

SIMULACIÓN DE UNA CÁMARA CONTADORA DE FOTONES PARA LA
ADQUISICIÓN DE IMÁGENES TRANSITORIAS EN ESCENARIOS SIN LÍNEA DE
VISIÓN

CRISTHIAN CAMILO REY RUEDA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE SISTEMAS E INFORMÁTICA
BUCARAMANGA

2025

SIMULACIÓN DE UNA CÁMARA CONTADORA DE FOTONES PARA LA
ADQUISICIÓN DE IMÁGENES TRANSITORIAS EN ESCENARIOS SIN LÍNEA DE
VISIÓN

CRISTHIAN CAMILO REY RUEDA

Trabajo de Grado para optar al título de
Ingeniero de Sistemas

Director:

Hoover Fabián Rueda Chacón

PhD. en Ingeniería Eléctrica y Computación

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE SISTEMAS E INFORMÁTICA
BUCARAMANGA

2025

DEDICATORIA

A Dios, porque nada de esto sería posible si no me lo permitiera
A mi papá, por enseñarme que en la vida todo se consigue con trabajo y esfuerzo
A mi mamá, por su amor de madre y por siempre querer lo mejor para mi
A Vale, por su apoyo incondicional en aquellos momentos donde mas lo necesité
A los familiares y amigos que de alguna u otra manera hicieron que esto fuera posible

Este trabajo está dedicado a ustedes, quienes son mi mayor inspiración y el motor de mi vida. Todo lo que hago, lo hago por ustedes.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios, por todas las bendiciones que me ha concedido en mi vida y por otorgarme los dones y las capacidades que han sido esenciales para mi desarrollo personal y profesional.

A mis papás, por dar su vida por mi, por siempre querer lo mejor para mi y por todo el amor que me han brindado a lo largo de mi vida.

A mi director, Hoover, por su invaluable guía durante el desarrollo de este proyecto. Su paciencia y disposición para compartir sus conocimientos han sido fundamentales en este proceso.

A mis familiares, quienes han sido testigos de mi crecimiento y han contribuido de manera significativa a que pueda alcanzar mis metas.

A mis amigos, por todas las risas, las charlas y los innumerables momentos compartidos que me han enseñado a valorar aún más la importancia de la amistad.

CONTENIDO

	pág.
1 OBJETIVOS	16
2 MARCO DE REFERENCIA	17
2.1 ADQUISICIÓN DE IMÁGENES DE FOTÓN A FOTÓN	17
2.2 IMÁGENES TRANSITORIAS	20
2.3 GENERACIÓN DE IMÁGENES SIN LÍNEA DE VISIÓN DIRECTA	23
2.4 ADQUISICIÓN DE IMÁGENES TRANSITORIAS USANDO BORDES VERTICALES	29
2.5 MALLAS TRIANGULARES	32
3 MÉTODO PROPUESTO	35
3.1 MODELADO DE LA ESCENA NLOS	36
3.2 MODELADO DE LA PROPAGACIÓN DE LA LUZ PARA ESCENARIOS NLOS	38
3.3 SIMULACIÓN DEL RUIDO	40
3.4 INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO DEL SIMULADOR	43
4 RESULTADOS	46
4.1 ANÁLISIS DE VARIACIÓN DE LOS OBJETOS	46
4.2 ANÁLISIS DE VARIACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA ESCENA	48
4.3 ANÁLISIS DE VARIACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL SENSOR Y DEL LÁSER	52
4.4 VALIDACIÓN DEL SIMULADOR	54
5 CONCLUSIONES	57
6 TRABAJO FUTURO	58

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1	Bosquejo del proceso de medición del tiempo de vuelo de un fotón. 18
Figura 2	Ejemplo de un sistema de captura de fotón a fotón. 19
Figura 3	Ejemplo sintético de transporte de luz resuelto temporalmente. 21
Figura 4	Arquitectura mas común de los sistemas de generación de imágenes sin línea de visión. 24
Figura 5	Ejemplo de reconstrucciones de albedo para objetos planos usando una configuración sin línea de visión directa. 26
Figura 6	Configuración de un sistema no confocal para la adquisición de imágenes NLOS. 27
Figura 7	Escenario de adquisición de imágenes transitorias NLOS usando bordes verticales. 30
Figura 8	Vista superior de la oclusión generada por un borde vertical. 32
Figura 9	Ejemplo de superficies tridimensionales generadas mediante mallas triangulares. 34
Figura 10	Ejemplo de un escenario tridimensional simulado de un sistema NLOS basado en un oclisor vertical modelado a partir de mallas triangulares. 37
Figura 11	Resultados de un proceso de simulación de una imagen transitoria. 40
Figura 12	Simulaciones de imágenes transitorias con ruido añadido. 43
Figura 13	Vista general de la interfaz gráfica de usuario. 45
Figura 14	Entorno simulado con varios objetos distribuidos de manera arbitraria. 47
Figura 15	Diversos escenarios con variaciones en tamaño y disposición de objetos. 49
Figura 16	Simulaciones con distintos posicionamientos del objeto y ocultando los muros. 51

Figura 17 Simulaciones modificando los parámetros del sensor y del láser.

54

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1 Resultados del proceso de validación bajo diferentes configuraciones del sistema.	56

RESUMEN

TÍTULO: SIMULACIÓN DE UNA CÁMARA CONTADORA DE FOTONES PARA LA ADQUISICIÓN DE IMÁGENES TRANSITORIAS EN ESCENARIOS SIN LÍNEA DE VISIÓN*

AUTOR: CRISTHIAN CAMILO REY RUEDA**

PALABRAS CLAVE: Adquisición de imágenes de fotón a fotón, Imágenes transitorias, Generación de imágenes sin línea de visión directa, Cámara contadora de fotones.

DESCRIPCIÓN:

La adquisición de imágenes transitorias en escenarios sin línea de visión directa (Non-Line-Of-Sight) es una tarea innovadora que posibilita la reconstrucción de objetos fuera del campo de visión directo de la cámara. Esta técnica enfrenta desafíos significativos debido a factores como la propagación de la luz, la complejidad geométrica del entorno y la limitada disponibilidad de cámaras especializadas para esta aplicación. En este trabajo, presentamos una plataforma de simulación interactiva que permite a los interesados en el área modelar y visualizar el comportamiento de una cámara de detección de fotones individuales en escenarios sin línea de visión directa mediante una interfaz gráfica intuitiva. Nuestra metodología abarca una representación tridimensional del entorno mediante mallas 3D, un modelo físico que simula la emisión y propagación de fotones en la escena y un sistema de adquisición de imágenes transitorias sin línea de visión directa basado en bordes verticales. Además, se implementan diversos parámetros de la escena para simular distintos entornos, permitiendo el ajuste de variables críticas como el campo de visión de la cámara, las dimensiones de la escena, el tamaño y la disposición de los objetos, la intensidad del láser y el nivel de ruido. Este simulador facilita el estudio del impacto de estos parámetros en la adquisición de imágenes transitorias, proporcionando una plataforma flexible para obtener diversas mediciones y contribuyendo al desarrollo de soluciones robustas en aplicaciones como la reconstrucción de objetos fuera del campo de visión directo.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería de Sistemas e Informática. Director: Hoover Fabián Rueda Chacón.

ABSTRACT

TITLE: SIMULATION OF A SINGLE-PHOTON CAMERA FOR TRANSIENT IMAGE ACQUISITION IN NON-LINE-OF-SIGHT SCENARIOS*

AUTHOR: CRISTHIAN CAMILO REY RUEDA**

KEYWORDS: Single-Photon Imaging, Transient Imaging, Non-Line-of-Sight Imaging, SPAD Camera.

DESCRIPTION:

The acquisition of transient images in Non-Line-Of-Sight (NLOS) scenarios is an innovative task that enables the reconstruction of objects outside the field of view of the camera. This technique faces significant challenges due to factors such as light propagation, the geometric complexity of the environment, and the limited availability of specialized cameras for this application. In this work, we present an interactive simulation platform that allows researchers and practitioners in the field to model and visualize the behavior of a single-photon detection camera in NLOS scenarios through an intuitive graphical interface. Our methodology encompasses a three-dimensional representation of the environment using 3D meshes, a physical model that simulates the emission and propagation of photons in the scene, and an NLOS transient imaging acquisition system based on vertical occluding edge configurations. Furthermore, various scene parameters are implemented to simulate different environments, enabling the adjustment of critical variables such as the camera's field of view, scene dimensions, object size and position, laser intensity, and noise levels. This simulator facilitates the study of the impact of these parameters on transient image acquisition, providing a flexible platform to obtain various measurements and contributing to the development of robust solutions in applications such as the reconstruction of objects outside the field of view.

* Bachelor Thesis

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Computer Science. Advisor: Hoover Fabián Rueda Chacón.

INTRODUCCIÓN

En el campo de la visión por computadora y la óptica computacional, uno de los principales desafíos radica en la precisión de la medición de la luz.¹ Esto se debe a que la mayoría de los equipos de adquisición de imágenes son considerablemente más lentos que la velocidad de la luz. Aunque las cámaras de alta velocidad pueden capturar varios miles de fotogramas por segundo, la luz puede recorrer cientos de metros en cada fotograma.² Sin embargo, con el desarrollo de dispositivos de adquisición de imágenes ultrarrápidos, se han alcanzado tiempos de exposición efectivos en el rango de nanosegundos o picosegundos. Estos tiempos de exposición son tan breves que la luz apenas se desplaza unos pocos centímetros durante cada fotograma, lo que desafía la suposición de que la luz se encuentra en un estado estacionario y obliga a considerar su naturaleza temporal. Como resultado, es posible obtener lo que se conoce como imágenes transitorias.³

Para la adquisición de imágenes transitorias, se han propuesto diversas técnicas que se enfocan en detectar y analizar la propagación de pulsos de luz ultracortos y su interacción con los objetos presentes en un escenario controlado, a tasas de muestreo comparables a la velocidad de la luz.⁴ Estas técnicas permiten conocer la respuesta temporal de la escena.

¹ Ramesh Raskar, Amit Agrawal y Jack Tumblin. “Coded exposure photography: Motion deblurring using fluttered shutter”. En: *ACM Transactions on Graphics* 25.3 (2006), págs. 795-804. DOI: 10.1145/1141911.1141961.

² Ahmed Kirmani et al. “Looking around the corner using transient imaging”. En: *IEEE 12th International Conference on Computer Vision (ICCV)*. 2009, págs. 159-166. DOI: 10.1109/ICCV.2009.5459253.

³ Andreas Velten et al. “Recovering three-dimensional shape around a corner using ultrafast time-of-flight imaging”. En: *Nature Communications* 3 (2013), pág. 745. DOI: 10.1038/ncomms1747.

⁴ 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), págs. 338-341. DOI: 10.1038/

Varias aplicaciones en visión por computadora aprovechan las imágenes transitorias para estimar la profundidad de las escenas, determinar la función de distribución bidireccional de la reflectancia (BRDF, por sus siglas en inglés Bidirectional Reflectance Distribution Function) y, más recientemente, para la medición y/o estimación de propiedades en escenas sin línea de visión directa.⁵

Los sistemas de adquisición de imágenes sin línea de visión (Non-Line-Of-Sight, NLOS) han ganado considerable atención en la última década debido a su potencial para visualizar y reconocer objetos que se encuentran ocultos desde la línea directa de visión. Estos sistemas son cruciales en una variedad de aplicaciones, desde la navegación autónoma⁶ y la vigilancia,⁷ hasta en el apoyo en actividades de rescate en situaciones de desastre.⁸ Una técnica específica dentro de los sistemas NLOS, que aún está en sus etapas iniciales de investigación, es el uso de ocluidores de luz, como los bordes verticales asociados a las paredes que naturalmente producen sombras en el piso y que pueden explotarse para mejorar la reconstrucción de objetos ocultos al reflejar la luz en superficies intermedias.⁹ Esta técnica promete ser más versátil y menos costosa, en

nature25489.

- ⁵ Adrian Jarabo. “Transient Imaging”. En: *Encyclopedia of Color Science and Technology*. Ed. por Renzo Shamey. 2020, págs. 1-5. DOI: 10.1007/978-3-642-27851-8_420-1.
- ⁶ Robinson Czajkowski y John Murray-Bruce. “Ghost-Probe: NLOS Pedestrian Rushing Detection with Monocular Camera for Automated Driving”. En: *Nature Communications* 15 (2024), pág. 1162. DOI: 10.1038/s41467-024-45397-7.
- ⁷ Augusto Aubry, Antonio De Maio y Massimo Rosamilia. “Reconfigurable Intelligent Surfaces for N-LOS Radar Surveillance”. En: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 70 (2021). DOI: 10.1109/tvt.2021.3102315.
- ⁸ Felix Heide et al. “Non-line-of-sight Imaging with Partial Occluders and Surface Normals”. En: *ACM Trans. Graph.* 38.3 (2019). DOI: 10.1145/3269977.
- ⁹ Joshua Rapp, Charles Saunders, Julián Tachella et al. “Seeing around corners with edge-resolved transient imaging”. En: *Nature Communications* 11 (2020), pág. 5929. DOI: 10.1038/s41467-020-19727-4.

términos de tiempo de adquisición, en comparación con otros enfoques.¹⁰ Sin embargo, uno de los mayores desafíos para su adopción y desarrollo es la falta de herramientas de simulación que permitan a los investigadores explorar libremente sus aplicaciones y limitaciones sin la necesidad de acceso inmediato a tecnologías avanzadas y, a menudo, costosas.¹¹

La necesidad de un simulador específico para sistemas NLOS basados en ocluidores de luz verticales producidos por esquinas se hace evidente al considerar las complejidades inherentes al modelado de estos sistemas. Estos desafíos abarcan múltiples aspectos técnicos, incluyendo la simulación precisa de la dinámica de propagación de la luz en entornos tridimensionales complejos, la interacción de los fotones con las superficies, y la captura eficiente de estos fotones mediante cámaras especializadas, como los diodos de avalancha monofotónicos (Single-Photon Avalanche Diode, SPAD). Un simulador específico para estos sistemas no solo facilita la experimentación y el análisis teórico sin la necesidad de costosos equipos físicos, sino que también permite la variación de parámetros del sistema en un entorno controlado. Esto es fundamental para el posterior desarrollo y mejoramiento de algoritmos de reconstrucción de imágenes transitorias, así como para la evaluación del rendimiento de diferentes configuraciones de la escena. Además, un simulador robusto puede servir como una herramienta educativa invaluable para formar a nuevos investigadores en el campo de la adquisición de imágenes transitorias en escenarios sin línea de visión directa.

El presente trabajo se enfoca en el desarrollo de una plataforma de simulación interactiva destinada a sistemas de adquisición de imágenes sin línea de visión directa basados en

¹⁰ Christopher Saunders et al. “Edge-resolved transient imaging: Performance analyses, optimizations, and simulations”. En: *IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*. 2021, págs. 2858-2862. DOI: 10.1109/ICIP42928.2021.9506590.

¹¹ Matthew O’Toole et al. “Reconstructing Transient Images from Single-Photon Sensors”. En: *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2017, págs. 2289-2297. DOI: 10.1109/CVPR.2017.246.

oclusores de luz verticales producidos por esquinas. La plataforma está diseñada para modelar y visualizar el comportamiento de una cámara tipo SPAD en entornos NLOS. Para alcanzar los objetivos propuestos, se desarrolló una metodología integral que abarca varias etapas clave. Inicialmente, se realizó el modelado tridimensional del entorno utilizando mallas 3D que representan las geometrías complejas de escenarios reales. Posteriormente, se implementó un modelo físico que simula la emisión de pulsos de luz ultracortos desde una fuente de iluminación y el retorno de los fotones reflejados hacia el sensor SPAD, incorporando la dinámica temporal necesaria para capturar imágenes transitorias con exposiciones en el rango de nanosegundos o picosegundos. A continuación, se integró un sistema de adquisición imágenes transitorias en escenarios NLOS basado en bordes verticales, permitiendo la detección precisa de fotones individuales. Para facilitar el uso de la plataforma, se diseñó una interfaz gráfica intuitiva que permite a los usuarios ajustar parámetros críticos como el campo de visión de la cámara, las dimensiones del espacio, el tamaño y la posición de los objetos, la intensidad del láser y el nivel de ruido, visualizando los resultados en tiempo real a través de una gráfica de intensidad integrada en el tiempo y una gráfica de la respuesta temporal en un píxel específico del sensor. Finalmente, se llevó a cabo un proceso de validación estimando el tiempo de integración teórico y comparándolo con el tiempo de integración medido por nuestro simulador en un píxel específico del sensor.

1. OBJETIVOS

Objetivo general

- Desarrollar un simulador en Python que emule el funcionamiento de una cámara contadora de fotones para la adquisición de imágenes transitorias en escenarios sin línea de visión directa de los objetos generados de manera sintética.

Objetivos específicos

1. Modelar matemáticamente la propagación de la luz en escenarios sin línea de visión y su detección a través de una cámara contadora de fotones.
2. Diseñar y simular escenas que incluyan objetos en una configuración sin línea de visión directa de la cámara.
3. Simular el proceso de conteo de fotones generados por una fuente de iluminación pulsada, por medio de una cámara parametrizada en términos del número de píxeles y resolución temporal.
4. Diseñar una interfaz para la visualización de las escenas sin línea de visión y de las imágenes transitorias obtenidas de la simulación del proceso de conteo de fotones.

2. MARCO DE REFERENCIA

2.1. ADQUISICIÓN DE IMÁGENES DE FOTÓN A FOTÓN

La adquisición de imágenes de fotón a fotón involucra un conjunto de técnicas que consolidan una rama importante de la óptica computacional, las cuales se encargan de medir la velocidad de la luz con alta precisión en rangos de tiempo ultracortos. Esto es posible gracias a las cámaras contadoras de fotones que se distinguen de las cámaras convencionales por su extrema sensibilidad a la luz incidente.¹² Estas cámaras son capaces de detectar fotones individuales con tiempos de exposición efectivos en el rango de nanosegundos o incluso picosegundos.^{13,14} Esta capacidad no solo amplía las aplicaciones de captación de imágenes, sino que también redefine los límites de la percepción temporal en sistemas de visión por computadora.

En este contexto, los fotones detectados se registran en función de su tiempo de llegada, formando histogramas que representan la distribución temporal de los fotones procedentes de una fuente de iluminación externa, como se ilustra en la Figura 1. Este enfoque permite adquirir información temporal de alta precisión, conocida como tiempo de vuelo (Time of Flight), que mide el lapso que tarda la luz en viajar desde la fuente hasta un objeto y regresar al detector.¹⁵ El tiempo de vuelo no solo proporciona una base para

¹² Iris Cusini et al. “Historical Perspectives, State of Art and Research Trends of SPAD Arrays and Their Applications (Part II: SPAD Arrays)”. En: *Frontiers in Physics* 10 (2022). DOI: 10.3389/fphy.2022.906671.

¹³ Jarabo, ver n. 5.

¹⁴ Anant Gupta, Atul Ingle y Mohit Gupta. “Asynchronous Single-Photon 3D Imaging”. En: *University Of Wisconsin-Madison*. 2019. DOI: 10.1109/iccv.2019.00800.

¹⁵ Marcin Grzegorzec et al. *Time-of-Flight and Depth Imaging. Sensors, Algorithms, and Applications*. 2013. DOI: 10.1007/978-3-642-44964-2.

medir distancias y profundidades con gran exactitud, sino que también es fundamental en aplicaciones como el mapeo 3D, la estimación de reflectancia y la reconstrucción de escenas sin línea de visión directa.¹⁶

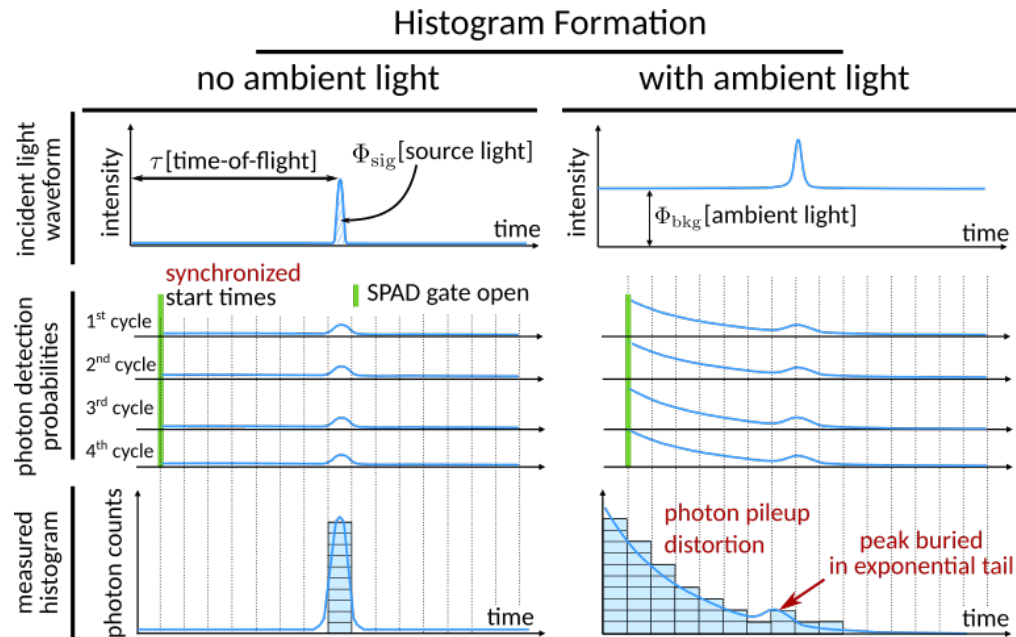


Figura 1. Bosquejo del proceso de medición del tiempo de vuelo de un fotón. Una cámara contadora de fotones registra los tiempos de llegada de los fotones que regresan al sensor provenientes de una fuente emisora de luz, y a partir de estos, construye un histograma que registra la frecuencia de los tiempos de llegada de los fotones. En ausencia de luz ambiente, el pico de este histograma corresponde a la profundidad real. Cuando hay presencia de luz ambiente, el histograma contiene fotones adicionales distribuidos uniformemente a lo largo del tiempo. Tomada de.¹⁷

Los dispositivos más comunes en la medición del tiempo de vuelo de la luz son los diodos de avalancha monofotónicos (SPAD, del inglés Single-Photon Avalanche Diodes). Estos han emergido como los fotodetectores ideales tanto para aplicaciones de conteo de fotones como para la temporización precisa de eventos que involucran fotones, superando a otros dispositivos tradicionales como los tubos fotomultiplicadores (PMT) y las placas

¹⁶ Heide et al., ver n. 8.

¹⁷ Anant Gupta, Atul Ingle y Mohit Gupta. "Asynchronous Single-Photon 3D Imaging". En: *University Of Wisconsin-Madison*. 2019. DOI: 10.1109/iccv.2019.00800.

multicanal (MCP).¹⁸ En términos de disponibilidad, los detectores SPAD están diseñados tanto en formato de píxel único como en formato de matriz (es decir, en configuraciones de cámara), cubriendo un amplio rango de longitudes de onda que incluyen las regiones visible e infrarroja.¹⁹ Las cámaras SPAD se han empleado en la captación de imágenes del tiempo de vuelo de la luz, donde la sensibilidad a un solo fotón permite capturar un pulso de luz propagándose en el espacio libre. La Figura 2 muestra la arquitectura de un sistema óptico que emplea un SPAD para determinar la distancia entre un emisor láser y un objeto o superficie mediante un haz de luz pulsado.

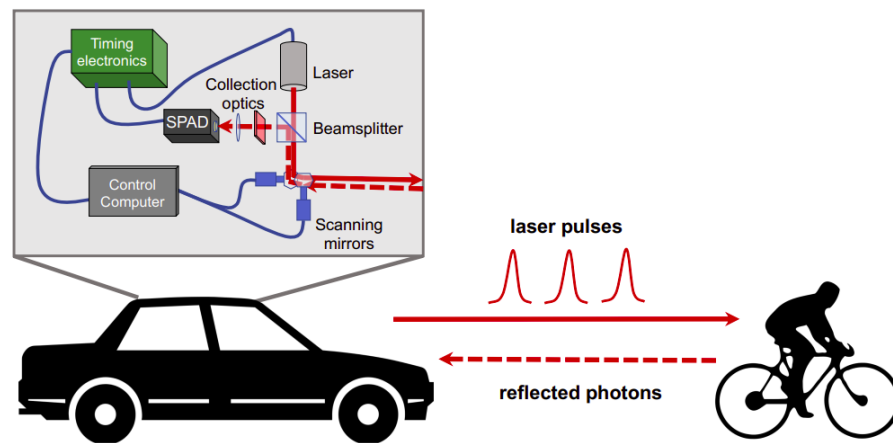


Figura 2. Ejemplo de un sistema de captura de fotón a fotón. En este sistema, un láser ilumina secuencialmente puntos individuales del entorno, guiado por un par de espejos de barrido. La luz reflejada en las superficies iluminadas es captada y dirigida hacia un detector SPAD sensible a fotones individuales. La diferencia de tiempo entre la emisión del pulso láser y la detección de los fotones reflejados se registra y se procesa para generar datos precisos sobre la distancia y las características del entorno escaneado. Tomada de.²⁰

¹⁸ Danilo Bronzi et al. “SPAD Detectors and Imagers: Figures of merit for Photon-counting and Photon-timing Applications: A Review”. En: *IEEE Sensors Journal* (2015). DOI: 10.1109/JSEN.2015.2483565.

¹⁹ Daniele Faccio, Andreas Velten y Gordon Wetzstein. “Non-line-of-sight imaging”. En: *Nat Rev Phys* 2 (2020), págs. 318-327. DOI: 10.1038/s42254-020-0174-8.

²⁰ Joshua Rapp et al. “Advances in Single-Photon Lidar for Autonomous Vehicles: Working Principles,

La aplicación mas común de las cámaras contadoras de fotones es la obtención de imágenes 3D.²¹ Cuando una fuente de luz ilumina una escena, algunos fotones emitidos impactan en un objeto y son reflejados de vuelta hacia la cámara, generando lo que conocemos como imágenes transitorias. Estas imágenes nos permiten analizar cómo se propaga la luz a través de una escena con una resolución temporal ultra alta, obteniendo una imagen en forma de cubo, denotada como $I(x, y, t)$, que contiene la radiancia de cada uno de los píxeles (x, y) a lo largo del tiempo t . Este aumento en la dimensión temporal enriquece la descripción de cómo la luz se propaga e interactúa con los objetos en la escena, ofreciendo así una comprensión más profunda de la misma.²² Otras aplicaciones que involucran el uso de cámaras contadoras de fotones se encuentran en áreas como la teledetección, robótica y la navegación de vehículos autónomos.²³

2.2. IMÁGENES TRANSITORIAS

La adquisición de imágenes transitorias engloba un conjunto de técnicas destinadas a detectar y analizar la propagación de pulsos de luz ultracortos y su interacción con la materia, a velocidades de fotogramas comparables a la velocidad de la luz.²⁴ A diferencia del proceso de adquisición de una imagen bidimensional convencional,

Challenges, and Recent Advances”. En: *IEEE Signal Processing Magazine* 37.4 (2020), págs. 62-71. DOI: 10.1109/MSP.2020.2983772.

²¹ Yanqiu Guan et al. “Lidar with superconducting nanowire single-photon detectors: Recent advances and developments”. En: *Optics And Lasers In Engineering* 156 (2022), pág. 107102. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2022.107102.

²² Diego Royo et al. “Non-line-of-sight transient rendering”. En: *Computers & Graphics* 107 (2022), págs. 84-92. DOI: 10.1016/j.cag.2022.07.003.

²³ Faccio, Velten y Wetzstein, ver n. 19; Joshua Rapp et al. “Advances in Single-Photon Lidar for Autonomous Vehicles: Working Principles, Challenges, and Recent Advances”. En: *IEEE Signal Processing Magazine* 37.4 (2020), págs. 62-71. DOI: 10.1109/MSP.2020.2983772.

²⁴ Royo et al., ver n. 22.

denotada como $I(x, y)$, que registra el estado estacionario de la distribución de la luz en una escena mediante una cámara tradicional, una cámara contadora de fotones captura imágenes transitorias, $I(x, y, t)$, que consisten en una secuencia temporal de imágenes que representan la respuesta de la escena a lo largo del tiempo t .²⁵ En la Figura 3, se ilustra el estado transitorio de la luz en una tarea de reconstrucción de escenarios, cuyo objetivo es recuperar la geometría 3D de un objeto oculto utilizando una fuente de luz. Las imágenes transitorias surgen de simular el transporte de la luz resuelto en el tiempo. Aprovechando la riqueza de información contenida en el transporte de luz a resoluciones temporales extremadamente altas, se han desarrollado técnicas innovadoras que permiten visualizar la luz en movimiento. Estas técnicas posibilitan observar objetos ocultos alrededor de las esquinas, detectar objetos en medios con alta dispersión y captar imágenes de objetos distantes, entre otras aplicaciones.²⁶

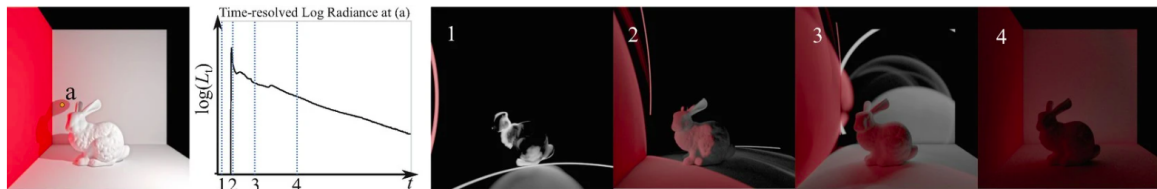


Figura 3. Ejemplo sintético de transporte de luz resuelto temporalmente. En el estado estacionario (izquierda), toda la luz ha completado su propagación a través de la escena. En contraste, en el estado transitorio, la radiancia recibida por el píxel es una función que depende del tiempo, y la luz requiere varios nanosegundos para finalizar su propagación por la escena. El gráfico ilustra el perfil temporal de la radiancia en el píxel (a), con los fotogramas individuales (1-4) representados como líneas punteadas verticales azules en el gráfico. Tomada de.²⁷

Adquirir imágenes transitorias equivale a captar la respuesta al impulso de una escena a

²⁵ Jingyu Lin et al. “Frequency-Domain Transient Imaging”. En: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 39.5 (2017), págs. 937-950. DOI: 10.1109/TPAMI.2016.2560814.

²⁶ Adrian Jarabo et al. “Recent advances in transient imaging: A computer graphics and vision perspective”. En: *Visual Informatics* 1.1 (2017), págs. 65-79. DOI: 10.1016/j.visinf.2017.01.008.

²⁷ Adrian Jarabo. “Transient Imaging”. En: *Encyclopedia of Color Science and Technology*. Ed. por Renzo Shamey. 2020, págs. 1-5. DOI: 10.1007/978-3-642-27851-8_420-1.

lo largo del dominio temporal. Definimos la respuesta al impulso de una escena como un operador lineal que relaciona el nivel de iluminación de la escena con la imagen captada, usando la ecuación del transporte de luz²⁸:

$$i = T \cdot p, \quad (1)$$

donde i es la imagen 2D capturada por la cámara, p es el vector de tamaño P que representa la iluminación de la escena y T es el operador de transporte de luz codificado como una matriz $I \times P$. La Ecuación (1) presupone que el transporte de luz se encuentra en un estado estacionario. Sin embargo, en su versión transitoria,²⁹ al incluir el dominio temporal en la ecuación de transporte de luz, se obtiene el siguiente resultado:

$$i(t) = \int_{-\infty}^{\infty} T(\tau)p(t - \tau)d\tau = (T * p)(t), \quad (2)$$

donde $i(t)$ representa la intensidad de la luz recibida en el instante t , $p(t)$ denota la función de iluminación con resolución temporal en el instante t y $T(t)$ es la matriz de transporte que describe la propagación de la luz con un tiempo de vuelo exactamente igual a t , dejando todos los términos dependientes del tiempo. La segunda igualdad ilustra la convolución en el dominio temporal entre T y p . Dada la naturaleza de las limitaciones físicas de los sensores, no es posible captar directamente la imagen transitoria en el instante t . Por lo tanto, la señal recibida es además convolucionada por la respuesta temporal del sensor, $s(t)$, que se centra en el tiempo t , resultando en una modificación de la señal detectada como se describe a continuación:

²⁸ Jarabo et al., ver n. 26.

²⁹ Matthew O’Toole et al. “Temporal frequency probing for 5D transient analysis of global light transport”. En: *ACM Transactions on Graphics* 33.4 (2014), págs. 1-11. DOI: 10.1145/2601097.2601103.

$$i(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t - \tau)(T * p)(\tau)d\tau = s(t) * (T * p)(t). \quad (3)$$

En la adquisición de imágenes transitorias, nuestro objetivo es calcular la imagen $i(t)$ que corresponde a la respuesta al impulso de la matriz de transporte T , tal y como se define en la Ecuación (3). En este cálculo, la función de iluminación $p(t)$ se asume como un delta de Dirac centrado en cero, $\delta_0(t)$, mientras que la respuesta del sensor $s(t)$ se modela como un delta de Dirac centrado en t , $\delta_t(t)$. Estas funciones de impulso permiten adquirir las características dinámicas esenciales de la propagación y detección de luz en el sistema estudiado.³⁰

2.3. GENERACIÓN DE IMÁGENES SIN LÍNEA DE VISIÓN DIRECTA

La habilidad de generar imágenes de objetos que se encuentran fuera de la línea de visión ha generado diversas aplicaciones en áreas como la búsqueda y rescate, la navegación de vehículos autónomos y el reconocimiento de objetos.³¹ Como se muestra en la Figura 4, la arquitectura más común de los sistemas de generación de imágenes sin línea de visión incluye una fuente de luz pulsada (láser), una cámara contadora de fotones (detector), una superficie difusa (generalmente una pared) y un objeto oculto cuya geometría se desea estimar.³² Inicialmente la fuente láser proyecta un pulso corto de luz sobre la pared visible. La luz se refleja de manera difusa desde la pared en múltiples direcciones, algunas de ellas llegando hasta el objeto que se encuentra oculto; tras colisionar con el

³⁰ Jarabo et al., ver n. 26.

³¹ Sheila Seidel et al. “Non-line-of-sight snapshots and background mapping with an active corner camera”. En: *Nature Communications* 14.1 (2023). DOI: 10.1038/s41467-023-39327-2.

³² Siyuan Shen et al. “Non-line-of-Sight Imaging via Neural Transient Fields”. En: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 43.7 (2021), págs. 2257-2268. DOI: 10.1109/tpami.2021.3076062.

objeto, se refleja nuevamente en múltiples direcciones llegando de nuevo a la pared y finalmente se capta esa cantidad de luz con un contador de fotones, generalmente un SPAD con resolución temporal. El objeto oculto puede reconstruirse modelando los tres rebotes que produce la luz, con lo que se consigue el objetivo de “ver a través de las esquinas”.³³

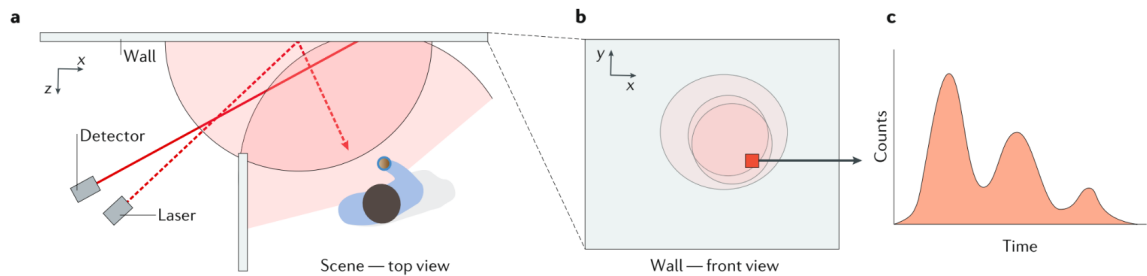


Figura 4. Arquitectura más común de los sistemas de generación de imágenes sin línea de visión. En (a) observamos la disposición de elementos más utilizada en sistemas de adquisición de imágenes sin línea de visión. En (b) podemos observar una vista frontal de la superficie visible en la cual se refleja la luz proyectada en forma de elipsoides, y en (c) observamos que una vez realizados los tres rebotes de la luz en el proceso de medición, la luz captada por el sensor se puede ver en una gráfica de frecuencia a partir del conteo de fotones realizado a lo largo del tiempo. Tomada de.³⁴

Diversos autores han propuesto ideas innovadoras para la adquisición y reconstrucción de imágenes transitorias en sistemas de generación de imágenes sin línea de visión, con el fin de lograr reconstruir de manera exitosa objetos que se encuentran ocultos en una escena. De manera general, estas se pueden clasificar en métodos pasivos y activos (según la fuente de iluminación usada) y en sistemas confocales y no-confocales (según la

³³ Faccio, Velten y Wetzstein, ver n. 19; Yue Li et al. “NLOST: Non-Line-of-Sight Imaging with Transformer”. En: *2023 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2023. DOI: 10.1109/cvpr52729.2023.01279.

³⁴ Daniele Faccio, Andreas Velten y Gordon Wetzstein. “Non-line-of-sight imaging”. En: *Nat Rev Phys* 2 (2020), págs. 318-327. DOI: 10.1038/s42254-020-0174-8.

disposición de los elementos usados). Los métodos pasivos^{35,36,37} utilizan únicamente la luz natural o ambiental emitida por la escena o el objeto oculto, captando las mediciones NLOS con cámaras convencionales. Este enfoque presenta grandes desafíos para la reconstrucción en escenas generales debido a la variabilidad y baja intensidad de la luz disponible. Por otro lado, los métodos activos^{38,39,40} emplean una fuente de luz artificial, como un láser, para iluminar la escena. Estos métodos reconstruyen las escenas ocultas utilizando mediciones transitorias activas.

Además, según la disposición de los elementos del sistema, el método confocal se caracteriza porque la fuente de iluminación y el detector se encuentran en un mismo punto x' y y' .⁴¹ Por otro lado, en los métodos no-confocales, el detector muestrea el transporte de luz indirecta en un punto de la pared diferente al iluminado por el láser.⁴² En la Figura 5 observamos un ejemplo de un escenario sin línea de visión directa en donde se busca reconstruir la reflectividad de algunos objetos, es decir, la fracción de la

³⁵ Mahed Batarseh et al. “Passive sensing around the corner using spatial coherence”. En: *Nature Communications* 9.1 (2018). DOI: 10.1038/s41467-018-05985-w.

³⁶ Jeremy Boger-Lombard y Ori Katz. “Passive optical time-of-flight for non line-of-sight localization”. En: *Nature Communications* 10.1 (2019). DOI: 10.1038/s41467-019-11279-6.

³⁷ Adam B Yedidia et al. “Using Unknown Occluders to Recover Hidden Scenes”. En: *2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2019, págs. 12223-12231. DOI: 10.1109/CVPR.2019.01251.

³⁸ O’Toole, Lindell y Wetzstein, ver n. 4.

³⁹ Kirmani et al., ver n. 2.

⁴⁰ David B. Lindell, Gordon Wetzstein y Matthew O’Toole. “Wave-based non-line-of-sight imaging using fast f-k migration”. En: *ACM Transactions on Graphics* 38.4 (2019), págs. 1-13. DOI: 10.1145/3306346.3322937.

⁴¹ O’Toole, Lindell y Wetzstein, ver n. 4.

⁴² Xiaochun Liu et al. “Non-line-of-sight imaging using phasor-field virtual wave optics”. En: *Nature* 572.7771 (2019), págs. 620-623. DOI: 10.1038/s41586-019-1461-3.

luz incidente que es reflejada por la superficie sin ser absorbida, también conocida como albedo.

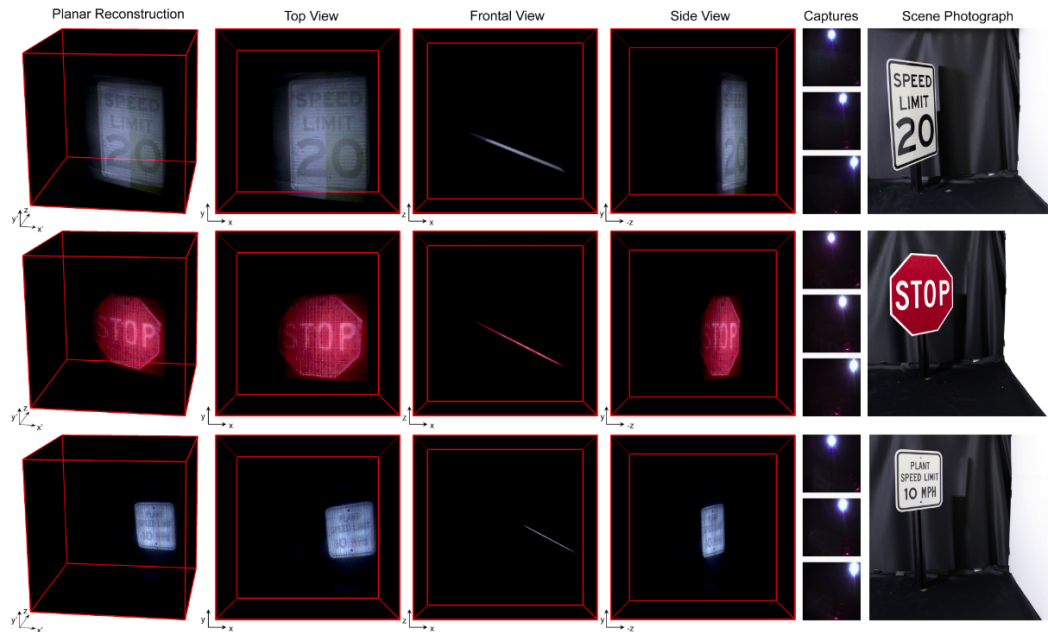


Figura 5. Ejemplo de reconstrucciones de albedo para objetos planos usando una configuración sin línea de visión directa. En la imagen se presentan reconstrucciones de reflectancia para tres superficies de materiales distintos, aplicados a objetos planos. La primera fila de imágenes muestra un objeto con un revestimiento retrorreflectante, similar a los utilizados en placas de automóviles y señales de tráfico de alta calidad. La segunda fila corresponde a una señal de tráfico pintada de manera convencional y la tercera fila nuevamente muestra una señal de tráfico de alta calidad. La última columna en cada conjunto de imágenes corresponde a fotografías de los objetos ocultos, proporcionando una referencia visual para la comparación de los diferentes materiales analizados. Tomada de.⁴³

En la Figura 6 observamos la configuración de un sistema no-confocal de adquisición de imágenes NLOS. Dada una fuente de luz láser en una posición \mathbf{l} , un detector SPAD de gran campo de visión (FOV, del inglés Field Of View) ubicado en una posición \mathbf{s} , y una escena con superficie S , la forma de la onda transitoria puede escribirse de la siguiente manera

⁴³ Wenzheng Chen et al. “Steady-State Non-Line-Of-Sight Imaging”. En: *IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. [En línea]. Disponible: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:53743050>. 2019, págs. 6783-6792.

$$i_{\mathbf{l},\mathbf{s}}(t) = \int_S \mathbf{R}(\mathbf{x}, \mathbf{l}, \mathbf{s}) \mathbf{G}(\mathbf{x}, \mathbf{l}) \mathbf{G}(\mathbf{x}, \mathbf{s}) \delta(\|\mathbf{x} - \mathbf{l}\|_2 + \|\mathbf{x} - \mathbf{s}\|_2 - ct) dA(\mathbf{x}), \quad (4)$$

donde \mathbf{x} es un punto de la escena en S y $dA(\mathbf{x})$ es un área infinitesimal alrededor de \mathbf{x} . La función delta de Dirac temporal $\delta(\cdot)$ compara la distancia de desplazamiento de la luz dado por ct con la longitud de la trayectoria de la luz $\mathbf{l} \rightarrow \mathbf{x} \rightarrow \mathbf{s}$, siendo c la velocidad de la luz.

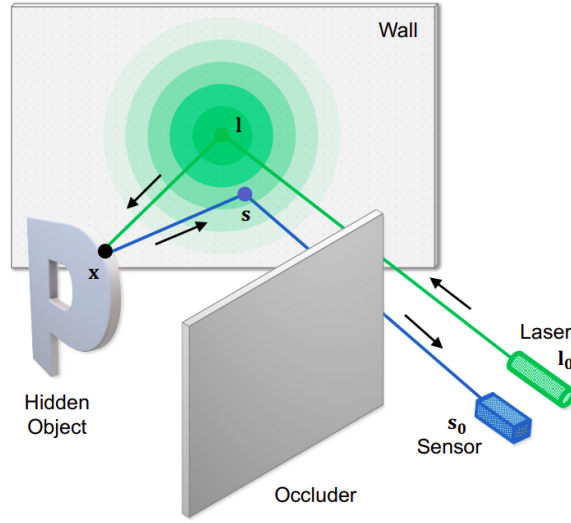


Figura 6. Configuración de un sistema no confocal para la adquisición de imágenes NLOS. Una fuente de luz láser pulsada ubicada en la posición l_0 ilumina una parte de la pared visible. La luz rebota interactuando con la escena oculta. Después de esto, la luz reflejada retorna a la pared y es finalmente captada por un sensor ubicado en la posición s_0 . Tomada de.⁴⁴

El término de reflectancia \mathbf{R} que modela la propiedad de reflectancia de S se puede representar de la siguiente manera

$$\mathbf{R}(\mathbf{x}, \mathbf{l}, \mathbf{s}) = \rho(\mathbf{x}) f_r(\mathbf{x}, n_{\mathbf{x}}, \omega_{\mathbf{x} \rightarrow \mathbf{l}}, \omega_{\mathbf{x} \rightarrow \mathbf{s}}), \quad (5)$$

⁴⁴ Fangzhou Mu et al. “Physics to the Rescue: Deep Non-Line-of-Sight Reconstruction for High-Speed Imaging”. En: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* (2024), págs. 1-12. DOI: 10.1109/TPAMI.2022.3203383.

donde $\rho(\mathbf{x})$ es el albedo en el punto \mathbf{x} , f_r representa la función de distribución de reflectancia bidireccional (BRDF, Bidirectional Reflectance Distribution Function) que describe cómo se refleja la luz en un objeto, en función de la geometría de la iluminación y de la visualización, $n_{\mathbf{x}}$ es la normal de la superficie en \mathbf{x} y $\omega_{\mathbf{x}}$ es un vector direccional unitario originado en \mathbf{x} . El término \mathbf{G} definido como

$$\mathbf{G}(\mathbf{x}, \mathbf{l}) = \frac{\langle n_{\mathbf{x}}, \omega_{\mathbf{x} \rightarrow \mathbf{l}} \rangle}{\|\mathbf{x} - \mathbf{l}\|_2^2} v(\mathbf{x}, \mathbf{l}), \quad (6)$$

$$\mathbf{G}(\mathbf{x}, \mathbf{s}) = \frac{\langle n_{\mathbf{x}}, \omega_{\mathbf{x}} \rangle}{\|\mathbf{x} - \mathbf{s}\|_2^2} v(\mathbf{x}, \mathbf{s}), \quad (7)$$

está descrito por la geometría de la escena, la iluminación y el campo de visión del detector. Este término captura la caída cuadrática de la intensidad (quadratic intensity fall-off), el efecto "foreshortening", y la visibilidad v .⁴⁵ La caída cuadrática de la intensidad se refiere a la disminución de la intensidad de la luz a medida que se aleja de la fuente de emisión, siguiendo una relación cuadrática inversa con la distancia que se puede expresar como

$$I \propto \frac{1}{r^2}, \quad (8)$$

donde I es la intensidad de la luz y r es la distancia desde la fuente de luz. Por otro lado, el efecto de escorzo o "foreshortening"^{es} un fenómeno visual en el cual la apariencia de un objeto cambia según el ángulo desde el cual se observa.⁴⁶ Cuando una superficie está inclinada con respecto a la línea de visión del observador, la longitud aparente de la superficie disminuye en proporción al coseno del ángulo entre la superficie y la línea

⁴⁵ Fangzhou Mu. "Learning to Reconstruct Scenes with Single-Photon Cameras". Tesis doct. Madison, WI: Univ. Wisconsin–Madison, 2023.

⁴⁶ Marta Wnuczko y John M. Kennedy. "Foreshortening increases apparent angles". En: *Attention, Perception, & Psychophysics* 83.6 (2021), págs. 2574-2582. DOI: 10.3758/s13414-021-02299-w.

de visión, expresándose de la siguiente manera

$$L_a = L_r \cdot \cos(\theta), \quad (9)$$

donde L_a es la longitud aparente, L_r es la longitud real del objeto, y θ es el ángulo entre la superficie y la línea de visión.⁴⁷ Es importante destacar que cuando el objeto es perpendicular al observador, es decir, cuando $\theta = 90^\circ$ y $\cos(\theta) = 1$, la longitud aparente coincide con la longitud real, es decir, $L_a = L_r$.

2.4. ADQUISICIÓN DE IMÁGENES TRANSITORIAS USANDO BORDES VERTICALES

Adquirir imágenes transitorias en escenarios NLOS se ha convertido en un desafío significativo en el área de la óptica computacional. Diversos enfoques han emergido, desde la proyección de un haz de luz a través del ojo de una cerradura⁴⁸ hasta el uso de ondas acústicas en lugar de luz para adquirir mediciones.⁴⁹ Un enfoque innovador en este contexto es el uso de bordes verticales como ocluidores naturales asociados a las paredes, lo que permite mejorar la reconstrucción de la geometría tridimensional de objetos ocultos mediante la propagación controlada de pulsos de luz ultracortos. Este método no solo aprovecha estructuras existentes en el entorno, sino que también promete

⁴⁷ Robinson Czajkowski y John Murray-Bruce. “Two-edge-resolved Three-dimensional Non-line-of-sight Imaging with an Ordinary Camera”. En: *Nature Communications* 15 (2024), pág. 1162. DOI: 10.1038/s41467-024-45397-7.

⁴⁸ Christopher Metzler, David B. Lindell y Gordon Wetzstein. “Keyhole Imaging: Non-Line-of-Sight Imaging and Tracking of Moving Objects Along a Single Optical Path”. En: *IEEE Transactions on Computational Imaging* (2021).

⁴⁹ David B. Lindell, Gordon Wetzstein y Vladlen Koltun. “Acoustic Non-Line-Of-Sight Imaging”. En: (2019).

un menor tiempo de adquisición, en comparación con enfoques tradicionales.⁵⁰ En la Figura 7 se muestra un ejemplo de configuración para adquirir imágenes transitorias utilizando bordes verticales. En esta configuración, se proyecta un haz de luz en la superficie del suelo del escenario reflejándolo hacia la escena donde se encuentran los objetos ocultos. Posteriormente, la luz reflejada realiza un segundo rebote en el objeto y, tras un tercer rebote en el suelo, retorna al campo de visión del sensor, el cual está estratégicamente ubicado en el suelo para captar las reflexiones necesarias.

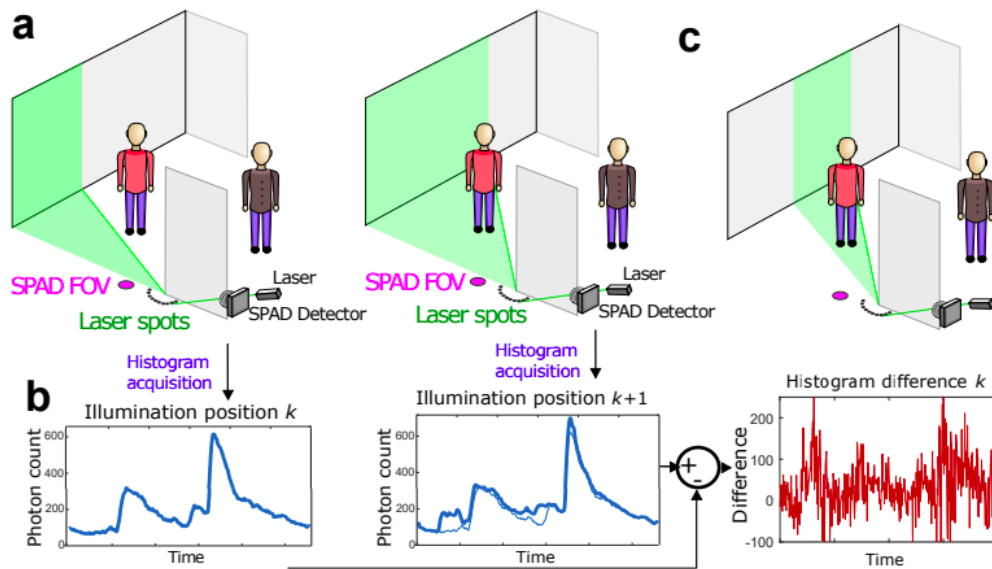


Figura 7. Escenario de adquisición de imágenes transitorias NLOS usando bordes verticales. En (a) podemos observar que se ilumina un láser pulsado sobre las posiciones de un semicírculo en el suelo, centradas en el borde de la pared oclusora. En (b) observamos que para cada punto de iluminación del láser se registra un histograma de tiempos de llegada de fotones. Finalmente, en (c) se calcula la diferencia entre dos histogramas secuenciales, que en promedio contienen las llegadas de fotones de una parte de la escena. Tomada de.⁵¹

Tomando \mathbf{l} como la posición de iluminación del láser y \mathbf{s} como un punto en el suelo en

⁵⁰ Rapp, Saunders, Tachella et al., ver n. 9.

⁵¹ Wenzheng Chen et al. “Steady-State Non-Line-Of-Sight Imaging”. En: *IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. [En línea]. Disponible: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:53743050>. 2019, págs. 6783-6792.

el área del n-ésimo píxel de la cámara \mathcal{P}_n , la cantidad de fotones durante el intervalo de tiempo k-ésimo en \mathcal{P}_n debido a la superficie oculta S esta dado por la expresión

$$i^{n,k} = \int_{(k-1)\Delta t}^{k\Delta t} \int_{\mathcal{P}_n} \int_S v(\mathbf{x}, \mathbf{s}) \rho(\mathbf{x}) \frac{f_r(\mathbf{x}, \mathbf{l}, \mathbf{s})}{\|\mathbf{l} - \mathbf{x}\|^2 \|\mathbf{s} - \mathbf{x}\|^2} \times \delta \left(t - t_0 - \frac{\|\mathbf{l} - \mathbf{x}\| + \|\mathbf{s} - \mathbf{x}\|}{c} \right) d_{\mathbf{x}} d_{\mathbf{s}} dt, \quad (10)$$

donde $\rho(\mathbf{x})$ es el albedo de la superficie en el punto \mathbf{x} , $\delta(\cdot)$ describe la variación de la intensidad del pulso de láser en función del tiempo, teniendo en cuenta el tiempo de vuelo de la luz. El término Δ_t representa la duración de un intervalo de tiempo, t_0 es el tiempo en que el pulso láser incide por primera vez en el punto de iluminación de la escena y c es la velocidad de la luz. El factor $f_r(\cdot, \cdot, \cdot)$ que representa la BRDF es producto del término de foreshortening. El factor $v(\mathbf{x}, \mathbf{s})$ es la función de visibilidad que describe la oclusión proporcionada por el borde vertical entre el punto \mathbf{x} de la superficie oculta y el punto \mathbf{s} del campo de visión del SPAD. En la vista superior de la Figura 8, se observa que el punto p_f que representa un punto en el campo de visión del sensor, está ubicado en un ángulo γ , medido desde la pared oclusora en el plano del suelo. Por otro lado, el punto p_s , que representa un punto de la superficie, se encuentra en un ángulo azimutal α , también en el plano del suelo, medido alrededor de la esquina desde el límite entre los lados ocultos y visibles de la pared. De esta manera, el punto p_f es solo visible a p_s si $\gamma \geq \alpha$

$$v(p_s, p_f) = \begin{cases} 1, & \text{si } \gamma \geq \alpha \\ 0, & \text{en caso contrario.} \end{cases} \quad (11)$$

La región amarilla en el campo de visión del SPAD corresponde al conjunto de todos los puntos p_f que no están ocluidos desde el punto p_s , es decir, donde $v(p_s, p_f) = 1$. Por el contrario, en la región verde, la luz proveniente del punto p_s es bloqueada por la pared,

resultando en $v(p_s, p_f) = 0$. Este patrón en forma de abanico se denomina penumbra y representa la transición entre iluminación total y oscuridad completa.⁵²

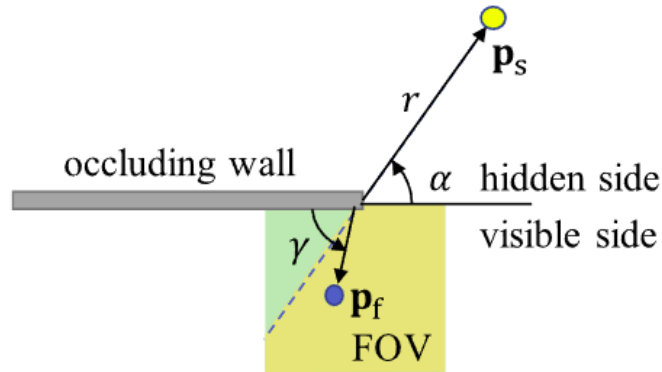


Figura 8. Vista superior de la oclusión generada por un borde vertical. El borde vertical bloquea la luz desde el punto p_s de la escena en función de su ángulo azimutal α , el cual es medido alrededor de la esquina. Un punto p_f en el campo de visión del sensor en el ángulo γ es iluminado por p_s si $\gamma \geq \alpha$. Tomada de.⁵³

2.5. MALLAS TRIANGULARES

Las mallas triangulares, también conocidas como triangular meshes, son representaciones geométricas utilizadas en área de gráficos por computadora (*computer graphics*) para modelar superficies tridimensionales. Estas mallas consisten en una colección de triángulos conectados de forma continua, formando superficies cerradas y sin agujeros en su estructura.⁵⁴ Gracias a su simplicidad y flexibilidad, las mallas triangulares son ampliamente empleadas en aplicaciones como la visualización 3D, el renderizado, la

⁵² William Krska et al. “Double Your Corners, Double Your Fun: The Doorway Camera”. En: *2022 IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP)*. 2022, págs. 1-12. DOI: 10.1109/ICCP54855.2022.9887738.

⁵³ Sheila Seidel et al. “Non-line-of-sight snapshots and background mapping with an active corner camera”. En: *Nature Communications* 14.1 (2023). DOI: 10.1038/s41467-023-39327-2.

⁵⁴ Partha Ghosh. *Nonwatertight Mesh Reconstruction*. 2022.

simulación física y el diseño asistido por computadora (CAD).⁵⁵ Una malla triangular $\mathcal{M} = (\mathcal{V}, \mathcal{F})$ está definida por un conjunto de vértices $\mathcal{V} = \{v_1, \dots, v_V\}$ y un conjunto de caras $\mathcal{F} \subseteq \{f_1, \dots, f_{\mathcal{F}}\}$ de manera que cada cara está delimitada por los vértices correspondientes $f_n \in \mathcal{V} \times \mathcal{V} \times \mathcal{V}$.⁵⁶ Una malla triangular también se puede representar en términos de las aristas correspondientes $\mathcal{E} = \{e_1, \dots, e_{\mathcal{E}}\}$ delimitadas por sus respectivos vértices $e_n \in \mathcal{V} \times \mathcal{V}$.

La integración geométrica de una malla triangular en \mathbb{R}^3 se especifica asociando una posición 3D, p_n , a cada vértice, $v_n \in \mathcal{V}$, de la siguiente forma

$$\mathcal{P} = \{p_1, \dots, p_V\}, \quad p_n := p(v_n) = \begin{pmatrix} x(v_n) \\ y(v_n) \\ z(v_n) \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^3, \quad (12)$$

de manera que cada cara $f_n \in \mathcal{F}$ corresponde a un triángulo en el espacio tridimensional especificado por las posiciones de sus tres vértices.⁵⁷ En la Figura 9 se muestra un ejemplo de esferas representadas mediante mallas triangulares. A medida que se incrementa el número de caras (de izquierda a derecha) en la malla, la aproximación a la forma tridimensional deseada se vuelve más precisa, logrando una mejor representación de la superficie objetivo.

⁵⁵ Jianwei Guo et al. “Automatic and High-quality Surface Mesh Generation for CAD Models”. En: *Computer-Aided Design* 109 (2018), págs. 49-59. DOI: 10.1016/j.cad.2018.12.005.

⁵⁶ David Stutz. *A Formal Definition of Watertight Meshes*. 2021.

⁵⁷ Mario Botsch et al. “Geometric modeling based on polygonal meshes Video files associated with this course are available from the citation page”. En: SIGGRAPH '07. San Diego, California: Association for Computing Machinery, 2007, 1–es.

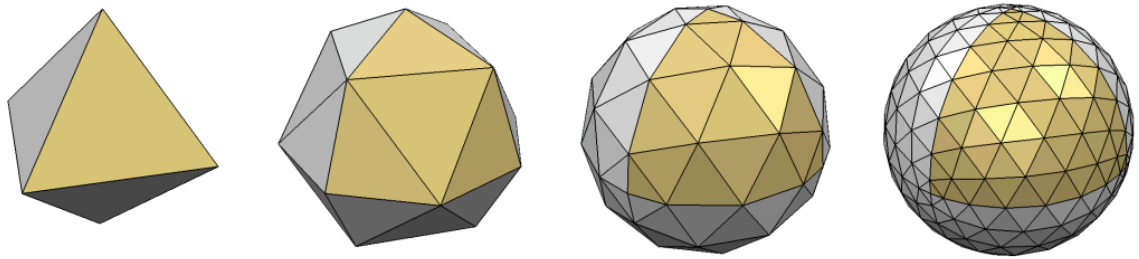


Figura 9. Ejemplo de superficies tridimensionales generadas mediante mallas triangulares. Cada una de estas superficies representa una esfera, y de izquierda a derecha se incrementa el número de caras de la malla en un factor de 4 en cada paso. Este refinamiento progresivo permite una aproximación más precisa a la forma deseada, logrando una representación más suave y detallada de la esfera. Tomada de⁵⁸

⁵⁸ Mario Botsch et al. "Geometric modeling based on polygonal meshes Video files associated with this course are available from the citation page". En: SIGGRAPH '07. San Diego, California: Association for Computing Machinery, 2007, 1-es.

3. MÉTODO PROPUESTO

En este trabajo se desarrolló una herramienta de simulación interactiva de una cámara contadora de fotones para sistemas de adquisición de imágenes transitorias en escenarios NLOS basados en bordes verticales. Este enfoque se caracteriza por su capacidad de modelar y visualizar la propagación de la luz en entornos tridimensionales complejos con alta precisión temporal, permitiendo analizar procesos de adquisición de imágenes transitorias en rangos de exposición ultracortos utilizando un ocluser vertical de la escena. El método propuesto consiste en una plataforma robusta que permite estudiar configuraciones específicas de escenarios NLOS a partir de los parámetros de la simulación, explorando su comportamiento y limitaciones sin la necesidad de equipos físicos costosos o experimentos prolongados.

La herramienta desarrollada integra un modelo matemático para la propagación y detección de la luz en escenarios NLOS, junto con un sistema de simulación basado en mallas 3D para representar la geometría del entorno. Asimismo, incluye un proceso de conteo de fotones generados por una fuente de iluminación pulsada, los cuales son captados una cámara parametrizada según el número de píxeles y la resolución temporal. Complementando estas funcionalidades, se ha diseñado una interfaz gráfica interactiva que permite configurar parámetros adicionales de la escena. Esto brinda al usuario la capacidad de explorar y visualizar los escenarios NLOS junto con los resultados del proceso de simulación. Dichos resultados se presentan mediante un mapa de intensidad integrado en el tiempo y gráficas de la respuesta temporal en cada píxel de la cámara, proporcionando una representación completa y dinámica de la propagación de la luz y su interacción con los objetos de la escena.

3.1. MODELADO DE LA ESCENA NLOS

El escenario diseñado para simular el proceso de propagación de la luz se modela como un espacio tridimensional delimitado por tres paredes y un techo, con objetos colocados en posiciones arbitrarias dentro del mismo. Dado que nuestro sistema de adquisición de imágenes transitorias en escenarios NLOS esta basado en un ocluser vertical, el diseño incluye una pared oclusora colocada estratégicamente en la parte frontal de la habitación. Esta pared restringe parcialmente la visibilidad del sensor durante el proceso de adquisición de mediciones, creando zonas de penumbra que simulan condiciones reales de escenarios NLOS basado en esquinas. Tanto las paredes como los objetos fueron incorporados en la escena como modelos tridimensionales construidos a partir de mallas triangulares. Las dimensiones y características de estas superficies varían en función de los parámetros configurados al momento de ejecutar la simulación, lo que permite adaptar el entorno a los requisitos específicos del experimento. En particular, los objetos cargados al sistema provienen de una lista previamente definida de archivos locales en formato .obj. Este formato fue seleccionado debido a su simplicidad, portabilidad y eficiencia en términos de almacenamiento y manejo de geometrías tridimensionales, lo que facilita su integración en sistemas de simulación y visualización interactiva.⁵⁹ Además de las superficies de la habitación y los objetos, en el escenario también se integra el campo de visión del sensor y el láser ubicados en la posición $[0, 0, 0]$. Esta ubicación estratégica permite una distribución uniforme del campo de visión del sensor sobre la escena. Desde esta posición, el sensor puede captar los fotones reflejados por el láser, también ubicado en el mismo punto, mientras que la presencia de la pared oclusora genera una oclusión parcial en las mediciones. En la Figura 10 observamos una demostración de un escenario simulado. En este caso específico, la habitación tiene dimensiones $3m \times 3m \times 3m$ y contiene en su interior un objeto con geometría de superficie

⁵⁹ Botsch et al., ver n. 58.

vertical.

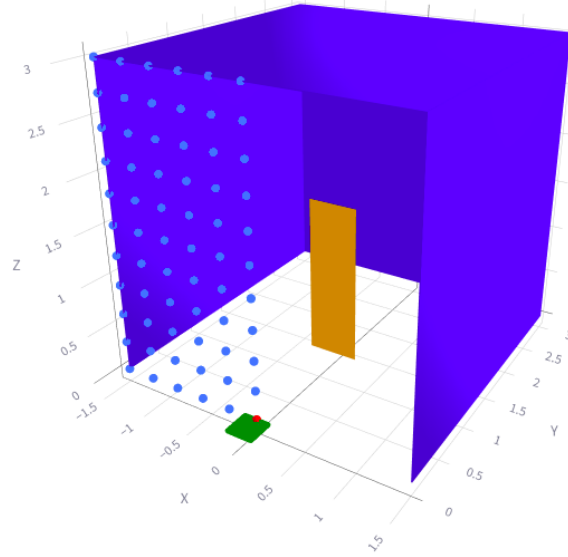


Figura 10. Ejemplo de un escenario tridimensional simulado de un sistema NLOS basado en un oclisor vertical modelado a partir de mallas triangulares. Las paredes que delimitan la habitación se visualizan en color azul, mientras que el objeto, representado como una superficie vertical, se muestra en color naranja. La pared oclusora, ubicada en la parte frontal de la habitación, se modela como una matriz dispersa de puntos de color azul. El sistema también incorpora el campo de visión del sensor y la posición del láser, ambos ubicados en la parte frontal y central de la habitación. El campo de visión de la cámara se representa en color verde, mientras que la posición del láser se indica en color rojo.

Considerando los efectos asociados a la adquisición de imágenes transitorias, se incorpora el fenómeno de escorzo o foreshortening, el cual describe cómo la longitud aparente de un objeto varía en función del ángulo de observación. Para abordar este aspecto, cada objeto cargado en la escena se orienta con una inclinación específica hacia el sensor, determinada por su posición dentro del entorno simulado. Este ángulo de inclinación asegura una interacción más precisa de la luz simulada con la geometría de los objetos presentes en la escena y se calcula de la siguiente manera

$$\cos \theta = \frac{a \cdot b}{\|a\| \|b\|} \quad (13)$$

donde a es el vector normal que representa la posición del sensor y b es un vector con

las posiciones del objeto.

3.2. MODELADO DE LA PROPAGACIÓN DE LA LUZ PARA ESCENARIOS NLOS

El modelado de la propagación de la luz se fundamenta en los principios físicos del tiempo de vuelo de los fotones. El proceso de simulación comienza con el láser situado en una posición fija en el espacio, p_L . Este láser emite pulsos de luz en una dirección específica definida por un vector normalizado n_L . Estos pulsos están compuestos por fotones que viajan a la velocidad de la luz c . La luz interactúa con las superficies presentes en la escena. Cada superficie está modelada como una malla triangular, lo que permite realizar cálculos geométricos precisos. Para cada triángulo de la superficie se evalúa si el rayo de luz lo interseca. En caso de haber intersección se calcula el punto de reflexión p_R y la dirección reflejada. Las superficies provocan una dispersión uniforme de la luz en todas las direcciones a partir del punto de impacto con la superficie, generando un patrón esférico de propagación. Después de la reflexión los fotones viajan hacia el sensor. El tiempo de vuelo total de la luz, desde que es emitida por el láser, pasando por la reflexión, hasta el sensor se calcula como

$$t = \frac{d_1 + d_2}{c} \quad (14)$$

siendo d_1 la distancia entre el láser y el punto de reflexión y d_2 la distancia entre el punto de reflexión y el sensor. De esta manera, la intensidad de la luz captada por un píxel de la cámara se calcula así

$$I = \frac{P_{Laser} \cdot A \cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2}{4\pi(d_1^2 \cdot d_2^2)} \quad (15)$$

donde P_{Laser} es la intensidad del láser en mW, A corresponde al área de cada triángulo que conforma las superficies de la escena simulada y θ_1 y θ_2 son los ángulos entre la

normal de la superficie y las direcciones de incidencia y reflexión respectivamente.

Finalmente, el tiempo de vuelo se traduce a intervalos de tiempo en el que los fotones son registrados por el sensor después de haber sido emitidos por el láser. Estos intervalos o bins de tiempo son discretos y se definen así

$$bin = \left\lfloor \frac{t}{\Delta_t} \right\rfloor \quad (16)$$

donde Δ_t representa la resolución temporal del sensor expresada en segundos. Al final de la simulación se obtiene una matriz tridimensional $I(x, y, t)$ donde x y y son las coordenadas de un píxel de la cámara y t es el bin temporal.

En la Figura 11 se presentan los resultados de la simulación de una imagen transitoria para el escenario NLOS simulado. En la imagen de la izquierda se muestra un gráfico que representa la intensidad integrada en el tiempo para cada píxel del sensor. En esta visualización se puede observar el patrón de penumbra generado por la pared oclusora, evidenciado por la presencia de píxeles que capturan información y otros que permanecen oscuros, indicando la ausencia de registros en esas áreas del sensor. Por otro lado, en la gráfica de la derecha se ilustra el conteo de fotones registrado en el píxel $(0, 0)$ del sensor a lo largo de diferentes intervalos de tiempo. Para la imagen de la simulación mostrada, el sensor era de tamaño 64×64 píxeles, el tamaño del *bin* era de 3×10^{-10} segundos, el campo de visión del sensor era de 0,25 metros y la intensidad del laser era de 1000mW.

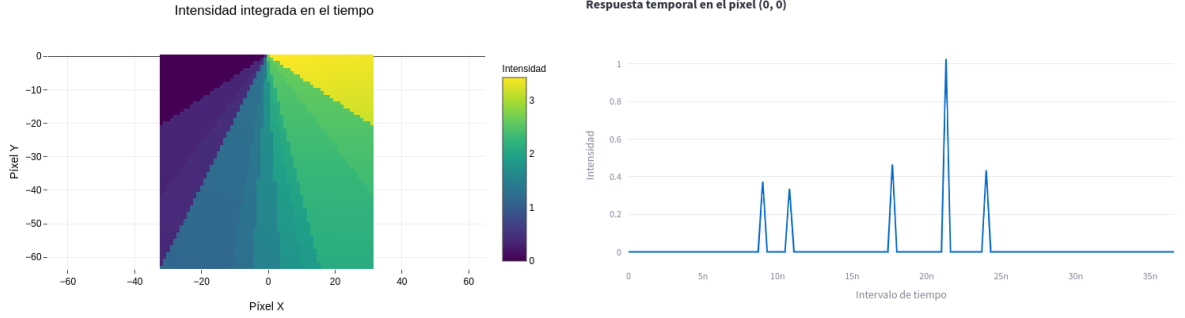


Figura 11. Resultados de un proceso de simulación de una imagen transitoria. En la gráfica de la izquierda observamos las mediciones captadas por el sensor en un gráfico de la intensidad integrada en el tiempo. En la imagen de la derecha observamos la gráfica de la respuesta temporal en un píxel específico del sensor.

3.3. SIMULACIÓN DEL RUIDO

Para recrear simulaciones más realistas, el proceso incluye la incorporación de tres tipos principales de ruido presentes en sistemas de adquisición de imágenes transitorias: el ruido del sensor, el ruido de luz ambiental y el ruido de Poisson o ruido de disparo. Cada uno de estos tipos de ruido está parametrizado dentro del proceso de simulación, lo que brinda la flexibilidad para configurar y replicar distintos escenarios experimentales.

Ruido del sensor: Se modela como un proceso Gaussiano aditivo. Este ruido representa las fluctuaciones aleatorias generadas por el sistema de detección (e.g., SPAD) debido a su sensibilidad electrónica. Este tipo de ruido se caracteriza por su distribución normal y se cuantifica utilizando la relación señal-ruido (Signal-to-Noise Ratio, SNR), un parámetro que mide la intensidad relativa de la señal frente al nivel de ruido. El valor de SNR proporcionado en decibelios (SNR_{dB}) se convierte a una escala lineal de la siguiente manera $SNR_{linear} = 10^{\frac{SNR_{dB}}{10}}$. A partir de la señal original i se calcula la potencia promedio de la señal como $P_{signal} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |i_k|^2$, donde N es el número de muestras de la señal. Luego, el poder del ruido se obtiene mediante la relación $P_{noise} = \frac{P_{signal}}{SNR_{linear}}$. Con el poder del ruido, calculamos la desviación estándar del ruido como $\sigma_{noise} = \sqrt{P_{noise}}$. Finalmente, se genera el ruido Gaussiano aditivo a partir de esta

desviación estándar como $\hat{n} \sim \mathcal{N}(0, \sigma_{noise}^2)$ y se agrega a las mediciones originales de manera aditiva $\hat{i}_k = i_k + |\hat{n}_k|$. A medida que el valor configurado de SNR disminuye, el nivel del ruido presente en las mediciones originales se incrementa.

Ruido de fondo o ruido ambiente: La luz ambiente que incide sobre el sensor se modela como una contribución uniforme a lo largo del tiempo, controlada mediante la relación señal-fondo (Signal-to-Background Ratio, SBR). Este parámetro cuantifica la proporción entre el nivel promedio de la señal y el nivel promedio del fondo, permitiendo ajustar el impacto del ruido de fondo en la simulación. Para calcular el nivel del ruido de fondo, primero se obtiene la suma total de las mediciones originales i , en la dimensión temporal, definida como i_t . A partir de un valor de SBR, se determina el número total de fotones de fondo necesario para mantener la proporción definida $i_b = \frac{i_t}{SBR}$. Finalmente, la contribución uniforme del ruido de fondo por cada bin temporal se calcula como $\tilde{n} = \frac{i_b}{N_b}$ donde N_b representa el número total de bins temporales. Este valor uniforme se añade a las mediciones originales, resultando en $\tilde{i} = i + \tilde{n}$.⁶⁰

Ruido de Poisson o ruido de disparo: Se utiliza para modelar la variabilidad estadística inherente a la detección de la luz en sistemas ópticos. Este tipo de ruido surge debido a la naturaleza discreta de la detección de fotones y refleja fluctuaciones en la cantidad de fotones detectados en un intervalo de tiempo. Para incorporar el ruido de Poisson a las mediciones originales, se comienza escalando la señal con un factor de escala $i_{scaled} = i \cdot K$. Esto asegura que los valores sean lo suficientemente grandes para garantizar una aplicación precisa de la distribución de Poisson, debido a que esta añade mayor variabilidad en los píxeles con valores de intensidad mas bajos. Posteriormente, se simula el número de fotones detectados en cada bin temporal utilizando la distribución de Poisson, cuya intensidad media corresponde a los datos

⁶⁰ Felipe Gutierrez-Barragan et al. “Compressive Single-Photon 3D Cameras”. En: *2022 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2022, págs. 17833-17843. DOI: 10.1109/CVPR52688.2022.01733.

escalados $n_p \sim Poisson(\lambda = i_{scaled})$, donde λ representa el valor promedio de la señal escalada en cada bin de tiempo. Finalmente, los datos con el ruido se reescalan para devolverlos al rango original $\bar{i} = \frac{n_p}{K}$.⁶¹

En la Figura 12 se presenta un ejemplo de diversos procesos de simulación con la incorporación de ruido. En cada caso, se ajustan los parámetros de SNR, SBR y el factor de escala del ruido de Poisson, permitiendo observar el efecto de añadir diferentes niveles de ruido, desde valores bajos hasta altos.

⁶¹ Gutierrez-Barragan et al., ver n. 60.

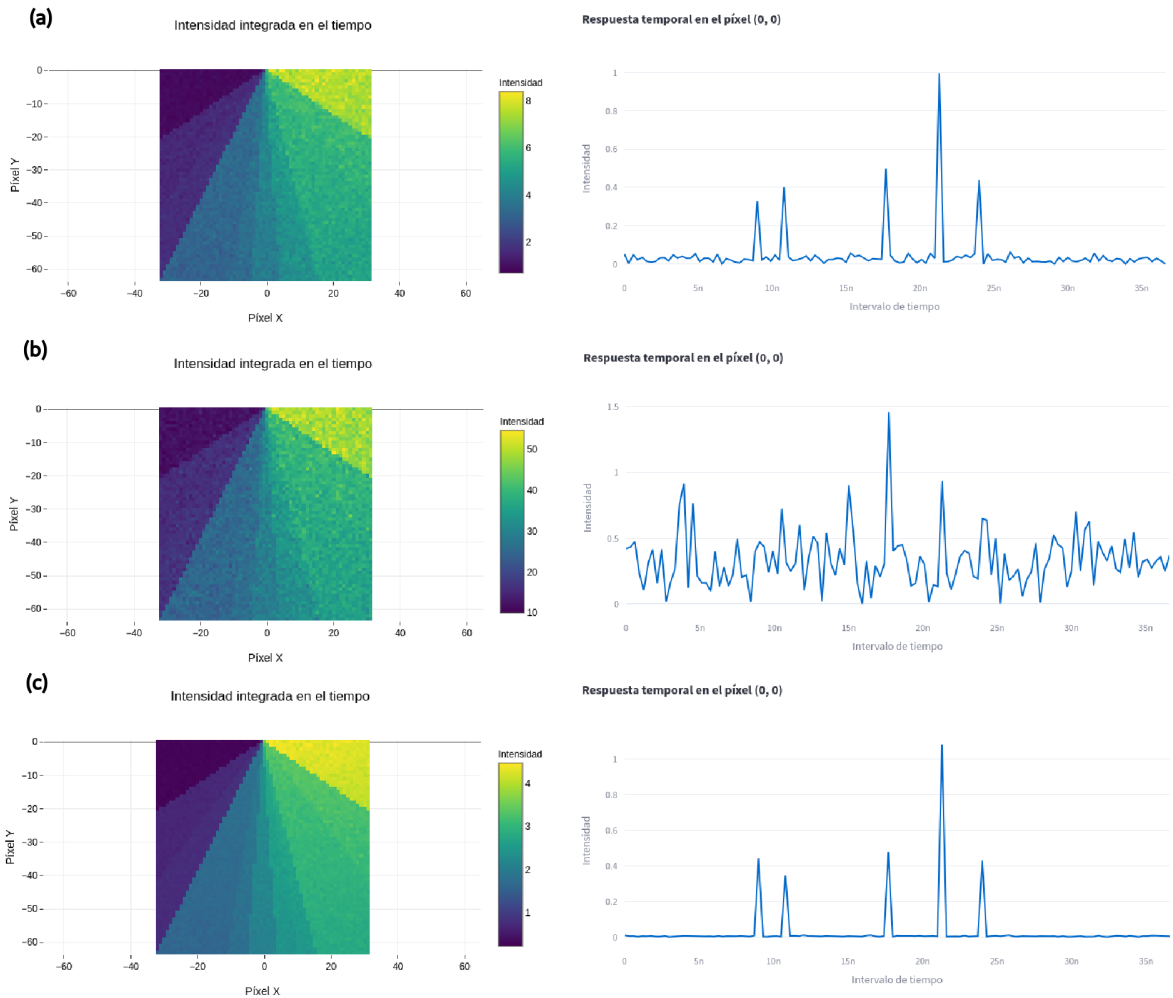


Figura 12. Simulaciones de imágenes transitorias con ruido añadido. En (a), los valores de los parámetros fueron configurados como $SNR = 20$, $SBR = 1.0$ y $Poisson-scale-factor = 100$, representando un nivel de ruido moderado. En (b), los parámetros se establecieron en $SNR = 5$, $SBR = 0.10$ y $Poisson-scale-factor = 10$, lo que generó un entorno con un alto nivel de ruido en la simulación. Finalmente, en (c), los parámetros fueron ajustados a $SNR = 30$, $SBR = 5.0$ y $Poisson-scale-factor = 1000$, configurando así un escenario con un nivel de ruido mínimo

3.4. INTERFAZ GRÁFICA DE USUARIO DEL SIMULADOR

Para hacer accesible el uso de este método de simulación de un sistema de adquisición de imágenes transitorias en escenarios NLOS se diseñó una interfaz gráfica web utilizando la

librería Streamlit⁶² de Python. Esta herramienta permite desarrollar interfaces gráficas de manera sencilla y eficiente, con una amplia variedad de componentes y la capacidad de generar aplicaciones web visualmente atractivas.

La interfaz se estructura en tres secciones principales. En la barra lateral izquierda, el usuario puede modificar los valores de los parámetros del simulador mediante diversos campos de entrada. En la parte inferior de esta sección, se encuentra un botón que permite ejecutar la simulación una vez definidos los parámetros de la simulación. Una vez iniciada la simulación, la parte central de la interfaz muestra una visualización 3D interactiva del escenario simulado, donde el usuario puede rotar, acercar y explorar las superficies de la escena. Finalmente, en la parte central de la interfaz, se presentan los resultados de la simulación, incluyendo una gráfica de intensidad integrada en el tiempo. A partir de esta gráfica, el usuario puede seleccionar distintos píxeles del sensor y visualizar la respuesta temporal correspondiente. Todos los gráficos y visualizaciones 3D de la interfaz fueron generados con la librería Plotly,⁶³ seleccionada por su simplicidad de uso y su capacidad para producir gráficos altamente interactivos y dinámicos. En la Figura 13 podemos observar una vista general de la interfaz web diseñada.

⁶² Streamlit Inc. *Streamlit: A faster way to build and share data apps*. <https://streamlit.io>. 2019.

⁶³ Plotly Technologies Inc. *Collaborative data science*. 2015. URL: <https://plot.ly>.



Simulation parameters

Room dimensions

Room width (min: 1 - max: 10)
1.5 -- +

Room length (min: 1 - max: 10)
3.0 -- +

Room height (min: 1 - max: 10)
3.0 -- +

Camera and laser parameters

Camera FOV
0.25 -- +

Camera Pixel Dimension
64 -- +

Bin Size (seconds)
3.9e-10 -- +

Position for heart.lobj

Take into account the dimensions of the room

heart.obj X Coordinate
0.00 -- +

heart.obj Y Coordinate
1.25 -- +

heart.obj Z Coordinate
0.00 -- +

heart.obj Pitch (radians)
0.00 -- +

heart.obj Yaw (radians)
1.57 -- +

heart.obj Size
2.13 -- +

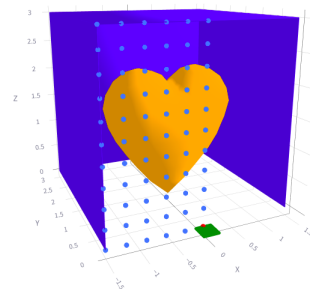
Hide All Walls

You need to press the "Run simulation" button always after any change to display the simulation.

Run simulation

Interactive Simulation for SPAD Camera in *NLOS* Scenarios 🕶️

3D Scene Visualization



Simulation Results

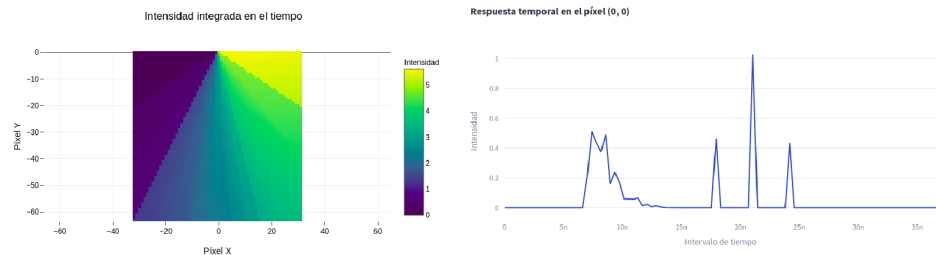


Figura 13. Vista general de la interfaz gráfica de usuario. La interfaz gráfica del simulador ha sido diseñada para simplificar y optimizar el uso del método de adquisición de imágenes transitorias sintéticas en escenarios NLOS. Proporciona una experiencia intuitiva e interactiva que permite a los usuarios configurar parámetros, visualizar resultados en 3D y analizar los resultados de las simulaciones de manera eficiente, facilitando así la comprensión y el aprovechamiento del sistema de simulación.

Finalmente, el código fuente del simulador puede ser consultado en el siguiente enlace:

<https://github.com/CristianR8/NLOS-Simulator>

4. RESULTADOS

4.1. ANÁLISIS DE VARIACIÓN DE LOS OBJETOS

Los objetos 3D empleados en la simulación fueron obtenidos de diversas bases de datos públicas, incluyendo la proporcionada por EdgeRunner de NVIDIA,⁶⁴ la cual ofrece modelos tridimensionales que pueden ser cargados como mallas triangulares en el escenario. Por defecto, todos los objetos se posicionan sobre el suelo del escenario al ser cargados. Sin embargo, es posible ajustar su posición dentro de la habitación en cualquiera de los tres ejes espaciales x , y y z . Además, los objetos inicialmente tienen un ángulo de orientación hacia el sensor, pero el usuario puede modificar su rotación mediante los parámetros de inclinación sobre el eje x (pitch), de rotación en torno al eje y (roll) y de giro alrededor del eje z (yaw).

Durante el proceso de simulación, se incluye la capacidad de ajustar el tamaño de los objetos mediante un factor de escalado que permite modificar las dimensiones del objeto en proporción a su tamaño original, aumentando o reduciendo su escala de manera uniforme, sin alterar la geometría intrínseca ni las proporciones relativas del modelo original. Finalmente, se implementó un mecanismo de validación para garantizar que el posicionamiento de los objetos dentro de la habitación sea correcto. Este proceso asegura que ningún objeto exceda las dimensiones físicas delimitadas por las paredes del escenario ni genere solapamientos con otros objetos, preservando la integridad y consistencia del entorno simulado. En la Figura 14 se presenta un entorno simulado compuesto por múltiples objetos con diferentes formas. La figura también incluye los resultados del proceso de simulación sin la incorporación de ruido adicional.

⁶⁴ Jiayang Tang et al. “EdgeRunner: Auto-regressive Auto-encoder for Artistic Mesh Generation”. En: (2024). DOI: 10.48550/arXiv.2409.18114. arXiv: 2409.18114 [cs.CV].

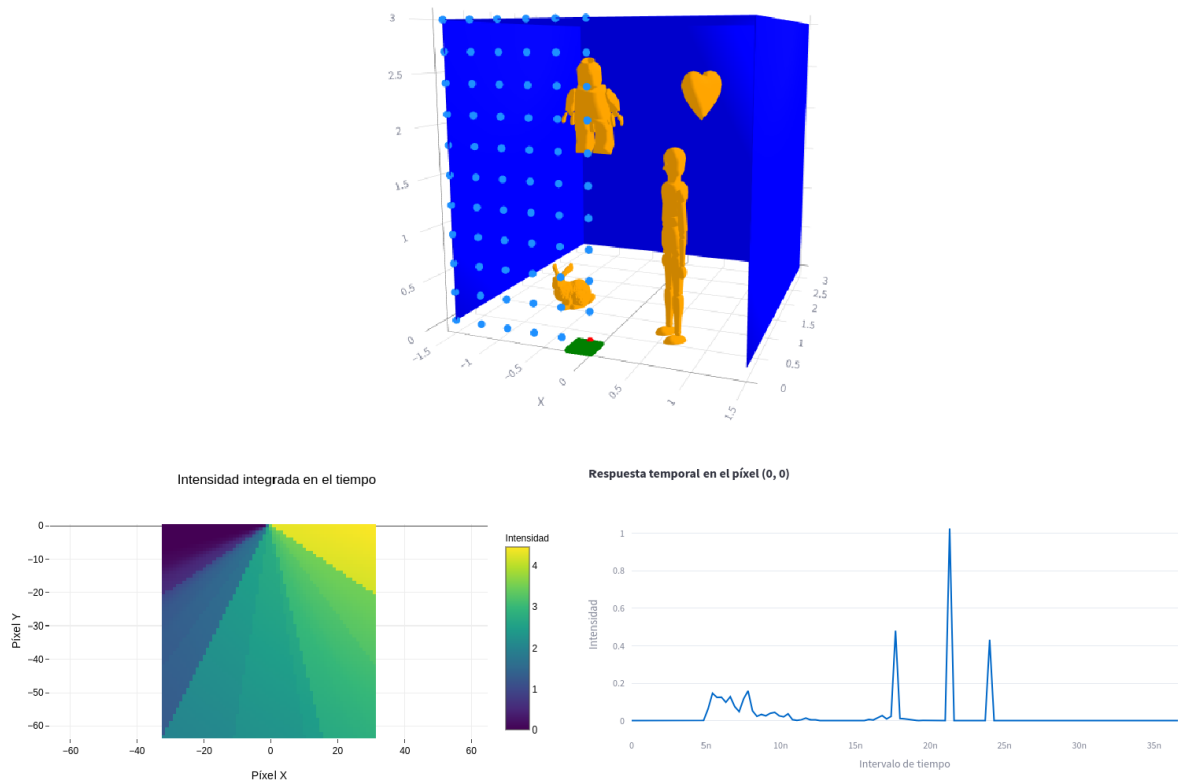


Figura 14. Entorno simulado con varios objetos distribuidos de manera arbitraria. En la parte superior, observamos el entorno 3D simulado. Cada objeto en la escena se define mediante parámetros independientes que permiten su ubicación precisa en el escenario, asegurando la ausencia de solapamientos y personalizando la configuración espacial de los mismos. En la parte de inferior, observamos los respectivos resultados de la simulación sin la incorporación de ruido añadido

Es importante aclarar que, en nuestro proceso de simulación, no se consideró el albedo de las superficies. Los colores asignados a los elementos en la simulación son meramente representativos y no influyen en la forma en que la luz interactúa con dichas superficies. Para simplificar el modelo, todas las superficies que participan en la interacción con la luz se asumieron con una reflectividad igual a 1, es decir, reflejan el 100% de la luz incidente. Además, el sistema permite al usuario cargar objetos personalizados, siempre que estos estén en formato .obj.

4.2. ANÁLISIS DE VARIACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA ESCENA

En nuestro sistema de simulación, las dimensiones de la habitación son completamente parametrizables, lo que permite generar escenarios poco comunes en el ámbito de la adquisición de imágenes sin línea de visión directa. Específicamente, el ancho (x), largo (y) y alto (z) de la habitación pueden ajustarse de manera independiente para adaptarse a diversas configuraciones experimentales. La Figura 15 presenta ejemplos de escenarios simulados con diferentes dimensiones de la habitación, junto con los resultados de las simulaciones correspondientes sin la incorporación de ruido.

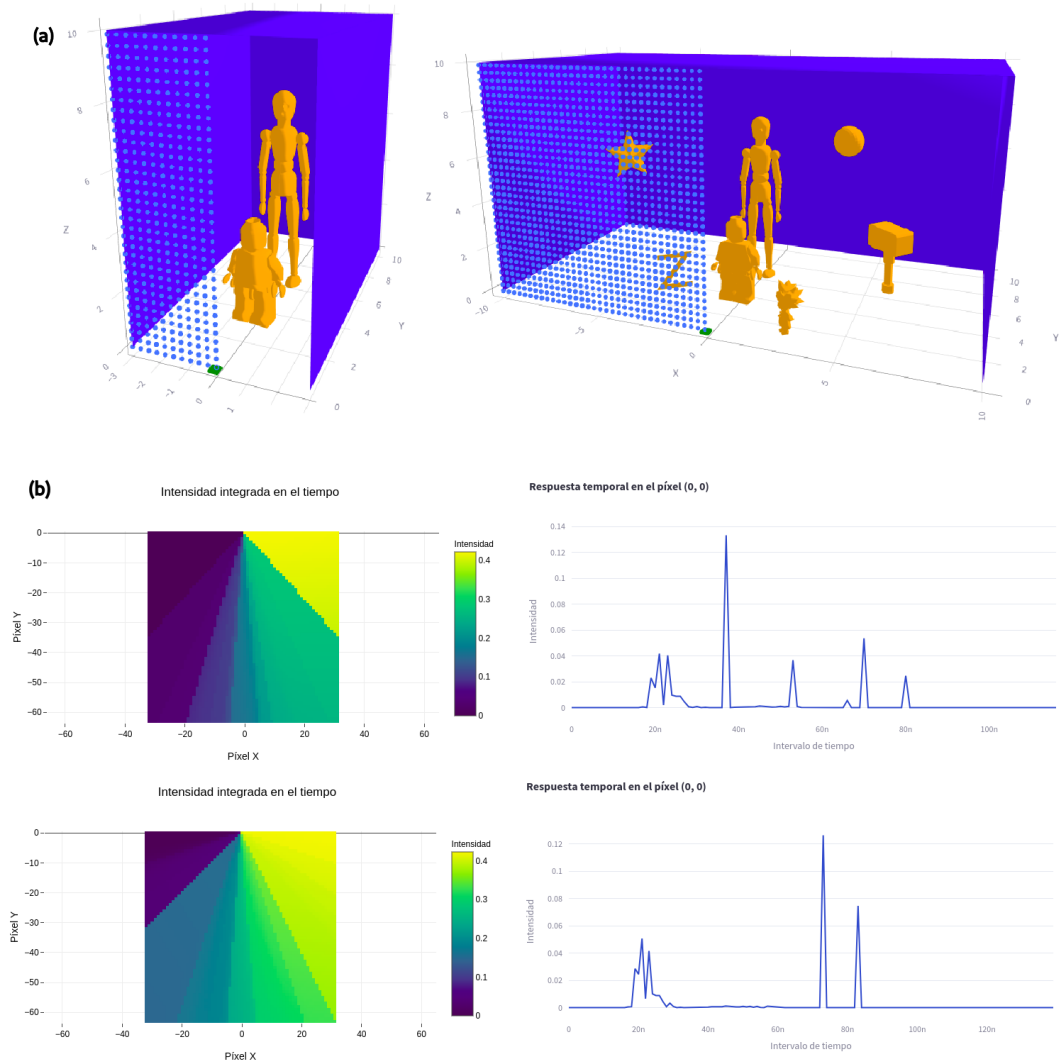


Figura 15. Diversos escenarios con variaciones en tamaño y disposición de objetos. En (a), se presentan dos escenarios con dimensiones de $6m \times 10m \times 10m$ y $20m \times 10m \times 10m$, respectivamente. Estos escenarios representan habitaciones con distribuciones poco habituales para realizar un proceso de adquisición de imágenes en sistemas NLOS. En (b), se muestran las mediciones obtenidas en cada caso; las gráficas superiores corresponden al escenario de mayor altura, mientras que las inferiores ilustran los resultados para el escenario de mayor anchura.

En nuestra simulación, implementamos una opción que permite eliminar los muros de la escena, exceptuando el muro ocluser. Esta configuración nos permitió modelar un sistema de adquisición de imágenes transitorias en el que se excluyen los rebotes

de luz con superficies distintas al objeto de interés. Al eliminar la interacción de los fotones con las paredes de la habitación, los resultados obtenidos durante el proceso de simulación mostraron diferencias significativas, ya que se eliminó una fuente importante de reflexiones que contribuyen al comportamiento óptico en entornos confinados. Esta configuración ofrece una perspectiva más específica sobre la interacción de las esquinas en el proceso de adquisición. En la Figura 16 se presentan los resultados de varias simulaciones realizadas en un escenario sin la presencia de muros. Además, se exploraron distintas configuraciones modificando las posiciones del objeto dentro de la escena, lo que permitió analizar el impacto de su ubicación en los resultados obtenidos.

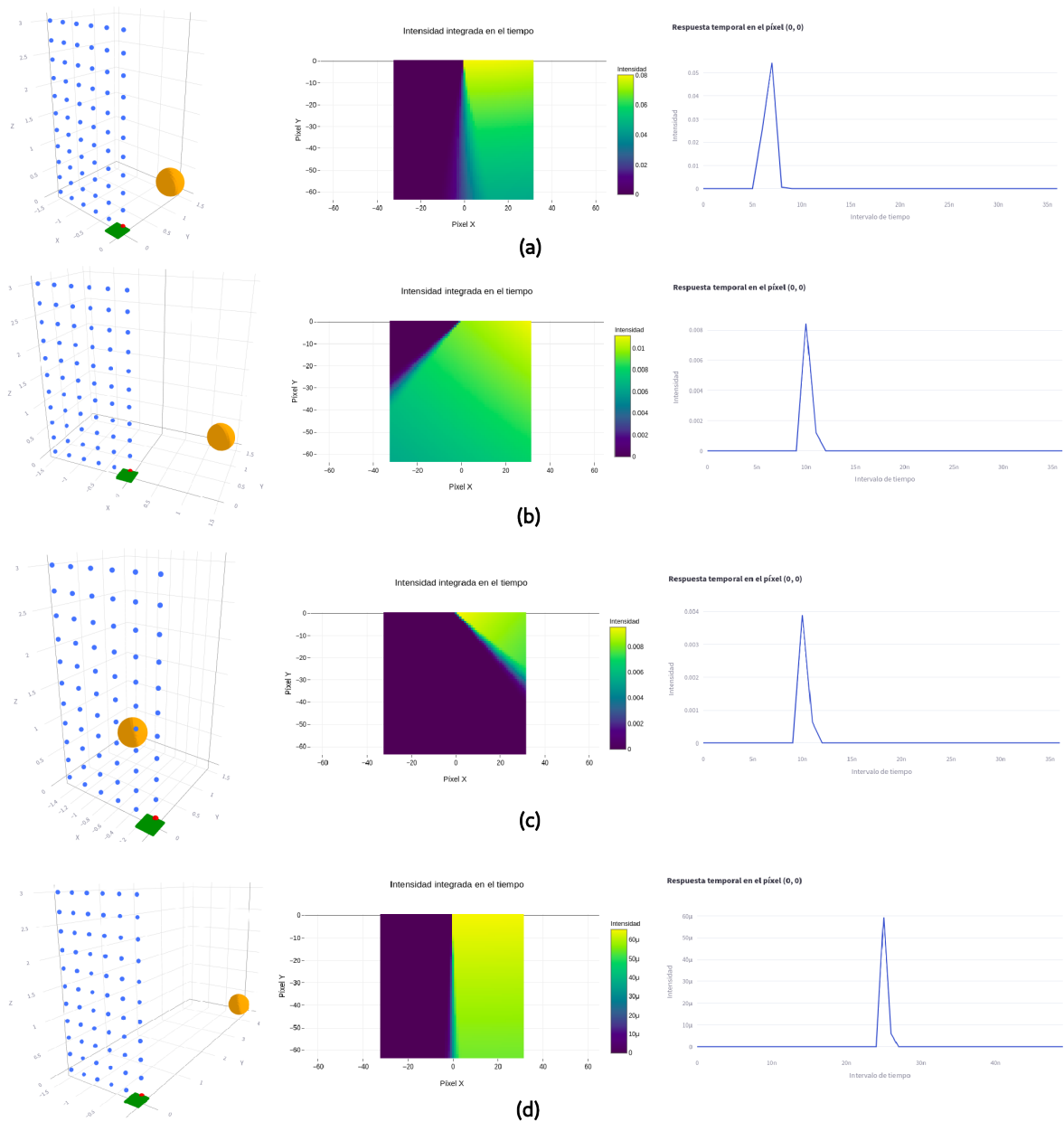


Figura 16. Simulaciones con distintos posicionamientos del objeto y ocultando los muros. En (a), (b) y (c), el objeto se posiciona en las coordenadas $[0, 1.25, 0]$, $[1.25, 1.25, 0]$ y $[-1.25, 1.25, 0]$ respectivamente, mostrando cómo la oclusión del muro genera regiones sombreadas en la gráfica de intensidad integrada en el tiempo, debido a la ausencia de fotones en ciertos píxeles del sensor. En (d), el objeto se aleja del sensor, colocándose en las coordenadas $[0, 4, 0]$. En la gráfica de la respuesta temporal correspondiente, se evidencia que el pico detectado en el píxel $(0, 0)$ ocurre en un intervalo temporal mas lejano en comparación con la respuesta temporal de (a). Este comportamiento refleja el incremento en el tiempo de vuelo debido a la mayor distancia entre el objeto y el sensor.

4.3. ANÁLISIS DE VARIACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL SENSOR Y DEL LÁSER

En el proceso de simulación, la parametrización de los dispositivos responsables de la adquisición de imágenes transitorias es fundamental para recrear escenarios realistas y ofrecer al usuario la flexibilidad de ajustar configuraciones según sus necesidades. Los parámetros ajustables del sensor y del láser son esenciales tanto para la generación de resultados precisos como para la interpretación adecuada de las mediciones obtenidas. A continuación, se detallan los parámetros utilizados en las simulaciones presentadas:

Campo de visión de la cámara. El campo de visión de la cámara es un parámetro que determina el ángulo máximo dentro del cual el sensor puede detectar fotones reflejados desde las superficies del entorno. Este parámetro es crítico para definir el alcance espacial de la simulación, ya que un FOV grande puede provocar una disminución en la resolución espacial debido a la necesidad de distribuir el mismo número de píxeles en un área más grande. Por defecto, en nuestro simulador, el FOV de la cámara puede configurarse dentro de un rango que va desde un valor mínimo de 0.10 metros hasta un máximo de 1.00 metros.

Número de píxeles de la cámara. La cantidad de píxeles representa la cantidad de elementos discretos disponibles en el sensor para muestrear el FOV. Una mayor cantidad de píxeles proporciona una resolución espacial más alta, permitiendo capturar detalles finos de la escena y mejorar la precisión en la detección de fotones. Sin embargo, este incremento en la resolución espacial requiere un mayor costo computacional, ya que se deben procesar más datos por unidad de tiempo, especialmente en simulaciones complejas. Por defecto, en nuestro simulador, la resolución de la cámara puede configurarse dentro de un rango que varía desde 16×16 píxeles como mínimo hasta un máximo de 512×512 píxeles.

Tamaño del bin temporal (s). El tamaño de bin temporal establece la resolución temporal del sistema en la medición del tiempo de vuelo de los fotones. Este parámetro

controla la granularidad con la que se registran los intervalos de tiempo entre la emisión de un fotón y su detección en el sensor. Un tamaño de bin menor proporciona una resolución temporal más precisa; sin embargo, reducir el tamaño de bin puede incrementar significativamente la complejidad y los recursos computacionales necesarios para procesar los datos. Por defecto, en la simulación, el tamaño del bin temporal puede ajustarse en un rango que varía desde un valor mínimo de 1×10^{-12} y un valor máximo de 1×10^{-8} .

Intensidad del Láser (mW). La intensidad del láser define la potencia de los pulsos de luz emitidos en cada ciclo de simulación. Una mayor intensidad aumenta la cantidad de fotones emitidos, lo que mejora la probabilidad de detección tras múltiples reflexiones en las superficies del entorno. Esto contribuye significativamente a aumentar la relación señal-ruido en las mediciones. Por defecto, en el simulador desarrollado, la intensidad del láser es un parámetro configurable que puede ajustarse dentro de un rango que varía desde un valor mínimo de $250mW$ hasta un máximo de $1000mW$.

En la Figura 17, se presentan dos simulaciones que exploran las configuraciones correspondientes a los valores mínimos y máximos de los parámetros previamente descritos, permitiendo analizar su impacto en los resultados obtenidos.

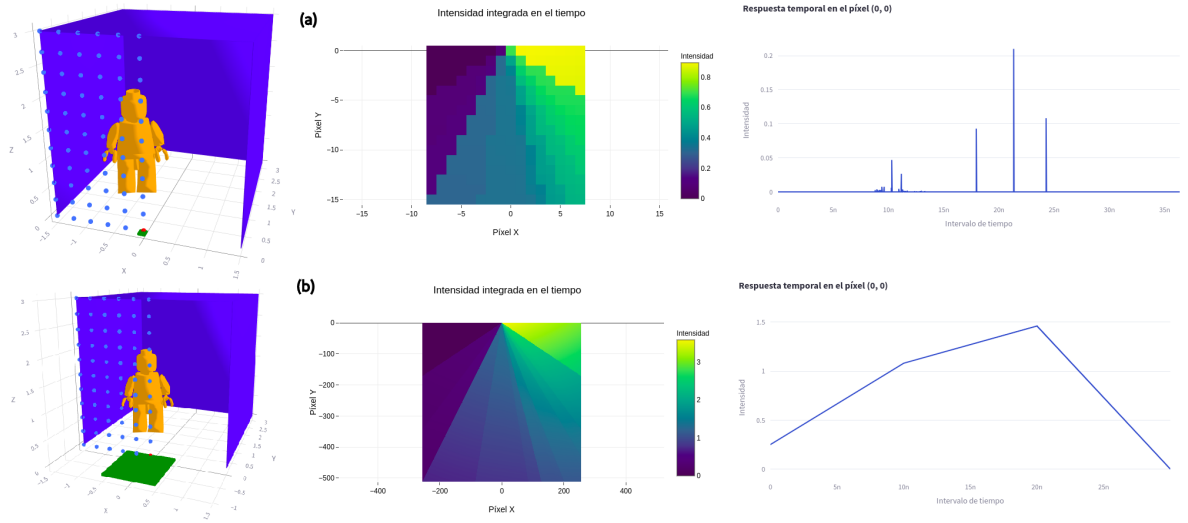


Figura 17. Simulaciones modificando los parámetros del sensor y del láser. En (a), se configuraron los siguientes valores: un campo de visión del sensor de 0.10, una resolución de cámara de 16×16 píxeles, un tamaño de bin de 1×10^{-12} segundos y una intensidad de láser de 250 mW. Por otro lado, en (b), se emplearon parámetros significativamente diferentes, incluyendo un campo de visión de 1.00, una resolución de cámara de 512×512 píxeles, un tamaño de bin de 1×10^{-8} segundos y una intensidad de láser de 1000 mW. Todas las simulaciones se llevaron a cabo en condiciones ideales, sin la presencia de ruido, para evaluar el efecto exclusivo de los parámetros seleccionados.

4.4. VALIDACIÓN DEL SIMULADOR

La validación del simulador se realizó mediante el cálculo de la distancia a la que se encontraba el objeto en la escena haciendo uso del tiempo de vuelo calculado por el sistema en un escenario específico. Este proceso permitió evaluar la precisión del simulador en la detección y conteo de fotones en diferentes tamaños de bin temporales. Durante el proceso de validación, se establecieron condiciones controladas para garantizar resultados precisos: los muros de la escena fueron eliminados, no se añadió ruido al sistema, y se utilizó un objeto tipo punto para realizar las mediciones. El procedimiento consistió en analizar la respuesta temporal de un píxel específico del sensor, que representa la intensidad de fotones detectados en función del tiempo. Se identificó el bin temporal con la máxima intensidad, definido como $bin = argmax(i_t)$, donde i_t es la distribución

temporal de la intensidad en dicho píxel. A continuación se calculó el tiempo de vuelo como $t = bin \times \Delta_t$, donde Δ_t es el tamaño del bin temporal establecido en la simulación. Con el tiempo de vuelo medido, se calculó la distancia teórica al objeto mediante la relación $d_o = \frac{t}{2} \times c$, comparándola con la distancia euclidiana real, calculada a partir de la posición del objeto y del láser en la escena con la expresión $d_e = \|\mathbf{x} - \mathbf{l}\|$, donde \mathbf{x} es la posición del objeto y \mathbf{l} la posición del láser. Se realizaron múltiples pruebas variando tanto el tamaño del bin temporal como la posición del objeto en la escena, demostrando que una reducción en el tamaño del bin temporal mejora la precisión del cálculo. Los resultados obtenidos se documentan en el Cuadro 1.

Δ_t [s]	Coordenadas del objeto	t [s]	d_e [m]	d_o [m]	Error [m]
1×10^{-8}	[1.5, 0.0, 3.0]	2,000	3,3541	2,9979	0.3562
1×10^{-10}	[1.5, 0.0, 3.0]	$2,2300 \times 10^2$	3,3541	3,3426	0.0115
1×10^{-12}	[1.5, 0.0, 3.0]	$2,2362 \times 10^4$	3,3541	3,3519	0.0022
1×10^{-8}	[1.5, 1.5, 3.0]	2,000	3,6742	2,9979	0.6763
1×10^{-10}	[1.5, 1.5, 3.0]	$2,4500 \times 10^2$	3,6742	3,6724	0.0018
1×10^{-12}	[1.5, 1.5, 3.0]	$2,4506 \times 10^4$	3,6742	3,6738	0.0004
1×10^{-8}	[1.5, 3.0, 3.0]	3,000	4,5000	4,4968	0.0032
1×10^{-10}	[1.5, 3.0, 3.0]	$3,000 \times 10^2$	4,5000	4,4968	0.0032
1×10^{-12}	[1.5, 3.0, 3.0]	$3,002 \times 10^4$	4,5000	4,4998	0.0002
1×10^{-8}	[1.5, 1.5, 0.0]	1,000	2,1213	1,4989	0.6224
1×10^{-10}	[1.5, 1.5, 0.0]	$1,410 \times 10^2$	2,1213	2,1135	0.0078
1×10^{-12}	[1.5, 1.5, 0.0]	$1,412 \times 10^4$	2,1213	2,1165	0.0048
1×10^{-8}	[0.0, 1.5, 0.0]	1,000	1,5000	1,4989	0.0011
1×10^{-10}	[0.0, 1.5, 0.0]	$1,000 \times 10^2$	1,5000	1,4989	0.0011
1×10^{-12}	[0.0, 1.5, 0.0]	$1,0007 \times 10^4$	1,5000	1,5000	0.0000
1×10^{-8}	[-1.5, 1.5, 0.0]	1,000	2,1213	1,4989	0.6224
1×10^{-10}	[-1.5, 1.5, 0.0]	$1,410 \times 10^2$	2,1213	2,1135	0.0078
1×10^{-12}	[-1.5, 1.5, 0.0]	$1,4158 \times 10^4$	2,1213	2,1222	0.0009

Cuadro 1. Resultados del proceso de validación bajo diferentes configuraciones del sistema. Estas mediciones se realizaron usando un FOV de 0,25 metros. Los resultados destacan el impacto de disminuir el tamaño del bin en la precisión de las mediciones. A medida que se reduce la resolución del bin temporal, la diferencia entre la distancia medida del objeto en la escena y la distancia Euclidiana real disminuye. En el cálculo de las distancias y del error se consideraron únicamente cuatro cifras significativas

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó un simulador de una cámara contadora de fotones diseñado para la adquisición de imágenes transitorias en escenarios sin línea de visión directa basado en un ocluser vertical para objetos generados sintéticamente. El simulador permite parametrizar tanto las dimensiones de la habitación como las características de los objetos en su interior, así como los parámetros del sensor y el láser. Esta flexibilidad posibilita la generación de imágenes transitorias en una amplia variedad de escenarios adaptados a necesidades específicas. Asimismo, se incorporó un modelo de ruido parametrizado que emula las condiciones reales de medición, lo que permite recrear entornos más realistas y personalizados para la simulación. Adicionalmente, se desarrolló una interfaz gráfica intuitiva que facilita la interacción con los diferentes parámetros del simulador, la configuración del escenario y el análisis de los resultados obtenidos. El proceso de validación del simulador demostró su capacidad para generar mediciones consistentes, lo que confirma su utilidad como una herramienta confiable para la creación de imágenes transitorias en múltiples configuraciones. Esto lo posiciona como un recurso valioso para aplicaciones como el desarrollo y prueba de algoritmos de reconstrucción basados en datos. El simulador ofrece a los investigadores interesados en la generación de imágenes sin línea de visión directa una plataforma versátil que elimina la necesidad de acceso a equipos tecnológicos costosos y, en muchos casos, inaccesibles. Además, su diseño basado en una interfaz gráfica democratiza su uso, haciéndolo accesible incluso en las etapas iniciales de proyectos de investigación, fomentando la exploración de aplicaciones innovadoras en este campo emergente.

6. TRABAJO FUTURO

La eficacia de la herramienta propuesta abre múltiples oportunidades para trabajos futuros. En primer lugar, se podría incorporar en el proceso de simulación un parámetro de reflectancia que permita que la luz incidente en las superficies varíe según las propiedades del material reflejante. Esto haría posible simular con mayor realismo la interacción de la luz en entornos con materiales diversos. Además, la implementación de trazado de rayos en escenarios más complejos contribuiría a enriquecer la fidelidad del simulador, acercándolo aún más a las condiciones reales. Asimismo, se podrían desarrollar herramientas más avanzadas para la generación de escenarios tridimensionales, empleando motores de renderizado robustos y completos como Blender o Mitsuba.⁶⁵ Este enfoque no solo ampliaría el ámbito de simulación, sino que también permitiría explorar en mayor profundidad el área de gráficos por computadora, logrando un proceso de simulación más sofisticado y versátil. Por otro lado, el sistema podría desempeñar un papel clave en la construcción de conjuntos de datos de imágenes transitorias generadas en escenarios sin línea de visión directa, específicamente en configuraciones basadas en oclusores verticales. Estos datos serían de gran utilidad para el desarrollo y perfeccionamiento de algoritmos de reconstrucción que requieran grandes volúmenes de información, como aquellos basados en redes neuronales profundas o arquitecturas de tipo transformer. Este recurso no solo beneficiará nuestra línea de investigación, sino que también impulsará avances en el campo de la adquisición de imágenes en sistemas NLOS. Finalmente, explorar métodos adicionales de validación y mejorar la interfaz de usuario contribuiría significativamente a optimizar la experiencia de quienes empleen la herramienta. Estas mejoras consolidarían la utilidad de la solución propuesta en una amplia variedad de

⁶⁵ Wenzel Jakob et al. *Mitsuba 3 renderer*. Ver. 3.1.1. <https://mitsuba-renderer.org>. 2022.

aplicaciones prácticas y contextos de investigación, reforzando su impacto en el ámbito de la simulación y la adquisición de imágenes transitorias.

BIBLIOGRAFÍA

- Aubry, Augusto, Antonio De Maio y Massimo Rosamilia. “Reconfigurable Intelligent Surfaces for N-LOS Radar Surveillance”. En: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 70 (2021). DOI: 10.1109/tvt.2021.3102315 (vid. pág. 13).
- Batarseh, Mahed et al. “Passive sensing around the corner using spatial coherence”. En: *Nature Communications* 9.1 (2018). DOI: 10.1038/s41467-018-05985-w (vid. pág. 25).
- Boger-Lombard, Jeremy y Ori Katz. “Passive optical time-of-flight for non line-of-sight localization”. En: *Nature Communications* 10.1 (2019). DOI: 10.1038/s41467-019-11279-6 (vid. pág. 25).
- Botsch, Mario et al. “Geometric modeling based on polygonal meshes Video files associated with this course are available from the citation page”. En: SIGGRAPH '07. San Diego, California: Association for Computing Machinery, 2007, 1–es (vid. págs. 33, 34, 36).
- Bronzi, Danilo et al. “SPAD Detectors and Imagers: Figures of merit for Photon-counting and Photon-timing Applications: A Review”. En: *IEEE Sensors Journal* (2015). DOI: 10.1109/JSEN.2015.2483565 (vid. pág. 19).
- Chen, Wenzheng et al. “Steady-State Non-Line-Of-Sight Imaging”. En: *IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. [En línea]. Disponible: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:53743050>. 2019, págs. 6783-6792 (vid. págs. 26, 30).

- Cusini, Iris et al. “Historical Perspectives, State of Art and Research Trends of SPAD Arrays and Their Applications (Part II: SPAD Arrays)”. En: *Frontiers in Physics* 10 (2022). DOI: 10.3389/fphy.2022.906671 (vid. pág. 17).
- Czajkowski, Robinson y John Murray-Bruce. “Ghost-Probe: NLOS Pedestrian Rushing Detection with Monocular Camera for Automated Driving”. En: *Nature Communications* 15 (2024), pág. 1162. DOI: 10.1038/s41467-024-45397-7 (vid. pág. 13).
- “Two-edge-resolved Three-dimensional Non-line-of-sight Imaging with an Ordinary Camera”. En: *Nature Communications* 15 (2024), pág. 1162. DOI: 10.1038/s41467-024-45397-7 (vid. pág. 29).
- Faccio, Daniele, Andreas Velten y Gordon Wetzstein. “Non-line-of-sight imaging”. En: *Nat Rev Phys* 2 (2020), págs. 318-327. DOI: 10.1038/s42254-020-0174-8 (vid. págs. 19, 20, 24).
- Ghosh, Partha. *Nonwatertight Mesh Reconstruction*. 2022 (vid. pág. 32).
- Grzegorzec, Marcin et al. *Time-of-Flight and Depth Imaging. Sensors, Algorithms, and Applications*. 2013. DOI: 10.1007/978-3-642-44964-2 (vid. pág. 17).
- Guan, Yanqiu et al. “Lidar with superconducting nanowire single-photon detectors: Recent advances and developments”. En: *Optics And Lasers In Engineering* 156 (2022), pág. 107102. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2022.107102 (vid. pág. 20).
- Guo, Jianwei et al. “Automatic and High-quality Surface Mesh Generation for CAD Models”. En: *Computer-Aided Design* 109 (2018), págs. 49-59. DOI: 10.1016/j.cad.2018.12.005 (vid. pág. 33).

- Gupta, Anant, Atul Ingle y Mohit Gupta. “Asynchronous Single-Photon 3D Imaging”. En: *University Of Wisconsin-Madison*. 2019. DOI: 10.1109/iccv.2019.00800 (vid. págs. 17, 18).
- Gutierrez-Barragan, Felipe et al. “Compressive Single-Photon 3D Cameras”. En: *2022 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2022, págs. 17833-17843. DOI: 10.1109/CVPR52688.2022.01733 (vid. págs. 41, 42).
- Heide, Felix et al. “Non-line-of-sight Imaging with Partial Occluders and Surface Normals”. En: *ACM Trans. Graph.* 38.3 (2019). DOI: 10.1145/3269977 (vid. págs. 13, 18).
- Inc., Plotly Technologies. *Collaborative data science*. 2015. URL: <https://plot.ly> (vid. pág. 44).
- Jakob, Wenzel et al. *Mitsuba 3 renderer*. Ver. 3.1.1. <https://mitsuba-renderer.org>. 2022 (vid. pág. 58).
- Jarabo, Adrian. “Transient Imaging”. En: *Encyclopedia of Color Science and Technology*. Ed. por Renzo Shamey. 2020, págs. 1-5. DOI: 10.1007/978-3-642-27851-8_420-1 (vid. págs. 13, 17, 21).
- Jarabo, Adrian et al. “Recent advances in transient imaging: A computer graphics and vision perspective”. En: *Visual Informatics* 1.1 (2017), págs. 65-79. DOI: 10.1016/j.visinf.2017.01.008 (vid. págs. 21-23).
- Kirmani, Ahmed et al. “Looking around the corner using transient imaging”. En: *IEEE 12th International Conference on Computer Vision (ICCV)*. 2009, págs. 159-166. DOI: 10.1109/ICCV.2009.5459253 (vid. págs. 12, 25).

- Krska, William et al. “Double Your Corners, Double Your Fun: The Doorway Camera”. En: *2022 IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP)*. 2022, págs. 1-12. DOI: 10.1109/ICCP54855.2022.9887738 (vid. pág. 32).
- Li, Yue et al. “NLOST: Non-Line-of-Sight Imaging with Transformer”. En: *2023 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2023. DOI: 10.1109/cvpr52729.2023.01279 (vid. pág. 24).
- Lin, Jingyu et al. “Frequency-Domain Transient Imaging”. En: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 39.5 (2017), págs. 937-950. DOI: 10.1109/TPAMI.2016.2560814 (vid. pág. 21).
- Lindell, David B., Gordon Wetzstein y Vladlen Koltun. “Acoustic Non-Line-Of-Sight Imaging”. En: (2019) (vid. pág. 29).
- Lindell, David B., Gordon Wetzstein y Matthew O’Toole. “Wave-based non-line-of-sight imaging using fast f-k migration”. En: *ACM Transactions on Graphics* 38.4 (2019), págs. 1-13. DOI: 10.1145/3306346.3322937 (vid. pág. 25).
- Liu, Xiaochun et al. “Non-line-of-sight imaging using phasor-field virtual wave optics”. En: *Nature* 572.7771 (2019), págs. 620-623. DOI: 10.1038/s41586-019-1461-3 (vid. pág. 25).
- Metzler, Christopher, David B. Lindell y Gordon Wetzstein. “Keyhole Imaging: Non-Line-of-Sight Imaging and Tracking of Moving Objects Along a Single Optical Path”. En: *IEEE Transactions on Computational Imaging* (2021) (vid. pág. 29).
- Mu, Fangzhou. “Learning to Reconstruct Scenes with Single-Photon Cameras”. Tesis doct. Madison, WI: Univ. Wisconsin–Madison, 2023 (vid. pág. 28).

- Mu, Fangzhou et al. “Physics to the Rescue: Deep Non-Line-of-Sight Reconstruction for High-Speed Imaging”. En: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* (2024), págs. 1-12. DOI: 10.1109/TPAMI.2022.3203383 (vid. pág. 27).
- O’Toole, Matthew, David B. Lindell y Gordon Wetzstein. “Confocal non-line-of-sight imaging based on the light-cone transform”. En: *Nature* 555.7696 (2018), págs. 338-341. DOI: 10.1038/nature25489 (vid. págs. 12, 25).
- O’Toole, Matthew et al. “Reconstructing Transient Images from Single-Photon Sensors”. En: *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2017, págs. 2289-2297. DOI: 10.1109/CVPR.2017.246 (vid. pág. 14).
- O’Toole, Matthew et al. “Temporal frequency probing for 5D transient analysis of global light transport”. En: *ACM Transactions on Graphics* 33.4 (2014), págs. 1-11. DOI: 10.1145/2601097.2601103 (vid. pág. 22).
- Rapp, Joshua, Charles Saunders, Julián Tachella et al. “Seeing around corners with edge-resolved transient imaging”. En: *Nature Communications* 11 (2020), pág. 5929. DOI: 10.1038/s41467-020-19727-4 (vid. págs. 13, 30).
- Rapp, Joshua et al. “Advances in Single-Photon Lidar for Autonomous Vehicles: Working Principles, Challenges, and Recent Advances”. En: *IEEE Signal Processing Magazine* 37.4 (2020), págs. 62-71. DOI: 10.1109/MSP.2020.2983772 (vid. págs. 19, 20).
- Raskar, Ramesh, Amit Agrawal y Jack Tumblin. “Coded exposure photography: Motion deblurring using fluttered shutter”. En: *ACM Transactions on Graphics* 25.3 (2006), págs. 795-804. DOI: 10.1145/1141911.1141961 (vid. pág. 12).
- Royo, Diego et al. “Non-line-of-sight transient rendering”. En: *Computers & Graphics* 107 (2022), págs. 84-92. DOI: 10.1016/j.cag.2022.07.003 (vid. pág. 20).

- Saunders, Christopher et al. “Edge-resolved transient imaging: Performance analyses, optimizations, and simulations”. En: *IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*. 2021, págs. 2858-2862. DOI: 10.1109/ICIP42928.2021.9506590 (vid. pág. 14).
- Seidel, Sheila et al. “Non-line-of-sight snapshots and background mapping with an active corner camera”. En: *Nature Communications* 14.1 (2023). DOI: 10.1038/s41467-023-39327-2 (vid. págs. 23, 32).
- Shen, Siyuan et al. “Non-line-of-Sight Imaging via Neural Transient Fields”. En: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 43.7 (2021), págs. 2257-2268. DOI: 10.1109/tpami.2021.3076062 (vid. pág. 23).
- Streamlit Inc. *Streamlit: A faster way to build and share data apps*. <https://streamlit.io>. 2019 (vid. pág. 44).
- Stutz, David. *A Formal Definition of Watertight Meshes*. 2021 (vid. pág. 33).
- Tang, Jiaxiang et al. “EdgeRunner: Auto-regressive Auto-encoder for Artistic Mesh Generation”. En: (2024). DOI: 10.48550/arXiv.2409.18114. arXiv: 2409.18114 [cs.CV] (vid. pág. 46).
- Velten, Andreas et al. “Recovering three-dimensional shape around a corner using ultrafast time-of-flight imaging”. En: *Nature Communications* 3 (2013), pág. 745. DOI: 10.1038/ncomms1747 (vid. pág. 12).
- Wnuczko, Marta y John M. Kennedy. “Foreshortening increases apparent angles”. En: *Attention, Perception, & Psychophysics* 83.6 (2021), págs. 2574-2582. DOI: 10.3758/s13414-021-02299-w (vid. pág. 28).

Yedidia, Adam B et al. “Using Unknown Occluders to Recover Hidden Scenes”. En: *2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2019, págs. 12223-12231. DOI: 10.1109/CVPR.2019.01251 (vid. pág. 25).