

Proyector de Imágenes virtuales en dos y tres dimensiones

Josué Calderón Zavala

07 de noviembre de 2011

Resumen

Las visualizaciones tridimensionales apuntan a proporcionar escenas vivas y naturales como si los ambientes de la simulación realmente existieran, haciéndose herramientas valiosas para muchas aplicaciones como la visualización médica, investigación científica, entretenimiento, arquitectura, anuncios publicitarios, computación tridimensional, sistemas de realidad virtual, área industrial y militar entre otras.

En esta tesis se investigaron las técnicas existentes de proyección de imágenes virtuales tridimensionales desde sus inicios hasta las propuestas generadas en los últimos años, donde este tópico está siendo cada vez más mencionado por las compañías productoras de tecnología, los medios y la ciencia.

Después de haber reunido y estudiado la información expuesta en los capítulos iniciales, se definió cual sería la técnica más adecuada para su estudio y posterior reconstrucción empleando como base de decisión la innovación, el material disponible en el laboratorio de Interferometría del Centro de Investigaciones en Óptica y su posible puesta en marcha en el ámbito comercial. Debido a que el interés del autor de esta tesis es la construcción y proyección de imágenes volumétricas virtuales se decidió desarrollar el proyecto cheoptics 360.

Este sistema consiste en la proyección de un conjunto de imágenes bidimensionales o tridimensionales (diseñadas en un software de modelado 3D) suministradas por proyectores multimedia desplegadas sobre una pantalla horizontal situada en la punta de una pirámide de vidrio. Así, por medio de la reflexión en las caras del prisma, el observador u observadores en el frente observan una escena u objeto virtual flotando en el centro del volumen, de esta forma, el espectador tiene libre movimiento alrededor del dispositivo obteniendo una reconstrucción tridimensional completa.

La construcción del prototipo expuesta en los capítulos 4 y 5 requirió el diseño y monto un sistema óptico capaz de generar un par de imágenes partiendo de una imagen proyectada por un cañón multimedia. Al modificar la dirección del camino óptico por medio de espejos durante su propagación, se consiguió desplegar las imágenes sobre una pantalla horizontal localizada en la punta de un prisma de vidrio obteniendo una imagen virtual tridimensional observada por medio de reflexión.

AGRADECIMIENTOS

Esta tesis, si bien ha requerido esfuerzo y dedicación por parte del autor y su director de tesis, no hubiese sido posible su realización sin la cooperación desinteresada de todas y cada una de las personas y muchas de las cuales han sido un soporte muy fuerte en momentos de angustia y desesperación.

Primero que nada, agradezco a Dios por que siempre ha mantenido su mano sobre mi hombro dandome salud y bienestar tanto a mi como a mi familia y seres queridos, porque ha puesto en mi camino a aquellas personas que han sido un soporte y compañía durante mi todo el periodo de estudio.

Agradezco al Conacyt por el apoyo económico que hizo posible el curso de la Maestría lo cual permitió concentrarme únicamente en el estudio y alcance de este proyecto.

Al Dr. Daniel Malacara Hernández por haber aceptado mi propuesta de tesis ayudandome a alcanzar el objetivo por el cual ingresé a esta institución, así como su asesoría y orientación durante el desarrollo de este trabajo.

Agradecer hoy y siempre a mi familia que siempre me ha apoyado en cada una de mis desiciones brindandome sus sabios consejos en momentos de flaqueza.

A mi abuelita Julia quien ha permanecido pendiente de mí y que todos los días brinda con sus oraciones protección hacia mi persona poniendo siempre en primera instancia mi bienestar motivo por el cual brindo esta tesis como un logro más para ella.

A mis padres Federico y Elvia por ser unos grandes maestros que día a día me enseñan algo nuevo, que no sólo han sido padres, también amigos que me han mostrado el camino para ser una persona de bien y perseverante pues sin sus enseñanzas mi camino habría sido más difícil.

A mis hermanos Julio César, Belem y Ana Karen que siempre me han inspirado ser un ejemplo a seguir y de quien gusto aprender día con día.

A Jaime, esposo de mi mamá por estar a su lado y haberla apoyado minimizando el arduo trabajo de mantener a un hijo.

A mis amigos Jonathan, Leo y Edgar brindarme su amistad, por preguntarme continuamente el estatus de mi estudio, escucharme y darme ánimos para concluir exitosamente esta meta.

Agradezco a mis compañeros de la maestría Yanely, David, Gely, Héctor, Carlos, Alan, Adrian Coronel, Adrian Martínez por todo su apoyo y transferencia de conocimientos, su tolerancia y principalmente la amistad otorgada durante todo este tiempo.

Agradezco a Yanely por el cariño que me ha otorgado, su apoyo, su gran motivación y escuchar largas pláticas aburridoras, por encontrar y decirme aquellos defectos y cualidades que me ayudan a crecer y conocerme más para buscar mi siguiente meta.

Al ahora Dr. Armando Gómez por facilitarme el uso del laboratorio de interferometría, por su transferencia de conocimientos y el gran tiempo dedicado aún cuando se encontraba cercano a su defensa de tesis de doctorado.

A mis sinodales la Dra. Cristina Solano y el Dr. Ricardo Flores que gracias a sus observaciones y comentarios fue posible incrementar la calidad de la tesis.

A Guille, Lorena y Fabiola por ayudarme a agilizar todos los trámites requeridos hasta el último momento de esta estancia.

A Jose Luis Flores del taller óptico por la construcción de la lente y Carlos Juárez del taller de películas delgadas por la aplicación de la película anti-reflectante y la película 50-50.

Y por último pero no menos importante al Centro de Investigaciones en Óptica por las facilidades y conocimiento otorgado en este trayecto.

Índice general

1. Introducción	6
1.1. Antecedentes	7
1.2. Consideraciones de la percepción 3D	10
2. Técnicas para sensación de tercera dimensión	15
2.1. Imagen estereoscópica	16
2.1.1. Métodos para crear una imagen estereoscópica	16
2.2. Imagen Auto-estereoscópica	18
2.2.1. Métodos para crear imágenes auto-estereoscópicas	19
2.3. Holografía	22
3. Dispositivos de proyección de imágenes 3D	27
3.1. Visualización volumétrica	27
3.1.1. Dispositivos con volumen dinámico	28
3.1.2. Dispositivos con volumen estático	31
3.2. Televisores 3D de Alta Definición	35
3.2.1. Televisores 3D de Barrera de Paralaje	35
3.2.2. Televisores 3D lenticulares	36
3.2.3. Televisores 3D de Persianas Activas	38
3.2.4. Televisores 3D Pasivos	39

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	5
4. Diseño óptico Gaussiano del relevador óptico	41
4.1. Montaje del Sistema	44
4.1.1. Uso de dos superficies reflectoras	45
4.1.2. Uso de tres superficies reflectoras	47
5. Diseño óptico Gaussiano de la pirámide	50
5.1. Desviación del Rayo Transmitido	51
5.2. Diseño de la pirámide de vidrio (60°)	51
5.3. Diseño de la pirámide de vidrio (45°)	54
5.4. Segunda Reflexión sobre la pantalla de observación	55
5.5. Altura de la pantalla de proyección	56
5.6. Espacio de Proyección	57
6. Prueba de la estrella	60
7. Resultados	64
8. Conclusiones	65

Capítulo 1

Introducción

El universo percibido por el ser humano está compuesto por tres dimensiones espaciales; expresadas generalmente en un sistema de coordenadas cartesianas que representan la localización geométrica de un objeto dentro de un espacio determinado. Además de estas coordenadas existen otras características intrínsecas que nos ayudan a percibir la posición del objeto e identificar el volumen que ocupa en un espacio tridimensional. Durante el paso del tiempo se han estudiado los fenómenos fisiológicos y psicológicos del ser humano que le permiten capturar y procesar el mundo que le rodea. Hace varios siglos se originó el desarrollo de diversos métodos artísticos y tecnológicos que han buscado plasmar escenas capaces de sumergir al espectador en un mundo tridimensional o en su defecto que pueden simular objetos volumétricos suspendidos en el aire. Esta búsqueda constante ha evolucionado desde escenarios pintados sobre un lienzo, la composición de pares de imágenes estáticas seccionadas e impresas periódicamente, arreglos de cámaras, lentes y/o espejos hasta nuestros días donde la computación ha logrado una gran capacidad de desempeño en materia de procesamiento gráfico que, por medio de complejos algoritmos matemáticos aplicados a los programas de software permiten a los artistas crear animaciones tridimensionales virtuales que al ser combinadas con efectos y componentes ópticas han logrado acercarse cada vez más a las ideas revolucionarias de los creadores de ciencia ficción donde constantemente se muestran imágenes virtuales proyectadas sin necesidad de un medio físico visible de por medio tal como la ya famosa proyección de la princesa Leia en la Guerra de las Galaxias de George Lucas, la llamada holográfica de la novela de ciencia ficción *The Eighty Minute Hour* de Brian Aldiss y la visualización de una imagen tomográfica del cerebro de un paciente mostrado flotando dentro de un cubo transparente en una de las series de televisión actuales.

Por lo tanto, podemos definir una imagen tridimensional como aquella impresión gráfica capaz de mostrar espacialmente los objetos que se encuentran dentro de ella otorgando

sensación de profundidad y realismo a la escena frente a la que se encuentra el espectador; en una proyección tridimensional es posible observar objetos que muestran gradualmente su lado derecho cuando el observador se mueve hacia su derecha y su lado izquierdo cuando este se mueve en sentido contrario.

El lector encontrará en esta tesis los avances obtenidos hasta nuestros días en materia de dispositivos tecnológicos que generan imágenes virtuales tridimensionales; así, como el diseño de un sistema óptico basado en las leyes de reflexión de la luz para la proyección de objetos suspendidos dentro de una pirámide de vidrio que pueden ser observados desde posiciones diferentes alrededor del mismo.

1.1. Antecedentes

En las primeras obras artísticas realizadas alrededor del año 1600 por Giovanni Battista della Porta [Okoshi, 1976] presenta una técnica de dibujo estereoscópico en la que se dibujan dos imágenes precisas de un objeto observado desde diferentes direcciones dando al observador percepción de profundidad.

El término percepción de profundidad fue descrito por Euclides en el año 280 A.D. como “la percepción de profundidad es recibir por medio de cada ojo la impresión simultánea de dos imágenes desiguales del mismo objeto al mismo tiempo” [Okoshi, 1976]. Esta percepción conduce al observador a tener una sensación de inmersión en la escena que se encuentra frente a él o a contar con la relación de distancia de los objetos respecto de su posición.

La percepción de profundidad es interpretada por el cerebro partiendo de la información enviada por ambos ojos del espectador (visión binocular) o por un sólo ojo (visión monocular), donde en esta última el efecto se produce por medio de una sola imagen. La ventaja de la visión binocular frente a la monocular resulta en el incremento del campo de visión del observador debido a que ambos ojos nos dan un campo de visión de 208° con 130° de traslape [Falk, et al., 1986].

Por más de doscientos años muchas personas hicieron dibujos estereoscópicos similares a los hechos por Della Porta. Con el arribo de la fotografía el interés por los dibujos estereoscópicos disminuyó, sin embargo, se impulsó el desarrollo de los estereoscopios.

Un estereoscopio, es un dispositivo capaz de crear sensación de profundidad de un objeto al obtener la información de dos fotografías (o dibujos estereoscópicos) y redirigir la información de cada una de ellas a cada ojo del observador, siendo el cerebro quien se encarga de mezclarlas para generar la percepción de una sola imagen tridimensional.

El primer estereoscopio fué creado por Sir Charles Wheatstone en 1838 (Wheatstone stereoscope) Figura 1.1.1. Este es un dispositivo que consta de cuatro pequeños espejos, con los centrales ubicados a 90 grados uno del otro. Al colocar los espejos de esta forma, las imágenes correspondientes a cada ojo son desviadas y puestas una al lado de la otra; así, al verse montadas una sobre otra dan el efecto estereoscópico o tridimensional. Para ajustarse al tamaño de distintas separaciones interpupilares, el dispositivo tiene un eje o pivote que altera el grado de separación de los espejos. La orientación de las imágenes es correcta porque hay un número par de reflexiones en cada uno de los dos haces. Por lo tanto, este estereoscopio sustituye el cruzar los ojos para ver fotos o videos estereoscópicos, que para muchos es algo difícil y/o incómodo.

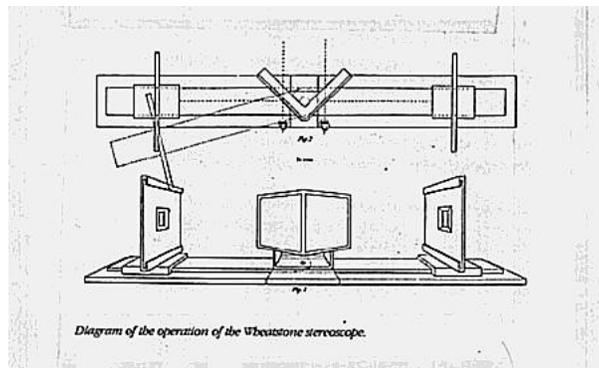


Figura 1.1.1: Estereoscopio Wheatstone. [<http://www.barnxbas.com/wheatstone.html>]

Con el pasar del tiempo, el estereoscopio creado por Sir Charles Wheatstone fue mejorado por otros científicos como Sir David Brewster en 1849 al reemplazar los espejos por lentes convexas (Brewster stereoscope) con lo que incrementó la visión del relieve y la facilidad de su fabricación Figura 1.1.2.

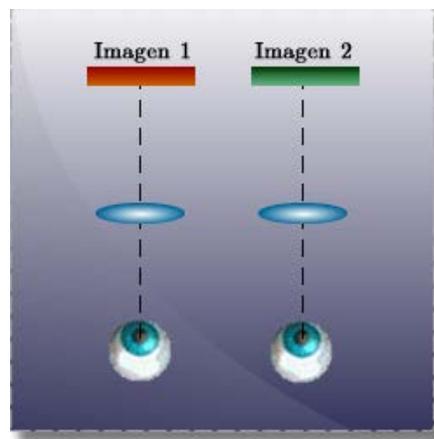


Figura 1.1.2: Estereoscopio Brewster.

La Tabla 1.1 lista el avance obtenido (después del estereoscopio de Brewster) durante el apogeo del desarrollo de estereoscopios y sucesivamente otras técnicas para crear imágenes tridimensionales así como el nombre de su creador [Okoshi, 1976].

Fecha	Inventor	Descripción
1862	Oliver Wendell Holmes	Agrego prismas a las lentes convexas del estereoscopio de Brewster.
	Clarence Kennedy	<i>Single-lens stereocamera.</i> Compuesta por una cámara de una lente grande (mayor a 75 mm) capaz de recolectar por sí sola la información de la imagen binocular necesaria.
1903	F. E. Ives	<i>Parallax Stereogram.</i> Consiste en una fina placa dividida en franjas verticales con una fotografía especialmente preparada detrás de la fina placa .
1908	M. G. Lippmann	<i>Parallax Panoramagram.</i> El ancho de las franjas de la placa es mucho menor que en un estereograma de paralaje.
1918	C.W. Kanolt	<i>Integral Photography.</i> Registra una imagen espacial completa. Consiste en una hoja (de vidrio o plástico) con aprox. 10,000 lentes convexas (fly's-eye), una placa fotográfica en el punto focal de las lentes.
1931	H.E. Ives	<i>Two-step Integral Photography.</i> Utiliza una segunda hoja de lentes que forma la imagen para ser vista correctamente por el espectador.
1940	F. E. Ives, Herbert E. Ives, Vanbenschoten, Winneck y Maurice Bonnet	<i>Lenticular Sheet.</i> Cambiaron las lentes convexas por lentes semicilíndricas. Esto dio a contar únicamente con paralaje horizontal.
1947	Dennis Gabor	<i>Holography:</i> Interferencia sobre una placa holográfica de un par de haces luminosos coherentes (láser), provenientes de una misma fuente de luz divididos en un haz de referencia (haz de luz sin modificación) y un haz objeto (reflexión del objeto).

Cuadro 1.1: Evolución de los dispositivos estereoscópicos.

1.2. Consideraciones de la percepción 3D

Existen cuatro condiciones primordiales que deben ser reunidas en una escena para que esta cree una correcta experiencia tridimensional [Dolgov, 1997]. Estas condiciones son señales neurofisiológicas conocidas como paralaje, disparidad binocular, disparidad de profundidad y convergencia. Estas señales nos permiten percibir diferencias en las características de los objetos dependiendo de la distancia a la que se localicen, por ejemplo, al encontrarse alejados son percibidos con menor tamaño, menor contraste, menor nitidez y son ligeramente diferentes en comparación con aquellos que se encuentran cercanos al espectador puesto que estos se observan con un tamaño mayor, se perciben con un contorno bien definido, tienen mayor contraste y principalmente bloquean la vista de los objetos del fondo.

A continuación se describe cada una de las condiciones que hemos de tomar en cuenta al momento de generar la imagen de un objeto o una animación tridimensional.

Paralaje Del griego “cambio” o “diferencia” [Dolgov, 1997], el paralaje es la desviación angular de la posición aparente de un objeto, dependiendo del punto de vista elegido. Para medir la profundidad, uno se basa en el hecho de que la vista es diferente desde posiciones diferentes. Como se muestra en la Figura 1.2.1, la posición del objeto observado en O, varía con la posición del punto de vista, en A o en B, al proyectar O contra un fondo suficientemente distante. Desde A el objeto observado parece estar a la derecha de la estrella lejana, mientras que desde B se ve a la izquierda de ella. El ángulo AOB es el ángulo de paralaje: ángulo que abarca el segmento AB desde O.

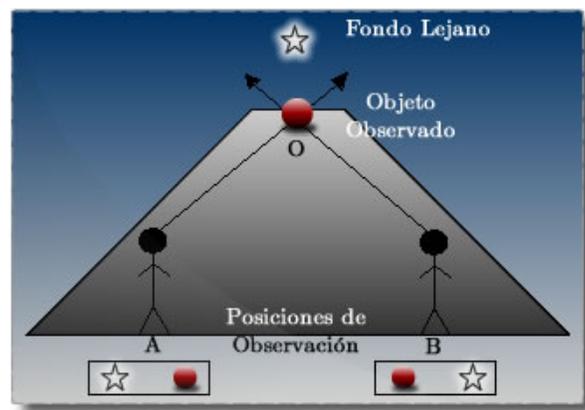


Figura 1.2.1: Representación del paralaje.

Por lo tanto, el paralaje ocurre cuando existe un cambio de posición del espectador, lo que produce una vista diferente cuando los objetos que se encontraban ocultos por el cuerpo del frente se vuelven visibles, sumado a esto, la velocidad de movimiento actúa también al ver que el primer plano se mueve con mayor velocidad que el fondo. Las técnicas estéreo 3D convencionales, pierden la capacidad de realizar el paralaje. Sin embargo, el paralaje no es absolutamente esencial para que el espectador tenga una experiencia 3D, además de esto, es necesario agregar un gran sentido de realismo a las imágenes tridimensionales.

Por lo tanto, cuando el observador cambia de posición respecto a una escena, ésta debe también cambiar su posición y/o las características dentro de la misma, de lo contrario el cerebro no interpretará la escena con la profundidad requerida.

Disparidad binocular La disparidad binocular se refiere a que cada ojo captura vistas ligeramente diferentes del mismo objeto Figura 1.2.2 debido a la separación existente entre ellos (aproximadamente de $6\frac{1}{2}$ cm [Falk, et al., 1986]). Esto es debido a que cada ojo tiene un ángulo de visión diferente, por lo tanto, los campos de visión se encuentran sobrepuestos significativamente. La disparidad binocular es indispensable para la determinación de la profundidad dado que el cerebro intenta conciliar los dos puntos de vista para así atribuir la diferencia de profundidad.

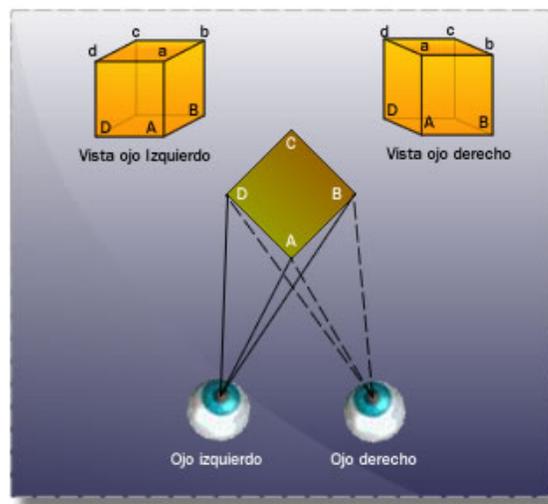


Figura 1.2.2: Disparidad binocular.

En una escena dos objetos serán vistos en profundidad si la separación entre las imágenes de las retinas difiere $1\mu m$ [Falk, et al., 1986] lo que es menor al diámetro de un cono del ojo humano. Esto puede ser producido registrando imágenes desde dos o más puntos de visión diferentes.

Disparidad de profundidad La disparidad de profundidad o acomodamiento es un proceso neurofisiológico que ajusta la forma del cristalino para enfocar sobre la retina la imagen de un objeto observado [Lizuka, 2009]. La cantidad de ajuste del cristalino necesaria para enfocar el ojo sobre un cuerpo nos indica la distancia a la que se localiza. Por ejemplo, si se observa un objeto claramente mientras los ojos están relajados, se sabe que el objeto se encuentra alejado, por el contrario, si al ver dicho objeto es necesario tensar los músculos ciliares para enfocarlo, entonces el objeto se encuentra en un punto cercano.

Cuando se enfocan cuerpos a una distancia determinada, objetos en otra distancia son vistos fuera de foco, y el cerebro ajusta las lentes y los músculos de la córnea para enfocar aquel en el que se centra la atención a esto se le conoce como acomodamiento. Debido a que el ojo está limitado en el campo de visión, uno nunca podrá enfocar todos los objetos que se encuentran en una escena (o todas las partes de un objeto tridimensional) por lo que es mejor fijar la atención sobre sólo uno a la vez. Cuando la atención de una persona es puesta en objetos borrosos, los ojos reenfochan el objeto para cambiar su estado de borroso a claro. Los cuerpos continuamente cambian de nítido a borroso, creando una escena en constante fluctuación hecha por una mezcla de imágenes nítidas y difusas las cuales se encuentran cambiando su foco continuamente. Este efecto puede ser observado con un ojo, creando la base de la percepción de profundidad limitada, mejor conocida como “percepción de profundidad monocular”.

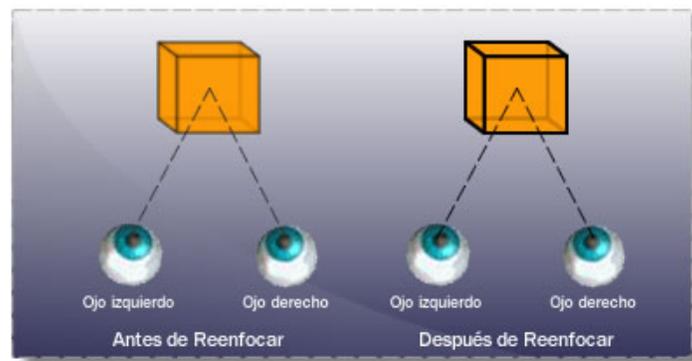


Figura 1.2.3: Disparidad de Profundidad.

Esta condición es muy importante, porque el cerebro actúa para reenfochar los ojos de una posición a otra, lo que conlleva a experimentar una verdadera percepción de profundidad. En los sistemas de representación de imágenes 3D actuales, no es posible que ocurra este fenómeno fisiológico, razón que produce fatiga visual y dolores de cabeza tras un periodo de visión extendido. Estos malestares son ocasionados por el conflicto causado entre el acomodamiento y la convergencia.

Este fenómeno está presente en la vida real y actualmente no puede ser reproducido con

las técnicas convencionales de 3D puesto que se requiere enfocar por lo menos dos componentes diferentes de una escena en por lo menos dos lugares diferentes en el espacio.

Convergencia Se conoce como convergencia a la superposición de las vistas obtenidas por cada ojo al momento de enfocar un cuerpo a una distancia determinada. El ángulo subtendido por un objeto entre los ejes visuales y la fovea decrece al incrementar la distancia del objeto. El eje visual no coincide exactamente con el eje óptico del lente cristalino pues hay de 1.5° a 5° de discrepancia entre ellos.

Si se observa un objeto cercano, el ángulo de visión entre ambos ojos es mayor que si se mira un objeto distante Figura 1.2.4. Para un objeto situado a 25 cm que es el punto normal de convergencia, el ángulo de visión es de 15° mientras que para un objeto localizado a 4 mts del espectador es apenas de 1° .

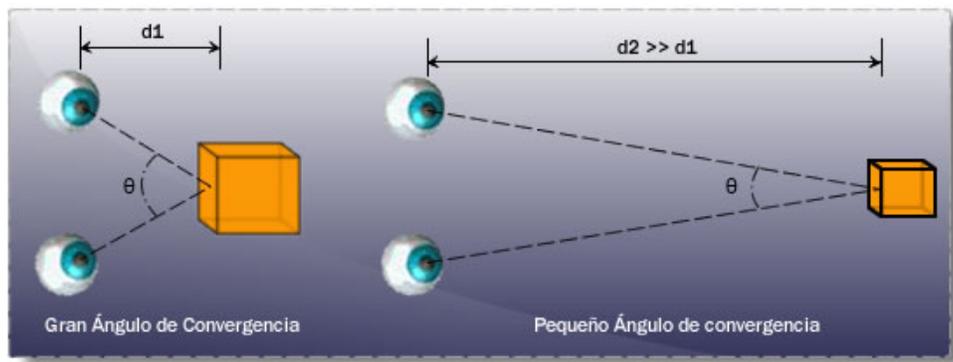


Figura 1.2.4: Convergencia.

Las características descritas arriba son definidas como las principales condiciones para crear un ambiente tridimensional, sin embargo existen otras condiciones que aportan gran sentido de realismo a una escena tridimensional como son:

Recordado de la geometría del objeto y perspectiva lineal: La memoria del observador en cuanto al tamaño y altura del objeto juega un papel importante en la obtención de la información tridimensional. Una imagen propiamente dibujada en un lienzo bidimensional puede hacer que los objetos dibujados en ella se vean tridimensionales. Los artistas escalan objetos cercanos más grandes que objetos lejanos para crear perspectiva lineal, así, una pintura en un lienzo bidimensional parece tridimensional.

Oclusión: El objeto obstruido siempre se encuentra más alejado que aquel que lo obstruye aún siendo éste de mayores dimensiones que el que se encuentra en primer plano.

Sombreado: Añadir un sombreado entre las diferentes secciones que forman una escena y/o simplemente sobre diversos puntos de un objeto así como un brillo relativo aumenta significativamente el efecto 3D.

Resolución: Aquellos objetos que cuenten con baja resolución o se vean borrosos indican su localización en una posición más alejada.

Como hemos visto, el estudio de la percepción tridimensional y los esfuerzos por generar imágenes capaces de producir sensación de tridimensionalidad al espectador no es un tema propio del siglo XXI, (aunque su auge se ha incrementado considerablemente en los últimos años) esto ha demostrado que durante la experiencia diaria, cada una de las señales fisiológicas desempeñadas por nuestro cuerpo y nuestro cerebro forman una correlación entre cada grado de ajuste, cada grado de convergencia, oclusión, nitidez, etc., que al ser consideradas al momento de desarrollar una imagen o escena tridimensional es posible identificar aquellas condiciones que mejor se adapten para obtener un resultado exitoso y con gran realismo donde el espectador sea nuestro mejor crítico.

Capítulo 2

Técnicas para sensación de tercera dimensión

Como hemos visto en el capítulo anterior, el estudio de las condiciones fisiológicas del ser humano generó diversas propuestas de fotografía que lograron proyectar el volumen de un objeto o incluso escenas completas. Hoy en día algunos conceptos de este tipo de fotografía aún son utilizados por los científicos y artistas de todo el mundo, adaptándolos de buena forma a la tecnología de nuestro tiempo, aunque estas aún presentan algunos problemas para lograr un efecto total como se describe a continuación.

Las visualizaciones estereoscópicas: Basadas en paralaje binocular pueden causar confusión visual, fatiga y dolor de cabeza en tiempos de exposición prolongados inducidos por las inconsistencias en la información visual de la imagen 3D.

Las visualizaciones de volumen: Generan imágenes tridimensionales basadas en puntos de luz organizados en un espacio 3D por medio de un escaneo óptico constituido por componentes mecánicas, pero no pueden proveer imágenes muy convincentes debido a que se hace una reproducción de color limitada y pobre debido a oclusiones.

Las visualizaciones Multi-Vista 3D: Usualmente despliegan de 8 – 16 imágenes planas vistas desde diferentes direcciones, desafortunadamente están comprometidas a un campo de visión limitado con características de saltos.

La fotografía integral: Es capaz de obtener en tiempo real imágenes continuas dentro de un ángulo de visión bajo luz incoherente y desplegando imágenes 3D en movimiento usando una sola lente tanto en la etapa de captura como la de despliegue. Sin embargo, el tamaño del despliegue, la resolución lateral y la profundidad de imagen son limitaciones básicas de estas aplicaciones.

Las imágenes virtuales: Creadas por reflexión generalmente se proyectan en un espejo o pantalla oculta dentro de un espacio físico [Barjau, 2005], donde las imágenes son percibidas por el espectador por medio de la reflexión sobre un vidrio o material transparente colocado frente a él a un ángulo determinado. Sin embargo, la nitidez de la imagen no siempre resulta suficiente y la imagen no puede ser observada en lugares bien iluminados.

La Holografía: es un método para la captura y reconstrucción de una imagen tridimensional que ha sido considerado el método ideal para generar imágenes tridimensionales puesto que la perspectiva es variable al moverse el espectador, lo cual es imposible con cualquier otro sistema. El problema aquí es que las visualizaciones holográficas disponibles con los materiales convencionales de registro exhiben una aplicación restringida debido a la falta de capacidad en la actualización de la imagen. Aunque recientemente un proyector 3D holográfico basado en polímeros fotorefractivos fue presentado [Tay, Blanche, et al, 2008], existen algunas limitaciones más en cuestión de material de registro pues aún es difícil realizarlo en tiempo real, no se cuenta con un formato a gran escala ni visualización 3D a color (full-color) con alta resolución.

2.1. Imagen estereoscópica

Una imagen estereoscópica resulta de la interpretación producida por el cerebro, basada en la combinación de un par de imágenes de la misma escena vista desde direcciones ligeramente diferentes, permitiendo la visualización de diversas características del cuerpo observado y de aquellos que se encuentran detrás de él. Esta percepción produce sensación de profundidad en la imagen al mostrar diferentes ángulos de visión de un objeto observado.

2.1.1. Métodos para crear una imagen estereoscópica

Las técnicas estereoscópicas fueron las primeras técnicas de formación de imágenes tridimensionales, sin embargo, uno de sus principales inconvenientes es que el observador requiere usar gafas para separar las vistas requeridas por cada ojo para percibir el efecto estereoscópico, de lo contrario, el usuario verá un efecto fantasma en la escena proyectada.

Anaglifos: En 1853, Wilhelm Rollman de Alemania demostró el principio del anaglifo [Lizuka, 2009] que consiste en separar imágenes en colores complementarios (verde y rojo) que representan las vistas izquierda y derecha; estas vistas son acomodadas una sobre la

otra en el mismo plano para ser separadas posteriormente por medio un filtro de color diferente en cada ojo Figura 2.1.1.

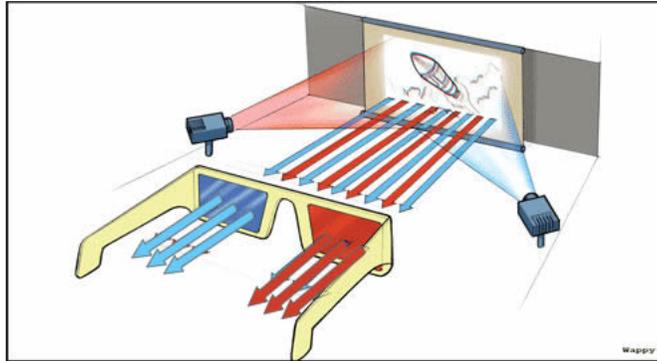


Figura 2.1.1: Filtro de color.

Polarización de la luz: En esta técnica, se proyecta una imagen con una polarización horizontal mientras que la otra lo es con una polarización vertical. Al proveer al espectador de gafas polarizadas ortogonalmente es posible hacer que cada ojo obtenga la información proveniente de la imagen con el eje de transmisión paralelo, así, si la lente del ojo derecho tiene un eje de transmisión vertical, éste recibirá sólo aquellas imágenes que cuenten con el eje homólogo, de la misma forma, el ojo izquierdo sólo recibirá aquellas imágenes polarizadas horizontalmente Figura 2.1.2.

Otra forma más efectiva de realizar esta tarea es que esto se puede hacer en dos estados diferentes de polarización. Por ejemplo, dos polarizadores lineales ortogonales o también en dos polarizaciones circulares uno hacia la derecha y otro hacia la izquierda con dos placas de fase ortogonales. La ventaja del segundo método es que no se mezclan las dos imágenes si el observador inclina la cabeza.

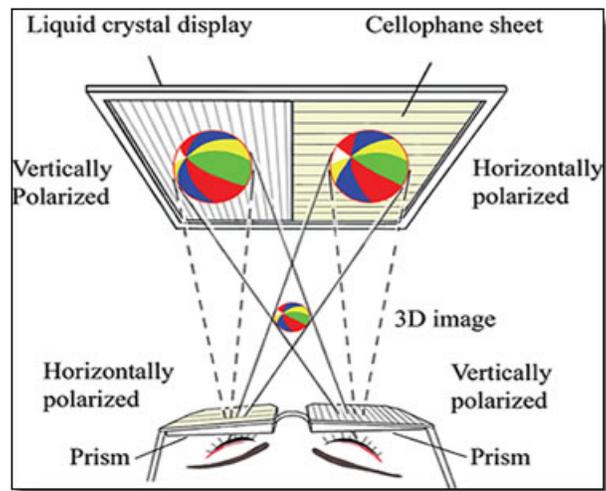


Figura 2.1.2: Proyección estereoscópica por polarización de luz, [Lizuka, 2009].

En la actualidad las películas 3D se graban generando imágenes estereoscópicas basadas en la polarización de la luz y puesto que necesitamos una imagen para cada ojo, es necesario grabar dos películas con imágenes separadas unos centímetros.

A la hora de proyectar la imagen en el cine, se proyectan las dos películas de forma que se intercalen los fotogramas para el ojo izquierdo y para el ojo derecho, es por eso que sin las gafas, vemos la imagen doble, ya que se proyectan los muy rápido los fotogramas. En total se proyectan 144 fotogramas por segundo frente a los 24 de una película convencional, esto se hace para eliminar el parpadeo de la imagen y da la sensación de ver dos imágenes superpuestas, pero la magia realmente sucede gracias al uso de la polarización de la luz.

Ventajas:

- Resolución de pantalla completa.
- Disminuye la incomodidad provocada por los colores complementarios del anaglifo.

Desventajas:

- Oscurecimiento de las imágenes.

2.2. Imagen Auto-estereoscópica

La diferencia principal entre las imágenes estereoscópicas y las auto-estereoscópicas radica en el hecho de que éstas pueden ser observadas sin necesidad de usar lentes especiales

u otros impedimentos, motivo por el cual, este tipo de técnicas tiene cierta ventaja sobre las anteriores.

2.2.1. Métodos para crear imágenes auto-estereoscópicas

Método de barrido: En 1903, el estadounidense Frederick E. Ives [Lizuka, 2009] propuso este método, en el se utiliza una placa con franjas verticales negras divididas por franjas transparentes (pantalla de barrido) Figura 2.2.1. Dos imágenes de una misma escena (vista desde direcciones diferentes) son puestas detrás de la pantalla de barrido, el espectador se sitúa frente al arreglo observando con cada ojo la imagen correspondiente a través de las rejillas transparentes.

El estereograma de paralaje, está conformado por tres elementos:

1. Pantalla de barrido: Consiste en una pantalla formada por líneas opacas (con la misma frecuencia) separadas por rendijas transparentes con un ancho menor.
2. Placa de vidrio transparente: Localizada detrás de la pantalla de barrido provocando un espaciado entre 1 y 3 mm.
3. Emulsión fotográfica: Que obtendrá la información de la imagen dividida en finas líneas de imagen alineadas detrás de cada apertura transparente.

Ventajas

- Se elimina el uso de lentes especiales para observar imágenes en relieve.

Desventajas

- Las franjas de la pantalla de barrido deben de ser extremadamente finas y estrechas para que el ojo humano no alcance a distinguirlo.
- Al contar con franjas estrechas, se obtiene dispersión de la luz debido al fenómeno de difracción.
- Disminuye el brillo y la nitidez de las imágenes.

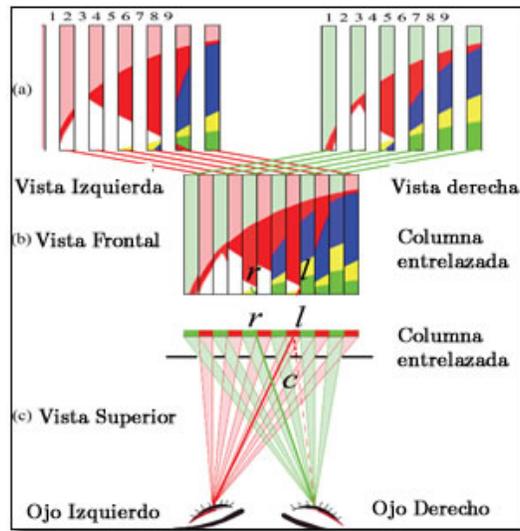


Figura 2.2.1: Superposición de imágenes.

Método lenticular: En este método, el concepto es el mismo que para el de la pantalla de barrido, sin embargo, a diferencia de este último, este método utiliza una hoja lenticular en la que se forma un arreglo lineal de lentes delgadas cilíndricas plano-convexas conocidas como “lenticulas” [Roberts, 2003], donde cada una actúa como un multiplexor de luz que proyecta un subconjunto de píxeles verticales frente a cada ojo. Esta hoja de lentes es transparente y la cara posterior, que constituye el plano focal de la lente, es plano Figura 2.2.2.

Por lo tanto, en vez de que se expongan imágenes estereográficas individuales detrás de la hoja lenticular, se registran imágenes individuales (rayadas) en color rojo, azul y verde y posteriormente se re-combinan por medio de un sistema de proyección especial en una única imagen a color usando una emulsión en blanco y negro [Roberts, 2003].

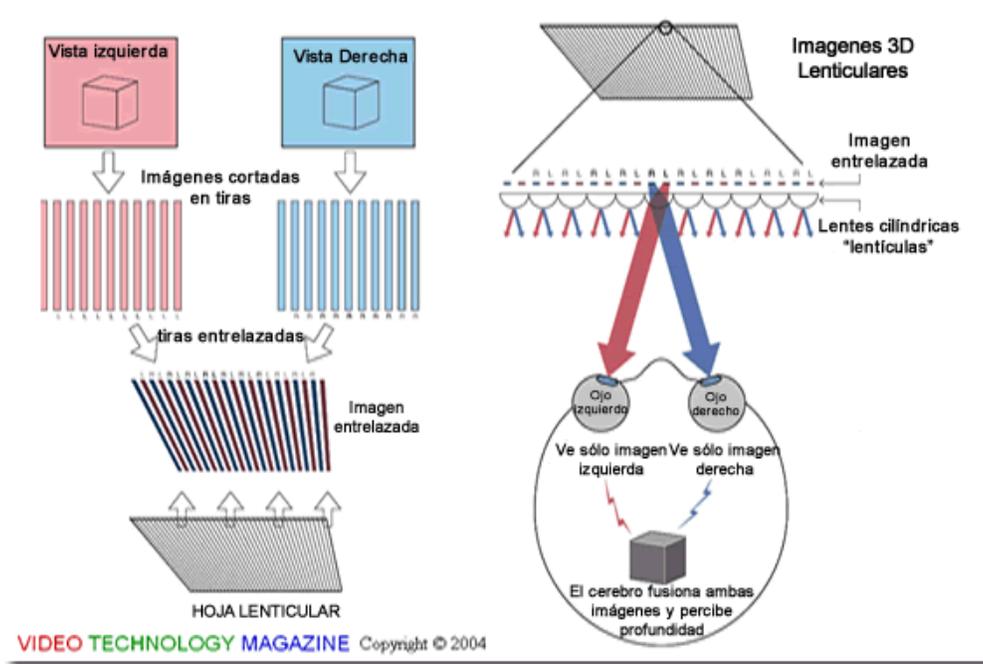


Figura 2.2.2: Proyección de una imagen 3D con hojas lenticulares.

Ventajas:

- Tiene una mayor resolución que el método de barrido.
- Mayor ángulo de visión.
- Mayor abundancia de luz.

Desventajas:

- El observador debe encontrarse en una sola posición.
- Sólo se tiene paralaje horizontal.
- La resolución total es dividida por lo menos entre dos (uno por imagen).

Método Integral: En Marzo de 1908, el físico alemán Gabriel Lippman [Roberts, 2003] propuso el uso de una serie de lentes en la superficie de la imagen en lugar de una serie de líneas opacas frente a ella. Utilizando un arreglo de lentes convexas conocida como ojos de mosca (fly's eye) fue capaz de registrar una imagen espacial completa con paralaje en todas las direcciones. Con éste método se obtuvieron colores bien definidos al momento

de reproducir la imagen gracias al registro de los patrones de interferencia generados por la luz directa y la luz reflejada por las lentes. Por lo tanto, este arreglo pudo ser utilizado tanto para registrar como para reproducir la imagen Figura 2.2.3.

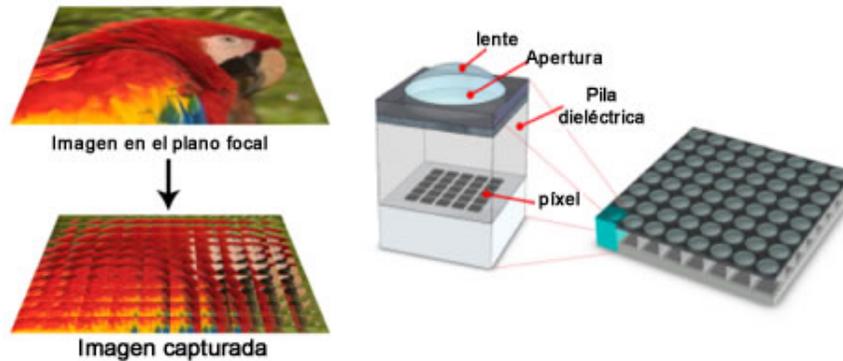


Figura 2.2.3: Registro 3D de una imagen por medio de un arreglo lentes biconvexas (fly's-eye).

Ventajas

- Cuenta con paralaje horizontal y vertical.
- se obtienen colores bien definidos al momento de reproducir la imagen.
- Este método puede ser utilizado para registrar como para reproducir una imagen.

Desventajas

- La imagen resultante puede parecer pixelada debido al gran número de lentes, puesto que cada una genera una pequeña imagen de la imagen total.
- Se sacrifica una gran cantidad de resolución espacial al contar con paralaje en ambas direcciones.

2.3. Holografía

En 1948 el físico Húngaro Dennis Gabor [Collier, Burckhardt, et al., 1971] desarrollo un método para registrar y reconstruir la amplitud y la fase de una onda al cual llamó holografía

del Griego “holos” que significa “completo” y “grafía” que significa “grabar” pues el registro que se obtiene de la imagen es completo incluyendo la información tridimensional.

La holografía es un proceso óptico de dos pasos para formar la imagen tridimensional de un objeto utilizando una fuente de luz coherente. Para esto, es necesario obtener un registro permanente del objeto en un medio fotosensible o digital [Schnars, Jueptner, 2005] , el cual es llamado holograma.

Para obtenerlo, un haz de luz láser se divide en dos ondas; una componente se dirige directamente hacia una placa holográfica conocida como onda de referencia y la otra componente se dirige hacia el objeto, denominada onda objeto [Caufield, 1979]. La luz reflejada por el objeto es dirigida hacia el medio fotosensible, superponiéndose al haz de referencia. Como los dos haces son coherentes, forman un patrón de interferencia complejo en el plano de la placa holográfica que sufrirá reacciones en los haluros de plata debido a la exposición de la intensidad luminosa, estos compuestos se fijan al aplicar un proceso de revelado.

Existen dos casos de obtención de hologramas: de amplitud, cuando el medio de registro es una emulsión de plata y cuando el holograma se “blanquea” para que se convierta en un medio transparente, entonces el holograma se llama de fase. Existen diferentes tipos de hologramas, conocidos como hologramas de transmisión, de reflexión y/o de arcoiris entre otros [McNair, 1983]. La Figura 2.3.1 muestra un arreglo para el registro de un holograma de transmisión.

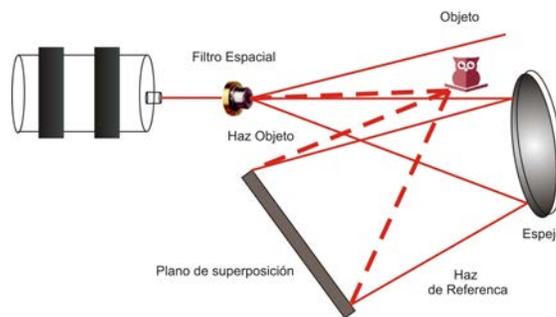


Figura 2.3.1: Holograma de transmisión.

La Figura 2.3.2 muestra la interferencia de las ondas objeto y referencia sobre una placa fotográfica.

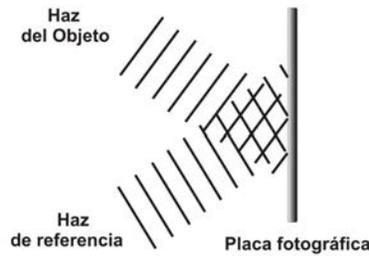


Figura 2.3.2: Patrón de Interferencia.

Si se suponen dos frentes de onda planos. Donde el haz de referencia está dado por

$$A(x, y) = a(x, y)e^{i\phi(x,y)} \quad (2.3.1)$$

y el haz proveniente del objeto

$$B(x, y) = b(x, y)e^{i(\alpha x + \phi(x,y))} \quad (2.3.2)$$

Donde el haz $B(x, y)$ se encuentra a un ángulo α respecto de $A(x, y)$, entonces, la intensidad total en la placa fotográfica será

$$I(x, y) = |a(x, y)e^{i\phi(x,y)} + b(x, y)e^{i(\alpha x + \phi(x,y))}|^2 \quad (2.3.3)$$

Después de que se revela el holograma se observan unas líneas que están muy cercanas entre sí, las cuales difractan la luz, esto da indicios de que la información ha sido grabada correctamente en la placa.

Cuando se ilumine el holograma con $A(x, y)$, la luz transmitida T será igual al producto de $A(x, y)$ por la transmitancia del holograma que es proporcional a la intensidad. Así entonces, se obtiene

$$T = a(a^2 + b^2)e^{i\phi} + a^2b(e^{i(\alpha x + \psi)}) + a^2b(e^{-i(\alpha x + \psi - 2\omega)}) \quad (2.3.4)$$

Donde

- $a(a^2 + b^2)e^{i\phi}$ orden cero de difracción
- $a^2b(e^{i(\alpha x + \psi)})$ imagen primaria (orden 1)

- $a^2b(e^{-i(\alpha x + \psi - 2\omega)})$ imagen primaria (orden -1)

En el proceso de reconstrucción, el holograma deberá colocarse frente a un haz de características similares al utilizado como referencia durante el registro del mismo, de lo contrario, no será posible su reconstrucción. La imagen del objeto es formada al difractarse la luz en la estructura registrada en el material.

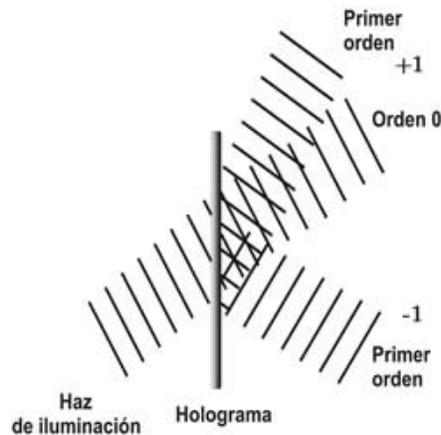


Figura 2.3.3: Difracción de la onda provocada por el patrón de referencia.

Al iluminar el holograma con el haz $A(x, y)$ se obtendrán los tres haces independientes mostrados en la ecuación 2.3.4. La imagen primaria (orden 1) también conocida como imagen real, se localiza en la misma posición que el objeto original, así mismo, la imagen primaria de (orden -1) también conocida como imagen virtual se forma en el lado opuesto de la placa.

Ventajas

- La imagen registrada es completamente tridimensional.
- La calidad de la imagen está ligada a la calidad de la película de registro.
- Es posible observar a través de la imagen.
- El observador puede encontrarse en cualquier punto frente a la imagen reconstruida.
- Tiene un ángulo de visión mayor a cualquiera de los métodos anteriores.

Desventajas

- El registro de la información es muy delicado.

- No se cuenta aún con un material con una gran velocidad de actualización.
- El láser utilizado para la reconstrucción debe ser de las mismas características que el utilizado para el registro.

Es notable que las técnicas descritas en este capítulo han evolucionado ligeramente en ocasiones complementándose unas a otras mostrando algunas ventajas y desventajas entre ellas. Como se mencionó anteriormente, la holografía resulta ser la técnica más prometedora no sólo en este ramo sino también en otras áreas como el almacenamiento de información en donde se ha obtenido un gran incremento de 500Gb/in² reportado por InPahse en 2006. De la misma forma Michael Talbot ha desarrollado una nueva teoría conocida como el “Universo Holográfico”, sin embargo este es un tema que queda fuera del objetivo de esta tesis.

Capítulo 3

Dispositivos de proyección de imágenes 3D

Actualmente es posible subdividir la tecnología de visualización 3D en aquellas que nos permiten ver modelos en tres dimensiones por medio de componentes mecánicas que se desplazan a grandes velocidades o aquellas que se encuentran contenidas en un volumen transparente con un ángulo de visión de 360 grados y aquellas que se presentan en monitores de rayos catódicos o compuestas por una serie de pantallas de cristal líquido que sumergen al usuario en la escena que se presenta frente a él.

3.1. Visualización volumétrica

La visualización volumétrica consiste en desplegar modelos tridimensionales proyectados sobre superficies mecánicas en movimiento en ocasiones contenidas dentro de un cuerpo transparente. Esto permite a uno o varios espectadores observar los objetos o imágenes proyectados sobre la superficie. Al mismo tiempo facilita el desplazamiento alrededor del dispositivo en contraste con otros aparatos convencionales como un monitor, donde las imágenes se muestran sobre una superficie plana.

Existen varios métodos para conseguir imágenes volumétricas. Estos métodos se pueden agrupar en dos categorías, dependiendo de si el volumen es generado por un dispositivo estático o en movimiento.

3.1.1. Dispositivos con volumen dinámico

En este tipo de dispositivos, el modelo tridimensional se crea por el movimiento mecánico, vibratorio o rotatorio de una pantalla [Guerrero, 2008]. La velocidad de movimiento de la pantalla debe ser lo suficientemente alta para que ésta no sea percibida por el observador. Sin embargo, aún a una gran velocidad es posible notar parpadeo en la imagen proyectada.

Los primeros dispositivos de este tipo se propusieron sobre el año 1940, por ejemplo, el de Parker and Wallis (1948). Desafortunadamente, la ausencia de los sistemas informáticos necesarios para su control hizo imposible producir sistemas operacionales en aquella época. Fue hasta la década de los 80-90, debido al aumento en la velocidad de procesamiento de las computadoras que mejoró la viabilidad en el desarrollo de estos aparatos.

Dispositivos de espejo Oscilante

Este dispositivo está constituido por un espejo situado frente a un monitor de rayos catódicos (Cathode Ray Tube, CRT) donde el espejo tiene la capacidad de variar su posición horizontal rápidamente lo cual provoca en los ojos del espectador la sensación de tercera dimensión al percibir profundidad, provocada por las imágenes proyectadas en el espejo a diferentes distancias Figura 3.1.1.

El espectador debe colocarse del mismo lado en que se coloca el monitor de rayos catódicos, con esto, la imagen del monitor se ve reflejada en el espejo creando la ilusión de que el objeto proyectado se encuentra frente al observador.

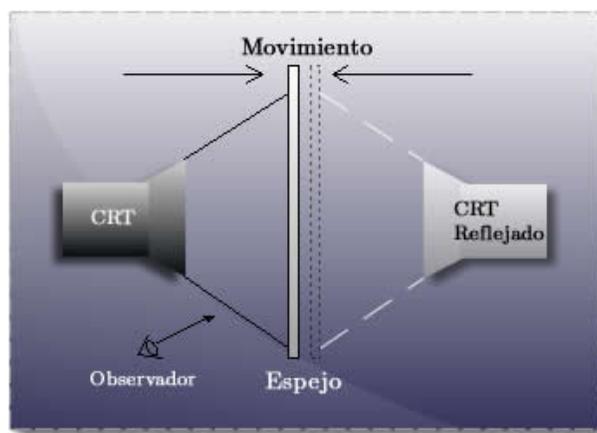


Figura 3.1.1: Esquema de un espejo oscilante.

Desventajas:

- La velocidad del movimiento de la pantalla debe ser lo suficientemente alta para que ésta no pueda ser percibida por el observador.
- La imagen proyectada puede verse afectada por la reflexión del ambiente circundante.

Dispositivos de Espejo Varifocal

Esta es la técnica de volumen dinámico más empleada, está constituida por un monitor de rayos catódicos, un espejo circular flexible y un altavoz de altas y bajas frecuencias. Sobre el altavoz el espejo flexible se sostiene por los bordes y modifica su distancia focal debido a las vibraciones del primero de ellos [Traub, 1968]. Por lo tanto, al tener un sistema sincronizado que controle la frecuencia del altavoz y las imágenes proyectadas en el monitor de rayos catódicos, el espectador puede ver objetos en profundidad. Esta técnica también ha sido empleada para la proyección y transmisión de video tridimensional [King, Berry, 1970].

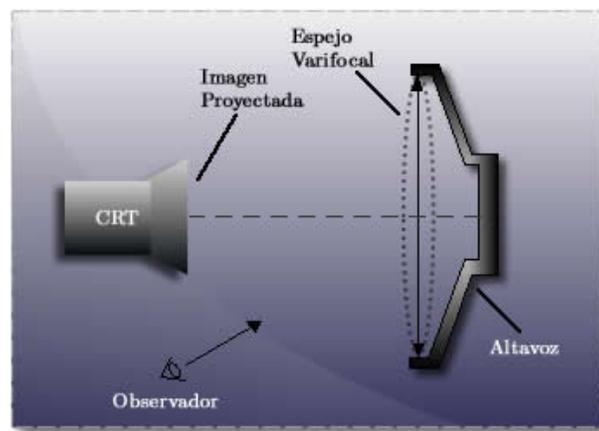


Figura 3.1.2: Espejo Varifocal [Guerrero, 2008].

Félix 3D

Los recientes avances en las tecnologías de proyección mediante diodos láser y, en particular de la tecnología de procesamiento digital de luz (Digital Light Processing, DLP2) de Texas Instruments han hecho posible la fabricación y distribución de estos instrumentos de proyección. Estos aparatos están compuestos por dos partes: un proyector y una superficie de proyección que se monta sobre un eje y utiliza un motor para hacerla girar a gran velocidad.

Actualmente hay dos tecnologías de proyección que se están usando en estos dispositivos. Los dispositivos Felix 3D y Genex utilizan tres láseres: uno rojo, uno verde, y uno azul, mientras que Perspecta utiliza la tecnología de procesamiento digital de luz.

El visualizador Felix 3D se basa en una pantalla helicoidal semitransparente Figura 3.1.3 [Langhans, et al., 2002]. La pantalla de proyección se hace girar rápidamente, proporcionando un medio de visualización volumétrica a través del cual se proyectan pulsaciones láser.

Debido a la alta velocidad de rotación (unas 1.200 RPM) la pantalla en si se hace invisible al observador.

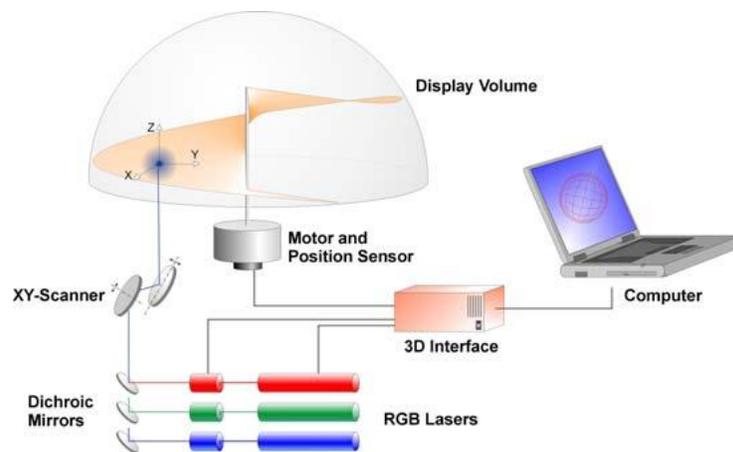


Figura 3.1.3: Funcionamiento Félix 3D [Guerrero, 2008].

Las imágenes en color se producen mediante la combinación de los láseres rojo, verde y azul (RGB) por lo que a través de la modulación de cada componente por separado, es posible producir cualquier color.

Perspecta Spatial 3D

Este dispositivo volumétrico es similar al Félix 3D, descrito anteriormente, sin embargo, éste utiliza una pantalla vertical sobre la que se proyectan imágenes multiperspectivas a gran velocidad de una escena tridimensional con un tamaño de 768 X 768 píxeles [Cossairt, et al., 2007]. En este dispositivo es posible observar una de las condiciones principales descritas en el primer capítulo de esta tesis que es ocultar de objetos lejanos por medio de objetos cercanos. La Figura 3.1.4 muestra un esquema de este instrumento.

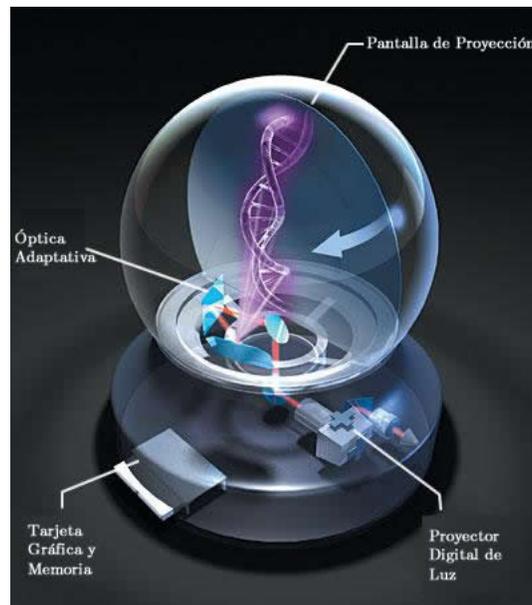


Figura 3.1.4: Funcionamiento Perspectra [Guerrero, 2008].

3.1.2. Dispositivos con volumen estático

Los aparatos que pueden crear un volumen sin la necesidad de emplear el movimiento mecánico se llaman dispositivos con volumen estático. Estos dispositivos son más confiables, y el hecho de que la frecuencia de actualización de la imagen no este determinada por el movimiento de la pantalla permite reducir el parpadeo de la imagen.

Los dispositivos de este tipo propuestos a la fecha emplean un volumen gaseoso o cristalino para producir una imagen 2D o volumétrica. Entre ellos podemos encontrar el HelioDisplay y el FogDisplay. Además hay otro dispositivo, el DepthCube, que también produce imágenes volumétricas, pero dentro de una pila de pantallas de cristal líquido. Mientras los primeros permiten al usuario tocar los objetos 3D, este último sólo permite visualizarlos.

HelioDisplay

El Helio display es una tecnología interactiva desarrollada por la empresa IO2 Technology [<http://www.io2technology.com/>] que proyecta en el aire imágenes estáticas o en movimiento que pueden ser manipuladas con la punta de los dedos.

Este dispositivo puede mostrar imágenes sobre un área de 30 pulgadas de diagonal, incluyendo secuencias de vídeo. Este aparato trabaja creando una nube de partículas microscópicas que vuelven al aire un medio imagen-amigable. La nube de partículas se proyecta e

ilumina desde la parte inferior del dispositivo, generando una imagen que flota en el aire. La Figura 3.1.5 presenta la imagen de un pez flotando en el centro de una sala de estar sin necesidad de una pantalla colocada sobre la mesa.



Figura 3.1.5: HelioDisplay [Guerrero, 2008].

FogScreen

FogScreen es una superficie de proyección incorpórea y penetrable creada por la empresa con nombre homónimo [<http://www.fogscreen.com/en/home/index.html>] que está formada por vapor seco proveniente del agua pura del grifo y sin productos químicos. El vapor es fresco y seco al tacto. FogScreen es fina y plana; por eso es capaz de generar una imagen de proyección de alta calidad. La imagen flota en el aire y puede ser observada por varios usuarios Figura 3.1.6. Con sólo dos proyectores estándar se puede crear una imagen frontal y otra posterior a cada lado de la cortina de vapor.



Figura 3.1.6: Fogscreen [Guerrero, 2008].

Monitores con varios LCDs

El dispositivo DepthCube de Light-Space [<http://www.lightspacetech.com/>] usa tres chips de la tecnología de procesamiento digital de luz Figura 3.1.7. Sin embargo, en vez de una sola pantalla de proyección este dispositivo tiene 20 pantallas de cristal líquido separadas una de otra unos 5 milímetros. Las imágenes de los dispositivos de procesamiento digital de luz atraviesan las pantallas de cristal líquido produciendo imágenes a distintas profundidades. Estas imágenes se combinan ópticamente para formar una imagen tridimensional.

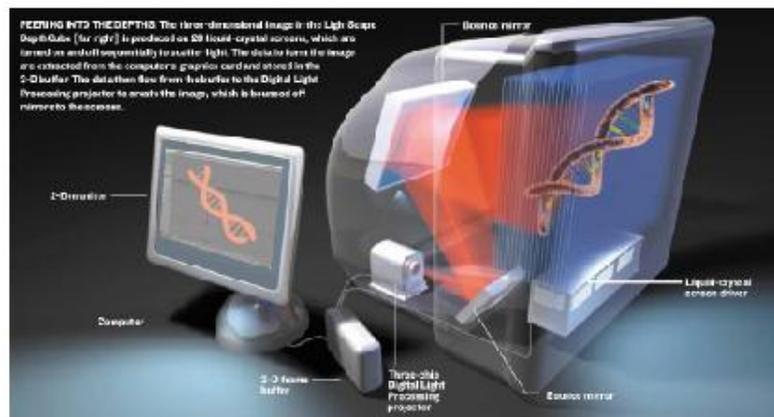


Figura 3.1.7: Esquema DepthCube [Guerrero, 2008].

Cheoptics 360

Cheoptics 360 es un arreglo formado por una pirámide invertida que utiliza cuatro placas de vidrio y cuatro proyectores donde cada uno despliega una imagen bidimensional de forma sincronizada Figura 3.1.8; al proyectar estas imágenes en el piso exterior de la pirámide invertida, las imágenes virtuales se funden creando una apariencia tridimensional del objeto que puede ser vista en un ángulo de 360°.



Figura 3.1.8: Imagen producida por Cheoptics 360 [Guerrero, 2008].

La arquitectura permite tener más de un usuario frente a la estructura pudiendo cada uno de ellos observar la imagen u objeto tridimensional desde diferentes direcciones.

Mirage

Mirage es un arreglo de dos espejos parabólicos opuestos capaces de proyectar una imagen real (a través del hueco del espejo superior) de un objeto pequeño localizado sobre el espejo inferior. El espejo parabólico superior localizado en la distancia focal del espejo inferior dirige todos los rayos procedentes del vértice de este último hacia abajo independientemente de su ángulo con respecto al eje. Cuando estos rayos verticales son reflejados por el espejo inferior convergen a un punto imagen el localizado en el vértice del espejo superior Figura 3.1.9.

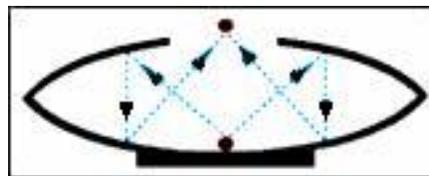


Figura 3.1.9: Rayos entre espejos parabólicos [Adhya, et al., 2006].

Para obtener un resultado favorable, la separación entre los espejos no debe variar puesto que se requiere tener una amplificación $M = 1$ de lo contrario, la imagen se deforma conforme al desplazamiento del espejo superior y/o el objeto [Adhya, et al., 2006].

3.2. Televisores 3D de Alta Definición

Muchas de las pantallas auto-estereoscópicas logran su efecto creando por lo menos dos imágenes diferentes, desplegadas usando dos conjuntos separados de píxeles sobre un dispositivo proyector visible por lo menos dentro de dos regiones separadas en el espacio, usualmente llamadas zonas de visión localizadas al frente del sistema. Si un observador se sienta al frente con un ojo en una región y otro en la otra, este observará una imagen con profundidad. Los métodos aquí expuestos son los más comunes existiendo otros que buscan resolver los principales problemas encontrados al utilizar estas técnicas [Gremse, 2009].

3.2.1. Televisores 3D de Barrera de Paralaje

En el caso de la empresa Dimension Technologies Inc. (DTI), el efecto es logrado por medio del uso de pantallas de cristal líquido de proyección trasera (back-light technology) conocida con el nombre de iluminación de paralaje (parallax illumination).

El arreglo emplea un sistema de proyección transmisor de pantallas de cristal líquido y se localiza una placa de iluminación especial separada a una distancia d . La placa de iluminación produce un gran número de líneas verticales muy delgadas, muy brillantes y separadas uniformemente Figura 3.2.1, con un espaciado negro entre cada una existiendo una línea para cada dos columnas de píxeles.

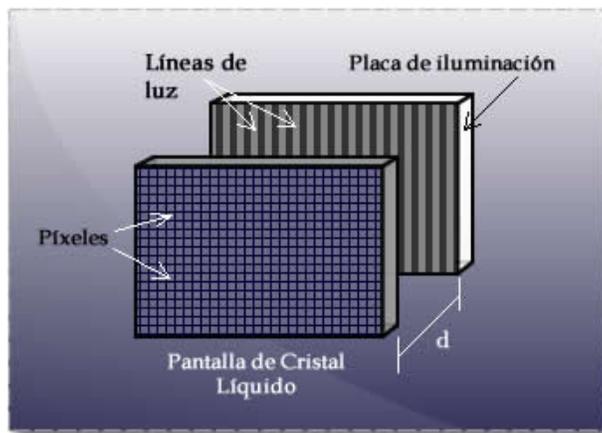


Figura 3.2.1: Sistema DTI [Eichenlaub, 1996].

Existe una relación fija entre la distancia del LCD a la placa de iluminación y la distancia entre la pantalla y el observador. Esto en parte, determina el fragmento de las “zonas

de visión”. Las zonas de visión tienen formas romboides donde sus puntos más anchos se extienden en un plano a una cierta distancia de la pantalla. La Figura 3.2.2 muestra las zonas de visión indicadas por rombos, donde, aquellos que se visualizan en color rojo, son reconocidos por el ojo izquierdo mientras que los representados en color azul, son reconocidos por el ojo derecho. El tamaño y distancia de las zonas de visión es determinado por la iluminación [Eichenlaub, 1996] utilizada para crearlas. Típicamente las zonas son de alrededor de 6.3 cm de longitud en su punto más ancho, que es el promedio de separación de los ojos de un humano adulto.

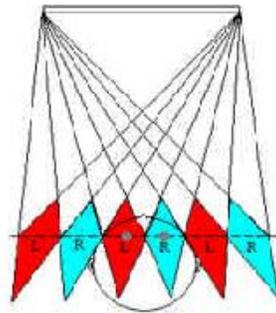


Figura 3.2.2: Zonas de visión [Lizuka, 2009].

Para visualizar las imágenes 3D, el par de imágenes estereoscópicas izquierda y derecha son puestas en columnas de elementos alternos. La imagen izquierda aparece en las columnas impares, mientras que la imagen derecha se visualiza en las columnas pares observándose ambas imágenes simultáneamente. Puesto que el ojo izquierdo ve las líneas de luz detrás de las columnas impares, éste ve solamente, la imagen izquierda desplegada en estas columnas. Similarmente, el ojo derecho, ve únicamente la imagen derecha desplegada en las columnas pares.

Las variaciones en el ancho de las rendijas darán lugar a variaciones en el brillo y, de hecho la diafonía entre las imágenes izquierda y derecha [Harrold, et al., 1997].

3.2.2. Televisores 3D lenticulares

Los televisores de pantalla plana LCD están compuestos por un cristal líquido (Liquid Crystal, LC) situado entre un par de placas polarizadas dispuestas de forma perpendicular con filtros de color rojo, verde y azul para crear imágenes a color. Los píxeles contenidos dentro del cristal líquido están formados por bloques conductores transparentes que recorren la

placa en dirección de las columnas. Estos píxeles pueden ser modulados por voltaje para permitir mayor o menor paso de luz a través de ellos. Sin embargo, las áreas no moduladas podrían permitir fugas de luz a su alrededor por lo que se aplica una máscara negra opaca delante de la placa.

Al aplicar una hoja lenticular verticalmente delante del panel LCD, los píxeles de despliegue son ampliados y proyectados frente a los ojos del usuario. Un criterio natural para la potencia de las lentes es que la distancia entre los centros de los píxeles sea adyacente, por lo tanto, las vistas izquierda y derecha deben ser ampliadas a una distancia interocular de 65 mm.

Suponiendo una pantalla de 14 pulgadas con una resolución de 1024 x 768 vemos que la distancia de separación entre los centros de los píxeles (pixel pitch o dot pitch) es de 300um por lo que se requiere una ampliación de 217 para lograr la distancia interocular. Este criterio implica que si el usuario se mueve más de la distancia interocular, las imágenes serán transpuestas y por lo tanto se percibe una imagen pseudoscópica [Berkel, et al.,1996].

Para evitar lo anterior, se opta por una ampliación de 540. Esto quiere decir que el doble píxel bajo cada lenticular es amplificado a $540 \times 0.3 \times 2 = 324\text{mm}$. El factor 2 del cálculo anterior indica el doblete (debido a que se tienen 2 vistas).

La vista es proyectada substancialmente hacia el usuario directamente enfrente de él. Ahora, si por ejemplo el usuario se mueve hacia la izquierda, el ojo derecho se moverá en la zona del ojo izquierdo, por lo que gracias a la gran ampliación esta es suficientemente grande para acomodar ambos ojos y, por lo tanto el usuario verá una imagen 2D normal. En otras palabras, la proyección cambia de estereoscópica a monoscópica.

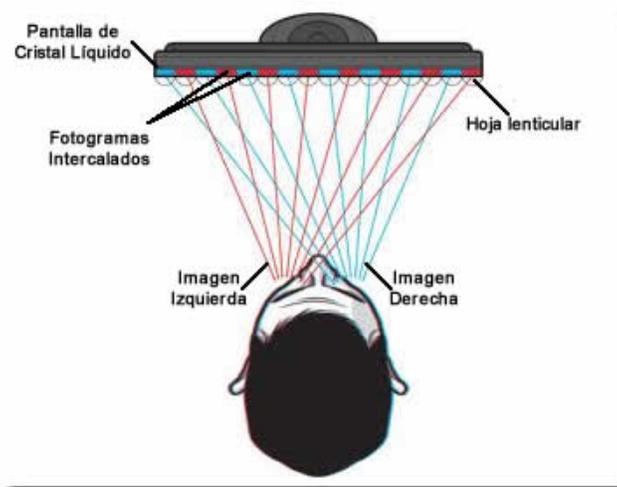


Figura 3.2.3: Proyección desde una TV lenticular.

3.2.3. Televisores 3D de Persianas Activas

En este sistema las gafas tienen “persianas activas” (active shutters) que están sincronizadas con las señales de la TV donde estas persianas bloquean rápidamente la vista derecha e izquierda alternativamente de tal forma que cada ojo recibe la imagen correcta.

Este sistema provee una buena resolución puesto que en esta tecnología cada ojo ve todas las líneas en el video mientras que en el de barrido cada ojo ve sólo la mitad de las líneas.

La imagen izquierda y derecha son desplegadas alternadamente a una velocidad alta (60 fotogramas/segundo $\times 2 = 120$ fotogramas). Cuando son vistas con las gafas, el cerebro crea la sensación de profundidad partiendo de la disparidad visual para obtener las imágenes 3D.

Las imágenes separadas para el ojo izquierdo y derecho se registran con una calidad de alta definición 1920 x 1080 y se reproducen a alta velocidad. Al ver estas imágenes a través de las gafas de cristal líquido especiales, que son temporizadas para abrir y cerrar la lente izquierda y/o derecha en sincronía con la alternación de las imágenes.

Un dato importante es que el cuarto debe estar completamente oscuro para que las gafas filtren sólo la imagen que se encuentra frente al espectador.

La TV despliega las imágenes derecha e izquierda secuencialmente, una después de la otra. Los lentes blanquean el ojo izquierdo y derecho en sincronía con un pulso infrarrojo proveniente de la televisión. Este efecto de polarización no baja tanto la brillantez de la imagen como en el cine. Esta brillantez la necesitamos para obtener una gran imagen en la casa.

El problema con el blanquear alternadamente la vista del ojo izquierdo y derecho es que el empleo prolongado puede provocar que la visión no sea confortable. Es por ello que construyen las gafas para blanquear sólo la imagen de la TV y no el resto de la luz que llega al ojo y lo que se encuentra alrededor de uno.

Las gafas también están diseñadas para minimizar la reflexión, la luz que llega a los ojos desde los lados y/o desde atrás. Se utiliza una gran cantidad de emisores IR para enviar la señal a las gafas, así la sincronía es sólida. Todos estos elementos de diseño ayudan a crear una experiencia 3D confortable.

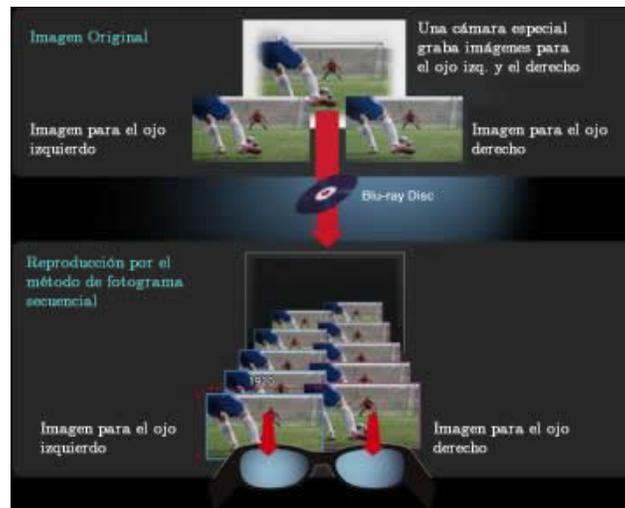


Figura 3.2.4: Proyección alternada de fotogramas.

3.2.4. Televisores 3D Pasivos

Los televisores 3D pasivos, a diferencia de los de persianas activas no basan su funcionamiento en la proyección temporal de imágenes polarizadas ortogonalmente, por el contrario, estos lo hacen espacialmente. Al colocar una pantalla de elementos holográficos (micropolarizadores) frente al cristal líquido, cada píxel de la pantalla LCD cuenta con un polarizador orientado en una dirección específica, por lo que las imágenes pueden ser proyectadas simultáneamente siendo filtradas posteriormente por las gafas con polarización ortogonal. Es probable que la polarización utilizada sea circular hacia la izquierda para un píxel y para el píxel adyacente circular hacia la derecha.

El objetivo de utilizar polarización circular es para evitar error en caso de que el usuario incline la cabeza, puesto que se evitara que las imágenes se inviertan en el momento en que el usuario incline la cabeza o en su defecto, se observe una imagen pseudoscópica. Por el momento no se halló una patente publicada, sin embargo, el funcionamiento explicado se basa en el concepto utilizado en los interferómetros que producen múltiples imágenes (Malacara,2007) .

Como podemos observar, aunque algunas de las tecnologías aquí expuestas emplea el concepto utilizado en la fotografía estereoscópica, la proyección de escenarios tridimensionales se ha vuelto más dinámica logrando producir imágenes con mayor realismo que pueden capturar fácilmente la atención del espectador, de ahí que este tema tome cada vez mayor fuerza. Sin embargo aún se tiene un buen camino por recorrer en la búsqueda de aquella imagen que alcance el nivel de calidad adecuado y que evite el uso de dispositivos



Figura 3.2.5: Televisor con polarización pasiva.

especiales para su observación ya sea por medio de reflexión, estereoscopía o la que ha sido encontrada como la de mayor futuro que es la holografía.

Después de haber reunido y estudiado la información expuesta en los capítulos iniciales, se definió cual sería la técnica más adecuada para su estudio y posterior reconstrucción empleando como base de decisión la innovación, el material disponible en el laboratorio de Interferometría del Centro de Investigaciones en Óptica y su posible puesta en marcha en el ámbito comercial. Debido a que el interés del autor de esta tesis es la construcción y proyección de imágenes volumétricas virtuales se decidió desarrollar el proyecto cheoptics 360.

Capítulo 4

Diseño óptico Gaussiano del relevador óptico

El sistema desarrollado consiste en la proyección de un conjunto de imágenes bidimensionales o tridimensionales (diseñadas en un software de modelado 3D) suministradas por proyectores multimedia y desplegadas sobre una pantalla horizontal situada en la punta de una pirámide de vidrio. Así, por medio de la reflexión de las caras de la pirámide, el observador u observadores localizados frente a esta observan una escena u objeto virtual flotando en el centro del volumen, de esta forma, el espectador tiene libre movimiento alrededor del dispositivo obteniendo una reconstrucción tridimensional completa.

Dadas las características y restricciones del proyecto, se diseñó y montó un sistema óptico capaz de generar dos imágenes idénticas que debían ser desplegadas sobre la pantalla horizontal de la pirámide de vidrio partiendo del plano de proyección vertical del cañón multimedia. Como el tamaño mínimo de la imagen de salida es de 20 x 15 cm y los elementos ópticos con que contamos en el laboratorio de interferometría tienen un diámetro entre 5 y 10 cm, fue necesario reducir las dimensiones de la imagen inicial para disminuir la pérdida de información al pasar o reflejarse por las componentes ópticas.

Haciendo uso de la ecuación para lentes delgadas [O'shea, 1985] calculamos la posición de cada una de las componentes ópticas, de las imágenes intermedias y de las imágenes resultantes. Se realizaron diferentes pruebas variando las distancias focales de las lentes hasta obtener aquella que se ajustaba mejor a las necesidades.

La Tabla 4.1 despliega el resultado de una serie de pruebas en las que se variaron las distancias focales de las lentes, las distancias a las que se ubicó el objeto y las distancias a las

que se encontraron las imágenes resultantes. Para esto se desarrollo un programa en hoja de cálculo que procesara los datos indicados.

Altura de la imagen original en cm: 15

Ancho de la imagen original en cm: 20

To	Ti	f	Reducción %	Amp. Lateral	Altura Imagen (cm)
-105	26.2	21	75 %	-0.250	-3.75
-90	27.3	21	70 %	-0.304	-4.56
-80	28.4	21	64 %	-0.355	-5.33
-100	25.0	20	75 %	-0.250	-3.75
-90	25.7	20	71 %	-0.285	-4.28
-100	33.3	25	67 %	-0.333	-5.00
-90	34.6	25	62 %	-0.384	-5.76
-100	66.6	40	33 %	-0.666	-10.0
-90	72.0	40	20 %	-0.800	-12.0

Cuadro 4.1: Cálculo de la posición de la imagen resultante de L1.

Cálculo por Trazo de Rayos

Otra forma de encontrar las posiciones de los elementos y sus imágenes resultantes es por medio del trazo de rayos, este es un método que puede entregar un resultado más exacto al anterior. Al desglosar el cálculo por diferentes métodos nos aseguramos de que los resultados obtenidos son correctos. La figura 4.0.1 presenta el diagrama de trazo de rayos para un brazo del sistema y sus distancias obtenidas.

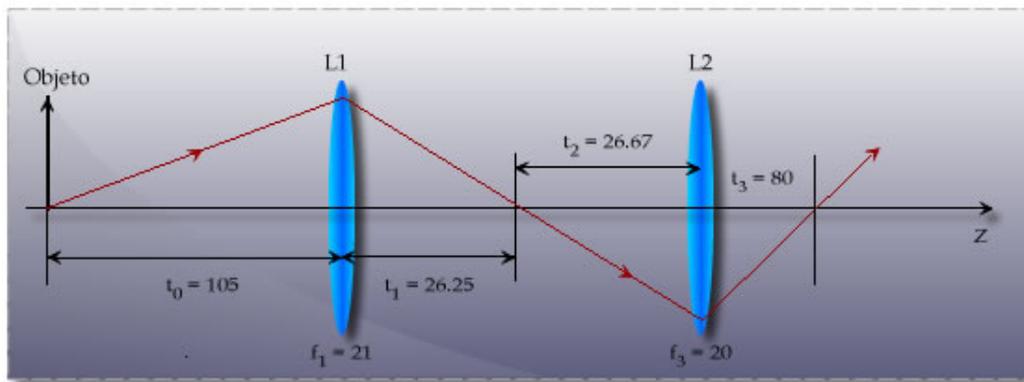


Figura 4.0.1: Trazo de rayos del sistema.

Se definió una reducción de 4 veces el tamaño original del objeto después de refractarse por la primer lente, con esto obtendremos una imagen que puede ser transportada por las

componentes ópticas sin pérdida de información. Sin embargo, requerimos incrementar nuevamente el tamaño de la imagen de resultante sobre la en la pantalla de proyección, por lo tanto, se decidió que una amplificación del triple respecto a la imagen intermedia $M = 3$ resultaba ideal para el sistema. Así entonces, la reducción total de la imagen inicial resultó ser del 25 % con una altura de 11.25 cm en la imagen resultante.

Reescribimos las condiciones iniciales:

- Angulo inicial: $u_0 = 0.1$, Altura inicial: $y_0 = 0$.
- Lente 1:
 - Distancia focal $f_1 = 21\text{cm}$
 - Amplificación $M_1 = -\frac{1}{4}$
- Lente 2:
 - Distancia focal $f_2 = 20\text{cm}$
 - Amplificación $M_2 = -3$

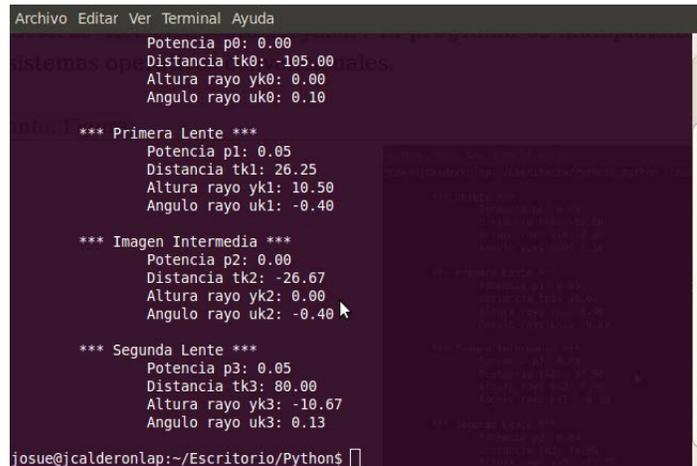
Empezando por el rayo meridional, se calculó la altura a la que este arriba a la lente dependiendo de la distancia a la que se encuentra el objeto, posteriormente; se obtuvo el ángulo de refracción del rayo y la distancia a la que se encontraría la imagen intermedia. Seguido de esto, se dedujo nuevamente la altura a la que el rayo llegaría a la segunda superficie y la distancia a la que se obtendría la imagen final.

La Tabla 4.1 despliega la solución del sistema por trazo de rayos completando cada propiedad con su valor correspondiente. Como podemos observar los datos insertados en esta tabla concuerdan con los datos obtenidos al utilizar únicamente la ecuación de las lentes, lo que indica que los cálculos son correctos.

	n	objeto	Primera lente	Imagen Intermedia	Segunda lente	Imagen final
Valores	$\phi = \frac{1}{f_k}$	0	0.05	0	0.04	0
Sistema	t_k	-105	26.25	-26.67	80	
Rayo	y_k	0	10.5	0	-10.67	0
Axial	u_k	0.1	-0.40	-0.40	0.13	
Rayo	\bar{y}_k					
Principal	\bar{u}_k					

Cuadro 4.2: Valores obtenidos dados los datos iniciales. Figura 4.0.1

Similar a lo anterior, para este método se desarrolló un programa en Python que calcula y arroja los valores de todas y cada una de las propiedades expuestas en la Tabla 4.2 ya sea para una, dos o más superficies refractoras Figura4.0.2. El programa es multiplataforma por lo que puede ser ejecutado en cualquiera de los sistemas operativos convencionales.



```
Archivo Editar Ver Terminal Ayuda
Potencia p0: 0.00
Distancia tk0: -105.00
Altura rayo yk0: 0.00
Angulo rayo uk0: 0.10

*** Primera Lente ***
Potencia p1: 0.05
Distancia tk1: 26.25
Altura rayo yk1: 10.50
Angulo rayo uk1: -0.40

*** Imagen Intermedia ***
Potencia p2: 0.00
Distancia tk2: -26.67
Altura rayo yk2: 0.00
Angulo rayo uk2: -0.40

*** Segunda Lente ***
Potencia p3: 0.05
Distancia tk3: 80.00
Altura rayo yk3: -10.67
Angulo rayo uk3: 0.13

josue@jcalderonlap:~/Escritorio/Python$
```

Figura 4.0.2: Programa hecho en python.

4.1. Montaje del Sistema

Puesto que el requerimiento del sistema es desplegar las imágenes sobre una pantalla horizontal localizada en el borde superior de la pirámide de vidrio, debemos hacer uso de espejos para cambiar la dirección del camino óptico, subir la imagen y por último proyectarla sobre la pantalla. La Figura 4.1.1 muestra el arreglo final.

Para proyectar la imagen se colocó el proyector multimedia entre el láser y la lente L1 a una distancia de 15 cm del primero de ellos. A continuación, se colocó la pantalla de vidrio esmerilado de 20 x 15 cm a 40 cm del proyector y se enfocó la imagen sobre ella. Se observó la imagen generada por L1 y se midió su tamaño dando un valor de 3.5 cm ratificando con esto los cálculos previamente descritos.

Hecho lo anterior, se desarrollaron dos experimentos con dos y tres espejos después de la segunda lente de ambos brazos para proyectar la imagen final sobre la pantalla horizontal.

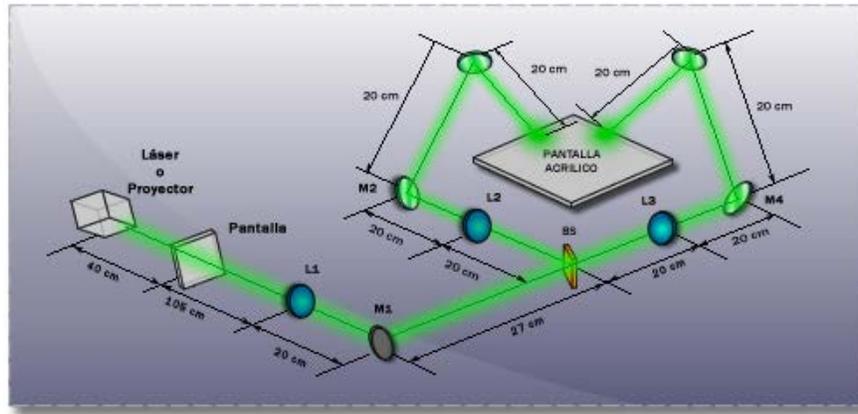


Figura 4.1.1: Proyección de dos imágenes a partir de una.

4.1.1. Uso de dos superficies reflectoras

Como primer experimento se utilizaron dos espejos a partir de la segunda lente de ambos brazos; el primer espejo reflejaba el rayo hacia arriba a un ángulo aproximado de 60° siendo reflejado posteriormente hacia abajo por medio del segundo espejo a un ángulo de 45° respecto a la normal de este último asegurando la incidencia del haz exactamente en el centro de cada elemento óptico de la Figura 4.1.2, es decir, que el sistema esté bien alineado.

Las distancias imagen d_{IM1} y d_{IM2} equivalen a la suma de las distancias entre los elementos L2, M2, M3 y L3, M4, M5 Figura 4.1.2 calculadas previamente.

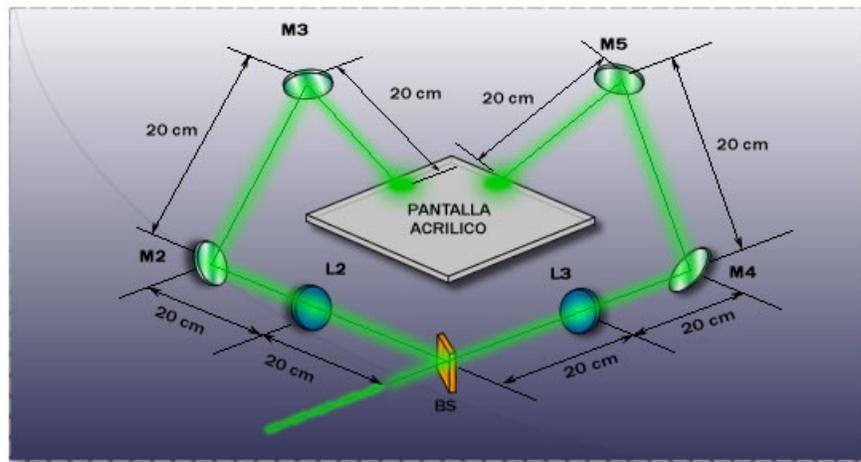


Figura 4.1.2: Distancias por elemento.

Como se muestra en la figura anterior, a causa del ángulo de inclinación del haz, la imagen presentó una aberración de proyección conocida como aberración de keystone Figura 4.1.3. Esta aberración se presenta cuando el plano de proyección se encuentra en ángulo respecto al eje de propagación de la luz presentando una forma trapezoidal en la imagen; además de esto, la imagen se ve con menor nitidez en la parte más alejada.

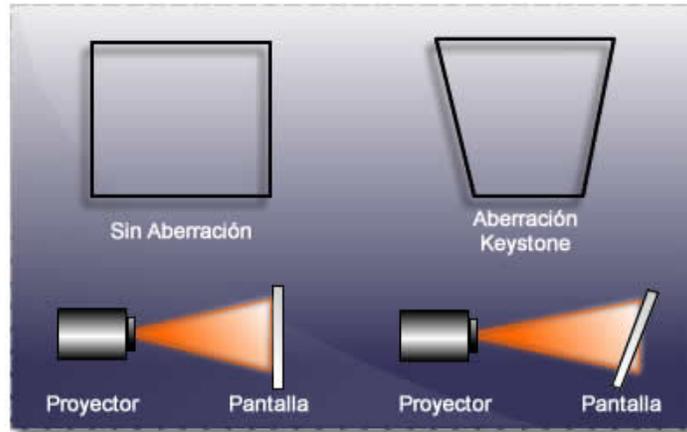


Figura 4.1.3: Aberración en plano inclinado.

Esta aberración puede ser eliminada realizando modificaciones en el arreglo óptico como lo describe [Duran, 2004] en su tesis de doctorado. Sin embargo, para nuestro caso se decidió modificar el camino óptico y agregar un espejo más a cada brazo como se explicará a detalle más adelante.

Siendo nuestro plano de proyección horizontal una placa cuadrada de vidrio esmerilado de 35x35 cm, al dividirlo por la mitad en los ejes x, y, las líneas divisorias denotan el lugar en el que se buscó centrar las proyecciones de forma tal que cada línea corte verticalmente por la mitad la imagen correspondiente Figura 4.1.4.

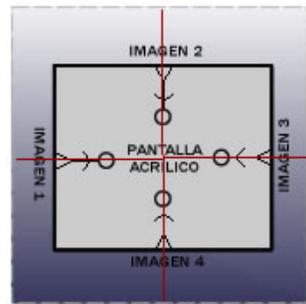


Figura 4.1.4: Proyección ideal en plano horizontal.

Puesto que el rayo reflejado por los espejos M2 y M4 llega en ángulo al plano horizontal

y recordando que cada espejo modifica la orientación de la imagen reflejada, al enfocarse esta última su orientación no concuerda con la línea divisoria de los ejes x, y, puesto que se encuentra rotada respecto a estos Figura (4.1.5), por tal motivo se añadió un nuevo espejo a cada brazo del arreglo.

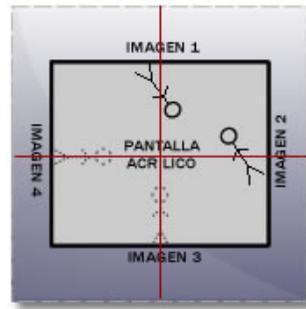


Figura 4.1.5: Proyección plano horizontal obtenida.

4.1.2. Uso de tres superficies reflectoras

Como se describió anteriormente el arreglo basado en dos superficies reflectoras posteriores a la segunda lente de los brazos del sistema, provocaba dos errores que producirían un resultado incorrecto al momento de desplegar las proyecciones puesto que estas deben ser idénticas para proveer la sensación correcta al espectador durante su movimiento alrededor de la pirámide.

Al incorporar un espejo más al arreglo los problemas generados por el ángulo de inclinación del haz de luz son eliminados siempre y cuando se procure que cada superficie reflectora cuente con un ángulo de 45° Figura (4.1.6) o un ángulo cercano que pueda ser corregido por la siguiente superficie, de manera que la reflexión provoque un cambio en la dirección del camino óptico de 90° (sea este paralelo o perpendicular al eje z o plano horizontal). Así entonces, en el brazo 1 tenemos el primer espejo M1 colocado a 15 cm a 45° hacia la izquierda seguido de esto el espejo M2 ubicado a 25 cm de M1 con un ángulo de 50° en dirección al techo y por último el espejo M3 dispuesto también a 50° en dirección al piso logrando así un rayo perpendicular incidente sobre la pantalla de acrílico.

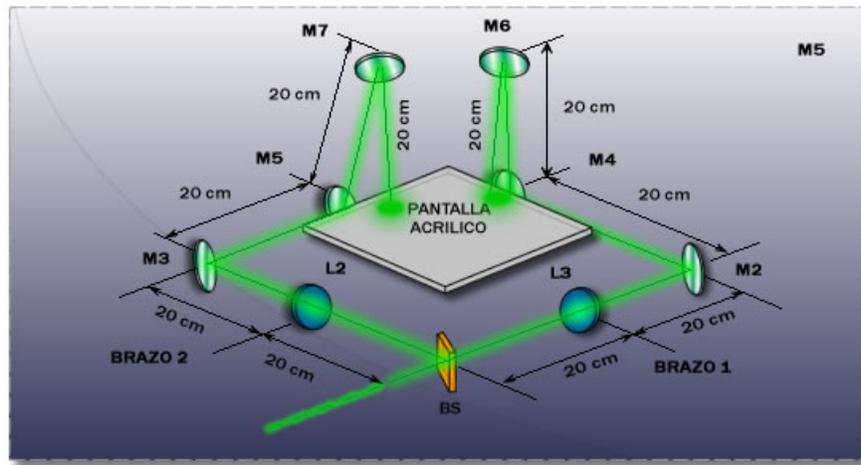


Figura 4.1.6: Arreglo tres superficies reflectoras.

Así entonces, al enfocar sobre la pantalla de proyección, el haz incidirá perpendicularmente a ella, con lo cual se logra obtener imágenes verticales y paralelas a las líneas divisorias Figura (4.1.7) apuntando hacia el centro del cuadro de vidrio esmerilado.



Figura 4.1.7: Proyección obtenida sobre el plano horizontal. Por falta de elementos ópticos y de intensidad de luz del proyector se realizaron sólo 2 proyecciones.

La pantalla de vidrio esmerilado dispersaba demasiado la luz por lo que intensidad de la imagen final era muy baja, para eliminar este problema, se colocó una lente de Fresnel en la posición en la que se encontraba la pantalla de vidrio de tal forma que la lente convergiera todos los rayos en la lente L1 obteniendo un gran incremento en la intensidad de la imagen al grado en que ésta pudo ser observada aún con el ambiente iluminado.

En este capítulo hemos visto el diseño y construcción del sistema óptico necesario para la proyección del objeto desarrollado con el software de modelado 3D, sin embargo, para obtener el resultado esperado se requiere de la construcción de la pirámide de vidrio con las consideraciones ligadas a ella, expuestas en el capítulo siguiente.

Capítulo 5

Diseño óptico Gaussiano de la pirámide

Como último punto en este desarrollo, tenemos la visualización en la pirámide de vidrio de las imágenes generadas, propagadas y proyectadas descritas en el capítulo precedente.

Al momento de crear la pirámide se tomaron en cuenta algunas variables debido a que sus caras serán las pantallas de observación del espectador y, dependiendo del cumplimiento de estas condiciones, tendremos un resultado completamente satisfactorio Figura 5.0.1.

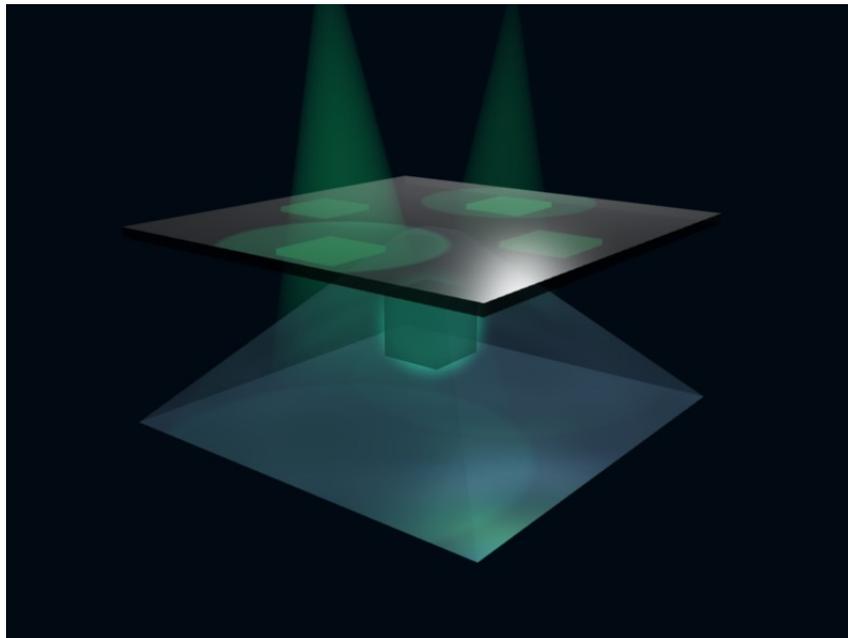


Figura 5.0.1: Esquema final de una proyección.

5.1. Desviación del Rayo Transmitido

Siendo el haz incidente normal a la pantalla de proyección horizontal, el rayo es transmitido directamente sin sufrir algún cambio. Sin embargo el único efecto que sufre el rayo es que el camino óptico es ligeramente desviado en la pantalla de observación debido a la inclinación de la misma.

Aplicando la Ley de Snell vemos que la desviación del rayo de luz está en función del ángulo de incidencia [Malacara, 2004] .

$$n \cdot \text{sen} \theta = n' \cdot \text{sen} \theta' \quad (5.1.1)$$

La Figura 5.1.1 muestra la desviación sufrida por el rayo al atravesar las pantallas de proyección y observación.

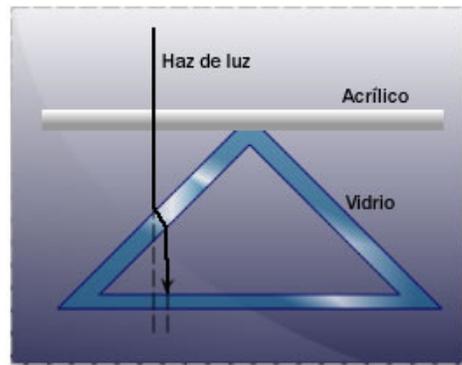


Figura 5.1.1: Desviación rayo transmitido.

Es importante tener en mente el rayo refractado puesto que conociendo el lugar al que el rayo llegará después de refractarse y teniendo en mente la irradiancia, podemos utilizar un método para disminuir la cantidad de luz refractada evitando así tener una imagen en el piso de la pirámide que pueda ser reflejada por las caras adyacentes.

5.2. Diseño de la pirámide de vidrio (60°)

Como primer experimento se diseñó y construyó una pirámide de vidrio donde los vértices de las caras laterales con respecto a la base forman un ángulo de 60 grados, para observar

experimentalmente los efectos provocados al momento de percibir las imágenes proyectadas sobre sus caras.

Para desarrollar una pirámide con un ángulo de inclinación específico, primero se calculó la apotema lateral de la pirámide dependiendo de la altura deseada, una vez determinado podemos también calcular el área que ocupará la figura final.

Siendo $a = 17.35\text{cm}$ y $\alpha = 69^\circ$ calculamos la altura de la pirámide,

$$\tan\alpha = \frac{b}{a} \quad (5.2.1)$$

Despejando b y sustituyendo, vemos que la altura correcta para obtener un ángulo de 60° respecto a la horizontal debe ser,

$$b = 29.9\text{cm}$$

Ahora bien, contando con la altura y el valor de la apotema, calculamos la apotema lateral de la pirámide

$$Ap = \sqrt{a^2 + b^2} = 34.6\text{cm} \quad (5.2.2)$$

Como el apotema lateral de la pirámide es la altura de cada triángulo que forma la cara del prisma de vidrio, calculamos la longitud del lado c y el ángulo β correspondiente.

Siendo $h = Ap$, apotema lateral, obtenemos el valor del lado $c = 38.6\text{cm}$

Por último, encontramos el valor del ángulo β formado por los lados de los triángulos individuales,

$$\tan\beta = \frac{h}{a} \quad (5.2.3)$$

Donde el resultado indica que el ángulo de los lados debe ser $\beta = 67.5^\circ$.

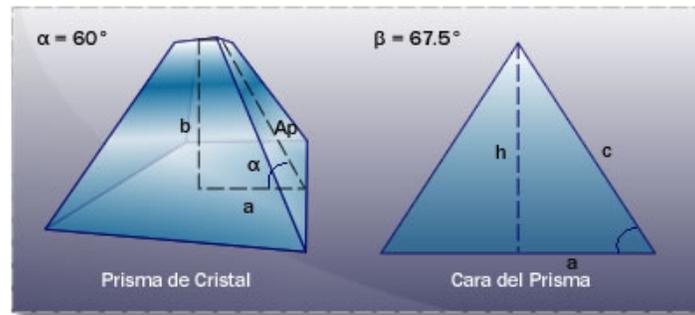


Figura 5.2.1: Apotema y cara de la pirámide 60°.

Reflexión en la cara de la pirámide 60°

Siguiendo la ley de Snell y suponiendo el mismo rayo incidente perpendicular a la pantalla de proyección, al transmitirse éste a la placa plano paralela del prisma de vidrio, vemos que el ángulo de incidencia es de 30° respecto a la normal de la cara puesto que su inclinación respecto a la horizontal es de 60°, por consiguiente la reflexión del rayo será igualmente a 30°.

Al propagar los rayos de la misma forma que el ojo los interpola en un punto P posterior a la placa de vidrio [Hetch, 2008], vemos que la reflexión también se extiende con el ángulo calculado Figura 5.2.2; por lo tanto al observar una imagen proyectada es notable una inclinación en dicha imagen, esto resulta ser incómodo para el observador localizado al frente de la pantalla, razón por la cual el efecto 3D puede no ser tan efectivo.

Este caso puede ser utilizado si la pirámide se encuentra a una altura mayor a la posición de observación natural de un espectador.

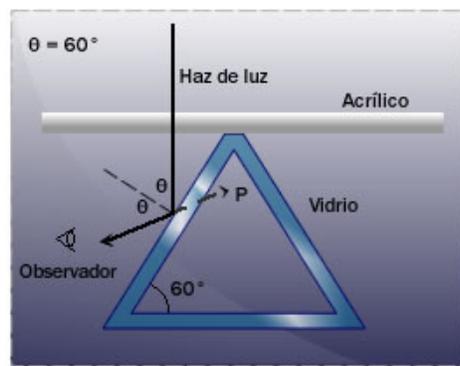


Figura 5.2.2: Reflexión pirámide 60°.

5.3. Diseño de la pirámide de vidrio (45°)

Como segundo experimento se diseñó y construyó una pirámide de vidrio con un ángulo de 45 grados respecto de la horizontal para conocer y reportar los efectos causados al momento de observar las imágenes proyectadas sobre sus caras. Similar al desarrollo de la pirámide con ángulo de 60 grados, primero se calcula el apotema lateral de la pirámide dependiendo de la altura que se desea y una vez determinado esto podemos también determinar el área que ocupará la figura final.

Así, teniendo un ángulo $\alpha = 45^\circ$, y una apotema $a = 20\text{cm}$ calculamos la altura de la pirámide despejando b de la ecuación 5.2.1 y sustituyendo estos valores, es notable que para obtener un ángulo de 45° con respecto a la horizontal, la altura debe ser igual al valor de la apotema de la pirámide.

Los pasos siguientes para calcular la apotema lateral de la pirámide y el ángulo β correspondiente son similares a los seguidos en el desarrollo de la pirámide de 60 grados.

La Tabla muestra los valores obtenidos.

Angulo α	Apotema a	Altura Pirámide	Apotema lateral $Ap = h$	Lado C	Angulo β
45°	20 cm	20 cm	28.2 cm	34.5 cm	54.6°

Cuadro 5.1: Datos del prisma a 45°.

La Figura 5.3.1 identifica cada una de las propiedades calculadas anteriormente.

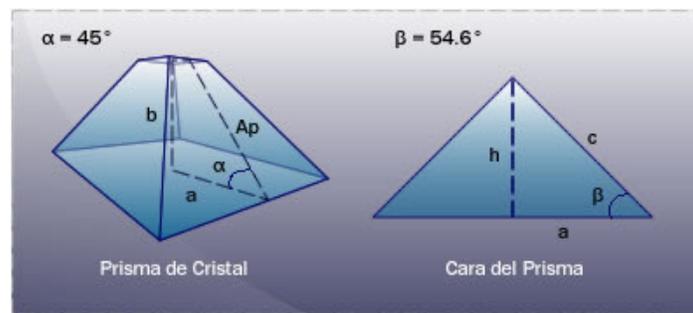


Figura 5.3.1: Apotema y cara de la pirámide 45°.

Reflexión en la cara de la pirámide

Conociendo la ley de Snell de la reflexión sabemos que “el ángulo del haz reflejado es igual al ángulo del haz incidente respecto a la normal de la superficie reflectora” [Malacara, 2004].

Así, si el rayo que incide sobre la cara inclinada del prisma de vidrio (suponiendo una inclinación de 45°) tiene un ángulo similar de 45° según la normal de la cara, entonces el rayo será reflejado a 45° de esta y por lo tanto paralelo al plano horizontal Figura 5.3.2.

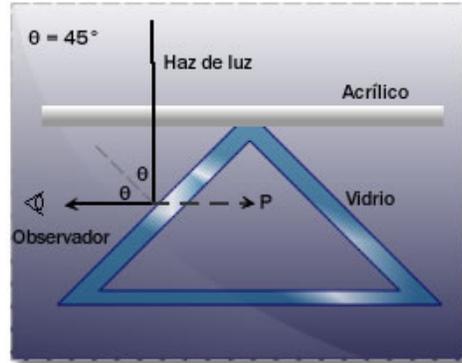


Figura 5.3.2: Reflexión pirámide a 45° .

Como sucede en la reflexión de un espejo plano visto desde el frente, la reflexión real del espejo no puede ser percibida por el ojo del observador, por lo tanto, el ojo interpola los rayos hacia atrás a lo largo de líneas rectas dando la impresión de que la imagen proviene del otro lado del vidrio [Hetch, 1998]. Puesto que los rayos provienen de un punto P detrás del vidrio, la imagen es ciertamente virtual.

Dado lo anterior, el observador tiene la sensación de que la animación se encuentra en la parte posterior del vidrio, es decir, dentro de la pirámide.

5.4. Segunda Reflexión sobre la pantalla de observación

Al ver la reflexión de la imagen sobre la pantalla de observación esta aparenta tener un fantasma, esto debido a la segunda reflexión provocada por la cara posterior de la superficie de vidrio [Hetch, 2008] de la pantalla y dependiendo del grosor de esta, será el desplazamiento sufrido por el rayo.

Recordando la ecuación de desviación del rayo provocado por una placa plano paralela y el cálculo realizado para una placa de 4 mm de espesor, vemos que el rayo es desviado aproximadamente 1.3 mm, por lo tanto, la segunda imagen reflejada tendrá una diferencia con la primera de ese mismo valor.

La Figura 5.4.1 muestra la longitud de la imagen reflejada por la primer y segunda reflexión.

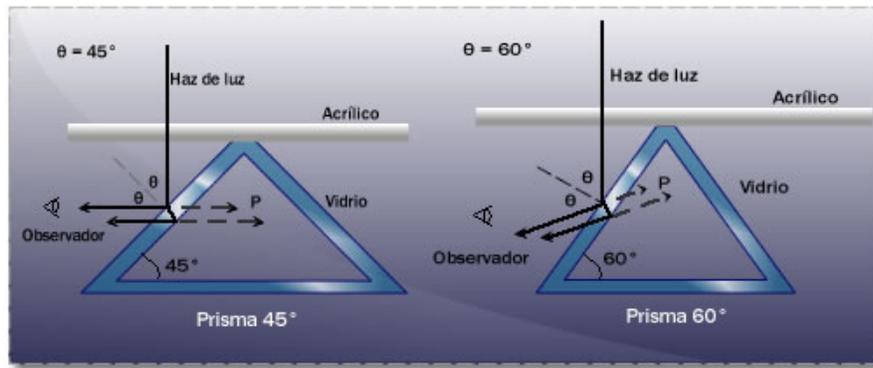


Figura 5.4.1: Efecto segunda reflexión.

Este problema fue eliminado aplicando una película antirreflejora sobre la primer cara de la superficie triangular, siendo la imagen observada aquella reflejada sobre la segunda cara de la placa plano paralela. Sin embargo, la intensidad de esta reflexión resultó ser mínima por lo que se aplicó una película de cromo para incrementarla. El porcentaje de transmitancia y reflectancia aproximado fue 50 - 50 evitando perder totalmente la transparencia del vidrio, de lo contrario, el efecto del objeto flotando dentro del volumen no hubiese sido alcanzado satisfactoriamente al ser visto como una simple reflexión sobre un espejo plano.

Una desventaja al aplicar la película delgada es que la calidad cromática de la imagen se ve disminuida aún cuando fue diseñada para trabajar con luz blanca.

5.5. Altura de la pantalla de proyección

Recordando que la reflexión en un espejo tiene una amplificación $M = +1$ con una longitud imagen igual a la distancia a la que se encuentra el objeto de la superficie reflectora, podemos medir la separación máxima a la que puede localizarse la pantalla de proyección siendo el valor inicial la punta de la pirámide.

Si dibujamos en dos dimensiones el esquema del triángulo formado por la pirámide con la pantalla horizontal Figura 5.5.1, podemos suponer que la pantalla puede localizarse a cualquier altura y siempre obtendremos la reflexión en el mismo punto, sin embargo esto no es verdadero pues al aumentar la distancia la imagen va desplazándose hacia el vértice superior de la pirámide hasta desaparecer.

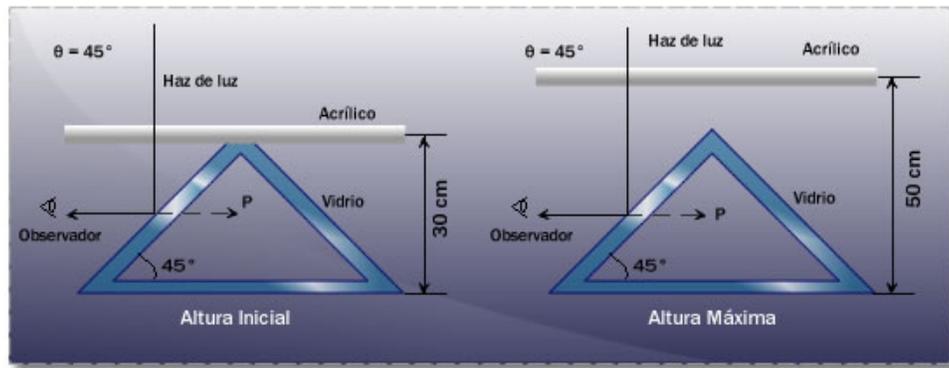


Figura 5.5.1: Altura pantalla proyección.

5.6. Espacio de Proyección

Tomando en cuenta que el medio sobre el que se observan las imágenes es una superficie triangular, el espacio de proyección queda determinado por el rectángulo circunscrito en la cara de la pirámide. Dado lo anterior, se realizó el cálculo del área del rectángulo antes mencionado.



Figura 5.6.1: Máximo rectángulo circunscrito.

Sea $s = x * y$ el área del rectángulo circunscrito donde,

- x base del rectángulo
- y altura del rectángulo
- A lado de la superficie triangular

En la Figura 5.6, tenemos dos triángulos rectángulos localizados en el extremo derecho e izquierdo del rectángulo dibujado de donde se puede deducir que los catetos de cada uno son y , y $x = \frac{A-x}{2}$ y la hipotenusa $(A - x)$.

Por el teorema de pitágoras tenemos que

$$(A - x)^2 = \left(\frac{A - x}{2}\right)^2 + y^2 \quad (5.6.1)$$

Resolviendo la ecuación anterior y despejando y ,

$$y = \frac{\sqrt{3}}{2}(A - x) \quad (5.6.2)$$

Puesto que $s = x * y$ es el área del rectángulo, entonces,

$$s = x * \frac{\sqrt{3}}{2}(A - x) = \frac{\sqrt{3}}{2}(Ax - x^2)$$

Derivando la ecuación anterior e igualando a 0 para encontrar x tenemos que

$$s' = \frac{\sqrt{3}}{2}A - \sqrt{3}x$$

Despejando x

$$x = \frac{A}{2} \quad (5.6.3)$$

Sustituyendo 5.6.3 en 5.6.2tenemos

$$y = \frac{\sqrt{3}}{4}A \quad (5.6.4)$$

Por lo que el área del rectángulo contenido en la cara de la pirámide resulta ser

$$s = x * y = \frac{\sqrt{3}}{8}A^2$$

La ecuación anterior sirve para calcular el espacio de proyección para cualquier tamaño de pirámide, útil para evitar modelar animaciones con mayores dimensiones que al ser presentadas sobre las placas de vidrio generen una impresión errónea.

Como se ha descrito en este capítulo, el diseño de la pirámide de vidrio es de suma importancia; de lo contrario al no contrar con ángulos de inclinación correctos, la altura necesaria y animaciones con las dimensiones correspondientes, el resultado será inconsistente y no recibirá la aceptación esperada.

Capítulo 6

Prueba de la estrella

Como sabemos existen diferentes tipos de aberraciones ya sean monocromáticas como: esférica, coma, astigmatismo, distorsión, petzval [Malacara, Malacara, 1988] [Malacara, Malacara, 2004] ó cromáticas, que pueden afectar un sistema óptico. Estas deben ser corregidas para conseguir resultados apropiados; dichas aberraciones pueden ser causadas por una alineación incorrecta, deformaciones en las lentes y/o cambios en las longitudes de onda del haz luminoso. Al aplicar la prueba de la estrella que es una de las diferentes técnicas existentes para la prueba de sistemas ópticos [Malacara, 2007] podemos identificar cada una de las aberraciones que afectan nuestro arreglo y eliminarlas hasta contar con un sistema únicamente restringido por difracción.

En este caso, primero se analizaron las lentes por separado y se obtuvieron imágenes de cada una de ellas haciendo uso de una cámara CCD (Charge Coupled Device, CCD), un láser de 550 nm, un diafragma para regular el diámetro del haz luminoso y un pinhole para simular la estrella. Puesto que la estrella requiere ser vista por la lente desde el infinito como se define en la literatura, una distancia aproximada de 20 veces la distancia focal de la lente [Malacara, 2007] suele ser apropiada.

La Figura 6.0.1 muestra un esquema de la configuración del arreglo armado para la prueba de la estrella.

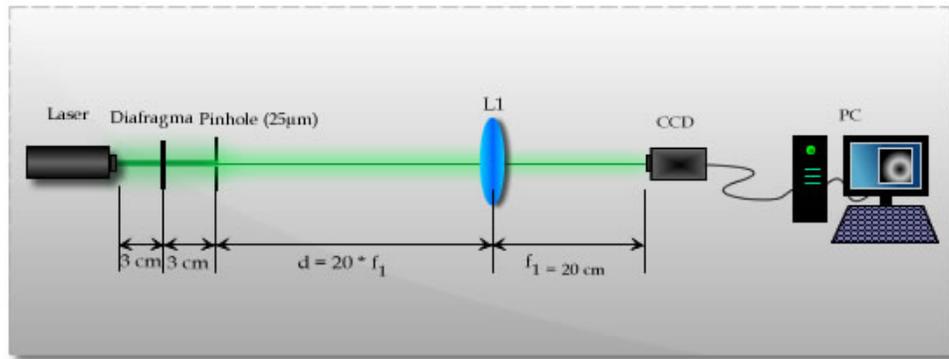


Figura 6.0.1: Prueba de la estrella.

Como se representa en el esquema anterior, primero se colocó el láser de 550 nm, seguido se situó a 3 cm el diafragma encargado de regular el diámetro de salida del láser, posteriormente para simular la estrella se ubicó a 3 cm el pinhole de $25\mu\text{m}$ y con ayuda de espejos planos se varió la dirección del camino óptico a través de la mesa holográfica hasta alcanzar una distancia de 400 cm lugar en el que se colocó cada una de las lentes sujetas a prueba. Por último se colocó la cámara CCD a la distancia focal de la lente y con ayuda de un software de computadora se capturaron sus imágenes Figura 6.0.2 .

La alineación de la lente fue verificada constantemente hasta obtener una imagen únicamente con aberración de esfericidad.

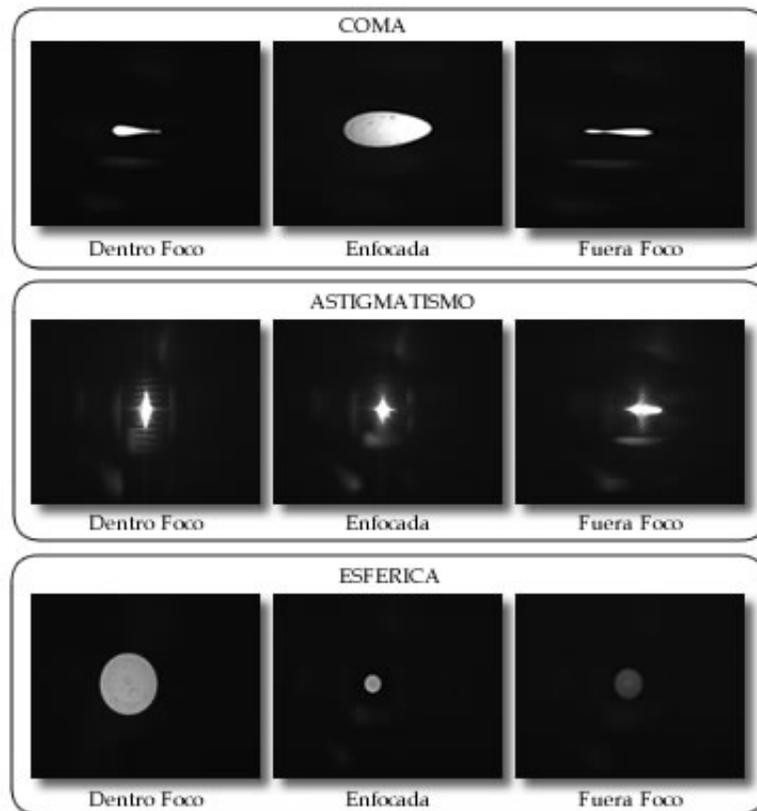


Figura 6.0.2: Imágenes resultantes.

Una vez evaluadas las tres lentes por separado, se montó la primer parte del sistema óptico como se muestra en la Figura 6.0.3. Con el láser de 550 nm en la posición designada durante la prueba de las lentes, se colocó la primer superficie refractora a 120 cm del mismo, seguido de esto se colocó un espejo plano de 12 cm de diámetro a una distancia de 15 cm para cambiar la dirección del camino óptico (debido a que se había llegado al límite de la mesa holográfica) y se validó experimentalmente la posición del punto de enfoque calculado anteriormente el cual fue hallado exitosamente a 26.6 cm de L1, seguido de esto, se colocó un divisor de haz de película delgada a 20 cm del espejo plano M1 para formar dos brazos y se montaron las lentes L2 y L3 ambas con distancia focal $f = 25$ cm y posteriormente se capturaron las imágenes con la cámara CCD. Durante el proceso se validó la alineación de cada componente y la propagación del haz luminoso a través de los elementos.

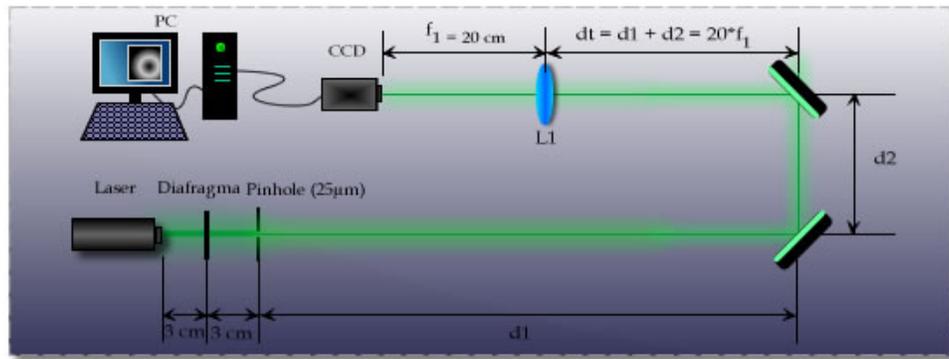


Figura 6.0.3: Primera sección del arreglo óptico.

La Figura 6.0.4 muestra la imagen resultante presentando únicamente aberración de esfericidad.

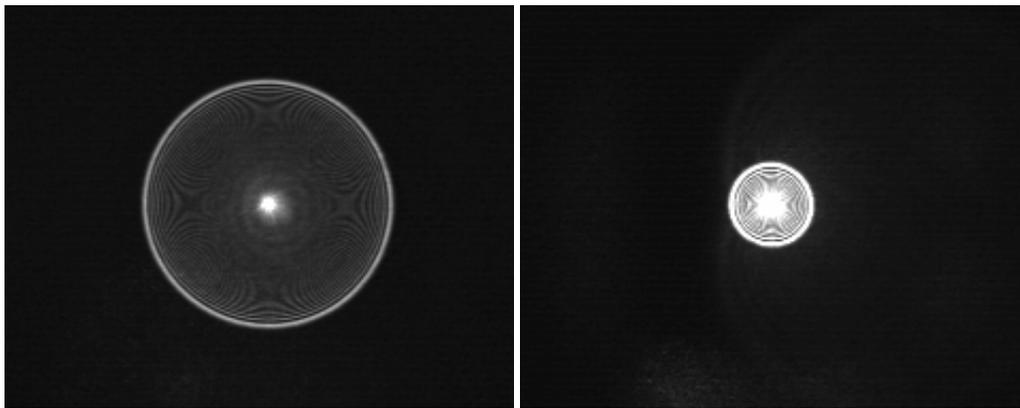


Figura 6.0.4: Disminución de aberraciones.

Recordando que el sistema está compuesto por dos brazos con una propagación de imagen en cada uno de ellos, la prueba fue ejecutada un par de veces.

La prueba de la estrella es la más sencilla de las técnicas empleadas para probar la calidad de las superficies refractoras que serán utilizadas en un arreglo óptico, así mismo, permite evaluar un sistema óptico y corregir la alineación de las componentes. Esto último fue el principal objetivo del uso de este método durante el desarrollo de los experimentos.

Capítulo 7

Resultados

Se aprendió el uso de un software de modelado 3D para el desarrollo de escenas tridimensionales considerando las condiciones expuestas en el primer capítulo de esta tesis.

Fue posible proyectar imágenes verticales libres de aberraciones sobre la pantalla de proyección.

Se comprobó la diferencia entre la visualización de imágenes proyectadas sobre pirámides con diferentes ángulos de inclinación y se identificaron las ventajas de cada proyección.

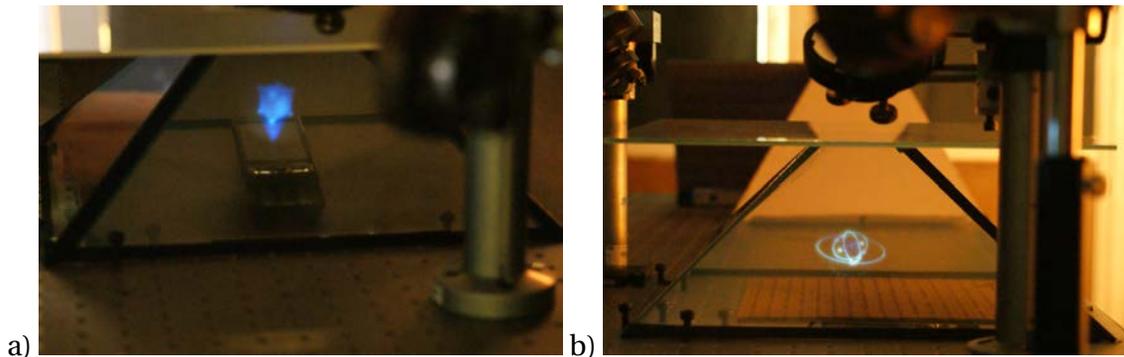


Figura 7.0.1: Proyecciones Obtenidas. a) Símbolo radioactivo con láser. b) Vídeo 3D con proyector multimedia.

Se proyectó el vídeo de varias animaciones sobre la pirámide de vidrio logrando el efecto propuesto en el objetivo de esta tesis.

Se logró eliminar la distorsión de la imagen visualizada provocada por la doble reflexión en la placa plana de la cara del prisma de vidrio.

Capítulo 8

Conclusiones

Con esta tesis hemos visto que las técnicas de proyección tridimensional surgieron desde hace cientos de años y deben cumplir con un cierto número de condiciones para lograr que un objeto o escena tridimensional de un aspecto real.

Al utilizar el arreglo piramidal, se comprobó que es posible formar imágenes virtuales suspendidas en el aire justo en el centro de su volumen, evitando la necesidad de una pantalla mecánica en movimiento que no produzca un efecto convincente, debido a que el movimiento genera divisiones entre las secuencias.

Al realizar pirámides con diferentes ángulos de inclinación, se comprobó que es importante mantener un ángulo de 45 grados respecto a la horizontal para que la imagen observada sea completamente vertical de lo contrario, la imagen será vista con una inclinación lo que provocaría molestia al espectador. Así mismo, al observar dos caras de la pirámide las imágenes no serán percibidas adecuadamente puesto que al encontrarse inclinadas no formarán correctamente la imagen tridimensional y se perderá el sentido de realismo. Sumado a lo anterior, se observó también que todas las imágenes proyectadas deben contar con las mismas características y localizarse a la misma altura de modo que al ser comparadas entre las caras se obtenga un aspecto tridimensional real.

Una ventaja encontrada al desarrollar este dispositivo en comparación con las pantallas de cristal líquido tridimensionales, se centra en que es posible observar animaciones en 360 grados contra los 108 grados otorgados por las primeras, sin embargo, por falta de equipo, en esta tesis únicamente se logró observar imágenes a 180 grados. Otra ventaja además del mayor ángulo de visión, es que las televisiones estereoscópicas requieren de lentes especiales para poder ver la escena en relieve; o en su defecto, si estas son autoestereoscópicas

el espectador tiene que estar en una posición exacta para poder percibir el efecto tridimensional, de lo contrario se observa una imagen ortoscópica o en caso de haber sido corregido una imagen bidimensional.

La ventaja de los dispositivos que proyectan imágenes sobre una superficie de partículas o de vapor radica en el hecho de que el espectador puede atravesar la animación desplegada. Sin embargo, los vórtices generados por el flujo de las partículas y/o el vapor, degradan la calidad de la imagen.

Se comprobó también que la altura de la pantalla de proyección no debe rebasar por mucho la altura de la pirámide, puesto que al ser incrementada, el desplazamiento de la imagen proyectada también es incrementado dirigiéndose hacia el borde superior de la pirámide y el tamaño de la superficie de observación se ve disminuido. Por lo tanto, si se tiene una animación creada para el tamaño del área de observación máxima esta se verá superada en dimensiones y los detalles de la imagen se perderán.

Para poder incrementar la altura de la pantalla de proyección, en vez de localizar la pantalla paralela al plano horizontal sobre el vértice superior de la pirámide, esta puede sustituirse por espejos paralelos a las caras de la pirámide, de manera que al desviar el haz luminoso con los espejos, este incide directamente sobre la cara inclinada. Así, la imagen reflejada en esta última es observada por el espectador de la misma forma que al tener la pantalla de proyección sobre la punta de la pirámide. Con esto la distancia objeto imagen puede ser incrementada.

Al utilizar pantallas de vidrio esmerilado o de acrílico se obtiene esparcimiento de la luz por lo que al observar la imagen proyectada sobre ellas es posible ver algún grado en la nitidez de la misma.

Fue fácil comprobar que la intensidad de la imagen juega un papel importante al ser proyectada en lugares bien iluminados pues al no poseer la intensidad suficiente, el efecto no será el mismo. Al utilizar películas delgadas sobre las placas de vidrio se mejoró el resultado puesto que se incremento la reflexión de la superficie. Sin embargo al agregar películas delgadas a las caras, la calidad cromática de la imagen es ligeramente disminuida.

Trabajo a futuro

Como trabajo a futuro se optó por cambiar los dispositivos de proyección ya sea a una pantalla de cristal líquido o una pantalla de diodos emisores de luz. Aunque la desventaja

de esta última, es que el tamaño del punto (pixel pitch ó dot pitch) es demasiado grande para distancias de observación pequeñas.

Utilizar otro tipo de materiales para las pantallas de observación (caras de la pirámide) sustituyendo así el uso de vidrio. con pantallas transparentes de retroproyección. Estas poseen la ventaja de desplegar la imagen y eliminar el efecto de reflexión del medio circundante con lo cual el realismo de la imagen es mejorado y el asombro del espectador incrementado.

Utilizar proyectores láser sobre pantallas transparentes para dar mayor luminosidad.

Modificar los arreglos para generar espacios tridimensionales que posean características que satisfagan la mayor cantidad de las condiciones de tridimensionalidad expuestas en el primer capítulo de esta tesis.

Glosario

- **Lúmen (lm):** Unidad del Sistema Internacional de Medidas para medir el flujo luminoso, una medida de la potencia luminosa percibida.
- **Imagen virtual:** Imagen formada por un espejo o lente que no puede ser observada en una pantalla en algún punto en el espacio.
- **Imagen real:** Imagen formada por un espejo o lente que puede ser observada en el algún punto en el espacio.
- **Neurofisiológico:** Modificación funcional del sistema nervioso producida por una acción o conducta de un ser orgánico.
- **Cono:** Los conos son células sensibles a la luz situadas en la retina de los vertebrados, en la capa fotorreceptora y son responsables de la visión en colores.
- **Bastón:** Los bastones son células fotorreceptoras situadas en la retina de los vertebrados y son responsables de la visión en condiciones de baja luminosidad. En conjunto, los bastones y los conos forman la capa fotorreceptora del ojo.
- **Músculo ciliar:** Músculo situado en el interior del ojo. La contracción de este músculo hace que se relajen las fibras que constituyen el ligamento suspensorio y como consecuencia el cristalino cambia de forma y se hace más esférico, aumentando su capacidad de refracción para poder enfocar objetos cercanos.
- **Análisis cualitativo:** Es aquel que tiene por objeto descubrir y aislar los elementos o ingredientes de un cuerpo compuesto.
- **Análisis cuantitativo:** Se emplea para determinar la cantidad de cada elemento o ingrediente descubierto con el análisis cualitativo.
- **Diafonía:** Perturbación electromagnética producida en un canal de comunicación por el acoplamiento de éste con otro u otros canales vecinos.

- Tamaño de punto (dot Pitch): El tamaño de punto es el espacio entre dos fósforos coloreados de un pixel. Los tamaños de punto más pequeños producen imágenes más uniformes. Un monitor de 14" suele tener un tamaño de punto de 0.28 mm o menos.
- Fóvea: Zona de 1.5 mm [<http://webvision.med.utah.edu/spanish/datos.html>] del ojo en la que se encuentra la mayor cantidad de conos (receptores de color).

Bibliografía

- [1] Barjau Delgado Everest, “3D Image Projection System”, International Application Number PCT/MX2003/000077.
- [2] Beltrán Guerrero Diana, Luis Basañez Villaluenga “Técnicas y algoritmos para la adquisición, transmisión y visualización de escenas 3D”, Universidad Politécnica de Catalunya, 2008.
- [3] Bolas M. T., S.S. Fisher and J. O. Merritt, “Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems III”, The International Society for Optical Engineering, San Jose, 1996.
- [4] Caulfield H. J., “Handbook of Optical holography”, Academic Press, 1979.
- [5] Collier R. J., C. B. Burckhardt, L. H. Lin, “Optical Holography”, Academic Press, 1971.
- [6] Cossairt Oliver S., Joshua Napoli, Samuel L. Hill, Rick K. Dorval, Gregg E. Favarola, “Occlusion-capable multiview volumetric three-dimensional display”, 2007.
- [7] Dolgoff Gene, “Real-Depth™ imaging: a new (no glasses) 3-D imaging technology with video/data projection applications”, Floating Images, Inc, 1997.
- [8] Duran Ramirez Victor Manuel, “Estudio y solución de algunos problemas en el diseño de sistemas ópticos”, Centro de Investigaciones en Óptica, 2004.
- [9] Eichenlaub Jesse B., “Prototype and collimated autostereoscopic displays”, Dimension Technologies Inc., 1996.
- [10] Falk David, Dieter Brill, David Stork, “Seeing the light, Optics in Nature, Photography, Color, Vision, and Holography”, 1986.
- [11] Gremse G. Felix; Philomin Vasanth, Tobias, Maarten, B. “A three dimensional display system”, International Application Number PCT/IB2009/0547113.
- [12] Gross Herbert, Singer Wolfgang, Totzeck Michael, “Handbook of Optical Systems, Physical Image Formation (Volume 2)”, Wiley VCH, 2005.

- [13] Harrold Jonathan, Adrian M.S. Jacobs, Graham J. Woodgate, David Ezra, “3D Display Systems Hardware Research”, Sharp Laboratories, 1999.
- [14] Hetch, “Óptica, Tercera Edición”, Pearson Educación, 1998.
- [15] King M. C., D.H. Berry, “Varifocal Mirror Technique for Video Transmission of Three-Dimensional Images”, 1970.
- [16] Langhans Knut, Detlef Bahr, Daviel Bezecny, Dennis Homann, Klaas Oltmann, Krishan Oltmann, Christian Guill, Elisabeth Rieper, Götz Ardey, “Felix 3D Display: An Interactive Tool for Volumetric Imaging”, 2002.
- [17] Lizuka Keigo, “Engineering Optics, Third Edition”, 2009.
- [18] Malacara Daniel, Juan Manuel Malacara, “Telescopios y estrellas”, La ciencia desde México, 1988.
- [19] Malacara Daniel, Zacarias Malacara, “Handbook of optical design, Second Edition”, Marcel Dekker inc., 2004.
- [20] Malacara Hernández Daniel, “Óptica Básica”, Fondo de cultura económica, 2004.
- [21] Malacara Hernández Daniel, “Optical Shop Testing, Third Edition”, Wiley Series, 2007.
- [22] McNair Don, “How to make Holograms”, Tab Books Inc, 1983.
- [23] Okoshi Takanori, “Three-Dimensional Imaging Techniques”, Academic Press, San Francisco, 1976.
- [24] O’Shea Donald C. , “Elements of Modern Optical Design”, Wiley Series, 1985.
- [25] Roberts E. David, “History of Lenticular and Related Autostereoscopic Methods”, Leap Technologies, 2003.
- [26] Sang Xinzhu, Fan Frank C., C. C. Jiang, Sam Choi, Wenhua Dou, Chongxiu Yu and Daxiong Xu. “Demonstration of a large size real-time full-color three dimensional display”, 2009.
- [27] Shaked Natan T., Barak Katz, and Joseph Rosen “Review of three-dimensional holographic imaging by multiple-viewpoint-projection based methods”, OSA, 2009.
- [28] Sriya Adhya, Noe John, “A complete Ray-trace Analysis of the Mirage Toy”, Department of Physics and Astronomy, 2006.
- [29] Tay S., Blanche P.-A., R. Voorakaranam, A. V. Tunc, W. Lin, S. Rokutanda, T. Gu, D. Flores, P. Wang, G. Li, P. St. Hilaire, J. Thomas, R. A. Norwood, M. Yamamoto, and N. Peyghambarian, , Nature 451, 628, 2008.

- [30] Traub C. Alan, "Stereoscopic Display Using Rapid Varifocal Mirror Oscillations", 1968.
- [31] Van Berkel Cees, David W. Parker, Antony R. Franklin, "Multiview 3D-LCD", Philips Research Laboratories, 1996.
- [32] Woodgate G. J., David Ezra, Jonathan Harrold, N. S. Holliman, G.R. Jones, R. R. Moseley, "Observer Tracking Autostereoscopic 3D Display Systems", Sharp Technical Journal Volume 69, 1997.
- [33] http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/084/htmsec_8.htm
- [34] <http://www.io2technology.com/>, "HelioDisplay".
- [35] <http://www.optigone.com>, "Mirage".
- [36] <http://webvision.med.utah.edu/spanish/datos.html>