

Universidad Miguel Hernández de Elche

MÁSTER UNIVERSITARIO EN ROBÓTICA



“Sistema óptico programable basado en lentes opto-electrónicas para enfoque adaptativo en cámaras digitales”

Trabajo de Fin de Máster
Curso Académico 2022/2023

Autor: Ericka Mariluz Matos Ferreras
Tutor/es: Ignacio Moreno Soriano

Sistema óptico programable basado en lentes opto-electrónicas para enfoque adaptativo en cámaras digitales.



Índice general

Capítulo 1.....	- 7 -
1. Introducción	- 7 -
1.1 Motivación del proyecto	- 8 -
1.2 Objetivos.....	- 8 -
1.3 Herramientas utilizadas	- 9 -
1.4 Estructura del documento	- 9 -
Capítulo 2.....	- 11 -
2. Marco teórico: Lentes y visión.....	- 11 -
2.1 Lentes convergentes y divergentes	- 11 -
2.2 Distancia focal de una lente	- 12 -
2.3 Formación de imágenes. Ley de Gauss	- 13 -
2.4 El ojo como sistema óptico	- 14 -
2.5 Enfoque en fotografía. Distancia focal y campo de visión	- 16 -
Capítulo 3.....	- 19 -
3. Lentes sintonizables	- 19 -
3.1 Lentes sintonizables Optotune.....	- 19 -
3.2 Control de las lentes Optotune.....	- 20 -
Capítulo 4.....	- 23 -
4. Sistema láser para la medida de distancias focales de lentes	- 23 -
4.1 Procedimiento experimental.....	- 23 -
4.2 Sistema experimental.....	- 25 -
4.3 Sistema de medida.....	- 27 -
4.4 Resultados con lentes estándar	- 28 -
4.4.1 Resultados con lente convergente de focal +250 mm	- 29 -
4.4.2 Resultados con lente convergente de focal +110 mm	- 30 -
4.4.3 Resultados con lente divergente de focal -90 mm.....	- 30 -
Capítulo 5.....	- 33 -
5. Calibración de una lente Optotune y aplicación en un sistema de enfoque automático	- 33 -
5.1 Calibración de una lente sintonizable Optotune	- 33 -
5.2 Aplicación en un sistema de enfoque automático.....	- 39 -
Capítulo 6.....	- 44 -

6. Conclusiones	- 44 -
7. BIBLIOGRAFÍA	- 46 -
ANEXOS	- 48 -
Datasheet lentes sintonizables Optotune.....	- 48 -



Índice de figuras

Figura 1: <u>Fig. 2.1.</u> Geometría y denominación de: (a) Lentes positivas (convergentes). (b) Lentes negativas (divergentes).....	11
Figura 2: <u>Fig. 2.2.</u> Plano focal imagen y distancia focal de una lente positiva y de una lente negativa.....	12
Figura 3: <u>Fig. 2.2.1.</u> Diagrama de rayos en una lente positiva cuando se coloca un punto de luz en el plano focal objeto.....	13
Figura 4: <u>Fig. 2.3.</u> Diagrama de rayos en una lente positiva en situación de formación de imagen.....	14
Figura 5: <u>Fig. 2.4.</u> Esquema simplificado de la estructura del ojo y del proceso de acomodación.....	15
Figura 6: <u>Fig. 2.5.</u> Mecanismo de enfoque en una cámara fotográfica	16
Figura 7: <u>Fig. 2.6.</u> Efecto del cambio de distancia focal del objetivo en fotografía (imagen adaptada de Nikon - Understanding Focal Length enlace)	17
Figura 8: <u>Fig. 3.1.</u> Modo de funcionamiento de las lentes fluidicas de Optotune (imagen adaptada de optotune.com).	19
Figura 9: <u>Fig. 3.2.</u> Diferentes modelos de lentes sintonizables de Optotune (imagen adaptada de optotune.com)	20
Figura 10: <u>Fig. 3.3.</u> Distintas carcasas de las lentes de la serie Optotune EL-10-30-C	20
Figura 11: <u>Fig. 3.4.</u> Controlador Lens Driver 4i y lente Optotune con conector Hirose.....	21
Figura 12: <u>Fig. 3.5.</u> Interfaz de control de las lentes Optotune, donde se indican los botones donde variar la corriente aplicada a la lente fluidicas.....	21
Figura 13: <u>Fig. 4.1.</u> Esquema del sistema experimental. (a) Haz colimado. (b) Introducción de una lente test convergente. (c) Introducción de una lente test divergente	24
Figura 14: <u>Fig. 4.2.</u> Fotografía del sistema experimental.....	25
Figura 15: <u>Fig. 4.3.</u> Detalle del láser CPS532 con soporte KM100 y del objetivo de microscopio sobre montura con ajustes micrométricos.....	26
Figura 16: <u>Fig. 4.4.</u> Fotografía del sistema para generar el haz de luz colimado.....	26
Figura 17: <u>Fig. 4.5.</u> Cámara Basler ace acA1300-200um con lente Tamron aspherical instalado enfocando el haz láser proyectado sobre un papel.....	27
Figura 18: <u>Fig. 4.6.</u> Ejemplo de la imagen observada en la cámara para dos valores de corriente eléctrica aplicada a una lente Optotune.....	28
Figura 19: <u>Fig. 4.7.</u> Geometría de la medida del diámetro del haz láser en función de la distancia x desde la lente test a la pantalla.....	28

Figura 20: <u>Fig. 4.8.</u> Resultados de la calibración de una lente simple convergente de focal de +250 mm.....	29
Figura 21: <u>Fig. 4.9.</u> Resultados de la calibración de una Lente simple convergente de focal de +110 mm.....	30
Figura 22: <u>Fig. 4.10.</u> Resultados de la calibración de una Lente simple divergente de focal de -90 mm.....	31
Figura 23: <u>Fig. 5.1.</u> Sistema de calibración de lentes aplicado a la lente opto-electrónica Optotune.....	33
Figura 24: <u>Fig. 5.2.</u> Calibración de la lente Optotune EL-10-30-Ci-VIS-LD-MV sin corriente aplicada.....	34
Figura 25: <u>Fig. 5.3.</u> Calibración de la lente Optotune EL-10-30-Ci-VIS-LD-MV con corriente aplicada de 60 mA.....	35
Figura 26: <u>Fig. 5.4.</u> Calibración de la lente Optotune EL-10-30-Ci-VIS-LD-MV con corriente aplicada de 120 mA	36
Figura 27: <u>Fig. 5.5.</u> Calibración de la lente Optotune EL-10-30-Ci-VIS-LD-MV con corriente aplicada de 180 mA.....	37
Figura 28: <u>Fig. 5.6.</u> Calibración de la lente Optotune EL-10-30-Ci-VIS-LD-MV con corriente aplicada de 292 mA.....	37
Figura 29: <u>Fig. 5.7.</u> Dependencia de la potencia óptica de la lente Optotune EL-10-30-Ci-VIS-LD-MV en función de la corriente aplicada.....	38
Figura 30: <u>Fig. 5.8.</u> Capturas en la cámara situada aproximadamente a 1 metro de la lente Optotune, para diferentes valores de la corriente aplicada.....	39
Figura 31: <u>Fig. 5.9.</u> Vista lateral y superior del montaje óptico compuesto de la lente Optotune, un objetivo de proyector y la cámara.....	40
Figura 32: <u>Fig. 5.10.</u> Sistema óptico de enfoque programable y objetos de prueba.....	41
Figura 33: <u>Fig. 5.11.</u> Imágenes captadas en la cámara cuando se ajusta la corriente de la lente Optotune. (a) 0 mA, (b) 29,18 mA, (c) 86,17 mA y (d) 292 mA.....	42

Sistema óptico programable basado en lentes opto-electrónicas para enfoque adaptativo en cámaras digitales.



AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, deseo expresar mi más sincero y puro agradecimiento a Dios, sin él nada de esto estaría ocurriendo; por su misericordia e incalculable precio pagado, para que hoy yo estuviera testificando por escrito la realización de este logro, ¡GRACIAS!

A mi tutor de tesis, profesor Ignacio Moreno Soriano, por su invaluable orientación, apoyo y dedicación a lo largo de este proyecto y por su confianza en mí, de que podía lograr hacer esto aun cuando no sabía nada de óptica y había reprobado su asignatura dos veces (risas...), me dijo que sí a esto, sin importar sus dudas y cuestiones. Su experiencia y conocimientos han sido fundamentales para el desarrollo y la culminación de este Trabajo Fin de Máster.

También quiero agradecer a mi universidad Miguel Hernández de Elche, por brindarme la oportunidad de realizar este trabajo de investigación y adquirir los conocimientos necesarios durante el máster para mi crecimiento profesional. Agradezco especialmente al profesor Carlos Pérez Vidal por su apoyo moral y ser humano, por su empatía ante situaciones y preguntas que nunca dudó en contestarme; fue un alivio tenerlo aquí.

Agradecer a la entidad **ValgrAI** –Valencian Graduate School and Research Network for Artificial Intelligence y a la **Generalitat Valenciana** como entidades responsables del apoyo económico para el desarrollo del máster.

En el mismo orden quiero agradecer a todos los profesores y profesionales del campo de la óptica que han compartido su conocimiento y experiencia conmigo a lo largo de mis estudios e investigaciones, Sr. Antonio Fimia y Sr. Enrique Rodríguez. Sus enseñanzas han sido fundamentales para mi formación y comprensión de los conceptos relacionados.

No puedo dejar de mencionar a mis compañeros de este viaje y amigos, quienes me han brindado su apoyo y aliento durante todo este proceso: Marian, Gregori, David, Richie, Fior, Luis, Nathalie, Anny, Leudy, Rey, Josías, Lisbeth, y los demás que saben quiénes son. ¡Gracias!

Le agradezco, como mención especial, al Sr. Álvaro Alhama, el ángel que el señor puso en este camino difícil para entender que él nunca nos deja solo, sus palabras, compañías, enseñanzas y sobre todo su motivación para que yo sea mejor cada día, son invaluable, siempre estaré agradecida, el mejor JEFE.

A la persona que le contaba esta realidad cuando apenas tenía 16 años, que me cuida desde el cielo y me da las fuerzas para seguir adelante, que confió en mí cuando ni pensaba llegar aquí, mi Rosa querida, desde la tierra te doy Gracias.

A mi papá, Eruben Adolfo Matos Valdez, ese soy YO, quien me enseñó desde pequeña a ignorar las adversidades y siempre seguir adelante, hasta lograrlo, quien me ayudó a crear mi primer prototipo y mi primer robot de cartón (risas...), aún en 3 vidas elegiría que fueras mi ejemplo y mi mentor, Gracias papá.

A mi mamá, hermanas y hermanos, y familia, por siempre confiar en mí y ayudarme cada día a salir adelante, por su unión y apoyo, por sus fuerzas, pero sobre todo por su AMOR. Gracias.

Sistema óptico programable basado en lentes opto-electrónicas para enfoque adaptativo en cámaras digitales.

A mi hija por ser mi mayor motivación. Te amo.

Al baby Sáez, por encontrarme en este camino y acompañarme a culminarlo, con altas y bajas, Te amo.

A los que siempre han estado ahí y me han apoyado sin importar, dónde, cuándo o cómo, estoy eternamente agradecida. Son parte fundamental en mi vida, aquí en España y allá en Rep. Dom.

A los que creyeron y apostaron que NO lo lograría, también a ellos gracias, más que a todos, ¡porque ellos fueron la causa de que pudiera demostrar que sí se puede!

¡Muchas gracias a todos!



Sistema óptico programable basado en lentes opto-electrónicas para enfoque adaptativo en cámaras digitales.



RESUMEN

En este proyecto se aplica el uso de lentes optoelectrónicas para el desarrollo de un sistema óptico que logra un enfoque adaptativo sin partes móviles. Mediante el uso de lentes de la empresa Optotune y un software para regular las focales por inyección de amperaje a las lentes, se logró ajustar el enfoque de un sistema óptico mostrando la capacidad de enfoque automático desde distancias lejanas hasta distancias muy cercanas de apenas centímetros. Las posibles aplicaciones prácticas abarcan áreas como la fotografía, la medicina y la seguridad. El proyecto incluye también la realización de un sistema láser para la medida de la distancia focal de las lentes. Mediante este trabajo, he adquirido conocimientos valiosos y una sólida experiencia en óptica y tecnologías de imágenes relacionadas al tema.



ABSTRACT

This project applies the use of optoelectronic lenses for the development of an optical system that achieves an adaptive focus without moving parts in digital cameras. Through the use of Optotune lenses and a software to regulate the focal points by injecting amperage to the lenses, it was possible to adjust the focus of an optical system showing the capacity of automatic focus from far distances to very close distances of just centimeters. Potential practical applications span areas such as photography, medicine and security. The Project includes the realitation of a laser besed system to measure the lens focal length with accuracy. In this work I have gained valuable knowledge and solid experience in optics and imaging technologies related to the topic.



Sistema óptico programable basado en lentes opto-electrónicas para enfoque adaptativo en cámaras digitales.



Capítulo 1

Introducción

En los últimos años ha surgido un creciente interés en el desarrollo de sistemas ópticos programables basados en lentes opto-electrónicas [1]. Estos sistemas combinan la óptica tradicional con componentes electrónicos y técnicas de procesamiento de señales, lo que brinda una mayor flexibilidad y control sobre las propiedades ópticas que permiten el desarrollo de sistemas automáticos de captura y procesado de imágenes.

En la actualidad los avances integrados de la óptica y la electrónica constituyen la base de una nueva generación de dispositivos optoelectrónicos que, con el esfuerzo constante dirigido a la miniaturización, los dispositivos ópticos están sujetos a requisitos cada vez más estrictos de precisión de fabricación, así como de estabilidad operativa y rendimiento. El desarrollo de sistemas ópticos programables basados en lentes opto-electrónicas es hoy en día una importante área de investigación y desarrollo en el campo de la óptica. Denominaciones como óptica activa, óptica adaptativa u óptica programable se han acuñado para describir estos sistemas. Optotune es una empresa que desarrolla y fabrica componentes ópticos activos, brindando soluciones innovadoras basadas en lentes opto-electrónicas programables o lentes sintonizables eléctricamente (ETL, del inglés Electrically Tunable Lenses) [2]. Utilizan la tecnología conocida como lentes líquidas o lentes fluídicas, en las que se utiliza un fluido transparente para infiltrar una membrana. Electrodo conectados a esta cámara crean una presión electrostática sobre la membrana de polímero que modifica su curvatura y por lo tanto la focal de la lente [3].

Las lentes programables se vienen empleando en diversos sistemas automáticos, por ejemplo, para medir distancias [4], sistemas de microscopía [5], sistemas de corrección de la visión [6]. Estas propiedades de las lentes ETL les brindan múltiples ventajas sobre otros sistemas, incluida una mayor compacidad debido al uso de menos componentes opto-mecánicos, una respuesta de frecuencia rápida y la ausencia total de movimiento mecánico.

Estos sistemas tienen un alto rango de aplicaciones. En el campo de la imagen, se utilizan para mejorar la resolución y calidad de imagen en sistemas de imágenes médicas y microscopía. En el ámbito de las comunicaciones ópticas, estas lentes permiten la manipulación y control de haces de luz para mejorar la transmisión y la recepción de información óptica. Además, estas lentes programables encuentran utilidad en sistemas de realidad aumentada y virtual, donde la adaptabilidad óptica es esencial para una experiencia inmersiva.

La investigación y desarrollo en este campo continúa avanzando, y se espera que las lentes opto-electrónicas programables desempeñen un papel cada vez más importante en el futuro de la óptica.

1.1 Motivación del proyecto

Previo a la aplicación en cualquier entorno, la captura de imágenes digitales ha experimentado avances significativos en los últimos años, brindando a los usuarios la capacidad de capturar imágenes con una calidad impresionante. Sin embargo, uno de los desafíos persistentes en la fotografía es lograr un enfoque preciso y adaptable en diversas condiciones de iluminación y distancia objeto de manera automática, sin muchos mecanismos externos.

La motivación detrás de este proyecto radica en la necesidad de superar estas limitaciones y mejorar la calidad y enfoque de la imagen en cámaras digitales. Un enfoque automático convencional puede no ser suficiente para situaciones desafiantes, como ambientes con poca luz o sujetos en movimiento rápido. La utilización de las lentes líquidas sintonizables es una de las tecnologías más prometedoras para este desafío.

El objetivo del presente estudio fue desarrollar un sistema óptico programable basado en lentes opto-electrónicas para lograr un enfoque adaptativo sin partes móviles. Para ello se han estudiado experimentalmente lentes sintonizables de la marca Optotune y se han calibrado sus propiedades de focalización.

1.2 Objetivos

Visto el enfoque que se plantea en el proyecto, es necesario mencionar y destacar algunos objetivos concretos. Se plantean los siguientes, que serán revisados nuevamente al final del documento:

- Poner en marcha lentes optoelectrónicas de la marca Optotune.
- Desarrollo de un sistema óptico simple para la evaluación de sus propiedades de focalización.
- Diseñar y desarrollar un sistema óptico para cámara digital programable basado en lentes opto-electrónicas que permita un enfoque adaptable.

1.3 Herramientas utilizadas

Dado el carácter experimental del trabajo, durante el proyecto se ha trabajado con diferentes herramientas. Las más relevantes se indican a continuación ya que serán referenciadas a lo largo del documento:

- Lentes simples de vidrio
- Lente Objetivo de Microscopio
- Lentes optoelectrónicas Optotune EL-10-30-C-VIS-LD-MV y EL-10-30-C-VIS-LD
- Tablero óptico de aluminio sólido
- Soportes y rieles
- Diafragma
- Láser de diodo de longitud de onda 532 nm (CPS 532 nm) verde y fuente de alimentación Thorlabs LDS55
- Cámara digital de la marca Basler modelo ace acA1300-200um
- Software Optotune
- Software Pylon Viewer 64 bit

1.4 Estructura del documento

A continuación, y para facilitar la lectura del documento, se detalla el contenido de cada capítulo:

- En este capítulo 1 se realiza una introducción, se expresa la motivación del proyecto, explicamos los objetivos buscados y las herramientas utilizadas.
- En el capítulo 2 se describe el marco teórico donde se resume brevemente la teoría de las lentes y la formación de imágenes.
- En el capítulo 3 describimos el modo de funcionamiento y las características de las lentes líquidas y se describe el software que se ha utilizado para su control.
- En el capítulo 4 implementamos un sistema láser para calibrar la distancia focal de lentes. El sistema se demuestra aquí con lentes simples de vidrio.
- En el capítulo 5 se calibran las distancias focales de las lentes Optotune y se incorporan en un sistema con la cámara digital y objetivo, validando las diferencias con respecto a los métodos convencionales de enfoque.
- En el capítulo 6 se presentan las conclusiones generales del proyecto, así como el planteamiento de desarrollos futuros.

Sistema óptico programable basado en lentes opto-electrónicas para enfoque adaptativo en cámaras digitales.



Capítulo 2

Marco teórico: Lentes y visión

A continuación, se hace una rápida revisión de la teoría de las lentes y la visión para poder comprender el sistema y el método desarrollado.

2.1 Lentes convergentes y divergentes

Una lente es un objeto transparente que modifica la trayectoria de los rayos de luz de forma tal que los rayos que han salido de un mismo punto del espacio se junten en otro punto del espacio, donde se forme la imagen. Tradicionalmente las lentes se han fabricado mediante vidrios con forma curva de revolución en torno al eje de la lente.

La curvatura de las lentes es el factor fundamental, junto con su índice de refracción, que influye en las propiedades de focalización y formación de imágenes. Hay dos tipos principales de curvatura en las lentes: curvatura convexa y curvatura cóncava. De acuerdo con su forma, las lentes se clasifican en lentes convergentes y lentes divergentes. Las lentes que son más gruesas en el centro son lentes positivas o convergentes, y pueden ser de tres tipos: biconvexas, plano-convexas y meniscos positivos. Las lentes más delgadas en el centro son lentes negativas o divergentes, y de nuevo pueden ser de tres tipos: bicóncavas, plano-cóncavas y meniscos negativos. (ver figura 2.1).

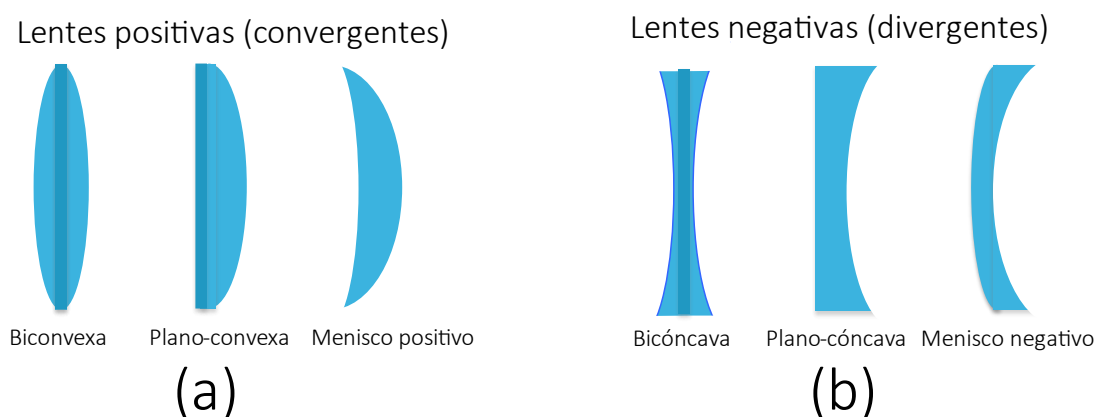


Fig. 2.1. Geometría y denominación de: (a) Lentes positivas (convergentes). (b) Lentes negativas (divergentes).

2.2 Distancia focal de una lente

Una lente enfoca los rayos de luz que llegan paralelos entre sí y transversales a la lente hacia un punto situado en su eje, conocido como el punto focal imagen (F'), y el plano transversal donde se localiza es el plano focal imagen.

La distancia focal es la propiedad óptica más importante de una lente. Se define como la distancia entre el plano principal imagen (H') de la lente y su plano focal imagen. El plano principal H' es el plano donde la lente forma una imagen con aumento unidad. En el caso de lentes simples delgadas, el plano H' coincide con la posición de la lente. En esta situación la distancia focal de la lente es simplemente la distancia desde el plano de la lente hasta el punto focal imagen F' .

Las lentes convergentes tienen una distancia focal positiva y enfocan los rayos de luz en un punto focal imagen en el lado opuesto a la fuente de luz. Por contra, las lentes divergentes tienen una distancia focal negativa y separan los rayos paralelos incidentes del eje de la lente, haciendo que parezcan provenir de un punto focal imagen (F') virtual, situado en detrás de la lente. La figura 2.2 muestra estas situaciones, donde siguiendo el convenio habitual se considera la luz propagándose de izquierda a derecha.

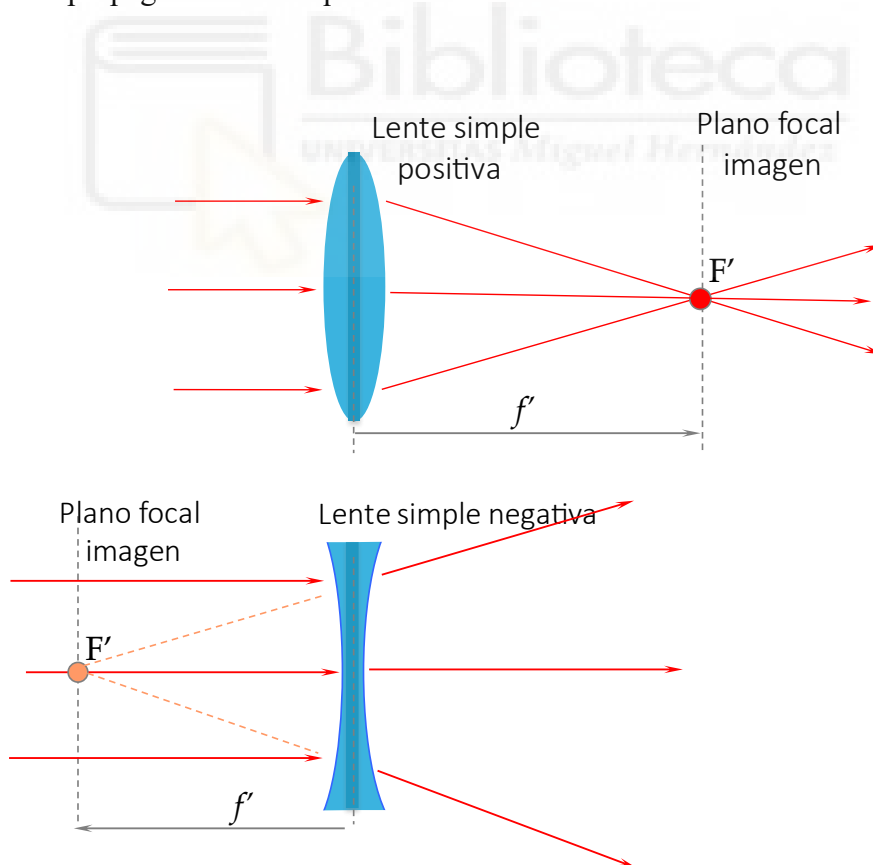


Fig. 2.2. Plano focal imagen y distancia focal de una lente positiva y de una lente negativa.

La potencia de una lente se define como la inversa de su distancia focal y depende de los radios de curvatura de las dos superficies de la lente (R_1 y R_2) y de su índice de refracción (n) según la siguiente ecuación, válida solamente para lentes delgadas:

$$P = \frac{1}{f'} = (n - 1) \left[\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right] \quad (2.1)$$

donde los signos de los radios de curvatura se toman positivos si el centro de curvatura queda a la izquierda y negativos al revés. Si la focal de la lente se expresa en unidades de metros, entonces la potencia se expresa en dioptrías (Dp).

Las lentes convergentes suelen emplearse también para producir un haz de luz colimado, es decir, compuestos por rayos paralelos entre sí. Para ello debe situarse un punto emisor de luz en el eje óptico de la lente, situado por delante de la lente a una distancia igual a su distancia focal, tal y como muestra la figura 2.2.1. Ese punto se conoce como punto focal objeto (F), y en esa situación los rayos de luz detrás de la lente son paralelos entre sí (formarían la imagen en el infinito).

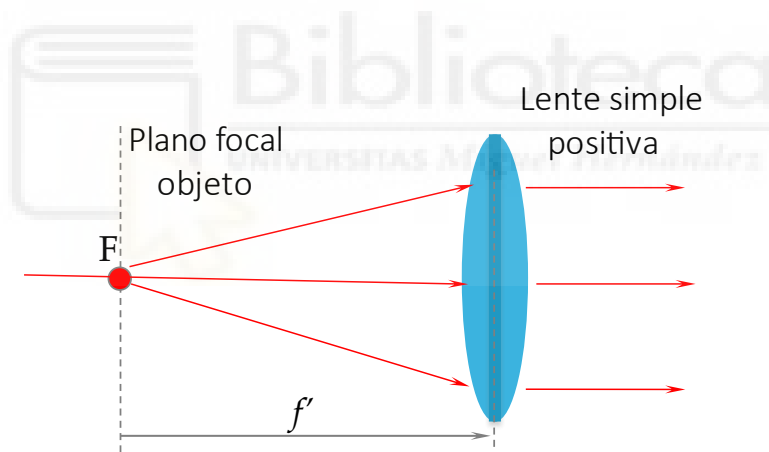


Fig. 2.2.1. Diagrama de rayos en una lente positiva cuando se coloca un punto de luz en el plano focal objeto.

2.3 Formación de imágenes. Ley de Gauss

La principal utilidad de las lentes es la de formar imágenes. Una imagen se produce cuando los rayos de luz que salen de un punto se reúnen en otro punto del espacio. En la situación más simple, en la cual se consideran solamente rayos de luz cuya dirección no se desvía apreciablemente del eje de la lente (conocida como aproximación de ángulos pequeños o aproximación paraxial), los puntos de luz situados en un mismo plano transversal forman imagen en otro plano transversa, y las distancias desde la lente a los planos objeto e imagen vienen determinadas por la siguiente ecuación conocida como ley de Gauss (o ley de las lentes):

$$-\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{f'} \quad (2.2)$$

Las distancias objeto (a) e imagen (a') se definen con su origen en la lente y su final en el punto objeto y en el punto imagen respectivamente, y son positivas si van en el sentido de la luz y negativas si van en sentido opuesto. La figura 2.3 ilustra esta situación para el caso de una lente positiva.

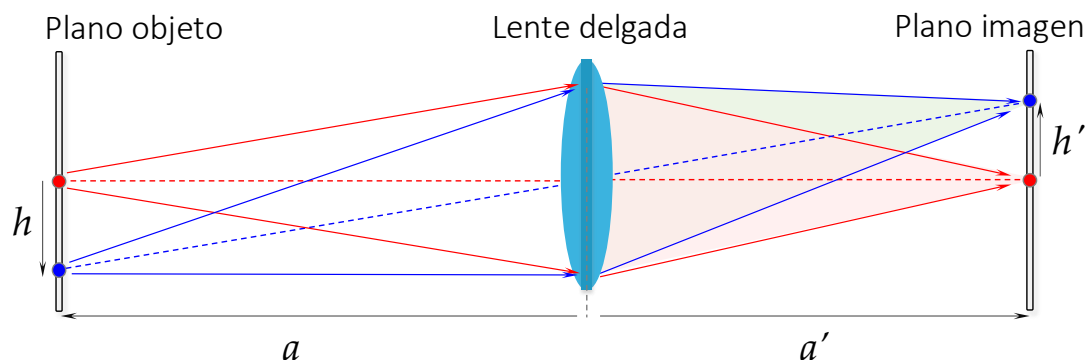


Fig. 2.3. Diagrama de rayos en una lente positiva en situación de formación de imagen.

La relación entre el tamaño de la imagen y el tamaño del objeto define el aumento lateral (M), que a su vez se relaciona con las distancias objeto e imagen según la siguiente relación:

$$M \equiv \frac{h'}{h} = \frac{a'}{a} \quad (2.3)$$

2.4 El ojo como sistema óptico

El ojo humano puede entenderse de forma simplificada como un sistema óptico de distancia focal positiva que forma una imagen real sobre el fondo del ojo. La figura 2.4 muestra un esquema simplificado del ojo. La potencia óptica del ojo está determinada por la córnea y por el cristalino. La retina está situada en el fondo del ojo, donde se localizan las células detectoras de luz (conos y bastones). El iris actúa como un diafragma que controla la cantidad de luz que penetra al ojo.

La capacidad para cambiar la distancia focal de la lente del ojo se basa en la modificación de la curvatura del cristalino, fenómeno que se denomina **acomodación**. La acomodación permite que el ojo ajuste automáticamente su enfoque de mirar objetos distantes a mirar objetos cercanos. En un ojo sano, el músculo ciliar se relaja cuando se miran objetos distantes (visión lejana), y los rayos que llegan paralelos se focalizan sobre la retina.

Por el contrario, cuando se observa un objeto cercano (visión cercana), los músculos ciliares aumentan la curvatura del cristalino, aumentando de esta forma la potencia de la lente del ojo. El punto más cercano que se puede enfocar se conoce como **punto próximo**. Con la edad se va reduciendo la capacidad de acomodación y alrededor de los 45 años se pierde totalmente, lo que se conoce como presbicia.

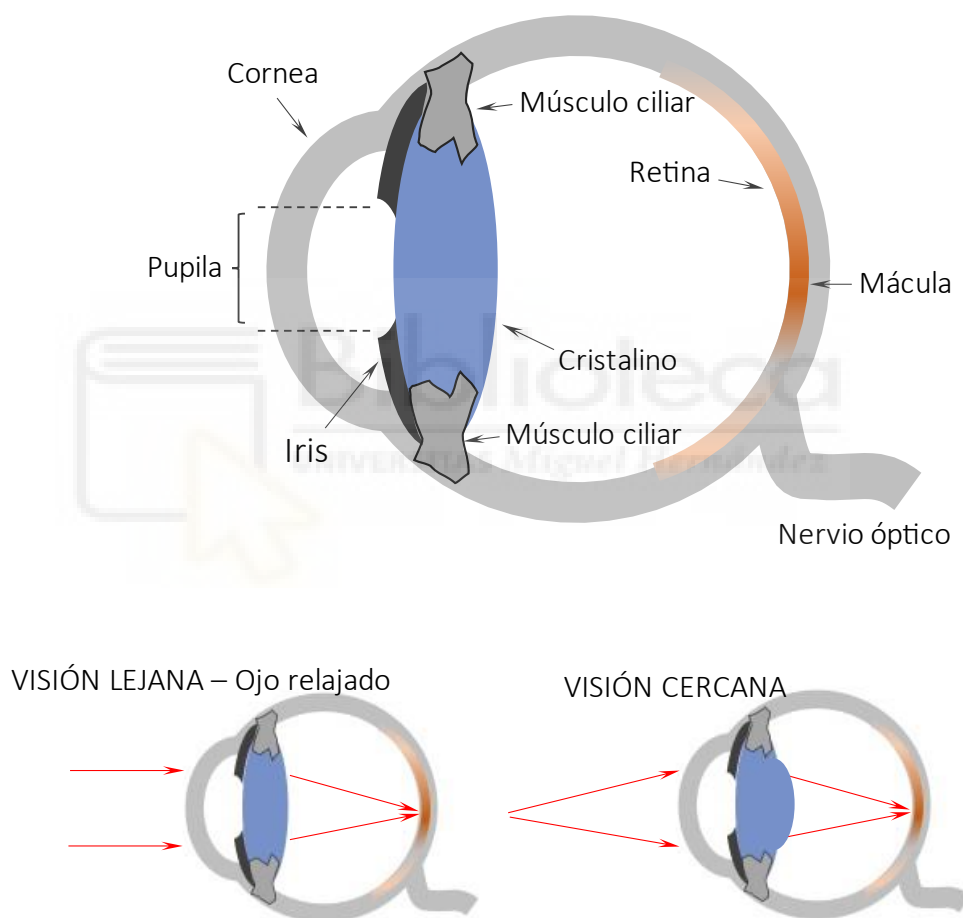


Fig. 2.4. Esquema simplificado de la estructura del ojo y del proceso de acomodación.

2.5 Enfoque en fotografía. Distancia focal y campo de visión

En las cámaras fotográficas las lentes son de vidrio, por lo que no se puede variar su distancia focal. El mecanismo de enfoque es por desplazamiento de la lente. La figura 2.5 ilustra este mecanismo, considerando una lente clásica de fotografía de focal estándar de 50 mm. Aunque los objetivos de fotografía son normalmente lentes compuestas, en esta figura simplificamos el proceso considerando una lente simple delgada.

Cuando se enfoca un objeto lejano, los rayos llegan a la lente paralelos y focalizan en su plano focal imagen (F'). Por tanto, el sensor de la cámara debe situarse en este plano (ver figura 2.6(a)). Para enfocar un objeto cercano, debe desplazarse el objetivo de la cámara alejándolo una pequeña distancia (Δ) del sensor, con objeto de aumentar la distancia imagen.

Por ello los objetivos fotográficos incorporan un mecanismo mecánico de enfoque que permite realizar este desplazamiento de la lente sin producir desalineamiento del eje de la lente. Al igual que en el ojo, las cámaras fotográficas tienen un punto próximo, de modo que no es posible enfocar objetos situados más cercanos.

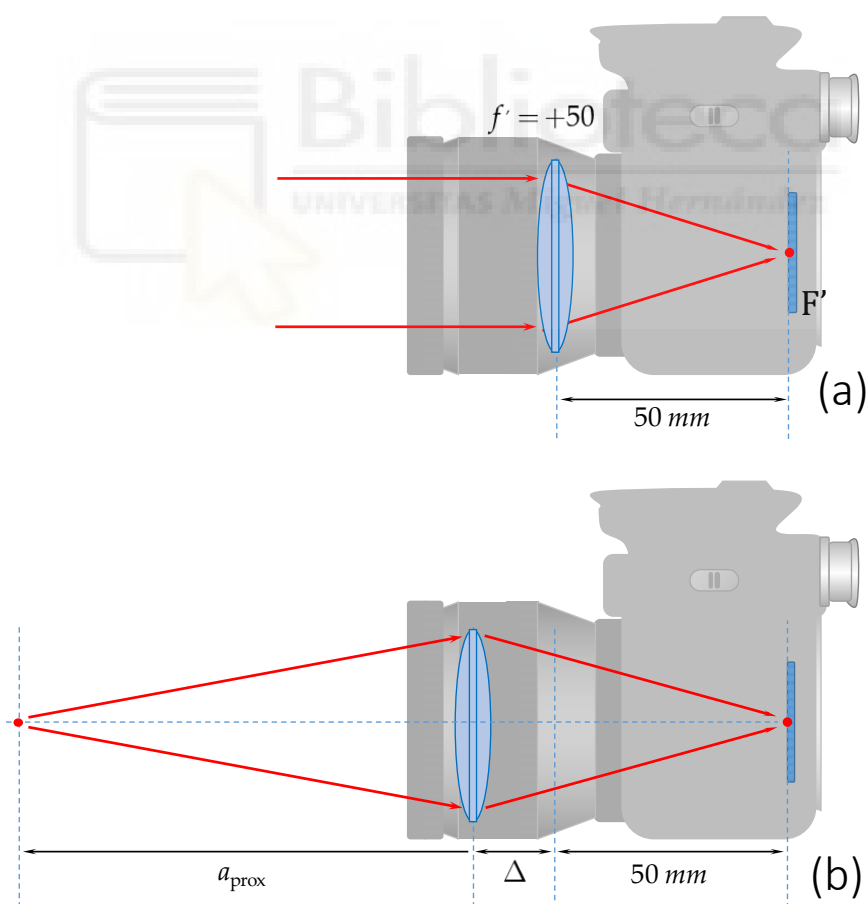


Fig. 2.5. Mecanismo de enfoque en una cámara fotográfica.

En fotografía clásica, los objetivos estándar son de distancia focal de 50 mm. Con esta focal reproducen aproximadamente el tamaño del campo de visión del ojo humano sobre un sensor de un tamaño de película fotográfica tradicional de 35 mm. Las propiedades de la imagen pueden variarse cambiando la lente, con objeto de usar una distancia focal diferente. Cambiar la lente, y de esta forma su distancia focal, tiene implicaciones en el tamaño de la imagen final. Así los teleobjetivos son lentes de fotografía con distancias focales superiores a 50 mm, y permiten realizar fotografías muy aumentadas de objetos lejanos. Por el contrario, los objetivos de gran angular tienen distancias focales inferiores a 50 mm, y permiten realizar fotografías con un campo de visión mayor (ver figura 2.6).

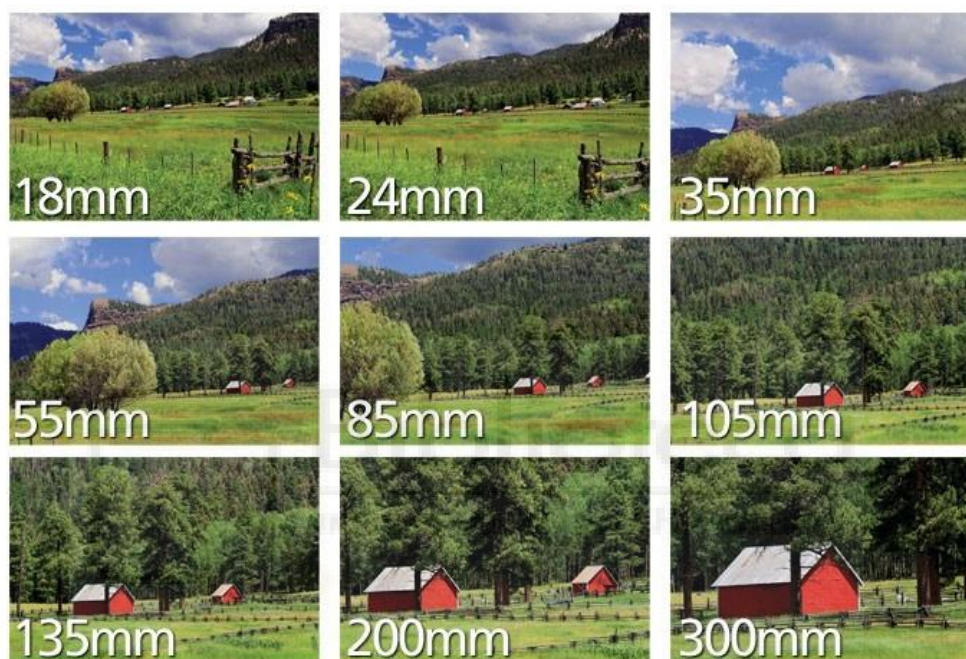


Fig. 2.6. Efecto del cambio de distancia focal del objetivo en fotografía (imagen adaptada de Nikon - Understanding Focal Length [enlace](#)).

En fotografía es común cambiar la lente para poder pasar de un sistema de teleobjetivo a un sistema de objetivo de gran angular. No obstante, también existen lentes de distancia focal variable, denominadas lentes tipo zoom, que utilizan varias lentes simples y algún tipo de mecanismo mecánico de desplazamiento de las lentes para variar la distancia entre ellas.

A pesar de la gran desarrollo y precisión de estos sistemas mecánicos empleados en las lentes de fotografía, la posibilidad de realizar cambios en la distancia focal de lentes sin necesidad de realizar movimientos es de gran interés, pues evita la degradación del sistema y evita la intervención directa, permitiendo ajustes remotos. Es por ello que las lentes optoelectrónicas de focal variable tienen gran interés.



Capítulo 3

Lentes sintonizables

Las cámaras con lentes mecánicas son demasiado lentas y además se desgastan por el uso extremo. Por eso surgieron las lentes sintonizables como una respuesta a la necesidad de contar con sistemas ópticos que pudieran adaptarse y ajustarse en tiempo real. Hoy en día existen diferentes tecnologías para la realización de lentes sintonizables, en las que se pueda variar la focal de manera electrónica. En la mayoría de los casos se basan en membranas elásticas rellenas de un fluido, de modo que mediante algún tipo de mecanismo físico sean capaces de modificar la curvatura de la membrana. Es por ello que se conocen con el nombre de **lentes fluídicas** o **lentes líquidas**.

Las lentes fluídicas están todavía limitadas a usar una apertura relativamente pequeña. No obstante, a pesar de esta limitación están adquiriendo un gran interés en la comunidad óptica y en aplicaciones de imágenes. Esta tecnología se volverá aún más atractiva con el tiempo a medida que estén disponibles lentes de mayor apertura, lo que permitirá una gama más amplia de aplicaciones de imágenes.

3.1 Lentes sintonizables Optotune

En este trabajo hemos usado lentes fluídicas de la marca Optotune. Estas lentes fluídicas emplean una membrana elástica de polímero, y utilizan un anillo de diámetro variable para presionar el centro de la membrana y dar así la curvatura a la lente. El mediante un actuador electromagnético se puede ejercer presión sobre el contenedor del fluido, que provoca el cambio de curvatura. Por lo tanto, la distancia focal de la lente está controlada por la corriente que fluye a través de la bobina del actuador. La figura 3.1 muestra el esquema de este modo de funcionamiento.

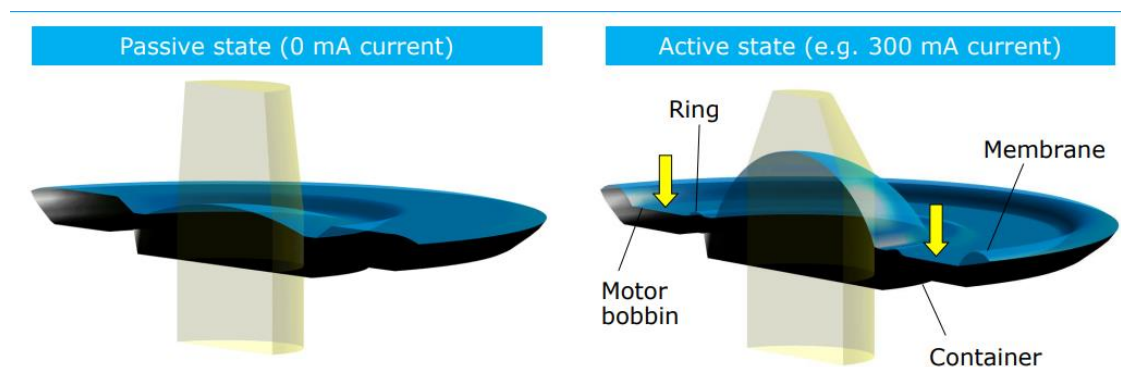


Fig. 3.1. Modo de funcionamiento de las lentes fluídicas de Optotune (imagen adaptada de optotune.com).

Optotune ofrece una amplia variedad de lentes sintonizables eléctricamente, disponibles en diferentes tamaños, potencia, dispersión y rangos de longitud de onda. La figura 3.2 muestra una imagen de diversos modelos de lentes de Optotune, adaptados a diferentes monturas. Los tiempos de respuesta son típicamente de milisegundos, lo que permite considerar aplicaciones basadas en cambios rápidos de la distancia focal.

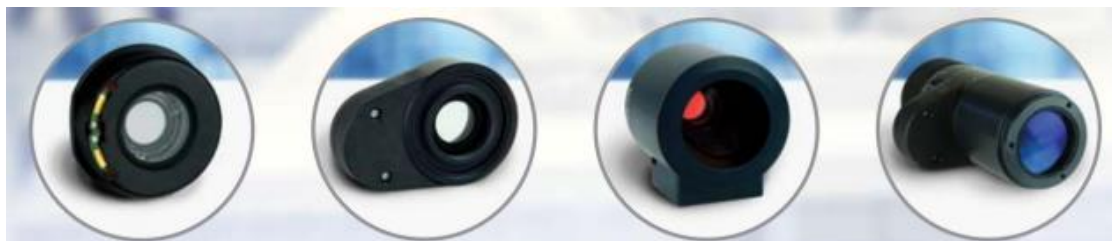


Fig. 3.2. Diferentes modelos de lentes sintonizables de Optotune (imagen adaptada de optotune.com)

Dentro de esta variedad hemos trabajado con lentes de la gama EL-10-30. Estos modelos operan con corrientes eléctricas de 0 a 300 mA, con una variación continua de la distancia focal de la lente, que puede variarse en intervalos de milisegundos.

Optotune ofrece tres tipos diferentes de carcasa de en la gama EL-10-30, que se muestran en la figura 3.3: (a) una carcasa compacta de 30×10,7 mm, (b) una carcasa de 30×20 mm con roscas de montaje en montura C y (c) una carcasa para montaje en montura C industrial con conector Hirose. En este trabajo hemos empleado lentes del modelo EL-10-30-C, que emplean el conector Hirose (caso (c) en la fig. 3.3).

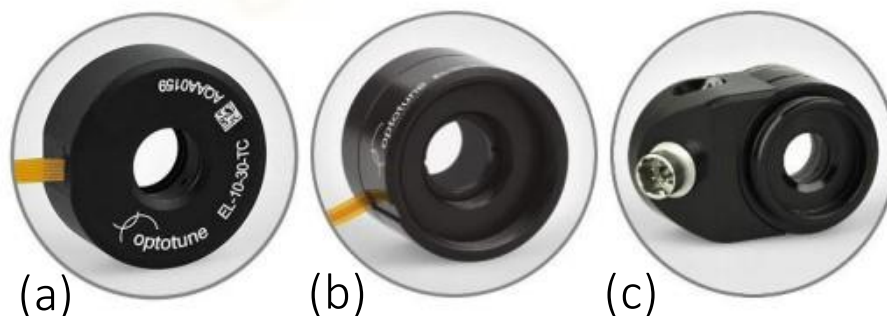


Fig. 3.3. Distintas carcasa de las lentes de la serie Optotune EL-10-30-C

3.2 Control de las lentes Optotune

Para el control de estas lentes, Optotune proporciona controladores específicos para aplicar la tensión y corriente necesarias para deformar la lente líquida y lograr la focal deseada. Actualmente ofrecen dos tipos de controladores: el *Electrical Lens Driver 4*, diseñado para lentes de tipo OEM con cables FPC de 6 patillas y carcasa de plástico, y el *Lens Driver 4i*, adecuado para controlar versiones industriales con conectores Hirose de 6 patillas y carcasa de acero.

Sistema óptico programable basado en lentes opto-electrónicas para enfoque adaptativo en cámaras digitales.

Éste último modelo es el que utilizamos. La figura 3.4 muestra fotografías del controlador y una de las lentes empleadas. El controlador se conecta a una salida USB del ordenador y por el otro extremo al conector Hirose de la lente.



Fig. 3.4, Controlador Lens Driver 4i y lente Optotune con conector Hirose.

Finalmente, Optotune proporciona un interfaz de control que permite a los usuarios ajustar la corriente aplicada a la lente de salida, que se muestra en la figura 3.5. Una vez realizada la conexión con la lente, el programa permite variar la corriente aplicada de manera continua bien mediante el cursor, o bien mediante los botones +/- . Además, se puede indicar el valor numérico. Opciones avanzadas permiten ajustar la señal a perfiles continuos, sinusoidal, rectangular o triangular, con niveles de señal superior e inferior y frecuencia de accionamiento ajustables.

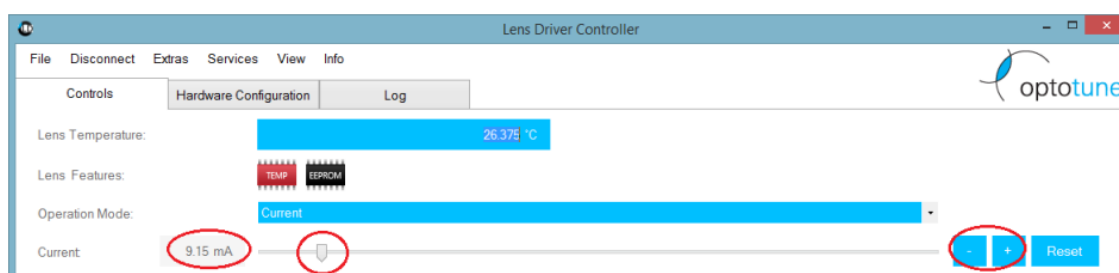


Fig. 3.5. Interfaz de control de las lentes Optotune, donde se indican los botones donde variar la corriente aplicada a la lente fluidicas.

En resumen, Optotune proporciona lentes fluidicas de diferentes características, así como los elementos controladores y software para su control. En este trabajo hemos utilizado este software para variar de manera controlada la focal de las lentes. Al final de la memoria se añade una nota técnica de Optotune con más detalles de la serie EL-10-30.



Capítulo 4

Sistema láser para la medida de distancias focales de lentes

En este capítulo se presenta el sistema láser que hemos desarrollado para la medida de las distancias focales de las lentes. En primer lugar, en este capítulo se ilustrará y verificará el procedimiento con una lente de vidrio estándar y, posteriormente, en el siguiente capítulo, se aplicará a medir las propiedades de las lentes sintonizables.

El método permite validar con precisión la distancia focal de lentes mediante la medición del diámetro del haz de luz del láser a diferentes distancias de la lente. Este método de medida de la distancia focal es una técnica directa y suficientemente precisa.

4.1 Procedimiento experimental

La figura 4.1 muestra un esquema del sistema experimental para la medida de la focal de las lentes. En este caso ilustramos las figuras con la luz viajando de derecha a izquierda para mostrar la misma dirección que se muestra en las fotografías del sistema experimental. Se emplea como fuente de luz un pequeño puntero láser. Mediante un objetivo de microscopio y una segunda lente convergente se realiza la operación de aumentar el diámetro del haz de luz, que a la salida del láser es de apenas un par de mm, a un tamaño de varios cm, en forma de un haz colimado.

Para conseguir que el haz sea colimado, esto es, que no sea convergente ni divergente, sino que mantenga su diámetro con la propagación, es necesario ajustar con precisión la distancia entre el objetivo de microscopio y la lente convergente que usamos como lente colimadora. El objetivo de microscopio es una lente compuesta, de distancia focal muy corta, que focaliza el haz de láser en un punto muy cercano a su salida. La lente colimadora debe colocarse de modo que este punto a la salida del microscopio esté situado en su punto focal objeto, de acuerdo con la discusión de la figura 2.3. De este modo, los rayos de salida son paralelos entre sí y el haz queda colimado.

A la salida de la lente colimadora se coloca un diafragma de diámetro variable para poder elegir el diámetro del haz. Dado que los láseres tienen un perfil de intensidad gaussiano, conviene ajustar el tamaño del diafragma para recoger un área central suficientemente intensa que proporcione un círculo de luz sobre una pantalla colocada de forma transversal. Justamente se usa esta pantalla para verificar la correcta posición de la lente colimadora, asegurando que el tamaño del círculo de luz se mantiene constante al desplazar la pantalla. Conviene que el diámetro del diafragma sea suficientemente grande para minimizar en lo posible los efectos de difracción, que dificultarían la determinación precisa del borde de haz y por tanto del diámetro del haz de luz presentado en la pantalla.

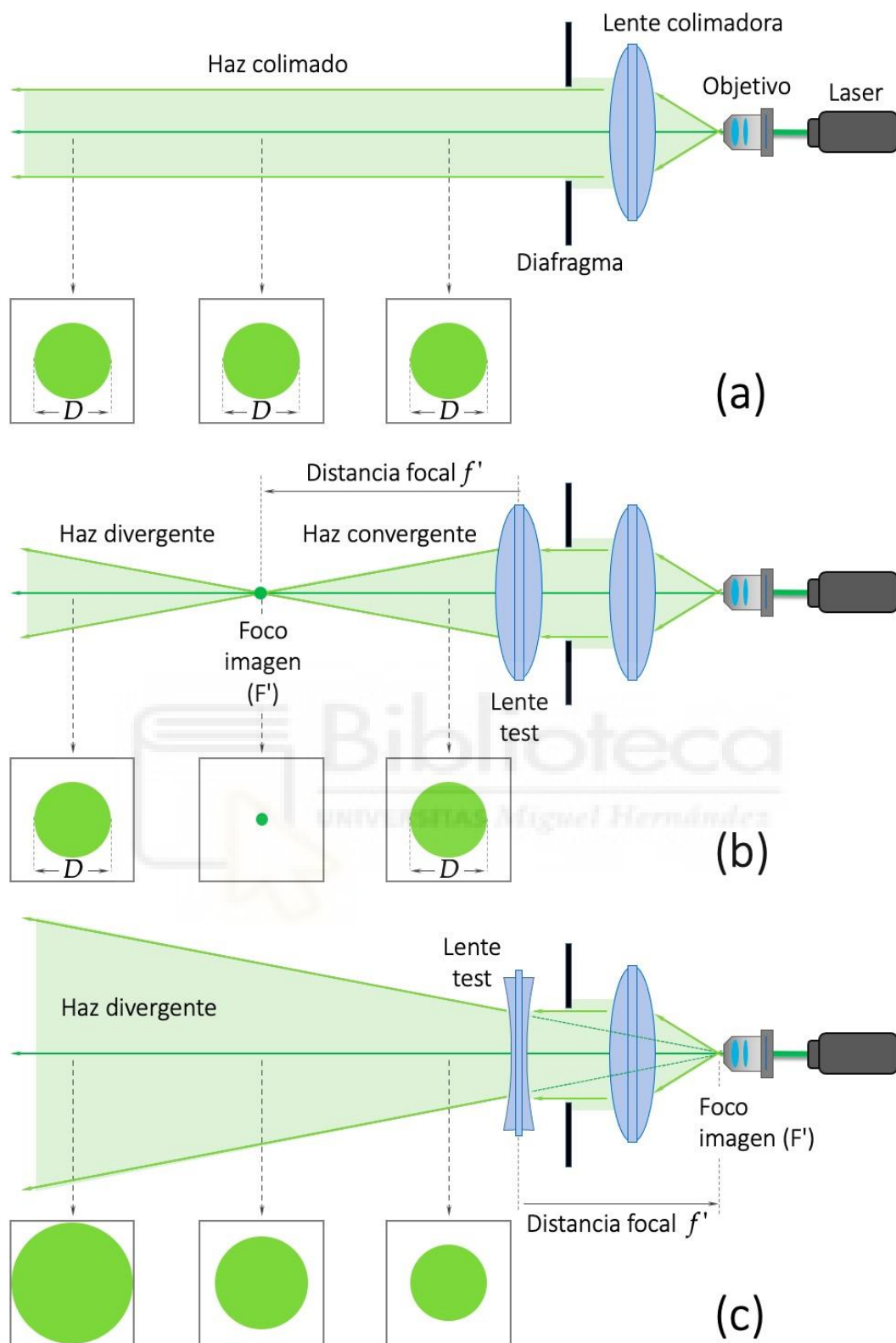


Fig. 4.1. Esquema del sistema experimental. (a) Haz colimado. (b) Introducción de una lente test convergente. (c) Introducción de una lente test divergente.

Una vez se ha obtenido un haz láser colimado de un diámetro de al menos unos 2cm, se introduce la lente test (Fig. 4.1 (b)). Ésta modificará el haz láser, haciendo que la luz converja hacia su punto focal imagen (F'). Si la lente test es convergente F' es un punto real y se observará una disminución del diámetro del haz láser sobre la pantalla a medida que nos acercamos al punto focal. Cuando se supera el punto focal, el haz láser diverge, y el tamaño del haz sobre la pantalla vuelve a aumentar (Fig. 4.1(b)). En cambio, si la lente test es divergente, el punto focal F' es virtual, y el haz aumenta de tamaño desde el mismo plano de la lente test. (Fig. 4.1(c)).

El método de medida de la distancia focal consiste en medir el diámetro del haz de luz sobre la pantalla de observación colocada a distintas distancias desde la lente test. De la figura 4.1, resulta evidente que el diámetro del haz de luz sobre la pantalla varía linealmente con la distancia medida desde la lente test, que suponemos una lente delgada simple y que tomamos como el origen de la medida de distancias. Por lo tanto, del ajuste lineal podremos determinar la distancia focal con precisión.

4.2 Sistema experimental

La figura 4.2, muestra una imagen del sistema experimental realizado en el laboratorio. En ella se muestra de derecha a izquierda el sistema propuesto en la figura 4.1, que contiene de derecha a izquierda el láser, el objetivo de microscopio, la lente colimadora, el diafragma, la lente test y la pantalla de observación, en la que puede observarse el haz láser proyectado.



Fig. 4.2. Fotografía del sistema experimental.

El láser es un láser de diodo de la marca Thorlabs, modelo DPSS CP532, que emite luz verde de longitud de onda de 532nm (figura 4.3, izquierda). Se colocó en un soporte modelo KM100 de Thorlabs, que permite mediante tornillos micrométricos alinear el láser en el banco y soportes donde se coloca el resto del sistema óptico.

El objetivo de microscopio es de la marca Edmund Optics con soporte y base agregada para mayor estabilidad (figura 4.3, derecha). La base incorpora un tornillo micrométrico que permite desplazar longitudinalmente el objetivo, y así poder ajustar con precisión la distancia con la lente colimadora.



Fig. 4.3. Detalle del láser CPS532 con soporte KM100 y del objetivo de microscopio sobre montura con ajustes micrométricos.

La fotografía de la figura 4.4 ilustra el sistema para generar el haz láser colimado. La lente simple de Edmund Optics, de distancia focal nominal de +5cm, se coloca entre el objetivo de microscopio y el diafragma. La distancia de la lente se ajusta para que el diámetro del haz láser de salida no varíe al propagarse. Esta invariancia se comprobó en una distancia de varios metros, por lo que podemos considerar que el haz láser de salida bien colimado. La fotografía también ilustra como el haz láser gaussiano es recortado por el diafragma, dejando pasar solamente la zona central que podemos aproximar como de una irradiancia aproximadamente uniforme.



Fig. 4.4. Fotografía del sistema para generar el haz de luz colimado.

4.3 Sistema de medida

A continuación, se coloca tras el diafragma la lente test que se desea analizar y se observa el haz láser sobre una pantalla.

Para poder medir con precisión el tamaño del haz de láser utilizamos una cámara monocromática Basler ace acA1300-200um con un lente esférica manual de zoom Tamron aspherical IR CCTV, modelo (figura 4.5). La cámara tiene una resolución de 1280×1024 píxeles, lo que permite obtener imágenes detalladas del haz de luz. La lente CCTV tiene una distancia focal variable de 4 a 12 mm, montura C, formato óptico de 1/2", rango de apertura F/1.2-360. Esta lente permite enfocar a distancias muy cercanas con gran aumento, lo que permite una buena precisión en la medida del diámetro del haz láser. Con objeto de proteger el sensor de la cámara de la intensidad del láser, se dejó una pantalla de papel donde proyectar el láser, y su imagen mediante la lente se enfocó en el sensor de la cámara, en un montaje como el que muestra la figura 4.5.



Fig. 4.5. Cámara Basler ace acA1300-200um con lente Tamron aspherical instalado enfocando el haz láser proyectado sobre un papel.

A modo de ejemplo, las imágenes que se muestran en la figura 4.6 ilustran lo que capta la cámara. Este ejemplo se obtuvo en una prueba a una distancia arbitraria con una de las lentes Optotune y con dos valores diferentes de corriente aplicada, con objeto de verificar su funcionamiento. En este caso se coloca adicionalmente una regla para visualizar fácilmente la variación del diámetro del haz láser. Se observa claramente como ocurre un cambio tanto en el diámetro del haz como en la intensidad del mismo cuando se aplica la corriente de 60 mA en comparación con la situación sin corriente eléctrica aplicada.

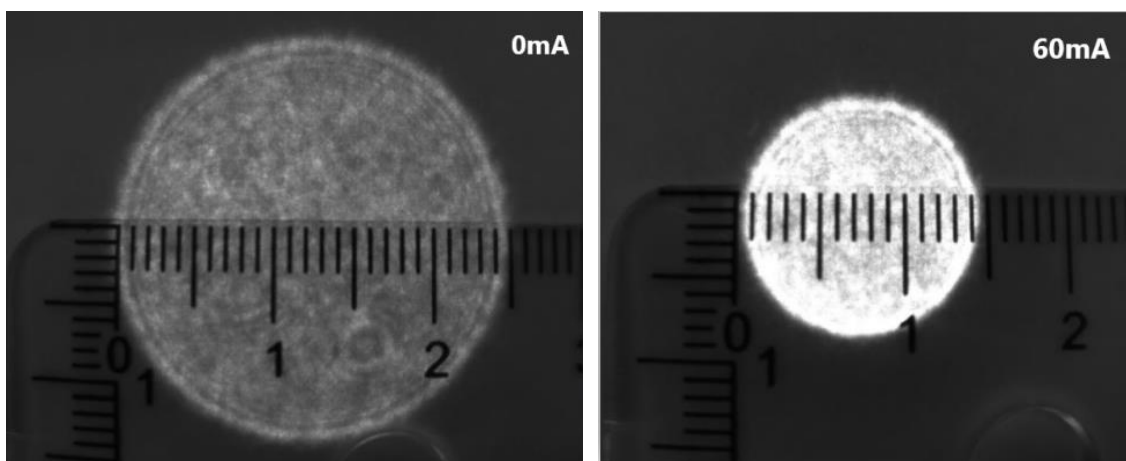


Fig. 4.6. Ejemplo de la imagen observada en la cámara para dos valores de corriente eléctrica aplicada a una lente Optotune.

4.4 Resultados con lentes estándar

En esta fase del proyecto utilizamos varias lentes simples de vidrio, con distancias focales conocidas, para verificar el procedimiento. La figura 4.7, muestra el esquema de la medida del diámetro $D(x)$ en función de la distancia x medida desde la propia lente test. A la vista de la figura, el diámetro sigue una relación del tipo

$$D(x) = D_0 - \frac{D_0}{f'} x \quad (4.1)$$

donde D_0 indica el diámetro en el punto $x = 0$. Para determinar la distancia focal de la lente basta determinar el punto x para el cual $D(x)$ se hace cero. La medida del diámetro del haz a distintas distancias permite realizar un ajuste por mínimos cuadrados y encontrar una medida más fiable que la realizada con una única medida.

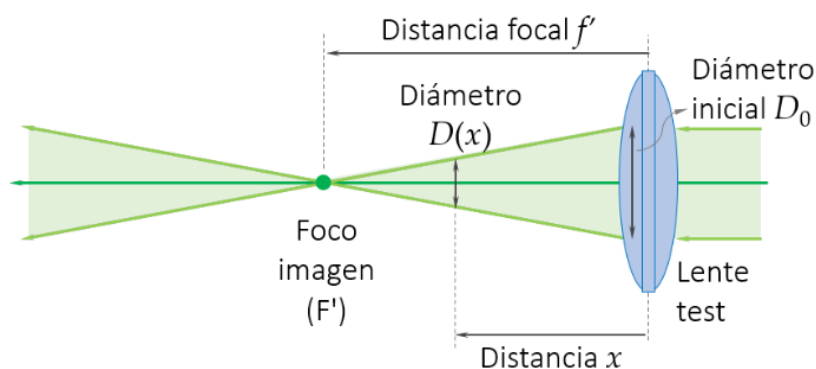


Fig. 4.7. Geometría de la medida del diámetro del haz láser en función de la distancia x desde la lente test a la pantalla.

4.4.1 Resultados con lente convergente de focal +250 mm

En primer lugar, procedimos a medir el diámetro del haz de luz láser a distintas distancias con la lente convergente de focal nominal de 250 mm. La gráfica de la figura 4.8, muestra los resultados. Al ser una lente convergente, el diámetro $D(x)$ inicialmente decrece y posteriormente crece al superar el plano focal. Por ello, cuando se ha superado el plano focal, asignamos un signo negativo a los valores de $D(x)$, para que los resultados sigan un comportamiento lineal de acuerdo con la trayectoria del rayo marginal del haz. Los resultados de la figura 4.8 muestran que efectivamente se sigue un comportamiento lineal, con un excelente coeficiente de correlación $R^2 = 0.99839$.

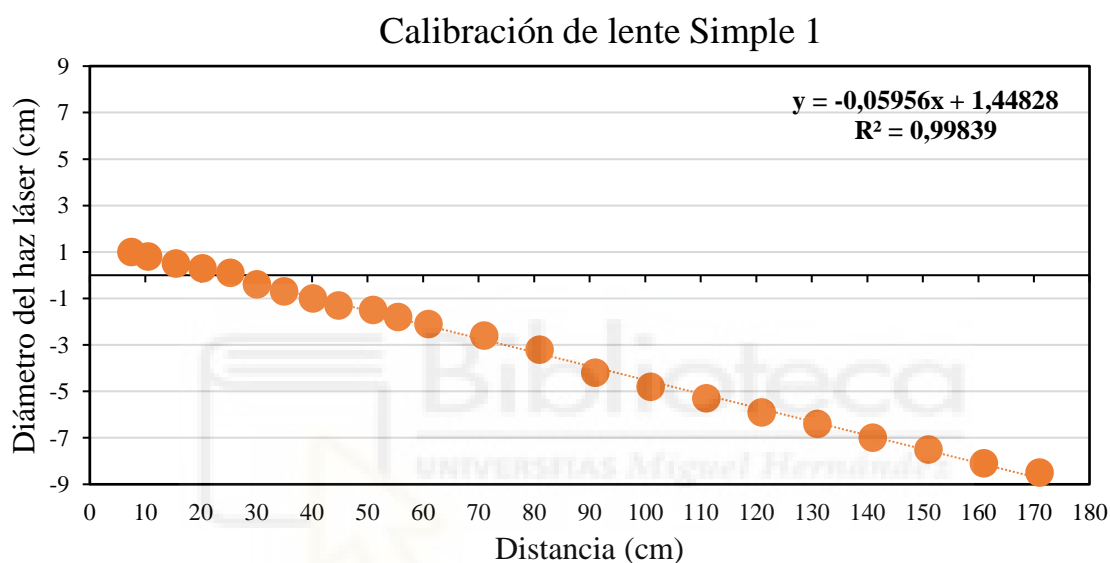


Fig. 4.8. Resultados de la calibración de una lente simple convergente de focal de +250 mm.

La gráfica muestra como el diámetro del haz láser inicialmente se reduce y aproximadamente a los 25 cm se hace mínimo. Se realizó un ajuste por mínimos cuadrados para determinar la línea recta que mejor se ajusta a estos datos, determinando la ecuación $y = -0.05956x + 1.44828$. Despejando para obtener la focal mediante los resultados de la pendiente y la ordenada al origen se obtiene que el valor de la distancia focal es:

$$f' = x|_{y=0} = -\frac{1.44828}{-0.05956} = +24.32 \text{ cm}$$

que se ajusta muy bien al valor nominal de la lente test empleada.

4.4.2 Resultados con lente convergente de focal +110 mm

A continuación, procedimos a repetir el experimento con otra lente convergente de distancia focal nominal de 110 mm. Los resultados se muestran en la figura 4.9. Se observa de nuevo un buen comportamiento lineal pero ahora la recta ahora corta el eje x en un valor mucho menor, ya que la lente tiene una focal más corta. A partir de la distancia de 110 cm no pude medir el diámetro debido a que se hacía demasiado grande, se salía de la pantalla.

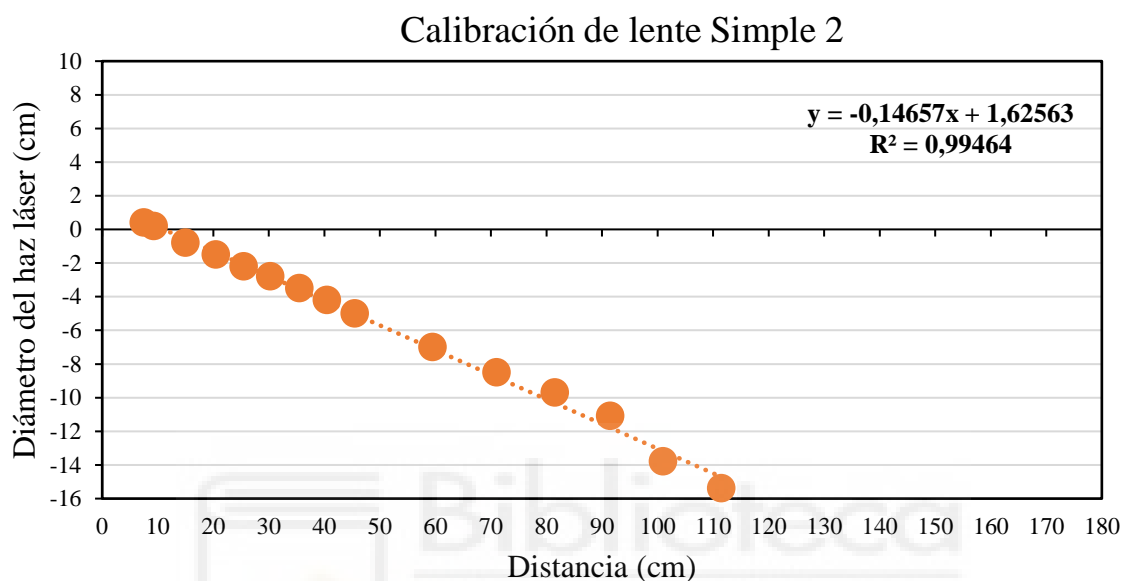


Fig. 4.9. Resultados de la calibración de una Lente simple convergente de focal de +110 mm.

Nuevamente se realizó el ajuste para determinar la línea recta que mejor se ajusta a los datos y se determinó la siguiente ecuación del ajuste: $y = -0.14657x + 1.62563$, con un coeficiente de correlación $R^2 = 0.99464$. En este caso el resultado obtenido fue

$$f' = x|_{y=0} = -\frac{1.62563}{-0.14657} = +11,09 \text{ cm}$$

de nuevo, con un ajuste excelente con el valor nominal de la focal de la lente test.

4.4.3 Resultados con lente divergente de focal -90 mm

Finalmente procedimos a medir el diámetro del haz de luz láser a distintas distancias con la lente divergente de focal nominal de -90 mm. En este caso se observó que el tamaño del haz crece desde la primera distancia tal y como es de esperar para una lente divergente.

A partir de la distancia de 100 cm de nuevo no pude medir el diámetro debido a que se hacía demasiado grande, se salía de la pantalla. No obstante, la gráfica de la figura 4.10, muestra suficientes puntos que siguen un buen comportamiento lineal. Pero ahora el punto de corte de la recta está en valores negativos de x , tal y como corresponde a un foco imagen F' virtual.

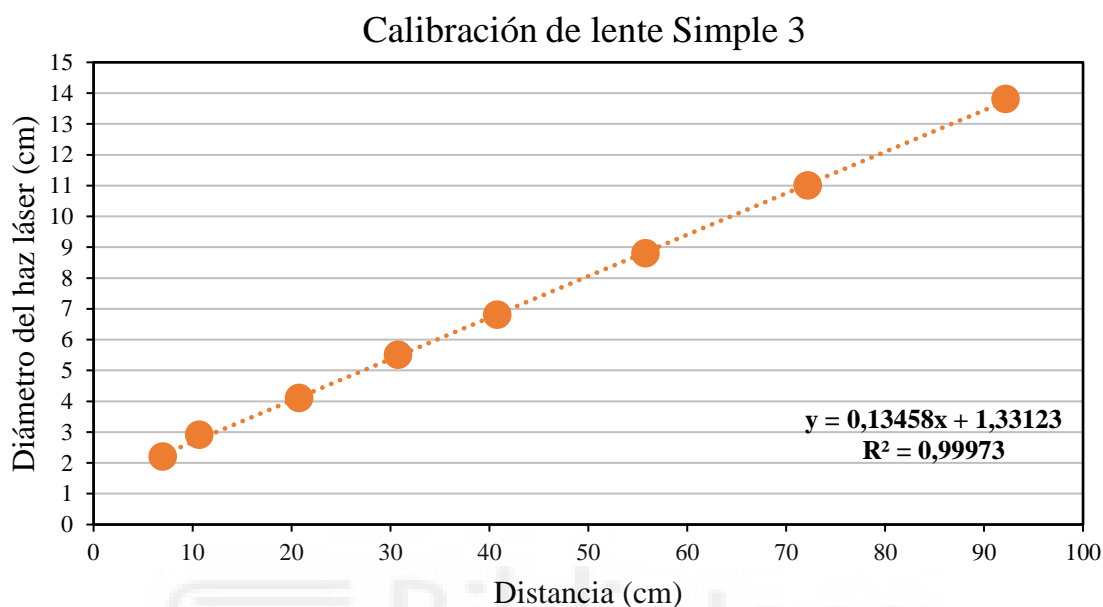


Fig. 4.10. Resultados de la calibración de una Lente simple divergente de focal de -90 mm.

El ajuste por mínimos cuadrados determinó la siguiente recta de regresión $y = 0.13458x + 1.33123$ con un excelente coeficiente de correlación $R^2 = 0.99973$. Despejando, se obtiene en este caso el siguiente resultado de la distancia focal:

$$f' = x|_{y=0} = -\frac{1.33123}{0.13458} = -9,89 \text{ cm}$$

de nuevo de acuerdo con el valor esperado.

En conclusión, estos resultados validan el método propuesto por medir la distancia focal de las lentes, sean convergentes o divergentes. Debe indicarse, no obstante, que el método es válido para lentes simples, en las que la distancia x pueda medirse fácilmente con su origen en la posición de la propia lente. Para lentes gruesas o lentes compuestas debe determinarse también la posición del plano principal imagen H' de la lente para poder determinar la distancia focal.

Sistema óptico programable basado en lentes opto-electrónicas para enfoque adaptativo en cámaras digitales.



Capítulo 5

Calibración de una lente Optotune y aplicación en un sistema de enfoque automático

5.1 Calibración de una lente sintonizable Optotune

En este capítulo se presentan los resultados con las lentes sintonizables de Optotune. Se utilizó el sistema y procedimiento de medida de la focal descrito en el capítulo anterior para medir la focal para varias condiciones de corriente de las lentes sintonizables. Finalmente, se presenta la utilización de una de estas lentes en un sistema de enfoque automático controlado desde un ordenador.

La figura 5.1 muestra una fotografía del sistema experimental, donde ahora se observa a la izquierda la lente sintonizable de Optotune, conectada a través del conector Hirose al controlador *Lens Driver Controller*, a su vez conectado a un ordenador. Mediante el software de control permite aplicar una corriente eléctrica que varía de en un rango de 0 a 30 0mA, para variar la distancia focal de la lente optoelectrónica.

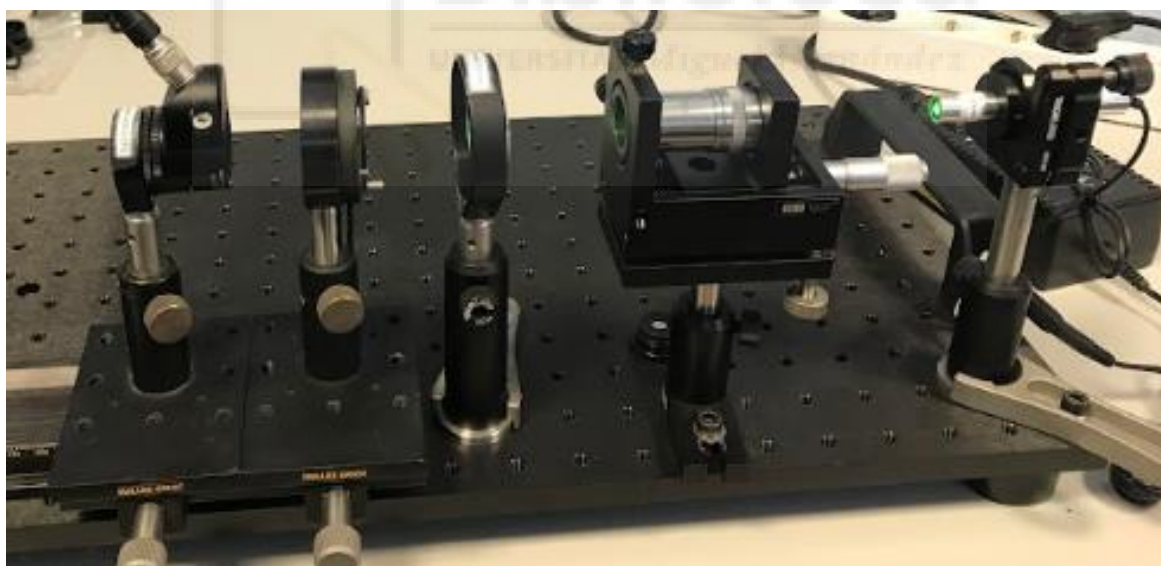


Fig. 5.1. Sistema de calibración de lentes aplicado a la lente opto-electrónica Optotune.

En el laboratorio hemos empleado dos modelos de lentes Optotune, ambas de la serie EL-10-30-C. El modelo EL-10-30-Ci-VIS-LD es la configuración básica y actúa siempre como una lente convergente y tiene un rango de potencia óptica nominal que puede variar de +5 dioptrías (distancia focal de +200 mm) hasta +10 dioptrías (distancia focal de +100 mm). Por otra parte, el modelo EL-10-30-Ci-VIS-LD-MV lleva incorporado un offset en forma de una lente compensadora de focal de -150 mm, de modo que tiene una potencia óptica nominal que

puede variar desde ser una lente divergente de potencia de $-1,5$ dioptrías (distancia focal de -667 mm) a ser una lente convergente de potencia de $+3,5$ dioptrías (distancia focal de $+286$ mm). En ambos modelos, el rango de operación de las lentes es operativo en el rango visible de longitudes de onda (400-700 nm).

En este trabajo se presentan los resultados solamente para el modelo EL-10-30-Ci-VIS-LD-MV, que nos permite variar el carácter de la lente, de ser divergente a ser convergente. Se aplicó el procedimiento expuesto en el capítulo anterior para diferentes valores de la corriente aplicada. Así, la figura 5.2 muestra el resultado cuando no se aplica corriente a la lente. Como se observa, el diámetro del haz láser siempre crece con la distancia, lo que radica que se trata de una lente divergente.

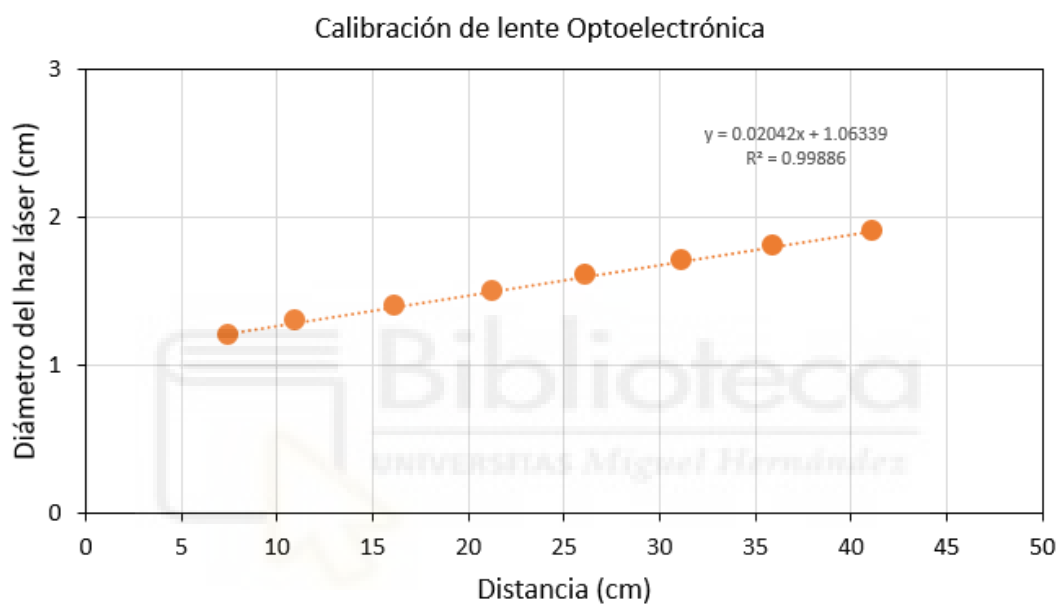


Fig. 5.2. Calibración de la lente Optotune EL-10-30-Ci-VIS-LD-MV sin corriente aplicada.

Para calcular la distancia focal realizamos el ajuste lineal de los puntos experimentales, que dio como resultado $y = 0.02042x + 1.06339$, con un coeficiente de correlación $R^2 = 0.99886$. Como en el capítulo anterior, calculamos la distancia focal buscando el valor de x por la cual se obtiene $y = 0$, siendo el resultado

$$f'(i = 0mA) = x|_{y=0} = -\frac{1.06339}{0.02042} = -52.08 \text{ cm}$$

El resultado confirma el carácter divergente de la lente, si bien el valor de la focal es cercano, pero ligeramente inferior al valor nominal indicado por el fabricante en ausencia de corriente.

A continuación, repetimos el procedimiento con un amperaje de **60mA** y obtuvimos los resultados que se muestran en la figura 5.3. Ahora se observa que el tamaño del haz láser apenas varía, lo que indica que la lente apenas tiene potencia óptica (la focal tiende a ser infinita). La gráfica determinó la siguiente ecuación del ajuste lineal $y = 0.00273x + 1.09333$ con un coeficiente de correlación $R^2 = 0.62467$, a partir del cual se obtiene una distancia focal

$$f'(i = 60mA) = x|_{y=0} = -\frac{1.09333}{0.00273} = -400.48 \text{ cm}$$

No obstante, notemos que esta medida puede tener un error significativo, a la vista del bajo coeficiente correlación.

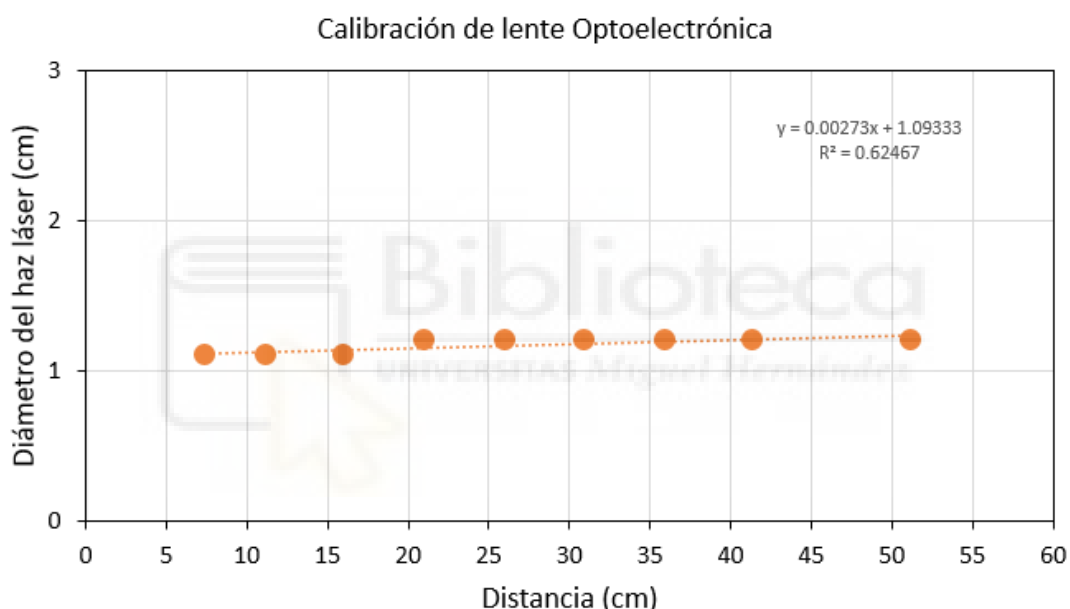


Fig. 5.3. Calibración de la lente Optotune EL-10-30-Ci-VIS-LD-MV con corriente aplicada de 60 mA.

Seguidamente aumentamos la corriente a **120mA**; Los resultados se muestran en la figura 5.4. Ahora se observa que el haz láser reduce su tamaño con la propagación, lo que indica que ahora la lente es convergente. De las medidas se deduce que la focal supera los 60 cm, puesto que en el rayo medido no se alcanza un diámetro de haz cercano a cero. La gráfica determinó la siguiente recta de regresión lineal $y = -0.01065x + 1.01913$ con un coeficiente de correlación $R^2 = 0.94878$, a partir de la cual se obtiene el siguiente valor de la distancia focal

$$f'(i = 120mA) = x|_{y=0} = -\frac{1.01913}{-0.01065} = +95,69 \text{ cm}$$

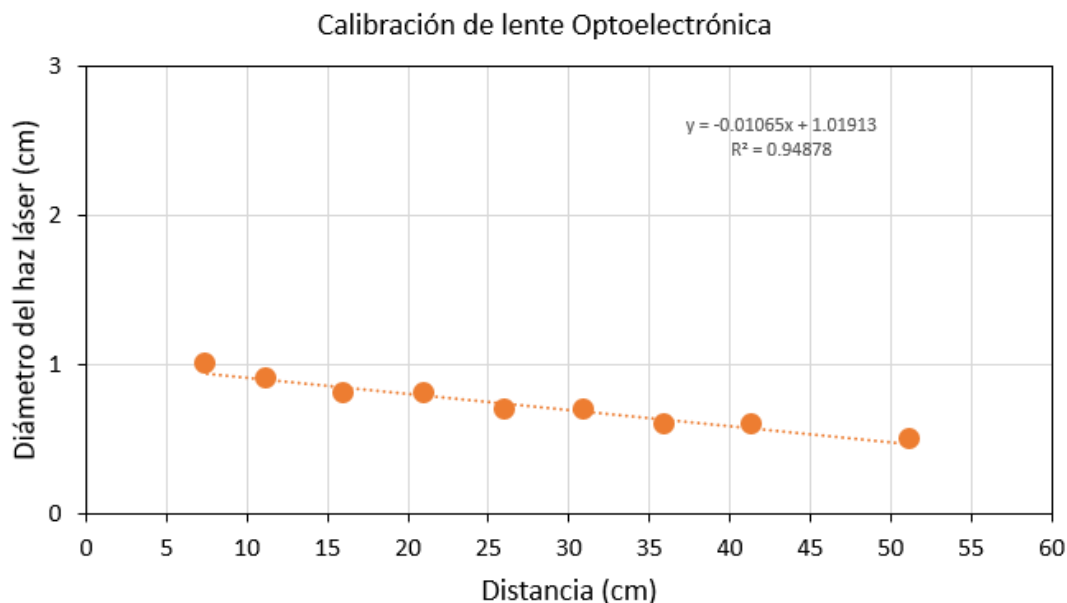


Fig. 5.4. Calibración de la lente Optotune EL-10-30-Ci-VIS-LD-MV con corriente aplicada de **120 mA**.

La figura 5.5 muestran los resultados para una corriente aplicada de **180 mA**. La gráfica muestra ahora el comportamiento de una lente convergente, en la que el tamaño del haz decrece con la distancia hasta un punto situado entre 35 y 40 cm, y vuelve a crecer por encima de 40 cm. Como los dos últimos puntos claramente corresponden a distancias más allá del foco, hemos realizado otra gráfica donde a estos dos puntos les damos un valor negativo.

El ajuste lineal determinó la siguiente ecuación $y = -0.02545x + 1.00546$ con un coeficiente de correlación $R^2 = 0.95501$, a partir de la cual se obtiene el siguiente valor de la distancia focal

$$f'(i = 180mA) = x|_{y=0} = -\frac{1.00546}{-0.02545} = +39,51 \text{ cm}$$

El resultado se ajusta bien al valor esperado de acuerdo a la gráfica de la figura 5.5.

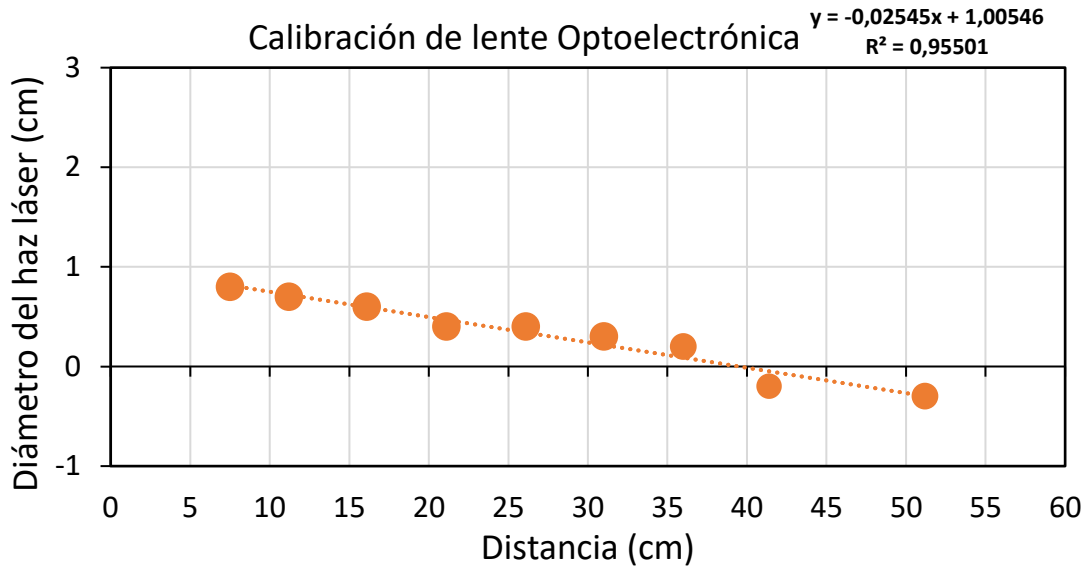


Fig. 5.5. Calibración de la lente Optotune EL-10-30-Ci-VIS-LD-MV con corriente aplicada de **180 mA**.

Finalmente, la figura 5.6 muestran los resultados para la corriente máxima que podemos aplicar de **292mA**. Se observa que la lente se hace más convergente puesto que la recta corta el eje horizontal en un punto más cercano localizado en torno a los 20 cm. El ajuste lineal de los puntos experimentales determinó la siguiente ecuación $y = -0.05434x + 1.00070$ con el coeficiente de correlación $R^2 = 0.99626$. A partir de este ajuste se obtiene el siguiente valor de la distancia focal

$$f'(i = 292mA) = x|_{y=0} = -\frac{1.00070}{-0.05434} = +18,42 \text{ cm}$$

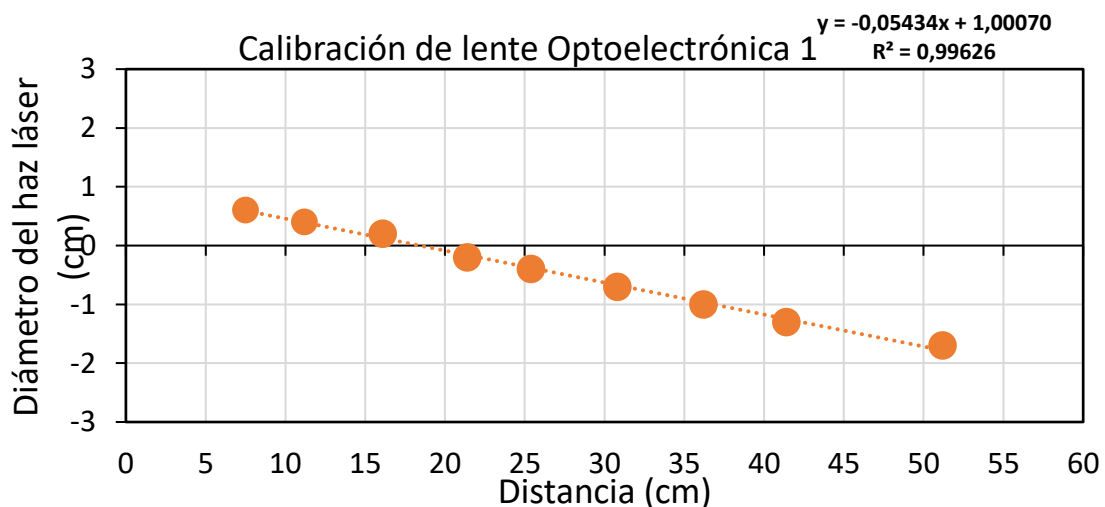


Fig. 5.6. Calibración de la lente Optotune EL-10-30-Ci-VIS-LD-MV con corriente aplicada de **292 mA**.

En la figura 5.7 mostramos los valores de la potencia óptica de la lente $P = 1/f'$ expresada en dioptrías, para los cinco valores de corriente aplicados. Observamos como la potencia óptica sigue un comportamiento lineal con la corriente eléctrica aplicada, de modo que la potencia aumenta progresivamente al aumentar la corriente.

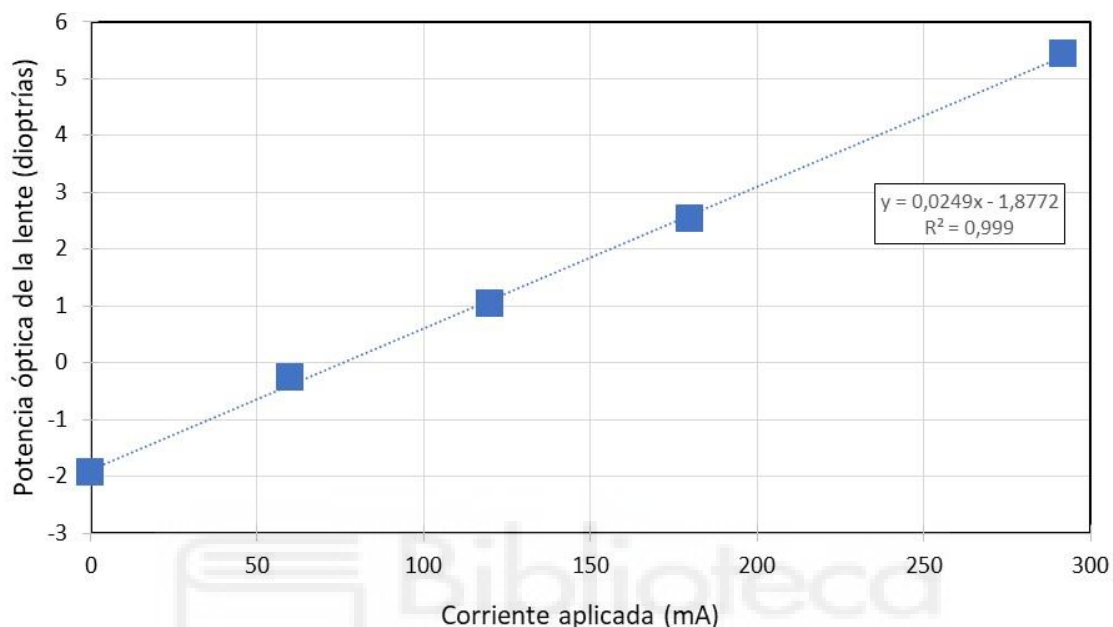


Fig. 5.7. Dependencia de la potencia óptica de la lente Optotune EL-10-30-Ci-VIS-LD-MV en función de la corriente aplicada.

Para ilustrar la capacidad de modificar la distancia focal, la figura 5.8 muestra las capturas en la cámara cuando se aplican diferentes de corriente. En este caso la cámara se situó cercana al foco de la lente para la corriente de 120 mA, a una distancia de la lente alrededor de 100 cm. Se observa la capacidad de cambiar el diámetro del haz láser, y por tanto su intensidad, mediante los cambios de corriente aplicada.

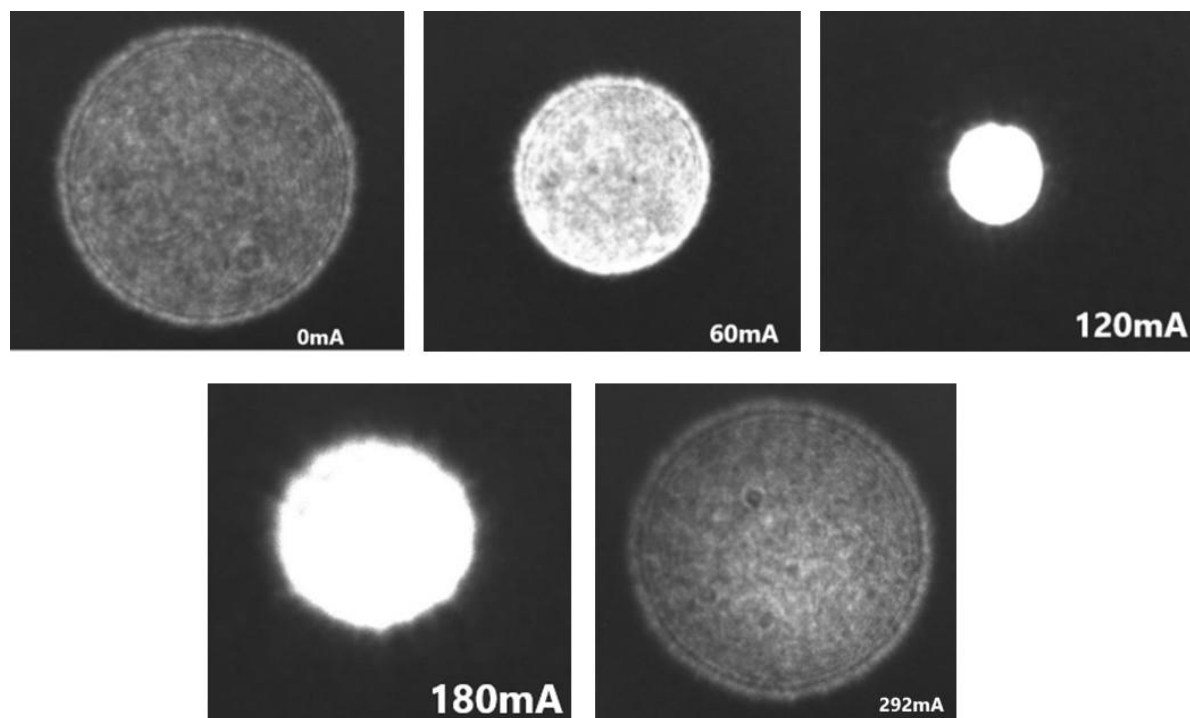


Fig. 5.8. Capturas en la cámara situada aproximadamente a 1 metro de la lente Optotune, para diferentes valores de la corriente aplicada.

5.2 Aplicación en un sistema de enfoque automático

Finalmente, en esta sección se realizó un sencillo sistema óptico para demostrar la capacidad de obtener un enfoque controlado por ordenador con la lente Optotune EL-10-30-Ci-VIS-LD. Para ello se realizó un sistema como el que se muestra en la figura 5.9. Delante de la cámara Basler se situó un objetivo de un proyector. Esta lente permite obtener una imagen de calidad en la cámara, no afectada sensiblemente por aberraciones, y con un amplio campo visual.

Delante del objetivo de proyector se situó la lente Optotune. La figura 5.10 ilustra el sistema en el laboratorio, donde delante de las lentes situamos diferentes objetos a distintas distancias. Al fondo del laboratorio (a una distancia de unos 15 metros) se observa un armario con carpetas. A distancias más cercanas situamos un cartel con las palabras “FUNDAMENTOS FISICOS DE LA VISIÓN” (a una distancia de aproximadamente 2 metros), unos destornilladores (a una distancia de medio metro) y una regla (a una distancia de unos pocos centímetros).

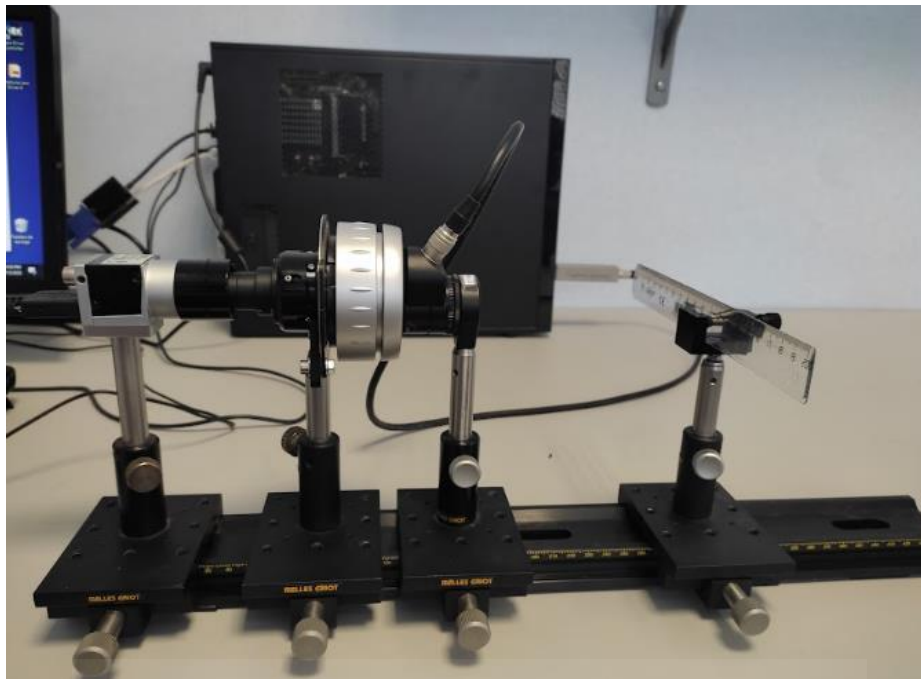


Fig. 5.9. Vista lateral y superior del montaje óptico compuesto de la lente Optotune, un objetivo de proyector y la cámara.

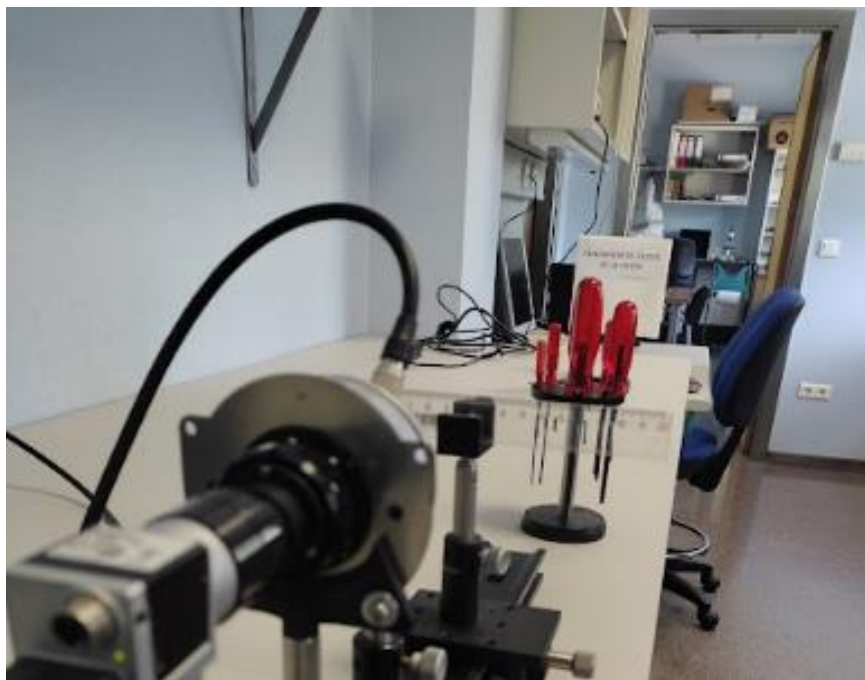


Fig. 5.10. Sistema óptico de enfoque programable y objetos de prueba.

Se ajustó la posición de la cámara para enfocar el fondo del laboratorio cuando la lente Optotune no tiene corriente aplicada. Como se ha visto en la sección anterior, la lente Optotune aumenta la potencia óptica a medida que se le aplica corriente. De este modo, enfocando al infinito en ausencia de corriente, podemos aprovechar el incremento de potencia óptica con la corriente para enfocar objetos situados más cercanos.

La figura 5.11 muestra los resultados que se obtuvieron variando la corriente aplicada en cada caso para enfocar los diferentes objetos situados a distintas distancias. En la figura 5.11(a) se observa la situación cuando no se aplica corriente a la lente Optotune. Se observa el fondo del laboratorio enfocado, lo que se aprecia en la nitidez de las carpetas en el armario. El cartel con las palabras “FUNDAMENTOS FISICOS DE LA VISION” se observa, pero ligeramente desenfocado. El desenfoco es mayor en los destornilladores y la regla no se llega a apreciar, debido al gran desenfoco.

La figura 5.11(b) corresponde a la situación en la que se ajustó la corriente a un valor de 29.18 mA, donde se observó el mejor enfoque del cartel con las palabras “FUNDAMENTOS FISICOS DE LA VISION”. Ahora las carpetas del fondo ligeramente aparecen desenfocadas. En la figura 5.11(c) se aumentó la corriente hasta 87,17 mA, para poder enfocar los destornilladores. El resto de objeto aparecen desenfocados. Finalmente, en la figura 5.11(d) se aumentó la corriente hasta el valor máximo de 292 mA y se alcanzó a enfocar la regla. El resto de los objetos no se aprecian pues aparecen completamente desenfocados.

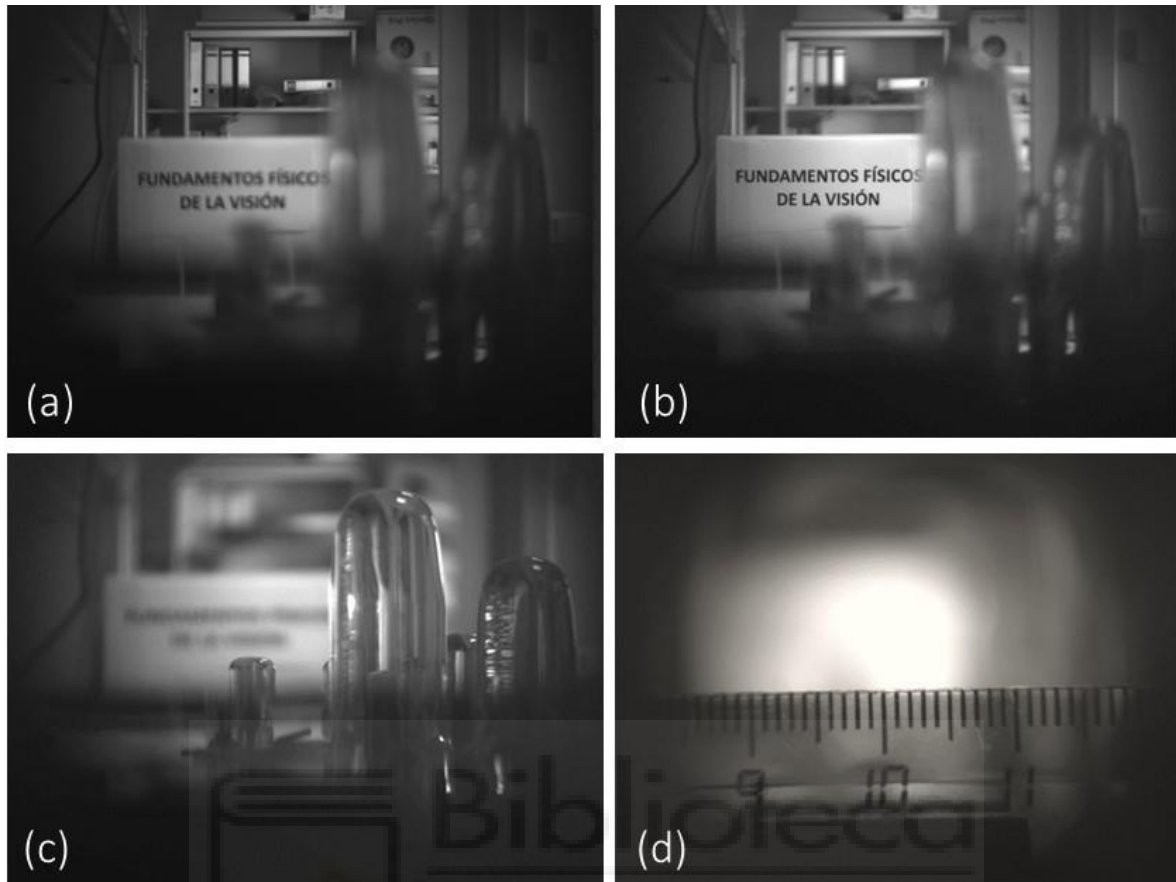


Fig. 5.11. Imágenes captadas en la cámara cuando se ajusta la corriente de la lente Optotune. (a) 0 mA, (b) 29,18 mA, (c) 86,17 mA y (d) 292 mA.

Todos estos resultados prueban la capacidad de enfocar electrónicamente mediante la lente Optotune, desde distancias muy lejanas hasta un punto próximo de apenas unos pocos centímetros, y representan el objetivo final que nos habíamos propuesto al iniciar el trabajo.

Sistema óptico programable basado en lentes opto-electrónicas para enfoque adaptativo en cámaras digitales.



Capítulo 6

Conclusiones

En resumen, en este trabajo se ha puesto en marcha una lente sintonizable fluídica (lente líquida) de la marca Optotune y se ha utilizado para realizar un sistema óptico de enfoque automático, sin partes móviles.

Para poder alcanzar este objetivo final he realizado los siguientes avances y desarrollos:

- He revisado la teoría básica de las lentes, su distancia focal y su relación con la curvatura de las superficies de la lente, y su capacidad para formar imágenes.
- He revisado el funcionamiento básico de las lentes fluídicas y cómo varían su distancia focal mediante la aplicación de una corriente eléctrica que modifica su curvatura.
- Hemos puesto en marcha una lente fluídica de la marca Optotune, y hemos instalado y documentado el software de control.
- Hemos puesto en marcha un sistema óptico simple para medir distancias focales de lentes basado en un láser, un objetivo de microscopio, y una lente convergente que se usa para colimar el haz láser. Incorporando una lente test tras la lente colimadora y midiendo la variación del diámetro del haz laser con la distancia hemos podido medir con precisión las distancias focales.
- He caracterizado en primer lugar lentes estándar de vidrio, de distancia focal conocida, para verificar el método de medida.
- Una vez comprobado, se ha aplicado el mismo método a caracterizar la distancia focal de una lente fluídica de la marca Optotune con la corriente aplicada. Los resultados muestran cómo la lente cambiar de ser divergente cuando no se aplica corriente a ser una lente convergente con la aplicación de corriente. Los valores obtenidos se ajustan razonablemente bien con los valores indicados por el fabricante.
- Finalmente, se ha realizado un sistema óptico sencillo consistente en una cámara digital, un objetivo de proyección y la lente fluídica. Hemos comprobado la capacidad de enfocar electrónicamente diferentes planos objeto, desde distancias muy lejanas hasta distancias de apenas unos centímetros.

Sistema óptico programable basado en lentes opto-electrónicas para enfoque adaptativo en cámaras digitales.

Este trabajo abre por tanto una nueva línea de trabajo en el Laboratorio TecnOPTO de la UMH (<https://tecnopto.umh.es/>), centrada en la posibilidad de cambiar la focal de sistemas ópticos de manera controlada desde un ordenador. Este tipo de tecnología basada en las lentes fluídicas suponen una nueva herramienta de gran utilidad en los campos de la óptica, la visión artificial o el procesado de imágenes.

Resulta especialmente interesante la elevada velocidad a la que se puede variar la focal (en el orden de milisegundos). Este aspecto no ha sido aún explotado en este trabajo, pero supone una ventaja importante con respecto a las lentes tradicionales.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. Sugiura, Variable - focus liquid-filled optical lens, *Applied Optics*, 1996, pp. 32 (22) 4181-4186.
- [2] Optotune, «Optotune.com,» Optotune Switzerland AG, 2023. [En línea]. Available: <https://www.optotune.com/focus-tunable-lenses..>
- [3] Y. Xu, Variable - focus liquid lens based on electrically responsive fluid, *Optics Letters*, 2022, pp. 47 (3) 509-512.
- [4] S. Studer, «Distance measurement using an Optotune focus tunable lens,» *Proceedings Spie*, pp. 11693 - 116930B, 2021.
- [5] S. H. M. N. T. H. B. C. M. G. S. Lou, «Electrically Tunable Lens (ETL)-Based Variable Focus Imaging System for Parametric Surface Texture Analysis of Materials,» *Micromachines*, pp. 13-17, 2021.
- [6] X. B. E. G. V. A. L. S. Y. M. V. R.-L. C. B.-G. M. V. E. L. S. M. C. Dorronsoro, «Turnable lenses: dynamic characterization and lined-tuned control for high - speed applications,» *Optics Express* , pp. 27(3) 2085-2100, 2019.

Sistema óptico programable basado en lentes opto-electrónicas para enfoque adaptativo en cámaras digitales.



Datasheet lentes sintonizables Optotune

FAST ELECTRICALLY TUNABLE LENS EL-10-30 SERIES



The curvature of this shape changing polymer lens is adjusted by applying current. The focal length is accordingly tuned to a desired value within milliseconds. Optotune offers three different types of housings of the EL-10-30. The compact 30x10.7 mm housing, a 30x20 mm housing with C-mount threads and the Industrial C-mount housing (Ci) with Hirose connector. For each housing there are different options to adapt the lens to your needs:

- Diverse cover glass coatings
- Optional offset lenses
- Optical power range

The table below summarizes the possible options for the three different housings. The overview of available standard products is summarized on page 2. At the end of this document you find a detailed explanation of the naming concept when ordering a customized EL-10-30.

Option	EL-10-30-TC	EL-10-30-C	EL-10-30-Ci
Cover glass coatings	VIS ¹ , NIR ²	VIS, NIR, 1064 ³	VIS, NIR, 1064
Optional offset lens	No	Yes	Yes

¹400-700 nm broad band ²700-1100 nm infra-red broad band ³narrow band 1064 nm

The following table outlines the specifications of our standard electrically tunable lens EL-10-30. Cover glass coatings and tuning range can be adapted on demand.

Mechanical specifications	EL-10-30-TC	EL-10-30-C	EL-10-30-Ci	
Clear aperture	10	10	10	mm
External diameter	30	30	Oval shape 48x30.5	mm
Thickness	10.7	24.6	24.6	mm
Weight	22.9	34.0	46.0	g
Connector length	100	100	1000 ¹	mm
Lifecycles (10-90% sinusoidal)	>1'000'000'000	>1'000'000'000	>1'000'000'000	

¹ Specified maximum Hirose cable length is 3m. Tests with 10m were successful, however the I2C runs in clock-stretching mode.

Electrical specifications

Absolute maximum voltage (coil)	5	V
Absolute maximum voltage (temp. sensor)	4.3	V
I2C supply voltage	3.3 (nominal), 3.6 (maximum)	V
Nominal control current with Lens Driver 4	0 to 250	mA
Absolute max. control current	0 to 400	mA
Motor coil resistance @ 25°C	12.5	Ω
Power consumption	0 to 0.9 (nominal), 0 to 2.0 (absolute max.)	W
Temperature sensor & memory	Yes (STTS2004)	
Response time (10%-90% step)	<2.5	ms
Settling time (typical at 30°C)	15 (rectangular step), 6 (controlled step)	ms

Optical specifications

	EL-10-30-TC	EL-10-30-C & Ci	
Focal tuning range @ 30°C ²	+50 to +120	+100 to +200	mm
Dispersion (at 20°C) 486 nm	1.302		
589 nm	1.300		
656 nm	1.299		
800 nm	1.298		
1065 nm	1.297		
1550 nm	1.296		
Abbe number V	100		
Wavefront error (@530 nm, 0 mA) Optical axis vertical / horizontal	<0.25 / <0.6	<0.15 / <0.25	λ RMS
Lens type	plano-convex		
Transmission spectrum	see Figure 7		
Optical retardance @590nm	6.4		nm
Optical damage threshold @ 1064 nm	10		kW/cm ²
Polarization	preserving		

Thermal specifications

Storage temperature	[-40,+85]	°C
Operating temperature ²	[-20,+65]	°C

² Different focal tuning ranges available upon request. Guaranteed tuning range is reduced over operating temperature range by 0.07 dpt/°C.

Overview of available standard products

Standard products	Tuning range ²	Refractive index	Cover glass coating	RMS wave- ³ front error	Integrated offset lens	Temperature sensor
EL-10-30-TC-VIS-12D	+8.3 to +20 dpt	1.30	400 – 700 nm	<0.25/<0.60 □	No	Yes
EL-10-30-TC-NIR-12D	+8.3 to +20 dpt	1.30	700 – 1100 nm	<0.25/<0.60 □	No	Yes
EL-10-30-C-VIS-LD	+5 to +10 dpt	1.30	400 – 700 nm	<0.15/<0.25 □	No	Yes
EL-10-30-C-NIR-LD	+5 to +10 dpt	1.30	700 – 1100 nm	<0.15/<0.25 □	No	Yes
EL-10-30-C-VIS-LD-MV	-1.5 to +3.5 dpt	1.30	400 – 700 nm	<0.15/<0.25 □	Yes (-150 mm)	Yes
EL-10-30-C-NIR-LD-MV	-1.5 to +3.5 dpt	1.30	700 – 1100 nm	<0.15/<0.25 □	Yes (-150 mm)	Yes
EL-10-30-Ci-VIS-LD	+5 to +10 dpt	1.30	400 – 700 nm	<0.15/<0.25 □	No	Yes
EL-10-30-Ci-NIR-LD	+5 to +10 dpt	1.30	700 – 1100 nm	<0.15/<0.25 □	No	Yes
EL-10-30-Ci-VIS-LD-MV	-1.5 to +3.5 dpt	1.30	400 – 700 nm	<0.15/<0.25 □	Yes (-150 mm)	Yes
EL-10-30-Ci-NIR-LD-MV	-1.5 to +3.5 dpt	1.30	700 – 1100 nm	<0.15/<0.25 □	Yes (-150 mm)	Yes

Housings

The EL-10-30-TC is preferably mounted in a 30 mm ring holder (see page 14). The relevant mechanical drawings are depicted below in Figure 1. Figure 2 shows the drawings of the C-mount housing. This housing has threads on either side and exhibits an M4 threaded hole in the housing for mounting on optical posts. Figure 3 shows the drawings of the industrial C-mount EL-10-30-Ci. This housing has an oval shape and no M4 threaded hole, however C-mount threads on either side like the C-mount housing. Apart from the housing and connector, the performance of the EL-10-30-C and EL-10-30-Ci are identical.

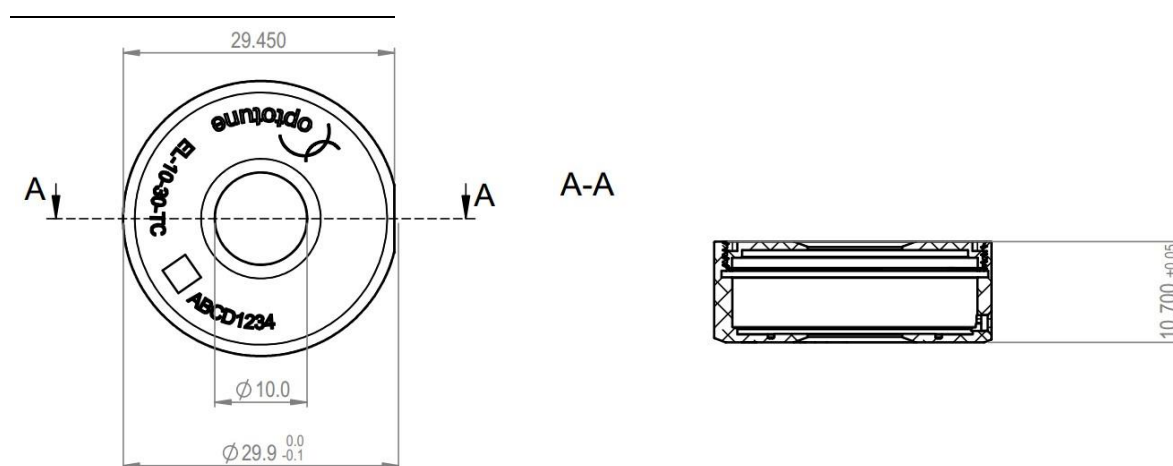


Figure 1: Mechanical drawing of the EL-10-30-TC (unit: mm).

³ Wavefront error in RMS □ @525 nm, 0 mA current with optical axis vertical / horizontal

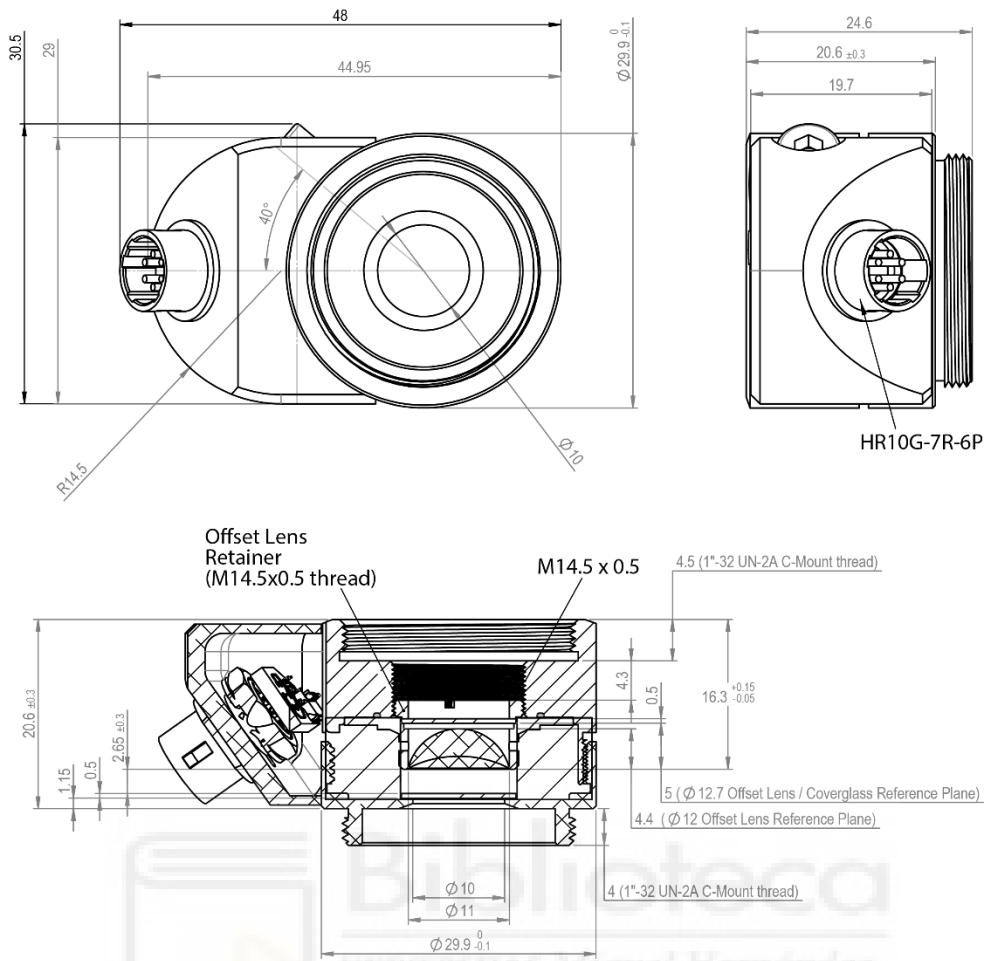
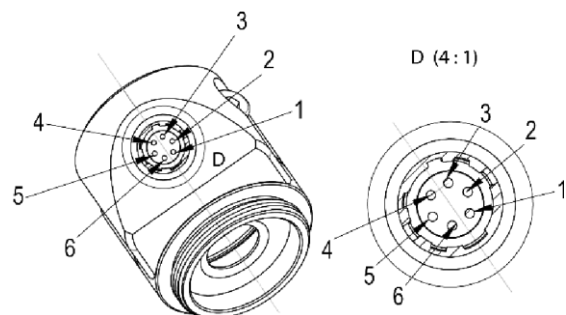


Figure 3: Mechanical drawing of the industrial C-mount EL-10-30-Ci (unit: mm).

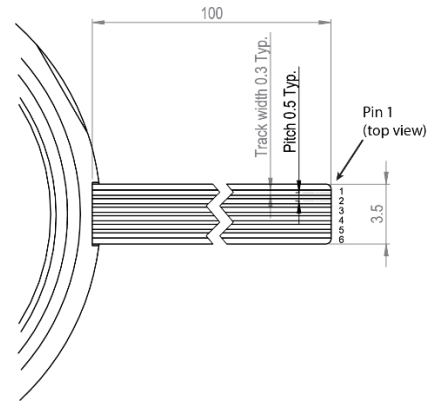
Electrical connection

The industrial design EL-10-30-Ci comes with a 6-pin Hirose connector. A 1m long cable to connect the EL-10-30Ci to the EL-E-4i driver is available from Optotune (P/N CAB-6-100). The EL-10-30-TC and EL-10-30-C has a 10 cm long FPC connection, which is compatible with Molex 0.5mm pitch 6 way FPC backflip connector (P/N 5034800600). All EL-10-30 lenses feature an STTS2004 temperature sensor with 256 bytes of memory. The I2C addresses of the temperature sensor and the EEPROM are 0x18 and 0x50, respectively.

Pinout EL-10-30-Ci		
Position	Function	Pins
1	Lens (+ pole)	-
2	Lens (- pole)	-
3	STTS2004 Gnd	1-4
4	STTS2004 Vcc 3.3V	8
5	STTS2004 SCL	6
6	STTS2004 SDA	5

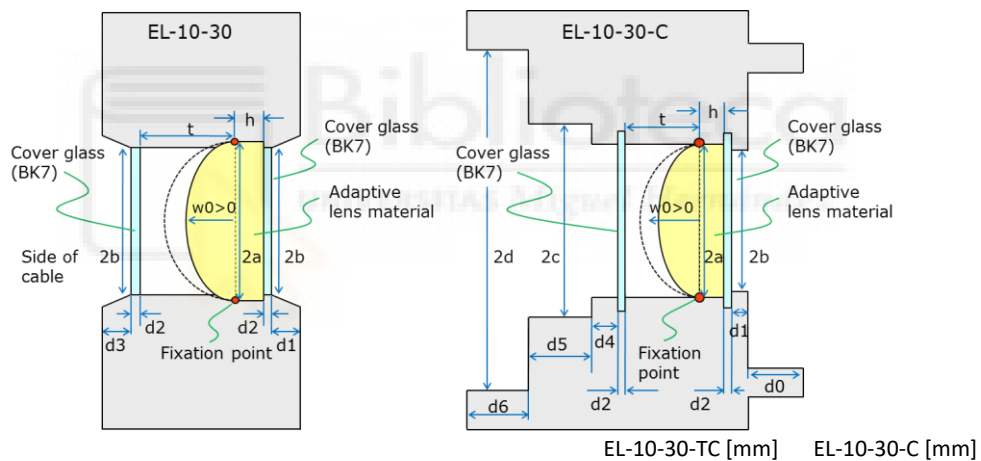


Pinout EL-10-30-TC and EL-10-30-C		
Position	Function	Pins
1	STTS2004 Gnd	1-4
2	Lens (- pole)	-
3	Lens (+ pole)	-
4	STTS2004 SDA	5
5	STTS2004 SCL	6
6	STTS2004 Vcc 3.3V	8



Optical layout

Figure 4 contains the information needed to model the EL-10-30 lenses for simulation. A more detailed design guide and a ZEMAX plug-in is available at <http://www.optotune.com/downloads>.



		EL-10-30-TC [mm]	EL-10-30-C [mm]
a:	Semi-diameter of lens	5.5	5.5
b:	Outer semi-diameter 1 (clear aperture)	5.0	5.0
c:	Inner semi-diameter	-	7.0
d:	Outer semi-diameter 2	-	11.9
w0:	Central deflection of lens	In function of applied current	
d0:	Thickness outer thread	-	4
d1:	Distance from bottom cover glass to housing	1.35 ± 0.2	1.15
d2:	Thickness of cover glasses	0.5	0.5
h:	Constant zone of lens material	2.35 ± 0.2	2.65 ± 0.3
t:	Cover glass distance	5	5
d3:	Distance from top cover glass to housing	1.0	-
d4:	Thickness holder ring	-	2

d5:	Distance from holder ring to housing	-	4.3
d6:	Thickness inner tread	-	4.5
Fixation point:	Lens edges always stay in the same axial position		

Figure 4: Optical layout of the EL-10-30-TC and EL-10-30-C with corresponding terminology. The optical design for the EL-10-30-Ci is identical to the C-mount version.

Using offset lenses

In the EL-10-30-C and -Ci the protective cover glass can be replaced by an offset lens of 12 or 12.7-mm diameter. This allows shifting the focal length range to any desired value. For example, adding an offset lens with $f = 150$ mm to the EL-10-30-C-VIS-LD will yield a focal length range of about -666 mm to infinity to +286 mm ($1/f_{res} = 1/f_{EL-10-30} + 1/f_{offset}$). The design of the EL-10-30-C is optimized for good alignment of the tunable lens and the offset lens. The maximal thickness of the offset lens may be 4.7 mm.

Working principle

The EL-10-30 is a shape-changing lens, as illustrated in Figure 5. It consists of a container, which is filled with an optical fluid and sealed off with an elastic polymer membrane. The deflection of the lens is proportional to the pressure in the fluid. The EL-10-30 has an electromagnetic actuator that is used to exert pressure on the container. Hence, the focal distance of the lens is controlled by the current flowing through the coil of the actuator.

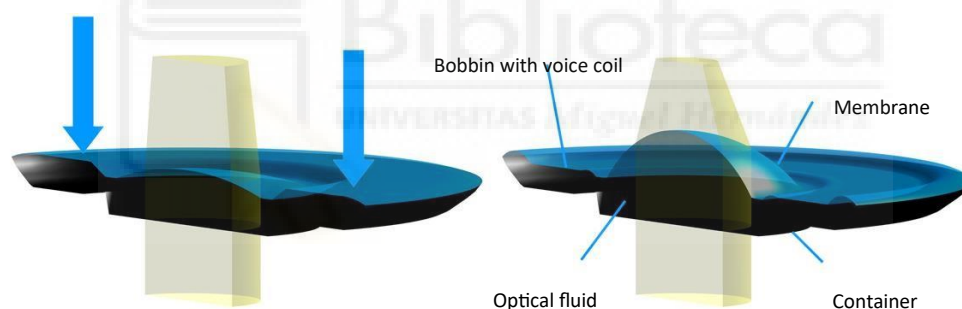


Figure 5: Working principle of the EL-10-30 series.

Focal length versus current

The optical power of the EL-10-30 increases with current, shown in Figure 6. The starting point at zero current is set during production and can be varied from lens to lens, whereas the maximal value is 500 mm. The slope of the optical power is influenced by the mechanical properties of the membrane, which can also be varied on request to achieve different ranges. In open loop systems, a calibration of the lens with look-up tables is recommended. The focal length also depends on temperature, see paragraph *temperature effects*.

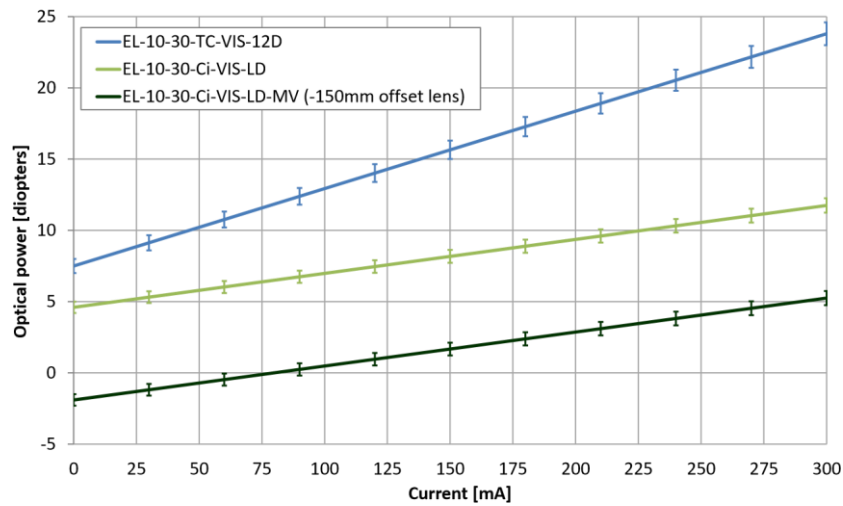


Figure 6: Relation of optical power to current for the most common EL-10-30 lenses

at 30°C. The error bars show the standard deviation from lens to lens.

Transmission range

Both the optical fluid and the membrane material are highly transparent in the range of 400 to 2500 nm. As the membrane is elastic it cannot be coated using standard processes, hence a reflection of 3 – 4% is to be expected. Cover glasses can be coated as desired. Figure 7 and Figure 8 show the transmission spectrum for our two standard broad-band coatings (visible and near infrared) as well as a custom narrow-band coatings:

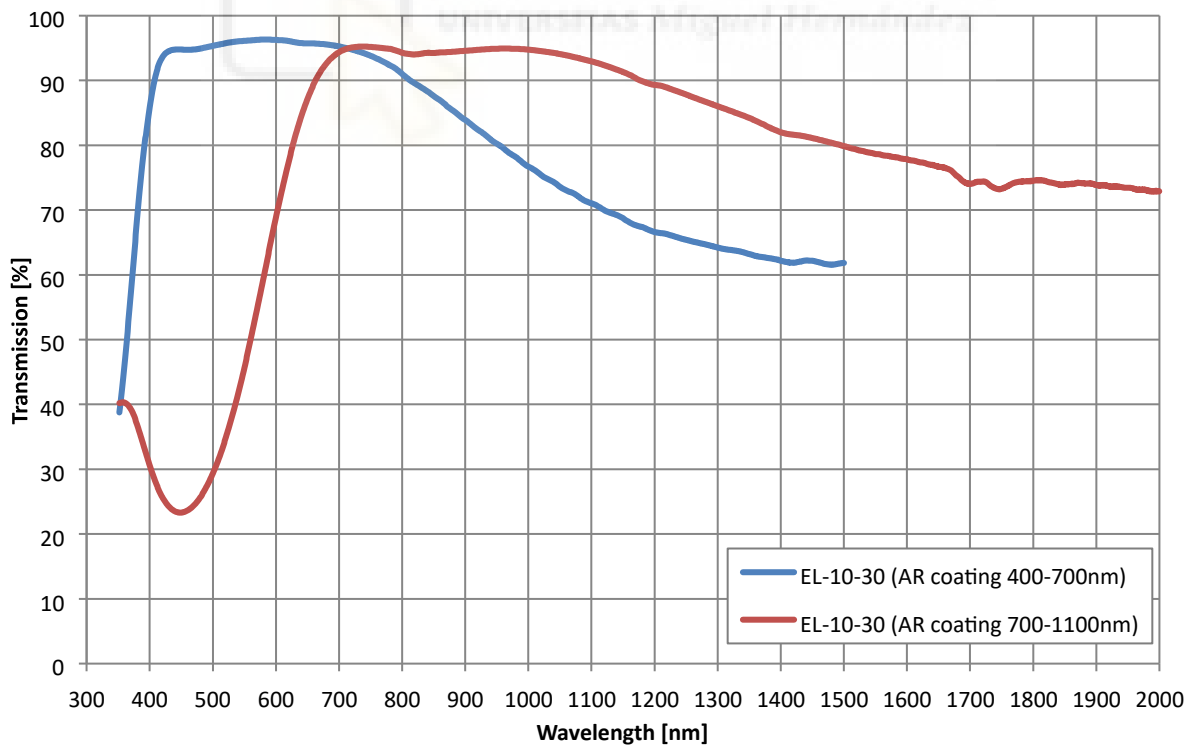


Figure 7: Transmission spectrum of the EL-10-30 for standard broad-band coatings.

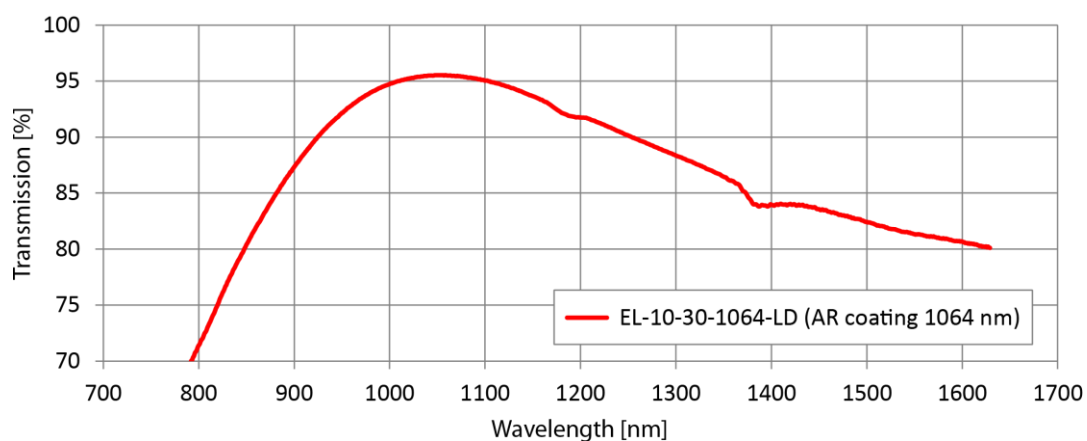


Figure 8: Transmission spectrum of the EL-10-30 for narrow-band 1064-nm coating.

The following graph (Figure 9) represents the transmission of the lens material only⁴, i.e. assuming perfect cover glasses.

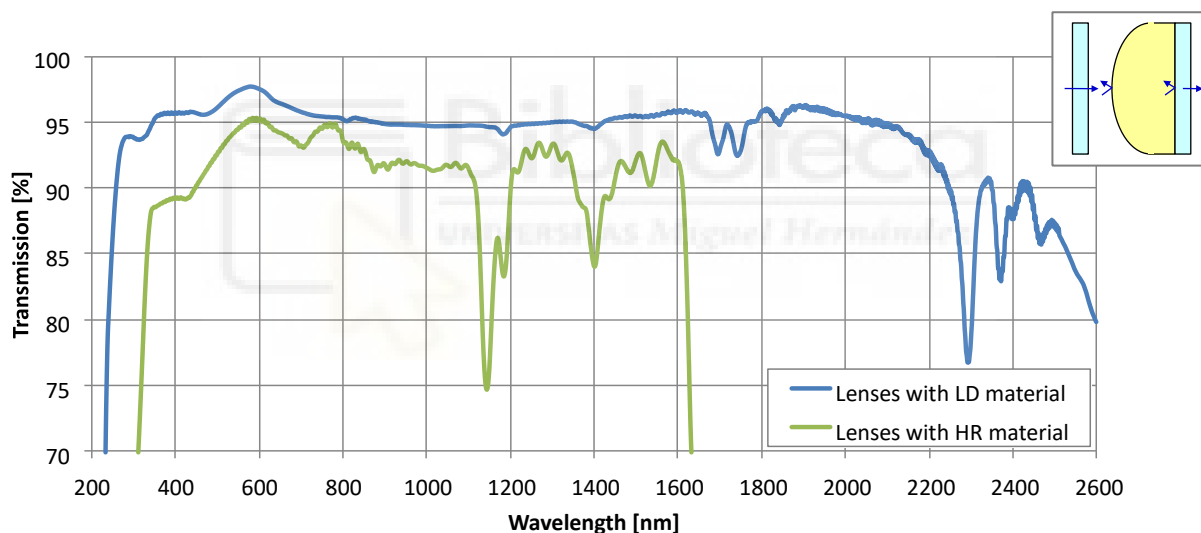


Figure 9: Transmission of the EL-10-30 assuming 100% transparent cover glasses.

Wavelength [nm]	VIS coating LD liquid	NIR coating LD liquid	1064 coating LD liquid
375	61.7	38.2	50.7
405	88.3	29.1	66.8
440	94.8	23.5	88.6
488	95.1	26.9	80.2
514	95.6	32.9	67.8
532	95.9	38.7	60.7
632	95.9	81.8	47.3

⁴ The transmission of the „lens material only“ is put together from measurements of several lenses with differently coated cover glasses, whereas the three interfaces of „air to cover glass“ were removed mathematically.

650	95.7	87.2	48.2
680	95.6	92.6	50.9
730	94.5	95.2	58.3
808	90.5	94.1	72.7
830	89.0	94.1	77.1
850	87.7	94.3	80.4
880	85.5	94.4	84.8
905	83.6	94.6	87.9
915	82.9	94.7	89.0
975	78.5	94.9	93.7
980	78.3	94.9	94.0
1030	74.9	94.4	95.4
1064	72.9	93.8	95.5
1070	72.7	93.7	95.4
1310	64.0	85.7	88.0
1540	NA	78.9	81.5
1550	NA	78.7	81.4

Table 1: Transmission values in percent of the EL-10-30 for common laser wavelengths

Laser damage measurements

The CW damage threshold of the lens material is 10 kW/cm² for a wavelength of 1064 nm. Further damage measurements with pulsed lasers have been performed with the following results:

- 1064 nm, 125 ns-pulsed at 50 kHz, damage at 2.6J/cm²
- 1064 nm, 10 ps-pulsed at 50 kHz, damage at 2.05J/cm²
- 532 nm, 1 ns-pulsed at 300 kHz, damage at 0.11J/cm²

For 1064 nm, long term measurements over 2000h show no degradation or change in the optical characteristic of the lens. The parameters of this measurement were: 100 ns-pulsed at 100 kHz and 40mJ/cm² fluence.

For 532 nm, measurements over 60h show no degradation or change in the optical characteristic of the lens. The parameters of this measurement were: 10 ns-pulsed at 30 kHz and 1.4mJ/cm² fluence.

While no heating up of the lens is observed with the pulsed lasers, a 200 W CW laser does heat up the lens, resulting in a focus drift, which stabilizes after about 10 seconds. To avoid heating of the lens due to reflections hitting absorbing surfaces, it is advised to calculate such reflections and preferably not use more than 8 mm of the clear lens aperture.

Wavefront quality

In principle, Optotune's focus tunable lenses exhibit a spherical lens shape (the nominal parameters can be found in the ZEMAX package, which is available for download on www.optotune.com).

As the membranes used are elastic, the lens shape is influenced by gravity. Results are summarized in Figure 10. With the lens lying horizontally (optical axis vertical), the RMS wavefront error of the EL-10-30 Series lenses is currently in the order of 0.1 λ (measured at 525 nm), allowing for high

quality imaging e.g. in microscopy. With the lens standing upright (optical axis horizontal) a Y-coma term must be added.

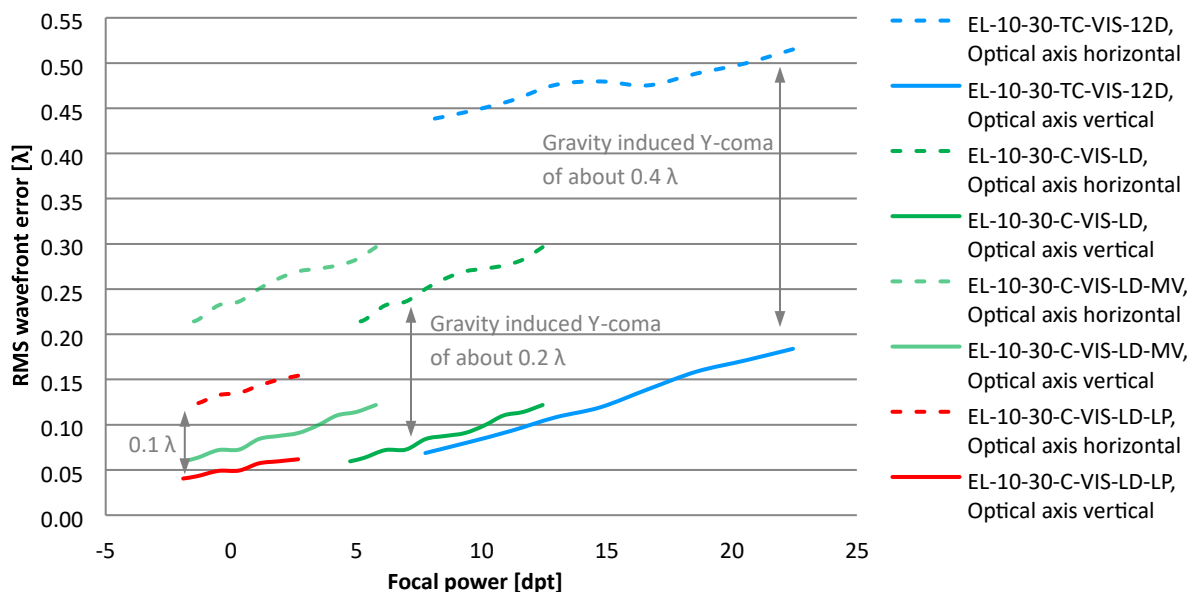


Figure 10: Wavefront measurement of typical EL-10-30-VIS-LD and EL-10-30-C-VIS-LD lenses at 525 nm and 80% of clear aperture, defocus, tilt & sphere excluded.

The gravity induced Y-coma term depends on the size of the lens, the density of the liquid and the mechanical properties of the membrane. While it is insignificant with lenses of apertures below 5 mm, it accounts for about 0.1 λ for the C-mount LP-version, 0.2 λ for the C-mount MV-version and 0.4 λ for the compact version of the EL10-30. The difference between the different variations of the EL-10-30 lenses is the design of the membrane. The stronger membrane of the EL-10-30-C (with the LP version having the strongest membrane) reduces the gravity effect, however at the expense of focal tuning range (4 diopters for the EL-10-30-C-VIS-LD-LP, 7.5 diopters for the EL-10-30-C-VIS-LD and 14 diopters for the EL-10-30-VIS-LD, see Figure 6).

Temperature effects

Heating up of the lens has two consequences: First, the refractive index of the optical fluid decreases. Second, the fluid expands in volume. While the first effect would decrease the optical power, the second effect increases it. With the EL-10-30 design, the second effect prevails. The optical power increases by approximately 0.7 diopters per 10°C temperature increase.

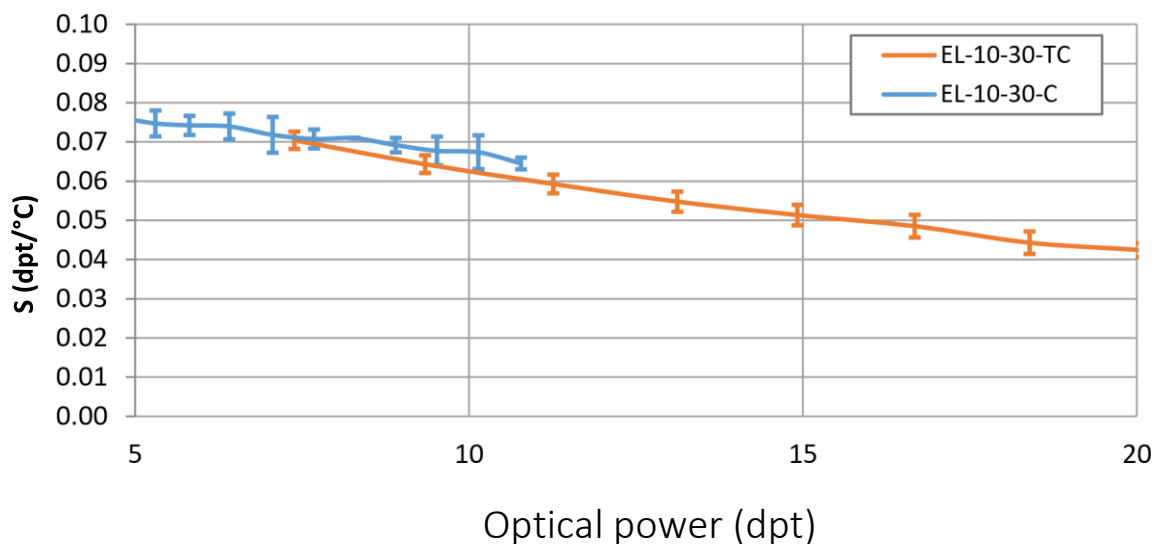


Figure 11: Temperature sensitivity S as a function of optical power.

This temperature effect is systematic and reproducible. This means the focal length can be controlled if the temperature is known. All EL-10-30 lenses have a built-in temperature sensor (STTS2004). Heating up of the lens occurs at room temperature if driven at high currents or due to absorption of high power laser light. In such cases the lens is preferably mounted using heat-conducting metal clamps. For custom designs it is possible to balance the two temperature effects such that the focus shift becomes minimal at a certain focal length.

Resolution and reproducibility

The step size of the focal power is limited by the resolution of the DAC of the current driver. For high precision applications a driver with 12 bits is recommended. As the relation between current and focal power is linear, the smallest step of e.g. the EL-10-30-C-VIS-LD about 0.0018 Dpt.

Unlike piezo systems, the EL-10-30 exhibits no hysteresis. The current through the coil induces a force, which is directly transferred onto the elastic membrane. There is no friction in the system. This means that at a constant temperature jumping between alternate current levels will always yield the same focal length. The effect of changes in temperature are described above. Optotune's Lens Driver 4 offers a focal power mode, which makes use of calibration data stored in the lens (EEPROM of the STTS2004). The absolute reproducibility achieved over an operating temperature range of 10 to 50°C amounts to typically 0.1 diopters. More details on the focal power mode are provided in the Lens Driver manual.

Resistance and Inductance of the driving coil

In principle, the EL-10-30 can be driven using a DC voltage (e.g. even a simple battery) or a current source. However, the focal length of the lens depends on the current flowing through the coil and the resistance of the coil changes with temperature (12.5 Ohm at 25°C) with a linear rate of 0.393%/°C. That is why, for highest stability, it is recommended to use a current source. Note that this temperature effect is visible within seconds and has nothing to do with the expansion of the optical fluid described above, which is on the order of minutes. For AC operation, the inductance of the coil, which depends on frequency, is an important parameter.

Frequency (Hz)	Coil Inductance (mH)
10000	0.76
1000	1.1
100	1.14
10	1.15

Recommended drivers and power supplies

Optotune provides its own high-precision USB drivers with a resolution of 0.1 mA. It includes the I2C readout of the temperature sensor, which can be used for temperature compensation.



There are also many alternative off-the-shelf products available to control the EL-10-30:

- Precision constant current driver for laser diodes with external control via 0-5 V analog signal (e.g. Edmund Optics NT56-804 or NT84-355)
- For high precision applications (0.1 mA resolution) with manual control: TTI QL355
- For high precision applications (0.1 mA resolution) with USB/RS232 computer control: TTI QL355P
- For low precision applications (1 mA resolution) with manual control: TTI EL301R
- For low precision applications (1 mA resolution) with USB computer control: Quakko HY3005DP <http://shop.vendio.com/Evan2002/item/2041700966/?s=1282809362>

The lens can also be driven using pulse width modulation (PWM) with a frequency between 20 kHz and 50 kHz. Another very useful component is the ADN8810 programmable precision current source of Analog Devices, which features 12 bits of resolution and can be controlled with an SPI interface.

Response time

The rise time on a current step is in the range of 2-4 ms, depending on the step size. However, it takes about 15 ms until the lens has fully settled. Figure shows the optical response on a current step measured with photodiode. The measurements were performed at room temperature.

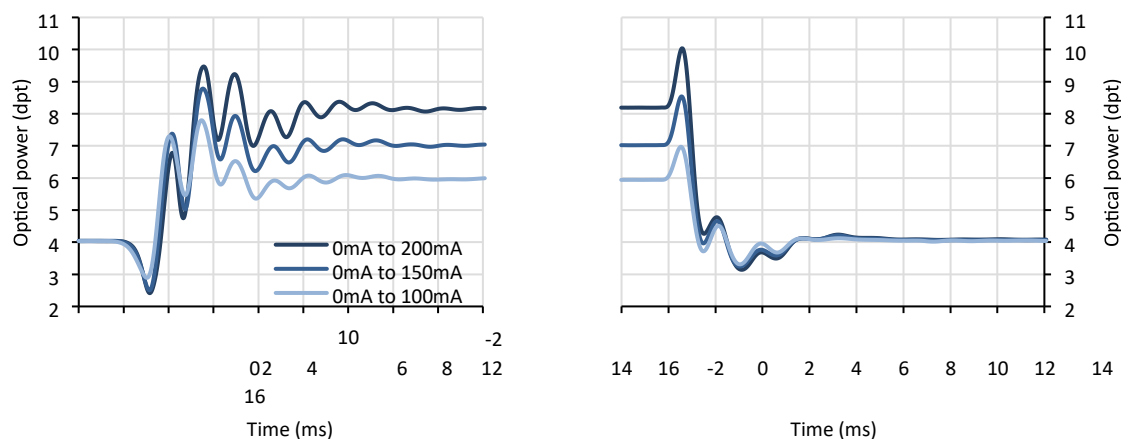


Figure 12: Typical optical response of the EL-10-30-C to a current step.

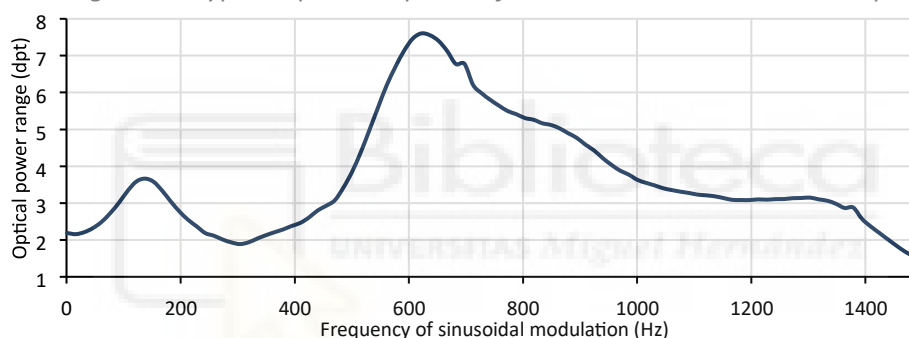


Figure 13: Typical frequency response of the EL-10-30-C with current oscillating from 50 to 150 mA.

This system is slightly over-damped and the frequency response in Figure shows a resonant frequencies at about 150 and 600 Hz. To achieve a shorter settling time, however, it is better to remove these frequencies from the step function. Also, settling time can be improved by applying an overshooting step function. Tests show that the dynamics of the lens is similar in both directions and across different current ranges. The fact that the step down to 0 mA settles faster with the EL-10-30-C is because the actuator actually hits the housing. It is generally recommended to operate above 10mA at all times to avoid this effect, as it may shorten the lifetime of the lens. With an optimized driving signal, the settling time is reduced below 5ms. Figure shows an example of the response behavior with a driving signal filtered with three low-pass filters (300 Hz) in series. The following graph shows the optical response on a current step measured using two photodiodes. Lenses with smaller apertures achieve even shorter settling times down to about 2ms.

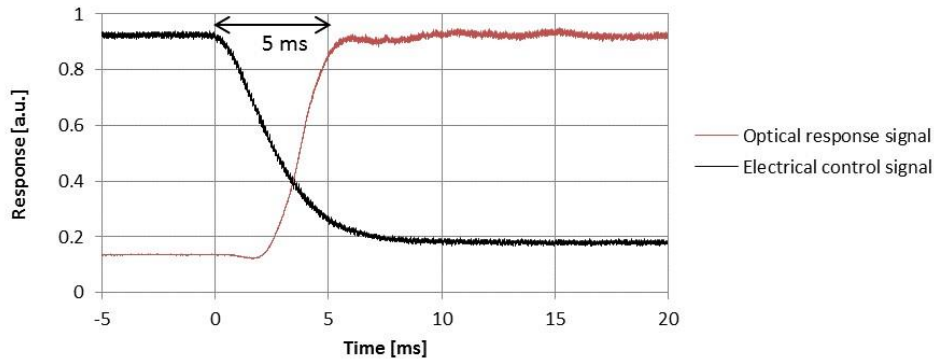


Figure 14: Optical response of the EL-10-30-C-LD-LP to a current step from 50 mA to 250 mA with a driving signal filtered with three low-pass filters (300 Hz) in series.

Another way to attenuate the oscillations seen in Figure 14 is by using standard passive elements. The circuit is illustrated on the left of Figure 15. It is analogous to a LC-low-pass filter used in loudspeakers, with a slew rate of 12 dB/octave (second order). Since the impedance of the EL-10-30, -C and -Ci is similar, the circuit is applicable to all members of the EL-10-30 series. On the right of Figure 15, the optical response of the EL-10-30-LP to a rectangular current step (10%-90%) is shown. The parameters of the LC-circuit correspond to a cut-off frequency of 165 Hz, showing good damping behavior. As a trade-off, the response time is slightly increased to about 5 ms.

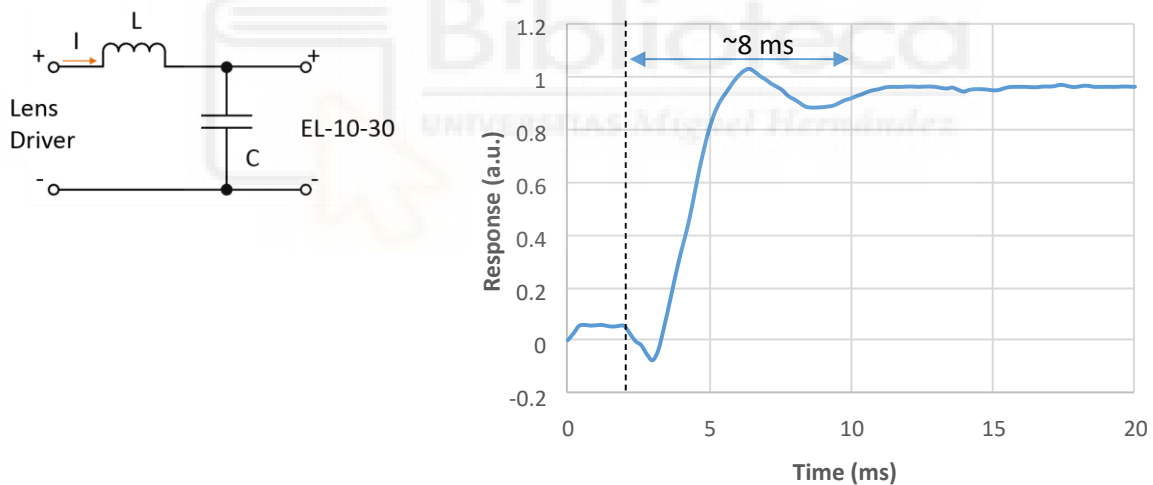


Figure 15: Filter circuit based on passive elements. The current output of the Lens Driver is connected on the left and the lens on the right side. In this example $C = 94 \mu\text{F}$ and $L = 10 \text{ mH}$, giving in a cut-off frequency of 165 Hz.

Atmospheric pressure and low temperature performance

By working principle, the atmospheric pressure has no influence on the lens. This has been validated down to values of 10^{-4} mbar. Furthermore, the EL-10-30 with LD material is suitable for low temperature operation. The lens is tunable down to temperatures as low as 230 K. The response time of the lens increases for lower temperatures (e.g. 3 s at 250 K and 60 s at 230 K). For temperatures below 220 K the lens freezes but no damage was observed in tests down to 10 K. The transmission of the lens is independent of the operating temperature.

Autofluorescence

The EL-10-30 with LD material is not auto fluorescent and can be used for fluorescence microscopy.

Mounting possibilities for the compact EL-10-30-TC



G024503000, LI-
NOS - Qioptiq



G061042000, LI-
NOS - Qioptiq



KM200V/M,
Thorlabs



NT57977,
Edmund Optics



NT64564,
Edmund Optics



NT03-676,
Edmund Optics

Life time

The EL-10-30 has passed relevant environmental and accelerated aging tests as outline in Table 2.

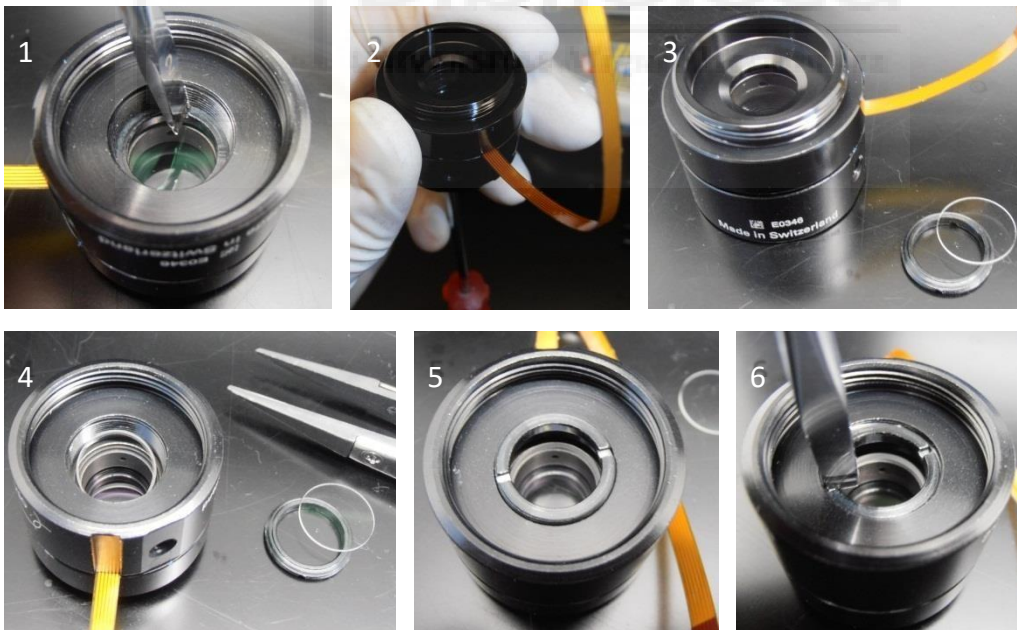
Test	EL-10-30
Mechanical cycling: 40 million full-range cycles (0 to 300 mA rectangular, at 10 Hz) 5 billion sinusoidal cycles at resonant frequency	Passed
High temperature test: 85±2°C; rel. hum. <6% for 168 hours, non-operational	Passed
Temperature cycling test: -40°C / +85°C for 30 min each, 3 min transition time, 100 cycles	Passed
Damp heat cycling test: 25°C / 55°C at 90-100% relative humidity, 3 hour transition time, 24h per cycle (9h plus transition time each), 18 cycles	Passed
Shock test: 500g for 1ms duration, 5 pulses in each direction (30 pulses in total)	Passed
Solar radiation test: 1120 W per m ² (IEC 60068-2-5), 8 h irradiation & 16 h darkness, 10 cycles	Passed

Table 2: Environmental tests performed with the EL-10-30.

Exchanging the offset lens of the EL-10-30-C Series

The EL-10-30-C is shipped with a planar cover glass or with an integrated offset lens (MV version), which is held in place by a retainer ring. The cover glass or offset lens can easily be exchanged by hand following the procedure outlined below. Please note that this is preferably done in a clean room or under a flow hood to avoid dust entering the tunable lens.

1. Loosen the retainer ring carefully with a small screw driver
2. After about 5 rotations turn the lens with the ring pointing down so no dust can get into the lens
3. Take out the cover glass / offset lens with the retainer ring. Prepare the new cover glass or lens.
4. Turn the lens again, but be careful, that no dust gets inside. Carefully drop the new cover glass or lens (planar side should usually look down towards the lens) inside using tweezers.
5. Put the retainer ring in by hand
6. Tighten the retainer ring with a screw driver. Be careful not to scratch the glass.
IMPORTANT: At the end, do not exert much torque (<1 Nm) as this might damage the tunable lens.



Ordering information for custom versions of the EL-10-30

For custom versions, please use the following concept for part numbers: **EL-10-30-H-**

AR-MAT-RANGE

H = TC: Compact housing with FPC connector

C: C-mount housing with FPC connector

Ci: Industrial C-mount housing with Hirose connector

AR = VIS: visible broad-band anti-reflection coating (400 – 700 nm)

NIR: near broad-band infrared anti-reflection coating (700 – 1100 nm)

1064: narrow-band anti-reflection coating at 1064

nm NOC: No coating

MAT = LD: low dispersion lens material ($n_D = 1.300$, $V = 100$, standard)

HR: high refraction lens material ($n_D = 1.559$, $V = 32$, available as customization)

RANGE = 12D: Focus tuning range from 8 to 20 diopters (standard for all EL-10-30-TC lenses)

MV: Machine vision option: Includes -150 mm focal length offset lens to achieve a total focal tuning range of -666 mm (-1.5 dpt) to infinity to +286 mm (3.5 dpt). Note: standard EL-10-30-C and -Ci lenses without the MV option range from 5 to 10 diopters.

Example: EL-10-30-C-NOC-LD refers to a custom electrical tunable lens of 10 mm aperture and 30 mm outer diameter (C-mount housing) with uncoated cover glasses, low dispersion lens material and a focal tuning range from +5 to +10 dpt.

Safety and compliance

The product fulfills the RoHS and REACH compliance standards. The customer is solely responsible to comply with all relevant safety regulations for integration and operation.

For more information on optical, mechanical and electrical parameters, please contact sales@optotune.com.

Sistema óptico programable basado en lentes opto-electrónicas para enfoque adaptativo en cámaras digitales.

