



**I  
N  
A  
O  
E**

# **DISEÑO DE UN OBJETIVO ULTRADELGADO MINIATURIZADO DEL TIPO OJO COMPUESTO DE APOSICIÓN ARTIFICIAL.**

Por  
**Ing. Anel Garza Rivera**

Tesis sometida como requisito parcial para obtener el  
grado de

**MAESTRO EN CIENCIAS EN LA  
ESPECIALIDAD DE ÓPTICA**

En el  
**Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y  
Electrónica**

**Diciembre 2009  
Tonantzintla, Puebla**

Supervisada por:  
**Dr. Francisco Renero Carrillo**  
©INAOE 2009

El autor otorga al INAOE el permiso de reproducir y  
distribuir copias en su totalidad o en  
partes de esta tesis.



*Dedicatoria*

*Para tí papá  
de tu niña.*

# Agradecimientos

Yo no podría decir si la motivación viene de dentro o si es algo que llega de fuera y que te inspira, tal vez es la combinación de ambas cosas, pero a decir verdad es mucho más cómodo seguir la primera ley de Newton y dejarnos llevar por la inercia, vencerla implica un gran esfuerzo, pero el ¿por qué? es lo que más vale la pena.

“Pienso, luego existo”, no se cual es primero pero te agradezco Dios por la oportunidad de ambas cosas.

“La sonrisa es la música del alma”, Gracias a Ian Lars y Olaf por llenarme el corazón con su cariño, por ser la luz de mis ojos y mi mejor razón para vivir.

Gracias a mi hermana Flor por estar ahí en las buenas y en las malas.

“Las flores que no se riegan se marchitan “, gracias al INAOE por darme el agua necesaria. Gracias al Dr. Francisco Renero por haber creído en mí, por hacer posible este trabajo, por sus ideas y por su gran motivación y apoyo.

*Gracias al Dr. Alejandro Cornejo, por enseñarme que vale la pena luchar por los ideales.*

*Gracias al Dr. Jorge Zurita por su tiempo, su paciencia al escuchar mis preguntas y por el gran empeño en darme siempre una respuesta, ha sido una luz en la oscuridad.*

*Gracias al Dr. Sergio Vázquez por contagiarme su gusto por el Diseño óptico y darme el entusiasmo de un visionario.*

*Gracias al Dr. Javier Sánchez Mondragón por su apoyo, entusiasmo y comprensión desde primer semestre hasta hoy.*

*Gracias al Dr. Alberto Jaramillo por sus comentarios tan buenos y enriquecedores de éste trabajo.*

*“La curiosidad es lo que ha impulsado al hombre a descubrir su entorno”*

*Gracias al Dr. Jorge Castro, Dr. Fermín Granados, Dr. Ponciano Rodríguez, Dr. Víctor Arrízón, Dr. Julio César Ramírez, Dr. Rubén Ramos, Dra. Svetlana Mansurova, Dr. Alexander Scherbakov, Dr. Javier Báez, a la gente del taller y a toda la coordinación de óptica por compartir conmigo sus conocimientos, por enseñarme que se pueden lograr muchas cosas*

con un arduo trabajo y por satisfacer de diferentes maneras mi curiosidad.

Gracias al Dr. Soto por su pre-prope que fue verdaderamente disfrutable.

Gracias muy especialmente a Juan Pablo Padilla y a Carlos Ortiz por su super ayuda en la realización de ésta Tesis y por hacerme sentir que tengo grandes amigos.

Gracias a mis compañeros y amigos: Adrián, Nicté, Valeria, Noemí, Juan Pablo Treviño, Miguel, Javier, Daniel, Enrique, Karla, Omar, Marilú y Roberto. Muy especialmente a Gaby Molar y a Lupita Méndez por su gran ayuda y porque sin ustedes no lo habría logrado.

Gracias a Adriana Chevalier por cuidar de mi bebé tan bien que tenía la tranquilidad suficiente para estudiar.

Gracias a Anya Packebush, Muriel Quast, Ivonne Castuera y a las mamás del salón de Ian por su ayuda cuando necesité dejar a mis pequeños.

“El futuro son ondas, el pasado son partículas”

Gracias a mí Papá, a Catí, y al Prof. Ernesto Fernández porque aunque no estén físicamente en este mundo su espíritu siempre me acompañará.

*Gracias a Rebeca, a Ludmila, a Horacio y a mis amigos de toda la vida.*

*Gracias a todas las personas que dijeron que jamás terminaría la maestría, porque eso me animó a demostrarles que podía.*

*“Camínante no hay camino se hace camino al andar”*

*Gracias a la vida por la posibilidad de continuar y de soñar...*

# Índice general

<b>Resumen</b>	<b>v</b>
<b>Objetivo</b>	<b>vii</b>
<b>Indice de figuras y tablas</b>	<b>viii</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Diseño y análisis de los ojos compuestos en la naturaleza</b>	<b>4</b>
2.1. Sistemas visuales . . . . .	4
2.2. La luz y la visión . . . . .	6
2.3. Sistemas ópticos de ojos compuestos en la naturaleza . . . . .	6
2.4. Biología de los ojos compuestos de aposición naturales . . . . .	8
2.5. Óptica Ommatidial del ojo de aposición . . . . .	12
2.6. La unidad visual del ojo compuesto de aposición. . . . .	14
2.7. Resolución y Sensitividad de los ojos compuestos de aposición . . . . .	16
2.8. Mapas de ojos de aposición . . . . .	18

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	II
2.9. Ojos compuestos de superposición naturales . . . . .	19
2.10. Otros tipos de ojos . . . . .	21
<b>3. Sistemas formadores de imágenes</b>	<b>22</b>
3.1. Antecedentes . . . . .	23
3.2. La cámara de pinhole y la cámara oscura . . . . .	23
3.3. La cámara de bolsillo . . . . .	27
3.4. El teléfono-cámara . . . . .	30
3.5. Varios modelos de cámaras espías . . . . .	32
3.5.1. Micro ojos . . . . .	32
3.5.2. MicroCam . . . . .	33
3.6. Escaners . . . . .	33
3.6.1. Microescaner bidimensional . . . . .	34
<b>4. Cámara delgada de ojo compuesto</b>	<b>36</b>
4.1. Propiedades ópticas de microlentes. . . . .	38
4.1.1. Aberraciones y límites de difracción . . . . .	38
4.1.2. Producto del espacio-ancho de banda . . . . .	39
4.1.3. Resolución del ojo compuesto . . . . .	40
4.2. Leyes de diseño . . . . .	41
4.3. Objetivo del tipo ojo compuesto de aposición con y sin paredes entre canales . . . . .	46



<i>ÍNDICE GENERAL</i>	III
<b>5. Diseño y optimización del objetivo de cámara ultradelgado</b>	<b>48</b>
5.1. Criterios de Diseño . . . . .	48
5.2. Metodología . . . . .	49
5.2.1. Arreglo de microlentes . . . . .	49
5.3. Simulación de los microdobletes cilíndricos (MDC) como unidades independientes . . . . .	52
5.3.1. Simulación del MDC1 para el OCAA1 (Ojo compuesto de aposición artificial 1) . . . . .	53
5.3.2. Simulación del MDC2 para el OCAA2 (Ojo compuesto de aposición artificial 2) . . . . .	57
5.3.3. Simulación del MDC3 para el OCAA3 (Ojo compuesto de aposición artificial 3) . . . . .	60
5.4. Configuración del arreglo de microlentes para la simulación. . . . .	63
5.4.1. OCAA1 . . . . .	64
5.4.2. OCAA2 y OCAA3 . . . . .	66
5.5. Parámetros de los diseños . . . . .	68
<b>6. Conclusiones</b>	<b>70</b>
<b>A. Fabricación y ensamblaje</b>	<b>72</b>
A.1. Fabricación del objetivo del tipo ojo compuesto de aposición sin paredes entre canales . . . . .	72
A.2. Fabricación del objetivo del tipo ojo compuesto de aposición con paredes entre canales . . . . .	74

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	IV
<b>B. Otros diseños usando ojos compuestos</b>	<b>75</b>
B.1. Cluster eye . . . . .	75
B.2. Ojo compuesto artificial esférico . . . . .	77
<b>C. Resultados experimentales y desempeño del sistema propuesto por Jacques Duparré</b>	<b>78</b>
C.1. Resultados experimentales realizados por Jacques Duparré . . . . .	78
C.2. Desempeño del sistema . . . . .	79
<b>D. El teorema de muestreo</b>	<b>80</b>
D.1. Muestreo y cuantización de una imagen. . . . .	80
D.2. El teorema de muestreo . . . . .	80
D.3. La transformada de Fourier de funciones muestreadas . . . . .	81

# Resumen

El usar cada vez artículos portátiles de un tamaño más práctico, se ha convertido en uno de los objetivos de la tecnología contemporánea. Al reducir el tamaño de los diferentes dispositivos ha sido posible aumentar su velocidad de respuesta, minimizar su consumo de energía, hacer más práctica su manipulación, etc. y al usuario final le ha permitido tener acceso a la información, datos, imágenes, videos, música, etc. casi en cualquier momento, y en cualquier lugar. La tendencia futura es continuar en esta dirección, por lo cual, las aplicaciones en el campo de la miniaturización son cada vez más grandes, lo que explica el gran crecimiento de áreas como la micro y nanotecnología.

Evidentemente la óptica ha jugado un papel crucial en este desarrollo, por un lado en la fabricación de microcomponentes electrónicos (sistemas ópticos de reducción); por otro, su uso en interconexión, procesamiento de señales, etc. Los sistemas formadores de imagen se usan de manera cotidiana y son los sistemas ópticos clásicos que están en continuo desarrollo (materiales, morfologías, etc.). Estos también se miniaturizan para satisfacer demandas científicas y tecnológicas (registro de recuerdos personales, documentos legales, microscopía, etc.).

En este trabajo, basándonos en la morfología de los ojos de los insectos y artrópodos, encontramos configuraciones que permiten aprovechar las características que han recibido de parte de la naturaleza en su óptica, ya que cuentan con una visión en relación a su tamaño. Gracias a este estudio hemos podido aplicar el modelo

de ojos compuestos de aposición en el diseño óptico de un objetivo ultradelgado miniaturizado que consta de un arreglo de microlentes colocados sobre un sustrato con paredes intermedias entre canales y colocado sobre un arreglo de pinholes que envían la señal óptica a un detector, donde se procesa.

Realizamos los cálculos de los parámetros de tres diseños que alternan diferentes materiales (variando el índice de refracción), modificando la curvatura de las microlentes del arreglo y jugando con la distancia entre pinholes, así como de una variación en la distancia focal. Todo esto permite presentar tres opciones para lograr un objetivo de cámara fotográfica que no exceda los 4 mm. de espesor (incluyendo el detector), y que logre obtener una resolución aceptable (aprox. de 88 líneas/FOV), tomando como ventaja el contar con un campo de visión mucho más amplio que el que es capaz de ver un ojo de apertura única.

Nuestros resultados muestran una disminución en el espesor propuesto en trabajos previos, una optimización individual de los micro dobletes cilíndricos (MDC) que conforman los arreglos de microlentes logra minimizar el diagrama de manchas y las aberraciones. El uso de diferentes materiales con varios índices de refracción, permite una mayor flexibilidad en el diseño, y la introducción de paredes opacas de diferente espesor entre canales evita la superposición de las imágenes. Es muy importante la posición de los pinholes que limitan la cantidad de luz que se registra en el detector, y que hacen la función de fotodetectores en nuestras configuraciones, lo que se traduce en un aumento del campo de visión (FOV), y nos permiten procesar mejor las imágenes.

# Objetivo

Calcular los parámetros de diseño de un objetivo de cámara fotográfica ultradelgado miniaturizado tomando el modelo de los ojos compuestos de aposición de moscas y mosquitos de las especies *Hermetia illucens* y *Holcocephala fusca*. El objetivo de cámara fotográfica consta de un arreglo de microlentes colocados sobre un sustrato y éste a su vez depositado sobre una capa metálica con pinholes que captan la imagen en un detector. Todo con la finalidad de no sobrepasar los 4 mm. de espesor, y que sea capaz de tener una resolución aceptable.

# Índice de figuras y tablas

- Figura 2.1: Diferentes tipos de ojos.
- Figura 2.2: Ojo compuesto de aposición de un insecto.
- Figura 2.3: Formación de una imagen por el ojo compuesto de aposición.
- Figura 2.4: Ommatidia típica de aposición y diferentes tipos de rhabdómeros.
- Figura 2.5: Tipos de fotorreceptores del ojo compuesto de aposición.
- Figura 2.6: Terminología del ojo compuesto de aposición.
- Figura 2.7: Morfología del ojo natural de aposición.
- Figura 2.8: Funcionamiento de un ojo de superposición.
- Figura 2.9: Los tres tipos de ojos de superposición: refractivos, reflectivos y de superposición parabólica.
- Figura 3.1: Muestra una habitación usada como cámara oscura.
- Figura 3.2: La fotografía más antigua del mundo.
- Figura 3.3: Cámara de caja portátil del siglo XIX.
- Figura 3.4: Cámara de estudio del siglo XIX.
- Figura 3.5: Cámara Brownie 1910.
- Figura 3.6: Cámaras portátiles del siglo XX.
- Figura 3.7: Polaroid Modelo J66.
- Figura 3.8: Cámara digital Canon Powershot A95.
- Figura 3.9: Imagen del “Intelecto”.
- Figura 3.10: Cámara espía conocida como micro-ojo.
- Figura 3.11: Microcam.

- Figura 3.12: Diagrama del microescáner bidimensional.
- Figura 3.13: Vista del menu lens drawing para el microescáner bidimensional.
- Figura 4.1: Ángulo de campo en el espacio del objeto.
- Figura 4.2: La resolución de una lente limitada por difracción.
- Figura 4.3: Ojo compuesto de aposición natural.
- Figura 4.4: Ojo compuesto de aposición artificial con arreglo de microlentes y pinholes.
- Figura 5.1: Posiciones de los pinholes y de las paredes entre ommatidias.
- Figura 5.2: Vista del menu surface data para el MDC1.
- Figura 5.3: Vista del menu ray intercept para el MDC1.
- Figura 5.4: Diagrama de manchas del MDC1.
- Figura 5.5: Función de punto extendido (PSF) del MDC1.
- Figura 5.6: Vista del menu surface data para el MDC2.
- Figura 5.7: Vista del menu ray intercept para el MDC2.
- Figura 5.8: Diagrama de manchas del MDC2.
- Figura 5.9: Función de punto extendido (PSF) del MDC2.
- Figura 5.10: Vista del menu surface data para el MDC3.
- Figura 5.11: Vista del menu ray intercept para el MDC3.
- Figura 5.12: Diagrama de manchas del MDC3.
- Figura 5.13: Función de punto extendido (PSF) del MDC3.
- Figura 5.14: Vista del menu surface data para un arreglo de 5 microlentes.
- Figura 5.15: Configuración del arreglo de microlentes en la OCAA1.
- Figura 5.16: Configuración del arreglo de microlentes en los OCAA2 y OCAA3.
- Figura A.1: Vista lateral del OAA sin y con paredes entre canales.
- Figura B.1: Cluster eye.
- Figura B.2: Ojo compuesto artificial esférico.
- Figura D.1: Función continua.
- Figura D.2: Función limitada por el ancho de banda.
- Figura D.3: Función de muestreo.

Figura D.4: Transformada de la función de muestreo.

Figura D.5: Formación de la función muestreada  $\tilde{f}(t)$

Figura D.6: Secuencia periódica infinita de copias en el dominio de la frecuencia.

Figura D.7: Razón de Nyquist.

Tabla 5.1: Posición de los pinholes para el diseño OCAA1.

Tabla 5.2: Posición de los pinholes para los diseños OCAA2 y OCAA3.

Tabla 5.3: Parámetros de diseño de los OCAA, de las ecuaciones del cap.4



# Capítulo 1

## Introducción

¿Será posible tener una cámara en una tarjeta de crédito? ¿Podrá estar una cámara integrada en la carrocería de un auto y avisarnos de un posible choque repentino? ¿Podríamos tomando el modelo de superficies reflectoras reducir el tamaño de plantas concentradoras de energía solar? Para algunas de estas preguntas no existe una respuesta clara, pero la realidad es que podemos volverlas tangibles si aplicamos el diseño óptico de manera no convencional. Si volteamos a ver a nuestro alrededor y analizamos los modelos de visión de insectos y de otros seres vivos podemos descubrir que basándonos en el modelo de sus ojos tenemos sistemas ópticos que pueden revolucionar nuestra realidad.

La miniaturización en la naturaleza ha permitido la supervivencia de varios seres al ser posible que se adapten de una manera correcta a su entorno. ¿Por qué no utilizar estas posibilidades que ha dado la evolución para lograr dispositivos adaptados a las funciones que deben realizar optimizando recursos? El objetivo de este trabajo es en función de un análisis de la visión de los insectos, encontrar modelos que permitan llevar a cabo un sistema óptico no convencional y que logren realizar las funciones que deben minimizando el tamaño de los componentes. La necesidad de crear sistemas ópticos cada vez más compactos, que permitan gran versatilidad en su uso y

manipulación, ha orillado a buscar nuevas soluciones que conduzcan a poder lograr una mejor calidad de imágenes con sistemas no convencionales. Apoyándonos en los conceptos de ojos compuestos que están presentes en los insectos, y basándonos en la información proporcionada por algunos trabajos previos [1,2], hemos diseñado tres objetivos de cámara fotográfica muy delgados (aprox.de 4 mm.), que consisten en un arreglo de microlentes de polímero colocadas sobre un sustrato con paredes opacas entre canales, y una capa metálica con un arreglo de pinholes que se encuentran sobre un detector.

Los tres diseños de los ojos compuestos de aposición artificial (OCAA) <sup>1</sup>, cuentan con un arreglo de microlentes, el primer OCAA1 tiene un radio de curvatura de las microlentes, de 100.62  $\mu\text{m}$  con índice de refracción de  $n_1=1.4370$ ; el espesor del sistema es de 340  $\mu\text{m}$ ; el segundo OCAA2 tiene un radio de curvatura de las microlentes de 94.47  $\mu\text{m}$  con índice de refracción  $n_1=1.4370$ , el tercer OCAA3 tiene un radio de curvatura de las microlentes de 119.4  $\mu\text{m}$  con índice de refracción  $n_1=1.5638$ ; el espesor del sistema es de 320  $\mu\text{m}$ . para los dos últimos diseños. El índice de refracción del sustrato sobre el cual son colocadas las microlentes es de  $n_2= 1.5168$ , y conservamos el número  $F/\#$  de 3.3 para todos los casos. El objetivo simula un ojo compuesto de aposición, y cada microlente enfoca la luz de un ángulo sólido pequeño en un fotoreceptor único. En la naturaleza este tipo de ojos pueden tener desde cientos a miles arreglos hexagonales de ommatidia (unidad mínima de lente-fotoreceptor), y en nuestro caso se trabajó con un área entre 2520  $\mu\text{m}$ . y 2500  $\mu\text{m}$ . en un detector de 500 x 500 pixeles.

Las simulaciones se realizaron para dos tipos de polímeros con índice de refracción que equivalen a los vidrios Schott FK54 y SK11 respectivamente, sobre un sustrato de BK7 ( $n=1.5168$ ), y observamos que el utilizar diversos materiales permite modificar el desempeño óptico. En este trabajo describimos, en el capítulo 2,

---

<sup>1</sup>aposición: colocación de las cosas en proximidad; la colocación de un objeto de manera ideal en la posición inmediatamente junto a otro de manera que los dos coincidan.

el ojo compuesto en la naturaleza. En el capítulo 3 hacemos un recorrido por la historia de la cámara fotográfica y de cómo ha evolucionado en cuanto a reducción de tamaño, además mencionamos otros sistemas formadores de imágenes.

En el capítulo 4 mostramos la base teórica que describen en trabajos previos y que sirve de base a nuestros propios diseños. En el capítulo 5 mostramos el procedimiento de diseño, calculamos la posición de los pinholes, presentamos los resultados de los cálculos para los parámetros que se utilizaron en los tres diseños, se muestra la simulación de los diferentes micro dobles cilindricos (MDC) y se analizan las aberraciones, el tamaño de manchas y la distribución de energía, que garantizan buena calidad de imagen. Finalmente en el capítulo 6 se presentan las conclusiones del trabajo y la proyección a futuro.

# Capítulo 2

## Diseño y análisis de los ojos compuestos en la naturaleza

### 2.1. Sistemas visuales

En la actualidad la persona promedio está expuesta a más de 3000 impresiones visuales cada día. Nuestros ojos son el conducto de información más poderoso con el que cuenta el cerebro. Leemos cinco veces más rápido de lo que habla una persona. Podemos registrar aproximadamente de 24 a 30 megabytes de información visual por segundo. Existen una gran cantidad de dispositivos móviles que presentan información, como laptops, cámaras digitales, teléfonos celulares, etc. La revolución visual ha generado la necesidad de sistemas ópticos cada vez más pequeños, baratos y con buena calidad de imágenes [1]. A través de la historia, el hombre siempre ha considerado al ojo de apertura simple para determinar el diseño básico de los sistemas ópticos, esto se ha debido en gran medida a que la imagen final siempre ha tenido que ser presentada en un formato que sea compatible con el sistema visual del humano. Este concepto se ha aplicado desde la lupa de los griegos, el telescopio de Galileo, hasta las cámaras y telescopios avanzados del presente. Con el avance de los

## CAPÍTULO 2. DISEÑO Y ANÁLISIS DE LOS OJOS COMPUESTOS EN LA NATURALEZA

### 2.1. SISTEMAS VISUALES

---

detectores de estado sólido, y de la computación digital en las últimas décadas, los sensores con el modelo de ojo de apertura única se han visto cada vez más limitados en los campos de robótica, reconocimiento de imágenes y detección de objetivos militares. Esta tecnología permitió la transferencia directa de la imagen producida por la óptica a un sistema masivo de procesamiento de datos. Sin embargo, todavía no existe un método que reproduzca la función visual del humano, por lo que los algoritmos más útiles han enfatizado pocos campos de visión, segmentación fina de la imagen y un procesamiento digital masivo para reconocimiento de imágenes. Existen métodos alternativos cuyo modelo se basa en los sistemas de ojos múltiples o compuestos de los artrópodos, lo que nos permite ofrecer nuevas maneras de segmentar el espacio objeto de un sensor, aumentar el campo de visión, y lograr funciones visuales de bajo nivel de manera relativamente fácil, barata y rápida [2].

El campo máximo de visión posible para lentes de apertura única es de 180 grados, lo cual no se da en la práctica. El desarrollo de plataformas que usan sensores ópticos ha sido restringido por la necesidad de sensores múltiples, más complejos, que puedan abarcar un mayor campo de visión. Con la tecnología de ojos compuestos un robot móvil podría tener un ojo compuesto de aposición para evitar colisiones. Si la necesidad del sistema de visión es robusto, compacto y barato, la tecnología basada en ojos compuestos es una excelente opción.

Los ojos compuestos naturales combinan pequeños volúmenes con un gran campo de visión, pagando el costo de baja resolución espacial. Para los pequeños invertebrados, los ojos compuestos ofrecen la solución perfecta para obtener información visual suficiente sobre su medio ambiente sin sobrecargar el cerebro con un procesamiento necesario de la imagen. Todos los tipos de ojos compuestos pueden usar mecanismos refractivos para la formación de imágenes e incorporan ópticas con índices de refracción de gradiente, y podemos encontrar también mecanismos reflectores.

## 2.2. La luz y la visión

El ojo se define como un órgano que proporciona visión espacial, en el cual los diferentes fotorreceptores captan ligeramente diferentes direcciones en el espacio. Esta función puede ser realizada por un ojo tipo planar ó por arreglos más sofisticados. La visión espacial requiere una comparación simultánea de niveles de luz en diferentes direcciones. Los ojos son órganos que extraen información sobre la luz reflejada o emitida por objetos que nos rodean. La luz interactúa con la materia de diferentes formas, Puede ser reflejada, transmitida, absorbida o dispersada, y todas estas transformaciones dependen de la longitud de onda [3]. Podemos afirmar que la mayoría de la luz es coloreada, cuando es vista por los animales que tienen la capacidad de detectar las diferencias espectrales. Algunos animales son sensibles a la polarización para detectar la dirección del sol, y otro tipo de ojos compuestos cuentan con superficies reflectivas. Los ojos pueden ser caracterizados por su resolución y sensibilidad. La resolución es la fineza , en términos angulares, con la cual el medio ambiente óptico es medido. La sensibilidad es cuantificable como el número de fotones que recibe un receptor cuando el ojo está observando una escena con una iluminación estándar. La resolución depende de la densidad de muestreo de los receptores retinales, y también de la calidad de la imagen óptica. La calidad puede verse afectada por defectos de enfocamiento, y por las aberraciones esférica y cromática, también está limitada por difracción. Entre mayor sea la apertura de la lente, menor serán los efectos causados por difracción.

## 2.3. Sistemas ópticos de ojos compuestos en la naturaleza

Los ojos compuestos realizan funciones sensoriales desde la obscuridad en la profundidad de los océanos, hasta la claridad extrema de la luz del sol en los desiertos.

## CAPÍTULO 2. DISEÑO Y ANÁLISIS DE LOS OJOS COMPUESTOS EN LA NATURALEZA

### 2.3. SISTEMAS ÓPTICOS DE OJOS COMPUESTOS EN LA NATURALEZA

Ellos proveen a la criatura que los posee de visión que usa para la supervivencia, así como de la sensibilidad a la luz dictada por la naturaleza. El ojo compuesto permite al animal desarrollar un sistema óptico adecuado a su entorno y capaz de desarrollar las funciones visuales que necesita. En la figura 2.1 podemos observar un diagrama de un ojo de apertura única como se presenta de forma natural (A), y su contraparte artificial (D), también se presentan los diagramas de ojos compuestos, donde se presenta el ojo de aposición natural (B), con su contraparte artificial (E) y el ojo de superposición natural (C), con su contraparte artificial (F) [3].

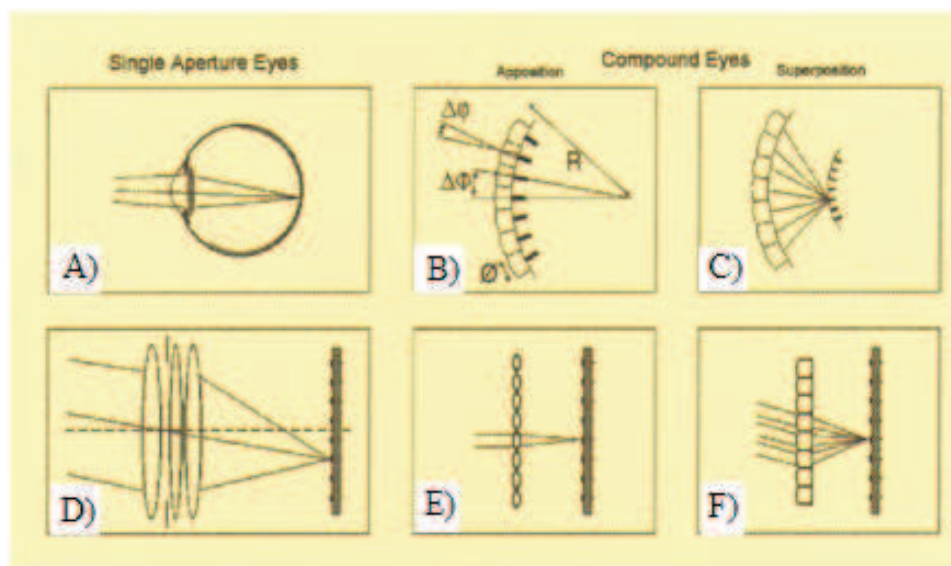


Figura 2.1: Diferentes tipos de ojos. A) y D) ojo de apertura única, B) y E) ojo compuesto de aposición, y C) y F) ojo compuesto de superposición [3].

## 2.4. Biología de los ojos compuestos de aposición naturales

El ojo compuesto de aposición consiste en un arreglo de lentes y fotorreceptores, donde cada una de las lentes enfoca la luz desde un pequeño ángulo sólido del objeto espacio hasta un conjunto de fotorreceptores. Cada sistema de lente-fotorreceptor recibe el nombre de ommatidia un “ojo pequeño”. Un ojo de aposición típico tiene miles de ommatidia empacados en arreglos hexagonales no uniformes. Un ommatidia puede tener diferentes componentes dependiendo del animal del que se trate, y de su medio ambiente. En muchas criaturas, el principal elemento de enfoque en la ommatidia de aposición es el cono del cristalino, el cual tiene un comportamiento de gradiente parabólico en el índice radial de refracción, con el índice más alto en el centro. El índice de gradiente (GRIN) combinado con la curvatura de las superficies del frente y posterior al cono del cristalino le da la potencia óptica. La propiedad (GRIN) fue propuesta por primera vez por Exner en 1891, y permite establecer que las lentes GRIN tienen propiedades similares en la producción de imágenes. Además del índice de refracción radial existen algunos insectos con índice de refracción longitudinal. Las lentes de la córnea también contribuyen a la potencia de enfoque del sistema óptico de la ommatidia [2].

Los ojos compuestos de aposición están formados por la ommatidia, en la cual cada grupo de receptores recibe una imagen invertida desde sus propias lentes. En ojos de aposición convencionales el fotorreceptor (rhabdómero) de cada ommatidia no resuelve en detalle cada imagen, pero actúa como un detector que mide el promedio de brillo de una pequeña región del espacio (típicamente un grado). La imagen erecta vista por el animal es el mosaico formado por los campos de visión adyacentes. En la figura 2.2 observamos la estructura básica de un ojo de aposición natural, donde se pueden apreciar los elementos de una ommatidia: lentes, receptores y estructuras asociadas [4].



## CAPÍTULO 2. DISEÑO Y ANÁLISIS DE LOS OJOS COMPUESTOS EN LA NATURALEZA

### 2.4. BIOLOGÍA DE LOS OJOS COMPUESTOS DE APOSICIÓN NATURALES

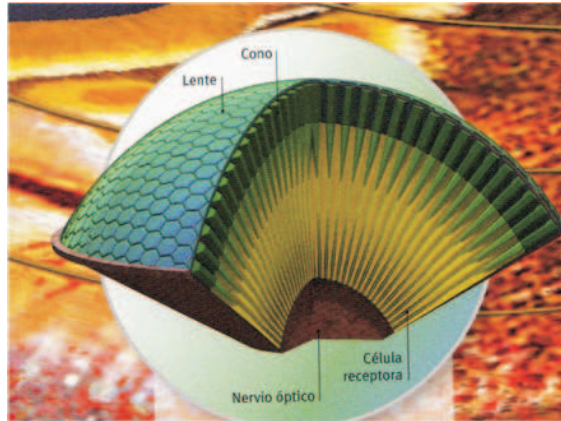


Figura 2.2: Ojo compuesto de aposición de un insecto que muestra el cono, la lente, el nervio óptico y la célula receptora [4].

Para algunas moscas la situación de formación de imágenes es un poco diferente: la imagen invertida en cada ommatidia es resuelta por siete receptores separados. Por lo tanto, las respuestas se combinan en la lamina (primera capa sináptica), de manera que las señales se relacionan, aumentando la sensibilidad sin perder resolución. A este arreglo se le llama superposición neural.

Pero entonces, ¿Qué ve un insecto? La respuesta depende del animal, pero en la mayoría de los ojos de aposición, las ocho células receptoras en cada ommatidia contribuyen a una sola estructura radial, conocida como rhabdómero, la cual está formada de una membrana fotoreceptiva que cubre un gran número de microvilli. Ópticamente cada ommatidia funciona de la siguiente manera; Una imagen invertida es enfocada en un borde del rhabdómero, él cual cuenta con un índice de refracción ligeramente mayor que sus alrededores, se comporta como una guía de onda, cuando la luz llega al borde, ésta viaja por la estructura, produciéndose una reflexión total interna. Cualquier información espacial del objeto que llega al borde del rhabdómero se pierde, se revuelve en las múltiples reflexiones, de manera que el rhabdómero actúa como una fotocelda que promedia la luz que le llega. Su campo de visión se define en términos geométricos, por el ángulo que subtiene el borde y el

## CAPÍTULO 2. DISEÑO Y ANÁLISIS DE LOS OJOS COMPUESTOS EN LA NATURALEZA

### 2.4. BIOLOGÍA DE LOS OJOS COMPUESTOS DE APOSICIÓN NATURALES

punto nodal de las lentes de la córnea. En ojos de aposición típicos se conoce como ángulo de aceptación. El campo de visión de un rhabdómero aposiciona el campo de su vecino, por lo que al final se produce una única imagen erecta hecha de un mosaico de campos de visión adyacentes.

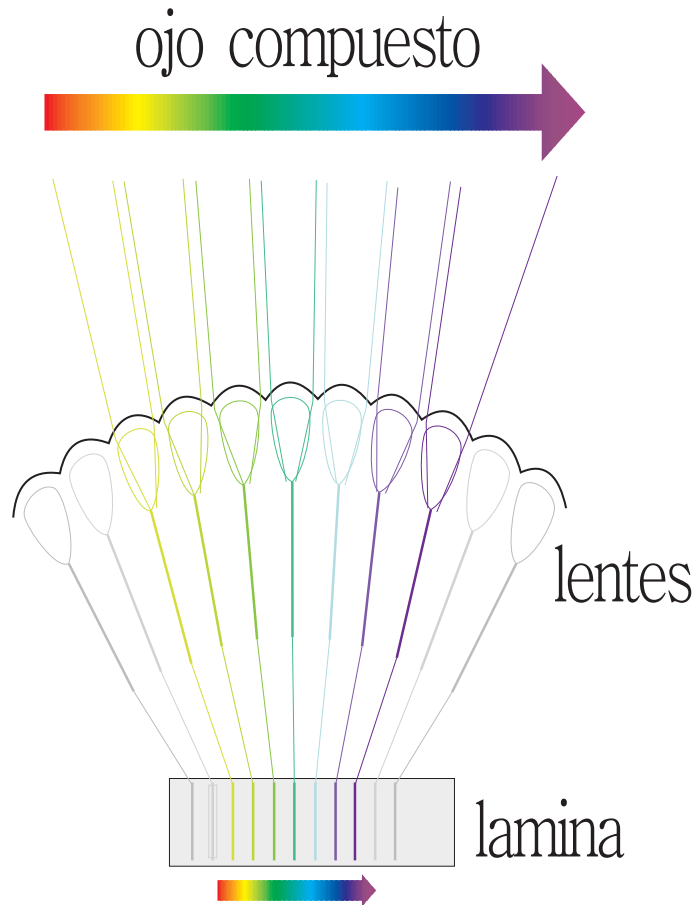


Figura 2.3: Formación de una imagen por el ojo compuesto de aposición.

En la figura 2.3 observamos como forma la imagen el ojo compuesto de aposición. Se observa claramente que las microlentes captan la luz proveniente de una parte del objeto, luego ésta pasa por un fotorreceptor que funciona como una guía de onda, y después pasa a través de un pinhole para formar una parte de la imagen que corresponde a la parte captada por el ángulo de aceptación. Este proceso se repite las mismas veces que el número de microlentes, y al final al conjunto continuo de

## CAPÍTULO 2. DISEÑO Y ANÁLISIS DE LOS OJOS COMPUESTOS EN LA NATURALEZA

### 2.4. BIOLOGÍA DE LOS OJOS COMPUESTOS DE APOSICIÓN NATURALES

todas las pequeñas imágenes se le llama imagen total.

En la figura 2.4 observamos la estructura de una ommatidia aislada que consta de una lente, cono del cristalino y fotorreceptor. También observamos los diferentes tipos de células receptoras, los siete rhabdómeros separados y los ocho rhabdómeros combinados [2].

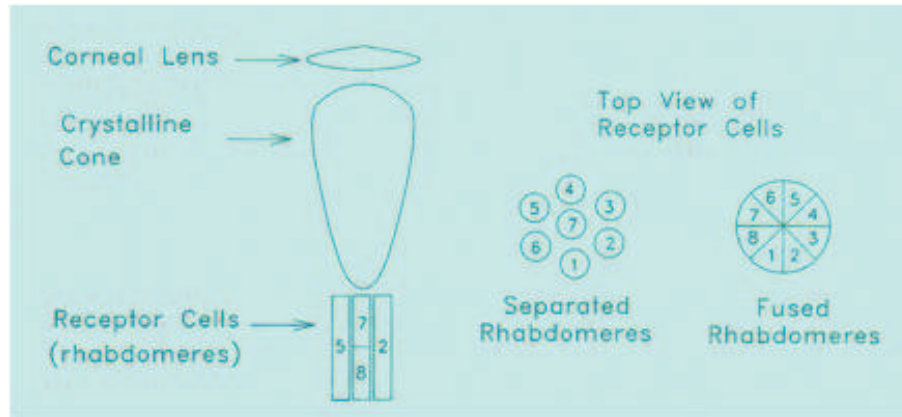


Figura 2.4: Ommatidia típica de aposición y diferentes tipos de rhabdómeros [2].

## 2.5. Óptica Ommatidial del ojo de aposición

En la figura 2.4 mostramos la unidad fundamental que es la ommatidia, también observamos la célula retinular que está formada por rhabdómeros. En muchos insectos y crustáceos cada ommatidia tiene ocho células retinulares, aunque el número puede variar de cinco a diecisiete. La absorción de fotones ocurre en una parte cónica de la célula retinular llamada rhabdom, que puede ser considerada como una guía de onda inhomogénea, anisotrópica y absorbente. Existen dos tipos principales de rhabdoms: separados y fusionados. Cada subsección de un rhabdom se llama rhabdómero. Un aspecto importante del rhabdom que se relaciona directamente con su estructura es la sensibilidad a la polarización. El fotorpigmento de cada sección del rhabdom está contenido en tubos muy bien empacados llamados microvilli, los cuales se encuentran de manera paralela de forma que cada rhabdómero o par de ellos tienen su propia sensibilidad a la polarización.

Existen dos parámetros de funcionamiento del ojo que sintetizan su desempeño, y que son independientes del tipo; éstas son la resolución y la sensibilidad. Existen muchos factores que afectan la habilidad del ojo de resolver detalles finos de objetos observados. La retina en un ojo de apertura única tiene una estructura granular, con lo que cada elemento de ésta subtiene un ángulo de aproximadamente 30 arco-segundos con respecto a las lentes del ojo, por lo que para resolver detalles entre objetos adyacentes, por lo menos un elemento de la retina no debe estar expuesto a los dos elementos estimulados, resultando el límite de resolución de 1 arco-min, que es una parte en 3440, ó 1 mm. en relación a 3.3 m. Se ha visto en experimentos que el poder de resolución del ojo depende de la luminancia del objeto, del diámetro de la pupila, y del contraste del objeto [25]. Para definir la resolución podemos acudir a varios criterios, pero en general cuando la diferencia de longitudes de onda entre dos líneas es lo suficientemente pequeña para que se superpongan, el máximo resultante quedará algo ambiguo. El poder de resolución será entonces la

## CAPÍTULO 2. DISEÑO Y ANÁLISIS DE LOS OJOS COMPUESTOS EN LA NATURALEZA

### 2.5. ÓPTICA OMMATIDIAL DEL OJO DE APOSICIÓN

longitud de onda media entre la diferencia mínima resoluble de longitudes de onda o límite de resolución [17]. La sensibilidad se refiere a la habilidad del ojo de captar suficiente luz hacia los receptores para poder hacer uso completo de la potencia de resolución [1]. En la figura 2.5 observamos en (a) la estructura de los rhabdómeros separados y fusionados, (b) la estructura de los rhabdómeros 1-6 y la estructura de los rhabdómeros 7 y 8, (c) se muestran rhabdómeros inusuales pertenecientes a un *Atalophlebia*. En la parte inferior donde se encuentran los círculos observamos la sensibilidad de los rhabdómeros a la polarización [2].

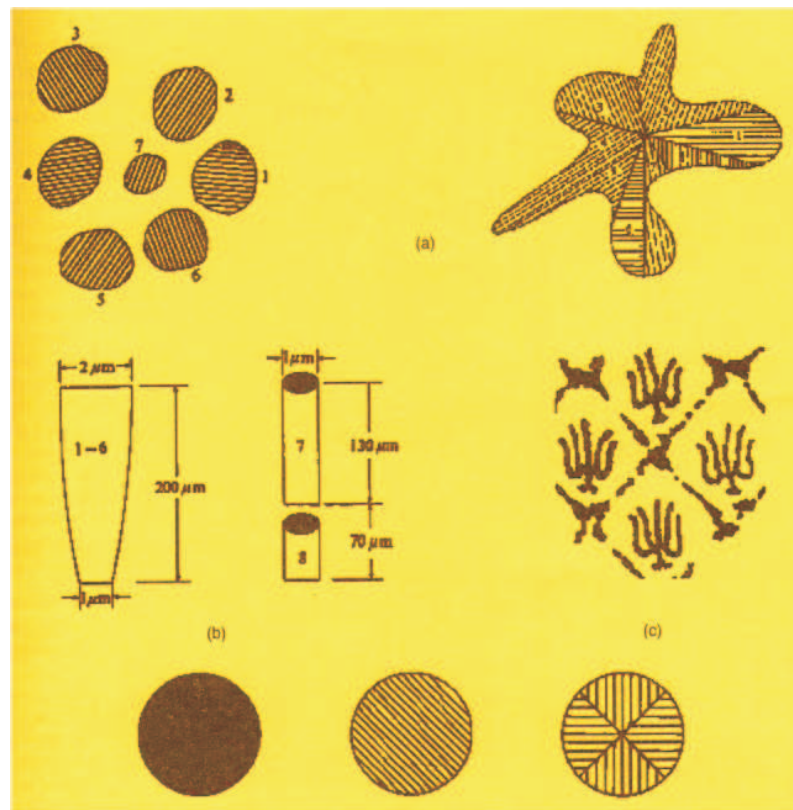


Figura 2.5: Tipos de fotoreceptores del ojo compuesto de aposición [2].

Los componentes ópticos y los procesos del ommatidia se combinan para formar lo que es su característica más importante, la función de aceptación angular. Todos los campos de visión de la ommatidia se traslapan con las ommatidias vecinas hasta cierto grado. El ancho de la función de aceptación angular y el grado de traslape son

importantes a la hora de determinar el límite de resolución del ojo como un todo.

El campo de visión o la sensibilidad angular de la ommatidia,  $A(\theta)$ , es igual al producto del aparato dióptrico, y las sensibilidades angulares del rhabdom:

$$A(\theta) = A_d(\theta)A_r(\theta). \quad (2.1)$$

La función de aceptación angular de la célula retinular puede ser aproximada por una función Gaussiana:

$$A(\phi) = e^{-2,77(\frac{\phi}{\Delta\rho})^2}, \quad (2.2)$$

donde  $\phi$  es la inclinación con respecto al eje del ommatidia de los rayos entrantes, y  $\Delta\rho$  es el ancho completo de la función al 50 % de sensibilidad (FWHM). En la figura 2.6 en la parte de arriba observamos la función de inclinación de la luz con respecto al ángulo de aceptación, en la parte de abajo se calcula el ángulo interommatidial como la razón del diámetro de la microlente entre el radio de curvatura de la misma [2].

## 2.6. La unidad visual del ojo compuesto de aposición.

Debido a la gran variedad de diferentes ojos compuestos de aposición que existen en la naturaleza, ha sido difícil identificar si la unidad funcional de percepción es la célula retinular individual, la ommatidia, o un grupo pequeño de ommatidias. La respuesta no es simple, pero se sabe que los axones de los rhabdómeros (R1-R6) de un grupo pseudopupilar están conectados a neuronas de segundo orden en la capa directamente debajo de la retina, la lamina. Las dos células centrales coaxiales “célu-

## CAPÍTULO 2. DISEÑO Y ANÁLISIS DE LOS OJOS COMPUESTOS EN LA NATURALEZA

### 2.6. LA UNIDAD VISUAL DEL OJO COMPUESTO DE APOSICIÓN.

---

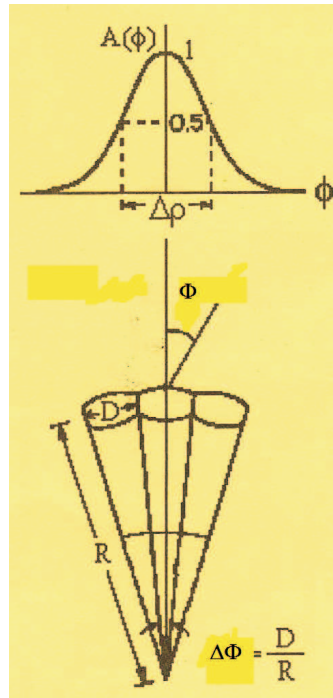


Figura 2.6: Terminología del ojo compuesto de aposición [2].

las visuales” (R7 y R8) están conectadas directamente a las neuronas en la médula, la capa debajo de la lamina. Las neuronas de segundo orden en la lamina están dedicadas a la detección de movimiento, mientras que las neuronas de la médula realizan detección de rasgos y reconocimiento de objetos. Por lo tanto, mientras ocho detectores diferentes en un sensor óptico están muestreando el mismo punto en el espacio objeto, cada uno lo está haciendo con diferente resolución espacial, con diferente sensibilidad espectral, y con diferentes propósitos perceptuales [2,5].

---

## 2.7. Resolución y Sensitividad de los ojos compuestos de aposición

Hay muchos factores que afectan el poder de resolución de un ojo compuesto de aposición. Los dos parámetros más críticos son el ángulo interommatidial  $\Delta\Phi$ , y la función de sensibilidad angular del rhabdómero. El ángulo interommatidial es el ángulo entre ejes ópticos de ommatidias adyacentes, y es el factor principal, después de la difracción, en determinar el límite de resolución de un ojo biológico compuesto. La ommatidia también puede ser definida como [2]:

$$\Delta\Phi = \frac{D}{R}. \quad (2.3)$$

En la figura 2.7 observamos los principales componentes de un ojo compuesto de aposición natural, donde se distinguen  $R$  radio de curvatura,  $D$  diámetro de la lente,  $d$  diámetro del fotoreceptor,  $f$  distancia focal,  $\Delta\Phi$  ángulo interommatidial y  $\Delta\phi$  ángulo de aceptación [3].

La función de sensibilidad angular de un rhabdómero es la medida de cuánta luz es absorbida por el rhabdómero como función del ángulo desde el eje óptico. Ésta será una de las principales diferencias entre los modelos de sensores biológicos y artificiales, ya que la función de sensibilidad angular de los sistemas diseñados por humanos puede ser muy diferente. La frecuencia de muestreo de un ojo compuesto de aposición, en ciclos por grado, es inversamente proporcional al ángulo interommatidial [2]. Con esto se asume que la función de sensibilidad angular de la ommatidia es lo suficientemente estrecha para lograr suficiente caída entre ommatidias adyacentes con lo que pueda ocurrir la modulación. Si se cumple el criterio de Nyquist de dos muestras por ciclo, la frecuencia más alta que puede resolver un ojo compuesto es:



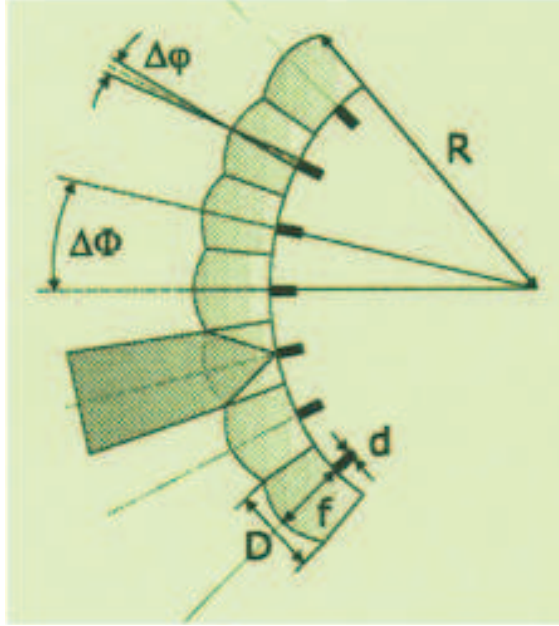


Figura 2.7: Morfología del ojo natural de aposición.  $R$  radio de curvatura,  $D$  diámetro de la lente,  $d$  diámetro del fotorreceptor,  $f$  distancia focal,  $\Delta\Phi$  ángulo interommatidial y  $\Delta\phi$  ángulo de aceptación [3].

$$\nu = \frac{1}{2\Delta\Phi}. \quad (2.4)$$

Para una rejilla cuadrada de ommatidia, y para una rejilla hexagonal de ommatidia:

$$\nu = \frac{1}{\sqrt{3}\Delta\Phi}. \quad (2.5)$$

La cantidad de luz colectada por una sola ommatidia se puede modelar como:

$$I = \left(\frac{\pi}{4}\right) \frac{\tau L}{F^2} = \left(\frac{\pi}{4}\right) \frac{\tau L d_{pu}^2}{f^2}, \quad (2.6)$$

donde  $I$  es la irradiancia ( $\text{W}/\text{m}^2$ ),  $L$  es la radiancia de la fuente ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{sr}$ ),  $d_{pu}$

es el diámetro de la pupila de entrada,  $f$  es la distancia focal del sistema,  $F$  es el número  $F/\#$  y  $\tau$  es la transmisión de la luz en el sistema.

Para el caso de una fuente extendida que cubre toda la función de aceptación angular del receptor, la sensibilidad del sistema es inversamente proporcional al cuadrado del número  $F/\#$ . Si el objeto es una sola fuente puntual, la sensibilidad del sistema es proporcional al tamaño de la pupila de entrada. Un diámetro típico para la ommatidia de una mosca es de  $25 \mu\text{m}$  con una distancia focal de  $50 \mu\text{m}$ . dando un número  $F/\#$  de 2.

## 2.8. Mapas de ojos de aposición

Ya que cada ommatidia muestrea individualmente el espacio objeto de un ojo de aposición, los ejes ópticos de la ommatidia no necesariamente deben de estar distribuidos uniformemente sobre la superficie del ojo. Al inclinar la ommatidia hacia cierto punto, se puede muestrear particularmente una región del espacio más que otras regiones. De ésta manera una región del ojo actuará como la fovea en el ojo de los vertebrados. Al crear ésta fovea, al realizar un mayor muestreo en una región resultará en un mayor radio de curvatura. Por lo tanto un ojo de insecto no tiene curvatura constante, es más plano en la región de la fovea donde los ángulos interommatidiales son más pequeños.

Existen dos parámetros que determinan la resolución del ojo compuesto, el ángulo interommatidial  $\Delta\Phi$ , y el campo de visión  $\Delta\rho$  ó (FOV). El arreglo del mapa ocular depende del medio ambiente donde vive el animal y las tareas ópticas que realiza.

## 2.9. Ojos compuestos de superposición naturales

A primera vista y desde fuera, los ojos compuestos de aposición son muy parecidos a los ojos compuestos de superposición, ambos presentan estructuras convexas de dimensiones semejantes, pero internamente hay muchas diferencias anatómicas [3]. La retina es una hoja única no dividida en unidades de ommatidias discretas como sucede en los ojos de aposición, y se encuentra dentro del ojo, por lo regular entre el centro de curvatura y la córnea. Entre la retina y las estructuras ópticas de la córnea existe una zona aparentemente vacía que a través de la cual se enfocan los rayos. Los dispositivos ópticos son varios, pueden ser telescopios refractivos, espejos o combinaciones de lentes y espejos. Lo más sorprendente es el funcionamiento de los ojos de superposición los cuales producen una sola imagen erecta en las vecindades de la retina. Esto no sólo los distingue de algunos tipos de ojos de aposición que producen múltiples imágenes invertidas, sino también de los ojos de apertura única donde la imagen que se forma también está invertida. El descubrimiento de este tipo de ojos se debe a Sigmund Exner en 1891, y mencionó que el mecanismo para lograr una sola imagen erecta consistía en redirigir la luz hacia atrás a través del eje óptico del elemento, para formar otro haz paralelo en el mismo lado del eje. Por lo que Exner demostró que esto sólo se podía lograr con un telescopio de dos lentes, con lo que concluyó que este tipo de estructuras están presentes en los ojos de los insectos. Conforme se avanzó en el estudio de este tipo de ojos, se encontró que cierto tipo de animales combinaban superficies reflectoras tipo espejos, por lo que existen tres tipos conocidos de ojos de superposición: refractivos y reflectivos. En la figura 2.8 se muestra (a) el diagrama presentado por Exner en 1891 donde presentaba el trazo de rayos necesario para producir la imagen. En (b) se muestra la refracción de la luz realizada por una lente convencional y también la refracción de la luz realizada por un elemento de un ojo de superposición [3].

## CAPÍTULO 2. DISEÑO Y ANÁLISIS DE LOS OJOS COMPUESTOS EN LA NATURALEZA

### 2.9. OJOS COMPUESTOS DE SUPERPOSICIÓN NATURALES

---

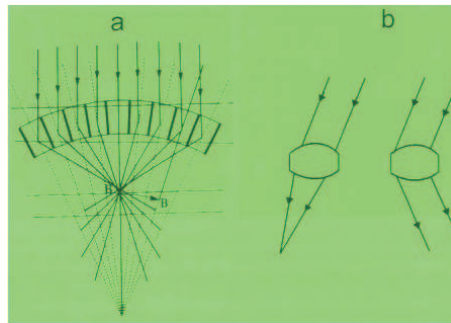


Figura 2.8: Funcionamiento de un ojo de superposición. (a) El diagrama presentado por Exner en 1891. (b) La refracción de la luz realizada por una lente convencional y también la refracción de la luz realizada por un elemento de un ojo de superposición [3].

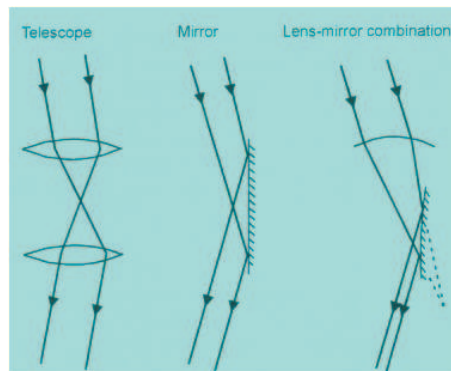


Figura 2.9: Los tres tipos de ojos de superposición: refractivos, reflectivos y de superposición parabólica.

En la figura 2.9 se presentan los ojos de superposición tipo telescopio refractivo, de superposición reflectivos con una componente parecida a un espejo plano y los ojos de superposición con una superficie parabólica refractiva y una superficie reflectiva plana [3].

## 2.10. Otros tipos de ojos

El campo de estudio de los ojos de los insectos y artrópodos es inmensamente amplio, por ejemplo ojos acuáticos, ojos anfibios, ojos nocturnos, arrítmicos, diurnos, etc. Con una gran variedad de mecanismos de funcionamiento que de estudiarse detenidamente, podrían dar nuevas ideas para el diseño óptico.

# Capítulo 3

## Sistemas formadores de imágenes

Un sistema óptico convencional consiste generalmente de una serie de superficies reflectivas y/o refractivas, las cuales presentan simetría rotacional con el eje óptico [7].

La revolución visual impulsada por las aplicaciones comerciales de aparatos digitales registradores de imágenes ha generado la necesidad de dispositivos miniaturizados y de sistemas ópticos compactos formadores de imágenes.

Existen principios ópticos generales que han sido aplicados en la miniaturización durante varios años por los diseñadores ópticos, pero al irse originando nuevas capacidades tecnológicas surgen las preguntas. ¿Cuáles principios de visión deben ser usados a qué nivel de miniaturización?, y ¿Qué tecnología debe ser aplicada para lograr un sistema formador de imagen adecuadamente adaptado? Los sistemas formadores de imágenes clásicos siempre han tenido su arquetipo en el modelo del ojo de apertura única, (principio en el que se basa el ojo humano), pero no siempre lo más importante es lograr una imagen de alta resolución, algunas veces lo que se pretende alcanzar es un sistema compacto, robusto y barato [2].

### 3.1. Antecedentes

El hombre siempre ha tenido la inquietud de plasmar las imágenes captadas por sus ojos, las cuales ocupan un lugar preponderante en su mente y en sus recuerdos, ha sido por esto que al ser una imagen en el cerebro algo tan efímero, el ser humano las ha querido preservar en algo mucho más duradero, como han sido las fotografías, las cuáles se han podido grabar en papel, dispositivos digitales, etc.

La palabra “fotografía” se deriva de la palabra griega “photos” que significa luz, y de “graphein” que significa dibujar. Esta palabra se fue usada por primera vez por Sir John F. W. Herschel en 1839, y es el método de grabar imágenes por acción de la luz, o la radiación relacionada en un material sensible a ella [8].

### 3.2. La cámara de pinhole y la cámara oscura

Alhazen (Ibn Al-Haytham), una gran autoridad en óptica en la Edad Media, que vivió aproximadamente en el año 1000 A.C., inventó la primera cámara de orificio, la cuál es un dispositivo que despliega la propagación rectilínea de la luz. De forma similar, pero a una escala más grande, tenemos a la cámara oscura, la cuál es una habitación o estructura con muy poca luz que tiene un pequeño orificio en la pared, a través del cual un paisaje o escena es proyectada, y se puede mostrar en una hoja de papel translúcida. En la figura 3.1 se muestra como al hacer un agujero en la pared de una vivienda, se proyecta el paisaje del exterior sobre un trozo de papel que sirve como detector [8].

Las cámaras fotográficas han acompañado al hombre desde 1826 con el invento de Joseph-Nicéphore Niépce, quien colocó un grabado tomado con una cámara oscura en una placa de metal cubierto con un bitumen, y lo expuso a la luz. Las áreas oscuras bloqueaban la luz, mientras que las claras permitieron que ésta reaccionara

## CAPÍTULO 3. SISTEMAS FORMADORES DE IMÁGENES

### 3.2. LA CÁMARA DE PINHOLE Y LA CÁMARA OSCURA

---



Figura 3.1: Muestra una habitación usada como cámara oscura [8].

con los químicos de la placa. Cuando Niépce colocó la placa en un solvente, apareció gradualmente una imagen. Cabe mencionar que la fotografía requería ocho horas de exposición a la luz para que apareciera la imagen, y no era capaz fijarse durante mucho tiempo. En la figura 3.2 se muestra la fotografía más antigua del mundo tomada por J.Niépce en 1825, al proyectarse la imagen de un hombre guiando a un caballo [8].

Con el desarrollo de los materiales fotosensitivos, se pudo lograr una fijación permanente de las fotografías. La cámara oscura se transformó en la cámara de caja de principios del siglo XIX. Ésta cámara contenía una simple lente de menisco con un diafragma. No tenía la aberración cromática corregida, y aunque cubría un campo de aprox.  $55^\circ$  de  $F/4$  a  $F/16$  requería largos tiempos de exposición.

Posteriormente, un doblete acromático reemplazo a la lente simple, y la apertura se volvió ajustable para diferentes cantidades de luz. La cámara no se podía usar



## CAPÍTULO 3. SISTEMAS FORMADORES DE IMÁGENES

### 3.2. LA CÁMARA DE PINHOLE Y LA CÁMARA OSCURA

---



Figura 3.2: La fotografía más antigua del mundo [8].

para distancias cortas [9]. La primera cámara que fue lo suficientemente pequeña como para considerarse portátil y práctica para la fotografía fue construida por Johann Zahn en 1865. En la figura 3.3. se muestra tanto el exterior como el interior de una cámara de caja portátil del siglo XIX [9].

Louis Daguerre fué el inventor del primer proceso práctico de fotografía. Logró reducir el tiempo de exposición a 30 minutos, y evitar que la imagen desapareciera después de ser grabada. El proceso de Daguerre fijaba las imágenes en una hoja de cobre platinada. Primero pulía la plata y después la cubría con una solución de yodo, creando una superficie muy sensible a la luz, después la colocaba a la salida de la cámara y la exponía a la luz por unos cuantos minutos. La imagen era dibujada por la luz. Posteriormente se bañaba la placa en una solución de cloruro de Plata, y se lograba fijar la imagen. En la figura 3.4 se muestra una cámara de estudio del siglo XIX [9].

CAPÍTULO 3. SISTEMAS FORMADORES DE IMÁGENES  
3.2. LA CÁMARA DE PINHOLE Y LA CÁMARA OSCURA

---

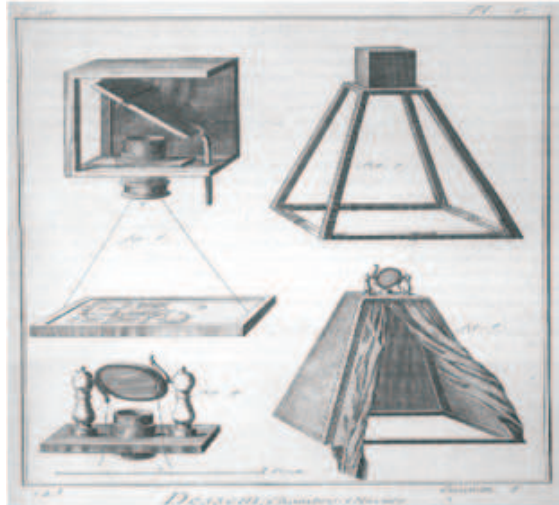


Figura 3.3: Cámara de caja portátil del siglo XIX [9].



Figura 3.4: Cámara de estudio del siglo XIX [9].

### 3.3. La cámara de bolsillo

En 1885 George Eastman creó la tecnología fotográfica moderna, que permitió al consumidor poder hacer uso conveniente de la cámara. La primera cámara Kodak tenía el rollo adentro, y para que éste fuera revelado y la película vuelta a cargar, era necesario devolver el aparato a la compañía. En 1901 Eastman creó la "Brownie" que fue la primera cámara portátil de gran popularidad. Se muestra en la figura 3.5 [10].



Figura 3.5: Cámara Brownie 1910 [10].

En la figura 3.6 se muestran cuatro tipos de cámaras portátiles del siglo XX

Con el surgimiento de la fotomicrografía a fines del siglo XIX, fue necesario usar cámaras adaptables a microscopios que fueran cada vez más pequeñas y ligeras, lo que hizo posible obtener fotografías de las observaciones realizadas al microcosmos.

En 1914 Oskar Barnack experimentó con el formato de película de 35 mm. que fue usado para crear fotografías y películas. En 1948 salió al mercado la cámara Polaroid, y fue un gran éxito gracias a que se podían revelar las fotos inmediatamente después de ser tomadas, el inconveniente fue su alto costo [10]. En la figura 3.7 se muestra una cámara Polaroid modelo J66 del año 1961 [10].



Figura 3.6: Cámaras portátiles del siglo XX [10].

La Instamatic fue una serie de cámaras baratas producidas por Kodak en 1963. Fueron muy populares, e introdujeron una generación de fotografía de bajo costo.

En 1972, Kodak introdujo la serie Instamatic de bolsillo con un formato 110. El mejor modelo fue la Instamatic 60, que fue popular hasta 1990.

Existe una gran cantidad de tipos de cámaras fotográficas, pero en la categoría de cámaras digitales, las de 35mm son las más comunes, donde el campo de observación depende de la distancia focal de las lentes y del formato del detector. En la figura 3.8 se muestra una cámara digital de 5 Megapíxeles de marca Canon Powershot A95 [10].

Recientemente la tecnología digital ha revolucionado la fotografía, ya que al poder almacenar en memoria las imágenes, ha sido posible su manipulación de una manera mucho más práctica. Las predecesoras de las cámaras digitales surgieron en

## CAPÍTULO 3. SISTEMAS FORMADORES DE IMÁGENES

### 3.3. LA CÁMARA DE BOLSILLO

---

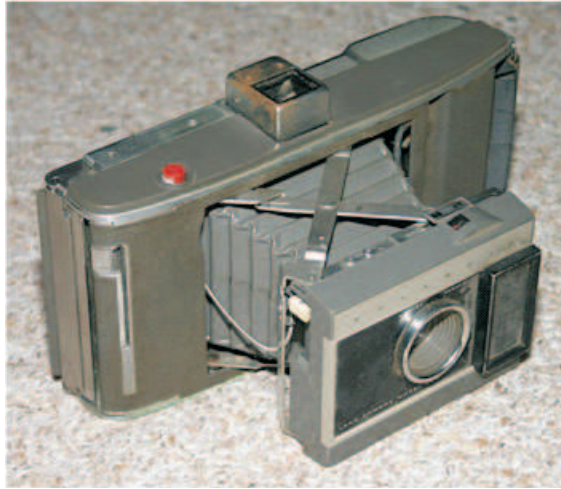


Figura 3.7: Polaroid Modelo J66 [10].

1972, y el primer prototipo fue producido en 1988 en Japón y en 1991 en Estados Unidos [9].



Figura 3.8: Cámara digital Canon Powershot A95 [10].

### 3.4. El teléfono-cámara

Un teléfono-cámara es un teléfono portátil que es capaz de realizar fotografías y/o tomar videos. Existen docenas de patentes que datan de 1960. Comparadas con las cámaras digitales de 1990, una cámara comercial integrada a un teléfono celular, requería menos batería y un alto nivel de electrónica integrada para permitir la miniaturización. El sensor de imagen CMOS de pixel activo (“camera-on-a-chip”) desarrollado por el Dr. Eric Fossum y su equipo a principios de los noventa logró desarrollar el primer teléfono-cámara moderno. El primer prototipo de teléfono cámara, conocido como el “Intelecto” fue desarrollado en 1993 por Daniel A Henderson, y era capaz de capturar imágenes estáticas, y de recibir fotografías y datos de video originados desde un centro de transmisión, y de desplegarlos en la pantalla. En la figura 3.9 se muestra una imagen del primer prototipo conocido como el “Intelecto” [11].

El diseño del teléfono-cámara de Shosaku Kawashima de Canon en Japón, en mayo de 1997 fue bastante bueno. En junio de 1997, Philippe Kahn compartió las fotos de su hija recién nacida con más de 2000 personas, dando lugar al origen de las comunicaciones visuales instantáneas.

El primer teléfono-cámara comercial fue completado con infraestructura de J-SH04, desarrollada por Sharp Corporation, y contaba con un sensor CCD. Este equipo salió a la venta en Japón en 2001, y en Norteamérica el primer teléfono-cámara salió en 2002, y fue manufacturado por Sanyo [11].

En el 2006, Thuraya saca el primer teléfono satelital con cámara integrada. El Thuraya SG-2520 es manufacturado por una compañía Coreana llamada APSI y consta de la plataforma Windows-CE.

Algunos de los teléfonos-cámaras usan sensores de imagen del tipo CMOS, ya que permiten reducir la cantidad de batería necesaria en comparación a los del tipo



Figura 3.9: Imagen del “Intelecto”[11].

CCD. Las imágenes generalmente se guardan en el formato JPEG-file-format y la estructura inalámbrica permite compartir las imágenes. El incluir una cámara en el teléfono resultó muy popular, ya que desde el comienzo J-Phone en Japón logró que la mayoría de sus suscriptores contaran con un equipo de este tipo en el transcurso de dos años. En 2008 Nokia vendió más teléfonos-cámara en comparación a las ventas de kodak de cámaras normales. Como resultado Minolta y Konica salen del mercado de cámaras de bolsillo. En este mismo año la cantidad de teléfono-cámaras a nivel mundial alcanza los 1.9 billones.



### 3.5. Varios modelos de cámaras espías

Existe una gran cantidad de éstos artefactos en el mercado, algunas cuentan con la tecnología CCD y CMOS, y la calidad de imagen es relativamente buena [12]. Las cámaras espías pueden estar integradas dentro de otros artefactos, como relojes, plumas, etc. Pero lo importante además de su tamaño, es la calidad de imagen que son capaces de reproducir.

#### 3.5.1. Micro ojos

Son unas esferas del tamaño de una bola de ping pong completamente inalámbricas, que consumen poca batería, pueden capturar hasta 30 imágenes por segundo, toman video en tiempo real, y cuentan con una memoria interna. El detector es de 320 x 240 pixeles [12]. En la figura 3.11 se muestra una cámara espía conocida como micro-ojo [12].



Figura 3.10: Cámara espía conocida como micro-ojo [12].



### 3.5.2. MicroCam

Es una cámara que consta de un CMOS en blanco y negro, pesa aprox. 0.9 g. sin cable. Sus dimensiones son de 8 mm. x 8 mm. En la figura 3.12 podemos observar el tamaño de la cámara en relación a una moneda de 25 centavos de dólar, este tipo de cámara puede resolver hasta 240 líneas [12].



Figura 3.11: Microcam [12].

## 3.6. Escaners

Existen varios tipos, siendo los más comunes los lectores de código de barras, los cuales son dispositivos optoelectrónicos que se utilizan para leer códigos de barras impresos. Consiste en una fuente luminosa, una lente y un sensor de luz que traduce los impulsos ópticos a pulsos eléctricos. Adicionalmente, casi todos los scanners de código de barras contienen circuitos decodificadores que analizan los datos proporcionados por la imagen del código de barras registrado por el sensor y envían el contenido al puerto de salida del escaner.

### 3.6.1. Microescaner bidimensional

Descripción general de un microescáner bidimensional: El haz de luz, proveniente de la fuente de iluminación, entra por la ventana V1 con un ángulo (beta) , los espejos E1, E2 y E3 reflejan el haz llevándolo hasta el espejo cónico E4 que lo enfocará hacia la ventana V2. E1 y E3 son dos espejos planos electrostáticos idénticos, colocados de manera que sus ejes de rotación sean ortogonales lo que significa que los espejos podrán ser inclinados, E1 a través del eje Z y E3 sobre el eje X, respectivamente. E3 se inclina en dirección opuesta a las manecillas del reloj ocasionando que el haz de luz se refleje hacia la izquierda a través de E2 llegando al espejo cóncavo, E4.

Así, el ángulo máximo que alcanza el haz de luz sobre el espejo cóncavo, E4, es  $\theta_{max}$ . El espejo plano fijo E2 realiza un enlace en el transporte de la luz del espejo E1 hacia el espejo E3 y también funciona como tapa superior o “techo” del sistema óptico [29].

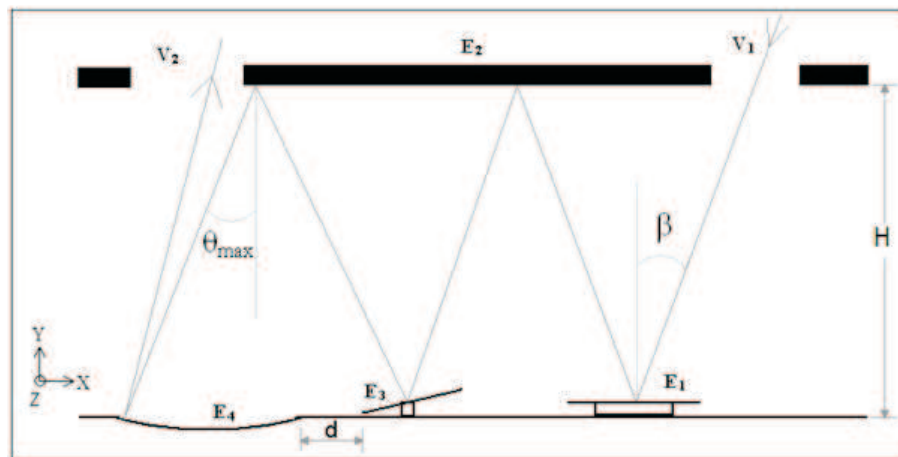


Figura 3.12: Diagrama del microescáner bidimensional [29].

En la figura 3.12 y 3.13 podemos ver la configuración del microescáner bidimensional. En la primera tenemos un diagrama de su funcionamiento y en la segunda la vista del menú lens drawing del OSLO [29].

# CAPÍTULO 3. SISTEMAS FORMADORES DE IMÁGENES

## 3.6. ESCANERS

H, es la distancia de separación entre el sustrato y la parte superior del sistema óptico (espejo plano fijo E3); la distancia d es la separación entre los espejos E3 y E4.

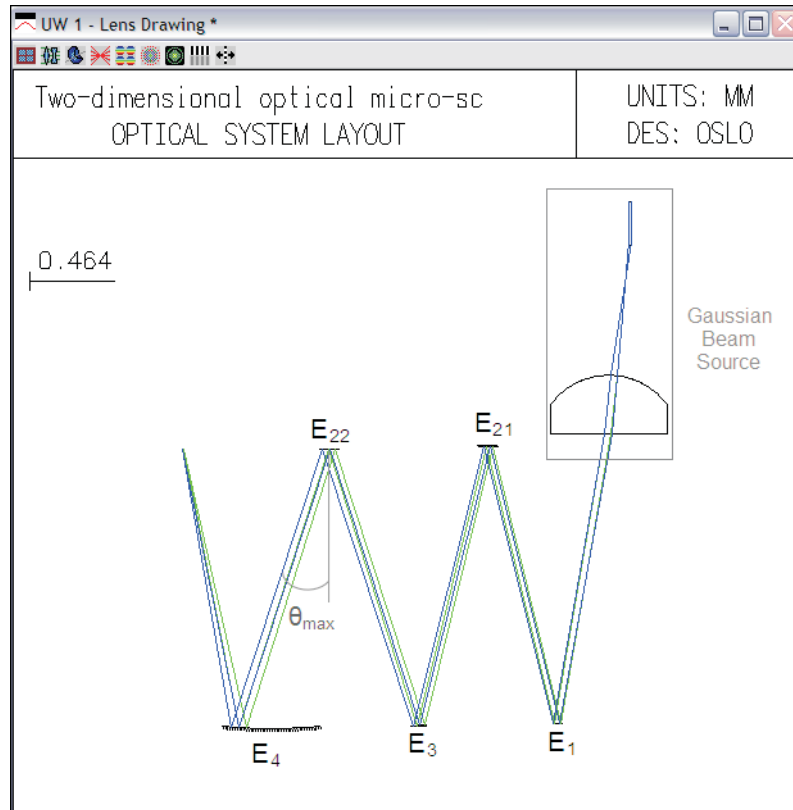


Figura 3.13: Vista del menu lens drawing para el microescáner bidimensional [29].

## Capítulo 4

# Cámara delgada de ojo compuesto

Los ojos compuestos de aposición naturales, combinan un volumen pequeño con un gran campo de visión (FOV). Todo esto a costa de una pobre resolución espacial comparada con la de los ojos de apertura única. Los sistemas miniaturizados productores de imágenes basados en la tecnología de visión de ojos compuestos artificiales han presentado un desempeño limitado debido a técnicas de fabricación inadecuadas, a un mal procedimiento de ensamblaje para las componentes individuales, al querer poner mayor atención en la electrónica que en el sistema formador de imágenes, ó al realizar un procesamiento de imágenes muy complejo [2].

Existe como antecedente importante el gran esfuerzo realizado por algunos diseñadores ópticos de implementar un sistema de ojo compuesto artificial que puede producir imágenes y que al mismo tiempo es de bajo costo, y que utiliza una distancia focal relativamente pequeña, así como un alto grado de integración con la optoelectrónica, obteniendo una muy buena resolución [15]. Un sistema plano productor de imágenes del tipo ojo compuesto, consta de un arreglo de microlentes posicionados en una estructura espacial, preferentemente con un aislamiento óptico

## CAPÍTULO 4. CÁMARA DELGADA DE OJO COMPUESTO

---

entre canales, y con un arreglo optoelectrónico de detectores con un pitch <sup>1</sup> diferente en el plano focal de los microlentes, logrando diferentes direcciones de visión para los canales ópticos [16]. Se puede usar adicionalmente un arreglo extra de pinholes para delimitar el área fotosensitiva de los pixeles del detector, si se da el caso de que no son lo suficientemente pequeños comparados con el tamaño del canal, detrás de cada microlente es formada una pequeña subimagen del objeto, gracias a la diferencia entre el pitch del arreglo de microlentes <sup>2</sup> y el del arreglo de pinholes en el detector <sup>3</sup>. Cada canal de la cámara corresponde a un ángulo de campo en el espacio del objeto, con los ejes ópticos de los canales dirigidos hacia arriba. En la figura 4.1 se muestra un sistema de tres microlentes con pinholes colocados en diferentes posiciones con respecto a su eje óptico. Se observa que los canales ópticos forman un ángulo que muestrea una parte del objeto, y dependiendo de la posición de los pinholes se colecta luz proveniente de diferentes partes del mismo.

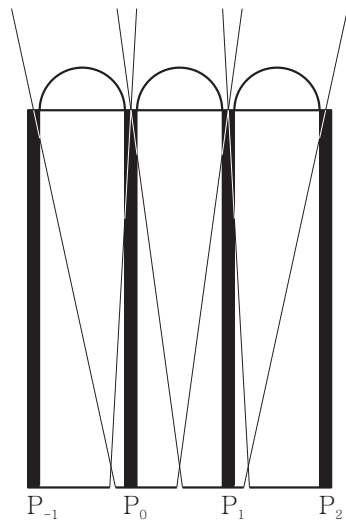


Figura 4.1: Esquematación del ángulo de campo en el espacio del objeto.

---

<sup>1</sup>pitch: también llamado periodo ó paso

<sup>2</sup> $P_L$ : distancia entre el centro de una microlente y el centro de la microlente adyacente

<sup>3</sup> $P_P$ : distancia que separa el centro de un pinhole del centro del otro

## 4.1. Propiedades ópticas de microlentes.

### 4.1.1. Aberraciones y límites de difracción

La apertura de una lente está dada por el número  $F = F/\# = \frac{f}{D}$ , donde  $f$  es la distancia focal de la lente y  $D$  es el diámetro [17]. La resolución limitada por difracción está dada por  $dx \approx \lambda F$ , la profundidad de foco por  $dz \approx 4\lambda F^2$ . En la figura 4.2 observamos una lente limitada por difracción, donde la luz pasa a través de una pequeña lente de altura  $dx$ , la profundidad de foco se logra a la distancia  $dz$ , y los ángulos de muestreo  $\Delta\Phi$  cambian según de la posición de la lente de donde provienen,  $D$  es la extensión del conjunto de microlentes [1].

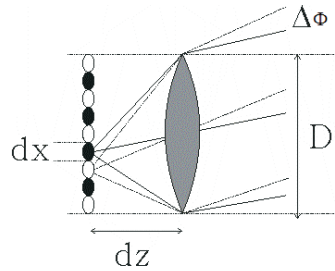


Figura 4.2: La resolución de una lente limitada por difracción [1].

Cuando queremos miniaturizar un sistema productor de imágenes, entonces cambia la magnitud de las aberraciones del frente de onda, ya que éstas son expresadas en fracciones de longitudes de onda. Si consideramos que según la óptica geométrica cuando tomamos un eje  $z$  como eje de revolución de un sistema óptico simétrico, la imagen ideal del plano  $x$ - $y$  se formará en el plano  $x'$ - $y'$  localizado después de una lente. Consideramos entonces este sistema como un sistema libre de aberraciones cuando todos los rayos del punto  $P$  en el plano  $x$ - $y$  pasan por el punto  $P'$  en el plano  $x'$ - $y'$ . Por lo tanto la constante de proporcionalidad ó la magnificación depende de la naturaleza del sistema óptico y de la posición axial en los dos planos [18]. Las lentes pequeñas tienen menos aberraciones que las lentes grandes para un mismo número

## CAPÍTULO 4. CÁMARA DELGADA DE OJO COMPUESTO

### 4.1. PROPIEDADES ÓPTICAS DE MICROLENTE.

---

$F/\#$  y a una cierta longitud de onda. Las aberraciones no tienen el mismo peso en un sistema de micro-óptica como en un sistema de macro-óptica. Para un sistema miniaturizado, el límite de difracción es el criterio más importante para describir y limitar la resolución y fineza de la imagen. Entendemos como fineza el contraste  $C$  producido por la diferencia de intensidades, captada por dos lentes consecutivas, dividida entre la suma de las mismas [3].

$$C = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}. \quad (4.1)$$

#### 4.1.2. Producto del espacio-ancho de banda

Al miniaturizar un sistema de lentes limitadas por difracción, no cambia el tamaño del pixel; de hecho al reducir el tamaño, se reduce drásticamente el número de pixeles de imagen transportados. Asumimos que para un sistema de lentes limitadas por difracción que producen una imagen en un campo cuadrado de tamaño  $I \times I = \frac{D^2}{2}$ . Para un sistema de este tipo, el número  $M$  de pixeles de imagen transportados está dado por:

$$M \approx \frac{I^2}{(\lambda F)^2} = \frac{D^2}{(2\lambda F)^2}. \quad (4.2)$$

El número de pixeles de la imagen  $M$ , también llamado producto espacio-ancho de banda, es proporcional al cuadrado del diámetro de la lente  $D^2$  multiplicado por un número  $F=F/\#$  constante [1]. Si asumimos que el grosor de un sistema de lentes es igual a su diámetro, la distancia total desde las lentes a la imagen estará dada por:

$$dz = D + f = D(1 + F). \quad (4.3)$$

### **4.1.3. Resolución del ojo compuesto**

Para un ojo compuesto de aposición redondo, la escena observada es dividida en sectores angulares  $\Delta\phi$ , llamado ángulo de aceptación, y al ángulo entre ejes ópticos, o entre dos diferentes sectores se conoce como ángulo interommatidial  $\Delta\Phi$ . Cada ojo detecta sólo una pequeña parte del objeto y formará la imagen en un pixel. La detección de la imagen se lleva a cabo de una forma paralela masiva [19], éste es un concepto muy efectivo para la detección de movimiento y para la observación de un gran campo objeto. El problema de este tipo de ojos es de cómo incrementar su resolución, con lo que intervienen diferentes variables como distancia focal y diámetro de las lentes. En la figura 2.3 del capítulo 2 se muestra como forma una ojo compuesto de aposición la imagen al muestrear el objeto, y en la figura 4.3 se muestra la morfología de un ojo compuesto de aposición natural.

Los tres tipos principales de microlentes comercialmente disponibles son: lentes difractivas, refractivas y de índice de gradiente. La diferencia entre ellas se debe a las limitaciones en su manufactura, lo que no permite implementar difracción, refracción y variación de índice de refracción en un solo tipo. Debido a la complejidad de la fabricación de las lentes GRIN, sus aplicaciones en captación de imágenes son limitadas. Las microlentes difractivas no son apropiadas para aplicaciones en sistemas ópticos formadores de imágenes, ya que la distancia focal y la eficiencia dependen de la longitud de onda de la luz, por lo que esto las limita a aplicaciones monocromáticas. La técnica más prometedora para los arreglos de microlentes refractivas son las técnicas de reflujo o de fundido de resist. El perfil de las lentes se forma por tensión superficial durante el fundido. La lente así creada sirve de master para procesos subsecuentes de transferencia como lo es el grabado de ion reactivo o la replicación en plástico. Los perfiles de lentes esféricas se obtienen al variar los parámetros del grabado durante la transferencia de grabado de ion reactivo [1].

La superposición espacial de las imágenes parciales creadas por los canales



adyacentes es la versión más popular para lograr sistemas miniaturizados productores de imágenes. Cada canal capta sólo una sección angular limitada. La fabricación a nivel oblea es la estrategia más adecuada.

## 4.2. Leyes de diseño

La figura 4.3 es un esquema de un ojo compuesto de aposición que existe en la naturaleza, cuyas características son: la distancia angular entre los ejes de los canales ópticos  $\Delta\Phi$ , (conocida como ángulo interommatidial), el ángulo de aceptación de cada canal óptico individual  $\Delta\phi$ , El diámetro  $D$  y el radio de curvatura  $R$  de cada microlente [1,2,15,16].

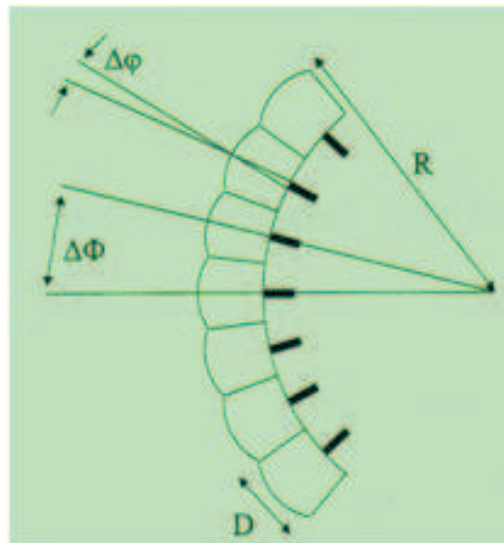


Figura 4.3: Ojo compuesto de aposición natural. [1,2,15,16].

En la figura 4.4 se muestra un ojo compuesto de aposición artificial, con arreglo de microlentes y pinholes, donde  $\Delta\Phi$  ángulo interommatidial,  $\Delta\phi$  ángulo de aceptación,  $D$  diámetro de la microlente,  $f$  distancia focal,  $d$  diámetro del pinhole,  $P_L$  pitch de las microlentes,  $P_P$  pitch de los pinholes. Se observa la diferencia entre el ojo compuesto de aposición natural y el artificial, en que el primero es un arreglo curvo, el segundo

es plano, y debido a esto se tiene que compenazar la curvatura modificando la posición de los pinholes, para que al muestrear el objeto se puedan captar todos los campos y además aumente el FOV. La ventaja de considerar un diseño plano en nuestro caso es para poder fabricar en un futuro una oblea plana con técnicas de litografía, lo que es necesario para el uso que le hemos destinado.

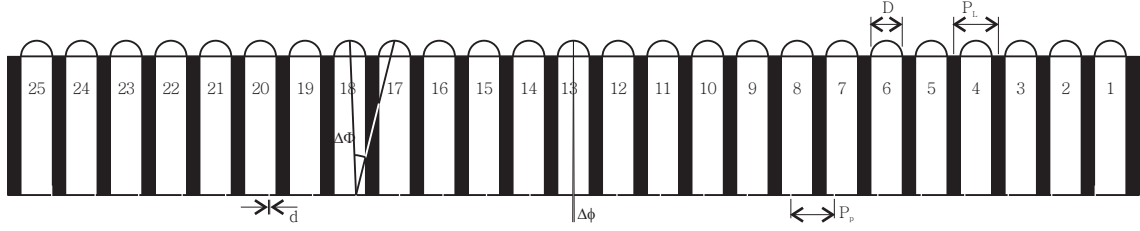


Figura 4.4: Ojo compuesto de aposición artificial con arreglo de microlentes y pinholes.

El ángulo interommatidial  $\Delta \Phi$  equivale a dirigir los ejes ópticos ó dirección de los canales de observación hacia arriba, formando una diferencia entre el pitch de las microlentes  $P_L$  y el pitch del arreglo de los pinholes  $P_P$  (ver figura 4.1).

La diferencia entre el pitch de las microlentes y el pitch de los pinholes proporciona el parámetro para calcular el ángulo interommatidial efectivo con el que trabaja nuestro sistema.

$$\Delta P = P_L - P_P. \quad (4.4)$$

La resolución angular del sistema es definida por el ángulo interommatidial  $\Delta \Phi$ ;

$$\Delta \Phi = \arctan \frac{\Delta P}{f}, \quad (4.5)$$

donde  $\Delta P$  es la diferencia de pitch, y  $f$  es la distancia focal de las microlentes [16]. El ángulo de aceptación  $\Delta \phi$  de un ommatidium ó canal individual, está determinado

por la función de sensibilidad angular, la cual está dada por la convolución de la *PSF* (función de punto extendido) de la microlente con la distribución de la transmitancia  $d_t$  en un pinhole con diámetro  $d$ , proyectado en la distancia angular del objeto. El ancho total a la mitad del máximo (FWHM) da  $\Delta\phi$  (Criterio de Sparrow)<sup>4</sup> [16].

$$\Delta\phi = \arctan \frac{FWHM(d_t \otimes PSF)}{f}. \quad (4.6)$$

La función de sensibilidad angular se usa comúnmente para caracterizar el funcionamiento de la ommatidia, y determina qué ángulo sólido en el espacio del objeto es procesado por el sistema óptico como un punto en la imagen, esto se logra graficando la eficiencia de la luz de un objeto puntual recibido por un fotoreceptor como función de la distancia angular del objeto puntual considerada desde el eje óptico de la ommatidia. Si asumimos una función de aceptación para un receptor gaussiano, el ángulo de aceptación  $\Delta\phi$  de un canal es determinado por el diámetro  $d$  de un pinhole entre la distancia focal  $f$ , y los efectos de difracción de las aperturas de las microlentes se determinan por  $\lambda$  la longitud de onda de la luz entre  $D$  el diámetro de la microlente [16].

$$\Delta\phi = \left( \left( \frac{d}{f} \right)^2 + \left( \frac{\lambda}{D} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (4.7)$$

Para obtener una buena sensibilidad con respecto a una fuente puntual, pero también una buena resolución, el tamaño del pinhole debe tener aproximadamente el tamaño de la *PSF*, que está dada por el diámetro del disco de Airy:

$$d_{Airy} = \frac{2,44\lambda f}{D}, \quad (4.8)$$

---

<sup>4</sup>Sparrow concibió la definición de resolución como el resultado de la separación de las líneas donde un punto de silla surge por primera vez, al mover las líneas más cerca una de la otra desde el infinito

donde  $\Delta\phi$  es la medida del ángulo sólido del objeto en el espacio, él cual es representado por el sistema óptico como un punto. El número máximo de pares de líneas a resolver (LP) sobre el  $FOV$  es la mitad del número de canales en el ojo de aposición, si el ángulo de aceptación de la ommatidia individual  $\Delta\phi$  está perfectamente acoplado al ángulo interommatidial. Para un ojo de aposición, la resolución de la imagen vista por el detector está determinada por la frecuencia de muestreo del ojo ( $\nu_S$ ), y por la calidad óptica, representada por la frecuencia de corte ( $\nu_{CO}$ ). Por lo que el ángulo interommatidial  $\Delta\Phi$  determina como es muestreada en total la imagen. Por lo tanto  $\nu_S = \frac{1}{2\Delta\Phi}$ [3]. Esto implica que  $\Delta\phi = 2\Delta\Phi$ . (Criterio de Nyquist)<sup>5</sup>[16], con lo que esperamos que la proporción aproximada entre ambos ángulos sea de 1:2, pero en la naturaleza no se da exactamente <sup>6</sup>, entonces el ángulo interommatidial es la medida promedio del ángulo medido para cada uno de los tres ejes del arreglo. Si el ángulo de aceptación  $\Delta\phi$  de una ommatidia individual es grande en comparación con el ángulo interommatidial, el periodo de pares de líneas a resolver está determinado por el ángulo de aceptación  $\Delta\phi$ . El número de pares de líneas a resolver ( $LP_S$ ) sobre el  $FOV$  está definido por:

$$Res_{FOV} = \frac{FOV}{\Delta\phi}. \quad (4.9)$$

El ángulo interommatidial  $\Delta\Phi$  determina la frecuencia de Nyquist del arreglo de sensores. El ángulo de aceptación  $\Delta\phi$  define la modulación para la frecuencia de un objeto dado, si  $2\Delta\Phi \gg \Delta\phi$ , ó determina el punto de corte de la resolución, si  $2\Delta\Phi < \Delta\phi$  (siguiendo el criterio de Sparrow). El tamaño del ángulo de aceptación determina la relación entre sensibilidad y resolución. El campo de visión ( $FOV$ ) del ojo compuesto está dado por:

$$FOV = \arctan \frac{a}{f}, \quad (4.10)$$

---

<sup>5</sup>ver apéndice D

<sup>6</sup>para un ojo de abeja 1:1.3

donde  $a$  es el tamaño de la subimagen <sup>7</sup>. Se escoge  $a < P_L$  para mantener espacio entre subimágenes y evitar que se empalmen. La diferencia de pitch para el arreglo de pinholes para una cámara de  $N_x$  canales sobre una dimensión se calcula por:

$$P_p = a \left( 1 + \frac{N_x}{N_x + 1} \right). \quad (4.11)$$

Entre más grande sea el diámetro del pinhole, mayor será la sensibilidad pero peor será la resolución y viceversa. Si los pinholes son menores que la  $PSF$  de las microlentes, el número de pixeles a resolver puede ser estimado determinando de la gráfica de microlentes de la resolución óptica de corte en pares de líneas por milímetro de una función de transferencia modulada ( $MTF$ ). La sensibilidad de un sistema formador de imágenes de apertura única para una fuente extendida es determinado por el número  $F$  del sistema ( $\frac{F}{\#}$ ). Esto también aplica para los ojos compuestos de aposición. Para un objeto distante la sensibilidad puede ser descrita como:

$$I_I = \frac{\pi\tau L_o}{4(F/\#)^2}, \quad (4.12)$$

donde  $I_I$  es la irradiancia en el plano imagen,  $\tau$  es la transmitancia del sistema óptico y  $L_o$  es la radiancia en el plano objeto. Si el objeto es una fuente Lambertiana perfecta,  $L_o$  es constante sobre el ángulo sólido del hemisferio, y cumple la relación  $I_o = \pi L_o$ , donde  $I_o$  es la irradiancia en la superficie del objeto. La sensibilidad de un solo canal óptico (ommatidia), debida a una fuente extendida es determinada por:

$$\frac{P_I}{I_o} = \tau N A^2 \frac{\pi d^2}{4}, \quad (4.13)$$

donde la apertura numérica  $NA$  de la microlente es  $NA = \frac{1}{2(F/\#)}$ ,  $d$  es el diámetro del pinhole,  $P_I$  es la potencia óptica capturada por un pinhole. Es importante men-

---

<sup>7</sup>imagen de un segmento del objeto

## CAPÍTULO 4. CÁMARA DELGADA DE OJO COMPUESTO

### 4.3. OBJETIVO DEL TIPO OJO COMPUESTO DE APOSICIÓN CON Y SIN PAREDES ENTRE CANALES

---

cionar que el diámetro de las microlentes no tienen influencia directamente en la sensibilidad, pero si a través de la apertura numérica  $NA$ . Si aumentamos el diámetro de las microlentes para una distancia dada, mejoramos todos los parámetros ópticos, pero, el tamaño del objetivo aumenta, y con él la apertura numérica ( $NA$ ) y por lo tanto aumentan las aberraciones. Si se aumenta el  $FOV$  al agregar una función de deflexión del haz luminoso que incide en las microlentes, obtenemos un mayor número de pixeles a resolver, mientras que todos los otros parámetros permanecen constantes. Podemos obtener como reglas de diseño; que el cálculo correcto de  $\Delta\phi$  por vía ( $d/f$  y  $\lambda/D$ ), con respecto a la resolución y sensibilidad deseadas es muy importante.  $\Delta\Phi$  y el número adecuado de canales individuales siguen en importancia a la determinación del ángulo de aceptación, así como el cálculo del  $FOV$ . Entre más largo sea el sistema formador de imágenes de tipo ojo compuesto, mayor será su capacidad de captar información espacial, y será más fácil lograr una mejor resolución y una mayor sensibilidad al mismo tiempo. Pero esto va de la mano con un aumento de extensión lateral de cada canal y por tanto del objetivo en conjunto (ver capítulo 5 donde se encuentran los parámetros de diseño).

### 4.3. Objetivo del tipo ojo compuesto de aposición con y sin paredes entre canales

Un objetivo del tipo ojo compuesto de aposición artificial tiene un factor de llenado pequeño en los pinholes en el plano imagen. La configuración ideal presentada en las referencias para el sensor es con un pitch entre pixeles de  $100 \mu\text{m}$ , y un área óptica activa en los pixeles del orden de unos cuantos micrómetros cuadrados. En el arreglo diseñado por et al.[16], no se usaron paredes entre canales <sup>8</sup>, se usó un arreglo del tipo CMOS de pixeles de  $128 \times 128$  con un pitch entre pixeles de  $69$

---

<sup>8</sup>consiste en usar un sustrato sobre el que son colocadas las microlentes sin ninguna barrera en su constitución, lo que puede causar que las imágenes presenten traslape.

**CAPÍTULO 4. CÁMARA DELGADA DE OJO COMPUESTO**  
**4.3. OBJETIVO DEL TIPO OJO COMPUESTO DE APOSICIÓN CON Y SIN**  
**PAREDES ENTRE CANALES**

---

$\mu\text{m}$ . La ventana óptica resulta de un tamaño de  $21.4 \times 21.4 \mu\text{m}$ . La sensibilidad del contraste usado en el sensor tipo CMOS es del 2%, la precisión en la orientación en las orillas es de  $\pm 3^\circ$  y tiene un rango de iluminación dinámico de 120 dB. En otros diseños realizados por et al. [15], se introdujeron paredes entre los canales individuales del ojo de aposición artificial. Debido a las estructuras opacas, la luz que se encuentra fuera del *FOV* es bloqueada. Las imágenes fantasmas son suprimidas y el contraste de la imagen es mejorado.

# Capítulo 5

## Diseño y optimización del objetivo de cámara ultradelgado

En los capítulos anteriores presentamos el marco teórico y los antecedentes de diseño del objetivo ultradelgado de tipo ojo compuesto de aposición. En este capítulo presentamos los criterios de diseño, el procedimiento que fue seguido para éste, así como las simulaciones y los resultados obtenidos hasta llegar a los arreglos de microlentes propuestos para consolidar sistemas ópticos optimizados.

### 5.1. Criterios de Diseño

Para realizar este diseño se consideró: simetría esférica de las microlentes, ángulos interommatidiales uniformes, y naturaleza de la fuente. Como criterios de diseño se tomaron en cuenta: *FOV* (campo de visión), resolución, sensibilidad, rango espectral, y frecuencia de corte.



## 5.2. Metodología

Los parámetros básicos del sistema son el número  $F/\# = 3,3$  y las distancias focales  $f_1=340 \mu\text{m}$ ,  $f_2=320\mu\text{m}$ . y  $f_3=320\mu\text{m}$ . Proseguimos calculando el diámetro de las microlentes y el radio de curvatura [15,16]. Una vez que tuvimos éste parámetro pudimos simular los Micro Dobletes Cilíndricos (MDC) en el programa OSLO. Además minimizamos las aberraciones ópticas. Utilizamos los índices de refracción de los siguientes vidrios: *FK54*, *SK11* y *BK7*.

### 5.2.1. Arreglo de microlentes

Las dimensiones del arreglo de microlentes se calcularon como sigue:

1. Consideramos el diámetro de las microlentes. Se les agregó el espesor de las paredes propuestas para evitar traslape con lo que obtuvimos el pitch de las microlentes.

$$P_L = D + e_p, \quad (5.1)$$

en la siguiente ecuación  $D$  diametro de las microlentes,  $P_L$  pitch de las microlentes y  $e_p$  espesor de la pared.

2. Calculamos el número de microlentes en una dimensión que caben en el detector.

$$N_x = \frac{W_D}{P_L}, \quad (5.2)$$

donde  $N_x$  es el número de microlentes en el eje  $x$ ,  $W_D$  es el ancho del detector y  $P_L$  es el pitch de las microlentes.

3. Pixeles que abarca una ommatidia.

$$n_{pixeles} = \frac{P_L}{t_{pixel}}, \quad (5.3)$$

donde  $n_{pixeles}$  es el número de pixeles que abarca una ommatidia,  $P_L$  es el pitch de las microlentes, y  $t_{pixel}$  es el tamaño del pixel del detector.

4. El diámetro de un pinhole con la ecuación 4.8.

5. El  $FOV$  con la ecuación 4.10.

6. El pitch de los pinholes con la ecuación 4.11.

7. La diferencia de pitch con la ecuación 4.4.

8. La posición de los pinholes,

a) Con respecto a la pared  $P_N$  de la microlente (figura 5.1): En este caso  $X_{N_{izq}}$  es la distancia medida desde la pared  $P_N$  de cada microlente, hasta donde se colocará el pinhole.

$$X_{N_{izq}} = N_L \Delta P, \quad (5.4)$$

donde  $N_L$  es el número de microlente y  $\Delta P$  es la diferencia de pitch.

b) Con respecto a la distancia absoluta medida desde cualquier pinhole de la lente, hasta la pared  $P_2$ . (figura 5.1) En este caso  $X_{N_{der}}$  es la distancia medida desde cualquier pinhole hasta la primera pared de la primera microlente del arreglo.

$$X_{N_{der}} = N_L P_P, \quad (5.5)$$

donde  $N_L$  es el número de microlente y  $P_P$  es el pitch de los pinholes.

Cabe mencionar que para diseños donde el espesor de las paredes entre canales

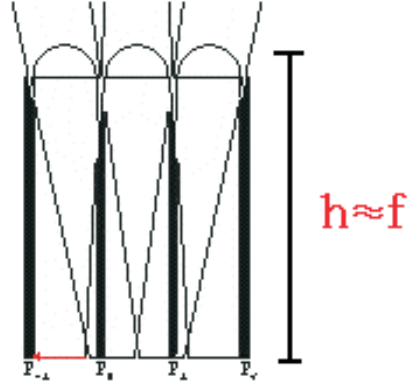


Figura 5.1: Posiciones de los pinholes y de las paredes entre ommatidias.  $P_{-1}$ ,  $P_0$ ,  $P_1$  y  $P_2$  son las posiciones de las paredes dependiendo de la microlente a la que corresponden.

implica un porcentaje considerable del valor total del pitch de las microlentes, es necesario calcular la posición de los pinholes de otra manera, donde la distancia efectiva sea la distancia total que abarcan las ommatidia sin considerar el área ocupada por las paredes opacas.

9. El ángulo de aceptación  $\Delta\phi$  con la ec. 4.7.
10. El ángulo interommatidial  $\Delta\Phi$  con la ec. 4.5.
11. La frecuencia de muestreo  $\nu$  con la ec. 2.4.
12. El número de pares de líneas a resolver  $Res_{FOV}$  sobre el  $FOV$ , con la ec. 4.9.

### 5.3. Simulación de los microdobletes cilíndricos (MDC) como unidades independientes

Para obtener la mejor calidad de imagen se consideraron tres microdobletes diferentes (MDC1, MDC2 y MDC3), como ommatidia independientes, por lo que se simularon diferentes lentes tratando de optimizar los radios de curvatura y distancias focales para obtener la menor cantidad de aberraciones posibles. Utilizamos el programa OSLO (Optics Software for Layout and Optimization) version Premium 6.2. Como herramienta de optimización se usó el Slider Wheel.<sup>1</sup> En las figuras 5.3, 5.7 y 5.11 se muestran las gráficas de las aberraciones de color lateral, aberración esférica longitudinal, distorsión, astigmatismo y aberración cromática. Cabe mencionar que son bastante pequeñas, ya que las microlentes están limitadas por difracción.

Recordamos que las aberraciones se definen como [17]:

Aberración esférica: corresponde a la dependencia de la distancia focal con la abertura para rayos no paraxiales. La distancia comprendida entre la intersección de un rayo con el eje y el foco paraxial, es conocida como la aberración esférica longitudinal. A la altura a la que un rayo cruza una pantalla por encima del eje óptico se le llama aberración esférica transversal o lateral. La aberración esférica desplaza la luz del disco central a los anillos de alrededor, los cuales se hacen más prominentes y ésto disminuye la irradiancia. En condiciones ideales, una lente formará una imagen de una fuente puntual, que consistirá en un diminuto disco circular y brillante rodeado de anillos tan débiles que apenas serán perceptibles; ésta será su distribución de Airy.

Astigmatismo: Cuando un punto objeto está situado a una distancia apreciable del eje óptico, el cono de rayos incidente sobre la lente será asimétrico. La configuración de un haz oblicuo de rayos paralelos será diferente en los planos meridional y

---

<sup>1</sup>Slider Wheel: es un submenú del OSLO.

## CAPÍTULO 5. DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DEL OBJETIVO DE CÁMARA ULTRADELGADO

### 5.3. SIMULACIÓN DE LOS MICRODOBLETES CILÍNDRICOS (MDC) COMO UNIDADES INDEPENDIENTES

---

sagital, como resultado las distancias focales en esos planos también serán diferentes. Cuando tenemos astigmatismo la imagen se transforma en una compleja distribución de zonas brillantes y oscuras y la imagen se alarga.

**Distorsión:** Se produce cuando las diversas zonas de la lente poseen distancias focales y aumentos diferentes. La distorsión se manifiesta como una deformación de la imagen en su conjunto, a pesar de que cada punto está nítidamente enfocado.

**Coma:** Es un deterioro de la imagen, asociada con un punto objeto apartado del eje aunque sea a una distancia corta. Su origen radica en que los planos principales pueden ser considerados como planos solamente en la región paraxial, ya que realmente son superficies curvas principales. La imagen que tiene coma se observa en lugar de un punto, como un cono alargado o un pequeño cometa.

**Aberración cromática:** ésta surge con la luz policromática, y se debe a que la ecuación de trazado de rayos es una función de los índices de refracción, los cuales, a su vez, varían con la longitud de onda. Diferentes rayos de colores cruzan el sistema con diferentes trayectorias, los cuales son enfocados sobre diferentes puntos del eje. La distancia axial entre dos de dichos puntos focales, la cual comprende una determinada gama de frecuencias se denomina aberración cromática axial. La distancia vertical entre dos de dichos puntos focales es una medida de aberración cromática lateral ó color lateral. La aberración cromática se observa como un conjunto de imágenes de color superpuestas y ligeramente desenfocadas, produciendo un borrón blancuzco o una superposición turbia.

#### **5.3.1. Simulación del MDC1 para el OCAA1 (Ojo compuesto de aposición artificial 1)**

El OCAA1 consiste en un arreglo cuadrado de 25 X 25 microlentes, tiene un espesor de 340 micras y se usó un doblete con vidrios de índices de refracción

## CAPÍTULO 5. DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DEL OBJETIVO DE CÁMARA ULTRADELGADO

### 5.3. SIMULACIÓN DE LOS MICRODOBLETES CILÍNDRICOS (MDC) COMO UNIDADES INDEPENDIENTES

---

$n_1= 1.437$  y  $n_2=1.5168$ , para la primera y segunda lente, respectivamente.

Al optimizar el radio de curvatura se obtiene un valor  $R1= 102.04 \mu\text{m}$ ., y tenemos un diametro  $D=70 \mu\text{m}$  para las microlentes.

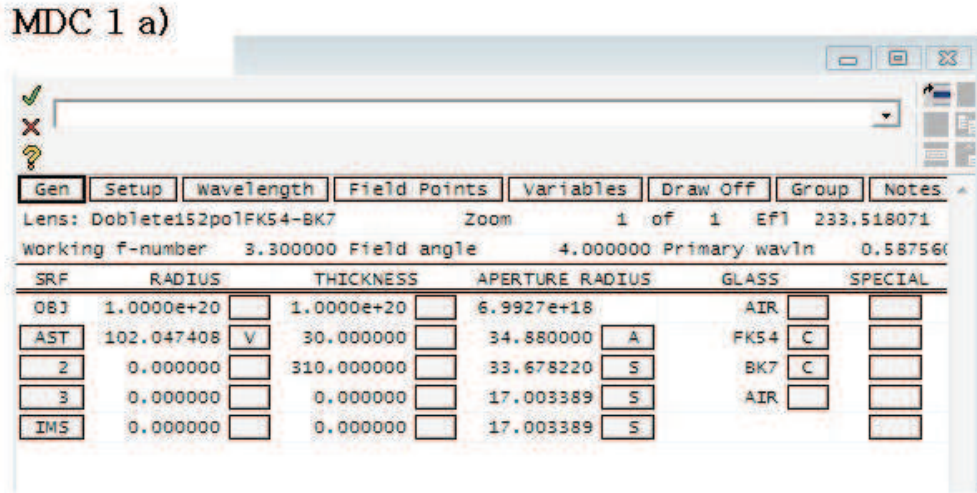


Figura 5.2: Vista del menu surface data para el MDC1

En la figura 5.2 tenemos la vista del menú con los parámetros del MDC1 en OSLO. Podemos ver la información correspondiente a la posición de las lentes, el radio de curvatura, el espesor, el radio de apertura, el material y los índices de refracción usados.

La figura 5.3 muestra un diagrama de MDC1 y gráficas correspondientes a algunas aberraciones de Seidel, y a la aberración cromática. En la figura 5.4 mostramos el diagrama de manchas para el MDC1 que especifica que el tamaño de mancha producida es adecuada para una amplia variedad de detectores comerciales. En la figura 5.5 se muestra la gráfica de la función de punto extendido (PSF).

# CAPÍTULO 5. DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DEL OBJETIVO DE CÁMARA ULTRADELGADO

## 5.3. SIMULACIÓN DE LOS MICRODOBLETES CILÍNDRICOS (MDC) COMO UNIDADES INDEPENDIENTES

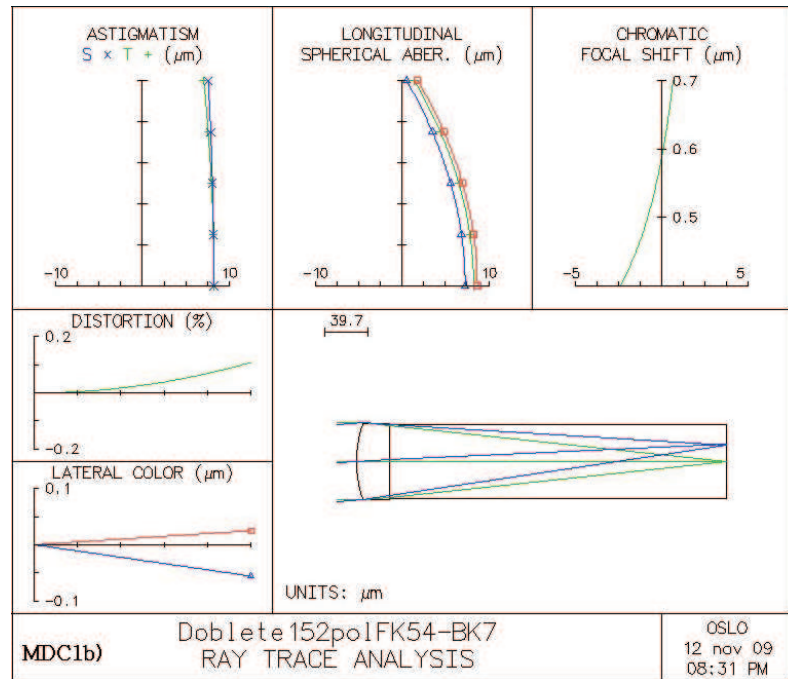


Figura 5.3: Vista del menu ray intercept para el MDC1.

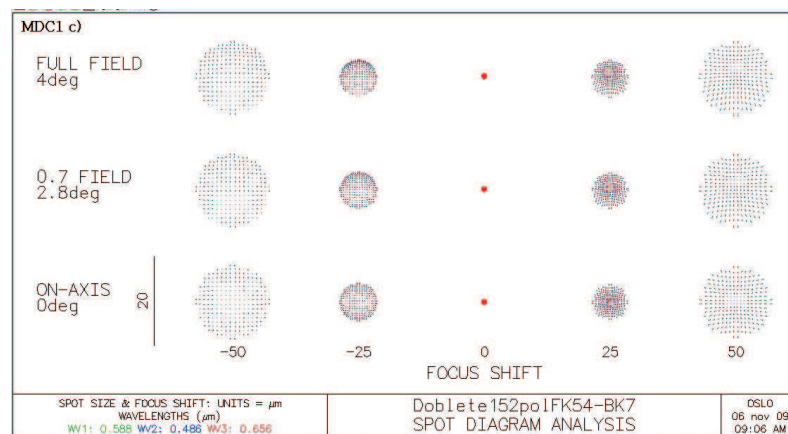


Figura 5.4: Diagrama de manchas del MDC1.

**CAPÍTULO 5. DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DEL OBJETIVO DE  
CÁMARA ULTRADELGADO**  
5.3. SIMULACIÓN DE LOS MICRODOBLETES CILÍNDRICOS (MDC) COMO  
UNIDADES INDEPENDIENTES

---

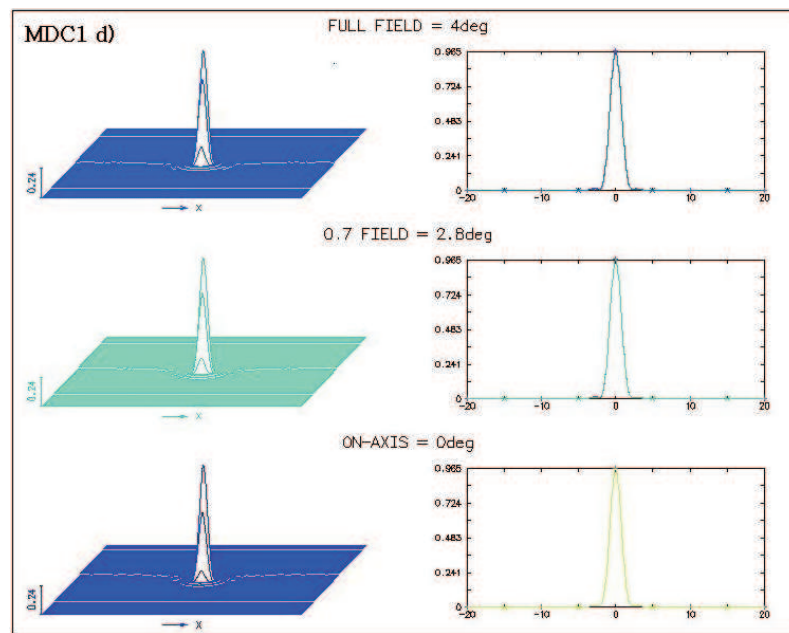


Figura 5.5: Función de punto extendido (PSF) del MDC1.



## CAPÍTULO 5. DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DEL OBJETIVO DE CÁMARA ULTRADELGADO

### 5.3. SIMULACIÓN DE LOS MICRODOBLETES CILÍNDRICOS (MDC) COMO UNIDADES INDEPENDIENTES

#### 5.3.2. Simulación del MDC2 para el OCAA2 (Ojo compuesto de aposición artificial 2)

El OCAA2 consiste de un arreglo cuadrado de 30 x 30 microlentes, tiene un espesor de 320  $\mu\text{m}$ . y se usó un doblete con índices de refracción de  $n_1=1.437$  y  $n_2=1.5168$ , para la primera y segunda lente, respectivamente. Al optimizar el radio de curvatura se obtiene un valor  $R_2=94.47 \mu\text{m}$ ., y tenemos un diámetro  $D=65.5 \mu\text{m}$  para las microlentes.

#### MDC2 a)

Gen	Setup	wavelength	Field Points	Variables	Draw On	Group	Notes
Lens: Doblete94.47po1FK54-BK7		Zoom	1 of 1	Ef1	216.194699		
Working f-number		3.300000	Field angle	7.425000	Primary wavln	0.587560	
SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPECIAL		
OBJ	1.0000e+20	1.0000e+20	1.3032e+19	AIR			
AST	94.477093	20.000000	32.756773	FK54		AS	
2	0.000000	300.000000	32.461795	BK7		S	
3	0.000000	0.000000	28.269923	AIR		S	
IMS	0.000000	0.000000	28.269923			S	

Figura 5.6: Vista del menú surface data para el MDC2.

En la figura 5.6 tenemos la vista del menú con los parámetros del MDC2 en OSLO. Podemos ver la información correspondiente a la posición de las lentes, el radio de curvatura, el espesor, el radio de apertura, el material y los índices de refracción usados.

# CAPÍTULO 5. DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DEL OBJETIVO DE CÁMARA ULTRADELGADO

## 5.3. SIMULACIÓN DE LOS MICRODOBLETES CILÍNDRICOS (MDC) COMO UNIDADES INDEPENDIENTES

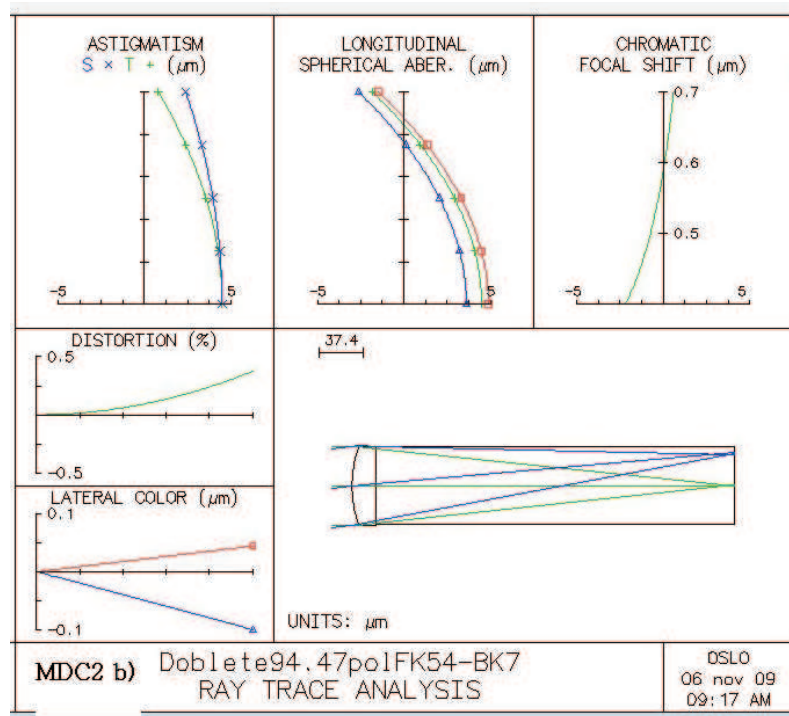


Figura 5.7: Vista del menu ray intercept para el MDC2.

La figura 5.7 muestra un diagrama de MDC2 y gráficas correspondientes a las aberraciones de Seidel y la aberración cromática. En la figura 5.8 mostramos el diagrama de manchas para el MDC2 que especifica que el tamaño de mancha producida es adecuada para varios detectores comerciales. En la figura 5.9 se muestra la gráfica de la función de punto extendido (PSF).

# CAPÍTULO 5. DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DEL OBJETIVO DE CÁMARA ULTRADELGADO

## 5.3. SIMULACIÓN DE LOS MICRODOBLETES CILÍNDRICOS (MDC) COMO UNIDADES INDEPENDIENTES

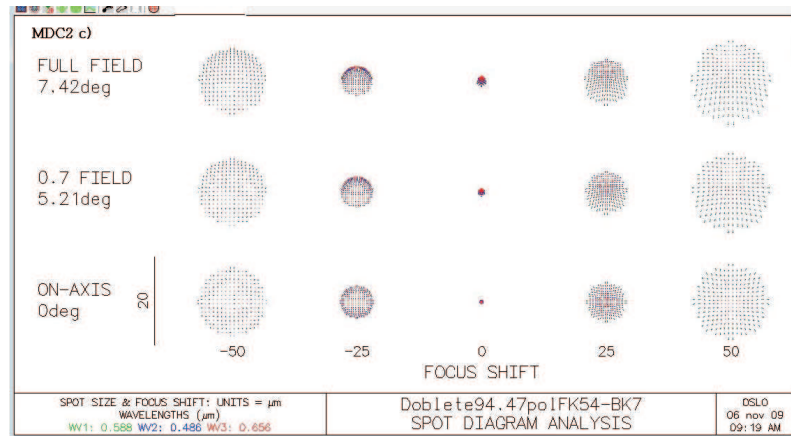


Figura 5.8: Diagrama de manchas del MDC2.

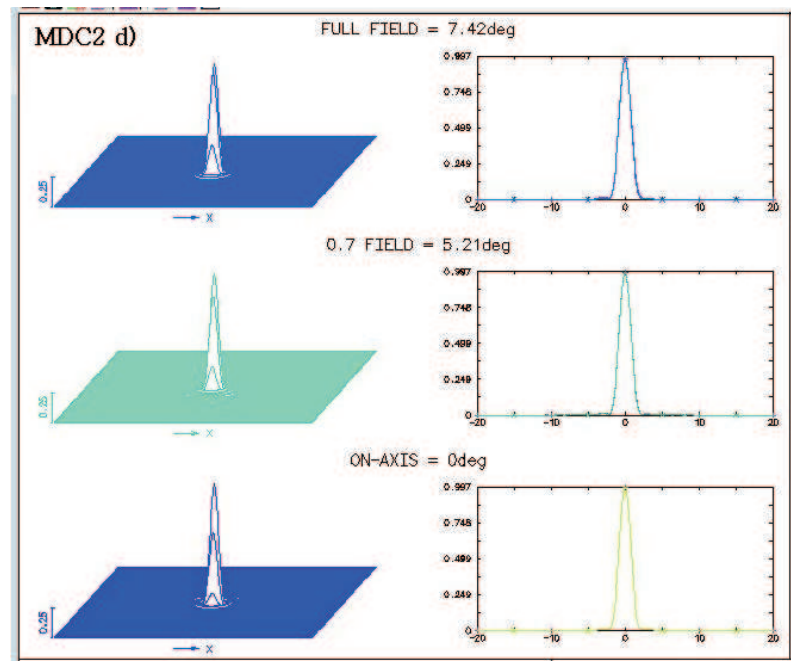


Figura 5.9: Función de punto extendido (PSF) del MDC2.

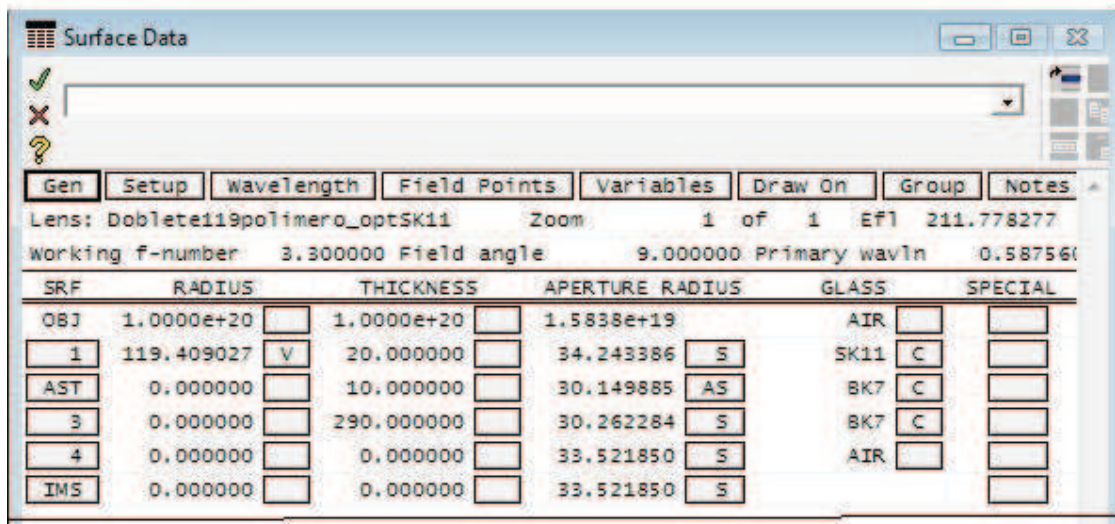
## CAPÍTULO 5. DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DEL OBJETIVO DE CÁMARA ULTRADELGADO

### 5.3. SIMULACIÓN DE LOS MICRODOBLETES CILÍNDRICOS (MDC) COMO UNIDADES INDEPENDIENTES

#### 5.3.3. Simulación del MDC3 para el OCAA3 (Ojo compuesto de aposición artificial 3)

El OCAA3 consiste en un arreglo cuadrado de 30 x 30 microlentes, tiene un espesor de 320  $\mu\text{m}$ . y se usó un doblete con índices de refracción de  $n_1=1.563840$  y  $n_2=1.5168$  para la primera y segunda lente, respectivamente. Al optimizar el radio de curvatura se obtiene un valor  $R3= 119.4 \mu\text{m}$ ., y tenemos un diámetro  $D=68.5 \mu\text{m}$  para las microlentes.

#### MDC3 a)



SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPECIAL
OBJ	1.0000e+20	1.0000e+20	1.5838e+19	AIR	
1	119.409027	20.000000	34.243386	SK11	C
AST	0.000000	10.000000	30.149885	BK7	C
3	0.000000	290.000000	30.262284	BK7	C
4	0.000000	0.000000	33.521850	AIR	
IMS	0.000000	0.000000	33.521850		

Figura 5.10: Vista del menú surface data para el MDC3.

En la figura 5.10 tenemos la vista del menú con los parámetros del MDC3 en OSLO. Podemos ver la información correspondiente a la posición de las lentes, el radio de curvatura, el espesor, el radio de apertura, el material y los índices de refracción usados.

La figura 5.11 muestra un diagrama de MDC3 y gráficas correspondientes a las aberraciones de Seidel y a la aberración cromática. En la figura 5.12 mostramos el

## CAPÍTULO 5. DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DEL OBJETIVO DE CÁMARA ULTRADELGADO

### 5.3. SIMULACIÓN DE LOS MICRODOBLETES CILÍNDRICOS (MDC) COMO UNIDADES INDEPENDIENTES

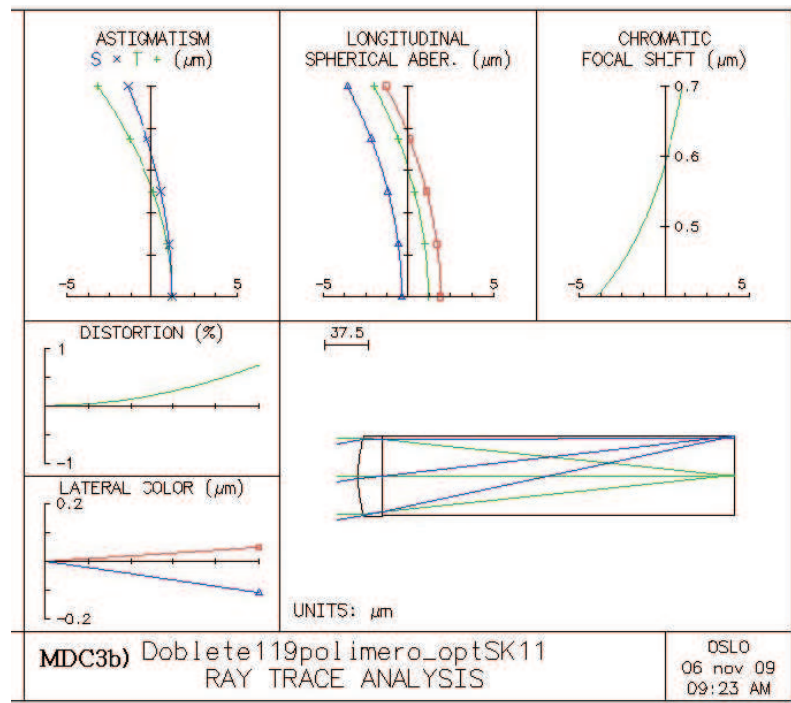


Figura 5.11: Vista del menu ray intercept para el MDC3.

diagrama de manchas para el MDC3 que especifica que el tamaño de mancha producida es adecuada para varios detectores comerciales. En la figura 5.13 se muestra la gráfica de la función de punto extendido (PSF).

Cabe mencionar que después de las simulaciones y de comparar los resultados de las aberraciones, el MDC3 es el que presenta un mejor desempeño y por consiguiente aberraciones más pequeñas, aunque en general los tres microdobletes cumplen con las especificaciones necesarias para el sistema de OCAA.

# CAPÍTULO 5. DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DEL OBJETIVO DE CÁMARA ULTRADELGADO

## 5.3. SIMULACIÓN DE LOS MICRODOBLETES CILÍNDRICOS (MDC) COMO UNIDADES INDEPENDIENTES

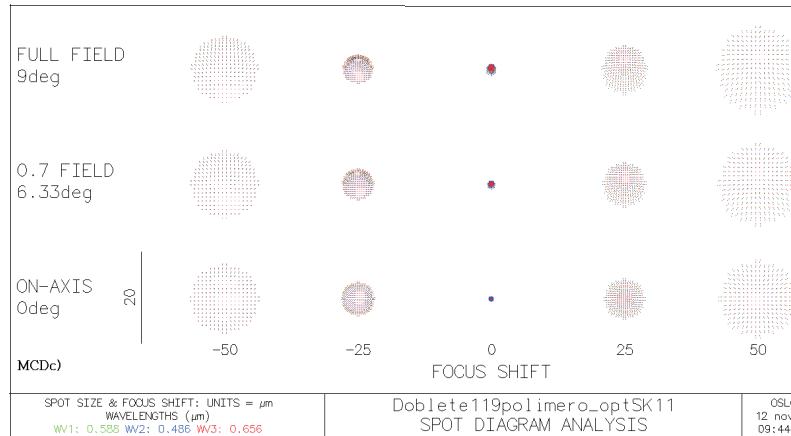


Figura 5.12: Diagrama de manchas del MDC3.

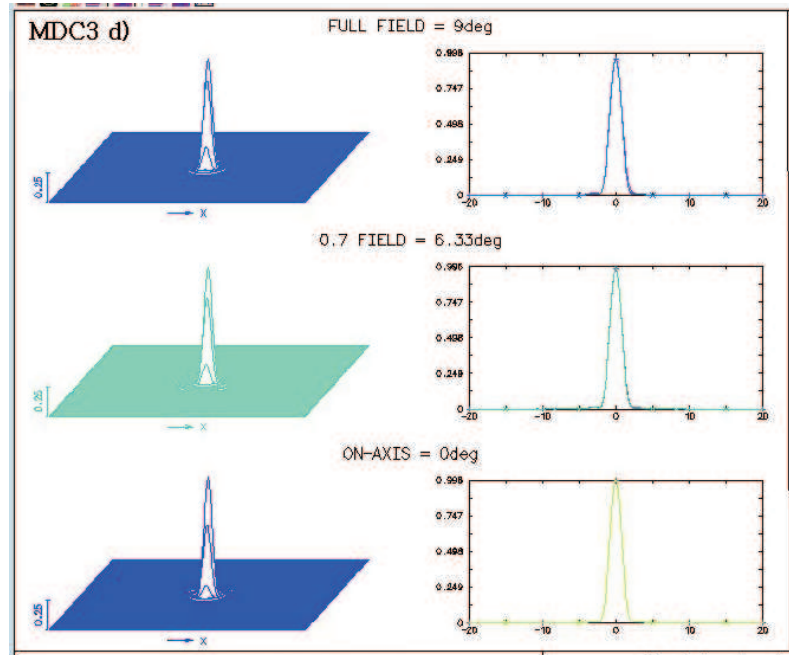


Figura 5.13: Función de punto extendido (PSF) del MDC3.



## 5.4. Configuración del arreglo de microlentes para la simulación.

Presentamos una simulación de un arreglo de 5 microlentes con,  $N=5$  en una dimensión espesor= $320 \mu\text{m}$ .  $R1=94 \mu\text{m}$ .  $n_1=1.437$ ,  $n_2=1.5168$ .

### Arreglo de microlentes a)

SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPECIAL
OBJ	1.0000e+20	1.0000e+20	1.0000e+14	AIR	
AST	1.0000e+20	0.000000	20.000000	AIR	F
2	94.000000	20.000000	20.000000	FK54	C
3	1.0000e+20	300.000000	20.000000	BK7	C
4	1.0000e+20	0.000000	20.000000	AIR	C
IMS	1.0000e+20	3.000000	20.000000		

Figura 5.14: Vista del menu surface data para un arreglo de 5 microlentes.

En la figura 5.14 tenemos la vista del menú con los datos de las superficies de un arreglo de 5 microlentes en OSLO. Podemos ver la información correspondiente a la posición de las lentes, el radio de curvatura, el espesor, el radio de apertura, el material, los índices de refracción usados, y en la columna Special tenemos los datos que nos permiten ver cómo se colocaron las microlentes para formar el arreglo. Cabe mencionar que para esta simulación se usó trazo de rayos no secuencial. Las gráficas de las aberraciones no se presentaron porque el programa OSLO no se adecuaba a lo que físicamente está pasando en nuestro sistema.

# CAPÍTULO 5. DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DEL OBJETIVO DE CÁMARA ULTRADELGADO

## 5.4. CONFIGURACIÓN DEL ARREGLO DE MICROLENTE PARA LA SIMULACIÓN.

### 5.4.1. OCAA1

Para el OCAA1  $N=25 \times 25$  Espesor= $340 \mu\text{m}$ .  $R1=102.04 \mu\text{m}$ .  $n_1=1.4370$ ,  $n_2=1.5168$ .

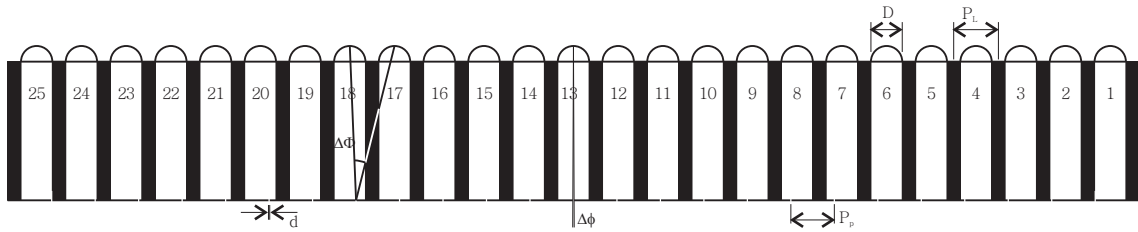


Figura 5.15: Configuración del arreglo de microlentes en la OCAA1.

En la figura 5.15 se muestra la configuración unidimensional del diseño OCCA1, con el arreglo de 25 microlentes, los pinholes están colocados de manera que se distribuyan a lo largo de todo el campo de visión. Cabe mencionar que en este diseño, al tener paredes con un espesor que implica un porcentaje alto del pitch total de las microlentes, hubo que modificar el sistema de cálculo de los pinholes, y se tomó como distancia neta para calcular su distribución la longitud efectiva de visión que comprende el arreglo, esto quiere decir sin incluir la longitud que abarcan las paredes. Esto modifica el valor calculado para el diámetro de los pinholes y de los ángulos de aceptación e interommatidial.

En la tabla 5.1 muestro los valores de la distancia en  $\mu\text{m}$ . con respecto a la pared  $P_N$  de cada microlente individual y la distancia total medida con respecto a cada pinhole del arreglo con relación a la primera pared de la lente 1 del arreglo. Esto con el fin de especificar la posición de los pinholes de manera unidimensional.



## CAPÍTULO 5. DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DEL OBJETIVO DE CÁMARA ULTRADELGADO

### 5.4. CONFIGURACIÓN DEL ARREGLO DE MICROLENTES PARA LA SIMULACIÓN.

---

Tabla 5.1 Posición de los pinholes para OCAA1

Posición de los Pinholes para el OCAA1		
# Lente MCD	Posición respecto a P <sub>N</sub> en (μm.)	Posición medida desde el pinhole a la pared de la 1ª lente
1	2.8	67.2
2	5.6	134.4
3	8.4	201.6
4	11.2	268.8
5	14	336
6	16.8	403.2
7	19.6	470.4
8	22.4	537.6
9	25.2	604.8
10	28	672
11	30.8	739.2
12	33.6	806.4
13	36.4	873.6
14	39.2	940.8
15	42	1008
16	44.8	1075.2
17	47.6	1142.4
18	50.4	1209.6
19	53.2	1276.8
20	56	1344
21	58.8	1411.2
22	61.6	1478.4
23	64.4	1545.6
24	67.2	1612.8
25	70	1680

**CAPÍTULO 5. DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DEL OBJETIVO DE  
CÁMARA ULTRADELGADO**

5.4. CONFIGURACIÓN DEL ARREGLO DE MICROLENTES PARA LA  
SIMULACIÓN.

---

**5.4.2. OCAA2 y OCAA3**

Para el OCAA2  $N=30 \times 30$  Espesor= $320 \mu\text{m}$ .  $R2=94.477 \mu\text{m}$ .  $n_1=1.4370$ ,  
 $n_2=1.5168$  Para el OCAA3  $N=30 \times 30$  Espesor= $320 \mu\text{m}$ .  $R3=119.41 \mu\text{m}$ .  
 $n_1=1.563840$ ,  $n_2=1.5168$ .

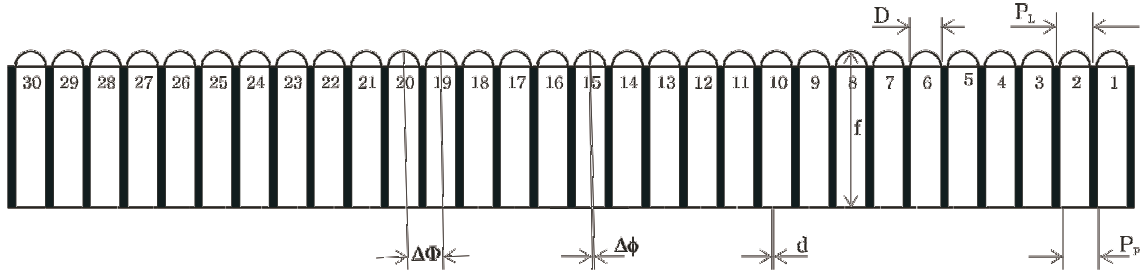


Figura 5.16: Configuración del arreglo de MDC en los OCAA2 y OCAA3.

En la figura 5.16 se muestra la configuración unidimensional de los diseños OCAA2 y OCAA3, con el arreglo de 30 microlentes, los pinholes están colocados de acuerdo a las ecuaciones 5.4 y 5.5.

En la tabla 5.2 apreciamos que los valores de la primera columna de la tabla corresponden a la distancia en micras medida desde la pared  $P_N$  de cada microlente individual hasta la posición donde se colocó el pinhole. Los valores de la segunda columna de la tabla corresponden a la distancia total medida desde el pinhole hasta la primera pared de la primera lente del arreglo. El diámetro del pinhole y los ángulos de aceptación e interommatidial dependen de la configuración calculada.

## CAPÍTULO 5. DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DEL OBJETIVO DE CÁMARA ULTRADELGADO

### 5.4. CONFIGURACIÓN DEL ARREGLO DE MICROLENTE PARA LA SIMULACIÓN.

---

Tabla 5.2: Posición de los pinholes para los arreglos OCAA2 y OCAA3

Posición de los Pinholes para el arreglo de microlentes		
# Lente	Posición respecto a P <sub>N</sub>	Posición medida desde el
MCD	en (μm.)	pinhole a la pared de 1º lente
1	2.7	81.3
2	5.4	162.6
3	8.1	243.9
4	10.8	325.2
5	13.5	406.5
6	16.2	487.8
7	18.9	569.1
8	21.6	650.4
9	24.3	731.7
10	27	813
11	29.7	894.3
12	32.4	975.6
13	35.1	1056.9
14	37.8	1138.2
15	40.5	1219.5
16	43.2	1300.8
17	45.9	1382.1
18	48.6	1463.4
19	51.3	1544.7
20	54	1626
21	56.7	1707.3
22	59.4	1788.6
23	62.1	1869.9
24	64.8	1951.2
25	67.5	2032.5
26	70.2	2113.8
27	72.9	2195.1
28	75.6	2276.4
29	78.3	2357.7
30	81	2439

## 5.5. Parámetros de los diseños

En la tabla 5.3 agregamos los valores de los parámetros calculados para los tres diseños de OCAA. Cabe mencionar que las principales diferencias entre ellos son la cantidad de microlentes de los arreglos (OCAA1 = 25x25) y (OCAA2 y OCAA3 = 30x30), ya que ésta cantidad depende del diámetro de las microlentes, así como del espesor de las paredes opacas comprendidas entre las ommatidias artificiales. Los espesores totales difieren en una cantidad de 20  $\mu\text{m}$ . y los valores de los radios de curvatura tampoco presentan una diferencia considerable. Los diámetros de los pinholes son similares en sus dimensiones en  $\mu\text{m}$ , y finalmente los valores del ángulo de aceptación  $\Delta\phi$  y del ángulo interommatidial  $\Delta\Phi$  son muy importantes ya que dan información sobre si al tener la proporción  $\Delta\phi = 2\Delta\Phi$  se cumple el criterio de Nyquist, el cual determina la frecuencia de muestreo y si ocurre el traslape de las imágenes. Para estos casos el OCAA2 y el OCAA3 cumplen mejor esta condición, y esto hace pensar que tendrán un buen desempeño. Los materiales a usar para fabricar el arreglo serían polímeros del tipo acrilato con índices de refracción  $n_1=1.4370$  para los OCAA1 y OCAA2 y un  $n_1=1.5638$  para el OCAA3, todos sobre un sustrato con índice de refracción  $n_2=1.5168$ . El número es  $F (F/\#)=3.3$  para los tres modelos.

**CAPÍTULO 5. DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DEL OBJETIVO DE  
CÁMARA ULTRADELGADO  
5.5. PARÁMETROS DE LOS DISEÑOS**

---

**Tabla 5.3.** Parámetros de diseño del Objetivo ultradelgado del tipo ojo compuesto de aposición, obtenidos con las ecuaciones del cap. IV [15,16].

Parámetro del Objetivo	OCAA 1	OCAA 2	OCAA 3
Pitch de la microlente ( $\mu\text{m}$ ) $P_L$	100	84	84
Número de canales $N$	25 x 25	30 x 30	30 x 30
Espesor ( $\mu\text{m}$ )	340	320	320
Número $F$ ( $F/\#$ )	3.3	3.3	3.3
Campo de visión (POV) (grados)	19°	14.71°	14.71°
Diámetro del pinhole $d_p$ ( $\mu\text{m}$ )	2.8	2.7	2.7
Estructura espaciadora entre microlentes / pinholes			
Espesor paredes entre canales ( $\mu\text{m}$ )	30	18.5	15.5
Replicación de microlentes	Polímero del tipo acrilato $n=1.4370$	Polímero del tipo acrilato $n=1.4370$	Polímero del tipo acrilato $n=1.5638$
Diámetro ( $\mu\text{m}$ )	70	65.5	68.5
Radio de curvatura ( $\mu\text{m}$ )	102.04	94.4771	119.4090
Radio de apertura ( $\mu\text{m}$ )	34.88	32.7567	34.2433
Número de píxeles por canal	20	16.7	16.7
Ángulo de aceptación $\Delta\theta$ (rad)	0.673°	0.937°	0.937°
Ángulo interomnifacial $\Delta\phi$ (rad)	0.4718°	0.4834°	0.4834°
Frecuencia de muestreo $\nu_s$ (ciclos/rad)	44.27	59.26	59.26

# Capítulo 6

## Conclusiones

El objetivo de cámara ultradelgado del tipo ojo compuesto de aposición es una contribución importante a la reducción del volumen en cámaras fotográficas, lo que permite una gran cantidad de aplicaciones, ya sea en nuevos dispositivos portátiles ultradelgados, como en sensores de imágenes de no tan alta resolución pero si de alta sensibilidad.

Los ojos compuestos de aposición tienen un volumen pequeño en la naturaleza ya que se encuentran presentes en insectos y artrópodos y un gran campo de visión (FOV) pero a costa de tener poca resolución espacial y algunas veces poca sensibilidad. Los ojos compuestos de superposición combinan la luz en la superficie de los fotorreceptores para formar una sola imagen erecta del objeto. En comparación al ojo compuesto de aposición, el de superposición es mucho más sensible a la luz, pero tiene una resolución muy lejana al límite de difracción.

El objetivo ultradelgado miniaturizado consiste en un arreglo de microlentes de un polímero del tipo acrilato, colocadas sobre un substrato con paredes opacas entre canales sobre una superficie metálica donde se encuentran unos pinholes colocados sobre un detector. Estos hacen la función de fotorreceptores. Las paredes se utilizan

para evitar el traslape de imágenes.

El pitch de los pinholes difiere del pitch de las microlentes para permitir un ángulo de visión individual para cada canal (ángulo interommatidial  $\Delta\Phi$ ), de éste ángulo y del ángulo de aceptación  $\Delta\phi$ , depende la frecuencia de muestreo, y para obtener el número mayor de líneas a resolver deberá cumplir con el Criterio de Nyquist  $\Delta\phi = 2\Delta\Phi$

La fabricación del objetivo en el INAOE sería posible utilizando técnicas de litografía en microelectrónica, aunque debe tenerse especial cuidado en la alineación de las microlentes en relación a los canales y a los pinholes. Es posible trabajar en las dimensiones en micrómetros requeridas para el diseño, y habría que practicar las técnicas de fabricación.

Sería posible realizar el diseño de un objetivo curvo usando el arreglo de las microlentes, todo esto con la finalidad de evitar aberraciones fuera de eje, y para evitar que disminuya la iluminación al incrementar el ángulo de campo, permitiendo que haya una incidencia perpendicular en cada canal. Al hacer el diseño de un objetivo plano, la curvatura la estamos compensando colocando los pinholes de manera que aumente el ángulo de campo.

Los diseños aquí planteados minimizan el tamaño de las manchas al haber optimizado los microdobletes cilíndricos de manera individual y se observa una buena disminución en la aberración cromática en relación con los diseños realizados por Duparré [15,16]. El MDC3 es en el que se observan aberraciones más pequeñas, por lo que debido a esto y a que cumple el criterio de Nyquist el diseño OCAA3 sería el más eficiente.

La visión del ojo de apertura única es la mejor en cuestión de resolución, por lo que tiene gran ventaja en comparación a los ojos de los insectos, pero el estudio de otros tipos de ojos que existen en la naturaleza nos puede dar alternativas en cuestión de reducir volumen y aumentar sensibilidad en muchos diseños ópticos.

# Apéndice A

## Fabricación y ensamblaje

### A.1. Fabricación del objetivo del tipo ojo compuesto de aposición sin paredes entre canales

La fabricación del ojo compuesto de aposición artificial producido por el Instituto Fraunhofer [16], se llevó a cabo usando litografía a una escala de oblea de Silicio. Se basó en una oblea de vidrio de 4 pulgadas (10.16-cm), con un arreglo de pinholes de un lado y con el arreglo de microlentes del otro lado. El grosor de la oblea es equivalente a la distancia focal de las microlentes en el vidrio. El pitch de los pinholes difiere del pitch del arreglo de las microlentes para producir un ángulo de visión individual en cada canal ( $\Delta\Phi$ ). Al variar los parámetros generando diferentes arreglos en la fotomascarilla de pinholes, se pudieron obtener diferentes objetivos en cada oblea. El diámetro de los pinholes (1-6  $\mu\text{m}$ ) fue generado por fotolitografía y grabado húmedo en una placa de metal de 200 nm. adherida a la oblea de vidrio. El diámetro ideal de los pinholes para que cada ommatidia capte la mayor cantidad de luz posible y de la mejor resolución es de  $d=3.5 \mu\text{m}$ . usando una  $\lambda= 550 \text{ nm}$ . En la figura A.1 observamos un esquema de la vista lateral del OAA, donde: A, microlentes,



## APÉNDICE A. FABRICACIÓN Y ENSAMBLAJE

### A.1. FABRICACIÓN DEL OBJETIVO DEL TIPO OJO COMPUESTO DE APOSICIÓN SIN PAREDES ENTRE CANALES

---

B, sustrato de vidrio, C, capa de metal con arreglo de pinholes, D, detector. Para la segunda figura con paredes para evitar el crosstalk, A, microlentes, B\*, fotopolímero que incluye paredes opacas, C, capa de metal con arreglo de pinholes, E, sustrato de soporte [15,16].

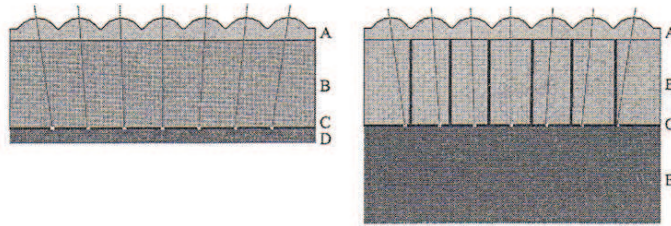


Figura A.1: Vista lateral del ojo de aposición artificial OAA sin y con paredes entre canales.

La generación de los arreglos de microlentes consistió en varios pasos que involucran la generación de un master y de un molde, así como una replicación en UV subsecuente. El master del fotoresist es fabricado sobre una oblea de Silicio con un procedimiento estándar (fotolitografía en combinación con un proceso de calentamiento a reflujo.) La replicación se llevó a cabo con una mascarilla de contacto alineadora (SUSS MA6), donde la separación entre oblea de vidrio y molde de mascarilla es llenada con un polímero inorgánico (sensible al UV), el cuál es posteriormente curado y separado del molde. La mascarilla alineadora facilita la compensación y el alineamiento de los patrones frontales y posteriores. Lo más crítico en la fabricación es la uniformidad de la distancia axial entre el vértice de las lentes y el pinhole, la cual es afectada por una serie de parámetros como la precisión del eje z de alineamiento de la mascarilla de MA6, ante el molde, soporte de la mascarilla y el sustrato; así como por la distancias focales no uniformes de las microlentes a través de la oblea.

## **A.2. Fabricación del objetivo del tipo ojo compuesto de aposición con paredes entre canales**

La región entre pinholes y microlentes no está sólo formada por un sustrato, sino por una capa espaciadora que consiste de columnas transparentes de fotopolímero SU8 ( $n=1.6$  para  $\lambda = 550\text{nm.}$ ) Las columnas son de  $30\ \mu\text{m}$  de ancho por  $260\ \mu\text{m}$  de fondo. Después de calentar las columnas de SU8 por 10 minutos a  $110^\circ\text{C}$ , los canales se llenaron de un polímero altamente absorbente (PSK2000), finalmente las microlentes se replicaron en la parte superior de ésta estructura. Debido a que el proceso de replicación es llevado a cabo con respecto a la superficie del sustrato surge una variación de espesor en el SU8[22].

# Apéndice B

## Otros diseños usando ojos compuestos

### B.1. Cluster eye

Es un sistema captador de imágenes que evita la superposición de las mismas, mediante el uso de diferentes canales. Una anexión espacial perfecta de las subimágenes individuales lleva a producir una imagen erguida completa en el detector. Este diseño cuenta con tres arreglos de microlentes con diferentes formas de pitches asemejando telescopios Keplerianos, incluyendo un arreglo de lentes de campo y un arreglo de diafragmas en el plano intermedio donde se forma la imagen. El sistema es un conjunto de micro-cámaras de pupila única que tienen ejes ópticos inclinados para obtener un ( $FOV$ ) campo de visión muy grande. Cada canal logra captar la imagen de una pequeña sección angular. Los tamaños del arreglo de diafragmas determinan la cantidad de traslape de las micro imágenes. Debido a la configuración de superficies refractivas, el sistema propuesto funciona como un ojo de superposición. Debido a la implementación de un arreglo con aperturas de campo, también funciona de una manera como ojo de aposición. Si el arreglo de diafragmas es removido, el sistema

## APÉNDICE B. OTROS DISEÑOS USANDO OJOS COMPUESTOS

### B.1. CLUSTER EYE

---

funciona como una Superlente de Gabor. En la figura B.1 distinguimos el Cluster eye donde podemos diferenciar los tres arreglos de microlentes que lo conforman, el detector, el objeto, la imagen intermedia y la imagen que se forma en el sensor [1].

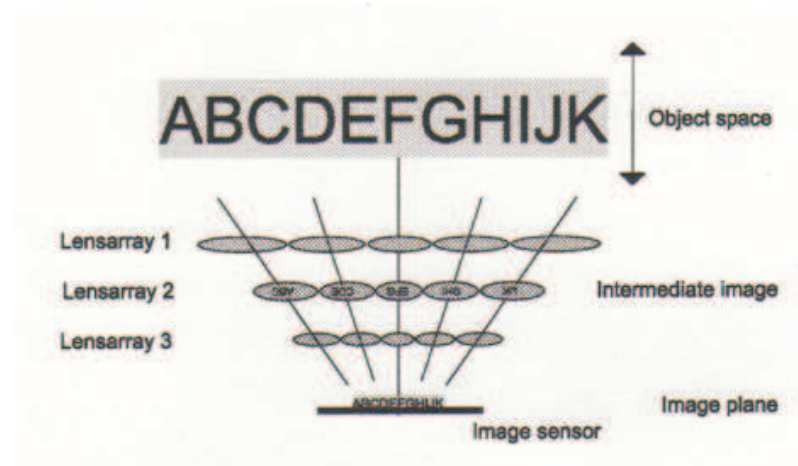


Figura B.1: Cluster eye.

## B.2. Ojo compuesto artificial esférico

Es un diseño óptico que consiste de un arreglo de microlentes y de un arreglo de pinholes localizados a la distancia focal. Los arreglos están colocados en dos plataformas de lentes independientes producidas por una técnica de litografía láser que es capaz de generar estructuras con muy poca desviación de la forma ideal en superficies curvas. En la figura B.2 vemos el diseño del ojo compuesto artificial esférico, donde se observan los mismos parámetros que en el ojo compuesto de aposición, sólo que físicamente corresponden a otra configuración, ya que el arreglo de microlentes está invertido. Entonces tenemos  $D$  para el diametro de la microlente,  $f$  es la distancia focal,  $d$  es el diametro de los pinholes,  $R$  es el radio de curvatura,  $\Delta\Phi$  es el ángulo intermatidial, y  $\Delta\phi$  es el ángulo de aceptación [27].

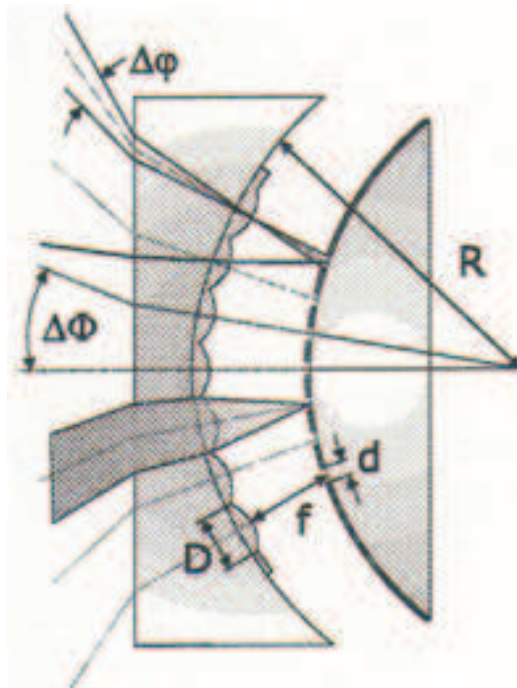


Figura B.2: Ojo compuesto artificial esférico.

# Apéndice C

## Resultados experimentales y desempeño del sistema propuesto por Jacques Duparré

### C.1. Resultados experimentales realizados por Jacques Duparré

Para la caracterización del prototipo original fabricado por el instituto Fraunhofer [15,16]. Los autores [15,16] registraron imágenes de diferentes objetos captando la imagen producida por el arreglo de pinholes en un CCD, y ellos midieron la función de transferencia de contraste (CTF). Al no usar paredes entre los diferentes canales, (diseño1 [16]) igualaron el tamaño de las imágenes de prueba con el *FOV* del prototipo. Para determinar la función de sensibilidad angular usaron una fibra unimodal de  $\lambda=637$  nm. que actúo como fuente puntual. Para realizar la medición, movieron la fibra lateralmente a una distancia de 300 mm. Frente a un único ommatidium, para poder determinar la potencia en el pinhole. Adicionalmente analizaron

las imágenes de la fuente puntual, tomadas con una cámara de 51 x 51 canales. La potencia medida en el pinhole fue normalizada hasta obtener la potencia integrada de un canal. La función de transferencia modulada (MTF) del dispositivo fue calculada al medir la función de aceptación angular. Las mediciones se realizaron para un pinhole con diámetro de 3  $\mu\text{m}$ . y obtuvieron un resultado de la medición para el FWHM de  $1.5^\circ$ , comparada con la función de sensibilidad angular teórica de FWHM=  $0.75^\circ$ . El factor de resolución limitante generado por el objetivo del ojo de aposición es la superposición de los ángulos de aceptación  $1/\Delta\Phi$  de los canales adyacentes en el espacio objeto, lo que crece en proporción a los diámetros de los pinholes. Por lo que los pinholes más pequeños dan las mejores características en la MTF (función de transferencia modulada). Cuando se usan pinholes muy pequeños para mejorar la resolución se reduce la sensibilidad.

## C.2. Desempeño del sistema

El Sistema óptico basado en la visión de ojo compuesto de aposición artificial con un grosor de 0.2 mm, resolución de 60 x 60 pixeles, y un *FOV* de  $20^\circ \times 20^\circ$  es adecuado para ser usado con sensores con un pitch entre pinholes relativamente grande[24]. La resolución lograda es de  $1.5 LP/^\circ$  no es muy buena comparada con los sistemas actuales productores de imágenes, pero la resolución obtenida es suficiente para muchas aplicaciones donde la reducción del espesor del sistema es crucial. Fue necesario introducir paredes entre canales para evitar el traslape de imágenes. El *FOV* del sistema puede hacerse más grande usando una lente de Fresnel, esto puede llevarse a cabo descentrando las microlentes.

# Apéndice D

## El teorema de muestreo

### D.1. Muestreo y cuantización de una imagen.

Para crear una imagen digital, tenemos que convertir los datos continuos adquiridos por un sensor en su forma digital. Esto involucra los procesos de muestreo y de cuantización. Si tenemos una imagen  $f$  continua con respecto a las coordenadas  $x$ ,  $y$  y amplitud, para convertirla en su forma digital tenemos que muestrear la función tanto en coordenadas como en amplitud. A la digitización en coordenadas se le da el nombre de muestreo y a la digitización en amplitud se le llama cuantización.

### D.2. El teorema de muestreo

El teorema de muestreo es una piedra angular de la teoría de procesamiento digital de señales. Fue formulado por primera vez por Harry Nyquist en 1928 [30], y fue probado formalmente por Claude E. Shannon, de los laboratorios Bell en 1949.

Se le llama función limitada por el ancho de banda, a una función  $f(t)$  cuya transformada de Fourier es cero para valores de frecuencia fuera de un intervalo



## APÉNDICE D. EL TEOREMA DE MUESTREO

### D.3. LA TRANSFORMADA DE FOURIER DE FUNCIONES MUESTREADAS

---

finito sobre el origen (ancho de banda)  $[-\mu_{max}, \mu_{max}]$ . En la figura D.1 vemos una función continua en el tiempo, en la figura D.2 vemos la transformada de Fourier de la función continua  $f(t)$  y se le llama función limitada por el ancho de banda.

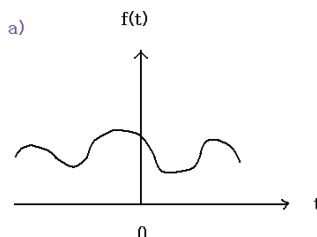


Figura D.1: función continua

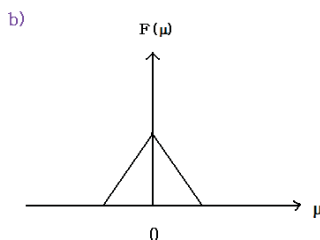


Figura D.2: función limitada por el ancho de banda

### D.3. La transformada de Fourier de funciones muestreadas

La transformada de Fourier de una función continua  $f(t)$  se denota por  $F(\mu)$ . La función muestreada correspondiente,  $\tilde{f}(t)$  es el producto de  $f(t)$  y de un tren de impulsos  $S_{\Delta T}(t)$ . En la figura D.3 se muestra la función de muestreo que se va a multiplicar por la función continua  $f(t)$ .

En la figura D.4 vemos la transformada de la función de muestreo que se aplicará en el teorema de convolución. En la figura D.5 se puede ver el producto

**APÉNDICE D. EL TEOREMA DE MUESTREO**  
**D.3. LA TRANSFORMADA DE FOURIER DE FUNCIONES MUESTREADAS**

---

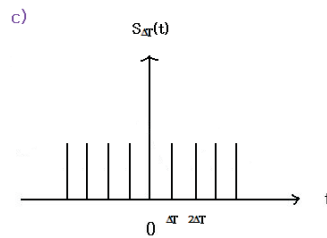


Figura D.3: función de muestreo

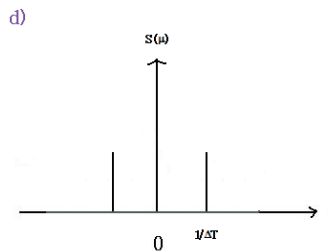


Figura D.4: transformada de la función de muestreo

de la función continua con el tren de impulsos. Sabemos del teorema de convolución que la transformada de Fourier del producto de dos funciones en el dominio del tiempo es la convolución de las transformadas de dos funciones en el dominio de la frecuencia, por lo tanto la transformada de Fourier  $\tilde{F}(\mu)$ , de la función muestreada  $\tilde{f}(t)$  es:

$$\tilde{F}(\mu) = F\{\tilde{f}(t)\}$$

$$\tilde{F}(\mu) = F\{f(t)S_{\Delta T}(t)\}$$

$$\tilde{F}(\mu) = F\{(\mu) \otimes S(\mu)\}$$

$$\tilde{F}(\mu) = \frac{1}{\Delta T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} F\left\{\mu - \frac{n}{\Delta T}\right\}$$

La sumatoria muestra que la transformada de Fourier  $\tilde{F}(\mu)$  de la función muestreada  $\tilde{f}(t)$  es una secuencia periódica infinita de copias de  $F(\mu)$ , la transformada de la función continua original. En la figura D.6 se puede ver el resultado

**APÉNDICE D. EL TEOREMA DE MUESTREO**  
**D.3. LA TRANSFORMADA DE FOURIER DE FUNCIONES MUESTREADAS**

---

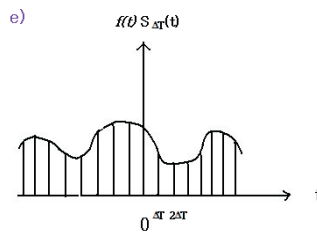


Figura D.5: formación de la función muestreada  $\tilde{f}(t)$ .

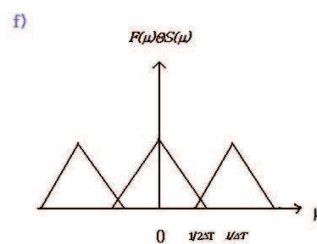


Figura D.6: secuencia periódica infinita de copias en el dominio de la frecuencia.

del teorema de convolución, y la generación de la secuencia infinita de copias. La separación entre copias está determinada por el valor  $\frac{1}{\Delta T}$  el cual es la razón usada para generar la función muestreada, por lo que sólo necesitamos completar un periodo para caracterizar la transformada entera. Esto implica que para recuperar  $f(t)$  de un sólo periodo debemos usar la transformada inversa de Fourier. Por lo que es posible extraer  $\tilde{F}(\mu)$  de un único periodo que es igual a  $F(\mu)$  si existe una separación suficiente entre copias, la cual se garantiza si

$$\frac{1}{2\Delta T} > \mu_{max}, \quad (\text{D.1})$$

ó

$$\frac{1}{\Delta T} > 2\mu_{max}, \quad (\text{D.2})$$

## APÉNDICE D. EL TEOREMA DE MUESTREO

### D.3. LA TRANSFORMADA DE FOURIER DE FUNCIONES MUESTREADAS

---

esta ecuación indica que una función continua, limitada por un ancho de banda se puede recuperar completamente de una serie de sus muestras, si las muestras son adquiridas con un periodo que excede dos veces el contenido de la frecuencia más alta de la función. A esto se le conoce como *el teorema de muestreo*. En la figura D.7 podemos ver como las muestras que satisfacen ésta condición no se superponen entre si. Podemos decir que no se pierde ninguna información, si la función continua, limitada por el ancho de banda es representada por muestras adquiridas a una razón mayor que dos veces el contenido de la función a la más alta frecuencia, a esto se le conoce como la razón de Nyquist. Por lo que de acuerdo al teorema de muestreo, el muestreo debe exceder la razón de Nyquist [31].

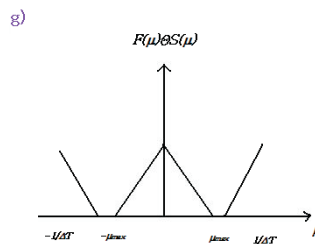


Figura D.7: razón de Nyquist.

Para recuperar  $F(\mu)$  de  $\tilde{F}(\mu)$ , multiplicamos la última por una función  $H(\mu)$ , y podemos obtener  $f(t)$  usando la transformada inversa de Fourier. A la función  $H(\mu)$  se le llama filtro pasa bajos porque deja pasar frecuencias bajas al final del rango de frecuencias pero elimina toda las frecuencias altas.

# Bibliografía

- [1] R. Völkel, M. Eisner, and K. J. Weible, “Miniaturized imaging systems”, *Microelectron. Eng.* 67-68, 461-472 (2003).
- [2] J.S. Sanders and C.E. Halford, “Design and analysis of apposition compound eye optical sensors”, *Opt. Eng.* 34, 222-235 (1995).
- [3] M.F. Land and D. E. Nilsson, “Animal Eyes”, *Oxford Animal Biology Series*, P. Willmer and D. Norman, eds. (Oxford U. Press, Oxford, Reino Unido 2002).
- [4] N. Tait, “Insectos y arañas”, Silver Dolphin eds. (Sydney, Australia 2008).
- [5] A. W. Snyder, “Acuity of compound eyes: physical limitations and design,” *J. Comput. Phys.* 116, 161-182 (1977).
- [6] J. Duparré, P. Dannberg, P. Schreiber, A. Bräuer, and A. Tünnermann, “Artificial apposition compound eye-fabricated by micro-optics technology”, *Appl. Opt.* 43, (2004).
- [7] M. Katz, “Introduction to Geometrical Optics”, World Scientific, (Nueva Jersey, 2002).
- [8] About.com inventors (2009) history+camera consulta realizada el 10 de octubre de 2009, en <http://inventors.about.com>
- [9] The people history (2009) history+camera consulta realizada el 10 de octubre de 2009, en <http://thepeoplehistory.com/cameras.html>

- [10] Wikipedia (2009, octubre 9) history+camera Consulta realizada el 10 de octubre en <http://wikipedia.com>
- [11] Wikipedia (2009, septiembre 19) Camara+phone consulta realizada el 10 de octubre en <http://wikipedia.com>
- [12] Spy gadgets (2007) Spy+camera. consulta realizada el 10 de octubre de 2009 en <http://spygadgets.com>
- [13] Wikipedia (2009, octubre 7) barcode+scanner consulta realizada el 10 de octubre de 2009 en <http://wikipedia.com>
- [14] J. Tanida, T. Kumagai, K. Yamada, and S. Miyatake, "Thin observation module by bound optics (tombo) concept and experimental verification", *Appl. Opt.* 40, 1806-1813 (2001).
- [15] J. Duparré and R. Völkel, "Novel Optics/Micro-Optics for Miniature Imaging Systems".
- [16] J. Duparré, P. Dannberg, P. Schreiber, A. Bräuer, y A. Tünnermann, "Thin Compound-eye camera", *Appl. Opt.* 44, (2005).
- [17] E. Hecht, "Óptica", 3ra. ed., Addison Wesley, (Madrid, España 2003).
- [18] W.T. Welford, "Aberrations of Optical Systems", Taylor and Francis, (Nueva York, 1986).
- [19] J.W. Goodman, "Introduction to Fourier Optics", 3ra.ed., Roberts and Company Publishers, Greenwood Village, (Colorado 2004).
- [20] M. Kufner y S. Kufner, "Micro-optics and Lithography" VUB Press, (Bruselas 1997).
- [21] M. Schaub, "The design of Plastic Optical Systems", SPIE Press, (Estados Unidos 2009).

- [22] M.C. Hutley, “Microlens arrays”, M.C. Hutley ed. (Reino Unido 1991).
- [23] K. Iga, Y Kokubun, y M. Oikawa, “Fundamentals of Microoptics”, Academic Press, Inc. (Tokyo 1984).
- [24] G. Oster y Y. Nishijima, “Moiré Patterns”, Scientific American 208, 54-63 (1963).
- [25] R. Kingslake, “Optical System design”, Academic Press, (Orlando, Florida 1983).
- [26] W.J. Smith, “Modern Optical Engineering”, 4ta. ed., McGraw-Hill, (Nueva York, 2007).
- [27] D. Radtke, J. Duparré, U. Zeitner, and A. Tünnermann, “Laser lithographic fabrication and characterization of a spherical artificial compound eye”, Optics Express 15. (Marzo 2007).
- [28] Lambda Research, “OSLO Optics Software for Layout and Optimization, Optics Reference”, Version 6.1 (Massachusetts 2001).
- [29] G. Molar y F. Renero “Diseño y caracterización de un microescáner bidimensional”, INAOE 2009.
- [30] R. González y P. Wintz “Digital Image Processing”, Addison-Wesley, (Massachusetts 1977).
- [31] W. Stanley y J. Jeffords “Electronic Communications: Principles and Systems”, Thompson, (Estados Unidos 2005).