



EFFECTOS DE DIFRACCIÓN DEL OJO DEL GECKO PARA ILUMINACIÓN DIURNA

Elizabeth López Meléndez ^a, Luis David Lara Rodríguez ^a, Francisco Javier Renero Carrillo ^a,

^a Departamento de Óptica , INAOE., elom@inaoep.mx, luislara@inaoep.mx, paco@inaoep.mx

RESUMEN:

La resolución y sensibilidad del ojo del Gecko (*Tarentola chazaliae*) ha sido descrita en la literatura, para diferentes condiciones de iluminación y en función de la variación de la morfología de la pupila. En condiciones de máxima iluminación la pupila se transforma en cuatro orificios, su ojo es considerado multifoco en el espectro visible y el ultravioleta. En base al diagrama de mancha del ojo del Gecko se obtiene su MTF y se simulan diferentes posibles escenarios de cómo es la visión del Gecko con las MTFs, además de presentar los patrones de difracción de las diferentes morfologías de la pupila.

1. INTRODUCCIÓN

El gecko de caso (*tarentola chazaliae*) es un pequeño lagarto terrestre de la familia de los gekkonidae, este se encuentra desde el sur de Marruecos, Mauritania y el oeste del Sahara hasta Senegal, el gecko fue clasificado por primera vez como *tarentola* por François Mocquard en 1895.

Los geckos llegan a medir de 6-9 cm ver Fig.1, aunque las hembras son ligeramente mayores y se caracteriza por su cabeza abultada y con forma semejante a un casco, que le otorga su nombre, su piel es de un color gris o castaño claro a oscuro, variando de intensidad ligeramente para camuflarse. Posee varias motas más oscuras en el dorso, que es recorrido en lomo por una línea longitudinal de manchas blancas. En recientes investigaciones se ha descubierto que el gecko puede ver en el espectro visible además del ultravioleta, cuando el gecko tiene luz tenue sus pupilas son redondas y completamente abiertas; en condiciones de máxima iluminación la pupila se transforma en cuatro orificios.



Figura 1. Fotografía de un gecko nocturno de casco (*Tarentola Chazalie*)

Roth¹ estudio la pupila del gecko nocturno de casco, las dimensiones del ojo para calcular la sensibilidad óptica de estos animales. Basándose en los datos obtenidos por Roth, en este trabajo se presenta el diagrama de mancha (spot diagram) del ojo del gecko, su función de transferencia



de modulación (MTF), los patrones de difracción del gecko con su pupila en diferentes condiciones de iluminación y finalmente se muestran simulaciones de la visión del gecko.

2. ÓPTICA COMPUTACIONAL Y EVALUACIÓN GEOMÉTRICA DE LA IMAGEN

Cuando las aberraciones exceden varias veces al límite de Rayleigh, los efectos de difracción son insignificantes y el resultado del trazado de rayos puede predecir la imagen de un punto con un buen grado de precisión. Esto se hace dividiendo la pupila de entrada del sistema óptico en un gran número de áreas iguales para trazar un rayo de un punto del objeto a través del centro de cada pequeña área. La intersección de cada rayo en el plano imagen se grafica, ya que cada rayo representa una contribución similar del total de la energía en la imagen, entonces la densidad de los puntos que se grafican es una medida de la densidad de poder (irradiancia, iluminancia) de la imagen. Un rayo interceptado en este tipo de graficas es llamado "Spot diagram", i. e. diagrama de mancha², todos los rayos en este trabajo tienen simetría circular.

Un tipo de objetivo comúnmente usado para probar el desempeño de un sistema de lentes consiste en una serie de barras brillantes y opacas del mismo ancho. Diversos conjuntos de patrones con diferente espaciado son usualmente obtenidos del sistema bajo prueba, en estos patrones la línea puede ser descartada, a esto se le considera el poder resolutor del sistema, el cual es expresado por un cierto número de líneas por milímetro (a la línea se le considera una barra brillante y la otra opaca).

Un parámetro altamente usado es la evaluación de desempeño del sistema de su contraste o modulación³, contra la frecuencia espacial, esto se conoce como la función de transferencia de modulación³ (MTF), para calcular la MTF a partir de un diagrama de manchas se describe a continuación.

Se asume que ha sido calculado correctamente el diagrama de manchas. La función de propagación de línea se determina por la integración del diagrama de manchas en una dirección; en la práctica uno asume un incremento Δx y cuenta todos los puntos entre el borde de la línea y su incremento. Se normaliza N_x (el número de puntos dentro de Δx) en contra de x , esto representa la función de propagación de línea que se llama $A(x)$ (Note que la función de propagación de punto (PSF), se podría derivar a partir del cálculo de la difracción si la MTF exacta es deseada).

Se obtiene la función de transferencia de modulación de la siguiente forma:

$$A_c(v) = \frac{\sum A(x) \cos(2\pi vx) \Delta x}{\sum A(x) \Delta x}, \quad (1)$$

$$A_s(v) = \frac{\sum A(x) \sin(2\pi vx) \Delta x}{\sum A(x) \Delta x}, \quad (2)$$

$$MTF(v) = |A(v)| = [A_c^2(v) + A_s^2(v)]^{1/2}, \quad (3)$$

Donde v representa la frecuencia espacial.



Los patrones de difracción son calculados a partir de la difracción de campo cercano usando la integral de Fresnel⁴, esta se calcula con ayuda de la transformada de Fourier; la integral de Fresnel se describe en la Eq. 4.

$$U_2(x_2, y_2) = \frac{1}{i\lambda z} e^{ikz} e^{ik\left(\frac{x_2^2 + y_2^2}{2z}\right)} \iint U_1(x_1, y_1) e^{ik\left(\frac{x_1^2 + y_1^2}{2z}\right)} e^{-ik\left(\frac{x_1 x_2 + y_1 y_2}{z}\right)} dx_1 dy_1, \quad (4)$$

3. RESULTADOS

En la Fig.2, se muestra un corte horizontal del ojo del gecko y los respectivos radios de curvatura para cada superficie, además de sus grosores. Se asume que la distancia focal del ojo del gecko usando el modelo de Gullstrand es de 3.6 mm. Los índices de refracción entre los radios de curvatura son: $n_1=1.336$ (r_2-r_1), $n_2=1.414$ (r_3-r_2), $n_3=1.336$ (retina – r_3). Se obtienen los diagramas de mancha y la MTF para una longitud de onda en el visible de 589.29 nm.

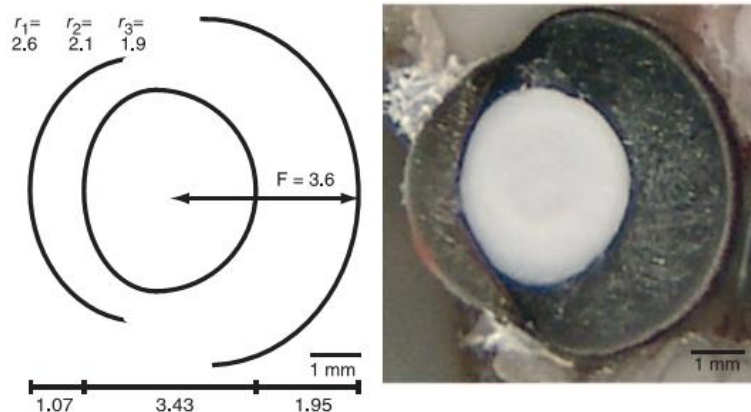


Figura 2. Radios de curvatura del sistema óptico del gecko nocturno de casco

En la siguiente tabla se dan algunos datos importantes sobre la anatomía del gecko obtenidos por Roth.

Tabla 1. Comparativa de la sensibilidad óptica del gecko nocturno de casco con el humano.

Visión de Color Confirmado	Gecko nocturno de casco (0.002 cd m ⁻²)	Humano (0.02 cd m ⁻²)
Coeficiente de absorción, k	0.035	0.035
Diámetro de pupila, $A(\mu\text{m})$	3900 ± 200	7000
Longitud focal, $f(\mu\text{m})$	3500 ± 100	16700
Diámetro del cono, $d(\mu\text{m})$	10 ± 2	1.5
Longitud del segmento externo del cono, $l(\mu\text{m})$	37 ± 5	30
Sensibilidad óptica para la luz blanca, $S_w(\mu\text{m}^2 \text{sr})$	28	0.08



En la Fig. 3 se muestra el diagrama del sistema óptico del gecko con trazado de rayos a 0° a $\pm 10^\circ$, en la Fig. 4 se presenta el diagrama de mancha de campo completo en el plano imagen, Fig. 5 muestra el diagrama de manchas en a través de focos diferentes en el plano imagen. Todas ellas con una longitud de onda con 589 nm. Se utilizó Zemax⁵ para obtener las diferentes simulaciones.

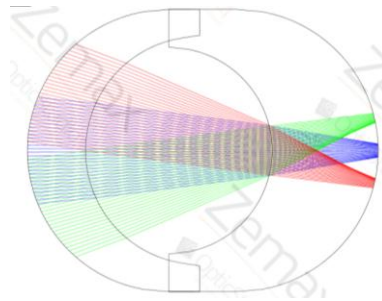


Figura 3. Diagrama del Sistema óptico del gecko nocturno de casco

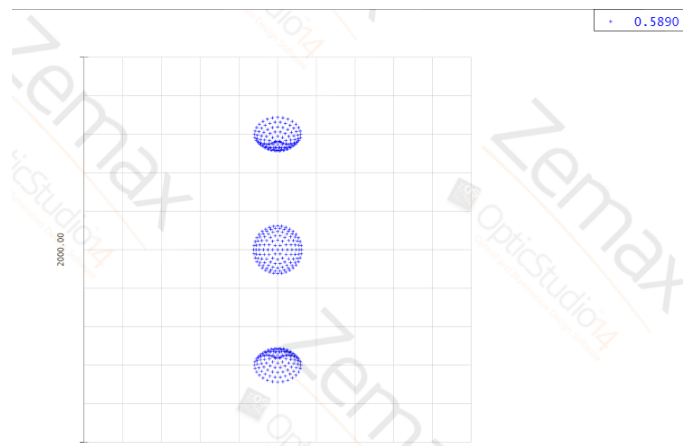


Figura 4. Diagrama de mancha de campo completo en el plano imagen

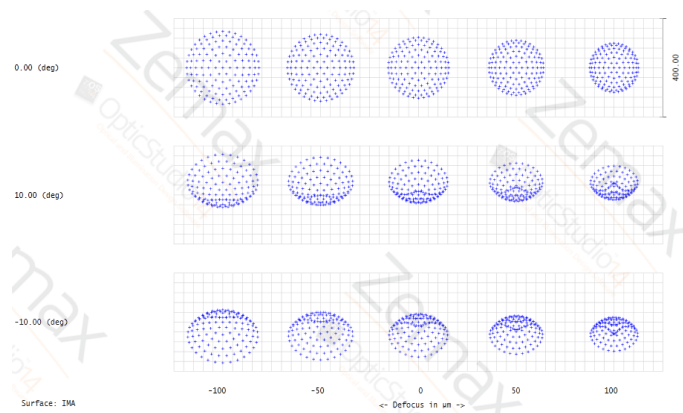


Figura 5. Diagrama de manchas a través de focos en el plano imagen.



Ahora se muestran (Fig. 6) la MTF(función de transferencia de modulación) del sistema.

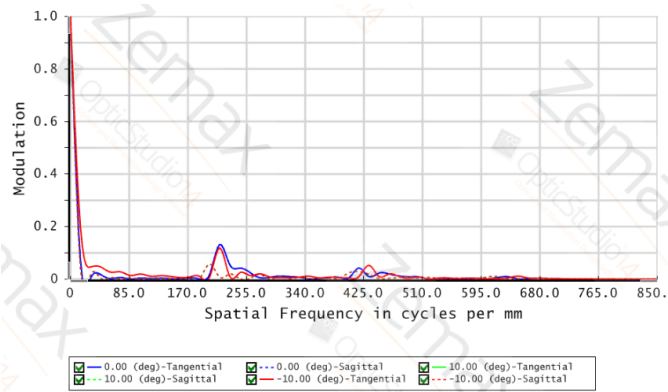


Figura 6. MTF del sistema óptico del gecko nocturno de casco.

En las siguientes figuras (Fig. 7-9) se muestran un conjunto de imágenes de entrada; las cuales son simuladas con el sistema óptico del gecko nocturno de casco propuesto por Roth, y las imágenes de salida del sistema se comparan con las de entrada. Para este trabajo solo se muestran comparativas visuales.

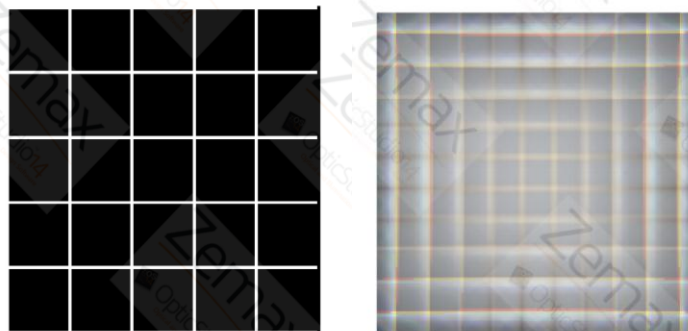


Figura 7. Imagen de Malla y su respectiva simulación.



Figura 8. Imagen de paisaje y su respectiva simulación.

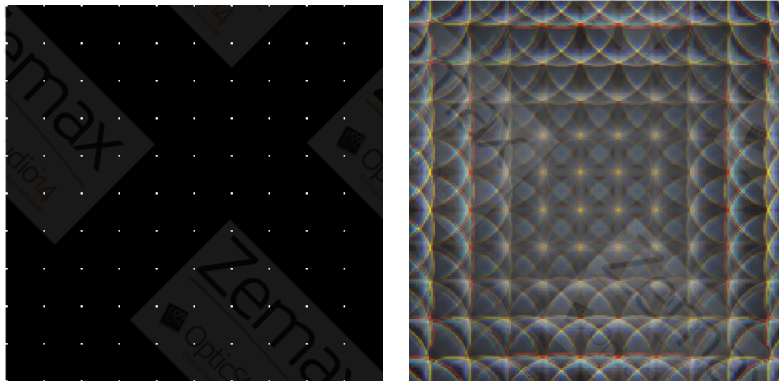


Figura 9. Imagen de malla de puntos y su respectiva simulación.

Por último se muestran los patrones de difracción de la pupila del gecko en diferentes configuraciones, para las simulaciones se usó MATLAB⁶. En la figura 10 se muestran imágenes de la pupila del gecko con diferentes condiciones de iluminación. En las figuras 11-12 se muestran los patrones de difracciones focalizadas y no focalizadas, de dos diferentes configuraciones, la primera de líneas con rombos y la segunda con círculos.

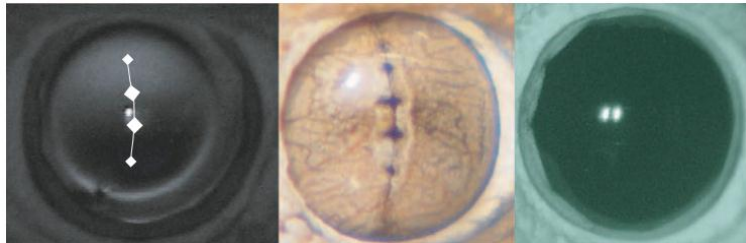


Figura 10 . De izq. a der. Imagen fotorefractometrica del ojo del gecko nocturno de casco con adaptación a la luz mostrada con líneas y rombos, pupila con luz, pupila sin luz.

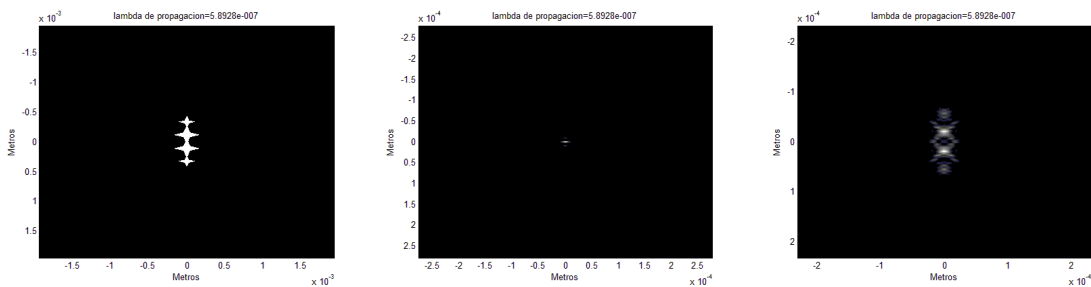


Figura 11 . De izq. a der. Pupila del gecko en forma de líneas y rombos, propagación de la pupila en foco 3.6 mm, propagación de la pupila desenfocada a 3 mm.

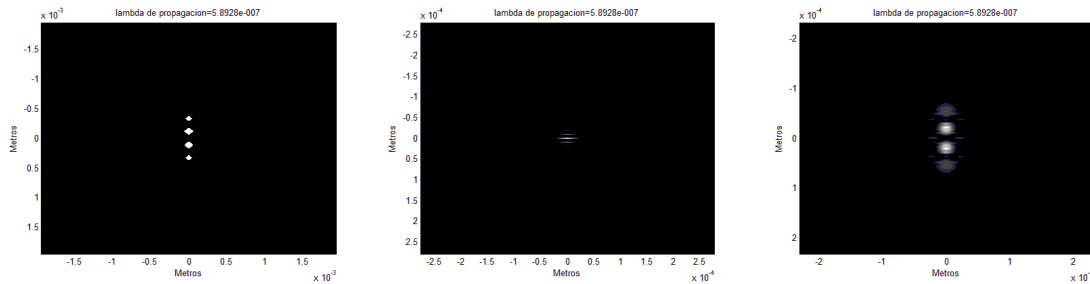


Figura 12 . De izq. a der. Pupila del gecko en forma de círculos, propagación de la pupila en foco 3.6 mm, propagación de la pupila desenfocada a 3 mm.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se discute la facilidad que tiene el gecko de casco nocturno de cambiar la forma de su pupila dependiendo de las condiciones de iluminación, se simularon los patrones de difracción de estos cambios de pupila para entender mejor sus fenómenos difractivos. También se hace un estudio y análisis del sistema óptico del ojo del gecko nocturno de casco, basado en el modelo de Roth. Para ello se calculó el diagrama de manchas del sistema óptico, su función de modulación de transferencia y simulaciones del comportamiento del sistema con diversas imágenes de entrada; observando que el sistema óptico del gecko tendría aberración de coma, esférica, cromática y tilde.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores E. Lopez M. y L. Lara R., agradecen a CONACyT y al INAOE por el apoyo con las becas doctorales, el Dr. F. Renero C. agradece al Sistema Nacional de Investigadores

BIBLIOGRAFÍA

1. Roth, L. S. V., Lundström, L., Kelber, A., Kröger, R. H. H., & Unsbo, P. (2009). The pupils and optical systems of gecko eyes. *Journal of Vision*, 9(3):27, 1–11, <http://journalofvision.org/9/3/27/>, doi:10.1167/9.3.27
2. Renero C., F.J., “Automatic Design of Lens Arrays for Optical Computing and Interconnects”, Febrero 1995, Departamento de Física Aplicada , Universidad de Osaka , Japon.
3. Smith, W. J., “Modern Optical Engineering: Design of optical systems”, McGraw hill, 2da edición, 1991.
4. Cathey, W.T. , “Optical Information Processing and Holography”, Universidad de Colorado, 1974, Wiley & Sons Inc.
5. www.zemax.com
6. www.matlab.com