

VNIVERSITAT Đ VALÈNCIA

PROGRAMA DE DOCTORADO EN FÍSICA



TESIS DOCTORAL

Mini-cámaras plenópticas para dispositivos portátiles

Leticia Carrión Higuera

Director: Dr. Arnau Calatayud Calatayud

Tutor: Dr. Manuel Martínez Corral

Enero 2022, Valencia

D. Arnau CALATAYUD CALATAYUD, Director del departamento de Óptica de Photonicsens y D. Manuel MARTÍNEZ CORRAL, Catedrático de Óptica adscrito al Departamento de Óptica y Optometría y Ciencias de la Visión de la *Universitat de València*,

CERTIFICAN que la presente memoria, *Mini-cámaras plenópticas para dispositivos portátiles*, resume el trabajo de investigación realizado, bajo su dirección y tutela respectivamente, por Dña. Leticia CARRIÓN HIGUERAS y constituye su Tesis para optar al Grado de Doctora en Física por la Universitat de València.

Y para que conste, en cumplimiento de la legislación vigente, firman el presente certificado en Valencia, a 9 de noviembre de 2021.

Dr. Arnau Calatayud

Dr. Manuel Martínez

Índice general

Agradecimientos	IV
Resumen	VII
Abstract	IX
Abreviaturas	XIII
Lista de figuras	XVII
1 Introducción	1
2 Fundamentos de la cámara plenóptica	9
2.1 La configuración 1.0	12
2.1.1 Registro del <i>light field</i>	14
2.2 La plenóptica como cámara de profundidad	18
2.2.1 Análisis geométrico de parámetros	19
2.3 Miniaturización de la cámara plenóptica	22
2.3.1 El sensor de imagen	22
2.3.2 La lente principal	23
2.3.2.1 Superficies	25
2.3.2.2 Aberraciones	27
2.3.2.3 Materiales	31

2.3.2.4	Manufacturabilidad	31
2.3.2.5	Calidad óptica	33
2.3.3	La matriz de microlentes o MLA	33
3	Diseños de lentes principales para mini-cámaras plenópticas	35
3.1	Parámetros clave a la hora de medir profundidades	35
3.2	Diseños <i>inline</i> tipo telefoto vs. diseños con espejos	38
3.2.1	Diseños <i>inline</i>	38
3.2.2	Diseños <i>folded</i>	39
3.2.3	Ventajas e inconvenientes	40
3.3	Diseño telefoto propuesto	43
3.3.1	Prediseño	43
3.3.2	Optimización de la lente	46
3.3.3	Resultados	48
4	Diseños de matrices de microlentes para mini-cámaras plenópticas	59
4.1	Consideraciones generales	60
4.2	Problemáticas en el diseño de MLAs para mini-cámaras plenópticas	61
4.2.1	Deslocalización de las microimágenes	61
4.2.2	Aberraciones de las microlentes	66
4.3	Diseños propuestos	66
4.3.1	<i>Pitch</i> variable	67
4.3.1.1	Tamaño y máscaras de cromo	71
4.3.2	Inclinación de las microlentes	72
4.3.3	<i>Pitch</i> variable e inclinación de las microlentes	76
5	Consideraciones de fabricación de mini-cámaras plenópticas	77
5.1	Fabricación de la lente principal	78

5.1.1	Desensibilización de la lente ante perturbaciones	79
5.1.1.1	Análisis de tolerancias	80
5.1.1.2	Descripción de los procesos de desensibilización .	83
5.1.1.3	Resultados: lente <i>as-built</i>	85
5.2	Fabricación de la matriz de microlentes	91
5.2.1	Asimetrías en la expansión térmica de la MLA y el sensor	92
5.3	Montaje de la cámara	94
5.3.1	Unión de la matriz de microlentes al sensor	94
5.3.2	Unión de la MLA-sensor a la lente principal o UBL	97
5.4	ApiCAM en funcionamiento	97
6	Conclusión	101
	Lista de publicaciones	107
	Bibliografía	109

Agradecimientos

Quisiera agradecer a las personas y organismos públicos y privados que me han permitido llevar a cabo esta investigación dando como fruto, tras cuatro años de trabajo, la presente tesis doctoral.

A mi director y compañero, Arnau, por acompañarme y ayudarme a aprender sobre plenóptica día tras día desde hace más de cinco años. A mis compañeros del departamento de Óptica, Diego y Gabriele, por vuestro apoyo y numerosas ideas y colaboraciones. Al resto de compañeros de Photonicsens de todos los departamentos: Algoritmos, *Hardware*, *Software*, *Marketing*, Proyectos, etc. por vuestra inestimable colaboración. Vosotros habéis posibilitado y dado vida a la mayoría de ideas que recopiló en este documento.

A Jorge y Ann, por darme la oportunidad de desarrollar esta poco común modalidad del doctorado en *Photonicsens* y por ofrecerme muchas facilidades y oportunidades para formarme y llevar a cabo mi investigación.

A mis profesores de óptica de la *Universitat de València*, Manolo y Genaro, por ser siempre referentes y estar dispuestos a ayudarme a mí y a todos mis compañeros de *Photonicsens* a desarrollar nuestro producto y comprender nuestra tecnología. A Manolo en especial, por tutorizarme en este trabajo.

A José Sasián, profesor de la *College of Optical Sciences* de la Universidad de Arizona, por enseñarme gran parte de lo que he aprendido acerca de diseño óptico y por mostrarse siempre dispuesto a ayudar.

A *Photonicsens*, a la *Universitat de València* y al Ministerio de Ciencia e Innovación, que financia esta investigación mediante el contrato predoctoral de Doctorado Industrial DI-16-08300.

A todas las personas que quiero y a todas las personas cercanas a mí que me han ayudado, cada uno a su manera, durante todos estos años. Gracias.

Resumen

En la presente tesis doctoral estudiamos la miniaturización de la tecnología plenóptica en configuración 1.0, algo hasta ahora no abordado en la bibliografía. El objetivo final es fabricar mini-cámaras plenópticas que tengan la suficiente calidad y precisión como para ser utilizadas en la industria de consumo como cámaras de profundidad que además ofrecen imagen.

En primer lugar, hacemos una revisión teórica de la tecnología plenóptica y su capacidad para registrar el *light field*. Seguidamente, evidenciamos las posibilidades de miniaturización describiendo las características básicas de los sensores CMOS para telefonía móvil, de las mini-lentes plásticas fabricadas mediante procesos de inyección y de las matrices de microlentes. Demostramos que maximizar la distancia focal y el diámetro de la pupila de la lente objetivo se traduce en una mejor precisión a la hora de calcular mapas de profundidad. A raíz de esto, analizamos en detalle las características de los diseños de lentes objetivo con espejos y de los diseños tipo telefoto, que permiten maximizar la distancia focal de la lente principal respetando los tamaños reducidos de la industria de las mini-cámaras. Asimismo, presentamos un diseño de tipo telefoto con alta compactabilidad diseñado *ad hoc* para funcionar como lente principal de una mini-cámara plenóptica. El diseño, compuesto por cinco lentes de plástico, presenta una estructura sencilla y una buena calidad óptica con una focal $f = 8,5 \text{ mm}$ en un tamaño total de $TTL = 6,7 \text{ mm}$, siendo por tanto su ratio telefoto de $TR = TTL/f = 0,78$ menor

que el de los diseños telefoto encontrados en la bibliografía, que suelen presentar un $TR = 0,9$ o similar.

Seguidamente, analizamos los problemas de deslocalización de las microimágenes que aparecen cuando utilizamos matrices de microlentes con periodo o *pitch* constante y lentes principales con *chief ray angles* (CRAs) altamente no lineales. Proponemos una solución en la que la distribución espacial de los centros de las microlentes se altera convenientemente con objeto de conseguir una localización ordenada y periódica de las microimágenes en el sensor. Asimismo, analizamos el problema de la incidencia de luz oblicua en las microlentes periféricas, y resolvemos inclinarlas de manera conveniente consiguiendo reducir las aberraciones de campo significativamente. La aplicación de estas técnicas nos permite aligerar los algoritmos de detección de los centros de las microimágenes y mejorar la calidad óptica de las mismas.

Por último, estudiamos algunos problemas de fabricación que hemos identificado como relevantes. En el caso de la lente principal, realizamos un exhaustivo análisis de tolerancias y conseguimos desensibilizar el diseño telefoto descrito ante descentramientos e inclinaciones que puedan producirse en el ensamblaje de los diferentes elementos que componen la lente objetivo. Utilizamos técnicas de optimización de configuraciones múltiples minimizando el error de la configuración nominal y de la perturbada al mismo tiempo. Asimismo, demostramos que la utilización del mínimo número de coeficientes esféricos en un diseño de este tipo es beneficioso para mantener el diseño comprensible y coherente y también para lograr lentes *as-built* que muestren buena calidad. Aplicando estas técnicas, conseguimos lentes robustas frente a perturbaciones que ofrecen mejor precisión a la hora de funcionar como lente principal en una cámara plenóptica. Por otra parte, analizamos el problema de la expansión térmica de la matriz de microlentes (*microlens array* o MLA) y el ensamblaje de los diferentes componentes

que conforman la cámara plenóptica, llegando a la conclusión de que un pegado directo de la MLA al sensor es la mejor opción.

El resultado final de este trabajo es el diseño y fabricación de la apiCAM. En la última sección, mostramos algunos ejemplos de una apiCAM en funcionamiento y concluimos el documento con una recopilación de las aportaciones realizadas y con una reflexión sobre las líneas futuras de trabajo que se presentan tras la realización de esta investigación.

Abstract

In this doctoral thesis we study the miniaturization of the plenoptic technology in configuration 1.0 which has not been addressed in the bibliography. The ultimate goal is to fabricate mini-plenoptic cameras that exhibit sufficient quality and accuracy to be used in the consumer industry as depth cameras that also show imaging capabilities.

First, we review the theoretical foundations of the plenoptic technology and its ability to record the light field. Next, we demonstrate the possibilities of miniaturization by describing the basics of CMOS sensors for cell phones, plastic mini-lenses manufactured by injection molding processes and microlens arrays. We demonstrate that maximizing the focal length and pupil diameter of the objective lens results in improved accuracy when calculating depth maps. Owing to this, we discuss the characteristics of mirrored objective lens designs and telephoto lens designs, which allow maximizing the focal length of the main lens while keeping the small sizes of the mini-camera industry. We present a telephoto-type design with a telephoto ratio of $TR = 0,78$ (significantly lower than those found in the bibliography) designed *ad hoc* to work as the main lens of a plenoptic mini-camera. The design, made of five plastic element lenses, features a simple structure and shows good optical quality with a focal length of $8,5 \text{ mm}$ in a $6,7 \text{ mm}$ spacing.

Subsequently, we analyze the microimages delocalization problems that arise

when using arrays of microlenses with constant *pitch* and main lenses with highly nonlinear CRAs. We propose a solution in which the spatial distribution of the microlens centers is conveniently altered in order to achieve an ordered and periodic localization of the microimages on the sensor, this aiding to lighten the LF processing algorithms. Also, we analyze the problem of oblique incidence of rays in the peripheral microlenses, and we propose to tilt them conveniently, managing to reduce the field aberrations.

Finally, we study some fabrication issues that we identify as relevant. In the case of the main lens, we perform an exhaustive tolerance analysis and desensitize the described telephoto design against decenters and tilts that may occur in the assembly of the different elements that compose the main lens. We use multiple configuration optimization techniques that seek to minimize the error of the nominal and the perturbed configurations at the same time. We also show that using the minimum number of aspherical coefficients in aspherical lenses is beneficial to keep the design understandable and coherent and also to achieve well-behaved as-built lenses. These techniques allow us to build robust lenses against perturbations which offer better depth estimations when integrated into a plenoptic camera. Moreover, we analyze the problem of thermal expansion of the microlens array and the assembly of the different elements that compose the plenoptic camera, concluding that a direct bonding of the MLA and the sensor is the best option.

To conclude, we show some examples of an apiCAM in operation and we close the document with a summary of our contributions and a reflection on the future work that arises from this research.

Acrónimos y definiciones

2D, 3D, 4D y 5D	Dos, tres, cuatro y cinco dimensiones
apiCAM	Módulo de mini-cámara plenóptica fabricada por Photonicsens
b	Distancia entre la pupila de salida de la lente principal y la matriz de microlentes
BFL	<i>Back Focal Length</i> o longitud focal imagen, que corresponde a la distancia medida en aire desde la última superficie óptica que conforma la lente principal hasta el sensor de imagen
CA	<i>Clear Aperture</i> , diafragma de campo o apertura efectiva de una lente
CRA	<i>Chief Ray Angle</i> o rayo principal, que se define con las coordenadas $(\vec{H}; \vec{\rho} = 0)$
CT y ET	<i>Center and Edge Thickness</i> o espesor central o en el borde de una lente
CTE	<i>Coefficient of Thermal Expansion</i> o coeficiente de expansión térmica
ϕ_{PS}	Diámetro de la pupila de salida de la lente principal
$d_{\mu L}$	Diámetro de una microlente que forma parte de la matriz de microlentes
f	Focal de la lente principal
$f_{\mu L}$	Focal de las microlentes que conforman la matriz de microlentes

FOV	<i>Field Of View</i> o campo visual de un sistema formador de imágenes medido angularmente
g	Distancia entre la matriz de microlentes y el sensor de imagen
gap	Entre microlentes adyacentes, diferencia entre el <i>pitch</i> ($p_{\mu L}$) y el diámetro de las microlentes ($d_{\mu L}$)
H y H'	Planos principales objeto e imagen de la lente principal
\vec{H}	Vector de campo (o simplemente campo) en el plano objeto
IH	<i>Image Height</i> o altura de la imagen medida en el sensor de imagen
IMPO	<i>Injection Molded Plastic Optics</i> (óptica de inyección de plásticos)
LF	<i>Light Field</i>
MLA	<i>Microlens Array</i> (matriz de microlentes)
MTF	<i>Modulation Transfer Function</i> o función de transferencia de modulación
MTFA	<i>Modulation Transfer Function Average</i> o media de la MTF tangencial y sagital
n	Índice de refracción
$N_{\mu L}$	Número de microlentes iluminadas por un punto objeto en una imagen epipolar
Ny	Frecuencia de Nyquist
OTTL	<i>Optical Total Track Length</i> o tamaño de la lente sin considerar partes mecánicas
PE y PS	Pupilas de Entrada y Salida
$p_{\mu L}$	<i>Pitch</i> de microlente o distancia entre centros de microlentes adyacentes
$\vec{\rho}$	Vector de pupila medido en la pupila de salida
R o ROC	<i>Radius Of Curvature</i> o radio de curvatura
RI	<i>Relative Illumination</i> o iluminación relativa

RMS	<i>Root Mean Square</i> o raíz de la media cuadrática
$ROC_{\mu L}$	Radio de curvatura de las microlentes
$s_{\mu L}$	Sagita de una microlente
<i>slope</i>	Pendiente de las líneas que forman los objetos en las imágenes epipolares
$t_{\mu L}$	Tamaño de microimagen
T_a	Temperatura
TR	<i>Telephoto ratio</i> o factor telefoto
TTL	<i>Total Track Length</i> o tamaño total de la lente
UBL	<i>Upper Barrel Lens</i> (barril de lentes que conforman la lente principal o lente objetivo de la cámara plenóptica)
V_d	Número de Abbe
WFNO	<i>Working F- Number</i> (número-f)

Lista de figuras

Capítulo 2

- [Figura 2.1] Geometría básica de un sistema óptico formador de imágenes.
- [Figura 2.2] Trazado de rayos en una cámara convencional.
- [Figura 2.3] Configuraciones de una cámara plenóptica.
- [Figura 2.4] Microimágenes recolectadas en un sensor plenóptico.
- [Figura 2.5] Esquema de funcionamiento de la cámara plenóptica 1.0. Microimágenes, renderizado de vistas y epipolares.
- [Figura 2.6] Geometría básica de una cámara plenóptica.
- [Figura 2.7] Ejemplo de imagen epipolar.
- [Figura 2.8] CRA de un sensor de imagen para telefonía móvil.
- [Figura 2.9] Parámetros constructivos básicos de una lente de plástico.
- [Figura 2.10] Ejemplo del perfil de una superficie esférica.
- [Figura 2.11] Definición del error de rayo en un sistema óptico aberrado.
- [Figura 2.12] Gráfica del error de rayo para las aberraciones principales.
- [Figura 2.13] Materiales aptos para óptica de plásticos.

Capítulo 3

- [Figura 3.1] Ejemplos de la reducción de la longitud mecánica de una lente al incluir espejos para doblar el camino óptico de la luz.
- [Figura 3.2] Diseño de una lente principal incluyendo una lente prismática.

- [Figura 3.3] *Layout* de la lente telefoto diseñada.
- [Figura 3.4] *Spots* sobre el plano del sensor de la lente diseñada.
- [Figura 3.5] MTF de la lente diseñada.
- [Figura 3.6] Aberración cromática de la lente diseñada.
- [Figura 3.7] Curvatura de campo, astigmatismo y distorsión.
- [Figura 3.8] Error de rayo de la lente.
- [Figura 3.9] Error absoluto de la lente diseñada en comparación con otras lentes telefoto encontradas en la bibliografía.

Capítulo 4

- [Figura 4.1] Esquema de los parámetros básicos de la matriz de microlentes.
- [Figura 4.2] Esquema de la localización de los centros de las microimágenes en una cámara plenóptica 1.0 con comportamiento a primer orden.
- [Figura 4.3] CRA de la lente telefoto diseñada.
- [Figura 4.4] Esquema de la localización de los centros de las microimágenes en una cámara plenóptica 1.0 con comportamiento real.
- [Figura 4.5] Aberraciones producidas por las microlentes que reciben luz con incidencia oblicua.
- [Figura 4.6] Esquema del diseño de *pitch* variable.
- [Figura 4.7] Corrección del centro de una microlente.
- [Figura 4.8] Gráfico de la corrección de centros conforme aumenta el campo.
- [Figura 4.9] Esquema del diseño de una MLA con microlentes esféricas y *pitch* variable.
- [Figura 4.10] Esquema de microlentes inclinadas.
- [Figura 4.11] Ejemplo 2D de un panel de microlentes inclinadas.
- [Figura 4.12] Cambio de calidad del foco de las microlentes con la inclinación de las mismas.

Capítulo 5

- [Figura 5.1] Módulo real de apiCAM.
- [Figura 5.2] Inserción de los elementos en el barril sostenedor o *holder*.
- [Figura 5.3] UBL completo.
- [Figura 5.4] Comportamiento nominal y perturbado de la lente telefoto diseñada.
- [Figura 5.5] *Layout* del diseño telefoto original y los diseños desensibilizados.
- [Figura 5.6] MTF del diseño original y los tres diseños desensibilizados.
- [Figura 5.7] MTF nominal y perturbada de los cuatro diseños, el original y los tres diseños desensibilizados.
- [Figura 5.8] Derivada de la parte polinómica de las asferas que conforman la L3 en los diseños telefoto realizados.
- [Figura 5.9] Expansión térmica irregular de la MLA y el sensor.
- [Figura 5.10] Unión de la MLA al sensor.
- [Figura 5.11] Esquema del *layout* del módulo de cámara plenóptica diseñada.
- [Figura 5.12] Fotografía real de un módulo de apiCAM.
- [Figura 5.13] Imágenes 2D y mapas de profundidad obtenidos con dos módulos de apiCAM.

Capítulo 1

Introducción

La óptica geométrica se considera una de las ciencias exactas más antiguas. Desde las primeras teorías sobre la propagación rectilínea de la luz hasta la ley de la refracción de Snell en 1621, cientos de científicos y estudiosos analizaron y construyeron diversidad de instrumentos ópticos. En 1637, Descartes proporcionó fundamentos matemáticos sólidos a la ley de Snell para desarrollar métodos de trazado de rayos y diseño de instrumentos ópticos. En 1841, Gauss demostró que, considerando los rayos paraxiales, cualquier lente puede ser sustituida por sus cuatro puntos cardinales, a saber; sus puntos focales y principales. Asimismo, mostró que las imágenes de un sistema con simetría de rotación podían expresarse como una serie de potencias en la que el primer orden proporcionaba la imagen ideal o estigmática y los siguientes órdenes daban cuenta de las aberraciones. Las aberraciones de tercer orden fueron estudiadas y popularizadas por Seidel a mediados del siglo XIX y las aberraciones de órdenes superiores fueron calculadas por primera vez a principios del siglo XX [1]. Todas estas herramientas fueron la base para el desarrollo del diseño óptico moderno, y aunque es cierto que actualmente es típico utilizar *software* de diseño de alto nivel, la comprensión de la teoría de aberraciones y formación de imágenes es vital para el diseñador óptico.

Tradicionalmente, los sistemas de formación de imágenes focalizan los rayos de los objetos fotografiados sobre el plano de un sensor fotográfico dando lugar a imágenes 2D. No obstante, los rayos de luz que parten de los objetos contienen más información acerca de dichos objetos. En el año 1991, Adelson y Bergen [2] propusieron describir de manera fenomenológica la distribución de intensidad de un rayo de luz con una función multidimensional parametrizada por las coordenadas espaciales (x, y, z) y direccionales (θ, φ) del rayo en un punto de su trayectoria, su longitud de onda (λ) y el tiempo (t) . Conociendo estas magnitudes, podría describirse completamente un rayo, o lo que es lo mismo, podría conocerse toda la información acerca de un rayo. Si se obvian las coordenadas de color y del tiempo, la función se reduce a 5D. Asimismo, si se considera una propagación sin atenuación, como ocurre en el espacio libre, la función plenóptica puede reducirse a 4D. A esta nueva función la conocemos como *4D light field*, término acuñado por Levoy y Hanrahan, y nos podemos referir a ella como $LF(x, y, \theta, \varphi)$ o simplemente LF [3, 4]. Registrar el *light field* con un sistema óptico permite no solo formar imágenes 2D con él, sino también obtener mapas de profundidad de los objetos fotografiados o hacer reconstrucciones 3D de los mismos, ya que el LF , además de registrar las coordenadas espaciales (x, y) , registra la dirección de propagación de los rayos de luz.

Aunque no fue hasta el año 1991 cuando se introdujo la nomenclatura del *light field*, en 1907, Gabriel Lippman [5] ya propuso un sistema óptico capaz de capturarlo. Este sistema consistía en insertar una matriz de lentes delante de un sensor, de manera que cada lente captaba una perspectiva diferente del objeto fotografiado, registrando pues información angular normalmente perdida en una cámara convencional. Desde la idea de Lippman, muchos otros sistemas ópticos capaces de capturar el *light field* se han estudiado [6–8]. La cámara plenóptica es uno de los sistemas que captura la información 3D de una escena. Una cámara

plenóptica se obtiene insertando una matriz de microlentes en el plano imagen de una cámara convencional, y posteriormente desplazando el sensor en la dirección axial. La primera cámara plenóptica fue fabricada en 1992 [9]. En el año 2005 esta tecnología fue ampliamente investigada por Ren Ng. [10] y fruto de estas investigaciones surgió Lytro [11] que fue la primera empresa en comercializar dispositivos plenópticos. Poco después apareció Raytrix [12, 13], que actualmente comercializa cámaras plenópticas para su uso en industria, principalmente.

Así pues, una cámara plenóptica consta de tres elementos básicos: una lente principal o conjunto de lentes objetivo, que funciona como una lente convencional y a la que nos referimos como barril de lentes o *UBL* de sus siglas en inglés *Upper Barrel Lens*; una matriz de microlentes, o *MLA*, de sus siglas en inglés *Micro Lens Array*; y un sensor de imagen. La lente principal cumple el papel de proporcionar imágenes en las inmediaciones de la MLA. Conceptualmente, la cámara plenóptica se rige por los mismos principios que la propuesta por Lippman, en que no se utilizaba dicha lente principal.

En este tipo de dispositivos, el diseño de los parámetros ópticos de cada elemento, así como la distribución de dichos elementos (las distancias relativas entre los diferentes elementos que conforman la cámara) es un tema delicado pero ampliamente estudiado. Podemos encontrar múltiples referencias en la bibliografía que explican detalladamente los principios de funcionamiento de una cámara plenóptica [10, 14, 15].

La cámara plenóptica tiene dos posibles configuraciones, conocidas como *un-focused* (o 1.0) y *focused* (o 2.0). La configuración 1.0 fue estudiada ampliamente por Ren Ng. y la 2.0 por Lumsdaine y Georgiev [10, 16–18]. Ambas difieren principalmente en la posición relativa de la matriz de microlentes (o *MLA*) con respecto a la imagen proporcionada por la lente principal. En el caso de la cámara plenóptica 1.0, la matriz de microlentes proporciona una matriz de imágenes de

la pupila de salida de la lente principal (o UBL). En general, las microlentes son mucho más pequeñas que la lente principal, por lo que en buena aproximación, esa matriz de imágenes se sitúa en el plano focal imagen de las microlentes, ya que la pupila de salida del UBL está situada a una distancia b de la MLA tal que $b \gg f_{\mu L}$.

En el caso de la configuración 2.0, las microlentes enfocan a una imagen intermedia del objeto producida por la lente principal y el sensor se sitúa, por tanto, a una distancia g tal que $g > f_{\mu L}$. A este caso se le conoce como configuración kepleriana. También puede suceder que la imagen intermedia se sitúe detrás del plano del sensor. En ese caso, estaríamos ante una configuración galileana.

Las configuraciones 1.0 y 2.0 han sido comparadas en la bibliografía en términos de resolución lateral o espacial y capacidad de medida de distancias. Zhu et al. [18] demuestran que la cámara plenóptica 1.0 tiene una mayor resolución angular, pero menor resolución lateral que la cámara plenóptica 2.0. A lo largo de esta memoria únicamente se va a trabajar con la configuración 1.0, puesto que una de las principales aplicaciones de la cámara plenóptica aquí descrita es funcionar como cámara de profundidad.

Volviendo al marco del diseño óptico de cámaras convencionales, a principios del siglo XXI surgió la idea de integrar una cámara fotográfica en un teléfono móvil. Esto fue posible gracias a los avances en las lentes plásticas fabricadas a través de moldes y a los avances en la tecnología de sensores de imagen CMOS. La idea de tener siempre una cámara fotográfica en el bolsillo atrajo a fabricantes y usuarios, hasta el punto de que, a día de hoy, la o las cámaras que incluye un teléfono móvil son uno de sus principales atractivos.

Una lente miniaturizada como las que se utilizan en los *smartphones* ha de respetar los tamaños reducidos y los bajos costes que exige la industria, lo cual supone un reto con muchas limitaciones. El problema no puede solucionarse es-

calando un diseño típico para una cámara de sensor de 35 mm a los tamaños adecuados, ya que esto resultaría en lentes no fabricables (lentes de grosores demasiado pequeños, problemas con tolerancias de fabricación, aperturas demasiado pequeñas, etc.). Asimismo, los procesos tradicionales de fabricación de lentes no pueden ser aplicados a los tamaños que maneja la industria de las mini-cámaras (cámaras de 3 a 10 mm) [19].

La introducción de las tecnologías de inyección de plásticos o IMPO (*Injection Molded Plastic Optics*) en la fabricación de lentes en miniatura permitió mejorar los diseños de lentes para mini-cámaras y facilitó que estas pudieran trabajar en aplicaciones de grandes volúmenes a bajo coste. En buena parte, esto ocurrió gracias a que las tecnologías IMPO permiten utilizar superficies esféricas y otras superficies complejas con relativa sencillez, puesto que aunque los moldes sean más complejos de definir, una vez fabricados, la producción funciona sin dificultades extra [20].

El número de elementos que se introducen en el ensamblaje de una mini-cámara está directamente relacionado con el coste y con la sensibilidad de la lente final a tolerancias. Por estos motivos y gracias a las libertades que ofrece la tecnología IMPO en el diseño de superficies, en óptica de plásticos se intenta que cada elemento cumpla una función clara y específica de la manera más eficiente y completa posible, de modo que se utilice el mínimo número de elementos sin sacrificar calidad [20].

Además de su uso obvio para tomar fotografías, muchos otros usos se han desarrollado y se desarrollarán para las cámaras de los teléfonos móviles. Actualmente existen aplicaciones que escanean documentos, que leen códigos de barras, que hacen reconocimiento facial, etc. [21]. En este contexto, el uso de cámaras de profundidad está extendiéndose cada vez más en el mercado de la telefonía móvil y también en muchos otros en que las dimensiones de los dispositivos deben

ser reducidas (medicina, gafas de realidad virtual o aumentada, videoconsolas, etc.). Las cámaras de profundidad abren un gran abanico de nuevos usos y formas de interactuar con el mundo a través de un dispositivo como puede ser un *smartphone*: realidad virtual, realidad aumentada, identificaciones biométricas seguras, mejoras en la fotografía tradicional, reconstrucciones 3D de objetos, etc. [22–24]. Actualmente, las cámaras de profundidad que existen en el mercado utilizan tecnologías que nada tienen que ver con la adquisición del LF, ya que requieren de iluminación activa de la escena 3D. Este es el caso de la tecnología *time of flight* o la basada en iluminación estructurada [25]. Es por ello que existe un interés en la miniaturización de las cámaras plenópticas. Miniaturizar una cámara plenóptica implica miniaturizar sus tres elementos estructurales, a saber; la lente principal, la matriz de microlentes y el sensor de imagen.

La miniaturización del sensor de imagen y de la lente principal para su uso en fotografía convencional resulta un tema ampliamente conocido y los problemas técnicos que de ello se derivan han sido en su mayoría resueltos y siguen estudiándose mejoras. No sucede lo mismo con la MLA y por ello hasta ahora no se conocen dispositivos plenópticos miniaturizados en el mercado. La fabricación de microlentes de diversos tamaños (desde decenas hasta cientos de micras) es un tema ampliamente estudiado en micro-óptica. Actualmente, existen muchas técnicas para fabricar microlentes: *photoresist reflow*, litografía, foto-polimerización, impresión 3D, ablación con laser... [26]. No obstante, la utilización de microlentes de tamaños del orden de micras para dispositivos plenópticos presenta ciertos conflictos a la hora de determinar si los efectos difractivos dominan y la teoría de propagación de rayos resulta insuficiente para analizar el sistema óptico. Estas cuestiones se han estudiado en el estado del arte imponiendo condiciones ciertamente restrictivas al tamaño de las microlentes en comparación con su respuesta impulsional o PSF (*Point Spread Function*) [27, 28]. No obstante, otros estudios

posteriores han demostrado que la resolución de las imágenes obtenidas y la capacidad para hacer reconstrucciones 3D de objetos en sistemas plenópticos con microlentes pequeñas se mantenía, desafiando los límites tradicionales de resolución [29].

En esta tesis presentamos tanto estrategias de diseño como diseños explícitos de los diferentes elementos que componen una cámara plenóptica miniaturizada. En el Capítulo 2 expondremos de manera resumida y desde un punto de vista teórico los parámetros y estrategias de diseño de una cámara plenóptica en configuración 1.0. Asimismo, explicaremos la manera en que la tecnología plenóptica puede medir las profundidades de los objetos que son fotografiados. Por último, detallaremos algunas consideraciones importantes sobre la miniaturización de los elementos estructurales de la cámara plenóptica: el sensor, la lente principal y las microlentes, centrándonos en la lente principal. En el Capítulo 3 hablaremos del papel de la lente principal o UBL en la capacidad de una cámara plenóptica de medir distancias. Analizaremos qué tipos de diseños son más convenientes para obtener mapas de profundidad precisos y presentaremos un diseño de UBL que hace uso de un prisma reflector y otro diseño de UBL en línea; ambos con capacidades mejoradas para funcionar como lente principal de una cámara plenóptica. En el Capítulo 4 nos centraremos en describir las problemáticas que surgen de la miniaturización de la matriz de microlentes o MLA y propondremos soluciones constructivas para los problemas identificados más importantes. En el Capítulo 5 hablaremos de la fabricación de los elementos que componen la cámara plenóptica. En primer lugar, daremos algunos consejos para desensibilizar la lente principal ante tolerancias de fabricación y ensamblaje de los elementos. Para ello, haremos un análisis de tolerancias y estudiaremos las lentes *as-built*¹ antes y después de la aplicación de los procesos de desensibilización. A continuación,

¹Lentes reales que se han fabricado en las que se tienen en cuenta las diferentes tolerancias que afectan al porcentaje final de productos fabricados con éxito.

1. Introducción

expondremos los problemas de fabricación más relevantes con respecto a la matriz de microlentes y; por último, hablaremos de la unión y ensamblaje de todos los elementos dando lugar al módulo de apiCAM. Para concluir, repasaremos las aportaciones descritas y mostraremos algún resultado experimental de imágenes 2D y mapas de profundidad obtenidos con un módulo de apiCAM. Asimismo, hablaremos de las perspectivas de trabajo futuro y nuevos retos que permitan seguir optimizando las capacidades de las cámaras plenópticas en miniatura.

Capítulo 2

Fundamentos de la cámara plenóptica

Los rayos que viajan a través del espacio pueden describirse de manera completa mediante la posición de su punto de intersección con un plano perpendicular a la dirección de propagación del haz de rayos y su dirección (x, y, θ, φ) , siguiendo la definición del *4D light field* o simplemente LF descrita en el Capítulo 1. Por otra parte, un sistema óptico formador de imágenes puede definirse de acuerdo a las leyes de la óptica gaussiana por sus pupilas de entrada y salida (PE y PS respectivamente), por sus planos principales H y H' y por sus puntos focales F y F' . En diseño óptico, a los rayos que atraviesan el sistema óptico en cuestión se les suele describir a través del vector de pupila $\vec{\rho}$ y del vector de campo \vec{H} . El vector de pupila da cuenta de por qué zona de la pupila de salida ha pasado un rayo, y el vector de campo indica la altura del rayo en el plano objeto, lo que se relaciona directamente con su altura en el plano del sensor. Se suele utilizar este par de vectores para caracterizar a los rayos porque las aberraciones de los sistemas ópticos pueden describirse en función de los mismos [30]. La dupla $(\vec{H}, \vec{\rho})$ define completamente un rayo de manera análoga a la nomenclatura de ángulos y

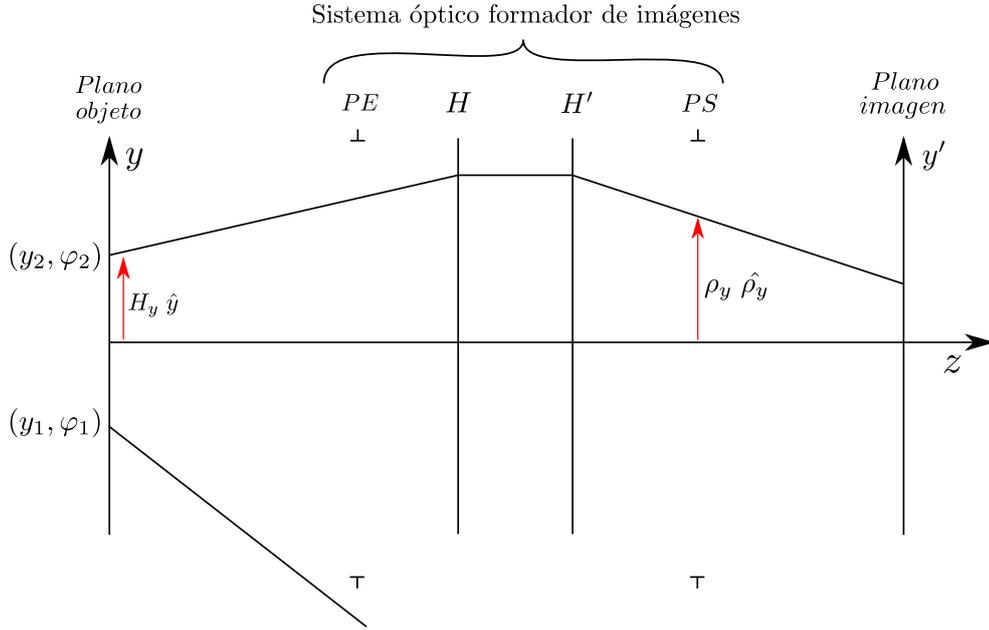


Figura 2.1: Geometría básica de un sistema óptico formador de imágenes.

posiciones que utiliza el LF, así pues, registrar los vectores $(\vec{H}, \vec{\rho})$ implica registrar el LF.

A modo de ejemplo, consideramos dos rayos viajeros arbitrarios con coordenadas (y_1, φ_1) y (y_2, φ_2) en el plano objeto de un sistema óptico formador de imágenes representado por sus pupilas de entrada y salida y por sus planos principales, tal y como puede verse en la figura 2.1. Puesto que el sistema tiene simetría axial, podemos limitar nuestro análisis a la sección meridional representada en el dibujo (y, z) , sin pérdida de generalidad. Como vemos en la figura 2.1, el rayo con coordenadas (y_2, φ_2) no consigue atravesar el sistema. Así pues, del conjunto infinito de rayos que viajan por el espacio, solo aquellos que tengan las coordenadas adecuadas llegarán al sensor de imagen. Si el sistema óptico es capaz de registrar la información de los rayos que lo atraviesan $(\vec{H}_y, \vec{\rho}_y)$, o $(\vec{H}, \vec{\rho})$ si consideramos las dos dimensiones XY del sensor, habrá registrado el LF.

Las cámaras convencionales no registran el LF. En la figura 2.2 podemos ver la sección transversal de una cámara convencional formada por una única lente

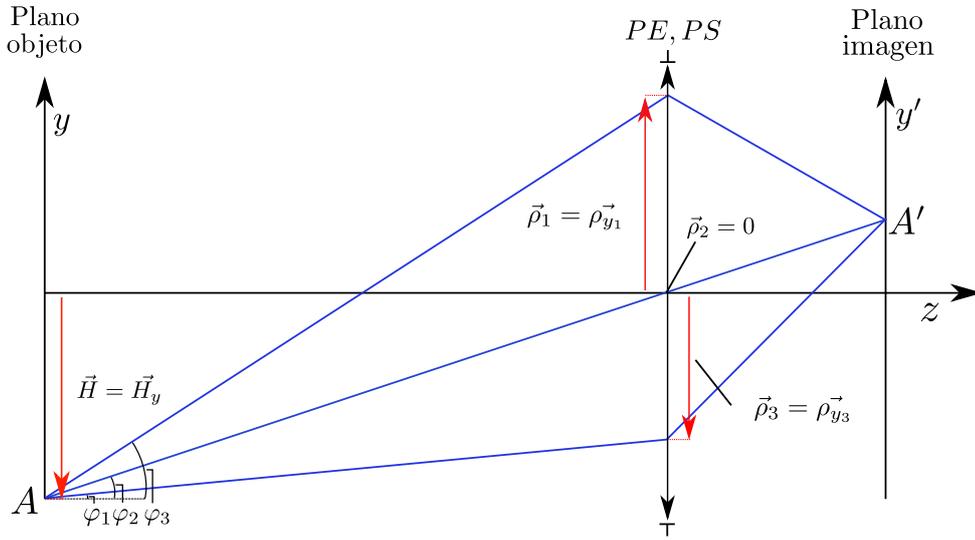


Figura 2.2: Trazado de rayos en una cámara convencional. Se evidencia la equivalencia entre la nomenclatura de ángulos y posiciones (φ, y) y la nomenclatura de vectores ($\vec{H}, \vec{\rho}$).

convergente con comportamiento ideal. El diafragma de apertura del sistema se sitúa sobre la propia lente. En el plano objeto se dibuja un punto A que emite luz en todas direcciones. Dicha luz llega a la lente y esta la enfoca sobre el punto A' en el sensor. Como ejemplo, se han dibujado tres rayos emergentes del punto A (comparten el vector de campo \vec{H}) que llegan al punto A' del sensor; pero cada uno lo hace pasando por un punto diferente de la pupila (su vector $\vec{\rho}$ es diferente), o equivalentemente, cada rayo emerge del punto A con un ángulo φ_i con $i = 1, 2, 3$, llegando al sensor de imagen con ángulos diferentes con respecto al eje z . Cada píxel del sensor registrará la coordenada \vec{H} con la resolución del tamaño de dicho píxel, pero puesto que la luz será integrada independientemente del ángulo de llegada o perspectiva, no registraremos el LF.

Las cámaras plenópticas sí registran el LF. Como ya hemos mencionado en el capítulo 1, estas cámaras tienen dos configuraciones esenciales: la 1.0 y la 2.0, que se diferencian en la posición relativa de la matriz de microlentes con

respecto al plano imagen de las mismas. En la figura 2.3 se puede ver un esquema de ambas configuraciones. La cámara plenóptica funciona de manera similar al sistema óptico propuesto por Lippmann en 1907. Como se puede ver en la figura 2.3b, la lente principal en la configuración 2.0 produce una imagen intermedia del objeto en las inmediaciones de las microlentes y cada microlente observa dicha imagen intermedia desde una perspectiva, registrando el LF. En el caso de la configuración 1.0, que es con la que trabajaremos nuestra investigación, el funcionamiento es algo menos intuitivo y se explica con detalle en las siguientes secciones.

2.1. La configuración 1.0

En el sensor de imagen de la cámara plenóptica 1.0 se obtienen un conjunto de microimágenes, tantas como microlentes compongan la MLA y alcancen el área activa del sensor. Cada una de estas microimágenes está limitada por la imagen de la pupila de salida de la lente principal. El tamaño de una microimagen, como se puede observar en los trazos rojos de la figura 2.3a, viene determinado por el tamaño de la pupila de salida del UBL y por la posición g de las microlentes con respecto al sensor de imagen. Además, como ya vimos en el Capítulo 1, $g \approx f_{\mu L}$. Teniendo en cuenta estas condiciones, se han de diseñar los elementos de manera que no se produzca solapamiento o viñeteado o que se produzca en la medida de lo deseado.

En la figura 2.4 observamos un ejemplo del efecto de solapamiento (a la derecha) y de viñeteado (a la izquierda). Como ya se ha estudiado en la literatura [10], la condición de *f-number matching*, es decir, la igualación de los números f de la lente principal o UBL y de la matriz de microlentes o MLA, conduce a una configuración sin solapamiento ni viñeteado. En el caso de la figura 2.4, la apertura tiene una forma circular, y por eso las microimágenes son también circulares.

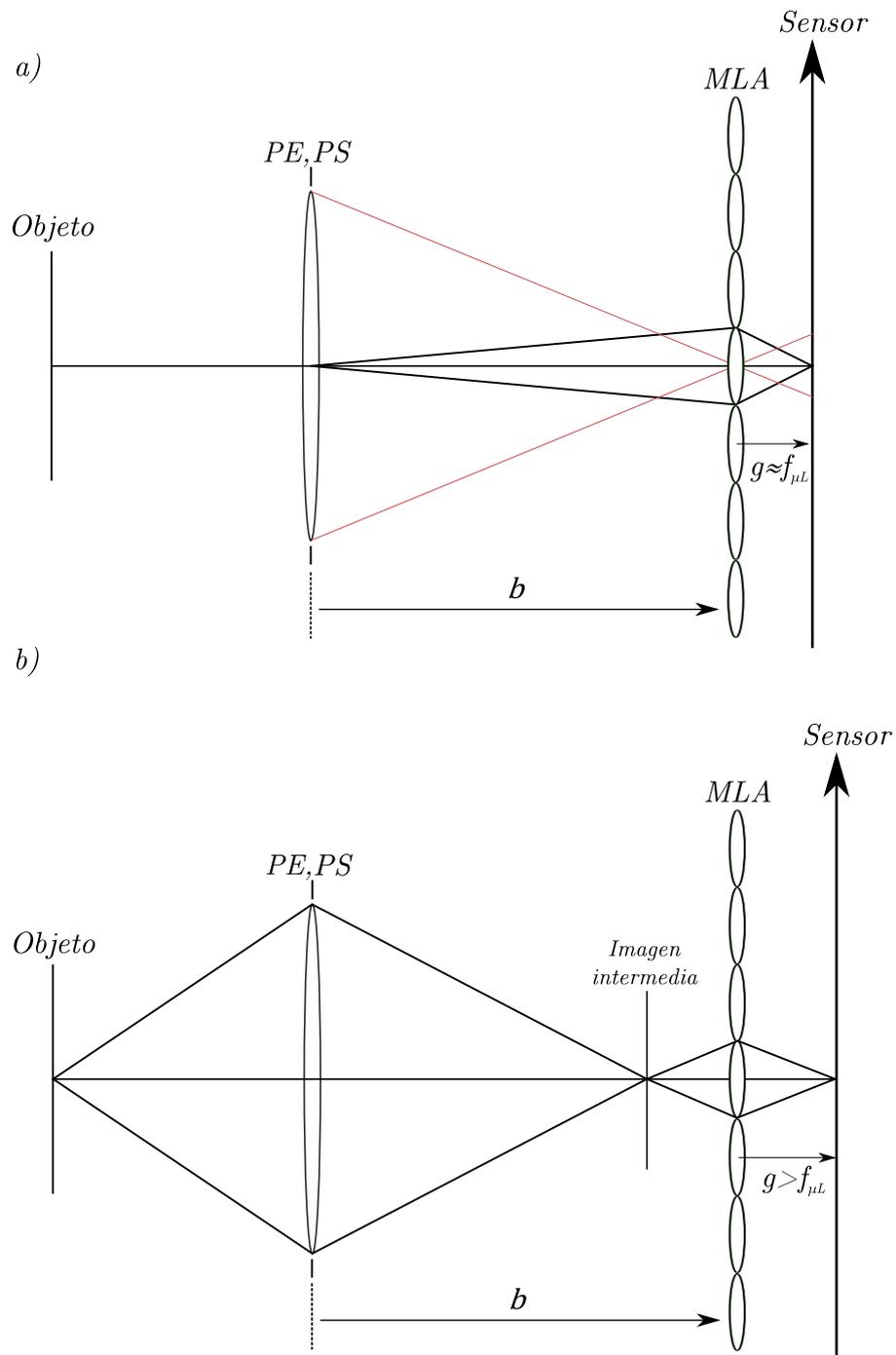


Figura 2.3: a) Configuración 1.0 y b) configuración 2.0 de una cámara plenóptica.

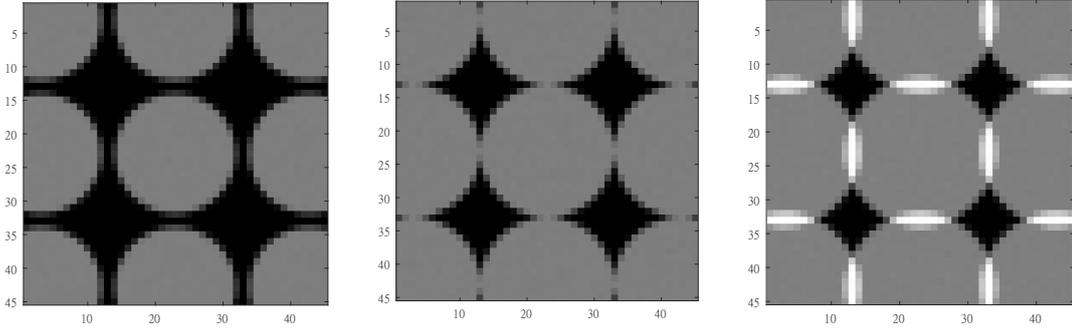


Figura 2.4: Izquierda, microimágenes con viñeteado; centro, configuración sin solapamiento ni viñeteado; derecha, microimágenes con solapamiento.

Otras formas pueden diseñarse con objeto de conseguir un factor de llenado del sensor mayor, es decir, evitando al máximo las zonas oscuras entre microimágenes. Asimismo, en la figura 2.4 la distribución de microimágenes es cuadriculada, pero otras distribuciones (v.g., hexagonales) pueden ser utilizadas [31, 32].

2.1.1. Registro del *light field*

En una cámara plenóptica 1.0, cada una de las microlentes que compone la MLA recibe luz de una pequeña parte del *Field Of View* o FOV de la cámara, registrando las coordenadas (x, y) o equivalentemente el vector \vec{H} de manera similar a como lo hacen los píxeles del sensor de imagen en una cámara convencional. De esta manera, al actuar el plano de la MLA como plano en donde se recoge la información espacial de la escena, la resolución espacial vendrá determinada por la distancia $p_{\mu L}$ o *pitch* entre centros de microlentes adyacentes [14, 17].

Para diferenciarse de las cámaras convencionales, en la cámara plenóptica 1.0 el recorrido de los rayos de luz no termina en el plano de las microlentes, sino que dichos rayos siguen fluyendo hacia el sensor de imagen que está situado a una distancia g del plano de las microlentes. Este hecho permite registrar la información angular (o información de pupila) de los rayos. Puesto que cada microimagen es

una imagen de la pupila de salida del sistema, la resolución angular de la cámara vendrá dada por el número de píxeles que compongan cada microimagen.

Nótese que, dado un sensor de imagen, la resolución espacial y angular de la cámara plenóptica están ligadas; de manera que si aumentamos la resolución angular, es decir, el número de píxeles por microimagen, habremos de aumentar el tamaño de las microlentes, perdiendo resolución espacial. Por otra parte, si reducimos el tamaño de las microlentes para ganar resolución espacial, cada una de ellas producirá microimágenes con un menor número de píxeles, perdiéndose resolución angular. El caso límite en que cada microimagen estuviese formada por un único píxel correspondería al caso de la cámara convencional. Mucho se ha investigado sobre la resolución lateral (o espacial) y la profundidad de foco de las cámaras plenópticas [18] y sobre cómo mejorar sus prestaciones con técnicas de superresolución sin sacrificar información angular [33–35]; no obstante, una explicación detallada de estos conceptos queda fuera del propósito de este trabajo.

A partir de la colección de microimágenes capturadas por el sensor plenóptico se reconstruye el LF. No obstante, dicha reconstrucción no es inmediata, ya que requiere de un proceso de calibración que comienza por identificar el centro de cada microimagen, que puede no ser fácil de definir si existen aberraciones ópticas o problemas de fabricación en la cámara. Para ello, es típico utilizar una imagen blanca (*white image*), obteniendo microimágenes blancas de una muestra blanca plana iluminada de forma homogénea e isotrópica, tal y como se advierte en la figura 2.4. Dansereau, Cho y muchos otros han hecho grandes avances en este tema [36, 37]. Una vez se ha decodificado el LF, con él pueden obtenerse un conjunto de imágenes con diferente perspectiva a las que llamaremos vistas y también un conjunto de imágenes con diferente información angular de diferentes zonas del campo que llamaremos epipolares [10].

En los siguientes esquemas podemos ver explícitamente cómo se registra el LF

en una cámara plenóptica 1.0. La figura 2.5 muestra dos ejemplos de funcionamiento de una cámara plenóptica a primer orden, en que tanto la lente principal como las microlentes presentan comportamiento ideal carente de aberraciones ópticas. En la figura 2.5a, el objeto puntual A (sobre el eje óptico) se conjuga con el punto A' sobre la microlente central. Esta divide la información angular entre los píxeles que componen la microimagen; en este caso tres píxeles, y por tanto, tres perspectivas que se observan pintadas en tres colores diferentes en la figura. El píxel central de la microimagen, sp'_m , recogerá la información angular de la zona central de la pupila de salida Lp_2 . Del mismo modo, el píxel sp'_{m-1} , de la parte superior de la pupila de salida Lp_1 , y el píxel sp'_{m+1} , de la parte inferior de la pupila de salida Lp_3 . Esto ocurrirá también para otros puntos del plano objeto independientemente de su coordenada espacial (\vec{H}). En la misma figura, se representa un punto B, con coordenada espacial (\vec{H}) diferente, cuya información angular se registrará de la misma manera pero en la microimagen $n - 2$. En la figura 2.5b, se puede observar qué sucede si el punto A se acerca axialmente a la cámara. Ahora, la imagen A' se sitúa por detrás del plano de las microlentes, de forma que la luz proveniente de A baña varias microlentes a la vez. Aún así, la información angular se repartirá convenientemente entre los píxeles de las microimágenes afectadas sin mezclarse.

En las figuras 2.5a y 2.5b, que representan un caso ideal en que la reconstrucción del LF es sencilla, se puede ver el renderizado¹ de las vistas (en este caso tres, pues hay tres perspectivas). Las vistas o imágenes sub-apertura son las imágenes 2D (1D si nos limitamos al plano YZ) registradas desde cada una de las perspectivas de la cámara y se componen de tantos píxeles como microlentes compongan la MLA, en este caso cinco.

Las imágenes epipolares (representadas también en las figuras 2.5a y 2.5b)

¹Proceso de generación o reconstrucción de imágenes por ordenador.

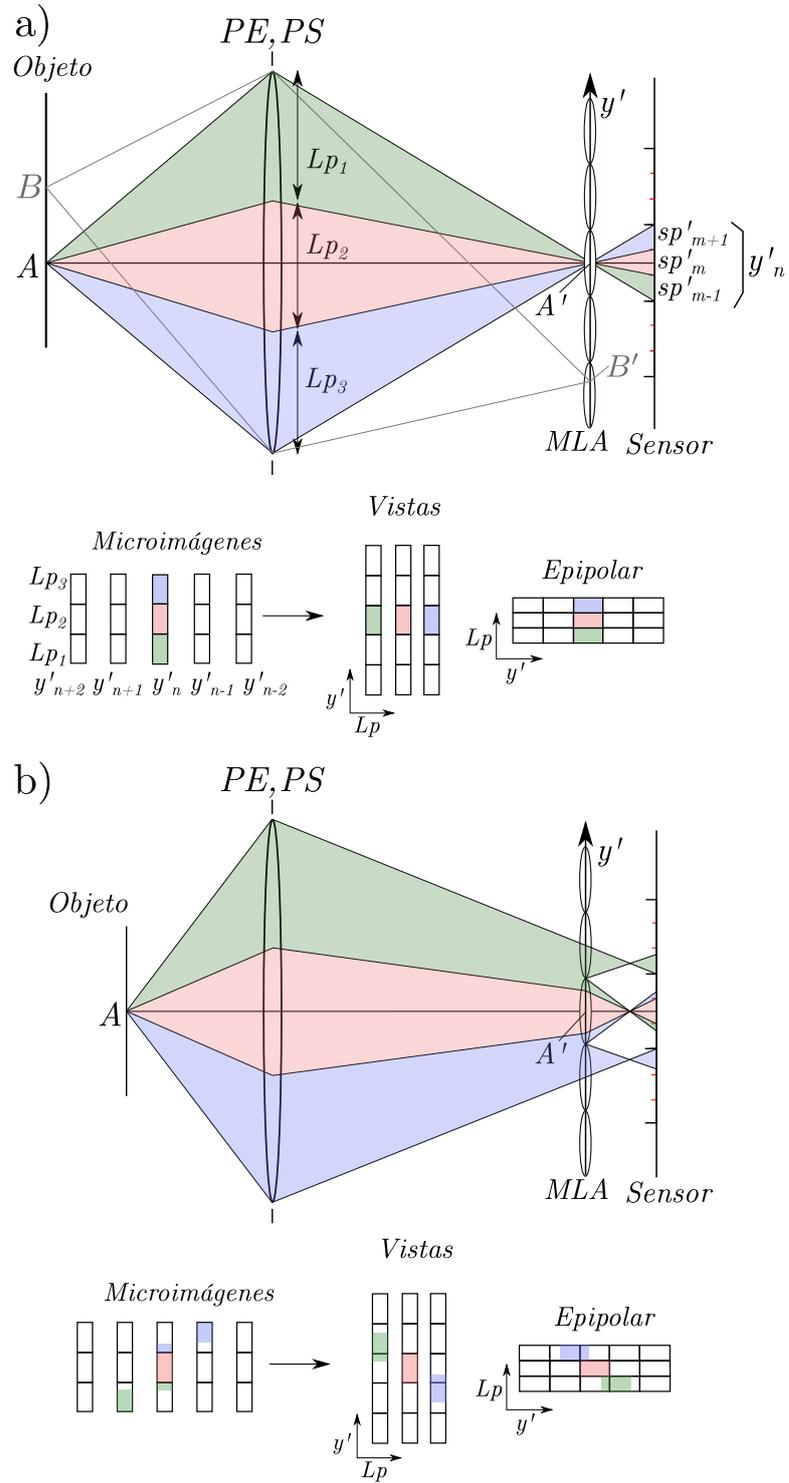


Figura 2.5: a) Un punto objeto A emite luz que pasa a través de una cámara plenóptica 1.0 con $H_y = 0$. Microimágenes y renderizado de las vistas. b) Dicho objeto A se desplaza axialmente con respecto a la cámara plenóptica. Microimágenes y renderizado de las vistas. Los píxeles iluminados parcialmente son una manera de representar que se iluminan con menor intensidad de luz.

permiten evaluar la disparidad de los objetos entre las diferentes vistas. Esta manera de visualizar el LF es compleja, ya que barre las coordenadas angulares o coordenadas de pupila en el eje de ordenadas y las coordenadas espaciales o coordenadas de microimagen en el eje de abcisas, permitiendo evaluar cómo cambia un punto de posición a lo largo de las diferentes perspectivas que recoge la cámara [10]. En el ejemplo de la figura 2.5a, puesto que el punto objeto enfoca sobre el plano de las microlentes, la epipolar aparece iluminada con una línea vertical, evidenciando que no existe disparidad en la posición del punto imagen entre las diferentes vistas. No obstante, en el caso de la figura 2.5b, podemos ver que dicho punto objeto aparecerá en diferentes coordenadas y' dependiendo de la vista o perspectiva. Es importante notar que los píxeles que aparecen parcialmente iluminados en los ejemplos de la figura 2.5 buscan representar píxeles iluminados con menor intensidad de luz.

2.2. La plenóptica como cámara de profundidad

Ya sabemos que conocer el LF implica poder conocer la distancia a la que se encuentran los objetos fotografiados. Existen muchas formas de evaluar la profundidad de los objetos a partir del LF y una de ellas es mediante el cálculo de la disparidad entre vistas a través de la pendiente de las líneas que forman los objetos en las imágenes epipolares (ver la reconstrucción de la figura 2.5). A esta disparidad, que definimos adimensional, la denominaremos *slope*. Muchos métodos que encontramos en la bibliografía se pueden utilizar para estimar el *slope* [38, 39].

En esta sección, nos centraremos en describir los parámetros ópticos y geométricos relevantes a la hora de evaluar la capacidad de una cámara plenóptica para funcionar como cámara de profundidad.

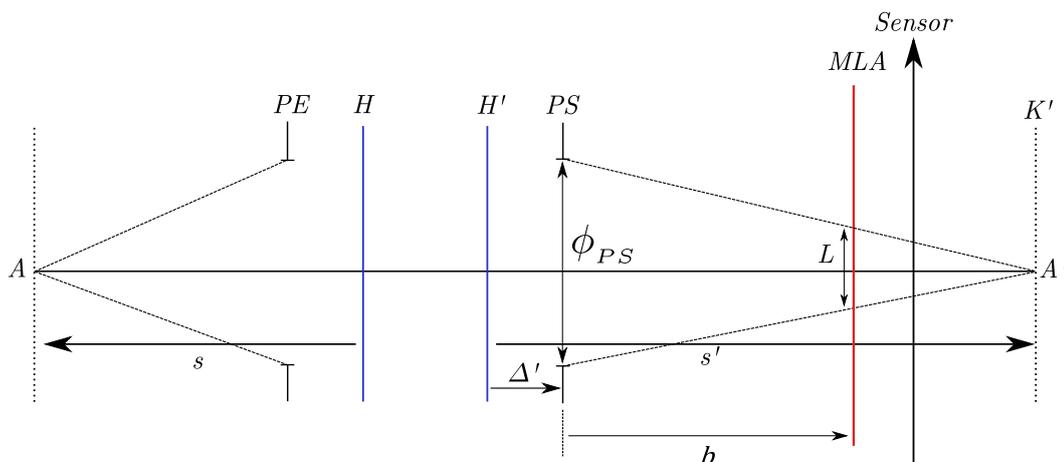


Figura 2.6: Esquema de la geometría de una cámara plenóptica 1.0 a primer orden que utilizamos para calcular cómo dicha cámara mide profundidades.

2.2.1. Análisis geométrico de parámetros

Prever y diseñar el desempeño de una cámara plenóptica es posible ya que se pueden optimizar ciertos parámetros con el objetivo de mejorar la capacidad de la cámara para medir profundidades en el rango deseado.

En la figura 2.6 podemos ver un esquema básico de una cámara plenóptica cuya lente principal está representada por sus planos principales (H, H') y sus pupilas de entrada y salida (PE, PS). Asimismo, se dibujan el plano de la MLA y el plano del sensor. Si consideramos que no existe la MLA, un punto objeto A situado a una distancia s del plano principal objeto H hace imagen sobre el plano K' a una distancia s' del plano principal imagen H' en el punto A' . Este plano no coincide con el plano del sensor. En el plano del sensor, el punto objeto en cuestión está desenfocado. Las ecuaciones de la óptica geométrica nos permiten relacionar las distancias s y s' con la focal del sistema, como vemos en la ecuación 2.1, por lo que si pudiéramos modelizar el desenfoco de manera precisa, seríamos capaces de, por triangulación, saber a que distancia s' habría enfocado el punto A' . Conocida s' , podríamos obtener s . Muchas técnicas de *depth-from-defocus* que intentan modelizar dicho desenfoco han sido desarrolladas en la

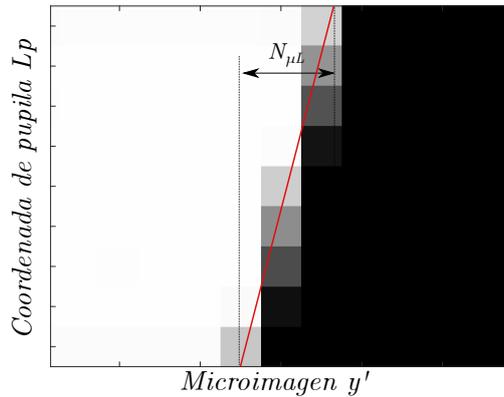


Figura 2.7: Imagen epipolar que ilustra la relación entre la pendiente de las líneas que forman los objetos en las imágenes epipolares y el número de microlentes iluminadas.

bibliografía [40, 41].

$$\frac{1}{-s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f} \quad (2.1)$$

En nuestro caso, y ahora considerando la MLA, este desenfoque se registra gracias las microlentes. Como vemos en la figura 2.6, el punto A' está ocupando un área en el plano de la MLA que en el plano del dibujo se representa mediante la longitud L . Dicha longitud se puede escribir como $L = p_{\mu L} N_{\mu L}$, donde $p_{\mu L}$ es el *pitch* de microlente y $N_{\mu L}$ el número de microlentes iluminadas. Como se puede ver en el renderizado de las microimágenes y epipolares de la figura 2.5b, el número de microlentes iluminadas está directamente relacionado con la pendiente de las líneas que forman los objetos en las imágenes epipolares. En la figura 2.7 se explicita esta relación para mayor claridad. El número de microlentes iluminadas podrá escribirse como $N_{\mu L} = slope \times n^\circ vistas$. Es importante advertir que $N_{\mu L}$ no tiene porqué ser entero, como puede verse tanto en la figura 2.5b como en la figura 2.7. Así pues, conocer la pendiente de una línea epipolar implica conocer L , y por tanto, poder calcular la distancia s . Desde este punto de vista, podemos decir que la cámara plenóptica mide desenfoques que permiten calcular profundidades.

Si observamos la figura 2.6, podemos escribir:

$$\frac{\phi_{PS}}{s' - \Delta'} = \frac{L}{s' - b - \Delta'} \quad (2.2)$$

donde ϕ_{PS} hace referencia al diámetro de la PS, b es la distancia entre la PS y el plano de la MLA y Δ' es la distancia entre H' y PS , tal y como se puede observar en la figura 2.6. Si particularizamos la ecuación anterior para el caso en que el punto objeto está en infinito, encontramos que podemos expresar b como:

$$b = f - \Delta' - \frac{L_{|\infty}(f - \Delta')}{\phi_{PS}} \quad (2.3)$$

donde hemos sustituido $s' = f$, dado que el objeto está situado en infinito y donde $L_{|\infty}$ es la longitud L para el caso de objeto en infinito y que definirá el punto de enfoque de la cámara. Ahora, despejamos s' de la ecuación 2.2 y la sustituimos en la 2.1:

$$\frac{1}{-s} = \frac{1}{f} - \frac{\phi_{PS}}{\phi_{PS} b + \phi_{PS} \Delta' - L\Delta'} + \frac{L}{\phi_{PS} b + \phi_{PS} \Delta' - L\Delta'} \quad (2.4)$$

Si tomamos el caso en que $\Delta' = 0$, por simplificación; recordando que $L = N_{\mu L} p_{\mu L}$, y por tanto, $L_{|\infty} = N_{\mu L_{|\infty}} p_{\mu L}$; sustituyendo el valor de b según la ecuación 2.4, y definiendo $S = 1/s$, finalmente podemos escribir:

$$S = -\frac{1}{f} + \frac{\phi_{PS}}{\phi_{PS} f - p_{\mu L} N_{\mu L_{|\infty}} f} - \frac{p_{\mu L}}{\phi_{PS} f - p_{\mu L} N_{\mu L_{|\infty}} f} N_{\mu L} = \frac{p_{\mu L} N_{\mu L_{|\infty}}}{\phi_{PS} f - p_{\mu L} N_{\mu L_{|\infty}} f} - \frac{p_{\mu L}}{\phi_{PS} f - p_{\mu L} N_{\mu L_{|\infty}} f} N_{\mu L} \quad (2.5)$$

Es decir, la proximidad (S) medida en dioptrías a la que se sitúa un punto objeto cuya imagen se analiza en el sensor de una cámara plenóptica es directamente proporcional al número de microlentes iluminadas por dicho punto objeto, o sea, al *slope*.

El error con el que mediremos la distancia al punto objeto s , se puede escribir como:

$$\epsilon(s) = s^2 \epsilon(S) = s^2 \frac{p_{\mu L}}{\phi_{PS} f - p_{\mu L} N_{\mu L} f} \epsilon(N_{\mu L}) \quad (2.6)$$

Dicho error será proporcional al cuadrado de la distancia a la que se sitúe el punto objeto, como vemos en la ecuación 2.6; es decir, distancias lejanas serán medidas con mayor error. Asimismo un *pitch* de microlente ($p_{\mu L}$) pequeño, un diámetro de la pupila de salida (ϕ_{PS}) grande y una focal (f) de la lente principal grande, favorecerán una mayor precisión en la medida de distancias objeto. El error en la medida de $N_{\mu L}$ dependerá de la resolución de las microimágenes y otros factores relacionados con los algoritmos utilizados. Las conclusiones son análogas si se analiza el caso en que $\Delta' \neq 0$.

En definitiva, a la hora de diseñar una cámara plenóptica, tendremos que ser conscientes de que los parámetros ópticos arriba descritos tendrán un impacto directo en la precisión con la que mediremos distancias.

2.3. Miniaturización de la cámara plenóptica

La miniaturización de la tecnología plenóptica, hasta ahora no tratada en la bibliografía, resulta de gran interés para las aplicaciones de fotografía digital con capacidad de registrar la información de profundidad de los objetos. Como ya hemos visto, la cámara plenóptica consta de tres elementos principales: la lente principal, la MLA y el sensor de imagen que tendrán que miniaturizarse.

2.3.1. El sensor de imagen

Los sensores en miniatura de imagen CMOS que se utilizan actualmente en la industria de telefonía móvil para cámaras convencionales gozan de píxeles cada

vez más pequeños ($< 0,8 \mu m$) y de resoluciones cada vez más altas ($> 48 Mpix$) [42], forzando a los diseños ópticos a ser cada vez más exigentes en cuanto a calidad óptica y corrección de aberraciones.

En estos sensores, la necesidad de circuitería entre píxeles hace que la zona sensible de los mismos no ocupe la totalidad del área del silicio, provocando una pérdida de eficiencia en la recolección de luz. Para evitar esta pérdida se utiliza una matriz de microlentes que mejora la eficiencia. Para no introducir confusiones con la matriz de microlentes o MLA descrita como elemento estructural en la cámara plenóptica, nos referimos a estas microlentes como microlentes de píxel.

Puesto que en la mayoría de casos en las cámaras convencionales el ángulo de incidencia de la luz sobre los píxeles aumenta conforme aumenta el campo \vec{H} (ver figura 2.2), las microlentes están más y más desplazadas con respecto al área activa del píxel conforme aumenta dicho campo. Esto significa que, en los sensores actuales, el fabricante elige qué ángulo es de eficiencia máxima para cada píxel del sensor [21]. Es típico que dichos sensores lleguen a ángulos de máxima eficiencia de recolección de $30 - 35^\circ$ en torno a las esquinas del sensor, con un comportamiento creciente que puede ser lineal o no lineal y partiendo de una microlente de píxel completamente centrada en el centro del sensor ($y' = 0$) [42], como se puede ver en la figura 2.8. Cuando se elige un sensor de imagen, ha de tenerse en cuenta esta característica, para adaptar el *Chief Ray Angle* (CRA) de la lente principal lo máximo posible a las características del sensor.

2.3.2. La lente principal

La industria de las lentes miniaturizadas está muy desarrollada y existe un amplio catálogo de lentes con diferentes características. Para especificar una lente miniaturizada de plástico los siguientes parámetros resultan fundamentales [19, 30]:

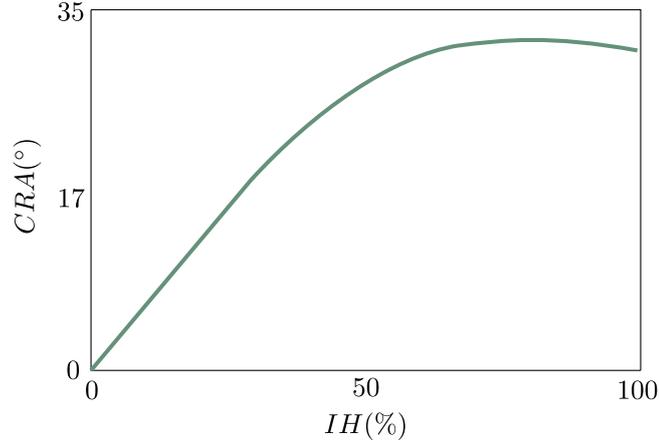


Figura 2.8: CRA típico de un sensor de imagen para telefonía móvil.

- *Field of view* (FOV_{lente}): Representa el campo angular de visión de la lente. Se relaciona con la longitud focal de la lente y el tamaño del sensor de imagen según la ecuación:

$$\tan\left(\frac{FOV_{lente}}{2}\right) = \frac{IH_{sensor}}{2f} \quad (2.7)$$

donde IH_{sensor} se refiere al *Image Height* del sensor, es decir, a su tamaño en la diagonal; y f se refiere a la focal de la lente. La ecuación 2.7 puede utilizarse indistintamente para cualquier campo \vec{H} ajustando convenientemente el ángulo de vista y la IH (*Image Height*) en ese punto.

- **Tamaño y resolución del sensor:** Se especifica con la IH_{sensor} descrita en el punto de arriba y con la resolución de píxel.
- *Total track length* (TTL): Se refiere al tamaño total de la lente, incluyendo las partes mecánicas. El *Optical Total Track Length* u OTTL lo utilizaremos para referirnos al tamaño de la lente desde la primera superficie hasta el plano imagen. En general, estas medidas se expresan para un objeto situado en infinito.

- *Working f-number* o número-f efectivo: Se refiere a la cantidad de luz efectiva que recoge la apertura del sistema. En este tipo de lentes, los números-f oscilan entre 3 – 4 para las lentes menos exigentes, o cuyos parámetros ópticos dificultan la optimización para aperturas grandes, como lentes tipo *zoom*, y entre 1,7 – 2,6 para las lentes más luminosas.
- *Chief ray angle*: Es un parámetro de diseño muy importante en este tipo de lentes. El *chief ray* o rayo principal se refiere al rayo de cualquier punto del campo que pasa por el centro de la pupila de salida (PS) del sistema, es decir, el rayo para el que $\vec{\rho} = 0$. En las lentes de plástico el CRA es típicamente no lineal, siendo creciente en casi todo el campo y saturando hacia el final. Muchas veces, el CRA se ajusta a la eficiencia del sensor. Si recordamos, el sensor utiliza microlentes de píxel que tienen ángulos de recolección preferentes.
- Iluminación relativa: Se refiere a la cantidad de luz que llega al sensor para cada punto del mismo con referencia al centro. Típicamente, se intenta obtener un valor de $> 40 - 50\%$ en las esquinas del sensor, lo que se corresponde aproximadamente con la ley de caída de intensidad del \cos^4 [30].

En las siguientes subsecciones describimos algunas consideraciones sobre las lentes plásticas: cómo se definen, sus aberraciones, los materiales con que se fabrican, la calidad óptica que suelen tener, etc.

2.3.2.1. Superficies

En el contexto en que la lente principal deja de ser ideal, como habíamos considerado para las descripciones teóricas de los apartados anteriores, y pasa a estar compuesta por un conjunto de lentes formadas por diferentes superficies y materiales, conviene definir algunos parámetros.

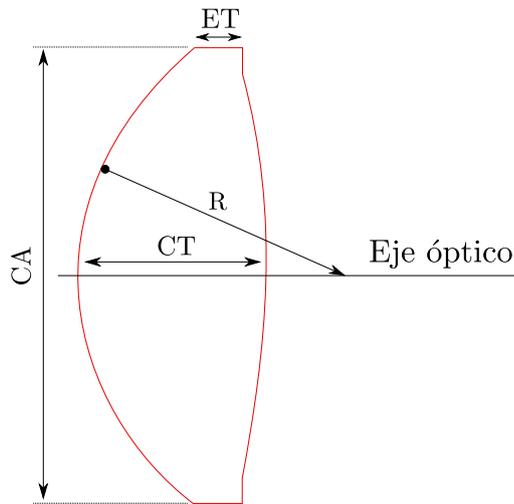


Figura 2.9: Parámetros constructivos básicos de una lente de plástico.

En la figura 2.9 podemos observar los parámetros básicos de una lente-elemento de plástico. En principio, una lente está formada por dos superficies esféricas o esféricas definidas cada una por su radio R y demás parámetros si son esféricas. En el caso de la figura 2.9, el radio señalado (R) tiene un radio de curvatura positivo. La lente suele estar fabricada de un material cuyo índice de refracción oscila entre 1,4 y 1,6 y embebida en aire. El grosor de la lente en su centro se denomina *Center Thickness* o CT, y en su extremo *Edge Thickness* o ET. La apertura, *Clear Aperture* o CA de cada superficie define el punto en que el rayo más alejado del centro óptico que pasa por el sistema atraviesa dicha superficie.

Las lentes fabricadas por inyección de moldes en plástico pueden estar definidas por superficies complejas, ya que, una vez se ha diseñado y construido el molde, replicar dichas superficies no supone ningún coste ni esfuerzo extra.

Las superficies esféricas están extendidas en el diseño de lentes en miniatura, hasta el punto de que es difícil encontrar un diseño en que todos o la mayoría de elementos no sean asferas, típicamente muy pronunciadas. Las asferas añaden variables al diseño, de manera que dan más libertad al diseñador. La combinación de estas permite controlar las aberraciones (incluyendo la distorsión), el CRA, la iluminación relativa, y todo ello en un tamaño lo suficientemente reducido.

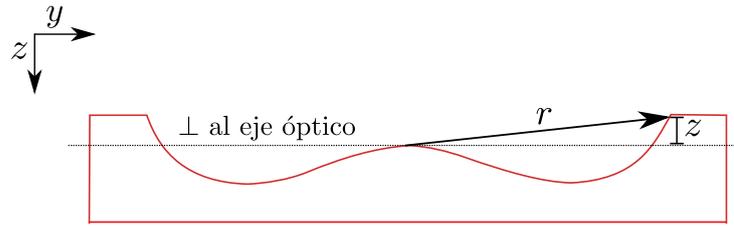


Figura 2.10: Ejemplo del perfil de una superficie esférica.

Una superficie esférica presenta simetría axial alrededor del eje óptico y puede tomar muchas formas, pero la definición que se suele utilizar responde a la siguiente ecuación [43]:

$$z(r) = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1 + k)c^2r^2}} + \sum_{i=2}^8 \alpha_{2i}r^{2i} \quad (2.8)$$

donde z es la sagita de la superficie, que mide la distancia de cada punto al eje óptico; c es la curvatura de la superficie ($1/R$), k es la constante cónica y α_{2i} los coeficientes esféricos. En la figura 2.10 se puede ver un ejemplo de superficie esférica.

2.3.2.2. Aberraciones

La lente principal va a presentar aberraciones, ya que no es un sistema de imagen ideal. Los sistemas ideales producen una imagen estigmática, es decir, a cada punto A del objeto le corresponde un punto A' de la imagen de manera unívoca, como sucedía en la figura 2.2. Además, en los sistemas ideales ocurre que las imágenes de los objetos son una representación precisa (aunque escalada) de dichos objetos, es decir, no presentan distorsión.

Las aberraciones que presentan las lentes reales, y por tanto las lentes en miniatura, surgen naturalmente al aplicar la ley de la refracción de Snell cuando rayos con diferentes vectores \vec{H} y $\vec{\rho}$ atraviesan los materiales de diferentes índices de refracción y números de dispersión de los que están compuestos las lentes. Si

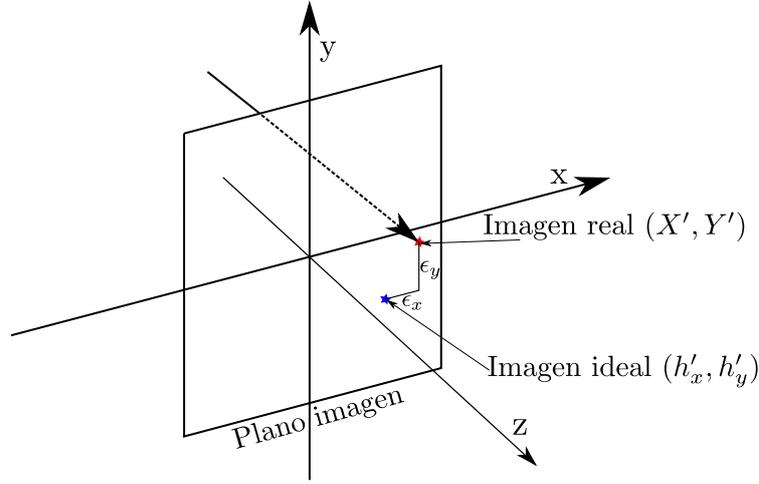


Figura 2.11: Ilustración de la definición del error de rayo en un sistema óptico aberrado.

tomamos como referencia el comportamiento ideal de los rayos, es decir, aquel que gobierna la región paraxial, podemos cuantificar lo aberrado que está un rayo a partir de la magnitud del error transversal de rayo ($\vec{\epsilon} = \epsilon_x \hat{x} + \epsilon_y \hat{y}$). La figura 2.11 ilustra el error de rayo de un rayo que llega al sensor de imagen sufriendo aberraciones [1].

Si consideramos que la imagen ideal está situada en el punto (h'_x, h'_y) y la imagen real en el punto (X', Y') , podemos escribir:

$$\begin{aligned} X'(H_x, H_y, \rho_x, \rho_y) &= \epsilon_x(H_x, H_y, \rho_x, \rho_y) + h'_x(H_x, H_y) \\ Y'(H_x, H_y, \rho_x, \rho_y) &= \epsilon_y(H_x, H_y, \rho_x, \rho_y) + h'_y(H_x, H_y) \end{aligned} \quad (2.9)$$

Es importante observar que, dado que el sistema tiene simetría de rotación, un punto objeto situado en el plano meridional, es decir, tal que $h'_x = 0$, puede describir totalmente el sistema sin pérdida de generalidad, de manera que:

$$\begin{aligned} X'(H_y, \rho_x, \rho_y) &= \epsilon_x(H_y, \rho_x, \rho_y) \\ Y'(H_y, \rho_x, \rho_y) &= \epsilon_y(H_y, \rho_x, \rho_y) + h'_y(H_y) \end{aligned} \quad (2.10)$$

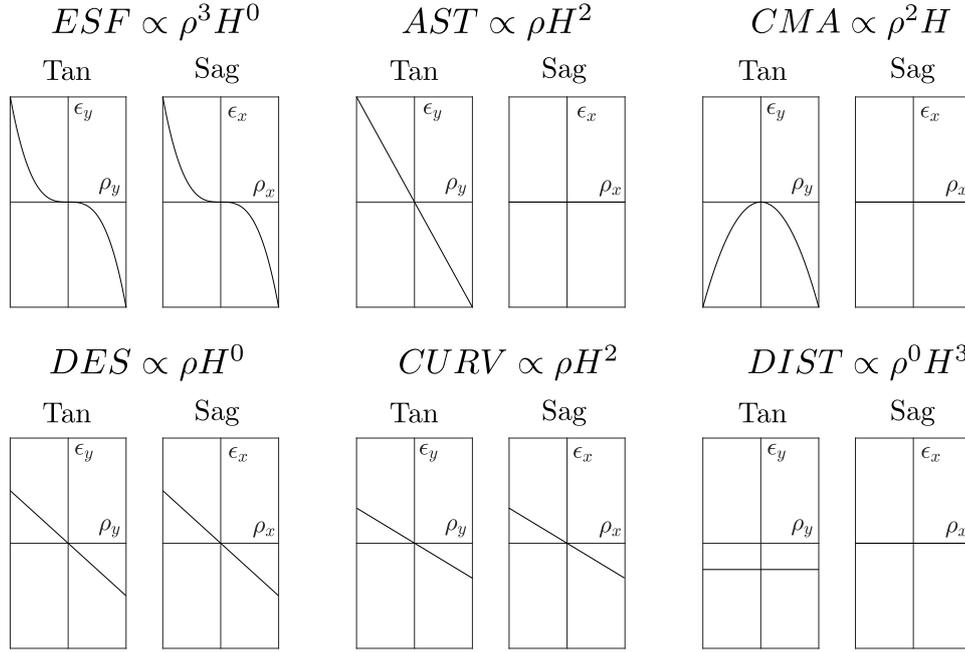


Figura 2.12: Error de rayo para las diferentes aberraciones de tercer orden y para el desenfoque calculado para un rayo meridional en un punto concreto del campo y para los planos tangencial y sagital de pupila en función de la coordenada de pupila [44].

La función del error de rayo puede ser descompuesta en diferentes términos, cada uno asociado a una aberración. En la figura 2.12 se muestran los gráficos de las aberraciones de Seidel o aberraciones de tercer orden, a saber: esférica, coma, astigmatismo, curvatura de campo y distorsión, calculadas para un rayo meridional en un punto concreto del campo y para los planos tangencial y sagital de pupila. Asimismo, se incluye el desenfoque, que podría ser considerado una aberración de segundo orden. En esta representación, ESF es la aberración esférica, que solamente depende de $\vec{\rho}$; AST es el astigmatismo, que depende de \vec{H} y de $\vec{\rho}$, así como el coma (CMA); CURV la curvatura de campo (dependiente de $\vec{\rho}$ y \vec{H}) y DIST la distorsión, que únicamente depende de la coordenada \vec{H} . También se incluye el desenfoque (DES).

Como se puede observar en la figura 2.12, las diferentes aberraciones dependen con diferente potencia de las coordenadas de pupila y de campo. Así pues, las

aberraciones que dependen del campo (astigmatismo, coma, curvatura de campo y distorsión) no estarán presentes para objetos cercanos al eje óptico ($\vec{H} \approx 0$) e irán creciendo conforme aumenta \vec{H} .

Además de las cinco aberraciones de Seidel y del desenfoque, es importante tener en cuenta las aberraciones cromáticas: la aberración cromática axial y la aberración cromática lateral. Estas aparecen por la naturaleza dispersiva de los materiales y afectarán a los sistemas que trabajen con luz de más de una longitud de onda, como sucede en una cámara plenóptica como la descrita en este documento. La aberración cromática axial desplaza el foco en función de la longitud de onda en la coordenada axial (coordenada z). La aberración cromática lateral cambia el aumento lateral de la lente en función de la longitud de onda. Las aberraciones cromáticas pueden minimizarse con la combinación adecuada de materiales.

En el caso de las cámaras plenópticas, no solo las imágenes de los objetos se degradan, sino que también se pueden ver afectados los mapas de profundidad. Las imágenes epipolares, a través de las cuales calculamos la profundidad de los objetos, pueden verse deformadas en presencia de aberraciones de la lente principal y también de las microlentes, como explicaremos más adelante. Los gráficos del error de rayo muestran cuánto se desvía un rayo (ϵ_x, ϵ_y) de su posición ideal en función de las coordenadas de pupila (ρ_x, ρ_y) para un punto concreto del campo. Las imágenes epipolares muestran en qué píxel ha caído un rayo dependiendo de su coordenada de pupila, o lo que es lo mismo, dependiendo de su perspectiva para una zona local del campo. En este sentido, si consideramos un comportamiento ideal de las microlentes, los gráficos de la figura 2.12 nos permiten comprender cómo nos van a afectar las diferentes aberraciones de la lente principal a la hora de calcular profundidades estimando *slopes* en las líneas que forman los objetos en las imágenes epipolares. A la vista de esto, las aberraciones que afectan de

manera diferente a los planos tangenciales y sagitales de pupila (a saber, astigmatismo y coma) serán especialmente problemáticas, ya que el mismo punto objeto situado a cierta distancia de la cámara será medido con diferentes profundidades dependiendo de si se toman las epipolares verticales (relacionadas con las coordenadas tangenciales de pupila) o las epipolares horizontales (relacionadas con las coordenadas sagitales de pupila).

Este tipo de estudios ya fue abordado por Ren Ng. en su tesis doctoral [10], en la que proponía métodos para corregir digitalmente las aberraciones. Otras investigaciones proponen métodos para la corrección de aberraciones en plenóptica [45–48], e incluso se menciona que algunas de ellas (v.g., la aberración esférica) pueden favorecer la detección de líneas epipolares en imágenes epipolares [46].

2.3.2.3. Materiales

Los materiales plásticos disponibles para la fabricación de lentes por inyección son reducidos si los comparamos con la cantidad de vidrios disponibles para el diseño convencional de lentes.

En óptica, para la corrección de aberraciones cromáticas al menos dos materiales de diferente número de Abbe (con diferente dispersión cromática) han de ser empleados. Típicamente se suelen utilizar policarbonatos, polimetilmetacrilatos y copolímeros cíclicos, que son suficientemente estables térmicamente y que presentan una diferencia en número de Abbe de $\Delta V_d = 25 - 35$, suficiente para la corrección de aberraciones cromáticas [21]. En la figura 2.13 se puede observar un gráfico de los materiales plásticos típicamente utilizados [49, 50].

2.3.2.4. Manufacturabilidad

La fabricación de lentes plásticas a través de moldes tiene algunas restricciones o reglas de diseño para asegurar que el plástico fluya por las piezas y se pueda

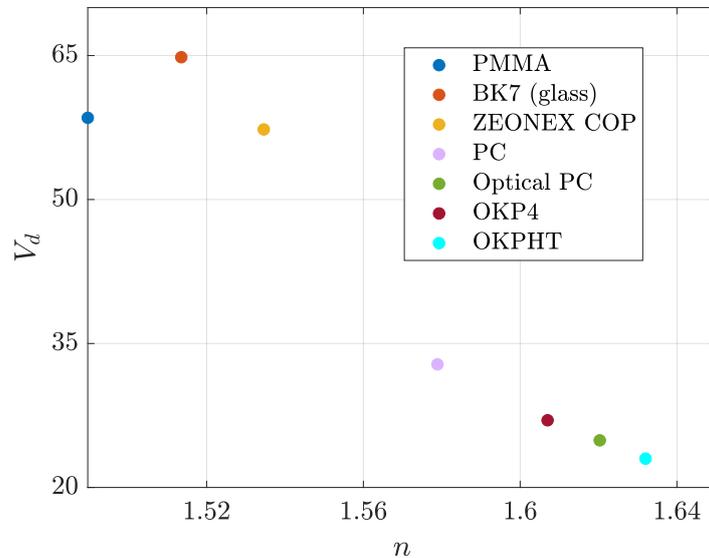


Figura 2.13: Relación entre el índice de refracción n y el número de Abbe V_d de diversos materiales plásticos y del BK7, un cristal óptico de referencia.

enfriar correctamente.

El ratio entre el CT (*Center Thickness*) y el ET (*Edge Thickness*) ha de ser preferiblemente menor que 3. Las lentes deben tener un grosor mínimo de 0,2 mm y los huecos de aire han de ser como mínimo de 0,02 mm en toda la extensión de la lente para asegurar el alineamiento sin colapso de los diferentes elementos. Asimismo, la derivada de las superficies ha de ser menor de 60° con respecto a la vertical en todos los puntos de la lente, para asegurar un desmolde correcto. Estos requerimientos se definen en la *clear aperture* (CA) de la lente. Más allá de esta apertura, han de diseñarse los llamados *flanges*, que sirven para sujetar los elementos ópticos en el barril sostenedor y que cumplen una función mecánica [30].

Para las lentes en miniatura, que son aproximadamente diez veces más pequeñas que las lentes para sensores de 35 mm, las tolerancias de fabricación se dividirán por diez [51]. Resumimos en la tabla 2.1 las tolerancias típicas.

Parámetro	Tolerancia
Center thickness (CT)	$\pm(2 - 5)\mu m$
Radio de curvatura (R)	$\pm(2 - 5)\mu m$
Descentramiento de las superficies	$\pm(2 - 5)\mu m$
Inclinación de las superficies	$\pm(2 - 5)\mu m$

Tabla 2.1: Tolerancias de precisión para lentes plásticas en miniatura. La inclinación se define como máximo desplazamiento en la CA de la lente [51].

2.3.2.5. Calidad óptica

La calidad óptica de estas lentes suele medirse en términos de la *Modulation Transfer Function* o MTF. La MTF da cuenta del contraste que presenta una lente a diferentes frecuencias espaciales y para diferentes partes del campo (diferentes coordenadas \vec{H}). El contraste del sistema óptico depende de muchos factores: los límites difractivos, las aberraciones ópticas, el tamaño del sensor, las técnicas de procesado de imagen utilizadas, etc. La MTF puede medirse como referencia a $f = Ny/2$ ó $Ny/4$, donde Ny representa la frecuencia de Nyquist, que es a su vez $Ny = 1/(2p_{pix})$ y donde p_{pix} es el tamaño del píxel del sensor de imagen que se está utilizando. A $Ny/2$ valores del 50 – 60 % serían buenos. Para las zonas centrales del campo siempre se espera mejor contraste que para los extremos.

2.3.3. La matriz de microlentes o MLA

En el caso de la plenóptica, miniaturizar la matriz de microlentes presenta diversos problemas. En primer lugar, el reducido tamaño de cada una de las lentes que componen la matriz. Como sabemos de apartados anteriores, el tamaño de las microlentes determinará la resolución espacial de nuestra cámara, por lo que hemos de elegir un tamaño adecuado. Si es demasiado pequeño, podría ser demasiado difícil de fabricar con precisión; además de que podrían dominar los efectos difractivos, algo no deseable en nuestro caso, ya que todos los modelos de cámara plenóptica que utilizamos se basan en un modelo de trazado geométrico

de rayos. Si es demasiado grande, tendremos muy poca resolución espacial, y las imágenes serán de calidad pobre. Las microlentes de una cámara plenóptica de las características que aquí describimos pueden fabricarse de muchas maneras, y cada una de ellas presenta dificultades diferentes. Generalmente, las microlentes se fabrican sobre un sustrato con técnicas de *polymer-on-glass*, impresión 3D, fotolitografía, etc [52].

A modo de ejemplo, la matriz de microlentes de la cámara Lytro Illum está compuesta por 625x434 microlentes que registran 15x15 perspectivas [53]. Dichas microlentes presentan forma hexagonal y tienen un tamaño de $d_{\mu L} = 20 \mu m$ [54], lo que supone un compromiso bastante acertado entre calidad de las lentes y resolución.

Capítulo 3

Diseños de lentes principales para mini-cámaras plenópticas

En la sección 2.3.2 hemos descrito las características fundamentales de las lentes objetivo en miniatura utilizadas de manera masiva en la industria de la telefonía móvil y otros dispositivos portátiles. Estas lentes pueden funcionar como lente principal en una cámara plenóptica. No obstante, puesto que las cámaras plenópticas presentan diferencias con respecto a las cámaras convencionales, algunos parámetros y consideraciones han de tenerse en cuenta. En este capítulo, exploramos algunos tipos de diseños que podrían resultar interesantes para funcionar como lentes principales de una cámara plenóptica en miniatura y describimos en detalle una lente diseñada a tal efecto.

3.1. Parámetros clave a la hora de medir profundidades

El diseño de la lente principal de una mini-cámara plenóptica es complejo, ya que no solo ha de cumplir las especificaciones convencionales de FOV, TTL,

calidad óptica, etc., sino que además han de tenerse en cuenta los requisitos de precisión en la estimación de profundidades y los rangos de operación descritos por el cliente.

En la sección 2.2.1 hemos explicado que la capacidad de medir distancias de una cámara plenóptica, en cuanto a la lente principal se refiere, depende directamente de la focal de la lente y del tamaño de su pupila de salida; concretamente, del producto de ambas magnitudes ($\phi_{PS}f$) (ver ecuación 2.6). Así pues, si quiéramos maximizar la precisión sería ideal aumentar lo máximo posible la focal y el tamaño de la pupila de salida del sistema. Puesto que el número-f efectivo o *Working F-Number* (WFNO) del sistema se define como $WFNO = f/\phi_{PE}$, donde f es la focal de la lente y ϕ_{PE} es el diámetro de la pupila de entrada del sistema, que se relaciona a su vez de manera directa con el tamaño de la pupila de salida ϕ_{PS} , disminuir el WFNO controlando el valor de la focal tiene un impacto directo en la mejora de la precisión.

En muchas ocasiones aumentar la focal del sistema o reducir el WFNO es, de inicio, imposible, ya que las especificaciones de FOV o cantidad de luz que debe recoger el sistema no lo permiten. Teniendo esto en mente, resulta muy interesante explorar los límites del diseño de mini-cámaras plenópticas en términos de la focal y el WFNO: ¿cuál es la lente objetivo con focal lo más grande posible y WFNO lo más pequeño posible que podemos diseñar sin sacrificar calidad óptica?

Una manera sencilla de aumentar la focal de un sistema es hacerlo más grande. Escalando una lente principal de focal modesta a tamaños más grandes podemos lograr las focales deseadas ya que existe una relación directamente proporcional entre el tamaño de la lente y su longitud focal. No obstante, el tamaño axial o TTL del que se dispone en una lente miniaturizada es de 3 a 10 *mm* aproximadamente. Esto limita mucho las focales que son fabricables. Por otra parte, aumentar la apertura del sistema de manera indefinida es imposible. Las aberraciones crecen

conforme crece el tamaño de la pupila (ver figura 2.12), haciendo que la imagen pierda calidad. Aunque los diseños de lentes en miniatura suelen tener WFNOs pequeños (i.e., $1,8 < WFNO < 3$), hemos de tener en cuenta que reducir a la mitad el WFNO supone un coste cuatro veces mayor en esfuerzo de diseño y optimización del sistema óptico [30]. Asimismo, existe una relación entre la dificultad de disminuir el WFNO y la longitud focal del sistema. Cuanto más grande sea la focal, más difícil será corregir el sistema para WFNO pequeños, ya que habremos de corregir aperturas grandes; por lo que hemos de analizar el compromiso entre tener focales muy grandes y recoger suficiente luz.

Actualmente en el mercado de las mini-cámaras existen muchos tipos de diseños dependiendo de algunos parámetros clave como el TTL, el FOV o la focal de la lente. En este sentido se puede definir el factor telefoto que sirve para clasificar la naturaleza de algunos diseños. El factor telefoto mide el ratio entre el OTTL y la focal del sistema, es decir, $TR = OTTL/f$, y es típico encontrar valores en torno a 1.2 para lentes objetivo en miniatura [30]. Cuando este factor es menor que 1 estamos ante un diseño de tipo telefoto, en el que la focal del sistema es más grande que su OTTL. Estos diseños son particularmente interesantes en el caso de la plenóptica miniaturizada, puesto que permiten aumentar la focal de la lente principal sin aumentar de manera consecuyente el tamaño de la lente. Asimismo, estos diseños pueden optimizarse para WFNO suficientemente bajos.

Por otra parte, existen los diseños con espejos a los que nos referimos como diseños *folded*, en los que los tamaños efectivos de las lentes se pueden controlar con la inclusión de uno o varios espejos o prismas ópticos que permiten mantener el grosor total de la lente bajo. En estos casos se pueden diseñar focales grandes al disponer de más espacio. De hecho, algunos *smartphones* comerciales han utilizado este recurso para conseguir *zoom* óptico x5 o incluso x10 [55, 56]. En estos casos, los WFNO suelen ser más grandes (i.e., $WFNO > 3$), pero el

aumento sustancial de la longitud focal compensa la pérdida de luz en términos de capacidad de medir distancias (ver ecuación 2.6).

3.2. Diseños *inline* tipo telefoto vs. diseños con espejos

Así pues, identificamos dos tipos de diseños que nos permiten maximizar la focal de la lente principal del sistema plenóptico manteniendo los tamaños que requiere la industria de las mini-cámaras, a saber: los diseños *inline*¹ tipo telefoto y los diseños *folded*.

3.2.1. Diseños *inline*

Los diseños telefoto *inline*, es decir, aquellos en los que la luz viaja a lo largo del eje z sin doblar su camino óptico, se han popularizado mucho en los últimos años en las cámaras de los *smartphones*, ya que, junto con la cámara principal del teléfono, permiten desarrollar algunas aplicaciones interesantes, como la fotografía de retrato con el famoso efecto Bokeh [57].

A nivel elemental, una lente telefoto está compuesta por dos componentes que presentan potencia positiva y negativa respectivamente. Para estas lentes, la potencia total del sistema es $K = K_1 + K_2 - K_1 K_2 d$, con K_1 la potencia del primer componente, K_2 la del segundo, y d la separación entre ambos componentes. En los sistemas de este tipo, corregir algunas de las aberraciones de tercer orden resulta sencillo, ya que la suma de potencias es pequeña, o incluso cero si $K_2 = -K_1$. No obstante, otras aberraciones como la distorsión pueden ser difíciles de corregir [58].

En un prediseño paraxial, si $f_2 = -x f_1$, siendo x un factor cualquiera, f_1

¹En línea, que se desarrollan en un solo eje.

la focal del primer componente y f_2 la focal del segundo componente, podemos escribir que:

$$f_1 = f \left(1 - \frac{1}{2} \left(x \pm \sqrt{x^2 - 4x(1 - TR)} \right) \right) \quad (3.1)$$

donde f es la focal total del sistema y TR el factor telefoto. Si tomamos $x = 1$, podemos ver que no existe solución real para la ecuación 3.1 si $TR < 0,75$. Este resultado es interesante, ya que nos marca un límite, al menos teórico, para el ratio telefoto cuando las potencias de los dos elementos son iguales. Ceñirse a esta condición resulta conveniente para corregir el astigmatismo y la curvatura de campo, pero dificulta la corrección de la distorsión, que podemos corregir dando valores diferentes a K_1 y K_2 [58, 59].

Los diseños telefoto en miniatura que se han encontrado hasta ahora en la bibliografía de patentes presentan ratios telefoto de $TR \approx 0,9$ [60] y hasta $TR \approx 0,85$ [61] con focales de entre 6 y 8 mm. Estos diseños suelen estar compuestos por cinco lentes elemento agrupadas según la estructura 2 + 1 + 2, en que el primer grupo es un doblete acromático que aporta potencia positiva, el segundo grupo, formado por una única lente, aporta potencia negativa, y el último grupo, formado por dos lentes, aporta también potencia negativa. Esta estructura sigue, de manera aproximada, la descripción de primer orden de los diseños telefoto.

3.2.2. Diseños *folded*

Los diseños con espejos o prismas permiten doblar el camino óptico de la luz haciendo posible diseñar lentes compactas. En estos casos, el OTTL efectivo de la lente es mucho mayor que su grosor, con lo que, potencialmente, se pueden diseñar focales muy grandes en espacios pequeños. En la figura 3.1 se muestran tres sistemas ópticos idénticos pero que presentan diferente compactibilidad. En el primer caso, la longitud mecánica (MTL) y óptica (OTL) de la lente son prácti-

camente coincidentes ($MTL_a \approx OTL_a$). En el segundo caso, la inclusión de un espejo permite reducir la longitud mecánica de la lente sin variar la longitud óptica ($MTL_b < OTL_b = OTLz_b + OTLy_b$). Por último, en el tercer caso, dicha longitud mecánica se consigue reducir casi a la mitad con respecto a la lente original gracias a la inclusión de dos espejos ($MTL_c \ll OTL_c = OTLz_{1c} + OTLy_c + OTLz_{2c}$). El ejemplo mostrado en la figura constituye un esquema teórico en que la lente principal está formada por un único elemento y en el cual solamente se dibuja el campo central ($H_y = 0$). En cuanto tratamos con sistemas reales formados por conjuntos de elementos e intentamos aumentar el FOV, los diseños se complican a nivel mecánico ya que es fácil que los rayos en su viaje hacia el sensor encuentren obstrucciones.

En este sentido, es una buena práctica colocar el elemento reflector como una de las primeras superficies. Asimismo, es útil utilizar como elemento reflector un prisma en que dos de las superficies puedan ser refractivas, permitiendo optimizar aún más el diseño. En la figura 3.2 se muestra un ejemplo de un diseño de este tipo [62]. Observamos una lente con cinco elementos etiquetados como L_i con $i = 1, 2, \dots, 5$, cuya focal asciende a 9,8 mm en un espacio de grosor menor a 6 mm. El primer elemento constituye un prisma reflector y refractor que permite la reducción de grosor de la lente drásticamente. La lente presenta un FOV de 26° y un WFNO de 3 y su IH total es de 5,6 mm.

3.2.3. Ventajas e inconvenientes

A la vista de las explicaciones sobre los diseños *inline* y *folded* de los apartados anteriores, parece claro que un diseño con superficies reflectoras es el que más conviene para maximizar la focal en una lente plenóptica miniaturizada para dispositivos portátiles. Pero lo cierto es que existen muchos inconvenientes a la hora de diseñar lentes con espejos para telefonía móvil. A continuación resumimos

3.2. Diseños inline tipo telefoto vs. diseños con espejos

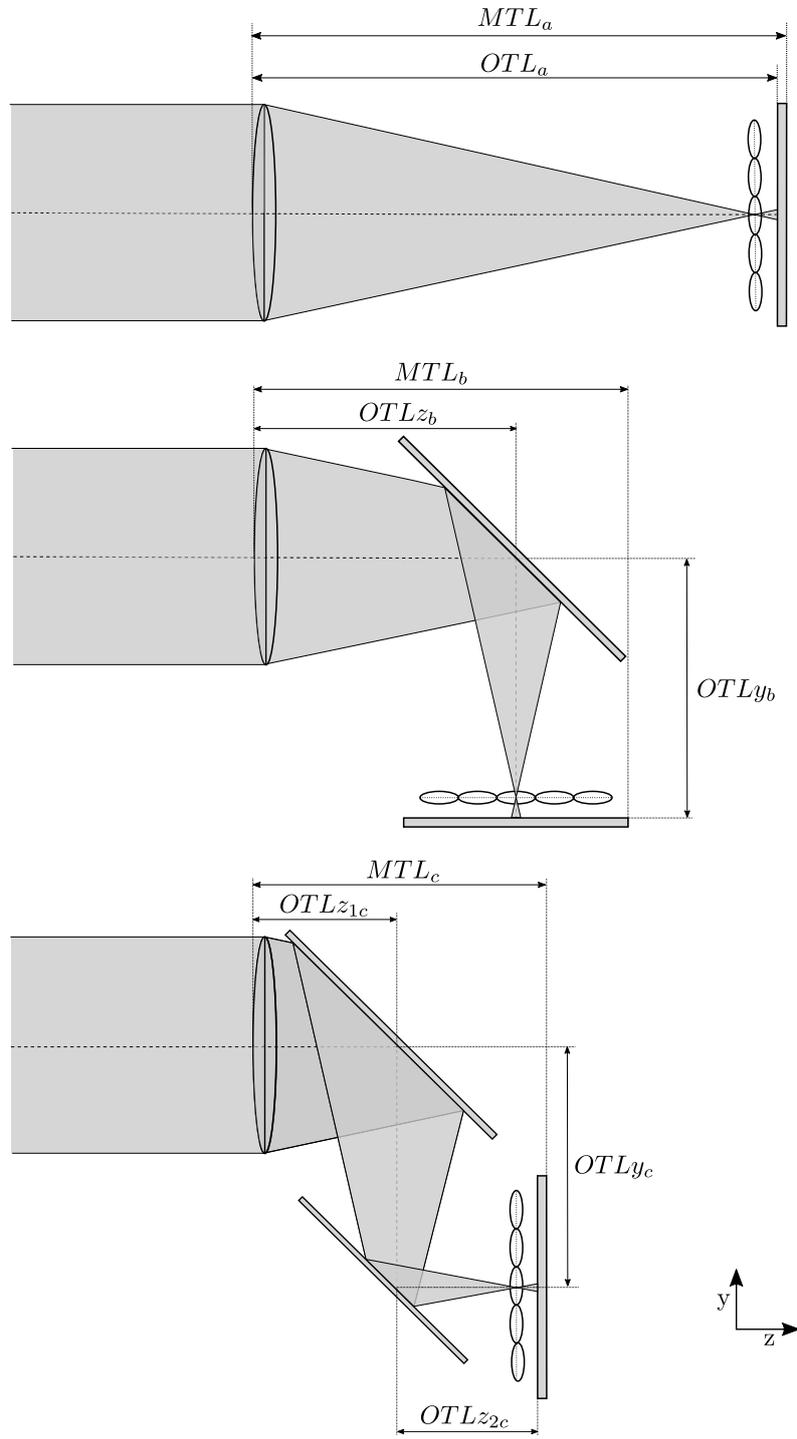


Figura 3.1: Reducción del grosor de una lente con la técnica de inclusión de espejos o prismas [62]. MTL se refiere a Mechanical Track Length o longitud mecánica y OTL refiere a Optical Track Length o longitud óptica.

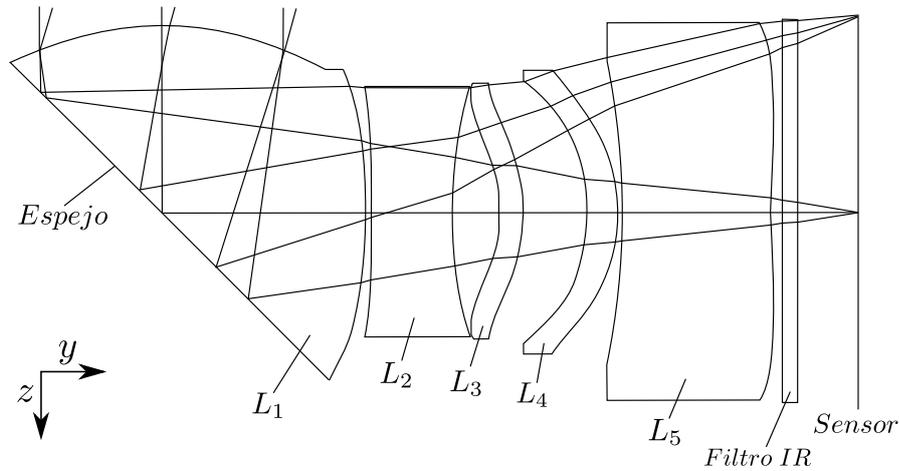


Figura 3.2: Ejemplo de un diseño con un prisma refractivo y reflectivo que permite reducir el grosor de una lente de focal grande, posibilitando que sea instalada en un dispositivo portátil como un smartphone [62].

algunos de los más importantes:

- **Pérdida de simetría axial** del sistema óptico y del barril mecánico. La inclusión del espejo o prisma hace perder la simetría axial del sistema que se convierte en simétrico planarmente, haciendo las tolerancias de fabricación más exigentes [44].
- La lente **pierde robustez opto-mecánica** ya que el módulo deja de ser una única pieza provocando que este sea más inestable a choques mecánicos.
- Los **efectos térmicos** son **asimétricos**, ya que los gradientes de temperatura afectan de manera diferente a las dos secciones transversales de la lente.
- El espejo o prisma es un elemento **difícil de construir** con precisión y difícil de alinear. Es difícil construir prismas a través de moldes, ya que los ángulos rectos son difíciles de manejar.
- Las lentes que incluyen espejos o prismas tendrán **precios de coste más elevados**.

- Los **sistemas de autofocus** en este tipo de lentes pueden ser **difíciles de diseñar**, ya que hay que mover dos elementos pesados.

A la vista de esta lista de dificultades, resulta conveniente revisar las posibilidades de los diseños *inline*. Es por ello que nos proponemos encontrar los límites de focales grandes en una lente telefoto *inline*, tal y como describimos en los siguientes apartados.

3.3. Diseño telefoto propuesto

En esta sección vamos a describir con detalle una lente objetivo telefoto, es decir, con $TR < 1$, diseñada ad-hoc para cámaras plenópticas traseras de telefonía móvil, en la que intentaremos reducir al máximo el ratio telefoto y con ello maximizar todo lo posible la focal, intentando, a su vez, mantener un WFNO bajo.

3.3.1. Prediseño

Antes de diseñar una lente objetivo han de definirse cuidadosamente sus especificaciones ópticas, a saber: focal, WFNO, FOV, resolución, iluminación relativa, etc. En este caso, puesto que queremos encontrar un límite para el factor telefoto de una cámara para telefonía móvil, no definiremos de manera estricta las especificaciones. Únicamente, indicaremos que el factor telefoto ha de ser $TR < 0,8$, que el tamaño total de la lente no puede sobrepasar los 7 mm y partiremos de un FOV inicial de 30° .

Para acromatizar las lentes se utilizarán dos materiales de índices de refracción y números de dispersión diferentes. Estos materiales son el E48R, de *Zeonex* [49]; y el OKP4HT, de *Osaka Gas Chemicals* [50]. Ambos muy extendidos en la industria de las lentes para telefonía móvil.

$\lambda[\mu m]$	peso	primaria
0,465	4	
0,510	23	
0,555	45	✓
0,610	23	
0,650	5	

Tabla 3.1: Longitudes de onda de trabajo.

Las longitudes de onda que se utilizarán en el diseño de la lente se detallan en la tabla 3.1, donde los pesos se han ajustado según la eficiencia cuántica de un sensor CMOS típico para telefonía móvil.

La lente objetivo estará formada por tres grupos de lentes: un primer grupo de lentes G_1 con potencia positiva, integrado por dos lentes formando un doblete acromático; un segundo grupo de lentes G_2 consistente en otro doblete acromático; y un tercer grupo de lentes G_3 , formado por una única lente de campo que actuará como *field-flattener*². La disposición de los elementos facilitará la resolución de la configuración con $TR < 0,8$ así como la corrección de las aberraciones primarias, según el prediseño paraxial. Así pues, tomando dicho prediseño paraxial, partiremos inicialmente de un ratio telefoto de $TR = 0,8$ y una relación de focales de $f_{G_2} = -f_{G_1}$, para un sistema de $TTL = 6,5 \text{ mm}$. Según la ecuación 3.1 podemos calcular la focal del primer grupo que sería: $f_{G_1} \approx 5,2 \text{ mm}$. La distancia entre el grupo positivo y el grupo negativo sería de $d \approx 3,7 \text{ mm}$.

La apertura física del sistema se situará en el primer elemento de G_1 , de manera que se pueda controlar el CRA y algunas aberraciones. Situar la apertura física en un lugar más centrado del diseño sería un error en este caso ya que el diseño por naturaleza no es simétrico. Asimismo, se permitirá el viñeteado de la pupila para obtener la suficiente calidad óptica en los extremos de la lente [30].

Para lograr el diseño telefoto compacto y bien corregido, se definen las si-

²Allanador de campo, o corrector de aberraciones de campo.

güentes relaciones para las distancias entre elementos:

$$\begin{aligned} \frac{T_{12}}{T_{23}} &< 0,1 \\ \frac{T_{34}}{T_{45}} &< 0,1 \\ 0,8 < \frac{T_{12}}{T_{34}} &< 1,25 \end{aligned} \tag{3.2}$$

donde T_{ij} se refiere al espacio de aire entre la lente i (L_i) y la lente j (L_j). Este espacio es medido en el eje óptico, aunque es recomendable que aplique a toda la *clear aperture* (CA) de la lente, especialmente entre las lentes L_1 y L_2 , y L_3 y L_4 . Estas relaciones de espacios entre los elementos son muy importantes, ya que indican que las lentes que conforman los dobletes han de estar muy juntas, siendo dichos dobletes compactos, y que los grupos de lentes estarán separados entre sí por distancias grandes. La separación entre G_1 y G_2 permitirá lograr la focal deseada y corregir las aberraciones primarias (recordemos que en el diseño paraxial esta separación es de unos 3.7 mm). La separación entre G_2 y G_3 permitirá a la última lente situarse cerca del sensor, con lo que resultará más fácil corregir las aberraciones de campo. Asimismo, la distancia entre la última lente y el sensor, o sea la *Back Focal Length* o BFL, deberá de ser lo suficientemente grande dejando espacio a un filtro de infrarrojos y a la matriz de microlentes, típicamente construida sobre un sustrato. Es decir, $BFL > 0,5 \text{ mm}$. Por otra parte, la configuración descrita como $2 + 2 + 1$ es conveniente, ya que se diferencia de manera obvia de las lentes telefoto ya patentadas en la bibliografía [60, 61] cuya estructura suele ser $2 + 1 + 2$, tal y como describimos en el apartado 3.2.1.

Para lograr que se cumplan las relaciones de la ecuación 3.2, los radios de las superficies que conforman las lentes deberían cumplir las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned} 0,8 < \frac{R_2}{R_3} < 1,2 \\ 0,5 < \frac{R_6}{R_7} < 2 \end{aligned} \tag{3.3}$$

donde R_i se refiere al radio de la superficie i y donde las superficies $i = 1, 2$ conforman L_1 , las superficies $i = 3, 4$ conforman L_2 , y así sucesivamente.

Además, para lograr un diseño que sea fabricable, las siguientes relaciones, ya mencionadas en la sección 2.3.2, son recomendadas:

$$\begin{aligned} \frac{CT}{ET} < 3 \\ sup_{slope} < 55^\circ \end{aligned} \tag{3.4}$$

donde sup_{slope} se refiere a la derivada de la superficie en cualquier punto de la CA de la lente medida con respecto al eje vertical (perpendicularmente al eje óptico).

3.3.2. Optimización de la lente

Con las consideraciones descritas, se procede a la optimización del diseño con la ayuda de *Zemax Optic Studio*. Para la optimización se define una función de mérito a través de diversos operandos intrínsecos del propio programa o creados *ad-hoc* por el usuario. Un algoritmo de búsqueda de mínimos locales minimizará el error definido en la función de mérito acercando el diseño a las especificaciones definidas y teniendo en cuenta las limitaciones indicadas [63].

La estructura inicial de la lente antes de comenzar con la optimización ha de cumplir de manera laxa las condiciones descritas en el apartado anterior, aunque la calidad óptica no sea buena. Los dobletes pueden tomarse de diseños de la literatura. La L_5 puede ser una lámina plano-paralela.

Antes de comenzar la optimización, hemos de muestrear los campos (H_y) de la manera deseada y elegir los parámetros ópticos que permitiremos que el programa modifique en busca de la solución óptima, a saber: radios, grosores y coeficientes esféricos de las superficies.

Podemos comenzar la optimización con los operandos TRCX y TRCY para todos los campos definidos y para todas las longitudes de onda, buscando reducir el tamaño del *spot*³ sobre el sensor; es decir, buscando que la lente en su plano de foco presente puntos focales con círculos de confusión pequeños. Cuando la calidad de la lente ya sea aceptable, podemos utilizar los operandos que buscan mejorar la MTF a diversas frecuencias: MECT, MECS. Además, utilizamos los operandos MNGC, MXGC, MNEG, MXEG, MNEA y MXEA para restringir los máximos y mínimos grosores de las lentes y los espacios de aire. Utilizamos TOTR para limitar el tamaño total de la lente o TTL, una de las especificaciones más importantes. Asimismo, utilizamos EFFL para definir la focal deseada para la lente y WFNO para asegurarnos de que la apertura es lo suficientemente grande. Definimos ad-hoc un operando para maximizar el producto $\phi_{PS}f$ en varios puntos del campo H_y . Empleamos RAID para controlar el CRA por debajo de los 30° y DISG para controlar la distorsión. Puesto que el astigmatismo y el coma son las aberraciones más importantes a corregir en una lente principal de una cámara plenóptica, reforzamos su corrección con los operandos FCGS, FCGT y DIFF para el astigmatismo, y TSCO y TTCO para el coma. Definimos ad-hoc un operando para controlar la derivada máxima de cada superficie y utilizamos ETVA, CTVA y DIVI para verificar que se cumplan los ratios adecuados mencionados en la ecuación 3.4. Utilizamos RELI para controlar la iluminación relativa del sistema, ya que vamos a permitir cierto viñeteado de la pupila [30, 64–66].

³Refiere al área que ocupa un punto objeto A al pasar a través de un sistema óptico formador de imágenes y enfocar sobre un plano K'.

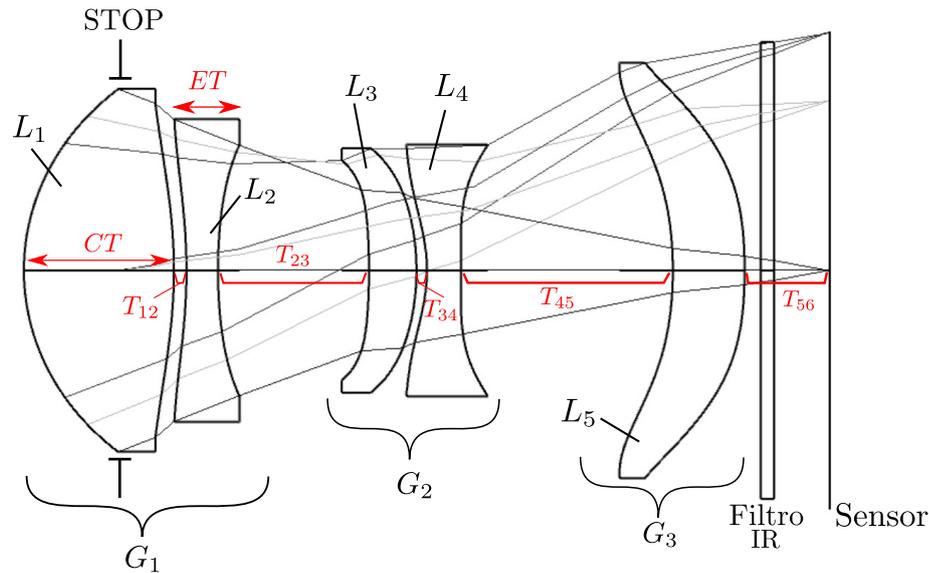


Figura 3.3: Layout de la lente telefoto diseñada [67].

3.3.3. Resultados

La estructura óptica final después del proceso de optimización se puede observar en la figura 3.3. En el *layout*⁴ de la lente objetivo se ven claramente diferenciados los tres grupos mencionados. Los parámetros ópticos básicos se resumen en la tabla 3.2. La lente presenta un factor telefoto de $TR = 0,786$, con una focal de $8,53 \text{ mm}$ en un espacio de $6,71 \text{ mm}$, exhibiendo más compactibilidad que cualquiera de los diseños *inline* que se hayan encontrado en la bibliografía de patentes. El FOV de la lente es de 26° para un sensor de diagonal 4 mm , lo que se correspondería con una resolución de 8 MPix si consideramos un tamaño de píxel de $1 \mu\text{m}$. El CRA máximo es de 15° , algo positivo para el comportamiento de las microlentes, como estudiaremos en el siguiente capítulo. La iluminación relativa (RI) se mantiene por encima del 53% para todos los campos. El $WFNO$ es 2,79, ya que reducirlo más complicaba la optimización de la lente y el *f-number matching* con las microlentes, que son más difíciles de fabricar para $WFNO < 2,8$.

Los materiales se combinan de manera que L_1 y L_4 utilizan E48R, y L_2 y L_3

⁴Esquema, representación o plano de un concepto o proyecto.

$f[mm]$	8,53	$f_{12}[mm]$	5,17
$WFNO$	2,79	$f_{34}[mm]$	-5,74
$TTL[mm]$	6,71	$f_5[mm]$	-32
TR	0,787	$\frac{f}{f_{12}}$	1,65
$FOV[^\circ]$	26	$\frac{TTL}{f_{12}}$	1,30
$IH[mm]$	2	$\frac{TTL}{IH}$	3,36
$CRA_{max}[^\circ]$	15,2	$RI_{min}[\%]$	53
T_{23}	1,26	$\frac{T_{12}}{T_{23}}$	0,084
T_{45}	1,77	$\frac{T_{34}}{T_{45}}$	0,049

Tabla 3.2: Parámetros ópticos básicos de la lente diseñada [67].

utilizan OK4PHT. Se analizan todas las configuraciones para cada doblete antes de llegar a dicha solución [30]. Como podemos ver en la tabla 3.2, las focales del grupo positivo ($f_{G_1} = f_{12}$) y del grupo negativo ($f_{G_2} = f_{34}$) son similares en módulo. La combinación de los dos dobletes previene de aberración esférica, coma, astigmatismo y aberraciones cromáticas. El quinto elemento, L_5 , aporta poca potencia al sistema, en comparación con las potencias de los grupos G_1 y G_2 , siendo esto congruente con su funcionalidad como lente de campo que se encarga de corregir la distorsión, la curvatura de campo y las demás aberraciones residuales.

Las relaciones entre los espacios de aire descritas en la ecuación 3.2 se cumplen, según podemos comprobar en la tabla 3.2. Las relaciones entre los radios y los parámetros de construcción descritos también se cumplen.

En la figura 3.4 se muestra el desempeño de la lente en términos de los *spots* que se producen en el sensor para nueve zonas del campo con diferente *Image Height* o *IH* (IMA en la figura). Cada longitud de onda analizada se muestra en un color y el disco de Airy se representa en negro para cada caso. Si calculamos la raíz cuadrada del valor cuadrático medio (RMS) del radio de cada *spot*, en

3. Diseños de lentes principales para mini-cámaras plenópticas

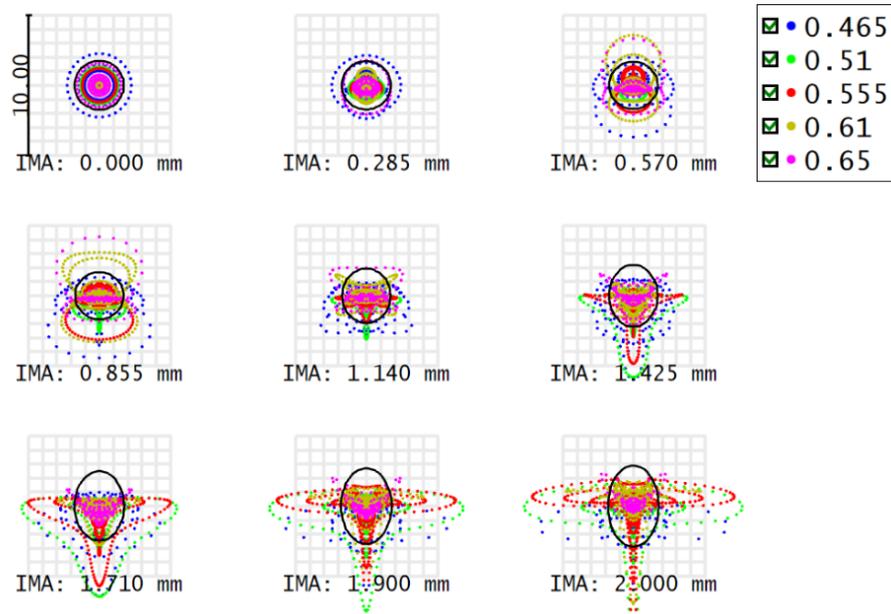


Figura 3.4: Spots sobre el plano del sensor de la lente diseñada. En negro, el límite por difracción. Los colores representan las diferentes longitud de onda.

todos los casos el valor obtenido es menor al radio del disco de Airy, por lo que puede decirse que la lente está limitada por difracción. En la figura 3.5 se observa la MTF calculada en los planos tangencial y sagital para diversas frecuencias. Teniendo en cuenta que para un sensor de píxel $1 \mu m$ la frecuencia de Nyquist es 500 cy/mm , para $Ny/4$ el contraste de la lente es del 70% aproximadamente.

En la figura 3.6, se evidencia el buen comportamiento de la lente en términos de la cromaticidad. La gráfica de la izquierda muestra la aberración cromática axial. Concretamente, se muestra la variación de la focal en función de la longitud de onda tomando como referencia la longitud de onda primaria que en este caso es 555 nm , como se indicaba en la tabla 3.1. La variación máxima de focal entre longitudes de onda por difracción es de $17 \mu m$, mientras que por aberraciones geométricas la lente presenta una variación máxima de $10 \mu m$. En la gráfica de la derecha observamos la aberración cromática lateral, que se representa mediante la variación máxima de la altura de los rayos con la longitud de onda en función

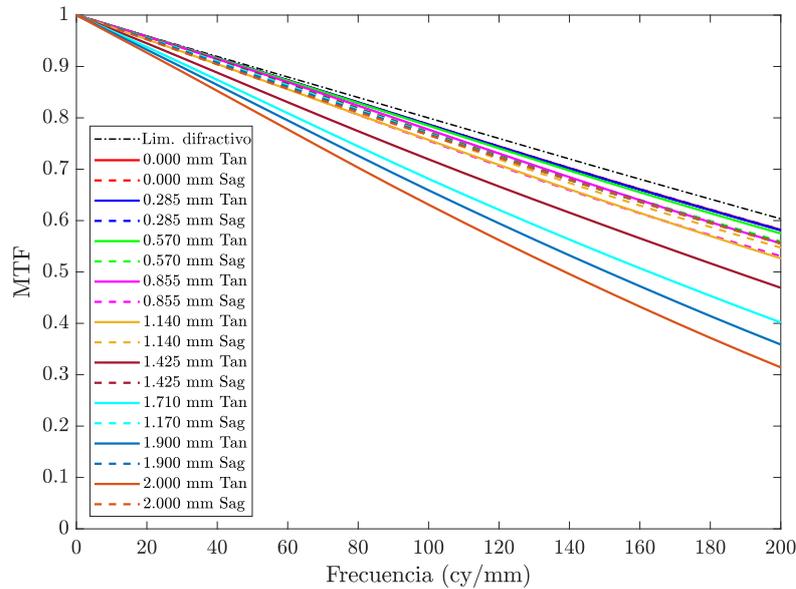


Figura 3.5: MTF de la lente diseñada. La línea punteada de color negro representa el límite difractivo.

de la IH en el sensor. Como se observa, dicha variación es menor en todos los casos que el límite difractivo que aparece en líneas punteadas.

En la figura 3.7 podemos observar la curvatura de campo de la lente (en la gráfica de la izquierda). Para representarla, se calcula la posición axial en que enfoca cada punto del campo tanto en el plano tangencial como en el plano sagital (dando cuenta esta diferenciación del asigmatismo). La línea de referencia se sitúa en el plano de foco paraxial y cada longitud de onda se dibuja en un color. Como podemos observar, ni siquiera en el campo central en que los rayos permanecen en todo momento cerca del eje óptico, el foco se sitúa en el plano predicho por la óptica paraxial. Esto es así porque en muchas ocasiones introducir desenfoque ayuda a corregir o encontrar un compromiso entre las demás aberraciones. No obstante, el cambio de foco es de unas $20 \mu m$, acercándose el foco real al comportamiento de aproximación paraxial o de primer orden. La máxima variación de foco entre el plano tangencial y sagital es de unas $20 \mu m$, lo que se traduciría en un cambio del *spot* producido en el plano de las microlentes de

3. Diseños de lentes principales para mini-cámaras plenópticas

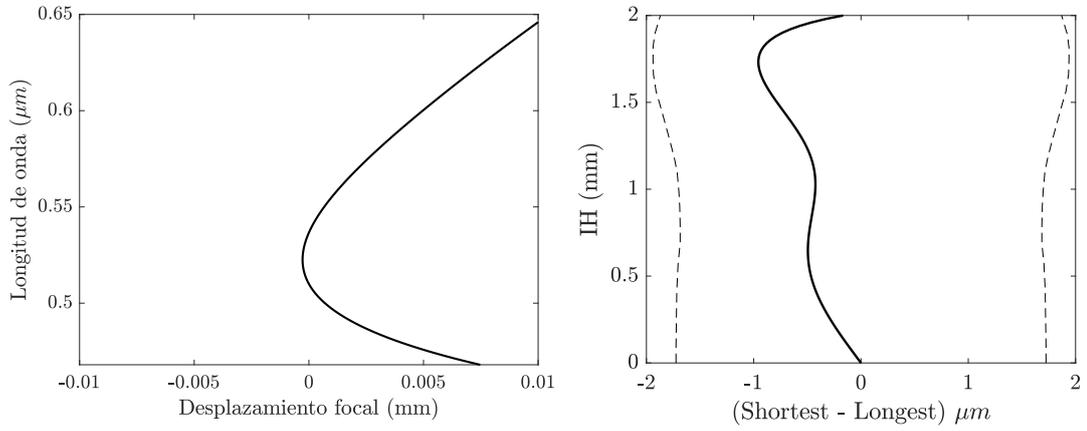


Figura 3.6: Aberración cromática axial (izquierda) y lateral (derecha). La línea punteada muestra el límite por difracción.

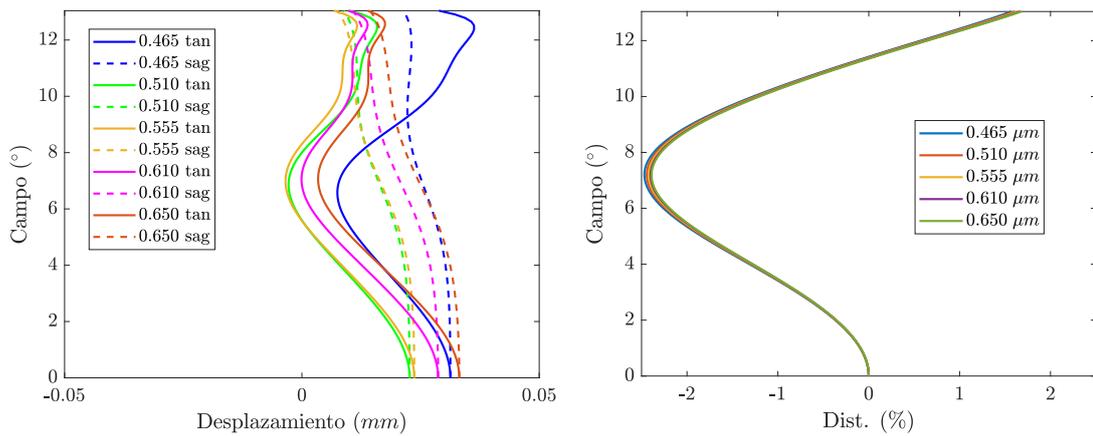


Figura 3.7: Curvatura de campo y astigmatismo (izquierda) y distorsión (derecha).

unas $3 - 4 \mu m$ de diámetro. Sería deseable reducir el astigmatismo al máximo, pero la solución obtenida presenta un buen compromiso entre el desempeño de la lente y sus parámetros ópticos fundamentales. En cuanto a la distorsión, que se representa en la gráfica de la derecha de la figura 3.7, observamos que esta se mantiene por debajo del 2,5% a lo largo de todo el campo, siendo este un valor bueno y aceptable para una lente de estas características.

La lente presenta viñeteado de la pupila, comenzando este a partir del 60% del IH de la lente y alcanzando una reducción de la pupila del 30% en el extremo del FOV, como se puede ver en la figura 3.4. El viñeteado de la pupila es común en las lentes de tipo telefoto en que es difícil corregir los campos extremos para toda la apertura. Esta reducción de la apertura se traduce en un WFNO más grande conforme aumenta el campo.

Para evaluar la capacidad de la lente objetivo diseñada a la hora de calcular profundidades, podemos utilizar la ecuación 2.6. Asimismo, comparar el desempeño de la lente aquí descrita con otras similares halladas en la bibliografía puede resultar provechoso. Asumiendo una misma distancia s , una misma matriz de microlentes (un mismo *pitch* $p_{\mu L}$) y un enfoque a infinito ($N_{\mu L|\infty} = 0$); podemos ver que cuanto mayor sea el producto $\phi_{PS}f$, menor error cometeremos en la estimación de distancias. En la tabla 3.3 se compara el potencial de la lente diseñada para medir distancias a lo largo del campo con las dos lentes telefoto más prometedoras encontradas en la bibliografía de las patentes [60,61].

Comparar lentes en estos términos no es una tarea sencilla, ya que muchos parámetros han de tenerse en cuenta; así pues, para llevar a cabo una comparación justa, los tres diseños se definen del mismo tamaño, escalando convenientemente las encontradas en la bibliografía. Asimismo, se define la apertura o el *WFNO* de manera que las tres lentes presenten una calidad del *spot* similar. Realizamos la comparación analizando diferentes puntos del campo, ya que, aunque es esperable

3. Diseños de lentes principales para mini-cámaras plenópticas

	Lente Objetivo	H_y norm.	$\phi_{PS} \cdot f$ [mm ²]	$(\phi_{PS} \cdot f)_{LD} / \phi_{PS} \cdot f$
LL_1	US2018/0088300A1	0	10,9	1,32
		0,5	10,1	1,37
		0,75	9,4	1,35
		1	8,8	1,16
LL_2	US2017/0146777A1	0	11,7	1,23
		0,5	11,3	1,22
		0,75	10,8	1,18
		1	9,4	1,09
LD	P202130334	0	14,4	1
		0,5	13,8	1
		0,75	12,7	1
		1	10,2	1

Tabla 3.3: Potencial de medida de distancias de diferentes lentes comerciales vs. la lente diseñada [60, 61, 67].

que el centro del sensor se comporte mejor, hemos de alcanzar suficiente calidad en los extremos si queremos diseñar una cámara funcional para todo su FOV. Para calcular el tamaño de la pupila de salida en función del campo, hacemos $\phi_{PSeq} = \phi_{PS}(1 - V_{field})$, donde ϕ_{PS} es el tamaño de la pupila de salida en el eje óptico y V_{field} es el factor de viñeteado de la pupila para un punto concreto del campo. Para calcular la focal equivalente en cada H_y , utilizamos la relación entre el ángulo de vista, la altura del rayo y la focal, a saber: $2 \tan(\alpha/2) = y'_{rayo}/f_{eq}$.

Como podemos observar en la tabla 3.3, la lente diseñada, a la que nos referimos como LD , presenta mayor potencial para medir distancias con menor error que las lentes de la literatura (etiquetadas como LL_1 y LL_2). Concretamente, y como se deriva de la ecuación 2.6, la proporción de productos $(\phi_{PSi} f_i) / (\phi_{PSj} f_j)$ da cuenta directa de la mejora o empeoramiento del error. Como vemos en la última columna de la tabla, para todos los campos la mejora que presenta la lente LD es como mínimo de un 10% con respecto a las otras dos lentes.

Por otro lado, en la ecuación 2.6 vimos que el error en la medida de distancias depende linealmente del error en la medida de microlentes iluminadas $\epsilon(N_{\mu L})$, y este error, según la figura 2.7, se puede entender como el error en la medida del

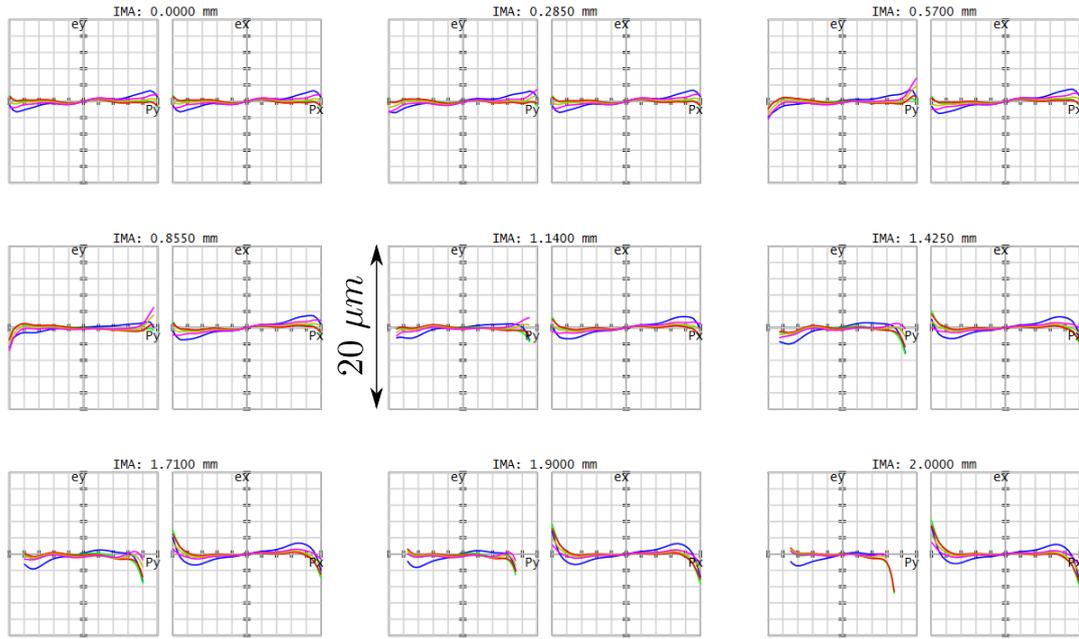


Figura 3.8: Error de rayo de la lente diseñada.

slope en las líneas epipolares. Como explicamos en la sección 2.3.2.2, la forma de las líneas epipolares está directamente relacionada con las gráficas del error de rayo, que nos permiten entender cómo nos afectan las diferentes aberraciones. Así pues, en una lente objetivo bien corregida en que el error de rayo sea muy bajo en el foco de la lente, los cambios de distancia de los objetos se traducirán en un desenfoque perfecto o casi perfecto, arrojando un bajo error en la medida del número de microlentes iluminadas y por tanto, un bajo error en la medida de distancias. Así pues, en la figura 3.8 podemos ver los errores de rayo para la lente diseñada para todos los campos H_y y todas las longitudes de onda. Teniendo en cuenta que la resolución de las líneas epipolares depende del *pitch* de microlente ($p_{\mu L}$), y este tiene un tamaño de entre $8 - 20 \mu m$, la lente está muy bien corregida para todos los campos y toda la extensión de la pupila.

Por último, para evaluar de manera más visual la precisión de la lente diseñada en comparación con otras lentes de la bibliografía, podemos ver en en la figura 3.9 la precisión de las tres lentes de la tabla 3.3 considerando únicamente la parte

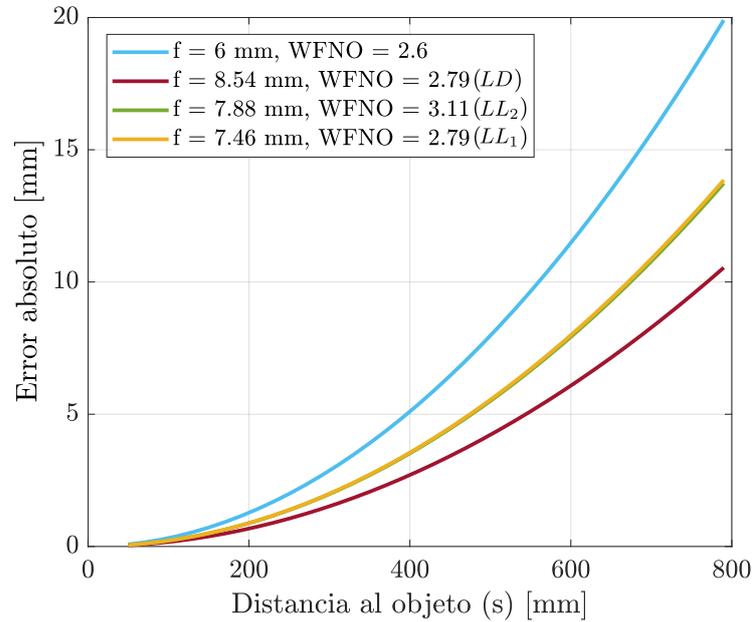


Figura 3.9: Error absoluto de la lente diseñada junto con el de otras lentes comerciales o de la bibliografía de patentes. Se etiquetan las lentes con el mismo código con el que se describen en la tabla 3.3.

central del campo y, de nuevo, siguiendo la ecuación 2.6. Como podemos observar, la mejor lente en términos de precisión es la diseñada y descrita en esta sección.

En conclusión, la lente objetivo presentada tiene una calidad óptica muy buena en cuanto a corrección de aberraciones y capacidad de medida de distancias se refiere si se utiliza como lente principal de una cámara plenóptica. Dadas sus especificaciones ópticas básicas como TTL, FOV o focal, es una buena candidata para aplicaciones de telefonía móvil en cámaras traseras como lente *zoom*. Enfocada a distancias cercanas puede utilizarse como lente para observar objetos con detalle y obtener alta precisión en el cálculo de los mapas de profundidad, una aplicación de amplio y reciente interés en el mercado de los *smartphones*. Asimismo, esta lente ejemplifica el límite inferior del factor telefoto que puede alcanzarse en una lente de tamaño inferior a 7 mm con una calidad óptica buena y un tamaño de sensor aceptable. La lente ha sido estresada en todas las direc-

ciones para disminuir al máximo el TR sin violar las reglas de fabricación, y es por ello un diseño que puede adaptarse con versatilidad para sensores más grandes si se relaja el requerimiento del $TR < 0,8$. Aunque la lente no alcanza las focales que podrían lograrse con diseños con espejos o prismas, tal y como hemos explicado en secciones anteriores, presenta un compromiso muy bueno entre calidad, longitud focal, WFNO, requerimientos de fabricación, manufacturabilidad y precio. En el Capítulo 5 analizaremos de forma detallada algunas consideraciones de manufacturabilidad de la lente descrita para mejorar su coste de fabricación y robustez ante tolerancias de fabricación.

3. Diseños de lentes principales para mini-cámaras plenópticas

Capítulo 4

Diseños de matrices de microlentes para mini-cámaras plenópticas

En el Capítulo 2 describimos sucintamente las características principales de la matriz de microlentes de una cámara plenóptica miniaturizada. La MLA es el elemento estructural más importante de la cámara plenóptica y ha de diseñarse concienzudamente, teniendo en cuenta no solo las características ópticas sino también los requisitos de fabricación. En este capítulo presentamos algunas de las dificultades que surgen en el diseño de la MLA como son las aberraciones o la disposición de las microimágenes en el sensor de imagen, y proponemos soluciones para lograr un funcionamiento mejorado del sistema plenóptico. Como ya mencionamos en el Capítulo 1, el análisis difractivo del comportamiento de las microlentes dentro de un sistema plenóptico presenta ciertos conflictos. En nuestro caso, tras comprobar experimentalmente la solvencia del modelo geométrico para el análisis de resultados de las cámaras fabricadas en Photonicsens, mantendremos en todo momento una descripción geométrica.

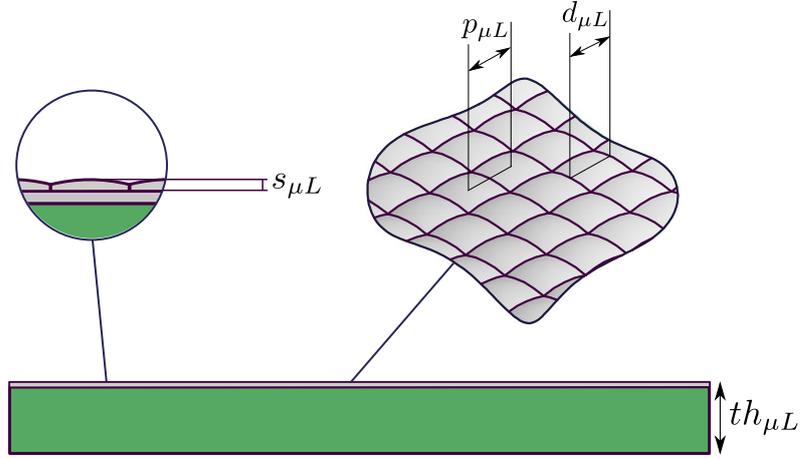


Figura 4.1: Esquema de los parámetros básicos de la matriz de microlentes.

4.1. Consideraciones generales

En la figura 4.1 se incluye un esquema de la matriz de microlentes con el fin de introducir los parámetros fundamentales de la misma. Esta MLA se comprende de un sustrato de grosor $th_{\mu L}$ y las microlentes propiamente dichas, que son fabricadas sobre dicho sustrato. El sustrato suele ser un cristal cuyas propiedades opto-mecánicas han de ser tenidas en cuenta en los diseños. Su inclusión es necesaria para dar estabilidad mecánica y servir de soporte sobre el cual se fabricarán las microlentes con diferentes técnicas: impresión, deposición, etc.

Las microlentes de la figura 4.1 son cuadradas en forma y distribución y presentan un factor de llenado casi del 100%, como se aprecia en el *layout* de la figura, ayudando esto a maximizar la recolección de luz. Otras formas son posibles: circulares, hexagonales, etc., no obstante, no todas ellas permiten este factor de llenado. La $s_{\mu L}$ representa la sagita de las microlentes, es decir, su altura con respecto al sustrato. Esta sagita dependerá directamente del radio de curvatura de las microlentes, que designamos como $ROC_{\mu L}$, y de su diámetro efectivo $d_{\mu L}$. La $p_{\mu L}$, ya descrita en secciones anteriores, corresponde al *pitch* de microlente, es

decir, a la distancia entre centros de microlentes adyacentes. Es importante notar que no en todos los casos $d_{\mu L}$ y $p_{\mu L}$ tienen por qué coincidir.

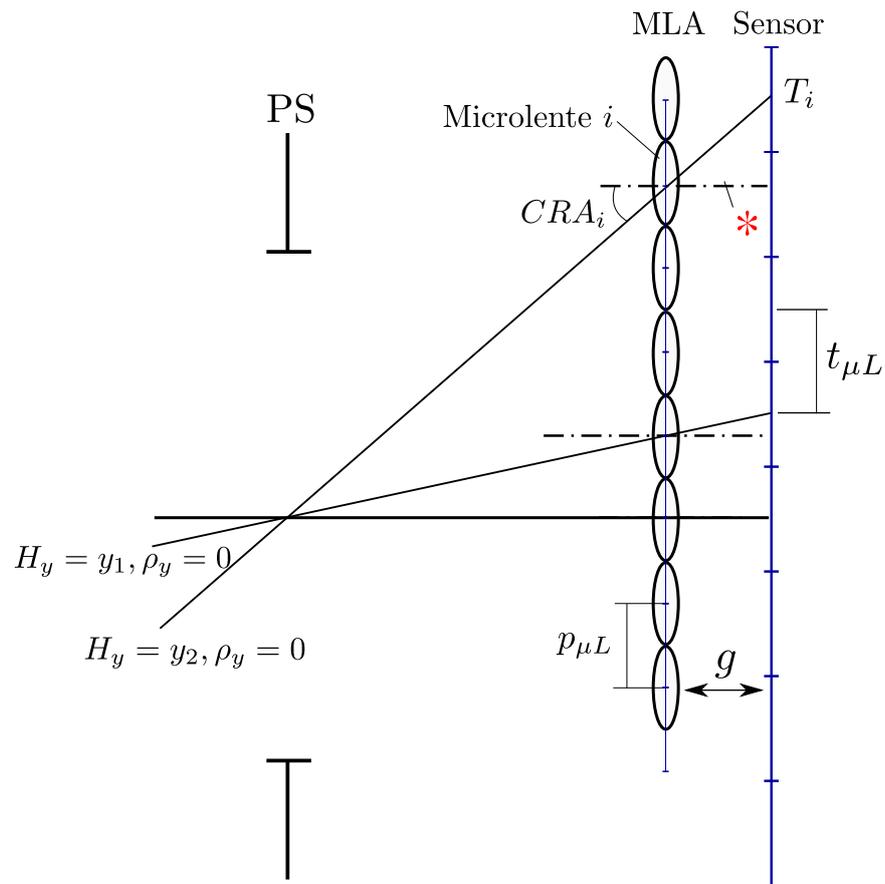
El número de microlentes que comprende una MLA es variable, ya que depende de parámetros del diseño como el tamaño de microimagen y el tamaño total del área activa del sensor. Típicamente, todas las microlentes de la matriz son iguales, es decir, tienen el mismo radio de curvatura, el mismo *pitch* y la misma forma y diámetro. Además, las microlentes son esféricas, ya que el uso de asferas u otras superficies complejas en dimensiones tan reducidas (unas pocas micras) no es sencillo y muchas veces tampoco conveniente, aunque pueden encontrarse trabajos en la bibliografía que describen matrices de microlentes asféricas [68,69].

4.2. Problemáticas en el diseño de MLAs para mini-cámaras plenópticas

Más allá de las dificultades que presentan las microlentes en miniatura a nivel de fabricación, en las cuales no vamos a entrar en detalle, identificamos dos problemas importantes a resolver si queremos que la cámara plenóptica funcione de la manera óptima a lo largo de todo el campo de vista de la cámara. Estos problemas son la deslocalización de las microimágenes y las aberraciones de las microlentes con el aumento del campo H_y .

4.2.1. Deslocalización de las microimágenes

Consideramos un sistema plenóptico en configuración 1.0 con comportamiento a primer orden diseñado sin solapamiento ni viñeteado de las microimágenes (i.e., el presentado en la figura 2.5). En este sistema, las microlentes que componen la MLA son homogéneas en *pitch* ($p_{\mu L}$). Asimismo, el tamaño de las microimágenes ($t_{\mu L}$) es constante a lo largo del sensor. Dado que existe un aumento entre el plano



*Eje óptico local de la microlente i

Figura 4.2: Esquema de la localización de los centros de las microimágenes en una cámara plenóptica 1.0 con comportamiento a primer orden [70].

de la MLA y el plano del sensor al estar estos separados una distancia g , se cumple que $t_{\mu L} > p_{\mu L}$. Esto implica que la línea que une el centro de una microlente con el centro de su microimagen asociada no es paralela al eje óptico, tal y como podemos observar en la figura 4.2. La posición del centro de la microimagen i -ésima, T_i , puede escribirse en función del CRA_i , que es el ángulo formado por el eje óptico local de la microlente i y el rayo que atraviesa la lente principal con $\rho_y = 0$ y el centro de la microlente i , tal y como se indica en la figura 4.2. De esta manera, el CRA_i constituye una discretización del CRA de la lente principal del sistema. En este caso de comportamiento a primer orden, la función $\tan(CRA_i)$ es lineal. Así pues, podemos decir que la microimagen i -ésima se situará en el sensor en la posición T_i según la ecuación:

$$T_i = ip_{\mu L} + g \tan(CRA_i) = ip_{\mu L} + g k i = (p_{\mu L} + g k) i = t_{\mu L} i \quad (4.1)$$

donde i es un contador de microlentes, $p_{\mu L}$ y g han sido definidos anteriormente y $\tan(CRA_i) = k i$, siendo k una constante que viene determinada por los parámetros geométricos de la cámara. Puesto que $p_{\mu L}$, g y k son constantes, las microimágenes quedarán equiespaciadas en el sensor, teniendo estas un tamaño constante $t_{\mu L}$, tal y como ya habíamos descrito.

En los sistemas de lentes reales la función $\tan(CRA_i)$ no crece de manera lineal, sino que puede presentar múltiples comportamientos, rompiendo esto la periodicidad de las microimágenes. En la figura 4.3 se muestra el CRA de la lente telefoto *inline* descrita en la sección 3.3.3 del Capítulo 3. La línea discontinua marca el comportamiento ideal equivalente de la lente, es decir, aquel que presentaría la lente si se comportase a lo largo de todo el campo como lo hace en el centro del mismo. Dicho comportamiento dista bastante del comportamiento

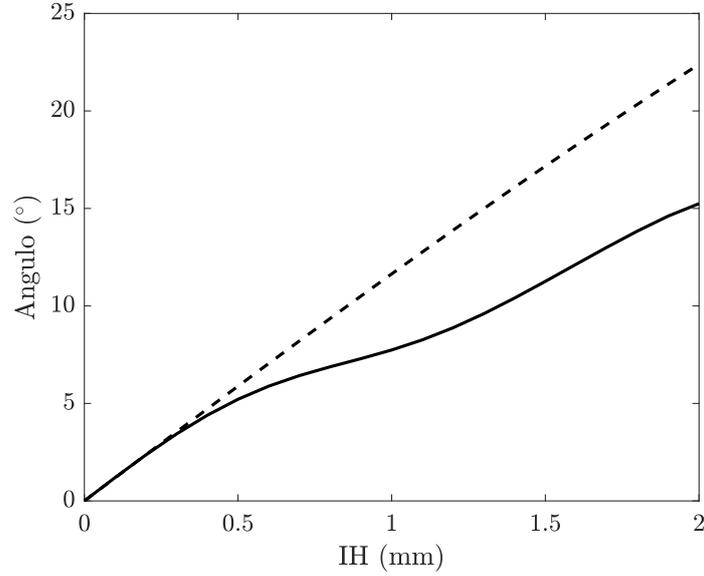
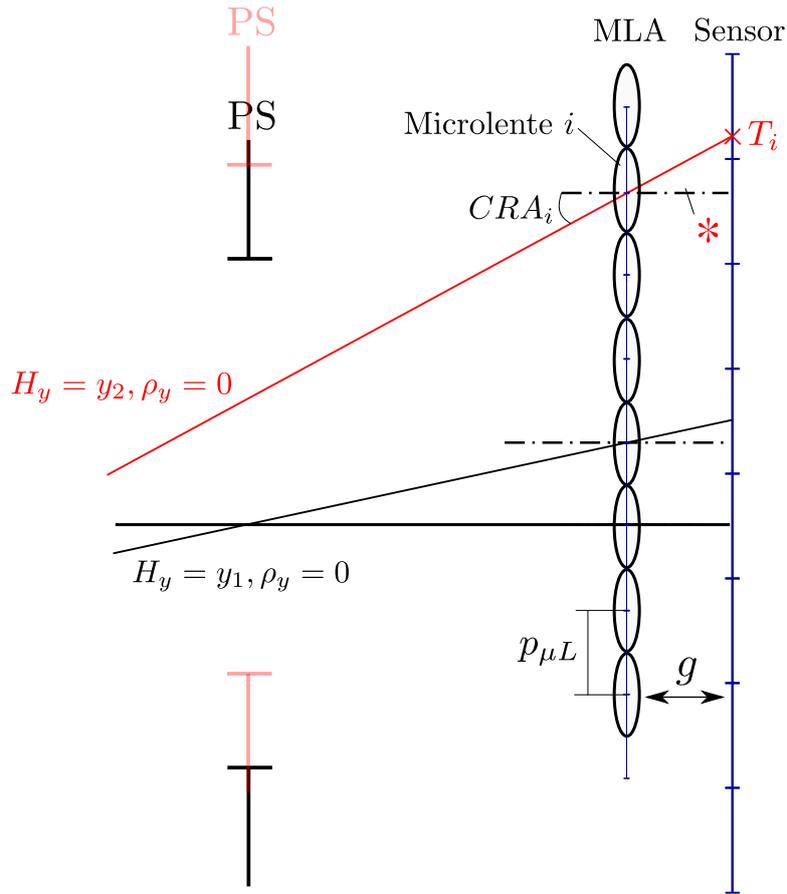


Figura 4.3: CRA de la lente telefoto diseñada. Se muestra en línea discontinua el CRA del sistema equivalente a primer orden.

real, siendo ambos coincidentes en la zona cercana al eje óptico, donde $H_y \approx 0$ y reina el comportamiento de primer orden. Si construimos una cámara plenóptica 1.0 con una lente cuyo CRA corresponde al de la figura 4.3 y cuya matriz de microlentes presenta un *pitch* constante a lo largo de todo el campo, el centro de las microimágenes T_i se sitúa en:

$$T_i = ip_{\mu L} + g \tan(CRA_i) \quad (4.2)$$

y dado que el CRA_i sigue el comportamiento de la figura 4.3, las microimágenes no quedarán equiespaciadas en el sensor, tal y como podemos ver en la figura 4.4, donde el rayo de luz coloreado en rojo incide sobre la microlente i con un ángulo CRA_i tal que la posición T_i de la microimagen resulta más baja de lo que habría sido en el caso de comportamiento ideal. Este hecho puede dar lugar a solapamientos, lo que dificulta la localización de las microimágenes haciendo necesario el uso de algoritmos o técnicas de calibración costosas.



* Eje óptico local de la microlente i

Figura 4.4: Esquema de la localización de los centros de las microimágenes en una cámara plenóptica 1.0 con un UBL real [70]. Las subdivisiones en azul del sensor muestran una distribución de microimágenes ideal y equiespaciada a lo largo de todo el sensor.

4.2.2. Aberraciones de las microlentes

Las microlentes, constituidas por una única superficie esférica, presentan aberraciones que pueden ser muy perjudiciales conforme aumenta el ángulo de incidencia sobre las mismas, algo que sucede conforme aumenta H_y , tal y como puede verse en las figuras 4.4 y 4.3. En la figura 4.5b se muestra la calidad del *spot* producido por una microlente de las características descritas en el apartado 4.1 para varios haces de luz planos que inciden con ángulos diferentes sobre la microlente.

Podemos ver que para un ángulo de incidencia de cero grados, el *spot* obtenido es bastante bueno, aunque sufre de aberración esférica. Conforme aumenta el ángulo de incidencia, aberraciones como el coma y la curvatura de campo dominan. Para un ángulo de incidencia de 30° el *spot* es inaceptable. Es una buena práctica mantener el CRA de la lente principal lo más bajo posible, para mejorar el comportamiento de las microlentes. En la lente telefoto *inline* descrita en la sección 3.3.3, el CRA máximo no supera los 15° , siendo esto beneficioso para el comportamiento de las microlentes. No obstante, en muchas ocasiones este control del CRA no es posible, sobre todo si intentamos diseñar cámaras con FOVs elevados. Asimismo, hemos de tener en cuenta que, aunque el CRA se mantenga bajo, cada microlente recibe luz de todas partes de la pupila de salida de la lente principal y los rayos marginales ($\rho_y = \pm 1$) podrán subtender ángulos más elevados con respecto al eje óptico local de la microlente que el *chief ray*, empeorando la calidad de las microimágenes.

4.3. Diseños propuestos

A continuación, presentamos algunas soluciones a los problemas anteriormente descritos. Estas soluciones, de tipo construccional, afectarán al diseño y fabrica-

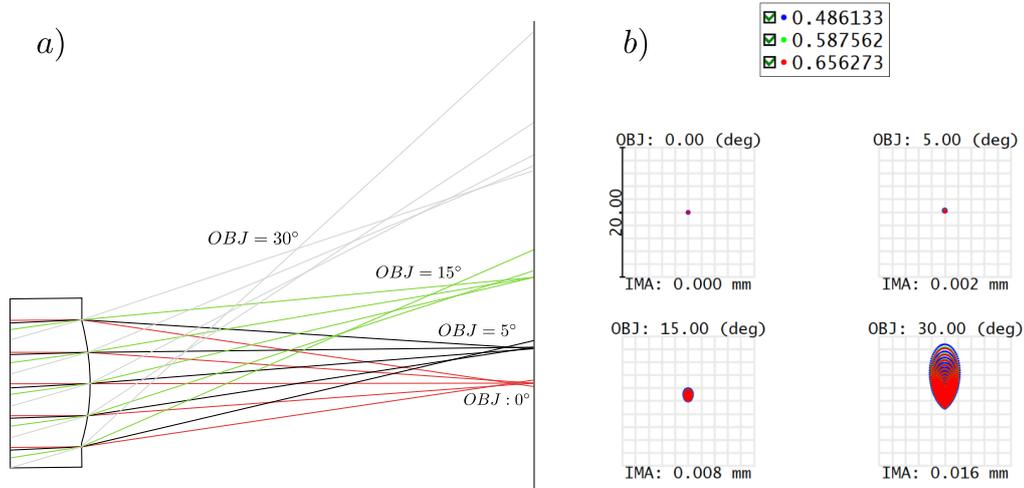


Figura 4.5: a) Trazado de rayos para diversos ángulos de incidencia sobre una microlente b) Spots producidos en el sensor por una microlente que recibe rayos de diversos ángulos de incidencia, además se muestran en tres colores tres longitudes de onda.

ción de la matriz de microlentes que dejará de tener *pitch* constante a lo largo del campo y cuyas microlentes presentarán una inclinación progresiva de su eje óptico local con respecto al eje óptico principal del sistema.

4.3.1. *Pitch* variable

Como explicamos en la sección 4.2.1, debido a la no linealidad de la tangente del CRA de la lente principal, las microimágenes no van a estar equiespaciadas en el sensor. El hecho de que las microimágenes tengan periodo constante resulta especialmente conveniente en los procesos de calibración ya que acelera los cálculos de decodificación del LF y reduce el error cometido por los algoritmos de búsqueda de centros. Para lograr microimágenes equiespaciadas sin modificar la curva de CRA de la lente principal, proponemos alterar la periodicidad de los centros de las microlentes convenientemente, pudiendo recuperar así la periodicidad en las microimágenes [70].

Así pues, vamos a imponer que para todo i la nueva posición de las micro-

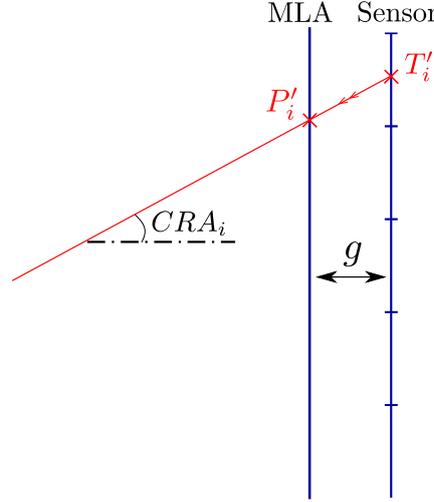


Figura 4.6: Partiendo de microimágenes periódicas en el sensor, desde el centro de cada microimagen trazamos un rayo con $\rho_y = 0$ para encontrar la posición de los centros de las microlentes en el plano de la MLA.

imágenes se sitúe en $T'_i = t_{\mu L} i$, tal y como vemos en la figura 4.6. Puesto que podemos conocer el CRA de la lente principal en cada posición T'_i , la nueva posición del centro de cada microlente vendrá dada por:

$$P'_i = it_{\mu L} - g \tan(CRA_i) \quad (4.3)$$

donde P'_i se refiere a la nueva posición de la microlente i -ésima, i es un contador de microlentes, $t_{\mu L}$ se refiere al tamaño de microimagen calculado para el sistema a primer orden, y por tanto constante; g es la separación entre la matriz de microlentes y el sensor y CRA_i es el CRA en la microimagen i .

Tomando como referencia el comportamiento del CRA descrito en la figura 4.3, en la figura 4.7 se muestran dos microlentes ($i, i-1$) con sus correspondientes microimágenes asociadas coloreadas en rojo y negro antes de realizar ninguna corrección. Los centros de las microlentes se sitúan en P_{i-1} y P_i , y los centros de sus microimágenes asociadas en T_{i-1} y T_i . Como podemos ver, ambas microimágenes solapan ligeramente debido al comportamiento del CRA . Utilizando la ecuación

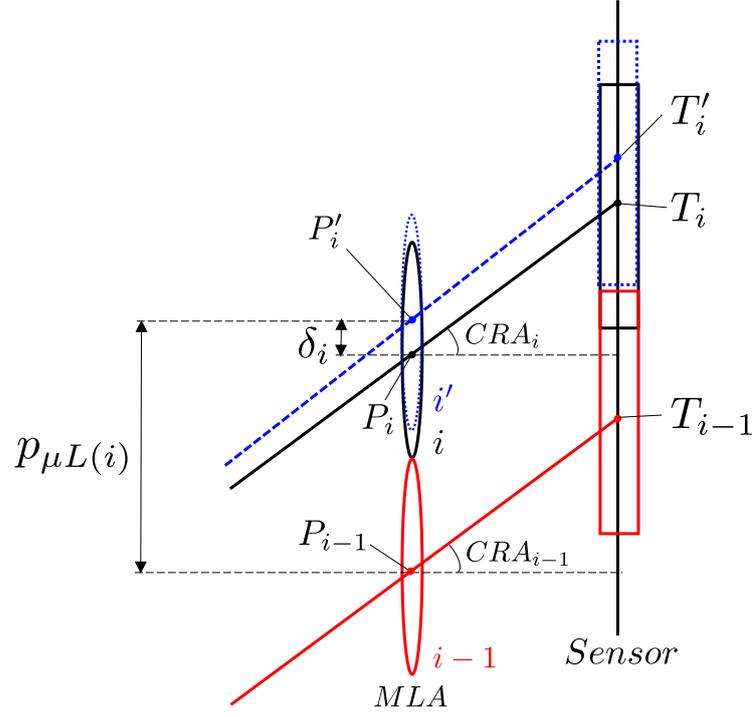


Figura 4.7: Ejemplo de la corrección del centro de una microlente para lograr microimágenes equiespaciadas para la lente telefoto diseñada en el Capítulo 3.

4.3, observamos que el centro de la microlente i se desplaza a la posición P'_i , produciendo ahora una microimagen centrada en T'_i que ya no sufre de *overlap* con respecto a su microimagen contigua. Tras la corrección, las microimágenes quedan equiespaciadas, pero no sucede así con los centros de las microlentes que pasan a tener una distribución irregular en la que $p'_{\mu L(i+1)} > p'_{\mu L(i)} > p'_{\mu L(i-1)} \dots$, donde se define $p'_{\mu L(i)} = P'_i - P'_{i-1}$ y donde P'_i se refiere la posición de la microlente i tras sufrir la corrección. Así pues, el nuevo *pitch* de microlente crece conforme aumenta H_y . Esto puede demostrarse analizando el cambio de posición δ_i que sufren las microlentes, que viene dado, según las ecuaciones 4.2 y 4.1 por:

$$\delta_i = P'_i - P_i = it_{\mu L} - g \tan(CRA_i) - i(t_{\mu L} - gk) = g[ki - \tan(CRA_i)] \quad (4.4)$$

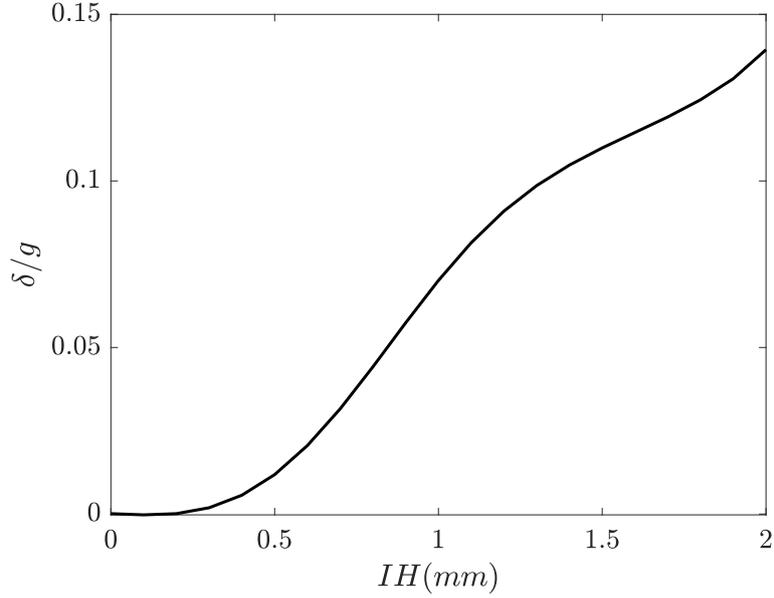


Figura 4.8: Corrección de los centros de las microlentes en función del campo.

donde $[ik - \tan(CRA_i)]$ es una función positiva y monótonamente creciente, como se puede deducir de la figura 4.3. Esto quiere decir que el CRA de la lente principal a primer orden es mayor que el CRA real de la lente y además la diferencia entre ambos aumenta conforme aumenta H_y . Si dibujamos la corrección según la ecuación 4.4 para el caso de la lente descrita en la sección 3.3.3, obtenemos la figura 4.8, corroborando que esta es positiva y creciente. Así pues, dado que $\delta_{i+1} > \delta_i$, se cumplirá que $p_{\mu L(i+1)} > p_{\mu L(i)}$. Es importante advertir que esta conclusión es contingente y que casos con diferentes comportamientos del CRA podrían dar lugar a correcciones δ_i decrecientes con H_y , haciendo que $p_{\mu L(i+1)} < p_{\mu L(i)}$.

Para todas las ecuaciones descritas en esta sección, hemos utilizado la aproximación de lente delgada a la hora de describir las microlentes; no obstante, las microlentes reales son esféricas con un $ROC_{\mu L}$ determinado que ha de tenerse en cuenta en la ecuación 4.3, que quedaría:

$$P'_i = it_{\mu L} - (g + ROC_{\mu L}) \tan(CRA_i) \quad (4.5)$$

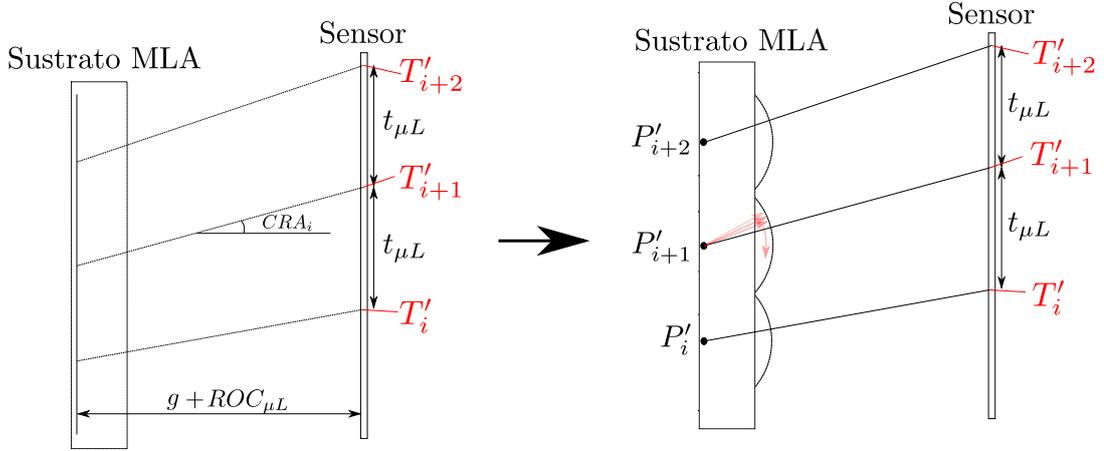


Figura 4.9: Diseño de una MLA esférica con pitch variable.

En la figura 4.9 se muestra la aplicación de la ecuación 4.5 para diseñar los centros de las microlentes en un caso real. De manera análoga a la figura 4.6, en el esquema de la izquierda se señalan las posiciones de los centros de las microimágenes periódicas T'_i sobre el sensor. Asimismo, se conoce el CRA de la lente principal en cada posición T'_i . Ahora, solo tendremos que propagar el rayo principal hacia atrás una cantidad $g + ROC_{\mu L}$ para encontrar el nuevo P'_i . Este rayo atravesará perpendicularmente la superficie esférica de la microlente y, por tanto, no se desviará. Desde el nuevo centro P'_i , dibujaremos las microlentes de radio $ROC_{\mu L}$, tal y como se ve en la parte derecha de la figura 4.9.

4.3.1.1. Tamaño y máscaras de cromo

Como hemos explicado y demostrado en la sección 4.3.1, la corrección aplicada al *pitch* de las microlentes puede hacer que los centros de las mismas estén cada vez más separados conforme aumenta H_y . Esto hace que, si no se reajustan los diámetros de las microlentes, haya huecos (gap_i) entre ellas que serán también más grandes conforme aumenta H_y . Entre estos huecos pasará luz que no será refractada por la MLA, pero que habrá sido previamente enfocada por la lente principal. Esta luz llegará al sensor y ensuciará las microimágenes, haciendo

que estas pierdan contraste. Para solucionar este problema pueden ajustarse los diámetros de las microlentes, de manera que no existan los huecos gap_i , o si esto resulta complicado, pueden pintarse con una máscara de cromo los huecos entre las diferentes microlentes. La máscara de cromo será opaca, de manera que la luz que llegue a las zonas no activas será absorbida y no ensuciará el sensor [70, 71].

4.3.2. Inclinación de las microlentes

Puesto que las aberraciones de las microlentes aumentan de manera drástica conforme la incidencia de los rayos es más oblicua con respecto al eje óptico local de la microlente, una buena solución consistiría en inclinar las microlentes convenientemente de manera que se reduzca el CRA_i efectivo. Este tipo de soluciones para sistemas que utilizan MLAs ya han sido propuestas en la bibliografía [71–74]. Así pues, adaptamos la idea al caso plenóptico e inclinamos cada microlente de manera que su eje óptico local coincida con su CRA_i (medido con respecto al eje óptico de la lente principal). En la figura 4.10 podemos ver un ejemplo de la matriz de microlentes tras el proceso de *tilt*¹. En esta figura se define el grado de *tilt* con el ángulo α_i que coincide con el CRA_i [70].

Como puede apreciarse en la figura 4.10, al haber inclinado las microlentes se abren huecos entre ellas en los que habrá que construir paredes que, para evitar que la luz refleje en ellas, sería conveniente que tuvieran la inclinación del CRA de la lente principal en ese punto. En la figura 4.11a se muestra una vista 2D de la matriz de microlentes inclinadas con diferentes zonas resaltadas (a, b, c, d) correspondientes a diferentes campos (a) $H_x = 0, H_y = 0$; b) $H_x = 0, H_y = 0,4$; c) $H_x = 0, H_y = 0,7$; d) $H_x = -1, H_y = 1$). Las siguientes figuras 4.11b-c muestran tres perspectivas 3D diferentes de las zonas resaltadas en la figura 4.11a con el objeto de ilustrar de manera más realista el resultado de la operación de

¹Inclinación.

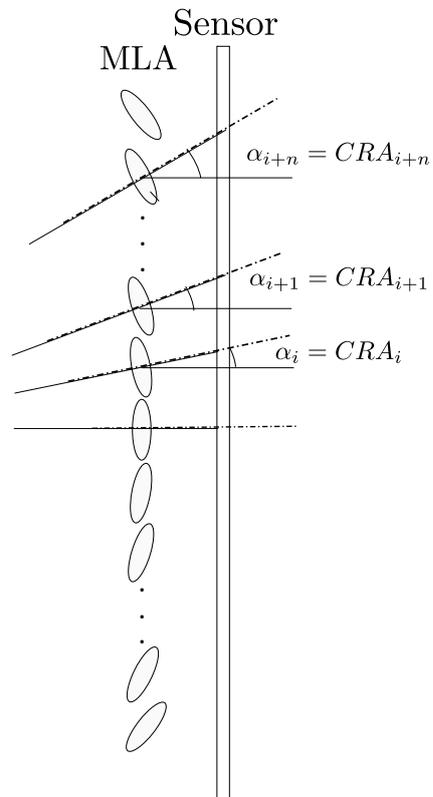


Figura 4.10: Inclinación de las microlentes siguiendo el CRA_i para disminuir las aberraciones por incidencia oblicua.

tilt. En la figura 4.11b se señalan explícitamente los ángulos de inclinación en cada eje. El ángulo α designa la inclinación con respecto al eje y y el ángulo β con respecto al eje x . Como podemos ver, puesto que para las zonas (a, b, c) la $H_x = 0$, el ángulo β para estas mismas zonas es cero.

A modo de ejemplo, en las figuras 4.11b-c se muestra también la herramienta torneadora que se puede utilizar para producir los moldes con los que, posteriormente, fabricar las matrices de microlentes en serie. Una microlente esférica inclinada se puede entender como una lente en la que el vértice y el centro no se sitúan en la misma posición con respecto al plano del sensor; por tanto, inclinar las microlentes es equivalente a desplazar el vértice de las mismas con respecto a su centro hasta que se alcanza el CRA_i deseado. Con esta estrategia se puede diseñar el molde que posteriormente servirá para construir las microlentes; no obstante, esta no es la única manera de fabricar microlentes inclinadas y otras muchas pueden ser utilizadas [71, 75].

En la figura 4.12 se muestra una microlente que recibe luz colimada con una inclinación de 5° , 15° y 25° . Como podemos ver, los rayos que presentan un mejor foco son los que inciden con un ángulo de 5° . Los rayos con inclinaciones de 15° y 25° sufren de una fuerte aberración de coma, así como de curvatura de campo. Si inclinamos la microlente 10° , la calidad de los tres puntos de foco, correspondientes a cada uno de los ángulos de incidencia, se equilibra. Ahora, el punto de mejor foco corresponde al de los rayos que inciden con 10° , como era de esperar. No obstante, la operación de inclinación de la lente no consigue eliminar por completo las aberraciones de campo. Ayuda notablemente a reducir el coma, pero no sucede lo mismo con la curvatura de campo. Esto es así porque el sensor de imagen no se inclina solidariamente con la microlente. A pesar de que los puntos de foco tras inclinar la microlente no son perfectos, la calidad de los mismos ha mejorado, demostrando que la operación de *tilt* resulta provechosa.

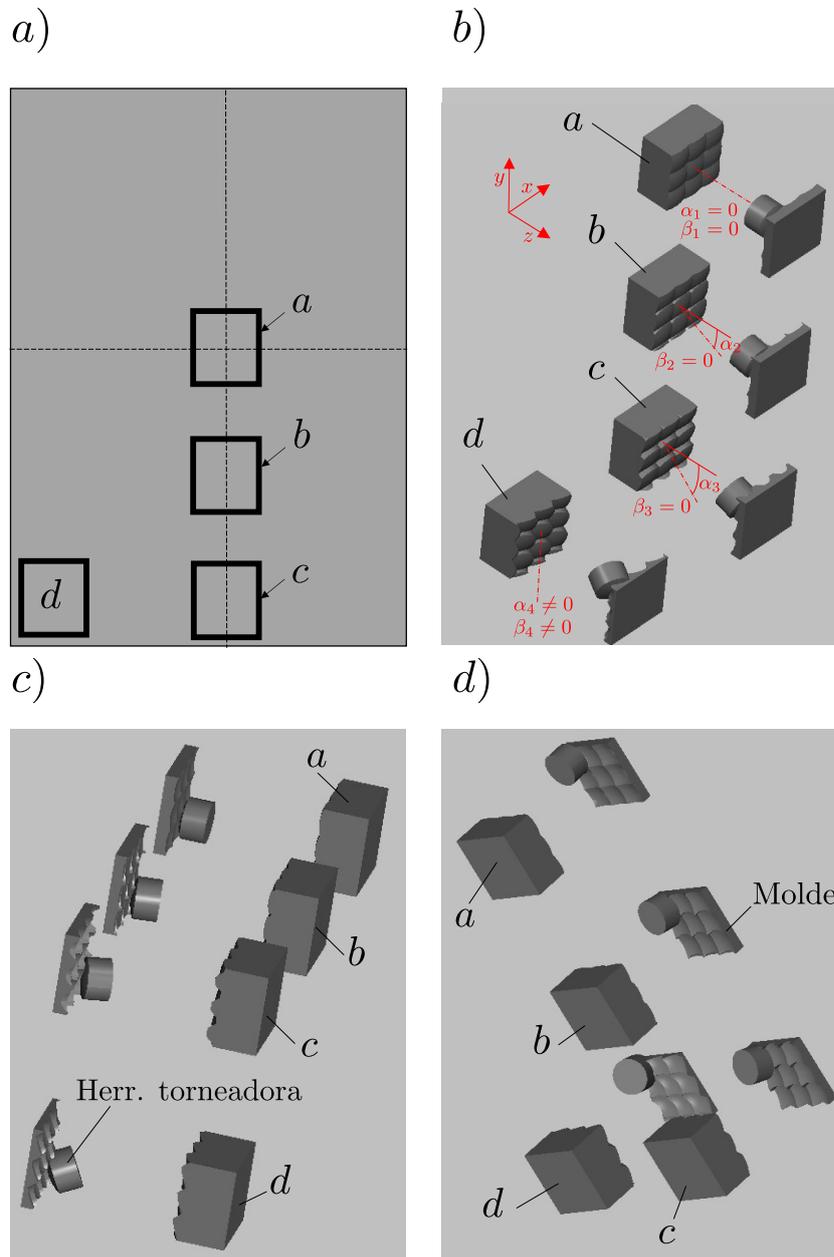


Figura 4.11: Ejemplo de diseño de una matriz de microlentes inclinadas de manera que se reducen las aberraciones por incidencia oblicua, a) vista 2D; b), c) y d) tres perspectivas 3D del diseño propuesto.

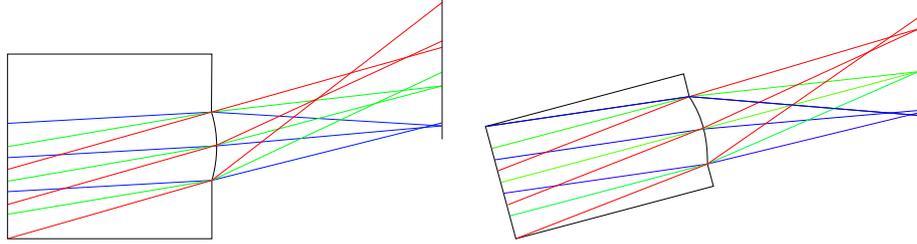


Figura 4.12: Muestra del cambio de la calidad de foco de una microlente al inclinarse según el ángulo de la luz que recibe.

Este mismo razonamiento puede ser extrapolado al caso de la cámara plenóptica, en que la microlente, en lugar de recibir luz colimada, recibe luz enfocada por la lente principal con un ángulo principal (CRA_i).

4.3.3. *Pitch* variable e inclinación de las microlentes

Los dos diseños propuestos para conseguir microimágenes equiespaciadas en el sensor y para reducir las aberraciones producidas por la incidencia oblicua de los rayos sobre las microlentes pueden ser implementados de manera independiente, pero también conjuntamente. El efecto sinérgico de combinar ambas técnicas existe, ya que, reduciendo las aberraciones de las microimágenes a la vez que situándolas de manera equiespaciada, se aligeran de forma considerable los algoritmos de reconstrucción del LF a la vez que mejora la calidad de las estimaciones de profundidad obtenidas, ya que las epipolares estarán mejor definidas, menos aberradas y será más fácil construirlas.

Capítulo 5

Consideraciones de fabricación de mini-cámaras plenópticas

Una vez diseñados los elementos que componen la mini-cámara plenóptica, estos deben ser fabricados y ensamblados dando lugar a un módulo de cámara compacto y robusto. En la figura 5.1 se muestra un ejemplo de una mini-cámara plenóptica fabricada en Photonicsens. En el presente capítulo se discuten algunas consideraciones de fabricación sobre la lente principal y las microlentes y sobre el ensamblaje de ambos componentes en el módulo final con el fin de desensibilizar la óptica del sistema ante tolerancias de fabricación y efectos térmicos.

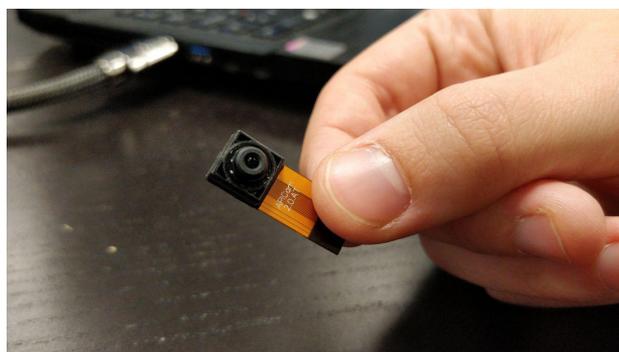


Figura 5.1: Módulo de apiCAM diseñado por Photonicsens para telefonía móvil.

5.1. Fabricación de la lente principal

En la sección 2.3.2 describimos algunos aspectos de fabricación importantes, como los materiales a utilizar o los tamaños y ratios de las lentes. Lo hicimos así puesto que el diseño *inline* telefoto presentado con detalle en el Capítulo 3 está concebido desde el inicio como un diseño para ser fabricado. No tiene sentido realizar diseños teóricos que no vayan a poderse llevar a la práctica, o, de hacerlo, tengan que sufrir modificaciones muy sustanciales dando lugar a diseños diferentes y requiriendo, por tanto, de numerosas iteraciones para llegar a una solución buena para el diseñador óptico y para el fabricante.

No obstante, respetar las reglas de manufacturabilidad de la tecnología IMPO no garantiza que las lentes diseñadas sean robustas ante tolerancias de fabricación. Tras completar un diseño óptico que satisface las especificaciones definidas es necesario hacer un análisis de tolerancias y en algunos casos esto puede requerir de un rediseño [30, 76].

Los procesos de fabricación y estrategias de alineamiento en lentes plásticas en miniatura han mejorado mucho en los últimos 20 años dando lugar a barriles de lentes muy precisos. En estos sistemas, las tolerancias más difíciles de controlar son los descentramientos e inclinaciones de los elementos. Esto es así debido a que los diferentes elementos se insertan en el sostenedor del barril de lentes o *barrel lens holder* con la ayuda de una herramienta de inserción, siendo este proceso menos preciso que el de la propia fabricación de cada uno de los elementos. Para ayudar en la inserción de los mismos sin dañarlos se fabrican los llamados *flanges*. Estos bordes de las lentes cumplen una función puramente estructural. El *holder* es una estructura plástica (generalmente de policarbonato) que sirve para sujetar las diferentes lentes que componen el barril, permitiendo que el conjunto sea una estructura sólida y robusta [20]. En la figura 5.2 se ilustran los diferentes elementos descritos de manera esquemática y en la figura 5.3 podemos ver el

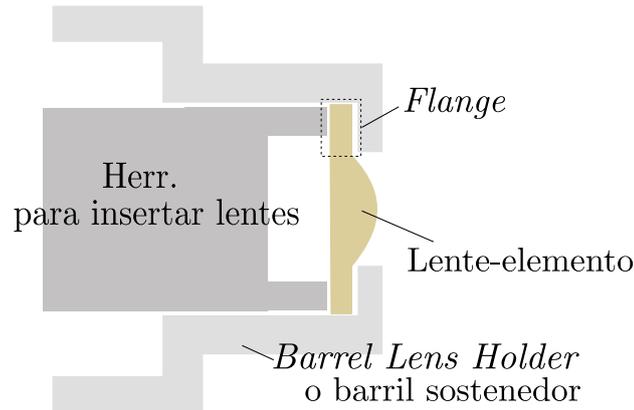


Figura 5.2: Barril sostenedor del UBL en el que la primera lente elemento es insertada gracias a la herramienta de inserción.

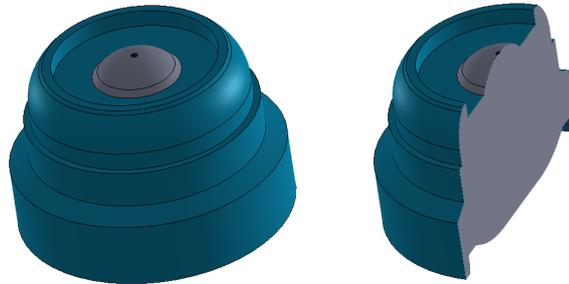


Figura 5.3: UBL (Upper Barrel Lens) completo.

layout del barril de lentes completo.

5.1.1. Desensibilización de la lente ante perturbaciones

Casi todos los diseños de lentes en miniatura coinciden en el hecho de que sus superficies ópticas están definidas por asferas pares (ver ecuación 2.8) con altos órdenes de asfericidad. En los diseños de la literatura es típico encontrar lentes objetivo con muchos coeficientes esféricos y de órdenes muy altos, llegando hasta orden 16 ($\alpha_{16}r^{16}$, con r la coordenada radial) [77]. No obstante, el uso sin control de tantos coeficientes esféricos puede dar lugar a sistemas poco robustos [78]. La trayectoria que sigue un haz de luz desde un punto objeto cambia cuando un elemento está descentrado o inclinado. Como consecuencia, partes de ese haz pueden atravesar regiones de los elementos que no atravesaban cuando el siste-

ma no estaba alterado, especialmente en la periferia de las lentes, en que zonas fuera de la *clear aperture* (CA) de la lente pueden recibir luz. El uso de muchos coeficientes esféricos es especialmente peligroso en estas regiones, ya que la sagita o la pendiente de la superficie (que no se controlan en la optimización) pueden dispararse [79]. Algunos estudios han demostrado que describir las superficies con polinomios de Forbes [80,81] puede dar lugar a mejores lentes *as-built*. Otros estudios han probado que el uso de superficies *free-form* [82], como las curvas pedal [83], puede ser beneficioso para obtener lentes robustas ante perturbaciones. En nuestro caso, mantenemos la descripción de asfera par, por su uso extendido en la industria, pero propondremos métodos para reducir el impacto del uso de un número alto de coeficientes esféricos.

Por otra parte, en la literatura se han propuesto muchos métodos de desensibilización [51,84,85]. No obstante, todos estos métodos buscan encontrar soluciones poco sensibles a tolerancias modificando todos o prácticamente todos los parámetros constructivos de las lentes, haciendo que varíe sustancialmente el *layout* final del sistema óptico. En los métodos que proponemos en este capítulo nos centraremos en desensibilizar una lente objetivo sin variar drásticamente su *layout* siendo esto beneficioso para reducir las iteraciones de diseño y para facilitar la comunicación entre diseñadores y fabricantes.

5.1.1.1. Análisis de tolerancias

El primer paso para desensibilizar una lente objetivo es hacer un análisis de tolerancias. Dicho análisis puede hacerse en *Zemax Optic Studio*, que ofrece una herramienta potente de análisis de sensibilidades permitiéndonos encontrar qué tolerancias afectan más al sistema. Asimismo, también nos permite realizar un análisis estadístico mediante métodos de Montecarlo [86]. El objetivo final del estudio de tolerancias es desensibilizar al máximo posible el sistema óptico ante

Tolerancias de los elementos	
Parámetro	Tolerancia
Descentramiento X	0,01 mm
Descentramiento Y	0,01 mm
Inclinación X	0,1°
Inclinación Y	0,1°

Tabla 5.1: Tolerancias para el análisis.

irregularidades en la fabricación sin perder de vista el coste extra que pueda suponer esto en la línea de producción, buscando encontrar un balance apropiado entre coste y *yield*¹ [87].

En la tabla 5.1 se resumen los valores de las tolerancias de ensamblaje a analizar. Estos valores corresponden a los parámetros concretos de una fábrica y pueden oscilar entre diferentes fabricantes. Como hemos mencionado, las tolerancias de ensamblaje (descentramiento e inclinación de los elementos) suelen ser las más críticas, por lo que realizamos el análisis únicamente con estas.

Antes de comenzar el análisis es conveniente definir los campos \vec{H} de manera que H_x y H_y se muestreen de manera simétrica. La pérdida de simetría axial por las perturbaciones introducidas hace que aparezcan aberraciones que solamente guardan simetría planar [88] por lo que es útil analizar el comportamiento de la lente en ambos planos XZ e YZ .

El criterio que vamos a utilizar para analizar la pérdida de calidad debido a las tolerancias será la media de la MTF tangencial y sagital para una frecuencia de 30 *cy/mm*. Asimismo, utilizaremos un compensador de foco; es decir, permitiremos al programa ajustar ligeramente la longitud focal trasera (BFL) del sistema para encontrar el plano de mejor foco. Este compensador es típico ya que las lentes para telefonía móvil suelen tener mecanismos de autofocus [21].

Teniendo en cuenta estas consideraciones, procedemos a realizar el análisis de

¹Rendimiento de un proceso industrial.

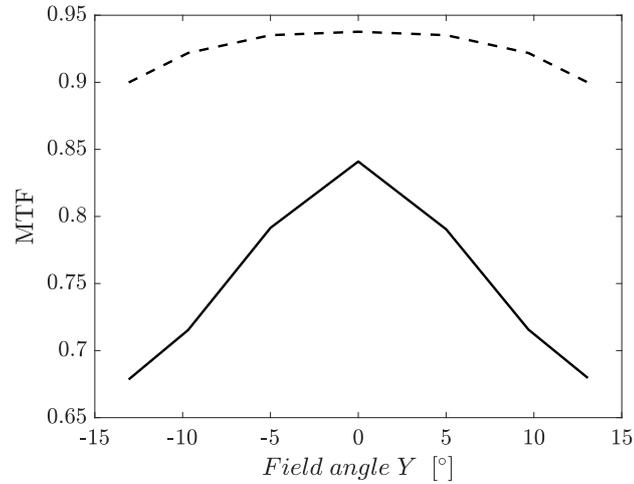


Figura 5.4: Comportamiento nominal de la lente telefoto diseñada para diversos campos H_y (en grados) en línea discontinua. Media de 200 lentes perturbadas generadas con métodos de Montecarlo para diversos campos H_y (en grados) en línea sólida. En ambos casos, se muestra como métrica la MTFA (MTF media entre los planos tangencial y sagital) para una frecuencia de 30 cy/mm.

sensibilidades en la lente objetivo de la figura 3.3, que tomaremos de ejemplo para mostrar los métodos de desensibilización propuestos. En el caso de este diseño, observamos que el *worst-offender* es, con mucha diferencia, el descentramiento de la tercera lente del barril (L3), seguido del descentramiento de la primera lente (L1). El *worst-offender* hace referencia al parámetro óptico que, tras ser alterado, tiene más impacto en la calidad óptica del sistema. En la figura 5.4 se resumen los resultados obtenidos tras el análisis de 200 lentes perturbadas mediante métodos de Montecarlo.

Como se puede ver, la pérdida de calidad óptica en los sistemas perturbados es evidente, sobre todo en la periferia del campo (donde el comportamiento de los polinomios de alto orden que describen las superficies se descontrola) por lo que resulta importante intentar desensibilizar el sistema lo máximo posible, poniendo especial atención a los *worst-offenders* ya mencionados.

5.1.1.2. Descripción de los procesos de desensibilización

Proponemos dos estrategias para lidiar con los problemas que surgen de usar asferas de alto orden [79]. La primera de ellas consiste en reducir gradualmente el número de coeficientes esféricos en lentes que presentan *a priori* demasiados. El proceso es el que sigue. En primer lugar, se reduce la magnitud del coeficiente esférico de más alto orden de la primera superficie del sistema (la primera superficie de la primera lente). La calidad de imagen se mantiene reoptimizando en cada paso y para la reoptimización se utilizan el resto de coeficientes esféricos y los radios de curvatura de la superficie en cuestión. El objetivo final es anular dicho coeficiente, lo que en muchas ocasiones es posible, ya que en las lentes objetivo en miniatura, las primeras superficies, que corrigen las aberraciones cromáticas y aportan potencia al sistema, pueden definirse con pocos coeficientes.

Una vez se ha anulado o reducido al máximo el coeficiente de más alto orden de la superficie 1, se continúa con los siguientes coeficientes de manera sucesiva, hasta que la calidad de imagen no se puede reestablecer. Esto hace que la superficie quede descrita con el mínimo número posible de coeficientes esféricos. Reducir el número de coeficientes de alto orden ayudará a reducir las altas pendientes y comportamientos extraños en las zonas periféricas de las lentes fuera de la CA.

Terminado el procedimiento para la primera superficie, se continúa reduciendo el número de coeficientes para la superficie 2, la superficie 3 y así sucesivamente hasta la última superficie del conjunto. Opcionalmente, para la reoptimización se pueden utilizar no solo los coeficientes esféricos de la superficie en cuestión, sino también los de las superficies colindantes.

Tras todo el proceso, el número de coeficientes esféricos necesario para representar la asfericidad de las lentes se reduce drásticamente sin cambiar de manera sustancial el *layout* del diseño, ya que solamente se han utilizado para reoptimizar la lente los coeficientes esféricos y radios de curvatura y el proceso ha sido

5. Consideraciones de fabricación de mini-cámaras plenópticas

	Conf. 1	Conf. 2	Conf. 3	...
L1	Nominal	Nominal	<i>Desc. Y + 0,1 μm</i>	...
L2	Nominal	Nominal	Nominal	...
L3	Nominal	<i>Desc. Y + 0,1 μm</i>	Nominal	...
L4	Nominal	Nominal	Nominal	...
L5	Nominal	Nominal	Nominal	...
Peso	10	5	1	...

Tabla 5.2: Ejemplo de sistema multi-configuración para desensibilizar los descentramientos de las superficies [79].

lento y controlado. Esta práctica es recomendable en cualquier diseño de lentes en miniatura ya que ayudará a reducir el impacto de las tolerancias de fabricación; no obstante, no es un método que desensibilice de manera directa el sistema ante sus *worst-offenders*. Es por ello que proponemos una segunda técnica.

La segunda técnica consiste en desensibilizar el sistema mediante configuraciones múltiples. En primer lugar, definimos un sistema multi-configuración en el que la primera configuración es la configuración nominal. A continuación, definimos configuraciones sucesivas (tantas como sea necesario) perturbando los elementos o las superficies con descentramientos o inclinaciones. Cada configuración perturba únicamente un elemento en una dirección y sentido y las perturbaciones se priorizan siguiendo el resultado del análisis de sensibilidades. La tabla 5.2 ilustra las configuraciones utilizadas para la desensibilización ante descentramientos, pero se pueden definir también tablas análogas para las inclinaciones de los elementos. Damos peso a las configuraciones de manera que la primera configuración (la nominal) tiene más importancia en la optimización con el objeto de preservar el comportamiento original de la lente. Seguidamente, definimos las variables, que en todas las configuraciones son las curvaturas de las superficies y los coeficientes esféricos. Con todo esto, podemos comenzar la optimización del sistema definiendo en la función de mérito los diferentes operandos para todas las configuraciones. El proceso de optimización puede ser costoso dependiendo del número de confi-

guras definidas y del número total de operandos a minimizar, es por eso que ha de hacerse lentamente y, si es necesario, por etapas, definiendo pocas configuraciones y priorizando reducir el impacto de las tolerancias que más hacen perder calidad al sistema cuando este se perturba.

5.1.1.3. Resultados: lente *as-built*

Aplicamos los métodos descritos a la lente objetivo de la figura 3.3. En primer lugar, reducimos el número de coeficientes esféricos utilizados para describir el sistema óptico. Partimos del diseño original con coeficientes de hasta orden 14 ($\alpha_{14} r^{14}$) para todas las superficies y tras un proceso lento e iterativo, conseguimos reducir hasta orden 6 ($\alpha_6 r^6$) todas las superficies excepto las que conforman la última lente (L_5). Para esta última lente la descripción se mantiene con coeficientes de hasta octavo orden ($\alpha_8 r^8$). A este diseño lo denominamos *diseño modificado 1*. Por otra parte, al diseño original aplicamos también el método de desensibilización por multi-configuración, centrándonos en inmunizar el sistema ante descentramientos del tercer elemento (L_3). A este diseño lo etiquetamos como *diseño modificado 2*. Por último, aplicamos el segundo método de desensibilización a la lente objetivo con coeficientes esféricos reducidos, obteniendo el *diseño modificado 3*.

En la figura 5.5 podemos observar los *layouts* de las cuatro lentes objetivo descritas arriba (la original y las tres desensibilizadas). En todos los casos, el aspecto de los diseños es muy similar, lo cual indica que los cambios realizados no van a afectar a la manufacturabilidad de las lentes, así como tampoco afectan a la comprensión e idiosincrasia del sistema óptico. El TTL e IH de los cuatro diseños es el mismo, y otros parámetros ópticos básicos como la EFL, el WFNO o el FOV sufren variaciones mínimas. Si observamos los *diseños modificados 3* y *4*, en los que se ha buscado reducir el impacto del descentramiento del tercer

5. Consideraciones de fabricación de mini-cámaras plenópticas

elemento, en ambos sucede que los rayos que atraviesan la periferia de L_3 lo hacen con un ángulo menos abrupto, ayudando esto a mejorar el comportamiento ante perturbaciones.

Asimismo, en la figura 5.6 se muestra la MTF de los cuatro diseños. En estas gráficas se puede observar que, tras los procesos de desensibilización, la MTF se ve ligeramente modificada, pero la calidad es lo suficientemente buena en todos los casos. Como podemos observar en la leyenda de las gráficas, el FOV de las lentes también se modifica ligeramente, cambiando un máximo de $0,25^\circ$ entre el sistema original y el desensibilizado. Este cambio en el FOV no afecta a la IH de la lente, que se mantiene en 2 mm.

Para comprobar que los métodos funcionan es necesario realizar un análisis de tolerancias y comparar los diferentes resultados de las lentes *as-built*. Así pues, generamos 200 sistemas perturbados con métodos de Montecarlo y analizamos su comportamiento nominal y la media del comportamiento de las configuraciones perturbadas. Las tolerancias a considerar son las mismas que las descritas en la tabla 5.1 y el criterio será de nuevo la MTF a 30 cy/mm . En la figura 5.7 se muestran los resultados. Como se puede observar, la configuración original presenta el mejor comportamiento nominal, pero la peor lente *as-built*. Fabricar esta lente objetivo supondría tener un *yield* muy bajo, ya que muchos barriles tendrían que desecharse por tener una calidad óptica demasiado pobre. El *diseño modificado 1*, que corresponde al sistema con coeficientes esféricos reducidos, se comporta de manera prácticamente idéntica al diseño original. Esto sucede así porque el primer método no busca mejorar explícitamente el comportamiento de la lente ante tolerancias, y el diseño propuesto (si recordamos del Capítulo 3) está bastante ajustado y llevado al límite para conseguir un factor telefoto bajo. El *diseño modificado 2*, que corresponde a la lente objetivo original desensibilizada por el segundo método, presenta una mejora sustancial del comportamiento ante

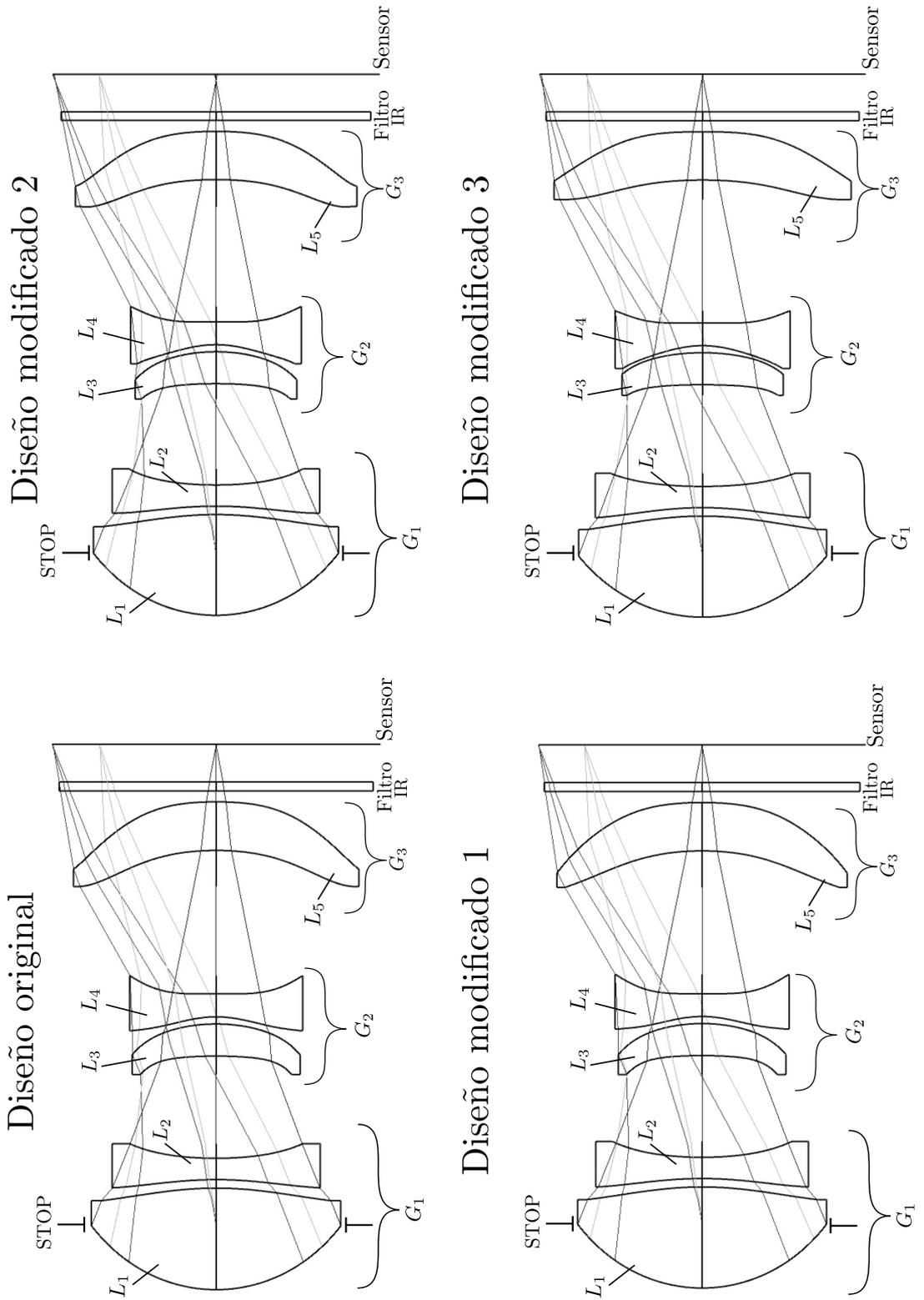


Figura 5.5: Layout del diseño original y los tres diseños desensibilizados según los métodos descritos en la sección 5.1.1.

5. Consideraciones de fabricación de mini-cámaras plenópticas

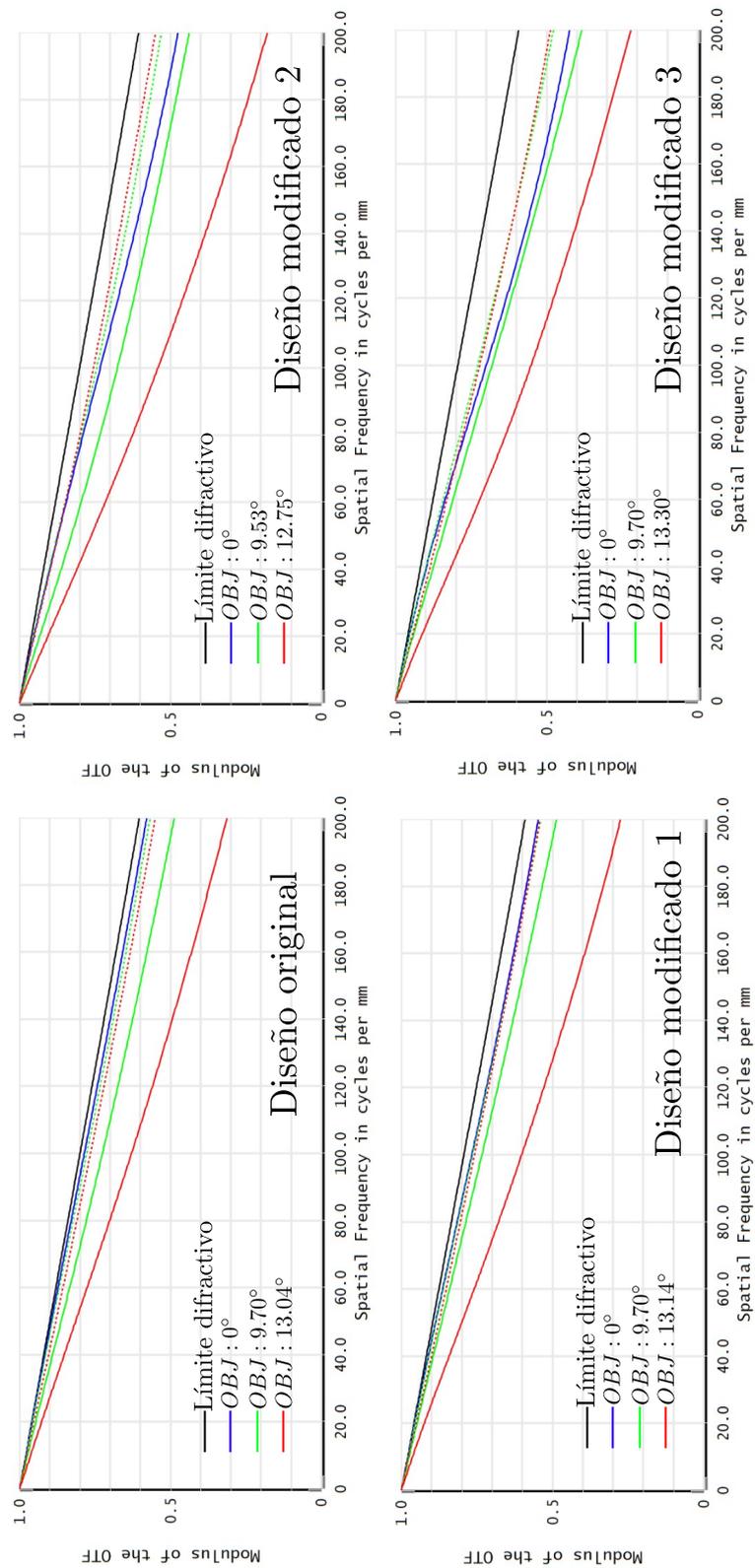


Figura 5.6: MTF de los cuatro diseños (el original y los tres desensibilizados).

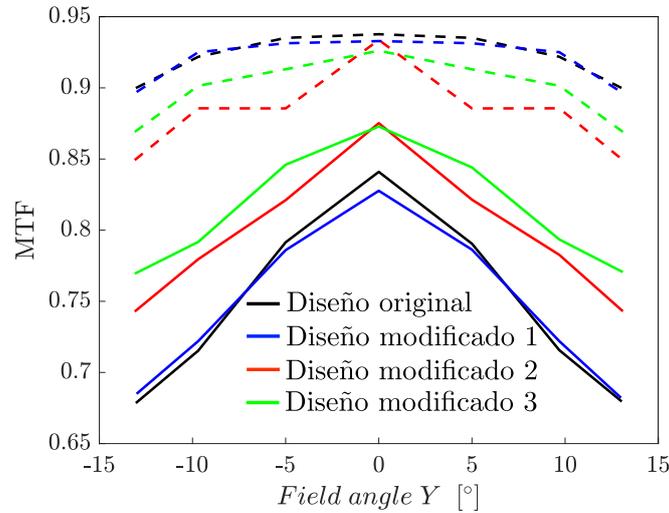


Figura 5.7: Comparación del diseño original y los tres diseños desensibilizadas ante perturbaciones. El comportamiento nominal del sistema para diversos campos H_y (en grados) se muestra en línea discontinua, la media de 200 sistemas perturbados generados con métodos de Montecarlo para diversos campos H_y (en grados) se muestra en línea sólida. En todos los casos, se muestra como métrica la MTFA (MTF media entre los planos tangencial y sagital) para una frecuencia de 30 cy/mm.

perturbaciones, pero sufre una pérdida de calidad notable en el comportamiento nominal. Esto es así porque a la herramienta de optimización del sistema en multi-configuración le cuesta encontrar soluciones si se definen muchas variables. En el caso del *diseño modificado 3*, que corresponde al diseño con coeficientes esféricos reducidos que además se desensibiliza a través de un sistema multi-configuración, la mejora es evidente. El comportamiento nominal del sistema es ligeramente peor, pero el comportamiento *as-built* mejora notablemente. Este último diseño evidencia que es mejor aplicar el segundo método de desensibilización a una lente cuyos coeficientes esféricos han sido reducidos, de manera que hay muchas menos variables a modificar para encontrar una solución satisfactoria. En el caso de los *diseños modificados 2 y 3* podría continuar mejorándose el comportamiento con una optimización más exhaustiva buscando desensibilizar el sistema ante todos los descentramientos e inclinaciones de los elementos, e incluso, de las superficies o de los radios.

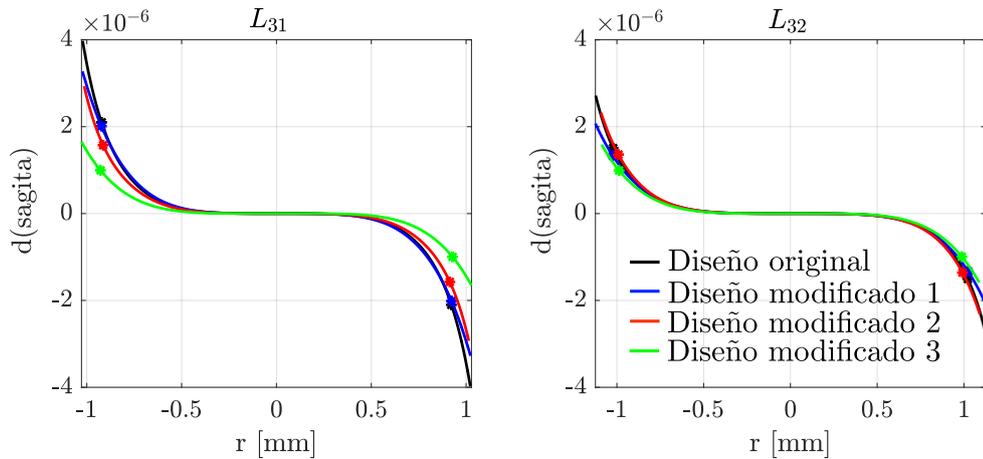


Figura 5.8: Derivada de la parte polinómica de las asferas que definen las superficies que conforman L_3 frente a la posición r (recordar figura 2.10). Los asteriscos marcan los límites de la apertura nominal o CA de cada superficie.

Como ya hemos explicado, los sistemas ópticos formados por elementos con muchos coeficientes esféricos que no han sido desensibilizados ante descentramientos e inclinaciones de dichos elementos pueden manifestar una pérdida en la calidad de la imagen producida por el hecho de que los polinomios de alto orden que definen las superficies no se comportan bien fuera de su apertura o CA. Para demostrar que los procesos de desensibilización ayudan a controlar estas superficies fuera del área activa, mostramos en la figura 5.8 la derivada de las dos superficies que conforman la lente 3, cuyo descentramiento resultaba ser (con mucha diferencia) el *worst-offender* del sistema. Los procesos de optimización y desensibilización descritos se han centrado en controlar las perturbaciones de este elemento. Concretamente, en la figura 5.8 se muestra la derivada de la parte polinómica que describe la sagita de las superficies que conforman la lente según la ecuación 2.8.

Como se puede observar en la figura 5.8, los diseños modificados presentan un comportamiento más suave que el diseño original, sobre todo el *diseño modificado 3*, que en su periferia tiene una derivada con mucha menos pendiente que el diseño original.

5.2. Fabricación de la matriz de microlentes

Uno de los principales problemas de la fabricación y ensamblaje de la matriz de microlentes es el efecto de expansión-contracción producido por los cambios de temperatura. Así como estos problemas, en la lente principal, pueden compensarse con un reenfoque (algo que es típico en las cámaras de telefonía móvil gracias a los mecanismos de autofocus), o en cualquiera de los casos pueden calibrarse dependiendo del rango de temperaturas al que vaya a trabajar la cámara con relativa facilidad, no ocurre así con la matriz de microlentes, que puede experimentar deformaciones ante cambios de temperatura que son difíciles de predecir. Estos cambios de temperatura pueden conllevar modificaciones estructurales importantes que empeoren el funcionamiento de la cámara.

En una cámara plenóptica, el alineamiento perfecto entre la matriz de microlentes y el sensor es muy importante. Las tolerancias que se han de alcanzar son exigentes o, si son más relajadas, la información de calibración necesaria para que la cámara funcione en todo su campo de vista es demasiado grande. La principal causa del desalineamiento de la MLA y el sensor es un proceso de alineamiento impreciso, especialmente si se introduce estrés mecánico en el sistema. Otra de las causas más comunes de estos desalineamientos es la diferencia de coeficiente de expansión térmica entre la matriz de microlentes, el sensor de imagen y el resto de componentes mecánicos que entren en contacto con estos dos últimos. En la bibliografía podemos encontrar documentos en donde se habla del desajuste en la localización de las microimágenes que se produce por irregularidades en la expansión térmica [89] u otros en donde se propone introducir deformaciones en las lentes para compensar las deformaciones del sensor de imagen [90].

5.2.1. Asimetrías en la expansión térmica de la MLA y el sensor

Así pues, una de las fuentes principales de desalineamiento entre la matriz de microlentes o MLA y el sensor de imagen pueden ser los desajustes en la expansión térmica. En la figura 5.9 se muestra el efecto de libre expansión térmica de ambos componentes y se ilustra el efecto que de ello se deriva. Consideramos el caso teórico en que ambos componentes se encuentran perfectamente planos a $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Asimismo, consideramos que la MLA está fabricada uniformemente de un cristal con coeficiente de expansión térmica (o CTE) α_1 y el sensor está fabricado principalmente de silicio con CTE α_2 . Ambos componentes se van a expandir en todas las direcciones aumentando sus tamaños cuando aumente la temperatura. Si $\alpha_1 \gg \alpha_2$ sucede que, al expandirse ambos componentes, no lo hacen en la misma proporción, de manera que los centros de las microimágenes se deslocalizan. Esto se puede observar en el detalle de la figura 5.9 donde podemos observar un *zoom* de las tres microlentes centrales y sus píxeles asociados. Cuando el sistema MLA-sensor es iluminado con luz colimada, cada microlente focaliza sobre el sensor en un píxel. Los píxeles han sido etiquetados del 1 al 13 para facilitar la lectura de la figura. A $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, la microlente central enfoca sobre el píxel etiquetado como 7 y sus adyacentes sobre los píxeles 3 y 11, respectivamente. No obstante, cuando aumenta la temperatura y se produce la expansión, estas microlentes ya no enfocan sobre los mismos píxeles. La microlente central sigue formando imagen sobre el píxel central (puesto que los componentes no están unidos sino que se expanden libremente en torno a su centro de masas) pero las microlentes adyacentes ahora enfocan sobre los píxeles 2 y 12.

Como sabemos del Capítulo 4, en una cámara plenóptica la posición de las microlentes a lo largo de la matriz se diseña para que cada microlente tenga su punto de foco asociado a un píxel concreto, pudiendo así conseguir microimágenes

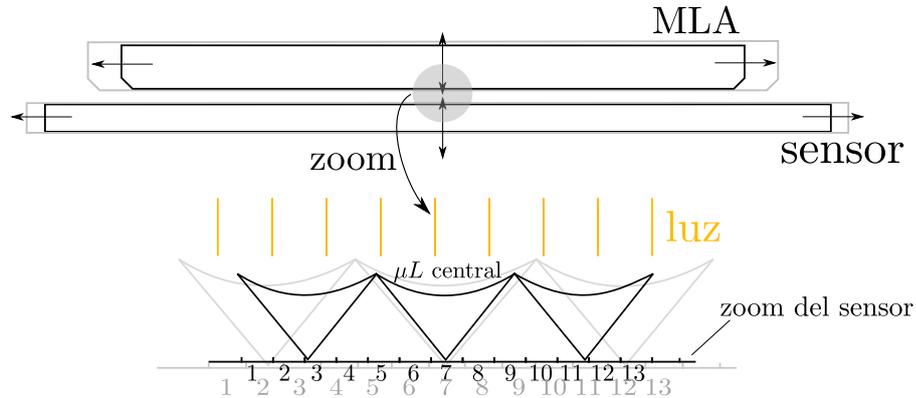


Figura 5.9: Ilustra la expansión irregular de la matriz de microlentes y el sensor cuando ambos tienen diferentes coeficientes de expansión térmica. Las microlentes y píxeles coloreados en negro corresponden al caso de $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Las microlentes y píxeles coloreados en gris claro corresponden al caso en que la temperatura ha aumentado y se ha producido la expansión térmica.

equiespaciadas en el sensor. Cuando el CTE de la MLA y del sensor no coinciden, esta posición preferente se perderá en cuanto aumente o disminuya la temperatura respecto a la de diseño. Para evitar esto, proponemos que los materiales de ambos componentes (MLA y sensor) tengan coeficientes de expansión térmica tal que $\Delta\alpha = |\alpha_1 - \alpha_2| < 3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ donde α_1 corresponde al CTE de la MLA y α_2 corresponde al CTE del sensor [91]. En este caso, si consideramos que ambos componentes miden aproximadamente 5 mm , el desajuste entre ambos ante un cambio de temperatura de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ sería de $\delta = 3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1} \times 20 \text{ K} \times 5 \text{ mm} = 0,0003 \text{ mm}$, lo que quiere decir que en los extremos del sensor el desajuste máximo sería de $0,3 \text{ }\mu\text{m}$, que correspondería a $1/3$ de píxel aproximadamente, dependiendo del sensor de imagen que se vaya a utilizar. Concretamente, recomendamos el uso del cristal AF32eco, cuyas propiedades térmicas son muy similares a las del sensor de imagen, permitiendo que no exista desajuste apreciable entre los componentes cuando estos se calientan o se enfrían [91].

5.3. Montaje de la cámara

Descritas algunas consideraciones importantes sobre la fabricación de la lente principal y de las microlentes, procedemos a describir algunos detalles de los procesos de ensamblado de los diferentes componentes de la cámara hasta completar el módulo.

5.3.1. Unión de la matriz de microlentes al sensor

Como ya mencionamos al inicio de la sección, la matriz de microlentes ha de estar unida al sensor de imagen de la manera más paralela posible y a pocas decenas de micras de distancia. Esto hace que la unión de ambos componentes haya de pasar por un proceso de alineamiento activo que ha de realizarse con técnicas de alineamiento en 6 ejes (X , Y , Z , yaw , $pitch$ y $roll$) con precisión submicrónica [92,93].

La MLA puede estar adherida al sensor directamente mediante pegamento o a través de un sostenedor mecánico. En cualquiera de los casos, los chips tienen que disponer de un área no activa lo suficientemente grande cubriendo todo el perímetro de la MLA para poder depositar el pegamento o ajustar el mecanismo de sujeción de manera firme sin interrumpir el paso de luz por el área activa. En la figura se muestra un ejemplo de pegado a través de un *holder* (a) y de pegado directo ($b - c$).

En la figura 5.10a podemos ver que la matriz de microlentes es insertada en un *holder* que la sujeta y le proporciona estabilidad mecánica en algunos ejes. El alineamiento en el eje Z y las rotaciones en los ejes X e Y están controlados por el sostenedor mecánico. Esta manera de unir los componentes resulta recomendable si es necesario controlar de manera muy precisa la distancia entre la matriz de microlentes y el sensor; no obstante, introducir un componente mecánico más al sistema puede provocar expansiones o contracciones difíciles de predecir cuando

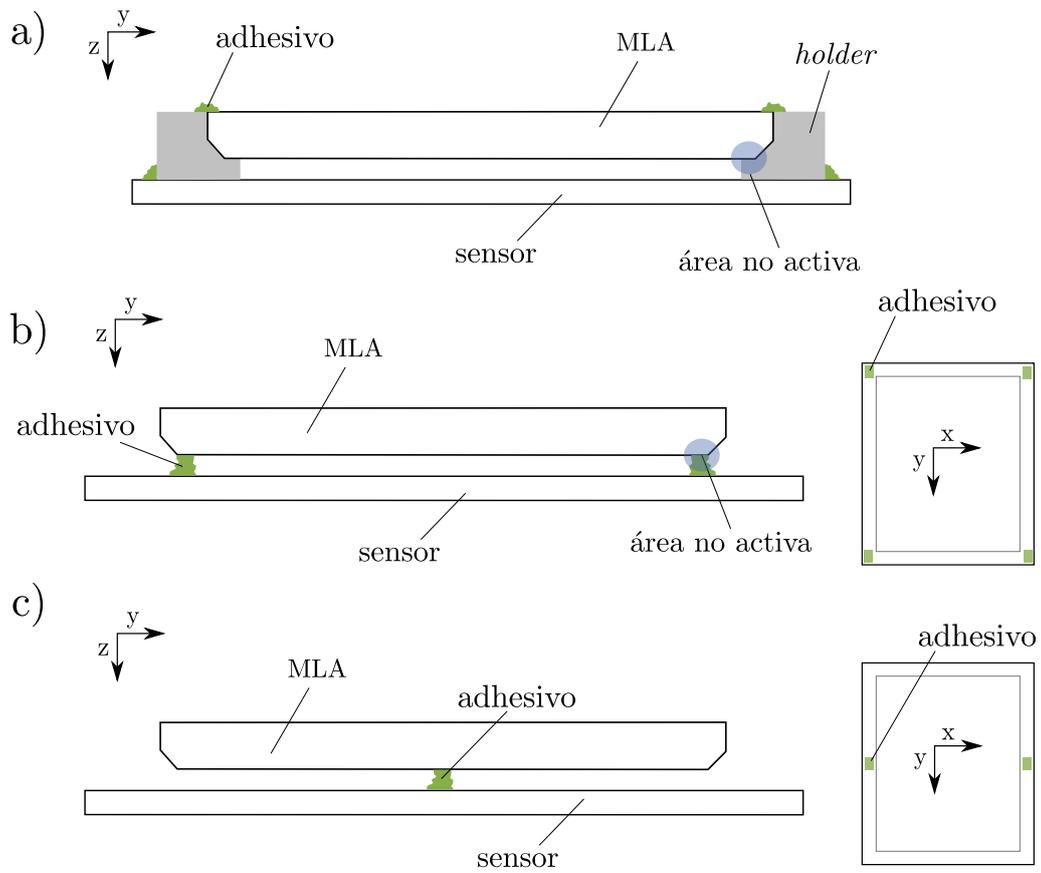


Figura 5.10: a) Muestra la adhesión de la MLA y el sensor a través de un sostenedor mecánico; b) adhesión directa con pegamento en las esquinas de la MLA; c) adhesión directa con pegamento en los laterales de la MLA [91].

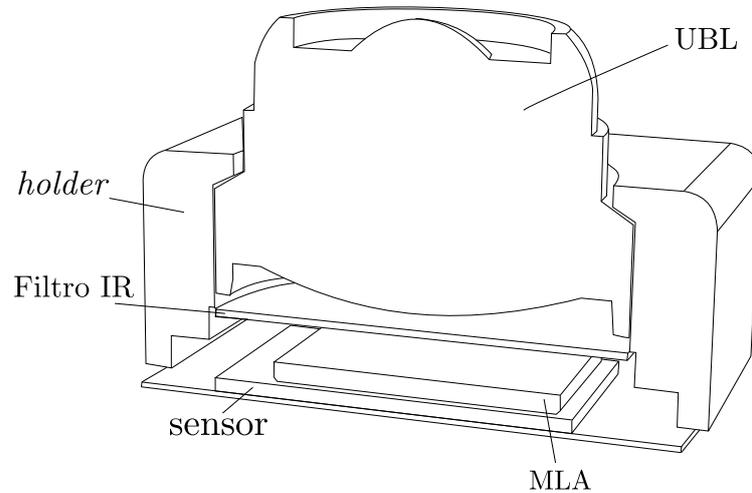


Figura 5.11: Esquema del layout final del módulo de cámara plenóptica diseñada [91].

aumente o disminuya la temperatura. Es por eso que con este tipo de unión resulta necesaria una simulación térmica modelizando de manera exhaustiva todos los componentes y sus materiales y los puntos de unión entre ellos. Además, las tolerancias en el proceso de fabricación del sostenedor o *holder* han de ser controladas con precisión para asegurar la correcta alineación de los componentes.

En las figuras 5.10b y 5.10c se muestran dos ejemplos de pegado directo de la MLA y el sensor de imagen. En estos casos, el pegamento se dispensa en el área no activa de la matriz de microlentes, y puede hacerse cubriendo todo el perímetro, en las esquinas, en los laterales, etc. Para escoger los puntos de unión óptimos es conveniente realizar una simulación de expansión-contracción del sistema. A priori, si la MLA y el sensor tienen un mismo coeficiente de expansión térmica, la manera ideal de unirlos sería dispensando pegamento en el centro de masas de ambos componentes (si es posible) promoviendo su expansión libre, tal y como se ilustra en la figura 5.9.



Figura 5.12: Módulo de cámara apiCAM, por Photonicsens.

5.3.2. Unión de la MLA-sensor a la lente principal o UBL

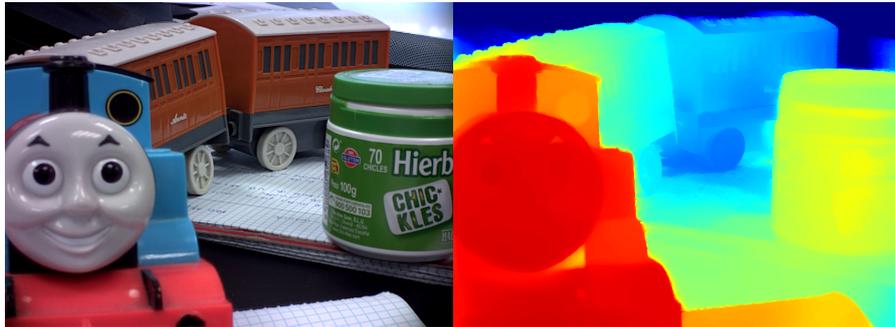
Una vez que la matriz de microlentes y el sensor han sido unidos, ya solo resta ensamblar este nuevo componente (MLA-sensor) a la lente principal o UBL. Para ello, podemos utilizar otro sostenedor mecánico, tal y como se señala en la figura 5.11. Finalizado el proceso de diseño, construcción y ensamblado de la cámara, el resultado del módulo de cámara plenóptica (apiCAM por *Photonicsens*) puede observarse en la figura 5.12. La cámara está lista para pasar por el proceso de calibración tras el cual podrá utilizarse de manera sencilla para obtener imágenes 2D y mapas de profundidad de los objetos fotografiados.

5.4. ApiCAM en funcionamiento

Para finalizar este trabajo, se incluyen dos ejemplos de imágenes y mapas de profundidad obtenidos con dos módulos de apiCAM en los que se puede comprobar que las cámaras resuelven con éxito las escenas planteadas, presentando mapas de profundidad precisos y e imágenes en color de buena calidad.

En la figura 5.13a, la cámara utilizada presenta un FOV de unos 60° y un

a)



b)

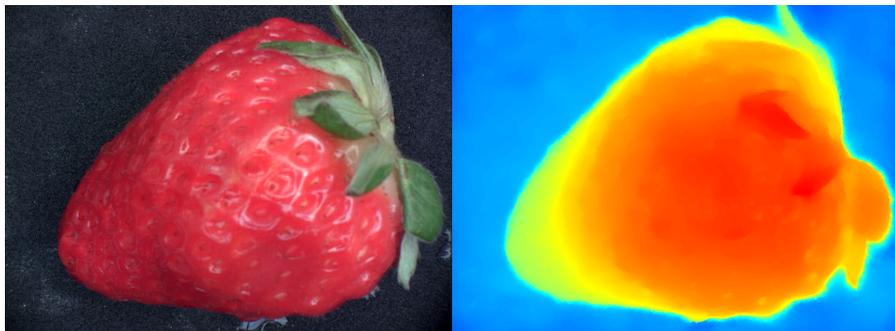


Figura 5.13: Izquierda, imagen 2D; derecha, mapa de profundidad en código de colores (rojo cerca, azul lejos) obtenidos con un módulo de apiCAM para aplicaciones de rango cercano, en el caso de a), y con un módulo de apiCAM para aplicaciones de fotografía macro, en el caso de b).

rango de trabajo de 10 a 40 *cm* aproximadamente, siendo útil para aplicaciones de rango cercano, como reconocimiento de gestos o aplicaciones de seguridad biométricas. Para tomar la fotografía y el mapa de profundidad de la figura 5.13b se utiliza una cámara con un FOV de 30° y un rango de trabajo de 2 a 15 *cm*, siendo esta cámara especialmente indicada para reconstrucciones 3D de objetos situados muy cerca de la cámara, o para mejorar las prestaciones de la fotografía de tipo macro. La lente principal empleada en este segundo módulo de *apiCAM* es una lente de tipo telefoto enfocada a una distancia corta. Esta lente tiene características similares a la lente diseñada y descrita en el Capítulo 3 pero no ha sido optimizada para maximizar las prestaciones de una cámara plenóptica, por lo que la utilización de la lente descrita en esta memoria permitiría resolver los mapas de profundidad con mayor calidad.

5. Consideraciones de fabricación de mini-cámaras plenópticas

Capítulo 6

Conclusión

El mercado de las mini-cámaras comenzó a experimentar un importante crecimiento en torno al año 2010. Desde entonces, no ha dejado de proliferar. Según Yole Développement, se estima un crecimiento en los beneficios totales obtenidos para este mercado de 31,1 a 57 billones de dolares americanos entre 2019 y 2025. Además, los módulos de cámara dedicados al registro de imagen 3D suponen un porcentaje muy significativo del total de mini-cámaras vendidas [94]. Las mini-cámaras plenópticas no ocupan, por el momento, un lugar destacado entre las tecnologías de registro de la información 3D de una escena. No obstante, ofrecen beneficios en muchos aspectos con respecto a otras tecnologías. Algunos de ellos son: la capacidad de registrar la información de imagen y la información de profundidad al mismo tiempo, la no necesidad de dispositivos que iluminen activamente la escena, el bajo consumo debido a que toda la información se registra en un único sensor de imagen, etc.

En la presente tesis doctoral hemos analizado la miniaturización de la tecnología plenóptica en configuración 1.0 proponiendo soluciones para algunos problemas clave que aparecen al reducir los tamaños de los componentes que integran la cámara. En primer lugar, hemos hecho una revisión teórica del funcionamiento de la cámara plenóptica 1.0 y de sus posibilidades para actuar como cámara

de profundidad y hemos demostrado la posibilidad de miniaturizar la tecnología plenóptica aprovechando los avances de la industria de sensores CMOS y de la fabricación de lentes por inyección de plásticos.

La cámara plenóptica, compuesta a nivel estructural por tres elementos clave (la lente principal, la matriz de microlentes y el sensor de imagen) presenta algunas dificultades a la hora de diseñar y fabricar sus componentes en miniatura. En el caso de la lente principal, aunque la producción de lentes plásticas para telefonía móvil está más que desarrollada, no todos los diseños son adecuados para funcionar en un módulo de cámara plenóptica. En el Capítulo 3 hemos analizado qué diseños de lentes principales son más adecuados, llegando a la conclusión de que las lentes de tipo telefoto tienen gran potencial. Hemos descrito un diseño telefoto con un ratio telefoto de $TR = 0,78$, sustancialmente por debajo de los encontrados en la bibliografía. Este factor telefoto nos ha permitido minimizar el error cometido en las estimaciones de profundidad, ya que hemos podido aumentar la focal de la lente manteniendo un tamaño adecuado para la industria de la telefonía móvil. Este diseño, compuesto por cinco elementos, presenta una estructura clara y coherente con las ecuaciones de primer orden, haciendo que sea manejable y fácil de entender. Asimismo, presenta una buena calidad óptica.

En el Capítulo 4 hemos analizado algunos de los problemas que presentan las microlentes. En primer lugar, hemos estudiado la deslocalización de las microimágenes debida al comportamiento no lineal del CRA conforme aumenta el campo H_y , y hemos propuesto una solución en la que la distribución espacial de los centros de las microlentes se altera con objeto de conseguir una localización ordenada y periódica de las microimágenes en el sensor. Asimismo, hemos analizado el problema de la incidencia oblicua en las microlentes periféricas, y hemos resuelto inclinarlas siguiendo el comportamiento de su CRA_i , consiguiendo reducir las aberraciones de campo aunque no la curvatura de campo, algo que resulta

inherente a las lentes esféricas que hacen imagen sobre sensores planos.

En el Capítulo 5 hemos estudiado algunos de los problemas de fabricación que hemos identificado como más relevantes. En el caso de la lente principal, hemos realizado un exhaustivo análisis de tolerancias y hemos desensibilizado el diseño telefoto que se presentó en el anterior capítulo ante descentramientos e inclinaciones que puedan producirse en el ensamblaje de las diferentes lentes (en este caso cinco) que componen el UBL a través de técnicas de optimización de configuraciones múltiples. Asimismo, hemos demostrado que la utilización del mínimo número de coeficientes esféricos en un diseño de este tipo es beneficioso para mantener el diseño comprensible y coherente y también para lograr lentes *as-built* que presenten buen comportamiento. Por otra parte, en el caso de la matriz de microlentes hemos analizado el problema de la expansión térmica, proponiendo utilizar AF32eco como material de la MLA, ya que a efectos de temperatura y expansión se comporta de manera similar al silicio. Por último, hemos estudiado algunas maneras de ensamblar los diferentes componentes que componen la cámara plenóptica, llegando a la conclusión de que un pegado directo de la MLA-sensor es la mejor opción.

Además de las contribuciones aportadas, la realización de este trabajo constituye un punto de partida para nuevas investigaciones. El desarrollo de nuevas ideas puede ayudar a aumentar la compresión de la tecnología plenóptica miniaturizada mejorando la calidad de los dispositivos fabricados por Photonicsens. En primer lugar, y en relación con la lente principal, resulta de especial interés investigar diseños que permitan encontrar los límites del WFNO (v.g., $WFNO = 1,7$), ya que con los diseños de tipo telefoto en los cuales se maximiza la focal resulta complicado diseñar un WFNO por debajo de 2,7. Estos diseños podrían resultar útiles para aplicaciones en que se requiera una alta recolección de luz y un FOV elevado. Por otro lado, sería provechoso profundizar en la comprensión del efecto

6. Conclusión

de las aberraciones de la lente principal en la calidad de los mapas de profundidad y, sobre todo, analizar el efecto de la combinación de las aberraciones de la lente principal y de las microlentes conforme aumenta el campo. Un estudio sinérgico de ambos componentes en términos de calidad óptica podría ayudar a reducir los errores de medida en las zonas periféricas del sensor.

En relación con la MLA, sería útil analizar nuevas posibilidades en la definición de la superficie que describe cada microlente que conforma la matriz. Microlentes con superficies cónicas o esféricas podrían ayudar a corregir algunas aberraciones (i.e. la aberración esférica).

En términos de fabricación, sería de especial interés continuar desensibilizando la lente principal. Atermalizar la lente al máximo posible resultaría útil para ahorrar información de calibración. Realizar estudios térmicos del módulo de la cámara completo sería de gran ayuda para evitar expansiones o contracciones que deformen los componentes estropeando la calidad de la cámara. Asimismo, sería bueno analizar la posibilidad de incluir un módulo de autoenfoque, que dotaría de versatilidad a la cámara. Por otra parte, investigar las posibilidades de fabricación monolítica de la cámara completa podría ser muy beneficioso. Nuevos retos en los diseños de lentes principales y de microlentes aparecerían al tener que usar materiales como separadores entre las lentes en lugar de espacios de aire. Esta tecnología dotaría de robustez al módulo garantizando su estabilidad con el tiempo.

Además de todas las ideas descritas, muchas otras pueden resultar de interés para fabricar módulos más precisos y versátiles. La aplicación de todas las técnicas descritas en el presente documento, junto con muchas otras que han sido desarrolladas en Photonicsens, nos ha permitido fabricar una mini-cámara plenóptica que ofrece imágenes y mapas de profundidad de buena calidad. ApiCAM está lista para cumplir las expectativas de muchas aplicaciones que demanda el mercado

para las mini-cámaras: reconocimiento de gestos, reconstrucciones 3D de objetos, realidad aumentada a corta y media distancia, etc. y tiene potencial para convertirse en un dispositivo de referencia en el mundo de las mini-cámaras con capacidad de registro del LF.

6. Conclusión

Lista de publicaciones

Patentes

- [I] L. Carrión-Higueras, J. Blasco Claret, F. Clemente Castelló, F. Alventosa Rueda, Francisco y A. Calatayud Calatayud, “Plenoptic camera for mobile devices,” Patente, 2019. WO/2019/174756 A1.
- [II] J. Blasco Claret, C. Montoliu Álvaro, A. Calatayud Calatayud, L. Carrión-Higueras y F. Alventosa Rueda, “Microlens Array,” Patente, 2020. US 11099304 B2.
- [III] J. Blasco Claret, C. Montoliu Álvaro, A. Calatayud Calatayud; L. Carrión-Higueras y A. Martínez Usó, “Device and method for obtaining distance information from views,” Patente, 2020. US20190236796 A1.
- [IV] J. Blasco Claret, I. Perino, L. Carrión-Higueras, J. Grandía Rodrigo y A. Martínez Usó, “An optical system including a microlens array,” Patente, 2020. PCT/EP2021/050880.
- [V] L. Carrión-Higueras, A. Calatayud Calatayud, J. Blasco Claret y J. Grandía Rodrigo, “Telephoto lens assembly and optical lens system for electronic portable devices,” Patente, 2021. PCT/EP2021/062833.

Artículos

- [I] L. Carrión-Higueras, A. Calatayud Calatayud y J. Sasián, “Improving as-built miniature lenses that use many aspheric surface coefficients with two desensitizing techniques,” *Optical Engineering*, vol. 60, no. 5, p.051208, 2021.

Bibliografía

- [1] R. Kingslake y R. B. Johnson, *Lens design fundamentals*. Academic press, 2009.
- [2] E. H. Adelson y J. R. Bergen, *The plenoptic function and the elements of early vision*. Vision and Modeling Group, Media Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, 1991, vol. 2.
- [3] M. Levoy y P. Hanrahan, “Light field rendering,” en *Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, 1996, pp. 31–42.
- [4] S. J. Gortler, R. Grzeszczuk, R. Szeliski, y M. F. Cohen, “The lumigraph,” en *Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, 1996, pp. 43–54.
- [5] G. Lippmann, “Epreuves reversibles donnant la sensation du relief,” *J. Phys. Theor. Appl.*, vol. 7, nro. 1, pp. 821–825, 1908.
- [6] J.-S. Jang y B. Javidi, “Three-dimensional synthetic aperture integral imaging,” *Optics letters*, vol. 27, nro. 13, pp. 1144–1146, 2002.
- [7] B. Wilburn, N. Joshi, V. Vaish, E.-V. Talvala, E. Antunez, A. Barth, A. Adams, M. Horowitz, y M. Levoy, “High performance imaging using large camera arrays,” en *ACM SIGGRAPH 2005 Papers*, 2005, pp. 765–776.

- [8] K. Venkataraman, D. Lelescu, J. Duparré, A. McMahon, G. Molina, P. Chatterjee, R. Mullis, y S. Nayar, “Picam: An ultra-thin high performance monolithic camera array,” *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, vol. 32, nro. 6, pp. 1–13, 2013.
- [9] E. H. Adelson y J. Y. Wang, “Single lens stereo with a plenoptic camera,” *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, vol. 14, nro. 2, pp. 99–106, 1992.
- [10] R. Ng, *Digital light field photography*. Stanford University, 2006, vol. 7.
- [11] R. Ng, C. Pitts, y T. Knight, “Light field data acquisition,” Patente, 2016, US 9467607B2.
- [12] C. Perwass y L. Wietzke, “Single lens 3D-camera with extended depth-of-field,” en *Human Vision and Electronic Imaging XVII*, vol. 8291. International Society for Optics and Photonics, 2012, p. 829108.
- [13] U. Perwass y C. Perwass, “Digital imaging system, plenoptic optical device and image data processing method,” Patente, 2012, US 2012/0050562A1.
- [14] M. Martínez-Corral y B. Javidi, “Fundamentals of D imaging and displays: a tutorial on integral imaging, light-field, and plenoptic systems,” *Advances in Optics and Photonics*, vol. 10, nro. 3, pp. 512–566, 2018.
- [15] I. Ihrke, J. Restrepo, y L. Mignard-Debise, “Principles of light field imaging: Briefly revisiting 25 years of research,” *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 33, nro. 5, pp. 59–69, 2016.
- [16] A. Lumsdaine y T. Georgiev, “The focused plenoptic camera,” en *2009 IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP)*. IEEE, 2009, pp. 1–8.

- [17] H. Navarro Fructuoso, *Captura y reproducción de imágenes 3D mediante sistemas de Imagen Integral. Diseño, implementación y aplicaciones*, 2014.
- [18] S. Zhu, A. Lai, K. Eaton, P. Jin, y L. Gao, “On the fundamental comparison between unfocused and focused light field cameras,” *Applied optics*, vol. 57, nro. 1, pp. A1–A11, 2018.
- [19] J. Bateau y P. Clark, “The optics of miniature digital camera modules,” en *International Optical Design Conference*. Optical Society of America, 2006.
- [20] M. Schaub, J. Schwiegerling, E. Fest, R. H. Shepard, y A. Symmons, *Molded optics: design and manufacture*. CRC press, 2016.
- [21] T. V. Galstian, *Smart mini-cameras*. CRC press, 2013.
- [22] J. Valentin, A. Kowdle, J. T. Barron, N. Wadhwa, M. Dzitsiuk, M. Schoenberg, V. Verma, A. Csaszar, E. Turner, y I. Dryanovski, “Depth from motion for smartphone AR,” *ACM Transactions on Graphics (ToG)*, vol. 37, nro. 6, pp. 1–19, 2018.
- [23] Z. Eng, Y. Y. Yick, Y. Guo, H. Xu, M. Reiner, T.-J. Cham, y S. Chen, “3D faces are recognized more accurately and faster than 2D faces, but with similar inversion effects,” *Vision research*, vol. 138, pp. 78–85, 2017.
- [24] N. Wadhwa, R. Garg, D. E. Jacobs, B. E. Feldman, N. Kanazawa, R. Carroll, Y. Movshovitz-Attias, J. T. Barron, Y. Pritch, y M. Levoy, “Synthetic depth-of-field with a single-camera mobile phone,” *ACM Transactions on Graphics (ToG)*, vol. 37, nro. 4, pp. 1–13, 2018.
- [25] P. Zanuttigh, G. Marin, C. Dal Mutto, F. Dominio, L. Minto, y G. M. Cortelazzo, “Time-of-flight and structured light depth cameras,” *Technology and Applications*, pp. 978–3, 2016.

- [26] H. Ottevaere, R. Cox, H.-P. Herzig, T. Miyashita, K. Naessens, M. Taghizadeh, R. Völkel, H. Woo, y H. Thienpont, “Comparing glass and plastic refractive microlenses fabricated with different technologies,” *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, vol. 8, nro. 7, p. S407, 2006.
- [27] M. Broxton, L. Grosenick, S. Yang, N. Cohen, A. Andalman, K. Deisseroth, y M. Levoy, “Wave optics theory and 3-d deconvolution for the light field microscope,” *Optics express*, vol. 21, nro. 21, pp. 25 418–25 439, 2013.
- [28] N. Cohen, S. Yang, A. Andalman, M. Broxton, L. Grosenick, K. Deisseroth, M. Horowitz, y M. Levoy, “Enhancing the performance of the light field microscope using wavefront coding,” *Optics express*, vol. 22, nro. 20, pp. 24 817–24 839, 2014.
- [29] A. Llavador, J. Garcia-Sucerquia, E. Sánchez-Ortiga, G. Saavedra, y M. Martínez-Corral, “View images with unprecedented resolution in integral microscopy,” *OSA Continuum*, vol. 1, nro. 1, pp. 40–47, 2018.
- [30] J. Sasián, *Introduction to Lens Design*. Cambridge University Press, 2019.
- [31] B. Javidi y F. Okano, *Three-dimensional television, video, and display technologies*. Springer Science & Business Media, 2002.
- [32] T. Georgiev y A. Lumsdaine, “Reducing plenoptic camera artifacts,” en *Computer Graphics Forum*, vol. 29, nro. 6. Wiley Online Library, 2010, pp. 1955–1968.
- [33] T. G. Georgiev y A. Lumsdaine, “Super-resolution with the focused plenoptic camera,” Patente, 2012, US 8,315,476.
- [34] T. E. Bishop y P. Favaro, “The light field camera: Extended depth of field, aliasing, and superresolution,” *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, vol. 34, nro. 5, pp. 972–986, 2011.

-
- [35] E. Y. Lam, “Computational photography with plenoptic camera and light field capture: tutorial,” *JOSA A*, vol. 32, nro. 11, pp. 2021–2032, 2015.
- [36] D. G. Dansereau, O. Pizarro, y S. B. Williams, “Decoding, calibration and rectification for lenselet-based plenoptic cameras,” en *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2013, pp. 1027–1034.
- [37] D. Cho, M. Lee, S. Kim, y Y.-W. Tai, “Modeling the calibration pipeline of the Lytro camera for high quality light-field image reconstruction,” en *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*, 2013, pp. 3280–3287.
- [38] H.-G. Jeon, J. Park, G. Choe, J. Park, Y. Bok, Y.-W. Tai, y I. So Kweon, “Accurate depth map estimation from a lenslet light field camera,” en *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 2015, pp. 1547–1555.
- [39] J. V. B. Claret, C. Montoliu, A. Calatayud, L. Carrion, y A. Martínez, “Device and method for obtaining distance information from views,” Patente, 2019, US 20190236796 A1.
- [40] M. Subbarao y G. Surya, “Depth from defocus: A spatial domain approach,” *International Journal of Computer Vision*, vol. 13, nro. 3, pp. 271–294, 1994.
- [41] S. Chaudhuri y A. N. Rajagopalan, *Depth from defocus: a real aperture imaging approach*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [42] <https://www.ovt.com/image-sensors/above-13-megapixels>, acceso: 2021-04.
- [43] <https://www.edmundoptics.es/knowledge-center/application-notes/optics/all-about-aspheric-lenses/>, acceso: 2021-10.

- [44] J. Sasián, *Introduction to aberrations in optical imaging systems*. Cambridge University Press, 2013.
- [45] L.-Y. Wei, C.-K. Liang, G. Myhre, C. Pitts, y K. Akeley, “Improving light field camera sample design with irregularity and aberration,” *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, vol. 34, nro. 4, pp. 1–11, 2015.
- [46] Q. Cui, S. Zhu, y L. Gao, “Developing an optical design pipeline for correcting lens aberrations and vignetting in light field cameras,” *Optics Express*, vol. 28, nro. 22, pp. 33 632–33 643, 2020.
- [47] Z. Cai, X. Liu, G. Pedrini, W. Osten, y X. Peng, “Unfocused plenoptic metric modeling and calibration,” *Optics express*, vol. 27, nro. 15, pp. 20 177–20 198, 2019.
- [48] —, “Light-field depth estimation considering plenoptic imaging distortion,” *Optics express*, vol. 28, nro. 3, pp. 4156–4168, 2020.
- [49] <https://www.zeonex.com/optics.aspx.html#techdata>, acceso: 2021-04.
- [50] <https://www.ogc.co.jp/e/products/fluorene/okp.html>, acceso: 2021-04.
- [51] R. Bates, “Performance and tolerance sensitivity optimization of highly aspheric miniature camera lenses,” en *Optical System Alignment, Tolerancing, and Verification IV*, vol. 7793. International Society for Optics and Photonics, 2010, p. 779302.
- [52] J. V. B. Blasco Claret, “Monolithic integration of plenoptic lenses on photosensor substrates,” Patente, 2016, US 9647150B2.
- [53] A. Vieira, H. Duarte, C. Perra, L. Tavora, y P. Assuncao, “Data formats for high efficiency coding of lytro-illum light fields,” en *2015 International*

- Conference on Image Processing Theory, Tools and Applications (IPTA)*.
IEEE, 2015, pp. 494–497.
- [54] M. Schambach y F. P. León, “Microlens array grid estimation, light field decoding, and calibration,” *IEEE transactions on computational imaging*, vol. 6, pp. 591–603, 2020.
- [55] <https://www.dxomark.com/huawei-p30-pro-camera-review/>, acceso: 2021-05.
- [56] S.-C. Park, S.-H. Lee, y J.-G. Kim, “Compact zoom lens design for a 5x mobile camera using prism,” *Journal of the Optical Society of Korea*, vol. 13, nro. 2, pp. 206–212, 2009.
- [57] T. Koskiranta, “Improving automatic imaging algorithms with dual camera system,” Tesis de Master, 2014.
- [58] C. Velzel, *A course in lens design*. Springer, 2014, vol. 183.
- [59] M. J. Kidger, “Fundamental optical design.” SPIE Bellingham, 2001.
- [60] L.-Y. Liao y H.-H. Huang, “Imaging lens system, imaging capturing device and electronic device,” Patente, 2015, US 2018/0088300-A1.
- [61] M. Dror y E. Goldenberg, “Miniature telephoto lens assembly,” Patente, 2017, US 2017/0146777-A1.
- [62] L. Carrión-Higueras, J. Blasco Claret, F. Clemente, F. Alventosa, y A. Calatayud, “Plenoptic camera for mobile devices,” Patente, 2018, PCT 2018/121146.
- [63] J. M. Geary, *Introduction to lens design: with practical ZEMAX examples*. Willmann-Bell Richmond, VA, USA, 2002.

- [64] T. Steinich y V. Blahnik, “Optical design of camera optics for mobile phones,” *Advanced Optical Technologies*, vol. 1, nro. 1-2, pp. 51–58, 2012.
- [65] P. Chen y X. Gao, “Optical design of the 13 mega-pixels mobile phone camera,” en *2016 3rd International Conference on Materials Engineering, Manufacturing Technology and Control*. Atlantis Press, 2016.
- [66] Y. Ma y V. Borovytsky, “Design of a 16.5 megapixel camera lens for a mobile phone,” *Open Access library journal*, vol. 2, nro. 03, 2015.
- [67] L. Carrión-Higueras, A. Calatayud Calatayud, J. Blasco Claret, y J. Grandía Rodrigo, “Telephoto lens assembly and optical lens system for electronic portable devices,” Patente, 2021, P 202130334.
- [68] D. Wu, Q.-D. Chen, L.-G. Niu, J. Jiao, H. Xia, J.-F. Song, y H.-B. Sun, “100 % fill-factor aspheric microlens arrays (amla) with sub-20-nm precision,” *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 21, nro. 20, pp. 1535–1537, 2009.
- [69] C.-C. Chiu y Y.-C. Lee, “Fabricating of aspheric micro-lens array by excimer laser micromachining,” *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 49, nro. 9-10, pp. 1232–1237, 2011.
- [70] J. Blasco Claret, C. Montoliu Álvaro, A. Calatayud Calatayud, L. Carrión-Higueras, y A. Martínez Usó, “Microlens array,” Patente, 2020, US 2020/0064522A1.
- [71] D. Daly, *Microlens arrays*. CRC Press, 2000.
- [72] E. Findlay, J. Dowling, A. Murray, L. Grant, y A. Caley, “Multi-channel image sensors,” Patente, 2021, US 2012/0206620A1.

- [73] M. M. Meyers, “Lenslet array system incorporating an integral field lens/reimager lenslet array,” Patente, 1998, US 5731899.
- [74] J. Duparré, F. Wippermann, P. Dannberg, y A. Reimann, “Chirped arrays of refractive ellipsoidal microlenses for aberration correction under oblique incidence,” *Optics express*, vol. 13, nro. 26, pp. 10 539–10 551, 2005.
- [75] K. Sae-Young, “Methods of manufacturings microlenses, microlens arrays and image sensors,” Patente, 2009, US 7605857B2.
- [76] W. J. Smith, *Modern optical engineering: the design of optical systems*. McGraw-Hill Education, 2008.
- [77] Y. Kubota, K. Kubota, H. Hirano, y T. Yonezawa, “Imaging lens,” Patente, 2016, US 2016/0377841A1.
- [78] J. P. McGuire, “Manufacturable mobile phone optics: higher order aspheres are not always better,” en *International Optical Design Conference*. Optical Society of America, 2010.
- [79] L. Carrión-Higueras, A. Calatayud, y J. Sasian, “Improving as-built miniature lenses that use many aspheric surface coefficients with two desensitizing techniques,” *Optical Engineering*, vol. 60, nro. 5, p. 051208, 2021.
- [80] G. Forbes, “Robust, efficient computational methods for axially symmetric optical aspheres,” *Optics express*, vol. 18, nro. 19, pp. 19 700–19 712, 2010.
- [81] G. Forbes y C. Menke, “Optical design with orthogonal surface descriptions,” en *Optifab 2013*, vol. 8884. International Society for Optics and Photonics, 2013, p. 88841C.

- [82] C. Xu, W. Song, y Y. Wang, “Design of a miniature anamorphic lens with a freeform front group and an aspheric rear group,” *Optical Engineering*, vol. 60, nro. 6, p. 065104, 2021.
- [83] Y. Yan y J. Sasian, “Miniature camera lens design with a freeform surface,” en *International Optical Design Conference*. Optical Society of America, 2017.
- [84] K. Fuse, “Method for designing a refractive or reflective optical system and method for designing a diffraction optical element,” Patente, 2003, US 6,567,226.
- [85] J. R. Rogers, “Using global synthesis to find tolerance-insensitive design forms,” en *International Optical Design Conference*. Optical Society of America, 2006, p. TuA4.
- [86] H. Sun, *Lens design: a practical guide*. Crc Press, 2016.
- [87] R. N. Youngworth, “Twenty-first century optical tolerancing: a look at the past and improvements for the future,” en *International Optical Design Conference 2006*, vol. 6342. International Society for Optics and Photonics, 2006, p. 634203.
- [88] E. Herman y J. Sasian, “Aberration considerations in lens tolerancing,” *Applied optics*, vol. 53, nro. 3, pp. 341–346, 2014.
- [89] T. G. Georgiev, “Method and apparatus for light-field imaging,” Patente, 2012, US 8290358B1.
- [90] J. Duparré, “Systems and methods for correcting for warpage of a sensor array in an array camera module by introducing warpage into a focal plane of a lens stack array,” Patente, 2015, US 20150288861A1.

- [91] J. Blasco, I. Perino, L. Carrión-Higueras, J. Grandía, y F. Alventosa, “An optical system including a microlens array,” Patente, 2020, PCT/EP2021/050880.
- [92] M. Châteauneuf y A. G. Kirk, “Six-degrees-of-freedom alignment technique that provides diagnostic misalignment information,” *Applied optics*, vol. 43, nro. 13, pp. 2689–2694, 2004.
- [93] C. Brecher, N. Pyschny, y J. Behrens, “Flexure-based 6-axis alignment module for automated laser assembly,” en *International precision assembly seminar*. Springer, 2010, pp. 159–166.
- [94] http://www.yole.fr/Camera_Module_Market_Update.aspx, acceso: 2021-08.

