

Introducción a la holografía digital

Walter Torres, Alejandro Vélez
Óptica de Fourier y procesamiento de la información
10 de julio de 2021
Semestre 2021-1
Instituto de Física, Universidad de Antioquia

Contenido

- Introducción
- Holografía de Fresnel.
- Holografía digital de Fresnel.
- Holografía digital de Fourier.
- Condiciones para el registro digital.
- Filtrado
- Multiplexado.
- Generación de hologramas por computadora.

Introducción

La holografía es una técnica que permite registrar la amplitud y fase de un campo electromagnético a partir de la intensidad del patrón de interferencia del mismo con un segundo campo de referencia. Esta técnica es de enorme utilidad, por ser la única forma de registrar efectivamente la información compleja de una onda.

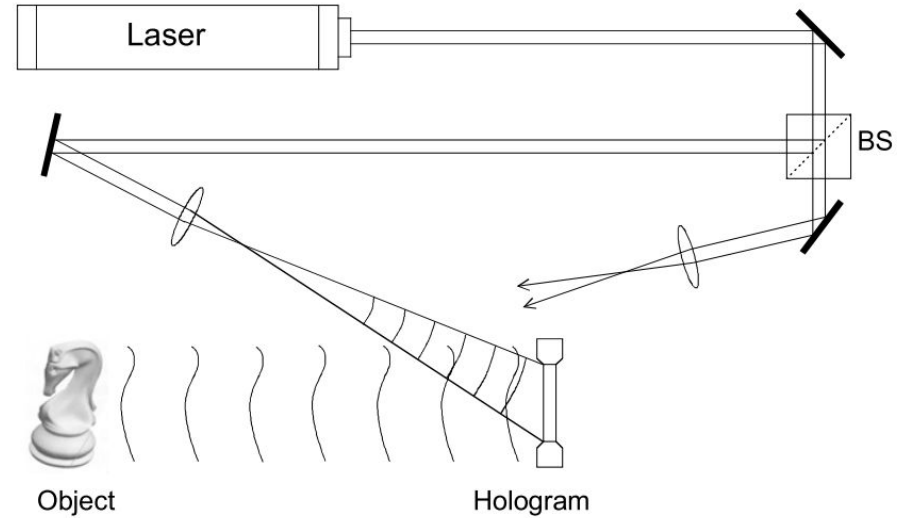
Existe un enorme abanico de técnicas holográficas, según las características del montaje empleado, el tipo de medio de registro, y la naturaleza del objeto cuyo holograma se desea registrar.

En esta clase, veremos algunos de los sistemas básicos de holografía, haciendo especial énfasis en la holografía digital.

Holografía de Fresnel.

En un sistema básico de registro holográfico de fresnel, se tiene un objeto, cuya información se desea registrar. Si este objeto es iluminado con luz coherente monocromática, la luz reflejada por el objeto (a la cual se denomina haz objeto) puede registrarse en un plano a una distancia determinada, y tendrá forma

$$O(x, y) = a_o(x, y) \exp(i\phi_o(x, y))$$



En ese mismo plano, se hace incidir un haz de referencia, descrito por

$$R(x, y) = re^{-\frac{2\pi}{\lambda}i(x \sin \phi)}$$

Holografía de Fresnel.

Si en plano donde interfieren el haz objeto y el haz de referencia se ubica un medio de registro sensible a la intensidad de la luz, como una placa fotográfica, obtendremos que la transmitancia de la placa tras la exposición es

$$h(x, y) = h_0 + \beta \tau I(x, y)$$

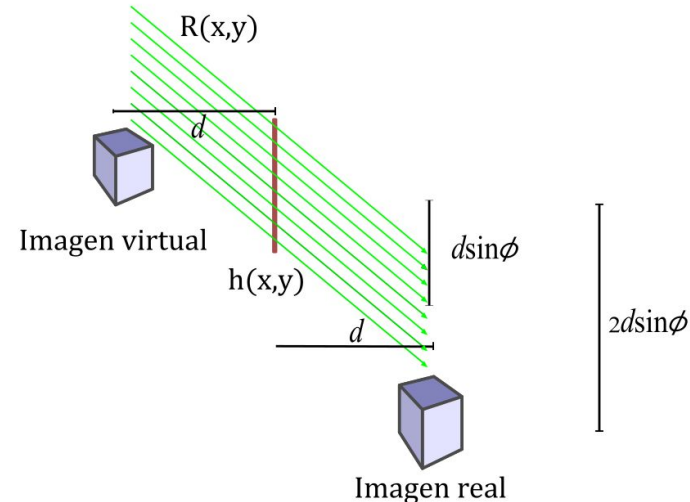
Esta transmitancia será nuestro holograma, donde β es la sensibilidad de la placa, τ es el tiempo de exposición, h_0 la transmisión de amplitud de la placa, e I es la interferencia entre los haces, dado por

$$I(x, y) = |O(x, y)|^2 + |R(x, y)|^2 + \\ O(x, y)R^*(x, y) + O^*(x, y)R(x, y)$$

Holografía de Fresnel.

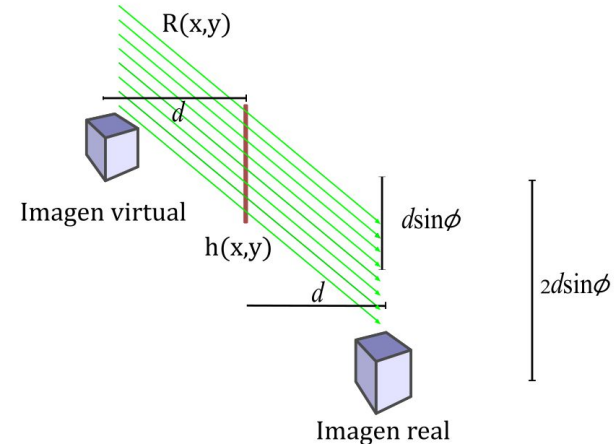
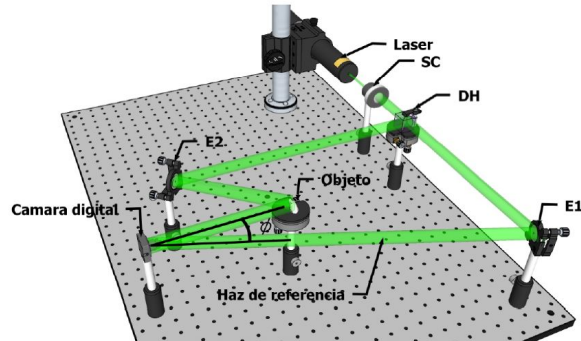
Para simplificar el tratamiento, consideremos una placa con transmitancia h_0 igual a cero, y con sensibilidad y tiempo de exposición unitaria. Así, el holograma será igual a la interferencia. Si se desea reconstruir la información del objeto a partir del holograma, se debe iluminar el mismo con la onda de referencia, obteniendo:

$$h(x, y)R(x, y) = [|O(x, y)|^2 + r^2]re^{-\frac{2\pi}{\lambda}i(x\sin\phi)} + r^2O(x, y) + r^2e^{-\frac{4\pi}{\lambda}i(x\sin\phi)}O^*(x, y)$$



Holografía digital de Fresnel

El registro y reconstrucción de hologramas con placas holográficas ha sido reemplazada por el uso de medios de registros digitales y reconstrucciones computacionales. A este tipo de holograma se le llama holografía digital.

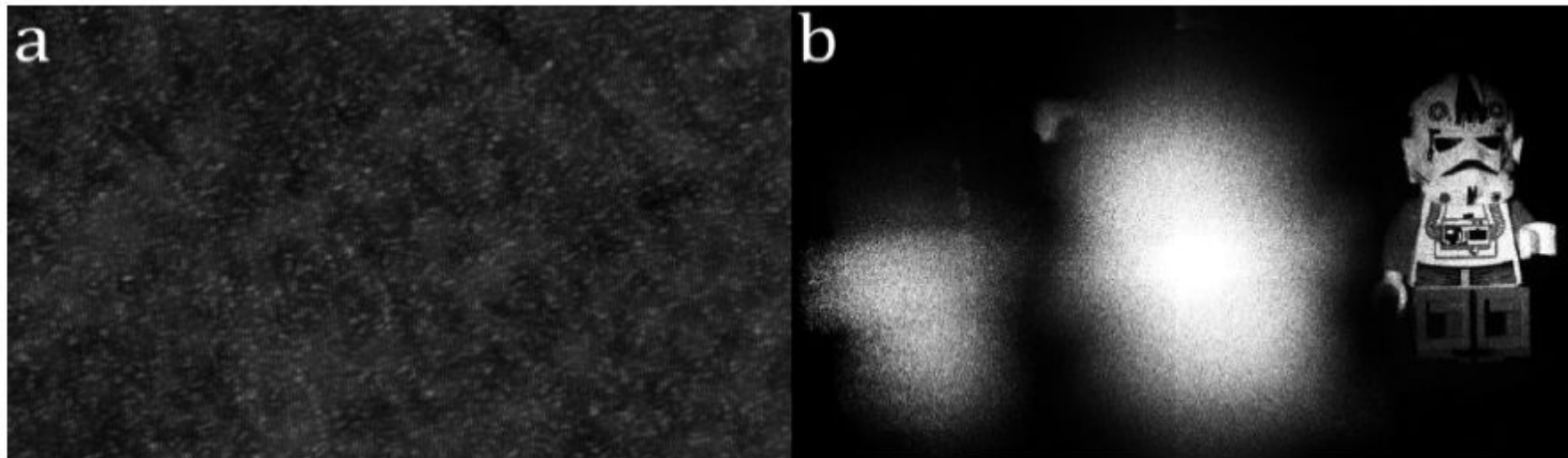


Sea

$$h(x, y)R(x, y) = [|O(x, y)|^2 + r^2]e^{-\frac{2\pi}{\lambda}i(x\sin\phi)} + r^2O(x, y) + r^2e^{-\frac{4\pi}{\lambda}i(x\sin\phi)}O^*(x, y)$$

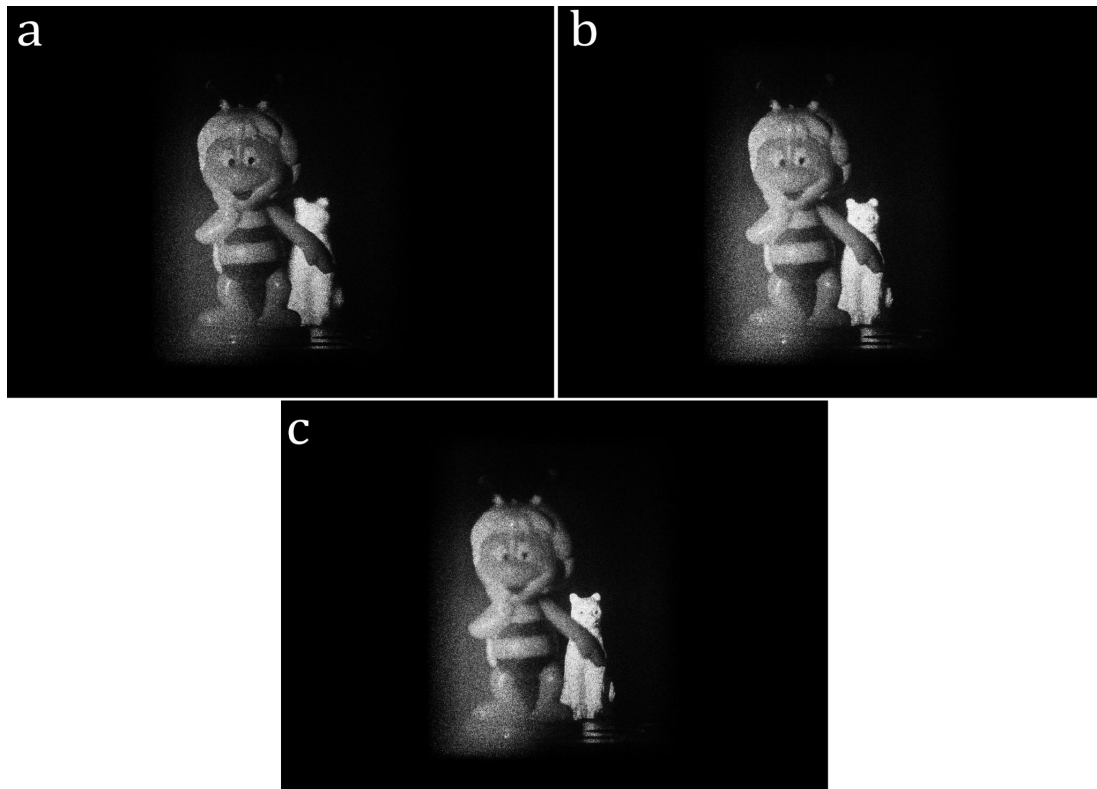
si se realiza una propagación computacional una distancia $-d$, se obtiene el campo en el plano del objeto.

Holografía digital de Fresnel



a) holograma de Fresnel fuera de eje, b) reconstrucción de a).

Holografía digital de Fresnel



Holografía digital de Fourier

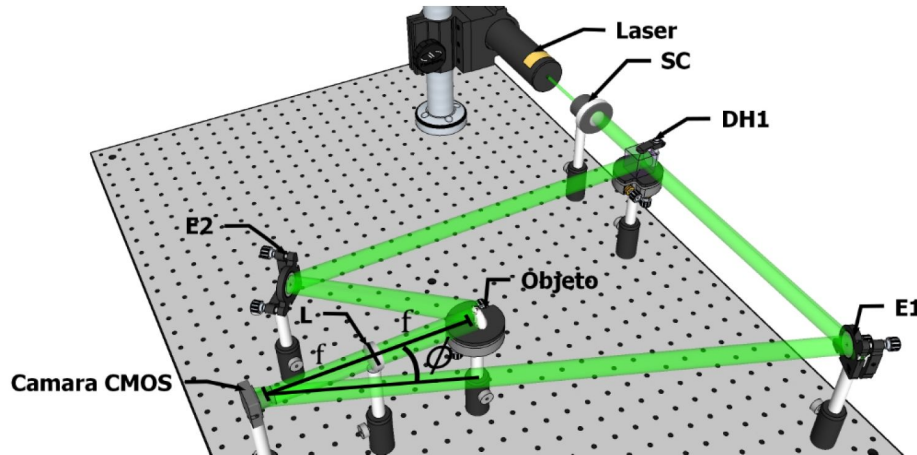
En un holograma de Fourier, se registra la interferencia entre la transformada de Fourier del campo en el plano objeto y la onda de referencia.

$$H(v, w) = |O(v, w)|^2 + |R(v, w)|^2 + \\ O(v, w)R^*(v, w) + O^*(v, w)R(v, w)$$

$$R(x, y) = re^{-\frac{2\pi}{\lambda}i(x\sin\phi)}$$

Realizando una transformada de Fourier inversa del holograma.

$$h(x, y) = o(x, y) \otimes o^*(x, y) + r^2 \\ ro(x, y) \otimes \delta\left(x - \frac{x \sin \phi}{\lambda}\right) + \\ ro^*(x, y) \otimes \delta\left(x + \frac{x \sin \phi}{\lambda}\right)$$



Holografía digital de Fourier



Al reconstruir computacionalmente un holograma de Fourier, tanto el objeto como su complejo conjugado aparecen en el mismo plano, a diferencia de en los hologramas de Fresnel.

Debido a la incapacidad de elegir el plano de reconstrucción, este tipo de hologramas es preferible para objetos 2D o con poca profundidad.

Condiciones para el registro digital.

La frecuencia espacial de las franjas de interferencia de un holograma depende del ángulo entre el haz objeto y el haz de referencia. Esta frecuencia es dada por

$$f_{\max} = \frac{2}{\lambda} \sin \frac{\theta_{\max}}{2}$$

si se usa una cámara digital con un tamaño de pixel finito, se pueden registrar frecuencias de hasta

$$f_{\max} = \frac{1}{2\Delta x} \quad \theta_{\max} = 2 \arcsin \left(\frac{\lambda}{4\Delta x} \right) \approx \frac{\lambda}{2\Delta x}$$



Condiciones para el registro digital.

Las cámaras tienen un rango dinámico limitado, lo que implica que hay una intensidad máxima que pueden registrar. El rango dinámico se mide en decibeles y es dado por

$$DR = 10 \log_{10} \left(\frac{I_{\max}}{I_{\min}} \right)$$

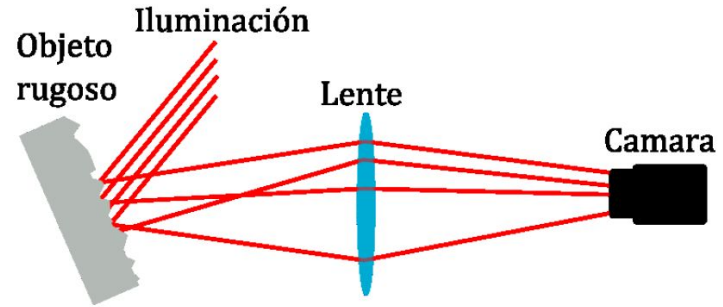
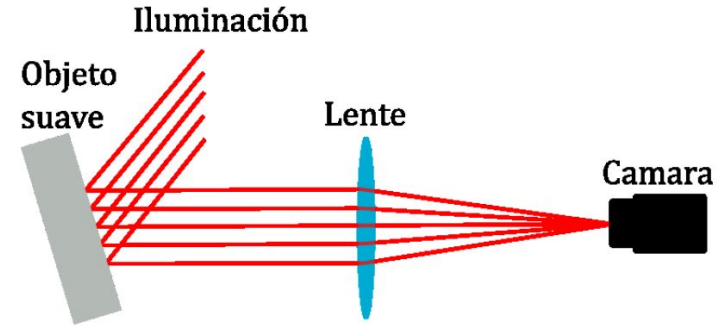
Objetos con zonas altamente uniformes son difíciles de registrar.

La resolución de una cámara digital determina la frecuencia espacial máxima resoluble en el objeto.

Así: Límite tamaño objeto -> tamaño pixel

Límite frecuencias objeto -> Resolución

Límite intensidad -> Rango dinámico



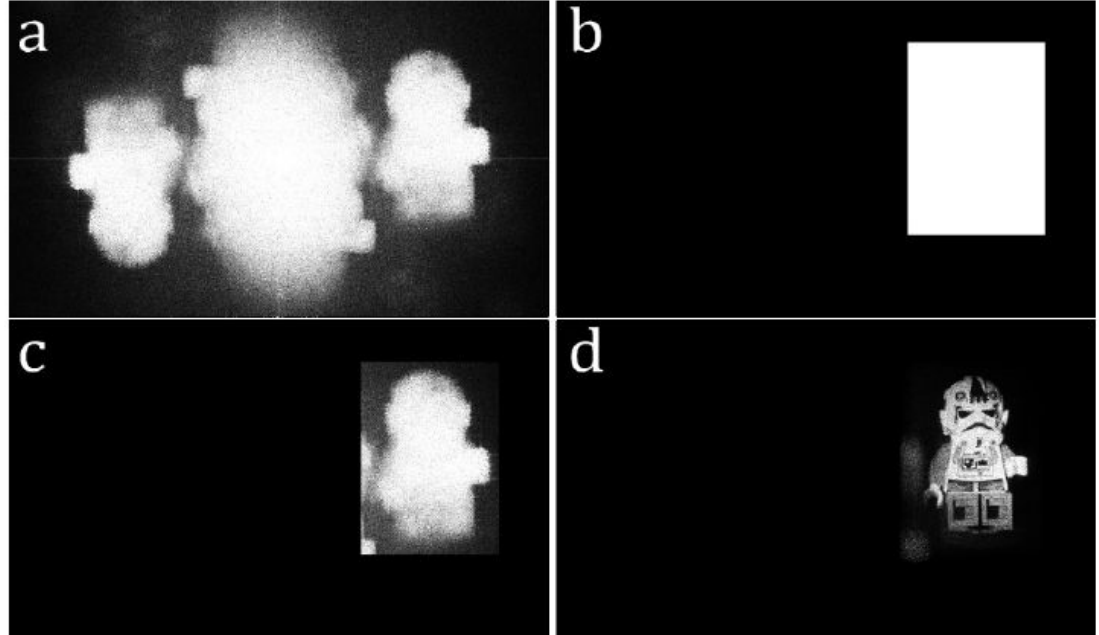
Ejemplos de cámaras

Camera	Chip type	Number of pixels	Pixel size [μm^2]	Frames per second	θ_{max} for $\lambda=633\text{nm}$
Roper Sci. MegaPlus 1.4i	FT	1317 x 1035	6.8 x 6.8	6.9	2.7°
Roper Sci. MegaPlus 16.8i	FT	4096 x 4096	9 x 9	0.47	2.0°
Roper Sci. MegaPlus ES1.0	IT	1008 x 1018	9 x 9	30	2.0°
Roper Sci. MegaPlus 4.0	IT	2048 x 2048	7.4 x 7.4	30	2.45°
Hamamatsu C8484-01	PSI	1344 x 1024	6.45 x 6.45	8.3	2.81°
Duncan DT1100	PS	1392 x 1040	4.65 x 4.65	12	3.9°

Filtrado

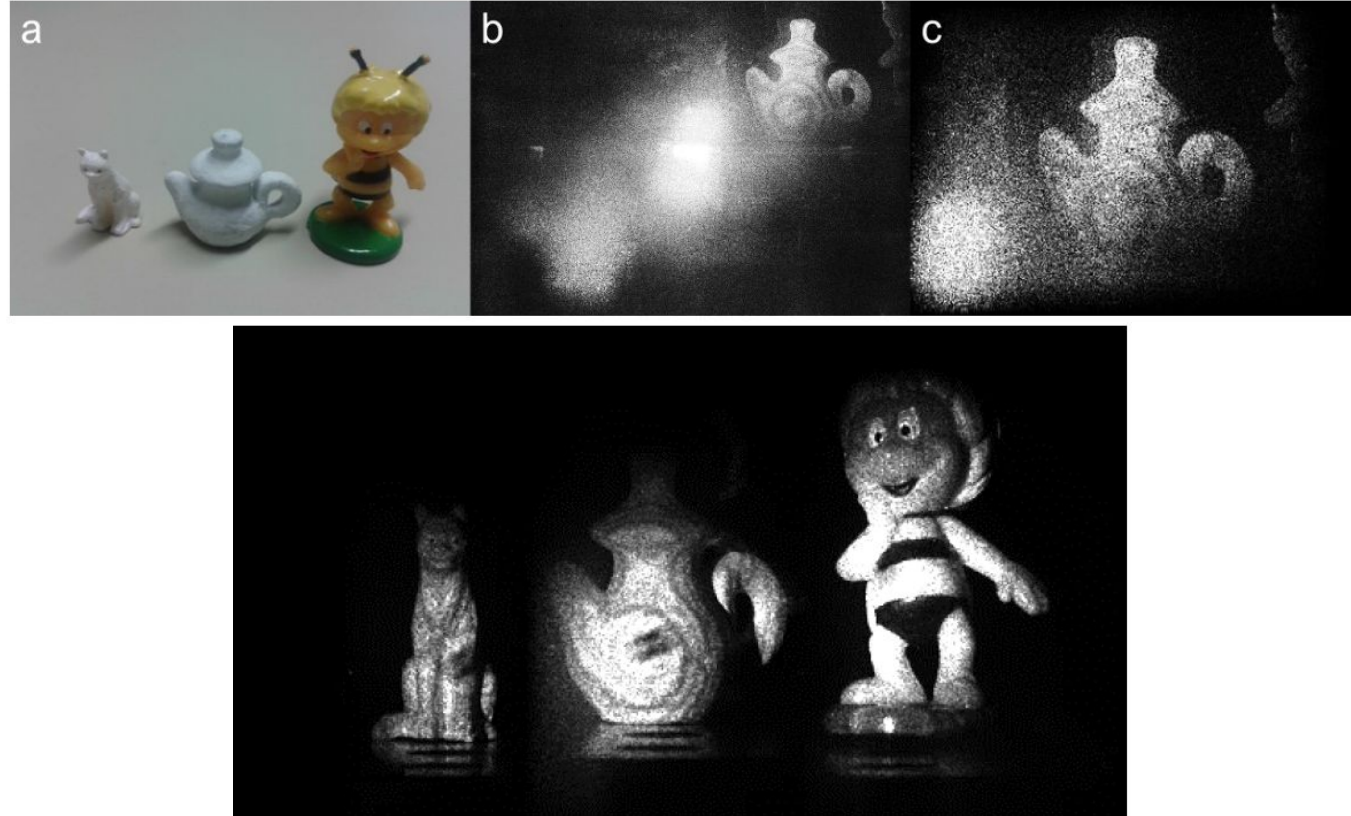
Se puede eliminar los términos no deseados de la reconstrucción por medio de un filtro paso banda.

Holograma->TF->multiplicar por filtro-> holograma filtrado-> reconstrucción sin términos no deseados.



Multiplexado

Sumando hologramas filtrados de diferentes objetos, se puede obtener un holograma que reproduce una escena más grande de lo que se puede registrar.



Generación de hologramas por computadora.

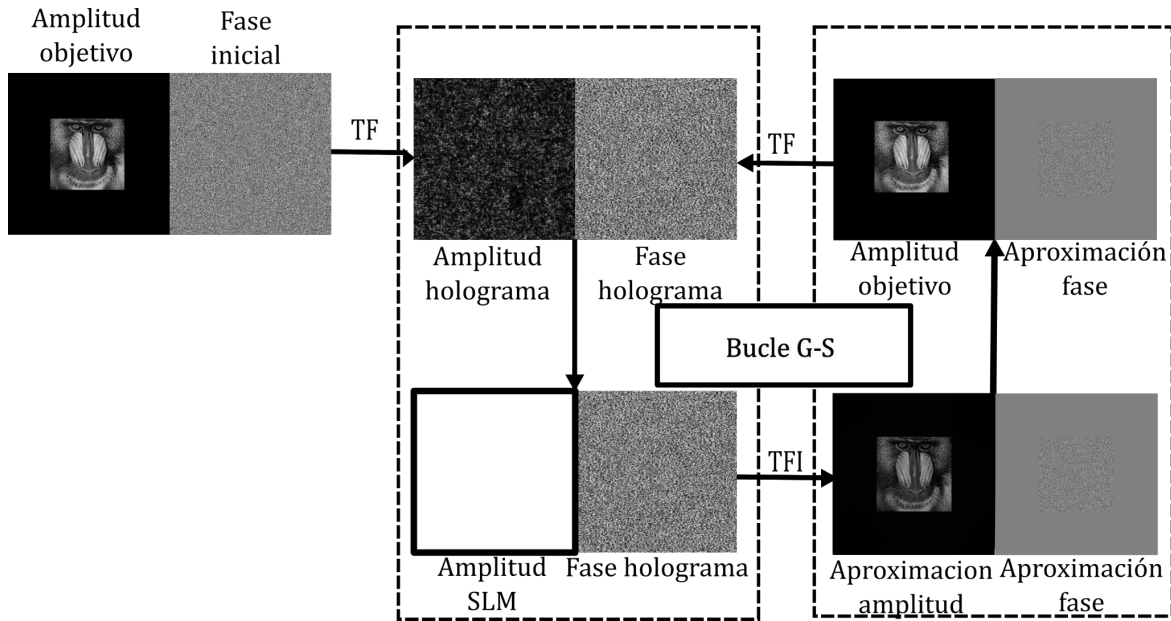
Consiste en obtener hologramas de objetos digitales. Existen diversos métodos dependiendo del tipo:

Hologramas complejos: es el campo del objeto propagado o su FT.

Hologramas de amplitud: producto de simular el registro óptico.

Hologramas de fase: requiere algoritmos especiales para codificar información compleja en una función de fase.

Algoritmo de Gerchberg-Saxton



El método más común para obtener hologramas de fase. Requiere varias iteraciones, pero es de gran utilidad para sistemas de proyección holográfica.