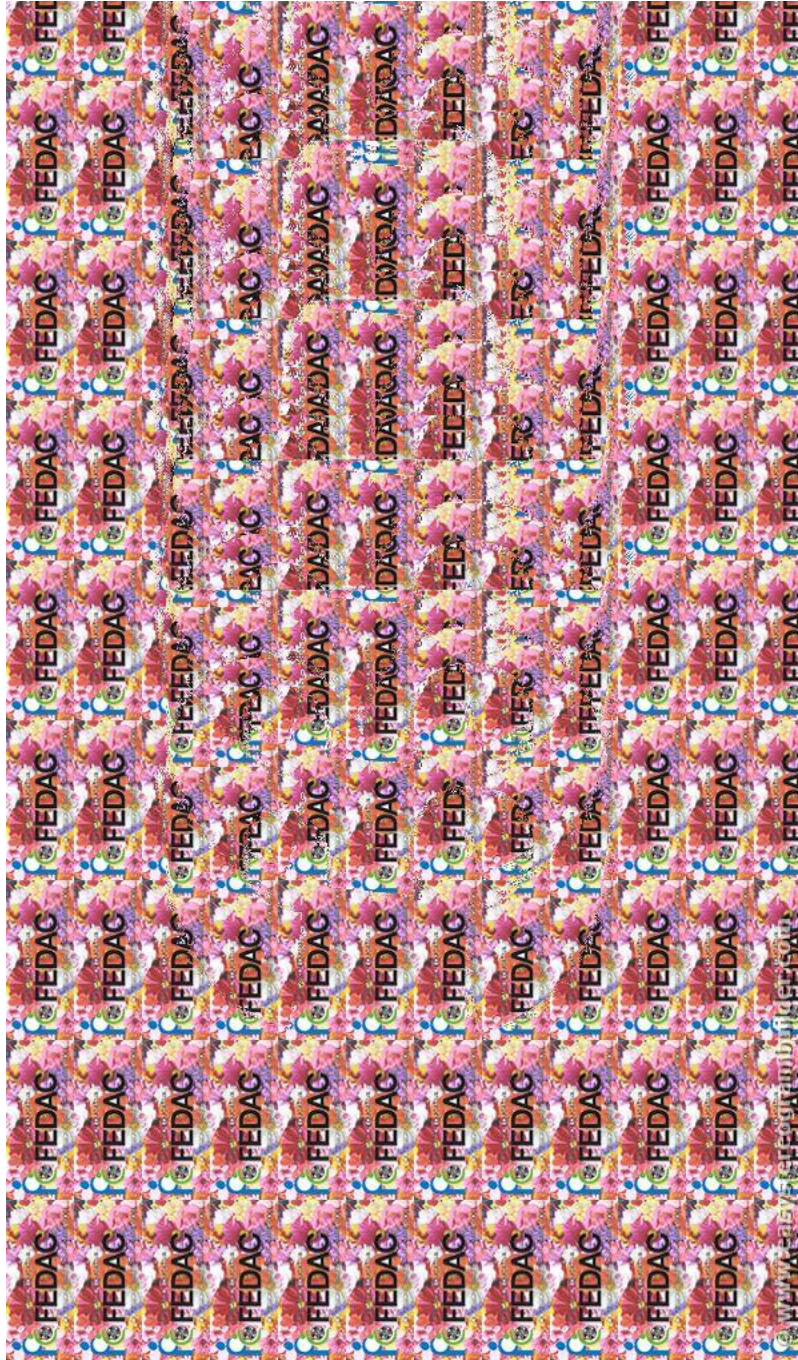


TÉCNICAS DE CREACIÓN DE IMÁGENES TRIDIMENSIONALES

Holografía, estereoscopia y realidad virtual



ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	3
2	MOTIVOS Y OBJETIVOS DEL TRABAJO.....	4
3	METODOLOGÍA.....	4
4	EXPLICACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE CREACIÓN DE IMÁGENES TRIDIMENSIONALES.....	6
5	ESTEREOSCOPIA.....	8
5.1	¿Qué es la estereoscopia?	8
5.2	¿Qué es un estereograma?	8
5.3	Parejas estereoscópicas	8
5.3.1	Bases y creación de las parejas estereoscópicas	9
5.3.2	Creación de parejas estereoscópicas con software informático	11
5.3.3	Estereograma de puntos aleatorios	12
5.3.4	Técnicas de presentación de parejas estereoscópicas	13
5.4	Autoestereogramas.....	16
5.4.1	¿Qué son los autoestereogramas?	16
5.4.2	Bases de los autoestereogramas.....	17
5.4.3	Creación de un autoestereograma con software informático.....	20
5.4.4	Tipos de autoestereogramas.....	23
5.5	¿Cómo se observan un autoestereograma y una pareja estereoscópica?	24
5.6	Aplicaciones	26
6	REALIDAD VIRTUAL.....	28
6.1	¿Qué es la realidad virtual?	28
6.2	Visión tridimensional en la realidad virtual	28
6.3	Interactividad	29
6.3.1	Posición y orientación del sujeto	29
6.3.2	Acciones con la mano y tacto.....	31
6.3.3	Visión y detección de los ojos y la cabeza	32
6.3.4	Oído y sonido tridimensional	33
6.3.5	Registro de voz.....	33
6.4	Aplicaciones	33
7	HOLOGRAFÍA	36
7.1	¿Qué es la holografía?.....	36
7.2	Bases de la holografía	37
7.3	¿Cómo se crea un holograma?	39
7.3.1	Proceso de creación del holograma.....	40
7.3.2	Proceso de reconstrucción del holograma	40
7.4	Tipos de hologramas.....	42
7.5	Imagen virtual e imagen real.....	44
7.6	Aplicaciones	45

8	EXPERIMENTOS	48
8.1	Experimento principal: Representación tridimensional de objetos con distintas técnicas	48
8.2	Experimento 1: Creación de una pareja estereoscópica de un corazón	48
8.3	Experimento 2: Creación de una pareja estereoscópica de una letra E	51
8.4	Experimento 3: Comparación entre dos parejas estereoscópicas con formas distintas	53
8.5	Experimento 4: Comparación entre dos parejas estereoscópicas con bases estereoscópicas distintas	55
8.6	Experimento 5: Comparación entre dos anaglifos con colores distintos	58
8.7	Experimento 6: Creación de un autoestereograma <i>hidden image</i> de un corazón	62
8.8	Experimento 7: Creación de un autoestereograma <i>hidden image</i> de una letra E	65
8.9	Experimento 8: Comparación entre dos autoestereogramas de imagen escondida con formas opuestas	67
8.10	Experimento 9: Creación de un autoestereograma <i>object array</i> de un corazón	68
8.11	Experimento 10: Creación de un autoestereograma <i>object array</i> de una letra E	70
8.12	Experimento 11: Comparación entre dos autoestereogramas <i>object array</i> con formas opuestas	72
8.13	Experimento 12: Creación de un coche holográfico	73
9	CONCLUSIÓN	78
	ANEXOS	80
	ANEXO 1: Fórmulas para calcular la distancia interaxial	81
	ANEXO 2: Base de los autoestereogramas (para visión cruzada)	83
	ANEXO 3: Cómo modelar una letra E tridimensional	84
	ANEXO 4: Cómo crear un mapa de profundidad	87
	ANEXO 5: Algoritmos para generar autoestereograms (Páginas web)	88
	ANEXO 6: Historia de la holografía	89
	ANEXO 7: Historia de la estereoscopía	94
	ANEXO 8: Historia de la realidad virtual	100
	ANEXO 9: Imágenes a tamaño completo	103
	ANEXO 10: Mapas de profundidad de los autoestereogramas	133
	ANEXO 11: Evolución de la popularidad del 3D en el cine	135
	BIBLIOGRAFÍA	138
	WEBGRAFIA	139

1 INTRODUCCIÓN

Este trabajo de investigación trata sobre las distintas técnicas actuales que permiten la creación de imágenes tridimensionales. Estas incluyen principalmente la holografía, la estereoscopia y la realidad virtual.

Para empezar a contextualizar el asunto, es necesario conocer el significado de algo tridimensional. Que un objeto o entidad sea tridimensional significa que tiene tres dimensiones, es decir, que cualquiera de los puntos que lo componen viene determinado por tres coordenadas distintas. Generalmente, estas tres dimensiones son la altura, la anchura y la longitud. El espacio que nos rodea es, visualmente, tridimensional. En este trabajo tratamos la representación visual del objeto, y en este campo los objetos son tridimensionales. La mayor parte de las formas de representación a lo largo de la historia, sin embargo, han sido bidimensionales, con la notable excepción de la escultura.

En este trabajo analizaremos las principales técnicas de creación de imágenes tridimensionales: la holografía, la estereoscopia y la realidad virtual. La finalidad de estas es representar un elemento, ser o proceso de la forma más real posible, preservando sus tres dimensiones, incluida la profundidad.

La holografía es una técnica fotográfica que utiliza un láser para representar imágenes en tres dimensiones, que cambian su perspectiva en función de la posición del observador.

La estereoscopia hace referencia a una técnica que utiliza dos imágenes, una para cada ojo, sincronizadas de tal manera que parezcan una sola, generando la ilusión de profundidad.

La realidad virtual es un sistema informático capaz de generar una simulación de un entorno o un mundo, real o imaginario, a través de varios gráficos estereoscópicos, produciendo la sensación de que el sujeto está inmerso en esa realidad.

2 MOTIVOS Y OBJETIVOS DEL TRABAJO

El tema que he escogido es complicado de investigar y de entender a mi edad y el conocimiento que tengo sobre este antes de empezar la investigación es mínimo. Por esta razón, me planteo este trabajo como un reto. Es un campo que realmente me interesa y, por ello, quiero ampliar mis conocimientos sobre él.

Adicionalmente, pienso que en la sociedad actual hay mucha ignorancia respecto a este ámbito, y la mayor parte de la gente desconoce el significado de las técnicas sobre las que hablaré. Con la elaboración de este proyecto, quiero conseguir que el tema sea un poco más conocido por la gente, quiero extender estas tecnologías, que de hecho son nuestro futuro, aunque solo sea entre mis compañeros.

Los objetivos que me planteo antes de realizar el trabajo son varios. En primer lugar, deseo ampliar mis conocimientos en el campo de la estereoscopia, la realidad virtual y la holografía. Como ya he dicho, pretendo divulgar la idea entre las personas más cercanas a mí. También, quiero ser capaz de, siguiendo razonamientos lógicos, plantear conjeturas y de comprobar su veracidad, así como la efectividad de lo aprendido, a través de experimentos.

Hipótesis: Actualmente es posible aplicar de forma doméstica las diferentes formas de generar imágenes tridimensionales, obteniendo buenos resultados.

3 METODOLOGÍA

En este trabajo, quiero centrarme en explicar varias técnicas con las que pueden crearse imágenes tridimensionales, concretamente la estereoscopia (en diversas formas y variantes) y la holografía. Explicaré principalmente en qué consisten estas técnicas y sus bases tecnológicas, matemáticas y biológicas. También, describiré las características de la imagen tridimensional creada y los pasos a seguir para su producción, sin olvidarnos de los métodos y aparatos utilizados para la visualización de la imagen tridimensional, en caso de ser necesarios. También hablaré de la realidad virtual como una técnica que va más allá de la simple representación tridimensional.

Más adelante, pondré en práctica algunos de los conceptos previamente explicados mediante la creación de varios hologramas y estereogramas. Esto me permitirá comprobar si los conocimientos teóricos referentes a estas tecnologías son realmente efectivos y además, posibilitará la comparación de muchos aspectos respecto al procedimiento utilizado y el resultado obtenido. Formularé hipótesis en los experimentos, para complementar la hipótesis inicial, y explicaré los resultados, a partir de los cuales sacaré conclusiones.

Finalmente, elaboraré una conclusión de todo el trabajo. En ella, explicaré si se verifican o no las hipótesis inicialmente expuestas y las de los experimentos y recogeré y constataré los hechos expuestos a lo largo del trabajo.

Por último, voy a elaborar un apartado de anexos para complementar la información expuesta en el trabajo y añadir datos o notas que puedan resultar interesantes o necesarias para la comprensión total de este.

A lo largo del trabajo vais a ver varias imágenes de tamaño reducido, concretamente imágenes hechas mediante estereoscopía o estereogramas (parejas estereoscópicas y autoestereogramas de diferentes tipos) de mi creación. Con el objetivo de posibilitar su correcta visualización, se adjuntan todos ellos en el apartado de anexos, pero a tamaño completo.

Además, notaréis que todos los estereogramas mostrados en el trabajo están adaptados a un tipo de visión particular (visión paralela o divergente). Dado que no todo el mundo utiliza este tipo de técnica visual, se incorporan en el apartado de anexos los mismos estereogramas, aunque adecuadas a la otra técnica visual posible para su visualización (visión cruzada o convergente).

4 EXPLICACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LAS TÉCNICAS DE CREACIÓN DE IMÁGENES TRIDIMENSIONALES

Antes de clasificarlas, hay que conocer el significado de las técnicas de creación de imágenes tridimensionales.

Una técnica de creación de imágenes tridimensionales es un procedimiento que se ejecuta con la finalidad de obtener una imagen que produce la ilusión de estar en tres dimensiones y, en consecuencia, de ser más real.

Existen varias técnicas. Las más destacadas son la holografía, la estereoscopia y la realidad virtual. A continuación se adjunta una tabla que compara las tres técnicas, haciendo referencia a sus cualidades principales y a sus semejanzas y diferencias.

	Holografía	Estereoscopia	Realidad virtual
Almacenamiento de la información	La información almacenada es tridimensional (se almacena la amplitud y la fase de las ondas)	La información almacenada es bidimensional (se almacena la intensidad luminosa de las ondas)	La información almacenada es tridimensional (el generador de los gráficos contiene información acerca de las tres dimensiones de los elementos del mundo virtual)
Reproducción de la información	La información se expone de forma tridimensional	La información es expuesta en un medio bidimensional	La información es expuesta en un medio bidimensional
Reconstrucción de la información	El haz de referencia reconstruye la información tridimensional almacenada al incidir sobre el holograma ya procesado	Cuando el sujeto observa el estereograma del modo adecuado, el cerebro reconstruye la imagen bidimensional y obtiene información tridimensional	El usuario percibe un mundo tridimensional al mirarlo a través del visor y utilizar los dispositivos adecuados
Visualización de la información	La información es reconstruida y observada tridimensionalmente	La información se ve en tres dimensiones al ser reconstruida por el cerebro	La información se ve en tres dimensiones al ser reconstruida por el cerebro
Fenómeno en el que se basa	Interferencia y difracción	Estereopsis	Estereopsis
Sentidos implicados	La vista	La vista	Pueden llegar a intervenir todos los sentidos

Perspectivas vistas del objeto o escena representado	Se ven varias perspectivas, que cambian con el movimiento visual, de la parte del objeto cuya luz incide sobre la película fotosensible	Solamente se ve una perspectiva del objeto. No varían las perspectivas captadas aunque cambie el punto de vista del observador	Los movimientos de cabeza permiten cambiar la perspectiva de la escena visualizada en el sentido o dirección que se quiera
Rasgos que se conservan en la reproducción	Geometría y tridimensionalidad	Geometría y tridimensionalidad	Depende de los dispositivos empleados
Rasgos que se pierden en la reproducción	Color (en la técnica habitual, no siempre), algunos planos del objeto representado, tacto del objeto, etc.	Texturas y colores de la figura tridimensional (en los autoestereogramas), planos de la escena u objeto presentado, tacto de la figura, etc.	Depende de los dispositivos empleados

5 ESTEREOSCOPIA

5.1 ¿Qué es la estereoscopia?

La estereoscopia es una técnica que permite la creación de un efecto de profundidad en una imagen bidimensional, hecha para visión binocular. La mayoría de técnicas estereoscópicas se basan en la captación de dos perspectivas que representan el mismo objeto o paisaje desde dos ángulos ligeramente distintos. Cada ojo visualiza una sola imagen y el cerebro se encarga de procesarlas y unir las, creando una sensación de profundidad.

Nuestra visión es estereoscópica, es decir, nuestros ojos captan de forma natural e instintiva la misma escena, pero cada uno de ellos obtiene una perspectiva distinta, con una ligera variación del ángulo respecto a la otra, a lo que denominamos disparidad. Nuestro cerebro procesa ambas percepciones y reconstruye distancias y volúmenes, produciendo un efecto de tridimensionalidad. Este proceso recibe el nombre de estereopsis.

5.2 ¿Qué es un estereograma?

Un estereograma es una imagen bidimensional que, mediante estereopsis, es capaz de producir una sensación de profundidad y de ser reconstruida por el cerebro como una imagen tridimensional. Se llama estereograma a cualquier conjunto de imágenes creadas mediante la técnica de la estereoscopia, que hemos nombrado anteriormente.

5.3 Parejas estereoscópicas

Las parejas estereoscópicas contienen dos perspectivas de una misma imagen, normalmente una al lado de la otra. Una de estas perspectivas representaría la visión captada por el ojo derecho y la otra por el izquierdo. Comúnmente estas parejas estereoscópicas son vistas sin ningún dispositivo adicional, haciendo único uso de nuestra visión binocular y de la técnica adecuada, pero existen ciertos tipos que sí que precisan del uso de instrumentos específicos. Se explican en el apartado de “técnicas de presentación de parejas estereoscópicas”.



Pareja estereoscópica de un corazón¹

5.3.1 Bases y creación de las parejas estereoscópicas

Una pareja estereoscópica se forma con dos imágenes que representan la misma escena desde perspectivas distintas. Las perspectivas se corresponden con las que captaría un humano medio si observase la misma escena a través del ojo derecho y el izquierdo por separado. Las diferencias que se producirían en esas condiciones son lo que se intenta imitar a la hora de crear parejas estereoscópicas; son las llamadas diferencias de paralaje. El paralaje es el cambio de posición que aparentemente experimenta un objeto al ser observado desde posiciones o puntos de vista diferentes. El paralaje se mide generalmente con el ángulo que forman las dos líneas de visión desde el ojo hacia el punto a observar.

Nuestros ojos se encuentran en posiciones distintas de la cabeza. Por eso, cada uno de ellos tiene visiones distintas de la misma escena (disparidad binocular), entre las cuales hay un cierto paralaje. Para demostrar este fenómeno pondré un ejemplo.

Actividad: Necesito que cierres un ojo y alinees tu dedo con un objeto o el borde de un elemento que esté en tu campo de visión. Ahora, manteniendo el dedo en esta posición, abre el ojo que tenías cerrado y cierra el otro. Podrás observar que, ahora, tu dedo ya no está alineado con ese objeto.

Esto es debido al paralaje existente entre la perspectiva captada por nuestros dos ojos de un mismo panorama. Nuestro córtex cerebral aprovecha este paralaje en un proceso llamado estereopsis, que consiste en la fusión de ambas imágenes, extrayendo información relativa a la profundidad y a la distancia que nos separa de los objetos que observamos.

Las imágenes que forman las parejas estereoscópicas pueden ser dibujos o fotografías. Nos centraremos en el último caso, cuya creación emplea la técnica de la fotografía estereoscópica.

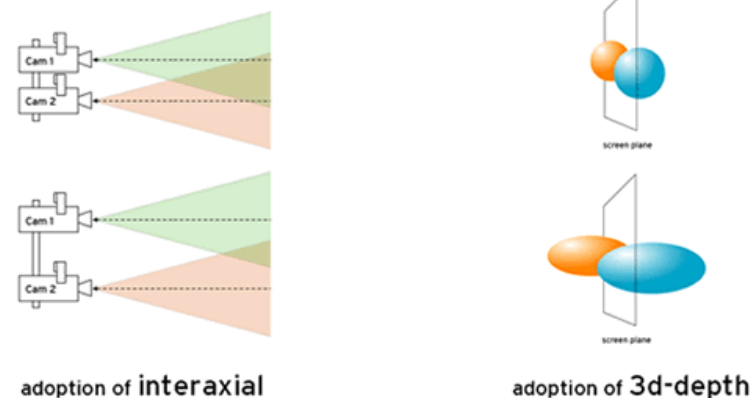
La sensación de profundidad creada al utilizar el tipo de visión o dispositivo adecuado depende de varios factores. Este efecto es mayor cuanto mayor es la separación entre

¹ Anexo 9 imagen 1

ambas imágenes y la distancia entre tomas. Por el contrario, la impresión es menor cuanto mayor es la distancia focal del objetivo de la cámara y la separación entre la cámara y la escena a fotografiar.

Sin embargo, aunque el efecto estereoscópico sea mayor cuanto más grande es la separación entre imágenes o distancia interaxial, esto no significa que cuanto más grande sea, mejor. De hecho, hay un límite que marca la distancia interaxial máxima e idónea entre tomas. Al sobrepasar este límite, experimentaremos distorsiones en la profundidad y las formas de la imagen tridimensional, como podemos observar en la imagen de abajo.

Basic techniques to influence a 3d-picture



Influencia de la distancia interaxial en el efecto 3D

Existen varias fórmulas creadas para calcular este límite o distancia interaxial máxima.

Base estereoscópica

Para crear una pareja de fotografías estereoscópicas, debemos tomar dos fotografías de una misma escena, con ciertas diferencias de paralaje. Estas fotografías pueden tomarse simultáneamente con una cámara estereoscópica, con dos cámaras unidas mediante un soporte, o con una sola cámara, desplazándola a una cierta distancia horizontal en la segunda toma.

Habitualmente, estas fotografías se toman con los ejes ópticos de las dos cámaras (o de la misma cámara en las dos tomas) en paralelo, aunque en ciertas ocasiones también pueden tomarse con los ejes convergiendo sobre un punto.

Frecuentemente se utiliza la distancia interpupilar como base estereoscópica. Cuando esto ocurre, el efecto resultante es conocido como orto-estéreo (la imagen tridimensional aparece a un tamaño y distancia normal, natural). Cuando se utiliza una base menor (normalmente para primeros planos), el efecto es llamado hipo-estéreo (la escena aparece más grande y cercana, se produce un fenómeno conocido como gigantismo). Si la distancia interaxial usada es mayor que la distancia interpupilar (usualmente para fotografías de objetos lejanos), el efecto es nombrado híper-estéreo (la imagen tridimensional aparece más pequeña y lejana, lo que se denomina enanismo).

Existen varias fórmulas para calcular la distancia máxima a la que deben encontrarse los ejes ópticos de la cámara en las dos fotografías para conseguir el máximo efecto estereoscópico sin provocar distorsiones en la pareja. Se adjuntan todas ellas y su explicación en el anexo 1.

El problema de las fórmulas expuestas es que en su gran mayoría han sido enunciadas ajustadas a los parámetros de las cámaras analógicas (normalmente con carretes de 35 mm). Sin embargo, casi todas las cámaras actuales son digitales.

De todos modos, los parámetros pueden ser adaptados a los de las cámaras digitales. Por ejemplo, el paralaje lineal o máxima desviación permitida en el carrete, pasa a ser la máxima desviación permitida en el CCD o sensor de imagen. El problema es que este sensor está escondido dentro de la cámara y normalmente no conocemos su tamaño. Además, muchas veces desconocemos la distancia focal de la cámara y su distancia hiperfocal no está marcada en las lentes (al ser lentes de zoom tienen varias distancias hiperfocales). Entonces, ¿cómo solucionamos estos problemas?

El secreto está en usar medidas equivalentes a 35 mm. Esto incluye la distancia focal y el tamaño del CCD o sensor de imagen. En consecuencia, establecemos 35 mm como distancia focal y utilizamos una medida de paralaje lineal adaptada a un sensor de 35 mm. El paralaje resultante sería un máximo de 1,17 mm.

5.3.2 Creación de parejas estereoscópicas con software informático

Hay varios programas que facilitan la tarea de creación de parejas estereoscópicas, ayudan a corregir errores y magnifican el efecto estéreo. A continuación, voy a detallar los pasos a seguir para crear una pareja estereoscópica:

1. **Toma de dos fotografías:** Como ya hemos explicado anteriormente, el primer paso es la toma de dos fotografías de la misma escena desde distintas perspectivas. El método más exacto es el uso de una cámara estereoscópica. Aun así, su disponibilidad doméstica no es frecuente, por lo que en este caso podemos recurrir a utilizar dos cámaras o incluso una sola, desplazándola entre tomas. Estos últimos métodos dan lugar a errores, con lo cual es imprescindible el empleo de un programa informático para alinear ambas imágenes.
Para la toma de fotografías podemos utilizar una de las fórmulas anteriores para calcular la distancia de desplazamiento del objetivo de la cámara entre tomas (o entre las dos cámaras en una sola toma) o podemos utilizar un método más inexacto. La técnica más empleada por aficionados consiste en hacer una de las fotografías apoyando el peso del cuerpo sobre el pie derecho, y la siguiente apoyándolo sobre el pie izquierdo. Si se utiliza un método más preciso, es recomendable utilizar un trípode. Si se pretende hacer un anaglifo, hay que procurar no fotografiar objetos de los colores que lo conformen.
2. **Alinear las fotografías (en mi caso con Stereo Photo Maker):** Primero, subimos las fotografías derecha e izquierda al programa *Stereo Photo Maker*. Podemos elegir entre dejar la fotografía izquierda en la posición izquierda y la derecha en la posición derecha (para visión paralela) o cruzar ambas fotografías (para visión cruzada). A continuación, tenemos dos opciones: podemos seleccionar la opción de alineamiento automático, que ajusta la imagen automáticamente (su rotación, su tamaño, su perspectiva, la posición de los

píxeles, la disparidad, etc.) con el objetivo de conseguir un efecto estereoscópico mayor y más nítido; o, si se prefiere, puede usarse el ajustamiento fácil, que es un alineamiento controlado por el usuario.

3. **Crear un anaglifo** (opcional): Si se quiere, puede seleccionarse la opción de creación de un anaglifo (explicados más adelante), ya sea en rojo y cian, en azul y amarillo, o en verde y rojo.
4. **Guardar la pareja estereoscópica**: Es decir, archivar las dos imágenes generadas (separadas o mezcladas), una para cada ojo, como una sola imagen estereoscópica.



Anaglifo azul-amarillo creado²

5.3.3 Estereograma de puntos aleatorios

Existe un tipo de parejas estereoscópicas que no se crean exactamente como el resto: los estereogramas de puntos aleatorios.

Este tipo de estereogramas se obtienen combinando dos imágenes estereoscópicas. Ambas imágenes se forman mediante patrones de puntos aleatorios. Estos patrones son casi idénticos, pero difieren en un subgrupo de puntos, que aparece desplazado horizontalmente en una de las imágenes.

Su procedimiento de diseño empieza por la creación de un patrón de puntos aleatorios y continúa por la selección de un grupo pequeño de puntos dentro de este patrón, que constituyen una forma determinada. Esta forma (puede ser un círculo, un rectángulo o lo que queramos) se desplaza hacia un lado, y el espacio vacío que se crea es rellenado con nuevos puntos aleatorios.

² Anexo 9 imagen 14



Estereograma de puntos aleatorios

El patrón original se coloca al lado del nuevo patrón, que contiene un subgrupo de puntos en posición diferente. Cuando la pareja se observa utilizando la técnica de visión o el dispositivo adecuado, por ejemplo un estereoscopio, se percibe este subgrupo de puntos a diferente profundidad que el resto, generando una tercera dimensión. Entonces, se ve la forma seleccionada, compuesta por el conjunto de puntos desplazados, flotando sobre la imagen (el patrón), que constituye el fondo.

Al observar un estereograma de puntos aleatorios, veremos en el centro de la pareja los puntos desplazados, pero en lugar de planos, los veremos como si estuviesen dispuestos sobre una forma tridimensional.

Después de la creación de este tipo de parejas estereoscópicas, creadas por primera vez por Béla Julesz, se planteó la posibilidad de conseguir el mismo efecto con una sola imagen. Esto supuso el principio de los autoestereogramas.

5.3.4 Técnicas de presentación de parejas estereoscópicas

A parte de los métodos de visión explicados más adelante para visualizar parejas estereoscópicas colocadas una al lado de la otra, existen varias técnicas de presentación y visualización de parejas estereoscópicas que permiten conferir un efecto 3D a la escena captada sin que el observador tenga que concentrarse y ejecutar técnicas de visión poco habituales.

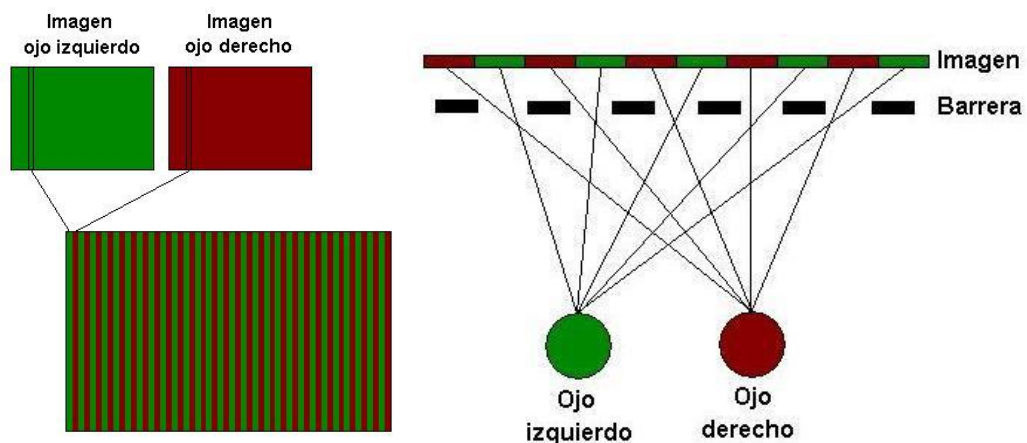
Autoestereoscopía

La autoestereoscopía permite que visualicemos en tres dimensiones la escena representada por una pareja estereoscópica bidimensional, sin el uso de gafas ni ningún otro dispositivo especial. La autoestereoscopía es llamada frecuentemente 3D sin gafas.

Distinguimos dos métodos que permiten crear imágenes autoestereoscópicas:

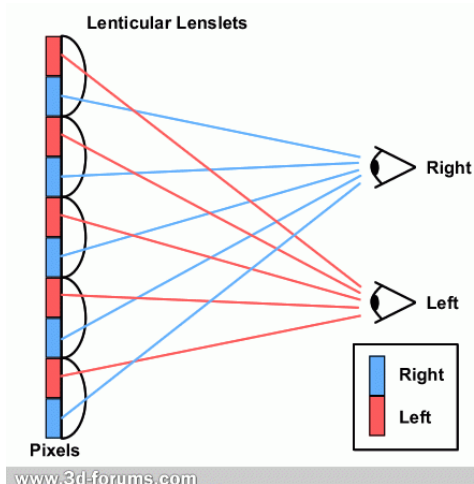
- **Barreras de paralaje:** Cada una de las dos fotografías tomadas se fractura en columnas verticales de píxeles, y posteriormente las columnas de ambas

imágenes se disponen alternamente formando una sola. En frente del reproductor de la imagen (una pantalla LCD, por ejemplo) se coloca una barrera opaca con columnas oscuras que impiden la visión de lo que hay detrás y columnas transparentes que actúan como una ventana y permiten ver a través. Las rejillas de la barrera y las columnas de la imagen están alineadas de tal modo que cada ojo solo pueda ver las partes de imagen que corresponden a la fotografía destinada a él. Así, el observador puede mover su cabeza y percibir diferentes perspectivas de la imagen 3D, aunque existen ciertas posiciones en las que el efecto 3D no es apreciable. En este tipo de estereogramas es frecuente el uso de más de dos imágenes.



Funcionamiento de las barreras de paralaje

- **Tecnología lenticular:** La tecnología lenticular también utiliza una imagen entrelazada como con las barreras de paralaje, pero en este caso se sustituye la barrera por una hoja lenticular. Una hoja lenticular está compuesta por dos caras: una cara lisa, en la que se imprime la imagen entrelazada, y una cara formada por lentes o lenticulas largas, finas y alineadas con las columnas de la imagen. Las lentes actúan como una lupa, y amplían la imagen que se encuentra debajo de ellas en función del ángulo de visión del espectador. Esta técnica proporciona a la imagen un efecto 3D, animación, zoom, etc.



Funcionamiento de la tecnología lenticular

Estereoscopia activa (obturación/ secuencia de fotogramas alternados)

Este sistema de 3D estereoscópico se basa en el uso de unas gafas especiales. Estas gafas de obturación funcionan con una batería y están compuestas por dos lentes cubiertas con una capa de cristal líquido naturalmente transparente, pero que cuando recibe una señal eléctrica se vuelve opaca o, si esta opaca, vuelve a su estado original.

Las gafas están conectadas al televisor mediante una frecuencia infrarroja o de radio, por ejemplo Bluetooth, aunque también pueden estar comunicadas por cable. Entonces, las gafas y el televisor se sincronizan, de modo que el televisor cambia la imagen expuesta en él en fracciones de segundo y cada lente de las gafas cambia de opaca a transparente o al revés al mismo tiempo. De esta manera, cuando se presenta en el televisor la imagen prevista para el ojo derecho, este ojo mantiene su lente transparente mientras que la lente del otro ojo se vuelve opaca, y cuando el televisor expone la imagen prevista para el ojo izquierdo pasa lo contrario. Estos cambios ocurren tan rápidamente que el observador no es capaz de percibirlos conscientemente, ya que el cerebro combina las dos imágenes captadas en una sola imagen tridimensional.

Estereoscopia pasiva (polarización)

Las ondas luminosas naturalmente vibran en todas las direcciones perpendiculares a la dirección de propagación de la onda. Las ondas polarizadas son ondas que solamente vibran en una dirección. La polarización es una técnica que permite obtener luz polarizada a partir de luz no polarizada.

En la estereoscopia o 3D activo, cada una de las imágenes que componen la pareja estereoscópica escogida es polarizada de un modo distinto a la otra. Como resultado se obtienen imágenes cuya luz reflejada vibra en una dirección o plano diferente a la otra. Por ejemplo, una de ellas lo hace verticalmente y la otra horizontalmente. Ambas imágenes se superponen y son visualizadas mediante unas gafas polarizadas. Cada una de las lentes de las gafas está polarizada de la misma manera que la imagen prevista para este. La lente solo permite que pase a través de ella la luz polarizada del mismo modo que esta, de manera que solo vemos por cada ojo la imagen tomada para tal. Así, nuestro cerebro emula la estereopsis producida a causa de nuestra visión binocular, obteniendo distancias y profundidades mediante la recombinación de ambas fotografías, hasta obtener una sola imagen con efecto 3D.

Anaglifos

Los anaglifos son parejas estereoscópicas especiales, ya que las dos imágenes utilizadas son “teñidas” de colores complementarios. Esto se hace utilizando filtros en la toma de fotografías, que impiden la llegada de la luz de ciertos colores a la cámara. Otra opción es tomar ambas fotografías de forma convencional y posteriormente eliminar los colores no deseados utilizando un software informático. Después, se superponen ambas imágenes, de manera que forman una sola.



Anaglifo de una letra E³

Los anaglifos son visualizados mediante el uso de gafas anaglíficas, con filtros de colores que regulan la luz que llega a cada ojo y lo dirigen hacia su respectiva fotografía. El filtro de cada lente será de un color complementario al de la otra.

El rojo-cian, verde-magenta y azul-amarillo son parejas de colores complementarios que podrían utilizarse para la fotografía anaglífica. Sin embargo, los anaglifos más comunes y que dan mejor resultado son los formados por rojo y cian.

5.4 Autoestereogramas

5.4.1 ¿Qué son los autoestereogramas?

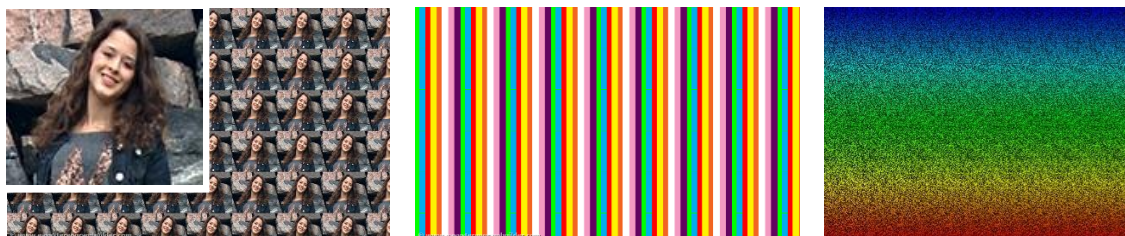
Los autoestereogramas, también llamados SIS (*Single-Image Stereogram*), son un tipo de estereogramas que se visualizan sin el uso de gafas o ningún otro dispositivo. Estos poseen la peculiaridad de que se forman con tan solo una imagen, en vez de con un par estereoscópico.

Los autoestereogramas son imágenes bidimensionales que esconden un objeto tridimensional. La imagen está formada por un patrón o textura, que puede estar formado por puntos aleatorios, figuras, estampados, elementos con contornos bien definidos, etc., y se repite de forma consecutiva, pero con ligeras diferencias (hay ciertos puntos desplazados en determinadas zonas). La visión binocular humana, cuando enfoca la vista por delante o por detrás del autoestereograma, capta dos imágenes, una para cada ojo. Entonces, el cerebro se encarga de fusionarlas, interpretando sus diferencias como profundidades, cosa que permite que veamos ciertos píxeles a distinta proximidad y percibamos una imagen tridimensional. La imagen tridimensional que visualizamos no tiene un color específico, sino que simplemente percibimos su geometría emergida o sumergida del resto de la imagen.

³ Anexo 9 imagen 15

5.4.2 Bases de los autoestereogramas

Un autoestereograma se forma por un patrón o textura repetida, que compone la imagen bidimensional que vemos a simple vista. Estas son las tres texturas que utilizaremos para la realización de nuestros estereogramas: una fotografía de mí, un patrón de rallas verticales multicolor y un patrón de rallas verticales multicolor y un patrón de puntos aleatorios.



Patrones escogidos para la creación de autoestereogramas

Los estereogramas realizados con el patrón de rallas verticales, por su geometría, son muy difíciles de visualizar. Aun así, los utilizaremos porque ello permite una clara apreciación del desplazamiento de píxeles producido en su creación.

El desplazamiento de píxeles se lleva a cabo en base a un algoritmo, que calcula el espacio que debe separar dos puntos homólogos de la imagen (intervalo de repetición) según la distancia a la que es observada, con la finalidad de obtener la longitud a la que ese punto debe emerger o hundirse del resto del patrón.

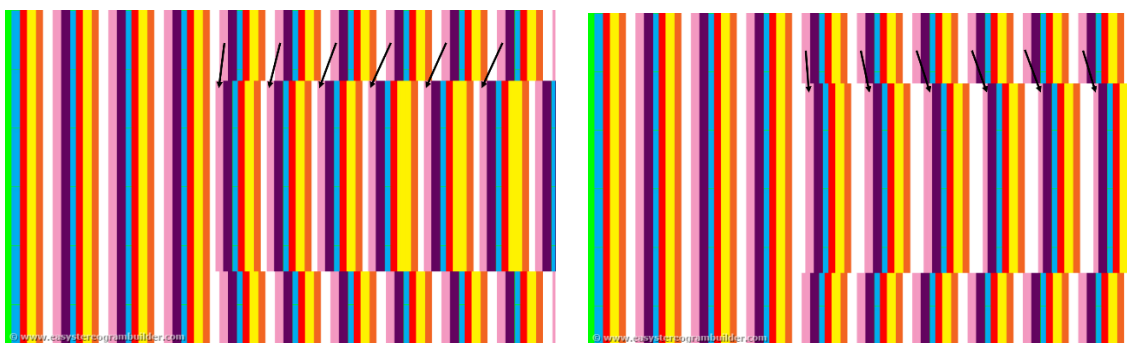


Autoestereogramas de mi creación para demostrar el desplazamiento de píxeles⁴

Las imágenes mostradas arriba son autoestereogramas que he creado para demostrar el desplazamiento de los píxeles de forma visual. La imagen emergente que esconden los tres autoestereogramas es un cuadrado bidimensional en el centro de estos, cuya profundidad es la misma en todas sus partes. Se aprecia que en el primer estereograma

⁴ Izquierda: anexo 9 imagen 17; derecha arriba: anexo 9 imagen 19; derecha abajo: anexo 9 imagen 21

la geometría del elemento escondido es distinguible a simple vista, cosa que solo ocurre por la uniformidad de su profundidad y porque el patrón escogido, al ser vertical, no interfiere en la percepción del desplazamiento de píxeles. El segundo patrón permite observar de manera clara las deformaciones que provoca en la imagen la traslación de algunos de sus puntos, aunque ya no pueden distinguirse las formas porque el estampado lo obstaculiza. Finalmente, en el estereograma de puntos aleatorios es muy complicado, o incluso imposible, percibir cualquier desplazamiento o deformación de la imagen, porque las partes trasladadas son rellenadas con más puntos aleatorios.



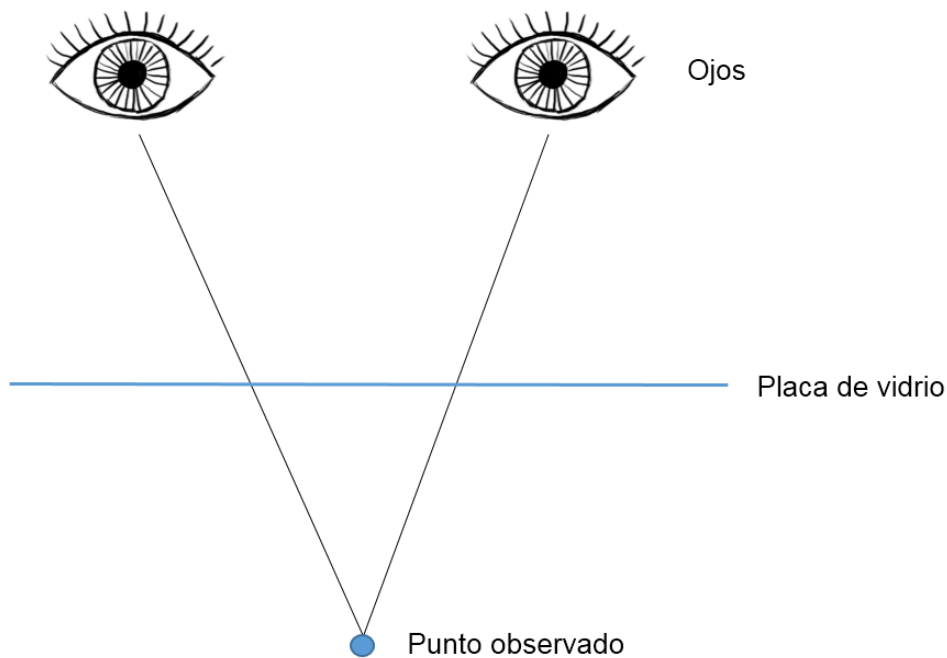
Autoestereogramas de mi creación para demostrar el desplazamiento de píxeles. A la izquierda, autoestereograma de un cuadrado plano emergente. A la derecha, autoestereograma de un cuadrado plano que se hunde del fondo.

Arriba, en la derecha, podemos ver otro estereograma que he creado para demostrar el desplazamiento de los píxeles. En la izquierda, encontramos de nuevo el primer estereograma expuesto en este apartado, para poder así comparar la traslación de puntos en la imagen. El estereograma de la derecha es el mismo, pero con la profundidad cambiada. Por tanto, esta vez el elemento escondido es un cuadrado bidimensional que debe sumergirse en el centro del estereograma. Ambos estereogramas tienen flechas negras, que muestran el desplazamiento producido en las franjas. De este modo, podemos advertir que el cambio de posición de determinadas partes de la imagen es prácticamente el mismo en las dos imágenes, con una notable diferencia: en el estereograma de la izquierda, en el que el cuadrado debe sobresalir del resto, la traslación es hacia la izquierda, y en el estereograma de la derecha, en el que el cuadrado debe hundirse, el desplazamiento es hacia la derecha.

Ahora que hemos demostrado el desplazamiento de píxeles, la pregunta es: ¿En qué se basa el algoritmo para calcular esta distancia?⁵

La explicación se basa en que cuando nuestros ojos miran un objeto, a cada uno de ellos le llega un rayo de luz procedente del punto en el que convergemos nuestra visión. Nuestro cerebro no es capaz de distinguir entre el punto en el que enfocamos nuestra vista y dos puntos idénticos al punto mirado situados cada uno en el camino de los dos rayos de luz hacia uno de nuestros ojos.

⁵ La explicación presupone el uso de técnicas de visión paralela. La explicación y el gráfico en base a las técnicas de visión cruzada se encuentra en el anexo 2.



Ojos convergiendo sobre un punto

Ahora, imaginemos que colocamos una placa de vidrio entre el punto observado y nuestros ojos. Vemos que hay dos puntos, uno para cada ojo, en los que los rayos de luz se cruzan con la placa. Estos puntos estarán más separados cuanto más lejos de nosotros está el punto observado, porque entonces nuestros ojos convergen a mayor distancia y, en consecuencia, los rayos de luz viajan más separados horizontalmente hasta encontrarse en el punto contemplado. Sin embargo, a cuanto más distancia nos encontremos del soporte escogido, más cerca se encontrarán los puntos que corresponden al cruce entre la placa de vidrio y los rayos de luz, porque los rayos viajarán menos separados horizontalmente. Cuanto mayor sea la distancia interpupilar del sujeto, mayor será la separación entre puntos.

Ahora imaginemos que sustituimos la placa de vidrio por un papel, manteniéndolo en la misma posición, y dibujamos los puntos en los que los rayos de luz pasaban por la placa de vidrio. Luego, imaginemos que miramos con cada ojo uno de estos puntos, de modo que nos llegue un rayo de luz desde cada uno de ellos hasta uno de nuestros ojos. ¿Qué pasaría ahora? Pues, basándonos en el principio previamente explicado, podemos deducir que nuestro cerebro fusionaría ambos puntos, de modo que lo único que veríamos sería un punto idéntico a los otros 2, pero en el lugar en el que convergen nuestros ojos. Esto es, exactamente lo que ocurre en los autoestereogramas. Lo que hacemos en realidad es engañar a nuestro cerebro aprovechando nuestra visión estereoscópica.

Para ver un autoestereograma es preciso enfocar la vista detrás del papel o pantalla en la que se representa (visión paralela) o delante (visión cruzada).

Teniendo en cuenta los parámetros recientemente explicados, existe una ecuación que permite calcular la separación entre píxeles homólogos o desplazamiento horizontal de un determinado píxel en un autoestereograma:

$$d = e * z / (z + v)$$

Donde:

d = separación entre píxeles homólogos

e = distancia interpupilar

z = profundidad del píxel por detrás del soporte (distancia entre el soporte y el píxel virtual o lugar donde vemos el píxel en la imagen tridimensional)

v = distancia de observación (distancia entre los ojos y el soporte)

5.4.3 Creación de un autoestereograma con software informático

Aunque, como ya hemos mencionado, la creación de estereogramas se basa en algoritmos y fórmulas complejas, actualmente cualquiera puede hacerlos con el mínimo conocimiento sobre el tema, ya que hay muchos programas informáticos que permiten crear estereogramas de forma sencilla. Para ello, casi todos requieren de la inserción de un mapa de profundidad del elemento a visualizar en tres dimensiones, además del patrón seleccionado.

Un mapa de profundidad es una imagen bidimensional en escala de grises, que contiene la información de la profundidad de la figura mediante la asociación del color blanco con valores que se percibirán más cercanos al observador, y el color negro con valores que producirán una sensación de lejanía respecto al sujeto⁶. Esta asociación de colores permite al programa calcular la distancia a la que deben encontrarse los píxeles en función de su profundidad y deformar la imagen para que esto ocurra.

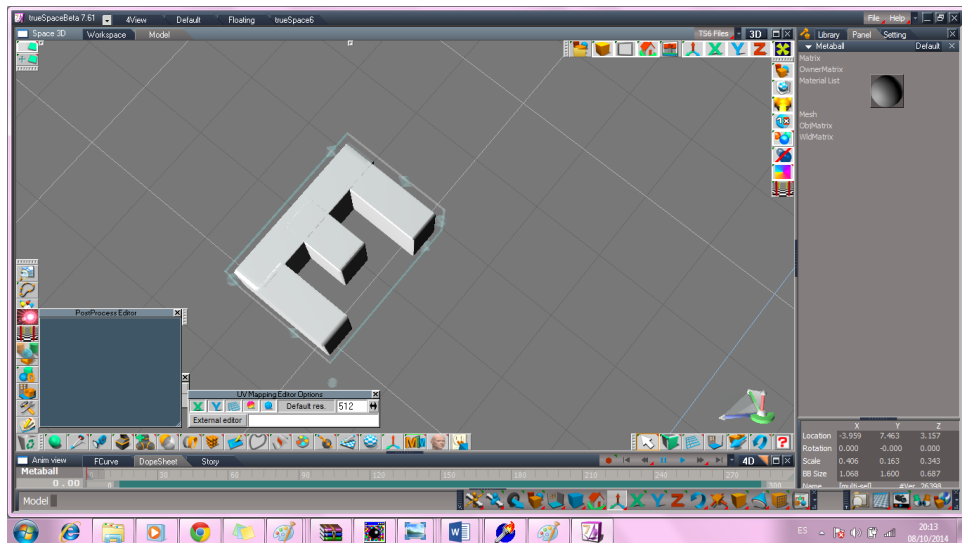
Para crear un estereograma puede partirse de un objeto 3D ya creado, e incluso de un mapa de profundidad ya hecho, hay muchas opciones distintas en internet. Aun así, yo voy a explicar todo el proceso, de principio a fin, para la creación de un estereograma completamente original.

A continuación voy a explicar detalladamente los pasos a seguir para la creación de estereogramas utilizando varios programas informáticos. Para la explicación voy a utilizar como ejemplo un estereograma creado completamente por mí.

1. **Modelado:** El primer paso para la creación de un estereograma es crear un modelo tridimensional. Yo creé en truespace un modelo de la inicial de mi nombre, una letra E⁷, pero puede modelarse cualquier cosa.

⁶ Supuesta visión paralela. Más adelante se explican los tipos de visión.

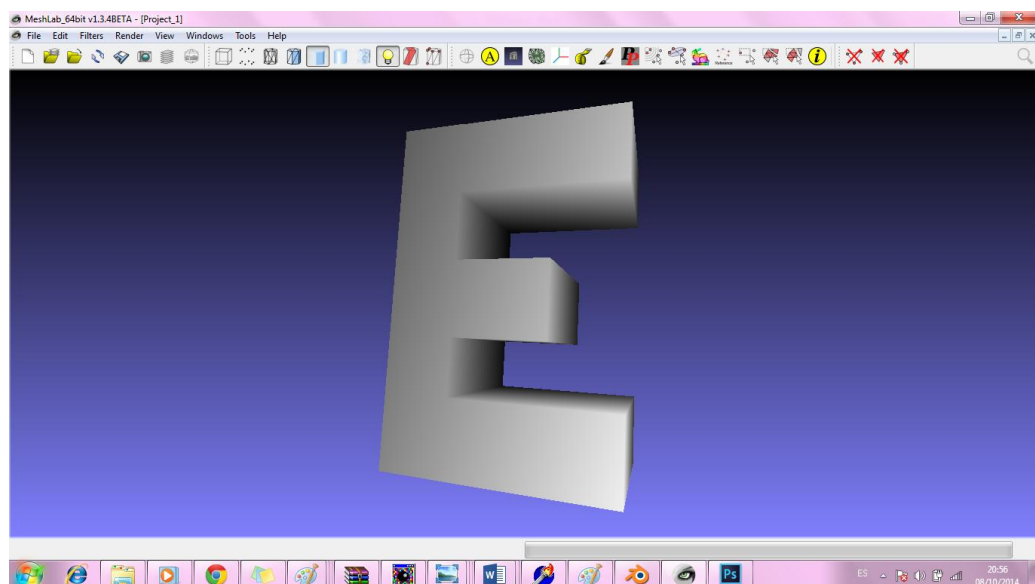
⁷ En el anexo 3, se explica la creación detallada de la letra E en *Truespace*.



Letra E modelada en Truespace

Otros programas de modelado 3D que podrían utilizarse son *3ds Max*, *Blender*, *Sketch up*, *Strata 3d*, *AutoCad*, etc.

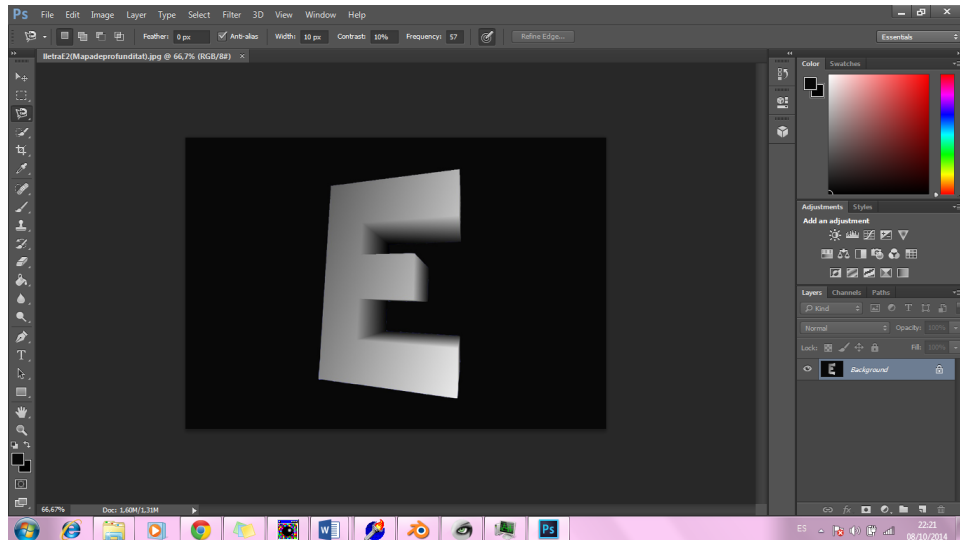
2. **Crear un mapa de profundidad⁸:** Necesitamos utilizar otro programa para poder crear un mapa de profundidad. Yo voy a usar meshlab. En primer lugar, importamos el modelo. Después, renderizamos la imagen, convirtiéndola en un mapa de profundidad. Jugamos con las opciones de la ventana que se ha abierto para conseguir el degradado de colores deseado, y también con la posición del modelo. Cuando hayamos conseguido el efecto deseado, capturamos el modelo y lo guardamos.



Mapa de profundidad de la letra E creado con Meshlab

⁸ Explicación paso a paso en el anexo 4

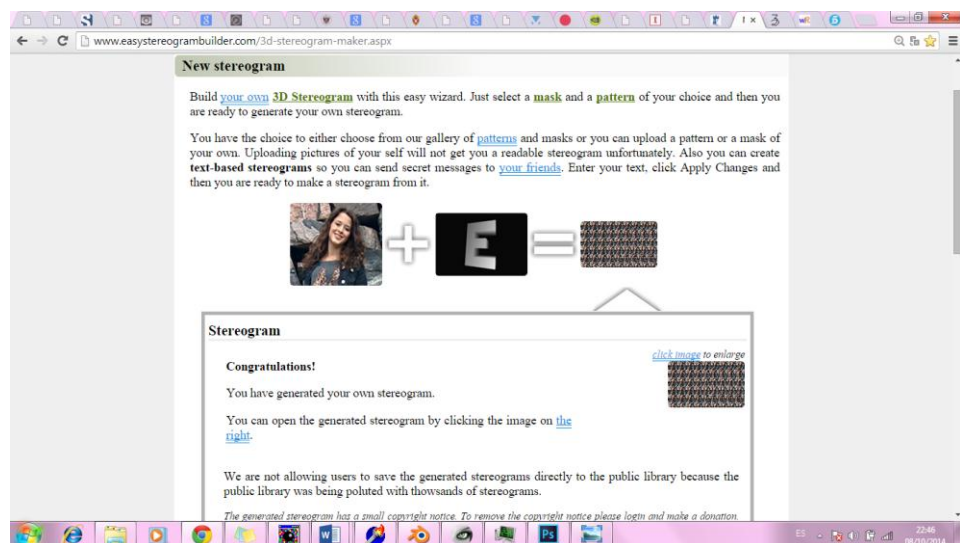
Ahora, para continuar, usaremos photoshop. En vista de que el fondo de la imagen es azul, y para la configuración del mapa de profundidad este debe ser negro (ya que este color representa el fondo de la imagen, la profundidad máxima) utilizaremos este programa para cambiarlo de color. Después, podemos redimensionar la imagen o incluso ajustar el tamaño del fondo como queramos.



Mapa de profundidad de la letra E terminado con photoshop

También puede utilizarse Photoshop para hacer todo el proceso de creación del mapa de profundidad.

3. **Crear el estereograma:** Seleccionamos un software de creación de estereogramas, como la web www.easystereogrambuilder.com. A continuación, seleccionamos un patrón, en mi caso una fotografía de mí. Luego, lo subimos junto con el mapa de profundidad creado. Por último, creamos el estereograma.



*Proceso de creación del autoestereograma con la web
www.easystereogrambuilder.com*



Autoestereograma finalizado⁹

Hay más software de creación de estereogramas, como Stereocreator, Stereogram Lab, Stereogram Maker o Stereogram Explorer. Algunos programas de creación de estereogramas, como por ejemplo Stereogram Explorer, permiten la creación de un mapa de profundidad a partir de una imagen tridimensional. Por eso, en caso de usarlos, podríamos saltarnos el paso anterior.

También existen algoritmos y códigos matemáticos para generar autoestereogramas. Se adjunta un link a las páginas en el anexo 5.

5.4.4 Tipos de autoestereogramas

Estereograma de imagen escondida (HIS: *Hidden Image Sterogram*)

Son los tipos más comunes de autoestereogramas, los que hemos explicado hasta ahora, en los que la imagen tridimensional a visualizar está escondida, es decir, no se puede apreciar a simple vista y es revelada al usar la técnica de visión adecuada.

Los niveles de profundidad, como ya hemos explicado, pueden estar codificados por cualquier elemento: estampados, contornos, texturas, etc. Lo importante es que si utilizamos un estampado, este no tenga grandes áreas monótonas, sin cambios.

Los más comunes son los autoestereogramas de puntos aleatorios (SIRDS: *Single Image Random Dot Stereogram*). Estos están compuestos por un patrón formado por puntos aleatorios, que se repite horizontalmente, de manera que cada punto de la imagen tiene un duplicado a una distancia determinada. Sin embargo, esta distancia entre puntos no es siempre la misma, sino que varía según unos cálculos que establecen la profundidad a la que deben ser observados.

Los estereogramas de imagen escondida son los más complicados de crear, pero son también los más frecuentes a causa del efecto tan intenso que producen.

⁹ Anexo 9 imagen 23

Los autoestereogramas de puntos aleatorios son muy conocidos desde que la famosa serie de libros *El Ojo Mágico* los popularizó.

Estereograma de matriz de objeto (OAS: *Object Array Stereogram*)

Este tipo de estereogramas se caracteriza porque la imagen a visualizar no está escondida, pero el efecto 3D sí lo está.

Al igual que en el tipo anterior, el patrón puede estar formado por cualquier elemento. Este patrón se repite alrededor de todo el estereograma, pero con ligeras diferencias de paralaje. La distancia a la que se encuentra la imagen tridimensional respecto del fondo aumentará cuanto mayor sea la distancia de repetición entre puntos homólogos de la imagen bidimensional.



Autoestereograma Object Array de una letra E¹⁰

Autoestereograma de texto (ASCII)

Un estereograma ASCII es un tipo de autoestereograma que está compuesto por caracteres ASCII en vez de píxeles. Puede ser de cualquiera de los tipos anteriores, su único rasgo característico es que su patrón, en vez de estar formado por una imagen, está configurado con texto.

Autoestereograma híbrido

Los autoestereogramas híbridos son una combinación de cualquiera de los tipos anteriores.

5.5 ¿Cómo se observan un autoestereograma y una pareja estereoscópica?

Para ver un autoestereograma o una pareja estereoscópica, no es necesario utilizar lentes ni ningún tipo de aparato. Solo requerimos de nuestra visión binocular y de unas condiciones adecuadas, como una buena iluminación.

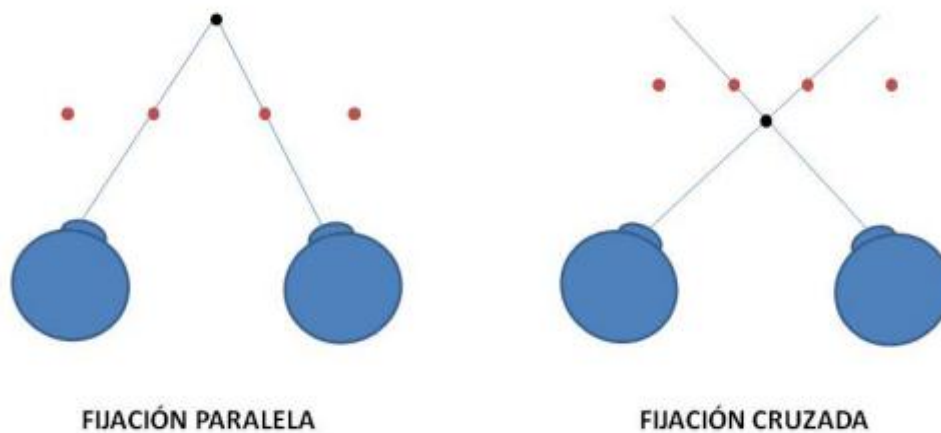
Es complicado ver un estereograma de este tipo por primera vez, ya que requiere de cierta técnica que los ojos no acostumbran a ejecutar.

Cuando se contempla una imagen convencional, los ojos tienen a converger sobre esta. Si visualizáramos un estereograma de este modo, sería imposible apreciar su efecto de tridimensionalidad.

Existen dos técnicas principales que pueden usarse para ver un autoestereograma o pareja estereoscópica. Se relatan a continuación:

¹⁰ Anexo 9 imagen 29

1. **Visión paralela o divergente:** Es la técnica más usada. Se trata de hacer converger los ojos en un punto detrás del estereograma, de enfocarlos más allá del plano de la imagen, como si miráramos al infinito. Los ejes ópticos divergen ligeramente, de modo que cada uno mira únicamente la imagen destinada a este, hasta que se consigue su fusión.
2. **Visión cruzada o convergente:** Los ejes ópticos se cruzan al mirar las imágenes, de modo que el ojo izquierdo enfoca a la imagen situada a la derecha, mientras que el ojo derecho enfoca a la imagen situada a la izquierda. Las imágenes también se cambian de posición, la izquierda se sitúa a la derecha y viceversa.



Esquema de la visión paralela y cruzada

Si en una imagen hecha para visión paralela se usa el método de la visión cruzada, o a la inversa, entonces el efecto tridimensional, en caso de aparecer, se produciría al revés, es decir, las partes de la imagen que deberían verse más lejanas aparecerán más cercanas al observador, y las que deberían emerger de la imagen se verán más hundidas. Esto se llama visión pseudoscópica.

La mayoría de las personas ven los autoestereogramas con visión divergente, por ello, los libros publicados con autoestereogramas están diseñados para este tipo de visión. En cambio, la mayor parte de las parejas estereoscópicas son creadas para visión convergente, porque esto elimina la limitación de tamaño que tienen las de visión paralela si están hechas para visualizarse sin equipamiento adicional.

Hay varios métodos diseñados para aprender a converger los ojos por delante de la imagen o a divergirlos.

Método 1:

Colócate el estereograma en frente de tu cara, tocando tu nariz. Relaja tus ojos. Debes mirar a través del estereograma, desenfocando la mirada del papel. Cuando lo hayas conseguido, aleja el estereograma de tu cara muy despacio. Tus ojos instintivamente intentarán enfocar la imagen, pero debes forzarlos a mantener la mirada en el infinito. Cuando empieces a percibir profundidades, deja la imagen donde está y mantén la visión. Cuando percibas una forma tridimensional clara, sabrás que has visto un estereograma. Si enfocas la vista en algún momento, vuelve a empezar el proceso.

Método 2:

Encuentra un punto lejano al que mirar. Puede ser un objeto de tu casa, un sitio a través de la ventana, etc. Fija la mirada allí. Poco a poco, coloca el estereograma en tu área de visión, pero sin enfocar tu mirada en él, manteniéndola en el punto escogido. Ahora, prueba a alejar o acercar el estereograma, hasta que esté en la distancia correcta para que veas el elemento escondido.

Método 3:

Para este método deberás poner tu estereograma detrás de un vidrio (puerta de vidrio, ventana, etc.) o recubrirlo con papel transparente brillante. También sirven los estereogramas que vienen en las cubiertas brillantes de algunos libros o el monitor del ordenador. Ahora, debe formarse un reflejo en el estereograma. Puedes encender una bombilla de forma que incida sobre este (si es visible, también sirve tu propio reflejo). Ahora, céntrate en el reflejo, míralo fijamente. Después de un rato, descubrirás la imagen tridimensional.

Método 4:

Para este último método necesitarás imprimir tu estereograma en una transparencia. Después, coge una hoja de papel y haz una X en ella. Coloca el estereograma a medio camino entre tus ojos y el papel y concéntrate en mirar fijamente a la X. Por último, mira sutilmente alrededor del estereograma y verás el objeto tridimensional aparecer.

Cabe destacar que una pequeña parte de la población nunca será capaz de visualizar un estereograma. Hay ciertos factores que dificultan mucho la tarea para ciertas personas, como el hecho de tener un ojo dominante (ya que en tal caso, ambos ojos no trabajan juntos ni coordinados, como deberían) o padecer de estrabismo o cataratas. Además, en caso de llevar gafas, el individuo deberá quitárselas para visualizar el estereograma, porque llevarlas puede complicar la labor, dependiendo del tipo de problema visual para el que estén graduadas.

5.6 Aplicaciones

La estereoscopia tiene un gran número de aplicaciones, que están en continuo avance y crecimiento, en ámbitos muy diversos. Destacan los campos siguientes:

- **Topografía:** La estereoscopia o, más específicamente, la estereofotogrametría, se utiliza actualmente para visualizar el terreno y hacer mediciones del relieve. Para ello, dos fotografías aéreas son tomadas con una distancia calculada entre

ambas, y son usadas para determinar la elevación del terreno y para obtener las coordenadas 3D de un punto en concreto. Esto se hace mediante triangulación. Se puede trazar una línea desde la localización de la cámara hasta el punto a analizar en cada una de las imágenes. La intersección de ambas líneas constituye la localización del punto. También puede reconstruirse la topografía de la superficie emergida y parte de la sumergida del planeta Tierra mediante imágenes tridimensionales simuladas realizadas con bases estereofotogramétricas.

- **Investigación espacial:** La posibilidad de obtener imágenes tridimensionales de los astros y satélites del sistema solar hacen que la estereoscopia constituya una tecnología idónea para la exploración espacial. Estas técnicas también pueden ser empleadas para el cálculo de distancias que separan nuestro planeta de otro astro, así como para la estimación del tamaño de los elementos del firmamento.
- **Medicina:** En medicina, se obtienen imágenes estereoscópicas a través de radiografías, ecografías, tomografías (TAC) y resonancias magnéticas nucleares (RMN). También se generan imágenes parecidas por ordenador. Estas se utilizan con fines tanto diagnósticos como didácticos.
- **Ingeniería molecular:** La estereoscopia se usa en la observación de moléculas complejas, mediante el empleo de microscopios binoculares. Esto ha dado lugar a la estereomicroscopia. Estas técnicas son muy útiles en la creación de nuevas moléculas, ya que permiten su visión estereoscópica cuando aún se encuentran en fase de diseño.
- **CAE/ CAD (Ingeniería asistida por ordenador/ diseño asistido por ordenador):** El diseño de prototipos industriales se beneficia en gran medida de la estereoscopia. Pueden realizarse modelos tridimensionales de un producto o instalación, cosa que permite analizarlo en profundidad y detectar cualquier desperfecto superficial e interno antes de que este sea construido. Esto supone un ahorro significativo de tiempo y dinero.
- **Realidad virtual:** Un innovador uso de la estereoscopia es su aplicación en la realidad virtual. La realidad virtual se sirve de gráficos estereoscópicos que son presentados al usuario en tiempo real, y con los que este puede interactuar. Esta tecnología presenta numerosas aplicaciones que analizaremos en el siguiente apartado.

6 REALIDAD VIRTUAL

6.1 ¿Qué es la realidad virtual?

La realidad virtual es un ambiente tridimensional generado por ordenador, que puede representar un mundo real o imaginario a tiempo real, y es presentado al usuario de modo que sienta que está físicamente presente en él.

Mediante ciertos aparatos que monitorizan las acciones del sujeto, como los cascos o gafas de realidad virtual, este puede explorar el ambiente, moviendo los ojos o la cabeza en distintas direcciones. En muchos casos también puede interactuar con ciertos elementos del mundo, a través del uso de dispositivos especiales como guantes sensitivos, que detectan los movimientos de los dedos del usuario.

El sentido básico que interviene en la realidad virtual es la vista. Aun así, hay varios sistemas que en la actualidad permiten experimentar estímulos sensoriales adicionales, por ejemplo sonido a través de auriculares e incluso tacto a través de guantes especiales.

La realidad virtual intenta abarcar los cinco sentidos, el sujeto, el entorno, y también las formas de interacción entre sujeto y entorno; y recrear esta experiencia mediante la tecnología.

6.2 Visión tridimensional en la realidad virtual

En la realidad virtual pueden llegar a intervenir multitud de sentidos. Sin embargo, el sentido primordial e imprescindible en una simulación de realidad virtual es la vista.

El mundo tridimensional que observamos a través de nuestros ojos está creado por un generador de mundos tridimensionales, que crea el ambiente con todo detalle y ubica objetos en unas coordenadas determinadas (definidas por la anchura, la longitud y la profundidad).

En el momento de presentar este mundo al usuario, se utilizan gráficos estereoscópicos. Se presentan dos perspectivas del mundo, una al lado de la otra, con un paralaje equivalente a la distancia interpupilar media. El sujeto utiliza aparatos para visualizar el mundo tridimensional. El artilugio utilizado dirige cada uno de los gráficos hacia su respectivo ojo, de modo que el cerebro sea capaz de fusionarlos y reconstruirlos como una sola imagen tridimensional, captada por la visión estereoscópica. Este proceso de visualización se basa en el mismo fenómeno que la estereoscopia, es decir, en la estereopsis, explicada anteriormente.

Por tanto, en lo que se refiere a la construcción de la tercera dimensión, la técnica empleada ya ha sido explicada en el apartado de estereoscopia. Con la única salvedad que las imágenes son generadas de forma dinámica por el ordenador. Por ello, centraremos este apartado en aquellos aspectos adicionales en que la realidad se potencia.

La realidad virtual nos presenta un mundo aparentemente real, tridimensional, explorable e interactivo.

Para que esta gran experiencia multisensorial sea posible, se requiere de una serie de aparatos que permiten tanto recibir información del ordenador como enviarla, a través de uno o más sentidos del ser humano, para maximizar esta vivencia y hacerla más real.

6.3 Interactividad

Para conseguir y mejorar el efecto de inmersión en una simulación de realidad virtual es preciso tanto detectar lo que realiza el sujeto (posición, movimientos, etc.) como ofrecerle información de retorno a partir del mundo creado en el ordenador.

Para detectar los parámetros del sujeto es preciso utilizar sensores, mientras que para ofrecerle *feedback* se usan efectores.

Aparatos de entrada (sensores):

- Sensores de posición tridimensionales
- Trackballs (Sistemas de control con bola)
- Joystick 3D (palanca de mando 3D)
- Ratón o teclado
- Guantes sensitivos
- Micrófonos

Aparatos de salida (efectores):

- Pantallas de proyección
 - o HMD (*Head Mounted Display*)
 - o BOOM (*Binocular Omni-Orientation Monitor*)
 - o CAVE (*Cave Automatic Virtual Environment*)
 - o *Workbench* (mesa de trabajo)
- Generadores de sonido tridimensional (altavoces)
- Dispositivos hápticos

6.3.1 Posición y orientación del sujeto

Para ofrecer una experiencia real es preciso saber dónde está ubicado el sujeto y hacia donde se orienta. Por ejemplo desde que punto mira y en qué dirección mira. De ello se encarga un conjunto de dispositivos llamados genéricamente sensores de posición tridimensionales.

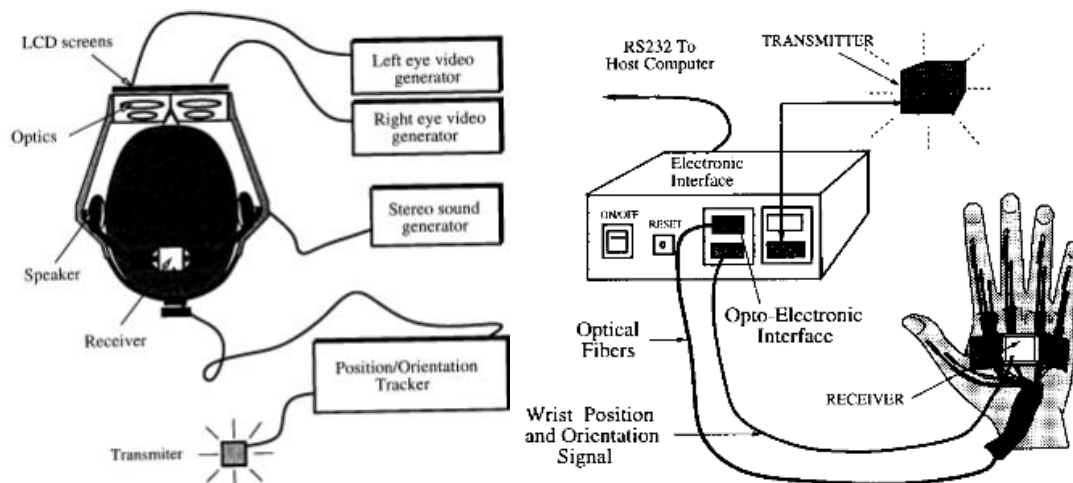
Estos utilizan campos magnéticos modulados, ultrasonidos, radares, cámaras de infrarrojos, LEDs, etc., para registrar la posición y orientación de un objeto en movimiento respecto a otro estático. Antes de su creación, se utilizaban sistemas de medida con contacto, como potenciómetros montados en brazos mecánicos, para realizar esta función.

El sensor obtiene seis valores, tres referentes a la posición del objeto y tres referentes a su orientación. La posición del objeto viene determinada por las tres coordenadas X, Y y Z. Su orientación viene determinada por los ángulos de rotación sobre los distintos ejes, cabeceo o *pitch*, balanceo o *roll* y guiñada o *yaw* respectivamente.

Los sensores realizan entre 30 y 120 mediciones por segundo. Su tiempo de respuesta debe ser el mínimo posible para que sea realmente efectivo.

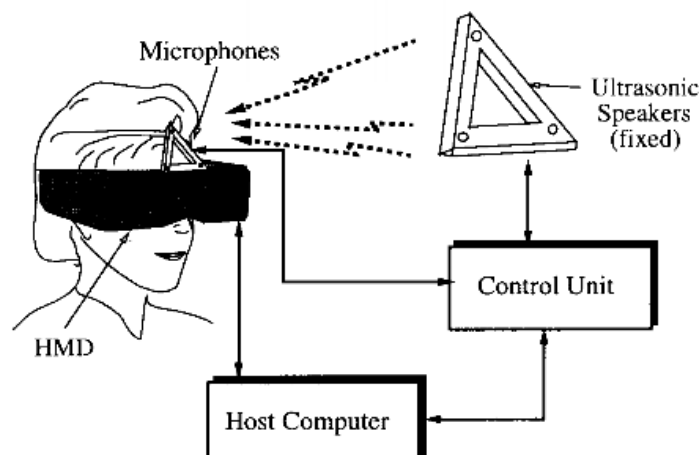
Los tipos de sensores más comunes son los magnéticos y los de ultrasonidos.

Los sensores magnéticos utilizan un campo magnético de baja frecuencia generado por un emisor constituido por tres antenas fijas. El receptor, compuesto por el mismo número de antenas, recibe una señal del emisor. Esta es procesada por una unidad electrónica que, mediante un algoritmo, calcula la posición y orientación del receptor en relación con el emisor. Posteriormente, los datos son enviados a un ordenador base mediante una línea de comunicación. De este modo, si el receptor se coloca en cierta parte del cuerpo, el ordenador puede obtener datos acerca de su movimiento.



Funcionamiento de un sensor magnético aplicado en un casco de visualización y un guante sensitivo

Los sensores de ultrasonidos cuentan con un emisor compuesto por tres altavoces colocados en los vértices de una estructura triangular, un receptor constituido por tres micrófonos montados en un bastidor triangular más pequeño y una unidad electrónica. La posición y orientación del receptor respecto al emisor se calculan según la siguiente ley: $c = (167.6 + 0.6T_k)$, donde c es la velocidad del sonido en metros por segundo y T_k la temperatura expresada en grados Kelvin. Sabiendo la temperatura puede calcularse la velocidad, y teniendo en cuenta el tiempo de vuelo, puede saberse la distancia. Se utiliza la triangulación para obtener la posición y orientación del receptor, y entonces se envían los datos al ordenador base.



Funcionamiento de un sensor de ultrasonido

Lo más común es medir los movimientos de las manos y de la cabeza. Para ello, el receptor se posiciona en los cascos de visualización, cosa que permite variar la perspectiva de la escena visualizada en función del movimiento de la cabeza del sujeto. También se sitúa un receptor en los guantes sensitivos, junto con algunos sensores de flexión. Esto posibilita el envío de información sobre las acciones, la posición y la orientación de las manos del usuario, así como la curvatura de sus dedos. Así, el inmerso puede coger objetos del mundo virtual, arrastrarlos, soltarlos e incluso moverlos en distintas direcciones.

Existen trajes con sensores que permiten medir los movimientos de casi todo el cuerpo.

6.3.2 Acciones con la mano y tacto

La mano es nuestro principal medio de interacción con nuestro entorno. Es nuestro órgano manipulador y ninguna experiencia será completa sin poder utilizarla con una cierta libertad. Para conseguir una sensación de presencia real en el mundo generado y maximizar la interactividad con él, es necesario monitorizar las acciones del sujeto en el entorno y enviar información de vuelta acerca del tacto o la fuerza generada por un objeto al tocarlo, empujarlo, arrastrarlo, etc.

Para permitir que el sujeto lleve a cabo acciones diversas en el mundo virtual se utilizan los guantes sensitivos.

Los guantes sensitivos cuentan con varios sensores de posición y otros que miden los valores angulares de las articulaciones de los dedos. Algunos incluso tienen sensores en la muñeca del usuario. Mediante estos, se obtienen datos sobre la posición y orientación de la mano del ejecutante en todo momento e incluso sobre la curvatura de sus dedos. El movimiento de las manos del operador es registrado y la información se envía al ordenador base, que ejecuta la función correspondiente a la acción realizada por el operador en el mundo virtual. Estas acciones abarcan desde arrastrar un objeto del mundo virtual, hasta levantarlo, cambiarlo de posición, luchar contra un adversario, etc.

Estos guantes proporcionan una gran libertad de movimiento, ya que se colocan sobre la mano como un complemento más, sin cohibir su actividad, lo cual amplía su campo de desplazamiento y permite al individuo interactuar con el mundo virtual de forma

intuitiva. Además, tienen una gran precisión a causa del número de sensores que lo componen y de su distribución, que permite medir el desplazamiento individual de cada dedo en distintas direcciones y sentidos.

El *DataGlove*, el *CyberGlove* y el *PowerGlove* son algunos de los guantes sensitivos comercializados más comunes.

En un mundo real, cuando un individuo realiza acciones de interacción o contacto con elementos del entorno, este experimenta varias sensaciones, como el tacto del objeto, la presión o la fuerza de oposición que ejerce sobre él. Para maximizar la verosimilitud e interactividad del ambiente, es necesario que el sistema de realidad virtual disponga de retroalimentación táctil y de fuerza, es decir, que proporcione al usuario información de vuelta procedente del mundo referente al tacto o la fuerza de oposición, como respuesta a una acción del sujeto. Para esta función se utilizan los llamados dispositivos hápticos.

Los dispositivos hápticos pueden colocarse en distintas partes del cuerpo, aunque lo más común es que se encuentren en las manos, situados en los guantes sensitivos. Según llegue la información a un punto concreto o a todo el cuerpo, el sistema será más o menos inmersivo.

Existen ciertos guantes que vibran, se llenan y vacían de aire e incluso oponen resistencia al chocar con un objeto virtual.

6.3.3 Visión y detección de los ojos y la cabeza

Nuestros ojos son capaces de cambiar de dirección y enfoque y mirar selectivamente diversos objetos o partes de la escena. Por ello, en la realidad virtual, es indispensable el uso de aparatos que conviertan el mundo virtual en imágenes adaptadas al sujeto y las envíen hacia su respectivo ojo. También es esencial el uso de mecanismos que registren los movimientos visuales del usuario, y los movimientos de la cabeza, y ajusten la perspectiva de la imagen reproducida en función de su dirección y sentido.

Para esta tarea, los aparatos más frecuentes son los cascos de visualización o *Head Mounted Displays*. Son dispositivos estereoscópicos que se montan sobre la cabeza y constan de dos pantallas, normalmente LCD o CRT, situadas justo delante de los ojos del individuo. Cada una de las pantallas presenta una imagen ligeramente distinta, para producir visión estereoscópica y efecto 3D. La proximidad de las pantallas con el ojo humano hace que la imagen reproducida llene todo el campo de visión del usuario, cosa que produce un efecto de total inmersión en el mundo virtual.

Los HMD cuentan con dispositivos de seguimiento, que permiten obtener datos acerca de los movimientos visuales o de la cabeza del operador y cambiar la perspectiva de la imagen reproducida por las pantallas en función de estos.

Como alternativa a los cascos de visualización, existen las gafas estereoscópicas. Su tecnología utiliza el método de la estereoscopia activa u obturación con pantallas grandes, como por ejemplo las CAVE o *workbench*, para producir un efecto de tridimensionalidad e inmersión. Las gafas y el monitor están sincronizados de modo que las gafas solo permiten la visión por el ojo que corresponde a la imagen reproducida por la pantalla en todo momento.

6.3.4 Oído y sonido tridimensional

Al igual que la vista, el sonido real también es tridimensional. Nuestros dos oídos, como nuestros dos ojos, permiten que detectemos diferencias en un mismo sonido que nos permiten ubicarlo en el espacio tridimensional. Es decir, sabemos de donde proviene un sonido. De hecho estamos rodeados de sonidos.

Por ello, los sistemas de realidad virtual, en caso de querer ser altamente reales e inmersivos, deben ser capaces de producir sonido virtual. El sonido virtual o 3D se trata de un tipo de audio que permite ubicar su posición de procedencia de modo que el oyente sienta la experiencia como si fuera real. El *Convolvotron*, el *Beachtron* y el *Acoustetron* son algunos ejemplos de generadores de sonido tridimensional.

6.3.5 Registro de voz

La voz es nuestro sistema de comunicación primordial. Es el método natural de comunicarnos con un sistema. Si un sistema acepta órdenes, aunque ya estemos acostumbrados al uso del ratón, de forma natural se las daríamos hablando.

En algunas simulaciones de realidad virtual, se utilizan micrófonos para permitir la entrada de órdenes. Esta tecnología se está desarrollando muy rápidamente. Como ejemplo encontramos las *Google Glass*, unas gafas de realidad aumentada creadas por *Google*, que utilizan esta tecnología intensivamente y reciben órdenes de voz.

Si el sistema ha de simular a alguien con capacidades de comunicación (otra persona por ejemplo), actualmente también es posible si la interacción es simple y limitada. Por ejemplo sistemas como *Siri* (para los *Iphone*) son capaces de mantener una pseudoconversación, en especial sobre su entorno (el teléfono).

Hay aspectos, como la interacción entre los propios elementos simulados, o el gusto o el olfato, más difíciles de recrear de forma realista y que normalmente se intentan simular solo si son necesarios. Pensemos por ejemplo en un sistema de realidad virtual para perfumistas.

6.4 Aplicaciones

La realidad virtual presenta aplicaciones en campos diversos, que abarcan ámbitos como el de la educación, la medicina o el ocio, entre muchos otros.

- **Medicina:** Actualmente existen varios simuladores que reproducen operaciones quirúrgicas mediante realidad virtual, cosa que permite la práctica repetida y el perfeccionamiento de la técnica de manera segura antes de proceder a su ejecución en un paciente real. También existen simuladores anatómicos, que facilitan el aprendizaje de la anatomía humana. Además, se utiliza la realidad virtual para el diagnóstico de discapacidad de un paciente y para la práctica de ejercicios que contribuyan a su rehabilitación y a una mejora de su calidad de vida. Su uso para el tratamiento de fobia es otro de sus muchas aplicaciones.

- **Enseñanza:** En el terreno educativo podemos utilizar la realidad virtual de muchos modos. Su uso facilita el aprendizaje y por eso ya se ha introducido en varias instituciones escolares de alrededor del mundo, como la escuela Shepherd, de Nottingham. Estas tecnologías proporcionan a los alumnos la posibilidad de experimentar con muchos de los conocimientos a aprender, cosa que dinamiza el proceso y favorece el entendimiento de los estudios. Un ejemplo es el laboratorio virtual de física, creado por R. Bowen Loftin, Mark Engelberg y Robin Benedetti, que permite a sus estudiantes la manipulación del entorno virtual, así como el control de las propiedades físicas de los objetos presentes en él, incluyendo aspectos como la gravedad, la fuerza de rozamiento o el coeficiente de restitución de los objetos. También existen simuladores del sistema solar, con los que se pueden observar las estrellas, mover planetas e incluso seguir la trayectoria de un cometa.
- **Arte:** La realidad virtual se utiliza en el ámbito de la arquitectura, la pintura, la música y la actuación. Actualmente, existen modelos virtuales de edificios en fase de diseño, que permiten su análisis y posterior venta antes de haber sido construidos. También existen recreaciones de monumentos o edificios históricos e incluso de ciudades enteras. Hay investigaciones en curso con el objetivo de posibilitar el acceso a distintos museos desde casa. Respecto a la música, se encuentran ambientes virtuales que proporcionan varios instrumentos al compositor, que él puede tocar como quiera. Por último, existen actores virtuales que se ajustan al actor humano y son capaces de reproducir sus gestos, movimientos, expresiones faciales, etc.
- **Ocio y entretenimiento:** Una de las aplicaciones más comunes de la realidad virtual es el terreno de los videojuegos. Las sensaciones más espectaculares pueden experimentarse en galerías de exposición de sistemas de realidad virtual, ya que un sistema con un alto nivel de inmersión e interactividad es muy aparatoso y costoso, por lo que los sistemas domésticos suelen ser más simples.
- **Campo militar:** En el campo militar, se utilizan las simulaciones de realidad virtual con fines de formación técnica. Estos sistemas permiten recrear escenarios particulares, a los que los aprendices deben reaccionar realizando distintas maniobras. Esto es mucho más seguro, tanto para el individuo como para el vehículo a utilizar, y a la larga menos costoso. Algunos de estos programas ya han sido implementados por la armada, la marina y la fuerza aérea de los Estados Unidos. Un ejemplo es la red SIMNET, cuyo objetivo es el entrenamiento de soldados en tripulaciones para la conducción de tanques en condiciones y entornos muy precisos.
- **Industria aeroespacial:** Los simuladores de vuelo son una herramienta muy eficaz y altamente empleada en la actualidad para probar la eficiencia y el comportamiento de un avión en distintos entornos y condiciones, sin exponerlo a riesgos reales de colisión, avería o deterioro y disminuyendo su coste inicial. También se emplean simulaciones de vuelo para que los pilotos aprendan la técnica y las distintas maniobras a realizar en cada momento, sin poner en

peligro su vida. Finalmente, pueden ser utilizados para simular misiones espaciales delicadas.

- **Negocios:** En el terreno de los negocios, la realidad virtual se aplica principalmente en el márketing, como medio publicitario. Muchas empresas actuales ofrecen la posibilidad de realizar una visita virtual para observar sus productos en una vista de 360°, ya sean las habitaciones de un hotel, una tienda, un vehículo, etc.

Conforme la realidad virtual se va aproximando más a la realidad que imita o representa, mayor es el campo en que se puede utilizar. Substituyendo la realidad por la realidad virtual se puede acceder a entrenamiento más barato, o más seguro, o más dirigido, etc.

7 HOLOGRAFÍA

7.1 ¿Qué es la holografía?

La holografía es una técnica que permite crear imágenes tridimensionales (hologramas) a través del principio de la interferencia y la difracción. Es decir, permite guardar una imagen tridimensional (y reproducirla con los medios adecuados) en una película bidimensional.

La técnica holográfica consiste en capturar y reproducir la luz utilizada en el proceso de grabación del holograma, luz que contiene información sobre el objeto que queremos representar tridimensionalmente. La holografía es una técnica de almacenamiento y recuperación de información, como la fotografía. El frente de onda creado, formado por la interferencia entre dos ondas (una con información del objeto y la otra, auxiliar, con ninguna información), queda grabado en una película fotosensible. Este contiene información sobre la amplitud y la fase del frente de onda que le llega. Después del procesado químico adecuado, podemos recuperar la información grabada (solamente la de la onda objeto) mediante la iluminación de la película fotosensible u holograma con la luz adecuada, haciendo que el frente de onda grabado del objeto se difracte hacia la dirección apropiada, es decir, que se reconstruya exactamente la amplitud y la fase del frente de onda original.

La técnica holográfica puede dividirse en dos fases. La primera consiste en captar información acerca de la luz proyectada por el objeto sobre una película fotosensible, es decir, en obtener su frente de onda. La segunda se trata de la reconstrucción del frente de onda original en ausencia del material usado para obtenerlo.

La holografía se parece mucho a la fotografía convencional. De hecho, la holografía es comúnmente descrita como una técnica avanzada de fotografía. Esto ocurre porque ambas técnicas son procesos que se basan en fenómenos ópticos y químicos para la obtención de imágenes duraderas. Son procesos que sirven para capturar, registrar y reproducir imágenes. Las imágenes se graban en materiales fotosensibles, es decir, materiales que contienen compuestos químicos sensibles a los efectos de la luz. Después, la fijación de la imagen se realiza a través de reacciones químicas. La diferencia principal entre la fotografía y la holografía es que la técnica fotográfica registra únicamente la intensidad luminosa de las ondas que el material recibe de la escena a reproducir, mientras que el procedimiento holográfico registra la amplitud y la fase de la onda objeto en una distribución de intensidades. Por esta razón, una fotografía contiene información bidimensional de la escena a representar y un holograma contiene información tridimensional del objeto a reproducir. Cuando una fotografía es iluminada con la fuente de luz adecuada, la intensidad luminosa registrada se reproduce y se propaga hacia todas las direcciones. Es por eso que la imagen es plana, sin profundidad. En cambio, cuando iluminamos un holograma con la fuente de luz adecuada, se reproduce el frente de onda grabado con su exacta amplitud y fase, es por eso que conseguimos una imagen tridimensional.

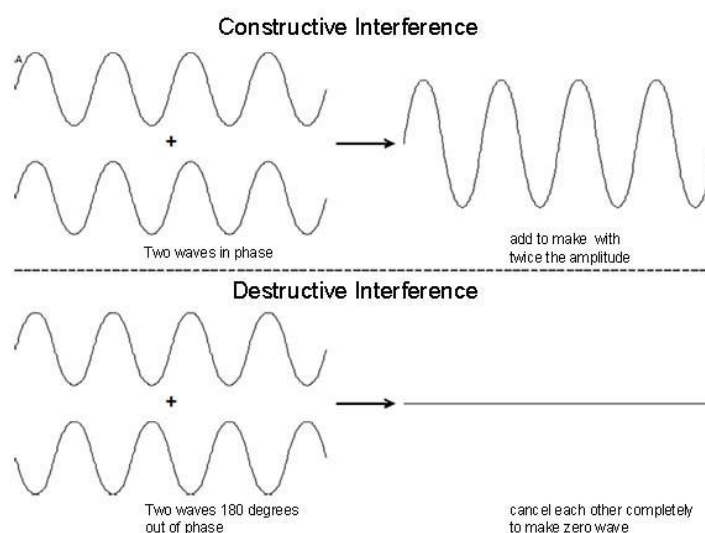
La holografía no es más que una fotografía que recoge la información tridimensional.
--

7.2 Bases de la holografía

Existen dos fenómenos físicos que constituyen el principio fundamental de la holografía: la interferencia y la difracción de las ondas de luz.

Empezaremos explicando el fenómeno de la interferencia. La condición básica que permite que el fenómeno de la interferencia entre dos ondas de luz pueda producirse es que estas dos ondas sean coherentes, es decir, que viajen en la misma fase y frecuencia. Las ondas monocromáticas siempre producen fenómenos de interferencia.

Cuando dos ondas coherentes con la misma amplitud y con distintas trayectorias coinciden en un mismo punto e instante, pueden producirse dos tipos de interferencia. Cuando las ondas que colisionan llegan en fase, la interferencia es constructiva, y la onda duplica su amplitud. Contrariamente, cuando las ondas que chocan llegan desfasadas, la onda se cancela parcial o totalmente, cosa que se traduce en un área sin luz, es decir, una franja oscura en el patrón de interferencia. Esto se conoce como interferencia destructiva. La intensidad de la onda resultante aumenta en el caso de una interferencia constructiva y disminuye en el caso de una interferencia destructiva.



Esquema de una interferencia totalmente constructiva (arriba) y totalmente destructiva (abajo)

Solamente la luz coherente produce patrones de interferencia estables, es decir, solo interferencias constructivas o solo interferencias destructivas en cada punto de la película fotosensible. La luz incoherente, en cambio, produce patrones de interferencia inestables. Esto se debe a que, en estos casos, la interferencia constructiva cambia rápidamente a una interferencia destructiva o viceversa. Aun así, estos cambios son imperceptibles por el ojo humano, que obtiene el valor medio de la intensidad luminosa. El patrón de interferencia debe ser estable en la holografía para que la película fotosensible sea capaz de capturarlo satisfactoriamente. Es por eso que, en la holografía, se utilizan láseres, ya que emiten una luz muy coherente.

Aunque los haces de luz utilizados sean coherentes, y no haya una diferencia inicial de coherencia entre ambos (requisitos que se cumplen en el caso habitual de la holografía,

ya que ambos haces provienen de la misma fuente de luz: un láser), en su punto de encuentro sí que puede existir cierta diferencia de fase, producida a causa de la diferencia de caminos o distancias. Esta diferencia de fase es:

$$2\pi/\lambda * (x_2 - x_1)$$

Donde x_2 es la distancia mayor de la fuente de luz al punto de encuentro, x_1 es la distancia menor y λ es la longitud de onda.

Así como el proceso de grabación del holograma se basa en el principio de la interferencia, el proceso de reconstrucción del mismo se basa en el principio de la difracción.

La difracción es un fenómeno físico que ocurre cuando una onda se encuentra con un obstáculo u orificio de una dimensión comparable a su longitud de onda. Al atravesar el orificio o pasar por los bordes del obstáculo, la onda se convierte en un nuevo foco emisor de un frente de onda secundario, que pasa a tener una forma curvada y semicircular.

Para que el fenómeno de la difracción se aprecie en gran cantidad, es necesario que el agujero u obstáculo sea de un tamaño similar al de la longitud de onda, porque en caso contrario, únicamente se doblan o curvan las ondas que pasan por los bordes del orificio u obstáculo.



Fenómeno de la difracción producido con distintas oberturas

Ahora que sabemos que es el principio de la difracción, ¿cómo se aplica a la holografía?

Las ondas de la luz son microscópicas. En consecuencia, para que un obstáculo o agujero actúe como foco emisor de un nuevo frente de onda formado por ondas de luz este debe ser también microscópico.

El patrón de interferencia de un holograma registrado en la película, cuando se ha procesado químicamente, configura una rejilla de puntos y rayas microscópicas conocida como red de difracción. Cada punto del holograma representa un obstáculo o una abertura en la red de difracción. Cuando se hace pasar luz de la longitud de onda adecuada a través de ella (no necesariamente de la misma longitud de onda que la original, ya que este parámetro solo afecta a la escala del objeto observado), cada punto del patrón se convierte en un foco emisor de su propia onda. Pero lo que nos interesa es que las ondas emitidas por el holograma sean solamente las del haz objeto, y no estén mezcladas con las del haz de referencia (como lo están en el patrón de interferencia). ¿Cómo se consigue esto? Iluminando el holograma con el haz de referencia.

El holograma, cuando ya está revelado o procesado químicamente, representa el “negativo” de la interferencia entre el haz de referencia y el haz objeto. Esto significa que las partes antes más iluminadas ahora están oscurecidas y las partes antes más oscuras ahora son transparentes y luminosas al ser expuestas por un haz de luz. El “negativo” de las ondas iniciales lo representaremos así:

$$\text{Holograma} = - (\text{haz de referencia} + \text{haz objeto})$$

Ahora, si iluminamos el holograma con el haz de referencia nos queda lo siguiente:

$$\text{Haz de referencia} - (\text{haz de referencia} + \text{haz objeto}) = - \text{haz objeto}$$

Observamos que de este modo volvemos a obtener el haz objeto original, aunque viaja en sentido contrario porque se origina desde el holograma hacia la posición del objeto, y no al revés, como al principio. De este modo, conseguimos reconstruir el objeto original grabado en el holograma. Las ondas difractadas son generalmente idénticas a las ondas objeto originales.

7.3 ¿Cómo se crea un holograma?

Un holograma es, por tanto, un registro del patrón de interferencia formado por dos haces de luz coherente (cuyas ondas tienen la misma longitud de onda y orientación, y están en fase, por ejemplo las de un láser), uno procedente directamente de la fuente de luz (haz de referencia) y el otro del objeto que queremos representar (haz objeto). Mientras que el haz de referencia no transporta ninguna información, este último contiene información sobre el objeto. El frente de onda derivado de la interferencia de los dos haces se proyecta sobre una película fotosensible, que procesada correctamente y con la iluminación adecuada, genera una imagen en tres dimensiones.

Cuando se mira a través de la película fotosensible procesada u holograma, con la geometría de observación e iluminación correcta, veremos una reproducción del objeto holografiado. El holograma actúa como una ventana, de modo que a medida que nos movemos y miramos a través de ella, vemos los cambios de perspectiva que se producirían si el objeto se encontrara realmente en esa posición. Todas las partes de la película fotosensible u holograma contienen toda la información tridimensional de la imagen. Si bien es cierto que la información en todos los puntos del holograma es diferente, porque las perspectivas del objeto son distintas en cada punto, también es completa. De este modo, si partiéramos el holograma por la mitad, o incluso en más trozos, seguiríamos viendo la imagen entera en cada una de estas partes, aunque observaríamos puntos de vista diferentes.

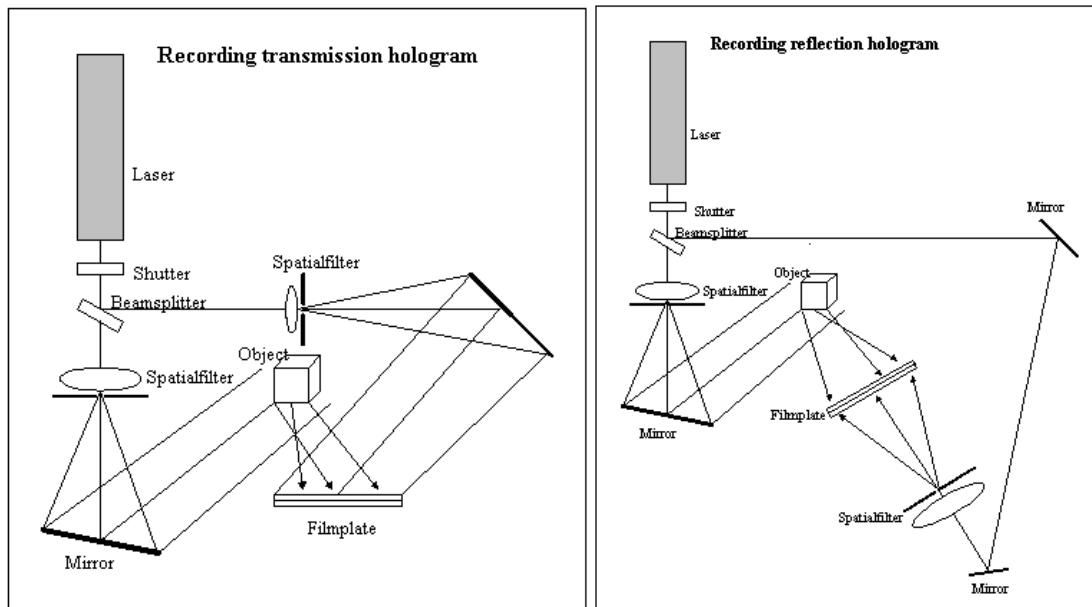
Durante el proceso de creación es necesario mantener un medio sin vibraciones, ya que la mínima vibración puede estropear el holograma.

Para la creación de un holograma se necesita el siguiente material:

- Un láser o fuente de luz coherente
- Un objeto a representar
- Un obturador
- Un divisor del haz
- Dos filtros espaciales
- Dos o tres espejos

- Una película fotosensible

7.3.1 Proceso de creación del holograma



Esquema de grabación de un holograma de transmisión (izquierda) y de reflexión (derecha)

Es necesario colocar el material según el esquema superior. Para un holograma de transmisión, debe atenderse al de la izquierda. Para un holograma de reflexión, al de la derecha. Cuando esté todo listo, hay que seguir los pasos siguientes:

1. En primer lugar, el haz inicial procedente de una fuente de luz coherente pasa a través del obturador, que permite controlar el tiempo de exposición del holograma, y posteriormente por el divisor del haz, que lo divide en dos haces separados por un ángulo de aproximadamente 90° , un haz de referencia y un haz objeto.
2. A continuación, cada uno de los haces pasa a través de un filtro espacial, que expande el haz. Después incide sobre un espejo parabólico, cosa que provoca su reflexión y dirige el haz de referencia hacia la película fotosensible y el haz objeto hacia el objeto.
3. El haz de referencia incide sobre la película fotosensible y el haz objeto sobre el objeto a representar. Este refleja la luz hacia la película. Los dos haces de luz interfieren, de modo que se forma un patrón de interferencia que queda registrado en la película.

7.3.2 Proceso de reconstrucción del holograma

Para poder ver la recreación del objeto, es necesario procesar adecuadamente la película fotosensible. La elección de los productos químicos se toma de acuerdo al tipo

de emulsión utilizada. Normalmente se utilizan placas de haluro de plata. El procedimiento, realizado siempre con la emulsión hacia arriba, se relata a continuación:

1. En primer lugar, la placa se sumerge en un revelador (base débil), que transforma los granos de plata que han reaccionado a la luz en plata metálica, de un color oscuro. Se suele usar el D-19 de Kodak, ya que es un revelador fotográfico comercializado. Todos los otros vienen en dos partes y son de más alta energía.
2. Se realiza un baño de paro (con un ácido débil o agua), que detiene la acción del revelador.
3. Para la creación de un holograma de fase, la placa se sumerge en un blanqueador, que transforma una red de amplitud en una red de fase, aumenta el índice de refracción de la placa y la hace transparente.
4. Para la creación de un holograma de amplitud modulada, se sustituye el proceso de blanqueo por el de fijado, que convierte los cristales de haluro de plata de la emulsión en complejos de plata solubles, que se eliminan después con el lavado, dejando únicamente la plata. El fijador hace que la imagen quede permanente e inalterable a la acción de la luz. También se utiliza el proceso de fijado para la creación de un holograma de fase si posteriormente se introduce la placa en un blanqueador realogeneado.
5. El holograma se introduce en una solución humectante, como el Photo-Flo de Kodak, con el que se consigue un escurrimiento adecuado y se impide la formación de gotas.
6. Finalmente, se procede al secado de la placa. La película se puede secar con un secador o se puede dejar en posición vertical mientras se seca.
7. El holograma es iluminado y observado con una geometría y un tipo de luz que depende del tipo de holograma realizado. Entonces, el holograma actúa como una ventana, y mientras el observador mira a través de esta y cambia su posición, se observan las distintas perspectivas de la imagen creada.

Actualmente existen kits que evitan la fase de revelado. La película, con suficiente exposición, crea directamente el patrón de interferencia fijado, y por tanto el holograma está inmediatamente disponible tras su toma.

La técnica más habitual para crear un holograma con movimiento comienza por recurrir al proceso habitual de creación de un holograma recientemente descrito. Después, se gira el objeto o se cambian los espejos y filtros espaciales de posición, de forma que el frente de onda procedente del objeto que incide sobre la película fotosensible abarque una parte diferente del elemento. Entonces, se graba el nuevo patrón de interferencia en la misma película fotosensible, de modo que el patrón formado por las ondas de la primera perspectiva se cruzará con el de la segunda.

7.4 Tipos de hologramas

Las diferentes aplicaciones de los hologramas y las sucesivas mejoras en cuanto a simplificar su realización y uso han dado lugar a una amplia variedad de tipos de hologramas, que podemos clasificar según el elemento diferenciador.

Según la geometría de registro y de observación, existen dos tipos de hologramas: los hologramas de transmisión y los de reflexión, cuyas propiedades y diferencias vienen explicadas en la tabla a continuación.

	Hologramas de transmisión	Hologramas de reflexión
Diferencias en el proceso de creación	El haz de referencia y el haz objeto inciden sobre el mismo lado de la película fotosensible (el lado de la emulsión).	El haz de referencia y el haz objeto inciden sobre lados opuestos de la película fotosensible. Se utilizan dos espejos para dirigir el haz de referencia hacia la cara posterior del holograma. La emulsión holográfica de la película debe estar orientada hacia el objeto.
Luz de reconstrucción	El haz de referencia original.	Fuente puntual o colimada de luz blanca o luz solar.
Posición del observador	El observador se sitúa en el lado opuesto al de la luz.	El observador contempla la imagen tridimensional desde el lado de procedencia de la luz.
Posición de la imagen virtual	Detrás del holograma.	Detrás del holograma.
Posición de la imagen real	En frente del holograma	En frente del holograma.

Los hologramas de reflexión pueden verse con luz blanca porque se graban de tal manera que el holograma solo deja pasar la luz de la misma longitud de onda que la que se ha utilizado en el proceso de grabación. Por eso, aunque se ilumine con luz blanca, el objeto representado aparecerá del color del láser utilizado.

Además, cabe destacar que los hologramas de transmisión se reconstruyen con la luz de un láser como norma general. Sin embargo, no siempre es así. Más adelante se explican un tipo de hologramas de transmisión especial que se reconstruyen con luz blanca.

Según el proceso de revelado de la película, se distinguen dos tipos de hologramas:

- **Hologramas de amplitud u hologramas de absorción:** La amplitud de la luz refractada es proporcional a la intensidad de luz registrada por el holograma. Los hologramas de amplitud son generalmente hologramas de transmisión, en cuyo proceso de reconstrucción utilizando el haz de referencia original, la parte del haz que no es absorbida genera el holograma. La información se graba en función de la conductividad del material.
- **Hologramas de fase:** Se somete la película a un procedimiento de blanqueo, que aumenta el índice de refracción de la placa metálica a causa de las

diferencias de grosor con la emulsión. Las diferencias de refracción entre la placa y la emulsión producen diferencias de fase en el haz que reconstruye el holograma. La información se graba en función de la permitividad o índice de refracción del material.

Según la anchura de la película, existen dos tipos de hologramas:

- **Hologramas delgados:** Son hologramas con un grosor menor que la separación entre franjas de interferencia adyacentes que componen el patrón del holograma.
- **Hologramas gruesos:** Son hologramas con un grosor mayor que la separación entre franjas de interferencia adyacentes que componen el holograma.

Según el ángulo entre el haz de referencia y el haz objeto encontramos dos tipos de hologramas:

- **Hologramas planos:** El ángulo formado por el haz de referencia y el haz objeto es menor de 90° .
- **Hologramas de volumen:** El ángulo entre el haz de referencia y el haz objeto es mayor de 90° .

Generalmente los hologramas delgados son hologramas planos y los hologramas gruesos son hologramas de volumen.

Existe también un tipo de hologramas especiales, los hologramas de transmisión de luz blanca. Se trata de un tipo de hologramas de transmisión cuya reconstrucción se realiza con luz blanca. Según la técnica utilizada, distinguimos dos subtipos: Los hologramas de plano de imagen y los hologramas de arcoíris.

Los hologramas de plano de imagen suelen crearse con un método de dos pasos. Primero, se hace un primer holograma del objeto. Después, se utiliza la imagen proyectada por el primer holograma para realizar un segundo holograma. Para ello, se coloca el nuevo soporte lo más cerca de la imagen posible, muchas veces incluso tocándola, con la finalidad de reducir cualquier borrosidad o desenfoque. Al visualizar el segundo holograma con luz blanca, el objeto a reproducir aparece acromático, es decir, en blanco y negro. Se utiliza esta técnica de dos pasos porque si colocáramos el objeto original lo más cerca posible del soporte, entonces impediríamos la llegada del haz de referencia sobre este. Es por eso que en el método de un solo paso el haz de referencia normalmente viene de debajo del soporte holográfico.

Existen también los hologramas de arco iris. En los hologramas de arco iris, puede utilizarse el mismo método de dos pasos o de un solo paso que en los de plano de imagen (normalmente utilizando lentes cilíndricas), con la diferencia de que en este caso se limita la información que llega al holograma mediante una lámina con una abertura horizontal, cosa que elimina el paralaje vertical de la imagen tridimensional a reproducir. El resultado es que cuando cambiamos el ángulo de observación en el plano vertical, no percibimos ningún cambio de perspectiva, pero sí que vemos un cambio de color en la imagen.



Holograma de arcoíris convencional (izquierda) y holograma de arcoíris prensado aplicado a un billete de 5 euros (derecha)

Hay un tipo de hologramas llamados hologramas prensados. Suelen ser hologramas de plano de imagen o de arco iris, ya que así pueden observarse con luz blanca. Se diferencian del resto en que el patrón de interferencia se registra sobre una capa de resina fotosensible (Fotore sist) colocada encima de una placa de vidrio. Esta resina se cubre después por un metal. Finalmente, se imprime o prensa la imagen en el material deseado utilizando calor. Este tipo de hologramas es idóneo para su producción en grandes cantidades porque, aunque su producción es cara en dosis pequeñas, a gran escala es muy barata.

Los hologramas prensados de arcoíris son los que suelen utilizarse en las tarjetas de crédito, las revistas, los billetes y otros productos comerciales, para evitar su falsificación.

Para holografar gente viva, y objetos poco estables, se utiliza la técnica de la holografía con láseres pulsados. Estos láseres emiten pulsos de luz muy cortos, que duran nanosegundos, pero que a su vez son muy intensos. El tiempo de exposición de un holograma hecho con luz pulsada puede ser extremadamente corto, de pocos nanosegundos. En tiempos de nanosegundos, no existen vibraciones significativas. Por ello, no se requiere de ninguna tabla de aislamiento y pueden holografiarse sujetos en movimiento.

Finalmente, existen los hologramas de ordenador, que se explican en el apartado de aplicaciones de la holografía.

Uno de los problemas de los hologramas es la dificultad de conseguir que tengan color. Hay varias técnicas que persiguen este objetivo y dan lugar a hologramas de color. La más común es la grabación del objeto con tres láseres de colores distintos: uno rojo, uno azul y uno verde. La emulsión holográfica que recibe la luz debe ser sensible a todo el espectro de la luz visible. La superposición de los tres tipos de luz da lugar a luz blanca. Esto permite recrear todos los colores del objeto, con lo que se obtiene una reproducción muy real.

7.5 Imagen virtual e imagen real

Cuando reconstruimos un holograma de transmisión con el haz de referencia original sobre la placa colocada del mismo modo que en el proceso de grabación y lo

observamos desde el lado opuesto a la luz, veremos una imagen virtual proyectada en el lado opuesto al que nos encontramos.

Cuando reconstruimos un holograma de reflexión con la fuente de luz adecuada incidiendo sobre la cara de la película fotosensible opuesta a la emulsión y lo observamos desde el mismo lado, veremos una imagen virtual proyectada en el lado opuesto al de la luz.

Esta imagen virtual es ortoscópica, es decir, verdadera, ya que la perspectiva y el paralaje que presenta se corresponden con los que obtendríamos al mirar al objeto real a través de la película.

La imagen que aparece en frente de nosotros, es decir, en el lado que corresponde a nuestra posición, se denomina imagen real.

En un holograma de transmisión, la imagen real aparece al mismo tiempo que la virtual, pero con muy poco brillo y nitidez, casi invisible. Para proporcionarle un brillo mayor, lo que hacemos es quitárselo a la imagen virtual girando el holograma 180° .

Para que la imagen real aparezca en un holograma de reflexión es necesario girar el holograma 180° .

Decimos que la imagen real es pseudoscópica, es decir, falsa, porque la perspectiva y sus cambios funcionan de la forma contraria a la esperada. Las partes que deberían aparecer más cercanas lo hacen a una distancia mayor y viceversa. Además, cuando nos movemos, veremos la imagen moverse hacia el mismo sentido, y no hacia el inverso, como sería de esperar. Todo ello da la sensación de que estamos observando la imagen desde su interior.

7.6 Aplicaciones

Actualmente, los usos de la holografía se están extendiendo y son cada vez más variados. Entre ellos encontramos los siguientes:

- **Exhibición:** Es el ámbito más popular de la holografía. Empezó usándose como medio publicitario y en salas para simular músicos, conferenciantes, actores, etc. Actualmente su uso está más extendido en la reproducción de piezas arqueológicas o muy valiosas en un museo. De este modo, evitamos su deterioro y eliminamos las posibilidades de robo.
- **Arte:** Con el desarrollo de la holografía y su bajada de precio, los artistas han empezado a crear e incorporar piezas holográficas en su colección. Ciertos museos ya muestran algunas de estas creaciones artísticas como parte de su inventario. Los hologramas, en este ámbito, dan lugar a la imaginación, ya que permiten la introducción fácil de efectos especiales. Además, por su atractivo visual, se suelen vender bastantes obras y juguetes con hologramas incorporados.
- **Seguridad:** Por su difícil falsificación, los hologramas son frecuentemente usados en los dispositivos de seguridad, para permitir o impedir el acceso a datos privados o áreas de seguridad. Un ejemplo son las tarjetas de crédito, que

llevan un pequeño holograma prensado. También se emplean en documentos de identificación y documentos clasificados. En este ámbito, se distingue otro uso distinto: el empaque de productos. Se adhiere una etiqueta holográfica a la caja del producto, como sello final. Esto garantiza que el producto que uno compra no ha sido abierto ya que, por un lado, la etiqueta es infalsificable, y por el otro, existen etiquetas con la función de autodestruirse en caso de ser desprendidas.

- **Medicina:** En el terreno de la medicina, existe la holografía de rayos X, que permite obtener imágenes tridimensionales de distintas partes del cuerpo de una persona que no pueden ser observables de otro modo, para fines de estudio o docentes. Con esta técnica pudo reproducirse en Japón el cráneo de una persona viva en 360° sin la necesidad de una intervención quirúrgica.
- **Microscopía holográfica:** La holografía facilita mucho el análisis de partículas microscópicas, ya que permite grabar todo el campo de visión de una sola vez, incluida la información de la profundidad. Esto permite determinar el tamaño, posición, desplazamiento y velocidad de las partículas.
- **Interferometría:** La interferometría holográfica hace posible la medición muy precisa de las deformaciones o cambios mínimos en un objeto cuando están sujetos a tensiones, presiones, vibraciones o cambios de temperatura. Para ello suele realizarse un holograma de doble exposición. Para empezar, se registra un holograma del objeto en su estado habitual y, posteriormente, se graba en la misma película fotosensible un segundo holograma del mismo elemento sujeto a condiciones distintas. Una vez revelado el holograma, se evidencia cualquier distorsión en el mismo.
- **Almacenamiento:** Se dice que las memorias holográficas podrían suponer una auténtica revolución en el futuro, y llegar a sustituir las memorias magnéticas y ópticas actuales. Frente a las memorias convencionales, que únicamente almacenan datos en su superficie, las memorias holográficas (que utilizan un método óptico) lo hacen tridimensionalmente, es decir, externa e internamente, cosa que conlleva una reducción del espacio utilizado y del tiempo de transmisión de datos. Su creación solamente difiere de la de los hologramas de transmisión convencionales en que en el proceso de grabación de las memorias holográficas, el haz objeto o haz señal, antes de incidir sobre la placa holográfica, pasa por un modulador espacial de luz (SLM), que contiene la información codificada en forma de píxeles. Entonces, este transfiere los datos al haz señal, que pasa a transportar la información a almacenar. Si queremos almacenar más información, solo hace falta variar el ángulo de incidencia del rayo de luz sobre el holograma.
- **Elementos ópticos holográficos (EOH):** Son elementos ópticos difractivos que se comportan como lentes, espejos, redes de difracción y otros elementos mucho más complejos como escáneres lectores de códigos de barras, dispositivos de procesamiento óptico de información o *head-up displays* (HUD) (pantallas transparentes colocadas en el parabrisas de un vehículo que se

encargan de aportar información al usuario, superponiéndola con la visión del exterior, de modo que no tenga que apartar nunca la vista del frente). Se utilizan principalmente en aviones militares y en coches de gama alta. Los elementos ópticos holográficos pueden realizar funciones únicas, que no son posibles con elementos ópticos convencionales. Pueden ser fabricados en cualquier forma y en una amplia gama de materiales. Son ligeros y suelen ser económicos.

- **Hologramas generados por ordenador:** El patrón de interferencia de un holograma no solo puede obtenerse físicamente, es decir, provocando el cruce de dos haces de luz, sino también digitalmente. Esto se hace con ayuda de un ordenador, que calcula la distribución de intensidades que produciría el objeto que queremos obtener. A partir del patrón, cuyo tamaño puede reducirse mucho digitalmente, se obtiene un holograma generado por ordenador. Los hologramas pueden hacerse tanto de un objeto real como de uno imaginario. Este proceso pertenece al amplio campo de la holografía digital.

La gran revolución doméstica de la holografía se espera que llegue cuando se consiga de forma industrial aplicarla a los aparatos domésticos como pantallas de televisión, de ordenador o del móvil.
--

8 EXPERIMENTOS

8.1 Experimento principal: Representación tridimensional de objetos con distintas técnicas

En este apartado se describe todo el procedimiento que he llevado a cabo para obtener representaciones tridimensionales de dos objetos específicos utilizando dos técnicas distintas para su creación. Yo he escogido representar un corazón, porque presenta formas redondeadas, y una letra E (la inicial de mi nombre), porque presenta formas abruptas, mediante el uso de la estereoscopia y la holografía.

Más adelante, voy a detallar los pasos seguidos durante todo su proceso de creación y compararé ambas técnicas destacando aspectos como su dificultad, el material necesario para su elaboración, la duración del procedimiento, etc. Después, presentaré una muestra visual de los resultados logrados, y compararé ambas imágenes tridimensionales insistiendo en los efectos de profundidad y tridimensionalidad que producen, la nitidez de los objetos obtenidos, la sensación de realidad que generan y su dificultad de visualización, entre otros aspectos.

El conjunto de experimentos de construcción constituyen a su vez, el experimento que me permitirá verificar mi hipótesis principal. Hay, sin embargo, algunos otros experimentos pensados para averiguar o contrastar aspectos específicos de cada técnica.

Por ejemplo, el uso del corazón y la letra E me permitirá comparar las similitudes y diferencias entre los efectos producidos por las formas suaves y las formas bruscas.

Recordemos que en los anexos están los resultados a página completa, para poder apreciar correctamente lo que en el experimento se indica.

Para algunos experimentos donde se requería la visualización de estereogramas por parte de varias personas, he intentado buscar a 20 personas que fueran capaces de hacerlo, comprobándolo a través de estereogramas de imagen escondida del libro “El Ojo Mágico”. Sin embargo, solo he encontrado a 6 personas capaces de verlos, y varias de ellas no eran capaces de ver otros tipos de estereogramas.

8.2 Experimento 1: Creación de una pareja estereoscópica de un corazón

A lo largo del trabajo, he explicado detalladamente la creación de parejas estereoscópicas. Ahora vamos a ponerla en práctica creando una pareja estereoscópica de una fotografía con un corazón como elemento central. Su creación responde a la voluntad de constatar el correcto funcionamiento de esta técnica y del procedimiento previamente explicado, así como de analizar la dificultad de su visualización.

La repetición de figuras (el corazón y la letra E) no responde a un criterio arbitrario, sino que responde a la intención de posibilitar una mejor comparación entre las distintas técnicas y creaciones, minimizando los factores que puedan afectar al efecto generado, ya sea mejorándolo o empeorándolo.

La selección de un elemento central con formas redondas, como el corazón, es muy importante en el caso de las parejas estereoscópicas porque permite comprobar si, realmente, esta redondez provoca distorsiones en la pareja estereoscópica al ser visualizada, como sería de esperar.

Hipótesis:

Es posible realizar en casa, con elementos habituales y accesibles, parejas estereoscópicas convencionales que produzcan el efecto tridimensional apropiado al ser visualizadas de forma adecuada.

Material:

- Cámara fotográfica
- Escena o elemento a fotografiar
- Cinta métrica
- Calculadora
- *Stereo photo maker*

Metodología:

En este experimento, crearé un tipo diferente de estereograma: una pareja estereoscópica, en este caso de un corazón como elemento central.

Después de crear el estereograma, comprobaré su eficacia mediante su visualización adecuada y descubriré si el efecto generado es el esperado y es acertado. También, comprobaré si se producen o no distorsiones en el corazón al aparecer en su forma tridimensional.

Realización:

Los pasos que he seguido para crear una pareja estereoscópica de un corazón se explican a continuación:

1. En primer lugar, he colocado el corazón (en mi caso un corazón de peluche) en el suelo, sujetado por un soporte trasero no visible en la fotografía. Lo he situado delante de un fondo con diferentes profundidades, evitando la monotonía para conseguir un efecto estereoscópico más apreciable. He dejado la cámara en el suelo a una cierta distancia del objeto y después, he tomado una fotografía de la escena captada. Será la fotografía destinada al ojo izquierdo.



Fotografía para el ojo izquierdo de la pareja estereoscópica

2. En segundo lugar, he medido la distancia del centro de la cámara al corazón (objeto más cercano) y al objeto más lejano (en mi caso el armario con paredes de cristal). Mediante las medidas obtenidas (750 milímetros hasta el objeto más cercano y 1750 milímetros hasta el objeto más lejano), y utilizando 35 milímetros como distancia focal y 1,2 mm como paralaje lineal, he calculado la base estereoscópica o distancia interaxial mediante la fórmula de Bercovitz porque es, supuestamente, la fórmula más precisa y exacta. La fórmula de Bercovitz establece una base estereoscópica de 43,5 milímetros.
3. A continuación, he desplazado la cámara 43,5 milímetros hacia la derecha y he tomado una fotografía. Esta será la fotografía para el ojo derecho. Es necesario saber a qué ojo corresponde cada fotografía en todo momento, motivo por el que es recomendable seguir siempre un orden definido en su toma.
4. Finalmente, he guardado las fotografías en el ordenador y he subido la fotografía para el ojo izquierdo y la fotografía para el ojo derecho en el programa *Stereo Photo Maker*.
5. He seleccionado la opción de alineamiento automático, muy eficaz para obtener buenas parejas estereoscópicas sin tener que ser tan preciso en la toma de fotografías. A continuación, he guardado la imagen obtenida como una pareja estereoscópica *side by side*.

Para crear las mismas parejas estereoscópicas, pero adecuadas a la técnica de visión cruzada, los pasos a seguir son los que ya he explicado, pero ha de tenerse en cuenta que al introducir las fotografías en el programa Stereo Photo Maker, debe seleccionarse la opción de intercambiar derecha e izquierda.

Resultados:



Pareja estereoscópica para visión paralela¹¹

Esta es la pareja estereoscópica obtenida. Está hecha para visión paralela, así que la gente que utiliza este tipo de técnica visual debería ser capaz de percibir el efecto 3D. Al ser visualizada correctamente, el observador percibe el corazón en tres dimensiones

¹¹ Anexo 9 imagen 1

y a menos profundidad que el resto de la imagen, más cercano al sujeto. También se advierten diferentes profundidades en los armarios, la televisión, la torre de ordenador, etc.

En la pareja estereoscópica expuesta no se manifiesta ninguna distorsión evidente al observar el corazón en su forma tridimensional.

A continuación se adjunta la misma pareja estereoscópica pero hecha para visión cruzada. Así, utilices el método que utilices, serás capaz de experimentar esta gran sensación de profundidad estereoscópica.



Pareja estereoscópica para visión cruzada¹²

Conclusión:

La hipótesis es verídica. Es posible crear parejas estereoscópicas de forma doméstica utilizando elementos habituales y fácilmente accesibles. La pareja estereoscópica obtenida produce un gran efecto estereoscópico.

8.3 Experimento 2: Creación de una pareja estereoscópica de una letra E

Previamente, en la parte teórica del trabajo, he explicado la creación de parejas estereoscópicas y en el experimento 1 he desarrollado la creación de una pareja estereoscópica de un corazón. Con la finalidad de verificar que esta técnica realmente funciona, y no solamente para figuras con un tipo de formas o unas condiciones determinadas, sino para cualquier circunstancia, he creado una pareja estereoscópica de fotografías con un elemento central distinto al anterior, y con características opuestas, una letra E.

Hipótesis:

Es posible realizar, de forma doméstica, parejas estereoscópicas convencionales y eficaces, que produzcan un efecto estereoscópico favorable.

¹² Anexo 9 imagen 2

Material:

El material empleado es el mismo que en la creación de la pareja estereoscópica del corazón, con la diferencia de que en esta ocasión, el elemento central de la escena a fotografiar es una letra E blanca tridimensional, y no un corazón rojo.

Metodología:

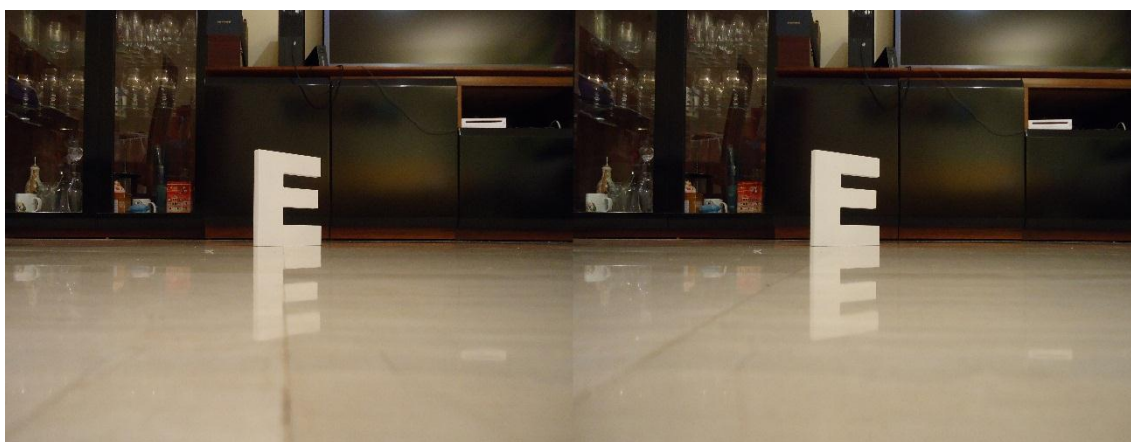
Voy a comenzar creando una pareja estereoscópica que contenga una letra E como elemento central.

Posteriormente, visualizaré la pareja obtenida, junto con un compañero, para comprobar que se aprecia el relieve y la profundidad de la imagen estereoscópica.

Finalmente, analizaré el resultado y el impacto visual generado y comprobaré si la hipótesis formulada es verídica.

Realización:

Los pasos para la creación de una pareja estereoscópica están explicados en el apartado de “realización” del experimento 1. La única parte diferente en este experimento es el primer paso. En este caso, se coloca una letra E blanca y tridimensional como elemento central de la fotografía, y no un corazón rojo. Por lo demás, todos los parámetros, incluso la distancia al objeto más cercano y la distancia al objeto más lejano, son idénticos. De este modo, podré comparar mejor las técnicas sin añadir cambios que puedan afectar a los efectos producidos.

Resultado:

Pareja estereoscópica para visión paralela¹³

Sobre este texto se observa la pareja estereoscópica obtenida. Está hecha para visión paralela, y al ser visualizada correctamente, se perciben diferentes profundidades en los elementos de la imagen, vistos en su forma tridimensional. La letra E aparece como el elemento más cercano al observador y los elementos del fondo presentan diferentes profundidades.

A continuación, encontramos la misma pareja estereoscópica, pero para visión cruzada.

¹³ Anexo 9 imagen 3



Pareja estereoscópica para visión cruzada¹⁴

Conclusión:

La hipótesis queda verificada. Como se ha demostrado en este experimento y el anterior, es posible crear parejas estereoscópicas a nivel doméstico con elementos habituales y accesibles, y que estas generen un efecto estereoscópico eficaz y positivo.

8.4 Experimento 3: Comparación entre dos parejas estereoscópicas con formas distintas

Después de haber creado varias parejas estereoscópicas con formas distintas en los experimentos 1 y 2, vamos a utilizar el resultado obtenido para compararlas.

Hipótesis:

La letra E, al ser una forma más definida y rectangular, y no tener tantas posibilidades de generar distorsiones como el corazón, genera un efecto estereoscópico mejor y mayor que el corazón en las parejas estereoscópicas.

Material:

- Pareja estereoscópica de un corazón como elemento central
- Pareja estereoscópica de una letra E como elemento central

Metodología:

Este tercer experimento consiste en la creación y comparación de dos parejas estereoscópicas, cada una de ellas con elementos distintos, que entre ellos poseen rasgos opuestos. El fondo tiene objetos variados y planos con diferentes profundidades, cosa que facilita una maximización del efecto estereoscópico creado. El fondo es el mismo en las dos fotografías, porque esto permite una mejor comparación de los elementos centrales de ambas fotografías, en los que realmente quiero centrarme, y permite ver las diferencias en el efecto provocado por estos objetos sin la incorporación de componentes adicionales que puedan interferir en la sensación generada.

Los elementos escogidos para las parejas estereoscópicas son un corazón y una letra E. La selección de un elemento con formas redondas, como el corazón, es muy

¹⁴ Anexo 9 imagen 4

importante en este caso porque hay conjeturas que explican la posibilidad de que se produzcan distorsiones importantes en este tipo de estructuras al ser visualizadas adecuadamente, y plantean la solución a este problema. Aprovechando la anterior creación de las dos parejas estereoscópicas, que está expuesta en los experimentos 1 y 2, vamos a utilizarla para iniciar una comparación entre ambas, referente en su mayoría a sus efectos visuales y la complejidad de su proceso de visualización.

Comenzaremos por el principio, es decir, por analizar la dificultad de visualización de las parejas estereoscópicas. Para ello, enseñaré ambas parejas estereoscópicas (las creadas según la fórmula de Bercovitz) a 6 personas, y mediré el tiempo empleado por cada una de ellas en visualizar los dos estereogramas.

Después, procederemos a analizar los efectos visuales provocados por las dos parejas estereoscópicas, comparando principalmente la forma o elemento central de la fotografía.

Resultado:

De las 6 personas a las que he mostrado las parejas estereoscópicas, solamente 3 han sido capaces de visualizarlas y de percibir la imagen tridimensional. Los resultados del tiempo tardado en cada caso son los siguientes:

	Pareja estereoscópica del corazón	Pareja estereoscópica de la letra E
Sujeto 1	No la ha visto	No la ha visto
Sujeto 2	No la ha visto	No la ha visto
Sujeto 3	2 segundos	8 segundos
Sujeto 4	13 segundos	19 segundos
Sujeto 5	No la ha visto	No la ha visto
Sujeto 6	64 segundos	92 segundos

A partir de las mediciones realizadas, expuestas en la tabla anterior, se observa que las personas seleccionadas han tardado más en visualizar la pareja estereoscópica formada por la letra E.

Pasemos a analizar el efecto generado por las dos parejas.

Aunque el efecto conseguido en ambas parejas estereoscópicas está muy logrado y es muy real, hay un elemento que destaca, y es el corazón. El corazón, por sus rasgos (es más grande, de un color más vivo y con formas redondeadas), rompe con la estructura y la monotonía del entorno, a diferencia de la letra E, y genera un efecto más sorprendente y tridimensional. En el caso del corazón, aunque está a igual distancia del fondo que la letra E, la sensación que se produce al visualizarlo es que está más lejos de este y más cerca del espectador, es decir, la diferencia de profundidades percibida por el observador es mayor en esta pareja estereoscópica.

Conclusión:

La hipótesis queda anulada. Las formas suaves (en este caso, el corazón) proporcionan un efecto estereoscópico mejor y mayor que las formas rectangulares en la creación de parejas estereoscópicas. De todos modos, para estar totalmente seguros y obtener resultados definitivos y concluyentes, sería ideal realizar el mismo experimento con más personas.

8.5 Experimento 4: Comparación entre dos parejas estereoscópicas con bases estereoscópicas distintas

Como hemos visto a lo largo del trabajo, existen varias fórmulas que permiten calcular la distancia interaxial a utilizar en la toma de fotografías al crear una pareja estereoscópica. Ahora, voy a poner en práctica algunas de estas fórmulas, dos concretamente, para ver si realmente afectan y provocan diferencias notorias en los efectos generados por la pareja estereoscópica obtenida en cada caso.

Hipótesis:

La fórmula de Bercovitz, al ser más completa y extensa, establece una base estereoscópica que produce un efecto estereoscópico mayor y mejor al ser utilizada en la creación de parejas estereoscópicas, frente a la regla del 1/30.

Material:

- Cámara fotográfica
- Escena o elemento a fotografiar
- Cinta métrica
- Calculadora
- *Stereo photo maker*

Metodología:

Para corroborar la hipótesis, voy a crear cuatro parejas estereoscópicas distintas, dos de ellas utilizando la fórmula de Bercovitz para calcular la base estereoscópica a emplear en la toma de fotografías, y las otras dos utilizando la regla del 1/30.

Dentro de estos pares, una de ellas va a tener un corazón como elemento central y la otra va a tener una letra E como figura principal. Esto me permitirá reafirmar que la hipótesis se cumple en todos los casos, y no solamente cuando se dan unas condiciones concretas. No voy a comparar los efectos producidos según la forma utilizada, porque esto ya se ha hecho en el experimento 3.

Después de haberlas creado, un compañero y yo vamos a visualizarlas. A continuación, voy a analizar los efectos producidos por cada una de las parejas y voy a evaluarlos hasta llegar a una conclusión y decidir cuál de las dos proporciona unos efectos óptimos.

Realización:

La creación de las parejas estereoscópicas puede consultarse en el experimento 1. El procedimiento de creación es el mismo, pero hay que acordarse de ajustar la base estereoscópica al realizar las parejas con la regla del 1/30. Con la fórmula de Bercovitz, la base estereoscópica es 43,5 mm, mientras que con la regla del 1/30, la distancia interaxial es 25 mm.

Hay que tener en cuenta que, en dos de los cuatro casos, es necesario substituir el corazón por la letra E, como elemento central de la fotografía.

Finalmente, en este experimento no he utilizado la opción de alineamiento automático en el programa *Stereo photo maker*, para evitar que factores externos interfirieran en el

efecto producido según la fórmula utilizada en el cálculo de la base estereoscópica e imposibilitaran su comparación.

Resultado:

En primer lugar, voy a exponer las parejas estereoscópicas creadas según la regla del 1/30.



Pareja estereoscópica de un corazón para visión paralela (regla del 1/30)¹⁵



Pareja estereoscópica de una letra E para visión paralela (regla del 1/30)¹⁶

En ambos casos, al visualizar la pareja estereoscópica correctamente, se ve el elemento central de la fotografía (el corazón y la letra E, respectivamente) como el objeto más cercano al observador, y hay diferencias de profundidades entre este elemento y el fondo. A su vez, se perciben diferentes profundidades en los elementos del fondo (el televisor, el armario, etc.).

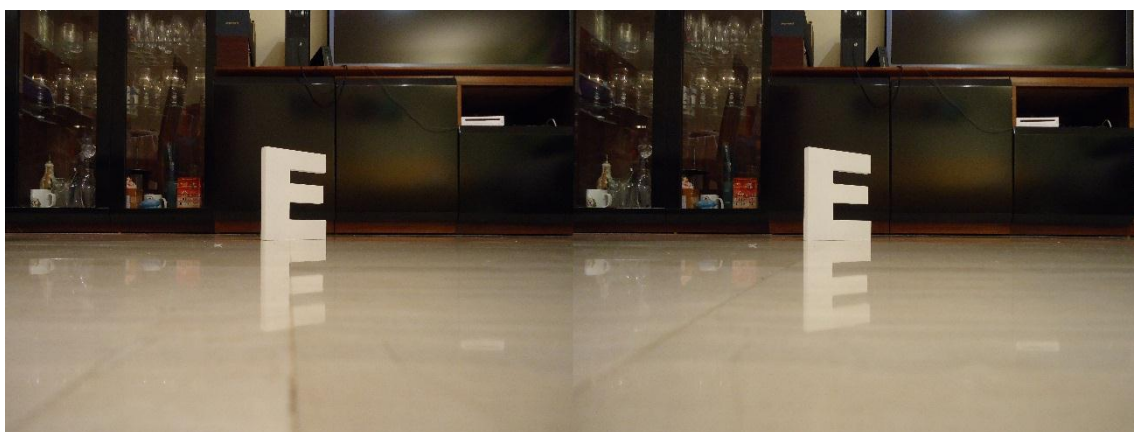
A continuación, voy a mostrar las parejas estereoscópicas creadas según la fórmula de Bercovitz.

¹⁵ Anexo 9 imagen 9

¹⁶ Anexo 9 imagen 11



Pareja estereoscópica de un corazón para visión paralela (fórmula de Bercovitz)¹⁷



Pareja estereoscópica de una letra E para visión paralela (fórmula de Bercovitz)¹⁸

En las parejas estereoscópicas creadas según la fórmula de Bercovitz, al ser visualizadas de forma adecuada, el efecto es muy similar al generado por las parejas estereoscópicas creadas según la regla del 1/30. El corazón y la letra E, respectivamente, aparecen en el centro como el elemento más cercano al observador y con una diferencia de profundidad bastante grande respecto al fondo. También se advierten diferencias de profundidades notables en los objetos y planos que conforman en fondo de la imagen.

Aunque la diferencia es muy sutil, sí que se aprecia una diferencia de profundidades y un efecto tridimensional mayor en los elementos de las parejas estereoscópicas creadas en función de la fórmula de Bercovitz.

Cabe recordar que, en los anexos, se encuentran las mismas parejas estereoscópicas adaptadas a la técnica de visión cruzada.

¹⁷ Anexo 9 imagen 5

¹⁸ Anexo 9 imagen 7

Conclusión:

La hipótesis se cumple. El efecto generado es óptimo cuando se utiliza la fórmula de Bercovitz para el cálculo de la base estereoscópica utilizada en la toma de las fotografías que componen la pareja estereoscópica.

8.6 Experimento 5: Comparación entre dos anaglifos con colores distintos

Después de haber creado varias parejas estereoscópicas, utilizando fórmulas y formas distintas, vamos a probar una nueva técnica de presentación de parejas estereoscópicas, el anaglifo.

Hipótesis:

Los anaglifos creados con la pareja de colores complementarios rojo-cian producen un efecto estereoscópico mayor y mejor que los que utilizan la pareja de colores complementarios amarillo-azul.

Material:

- Fotografía estereoscópica de un corazón para el ojo izquierdo
- Fotografía estereoscópica de un corazón para el ojo derecho
- Fotografía estereoscópica de una letra E para el ojo izquierdo
- Fotografía estereoscópica de una letra E para el ojo derecho
- *Stereo photo maker*

Metodología:

Para comprobar esta hipótesis, crearé anaglifos diferentes, utilizando las dos parejas de colores complementarios previamente mencionadas. Con la finalidad de obtener datos contrastados y definitivos, voy a realizar el mismo tipo de anaglifo con dos formas distintas: un corazón y una letra E que, además, al ser de colores diferentes, me permitirán ver cómo afecta este segundo factor (el color) en los anaglifos.

Al terminar, visualizaré los anaglifos con las gafas anaglíficas convenientes, analizaré sus efectos visuales y valoraré cuál de los dos genera un efecto tridimensional mayor y más impactante.

Realización:

Como en el experimento 1 y 2 ya hemos tomado las fotografías necesarias para la creación del anaglifo, vamos a partir de ellas para la realización de este quinto experimento. Los pasos a seguir para crear un anaglifo partiendo de las fotografías previamente tomadas se explican a continuación:

1. Para empezar, subimos las 2 fotografías (una para el ojo izquierdo y una para el ojo derecho) al programa *Stereo photo maker*.
2. En segundo lugar, seleccionamos la opción de alineamiento automático.
3. Escogemos la opción de anaglifo, y dentro de esta, el color adecuado en cada caso (rojo-cian o amarillo-azul).
4. Finalmente, guardamos la imagen estereoscópica obtenida.

Realizamos el proceso anteriormente relatado cuatro veces, una vez para cada pareja de fotografías (el corazón y la letra E) y cada pareja de colores complementarios del anaglifo.

Resultado:

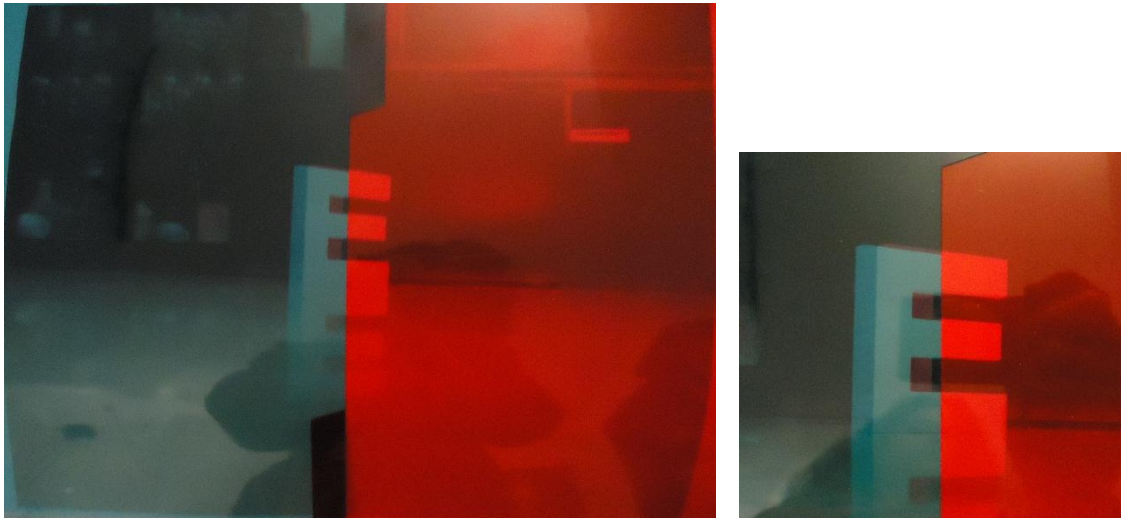
Debajo, encontramos el anaglifo creado a partir de la pareja estereoscópica de la letra E en los colores rojo-cian. Al ser un objeto blanco, los colores del anaglifo se aprecian muy bien. Al ser visualizado con gafas anaglíficas con filtros de los colores rojo-cian, percibimos los objetos en su forma original, con su tridimensionalidad y sus diferencias de profundidades. El efecto creado es muy real.



Anaglifo rojo-cian¹⁹

Cabe destacar que los colores de las gafas deben coincidir a la perfección con los del anaglifo. Yo, en un principio, seleccioné una tonalidad de azul muy parecida al cian, pero no lo suficiente, y al visualizar la pareja con las gafas creadas, el efecto no era el deseado. Para demostrarlo, he colocado en cada mitad de la imagen uno de los papeles utilizados inicialmente para crear las lentes. En la parte derecha, cubierta con el papel rojo, vemos que la parte roja del anaglifo deja de verse en su mayoría como una duplicación de la imagen y se fusiona con esta, mientras que la parte izquierda, cubierta con el papel azul, no provoca la fusión de las partes de la imagen de color cian porque los colores del anaglifo y el acetato no coinciden.

¹⁹ Anexo 9 imagen 15



Pareja estereoscópica cubierta con los papeles rojo y cian de las primeras lentes

Bajo este texto, se expone el mismo anaglifo pero en los colores amarillo y azul, creado con la finalidad de posibilitar una comparación más precisa y exhaustiva, de descubrir que colores van mejor para optimizar el efecto estereoscópico y de verificar que el método funciona bien y permite obtener un resultado acertado y preciso.



Anaglifo amarillo-azul²⁰

²⁰ Anexo 9 imagen 16



Anaglifo rojo-cian²¹

Arriba encontramos un anaglifo rojo-cian hecho con las fotografías del corazón. Como todo anaglifo, debe ser visualizado con unas gafas anaglíficas, en este caso de los colores rojo-cian. Entonces, advertimos que el efecto no es el deseado en ciertas partes porque el elemento central de la fotografía (el corazón) es rojo, factor no adecuado para la creación de anáglifos que contengan este color. Por este motivo, aunque el fondo sí que adquiere profundidad al ser visualizado con las gafas, el corazón no aparece en tres dimensiones, sino que se ve en dos dimensiones rodeado en algunas zonas por sus siluetas, causadas por la creación del anaglifo.

A bajo, se halla el anaglifo construido con las mismas fotografías que en el caso anterior, pero en los colores amarillo y azul, porque de este modo puede observarse el efecto anaglífico real sin distorsiones en el efecto tridimensional producidas por las incompatibilidades de colores. Se observa a continuación:

²¹ Anexo 9 imagen 13



Anaglifo amarillo-azul²²

Conclusión:

El efecto tridimensional creado es mayor al utilizar la pareja de colores complementarios rojo-cian en la creación del anaglifo, siempre y cuando la escena fotografiada no contenga elementos de los colores con los que se crea el anaglifo. La hipótesis se confirma.

8.7 Experimento 6: Creación de un autoestereograma *hidden image* de un corazón

En el texto, he explicado los pasos a seguir para crear un autoestereograma de imagen escondida. Ahora voy a comprobar, mediante su creación, si esta técnica realmente funciona. También descubriré el nivel de dificultad de su visualización.

Hipótesis:

Es posible crear un autoestereograma de imagen escondida utilizando solamente elementos y software común.

Material:

- Patrón o estampado
- Corazón tridimensional o software de modelado 3D
- *Meshlab*
- *Photoshop*
- Página web <http://www.easystereogrambuilder.com/3d-stereogram-maker.aspx>

²² Anexo 9 imagen 14

Metodología:

Voy a crear un autoestereograma con un corazón tridimensional. El corazón es la imagen escondida, que no se encuentra visible en el patrón y que solamente se percibe al observar el estereograma correctamente.

Una vez realizado, intentaré yo misma, junto con otra persona, visualizar el estereograma para verificar que es correcto.

Realización:

Aunque el principio en el que se basan los autoestereogramas de imagen escondida y las parejas estereoscópicas es muy similar, su creación es muy diferente, como veremos seguidamente.

Los pasos que he seguido para crear un autoestereograma de imagen escondida con un corazón tridimensional son los siguientes:

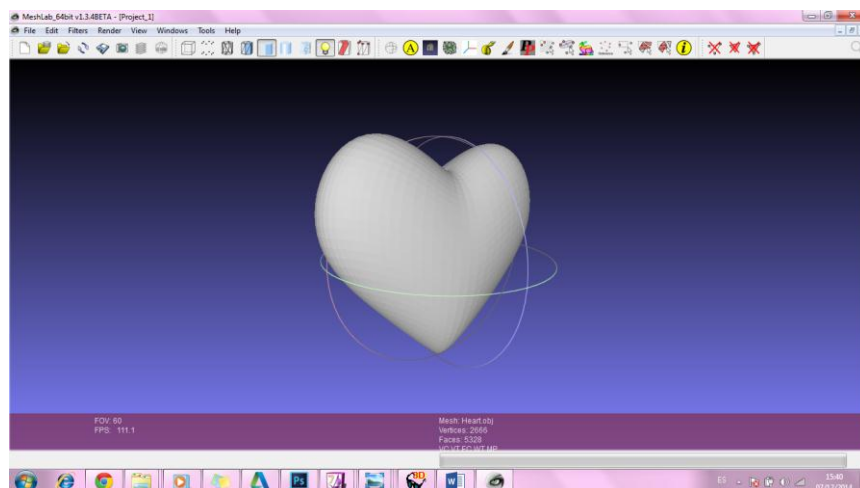
1. En primer lugar, he seleccionado un estampado para el patrón del estereograma. He escogido una foto mía como marca personal.



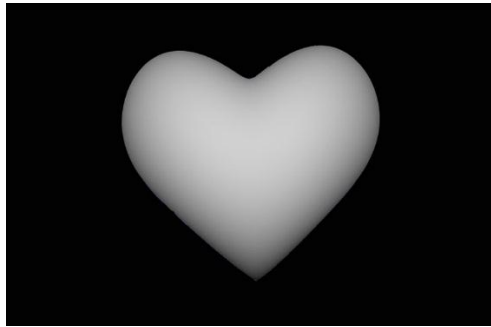
Patrón del autoestereograma Hidden Image

1. A continuación, he descargado un corazón tridimensional premodelado de internet. También puede crearse, aunque Truespace es un programa bastante limitado para esta tarea, así que debería de utilizarse un software más avanzado como 3ds max (que no es gratuito). El vídeo expuesto a continuación muestra los pasos a seguir en 3ds max para su modelado:

<https://www.youtube.com/watch?v=2h43pxVOWs4>.



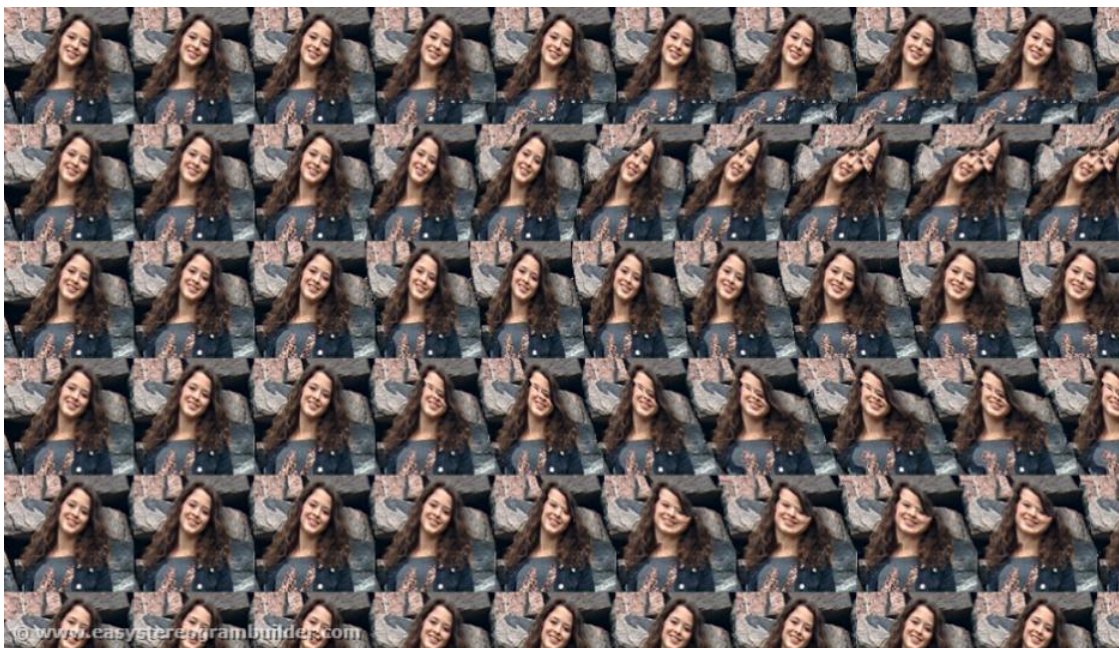
2. Después, he creado un mapa de profundidad del corazón. Pueden consultarse los pasos a seguir para su creación en el anexo 4.



Mapa de profundidad del autoestereograma de imagen escondida

3. Finalmente, he ido a la web <http://www.easystereogrambuilder.com/3d-stereogram-maker.aspx>, he subido el mapa de profundidad y el estampado elegido y he escogido la opción de generar un estereograma.

Resultado:



Autoestereograma de imagen escondida para visión paralela²³

El estereograma situado arriba es el resultado de los pasos anteriormente relatados. Podemos percibir ciertas distorsiones en el patrón, causadas por el desplazamiento de píxeles producido para que el ojo las capte de modo que el cerebro sea capaz de interpretarlas como un corazón situado en el centro del estereograma con una

²³ Anexo 9 imagen 25

profundidad diferente a la del fondo. Se advierte una acentuación de las distorsiones en la parte derecha de la imagen.

Este estereograma está hecho para visión paralela. Así, al utilizar cualquier técnica efectiva que provoque la divergencia de nuestros ojos, percibimos un corazón que sobresale del resto del estereograma. Si, por el contrario, utilizamos una técnica de visión cruzada y convergimos nuestros ojos sobre un punto por delante de la imagen, percibimos el estereograma con una profundidad invertida, es decir, vemos un corazón hundiéndose desde el soporte.

Conclusión:

La hipótesis se verifica, ya que he creado el autoestereograma y este se visualiza correctamente.

8.8 Experimento 7: Creación de un autoestereograma *hidden image* de una letra E

Para poder verificar completamente el funcionamiento del procedimiento de creación de autoestereogramas de imagen escondida y obtener datos contrastados sobre su grado de complejidad, voy a crear un segundo autoestereograma con un elemento escondido un poco distinto, una letra E. La letra E, al presentar formas más abruptas, me permitirá comprobar si, realmente, el proceso de creación es efectivo para diferentes figuras o condiciones, o si lo es solamente cuando se cumplen ciertos requisitos.

Hipótesis:

Es posible crear, a nivel doméstico y gratuitamente, estereogramas de imagen escondida efectivos.

Material:

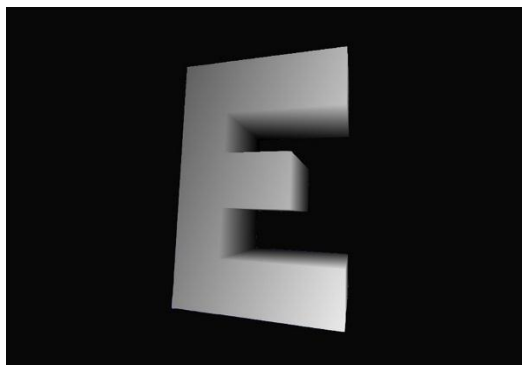
El material utilizado es el mismo que en la creación del autoestereograma de imagen escondida de un corazón.

Metodología:

La metodología es la misma que en la creación del autoestereograma de imagen escondida de un corazón aunque, en este caso, se crea un autoestereograma *hidden image* de una letra E.

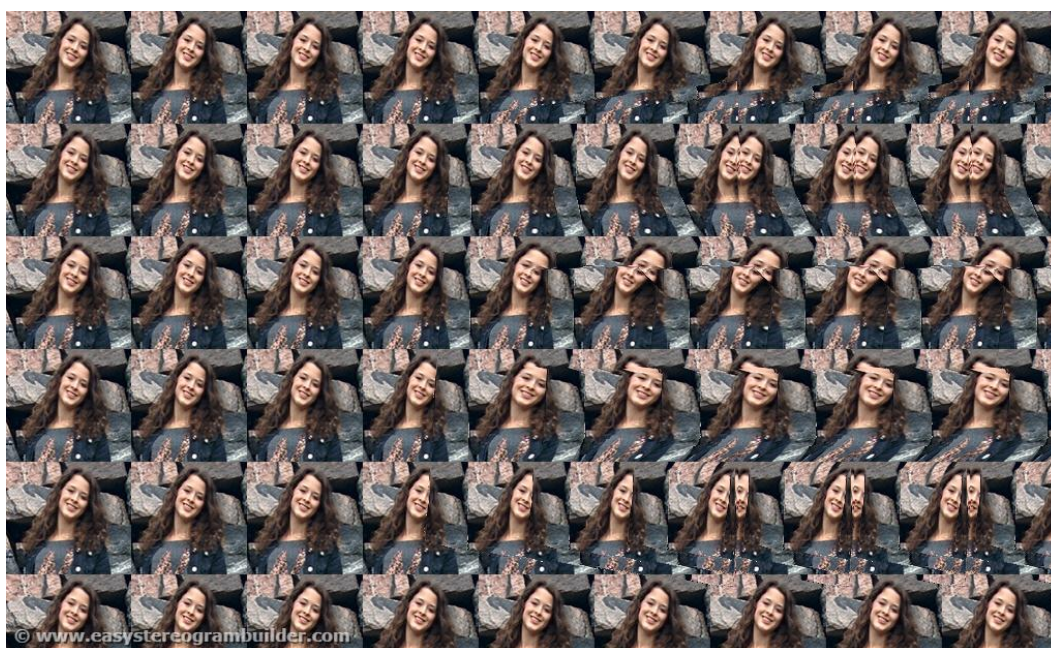
Realización:

Todos los pasos para la creación de un autoestereograma de imagen escondida de una letra E pueden consultarse en el apartado “creación de un autoestereograma con software informáticos”. El procedimiento es el mismo que en el experimento anterior, pero sustituyendo el modelado (en mi caso en Truespace) y mapa de profundidad de un corazón por el de una letra E.



Mapa de profundidad del autoestereograma de imagen escondida

Resultado:



Autoestereograma de imagen escondida para visión paralela²⁴

Arriba se sitúa el autoestereograma creado. Percibimos una clara deformación de la imagen como resultado del desplazamiento de píxeles, que se acentúa en la parte derecha del autoestereograma. Al visualizar el estereograma correctamente, es decir, divergiendo los ojos, porque es un autoestereograma hecho para visión paralela, vemos una letra E en el centro de la imagen emergiendo desde el fondo.

Conclusión:

La hipótesis se confirma por partida doble (en el caso del corazón y en este, el de la letra E). Es posible crear un autoestereograma de imagen escondida eficaz y correctamente visualizable de forma doméstica, gratuitamente y con elementos e instrumentos comunes, como demuestran los resultados de este experimento al ser visualizados de forma adecuada.

²⁴ Anexo 9 imagen 23

8.9 Experimento 8: Comparación entre dos autoestereogramas de imagen escondida con formas opuestas

Los dos experimentos anteriores se dedican a la creación de dos autoestereogramas del mismo tipo, con el mismo patrón pero diferente elemento escondido. En este experimento voy a centrarme en su comparación.

Hipótesis:

Un corazón, al ser una forma más suave, con una amplia gradación entre las diferentes profundidades que lo componen, es más fácilmente visualizable que una letra E en un estereograma de imagen escondida.

Material:

- Autoestereograma de imagen escondida de un corazón
- Autoestereograma de imagen escondida de una letra E

Metodología:

El experimento consiste en la creación de dos autoestereogramas *hidden image* con formas diferentes en la imagen escondida: uno con formas más suaves y otro con formas más abruptas. Dado que en los dos experimentos anteriores, he creado dos autoestereogramas de imagen escondida que cumplen estos requisitos, comparten el mismo patrón pero los mapas de profundidad utilizados para su creación son distintos, los aprovecharé y pasaré directamente a su comparación. Me centraré en los aspectos visuales, es decir, la sensación que producen, los efectos que generan, las distorsiones experimentadas, y la dificultad a la hora de ser visualizados.

El corazón y la letra E, al ser dos figuras muy distintas, una de ellas con formas suaves y redondeadas y la otra con formas abruptas y rectangulares, es de esperar que originen resultados y efectos bastante diferentes. Esto es lo que veremos a continuación, mediante la visualización adecuada de los dos autoestereogramas *hidden image* creados.

El primer aspecto a estudiar es el tiempo y la complejidad de visualización. Para poder obtener resultados concluyentes, pediré a 6 personas que intenten visualizar ambos estereogramas y cronometraré el tiempo que tardan en lograrlo. Una de estas personas soy yo. He decidido realizar el experimento con pocas personas porque me es muy difícil encontrar a gente que pueda visualizar estereogramas.

Después de haber estudiado el primer factor, procederé a comparar los efectos visuales generados por ambos estereogramas.

Resultado:

Las mediciones de los tiempos tardados por las seis personas para visualizar los autoestereogramas *hidden image* son muy distintos, porque hay sujetos más y menos entrenados en esta práctica. Los resultados se muestran en la tabla siguiente:

	Autoestereograma de imagen escondida del corazón	Autoestereograma de imagen escondida de la letra E
Sujeto 1	13 segundos	20 segundos
Sujeto 2	172 segundos	200 segundos
Sujeto 3	31 segundos	26 segundos
Sujeto 4	9 segundos	12 segundos
Sujeto 5	22 segundos	21 segundos
Sujeto 6	42 segundos	57 segundos

A partir de los datos de la tabla, vemos que el autoestereograma de imagen escondida del corazón se visualiza de forma más fácil y rápida.

Ahora veamos las diferencias en los efectos visuales de los autoestereogramas.

En la letra E, el efecto generado es muy marcado, se ve una letra E emergiendo bastante del soporte. Está ligeramente inclinada y la parte derecha del carácter aparece más cercana al observador que la parte izquierda. Se aprecia claramente la unión del fondo con la letra E, es decir, la letra E no flota, sino que su parte más lejana está “pegada” al fondo, que es el lugar de donde sale. Se advierte una gran diferencia de profundidad entre el fondo y la parte más cercana de la figura.

En el corazón, sin embargo, el impacto visual y el efecto estereoscópico no son tan pronunciados ya que, al ser una forma menos marcada, la diferencia de profundidades sucede en menor medida y no es tan brusca, es más gradual. El corazón emerge en el centro del autoestereograma, y su parte central sobresale más que su exterior. La unión entre el fondo y el corazón se distingue menos. Esa sensación de que la figura surge desde el fondo no está tan presente.

Conclusión:

Por todo lo explicado, deduzco que el impacto producido por la letra E es mayor y mejor que el generado por el corazón, y en consecuencia, concluyo que las formas más marcadas y abruptas proporcionan un efecto estereoscópico óptimo, así como una sensación de realidad superior a la de las formas suaves y, por lo tanto, son las idóneas para la creación de autoestereogramas *Hidden Image*. Sin embargo, el estereograma de imagen escondida del corazón se visualiza más rápidamente. En consecuencia, se verifica la hipótesis.

8.10 Experimento 9: Creación de un autoestereograma *object array* de un corazón

Previamente, he explicado la creación de un estereograma *hidden image* con un corazón tridimensional escondido. A continuación, voy a explicar algo bastante parecido: la creación de un autoestereograma *object array* con corazones tridimensionales a percibir. Esto me permitirá comprobar que el procedimiento de creación realmente es efectivo y da lugar a imágenes con un efecto tridimensional escondido. También analizaré la complejidad de visualización del autoestereograma obtenido.

Hipótesis:

Es posible crear un autoestereograma *object array* a nivel doméstico, sin material caro e inaccesible y que produzca un efecto apropiado y acertado.

Material:

- Patrón o estampado
- Corazón tridimensional o software de modelado 3D
- *Meshlab*
- *Photoshop*
- *Stereogram Lab*

Metodología:

En primer lugar, crearé un autoestereograma *object array* con un patrón formado por un corazón.

Después, el autoestereograma será visualizado adecuadamente para comprobar que es efectivo y que produce el efecto buscado, es decir, que los corazones que conforman el patrón sobresalgan de la imagen.

Realización:

El procedimiento que he ejecutado en la creación del estereograma *object array* explicado es muy parecido al del *hidden image*, porque ambos estereogramas utilizan un patrón y un mapa de profundidad, aunque difieren en un paso al final.

1. Primeramente, he seleccionado un estampado. En este momento es importante tener en cuenta que en los *object array*, las figuras o elementos que se perciben a diferente profundidad deben estar dentro del patrón. Por esta razón, he creado un estampado, con photoshop, formado por un corazón como elemento central y parte de un electrocardiograma como fondo.



Patrón del autoestereograma object array

2. A continuación, he seleccionado un corazón tridimensional premodelado, el mismo que en la creación del autoestereograma de imagen escondida.
3. Después, he creado un mapa de profundidad del corazón. Su proceso de creación puede ser consultado en el anexo 4.
4. Por último, he introducido el mapa de profundidad y el estampado en el programa *Stereogram Lab* y he renderizado el estereograma.

Resultados:



Autoestereograma object array para visión paralela²⁵

El estereograma de arriba es el resultado del procedimiento explicado. Se perciben grandes distorsiones en el patrón como resultado del desplazamiento de píxeles, mayores que en el experimento anterior porque, en este, se renderiza el estereograma de modo que todos los corazones se perciban a una profundidad diferente que el fondo. Se advierten mayores distorsiones en el fondo porque no es monótono ni continuo, mientras que los corazones lo son en mayor medida.

La principal diferencia de estos estereogramas respecto al subtipo anterior es que, en este caso, los corazones se encuentran visibles a simple vista. Las figuras se encuentran repetidas veces en el estereograma, porque forman parte del patrón. Lo que hay que percibir en este estereograma no es una imagen escondida, sino una profundidad escondida. Hay que percibir los corazones con un efecto tridimensional y una profundidad diferente a la del fondo.

Este estereograma, al igual que el anterior, está hecho para ser visto con la técnica de visión paralela. De este modo, al visualizarlo con este tipo de visión, percibimos todos los corazones que conforman el estereograma emergiendo del soporte y como si cada uno de ellos estuviera sobre otro corazón conformado por las rallas azules del patrón. Si visualizamos este mismo estereograma utilizando la técnica de la visión cruzada, los corazones aparecen hundiéndose desde el fondo.

Conclusión:

Después de visualizarlo adecuadamente, junto con otra persona, puedo afirmar que la hipótesis se ratifica. Es posible crear un autoestereograma object array con elementos domésticos y habituales que produzca los efectos buscados al ser visualizado correctamente.

8.11 Experimento 10: Creación de un autoestereograma object array de una letra E

Con el objetivo de corroborar la hipótesis anterior, y de verificar que se cumple en varios casos y condiciones, voy a realizar un experimento muy similar al anterior.

Hipótesis:

Es posible crear un autoestereograma *object array* con elementos domésticos que genere un efecto acertado al ser visualizado de forma adecuada.

²⁵ Anexo 9 imagen 27

Material:

El material utilizado es el mismo que en la creación del autoestereograma *object array* de los corazones.

Metodología:

La metodología es prácticamente la misma que en la creación del autoestereograma *object array* de los corazones, aunque en esta ocasión vamos a crear un autoestereograma *object array* de una figura distinta, una letra E.

Realización:

Los pasos para la creación del autoestereograma son los mismos que en el experimento anterior, en el que se crea un autoestereograma *object array* de un corazón, aunque sustituyendo el modelado (en mi caso en *Truespace*) y mapa de profundidad de un corazón por el de una letra E, y cambiando el estampado o patrón de un corazón por el de una letra E, en esta ocasión también con un fondo distinto.

Resultado:

*Autoestereograma object array para visión paralela*²⁶

Sobre este texto observamos el estereograma creado. Como en todos los autoestereogramas (aunque en los de puntos aleatorios no sea perceptible), existe una clara deformación de la imagen como resultado del desplazamiento de píxeles, que esta vez se aglutinan en la letra E y no en el fondo. En la parte izquierda del estereograma, las distorsiones se concentran a la izquierda de la letra E, y a medida que movemos nuestra vista hacia la parte derecha de la imagen, advertimos que las distorsiones también se desplazan hacia la derecha de la letra E. En el fondo del patrón, al ser bastante caótico, las deformaciones se notan muy poco, factor favorable para la imagen bidimensional generada.

El estereograma expuesto arriba está hecho para visión paralela. Al visualizarlo adecuadamente, vemos las 6 letras E que conforman el estampado sobresalir del fondo, y unas sombras sutiles proyectadas a la profundidad del soporte.

Conclusión:

De nuevo, la hipótesis se confirma. Es posible crear estereogramas *object array* a nivel doméstico en varias condiciones, sin necesidad de utilizar elementos inaccesibles y caros. Se obtiene un autoestereograma con un efecto acertado cuando se visualiza convenientemente.

²⁶ Anexo 9 imagen 29

8.12 Experimento 11: Comparación entre dos autoestereogramas *object array* con formas opuestas

Aprovechando la creación, en los experimentos 9 y 10, de dos autoestereogramas *object array* con formas opuestas, vamos a llevar a cabo un tercer experimento basado en su comparación.

Hipótesis:

Un autoestereograma *object array* con formas más suaves y poco definidas es más fácil de visualizar en tres dimensiones que uno con formas marcadas y rectangulares.

Metodología:

Este experimento se basa en la creación de dos autoestereogramas *object array*, ambos con patrones y mapas de profundidad distintos, y de su posterior comparación.

En los estereogramas *object array*, el elemento que queremos que sobresalga, que tenga una profundidad distinta al resto, está presente en el patrón. Este elemento es distinto en los dos autoestereogramas creados. He escogido dos figuras contrarias en muchos aspectos, para que los efectos producidos sean lo más diferentes posible y para comprobar la veracidad de la hipótesis. Estas dos figuras son un corazón, por su perfil redondeado, y una letra E, por su estructura rectangular. En los experimentos 9 y 10 puede consultarse la creación de autoestereogramas *object array* con estas imágenes, por lo tanto, en este apartado me centraré en su comparación, sobre todo en lo que respecta al impacto visual generado y al tiempo necesario para experimentar la sensación que los caracteriza.

El primer aspecto a estudiar y comparar es la dificultad y el tiempo de visualización de ambos estereogramas. Para obtener resultados definitivos, agruparé a 6 personas – incluyéndome a mí misma- para que visualicen los estereogramas, con la intención de cronometrar el tiempo tardado en conseguirlo.

Después, seguiré con la comparación de los efectos visuales producidos por los dos estereogramas.

Resultado:

De las seis personas escogidas para realizar el experimento, solamente una de ellas ha sido capaz de visualizar este tipo de estereogramas.

A continuación se exponen los tiempos requeridos por las seis personas escogidas para visualizar los dos autoestereogramas *object array* creados.

	Autoestereograma <i>object array</i> del corazón	Autoestereograma <i>object array</i> de la letra E
Persona 1	13 segundos	20 segundos
Persona 2	No lo ha visto	No lo ha visto
Persona 3	No lo ha visto	No lo ha visto
Persona 4	No lo ha visto	No lo ha visto
Persona 5	No lo ha visto	No lo ha visto
Persona 6	No lo ha visto	No lo ha visto

A raíz de los datos presentados en la tabla anterior, se advierte que el autoestereograma *object array* compuesto por el patrón del corazón ha sido visualizado por el sujeto de forma más sencilla que el formado por el patrón de la letra E.

Ahora vamos a analizar la sensación visual generada por los estereogramas. En el primer autoestereograma, los 6 corazones rojos emergen del fondo, y se observa en la base una especie de silueta del corazón, una aureola estampada como el resto del fondo (con rallas azules) situada detrás del corazón, a la misma profundidad que el soporte. En el segundo autoestereograma, también se observan las 6 letras E sobresaliendo del fondo, aunque en el fondo también se ven algunas partes de la letra, con su mismo color, que parecen ser sombras del carácter que emerge.

Los efectos originados por el autoestereograma de corazones son más impresionantes y sorprendentes.

Cabe destacar que, en ambos casos, la figura sobresaliente tiene un aspecto aproximadamente llano, es decir, no hay demasiada gradación de profundidades en ninguno de los dos autoestereogramas.

Conclusión:

En base a los resultados obtenidos se concluye que, pese a que los autoestereograms *object array* son todos bastante difíciles de visualizar, los que están formados por corazones o, si lo expresamos de modo más genérico, las formas suaves y redondeadas, son más fáciles de visualizar y proporcionan un mejor efecto que las formas rectangulares y marcadas. Aunque aparentemente la hipótesis queda ratificada, con un solo individuo que haya visto las imágenes no podemos extraer conclusiones. Se necesita una muestra social más numerosa.

8.13 Experimento 12: Creación de un coche holográfico

En el apartado de holografía de este trabajo, hemos visto de un modo detallado el procedimiento genérico de creación de hologramas. En este experimento, vamos a ponerlo en práctica y a comprobar hasta qué punto es efectivo y genera los resultados esperados. Para conseguirlo, crearemos un holograma que contenga la información tridimensional de varios planos de un coche.

Hipótesis:

Es posible realizar hologramas de forma fácil, a nivel doméstico, y obtener figuras claras y nítidas.

Material:

- Kit de holografía
- Objeto pequeño y rojo en forma de coche
- Mesa o superficie sólida y estable
- Habitación totalmente oscura

El kit de holografía contiene todo lo necesario para hacer un holograma: la base, el láser, las placas holográficas, una luz azul de seguridad, etc. Las placas poseen la peculiaridad de que se revelan durante la exposición a la luz del láser, por lo que no requieren de productos específicos de revelado. Esta característica elimina el riesgo de

sobreexposición. El kit también viene con un objeto de prueba, un coche rojo, que es el que vamos a utilizar en este caso.

Metodología:

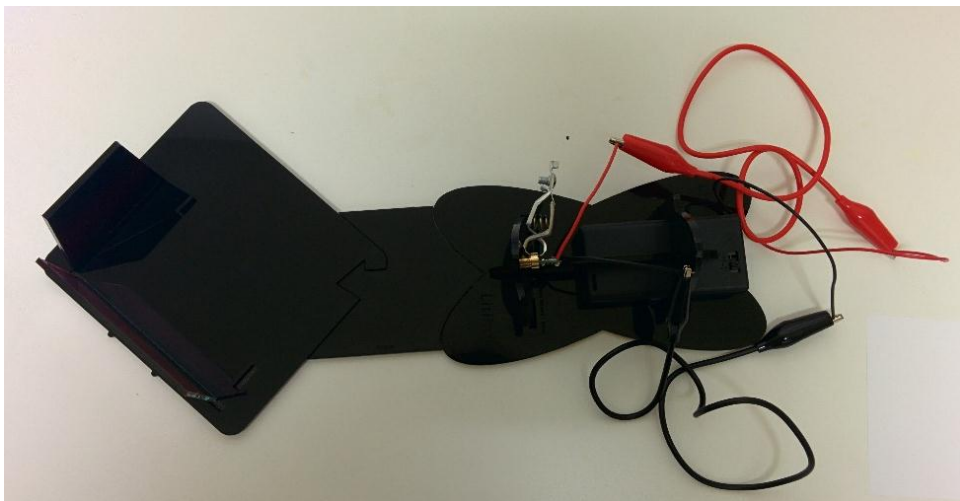
En este experimento crearé un holograma de un pequeño coche rojo, y después procederé a la descripción y análisis de la imagen virtual reproducida al reconstruirlo.

Realización:

La creación de un holograma es más complicada que la de un estereograma, porque necesita de muchos más materiales y su proceso de creación requiere de un número de condiciones considerable, que además son bastante específicas.

A continuación voy a explicar los pasos que he seguido para crear un holograma con el kit de holografía y un objeto pequeño en forma de coche.

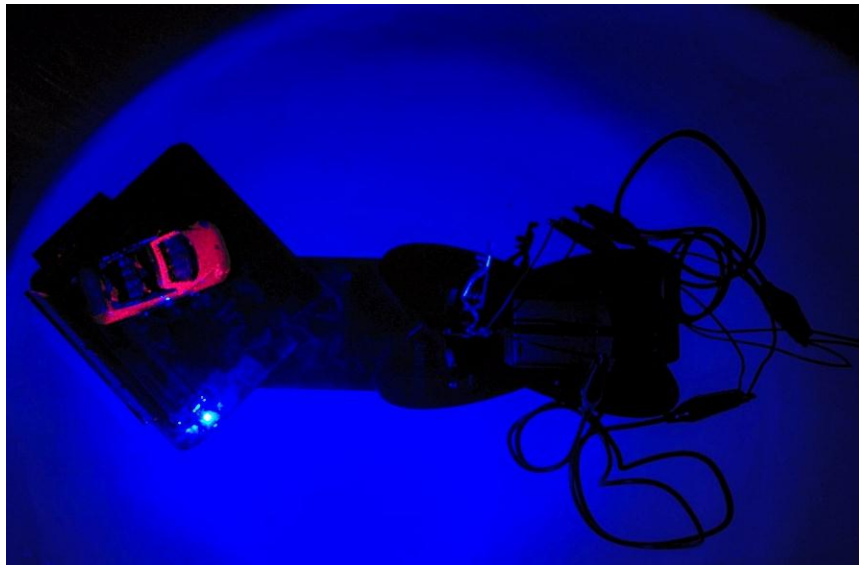
1. Para comenzar, he seleccionado el objeto a holografar, en este caso un pequeño coche rojo, ya que las placas holográficas disponibles son pequeñas y el rojo, al coincidir con el color de la luz del láser, es el color que da mejores resultados.
2. En segundo lugar, he montado la base para hacer el holograma y he colocado todos los elementos según las instrucciones



Base montada

3. Después, he encendido el láser y he dejado que se calentase durante 5 minutos aproximadamente.
4. Mientras, he colocado el objeto a holografar y un cristal de prueba del tamaño de la placa holográfica en su lugar correspondiente. He ido moviendo el ángulo de incidencia del láser y el objeto para asegurar que el láser incidía sobre el objeto y la placa.
5. En este momento, he colocado un trozo de cartulina negra delante del láser a modo de obturador y he apagado la luz, dejando la habitación completamente a oscuras.

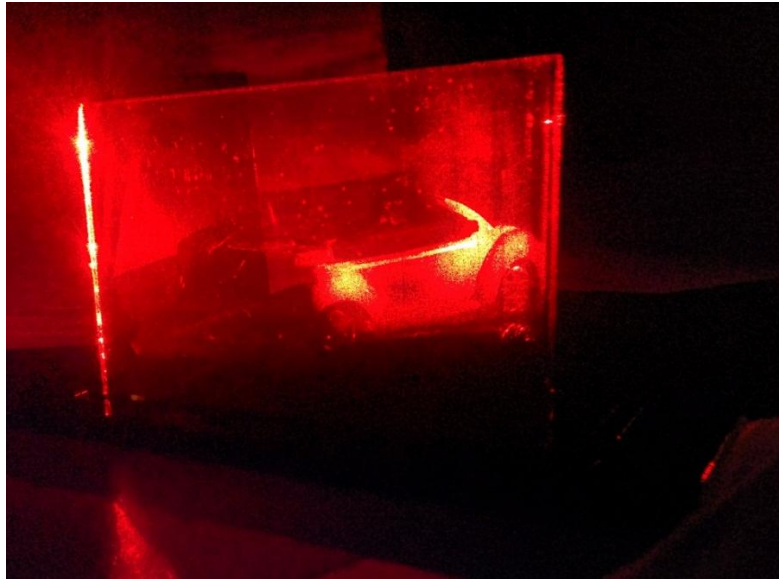
6. He encendido la luz azul de seguridad, para permitir la visibilidad sin afectar negativamente el holograma. Después, he abierto la caja de placas holográficas (es muy importante que este paso se haga a oscuras, dado que la exposición de las placas a la luz haría que se revelaran y dejaran de ser válidas), he sacado una y he cerrado bien la caja. He colocado la placa en su lugar correspondiente, en sustitución del cristal de prueba.
7. He esperado unos tres minutos en una posición estática a que cualquier vibración o ruido se minimizara. Pasado este tiempo, he quitado la cartulina negra, permitiendo la incidencia de la luz del láser sobre el objeto y la placa.



Exposición de la placa holográfica

8. Llegados a este punto, he esperado unos 15 minutos sin hacer ningún ruido o movimiento y a continuación, he colocado la cartulina negra de nuevo delante del láser, impidiendo el paso de la luz.
9. En este instante, he quitado el coche de su sitio y después he quitado la cartulina negra, dejando viajar la luz de nuevo hasta la placa holográfica. ¡Y ya tenemos el holograma acabado! Ahora ya puede encenderse la luz, aunque es recomendable observar la imagen virtual holográfica con poca luz.

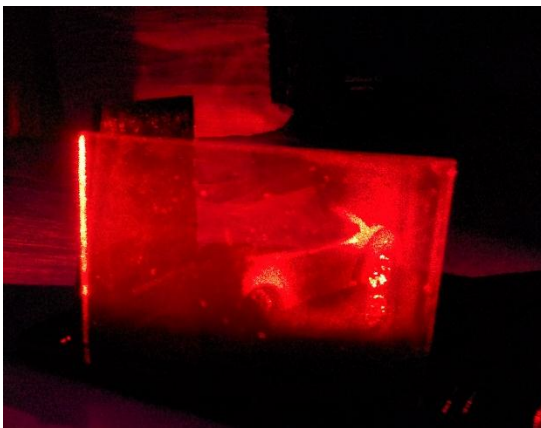
Resultado:



Holograma reconstruido

Esta es la representación tridimensional del coche original fruto de la reconstrucción del holograma.

En la representación holográfica del coche, percibimos el objeto en su forma tridimensional sin necesidad de utilizar ningún aparato o de realizar ningún esfuerzo adicional. En la fotografía expuesta arriba, no puede apreciarse la tridimensionalidad del objeto holográfico porque la fotografía es un medio de almacenamiento y reproducción de imágenes bidimensional. Cabe destacar que este holograma está hecho a muy pequeña escala y a nivel doméstico, por lo que no se disponen de tantos aparatos ni de unas condiciones tan precisas como puede ser en los centros o laboratorios de holografía. Por eso, los resultados no son tan perfectos ni reales como lo serían en estos centros especializados, pero teniendo en cuenta que la holografía se basa en la reconstrucción del frente de onda original generado por el objeto, deberían serlo si todas las condiciones fuesen las correctas. Aun así, los resultados son muy reales, así que, ¡imaginemos como serían si se cumplieran todos los requerimientos!



Diferentes perspectivas del holograma reconstruido

Sobre este texto podemos ver diferentes perspectivas del coche reconstruido, vistas a través del holograma, que actúa como una ventana a la reproducción del objeto. El holograma es del color de la luz del láser, es decir, rojo, porque todas las ondas que llegan a la placa holográfica procedentes del láser son de una única longitud de onda, que equivale al color rojo. Esta monocromía debilita el efecto de realidad producido por el holograma. Sin embargo, es necesario tener en cuenta que es posible hacer hologramas policromos, aunque es más complicado, porque hace falta disponer de láseres de varios colores. Además, si el objeto a holografar es rojo, como en este caso, la monocromía no es un gran problema.

Por todo lo explicado, vemos que el resultado obtenido es muy real, y tridimensional.

Conclusión:

La hipótesis se verifica parcialmente. Sí que es posible realizar hologramas a nivel doméstico, como hemos comprobado en este experimento, pero no de forma fácil. La creación de hologramas es complicada, requiere de unas condiciones muy específicas y de material e instrumentos caros.

Experimento con un corazón y una letra E:

Con el objetivo de constatar completamente la efectividad del método holográfico, había decidido crear varios hologramas utilizando objetos diversos, con propiedades contrarias entre ellos. Escogí un pequeño corazón rojo y una pequeña letra E roja.

Los primeros experimentos los realicé con el corazón, y lo que obtuve fue parte de su silueta, aunque poco marcada. El corazón no se apreciaba en la medida en que debía. Con este objeto realicé bastantes pruebas y obtuve resultados muy parecidos y cada vez peores.

Después, llevé a cabo algún experimento con la letra E. Lo que obtuve fue similar al caso anterior, aunque aún peor. La imagen virtual generada tenía partes de la silueta de la letra E, pero muy poco visibles y en muy pocas zonas. No pude realizar muchas pruebas con la letra E porque enseguida se me estropeó el láser. La luz que sacaba era muy débil, con una diferencia notoria respecto a la que emitía inicialmente. Después de realizar un intento de grabación del holograma con este láser, exponiendo la película holográfica por el tiempo necesario, la placa no se había revelado, seguía del color inicial y, en consecuencia, al reconstruirlo, no se veía absolutamente ninguna parte de la figura original.

La conclusión es que el láser que venía con el kit era defectuoso, ya que se fue degradando paulatinamente hasta que dejó de funcionar correctamente.

Para solucionar este problema, decidí comprar otro láser e hice varias pruebas de hologramas con la letra E. En todas pasó lo mismo, la placa no se revelaba, se mantenía del color azul inicial y no cambiaba a un color rojizo. Al reconstruir el holograma, no se veía nada, ninguna parte del objeto original. Parecía como si al láser le faltara potencia.

Inicié el proceso para obtener un láser de reemplazo desde la casa donde lo compre, pero este, debido a que la compra fue por internet y en el extranjero, está resultando muy dificultoso, de forma que aún no dispongo de un nuevo láser.

Debido a estas dificultades, me fue imposible crear mis propias figuras holográficas con formas diferentes y contrarias, así como realizar experimentos de comparación. He tenido que conformarme con los primeros que realicé con el coche.

9 CONCLUSIÓN

Después de haber creado varios hologramas y estereogramas, y experimentado todo el procedimiento necesario para obtener un resultado adecuado, ya puedo extraer varias conclusiones respecto a las técnicas ejecutadas, y comprobar si las hipótesis expuestas al inicio del trabajo se verifican.

Aunque ya he extraído pequeñas conclusiones en cada experimento, en este apartado voy a exponer conclusiones globales destacando y comparando numerosos aspectos de ambas técnicas.

En primer lugar, he constatado que, con los elementos disponibles en la actualidad, la técnica holográfica es bastante más difícil de ejecutar que la estereoscópica. No solamente requiere de unas condiciones mucho más numerosas y específicas (oscuridad, ausencia de vibraciones, coherencia de la luz, etc.), sino también de más tiempo y material. Cabe destacar que el tiempo que yo he necesitado no es el habitual, porque mis placas se revelaban con la acción luminosa, a diferencia de las convencionales. La creación de estereogramas, no obstante, no requiere de condiciones especiales ni de un número elevado de instrumentos y materiales.

Un factor que obstaculiza aún más la creación de hologramas a nivel doméstico es la falta de disponibilidad de los elementos necesarios en el mercado interior. Sin embargo, este factor no afecta a la estereoscopia, pues puede ser ejecutada mucho más fácilmente, ya que su creación precisa de un número bastante más pequeño de herramientas y materiales, que además son muy habituales y casi todos tenemos en nuestras casas (un ordenador, una cámara fotográfica, etc.). Asimismo, existen programas y páginas web que facilitan mucho la tarea.

En consecuencia, las técnicas estereoscópicas son realizables a nivel doméstico. En cambio, la complicación técnica de la holografía hace que, aun existiendo kits que simplifican la realización de hologramas, el que los usa está totalmente a merced del kit, dado que, por su complejidad, cualquier defecto de funcionamiento no tiene posibilidad de solución. La holografía doméstica se asemeja pues, más a cualquier otra tecnología para la que se adquieren aparatos completos (por ejemplo un televisor).

El segundo factor a destacar es el resultado visual logrado, la sensación tridimensional generada y la emulación de la realidad conseguida, que al fin y al cabo es el objetivo principal de estas tecnologías y, en consecuencia, la cuestión más relevante.

Respecto a este asunto, concluimos que la holografía consigue una representación tridimensional del objeto más lograda y con una apariencia más real. Esto se debe a que la holografía, a diferencia de la estereoscopia, reproduce varias perspectivas del objeto, conserva las texturas e incluso puede llegar a preservar los colores, aunque no es lo habitual hoy en día. Otro punto que contribuye a esta sensación es el hecho de que en la holografía no se tenga que realizar ningún esfuerzo visual para apreciar la tridimensionalidad. En la estereoscopia, como se parte de la visión de una imagen bidimensional, esta puede influir en la idea que se tiene sobre lo que va a percibirse.

Por otro lado, el sentimiento de sorpresa es mucho mayor en la estereoscopia, precisamente por el hecho de que se parte de una imagen bidimensional. El observador no se espera lo que va a aparecer delante de sus ojos y, si es principiante y no ha experimentado nunca antes esta sensación, no cree que sea posible conseguir algo así mediante una imagen con apariencia normal. Por eso, al ver el cambio de una imagen

“corriente” a un objeto en tres dimensiones, se produce una sensación de asombro y fascinación.

El estudio realizado sobre la realidad virtual, me ha permitido observar el gran potencial que la representación de mundos tridimensionales tiene aún por recorrer. Después de tratar simplemente el hecho de que las imágenes, como las reales, sean tridimensionales, aún hay que añadir oído, tacto, gusto, olfato, interacción, etc., para conseguir una reproducción fiel de la realidad. Por otra parte la tecnología empleada es aún difícil y muy cara.

ANEXOS

ANEXO 1: Fórmulas para calcular la distancia interaxial

Existen varias fórmulas y ecuaciones que se utilizan para calcular la base estereoscópica o distancia interaxial óptima, es decir, aquella que permite conseguir el máximo efecto estereoscópico sin producir distorsiones en la imagen o alterar la sensación generada.

Símbolos

B= Base estereoscópica o distancia interaxial: es la separación máxima entre el centro de las lentes de ambas cámaras o la cámara entre las dos tomas de manera que la pareja estereoscópica resultante no exceda el máximo paralaje aceptable.

P= Máximo paralaje lineal (en mm): es el paralaje máximo expresado en milímetros. Es la máxima desviación aceptable, es decir, la diferencia entre el mayor desplazamiento de la imagen (producido por el objeto más cercano) y el menor (producido por el objeto más lejano) en el carrete o el chip. La máxima desviación aceptable coincide con 1/30 de la distancia focal de la cámara o del carrete o sensor de la imagen.

L= Distancia, expresada en milímetros, de la cámara al objeto más lejano

N= Distancia, expresada en milímetros, de la cámara al objeto más próximo

F= Longitud focal de la lente (en mm): distancia desde el centro óptico de la lente hasta el punto focal, en el que se cruzan los rayos procedentes del objeto. Si el objeto está en el infinito, los rayos que emite son paralelos y el punto focal se encuentra en la película o sensor de la cámara.

i = Distancia interpupilar (habitualmente 65 mm)

V = Distancia de observación de la pareja estereoscópica

H = Distancia hiperfocal: distancia de enfoque con mayor profundidad de campo, con mayor nitidez (La profundidad de campo se extiende desde la mitad de esta longitud hasta el infinito)

Fórmulas

En primer lugar, podemos utilizar la famosa regla del 1/30. Esta se deduce a partir de los trabajos de Brewster y consiste en establecer un treintavo de la distancia del objetivo de la cámara al objeto más cercano como base estereoscópica.

$$B = N/30$$

Esta ecuación es poco precisa, y por su simplicidad, carece de exactitud.

La fórmula más exacta y completa, ya que tiene en cuenta una gran cantidad de parámetros, es la fórmula de Bercovitz.

$$B = P(LN/(L-N)) (1/F - (L+N)/2LN)$$

Cuando $L = \infty$, entonces la fórmula de Bercovitz se simplifica a:

$$B = P (N/F - 1/2)$$

La fórmula de Bercovitz, sin embargo, presenta ciertos errores. Hay varios científicos que han trabajado para corregir estos errores y conseguir más precisión en situaciones determinadas.

Uno de estos científicos es Michael K. Davis. En fotografía macroestereoscópica con imágenes de primer plano poco profundas, la fórmula de Bercovitz determina una distancia interaxial muy grande. Esto distorsiona la profundidad percibida al visualizar la pareja estereoscópica. Para solucionar este problema, Davis estableció que en los casos en los que la distancia de la cámara al objeto más lejano es menor que el doble de la distancia de la cámara al objeto más cercano ($L < 2N$) se ajusta la fórmula de Bercovitz, imponiendo arbitrariamente **$L = 2N$** .

Después se presentó otro obstáculo: las formas redondas solían distorsionarse al visualizar la imagen. Para asegurar la percepción de la redondez correcta y de una forma estereoscópica realista, Wattie realizó otra modificación a la fórmula de Bercovitz, que derivó en la siguiente fórmula:

$$B = N * i / V.$$

De esta fórmula se deduce que la distancia entre los ejes ópticos de las cámaras va a ser distinta según la distancia a la que pretendamos observar las imágenes.

Frank Di Marzio creó una ecuación, derivada de la fórmula de Bercovitz, que permite calcular la distancia interaxial a partir de la distancia hiperfocal.

$$B = H / 60.$$

La ecuación anterior se utiliza en los casos habituales en los que $L \geq 2N$. En caso contrario ($L < 2N$, para la fotografía macroestereoscópica), di Marzio, basándose en el trabajo de Michael K. Davis, concluyó que:

$$B = N / 15$$

Cabe destacar que esta fórmula contradice la fórmula de Brewster o regla del 1/30.

Más recientemente, Pierre Meindre ha creado una página web (<http://pmeindre.free.fr/BaseCalc.html>) consistente en una calculadora que determina la distancia interaxial requerida para la toma de dos fotografías estereoscópicas. Los cálculos se basan en la fórmula siguiente (derivada de la fórmula de Bercovitz):

$$B = (P/F) * (LN/(L-N))$$

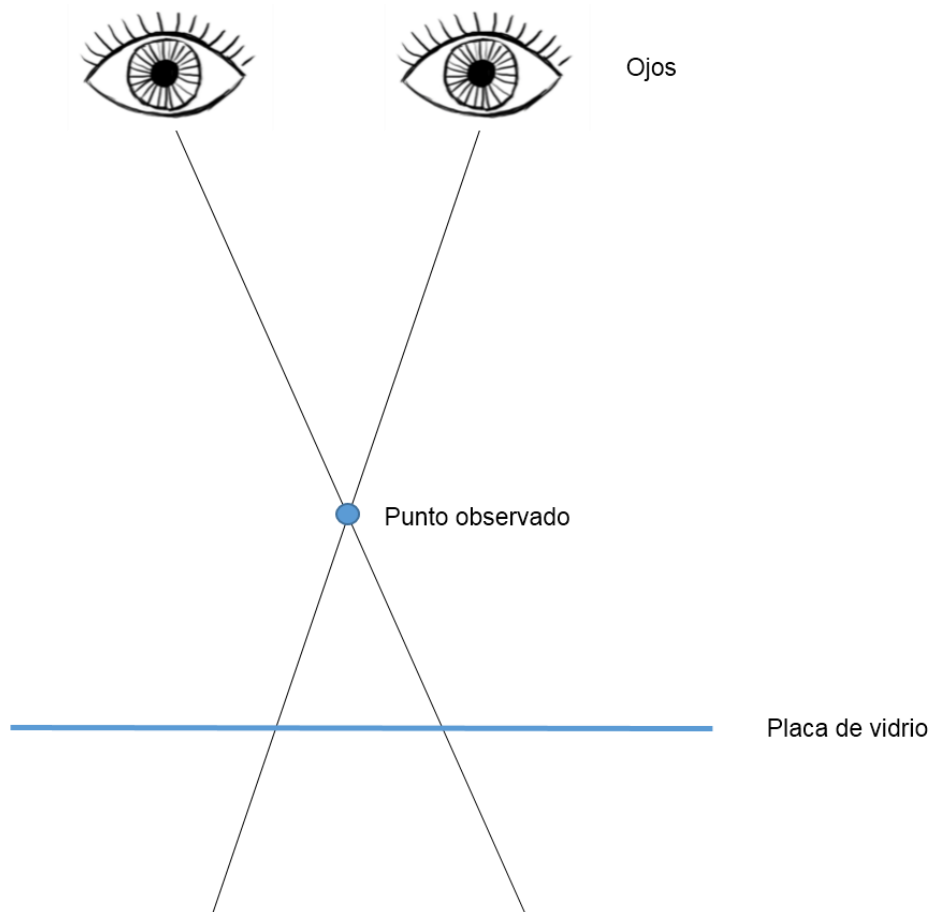
Sin embargo, la fórmula de Meindre tiene sus limitaciones, y es que solo funciona si la distancia de la cámara al objeto más cercano es mucho menor que la distancia focal del objetivo de la cámara. En consecuencia, no es válida para fotografías de primer plano ni para fotografía macroestereoscópica.

ANEXO 2: Base de los autoestereogramas (para visión cruzada)

La base de los autoestereogramas es, de hecho, la misma para cualquier técnica visual. Solamente difiere en un aspecto, y es en el lugar en que aparece la imagen o píxel visualizado.

La explicación basada en la placa de vidrio sirve también para la técnica de visión cruzada si cambiamos ciertas condiciones. En este caso, la placa debería colocarse de nuevo en la línea que une el punto observado con el ojo, pero más allá de este punto, como muestra el gráfico. Los puntos en los que se cruzan los rayos de luz con la placa (detrás del punto observado) son los que posteriormente se dibujan en el papel, representando dos píxeles homólogos de un autoestereograma.

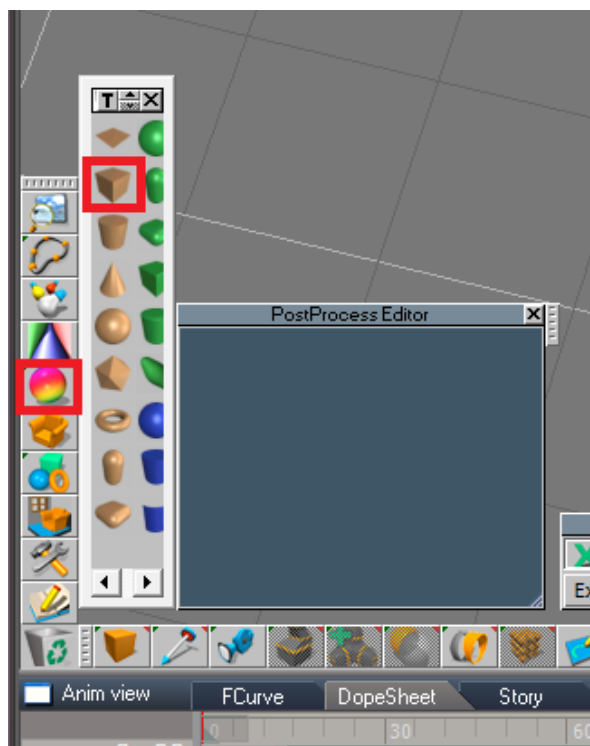
Entonces, el que utiliza la visión convergente o visión cruzada ve el punto resultante de la fusión cerebral de los dos píxeles en el lugar en el que convergen sus ojos, por delante de la imagen.



ANEXO 3: Cómo modelar una letra E tridimensional

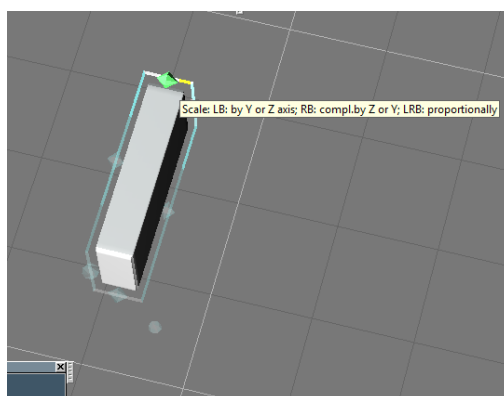
A continuación, explicaré los pasos a seguir para crear un modelo tridimensional de una letra E utilizando el programa *Truespace*.

1. Abrir el programa Truespace.
2. Seleccionar la opción “color shaders” (en la parte izquierda de la pantalla) y, dentro del menú desplegable abierto, la opción “cube”. La imagen inferior muestra recuadradas en rojo las opciones a escoger.



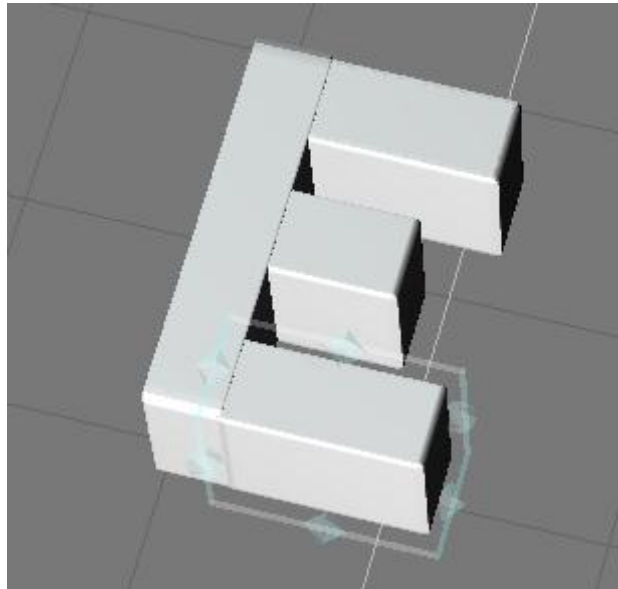
Opciones escogidas

3. Crear un cubo con la medida deseada. Será el “tronco” de la letra E. Pueden ajustarse las dimensiones del cubo haciendo *click* sobre él con la herramienta “object tool” y arrastrando con el ratón las líneas azules que lo rodean.



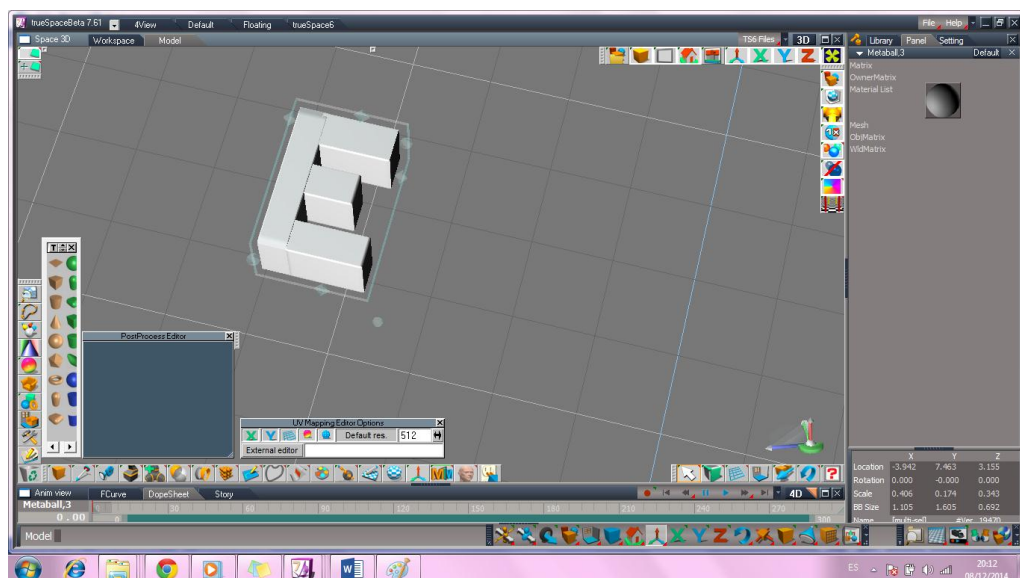
Tronco de la letra E

4. Crear tres cubos perpendiculares al tronco de la letra E. Serán las “patas” de la letra E. Dos de ellas deben ser de igual tamaño y estar unidas a los extremos del tronco y una de ellas debe ser un poco más corta y estar unida al centro del tronco. Puede utilizarse la herramienta “object tool” para mover los cubos, arrastrándolos.



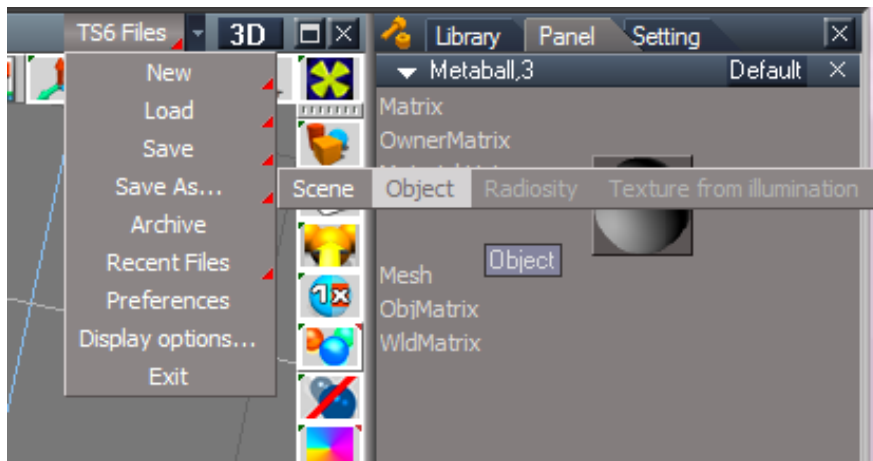
Tronco y tres patas de la letra E

5. Seleccionar los 4 cubos que conforman la letra E haciendo *click* en ellos con la herramienta “object tool” manteniendo la tecla control apretada.

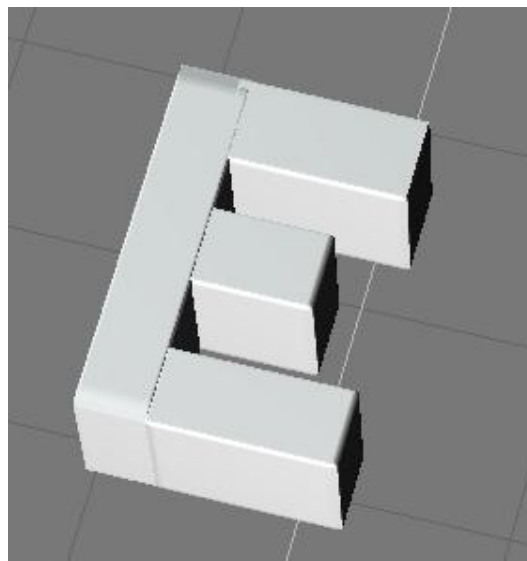


Letra E seleccionada

6. Guardar la letra E como objeto en formato 3ds.



Opción de guardado



Letra E acabada

ANEXO 4: Cómo crear un mapa de profundidad

A continuación, se explican los pasos a seguir para crear un mapa de profundidad de un objeto, partiendo de un modelo tridimensional. Se divide el proceso en dos partes, la primera parte en el programa *meshlab* y la segunda en *photoshop*.

➤ En meshlab

1. Importamos a meshlab el modelo tridimensional creado.
2. Escogemos *render* → *shaders* → *depthmap.gdp*. Esto creará un mapa de profundidad de la imagen.
3. Se abrirá una ventana en la que pone “form”. Ve a la parte “Uniform Variables” y ajusta el *zmaz* y *zmin* hasta que quede como deseas, teniendo en cuenta que deberás otorgar un valor mayor a *zmin*, para que las partes más cercanas sobresalgan de la imagen en visión paralela.
4. Mueve la imagen hasta que quede en la posición que prefieras.
5. Haz click en *view* → *Trackball* → *Show Trackball*. Esto hará que las líneas de alrededor del modelo desaparezcan. Si el modelo es grande y es necesario, quita la barra lila inferior haciendo click en *view* → *Info* → *Show Info Panel*.
6. Haz una captura de pantalla de la imagen y recorta un rectángulo que contenga el modelo. Guarda la imagen y ábrela en Photoshop.

➤ En photoshop

7. Marca la silueta del modelo con el lazo magnético o la varita mágica, haz *click* en el botón derecho del ratón y escoge *select inverse*. Después, vuelve a hacer *click* en el botón derecho del ratón y escoge *layer via cut*. Se creará una capa nueva “layer 2”.
8. Suprime la nueva capa. Ahora tienes la letra con un fondo negro.
9. Si quieres cambiar el tamaño de la imagen selecciona *Image* → *Image Size*, y pon tus medidas deseadas. Si lo que quieres es aumentar el tamaño de la imagen añadiendo más fondo negro, sin que se modifique lo que tienes hasta ahora, selecciona *Image* → *Canvas Size*. Pon las dimensiones de imagen que quieres y selecciona como “canvas extensión color” el negro.

ANEXO 5. Algoritmos para generar autoestereograms (Páginas web)

Bajo este texto, se presentan 5 páginas web que contienen algoritmos utilizados para la creación de estereogramas.

<http://www.techmind.org/stereo/stech.html>

http://www.garybeene.com/stereo/rds-alg_basic.htm

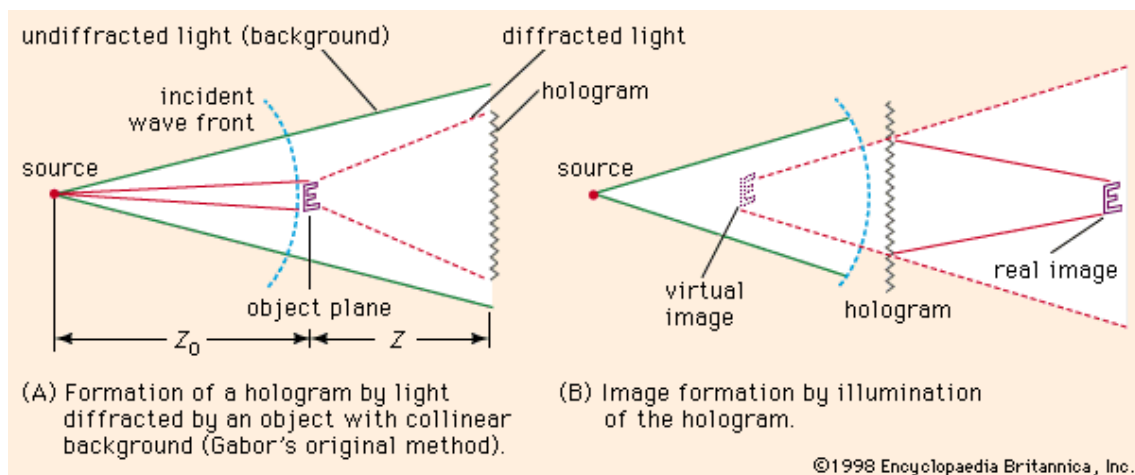
http://scien.stanford.edu/pages/labsite/2003/psych221/projects/03/jgin/say_what.htm

<http://www.nottingham.ac.uk/~etzpc/nz/sirds/creation.html>

<http://www.cs.uu.nl/wiki/pub/USCS/ComputerLab/Stereograms-final.pdf>

ANEXO 6: Historia de la holografía

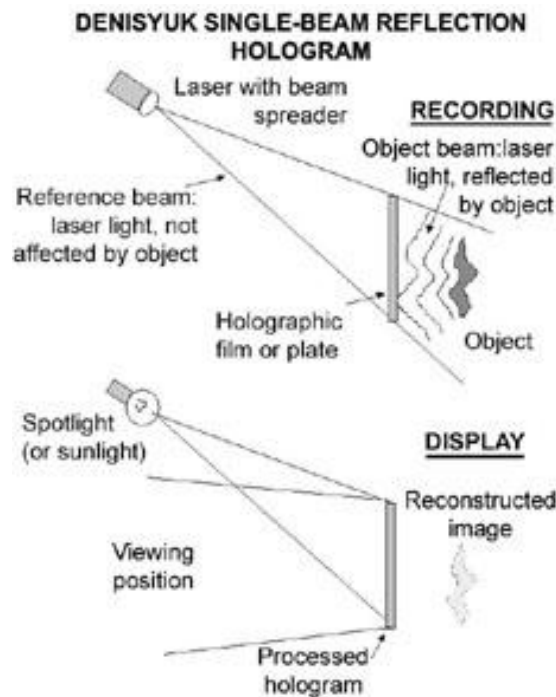
1947 → El físico húngaro-británico Dennis Gabor crea el concepto de holografía (del griego “holos”, que significa completo, y “gramma”, que significa mensaje) en su búsqueda de un método para mejorar la resolución y definición de las imágenes proporcionadas por un microscopio electrónico. Su método holográfico consiste en la reconstrucción del frente de onda de la luz reflejada por un objeto basándose en el fenómeno de la difracción. El primer paso de su método es la grabación sobre una placa fotográfica del patrón de difracción producido por una onda de luz (o haz de electrones en el caso del microscopio electrónico) al pasar por el objeto a representar. El segundo paso consiste en la reconstrucción del frente de onda original haciendo incidir un haz luminoso en la placa previamente revelada. Por aquella década su proyecto no fue exitoso, porque las fuentes de la época no eran verdaderamente coherentes y tenía que utilizar una lámpara de mercurio para sus experimentos, cosa que limitaba la capacidad de obtener profundidad y provocaba distorsiones e imágenes dobles en los hologramas (imagen real e imagen virtual simultáneas). No obstante, su proyecto supuso un nuevo método de creación de imágenes y sentó las bases de la holografía.



1960 → El doctor T. H. Maiman inventa el láser pulsado de rubí. Más tarde en el mismo año, Ali Javan inventa el láser de gas (Helio-Neón), el primer láser de luz continua. El láser, por su alta coherencia, intensidad y monocromía se convierte en la fuente de luz idónea para la creación de hologramas.

1962 → El físico ruso Y. N. Denisuk, que no tiene conocimiento de la labor llevada a cabo por Gabor, crea los primeros hologramas de reflexión, visibles con luz blanca, combinando sus trabajos en el diseño de instrumentos ópticos con los trabajos de Lippman (Premio Nobel de Física de 1908) sobre la fotografía en color. Realiza sus primeros experimentos en 1958 con una lámpara de mercurio y da lugar a un holograma que es observable con una bombilla convencional. La fuente de luz utilizada solamente permitía que realizara hologramas de objetos muy poco profundos, como monedas o espejos. No publica su técnica en la URSS hasta 1962. La técnica de un solo haz de Denisuk consiste en iluminar la placa holográfica con la fuente de luz coherente, con el objeto colocado detrás de ella. La placa utilizada es de grano tan fino que solo absorbe

una pequeña parte de la luz. En consecuencia, el resto de esa luz llega al objeto a representar, que la refleja de nuevo hacia la cara posterior de la placa.



1962 → Los radiofísicos y ópticos Emmett Leith y Juris Upatnieks de la universidad de Michigan se dan cuenta, mientras trabajan en el desarrollo de un radar de exploración lateral, de la posibilidad de conseguir reproducciones tridimensionales de objetos. Enseguida se percatan de que han redescubierto el método holográfico de Gabor. Entonces, deciden probar el procedimiento que habían usado en el desarrollo de esos radares utilizando un láser de Helio-Neón como fuente de luz. El resultado es el primer holograma de transmisión con láser de objetos tridimensionales (de un juguete y un pájaro). Esto da lugar a una nueva técnica denominada holografía de fuera de eje, que es la que se usa actualmente. La técnica consiste en separar el haz de luz utilizado en dos haces: un haz de referencia y un haz objeto. Esto soluciona el problema de las dobles imágenes simultáneas y da lugar a una imagen clara y tridimensional, con profundidad apreciable, pero que debe ser reconstruida con la luz de un láser.

1965 → Tres equipos de trabajo de los Estados Unidos consiguen crear hologramas de reflexión utilizando la técnica de fuera de eje propia, por aquel entonces, de los hologramas de transmisión con láser. N. Hartmann se convierte en dueño de la patente de este proceso.

1965 → Robert Powell y Karl Stetson publican el primer artículo sobre interferometría holográfica, una técnica que permite evidenciar pequeñas distorsiones en los objetos o materiales sin destruirlos, para comprobar su calidad.

1967 → Larry Lambert y la *Conductron Corporation* hacen el primer holograma de una persona, utilizando un láser pulsado.

1968 → El doctor Stephen A. Benton inventa los hologramas de transmisión de luz blanca, en concreto los hologramas de arcoíris, mientras trabaja en el laboratorio de búsqueda de Polaroid en la creación de un televisor holográfico. Estos son los primeros hologramas de transmisión que pueden reconstruirse con luz blanca, prescindiendo del láser. Los distintos colores del arcoíris, que forman el espectro de la luz blanca, pueden observarse en la imagen producida por el holograma, en función del ángulo de observación escogido. La invención de Benton hizo posible la producción en masa de hologramas, con la técnica del estampado o prensado.

1970 → Denisyuk recibe el Premio Lenin.

1971 → Dennis Gabor recibe el Premio Nobel de Física “por su invención y desarrollo del método holográfico en 1947”.

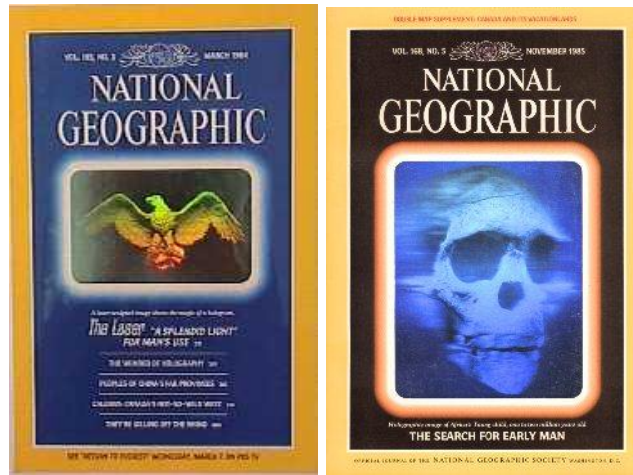
1972 → Lloyd Cross crea los hologramas integrales u hologramas multiplex combinando el principio de los hologramas de transmisión de luz blanca con la cinematografía. Utiliza escenas 2D consecutivas de una grabación de un ente rotatorio y las registra sobre una placa holográfica. Al ser reconstruido el holograma, el resultado es un objeto tridimensional que aparentemente se mueve. Esta percepción de movimiento se basa en el mismo principio que la estereoscopia.

1976 → Victor Komar y sus compañeros en the *All-Union Cinema and Photographic Research Institute* (NIFKI) llevan a cabo el primer prototipo de película holográfica. Utilizan una cámara holográfica pulsada para grabar las imágenes. La película, de una duración de 47 segundos, se proyecta en una pantalla holográfica, con la imagen orientada hacia distintos puntos de la audiencia. Este método permite ver la película en tres dimensiones sin el uso de gafas especiales, aunque la audiencia nunca sobrepasa las tres personas. Su plan de hacer una película de entre 20 y 30 minutos para una audiencia de entre 200 y 300 personas nunca llega a hacerse realidad.

1976 → Se funda el museo de holografía en Nueva York.

1983 → MasterCard International, Inc. y VISA se convierten en las primeras compañías en incorporar hologramas de arcoíris a sus documentos de seguridad.

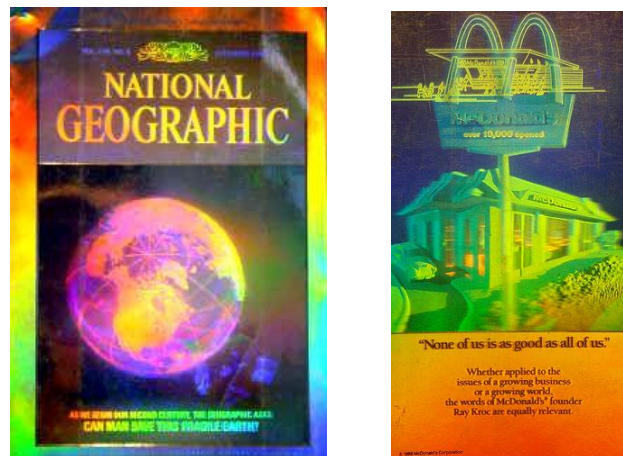
1984 → *National Geographic* se convierte en la primera empresa de revistas importante en poner un holograma en su portada. La publicación de los ejemplares hace que se distribuyan más de 11 millones de hologramas alrededor del mundo.



Revista de National Geographic de 1984 (izquierda) y 1985 (derecha)

1985 → A causa del gran éxito de la primera publicación de este tipo, *National Geographic* lanza una segunda revista con un holograma incorporado.

1988 → National Geographic lanza una tercera y última revista con holograma incorporado. Es la publicación más ambiciosa, porque tiene un holograma del globo terráqueo en la portada y un anuncio holográfico en la contraportada.



1989 → Los hologramas son usados por primera vez en billetes (500 chelines austríacos).

1992 → El museo de holografía de Nueva York cierra por problemas financieros. En este momento, el museo posee la colección de hologramas más extensa del mundo.

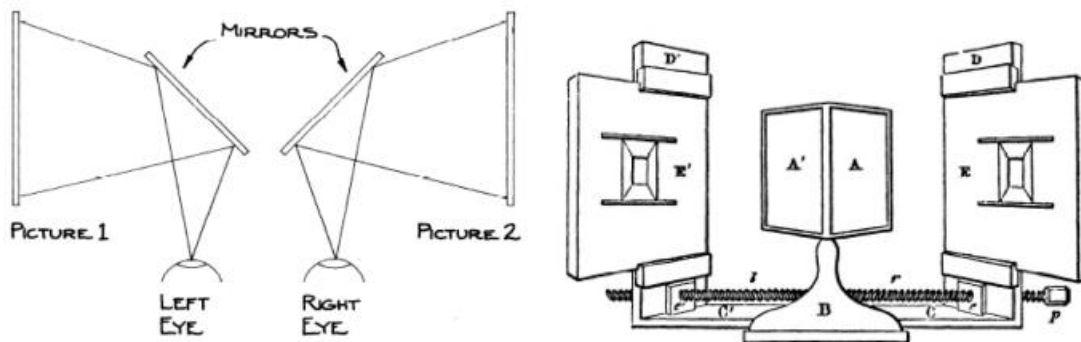
1993 → El museo MIT adquiere toda la colección de hologramas del museo de holografía de Nueva York.

1995 → Iraq es el primer país en incorporar un holograma a su pasaporte.

2002 → Circulan los billetes del euro con un holograma en cada una de sus variantes.

ANEXO 7: Historia de la estereoscopia

1838 → El físico británico Charles Wheatstone crea el primer **estereoscopio** (*The Mirroscope*), basándose en su teoría de visión tridimensional, conocida como estereopsis. Su teoría establece que cada uno de nuestros ojos ve las cosas con un aspecto ligeramente diferente, con una disparidad horizontal o binocular entre las dos imágenes captadas, y que los humanos perciben profundidad cuando su cerebro combina ambas imágenes. Wheatstone piensa que se puede conseguir el mismo efecto de estereopsis a través de una pareja de imágenes bidimensionales similares dibujadas desde perspectivas ligeramente distintas, provocando que el cerebro fusione ambas imágenes al ser enviadas cada una hacia su respectivo ojo. Para conseguir su propósito, Charles construye su estereoscopio con espejos colocados en un ángulo oblicuo. El físico hace las primeras parejas estereoscópicas utilizando dibujos.



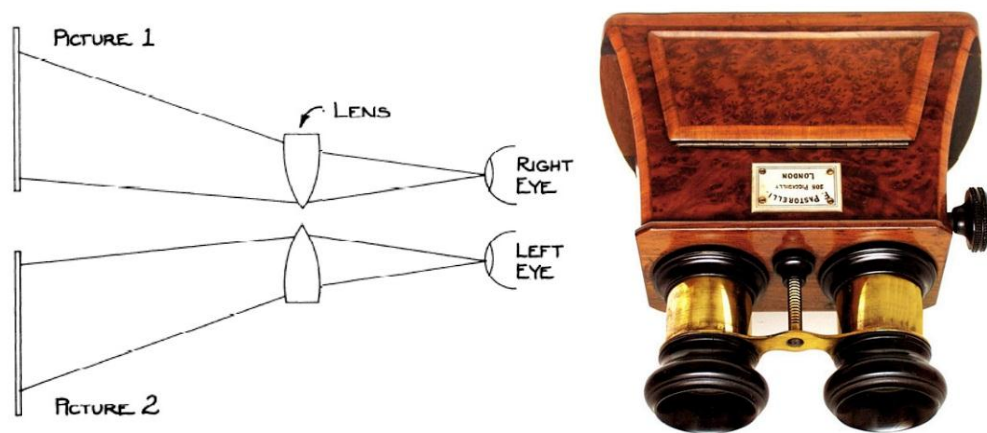
Esquema del funcionamiento del Mirroscope

1839 → Se hace público el proceso fotográfico (daguerrotipo) de la mano de Daguerre, quien había trabajado para mejorar el procedimiento inicial de Nicéphore Niepce.

Década del 1840 → Después de la invención oficial de la fotografía, se empiezan a hacer parejas estereoscópicas con fotografías y los estereoscopios empiezan a popularizarse en el ámbito doméstico.

1844 → David Brewster menciona por primera vez el principio de los autoestereogramas. Brewster se da cuenta de que la repetición imperfecta de estampados en papel pintado puede provocar cierto efecto de relieve y relata esta fenómeno en la publicación "On the knowledge of distance given by binocular vision".

1849 → David Brewster crea el estereoscopio lenticular, un aparato compacto y portable que utiliza lentes en vez de espejos para direccionar cada ojo hacia su respectiva imagen.



Estereoscopio lenticular (derecha) y esquema de su funcionamiento (izquierda)

1851 → El estereoscopio de Brewster, construido por Jules Duboscq, se expone en el Crystal Palace de Londres con motivo de la Exposición Universal de 1851. La reina Victoria se muestra interesada en él. Gracias a este hecho, la fotografía estereoscópica y el estereoscopio alcanzan gran popularidad.

1852 → John Benjamin Dancer inventa la primera cámara estereoscópica comerciable (cámara binocular), que mostrará en el año 1853 y perfeccionará y patentará en el año 1856.

1858 → Joseph d'Almeida empieza a proyectar imágenes estereoscópicas a través de una linterna mágica utilizando filtros verdes y rojos. La audiencia lleva gafas con una lente verde y una roja. Esto da lugar a las gafas anaglíficas y el proceso anaglífico, que más adelante será perfeccionado.

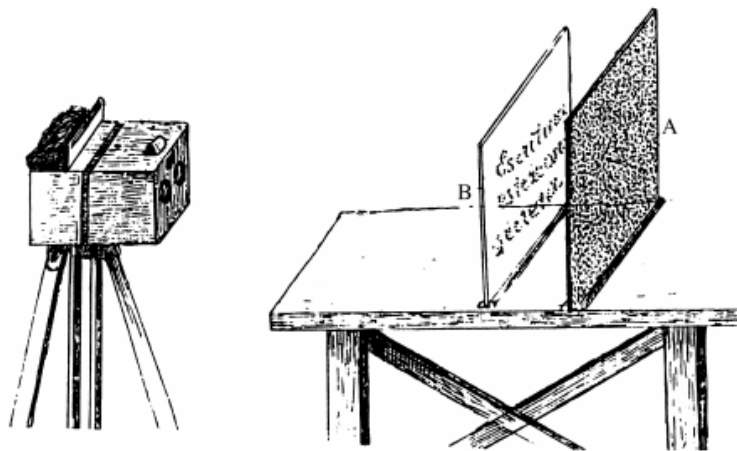
1860 → Alrededor del 1860, Oliver Wendell Holmes inventa el estereoscopio americano, un estereoscopio con lentes portable, simplificado y mucho más económico.



Estereoscopio americano

1872 → Santiago Ramón y Cajal realiza experimentos sobre la percepción

estereoscópica, con los que da lugar a una forma temprana de estereogramas de puntos aleatorios. Con su método, él pretende obtener una imagen formada por puntos, líneas, letras o garabatos, en la que no se puede distinguir nada a simple vista, pero mediante el uso de un estereoscopio, se percibe una frase o texto perfectamente legible emergiendo del fondo. Su método de creación de estereogramas consiste en llenar una hoja con puntos, líneas, garabatos o letras arbitrariamente. Después, se escribe lo que se quiere que sobresalga del fondo en un vidrio, con el mismo método usado para dibujar el fondo (por ejemplo puntos o letras de la misma medida aproximada que los del fondo). Por último, se coloca el vidrio a unos 10 o 15 cm en frente de la imagen de fondo y se fotografía el resultado con una cámara estereoscópica. Se obtiene una pareja estereoscópica solamente visible a través de un estereoscopio. Ramón y Cajal publica sus hallazgos en una revista de fotografía en el año 1901. Su publicación en español impide que se extienda la información en la comunidad científica.



Esquema de fotografía del estereograma de Ramón y Cajal

1891 → Louis du Haron crea los primeros anaglifos impresos, yuxtaponiendo dos imágenes estereoscópicas de colores verde y rojo o azul y rojo en el mismo papel al ser impresas.

1889 → William Friese-Green crea las primeras imágenes anaglíficas en movimiento, utilizando una cámara de dos lentes de su propia creación. En 1893 patenta su proceso consistente en la proyección de ambas imágenes una al lado de la otra y su visualización a través de un estereoscopio.

1903 → *L'Arrivée du Train* se convierte en el primer corto en 3D estereoscópico proyectado para audiencias. Está creado por los hermanos Lumière (Auguste y Louis) y dura menos de un minuto.

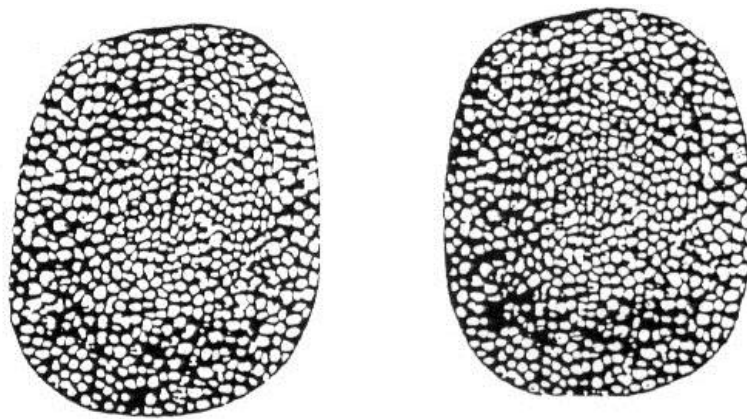
1915 → Se crea el primer corto comercial en 3D estereoscópico. La audiencia debe llevar gafas anaglíficas con filtros de los colores rojo y verde para verlo.

1922 → Se crea el primer largometraje en 3D, *The Power of Love*. El 3D es creado mediante el sistema de anaglifo verde-rojo.

1932 → Polaroid lanza al mercado el **filtro polarizador sintético** ideado por Edwin Herbert Land para reducir el resplandor de los faros de los coches.

1936 → Se aplican los filtros polarizados al ámbito de la estereoscopía y el 3D públicamente (Edwin ya hacía pruebas privadas de su uso en este ámbito a partir del 1934) a través de las gafas 3D polarizadas. La primera película orientada al público general que utiliza estas gafas es una proyectada por Polaroid en el museo de ciencias e industria de Nueva York.

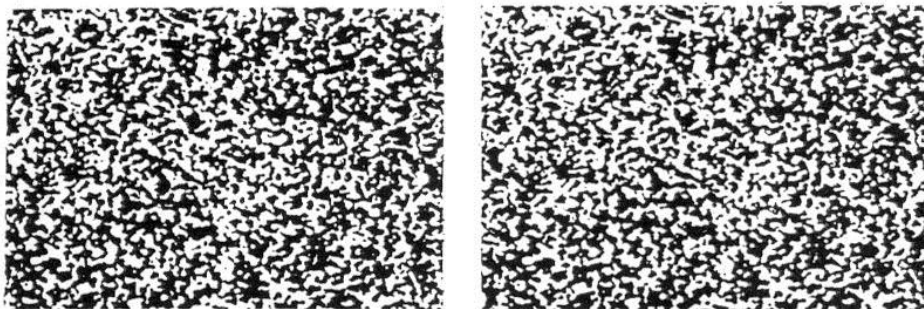
1939 → El ruso Boris Kompaneysky crea el primer estereograma de manchas aleatorias. Boris crea una pareja estereoscópica consistente en un patrón de manchas blancas y negras que esconden la cara de Venus.



Estereograma de manchas aleatorias de Boris Kompaneysky

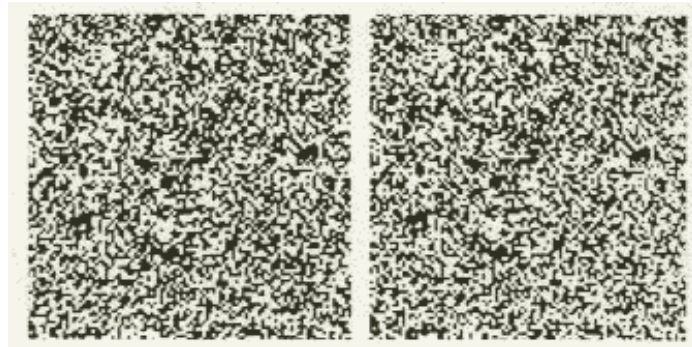
1952 → *Bwana Devil* se convierte en la primera película en color con efectos de 3D estereoscópico. Su lanzamiento es un éxito y da lugar a la edad de oro de las películas 3D (1952 – 1954).

1954 → El estadounidense Claus M. Aschenbrenner crea a mano el primer estereograma de puntos aleatorios, en el que aparecen las letras LEAK al producirse la fusión entre ambas imágenes.



Estereograma de puntos aleatorios de Claus M. Aschenbrenner

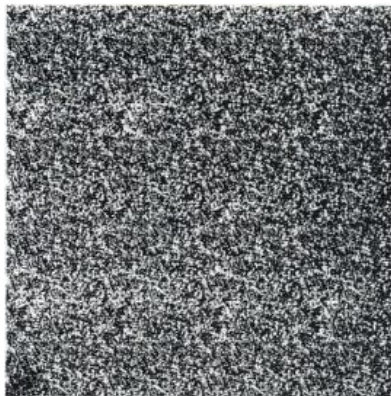
1959 → El doctor Béla Julesz crea el primer estereograma de puntos aleatorios por ordenador (pareja estereoscópica) para el estudio de la percepción de profundidad.



Estereograma de puntos aleatorios de Béla Julesz

1962 → Bela Julesz y J. Miller se dan cuenta de que la profundidad generada por sus estereogramas se basa solamente en la estereopsis, un proceso neurológico y no visual. Sus parejas estereoscópicas no contienen formas ni colores, por tanto no hay nada que pueda interferir en el efecto tridimensional producido.

1970 → El japonés Masayuki Ito crea el primer autoestereograma, formado por 4 franjas de puntos aleatorios. La imagen sobresaliente es un conjunto de cuadrados, o de rectángulos si giramos la imagen 90 °. La imagen se observa con la visión binocular, sin aparatos.



Primer autoestereograma

1974 → Alfons Schilling crea un autoestereograma a mano (con una imagen plana emergiendo del fondo).

1979 → Christopher Tyler combina los autoestereogramas con los estereogramas de puntos aleatorios para crear los autoestereogramas o estereogramas de imagen única de puntos aleatorios (**SIRDS**) en blanco y negro. Necesita la ayuda de la programadora informática Maureen Clark para idear un algoritmo que permita crearlos con el ordenador

(lo publican en 1991). Utilizan un ordenador Apple II y el lenguaje de programación BASIC.

1991 → Tom Baccei, Cheri Smith y Bob Salitsky publican en Japón el primer libro de estereogramas, titulado *Miru Miru Mega Yokunaru Magic Eye*, que pronto se convierte en *Best seller*.

1993 → Se publica el primer libro de la serie *Magic Eye* en los Estados Unidos (*Magic Eye: A New Way of Looking at the World*).

ANEXO 8: Historia de la realidad virtual

1957 → Morton Heilig inventa el Sensorama, un aparato basado en la tecnología multimodal, que utiliza los distintos sentidos para producir una sensación de realidad. Con él, se pretende estimular la vista, la oída, el gusto y el tacto. El sensorama reproduce imágenes estereoscópicas y genera sonido estéreo, vibraciones e incluso viento y aromas. Morton graba varios cortometrajes para el Sensorama con una cámara estereoscópica. Uno de los primeros cortometrajes que se proyectan en el aparato consiste en un trayecto en bicicleta por las calles de Brooklyn. Morton patenta el Sensorama en 1962.

1961 → *Philco Corporation* crea el *Headsight*, el precursor del casco de realidad virtual. Este casco está conectado a una cámara y se compone de una pantalla de vídeo CRT y un sistema de seguimiento magnético, que permite cambiar la perspectiva de las imágenes observadas (variando la dirección y el ángulo de la cámara) en función del movimiento de la cabeza del usuario.

1965 → Aparece el concepto de realidad virtual cuando Ivan Sutherland publica un artículo llamado "The Ultimate Display". En este artículo Ivan propone la construcción de un mundo virtual que parezca real para cualquier usuario, que incluya sonido tridimensional y estímulos táctiles, que permita al sujeto manipular objetos de forma intuitiva y que sea observado a través de un casco de visualización conectado a un ordenador con gráficos interactivos y cambiantes.

1968 → Ivan Sutherland, con la ayuda de su estudiante Bob Sproull, crea el primer casco de visualización de realidad aumentada y realidad virtual al que llama "Espada de Damocles". Su casco se conecta a un ordenador y consta de dos pantallas de tubos de rayos catódicos, cosa que proporciona un efecto estereoscópico y permite la percepción de profundidad. Además, el aparato tiene un sistema de seguimiento que registra los movimientos de cabeza del usuario y cambia la imagen visualizada en función de estos.

1972 → *General Electric Corporation* construye, por orden de la armada norteamericana, uno de los primeros simuladores de vuelo computarizados. Este provee un campo de visión de 180 ° e imágenes a tiempo real.

1977 → Aparece el primer guante sensitivo, el guante Sayre, creado por Daniel Sandin y Tom Defanti basándose en una idea de Richard Sayre. El guante tiene una fuente de luz en un extremo y una célula fotoeléctrica en el otro. La variación de la cantidad de luz que recibe la célula al mover los dedos permite hacer un seguimiento de su flexión.

1978 → El sistema *Aspen Movie Map* es desarrollado por un equipo del MIT dirigido por Andrew Lippman. El sistema consiste en emular un tour por la ciudad de Aspen, Colorado. Las imágenes son tomadas a través de varias cámaras montadas en un coche, que van tomando fotografías consecutivas de lo que hay delante, detrás y a los lados del automóvil mientras se desplaza. Hay opciones de tour de la ciudad en verano o en invierno.

1980 → La compañía *StereoGraphics* crea las primeras gafas de visión estereoscópica.

1982 → Thomas Furness crea el simulador de vuelo más avanzado del momento mientras trabaja en los *US Air Force's Armstrong Medical Research Laboratories*.

1982 → Thomas Zimmerman patenta el primer guante sensitivo con sensores ópticos.

1983 → El doctor Gary Grimes crea un guante sensitivo de entrada de datos en los laboratorios Bell. El guante consta de sensores de flexión en los dedos, sensores táctiles en las yemas de los dedos, y sensores de posición y orientación en la muñeca.

1983 → Mark Callahan crea en el MIT un HMD (casco de visualización) muy similar al de Ivan Sutherland, pero actualizado con las nuevas herramientas informáticas y de visualización de la época.

1984 → Mike Mc Greevy y Jim Humphries crean un HMD para la NASA llamado VIVED (*Virtual Visual Environment Display*). Se utiliza para entrenar futuros astronautas a través de simulaciones de las condiciones del espacio exterior.

1989 → Tom Zimmerman trabaja junto con Jaron Lanier (popularizador del término realidad virtual) para mejorar su idea de guante sensitivo incorporando sensores ultrasónicos y magnéticos para hacer un seguimiento de la posición de las manos. Esto da lugar al *Power Glove* y al *Data Glove* respectivamente. El primero en ser comercializado es un Power Glove de la marca Nintendo.

1990 → Surge la primera compañía de software de realidad virtual comercializables, "sense8". Las herramientas del software son para sistemas SUN.

1990 → Jonathan Waldern introduce "virtuality", las máquinas de juegos de realidad virtual. Muestra las máquinas en la nonagésima exhibición de gráficos de ordenador.

1991 → Antonio Medina, un científico de la NASA, crea un sistema de realidad virtual para dirigir los Mars Exploration Rovers o robots exploradores de Marte desde la Tierra.

1992 → *Electronic Visualization Lab* (EVL) de la universidad de Illinois, Chicago, crea los CAVE (*Cave Automatic Virtual Environment*), como alternativa a los HMD. Se trata de habitaciones con gráficos virtuales proyectados, visibles con gafas de obturación, que provocan un efecto estereoscópico magnificado.

1995 → Nintendo saca al mercado la *Virtual Boy*, la primera consola de realidad virtual, que acaba siendo un fracaso.

1995 → Aparece el RMDL (*Virtual Reality Modeling Language*) o lenguaje de modelado de realidad virtual.

2014 → Google anuncia la invención de sus *Cardboard*, un visor estereoscópico de creación propia para smartphones.

ANEXO 9: Imágenes a tamaño completo

Imagen 1: Pareja estereoscópica de un corazón para visión paralela (con alineamiento automático)



Imagen 2: Pareja estereoscópica de un corazón para visión cruzada (con alineamiento automático)



Imagen 3: Pareja estereoscópica de una letra E para visión paralela (con alineamiento automático)



Imagen 4: Pareja estereoscópica de una letra E para visión cruzada (con alineamiento automático)



Imagen 5: Pareja estereoscópica de un corazón para visión paralela (fórmula de Bercovitz)



Imagen 6: Pareja estereoscópica de un corazón para visión cruzada (fórmula de Bercovitz)



Imagen 7: Pareja estereoscópica de una letra E para visión paralela (fórmula de Bercovitz)



Imagen 8: Pareja estereoscópica de una letra E para visión cruzada (fórmula de Bercovitz)



Imagen 9: Pareja estereoscópica de un corazón para visión paralela (regla del 1/30)



Imagen 10: Pareja estereoscópica de un corazón para visión cruzada (regla del 1/30)



Imagen 11: Pareja estereoscópica de una letra E para visión paralela (regla del 1/30)



Imagen 12: Pareja estereoscópica de una letra E para visión cruzada (regla del 1/30)



Imagen 13: Anaglifo rojo-cian de un corazón



Imagen 14: Anaglifo amarillo-azul de un corazón



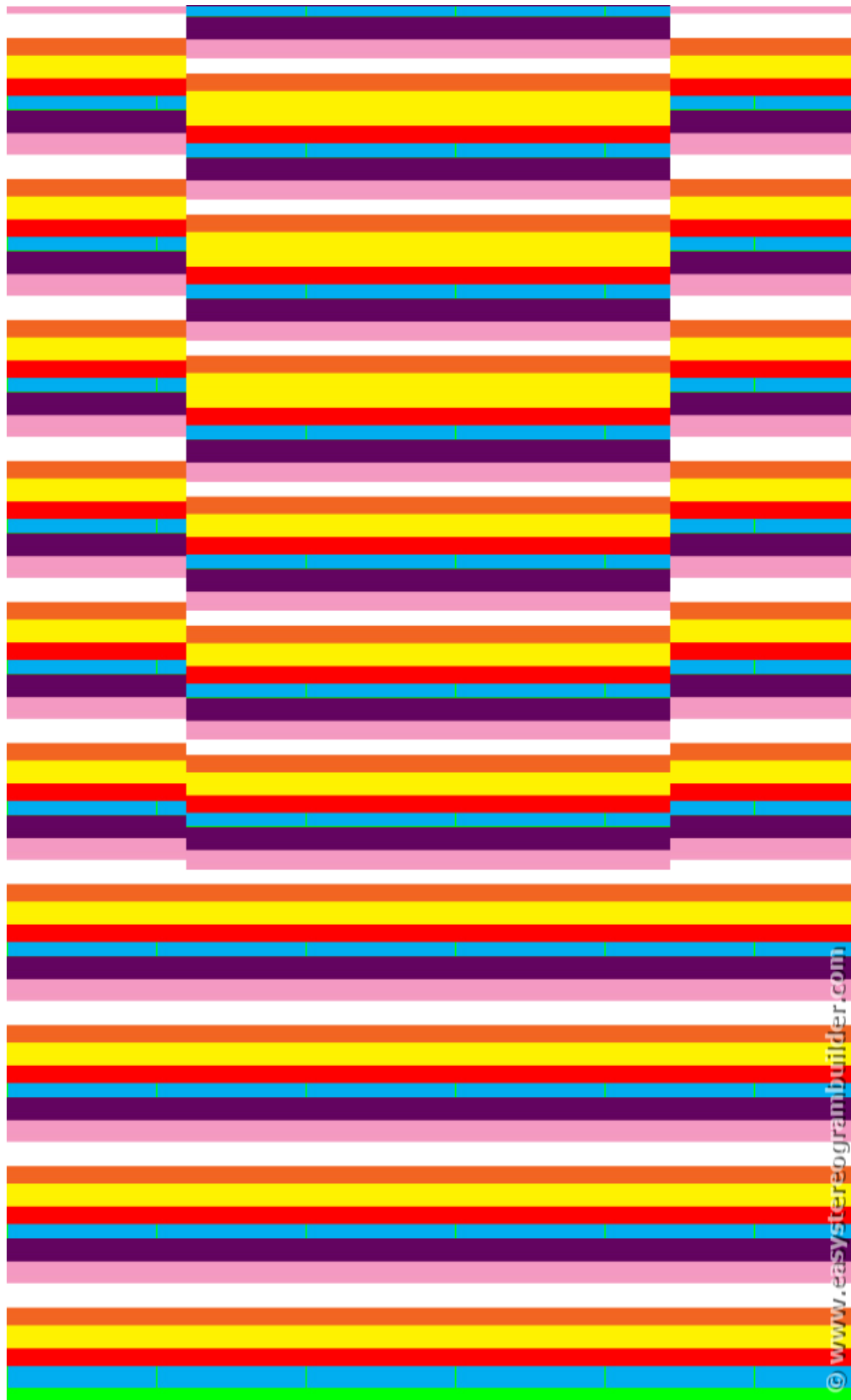
Imagen 15: Anaglifo rojo-cian de una letra E



Imagen 16: Anaglifo amarillo-azul de una letra E



Imagen 17²⁷: Autoestereograma *hidden image* de un cuadrado para visión paralela (patrón de rallas verticales)



²⁷ Consultar anexo 10 para ver los mapas de profundidad de los autoestereogramas.

Imagen 18: Autoestereograma *hidden image* de un cuadrado para visión cruzada (patrón de rallas verticales)

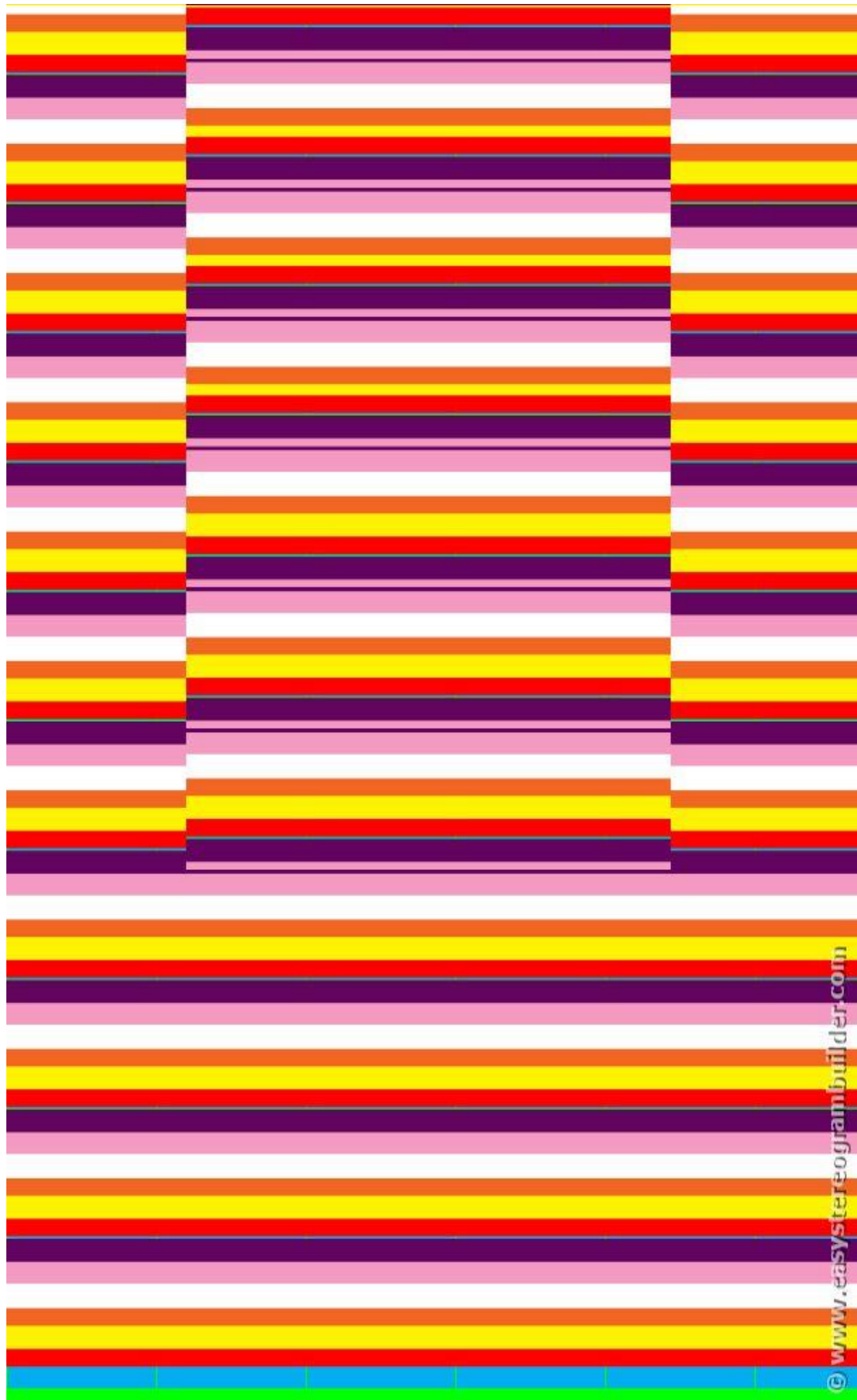


Imagen 19: Autoestereograma *hidden image* de un cuadrado para visión paralela (patrón rostro)



Imagen 20: Autoestereograma *hidden image* de un cuadrado para visión cruzada (patrón rostro)



Imagen 21: Autoestereograma *hidden image* de un cuadrado para visión paralela (patrón de puntos aleatorios)

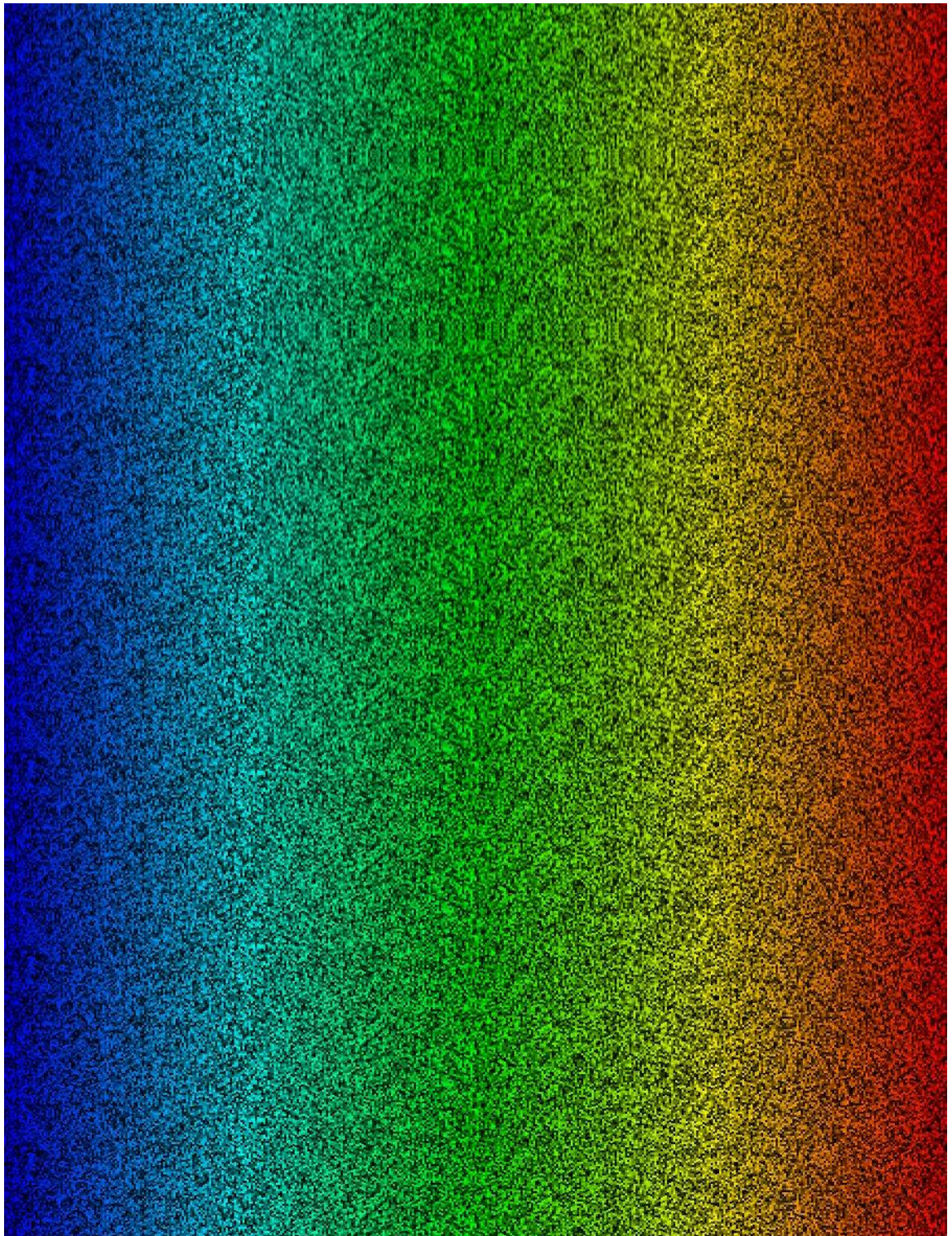


Imagen 22: Autoestereograma *hidden image* de un cuadrado para visión cruzada (patrón de puntos aleatorios)

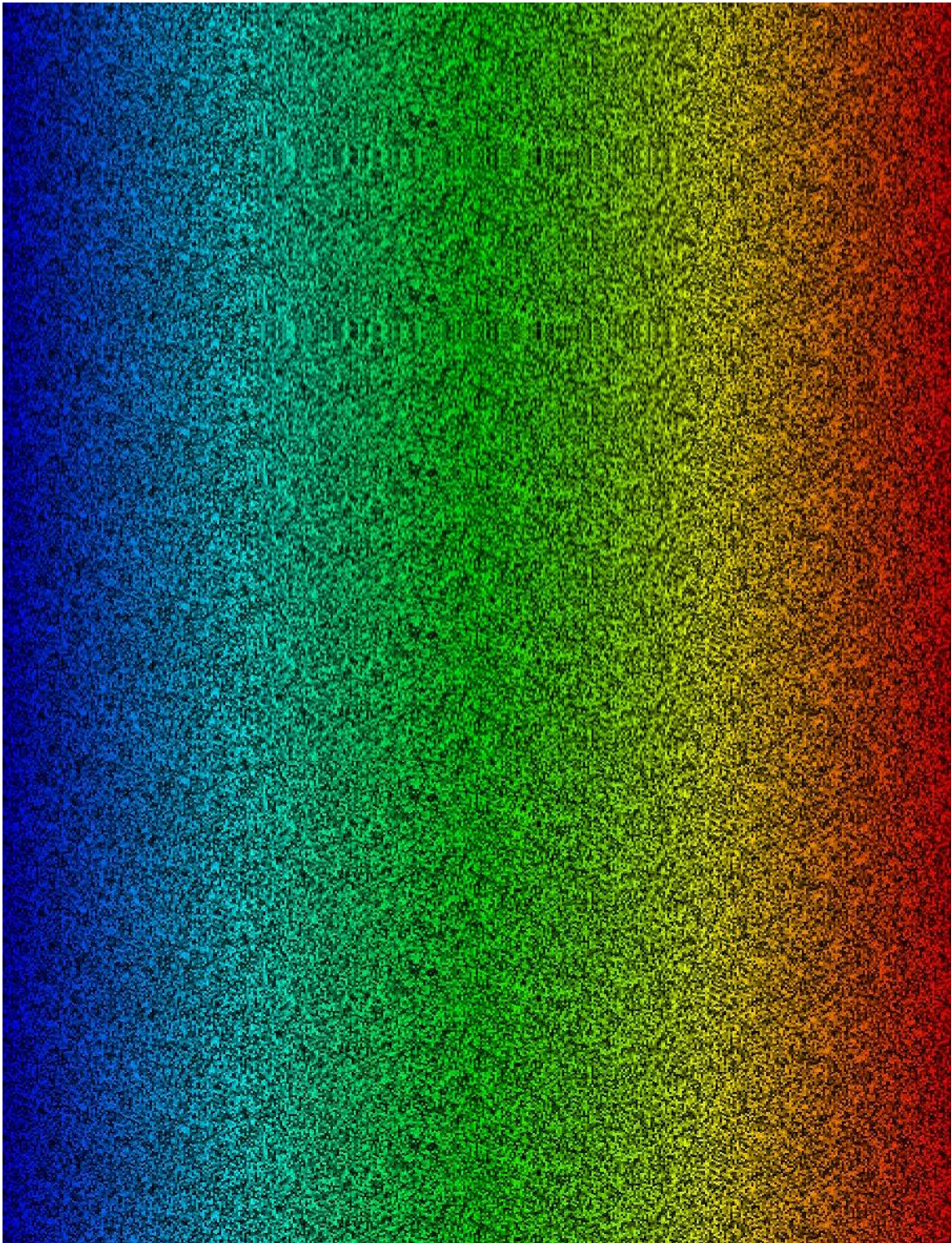


Imagen 23: Autoestereograma *hidden image* de una letra E para visión paralela (patrón rostro)



Imagen 24: Autoestereograma *hidden image* de una letra E para visión cruzada (patrón rostro)



Imagen 25: Autoestereograma *hidden image* de un corazón para visión paralela (patrón rostro)



Imagen 26: Autoestereograma *hidden image* de un corazón para visión cruzada (patrón rostro)



Imagen 27: Autoestereograma *object array* de un corazón para visión paralela

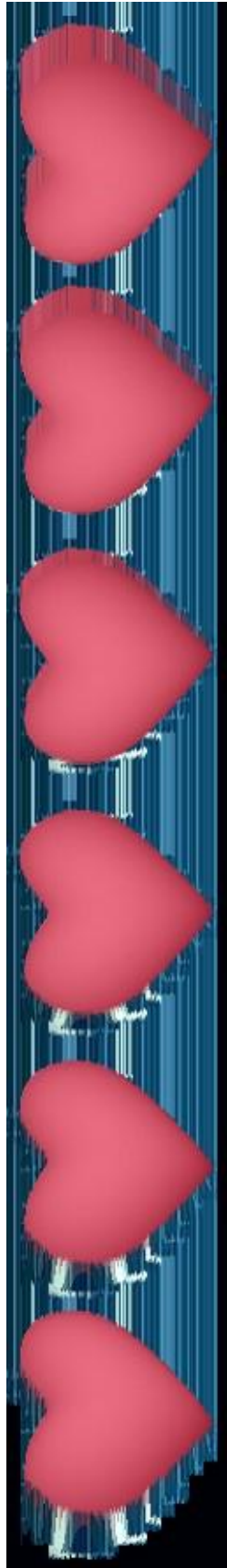


Imagen 28: Autoestereograma *object array* de un corazón para visión cruzada

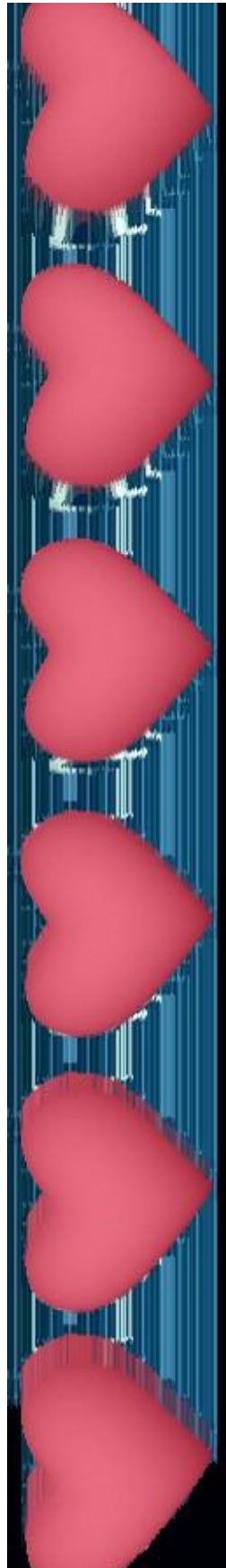


Imagen 29: Autoestereograma *object array* de una letra E para visión paralela



Imagen 30: Autoestereograma *object array* de una letra E para visión cruzada



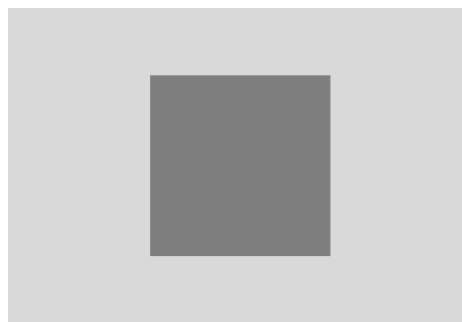
ANEXO 10: Mapas de profundidad de los autoestereogramas

En este apartado se encuentran los mapas de profundidad utilizados para la creación de los autoestereogramas expuestos en el anexo 9 (imágenes 17 – 30). Sobre cada mapa de profundidad está escrito el número de las imágenes del anexo 9 a las que corresponde.

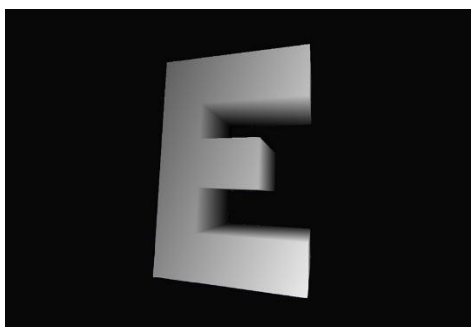
Imágenes 17, 19 y 21



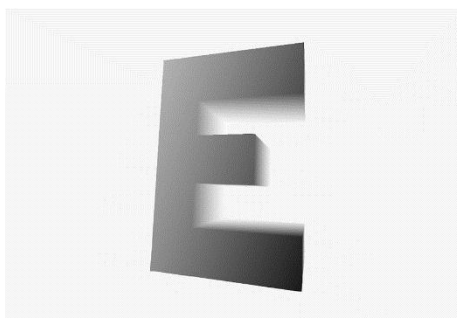
Imágenes 18, 20 y 22



Imágenes 23 y 29



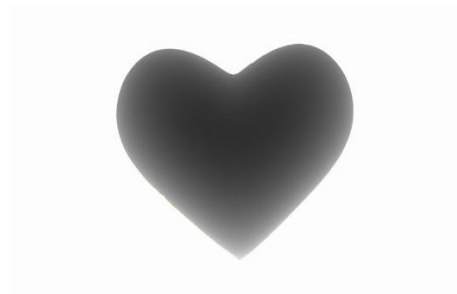
Imágenes 24 y 30



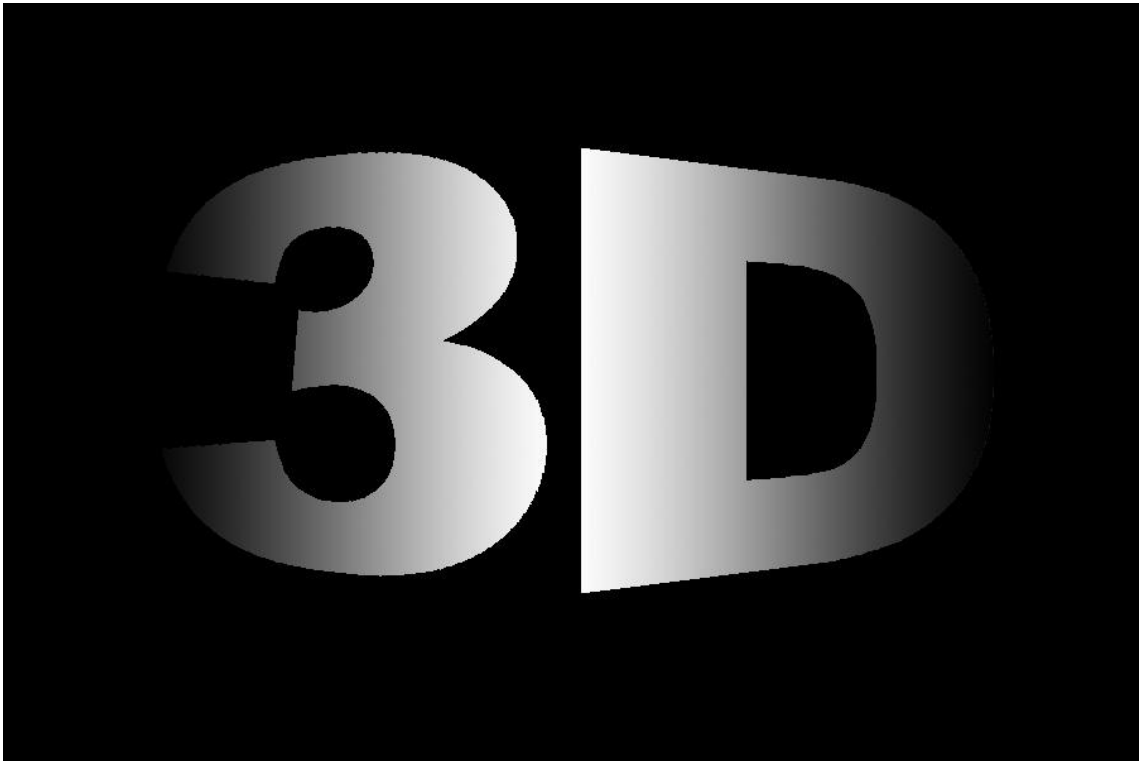
Imágenes 25 y 27



Imágenes 26 y 28



Seguidamente, se presenta el mapa de profundidad que ha servido para realizar la portada de este trabajo.



ANEXO 11: Evolución de la popularidad del 3D en el cine

Al final del anexo puede verse un gráfico con todas las películas 3D estrenadas a lo largo de la historia. El gráfico abarca el período temporal comprendido entre los años 1903 y 2011. Las partes en las que el gráfico es más ancho representan un volumen más amplio de películas hechas en esa época.

El gráfico comienza en el año 1903 con un solo cortometraje, producido por los hermanos Lumière: "L'Arrivée d'un train en gare de La Ciotat". A partir de entonces, pasan varios años hasta que vuelve a hacerse ningún tipo de creación audiovisual en tres dimensiones.

Con el estreno en el año 1922 del largometraje "The Power of Love" (película que utiliza el proceso anaglífico), empieza a crecer la producción cinematográfica tridimensional.

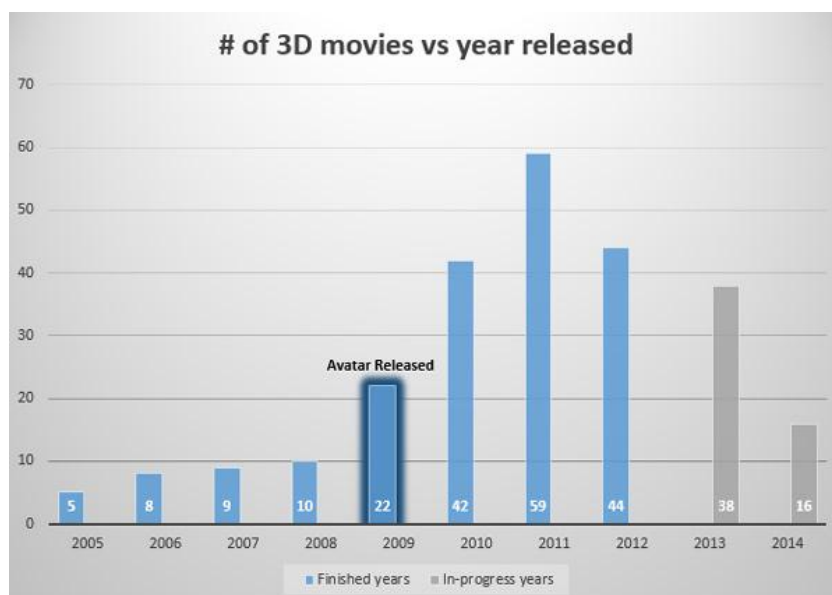
Observamos que en el año 1929 la producción se estanca considerablemente, y no alcanza su esplendor hasta el 1952, con el estreno de la película "Bwana Devil" (película que utiliza el proceso de polarización).

A mediados de la década de los 50 la creación de películas tridimensionales entra en decadencia.

A mediados de la década de los 70 la producción cinematográfica en tres dimensiones empieza a crecer y a principios de los 80 experimenta un gran auge.

A principios de los años 90 la popularidad del 3D se estanca, y no aumenta de forma importante hasta la década del 2000.

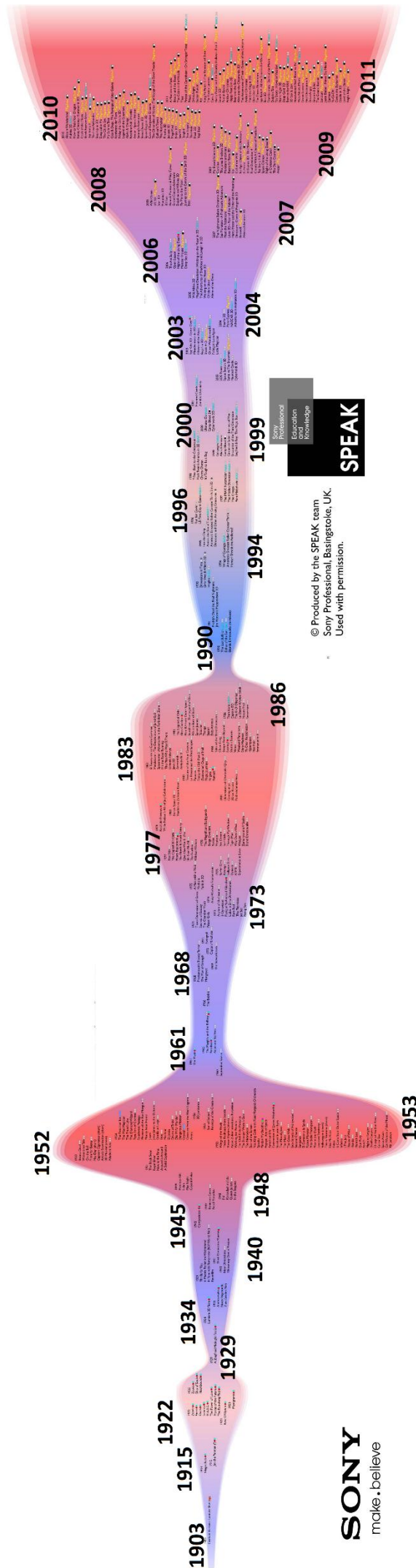
Llegados a este punto, vamos a analizar esta década y lo que llevamos de la siguiente mediante el gráfico que se expone a continuación.



Como se aprecia, a mediados de la década del 2000, la producción es muy baja. La popularidad del 3D empieza a crecer de forma notoria con el estreno de la película

“Avatar” en el año 2009. Esto impulsa la producción cinematográfica de películas en tres dimensiones, y en el año 2010 y sobre todo en el 2011 el 3D alcanza su máxima popularidad, con una gran cantidad de películas hechas con esta tecnología.

A partir de este año, la popularidad del 3D decrece hasta el punto en el que nos encontramos en la actualidad. Actualmente, el 3D cinematográfico es conocido pero se aplica muy ocasionalmente. Solo queda esperar la llegada de un auge como el del 1952, 1980 o 2011, que cambie de forma definitiva todo el panorama actual y convierta el 3D en algo conocido, popular y habitual.



SONY
make.believe

BIBLIOGRAFÍA

- Bergua, Antonio; Skrandies, Wolfgang: "An early antecedent to modern random dot stereograms" en: The Secret Stereoscopic Writing of Ramon y Cajal. Int J Psychophysiol. Giessen, Alemania. 2000.
- Burdea, Grigore: Tecnologías de la realidad virtual. Paidós Ibérica. 1996.
- Dalí, Salvador: 3DALI. Dalí y la holografía: realidad virtual e ilusión de realidad. DAS Edicions. Figueres, España. 2012.
- Hariharan, P.: Basics of Holography. Cambridge University Press. 2002.
- Hill, Peter D.: Así se crea realidad virtual. Rosaljai. 1996.
- Howard, Ian P; Rogers, Brian J.: Perceiving in Depth, Volume 2: Stereoscopic Vision. Oxford University Press. 2012.
- Iovine, John: La Holografía: Una Guía Fácil Para Hacer Hologramas. S.A. McGraw-hill; Interamericana de España. 1991.
- Kasper, Joseph Emil; Feller, Steven A: The Complete Book of Holograms: How They Work and how to Make Them. Courier Corporation.
- Levine, Gene; Priester, Gary W.: Hidden Treasures: 3-D Stereograms. Sterling Publishing Company, Inc. 2008.
- Martín, Pablo: El libro de la holografía. Alianza Editorial. Madrid, España. 1997.
- Tanimoto, Steven: An Interdisciplinary Introduction to Image Processing: Pixels, Numbers, and Programs. MIT Press. Washington, EEUU. 2012.

WEBGRAFIA

- http://235bowery.s3.amazonaws.com/exhibitionlinks/62/Holography_Timeline.pdf
- <http://3ddigitalphoto.com/make3d.asp>
- <http://allvirtualreality.com/tutorials/timeline-virtual-reality-history-important-vr-chronological-events.html>
- http://askyl.free.fr/index.php?option=com_content&view=article&id=59&Itemid=120
- <http://blog.cine3d.ch/theorie/quest-ce-que-la-stereoscopie/methodes-de-travail/523-methode-di-marzio/>
- <http://blogdepercepcion.es/?p=1117>
- <http://bucketomac.de/stereogram/howto-create-depth-maps/>
- <http://camhprice.files.wordpress.com/2012/11/3d-movie-timeline-medium.jpg>
- http://centrodeartigos.com/articulos-de-todos-los-temas/articulo_32999.html
- <http://dac.escet.urjc.es/rvmaster/rvmaster/asignaturas/Estereo.pdf>
- <http://dplenticulareurope.com/productos-y-servicios/tecnologia-lenticular/?lang=es>
- <http://electronics.howstuffworks.com/gadgets/other-gadgets/virtual-reality.htm>
- <http://eltamiz.com/2011/02/03/%C2%BFque-es-un-holograma-ii-visualizacion/>
- <http://es.scribd.com/doc/30172205/Estereogramas-3D>
- <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/optmod/holog2.html>
- <http://intercentres.edu.gva.es/iesleonardodavinci/Fisica/Ondas/Ondas10.htm>
- <http://lpkaster.com/introsis.html>
- <http://mentalfloss.com/article/29771/why-cant-some-people-see-magic-eye-pictures>
- <http://mit.ocw.universia.net/MAS-450Holographic-ImagingSpring2003/NR/rdonlyres/Media-Arts-and-Sciences/MAS-450Holographic-ImagingSpring2003/D6E98688-6ECF-418B-BA08-F82DA669DCC7/0/holochemistry.pdf>
- <http://nzphoto.tripod.com/3d/330baseformulae.html>
- <http://nzphoto.tripod.com/stereo/3dtake/fbercowitz.htm#symbol>
- http://pendientedemigracion.ucm.es/info/giboucm/Download/Practica_Labo_Holografia.pdf
- <http://sabia.tic.udc.es/gc/Contenidos%20adicionales/trabajos/3D/estereoscopia/Aplicaciones.htm>
- <http://sabia.tic.udc.es/gc/Contenidos%20adicionales/trabajos/3D/Realidad%20Virtual/web/dispositivos/hmd.html>
- <http://sabia.tic.udc.es/gc/Contenidos%20adicionales/trabajos/Hardware/Historia Visual/3d-ti-singafas.html>
- <http://silver.neep.wisc.edu/~lakes/hoAppl.html>
- <http://smattes.com/article/47/sensorama>
- <http://stereoscopy.co/more/history>
- http://usuarios.arsystel.com/luismarques/documentacion/txt/04120_imagen_unica.htm
- <http://usuaris.tinet.org/mjsales/colorcom.html>
- <http://virtualenvironments.pbworks.com/f/loftin.pdf>

- <http://web.mit.edu/museum/collections/holography.html>
- http://web.mit.edu/museum/pdf/Holography_Glossary.pdf
- <http://web.ua.es/es/protocolo/documentos/lecciones/leccion-inaugural-2007-2008.pdf>
- <http://www.amog.com/tech/101395-timeline-3d-films/>
- <http://www.bdigital.unal.edu.co/1692/2/jairoorlandolopezpareja.19872.pdf>
- <http://www.bowater.co/history-of-holography.html>
- <http://www.cg.tuwien.ac.at/~mroz/sirds/history.html>
- <http://www.cmdconf.net/2014/pdf/6.pdf>
- http://www.conection3d.com/que_es_estereoscopia.html
- <http://www.cs.ox.ac.uk/people/ian.collier/3d/stereo.html>
- <http://www.definitions.net/definition/virtual%20reality>
- <http://www.depthcharge3d.com/3dphotography.shtml>
- <http://www.docstoc.com/docs/56993396/Virtual-Reality---Download-as-PowerPoint>
- <http://www.explainthatstuff.com/how-3d-tv-works.html>
- http://www.eyetricks-3d-stereograms.com/kinds_of_stereograms.html
- <http://www.fib.upc.edu/retro-informatica/avui/realitatvirtual.html>
- <http://www.focusillusion.com/Instructions/>
- <http://www.fou.uib.no/fd/1996/h/404001/kap02.htm>
- <http://www.fou.uib.no/fd/1996/h/404001/kap02.htm>
- http://www.geocities.ws/jesumvz/incom/virtual_009.htm
- <http://www.google.com/patents/WO2007109626A2?cl=en>
- http://www.hidden-3d.com/how_to_view_stereogram.php
- http://www.hidden-3d.com/stereogram_theory.php
- http://www.hlhologram.com/Uses_of_hologram.html
- <http://www.holography.ru/histeng.htm>
- <http://www.hololight.net/ho.html>
- <http://www.holophile.com/history.htm>
- <http://www.ihma.org/pages/the-history-of-holography>
- <http://www.imin-vr.com/kb/how-are-stereoscopic-images-displayed/>
- http://www.javi.it/r_virtual6.html
- <http://www.lsi.upc.edu/~virtual/SGL/guions/ArquitecturaRV.pdf>
- <http://www.monografias.com/trabajos98/holografia/holografia.shtml#aplicacioa>
- <http://www.ordenadores-y-portatiles.com/bases-memoria-holografica.html>
- <http://www.packaging.enfasis.com/articulos/19699-holografia-herramienta-seguridad-el-empaque>
- http://www.quadernsdigitals.net/datos_web/hemeroteca/r_1/nr_636/a_8619/8619.html
- http://www.quadernsdigitals.net/datos_web/hemeroteca/r_1/nr_636/a_8619/8619.html
- <http://www.redes-cepalc.org/ciencias1/fotografia/anaglifos.htm>
- <http://www.sbfisica.org.br/rbef/pdf/323502.pdf>
- http://www.scholarpedia.org/article/Autostereogram#Historical_Timeline
- <http://www.shortcourses.com/stereo/stereo3-14.html>
- <http://www.timetoast.com/timelines/realidad-virtual--6>
- <http://www.um.es/LEQ/laser/Ch-10/F10s3p1.htm>
- <http://www.um.es/leq/laser/Ch-10/F10s3p1.htm>

- <http://www.um.es/leq/laser/Ch-10/F10s4p1.htm>
- <http://www.um.es/leq/laser/Ch-10/F10s4p5.htm>
- http://www.upf.edu/pdi/dcom/xavierberenguer/recursos/fig_calc/_8_/estampes/4_7.htm
- <http://www.vision3d.com/3views.html>
- <http://www.vrs.org.uk/#virtual-reality>
- <http://www.vrs.org.uk/virtual-reality-applications/index.html>
- https://courses.cit.cornell.edu/ece576/FinalProjects/f2007/awh24_mdj23/awh24_mdj23/
- <https://www.cs.sfu.ca/CourseCentral/414/li/material/refs/SIRDS-Computer-94.pdf>