

Hologramas de Transmisión de vista completa 360° *Full-View*

David Jiménez Barrero
(Dated: 19 de mayo de 2012)

En este proyecto se analizan diferentes aspectos de la técnica *Full-View* [Hariharan, 2002], entre los cuales se estudia la respuesta de la película usada a diferentes longitudes de onda, diferentes tiempos de exposición, y diversos factores externos con el objetivo de obtener el mejor holograma y discutir las ventajas y desventajas de esta técnica frente a las demás.

I. INTRODUCCIÓN

Los hologramas de transmisión tomados con técnicas tradicionales producen una imagen virtual en la que el rango en el que se puede ver se encuentra en un ángulo muy limitado. Por medio del uso de la técnica *Full-View* [Hariharan, 2002] se cambia el montaje de la toma para permitir un mayor ángulo de observación que la forma tradicional. Por medio de esta técnica se permite un registro holográfico del objeto de 360°.

II. MARCO TEÓRICO

A. Modelo Matemático del Holograma de Transmisión

Los hologramas se producen gracias al patrón de interferencia generado por una fuente de luz de referencia y la luz proveniente del objeto. El esquema se puede apreciar simplificado en la Figura 1. Es importante mencionar que la luz utilizada debe ser coherente y con igual fase (de aquí la importancia del uso de un láser para el experimento) y la usada para iluminar al objeto debe ser la misma de la onda de referencia

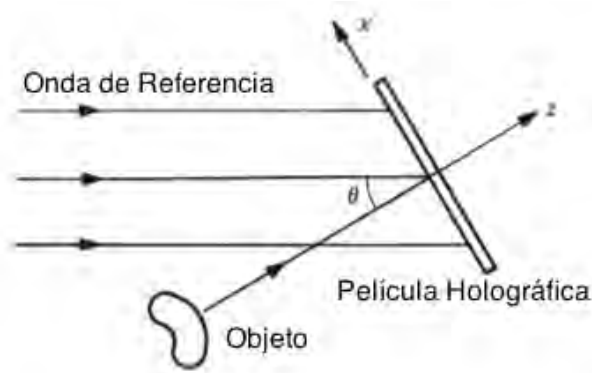


Figura 1. Esquema simplificado. Tomado HARIHARAN, *Basics of Holografy*, 2002. EDITADA

Es natural escribir la amplitud de la onda de referencia de la forma

$$r(x, y) = r \exp(iK \cdot x \sin \theta) \quad (1)$$

donde k es el número de onda. Vemos que la amplitud solo depende de la fase que varía respecto a la posición en x . Por otro lado, debido al principio de Huygens-Fresnel, cada punto del objeto puede considerarse como una fuente de luz esférica. Esto facilita el problema ya que podemos analizar solo un punto por separado incidiendo en la película. Entonces podemos escribir la amplitud de la luz proveniente del objeto como

$$o(x, y) = o \exp(-i\phi(x, y)) \quad (2)$$

Donde ϕ es una función que depende de x y y debido a que o es una fuente de luz esférica.

La intensidad de luz sobre la película es entonces

$$\begin{aligned} I(x, y) &= [r(x, y) + o(x, y)][r(x, y) + o(x, y)]^* \\ &= |r(x, y)|^2 + |o(x, y)|^2 \\ &\quad + r \cdot o \exp(-i\phi(x, y)) \exp(-iK \cdot x \sin \theta) \\ &\quad + r \cdot o \exp(iK \cdot x \sin \theta) \exp(i\phi(x, y)) \end{aligned} \quad (3)$$

La transmitancia en una película holográfica, que corresponde a la fracción de la amplitud transmitida con la incidente, se escribe como

$$t = t_f + \gamma TI \quad (4)$$

donde t_f es la transmitancia de fondo, T es el tiempo de exposición del holograma, γ es una constante de la película holográfica e I es la intensidad de la luz. Cuando la película es iluminado sin el objeto, la amplitud transmitida por el holograma es

$$u(x, y) = r \cdot t \quad (5)$$

En este caso tenemos que $u(x, y)$ es

$$\begin{aligned} u(x, y) &= t'_f r \exp(iK \cdot x \sin \theta) \\ &\quad + \gamma T r o^2 \exp(iK \cdot x \sin \theta) \\ &\quad + \gamma T r^2 o(x, y) \\ &\quad + \gamma T r^2 o^*(x, y) \exp(2iK \cdot x \sin \theta) \end{aligned} \quad (6)$$

donde $t'_f = t_0 + \gamma T r^2$ es la transmitancia de fondo. De esta ecuación podemos ver que el primer término es

t'_0 veces la amplitud de la luz de referencia, el segundo término es un halo de ambas fuentes, el tercero es γTr^2 veces $o(x, y)$ y el cuarto término es el complejo conjugado del anterior por un factor exponencial. El tercer término constituye una imagen virtual del objeto y el cuarto una imagen real [Hariharan, 2002]. No obstante, dependiendo del ángulo θ uno de estos dos términos se vuelve despreciable.

Cada una de las fuentes de radiación del objeto forman un patrón de interferencia de la forma mencionada anteriormente. La colección de todas estas fuentes crea un patrón de interferencia en la película que tiene almacenada la información del objeto.

Este procedimiento de grabado de hologramas se conoce como *holografía de transmisión* y se identifica ya que la fuente de referencia y la del objeto inciden sobre la misma cara de la película holográfica. Los hologramas de reflexión, que no tienen relevancia en el experimento, se identifican por que las fuentes inciden sobre caras diferentes.

B. Hologramas de Transmisión *Full-View*

Los hologramas de transmisión *Full-View* consisten en una película dispuesta en forma cilíndrica con el objeto en el interior. La película se ilumina junto con el objeto por un haz de luz proveniente de un láser (ya sea por medio de un lente o utilizando un diodo láser divergente). La luz que va directamente a la película sirve como onda de referencia, mientras que la que ilumina al objeto es la que lleva la información del mismo luego a la película. Este procedimiento crea una imagen virtual del objeto, sin embargo esta puede observarse 360° alrededor a diferencia de los hologramas tradicionales. El holograma contiene información de todos los ángulos alrededor del objeto y al rotarse se puede observar todas las caras del mismo.

C. Funcionamiento de las Películas Holográficas

Las películas holográficas tienen la responsabilidad de almacenar la información de la interferencia producida entre la onda de referencia y la proveniente del objeto. La película se encuentra cubierta por un Halogenuro de Plata. Cuando el patrón de interferencia incide sobre la película, algunos granos se *broncean* por la luz mientras que otros no. Esto se debe a la interferencia constructiva y destructiva que crea franjas de máximos y mínimos de luz. Luego del proceso de revelado, las zonas bronceadas terminan teniendo un mayor espesor que las zonas que no tuvieron contacto directo con la luz.

Para un haz de luz puntual incidiendo sobre una película holográfica junto a una onda de referencia plana, la película, luego del revelado y en la ausencia del haz puntual, se convierte en un lente de Fresnel inverso, en el que la luz

de referencia se focaliza en un punto reconstruyendo el haz de luz puntual. Ya que un objeto iluminado se puede modelar como muchas fuentes de luz por el principio de Huygens–Fresnel, entonces el holograma se produce por la suma de todas estas pequeñas interferencias.

D. Revelado de Películas

Se preparan tres soluciones. La primera solución se prepara mezclando 750ml de agua destilada, 20 gramos de catecol, 10 gramos de ácido ascórbico, 10 gramos de sulfito de sodio y 75 gramos de urea.

La segunda solución contiene 800ml de agua destilada y 60 gramos de carbonato de sodio anhidro.

Finalmente se prepara una solución blanqueadora con 750ml, 5 gramos de dicromato de potasio y 80 gramos de bisulfato de sodio.

Para revelar las películas se mezcla la primera con la segunda solución. Estas se deben mezclar antes de hacer el revelado ya que su efecto solo dura 8 horas, esta se denomina solución de trabajo. El proceso de revelado se describe a continuación:

- Se lava la película en la solución de trabajo por 2 minutos.
- Se lava en agua por 3 minutos.
- Se lava en solución blanqueadora hasta que la película se ponga transparente. Debe ser menos de 2 minutos.
- Se lava en agua por 3 minutos.
- Se lava en una solución de agua y fotoflo (se adquiere en cualquier tienda de fotografía).
- Se deja secar.

[JD-2 HOLOGRAPHY FILM DEVELOPER, Photographer's Formulary Inc.]

III. MONTAJE EXPERIMENTAL

A. Montaje

El experimento se lleva a cabo en una mesa óptica para evitar vibraciones que puedan resultar en ruido o incluso en una toma fallida. El montaje experimental consiste en un haz de luz proveniente de un láser de Helio-Neón emitiendo a 633nm, que pasa por un lente biconvexo de distancia focal 25.4mm, divergiendo. Este se dirige por medio de un espejo hacia el cilindro que contiene al objeto y la película holográfica con el lado de la emulsión (lado que contiene el halogenuro de plata expuesto) hacia adentro. En el fondo del cilindro hay un espejo convexo que re dirige la luz hacia las paredes del cilindro, aumentando

el área cubierta por la onda de referencia. El esquema del montaje se puede observar en la Figura 2.

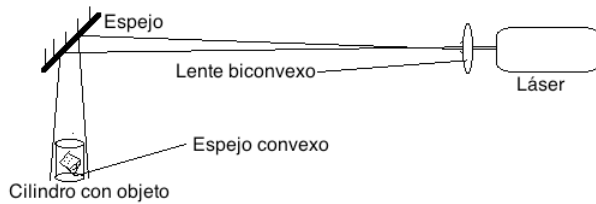


Figura 2. Esquema del montaje experimental

La Figura 3 muestra una foto del montaje, en ella vemos el objeto (un dado en el momento de la foto), el cilindro con el espejo convexo y el espejo que redirecciona la luz. Aquí también se puede observar que el cilindro se encuentra sobre Foamy negro para evitar reflexiones de luz indeseadas.

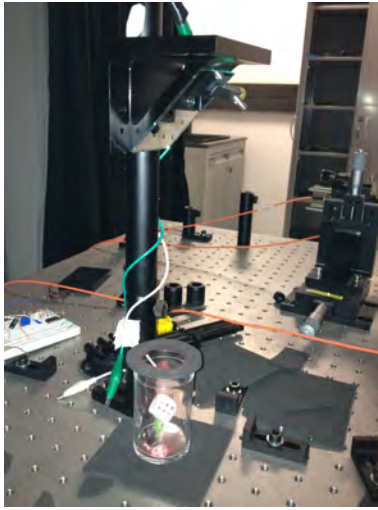


Figura 3. Foto del montaje experimental desde la posición del láser

Las películas utilizadas en el experimento son de referencia PFF-01 fabricadas por la compañía **Interagraf LLC**. Estas tienen mayor sensibilidad a la luz en un rango de 600-680nm con un poder de resolución de 3000 líneas/mm. La Figura 4 muestra la cantidad de energía incidente en la película requerida por longitud de onda.

B. Cálculos y Adecuación pre-experimentales

Los cálculos de exposición de las películas se hacen por medio de la gráfica observada en la Figura 4. Así se obtiene el valor aproximado de la energía requerida para hacer el grabado del holograma. En el caso del láser utilizado, con una longitud de onda de 633nm, se encontró que la energía requerida era de $10^{1,8} \mu\text{joules}/\text{cm}^2$. Con el láser encendido se midió la potencia/unidad de área en el cilindro. El valor obtenido fue de $2,47 \mu\text{W}/\text{cm}^2$.

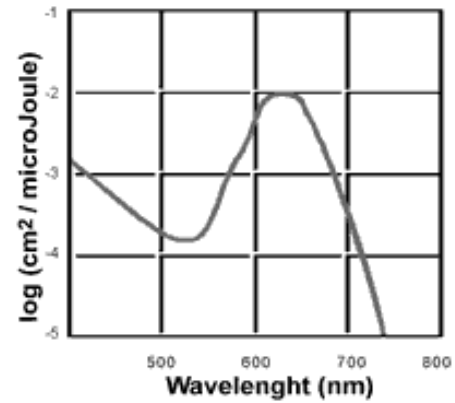


Figura 4. Logaritmo de la 1/energía requerida contra longitud de onda. Tomado <http://www.geola.lt/lt/holographymaterials/red-sensitive/>

Con estos datos se puede hacer un simple despeje por el tiempo de exposición usando $\text{Potencia} = \text{Energía}/\text{tiempo}$. El tiempo de exposición requerido que se obtuvo fue de 25 segundos.

IV. RESULTADOS

Se realizaron tres tomas de datos en tres días diferentes, en las que se variaron los tiempos de exposición y los objetos.

Para medir el porcentaje de grabado el procedimiento implementado consiste en ubicar una hoja cuadrículada bajo la película revelada, y contar el número de recuadros que contienen alguna información grabada. Una película holográfica (de dimensiones $5,25\text{cm} \times 12\text{cm}$) ocupa 264 recuadros que equivalen al 100%. El error es de $\pm 0,3787\%$.

A. Primera Toma

En la primera toma se tomaron 5 hologramas a tiempos de 20, 25 y 30 segundos de exposición de un muñeco de Lego pintado de blanco (Figura 5). Es importante mencionar que en esta toma - al igual que en la tercera - se utilizó un anillo de Foamy cortado sobre la parte superior del cilindro que sostiene las películas siguiendo una variación del experimento tomada en pro de la mejora de la resolución [INDUSTRIAL FIBER OPTICS INC., *Sandbox Holography Kit*].

Cuadro I. Porcentaje de grabado por tiempo de exposición

20s	25s	30s
15 %	57 %	18 %
52 %		16 %

En la primera toma podemos ver un promedio de



Figura 5. Muñeco de Lego original.

33.5% de grabado en la película, para 20 segundos, un promedio de 57% para 25 segundos y un promedio de 17% para los datos tomados con exposición de 30 segundos.

A pesar de que la exposición a 20 segundos obtuvo un mayor porcentaje de grabado frente a las otras exposiciones, tiempos tan bajos se descartaron en las tomas futuras debido a la baja resolución obtenida en las películas.

En la Figura 6 podemos ver el muñeco grabado en la película, en ella se observa parte de la cabeza y un brazo.



Figura 6. Holograma del muñeco de Lego en el que se aprecia una porción de la cabeza y un brazo.

B. Segunda Toma

En la segunda toma se grabaron hologramas de una figura antropomórfica metálica con una sombrilla blanca. La escogencia de ambos tonos de colores en la misma toma tiene razones de calidad del holograma. Con esto se busca comparar la definición de las figuras en ambos tonos luego del revelado. En esta toma se omitió el anillo mencionado anteriormente.

En esta toma se obtuvo un porcentaje de grabado de 54.5% para 25 segundos, para 28 segundos 33% y finalmente para 30 segundos un grabado del 55%.

Cuadro II. Porcentaje de grabado por tiempo de exposición

25s	28s	30s
38 %	25 %	30 %
80 %	60 %	80 %
80 %	14 %	
20 %		

C. Tercera Toma

En esta toma se utilizó el muñeco de Lego al igual que el objeto metálico.

Cuadro III. Porcentaje de grabado por tiempo de exposición

25	28	30
2 %	5 %	3 %
35 %	13 %	3 %
1 %	8 %	3 %
35 %	3 %	2 %
3 %	15 %	

Como se mencionó anteriormente, en esta toma al igual que en la primera, se utilizó un anillo en la parte superior del cilindro y se aseguró que estuviese completamente concéntrico con el cilindro. En la Figura 7 se observa un holograma de la figura metálica antropomórfica, en ella no se ve mucha definición sin embargo se aprecian la cabeza y los brazos levantados.



Figura 7. Figura antropomórfica metálica con baja definición. Se aprecia la forma de la cabeza y de los brazos levantados al igual que una porción del cuerpo.

V. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En ninguna de las tres tomas realizadas se logró un recubrimiento del 100 % de la película. La segunda toma fue la más exitosa en términos de la cantidad de películas con alto grado de recubrimiento. Esto se debe a que al momento de la toma no se empleó el anillo de fomi. En la primera toma, que se obtuvo un medio grado de recubrimiento de las películas, no se procuró que el anillo estuviese concéntrico con el cilindro. Esto permitió que algunas ondas de luz golpearan directamente la película en vez de que rebotaran primero en el objeto, actuando como ondas de referencia. Sin embargo en la toma de algunas películas el anillo estaba casi concéntrico y por eso su bajo porcentaje de grabado.

En la toma tres, al ubicar el anillo concéntrico, se bloquearon las ondas de referencia resultando así en el *velado* de la mayoría de las películas. Pocas obtuvieron un porcentaje mayor a 15 %, esto se debe a que algunas ondas de luz alcanzaron a incidir en las paredes directamente a pesar de la presencia del anillo. Es por esto que los grabados se encuentran solo en las partes inferiores de las películas.

La segunda toma no produjo una película de 100 % de grabado debido a que la luz no alcanzaba a pegar en la totalidad de las paredes del cilindro debido a imperfecciones en las paredes del mismo y la posición de la película que no se encontraba en algunos casos completamente erecta.

VI. CONCLUSIONES

Finalmente podemos concluir que para obtener el mejor holograma de transmisión *Full-View* se debe buscar

que el radio de divergencia del rayo de luz sea muy cercano al radio del cilindro al momento de entrar al mismo. Si el radio es más grande, como fue el caso del experimento, puede que las paredes del interior no queden completamente iluminadas causando discontinuidad en la imagen luego del revelado.

El uso del anillo no se recomienda ya que puede bloquear la luz entrante y no permitir que hayan ondas de referencia en algunas zonas de las paredes. De igual forma se debe saber que al tomar hologramas de objetos grandes, la luz puede no llegar a las partes inferiores causando que estas no queden impresas en la película a pesar de la presencia del espejo convexo en el interior.

Para cerrar, la toma de hologramas es un proceso largo, agotador y costoso en el que muchas pequeñas variables en el momento de la toma, tanto como en el proceso de revelado pueden alterar negativamente en gran medida el resultado final.

VII. REFERENCIAS

- INDUSTRIAL FIBER OPTICS INC., *Sandbox Holography Kit*; Referencemanual and Experiment Guide, 2008.
- JD-2 HOLOGRAPHY FILM DEVELOPER, *Photographer's Formulary Inc.*
- P. HARIHARAN, *Basics of Holography*, Cambridge University Press, 2002.
- SAXBY, G., *Practical Holography*, Institute of Physics Publishing, 3rd Edition, 2004.