

Implementación y evaluación de algoritmos para la visualización de imágenes de campos de luz^{*1}

*Implementation and evaluation of algorithms
for the visualization of light fields images*

*Implementação e avaliação de algoritmos para a
visualização de imagens de campos de luz*

**GUSTAVO HORACIO BIZAI², ADRIÁN SALVATELLI³,
JESÚS CALDERÓN⁴, BARTOLOMÉ DROZDOWICZ⁵**

Recibo: 17.09.2018 – Aprobación: 23.03.2019

DOI: <https://doi.org/10.30554/ventanainform.39.3306.2018>

Resumen: *En el presente trabajo se determinaron las posibilidades de utilizar el modelo de campos de luz para generar nuevas representaciones de una escena 3D analizando la información espacio-angular que contiene la función plenóptica y su codificación en una matriz 4D, seleccionando parametrización de dos planos paralelos. Se implementa dicha codificación,*

Modelo para la citación de este artículo / Template for citation of this article / Modelo para a citação deste artigo: BIZAI, Gustavo Horacio; SALVATELLI, Adrián; CALDERÓN, Jesús & DROZDOWICZ, Bartolomé (2018). Implementación y evaluación de algoritmos para la visualización de imágenes de campos de luz. En: Ventana Informática No. 39 (jul-dic). Manizales (Colombia): Facultad de Ciencias e Ingeniería, Universidad de Manizales. p. 17-33. ISSN: 0123-9678. DOI: <https://doi.org/10.30554/ventanainform.39.3306.2018>

- 1 Artículo de investigación / Research article / Artigo de pesquisa
Proyecto / Project / Projeto: Sistema de Información Plenóptica como medio diagnóstico para Lámparas de Hendidura / Plenoptic Information System as diagnostic means for Slit Lamps / Sistema de Informação Plenóptica como meio de diagnóstico para Lâmpadas de Fenda.
Período / Period / Período: 04/2014 - 08/2018
Institución / Institution / Instituição: Universidad Nacional de Entre Ríos (Oro Verde, Entre Ríos, Argentina).
- 2 Magíster en Análisis y Procesamiento de Imágenes / Master in Image Analysis and Processing / Mestrado em Análise e Processamento de Imagens. Docente investigador / Teaching researcher / Professor pesquisador, Universidad Nacional de Entre Ríos (Oro Verde, Entre Ríos, Argentina). gbizai@ingenieria.uner.edu.ar, gbizai@gmail.com.
- 3 Magíster en Informática Aplicada a la Ingeniería / Master in Computer Science Applied to Engineering / Mestrado em Ciência da Computação Aplicada à Engenharia. Docente investigador / Teaching researcher / Professor pesquisador, Universidad Nacional de Entre Ríos (Oro Verde, Entre Ríos, Argentina). asalvatelli@ingenieria.uner.edu.ar.
- 4 Licenciado en Astronomía, Licenciado en Física / Degree in Astronomy, Degree in Physics / Licenciatura em Astronomia, Licenciatura em Física. Docente investigador / Teaching researcher / Professor pesquisador, Universidad Nacional de Córdoba (Córdoba, Argentina). calderon@oac.uncor.edu.
- 5 Ingeniero Electricista Electrónico / Electronic Electrical Engineer / Engenheiro Eletricista Eletrônico. Docente investigador / Teaching researcher / Professor pesquisador, Universidad Nacional de Entre Ríos (Oro Verde, Entre Ríos, Argentina). bartdrozdowicz@gmail.com.

visualización multiperspectiva y reenfoque en el dominio espacial y frecuencial, basados en numerosos autores y un dispositivo experimental. Se evaluaron los algoritmos con base en tiempos de proceso, preservación de los atributos fotométricos de la escena y rangos de reenfoque. Pudo concluirse que la fotografía plenóptica es una potente herramienta para visualización 3D.

Palabras clave: *Plenóptica, campos de luz, multiperspectiva, refocalización digital, mapas de profundidad.*

Abstract: *In this work we determine the possibilities of using the light field model to generate new representations of a 3D scene by analyzing the space-angular information that contains the plenoptic function and its coding in a 4D matrix, selecting parametrization of two parallel planes. We implemented this coding, mutiperspective visualization and refocusing in the spatial and frequency domain, based on numerous authors and an experimental device. We evaluate the algorithms based on process times, preservation of the photometric attributes of the scene and refocus ranges. We conclude that the plenoptic photography is a powerful tool for 3D visualization.*

Keywords: *plenoptic, light field, multiperspective, digital refocusing, depth maps.*

Resumo: *No presente trabalho determinamos as possibilidades do uso do modelo de campo de luz para gerar novas representações de uma cena 3D, analisando a informação do espaço angular que contém a função plenóptica e sua codificação numa matriz 4D, selecionando a parametrização de dois planos paralelos. Implementamos esta codificação, visualização multiperspectiva e reorientação no domínio espacial e de frequência, com base em inúmeros autores e um dispositivo experimental. Avaliamos os algoritmos baseados em tempos de processo, preservação dos atributos fotométricos da cena e refocagem de faixas. Concluimos que a fotografia plenóptica é uma ferramenta poderosa para visualização 3D.*

Palavras-chave: *plenóptica, campos de luz, multiperspectiva, refocalização digital, mapas de profundidade.*

Introducción

La vida se desarrolla en un espacio tridimensional y el sistema visual percibe las profundidades a partir de la estereopsis⁶. Sin embargo, la visión estereoscópica puede darse mediante *«el empleo de algunos mecanismos o procedimientos que involucran el uso de instrumentos o equipos, como los sistemas de visión paralela, visión cruzada, anáglifos, polarización, obturación, cascos de realidad virtual y monitor lenticular»* (Cárdenas, Morales & Ussa, 2015, 202), cuyos fundamentos describe Wheatstone (1838, 375-393) quien construye el primer estereoscopio, antes del descubrimiento de la fotografía⁷.

La extracción de información tridimensional de una imagen bidimensional consiste en la recuperación de los descriptores dimensionales espaciales perdidos por el mapeo de la escena 3D al plano de la imagen. Para obtener una representación tridimensional, según Tumu et al. (2012, 182), existen numerosos métodos basados en diferentes técnicas, que podrían clasificarse como reconstrucción o visualización 3D a partir de múltiples imágenes o a partir de una única imagen. La estereoscopia⁸ es la técnica más difundida y estudiada para la visualización tridimensional y cálculo de profundidades a partir de dos imágenes desplazadas.

Tumu et al. (2012, 182) aseguran que con una única imagen es necesario recurrir a texturas, formas y tamaños, oclusiones, puntos de fuga, etc., mediante los cuales pueden inferirse profundidades. También puede aprovecharse la natural visión binocular, como lo plantea Ives en 1903, según Llavador (2017, 2), en su patente de *«un estereograma capaz de producir, cuando era visto desde el punto de vista adecuado, una única imagen con sensación de profundidad sin necesidad de utilizar ningún dispositivo óptico»*.

6 «La visión estereoscópica es un proceso inherente a los seres humanos, consistente en obtener una vista tridimensional de objetos percibidos mediante visión binocular. El cerebro humano interpreta la realidad a partir de las imágenes que le proporcionan los dos ojos, las cuales presentan diferencias entre sí, ocasionadas por su separación; la disparidad o paralaje entre dichas imágenes es utilizada por el cerebro para percibir la profundidad» (Cárdenas, Morales & Ussa, 2015, 202). De acuerdo con Navarro (2014, 1-2), si se tuviera un solo ojo, por paralaje también es posible dicha percepción a lo que se suman otras pistas para inferir distancias tales como oclusiones, sombras, variaciones de luminancia y textura.

7 Es de aclarar que «La fotografía convencional reduce la información tridimensional a dos dimensiones, superponiendo la información de la dimensión “profundidad” en un plano (el plano focal de la cámara), con la consiguiente pérdida de dicha información 3D. La cámara convencional no registra todas las direcciones de la luz reflejada por la escena, sino la suma total de los rayos que alcanzan cada fotosito del sensor CMOS o CCD. Surge entonces la pregunta: ¿podemos capturar imágenes del mundo sin perder la información de profundidad?» (Bizai, 2018, 9).

8 Según Crespo (2016, 15), aunque los antecedentes teóricos de la visión binocular se remontan a los tratados de Euclides y la primera adscripción concreta de la relación visión binocular con la percepción tridimensional se adjudica a Da Vinci, la estereoscopia como técnica se origina en Inglaterra, por parte de Sir Charles Wheatstone, quien en 1838 presenta sus estudios ante la Royal Society en Londres.

Otra alternativa es la holografía, introducida en 1948 por Gabor, «*un método de recuperación integral de la información relacionada con el campo de irradiación generalizada de un objeto real, es decir, es un registro de los patrones de interferencia de la luz, que permite obtener imágenes ópticas tridimensionales de distintos objetos*» (Ribeiro, et al., 2018, 36), que requiere instrumentación específica y ambientes controlados por lo que su uso no es simple. Pero existe una técnica denominada Fotografía Plenóptica que, a partir de una única captura y una única cámara permite, con posproceso, reconstruir imágenes de la escena como si fuera observada desde diferentes puntos de vista y con foco en distintas profundidades, la cual en comparación con las opciones anteriores se sitúa en un lugar de ventaja competitiva para la visualización 3D.

«En 1908 el Profesor Gabriel Lippmann (1845-1921) propuso un método basado en una matriz de lentes [19], [20], [21] y obtuvo imágenes que debían reproducirse luego anteponiendo nuevamente dicha matriz. Denominó a su técnica Fotografía Integral puesto que el resultado es la integración de todas las imágenes producidas por las pequeñas lentes en una imagen completa tridimensional. Este desarrollo presentaba inconvenientes técnicos para su implementación y quedó latente hasta el desarrollo de las computadoras y los sensores CCD. Edward Adelson y John Wang redescubren en 1992 esta técnica, a la que bautizan Fotografía Plenóptica [22]» (Bizai, 2018, 14).

En este trabajo se exploran los fundamentos de las imágenes de campos de luz capturadas con una cámara plenóptica, así como la evaluación de *performance* de diferentes algoritmos implementados, basados en diferentes autores, considerando los criterios tiempos de proceso, preservación de atributos fotométricos y resolución de reenfoque a diferentes profundidades de la escena.

1. Fundamento Teórico

1.1 La cámara plenóptica y el espacio de los rayos

Según Morales, Sossa & Rubio (2015, 57), una cámara plenóptica es un dispositivo para tomar fotografías y enfocarlas posteriormente, siendo su principal ventaja que puede adquirir la información de profundidad (o diferentes distancias focales) en un solo disparo, lo cual es imposible para una cámara convencional, aunque demandan

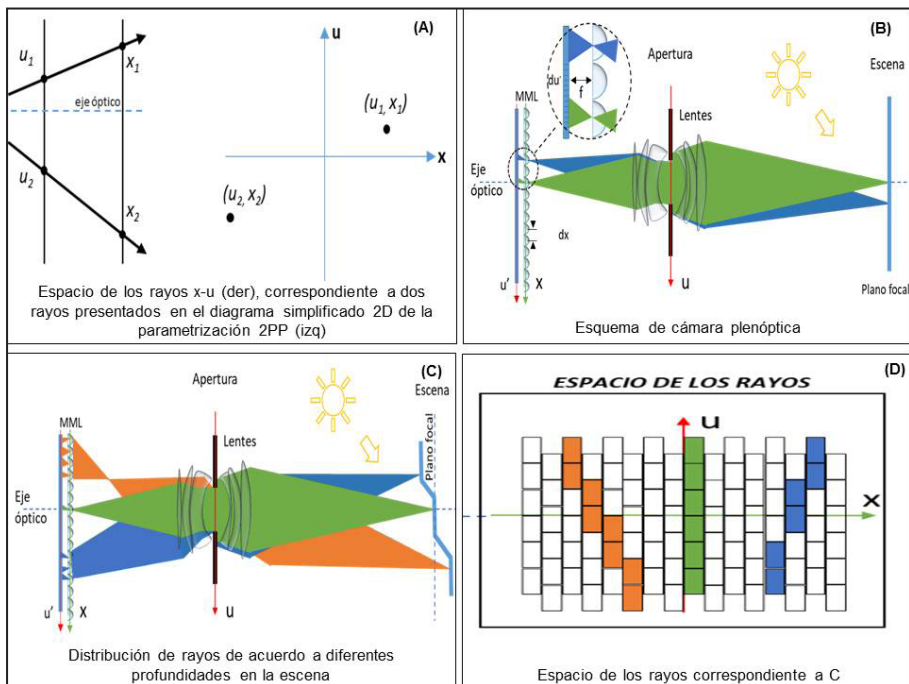
alto poder de cómputo. Su uso en el campo científico se ha extendido al procesamiento digital de imágenes (reconocimiento de rostros en multitudes, reconstrucción 3D de objetos o creación de imágenes con súper resolución). Puede entenderse, de acuerdo con Higa (2015, 7-9), como una cascada de la lente principal seguida de las microlentes, donde los rayos enfocados por la lente principal se separan por las microlentes y se capturan en el sensor, haciendo que en su plano existen rayos con la misma posición, pero ángulos diferentes, pues cada microlente transforma las coordenadas angulares en coordenadas espaciales, haciendo que esta nueva información sea capturada por el sensor. Además, señala que mientras en la cámara plenóptica 1.0, las microlentes se fijan a una distancia f del sensor y enfocadas en el infinito, en la 2.0, están enfocadas en la imagen creadas por la lente principal, logrando un aumento de hasta $27 \times$ en la resolución espacial de la imagen renderizada.

«La Cámara plenóptica permite, pues, obtener la imagen asociada a cada punto de la apertura de forma independiente a los demás puntos, y por lo tanto aplicar todas las técnicas disponibles para el sensor de frente de onda de Shack-Hartmann (Hardy J., 1978), ya que estaríamos virtualmente en la misma situación que si hubiéramos colocado un array de microlentes conjugado a la apertura, pudiendo hacer subimágenes independientes de cada una de las zonas en las que subdividamos la apertura, para luego estudiar los desplazamientos laterales relativos de los que extraeremos las pendientes locales y finalmente, realizando una integración global, obtener el frente de onda» (Rodríguez, 2015, 43).

«La cámara plenóptica captura el “campo de luz” [Light Field, LF, en inglés], definido como la radiancia de los rayos de la escena en el espacio. La función que describe la intensidad de cada rayo de luz como una función de su posición y dirección se denomina “función plenóptica”» (Bizai, 2018, 14). Para describir unívocamente a un rayo, existen varias parametrizaciones, aunque se aborda la de dos planos paralelos (2PP), donde, según Bizai (2018, 20-21), el rayo queda definido por los puntos de intersección con dos planos normales al eje óptico, separados una determinada distancia. Una simplificación permite representar a los rayos en un diagrama 2D, con el eje óptico como abscisa y los planos paralelos como los ejes x y u de cada plano (también pueden ser los ejes y y v), separados una distancia d . En el espacio de los rayos, si

dos rayos atraviesan los 2PP en diferentes puntos, se observan como un par de puntos (Figura 1A).

La cámara plenóptica antepone al sensor de imagen una matriz de microlentes (MML) que refractan los conos de luz correspondientes a los puntos de la escena, de modo que los rayos se reparten en los fotositos del sensor digital ubicado una distancia f (distancia focal de las microlentes) detrás de la matriz. En la cámara plenóptica se ubica el plano $u-v$ en la apertura y el plano $x-y$, en la MML, como se observa en la Figura 1B. Los pixeles ubicados detrás de cada microlente capturan por separado los rayos que provienen desde diferentes ángulos en el cono de luz, de manera que pueden guardar información angular que, en el caso de una cámara convencional, se integra en el sensor. El espacio de los rayos $x-u$ de la cámara plenóptica está discretizado como cuadrícula, donde cada celda corresponde a los fotositos del sensor digital y cada columna, al conjunto de los fotositos (denominado microimagen) ubicados debajo de cada microlente. Los puntos de la escena en foco se mapean como columnas verticales en el espacio de los rayos, mientras que puntos en otras profundidades se observan como rectas inclinadas (Figura 1C y 1D).



Mientras Morales, Sossa & Rubio (2015), presentan un sistema basado en control difuso que selecciona, entre un conjunto de imágenes con enfoques en diferentes planos, aquella imagen en la cual el objeto de interés presenta mayor nitidez, Rodríguez (2015, 42), utiliza la cámara plenóptica por «*la capacidad de generar digitalmente la imagen correspondiente a cada una de las zonas de la apertura, lo cual permitirá estimar directamente la pendiente del frente de onda en ese punto y por lo tanto, el frente de onda total*». Por otra parte, Tapia (2016, 92), presenta dos aplicaciones de estas cámaras (una en microscopía y otra en imágenes infrarrojas), como posibles para la captura de información de ondas microondas mediante el arreglo de antenas milimétricas/submilimétricas, o la captura de imágenes infrarrojas para usos militares mediante arreglos de microlentes infrarrojos o *scanning*.

2. Metodología

Gracias a la información angular provista por las lenticulas, la fotografía plenóptica permite visualizar la escena desde diferentes perspectivas. Pero más interesante es la posibilidad de obtener imágenes reenocadas en diferentes profundidades, algoritmos propuestos por diferentes autores, que se han implementado y comparado su *performance*. En este trabajo se usa la cámara plenóptica Lytro® F01⁹, que permite obtener un campo de luz $LF(378,379,11,11,3)$. La última dimensión guarda los tres canales de color RGB. Se utiliza el entorno de programación MatLab® para la codificación del LF, la visualización multiperspectiva y el reenfoque digital en el dominio espacial y frecuencial, basados en numerosos autores y un dispositivo experimental. Se evalúan los algoritmos con base en tiempos de proceso, preservación de los atributos fotométricos de la escena y rangos de reenfoque. El procesamiento se realiza en un computador Intel® i7 6700HQ @ 2.60GHz, 16.0GB RAM.

2.1 Codificación de la función plenóptica

El campo de luz es la distribución espacial y angular de toda la luz en el espacio, y se representa como espacio de los rayos de acuerdo con una parametrización 2PP. El cono de los rayos que pasan por la apertura se refracta en las microlentes distribuyéndose en los fotositos, para asignar el plano $u-v$ al plano del sensor de imagen. Entonces cada rayo queda definido por los puntos (x,y,u,v) y el conjunto de todos ellos ocupando el

⁹ Corresponde a «*la primera generación de esta marca. La F01 posee una matriz de 378 x 379 microlentes ordenadas en geometría hexagonal, de 11 x 11 pixeles cada una y un patrón Bayer para codificar los canales de color RGB*» (Bizai et al., 2017, 385).

espacio es la función plenóptica cuatro dimensional $LF(x,y,u,v)$. La posición (x,y) corresponde a la posición de la lenticula de la MML mientras que (u,v) representa la posición del pixel debajo de aquella lenticula. La codificación del LF crea la matriz 4D recorriendo la imagen cruda y asignando a cada pixel una lenticula y una posición dentro de ella. Se implementa una codificación basada en bucles *read_LFfor* y otra vectorizada *read_LFvect*.

2.2 Renderizado y multiperspectiva

Para formar la imagen de una cámara plenóptica tal como fue capturada en el plano óptico, se requiere calcular las integrales de proyección verticales (Figura 1D), cono de rayos correspondiente al plano focal). La integración es equivalente a promediar los valores capturados por los fotositos pertenecientes a cada microlente, acción denominada *renderizado* y mostrada en el Pseudocódigo 1:

```

1. Input: matriz LF(Nx,Ny,Nu,Nv,ColorCh) .
2. Output: matriz imagen im de Nx*Ny elementos, modelo
   de color RGB
3. Calcular:  $k=Nu*Nv$ 
4. for cada microimagen (Nx,Ny)
   Promedio=( $\Sigma$  de los k pixeles Nu,Nv) / k
   im(Nx,Ny):=Promedio
5. end

```

Cabe recordar que para obtener imágenes en diferentes perspectivas, los pixeles debajo de cada microlente recogen los rayos provenientes de diferentes direcciones. Por ello, al elegir uno de estos pixeles, se eligen rayos provenientes desde la misma dirección y por lo tanto, reconstruir la escena desde aquella perspectiva. Esta acción es equivalente a restringir la entrada de luz desde un ángulo particular, por lo que se le denomina *imagen subapertura*, que contiene (x,y) pixeles (el número de lenticulas de la MML) y en sintaxis de MatLab®, se construye utilizando la función *squeeze*.

2.3 Algoritmos de refocalización

La *refocalización* se considera como el «proceso computacional que permite la obtención de una nueva imagen, enfocada en una determinada posición dentro del rango de profundidades de la escena capturada con una cámara plenóptica. [...] es una acción a posteriori de la toma fotográfica y por lo tanto puede hacerse en cualquier momento y variando las posiciones del foco, siempre que se cuente con la imagen cruda del LF capturado por la cámara» (Bizai, 2018, 52).

2.3.1 Algoritmo Desplazamiento-Suma (DS). Se basa en el Operador de Formación Fotográfica que permite la obtención de una imagen enfocada en una posición $F'=\alpha F$, donde F es la distancia que separa el sensor de la apertura, de acuerdo con Ng (2006, 20). El Operador puede resolverse promediando las subaperturas desplazadas un valor k . El Pseudocódigo 2 presenta la implementación y la Figura 2A muestra dos imágenes con diferente foco por DS.

```

1. Input: a) matriz LF(Nx,Ny,Nu,Nv,ColorCh); b)  $\alpha=F'/F$ 
2. Output: matriz imagen im de Nx*Ny elementos, modelo de color RGB.
3. Calcular:  $k=1 - (1/\alpha)$ ;
4. Vistadesplazada = ceros(Nx,Ny);
5. for cada CanalColor
6.     for cada subapertura
7.         Transitorio=subapertura trasladada k posiciones
8.         Vistadesplazada =Vistadesplazada + Transitorio
9.     end
10.    10: end
11.    11: im(Nx,Ny):= Vistadesplazada / (Nu*Nv)

```

2.3.2 Algoritmo Transformación de la Radiancia (SR). Si las integrales de proyección en el espacio de los rayos se calculan con diferentes inclinaciones, se obtienen reenfoques en diferentes profundidades. Otra manera de arribar a los mismos resultados es *deformando* dicha radiancia mediante la aplicación de una transformación T de sesgado y renderizando. El Pseudocódigo 3 implementa esta refocalización y la Figura 2B muestra dos imágenes con diferente foco por SR.

```

1. Input: a)matriz LF(Nx,Ny,Nu,Nv,ColorCh); b)  $\Theta$ =parámetro desplazamiento de radiancia
2. Output: matriz imagen im de Nx*Ny elementos, modelo de color RGB.
3. Calcular:  $[XX,YY,vv,ww] = \text{grilla 4D donde } XX=Nx, YY=Ny, uu=Nu, vv=Nv;$ 
4.  $\text{corte\_x} = XX + \Theta * uu / Nu;$ 
5.  $\text{corte\_y} = YY + \Theta * vv / Nv;$ 
6. for cada CanalColor
7.     Transitorio = interpolación de los valores de LF a sus nuevas posiciones corte_x, corte_y
8. end
9. renderizar Transitorio

```

2.3.3 Algoritmo Corte del Espectro de Fourier (CE). Es posible calcular el espectro del campo de luz, por analogía con el Teorema del Corte de Fourier, el corte del espectro 4D devuelve un plano transformado 2D que permite, al aplicar la transformada inversa de Fourier, recuperar la imagen, dependiendo su enfoque del ángulo de corte del espectro, según Ng (2006, 89). El Pseudocódigo 4 resume el algoritmo y la Figura 2C muestra dos imágenes con diferente foco por CE.

1. **Input:** a) matriz **LF** (**Nx,Ny,Nu,Nv,ColorCh**) ; b) β =parámetro pendiente plano de corte
2. **Output:** matriz imagen **im** de $Nx \times Ny$ elementos, modelo de color RGB.
3. **Calcular:** **FFTLF = TransformadaFourier4D(LF)**
 XX, YY] = grilla 2D donde $XX=Nx$, $YY=Ny$;
 $uu = \beta * (XX - Nx/2) + Nu/2$;
 $vv = \beta * (YY - Ny/2) + Nv/2$;
4. **for** cada **CanalColor**
5. **PlanoCorte**= interpolación de los valores de **FFTLF** a sus nuevas posiciones uu, vv
6. **end**
7. **im =TransfFourierInversa2D PlanoCorte**

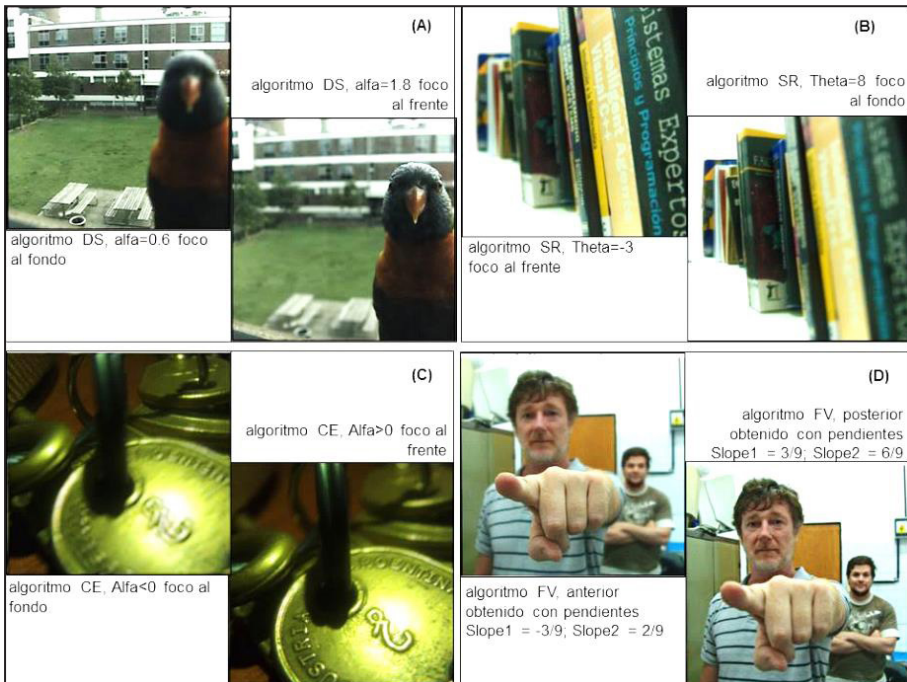


Figura 2. Algoritmos de refocalización

2.3.4 Plenoptic 2.0 por Bloques (P2.0). Cabe destacar su potencia en cuanto a tiempos de proceso y resolución de los reenfoques. «*La imagen renderizada $I(k,l)$ puede obtenerse de un sistema plenóptico enfocado (Plenoptic 2.0) por comprender el proceso de renderizado como la extracción de subbloques de las subimágenes (píxeles debajo de cada microlente) y su concatenación, para obtener la imagen enfocada a una determinada profundidad*» (Bizai, 2018, 56). La idea es, a partir de una posición x en la imagen renderizada, determinar la posición correspondiente en el sensor de imagen, cuya intensidad deberá indexar en x . Dado lo extenso del algoritmo no se transcribe el pseudocódigo.

2.3.5 Algoritmo de Foco Volumétrico (FV). Dansereau (2014, 69-70), señala que al igual que en el enfoque plano, combina la luz proveniente de diferentes direcciones para aumentar la relación señal/ruido (SNR), aunque mantiene un rango de profundidades enfocadas, desenfocando los elementos de la escena fuera del volumen focal, pudiendo simplificar el diseño del sistema al ofrecer diferentes compromisos en profundidad de campo y SNR. Así, Dansereau, Pizarro & Williams (2015, 15:2) presentan el enfoque volumétrico, un método que mejora la SNR a la vez que mantiene el enfoque nítido en un rango de profundidades seleccionado por el usuario, en lugar de hacerlo a una profundidad única como en el enfoque convencional. Dansereau (2015) generó un *Light Field Toolbox* para MatLab® de dominio público con el que, previos ajustes en las capturas, se obtienen resultados como los presentados en Figura 2D.

2.4 Visualización 3D

Se denomina pila focal (*focal stack*, en inglés) al conjunto de las imágenes enfocadas en diferentes distancias, con las cuales pueden simularse los efectos de profundidad de campo, según Jacobs, Baek & Levoy (2012, 1). El desenfoque está asociado al borronero y lo enfocado, a mayor nivel de detalle. Con la pila focal pueden extraerse las formas de una escena, es decir, construir un mapa de profundidades (*depth map*). Al respecto, Tao et al. (2013, 278-279) proponen aprovechar las dos cualidades que posee la fotografía plenóptica a partir de una única captura (reenfoque y perspectiva) y presentan un algoritmo que extrae, analiza y combina las claves de desenfoque y correspondencia, para producir mapas de profundidad de alta calidad que se pueden usar para la manipulación de profundidad de campo y la reconstrucción de la superficie. Se adaptó el algoritmo de Tao et al., a las imágenes de Lytro® F01 se obtienen resultados como el mostrado en la Figura 3.

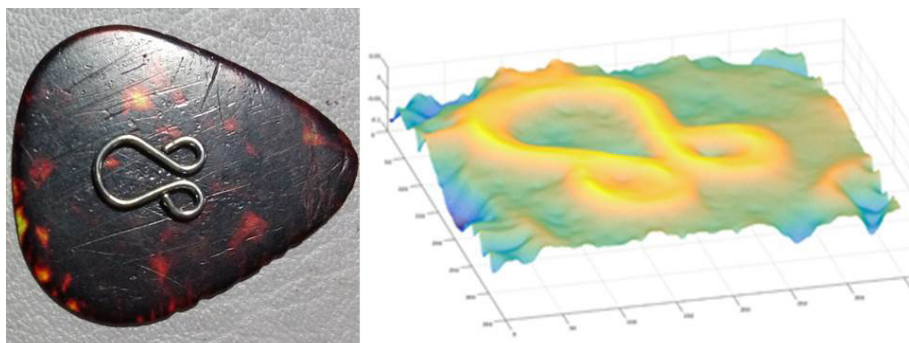


Figura 3. Malla 3D del mapa de profundidades combinado de Tao et al. (2013) para el gancho mostrado a la izquierda, sobre una púa de guitarra, como referencia. Su diámetro es de 0.8 mm.

3. Resultados

3.1 Evaluación de los algoritmos

La vectorización de la codificación del campo de luz incrementa la velocidad del proceso en un factor de aproximadamente 1000 comparada con la codificación basada en bucles, por lo que *read_LFvect* es el método seleccionado. A modo de ejemplo, para codificar una imagen cruda de 4624 x 4624 x 3 uint8, 4.414MB, $N_{xy}=289$ y $N_{uv}=16$ se requieren 0.16 segundos.

En cuanto al proceso de multiperspectiva, el tiempo de cómputo para Plenoptic 1.0 es insignificante ya que se basa en una función MatLab® vectorial optimizada. Por ejemplo, una imagen capturada con cámara Lytro® F01 de 378x379 lenticulas, cada una con 11x11 pixeles, insume 0.03s promedio (30 pruebas) para visualizar una perspectiva.

Los criterios adoptados para evaluar las implementaciones de refocalización fueron: tiempos de proceso, preservación de los atributos fotométricos de la escena y rangos de reenfoque.

3.1.1 Tiempos de proceso. En primer lugar, se promedian 30 corridas en cada caso (algoritmo con sus correspondientes parámetros) para una captura con Lytro® F01. Ninguno de los cinco algoritmos muestra dependencia del tiempo de cómputo para diferentes valores de los correspondientes parámetros (α (DS), Θ (SR), β (CE), *Slopes* (FV) y *M* (P2.0)). Por otra parte, se estudia la dependencia del tiempo de cómputo con la cantidad de pixeles por microlente. Se ensayan microimágenes

de 11x11px (Lytro® F01), 15x15 px (Lytro® Illum) y 20x20 px (imagen cruda de acceso libre)¹⁰.

Para todos los algoritmos se observa una dependencia lineal del tiempo de cómputo con la cantidad de píxeles por microlente, quedando afuera del análisis el P2.0, por no contar con imágenes comparables en esta arquitectura. Finalmente, se evalúa la influencia del tamaño de la imagen reenfocada en los tiempos de proceso. Es interesante cómo los algoritmos DS y P2.0 aumentan linealmente sus tiempos de cómputo a medida que crece el tamaño de la imagen, mientras que el resto de los algoritmos sufren un incremento no lineal con una tendencia exponencial en las mismas circunstancias (Tabla 1).

Tabla 1. Comparación de tiempos de cómputo, atributos fotométricos y enfoque en profundidad para los algoritmos ensayados

Algoritmo	Tiempo Promedio de Relocalización [s]	Relación Tiempo de Cómputo – Tamaño microlente	Relación Tiempo de Cómputo – Tamaño imagen reenfocada	Preservación del balance color	Preservación brillo y contraste	Resolución en Profundidad
Desplazamiento Suma	2.17888	lineal	lineal	sí	sí	buena
Sesgado de la Radiancia	31.66433	lineal	no lineal	sí	sí	regular
Corte del Espectro	1.87245	lineal	no lineal	no	no	regular
Foco Volumétrico	7.93300	lineal	no lineal	sí	sí	regular
Plenoptic 2.0 por Bloques	1.18228	S/D	lineal	sí	sí	S/D

3.1.2 Preservación de los atributos fotométricos. Se evalúan si las refocalizaciones afectan brillo, contraste y color. Para ello se montó un dispositivo experimental con muñecos Lego®¹¹ sobre una hoja cuadriculada para medir su separación. Se comparan las imágenes reenfocadas por los diferentes algoritmos con la imagen original renderizada (algoritmo renderizado), analizando los perfiles de imagen e histogramas de cada canal de color. El único algoritmo que alteró brillo, contraste y balance de color fue el CE.

¹⁰ La imagen, disponible en <http://graphics.stanford.edu/projects/lfmicroscope/images/fluorcrayons-rot2-shc.jpg>, corresponde a un campo de luz de una torre de 200 micrones de cera fluorescente. El objetivo es 20x/0.5 (seco), usado sin cubreobjetos.

¹¹ La razón de utilizar juguetes Lego fue aprovechar los detalles pintados sobre el plástico para observarlos cuando se hace foco sobre ellos, a la vez que pueden ser fácilmente manipulados.

3.1.3 Rangos de reenfoque. Se obtiene con Lytro® F01 un fantoma de escalera (Figura 4) para analizar cómo cambia la zona de enfoque en función de las variaciones de los parámetros de los algoritmos propuestos. Una forma rápida de verificar el cambio de plano focal y estimar su posición es analizando los bordes, ya que la imagen en foco presenta buena calidad de bordes, mientras que si está desenfocada, se observa borrosa. De los detectores de bordes ensayados, el Laplaciano del Gaussiano (LoG) permitió visualizar los cambios con mayor claridad.

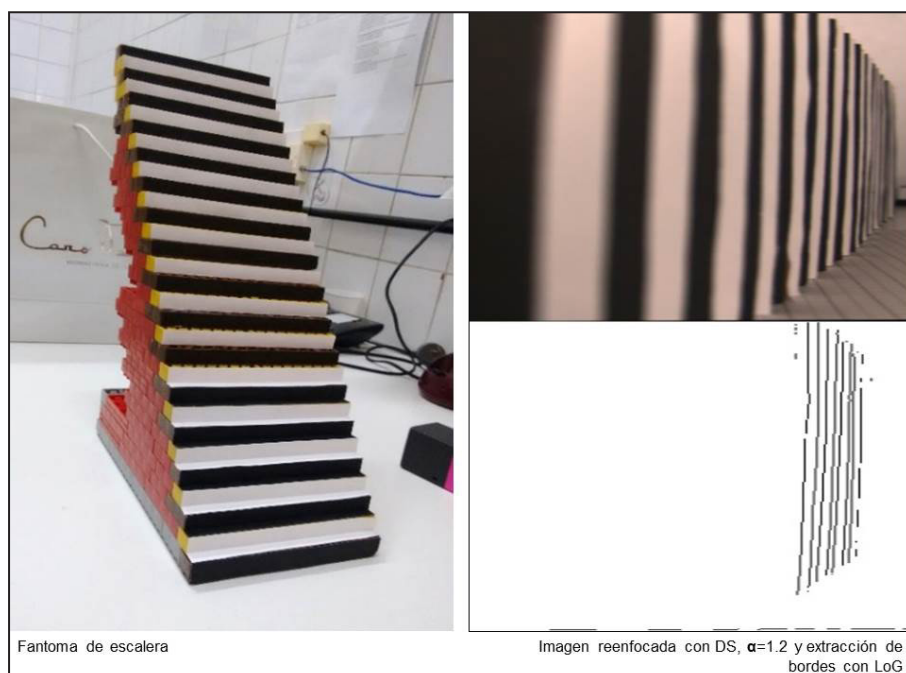


Figura 4. Fantoma e imagen reenfocada

Se obtienen resultados cualitativos de la calidad del enfoque posicionado en distintos rangos de profundidad de campo, basados en el análisis de bordes, donde los bordes en las imágenes obtenidas para evaluar las regiones en foco muestran claramente que las posiciones de dichas regiones van desplazándose a medida que cambian los parámetros de los algoritmos ensayados. En la Tabla 1 se presenta la comparación de resultados. Para los enfoques, el análisis es cualitativo y la mejor *performance* fue para DS.

4. Conclusiones

En el presente trabajo se determinan las posibilidades de utilizar el modelo de campos de luz para la generación de nuevas representaciones de una escena 3D analizando la información espacio-angular que contiene la función plenóptica y la manera de codificarla en una matriz 4D, seleccionando la parametrización de dos planos paralelos. Se implementa en MatLab® la codificación de imágenes crudas de cámaras plenópticas en matrices 4D y se obtiene reenfoque en el dominio espacial y frecuencial, basados en diferentes autores. Se desarrolla un dispositivo experimental utilizando una cámara plenóptica Lytro® F01, muñecos Lego y un fantoma de escalera para generar imágenes con objetos separados a diferentes distancias. Los criterios adoptados para evaluarlas fueron: tiempos de proceso, preservación de los atributos fotométricos de la escena y rangos de reenfoque.

El algoritmo Desplazamiento-Suma resultó ser el de mejor *performance* promedio para la arquitectura Plenoptic 1.0, con un tiempo de refocalización de 2.17 s para imágenes crudas de 16Mp, relación lineal del tiempo de cómputo con el tamaño de la imagen reenfocada, preservación de los atributos fotométricos de color, brillo y contraste de la escena y mejor comportamiento comparativo de rangos de enfoque.

Pese a las limitaciones de la cámara Lytro® F01 (la más económica del mercado con un precio de U\$S100), se pudo capturar imágenes útiles para ser procesadas con los algoritmos, de donde se infiere que para comenzar a dar los primeros pasos en el aprendizaje de esta técnica, esta cámara es apropiada. Aunque la implementación de los algoritmos se hizo con MatLab®, una migración del código a plataformas de trabajo paralelo basadas en GPU permitirá obtener resultados en tiempo cuasi real.

Referencias bibliográficas

- BIZAI, Gustavo H. (2018). Implementación y evaluación de algoritmos para la visualización de imágenes de campos de luz [en línea]. Tesis de Maestría (Magíster en Análisis y procesamiento de imágenes). Córdoba (Argentina): Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Matemática, Astronomía, Física y Computación y Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales. 123 p. <https://rdu.unc.edu.ar/bitstream/handle/11086/6341/TesisMAPI_GBizaiFINAL.pdf?sequence=1&isAllowed=y> [consulta: 18/10/2018]
- BIZAI, Gustavo; PEIRETTI, Facundo; SALVATELLI, Adrián & DROZDOWICZ, Bartolomé (2017). Evaluación de Algoritmos de Refocalización para Radiancias de Arquitectura Plenoptics 1.0 [en línea]. En: XIX Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación, WICC 2017 (27-28/04/2017). Buenos Aires (Argentina): RedUNCI – ITBA. Actas del WICC 2017. p. 384-388. ISBN: 978-987-42-5143-5 <<http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/61822/>

- Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>, <<https://libros.unlp.edu.ar/index.php/unlp/catalog/view/754/749/2511-1>> [consulta: 10/08/2018]
- CÁRDENAS QUIROGA, Elsa Adriana; MORALES MARTÍN, Luz Yolanda & USSA CAYCEDO, Andrés (2015). La estereoscopia, métodos y aplicaciones en diferentes áreas del conocimiento [en línea]. En: Revista Científica General José María Córdova, Vol. 13, No. 16 (jul-dic). Bogotá (Colombia): Escuela Militar de Cadetes "General José María Córdova". p. 201-219. ISSN: 1900-6586 <<http://www.scielo.org.co/pdf/recig/v13n16/v13n16a10.pdf>> [consulta: 10/10/2018]
- CRESPO-ARMAÍZ, Jorge L. (2016). La primera sociedad mediática: fotografía, estereoscopia y el nuevo orden visual. Morrisville (NC, EUA): Lulu Press, Inc. 98 p. ISBN: 978-329-79758-1
- DANSEREAU, Donald G.; PIZARRO, Oscar & WILLIAMS, Stefan B. (2015). Linear Volumetric Focus for Light Field Cameras [online]. In: ACM Transactions on Graphics, TOG, Vol. 34, No. 2 (feb). New York (NY, USA): ACM. p. 15:1-15:20. ISSN: 0730-0301 <<http://dx.doi.org/10.1145/2665074>>, <<https://dl.acm.org/citation.cfm?id=2665074>> [consult: 12/08/2018]
- DANSEREAU, Donald Gilbert (2014). Plenoptic signal processing for robust vision in field robotics [online]. Doctoral Thesis (Doctor of Philosophy). Sidney (Australia): The University of Sydney, School of Aerospace, Mechanical and Mechatronic Engineering, Australian Centre for Field Robotics. 192 p. <<http://www-personal.acfr.usyd.edu.au/ddan1654/Dansereau2014Plenoptic.pdf>> [consult: 10/07/2018]
- DANSEREAU, Donald Gilbert (2015). Light Field Toolbox v0.4 [online]. Natick (MA, USA): MathWorks (12/02/2015). <<http://dgd.vision/Tools/LFToolbox/>>, <<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/49683-light-field-toolbox-v0-4>> [consult: 07/08/2018].
- HIGA, Rogério Seiji (2015). Contribuições na aplicação de câmeras plenópticas em vigilância e no desenvolvimento de um padrão de abertura codificada [em línea]. Tese de Doutorado (Doutor em Engenharia Elétrica, Área de concentração: Telecomunicações e Telemática). Campinas (SP, Brasil): Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. 110 p. <http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/261222/1/Higa_RogérioSeiji_D.pdf> [consulta: 10/08/2018]
- JACOBS, David E.; BAEK, Jongmin & LEVOY, Marc (2012). Focal stack compositing for depth of field control [online]. In: Stanford Computer Graphics Laboratory Technical, Report 2012-1 (oct). Stanford (CA, USA): Stanford University. 10 p. <<https://graphics.stanford.edu/papers/focalstack/focalstack.pdf>> [consult: 12/10/2018]
- LLAVADOR ANCHETA, Anabel (2017). Captura y procesamiento de imágenes de alta resolución mediante sistemas de microscopia integral [en línea]. Tesis doctoral (Doctor en Física). Valencia (España): Universidad de Valencia. 143 p. <<https://core.ac.uk/download/pdf/84750599.pdf>> [consulta: 12/07/2018]
- MORALES-BOTELLO, Leonel; SOSSA-AZUELA, J. Humberto & RUBIO-ESPINO, Elsa (2015). Implementación y control de un conmutador de imágenes multifocales [en línea]. En: Research in Computing Science, Vol. 91 (may). México D.F. (México): Instituto Politécnico Nacional. p. 57-68. ISSN: 1870-4069 <http://www.rcs.cic.ipn.mx/2015_91/Implementacion%20y%20control%20de%20un%20conmutador%20de%20imágenes%20multifocales.pdf> [consulta: 12/09/2018]
- NAVARRO FRUCTUOSO, Héctor (2014). Captura y reproducción de imágenes 3D mediante sistemas de Imagen Integral: Diseño, implementación y aplicaciones [en línea]. Tesis doctoral (Doctor en Física). Valencia (España): Universidad de Valencia. 167 p. <<http://roderic.uv.es/handle/10550/36015>> [consulta: 10/08/2018]
- NG, Ren (2006). Digital light field photography [online]. Doctoral Dissertation (Doctor in Philosophy). Stanford (CA, USA): Stanford University. 203 p. ISBN: 978-0-542-70779-7 <<https://dl.acm.org/citation.cfm?id=1195187>> [consult: dd/mm/yyyy]
- RIBEIRO, Allan V.; GODOY, Gabriela C.; BELINI NETO, Luiz & DE SOUZA- FILHO, Moacir P. (2018). Holografía y realidad virtual en la enseñanza de nanotecnología: nuevos horizontes dirigidos a educación secundaria [en línea]. En: Momento: revista de Física, No. 56E. Bogotá (Colombia): Universidad Nacional de Colombia, p. 34-45. e-ISSN 2500-8013 <<https://revistas.unal.edu.co/index.php/momento/article/view/71645/65672>> [consulta: 12/09/2018]
- RODRÍGUEZ RAMOS, Luis Fernando (2015). Utilización de la Cámara Plenóptica como sensor de frente de onda para Óptica Adaptiva en Astrofísica [en línea]. Tesis Doctoral (Doctor en Física e Ingeniería). Santa Cruz de Tenerife (España): Universidad de La Laguna. 149 p. <<https://www.educacion.gob.es/teseo/imprimirFicheroTesis.do?idFichero=4vk87ASeTu8%3D>> [consulta: 10/08/2018].
- TAO, Michael W.; HADAP, Sunil; MALIK, Jitendra & RAMAMOORTHY, Ravi (2013). Depth from Combining Defocus and Correspondence Using Light-Field Cameras [online]. In: 2013 IEEE International Conference on Computer Vision, ICCV 2013 (01-08/12/2013). Sidney (NSW, Australia): IEEE. KELLENBERGER, Patrick (ed.). Proceedings of the ICCV 2013. Danvers (MA, USA): The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. p. 673-680. ISBN: 978-1-4799-2839-2 <<https://doi.org/10.1109/ICCV.2013.89>>, <<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&number=6751193>> [consult: 20/07/2018]

- TAPIA FARÍAS, Jorge Eduardo (2016). Cámaras Plenópticas, diseño y aplicaciones [en línea]. Tesis de grado (Magíster en Ciencias con mención en Física). Concepción (Chile): Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 94 p. <http://repositorio.conicyt.cl/bitstream/handle/10533/182502/TAPIA_JORGE_2767M.pdf?sequence=1> [consulta: 08/08/2018]
- TUMU, Sudheer; AVASARALA, Viswanath; JONNALAGADDA, Sai Tejaswi & WADEKAR, Prasad (2012). Chapter 8. Monocular-Cues Based 3-D Reconstruction. 3-D Surface Geometry and Reconstruction: A comparative review [online]. In: PATI, Umesh Chandra (ed.). 3-D Surface Geometry and Reconstruction: Developing Concepts and Applications. Hershey, PA: IGI Global. p. 181-196. e-ISBN: 9781466601147 <<http://dx.doi.org/10.4018/978-1-4666-0113-0.ch008>>, <<https://www.igi-global.com/chapter/monocular-cues-based-reconstruction/64390>> [consult: 10/08/2018]
- WHEATSTONE, Charles (1838). Contributions to the Physiology of Vision. Part the First. On Some Remarkable, and Hitherto Unobserved, Phenomena of Binocular Vision [online]. In: Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Vol. 128. London (UK): The Royal Society. p. 371-394. ISSN: 02643839 <<https://www.jstor.org/stable/pdf/108203.pdf>> [consult: 12/08/2018]