



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

REVISIÓN DE TÉCNICAS DE GENERACIÓN Y VISUALIZACIÓN DE IMÁGENES 3D

Autor/es

David Gracia García

Director/es

M^a VICTORIA COLLADOS COLLADOS

Facultad de Ciencias – Universidad de Zaragoza
Grado en Óptica y Optometría
Curso académico 2019-2020

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	2
1.1 GENERACIÓN Y VISUALIZACIÓN DE IMÁGENES EN 3D. EL FUTURO.	2
2. OBJETIVOS	2
3. FUNDAMENTOS DE LA VISIÓN BINOCULAR	3
4. TÉCNICAS DE GENERACIÓN DE IMÁGENES 3D. LA HOLOGRAFÍA	7
5. TÉCNICAS DE VISUALIZACIÓN DE IMÁGENES 3D	11
5.1 ESTEREOGRAMAS	11
5.1.1 ESTEREOSCOPIOS	12
5.1.2 ANAGLIFOS	14
5.1.3 POLARIZADOS	14
5.1.4 LCD	15
5.2 LENTICULARES	17
5.3 BARRAS DE PARALAJE	19
6. EFECTOS 3D	20
6.1 PANTALLAS TRANSPARENTES	20
6.2 PIRÁMIDE HOLOGRÁFICA	21
7. CONCLUSIONES	22
8. BIBLIOGRAFÍA	23

1. INTRODUCCIÓN

1.1 GENERACIÓN Y VISUALIZACIÓN DE IMÁGENES EN 3D. EL FUTURO.

Los dispositivos estereoscópicos han cobrado mucha importancia en nuestra sociedad actual para innumerables aplicaciones, algunas de estas tan importantes como la operación de dispositivos remotos, imágenes médicas, cirugía, visualización científica y diseño asistido por ordenador, entre otras muchas. Sin embargo, el desarrollo más significativo y emocionante es la incorporación de tecnologías estereoscópicas en nuestra vida social y entretenimiento; podemos destacar la cinematografía, la televisión y los videojuegos.

En todas estas aplicaciones, las imágenes y visualizaciones tridimensionales deben crear una representación fidedigna de la estructura 3D de la escena representada a partir de una pareja de imágenes 2D. No sólo basta con representar y visualizar fielmente la imagen en 3D, el espectador debe estar cómodo y cumplir unos requisitos de satisfacción para disfrutarlo (la fatiga ocular o los dolores de cabeza y mareos son causas muy comunes que detallaremos más adelante). La generación y presentación de las imágenes estereoscópicas debe ser extremadamente precisa para no generar estas causas de discomfort.

Hemos hablado de imágenes estereoscópicas, pero también existen, para estas aplicaciones, técnicas que generan una imagen 3D real, sin partir de imágenes 2D, por ejemplo, la holografía.

En este documento revisaremos los fundamentos de la capacidad estereoscópica de nuestro sistema visual y cómo puede verse afectada, además de las técnicas que permiten generar una imagen tridimensional real, visualizar una imagen 2D en tres dimensiones y algunos efectos que generan una "falsa" ilusión estereoscópica.

2. OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo es realizar una revisión de las diferentes técnicas para generar imágenes 3D y para visualizar una imagen tridimensional a partir de imágenes planas. Es muy importante diferenciar la generación real de una imagen en 3D (en esto se basa la holografía) de la visualización de una imagen plana de manera tridimensional. Analizaremos el fundamento físico de cada una de estas técnicas, sus aplicaciones y ventajas e inconvenientes.

3. FUNDAMENTOS DE LA VISIÓN BINOCULAR

La estereopsis es la capacidad visual para percibir el espacio de una manera tridimensional. El cerebro fusiona e interpreta la ligera diferencia entre las imágenes retinianas de ambos ojos, originando así una sensación de profundidad.

Para que esto sea posible, nuestro sistema visual binocular debe estar capacitado anteriormente para lograr una percepción simultánea de un mismo objeto en cada ojo por separado y poder fusionar estas dos imágenes en una sola [1].

“El objetivo fundamental de la visión binocular es la interpretación fidedigna de nuestro entorno en una única imagen a partir de las dos imágenes retinianas. Para que esto ocurra (visión haplópica) hace falta una coordinación motora y sensorial” [2].

Para que la visión binocular funcione correctamente, deben llevarse a cabo las siguientes acciones:

- Los campos visuales monoculares deben solaparse.
- Los dos ojos deben moverse de forma coordinada. Mediante los músculos extraoculares, los ejes visuales de ambos ojos se dirigen hacia el punto de fijación del objeto que se desea observar. Así pues, las imágenes en ambos ojos del punto fijado se forman sobre las fóveas.
- Debe mantenerse la correspondencia retiniana:

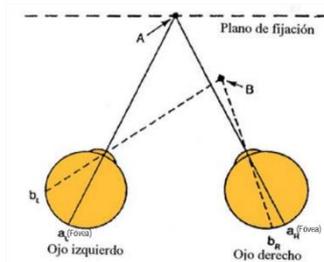


Figura 1: Esquema de correspondencia retiniana [2]

Como se muestra en la figura 1, cuando los dos ojos se fijan en un punto A, la imagen de este punto se forma en el centro de la fóvea. Estas dos zonas en retina (a_R y a_L) se denominan puntos correspondientes ya que excitan la misma zona del cerebro y se interpreta como una sola imagen. Si el par de puntos de las retinas de ambos ojos presentan la misma excentricidad se denomina correspondencia retiniana.

- Fusión de las imágenes neuronales. Una vez conseguido todo esto, el cerebro procesa las dos imágenes retinianas para producir la sensación de un único objeto (fusión sensorial) [2].

La fusión motora se define como la habilidad para alinear los ojos de manera que pueda mantenerse la fusión sensorial. En este caso, el estímulo de los movimientos oculares de fusión es la disparidad retiniana que supera los límites de las áreas de Panum. Y contrariamente a la fusión binocular, su responsable principal es la retina periférica. Si

hay fusión motora y sensorial, pero las imágenes que procesa el cerebro, procedentes de los dos ojos, son iguales o excesivamente diferentes (por defectos refractivos o retinianos), no se consigue estereopsis. Si el defecto se encuentra en los mecanismos de fusión y no se consigue fusionar las imágenes, por ejemplo, por ojos disociados, se produce diplopia y las imágenes se ven separadas. Cuando ni siquiera se consigue el primer grado de visión binocular (percepción simultánea), el efecto será la supresión de una de las imágenes retinianas.

Cuando se fija la mirada en un punto determinado, los puntos más alejados y los más cercanos se observan con diplopia (homónima y cruzada respectivamente). Teóricamente, esto debería ocurrir, aunque el punto de fijación y el segundo punto estuviesen muy próximos, como se muestra en la figura 1. En la práctica existe un intervalo espacial dentro del cual la imagen de los dos puntos es haplópica.

Este intervalo espacial en el cual se consigue fusionar las imágenes, aunque los puntos no sean correspondientes, se denomina Área de fusión de Panum, ya que la fusión se da punto a área, y no punto a punto (un punto imagen en una retina funde con los puntos imagen en la otra retina que están dentro de un área en torno al punto correspondiente). Los puntos del área de Panum forman el espacio de Panum (figura 2), un espacio virtual donde los objetos se perciben en visión haplópica, y los que se encuentren fuera, en visión diplópica. Este espacio también es responsable de poder conseguir estereopsis visualizando estereogramas.

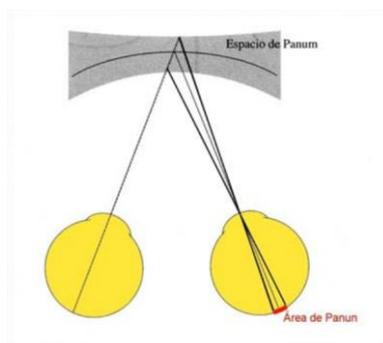


Figura 2: Esquema de correspondencia entre el Área de Panum y el espacio de Panum [2]

Esto demuestra que existe una tolerancia en los mecanismos de fusión, aunque las imágenes retinianas no tengan una correspondencia total. Las áreas fusionales son elípticas y el rango fusional es mayor para estímulos separados horizontalmente que para estímulos separados verticalmente. El tamaño de las áreas de Panum (y por ello el del espacio de Panum) aumenta al incrementar la excentricidad del punto que se observa. Debido a esto se facilita la fusión en la periferia de la retina y las anomalías son más tolerables que en la fovea [1,2,3].

Debido a la separación natural entre los dos ojos, todos los objetos que observamos de una escena se proyectan desplazados en las retinas del ojo derecho e izquierdo y, por tanto, ese desplazamiento (figura 3) es el que permite ver la escena en profundidad. El estímulo visual que desencadena el fenómeno de la estereopsis es la disparidad [3], debido precisamente a esa diferencia en las imágenes que capta cada ojo de una determinada escena. El término disparidad se refiere a la discrepancia angular entre las

posiciones de las imágenes de un mismo objeto en ambos ojos. El procesamiento de la disparidad binocular es muy importante para numerosas funciones sensoriales, perceptivas y motoras. Una de las consecuencias directas de tener acceso a la disparidad es la capacidad de estimar la profundidad de objetos y planos en una escena. Además de la estimación de la profundidad, también se sabe que la disparidad binocular impulsa los movimientos oculares de vergencia y la acomodación, para desempeñar un papel importante en la ejecución de acciones.

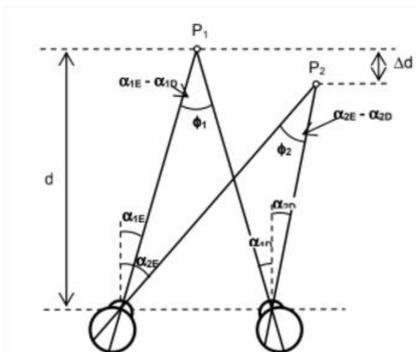


Figura 3: Esquema de la disparidad binocular [5]

La disparidad binocular se puede calcular como:

$$DB = (\alpha_{2E} - \alpha_{1E}) - (\alpha_{2D} - \alpha_{1D}) = (\alpha_{2E} - \alpha_{2D}) - (\alpha_{1E} - \alpha_{1D}) \approx \frac{dip\Delta d}{d^2} \quad (1)$$

Si el resultado es un valor positivo indicará que P2 está más próximo que P1, pero si es de signo negativo indicará que está más alejado que P1 [5].

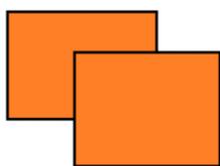
Como acabamos de ver, para percibir la profundidad del entorno el sistema binocular debe funcionar correctamente y trabajar de forma coordinada y conjugada, sin embargo, es posible que monocularmente el cerebro interprete cierta información y logre esta sensación de tridimensionalidad. Pueden diferenciarse diversos tipos de mecanismos que actúan a nivel monocular en la visión para proporcionar información tridimensional [1,2,5].

De manera natural, el ojo puede acomodar si las imágenes que está percibiendo se encuentran borrosas. Cuando esta acomodación se activa, el sistema visual asocia este fenómeno a que el objeto se encuentra en una posición más cercana. De la misma manera, la convergencia también actúa para cambiar los puntos de fijación. Estos cambios actúan en el ángulo de convergencia y se percibe la diferencia de profundidad entre ambos puntos. Existen, además, muchas otras pistas monoculares que no se basan en nuestra información fisiológica, sino en nuestro aprendizaje [1,2,5].

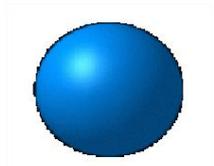
Cuanto más pequeño sea el tamaño percibido en retina de un objeto, dará la sensación que se encuentra más lejano que, por el contrario, un objeto con mayor tamaño en retina. La perspectiva geométrica es utilizada para la obtención de información de

cómo están posicionados todos los objetos, causado porque existe una confluencia de líneas en una escena también llamada punto de fuga. Un concepto similar es la altura relativa; si los objetos del entorno se disponen en diagonal y hay una línea horizontal que los separa a ambos lados, los objetos situados arriba darán la sensación de estar más alejados.

El fenómeno de difusión depende de la longitud de onda. Si el objeto está alejado, atraviesa más atmósfera hasta que la luz alcanza el objeto que si un objeto estuviera cerca, y da la sensación que los objetos están menos nítidos, más difuminados y más azulados. Los objetos más iluminados dan la sensación de estar más próximos que los que están menos iluminados. Un objeto que presenta sombras parece tener tridimensionalidad, como se muestra en la figura 4b).



a) *Superposición de imágenes*



b) *Luces y sombras*



c) *Gradiente de texturas*

Figura 4: Pistas monoculares para la percepción de profundidad [6]

Dentro del gradiente de texturas, cuando una textura posee un patrón que es repetitivo, parecerá que se vuelve más pequeño cuanto más lejos esté el observador (figura 4c)). Es una técnica utilizada comúnmente por los artistas para lograr la sensación de profundidad. Además, en objetos lejanos es imposible poder apreciar pequeños detalles, al contrario que, si son objetos cercanos, donde sí que es posible. El paralaje está basado en la velocidad relativa de cada objeto. Cuando se mueve el observador, éste percibe el movimiento de los objetos situados en su campo de visión. Cuando más cerca esté un objeto del observador en movimiento, éste percibirá un movimiento más rápido, y en sentido opuesto al movimiento del observador. Por el contrario, cuanto más alejados estén los objetos, más lento se percibirá el movimiento.

La interposición ocurre cuando existen dos objetos puestos de tal modo que uno de ellos está superpuesto o cubriendo una parte del otro (figura 4a)). Se interpreta entonces que el primero de ellos está en una posición más cercana.

Gracias a todos estos factores empíricos monoculares, se puede obtener la percepción de profundidad, aunque no tiene porqué llevarnos a poseer estereopsis. Por eso mismo, aunque una persona pierda capacidad estereoscópica puede seguir manteniendo una calidad de vida aceptable, aunque existen evidencias de que la gran parte de las funciones diarias de la vida se mejorarían gracias a la percepción estereoscópica binocular [3].

4. TÉCNICAS DE GENERACIÓN DE IMÁGENES 3D. LA HOLOGRAFÍA

En este apartado se explicará la holografía como técnica de generación de imágenes reales o virtuales en tres dimensiones.

En una fotografía se registra en un material fotosensible la amplitud (intensidad) de la onda que proviene del objeto a fotografiar, resultado de la reflexión y/o difusión de un iluminante por parte del objeto. La onda que sale del objeto iluminado tendrá la forma general: $A\varepsilon^{i\alpha}$ donde A es la amplitud de la onda, y α es la fase. La amplitud de una onda no contiene información sobre la profundidad, es decir, sobre la posición (distancia a la cámara) en la que se encuentra cada punto del objeto. Esta información se encuentra en la fase de la onda, y no es posible registrarla en un medio sensible a la intensidad, ya que la intensidad tan sólo depende de la amplitud de la onda:

$$I = (A\varepsilon^{i\alpha})(A\varepsilon^{i\alpha})^* = A\varepsilon^{i\alpha}A\varepsilon^{-i\alpha} = A^2 \quad (2)$$

Para conseguir que en un medio fotosensible quede registrada la información de la fase de la onda objeto, se utiliza el fenómeno de la interferencia, es decir, se hace interferir la onda objeto con una onda de referencia (de fase conocida). Si ambas ondas son coherentes, la intensidad de la interferencia depende de la diferencia de fase entre ambas ondas, de esta manera, en la intensidad de la interferencia tendremos información de la fase de la onda objeto. En esto se basa la holografía, que es un método de producción de imágenes tridimensionales en dos etapas (registro y reconstrucción). Mediante el proceso de registro se almacena en determinados medios fotosensibles la información necesaria en forma de franjas de interferencia para posteriormente reconstruir un frente de onda idéntico al que dio lugar a esa información. El medio fotosensible ya impresionado, soporte de esta información, constituye el holograma.

En la primera etapa del método holográfico, el registro, se hacen interferir [7] las ondas emitidas por cada uno de los puntos del objeto con un haz de referencia y se graba la interferencia de dos ondas, la onda objeto y la onda de referencia, como se muestra en la figura 4 (izquierda).

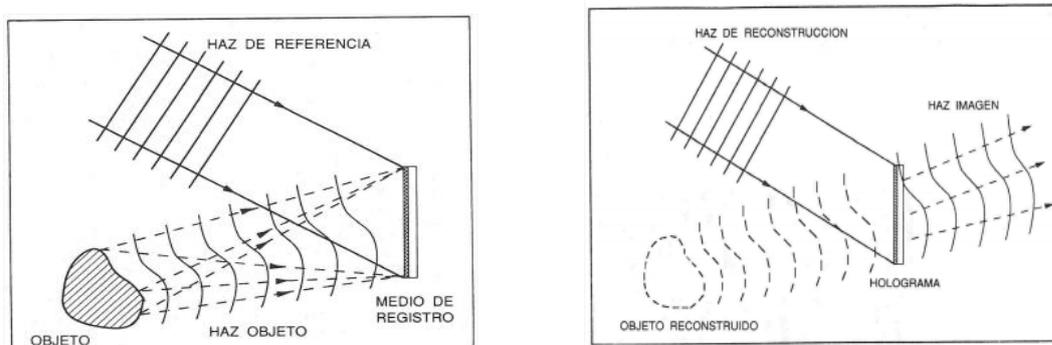


Figura 5: Esquema de la etapa de registro (izquierda) y reconstrucción (derecha) de un holograma [7]

Para un análisis simple, consideremos un objeto iluminado mediante un haz de luz

coherente. Este objeto difunde parte de la luz incidente y esta luz dispersada constituye la onda objeto que puede caracterizarse mediante la función compleja (campo eléctrico) de la onda objeto:

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_0 \exp(-i\phi_0) \quad (3)$$

Donde ε_0 es la amplitud de la onda y ϕ_0 su fase. Esta onda objeto se hace interferir con la onda de referencia:

$$\varepsilon_R = \varepsilon_R \exp(-i\phi_R) \quad (4)$$

En la superficie del material fotosensible:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_R = \varepsilon_0 \exp(-i\phi_0) + \varepsilon_R \exp(-i\phi_R) \quad (5)$$

La intensidad resultante en cada punto del plano del holograma, correspondiente a la suma de ambas ondas, puede escribirse como:

$$I = |\varepsilon_0 + \varepsilon_R|^2 \quad (6)$$

Sustituyendo en esta expresión las ecuaciones 1 y 2 queda:

$$I = |\varepsilon_0|^2 + |\varepsilon_R|^2 + \varepsilon_0 \varepsilon_R [\exp i(\phi_0 - \phi_R) + \exp i(\phi_R - \phi_0)] \quad (7)$$

y finalmente:

$$I = |\varepsilon_0|^2 + |\varepsilon_R|^2 + 2 \varepsilon_0 \varepsilon_R \cos(\phi_R - \phi_0) \quad (8)$$

Por tanto, la intensidad de la interferencia de dos ondas coherentes depende de la diferencia de fase entre las ondas en cada punto. Esto significa que la interferencia produce diferencias de intensidad en las diferentes zonas del material dependiendo de la fase de las dos ondas en cada punto (figura 6). Después, depende del material y de cómo se trate posteriormente, estas diferencias de intensidad pueden quedar registradas en forma de diferencias de absorción (será entonces un holograma de amplitud), o diferencias de índice o de espesor (holograma de fase) [7].

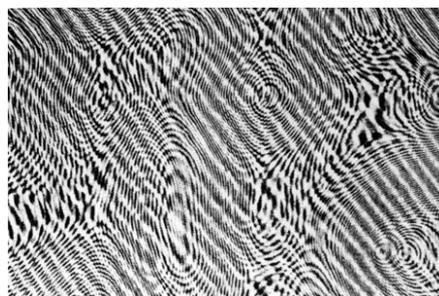


Figura 6: Interferencia de un objeto y una onda plana [8]

Además de satisfacerse las condiciones de coherencia necesarias para la formación de la interferencia, el poder de resolución del medio de registro debe ser elevado, pues las franjas de interferencia pueden tener separaciones del orden de 1 μm . Estos órdenes de magnitud hacen necesaria una ausencia total de movimientos y

vibraciones de los elementos que intervienen en la formación del holograma.

El holograma una vez registrado se ilumina con la misma onda de referencia utilizada en el registro: Esta etapa es la que llamamos reconstrucción del holograma. La onda de referencia es difractada por la estructura de amplitud, índice o espesor variable generada en el material fotosensible, de forma que da lugar a varias ondas, una de ellas será una réplica de la onda objeto. Por tanto, un observador a la salida del holograma verá la luz como si viniera del objeto, aunque el objeto no esté físicamente.

Si consideramos un holograma de amplitud, la transmitancia del holograma una vez revelado el material es [9]:

$$t_a = t_b + \beta t [|\varepsilon_0|^2 + \varepsilon_0 \varepsilon_R \exp^{i(\phi_R - \phi_0)} + \varepsilon_R \varepsilon_0 \exp^{-i(\phi_R - \phi_0)}] \quad (9)$$

Donde t_b es una transmitancia uniforme debido a la onda de referencia y β la pendiente de la curva t_a (E) en $t_a = t_b$. Ahora se ilumina el holograma con una onda similar a la de registro:

$$C t_a = t_b C + C \beta t [|\varepsilon_0|^2 + \varepsilon_0 \varepsilon_R \exp^{i(\phi_R - \phi_0)} + \varepsilon_R \varepsilon_0 \exp^{-i(\phi_R - \phi_0)}] \quad (10)$$

$$\text{Si } C = \varepsilon_c \exp^{-i\phi_R} = \varepsilon_c b_0 \exp^{-i\phi_R} + \varepsilon_c \beta t |\varepsilon_0|^2 \exp^{-i\phi_R} + \varepsilon_c \beta t \varepsilon_0 \varepsilon_R \exp^{i(-\phi_0)} + \varepsilon_c \beta t \varepsilon_R \varepsilon_0 \exp^{-i(2\phi_R - \phi_0)}$$

Donde C es la onda de referencia (suele ser una onda esférica o plana, es decir, no contiene información, te ofrece un fondo de transmitancia). Tras iluminar el holograma registrado con esta onda de referencia, cada término está multiplicado por dicha onda y se forman los 4 términos. Si C es igual a la onda de referencia utilizada, el término U_3 ($\varepsilon_c \beta t \varepsilon_0 \varepsilon_R \exp^{i(\phi_R - \phi_0 - \phi_R)}$) es una réplica con diferente amplitud a la que teníamos, ya que el propósito es reconstruir la fase de la onda objeto. En el cuarto término queda algo similar pero como se puede observar las fases no se cancelan, sino que se mezclan las fases de la onda objeto y la onda de referencia. A la salida del holograma el único término que reproduce la onda como si viniera del objeto es el término U_3 .

Pueden hacerse varias clasificaciones en función de los distintos parámetros que intervienen en la realización del holograma. Desde un punto de vista puramente geométrico [7] se habla de hologramas en eje, en los cuales la dirección de los haces objeto y referencia es la misma, y hologramas fuera de eje donde las direcciones entre estos forman un cierto ángulo. Hablando de materiales fotosensibles en holografía, pueden utilizarse los mismos que los materiales fotográficos, como haluros de plata, aunque son películas ligeramente diferentes que las películas fotográficas, ya que estas últimas no necesitan tanta resolución. Esto se debe a que para seguir esas variaciones de intensidad hace falta un grano mucho más fino. Existen otros materiales, como gelatinas dicromatadas o fotopolímeros, que también se utilizan para el registro holográfico [10].

Si además de la dirección de los haces se considera el sentido de los mismos, se puede hablar de hologramas por transmisión y hologramas por reflexión. En los primeros (figura 7, derecha), el sentido de los haces es el mismo, es decir, las ondas inciden sobre la misma cara del material. En cambio, si al incidir sobre el material, los haces entran desde lados opuestos (distinto sentido) el holograma resultante actúa por reflexión.

La ventaja más importante de los hologramas de reflexión es que se pueden reconstruir con luz blanca, a diferencia de los hologramas de transmisión que sólo se pueden reconstruir con láser, con una longitud de onda similar a la de registro. Los hologramas de reflexión sólo son eficientes para una longitud de onda (o en un pequeño rango alrededor de una longitud de onda), no es necesario que la fuente de iluminación en la reconstrucción sea monocromática, ya que el propio holograma filtra las otras longitudes de onda.

Los hologramas resultantes [7] sólo se verán de un color ya que sólo se difracta eficientemente para unas longitudes de onda en torno a la central. Para poder visualizarlo con color han de ser registrados tres hologramas con tres láseres de colores diferentes (rojo, verde y azul).

Una de las características más peculiares de un holograma es que toda la imagen se puede encontrar en cualquier punto del soporte fotosensible, de manera que, si un holograma fuera partido por la mitad, en cada mitad aparecería la imagen original entera y completa.

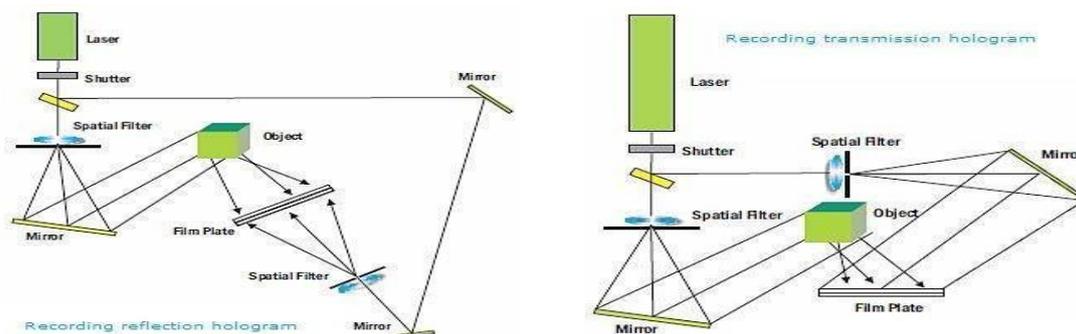


Figura 7: Esquema de holograma de reflexión (izquierda) y transmisión (derecha) [11]

La posibilidad de generar imágenes tridimensionales con técnicas holográficas puede tener muchas utilidades, por ejemplo en museos, para la exposición de objetos de arte demasiado valiosos o delicados como para que el original sea exhibido (por ejemplo, la exhibición del hombre de Lindow, una momia de más de 2300 años de antigüedad) [12], para arte (los retratos holográficos son muy espectaculares, uno de los más famosos es el realizado a la Reina Isabel II de Inglaterra [13]) o entretenimiento (la televisión holográfica (sin necesidad de usar sistemas estereoscópicos anaglíficos o polarizadores)). Otra aplicación es la realización de retratos. En este caso, el sujeto ha de permanecer completamente inmóvil durante la exposición, algo imposible debido a la respiración, parpadeo, en definitiva, movimientos del objeto que va a ser registrado. Esto se resuelve con la utilización de láseres pulsados que provocan breves pulsos de luz de alta energía, de forma que la exposición es tan breve que los movimientos de la escena no son significativos. La holografía tiene también otras muchas aplicaciones, por ejemplo, en el campo de la metrología o en el de la seguridad (tarjetas de crédito, billetes de banco, documentos de identidad, autenticación de huellas digitales, etiquetas de productos y productos farmacéuticos [12])

Una de las desventajas que tiene la holografía para determinadas aplicaciones es la dificultad para generar imágenes en movimiento. Para hacerlo necesitaríamos que en

el medio de registro cambiase la figura interferencial en el tiempo. Esto puede solucionarse con la holografía digital, en la que se calcula la figura interferencial matemáticamente y se registra en un medio digital (un modulador de luz) [14]. En este tipo de medios de registro, la figura interferencial que se presenta en el medio puede ir cambiando con el tiempo, de forma que se puede generar una figura en movimiento. Esto se puede considerar el inicio de la llamada televisión holográfica, aunque la dificultad en este caso radica en conseguir moduladores de luz con suficiente resolución para registrar la figura interferencial y suficientemente grande a un coste razonable.



Figura 8: Joyas y objetos representados mediante hologramas del tesoro de Villena de 1984 (izquierda) y holograma de un retrato de la Reina Isabel II de Inglaterra (derecha) [12,13]

5. TÉCNICAS DE VISUALIZACIÓN DE IMÁGENES 3D

5.1 ESTEREOGRAMAS

En el apartado anterior hemos explicado la holografía como una técnica para generar imágenes en 3 dimensiones. En este apartado veremos diferentes técnicas para la visualización de una imagen tridimensional a partir de dos imágenes planas.



Figura 9: Principio de funcionamiento de un estereograma [4]

Una de las propiedades de la visión binocular es la visión estereoscópica. De forma monocular es posible suplantar esta propiedad como ya hemos mencionado anteriormente, pero en realidad, no existe la visión estereoscópica monocularmente. La estereopsis se produce porque cada ojo percibe una imagen del objeto 3D diferente. Como observamos en la figura 7 (b), si sustituimos el objeto 3D de la figura 7 (a), formado por dos objetos a diferente distancia del observador, por dos imágenes planas separadas una cierta distancia, y hacemos que cada ojo vea sólo una de las imágenes, el resultado final es el mismo, nuestro cerebro fusiona las dos imágenes y las interpreta como un objeto en 3D (figura 7 (c))

Podemos hacer una división entre la generación y la visualización de los estereogramas. Para fabricar estas dos imágenes existen principalmente dos métodos, ya pueden ser imágenes calculadas o también pueden ser registradas, por ejemplo, con 2 cámaras fotográficas separadas una cierta distancia, esto implica que con cada una registras una perspectiva diferente, por lo tanto, de cada objeto tendrías dos imágenes planas, lo único que haría falta es que al ser presentadas al observador cada una de estas imágenes se viera con un ojo diferente.

Para poder obtener esa sensación de profundidad hay que asegurar que cada imagen plana sea percibida por su ojo correspondiente, por lo cual necesitaremos un sistema que lo permita. Para conseguirlo, existen diferentes técnicas de visualización.

5.1.1 ESTEREOSCOPIOS

Para poder visualizar una imagen con estos instrumentos es necesario que la imagen sea realizada con una cámara estereoscópica [15] que permitan obtener una imagen doble (par estereoscópico) como el que se muestra en la figura 10. De esta forma, el estereoscópico enviará la imagen izquierda al ojo correspondiente, y lo mismo con el ojo derecho. Cabe mencionar que es posible conseguir este efecto sin la ayuda de ningún instrumento externo, pero los estereoscopios facilitan mucho esta tarea.



Figura 10: Imagen de un par estereoscópico [16]

En el estereoscopio de Wheatstone (figura 11, izquierda) se coloca encima de un tablero horizontal dos espejos planos, perpendiculares entre sí, con unos paneles donde se insertarán los pares estereoscópicos. Las imágenes del par debían estar invertidas lateralmente para su correcta visualización. El instrumento dispone de un hueco en la intersección de los espejos planos para colocar la nariz, de este modo, los ojos se

encuentran lo más cerca posible de los espejos. Los tableros dispuestos se pueden mover y de este modo el observador puede calibrarlos hasta que la imagen aparezca como única y así se consiga la estereopsis. Las imágenes podían verse opuestas si colocabas la imagen del par estereoscópico del contrario, es decir, lo que antes se veía como más cercano al observador, ahora será lo más lejano, y viceversa.

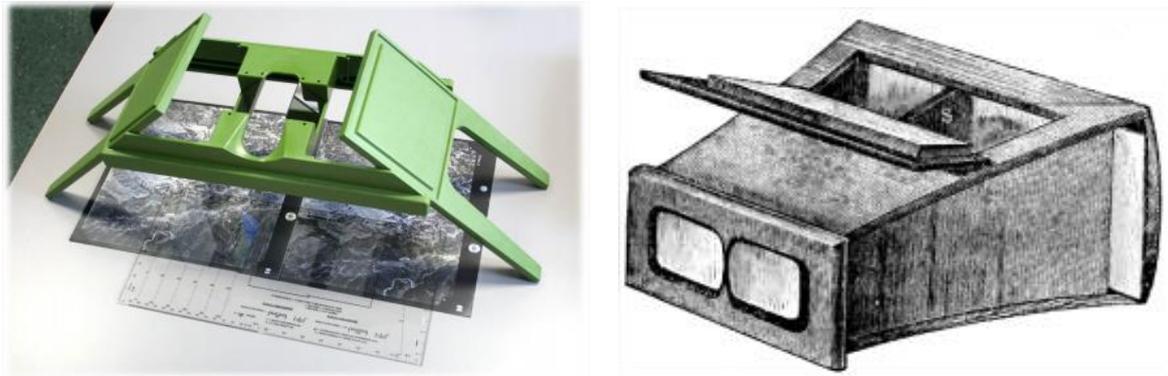


Figura 11: Estereoscopio de espejos (izquierda) y estereoscopio lenticular (derecha) [15]

El estereoscopio lenticular (figura 11, derecha) era más reducido y no disponía de espejos, sino de un sistema prismático para proyectar cada imagen del par estereoscópico al ojo correspondiente. El sistema prismático estaba formado por un par de semilentes. Las semilentes son lentes obtenidas a partir de una sola lente, la cual se divide en dos por un plano que pasa por su centro óptico, de forma que las dos lentes que quedan tienen una doble función: por una parte, generan un efecto prismático base temporal que provoca que cada imagen sea vista sólo con su ojo correspondiente. Por otra parte, mandan la imagen de cada objeto al infinito, de forma que el sujeto no tenga que acomodar, proporcionando además la imagen con un cierto aumento. El estereoscopio consta de una tapa superior para el paso de luz y que el instrumento no sea opaco y la parte inferior está hecha con un vidrio esmerilado para difundir la luz y conseguir una iluminación uniforme al observar la imagen. Las semilentes se colocan en la parte frontal, en dos tubos. Una ventaja respecto al otro es que los oculares son ajustables a la distancia interpupilar del observador. Por último, el par estereoscópico se coloca a una distancia igual a la focal de las semilentes, ya que la imagen de cada objeto enfoca al infinito [15].

Es posible, mediante el entrenamiento visual, conseguir separar el sistema de acomodación del sistema vergencial, de este modo, se puede lograr cruzar los ejes visuales en un punto más cercano del objeto que queremos observar mientras la acomodación se relaja. A pesar de que este método es posible mediante la práctica, puede resultar complicado, por lo que los estereoscopios son instrumentos muy útiles para visualizar imágenes estereoscópicas.

5.1.2 ANAGLIFOS

En el anaglifo se utilizan filtros de colores complementarios, como por ejemplo rojo-azul o rojo-verde. Esto es así porque dentro del espectro visible, esos dos filtros están lo suficientemente separados, como se muestra en la figura 12, de forma que la transmitancia de uno de los filtros se centra en 550 nm (para el verde) y el otro se centra en 650 nm (para el rojo), por lo cual, aunque los filtros tengan un ancho de banda, ya que un filtro tan estrecho no es utilizado para este tipo de gafas, si separas lo suficiente las dos longitudes de onda, luego al mostrar un objeto en verde (corresponde al filtro de 550 nm) y otro objeto en el rojo (corresponde al de 650 nm) no se superponen, ya que están lo suficientemente separados.

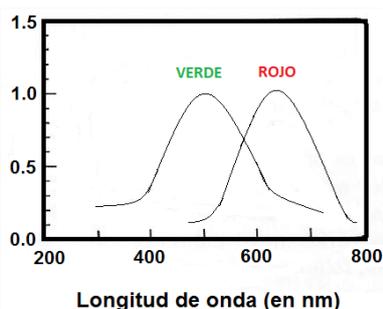


Figura 12: Diagrama ilustrativo de la transmitancia de los filtros verde y rojo

Se utilizan después dos imágenes que cumplen los criterios explicados anteriormente, cada una con un filtro de color distinto y se superponen, consiguiendo un efecto tridimensional al ser observado con gafas anaglifas. Es decir, si la imagen posee un filtro verde, no se verá con el ojo izquierdo, pero sí con el derecho y viceversa. Los principales problemas [17] con los anaglifos son la poca calidad de la imagen a través de un filtro, la rivalidad retiniana y la fidelidad limitada del color del filtro usado. Existen soluciones para reducir el efecto de los dos primeros problemas, pero los colores nunca pueden reproducirse correctamente en las imágenes proporcionadas con gafas anaglifas; por ejemplo, el rojo solo se puede representar como marrón púrpura oscuro, en el mejor de los casos, en un anaglifo rojo/cian. Se utiliza en cines, monitores de ordenadores y televisión, etc.

5.1.3 POLARIZADOS

La polarización hace referencia a la dirección del vector campo eléctrico en una onda electromagnética.

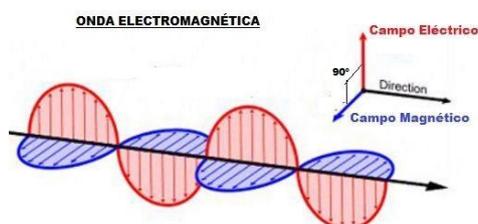


Figura 13: Esquema de onda electromagnética [18]

En la figura de la izquierda, la polarización es lineal [19], esto se produce cuando sus componentes X e Y están en fase (ángulo de desfase nulo), es decir, cuando alcanzan sus máximos y mínimos simultáneamente, o en contrafase (con un ángulo de desfase de 180°), cuando una de las componentes alcanza su máximo, simultáneamente la otra componente se encuentra en su mínimo. La dirección de la oscilación es determinada por la relación entre las amplitudes de las dos componentes, y es la dirección de la polarización lineal. La oscilación del plano perpendicular a la dirección de propagación se produce en una línea recta.

En la figura central, se trata de una polarización circular, donde una de las componentes se anula cuando la otra alcanza su máximo/mínimo (ángulo de desfase de 90°). Las dos componentes perpendiculares tienen la misma amplitud. Estos 90° de diferencia entre las componentes pueden ser de adelanto de la componente X respecto a la componente Y, o de retraso. Según sea el caso, el campo eléctrico gira en un sentido o en otro (horario o antihorario). En la polarización circular, la trayectoria trazada por el vector del campo eléctrico traza la forma de una circunferencia.

La figura de la derecha corresponde a un caso donde las componentes tienen distintas amplitudes y el ángulo de desfase entre ellas es distinto de 0° y 180° , representa la polarización elíptica.

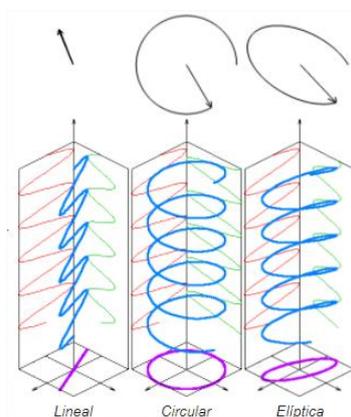


Figura 14: Tipos de polarización de una onda electromagnética. Variación del vector de campo eléctrico (azul) con el tiempo (el eje vertical), con sus componentes X e Y (roja/izquierda y verde/derecha), y la trayectoria trazada por la punta del vector en el plano (púrpura).

Existen unos elementos llamados polarizadores que solo dejan pasar el campo eléctrico que vibra en una dirección determinada. Si yo genero las dos imágenes planas cada una con una polarización diferente, con unas gafas polarizadas cada ojo sólo ve una de las imágenes planas, la luz proveniente de la otra queda bloqueada. Se puede conseguir con polarizadores lineales perpendiculares entre sí, tanto en la imagen plana como en la gafa, o con polarizadores circulares.

5.1.4 LCD

Las gafas LCD o Shutter glasses se utilizan en conjunto con un monitor, es otra manera distinta de mandar imágenes diferentes a cada uno de los ojos. Las gafas están

sincronizadas con el monitor, de tal forma que se muestran las imágenes correspondientes al ojo derecho cuando el ojo izquierdo está obturado, y viceversa. La frecuencia de presentación de las imágenes en pantalla tiene que estar coordinada con la frecuencia de obturación de las gafas. Existe una frecuencia límite [17] (120 hz) por la cual, si las imágenes se encuentran por debajo de ese umbral, no se perciben las imágenes en tres dimensiones ya que la información es recogida monocularmente con un ojo y el otro alternativamente.

Una aplicación muy interesante de los estereogramas es la capacidad de determinar el umbral de profundidad para calcular la agudeza estereoscópica. Para realizar esta medida el método utilizado son los estereotest. Estos están formados por una serie de estímulos de disparidad binocular. El sujeto tiene que poseer percepción simultánea y fusión para percibir la estereopsis. Se muestran una serie de estereogramas, correspondientes a la visualización de dos objetos a una distancia entre sí (en profundidad) cada vez más pequeña. Se empieza desde los estereogramas correspondientes a distancias entre los objetos más grandes y se va pasando a otros estereogramas donde se presentan unas distancias entre los objetos cada vez más pequeña, hasta que el sujeto no puede percibir que los objetos se encuentran en distinto plano. El estereotest está formado por una base (parte del dibujo común a ambas imágenes del par estereoscópico), un elemento desplazado (el detalle que el observador debe ver en un plano distinto de la base) y el resto de detalles que posee el dibujo y que son invariantes. Cuanto más bajo sea este umbral de profundidad, mayor es la estereoagudeza. Existen diversos métodos para determinarla [20].

Otra aplicación muy característica de los estereogramas es el cine en 3D. Actualmente existen algunos cines que cuentan con un sistema de proyección polarizado. Este nuevo sistema ofrece ventajas respecto al cine 3D anaglífico al que estamos acostumbrados, ya que la calidad de fidelidad del 3D es muy superior. Sin embargo, estos sistemas de proyección polarizados todavía no están implantados en todos los cines.

El disconfort visual es un impedimento importante para el uso de dispositivos estereoscópicos. Son muchas las personas que, por su propia fisiología, no pueden visualizar imágenes estereoscópicas. Además de las causas que no permitan al individuo tener alguno de los grados de visión binocular (percepción simultánea, fusión o estereopsis), existen otras causas que pueden generar una incomodidad visual [21].

Si las imágenes estereoscópicas presentadas al observador tienen paralaje vertical, el objeto físico que se desea observar no es consistente. Este problema puede ser debido a diferentes causas, como una incorrecta alineación de los dispositivos que generan la imagen (por ejemplo, con las cámaras durante la filmación) o que sea durante la presentación de estas imágenes (que no están alineadas), como utilizar cámaras con lentes convergentes. Estos pequeños errores de cálculo, tanto a la hora de generar la imagen como a la de presentarla, pueden provocar que el observador tenga que hacer uso de la vergencia vertical para solucionar este problema visual, ya que provocan un cambio en las disparidades verticales de la retina, por lo tanto, el efecto estereoscópico no es satisfactorio, y causa al observador fatiga visual [21].

Como hemos visto anteriormente, existen una serie de características que nos aportan información de la posición y profundidad de los objetos a pesar de estar en 2D, por ejemplo, la interposición de imágenes, las luces y sombras, etc. Estas pistas también están presentes en los dispositivos estereoscópicos y, pese a dar más información y sentido cualitativo de la tridimensionalidad, estas fuentes pueden ser incompletas, imprecisas, ambiguas e incluso contradictorias [21], generando un conflicto entre las disparidades (tanto horizontal como vertical, según las pistas que percibimos) retinianas, ya que la fusión eficiente de dos imágenes sólo es posible en una pequeña región (área de Panum) en la que el sistema visual percibe un solo objeto [22]. Todavía no hay una información clara y concisa de los problemas que esto puede generar al observador, sin embargo, otros estudios destacan que puede llegar a ocasionar confusión, mareos y/o rivalidad binocular.

A pesar de los avances tecnológicos que han ido implementándose en los dispositivos estereoscópicos, los problemas de incomodidad y fatiga siguen siendo frecuentes entre los observadores y, por ende, una mala percepción de la profundidad. Se estima que aproximadamente un 36% de los observadores [21] han sufrido de alguno de estos problemas al visualizar una película en 3D. Uno de los principales problemas de disconfort a la hora de visualizar estas imágenes estereoscópicas es el enfoque, debido a la acomodación y a la vergencia. Cuando se observa cualquier punto de nuestro entorno, la acomodación y la vergencia focalizan a la misma distancia, puesto que van ligadas, pero para visualizar imágenes estereoscópicas, por ejemplo, una pantalla de un cine 3D, el observador debe acomodarse en un plano diferente al plano de convergencia de los ojos, es lo que se conoce como conflicto de vergencia-acomodación [21,22], causante de conflictos de incomodidad y fatiga visual, mencionados anteriormente.

Además de estos problemas, la interferencia de las imágenes provoca que la imagen del ojo izquierdo sea parcialmente visible por el ojo derecho, y viceversa. Esto puede ser causado, por ejemplo, por los filtros usados en los anaglifos, los cuales tienen una anchura espectral demasiado grande y no están lo suficiente separados un espectro del otro; en las gafas polarizadas se pueden dar errores en la orientación de los polarizadores; parpadeo de las imágenes relacionadas con una frecuencia temporal (LCD), aunque estos problemas tienen amplias soluciones hoy en día. En general, se puede concluir que visualizar imágenes estereoscópicas puede suponer un problema visual, y que los cálculos para realizar esta tarea han de ser sumamente precisos, ya que cualquier mínimo error deriva en una causa de disconfort visual para el observador.

5.2 LENTICULARES

Las pantallas lenticulares son otro método para visualizar imágenes planas usando el entremezclado espacial. Es utilizada en algunos televisores o en la cinematografía en 3D. Estas pantallas están compuestas por hojas delgadas de plástico, con estrechas lentes cilíndricas moldeadas en un lado [23].

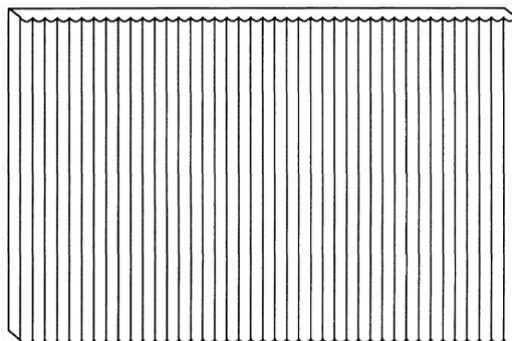


Figura 15: Lentes cilíndricas moldeadas y dispuestas para generar un lenticular [23]

La anchura de cada lente cilíndrica es de 0.5 mm aproximadamente. Las imágenes grabadas del par estereoscópico se cortan en finas y largas láminas, de una anchura menor que la de cada lentículo, y adherido a la parte posterior de la hoja de plástico como se muestra en la figura [23].

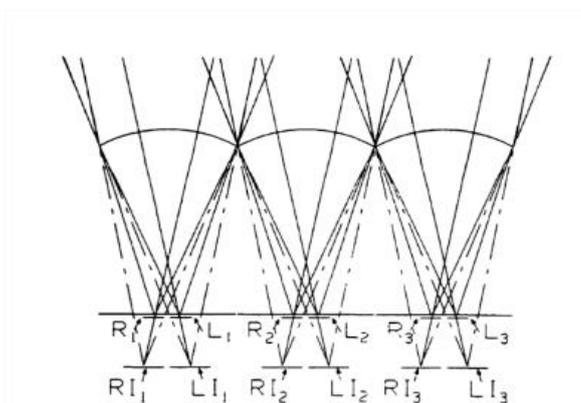


Figura 16: Formación de la imagen por una pantalla lenticular [23]

Se disponen de tal manera que L1, L2, L3... son las tiras sucesivas de imágenes grabadas para ojo izquierdo, y R1, R2, R3... sean las tiras sucesivas de imágenes grabadas del ojo derecho. Los rayos centrales que van desde cada lámina y pasa por la lente están mostrados en la figura. Las dimensiones quedan perfectamente ajustadas para que estos rayos centrales diverjan aproximadamente 12° (se forma una imagen virtual de cada tira detrás del lenticular), de forma que los rayos que salen de la imagen correspondiente a uno de los dos ojos sólo alcance éste y no puedan llegar al otro, debido a la separación interpupilar estándar (con una separación interpupilar estándar de 62 mm) y una distancia de observación de 30 cm. Por lo tanto, queda perfectamente ajustado para que cada ojo vea sólo su imagen correspondiente.

El poder óptico de cada lentículo es ajustado para que la imagen virtual sufra una magnificación de dos aumentos, por lo que la distancia detrás del plano de la pantalla lenticular es pequeña. Así pues, el punto de fijación de la convergencia de los ojos y el foco del plano lenticular están cercanos entre sí, y el efecto de sensación estereoscópica es satisfactorio. Como hemos visto, este sistema supone ciertas ventajas al no generar los problemas de vergencia-acomodación surgido en los estereogramas. Además, el aumento sirve para unir las tiras de la imagen vista por cualquiera de los ojos en la hoja continua, como muestra LI1, LI2, LI3... o RI1, RI2, RI3...

Este método ha sido aplicado a sistemas de televisión mediante la colocación de pantallas lenticulares en frente de la pantalla del monitor, y los sistemas cinematográficos [23,24] por retroproyección de una película en la parte posterior de la pantalla lenticular. En ambos casos, hay que tener cuidado de mantener correcta la alineación de los pares de imágenes y su correspondiente lenticular (figura 16), perfectamente enfrentados, sin desplazamientos de los planos objeto con el plano del lenticular. Esto supone una desventaja ya que el cálculo ha de ser muy preciso, y está restringido a unas ciertas distancias para su correcta visualización, aunque es cierto que supone una gran ventaja ya que no necesita de ningún dispositivo externo (polarizadores, espejos...) para su visualización.

5.3 BARRAS DE PARALAJE

Con la misma filosofía de conseguir que cada ojo visualice una imagen diferente, se utiliza un sistema similar al del lenticular que acabamos de explicar.

El fundamento básicamente es el mismo, pero en vez de utilizar lentes para separar un poco más las imágenes que ven los dos ojos para poder visualizar con cada ojo por separado, se hace mediante un plano entre el objeto y los ojos de forma que en ese plano haya barras que impidan el paso de la luz correspondiente a las imágenes del ojo no correspondiente.

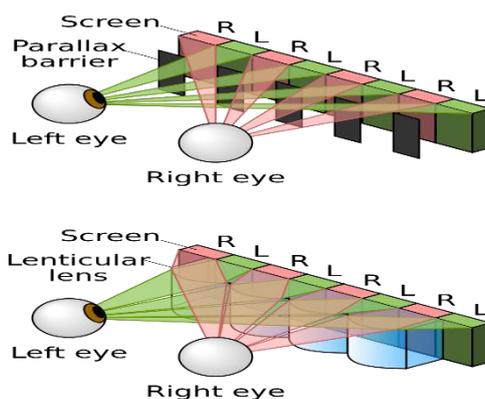


Figura 17: Comparativa del principio óptico entre las barras de paralaje y los lenticulares [25]

La aplicación más conocida de esta técnica en particular es la Nintendo 3D. Este dispositivo no utiliza lentes, sino que utiliza una barrera de paralaje [26]. La pantalla posee una capa especial que ayuda a dirigir la luz de una manera en concreto. En realidad, es una segunda pantalla de cristal líquido, también llamado LCD, en la que el cristal crea barreras que bloquean la luz que viene del objeto correspondiente al ojo contrario. Por eso, si se apaga el modo 3D, el cristal permite que la luz pase libremente y así los dos ojos reciban una imagen idéntica. Este aparato cuenta con un interruptor que se puede mover, al hacerlo se ajusta la ubicación y el ancho de los cristales en la barrera de paralaje, para que pueda enviar diferentes imágenes a cada ojo.

El cerebro recibe ambos conjuntos de imágenes y las junta en una sola imagen con profundidad. Existe cierta desventaja en el método ya que el efecto 3D solo funciona

en un ángulo de visión estrecho. Si se sostiene el 3D demasiado a la izquierda o a la derecha, el observador vería un doble conjunto de imágenes y se desorientaría.

Al igual que ocurría con los lenticulares, este sistema supone una ventaja al no necesitar ningún objeto externo que facilite su visualización, sin embargo, la desventaja es que se necesita un buen alineamiento del observador frente al sistema de barras de paralaje y con una orientación determinada para que el efecto sea satisfactorio, aunque para la mayoría de espectadores es fácil guardar la distancia adecuada para obtener este efecto 3D. Otra desventaja es que los desarrolladores tienen que diseñar juegos con dos conjuntos de imágenes diferentes y conlleva una mayor velocidad de procesado. Es la razón por la cual los juegos más antiguos como DS y DSi no poseen 3D.

6. EFECTOS 3D

6.1 PANTALLAS TRANSPARENTES

El fundamento principal de la pantalla transparente o lámina transparente [27] consiste en que la imagen que va a ser representada no es una visualización en 3D real, es un efecto que te permite ver una imagen de un objeto flotando en el espacio, pero el objeto no es tridimensional, ni estás proporcionando al cerebro la información necesaria para codificar esa imagen en tres dimensiones.

Como se muestra en la figura 19, la dirección de los rayos del objeto real se dirige a una lámina o pantalla que se dispone de tal forma que los rayos reflejados incidan en el sistema visual del observador. La característica principal es que, al tratarse de una pantalla semitransparente, la cual deja pasar los rayos de luz a través de ésta, el observador puede observar a la vez el fondo sobre el que se observa la imagen virtual, dando esta falsa ilusión que el objeto se encuentra flotando en el espacio, aunque realmente la imagen es en 2D.

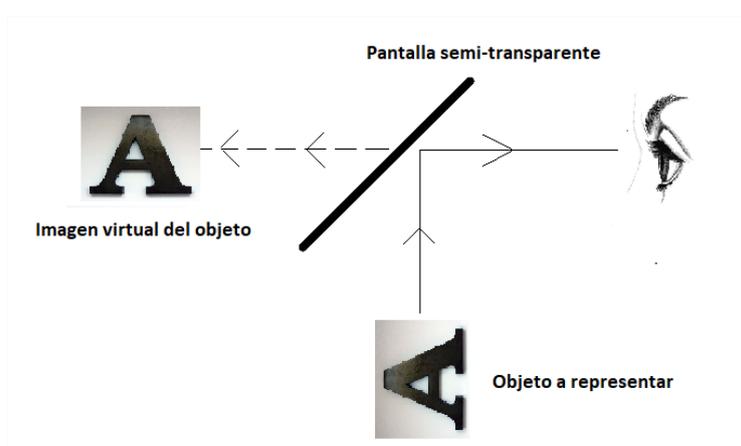


Figura 18: Fundamento de la formación de una imagen con una pantalla transparente

6.2 PIRÁMIDE HOLOGRÁFICA

Ampliando la información que acabamos de ver, un paso más allá son las pirámides holográficas. Comparten el mismo fundamento físico que las pantallas transparentes, pero esta vez con 3 ó 4 pantallas que forman una pirámide.

El fundamento principal de la pirámide holográfica por ende consiste en que la imagen que va a ser representada aparece para el observador en el centro de la pirámide, dando la sensación de que se encuentra suspendida en el aire. Esta imagen es el reflejo en la pared de la pirámide de lo que está apareciendo en nuestra pantalla. La pantalla está situada en la parte de arriba, donde se proyecta el vídeo o la imagen (partido en las mismas caras que tenga la pirámide). En realidad, es el mismo vídeo, pero generado 4 veces y girado uno respecto a otro. Puede ser que sea el mismo vídeo pero que esté adelantado uno respecto al otro unos segundos, de forma que cuando das la vuelta a la pirámide como observador, se mantiene la continuidad del mismo debido al retardo y se encontrará en la posición que lo habías dejado. Produce sensación de tridimensionalidad y nos da ese efecto 3D, aunque es solo una ilusión óptica ya que realmente, la imagen es en 2D. Aunque este efecto recibe el nombre de pirámide holográfica, no es un holograma como tal como hemos visto anteriormente.

Las pirámides holográficas han cobrado una especial importancia para la publicidad, ya que los efectos que crea son muy vistosos para el público. Generalmente se usa en stands, ferias, oficinas, tiendas, showroom, puntos de venta o museos. Las pirámides holográficas suelen tener 3 ó 4 caras para ofrecer mayores ángulos de visión al público.

Cada empresa puede crear su propio estilo de pirámide. Una de las más cotizadas actualmente es la pirámide holográfica 360, de la empresa *luftScreen* [28]. Consiste en un “display” piramidal formado por 4 proyectores cuya función es mostrar productos, logos, o cualquier objeto, ya que más tarde el prisma los reúne, así el observador ve desde cada posición una imagen, pero mientras rodea la pirámide tiene cierta continuidad especial. Se denomina 360 debido a que es posible rodear el “display”, pudiendo observar la imagen holográfica mientras flota en medio del mismo. Así pues, se consigue un efecto 360° realmente impactante.

Las pirámides holográficas de 3 caras comparten el mismo principio de funcionamiento, aunque éstas no pueden observarse desde todas las perspectivas ya que su área de visión es de 180°.

La mayoría de estos aparatos disponen de lámparas LED para controlar su iluminación, cristales de alta resistencia, tratamientos anti-manchas y una pantalla full HD para ofrecer la mejor calidad visual.



Figura 19: Pirámide holográfica

7. CONCLUSIONES

En este trabajo se hace una revisión de todas las técnicas de generación y visualización de imágenes en tres dimensiones.

Existen las técnicas de generación de imágenes en tres dimensiones, como la holografía. La ventaja es que realmente estás generando la imagen de un objeto en tres dimensiones, no hace falta proporcionar información al cerebro para que interprete el objeto. El problema de la holografía analógica es que se necesita unas fuentes de luz adecuadas, es decir, fuentes de luz monocromáticas y coherentes (fuente de luz laser). Esto limita de algún modo esta técnica ya que se necesitan unas instalaciones específicas para poder hacer los hologramas. También tiene unas restricciones de visualización, ya que sólo determinados tipos de hologramas se pueden visualizar con luz blanca.

Ahora mismo la holografía se utilizar para la visualización de objetos estáticos, pero para poder realizar hologramas de objetos en movimiento se necesita holografía digital. En el dispositivo digital puedes añadir interferencias del objeto en diferentes posiciones, el resultado del holograma aparecería como un video.

Las técnicas de visualización son mucho más fáciles de implementar que las anteriores, y también se logra visualizar un objeto en tres dimensiones. El problema de estos métodos surge con el discomfort visual que genera a algunos pacientes como hemos explicado anteriormente, así como según estén registradas y visualizadas las imágenes, además de la interferencia entre las imágenes que mandas al ojo derecho y ojo izquierdo.

Existen otros efectos que realmente no permiten visualizar un objeto en tres dimensiones, sino que son efectos que, de alguna manera, engañan al cerebro para visualizar un objeto como si estuviese flotando en el espacio, y eso nos da esa sensación de tridimensionalidad.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. A. Pons, F. M. Verdú. Fundamentos de Visión Binocular. Publicaciones Universidad de Valencia. 2004.
2. J. M. Álvarez. Grado en óptica y optometría. Zaragoza. Apuntes de Óptica Visual II. 2017
3. T. Chauhan, Y. Héjja-Brichard, B. R. Cottureau, Modelling binocular disparity processing from statistics in natural scenes, *Vision Research*, Volume 176, 2020, Pages 27-39. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0042698920301231>
4. J. L. Álvarez, M. Tapias. Distancia Visual y Estereopsis, Motilidad y percepción binoculares, Universidad de Castellón, 2013
5. M. Tapias Anton, J. L. Álvarez Muñoz. Grado en óptica y optometría. Terrasa. Apuntes de motilidad y percepción binoculares. 2016. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/189582>
6. <https://mmrk16.blogspot.com/2015/11/texture-gradient.html>
7. A. Beléndez, I. Pascual, A. Fimia. "Holografía, conceptos básicos, materiales de registro y aplicaciones". *Revista española de física* 5. 1991. Disponible en: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/9208/3/REF_v5_n2_pp40-46_1991.pdf
8. <http://holoar.com.ar/holografia.htm>
9. E. I. Mayayo, Diseño de test de agudeza visual estereoscópica holográfico, Trabajo Fin de Grado presentado en la Universidad de Zaragoza (2018)
10. True colour Denisyuk-type hologram recording in Bayfol HX self-developing photopolymer. Irene Vázquez-Martín, Marina Gómez-Climente, Julia Marín-Sáez, M. Victoria Collados, Jesús Atencia, *Proc. of SPIE* Vol. 10233, 1023317 (2017)
11. https://holmarc.com/images/holographic_lab2.jpg
12. Augusto Beléndez. "¿Qué se puede hacer con la holografía?". *Física para tod@s [blog]*. Alicante. 04/07/2015. Disponible en: <https://blogs.ua.es/fisicateleco/2015/07/04/que-se-puede-hacer-con-la-holografia/>
13. https://i.dailymail.co.uk/i/pix/2012/04/17/article-2130943-00198F941000044C-110_964x818.jpg
14. Pascal Picart and Silvio Montresor. Optical holography: materials, theory and applications. *Digital Holography*. [Recurso electrónico]. Londres: Elsevier, 25 de octubre de 2019. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128154670000050>
15. Castro Torres, J. J.; Arredondo Garrido, D.; Prados García, C.; García Gallardo, M. T.; López Nevot, J. A.; Rivas López, E. J.; Barrios Rozúa, J. M.; García Luque, M. Innovación docente interdisciplinar en la universidad: estudio de la Arquitectura, el Derecho y la Historia del Arte del patrimonio histórico-artístico de la ciudad de Granada a través de la fotografía estereoscópica. *Fundamentos de la visión y fotografía estereoscópicas*. Granada: Proyectos de Innovación Docente 13-38 y 15-39, 2018

16. https://www.monolitonimbus.com.br/wp-content/uploads/2014/06/par_estereo.jpg
17. Boulos, M. N., & Robinson, L. R. (2009). Web GIS in practice VII: stereoscopic 3-D solutions for online maps and virtual globes. *International journal of health geographics*, 8, 59. <https://doi.org/10.1186/1476-072X-8-59>
18. <https://www.areatecnologia.com/imagenes/onda-electromagnetica.jpg>
19. J. Tornos. Grado en óptica y optometría. Zaragoza. Apuntes de Óptica Física. 2017
20. M. C. López de la Fuente. Grado en óptica y optometría. Zaragoza. Apuntes de Terapia y Rehabilitación visual. 2017
21. Martin S. Banks, Jenny C. A. Read, Robert S. Allison, Simon J. Watt. "Stereoscopy and the Human Visual System". *Motion Imaging J.* 1 de mayo de 2013. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3490636/>
22. Kasim Terzić, Miles Hansard. Methods for reducing visual discomfort in stereoscopic 3D: A review. [Recurso electrónico]. Vol. 47. Londres: Elsevier, 6 de agosto de 2016. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0923596516301096>
23. Daniel B. Diner, Derek H. Fender. *Human Engineering in Stereoscopic Viewing Devices* [Recurso electrónico]. Pasadena, California: Springer Science & Business Media, 11 de noviembre de 2013. Disponible en: <https://books.google.es/books?id=i9MFCAAQBAJ&pg=PA37&dq=stereoscopic+images&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwjPqOCJtM3rAhUOmRoKHZ8uB3QQ6AEwAXoECAMQAg#v=onepage&q&f=false>
24. V. Michael J. Bove. *Optical holography: materials, theory and applications. Holographic Television.* [Recurso electrónico]. Londres: Elsevier, 25 de octubre de 2019. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128154670000049?via%3Dihub>
25. https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/a/a8/Parallax_barrier_vs_lenticular_screen.svg/1200px-Parallax_barrier_vs_lenticular_screen.svg.png
24. Jonathan Strickland. "How the Nintendo 3DS Works". *The Parallax Barrier.* 2011. Disponible en: <https://electronics.howstuffworks.com/nintendo-3ds5.htm>
26. C. P. Estremera. Grado en Física. Navarra. VI-DEC (Vídeos Didácticos de Experimentos Científicos). Disponible en: https://www.unav.edu/documents/29007/8773000/videc_f05.pdf/2d1ece1c-4a7c-4316-92b8-8d9e0e6a4423
27. *Sistemas de proyección de hologramas. Pirámide holográfica 360.* México. Disponible en: <https://luftscreen.com.mx/piramide-holografica-360/>