



**Universidad**  
Zaragoza



Proyecto Final de Carrera  
Ingeniería Informática  
Curso 2010-2011

# Desarrollo de una interfaz gráfica cerebro-computador para el movimiento de una prótesis robótica con actividad mental

**Raquel Noé Martínez**

Marzo de 2011

Director: Javier Mínguez Zafra  
Codirector: Luis Montesano del Campo

Departamento de Informática e Ingeniería de Sistemas  
Centro Politécnico Superior  
Universidad de Zaragoza



*«There is an objective reality out there, but we view it through the spectacles of our beliefs, attitudes, and values.»*

David G. Myers, Social Psychology



# Agradecimientos

---

*«Your friend is the man who knows all about you, and still likes you»*  
Elbert Hubbard

Nunca es fácil escuchar, sin perder la sonrisa ni dispersar la atención, cuando no entiendes nada de lo que te está contando.

Nunca es fácil aguantar los cambios de humor y los desplantes, cuando tras el día entero fuera de casa llega arremetiendo contra todo lo que le rodea.

Nunca es fácil seguir alentando, cuando ves la imagen de la derrota y el desánimo en su cara.

Nunca es fácil aguantar siempre los mismos agobios, cuando piensas que al final todo se consigue y parece no querer escucharte.

Nunca es fácil ayudar a pensar cuando no se sabe ni sobre qué hay que pensar.

Nunca es fácil seguir explicando un razonamiento sin perder la compostura ni la paciencia, cuando lo has hecho una y otra vez y se sigue en el mismo punto.

Nunca es fácil...

Nunca es fácil comprender a un ingeniero...

Por todo esto que han sabido hacer conmigo, simplemente, gracias.



# Desarrollo de una interfaz gráfica cerebro-computador para el movimiento de una prótesis robótica con actividad mental

## RESUMEN

---

El objetivo de este proyecto de investigación es el desarrollo de un sistema para controlar un brazo robótico según la intención de movimiento del usuario. El sistema consiste en una interfaz cerebro-computador basada en electroencefalografía, una interfaz gráfica, y por último la comunicación de ésta con el robot para que realice tareas de movimiento hasta el destino deseado por el usuario.

Las características atribuidas a la interfaz desarrollada van más allá de la capacidad de producir el fenómeno neurológico necesario para descifrar de él la intención del movimiento del usuario; ya que con el diseño establecido se consigue crear la sensación de profundidad, y además, al realizar un posicionamiento del resto de elementos involucrados en la escena en tiempo real a partir de posiciones relativas, mediante realidad aumentada, se le otorga cierto grado de libertad de movimiento al usuario.

El funcionamiento de la aplicación desarrollada se describe a continuación: *Desde el punto de vista del usuario.* La interfaz gráfica muestra, superpuesto a la captura de vídeo en tiempo real del entorno circundante, un mallado a modo de guía para informar al usuario de las posiciones predefinidas existentes en su campo de visión. El usuario se concentra en una posición concreta de las posibles que le son presentadas, y el sistema lleva a cabo una estimulación cromática mediante flashes luminosos de todas las posiciones. Dicha estimulación produce el fenómeno neurológico deseado (el potencial evocado P300, concretamente), que medido y procesado permite decodificar la intención del usuario. Esa intención se transfiere al sistema robótico, y éste realiza el movimiento hasta la posición deseada por el usuario. *Desde el punto de vista del sistema robótico.* La interfaz gráfica muestra, superpuesto nuevamente a la captura en tiempo real del entorno, el mallado, pero en esta ocasión, desde la perspectiva del propio robot. Por tanto, una vez que el sistema le comunica la posición, el movimiento del robot puede entenderse como un movimiento hacia la posición de los cubos determinada por la posición del usuario respecto a él.

En este documento queda reflejada la realización de este proyecto, englobando todas las etapas del mismo, desde la idea inicial hasta la finalización, pasando por todas las fases intermedias tales como diseño y desarrollo.



# Índice

---

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Contexto . . . . .	1
1.2. Motivación y trabajo relacionado . . . . .	1
1.3. Alcance del proyecto . . . . .	3
1.4. Estructura del documento . . . . .	5
<b>2. Diseño del sistema</b>	<b>6</b>
2.1. Interfaz gráfica (GUI) . . . . .	6
2.1.1. Sistema de referencia . . . . .	7
2.1.2. Paradigma de estimulación visual . . . . .	7
2.2. Posicionamiento en la escena . . . . .	12
2.2.1. Previo . . . . .	14
2.2.2. Localización . . . . .	14
2.2.3. Limitaciones en la “libertad” de movimiento . . . . .	26
2.3. Implementación . . . . .	28
<b>3. Integración</b>	<b>30</b>
3.1. Sistema de comunicaciones . . . . .	31
3.2. Interfaz Hombre-máquina . . . . .	31
3.2.1. Protocolo neurofisiológico . . . . .	31
3.2.2. Adquisición de datos . . . . .	33
3.2.3. Modificaciones necesarias . . . . .	34
3.2.4. Comunicación . . . . .	34
3.3. Integración GUI-ROBOT . . . . .	35
3.3.1. Sistema robótico. Infraestructura . . . . .	35
3.3.2. Limitaciones impuestas . . . . .	36
3.3.3. Comunicación . . . . .	40
<b>4. Validación</b>	<b>41</b>
4.1. Evaluación de la precisión en la estimación de la posición . . . . .	41
4.1.1. Pruebas aisladas . . . . .	41
4.1.2. Prueba de larga duración . . . . .	42
4.1.3. Modificaciones posteriores . . . . .	42

<b>5. Métodos de experimentación</b>	<b>45</b>
5.1. Introducción . . . . .	45
5.2. Validación de la interfaz hombre-máquina . . . . .	47
5.3. Validación sistema interfaz gráfica-robot . . . . .	49
5.4. Validación del sistema completo . . . . .	51
<b>6. Conclusiones y trabajo futuro</b>	<b>52</b>
6.1. Conclusiones . . . . .	52
6.2. Trabajo futuro . . . . .	53
<b>Bibliografía</b>	<b>55</b>
<b>A. Desarrollo</b>	<b>57</b>
A.1. Hitos del proyecto . . . . .	57
A.2. Diagrama de Gantt . . . . .	59
A.3. Fases de desarrollo . . . . .	60
A.4. Problemas encontrados . . . . .	60
<b>B. RV y RA</b>	<b>61</b>
B.1. Introducción . . . . .	61
B.2. Realidad Aumentada . . . . .	62
B.2.1. Cómo funciona . . . . .	62
B.3. Realidad Virtual . . . . .	63
B.3.1. Cómo funciona . . . . .	63
B.4. Realidad Virtual VS. Realidad Aumentada . . . . .	64
B.5. Estudio comparativo de gafas . . . . .	65
B.5.1. Gafas de RA . . . . .	65
B.5.1.1. Vuzix WRAP 920AR (próximamente en 2010) . . . . .	65
B.5.1.2. iWear®CamAR™& iWear®VR920 . . . . .	66
B.5.2. Gafas de RV . . . . .	68
B.5.2.1. Vuzix WRAP 920 . . . . .	68
B.5.2.2. Vuzix WRAP 280 . . . . .	69
B.5.2.3. Rimax Virtual Vision 3.0 . . . . .	70
B.5.2.4. Rimax Virtual Vision 4.0 . . . . .	71
B.5.2.5. Rimax Virtual Vision 5.0 . . . . .	72
B.5.2.6. Comparativa . . . . .	73
B.5.3. Conclusiones . . . . .	73
<b>C. Interfaces cerebro-computador</b>	<b>74</b>
C.1. Tecnologías BCI . . . . .	74
C.1.1. Técnicas de adquisición . . . . .	74
C.1.2. Señales neurofisiológicas . . . . .	75
C.1.3. Artefactos . . . . .	76
C.1.3.1. Artefactos fisiológicos . . . . .	76
C.1.3.2. Artefactos extrafisiológicos . . . . .	79

C.2. Infraestructura utilizada . . . . .	80
C.2.1. Amplificador . . . . .	80
C.2.2. Gorro . . . . .	81
C.2.3. Electrodo . . . . .	82
C.2.4. Geles . . . . .	83
C.2.5. Otros . . . . .	83
C.3. Sistema 10-20 . . . . .	84
C.4. Protocolos de montaje y limpieza . . . . .	86
C.4.1. Protocolo de montaje . . . . .	86
C.4.2. Protocolo de limpieza . . . . .	86
C.5. Herramientas . . . . .	87
C.5.1. BCI2000 . . . . .	87
C.5.2. P300GUI . . . . .	88
<b>D. Interfaz gráfica</b>	<b>89</b>
D.1. Entorno de desarrollo . . . . .	89
D.1.1. Entorno de desarrollo hardware . . . . .	89
D.1.2. Entorno de desarrollo software . . . . .	90
D.1.2.1. Elementos lógicos empleados . . . . .	90
D.1.2.2. Elementos lógicos desestimados . . . . .	92
D.2. Paradigma de estimulación visual (extendido) . . . . .	93
D.2.1. Fases . . . . .	93
D.2.1.1. Fase 1: Estimulación secuencial . . . . .	94
D.2.1.2. Fase 2: Estimulación por planos . . . . .	97
D.2.1.3. Fase 3: Estimulación en dos pasos . . . . .	104
D.2.1.4. Fase 4: Estimulación por planos modificados . . . . .	106
D.2.2. Estudio colores . . . . .	111
<b>E. Validación (Extendido)</b>	<b>113</b>
E.1. Prueba estática . . . . .	113
E.1.1. Conclusiones . . . . .	128
E.2. Prueba de marcadores . . . . .	129
E.3. Prueba dinámica . . . . .	132
E.3.1. Conclusiones . . . . .	139
E.4. Prueba de larga duración . . . . .	140
E.5. Pruebas diferentes tamaños de buffer . . . . .	144
<b>F. ARTToolKit</b>	<b>146</b>
F.1. Introducción . . . . .	146
F.2. Arquitectura . . . . .	147
F.3. Principios de desarrollo . . . . .	148
F.3.1. Sistema de coordenadas . . . . .	148
F.3.2. Esquema funcional . . . . .	149
F.4. Set up y calibrado de cámaras . . . . .	150

F.5. Tracking . . . . .	154
F.5.1. Marcadores . . . . .	155
F.5.1.1. Detección . . . . .	157
F.5.1.2. Estudio patrones . . . . .	157
F.5.1.3. Influencia de la distancia . . . . .	159
F.5.2. Matrices de transformación . . . . .	159
F.6. Instalación y running . . . . .	160
F.6.1. Software necesario . . . . .	160
F.6.2. Pasos de instalación . . . . .	160
F.7. Otras alternativas . . . . .	162

# Índice de figuras

---

1.1. Esquema general . . . . .	4
2.1. Sistema de coordenadas cartesianas tridimensional . . . . .	7
2.2. Mallado . . . . .	9
2.3. Planos cubos pequeños + mallado . . . . .	10
2.4. Dimensiones establecidas . . . . .	11
2.5. Posicionamiento . . . . .	13
2.6. Marcador . . . . .	14
2.7. Grafo de transformación . . . . .	16
2.8. Transformaciones objetivo . . . . .	17
2.9. Transformación relativa: mallado respecto de cámara-robot . . . . .	19
2.10. Transformación relativa: cámara-usuario respecto de cámara-robot . . . . .	20
2.11. Transformación relativa: marcador respecto de cámara-robot . . . . .	21
2.12. Transformación relativa: cámara-usuario respecto de marcador . . . . .	22
2.13. Transformación relativa: marcador respeto de cámara-usuario . . . . .	23
2.14. Esquema completo de transformaciones . . . . .	24
2.15. Esquema completo de transformaciones ARToolKit . . . . .	25
2.16. C1 y C2 no marcador . . . . .	26
2.17. C1 no marcador . . . . .	27
2.18. C2 no marcador . . . . .	27
2.19. Flujo de frames . . . . .	29
3.1. Esquema general . . . . .	30
3.2. Visualización P300 . . . . .	33
3.3. Targets . . . . .	34
3.4. Brazo robótico . . . . .	35
3.5. Sistema de coordenadas . . . . .	35
3.6. Posicionamiento . . . . .	36
3.7. Gráfico completo de transformación . . . . .	37
3.8. Esquema de transformaciones completo . . . . .	38
3.9. Mensaje: WARNING . . . . .	39
3.10. SComunicación GUI-ROBOT . . . . .	40
4.1. Esquema general del filtro de media . . . . .	43

4.2. Comparativa sin filtro vs. filtro . . . . .	44
5.1. Montaje con el Sistema Internacional 10-20 . . . . .	46
5.2. Correspondencia de nomenclaturas . . . . .	47
5.3. Screening . . . . .	47
5.4. Spectrogram y Topoplot . . . . .	48
5.5. P300 y rendimiento teórico . . . . .	48
5.6. Setup robot . . . . .	49
5.7. Validacion GUI-ROBOT. Cámara 2 . . . . .	49
5.8. Prueba 1. Posiciones alcanzadas por el robot . . . . .	50
5.9. Prueba 2. Posiciones alcanzadas por el robot . . . . .	50
A.1. Diagrama de Gantt del proyecto. . . . .	59
B.1. Vuzix WRAP 920AR . . . . .	65
B.2. iWear CamAR & iWear VR920 . . . . .	66
B.4. iWear CamAR . . . . .	67
B.5. Vuzix WRAP 920 . . . . .	68
B.6. Vuzix WRAP 280 . . . . .	69
B.7. Rimax Virtual Vision 3.0 . . . . .	70
B.8. Rimax Virtual Vision 4.0 . . . . .	71
B.9. Rimax Virtual Vision 5.0 . . . . .	72
C.1. Artefacto electromiográficos . . . . .	76
C.2. Artefacto de parpadeo. . . . .	77
C.3. Artefacto electrooculográfico. . . . .	77
C.4. Artefacto electrocardiográfico. . . . .	78
C.5. Artefacto de pulso . . . . .	78
C.6. Artefacto de la respiración. . . . .	78
C.7. Artefacto de la piel. Transpiración . . . . .	79
C.8. Popping . . . . .	79
C.9. Mal contacto de electrodos . . . . .	79
C.10. Amplificador utilizado . . . . .	80
C.11. Gorro utilizado . . . . .	81
C.12. Cintas de sujeción utilizadas . . . . .	81
C.13. Electrodos utilizados . . . . .	82
C.14. Driver/interfaz adicional GAMMAbox . . . . .	83
C.15. Geles . . . . .	83
C.16. Posiciones según el Sistema Internacional 10-20 . . . . .	84
C.17. Sistema Internacional 10-20 . . . . .	85
C.18. Herramienta BCI2000 . . . . .	88
D.1. Modelo cámara usada . . . . .	90
D.2. Regla de la mano derecha . . . . .	93
D.3. Cubo . . . . .	94

D.4. División de los ejes de coordenadas . . . . .	94
D.5. Cubo + color . . . . .	95
D.6. Mallado v.1 . . . . .	96
D.7. Cubo + color + mallado . . . . .	96
D.8. Cubo general . . . . .	97
D.9. Planos . . . . .	98
D.10. Planos cubos + mallado . . . . .	99
D.11. Planos esferas sólidas + mallado . . . . .	100
D.12. Planos esferas wire + mallado . . . . .	101
D.13. Planos pirámides + mallado . . . . .	102
D.14. Planos cubos-esferas-pirámides + mallado . . . . .	103
D.15. Estimulación XY . . . . .	104
D.16. Estimulación Z . . . . .	105
D.17. Planos cubos pequeños + mallado v.1 . . . . .	106
D.18. Mallado v.2 . . . . .	107
D.19. Planos cubos pequeños + mallado v.2 . . . . .	108
D.20. Mallado v.3 . . . . .	109
D.21. Planos cubos pequeños + mallado v.3 . . . . .	110
E.1. Prueba Estática 1. Transformaciones . . . . .	114
E.2. Prueba Estática 1. Transformaciones cámara 1 . . . . .	115
E.3. Prueba Estática 1. Transformaciones cámara 2 . . . . .	116
E.4. Prueba Estática 2. Transformaciones . . . . .	118
E.5. Prueba Estática 2. Transformaciones cámara 1 . . . . .	119
E.6. Prueba Estática 2. Transformaciones cámara 2 . . . . .	120
E.7. Prueba Estática 3. Transformaciones . . . . .	122
E.8. Prueba Estática 3. Transformaciones cámara 1 . . . . .	123
E.9. Prueba Estática 3. Transformaciones cámara 2 . . . . .	124
E.10. Prueba Estática 4. Transformaciones . . . . .	126
E.11. Prueba Estática 4. Transformaciones cámara 1 . . . . .	127
E.12. Prueba Estática 4. Transformaciones cámara 2 . . . . .	128
E.13. Prueba Marcadores 1. Transformaciones . . . . .	129
E.14. Prueba Marcadores 2. Transformaciones . . . . .	130
E.15. Prueba Marcadores 3. Transformaciones . . . . .	131
E.16. Prueba Dinámica 1. Transformaciones . . . . .	133
E.17. Prueba Dinámica 1. Transformaciones cámara 1 . . . . .	134
E.18. Prueba Dinámica 2. Transformaciones cámara 2 . . . . .	135
E.19. Prueba Dinámica 3. Transformaciones . . . . .	137
E.20. Prueba Dinámica 3. Transformaciones cámara 1 . . . . .	138
E.21. Prueba Dinámica 3. Transformaciones cámara 2 . . . . .	139
E.22. Prueba larga. Transformaciones . . . . .	141
E.23. Prueba larga. Cámara 1 . . . . .	142
E.24. Prueba larga. Cámara 2 . . . . .	143
E.25. Comparativa sin filtro vs. filtro . . . . .	144

F.1. Arquitectura . . . . .	147
F.2. Desarrollo . . . . .	148
F.3. Sistema de coordenadas . . . . .	148
F.4. Funcionamiento . . . . .	150
F.5. Patrones de calibración . . . . .	151
F.6. Paso 1 calibrado cámaras: puntos . . . . .	152
F.7. Paso 1 calibrado cámaras: resultado . . . . .	152
F.8. Paso 2 calibrado cámaras . . . . .	153
F.9. Paso 2 calibrado cámaras: líneas . . . . .	153
F.10. Marcadores . . . . .	155
F.11. patt.sample1 . . . . .	156
F.12. Marcador y objeto virtual . . . . .	157
F.13. Catálogo de marcadores . . . . .	158
F.14. Estudio marcadores . . . . .	158
F.15. Influencia distancia . . . . .	159

# Índice de tablas

---

3.1. Límites del robot . . . . .	39
B.1. comparativa diferentes modelos Virtual Vision . . . . .	73



# 1. Introducción

---

*«Todo lo que puedas imaginar es real.»*  
Pablo Picasso

## 1.1. Contexto

Este proyecto fin de carrera se ha realizado en el Centro Politécnico Superior en el departamento de Informática e Ingeniería de Sistemas de la Universidad de Zaragoza, en concreto, con el grupo de Robótica, Percepción y Tiempo Real (RoPeRT). El trabajo desarrollado supone una propuesta que combina varias líneas de investigación tanto en el campo de las Interfaces Cerebro Computador, como en el campo de la Visión por Computador.

## 1.2. Motivación y trabajo relacionado

Una de las aplicaciones robóticas con mayor potencial de impacto en la sociedad es aquella destinada a suplir o aumentar capacidades de personas, por ejemplo, con discapacidades físicas o mentales, así como aquellas destinadas a rehabilitación y recuperación de funciones perdidas. El desarrollo de sistemas robóticos que cumplan estas funciones no sólo mejora la calidad de vida de las personas necesitadas y de su entorno, sino que también tendrá una importante influencia en variables socio-económicas asociadas a estas dependencias. En este contexto, las Interfaces Cerebro-Computador (ICC) son sistemas que permiten traducir en tiempo real la actividad eléctrica cerebral en comandos para controlar dispositivos. No hacen uso de actividad muscular, y por tanto, pueden ser utilizadas por personas con deficiencias neuromusculares severas, como la esclerosis lateral amiotrófica o el infarto cerebral.

Gran parte del trabajo relacionado con la aplicación de esta tecnología al control de prótesis robóticas se ha centrado en el uso de técnicas invasivas para recoger la actividad cerebral y han sido probadas en animales. Dadas las fuertes barreras éticas y morales que presentan estas técnicas, los métodos no invasivos, aquéllos que no requieren inter-

vención quirúrgica como el electroencefalograma (EEG<sup>1</sup>), han experimentado un impulso importante en los últimos años.

En la actualidad, existen varios prototipos de ICC basados en EEG para el control de sillas de ruedas eléctricas [1] o para el control de robots móviles de telepresencia [2]. Sin embargo, a día de hoy, no existen sistemas para el control de prótesis de brazo capaces de realizar tareas de manipulación de forma funcional. Actualmente existe un trabajo relacionado con el control de una prótesis mediante una técnica no invasiva que consiste en una mano protésica que realiza dos movimientos, abrir y cerrar [3].

En este proyecto se ha desarrollado un sistema para controlar una prótesis de brazo robótica según la intención del usuario. La aplicación desarrollada consiste en una Interfaz Cerebro-Computador basada en EEG con un protocolo de control centrado en el potencial evocado P300<sup>2</sup>, una interfaz gráfica que mediante realidad aumentada realiza el posicionamiento en escena de los elementos involucrados, y por último, la comunicación de ésta con el sistema robótico para que ejecute el movimiento hasta el destino deseado por el usuario.

A muy alto nivel, el funcionamiento del sistema es el siguiente:

1. La interfaz gráfica muestra, superpuesto a la captura de vídeo en tiempo real, un mallado a modo de guía para informar al usuario de las posiciones predefinidas existentes en su campo de visión.
2. El usuario se concentra en una posición determinada de las ofertadas, y el sistema realiza una estimulación cromática mediante flashes luminosos de todas las posiciones.
3. Ante la estimulación de la posición deseada, se produce el fenómeno neurológico buscado (el potencial evocado P300, concretamente), que medido y procesado permite decodificar la intención del usuario.
4. Esa intención se transfiere al sistema robótico, y éste realiza (de manera autónoma) el movimiento hasta la posición deseada por el usuario.

---

<sup>1</sup>ElectroEncephaloGraph

<sup>2</sup>Positive 300

### 1.3. Alcance del proyecto

El principal objetivo del presente proyecto consiste en el diseño, desarrollo y validación de una interfaz gráfica que permita el movimiento, en las tres coordenadas del espacio, de una prótesis robótica mediante actividad mental. Para ello, las señales eléctricas del cerebro obtenidas a partir del registro del electroencefalograma (EEG) se analizan mediante técnicas de Interfaz Cerebro-Computador (*Brain Computer Interface*, BCI), convirtiendo las intenciones del usuario en comandos de movimiento capaces de manejar el sistema robótico.

Los objetivos particulares en este proyecto son:

- **Diseño de una interfaz gráfica** que permita al usuario una fácil distinción entre las regiones del espacio propuestas.
- **Posicionamiento de los elementos** en escena a través de cámaras, mediante transformaciones relativas entre ellos, para obtener una transformación global del entorno desarrollado haciéndolo conocido en todo momento.
- **Validación de la plataforma** en cuanto al funcionamiento esperado.
- **Integración** de la interfaz gráfica con el sistema robótico y la plataforma BCI2000.
- **Validación del sistema total diseñado** con un usuario a modo de prueba de concepto, realizando validaciones de la integración entre BCI2000 y la interfaz gráfica y de la integración entre el robot y la interfaz gráfica. Y una última validación del sistema completo no realizada por encontrar problemas (detallados en apartados sucesivos) con la validación anterior entre el robot y la interfaz gráfica.

Debido a que el sistema total realizado incluye partes desarrolladas íntegramente para este proyecto fin de carrera y partes existentes sobre las cuales tan sólo se ha diseñado su integración en el conjunto, en la figura 1.1, se detalla la naturaleza de cada una de dichas partes involucradas en el proyecto. Aquellas desarrolladas en su totalidad para este proyecto se señalan en color rojo; las partes existentes y utilizadas sin modificación interna se señalan en verde; y las partes diseñadas para la integración de los elementos ya desarrollados al proyecto se señalan en azul.

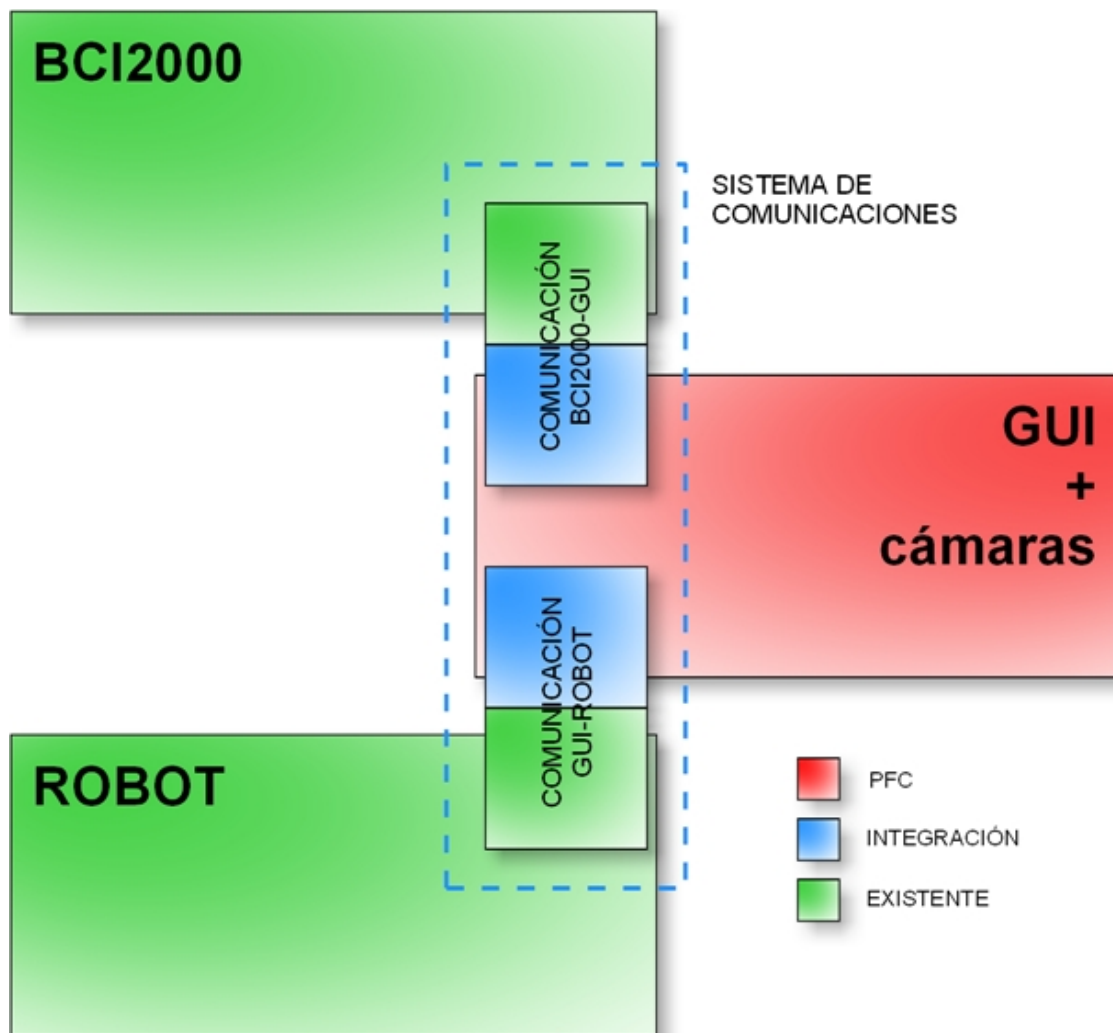


Figura 1.1: Partes que integran el proyecto

## 1.4. Estructura del documento

El presente documento consta de seis capítulos. En este primer capítulo se encuentra la introducción. El capítulo 2 está destinado al diseño del sistema, donde se detalla cada una de las partes que integran el sistema desarrollado. La integración del sistema completo, interfaz gráfica, plataforma BCI2000 y sistema robótico, se explica en el capítulo 3. En el capítulo 4 se encuentra la evaluación y validación de cada una de las partes. En el capítulo 5 se describen las pruebas de validación de la integración de la interfaz gráfica con la plataforma BCI2000 y el sistema robótico por separado. Y, por último, el capítulo 6, presenta las conclusiones obtenidas tras el trabajo realizado en el proyecto y las posibles líneas de trabajo futuro sobre el mismo.

Además, se incluyen a modo de complementación del trabajo desarrollado, seis anexos. En el primero de ellos, anexo A, se describe el proceso evolutivo seguido por el proyecto. En el anexo B, se realiza una definición de Realidad Virtual y Realidad Aumentada y se presenta un estudio acerca de las diferentes gafas que podrían ser un sustituto para el soporte actual de la interfaz, la pantalla. A lo largo del anexo C, se pretende dar una visión general de las Interfaces Cerebro-Computador en aquellos aspectos relacionados directamente con este proyecto, así como una descripción de las dos herramientas utilizadas para el tratamiento de señales cerebrales. Por su parte, en el anexo D, se profundiza en todos aquellos detalles referentes a la definición de la apariencia definitiva de la interfaz gráfica. El anexo E presenta todos aquellos resultados derivados de las pruebas realizadas sobre el sistema. Y por último, en el anexo F, se realiza una descripción más amplia de la herramienta ARToolKit, una de las partes esenciales en la implementación.

## 2. Diseño del sistema

---

En este capítulo se describen las diferentes partes que integran el proyecto. En la sección 2.1 se detalla la interfaz gráfica, y en la sección 2.2, se explica todo lo relacionado con el posicionamiento en la escena de los diferentes elementos involucrados.

### 2.1. Interfaz gráfica (GUI)

Para establecer el diseño de la interfaz gráfica a desarrollar hay que tener presente las principales pinceladas de su objetivo final, aunque dicho objetivo se va a ir explicando y reafirmando a medida que se avance en la explicación del diseño e integración del sistema completo.

La interfaz gráfica debe ser capaz de mostrar estímulos visuales en determinados instantes de tiempo, los cuales deben provocar en el sujeto el fenómeno neurológico deseado (el potencial evocado P300). Ante este hecho se ve justificada la definición de un paradigma de estimulación (apartado 2.1.2); ya que el potencial evocado mencionado se obtiene a partir de paradigmas que combinan estímulos aleatorios: estímulos frecuentes e infrecuentes. Además, es necesario establecer una serie de requisitos adicionales que dicha interfaz debe cumplir: **intuitiva** para el usuario, es decir, fácil de utilizar; y claridad inequívoca en la **sensación de profundidad** para el usuario, ya que ésta es la característica más importante, junto con la libertad de movimiento otorgada al usuario al realizar el posicionamiento en escena en tiempo real, y a partir de localizaciones relativas, mediante realidad aumentada.

En los sucesivos apartados, se detalla cada una de las partes que componen dicha interfaz, así como todos los cambios realizados durante el proceso para llegar a cumplir esos requisitos establecidos anteriormente. En primer lugar, se establece el sistema de referencia utilizado (apartado 2.1.1), y a continuación, se explica el paradigma de estimulación seguido para interactuar con el usuario (apartado 2.1.2), paradigma que determina todo lo relacionado con la apariencia de la interfaz.

### 2.1.1. Sistema de referencia

Dado que el mundo real en el que nos desenvolvemos es tridimensional, dinámico y los cambios que se producen en él son causados por nuestros propios movimientos y/o por los movimientos de otros objetos o actores, es necesario designar los puntos en dicho espacio tridimensional. Para ello el sistema de referencia utilizado es el sistema cartesiano (x,y) extendido hacia la tercera dimensión añadiendo una nueva coordenada z, sistema cartesiano tridimensional.

En la figura 2.1, se representa la orientación establecida de los ejes de coordenadas en el sistema de referencia cartesiano tridimensional.

Así mismo, el tipo de estructura de referencia usado para los sentidos positivos de los ejes está basado en la regla de la mano derecha (sección D.2). Todos los sistemas de coordenadas a los que se haga referencia a lo largo del presente documento se suponen siguiendo dicha regla.

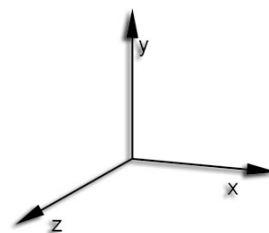


Figura 2.1: Sistema de coordenadas cartesianas tridimensional

### 2.1.2. Paradigma de estimulación visual

Debido a la dificultad que supone la incorporación de una tercera dimensión (profundidad) en un sistema como el desarrollado, y a que la definición de dicho paradigma de estimulación visual es una de las partes fundamentales en este proyecto, (la interfaz gráfica depende por completo de sus características), su establecimiento ha experimentado numerosos cambios. A continuación se presenta un resumen de las diferentes alternativas propuestas, considerando varios puntos clave: forma, color y disposición de dicha forma en el espacio (detalladas en su totalidad en la sección D.2) y una descripción más en profundidad de la opción elegida.

En algunas de las aplicaciones desarrolladas hasta el momento basadas en Interfaz Cerebro-Computador [1] [2], utilizan como elemento de atención el punto, situado en el espacio mediante dos coordenadas (x,y), pero al tener que introducir la sensación de profundidad, la tercera dimensión (coordenada z), dicho elemento de atención debe poseer también esa característica, por lo que es necesario utilizar un volumen.

La definición de dicho volumen (el cubo); la dotación de un color característico y la definición de las diferentes posiciones alcanzables por éste; y, por último, la incorporación de una guía semitransparente (el mallado), para facilitar al usuario la ubicación de las diferentes posiciones ofertadas, suponen la **primera fase** (ver apartado D.2.1.1) en el establecimiento del paradigma de estimulación.

En una **segunda fase** de modificaciones (ver apartado D.2.1.2), se define un volumen generado por planos seriados<sup>1</sup> a lo largo de los tres ejes definidos, un total de 9 planos, es decir, un total de 27 posiciones seleccionables. Siendo esos planos los que conforman los diferentes flashes presentados al usuario durante la estimulación. Además, es necesario definir el cuerpo que forma dichos planos. Inicialmente, el cubo, a continuación, la esfera, y por último, la pirámide. Buscando la máxima claridad posible, se propone también una combinación de las tres formas, estableciendo la pirámide para la posición más cercana, la esfera para la posición intermedia y el cubo para la posición más lejana.

Sin perder de vista el principal propósito con la definición de este paradigma de estimulación visual, un claro discernimiento entre las distintas posiciones existentes, se decide pasar a una **tercera fase** de cambios (ver apartado D.2.1.3), una redefinición completa del paradigma, dejando a un lado los planos y estableciendo una estimulación en dos pasos. En primer lugar, estimulación por filas y por columnas (estimulación en torno al eje X y al eje Y). Una vez determinada la selección, estimulación en profundidad, en torno al eje Z.

Esta alternativa se propone sin considerar su posterior integración en la plataforma BCI2000. Dicha integración, supone combinar dos patrones de estimulación, lo que complica implementación y lógica de control del sistema y además, el entrenamiento<sup>2</sup> del usuario debe ser más largo (aproximadamente el doble) al tener que entrenar dos clasificadores en lugar de uno. Por tanto, se decide, en una **cuarta fase** (ver apartado D.2.1.4), volver a una versión del paradigma descartada con anterioridad, *estimulación por planos* (que supone una integración en BCI2000 más similar a las realizadas previamente).

Sobre dicha versión anterior, (detallada en el apartado D.2.1.2), se realizan las modificaciones pertinentes para dotar a la interfaz de esa “sensación de profundidad”.

Estas modificaciones se desarrollan de manera incremental, empezando por modificaciones en el tamaño de los cubos que forman cada uno de los planos y en el tamaño del mallado, hasta una redefinición del color asociado a cada una de las profundidades.

Tras diferentes pruebas y comparaciones, se llega a la conclusión de que la estimulación cromática definida inicialmente no es la más apropiada para una adecuada estimulación visual, por lo que se intentan determinar dichos colores realizando un pequeño estudio (ver apartado D.2.2) sobre las diferentes características de los mismos y sus contribuciones a la actividad cerebral, puesto que con los colores sugeridos inicialmente (verde-amarillo-rojo), por muy intuitiva que resulte su secuencialidad debido a su similitud con las luces de un semáforo, resulta incómodo para el usuario mantener centrada su atención durante un cierto periodo de tiempo, por ser colores demasiado llamativos, y resultar una combinación tediosa. Como resultado de dicho estudio, en la versión definitiva de la interfaz, los colores son: rojo, verde y azul. En un intento de clarificar lo máximo posible la posición central del mallado (resultante de la intersección entre los planos 2, 5 y 8 de la figura 2.3), por ser

---

<sup>1</sup>Planos repetidos y ordenados de una forma adecuada para formar un volumen

<sup>2</sup>Calibración del sistema y evaluación del rendimiento.

la que más problemas presenta en su discernimiento, la disposición elegida es la siguiente: el color verde para la posición más cercana, el color azul para la posición intermedia y el color rojo para la posición más lejana.

Aplicando los colores seleccionados al mallado, la apariencia resultante puede verse en la figura 2.2. Y en cuanto al conjunto completo de planos, en la figura 2.3.

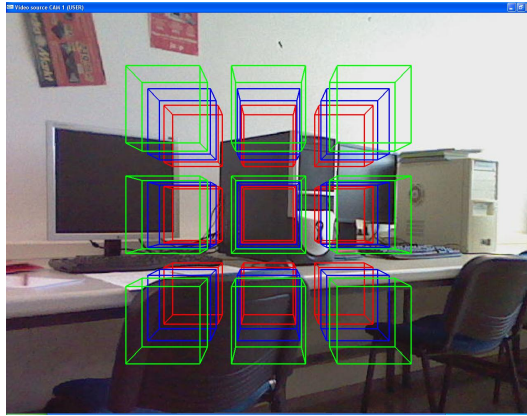


Figura 2.2: Versión definitiva del mallado de la interfaz

Para más información sobre la interfaz, como se ha ido señalando, consultar el anexo D.

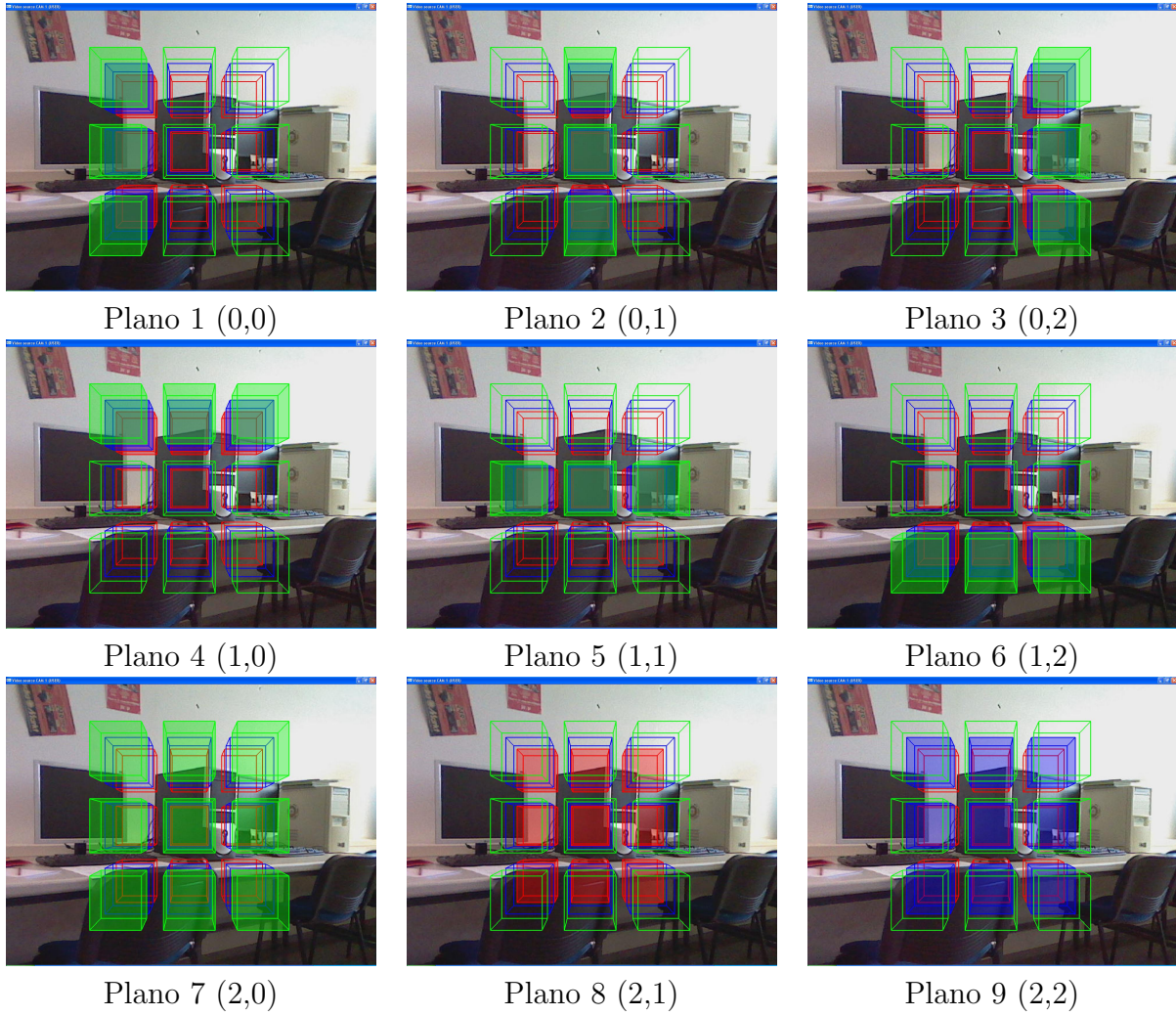


Figura 2.3: Diferentes planos formados por cubos pequeños en los que dividimos el espacio + mallado

Todas las modificaciones, además de realizarse buscando la mejor alternativa para su posterior integración, se han realizado intentando lograr la mayor comodidad para el usuario y disminuir su esfuerzo de concentración.

Esta solución, se adopta como definición final del paradigma de estimulación visual ya que cubre todos los requisitos planteados, además de suponer una integración más sencilla en la plataforma BCI2000.

Una vez determinado todo lo relacionado con el aspecto de la interfaz, se definen las dimensiones de los cubos, la separación entre ellos (figura 2.4 (a)), además de la separación entre la cámara y el mallado (figura 2.4 (b)). No obstante, ante el hecho de que tanto los colores como todas las dimensiones involucradas son algo asociado, en cierto modo, al usuario en cuestión, se decide incluir la posibilidad de parametrización de dichas características.

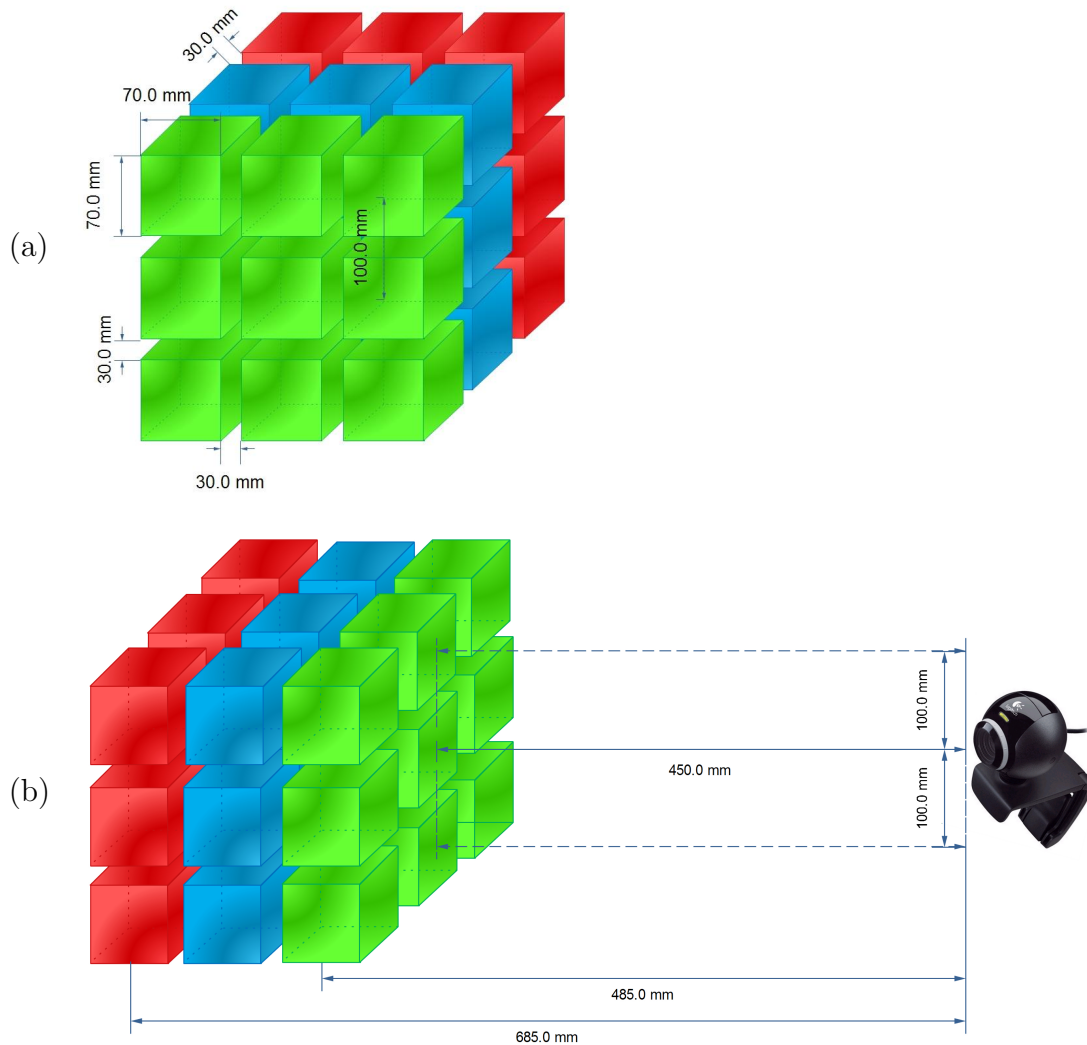


Figura 2.4: (a) Dimensiones del mallado (b) Distancias entre mallado y cámara.

## 2.2. Posicionamiento en la escena

Al enfrentarse al posicionamiento en la escena surgen dos problemas, el primero de ellos se plantea desde un *punto de vista geométrico*, y el segundo desde el *punto de vista de la cámara*. Desde un *punto de vista geométrico*, para conseguir planos realistas del mundo tridimensional, se debe hacer uso de la geometría proyectiva, en la que cada punto representa una línea visual. Para describir un punto en el espacio proyectivo se utilizan las coordenadas homogéneas (August Ferdinand Möbius, 1837). Es decir, un espacio n-dimensional se encuentra representado en coordenadas homogéneas por (n+1) dimensiones, por lo que un vector  $p(x,y,z)$  vendrá representado por  $p(wx,wy,wz)$ , donde w tiene un valor arbitrario y representa un factor de escala.

En la librería gráfica utilizada para la renderización de la aplicación (OpenGL), se hace uso de su notación en forma matricial; lo que permite tratar las transformaciones geométricas como una multiplicación de matrices. Dichas matrices, denominadas *matrices de transformación homogéneas* describen todas las transformaciones: traslación, escalado, rotación.

Se define como matriz de transformación homogénea H a una matriz de dimensión 4x4 que representa la transformación de un vector de posición expresado en coordenadas homogéneas de un sistema de coordenadas a otro.

En general se representa:

$$H = \begin{bmatrix} R_{3x3} & p_{3x1} \\ f_{1x3} & w_{1x1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Rotación} & \text{Traslación} \\ \text{Perspectiva} & \text{Escalado} \end{bmatrix}$$

Matriz homogénea básica de traslación:

$${}^aH_b = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & p_x \\ 0 & 1 & 0 & p_y \\ 0 & 0 & 1 & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Matrices homogéneas básicas de rotación, según el eje sobre el que se realice dicha rotación:

$$H(x, \alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad H(y, \phi) = \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & \sin \phi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \phi & 0 & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad H(z, \theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Dicha matriz H, geoméricamente representa la “localización” de un sistema de coordenadas ligado al cuerpo, con respecto a un sistema de coordenadas de referencia.

Y desde el *punto de vista de la cámara*, uno de los principales problemas presentes al trabajar con realidad aumentada, gira en torno al *tracking*<sup>3</sup>, es decir, conocer la posición

---

<sup>3</sup>Seguimiento de la cámara

de la cámara en la escena en todo momento, para así poder realizar las operaciones necesarias sobre los objetos virtuales, y que éstos se integren correctamente en el mundo real. Existen numerosas alternativas frente a este problema; una de ellas es el *tracking* óptico, que se divide en posicionamiento basado en marcadores, o sin marcadores. (Para más información sobre *tracking*, puede consultarse la sección F.5). Por los requerimientos del sistema, el posicionamiento en marcadores resulta más adecuado, ya que el cometido de dicho marcador se centra en el posicionamiento de los elementos en la escena.

Existen cuatro elementos de interés en el escenario mostrado en la figura 2.5, un único marcador, dos cámaras (una de ellas situada en el usuario; y la otra situada en el robot) y un mallado 3D (grid). La localización de dichos objetos se realiza a partir de otras localizaciones relativas, operando con matrices de transformación homogéneas.

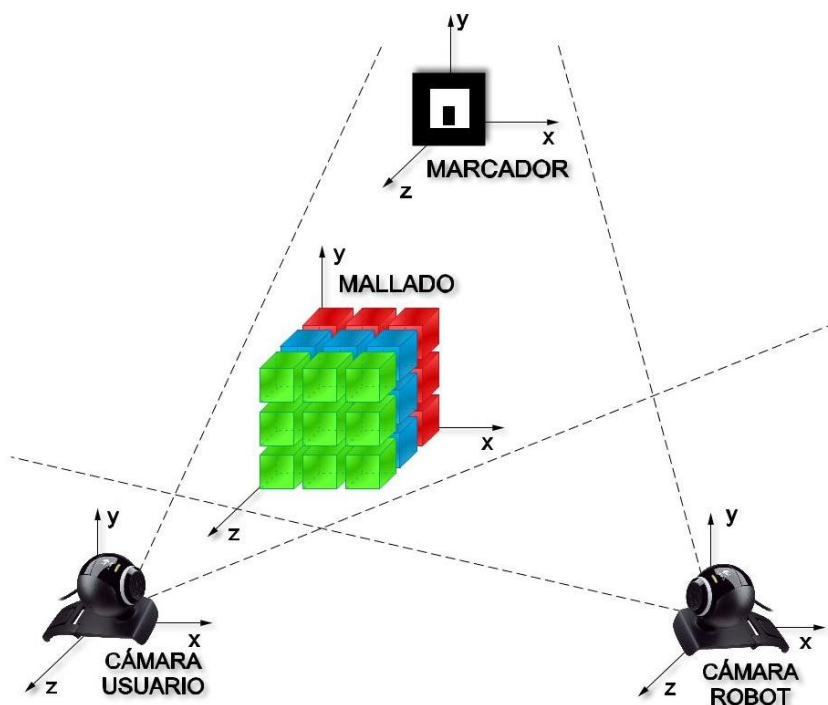


Figura 2.5: Posicionamiento en la escena

Inicialmente, se sitúa el origen de coordenadas de la aplicación, del mundo, en el mallado, y la cámara en función de éste; pero al introducir la detección de marcadores para posicionamiento, es mejor centrar el sistema en la cámara. Por tanto, para facilitar la transformación de coordenadas entre el marcador y los demás elementos, la cámara del usuario se sitúa como origen de coordenadas de nuestro sistema de referencia. Además, dicha decisión es reafirmada al añadir elementos al sistema, ya que el “motor” principal de la aplicación es el usuario. Por tanto, es trivial situar los demás elementos en función de él.

### 2.2.1. Previo

**Calibrado de cámaras** Para poder establecer una correspondencia coherente entre los puntos de una imagen real tomada por una cámara y la realidad, es decir para obtener un correcto posicionamiento en la escena, necesitamos que las cámaras con las que tomamos las imágenes estén correctamente calibradas.

**Calibrado**, se denomina al proceso de estimación de los parámetros intrínsecos y extrínsecos de una cámara.

En este proyecto se ha seguido la calibración en dos pasos ya que ofrece mayor exactitud para medidas en 3D (una explicación más detallada sobre el calibrado de las cámaras puede encontrarse en la sección F.4).

**Elección patrón marcador** Ante la variedad de marcadores presentados por ARToolKit, se realiza un estudio comparativo (ver apartado F.5.1.2), con el fin de elegir aquel que presente más estabilidad conforme se aumenta la distancia a él. El patrón elegido se muestra en la figura 2.6.

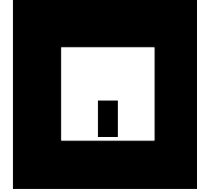


Figura 2.6: Patrón utilizado

### 2.2.2. Localización

Para relacionar el sistema de coordenadas del usuario con el sistema de coordenadas del robot y lograr así la sincronización de ambos mundos, para una exitosa conclusión del movimiento del brazo robótico hasta la posición deseada por el usuario, es necesario conocer la posición del mallado respecto al robot. Dicha localización se lleva a cabo a través de las dos cámaras existentes en el sistema, una asociada al usuario y otra asociada al robot, y del marcador que actúa de referencia base para el sistema de transformaciones necesario para establecer las localizaciones relativas.

La notación utilizada [4] durante la explicación es como sigue:

${}^aT_b$  → dónde se encuentra B respecto a A

$${}^aT_b = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & T_x \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & T_y \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & T_z \end{bmatrix}$$

Una explicación más detallada de dicha matriz se encuentra en el apartado F.5.2.

${}^aH_b$  → **transformación homogénea** relativa de B respecto de A  
 → localización (orientación y posición) de B respecto de A  
 → movimiento (rotación y traslación) de llevar A hasta B

Una matriz de transformación homogénea para un espacio tridimensional y en el contexto de la robótica, se representa como sigue, siendo  $[n \ o \ a]$  una terna ortonormal que representa la orientación y  $p$  el vector que representa la posición.

$${}^aH_b = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n & o & a & p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & p \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

donde:

$$\begin{aligned} {}^aH_b &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ 1 \end{bmatrix} = \text{Origen}_b & \quad {}^aH_b &= \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \\ 0 \end{bmatrix} = \text{Dirección } x_b \\ {}^aH_b &= \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} o_x \\ o_y \\ o_z \\ 0 \end{bmatrix} = \text{Dirección } y_b & \quad {}^aH_b &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \\ 0 \end{bmatrix} = \text{Dirección } z_b \end{aligned}$$

siendo:

$$R = [n \ o \ a] \quad |R| = 1$$

Debe señalarse, también, la inversa de una matriz homogénea:

$${}^aH_b^{-1} = \begin{bmatrix} n_x & n_y & n_z & -n^{-T}p \\ o_x & o_y & o_z & -o^{-T}p \\ a_x & a_y & a_z & -a^{-T}p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n & o & a & p \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Y teniendo en cuenta el significado geométrico de una matriz de transformación, se deduce que los vectores fila de la submatriz de rotación de la matriz  ${}^aH_b$ , representan los ejes principales del sistema de coordenadas de referencia.

Los elementos posicionados sin realizar ninguna transformación serían, en primer lugar, la cámara asociada al usuario ya que, como se ha comentado con anterioridad, se establece como origen de coordenadas del mundo. Y para el usuario, la posición del mallado, que se corresponde con la calculada respecto a su cámara asociada. Dicha posición viene establecida por definición, es fija en todo momento respecto al usuario (respecto al origen de coordenadas de la aplicación).

La representación gráfica de la transformación objetivo en el proceso seguido se muestra en el gráfico de transformación de la figura 2.7.

Además, cualquier otra relación puede ser obtenida fácilmente a partir del gráfico. Para ello se va desde el nodo inicial al final multiplicando las matrices de transformación

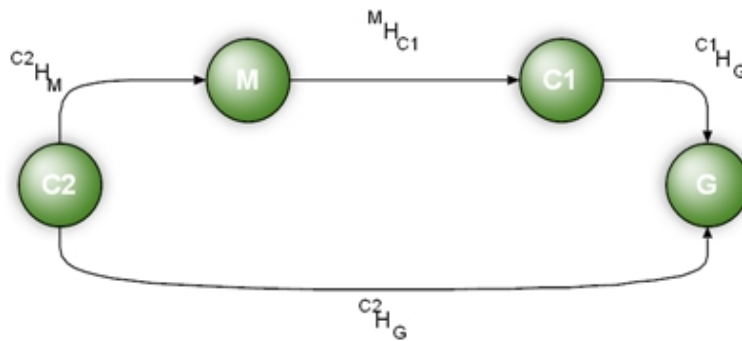


Figura 2.7: Gráfico de transformación

correspondiente a los arcos del gráfico, y considerando que si se recorren éstos en el sentido inverso a las flechas debe utilizarse una matriz inversa.

A continuación se explica el procedimiento seguido para las dos cámaras:

### Localización del mallado respecto a la cámara 1

Como se ha mencionado, calcular la posición del mallado respecto al usuario es lo mismo que calcular la localización del mallado respecto a la cámara asociada al usuario (cámara C1).

Transformación desde el eje de coordenadas de la cámara C1 hacia el eje de coordenadas del mallado, es decir, traslación del origen de coordenadas de la aplicación (0,0,0), situado en la cámara C1, hasta la posición designada para el mallado, en concreto a una distancia de 450 mm. (ver figura 2.4).

### Localización del mallado respecto a la cámara 2

Para calcular la transformación final existente entre el mallado y la cámara 2, se han seguido una serie de transformaciones asociadas a localizaciones intermedias que son explicadas a continuación.

En la figura 2.8 se visualizan las transformaciones objetivo, desde ambas cámaras al mallado.

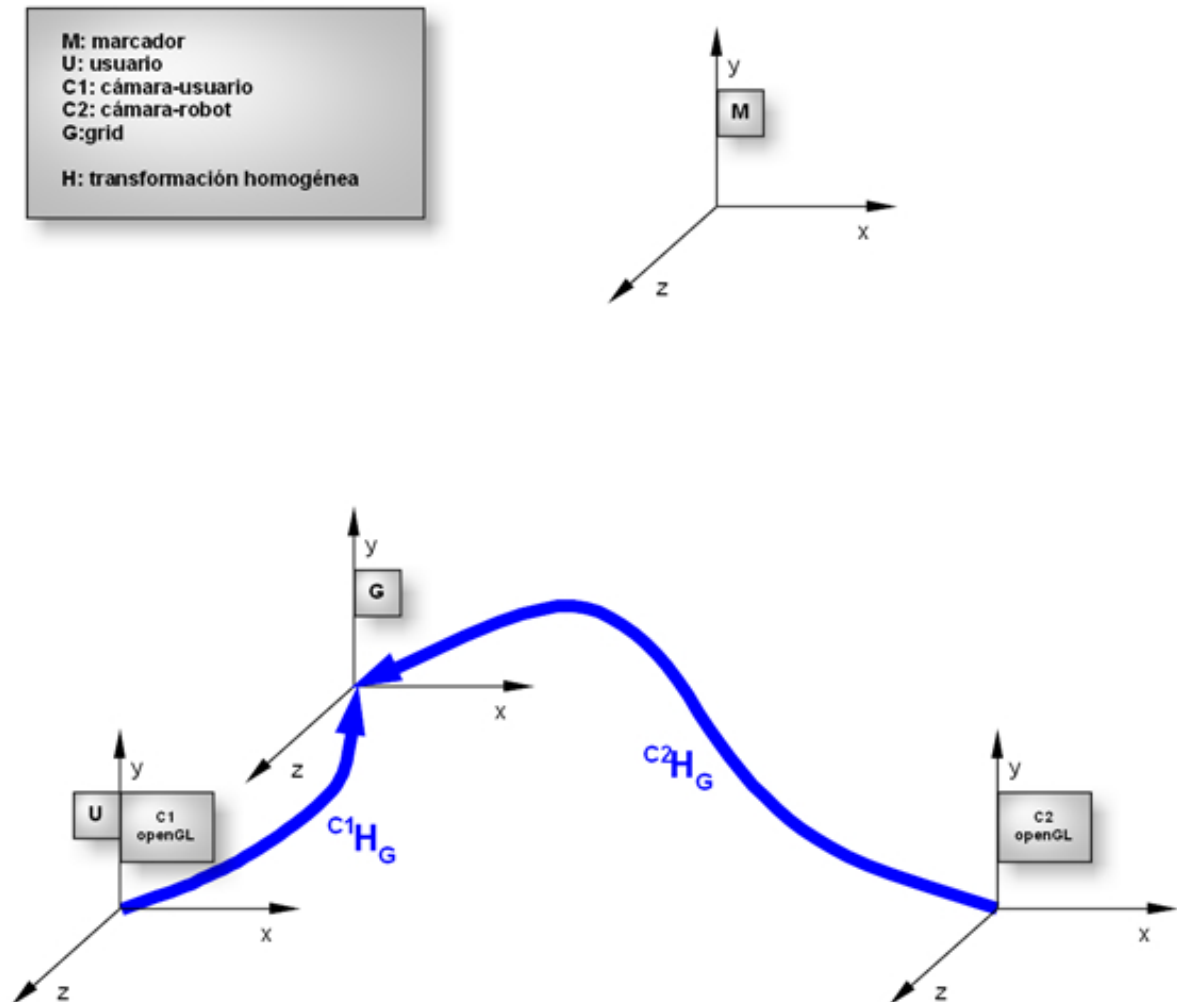


Figura 2.8: G respecto  $C1 \rightarrow^{C1} H_G$   
 G respecto  $C2 \rightarrow^{C2} H_G$

Por tanto, la concatenación de transformaciones necesaria para calcular la localización del mallado respecto a la cámara 2, asociada al robot, empezando por el objetivo a conseguir y en pasos sucesivos explicando cómo se obtiene cada una de las transformaciones necesarias, quedaría como sigue, siendo:

$$\left\{ \begin{array}{ll} G & \text{grid (mallado)} \\ C1 & \text{cámara usuario} \\ C2 & \text{cámara robot} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{ll} M & \text{marker (marcador)} \\ H & \text{transformación homogénea} \\ T & \text{transformación no-homénea} \end{array} \right.$$

$${}^{C2}\mathbf{H}_G = {}^{C2}\mathbf{H}_{C1} \cdot {}^{C1}\mathbf{H}_G \text{ (figura 2.9)}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} {}^{C2}\mathbf{H}_{C1} = {}^{C2}\mathbf{H}_M \cdot {}^M\mathbf{H}_{C1} \text{ (figura 2.10)} \\ \left\{ \begin{array}{l} {}^{C2}\mathbf{H}_M = \mathbf{H}({}^{C2}\mathbf{T}_M)^1 \text{ (figura 2.11)} \\ {}^{C2}\mathbf{T}_M = \text{C2 detecta M (ARToolKit)}^2 \\ {}^M\mathbf{H}_{C1} = \mathbf{H}([{}^{C1}\mathbf{H}_M]^{-1})^1 \text{ (figura 2.12)} \\ \left\{ \begin{array}{l} {}^{C1}\mathbf{H}_M = \mathbf{H}({}^{C1}\mathbf{T}_M)^1 \text{ (figura 2.13)} \\ {}^{C1}\mathbf{T}_M = \text{C1 detecta M (ARToolKit)}^2 \end{array} \right. \end{array} \right. \\ {}^{C1}\mathbf{H}_G \text{ (figura 2.8)} \end{array} \right.$$

<sup>1</sup> Referente a OpenGL. <sup>2</sup> Referente a ARToolKit.

---

<sup>1</sup>Transformación de matriz no-homogénea utilizada por ARToolKit, a matriz homogénea utilizada por OpenGL

<sup>2</sup>Detección de marcadores de ARToolKit, explicada con más detalle en el apartado F.5.1

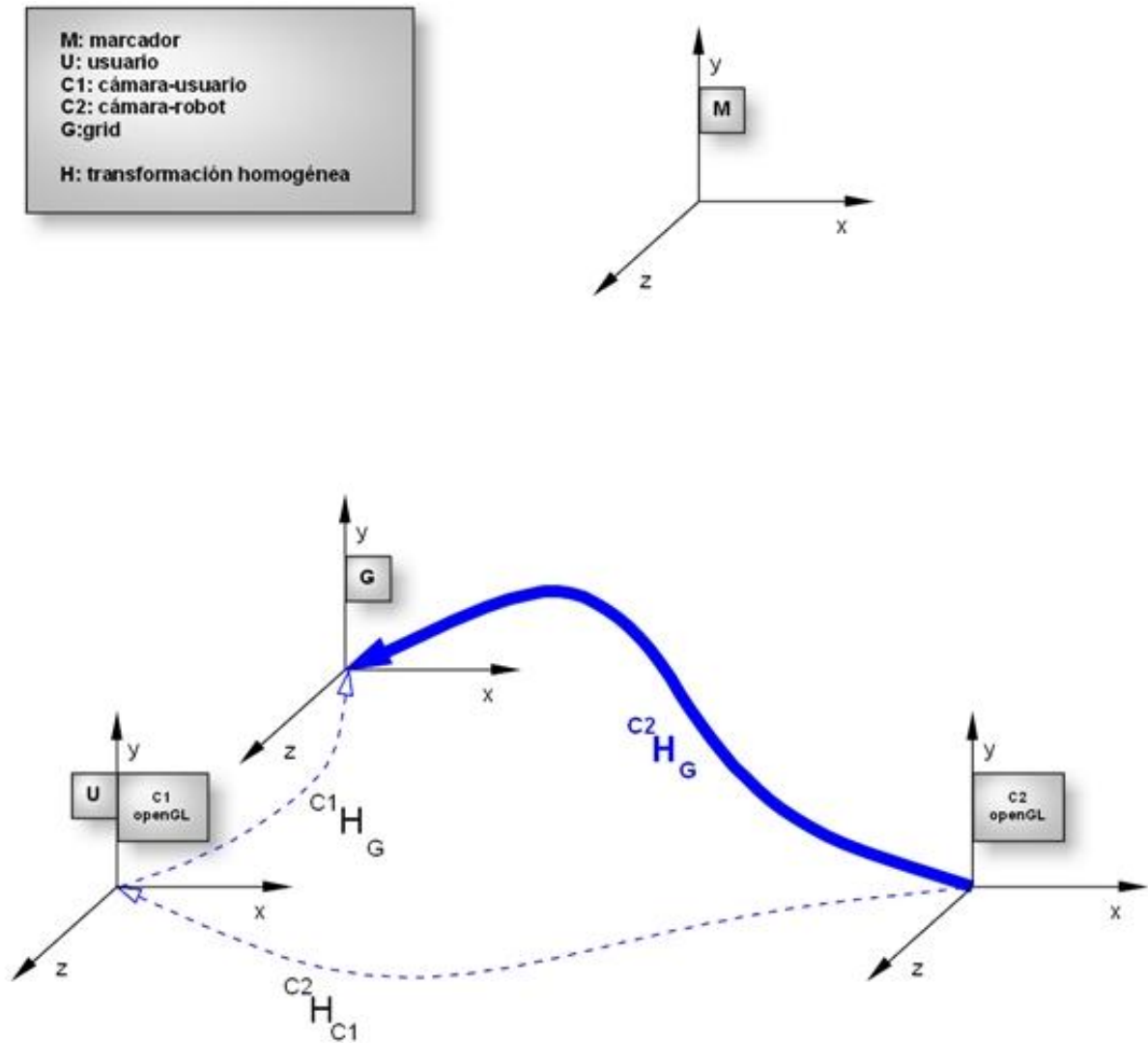


Figura 2.9:  ${}^{C2}H_G = {}^{C2}H_{C1} \cdot {}^{C1}H_G$

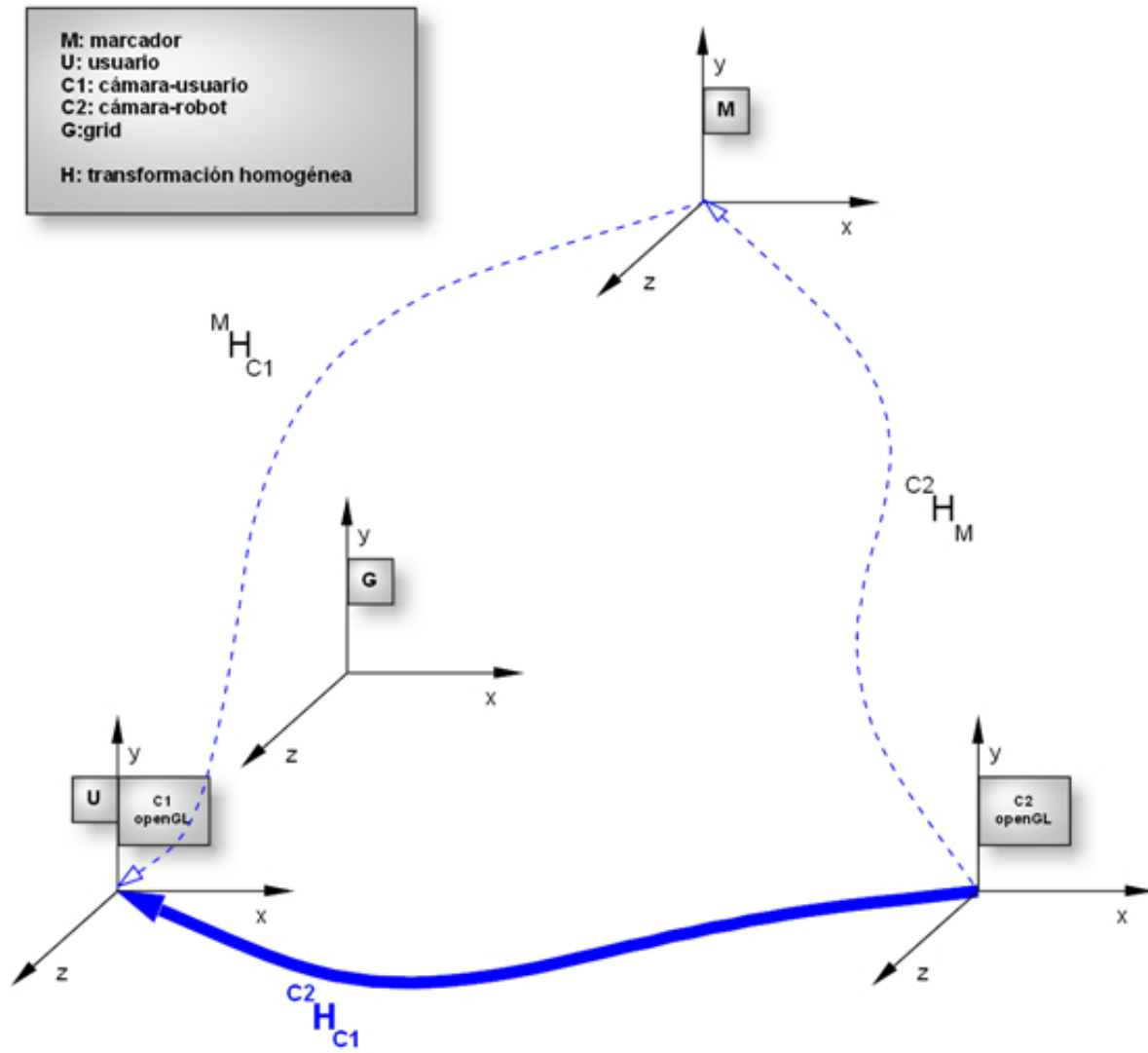


Figura 2.10:  $C2 H_{C1} = C2 H_M \cdot M H_{C1}$

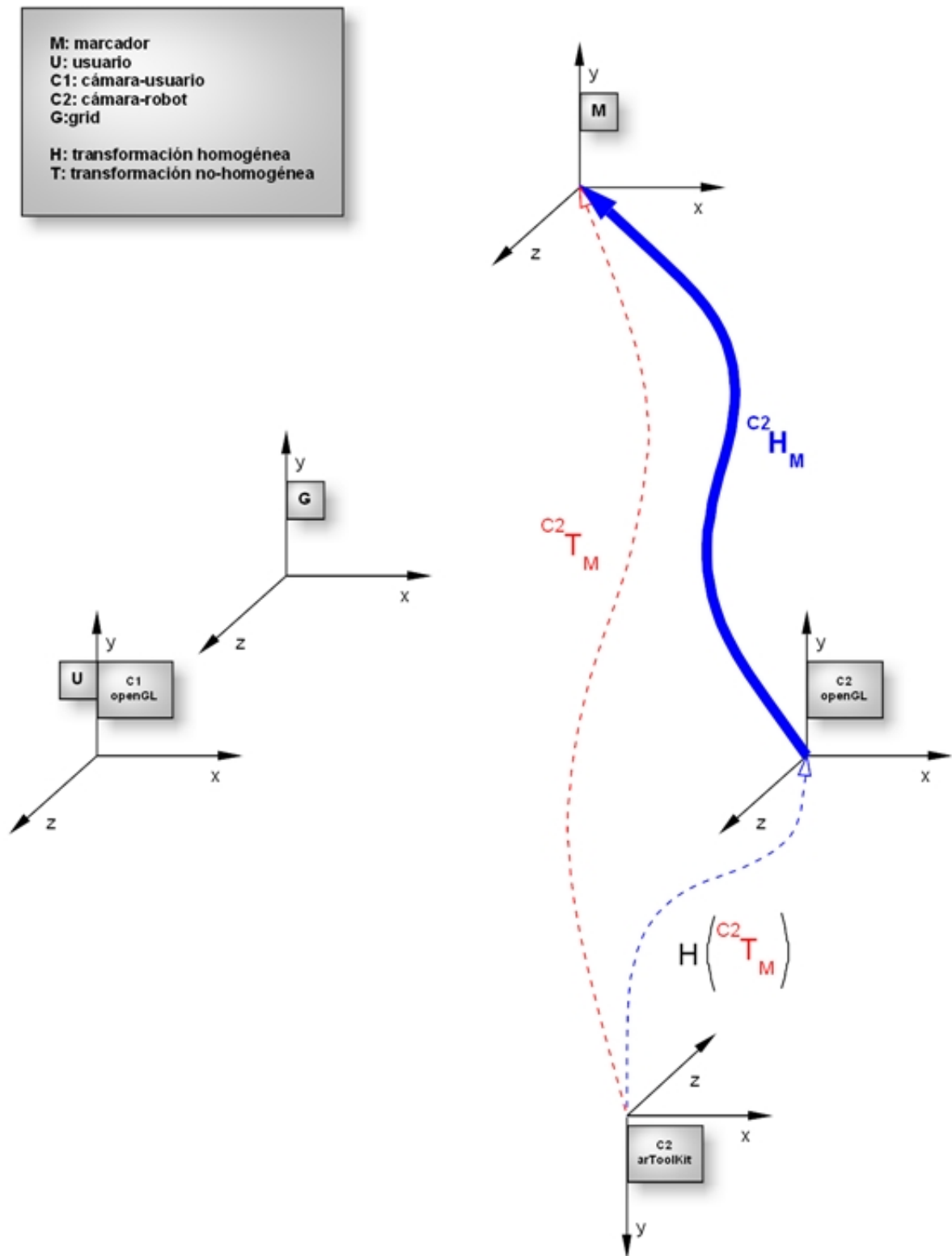


Figura 2.11:  ${}^{C2}H_M = H({}^{C2}T_M)$   
 ${}^{C2}T_M$  = C2 detecta M (ARToolKit)

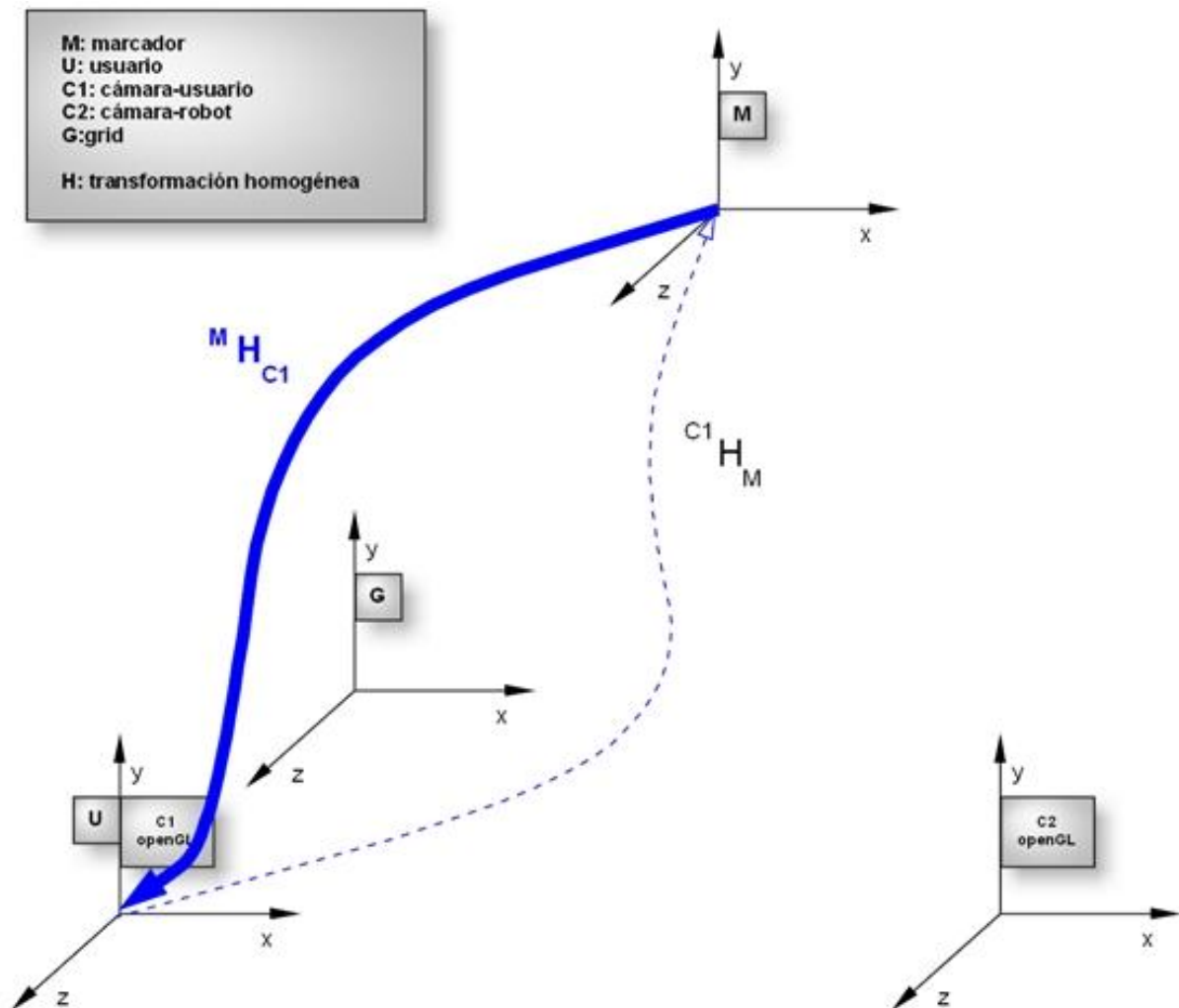


Figura 2.12:  ${}^M H_{C1} = [{}^{C1} H_M]^{-1}$

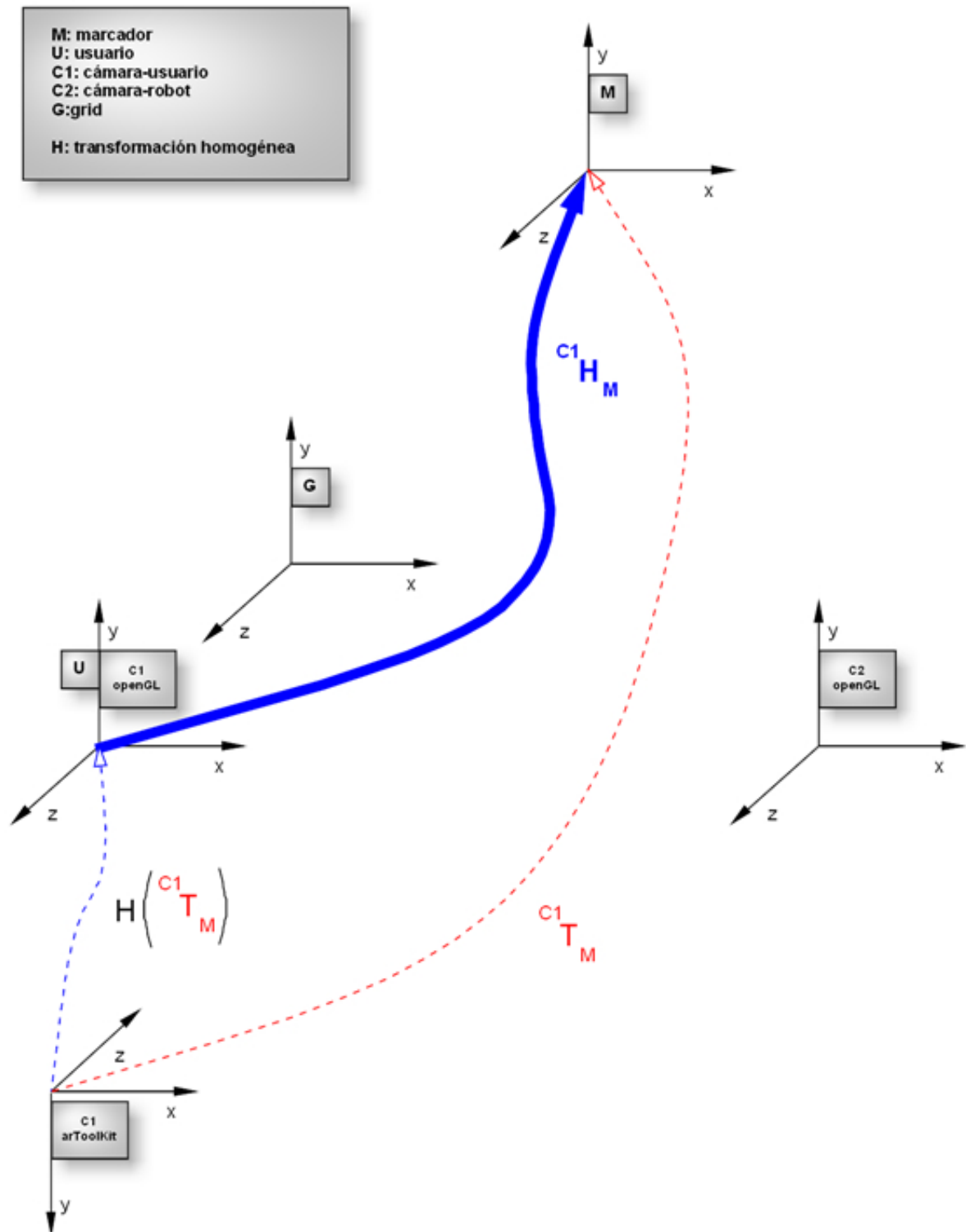


Figura 2.13:  ${}^{C1}H_M = H({}^{C1}T_M)$   
 ${}^{C1}T_M = C1$  detecta  $M$  (ARToolKit)

El esquema completo de transformaciones puede verse en la figura 2.14.

$${}^{C2}\mathbf{H}_G = ({}^{C2}\mathbf{H}_M \cdot ({}^{C1}\mathbf{H}_M)^{-1}) \cdot {}^{C1}\mathbf{H}_G$$

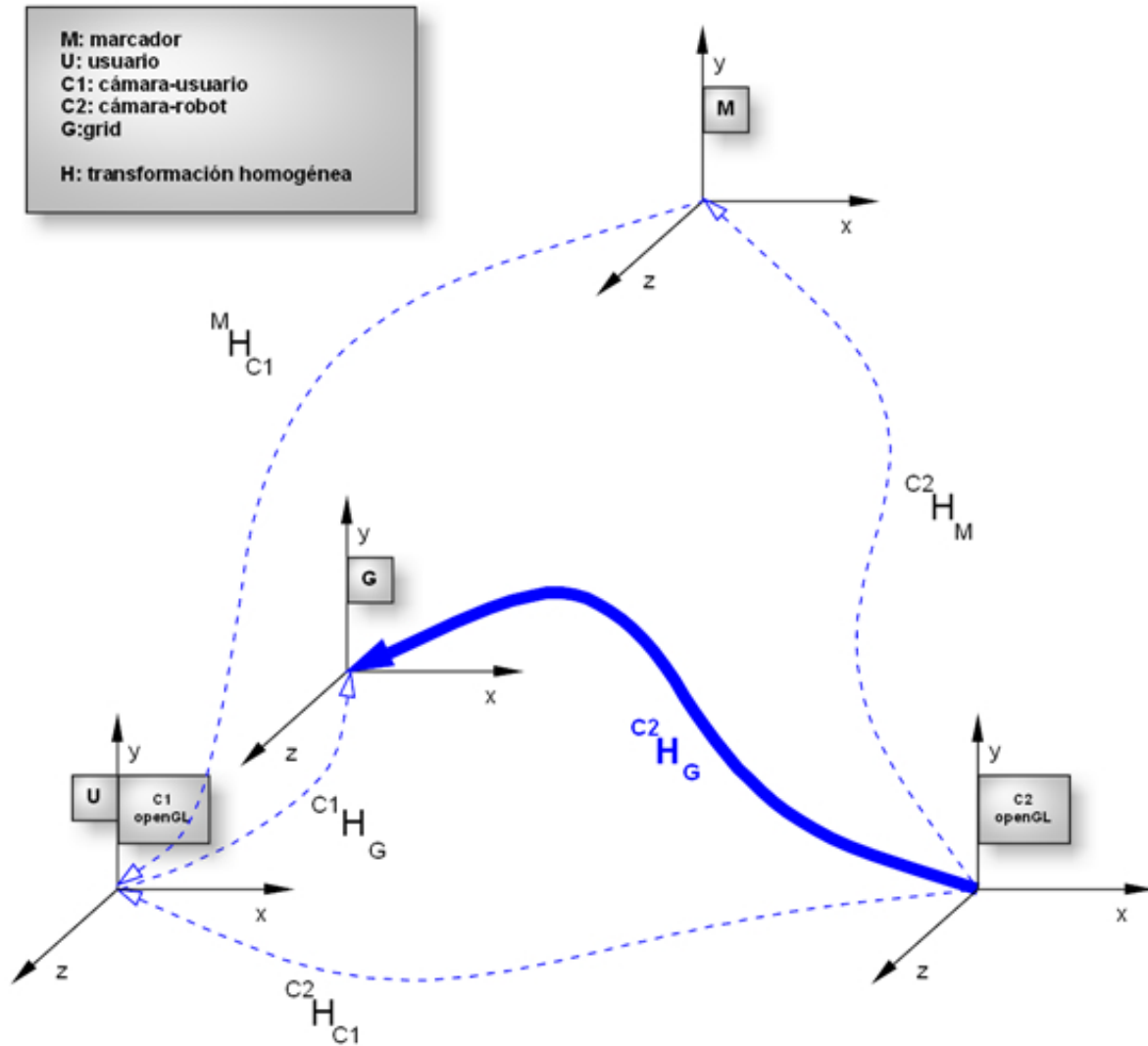


Figura 2.14: Esquema completo de transformaciones

Y en cuanto a las transformaciones referentes a ARToolKit, un esquema completo se muestra en la figura 2.15.

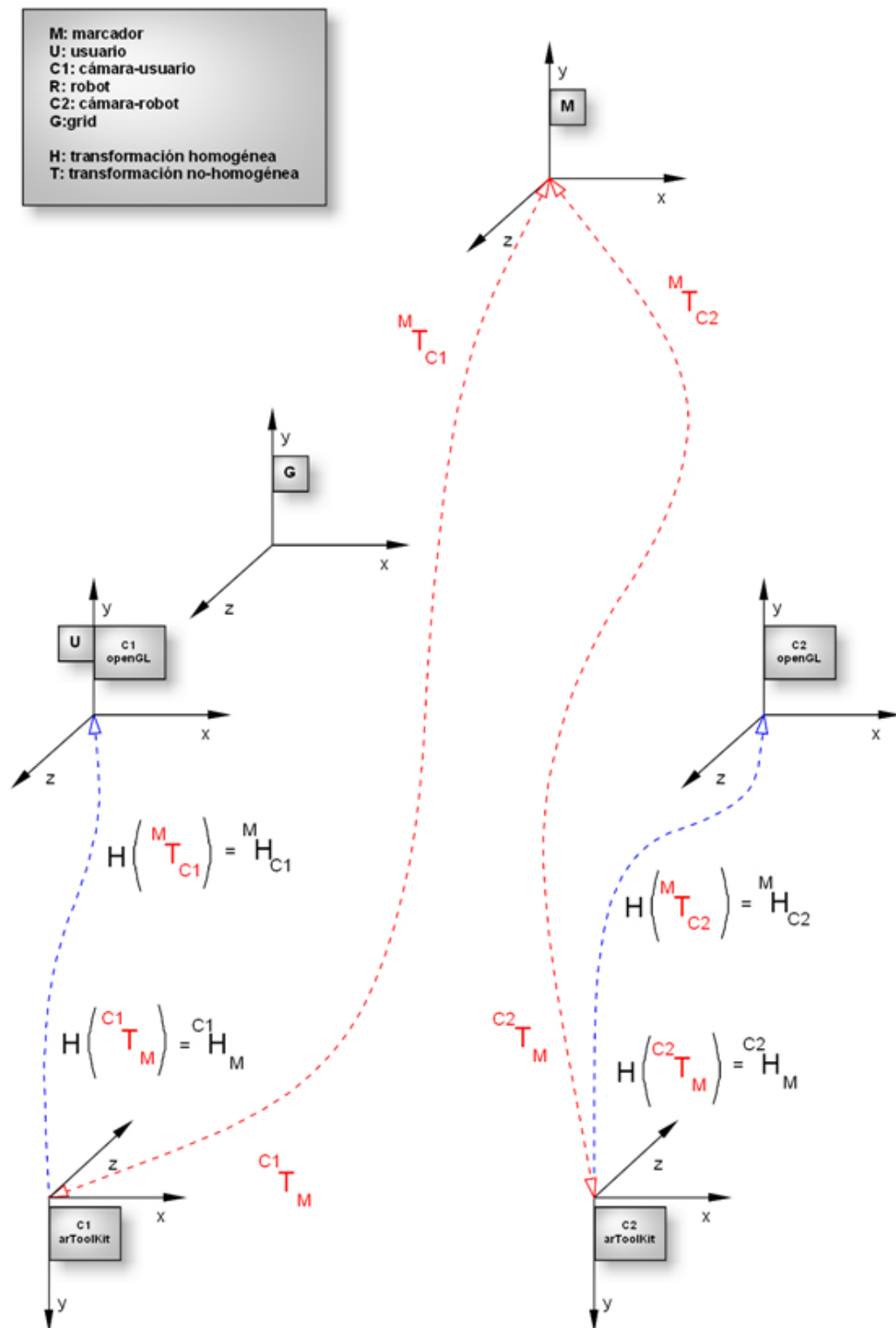


Figura 2.15: Esquema completo de transformaciones de ARToolKit

### 2.2.3. Limitaciones en la “libertad” de movimiento

Una de las características distintivas de este proyecto, además de la sensación de profundidad, como se ha comentado anteriormente, es la incorporación de cierto grado de libertad al usuario (a la cámara asociada a él).

Esta característica es el resultado de todo el proceso descrito en el apartado anterior sobre localización dentro de la escena (apartado 2.2.2).

Existe la limitación inevitable de que todo el posicionamiento en la escena depende de la visualización de un marcador común, para a partir de él poder calcular la posición de todos los elementos necesarios del entorno.

Por tanto, en cuanto a la presencia o ausencia de los marcadores en el campo de visión de las cámaras, pueden darse tres situaciones:

1. Ninguna de las dos cámaras visualiza el marcador (figura 2.16)

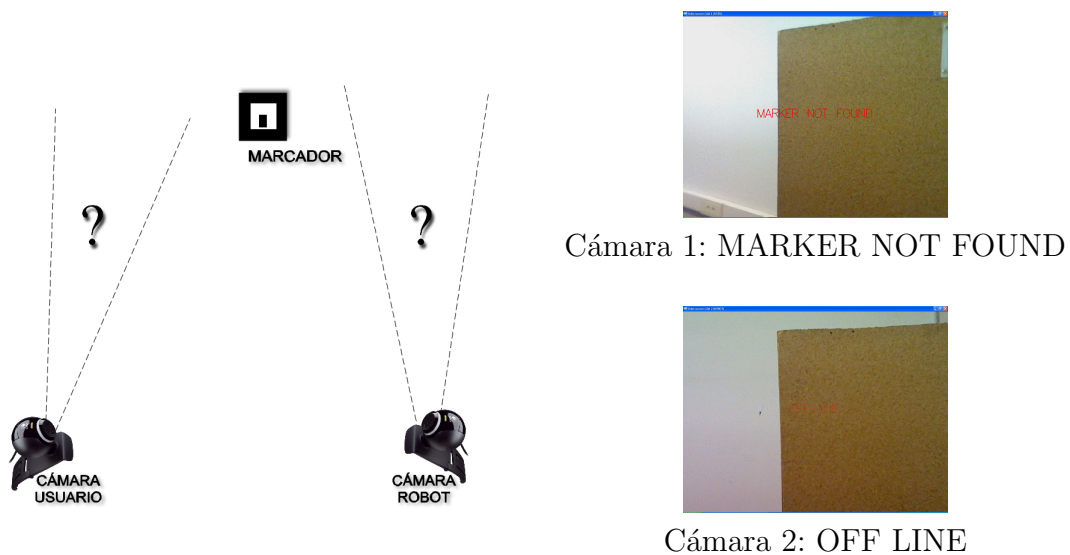


Figura 2.16: No se encuentra marcador en ninguna de las dos cámaras. Mensajes de información

#### 2. Cámara 1 no visualiza el marcador (figura 2.17)

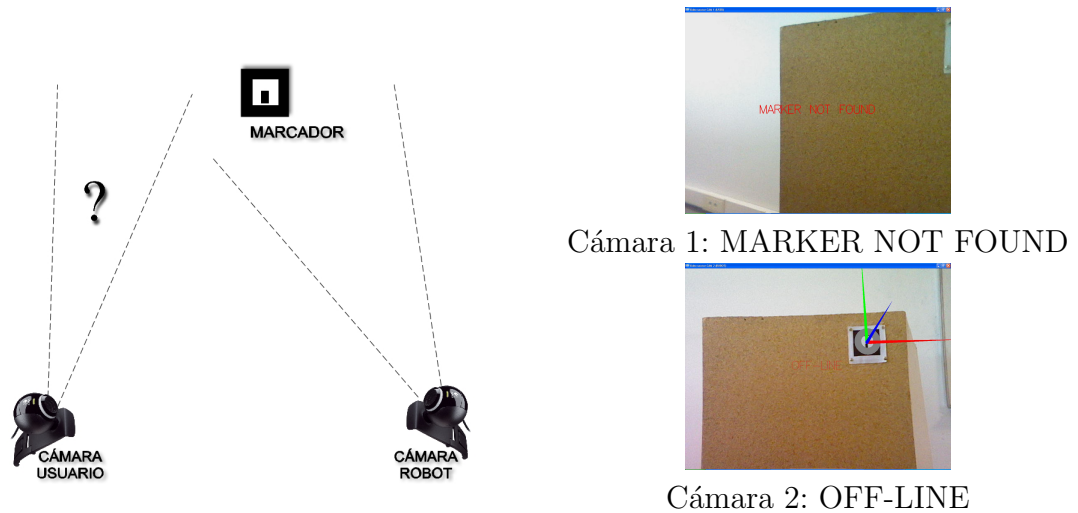


Figura 2.17: Cuando la cámara 1, asociada al usuario, no visualiza el marcador, se muestra en dicha pantalla un mensaje informando de ese hecho al usuario y no hay posicionamiento en escena de ningún elemento, ya que no se puede situar ni el origen de coordenadas en la misma.

#### 3. Cámara 2 no visualiza el marcador (figura 2.18)

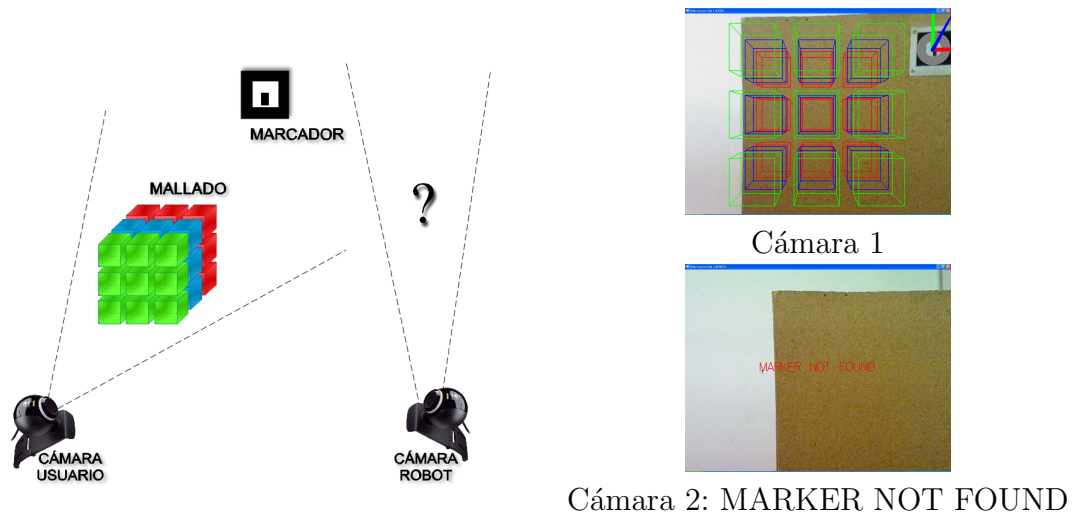


Figura 2.18: No repercute en la visualización de la cámara 1, la presencia o ausencia del marcador en la cámara 2.

Actuando en consecuencia ante esta limitación, la interfaz gráfica proporciona los mensajes adecuados al usuario (indicados en las figuras anteriores), dándole información en todo momento de qué ha sucedido en el sistema.

Existe también una limitación impuesta por la distancia hasta el marcador ya que esto incrementa el ruido introducido en las transformaciones llegando a magnitudes que “contaminan” de tal forma la transformación que se hace inviable su posterior utilización.

Ante este hecho se decide implementar un filtro de media para intentar mitigar en la medida de lo posible dichas vibraciones (explicado en detalle en el apartado 4.1.3).

El máximo establecido para garantizar que la vibración no influye demasiado es 1,5 m, con filtro incluido; el estudio realizado para su determinación se detalla en el apartado F.5.1.3.

### 2.3. Implementación

En esta sección se define la implementación del sistema. La metodología de programación desarrollada es totalmente orientada a objetos en el lenguaje C++, lo que facilita su diseño e implementación.

Al igual que muchas aplicaciones de realidad aumentada, este proyecto está basado en dos librerías: **OpenGL** para renderización y **ARToolKit** para posicionamiento en la escena.

A continuación se detallan aquellos aspectos relevantes sobre el diseño de la implementación realizada.

Hay tres grandes módulos:

- **Contexto:** Formado por la ventana y la cámara
- **Marcador:** Patrón utilizado para posicionamiento en la escena del resto de elementos. Es común a ambos contextos porque es el elemento que los relaciona.
- **Interfaz gráfica:** Engloba todo aquello relacionado con la visualización del mallado y de los planos de estimulación.

Se han establecido dos contextos, es decir, dos cámaras cada una con una ventana asociada. Tras establecerse la relación correspondiente entre ellos a través del marcador, se obtiene la información necesaria utilizada por la interfaz para visualizar en cada una de las ventanas el mismo objeto, el mallado, desde dos puntos de vista diferentes, el correspondiente a cada cámara.

Al trabajar con dos cámaras es necesario establecer un flujo de ejecución para controlar el tratamiento de frames leídos de cada cámara y poder así realizar de manera correcta las transformaciones y sólo en los casos que interesen. Dicho flujo queda reflejado en la figura 2.19.

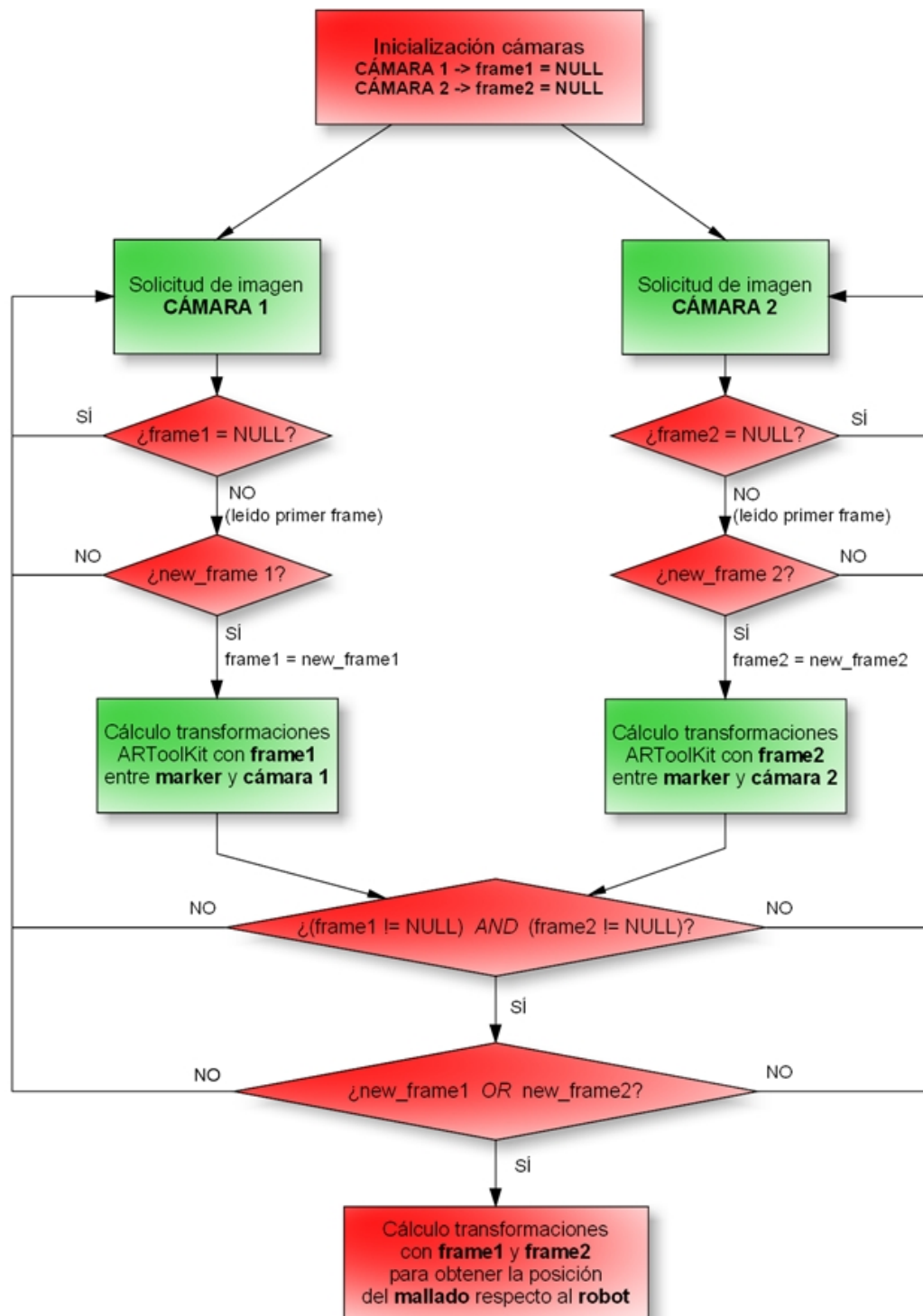


Figura 2.19: Tratamiento del flujo de frames de ambas cámaras. Las partes coloreadas en verde corresponden a ARToolKit y las partes en rojo corresponden a la implementación propia.

### 3. Integración

En este capítulo se describe el sistema de comunicaciones y las modificaciones pertinentes introducidas al realizar tanto la integración de la interfaz hombre-máquina (sección 3.2) como la integración entre la interfaz gráfica y el robot (sección 3.3).

En la figura 3.1 queda reflejado el esquema general con los diferentes componentes.

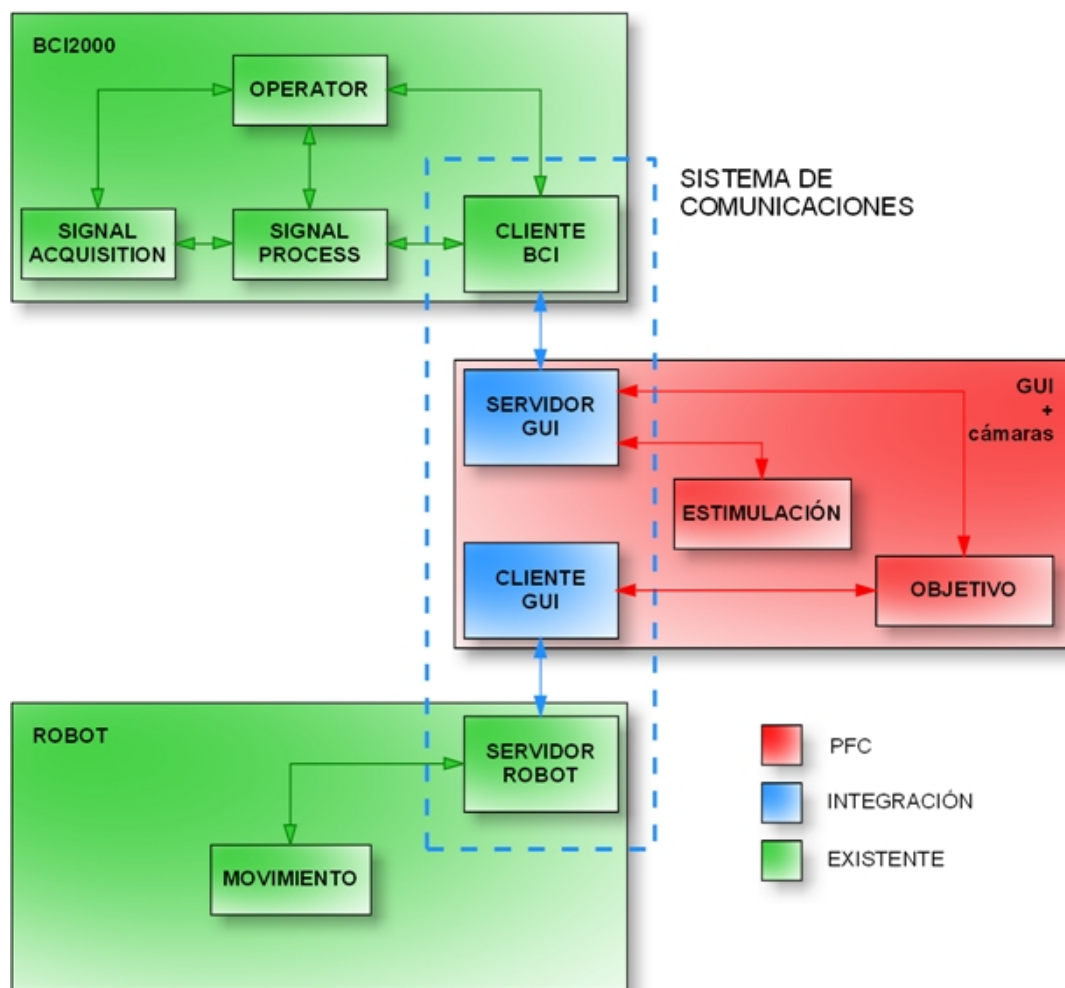


Figura 3.1: Esquema general de la aplicación desarrollada

### 3.1. Sistema de comunicaciones

El sistema de comunicaciones está compuesto por dos enlaces cliente-servidor. En uno la plataforma BCI2000 actúa como entidad cliente y la interfaz gráfica actúa como entidad servidor y en el otro la interfaz gráfica actúa como entidad cliente y el robot como entidad servidor. El elemento común a ambos enlaces es la interfaz gráfica por ser la parte desarrollada íntegramente en este proyecto y así evitar, en la medida de lo posible, modificaciones internas de las partes ya existentes incorporadas al proyecto. La conexión entre estas entidades está basada en el paradigma cliente/servidor sobre TCP/IP mediante *sockets*. La plataforma de *sockets* utilizada es de propósito general, realizando una adaptación de la misma a las necesidades del proyecto, en cuanto a la estructura y contenido de los mensajes empleados en la comunicación. El diseño realizado para cada una de las comunicaciones se detalla en su apartado correspondiente. Apartado 3.2.4 para la interfaz hombre-máquina y apartado 3.3.3 para la prótesis robótica.

### 3.2. Interfaz Hombre-máquina

En esta sección se describen los componentes del sistema de interacción hombre-máquina. En primer lugar, en el apartado 3.2.1, el protocolo neurofisiológico seguido y la señal cerebral objeto de estudio. A continuación, en el apartado 3.2.2, el sistema de interfaz cerebro-computador que se encarga de la adquisición, procesamiento y tratamiento de resultados. Y por último, la interfaz gráfica, que por su relevancia en este proyecto se explica en el apartado 2.1.

La interfaz gráfica está sincronizada con el módulo de aplicación de la herramienta BCI2000 y su función es, como se ha comentado con anterioridad, la de mostrar estímulos visuales en determinados instantes de tiempo marcados por el sistema de eventos de dicha herramienta. Estos estímulos deben provocar en el sujeto el potencial evocado P300.

#### 3.2.1. Protocolo neurofisiológico

Hablando de técnicas de adquisición de señales cerebrales, podemos definir básicamente dos modalidades: las técnicas invasivas, y las no invasivas.

En el primer caso, la implantación de los electrodos en la corteza cerebral, o directamente en el cerebro, se realiza mediante intervención quirúrgica, por lo que a pesar de la nitidez de la señal obtenida, ventaja fundamental de este tipo de técnicas, no debemos dejar de lado las consideraciones éticas que supone su utilización.

Por contra, en las técnicas no invasivas no se requiere ningún tipo de intervención en el paciente. El método más utilizado, por accesibilidad económica, facilidad de montaje y

adaptación sin grandes requerimientos a cualquier laboratorio, es la electroencefalografía (EEG). Como ya se ha comentado en la introducción, tras una breve argumentación, es esta técnica la utilizada para la adquisición de señales cerebrales (para más información, consultar apartado C.1.1).

La infraestructura necesaria para la adquisición de señales mediante EEG se centra en un montaje de electrodos situados en unas posiciones determinadas que vienen marcadas por un gorro con orificios guía. Concretamente consta de 18 electrodos, 16 de ellos destinados a la recogida de la señal (canales), 1 de tierra, y 1 de referencia. Esta disposición seguida viene marcada por el Sistema Internacional 10-20 (explicación con más detalle en la sección C.3). Dichos electrodos están conectados a un amplificador, el cual a su vez, se encuentra conectado a un ordenador mediante un cable USB.

Para intentar minimizar la pérdida de información de las señales objeto de estudio y obtener así la mayor nitidez posible al recoger la actividad cerebral, deben aplicarse unos protocolos de limpieza, montaje y aplicación de geles específicos (ver sección C.4), a fin de reducir todo lo posible la impedancia entre los electrodos y el cuero cabelludo. Así mismo, por parte del sujeto, se requiere concentración para evitar, en cuanto esté en su mano, cualquier tipo de artefacto<sup>1</sup> (ver apartado C.1.3).

Considerando las diferentes características ofrecidas por EEG, se encuentran diversas señales neurofisiológicas (ver apartado C.1.2) que resultan útiles en cuanto a comunicación o control.

Para este proyecto, la señal elegida ha sido, dentro de los fenómenos asociados a algún estímulo sensorial externo (denominados potenciales evocados), la onda P300, descrita inicialmente por *Sutton, et al* [5], es un componente positivo de larga latencia de los potenciales evocados que puede provocarse por estímulos de diferente naturaleza que afecten a distintos sistemas sensoriales (somestésico, visual, auditivo). Recibe su nombre por su polaridad positiva y porque su pico o meseta se encuentra en torno a los 300 milisegundos en sujetos adultos jóvenes tras la aparición de un estímulo esperado en una secuencia de estímulos aleatorios. Sin embargo, dicha latencia al pico máximo puede variar, según factores como: la edad del sujeto, la complejidad del paradigma empleado y de la vía sensorial.

Esta onda se obtiene a partir de paradigmas que combinan estímulos aleatorios: estímulos frecuentes e infrecuentes. El sujeto debe atender exclusivamente a la presentación del estímulo infrecuente, estímulo diana o blanca y contar el número total de veces en que este estímulo aparece.

En este caso, el sujeto seleccionado es un adulto joven y el paradigma utilizado es un paradigma de estimulación visual (ver apartado 2.1.2), el cual combina estímulos luminosos coloridos como estímulos diana y ausencia de estímulo luminoso como estímulo frecuente. En la figura 3.2 se observa un ejemplo de señal P300 obtenida durante la tarea de *screening*.

---

<sup>1</sup>Alteración no deseada en la señal producida por movimientos oculares, musculares...

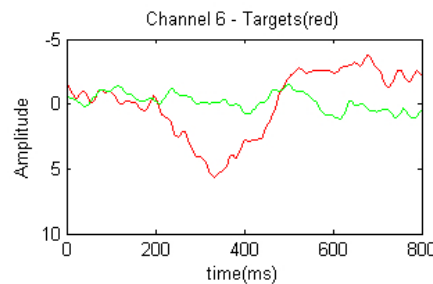


Figura 3.2: Representación visual de un potencial P300

Este fenómeno neurológico será utilizado como base en la interacción para el sistema BCI.

Para más información, como se ha ido señalando a lo largo del apartado, consultar el Anexo C, en el cual se amplía la información sobre tecnologías BCI (adquisición, señales neurológicas y artefactos), infraestructura, sistema 10-20 y protocolo de montaje y limpieza.

### 3.2.2. Adquisición de datos

Como cualquier sistema de comunicación o control, los sistemas BCI tienen una entrada, como por ejemplo, la actividad electrofisiológica del usuario, una salida (determinados comandos para un dispositivo), componentes que traducen la entrada en la salida, y un protocolo que determina el onset, offset y tiempo de operación [6].

En este proyecto, para la realización de la adquisición de datos ha sido empleado un entorno de código abierto, BCI2000[7].

BCI2000 es un sistema basado en eventos, compuesto por tres módulos principales: adquisición, procesado y aplicación, comunicados entre sí por TCP/IP. El *módulo de adquisición* se encarga de la adquisición de la señal cerebral que llega a los electrodos tras ser amplificada. El *módulo de procesado* recibe esa señal y la procesa en busca de un patrón neurológico concreto (en este proyecto, la señal P300). Y el *módulo de aplicación* se encarga de enviar a la interfaz los estímulos a visualizar que tratan de provocar en el usuario el potencial evocado P300. Y un módulo adicional que se encarga de la sincronización entre los anteriores.

Así mismo, para conseguir un buen rendimiento del sistema, es necesario el uso correcto de métodos de aprendizaje. En este caso, la aplicación elegida ha sido P300GUI, script de Matlab que cuenta con un clasificador lineal.

La herramienta P300GUI adapta el sistema a un sujeto particular, algo esencial ya que cada persona tiene una actividad cerebral distinta, y por tanto, un potencial P300 distinto ante los estímulos.

Antes de la realización de experimentos en tiempo real (los denominados experimentos *online*), es necesario el entrenamiento del sistema recogiendo datos de la actividad cerebral de un sujeto en concreto (experimentos *offline*). Posteriormente se aplica una clasificación lineal de esos datos mediante el método estadístico SWLDA<sup>2</sup>, generando una matriz de pesos, parámetro de entrada de BCI2000, que determina la importancia relativa de cada canal, al determinar la selección deseada del sujeto, determinando el rendimiento del sistema. Se habla de un sistema entrenado o calibrado y listo para la realización de experimentos *online* una vez introducida la matriz de pesos en BCI2000 para un sujeto concreto, siempre y cuando haya sido entrenado correctamente.

Si se desea más información, puede consultarse el apartado C.5, donde se realiza una descripción más detallada de ambas herramientas.

### 3.2.3. Modificaciones necesarias

Al realizar la integración con la plataforma BCI2000, se introducen los targets (figura 3.3), empleados para dar *feedback* al usuario acerca de la selección vaticinada por el clasificador a partir del estudio de su intención de movimiento.



Figura 3.3: Targets

### 3.2.4. Comunicación

En este caso como entidad cliente se encuentra la plataforma BCI2000 y como entidad servidor la interfaz gráfica. La decisión de que la interfaz gráfica sea el servidor se debe a que la aplicación debe mantener una gestión de eventos continua y asíncrona.

Una vez establecida la conexión, desde la plataforma BCI2000 se envía a la interfaz gráfica el estímulo a mostrar en cada instante, (un número del 0 al 9 para estimulación, siendo el 0 el correspondiente a la no estimulación y del 1 al 9 cada uno de los posibles planos). Además, una vez que se ha determinado la posición deseada por el usuario, se envía a la interfaz un carácter (explicada su correspondencia en la figura 5.2) para indicar el cubo seleccionado, el target. Para iniciar la estimulación, tanto al inicio como entre secuencias, es necesario el envío de un 0. De esta manera se muestra en primera instancia el mallado así como se indica al usuario el comienzo de la estimulación.

<sup>2</sup>StepWise Linear Discriminant Analysis

### 3.3. Integración GUI-ROBOT

En esta sección se describe el sistema robótico (apartado 3.3.1), las limitaciones que presenta (apartado 3.3.2) y por último, su comunicación con la interfaz gráfica (apartado 3.3.3).

#### 3.3.1. Sistema robótico. Infraestructura

Un robot sin software no tiene vida, no puede actuar ni percibir. Por ello la informática está tan ligada a la robótica, ya que dota a los robots de la capacidad de actuar coherentemente con los datos recibidos.

Entre 2001 y 2006, la empresa suiza Neuro-nics, gracias a las continuas investigaciones y al desarrollo, así como a la producción y a la comercialización realizó el lanzamiento de la serie de productos Katana 100, 200, 300 y 400.

En concreto en este proyecto, el modelo usado ha sido el Katana 300 (figura 3.4).



Figura 3.4: Brazo robótico utilizado

El sistema de ejes de coordenadas en el robot está dispuesto como puede apreciarse en la figura 3.5 (a). En concreto, los ejes para la base del robot en cuestión, pueden verse en la figura 3.5 (b).

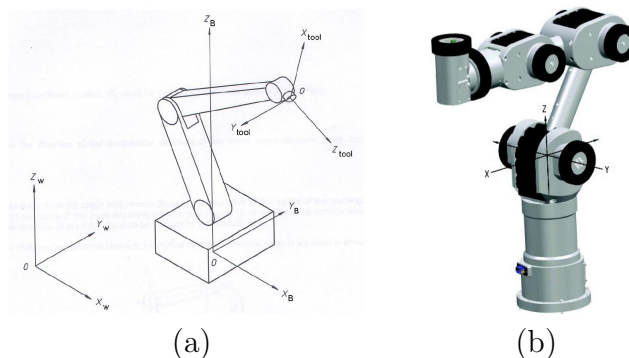


Figura 3.5: Sistema de coordenadas del robot

Incorporando el sistema robótico a la interfaz desarrollada, el posicionamiento completo en la escena quede definido en la figura 3.6.

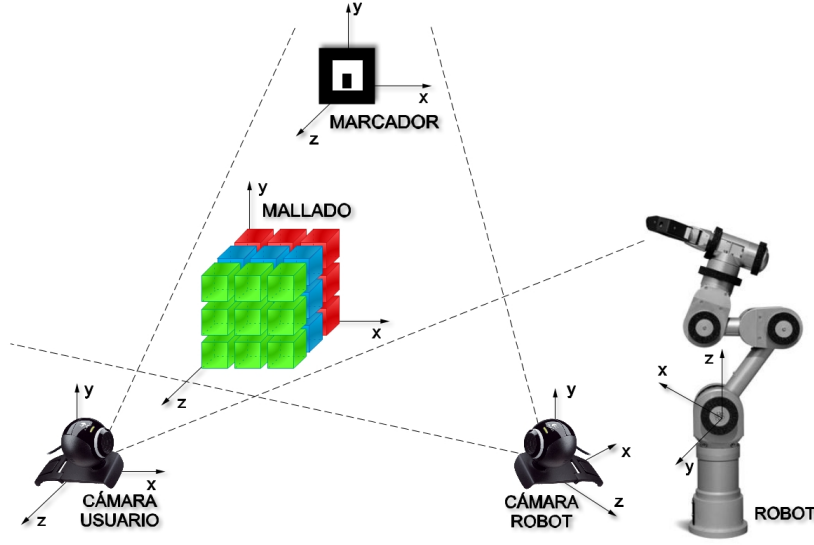


Figura 3.6: Posicionamiento en la escena

### 3.3.2. Limitaciones impuestas

El robot presenta dos limitaciones al integrarlo junto con la interfaz, la situación de su origen de coordenadas, y el espacio de trabajo con el que cuenta al encontrarse situado en una posición fija.

#### Origen de coordenadas

Debido a que no se puede acceder al origen de coordenadas (0,0,0) del robot por encontrarse dentro de su cilindro central, surge la necesidad de una nueva transformación, de la cámara 2 en el robot:  ${}^R\mathbf{H}_{C2}$

Dicha matriz de transformación es fija, obtenida realizando una traslación (expresado en milímetros)

$${}^R\mathbf{H}_{C2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 120,0 \\ 0 & 1 & 0 & 0,0 \\ 0 & 0 & 1 & -45,0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

y una rotación mediante ángulos Euler, concretamente en este caso, se usa la convención “ZXZ”: La transformación buscada del sistema del espacio al brazo robótico puede lograrse a través de la matriz de transformación R, donde los ángulos de Euler  $\phi$ ,  $\theta$  y  $\psi$  especifican la orientación de un sistema de referencia de ejes ortogonales, normalmente móvil (la cámara), respecto a otro sistema de referencia de ejes ortogonales normalmente fijos (el robot), y por tanto actúan como tres coordenadas generalizadas.

$$\begin{aligned}
 R(\phi, \theta, \psi) &= \\
 &= Rot(\mathbf{z}, \phi) \cdot Rot(\mathbf{x}, \theta) * Rot(\mathbf{z}, \psi) = \\
 &= \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi & 0 & 0 \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \\
 &= \begin{bmatrix} \cos \phi \cos \psi - \sin \phi \cos \theta \sin \psi & -\cos \phi \sin \psi - \sin \phi \cos \theta \sin \psi & \sin \phi \sin \theta & 0 \\ \sin \phi \cos \psi + \cos \phi \cos \theta \sin \psi & -\sin \phi \sin \psi + \cos \phi \cos \theta \cos \psi & -\cos \phi \sin \theta & 0 \\ \sin \theta \sin \psi & \sin \theta \cos \psi & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Quedando  ${}^R\mathbf{H}_{C2}$  de la siguiente forma:

$${}^R\mathbf{H}_{C2} = {}^R\mathbf{H}_{C2} \cdot R(\phi, \theta, \psi)$$

De este modo, la transformación desde el eje de coordenadas del robot hacia el eje de coordenadas del mallado resulta:

$${}^R\mathbf{H}_G = {}^R\mathbf{H}_{C2} \cdot {}^{C2}\mathbf{H}_G$$

Quedando el grafo de transformación como muestra la figura 3.7, y el esquema completo de las transformaciones como muestra la figura 3.8

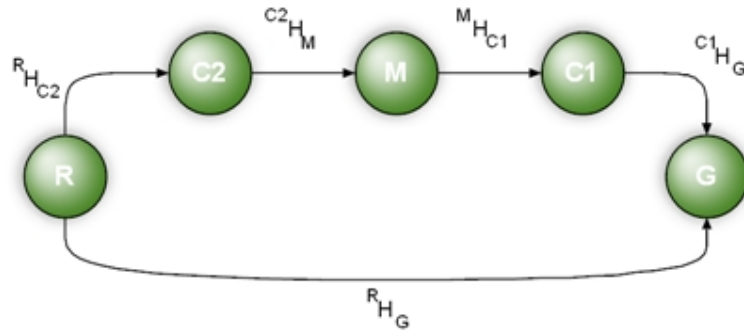


Figura 3.7: Gráfico completo de transformación

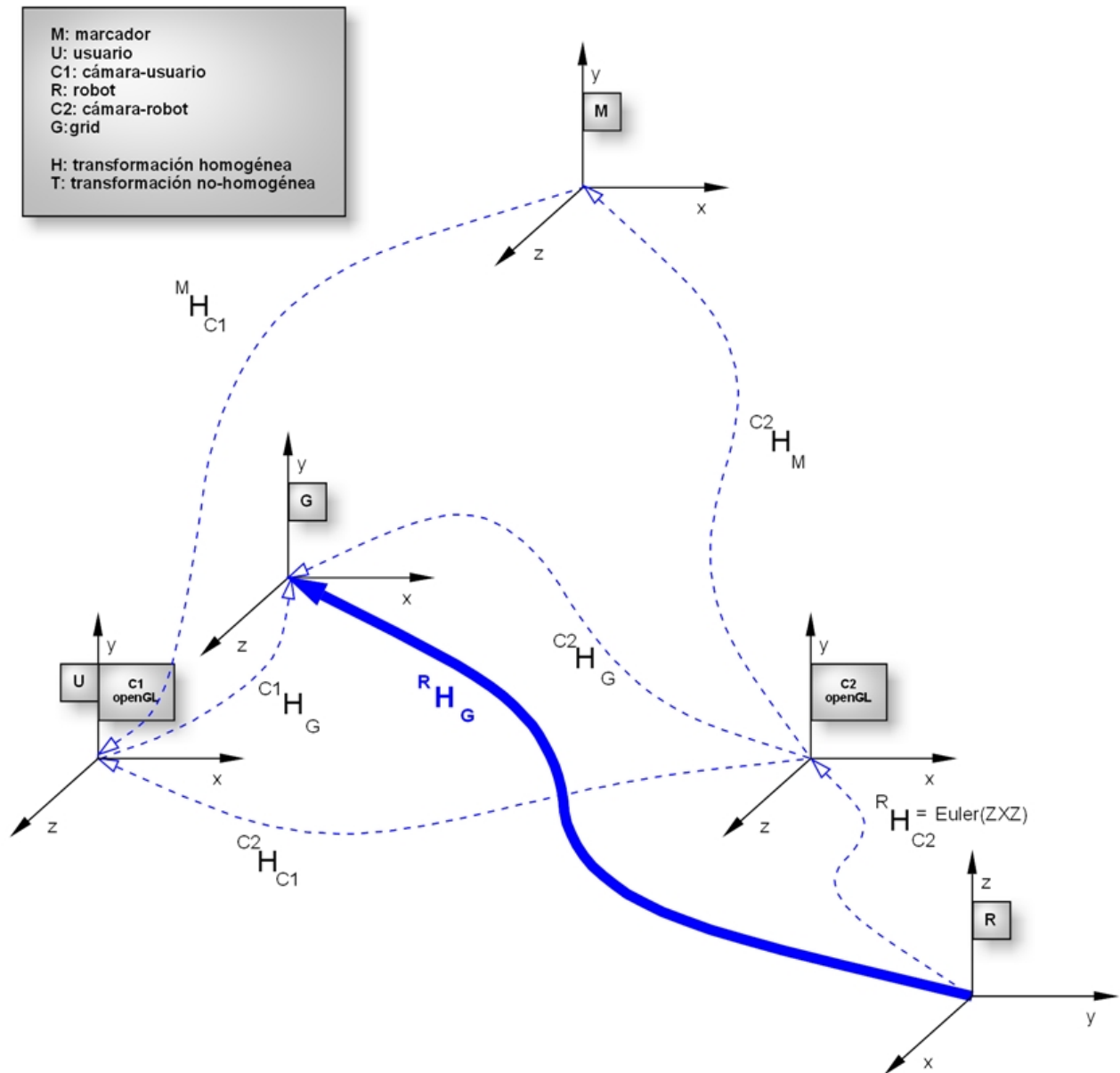


Figura 3.8: Esquema de transformaciones completo

### Espacio de trabajo

El robot tiene una posición fija, al tratarse de un brazo robótico industrial. Esto hace que existan posiciones inalcanzables por su propia estructura. Teniendo en cuenta dichas limitaciones, se calculan las posiciones alcanzables y no alcanzables para el robot. Los límites establecidos para el robot pueden verse en la siguiente tabla:

$z$	$r_{min}$	$r_{max}$
-100	110	630
-50	110	640
0	160	640
50	160	640
100	170	630
150	180	620
200	180	610
250	170	590
300	160	560
350	160	530
400	300	500
450	250	450

A cada distancia en el eje  $z$ , le corresponde un radio mínimo y un radio máximo de alcance de acuerdo a la expresión:

$$\text{radio } (r) = \sqrt{x^2 + y^2}$$

Para valores de  $z$  entre dos de los valores de la tabla, para el límite superior se elige el máximo de los radios mínimos y para el límite inferior, se elige el mínimo de los radios máximos.

Tabla 3.1: Límites del robot

Esto traducido para el usuario se realiza mostrando en pantalla aquellas posiciones accesibles con el setup establecido en cuanto a la posición del usuario respecto al robot, y aquellas posiciones no accesibles no se muestran, además del mensaje **WARNING**; un ejemplo de esto puede verse en la figura 3.9, donde no aparecen las posiciones inferiores del mallado por encontrarse fuera del espacio del trabajo del robot.

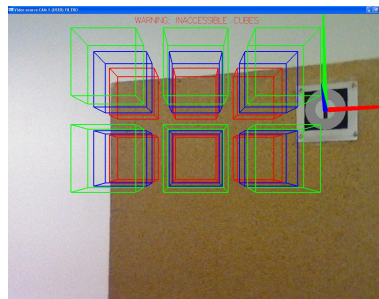


Figura 3.9: Mensaje de información: Existen cubos inalcanzables

#### 3.3.3. Comunicación

El sistema de control del robot se encuentra en un entorno Linux en un ordenador portátil al que se conecta la interfaz gráfica mediante el protocolo TCP/IP.

Una vez establecida la conexión, la interfaz envía posiciones en tres coordenadas ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) al ordenador portátil. Ese portátil, conectado al robot por puerto serie, le ordena el movimiento a realizar. En la figura 3.10 puede verse un esquema que refleja dicha comunicación.

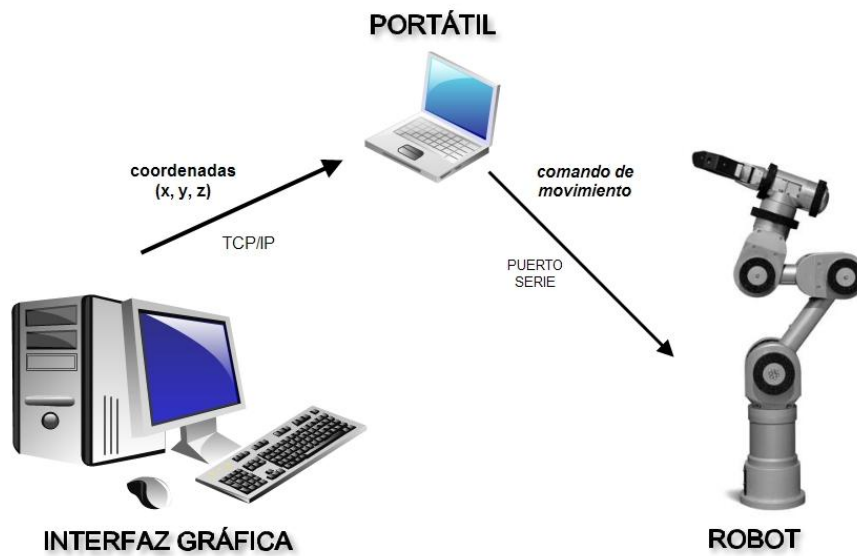


Figura 3.10: Sincronización

## 4. Validación

---

*«No amount of experimentation can ever prove me right; a single experiment can prove me wrong.»*

Albert Einstein

En este capítulo se citan todas aquellas pruebas realizadas para conseguir una completa validación de la interfaz y el sistema de posicionamiento en la escena. La descripción completa de las mismas, así como las gráficas de resultados se encuentran en el anexo E.

### 4.1. Evaluación de la precisión en la estimación de la posición

Esta batería de pruebas está destinada a la comprobación de la estabilidad frente al movimiento de las cámaras por parte del sistema desarrollado.

#### 4.1.1. Pruebas aisladas

Las pruebas realizadas son de tres tipos:

- **Estática:** realizadas a distancias cortas y a distancias largas.
- **En movimiento:** movimientos horizontales y verticales.
- **Referentes al marcador:** presencia y ausencia del mismo.

Dichas pruebas se realizan tanto para marcadores grandes (197 mm) como para marcadores pequeños (80 mm).

Las conclusiones extraídas de las pruebas realizadas, llevan a establecer la configuración más estable del sistema en torno a las siguientes características de los elementos: marcador grande (197 mm) y situado a una distancia cercana.

Estas características determinadas se ven modificadas al introducir en el espacio de trabajo, formado hasta el momento por las cámaras y el marcador, el sistema robótico. Al existir la necesidad de visualización del marcador en todo momento para poder posicionar unos elementos en función de otros, éste debe ser pequeño para así disponer de un mayor margen de maniobra pensando en los movimientos del robot y de los posibles movimientos de la cámara del usuario.

#### 4.1.2. Prueba de larga duración

Se realiza también una prueba de larga duración, cuya finalidad es comprobar el correcto funcionamiento de la aplicación en presencia de marcador y en su ausencia, comprobar la correspondencia entre el movimiento de la cámara y el movimiento del mallado y comprobar la corrección de los cálculos de las transformaciones. Además, se quiere ver si la aplicación es estable el suficiente tiempo como para realizar un experimento BCI sin sufrir alteraciones sin causa aparente.

#### 4.1.3. Modificaciones posteriores

Tras las pruebas realizadas se acusa la inestabilidad por vibración y ruido introducido del sistema según la separación entre cámara y marcador lo que imposibilita su utilización con usuarios. Por tanto, se implementa un filtro de media con el objetivo de mitigar en la medida de lo posible dichas vibraciones. El fundamento de dicho filtro radica en el establecimiento de un buffer donde ir almacenando las transformaciones proporcionadas por **ARToolKit** al detectar el marcador, para una vez completo dicho buffer, realizar la media de las transformaciones almacenadas y obtener una “suavizada”.

El esquema seguido para el diseño del filtro de media se muestra en la figura 4.1.

La determinación de su verdadera utilidad se realiza tanto visualmente introduciendo los cambios pertinentes en la interfaz y observando la diferencia en cuanto a ruido en la imagen alternando instantes con filtro y sin filtro; como matemáticamente comparando ejecuciones con filtro y sin éste en una misma gráfica.

En la figura 4.2 puede verse como realmente el filtro suaviza la evolución de las transformaciones, traduciéndose esto en ejecución en una vibración mucho menor.

Además, una vez comprobada la utilidad del filtro implementado se realizan varias pruebas variando el tamaño del buffer, con valores significativos, aumentando la distancia progresivamente. Las gráficas obtenidas de los resultados de estas pruebas se encuentran en el apartado E.5.

Los mejores resultados obtenidos son para los valores intermedios de buffer, aquellos más cercanos a la tasa de refresco de las cámaras en torno a los 30fps.

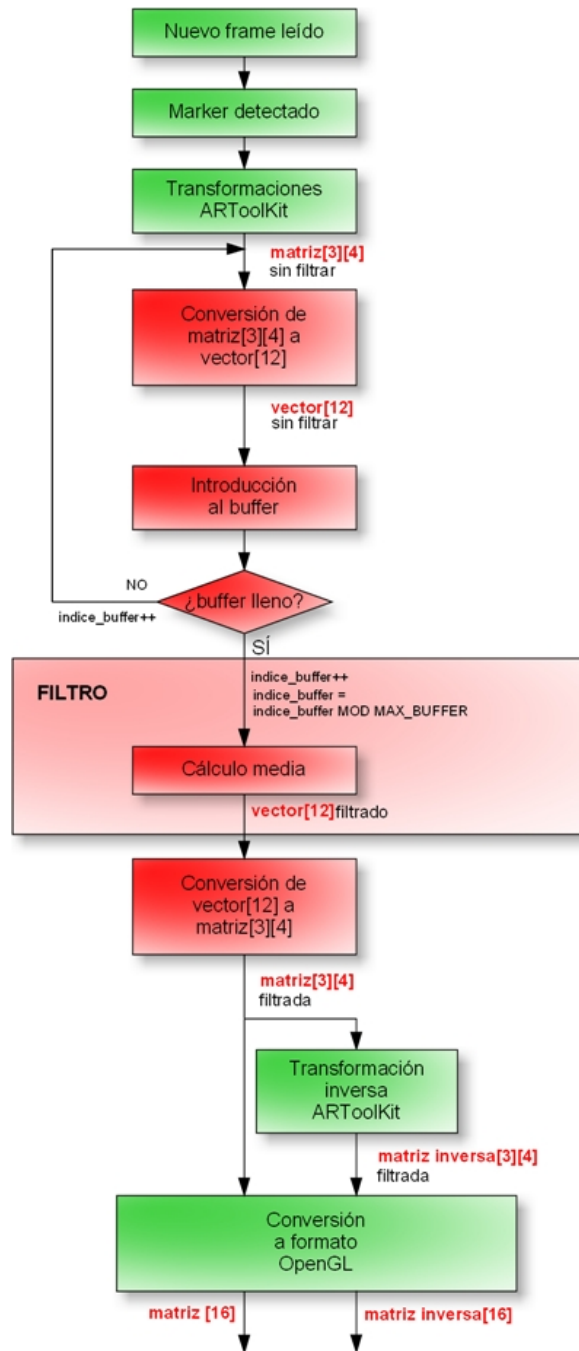


Figura 4.1: Esquema general del filtro de media realizado. Las partes coloreadas en verde corresponden a utilización de funciones directamente de una librería y las partes en rojo corresponden a la implementación propia.

## 4. Validación

### 4.1 Evaluación de la precisión en la estimación de la posición

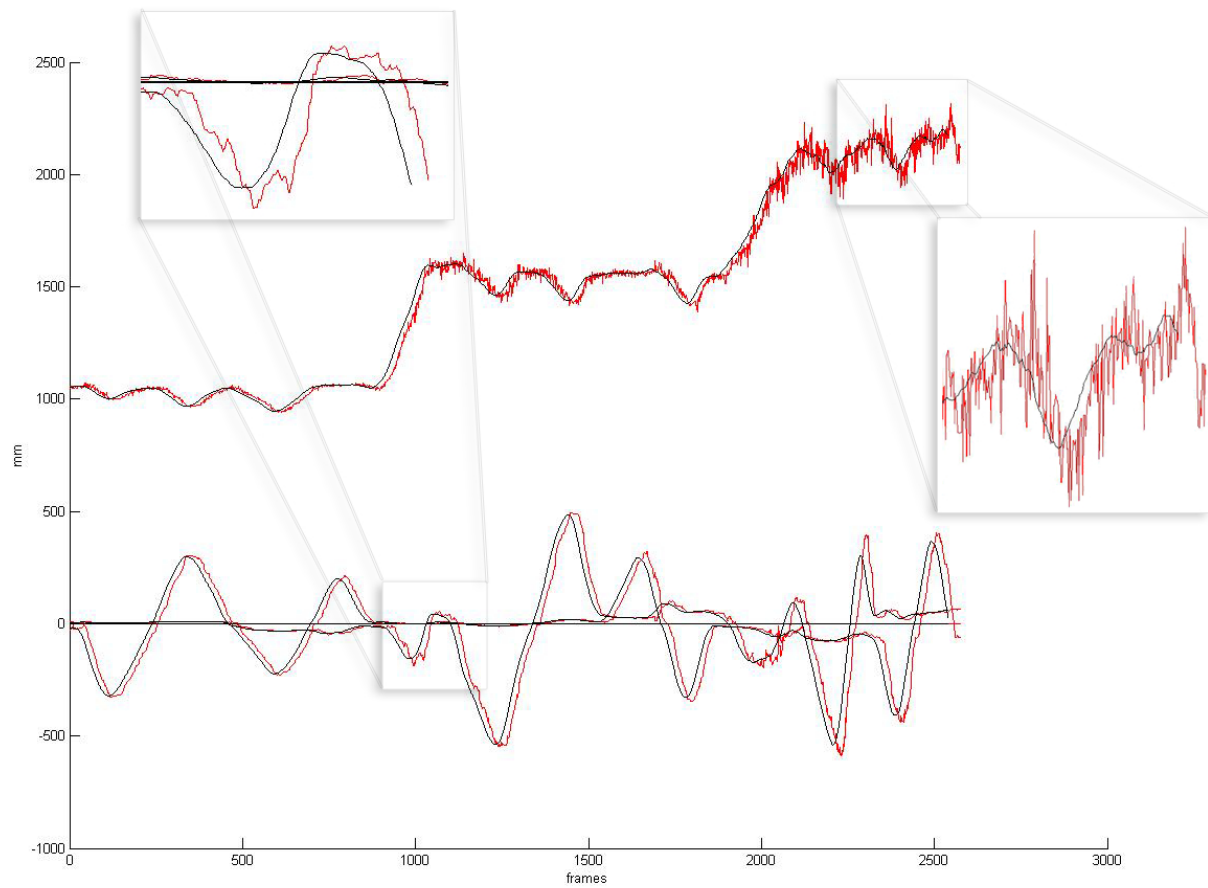


Figura 4.2: Comparación de resultados obtenidos para el caso de ejecución sin filtro y ejecución aplicando el filtro implementado de media.

## 5. Métodos de experimentación

---

En este capítulo, se realiza una puesta en escena en cuanto a experimentos a modo de introducción (sección 5.1), en la sección 5.2 se describe la validación realizada sobre la integración de la interfaz hombre-máquina, en la sección 5.3 se detalla la validación de la integración con el sistema robótico. Y por último en la sección 5.4, se detalla la integración total de la aplicación y los problemas encontrados en la misma.

### 5.1. Introducción

Para la detección de un patrón EEG asociado a una tarea cognitiva o mental, la ubicación de los electrodos es fundamental. Una configuración mal escogida no podrá registrar una actividad cerebral relacionada. Además, las investigaciones demuestran que ciertas tareas cognitivas o mentales están localizadas, y sugieren configuraciones que implican que los electrodos estén en posiciones adecuadas para su monitoreo.

Por todo ello, se ha seguido el Sistema Internacional 10-20, un estándar para describir y aplicar la ubicación y nombrado de los electrodos en el cuero cabelludo en el contexto de un experimento de EEG. (Para más información, consultar el apartado C.3).

En este proyecto se utilizan, concretamente, 18 electrodos, 16 electrodos para la adquisición de la señal, 1 electrodo de referencia y 1 electrodo de tierra. En la figura 5.1, pueden verse en color rojo las posiciones de los electrodos utilizados, en color amarillo, la posición del electrodo de tierra y en color azul, la posición del electrodo de referencia situado en el lóbulo de la oreja izquierda (o derecha, según cómo se establezca) del sujeto.

En la misma figura se muestra la correspondencia entre las posiciones de los electrodos y los canales en la herramienta BCI2000.

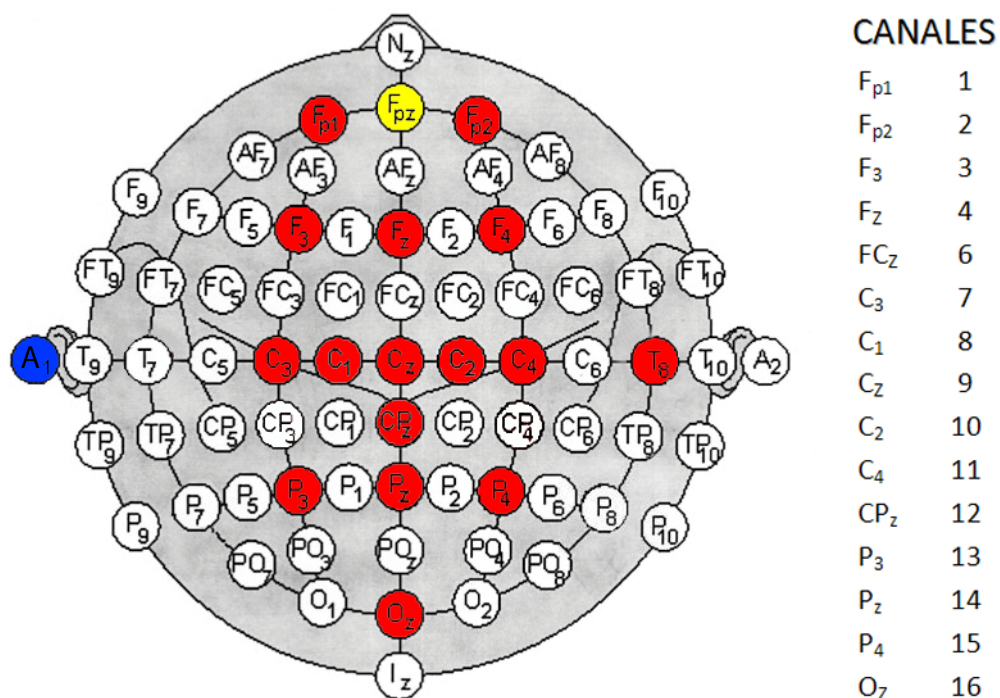


Figura 5.1: Montaje realizado en este proyecto. Las posiciones coloreadas en rojo corresponden a los 16 electrodos, la posición coloreada en amarillo corresponde al electrodo de tierra y la posición coloreada en azul al electrodo de referencia.

Además, para facilitar la tarea de control, el nombrado de los distintos estímulos sigue la disposición presentada en la figura 5.2.



La correspondencia establecida en cuanto a nomenclatura entre BCI2000 y la interfaz gráfica es como sigue, el color verde en el teclado representa los cubos situados en las posiciones más cercanas (plano xy - 1), el color azul, los cubos situados a media distancia (plano xy - 2) y el color rojo para los situados en las posiciones más lejanas (plano xy - 3).

Figura 5.2: Correspondencia de nomenclaturas entre BCI2000 y la interfaz gráfica.

## 5.2. Validación de la interfaz hombre-máquina

La prueba a realizar para la validación de este conjunto, para validar la correcta integración, es la tarea de *screening*, el estudio de la respuesta P300 ante la interfaz gráfica. En dicha tarea el usuario debe prestar atención a una secuencia de estímulos (9 tipos de estímulos diferentes, planos luminosos) presentados cíclicamente, con el fin de contabilizar la iluminación de cada una de las posiciones predefinidas durante aproximadamente 8 minutos. El tiempo entre estímulos 300 ms, la duración del estímulo visual 300 ms, y el tiempo entre secuencias 4s. En cada ejecución debe contabilizar un total de 30 apariciones para la posición determinada. Una imagen tomada durante la sesión de *screening* puede verse en la figura 5.3.

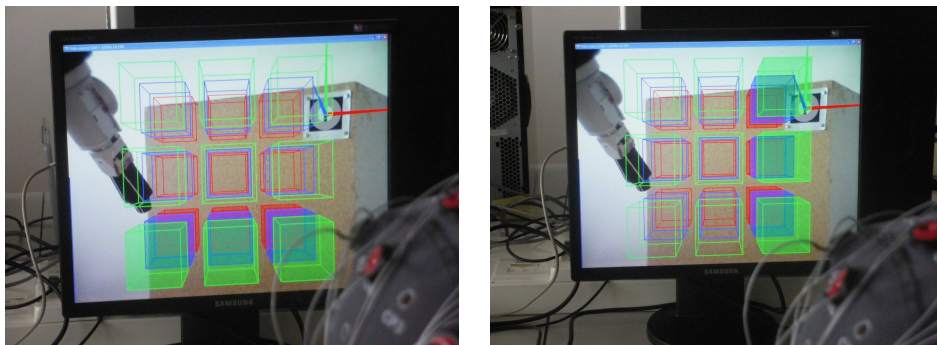


Figura 5.3: Imagen de la sesión de screening realizada

Los resultados de la realización de esta primera tarea en cuanto a obtención de P300 son satisfactorios y se explican a continuación.

En la figura 5.4(a) se muestra la actividad cerebral en los distintos canales, representándose los 16 canales en el eje de las ordenadas y el tiempo transcurrido en el eje de las abscisas. Supone una visualización gráfica del cálculo de la medida  $r^{21}$  por cada canal. En este caso concreto, los canales 4, 6, 9 y 10 presentan los valores más altos a una latencia de 300ms. En la figura 5.4(b), puede verse el mapa topográfico de la distribución de los valores  $r^2$  sobre la superficie de la cabeza a aproximadamente 300ms. En el lóbulo frontal es el área con mayor valor para  $r^2$  a esa latencia.

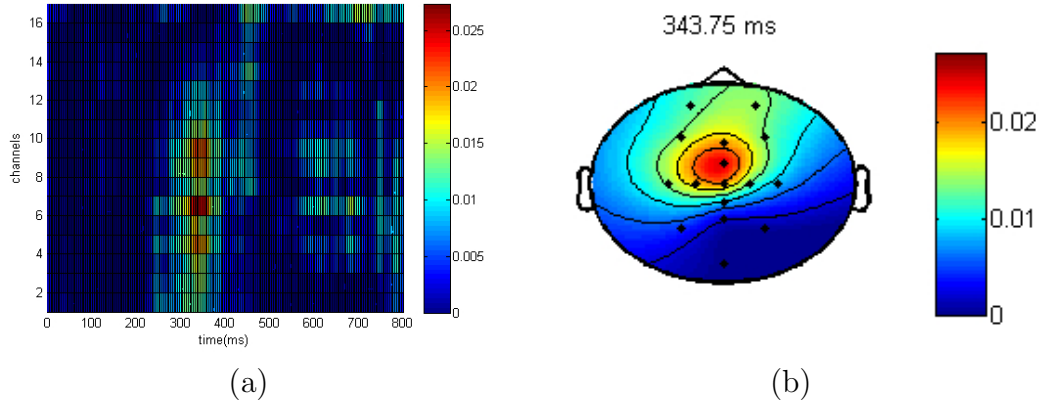


Figura 5.4: (a) Valores  $r^2$ , en el intervalo de 0 a 800 ms, para cada canal, tras la aparición del estímulo objetivo, mostrados sobre escala cromática, representando los colores cálidos las zonas de mayor actividad cerebral, y los fríos las de menor. (b) Mapa topográfico

En la figura 5.5, en la gráfica superior, se muestra la representación visual del potencial P300. Concretamente, muestra la actividad eléctrica registrada en el electrodo  $FC_z$ , correspondiente al canal 6, cuando no se muestra el estímulo en color verde, y cuando el estímulo aparece en pantalla en color rojo. En la gráfica inferior, se muestra la diferencia de los cuadrados (variación de  $r^2$  de las dos señales anteriores). Se observa un pico importante alrededor de los 300 ms, este pico representa la señal P300. Este promedio observado es el promedio teórico, siendo siempre inferior en la práctica.

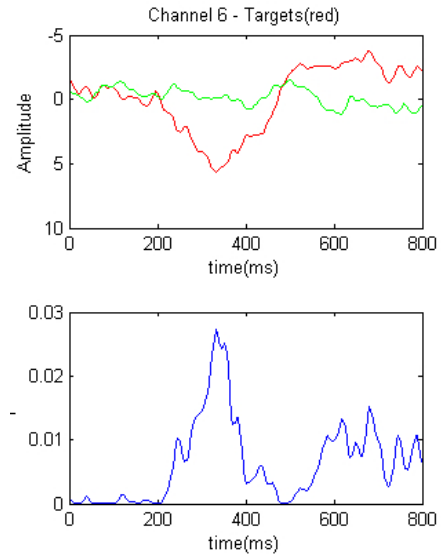


Figura 5.5: Representación visual del potencial P300 y su rendimiento teórico

<sup>1</sup>Métrica para determinar en cada instante temporal el grado de diferencia entre la señal correspondiente al objetivo y la clase no objetivo, en este caso el potencial evocado P300

### 5.3. Validación sistema interfaz gráfica-robot

Para la validación de la integración realizada entre la interfaz gráfica y el sistema robótico se realizan experimentos sin involucrar la parte de BCI2000, con el único propósito de evaluar la posición alcanzada por el robot ante una posición solicitada por la interfaz gráfica.

El *setup* establecido para dicha prueba se presenta en la figura 5.6.



Figura 5.6: Setup establecido para las pruebas de validación con el robot

Hay que señalar que se realizaron dos tipos de pruebas, enviando en ambos las mismas secuencias de coordenadas, pero visualizando ventanas diferentes.

Debido a que la interfaz envía al robot las coordenadas  $x,y,z$  en la cámara 2 transformadas al sistema de coordenadas del robot mediante la transformación obtenida al realizar un calibrado de dicha cámara manualmente, la primera prueba que se realiza para validar la correcta integración de la interfaz y el brazo robótico se realiza observando lo mostrado en la ventana asociada a la cámara 2, sin tomar en consideración la visualización de la ventana del usuario.

La posición inicial del mallado puede verse en la figura 5.7

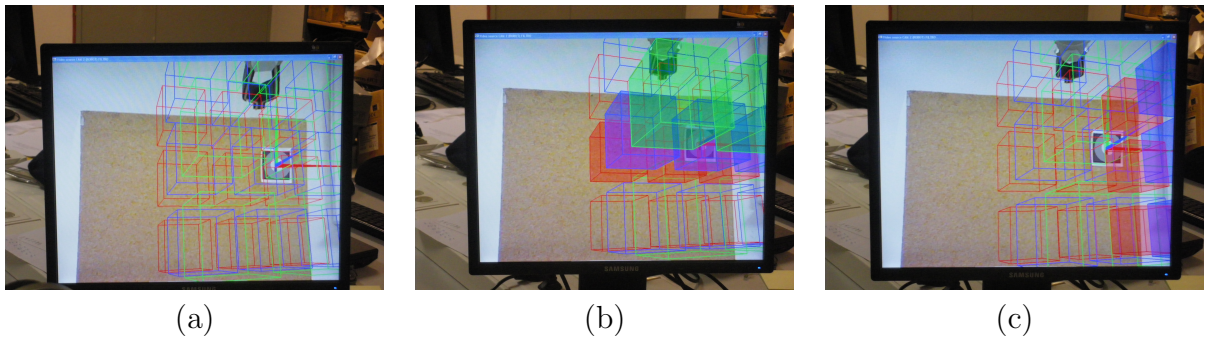


Figura 5.7: Visualización en la cámara 2 (a) Posición inicial que presenta el mallado en esta prueba (b) y (c) Durante la estimulación

En la figura 5.8, se observa la posición del robot para tres cubos distintos:

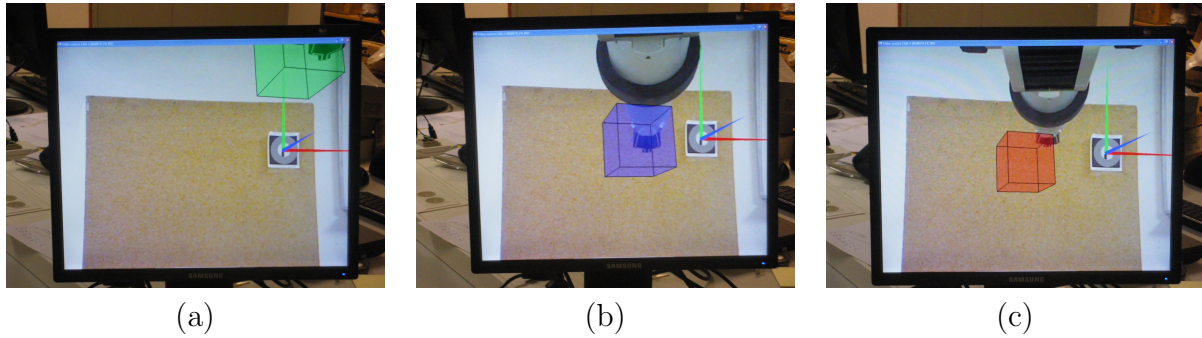


Figura 5.8: Imagen de la sesión de validación entre interfaz y sistema robótico realizada. Ejecución parcialmente correcta

Los resultados observados no son completamente satisfactorios ya que la posición alcanzada por el robot está desplazada respecto al objetivo, el punto central del cubo alcanzado. Este error, como se ha comentado, viene determinado por la calibración manual de dicha cámara.

La segunda prueba realizada se centraba en la pantalla del usuario, figura 5.9:

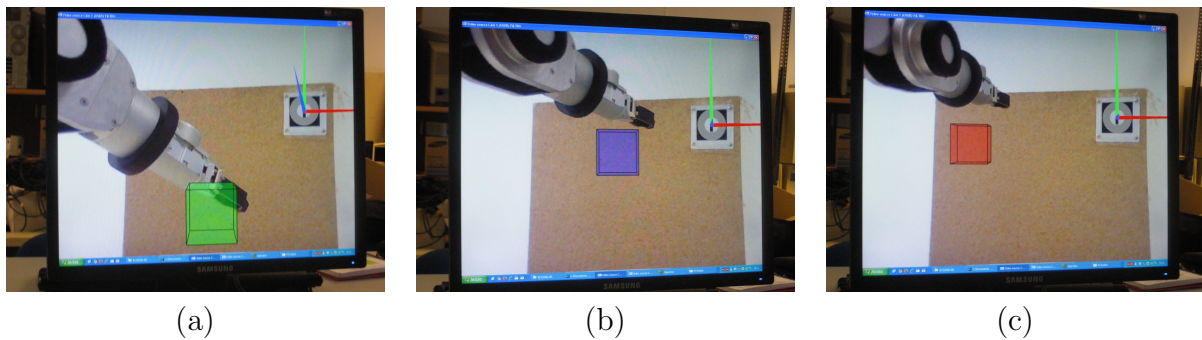


Figura 5.9: Imagen de la sesión de validación entre interfaz y sistema robótico realizada. Ejecución parcialmente correcta

Los resultados obtenidos presentan errores mayores que los observados en la pantalla de la cámara del robot, ya que sumado a la calibración manual realizada, con los errores de precisión que esto puede introducir, aquí influyen también las vibraciones e inestabilidades en cuanto a la posición proporcionada por la herramienta **ARToolKit** por lo que en la pantalla del usuario se observa que la posición alcanzada por el robot se aleja aún más de la posición correcta.

Por tanto, puede concluirse la influencia de los errores de precisión de la calibración manual de la cámara 2 en la visualización en la pantalla asociada a dicha cámara y en la visualización en la pantalla del usuario, se suma este error de precisión al introducido por la herramienta **ARToolKit**.

#### 5.4. Validación del sistema completo

En cuanto a la integración del sistema completo cabe señalar que no se realiza una validación de todo el sistema porque al no conseguir una integración satisfactoria entre la interfaz y el robot por los problemas comentados en el apartado anterior, se considera que el funcionamiento no es el adecuado y deseado para realizar experimentos con usuarios reales.

## 6. Conclusiones y trabajo futuro

---

En este capítulo se resumen las conclusiones y aportaciones de este Proyecto Fin de Carrera, destacándose tanto las características del sistema desarrollado como todo el proceso de diseño y evaluación que ha permitido llegar hasta él.

### 6.1. Conclusiones

*«The line between failure and success is so fine that we scarcely know when we pass it: so fine that we are often on the line and do not know it.»*  
Elbert Hubbard

En este Proyecto Fin de Carrera, se ha realizado una interfaz gráfica mediante la cual un usuario, eligiendo mentalmente, y siguiendo una metodología concreta, una de las posiciones que se le ofrecen, y tras un tratamiento de las señales cerebrales obtenidas de dicha elección, es capaz de mover un brazo robótico a la posición deseada. Se ha diseñado e implementado un paradigma de estimulación visual capaz de provocar en el usuario la señal P300, señal necesaria en este tipo de experimentos. El paradigma diseñado es útil para el estudio de la onda P300, dada la constancia con que se aprecian los parámetros y morfología de este potencial y ha servido para la consecución de lo planteado al inicio del desarrollo de la aplicación, el movimiento de un brazo robótico con actividad mental.

En este Proyecto Fin de Carrera se han cumplido en gran medida los objetivos propuestos. Sin embargo hay aspectos para los que no se ha conseguido una solución en los plazos marcados. A continuación se describen estos problemas y posibles soluciones en los mismos: (i) una pobre calibración entre la cámara asociada al robot y el propio robot, proponiendo como solución una calibración mediante trayectoria conocida; (ii) ruido incremental con la distancia por parte de **ARToolKit**, con la solución de implementar un filtro de mediana para mitigar las vibraciones ya que proporciona un valor real presente y no un promedio; o, sustituir la herramienta utilizada por otra que, sin necesidad de ser modificada internamente de soporte a dos flujos de vídeo. Estos problemas encontrados, al tratarse de puntos sin abordar a nivel técnico, han impedido la completa consecución del proyecto ya que no se puede seguir adelante al no disponer de una configuración estable y correcta sobre la que realizar los experimentos de BCI en sujetos reales.

## 6.2. Trabajo futuro

*«Predictions is very difficult, especially about the future.»*

Niels Bohr

Hay varias ideas y mejoras que se podrían aplicar a este proyecto con respecto a funcionalidad y soporte.

Posibles líneas de trabajo futuro:

- Para aumentar la robustez del sistema, reforzar el cálculo de la posición de la cámara ante oclusiones parciales de un marcador, ya que hasta el momento, o la cámara dispone de la visualización completa del mismo o el marcador no puede ser identificado correctamente, y por tanto no se puede calcular de nuevo su posición y orientación.
- Reconocimiento de objetos 3D como posibles posiciones para ofertar al usuario en lugar de las prefijadas en el mallado. Ampliar la posibilidad de selección no sólo a posiciones en el espacio sino a objetos detectados en el campo de visión del usuario.
- Incorporación de unas gafas de RA (justificado el porqué prevalecen sobre las de RV - ver anexo B -) para proyectar sobre ellas la interfaz diseñada; en un intento de asemejar lo máximo posible la situación a la situación real. En este proyecto fin de carrera no se usaron por no encontrar en el mercado en el momento deseado, un modelo que cumpliera con todas las expectativas deseadas. (había un modelo que se ajustaba muy bien pero en el momento de tomar una decisión acerca del uso o no de este dispositivo no había salido al mercado. A día de hoy dicho modelo ya se encuentra en el mercado pero excede el presupuesto disponible).



# Bibliografía

---

- [1] I. Iturrate, J.M. Antelis, A. Kübler, J. Mínguez. A Noninvasive Brain-Actuated Wheelchair Based on a P300 Neurophysiological Protocol and Automated Navigation. *IEEE Transactions on Robotics*, 25(3):614–627, June 2009.
- [2] C. Escolano, J. Antelis, and J. Minguez. Human-Brain Teleoperated Robot between Remote Places. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2009.
- [3] G.R. Müller-Putz, R. Scherer, G. Pfurtscheller, C. Neuper, R. Rupp. Non-Invasive Control of Neuroprostheses for the Upper Extremity: Temporal Coding of Brain Patterns. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, pages 3353–3356, September 2009.
- [4] J. D. Tardós. *Localización espacial*. Sistemas de percepción y robótica. Máster en Ingeniería de Sistemas e Informática. Centro Politécnico Superior. Universidad de Zaragoza, 2008.
- [5] S. Sutton, M. Braren, J. Zubin, E.R. John. Evoked-Potential Correlates of Stimulus Uncertainty. *Science*, 150(3700):1187–1188, 26 November 1965.
- [6] J.R. Wolpaw, N. Birbaumer, D.J. McFarland, G. Pfurtscheller, T.M. Vaughan. Brain-Computer Interfaces for communication and control. *Clinical Neurophysiology*, 113:767–791, 2 March 2002.
- [7] G. Shalk, D.J. McFarland, T. Hinterberger, N. Birbaumer, J.R. Wolpaw. BCI2000: A General-Purpose Brain-Computer Interface (BCI) System. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 51(6):1034–1043, May 2004.
- [8] S.R. Benbadis D. Rielo. EEG Atlas: EEG Artifacts. *Neurology in eMedicine*, Electroencephalography Atlas:1–13, 2006. Update Mar 8, 2010.
- [9] E. Niedermeyer, F. Lopes da Silva. *Electroencephalography: Basic Principles, Clinical Applications, and Related Fields*. Lippincott Williams and Wilkins, 5 edition, 2005.
- [10] BCI2000 workshop. The 10-20 International System. Albany, NY, June 2005.

- [11] R. Hartley A. Zisserman. *Multiple View Geometry in Computer Vision*, volume 1. Cambridge University Press, 2 edition, 2003.
- [12] H. Kato et al. *Augmented Reality Toolkit*. Human Interface Technology Laboratory, 2004. <http://artoolkit.sourceforge.net/>.
- [13] C. González Morcillo. *S.1.2. Introducción a ARToolKit*. Realidad Aumentada. Escuela Superior de Informática. Universidad de Castilla-La Mancha, Noviembre 2010.