

Implementación de Redes Neuronales Convolucionales (CNN) para predecir coeficientes de Zernike usando imágenes de Hartmann–Shack

1st Alejandro Becerra

Departamento de Ingeniería de Sistemas

Universidad de Antioquia

Medellín, Colombia

alejandro.becerraa@udea.edu.co

Resumen—Este proyecto busca mejorar la precisión en la estimación de aberraciones ópticas a partir de imágenes Hartmann–Shack mediante el uso de modelos de aprendizaje profundo. Se desarrolla una inteligencia artificial basada en una red neuronal convolucional (ResNet18) para predecir los coeficientes de Zernike del 1 al 21. Los resultados obtenidos hasta el momento muestran una alta correlación entre los coeficientes reales y los predichos, una reducción progresiva del error cuadrático medio (RMSE) y una distribución de residuos centrada en cero, lo que evidencia un modelo estable y generalizable.

Palabras clave—Imágenes de Hartmann–Shack, Coeficientes de Zernike, Polinomios de Zernike, Red Neuronal Convolucional, ResNet18, Censado de frente de onda, Teorema del Límite Central.

I. INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas, diversas investigaciones han sentado las bases teóricas y experimentales para el estudio y modelado de aberraciones ópticas, así como para la aplicación de métodos computacionales avanzados en su análisis. Desde los primeros trabajos sobre redes neuronales artificiales, se ha reconocido su capacidad para aprender representaciones complejas a partir de datos visuales, emulando el comportamiento del cerebro humano mediante el ajuste iterativo de parámetros internos [4].

En paralelo, el campo de la óptica oftálmica ha experimentado un avance significativo gracias a la caracterización matemática de las aberraciones, entendidas como desviaciones en la propagación del frente de onda que afectan la calidad de las imágenes formadas por los sistemas ópticos, incluido el ojo humano [1].

La estimación precisa de aberraciones ópticas mediante imágenes Hartmann–Shack representa un componente esencial en la óptica adaptativa, permitiendo analizar las desviaciones del frente de onda reflejado por el ojo humano [1]. Tradicionalmente, estos análisis se han basado en el cálculo de los polinomios de Zernike, que describen de forma matemática las irregularidades del sistema visual [2]; sin embargo, los métodos clásicos presentan limitaciones ante la complejidad y el volumen de los datos. En este contexto, las redes neuronales convolucionales (CNN) [3] surgen como una alternativa eficaz para extraer patrones espaciales y predecir parámetros

ópticos con alta precisión. Este trabajo propone el uso de una arquitectura ResNet18 para predecir los coeficientes de Zernike del 1 al 21 a partir de imágenes Hartmann–Shack, incluyendo los coeficientes 1 y 2, cuya incorporación mejora la representación de los desplazamientos lineales de los píxeles. Con ello, se busca optimizar la reconstrucción del frente de onda y avanzar hacia sistemas de diagnóstico óptico más precisos y automatizados, fortaleciendo la relación entre el análisis físico y el modelado mediante aprendizaje profundo.

II. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

A. Contexto del problema

Las aberraciones ópticas, según Vidal [5], son desviaciones en la propagación del frente de onda que afectan la calidad de las imágenes formadas por los sistemas ópticos, incluido el ojo humano. Estas aberraciones pueden clasificarse en aberraciones de bajo orden (como el desenfoque y el astigmatismo) y de alto orden (como la coma y el trébol), las cuales cambian dinámicamente en el tiempo y presentan variaciones individuales entre sujetos. Para su caracterización, el sensor de frente de onda Hartmann–Shack (SHWFS, por sus siglas en inglés) se ha consolidado como una herramienta ampliamente utilizada en aplicaciones oftálmicas, gracias a su simplicidad, sensibilidad y versatilidad [1]. Este sistema se basa en una matriz de microlentes que descompone el haz incidente en múltiples subaperturas, permitiendo registrar la desviación local del frente de onda a través del desplazamiento de los puntos focales proyectados sobre un sensor ver figura 1.

Sin embargo, como señalan Zhang *et al.* [8], existen limitaciones en la medición cuando se presentan aberraciones de gran amplitud o tamaños pupilares amplios, pues el rango dinámico del SHWFS resulta insuficiente para capturar con precisión las desviaciones extremas. Los métodos tradicionales de reconstrucción del frente de onda como los algoritmos modales y zonales fallan en estos casos debido al desplazamiento excesivo de los puntos fuera de su subapertura de referencia, generando errores significativos en la reconstrucción ver figura 2 [2].

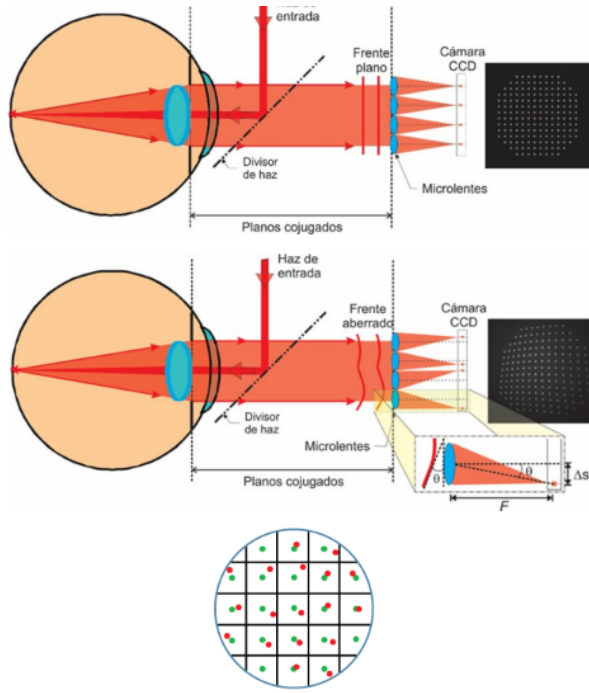


Fig. 1. Comparación entre imágenes de Hartmann-Shack ideal y aberrada

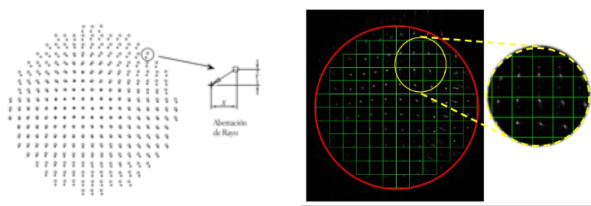


Fig. 2. Método tradicional calculo de aberraciones

Para abordar esta problemática, se han propuesto métodos de expansión del rango dinámico basados en extrapolación, correlación gaussiana y optimización iterativa, pero estos suelen depender de condiciones iniciales precisas o de la visibilidad total de los puntos de referencia. Recientemente, enfoques basados en aprendizaje profundo han demostrado su capacidad para aprender directamente la correspondencia entre los patrones Hartmann-Shack y los mapas de fase del frente de onda, evitando los errores de asignación subapertura y mejorando simultáneamente la precisión y el rango dinámico [3].

En este proyecto, se emplea un enfoque de aprendizaje profundo utilizando una red neuronal convolucional (CNN) basada en la arquitectura *ResNet18*. Esta arquitectura utiliza bloques residuales que facilitan el flujo de gradientes y mitigan el problema de desaparición del gradiente en redes profundas. Cada bloque residual consta de dos capas convolucionales con un tamaño de kernel de 3×3 , seguidas de una función de activación no lineal. El primer conjunto de bloques comienza con 64 canales de entrada, reducidos a 32 canales; posterior-

mente, la profundidad de la red aumenta progresivamente (32, 64 canales) mediante el uso de *stride 2* en algunos bloques para reducir la resolución espacial de la imagen. Este diseño permite capturar características de alto nivel preservando la eficiencia computacional, mientras que las conexiones de identidad garantizan la preservación de la información a través de la red [3].

Antes del entrenamiento de la red neuronal, se construyó una base de datos de imágenes del sistema óptico a evaluar. En este caso, el sistema estudiado corresponde a un ojo artificial diseñado para simular las diferentes aberraciones presentes en un ojo humano real. Las imágenes se generaron empleando el sensor Hartmann-Shack, el cual permite analizar cómo se comportan diferentes regiones del ojo al hacer pasar un haz de luz a través de cada microlente. Dependiendo del ángulo de desviación de la luz reflejada, se determinan los coeficientes de Zernike, que a su vez caracterizan matemáticamente el tipo y la magnitud de la aberración presente [2]. Estos polinomios, definidos por Mahajan [2], constituyen una base ortogonal que describe las aberraciones en pupilas circulares y se utilizan ampliamente en la representación y corrección de errores ópticos.

Una vez obtenidas las imágenes Hartmann-Shack, la red neuronal convolucional (*ResNet18*) se entrena para reconocer las características morfológicas del patrón y predecir los coeficientes de Zernike asociados. De esta forma, la CNN actúa como un mapeo de extremo a extremo entre los Hartmannogramas y los frentes de onda reconstruidos, eliminando la necesidad de métodos modales o zonales clásicos y aumentando la robustez del proceso de medición. El uso de este enfoque basado en aprendizaje profundo representa una integración efectiva entre la óptica física y la inteligencia artificial, contribuyendo al desarrollo de sistemas oftálmicos más precisos y automatizados para la evaluación de aberraciones oculares.

B. Composición de la base de datos

El conjunto de datos empleado proviene de una base de imágenes sintéticas de un ojo artificial, generadas mediante la simulación del patrón Hartmann-Shack para diferentes combinaciones de coeficientes de Zernike en el rango $[-1, 1]$.

- **Tipo de datos:** Imágenes (matrices 2D) en formato .png acompañadas de un vector de 21 coeficientes reales en formato .txt.
- **Tamaño:** 34.000 imágenes generadas (tamaño en disco de aproximadamente 4 GB).
- **Dimensión de entrada:** 1280×1024 píxeles por imagen.
- **Etiquetas:** 21 valores reales asociados a los coeficientes de Zernike.
- **Distribución:** Entrenamiento 80%, Validación 10%, Prueba 10%.

III. MÉTRICAS DE DESEMPEÑO

A. Métricas de regresión

- **RMSE (Root Mean Squared Error):** utilizada como función de pérdida principal.

- Coeficiente de correlación (R): superior a 0.98 en la mayoría de los coeficientes.
- Distribución de residuos: simétrica y centrada en cero.
- Diagramas de caja: muestran estabilidad y ausencia de valores atípicos significativos.

B. Métricas de desempeño del negocio

- Precisión óptica: mejora en la caracterización del frente de onda con errores inferiores al 1%.
- Fiabilidad del modelo: estabilidad ante variaciones en los coeficientes lineales (1 y 2).
- Generalización: validación cruzada con coeficientes no vistos durante el entrenamiento.

IV. REFERENCIAS Y RESULTADOS PREVIOS

Estudios pioneros, como el de Tabernero, profundizaron en el origen de estas aberraciones y su relación con el diseño de lentes intraoculares, aportando un marco experimental sólido para su medición y corrección [7].

Posteriormente, Torres y Ruiz demostraron la utilidad del análisis del frente de onda mediante el sensor Hartmann–Shack, aplicándolo a ojos con queratocono para identificar aberraciones de alto orden, lo que permitió correlacionar patrones de desviación del haz de luz con irregularidades corneales y estableció un precedente clave para trabajos de reconstrucción del frente de onda [1].

En el ámbito matemático, Mahajan formalizó el uso de los polinomios de Zernike como herramienta para describir las aberraciones ópticas en sistemas con pupilas circulares, definiendo una base ortogonal que facilita la cuantificación y representación de cada tipo de aberración [2].

Complementariamente, Comastri *et al.* extendieron este análisis mediante transformaciones de coeficientes de Zernike en escenarios donde la pupila se desplaza o contrae transversalmente, aportando una visión más completa de la dinámica del sistema óptico [6].

Con el advenimiento de la inteligencia artificial moderna, la introducción de redes neuronales convolucionales (CNN)—arquitecturas particularmente eficientes para extraer características espaciales y jerárquicas en imágenes— ha abierto nuevas posibilidades para el análisis automatizado de frentes de onda. Estas redes permiten detectar patrones complejos en imágenes Hartmann–Shack y relacionarlos con los coeficientes de Zernike, ofreciendo una alternativa más rápida, precisa y generalizable frente a los métodos clásicos de reconstrucción óptica [3].

REFERENCIAS

- [1] K. Torres y N. Ruiz, “Aberraciones de alto orden en ojos con queratocono, medidas mediante análisis de frente de onda Hartmann–Shack,” *Revista Mexicana de Oftalmología*, vol. 83, no. 2, pp. 100–105, 2009.
- [2] V. N. Mahajan, “Zernike circle polynomials and optical aberrations of systems with circular pupils,” *Applied Optics*, vol. 20, no. 13, pp. 2091–2098, 1981.
- [3] E. Todt and B. A. Krinski, *Convolutional Neural Network – CNN*, 30 Nov. 2019. [En línea]. Disponible: https://www.inf.ufpr.br/todt/IAaplicada/CNN_Presentation.pdf
- [4] R. Salas, *Redes neuronales artificiales*, Universidad de Valparaíso, Departamento de Computación, vol. 1, no. 1, pp. 1–7, 2004.
- [5] R. Vidal Olarte, *Entendiendo e interpretando las aberraciones ópticas / Understanding and Interpreting Optical Aberrations*, 2011.
- [6] S. A. Comastri, K. Bastida, G. Martín, y A. Bianchetti, *Aberrometrías oculares y de otros sistemas ópticos: transformación de coeficientes Zernike al contraer y desplazar transversalmente la pupila*, Informe N.º 208, Facultad de Ingeniería, Universidad de Belgrano, 2008.
- [7] J. Tabernero, *Estudios de las fuentes de aberraciones en el ojo humano. Aplicaciones en lentes intraoculares*, Tesis doctoral, Universidad de Murcia, Murcia, España, 2007.
- [8] H. Zhang, J. Zhao, H. Chen, Z. Zhang, C. Yin, y S. Wang, “Large-Dynamic-Range Ocular Aberration Measurement Based on Deep Learning with a Shack–Hartmann Wavefront Sensor,” *Sensors*, vol. 24, no. 9, p. 2728, 2024. DOI: 10.3390/s24092728.