

Elementos Difractivos en la Corrección de la Presbicia

Rodrigo Henao^a, Alberto Ciro^b, Andrzej Kolodziejczyk^c, Zbigniew Jaroszewicz^d

^aGrupo de Óptica y Fotónica, Instituto de Física, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia;

^bInstituto Tecnológico Metropolitano, Medellín, Colombia.

^cFacultad de Física, Universidad Politécnica de Varsovia, Varsovia, Polonia

^dInstituto de Óptica Aplicada, Varsovia, Polonia

RESUMEN

La presbicia es la pérdida de la capacidad de acomodación del ojo que afecta a la mayoría de personas que tienen edad avanzada. Entre todos los elementos diseñados para la corrección de este defecto están las lentes bifocales y progresivas o los elementos formadores de imágenes con gran profundidad de foco, siendo estos últimos los más prometedores para la corrección de la presbicia. Los elementos ópticos difractivos hacen parte de una rama de la óptica moderna en rápido desarrollo debido a que permiten generar distintos frentes de onda con prácticamente cualquier forma, su gran versatilidad los hace extremadamente promisorios para abordar otra forma de corregir la presbicia. De los elementos ópticos difractivos, los elementos formadores de imágenes con profundidad de foco extendido son los más adecuados para aproximarse a la solución del problema. Dichas estructuras tienen la característica de focalizar una onda plana incidente en un segmento de línea sobre el eje óptico. En este trabajo se presenta varios elementos con estas características y se establecen criterios para seleccionar el más prometedor para esta aplicación particular.

Palabras Clave: Elementos difractivos, acomodación del ojo

ABSTRACT

Presbyopia is the loss of the ability of accommodation of the eye that affects most elderly people. Among all elements designed to correct this defect are bifocals and progressive lenses or elements' images' formers with extended depth of focus; the latter being the most promising for the correction of presbyopia. The diffractive optical elements are part of a branch of the rapidly developing modern optics because they allow the generation of different wave fronts with virtually any form. Their great versatility make it extremely promising to approach this in another way to correct the Presbyopia. Of the diffractive optical elements the training elements' images with extended depth of focus are the most suitable approach to solve the problem. Such structures have the characteristics to focus a incident wave plane on a line segment on the optical axis. This paper presents various elements with these characteristics and establishes criteria to select the most promising for this particular application.

Keywords: Diffractive elements, Accommodation of the eye

1. INTRODUCCIÓN

La presbicia es la pérdida de acomodación del ojo humano. Un ojo con presbicia enfoca objetos solamente a grandes distancias. La mayoría de las personas en edad avanzada pierden completamente la habilidad de la acomodación. En este caso, es necesario usar elementos con una longitud focal variable para la corrección de la visión.

Un adulto en condiciones normales tiene una amplitud de acomodación de 4 dioptrías; desafortunadamente con la edad, esta amplitud decae [1]; en los niños esta propiedad del ojo es de alrededor de 14 dioptrías.

Un modelo sencillo que permite representar un ojo humano con presbicia se muestra en la figura 1.

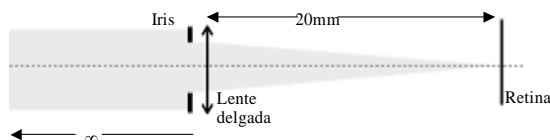


Figura 1. Modelo simplificado del ojo humano con presbicia

En este modelo de ojo, una lente delgada representa todos los elementos que contribuyen a la formación de imágenes en la retina incluyendo cristalino y córnea, dicha lente tiene una potencia de 50 dioptrías. Para distancias de 25cm es necesario una potencia de 54 dioptrías. Por tanto, se requiere un elemento que facilite esta variación de la amplitud de acomodación desde el infinito hasta la distancia de lectura.

Entre los elementos que se han tenido como solución al problema de la presbicia, están las lentes bifocales, lentes progresivas y elementos que forman imágenes con profundidad de campo. La solución dada con lentes en general varifocales, presenta inconvenientes ya que se necesita utilizar diferentes partes de la lente con el fin de observar cómodamente diferentes planos. En consecuencia se debe buscar soluciones más funcionales. Las investigaciones en el momento en este tema, están encaminadas a desarrollar elementos formadores de imágenes con profundidad extendida de foco, especialmente, aquellos elementos que focalizan ondas planas en un segmento de línea [2-5]. A estos elementos se les denomina elementos difractivos con profundidad extendida de foco y probablemente, en estos elementos está la solución óptima. Sin embargo, presentan una desventaja que es la aberración cromática, ya que la visión se produce con luz policromática. Según la literatura científica, varios de los elementos más utilizados en investigaciones son: axilente, axicones logarítmicos delantero y retrógrado, ojo de pavo real y el elemento espada de luz.

Las siguientes son las transmitancias de fase de los elementos mencionados:

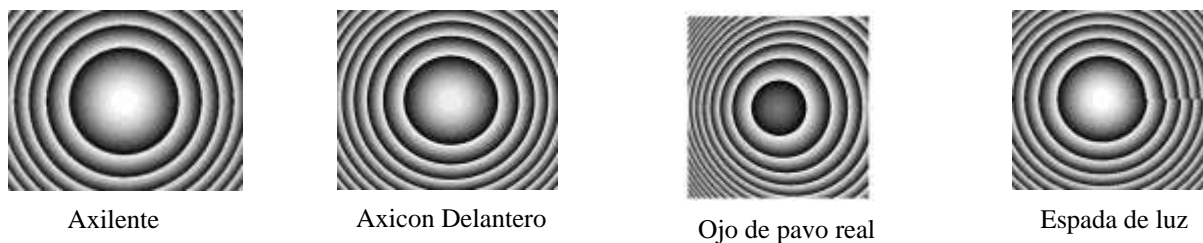


Figura 2. Representación de las transmitancias.

2. TEORÍA

Los elementos ópticos difractivos que potencialmente tienen aplicaciones oftalmológicas en el problema de la presbicia se caracterizan esencialmente porque pueden enfocar ondas planas en un segmento de línea a lo largo del eje óptico. Por consiguiente, es indispensable diseñar para cada elemento su transmitancia de fase la cual puede hacerse en principio por métodos analíticos, o en su defecto utilizar métodos numéricos. La transmitancia de los elementos mencionados se diseña haciendo uso de la conservación de la energía y del método del trazado de rayos[6].

2.1. Axicon

Para el diseño de su transmitancia se asume simetría de revolución. Esto quiere decir según la gráfica de la figura 3, que un anillo de radio r y de espesor infinitesimal dr en el plano del elemento, enfoca luz en un punto $P(0,0,z)$ del segmento

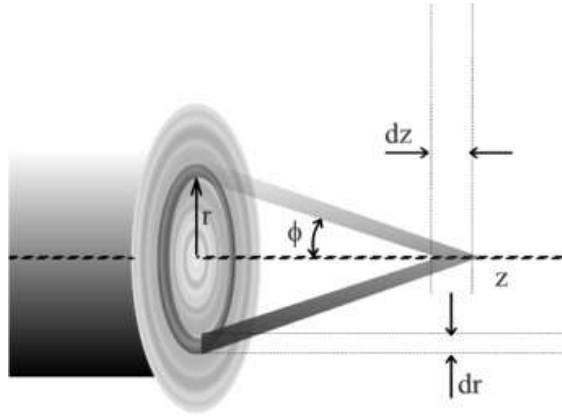
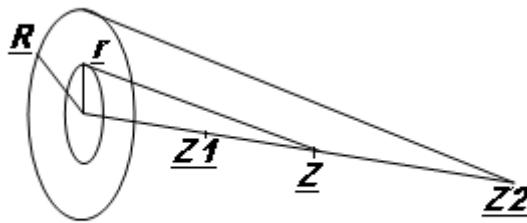


Figura 3. Diagrama que muestra el enfoque de un anillo de un axicon.

Los siguientes son dos tipos de axicones:

Axicon logarítmico delantero:



Axicon logarítmico retrógrado:

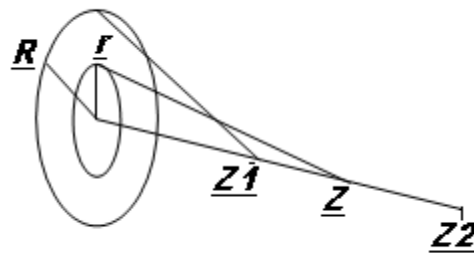


Figura 4. Esquemas de axicones logarítmicos delantero y retrógrado respectivamente

La transmitancia de fase para cualquier elemento difractivo se define [5] como:

$$T(r) = \exp(ik\varphi) \tag{1}$$

donde $k = 2\pi/\lambda$ y φ es la distribución de fase .

La fase para el primer elemento está dada por:

$$\varphi(r) = -(1/2a) \ln(ar^2 + z_1) + cte \quad (2)$$

con $a = \frac{z_2 - z_1}{R^2}$ y R = radio de la abertura.

De igual manera para el segundo elemento la fase está dada por:

$$\varphi(r) = (1/2a) \ln(z_2 - ar^2) + cte \quad (3)$$

2.2. Axilente

Se presenta como una modulación radial a la fase de una lente convencional; según la literatura[7] este elemento no obedece la ley de conservación de la energía, sin embargo hay investigaciones[8-11] que indican que puede formar imágenes con profundidad de foco. Mediante simulaciones, hemos podido corroborar en parte esta propiedad. Su transmitancia de fase está dada por [12]

$$\varphi(r) = -\frac{r^2}{2(z_1 + r^2\Delta/R^2)} \quad (4)$$

$$\varphi(r) = -\frac{r^2}{2(z_1 + \frac{r^2\Delta}{R^2})}$$

donde $\Delta = z_2 - z_1$, representa el segmento focal y R =radio del elemento

2.3. Ojo de pavo real

En este caso, un segmento infinitesimal lineal en el plano del elemento enfoca luz en un punto del segmento focal [6]. Su fase está determinada por:

$$\varphi(x, y) = -\frac{y^2}{2(d + Lx/A)} - \frac{xA}{L} + \frac{A^2d}{L^2} \ln \left| \frac{Lx}{A} + d \right|. \quad (5)$$

donde d es la distancia desde el elemento hasta z_1 y $L = z_2 - z_1$

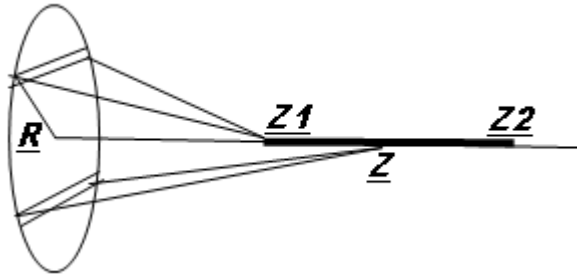


Figura 5. Diagrama que ilustra el enfoque de segmentos lineales del ojo de pavo real.

2.4. Espada de luz

A diferencia de los elementos anteriores, la espada de luz presenta modulación angular. El método del trazado de rayos permite ver que un sector diferencial angular del plano del elemento, enfoca luz en un pequeño segmento perpendicular al eje óptico y al sector diferencial, lo que indica que no enfoca directamente en puntos del eje. Solamente en el caso de aberturas pequeñas, se puede considerar en primera aproximación, que la luz se enfoca sobre el eje óptico.

La fase que determina su transmitancia de fase viene dada [3, 12] por la expresión:

$$\varphi(r) = -\frac{r^2}{2(z_1 + \theta\Delta/2\pi)} \quad (6)$$

donde r, θ son coordenadas polares en el plano del elemento y Δ se define como $z_2 - z_1$, según la figura 6.

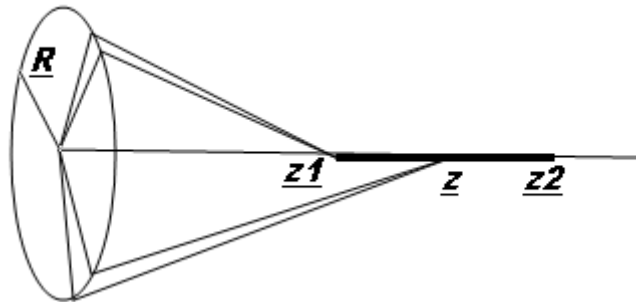


Figura 6. Representación de la focalización de los sectores angulares de la espada de luz.

3. PROCEDIMIENTO

El procedimiento que se sigue para la realización de las simulaciones es el siguiente: se elige una serie de planos de entrada ubicados a ciertas distancias del elemento difractivo. Para cada plano de entrada, la imagen se forma a 20mm mas allá del elemento. Estos elementos ópticos funcionan como lentes delgadas no-convencionales y son iluminados con luz monocromática de 6328 angstroms.

De acuerdo a la teoría de formación de imágenes para sistemas incoherentes, se procede así:

- Se construye la imagen de un objeto punto perteneciente al plano de entrada y que corresponde a la intersección de éste con el eje óptico. Para ello se ilumina el elemento difractivo con una onda esférica de radio igual a la

distancia entre el plano de entrada y el plano del elemento y luego se propaga 20mm hacia adelante. Esta imagen se le denomina función de punto extendido para sistemas coherentes.

- Seguidamente se construye el módulo cuadrado de la función de punto extendido anterior para definir así la función de punto extendido de sistemas incoherentes, que representa la distribución de intensidad de la imagen de una fuente puntual ubicada en el centro del plano de entrada.
- Se construye la transformada de Fourier de la distribución de intensidad de la imagen del objeto del plano de entrada haciendo uso del teorema de la convolución; esto es, se realiza el producto de la transformada de Fourier de la función de punto extendido incoherente con la transformada de Fourier de la distribución de intensidad de la imagen ideal del objeto dada por la óptica geométrica.
- Finalmente mediante la transformada inversa de Fourier del inciso anterior se obtiene la distribución de intensidad de la imagen buscada.

4. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES

Se analiza una serie de imágenes de un mismo objeto creadas por diferentes elementos ópticos difractivos . La transmitancia de estos elementos se diseña sobre aberturas circulares de 6mm de diámetro y son expresadas en coordenadas polares . La distancia del plano de entrada al plano del elemento se representa por la letra p.La distancia del plano del elemento al plano de salida es 2cm. El segmento focal se toma entre 18.5mm y 20.0mm. El objeto plano en este caso,lo constituye tres letras mayúsculas transparentes que conforman la palabra GOF. Se utilizó una lente de distancia focal 19.25mm con plano de salida a 20mm sólo para mostrar su prácticamente nula profundidad de foco.

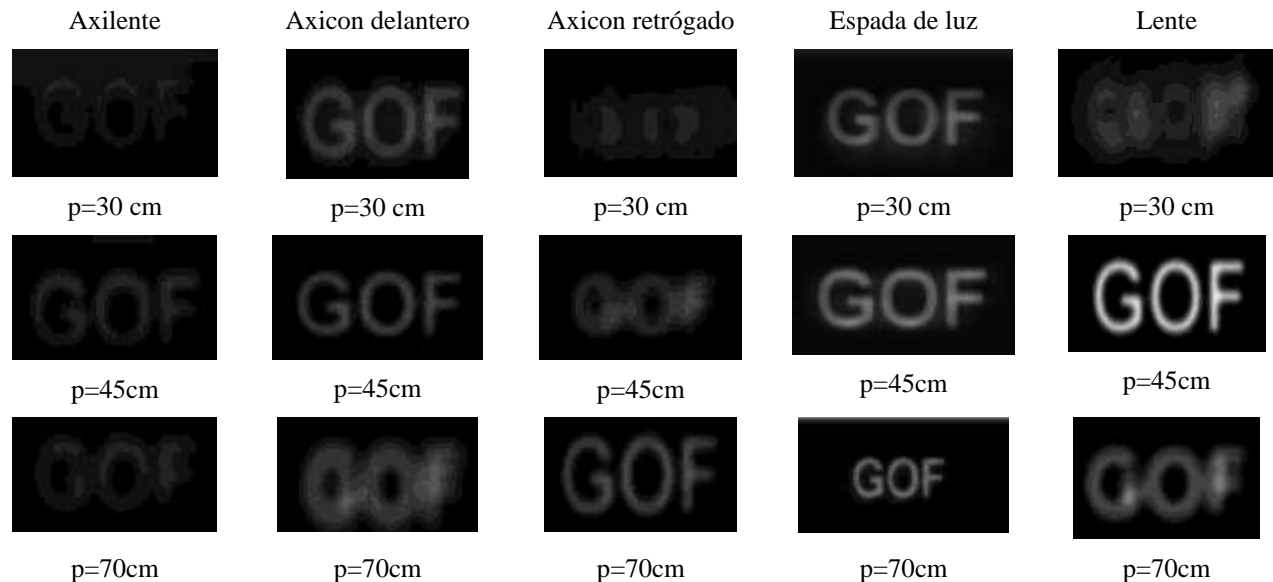


Figura 7. Imágenes producidas por los diferentes elementos ópticos difractivos de la sigla GOF colocada a la distancia mostrada debajo de cada imagen.

Aún cuando el elemento ojo de pavo real presenta profundidad de foco extendida, no se presentan resultados de este elemento en este trabajo.

Para la axilente, las imágenes que corresponden a las primeras distancias, presentan muy bajo contraste, y la resolución es relativamente buena. Esto quiere decir que el módulo de la función de transferencia óptica presenta valores pequeños para un amplio rango de frecuencias espaciales alrededor de la frecuencia cero.

Las últimas imágenes se presentan borrosas, es decir muchas frecuencias espaciales no están bien representadas, lo que origina mala resolución como también bajo contraste.

Axicon logarítmico delantero: la calidad de las imágenes es mejor que las imágenes de la axilente para pequeñas distancias. Para distancias mayores la calidad de las mismas se deteriora.

Axicon logarítmico retrógrado: las imágenes correspondientes a distancias menores de 50cm se presentan borrosas, es decir no hay buena definición ni contraste mientras que para distancias mayores la resolución mejora, aunque con bajo contraste.

Para todas las distancias involucradas en la simulaciones, las imágenes producidas por el elemento espada de luz, presentan mejor calidad en cuanto que la resolución de las imágenes supera los casos anteriores, no obstante su regular contraste.

En cuanto a la lente que se toma solamente como un elemento de referencia ya que no tiene profundidad de foco, se puede decir que forma imágenes de gran calidad para planos de entrada muy cercanos a 51.3cm., esto significa que este elemento es muy sensible al desenfoque.

5. CONCLUSIONES

Se ha hecho un estudio teórico con cuatro elementos difractivos utilizando parámetros de la visión humana. Según los resultados mostrados arriba, la axilente y los axicones no garantizan que la buena calidad de las imágenes sea insensible a la variación de la distancia del plano de entrada. Parece que la espada de luz presenta posibilidades de satisfacer el requerimiento anterior, por tanto, los futuros trabajos de investigación estarán orientados a explorar posibilidades con este elemento, con miras a dar solución al problema de la presbicia.

AGRADECIMIENTOS

R. Henao agradece el apoyo del CODI-Universidad de Antioquia y A. Ciro agradece todo el respaldo dado por el Instituto Tecnológico Metropolitano de Medellín para la presentación de este trabajo.

REFERENCIAS

1. Purves D. et al., neuroscience, segunda edición, sección.11, Sinauer Associates, 2001
2. N. Davidson, A.A. Friesem, E. Hasman. "Holografic Axilens: high resolution and long focal depth", Opt.Lett.16, 523-525, 1991.
3. G. Mikula, A. Kolodziejczyk, M. Makowski, C. Prokopowicz, M. Sypek, "Diffractive elements for imaging with extended depth of focus", Opt.Eng. **44**, 058001-058007, 2005
4. A. Kolodziejczyk, S. Bará, Z. Jaroszewicz, M. Sypek, "The light sword optical element-a new diffraction structure with extended depth of focus," J.Mod.Opt. **37**, 1283-1286, 1990
5. J. Sochacki, A. Kolodziejczyk, K.Jaroszewicz, S.Bará, "Nonparaxial design of generalized axicones", Appl.Opt. **31**, 5326-5330, 1992
6. Z.Jaroszewicz,A.Kolodziejczyk,D.Mouriz, J.Sochacki, "Generalized zone plates focusing light into arbitrary line segments," J.Mod.Opt. **40**, 601-612, 1993
7. J. Sochacki, S. Bara, Z. Jaroszewicz, A. Kolodziejczyk, "Phase retardation of the uniform-intensity axilens," Opt. Lett. **17**, 7-9, 1992.
8. B.-Z. Dong, J. Liu, B.-Y. Gu, G.-Z. Yang, "Rigorous electromagnetic analysis of a microcylindrical axilens with long focal depth and high transverse resolution," J. Opt. Soc. Am. A **18**, 1465-1470,2001.
9. J.-S. Ye, B.-Z. Dong, B.-Y. Gu, G.-Z. Yang, S.-T. Liu, "Analysis of a closed-boundary axilens with long focal depth and high transverse resolution based on a rigorous electromagnetic theory," J. Opt. Soc. Am. A **19**, 2030-2035, 2002.
10. F. Di, Y. Yingbai, J. Guofan, W. Minxian, "Rigorous concept for the analysis of diffractive lenses with different axial resolution and high lateral resolution," Opt. Express **17**, 1987-1994,2003.
11. J. Lin, J. Liu, J. Ye, S. Liu, "Design of microlenses with long focal depth based on general focal length function," J. Opt. Soc. Am. A **24**, 1747-1751, 2007.
12. G. Mikula, Z. Jaroszewicz, A. Kolodziejczyk, K. Petelczye, M. Sypek, "Imaging with extended focal depth by means of lenses with radial and angular modulation", Opt.Express 15, 9184-9193, 2007