ▶ Orientación (mostrado como una brújula)
 - ▶ Altitud (mostrado como una barra)
 - ▶ Velocidad del vehículo
- ▶ Consignas del operador:

- ▶ Orientación (mostrado con una segunda aguja en la brújula)
- ▶ Altitud (mostrado también como una barra)
- ▶ Cabeceo, balanceo y guiñado (horizonte artificial)
- ▶ Velocidad del vehículo
- ▶ Vista 3D creada a partir de la cámara virtual que muestra los siguiente elementos delante de la imagen real del vídeo:
 - ▶ Terreno en modo *wireframe*
 - ▶ Objetos conocidos del escenario también en modo *wireframe*
 - ▶ Distancia del vehículo teleoperado con los objetos conocidos
- ▶ Vista de perspectiva 3D. Esta es una vista virtual del vehículo teleoperado en tercera persona
- ▶ Vista superior. Esta es otra vista virtual del vehículo pero simulando una vista cartográfica. Muestra la siguiente información:
 - ▶ Orientación del vehículo
 - ▶ Trayectoria del vehículo
 - ▶ Elevación del terreno mediante isoclinas
 - ▶ Objetos conocidos del escenario con etiquetas de texto
 - ▶ Distancia del vehículo a los objetos conocidos
 - ▶ Ruta de la misión

El usuario puede elegir en cada momento que vista desea usar mediante las teclas de función.

3.4. Ensayos realizados

Para comprobar la funcionalidad del sistema de teleoperación desarrollado en el proyecto *TeleDrive* se realizaron diversas pruebas de cada subsistema por separado y finalmente una prueba del sistema completo. En total se llevaron a cabo 4 pruebas que se detallan a continuación.

3.4.1. Prueba de teleoperación desde grandes distancias

En este ensayo se buscaba comprobar el funcionamiento de varios de los subsistemas del proyecto *TeleDrive*:

- ▶ Estación de control remoto
- ▶ Software de teleoperación del vehículo terrestre
- ▶ Adaptación del vehículo teleoperado a los requerimientos de este proyecto

- Realización de un ensayo de teleoperación desde muy largas distancias

El vehículo, situado en las instalaciones de la Universidad de Zaragoza, fue teleoperado desde Nepal usando la cámara de abordo del vehículo, mientras desde Francia se supervisó el proceso, desde la estación de control remoto, usando una cámara ambiente.

Para poder teleoperar el vehículo desde tan larga distancia se hizo uso de Internet como medio de transmisión de los datos, tanto de los controles como de las imágenes. En un sistema de transmisión de este tipo se depende mucho de la propia red que escapa en gran parte de nuestro control. Solo se puede asegurar un correcto funcionamiento en ambos extremos de la línea, pero no del sistema de transmisión intermedio.

También se tuvo que adaptar el mando de control para poder usarlo a través de un ordenador. De esta forma se puede controlar el vehículo desde cualquier ordenador conectado a Internet que tenga el software adecuado desarrollado específicamente para este proyecto. También se puede observar la cámara ambiente, colocada encima del monitor, usada por el supervisor remoto, situado en Francia.



Imagen 3.18. Imagen del adaptador del mando de control usado en la prueba



Imagen 3.19. Imagen del vehículo teleoperado terrestre durante la prueba

En la imagen 3.19 vemos el vehículo teleoperado en la Universidad de Zaragoza durante este ensayo. Debido a las características todoterreno del vehículo se hizo uso de todo el espacio disponible incluyendo las partes ajardinadas.

En los ensayos realizados se midió un retraso en las comunicaciones de unos 1,2 segundos, por lo que la propia tarea de teleoperación debió de adaptarse a tales circunstancias, limitando la velocidad máxima del vehículo y reducir de este modo el riesgo. En concreto la velocidad máxima del vehículo teleoperado en este ensayo se ajustó a 10 Km/h. Es decir, que el operador remoto debe de dejar un margen de más de 4 metros para poder reaccionar en caso necesario. En este ensayo se observó que aún con este retraso era posible realizar la tarea de teleoperación con una más que razonable seguridad y destreza.

A pesar de los obstáculos existentes y demás riesgos existentes en el escenario disponible (árboles, terraplenes, etc) la tarea de teleoperación se llevó a cabo sin ningún percance.

Este ensayo además se realizó públicamente por lo que tuvo una repercusión en los medios de información locales tanto en España como en Francia.

3.4.2. Prueba del mini-submarino teleoperado en Oceanopolis

La prueba del mini-submarino fue llevada a cabo en dos etapas. En la primera se realizó una calibración del sistema en una piscina cercana a Marsella. De esta manera el ensayo final en el acuario de Ocenopolis se llevó a cabo con el sistema ya preparado. En Marsella se llevaron a cabo diversos ensayos de calibración del mini-submarino, como puede verse en las siguiente imágenes:



Imagen 3.20. Imágenes de las pruebas realizadas en Marsella

Estos ensayos previos fueron importantes, ya que permiten una mejor calibración y ajuste del mini-submarino ya que las condiciones ambientales son mucho más favorables: mejor visibilidad, obstáculos estáticos y conocidos, mejor calidad del agua, etc.

En concreto en estos ensayos se evaluaron los siguientes subsistemas:

- ▶ Selección e instrumentación del mini-submarino teleoperado
- ▶ Desarrollo del módulo de realidad aumentada

Como puede verse en las imágenes anteriores, se situaron diversos obstáculos para simular los objetos que se encontrarían más adelante en las pruebas en Oceanopolis. De esta manera se calibró también el sistema de realidad aumentada. A continuación vemos imágenes del sistema de realidad aumentada en el que se reconocen correctamente los diversos objetos existentes en el escenario.



Imagen 3.21. Capturas del módulo de realidad aumentada

En imagen 3.22 vemos el mini-submarino en Oceanopolis y los objetos situados para su reconocimiento.



Imagen 3.22. El mini-submarino durante los ensayos en Oceanopolis

Una vez comprobado el funcionamiento del mini-submarino y el sistema de realidad aumentada se procedió a realizar los ensayos en oceanopolis donde se llevaron a cabo numerosas pruebas. En este caso el mini-submarino operó en un ambiente real, en el que se situaron diversos objetos conocidos para comprobar si era

capaz de reconocerlos.

Estos ensayos se realizaron con éxito y se comprobó la eficiencia del sistema y el correcto funcionamiento tanto del mini-submarino como del sistema de realidad aumentada, ya que el mini-submarino fue capaz de reconocer los objetos situados en el escenario de teleoperación.

3.4.3. Prueba del sistema de visión estereoscópica

El mini-submarino fue equipado con un sistema innovador de visión estereoscópica. En las siguientes imágenes podemos ver el sistema acoplado al mini-submarino:



Imagen 3.23. Sistema de visión estereoscópica usado en el mini-submarino

Los ensayos llevados a cabo en el laboratorio demostraron el correcto funcionamiento del sistema, sin embargo los ensayos llevados a cabo en condiciones reales no fueron tan satisfactorios. Estos ensayos fueron realizados en la costa de Fiumicino, pero bajo unas condiciones meteorológicas bastante desfavorables, por lo que la visibilidad se vio fuertemente disminuida, impidiendo la realización de las pruebas deseadas.

3.4.4. Prueba del sistema completo

El objetivo de estos ensayos fue la validación de la cadena completa de teleoperación: Vehículo teleoperado, estación de control central y *showroom*. Para la realización de esta prueba se condujo el vehículo teleoperado en diferentes terrenos incluyendo obstáculos como el de la imagen 2.25. Conjuntamente, la estación de control central y el *showroom* reproducen el movimiento del vehículo teleoperado, mediante sendas plataformas móviles, transmitiendo al operador del vehículo y a los pasajeros virtuales la sensación de movimiento.

En la plataforma esférica (estación de control central) estaba montado el operador del vehículo realizando las tareas de teleoperación (ver imagen 2.26) y en la plataforma hexápoda (*Showroom*) estaban los pasajeros virtuales. Ambas plataformas simulaban sincronizadamente el movimiento del vehículo teleoperado cuando éste pasaba sobre un obstáculo.

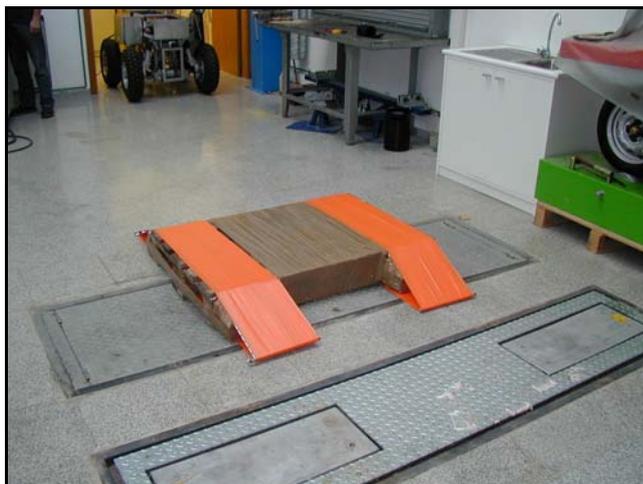


Imagen 3.24. Obstáculo usado en las pruebas



Imagen 3.25. Teleoperador del vehículo montado en la plataforma esférica

Los subsistemas involucrados en las pruebas fueron:

- ▶ Diseño y desarrollo de la estación de control central
- ▶ Diseño y desarrollo del *showroom*
- ▶ Desarrollo y comprobación de los algoritmos de movimiento de la estación de

control central y del *showroom*

- Estación de control remoto
- Desarrollo de software específico para la teleoperación del vehículo terrestre
- Adaptación del vehículo teleoperado terrestre a los requerimientos del ensayo

En estos ensayos se pudo comprobar que el sistema completo es totalmente funcional y que tanto la estación de control central como el *showroom* son capaces de simular con bastante eficiencia la sensación de movimiento. El sistema de transmisión por radio frecuencia usado en estos ensayos proporcionaba una calidad de vídeo suficiente para los requerimientos del ensayo, aunque sufría de leves interferencias.

Durante los ensayos se midió un retraso en el movimiento de las plataformas móviles de 1,2 segundos aproximadamente. Esto fue debido en parte al empeoramiento de la señal de los sensores de movimiento embarcados en el vehículo mediante la transmisión analógica. Para eliminar el ruido de la señal de estos sensores de debieron usar varios pasos de filtros que introducían un gran desfase. Como se ha dicho en capítulos anteriores, para una correcta sensación de telepresencia, es importante la sincronización entre la imagen recibida y la simulación del movimiento. Además, se puede producir el llamado *motion sickness* [49, 43, 62] que afecta tanto al operador del vehículo como a los pasajeros virtuales. Por lo tanto, y para evitar estos inconvenientes, se decidió aplicar un retraso voluntario a las imágenes recibidas, para sincronizarlas con la simulación del movimiento.

También se realizaron pruebas para comparar la destreza del operador usando y sin usar la plataforma generadora de movimiento para poder comparar ambas situaciones. Estos ensayos fueron llevados a cabo en las instalaciones de la Universidad de Zaragoza, en la parte trasera del edificio Betancourt. En la tabla 3.2 se valora la destreza del operador al realizar diversas maniobras.

Las maniobras realizadas en los ensayos fueron: desplazamiento en línea recta, *slalom* a baja velocidad, *slalom* a media velocidad, frenada y paso por rampa. En la imagen 3.24 se puede ver la rampa usada en la última maniobra.

Maniobra	Con movimiento de la plataforma	Sin movimiento de la plataforma
Desplazamiento en línea recta	Alta	Alta
<i>Slalom</i> a baja velocidad	Alta	Media
<i>Slalom</i> a media velocidad	Media	Baja
Frenada	Media	Baja
Paso por rampa	Alta	Media

Tabla 3.2. Destreza observada del operador en diferentes maniobras

Se han elegido cuatro niveles de destreza: baja, media, alta y muy alta. El primer nivel, baja, indica que el operador no es capaz de realizar la maniobra o la lleva a cabo con serias dificultades. El segundo nivel, media, indica que el operador puede realizar la maniobra con pocas dificultades. En el tercer nivel, alta, la maniobra no representa ninguna dificultad para el operador. El cuarto nivel, muy alta, se reserva como comparación objetiva indicando el nivel de destreza de un operador adiestrado que realiza la maniobra de forma directa, sin hacer uso de la teleoperación.

3.5. Conclusiones

Como se ha visto en los ensayos descritos anteriormente, en el proyecto *TeleDrive* se consiguió realizar con éxito toda la cadena de teleoperación tanto de un vehículo terrestre, como de un vehículo acuático. Se realizaron ensayos con resultados totalmente positivos de teleoperación remota a grandes distancias a través de Internet del vehículo terrestre y también la teleoperación de este mismo vehículo desde un puesto multisensorial. También se llevaron a cabo ensayos con el mini-submarino teleoperado y se validaron las herramientas de realidad aumentada desarrolladas especialmente para este proyecto.

Los ensayos realizados fueron sintéticos, pero las tecnologías usadas y desarrolladas son lo suficientemente maduras para ser aplicadas en casos reales. En este caso la transmisión a través de Internet para la teleoperación de vehículos puede ser usada en aplicaciones de baja velocidad, ya que el retraso en las comunicaciones representa un importante aspecto de seguridad. Sin embargo, usando sistemas más avanzados de comunicación dedicados, como por ejemplo comunicaciones vía satélite, se podrían conseguir mejores resultados.

También se ha podido comprobar la eficiencia de las plataformas móviles en la simulación del movimiento del vehículo teleoperado. El uso de un asiento activo o plataforma móvil representa un avance en la teleoperación de vehículos, ya que se aumenta considerablemente el grado de inmersión del operador en el entorno remoto, aplicando totalmente el concepto de telepresencia.

Además se pudo comprobar que el uso de plataformas móviles aumenta considerablemente la precisión y destreza del operador remoto, ya que se está percibiendo el movimiento del vehículo teleoperado. Sin embargo es de especial importancia la sincronización entre el movimiento y el vídeo, ya que el sistema de percepción humano es muy sensible a los desfases entre ambas señales.

CAPÍTULO 4

DESARROLLO Y PRUEBAS DE UN VEHÍCULO TELEOPERADO DE MEDIA VELOCIDAD

4.1. Introducción

Para el desarrollo de este vehículo teleoperado se usaron muchos de los conocimientos adquiridos en el desarrollo del proyecto *TeleDrive*, descrito en el capítulo anterior.

Este vehículo fue desarrollado para la empresa Applus como banco de prueba de ADAS (Advance Driving Assistance System) en vehículos de Mercedes-Benz. Las características de este vehículo teleoperado son totalmente diferentes a las del vehículo teleoperado usado en el proyecto *TeleDrive* ya que tienen objetivos diferentes. No se trata de un proyecto de investigación como el proyecto *TeleDrive* sino de desarrollo. Es decir, en este caso el objetivo era construir un vehículo teleoperado totalmente funcional y adaptado a unos requerimientos específicos.

Ya que este vehículo fue desarrollado por encargo y con un objetivo bien definido, vamos a explicar primero la forma en la que se iba a usar el vehículo, para después describir el diseño y los elementos del vehículo.

4.2. Objetivos y funciones del vehículo

La función principal del vehículo teleoperado era probar nuevos sistemas ADAS en turismos de Mercedes-Benz. El funcionamiento de estos sistemas de seguridad queda

fuera del alcance de este capítulo, ya que mi participación se basó exclusivamente en el desarrollo del vehículo teleoperado. Este vehículo fue desarrollado a partir de la definición de los ensayos que se iban a realizar.

En el ensayo intervienen dos vehículos:

- Vehículo turismo objetivo de los ensayos
- Vehículo teleoperado

Intervienen además, al menos dos personas:

- Conductor del vehículo turismo
- Conductor del vehículo teleoperado

Ambas personas se sitúan en el vehículo turismo, la primera obviamente en el puesto del conductor y la segunda en el puesto del copiloto. El conductor del vehículo teleoperado realiza las maniobras oportunas con el mismo para comprobar la reacción del sistema ADAS del vehículo turismo. El ensayo básico consiste en situar el vehículo teleoperado delante del vehículo turismo, ambos circulando a una velocidad similar, y realizar una frenada brusca. El sistema ADAS del vehículo turismo deben de actuar para evitar la colisión. En la siguiente figura podemos ver un esquema del ensayo:

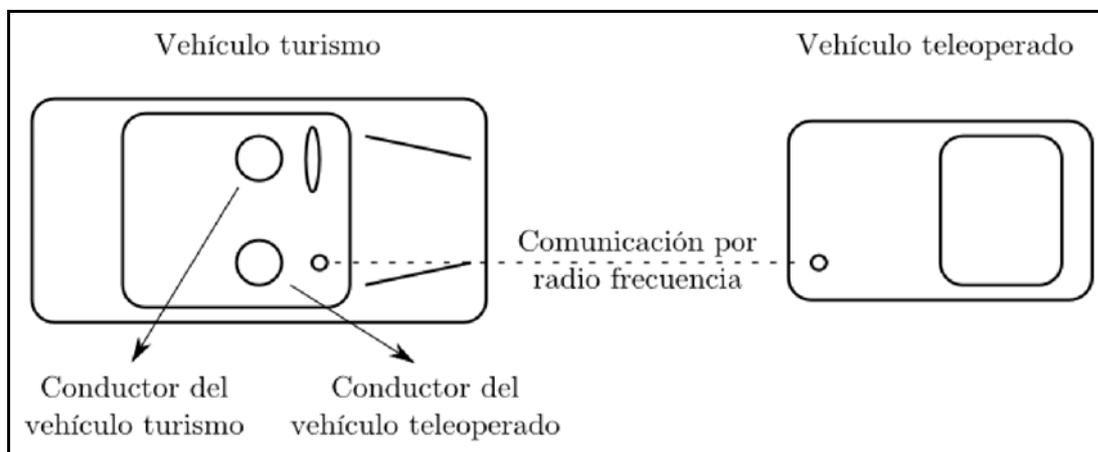


Figura 4.1. Esquema del ensayo

A partir de estos datos se derivan las características que debe de cumplir del vehículo teleoperado:

- Posibilidad de circular a media velocidad. Ya que se trata de ensayos de sistemas de seguridad, hay que garantizar que se puedan realizar a velocidades suficientemente elevadas. Se deben de garantizar al menos 40 Km/h de velocidad máxima.
- Sistema de parachoques especial en la parte trasera. Ya que son ensayos de

sistemas de seguridad experimentales cabe la posibilidad de que se produzca una colisión. Este sistema de parachoques debe de garantizar la integridad de ambos vehículos.

- ▶ Sistema de visión directa. Ya que la teleoperación es a corta distancia y el operador del vehículo teleoperado estará siempre en visión directa con el vehículo no hace falta dotarlo de sistema de cámaras.
- ▶ Tiempo de reacción. Para una teleoperación cómoda se debe de conseguir un tiempo de reacción de los controles razonable. En este caso, debido a que se trata de un vehículo teleoperado de media velocidad, es especialmente crítico.
- ▶ Sensibilidad en los controles. Debido también a que se trata de teleoperación a media velocidad debemos de tener una sensibilidad suficiente en los controles de dirección para poder ejecutar maniobras suaves y precisas.

Estas son las características particulares que debe de cumplir el vehículo teleoperado, aunque existen otras comunes al diseño de cualquier vehículo teleoperado:

- ▶ Seguridad hombre-máquina. Se debe de asegurar en todo momento que cualquier fallo de transmisión o alimentación no derive en una situación de riesgo. Por ello se debe de dotar al vehículo teleoperado de un sistema de seguridad a prueba de fallos.

4.3. Diseño del vehículo teleoperado

4.3.1. Introducción

Como hemos visto en el apartado anterior, la principal característica del vehículo es que debe de circular a media velocidad. Conseguir esto con un vehículo fabricado de *ex-profeso* es muy complicado, ya que habría que asegurar el correcto funcionamiento de los elementos mecánicos. La etapa de diseño y fabricación del vehículo habría sido demasiado larga para fabricar una sola unidad. Por esta razón se optó por usar como base un vehículo comercial.

Una vez seleccionado el vehículo se procedió a su transformación a vehículo teleoperado. Para ello hizo falta instalar un sistema de actuadores para accionar los diversos controles del vehículo. Este sistema de controles anula la posibilidad de un manejo manual, de forma que este vehículo solo puede emplearse en modo teleoperado. Estos actuadores están controlados por un autómatas capaz de recibir comandos a través de un radio-modem.

Por otra parte hace falta desarrollar el interfaz con el que se controla el vehículo. Se fabricó un maletín con todo el equipo necesario consistente en: batería, radio-modem, ordenador portátil y joystick.

4.3.2. Vehículo base

Dado que cualquier vehículo del mercado es capaz de alcanzar la velocidad exigida en los requerimientos (por otra parte cualquier vehículo que pueda circular es capaz de superar los 40 Km/h) y que la capacidad de carga tampoco representa un problema se optó por buscar el vehículo más sencillo posible siempre que permitiera su adaptación a vehículo teleoperado.

El vehículo elegido para su transformación fue un Aixam Mega con chasis y cabina, sin ningún tipo de carrozado especial. Se trata de un camión ultra ligero que puede ser conducido sin licencia de conducción. La zona de carga se dejó libre para instalar el sistema de control y comunicación del vehículo.



Imagen 4.1. Vehículo Aixam Mega chasis cabina usado como base

Se eligió la opción de motor eléctrico de 4Kw ya que para la aplicación se ajustaba perfectamente a las necesidades. La principal desventaja de un vehículo con motor eléctrico respecto a uno con motor de combustión es la autonomía y el tiempo de carga. En este caso, el vehículo iba a ser usado en pruebas puntuales, por lo que el tiempo de autonomía se consideró suficiente.

Aparte de las características propias de cualquier vehículo (luces de posición, intermitentes, freno de servicio, freno de mano, limpiaparabrisas, etc) las características particulares de este vehículo son las siguientes:

- ▶ Motor eléctrico de 4Kw
- ▶ Tracción delantera
- ▶ Marcha adelante y marcha atrás
- ▶ Velocidad máxima 50 Km/h (autolimitados)
- ▶ Dirección delantera
- ▶ Autonomía a régimen máximo de 1,5 horas
- ▶ Dos plazas
- ▶ Frenos de tambor en las cuatro ruedas

4.3.3. Sistemas adicionales de teleoperación

Para poder usar este vehículo como teleoperado se añadieron tres servo-actuadores eléctricos que actuaban sobre el acelerador, freno y dirección respectivamente. El cambio de marcha se dejó sin automatizar, de forma que no se puede cambiar el

sentido de la marcha desde el puesto de teleoperación. Estos tres actuadores están controlados por un autómata situado en la parte trasera del vehículo. Este autómata es capaz de recibir comandos a través de un radio-modem.

En la siguiente imagen podemos ver los servo-actuadores del acelerador y del freno.

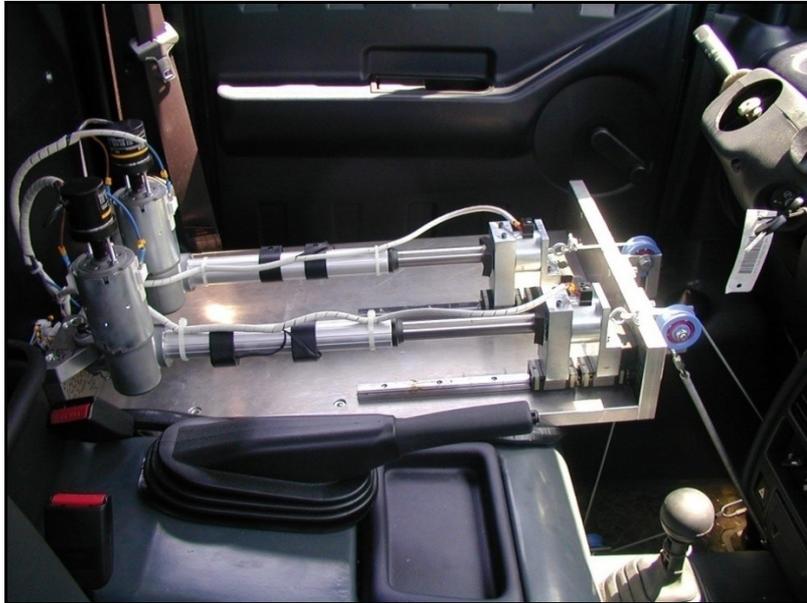


Imagen 4.2. Actuadores del freno y del acelerador

En la parte trasera del vehículo está situado el sistema de control y las baterías auxiliares. En esta imagen vemos el armario con el autómata que controla los servo-actuadores.

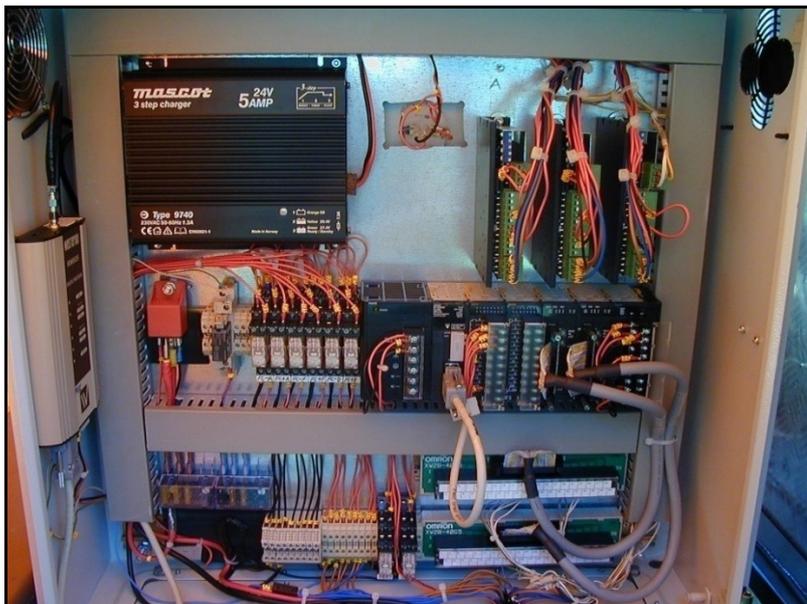


Imagen 4.3. Autómata que controla el vehículo teleoperado

Para implementar la seguridad hombre-máquina se debe de asegurar que en caso de un problema eléctrico o de comunicación el vehículo se detenga solo. Por lo tanto,

se debe de hacer el sistema de forma que la posición de reposo de los pedales debe de ser con el acelerador suelto y con el freno al máximo. Para conseguir esto los pedales del freno y del acelerador están sometidos a dos acciones opuestas: un muelle, que los lleva a su posición de reposo, y el servo-actuador. De esta manera el servo-actuador tiene que vencer la fuerza del muelle y la del propio pedal, pero nos aseguramos de que en caso de emergencia basta con devolver a los pedales a su posición inicial. Para poder hacer esto se usó un acoplamiento electromagnético entre los servo-actuadores y los pedales del freno y del acelerador. Si hay un fallo en el sistema de comunicación, el autómatas corta la corriente de estos electroimanes y los pedales van a su posición de reposo. Y si hay un fallo eléctrico los electroimanes dejan de actuar y vuelven a su posición de reposo.

Esquemáticamente sería lo siguiente:

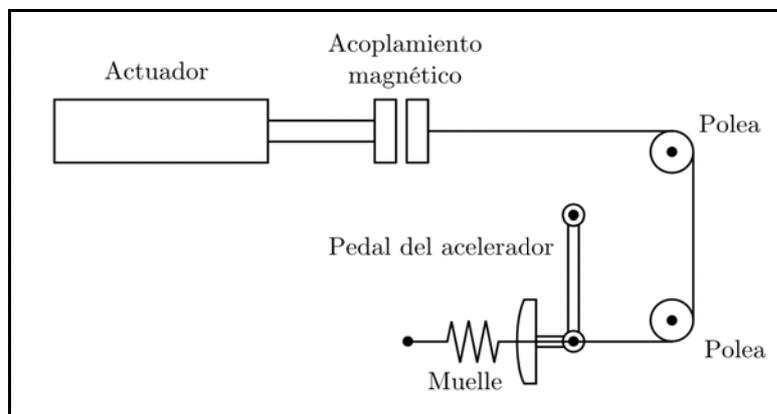


Figura 4.2. Esquema del pedal del acelerador

Como se puede ver en la figura anterior, el muelle tiende a llevar el pedal del acelerador a su posición de reposo, que es desacelerar. El actuador, a través del acoplamiento electro-magnético mueve el pedal a la posición de acelerar. Si este acoplamiento deja de actuar, por fallo eléctrico o de comunicación, el vehículo deja de acelerar.

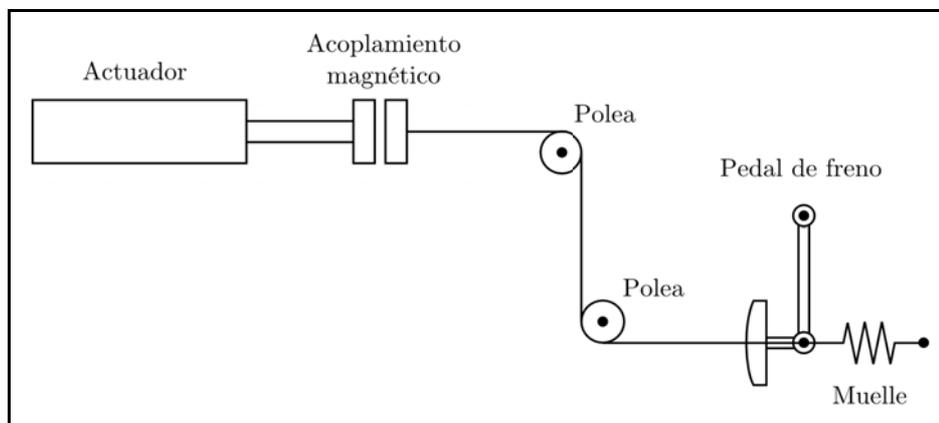


Figura 4.3. Esquema del pedal de freno

En el caso del pedal de freno el muelle y el actuador tienen funciones opuestas. En este caso la posición de reposo es con el freno al máximo. De esta manera cuando se

interrumpe el acoplamiento magnético el vehículo frena.

El control de los actuadores se realiza en posición, por lo que es posible disponer de retroalimentación. Es decir, el operador conoce en cada momento cual es la posición de los actuadores, para saber cual está siendo la respuesta del vehículo a sus órdenes de control. Esto añade un sistema de seguridad adicional ya que el operador puede reconocer un problema inmediatamente y detener el proceso. Si el operador corta la comunicación el vehículo se detendrá automáticamente, mediante el sistema anteriormente descrito.

Para asegurar un mínimo de seguridad en caso de impacto por alcance, el vehículo está dotado de un parachoques especial en la parte trasera. Este parachoques está compuesto por una base rígida con tres amortiguadores de goma tubulares. De esta manera podemos asegurar la integridad de ambos vehículos (el vehículo teleoperado y el vehículo de los ensayos) en colisiones a baja velocidad relativa.



Imagen 4.4. Parachoques especial montado en el vehículo teleoperado

4.3.4. Sistemas de comunicaciones

Como se ha dicho antes, el autómatas que controla los actuadores recibe comandos a través de un radio-modem. Mediante estos comandos es posible controlar a distancia el vehículo teleoperado.

Algunas características del radio-modem utilizado son las siguientes:

- Posibilidad de usar hasta 5 repetidores
- Hasta 10Km de rango a 4800 baudios

- Interfaz de comandos AT
- Comunicación RS232 y RS485

La conexión entre el radio-modem y el ordenador de control y la conexión entre el radio-modem y el autómata que control el vehículo teleoperado se realiza a través del puerto serie RS232. Ambos radio-modem solo realizan la función de túnel en la comunicación y únicamente hacen llegar los datos del ordenador al autómata sin ningún tipo de procesado. Por esta razón los radio-modem son transparentes tanto al ordenador como al autómata y no afectan al protocolo de comunicación existente entre ambos. En la figura (...) se puede ver el esquema de comunicaciones.

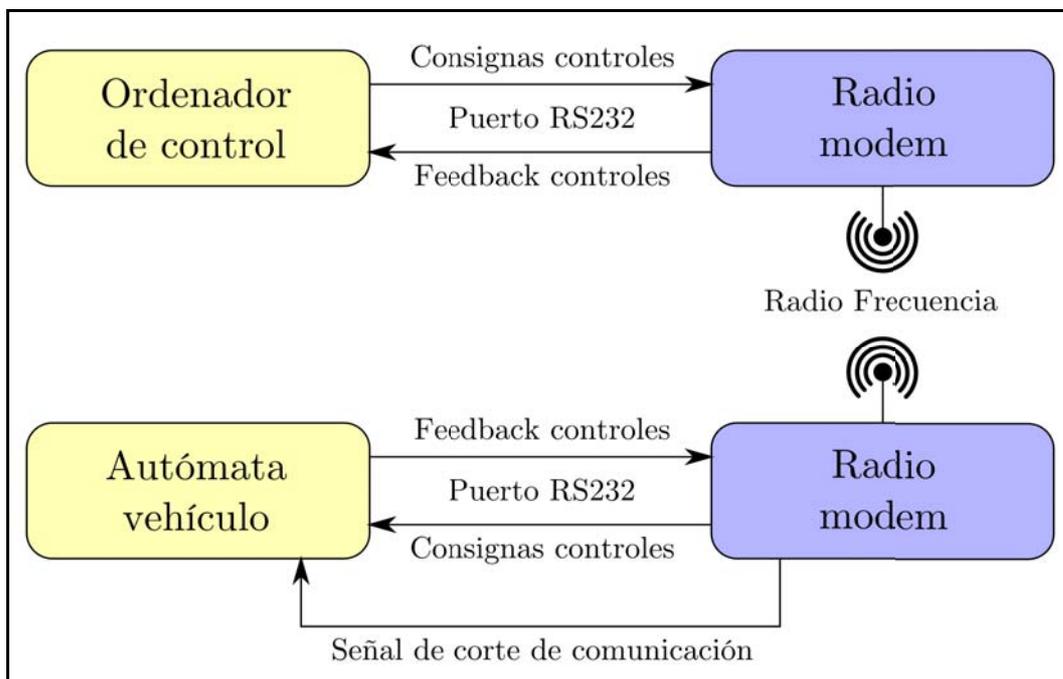


Figura 4.4. Esquema de comunicaciones entre el ordenador de control y el autómata del vehículo teleoperado

Los radio-modem usados en este proyecto tienen un sistema de seguridad que avisa en caso de corte de comunicación. Las estaciones se deben de configurar en modo esclavo-maestro. El radio-modem del maletín de control, configurado en modo esclavo, se conecta al radio-modem del vehículo teleoperado, configurado en modo maestro. De esta manera si el radio-modem maestro detecta un corte en la comunicación manda una señal al autómata que detiene automáticamente el vehículo. El radio-modem maestro manda una señal de verificación cada segundo y si no recibe respuesta en dos envíos consecutivos envía esta señal.

Además de la propia seguridad de la comunicación de los radio-modem existe la propia seguridad del protocolo de comunicación entre el ordenador de control y el autómata. El autómata está configurado para usar el protocolo estándar *Hostlink*. Este protocolo incluye control de errores mediante *checksum* lo que nos da una doble seguridad en las comunicaciones.

En el protocolo *Hostlink* cada comando que se envía al autómeta recibe una respuesta de confirmación, por lo que hay que esperar entre envíos. En este caso se emplearon dos tipos de envíos. El primero de escritura en un área de memoria para la consigna de los servo-actuadores. Y el segundo de lectura de un área de memoria para conocer la posición real de los servo-actuadores, para tener realimentación. Además los paquetes de datos pasan por tres fases de transmisión: ordenador-radiomodem, radiomodem-radiomodem y radiomodem-autómeta (ver figura ...). Todos estos factores aumentan el tiempo de respuesta del vehículo. El tiempo de ciclo completo medido fue de unos 0,4 segundos, que traducido en distancia recorrida por el vehículo a su velocidad máxima son 5,5 metros.

Esta distancia de seguridad es únicamente debida al ciclo de comunicación, pero para realizar una teleoperación segura hay que dejar mucho más margen. Primero por el tiempo de reacción del operador del vehículo teleoperado, que generalmente se establece entre 0,4 y 0,6 segundos, y segundo por el tiempo de frenada del vehículo teleoperado. Con una deceleración de 0,4g ($3,92\text{m/s}^2$) a 50Km/h recorre unos 24 metros de distancia.

4.3.5. Interfaz de control

El interfaz de control consiste en un maletín portátil que puede ser llevado por un operador. Este maletín contiene los siguientes elementos:

- Batería
- Ordenador portátil
- Radio-modem (conectado al ordenador portátil mediante el puerto RS232)
- Joystick (conectado al ordenador portátil mediante el puerto USB)

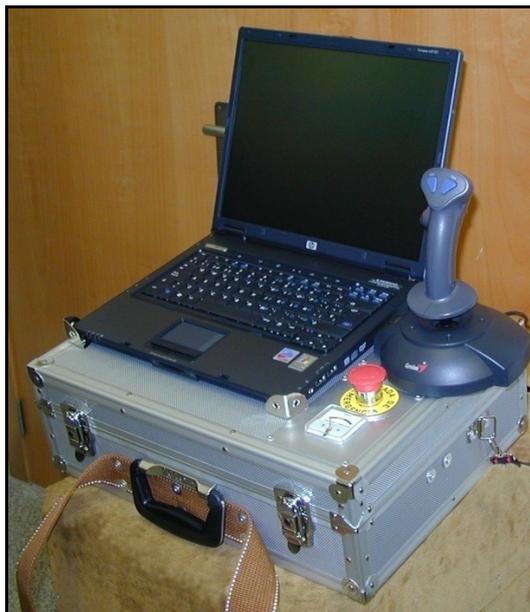


Imagen 4.5. Maletín de control

La batería alimenta tanto al radio-modem como al ordenador portátil, por lo que éste debe estar siempre sin batería. En caso contrario la batería del maletín intenta recargar la batería del portátil y se reduce drásticamente su duración.

Aunque según las especificaciones de las pruebas a realizar por este vehículo el operador del vehículo teleoperado va sentado en el coche objeto de los ensayos, el maletín de control está adaptado para poder llevarlo colgado con sujeciones a la cintura y al cuello. De esta manera el operador también puede manejarlo con comodidad estando de pie.



Imagen 4.6. Operador con el maletín de control

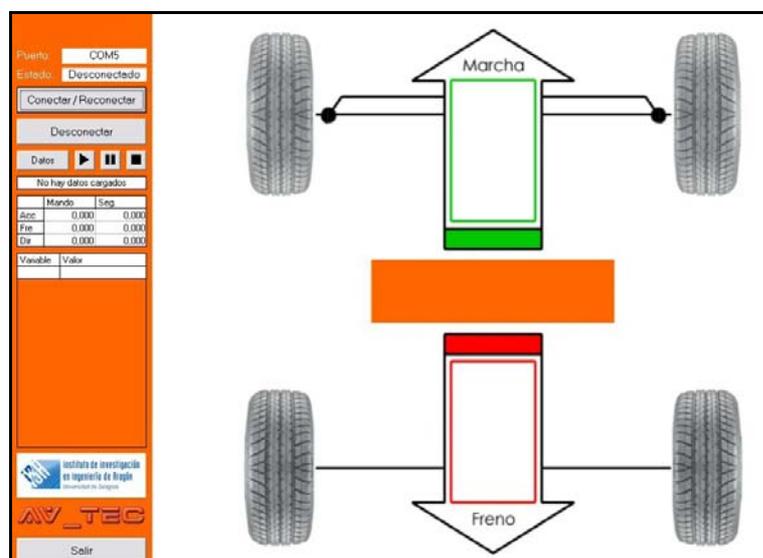


Imagen 4.7. Interfaz gráfic para conducir del vehículo teleoperado

En la pantalla del portátil aparece un esquema del vehículo en el que se indican las consignas de control que se envían y la retroalimentación de los servo actuadores. La barra verde indica la posición del acelerador y la barra roja la del freno. Ambas barra están divididas en dos partes, izquierda y derecha que indican la consigna y la retroalimentación respectivamente.

La dirección del vehículo se representa mediante la orientación de las ruedas directrices. Se dibujan dos ruedas con transparencia al 50% para la consigna y la retroalimentación.

A parte de estas representaciones gráficas se muestran los datos numéricos en una tabla. También existe la posibilidad de generar un conjunto de consignas para ejecutarlas automáticamente. Esta última característica se implementó bajo la petición de la empresa que encargó el vehículo teleoperado. Es una sencilla utilidad que permite reproducir consignas fijas en función del tiempo.

4.4. Ajustes del sistema

Antes de realizar pruebas con el vehículo en movimiento se probaron y calibraron los sistemas por separado:

- ▶ Cadena de comunicaciones ordenador-radio-modem-autómata
- ▶ Cadena de control autómatas-actuadores

En la cadena de comunicaciones hizo falta ajustar todos los parámetros de las conexiones. En los enlaces entre el ordenador y el radio-modem y el autómatas y el radio-modem se seleccionó la velocidad máxima de comunicación. Sin embargo en la comunicación entre los dos radio-modem se seleccionó una velocidad intermedia, ya que la distancia máxima de comunicación depende de la velocidad de transmisión. Para la aplicación a la que estaba destinado este vehículo no era necesaria demasiada distancia de teleoperación.

En la cadena de control autómatas-actuadores se ajustaron todos los parámetros de control en posición ajustando, entre otros parámetros, la velocidad máxima de cada actuador. Se probaron varias combinaciones, ya que una velocidad demasiado elevada produce un control más brusco del vehículo, pero una velocidad demasiado lenta produce un retardo. Siempre por motivos de seguridad, la velocidad del actuador del freno se configuró a una velocidad más elevada que el actuador del acelerador. La dirección se ajustó hasta obtener un comportamiento adecuado.

Una vez que los sistemas básicos estuvieron ajustados se pasó a probar el sistema completo. Para ello primero se desactivaron los electroimanes de los actuadores, de forma que los actuadores del freno y del acelerador no tenían ningún efecto. De esta manera se terminaron de ajustar los parámetros de velocidad. Luego, con los electroimanes conectados, pero con el vehículo en punto muerto, se comprobó la eficiencia de los actuadores controlando los pedales.

4.5. Ensayos realizados

4.5.1. Pruebas en la Universidad de Zaragoza

El primer ensayo con el vehículo en marcha se realizó en la Universidad de Zaragoza. Se realizó con extremo cuidado y siempre a velocidades muy bajas, ya que no se disponía de demasiado espacio. En estos primeros ensayos se comprobó que el vehículo tenía una respuesta muy buena a los comandos de control y con un retardo bastante contenido. Se midió un retraso máximo aproximado de 0.5 segundos. A la velocidad máxima del vehículo de 50 km/h supone una distancia recorrida de más de 6 metros, aunque en estos ensayos obviamente no se alcanzaron estas velocidades.

Una vez que se comprobó el funcionamiento general del sistema, se llevó a cabo la teleoperación del vehículo desde la plataforma esférica. De igual manera que en el proyecto *Teledrive*, el operador del vehículo estaba montado sobre la plataforma esférica conduciendo el vehículo. Se realizaron varias maniobras con y sin el uso de la plataforma esférica y se pudo constatar de nuevo una mejora en la destreza del operador cuando realiza la tarea desde una plataforma móvil. En la siguiente tabla, y con los mismo criterios seguidos en los ensayos del proyecto *Teledrive*, se muestran los resultados de estos ensayos.

Maniobra	Con movimiento de la plataforma	Sin movimiento de la plataforma
Desplazamiento en línea recta	Alta	Alta
<i>Slalom</i> a baja velocidad	Alta	Media
<i>Slalom</i> a media velocidad	Media	Baja
Frenada	Media	Baja

Tabla 2.1. Destreza observada del operador en diferentes maniobras

En este caso no se pudo realizar la maniobra de paso por rampa, ya que el peso del vehículo era excesivo para la rampa usada en el proyecto *Teledrive*. Este vehículo sin embargo era capaz de realizar una maniobra de *slalom* a alta velocidad, pero en las instalaciones de la Universidad de Zaragoza no hay espacio suficiente para realizar este ensayo con seguridad.

4.5.2. Pruebas en pista

Con este vehículo realizamos dos tandas de ensayos en la empresa Applus que cuenta con pistas adaptadas para ello. En esa ocasión ya no se utilizó la plataforma móvil, ya que no era posible trasladar la plataforma esférica desde la Universidad de

Zaragoza y no era el objetivo de este vehículo teleoperado. En estos ensayos se pudo probar el vehículo al máximo de sus posibilidades tanto en velocidad como en maniobrabilidad. En los primeros ensayos se produjo el fallo de uno de los elementos el autómata, que causó numerosos fallos generales de todo el sistema. Esta circunstancia redujo el número de ensayos, pero se comprobó la eficacia de los sistemas de seguridad. Por esta razón fue necesario realizar una segunda tanda de ensayos ya con el componente defectuoso cambiado.

A parte de la funcionalidad general del sistema, se comprobaron diversos aspectos particulares del vehículo:

- ▶ Se alcanzó la velocidad máxima teórica del vehículo de 50 Km/h en llano, gracias sobretodo a las instalaciones disponibles perfectamente adaptadas para ensayos con vehículos experimentales. En general es bastante arriesgado llevar un vehículo teleoperado a esta velocidad ya que, como hemos visto antes, la distancia que recorre el vehículo durante el tiempo de respuesta del sistema es relativamente elevada.
- ▶ La maniobrabilidad del vehículo resultó ser bastante buena con un buen tiempo de respuesta y velocidad en la ejecución de instrucciones fijas. Debido a la geometría del vehículo el radio de giro es bastante pequeño y debido a la tracción eléctrica la respuesta en arranque es bastante rápida.

Después de estos ensayos el vehículo quedó totalmente preparado para las pruebas para las que estaba destinado. Se realizó una simulación de los ensayos posteriores y el vehículo respondió perfectamente.



Imagen 4.8. Vehículo teleoperado

Como anécdota de estos ensayos, probamos el sistema de consignas automáticas introduciendo la siguiente cadena de instrucciones: aceleración, giro y frenado. Nos situamos en un vehículo siguiendo al vehículo teleoperado y ejecutamos las instrucciones. La primera parte de aceleración la realizó correctamente, pero la segunda, debido al poco radio de giro del vehículo teleoperado, la realizó más rápido de lo previsto. Nuestro vehículo no fue capaz de realizar esa maniobra tan rápidamente, por lo que el vehículo teleoperado se situó prácticamente a nuestra espalda. Afortunadamente realizó correctamente la tercera parte de la cadena de instrucciones y frenó a tiempo.

4.6. Conclusiones

En este proyecto se transformó un vehículo comercial eléctrico en un vehículo teleoperado. Se automatizaron los controles principales y se le dotó de un sistema de comunicación por radio frecuencia. El vehículo teleoperado pasó con éxito todas las pruebas y demostró una gran capacidad de maniobra. El sistema de comunicación resultó ser suficientemente rápido para la aplicación a la que está destinado demostrando además el nivel de seguridad del sistema de emergencia. Después de los ensayos y de los ajustes realizados el vehículo quedó totalmente operativo para realizar ensayos del sistema ADAS.

Además, el método empleado para su transformación es totalmente genérico, por lo que el sistema descrito en este capítulo puede ser aplicado a cualquier vehículo de serie.

Este vehículo se usó también, fuera de las especificaciones originales, para realizar ensayos de teleoperación desde un puesto multisensorial. Las conclusiones de estos ensayos fueron las mismas que en el proyecto *Teledrive*, demostrando una vez más que el uso de plataformas móviles en teleoperación de vehículos representa una gran ventaja aumentando la destreza del operador.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y FUTUROS TRABAJOS

5.1. Conclusiones generales

Históricamente, en el campo de la teleoperación de vehículos se han ido mejorando los sistemas de visualización [7, 55] incluyendo en algunos casos sistemas de realidad aumentada [38, 65]. También se han desarrollado interfaces hápticos para transmitir información de retorno al operador y se han mejorado los sistemas de comunicación y control de los vehículos teleoperados [10, 36]. Sin embargo ninguna aplicación actual hace uso de plataformas móviles para transmitir estímulos vestibulares.

En esta tesis se ha desarrollado toda la cadena de control de un vehículo teleoperado incluyendo un puesto multisensorial montado sobre una plataforma generadora de movimiento. En los ensayos finales de los proyectos *TeleDrive* y *“Desarrollo de un vehículo teleoperado”* se pudo verificar que el uso de plataformas móviles en la teleoperación de vehículos aumenta considerablemente no solo el grado de realismo sino también la destreza del operador del vehículo, ya que está percibiendo el movimiento del vehículo. Se pudo comprobar por lo tanto que existe una gran diferencia entre realizar una teleoperación con o sin estímulos vestibulares.

La eficiencia de las plataformas móviles está muy probada en simuladores de aviación [45, 50] y conducción [29, 30] en los que se ha podido observar y medir el efecto llamado *motion sickness* (comodidad, mareos, fatiga, etc) [19, 43, 62]. Al usar plataformas móviles en teleoperación de vehículos debemos de poner especial cuidado en la sincronización de la imagen y el movimiento, ya que cualquier desfase puede producir este efecto.

5.2. Contribuciones originales de este tesis

Repasando la lista de objetivos de esta tesis expuesta en el primer capítulo, se muestra a continuación un resumen de las contribuciones originales que esta tesis aporta al campo de la teleoperación de vehículos:

1. Se ha recopilado información acerca del estado actual de la teleoperación de vehículos. En la mayoría de los casos las mejoras se basan en sistemas de visión, control e interfaces hápticos, pero ninguna aplicación actual hace uso de plataformas de movimiento.
2. Se han analizado diversas arquitecturas de plataformas generadoras de movimiento, desde el punto de vista de percepción humano, para explicar de forma objetiva la influencia de los estímulos vestibulares en teleoperación de vehículos. Este análisis incluye la plataforma hexápoda [8, 9, 53], esférica [1, 31], de paralelogramos [16] y plataformas sobre raíles.
3. Se ha desarrollado la cadena de control de un vehículo teleoperado, aplicable a cualquier vehículo, basada en: Estación de control central, modulo de transmisión por radio frecuencia, PLC de control local del vehículo y actuadores de los mandos de control del vehículo. La estación de control central desarrollada consiste en un puesto multisensorial montado sobre una plataforma generadora de movimiento capaz de transmitir estímulos vestibulares al operador.
4. Se han seleccionado los sensores y cámaras a montar en el vehículo y se ha desarrollado el software necesario para la lectura y procesado de los datos.
5. Se ha desarrollado el software necesario para la teleoperación a grandes distancias a través de Internet. Este software permite una comunicación rápida y sencilla entre los dos extremos de la cadena de teleoperación, así como la transmisión de los datos de los sensores y las cámaras embarcadas en el vehículo teleoperado.
6. Se han desarrollado todos los componentes de la cadena de comunicación y control para gestionar el movimiento de la plataforma móvil y permitir la reproducción simultánea de la imagen y sonidos capturados por las cámaras embarcadas en el vehículo. Se han utilizado dos tipos diferentes de plataformas móviles: hexápoda y esférica, para el *showroom* y la estación de control central respectivamente.
7. En los ensayos realizados en los proyectos *Teledrive* y “*Desarrollo de un vehículo teleoperado*” se comprobó la eficiencia de los vehículos teleoperados desarrollados y la mejora que representa el uso de los estímulos vestibulares en la teleoperación de vehículos desde puestos multisensoriales. Para valorar esta mejora se realizaron ensayos con y sin el uso de plataformas generadoras de movimiento.

5.3. El futuro de la teleoperación y telepresencia

Con el fin de evitar riesgos a las personas, la tecnología de la teleoperación de vehículos se ha ido desarrollando enormemente. Primero en el uso de nuevas tecnologías de comunicación y segundo en la evolución de los propios robots y vehículos teleoperados.

Uno de los signos de que una tecnología ya está madura es cuando empieza a llegar a todo el mundo. Hace unos años un vehículo teleoperado con sistema de comunicaciones y transmisión de audio y vídeo, solo podía ser usado en aplicaciones específicas debido a su alto coste. Actualmente hay juguetes que consiguen reproducir en pequeña escala estos dispositivos. Esto es en parte gracias al desarrollo de Internet y sobretodo de las redes inalámbricas hace posible que se puedan teleoperar robots y vehículos desde grandes distancias de una manera relativamente sencilla.

Poco a poco la robótica va avanzando y vamos creando dispositivos autónomos. Estos dispositivos simplemente realizarán su trabajo sin intervención humana. Podrán explorar lugares recónditos, no solo en la Tierra sino en otros planetas y satélites del sistema solar. ¿De qué sirve tener un vehículo autónomo en el cráter de un volcán, en una falla oceánica o en la Luna? La telepresencia es la unión entre la máquina y el hombre. Gracias a ella podremos sentir que estamos en el sitio la máquina. Todavía se tienen que mejorar las tecnologías, pero poco a poco vamos incrementando el grado de realismo: gafas y cámaras estereoscópicas, sonidos holofónicos que reproducen el sonido tridimensional, plataformas de movimiento cada vez más avanzadas, etc.

5.4. Líneas futuras de investigación

Actualmente sigo trabajando en teleoperación de vehículos y plataformas móviles. Cada una de las partes que componen la red de teleoperación pueden ser mejoradas. Desde los sistemas de transmisión hasta el control del vehículo teleoperado, pasando por el control de la plataforma móvil.

En total he trabajado con tres vehículos teleoperados terrestres diferentes. El primero el vehículo usado en el proyecto *Teledrive* y el descrito en el capítulo 4. En estos momentos estoy trabajando con mi tercer vehículo teleoperado de características totalmente diferentes a los dos primeros (si bien, los dos primeros ya son totalmente diferentes entre si). También continuaremos con el trabajo y estudio de mini-submarinos teleoperados intentando de esta forma extender el uso de la teleoperación y telepresencia a todo tipo de vehículos, ya sean terrestres, acuáticos o aéreos.

Desde el punto de vista de la telepresencia, estamos trabajando en un dispositivo integrado para poder transformar cualquier vehículo terrestre, acuático o aéreo en un sistema de telepresencia, recogiendo y transmitiendo información de audio, vídeo y movimiento. En este caso no sería teleoperación ya que no seríamos capaces de controlar el vehículo a distancia, sino solamente percibir la misma sensación que tendríamos dentro de él.

Aunque ya tenemos una importante base tecnológica y de conocimiento, la

teleoperación y la telepresencia son dos campos en los que todavía quedan muchas cosas por desarrollar y mejorar. Lo más difícil, sin embargo, es poder aplicar la telepresencia en un proyecto de aplicación real, ya que hasta ahora sigue perteneciendo al campo de la investigación.

ANEXO A

Artículos y publicaciones

A.1. Artículos de revista

MAZA M.; y ORTIZ J. “Humanoid Motion Replication by a Spherical Motion Base”. *International Journal of Humanoid Robotics (IJHR)*. I.S.S.N.: 0219-8436. Marzo de 2007. Vol. 4, pp. 97-124.

Artículo indexado en: *Science Citation Index Expanded; Current Contents/Engineering, Computing & Technology; e ISI Alerting Services*.

MAZA M.; ORTIZ J.; y BASELGA S. “Wheeled Vehicle Teleoperation from a Multisensory Driving Interface”. *International Journal of Robotics Research*.

Artículo pendiente de publicación.

HUMANOID MOTION REPLICATION BY A SPHERICAL MOTION BASE

MARIO MAZA

*Department of Mechanical Engineering, University of Zaragoza-CPS
C/ María de Luna s/n, 50018 Zaragoza, Spain
mmaza@unizar.es*

JESUS ORTIZ

*Department of Mechanical Engineering, University of Zaragoza-CPS
C/ María de Luna s/n, 50018 Zaragoza, Spain
jortizsl@unizar.es*

A humanoid is a robot that looks like a human (it has human shape, with a trunk, two arms, two legs and a head) and has been specially designed to act like a human being. This paper presents the procedures and results of a series of tests consisting of the reproduction of some target humanoid movements (walking, sitting, standing up, etc.) by a 4-DOF spherical motion base. In this way, an operator seated on the motion base will be able to feel the movements of the humanoid, creating a feeling of teleexistence. This paper contributes to the improvement and development of the teleexistence /telepresence technology applied to humanoid research.

Keywords: teleexistence, telepresence, humanoid, motion reconstruction, motion base

1. Introduction.

Teleexistence (telepresence) represents a new concept that allows a person to have the sensation of being at a place other than the place where he or she actually is by using surrogate robots, remote/local computers and cybernetic human interfaces. This technology enables humans to experience events, perform tasks and act in a virtual environment just as if they were in essence or in effect in the real environment with the feeling of existing in a surrogate robot. To achieve this, it is necessary to transmit to the human sensory system stimuli simulating those in the real world.

It has been a long-standing dream among humans to create a robot similar to humans. A humanoid can be defined as a robot that must have a human-like body and human-like functionality with human-like perception. There are two standpoints in developing humanoids: the first is to make the robot's body and its actions more realistic; another one is to make the robot's behaviour more intelligent and human-like. Development of effective and accurate humanoid motion is a key task.

The reproduction of a remotely operated vehicle (ROV) motion, for teleoperation purposes, has already been dealt with in some publications and research projects [12, 13]. The experience gained in these projects can now be transferred to the replication of humanoid's movements by a motion base or motion platform, for teleoperation and teleexistence purposes. This paper intends the study of the replication of humanoid movements by a spherical motion base, considering this as an innovative contribution to current teleexistence techniques.

In order to analyse the influence of the movement replication in the sensation of telepresence, several tests have been performed. In these tests, motion sensors were

placed on a person's head (in the place of a humanoid). The movements captured by these sensors were replicated by a motion platform and the sensations experienced were discussed and analysed.

2. Human Motion Perception.

We are targeting the reproduction of humanoid movements by a motion base. This motion base will generate to the person seated on it a motion sensation similar to that he/she would have inside the humanoid. It is important then to analyze the way humans perceive motion, in order to determine how the humanoid motion can be replicated by the motion base.

The characterization of human motion perception is a problem that was dealt-with in the past, in parallel with the development of the first moving-base flight simulators. The main perception models were established in the sixties and seventies.

Although many sensors throughout the body play a role in this sensing process, it is apparent that the vestibular system (Fig. 1) located in the head (internal ear) provides the dominant signals [2].

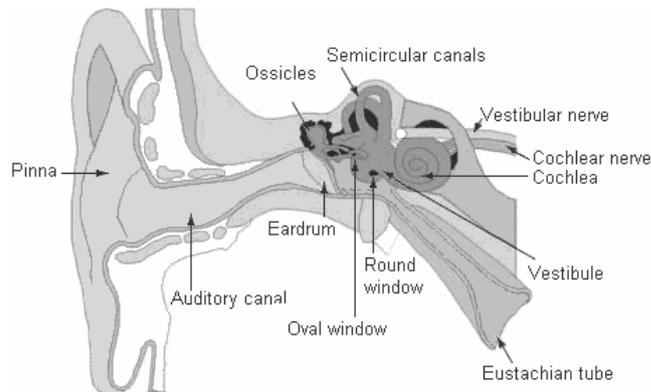


Fig. 1. The human internal ear.

2.1. Rotational motion sensation.

The primary sensing organs for rotational motion are the semicircular canals, located in the internal ear as shown in (Fig. 1). It has been demonstrated that the system can be regarded as an angular velocity sensor and that three orthogonal sensing axes can be used to represent the sensation. (Fig. 2).

The three so-called semicircular canals actually form two thirds of a circle, closed by a collective base called utricle. The diameter of the circles is about 6 mm and the canals, filled with endolymph, have a cross section with a diameter of 0.2 mm

approximately. Just before a canal enters the utricle, there is a widening of the canal (1.1 mm), the ampulla. Here the cupula, supported by its base (the crista) acts like a flapper-like valve. Crista and cupula together seal the ampulla.

The three canal loops lie in approximately orthogonal planes (Fig. 2). We define thus the “natural” reference frame as:

- X axis pointing forward.
- Y axis pointing sideward
- Z axis pointing upward.

The planes of the vertical canals in left and right ear make angles of 45 degrees with the Y (lateral) axis. Each canal has a coplanar canal in the opposite ear. The canals called "horizontal" in fact make an angle of 30° with the XOY (horizontal) plane.

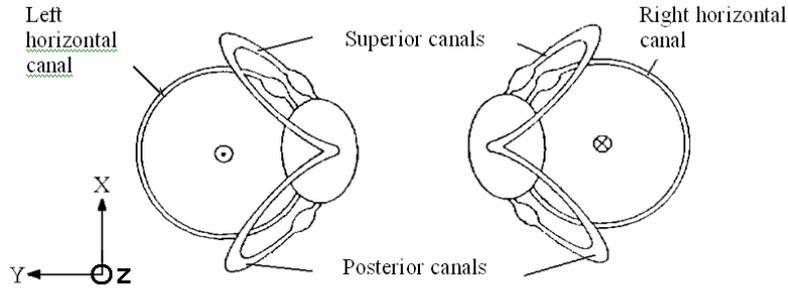


Fig. 2. Location of the semicircular canals in both ears (top view).

For the frequency range of interest in this paper, the model of Young et al. [10] was found the most adequate. This model is represented in (Fig. 3) and each of the three channels has the same form although the parameter values may differ. The block representing the dynamics of the semicircular canal itself has as its output the deflection δ of the cupula.

This system is modelled as an overdamped torsional pendulum. As suggested in [11] and [6,7], a cupula deflection threshold has been included in the model. The first order high-pass filter block accounts for the observed washout of the human response to steady state rotational acceleration inputs. The corresponding transfer function for the linear portion of the model is (for any one channel):

$$\frac{\hat{\omega}}{\omega} = \frac{T_L T_a s^2}{(T_L s + 1)(T_s s + 1)(T_a s + 1)} \quad (1)$$

where:

- ω is the angular velocity input about one of the three axes and
- $\hat{\omega}$ is the perceived angular velocity.

The threshold is represented by:

$$\begin{aligned} \Delta &= 0 && \text{for } |\delta| \leq \delta TH \\ \Delta &= \delta - \text{SGN}(\delta)\delta TH && \text{for } |\delta| > \delta TH \end{aligned} \quad (2)$$

A number of experiments were performed to determine the values for the parameters in this model [10]. They are listed in Table 1:

Table 1: Rotation Motion Sensation Model Parameters.

	<i>Pitch</i> (about y-axis)	<i>Roll</i> (about x-axis)	<i>Yaw</i> (about z-axis)
$T_L(s)$	5.3	6.1	10.2
$T_S(s)$	0.1	0.1	0.1
$T_a(s)$	30	30	30
$\delta TH(\text{deg/s})$	3.6	3.0	2.6

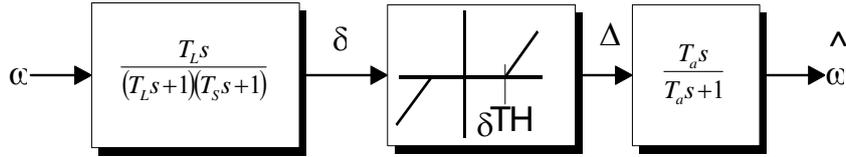


Fig. 3. Model of the Semicircular Canal System, ω =angular velocity.

The frequency response function corresponding to Eq. (1) is plotted in Figs. 4 to 6, with the coefficient values given in Table 1.

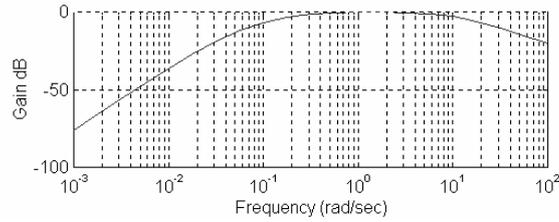


Fig. 4: Bode representation of angular velocity perception: Pitch (about Y axis).

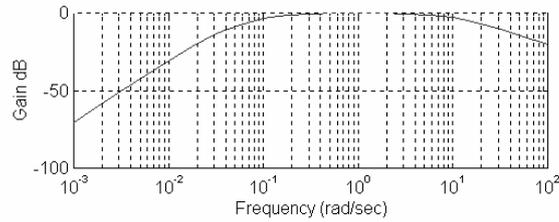


Fig. 5. Bode representation of angular velocity perception: Roll (about X axis).

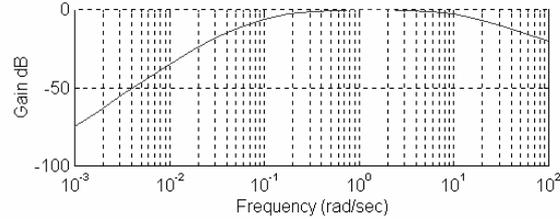


Fig. 6: Bode representation of angular velocity perception: Yaw (about Z axis).

It can be seen from the amplitude ratio plots that this system is a good sensor of angular velocity in the frequency band 0.2 rad/s to 10 rad/s. Its response $\hat{\omega}$ tends to zero for both steady-state angular velocity and steady-state angular acceleration inputs.

2.2. Specific force sensation.

Specific force \vec{f} is defined as the vector difference between translational inertial acceleration $\vec{\gamma}$ and the acceleration due to gravity \vec{g} , that is:

$$\vec{f} = \vec{\gamma} - \vec{g} \quad (3)$$

Specific force is felt by the otolith (the other major sensor contained within the vestibular system) complemented by the perception performed by muscles and tendons through contact pressure. (propioreceptors) (Fig 7).

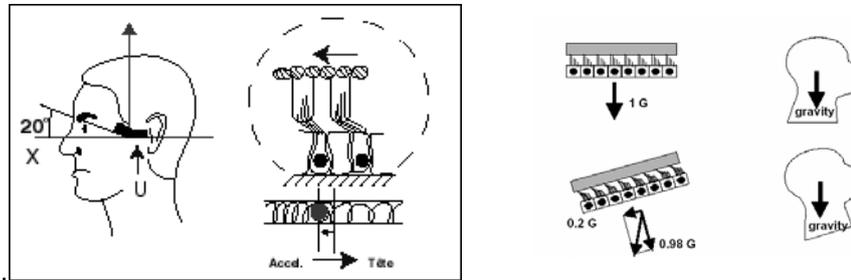


Fig. 7. The otolith system.

Sinacori [9] defines the specific force as the quantity we can feel by virtue of surface pressures on our body. Therefore, specific force is that we can feel through a relative deformation of different parts of our body.

In terms of forces, specific force is the sum of the external forces acting on a body divided by the body mass less the gravitational components.

Basic components of the otoliths are a slightly curved supporting base, the macula, containing sensory haircells and supporting cells, and the gelatinous membrane, resting on the macula. Embedded in the membrane are the otoconia (calcite crystals). Both utricle and saccule are filled with endolymph.

Specific forces parallel to the plane of the maculae will cause the otoconia to shear relative to the macula. The cilia of the haircells will bend and, as in the crista, the

haircells will alter the firing rate of the afferent neurons. The average plane of the utricular macula is approximately parallel to the horizontal canals. The saccular macula is roughly parallel to Z (vertical) axis.

The active portion of the otolith system in man is thought to be contained within the utricle, the common base of the semicircular canals. The response of the otolith is combined with that from other body sensors (the proprioreceptors) to generate the perceived specific force \hat{f} with components along the three head axes (Fig. 7). In the present study, the subjective sensation model of Meiry [4] is employed.

The model for subjective specific force is presented in (Fig. 8) and each of the three channels has the same form although the parameter values may differ. The block representing the dynamics of the otolith itself has the output d , the displacement of the otolith with respect to the macula. The corresponding transfer function for the linear portion of the model is (for any one channel):

$$\frac{\hat{f}}{f} = \frac{K(\tau_a s + 1)}{(\tau_l s + 1)(\tau_s s + 1)} \quad (4)$$

where:

- f is the specific force along any one of the three axes.
- \hat{f} is the perceived specific force along any one of the three axes.

The threshold is represented by:

$$\begin{aligned} D &= 0 & \text{for } |d| \leq dTH \\ D &= d - SGN(d)dTH & \text{for } |d| > dTH \end{aligned} \quad (5)$$

It appears that only a few studies were performed in the past to determine the form of Eq. (4) and its parameter values [4,3]. In the work of Meiry reported in [4], the otoliths responses along the X and Z axes of (Fig. 2) were studied producing the parameter values listed in the following Table 2:

Table 2. Specific Force Sensation Model Parameters.

	<i>Surge</i> (along x-axis)	<i>Sway</i> (along y-axis)	<i>Heave</i> (along z-axis)
$\tau_L (s)$	5.33	5.33	5.33
$\tau_S (s)$	0.66	0.66	0.66
$\tau_a (s)$	13.2	13.2	13.2
K	0.4	0.4	0.4
dTH(m/s²)	0.17	0.17	0.28

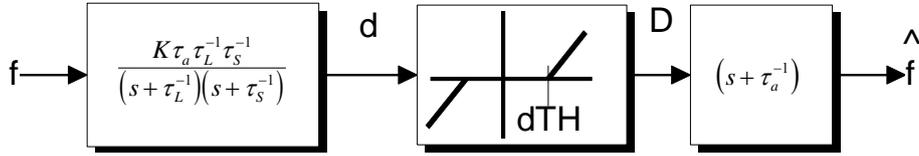


Fig. 8. Model of the Otolith System.

The values of the threshold level, dTH, have been determined from the response latency times reported in [6] and the model of (Fig. 8). These latencies represent the time following the application of a translational acceleration step at which the subjects reported the onset of motion sensation.

The frequency response function corresponding to Eq. (4) is plotted in Fig. 9 for typical parameter values of Table 2:

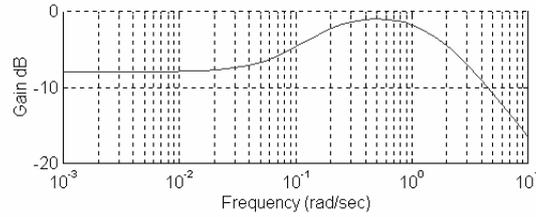


Fig. 9. Specific force Perception: Surge (along X axis), Sway (along Y axis) and Heave (along Z axis).

It can be seen from the amplitude ratio plot shown in (Fig. 9) that the system is a good sensor for specific force in the frequency band of 0.2 rad/s to 2 rad/s. It has a steady response to constant values of \vec{f} because this system will respond to the gravity vector alone (Fig.7) when the translational inertial acceleration of the head is zero, it can be used to determine one's tilt orientation with respect to the local vertical.

3- Motion sensors onto the humanoid.

Once we have achieved a better understanding of the characteristics of the human motion perception, we can conclude that the sensor unit embarked in the humanoid should be able to acquire, at least, the humanoid's angular velocity and acceleration (specific force) vectors. The location of the sensors, in order to make a better correlation, should be in the head of the humanoid, close to the actual location of the vestibular organ, as shown in Fig. 10.

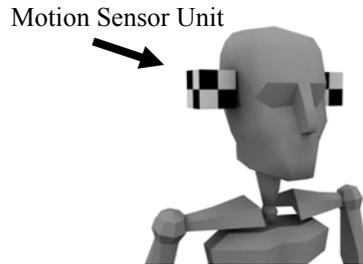


Fig. 10. Location of the motion sensor unit.

Ranges and technical features of these sensors should be in accordance with the characteristics of the humanoid (imitating human) motion. The sensor system used by the authors in the experiments is described in section 6.2.

4- The Spherical Motion Base and Motion Simulation.

4.1. Motion Simulation.

As stated before, telepresence or teleexistence can be defined as the experience of being fully present at a live real world location remote from one's own physical location. Someone experiencing telepresence would therefore be able to behave, and receive stimuli, as though at the remote site. In order to improve the feeling of teleexistence derived from a humanoid, we target to generate a motion sensation exactly as if we actually were the humanoid (Fig. 11). For such purpose, a spherical platform will be used as motion generation platform.

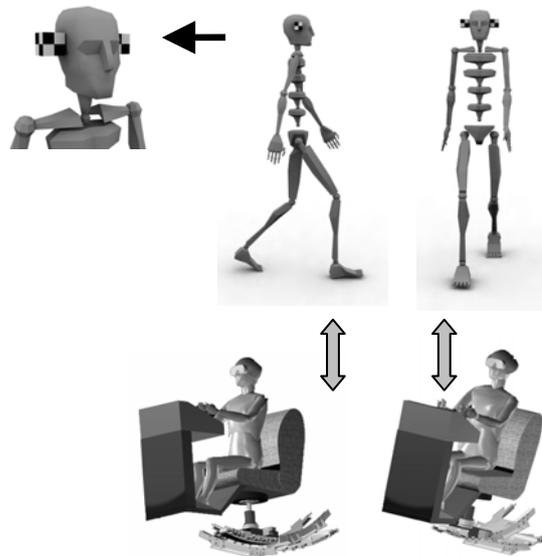


Fig. 11. General layout.

The generation of telepresence sensation is accomplished by a combination of audio, visual and motion stimuli, which generate inputs to the human physiological system. To ensure that the human sensory system receives coherent information, great attention to a number of factors is required:

(i) Audio, visual and motion queues must be synchronized. This requires the motion system to:

- a) Provide motion amplitudes consistent with the visual image.
- b) Provide motion dynamics consistent with the human body response range.
- c) Provide restoring motions (motions which should not be perceptible) at amplitudes which are below the human sensory threshold.

(ii) Polluting inputs must be excluded:

- a) Audio noise.
- b) Motion vibrations.

4.2. The Spherical Platform: architecture description.

This type of architecture is considered by the authors as the most adequate to carry out a reproduction of the humanoid's movements. In order to do so, we point out the important function and localization of the vestibular organ.

The spherical platform architecture has 4 degrees of freedom that can be easily identified in Fig. 12:

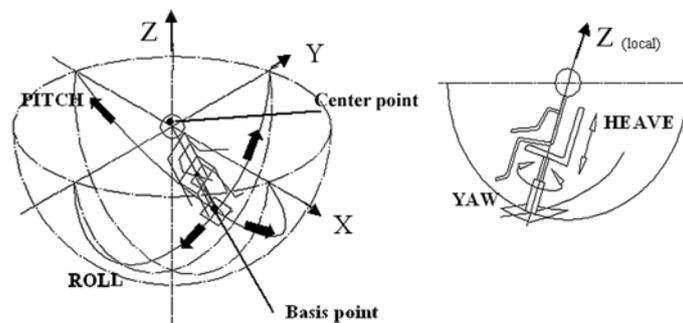


Fig. 12. The Spherical Platform 4 degrees-of-freedom.

There are two main points which define this spherical architecture:

- (i) The centre point, located at the operator's head (vestibular organ). The location at this specific point is important to avoid linear accelerations of the head when the platform rotates.
- (ii) The basis point. This point moves on a spherical surface to provide roll and pitch rotations.

The Spherical Platform 4 degrees-of-freedom are shown in Figs. 13 to 16:

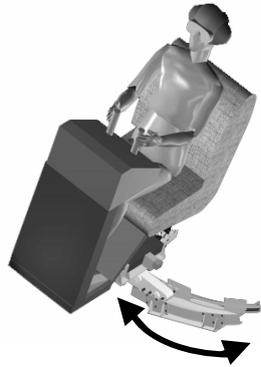


Fig. 13. Roll (rotation around the x-axis).

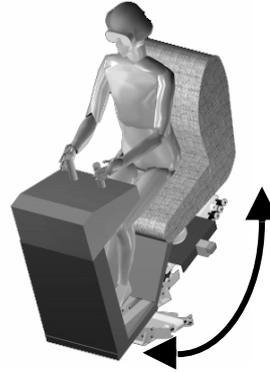


Fig. 14. Pitch (rotation around the y-axis).

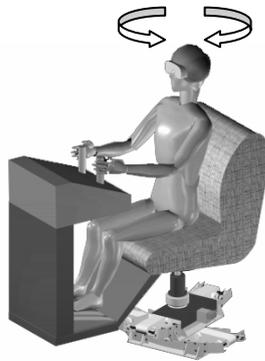


Fig. 15. Yaw (rotation around the z-axis).

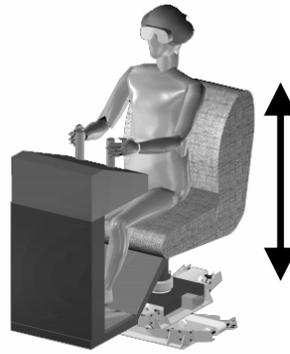


Fig. 16. Heave (displacement along the z-axis).

An example of an application of the Spherical Platform is the driving simulator shown in Fig. 17:

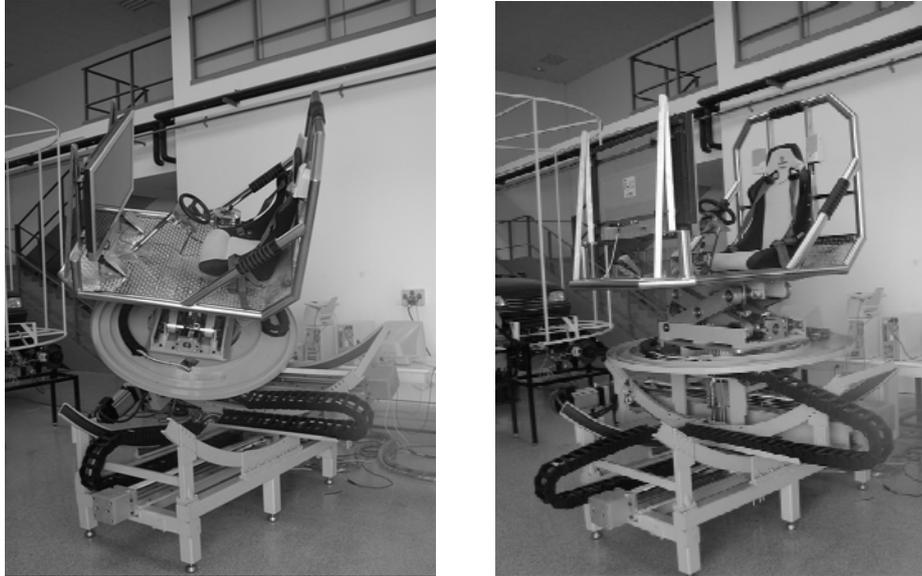


Fig. 17. A spherical platform used in a driving simulator.

The technical solutions implemented to generate the 4 motions are:

- (i) Roll: A pair of curved rails fixed to the platform base is used to produce the roll movement. These rails allow the lower carriage to describe a circular movement (roll), centred at the driver's vestibular organ.
- (ii) Pitch: A second pair of curved rails and a second linear actuator are mounted perpendicularly to the rolling rails on the lower carriage. These rails let the upper carriage describe a circular movement (pitch) centred in the operator's vestibular organ as well.
- (iii) Yaw: A platform able to rotate around its vertical axis is mounted on the upper carriage. Motion is based on a toothed belt mechanism, driven by a servomotor.
- (iv) Heave: Vertical displacement is provided by a scissor-type mechanism.

The excursion limits of this platform depend on its specific dimensions. The resolution of the forward kinematics is very simple. Some average values can be given, for the platform used in our experiments:

Table 3. Excursion limits of the spherical platform motion base.

<i>DOF</i>	<i>MAXIMUM EXCURSION</i>
Roll	±35 deg
Pitch	± 35 deg
Yaw	± 180 deg
Heave	± 250 mm

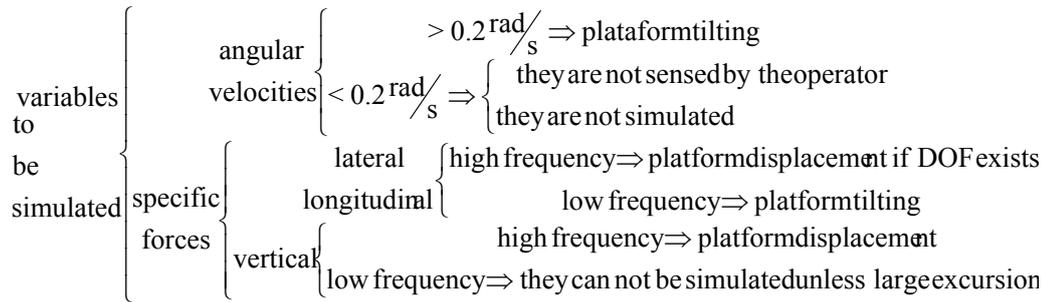
5- Motion Base Drive Logic.

The motion base cannot reproduce exactly the same movements performed by the humanoid's head, due to the physical limits allowed by the platform (Table 3). To transmit the humanoid's motion sensation, the motion base performs a simulation of the humanoid's movements. Motion simulation is made possible because the human nervous system is highly adaptable. Specifically, certain types of stimuli can evoke the same sensation and response even when the stimulus magnitude varies. In engineering terms, this means that one-to-one motion reproduction in a motion base is not necessary and this is the main reason why motion simulation is possible and why it works in practice.

The approach followed to achieve this objective is:

- (i) To set two equivalent points, one on the humanoid and one on the motion base.
- (ii) To obtain the values of the specific force and angular velocity vectors at the established humanoid's point, by means of the motion sensors previously explained in section 4.
- (iii) To use the previously mentioned values as inputs for the motion base drive logic. In this way, the established point on the motion base will have the same specific force and angular velocity than the equivalent point on the humanoid.

The following chart summarizes the main principles used to simulate a general humanoid motion:



In a schematic way, it can be represented as (Fig. 18):

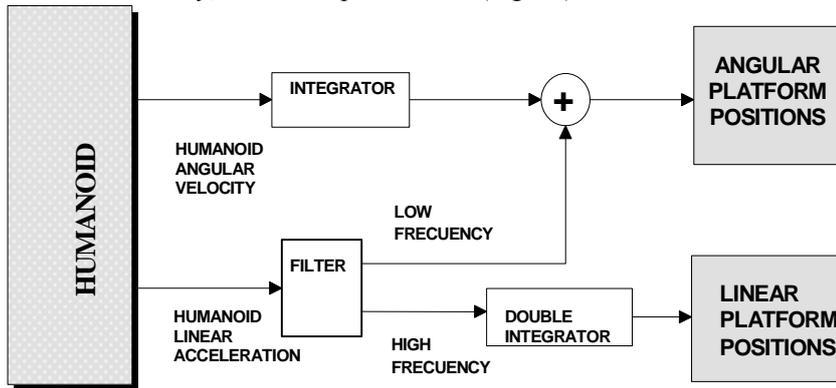


Fig. 18. Scheme of the motion base drive logic.

Thus, the basic principles of motion simulation can now be established. Let's consider the simulation of a humanoid motion performed by a motion base. The following frames need to be previously defined:

- $S_H = X_H Y_H Z_H$: This is a frame attached to the humanoid's head with its origin located at a point midway between the two sensor units on the head. The X_H axis points forward and the Z_H axis upward along the spine. The X_H - Z_H plane contains the humanoid's vertical plane of symmetry.
- $S_{mb} = X_{mb} Y_{mb} Z_{mb}$: frame having its origin located at a point in the motion base operator's head at a point midway between his right and left vestibular systems.

Thus, for the specific force:

$$\left[\vec{f}_{humanoid} \right]_{S_H} = \left[\vec{f}_{platform} \right]_{S_{mb}} \quad (6)$$

That is, specific force at the origin of frame S_H (head of humanoid), expressed in frame S_H equal to specific force at the origin of frame S_{mb} (head of motion base operator), expressed in frame S_{mb} .

For the simulation of the humanoid's angular velocity:

$$\left[\vec{\Omega}_{Abs} \left(\begin{matrix} \\ \\ \end{matrix} \right) \right]_{S_H} = \left[\vec{\Omega}_{Abs} \left(\begin{matrix} \\ \\ \end{matrix} \right) \right]_{S_{mb}} \quad (7)$$

Humanoid angular velocity in frame S_H is equal to motion base driver angular velocity in frame S_{mb} . In this way both the humanoid and the motion base operator will have the same motion perception, which is our objective.

6- Validation tests.

6.1. Experimental set-up.

The objective of the test was to validate the theoretical approach for motion replication explained in the previous sections and the capacity of the spherical platform to perform humanoid motion replication. The authors didn't count on a humanoid to be instrumented with motion sensors. As a humanoid in motion approaches human movements, it was assumed that results obtained when using a human test subject (HTS) were valid for humanoids as well.

Two motion sensors and a webcam were placed on the HTS's head. In this way, all motions performed by the HTS were acquired, complemented with the images taken by the webcam. (Fig. 19).

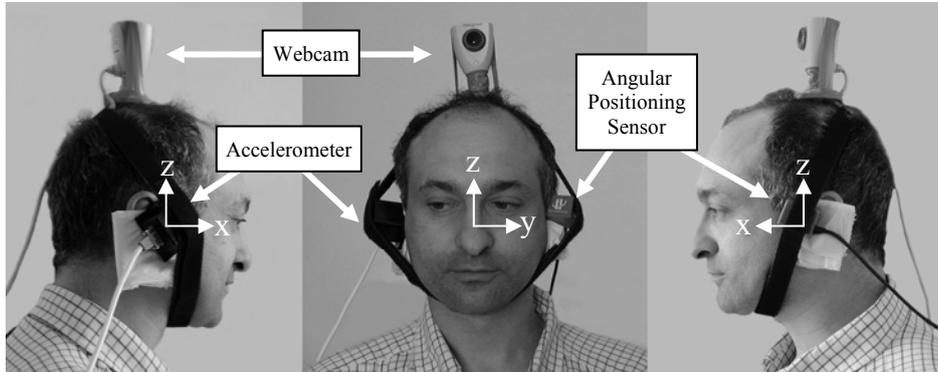


Fig. 19. Human test subject instrumented.

The connection of the sensors and the webcam to the central computer was done by means of wires. This fact implied some difficulty to the HTS's mobility.

HTS motion replication was not performed in real time; once all the data were collected, they were processed (as explained in section 6.3) and they were synchronized with the images taken by the webcam, in order to do a latter replication by the motion base, which was equipped with a video system.

6.2. Sensors.

Two motion sensors were used to acquire the HTS movements: a triaxial accelerometer and a 3D angular positioning sensor.

The triaxial accelerometer measured the acceleration produced in 3 perpendicular axes. It was a K-Beam series 8393A from Kistler with the following features:

Table 4. Triaxial accelerometer KISTLER K Beam 8393A2.

Acceleration Range	± 2 g
Sensitivity	1000 ($\pm 5\%$) mV/g
Frequency Response	0 ... 300 ($\pm 5\%$) Hz
Sensitive Axis Misalignment typ.	10 mrad
Sensitive Axis Misalignment max.	30 mrad

The connection between the accelerometer and the central computer was carried out by means of a Humusoft MF604 A/D board. It had the following features:

Table 5. A/D board Humusoft MF604.

Analog Input:	Channels 8 single-ended
Analog Output:	Channels 4 channels, 12-bit
Digital I/O:	Input lines 8, TTL compatible Output lines 8, TTL compatible
Encoder Inputs:	Input channels 4, single ended or differential
Sampling rate	Up to 100 kHz

The angular positioning sensor gave the 3 orientation angles. Two of the angles measured the sensor horizontal inclination with respect to the gravity vector. The third angle gave the azimuth angle (compass).

An IntertiaCube² by Intersense was used. It had the following features:

Table 6. Angular Position Sensor InterSense InertiaCube²

Degrees of Freedom	3 (Yaw, Pitch and Roll)
Angular Range	Full 360° - All Axes
Maximum Angular Rate	1200° per second
Minimum Angular Rate	0° per second
Accuracy	1° RMS at 25°C
Angular Resolution	0.01° RMS
Serial Rate	115.2 kbaud
Interface	RS-232 Serial

6.3. Signal conditioning.

Signals from the triaxial accelerometer and the angular positioning sensor were acquired with only high frequency filtering. Afterwards, some other specific filters and conditioning techniques were applied.

Signal sampling rate during the tests was 100 Hz with a steady time step of 10 milliseconds.

Two types of filters were used: a first order frequency discrete filter and a moving average filter:

(i) First order discrete filter

Applied only to the triaxial accelerometer signals.

The first order filter causes a gap and an offset. Consequently, as tests are not performed in real time, it is necessary to adjust the signal's offset and time once the filter has been applied.

The filter's equation can be expressed as:

$$sf[i] = sf[i-1] \cdot e^{(-2 \cdot \pi \cdot f \cdot \Delta t)} + s[i] \cdot (2 \cdot \pi \cdot f \cdot \Delta t) \quad (8)$$

Where:

sf[i]	Filtered signal value in point i
sf[i-1]	Filtered signal value in point i-1
s[i]	Not filtered signal value in point i
Δt	Time interval between points i and i-1
f	Filter's design parameter

The f parameter is equivalent to the cut-off frequency in an analogical lowpass filter. The smaller f is, the softer the signal becomes, but also produces more delay and offset.

In this study, f has been given a value of 2.

(ii) *Moving average filter.*

This filter was applied to all signals, adjusting amplitude in all cases. The moving average filter can be expressed as:

$$sf[i] = \frac{1}{2 \cdot k + 1} \cdot \left(\sum_{j=i-k}^{j=i+k} s[j] \right) \quad (9)$$

Where:

sf[i] Filtered signal value in point i
s[j] Not filtered signal value in point j
k Filter amplitude

The filter amplitude, k, is the number of previous and subsequent point used to calculate the arithmetic mean. In order to work independently of the sampling rate, the filter amplitude k can be calculated according to the time interval inside which the arithmetic mean will be calculated:

$$k = \Delta T \cdot f_m \quad (10)$$

Where:

ΔT Filter's time interval
 f_m Sampling rate

In this study, sampling rate is 100 Hz (time step: 10 ms). A filter's time interval of 0.2 seconds was enough for both signals. In this study, it means 20 sample points.

In the following graphs (Figs. 20 and 21) it can be seen the filtered and not filtered acceleration and angular position signals:

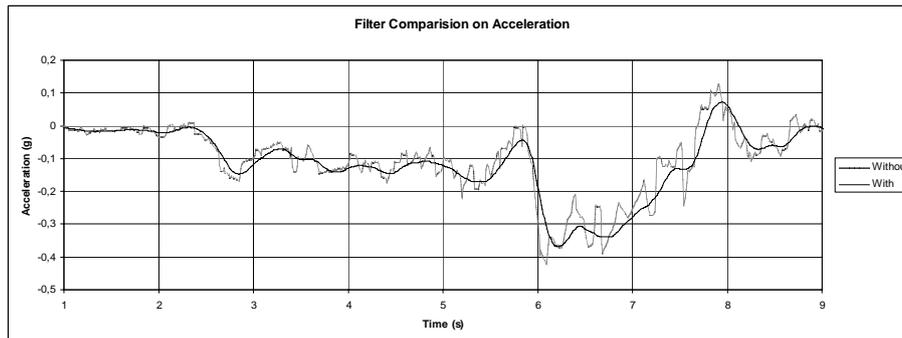


Fig. 20. Accelerometer data with and without filtering.

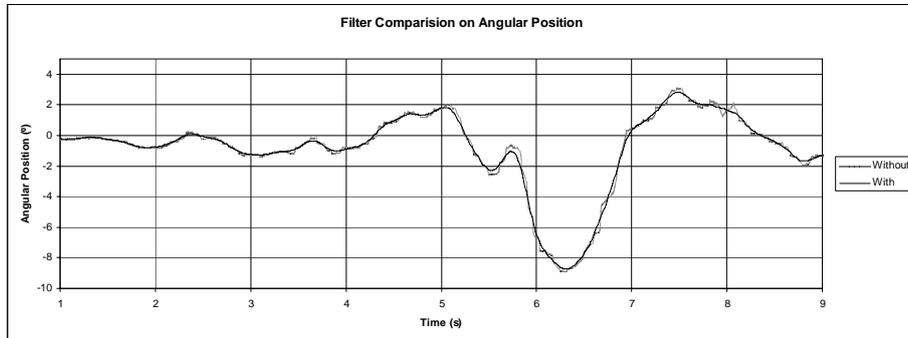


Fig. 21. Angular position data with and without filtering.

The triaxial accelerometer records the lineal acceleration plus the gravity acceleration. Thus, for the acceleration calculation, we must compute the gravity vector relative to the HTS's axes and subtract it from the accelerometer values. Therefore we must compute the HTS's rotation matrix by means of the angles captured by the angular position sensor. In the following scheme we can see this algorithm.

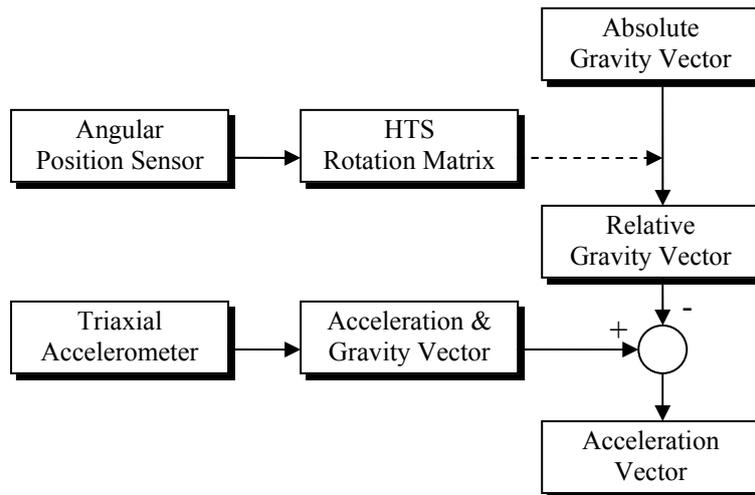


Fig. 22. Acceleration vector calculation.

With the computed acceleration and the angular position information we can use the algorithms described in the section 5 to control the motion platform. All these algorithms have been validated in other projects, both motion simulation projects [12] and motion reproduction projects [13].

6.4. Test cases.

Tests were carried out covering three different cases:

- Case 1, the HTS walks straight ahead.
- Case 2, the HTS sits down and stands up from a chair.
- Case 3, the HTS bends forwards, backwards and laterally.

These three cases implied only simple movements. In order to ensure the repetibility of the experiments, these three tests were performed several times.

(i) Case 1: Walking.

The HTS walks straight ahead. Next graphs (Figs. 22 and 23) show the signals produced by the triaxial accelerometer and angular positioning sensor.

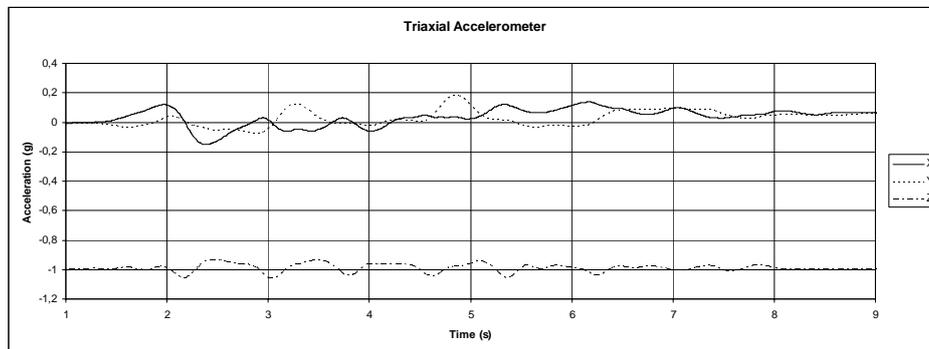


Fig. 22. Acceleration when HTS walking.

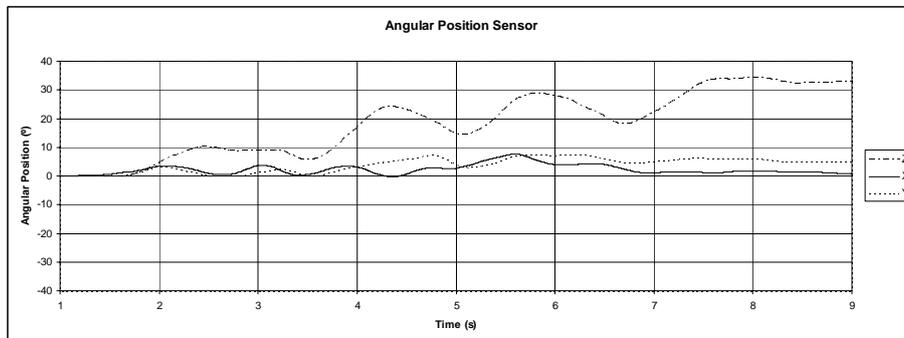


Fig. 23. Angular position when HTS walking.

The peaks in the vertical acceleration (Fig. 22) represent the steps made by the HTS when walking.

(ii) Case 2: Sitting down and standing up from a chair.

At the beginning of the test, the HTS is standing. Then, he walks towards a chair, sits down and stands up again. Next graphs (Figs. 24 and 25) show the signals produced by the triaxial accelerometer and angular positioning sensor.

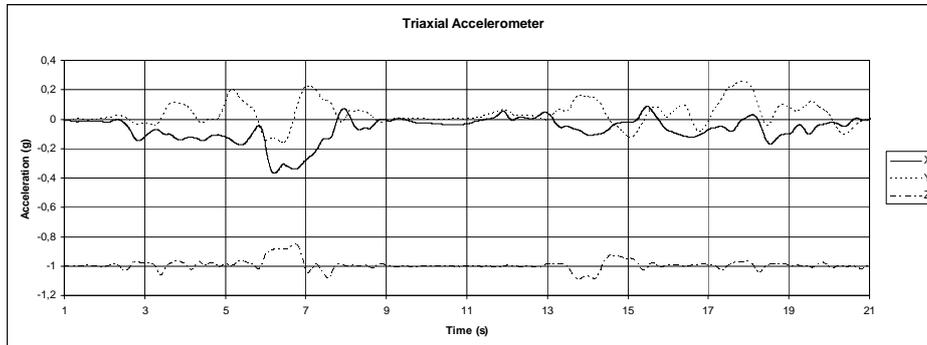


Fig. 24. Acceleration produced when HTS sitting down and standing up.

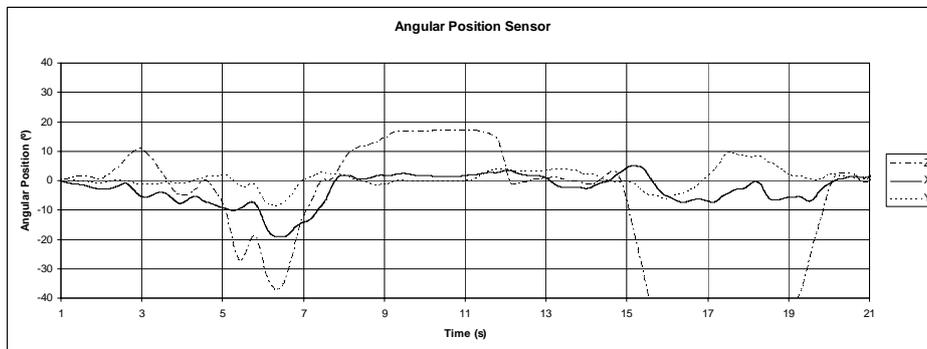


Fig. 25. Angular position when HTS sitting down and standing up.

The HTS makes several steps when walking towards the chair. These steps can be easily identified in the vertical acceleration graph (Fig. 24). When the HTS is sitting down, there is an increase both in acceleration and in the inclination angle. While the HTS is seated there is no variation in the value of the signals, but a new increment in acceleration and inclination is produced when he stands up from the chair.

(iii) Case 3: Bending.

This test was performed in order to combine linear and angular motions (Figs. 26 and 27). First, the HTS bends forwards and backwards, and laterally afterwards.

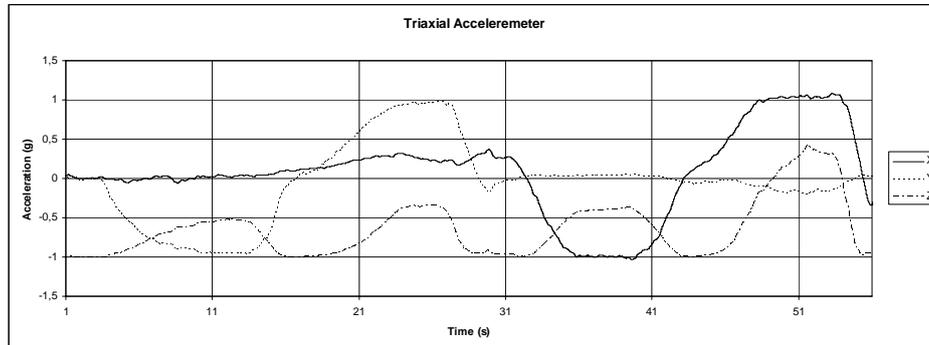


Fig. 26. Acceleration when HTS bending.

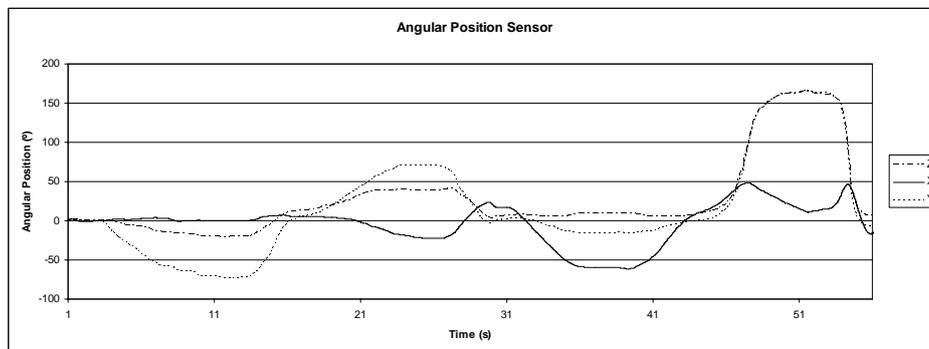


Fig. 27. Angular position when HTS bending.

6.5. Creation of telepresence sensation: HTS motion replication.

Once HTS movements were acquired by the sensors, they were replicated by the spherical motion platform. The images captured by the webcam were reproduced synchronized with platform motion as well. Fig. 28 shows the spherical platform in operation during the tests.



Fig. 28. Spherical platform in operation.

We name Telepresence Sensation Receptor (TSR) to the person seated on the platform. According to the algorithm explained in section 5, which is in turn consequence of the motion perception models also presented in section 2, the platform should reproduce the HTS's specific force and angular velocity vectors in each of the three test cases, in a way that it induces to the TSR a motion sensation equivalent to the actual motion performed by the HTS.



Fig. 29. TSR using the head mounted display.

Let's analyse each of the three test cases separately:

i) Case 1: walking.

Specific force.

Horizontal (X,Y) components of the HTS's specific force are simulated by platform tilting, using in consequence the gravity vector. It can be noticed (fig. 22) that the maximum values measured are inside the band -0.2 to 0.2 g's, which according to the explained motion simulation algorithm, implies to tilt the platform a α_{max1} angle:

$$\alpha_{max1} = \arcsine(0.2) = 11.53 \text{ deg} \quad (11)$$

This calculated platform inclination is inside the operational limits of the platform (table 3). Thus, the platform can perform a perfect reconstruction of the HTS's horizontal (X,Y) specific force components.

The vertical component (Z) of the specific force vector varies (Fig. 22) inside the band -0.9 to -1.1 g's, being its neutral value -1.0 g. To simulate this component, the platform must perform the following vertical displacement, obtained after the high-pass filtering and double integration of the signal:

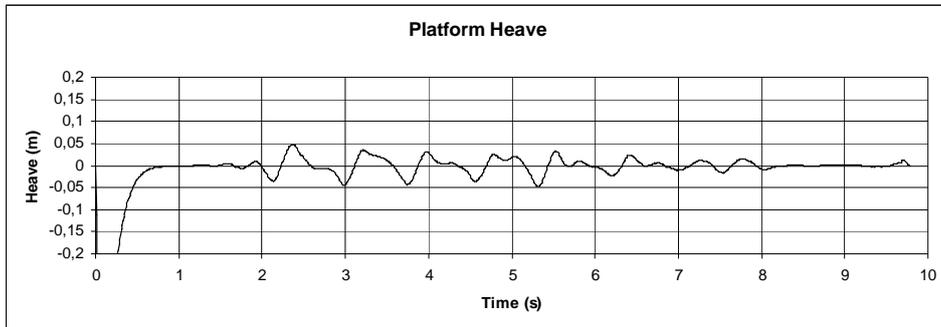


Fig. 30. Vertical displacement of the platform in test case 1.

Vertical displacement, from -0.05 m to 0.05 m, is inside the operational limits of the platform (table 3). It is possible in consequence a perfect reconstruction of the HTS's vertical (Z) specific force component.

Angular velocity.

As X,Y components (rollrate and pitchrate) of the angular velocity vector are included in the Y,X respectively components of the specific force vector, the only relevant component to be taken into account is the Z component (yawrate). This is so because

HTS movements are performed in a very smooth way, and the importance of the translational acceleration is neglectable. Sensors on the HTS measure the yaw angle. If the platform is able to perform a 1 to 1 reproduction of the platform angular position, then it performs a 1 to 1 reproduction of the HTS yawrate, which is our target. Observing Fig. 23, we can see that maximum HTS's yaw excursion does not exceed 40 deg. It can be then reproduced by the platform, as its maximum yaw excursion is ± 180 deg.

ii) *Case 2: sitting down and standing up from a chair.*

Specific force.

An approach similar to case 1 is followed in this case. Horizontal (X,Y) components of the HTS's specific force are simulated by platform tilting. It can be noticed (fig. 24) that the maximum values measured are inside the band -0.4 to 0.3 g's, which according to the explained motion simulation algorithm, implies to tilt the platform a maximum α_{max2} angle of:

$$\alpha_{max2} = \arcsine(0.4) = 23.54 \text{ deg} \quad (12)$$

This value is inside the operational limits of the platform (table 3). Thus, the platform can perform a perfect reconstruction of the HTS's horizontal specific force components in this case as well.

The vertical component (Z) of the specific force vector varies inside the band -0.82 to -1.1 g's, (see fig. 24) being its neutral value -1.0 g. To simulate this component, the platform must perform the following vertical displacement, obtained after the high-pass filtering and double integration of the signal:

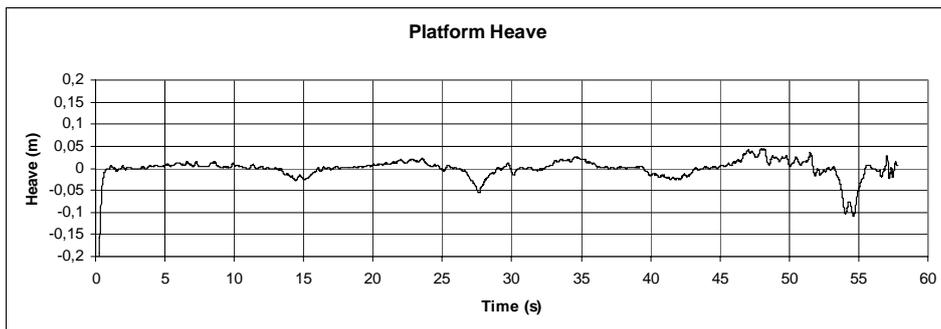


Fig. 31. Vertical displacement of the platform in test case 2.

Vertical displacement, from -0.1 m to 0.05 m, is also inside the operational limits of the platform. A perfect reconstruction is possible as well.

Angular velocity

Similarly to case 1, it is also possible to do a 1 to 1 reconstruction of the HTS's yawrate (Fig. 25).

iii) Case 3: bending.

Specific force

This case is different from the previous ones. (X,Y) acceleration components reach greater values, due to the important roll and pitch angles achieved by the HTS, being in the band -1 to 1 g's (see fig. 26). The simulation of these acceleration values would imply to tilt the platform a maximum $\alpha_{\max 3}$ angle of:

$$\alpha_{\max 3} = \arcsine(1) = 90 \text{ deg} \quad (13)$$

This value clearly exceeds the angular excursion limits of the platform and would imply the TSR to fell off under their own weight!

In consequence, the strategy followed consisted of the scaling of the signal to be simulated by a constant K smaller than one. In this way, the signal simulated by the platform keeps the original shape, but reaches smaller values. Such strategy is commonly followed by driving simulators; where very often the acceleration signals to be simulated by the motion base exceed the operational limits of the platform. The experience gained in these cases indicates that the fidelity and quality of the simulation remains acceptable [12,13].

The vertical component (Z) of the specific force vector varies inside the band -1 to 0.4 g's, (see fig. 26) being its neutral value -1.0 g. To simulate this component, the platform must perform the following vertical displacement, obtained after the high-pass filtering and double integration of the signal:

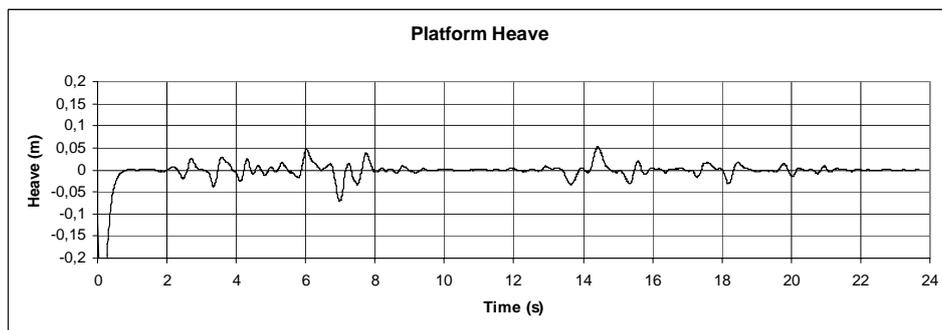


Fig. 32. Vertical displacement of the platform in test case 3.

Vertical displacement, from -0.07 m to 0.05 m, is also in this case inside the operational limits of the platform.

Angular velocity

Similarly to the previous cases, it was also possible to do a 1 to 1 reconstruction of the HTS's yawrate.

6.6. Results and discussion.

In the tests carried out, the motion base made a replication of the HTS's movements in the three tests cases described in previous sections (walking, sitting down/standing up from a chair and bending). The TSR received the motion stimuli generated by the motion base (vestibular stimuli) and watched the images captured by the webcam (visual stimuli) using two different devices (Figs. 28 and 29):

- A 42" flat screen.
- A head mounted display.

In order to analyse the importance of each independent stimuli (vestibular and/or visual) to create telepresence sensation, three different reconstructions were made:

- The TSR sensing the movements of the motion base and watching the images captured by the webcam (vestibular and visual stimuli).
- The TSR sensing the movements produced by the motion base without images (vestibular stimuli only).
- The TSR just watching the images captured by the webcam, without platform motion (visual stimuli only).

The tests didn't intend to measure the quality and fidelity of performance of the spherical motion base, even of the motion replication algorithm, as this topic has been dealt with in previous research projects [12,13] with good results. The aim was to validate the ability and feasibility of the whole system to create telepresence sensation. Thus, the evaluation of the tests results couldn't be quantitative but qualitative, based on subjective perceptions and opinions of a sample (seven) of TRS's who tried the system. After the tests, they expressed their sensations and perceptions, which are summarized as follows:

- The sense of telepresence is achieved in the three test conditions: creating both vestibular and visual stimuli, with only vestibular stimuli, with only visual stimuli.
- The highest sensation was achieved when receiving all stimuli.
- In the tests carried out using exclusively the motion base, the sense of teleexistence was high. This is due to the fact that the motion stimuli generated

by the motion platform are centred on the vestibular organ, which is exactly the location of the motion sensors on the HTS.

- The sense of teleexistence achieved just by means of images was also very high, but in all cases appeared a reflex action: TSR's moved his/her trunk and head trying to follow the trajectory of the webcam when the images were shot. This fact was much more pronounced when using the head mounted display.
- The feeling of teleexistence when using the head mounted display is higher than when using the flat screen. This is due to the fact that the TSR wasn't seated on a closed cabin but on an open platform, so he/she could see the surrounding elements, not being in consequence isolated from the real environment.
- Synchronization between motion platform movements and images was a key factor to create a sense of telepresence. Any little delay between the movement of the platform and the images was perceived and caused sickness and lose of the sense of telepresence.

7. Conclusion.

This paper is an innovative contribution to humanoids-telepresence research, as it presents a technology that makes possible the replication of a humanoid's movements on a motion base, increasing in this way the sense of telepresence.

This paper describes the way human beings perceive motion. It also analyses which physiological sensors are involved and which kinematic variables are perceived. Motion perception is mainly made by the vestibular organ located in the internal ear. Based on that, this paper presents a 4-DOF spherical motion base specially adapted to transmit stimuli to the vestibular organ, in order to induce a very realistic motion sensation. The main principles and equations to carry out humanoid motion simulation are given.

Some humanoid movements (done by a instrumented human test subject) were registered and subsequently reproduced by a motion base equipped with a screen or HMD.

From the tests carried out, it was appreciated that images are the dominant signal and that, if they are complemented with the replication of movements by the motion base, the sense of telepresence is greatly increased and intensified. Consequently, synchronization between motion platform movements and images is a key factor to create a fine sense of telepresence. It also is important to isolate the individual from the real environment in order to increase the sense of realism.

8. References.

- [1] Grant, P., Papelis Y., Clark A., *Enhancements to the NADS Motion Drive Algorithm for Low-Speed Urban Driving*. Driving Simulator Conference, Paris September 2004.
- [2] Gum, D. R., *Modelling Of The Human Force And Motion Sensing Mechanisms*, AFHRL-TR-72-54 (June 1973).
- [3] Hosman, R.J.A.W. and van der Varrt, J.C., *Vestibular Models And Thresholds For Motion Perception. Results of Tests in a Flight Simulator*, Delf University of Technology, Dept. of Aerospace Engineering, Report LR-265 (April 1978).

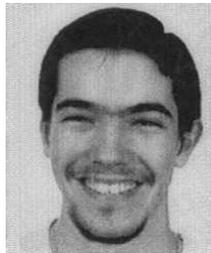
- [4] Meiry, J.L., *The Vestibular System And Human Dynamic Space Orientation*, NASA CR-628 (Oct. 1966).
- [5] Nordmark, S., Janson H., Palmkvist G., Sehammar H., *The New VTI Driving Simulator. Multi Purpose Moving Base with High Performance Linear Motion*. Driving Simulator Conference, Paris September 2004.
- [6] Peters, R.A., *Dynamics of the Vestibular System and Their Relation to Motion Perception, Spatial Disorientation and Illusions*, NASA CR-1309 (April 1969).
- [7] Reid, L.D., Nahon, M.A., *Flight Simulation Motion-Base Drive Algorithms: part I—Developing and Testing the Equation*. UTIAS report No. 296 CN ISSN 0082-5255 (December 1985)
- [8] Reid, L.D., Nahon, M.A., *Response of Airline Pilots to Variations in Flight Simulator Motion Algorithms*. AIAA Journal of Aircraft, Vol.25, No.7, pp. 639-646 (1988)
- [9] Sinacori, J.B., *A Practical Approach To Motion Simulation*, AIAA No. 73-931.
- [10] Young, L.R., Meyri, J.L., Newman J.S. and Feather, J.E., *Research in Design and Development of a Functional Model of the Human Nonauditory Labyrinths*, Aerospace Medical Research Laboratory, TR-68-102 (March 1969).
- [11] Zacharias, G.L., *Motion cue models for Pilot-Vehicle Analysis*, AMRL-TR-78-2, (May 1978).
- [12] TELEDRIIVE “*Vehicle teleoperation system for application to entertainment, research and remote interventions*”. IST- 1999 – 57451.
- [13] SIMUSYS “*Innovative high-performance motion simulation system for entertainment, research and training applications*” - IST - 1999 – 56418.

9. Authors' CVs



Mario Maza received his degree in Mechanical Engineering from the University of Zaragoza (Spain) in 1991. In 1999 he received his PhD. in Mechanical Engineering from the University of Zaragoza, and he received his PhD. in Robotics from the University of Versailles (France) in 2003. From 1991 to 1992 he worked as design engineer in the company *Industrias Albajar S.A.*. From 1992 to 1996 he worked as R&D Manager in the company *Técnicas del Pirineo S.A.* From 1996 to 1998 he worked as a researcher in *Centre de Robotique Integree d'Ile de France*. At the moment, he is

working as a Professor in the Department of Mechanical Engineering at the University of Zaragoza. He is head of a Research Group on motion simulation. Mario Maza is the author of over 35 technical publications. He has taken part in 25 publicly funded research projects and in 15 privately funded research projects. He has contributed to 29 Congresses with different publications. He has been the coordinator of 2 PhDs at the University of Zaragoza. Since the year 2000, he is the Technical Director of the Vehicle Laboratory and the Technical Director of the Rehearsal Laboratory of the University of Zaragoza. He is also a member of S.A.E. (Society of Automobile Engineers) since 2003, and the Coordinator of the Transportation Area of the University of Zaragoza from 2002 to 2004.



Jesús Ortiz received his degree in Mechanical Engineering from the University of Zaragoza in 2003. At present, he is doing his Ph.D on the vehicles teleoperation. He is currently working in areas such as teleoperation, driving simulators, virtual reality and programming. He has taken part in 3 research projects funded by the European Commission. He has contributed with his publications to 2 international congresses, and he has published the book “Problemas de diseño de vehículos”. He spent 2 months at the École Nationale d’Ingénieurs Supérieurs de Bourges

(France) working as an invited professor.

Wheeled Vehicle Teleoperation from a Multisensory Driving Interface.

Mario Maza

Department of Mechanical Engineering

University of Zaragoza, (CPS)

C/ Maria de Luna, s/n

50018 Zaragoza, Spain

mmaza@unizar.es

Jesús Ortiz

Department of Mechanical Engineering

University of Zaragoza, (CPS)

C/ Maria de Luna, s/n

50018 Zaragoza, Spain

Santiago Baselga

Department of Mechanical Engineering

University of Zaragoza, (CPS)

C/ Maria de Luna, s/n

50018 Zaragoza, Spain

Abstract.

This paper describes the technology and systems developed for the teleoperation of vehicles using multimodal driving interfaces including, among others, vestibular cues. Special attention has been paid to the increment of dexterousness resulted when teleoperation is performed from such multimodal driving interface compared to simpler ones.

This paper also presents the results of a series of tests carried out using two different wheeled Remotely Operated Vehicles (ROVs): the first ROV can reach a maximum speed of 11 km/h and the second one can reach a maximum speed of 50 km/h. These ROVs were tested in two different ways: firstly, a human operator remotely operated the vehicle by means of a joystick, having visual contact with the vehicle; secondly, a human operator teleoperated the ROVs from a driving interface installed on a motion base using the images captured by embarked cameras. Results obtained in both cases are compared.

KEY WORDS- Teleoperation, motion sensation, driving interface.

1. Introduction.

Teleoperation, the remote operation of a vehicle or robot (ROV: remotely operated vehicle), is traditionally used in situations where a human controller is required but their presence at the location may be hazardous. Some examples include tactical urban reconnaissance, underwater activities, surveillance, bomb disposal, planet exploration, contaminated site cleanup, etc. Fig. 1 shows a typical control station for mining equipment [1, 2]. Fig. 2 shows a control station for unmanned aircraft [3].



Fig. 1. NUMBAT surface control station.



Fig. 2. PREDATOR control station

The teleoperation technology described in this paper has been mainly developed in the *TELEDRIVE* project, funded by the European Commission under the programme IST [4], which intended the development of a highly efficient vehicle teleoperation system suitable for remote interventions, entertainment and research.

A teleoperation interface, commonly known as **central control station** (CCS) is the post from where a person called *vehicle operator* teleoperates the ROV. The current teleoperation interfaces commercially used are relatively unsophisticated, having two basic components: the vision system and the control interface. The control interface is often an adaptation of the earlier generation of remote controllers and the vision system usually consists of two screens giving simultaneous rear and front views. The replication of the ROV's motion at the control station, for instance by sitting the operator on a motion base or active seat, is an issue hardly reported in the technical literature. Such strategy is interesting because teleoperation tasks can be made more natural and easier for the operator by creating a feeling of presence. In this way, the operator's vestibular and kinesthetic sensations are coupled to the visual information.

2. System description.

2.1 Introduction.

The teleoperation chain presented in this paper is a complex system formed by different parts or subsystems (Fig.3.).

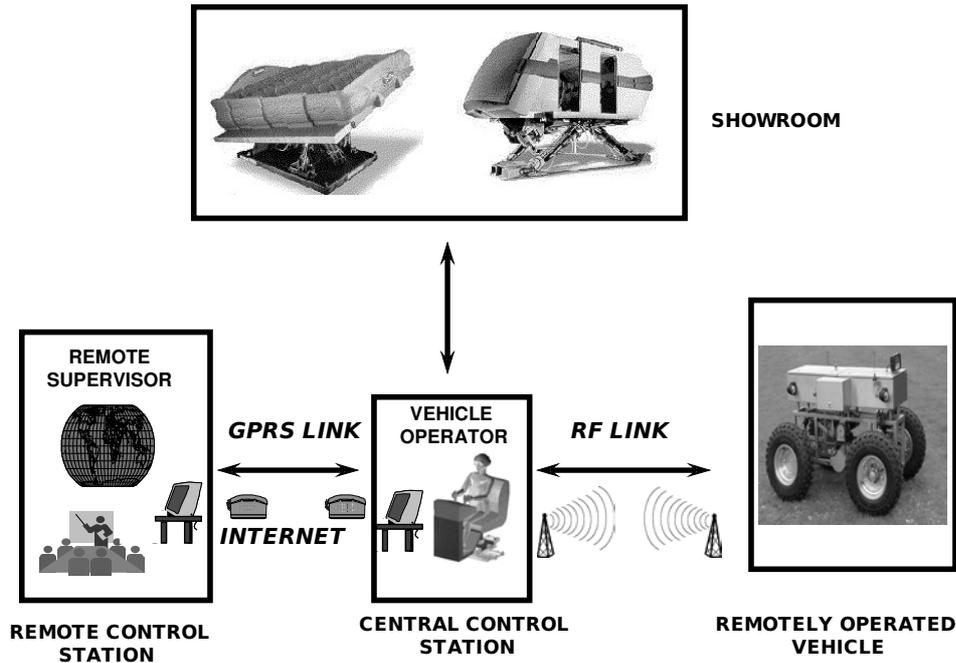


Fig. 3. Teleoperation chain.

The **vehicle operator** is the person who tele-drives the remote vehicle (ROV). The vehicle operator controls the motion of the ROV from a driving post called **central control station** (CCS). Such post is mounted on a motion base. In this way, the driver watches the images taken by the ROV's embarked cameras and at the same time feels the ROV's motion, increasing in this way the sensation of telepresence and the dexterousness in the ROV manipulation, as it will be later tested. The **remote supervisor**, located in the **Remote Control Station** (RCS), is the person who controls the operation of the tools, system or end-effectors installed in the ROV (remote interventions) or just receives data from the sensors and cameras installed on the vehicle and checks operational safety (entertainment applications). The purpose of the remote control station (RCS) is the implementation of a post from where the general operation of all subsystems can be monitored, mainly for safety purposes. The **virtual passengers** are the people installed in a cabin named **showroom**. This cabin is mounted on a motion base. These virtual passengers receive images from the ROV and also motion stimuli by the replication of the ROV's motion done by the motion base, creating a feeling of telepresence.

The main information flow among the different subsystems is shown in Fig. 4.

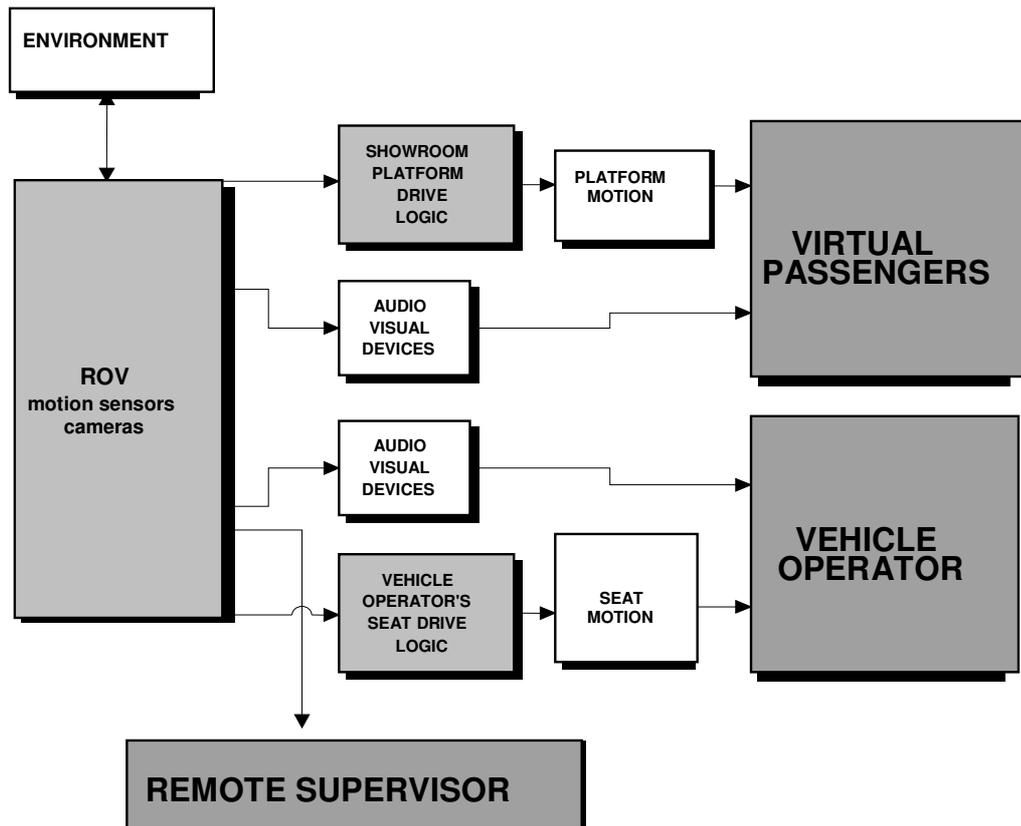


Fig. 4. Data flow among subsystems

This paper focuses on the interaction between the vehicle operator and the ROV.

2.2 Remotely Operated Vehicle no. 1 (ROV1).

A general view of this ROV can be seen in Fig. 5.

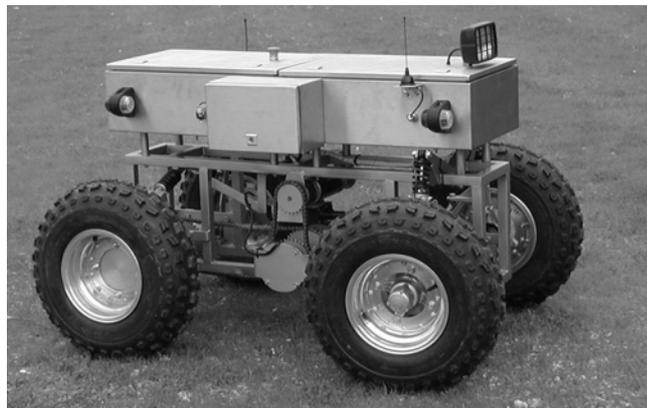


Fig. 5. Teleoperated wheeled vehicle.

This vehicle has been designed as a compact exploration rover with important all-terrain and manoeuvrability capabilities. It is electrically driven and it is equipped with a 4-wheel-drive, 2-differentials transmission system. Driving control includes forward-backward motion selection, variable speed up to 12 Km/h, steering and 4x4 or 4x2 traction. Its suspension system is also adapted to rough terrains with important unevenness. This vehicle has been tested in rough conditions showing remarkable motion capabilities. The wheeled ROV is driven from a control unit that can be carried by the operator (by means of a belt) or integrated in the CCS. This unit is a RF DTRII emitter (Fig. 6). It is formed by two joysticks (forwards-backwards, left-right), five buttons (horn, lights, and other auxiliary functions) and the emergency stop.

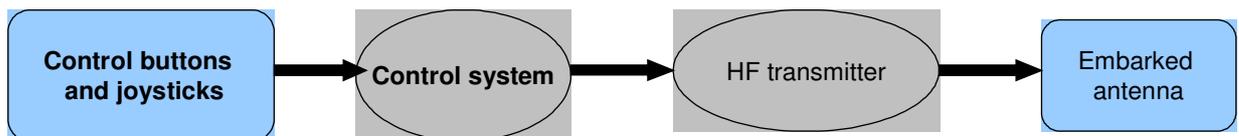


Fig. 6. Emitter scheme

Inside the vehicle a receiver unit is installed. It is a DTRII unit composed of a high frequency receiver, a control system and a transmitter (Fig. 7). Its role is to give the information it receives from the combi-synthesized emitter to the vehicle drive and steering systems.

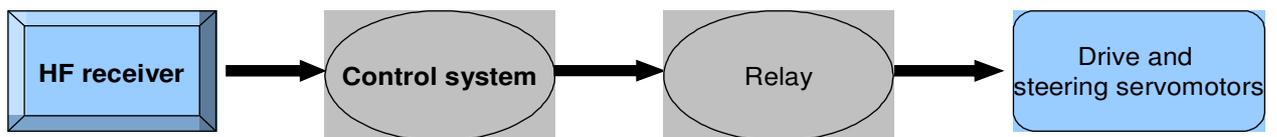


Fig. 7. Receiver unit



Fig. 8. ROV control unit.

2.3 Remotely Operated Vehicle no. 2 (ROV 2).

ROV2 consists of a commercial electrical vehicle that has been modified and adapted to be teleoperated. It is a 2 wheel-drive and two-wheel steering vehicle whose maximum speed is 50 km/h. Its motor power is 4 Kw and it has autonomy of 60 km. ROV2 is shown in Fig. 9.



Fig. 9. ROV2.

In order to teleoperate the vehicle, the conventional pedals and the steering-wheel were replaced by electrical servoactuators. Control electronics, power electronics and communication system were integrated in the vehicle.

Vehicle teleoperation is carried out from a control board formed by a PC and a joystick. It is shown in the next figures. The joystick is used to control the following functions: acceleration/braking, right steering and emergency stop. Maximum distance between the vehicle and the control joystick is 3 km. The communication scheme between the control board and the vehicle is exactly the same as the one detailed for ROV1. (see section 2.2).



Fig. 10. Control board.

An easy-to-read diagram displayed on the control PC screen, shows in real time the commands sent to the ROV and the actual response of the different subsystems.

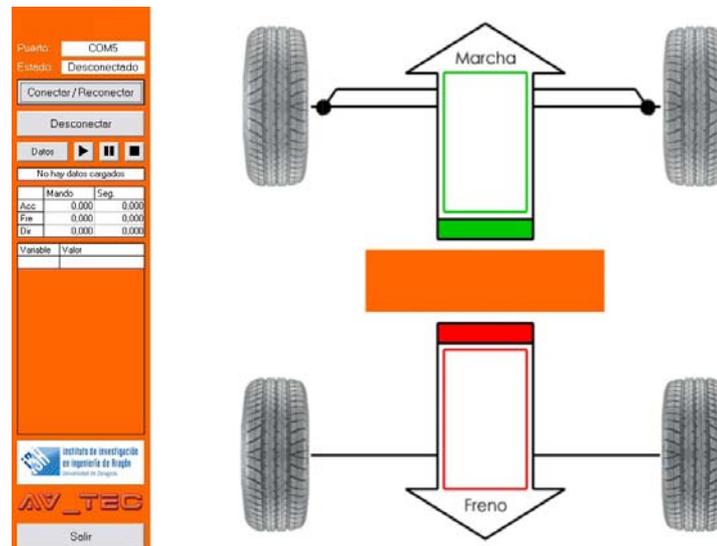


Fig. 11. Main control screen.

2.4 Embarked equipment.

ROV1 and ROV2 are both equipped with the same sensors for image acquisition and vehicle motion acquisition. Main characteristics of this equipment are:

1. An embarked camera, a standard CCD colour camera F1.2/4 mm. Audio/video transmission is done using a wireless A/V sender, 2.4 GHz.
2. Motion sensor unit formed by the following elements:
 - 3-axis accelerometer. Range: 0-2 g's, 0-50 Hz. Sensibility 500 mV/g.
 - 3orthogonal angular-rate sensors. Range: 0-150 rad/s. Range +- 100 %/seg. Coriolis type.
 - 2- axis inclinometer. Range +- 50 deg.

The function of the 3-axis accelerometer and the 3 orthogonal angular-rate sensors is to acquire acceleration and angular velocity vectors. The function of the 2- axis inclinometer is to complement, calibrate and check the signals from the accelerometers.

2.5 Communication links among ROVs and operator / supervisor / showroom stations and global control system.

There is a number of communication links amongst the different elements and systems. The main ones are represented in the following diagram (Fig. 12).

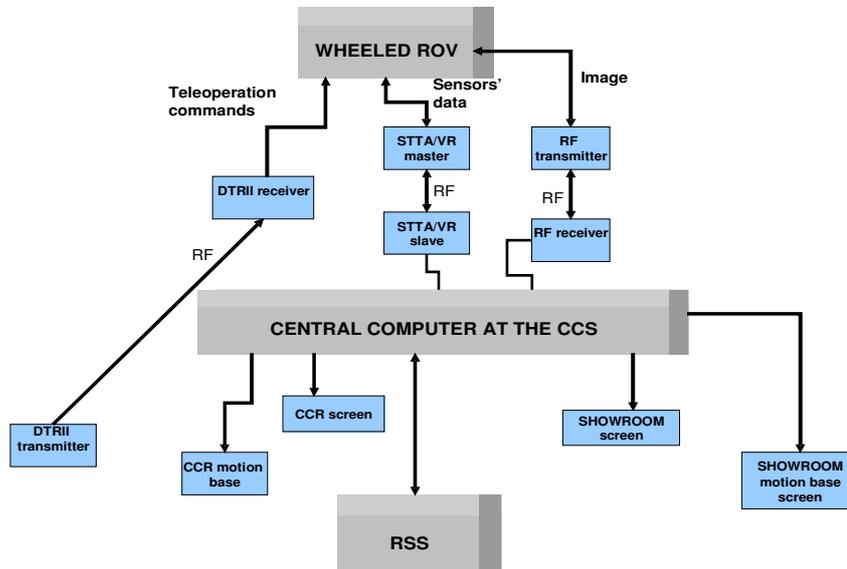


Fig.12. Main communication links.

2.6 Central Control Station Motion Base.

The CCS motion base has 4 degrees of freedom that can be easily identified in Fig. 13: Roll (rotation around x-axis), pitch (rotation around y-axis), yaw (rotation around z-axis), heave (displacement along z-axis) [5,6]

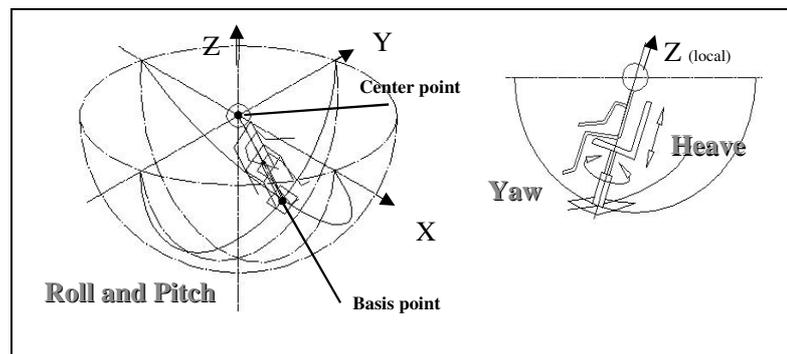


Fig. 13. Central control station's motion base architecture.

There are two main points which define this spherical architecture:

- **The center point**, located at the driver's head. The location at this specific point is important to avoid linear accelerations of the head when the seat rotates. Besides, it coincides with the location of the driver's vestibular organ.

- **The basis point**. This point moves on a spherical surface to provide roll and pitch rotations. A pictorial view of the CCS motion base is given in Fig. 14.



Fig. 14. Central control station's motion base

2.7 Showroom.

The showroom is another important part of the system. It is formed by a closed cabin mounted on a motion base. The cabin has enough capacity for five seated people, "the virtual passengers". It is made of light composite materials, such as glass fiber+ epoxy resin.



Fig. 15. Showroom cabin

The cabin is mounted on a motion base (hexapod or Stewart platform) and equipped with a front screen projecting the images taken by the embarked cameras. Its basic purpose is to induce people the sensation of actually being riding the ROV. Such real images can be enhanced by means of augmented reality applications, making possible the overlaying of additional data or information, so it can be adequate for educational purposes.

3. Transmission of motion sensation in teleoperation.

The process followed can be summarised as:

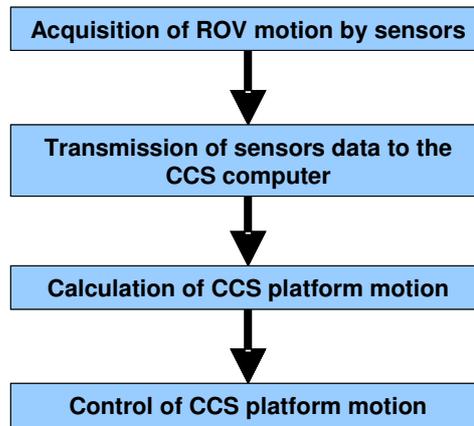


Fig. 16. ROV motion replication.

The replication of the ROV motion at the CCS (central control station) can exclusively be made by using a motion base or platform. As the CCS will not exactly replicate the ROV motion, it is necessary to generate a motion sensation similar to the sensation the driver would have being in the actual ROV. To reach such objective, the use of driving simulators motion base algorithms is a valid strategy.

Ideally, any ROV motion, to be properly replicated, needs a full 6-DOF motion at the CCS platform. It is important however to consider the motion replication fidelity that can be achieved with a reduced number of DOF's of the motion base.

The applicability of such simplified systems for flight simulators has already been analyzed in detail in some publications [7, 8, 9]. The platform architectures considered were always parallel-type. The conclusion achieved by *Pouliot et al.* [10] was that, in most cases, a 3-DOF's motion base was capable of producing a motion sensation quality comparable to that obtained with the classical 6-DOF's Stewart Platform [11]. In this sense, the 4-DOF motion base presented in section 2.6 can provide, due to its large angular excursions, greater acceleration sensation than traditional parallel systems.

3.1 CCS and showroom motion base drive algorithm.

The strategies used to generate motion sensation at the CCS and showroom are derived from those developed for driving simulators (Fig. 17). [12]

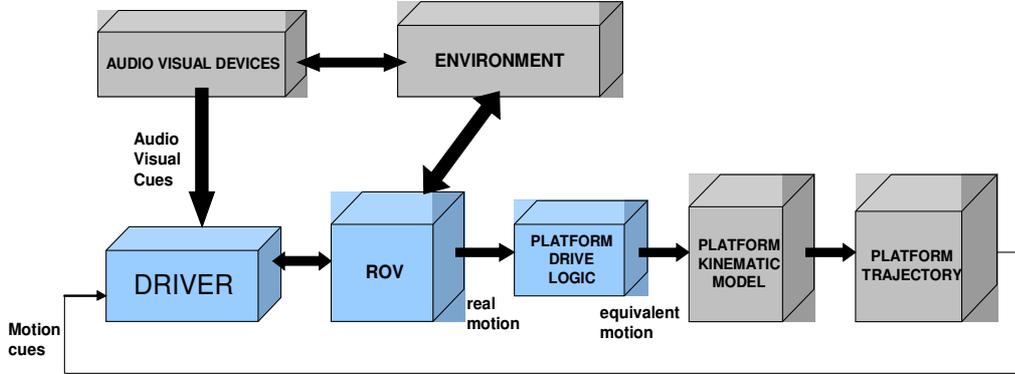


Fig. 17. Motion generation at the CCS and the showroom.

They are based on the way the human being perceives motion [13, 14]. It is explained in detail in the following section.

4. Human sensory system and motion perception.

Previous to the development of any ROV motion replication algorithm at the CCS, it is necessary to have models predicting the sensation of actual physical motion by humans (without visual cues). The main perception models were established in the sixties and seventies, completed with some recent studies. Although many sensors throughout the body play a role in this sensing process, it is apparent that the vestibular system located in the head (internal ear) provides the dominant signals [12]. It was established that human motion perception involves only angular velocity and linear acceleration (specific force).

4.1 Angular velocity perception.

The primary sensing organs for rotational motion are the semicircular canals, located in the internal ear.

For the frequency range of interest in the present paper, the model of *Young et al* [13, 15] was found the most adequate. The corresponding transfer function for the linear portion of the model is (for any one channel):

$$\frac{\hat{\omega}}{\omega} = \frac{T_L T_a s^2}{(T_L s + 1)(T_S s + 1)(T_a s + 1)} \quad (1)$$

where:

ω is the angular velocity input about one of the three axis

$\hat{\omega}$ is the perceived angular velocity.

A number of experiments were performed to determine the values for the parameters in this model. They are listed in the following Table 1: [13]

	<i>Pitch</i> (about y-axis)	<i>Roll</i> (about x-axis)	<i>Yaw</i> (about z-axis)
$T_L(s)$	5.3	6.1	10.2
$T_S(s)$	0.1	0.1	0.1
$T_a(s)$	30	30	30
Threshold (deg/s)	3.6	3.0	2.6

Table 1. Rotation Motion Sensation Model Parameters.

It can be seen that this system is a good sensor of angular velocity in the frequency band 0.2 rad/s to 10 rad/s. Its response $\hat{\omega}$ tends to zero for both steady-state angular velocity and steady-state angular acceleration inputs.

4.2. Acceleration Perception (specific force)

Specific force is felt by the otolith (Fig.18) (the other major sensor contained within the vestibular system) complemented by the perception performed by muscles and tendons through contact pressure.

Specific force f is defined as the vector difference between translational inertial acceleration γ and the acceleration due to gravity g , that is:

$$f = \gamma - g \quad (2)$$

In terms of forces, specific force is the sum of the vehicle's external forces divided by the vehicle mass less the gravitational components.

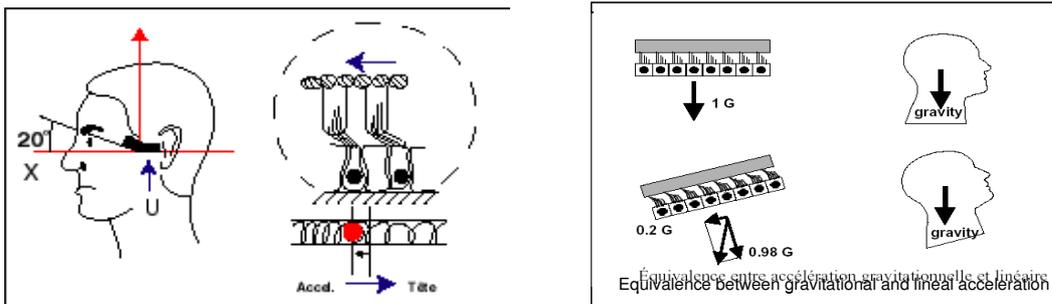


Fig. 18. The otolith specific force perception.

The corresponding model and transfer function for the linear portion of the model is (for any one channel):

$$\frac{\hat{f}}{f} = \frac{K(\tau_a s + 1)}{(\tau_l s + 1)(\tau_s s + 1)} \quad (3)$$

where:

f is the specific force along any one of the three axis.

\hat{f} is the perceived specific force along any one of the three axis.

Based on this work *Mairy and Young* [13] produced the parameter values listed in Table 2:

	<i>Surge</i> (along x-axis)	<i>Sway</i> (along y-axis)	<i>Heave</i> (along z-axis)
$\tau_L (s)$	5.33	5.33	5.33
$\tau_S (s)$	0.66	0.66	0.66
$\tau_a (s)$	13.2	13.2	13.2
K	0.4	0.4	0.4
Threshold (m/s²)	0.17	0.17	0.28

Table 2. Specific Force Sensation Model Parameters

It can be seen that the system is a good sensor for specific force in the frequency band of 0.2 rad/s to 2 rad/s. It has a steady response to constant values of f . Because this system will respond to the gravity vector alone, when the translational inertial acceleration of the head is zero, it can be used to determine one's tilt orientation with respect to the local vertical.

5. Development of the CCS motion base drive logic algorithm.

In motion sensation reconstruction, two are the main objectives:

Let S_{cpc} a frame attached to the ROV and S_{cps} a frame attached to the CCS.

$$\left[f_{\text{on the ROV}} \right]_{S_{cpc}} = \left[f_{\text{on the CCS}} \right]_{S_{cps}} \quad (4)$$

That is:

Specific force at the origin of frame S_{cpc} (head of ROV driver), in frame S_{cpc}

Equal to

Specific force at the origin of frame S_{cps} (head of CCS driver), in frame S_{cps}

And in an equivalent way:

$$\left[\Omega_{Abs \text{ on the ROV}} \right]_{S_{cpc}} = \left[\Omega_{Abs \text{ on the CCS}} \right]_{S_{cps}} \quad (5)$$

That is:

ROV angular velocity in frame S_{cpc}

Equal to

CCS angular velocity in frame S_{cps}

By keeping these two objectives it is possible to reconstruct the ROV motion in the CCS.

The way the simulator motion bases operate can be described as follows:

- The vehicle angular velocities are high pass filtered and then reproduced by the platform. In this way, only the frequencies inside the human motion perception bandwidth are considered.
- The specific forces are divided into different components:
 1. High frequency components of longitudinal and lateral specific forces which are associated to short displacements of the ROV, are simulated by means of longitudinal or lateral displacements of the platform. They are basically reproduced.
 2. Low frequency components of longitudinal and lateral specific forces, associated to ROV long displacements, can not be reproduced as they would exceed the excursion limits of the platform. They are then simulated by platform tilting. The tilting angle is achieved at a rotational speed below the human perception threshold.

This strategy, called the wash-out algorithm, is summarised in the following scheme:

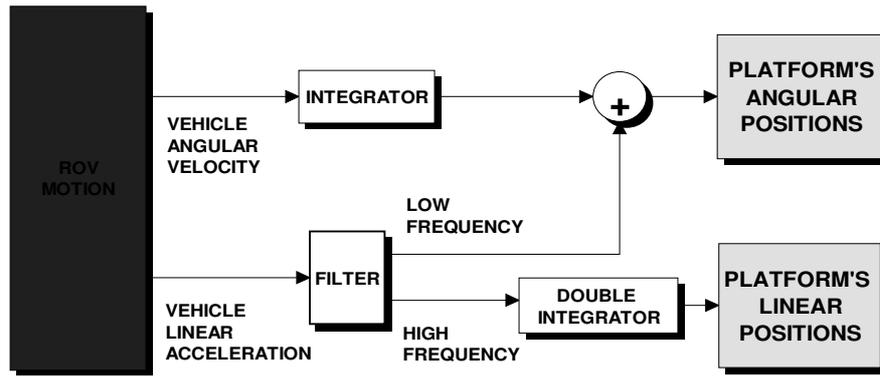


Fig. 19.The wash-out algorithm

7. Tests of the system.

7.1 Introduction.

In order to test the effect of the ROV's motion replication performed by the driving interface, this section analysis the quality of the teleoperation of ROV1 and ROV2 from two types of driving interfaces: with and without motion replication.

7.2 Teleoperation of ROV1 from a simple interface: joystick + direct visual contact.

To perform this series of tests, ROV1 was teleoperated by means of the joystick previously described (see section 2.2). Maximum distance between the operator and the ROV was 300 m, and the operator had direct visual contact with the vehicle all the time. As described in section 2.2, ROV1 maximum speed is 11 km/h.

Different manoeuvres were performed:

- **Driving and braking.** A number of driving and braking manoeuvres were repeatedly carried out. Driving manoeuvre was performed with no difficulties but precision in braking depended on the distance between the operator and ROV1 as the further the vehicle was the less precision the operator had. This implies that when the operator is far from the vehicle there is no much precision in the commands he transmits with the joystick and the vehicle can crash against any nearby object.
- **Teleoperation in an outdoor pathway including bends.** ROV1 was teleoperated in outdoor pathways close to the laboratory. No difficulties arose when there was not much distance between the operator and the vehicle, but precision became smaller as the distance between ROV1 and the operator increased. When driving bends, it is very important that the orientation of the vehicle and the orientation of the operator coincide, otherwise the operator would have to move the joystick to the left if he wanted to turn right, and so on. This requires extreme attention and concentration.
- **Driving forwards and backwards.** Precision when driving forwards and backwards depended both on the distance between the vehicle and the operator and on the relative orientation between them. The closer the operator to the vehicle, the better accuracy.
- **180-degree turn.** In order to perform a 180-degree turn, the operator has to accurately observe the distance between the ROV and the surrounding obstacles. He also has to adjust the right/left commands he transmits with the joystick as the orientation of the vehicle has changed, so the vehicle's right side has become the operator's left side, and vice versa.
- **Obstacle avoidance.** The object of the test was to avoid an obstacle placed in the pathway. In the first test, the operator was placed at a distance of 10 m far from the obstacle and the manoeuvre was performed with no difficulties. In the second test, the operator was placed 200 m far from the obstacle, and it was difficult to carry out the manoeuvre accurately.

7.3 Teleoperation of ROV2 from a simple interface: joystick + direct visual contact.

The series of tests performed with ROV1 were also carried out with ROV2:

- **Driving and braking.** The same results were obtained as those obtained with ROV1. It was also demonstrated that as ROV2 can reach a higher maximum speed than ROV1, acceleration and braking times are also higher.
- **Teleoperation in an outdoor pathway including bends.** The same results were obtained as those obtained with ROV1. As ROV2 can reach a higher maximum speed than ROV1, the operator has to calculate more accurately all the distances when performing these manoeuvres.
- **Driving forwards and backwards.** The same results were obtained as those obtained with ROV1. Backwards driving can be carried out only when driving at a limited speed (less than 15 km/h approx.), otherwise the vehicle can become unstable.
- **180-degree turn.** The same results were obtained as those obtained with ROV1.
- **Obstacle avoidance.** The same results were obtained as those obtained with ROV1. Obstacle avoidance gets more difficult when speed increases since it requires anticipation in performing all the manoeuvres to avoid wheel slip and overturning in case of sudden steering at a high speed.

7.4 Teleoperation of ROV1 from a multimodal driving interface: motion base + video + joystick.

The sensors unit and the front camera described in previous sections were embarked in ROV1, so all the movements produced by the vehicle were captured by the embarked sensors and then transmitted to the motion base. This motion base moved according to the data received, inducing to the driver the same motion sensation he would have if he was actually driving the vehicle. The images captured by the embarked camera are transmitted to the central control station (CCS) and shown in the front screen placed there.

The following tests were carried out:

- **Driving and braking.** The driver perceives through the movement of the motion base all the driving and braking acceleration values experienced by ROV1, so he can adjust in a more precise way the commands transmitted to the ROV. When performing braking manoeuvres, in order to avoid collision against objects, the distance between ROV1 and those objects is estimated taking into account the images captured by the embarked camera and shown in the front screen located in the CCS. Tests have demonstrated that these estimated distances are not as accurate as those obtained when there is direct visual contact being the ROV close to the

operator, consequently the risk of collision increases. However, as the maximum speed ROV1 can reach is really low, this risk is not significant.

- **Teleoperation in an outdoor pathway including bends.** ROV1 runs at rather low speed (11 Km/h maximum). Under these conditions, driving accuracy is quite good since satisfactory handling can be performed from the images projected in the front screen.

- **Obstacle avoidance.** In this case, accuracy in avoiding obstacles is also quite good.

7.5 Teleoperation of ROV2 from a multimodal driving interface: motion base + video + joystick.

The series of tests performed with ROV1 were also carried out with ROV2, but the fact that ROV2 can reach a speed significantly higher than ROV1 modifies both the behaviour of the vehicle and the results obtained from the tests:

- **Driving and braking.** The same results were obtained as those obtained with ROV1, but as ROV2 can reach a higher maximum speed than ROV1, the risk of collision is higher as it is more difficult to calculate the distances. The movement of the motion base helps to a better perception of the vehicle dynamics and complements in a proper way the information coming from the images. In this test, it was seen how a minimum desynchronization between the image and the motion base caused some loss of accuracy in the teleoperation process and also made the teleoperator feel motion sickness.

- **Teleoperation in an outdoor pathway including bends.** The remarks given for the previous test are also applicable to this test. Perception of the ROV dynamics by means of the movement of the motion base helps to obtain more accuracy during teleoperation.

- **Obstacle avoidance.** In this test, the movement of the motion base is also a significant help when driving, although the main information is obtained from the images.

8. Conclusion.

Accurate vehicle teleoperation is a complex task that requires a high level of training and concentration. Depending on the maximum speed the ROV can reach and the different manoeuvres it has to carry out, the requirements towards the operator may vary. The quantity and quality of the information the operator receives determines the accuracy in the teleoperation. The target of our research was to quantify the effect of the introduction of motion cues in the driving interface complementing visual information.

To carry out this study, two different ROVs have been used:

- ROV1: maximum speed 11 Km/h

- ROV2: maximum speed 50 Km/h

Both vehicles were operated in two different ways:

- By means of a control joystick, while the operator keeps direct visual contact with the vehicle all the time.
- From a multisensorial teleoperation station mounted on a 4-DOF motion base in order to reconstruct the movements of the ROV. Images captured by an embarked camera on the ROV are seen by the operator on a front screen.

In all cases, the ROV's were tested performing different tasks: obstacle avoidance, accelerating/braking, bend driving, ...

From the analysis of the tests results it can be concluded that:

- Vehicle teleoperation at high speed with just direct visual contact is risky, as the operator doesn't have the feeling of speed and the vehicle could crash or overturn. In this case, the teleoperation from a post (mounted on a motion base) that transmits the operator the sensation of the ROV's movement has proved to be more accurate. At low speed there is no significant improvement.
- Precision tasks such as obstacle avoidance or braking in front of obstacles need an estimation of the distance between the vehicle and the obstacles. This estimation is more accurate when the operator is placed next to the ROV and has direct visual contact. If this estimation is made from the images captured by embarked cameras, accuracy is smaller and there is a higher risk of collision.
- Detected desynchronisation between image and motion (less than 1 s in all cases) in the multisensorial teloperation station generates, after some time, symptoms of motion sickness to the operator. This is a common but annoying effect of teleoperation systems.

9. References.

[1] Hainsworth D. W., "Teleoperation User Interfaces For Mining Robotics" IEEE International Conference on Robotics and Automation. San Francisco – California. April 2000.

[2] Ralston J. C., Hainsworth D. W.. "The Numbat: A Remotely Controlled Mine Emergency Response Vehicle", Proceedings of the International Conference on Field and Service Robotics, pp. 48-55, Canberra, Australia, December 1997.

[3] Capt Mark H. Draper, Ph.D. Heath A. Ruff "Multi-Sensory Displays And Visualization Techniques Supporting The Control Of Unmanned Air Vehicles" IEEE International Conference on Robotics and Automation. San Francisco – California. April 2000.

- [4] TELEDRIE: "Vehicle teleoperation system for application to entertainment, research and remote interventions". Contract number: IST- 1999 - 57451
- [5]. Maza M., Fontaine J-G, Baselga S. "Analysis Of Parallel Platforms As Motion Generators For Driving Simulators. Alternative Architectures"98VR054, 31st ISATA. Düsseldorf, pp. 185-192. Junio 1998.
- [6] Maza M., Fontaine J.G., Louboutin J.P., Baselga S. "A Spherical Motion Base Used As Motion Generator Platform For Driving Simulators".ICARCV'98. SINGAPORE. VOL. 2, pp 1725-1729. Diciembre 1998.
- [7] Shiabev, V.M. "New concept f the motion system for a low-cost flight simulator: Development and design", AIAA FST Conf. 1993
- [8] Lee K.M., Shad D.K., "Kinematic Analysis of a Three-Degrees-of-Freedom-in-Parallel Actuated Manipulator", J. Robotics Automat, vol 4, no.3, pp 354-356, 1988.
- [9] Kurtz R., Haywarda V., "Multiple Goal kinematic Optimization of a Parallel Spherical Mechanism with Actuator Redundncy" IEE Trans. On Robotics and Automation, vol. 8, No. 5, pp. 644-651. October 1992.
- [10] Pouliot Nicolas A., Meyer A. Nahon, Clément M. Gosselin, « Analysis and Comparison of the Motion Simulation Capabilities of Three-Degree-of-FreedomnFlight Simulators". AIAA paper No. 93-3474-CP, 1993.
- [11] Stewart D., "A Platform with Six Degrees of Freedom". Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Vol 180, No. 5, pp. 371-378. 1965
- [12] Sinacori, J.B., "A Practical Approach To Motion Simulation", AIAA paper No. 73-931.
- [13] Young, L.R., Meyri, J.L., Newman J.S. and Feather, J.E., "Research In Design And Development Of A Functional Model Of The Human Nonauditory Labyrinths", Aerospace Medical Research Laboratory, TR-68-102, March 1969.
- [14] Meiry, J.L., "The Vestibular System And Human Dynamic Space Orientation", NASA CR-628, Oct. 1966.
- [15] Zacharias G.L., "Motion Cue Models For Pilot-Vehicle Analysis", AMRL-TR-78-2, May 1978.

A.2. Congresos internacionales

MAZA M.; BASELGA S.; y ORTIZ J. "Approaches to the Generation of Whole Body Motion Sensation in Teleoperation". *CLAWAR 2004*. Madrid, España, 2004.

MAZA M.; BASELGA S.; y ORTIZ J. "Vehicle Teleoperation with a Multisensory Driving Interface". *CLAWAR 2004*. Madrid, España, 2004.

VEHICLE TELEOPERATION WITH A MULTISENSORY DRIVING INTERFACE

Mario Maza , Santiago Baselga, Jesús Ortiz

University of Zaragoza, Department of Mechanical Engineering, (CPS)

C/ Maria de Luna, s/n; 50018 Zaragoza, Spain

e-mail : mmaza@unizar.es

Abstract

This paper describes the technology developed in a recent research project for the teleoperation of wheeled ROV's from a multisensory driving interface. This driving interface is mounted on a motion base to generate the whole body motion sensation. To reach such objective, it uses the same motion sensation generation algorithms developed for driving simulators.

Keywords

Teleoperation, motion sensation, driving interface.

1. INTRODUCTION

The exploration of hostile or extreme condition zones, polluted sites, or any mission which could be dangerous for men are activities which could be part of the field of application of teleoperated vehicles. Some systems for vehicle teleoperation can also be found in the entertainment sector, where the goal can be, for instance, virtual visits to underwater sites or distant famous ruins, etc.

The teleoperation technology described in this paper has been developed in the **TELEDRIVE** project, funded by the European Commission under the programme IST- 1999 – 57451, which intends the development of a highly efficient vehicle teleoperation system suitable for remote interventions, entertainment and research.

2. SYSTEM DESCRIPTION

2.1. Introduction

The teleoperation chain implemented in *TELEDRIVE* is a complex system formed by different parts or subsystems (Fig.1.).

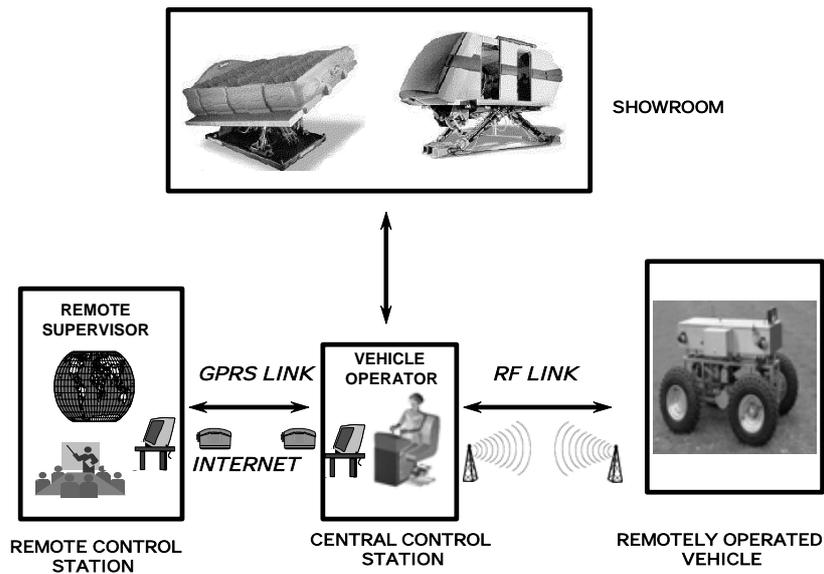


Fig. 1. *TELEDRIVE* layout.

The **vehicle operator** is the person who tele-drives the remote vehicle (ROV).

The **supervisor** is the person who controls the operation of the tool, system or end-effectors installed in the ROV (remote interventions) or just receives data from the sensors and cameras installed on the vehicle and checks operational safety (entertainment applications).

The **virtual passengers** are the people installed in a cabin named **showroom**. This cabin is mounted on a motion base. These virtual passengers receive images from the ROV and also motion stimuli by the replication of the ROV's motion done by the motion base.

The vehicle operator controls the motion of the ROV from a driving post called **central control station** (CCS). Such post is mounted on a motion base. In this way, the driver watches the images taken by the ROV's embarked cameras and at the same time feels the ROV's motion, increasing in this way the sensation of telepresence.

The **remote supervisor** in the remote control station is in charge of the surveillance and operational safety of the system.

The purpose of the **remote control station (RCS)** is the implementation of a post from where the general operation of all **TELEDRIVE** subsystems can be monitored, mainly for safety purposes. The main information flow among the different subsystems is shown in Fig. 2.

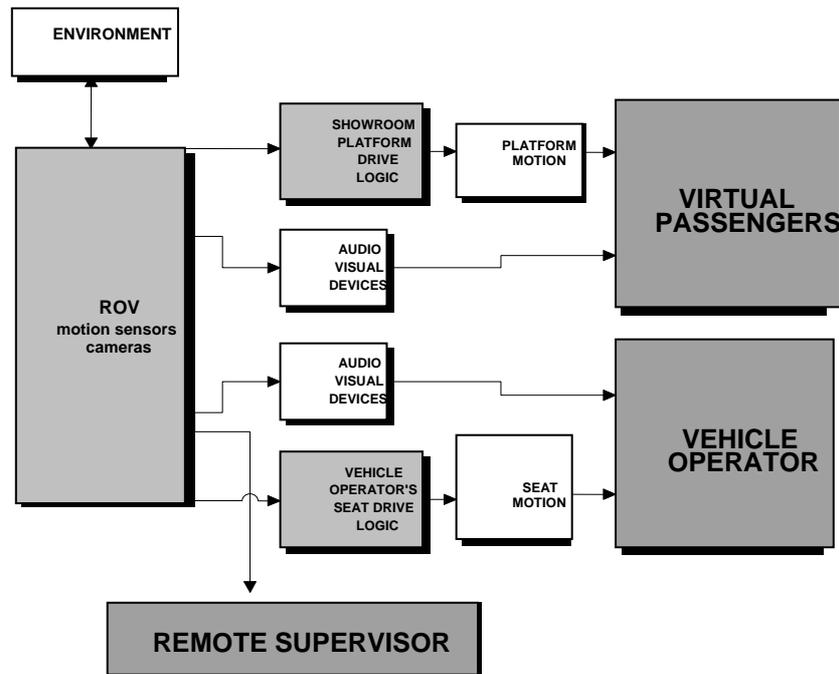


Fig. 2. Data flow among subsystems

2.2. Showroom

The showroom is another important part of **TELEDRIVE** system. It is formed by a closed cabin mounted on a motion base. The cabin has enough capacity for five seated people, “the virtual passengers”. It is made of light composite materials, such as glass fiber+ epoxy resin.



Fig. 3. Showroom cabin

The cabin is mounted on a motion base (hexapod or Stewart platform) and equipped with projection screens to communicate audiovisual cues to the virtual passengers. Its basic purpose is to induce people to the sensation of actually being riding the vehicle, and at the same time, project the images taken by the embarked ROV's cameras. Such real images are enhanced by means of augmented reality applications, making possible the overlaying of additional data or information, so it can be adequate for educational purposes.

2.3. Remotely operated wheeled vehicle (ROV)

The wheeled ROV is a key part of the system. A general view of this ROV can be seen in Fig. 4.

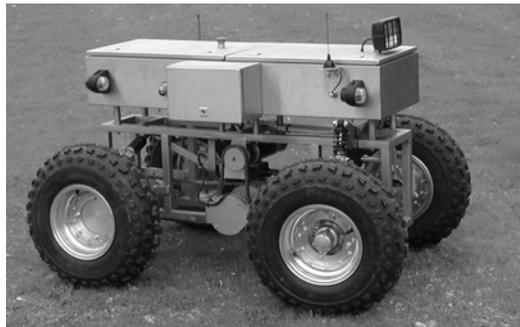


Fig. 2. Teleoperated wheeled vehicle.

This vehicle has been designed as a compact exploration rover with important all-terrain and manoeuvrability capabilities. It is electrically driven and it is equipped

with a 4-wheel-drive, 2-differentials transmission system. Driving control includes forward-backward motion selection, variable speed up to 12 Km/h, steering and 4x4 or 4x2 traction. Its suspension system is also adapted to rough terrains with important unevenness.

This vehicle has been tested in rough conditions showing remarkable motion capabilities. The wheeled ROV is driven from a control unit integrated in the CCS. This unit is a RF DTRII emitter (Fig. 5). It is formed by two joysticks (forwards-backwards, left-right), five buttons (horn, lights, and other auxiliary functions) and the emergency stop.

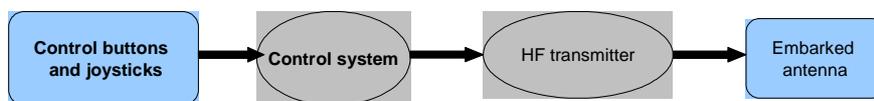


Fig. 3. Emitter scheme

Inside the vehicle a receiver unit is installed. It is a DTRII unit composed of a high frequency receiver, a control system and a transmitter (Fig. 6). Its role is to give the information it receives from the combi-synthesized emitter to the vehicle drive and steering systems.

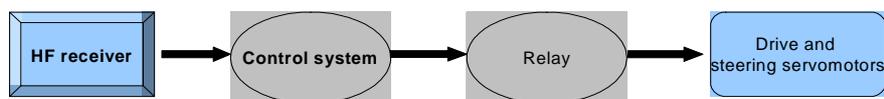


Fig. 4. Receiver unit

The wheeled vehicle is also equipped with a standard CCD colour camera F1.2/4 mm. Audio/video transmission is done using a wireless A/V sender, 2.4 GHz, range 130 m.

The ROV's motion reconstruction at the CCS and Showroom is a key part of this project. To make possible a realistic ROV motion replication, embarked sensors should therefore acquire exactly the relevant kinematic magnitudes: angular velocity (3-D) and linear acceleration (3-D). The sensor system selected for the wheeled ROV is formed by the following elements:

- 3-axis accelerometer. Range: 0-2 g's, 0-50 Hz. Sensibility 500 mV/g.
- 3orthogonal angular-rate sensors. Range: 0-150 rad/s. Range +- 100 %/seg. Coriolis type.
- 2- axis inclinometer. Range +- 50 deg.

The function of the 3-axis accelerometer and the 3 orthogonal angular-rate sensors is obvious. The function of the 2- axis inclinometer is to complement, calibrate and check the signals from the accelerometers.

2.4. Communication links among ROV's and operator / supervisor / showroom stations and global control system

Several parts and subsystems form *TELEDRIVE*. There is a number of communication links amongst them. The main ones are represented in the following diagram (Fig. 7).

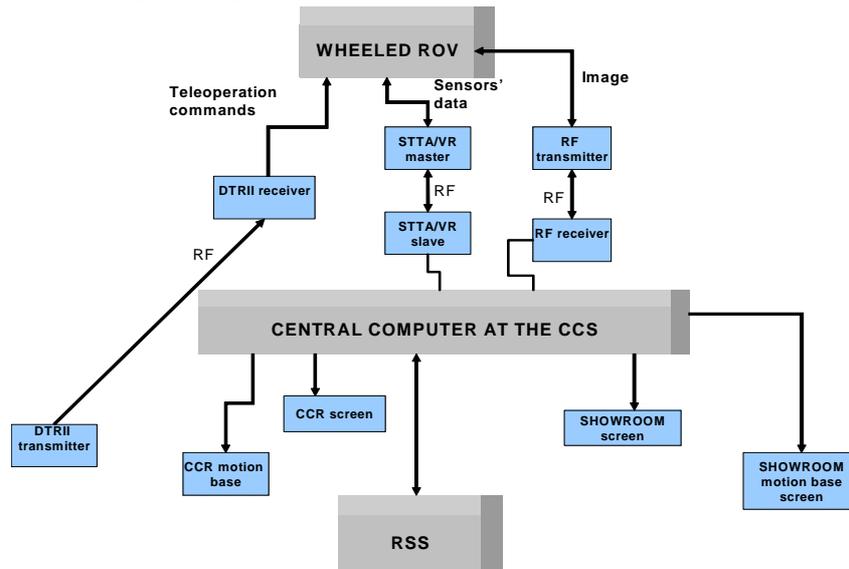


Fig. 5. Main communication links

2.5. Central Control Station Motion base

The CCS motion base has 4 degrees of freedom that can be easily identified in Fig. 8: Roll (rotation around x-axis), pitch (rotation around y-axis), yaw (rotation around z-axis), heave (rotation along z-axis).

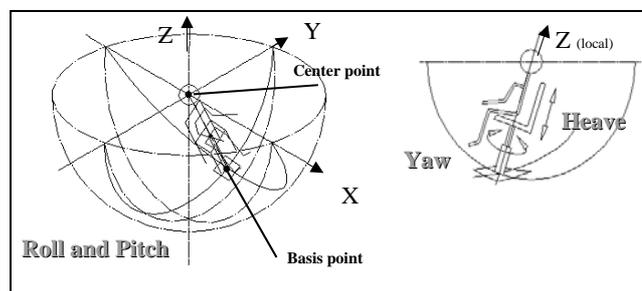


Fig. 6. Central control station's motion base architecture.

There are two main points which define this spherical architecture:

- **The center point**, located at the driver's head. The location at this specific point is important to avoid linear accelerations of the head when the seat rotates.
- **The basis point**. This point moves on a spherical surface to provide roll and pitch rotations.

A pictorial view of the CCS is given in Fig. 9.



Fig. 7. Central control station's motion base

2.6. CCS and showroom motion based drive algorithm

The strategies used to generate motion sensation at the CCS and showroom are derived from those developed for driving simulators (Fig. 10). [1]

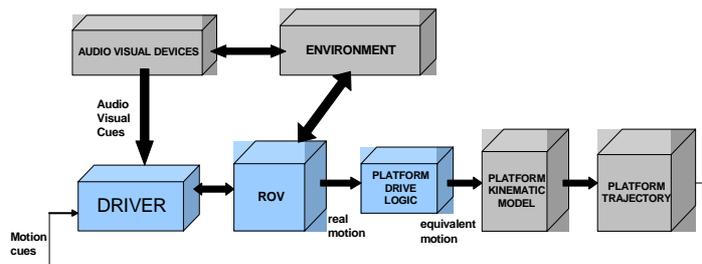


Fig. 8. Motion generation at the CCS and the showroom.

They are based on the way the human being perceives motion [2,3] with the vestibular organ. This organ contains two main physiological sensors:

- the otoliths, sensitive to specific forces. The specific force is defined as the vector difference between translational inertial acceleration and gravity acceleration: $f = a - g$. As an example, riding a vehicle moving at constant speed on a level flat road, we sense the f vector pointing upward perpendicular to the road. Accelerating on the same road f points upward but with some forwards inclination.

- the semicircular canals, sensitive to angular velocity. The semicircular canals are not equally sensitive to the whole possible spectrum of angular velocities. Different authors have established perception threshold and bandwidth.

It is assumed then that human motion perception involves only specific forces and angular velocities. Thus, the CCS and showroom motion bases simulate only these two kinematic parameters from all defining the motion of the ROV. The way the simulator motion bases operate can be described as follows:

- The vehicle angular velocities are high pass filtered and then reproduced by the platform. In this way, only the frequencies inside the human motion perception bandwidth are considered.
- The specific forces are divided into different components:

1) High frequency components of longitudinal and lateral specific forces which are associated to short displacements of the ROV, are simulated by means of longitudinal or lateral displacements of the platform. They are basically reproduced.

2) Low frequency components of longitudinal and lateral specific forces, associated to ROV long displacements, can not be reproduced as they would exceed the excursion limits of the platform. They are then simulated by platform tilting. The tilting angle is achieved at a rotational speed below the human perception threshold.

This strategy, called the wash-out algorithm, is summarised in the following scheme:

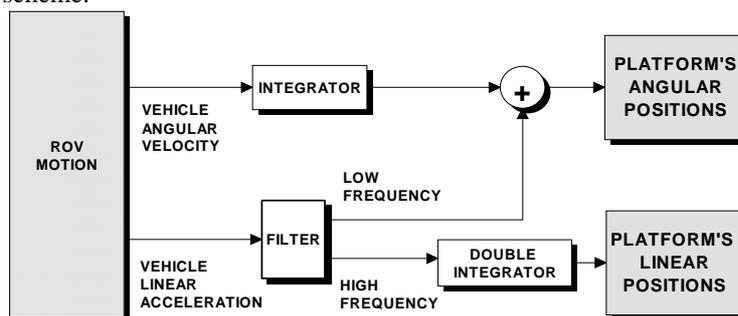


Fig. 9. The wash-out algorithm

3. TESTS OF THE SYSTEM

The system described in this paper has been extensively tested, with the ROV running on different environments. The quality of sensations in the CCS and the showroom proved to be fairly good.

One of the weakest points is the travel speed of the ROV since its maximum driving speed must be kept under 12 km/h. Satisfactory results have been obtained with the vehicle moving at 10 km/h. Once this speed has been surpassed, the expected synchronization between the motion bases movement and the images taken from the ROV embarked cameras is lost and a delay appears.

The appearance of this delay is mainly caused by the time required for acquiring and processing the ROV motion parameters in the PC as well as the time needed for the calculation of the platform motion and position control.

4. CONCLUSION

This paper describes an innovative architecture used for a vehicle teleoperation system, with special emphasis on the reconstruction of the ROV motion sensation. For that purpose two motion bases are used: one for the vehicle teleoperator and a second one for virtual passengers or non-interactive users of the system.

The results obtained have revealed the feasibility of the reconstruction of the ROV motion in the teleoperation process.

5. REFERENCES

[1] Sinacori, J.B., "A Practical Approach To Motion Simulation", AIAA paper No. 73-931.

[2] Young, L.R., Meyri, J.L., Newman J.S. and Feather, J.E., "Research in Design and Development of a Functional Model of the Human Nonauditory Labyrinths", Aerospace Medical Research Laboratory, TR-68-102, March 1969.

[3] Meiry, J.L., "The Vestibular System And Human Dynamic Space Orientation", NASA CR-628, Oct. 1966.

APPROACHES TO THE GENERATION OF WHOLE BODY MOTION SENSATION IN TELEOPERATION

Mario Maza , Santiago Baselga, Jesús Ortiz

University of Zaragoza, Department of Mechanical Engineering, (CPS)

C/ Maria de Luna, s/n; 50018 Zaragoza, Spain

e-mail : mmaza@unizar.es

Abstract

This paper makes a review of the motion perception models and motion sensation generation strategies in VR systems, especially in driving simulators. It also presents how, by using similar strategies to the ones used in driving simulators, it is possible to make a reconstruction of the ROV motion in the teleoperation interface. Finally, it presents three different motion base mechanical architectures, to be used as motion generation platforms of the teleoperation interface.

Keywords

Teleoperation, motion sensation, driving interface.

1. INTRODUCTION

Teleoperation, the remote operation of a vehicle or robot (ROV: remotely operated vehicle), is traditionally used in situations where a human controller is required but their presence at the location may be hazardous. Some examples include tactical urban reconnaissance, underwater activities, surveillance, bomb disposal, planet exploration, contaminated site cleanup, etc. Fig. 1 shows a typical control station for mining equipment [1, 2]. Fig. 2 shows a control station for unmanned aircraft [3].



Fig. 1. NUMBAT surface control station



Fig. 2. PREDATOR control station

A teleoperation interface, commonly known as central control station (CCS), can be made more natural and easier for the operator by creating a feeling of presence, for example, by using stereo video cameras that follow the movements of the user's head [4]. In this way, the operator's vestibular and kinesthetic sensations are coupled to the visual information from the ROV.

The current teleoperation interfaces commercially used are relatively unsophisticated, having two basic components: the vision system and the control interface. The control interface is often an adaptation of the earlier generation of remote controllers and the vision system consists of usually two screens giving simultaneous rear and front views. The replication of the ROV's motion at the control station, for instance by sitting the operator on a motion base or active seat, is an issue hardly reported in the technical literature.

This paper analysis the way the human being perceives motion (without visual cues) and how motion sensation on the CCS can be generated.

2. HUMAN SENSORY SYSTEM AND MOTION PERCEPTION

Previous to the development of any ROV motion replication algorithm at the CCS, it is necessary to have models predicting the sensation of actual physical motion by humans (without visual cues). The main perception models were established in the sixties and seventies, completed with some recent studies. Although many sensors throughout the body play a role in this sensing process, it is apparent that the vestibular system located in the head (internal ear) provides the dominant signals [1]. It was established that human motion perception involves only angular velocity and linear acceleration (specific force).

2.1. Angular velocity perception.

The primary sensing organs for rotational motion are the semicircular canals, located in the internal ear.

For the frequency range of interest in the present paper, the model of *Young et al* [5] was found the most adequate. The corresponding transfer function for the linear portion of the model is (for any one channel):

$$\frac{\hat{\omega}}{\omega} = \frac{T_L T_a s^2}{(T_L s + 1)(T_S s + 1)(T_a s + 1)} \quad (1)$$

where:

- ω is the angular velocity input about one of the three axis
- $\hat{\omega}$ is the perceived angular velocity.

A number of past experiments have been performed to determine the values for the parameters in this model. They are listed in the following Table 1: [6]

	<i>Pitch</i> (about <i>y</i> -axis)	<i>Roll</i> (about <i>x</i> -axis)	<i>Yaw</i> (about <i>z</i> -axis)
T_L(s)	5.3	6.1	10.2
T_S(s)	0.1	0.1	0.1
T_a(s)	30	30	30
Threshold (deg/s)	3.6	3.0	2.6

Table 1. Rotation Motion Sensation Model Parameters.

It can be seen that this system is a good sensor of angular velocity in the frequency band 0.2 rad/s to 10 rad/s. Its response $\hat{\omega}$ tends to zero for both steady-state angular velocity and steady-state angular acceleration inputs.

2.2. Acceleration Perception (specific force)

Specific force is felt by the otolith (Fig.3) (the other major sensor contained within the vestibular system) complemented by the perception performed by muscles and tendons through contact pressure.

Specific force \vec{f} is defined as the vector difference between translational inertial acceleration $\vec{\gamma}$ and the acceleration due to gravity \vec{g} , that is:

$$\vec{f} = \vec{\gamma} - \vec{g} \quad (2)$$

In terms of forces, specific force is the sum of the vehicle's external forces divided by the vehicle mass less the gravitational components.

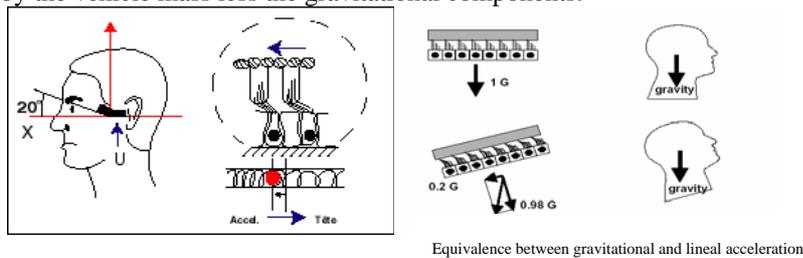


Fig. 3. The otolith specific force perception.

The corresponding model and transfer function for the linear portion of the model is (for any one channel):

$$\frac{\hat{f}}{f} = \frac{K(\tau_a s + 1)}{(\tau_l s + 1)(\tau_s s + 1)} \quad (3)$$

where:

- f is the specific force along any one of the three axis.
- \hat{f} is the perceived specific force along any one of the three axis.

Based on this work *Mairy and Young* [7] produced the parameter values listed in Table 2 :

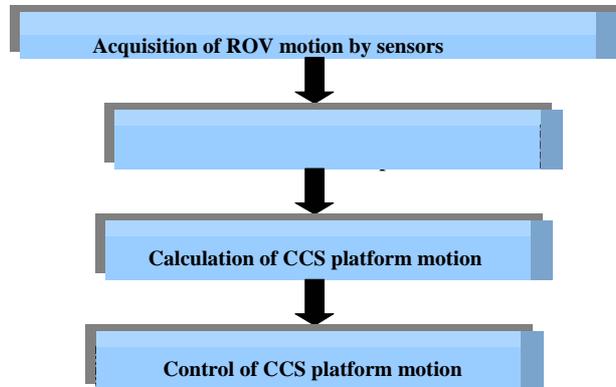
	<i>Surge</i> (along <i>x</i> - axis)	<i>Sway</i> (along <i>y</i> - axis)	<i>Heave</i> (along <i>z</i> -axis)
$\tau_L(s)$	5.33	5.33	5.33
$\tau_S(s)$	0.66	0.66	0.66
$\tau_a(s)$	13.2	13.2	13.2
K	0.4	0.4	0.4
Threshold (m/s²)	0.17	0.17	0.28

Table 2. Specific Force Sensation Model Parameters

It can be seen that the system is a good sensor for specific force in the frequency band of 0.2 rad/s to 2 rad/s. It has a steady response to constant values of \bar{f} . Because this system will respond to the gravity vector alone, when the translational inertial acceleration of the head is zero, it can be used to determine one's tilt orientation with respect to the local vertical.

3. TRANSMISSION OF MOTION SENSATION IN TELEOPERATION

The process followed can be summarised as:



The replication of the ROV (remotely operated vehicle) motion at the CCS (central control station) can exclusively be made by using a motion base or platform. As the CCS will not exactly replicate the ROV motion, it is necessary to generate a motion sensation similar to the sensation the driver would have being in the actual ROV. To reach such objective, the use of driving simulators motion base algorithms is a valid strategy.

Ideally, any ROV motion, to be properly replicated, needs a full 6-DOF motion at the CCS platform. It is important however to consider the motion replication fidelity that can be achieved with a reduced number of DOF's of the motion base. The applicability of such simplified systems for flight simulators has already been analyzed in detail in some publications [8,9,10]. The platform architectures considered were always parallel-type. The conclusion achieved by *Pouliot et al.* [8] was that, in most cases, a 3-DOF's motion base was capable of producing a motion sensation quality comparable to that obtained with the classical 6-DOF's Stewart Platform [11].

4. DEVELOPMENT OF THE CCS MOTION BASE DRIVE LOGIC ALGORITHM

In motion sensation reconstruction, two are the main objectives:

Let S_{cpc} a frame attached to the ROV and S_{cps} a frame attached to the CCS.

$$\left[\vec{J}_{\text{on the ROV}} \right]_{S_{cpc}} = \left[\vec{J}_{\text{on the CCS}} \right]_{S_{cps}} \quad (4)$$

That is:

Specific force at the origin of frame S_{cpc} (head of ROV driver), in frame S_{cpc}

Equal to

Specific force at the origin of frame S_{cps} (head of CCS driver), in frame S_{cps}

$$\left[\vec{\Omega}_{Abs \text{ on the ROV}} \right]_{S_{cpc}} = \left[\vec{\Omega}_{Abs \text{ on the CCS}} \right]_{S_{cps}} \quad (5)$$

ROV angular velocity in frame S_{cpc}

Equal to

CCS angular velocity in frame S_{cps}

By keeping these two objectives it is possible to reconstruct the ROV motion in the CCS.

5. ARCHITECTURES FOR THE CCS MOTION BASE

This section shows three different architectures used to provide motion sensation in the CCS. The first one is a classical 6-DOF system. The other two are

simplified 4-DOF systems able to provide a motion sensation quality similar or even greater than that given by the complete 6-DOF systems. The three platform architectures described below have been tested with optimal results for the teleoperation of the wheeled ROV shown in Fig.4.



Fig 4. Wheeled ROV used in the tests.

6. DOF Stewart platform

This is the most classical architecture. The Stewart platform is a universal 6-DOF motion base, used in flight-driving simulators, robotics, earthquakes research, etc. It consists of a moving platform attached to a fixed base by means of six legs. Each of the legs consists of - from base to top- a fixed unactuated Hooke joint, an actuated prismatic joint and an unactuated spherical joint, attached to the moving platform. The mentioned prismatic joints are typically hydraulic or electric linear actuators. The architecture of this classical six degree-of-freedom parallel mechanism is showed in figure 6. It was first presented in 1965 [11]. Fig. 5 shows a driving simulator using the Stewart platform motion base, which was tested for the teleoperation of the ROV shown in Fig. 4.



Fig. 5. Implementation of the Stewart platform.

6.1. Spherical platform

This is a 4-DOF motion base specially adapted to the replication of wheeled ROV's motion. There are two main points which define this spherical architecture (Fig. 6):

- **The center point**, located at the driver's head. The location at this specific point is important to avoid linear accelerations of the head when the platform rotates.
- **The basis point**. This point moves on a spherical surface to provide roll and pitch rotations.

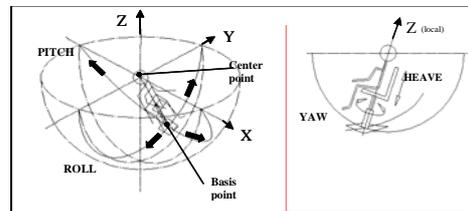


Fig. 6. The Spherical Platform architecture: heave displacement and yaw rotation.

In this way, the Spherical Platform has 4 DOF (Fig. 7):

- Roll (rotation around x-axis)
- Pitch (rotation around y-axis)
- Yaw (rotation around z-axis)
- Heave (displacement along z-axis)

A practical implementation of this architecture is shown in Fig. 7.



Fig. 7 Implementation of the spherical platform

6.2. Parallelogram platform

This 4-DOF platform represents, as the previous case, an innovative approach to the problem of motion sensation generation. The system is formed by:

- two four-bar mechanisms, the first one on the floor, supporting the whole system, the second one mounted on top of the first one and perpendicular to it. These systems provide roll and pitch inclination.
- A rotation mechanism based on a slew ring, to provide yaw rotation.
- A scissors-type mechanism, to provide heave motion.

A pictorial view of this system is shown in Fig. 8.



Fig. 8. Implementation of the parallelogram platform.

6.3. Comparison of the motion generation capacity of the 3 architectures presented

The sensation of being accelerating on a motion base is proportional to the tilting angle, that is, using the gravity vector as it was previously explained. Table 3 compares the motion capacity of the three above described architectures:

MAXIMUM EXCURSION

DOF	HEXAPOD	SPHERICAL	PARALELLOGRAM
Roll	± 22 deg	± 90 deg	± 22 deg
Pitch	± 22 deg	± 90 deg	± 22 deg
Yaw	± 22 deg	± 180 deg	± 180 deg
Surge	± 0,3 m	0	0
Sway	± 0,3 m	0	0
Heave	± 0,2 m	± 0,3 m	± 0,3 m

Table 3. Platform comparison

It can be easily appreciated that the spherical architecture provides much greater angular excursion, thus being able to generate bigger acceleration sensation.

7. CONCLUSION

This paper explains why most of the technology developed for the driving simulators can be directly applied in vehicle teleoperation systems, especially all that concerns the algorithms used to replicate the ROV motion using a motion base, as well as the different architectures of the motion base itself.

The paper presents and compares three different motion base architectures used for vehicle teleoperation, the first one a complete 6-DOF system, the other two simplified 4-DOF systems. The three of them have proved their functionality to perform this task.

8. REFERENCES

- [1] D. W. Hainsworth "Teleoperation User Interfaces For Mining Robotics" IEEE International Conference on Robotics and Automation. San Francisco – California. April 2000.
- [2] J. C. Ralston and D. W. Hainsworth. "The Numbat: A Remotely Controlled Mine Emergency Response Vehicle", *Proceedings of the International Conference on Field and Service Robotics*, pp. 48-55, Canberra, Australia, December 1997.
- [3] Capt Mark H. Draper, Ph.D. Heath A. Ruff "Multi-Sensory Displays and Visualization Techniques Supporting the Control of Unmanned Air Vehicles" IEEE International Conference on Robotics and Automation. San Francisco – California. April 2000.
- [4] "Improving Pilot Dexterity with a Telepresent ROV ". Philip J. Ballou, Senior Vice President, Deep Ocean Engineering, Inc., USA
- [5] Young, L.R., Meyri, J.L., Newman J.S. and Feather, J.E., "Research in Design and Development of a Functional Model of the Human Nonauditory Labyrinths", Aerospace Medical Research Laboratory, TR-68-102, March 1969.
- [6] Gum, D. R., "Modelling Of The Human Force And Motion Sensing Mechanisms", AFHRL-TR-72-54, June 1973.

[7] Meiry, J.L., "The Vestibular System And Human Dynamic Space Orientation", NASA CR-628, Oct. 1966.

[8] Pouliot Nicolas A., Meyer A. Nahon, Clément M. Gosselin "Analysis And Comparison Of The Motion Simulation Capabilities Of Three-Degree-Of-Freedom Flight Simulators". AIAA paper No. 93-3474-CP, 1993.

[9] Shiabev, V.M., "New concept of the motion system for a low-cost flight simulator: Development and design", AIAA FST Conf. 1993.

[10] Kurtz R., Hayward V., "Multiple Goal Kinematic Optimization of a Parallel Spherical Mechanism with Actuator Redundancy" IEEE Trans. On Robotics and Automation, Vol. 8, No. 5, 644-651. October 1992.

[11] Stewart D., "A Platform with Six Degrees of Freedom".. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Vol. 180, No. 5, pp 371-378. 1965.

A.3. Congresos nacionales

MAZA M.; BASELGA S.; y ORTIZ J. “Simulador de Conducción Dinámica para Entrenamiento de Conductores”. *VI Congreso de Ingeniería del Transporte (CIT 2004)*. Zaragoza, España, 2004. pp. 2303-2310.

Simulador de conducción dinámico para entrenamiento de conductores

Mario Maza Frechín

Profesor, Área de Ingeniería e Infr. de los Transportes, Universidad de Zaragoza, España

Santiago Baselga Ariño

Profesor, Área de Ingeniería e Infr. de los Transportes, Universidad de Zaragoza, España

Jesús Ortiz Sánchez-Lafuente

Investigador, Área de Ingeniería e Infr. de los Transportes, Univ. de Zaragoza, España

RESUMEN

Este artículo presenta el simulador de conducción dinámico SIMUSYS. Una de sus características principales es el uso, como base generadora de movimiento, de una plataforma esférica con cuatro grados de libertad, en combinación con sistemas de audio y vídeo.

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de simuladores de conducción realistas es un tema de gran interés y actualidad dentro del mundo de los transportes por carretera. Un simulador es una potente herramienta que permite, a un coste razonablemente bajo, estudios rápidos y eficientes de diferentes aspectos de los vehículos, conductores e interacciones entre ellos. También se utiliza para el entrenamiento de conductores. El nivel de efectividad de los simuladores depende de su nivel de realismo, es decir, de su capacidad de inmersión de los usuarios en un mundo en parte virtual (imágenes, sonido), en parte real (movimiento).

SIMUSYS, “SISTEMA SIMULADOR DE MOVIMIENTO DE ALTO RENDIMIENTO PARA EL ENTRETENIMIENTO, INVESTIGACIÓN Y APLICACIONES FORMATIVAS”, contrato nº CRAFT- IST - 1999 – 56418, es un proyecto cooperativo de investigación, (CRAFT) financiado por la Comisión Europea y desarrollado desde el 01/01/ 2001 hasta el 28/02/2003. El consorcio que ha realizado este proyecto, liderado por la Universidad de Zaragoza, esta formado por empresas y centros de investigación de

España, Italia y Francia.

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

2.1 Introducción

Conceptualmente, se puede describir un simulador de conducción como un sistema modular con interacción continua entre los módulos (figura 1).

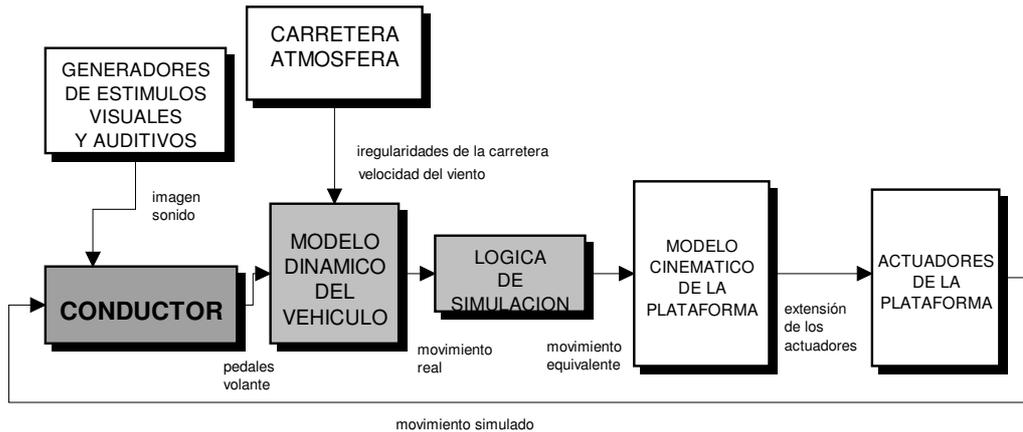


Fig. 1 – Esquema de funcionamiento del sistema

En un simulador, el conductor recibe tres tipos distintos de estímulos: visuales, auditivos y de movimiento. Con ellos se consigue inducir en él la sensación de que está conduciendo un vehículo real, es decir, se produce una inmersión en un mundo virtual.

La lógica de simulación permite transformar el movimiento del vehículo virtual (modelo dinámico de ordenador) en un movimiento equivalente de la plataforma del simulador. Es decir, producir en la persona dentro del simulador la misma sensación de movimiento que tendría si estuviera dentro del vehículo real.

2.2 Plataforma generadora de movimiento

La base móvil de SIMUSYS tiene cuatro grados de libertad (con sus correspondientes límites de desplazamiento) que se pueden identificar fácilmente en la figura 2 [1,2,3,4]:

- Balanceo, rotación alrededor del eje X (± 22 grados)
- Cabeceo, rotación alrededor del eje Y (± 22 grados)
- Guiñada, rotación alrededor del eje Z (± 180 grados)
- Elevación, movimiento por el eje Z (± 250 cm)

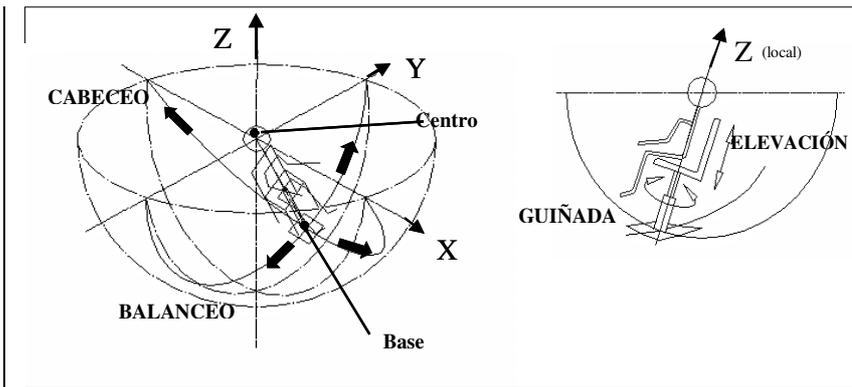


Fig. 2 – SIMUSYS 4 grados de libertad

Hay dos puntos fundamentales que definen esta arquitectura esférica:

- El punto central o centro, situado en la cabeza del conductor. La posición en este punto específico es importante para evitar aceleraciones lineales de la cabeza cuando el asiento rota. Efectivamente, en el caso de un desplazamiento por el eje Z simultáneo a rotaciones en los ejes X o Y, se produce un desplazamiento lineal de la cabeza no deseado, pero desechado en los cálculos dada su magnitud poco significativa.
- La base. Este punto se mueve en una superficie esférica para proporcionar las rotaciones alrededor de los ejes X e Y.

2.3 Sistema de imagen y sonido

Como instrumento gráfico, SIMUSYS utiliza el paquete DARKBASIC para PCWIN [9]. Esta solución ha resultado ser simple y efectiva. Se han desarrollado escenarios básicos de carretera y todo terreno (figura 3).



Fig. 3 – Simulador de carretera y simulador todo terreno

2.4 Sistema de control

La plataforma móvil se controla realizando un clásico control de posición. Este control se basa en la interacción de tres módulos fundamentales. Como hardware, hay un ordenador y un controlador de la posición de la plataforma (PLC o CNC) (figura 4):

- Una herramienta gráfica calcula a tiempo real: la velocidad angular y lineal, y la aceleración lineal y angular del vehículo de acuerdo con las acciones del conductor en el volante y los pedales (situados en la cabina y conectados al PC mediante el puerto de juegos) y el ambiente concreto en que circula el vehículo (circuito, off-road, etc.).
- Un segundo módulo, integrado en la herramienta gráfica, calcula el movimiento de la plataforma SIMUSYS (trayectoria de la plataforma) de acuerdo con el movimiento del vehículo, calculado previamente. Este módulo ejecuta una versión simplificada del algoritmo *wash-out*. El algoritmo *wash-out* determina cómo se debe mover la plataforma para provocar al conductor de SIMUSYS una sensación de movimiento similar a aquélla que sentiría al conducir un vehículo. Así, este módulo produce 4 señales analógicas correspondientes a las posiciones de los servomotores de la plataforma, a una tasa mínima de 25 posiciones por segundo. Cada señal analógica controla la posición de cada grado de libertad de la plataforma.
- Un tercer módulo recibe las cuatro señales analógicas y lleva a la plataforma a la posición establecida en el módulo anterior. Este módulo consiste en un controlador PLC o CNC comercial, efectuando un esquema PID.

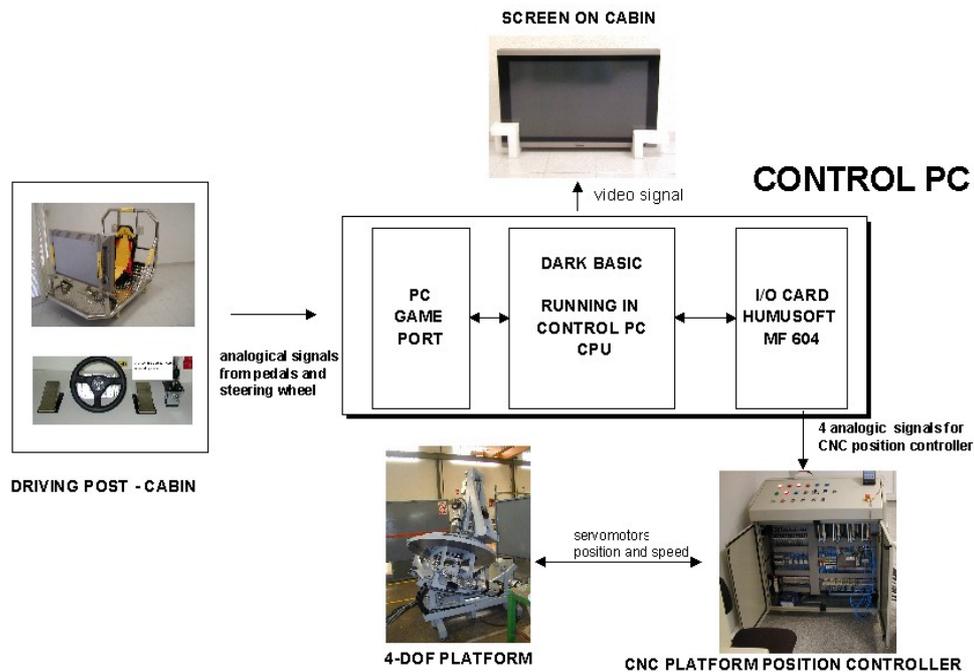


Fig. 4 - Sistema de control de SIMUSYS

2.5 Lógica de movimiento

Para poder realizar la transformación del movimiento del vehículo virtual en movimiento de la plataforma, debemos considerar las características de percepción del movimiento del sistema nervioso humano. El hombre percibe el movimiento (sin estímulos visuales) mayormente con los órganos vestibulares, situados en el oído interno [5,6,7,8]. Este órgano incluye dos elementos sensores distintos:

- **Los otolitos, sensibles a las fuerzas específicas.** La fuerza específica se define como la diferencia vectorial entre la aceleración de translación y la aceleración gravitacional: $f = a - g$. Como ejemplo, dentro del un vehículo acelerando sobre una superficie plana, percibimos el vector f apuntando hacia arriba, pero inclinado hacia delante como consecuencia de la aceleración traslacional.
- **Los canales semicirculares, sensibles a las velocidades angulares.** Existe un umbral mínimo de percepción para las velocidades angulares, aproximadamente 0,5 Hz.

Así, los principios básicos de funcionamiento de un simulador son:

- Reproducir, en tanto como sea posible, la porción de magnitudes angulares (inclinaciones, velocidades y aceleraciones) que podemos percibir.
- Usar el vector aceleración de la gravedad \mathbf{g} para reproducir el vector fuerza específica \mathbf{f} , es decir, simular aceleraciones traslacionales mediante inclinaciones del simulador.

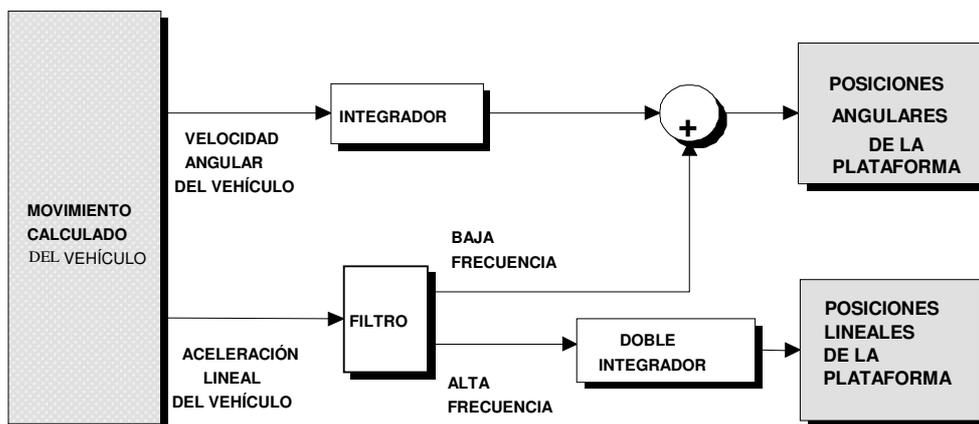


Fig. 5 - Flujo de cálculo

Se asume entonces que la percepción humana del movimiento sólo lleva aparejadas fuerzas específicas y velocidades angulares. Por lo tanto, un simulador de coches sólo simula estos dos parámetros cinemáticos definiendo el movimiento del vehículo. La forma en que la base móvil del simulador actúa se describe a continuación (figura 5):

- Las velocidades angulares del vehículo son filtradas y después reproducidas por el simulador. De esta forma, sólo se consideran las frecuencias dentro de la anchura de banda de percepción humana del movimiento (frecuencias mayores de 2 rad/s).
- Las fuerzas específicas se dividen en diferentes componentes:
 - 1) Componentes de alta frecuencia de fuerzas específicas longitudinales y laterales, que se asocian a desplazamientos cortos del vehículo. Se simulan mediante desplazamientos básicos longitudinales y laterales del simulador.
 - 2) Componentes de baja frecuencia de fuerzas específicas longitudinales y laterales, asociadas a desplazamientos largos del vehículo. No se pueden reproducir ya que excederían los límites de la plataforma. Son por lo tanto simulados mediante la inclinación del simulador. El ángulo de inclinación se alcanza a una velocidad rotacional por debajo del umbral de percepción humana. De lo contrario se

induciría una falsa sensación de rotación que no respondería a ningún movimiento del vehículo.

2.6 Sistema integrado

En la figura 6 se detallan las partes principales que componen SIMUSYS.

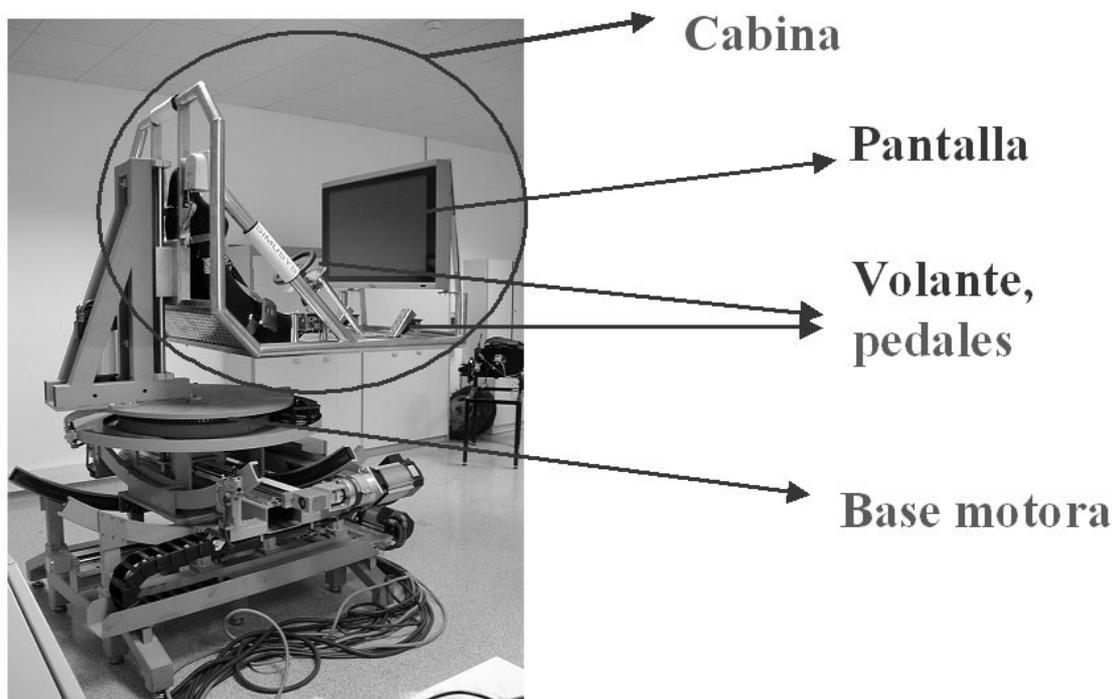


Fig. 6 - Partes fundamentales de SIMUSYS

3. PRUEBAS DEL SISTEMA

El proyecto SIMUSYS concluyó con un prototipo completamente operativo, un simulador para la conducción dirigido al sector del ocio y ampliamente probado bajo diferentes condiciones:

- Prueba de subsistemas independientes: plataforma motora, herramienta gráfica y sistema de control.
- Prueba del sistema integrado: pruebas en el taller por los elementos del prototipo.
- Prueba del prototipo terminado llevada a cabo por usuarios reales: adolescentes y gente joven. También se realizaron cuestionarios sobre las opiniones de los usuarios.

Las pruebas de SIMUSYS han sido encaminadas a la comprobación de dos aspectos diferentes:

- **La operativa global del prototipo.** SIMUSYS es una máquina formada por una serie de subsistemas: base móvil, motor gráfico, control electrónico, potencia de electrónica, etc. Como una unidad integrada, la operativa total del sistema debía ser verificada y evaluada; para ello, se llevaron a cabo diferentes pruebas:
 - 1) Comprobación de que todos los subsistemas trabajan adecuadamente, mediante la observación visual directa de los sistemas en funcionamiento, para detectar fallos y roturas, ruido anormal, vibración anormal, etc.
 - 2) Comprobación de la coordinación entre los diferentes subsistemas, especialmente el retraso entre la imagen y el desplazamiento de la base, midiendo el desfase temporal entre la imagen y los desplazamientos de la base.
 - 3) Cuantificación de la fiabilidad de todo el sistema en términos de tiempo antes del fallo, períodos de mantenimiento, etc, mediante la medición del tiempo entre fallos.
 - 4) Seguridad general del sistema. Observación de las partes en movimiento. Análisis de la situación y protección de las partes móviles. Verificación de que los estándares de protección eléctrica se cumplen.

En las pruebas realizadas al prototipo terminado de SIMUSYS, se comprobó una buena sincronización entre el movimiento de la base móvil y la simulación gráfica. Los diferentes subsistemas no presentaron fallos de funcionamiento. Y los movimientos de la base móvil resultaron suaves y acordes con la simulación.

- **La calidad de las sensaciones en el simulador.** Se invitó a los usuarios de SIMUYS a que expresaran su opinión después de probarlo. Además se midió la existencia e importancia de los “efectos colaterales” tales como mareo por el movimiento y/o por la simulación siguiendo la serie APTS (Automated Potable Test System) [10, 11] desarrollada por la Essex Corporation para la NASA.

Aunque aparentemente el usuario de SIMUSYS no realiza ningún esfuerzo físico, la simulación tiene influencias fisiológicas en el usuario, tales como la variación del ritmo cardíaco y la presión arterial. Ambas propiedades fueron medidas en diferentes usuarios en

la prueba del prototipo terminado, percibiéndose un aumento de ambas durante la simulación. La variación de estas propiedades depende de la edad y del sexo del usuario.

4. CONCLUSIONES

El proyecto SIMUSYS se ha desarrollado entre el 01/01/2001 y el 28/02/2003. De él se han obtenido muchos resultados, datos y conclusiones que se resumen a continuación:

- El proyecto terminó con un simulador totalmente operativo y que es el único que utiliza como base motora plataformas esféricas con cuatro grados de libertad.
- SIMUSYS, como simulador de conducción, ha resultado ser un sistema muy efectivo. En cualquier caso, está particularmente indicado para el sector del entretenimiento, aunque también se puede usar en otras aplicaciones de Realidad Virtual.
- En el proyecto SIMUSYS se ha conseguido que el control de la base móvil y la simulación gráfica la realice un solo ordenador.
- El proyecto SIMUSYS ha puesto en práctica un algoritmo de simulación motora derivado de los simuladores de vuelo pero adaptado a la simulación del movimiento de vehículos terrestres.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo quieren agradecer a la Comisión Europea su apoyo económico para el desarrollo del proyecto SIMUSYS.

REFERENCIAS

- [1] Maza M., J Fontaine-G, Baselga S., “The Use of Parallel Platforms as Motion Generators in Driving Simulators. Alternative Architectures”. Proc. 31st ISATA 98VR054, June 1998.
- [2] Maza M., Fontaine J-G, Baselga S., “Motion Transmission In VR Systems: The Spherical Platform Concept” ICMCR’99 IN OSAKA-(Japan), June 1999.
- [3] Maza M., Fontaine J-G, Louboutin J-P, Baselga S., “ A Spherical Motion Base To Be Used As Motion Generator Platform For Driving Simulators”. ICARCV 98, 5TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONTROL, AUTOMATION, ROBOTICS AND VISION. (Singapore), Dec. 1998.
- [4] Maza M., Baselga S.: “*Plataformas Generadoras De Movimiento En Simuladores De Conducción. Requerimientos Y Análisis*”. XIII - CONGRESO NACIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA - Tarrasa – (España) Dic. 1998.

- [5] Zacharias, G.L. "Motion Cue Models for Pilot-Vehicle Analysis", AMRL-TR-78-2, May 1978.
- [6] R.J.A.W. Hosman, J.C. van der Vaart, "Vestibular Models and Thresholds of Motion Perception. Results of Tests in a Flight Simulator". Delft University of Technology, Dept. Of Aerospace Engineering , Report LR-265, 1978.
- [7] J.B. Sinacori, "A Practical Approach to Motion Simulation". AIAA paper No. 73-931. 1973
- [8] C.S. Ernst, J.B. Sinacori, "A Methodology for Determining Motion System Requirements for a Land Vehicle Simulator". Society for Computer Simulation International. ISSN: 0735-9276 . 1989
- [9] www.darkbasic.com and www.darkbasicpro.com
- [10] Lane N.E., Kennedy R.S., "Users Manual for the Automated Performance Test System (APTS)" Essex Corporation, prepared for NASA Lyndon B. Johnson Space Centre under contract No NAS9-17326, January 1990.
- [11] Kennedy R.S. et al., "Automated Portable Test System (APTS): a Performance Envelope Assessment Tool" SAE Technical Paper Series, Report No 851775, 1985.

ANEXO B

Notas de prensa

Quand l'œil de Dieu joue du robot depuis le Népal

L'œil de Dieu, c'est ce qui permet de voir une scène de haut, par opposition à l'œil de l'escargot, qui situe le regard au plus près du sol. Les amateurs de jeux vidéo utilisent l'un et l'autre sur leur écran ; les scientifiques font la même chose en direct entre le Népal, la France et l'Espagne. Explications.

L'EXPÉRIMENTATION qui a été réalisée lundi à l'école nationale supérieure d'ingénieurs (ENSI) de Bourges, a demandé des moyens importants. Elle faisait intervenir un opérateur situé à Katmandou (Népal) et un autre situé à Bourges sur un même robot agissant à Saragosse (Espagne).

Sur le papier, rien de très spectaculaire. En terme de réalisation et de promesses d'avenir, ce n'est en revanche pas la même chose.

« On sait mettre en liaison un homme et une machine, explique Jean-Guy Fontaine, directeur de la recherche à l'ENSI. C'est de la téléopération. Ce peut être plus ou moins compliqué, selon que la machine se trouve derrière une vitre et qu'on la voit, ou sur Mars... Cela entraîne des stratégies différentes. Mais on sait faire ».

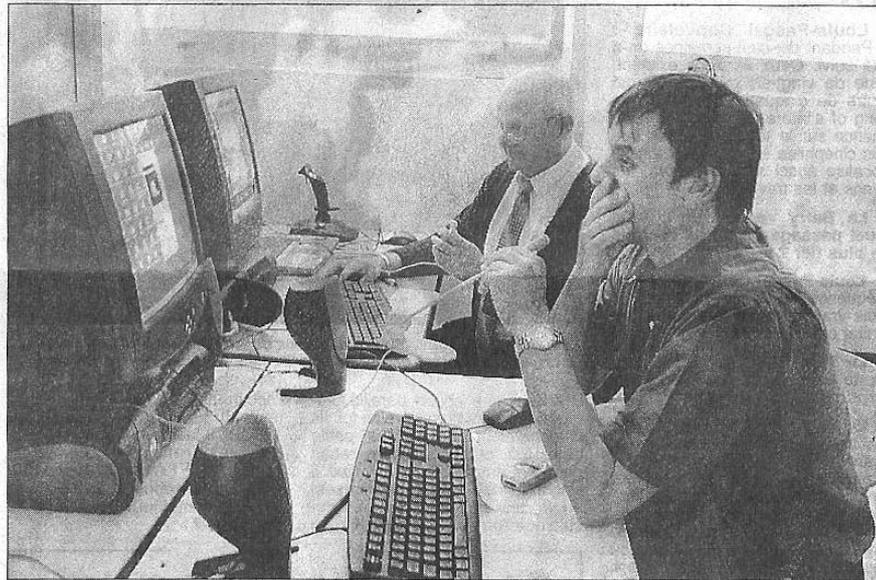
Ensuite, poursuit le chercheur, « nous avons fait en sorte qu'un opérateur commande à plusieurs machines... Les informaticiens aiment bien. On appelle ça l'émergence de vie collective. C'est une forme de vie artificielle, les robots communiquent entre eux et font remonter l'information à l'être humain. On le fait avec des fourmis et un morceau de sucre sur un écran, ou en faisant jouer des robots au football ».

La hiérarchie humaine

La nouvelle étape, c'est l'inverse : plusieurs opérateurs intervenant sur un même objet. « On peut imaginer une péniche, un sous-marin, poursuit Jean-Guy Fontaine. Ça n'existe quasiment pas ».

Pourquoi une telle démarche, qui paraît prendre le problème à l'envers ? Parce que la hiérarchie humaine a ses règles. « Elle impose parfois l'intervention de plusieurs intervenants, avec des responsabilités et/ou des compétences différentes. Ce qui veut dire, souligne le chercheur, que nous devons faire correspondre la hiérarchie technique à la hiérarchie humaine ».

Cette technique, il est vrai, est pleine de promesses. Elle peut concerner aussi bien l'infiniment



La mise en pratique entre le Népal (à gauche) et l'Espagne.

petit, et on est alors facilement dans le domaine médical, que la commande de canons à eau lors d'un incendie, ou la surveillance d'une chambre de personne malade ou dépendante. Bref, on est, de manière très générale, dans le domaine de la maîtrise du risque... Ce qui, à Bourges, est une notion riche de sens, voire de promesse d'emploi.

Et on est là au cœur du problème qui a motivé l'expérimentation mise en place en début de semaine. Plusieurs événements se sont retrouvés pour permettre la mise en synergie d'acteurs répartis un peu partout dans le monde.

Le premier est sans doute le projet européen « Teledrive » de l'université de Saragosse (1), le second les travaux réalisés par Jean-Guy Fontaine dans le cadre du laboratoire de robotique de Paris et poursuivis ensuite à Bourges, et le troisième l'opportunité du trek autour des Annappinas auquel participait jusqu'à ces

derniers jours (2) Pierre Marché, directeur de l'ENSI.

L'œil de Dieu du... Toit du monde

De par sa position à proximité du Toit du monde, Pierre Marché a (... naturellement) pris le rôle de l'œil de Dieu, les opérateurs de Bourges se contentant de l'œil de l'escargot, tandis qu'à Saragosse les scientifiques espagnols regardaient leur robot sur roues doté de deux caméras se déplacer dans un sens ou dans l'autre, et envoyer vers la France et le Népal des images différentes - et complémentaires.

Dire que tout a parfaitement fonctionné serait exagéré. Mais, concluait hier Jean-Guy Fontaine, « toute la faisabilité a été testée. Ce qui veut dire qu'il faudra fiabiliser le système ».

Pour autant, la mise en situation réelle de réalisations de ce type est imminente. Dans quelques mois est prévue, à la

maison de retraite de Bellevue, à Bourges, la mise en place d'un pavillon témoin sur lequel pourront intervenir à distance plusieurs opérateurs. On n'en est pas encore à l'extrême sophistication du système, mais on peut facilement imaginer la surveillance — et l'intervention si nécessaire — du chauffagiste, etc., et tout ce qui se fait de plus fin dans le domaine médical. « On imagine ce qui se fait de mieux dans la domotique, conclut Jean-Guy Fontaine, et on y ajoute la commande à distance ». L'affaire, on l'imagine facilement, est à suivre.

Bertrand Philippe.

(1) On est dans le cadre de projets européens de coopération de recherches, dits projets CRAFT.

(2) Pierre Marché doit rentrer en France aujourd'hui avec ses compagnons de marche. Il avait intégré la grande randonnée organisée pendant près d'un mois par Patrick Dorie, kinésithérapeute à Bourges, qui comprenait également Evetyne Dorie, libraire, et Pascal Julienne, stomatologue.

Viernes 29 DE OCTUBRE DE 2004

ZARAGOZA



3



Un estudiante del CPS prueba la cabina del *Teledrive*, ayer, en la Universidad.

La Universidad crea una cabina virtual que simula un vehículo

| R. A. | 20 MINUTOS |

Sentirlo y verlo todo como si se viajara en un coche o en un submarino, pero sin moverse de una cabina virtual. Es lo que permite el proyecto *Teledrive*, una de las apuestas más novedosas del ocio, que se presentó ayer en la Universidad de Zaragoza.

El proyecto, impulsado por el Centro Politécnico Superior (CPS), y en el que también han participado Francia, Grecia e Italia, ha atraído ya la atención de varios empresarios del sector lúdico y está preparado, además, para facilitar trabajos relacionados con la seguridad.

La nueva tecnología está constituida por una cabina y por un vehículo (coche, submarino, todoterreno, etc.) acondicionado con una cámara y varios sensores de movimiento. El usuario se instala en la cabina virtual, que recibe datos del vehículo a distancia, reproduce las imágenes que capta y simula sus movimientos (baches, vaivenes y cambios de dirección). La sensación es la de viajar en el propio vehículo.

Entre las empresas que se han interesado en el *Teledrive* destaca la zaragozana Industrias Royo, SA, especializada en la construcción de atracciones de feria.

EN LA PRÁCTICA

Carmen Serrano | Coordina: ITA

VEHÍCULOS TELEOPERADOS PARA LOS PARQUES DE OCIO

INDUSTRIAS ROYO Y EL I3A HAN CREADO NOVEDOSOS SISTEMAS DE TELEOPERACIÓN Y TELEEXISTENCIA

COLABORACIÓN Los conceptos de teleoperación y teleexistencia forman parte ya del material con que se monta un parque de atracciones. Son muchas las posibilidades de esta novísima tecnología en el campo del ocio: teleoperación de un vehículo con el puesto de conducción en movimiento, para obtener la sensación de que uno va dentro del vehículo teleoperado; sistema de visión estereoscópica para el interior de la cabina; sistema de realidad aumentada para su uso en acuarios; viajes virtuales en entornos peligrosos...

Son algunas de las aplicaciones que detalla Mario Maza, responsable de una investigación sobre teleoperación y teleexistencia desarrollada en Zaragoza por el

Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A) y la empresa Industrias Royo. Se trata del proyecto Teledrive, enmarcado en el V Programa Marco de la UE y en el que han participado también socios de Francia, Italia y Grecia.

El resultado de esta investigación, ya concluida, es una cabina con capacidad para cinco personas sentadas, que "reciben a través de pantallas las imágenes que captan las cámaras instaladas en los vehículos teleoperados, al tiempo que la cabina se mueve, comunicándoles la misma sensación de movimiento que tendrían si estuvieran dentro del vehículo teleoperado, induciendo así la sensación de teleexistencia".

Mario Maza, del Grupo de Tec-

APLICACIONES

■ **Proyecto:** Teledrive. **Desarrollo** de sistemas de teleoperación y teleexistencia para el ocio. V Programa Marco de la UE.

■ **Autores:** Empresa Industrias Royo y el Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A), de la Universidad de Zaragoza.

■ **Presupuesto:** 1.000.000.

■ **Fase del proyecto:** concluido. Se trabaja ahora en las aplicaciones,

nologías Avanzadas para los Vehículos y Sistemas Mecánicos del I3A, explica también que "el puesto de conducción constituye otra novedad de este proyecto, porque el conductor o teleoperador conduce ayudado no sólo por las imágenes captadas por las cámaras embarcadas, sino además por el movimiento. Así, al generarse una sensación de telepresencia, se aumenta la precisión en la teleoperación".

Con Industrias Royo como coordinador financiero del proyecto, el I3A, que depende de la Universidad de Zaragoza, asumió la dirección técnica del mismo. La colaboración entre ambas entidades viene de lejos. Hace años que trabajan juntos en el desarrollo de sistemas para el ocio, dentro del

campo de los simuladores de conducción.

Aunque el entretenimiento es la finalidad de los productos resultantes, de este proyecto se derivan también algunas aplicaciones industriales. Incluye un software genérico de teleoperación que permite dirigir por internet cualquier sistema. Y podría ser utilizado en tareas de salvamento, desactivación de explosivos o labores de investigación.

INNOV^AARAGÓN

Programa cofinanciado por FEDER y el Gobierno de Aragón



Fondo Europeo de Desarrollo Regional

32 Domingo

Cosas de Casa

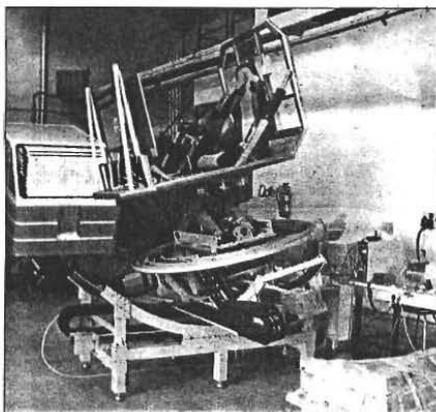
Diario del Alto Aragón
Domingo, 26 de diciembre de 2004



Ramon Del Cacho y Mario Maza. S.E.



S.E.



S.E.



Un proyecto desarrollado desde la Universidad de Zaragoza

Teledrive, entre lo real y lo virtual

Rosa GONZÁLEZ

HUESCA. Imaginemos que queremos hacer una visita virtual a unas minas sumergidas. Para ello, enviamos un submarino equipado con todo tipo de sensores para que nos transmita a la superficie toda la información del lugar que visitamos, es decir, no sólo imágenes sino también sonidos, iluminación...

Una de las novedades de este proyecto es que el vehículo está equipado con sensores de movimiento, de forma que, desde la superficie, metidos dentro de una cabina denominada "Show room" con capacidad para cinco personas sentadas, recibimos en tiempo real las imágenes que capta el vehículo y nos movemos igual que si estuviéramos dentro del mismo, lo que induce a una sensación de telepresencia.

La tecnología parece no tener límites y Teledrive es un ejemplo de ello. Se trata de un proyecto de teleoperación de vehículos desarrollado desde la Universidad de Zaragoza

dentro del V Programa Marco de Investigación de la Comisión Europea. El equipo encargado de su ejecución está formado por cuatro doctores, siete técnicos especialistas y un número variable de estudiantes becados.

El investigador responsable es el zaragozano Mario Maza y, en su equipo se encuentra el oscense Ramon Del Cacho.

Este proyecto, que cuenta con un presupuesto de un millón de euros de capital público y privado a partes iguales, comenzó a desarrollarse en 2003 y finaliza con el año 2004. En él participan empresas y universidades de España, Francia, Italia y Grecia, aunque la dirección técnica y la coordinación corresponden al Grupo de Tecnologías Avanzadas para los Vehículos y Sistemas Mecánicos del Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A).

Maza explica que han elegido el desarrollo de este proyecto en concreto "por lo que aporta. Lo que lo hace socialmente interesante es la posibilidad de hacer visitas virtuales

a lugares donde, por peligro o por dificultad, no podemos estar".

Pero, además, incluye la 'realidad aumentada'. Esto es, las imágenes que son captadas por el vehículo teleoperado son aumentadas y mejoradas a través de un sistema informático. "Por ejemplo, podemos estar visitando una cueva de difícil acceso a pie y en la que es mucho más cómodo y divertido hacer una visita virtual. A la vez que vemos, por ejemplo, una estalactita, superponiéndose a esa imagen real se nos abre una ventanita que nos explica qué es una estalactita y cómo se forma", explica Maza.

Por tanto, este proyecto también cuenta con una parte didáctica que lo hace muy atractivo para los museos o algunos centros de ocio. Es el caso de Oceanópolis, un acuario socio del proyecto ubicado en el noroeste de Francia, "donde ya están implantando una atracción en la que se utiliza un pequeño submarino para seguir a los peces". La interacción de Teledrive permite a los propios visitantes del acuario elegir qué partes le interesan más para que el conductor del vehículo teleoperado pueda dirigirse a ellas.

La otra gran aplicación de este proyecto es la realización de tareas de salvamento, labores de mantenimiento en túneles, desactivado de explosivos, incendios, televigilancia... Esta última es una de las aplicaciones que, según Maza, se tuvieron en cuenta a la hora de seleccionar este proyecto. "Imaginemos que tenemos que vigilar el perímetro de una finca o una nave. En vez de que un vigilante haga la ronda habitual de control, hará un vehículo teleoperado equipado de sensores más potentes que los propios fisiológicos de las personas. Podemos detectar cosas que el humano no puede oír con mayor claridad, ver cosas que el ojo no ve... y evitando riesgos", apunta.

Para ello, se utilizará un vehículo todo-terreno similar a un coche teledirigido con un tamaño de un metro y medio. Si por el contrario deseamos un submarino, utilizaremos un aparato de tan sólo medio metro.

"Otra aplicación que ha surgido y en la que ya hay empresas interesadas es la labor de mantenimiento en túneles, con el fin de evitar riesgos para las personas. Podemos enviar este vehículo equipado de los sensores adecuados a la inspección a realizar. Desde la superficie, podemos recibir toda la información de los sensores y sentir cómo se va moviendo el vehículo, una de las novedades del proyecto, de manera que hagamos la labor de inspección sin necesidad de poner en riesgo la vida de una persona", explica el responsable de Teledrive.

Además de este proyecto, Maza señala que, desde el grupo de Tecnologías Avanzadas, se están realizando investigaciones en otros campos como la tele-rehabilitación, liderado por una empresa oscense, simuladores de conducción o automatización de tareas de limpieza de fachadas con tecnología láser.

Realidad virtual para todos los **sentidos**

Un grupo del Instituto de Investigación en Ingeniería (I3A) es uno de los referentes en el desarrollo de simuladores de conducción

Se entiende por realidad virtual el conjunto de tecnologías que permiten la creación de estímulos generados por ordenador, y que al ser interpretados por nuestro cerebro causan la sensación de estar viendo, oyendo o sintiendo cosas o situaciones no reales. Así, la realidad virtual no se limita a la generación de imágenes realistas, sino que contempla la generación de todos los estímulos perceptibles por el sistema sensorial humano.

Son poco comunes los sistemas capaces de generar y transmitir varios tipos de estímulos simultáneamente. La mayor parte de sistemas de realidad virtual contemplan la generación de estímulos audiovisuales. En particular, la generación de sensación de movimiento mediante estímulos vestibulares (sin la participación del órgano visual o solamente complementada por éste) es poco frecuente.

Los simuladores de conducción son uno de los pocos sistemas que, haciendo uso de las tecnologías de realidad virtual, combinan estímulos vestibulares y audiovisuales, y permiten una inmersión completa en entornos virtuales. Un simulador está formado por una plataforma generadora de movimiento sobre la que se monta una cabina o la carrocería de un vehículo, equipada con pantallas y altavoces.

LOS INTEGRANTES El grupo Tecnologías Avanzadas para los Vehículos y Sistemas Mecánicos (AVTEC), dirigido por Mario Maza e integrado por los investigadores Santiago Baselga, Juan Lladó, Beatriz Sánchez-Tabuena, Ramón del Cacho, Jesús Ortiz, Marisa Orna e Inmaculada Arnal, forma parte del Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A). AVTEC posee una larga trayectoria y experiencia en el desarrollo de simuladores de conducción, siendo uno de los grupos de referencia a nivel mundial en este campo. También ha participado en numerosos proyectos europeos y nacionales y ha generado un importante volumen de documentación.



►► El simulador esférico es un sistema que permite generar unas sensaciones de aceleración sostenida con unos valores no alcanzables por ningún otro sistema.

Dentro de sus desarrollos, cabe destacar el simulador esférico mostrado en la imagen, un sistema único en el mundo que permite, gracias a sus amplios rangos de movimiento, generar unas sensaciones de aceleración sostenida con unos valores no alcanzables por ningún otro sistema.

AVTEC también trabaja en el campo de la teleoperación de vehículos, utilizando como puesto de conducción un simulador de conducción. De esta

forma, el conductor opera el vehículo con la ayuda de las imágenes captadas por una cámara embarcada en el vehículo y puede además percibir el movimiento de éste gracias al movimiento de la plataforma del simulador.

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA

i3a@unizar.es

REPORTAJE

Un coche para salvar vidas

Un grupo de la Universidad de Zaragoza ha desarrollado un vehículo teleoperado que está utilizando para probar sistemas inteligentes de ayuda a la conducción

ALEJANDRO AISA
ZARAGOZA

Parece un cochecito de golf, pero sirve para muchísimo más que para llevar unos palos. Un grupo de investigación de la Universidad de Zaragoza y la empresa Idiada han desarrollado un vehículo teleoperado con el que se pueden probar sistemas inteligentes de ayuda a la conducción sin necesidad de que alguien se la juegue mientras lo prueba. Un gran avance con denominación de origen aragonesa que puede salvar vidas.

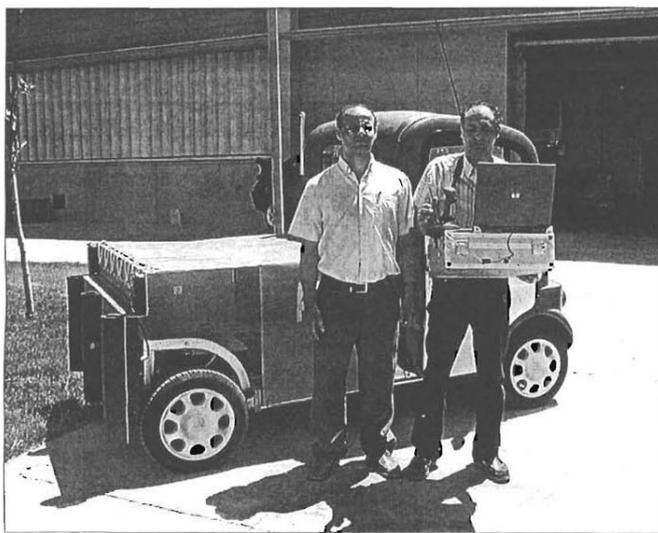
Los protagonistas son el Grupo de Técnicas Avanzadas para los Vehículos y Sistemas Mecánicos del Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A) e Idiada, el Instituto de Investigación Aplicada del Automóvil, que tiene su sede en Santa Oliva (Tarragona). La idea surgió de la entidad catalana, pero ha sido en el campus zaragozano donde se ha desarrollado.

«La base es un vehículo eléctrico, comercial, que hemos modificado para nuestro propósito», explica Mario Maza, quien junto con Ramón del Cacho ha dirigido este proyecto «absolutamente pionero» que cuenta con el respaldo de una gran marca automovilística.

Primeras aplicaciones

El experimento ha servido para probar mecanismos inteligentes de ayuda a la conducción, como los sistemas de frenado por aproximación al vehículo precedente, que aún no están pulidos pero que ya incorporan algunos camiones.

«Es una apuesta de futuro que, lógicamente, reducirá el riesgo de accidentes. Habrá sensores que medirán la distancia con el vehículo de delante y la velocidad se reducirá de forma automática en caso de peligro», relata Maza.



►► Protagonistas ► Maza, a la izquierda, y Del Cacho, con el vehículo teleoperado.

De momento se ha construido un prototipo que puede circular a 50 kilómetros por hora y que tiene una autonomía de 70 kilómetros antes de recargar las baterías. Se controla desde otro vehículo y las pruebas se llevan a cabo en un circuito cerrado.

«De momento, los test han sido muy positivos y vamos a pasar a otras fases del proyecto. El objetivo es construir un coche teleoperado que llegue a 120 kilómetros por hora y otro que alcance los 150», añade el responsable del grupo.

Maza recuerda que el origen de

los vehículos teleoperados se encuentra en la industria militar. «A veces, la ingeniería progresa en este terreno, ya que uno de los primeros usos fue poner y quitar minas, así como desactivar explosivos».

Su grupo ya diseñó otro aparato, no tan complejo, por encargo de una empresa de seguridad de Francia. «Con un vehículo teleoperado se pueden peinar grandes superficies, como un polígono, sin poner en peligro la integridad de un vigilante, que puede analizar en una cabina los datos que reciba».

EDUCACIÓN

Teruel invita a presentar iniciativas extraescolares

EL PERIÓDICO
TERUEL

El Ayuntamiento de Teruel mantiene abierto hasta el próximo 8 de septiembre el plazo para presentar proyectos relacionados con el programa *Abriendo el cole*, que tiene como objetivo principal promover acciones educativas fuera del horario lectivo.

Los estudios educativos que sean autorizados deberán estar integrados en el proyecto educativo del propio centro docente y contar desde un principio con la colaboración de las asociaciones de padres y madres, así como de los consejos escolares.

El ámbito de actuación se circunscribe a los centros escolares de la ciudad de Teruel, tanto en los niveles de Educación Infantil, como Primaria y Educación Especial. Las actividades que formen parte del proyecto irán dirigidas preferentemente al alumnado y a las asociaciones de padres y madres del propio centro.

La comunidad educativa que desee participar en el programa elaborará un proyecto y lo someterá a la aprobación del Consejo Escolar. Tras recibir el visto bueno, se incorporará a la programación general anual y se presentará en la Concejalía de Educación del consistorio o en el Servicio Provincial de Educación, Cultura y Deporte.

El programa está financiado conjuntamente por el Gobierno aragonés y el consistorio.

PROYECTO DE LA AGENCIA ESPACIAL EUROPEA

Estudiantes aragoneses fabrican un microsatélite

Quince equipos de nueve países europeos han participado en el trabajo

EL PERIÓDICO
ZARAGOZA

Estudiantes de la Universidad de Zaragoza han participado en la fabricación del microsatélite SSETI-Express cuyo lanzamiento, previsto para la semana pasada, se ha retrasado hasta el 27 de septiembre por un problema de contratos con el lanzador.

Este microsatélite, el primero construido íntegramente por universitarios europeos, iba a ser lanzado desde el cosmodromo ruso de Plesetsk, donde se encuentra desde hace un mes, explicó a Efe la estudiante española Elena Martínez. El equipo zaragozano, que ha realizado el «cálculo numérico» del proyecto, está formado por cinco estudiantes de Física y de Matemáticas.

Durante año y medio, quince equipos de estudiantes de una decena de universidades pertenecientes

a nueve países europeos, entre ellas la Universidad de Zaragoza, han fabricado el microsatélite, destinado a una órbita polar como enlace para radioaficionados, desde donde pueda enviar fotografías a la Tierra.

El satélite también se va a utilizar para «probar los subsistemas» del ESEO (Orbitador Europeo Estudiantil hacia la Tierra), un microsatélite más complejo que el SSETI-Express y que será lanzado dentro de un par de años.

La construcción del SSETI-Express es un proyecto de educación de la Agencia Espacial Europea (ESA), que se ha encargado de supervisar la fabricación y las pruebas en sus instalaciones de Holanda, además de asumir la financiación.

La otra cara de la Historia ZARAGOZA a escena

DESCUBRE ZARAGOZA A TRAVÉS DE SUS VISITAS TEATRALIZADAS "CIUDAD DE LAS CULTURAS" Y "CIUDAD DEL AGUA"

INFORMACIÓN Y RESERVAS EN OFICINAS MUNICIPALES DE TURISMO
902 20 12 12 Y 976 20 12 00
WWW.ZARAGOZATURISMO.ES

HOZCEA, Gobierno de Aragón, etc.

ARAGÓN

Mario M

INVESTIGACIÓN VEHÍCULOS TELEOPERADOS, VIGILANCIA EN RIESGOS

SEGURIDAD Los vehículos te-
leoperados, es decir, opera-
dos a distancia, tienen
más campos de aplica-
ción. El grupo AV-TEC (Tecnolo-
gías Avanzadas para los Vehícu-
los y Sistemas Mecánicos), del
Instituto de Investigación en In-
geniería de Aragón (I3A), trabaja
hace años, entre otros ámbitos,
en el desarrollo de este tipo
de vehículos. El grupo desarrolla
vehículos teleguidados que reducen
los riesgos personales en las
operaciones de vigilancia e inspec-

ción de las aplicaciones de
vehículos se encuentra en el
campo de la vigilancia y la seguri-
dad. Imaginemos una finca rústica
con un perímetro externo de una
señal o el interior de un almacén
para la vigilancia de estos lugares.
Un vigilante deberá realizar
su tarea intentando ver posi-
bles intrusos, escuchando ruidos
anormales, etc. Esto entraña un
riesgo personal. Como al-
ternativa, la ronda puede ser rea-
lizada por un vehículo teleguida-
do, equipado con sensores y
conectado vía radio al centro
de control central. Los sensores
permiten al vehículo ver a través
del ojo humano (visión
normal, infrarrojos...), escuchar
a través del oído humano (mayor
frecuencia y banda de frecuencias),
detectar vibraciones, cambios de
temperatura, etc. Así, la inspec-

ción puede realizarse de forma
más efectiva y sin riesgos perso-
nales. El grupo AV-TEC ha desa-
rrollado alguno de estos vehícu-
los.

CONDUCCIÓN Un segundo campo
de aplicación de los vehículos te-
leoperados se encuentra en el
desarrollo y prueba de los nuevos
sistemas inteligentes de ayuda a
la conducción. Hoy día, los vehí-
culos incorporan un buen núme-
ro de sistemas inteligentes que,
en caso de peligro, actúan sobre
los frenos o la dirección. Los más
conocidos son el ABS, ASR, ESP,
etc. Sin embargo, los fabricantes
trabajan en el desarrollo de nue-
vos conceptos, tales como siste-
mas que detectan la distancia al
vehículo que nos precede y, si es
menor que un cierto valor, frenan
nuestro vehículo; sistemas de
guiado capaces de leer las marcas
en la carretera y evitar una salida
de la calzada, etc. Para el desa-
rrollo, ajuste y prueba de todos
estos sistemas, y con el objetivo
de minimizar el riesgo personal
de los conductores de prueba,
los fabricantes pueden utiliza-
r vehículos teleguidados. AV-
TEC ha desarrollado y desa-
rrolla también alguno de estos
vehículos.

MARIO MAZA ES EL INVESTIGADOR RESPONSABLE
DEL GRUPO TECNOLOGÍAS AVANZADAS PARA LOS
VEHÍCULOS Y SISTEMAS MECÁNICOS (AV-TEC)



El grupo, en el edificio Betancourt del Centro Politécnico Superior. JAVIER PARDOS

LA FICHA

**GRUPO
DE INVESTIGACIÓN
TECNOLOGÍAS
AVANZADAS PARA
LOS VEHÍCULOS Y
SISTEMAS MECÁ-
NICOS (AV-TEC)**

- Grupo emergente.
- **Ámbito de trabajo:** vehículos, realidad virtual, cinemática y dinámica.
- **Organismo:** Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A), U. de Zaragoza.
- **Número de miembros:** cuatro doctores, dos titulados y dos técnicos.
- **Fecha de formación del grupo:** abril de 2005.
- **Líneas de investigación:** simuladores de conducción, teleoperación de vehículos y cálculo de piezas y componentes.
- **Principales logros:** se han patentado varios modelos de simuladores de conducción,

para el estudio de la conducción y entre-
tenimiento de conductores, también para el
diseño del entretenimiento. El grupo es una
referencia internacional en este campo. Además
trabaja en el desarrollo de suspensiones activas,
diseño y cálculo de componentes, cinemática
dinámica de sistemas, etc. Ha recibido varios
premios nacionales e internacionales.

- **Financiación:** empresa privada, Comisión
Europea, programas nacionales
y autonómicos.
- **Página web:**
www.av-tec.org/
- **Contacto:**
mmaza@unizar.es



PRÁCTICA

Carmen Serrano | Coordina:

PRÁCTICA, A LA ÚLTIMA EN TECNOLOGÍA DE LOCALIZACIÓN

EN EL PASADO MES DE FEBRERO SE PUDO PROBAR UN NOVEDOSO SISTEMA DE INFORMACIÓN EN LA DURA TRAVESÍA CON TRINEOS

IDEAR

el Periódico

SEMINARIO DE EL PERIÓDICO DE ARAGÓN DIRECTOR: JAIMÉ ARMENGOL

JUEVES, 30 DE MARZO DEL 2006

SUPLEMENTO DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA, TECNOLÓGICA Y DE INVESTIGACIÓN

DIVULGACIÓN | Zaragoza se prepara para una nueva cita de 'Ciencia en la calle' hasta el sábado | Página 6
 TECNOLOGÍA | Especialistas en usabilidad y arquitectura de la información se reúnen mañana | Página 7
 ENTREVISTA | Susanna Manrubia: «No tenemos pruebas de que sólo haya vida basada en el carbono» | Página 8



Un viaje virtual gracias a la teleoperación

El Grupo de Tecnologías Avanzadas para los Vehículos y Sistemas Mecánicos del IA finaliza el proyecto europeo TELEDRIVE

MARCO MAZA FRED'HIN GRUPO DE TECNOLOGÍAS AVANZADAS PARA LOS VEHÍCULOS Y SISTEMAS MECÁNICOS (3A)

Con la tecnología de los simuladores de conducción y la teleoperación de vehículos, el Grupo de Tecnologías Avanzadas para los Vehículos y Sistemas Mecánicos del Instituto Universitario de Investigación en Ingeniería de Aragón (IA) ha participado junto a empresas y universidades de Francia, Italia y Grecia en un proyecto de teleoperación: el TELEDRIVE.

Para ello, se han desarrollado unes aplicaciones originales consistentes en la utilización de vehículos de ruedas y submarinos equipados con sensores, que realizan viajes en lugares de interés (interior de cuevas, ruinas submarinas, etc.). Los datos recogidos -imágenes, sonidos, aceleraciones del vehículo, etc.- son reproducidos en un sistema similar a un simulador de conducción, formado por una cabina para varias personas equipada con pantallas, altavoces, generadores de humedad... A su vez, la cabina se monta sobre una plataforma móvil como la de los simuladores de conducción.

De esta forma, los ocupantes de la cabina pueden realizar un viaje virtual al lugar de interés, viendo las imágenes, escuchando los sonidos, sintiendo la humedad del lugar y además experimentando la misma sensación de movimiento que hubieran tenido dentro del vehículo, gracias al movimiento de la plataforma sobre la que se monta la cabina. Se han realizado también experiencias para la realización de viajes virtuales en tiempo real, es decir, estando el vehículo en el lugar de interés, transmitiendo los datos y reproduciendo en la cabina todas las sensaciones en tiempo real. El grupo acaba de finalizar el proyecto europeo TELEDRIVE con los mismos objetivos exactamente, y ahora se está definiendo con Oceanopolis (Brest-Francia) un sistema de estas características para su uso en el interior de acuarios.
 Fuente: www.aragoninvestiga.org



COLABORAN:



PATROCINA:

IDEAR es un suplemento especial de EL PERIÓDICO DE ARAGÓN que se entrega conjuntamente e inseparablemente con el diario. Director: Jaime Armengol. Redacción: Patricia Ayala, Miquela Ángel Otero, Carmen Pujol y Inés José Sospedra. Diseño: Carmen Muñoz, José Joaquín Rodríguez, Susana Gilman y José J. Balle. Fotografía: Rogelio Salazar, Ángel de Cordero, Ricardo Pujana y Comunicación. Colaboradores y firmas: Miquel Ferrer, J. Antonio de Miguel, E. Puiggras, Daniel Torres y J. Pampalona.

ANEXO C

Software desarrollado

C.1. Proyecto *Teledrive*

C.1.1. Programa *Teledrive*

El funcionamiento de este programa está detalladamente descrito en el apartado 3.3.2 de esta tesis. Está desarrollado en el programa *Microsoft Visual Basic 6.0* y cuenta únicamente con un formulario que se encarga de realizar todas las tareas. Usa también una simple librería para gestionar archivos de configuración en formato *ini*, programada en una clase de *Visual Basic* llamada *Archivo_ini*.

El archivo principal del programa llamado *fm_chat* tiene las siguientes funciones y procedimientos principales (mostradas según el orden de aparición en el código fuente):

```
Private Sub cmm_borraLog_Click()
```

Borra el listado de comandos transmitidos durante la sesión.

```
Private Sub cmm_conectar_Click()
```

Comienza la conexión dependiendo de los parámetros seleccionados. Hay dos modos de conexión: *Server* y *Slave*.

```
Private Sub cmm_elegir_Click()
```

Esta función abre una ventana de selección del programa de control del vehículo

teleoperado.

Private Sub *cmm_program_Click()*

Lanza el programa de control del vehículo teleoperado en el ordenador local y envía un comando al programa *Teledrive* del ordenador remoto para que realice la misma acción.

Private Sub *cmm_receiver_Click()*

Lanza el programa *Receiver* y envía un comando al programa *Teledrive* del ordenador remoto para que lance el programa *Transmitter*.

Private Sub *cmm_transmitter_Click()*

Lanza el programa *Transmitter* y envía un comando al programa *Teledrive* del ordenador remoto para que lance el programa *Receiver*.

Private Sub *procesaMensaje(mensaje As String)*

Procesa los mensajes que llegan a través de la conexión mediante *Winsock* y realiza las operaciones oportunas. En el apartado 3.3.2 de esta tesis están descritos los comandos que se transmiten entre el ordenador local y el remoto y las acciones en cada caso.

Todas las funciones de comunicación y eventos del programa *Teledrive* escriben en la pantalla un mensaje de registro que el programa salva automáticamente al final de la sesión en formato *rtf*.

C.1.2. Programa *Transmitter*

El programa *Transmitter* está realizado en *Microsoft Visual C++ 6.0*. El archivo principal llamado *captest.cpp* contiene las funciones principales de captura de vídeo y transmisión de los datos a través de Internet. El archivo encargado de gestionar las ventanas se llama *dialogs.cpp*. Se usan además varias librerías auxiliares que son: *jpeg.cpp*, *TCPInvitado.cpp*, *TCPServidor.cpp* y *UDPConexion.cpp*. Para la compresión de las imágenes en formato *jpeg* se usa la librería *Intel(R) JPEG Library (IJL)*.

El funcionamiento general de este programa está descrito en el apartado 3.3.3 de esta tesis.

A continuación se describen las funciones principales del archivo *captest.cpp* en el orden en el que aparecen en el código fuente:

```
int PASCAL WinMain(HINSTANCE hInstance, HINSTANCE hPrevInstance, LPSTR
lpCmdLine, int nCmdShow)
```

Esta función corresponde al punto de entrada del programa. Realiza todas las tareas de inicialización de la ventana y carga el archivo de configuración (llamado *Transmitter.cfg*)

```
LRESULT FNVCALLBACK FrameCallbackProc(HWND hWnd, LPVIDEOHDR lpVHdr)
```

Esta función es llamada cuando se recibe un nuevo cuadro de la cámara. Lee el *buffer* de la cámara, comprime la imagen en formato *jpeg* y envía la imagen comprimida a través de Internet al programa *Receiver* del ordenador remoto.

```
LONG FAR PASCAL MainWndProc(HWND hWnd, UINT Message, UINT wParam, LONG lParam)
```

Esta función se encarga de gestionar los mensajes que le llegan a la ventana del programa. Inicia la captura de la cámara cuando arranca el programa mediante los drivers *vfw*, de mostrar la imagen recibida y de guardar el nuevo archivo de configuración al cerrar el programa.

C.1.3. Programa *Receiver*

El programa *Receiver* está realizado en *Microsoft Visual C++ 6.0*. El archivo principal llamado *main.cpp* contiene las funciones principales de captura de vídeo y transmisión de los datos a través de Internet. Los archivos para gestionar las conexiones a Internet y compresión en formato *jpeg* son los mismos que en el programa *Transmitter*.

El funcionamiento general de este programa está descrito en el apartado 3.3.3 de esta tesis.

A continuación se describen las funciones principales del archivo *main.cpp* en el orden en el que aparecen en el código fuente:

```
int APIENTRY WinMain(HINSTANCE hInstance, HINSTANCE hPrevInstance, LPSTR lpCmdLine, int nCmdShow)
```

Esta función es el punto de entrada del programa. Realiza todas las tareas de inicialización de la ventana y carga el archivo de configuración (llamado *Receiver.cfg*).

```
LRESULT CALLBACK WndProc(HWND hWnd, UINT message, WPARAM wParam, LPARAM lParam)
```

Esta función se encarga de gestionar los mensajes que le llegan a la ventana del programa. Recibe los datos a través de Internet del programa *Transmitter* del ordenador remoto. Descomprime la imagen recibida y la muestra en la ventana. También guarda el nuevo archivo de configuración al cerrar el programa.

C.1.4. Programa de control de las plataformas

Este programa está realizado en *Microsoft Visual Basic 6.0*. Este programa se encarga de leer los datos de los sensores del vehículo teleoperado y controla las dos plataformas móviles. El funcionamiento general del programa se describe en la siguiente figura:

Figura B.1. Esquema del programa de control de las plataformas

Debido al ruido presente en la señal de los sensores se debe de realizar un filtrado previo de los datos consistente en un filtro de media móvil y un filtro paso bajo. Mediante los algoritmos de control de plataformas móviles descritos en el apartado 2.6.2 de esta tesis se calcula el movimiento de la plataforma esférica y de la plataforma hexápoda.

El archivo principal de este programa se llama *fm_principal* y contiene las siguientes funciones principales:

`Private Sub cmm_simusys_iniciar_Click()`

Esta función inicia la comunicación con la plataforma Simusys que se controla a través de una tarjeta de adquisición de datos *Humusoft*.

`Private Sub cmm_stewart_iniciar_Click()`

Esta función inicia la comunicación con la plataforma hexápoda *Moog* que se controla a través del puerto *Ethernet* mediante el protocolo *UDP*.

`Private Sub cmm_td_iniciar_Click()`

Esta función inicia la simulación del movimiento del vehículo teleoperado enviando sincronizadamente las consignas necesarias a ambas plataformas.

La lectura de los datos del vehículo teleoperado y el control de cada una de las plataformas se lleva a cabo mediante un temporizador. En total este programa usa tres para cada una de las funciones:

`Private Sub Timer_entradas_Timer()`

Lee los datos de la tarjeta de adquisición y calcula las consignas de ambas plataformas.

`Private Sub Timer_stewart_Timer()`

Actualiza las consignas calculadas de la plataforma hexápoda.

`Private Sub Timer_simusys_Timer()`

Actualiza las consignas calculadas de la plataforma esférica.

C.2. Proyecto “*Desarrollo de un vehículo teleoperado*”

C.2.1. Interfaz de control

El interfaz de control del vehículo teleoperado está realizado en *Microsoft Visual Basic 6.0*. Se encarga de leer los controles del maletín de control (ver imagen 4.5) y enviar las consignas necesarias al vehículo teleoperado. En la figura 4.4 se puede ver el esquema de comunicaciones de este proyecto.

Este programa consiste en una pantalla principal (ver imagen 4.7) en la que está representado el vehículo teleoperado con las tres consignas principales: acelerador, freno y dirección. Este programa muestra dos valores para cada una de ellas: el valor que se está enviando al vehículo y el valor real que tienen los actuadores. De esta manera se puede comprobar fácilmente si el sistema está funcionando correctamente.

Para la representación gráfica del vehículo se han utilizado las librerías *DirectX 8.0*.

Las funciones y procedimientos principales de este programa se encuentran en el archivo *fm_principal* y son las siguientes:

`Private Sub iniciaDirectx()`

Esta función inicia la librería *DirectX* y carga las imágenes que usa el programa.

`Private Sub cmm_conectar_Click()`

Inicia la comunicación con el vehículo teleoperado.

`Private Sub cmm_desconectar_Click()`

Finaliza la comunicación con el vehículo teleoperado.

`Private Sub Form_Load()`

Inicia el formulario principal, busca y configura el *joystick* y llama a la función *iniciaDirectx*.

`Private Sub Timer1_Timer()`

Esta función lee los últimos valores del *joystick*, envía los datos al vehículo teleoperado, lee los datos del vehículo teleoperado y actualiza los elementos de la pantalla.

Bibliografía

- [1] *Proyecto ACTISEAT: "Active System for Vibration Isolation and Acceleration Compensation for Vehicle Embarked Equipment and Persons"*. Número de Contrato: BRST – CT98 – 5309, Proyecto no. BE – S2 – 5472. Enero de 1999 – diciembre de 2000.
- [2] ADVANI Sunjoo Kan. *Method of Manufacturing a Motion Simulator and a Motion Simulator*. Inventor: Advani Sunjoo Kan. Int. CI: G 9B 009/14. Número de solicitud: 776873. Fecha de solicitud: 1997-04-7. Patente US 5829982. 1998-11-03.
- [3] BALLOU P.J. "Toward a Telepresent Underwater ROV System". *Underwater Robotic Vehicles, TSI Press*. 1995, Albuquerque, NM, EE.UU., pp. 265-276.
- [4] BALLOU P.J. "Improving Pilot Dexterity with a Telepresent ROV". *Deep Ocean Engineering Inc.* EE.UU.
- [5] CARMEIN David. *Virtual Reality System with Enhanced Sensory Apparatus*. Inventor: Carmein David. Int. CI: G 9B 009/14. Número de solicitud: 600893. Fecha de solicitud: 1996-02-13. Patente US 5980256. 1999-11-09.
- [6] CHEN S-H.; y FU L-C. "Predictive Washout Filter Design Using de Forward Kinematics and a Kalman Filter". *International Conference on Control Applications, 2007 (CCA 2007)*. Singapur. Octubre de 2007. pp. 420-425.
- [7] DRAPER Mark H.; y RUFF Heath A. "Multisensory Displays and Visualization Techniques Supporting the Control of Unmanned Air Vehicles". *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. San Francisco, California, EE.UU., Abril de 2000.

- [8] FICHTER E.F. “A Stewart Platform Based Manipulator: General Theory and Practical Construction”. *International Journal of Robotics Research*, 1986, Vol. 5, pp. 157-182.
- [9] GOUGH V.E.; y WHITEHALL S.G. “Universal Tire Test Machine”. *9th International Technical Congress, F.I.S.I.T.A.* 1962, pp. 177.
- [10] GUENARD N.; HAMEL T.; y ECK L. “Control Laws for the Tele Operation of an Unmanned Aerial Vehicle Known as an X4-flyer”. *International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2006*. Beijing, China. Octubre de 2006. pp. 3249-3254.
- [11] GUM D.R. “Modelling of the Human Force and Motion Sensing Mechanisms”. *AFHRL-TR-72-54*. Junio de 1973.
- [12] HAINSWORTH D.W. “Teleoperation User Interfaces For Mining Robotics” *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. San Francisco, California, EE.UU., abril de 2000.
- [13] HOSMAN R.J.A.W.; y VAN DER VARRT J.C. “Vestibular Models and Thresholds for Motion Perception. Results of Tests in a Flight Simulator”. *Delf University of Technology, Dept. of Aerospace Engineering*. Abril de 1978. Report LR-265.
- [14] HUANG C-I.; y FU L-C. “Human Vestibular Based (HVB) Senseless Maneuver Optimal Washout Filter Design for VR-based Motion Simulator”. *IEEE International Conferene on Systems, Man and Cybernetics, 2006 (ICSMC '06)*. Taipei, Taiwan. Octubre de 2006. pp. 4451-4458.
- [15] HUNT K.H. “Structural Kinematics of In-Parallel-Actuated Robot Arms”. *ASME Journal of Mechanism, Transmissions and Automation in Design*, 1983, Vol. 105, pp. 705-712.
- [16] *Proyecto INNOVA COOPERA “Simulador de conducción interactivo para los sectores de la feria y el entretenimiento”*. Número de contrato: Diputación General de Aragón, proyecto ITA 1526. Febrero de 2003 - abril de 2004.
- [17] KURTZ R.; y HAYWARD V. “Multiple Goal Kinematic Optimization of a Parallel Spherical Mechanism with Actuator Redundancy”. *IEEE Internation Conference on Robotics and Automation*. Octubre de 1992. Vol. 8, no. 5, pp. 644-651.

- [18] LEE K.; y SHAH D.K. “Kinematic Analysis of a Three Degrees of Freedom In-Parallel Actuated Manipulator”, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1987, Vol. 1, Raleigh, NC, pp. 345-350.
- [19] LIN C-T.; CHUANG S-W.; CHEN Y-C.; KO L-W.; LIANG S-F.; y JUNG T-P. “EEG Effects on Motion Sickness Induced in a Dynamic Virtual Reality Environment”. *29th Annual International Conference of the IEEE. Engineering in Medicine and Biology Society, 2007 (EMBS 2007)*. Lyon, Francia. Agosto de 2007. pp. 3872-3875.
- [20] LING S-H. *Motion/Force Simulators with Six Degrees of Freedom*. Inventor: Ling Shou Hung. Int. CI: G 9B 009/14. Número de solicitud: 563093. Fecha de solicitud: 1995-11-27. Patente US 5752834. 1998-05-19.
- [21] LU K.; FITZGERAL J.M.; y LEWIS F.L. “Kinematic Analysis of a Stewart Platform Manipulator”. *IEEE Transaction on Industrial Electronics*. Abril de 1993, Vol. 40, No. 2, pp. 282-293.
- [22] MARCHEGIANI D. *Motion Simulator*. Inventor: Marchegiani Daniel. Int. CI: G 9B 009/14. Número de solicitud: 516260. Fecha de solicitud: 1974-10-21. Patente US 396738. 1976-07-06.
- [23] MARTINEZ C.; y KEENER-CHAVIS P.; “NOAA Ship Okeanos Explorer: Telepresence in the Service of Science, Education and Outreach”, *Oceans 2006*. Boston, EE.UU. Septiembre de 2006. pp. 1-5.
- [24] MAZA M.; FONTAINE J-G.; y BASELGA S. “Analisis of Parallel Platforms as Motion Generators for Driving Simulators. Alternative Architectures”. *31st ISATA 98VR054*, Düsseldorf, Alemania, junio de 1998.
- [25] MAZA M.; FONTAINE J-G.; LOUBOUDIN J-P.; y BASELGA S. “Modular Simulators for Off-road Vehicles. Virtual Reality in Driving Simulators”. *31st ISATA 98VR052*, Düsseldorf, Alemania, junio de 1998.
- [26] MAZA M.; FONTAINE J-G.; y BASELGA S. “The use of Parallel Platforms as Motion Generations in Driving Simulators. Alternative Architectures”. *31st ISATA 98VR054*, Düsseldorf, Alemania, junio de 1998.
- [27] MAZA M.; FONTAINE J-G.; LOUBOUTIN J-P.; y BASELGA S. “A Spherical Motion Base to be Used as Motion Generator Platform for Driving Simulators”. *5th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision ICARCV 98*, Singapur, diciembre de 1998.

- [28] MAZA M.; FONTAINE J-G.; TEJEL J.I.; y BASELGA S.; “Simulation of Land Vehicles Motion: An Adaptable Logic for the Simulator Motion Base”. *5th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision ICARCV 98*, Singapur, diciembre de 1998.
- [29] MAZA M.; y BASELGA S. “Los simuladores de conducción. Una herramienta de Realidad Virtual para el Estudio de Vehículos y Conductores”. *XIII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica*, Tarrasa, España, diciembre de 1998.
- [30] MAZA M.; y BASELGA S. “Plataformas Generadoras de Movimiento en Simuladores de Conducción. Requerimientos y Análisis”. *XIII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica*, Tarrasa, España, diciembre de 1998.
- [31] MAZA M.; y FONTAINE J-G. “Motion Transmission in VR Systems: The Spherical Platform Concept. *Topical Workshop on Virtual Reality and Advanced Human-Robot Systems, ISMCR'99*. Tokyo, Japón, 1999, pp. 28-34.
- [32] MAZA M.; BASELGA S.; y ORTIZ J. “Approaches to the Generation of Whole Body Motion Sensation in Teleoperation”. *CLAWAR 2004*. Madrid, España, 2004.
- [33] MAZA M.; BASELGA S.; y ORTIZ J. “Vehicle Teleoperation with a Multisensory Driving Interface”. *CLAWAR 2004*. Madrid, España, 2004.
- [34] MAZA M.; BASELGA S.; y ORTIZ J. “Simulador de Conducción Dinámica para Entrenamiento de Conductores”. *VI Congreso de Ingeniería del Transporte (CIT 2004)*. Zaragoza, España, 2004. pp. 2303-2310.
- [35] MAZA M.; y ORTIZ J. “Humanoid Motion Replication by a Spherical Motion Base”. *International Journal of Humanoid Robotics (IJHR)*. I.S.S.N.: 0219-8436. Marzo de 2007. Vol. 4, pp. 97-124.
- [36] MEIER R. “Sensor Fusion for Teleoperation of a Mobile Robot”, Tesis doctoral. Swiss Fed. Inst. of Technology Lausanne, Switzerland, Marzo de 1999.
- [37] MEIRY J.L. “The Vestibular System and Human Dynamic Space Orientation”. *NASA*, CR-628. Octubre de 1966.
- [38] MILGRAM Paul; RASTOGI aun; y GRODSKI Julius J. “Telerobotic Control Using Augmented Reality”. *IEEE International Workshop on*

- Robot and Human Communication, ROMAN'95*. Tokyo, Japón, julio de 1995, pp. 5-7.
- [39] MURPHY R; y ROGERS E. “Cooperative Assistance for Remote Robot Supervision”, *Presence* 5(2), 1996.
- [40] MYERS E.; COPPIN P.; WAGNER M.; FISCHER K.; LUISA L.; McCLOSKEY W.R.; y SENEKER D. “Bringing Remote Experience of Mars to the Public through Telepresence”. *Symposium on Information Visualization 2004 (INFOVIS 2004)*. Octubre de 2004. pp. 16.
- [41] NANUA P.; WALDRON K.J.; y MURTHY V. “Direct Kinematic Solution fo a Stewart Platform”. *Robotics Automat*, 1990, Vol. 6, no.6, pp. 438-444.
- [42] PAULOS Eric; y CANNY John. “Design Personal Teleembodiment”. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. San Francisco, California, EE.UU., abril de 2000.
- [43] PETERS R.A. “Dynamics of the Vestibular System and their Relation to Motion Perception: Spatial Disorientation and Illusions”. *NASA CR-1309*. Abril de 1969.
- [44] PIERROT F.; REYNAUD C.; y FOURNIER A. “A Simple and Efficient Parallel Robot”. *Robotics*, 1990, Vol. 8, pp. 105-109.
- [45] POULIOT Nicolas A.; MEYER A. Nahon; y CLÉMENT M. Gosselin. “Analysis and Comparision of the Motion Simulation Capabilities of Three-DOF Flight Simulators”. *AIAA*, 1993, no. 93-3474-CP.
- [46] RAGHAVAN M. “The Stewart Platform of General Geometry has 40 configurations”. *ASME Journal of Mechanical Design*, 1993, Vol. 115, pp. 277-282.
- [47] RALSTON J.C.; y HAINSWORTH D.W. “The Numbat: A Remotely Controlled Mine Emergency Response Vehicle”. *International Conference on Field and Service Robotics*. Camberra, Australia. Diciembre de 1997. pp. 48-55.
- [48] REID L.D.; y NAHON M.A. “Flight Simulation Motion-Base Drive Algorithms: Part I – Developing and Testing the Equation”. *UTIAS report no. 296*. Diciembre de 1985. CN ISSN 0082-5255.
- [49] REID L.D.; y NAHON M.A. “Response of Airline Pilots to Variations in Flight Simulator Motion Algorithms”. *AIAA Journal of Aircraft*. 1988. Vol. 25, no. 7, pp. 639-646.

- [50] SHIABEV V.M. “New Concept of the Motion System for a Low-cost Flight Simulator: Development and Design”. *AIAA FST Conference*. 1993.
- [51] *Proyecto SIMUSYS: Innovative High-performance Motion Simulation System for Entertainment*. Número de contrato: Proyecto europeo IST-1999-56418. Enero de 2001 - diciembre de 2002.
- [52] SINACORI, J.B. “A Practical Approach to Motion Simulation”. *AIAA*, no. 73-931.
- [53] STEWART D.A. “Platform with Six Degrees of Freedom”. *Institution of Mechanical Engineers*. London, Inglaterra, 1965, Vol. 180, Part 1, pp. 371-386,
- [54] TACHI S. “Toward the Telexistence Next Generation”. *11th International Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT 2001)*. Tokyo, Japón, Diciembre de 2001, pp. 1-8.
- [55] TACHI S. “Telexistence and Retro-reflective Projection Technology”. *5th Virtual Reality International Conference (VRIC 2003)*. Laval, Francia, Mayo de 2003, pp. 1-9.
- [56] TACHI S.; KOMORIYA K.; SAWADA K.; NISHIYAMA T.; ITOKO T.; KOBAYASHI M.; y INOUE K. “Development of Telexistence Cockpit for Humanoid Robot Control”. *32nd International Symposium on Robotics (ISR 2001)*. Seoul, Corea, Abril de 2001, pp. 1483-1488.
- [57] *Proyecto TELEDIMOS: “Telepresence Simulation Platform Supporting Civil Works Machines in Remote Dismantling Waste Disposal and Large Scale Demining Operations”*. Número de contrato: CORDIS Cost-sharing contracts 1049979.
- [58] *Proyecto TELEDRIIVE: “Vehicle Teleoperation System for Application to Entertainment Research and Remote Interventions”*. Número de contrato: IST-1999-57451. Septiembre de 2002 – octubre de 2004.
- [59] TETERUKOV D. O.; FONTAINE J-G.; BERESTNEV O. V.; et al. *Designing of the Spherical Motion Platform on the Basis of Four-bar Linkage for Virtual Reality Systems*. Minsk: UP Technoprint, 1999.
- [60] TOSHIMA I.; y AOKI S. “The Effect of Head Movement on Sound Localization in an Acoustical Telepresence Robot: TeleHead”. *International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2006*. Beijing, China. Octubre de 2006. pp. 872-877.

- [61] TSAI L.W. “Kinematics of a Three DOF Platform with Three Extensible Limbs”. *5th International Symposium on Recent Advantages in Robot Kinematics*. Bernardin-Portoroz, Slovenia, 1996. Kluwer Academic Publishers, Boston, p. 410.
- [62] VAL S.; *Análisis de Factores Humanos en Simuladores de Conducción Basado en una Plataforma Generadora de Movimiento de 4 Grados de Libertad*. Tesis doctoral. Centro Politécnico Superior, Universidad de Zaragoza, 2005.
- [63] YOUNG L.R.; MEIRY J.L.; NEWMANN J.S.; y FEATHER J.E. “Research in Design and Development of a Functional Model of the Human Nonauditory Labyrinths”. *Aerospace Medical Research Laboratory*. TR-68-102. Marzo de 1969.
- [64] ZACHARIAS G.L. “Motion Cue Models for Pilot-vehicle Analysis”. *AMRL-TR-78-2*. Mayo de 1978.
- [65] ZALUD L.; “Augmented Reality User Interface for Reconnaissance Robotic Missions”. *The 16th IEEE International Symposium on Robot and Human Interaction Communication, 2007 (RO-MAN 2007)*. Jeju, Corea. Agosto de 2007. pp. 974-979.
- [66] ZALUD L.; “ARGOS System for Heterogeneous Mobile Robot Teleoperation”. *International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2006*. Beijing, China. Octubre de 2006. pp. 211.216.

