

Implementación de un sistema óptico que incluye un sensor de Hartmann-Shack para medir un frente de onda en el software WaveView

EZEQUIEL PAZ TOTOLHUA¹, MARCELO DAVID ITURBE CASTILLO², MARCO ANTONIO ALONSO PÉREZ³, JACOB VASQUEZ SANJUAN³, AND JAVIER CALDERA MIGUEL⁴

¹Maestría en Ingeniería en Automatización de Procesos Industriales, Universidad Politécnica de Puebla, 3er carril del Ejido Serrano S/N, San Mateo Cuanalá, Juan C. Bonilla, CP 72640, Puebla, México, E-mail: ezequiel.paz@uppuebla.edu.mx

²Laboratorio de Óptica Visual en INAOE, Luis Enrique Erro # 1, Tonantzintla, Puebla, México C.P. 72840, E-mail: diturbe@inaoep.mx

³Ingeniería en Sistemas Automotrices, Universidad Politécnica de Puebla, 3er carril del Ejido Serrano S/N, San Mateo Cuanalá, Juan C. Bonilla, CP 72640, Puebla, México, E-mail: marco.alonso@uppuebla.edu.mx, jacob.vasquez@uppuebla.edu.mx

⁴Ingeniería en Informática, Universidad Politécnica de Puebla, 3er carril del Ejido Serrano S/N, San Mateo Cuanalá, Juan C. Bonilla, CP 72640, Puebla, México, E-mail: javier.caldera@uppuebla.edu.mx

Compiled December 4, 2017

RESUMEN

Este artículo presenta la implementación de un sistema de óptica para medir el frente de onda de un ojo artificial con presencia de aberraciones evaluadas a través de un sensor de Hartmann-Shack en el software WaveView. El ojo humano, se comporta como sistema óptico no ideal en constante movimiento. Las aberraciones ópticas son imperfecciones en el ojo que producen imágenes defectuosas e impiden reproducir una copia clara y exacta del objeto de fijación. El método utilizado en la reconstrucción del frente de onda para el ojo artificial es el modal, expresado en coeficientes de polinomios de Zernike. Se describe el método para realizar la medición con el sistema propuesto que incluye al sensor de Hartmann-Shack y al láser He-Ne, para obtener el frente de onda y determinar las aberraciones a través de los coeficientes de Zernike en el ojo artificial en tiempo real. © 2017 Universidad Politécnica de Puebla

OCIS codes: (140.3490) Lasers, distributed feedback; (060.2420) Fibers, polarization-maintaining; (060.3735) Fiber Bragg gratings.

<http://dx.doi.org/10.1364/ao.XX.XXXXXX>

1. INTRODUCCIÓN

El sensor Hartmann-Shack fue desarrollado en el año 1900 por Johannes Hartmann para medir las aberraciones en los espejos y lentes de los grandes telescopios [1]. El método de Hartmann en un principio consistía en perforar una pantalla opaca con numerosos agujeros, de modo que cada agujero actuaba como una apertura para aislar un pequeño grupo de haces luminosos, que pudieran ser rastreados para determinar cualquier error en su

dirección de propagación, que correspondería con la pendiente local del frente de onda, logrando de este modo conocer el frente de onda. En 1971 Shack modificó esta técnica sustituyendo la pantalla de agujeros de Hartmann por una red de pequeñas lentes que enfocan la luz en una matriz de puntos luminosos, lo que incrementó la señal-ruido del registro. Este modelo constituye el esquema básico del actual sensor de frente de onda de Hartmann-Shack. El primer uso del sensor fue planteado en 1994 por Liang y colaboradores, quienes incorporaron un sistema telescópico para conjugar el plano de la pupila del ojo con el plano de la red de microlentes. De esta forma, el haz de salida del ojo proveniente de la reflexión sobre la retina de un haz de entrada, se muestreaba directamente sobre el plano de la pupila [2]. Hoy en día los sensores de frente de onda, son utilizados en los campos de la ciencia aplicada como: control de calidad industrial, aeroespacial, creación de semiconductores, microscopía y bio-imagen [3].

El objetivo de este trabajo es implementar un sistema de óptica que incluye un sensor de Hartmann-Shack para obtener un frente de onda proveniente de un láser que ha incidido en un ojo artificial (arreglo de lentes) y evaluar e interpretar sus aberraciones en tiempo real, modificando parámetros del software WaveView.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 El sensor de Hartmann-Shack "HASO4 VIS"

El diseño mecánico del sensor Hartmann-Shack del tipo HASO4 VIS utilizado, se muestra en la Figura 1 con las dimensiones a escala en milímetros [4]. El sensor de frente de onda, consiste en dos elementos, una matriz de lentes y un detector con una cámara CCD.

Internamente en el sensor, el haz del láser se divide en múltiples haces elementales, utilizando una matriz de microlentes. Estos haces secundarios se centran en el detector de una cámara. Posteriormente, se realiza un análisis de la información para

Dimensión de abertura	3.6 x 4.6 mm ²
Número de microlentes	32 x 40
Rango de inclinación dinámico	> ± 3° (400 lambda)
Longitud de onda de trabajo	400 - 700 nm
Interfaz / fuente de alimentación	USB 3.0 / 2.7 W via USB
Intensidad máxima	50 mW/ cm ²
Frecuencia máxima de adquisición	100 Hz
Temperatura de trabajo	15 - 30 °C
Dimensiones / peso	(L x W x H) 42 x 42 x 42 mm / 150g
Tensión / Fuente de alimentación	5 V / 2.7 W
Sistema Operativo	Win XP, Win 7 (x86, x64)

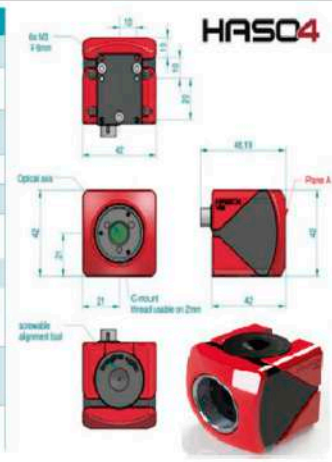


Fig. 1. Diseño mecánico, especificaciones y características de un sensor de frente de onda de Hartmann-Shack HASO4 VIS" [4].

determinar la fase y la intensidad del haz. El funcionamiento aplicado a un ojo se muestra en la Figura 2 y Figura 3. Se presentan dos casos: medida en un ojo perfecto, Figura 2 y medida en un ojo con aberraciones, Figura 3. Se muestra el detalle de la geometría en el desplazamiento del spot [5]. Una aberración se caracteriza mediante la diferencia entre el frente de onda generado por el sistema y un frente de onda esférico de referencia. Esta comparación se denomina aberración de onda. Cuando se incide un frente de onda plano en un ojo sin anomalías, si no existen aberraciones, los haces de luz tendrán el mismo camino óptico, por lo que estaría en fase y se produce una convergencia de la onda, ya que se considera totalmente esférica. Sin embargo, en un ojo en presencia de aberraciones existe una diferencia de camino óptico, y debido a una convergencia inadecuada de los haces, la onda no es esférica, el frente de onda resultante es aberrado.

2.2 Los Polinomios de Zernike

Para representar las aberraciones ópticas, es mediante polinomios en coordenadas polares llamados polinomios de Zernike. Son un conjunto orto normal usados en el desarrollo de una función de frente de onda en sistemas ópticos con pupilas con simetría circular, para observar la forma de una córnea. En particular, los coeficientes de los polinomios de Zernike indican el grado en que las aberraciones son de alto y bajo orden y son compensados por los de inferior orden [6]. Los polinomios de Zernike están normalmente definidos en coordenadas polares (r, ϕ) donde r es la coordenada radial normalizada y ϕ es la componente angular [7]. La forma general de los polinomios de Zernike, pares e impares se calculan con la Ec. (1).

$$z_n^m(r, \phi) = \begin{cases} N_n^m R_n^m(r) \sin(m\phi) \\ -N_n^m R_n^m(r) \cos(m\phi) \end{cases} \quad (1)$$

Donde:

r = Es la coordenada radial normalizada.

ϕ = Es la componente angular.

N_n^m = Es el factor de normalización.

R_n^m = Es la función radial definida por la Ec. (2) para n y m enteros.

n = Indica la potencial radial más alta del polinomio.

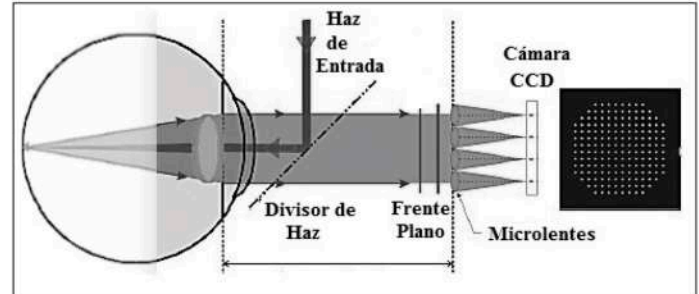


Fig. 2. Principio de medida del sensor de Hartmann-Shack para un ojo perfecto [5].

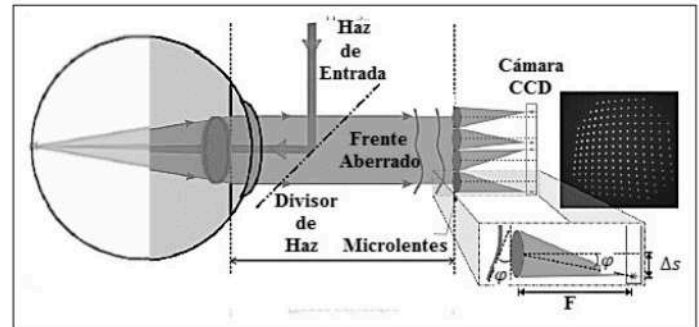


Fig. 3. Principio de medida del sensor de Hartmann-Shack para un ojo con aberraciones [5].

m = Indica la frecuencia angular.

La función radial que se encuentra dentro de la forma general de los polinomios de Zernike, se obtiene mediante la Ec. (2).

$$R_n^m(r) = \sum_{s=0}^{(n-|m|)/2} \frac{(-1)^s (n-s)!}{s! [(n+|m|)/2 - s]! [(n-|m|)/2 - s]!} r^{n-2s} \quad (2)$$

Y en la Ec. (3) se muestra el factor de normalización [8].

$$N_n^m = \sqrt{\frac{2(n+1)}{\delta_{mo}}} \quad (3)$$

Donde:

n = Indica la potencial radial más alta del polinomio y puede tomar un valor entero positivo o cero.

m = Indica la frecuencia angular, puede tomar algunos valores respecto a la Ec. (4).

$$m = -n, -n+2, n+4, \dots, n \quad (4)$$

La Figura 4 muestra los primeros 15 polinomios de Zernike, asociados a las aberraciones puras correspondientes. Los modos de orden radial $n = 2$ (fila 3), es decir desenfoque y astigmatismo, se definen como las aberraciones de bajo orden y son las que habitualmente ejercen un mayor impacto en la calidad óptica de un sistema de formación de imágenes [1].

2.3 Estado del arte

En 1971, [9] Shack modificó el sensor de Hartmann, sustituyendo la pantalla de agujeros por una red de pequeñas lentes que enfocan la luz en una matriz de puntos luminosos, lo que incrementó la señal-ruido del registro. Este modelo constituye el esquema básico del actual sensor de frente de onda de Hartmann-Shack.

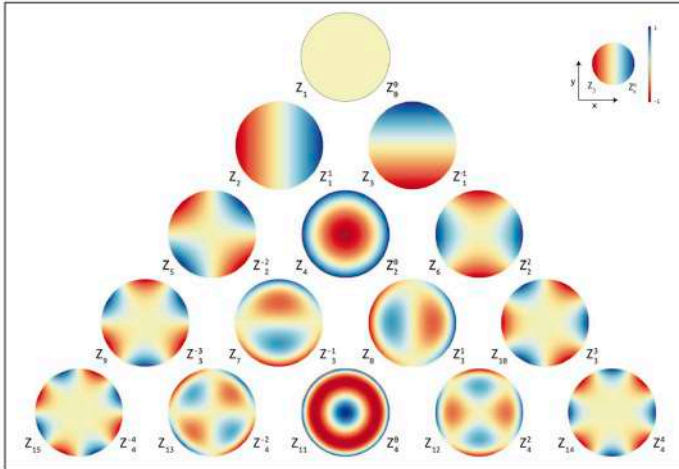


Fig. 4. Los primeros 15 polinomios de Zernike, asociados a las aberraciones puras correspondientes [1].

En 1994, [10] Liang y colaboradores utilizaron el sensor de frente de onda Hartmann-Shack para medir aberraciones en el ojo humano. Ellos incorporaron un sistema telescópico para conjugar el plano de la pupila del ojo con el plano de la red de microlentes. De esta forma, el haz de salida del ojo proveniente de la reflexión sobre la retina de un haz de entrada, se muestrea directamente sobre el plano de la pupila.

En 2012, [11] Brousseau, J. P. Véranb, S. Thibaulta, y S. F. Boivina realizaron un simulador visual. La configuración completa fue montada sobre una tabla óptica de un metro cuadrado, en su implementación agregaron un sensor de Hartmann-Shack que actuaron para la medición y evaluación de aberraciones ópticas únicamente.

En 2015, [12] G. Guey, G. Dovillaire, and M. Bach, realizaron la medición de un frente de onda utilizando un sensor de Hartmann-Shack HASO3 similar al utilizado en este artículo. Ya que un nuevo método para disminuir rápidamente aberraciones dentro de una alineación óptica compleja es utilizando estos sensores de frente de onda en conjunto con soportes ópticos simples y espejos deformables.

En 2016, [13] la empresa ALPAO desarrollo sus propios espejos deformables para configurar sistemas de óptica adaptativa y poder corregir aberraciones ópticas oculares, además está integrando a sus sistemas sensores de frente de onda de Hartmann-Shack HASO independientes con ciertas características inusuales, una configuración de la implementación se muestra en la Figura 5.

3. METODOLOGÍA

Se realizó la implementación e instrumentación de un sistema de óptica adaptativa, el equipo fue proporcionado por el INAOE, el propósito es proponer un arreglo para futuras investigaciones en el campo de la óptica y el estudio del ojo humano. La metodología se centra en un conjunto de elementos ópticos. El sensor de Hartmann-Shack se manipula a través de un algoritmo de control en Matlab y la utilización del programa WaveView.

3.1 Implementación de un sistema óptico que incluye al sensor de Hartmann-Shack "HASO4 VIS"

Se realizó el montaje mecánico de un láser He-Ne de longitud de onda de 632.3 nanómetros sobre una mesa estabilizadora,

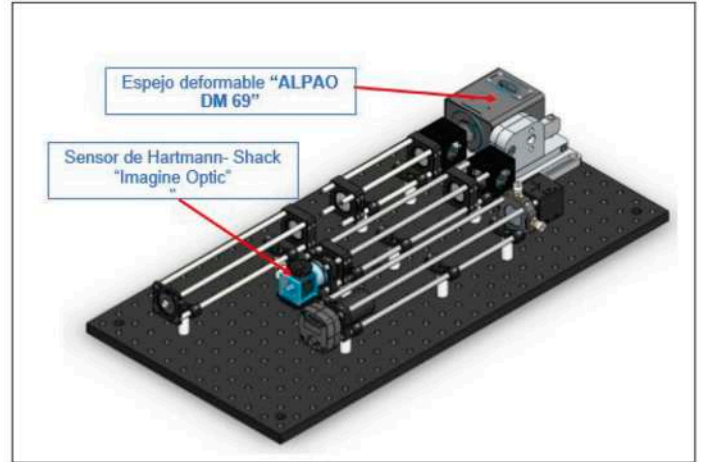


Fig. 5. Configuración de un sistema ALPAO utilizando un sensor de Hartmann-Shack del tipo HASO [13].

utilizando una base dinámica para controlar el movimiento en el eje X y Y. Se hizo el montaje de un filtro espacial y un colimador de haz, los cuales filtran el haz de potencia del láser He-Ne para obtener un haz de salida de intensidad ideal para realizar la medición. Después se realizó el montaje del sensor de Hartmann-Shack junto al arreglo de lentes (pupila y córnea) que representan el ojo artificial. Obteniéndose un sistema de óptica adaptativa para la reconstrucción, como se observa en la Figura 6.

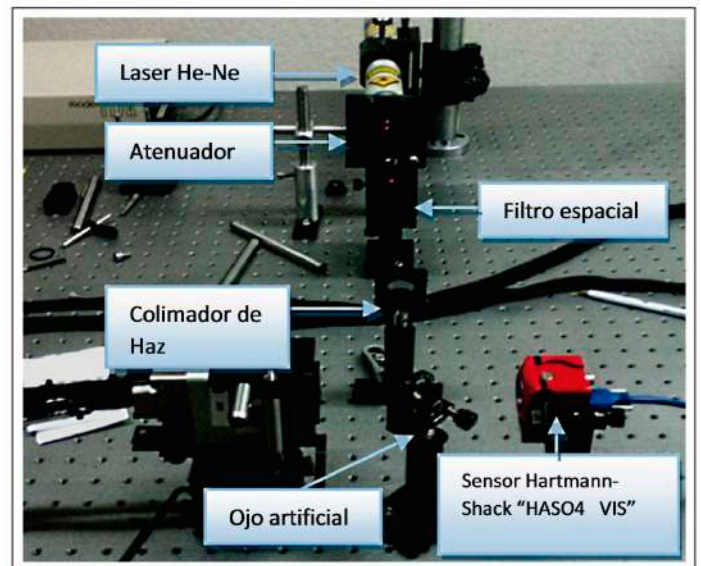


Fig. 6. Implementación de un sistema de óptica para medir un frente de onda.

4. RESULTADOS

A continuación, se muestran los resultados experimentales de la adquisición y evaluación del frente de onda que el láser ha generado al incidir en el arreglo de lentes (ojo artificial). Se utilizaron dos herramientas informáticas para la reconstrucción del frente de onda y la fase: Matlab y WaveView. El sistema que incluye la distribución de los instrumentos ópticos implicados se detalla en el apartado de la Metodología.

Utilizando Matlab R2015a se crearon todos los dispositivos ópticos implicados en la instrumentación a través de la programación. Entonces se ejecutó el algorithm 1 para la medición del frente de onda [7].

Algorithm 1. Algoritmo en Matlab R2015a para la construcción del frente de onda.

- 1: userStartup ▷ Comunica y reconstruye los elementos implicados en el sistema de óptica adaptativa
- 2: **procedure** O(n) ▷ Inicio para el sistema de OA
Configuración del sensor de Frente de Onda del tipo Hartmann-Shack.
- 3: wfs.Online(); ▷ Conecta el sensor de Hartmann-Shack
Se obtienen los centros de Gravedad.
- 4: [cx, cy, flux] = wfs.GetCog(); ▷ Se obtienen los centros de gravedad
- 5: plot(cx,cy,'); ▷ Despliega los centros de gravedad
Se construye la fase.
- 6: phase = wfs.GetPhase(); ▷ Se obtiene la construcción de la fase
- 7: imagesc(phase); ▷ Despliega la fase
Se obtienen los coeficientes de Zernike.
- 8: zernike = wfs.GetMode(); ▷ Se obtiene los coeficientes de Zernike
- 9: bar(zernike); ▷ Despliega los coeficientes de Zernike
Monitoreo y cálculo de las pendientes.
- 10: wfs.StartSlopeRtd(); ▷ Empieza el monitoreo de las pendientes
Monitoreo y cálculo del frente de onda.
- 11: wfs.StartWavefrontRtd(); ▷ Empieza el monitoreo del frente de onda
Cambio de referencias de las pendientes.
- 12: [sx,sy] = wfs.GetSlope(); ▷ Se obtienen las pendientes del frente de onda
- 13: wfs.SetReferenceSlope(sx,sy); ▷ Se obtienen las pendientes del frente de onda
- 14: wfs.Off; ▷ Se apaga el sensor de frente de onda de Hartmann-Shack
- 15: cam.StopRtd ▷ Se detiene el monitoreo de la cámara del sensor
- 16: cam.Off; ▷ Se apaga la cámara

La Figura 7 muestra la adquisición de un frente de onda para un distancia diferente del arreglo de lentes que representan el ojo artificial (pupila y córnea) al ejecutar el algorithm 1 en el entorno MATLAB 2015a.

En la Figura 7 la imagen superior izquierda muestra el resultado reconstruido de la fase. La parte inferior izquierda representa los coeficientes de Zernike y la parte superior e inferior derecha las gráficas PV (comparación entre un frente de onda plano y un frente de onda aberrado) y el voltaje RMS.

El software WaveView es usado para controlar los distintos modos de adquisición de la imagen de la cámara del sensor de Hartmann-Shack. Con WaveView, se elige la reconstrucción del frente de onda por métodos zonales o modales. La reconstrucción modal es una descomposición del frente de onda en una base ortogonal para entender las aberraciones [14].

Los parámetros ingresados al inicio de sesión, para realizar mediciones son: longitud de onda de 633 nanómetros del láser He-Ne y unidades de la reconstrucción de la fase en micrómetros. El software realiza la comprobación rápida de la medición del frente de onda proporcionado por el sistema, en tiempo real.

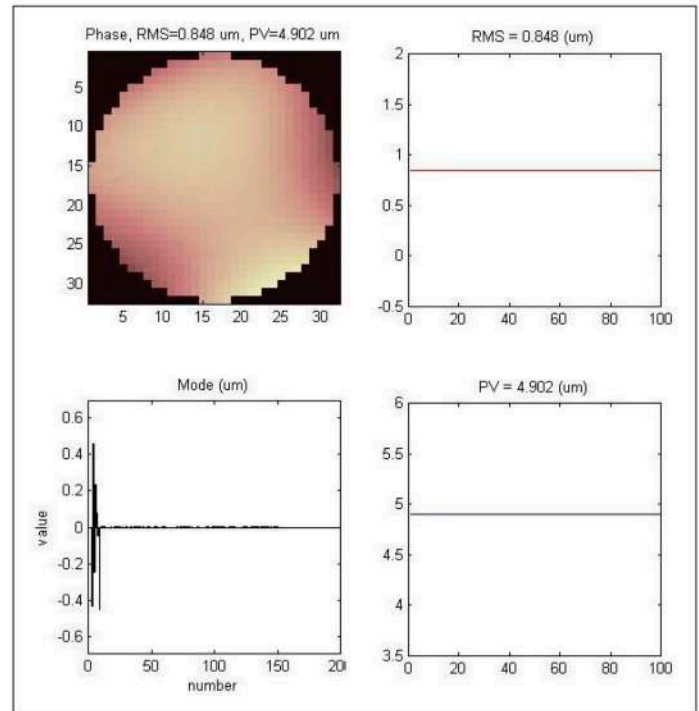


Fig. 7. Reconstrucción de la fase en MATLAB R2015a con PV=4.902 micrometros y RMS=0.848 micrometros

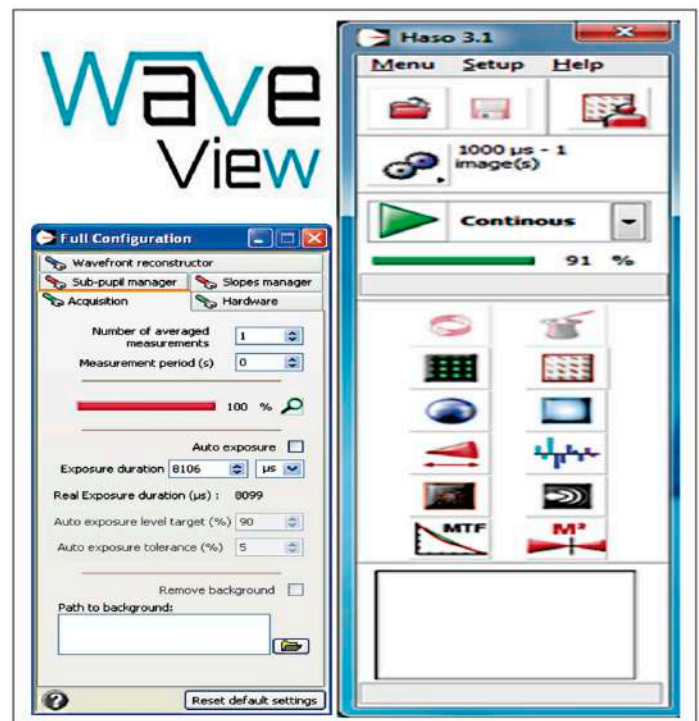


Fig. 8. Ventana de nueva sesión y configuraciones del software WaveView.