

4/17/2023

1

HOLOGRAFÍA

Raúl Belmonte Aix

Ginés González Guirado

2023

NEW SPECTRUM OF
LIGHT, 3D LASER
PROJECTION -
[YouTube](#)



ÍNDICE

- 1.Introducción e historia
- 2.Diferencias con la fotografía
- 3.Base teórica
- 4.Tipos de hologramas
- 5.Efectos de aspecto
- 6.Holografía en movimiento
- 7.CGH
- 8.Fuentes de luz y materiales de grabación
- 9.Hologramas multicolor
- 10.Copia de hologramas
- 11.Aplicaciones en la ciencia



INTRODUCCIÓN

- ¿Qué es la Holografía?

Producción imagen 3D con luz coherente grabando fase y amplitud .

- ¿Cuándo surge?

Nace en 1948 por Dennis Gabor, no se aplica a la luz al principio por falta de fuente coherente. Comienza con holografía de electrones y se inventa para mejorar la microscopía de rayos X.

En 1962 Yuri Denuskuvi desarrolla primera cámara holográfica y se crea primer sistema de láser holográfico. Permite la invención de la holografía óptica.

En 1971 dan nobel a Dennis por la invención y desarrollo del método holográfico. Años posteriores sigue desarrollándose.

DIFERENCIAS CON FOTOGRAFÍA

11/7/2023

Holografía

- Imagen formada a través de patrón de interferencia.
- Información de la luz en un rango de direcciones
 - La luz dispersa llega directa a la película fotográfica.
- Reconstrucción 3D con profundidad.
 - Necesario láser para recrearla.
- Mayor información, fase y amplitud.
 - Conservación de paralaje

Fotografía

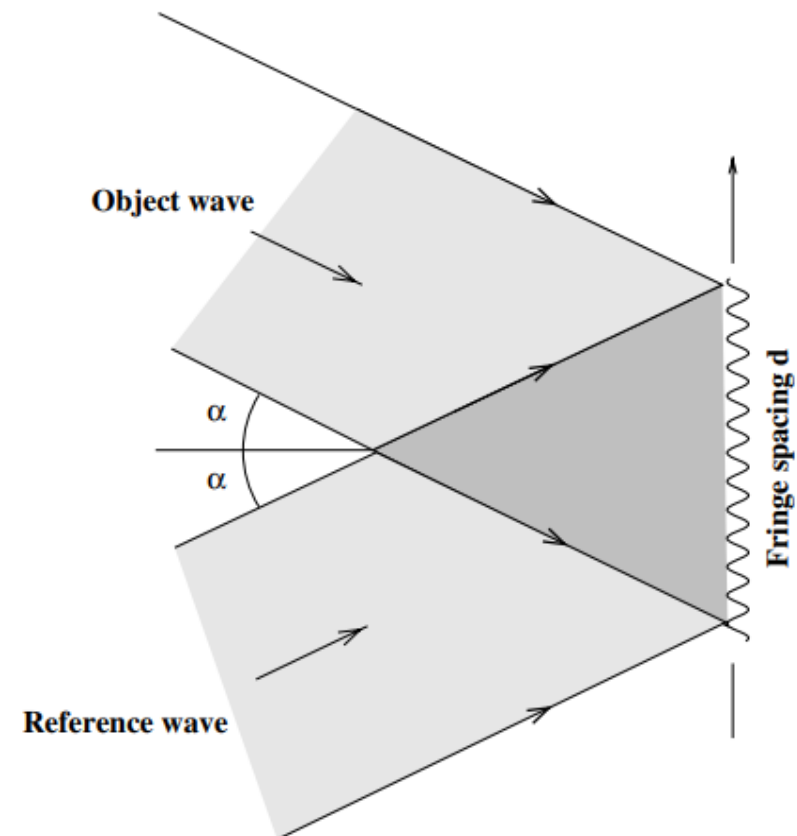
- Imagen formada por luz reflejada de un objeto.
- Información de la luz en una sola dirección.
 - La luz se enfoca con una lente.
- Reconstrucción 2D limitada en profundidad.
 - Fácil de apreciar la imagen.
 - Únicamente intensidad luz.
- Falsa sensación de profundidad

BASE TEÓRICA

La holografía nos permite recrear frente de ondas gracias a interferencia y difracción.

Trataremos onda objeto con una onda plana de referencia coherente, con cierto ángulo y obtendremos que nos genera una red de difracción en la película.

$$d = \sin \alpha \frac{\lambda}{2}$$



BASE TEÓRICA

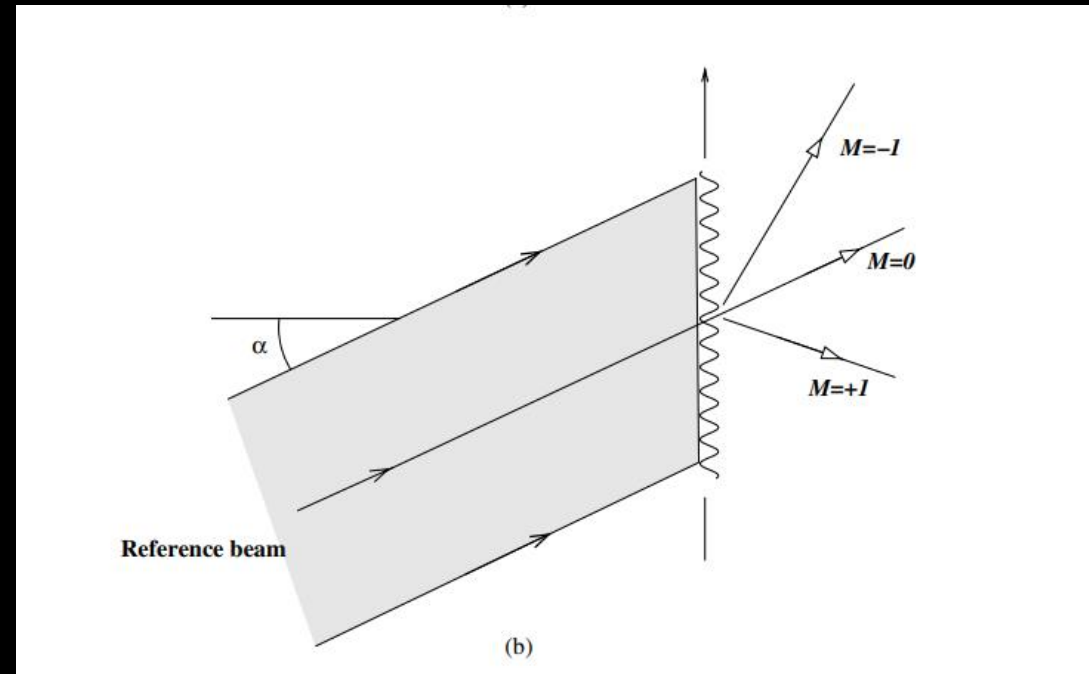
4/17/2023

Como resultado tenemos distribución sinusoidal de transparencias.

Si iluminamos la placa de la misma manera con el rayo de referencia tendremos 3 rayos: $m = 0$, rayo no desviado; $m = -1$, la reconstrucción del objeto; $m = 1$, imagen que no buscamos.

Para que rayo objeto emerja en dirección θ que cumpla la d anterior será $\theta = -\alpha$

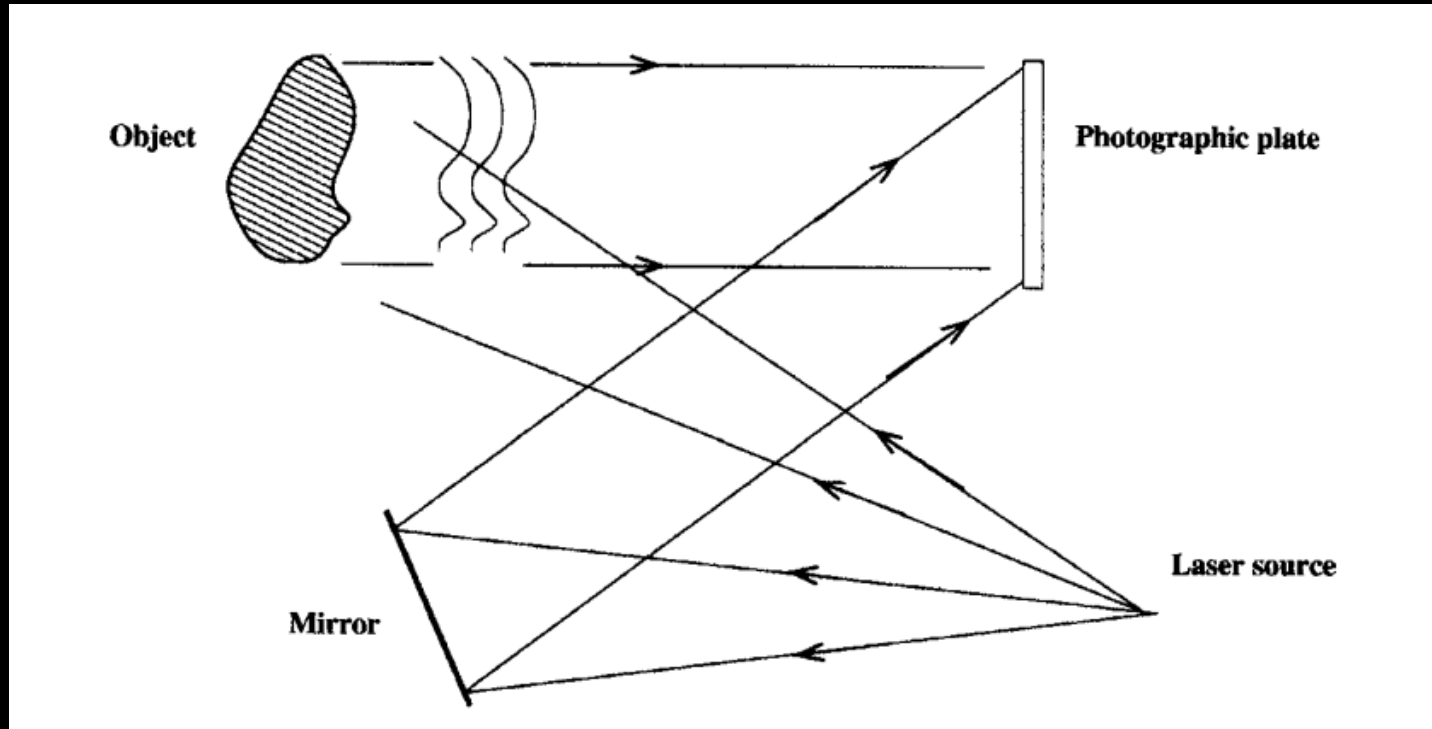
$$\sin \theta - \sin \alpha = m \frac{\lambda}{d}$$



BASE TEÓRICA

Una fuente de luz produce rayos de luz coherente monocromática.

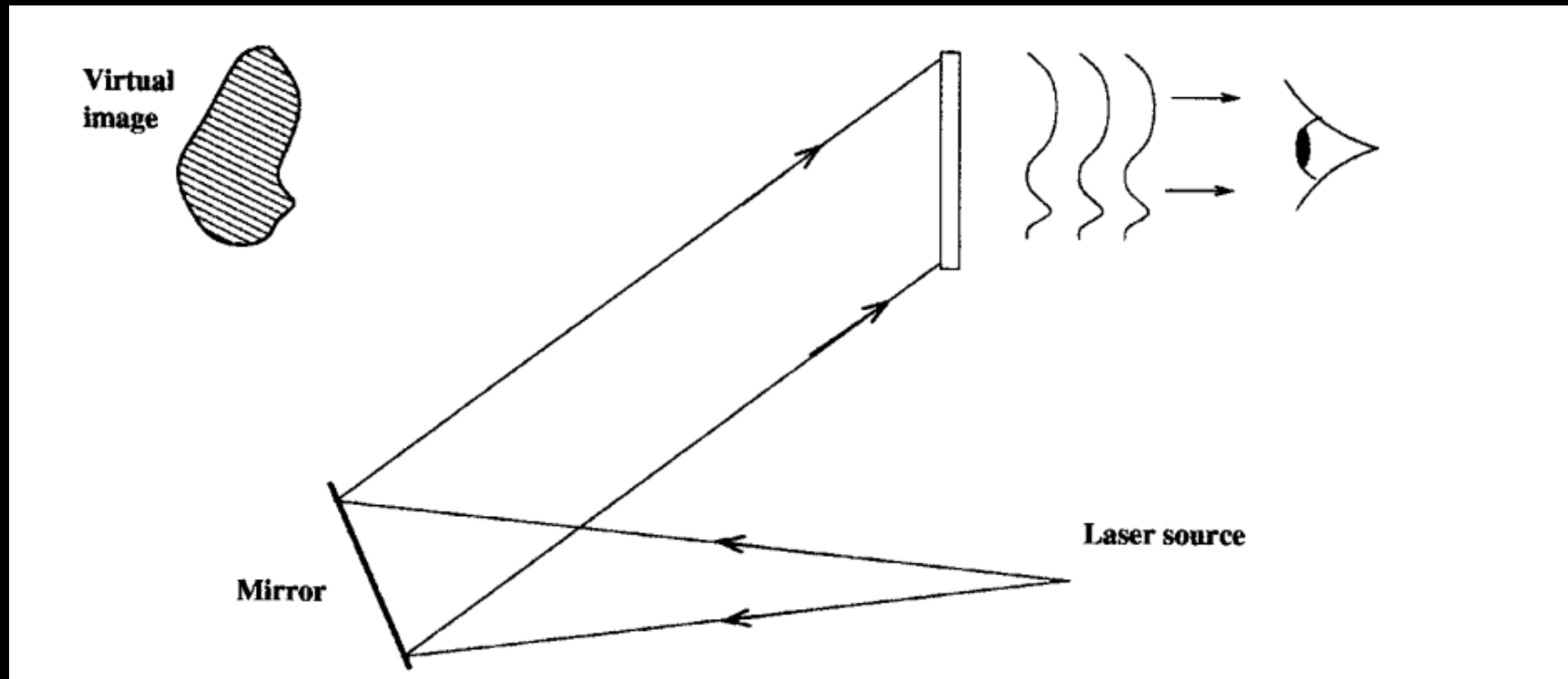
Se dividen en un beam splitter: object beam, dirigido al objeto que forma haz dispersado, y reference beam, dirigido a la placa fotográfica. La interferencia codifica fase y amplitud ondas.



BASE TEÓRICA

Se guarda este patrón en la placa.

Para recrearlo se ilumina con misma luz de manera similar. Reconstruye ondas gracias al patrón de interferencia y se observa el objeto.



BASE TEÓRICA

Si consideramos la amplitud de la onda objeto y de referencia en el plano de la placa fotográfica:

$$E_0(x, y, t) = A(x, y) \exp[i (\phi(x, y) - \omega t)]$$

$$E_R(x, y, t) = A_R(x, y) \exp[i (\rho(x, y) - \omega t)] = A_R \exp[i(kx - \omega t)]$$

Como onda de referencia es plana e incide en plano (x,y) con ángulo theta tendremos que su parte espacial es kx con amplitud constante y k dado por:

$$k = 2\pi \sin \frac{\theta}{\lambda}$$

La irradianza entonces:

$$I(x, y) = |E_R(x, y) + E_0(x, y)|^2 = A_R^2 + A^2 + 2AA_R \cos[\phi(x, y) - kx]$$

BASE TEÓRICA

4/17/2023

Si consideramos la amplitud de la onda objeto y de referencia en el plano de la placa fotográfica:

$$E_0(x, y, t) = A(x, y) \exp[i (\phi(x, y) - \omega t)]$$

$$E_R(x, y, t) = A_R(x, y) \exp[i (\rho(x, y) - \omega t)] = A_R \exp[i(kx - \omega t)]$$

Como onda de referencia es plana e incide en plano (x,y) con ángulo theta tendremos que su parte espacial es kx con amplitud constante y k dado por:

$$k = 2\pi \sin \frac{\theta}{\lambda}$$

La irradianza que llega a la placa entonces:

$$I(x, y) = |E_R(x, y) + E_0(x, y)|^2 = A_R^2 + A^2 + 2AA_R \cos[\phi(x, y) - kx]$$

BASE TEÓRICA

4/17/2023

Si consideramos relación lineal transmitancia $T(x,y)$ e irradianza, iluminando la placa con onda similar a referencia:

$$E_F = T(x,y)E_R(x,y) = H(x,y)E_R(x,y) - C A_R^2 E_0(x,y) - C E_R(x,y)^2 E_0(x,y)^*$$

Buscamos cuarto término: Idéntico a la onda salvo constante y reconstruye imagen virtual.

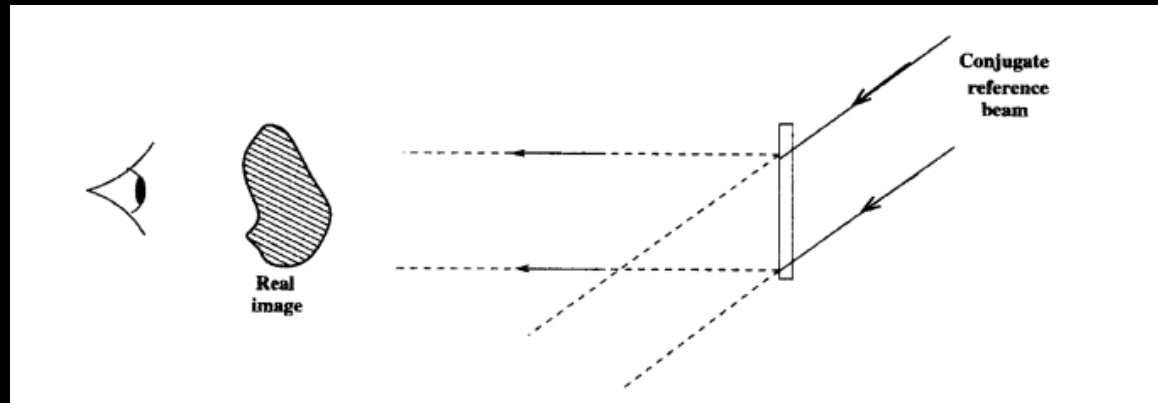
Último término: Complejo conjugado del rayo de luz que crea imagen real, va a estar separado casi el doble del ángulo incidente.

Si se desea imagen real, usar reference beam conjugado. Las amplitudes ahora serán conjugadas.

TIPOS DE HOLOGRAMAS

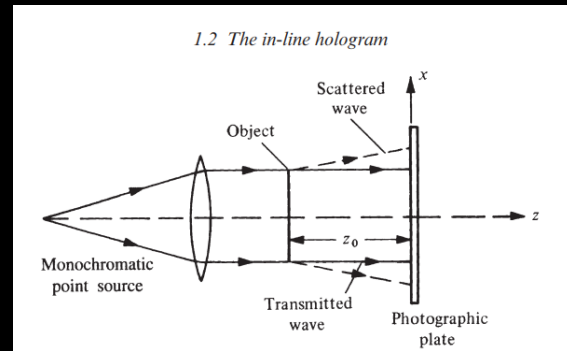
4/17/2023

Si buscamos la imagen real iluminamos con el conjugate reference beam.

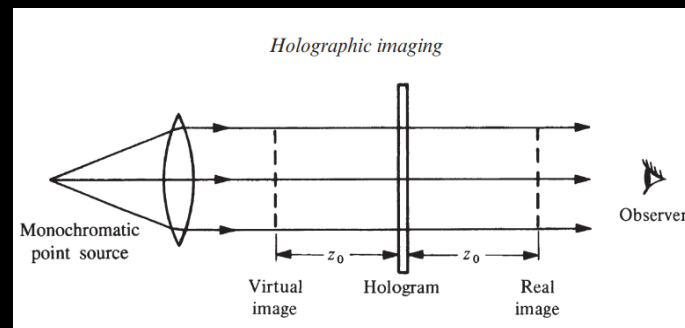


TIPOS DE HOLOGRAMAS

- Inline hologram: Consiste en objeto pequeño transparente con detalles opacos colocado eje normal a película. El patrón por rayo transmitido y difractado.

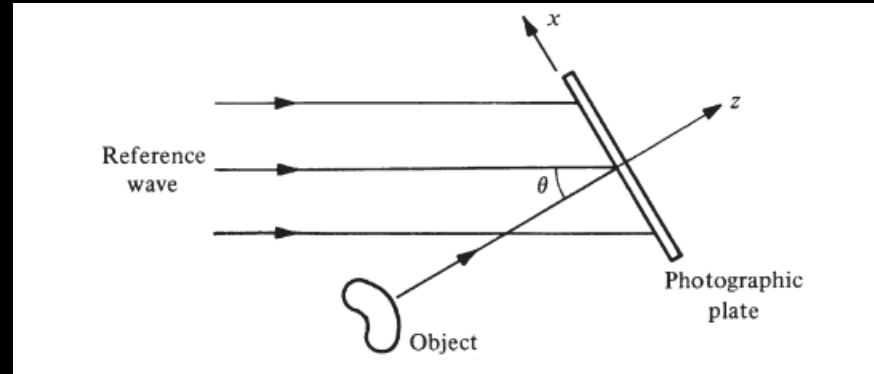


Observador verá imagen superpuesta por dos imágenes.

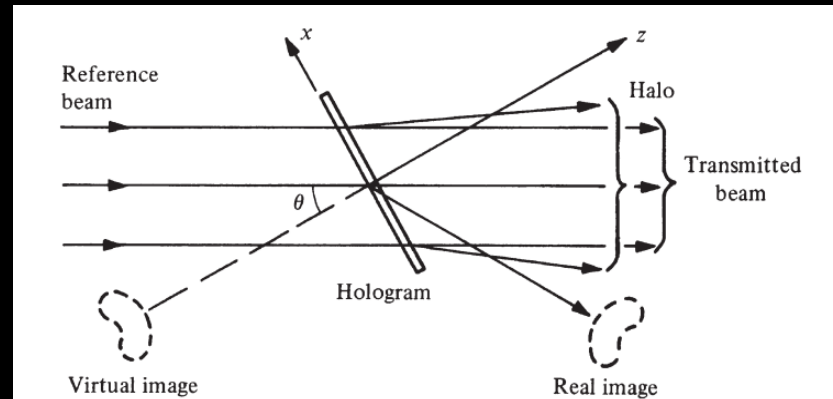


TIPOS DE HOLOGRAMAS

- Off-axis hologram: Emplea otra vez luz colimada con intensidad uniforme derivada de fuente que ilumina objeto



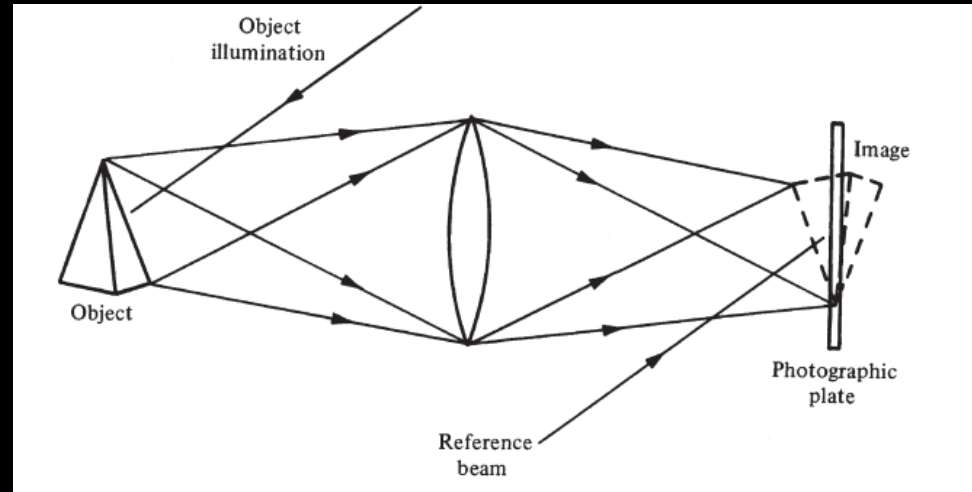
Misma distancia imágenes pero en zonas opuestas.



TIPOS DE HOLOGRAMAS

4/17/2023

- Image hologram: Hologramas de imagen real de objeto formada por lente, con placa situada en el centro. Cuando se reconstruye, parte se reconstruye delante y parte detrás. Menor coherencia necesaria y permite usar luz blanca para poca anchura.



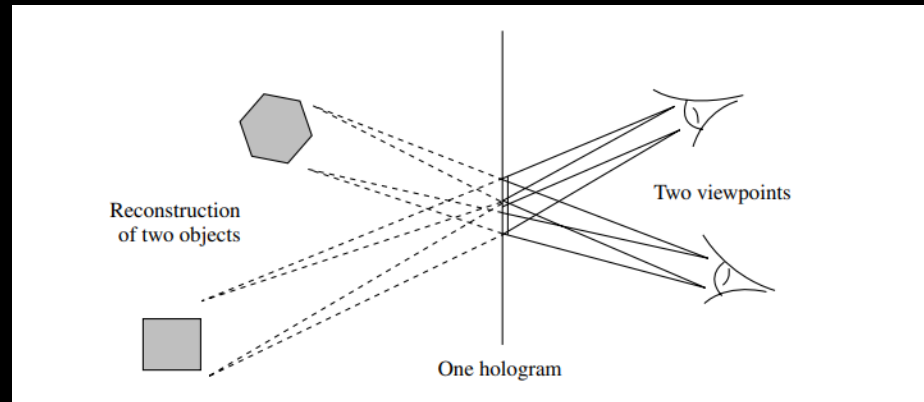
TIPOS DE HOLOGRAMAS

4/17/2023

- Reflection hologram: Obtener holograma con rayos viniendo de sitios opuestos y forman línea de interferencia peculiar como capas separadas la mitad de longitud de onda. Cuando se iluminan con fuente de luz en punto bandas de longitud de onda estrechas y reconstruyen imagen.

EFFECTOS EN ASPECTO

Como la luz de un holograma viene de una región concreta, lo que vemos depende de la posición y ángulo del ojo con objeto. Aunque se rompa, si permanece ese fragmento, seguiremos viéndolo



Para ver objeto reconstruido solo se utiliza una porción del holograma que vista desde otro ángulo permite visión distinta. Se pueda dar superposición de hologramas en misma placa, distintos rayos referencia para reconstruir cada objeto. Rango limitado de hologramas

HOLOGRAFÍA EN OBJETOS EN MOVIMIENTO

4/17/2023

Reto por la diferencia de fase entre reference beam y object beam dispersado, no puede moverse más allá de fracción de longitud de onda o no habrá imagen.

Si tenemos sistema de luz coherente con los dos rayos formando ángulo, si movemos objeto cerca de longitud de onda de uno de los rayos provocará movimiento de líneas de interferencia. Tiempo corto de exposición.

¿Tiempo de exposición? Si tenemos $v = 19 \text{ m/s}$, y $\Delta\lambda = \lambda/10$ el máximo movimiento, considerando cyan $\lambda = 5 \cdot 10^{-7} \text{ m}$ por lo que tendremos una exposición de $t = \Delta\lambda/v = 5 \cdot 10^{-9} \text{ s}$

CGH

Recreación de hologramas por ordenador, se calcula el patrón de interferencia que crearía un objeto. Útil para objetos complejos, importante dimensiones correctas.

Pasos:

- 1) Cálculo amplitud compleja de onda objeto en plano holograma considerando que es DFT de amplitud compleja en plano del objeto.
- 2) Utilizar valores de la DFT para crear holograma.

El resultado se puede controlar para producir versión a gran escala.

ALEATORIEDAD DE FASE

Objetos simples dan coef. de Fourier con módulo grande bajas frecuencias, las altas pequeño. Cuando fase final no es importante, al multiplicar por factor fase aleatorio antes de DFT se minimiza el problema. Magnitudes de coef. Más uniforme

Equivalente a poner difusor en transparencia objeto y produce imagen con speckle pattern: Patrón granulado aleatorio cuando luz muy coherente se refleja difusamente en superficie con estructura complicada.

ALEATORIEDAD DE FASE

Objeto con fase aleatoria:

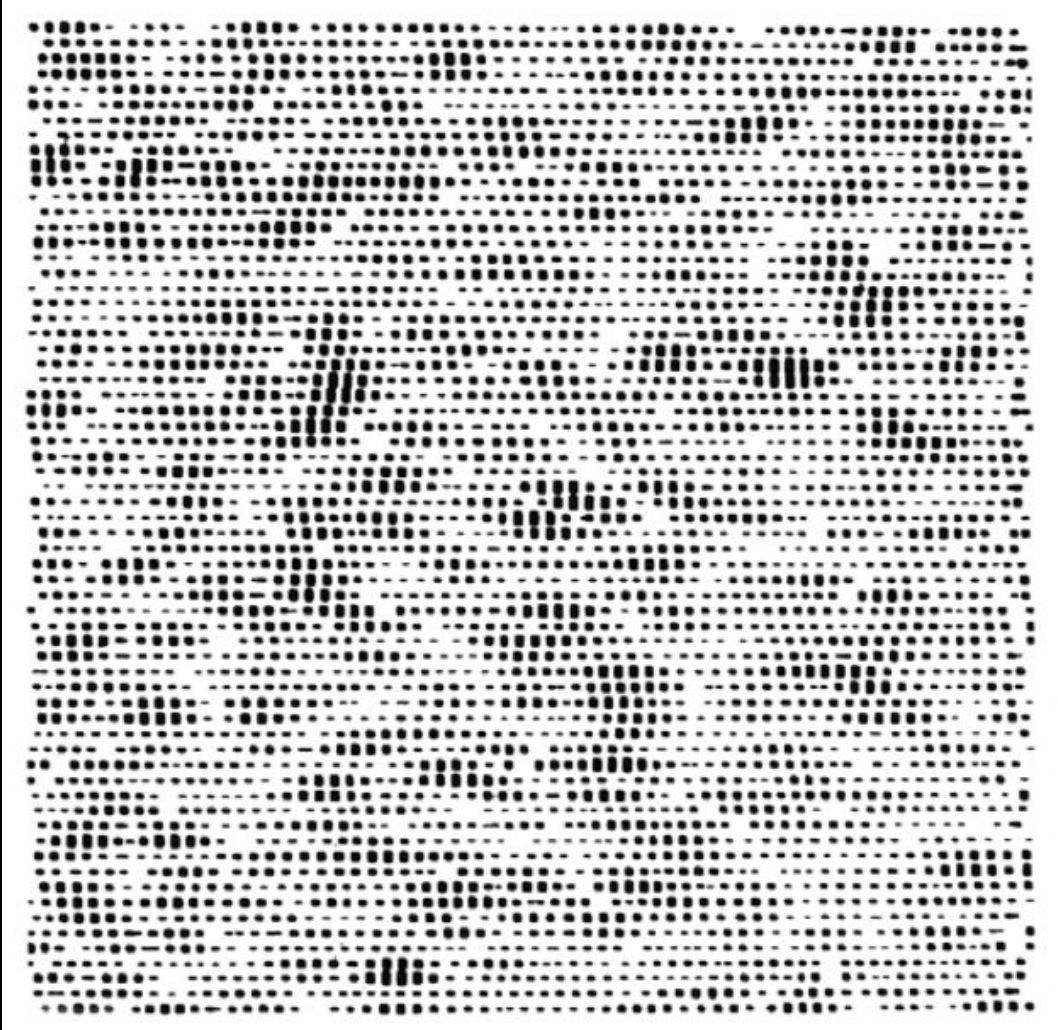
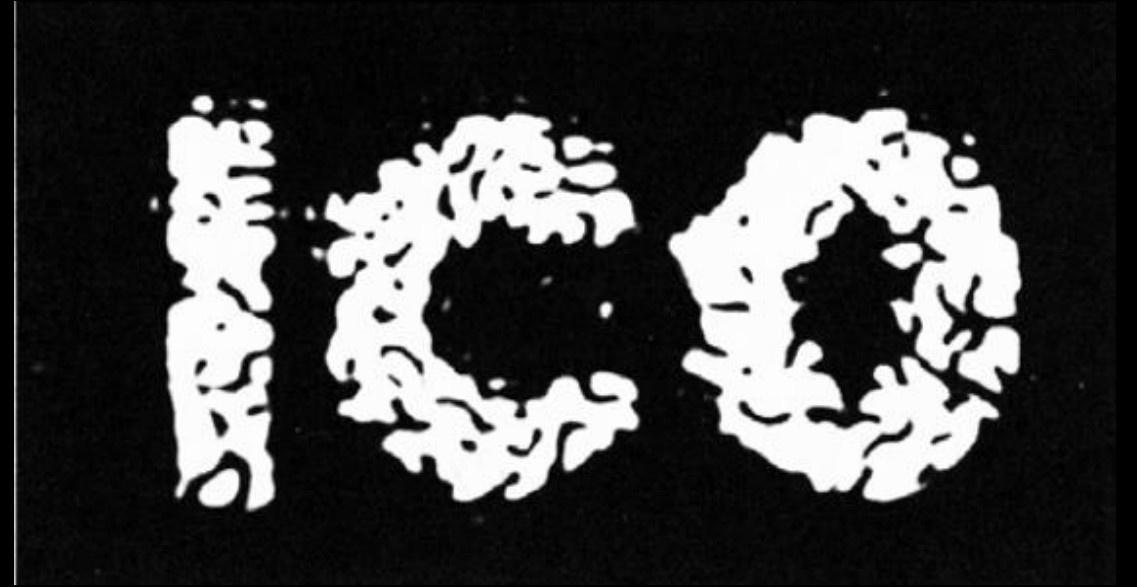


Imagen reconstruida:



OBJETOS 3D CGH

Aproximar como suma de secciones equispaciadas que se cruzan normales eje z. Partes lejanas pueden dar problemas, ocultas por superficies en frente.

En cada punto del holograma contribuciones de onda objeto sea puntos en el objeto que pueden verse desde ese punto del holograma.

Mucha potencia computacional, para minimizarlo:

- a) Eliminar paralaje vertical con TF -> Líneas horizontales sucesivas
- b) Producir perspectivas de objeto visto con ciertos ángulos plano horizontal que codifican como bandas verticales en holograma. Si se ilumina con reference beam conjugado se obtiene imagen real formada por imágenes 2D.

Fuentes de luz

Principal fuente de luz: láser

¿Por qué se usa el láser?

Maximizar franjas de visibilidad



Luz coherente

Requisitos de coherencia

Coherencia espacial: Longitud de coherencia mucho mayor que el valor máximo de la diferencia de camino óptico entre el objeto y los haces de referencia en el sistema de grabación.

Se suele trabajar en modo TEM.

Coherencia temporal.

Emitir en 1 sola línea espectral no asegura una coherencia temporal adecuada, ya que el láser puede oscilar en una serie de modos longitudinales que se encuentran dentro del perfil de esta línea espectral.

Fuentes de luz

Laser	Output	Wavelength (nm)	Power
Ar ⁺	cw	514, 488	1 W
He–Cd	cw	442	25 mW
He–Ne	cw	633	2–50 mW
Kr ⁺	cw	647	500 mW
Diode	cw	670–650	5 mW
Diode–YAG	cw	532	100 mW
Dye	cw	tunable	200 mW
Ruby	pulsed	694	1–10 J

Principales materiales de grabación

Material	Exposure (J/m ²)	Resolution (mm ⁻¹)	Processing	Type	η_{\max}
Photographic	≈ 1.5	≈ 5000	Normal	Amplitude	0.06
			Bleach	Phase	0.60
DCG	10^2	10 000	Wet	Phase	0.90
Photoresists	10^2	3000	Wet	Phase	0.30
Photopolymers	$10-10^4$	5000	Dry	Phase	0.90
PTP	10^{-1}	500-1200	Dry	Phase	0.30
BSO	10	10 000	None	Phase	0.20

Hologramas multicolor

Imágenes multicolor puede ser producida por un holograma registrado con tres longitudes de onda adecuadamente elegidas.

Problema



Cada holograma difracta, además de la longitud de onda utilizada para registrarlo, las otras dos longitudes de onda también.

Imágenes de diafonía



Se solapan y degradan la imagen.

Hologramas multicolor

Hologramas de Reflexión multicolor.

Registramos hologramas con 3 longitudes de onda y se produce un conjunto de planos de interferencia para cada longitud de onda.

Ilumino con luz blanca



Cada conjunto de planos de interferencia difracta una banda estrecha de longitudes de onda centrada en la longitud de onda original utilizada para registrarlo, dando una imagen multicolor libre de diafonía.

Hologramas multicolor

Hologramas de arcoiris multicolor.

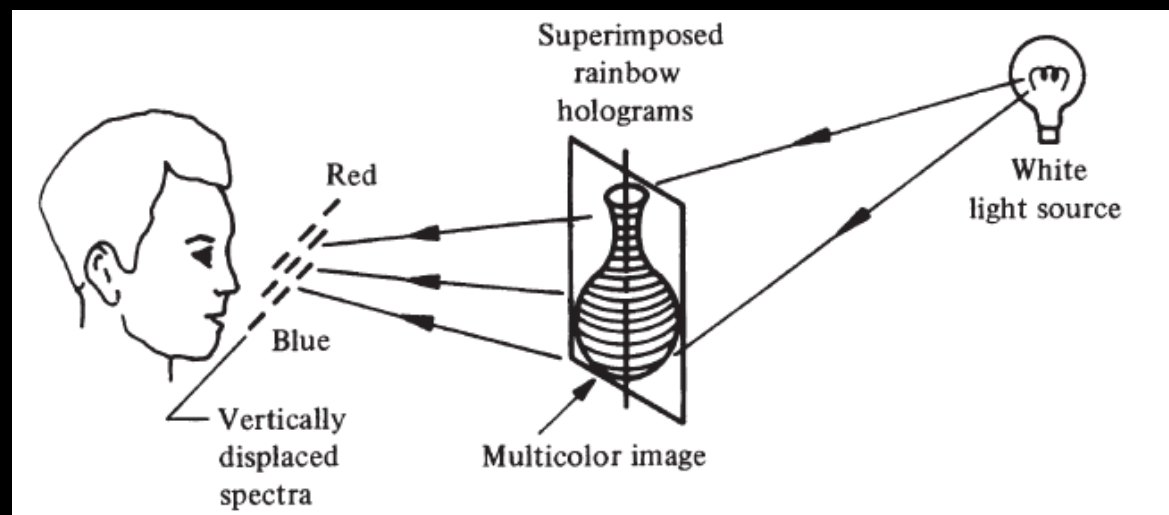
Utiliza hologramas de arco iris superpuestos.

Se realizan 3 hologramas primarios con luz láser roja, verde y azul.

Se usan con las mismas fuentes de láser para hacer un conjunto de tres hologramas de arcoíris, que luego se superponen.

Cuando se ilumina con luz blanca, reconstruye 3 imágenes del objeto.

Se forman 3 imágenes dispersas de la rendija en el espacio de visualización.



Hologramas multicolor

Hologramas de arcoiris multicolor.

Si un observador mira el holograma desde la posición original de la rendija, ve tres imágenes superpuestas del objeto reconstruido en los colores con los que se hicieron los hologramas primarios.

Los hologramas del arco iris se pueden usar de manera muy efectiva en pantallas multicolores, ya que las imágenes reconstruidas son muy brillantes y exhiben una alta saturación de color, y también están libres de diafonía.

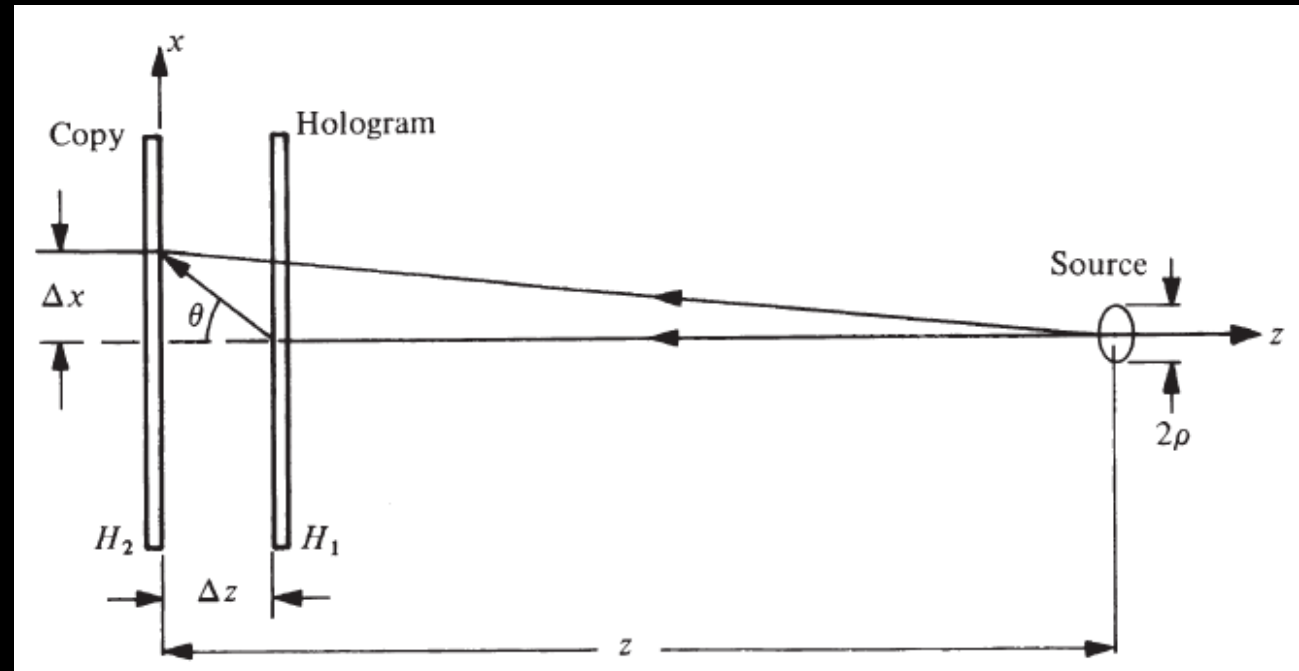
Copia de Hologramas

Forma 1.

Una manera es iluminar el holograma con el conjugado de la onda de referencia utilizada para hacerlo. La onda reconstruida por el holograma se puede usar con otra onda de referencia para registrar un holograma de segunda generación.

Forma 2. "Impresión por contacto"

En el material de copia se graba el patrón de interferencia formado por la luz difractada por el holograma y la luz transmitida por él, la coherencia de la iluminación debe ser adecuada para producir franjas de interferencia de alta visibilidad.



Copia de Hologramas

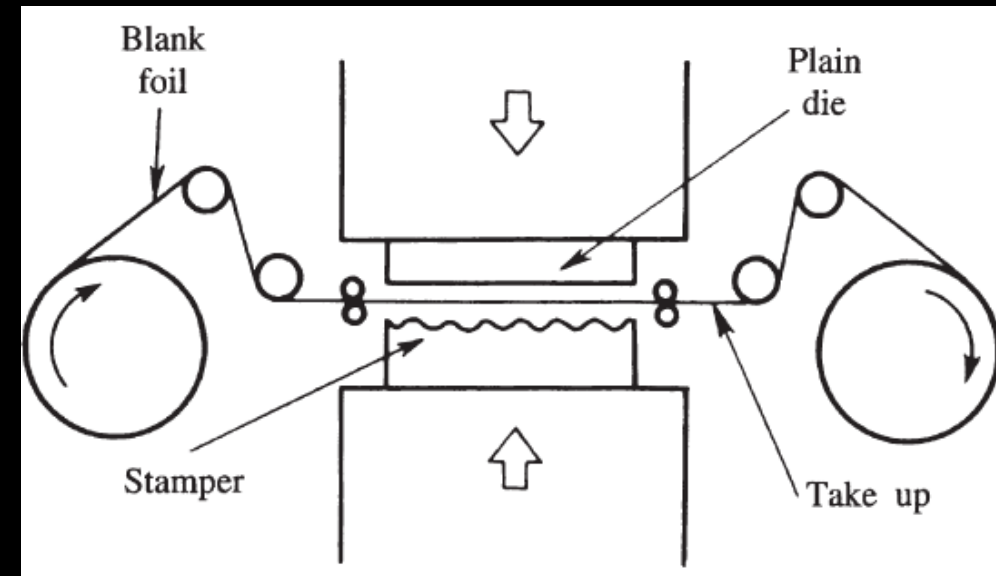
4/17/2023

Forma 3. Hologramas en relieve.

Los hologramas grabados en una fotoprotección se pueden copiar mediante estampado.

Los hologramas en relieve se pueden transferir a una superficie opaca, como la cubierta de un libro, mediante transcripción. Para permitir la visualización por luz reflejada, la lámina de transcripción contiene dos capas más, una capa reflectante de aluminio depositada al vacío sobre la capa de grabación del holograma y una capa adhesiva. Cuando la lámina de transcripción se coloca sobre el sustrato al que se va a transferir el holograma y se presiona con un troquel calentado, la capa adhesiva inferior se derrite y se adhiere al sustrato. Después de que se enfríe, la película base se puede levantar, dejando las otras capas, incluido el holograma, adheridas al sustrato.

Los hologramas en relieve ahora se usan ampliamente como característica de seguridad en tarjetas de crédito y mercancías de calidad.



Aplicaciones en imagen

Análisis del tamaño de partículas.

Las mediciones en partículas pequeñas en movimiento distribuidas a través de un volumen apreciable no son posibles con un sistema óptico convencional porque un microscopio que puede resolver partículas de diámetro d tiene una profundidad de campo limitada:

$$\Delta z = d^2 / 2\lambda$$

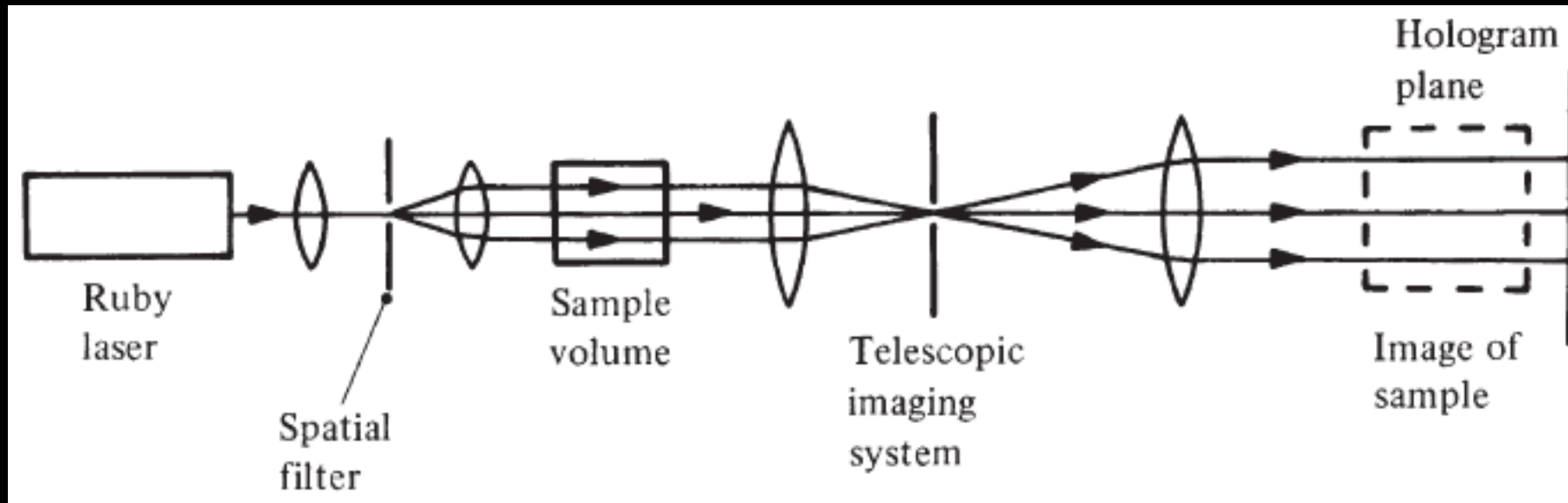
Este problema se puede superar utilizando un holograma grabado con un láser pulsado para almacenar una imagen tridimensional de alta resolución de todo el campo en cualquier instante.

Siempre que la cantidad de luz que se transmite directamente sea lo suficientemente grande (>80 por ciento) para servir como haz de referencia, es posible utilizar la holografía en línea.

Aplicaciones en imagen

4/17/2023

Análisis del tamaño de partículas.



Se satisface la condición de campo lejano.

$$(z \gg d^2 / \lambda)$$

Formando así un holograma de Fraunhofer.

Aplicaciones en imagen

4/17/2023

Análisis del tamaño de partículas.

El tiempo de exposición permisible para registrar un holograma de un campo de partículas en movimiento depende de la velocidad de las partículas. Para el análisis de tamaño, un criterio útil es que la partícula no debe moverse más de una décima parte de su diámetro durante la exposición.

Para producir una imagen aceptable de una partícula, el holograma debe registrar el máximo central y al menos tres bandas laterales de su patrón de difracción.

$$\theta_{\max} = 4\lambda / d$$

Para ver la imagen, el holograma se ilumina con un haz de luz colimado de un láser He-Ne. Se forman dos imágenes a la misma distancia $\pm z$ del holograma, una delante y otra detrás. Sin embargo, con un holograma de Fraunhofer, la luz que contribuye a la imagen conjugada de cada partícula se distribuye en un área tan grande en el plano de la imagen primaria que produce solo un fondo débil y uniforme. Como resultado, la imagen principal se puede ver sin interferencia significativa de la imagen conjugada.

El análisis holográfico del tamaño de las partículas ha encontrado varias aplicaciones, incluidos estudios de gotas de niebla, aerosoles dinámicos y plancton marino. Otra aplicación significativa ha sido en la fotografía de cámara de burbujas.

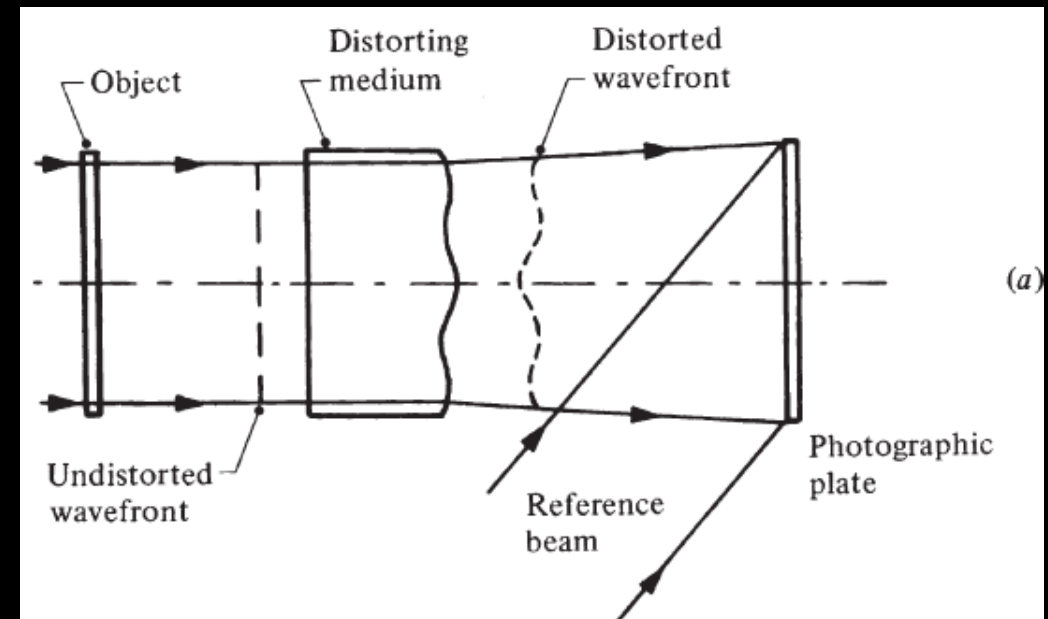
Aplicaciones en imagen

Imágenes a través de medios distorsionadores.

La holografía se puede utilizar para producir una imagen no distorsionada de un objeto que se encuentra detrás de un medio distorsionador. Para ello, tenemos 2 maneras:

- Una forma es hacer que la onda de referencia experimente la misma distorsión que la onda objeto. Esto es posible si el medio de distorsión es muy delgado o si la separación angular de las ondas es muy pequeña.
- Alternativamente, podemos usar un haz de referencia colimado para registrar un holograma de la onda del objeto aberrado, cuya amplitud compleja tomamos como

$$o(x, y) = |o(x, y)| \exp[-i\phi(x, y)]$$



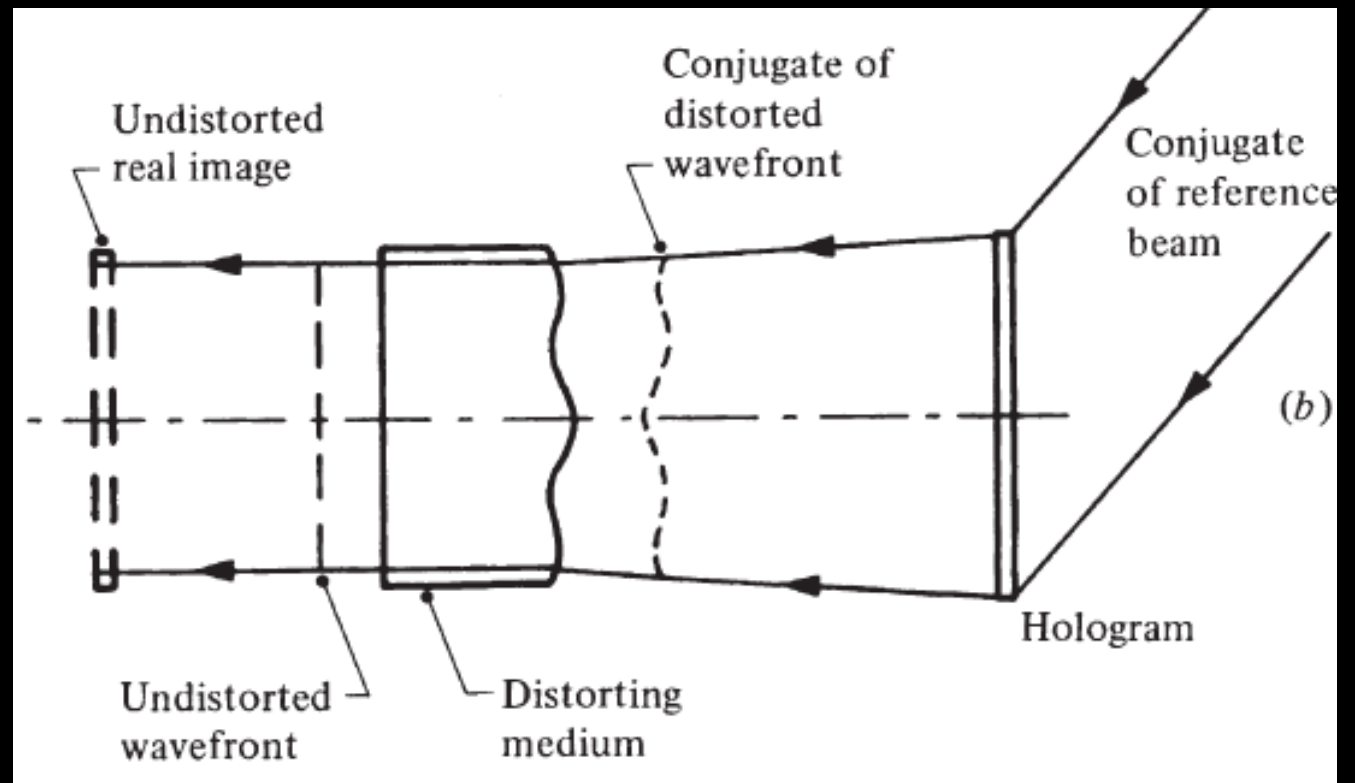
Aplicaciones en imagen

Imágenes a través de medios distorsionadores.

El holograma se ilumina por el conjugado de la onda de referencia original. Luego, el holograma reconstruye el conjugado de la onda del objeto original, cuya amplitud compleja en el plano del holograma es

Esta onda tiene exactamente los mismos errores de fase que la onda del objeto original, excepto que son de signo opuesto.

En consecuencia, cuando esta onda se propaga de regreso a través del medio distorsionador, los errores de fase introducidos por ella se anulan exactamente, de modo que se forma una imagen real sin distorsiones del objeto en su posición original.



Aplicaciones en imagen

Múltiples imágenes.

Hay muchas aplicaciones en las que es necesario producir una matriz de imágenes idénticas. Se puede usar un holograma para producir una matriz de este tipo con una sola exposición.

Múltiples imágenes usando hologramas de Fourier.

Una matriz $n \times n$ de imágenes idénticas separadas por intervalos (x_0, y_0) puede ser producido por un holograma con una función de transferencia

$$H(\xi, \eta) = \sum_n \sum_m \exp[-i2\pi(nx_0\xi + my_0\eta)].$$

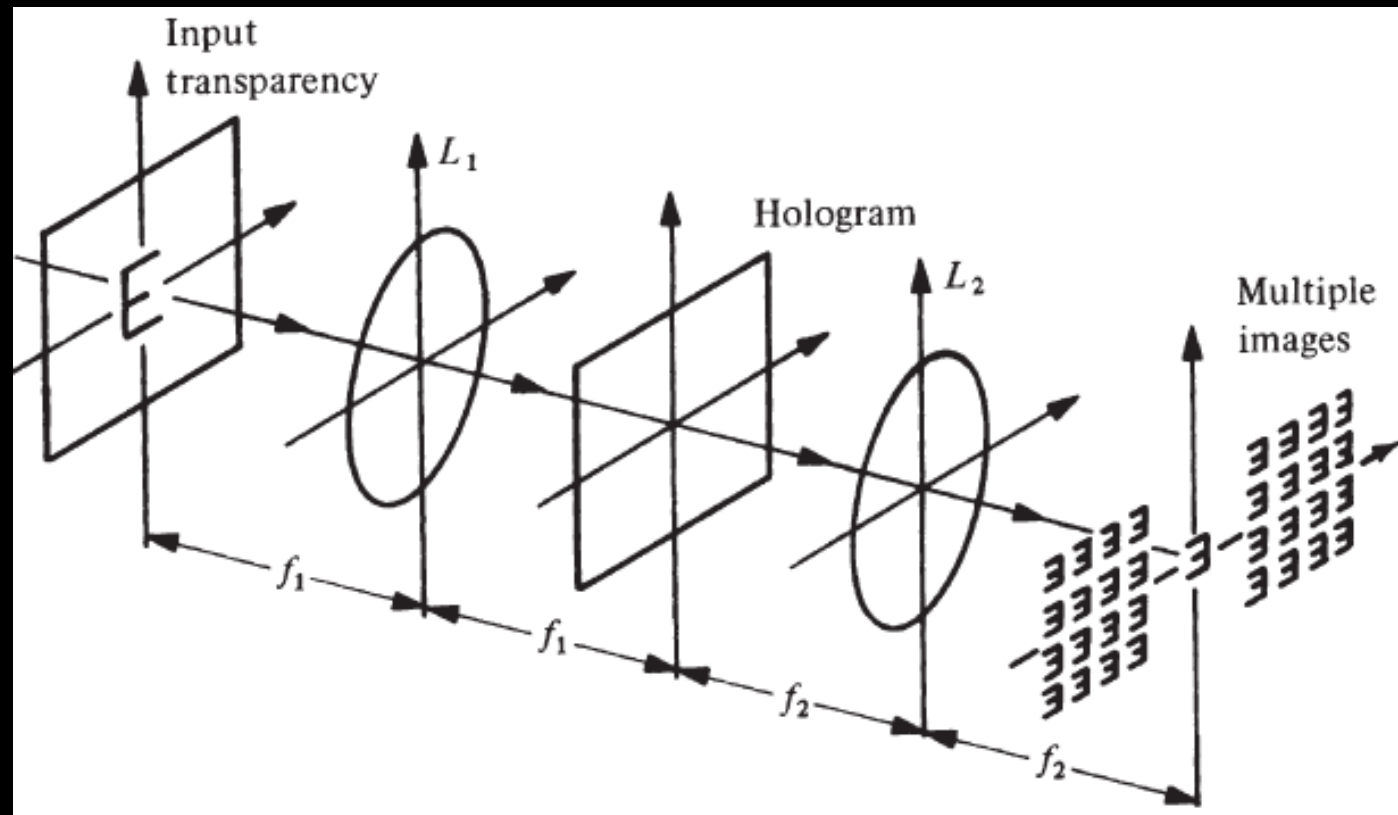
Cuando se ilumina con un frente de onda plano, este holograma reconstruye un conjunto de ondas planas que viajan en direcciones correspondientes a los centros de las imágenes en la matriz.

Aplicaciones en imagen

Múltiples imágenes.

Múltiples imágenes usando hologramas de Fourier.

El holograma se coloca en el plano focal posterior de la lente L_1 .



Aplicaciones en imagen

Múltiples imágenes.

Múltiples imágenes usando hologramas de Fourier.

Si se utiliza como entrada una transparencia con una transmitancia de amplitud $f(x, y)$ ubicada en el plano focal frontal de $L1$ e iluminada por un haz colimado, su transformada de Fourier $F(\xi, \eta)$ se muestra en el plano focal posterior de $L1$, de modo que el frente de onda que emerge del holograma es

$$G(\xi, \eta) = F(\xi, \eta) H(\xi, \eta)$$

Una segunda operación de transformada de Fourier por la lente $L2$ produce un conjunto de múltiples imágenes.

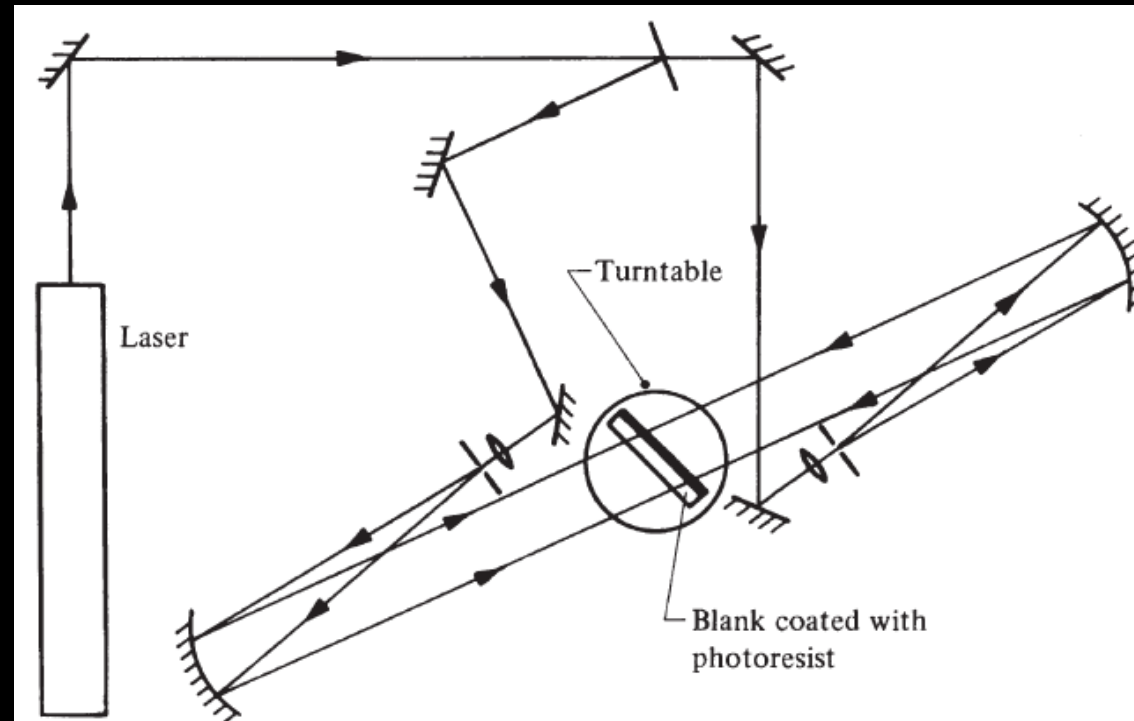
$$\begin{aligned} g(x, y) &= f(x, y) * \sum_n \sum_m \delta(x - nx_0, y - my_0) \\ &= \sum_n \sum_m f(x - nx_0, y - my_0). \end{aligned}$$

Otras aplicaciones

Rejillas de difracción holográfica.

Se pueden producir rejillas de difracción de alta calidad registrando un patrón de interferencia en una capa de fotorresistente recubierta sobre un sustrato trabajado ópticamente. Las rejillas holográficas están libres de errores periódicos y aleatorios y exhiben niveles muy bajos de luz dispersa.

Sistema óptico típico utilizado para producir redes holográficas:

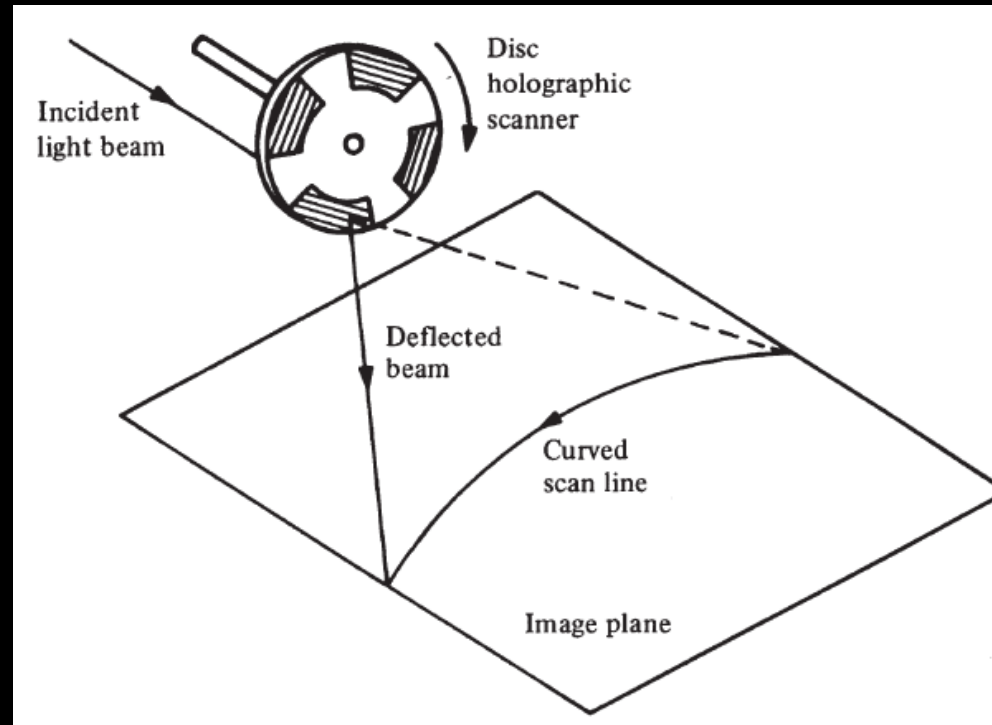


Otras aplicaciones

Escáneres holográficos.

Los escáneres holográficos son significativamente más baratos que los escáneres de espejo y se usan ampliamente para impresión sin impacto de alta velocidad.

Un escáner típico consta de un disco con una serie de hologramas grabados en él, utilizando una fuente puntual como objeto y un haz de referencia colimado. Girar el disco hace que el punto de la imagen reconstruida escanee el plano de la imagen.



Otras aplicaciones

Filtros holográficos.

Los hologramas de reflexión de volumen grabados en gelatina bicromada se pueden utilizar como filtros de rechazo de banda estrecha (filtros de muesca).

Para fabricar tales filtros, un haz de luz láser (longitud de onda λ), refractado en un ángulo θ dentro de una capa de gelatina dicromatada (índice de refracción n), se refleja en un espejo en contacto con su superficie posterior para producir franjas de interferencia paralelas a la superficie. con un espaciado

$$\Lambda = \lambda / 2n \cos \theta.$$

El ángulo θ se elige de modo que el filtro tenga su pico de reflectancia en la longitud de onda deseada.

Una aplicación importante de tales filtros de muesca ha sido la protección de los ojos contra la radiación láser, manteniendo al mismo tiempo una alta transmitancia visual.

Otras aplicaciones

Elementos ópticos holográficos. (HOE)

Se puede usar un holograma para transformar un frente de onda óptico de la misma manera que una lente. Además, los hologramas generados por computadora pueden producir un frente de onda que tiene cualquier forma arbitraria.

Una de las principales ventajas de los HOE sobre los elementos ópticos convencionales es que su función es independiente de la geometría del sustrato.

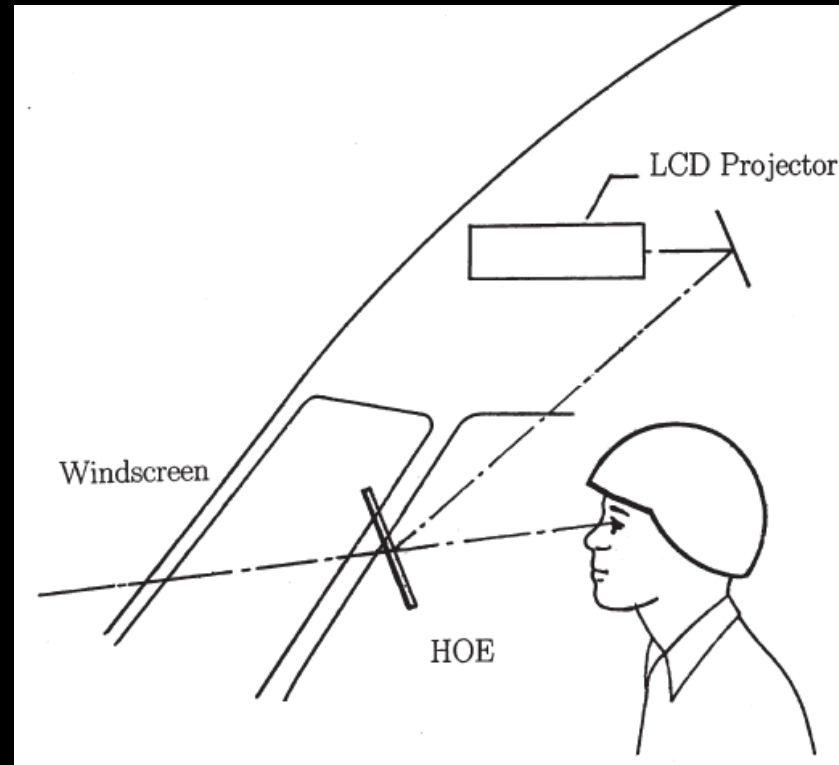
Otra ventaja es que se pueden grabar varios hologramas en la misma capa, por lo que es posible que los elementos se superpongan espacialmente.

Finalmente, los HOE brindan la posibilidad de corregir las aberraciones del sistema en un solo elemento, por lo que no se requieren elementos correctores separados.

Otras aplicaciones

Elementos ópticos holográficos. (HOE)

Pantallas frontales: Una de las aplicaciones más exitosas de los HOE ha sido en las pantallas de visualización frontal para aeronaves de alto rendimiento, donde un HOE, utilizado como combinador, proyecta una imagen de los instrumentos en el infinito, a lo largo de la línea de visión normal del piloto.



Otras aplicaciones

Elementos ópticos holográficos. (HOE)

Conformación de haz: Los elementos ópticos holográficos ahora se usan ampliamente con diodos láser para corregir la divergencia y el astigmatismo del haz. Debido a la diferencia en las longitudes de onda de registro y lectura, es necesario registrar el holograma con un frente de onda aberrado. También se pueden usar dos HOE para generar un haz circular o rectangular uniforme.

Otra aplicación interesante ha sido generar haces con un perfil de amplitud descrito por una función de Bessel.

Otra aplicación más ha sido en cabezales ópticos para reproductores de discos compactos. Por lo general, el HOE produce tres puntos enfocados en la superficie del disco. El punto central se utiliza para enfocar el haz y leer información, y los dos puntos exteriores proporcionan una señal de error de seguimiento.

Otras aplicaciones

Redes de interconexión.

Los circuitos integrados en una computadora se conectan tradicionalmente mediante cables metálicos. Las interconexiones ópticas que utilizan elementos ópticos holográficos minimizan los retrasos de propagación; además, reducen los requerimientos de espacio, ya que varias señales pueden propagarse a través de la misma red sin interferencias mutuas.

Redes neuronales holográficas.

Las redes neuronales holográficas son atractivas porque ofrecen una gran capacidad de almacenamiento, así como acceso paralelo y capacidades de procesamiento durante las fases de aprendizaje y lectura.

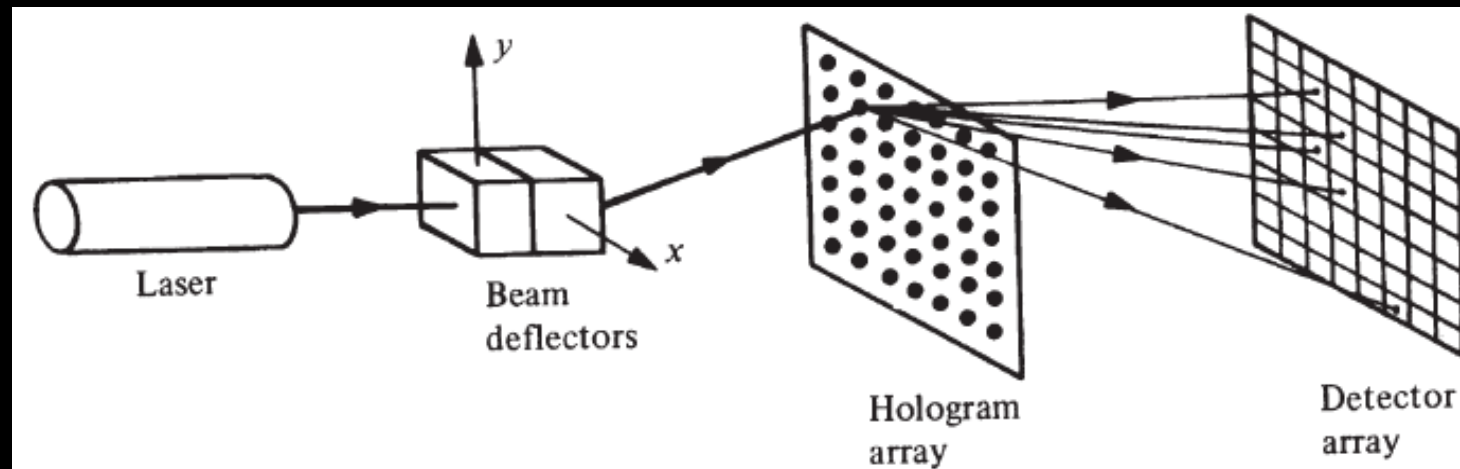
En una red neuronal holográfica, las neuronas están representadas por píxeles en un modulador de luz espacial. El brillo de un píxel corresponde al nivel de activación de la neurona. Si se ilumina un par de píxeles con un haz coherente, se puede formar un holograma en un material de grabación adecuado. Si, posteriormente, uno de los dos haces originales se utiliza para dirigir el holograma, el otro haz se reconstruye con una eficiencia que representa el peso entre estas neuronas. Con un material de registro fotorrefractivo, se puede implementar un proceso de aprendizaje aumentando, o disminuyendo, los pesos selectivamente.

Otras aplicaciones

Memorias holográficas.

La máxima densidad de almacenamiento útil con las técnicas convencionales se establece por el hecho de que el polvo o los arañazos pueden provocar la pérdida total de partes significativas de la información. Con los hologramas, el daño en la superficie solo da como resultado una caída en la relación señal-ruido general, lo que hace posible densidades de almacenamiento mucho más altas.

Esto condujo, incluso bastante pronto, al desarrollo de memorias holográficas en el que se usaron dos moduladores acústico-ópticos desviando un rayo láser para dirigirse a cualquiera de una serie de hologramas. La información almacenada en el holograma luego fue leída por una matriz de detectores en el plano de la imagen.



Interferometría holográfica

4/17/2023

La holografía permite almacenar un frente de onda y reconstruirlo en un momento posterior. Como resultado, las técnicas interferométricas se pueden utilizar para comparar dos frentes de onda que originalmente estaban separados en el tiempo o el espacio, o incluso frentes de onda de diferentes longitudes de onda.

Además, dado que un holograma reconstruye fielmente la forma de un objeto con una superficie rugosa, hasta sus detalles más pequeños, los cambios a gran escala en la forma de casi cualquier objeto se pueden medir con precisión interferométrica.

La interferometría holográfica ahora se usa ampliamente en pruebas no destructivas, aerodinámica, transferencia de calor y diagnóstico de plasma, así como en estudios del comportamiento de estructuras anatómicas y prótesis bajo estrés.

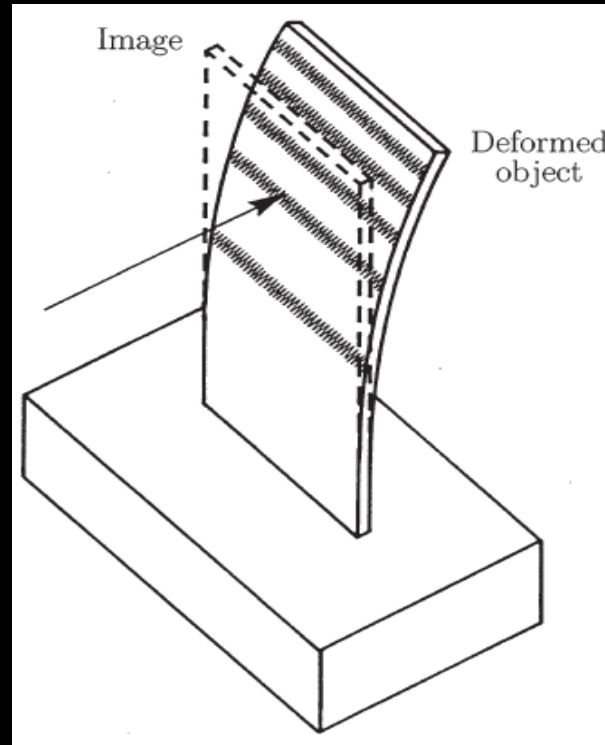
Interferometría holográfica

4/17/2023

Interferometría en tiempo real.

Si se vuelve a colocar un holograma en su posición original en el mismo sistema óptico que se usó para registrarlo y se ilumina con la onda de referencia original, se reconstruye la onda del objeto original.

Si, entonces, la forma del objeto cambia ligeramente, la onda del objeto transmitida directamente interferirá con la onda del objeto reconstruido para producir un patrón de franjas que mapea los cambios en la forma del objeto.



Interferometría holográfica

Interferometría en tiempo real.

Si los cambios en la forma del objeto son pequeños, solo se modifica la fase de la onda del objeto. La intensidad en el patrón de interferencia producido por estas dos ondas es, por tanto,

$$\begin{aligned} I(x, y) &= |u_1(x, y) + u_2(x, y)|^2 \\ &= |o(x, y)|^2 [\beta^2 T^2 r^4 + (t_0 + \beta T r^2)^2 \\ &\quad + 2\beta T r^2 (t_0 + \beta T r^2) \cos \Delta\phi(x, y)] \end{aligned}$$

Como β es negativo, se ven franjas oscuras cuando $\Delta\phi(x, y) = 2m\pi$, donde m es un número entero.

Las franjas de interferencia obtenidas por esta técnica se pueden utilizar para estudiar cambios en la forma del objeto en tiempo real.

Un problema de la interferometría holográfica en tiempo real es que la luz dispersada por el objeto se despolariza en gran medida. La caída resultante en la visibilidad de las franjas puede evitarse usando un polarizador cuando se observan las franjas.

Interferometría holográfica

Interferometría de doble exposición.

También es posible grabar dos hologramas en la misma placa fotográfica; uno del objeto en su estado original, y el otro del objeto deformado. La intensidad en la imagen es

$$I(x, y) = |o(x, y)|^2 [1 + \cos \Delta\phi(x, y)]$$

En este caso, se ven franjas brillantes cuando $\Delta\phi(x, y) = 2m\pi$.

La interferometría holográfica de doble exposición tiene la ventaja de que el reposicionamiento del holograma no es crítico, ya que las dos ondas de interferencia siempre se reconstruyen en el registro exacto. Además, la visibilidad de las franjas es buena, ya que las dos ondas tienen la misma polarización y la misma amplitud.

Un problema común en la interferometría holográfica de doble exposición con un láser cw son los movimientos no deseados del objeto entre las dos exposiciones.

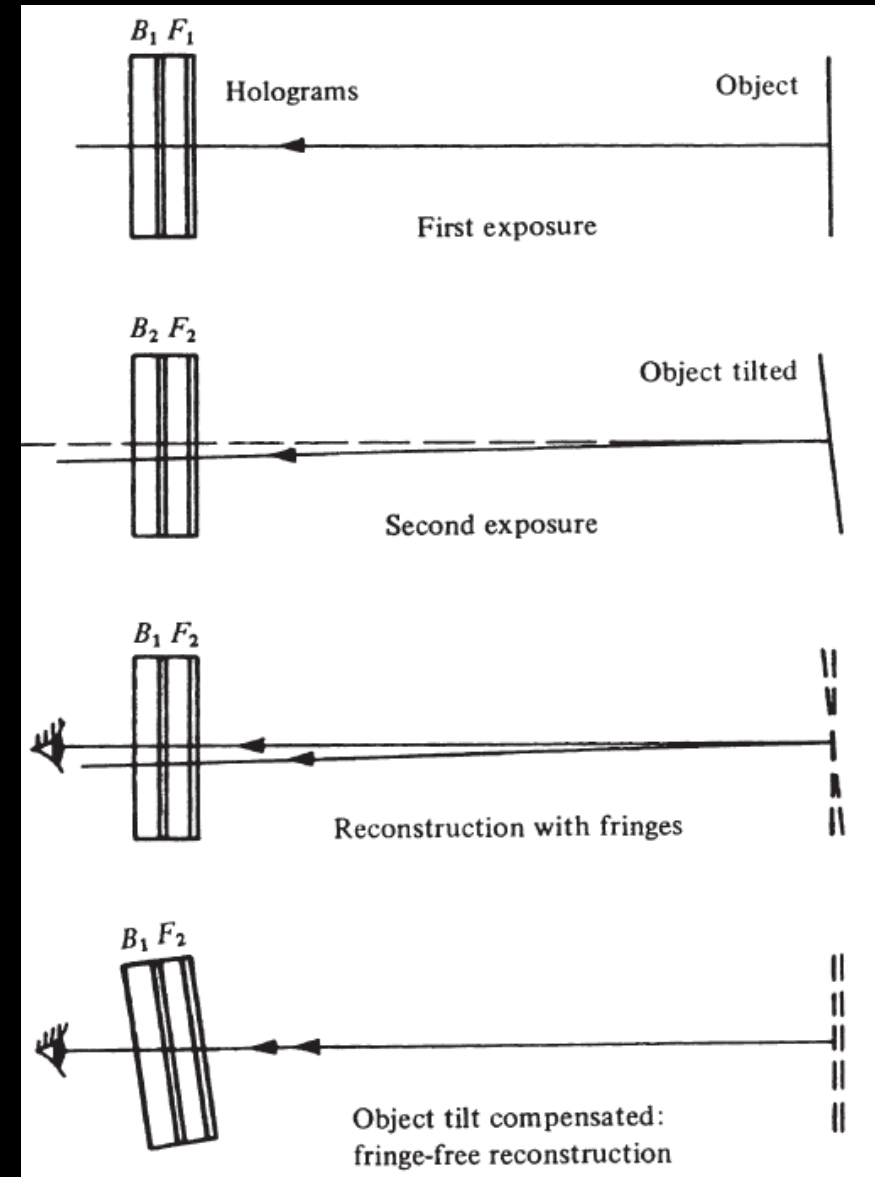
Una desventaja de la interferometría holográfica de doble exposición es que no se dispone de información sobre los estados intermedios del objeto.

Interferometría holográfica

Hologramas sándwich.

En esta técnica, como se muestra en la fig. 13.3, se exponen pares de placas holográficas en el mismo portaplacas, con sus superficies recubiertas de emulsión hacia el objeto. B_1 , F_1 están expuestos con el objeto sin tensión, mientras que B_2 , F_2 y B_3 , F_3 , . . . , están expuestos en etapas sucesivas del objeto con carga.

Después de procesar las placas, si B_1 se combina con F_2 , F_3 , . . . , en el portaplacas original e iluminado con el haz de referencia original, es posible estudiar la deformación total en cualquier etapa, ya que combinaciones como B_2F_3 , B_3F_4 , . . . muestran los incrementos en las deformaciones.



Interferometría holográfica

4/17/2023

Medidas industriales.

La interferometría holográfica normalmente requiere un entorno extremadamente estable. Sin embargo, se han desarrollado diversas técnicas que permiten utilizar la interferometría holográfica en un entorno industrial.

La interferometría holográfica de doble exposición se puede utilizar para estudiar fenómenos transitorios, como deformaciones debidas a cargas de impacto. La holografía de sándwich se puede utilizar para eliminar desplazamientos de cuerpo rígido no deseados.

Campos de índice de refracción.

La interferometría holográfica tiene ventajas prácticas incluso en aplicaciones como la visualización de flujo y los estudios de transferencia de calor, donde la interferometría convencional se ha utilizado durante muchos años.

La interferometría holográfica también se ha encontrado útil en el diagnóstico de plasma. Dado que un plasma es altamente dispersivo, las mediciones de la distribución del índice de refracción en dos longitudes de onda se pueden usar para determinar la densidad de electrones directamente.

Interferometría holográfica

4/17/2023

Desplazamientos de superficie.

Con un objeto que tiene una superficie rugosa, la fase varía de manera aleatoria a lo largo del frente de onda del objeto. Como resultado, solo las ondas de los puntos correspondientes en el frente de onda del objeto y el frente de onda reconstruido contribuyen efectivamente al patrón de interferencia, y la intensidad en cualquier punto está determinada por la diferencia de fase entre las ondas de estos dos puntos.

Localización de las franjas.

Con un objeto que tiene una superficie rugosa, la visibilidad de las franjas de interferencia es máxima para una posición particular del plano de observación, conocido como plano de localización.

En general, esta diferencia de fase variará en el rango de direcciones de visualización definidas por la apertura de la lente de visualización, lo que dará como resultado una pérdida de contraste de las franjas. Sin embargo, es posible encontrar un plano en el que el valor de $\Delta\phi$ sea casi constante en este rango de direcciones de observación; este es el plano de localización de las franjas.

Interferometría holográfica

4/17/2023

Análisis de tensión.

La inspección del patrón de franjas es bastante útil para detectar defectos localizados o áreas de concentración de tensiones.

Los primeros trabajadores tendieron a favorecer los métodos que utilizan observaciones de localización de franjas, ya que, en algunos casos, permiten mediciones directas de la deformación. Sin embargo, su precisión es limitada y, a veces, la interpretación de las franjas es difícil.

Una forma de calcular las deformaciones es evaluar los desplazamientos superficiales, con referencia a algún punto del campo que se supone estacionario, y diferenciar estos valores. Si bien es posible utilizar tres observaciones del orden de franjas realizadas desde tres direcciones, un mejor método es usar una sola dirección de observación y tres direcciones diferentes de iluminación del objeto.

Técnicas avanzadas

Superficies vibrando.

La interferometría holográfica se puede utilizar para mapear la amplitud de vibración de un objeto con una superficie reflectante difusa.

Interferometría estroboscópica. En esta técnica, se registra un holograma del objeto que vibra utilizando una secuencia de pulsos de luz que se activan en los tiempos Δt_1 y Δt_2 después del inicio de cada ciclo de vibración.

Interferometría de promedio de tiempo. En esta técnica, se registra un holograma de la superficie vibrante con un tiempo de exposición que es largo en comparación con el período de vibración. la amplitud compleja $u(x, y)$ de la onda reconstruida por el holograma será proporcional al promedio de tiempo de $o(x, y, t)$ sobre el intervalo de exposición T , por lo que

$$\begin{aligned} u(x, y) &= \frac{1}{T} \int_0^T |o(x, y)| \exp\{-i[\phi(x, y) + \mathbf{K} \cdot \mathbf{L}(x, y) \sin \omega t]\} dt, \\ &= |o(x, y)| \exp[-i\phi(x, y)] \frac{1}{T} \int_0^T \exp[-i\mathbf{K} \cdot \mathbf{L}(x, y) \sin \omega t] dt = o(x, y) M_T(x, y) \end{aligned}$$

Técnicas avanzadas

Superficies vibrando.

$MT(x, y)$ se conoce como la función característica. Si el tiempo de exposición es largo en comparación con el período de la vibración ($T \gg 2\pi/\omega$ \$), tenemos

$$M_T(x, y) = T \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \exp[-i\mathbf{K} \cdot \mathbf{L}(x, y) \sin \omega t] dt \\ = J_0[\mathbf{K} \cdot \mathbf{L}(x, y)],$$

donde J_0 es la función de Bessel de orden cero de primera clase. La intensidad en la imagen reconstruida es

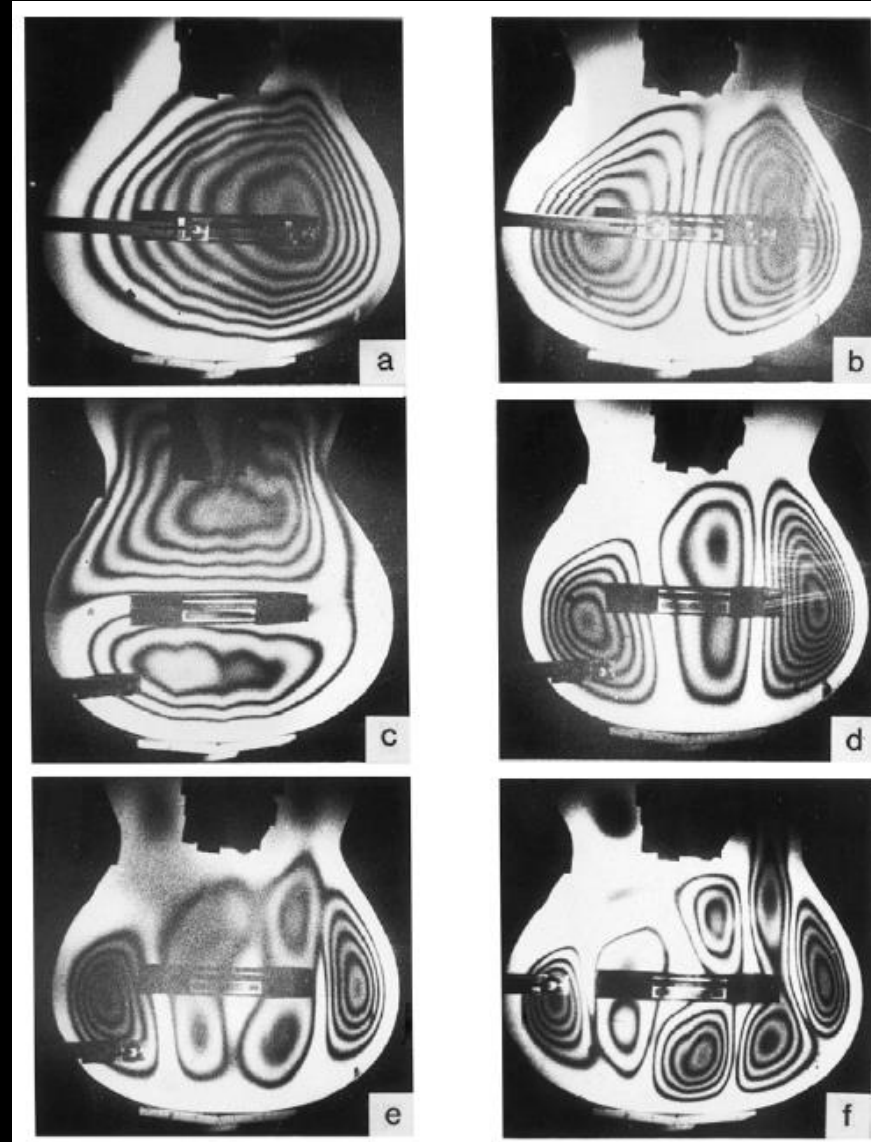
$$I(x, y) = |o(x, y) M_T(x, y)|^2 \\ = I_0(x, y) J_0^2[\mathbf{K} \cdot \mathbf{L}(x, y)].$$

Si la amplitud de vibración varía sobre el objeto, se da lugar a franjas (contornos de igual amplitud de vibración) que cubren la imagen reconstruida. Las franjas oscuras, en las que la intensidad cae a cero, corresponden a los ceros de la función de Bessel, y las franjas claras a sus máximos. El primer máximo, que corresponde a los nodos, es el más brillante, mientras que las intensidades de los máximos sucesivos, que se producen a mayores amplitudes de vibración, disminuyen progresivamente.

Técnicas avanzadas

Superficies vibrando.

Una serie de interferogramas promediados en el tiempo obtenidos con una guitarra acústica, que muestran los modos resonantes de su caja de resonancia.



Técnicas electrónicas

Debido a que la intensidad en las franjas de interferencia de dos haces varía sinusoidalmente con la diferencia de fase, es difícil ubicar los máximos o mínimos de la franja, en una fotografía del patrón de interferencia, a menos de una décima parte del espacio entre franjas.

Evaluación asistida por computadora.

Una forma de obtener una mayor precisión es mediante el uso de una cámara CCD interconectada con una computadora para muestrear y almacenar los valores de la intensidad en el patrón de interferencia en una serie de puntos.

El preprocesamiento suele ser necesario para reducir el ruido moteado, así como para corregir las variaciones locales en el brillo de la imagen.

Técnicas de transformada de Fourier. Una inclinación adicional introducida en uno de los haces (por ejemplo, en la dirección x) genera franjas de fondo correspondientes a una frecuencia espacial. Estas franjas están moduladas por la diferencia de fase adicional entre los haces debido a los cambios en el objeto. Si la frecuencia espacial es suficientemente alta, la transformada de Fourier de la distribución de intensidad en el patrón de interferencia se puede procesar para obtener la diferencia de fase. La técnica de la transformada de Fourier es más útil en estudios de objetos de fase, donde el vector de sensibilidad no varía sobre el campo y es posible producir franjas rectas igualmente espaciadas.

Técnicas electrónicas

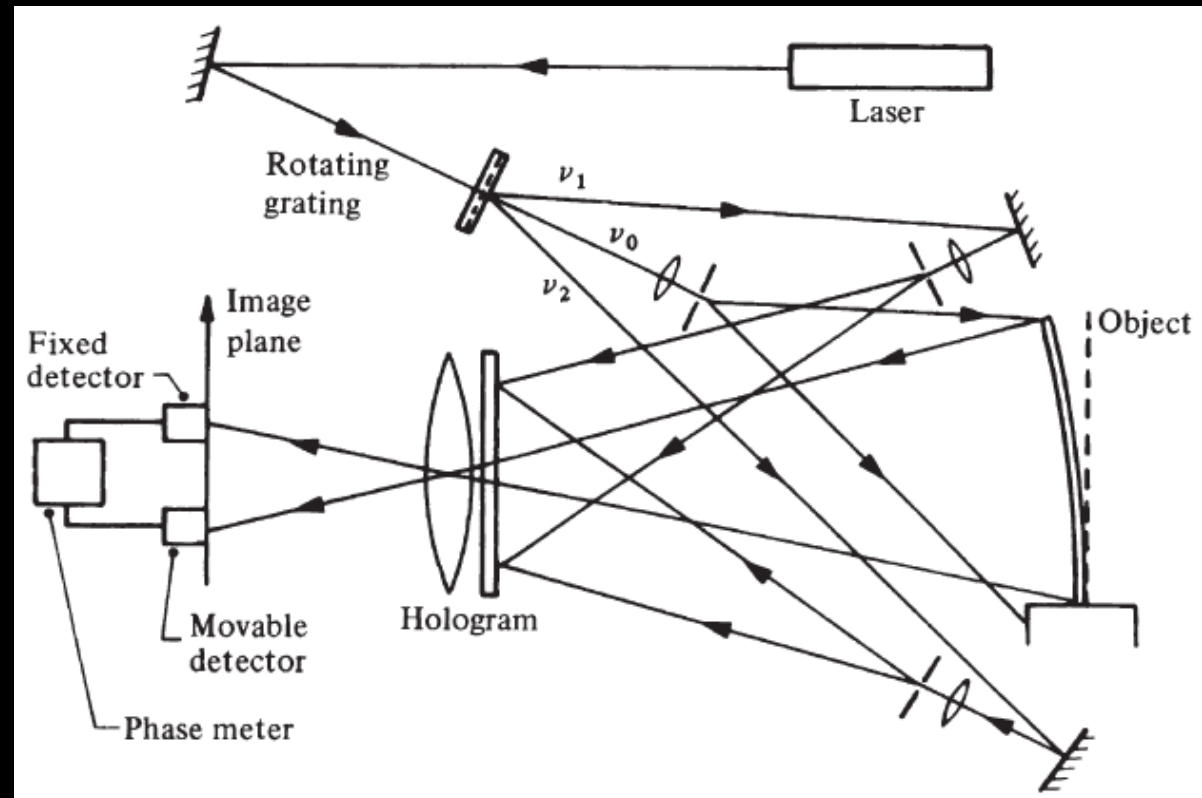
4/17/2023

Interferometría heterodina.

Se pueden realizar mediciones muy precisas de la diferencia de fase en cualquier punto mediante interferometría holográfica heterodina.

En esta técnica, se graban dos hologramas del objeto, en etapas sucesivas de carga, utilizando el sistema óptico que se muestra.

Los dos hologramas se graban en la misma placa, con diferentes haces de referencia que tienen la misma frecuencia que el haz del objeto, pero con una separación angular.



Técnicas electrónicas

Interferometría heterodina.

En la etapa de reconstrucción, se introduce una pequeña diferencia de frecuencia entre los dos haces de referencia que iluminan el holograma por medio de una rejilla giratoria o dos moduladores acústico-ópticos operados a frecuencias ligeramente diferentes. Cuando las dos ondas reconstruidas se superponen en un fotodetector, la salida viene dada por la relación

$$I(x, y, t) = |a_1(x, y)|^2 + |a_2(x, y)|^2 + 2|a_1(x, y)||a_2(x, y)| \times \cos[2\pi(\nu_1 - \nu_2)t - \Delta\phi(x, y)],$$

donde ν_1 y ν_2 son las frecuencias de los dos haces que iluminan el holograma, $a_1(x, y)$ y $a_2(x, y)$ son las amplitudes de las ondas reconstruidas y $\Delta\phi(x, y) = \phi_1(x, y) - \phi_2(x, y)$, donde $\phi_1(x, y)$ y $\phi_2(x, y)$ son las fases de las ondas reconstruidas.

Esta técnica puede medir las diferencias de fase con un alto grado de precisión (superior a $2\pi/500$), pero, dado que implica mediciones punto por punto, es lenta y requiere un entorno muy estable.

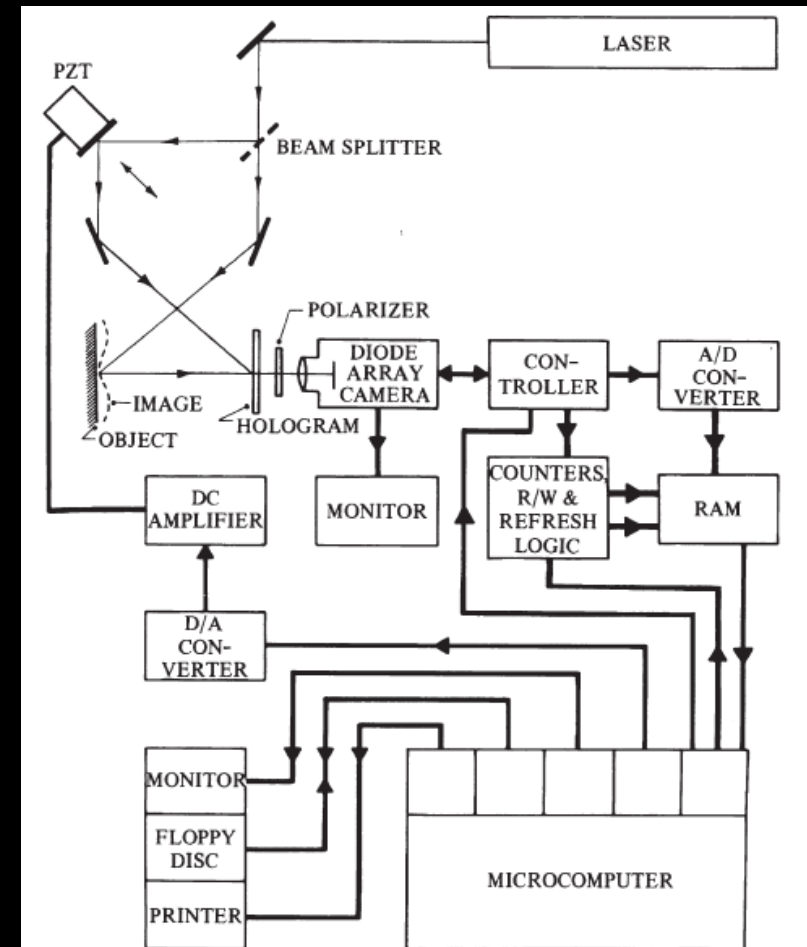
Técnicas electrónicas

Interferometría de cambio de fase.

La interferometría holográfica de cambio de fase permite mediciones precisas en franjas en tiempo real en una gran cantidad de puntos en muy poco tiempo.

En esta técnica se forma una imagen de las franjas en tiempo real en una matriz CCD. Durante un solo escaneo de la matriz, los valores de la intensidad en cada uno de los píxeles se leen, digitalizan y almacenan en la memoria de una computadora.

Entre exploraciones sucesivas de la matriz, la fase del haz de referencia se cambia, en relación con la del haz del objeto, por medio de un espejo montado en un traductor piezoeléctrico (PZT) al que se aplican los voltajes apropiados por un amplificador controlado, a través de un digital a analógico convertidor, por la computadora.

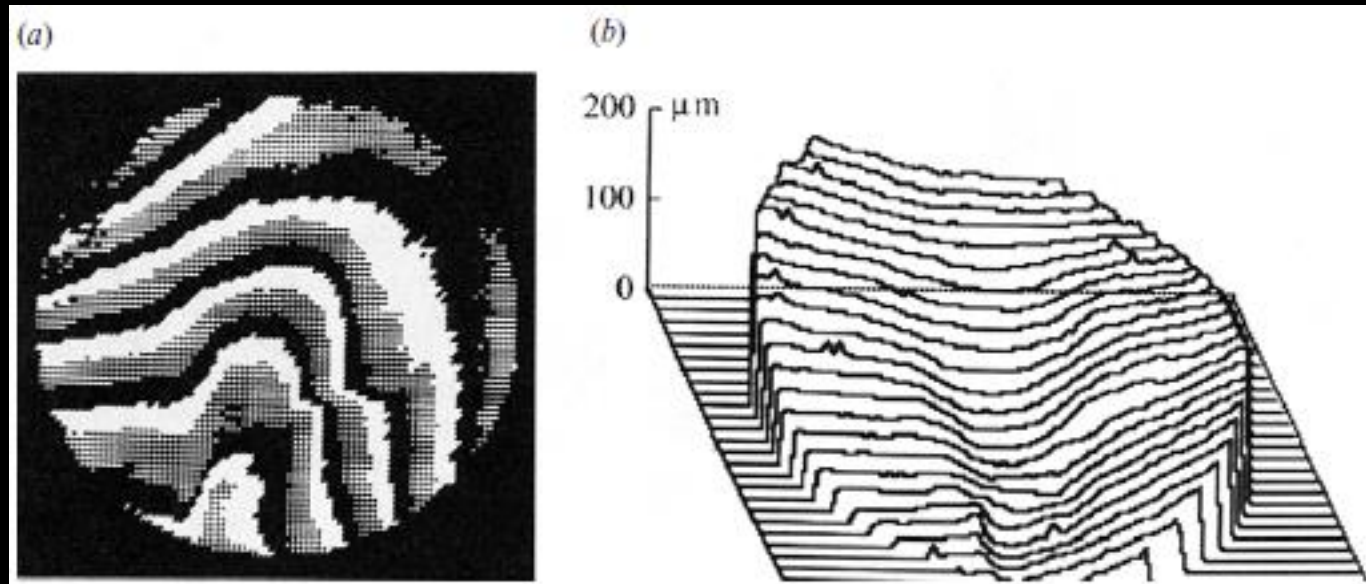


Técnicas electrónicas

Interferometría de cambio de fase.

Desplazamientos vectoriales. El cambio de fase se ha aplicado a la medición de desplazamientos y deformaciones vectoriales.

Contorneado. El cambio de fase se puede utilizar con holografía de dos longitudes de onda, así como con la técnica de dos índices de refracción, para contornear superficies. La figura muestra un mapa de contorno y un gráfico isométrico del patrón de desgaste en una superficie obtenida con la técnica de dos índices de refracción. El intervalo de contorno era de 200 micrómetros y las lecturas podían repetirse hasta ± 1 micrómetro.

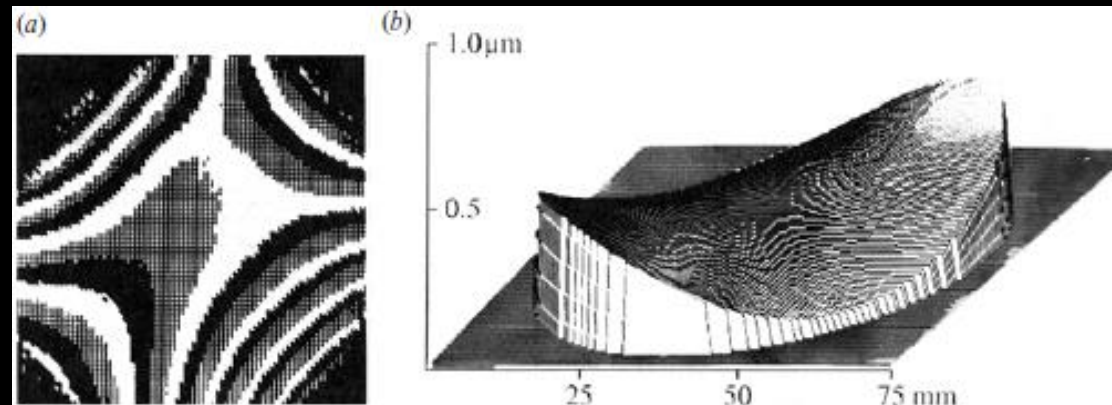


Técnicas electrónicas

Interferometría de cambio de fase.

Análisis de vibraciones. La interferometría holográfica estroboscópica produce franjas con una distribución de intensidad cosenoidal, de modo que se pueden realizar mediciones precisas del desplazamiento de la superficie mediante técnicas de cambio de fase. Sin embargo, cuando se observan las franjas en tiempo real, el ancho del pulso debe reducirse a una pequeña fracción del período de la vibración, lo que provoca una caída importante en el brillo de la imagen. Este problema se puede superar usando iluminación estroboscópica para grabar un holograma del objeto vibrando y haciendo mediciones en las franjas obtenidas con el objeto estacionario e iluminación continua.

La figura (a) es un gráfico de contorno de los desplazamientos superficiales de una placa de metal cuadrada que vibra a 231 Hz obtenida por interferometría holográfica de cambio de fase con iluminación estroboscópica, mientras que la figura (b) es un gráfico tridimensional de los desplazamientos sobre el centro de la placa.

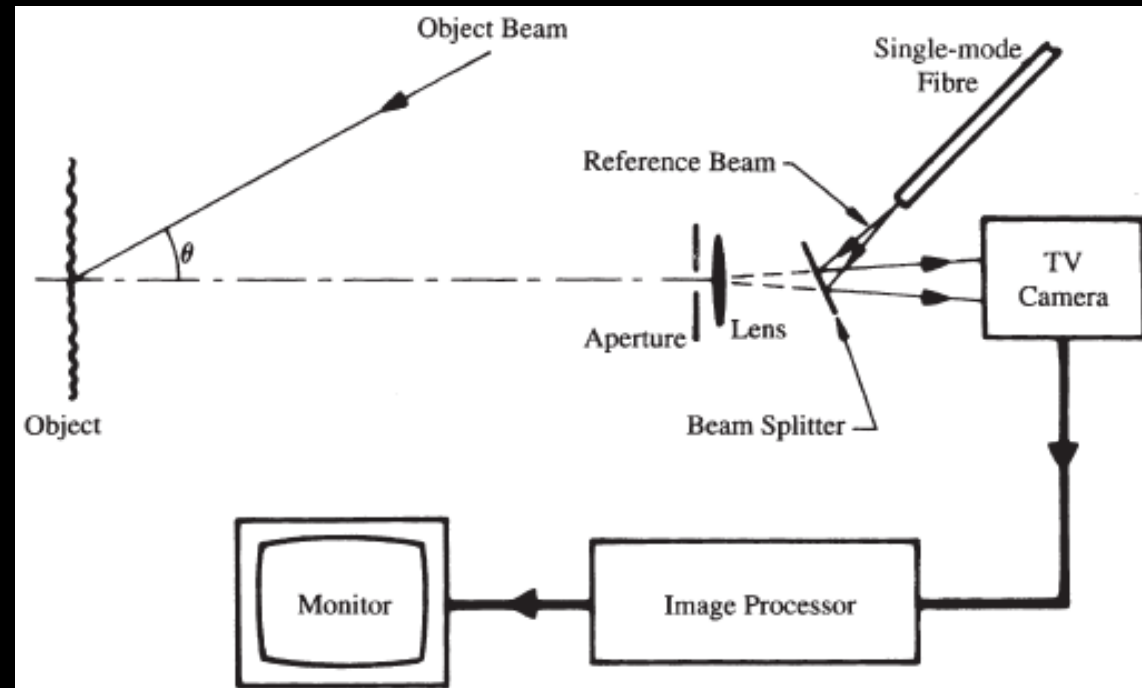


Técnicas electrónicas

Interferometría holográfica electrónica. (ESPI)

Se puede considerar que la interferometría holográfica electrónica evolucionó a partir de la interferometría de patrón de motas electrónica (ESPI).

Un sistema típico utilizado para ESPI se muestra en el esquema. El objeto se refleja en el objetivo de una cámara de televisión junto con un haz de referencia coaxial. El holograma de imagen resultante tiene una estructura moteada gruesa que puede ser resuelta por la cámara de televisión. Cualquier cambio en la forma del objeto da como resultado un cambio en la distribución de intensidad de las motas en la parte correspondiente de la imagen.



Dispositivos holográficos

4/17/2023

Heliodisplay.

El Heliodisplay es una tecnología creada por la empresa IO2Technology que reproduce hologramas en 2-D sin utilizar un medio físico como una pantalla. Lo que hace es convertir las propiedades del reflejo del aire. El aire es capturado, convertido instantáneamente y vuelto a expulsar. La imagen se proyecta sobre el aire convertido.



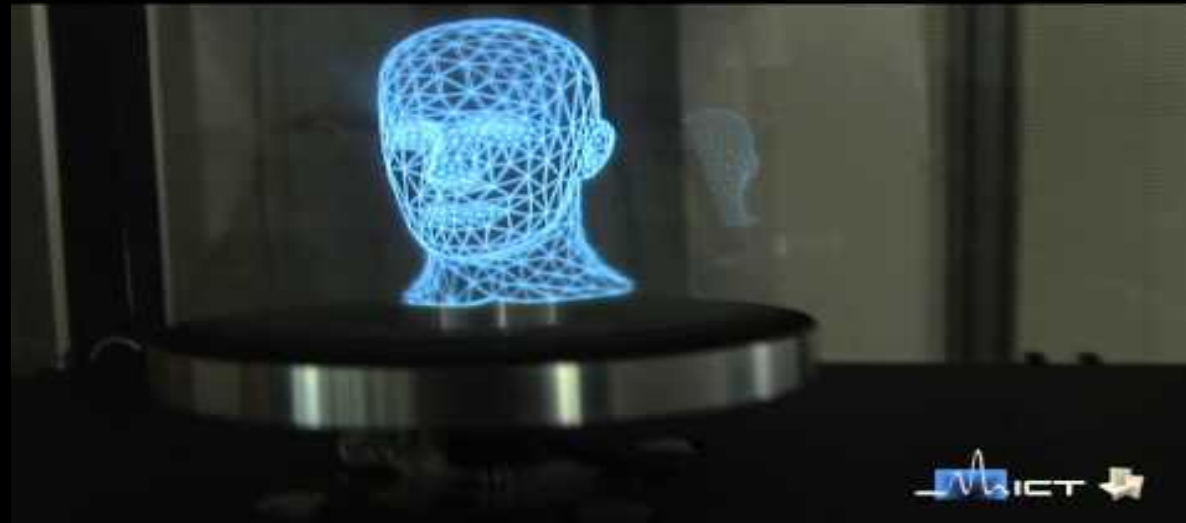
Dispositivos holográficos

4/17/2023

Interactive 360° Light Field Display

Es un dispositivo de vídeo holográfico desarrollado en conjunto por Sony, Fake Space Lab y la Universidad del Sur de California.

El sistema presentado consta de un videoprojector de alta velocidad, un espejo rotatorio cubierto por un difusor holográfico y un circuito semiconductor FPGA (Field Programmable Gate Array), que se encarga de decodificar la señal DVI. Se utiliza una tarjeta gráfica programable y estándar que puede renderizar más de 5000 imágenes por segundo y proyectar vistas en 360 grados con separación de 1,25 grados.



Bibliografía

Hariharan, P (2002). Basics of Holography. Cambridge: Cambridge University Press.

F. Graham Smith, Terry A. King, D. Wilkins (2007). Optics and Photonics: An Introduction (2nd Edition). Wiley.

<https://en.wikipedia.org/wiki/Holography>

<https://es.wikipedia.org/wiki/Holografía>