

Trabajo Fin de Grado

Mejora de un modelo de representación de materiales
para su uso en edición intuitiva de apariencia

Improvement of a material representation model for
intuitive appearance editing

Autor/es

Sandra Malpica Mallo

Director/es

Belén Masiá Corcoy
Ana Serrano Pacheu

Universidad de Zaragoza / Escuela de Ingeniería y arquitectura
2017

DECLARACIÓN DE
AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D^a. Sandra Malpica Mallo

con nº de DNI 72895299L en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)
Grado de Ingeniería Informática, (Título del Trabajo)

Mejora de un modelo de representación de materiales para su uso en edición intuitiva de apariencia

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 21 de abril de 2017

Fdo: Sandra Malpica Mallo

Resumen

En informática gráfica, un aspecto crucial es la apariencia de los materiales presentes en una escena. Dicha apariencia depende de cómo interacciona cada material con la luz (cuánta luz refleja, en qué direcciones, etc.). Esta interacción es compleja y ha de ser representada matemáticamente para poder simularla en el ordenador. Para ello, a lo largo de los años se han creado distintas representaciones, ya sea midiendo directamente los materiales reales o simulando su comportamiento de forma analítica. Cada representación tiene sus ventajas e inconvenientes. Por ejemplo: los modelos de representación basados en la medición de materiales reales son más fieles a la realidad pero más costosos en general computacionalmente y en su adquisición, mientras que los modelos analíticos son más compactos pero pueden fallar a la hora de representar un material real, tanto en su apariencia visual como en sus propiedades físicas. Además de las distintas representaciones, es interesante la posibilidad de editar los materiales ya existentes para crear materiales nuevos, y poder hacerlo de una forma intuitiva, de tal manera que un usuario sin conocimientos de alto nivel en una representación en concreto sea capaz de editar la apariencia de un material en poco tiempo y con poco esfuerzo.

Este trabajo se centra en la mejora de una representación que permite almacenar de forma compacta la medición real de un material y en un modelo que permite la edición de la apariencia de un material de forma intuitiva para el usuario, centrándose en su capacidad para representar de forma correcta un rango de diferentes tipos de materiales y aumentándola.

Para poder alcanzar este objetivo, se debe comprender a qué se deben las limitaciones actuales y crear una representación que las supere. Después la nueva representación tiene que poder ser integrada en el modelo de edición. Tras probar que es capaz de sobrepasar dichas limitaciones, la nueva representación debe ser integrada con el marco anterior mediante una nueva técnica de navegación entre distintas representaciones de materiales.

Un punto crucial de este salto de una representación a otra es el punto en el que debe ser realizado. Para hallarlo se crea una medida que depende de las características del material y que permite definir una frontera común entre ambas representaciones.

Finalmente, una vez se ha mejorado el rango de materiales que pueden ser editados se trabaja en la integración de la representación en un marco intuitivo y de fácil uso para los usuarios. De esta forma se consiguen aunar varios aspectos clave presentes en la edición de materiales: una interfaz sencilla y fácil de usar, un método de edición intuitivo y funcional para una amplia variedad de materiales y una representación compacta y de buena calidad para dichos materiales.

Agradecimientos

Este proyecto se ha desarrollado en el *Graphics and Imaging Lab* de la Universidad de Zaragoza. Quisiera agradecer a todos sus miembros el haberme hecho sentir como en casa y toda la ayuda que me han prestado durante los meses en los que he podido trabajar con ellos.

Me gustaría darle las gracias especialmente a Diego Gutiérrez, por darme la oportunidad de trabajar en este grupo de investigación y por todos sus buenos consejos. También le estoy agradecida a Belén Masiá, mi directora en este proyecto, por su ayuda, su franqueza y su experiencia que tanto me han enseñado. Ana Serrano, mi codirectora, ha sido un apoyo y una fuente de ideas y conocimiento sin la que este trabajo no habría llegado a ser lo que es hoy.

Por otra parte, me gustaría darle las gracias a Estefanía Garijo por su inestimable ayuda en cuestiones matemáticas y físicas, por sus apuntes de álgebra interminables y por 17 años de férrea amistad. También le doy las gracias a Héctor Orera y a su paciencia por su ayuda en más problemas matemáticos. A nivel personal, quiero agradecer a la asociación universitaria La Cueva de Smaug. Sobre todo a David Orera el haber sido un oasis de paz y una mano amiga durante todo este tiempo. A todos los miembros con los que he podido pasar un buen rato (Jose Miguel, Sergio, Laura, Amelia, Álvaro, Raquel, Guillermo (*Oráculo*) y Guillermo (*Pendiente*)). También a Sonia Seguer por su amor por la arquitectura y su amplio conocimiento de usos y costumbres *maños* que más de una vez me han salvado. A Álvaro Mares por encontrarle la gracia a la situación más absurda y por no tomarse en serio al mundo. A María Leoz, por ser la mejor hermana que podría haber deseado y por enseñarme la vida desde otro punto de vista. A Iván Calonge por su fuerza de voluntad admirable y por las viejas conversaciones nocturnas que nunca acaban. A Esther Calonge por ser siempre sincera conmigo y por su cariño. A Adrián Barranco por estar siempre ahí. Les doy las gracias a todos los compañeros que me han ayudado a terminar esta carrera (Cristina, Patricia, Jaime, Adrián, Richard, Juan Luis) sufriendo conmigo en las entregas y exámenes y obligándome a salir de vez en cuando. Al *staff* de Natsuyoru por hacerme un hueco y perdonar que siempre posponga las entregas de mis QCs. A Droi por ser como es y por venir a verme desde tan lejos. A todos los profesores de la universidad que me han enseñado algo en estos cuatro años, por su dedicación. Al I.E.S. Virgen del Espino de Soria, en especial a Maribel, Loli, M^a Ángeles, Montse, Susan y Rubén por darme una base sólida y fuerte antes de comenzar la universidad. A MJ por mostrarme el camino y enseñarme a decidir.

Por último, quiero darles las gracias a mis padres por enseñarme todo lo que no se puede aprender en un aula, por su amor incondicional y por hacer posible que sea la persona que soy hoy. A mi abuelo por enseñarme los placeres de las cosas sencillas. Sobre todo, quiero darle las gracias a David Leoz, por haber trabajado durante estos años por los dos para que haya podido vivir en Zaragoza y estudiar en la universidad y por ser mi apoyo más cercano y mi compañero.

Índice

1. Introducción	8
1.1. Objetivo, alcance y contexto del proyecto	8
1.2. Organización del proyecto	9
1.3. Planificación	9
2. Marco teórico	11
3. Trabajo relacionado	15
4. Creación de una nueva representación	17
4.1. Introducción	17
4.2. Representación de Serrano et al.	18
4.3. Descomposición PCA	18
4.4. Entrenamiento de atributos	20
4.5. Reconstrucción y comparación con la representación original	22
5. Transición entre representaciones	25
5.1. Introducción	25
5.2. Obtención de la medida de especularidad	26
5.2.1. Estándares de la industria	26
5.2.2. Ajuste a modelos paramétricos	27
5.2.3. Direcciones principales	29
5.2.4. Validación del ratio y reentrenamiento de la base de soft PCA	31
5.3. Cambio entre bases	32
5.3.1. Full PCA a soft PCA	32
5.3.2. Soft PCA a full PCA	33
5.4. Muestra de la navegación entre bases	34
6. Integración en el sistema de edición	36
6.1. Introducción	36
6.2. Sistema de edición	36
6.2.1. Cambio del ratio manual de especularidad por SVMs	38
6.3. Plugin interactivo	39
6.3.1. Cambio del paso de <i>full PCA</i> a <i>soft PCA</i>	39
6.3.2. Cambio del método de optimización de los atributos	41
6.4. Limitaciones encontradas	41

7. Resultados	43
8. Conclusiones y trabajo futuro	46
Bibliografía	48
A. Listado de las BRDFs de MERL	52
B. Trabajo sometido al CEIG	53

Índice de figuras

1.1. Diagrama de Gantt de las actividades realizadas a lo largo del proyecto.	10
2.1. Esquema de un gonireflectómetro	12
2.2. Ilustración de una descomposición PCA	13
2.3. Esquema de la reflexión de la luz, ejemplo de un material especular y otro difuso	14
2.4. Polar plots	14
4.1. Comparación ente BRDFs originales y reconstruidas	19
4.2. Interfaz del experimento de Serrano et al.	21
4.3. Comparación con la nueva representación de la base de <i>soft PCA</i>	23
4.4. Comparación con la nueva representación para un caso especular	23
4.5. Muestra bidimensional de la distribución de las BRDFs de MERL	24
4.6. Representación gráfica de las bases PCA	24
5.1. Esquema de un medidor de brillo	26
5.2. Relación entre modelos analíticos y especularidad de las BRDFs	28
5.3. Valores de las direcciones de Nielsen para 2 BRDFs	29
5.4. Valores de las direcciones de Nielsen para las BRDFs de MERL	30
5.5. Valores de una única dirección de Nielsen para las BRDFs de MERL	30
5.6. Muestra de un polar plot	31
5.8. Ilustración de la navegación entre representaciones	33
5.7. Muestra tridimensional de las BRDFs de MERL en varios espacios PCA	35
6.1. Edición de la BRDF chrome	37
6.2. Clasificación de especularidad con SVMs	38
6.3. Interfaz original del plugin de edición	39
6.4. Interfaz modificada del plugin de edición	40
6.5. Muestra de las limitaciones del método de descenso de gradiente	41
7.1. Ejemplo de edición con cambio de base	44
7.2. Resultados de ediciones sobre varias BRDFs	44
7.3. Ejemplo de edición con cambio de base	45

1. Introducción

1.1. Objetivo, alcance y contexto del proyecto

En los últimos años, las técnicas de medición de apariencia de materiales se han vuelto más eficientes y exactas. Esto ha supuesto un incremento del número de bases de datos públicas y técnicas de modelado de materiales. Aún así, la edición de apariencia de materiales ha seguido siendo un reto debido a varias razones, incluyendo la desconexión entre la representación de los datos y el entendimiento humano, la complejidad de algunas representaciones que requieren la utilización de cientos de parámetros, y el hecho de que el comportamiento real de la apariencia es alto dimensionalmente y no lineal, lo que conduce a parámetros de edición no intuitivos.

Aún así, el incremento de disponibilidad de datos públicos ha ayudado a la construcción de nuevas técnicas de edición para los datos capturados. Estas técnicas han surgido durante los últimos años solucionando los problemas mencionados. De entre ellas, destacan las técnicas basadas en el uso de parámetros intuitivos como el trabajo de Serrano et al. [4] que sobresale por su facilidad de uso para usuarios no especializados.

Este trabajo se basa en el método de edición de materiales intuitivo de Serrano et al. y mejora algunas de sus limitaciones en cuanto a la representación de ciertos tipos de materiales. En su trabajo, Serrano et al. utilizan una representación de BRDFs (funciones de distribución de reflectancia bidireccional) que consiste en una combinación de componentes principales (obtenida mediante una descomposición PCA) para reducir la dimensionalidad. Después relacionan dichos componentes con sus atributos perceptuales. La base PCA que utilizan en su trabajo está sesgada hacia materiales especulares y puede fallar al representar materiales muy difusos, dando lugar a artefactos que pueden aparecer durante la edición.

El objetivo de este trabajo es resolver ese problema. Para ello, se construye sobre su trabajo y se propone una nueva base PCA, complementaria a la original de Serrano et al., que funciona mejor en la representación de los materiales difusos. Después se relacionan los componentes de la nueva base con los mismos atributos perceptuales. De esta forma se obtienen dos representaciones separadas. Cada una de ellas representa bien una parte complementaria del espacio total de materiales sobre el que se está trabajando, ya sean estos difusos o especulares.

Para poder trabajar de una forma efectiva con ambas representaciones, se propone un nuevo método para poder navegar entre ellas durante el proceso de edición de apariencia. Esta navegación se sustenta en una nueva medida de la especularidad de materiales capturados. Utilizando esta medida de especularidad para distinguir los materiales difusos de los especulares, creamos

un hiperplano utilizando SVMs (del inglés *Support Vector Machines*) en cada una de las bases PCA, creando de esta forma una frontera en el espacio de componentes principales que nos permite saber cuándo se debe saltar de una representación a la otra.

Finalmente, se integra todo el trabajo desarrollado en un nuevo marco de edición de BRDFs mostrando que las limitaciones del trabajo de Serrano et al. han sido superadas. Además, la nueva medida de especularidad puede ser utilizada independientemente de este marco de edición para cualquier tipo de material capturado con datos reales.

El alcance de este proyecto incluye:

- Implementación de una nueva representación de BRDFs.
- Reproducción del proceso de edición de apariencia de Serrano et al. con la nueva representación.
- Estudio de las diferencias de la nueva representación con la original.
- Creación de una medida de especularidad de materiales.
- Creación de un procedimiento para navegar entre las distintas representaciones de BRDFs utilizadas en este trabajo.
- Integración del nuevo sistema de edición en un programa interactivo.

1.2. Organización del proyecto

Primero se explica el marco teórico mínimo necesario para comprender el resto del trabajo explicado a lo largo de la memoria en el Capítulo 2. Después, en el Capítulo 3 se presenta un resumen de los trabajos previos relacionados con la simulación de materiales y la edición de su apariencia que han influido de alguna manera en este trabajo, ya sea porque han aportado conocimientos sin los que su realización no habría sido posible o porque son parte fundamental de su base conceptual. En el Capítulo 4 se explica en profundidad la creación de la nueva representación y se compara con la original de Serrano et al. El Capítulo 5 trata sobre la medida de especularidad y la navegación entre las dos representaciones. En el Capítulo 6 se explica cómo se ha integrado el nuevo sistema de edición en una aplicación interactiva. Finalmente, en los Capítulos 7 y 8 se explican los resultados y conclusiones obtenidos así como posible trabajo futuro.

1.3. Planificación

Durante los cinco meses aproximados de duración del proyecto, el trabajo se ha dividido en las siguientes tareas: documentación del marco teórico, estudio del estado del arte, estudio y replicación del trabajo de Serrano et al., creación de una nueva representación de BRDFs y construcción de la técnica de Serrano con la nueva representación, estudio y creación de una nueva medida de especularidad para BRDFs capturadas, creación de un método de navegación

1. Introducción

entre las dos representaciones utilizadas, integración en un programa interactivo de edición y obtención y estudio de resultados. La distribución de estas tareas a lo largo del tiempo se puede ver en la Figura 1.1 Además, todas las tareas de implementación han sido realizadas con Matlab y Python. Para esta última herramienta ha sido necesario un breve aprendizaje. También ha sido necesario familiarizarse con las herramientas específicas relacionadas con BRDFs como la librería Alta o el programa *BRDF explorer*.

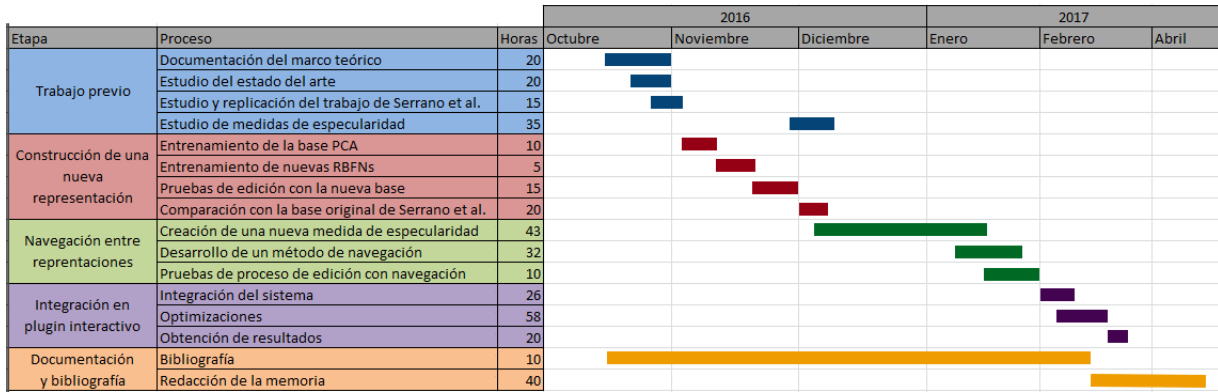


Figura 1.1: Diagrama de Gantt de las actividades realizadas a lo largo del proyecto.

2. Marco teórico

En este capítulo se describen varios conceptos tanto teóricos como prácticos que se utilizan a lo largo de este trabajo. La intención de este capítulo es la de ayudar a hacer de este documento un conjunto de información autocontenida. Sin embargo explicar en profundidad todos los conceptos que aquí se utilizan sería demasiado extenso. Por ello, se explican los fundamentos de cada concepto que se consideran suficientes y necesarios para sustentar la teoría utilizada en este trabajo, junto con enlaces a la bibliografía en la que se puede encontrar información más extensa.

Definición de una BRDF. Una BRDF (por sus siglas del inglés *Bidirectional Reflectance Distribution Function*) es una función de cuatro variables reales que define cómo se refleja la luz en una superficie opaca. Fue definida por Nicodemus [11] en 1965, y se utiliza tanto en óptica del mundo real como en informática gráfica para definir cómo se distribuye la luz incidente que se refleja desde una dirección a lo largo de todas las posibles direcciones de salida tras reflejarse en la superficie. Es decir, una BRDF define la apariencia de los materiales opacos y su interacción con la luz. Su fórmula es la siguiente:

$$f_r(\omega_i, \omega_r) = \frac{dL_r(\omega_r)}{dE_i(\omega_i)} = \frac{dL_r(\omega_r)}{L_i(\omega_i) \cos \theta_i d\omega_i}$$

Donde \mathbf{L} representa la radiancia [12], \mathbf{E} la irradiancia [13] y θ_i el ángulo entre ω_i y la normal de la superficie (el ángulo de la luz incidente). Mientras que el índice i indica luz incidente, el índice r indica luz reflejada.

En el mundo real este comportamiento es complejo. Debido a esta complejidad, a lo largo de los años han surgido distintas formas de representar BRDFs en el mundo de la informática gráfica para la simulación de apariencia de materiales, que pueden ser divididas entre analíticas o empíricas (BRDFs medidas). Como se ha explicado en el Resumen, las BRDFs medidas presentan ciertas ventajas como su alta calidad, por lo que se utilizarán a lo largo de este trabajo.

Modelos analíticos. Por un lado se encuentran las BRDFs analíticas, que modelan mediante una función matemática el comportamiento de los materiales. Estos modelos son una simplificación del comportamiento real de la interacción de la luz con los materiales. Sus principales ventajas son su eficiencia en coste de computación así como un número de parámetros reducido con el que trabajar. Sin embargo, los parámetros de los modelos analíticos a menudo no son intuitivos ni amigables para los usuarios. Por ello, al querer editar la apariencia de un material, una tarea *a priori* sencilla como hacer un material más especular puede resultar com-

pleja por no haber una correspondencia con los parámetros del modelo. Además, estos modelos analíticos no siempre son capaces de representar fielmente algunos efectos visuales complejos que se producen en la vida real.

Modelos empíricos. Por otro lado, durante los últimos años han surgido formas de representación de BRDFs basadas en mediciones del mundo real. Una forma de representar la BRDF de un material es midiendo para cada posible ángulo incidente y de salida la cantidad de luz reflejada desde la superficie del material debido a una luz incidente. El almacenamiento y utilización directa de datos reales implica resultados mucho más fieles a la realidad. En la Figura 2.1 se puede observar un aparato que permite realizar la medición de una BRDF. La estructura de almacenamiento de las BRDFs medidas utilizadas en este trabajo consta de una tabla en la que se guarda, para cada posible ángulo de salida y de entrada la medida física de la BRDF capturada por el sensor de medición. Esta medida se guarda para cada uno de los tres canales de color RGB. En total, para los materiales tratados en este trabajo, el tamaño de la tabla que representa la BRDF de cada material es de $1.458.000 \times 3$ (1.458.000 medidas por los tres canales de color). Una forma de reducir el espacio que ocupan las BRDFs medidas pese a que se pierde fidelidad, es ajustarlas a modelos analíticos conocidos, modificando los parámetros del modelo en cuestión hasta que la apariencia conseguida se parezca lo máximo posible al material real. En la actualidad, existen herramientas que facilitan la realización de este trabajo, como la librería de análisis de BRDFs Alta [14].

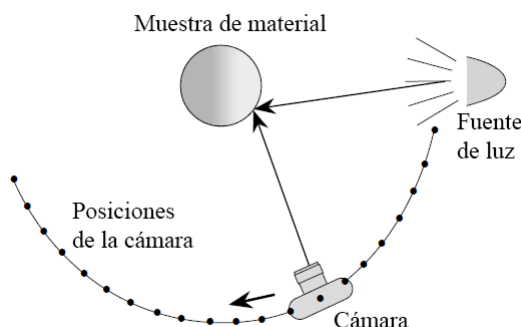


Figura 2.1: Esquema de un goniorelectómetro, aparato utilizado para medir BRDFs. La cámara se mueve a distintas posiciones para capturar la luz saliente del material desde todos los ángulos de salida posibles. Este proceso se repite para cada ángulo de incidencia de la luz. Imagen de [1]

Tener que observar la luz que se refleja desde una superficie en todas las direcciones posibles de salida también implica que cada material capturado necesita un gran número de mediciones para obtener un buen resultado. Además, los datos capturados tampoco son intuitivos ni fáciles de manipular.

Una opción para conseguir representaciones realistas, sencillas, intuitivas y que ocupen poco espacio de almacenamiento es utilizar técnicas de reducción de dimensionalidad sobre BRDFs medidas. En el Capítulo 4 se trata este tema en mayor profundidad. Cabe destacar que a lo largo de este trabajo se utilizarán las palabras *BRDF* y *material* de forma indistinta.

Descomposición PCA. La descomposición PCA (del inglés *principal component analysis*) es un procedimiento estadístico que permite reducir la dimensionalidad de un conjunto de

datos. Este método escoge las dimensiones de los datos que contienen más información para representar los mismos, reduciendo el número de dimensiones necesarias y minimizando el error de reconstrucción de los datos (comparándolos con los datos originales). En la Figura 2.2 se muestra un ejemplo de PCA en el que se reduce la dimensionalidad de un conjunto de datos. La descomposición PCA se utiliza en la construcción de modelos predictivos y el análisis de datos de alta dimensionalidad.

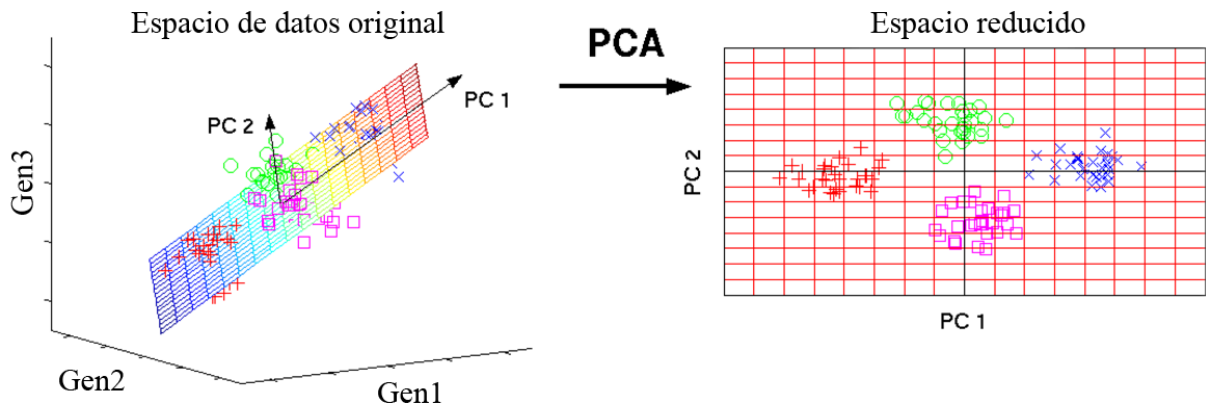


Figura 2.2: Ilustración de una descomposición PCA sobre un conjunto de datos en 3 dimensiones. Como se puede observar en la imagen izquierda, los datos están inicialmente expresados en función de 3 componentes diferentes (Gen1, Gen2, Gen3). Sin embargo, llevando a cabo una descomposición PCA se observa que la misma información que separa los datos en distintas agrupaciones se puede encontrar en un espacio reducido, en este caso bidimensional. Imagen extraída de [2].

Red neuronal artificial de base radial. Una RBFN (del inglés *Radial Basis Function Network*) es un tipo de red neuronal que usa funciones de base radial para la activación de sus neuronas. Es una forma matemática de modelar sistemas de predicción, de control, de clasificación y de aproximación. La salida de una RBFN es una combinación de funciones radiales dependiente de los datos de entrada a la red y pesada con unos parámetros concretos. Las RBFNs sirven como aproximadores universales de una función [15].

Materiales especulares y materiales difusos. A lo largo de este trabajo se habla de la diferencia entre materiales especulares y materiales difusos. Un material especular ideal sería un espejo, en el que la luz incidente rebota en la superficie del objeto y se refleja en una única dirección de salida. En un material difusor ideal, la luz por el contrario rebotaría contra la superficie y se repartiría de igual manera en todas las direcciones de salida posibles. Los metales pulidos o las superficies lacadas suelen tener un aspecto más especular que materiales como la tela vaquera y la piedra caliza, que son más difusos. En la figura 2.3 se puede observar cómo se refleja la luz incidente en una superficie, y un ejemplo de un material difuso y de otro especular. El ojo humano puede distinguir a simple vista la especularidad de un material. La especularidad de un material se refleja también en la forma del *polar plot* que forma la BRDF que lo representa.

Gráficas en coordenadas polares o *Polar plots*. Una forma de extraer información sobre el comportamiento de una BRDF sin tener que inspeccionarla visualmente es calcular su polar plot. Existen programas, como *BRDF explorer* que realizan este cálculo. El *polar plot* de una BRDF es una gráfica que muestra (en 2D o 3D) cómo se refleja la luz incidente. En la Figura 2.4 se puede ver el *polar plot* de varias BRDFs distintas. Los *polar plots* de los materiales

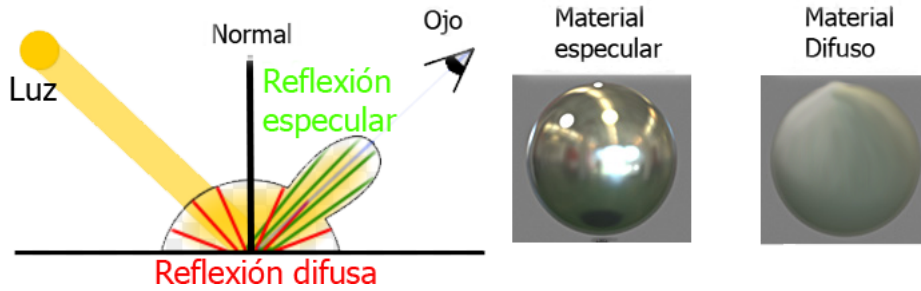


Figura 2.3: A la izquierda se muestra un esquema de la reflexión de la luz, que causa lóbulos especulares de mayor intensidad o iluminación difusa en todas las direcciones dependiendo del tipo de superficie en la que se refleje. En el centro, un ejemplo de un material altamente especular y a la derecha un material más difuso. Imagen obtenida de [3]

difusos tendrán formas más redondeadas y suaves, mientras que los de los materiales especulares presentarán picos mayores en la zona de reflexión especular.

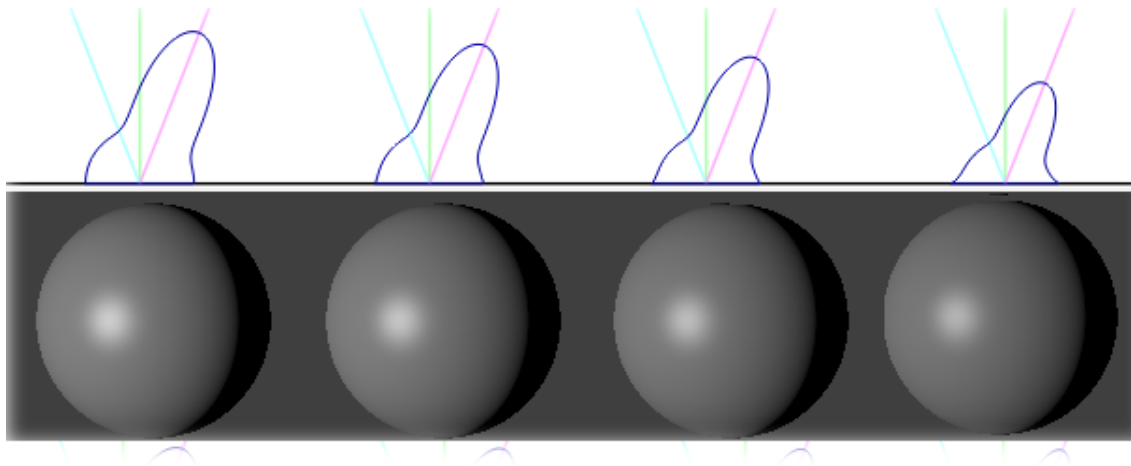


Figura 2.4: Polar plots de distintas BRDFs. Como se puede observar, el tamaño del polar plot decrece según disminuye el tamaño y la intensidad del lóbulo especular.

3. Trabajo relacionado

A continuación se presenta un resumen del trabajo relacionado con este proyecto. Para facilitar la comprensión del mismo, éste se presenta agrupado por distintas categorías, cada una de ellas relacionada con una parte o la totalidad del trabajo que se desarrolla en este documento.

Estándares industriales. A lo largo de los años, se han desarrollado varios estándares para caracterizar la reflectancia de los materiales que se pueden encontrar en el mundo real [16]. La ASTM (*American Society for Testing and Materials*) ha formalizado dichos estándares en una colección de documentos. De entre todos ellos, algunos están especializados en definir algunas de las dimensiones del brillo de los materiales [17] además de los ángulos desde los que el material debe ser medido [18], [19]. Esto permite una caracterización completa del brillo en un material. Westlund y Meyer [6] encontraron una correlación ente dicha caracterización dada por los estándares de la industria y los parámetros de algunos modelos analíticos de reflectancia (BRDFs analíticas), relacionando de esta manera propiedades de las BRDFs simuladas virtualmente con medidas de materiales reales.

Edición de modelos existentes. Algunos trabajos sobre la edición de BRDFs incluyen *BRDF shop* [20], que presenta una interfaz amigable y un modelo basado en una extensión del de Ward [9]. Otros trabajos se basan en navegación dirigida por imágenes [21] en la que usan como distancia la diferencia entre visualizaciones de imágenes. Talton et al. [22] se centran en un sistema de edición colaborativo sobre el espacio del modelo de Ashikhmin [23]. Otros trabajos existentes se basan en la realimentación rápida de ediciones de BRDFs [24, 25, 26] o se especializan en un tipo de ediciones muy concreto, como las necesitadas en el diseño de pintura para coches, como el trabajo de Ershov et al. [27], centrado en las propiedades físicas de los ingredientes de la pintura que afectan a su apariencia. También hay trabajos que editan BRDFs medidas sin ajustarlas a ningún modelo analítico, a pesar de la aparición de algunas desventajas (como espacios de edición demasiado complejos [17]). Lawrence et al. [28] descomponen el comportamiento de las BRDFs en simples curvas unidimensionales que representan sus propiedades físicas. Su trabajo lo continúan Ben-Artzi et al. [29] añadiendo luz directa compleja además de interreflexiones. Algunos de estos métodos carecen de espacios de edición suficientemente amplios además de tener parámetros de edición no intuitivos.

Espacios de edición perceptual. Muchos trabajos han aplicado estrategias perceptuales en informática gráfica [30]. En el campo poco explorado de la edición de *light fields*, Jarabo et al. [31] usan varias herramientas basadas en la visualización de imágenes para mostrar el potencial de la edición de *light fields*, además de favorecer la exploración artística con la creación de interfaces versátiles. Las aplicaciones que usan espacios altamente dimensionales incluyen simulación de multitudes [32], diseño de fuentes de texto [33], medidas de similaridad de estilos [34], taxo-

nomía de diseño de interiores [35], percepción de materiales translúcidos [36] o diseño de *shaders* [37]. Basándose en ellos, Boyadzhiev et al. [38] introdujeron atributos intuitivos para la edición de materiales basada en imágenes. Sigal et al. [39] utilizan los parámetros de un simulador personalizado para la simulación de prendas. Pellacini et al. [40] observaron que el comportamiento no lineal de los parámetros analíticos hacía que el proceso de edición no fuera intuitivo al modificar directamente dichos parámetros. Debido a ello, infieren un escalado perceptualmente uniforme para el modelo de Ward, usado desde entonces para estudiar espacios de navegación basados en imágenes [21] o para estudiar la influencia de la forma en la percepción del material [41]. El concepto de espacios perceptualmente uniformes es extendido por Wills et al. [17] para BRDFs medidas. En su trabajo proponen un espacio intuitivo y de baja dimensionalidad adecuado para la construcción de nuevos materiales, aunque este espacio está limitado a la edición de brillo. Kerr y Pellacini [42] mostraron que la navegación basada en imágenes parecía ser menos eficiente que el uso del modelo de Ward perceptualmente uniforme para la tarea particular de ajustar la apariencia de un material. Aún así, sólo utilizaron dos atributos (difuso y especular) y sólo estudiaron BRDFs incoloras.

Matusik et al. [43] presentan un modelo de reflectancia basado en datos. Reducen la dimensionalidad de las BRDFs bien mediante una descomposición PCA o mediante la utilización de reductores de dimensionalidad no lineales. Después, definen un conjunto de características perceptuales y llevan a cabo un experimento con un único usuario que decide si un material tiene o no dichas características. Con estas respuestas construyen vectores que permiten la navegación a lo largo de sus espacios de BRDFs especificando cambios en sus características que se traducen en direcciones específicas dentro del espacio.

Basándose en el trabajo de Matusik, el de Serrano et al. [4] es diferente en varios aspectos. En su trabajo también reducen la dimensionalidad de las BRDFs mediante descomposición PCA, y emplean un conjunto de atributos significativos para realizar la edición de materiales. Sin embargo, sus 14 atributos son seleccionados llevando a cabo un experimento a gran escala. En este experimento, los atributos son identificados por los usuarios como intuitivos, descriptivos y discriminativos a la hora de reflejar las propiedades visuales de un material. En su trabajo usan el mismo método de reducción de la dimensionalidad y escalado significativo perceptualmente que se usa en el trabajo de Nielsen et al. [44] que hace que su espacio PCA sea comparable a espacios puramente perceptuales [17]. Efectúan un muestreo denso y uniforme sobre este espacio, sintetizando BRDFs adicionales de su base de datos inicial (obteniendo un total de 406), y obtienen para ellas 56000 respuestas de 400 participantes en un experimento a gran escala. Con estas respuestas construyen envolturas complejas de sus atributos en el espacio PCA. Esto les permite editar de forma intuitiva BRDFs medidas de forma que un usuario sin conocimientos técnicos sea capaz de cambiar fácilmente la apariencia de un material.

Sin embargo, su base PCA está sesgada hacia los materiales especulares. Esto quiere decir que existe la posibilidad de que aparezcan artefactos en las BRDFs al tratar de representar materiales difusos o al disminuir atributos especulares durante el proceso de edición. Los artefactos suelen tomar la forma de un halo oscuro alrededor de la dirección especular. En este trabajo se describe el proceso seguido para atajar este problema.

4. Creación de una nueva representación

4.1. Introducción

En este capítulo se describe la representación existente de BRDFs así como su integración en un sistema de edición intuitiva. A continuación se explica cómo, siguiendo el mismo proceso, se ha creado una nueva representación para los materiales en los que el primer modelo presentaba problemas y cómo se ha integrado dicha representación en el sistema de edición. Por último, se describe un análisis de la nueva representación así como de sus limitaciones, y se comentan las razones por las que una única representación en este caso no es suficiente para resolver el problema que abarca este trabajo.

El punto de partida para crear una nueva representación son los trabajos de Nielsen et al.[44] y de Serrano et al. [4]. Nielsen realiza un *mapeo* logarítmico de BRDFs medidas en un espacio que permite la extracción de sus componentes principales (mediante descomposición PCA). Serrano construye, sobre los componentes principales extraídos, un sistema de edición de BRDFs con atributos intuitivos. En este trabajo se propone cambiar el conjunto de las BRDFs medidas sobre las que se realiza la primera descomposición PCA para poder representar mejor ciertos tipos de materiales, en concreto los menos especulares.

Como en la representación de Serrano, el conjunto de las BRDFs sobre el que se realizará la descomposición PCA es la base de datos de MERL [45]: una base de datos de mediciones reales de 100 materiales distintos. Sin embargo, en vez de usar todos los materiales se escogerá el subconjunto que mejor represente las propiedades que exhiben problemas en la representación existente.

Una vez se obtenga la representación PCA de las BRDFs escogidas, se realizará un entrenamiento para relacionar los coeficientes PCA obtenidos con 14 atributos perceptuales. Esta lista de atributos ha sido seleccionada en el trabajo de Serrano et al. mediante un experimento en el que se demuestra que son significativos además de suficientes para definir la apariencia general de una amplia variedad de materiales.

Antes de dar la nueva representación por válida será necesario realizar varias pruebas de reconstrucción y edición de materiales para demostrar que es capaz de cumplir con su objetivo. En este caso dicho objetivo consiste en la correcta representación de, al menos, los materiales que presentan problemas en el modelo anterior.

4.2. Representación de Serrano et al.

Serrano et al. reducen en su trabajo la dimensionalidad de las BRDFs mediante una descomposición PCA. Una base PCA puede ser entrenada mediante un conjunto de datos, en este caso de BRDFs medidas. Una vez la base ha sido entrenada puede representar cualquier BRDF de la siguiente manera:

$$b = Q\alpha + \mu \quad (4.1)$$

Donde b es la BRDF representada en la base, Q es la matriz que representa la base PCA, μ es la media de los datos medidos y α los coeficientes de cada componente principal para BRDF b en particular. Antes de realizar esta descomposición, se realiza un *mapeo* logarítmico de los datos medidos para reducir el efecto de los picos especulares sobre el resto de la información, al igual que Serrano et al. realizan en su trabajo.

Una vez se obtienen los componentes, se procede a relacionarlos con un conjunto de atributos perceptuales utilizando RBFNs. La red utilizada en el trabajo de Serrano et al. para cada atributo es la siguiente:

$$y = \varphi(\alpha) = \sum_{i=1}^{N_c} \theta_i \exp^{-\beta \|\alpha - c_i\|^2} \quad (4.2)$$

Donde y es un valor en el rango $[0..1]$ que representa la presencia o ausencia del atributo, N_c es el número de neuronas de la red, c_i son los centros de las neuronas y θ_i los pesos de cada neurona. β es un parámetro que controla la suavidad de las funciones Gaussianas y α los primeros cinco componentes de la base PCA.

4.3. Descomposición PCA

La reducción de dimensionalidad de las BRDFs medidas mediante un análisis de componentes principales (PCA) fue propuesta por Matusik et al. en 2003. Esta técnica presenta una doble ventaja. Por un lado, permite una representación mucho más compacta de un material medido. Por otro lado, también permite la interpolación de BRDFs mediante la combinación lineal de sus componentes principales, lo que facilita la creación de nuevos materiales a partir de los existentes. Esta técnica ha sido utilizada en trabajos posteriores, incluyendo Nielsen et al. [44] y Serrano et al. [4].

Partiendo de una base de BRDFs medidas, se puede aprender una base de componentes principales mediante descomposición PCA, en la que cualquier BRDF puede ser representada como una combinación lineal de la base aprendida, los coeficientes de la BRDF para esa base, y la media de los datos de las BRDFs usadas para el entrenamiento inicial. Una vez obtenidos los coeficientes de la BRDF para la base entrenada, es posible reconstruir la BRDF original siguiendo el procedimiento empleado por Nielsen et al. Tanto en este trabajo como en el de Serrano et al. se utilizan los cinco primeros componentes principales ya que se ha demostrado que son suficientes para reconstruir un material de forma que éste y el original no sean distinguibles a simple vista.

En la Figura 4.1 se puede ver la comparación entre dos BRDFs originales y su reconstrucción a partir de la base PCA de Serrano et al.

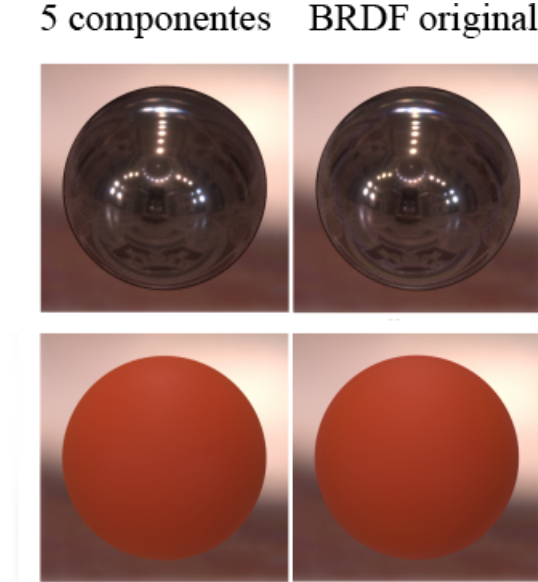


Figura 4.1: Comparación de dos BRDFs originales de la base de MERL con sus reconstrucciones de la base PCA de Serrano et al. [4]. En la fila superior, la BRDF *ss440* de MERL. En la fila inferior, la BRDF *dark red paint* de MERL. En la columna izquierda se ve la reconstrucción, y en la derecha el material original para cada BRDF. Imagen de [4].

El conjunto de BRDFs que la base PCA puede representar de forma correcta depende en gran medida de las BRDFs iniciales que se usan para el entrenamiento. Tanto Nielsen et al. como Serrano et al. utilizan la base de datos de materiales de MERL adquirida por Matusik et al. y que está disponible de forma pública en Internet. Esta base de datos dispone de 100 materiales que representan adecuadamente la mayoría de materiales que se encuentran en el mundo real, con la restricción de que todos ellos son isotrópicos. También aparecen materiales de distintos colores (*pink plastic* o *dark blue paint*). Sin embargo, el muestreo de materiales no es uniforme a lo largo de la dimensión del color (es decir, la base no cuenta con los materiales *pink metallic paint* o *dark blue fabric*, por ejemplo). Este inconveniente se resuelve tratando cada canal de color de la BRDF como una muestra independiente, e ignorando el color del material a la hora de entrenar la base PCA. Otro problema de la base de datos de MERL es que tampoco está muestreada uniformemente a lo largo de los distintos tipos de materiales existentes. En concreto, hay un mayor número de materiales *especulares* que de materiales *difusos*. Por ejemplo, hay 12 materiales de tipo *fabric* y 23 de tipo *paint*. Este hecho, sumado a que las BRDFs de los materiales especulares muestran picos en sus valores varios órdenes de magnitud mayores que las de los materiales difusos, implica que los materiales especulares tienen un mayor peso en la base entrenada de componentes principales. Una forma de suavizar este problema es realizar la descomposición PCA sobre un mapeo logarítmico de los datos originales, pero este paso intermedio necesario no es suficiente. Tanta es la influencia de estos picos especulares, que las bases entrenadas con las 100 BRDFs de MERL no son capaces de representar adecuadamente los materiales más difusos de la misma (como *white fabric*). Para arreglar el problema del *bias* de la base PCA debido a los materiales especulares de la base de MERL, Nielsen propone crear una segunda base PCA o *soft PCA base*, entrenada solo con materiales difusos, y alternar entre

4. Creación de una nueva representación

las dos dependiendo del tipo de material que se quiera representar. Siguiendo esta idea, se escoge inicialmente un subconjunto de 40 de las 100 BRDFs de la base de datos de MERL con las que se entrena la base secundaria o *soft*.

El método inicial mediante el cual se eligen estas 40 BRDFs consiste en observar imágenes de esferas renderizadas de cada uno de los 100 materiales en un entorno gris neutro e iluminadas por dos luces puntuales que permiten ver las características de cada material en concreto. A partir de estas imágenes se realiza una clasificación manual de 40 materiales con los que se entrena la nueva base. Más adelante, en una segunda revisión de los componentes iniciales de la base de *soft PCA*, se exploran otras dos formas de escoger las BRDFs iniciales para esta base de tal forma que se maximice el detalle a la hora de representar BRDFs *difusas* y se eliminen espúreos (*outliers*) o BRDFs más especulares que podrían haber sido introducidas por un fallo humano. En el Anexo A se puede encontrar una lista de las 100 BRDFs de MERL y de las que han sido escogidas en este trabajo como más difusas para entrenar la base de *soft PCA*. Los otros métodos para escoger las BRDFs de la base se detallan en el siguiente capítulo. En la Figura 4.6 se puede observar una comparación entre la nueva base y la original de Serrano et al. además de una breve explicación de sus diferencias en la Sección 4.5.

4.4. Entrenamiento de atributos















Siguiendo los atributos perceptuales obtenidos en el trabajo de Serrano que se pueden ver en la Tabla 4.1, se entrena una red neuronal radial (RBFN) que relaciona los coeficientes de 406 BRDFs (las 100 medidas de MERL más 306 sintetizadas como combinación lineal de las 100 primeras) en la base de *soft PCA* con la medida de cada uno de esos atributos para cada material. Esta medida se obtuvo lanzando un experimento masivo en Mechanical Turk [46] en la que se pregunta a los participantes si un material posee en una escala del uno al cinco cada uno de los atributos. A partir de las 56000 respuestas de 400 usuarios se obtiene el valor de los 14 atributos para cada material. En la Figura 4.2 se puede ver la interfaz usada para realizar el experimento.

1	<i>plastic</i>	apariencia plástica
2	<i>rubber</i>	apariencia de goma
3	<i>metallic</i>	apariencia metálica
4	<i>fabric</i>	apariencia de tela
5	<i>ceramic</i>	apariencia cerámica
6	<i>soft</i>	suavidad
7	<i>hard</i>	dureza
8	<i>matte</i>	mate
9	<i>glossy</i>	brillo
10	<i>bright</i>	luminosidad
11	<i>rough</i>	áspero
12	<i>strength of reflections</i>	fuerza de reflejos
13	<i>sharpness of reflections</i>	definición de reflejos
14	<i>tint of reflections</i>	color de reflejos

Tabla 4.1: Listado de los atributos utilizados para la edición de materiales

4. Creación de una nueva representación

Please, remember you can hover your mouse over the bubble icon next to the attributes to see their descriptions.

	None or Very little	1	2	3	4	A lot
 Plastic-like	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
 Rubber-like	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
 Metallic-like	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
 Fabric-like	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
 Ceramic-like	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
 Soft	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
 Hard	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
 Matte	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
 Glossy	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
 Bright	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
 Rough	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
 Strength of reflections	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
 Sharpness of reflections	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
 Reflections tinted towards the material color	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

1/11

Next Sphere!

Figura 4.2: Muestra de la interfaz utilizada en el experimento de Serrano et al. [4]. Este experimento fue lanzado mediante Mechanical Turk y sus respuestas se utilizan en este trabajo para el entrenamiento de las redes neuronales de los atributos, al igual que Serrano et al. hacen en su trabajo. Figura obtenida del material suplementario de [4].

Una vez obtenidos los coeficientes de las 406 BRDFs en la base de *soft PCA* junto con los valores de los atributos para cada una de ellas, se procede a ajustar los parámetros de entrenamiento de la red neuronal, de tal forma que se minimice el error de predicción de la misma. Los parámetros que deben ajustarse son:

- **El número de neuronas de la red:** Tener un número correcto de neuronas a la hora de entrenar una red es importante. Un número demasiado alto de neuronas puede llevar a *overfitting* de los datos de entrenamiento, mientras que un número insuficiente de neuronas no será capaz de proporcionar información de forma correcta. En este caso, y con la red que se utiliza, el número de neuronas puede variar entre 10 y 100.

- **Valor *sigma*:** Este es un valor proporcionado por la persona que realiza a cabo el entrenamiento en cada caso, y se suele fijar mediante experimentación. Controla la *anchura* de las neuronas. Valores sigma más pequeños *fitearán* los datos de forma más ajustada, mientras que un valor mayor de sigma producirá unos resultados más "suaves". En este caso se ha experimentado con valores de sigma entre 1 y 1000.

Para elegir la combinación de parámetros que minimice el error, se ha realizado un entrenamiento mediante validación cruzada, separando aleatoriamente un 2.5 % de los datos para validación. Además, este proceso se ha realizado 10 veces con diferentes conjuntos de validación para evitar casos de mínimos locales en los que no se encuentra una buena solución por una mala inicialización de los pesos de las neuronas y casos en los que el conjunto de validación es demasiado poco representativo del conjunto total de datos. Al realizar este proceso con las distintas posibles combinaciones de parámetros de entrenamiento, se ha encontrado el caso óptimo y los demás han sido descartados. En concreto, la red neuronal tiene 25 neuronas y un valor sigma de 10.

4.5. Reconstrucción y comparación con la representación original

Con la base *soft PCA* entrenada y las redes neuronales correctamente ajustadas para esta nueva base, se puede proceder a la edición y reconstrucción de BRDFs y a su comparación con la representación original del trabajo de Serrano. El primer paso para asegurar que la nueva representación cumple con sus objetivos es reconstruir las BRDFs que presentaban fallos y comprobar que ya no los presentan. En la Figura 4.3 se puede comprobar que el fallo ha sido corregido. Se comprueba también, en la Figura 4.4, que la nueva base no representa correctamente materiales especulares. Esto se debe a que al haber sido entrenada con BRDFs difusas, no es capaz de reconstruir de forma correcta los picos más brillantes característicos de los materiales especulares, como es el caso del material plástico mostrado en la Figura 4.4. La base *soft PCA* no es, por tanto, útil por sí sola para realizar ediciones de materiales. Este comportamiento era esperado, teniendo en cuenta las limitaciones de la base original. Se propone por tanto utilizar ambas bases tanto para la edición como para la reconstrucción de los materiales en función de la especularidad de los mismos y alternar entre ellas cuando sea necesario, de forma que siempre se consiga una representación correcta. La intuición detrás de este cambio de representación es que debe existir una zona de transición (o frontera) en la que ambas representaciones se comportarán de forma correcta. Siendo capaces de encontrar paramétricamente dicha zona en los dos espacios de coeficientes de las bases PCA, será posible navegar entre ellas de forma transparente al usuario que esté realizando una edición. En el siguiente capítulo se explica cómo se ha encontrado este punto de paso entre ambas representaciones para poder realizar la edición.

Por último, se muestra una representación en 2D de 2 de los cinco coeficientes del espacio PCA de las BRDFs, tanto para la base *soft PCA* como para la base *full PCA* en la Figura 4.5. Como se puede comprobar, no existe una relación a simple vista entre el punto del espacio PCA en el que se encuentra cada una en las dos representaciones, por lo que no es trivial la navegación entre ellas. En el siguiente capítulo se explicará con más detalle cómo se ha conseguido esta navegación.

4. Creación de una nueva representación

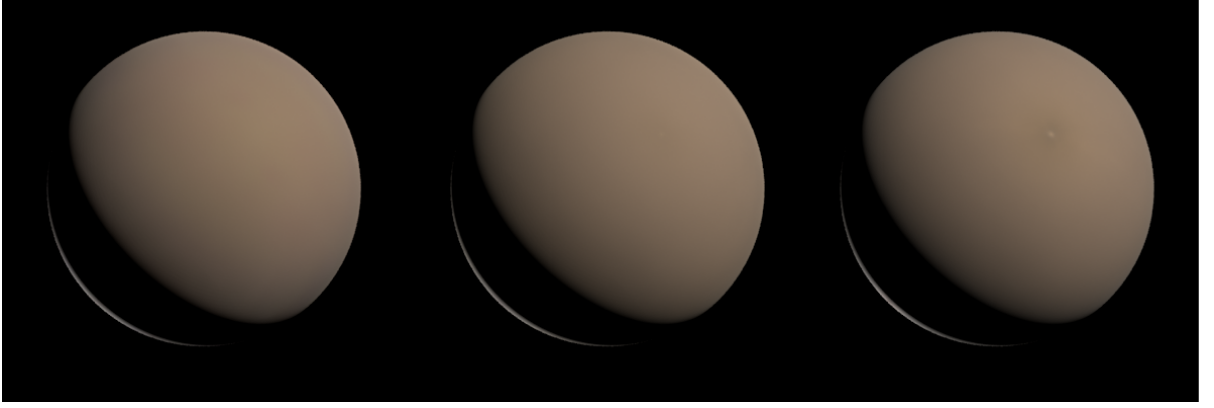


Figura 4.3: Comparación de la BRDF original de MERL (izquierda) con la nueva representación de la base de *soft PCA* (centro) y con la representación original de Serrano (derecha) para la BRDF *white fabric*.



Figura 4.4: Comparación de la BRDF original de MERL (izquierda) con la nueva representación de la base de *soft PCA* (centro) y con la representación original de Serrano (derecha) para la BRDF (*red specular plastic*). Esta BRDF no se representa correctamente en la nueva base *soft PCA*, ya que no es capaz de representar materiales especulares correctamente.

Para poder comparar directamente la base PCA entrenada con todas las BRDFs de MERL (o *full PCA*) con la base de *soft PCA* se muestran en la Figura 4.6 cortes bidimensionales de los primeros cinco componentes principales de ambas bases. Nielsen realiza una interpretación de estas *slices*, en la que el primer componente principal (PC) representa el pico especular, el segundo la zona difusa de la BRDF, el tercer PC representa la forma del pico especular, etc. El hecho de que el primer componente principal de la base de Serrano et al. esté tan relacionado con el pico especular de la BRDF es coherente con el hecho de que los materiales especulares se representen sin ningún problema. La nueva base PCA, sin embargo, presenta un comportamiento distinto no sólo en el primer PC, si no en todos los demás. Se cree que en este caso los dos primeros PCs están más relacionados con las zonas difusas de la BRDF, pero sería necesario un análisis en profundidad de todos los componentes para poder realizar afirmaciones de su comportamiento, lo que sería un interesante trabajo futuro y extensión a este trabajo.

4. Creación de una nueva representación

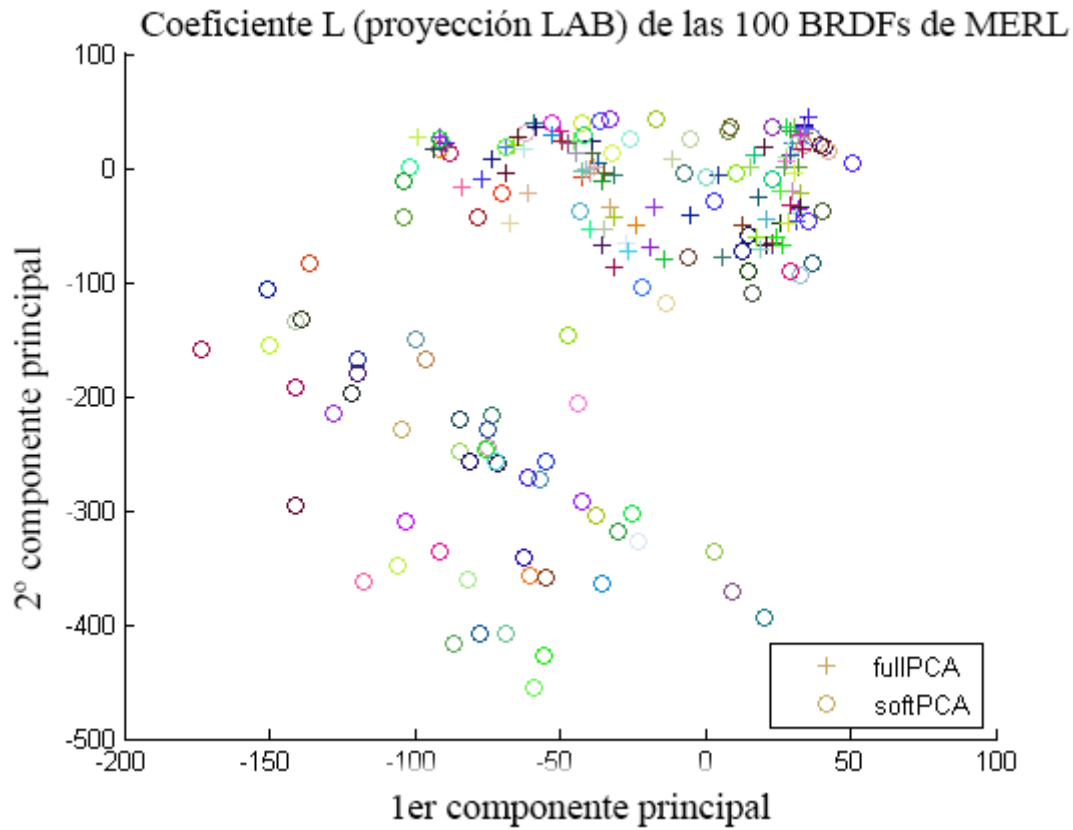


Figura 4.5: En el gráfico se puede ver una representación en 2D de los coeficientes PCA de las dos bases para las 100 BRDFs de MERL. Las BRDFs de la base de Serrano se representan con el símbolo '+' y las de la base de *soft PCA* con el símbolo 'o'. La misma BRDF tiene el mismo color en las dos representaciones. No se observa ninguna correlación a simple vista.

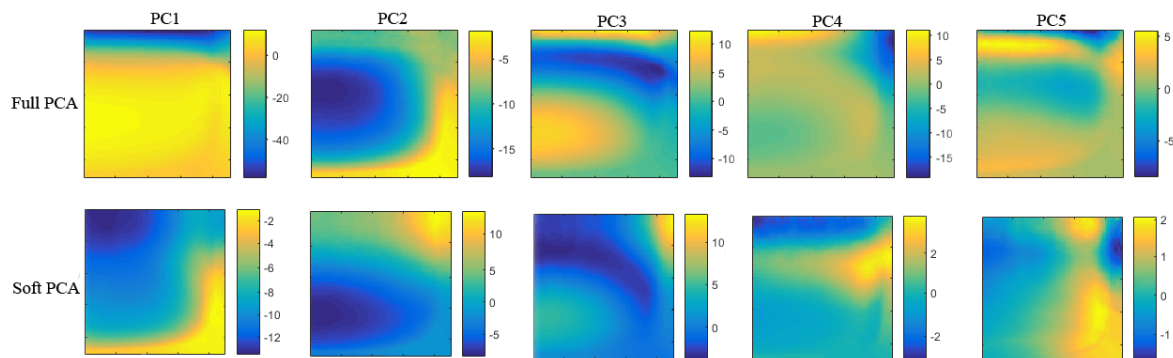


Figura 4.6: Comparación de la nueva base de *soft PCA* con la de *full PCA* original. Cada gráfico representa los valores de los vectores propios de un componente principal de la base. Cada columna representa un componente principal (PC), se muestran los primeros cinco PCs de la base original (arriba) y la creada en este trabajo (abajo) ya que son los que tienen mayor varianza y los que se usan para representar una BRDF. Se debe tener en cuenta que los gráficos no comparten la misma escala, para una mejor observación de la variabilidad de cada uno de ellos.

5. Transición entre representaciones

5.1. Introducción

En este capítulo se describe el método seguido para encontrar una medida de especularidad para cualquier BRDF. A continuación se explica cómo esta medida se ha utilizado para navegar entre la representación original y la de la base de *soft PCA*. Por último, se muestra un ejemplo del antes y el después del cambio de representación durante la edición de una BRDF.

El punto de partida para buscar una medida de especularidad son los estándares de la industria. Existen varios estándares internacionales para medir el brillo de un material, usados por los profesionales mayormente para realizar distintos controles de calidad sobre materiales como pinturas de coche, cerámicas, metales, plásticos, etc. Estos estándares describen cómo puede medirse una muestra de material para obtener una medida de brillo del mismo o *glossiness* dependiendo del tipo de material y los ángulos de incidencia de la luz y de captura del brillo.

Otros estudios muestran que existe una relación entre el brillo especular de un material y los valores de algunos parámetros de varios modelos analíticos de BRDFs. Se estudiará con la librería para BRDFs *Alta* [14] el *fit* de las BRDFs de MERL a varios modelos analíticos para comprobar si los parámetros de dichos modelos son capaces de representar la especularidad de un material.

Por último, siguiendo el trabajo de Nielsen et al.[44], se muestrearán los valores más significativos de una BRDF para comprobar si existe una diferencia clara en esos puntos del valor de una BRDF especular y el de una BRDF difusa.

Una vez obtenido y validado la medida de especularidad escogida, se mejora la selección manual de las BRDFs que forman parte de la base de *soft PCA* para obtener una mayor precisión en la representación de las BRDFs difusas. Con la nueva selección, se vuelve a entrenar la base PCA y se repite todo el proceso del Capítulo 4. Todos los resultados mostrados en ese capítulo son de la última base de *soft PCA* entrenada.

Con la base PCA mejorada y la medida de especularidad definida, se procede a realizar la navegación entre ambas representaciones. La opción más sencilla, *a priori*, es realizar la reconstrucción de los componentes PCA de cada base a la BRDF tabulada, y a partir de ahí volver a proyectar la BRDF medida en la otra base. Además de esta opción se explorarán otras como una matriz de cambio de base en el espacio de los componentes PCA, una conversión lineal entre ambas representaciones y el entrenamiento de una red neuronal para realizar el cambio de base.

Finalmente, con la navegación entre bases solucionada, se muestra como ejemplo una situación de edición en la que se realiza un cambio entre las dos representaciones. En el capítulo 7 en este documento, se indicará en cada figura si las ediciones mostradas conllevan o no un cambio de base.

5.2. Obtención de la medida de especularidad

Como se ha visto en el Capítulo 4, ninguna de las dos bases PCA son suficientes por sí solas para representar de forma correcta todas las BRDFs que se encuentran en la base de datos de MERL [45] ni para realizar ediciones de BRDFs en las que la especularidad del material cambia demasiado. Por tanto, es necesario definir un ratio de especularidad para cada BRDF de tal forma que se pueda limitar el radio de acción de cada una de las bases. Los materiales más difusos, como las telas, se representarán con la base de *soft PCA*, mientras que los más especulares como los metales se representarán con la base original o *full PCA*. Durante la edición de las BRDFs, se comprobará de forma iterativa a qué representación pertenece la misma en cada momento con el ratio de especularidad, para poder cambiar entre las bases en caso de que fuera necesario. A continuación se muestran las distintas opciones exploradas para obtener dicho ratio.

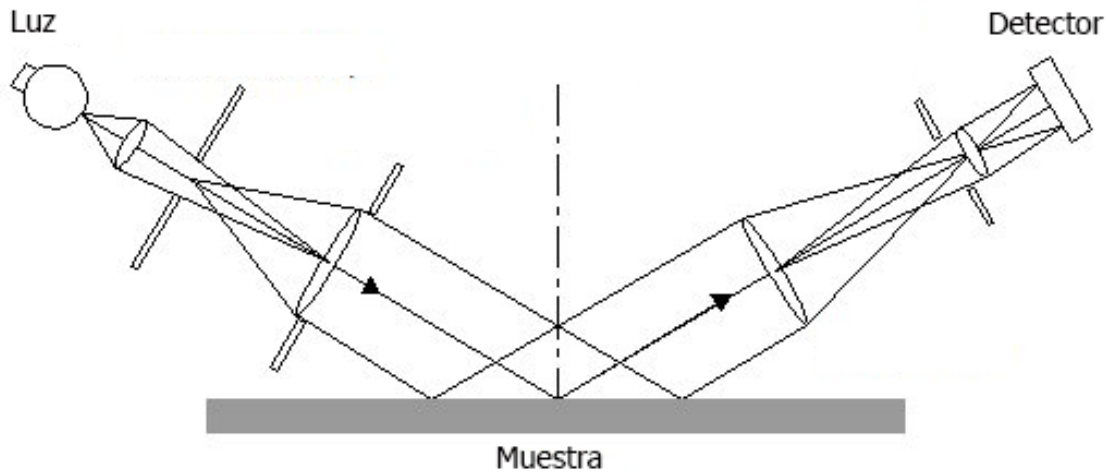


Figura 5.1: Esquema de un medidor de brillo, consistente en una fuente de luz y un sensor que captura dicha luz una vez ha impactado contra la muestra del material que se está midiendo. Imagen obtenida de [5].

5.2.1. Estándares de la industria

En algunos casos, los modelos gráficos de apariencia de materiales utilizan los estándares de la industria para imitar la apariencia real de los mismos en sus simulaciones. Dichos estándares incluyen, por ejemplo, la medida del brillo o *glossiness* de un material, una propiedad relacionada con la especularidad de la BRDF. En la industria, esta medida se lleva a cabo con *glossmeters* o medidores de brillo, como el de la Figura 5.1. Para cada muestra, y dependiendo del tipo de material, se realizan una o varias medidas con el *glossmeter* para definir el brillo de dicho material en *Gloss Units (GU)*. Según Alman et al. [18] y Saris et al. [19] son suficientes 3 medidas a

distintos ángulos (cerca del brillo especular, lejos del brillo especular y en un punto intermedio) para determinar el brillo de un material metálico. Otros estándares de la industria especifican distintos ángulos de medición para otros materiales. Sin embargo, esta aproximación presenta dos problemas: primero, la falta de una forma única y óptima de medir el brillo de cualquier tipo de material (distintos estándares de la industria se especializan en distintos tipos de materiales) hace difícil la elección de uno de estos sistemas de medición. Segundo, todas estas mediciones se realizan sobre materiales reales utilizando un medidor de brillo. Para poder replicar las mediciones en cualquier material virtual, sería necesaria la implementación de un *virtual light meter* como el de Westlund y Meyer [6]. En el mismo trabajo, se expone que existe una relación entre las medidas de *glossiness* de la industria y los valores de los parámetros de algunos modelos analíticos que se exploran en el siguiente apartado de este trabajo.

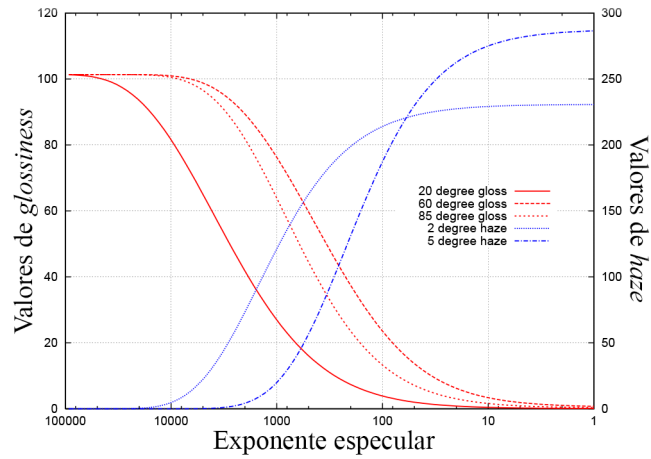
5.2.2. Ajuste a modelos paramétricos

Debido a las dificultades que implica seguir el método estándar de la industria para encontrar un ratio de especularidad de un material virtual, y gracias al trabajo de Westlund y Meyer[6], se decide explorar la utilidad de los modelos paramétricos para este propósito. Según Westlund y Meyer, existe una correlación entre la especularidad de un material, el valor de los parámetros de ciertos modelos analíticos y las medidas de *glossiness* de los estándares de la industria. En la Figura 5.2 se puede ver la relación entre las dos últimas para varios modelos analíticos.

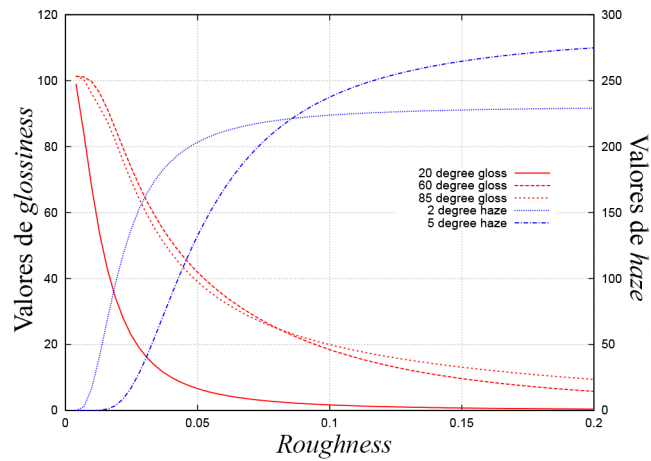
Mediante la utilización de la librería Alta para el análisis de BRDFs [14] se realiza un fiteo de cada una de las 100 BRDFs a varios modelos analíticos: Beckmann [47], Blinn [48], Lafortune [49] y Ward [9]. Para cada uno de los modelos, se estudia el valor de todos sus parámetros para ver si las BRDFs escogidas como difusas en el entrenamiento de la base de *soft PCA* muestran un rango de valores distinto al de las BRDFs más especulares. Para ciertos parámetros de 3 modelos se observa una relación entre la especularidad del material y el valor del parámetro: los materiales más difusos como *fabrics* aparecen con los valores más pequeños, mientras que los materiales como *steel* y *chrome* tienen los valores más altos.

Este método de obtención de un ratio de especularidad elimina los problemas del apartado anterior (con un único método podemos obtener un ratio para cualquier tipo de material, y cualquier BRDF editada puede ser ajustada a los modelos analíticos usando la librería Alta) pero presenta sus propios problemas: el ratio no es 100 % exacto, ya que algunos plásticos aparecen con el mismo valor que otros materiales difusos. Además, el uso de una herramienta de terceros aumenta la complejidad del sistema de edición actual, tanto en su construcción como en su uso. Debido a esto, se busca una última forma de encontrar un ratio de especularidad que funcione para cualquier BRDF, sea lo más correcta posible y no aumente demasiado la complejidad del actual sistema de edición, que se describirá en el siguiente apartado.

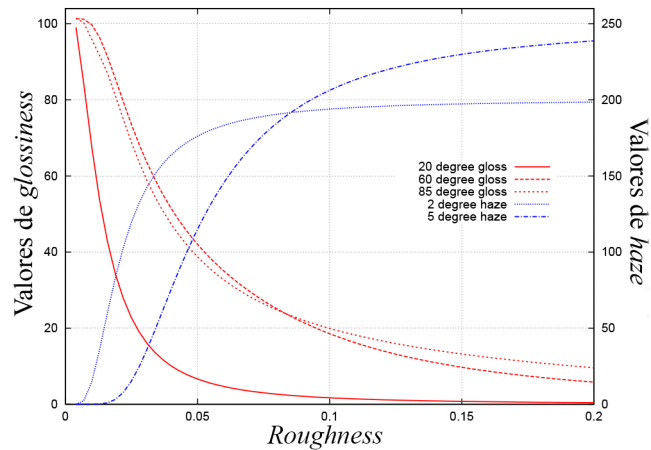
5. Transición entre representaciones



Gloss y haze frente al exponente especular del modelo modificado de reflexión de Phong



Gloss y haze frente al coeficiente de roughness del modelo de reflexión isotrópica de Ward



Gloss y haze frente al coeficiente de roughness del modelo de reflexión isotrópica de Ward

Figura 5.2: Extracto del trabajo de Westlund y Meyer [6], en el que se puede ver la relación entre el valor de brillo de un material a distintos ángulos (en rojo) y el valor de los parámetros de ciertos modelos analíticos en el eje de abscisas. De arriba a abajo, estos parámetros son: exponente especular del modelo de Phong [7] modificado [8], coeficiente de *roughness* para el modelo de Ward [9] y coeficiente de *roughness* para el modelo de Cook-Torrance [10].

5.2.3. Direcciones principales

Con las nociones aprendidas en los dos apartados anteriores y siguiendo la idea del trabajo de Nielsen et al.[44] sobre cómo capturar las características de una BRDF real con el menor número de mediciones posibles, se propone una nueva forma de capturar el ratio de especularidad. Según Nielsen, realizando mediciones desde 5 direcciones específicas es posible reconstruir de forma correcta un gran número de las BRDFs de la base de MERL. Esto implica que la información contenida en esas 5 direcciones es suficientemente representativa de cada material. Por ello, se observa el valor de las 100 BRDFs de MERL en esos cinco puntos y se estudia si existe alguna diferencia de comportamiento entre los materiales especulares y los difusos en esos puntos. Esta diferencia de comportamiento se ilustra en la Figura 5.3 con dos BRDFs representativas: *light brown fabric*, una BRDF difusa, y *steel*, una BRDF especular.

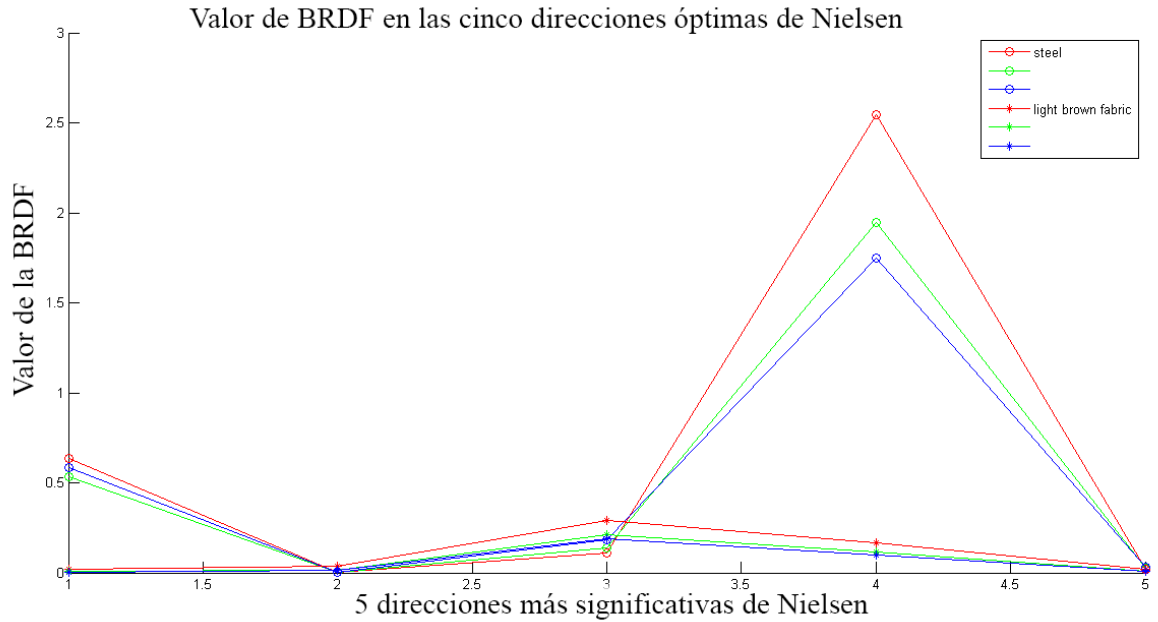


Figura 5.3: Muestra de los valores de 2 BRDFs en las 5 direcciones más significativas de Nielsen. Las BRDFs son *light brown fabric* (círculo) y *steel* (asterisco). Para cada una de ellas, se muestran los tres canales de color. Se puede observar un comportamiento muy diferenciado entre la BRDF difusa, que disminuye su valor entre la tercera y la cuarta dirección, y la BRDF especular que muestra un ascenso mucho más pronunciado en la misma zona.

Se observa una diferencia clara de comportamiento, en la que la BRDF especular presenta un gran pico ascendente en la cuarta dirección, mientras que la BRDF difusa presenta un pico muy ligero en la tercera para después descender. Se realiza esta misma comprobación para las 100 BRDFs de MERL para comprobar que este comportamiento es consistente. Como se puede ver en la Figura 5.4, existen dos tipos de comportamientos claramente diferenciados para prácticamente la totalidad de la base de MERL, que se ajustan a los encontrados con las dos BRDFs representativas. Este método de obtención de la especularidad de un material es sencillo de calcular, no depende del tipo de material que se esté utilizando y no aumenta la complejidad durante el proceso de edición, ya que es posible obtener los valores de la BRDF mediante el mismo proceso de reconstrucción desde los componentes PCA que se utiliza normalmente.

5. Transición entre representaciones

Nielsen también facilita en su trabajo cuáles serían las direcciones óptimas de captura de una BRDF para un número de mediciones desde 1 hasta 20. En la Figura 5.5 se puede ver que incluso con una única medición las BRDFs especulares muestran un valor mucho más alto que las difusas. En concreto, todas las BRDFs difusas tienen un valor inferior a 1. Como un único valor demuestra ser suficiente para distinguir la especularidad de un material, éste será el ratio que se utilizará de ahora en adelante. En el siguiente apartado se muestra una validación adicional de este ratio.

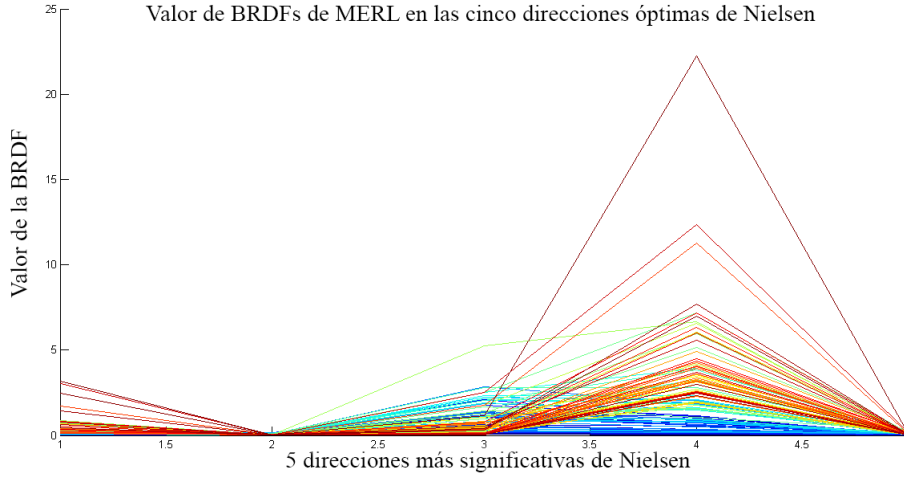


Figura 5.4: Muestra de los valores de las 100 BRDFs de MERL en las 5 direcciones más significativas de Nielsen. Se pueden observar dos comportamientos claramente diferenciados. Los colores fríos muestran el comportamiento de las BRDFs difusas, y los más cálidos los de las especulares. Por simplicidad, se muestra solamente uno de los tres canales de color de cada BRDF.

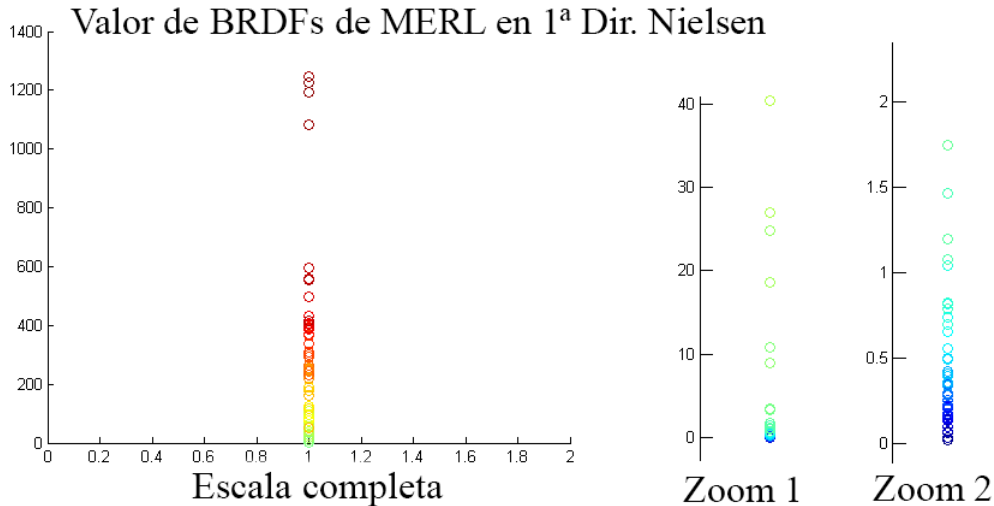


Figura 5.5: Muestra de los valores de las 100 BRDFs de MERL en la dirección más significativa de Nielsen. Como en la Figura 5.4 los colores más fríos se corresponden con las BRDFs más difusas y los cálidos con las especulares. A la derecha de la gráfica principal se muestran dos ampliaciones en las que se ven con más claridad los valores de las BRDFs más difusas. Por simplicidad, se muestra un único canal de color para cada BRDF.

5.2.4. Validación del ratio y reentrenamiento de la base de soft PCA

La herramienta *BRDF explorer* de Disney es una herramienta gratuita de código abierto que permite visualizar BRDFs. Esta herramienta interactiva es capaz además de mostrar información asociada a la BRDF, como su *polar plot*. Para validar el ratio de especularidad obtenido a partir de las direcciones de medición óptimas de Nielsen se examinan los *polar plots* de las 100 BRDFs de MERL. Se espera encontrar picos especulares en las BRDFs con un ratio de especularidad alto. Durante este proceso de validación, se observa que algunas de las BRDFs clasificadas como difusas en el entrenamiento de la base *soft PCA* presentan un comportamiento diferente al esperado, como puede observarse en la Figura 5.6. El ratio especular de dichas BRDFs también es más alto que el de otras como *white fabric*, por lo que la clasificación manual de la base actual presenta fallos en su entrenamiento.

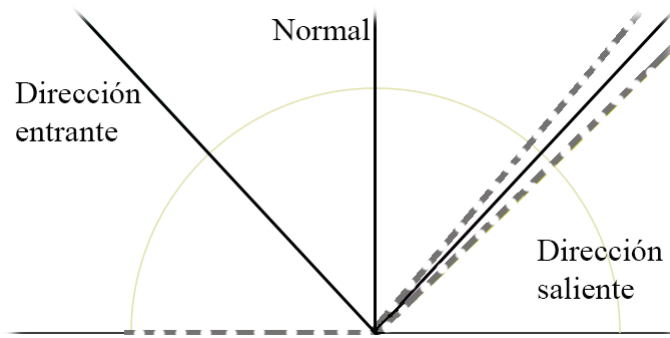


Figura 5.6: Muestra del *polar plot* de una de las BRDFs escogidas manualmente para entrenar la base de *soft PCA*. Las líneas negras sólidas representan la normal y los ángulos la incidencia de la luz (izquierda) y la reflexión de la luz (derecha). En gris, líneas discontinuas, se muestra el *polar plot* de la BRDF. Como se puede comprobar, muestra un pico especular mayor de lo esperado.

Debido a esto, se decide reentrenar la base difusa y repetir todo el proceso del Capítulo 4 para eliminar los fallos encontrados. Todos los *polar plots* que exhiben un comportamiento difuso presentan un ratio especular cuyo valor no pasa de 0.4. Por tanto, la nueva base de *soft PCA* se entrenará sólo con las BRDFs que no presenten picos especulares en el *polar plot* y cuyo ratio sea inferior a 0.4. En la Figura 5.7 se puede ver el ratio de especularidad para las 100 BRDFs de MERL (y las 306 generadas por Serrano) y su posición en el espacio PCA para la base original, la base de *soft PCA* inicial y la nueva base *soft PCA* reentrenada.

En cuanto a la orientación espacial, es interesante observar cómo en la representación de Serrano et al. [4] y en la base de *soft PCA* inicial las BRDFs difusas ocupan una pequeña zona del espacio 5D de los componentes de la base PCA, mientras que en la base de *soft PCA* las BRDFs difusas se extienden a lo largo de una zona mayor. Esto indica que la nueva representación ha sido capaz de retener una mayor información de los materiales difusos (característica que no presentan los otros dos modelos mostrados) y por tanto es capaz de representarlos mejor.

Una vez reentrenada la base de *soft PCA* y validado el ratio de especularidad, se pasa a explicar el proceso de navegación entre la representación obtenida y la original de Serrano en la siguiente sección.

5.3. Cambio entre bases

La navegación entre la representación de Serrano y la nueva base de *soft PCA* no es inmediata. Ambas representaciones se han obtenido mediante descomposición PCA, reduciendo la dimensionalidad de las BRDFs a 5 componentes. Como primera opción, se calcula una matriz lineal de cambio de base entre las dos representaciones. Sin embargo, no se encuentra ninguna aplicación lineal que funcione en ninguna de las dos direcciones. La matriz de cambio de base hallada funciona bien para los puntos linealmente independientes con los que se construye la matriz y en una única dirección. Se comprueba que, para distintos elementos iniciales de la matriz de cambio de base esta situación se mantiene. En el caso de que la aplicación lineal entre ambas bases PCA existiese, debería poder hallarse una transformación lineal a partir de bases de los dos espacios 5D para navegar entre ambas representaciones de forma correcta, pero este comportamiento esperado no aparece. Esto puede deberse a que las cinco dimensiones que utiliza cada base PCA no se encuentran en el mismo subespacio 5D ya que la representación de la base de *soft PCA* ha sido entrenada con un número menor de muestras y dispone de menos información. A continuación se presentan otras formas de realizar el cambio de base.

5.3.1. Full PCA a soft PCA

Como se ha explicado, la base PCA de Serrano está entrenada con un número mayor de BRDFs por lo que dispone de más información sobre su comportamiento que la base de *soft PCA*. Para poder navegar desde la base original hacia la reentrenada de *soft PCA* se decide realizar primero una reconstrucción de la BRDF original a partir de los componentes PCA de la primera base, y después proyectar dicha reconstrucción a la segunda, para obtener unos componentes distintos de la misma BRDF.

Hay que tener en cuenta que este proceso funciona correctamente pero tiene sus limitaciones. Por ejemplo, las BRDFs altamente difusas no se representan de forma correcta en la base de *full PCA*. Como se ha comentado anteriormente aparece un halo oscuro en la zona de máxima luminosidad del material. Esto se debe a que la base *full PCA* no es capaz de reconstruir esa información correctamente. Si se navega desde la base de *full PCA* a la de *soft PCA* en uno de estos casos, la pérdida de información inicial se mantiene a lo largo del proceso. Es decir, no es posible recuperar una mala representación mediante un cambio de base, los fallos que hubiese al reconstruir la BRDF a partir de los componentes PCA se mantendrán al cambiar de representación porque la información ya se ha perdido.

Se hace por tanto especialmente importante definir cuidadosamente una zona común o frontera donde ambas representaciones se comporten de forma correcta y en la que sea posible navegar entre una y otra. Inicialmente, se realiza una exploración visual de la frontera, tomando como punto de referencia BRDFs que se representan correctamente en las dos bases y se comprueba que la navegación entre las dos representaciones funciona bien en una dirección (desde la representación de Serrano hacia la de *soft PCA*). Más adelante, durante las ediciones, el punto de cambio de base vendrá definido por el ratio de especularidad anteriormente encontrado. Se realizan las mismas pruebas para comprobar si este método es bidireccional, es decir, si se puede pasar de la misma forma desde la representación de *soft PCA* hacia la de *full PCA*. Sin embargo, debido de nuevo a que el entrenamiento de la base *soft PCA* se ha realizado con un número de

muestras menor, la navegación no funciona en el otro sentido, por lo que se debe buscar una alternativa diferente. En la figura 5.8 se muestra un diagrama explicativo de la frontera entre las dos bases.

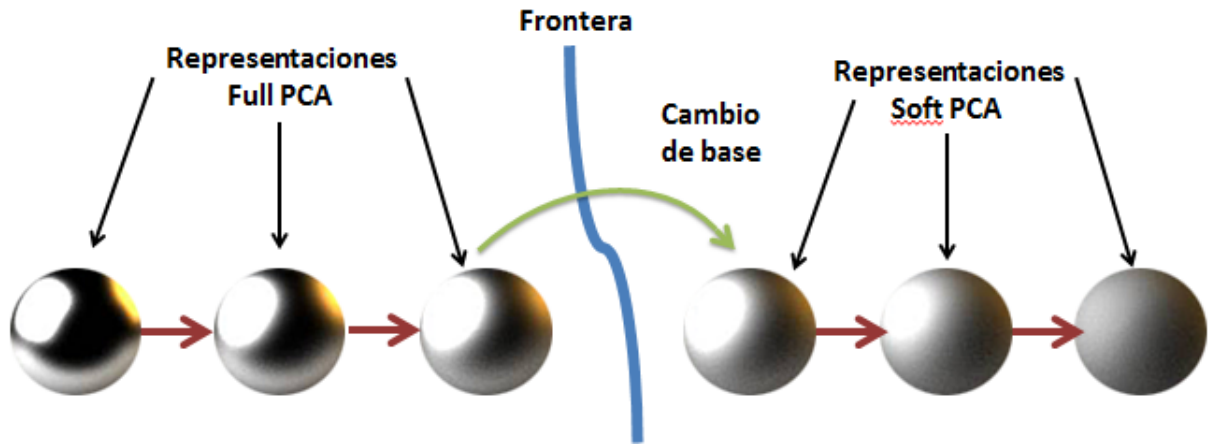


Figura 5.8: Esquema explicativo de la definición de la frontera y la navegación entre representaciones. La edición del material se realiza en el espacio *full PCA*, disminuyendo su especularidad mientras dicha base sea capaz de representar la BRDF correctamente. Antes de que se empiece a perder información, en la frontera (una zona común para ambas bases), se produce el salto a la base *soft PCA*, en la que la edición continua hasta llegar a la apariencia deseada. El paso de esta base a la anterior se explica en la Subsección 5.3.2. El mapa de color indica el valor del atributo que va disminuyendo a lo largo del espacio PCA.

5.3.2. Soft PCA a full PCA

El paso de la representación de Serrano a la de *soft PCA* funciona de forma correcta en la frontera simplemente reconstruyendo una BRDF a partir de sus componentes PCA y después proyectándola en la otra base, pero la navegación en sentido contrario no funciona correctamente. Debido a ello, se propone entrenar el paso entre la representación de *soft PCA* y la de Serrano con una red neuronal del mismo modo que se entrena el valor de los atributos perceptuales utilizando la Ecuación 4.2. En este caso, se entrena el paso entre los dos espacios de componentes de las bases PCA, siguiendo el procedimiento de la Sección 4.4. De nuevo, se ajustan el número de neuronas de la red y el valor sigma de la misma.

Para elegir la combinación de parámetros que minimice el error, se ha realizado un entrenamiento mediante validación cruzada, separando aleatoriamente un 5 % de los datos para validación. Además, este proceso se ha realizado 10 veces con diferentes conjuntos de validación para evitar casos de mínimos locales en los que no se encuentra una buena solución por una mala inicialización de los pesos de las neuronas y casos en los que el conjunto de validación es demasiado poco representativo del conjunto total de datos. Al realizar este proceso con las distintas posibles combinaciones de parámetros de entrenamiento, se ha encontrado el caso óptimo y los demás han sido descartados. En concreto, la red neuronal tiene 100 neuronas y un valor sigma de 100.

Con la nueva red neuronal entrenada y el procedimiento de reconstrucción explicado en el apartado anterior, ya se dispone de una forma para navegar en ambos sentidos entre las dos

representaciones. Cabe destacar que el cambio de base utilizando la red neuronal es más rápido que el cambio de base pasando por la reconstrucción de la BRDF, por lo que no se descarta entrenar otra red para el paso de *full PCA* a *soft PCA* si la rapidez fuera un requisito necesario durante el proceso de edición.

5.4. Muestra de la navegación entre bases

El paso de una base a otra para las 100 BRDFs de MERL es prácticamente inmediato con los dos métodos descritos en los apartados anteriores (incluso sin esos métodos, se podría realizar un mapeo directo entre los componentes PCA de las dos bases para cada una de las 100 muestras). Sin embargo, durante el proceso de edición es posible que el usuario introduzca BRDFs distintas a las ya conocidas (de otras bases de datos existentes o capturadas por él mismo), además de que al modificar el valor de un atributo de un material, el material cambia y sus componentes PCA cambian con él. Es por tanto necesario disponer de estos métodos de navegación, así como del ratio de especularidad que indica cuándo debe producirse el salto, de manera que no sea necesaria hacer una comprobación manual en cada paso de la edición.

Como se ha explicado anteriormente, todas las BRDFs que presentan un ratio de especularidad menor a 0.4 son difusas. Inicialmente se establece el umbral del ratio en este valor, ya que funciona de forma correcta en una amplia variedad de casos.

5. Transición entre representaciones

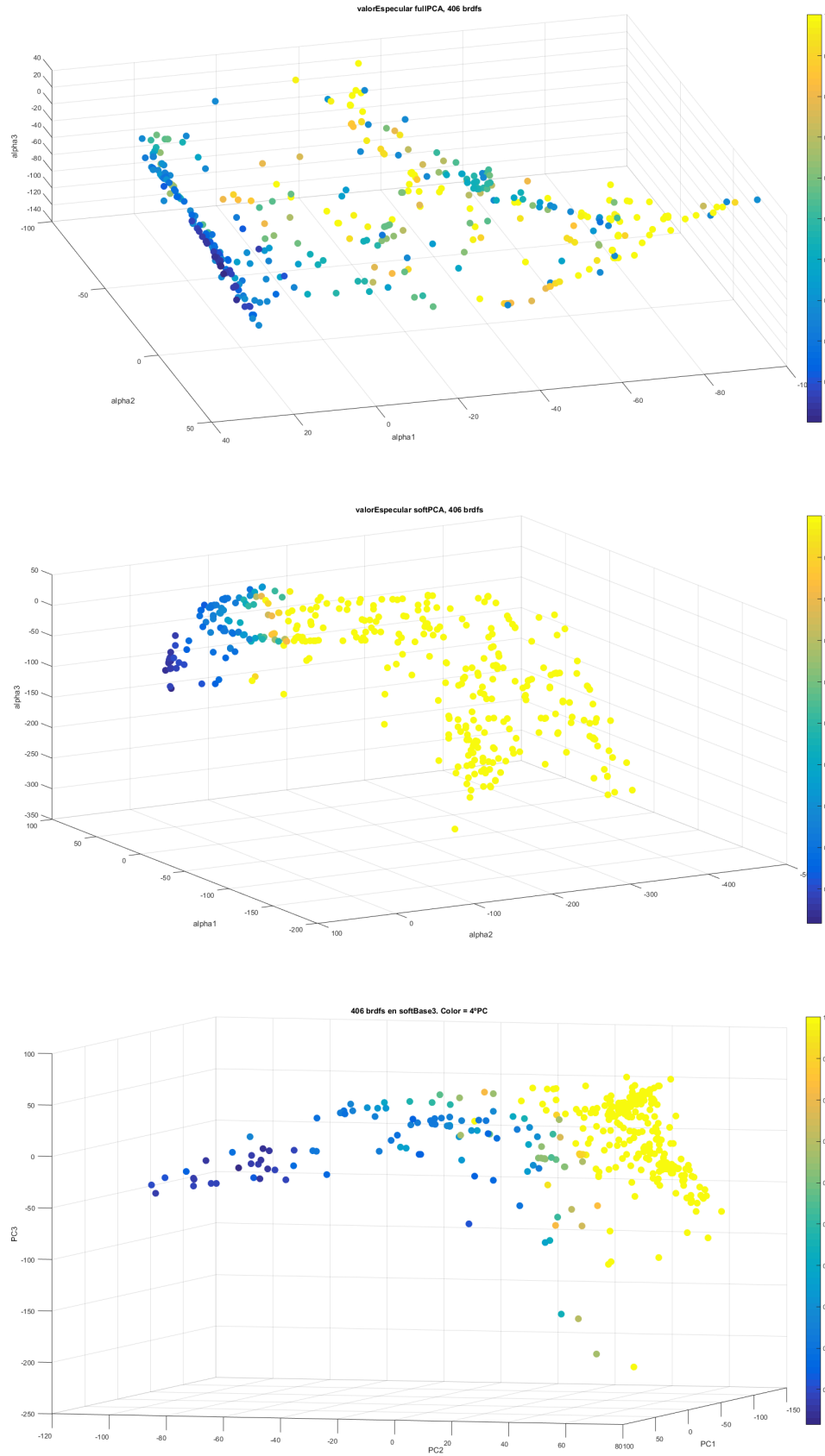


Figura 5.7: Muestra de los tres primeros componentes de 406 BRDFs en la base de Serrano (arriba), la base de *soft PCA* entrenada manualmente (centro) y la base de *soft PCA* entrenada con el ratio de especularidad encontrado (abajo). El color muestra el ratio de especularidad. Los valores mayores de 1 han sido *clampeados* para una mayor claridad en la escala de color. Como se puede ver, la base de *soft PCA* reentrenada muestra una mayor variabilidad a la hora de representar los materiales más difusos a lo largo del espacio de componentes.

6. Integración en el sistema de edición

6.1. Introducción

En este capítulo se describe en profundidad cómo funciona el sistema de edición de materiales de Serrano et al., así como los cambios realizados sobre el mismo para su integración en un plugin de edición interactivo. Dichos cambios incluyen mejora de la fluidez del sistema y optimización del mismo. Por último, se habla de las limitaciones encontradas a lo largo de este trabajo.

En la primera sección de este capítulo se describe con mayor detalle el sistema de edición original. Se observa cómo, desde una BRDF como punto de partida, se realiza un descenso de gradiente minimizando el valor de un atributo en sucesivos pasos que modifican los componentes PCA de la BRDF, para así obtener una apariencia nueva de forma intuitiva para el usuario. También se describen los cambios realizados para que este mismo sistema funcione con dos representaciones distintas (la de Serrano y la de *soft PCA* reentrenada) de forma transparente al usuario.

A continuación, se describe un plugin interactivo ya existente diseñado para poder editar y visualizar BRDFs sin necesidad de manipular ningún tipo de código fuente, de tal forma que sea más sencillo para un usuario con un conocimiento técnico menor utilizar este sistema. Este plugin se modifica en este trabajo para poder utilizarlo con el sistema de edición de dos representaciones.

Por último, se explican las debilidades de la aproximación seguida en este trabajo, y cómo se ha minimizado el impacto de las mismas en su funcionamiento, barajando distintas estrategias de contención y corrección de estos puntos débiles. También se comentan las limitaciones que no se han podido solucionar en este trabajo pero de las que se tiene constancia.

6.2. Sistema de edición

Una de las contribuciones del trabajo de Serrano et al. es que permite editar un material dado no mediante el ajuste de un sinfín de parámetros analíticos y de difícil comprensión, sino mediante un conjunto definido de atributos perceptuales significativos validados por un experimento dirigido con usuarios reales. Este hecho hace que editar un material sea tan intuitivo para un usuario como, por ejemplo, aumentar su apariencia metálica hasta cierto punto.

Para conseguir esta transparencia a la hora de editar una BRDF, Serrano et al. utilizan

56000 respuestas de usuarios reales para entrenar una red neuronal que permite asociar a los componentes PCA de una BRDF cierto valor para cada uno de los 14 atributos que utiliza. De esta forma se obtiene que a cada punto del espacio 5-dimensional (en la Ecuación 4.2 se muestra que se utilizan los cinco primeros componentes de la base PCA en el trabajo de Serrano et al., al igual que en este) que representa todos los posibles componentes de BRDFs en su base PCA le corresponde un valor de cada uno de los catorce atributos.

Utilizando el método de descenso de gradiente, es posible moverse por este espacio 5-dimensional para obtener un valor de un atributo distinto, modificando en el proceso el valor de los componentes PCA de la BRDF así como su aspecto. En la Figura 6.1 se puede observar el camino seguido durante una edición y cómo se ha modificado la apariencia de la BRDF original.

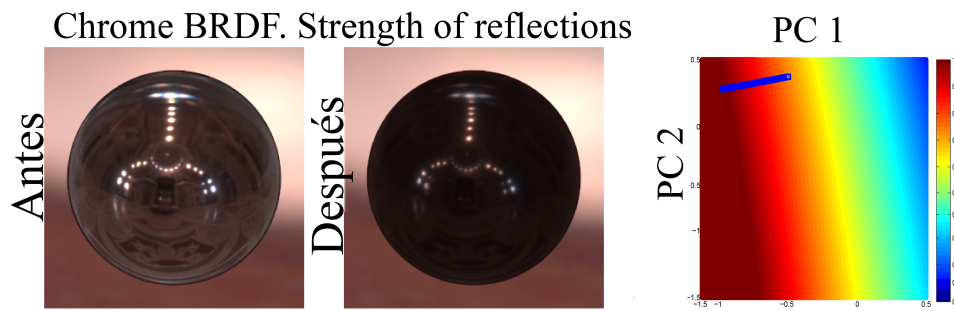


Figura 6.1: Edición de la BRDF *chrome* disminuyendo su atributo *strength of reflections*. Se puede ver la BRDF original (izquierda), la misma BRDF modificada (centro), y el camino seguido mediante descenso de gradiente para modificar su atributo (derecha). Edición realizada únicamente con la base de *full PCA*. Imagen adaptada de Serrano et al. [4]

Para adaptar este sistema al uso de dos representaciones distintas de BRDFs, se realizan algunos cambios. En lugar de realizar el descenso de gradiente a la vez en los dos espacios PCA, se va saltando de uno a otro según sea necesario. Para elegir en cuál de los dos espacios se inicia el descenso de gradiente se obtiene la medida de especularidad de la BRDF original que se quiere editar siguiendo el procedimiento explicado en la Subsección 5.2.3. Dependiendo de si el valor obtenido está por encima o por debajo del ratio fijado se utiliza la base original de Serrano et al. (para las BRDFs especulares que superan el ratio) o la base *soft PCA* (para las BRDFs difusas cuyo valor de especularidad es menor que el ratio fijado). Después de esta decisión inicial, se sigue el proceso de descenso de gradiente normal. En cada paso del proceso, se vuelve a calcular la especularidad de la BRDF editada para comprobar que se mantiene en el rango de valores de la base con la que se está representando. Si en algún momento se acerca demasiado a la frontera, se realiza un cambio de base de acuerdo a lo explicado en la Sección 5.3. Para evitar que se produzcan saltos continuos de una base PCA a la otra en estos puntos cercanos a la frontera, se introduce una ligera histéresis en el ratio de la especularidad obtenido mediante experimentación (por ejemplo, se salta de *full PCA* a *soft PCA* cuando se alcanza al valor de 0.3 pero el salto en la dirección contraria se realiza al llegar a 0.4).

Se encuentra que tanto la histéresis como el ratio fijados no siempre funcionan igual de bien para todos los casos de edición. A veces el salto se produce después de que hayan aparecido artefactos indeseables en las BRDFs, aunque en otros casos funciona bien. Además, el proceso de optimización de descenso de gradiente a menudo encuentra mínimos locales en el espacio PCA de los que no puede salir, por lo que hay valores de atributos inalcanzables desde ciertas

partes del espacio. Las optimizaciones aplicadas para resolver estos problemas se exponen en la Sección 6.3.

6.2.1. Cambio del ratio manual de especularidad por SVMs

Como se ha explicado en la sección anterior, el ajuste manual del ratio no siempre funciona igual de bien para todos los casos de edición. Para evitar este problema, se entrena un SVM con el valor de especularidad de las 100 BRDFs de MERL y así se obtiene una herramienta de clasificación binaria y automática para nuestros dos tipos de materiales (difusos y especulares). En la Figura 6.2 se puede ver el espacio de las 406 BRDFs mostrado en la Figura 5.7, esta vez con la clasificación del SVM en vez de con el valor del ratio de especularidad.

Este cambio nos permite definir de forma automática un hiperplano dentro de los dos espacios PCA que actúa como frontera durante la edición. Al haber sido entrenado con los datos reales de las BRDFs de MERL, define este hiperplano de una forma más óptima que el ajuste manual del ratio. Además, ya no se necesita obtener la medida de especularidad en cada paso de la edición, ya que el *input* del SVM son los componentes de la base PCA. Esto aumenta la velocidad de cada paso de edición, ya que evita tener que reconstruir cada BRDF a partir de sus componentes PCA para obtener su medida de especularidad.

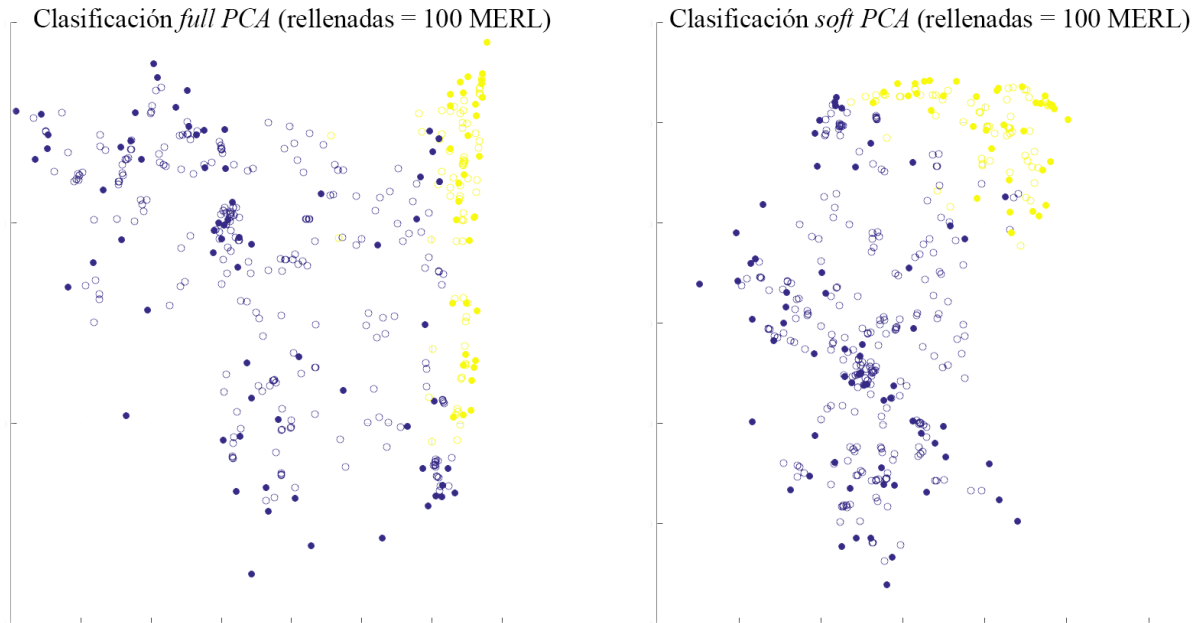


Figura 6.2: A la izquierda, clasificación de las 406 BRDFs disponibles con el SVM de *full PCA*. A la derecha, misma clasificación con el SVM de *soft PCA*. En azul se muestran las BRDFs especulares y en amarillo las difusas. Las BRDFs de la base de datos de MERL, con las que se ha realizado el entrenamiento de los SVMs, se encuentran rellenas en su color. Para mayor simplicidad, se muestra un corte bidimensional del espacio 5-dimensional en el que se encuentran los componentes de las BRDFs para cada base.

6.3. Plugin interactivo

Una vez se obtiene un sistema de edición que funciona con las dos representaciones, se decide incluirlo en un plugin interactivo de edición. Este plugin, ya existente, utiliza el trabajo de Serrano et al. y la herramienta *BRDF explorer* de Disney para editar materiales y mostrarlos de forma interactiva para el usuario. Este método es mucho más directo y visual para la edición de BRDFs, ya que el usuario no tiene que modificar manualmente ninguna línea de código y además puede ver los resultados del material que está editando con sólo pulsar un botón. En la Figura 6.3 se muestra el aspecto original del plugin existente, y en la Figura 6.4 las modificaciones realizadas en este trabajo para incluir la edición con las dos bases. La modificación visible de cara al usuario, es que puede visualizar una muestra en 2D del espacio PCA coloreado con el valor de un atributo para las dos representaciones existentes. De esta forma puede observar la misma BRDF en los dos espacios PCA de forma simultánea. Aunque se vea el punto del espacio en el que se sitúa la BRDF en las dos representaciones, tanto la edición como la representación se realizan con una única base PCA en cada momento. Es decir, mientras se esté trabajando con un material especular, la edición se llevará a cabo con la base *full PCA* y la visualización se renderizará a partir de los componentes de la misma base, aunque se podrá ver en qué punto del espacio de la base de *soft PCA* se encontraría dicho material, y viceversa.

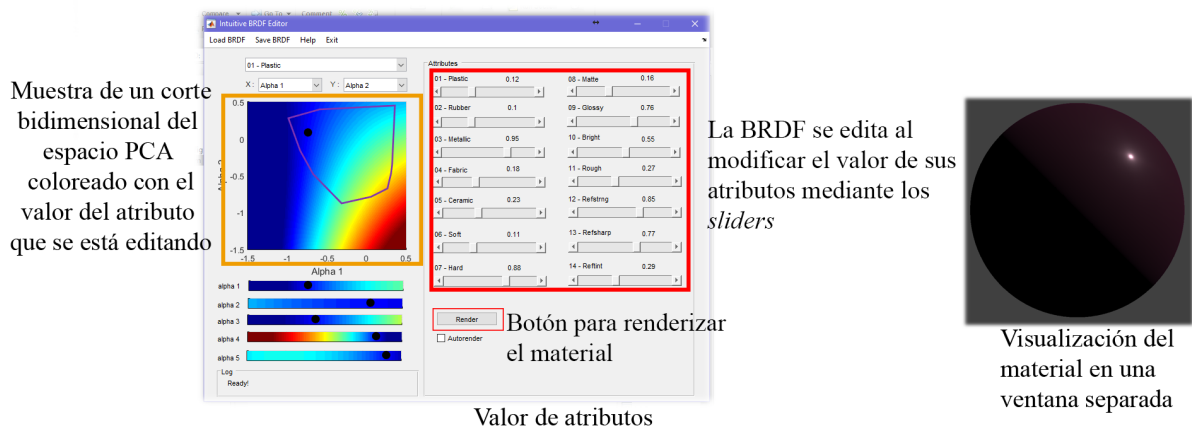


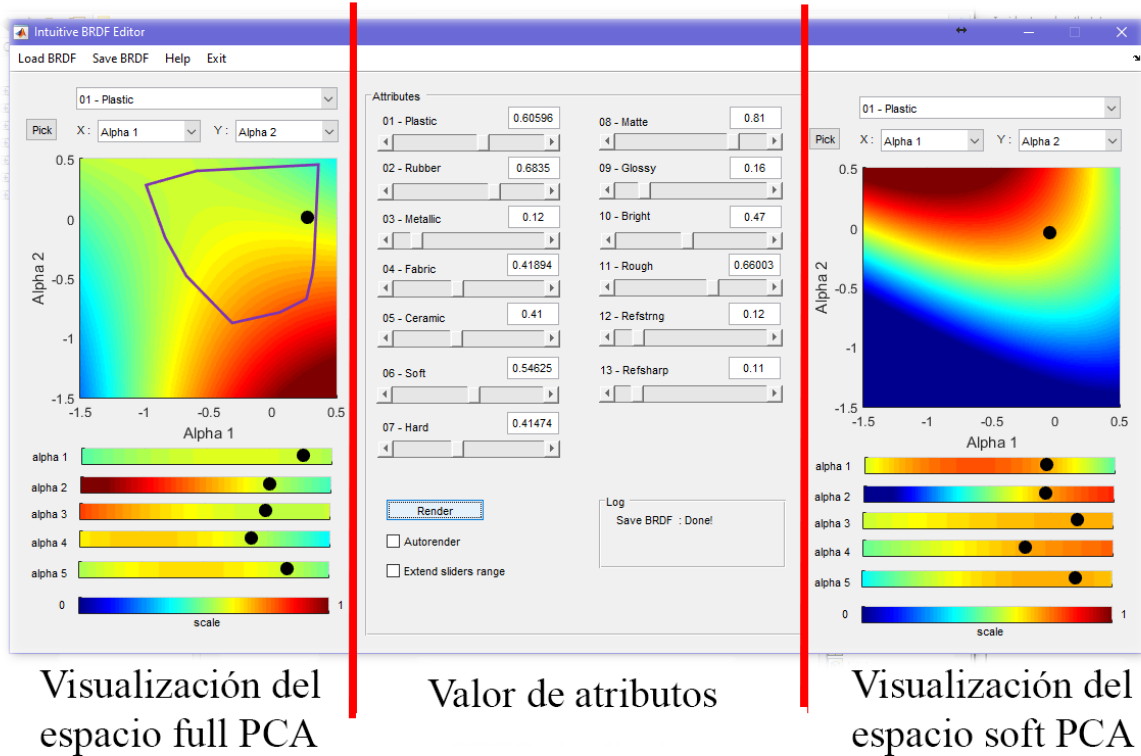
Figura 6.3: Muestra del plugin de edición interactivo existente. A la izquierda se ve un gráfico 2D del espacio PCA junto con el valor de un atributo. En el centro los sliders que controlan la edición y muestran los valores de cada atributo para la BRDF, y a la derecha la BRDF renderizada con *BRDF explorer*.

Además de esta mejora en la experiencia del usuario, se realizan algunas modificaciones al funcionamiento interno del sistema, tanto para solventar los problemas encontrados hasta el momento como para hacerlo más rápido para el usuario.

6.3.1. Cambio del paso de *full PCA* a *soft PCA*

Con las SVMs entrenadas, se observa que el paso que consume más tiempo durante la edición es el cambio de base de *full* a *soft PCA*. Se observa también que el caso en la dirección contraria es mucho más rápido (la diferencia es del orden de dos o tres segundos para el primer caso, y unos 300ms en el segundo). Debido a esto, y para agilizar el proceso de edición en el plugin

Nueva interfaz



Visualización del material en una ventana separada

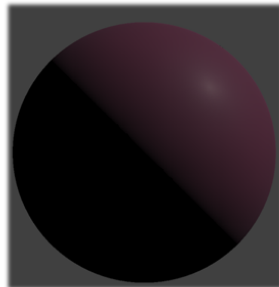


Figura 6.4: Modificación del plugin de edición interactivo para que funcione con el sistema de edición de dos representaciones. Se añade otro gráfico para que el usuario pueda ver a la vez los dos espacios PCA en 2D.

interactivo, se decide entrenar otra red neuronal que regule el paso de la base de Serrano et al. a la nuestra. Se sigue el mismo procedimiento que en el caso anterior (el paso de *soft PCA* a *full PCA*, explicado en la Subsección 5.3.2), y se obtiene una mejora significativa del coste en tiempo. De forma análoga al proceso realizado en la navegación de *soft PCA* a *full PCA*, se utilizan los valores de los componentes de las 100 BRDFs de MERL en la base de *full PCA* y en la de *soft PCA* para entrenar una red neuronal, de tal forma que al recibir una BRDF expresada en la primera base, nos dé los componentes de la misma BRDF para la segunda base. Después de realizar el análisis de ajuste de parámetros (explicado también en la Subsección 5.3.2) se obtiene una red capaz de navegar entre la representación de Serrano et al. y la nuestra de una forma más eficaz que pasando por la reconstrucción de una BRDF medida a partir de sus componentes

PCA.

6.3.2. Cambio del método de optimización de los atributos

Como se ha explicado en la sección anterior, el descenso de gradiente presentaba problemas en los mínimos locales. Para evitarlos, se decide utilizar el algoritmo *SQP* [50]. En concreto, se utiliza la implementación del mismo que ofrece la herramienta *fmincon* de Matlab. De esta forma se consigue una optimización más eficiente que en el descenso de gradiente, por lo que la zona del espacio PCA por la que el usuario se puede mover durante sus ediciones aumenta. Además, este método es también más rápido que el descenso de gradiente. En la figura 6.5 se muestra un caso ilustrativo en el que existe la posibilidad de que el descenso de gradiente no llegue a la solución óptima.

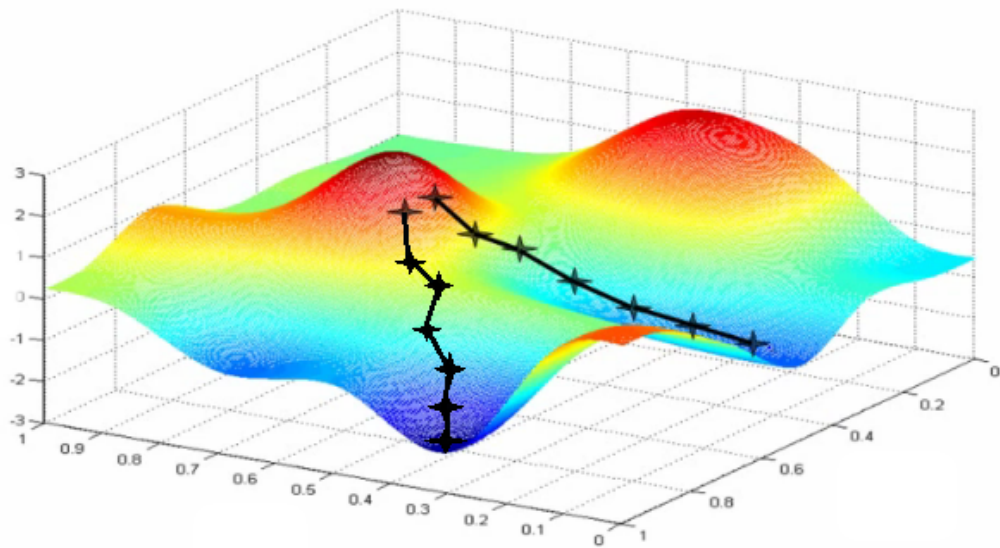


Figura 6.5: Muestra de un caso en el que no está asegurado que el descenso de gradiente llegue a la solución óptima. El camino izquierdo representa la llegada al mínimo absoluto, y el derecho a un mínimo local. Debido a la separación de las dos zonas de mínimo valor, una vez el descenso comienza en una de las dos direcciones ya no es posible retroceder hacia la otra dirección. Este problema se soluciona con el algoritmo *SQP*. Imagen obtenida de *Stanford machine learning course* (<http://cs229.stanford.edu/>)

6.4. Limitaciones encontradas

A pesar de los problemas solventados, el nuevo sistema aún tiene limitaciones que no se han podido solucionar. Sin embargo, estas limitaciones han sido estudiadas y se exponen en esta sección en la que también se proponen posibles soluciones para las mismas.

En el método original de edición de Serrano et al., el espacio PCA estaba limitado por un *convex hull*. Un *convex hull* o envoltente convexa es el espacio mínimo que contiene todos los puntos de un conjunto, de tal forma que los límites del *convex hull* envuelven todos los datos

contenidos en dicho conjunto de forma convexa. En concreto, el *convex hull* de Serrano et al. está formado a partir de las 100 BRDFs de MERL. Esta limitación garantizaba que todas las ediciones que se produjeran dentro del *convex hull* conservarían las propiedades matemáticas necesarias para que una BRDF fuese plausible. Esta misma aproximación, sin embargo, no sirve en la base de *soft PCA*. La base de *full PCA* generalmente representa bien todas las BRDFs de la base de datos de MERL. Además, también representa de forma correcta una gran parte del espacio delimitado por un *convex hull* formado por dichas BRDFs. En el caso de la base de *soft PCA*, la región delimitada por todas las BRDFs de la base de datos de MERL es mucho más amplia que la zona de materiales difusos en la que esta base representa BRDFs de forma correcta. Debido a esta diferencia, un *convex hull* de estas características no asegura que no aparezcan artefactos en el espacio de la base *soft PCA*. Para garantizar que las BRDFs editadas en la base *soft PCA* son físicamente correctas habría que asegurar una por una las tres propiedades que deben cumplir: reciprocidad, no negatividad y conservación de la energía [51]. Las dos primeras siempre se cumplen por la forma en que están codificadas y almacenadas las BRDFs tabuladas, por lo que sólo haría falta calcular la conservación de la energía cuando fuera necesario.

Al realizar pruebas exhaustivas gracias a la facilidad del plugin para llevar a cabo de forma más eficaz y sencilla las ediciones de BRDFs se consigue aumentar la información disponible sobre el comportamiento de la nueva base de *soft PCA*. Las optimizaciones en el algoritmo de minimización, así como en la clasificación y navegación entre las distintas bases permiten realizar un mayor número de pruebas en menos tiempo, sin necesidad de modificar ni una línea de código durante todo el proceso. La exploración del nuevo espacio 5-dimensional demuestra que hay regiones que no están bien representadas, en las que no hay suficiente información para mostrar correctamente una BRDF a partir de sus componentes PCA o que se salen del rango de valores de los materiales conocidos con los que se han entrenado las bases PCA. Estas regiones oscuras o agujeros de información pueden dar lugar a resultados inesperados o artefactos en la BRDF editada. En concreto, se observa que la probabilidad de encontrarse con uno de estos agujeros del espacio PCA aumenta al realizar sucesivas ediciones que impliquen cambios de base sobre una misma BRDF. Los artefactos hallados en estos casos son como los que se muestran en la Figura 4.4, en los que la base *soft PCA* carecía de la información necesaria para representar correctamente un material especular. En este otro caso, la aparición de zonas con poca o mala información puede deberse a dos razones: que el hiperplano definido por los SVMs que indican cuándo cambiar de base no sea del todo fiable, o que las redes que pasan de una base a otra introduzcan pequeños errores que se van acumulando consecutivamente hasta causar el problema. Una posible solución para ambos problemas sería la de obtener más datos para entrenar tanto las redes neuronales como los SVMs.

7. Resultados

Como se ha visto en la Figura 4.3, la base *soft PCA* es capaz de representar materiales difusos de la base de datos de MERL. Esto resuelve el problema de la representación de BRDFs que mostraba la base PCA utilizada en Serrano et al., pero no es suficiente por sí sola para soportar un proceso de edición con materiales cuya especularidad varía. Debido a esto, ambas representaciones son necesarias para cubrir toda la variedad de especularidad de los materiales. Para conseguirlo, en este trabajo se ha creado una nueva medida de especularidad, basada en la información que se puede encontrar en las direcciones más significativas proporcionadas por Nielsen et al. en su trabajo para la adquisición de datos de BRDFs. Una vez se conoce la representación que debe usarse en un momento dado, la navegación entre distintas representaciones se consigue mediante RBFNs entrenadas. Para automatizar la frontera entre las distintas bases PCA, se usa la medida de especularidad como un ratio para entrenar dos SVMs que delimitan la zona del espacio PCA de cada base en la que su comportamiento es correcto. Finalmente, esta técnica se integra en un plugin de edición de materiales ya existente para mejorar la experiencia del usuario. Las limitaciones del modelo previo han sido sobrepasadas. A continuación se presentan los resultados obtenidos así como las limitaciones encontradas para este nuevo modelo.

Se ha comprobado que la técnica de dos representaciones presenta algunos inconvenientes nuevos que no se habían encontrado previamente en el trabajo de Serrano et al. En concreto, durante el proceso de edición, una larga sucesión de ediciones que impliquen un cambio de representación puede conducir con el tiempo a algún tipo de artefactos, probablemente debido a pequeños errores introducidos por las RBFNs que cambian de una base PCA a la otra. La representación *full PCA* no muestra este problema al trabajar siempre con una única representación.

Durante la edición, un *envolvente convexa* (o *convex hull* en inglés) actúa como límite definido sólidamente para definir la zona del espacio *full PCA* en el que se pueden llevar a cabo ediciones evitando la aparición de artefactos. Esta es una aproximación conservadora, ya que asegura que cualquier BRDF dentro de la envolvente convexa formada por las BRDFs de MERL mantendrá sus propiedades de forma correcta. Pero no hay razón por la que no pueda haber otras BRDFs nuevas y plausibles fuera de la envolvente convexa. Siempre y cuando se aseguren sus propiedades matemáticas, se debería permitir al usuario explorar un espacio más amplio del que puede usar ahora.

Pese a estas limitaciones, la mejora respecto al modelo anterior de Serrano et al. es plausible. La Figura 7.3 muestra una edición con un cambio de representaciones desde *soft PCA* hacia *full PCA*. Conseguir ambos extremos no habría sido posible si sólo una de las dos representaciones fuese utilizada. En la interfaz del plugin se puede ver cómo la misma BRDF se mueve en el espacio PCA de forma diferente en cada una de las representaciones. Según el material se vuelve

más especular, el punto correspondiente a la BRDF en el espacio de la nueva base se mueve a una zona en la que falta información para una representación correcta del material, mientras que la misma BRDF en el espacio de la base de *full PCA* se representa correctamente y permanece siempre dentro de los límites de la envolvente convexa. La Figura 7.1 muestra el caso inverso, una edición en la que la representación cambia de *full PCA* a *soft PCA*. La Figura 7.2 muestra otros ejemplos de ediciones con el nuevo plugin.

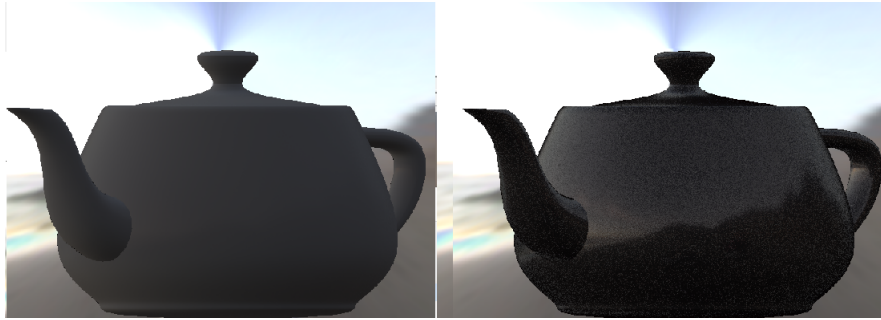


Figura 7.1: Ejemplo de una edición con cambio de base (de *full PCA* a *soft PCA* de la BRDF de MERL *chrome*). Se modifica el valor del atributo metálico del valor original al mínimo posible. La imagen izquierda corresponde a la BRDF editada, representada a partir de la base *soft PCA*, mientras que la derecha corresponde a la original reconstruida a partir de sus componentes de la base *full PCA*.

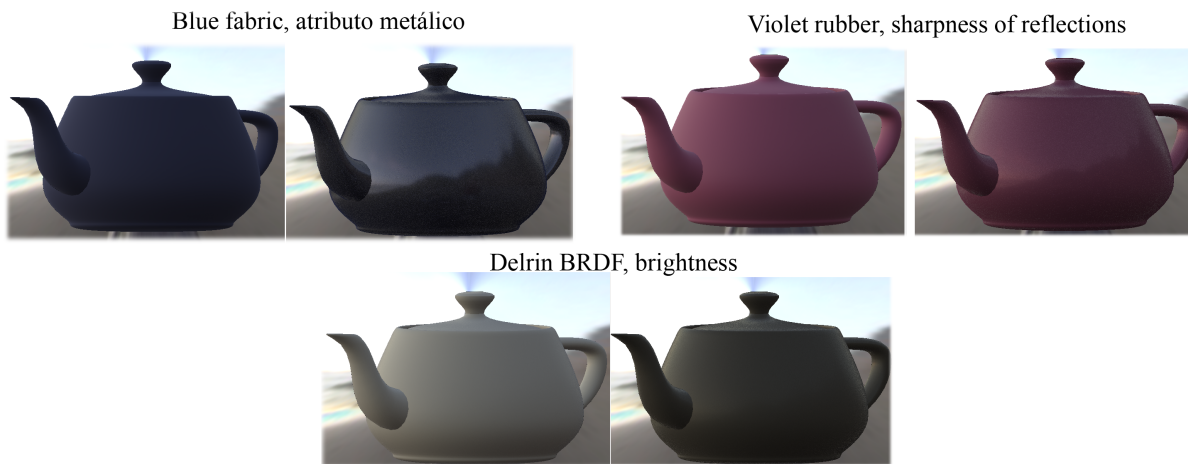


Figura 7.2: Resultados de ediciones sobre varias BRDFs. La BRDF inicial se muestra a la izquierda, y el resultado de la edición a la derecha. De arriba a abajo e izquierda a derecha, estas ediciones son: *blue fabric* aumentando el atributo metálico (cambio de *soft PCA* a *full PCA*), *violet rubber* incrementando *sharpness of reflections* (cambio de *soft PCA* a *full PCA*) y *delrin*, disminuyendo *brightness*.

7. Resultados

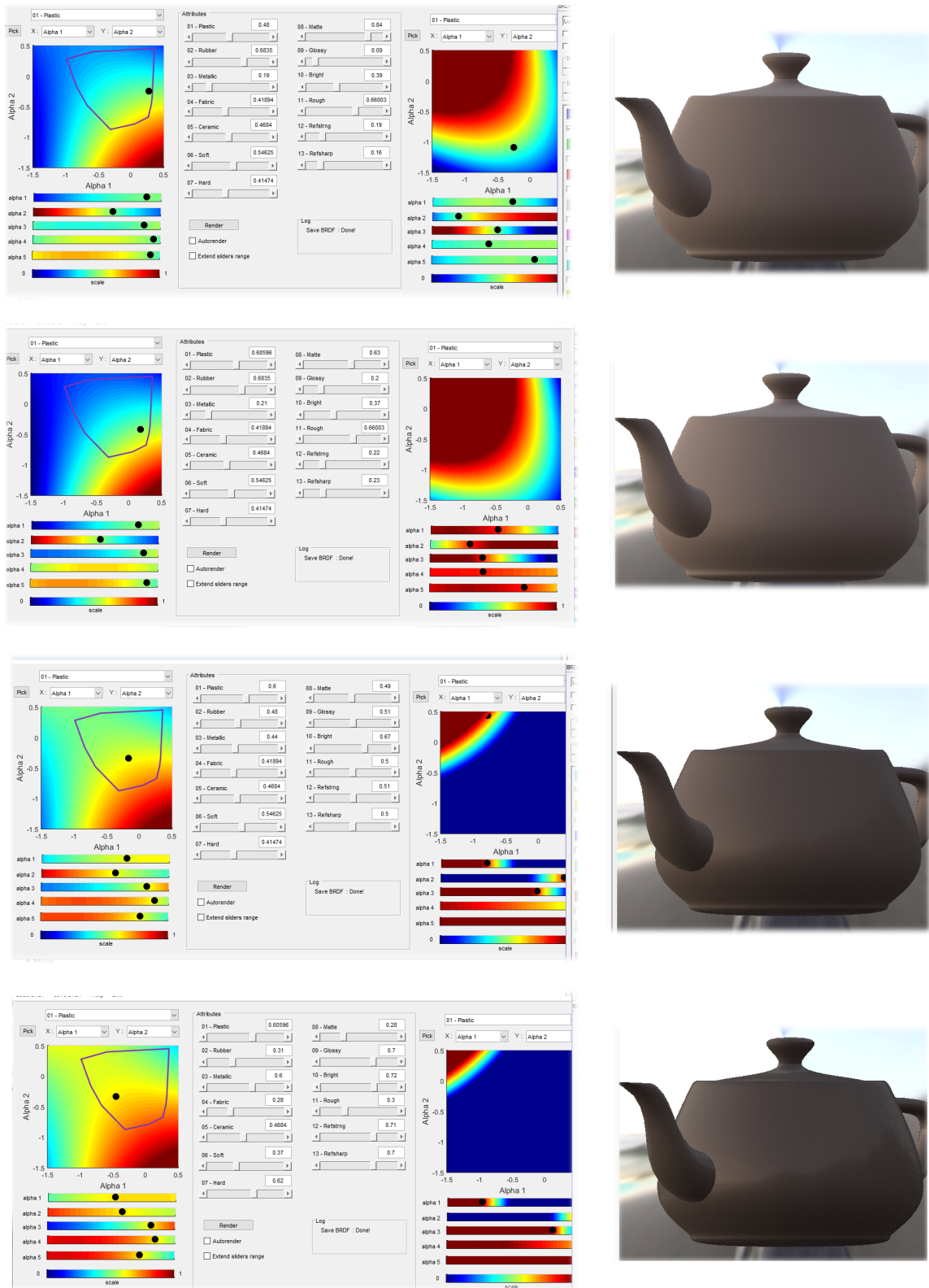


Figura 7.3: Ejemplo de una edición de la BRDF de MERL *beige fabric*, con un cambio desde la base de *soft PCA* a la de *full PCA*. El atributo *glossy* se modifica desde el valor más bajo (arriba) hasta el más alto (abajo). A la izquierda la interfaz del plugin puede verse. Cabe destacar cómo el punto del espacio PCA en el que se encuentra la BRDF se modifica a lo largo de la edición. A la derecha, se muestra el cambio de la apariencia de la BRDF.

8. Conclusiones y trabajo futuro

En este proyecto se ha mostrado que cuando un tipo de materiales se encuentra pobremente representado en un conjunto de datos, es posible la utilización de una base PCA entrenada sólo con ese tipo de materiales para representarlos mejor, siempre y cuando ésta posea una frontera común con la otra (u otras) base PCA. Este descubrimiento podría ser útil cuando no es posible la obtención de un mayor número de muestras, o cuando la diferencia entre distintos tipos de materiales es tan grande que sesga los componentes de la base PCA hacia un tipo de materiales. También se ha presentado en este trabajo una nueva medida de especularidad para BRDFs tabuladas, que no está limitada a ningún tipo de material y cuyo uso es sencillo y de bajo coste computacional cuando se trabaja con este tipo de BRDFs.

Aún así, quedan fronteras abiertas, y muchas oportunidades de trabajo futuro interesantes. Por ejemplo, un análisis en profundidad de las diferencias de las bases PCA podría darnos más información sobre su comportamiento. Como se ha mostrado en la Figura 4.5 se muestran las profundas diferencias entre los componentes principales de ambas bases PCA, pero no se conoce en profundidad el significado o los efectos de dichas diferencias o cómo poder utilizarlas para mejorar el sistema de representación actual.

Otra línea de trabajo futuro interesante sería la exploración de otros métodos para realizar la navegación entre distintas representaciones. Se sabe que se producen pequeños desajustes al navegar entre las dos bases PCAs utilizando las RBFNs entrenadas en este trabajo. El estudio de otros métodos de navegación podría ser útil para minimizar dichos desajustes.

Finalmente, la ampliación del espacio PCA en el que el usuario puede realizar ediciones podría ser ampliado. Este espacio está actualmente limitado por una envolvente convexa. Su uso podría ser sustituido o incluso eliminado siempre y cuando las propiedades físicas de la BRDF se mantuvieran. De las tres propiedades matemáticas que aseguran la corrección física de una BRDF (reciprocidad, no negatividad y conservación de la energía), dos se aseguran por la forma en la que las BRDFs tabuladas son almacenadas y representadas. Un estudio en profundidad de la propiedad de conservación de la energía podría abrir un camino de nuevos materiales para el usuario.

Como fruto de este trabajo ha surgido una publicación científica que ha sido sometida al Congreso Español de Informática Gráfica (CEIG) y que se encuentra actualmente bajo revisión a la espera de ser aceptada. El trabajo presentado, en inglés, puede encontrarse en el anexo B.

Personalmente, este trabajo ha supuesto una forma de demostrar los conocimientos adquiridos durante la carrera, así como la capacidad de resolver problemas complejos para los que no se conoce *a priori* una solución. También ha servido como un primer paso en el mundo de

8. Conclusiones y trabajo futuro

la investigación, en el que he descubierto un entorno desafiante, interesante y lleno de posibilidades del que espero seguir formando parte. En resumen este trabajo, que a veces me ha puesto a prueba, es para mí el satisfactorio punto final del grado que me permitirá ser ingeniera informática y el principio (con suerte) del resto de mi carrera académica. Gracias a mi directora y a mi codirectora seguiré trabajando en el grupo de investigación en el que se ha desarrollado este TFG, comenzaré un máster en septiembre de este año y proseguiré con mis estudios hasta completar el doctorado.

Bibliografía

- [1] Stephen R. Marschner, Stephen H. Westin, Eric P. F. Lafortune, Kenneth E. Torrance, and Donald P. Greenberg. Image-based brdf measurement including human skin. In *Proceedings of the 10th Eurographics Conference on Rendering*, EGWR'99, pages 131–144, Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland, 1999. Eurographics Association.
- [2] Matthias Scholz. *Approaches to analyse and interpret biological profile data*. PhD thesis, 2006.
- [3] Physically based rendering. http://www.codinglabs.net/article_physically_based_rendering_cook_torrance.aspx. Accedido por última vez el 18 de abril de 2017.
- [4] Ana Serrano, Diego Gutierrez, Karol Myszkowski, Hans-Peter Seidel, and Belen Masia. An intuitive control space for material appearance. *ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH ASIA 2016)*, 35(6), 2016.
- [5] Wikipedia: glossmeter. <https://en.wikipedia.org/wiki/Glossmeter>. Accedido por última vez el 10 de marzo de 2017.
- [6] Harold B. Westlund and Gary W. Meyer. *Applying appearance standards to light reflection models*, pages 501–510. Association for Computing Machinery, 2001.
- [7] Bui Tuong Phong. Illumination for computer generated pictures. *Commun. ACM*, 18(6):311–317, June 1975.
- [8] Robert R. Lewis. Making shaders more physically plausible. *Computer Graphics Forum*, 13(2):109–120, 1994.
- [9] Gregory J. Ward. Measuring and modeling anisotropic reflection. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 26(2):265–272, July 1992.
- [10] R. L. Cook and K. E. Torrance. A reflectance model for computer graphics. *ACM Trans. Graph.*, 1(1):7–24, January 1982.
- [11] Fred E. Nicodemus. Directional reflectance and emissivity of an opaque surface. *Appl. Opt.*, 4(7):767–775, Jul 1965.
- [12] Radiancia: flujo de radiación emitida o reflejada por una superficie, por unidad de ángulo sólido por unidad de área proyectada. <https://en.wikipedia.org/wiki/Radiance>. Accedido por última vez el 18 de abril de 2017.

- [13] Irradiancia: flujo de radiación recibida por una superficie por unidad de área. <https://en.wikipedia.org/wiki/Irradiance>. Accedido por última vez el 18 de abril de 2017.
- [14] Alta: a brdf analysis library. <http://alta.gforge.inria.fr/>. Accedido por ultima vez el 9 de marzo de 2017.
- [15] J. Park and I. W. Sandberg. Universal approximation using radial-basis-function networks. *Neural Comput.*, 3(2):246–257, June 1991.
- [16] Richard S. Hunter and Richard W. Harold. *The Measurement of Appearance (2nd Edition)*. Wiley, 1987.
- [17] Josh Wills, Sameer Agarwal, David Kriegman, and Serge Belongie. Toward a perceptual space for gloss. *ACM Trans. Graph.*, 28(4):103:1–103:15, September 2009.
- [18] David H. Alman. Directional color measurement of metallic flake finishes. In *In Proceedings of the ISCC Williamsburg Conference on Appearance*, pages 53–56, 1987.
- [19] H. J. A. Saris, R. J. B. Gottenbos, and H. Van Houwelingen. Correlation between visual and instrumental colour differences of metallic paint films. *Color Research and Application*, 15(4):200–205, 1990.
- [20] Mark Colbert and Sumanta Pattanaik. BRDF-Shop: Creating Physically Correct Bidirectional Reflectance Distribution Functions. *IEEE Computer Graphics and Applications*, pages 30–36, 2006.
- [21] Addy Ngan, Fredo Durand, and Wojciech Matusik. Image-driven Navigation of Analytical BRDF Models. In *Proc. of EGSR’06*, 2006.
- [22] Jerry O. Talton, Daniel Gibson, Lingfeng Yang, Pat Hanrahan, and Vladlen Koltun. Exploratory modeling with collaborative design spaces. *ACM Trans. Graph.*, 28(5):167:1–167:10, December 2009.
- [23] Michael Ashikhmin, Simon Premože, and Peter Shirley. A Microfacet-based BRDF Generator. In *Proc. of SIGGRAPH’00*, SIGGRAPH ’00, pages 65–74, New York, NY, USA, 2000. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- [24] Xin Sun, Kun Zhou, Yanyun Chen, Stephen Lin, Jiaoying Shi, and Baining Guo. Interactive Relighting with Dynamic BRDFs. *ACM Trans. Graph.*, 26(3), July 2007.
- [25] Ewen Cheslack-Postava, Rui Wang, Oskar Akerlund, and Fabio Pellacini. Fast, realistic lighting and material design using nonlinear cut approximation. *ACM Trans. Graph.*, 27(5):128:1–128:10, December 2008.
- [26] Chuong H. Nguyen, Min-Ho Kyung, Joo-Haeng Lee, and Seung-Woo Nam. A PCA Decomposition for Real-time BRDF Editing and Relighting with Global Illumination. In *Eurographics Symposium on Rendering*, pages 1469–1478, 2010.
- [27] Sergey Ershov, Konstantin Kolchin, and Karol Myszkowski. A realistic lighting model for computer animators. *Computer Graphics Forum*, 20(3), 2001.

- [28] Jason Lawrence, Aner Ben-Artzi, Christopher DeCoro, Wojciech Matusik, Hanspeter Pfister, Ravi Ramamoorthi, and Szymon Rusinkiewicz. Inverse shade trees for non-parametric material representation and editing. *ACM Trans. Graph.*, 25(3):735–745, July 2006.
- [29] Aner Ben-Artzi, Ryan Overbeck, and Ravi Ramamoorthi. Real-time BRDF editing in complex lighting. *ACM Trans. Graph.*, 25(3):945–954, July 2006.
- [30] Ann McNamara, Katerina Mania, and Diego Gutierrez. Perception in graphics, visualization, virtual environments and animation. In *SIGGRAPH Asia 2011 Courses*, 2011.
- [31] Adrian Jarabo, Belen Masia, Adrien Bousseau, Fabio Pellacini, and Diego Gutierrez. How do people edit light fields? *ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH 2014)*, 33(4), 2014.
- [32] Stephen J. Guy, Sujeong Kim, Ming C. Lin, and Dinesh Manocha. Simulating heterogeneous crowd behaviors using personality trait theory. In *Proc. of the 2011 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*, SCA ’11, pages 43–52, 2011.
- [33] Peter O’Donovan, Jānis Lībeks, Aseem Agarwala, and Aaron Hertzmann. Exploratory font selection using crowdsourced attributes. *ACM Trans. Graph.*, 33(4):92:1–92:9, July 2014.
- [34] Elena Garces, Aseem Agarwala, Diego Gutierrez, and Aaron Hertzmann. A similarity measure for illustration style. *ACM Trans. Graph.*, 33(4), July 2014.
- [35] Sean Bell, Paul Upchurch, Noah Snavely, and Kavita Bala. Opensurfaces: a richly annotated catalog of surface appearance. *ACM Trans. Graph.*, 32(4):111:1–111:17, July 2013.
- [36] Ioannis Gkioulekas, Bei Xiao, Shuang Zhao, Edward H. Adelson, Todd Zickler, and Kavita Bala. Understanding the role of phase function in translucent appearance. *ACM Trans. Graph.*, 32(5):147:1–147:19, October 2013.
- [37] Yuki Koyama, Daisuke Sakamoto, and Takeo Igarashi. Crowd-powered parameter analysis for visual design exploration. In *Proc. of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST ’14, pages 65–74, 2014.
- [38] Iyaylo Boyadzhiev, Kavita Bala, Sylvain Paris, and Edward Adelson. Band-sifting decomposition for image-based material editing. *ACM Trans. Graph.*, 34(5):163, October 2015.
- [39] Leonid Sigal, Moshe Mahler, Spencer Diaz, Kyna McIntosh, Elizabeth Carter, Timothy Richards, and Jessica Hodgins. A perceptual control space for garment simulation. *ACM Trans. Graph.*, 34(4):117:1–117:10, July 2015.
- [40] Fabio Pellacini, James A. Ferwerda, and Donald P. Greenberg. Toward a psychophysically-based light reflection model for image synthesis. In *Proc. of SIGGRAPH’00*, pages 55–64, 2000.
- [41] Peter Vangorp, Jurgen Laurijssen, and Philip Dutré. The influence of shape on the perception of material reflectance. *ACM Trans. Graph.*, 26(3), July 2007.
- [42] William B. Kerr and Fabio Pellacini. Toward evaluating material design interface paradigms for novice users. *ACM Trans. Graph.*, 29(4):35:1–35:10, July 2010.

- [43] Wojciech Matusik, Hanspeter Pfister, Matt Brand, and Leonard McMillan. A data-driven reflectance model. *ACM Trans. Graph.*, 22(3):759–769, July 2003.
- [44] Jannik Boll Nielsen, Henrik Wann Jensen, and Ravi Ramamoorthi. On optimal, minimal brdf sampling for reflectance acquisition. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 34(6):186:1–186:11, November 2015.
- [45] Wojciech Matusik, Hanspeter Pfister, Matt Brand, and Leonard McMillan. A data-driven reflectance model. *ACM Transactions on Graphics*, 22(3):759–769, jul 2003.
- [46] Amazon mechanical turk, a crowdsourcing internet marketplace. https://en.wikipedia.org/wiki/Amazon_Mechanical_Turk. Accedido por última vez el 1 de marzo de 2017.
- [47] Petr Beckmann and Andre Spizzichino. *The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces*. Norwood, MA : Artech House, 1987.
- [48] James F. Blinn. Models of light reflection for computer synthesized pictures. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 11(2):192–198, July 1977.
- [49] Eric P. F. Lafortune, Sing-Choong Foo, Kenneth E. Torrance, and Donald P. Greenberg. Non-linear approximation of reflectance functions. In *Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, SIGGRAPH 1997, pages 117–126, New York, NY, USA, 1997. ACM Press Addison-Wesley Publishing Co.
- [50] Sequential quadratic programming. https://en.wikipedia.org/wiki/Sequential_quadratic_programming. Accedido por última vez el 18 de abril de 2017.
- [51] Joel DeYoung and Alain Fournier. Properties of tabulated bidirectional reflectance distribution functions. In *Proceedings of the Graphics Interface 1997 Conference, May 21-23, 1997, Kelowna, BC, Canada*, pages 47–55, May 1997.

Anexo A. Listado de las BRDFs de MERL

En este anexo se muestra un listado de las 100 BRDFs de MERL, separadas dependiendo de si se han utilizado en el entrenamiento final de la base de *soft PCA* (materiales difusos) o si no han sido utilizadas (materiales especulares).

BRDFs especulares:

Alum bronze, alumina oxide, aluminium, aventurnine, black obsidian, black phenolic, black soft plastic, blue acrylic, blue metallic paint, blue metallic paint 2, brass, cherry 235, chrome steel, chrome, color changing paint1, color changing paint 2, color changing paint 3, delrin, fruit-wood 241, gold metallic paint, gold metallic paint 2, gold metallic paint 3, gold paint, gray plastic, grase covered steel, green acrylic, green metallic paint, green metallic paint 2, green plastic, hematite, maroon plastic, neoprene rubber, nickel, nylon, pearl paint, pickled oak 260, pink jasper, pink plastic, polyethylene, pure rubber, purple paint, pvc, red metallic paint, red phenolic, red specular plastic, silicon nitride, silver metallic paint, silver metallic paint 2, specular black phenolic, specular blue phenolic, specular green phenolic, specular maroon phenolic, specular orange phenolic, specular red phenolic, specular violet phenolic, specular white phenolic, specular yellow phenolic, ss440, steel, tungsten carbide, two layer gold, two layer silver, violet acrylic, violet rubber, white acrylic, white diffuse bball, white marble, white paint, yellow matte plastic, yellow phenolic.

BRDFs difusas:

Beige fabric, black fabric, black oxidized steel, blue fabric, blue rubber, colonial mapple 223, dark blue paint, dark red paint, dark specular fabric, green fabric, green latex, ipswich pine 221, light brown fabric, light red paint, natural 209, orange paint, pink fabric, pink fabric 2, pink felt, polyurethane foam, red fabric, red fabric2, red plastic, special walnut 224, teflon, white fabric, white fabric2, yellow paint, yellow plastic.

Anexo B. Trabajo sometido al CEIG

Improved Intuitive Appearance Editing based on Soft PCA

Submission ID: 2

Abstract

During the last few years, many different techniques for measuring material appearance have arisen. These advances have allowed the creation of large public datasets, and new methods for editing BRDFs of captured appearance have been proposed. However, these methods lack intuitiveness and are hard to use for novice users. In order to overcome these limitations, Serrano et al. [Serrano16] recently proposed an intuitive space for editing captured appearance. They make use of a representation of the BRDF based on a combination of principal components (PCA) to reduce dimensionality, and then map these components to perceptual attributes. This PCA representation is biased towards specular materials and fails to represent very diffuse BRDFs, therefore producing unpleasant artifacts when editing. In this paper, we build on top of their work and propose to use two separate PCA bases for representing specular and diffuse BRDFs, and map each of these bases to the perceptual attributes. This allows us to avoid artifacts when editing towards diffuse BRDFs. We then propose a new method for effectively navigate between both bases while editing based on a new measurement of the specularity of measured materials. Finally, we integrate our proposed method in an intuitive BRDF editing framework and show how some of the limitations of the previous model have been overcome with our representation. Moreover, our new measure of specularity can be used on any measured BRDF, as it is not limited only to MERL BRDFs.

Categories and Subject Descriptors (according to ACM CCS): I.3.7 [Computer Graphics]: Three-Dimensional Graphics and Realism—Material perception

1. Introduction

Measurement techniques for material appearance have become more efficient and accurate over the last few years (e.g., [NJR15], [AWL15]). This has led to an increase in the number of available public databases and modeling techniques [MPBM03], [FVH14]. Yet editing material appearance has remained a challenge due to several reasons, including the disconnection between the data representation and human understanding, the complexity of some representations that require handling hundreds of parameters [ATDP11], [Bur12], and the high-dimensionality, non-linearity of real world appearance behavior that leads to unintuitive editing parameters.

However, the increase of public available data has helped in the construction of new editing techniques for the captured data [SGM*16], [WAKB09] that have arisen in the last few years overcoming the problems mentioned above. Among them, those techniques based on the use of intuitive parameters, like the work of Serrano et al. [SGM*16] stand out due to their ease of use for novice users.

In this paper, we build on the intuitive editing of material appearance method by Serrano et al. and address some of its limitations regarding the edition of certain types of materials. They make use of a BRDF representation consisting on a combination of principal components (PCA) to reduce dimensionality, and then map these components to perceptual attributes. This PCA representation is bi-

ased towards specular materials and can fail to properly represent very diffuse BRDFs, producing artifacts when editing. To solve this problem, we build on top of their work and propose to use a new PCA base, together with the original one, that better supports the representation of diffuse materials. We also map this new PCA base to the perceptual attributes found by Serrano, thus allowing the edition technique to follow the same rules even if there are two different PCA bases.

We then propose a new method for effective navigation between both bases while editing. It relies on a new measurement of the specularity of measured materials. Using the specularity measurement to separate between diffuse and specular materials, we fix a hyperplane using support vector machines (SVM) that works as a frontier between both representations on their PCA subspaces.

Finally, we integrate our proposed method in an intuitive BRDF editing framework and show how some of the limitations of the previous model have been overcome with our representation. Moreover, our new measure of specularity can be used on any measured BRDF, as it is not only limited to MERL BRDFs.

The next section shows the related work and state of the art in this particular field of computer graphics. Sections 3 to 5 show the technical details of this work, including how the new representation has been built (Section 3), how the measurement of specularity and navigation between PCA bases work (Section 4) and the integration of the representation in an interactive edition plugin (Section 5).

Finally, the results are shown (Section 6) and the conclusions and future work of this paper are presented.

2. Related Work

Industrial standards. Over the years, several standards have been developed in order to characterize reflectance of real world materials [HH87]. These have been formalized in a collection of documents by the American Society for Testing and Materials (ASTM). Among them, some standards are specialized on defining a number of gloss dimensions [WAKB09] in addition to the angles from where the material should be measured [Alm87], [SGVH90]. This allows for a complete characterization of the glossiness of materials. Westlund and Meyer [WM01] find a correlation between this glossiness characterization given by the industry and parameters of some analytic reflectance models, linking in this way the industry standards of real world materials with properties of virtual BRDFs.

Editing of existing models. Some works on editing existing BRDFs include BRDF-Shop [CP06], which includes an artist-friendly interface and a model based on an extension to Ward's. Other works are based on image-driven navigation [NDM06] using as distance the difference between rendered images. Talton et al. [TGY*09] focus on a collaborative editing system over the space of Ashikhmin's model [APS00]. Other existing works are based on fast feedback of BRDF edits [SZC*07, CPWAP08, NKLN10] or specialize in a narrow variety of editions, as those needed in car paint design like the work of Ershov et al. [EKM01], focused on the physical properties of paint ingredients which affect its appearance. There are also existing works that edit measured BRDF data without fitting to any parametric models, in spite of its drawbacks (like large editing spaces [WAKB09]). Lawrence et al. [LBAD*06] decompose the BRDFs behaviour to simple 1D curves representing its physical properties. Their work is continued by Ben-ARTzi et al. [BAOR06] allowing for complex direct lighting as well as inter-reflections. Some of these methods lack a sufficiently large editing space as well as intuitive editing parameters.

Perceptual editing spaces. Perceptual strategies have been applied by many different works in computer graphics [MMG11]. On the little explored work of editing light fields, Jarabo et al. [JMB*14] use different image-based tools to show the potential of light field editing, besides favoring artistic exploration with their versatile interfaces. Applications using high dimensional spaces include crowd simulation [GKLM11], font design [OLAH14], style similarity [GAGH14], interior design taxonomy [BUSB13], translucency perception [GXZ*13], or shader design [KSI14]. After them, Boyadzhiev et al. [BBPA15] introduced intuitive attributes for image-based material editing. For garment simulation, Sigal et al. use the parameters of a custom pipeline simulator [SMD*15]. Pellacini et al. [PFG00] observed that non-linear behaviour of analytic parameters caused the editing process to be unintuitive when directly tuning these parameters. Due to this finding, they derive a perceptually uniform parameter scaling for the Ward model, used since then to study image-driven navigation spaces [NDM06] or the influence of shape in material perception [VLD07]. The concept of perceptually uniform spaces is extended by Wills et al. [WAKB09] for measured BRDFs. They propose a intuitive, low-dimensional space suited for the construction of new

materials, although their space is limited to gloss editing. Kerr and Pellacini [KP10] showed that image-driven navigation seemed to be less efficient than the use of the Ward model and its perceptually linearized version, for the particular task of matching material appearance. However, they only used two simple sliders (diffuse and specular) and only studied colorless BRDFs.

Matusik et al. [MPBM03] present a data-driven reflectance model. They reduce the measured BRDFs' dimensionality either by performing a principal component analysis (PCA) or by using non-linear dimensionality reducers. Then, they define a set of *perceptual traits* and carry a single user experiment where the user decides whether a given material has or not this perceptual traits. They build trait vectors that allow the navigation in their BRDF spaces by specifying desirable changes for their traits that result in given directions for the navigation process.

Building upon Matusik's work, the work of Serrano et al. [SGM*16] is different in many ways. They also reduce the measured BRDFs' dimensionality by means of principal component analysis, and employ a set of perceptually meaningful attributes for material edition. However, their 14 attributes are found carrying out a large-scale experiment and are identified as intuitive, descriptive and discriminative when describing reflectance properties. They use the same decomposition method for dimensionality reduction and perceptual meaningful scaling used in the work of Nielsen et al. [NJR15] that makes their reduced PCA space comparable to purely perceptually derived spaces [WAKB09]. They perform a dense uniform sampling of their PCA space, synthesizing additional BRDFs from their initial MERL dataset (totaling 400), and obtain 56000 attribute ratings from 400 participants on a large scale experiment. They use these ratings to reconstruct perceptually-based complex embeddings of their attributes in the PCA space. This allows for intuitive editions of measured BRDF data, where a novice user can easily change the appearance of a material.

However, their PCA base is biased towards specular materials. This means that artifacts may appear sometimes when trying to represent diffuse materials or during the edition when lowering specular attributes. The artifacts are usually a dark halo around the specular direction. To solve this problem, in this work we follow [NJR15] suggestion and train a separate 'soft' PCA base to represent only the diffuse materials. Using the same ratings obtained by Serrano, we map the new PCA coefficients to the same set of 14 attributes found on their work. However, this is not enough when editing the materials since the base to be used on each moment depends on the particular BRDF characteristics that change along the edition. This is why we propose a new specularly measurement for BRDFs and a technique to navigate between both PCA representations when needed. This allows us to adress the diffuse artifacts and build a editing technique that works on a wider range of materials.

3. Creation of the new representation

In this section we replicate the work of Serrano. First we train a PCA basis from MERL measured BRDFs and then we map the obtained PCA coefficients with user-given values for the 14 perceptual attributes.

3.1. PCA training

A principal component basis can be trained using a dataset of measured BRDFs. Once the PCA basis is trained, it can be used to represent any other BRDF as follows:

$$\mathbf{b} = \mathbf{Q}\boldsymbol{\alpha} + \boldsymbol{\mu} \quad (1)$$

Where \mathbf{b} is the BRDF represented in the basis, \mathbf{Q} is the matrix representing the PCA basis, $\boldsymbol{\mu}$ is the average of the measured data and $\boldsymbol{\alpha}$ the coefficients of each of the principal components for the particular BRDF \mathbf{b} . Prior to the PCA training, a log-relative linear mapping of the measured data is performed to reduce the effect of the specular peaks on the overall information, as Serrano et al. do on their work.

As we have discussed in previous sections, the PCA basis used in Serrano et al. [SGM*16] is biased towards specular materials, thus not allowing more diffuse BRDFs to be represented properly. This is not only a problem on the representation of existing BRDFs, but also in the process of intuitively editing materials as the specularity of BRDFs can be reduced when some of its attributes are modified (i.e. when the *matte* attribute increases) causing unwanted artifacts to appear. To address this problem, Nielsen et al. [NJR15] suggest that a separate, soft PCA basis could be used. This is the approach followed in this work, as explained in this section.

We build upon the work of Serrano [SGM*16] and create a new PCA basis, using a subset of the initial 100 MERL BRDFs [MPBM03]. The range of materials that the basis can represent correctly depends to a large degree on the BRDFs used to train that PCA basis. In this case we want to represent correctly diffuse materials and avoid the bias towards specular peaks. Thus, from the 100 BRDFs that form the database, we choose a subset consisting of the less specular materials and train a PCA basis with them. Initially, the 100 BRDFs are rendered and the diffuse materials are selected manually based on their appearance and the shape of their specular peaks. Figure 1 shows that this trained soft PCA basis can represent correctly diffuse materials. In Figure 3 we show a representation of the first five principal components of each PCA bases. According to Nielsen [NJR15] the first principal component of the 'full' PCA basis was strongly correlated with the specular peak information on the BRDFs. It is not surprising then that the soft PCA first component is widely different than the previous one, as the majority of the specular information has been removed from the training dataset. We also confirm that the soft PCA basis can't represent specular materials: Figure 2 shows an example of a specular material reconstructed from its soft PCA coefficients compared to the full PCA representation and the original BRDF from MERL.

3.2. RBFN training

The neural network used by Serrano uses a radial basis function (RBF) for each attribute that can be expressed as follows:

$$y = \varphi(\boldsymbol{\alpha}) = \sum_{i=1}^{N_c} \theta_i \exp^{-\beta \|\boldsymbol{\alpha} - \mathbf{c}_i\|^2} \quad (2)$$

Where y is a value in the range $[0..1]$ that represents the strength

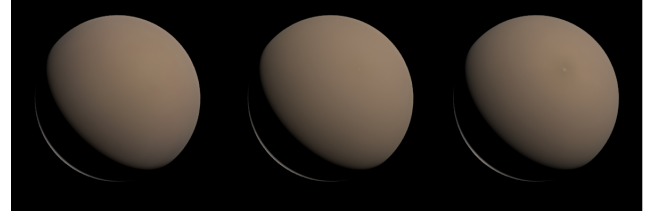


Figure 1: The original MERL BRDF white-fabric (left), compared with the reconstruction from its soft PCA coefficients (center) and a reconstruction from the original Serrano's work [SGM*16] (right). The artifacts of the diffuse material disappear with the new PCA basis.

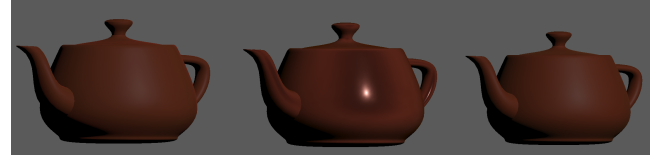


Figure 2: The original MERL BRDF red-specular-plastic (left), compared with the reconstruction from its soft PCA coefficients (center) and a reconstruction from the original Serrano's work [SGM*16] (right). The artifacts present in the soft PCA representation show that it can't correctly depict specular materials.

of said attribute, N_c is the number of neurons in the network, c_i are the centers of the neurons and θ_i the weights for each neuron. β is a parameter that controls the smoothness of Gaussian functions and $\boldsymbol{\alpha}$ the first five coefficients of the PCA basis.

Once the PCA basis has been trained, we use the 14 attributes found by Serrano et al. [SGM*16] (listed in Table 1) and their experimental subjective ratings to train a radial basis function network (RBFN) that maps the value of each attribute with the PCA coefficients for any BRDF. We keep the five first principal components to represent a single BRDF as it has been proven that a reconstruction of a BRDF based on its first five principal components is enough to make it undistinguishable in most cases (in all the cases where artifacts aren't present).

Our input data consists on 406 different BRDFs (100 from MERLs database plus 306 new synthesized BRDFs from Serrano [SGM*16]) and the 56000 attribute ratings (400 BRDFs x 10 responses/BRDF x 14 questions/BRDF) gathered through Mechanical Turk by Serrano et al.. From our dataset, we separate randomly 5% of the BRDFs to use as a validation set, and do the training with the remaining 95%. We repeat this process for 10 times with different training and validation sets to find the average error of the neural network. We carry out this process with different training parameters to minimize the average validation error. At the end, we choose a neural network with 25 neurons and a sigma value of 10 (this value is given by the trainer of the neural network, and is usually achieved through experimentation; the smaller the value the tightest the fit to the data, and the bigger the smoother the results

will be), which are different parameters to the ones originally used by Serrano.

1	<i>plastic</i>
2	<i>rubber</i>
3	<i>metallic</i>
4	<i>fabric</i>
5	<i>ceramic</i>
6	<i>soft</i>
7	<i>hard</i>
8	<i>matte</i>
9	<i>glossy</i>
10	<i>bright</i>
11	<i>rough</i>
12	<i>strength of reflections</i>
13	<i>sharpness of reflections</i>
14	<i>tint of reflections</i>

Table 1: List of the 14 attributes used in the BRDFs edition.

With the PCA basis trained and optimized, and the neural networks (one for each attribute) fitted to the data we can rebuild the editing process and see how the new soft PCA basis behaves. This test shows clearly that the soft PCA basis is not enough by itself to depict all the material variety that can be found in the MERL database. In the same way, the original full PCA representation isn't either able to correctly depict diffuse materials. To correctly represent both types of materials, we need to use each of the PCA bases when needed, according to the specularity of the material. Additionally, in order to use these representations for editing, we need to know which representation is needed in each edition step, as the specularity of a BRDF might change when modifying some of its attributes. To solve this we propose in the next section a new specularity measure that determines when to use what PCA basis and a novel approach to navigate between both representations when needed during the editing process.

4. Navigation between representations

4.1. Measure of material specularity

It has been demonstrated that neither our soft PCA basis nor Serrano's [SGM*16] can correctly represent the full MERL's database [MPBM03] range. It is necessary that both of them are used to achieve correctness in the full range of specularity. To do so, we propose a novel measure of specularity that allows us to use one basis or the other when needed, as well as a method to navigate between representations when there isn't an original reference from which we can obtain the PCA coefficients of both representations (that is, during the editing process).

Industry standards. Many international standards define the methods and specifications for glossiness measurement of real world materials using glossmeters. This glossiness is related to the specularity of a BRDF, and the industry sets different measurement techniques and glossmeters for different types of materials. A standard glossmeter scheme is shown in Figure 4. Depending on the technique used, the light and sensor are placed at different angles. According to Alman et al. [Alm87] and Saris et al. [SGVH90], 3

measurements at different angles are often enough to determine the glossiness of a metallic sample. Nevertheless, this approximation presents two drawbacks: first, each standard is specifically designed for a given material type (different materials - i.e. metal and plastic - are usually measured at different angles). And second, these measurements are meant to be obtained through a glossmeter in real life materials. To use this in virtual materials we would need to implement a virtual glossmeter that would increase the complexity and processing time of the editing process, and that is something we want to avoid as much as possible.

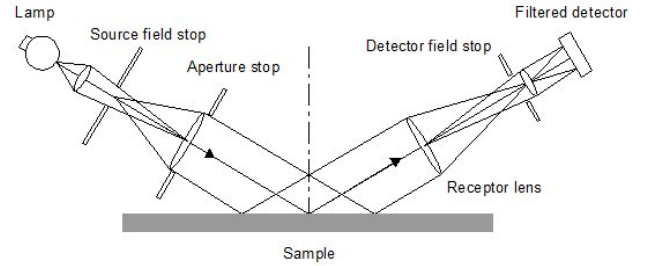


Figure 4: Scheme of a glossmeter, consisting on a light source and a sensor that captures the reflected light from the sample material.

Parametric model fitting. Following the work on applying industry standards to virtual materials of Westlund and Meyer [WM01] we find their correlation between the glossiness of a material and the values of certain parameters of analytic models. According to Westlund and Meyer, there is a relationship between the specularity coefficient of some analytic models and the glossiness measurement of a material. Using *Alta: a library for BRDF analysis* [Alt] we fit each one of the 100 MERL BRDFs to four different analytic models: Beckmann [BS87], Blinn [Bli77], Lafor-tune [LFTG97] and Ward [War92]. From the fittings, we study the values of each model's parameters to see if there is a correlation between them and the material's specularity. We found two different parameters where this evidence can be seen (Blinn and Ward specularity coefficient). Generally the more specular materials have higher parameter values, while the more diffuse materials present lower parameter values. However this behaviour is not always consistent, which means this option is not reliable in 100% of the samples. Besides, cost of computing these parameters also increases the level of complexity during edition. The specularity measure should be needed for each of the editing process steps. Due to this reasons, we decide to find another specularity measure for measured BRDFs.

Nielsen optimal directions. The work of Nielsen [NJR15] shows that good quality BRDFs can be acquired with few measurements in certain specific angles. This means that the characteristic behaviour of a material can be extracted from these directions. Our hypothesis is that the specularity information of the material can be obtained by just looking at the values stored on these directions, and that a difference in behaviour will appear between specular and diffuse BRDFs. To prove this, we obtain the values for the five most significant directions that Nielsen provides in

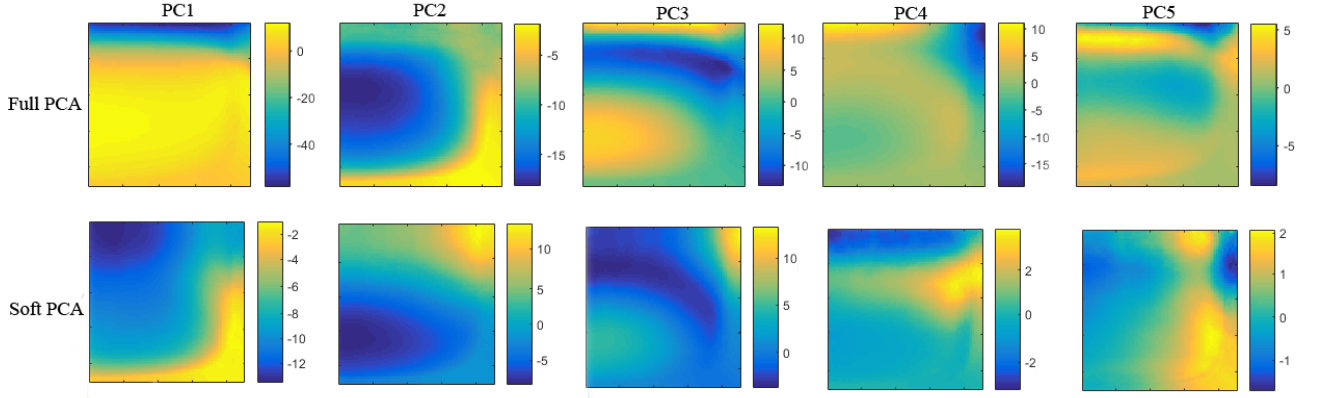


Figure 3: Comparison between the old BRDF representation (first row) with the new soft PCA basis (second row). For each row, the columns represent a 2D slice of the first five principal components eigenvectors.

his work for two very different materials and compare them, as this is the minimum number of samples required to correctly depict most BRDFs. In Figure 5 we can see a clear evidence that sustains our hypothesis. The specular material shows higher values on the specular peak as expected, while the diffuse material shows a slight descent on the same exact position. With this simple technique, we can tell whether a material is or not specular. To extend this proof of concept, we carry out the same procedure, this time with the whole MERL database. Figure 6 shows the values of the mentioned 5 most significant directions for the 100 MERL BRDFs. We can clearly distinguish two different behaviours to which most of the materials correspond, that are strongly correlated to the specularity of the BRDF. In Figure 6 the warmer colours correspond to more specular materials, while the cooler are associated with more diffuse materials.

We also show that even using the single most significant direction that Nielsen et al. provide on their work, this difference in behaviour remains. Figure 7 again shows for the 100 MERL BRDFs the value of the most significant direction given by Nielsen. Once again there is a clear difference where the diffuse BRDFs show the lowest values (below 0.4) and the specular BRDFs show higher values, in some cases several orders of magnitude higher. We propose as specularity measure an average of the RGB values for the most significant direction given by Nielsen on his work, as this is a simple yet effective method to acquire information about the specularity of a material. To validate our specularity measure we look at the polar plots of the 100 MERL BRDFs. Finally, we use all the gathered information to retrain the soft PCA base for greater accuracy.

Figure 8 shows the specularity value for the 406 BRDFs used in the attribute training in the previous section, each one of them projected in the first three dimensions of the PCA components for both representations. Note that all values above 1 have been clamped to have a clearer vision of the diffuse region. It is interesting to see how the diffuse materials are all bound together in a small area of the full PCA space, while they occupy a much larger zone in the

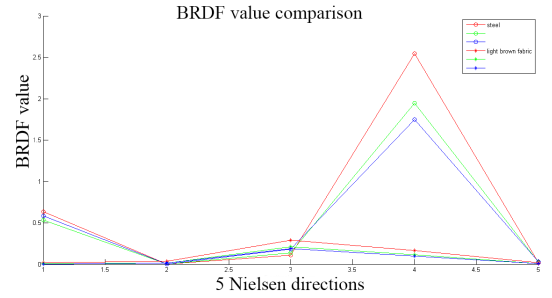


Figure 5: Values of 2 BRDFs on the first five most significant Nielsen directions. The samples are light-brown-fabric ('*') and steel ('o'). For each one of them, the values of the three color channels of the tabulated BRDF are shown.

soft PCA representation. This shows that the soft PCA basis fulfills its purpose of maximizing the diffuse information alongside its first components, where the full PCA basis was biased towards the representation of the specular peaks of other materials.

4.2. Navigation between the representations

Once we know when do we have to use *what* PCA basis, we need a technique to represent the same BRDF on both representations and to navigate between them (i.e., given the full PCA coefficients of a BRDF, find its soft PCA coefficients when there is no original measured data during the editing process). The first idea is to find a change of basis matrix, but no linear application is found that works on any direction. The second idea is to rebuild the measured BRDF from its PCA coefficients from one basis and then from the rebuilt BRDF find the PCA coefficients of the other basis. This approximation works well when the starting point is the full PCA basis, and only if the BRDF was correctly represented on that basis be-

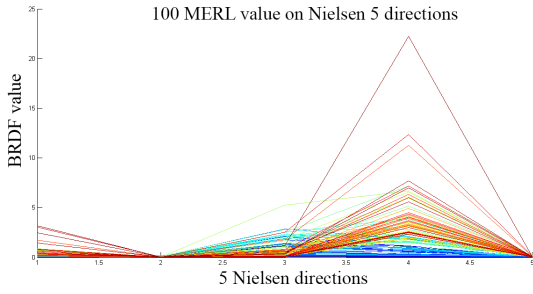


Figure 6: Values of the 100 MERL BRDFs on the first five most significant Nielsen directions. For the shake of simplicity, only one color channel is shown for each of them. The colormap that shows the difference between diffuse and specular BRDFs is obtained with the difference from the third and fourth directions value.

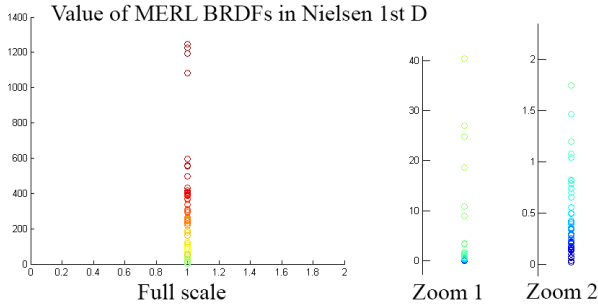


Figure 7: Values of 100 BRDFs on the most significant Nielsen direction. On the right graphic we can see the values of the 100 BRDFs, while the middle and left ones are two consecutive zooms among the first one. For the shake of simplicity, only one color channel is shown for each of them. The colormap is obtained with the mean of the three color channels.

fore the change. This means that once the undesired artifacts have appeared in a representation the missing information cannot be recovered even if the other representation is used, so the navigation between the PCA bases must occur in a point where both representations behave correctly (this happens in the frontier between specular and diffuse materials, given by the specular ratio) to avoid this problems. Unfortunately, due to the limited dataset with wich the soft PCA basis was trained this approximation doesn't work on the opposite direction.

To move from the soft PCA space to the full PCA representation a different method is needed. We use the same neural networks used in the attribute trainings to learn the correspondence between both bases. Once again, we perform the same cross validation process to minimize the average error and find the optimum parameters, this time with the PCA coefficients as input. This neural network has 100 neurons and a sigma value of 100. With these two methods we can finally navigate between both representations when needed.

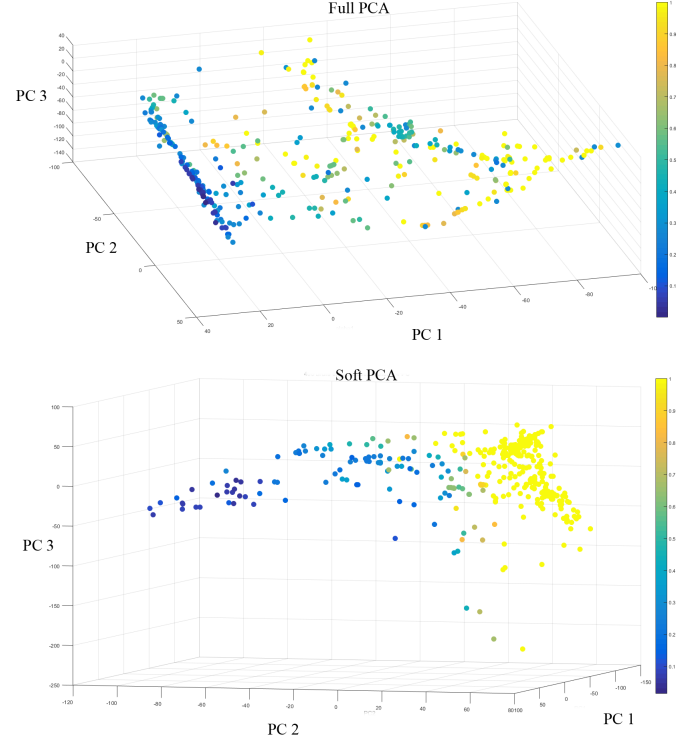


Figure 8: Shows the first three PCA coefficients of 406 BRDFs (100 of which are MERL's database and the rest the synthesized by Serrano) for full PCA (top) and soft PCA (down) representation. The color shows their specularity measure. Values under 0.4 represent diffuse materials.

5. Interactive plugin for material edition

One of the contributions of the work of Serrano [SGM*16] is that they allow the edition of a material through simple, intuitive attributes that the user can understand, instead of non-linear, non-friendly parameters hard to comprehend for anyone but specialists in the matter. Using the RBFNs trained before, the edition is achieved using the attribute value as a minimization parameter in a gradient descent algorithm. Every point of the 5 dimensional space is associated with one attribute value for each attribute, thus allowing the BRDF coefficients to change with each minimization step. In Figure 9 a 2D slice of the PCA space is shown along the path followed during the edition of a BRDF. The adaptation of this process to the new representation is simple. First, the specularity measure is obtained from the original BRDF to edit. Depending on this value and the specular ratio, the gradient descent is performed on the corresponding PCA basis. As the material characteristics change during the editing process, a new specularity measure is obtained in each editing step obtaining a new tabulated BRDF from the actual PCA coefficients. If the specularity value reaches the limit of its representation a navigation between the PCA bases occurs. To avoid swinging persistently among the representations,

a certain hysteresis is used on the navigation boundary, calibrated through experimentation.

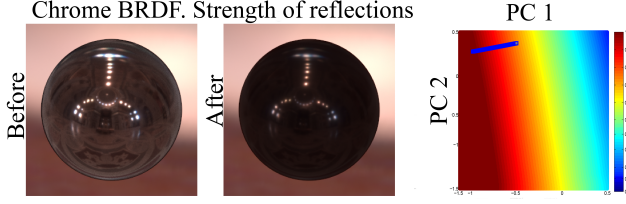


Figure 9: Edition of the chrome BRDF decreasing its strength of reflections. The original BRDF can be seen on the left, and the edited on the center. On the right, a 2D slice of the PCA space with the path followed for the edition (blue line). The colormap represents the attribute value, with warmer colours at its maximum.

Once the edition works with both PCA bases, we take one more step and present the two representation technique in an interactive editing plugin. This plugin uses Disney’s *BRDF explorer* to visualize BRDFs and a *Matlab* interface that gives the user a friendly tool to edit materials. Figure 10 shows the interface, where 2D slices of both representations can be seen.

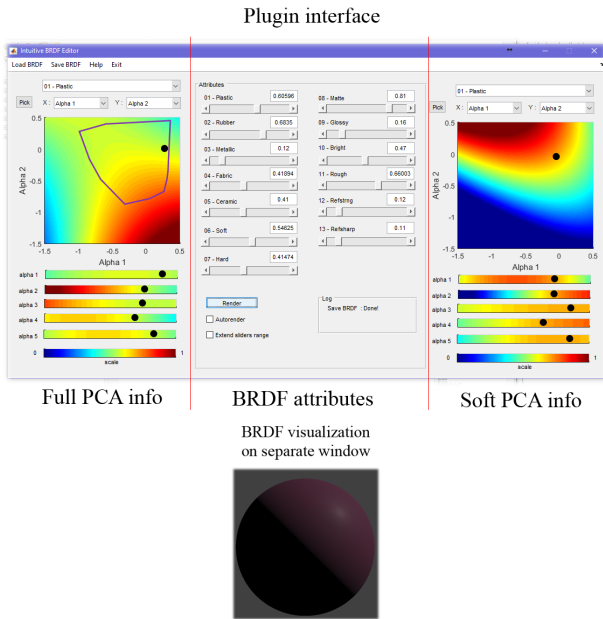


Figure 10: Our plugin interface shows a 2D slice of the full PCA space (left), the BRDF attribute values (center), and a 2D slice of the soft PCA space (right). On a separate window, a visualization of the BRDF is shown.

In order to improve the time response and the user experience of the plugin two main changes are made to the existing system:

- The boundary where both representations behave correctly is a

part of the 5D space where each of them exists. Considering such dimensionality, the fact that the manual calibration of the specularity ratio doesn’t always work is not surprising. Besides, the obtaining of each specularity measurement means the reconstruction of the tabulated BRDF from its PCA coefficients. Considering the spatial location and separation of specular and diffuse BRDF on each PCA basis, as Figure 8 shows, the idea of building a spatial division for the navigation based on the specularity measurement of the available BRDFs arises. We decide to train support vector machines (SVMs) with this information, in such a way that the SVMs will tell us if a BRDF is in the space zone where the PCA basis correctly represents materials or if we have to change to the other representation. Thus we achieve an automatic frontier for the editing process.

- The other modification is the navigation between full PCA and soft PCA representation. We find out that the navigation made with the RBFN is much faster than the reconstruction one (from some *ms* for RBFNs to around 3s for reconstruction method depending on the machine used). Removing this time consuming dam will give the user a better experience and make the transition even on both directions. Thus, we train another RBFN for this purpose.
- Last but not least, the gradient descent algorithm that lead the editing process has been changed to use *Matlab*’s *fmincon* with the *sqp* algorithm. This has made the system faster and more robust, as this method is able to avoid local minimum values.

In the next and last section we show our results and discuss our limitations, explaining their causes and setting probable future lines of work to solve them.

6. Results

As we have shown in Figure 1, the soft PCA basis is good enough to depict diffuse materials from MERL’s BRDF database. This solves the BRDF representation problem, but is not enough to fix the edition drawbacks of the previous work. Thus, both representations are needed to correctly depict diffuse and specular materials. This has been achieved through a novel specularity measurement, based on the information present on Nielsen most significant direction for BRDF acquisitions. Once the representation that is needed is known, navigation between the BRDF representations can be achieved through trained RBFNs. For an automation of the PCA basis frontier, we use the specularity ratio to train two SVMs that designate the PCA space zone where a representation behaves correctly. We integrate this technique in a material editing plugin for a better user experience. We have overcome the spotted weakness of the previous model. Next we present our results as well as the limitations found to our model.

We’ve found out that the two representation technique is less robust than only using full PCA. This means that during the editing process, a one way path will work fine (changing the value of the attribute once), but constantly moving forward and backward from one representation to another will eventually lead to some kind of artifacts due to the small misalignment caused by the RBFNs that change the PCA coefficients from one basis to the other. The full

PCA representation of Serrano et al. is more resistant to these type of constant changes.

During the edition, a convex hull acts as a solid boundary to limit the part of the full PCA space where the editions can take part, thus avoiding artifacts to appear. This is a conservative approach, since any BRDF inside the convex hull will keep its physical plausibility. But there is no reason why there might not be other novel and plausible BRDFs outside the convex hull. As long as their physical properties were assured, the user should be able to explore a wider space than he is now.

Nonetheless, the improvement over the past limitations is plausible. Figure 12 shows a successful edition with a change of representation from soft to full PCA. None of the extremes would've been possible if only one representation was to be used. On the plugin interface we can see how the same BRDF behaves differently on both representations. As the material gets more glossy (more specular), the corresponding point of the 5D PCA space for the soft PCA basis moves to a zone where the BRDFs are no longer correctly represented, while the same BRDF on the full PCA basis is correctly represented and stands inside the convex hull. Figure 11 shows the opposite case, a change of representation from full PCA to soft PCA. Figure 13 shows other examples of BRDF editions with our plugin.

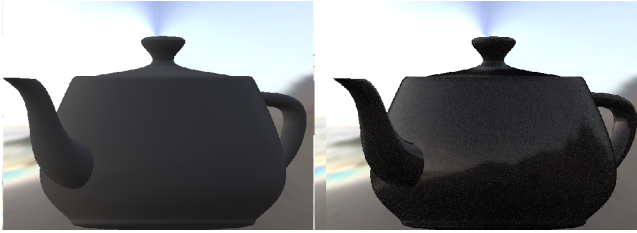


Figure 11: Sample of an edition with change of PCA basis (from full to soft) of the MERL BRDF chrome. The attribute "metallic" is being modified, from original to lowest possible values. The left image corresponds to a soft PCA basis representation (low metallic value), while the right image corresponds to the original BRDF (reconstructed from its full PCA coefficients).

7. Discussion and conclusion

With our work we have shown that where a type of material is under represented, a separate PCA basis can be made to represent it better, as long as it shares a common boundary with the other (or others) PCA basis. This could be useful when no more samples can be acquired, or when the huge difference between material types biases the PCA basis towards one of them. We have also presented a novel specular measure for tabulated BRDFs, that is not restricted to a type of material, not expensive to use.

Yet there are open questions and many opportunities for interesting future work. For example, a further analysis of the differences on the PCA bases would give us more information of their behaviour. Figure 4 shows that both bases are indeed different on

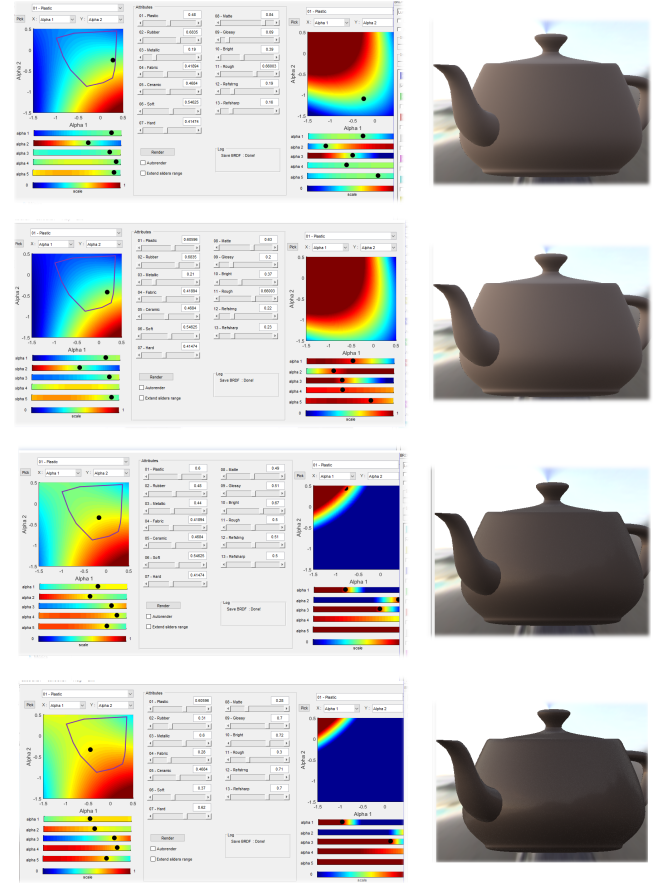


Figure 12: Sample of a edition of the MERL BRDF beige-fabric, with a change from soft to full PCA basis. The attribute "glossy" is being modified, from lowest (top) to highest (down). On the left, the editing plugin can be seen. Please note how the PCA slices are modified along the edition. On the right, the change of the BRDF appearance is shown.

their principal components, but we don't certainly know what these differences mean or how we can take advantage of them.

Another interesting line of work would be exploring other methods to navigate between the representations. We know that some misalignments exist when navigating between the PCA bases using our trained RBFNs. Studying other possible navigation methods could be useful to minimize these misalignments.

Finally, we would like to broaden the PCA space where the user can make the editions. As we've mentioned before, this is now limited by the boundaries of a convex hull. The use of the convex hull could be replaced by ensuring that the physical properties of the BRDF are met. From the three principal physical properties of a BRDF (non-negativity, reciprocity and energy conservation) the first two are assured by implementation details. Working on the third property would open the possibility of new materials for the user.

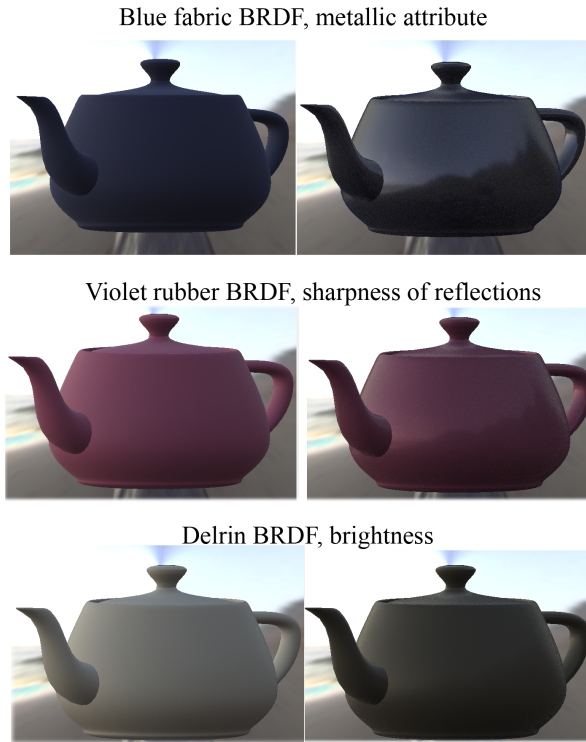


Figure 13: Results of the editions on several BRDFs. The initial BRDF is shown on the left, and the edition result on the right. From top to bottom, these editions are: blue-fabric, increasing metallic attribute (change from soft to full PCA basis), violet rubber, increasing sharpness of reflections (change from soft to full PCA basis) and delrin, decreasing brightness.

References

- [Alm87] ALMAN D. H.: Directional color measurement of metallic flake finishes. In *In Proceedings of the ISCC Williamsburg Conference on Appearance* (1987), pp. 53–56. 2, 4
- [Alt] Alta: a brdf analysis library. <http://alta.gforge.inria.fr/>. Accedido por ultima vez el 9 de marzo de 2017. 4
- [APSO0] ASHIKHMIN M., PREMOŽE S., SHIRLEY P.: A Microfacet-based BRDF Generator. In *Proc. of SIGGRAPH'00* (New York, NY, USA, 2000), SIGGRAPH '00, ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., pp. 65–74. URL: <http://dx.doi.org/10.1145/344779.344814>, doi:10.1145/344779.344814. 2
- [ATDP11] AN X., TONG X., DENNING J. D., PELLACINI F.: Appwarp: Retargeting measured materials by appearance-space warping. *ACM Trans. Graph.* 30, 6 (Dec. 2011), 147:1–147:10. 1
- [AWL15] AITTALA M., WEYRICH T., LEHTINEN J.: Two-shot SVBRDF capture for stationary materials. *ACM Trans. Graph.* 34, 4 (July 2015), 110:1–13. 1
- [BAOR06] BEN-ARTZI A., OVERBECK R., RAMAMOORTHY R.: Real-time BRDF editing in complex lighting. *ACM Trans. Graph.* 25, 3 (July 2006), 945–954. 2
- [BBPA15] BOYADZHEV I., BALA K., PARIS S., ADELSON E.: Band-sifting decomposition for image-based material editing. *ACM Trans. Graph.* 34, 5 (Oct. 2015), 163. 2
- [Bli77] BLINN J. F.: Models of light reflection for computer synthesized pictures. *SIGGRAPH Comput. Graph.* 11, 2 (July 1977), 192–198. URL: <http://doi.acm.org/10.1145/965141.563893>, doi:10.1145/965141.563893. 4
- [BRD] Disney brdf explorer. <https://www.disneyanimation.com/technology/brdf.html>. Accedido por ultima vez el 9 de marzo de 2017.
- [BS87] BECKMANN P., SPIZZICHINO A.: *The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces*. Norwood, MA : Artech House, 1987. 4
- [Bur12] BURLEY B.: Practical Physically Based Shading in Film and Game Production - Physically Based Shading at Disney - Course Notes. In *SIGGRAPH Courses* (2012). 1
- [BUSB13] BELL S., UPCHURCH P., SNAVELY N., BALA K.: Open-surfaces: a richly annotated catalog of surface appearance. *ACM Trans. Graph.* 32, 4 (July 2013), 111:1–111:17. URL: <http://doi.acm.org/10.1145/2461912.2462002>, doi:10.1145/2461912.2462002. 2
- [CP06] COLBERT M., PATTANAIK S.: BRDF-Shop: Creating Physically Correct Bidirectional Reflectance Distribution Functions. *IEEE Computer Graphics and Applications* (2006), 30–36. 2
- [CPWAP08] CHESLACK-POSTAVA E., WANG R., AKERLUND O., PELLACINI F.: Fast, realistic lighting and material design using nonlinear cut approximation. *ACM Trans. Graph.* 27, 5 (Dec. 2008), 128:1–128:10. 2
- [EKM01] ERSHOV S., KOLCHIN K., MYSZKOWSKI K.: A realistic lighting model for computer animators. *Computer Graphics Forum* 20, 3 (2001). 2
- [FVH14] FILIP J., VAVRA R., HAVLICEK M.: Effective acquisition of dense anisotropic BRDF. In *Proc. of ICPR 2014* (August 2014), pp. 2047–2052. 1
- [GAGH14] GARCES E., AGARWALA A., GUTIERREZ D., HERTZMANN A.: A similarity measure for illustration style. *ACM Trans. Graph.* 33, 4 (July 2014). 2
- [GKLM11] GUY S. J., KIM S., LIN M. C., MANOCHA D.: Simulating heterogeneous crowd behaviors using personality trait theory. In *Proc. of the 2011 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation* (2011), SCA '11, pp. 43–52. 2
- [GXZ*13] GKIOULEKAS I., XIAO B., ZHAO S., ADELSON E. H., ZICKLER T., BALA K.: Understanding the role of phase function in translucent appearance. *ACM Trans. Graph.* 32, 5 (Oct. 2013), 147:1–147:19. URL: <http://doi.acm.org.ezp-prod1.hul.harvard.edu/10.1145/2516971.2516972>, doi:10.1145/2516971.2516972. 2
- [HH87] HUNTER R. S., HAROLD R. W.: *The Measurement of Appearance* (2nd Edition). Wiley, 1987. 2
- [JMB*14] JARABO A., MASIA B., BOUSSEAU A., PELLACINI F., GUTIERREZ D.: How do people edit light fields? *ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH 2014)* 33, 4 (2014). 2
- [KP10] KERR W. B., PELLACINI F.: Toward evaluating material design interface paradigms for novice users. *ACM Trans. Graph.* 29, 4 (July 2010), 35:1–35:10. 2
- [KSI14] KOYAMA Y., SAKAMOTO D., IGARASHI T.: Crowd-powered parameter analysis for visual design exploration. In *Proc. of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology* (2014), UIST '14, pp. 65–74. 2
- [LBAD*06] LAWRENCE J., BEN-ARTZI A., DECORO C., MATUSIK W., PFISTER H., RAMAMOORTHY R., RUSINKIEWICZ S.: Inverse shade trees for non-parametric material representation and editing. *ACM Trans. Graph.* 25, 3 (July 2006), 735–745. 2
- [LFTG97] LAFORTUNE E. P. F., FOO S.-C., TORRANCE K. E., GREENBERG D. P.: Non-linear approximation of reflectance functions. In *Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer*

- Graphics and Interactive Techniques* (New York, NY, USA, 1997), SIGGRAPH 1997, ACM Press Addison-Wesley Publishing Co., pp. 117–126. URL: <http://dx.doi.org/10.1145/258734.258801>, doi:10.1145/258734.258801. 4
- [MMG11] McNAMARA A., MANIA K., GUTIERREZ D.: Perception in graphics, visualization, virtual environments and animation. In *SIGGRAPH Asia 2011 Courses* (2011). 2
- [MPBM03] MATUSIK W., PFISTER H., BRAND M., MCMILLAN L.: A data-driven reflectance model. *ACM Trans. Graph.* 22, 3 (July 2003), 759–769. 1, 2, 3, 4
- [NDM06] NGAN A., DURAND F., MATUSIK W.: Image-driven Navigation of Analytical BRDF Models. In *Proc. of EGSR'06* (2006). 2
- [NJR15] NIELSEN J. B., JENSEN H. W., RAMAMOORTHY R.: On Optimal, Minimal BRDF Sampling for Reflectance Acquisition. *ACM Trans. Graph.* 34, 6 (Nov. 2015). 1, 2, 3, 4
- [NKL10] NGUYEN C. H., KYUNG M.-H., LEE J.-H., NAM S.-W.: A PCA Decomposition for Real-time BRDF Editing and Relighting with Global Illumination. In *Eurographics Symposium on Rendering* (2010), pp. 1469–1478. 2
- [OLAH14] O'DONOVAN P., LIBEKS J., AGARWALA A., HERTZMANN A.: Exploratory font selection using crowdsourced attributes. *ACM Trans. Graph.* 33, 4 (July 2014), 92:1–92:9. 2
- [PFG00] PELLACINI F., FERWERDA J. A., GREENBERG D. P.: Toward a psychophysically-based light reflection model for image synthesis. In *Proc. of SIGGRAPH'00* (2000), pp. 55–64. 2
- [SGM*16] SERRANO A., GUTIERREZ D., MYSZKOWSKI K., SEIDEL H.-P., MASIA B.: An intuitive control space for material appearance. *ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH ASIA 2016)* 35, 6 (2016). 1, 2, 3, 4, 6
- [SGVH90] SARIS H. J. A., GOTTENBOS R. J. B., VAN HOUWELINGEN H.: Correlation between visual and instrumental colour differences of metallic paint films. *Color Research and Application* 15, 4 (1990), 200–205. URL: <http://dx.doi.org/10.1002/col.15080150405>, doi:10.1002/col.15080150405. 2, 4
- [SMD*15] SIGAL L., MAHLER M., DIAZ S., MCINTOSH K., CARTER E., RICHARDS T., HODGINS J.: A perceptual control space for garment simulation. *ACM Trans. Graph.* 34, 4 (July 2015), 117:1–117:10. 2
- [SZC*07] SUN X., ZHOU K., CHEN Y., LIN S., SHI J., GUO B.: Interactive Relighting with Dynamic BRDFs. *ACM Trans. Graph.* 26, 3 (July 2007). 2
- [TGY*09] TALTON J. O., GIBSON D., YANG L., HANRAHAN P., KOLTUN V.: Exploratory modeling with collaborative design spaces. *ACM Trans. Graph.* 28, 5 (Dec. 2009), 167:1–167:10. 2
- [VLD07] VANGORP P., LAURIJSSEN J., DUTRÉ P.: The influence of shape on the perception of material reflectance. *ACM Trans. Graph.* 26, 3 (July 2007). 2
- [WAKB09] WILLS J., AGARWAL S., KRIEGMAN D., BELONGIE S.: Toward a perceptual space for gloss. *ACM Trans. Graph.* 28, 4 (Sept. 2009), 103:1–103:15. 1, 2
- [War92] WARD G. J.: Measuring and modeling anisotropic reflection. *SIGGRAPH Comput. Graph.* 26, 2 (July 1992), 265–272. URL: <http://doi.acm.org/10.1145/142920.134078>, doi:10.1145/142920.134078. 4
- [WM01] WESTLUND H., MEYER G.: *Applying appearance standards to light reflection models*. Association for Computing Machinery, 2001, pp. 501–510. doi:10.1145/383259.383318. 2, 4