



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Reconstrucción de transporte de luz transitorio en
escenas ocultas

Transient light transport reconstruction in hidden
scenes

Autor

María Peña López de Murillas

Directores

Julio Marco Murria

Diego Gutiérrez Pérez

Titulación

Grado en Ingeniería Informática

AGRADECIMIENTOS

Quiero dar las gracias a Julio Marco y Diego Gutiérrez por ofrecerme la oportunidad de trabajar en un proyecto tan interesante y ayudarme y orientarme durante el desarrollo del trabajo.

Agradecer también a Diego Royo, que sin ser mi tutor me ha ayudado y aconsejado desde el principio del proyecto, y a todos los compañeros del *Graphics and Imaging Lab* por el buen ambiente y por hacerme sentir como en casa.

Finalmente, a mi familia, a mi novio y a mis amigos por estar siempre ahí animándome y apoyándome.

Reconstrucción de transporte de luz transitorio en escenas ocultas

RESUMEN

La imagen computacional es un conjunto de técnicas digitales que permiten formar imágenes a partir de medidas de sensores de distintos tipos, en contraste a los procesos ópticos que generan las imágenes en una cámara tradicional, y sustituyen o incrementan las capacidades de algunos procesos ópticos. Uno de los avances recientes más espectaculares tiene que ver con cámaras computacionales ultrarrápidas, que permiten capturar el transporte de luz en la escena a lo largo del tiempo.

Una de las nuevas aplicaciones que han surgido a raíz de estas cámaras es la de ser capaz de ver objetos ocultos alrededor de esquinas, dentro del campo conocido generalmente como *non-line-of-sight (NLOS) imaging*. Para ello es necesario analizar la luz indirecta que se refleja sobre objetos visibles, y a partir de ella reconstruir computacionalmente la escena oculta. Esto puede dar lugar a muchas aplicaciones prácticas como evitar colisiones entre vehículos, o visualizar regiones de difícil acceso.

Sin embargo, la mayoría de los algoritmos existentes se limitan a recuperar la geometría de la escena oculta, descartando la información temporal del transporte de luz. Si pudiéramos recuperar esta información en un entorno de NLOS, podríamos por ejemplo analizar de qué materiales son los objetos de la escena oculta, o ver incluso alrededor de dos esquinas.

El objetivo de este trabajo es desarrollar un método para reconstruir el transporte de luz transitorio en escenas ocultas, y analizar el comportamiento de distintas funciones de filtrado de cara a potenciales aplicaciones novedosas de análisis de escenas ocultas. En concreto, primero se ha implementado el algoritmo clásico de reconstrucción de escenas ocultas, *backprojection filtrado*, que estima la posición de los objetos ocultos triangulando a partir del tiempo de propagación de la luz. A continuación se ha extendido dicho algoritmo para obtener uno nuevo, al que llamamos *backprojection filtrado resuelto en tiempo*, que proporciona información sobre el transporte de la luz en la escena oculta *a lo largo del tiempo*. Se ha analizado el efecto de distintas técnicas de filtrado sobre ambos algoritmos y la información que proporciona la reconstrucción obtenida por el nuevo algoritmo en distintas escenas con variaciones de material, rango, y complejidad. Se espera que este segundo algoritmo sea utilizado en futuras investigaciones sobre NLOS.

Índice

1. Introducción	1
1.1. Contexto del trabajo	1
1.2. Objetivo del trabajo	3
1.3. Planificación y herramientas	4
2. Trabajo relacionado	7
3. Modelos de reconstrucción	9
3.1. Algoritmo de <i>backprojection filtrado</i>	9
3.2. <i>Backprojection filtrado resuelto en tiempo</i>	12
3.3. Filtrado	17
3.3.1. Laplaciano	17
3.3.2. <i>Laplacian of Gaussian</i> (LoG)	18
3.3.3. Campos de fasores	19
4. Resultados	21
4.1. Análisis de filtrado en <i>backprojection filtrado</i> convencional	21
4.2. Análisis de filtrado para iluminación indirecta	23
4.3. Variación de la distancia a la pared difusa	27
4.4. Variación del material	30
4.5. Variación del número de objetos	31
5. Conclusiones	37
Bibliografía	39
Lista de Figuras	41

Capítulo 1

Introducción

1.1. Contexto del trabajo

La imagen computacional es un conjunto de técnicas digitales que permiten formar imágenes a partir de medidas de sensores de distintos tipos, en contraste a los procesos ópticos que generan las imágenes en una cámara tradicional. Estas técnicas sustituyen o incrementan las capacidades de algunos procesos ópticos. Una cámara de fotos genera imágenes a partir de la luz que recibe un sensor durante un cierto tiempo, denominado tiempo de exposición. En fotografía tradicional, el tiempo de exposición es suficientemente largo como para que la luz recorra la escena completa. Por ello, en la imagen final se integra la iluminación recibida en instantes diferentes y se pierde la información temporal sobre el transporte de la luz desde que es emitida hasta que llega al sensor de la cámara, dando la sensación de que su velocidad es infinita.

Gracias al desarrollo de sensores con tiempos de exposición comparables a la velocidad de la luz y su combinación con láseres ultrarrápidos que emiten pulsos de luz de incluso menor duración, es posible ver el transporte de luz resuelto en tiempo dentro de la escena [1] y se hace evidente que su velocidad es finita. El tiempo de propagación de la luz depende de los caminos ópticos entre los objetos, por lo que se puede utilizar para medir distancias. Esto se ha utilizado por ejemplo en la Kinect 2, un periférico originalmente para la consola Xbox One, que obtiene imágenes con información de profundidad y las utiliza para reconocer los movimientos de los jugadores.

Más recientemente, se han utilizado cámaras con resolución temporal de picosegundos para ver objetos ocultos alrededor de esquinas [2, 3, 4], dentro del campo de imagen computacional conocido como *non-line-of-sight (NLOS) imaging*, que consiste en recuperar información sobre una escena que no se puede ver desde el sensor. Para ver objetos ocultos alrededor de esquinas se analiza la información sobre la luz indirecta que producen los objetos ocultos sobre objetos visibles, y se reconstruye computacionalmente la escena oculta. Ver alrededor de esquinas puede ser de mucha

utilidad en distintos escenarios, como los que se ilustran en la Figura 1.1: labores de rescate, evitar colisiones entre vehículos autónomos, o para visualizar o reconstruir regiones de difícil acceso en endoscopias.

El escenario habitual de captura de los datos se muestra en la Figura 1.2, y consiste típicamente en una pared difusa plana visible por la cámara, colocada frente a la escena oculta que se quiere reconstruir, y otro muro que impide que la cámara vea directamente la escena.

Se han propuesto distintos algoritmos para resolver el problema de la visión alrededor de esquinas, basados principalmente en invertir el transporte de la luz a partir del tiempo de propagación (o tiempo de vuelo) para reconstruir la geometría de la escena oculta [5]. El algoritmo de *backprojection filtrado* es uno de los primeros que se desarrollaron para ver alrededor de esquinas [2], y sigue siendo uno de los más empleados. Los algoritmos basados en *backprojection* utilizan el tiempo de vuelo de la luz indirecta detectada para estimar la geometría oculta mediante triangulación en base a distintas muestras capturadas sobre las superficies visibles.

Sin embargo, los algoritmos actuales solo recuperan la geometría de la escena, y se pierde toda la información del transporte de luz transitorio en ella. Reconstruir el transporte de luz transitorio en la escena oculta es interesante porque proporciona información similar a la que se obtendría al observar la escena desde donde se encuentra la pared visible, equivalente a colocar en la pared una cámara de gran resolución temporal que ve directamente la escena. De esta forma, la escena oculta se transforma conceptualmente en una escena visible, y se podrían aplicar métodos basados en transporte de luz transitorio que funcionan en escenas visibles sobre los mismos problemas para escenas ocultas, como por ejemplo, analizar los materiales de los objetos que la forman, como ya hicieron Wu et al. [7] en escenas visibles, o volver a aplicar técnicas NLOS para ver alrededor de una segunda esquina, utilizando una superficie de la escena oculta como “pared visible” de la segunda escena. Ver alrededor de más de una esquina es especialmente interesante en imagen médica, ya que las regiones internas, como los intestinos, suelen tener formas complejas y algunos entornos son difíciles de alcanzar con las cámaras. Durante el proceso de reconstrucción de la escena oculta se aplica un paso de filtrado, que resulta clave para incrementar la calidad de la reconstrucción. En la reconstrucción de transporte de luz transitorio también es un elemento clave.

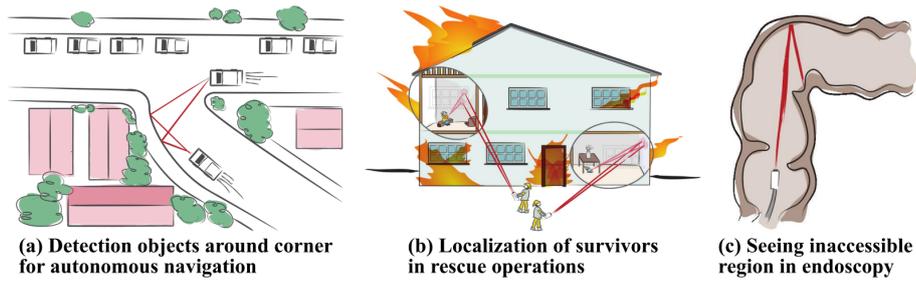


Figura 1.1: Potenciales aplicaciones de la visión alrededor de esquinas (figura de Maeda et al. [5]).

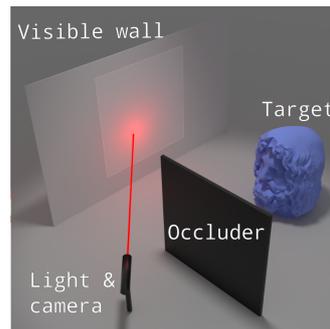


Figura 1.2: Ejemplo de configuración típica de obtención de datos para reconstruir escenas ocultas (figura de Galindo et al. [6]). Hay una superficie difusa (“Visible wall”) en la línea de visión del dispositivo de captura que se ilumina con un pulso corto de luz y lo dispersa. La luz llega desde el muro al objeto oculto, marcado como “Target”. Después vuelve al muro, desde donde puede alcanzar la cámara. El objeto a reconstruir se encuentra oculto por otro muro (“Occluder”).

1.2. Objetivo del trabajo

El objetivo de este trabajo es implementar *backprojection filtrado* y, a partir de ello, desarrollar un algoritmo que extiende *backprojection* para obtener la información del transporte de luz transitorio en la escena oculta, así como analizar el efecto de distintas técnicas de filtrado en ambos algoritmos. Para ello se han seguido los siguientes pasos:

- Se ha implementado *backprojection filtrado* convencional.
- Se han analizado los resultados obtenidos por el algoritmo bajo distintas técnicas de filtrado.
- Partiendo de *backprojection filtrado*, se ha formulado e implementado el nuevo algoritmo, *backprojection filtrado resuelto en tiempo*.
- Se han analizado los resultados obtenidos por el nuevo algoritmo bajo distintas técnicas de filtrado.

- Se ha analizado la información que proporciona la reconstrucción de luz indirecta en diferentes escenas, de cara a potenciales aplicaciones futuras como ver alrededor de dos esquinas o analizar los materiales de la escena.

Este documento se ha organizado con la siguiente estructura: En el Capítulo 2 se introducen conceptos relacionados y otros trabajos realizados en el mismo campo de estudio. A continuación, en el Capítulo 3 se explican el algoritmo de *backprojection filtrado*, que se ha tomado como base, y *backprojection filtrado resuelto en tiempo*, el algoritmo desarrollado para computar la probabilidad de que la luz capturada en un instante provenga de cierto punto de la escena oculta y con un tiempo de propagación concreto. En el Capítulo 4 se muestran y analizan los resultados obtenidos. Finalmente, en el Capítulo 5 se describen las conclusiones obtenidas y posible trabajo futuro.

1.3. Planificación y herramientas

El proyecto ha tenido una duración aproximada de 340 horas dedicadas a lo largo de aproximadamente cinco meses. Se ha dividido en las siguientes tareas, distribuidas a lo largo de la duración del proyecto como se muestra en la Figura 1.3: estudio del estado del arte en técnicas de reconstrucción de escenas ocultas, implementación de un algoritmo existente de reconstrucción de geometría oculta y análisis de su resultado bajo distintos filtrados, diseño e implementación del nuevo algoritmo para visualizar la propagación de la luz en la escena oculta, análisis de distintas técnicas de filtrado sobre la reconstrucción y de las reconstrucciones obtenidas en distintas escenas, y redacción de la memoria.

La implementación del algoritmo y visualización de los resultados se ha llevado a cabo en MATLAB. El comportamiento del algoritmo se ha probado sobre escenas sintéticas disponibles en el *dataset* público Z-NLOS [6], y sobre algunas generadas con un sistema de simulación de transporte de luz implementado en C++ a partir de Mitsuba 2 [8], según las necesidades del experimento.

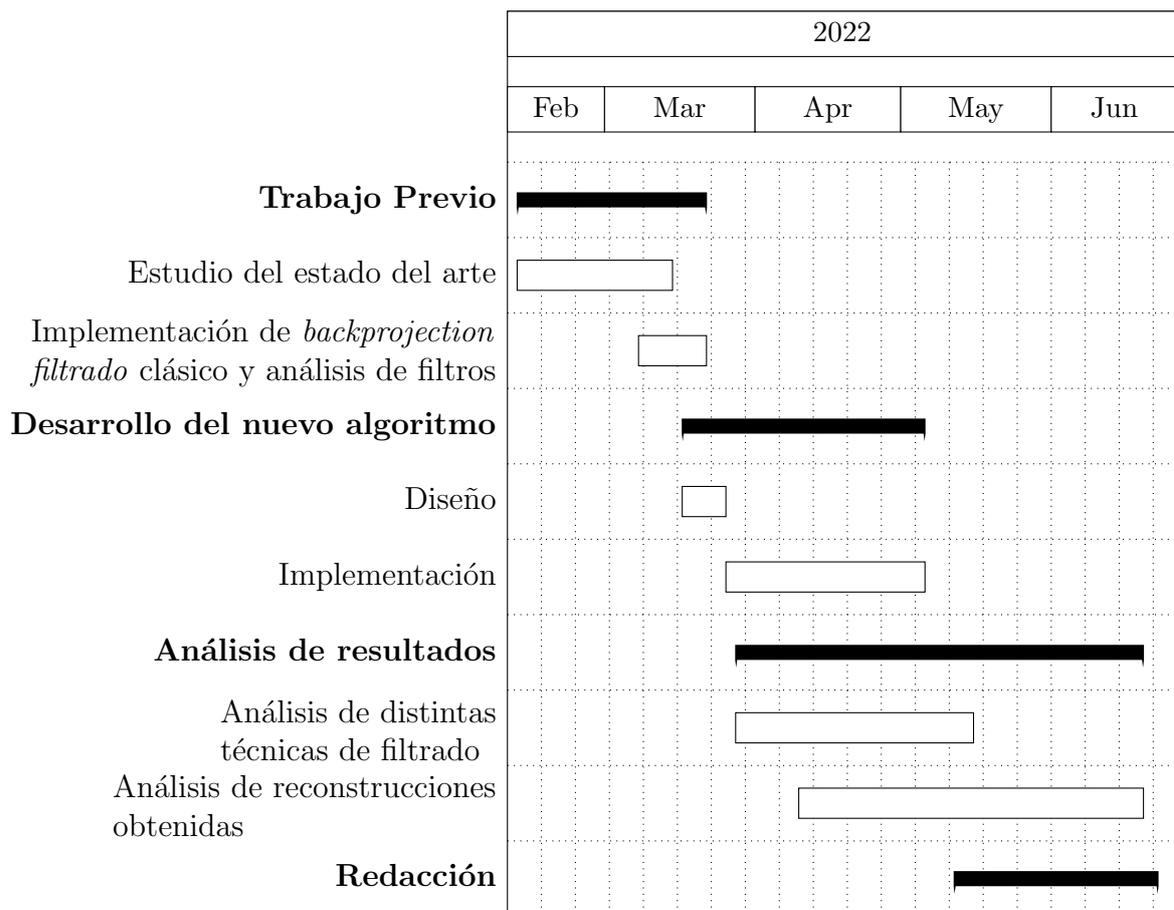


Figura 1.3: Diagrama de Gantt del trabajo.

Capítulo 2

Trabajo relacionado

Una de las aplicaciones más novedosas de la imagen computacional es obtener información sobre escenas que están ocultas respecto a un observador. Estas aplicaciones se basan en analizar la luz indirecta que producen los objetos ocultos sobre objetos visibles por el observador, ya que la estructura espacio-temporal del transporte de luz puede revelar información sobre posición, estructura geométrica, o propiedades de reflectancia de los objetos ocultos.

Los métodos para reconstruir escenas ocultas se pueden clasificar en dos grupos según la información que utilizan: métodos de transporte de luz estacionario (sin información temporal) y métodos de transporte de luz transitorio o resuelto en tiempo. Los métodos de transporte de luz estacionario utilizan la iluminación indirecta sobre las superficies visibles capturada durante tiempos de exposición muy largos en comparación con la velocidad de la luz. Por ello, ignoran la información temporal sobre propagación de la luz, igual que ocurre en fotografía tradicional. La información disponible es por lo tanto muy limitada, basándose solo en analizar cambios de iluminación espaciales, lo que limita el rango de aplicabilidad o la variedad de escenas que se pueden reconstruir [5, 9]. Algunas de estas aplicaciones limitadas son el seguimiento de objetos sin recuperar su forma [10] o reconstrucciones de solo una o dos dimensiones [11, 12].

Por el contrario, los métodos de transporte de luz transitorio analizan la luz indirecta a resoluciones temporales comparables con la velocidad de la luz. Gracias al desarrollo de sensores ultrarrápidos que permiten capturar la luz en movimiento [1, 2, 13], un gran número de métodos combinan este tipo de sensores con pulsos láser para analizar la información temporal del transporte de luz indirecto producido por las escenas ocultas, información que en los métodos de transporte de luz estacionario se integra en una sola imagen y se pierde. La estructura temporal del transporte de luz indirecto capturado depende de la geometría y los materiales de toda la escena, tanto visible como ocluida, por lo que contiene información sobre la escena oculta. Se han desarrollado distintos algoritmos para reconstruir la geometría oculta a partir de

esta información [5, 14, 15], que generalmente analizan la iluminación indirecta sobre una única superficie, habitualmente plana. Un gran número de estos métodos utilizan algoritmos basados en *backprojection*, que utilizan múltiples muestras de iluminación y medición en la geometría visible para invertir el transporte transitorio capturado y estimar la geometría de la escena mediante triangulación [2, 3, 16, 17, 18]. Los recientes avances en métodos basados en campos de fasores [4] han dado lugar a métodos que reconstruyen geometría oculta de forma interactiva [19] o incluso en tiempo real [20].

Una de las limitaciones de la mayor parte de los algoritmos existentes es que solo estiman información geométrica, ignorando toda la información temporal del transporte de luz transitorio entre los objetos de la escena. El desarrollo reciente de métodos basados en campos de fasores plantea las reconstrucciones NLOS como un problema de óptica virtual [4, 21], dando los primeros pasos para reconstruir y analizar el transporte de luz transitorio en escenas ocultas desde un punto de vista radiométrico. En escenas visibles el análisis de la información de iluminación resuelta en tiempo es clave para estimar propiedades de la escena, como la profundidad [22], los materiales que la forman [23], o la separación de las distintas componentes del transporte de luz [7]. El objetivo de este trabajo es desarrollar y analizar el comportamiento de algoritmos que recuperen el transporte de luz transitorio en escenas ocultas. Este tipo de algoritmos serían de utilidad para migrar las técnicas de imagen computacional de análisis de escenas visibles a escenas no visibles, o para aplicar recursivamente los métodos de NLOS con el objetivo de ver alrededor de más de una esquina.

Capítulo 3

Modelos de reconstrucción

En este capítulo se explica el algoritmo de *backprojection filtrado*, propuesto originalmente para reconstrucción de escenas ocultas por Velten et al. [2]. En este trabajo se ha implementado el algoritmo, y se ha utilizado esta implementación como base para desarrollar el nuevo algoritmo que añade la dimensión temporal a la reconstrucción. Los algoritmos basados en *backprojection* provienen del campo de tomografía computarizada [2], donde ya se empleaba para reconstruir volúmenes a partir de múltiples medidas tomadas alrededor de él desde distintos ángulos. Después se explica el nuevo algoritmo desarrollado, al que llamamos *backprojection filtrado resuelto en tiempo*, que generaliza *backprojection filtrado* convencional para reconstruir la iluminación de la escena oculta a lo largo del tiempo y no solo su geometría. Esta reconstrucción resulta interesante para analizar las escenas en mayor profundidad y obtener información sobre ellas que la reconstrucción de geometría no contiene pero sí se ha podido obtener en escenas visibles al conocer el transporte de luz transitorio en ellas. Dado que los modelos de reconstrucción basados en *backprojection* habitualmente realizan un filtrado de los datos para reconstruir la escena oculta correctamente, en la última sección de este capítulo se explican las técnicas de filtrado más utilizadas y su aplicación en los modelos de reconstrucción explicados.

3.1. Algoritmo de *backprojection filtrado*

Los algoritmos basados en *backprojection* permiten obtener una estimación de la geometría de una escena oculta a partir de medidas a gran resolución temporal de la iluminación indirecta producida por los objetos ocultos en una superficie visible.

El escenario típico de captura de los datos, mostrado en la Figura 3.1, consiste en una pared difusa visible frente a la escena oculta que se quiere reconstruir, una cámara ultrarrápida colocada de forma que puede ver la pared pero no la escena, y un láser orientado también hacia la pared visible. Tanto el láser como la cámara iluminan y

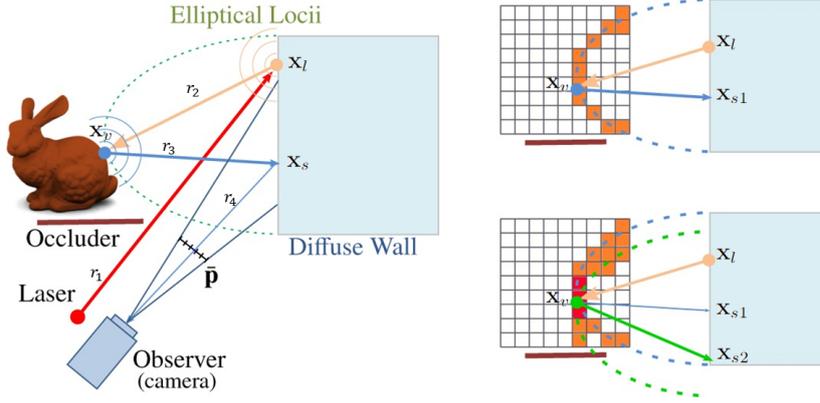


Figura 3.1: Resumen del método de *backprojection filtrado* (figura de Arellano et al. [3], con la notación modificada). A la izquierda, ilustración de la escena. Un pulso láser de pocos femtosegundos ilumina la pared difusa (visible) en \mathbf{x}_l , creando una fuente de luz virtual que ilumina la escena. El reflejo de la luz en la superficie oculta viaja de vuelta a la pared, donde se observa el punto \mathbf{x}_s con la cámara. El tiempo de propagación desde un punto \mathbf{x}_v en la superficie oculta, dependiente de la distancia $r_2 + r_3$, define un elipsoide con focos \mathbf{x}_l y \mathbf{x}_s . A la derecha, se muestra que varios elipsoides con distintos focos se cortan en el punto de la superficie oculta que los define. Estas intersecciones definen el mapa de probabilidad de la geometría oculta, que a continuación se filtra para obtener la reconstrucción final.

miden, respectivamente, distintos puntos en la pared visible. El recorrido que sigue la luz capturada se indica en la figura con los vectores r_1 , r_2 , r_3 y r_4 y es el siguiente: El láser emite un pulso de luz de muy corta duración que ilumina el punto \mathbf{x}_l en la pared visible, desde donde se dispersa en múltiples direcciones, iluminando la escena oculta. Cuando la luz reflejada alcanza el objeto en \mathbf{x}_v , se vuelve a reflejar desde este punto y llega de nuevo a la pared. Finalmente, la cámara captura la luz que se refleja hacia ella en una serie de puntos \mathbf{x}_s en la pared visible. El conjunto de mediciones de la cámara para cada punto de iluminación \mathbf{x}_l habitualmente se denomina función impulso H . Habitualmente se asume que las mediciones representadas por H se pueden modelar mediante la siguiente expresión

$$H(\mathbf{x}_l, \mathbf{x}_s, t) = \int \delta(d' + d_{lv} + d_{sv} - ct) f(\mathbf{x}_v) d\mathbf{x}_v, \quad (3.1)$$

donde c es la velocidad de la luz y $d_{ab} = \|\mathbf{x}_a - \mathbf{x}_b\|$, es decir, la distancia en línea recta entre \mathbf{x}_a y \mathbf{x}_b . $f(\mathbf{x}_v)$ representa el porcentaje de radiación (i.e. el albedo) reflejado por la superficie oculta en \mathbf{x}_v . Las distancias d_{lv} y d_{sv} son las distancias que recorre la luz entre la pared y cada punto \mathbf{x}_v de la escena oculta, r_2 y r_3 respectivamente en la Figura 3.1. Por otro lado, $d' = r_1 + r_4$ es la suma de las distancias entre el láser y \mathbf{x}_l , y entre \mathbf{x}_s y la cámara, constante para cada par de puntos $\mathbf{x}_l, \mathbf{x}_s$. Por lo tanto, la suma $d' + d_{lv} + d_{sv}$ es la distancia total recorrida por la luz desde que se emite hasta que

llega al sensor, si hay geometría en \mathbf{x}_v e interactúa con ella (se asume que dentro de la escena oculta no hay oclusiones). La función *delta* $\delta(x)$ toma valor 0 al evaluarse con cualquier $x \neq 0$, mientras que $\delta(0) = 1$. De este modo se restringe la propagación a los caminos de luz que solo realizan una interacción con la escena oculta al viajar entre \mathbf{x}_l y \mathbf{x}_s : la luz reflejada por \mathbf{x}_v se captura cuando ha transcurrido exactamente el tiempo que necesita para recorrer la distancia $d' + d_{lv} + d_{sv}$, asumiendo que todo lo recibido en H es luz que solo ha realizado una interacción entre \mathbf{x}_l y \mathbf{x}_s .

Backprojection tiene como objetivo desambiguar el término $f(\mathbf{x}_v)$ en la Ecuación 3.1 respecto a la H capturada, aproximándolo mediante la siguiente expresión

$$f_{ub}(\mathbf{x}_v) \approx \iint_{SL} H(\mathbf{x}_l, \mathbf{x}_s, t' + t_{lv} + t_{sv}) d\mathbf{x}_l d\mathbf{x}_s, \quad (3.2)$$

donde $f_{ub}(\mathbf{x}_v)$ es la reconstrucción que se obtiene, $t' = d'/c$ es el tiempo que tarda la luz en recorrer la distancia d' , $t_{lv} = d_{lv}/c$ es el tiempo que tarda en recorrer d_{lv} , y $t_{sv} = d_{sv}/c$ es el tiempo que tarda en recorrer d_{sv} .

La Ecuación 3.2 intenta triangular la posición de los puntos \mathbf{x}_v de la geometría oculta a partir del tiempo de vuelo de la luz capturada. El término t' es constante para cada par de puntos $\mathbf{x}_l, \mathbf{x}_s$, lo que permite conocer el tiempo que la luz capturada en un instante ha tardado en llegar desde \mathbf{x}_l hasta \mathbf{x}_s pasando por un punto \mathbf{x}_v de la escena oculta, esto es, la suma $t_{lv} + t_{sv}$. Como se puede ver en la Figura 3.1, este tiempo de propagación no corresponde a un solo punto \mathbf{x}_v , sino a un conjunto de puntos en la superficie de un elipsoide cuyos focos son \mathbf{x}_l y \mathbf{x}_s . En la reconstrucción $f_{ub}(\mathbf{x}_v)$ obtenida, la iluminación capturada ha contribuido a todos los puntos que la pueden haber producido (toda la superficie del elipsoide), generando un mapa de probabilidad de que cada \mathbf{x}_v pertenezca a la geometría oculta: es más probable que pertenezcan a la geometría oculta los puntos donde se intersecan más elipsoides que los puntos donde se intersecan pocos.

La triangulación mediante elipsoides provoca que se sumen falsos positivos, integrando la radiancia de H sobre puntos \mathbf{x}_v donde no hay geometría. Estos puntos que no pertenecen a la geometría pero a los que ha contribuido el proceso de reconstrucción (Ecuación 3.2) enmascaran la forma real del objeto. Por ello, en la práctica *backprojection* aplica un proceso de filtrado que intenta eliminar los caminos de luz que en realidad no han ocurrido, para recuperar la geometría real de la escena oculta. A esto se le conoce como *backprojection filtrado*. El filtrado se puede aplicar espacialmente sobre la reconstrucción f_{ub} , o temporalmente sobre H antes de computar la integral. Al añadir el filtrado en la Ecuación 3.2 se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}
f(\mathbf{x}_v) &\approx K(\mathbf{x}_v) * f_{ub}(\mathbf{x}_v) \\
&\approx K(\mathbf{x}_v) * \iint_{SL} H(\mathbf{x}_l, \mathbf{x}_s, t' + t_{lv} + t_{sv}) d\mathbf{x}_l d\mathbf{x}_s,
\end{aligned} \tag{3.3}$$

$$f(\mathbf{x}_v) \approx \iint_{SL} H'(\mathbf{x}_l, \mathbf{x}_s, t' + t_{lv} + t_{sv}) d\mathbf{x}_l d\mathbf{x}_s, \tag{3.4}$$

donde la Ecuación 3.3 corresponde a aplicar filtrado sobre la dimensión espacial de la reconstrucción y la Ecuación 3.4 corresponde a aplicarlo sobre la dimensión temporal de la función H leída. $K(\mathbf{x}_v)$ representa el *kernel* de un filtro sobre la dimensión espacial y $*$ representa una convolución en la dimensión del filtro. H' es la función de impulso filtrada temporalmente,

$$H'(\mathbf{x}_l, \mathbf{x}_s, t) = K(t) * H(\mathbf{x}_l, \mathbf{x}_s, t) \tag{3.5}$$

donde $K(t)$ representa el *kernel* de un filtro sobre la dimensión temporal.

No existe solución analítica para la Ecuación 3.2, ni para sus modificaciones añadiendo filtrado, las Ecuaciones 3.3 y 3.4, por lo que se resuelven numéricamente, transformando las integrales en sumatorios que recorren la función H , que se ha capturado de forma discreta. El espacio del volumen reconstruido se discretiza también, en un conjunto de vóxeles, y se realiza el cálculo para cada vóxel en lugar de cada punto.

3.2. *Backprojection filtrado resuelto en tiempo*

Backprojection filtrado convencional (Ecuaciones 3.3 y 3.4) recupera la geometría de la escena oculta utilizando la información sobre el tiempo que tarda la luz en recorrer un tipo de camino concreto, mostrado en la Figura 3.1 y en el modelo de captura de iluminación (Ecuación 3.1): los caminos de luz que desde la pared visible llegan a la escena oculta, interactúan con ella solo una vez, y vuelven a la pared, desde donde llegan a la cámara.

Desde el punto de vista de la pared visible, que ilumina la escena reflejando el pulso láser, la luz utilizada para reconstruir la geometría proviene de luz directa sobre la escena oculta, ya que la luz que alcanza la escena oculta proviene directamente de la pared. Durante esta sección y las siguientes, el término “luz directa” designa la luz que procede de estos caminos de luz que solo interactúan una vez con la escena oculta.

La captura de la función de impulso H (Ecuación 3.1) se modela de forma que solo incluye los caminos de luz directa. Sin embargo, dependiendo de la geometría de la escena oculta, es posible que ocurran situaciones como la mostrada en la

Figura 3.2, donde alguno de los caminos de luz interactúa con otros puntos de la escena antes de llegar al punto \mathbf{x}_v de la geometría oculta. Estos caminos son ignorados por *backprojection filtrado* convencional, pero contienen información adicional sobre la escena. Para poder estimar estos caminos de luz adicional, a continuación se propone el algoritmo de *backprojection resuelto en tiempo* que incluye tanto los caminos de luz directa utilizados por *backprojection* convencional para estimar la geometría oculta, como los caminos de mayor longitud que representan la luz indirecta de la escena oculta, y su versión aplicando filtrado, *backprojection filtrado resuelto en tiempo*. Durante esta sección y las siguientes, el término “luz indirecta” designa la luz que procede de estos caminos de luz que interactúan varias veces con la escena oculta.

En la Figura 3.3 se muestra un ejemplo de iluminación capturada por la cámara en un punto \mathbf{x}_s de la pared a lo largo del tiempo. La escena oculta en el ejemplo consiste en un objeto aislado de superficie plana orientada de forma paralela a la pared. Como la superficie es completamente plana, no se puede producir luz indirecta entre puntos del objeto, así que toda la luz indirecta proviene de caminos de luz como el mostrado en la imagen central de dicha figura, que interactúan alternativamente con la pared y con el objeto. Esto permite ver en la imagen derecha de la figura que efectivamente se está capturando iluminación posterior a la luz directa, fácilmente distinguible por la gran diferencia entre el tiempo de vuelo de la luz directa y la indirecta.

Para añadir la dimensión temporal a la reconstrucción de la escena oculta $f_{ub}(\mathbf{x}_v)$, se acumulan los valores de H a los que ha podido contribuir la luz, directa o indirecta, desde cada punto \mathbf{x}_v de la escena oculta en un momento dado,

$$f_{ub}(\mathbf{x}_v, t) \approx \iint_{SL} H(\mathbf{x}_l, \mathbf{x}_s, t' + t_{lv} + t_{sv} + t) d\mathbf{x}_l d\mathbf{x}_s \quad (3.6)$$

donde $f_{ub}(\mathbf{x}_v, t)$ es la reconstrucción espaciotemporal obtenida, \mathbf{x}_l es un punto iluminado por el láser, \mathbf{x}_s es un punto capturado por la cámara, t' es la suma de la distancia del láser a \mathbf{x}_l y de la distancia de la cámara a \mathbf{x}_s , constante para cada par $\mathbf{x}_l, \mathbf{x}_s$, y t_{ab} es el tiempo que tarda la luz en recorrer la distancia entre dos puntos \mathbf{x}_a y \mathbf{x}_b en línea recta. Sea $t_d = t' + t_{lv} + t_{sv}$ el tiempo de vuelo de la luz directa en un punto \mathbf{x}_v de la escena oculta, $f_{ub}(\mathbf{x}_v, t)$ contiene la acumulación de intensidad de todos los caminos de luz con tiempo de vuelo $t_d + t$, que son aquellos que han podido interactuar con \mathbf{x}_v t instantes más tarde de que reciba la luz directa, y a continuación viajar a \mathbf{x}_s .

Esta ecuación que se acaba de describir generaliza la Ecuación 3.2, que define *backprojection* clásico, de tal forma que el instante inicial $t = 0$ corresponde a la luz directa recuperada originalmente, $f_{ub}(\mathbf{x}_v, 0) = f_{ub}(\mathbf{x}_v)$. Nótese que ahora hay dependencia temporal tanto en la reconstrucción f_{ub} como en la evaluación de la función

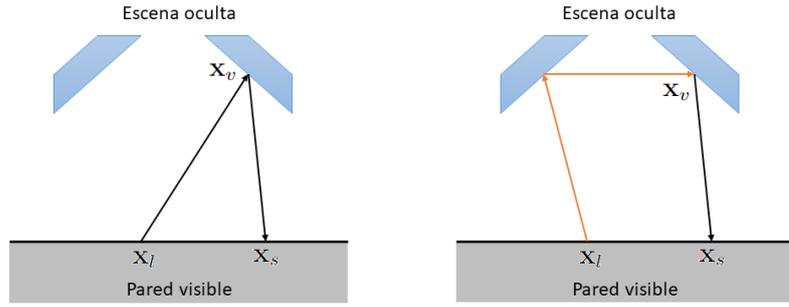


Figura 3.2: Ilustración de caminos de luz directa e indirecta desde el punto de vista de la pared visible. La escena se muestra desde la vista superior. A la izquierda, la luz que llega a \mathbf{x}_s desde \mathbf{x}_v es luz directa, ya que procede directamente de \mathbf{x}_l . A la derecha, la luz ha tomado otro camino más largo, marcado en naranja, que interactúa con la escena oculta antes de llegar a \mathbf{x}_v , produciendo luz indirecta.

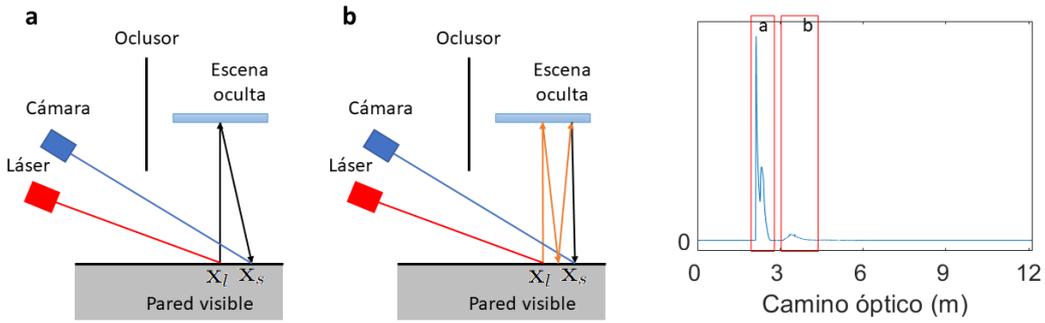


Figura 3.3: Visualización de caminos de luz directa (a) e indirecta (b) en una escena oculta con un objeto plano aislado vista desde arriba, y de la iluminación capturada en un punto \mathbf{x}_s . Como el objeto es plano, todos los caminos de luz indirecta posibles viajan alternativamente entre el objeto y la pared visible, como marcan las flechas naranjas en b. En la imagen derecha se muestra la iluminación capturada en \mathbf{x}_s a lo largo del tiempo. En ella se distingue un primer intervalo con valores positivos que corresponde a la luz directa sobre distintos puntos del objeto, procedente de caminos de luz como el mostrado en a. A cierta distancia se distingue un segundo intervalo positivo, correspondiente con la luz indirecta que ha recorrido caminos como el mostrado en b.

H , ya que si \mathbf{x}_v ha recibido iluminación en diferentes instantes, los tiempos de vuelo correspondientes también serán distintos.

Igual que ocurriría con *backprojection*, no existe solución analítica para la Ecuación 3.6 y se resuelve numéricamente mediante sumatorios, con el volumen discretizado en vóxeles. Los elementos consecutivos en la dimensión temporal de H , a partir del instante t_d , contribuyen a elementos consecutivos en la dimensión temporal de la reconstrucción f , de forma que $f_{ub}(\mathbf{x}_v, t)$ es la suma de los distintos vectores $H(\mathbf{x}_l, \mathbf{x}_s, t)$, si se considera que el valor correspondiente al instante t_d es su primer

valor.

En la Figura 3.4 se muestra una forma de optimizar el cálculo de la reconstrucción: para evitar realizar los sumatorios individualmente para cada instante temporal para un vóxel \mathbf{x}_v concreto, ya que todos aplican un mismo desplazamiento negativo de t_d posiciones, se aplica el desplazamiento una sola vez al vector completo, y se suma este sobre el vector de la reconstrucción que corresponde a \mathbf{x}_v .

En la función de impulso H existen mediciones anteriores a t_d . Estas no se utilizan para reconstruir porque desde el punto de vista de la pared visible no tienen sentido físico: el mínimo tiempo de propagación entre \mathbf{x}_l y \mathbf{x}_s corresponde a la luz directa en \mathbf{x}_v , con tiempo t_d , por lo que si hay mediciones positivas de instantes anteriores, esa luz tiene que proceder de otro vóxel diferente.

Por otro lado, la función H se ha discretizado en captura, y el tamaño de su dimensión temporal es limitado por un valor t_{\max} , provocando que tras el desplazamiento de t_d posiciones, no todos los vectores que se están sumando tengan el mismo tamaño. Este problema se puede solucionar en la implementación de dos maneras: la primera aproximación es rellenar el vector con ceros hasta que tenga el tamaño deseado, asumiendo que $H(\mathbf{x}_l, \mathbf{x}_s, t) = 0$ para $t > t_{\max}$; la segunda es asumir que la dimensión temporal tiene un comportamiento cíclico, y colocar los elementos iniciales descartados a continuación del último elemento del vector, de forma que se mantiene su tamaño. Esta segunda aproximación da un resultado físicamente incorrecto a partir de cierto instante, cuando se empiecen a sumar intensidades que corresponden a luz directa en otros vóxeles, por lo que solo se puede utilizar si no se necesita analizar instantes tan avanzados.

En este caso, se han implementado y probado ambas versiones. Como el intervalo temporal que se ha analizado en los experimentos realizados es considerablemente menor que el intervalo durante el que se han capturado datos, se ha optado por utilizar la segunda aproximación, que resulta más eficiente y obtiene los mismos resultados en el intervalo de interés.

Como se ha explicado anteriormente, los modelos basados en *backprojection* habitualmente realizan un paso de filtrado previo o posterior al cálculo integral para recuperar la geometría, porque cada valor de H con tiempo de vuelo t_d contribuye a todos los vóxeles de un elipsoide y no solo a los que pertenecen a la superficie oculta que generó esa medida. Este problema sigue presente en el nuevo algoritmo, por lo que también es necesario aplicar filtrado. Añadiendo el filtrado en la Ecuación 3.6, las

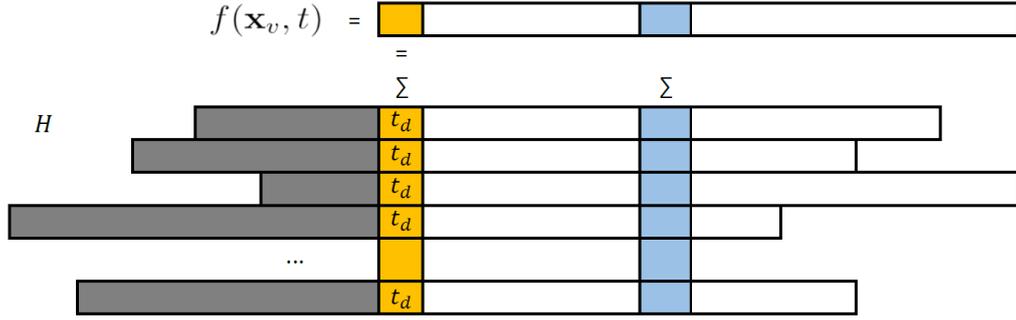


Figura 3.4: Obtención de la reconstrucción $f(\mathbf{x}_v, t)$ de un vóxel concreto \mathbf{x}_v . La columna amarilla contiene el valor leído por el sensor para cada par de puntos láser-sensor en el instante t_d , correspondiente al tiempo de vuelo de la luz directa sobre el vóxel considerado. El primer valor de la reconstrucción, $f(\mathbf{x}_v, 0)$ es la suma de toda la columna, y los valores leídos anteriormente, marcados en gris, no se utilizan para este vóxel. La casilla azul en f representa la iluminación recuperada en \mathbf{x}_v t instantes más tarde de la iluminación directa, y se obtiene sumando los valores de la columna azul en la matriz de lecturas con las filas desplazadas. Si alguno de los vectores, tras el desplazamiento, tiene menos elementos que la posición que se está sumando, se suma un 0 en su lugar.

ecuaciones que describen el algoritmo son

$$\begin{aligned} f(\mathbf{x}_v, t) &\approx K(\mathbf{x}_v, t) * f_{ub}(\mathbf{x}_v, t) \\ &\approx K(\mathbf{x}_v, t) * \iint_{SL} H(\mathbf{x}_l, \mathbf{x}_s, t' + t_{lv} + t_{sv} + t) d\mathbf{x}_l d\mathbf{x}_s \end{aligned} \quad (3.7)$$

si se filtra la reconstrucción obtenida por la Ecuación 3.6, y

$$f(\mathbf{x}_v, t) \approx \iint_{SL} [K(t) * H(\mathbf{x}_l, \mathbf{x}_s, t' + t_{lv} + t_{sv} + t)] d\mathbf{x}_l d\mathbf{x}_s \quad (3.8)$$

si se filtra la función H antes de reconstruir. $K(\mathbf{x}_v, t)$ representa el *kernel* de un filtro de cuatro dimensiones (espacio y tiempo), $K(t)$ representa el *kernel* de un filtro sobre la dimensión temporal y $*$ representa una convolución en las mismas dimensiones que los filtros correspondientes.

Como muestra la Ecuación 3.7, para aplicar filtrado sobre la reconstrucción inicial hay que hacer una convolución en cuatro dimensiones. Esta operación necesita mucha memoria para realizarse y es también más costosa en tiempo que aplicar varias convoluciones en una sola dimensión. Adicionalmente, dado que características temporales del transporte de luz capturado en H están relacionadas con caminos ópticos entre puntos \mathbf{x}_v de la escena oculta, filtrar temporalmente la función impulso (Ecuación 3.8) realiza de forma implícita un filtrado espacial sobre el transporte reconstruido $f(\mathbf{x}_v, t)$. Por ello, en este trabajo el análisis de las técnicas de filtrado se realiza sobre la Ecuación 3.8, que resulta más eficiente.

3.3. Filtrado

El filtrado es un paso necesario para recuperar la forma de la geometría reconstruida correctamente, ya que contiene errores de estimación a causa de los elipsoides empleados para triangular. Se realiza aplicando una convolución sobre los datos con un cierto *kernel*, y se puede aplicar tanto sobre la dimensión temporal de la señal capturada como sobre el volumen reconstruido, como muestran las Ecuaciones 3.3 y 3.4.

En la Figura 3.5 se muestra el *kernel* de tres filtros distintos utilizados, visualizados en espacio de frecuencias para ilustrar cuáles son las frecuencias que amplifica o atenúa cada uno. Estos tres filtros son los más habituales usados para reconstrucción de escenas ocultas mediante *backprojection filtrado* [2, 4, 16].

Aplicar un filtro espacialmente sobre la reconstrucción obtenida por la Ecuación 3.2 modifica dicha reconstrucción y el nivel de detalle que se puede obtener. La dimensión temporal está muy relacionada con las características espaciales (el tiempo de vuelo depende de las distancias entre puntos de la geometría), por lo que filtrar temporalmente está modificando indirectamente la geometría que ha producido la señal. A continuación se presentan los filtros que se han aplicado en este trabajo.

3.3.1. Laplaciano

El filtro Laplaciano es uno de los filtros empleados en tomografía computacional, de donde proviene el algoritmo de *backprojection*, y en el *paper* donde se propuso por primera vez para reconstruir escenas ocultas [2].

Este filtro se utiliza también en procesado de imágenes, para detectar bordes y máximos locales. Para ello utiliza solo los píxeles adyacentes al considerado en cada instante, por lo que su *kernel* es muy estrecho, lo que lo hace propenso a amplificar el ruido. La operación que realiza es la segunda derivada de la función que se quiere filtrar:

$$\nabla^2(t) = \frac{\partial^2}{\partial t^2} \quad (3.9)$$

cuando el filtro se aplica sobre una dimensión, y

$$\nabla^2(x, y, z) = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (3.10)$$

cuando se aplica sobre tres dimensiones, donde ∇^2 es el operador Laplaciano.

En el mapa de probabilidad tridimensional que se obtiene con *backprojection*, los máximos locales corresponden a intersecciones de muchos elipsoides, por lo que son buenos candidatos a pertenecer a la geometría oculta.

En la Figura 3.5a se muestra el *kernel* de este filtro, visualizado en espacio de frecuencias. En ella se ve que amplifica las frecuencias más altas, mientras que las bajas

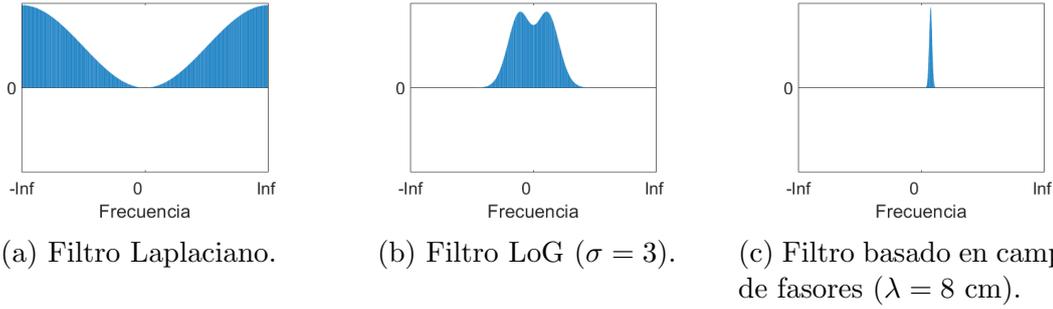


Figura 3.5: Visualización en espacio de frecuencias del *kernel* de varios filtros estudiados.

se atenúan más cuanto más bajas son. Las frecuencias se traducen a cierta longitud de onda, de forma que amplificar una frecuencia amplifica los detalles proporcionales a dicha longitud de onda. En este caso, al amplificarse las frecuencias altas, los detalles más amplificados son muy pequeños, añadiendo mucho ruido y atenuando la contribución de superficies con tamaño visible.

3.3.2. *Laplacian of Gaussian (LoG)*

Este filtro combina un filtro Gaussiano, utilizado típicamente para eliminar altas frecuencias, suavizar imágenes y reducir el ruido en ellas, con el filtro Laplaciano, explicado en la sección anterior. De esta forma, permite identificar los máximos locales sin verse tan afectado por el ruido que pueda haber en la señal. Se puede aplicar en dos pasos: aplicando primero el filtro Gaussiano sobre la función a filtrar y después calculando el Laplaciano del resultado. Sin embargo, también es posible obtener el *kernel* del LoG inicialmente y realizar un solo paso de filtrado.

$$LoG(f) = \nabla^2(g * f) = (\nabla^2 g) * f \quad (3.11)$$

donde f es la función sobre la que se aplica el filtrado (la función de impulso H o la reconstrucción f_{ub}), $LoG(f)$ es el resultado del filtrado, y g es el *kernel* Gaussiano. Matemáticamente, el *kernel* unidimensional del LoG es

$$LoG(t) = -\frac{2}{\sqrt{3}\sigma\pi^{1/4}} \left(1 - \left(\frac{t}{\sigma}\right)^2\right) e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} \quad (3.12)$$

y el tridimensional es

$$LoG(x, y, z) = -\frac{3}{\sigma^2} \left(1 - \frac{1}{3} \frac{x^2 + y^2 + z^2}{\sigma^2}\right) e^{-\frac{x^2 + y^2 + z^2}{2\sigma^2}} \quad (3.13)$$

El peso otorgado a cada frecuencia por el *kernel* del filtro LoG depende de la desviación típica σ asociada al filtro Gaussiano empleado: cuanto mayor es, más se

amplifican las frecuencias cercanas a 0 y se atenúan las frecuencias altas, mientras que al disminuir el valor de σ el filtro se asemeja cada vez más al Laplaciano. Desde la perspectiva del dominio de frecuencias, el objetivo principal del uso de este filtro es disminuir la influencia que tienen las frecuencias altas en el filtro Laplaciano, aunque si se atenúan en exceso cobran demasiada importancia las frecuencias cercanas a 0, amplificando detalles excesivamente grandes que tampoco permiten distinguir la forma correctamente

En la Figura 3.5b se muestra un ejemplo de *kernel* LoG en el que se han atenuado mucho las frecuencias altas, y se amplifican frecuencias bastante bajas.

3.3.3. Campos de fasores

Los dos filtros anteriores fueron propuestos por los métodos originales de reconstrucción de escenas ocultas mediante *backprojection filtrado* [2, 16]. Sin embargo, posteriormente se han introducido otras técnicas más complejas que proporcionan mejores resultados. Uno de estos es el filtrado basado en campos de fasores, basado en propiedades físicas de ondas e introducido por Liu et al. [4]. En este caso, se trata de un filtro que se aplica temporalmente.

Como se ha explicado anteriormente, el filtro Laplaciano amplifica mucho las frecuencias altas, mientras que el filtro LoG atenúa parte de estas altas frecuencias que son demasiado intensas en el filtro Laplaciano. Idealmente nos gustaría controlar de forma más explícita cuáles son las frecuencias que se amplifican, para tener mayor control sobre el detalle recuperado. El filtro basado en campos de fasores lo permite: es un filtro parametrizado respecto a una frecuencia ω , correspondiente a una longitud de onda $\lambda = 1/\omega$ indicada en su definición. Su expresión, definida por Liu et al. [4], es la siguiente

$$pf(t) = e^{-\frac{(t-\mu)^2}{(2\sigma_{pf})^2}} e^{\frac{2i\pi}{\lambda t}} \quad (3.14)$$

donde λ es la longitud de onda central del pulso y σ_{pf} controla su anchura. Como muestra la Figura 3.5c para un filtro con longitud de onda $\lambda = 8$ cm, este filtro amplifica las frecuencias cercanas a $\omega = 1/\lambda$ y atenúa las demás en gran medida.

Capítulo 4

Resultados

En este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos por los algoritmos introducidos en el Capítulo 3 bajo distintas técnicas de filtrado. Se han probado distintas escenas sintéticas, cambiando características concretas en cada una que afectan al transporte de luz indirecto: distancia del objeto oculto a la pared visible, propiedades de reflectancia de la superficie del objeto oculto, y complejidad de la escena oculta de forma que se incrementa el número de caminos distintos por los que la luz puede llegar al sensor. La mayoría de las escenas están contenidas en el *dataset* público Z-NLOS [6], y las adicionales se han generado mediante un sistema de simulación de transporte de luz que parte del renderizador Mitsuba 2 [8].

4.1. Análisis de filtrado en *backprojection filtrado convencional*

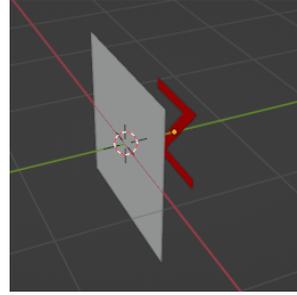
En la Sección 3.3 se han explicado distintas técnicas de filtrado que se pueden aplicar para intentar recuperar correctamente la geometría del objeto oculto. Se han probado estos filtros en la implementación realizada y a continuación se analiza el efecto que produce cada uno. Los filtros Laplaciano y LoG se han aplicado espacialmente sobre f_{ub} (Ecuación 3.3) tal y como se aplican tradicionalmente en métodos de *backprojection filtrado* convencional [2, 16]. Por el contrario, el filtrado basado en campos de fasores se ha aplicado temporalmente sobre H (Ecuación 3.4), como se define en el trabajo original de Liu et al. [4].

En la Figura 4.1 se muestra la escena sobre la que se ha aplicado el algoritmo. Esta consiste en un objeto aislado, plano, difuso y con forma de letra Z, situado a medio metro de distancia de la pared visible y paralelo a ella.

En la Figura 4.2 se muestran las reconstrucciones obtenidas y los *kernels* de los filtros utilizados, tanto en dominio espacial o temporal como en dominio de frecuencias. Aplicar una convolución provoca que los valores en los bordes del resultado no sean



(a) Vista de la escena desde la pared difusa.



(b) Vista 3D de la escena.

Figura 4.1: Escena estudiada. Consiste en un único objeto plano y difuso con forma de letra Z, colocado a medio metro frente a la pared y paralelo a ella.

correctos, ya que para realizar la operación consideran valores fuera del rango de la función que se está filtrando. Por ello, al filtrar espacialmente sobre la reconstrucción, no todos los valores en el volumen son válidos. En esta figura se han eliminado estos valores (asignando valor 0) para comparar la forma reconstruida que corresponde al objeto, pero en la Figura 4.3 se muestra la reconstrucción obtenida realmente, donde aparece iluminación en los bordes por delante del objeto, como si se encontrara dentro de una caja. Esto produce cierta pérdida de información, porque muestra iluminación en lugares donde no hay geometría, pero podría estar enmascarando su presencia si la hubiera.

La primera fila de la Figura 4.2 muestra la reconstrucción obtenida sin filtrar, donde se puede ver claramente la forma de muchos elipsoides, y no se puede distinguir la forma real del objeto, como ya se había adelantado en la Sección 3.1. En la siguiente fila se muestra el efecto tras aplicar un filtrado Laplaciano sobre ella: la forma del objeto aparece muy definida, pero algunas de las intersecciones entre elipsoides fuera del objeto siguen siendo visibles. Para intentar eliminarlas en mayor medida, se ha probado a aplicar filtrado LoG sobre la reconstrucción inicial. En la tercera fila de la figura se muestra el resultado: los artefactos de imagen se han reducido y la forma del objeto se distingue, pero se ha difuminado al aumentar el tamaño del *kernel* empleado. En la última fila se muestra el resultado obtenido con la última técnica de filtrado probada: filtrar temporalmente la función de impulso H con un filtro basado en campos de fasores y utilizar la función filtrada para calcular la reconstrucción. La forma del objeto se ha recuperado correctamente y los artefactos de imagen desaparecen prácticamente por completo. Además, en este caso no aparece falsa geometría en los bordes del volumen reconstruido.

El mayor problema del filtrado basado en campos de fasores es el tiempo de procesamiento que necesita. Como muestra la Ecuación 3.14, utiliza valores complejos,

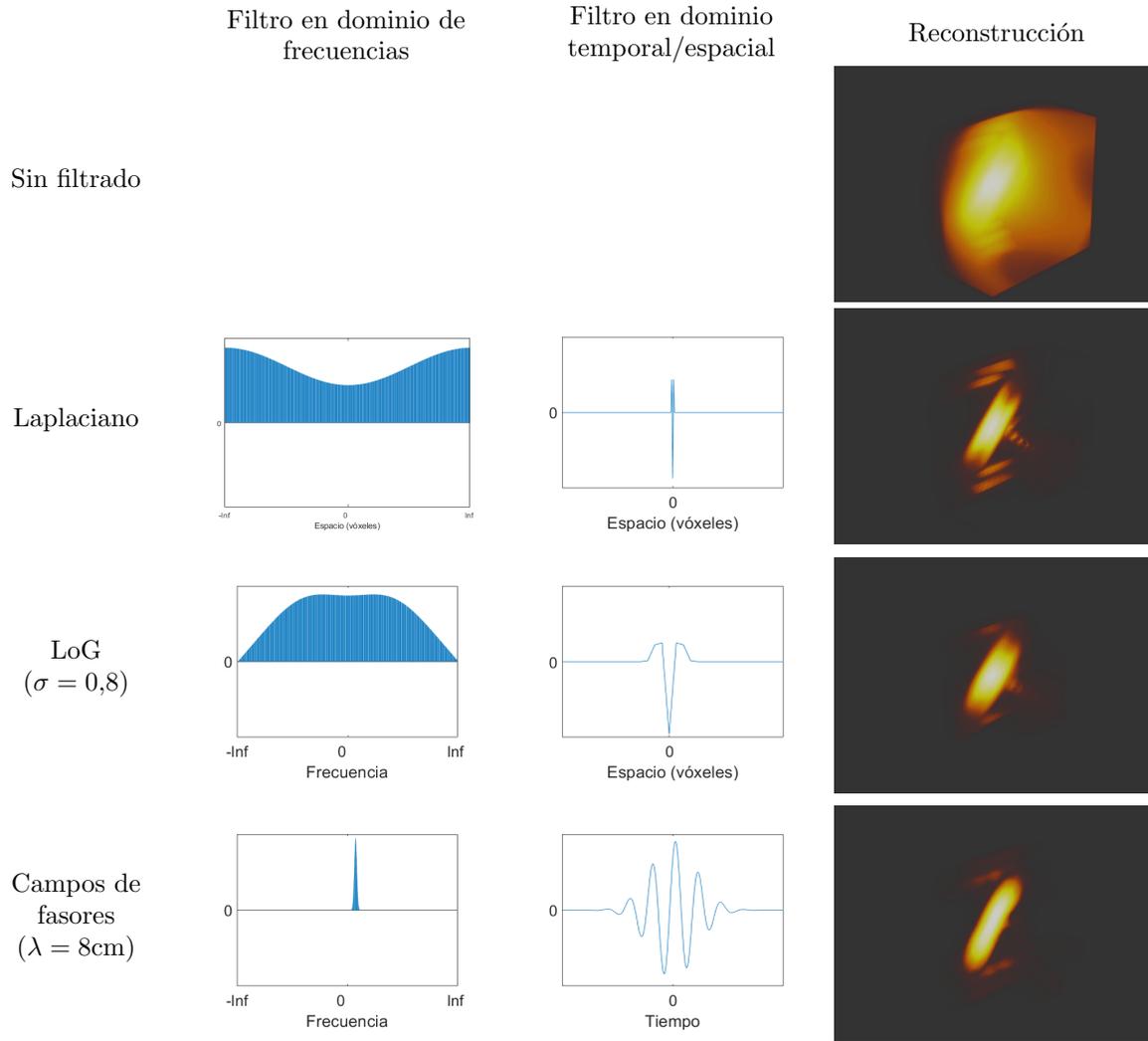


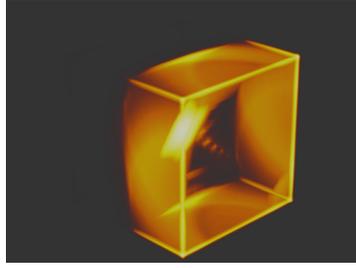
Figura 4.2: Filtros utilizados y reconstrucción obtenida con cada uno. La resolución en vóxeles es $32 \times 32 \times 32$. En la reconstrucción sin filtrar no se distingue la forma del objeto. Aplicando un filtro Laplaciano se recupera la forma del objeto pero siguen apareciendo bastantes falsos positivos. El filtro LoG es relativamente estrecho, por lo que atenúa las frecuencias más altas pero sigue amplificando otras frecuencias altas. La reconstrucción mejora respecto al filtro Laplaciano en términos de falsos positivos, pero la forma del objeto se desenfoca. El filtro basado en campos de fasores amplifica frecuencias muy concretas, y consigue eliminar casi por completo los falsos positivos sin desenfocar tanto como LoG.

por lo que los cálculos tardan más tiempo en realizarse.

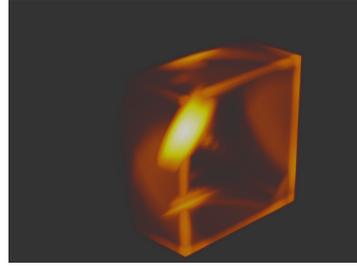
En la Figura 4.4 se muestra el efecto que produce el filtrado temporal sobre la función de impulso H , obteniendo distintas funciones según el tipo de filtrado empleado.

4.2. Análisis de filtrado para iluminación indirecta

Backprojection filtrado convencional se utiliza desde hace varios años, por lo que ya hay técnicas de filtrado que se sabe que funcionan bien. Sin embargo, no hay estudios



(a) Filtrado Laplaciano.



(b) Filtrado LoG.

Figura 4.3: Reconstrucciones obtenidas tras filtrar espacialmente. En los bordes del volumen se muestran valores que no se han filtrado correctamente, pero eliminar estos valores conlleva el riesgo de eliminar parte de la geometría oculta.

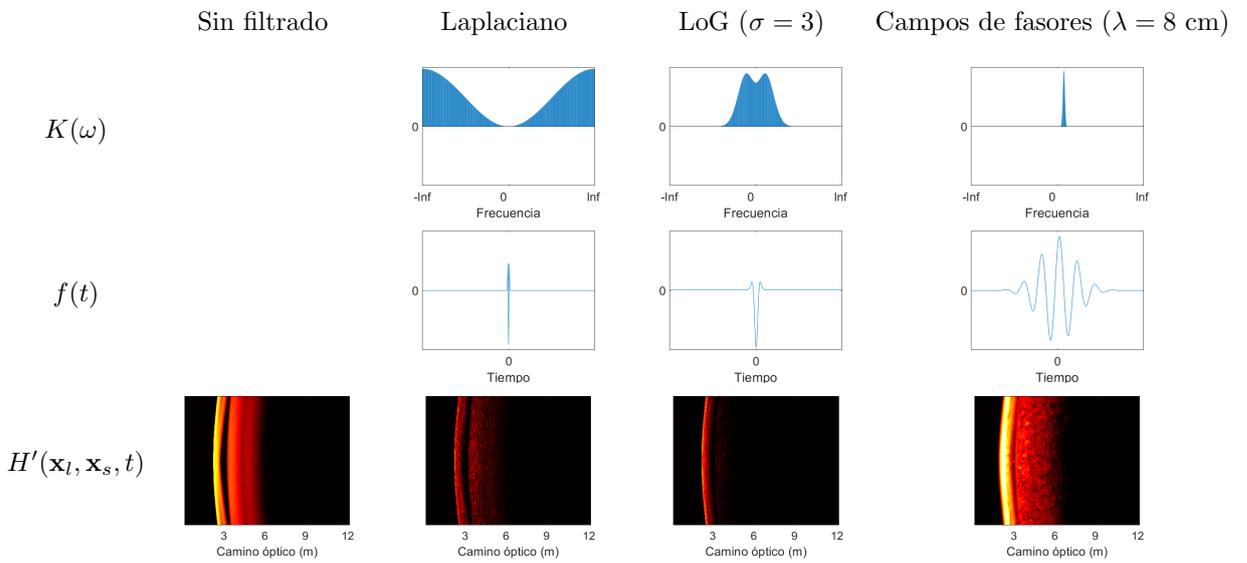


Figura 4.4: Visualización de los *kernels* de distintos filtros en espacio de frecuencias ($K(\omega)$) y temporal ($K(t)$), y su efecto sobre la función de impulso cuando se utilizan para filtrarla.

previos sobre qué técnicas funcionan mejor para reconstruir iluminación indirecta. En este trabajo se han probado tres filtros diferentes con la implementación realizada de *backprojection filtrado resuelto en tiempo* sobre una escena simple para analizar su comportamiento. Como se explica en la Sección 3.3, filtrar la reconstrucción obtenida conlleva realizar una convolución en cuatro dimensiones y es muy costoso, y como se muestra en la Sección 4.1, los valores obtenidos en los bordes son incorrectos. Por ello, las pruebas se han realizado únicamente aplicando la Ecuación 3.8 discretizada, filtrando en tiempo la iluminación capturada H .

La escena estudiada se muestra en la Figura 4.5, junto con un esquema de los caminos de luz indirecta que reconstruye el algoritmo. Es la misma escena explicada en la sección anterior: un objeto plano en forma de Z a medio metro de la pared visible.

Los únicos elementos de la escena son el plano del objeto y la pared difusa, por lo

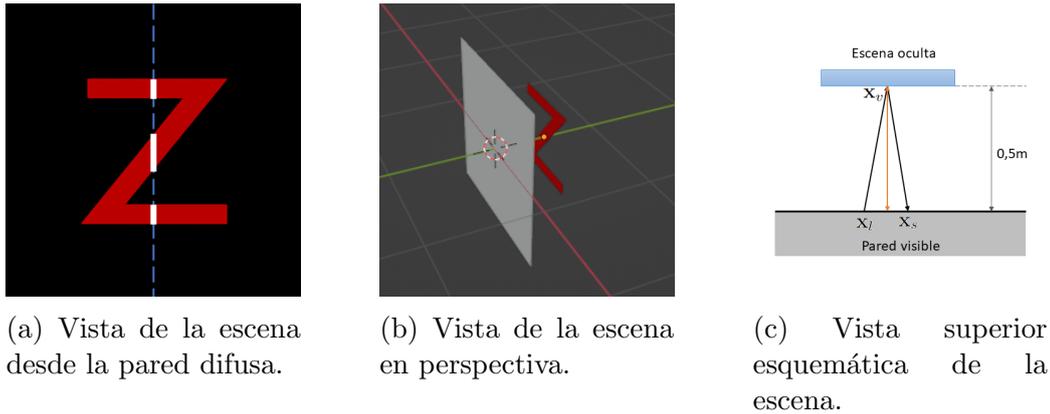


Figura 4.5: Escena estudiada. Consiste en un único objeto plano con forma de letra Z, colocado a medio metro frente a la pared y paralelo a ella. En (a) se indica con una línea discontinua azul la columna de vóxeles cuya reconstrucción se analiza, y en blanco los vóxeles de geometría en dicha columna, sobre los que se reconstruye iluminación. En (c) se muestran algunos caminos de luz posibles que pasan por un punto x_v . El camino negro representa el seguido por la luz directa y el naranja es uno de los posibles caminos que ha podido seguir la luz indirecta al llegar a x_v por primera vez, antes de llegar también a x_s .

que los caminos que recorre la luz y que la cámara puede capturar siempre provienen de caminos como el marcado con una flecha naranja en la Figura 4.5c, que se reflejan alternativamente en el objeto y la pared.

En el instante inicial de la reconstrucción debería apreciarse un máximo en los vóxeles que pertenecen al objeto, correspondiente a la luz directa recibida. Posteriormente, la iluminación sobre el volumen se irá desvaneciendo hasta que llegue la luz indirecta y se produzca un nuevo máximo local.

Como se puede ver en la Figura 4.5c, la única luz indirecta que puede recibir el objeto proviene de caminos como el que se muestra en ella, que viajan del objeto a la pared y viceversa alternativamente, donde el camino indicado por la flecha bidireccional naranja se puede repetir hasta que la luz sea completamente absorbida por una de las superficies. La distancia que cubre esta flecha es medio metro en cada sentido, es decir un metro, por lo que los primeros caminos de luz indirecta que se detecten habrán recorrido 1 metro más que los de luz directa. Por lo tanto, el segundo máximo local de intensidad lumínica a lo largo del tiempo aparecerá en el instante correspondiente a haber recorrido 1 metro.

Para facilitar la lectura e interpretación de los resultados, las medidas del eje temporal se indican en metros (distancia recorrida por la luz en el tiempo correspondiente), tanto para esta escena como para posteriores.

En la Figura 4.5a se muestra la columna de vóxeles elegida para visualizar el resultado, marcada con una línea discontinua. Se trata de la columna central del

volumen, porque es la única en la que hay tres zonas con geometría separadas entre sí, y así se puede ver el transporte de luz en zonas distintas.

La intensidad de la luz se atenúa proporcionalmente a la distancia que recorre, y también cuando interactúa con una superficie, que absorbe parte de la luz que ha recibido y refleja el resto. La luz directa solo ha interactuado con la escena oculta una vez, mientras que la indirecta ha interactuado múltiples veces, tanto con la escena oculta como con la pared, por lo que ha sido absorbida más veces y está más atenuada. Al haber integrado la luz directa en el instante inicial, y luz indirecta en instantes posteriores, el máximo local correspondiente a la primera luz indirecta es mucho menor que el de luz directa y no es apreciable a simple vista si se muestra según una escala lineal, por lo que en las gráficas se ha utilizado una escala logarítmica.

En la Figura 4.6 se muestra una comparativa de los resultados tras aplicar filtrado Laplaciano, LoG y basado en campos de fasores, explicados en la Sección 3.3, mostrando todos los pasos seguidos para reconstruir. En la primera y segunda fila se muestra el *kernel* de cada filtro en dominio de frecuencias y temporal respectivamente, en la tercera se muestra el valor de H' a lo largo del tiempo en una columna de puntos de la pared, y en la cuarta se muestra la reconstrucción obtenida en una columna de vóxeles a lo largo del tiempo.

En la reconstrucción obtenida $f(\mathbf{x}_v, t)$ al aplicar filtrado Laplaciano se han amplificado demasiado las frecuencias altas, por lo que aparece mucho ruido que no se corresponde con el comportamiento esperado y no es posible distinguir en qué momento la escena se vuelve a iluminar. Al aplicar LoG, las frecuencias más altas se han atenuado y la reconstrucción permite distinguir frentes de onda mucho más suaves, pero no se corresponden con el comportamiento esperado, sino que en el instante en que debería mostrarse la luz indirecta, marcado con un rectángulo azul, se produce un mínimo entre dos frentes de onda, y se producen múltiples máximos locales antes de este instante en los vóxeles que forman parte de la geometría. El último filtro probado, basado en campos de fasores, amplifica frecuencias muy concretas y únicamente considera detalles de tamaño proporcional a 8 cm, que es la longitud de onda con la que se ha creado. Es el único de los tres que ha dado buen resultado, aproximando correctamente el comportamiento esperado: los vóxeles correspondientes a la geometría en esta columna (indicados en blanco en la Figura 4.5a, y con rectángulos azules en la imagen inferior derecha de la Figura 4.6) muestran máximos locales tanto en el instante inicial como a 1 metro de distancia, estos últimos más atenuados.

En la Figura 4.7 se muestra el plano del objeto reconstruido con cada técnica de filtrado en dos instantes: cuando el objeto recibe la luz directa y cuando debería recibir iluminación indirecta por primera vez. La visualización temporal del resultado tras

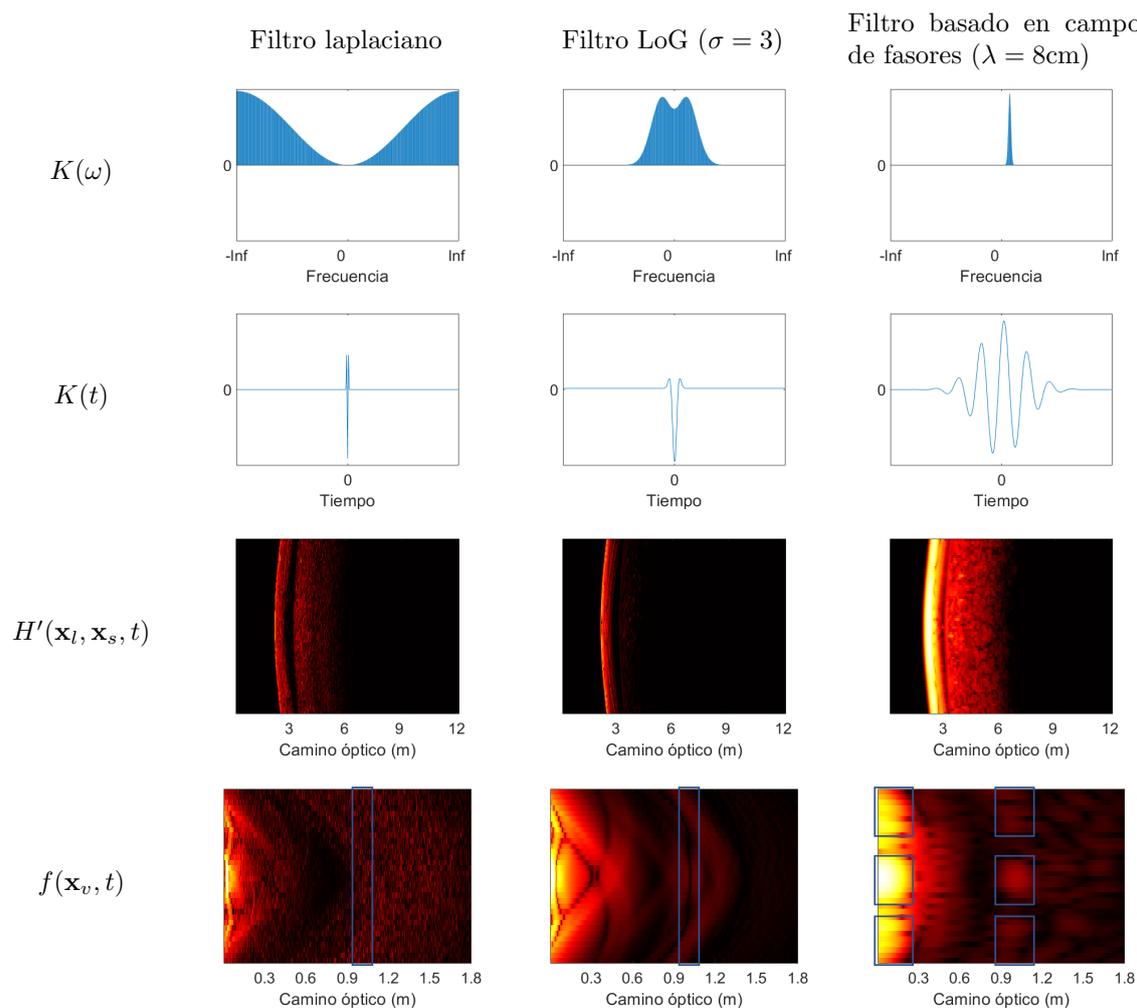


Figura 4.6: Filtros utilizados y resultados obtenidos para la Z aislada a medio metro de la pared visible.

aplicar filtrado Laplaciano tenía demasiado ruido y no permitía distinguir frentes de onda. Del mismo modo, la reconstrucción del plano en el instante correspondiente a la luz indirecta tiene mucho ruido y no muestra nada que se parezca a la forma del objeto. En el caso del filtrado LoG, temporalmente se aprecia un mínimo local, pero al visualizar el plano se observa que la columna central de la reconstrucción es correcta. Sin embargo, el resto del plano no muestra la forma del objeto sino un marco cuadrado redondeado alrededor de la diagonal. Por último, al aplicar filtrado basado en campos de fasores sí se recupera la forma correcta, a excepción de una pequeña parte de los segmentos horizontales.

4.3. Variación de la distancia a la pared difusa

En este experimento se analiza la diferencia entre las reconstrucciones si el objeto se encuentra a distinta distancia de la pared visible. El tiempo de vuelo de la luz

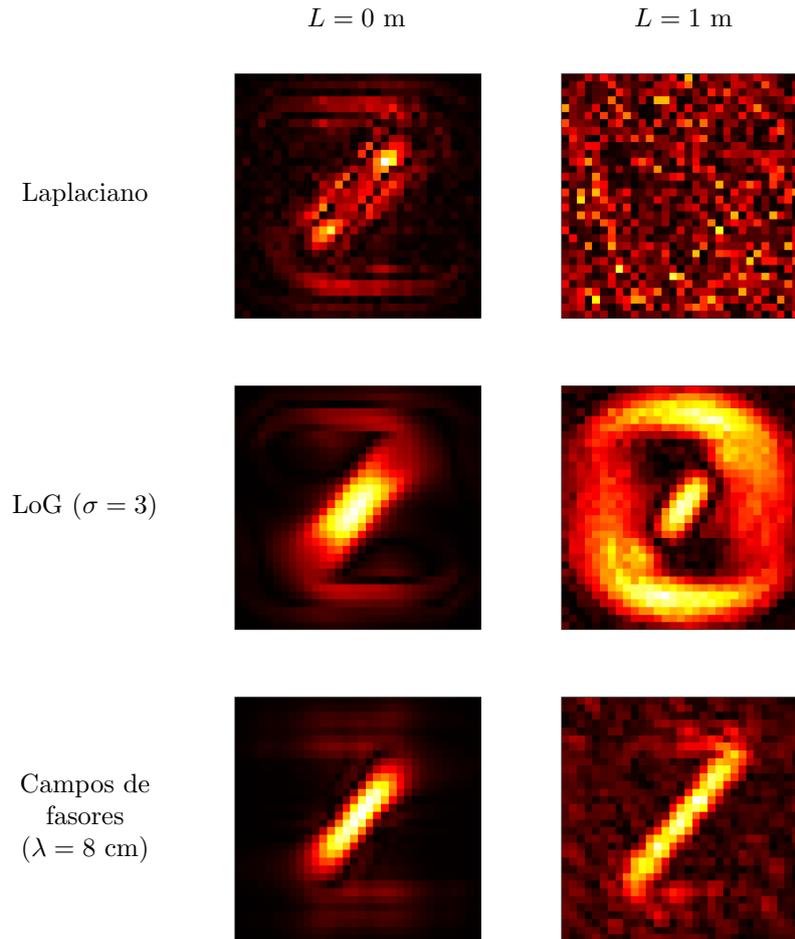
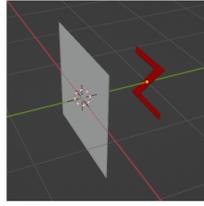


Figura 4.7: Vista del plano en el que se encuentra el objeto en la reconstrucción en dos instantes diferentes para cada técnica de filtrado probada. $L = ct$ es la longitud del camino óptico recorrido en cada instante. La primera columna corresponde al instante inicial y, aunque al aplicar filtrado Laplaciano o LoG se producen numerosos artefactos en la imagen, es posible distinguir la forma del objeto. La segunda columna corresponde al instante en que el objeto recibe iluminación por primera vez, pero solo se obtiene la forma al aplicar filtrado basado en campos de fasores. La intensidad lumínica mostrada se ha escalado para visualizar el resultado pero no se corresponde con la escala mostrada en la primera columna.

directa depende de esta distancia, de forma que si el objeto está más lejos, la luz tardará más en recorrer el camino correspondiente. Para probar que la luz indirecta no desaparece de la reconstrucción y que se recibe en un instante diferente, se ha aplicado el algoritmo sobre la escena mostrada en la Figura 4.9e, que contiene el mismo objeto que la anterior pero colocado a 1 metro de distancia de la pared (el doble que en la escena anterior), y se visualiza la iluminación sobre la misma columna de vóxeles. En la Figura 4.8 se muestra una vista tridimensional de la escena junto a la reconstrucción que ha obtenido *backprojection filtrado* tradicional, aplicando filtrado temporal basado en campos de fasores.



(a) Vista de la escena en perspectiva.



(b) Reconstrucción de la geometría.

Figura 4.8: Escena estudiada y reconstrucción obtenida con *backprojection* filtrado con un filtrado basado en campos de fasores. Consiste en un único objeto plano con forma de letra Z, colocado a 1 metro frente a la pared y paralelo a ella.

En este caso, como la distancia entre el objeto y la pared es 1 metro, la luz indirecta, mostrada en la Figura 4.9f, recorrerá 2 metros más que la directa tras reflejarse por primera vez en el objeto, y en la visualización a lo largo del tiempo aparecerá en el instante correspondiente a los 2 metros. Dado que los filtros laplaciano y LoG no proporcionan buenos resultados, solo se ha utilizado el filtro basado en campos de fasores empleado en la Sección 4.2, con la misma longitud de onda $\lambda = 8$ cm.

En la Figura 4.9 se pueden ver ambas escenas y la reconstrucción obtenida a lo largo del tiempo para cada una. Igual que en la escena anterior, se está mostrando la iluminación sobre la columna central de la superficie del objeto. Al comparar la Figura 4.9c y la Figura 4.9g, se ve que la luz directa aparece en ambas en el mismo momento, el instante inicial. Sin embargo, y como se esperaba, cuando en la primera escena aparece la luz indirecta (encuadrada en azul en la figura), en la segunda no hay luz, ya que la directa se ha desvanecido por completo y la indirecta no ha llegado aún. A los 2 metros del instante inicial, en la segunda escena se vuelve a apreciar iluminación, donde destacan claramente 3 formas, que también se han encuadrado en azul: los bordes superior e inferior y la zona central, que han recibido la luz proveniente de la pared.

En la Figura 4.10 se muestra la reconstrucción obtenida del plano del objeto a lo largo de distintos instantes, comparada con el mismo instante en la reconstrucción de la escena en la que el objeto está a medio metro. En ella se observa que la forma se ha desenfocado, igual que ocurre al fotografiar objetos más lejanos con una cámara tradicional. También se puede ver que cuando aparece luz indirecta en la primera escena, la segunda está completamente a oscuras, situación que se mantiene hasta que llega la luz indirecta. En este último instante se puede distinguir perfectamente la forma del objeto gracias a dicha luz.

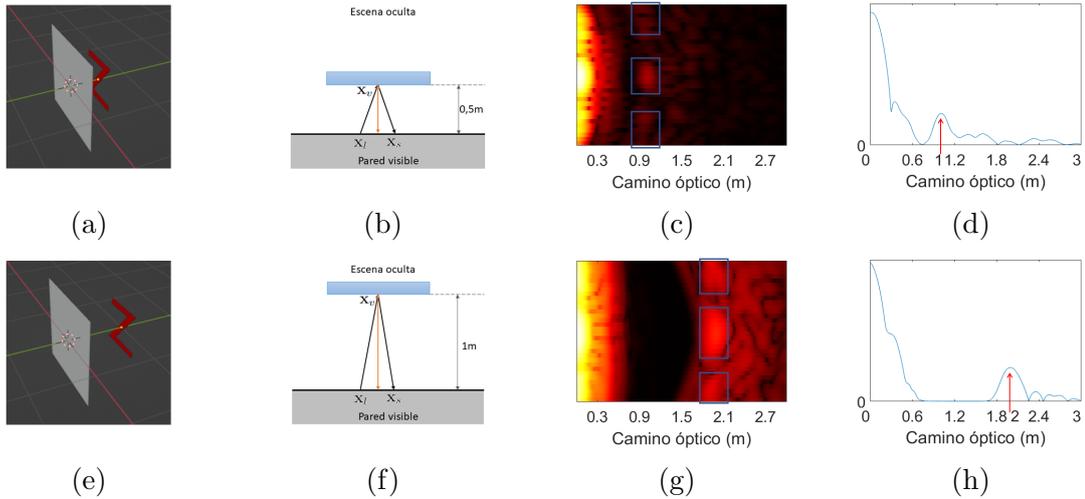


Figura 4.9: Vista de las escenas y la reconstrucción obtenida para la columna central del objeto en cada una. Arriba: el objeto y la pared están separados medio metro, y la luz indirecta aparece a 1 metro. Abajo: el objeto y la pared están separados 1 metro, y la luz indirecta aparece a 2 metros. A la derecha se muestra la reconstrucción de iluminación a lo largo del tiempo sobre el vóxel central únicamente, indicando el momento que corresponde a la luz indirecta en cada una.

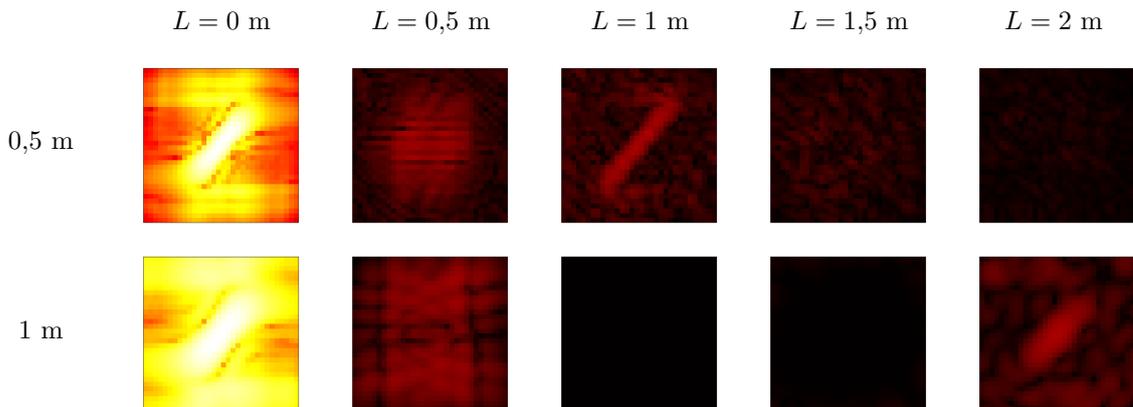


Figura 4.10: Reconstrucción de la luz que ilumina el plano del objeto en distintos instantes para las escenas estudiadas. $L = ct$ es la longitud del camino óptico recorrido en cada instante. La distancia entre pared visible y objeto oculto es el doble en la fila inferior que en la superior, y la luz indirecta tarda el doble en llegar. Las imágenes correspondientes al instante inicial se han saturado para hacer visible la iluminación indirecta manteniendo la escala.

4.4. Variación del material

En este experimento se analiza la diferencia entre las reconstrucciones si cambian las propiedades del material del que está hecho el objeto. En la Figura 4.11 se muestran distintos comportamientos de la luz ante distintos materiales.

En las escenas anteriores, el objeto estaba hecho de un material difuso, por lo que reflejaba la luz recibida uniformemente en todas las direcciones (ver la imagen izquierda

en la Figura 4.11 o la superior izquierda en la Figura 4.12). Para estudiar el efecto de distintos materiales sobre la reconstrucción obtenida, se han probado dos escenas con la misma configuración que la anterior pero modificando el material del que está hecho el objeto para que tenga comportamiento no difuso.

Como se muestra en la imagen central en la Figura 4.11, en un material perfectamente especular, la luz se refleja en una sola dirección, simétrica a la dirección de llegada respecto a la normal de la superficie. Si el material no es perfectamente especular sino que presenta cierta microestructura (ver imagen derecha en la Figura 4.11), el ángulo sólido que cubre las direcciones de salida aumenta. En el simulador de transporte de luz utilizado estos materiales reciben el nombre de especulares rugosos.

El material escogido ha sido uno especular rugoso (concretamente cobre, definido en el renderizador Mitsuba 2 [8]), con dos grados distintos de rugosidad $\alpha = 0,3$ y $\alpha = 0,1$. El primero corresponde a una superficie muy rugosa, aunque no tanto como un material difuso, por lo que el lóbulo de direcciones de salida de la luz reflejada es bastante ancho sin llegar a ser una hemiesfera (ver imagen central izquierda en la Figura 4.12). En la segunda escena se concentra más, sin llegar a ser una dirección única, por ser relativamente rugosa la superficie (ver imagen inferior izquierda en la Figura 4.12). Estas dos escenas no estaban disponibles en el *dataset* y ha sido necesario generarlas.

En la Figura 4.12 se muestran los resultados obtenidos. La luz indirecta que proviene de la pared visible, marcada en la figura con rectángulos azules sobre la columna derecha, se muestra a 1 metro, ya que la distancia es la misma, sin embargo, la precisión espacial disminuye conforme aumenta el comportamiento especular, y los segmentos reconstruidos de la Z se desenfocan y ensanchan. Esto se debe a que la superficie sobre la que el objeto refleja la luz se ha reducido, como ilustra la columna izquierda de la figura, y ello disminuye la variedad de muestras que se pueden emplear para triangular su posición. Al disminuir lo difuso que es el material, aparece un nuevo frente de onda inesperado, señalado en la imagen central derecha de la figura con una flecha gris. No está claro qué representa, pero es probable que sean elipsoides que no se han filtrado correctamente.

4.5. Variación del número de objetos

En este experimento se analiza la reconstrucción obtenida de una escena en la que la luz indirecta puede seguir una mayor variedad de caminos. Para ello, se ha utilizado una escena, mostrada en la Figura 4.13, que contiene el mismo objeto difuso con forma

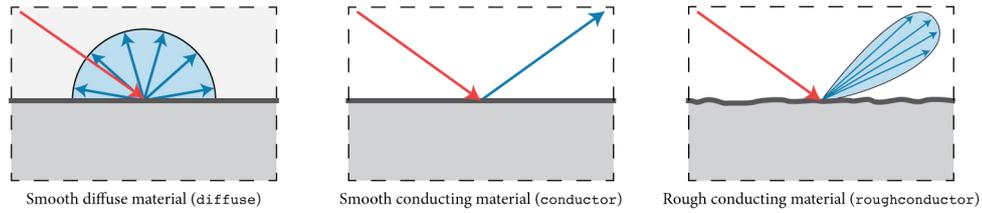


Figura 4.11: Vista esquemática del comportamiento de distintos materiales ante la luz incidente (simplificación de una figura de Merlin et al. [8]). Las flechas rojas representan la iluminación incidente y las azules la luz reflejada. Los materiales difusos son los modelados por `diffuse`, los especulares perfectos por `conductor`, y los especulares rugosos por `roughconductor`.

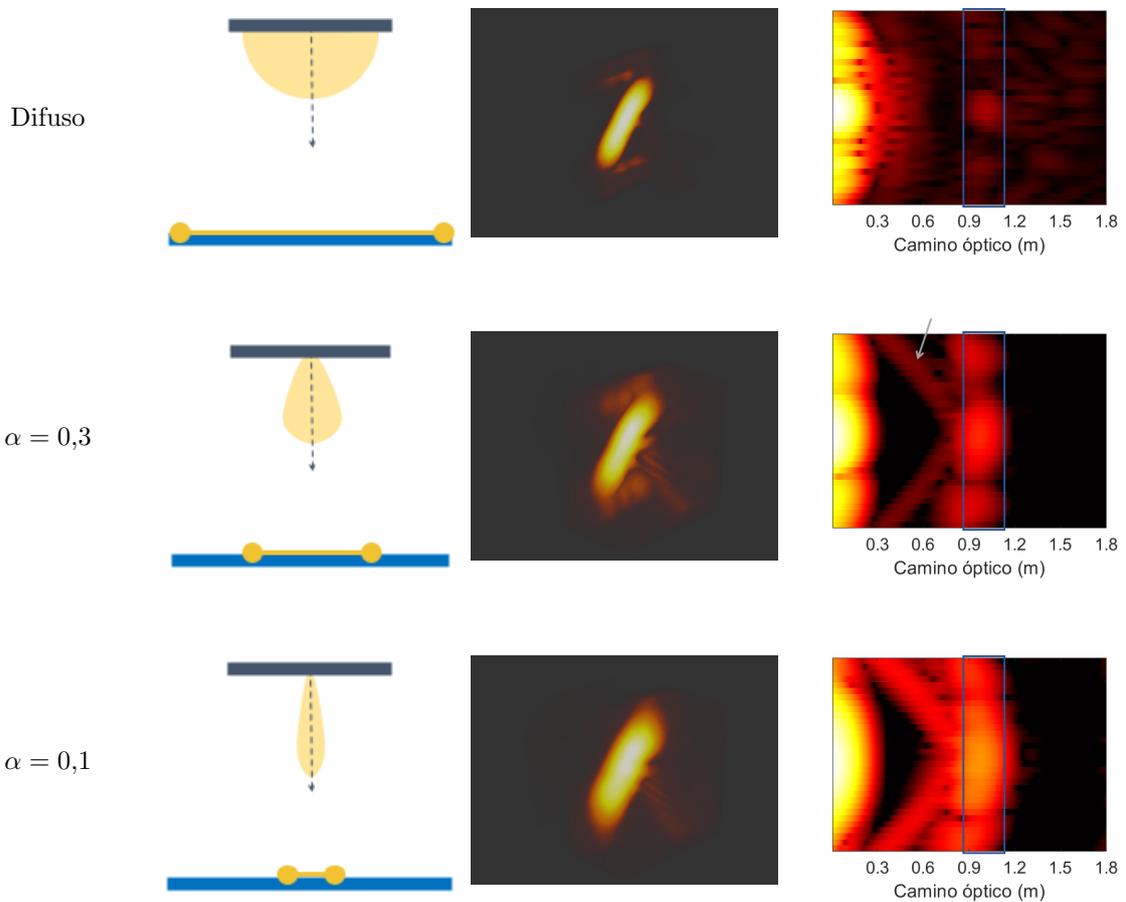


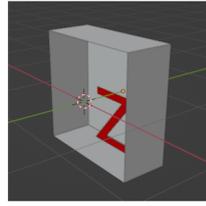
Figura 4.12: A la izquierda, distribución de las direcciones de salida de la luz reflejada. En el centro, reconstrucción de la geometría obtenida con *backprojection filtrado* convencional. A la derecha, reconstrucción de la iluminación sobre la columna central de vóxeles a lo largo del tiempo para distintos materiales, de más a menos difuso. Se consiguen recuperar luz directa e indirecta, pero conforme se hace menos difuso el material disminuye la precisión.

de Z colocado a medio metro de la pared, pero está rodeado por paredes que forman una caja, siendo una de dichas paredes la que escanean el láser y la cámara. El objeto

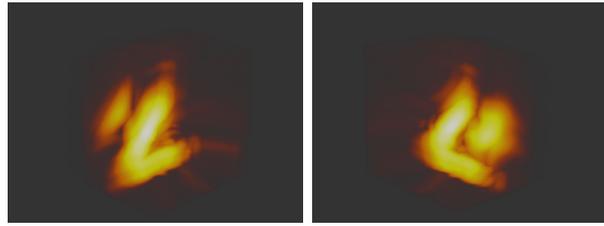
está apoyado sobre el suelo, y a diferente distancia de dos paredes laterales y del techo. El fondo se encuentra 15 cm por detrás del objeto. La luz indirecta que se recibe desde la pared seguirá apareciendo a 1 metro, pero como se puede ver en la Figura 4.14e, también habrá luz indirecta que provenga de las demás paredes que lo rodean.

La luz que llega al suelo, y desde allí a la parte inferior del objeto, se mostrará poco después de la luz directa, por lo cercanos que están. También, al interactuar con menos superficies y recorrer menos distancia, la intensidad no está tan atenuada como la segunda vez que se recibe desde la pared. El centro y el segmento superior de la Z se encuentran más alejados del suelo, 0,5 y 0,8 metros respectivamente, en media, por lo que tardará más en llegar. Si el techo también estuviera en contacto con el objeto, la imagen obtenida al mostrar una columna a lo largo del tiempo sería simétrica en el eje Y. Como está alejado, no se aprecia su efecto y llega más iluminación a la mitad inferior. Las paredes laterales no están tan lejos como el techo, pero aún así se encuentran a 80 cm del centro de la escena. La luz que reflejan sobre el centro del objeto recorre aproximadamente 1,2 metros más que la directa. Como el suelo y el objeto se encuentran a distancias similares de la pared visible, la luz que se refleja entre el suelo y las paredes laterales también puede mostrarse en este instante.

También hay que tener en cuenta que la pared del fondo recibe luz de la pared visible y la refleja de vuelta. Como está 0,15 metros por detrás del objeto, el camino de ida y vuelta debe recorrer 0,3 metros más que la luz reflejada en el objeto. Cuando se observe la iluminación a lo largo del tiempo sobre el plano del objeto, esta luz que procede de un plano diferente también se mostrará porque aparece posteriormente a la luz directa en el plano enfocado. El objeto ocluye parcialmente el plano que hay detrás, por lo que este recibirá menor iluminación directa sobre los vóxeles más cercanos al objeto que en el resto. Por ello, al visualizar la iluminación en la columna central de vóxeles de la reconstrucción del objeto, en los huecos que quedan entre los segmentos que forman la Z, aparecen dos lugares iluminados a 0,3 metros de la luz directa sobre la columna, fácilmente identificables por mostrar una intensidad similar a la del instante inicial. Este plano tras el objeto también recibe luz indirecta, procedente de cualquiera de las paredes. Una posible fuente de luz indirecta son los caminos mostrados en la Figura 4.15, que llegan primero al objeto, se reflejan hacia la pared visible, desde ella llegan hasta el plano, y por último llegan a x_s y hasta la cámara. La primera parte del camino (flecha negra en la figura) tiene la misma longitud que los caminos de luz directa al plano del objeto, y la segunda (flecha naranja) tiene la misma longitud que los caminos de luz directa al plano trasero. Como ya se ha explicado, la luz que va y vuelve de la pared visible a la trasera recorre 0,3 metros más que la que va al objeto, por lo que este tipo de caminos de luz indirecta recorren 0,3 metros más que los caminos de



(a) Vista de la escena.



(b) Reconstrucción de la geometría observada desde distintos ángulos.

Figura 4.13: Escena estudiada y reconstrucción obtenida con *backprojection filtrado* con un filtrado basado en campos de fasores. Consiste en un objeto plano con forma de letra Z, colocado a medio metro frente a la pared y paralelo a ella, y rodeado por varias paredes que forman una caja. En la visualización se ha ocultado la pared visible para mostrar el objeto. La reconstrucción se muestra desde dos puntos de vista para visualizar mejor que la pared trasera también se ha reconstruido parcialmente.

luz indirecta sobre el objeto que se han estudiado en las escenas anteriores, en total 1,3 metros más que la luz directa sobre el objeto. Esta misma distancia se puede recorrer en sentido contrario (en la figura, sería recorrer primero la flecha naranja y después la negra): primero la luz llega a la pared trasera, de allí vuelve a la visible, y de allí al objeto. La distancia es la misma, por lo que aparece en el mismo instante, pero en este caso sí se trata de luz indirecta sobre la geometría observada.

En la Figura 4.14f se puede ver que en la reconstrucción se muestran todos los frentes de luz mencionados, aunque la luz que reflejan las paredes sobre el objeto es difícil de distinguir de la que proviene de los caminos como el mostrado en la Figura 4.15 (la pared visible ilumina la trasera tras interactuar con el objeto, o ilumina el objeto tras haber interactuado con la pared trasera), ya que aparecen en instantes cercanos (aproximadamente 1,2 y 1,3 metros). El rectángulo **a** en la Figura 4.14f contiene la luz directa sobre el objeto y parte del suelo. En **b** se muestra la luz directa sobre la pared del fondo. La luz indirecta desde la pared visible sobre el objeto está contenida en el rectángulo **c** y aparece a la vez que en la escena con un objeto aislado (Figura 4.14c), mientras que la luz indirecta ha seguido caminos como el de la Figura 4.15 está en el rectángulo **d**.

En la Figura 4.16 se muestra la reconstrucción del plano del objeto en distintos instantes. Como se ha mencionado antes, la mitad inferior de la reconstrucción se muestra más iluminada que el resto por influencia del suelo, y en el instante correspondiente a que la luz haya recorrido 0,3 metros más que la luz directa, se recupera parte de la pared trasera. En el instante que corresponde a la luz indirecta desde la pared visible, la columna central muestra iluminación como se veía en la Figura 4.14f, y la visualización del plano muestra una parte del objeto, pero también

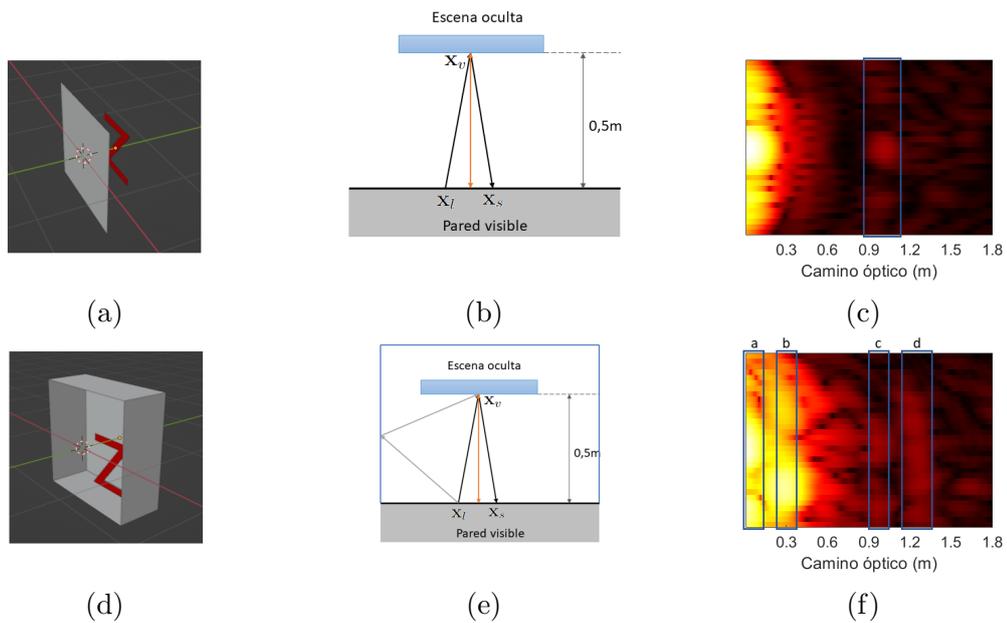


Figura 4.14: Vista de la escena con el objeto rodeado por varias paredes (abajo) y la iluminación reconstruida, y comparación con la escena simple (arriba). El objeto es el mismo plano con forma de Z, colocado paralelo a la pared visible, a medio metro de distancia de ella. La base del objeto está apoyada sobre el suelo, mientras que el techo y las paredes laterales están separados de los bordes del objeto. La pared visible se omite en la imagen inferior izquierda para mostrar la escena oculta. Se muestra también un esquema de algunos caminos que puede seguir la luz indirecta. Comparando (b) y (e) se puede ver que han aparecido nuevos caminos de luz que antes no eran posibles, que siguen el recorrido gris para llegar a x_v . Comparando (c) y (f), se ve que la luz procedente de la pared visible aparece en ambas escenas en el mismo instante, correspondiente a recorrer 1 metro más que la luz directa, como se esperaba. En la inferior se aprecia que la zona inferior está más iluminada que la superior, por cercanía con el suelo, y se muestra iluminación en otros instantes, procedente de nuevos caminos de luz posibles.

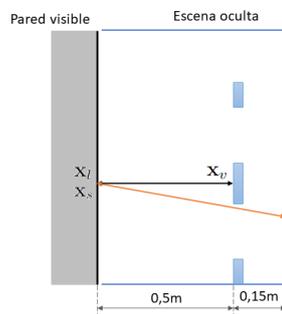


Figura 4.15: Vista de perfil de la escena, cortada por el centro del objeto. Se muestra un tipo de camino posible de luz indirecta entre el objeto y la pared trasera que previamente interactúa con la pared visible.

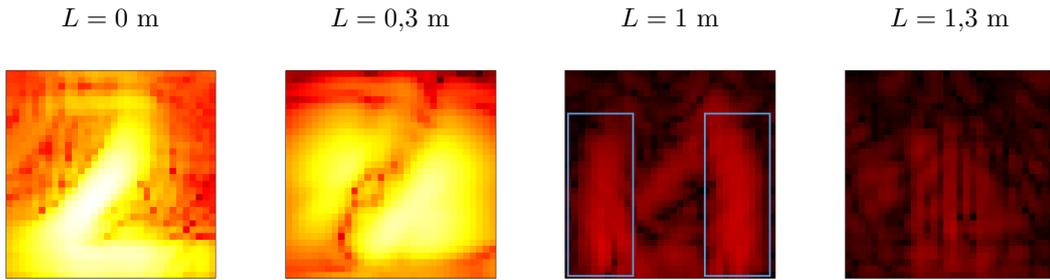


Figura 4.16: Reconstrucción de la luz que ilumina el plano del objeto en distintos instantes para la escena estudiada. $L = ct$ es la longitud del camino óptico recorrido en cada instante. La iluminación posterior a la luz directa se trata como indirecta, por lo que en el instante correspondiente a haber recorrido 0,3 metros se muestra la luz directa en la pared tras el objeto. En el instante que corresponde a haber recorrido 1,3 metros, la luz indirecta capturada proviene de varios vóxeles en distintos planos (objeto y pared trasera) que se muestran integrados en el plano del objeto.

muestra iluminación sobre vóxeles laterales en los que no hay geometría (rectángulos azules en la tercera imagen de la Figura 4.16), que probablemente corresponde a las paredes laterales.

Capítulo 5

Conclusiones

En este trabajo se ha propuesto, implementado y analizado un algoritmo para reconstruir el transporte de luz resuelto en tiempo en escenas ocultas. Para ello, primero se ha estudiado el estado del arte en técnicas de reconstrucción de escenas ocultas basadas en *backprojection*, e implementado *backprojection filtrado* convencional para reconstruir geometría oculta, analizando el comportamiento de distintas técnicas de filtrado. Basado en ese algoritmo, se ha propuesto e implementado una generalización que reconstruye la iluminación sobre los objetos ocultos a lo largo del tiempo, es decir, el transporte transitorio de la luz en la escena oculta. Se ha analizado el efecto de distintas técnicas de filtrado en la reconstrucción de transporte de luz transitorio en distintas escenas ocultas, con variaciones de distancia de la geometría, funciones de reflectancia, y complejidad de la escena (al añadir más objetos en la escena, el número de caminos distintos que puede tomar la luz para llegar al sensor también aumenta y es más difícil obtener una reconstrucción precisa con las técnicas más simples).

Con este trabajo se ha dado un primer paso hacia el análisis de la iluminación a lo largo del tiempo en una escena oculta desde el punto de vista de invertir el transporte de luz capturado, y se ha comprobado que en ella hay información extraíble sobre el resto de la escena. Se puede seguir esta línea de trabajo para encontrar maneras más automáticas de extraer la información a partir de una reconstrucción dada, y de aprovecharla para otras aplicaciones, como aplicar técnicas desarrolladas para escenas visibles que hasta ahora no se podían aplicar sobre escenas ocultas, por ejemplo analizar los materiales de los objetos que hay en la escena [7] o aplicar de nuevo técnicas de reconstrucción de escenas ocultas para ver alrededor de múltiples esquinas.

Para continuar con esta línea de trabajo sería conveniente mejorar la precisión de la reconstrucción de la iluminación de la escena oculta a lo largo del tiempo: el problema principal es que en algunos casos se muestra iluminación en vóxeles donde no hay geometría, lo suficientemente intensa como para ser confundida con iluminación real en ellos, que procede en realidad de otros vóxeles. Antes de usar los datos para

otras aplicaciones sería conveniente desarrollar filtros más sofisticados, basados en los principios ópticos que definen el transporte virtual de luz en la escena oculta [4], para distinguir y eliminar estos casos en la medida de lo posible.

Una de las aplicaciones más prometedoras de este trabajo, y en la que se está trabajando actualmente, es el uso de la iluminación resuelta en tiempo sobre la escena oculta para aplicar algoritmos de NLOS de forma recursiva, y conseguir ver objetos ocultos alrededor de una segunda esquina.

Bibliografía

- [1] Andreas Velten y col. «Femto-Photography: Capturing and Visualizing the Propagation of Light». En: *ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH 2013)* 32.4 (2013).
- [2] Andreas Velten y col. «Recovering three-dimensional shape around a corner using ultrafast time-of-flight imaging». En: *Nature Communications* 3.1 (2012), pág. 745. ISSN: 2041-1723. DOI: [10.1038/ncomms1747](https://doi.org/10.1038/ncomms1747). URL: <https://doi.org/10.1038/ncomms1747>.
- [3] Victor Arellano, Diego Gutierrez y Adrian Jarabo. «Fast back-projection for non-line of sight reconstruction». En: *Opt. Express* 25.10 (2017), págs. 11574-11583. DOI: [10.1364/OE.25.011574](https://doi.org/10.1364/OE.25.011574). URL: <http://opg.optica.org/oe/abstract.cfm?URI=oe-25-10-11574>.
- [4] Xiaochun Liu y col. «Non-line-of-sight imaging using phasor-field virtual wave optics». En: *Nature* 572.7771 (2019), págs. 620-623.
- [5] Tomohiro Maeda y col. *Recent Advances in Imaging Around Corners*. 2019. DOI: [10.48550/ARXIV.1910.05613](https://arxiv.org/abs/1910.05613). URL: <https://arxiv.org/abs/1910.05613>.
- [6] Miguel Galindo y col. *A dataset for benchmarking time-resolved non-line-of-sight imaging*. 2019. URL: <https://graphics.unizar.es/nlos>.
- [7] Di Wu y col. «Decomposing Global Light Transport Using Time of Flight Imaging». En: *International Journal of Computer Vision* 107.2 (2014), págs. 123-138. ISSN: 1573-1405. DOI: [10.1007/s11263-013-0668-2](https://doi.org/10.1007/s11263-013-0668-2). URL: <https://doi.org/10.1007/s11263-013-0668-2>.
- [8] Merlin Nimier-David y col. «Mitsuba 2: A Retargetable Forward and Inverse Renderer». En: *ACM Trans. Graph.* 38.6 (2019). ISSN: 0730-0301. DOI: [10.1145/3355089.3356498](https://doi.org/10.1145/3355089.3356498). URL: <https://doi.org/10.1145/3355089.3356498>.
- [9] Antonio Torralba y William T Freeman. «Accidental pinhole and pinspeck cameras: Revealing the scene outside the picture». En: *2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. IEEE. 2012, págs. 374-381.
- [10] Jonathan Klein y col. «Tracking objects outside the line of sight using 2D intensity images». En: *Scientific Reports* 6 (2016).
- [11] Katherine L Bouman y col. «Turning corners into cameras: Principles and methods». En: *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*. 2017, págs. 2270-2278.
- [12] Charles Saunders, John Murray-Bruce y Vivek K Goyal. «Computational periscopy with an ordinary digital camera». En: *Nature* 565.7740 (2019), págs. 472-475.

- [13] Felix Heide y col. «Low-budget Transient Imaging Using Photonic Mixer Devices». En: *ACM Trans. Graph.* 32.4 (2013).
- [14] Felix Heide y col. «Diffuse mirrors: 3D reconstruction from diffuse indirect illumination using inexpensive time-of-flight sensors». En: *IEEE Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2014.
- [15] Shumian Xin y col. «A theory of Fermat paths for non-line-of-sight shape reconstruction». En: *IEEE Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2019, págs. 6800-6809.
- [16] Mauro Buttafava y col. «Non-line-of-sight imaging using a time-gated single photon avalanche diode». En: *Opt. Express* 23.16 (2015).
- [17] Matthew O’Toole, David B Lindell y Gordon Wetzstein. «Confocal non-line-of-sight imaging based on the light-cone transform». En: *Nature* 555.7696 (2018), pág. 338.
- [18] David B Lindell, Gordon Wetzstein y Matthew O’Toole. «Wave-based non-line-of-sight imaging using fast fk migration». En: *ACM Trans. Graph.* 38.4 (2019), págs. 1-13.
- [19] Ji Hyun Nam y col. «Low-latency time-of-flight non-line-of-sight imaging at 5 frames per second». En: *Nature communications* 12.1 (2021), págs. 1-10.
- [20] Zhengpeng Liao y col. «FPGA Accelerator for Real-Time Non-Line-of-Sight Imaging». En: *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers* (2021).
- [21] Julio Marco y col. «Virtual light transport matrices for non-line-of-sight imaging». En: *2021 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*. 2021.
- [22] Mohit Gupta y col. «Phasor imaging: A generalization of correlation-based time-of-flight imaging». En: *ACM Trans. Graph.* 34.5 (2015).
- [23] Shuochen Su y col. «Material classification using raw time-of-flight measurements». En: *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2016, págs. 3503-3511.

Lista de Figuras

1.1.	Potenciales aplicaciones de la visión alrededor de esquinas (figura de Maeda et al. [5]).	3
1.2.	Ejemplo de configuración típica de obtención de datos para reconstruir escenas ocultas (figura de Galindo et al. [6]). Hay una superficie difusa (“Visible wall”) en la línea de visión del dispositivo de captura que se ilumina con un pulso corto de luz y lo dispersa. La luz llega desde el muro al objeto oculto, marcado como “Target”. Después vuelve al muro, desde donde puede alcanzar la cámara. El objeto a reconstruir se encuentra oculto por otro muro (“Occluder”).	3
1.3.	Diagrama de Gantt del trabajo.	5
3.1.	Resumen del método de <i>backprojection filtrado</i> (figura de Arellano et al. [3], con la notación modificada). A la izquierda, ilustración de la escena. Un pulso láser de pocos femtosegundos ilumina la pared difusa (visible) en \mathbf{x}_l , creando una fuente de luz virtual que ilumina la escena. El reflejo de la luz en la superficie oculta viaja de vuelta a la pared, donde se observa el punto \mathbf{x}_s con la cámara. El tiempo de propagación desde un punto \mathbf{x}_v en la superficie oculta, dependiente de la distancia $r_2 + r_3$, define un elipsoide con focos \mathbf{x}_l y \mathbf{x}_s . A la derecha, se muestra que varios elipsoides con distintos focos se cortan en el punto de la superficie oculta que los define. Estas intersecciones definen el mapa de probabilidad de la geometría oculta, que a continuación se filtra para obtener la reconstrucción final.	10
3.2.	Ilustración de caminos de luz directa e indirecta desde el punto de vista de la pared visible. La escena se muestra desde la vista superior. A la izquierda, la luz que llega a \mathbf{x}_s desde \mathbf{x}_v es luz directa, ya que procede directamente de \mathbf{x}_l . A la derecha, la luz ha tomado otro camino más largo, marcado en naranja, que interactúa con la escena oculta antes de llegar a \mathbf{x}_v , produciendo luz indirecta.	14

3.3.	Visualización de caminos de luz directa (a) e indirecta (b) en una escena oculta con un objeto plano aislado vista desde arriba, y de la iluminación capturada en un punto \mathbf{x}_s . Como el objeto es plano, todos los caminos de luz indirecta posibles viajan alternativamente entre el objeto y la pared visible, como marcan las flechas naranjas en b . En la imagen derecha se muestra la iluminación capturada en \mathbf{x}_s a lo largo del tiempo. En ella se distingue un primer intervalo con valores positivos que corresponde a la luz directa sobre distintos puntos del objeto, procedente de caminos de luz como el mostrado en a . A cierta distancia se distingue un segundo intervalo positivo, correspondiente con la luz indirecta que ha recorrido caminos como el mostrado en b	14
3.4.	Obtención de la reconstrucción $f(\mathbf{x}_v, t)$ de un vóxel concreto \mathbf{x}_v . La columna amarilla contiene el valor leído por el sensor para cada par de puntos láser-sensor en el instante t_d , correspondiente al tiempo de vuelo de la luz directa sobre el vóxel considerado. El primer valor de la reconstrucción, $f(\mathbf{x}_v, 0)$ es la suma de toda la columna, y los valores leídos anteriormente, marcados en gris, no se utilizan para este vóxel. La casilla azul en f representa la iluminación recuperada en \mathbf{x}_v t instantes más tarde de la iluminación directa, y se obtiene sumando los valores de la columna azul en la matriz de lecturas con las filas desplazadas. Si alguno de los vectores, tras el desplazamiento, tiene menos elementos que la posición que se está sumando, se suma un 0 en su lugar.	16
3.5.	Visualización en espacio de frecuencias del <i>kernel</i> de varios filtros estudiados.	18
4.1.	Escena estudiada. Consiste en un único objeto plano y difuso con forma de letra Z, colocado a medio metro frente a la pared y paralelo a ella. .	22
4.2.	Filtros utilizados y reconstrucción obtenida con cada uno. La resolución en vóxeles es 32x32x32. En la reconstrucción sin filtrar no se distingue la forma del objeto. Aplicando un filtro Laplaciano se recupera la forma del objeto pero siguen apareciendo bastantes falsos positivos. El filtro LoG es relativamente estrecho, por lo que atenúa las frecuencias más altas pero sigue amplificando otras frecuencias altas. La reconstrucción mejora respecto al filtro Laplaciano en términos de falsos positivos, pero la forma del objeto se desenfoca. El filtro basado en campos de fasores amplifica frecuencias muy concretas, y consigue eliminar casi por completo los falsos positivos sin desenfocar tanto como LoG.	23

4.3.	Reconstrucciones obtenidas tras filtrar espacialmente. En los bordes del volumen se muestran valores que no se han filtrado correctamente, pero eliminar estos valores conlleva el riesgo de eliminar parte de la geometría oculta.	24
4.4.	Visualización de los <i>kernels</i> de distintos filtros en espacio de frecuencias ($K(\omega)$) y temporal ($K(t)$), y su efecto sobre la función de impulso cuando se utilizan para filtrarla.	24
4.5.	Escena estudiada. Consiste en un único objeto plano con forma de letra Z, colocado a medio metro frente a la pared y paralelo a ella. En (a) se indica con una línea discontinua azul la columna de vóxeles cuya reconstrucción se analiza, y en blanco los vóxeles de geometría en dicha columna, sobre los que se reconstruye iluminación. En (c) se muestran algunos caminos de luz posibles que pasan por un punto \mathbf{x}_v . El camino negro representa el seguido por la luz directa y el naranja es uno de los posibles caminos que ha podido seguir la luz indirecta al llegar a \mathbf{x}_v por primera vez, antes de llegar también a \mathbf{x}_s	25
4.6.	Filtros utilizados y resultados obtenidos para la Z aislada a medio metro de la pared visible.	27
4.7.	Vista del plano en el que se encuentra el objeto en la reconstrucción en dos instantes diferentes para cada técnica de filtrado probada. $L = ct$ es la longitud del camino óptico recorrido en cada instante. La primera columna corresponde al instante inicial y, aunque al aplicar filtrado Laplaciano o LoG se producen numerosos artefactos en la imagen, es posible distinguir la forma del objeto. La segunda columna corresponde al instante en que el objeto recibe iluminación por primera vez, pero solo se obtiene la forma al aplicar filtrado basado en campos de fasores. La intensidad lumínica mostrada se ha escalado para visualizar el resultado pero no se corresponde con la escala mostrada en la primera columna. .	28
4.8.	Escena estudiada y reconstrucción obtenida con <i>backprojection</i> filtrado con un filtrado basado en campos de fasores. Consiste en un único objeto plano con forma de letra Z, colocado a 1 metro frente a la pared y paralelo a ella.	29

- 4.9. Vista de las escenas y la reconstrucción obtenida para la columna central del objeto en cada una. Arriba: el objeto y la pared están separados medio metro, y la luz indirecta aparece a 1 metro. Abajo: el objeto y la pared están separados 1 metro, y la luz indirecta aparece a 2 metros. A la derecha se muestra la reconstrucción de iluminación a lo largo del tiempo sobre el vóxel central únicamente, indicando el momento que corresponde a la luz indirecta en cada una. 30
- 4.10. Reconstrucción de la luz que ilumina el plano del objeto en distintos instantes para las escenas estudiadas. $L = ct$ es la longitud del camino óptico recorrido en cada instante. La distancia entre pared visible y objeto oculto es el doble en la fila inferior que en la superior, y la luz indirecta tarda el doble en llegar. Las imágenes correspondientes al instante inicial se han saturado para hacer visible la iluminación indirecta manteniendo la escala. 30
- 4.11. Vista esquemática del comportamiento de distintos materiales ante la luz incidente (simplificación de una figura de Merlin et al. [8]). Las flechas rojas representan la iluminación incidente y las azules la luz reflejada. Los materiales difusos son los modelados por **diffuse**, los especulares perfectos por **conductor**, y los especulares rugosos por **roughconductor**. 32
- 4.12. A la izquierda, distribución de las direcciones de salida de la luz reflejada. En el centro, reconstrucción de la geometría obtenida con *backprojection filtrado* convencional. A la derecha, reconstrucción de la iluminación sobre la columna central de vóxeles a lo largo del tiempo para distintos materiales, de más a menos difuso. Se consiguen recuperar luz directa e indirecta, pero conforme se hace menos difuso el material disminuye la precisión. 32
- 4.13. Escena estudiada y reconstrucción obtenida con *backprojection filtrado* con un filtrado basado en campos de fasores. Consiste en un objeto plano con forma de letra Z, colocado a medio metro frente a la pared y paralelo a ella, y rodeado por varias paredes que forman una caja. En la visualización se ha ocultado la pared visible para mostrar el objeto. La reconstrucción se muestra desde dos puntos de vista para visualizar mejor que la pared trasera también se ha reconstruido parcialmente. . . 34

- 4.14. Vista de la escena con el objeto rodeado por varias paredes (abajo) y la iluminación reconstruida, y comparación con la escena simple (arriba). El objeto es el mismo plano con forma de Z, colocado paralelo a la pared visible, a medio metro de distancia de ella. La base del objeto está apoyada sobre el suelo, mientras que el techo y las paredes laterales están separados de los bordes del objeto. La pared visible se omite en la imagen inferior izquierda para mostrar la escena oculta. Se muestra también un esquema de algunos caminos que puede seguir la luz indirecta. Comparando (b) y (e) se puede ver que han aparecido nuevos caminos de luz que antes no eran posibles, que siguen el recorrido gris para llegar a \mathbf{x}_v . Comparando (c) y (f), se ve que la luz procedente de la pared visible aparece en ambas escenas en el mismo instante, correspondiente a recorrer 1 metro más que la luz directa, como se esperaba. En la inferior se aprecia que la zona inferior está más iluminada que la superior, por cercanía con el suelo, y se muestra iluminación en otros instantes, procedente de nuevos caminos de luz posibles. 35
- 4.15. Vista de perfil de la escena, cortada por el centro del objeto. Se muestra un tipo de camino posible de luz indirecta entre el objeto y la pared trasera que previamente interactúa con la pared visible. 35
- 4.16. Reconstrucción de la luz que ilumina el plano del objeto en distintos instantes para la escena estudiada. $L = ct$ es la longitud del camino óptico recorrido en cada instante. La iluminación posterior a la luz directa se trata como indirecta, por lo que en el instante correspondiente a haber recorrido 0,3 metros se muestra la luz directa en la pared tras el objeto. En el instante que corresponde a haber recorrido 1,3 metros, la luz indirecta capturada proviene de varios vóxeles en distintos planos (objeto y pared trasera) que se muestran integrados en el plano del objeto. 36