

How is the correlation between data science and optics?

Juan Manuel Hill and Jhon Stivenson Pabón*
MATHEMATICAL MODEL I, group A2, year 2022.
Professor: PhD. Fabio Lora Clavijo
Universidad Industrial de Santander
Bucaramanga. Colombia
(Dated: March 28, 2022)

La conexión entre la ciencia de datos y la óptica ha emergido en paralelo con el desarrollo tecnológico, y la tendencia indica que seguirá fortaleciéndose en todos los campos abordados por la óptica. La óptica es una ciencia enfocada en modelar las propiedades de la luz y sus interacciones con la materia, de lo cual ha emergido un considerable interés en la investigación fundamental y el desarrollo industrial con participaciones billonarias. Siendo el desarrollo de elementos y dispositivos ópticos es uno de los indicadores de desarrollo de un país.

Debido a esta relevancia y a la existencia de una fuerte componente experimental en la óptica, se encuentra una creciente cantidad de datos, por lo que su procesamiento es parte fundamental en su uso. Se estima que la creciente tendencia demandará de una colaboración internacional más activa dedicada para capturar, compartir, tratar y analizar datos de forma óptima.

Sobre los tópicos que aborda la óptica, estos son amplios y variados, ya que dependiendo de la aplicación se utiliza al menos una de las tres formas de describir la luz: como rayos en óptica geométrica, como ondas electromagnéticas en óptica física u ondulatoria y como cuantos de energía en la óptica cuántica. En cada uno de sus enfoques se encuentran datos, algoritmos y aplicaciones específicas.

En óptica geométrica se destacan los sistemas formadores de imagen con interés en la generación de esquemas de lentes, sensores y la optimización de estos. En la óptica ondulatoria se encuentra la mayor cantidad de aplicaciones e información, en campos como la interferometría, polarimetría, refractometría, espectroscopia, dispositivos de precisión con propiedades electro-ópticas, como sensores, fotodetectores y pantallas de cristal líquido entre otros. En la óptica cuántica, la fotónica se explora como la generación de estados cuánticos y no clásicos, la microscopia de resoluciones atómicas de efecto túnel, la generación de números aleatorios, la transmisión de información, el

enfriamiento de átomos y gases cercanos al cero absoluto y la interacción luz-materia, incluso se encuentran usos en observaciones astronómicas.

En base a lo anterior, se destaca el uso de lentes en cualquiera de los campos de aplicación, siendo el elemento óptico más común no sólo para formar imágenes sino también para redirigir un haz, colimar y modular el frente de onda. Identificando la generación de superficies de lentes como un problema tecnológico y abordado desde la teoría de astigmatismo riguroso obteniendo las superficies de los lentes que permiten formar imagen [1]. Experimentalmente la generación de lentes se aborda desde la ingeniería de diseño, y se enfoca en la búsqueda de técnicas que permitan el pulido de superficies específicas en el perfil de los lentes.

Mediante el diseño de ingeniería óptica y su proceso de resolución de problemas técnicos, se identifica dentro de los requisitos para crear nuevos instrumentos ópticos el abordar metodologías que mejoren la imagen debido a las limitaciones que existen en la creación de lentes propias de la técnicas de pulido. Identificando el problema como una optimización entre la técnica que permita obtener la mejor calidad de imagen posible compensando las aberraciones que distorsionan la imagen. Un factor importante para caracterizar un sistema formador de imágenes es la llamada respuesta a un objeto puntual o PSF(Point Spread Function) [2], el cual es un algoritmo que permite obtener la imagen de una fuente puntual. Esta señal determinará la calidad del sistema formador de imagen así como sus aberraciones y resolución espacial mediante la operación de convolución de la PSF con la imagen.

Cabe señalar que en las tecnologías de pulimento de lentes no hay datos libres. Está privatizada su información e incluso hay restricciones en la adquisición de la tecnología por países, siendo Colombia inhabilitado para la compra de estos sistemas de pulimento de última tecnología. Cabe resaltar, que las técnicas de pulido se basan en métodos artesanales sin protocolos libres y adquiridos con los años mediante la experiencia. Debido a ello, aún no existe una ciencia de datos en el campo de pulimento de lentes.

* Correspondence email address: jhon2228082@correo.uis.edu.co

Los lentes son comúnmente usados en la óptica para la generación de imágenes, siendo el tratamiento de esta señal la unión con la ciencia de datos. Las imágenes se modelan matemáticamente de manera discreta como una matriz que representa los píxeles. Se identifica además esta información de tipo bidimensional, en la cual puede adquirirse más información como una distribución tipo histograma y espacial por un perfil de intensidades utilizada en tareas como clasificación de patrones mediante matrices o Kernel específicos para identificar: bordes, realzar colores, mejoramiento en la calidad, mejorar la resolución espacial, realzar características, filtrar la señal para eliminar ruido por métodos como deconvolución y retro-propagación, entre otros.

Esto es permitido debido a la identificación de una imagen como una señal y su modelo matemático matricial, el cual abrió todo un campo basado en algoritmos y la ciencia de datos llamado computer vision. Donde su principal interés es extraer información específica de las imágenes mediante uso computacional. Entre los campos abordados están la estimación de movimiento, vigilancia, modelado 3D, determinar eventos, estimación de pose, estimación de la profundidad tridimensional, entre otros. Siendo estas tareas fortalecidas y optimizadas con los métodos de inteligencia artificial como machine learning y deep learning, tanto así que se han creado redes neuronales convolucionales [3] enfocadas en el tratamiento de imágenes.

La captura de imágenes pueden obtenerse mediante sensores de cámaras CCD, CMOS en esquemas de microscopia, astronomía y en escala estándar. Por ejemplo, el campo de sensado remoto [4] adquiere imágenes espectrales por medio de satélites con énfasis en vigilancia de cultivos, optimización de espacios y clasificación espectral. Debido a la incapacidad de adquirir un satélite se han generado colaboraciones para capturar, procesar y compartir datos mediante la generación de bases de datos llamadas Datasets <https://sedac.ciesin.columbia.edu/theme/remote-sensing/data/sets/browse>, los cuales pueden incluso generarse e indexarse como producto de investigación en plataformas como IEEE datasets. <https://ieee-dataport.org/topic-tags/computer-vision>

Una aplicación reciente en computer visión es la estimación del mapa de profundidades. Es un reto y una necesidad poder modelar el mundo tridimensional en que vivimos y el cual queremos simular por computador. Este campo implica, extraer información tridimensional de una señal bidimensional y se logra mediante algoritmos como trazado de rayos, proyección

de sombras, revisión de morfología, retrodispersión de un haz de luz, entre otros. Este enfoque es ampliamente utilizado en el campo de los videojuegos, la realidad virtual, los videos y animaciones generados en computadora con alta resolución, también en aplicaciones para diseño y arquitectura 3D, y es también la tecnología utilizada en tareas de los robots y vehículos autónomos [10]. Esta tecnología utiliza para la adquisición de la imágenes una cámara de color de tres canales como RGB, ya que con una imagen en escala de grises la estimación es más costosa computacionalmente. Y mediante la estimación del mapa de profundidades los autos pueden evitar accidentes con un frenado automatizado e incluso manejarse incluso solos [11]. Esta tecnología es la usada en los autos eléctricos Tesla <https://www.tesla.com/AI> de última generación. Además, mediante los datasets de imágenes se implementan modelos de aprendizaje profundo para entrenar los algoritmos de estimación del mapa de profundidades y obtener una mayor precisión y poder predictivo.

El análisis de las imágenes también tiene importantes usos en el área médica en un variado uso de tecnologías, de varios rangos espectrales hasta acústica, generando campos como bióptica, biometría y óptica visual. En general el área de la salud las imágenes se usan para identificar cambios morfológicos para detección temprana de enfermedades, así como en la identificación de patrones en las imágenes para diversas técnicas comerciales como la biometría: el reconocimiento de huellas dactilares y retina, medidores de glucosa, ritmo cardíaco, oxígeno entre otras. En óptica visual enfocado en salud visual tal como observaciones de la retina, y en el diagnóstico como daños en nervios ópticos como el glaucoma. También se usan en técnicas de microscopia para el análisis de biopsias para caracterizar tejidos anómalos y el conteo de microorganismos. En técnicas como polarimetría, se usa para mediciones específicas como de glucosa. En cada campo se han generado conjuntos de datos <https://data.world/datasets/biometrics> y en algunos incluso se han desarrollado paquetes o software para su análisis.

Sobre las múltiples aplicaciones ópticas descritas, todas ellas utilizan una gran cantidad de datos, los cuales requieren ser compartidos en tiempo real desde laboratorios más sofisticados y capacitados en la obtención de los datos. Esto se ha logrado a través de la unión de países, que ha dado el nacimiento a observatorios astronómicos en un amplio rango del espectro, desde radiofrecuencias, electromagnéticos, óptico, altas energías e incluso gravitacionales mediante el observatorio LIGO. Los cuales requieren de la colaboración debido a sus altos costos, uso estructural y el conocimiento de expertos de todo el mundo.

Como ejemplo, el observatorio de ondas gravitacionales LIGO. Este es un proyecto internacional que ostenta de ser el instrumento más sensible jamás creado, capaz de medir fluctuaciones en el espacio mismo mediante patrones de interferencia registrados usando estados cuánticos de la luz para obtener alta precisión en fase requerida en la técnica interferométrica. Estas fluctuaciones son las llamadas ondas gravitacionales. Este programa tiene una base de datos libres obtenidos en su página oficial (<https://www.ligo.caltech.edu/page/ligo-data>) del cual se puede acceder y descargar, así como también se ha generado paquetes libres de análisis como Gwpy(<https://pypi.org/project/gwpy/>) y PyCBC(<http://pycbc.org/pycbc/latest/html/>) para lenguaje python, que permite inferir por ejemplo las masas de los objetos masivos que generaron la señal captada entre otras cosas.

Sin embargo, a pesar de esta gran volumen de datos es común encontrar la inexistencia de laboratorios o bases de datos sobre diversos temas <https://acortar.link/xP1aXV>, dependiendo directamente de la especificidad del enfoque. En este caso, también es posible llegar a colaboraciones con el objetivo de buscar nuevos esquemas ópticos que permitan generar conjuntos de datos propios. Incluso esta necesidad se puede satisfacer mediante el desarrollo de conjuntos de datos sintéticos, generados a través de simulaciones. Los cuales cumplen con la tarea de suministrar los datos necesarios para el entrenamiento o realizar modelos predictivos.

Por otro lado, en el análisis de los datos obtenidos por los grandes laboratorios que capturan una gran cantidad y permiten compartirlos en bibliotecas para la comunidad, implican la generación de un camino para el desarrollo de algoritmos que analizan estos datos. Este es un gran avance ya que la inaccesibilidad o lejanía de los esquemas ópticos ya no es un problema, permitiendo la colaboración independiente en cualquier lugar del mundo al que se acceda.

Cabe resaltar, que no siempre se requiere que los datos sean en grandes cantidades. Existen ramas tales que con pocos datos o nulos se pueda reconstruir una señal con alta preposición como el Compressing sensing [5]. Estas metodologías de construir de una señal mediante el uso de pocos datos utiliza de una representación sparse, generado mediante matrices binarias blanco y negro obtenidas por un patrón de espejos micro-estructurado con un determinado diseño, ya que las matrices aleatorias o gaussianas no son las más óptimas para esta tarea. Además de los moduladores de amplitud se usan elementos

moduladores de fase, generados por un mapa de alturas en un vidrio homogéneo [6]. Mediante algoritmos de deep learning se utiliza el llamado End to End: Optimización de códigos de apertura binarios y de mapa de alturas Doe (Diffractive optical element)[7] para optimizar tanto la imagen de salida en la red como el perfil que el modulador de amplitud o fase debe tener.

Además existe una técnica en esta rama que permite interpolar una imagen 2D captada en un sensor 1D mediante la técnica de Single pixel sensor [8]. Esta obtiene una imagen usando un medidor de intensidades o incluso con un espectrómetro mediante una modulación de la imagen de entrada por un patrón 2D generado por un array de microespejos estructurados (DMD) previamente optimizada su matriz de representación. Siendo esta técnica el extremo del compressing sensing, ya que esto permite obtener una imagen mediante un píxel o un array lineal, tal como un foto-diodo. Siendo esta además el campo que se enfrente directamente con los protocolos de captura de datos y su criterio de resolución determinado por Shannon en su teorema: fundamental en la teoría de señales. Existe una metodología similar de determinar una imagen con pocos datos, sin embargo esta no usa modulación espacial, y se logra netamente apartir de una escena bajo condiciones de iluminación, esta técnica se llama Low light [9], y pretende recuperar una imagen fidelina sin someter el objeto a una fuente de iluminación externa, es decir, capturar la imagen con poca o nula luz. Esto se logra mediante patrones estadísticos que permiten formar una imagen desde un señal donde el ruido tienen la misma energía que la imagen.

Esto esboza un panorama sobre la ciencia de datos en la óptica. Aún así, existen aplicaciones en las que no hay bases datos, por lo que se requiere la generación de unos propios, posteriormente limpiarlos, graficarlos y la generación de algoritmos propios dependiendo a los requerimientos. Eso hace que emerjan constantemente nuevas bases de datos, algoritmos y paquetes en diferentes lenguajes de programación en constante actualización de la mano a los avances contemporáneos.

Cabe destacar el carácter inverso a la tesis expresada en este ensayo: La importancia de la óptica en la ciencia de datos. Ya que la propia información es transmitida y modulada por la luz en el campo de las telecomunicaciones a través de conexiones de fibra óptica. Se destacan los avances contemporáneos en encriptación y desencriptación, generadores de números aleatorios, transmisión y pérdida de información, generación de qubits cuánticos por superposición de estados polarizados en un haz de fotones [12], ya que la luz al ser un bosón admite la superposición de estados cuánticos puros, siendo cualquier estado polarizado:

lineal, elíptico o circular la superposición de el espín del fotón con valores h y $-h$ asociados a la base de estados circular derecha e izquierda respectivamente, permitidos para fotones individuales.

Por lo tanto, esto compone una de las metodologías para generar qubits exploradas en la emergente computación cuántica. Siendo la pérdida de la coherencia el mayor problema en la actualidad, esto se traduce en la posibilidad tecnológica de cifrar y descifrar la información sin destruir por completo el estado de polarización y mantener las predicciones el mayor tiempo

posible. En base a todo lo anterior, se evidenciando un esfuerzo actualmente donde se está explorando el uso de la fotónica para transmitir y procesar información con mayor eficiencia, siendo fundamental en nuestra era dominada por la información y el desarrollo tecnológico.

En conclusión, en este ensayo se trató de mostrar la relación sinérgica entre la óptica y la ciencia datos, donde ambos campos se nutren por los desarrollos en cada campo. Y se identifica que esta correlación será creciente y directamente proporcional al desarrollo tecnológico mundial.

-
- [1] Silva-Lora Alberto and Torres Rafael 2020 Explicit Cartesian oval as a superconic surface for stigmatic imaging optical systems with real or virtual source or imageProc. R. Soc. A.4762019089420190894
 - [2] Raymond G. White and Robert A. Schowengerdt, "Effect of point-spread functions on precision edge measurement," J. Opt. Soc. Am. A 11, 2593-2603 (1994)
 - [3] O'Shea, Keiron, and Ryan Nash. "An introduction to convolutional neural networks." arXiv preprint arXiv:1511.08458 (2015).
 - [4] Yichun Xie, Zongyao Sha, Mei Yu, Remote sensing imagery in vegetation mapping: a review, Journal of Plant Ecology, Volume 1, Issue 1, March 2008, Pages 9–23, <https://doi.org/10.1093/jpe/rtm005>
 - [5] D. L. Donoho, "Compressed sensing," in IEEE Transactions on Information Theory, vol. 52, no. 4, pp. 1289–1306, April 2006, doi: 10.1109/TIT.2006.871582.
 - [6] Jeon, D. S., Baek, S.-H., Yi, S., Fu, Q., Dun, X., Heidrich, W., Kim, M. H. (2019). Compact snapshot hyperspectral imaging with diffracted rotation. ACM Transactions on Graphics, 38(4), 1–13. doi:10.1145/3306346.3322946
 - [7] Baek, S.-H., Ikoma, H., Jeon, D. S., Li, Y., Heidrich, W., Wetzstein, G., Kim, M. H. (2021). Single-shot Hyperspectral-Depth Imaging with Learned Diffractive Optics. 2021 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). <https://doi.org/10.1109/iccv48922.2021.00265>
 - [8] Edgar, M.P., Gibson, G.M. Padgett, M.J. Principles and prospects for single-pixel imaging. Nature Photon 13, 13–20 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41566-018-0300-7>
 - [9] X. Guo, Y. Li and H. Ling, "LIME: Low-Light Image Enhancement via Illumination Map Estimation," in IEEE Transactions on Image Processing, vol. 26, no. 2, pp. 982–993, Feb. 2017, doi: 10.1109/TIP.2016.2639450.
 - [10] M. Mancini, G. Costante, P. Valigi, T. A. Ciarfuglia, J. Delmerico and D. Scaramuzza, "Toward Domain Independence for Learning-Based Monocular Depth Estimation," in IEEE Robotics and Automation Letters, vol. 2, no. 3, pp. 1778–1785, July 2017, doi: 10.1109/LRA.2017.2657002.
 - [11] Ni, Jianjun Chen, Yinan Chen, Yan Zhu, Jinxiu Ali, Deena Cao, Weidong. (2020). A Survey on Theories and Applications for Self-Driving Cars Based on Deep Learning Methods. Applied Sciences. 10. 10.3390/app10082749.
 - [12] Wang, Y., Li, J., Zhang, S. et al. Efficient quantum memory for single-photon polarization qubits. Nat. Photonics 13, 346–351 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41566-019-0368-8>