A Smart Fourier Ptychography System: Integrating Optical Hardware and Computational Algorithms

Jairo Cuero[1]; Andrés-F Jiménez López[2]; Angel Cruz-Roa[3]; Cesar Diaz-Celis[4]
[1,2,3,4]*Universidad de los Llanos, Colombia, jairo_cuero@unillanos.edu.co, ajimenez@unillanos.edu.co, aacruz@unillanos.edu.co, cesar.diaz@unillanos.edu.co*

***Abstract*– Microscopy has evolved significantly with the development of high-resolution techniques, overcoming the limitations of optical diffraction. Fourier ptychography (FP) has established itself as a powerful alternative for high-resolution image reconstruction without lenses, employing iterative algorithms based on the Fourier transform. In this work, we present the design and development of a Fourier ptychography prototype using a trinocular microscope, an LED array, and different processing platforms, such as Raspberry Pi-type single-board computers (SBCs), graphical processing units (GPUs), and processor and FPGA integrated circuits (FPSoCs). Different experimental configurations reported in the literature are analyzed, and the viability of each processing platform is evaluated in terms of accuracy, speed, and computational efficiency. As a result, an optoelectronic design for the prototype is proposed, and the essential elements for its construction are defined.**

***Keywords*-- High-resolution microscopy, Fourier ptychography, image reconstruction, computational processing.**

Un sistema inteligente de pticografía de Fourier: Integración de hardware óptico y algoritmos computacionales

Jairo Cuero[1]; Andrés-F Jiménez López[2]; Angel Cruz-Roa[3]; Cesar Diaz-Celis[4]
[1,2,3,4]*Universidad de los Llanos, Colombia, jairo_cuero@unillanos.edu.co, ajimenez@unillanos.edu.co, aacruz@unillanos.edu.co, cesar.diaz@unillanos.edu.co*

Resumen– ***La microscopía ha evolucionado significativamente con el desarrollo de técnicas de alta resolución, superando las limitaciones impuestas por la difracción óptica. Entre estas, la pticografía de Fourier (FP) se ha consolidado como una alternativa poderosa para la reconstrucción de imágenes de alta resolución sin el uso de lentes, empleando algoritmos iterativos basados en la transformada de Fourier. En este trabajo, se presenta el diseño y desarrollo de un prototipo de pticografía de Fourier utilizando un microscopio trinocular, una matriz de LEDs y diferentes plataformas de procesamiento, como computadoras de placa única (SBC) tipo Raspberry Pi, unidades de procesamiento gráfico (GPU) y circuitos integrados de procesador y FPGA (FPSoC). Se analizan distintas configuraciones experimentales reportadas en la literatura y se evalúa la viabilidad de cada plataforma de procesamiento en términos de precisión, velocidad y eficiencia computacional. Como resultado se propone un diseño optoelectrónico para el prototipo y se definen los elementos esenciales para su construcción.***

Palabras clave: Microscopía de alta resolución, pticografía de Fourier, reconstrucción de imágenes, procesamiento computacional.

I. Introducción

La microscopía es una disciplina fundamental en las ciencias, centrada en la observación y análisis de estructuras demasiado pequeñas para ser observadas a simple vista [1]. A lo largo de la historia, los avances en microscopía han permitido explorar desde células y tejidos hasta estructuras moleculares, revolucionando áreas como la biología, la química, la física y la ciencia de materiales [2]. Inicialmente, la microscopía óptica tradicional dominó el campo, pero las limitaciones impuestas por la difracción llevaron al desarrollo de técnicas de alta resolución que superan el límite clásico de resolución [3].

En la actualidad, la microscopía de alta resolución abarca una variedad de enfoques avanzados, cada uno diseñado para abordar diferentes aplicaciones y escalas [4]. Entre las principales técnicas se destacan la microscopía de superresolución óptica, que supera el límite de difracción mediante métodos como STED (*Stimulated Emission Depletion*) [5], PALM (*Photoactivated Localization Microscopy*) [6] y STORM (*Stochastic Optical Reconstruction Microscopy*) [7]. Además, la microscopía electrónica, utilizando haces de electrones en lugar de luz, permite obtener resoluciones a nivel atómico a través de variantes como la microscopía electrónica de transmisión (TEM, por sus siglas en inglés) y la de barrido (SEM, por sus siglas en inglés) [8]. Por otro lado, la microscopía de fuerza atómica (AFM, por sus siglas en inglés) facilita obtener imágenes topográficas con resolución nanométrica, mediante la interacción entre una sonda y la superficie del material [9]. En este contexto, recientemente ha emergido la pticografía, un método computacional que ofrece alta resolución a partir de patrones de difracción.

La pticografía presenta modalidades adaptadas a diversas aplicaciones, como la pticografía de rayos X [10], que utiliza haces coherentes para caracterizar materiales y estructuras biológicas a nivel nanométrico. La pticografía en electrones [11], ideal para el estudio de materiales cristalinos y biomateriales. También existe la pticografía en luz visible, aplicada principalmente en muestras biológicas debido a su carácter no invasivo y alta resolución [12].

Los procesos de reconstrucción en pticografía se basan en algoritmos iterativos como el algoritmo de retropropagación iterativa (RA), que está diseñado para estimar la fase mediante la retropropagación de la onda. Por otro lado, el enfoque de minimización de error (ER) y el "Hybrid Input-Output" (HIO) ajustan iterativamente la fase y la amplitud de la onda incidente hasta converger en una solución consistente con los patrones de difracción observados [13]. Por otro lado, la optimización basada en gradientes mejora la eficiencia en la reconstrucción mediante técnicas avanzadas de optimización [14].

La pticografía presenta cuatro esquemas representativos (figura 1) que varían según el uso de lentes y el tipo de codificación empleado en la detección o la iluminación [15].

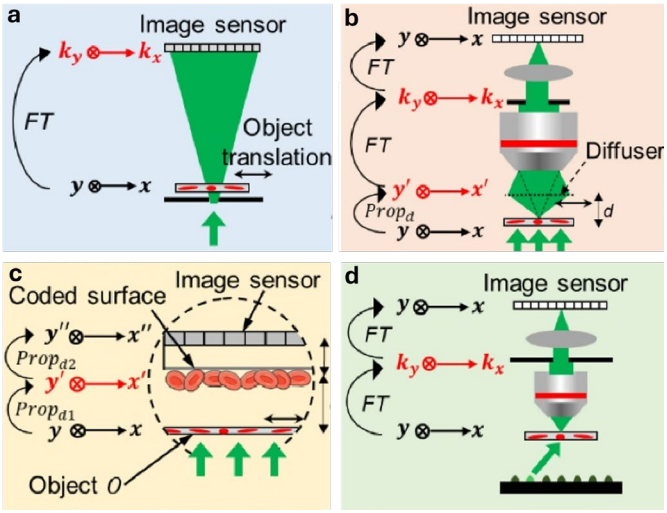

Fig.1. Esquemas principales de pticografía. a) pticografía convencional, b) pticografía con modulación estructurada basada en lentes, c) pticografía codificada sin lentes, d) pticografía de Fourier. Imagen adaptada de [15]

En primer lugar, la pticografía convencional (fig. 1a) se basa en haces coherentes y configuraciones sin lentes, capturando patrones de difracción que posteriormente se reconstruyen mediante algoritmos iterativos [16]. Por otro lado, la pticografía con modulación estructurada (fig. 1b) aplica una codificación directa en la detección mediante sistemas de lentes, optimizando la calidad y el contraste de la imagen reconstruida [17]. La figura 1c presenta el esquema de la pticografía codificada sin lentes, en la que se introduce una codificación en la iluminación del haz para mejorar la recuperación de la información estructural [18]. Finalmente, en la figura 1d se muestra el esquema de la pticografía de Fourier que utiliza una serie de patrones de difracción desplazados en fase y posteriormente reconstruidos mediante la transformada de Fourier, lo que permite una resolución superior [19].

La pticografía de Fourier es una modalidad que reconstruye imágenes mediante la recuperación iterativa de la fase a partir de datos de difracción. Su principio de funcionamiento se basa en la transformada de Fourier, que permite convertir la información del dominio de la difracción al dominio espacial [20]. A diferencia de la microscopía tradicional basada en lentes, este método aprovecha algoritmos computacionales avanzados para recuperar la fase y la amplitud de la onda dispersada, permitiendo obtener imágenes con resoluciones superiores [21]. El proceso comienza al iluminar la muestra con un haz coherente y registrar los patrones de difracción. A partir de estos patrones, se aplica un algoritmo iterativo que recupera la fase perdida, permitiendo reconstruir la imagen final con alta resolución [22].

Una de las principales ventajas de esta técnica es que supera el límite de difracción, ya que no depende de lentes. Además, su carácter no destructivo la hace ideal para muestras biológicas o sensibles como virus y proteínas. También permite obtener información tridimensional mediante variaciones angulares en la captura de datos. Entre sus aplicaciones se incluyen la caracterización de nanomateriales y defectos estructurales en la ciencia de materiales, el estudio detallado de células y tejidos en biología estructural, y el análisis de dispositivos nanométricos en el área de nanotecnología.

En la Figura 2 se presentan cuatro plataformas descritas en la literatura para la implementación de técnicas de pticografía. En la Figura 2a utilizan una raspberry pi como elemento de control, un módulo de cámara de la misma marca y unos lentes adicionales que conforman el detector y el objetivo respectivamente, también se utiliza una matriz de leds como fuente de iluminación [23]. En la Figura 2b se muestra una configuración convencional montada sobre un microscopio trinocular, acá se utiliza un Arduino para el control del sistema de iluminación [24]. En la Figura 2c se aprecia un sistema que utiliza igualmente una matriz de leds, pero montada sobre un microscopio invertido con cámara y como dispositivo de procesamiento principal se usa una FPGA [25]. Finalmente, en la Figura 2d se emplean las lentes de un teléfono celular para formar el objetivo y se acopla una cámara CCD como detector, asimismo, se incluye una matriz de leds 8x8 y el procesamiento se realiza mediante un computador [26].

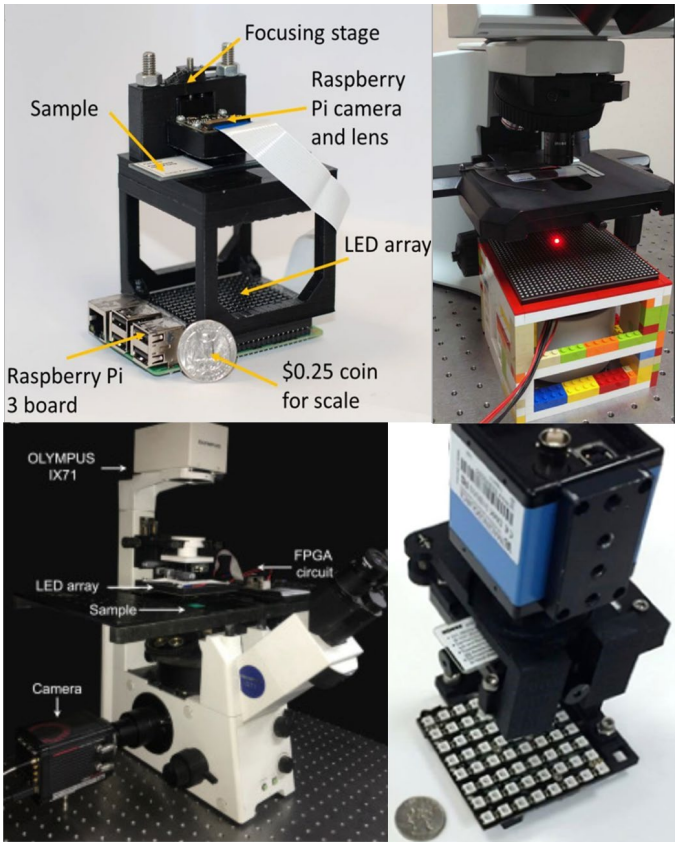

Fig. 2. Distintos prototipos que implementan FP. a) Con una tarjeta y cámara raspberry pi, b) Con Arduino y un microscopio convencional, c) con

un microscopio y una FPGA, d) Con los lentes de la cámara de un teléfono celular. Fuente: El autor con información de [23] a [26].

En este trabajo se presenta el avance del desarrollo de un prototipo de de pticografía de Fourier usando un microscopio trinocular, una matriz de leds y diferentes sistemas de procesamiento cómo los son SBC tipo raspberry Pi, GPU y FPSoC.

II. Metodología

Para el desarrollo de este trabajo, se empleó la metodología basada en el desarrollo de prototipos, permitiendo una integración progresiva y optimizada de los componentes ópticos y electrónicos del sistema de pticografía de Fourier.

El prototipo de pticografía de Fourier desarrollado en este trabajo debe integrar un sistema óptico y electrónico que garantice la captura y reconstrucción de imágenes de alta resolución sin el uso de lentes. Para ello, debe contar con una matriz de LEDs como fuente de iluminación controlada, un microscopio trinocular para la captura de patrones de difracción y una plataforma de procesamiento flexible que permita la implementación de algoritmos iterativos. Además, el sistema debe asegurar la sincronización entre la adquisición de datos y el procesamiento de imágenes, permitiendo ajustes en la configuración óptica y electrónica para mejorar su rendimiento. La modularidad del diseño facilitará futuras mejoras y adaptaciones según los requerimientos específicos de la aplicación.

A continuación, se muestran los aspectos fundamentales del diseño del sistema.

1) *Matriz de LEDs programable:* Se utiliza una matriz de LEDs personalizada con un paso pequeño (2.5 mm) para proporcionar iluminación controlada desde diferentes ángulos. Esto permite la captura de imágenes de baja resolución en condiciones de iluminación variables, que luego se sintetizan en una imagen de alta resolución.
2) *Plataformas compactas de FPM:* Algunas implementaciones utilizan un teléfono inteligente como dispositivo de imagen, aprovechando su cámara integrada y capacidades computacionales para lograr portabilidad y bajo costo. Otros prototipos utilizan una Raspberry-Pi para la adquisición y procesamiento de imágenes, ofreciendo una solución económica y compacta.
3) *Lente objetivo de alta resolución:* En algunas implementaciones se utiliza un lente objetivo de alta resolución para generar una imagen virtual del objeto en el plano de la imagen, que luego se procesa utilizando algoritmos de FPM.
4) *Algoritmos computacionales:* El FPM depende en gran medida de algoritmos de reconstrucción computacional para combinar las imágenes de baja resolución capturadas bajo diferentes ángulos de iluminación en una sola imagen de alta resolución. Estos algoritmos generalmente involucran la recuperación de fase y la síntesis en el espacio de Fourier.
5) *Integración de imagen de fluorescencia:* Algunos sistemas de FPM integran capacidades de imagen de fluorescencia, lo que los hace adecuados para aplicaciones biológicas donde se utilizan marcadores fluorescentes.
6) *Componentes portátiles y de bajo costo:* Muchas implementaciones de FPM se centran en el uso de componentes económicos y disponibles en el mercado (por ejemplo, teléfonos inteligentes, Raspberry-Pi, lentes de teléfonos móviles) para hacer que la tecnología sea accesible y portátil.

III. Resultados

Inicialmente, se ensambló un microscopio trinocular con una matriz de LEDs como fuente de iluminación, asegurando una distribución uniforme y controlada del haz de luz. Posteriormente, se integraron distintas plataformas de procesamiento, incluyendo computadoras de placa única (SBC) tipo Raspberry Pi, unidades de procesamiento gráfico (GPU) y circuitos integrados de procesador y FPGA (FPSoC), con el fin de evaluar su compatibilidad y capacidad de gestión de datos en la reconstrucción de imágenes. A lo largo del proceso, se realizaron ajustes en la disposición de los componentes ópticos y electrónicos para optimizar la alineación y sincronización del sistema. Este enfoque iterativo permitió una implementación flexible y adaptativa, asegurando una correcta integración entre los módulos de adquisición de datos, iluminación y procesamiento computacional.

Una vez se han determinado las características principales de las implementaciones reportadas en la literatura, se presenta el diseño del prototipo para microscopía de alta resolución basado en la técnica de pticografía de Fourier, como se aprecia en la Figura 3.

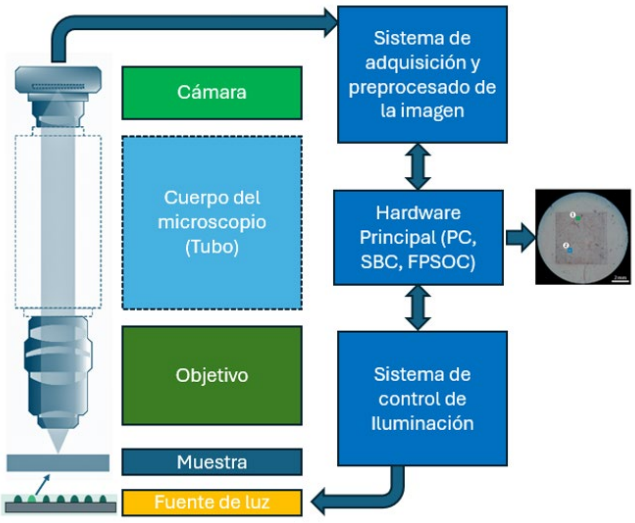

Fig. 3. Diseño preliminar del prototipo. Fuente: Los autores.

Por facilidad en el montaje se eligió usar un microscopio trinocular. Se usan diversas cámaras para comparar el desempeño en la adquisición de datos. Para el sistema de iluminación se emplean dos matrices de leds con diferente espaciado, las cuales se controlan mediante una tarjeta raspberry pi zero 2W. El procesamiento de las imágenes y su reconstrucción se hace en el hardware principal, que corresponde a los siguientes equipos: una Raspberry pi5, un FPSoC como las tarjetas KRIA, un computador portátil con GPU e Intel core i9 o también en un Workstation con GPU RTX.

C. Componentes y Equipos Electrónicos

De acuerdo con el diseño preliminar se han seleccionado los elementos esenciales para el proyecto y que cumplen con las características definidas en los apartados anteriores. No se tienen en cuenta los elementos secundarios para el montaje y las pruebas electrónicas.

1) *Microscopio trinocular compuesto:* Microscopio trinocular compuesto con cámara de 5.0 MP, Aumento 40X-2500X, etapa mecánica de dos capas, software compatible con Windows/Mac, 4 objetivos acromáticos DIN montados en una torreta giratoria con 6 niveles de aumento: 40X, 100X, 250X, 400X, 1000X y 2500X, cabezal Siedentopf profesional giratorio con oculares de vidrio intercambiables de campo ancho 10X y 25X.
2) *Módulo de cámara Raspberry Pi HQ* para Raspberry Pi 4 3 Modelo B, con sensor IMX477 de 12.3MP compatible con lentes de montaje C y CS, alta resolución y sensibilidad, alternativa para módulo de cámara V2 Compatible con Raspberry Pi 4 B/3B+/3B/2B/B+/A+/Zero/Zero W.
3) *Cámara de microscopio de 41MP* con adaptador para montaje C, Sensor IMX334 de 1/1.8in, tamaño del píxel 2.0 x 2.0µm, resolución 3840 x 2160 a 30FPS, 1920 x 1080 a 120FPS y 60FPS. Con tarjeta de memoria + UVC Video: 3840 x 2160 a 30 FPS, Tiempo de exposición automático y manual.
4) *Panel de matriz de 1024 LEDs RGB* en arreglo 32x32 con un espaciado de cuadrícula de 4 mm, con conectores IDC duales. Compatible con Raspberry Pi, ESP 32, Arduino. Dimensiones 128 x 128 mm.
5) *Panel de matriz de 1024 LEDs RGB* en arreglo 64x64 con un espaciado de cuadrícula de 2 mm, con conectores IDC duales. Compatible con Raspberry Pi, ESP 32, Arduino. Dimensiones 128 x 128 mm.
6) *Plataforma de desarrollo KR260* basada en el módulo Kria K26 diseñada para aplicaciones de alto rendimiento. Chip Zynq™ UltraScale+™ MPSoC EV (XCK26), 4 GB (4 x 512 Mb x 16 bits) DDR4 sin ECC. 256K Celdas lógicas del sistema, 144 Bloques de RAM, 64 Bloques UltraRAM, 1.2K Slices DSP. Con adaptador de corriente, memoria SD y cables ethernet y USB.
7) *Plataforma de desarrollo KV260* basada en el módulo Kria K26 diseñada para aplicaciones de visión artificial. Chip Zynq™ UltraScale+™ MPSoC EV (XCK26), 4 GB (4 x 512 Mb x 16 bits) DDR4 sin ECC, Procesador de imagen OnSemi AP1302 ISP, 256K Celdas lógicas del sistema, 144 Bloques de RAM, 64 Bloques UltraRAM, 1.2K Slices DSP. Con módulo cámara RGB con autoenfoque de 13MP, adaptador de corriente, memoria SD y cables ethernet y USB.
8) *Plataforma de desarrollo Raspberry Pi 5*, con SoC Broadcom BCM2712 2.4GHz de cuatro núcleos 64-bit Arm Cortex-A76, 8GB de RAM, 512KB de cache L2 y 2MB cache compartido L3, GPU VideoCore VII, compatibles con OpenGL ES 3.1 y Vulkan 1.2. Conectividad inalámbrica WiFi 2.4 GHz & 5.0 GHz IEEE 802.11ac, Gigabit Ethernet vía PoE+, Bluetooth: Versión 5.0, BLE, UART, 2 puertos micro-HDMI, 2 conectores MIPI de 4 carriles para pantalla o cámara, PCI Express de 1X.
9) *Tarjeta Raspberry Pi Zero 2 W* con CPU Arm Cortex-A53 de cuatro núcleos y 64 bits, con una frecuencia de 1 GHz. Conectividad inalambrica 802.11 b/g/n de 2,4 GHz y Bluetooth 4.2 con soporte para Bluetooth Low Energy (BLE). Ranura para tarjeta microSD, un conector de cámara CSI-2, un USB On-The-Go (OTG), 40 pines compatible con HAT.
10) *Tarjeta GPU GeForce RTX 4090 24GB*, NVIDIA® GeForce RTX™ 4090, AI performance 1345, Bus standard PCI Express 4,0, OpenGL 4,6, video memory 25GB GDDR6X, OC mode: 2595 MHz, default mode: 2565MHZ Boost Clock, memory speed 21Gbps, memory interface 384 - bit, resolution: digital Max resolution 7680x 4320. Software: ASUS GPU Twwak II & GeForce, game ready driver & studio. Power connector: 1 x 16 – pin.
11) *Computador portátil con Procesador: Intel Core Ultra 9:* 185H (24MB cache, 16 cores, 22 threads, up to 5.1GHz, 45W), Memoria:32GB, 2x16GB, DDR5, con crecimiento hasta 64GB en 2 slots, Disco duro:1 TB, PCIe NVMe, SSD y ranura libre para otro discom.2PCIe, Tarjeta de video: NVIDIA RT X 2000 Ada 8GBG DDR6, Licencia: Windows 11Pro, English, Brazilian Portuguese, French, Spanish, Pantalla: 15.6”pulgadas Full HD(1920x1080) cámara y micrófono con teclado retroiluminado,Tarjeta inalámbrica: Wi-Fi 62 x 2, 802.11ax Bluetooth.

IV. CONCLUSIONES

Como parte del desarrollo del prototipo de pticografía de Fourier, se ha logrado la integración inicial del sistema óptico y

electrónico. Se ensambló un microscopio trinocular con una matriz de LEDs programable como fuente de iluminación, permitiendo el control de patrones de iluminación para mejorar la reconstrucción de imágenes. Además, se han evaluado diferentes plataformas de procesamiento, incluyendo Raspberry Pi y GPU, para gestionar la adquisición de datos y la implementación de algoritmos de reconstrucción de fase. Hasta el momento, se ha establecido un flujo de trabajo funcional que permite la captura de patrones de difracción y su procesamiento preliminar. Los siguientes pasos incluyen la optimización de la sincronización entre la iluminación y la adquisición de imágenes, así como la implementación y comparación de diferentes enfoques algorítmicos para mejorar la resolución y calidad de la reconstrucción.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue realizada por los grupos de investigación EYSI, Macrypt y GITECX de la Universidad de los Llanos. El estudio cuenta con financiación de la Dirección General de Investigaciones de la Universidad de los Llanos – Colombia, en el marco del proyecto: Diseño de un prototipo para microscopía de alta resolución basado en la técnica de pticografía de Fourier (C10-F02-007 2024 FCBI).

REFERENCES

[1] Prasad, R. D., Prasad, R. S., Prasad, R. B., Prasad, S. R., Singha, S. B., Singha, D., ... & Navathe, G. J. (2024). A review on modern characterization techniques for analysis of nanomaterials and biomaterials. ES Energy & Environment, 23, 1087.

[2] Sobti, R. C., Ali, A., Dolma, P., Kadwalia, A., Dolma, T., Rai, J., & Chauhan, A. (2022). Emerging techniques in biological sciences. Advances in Animal Experimentation and Modeling, 3-18.

[3] Zuo, C., & Chen, Q. (2022). Resolution, super-resolution and spatial bandwidth product expansion——some thoughts from the perspective of computational optical imaging. Chinese Optics, 15(6), 1105-1166.

[4] Betzig, E., Patterson, G. H., Sougrat, R., Lindwasser, O. W., Olenych, S., Bonifacino, J. S., ... & Hess, H. F. (2006). Imaging intracellular fluorescent proteins at nanometer resolution. science, 313(5793), 1642-1645.

[5] Lukinavičius, G., Alvelid, J., Gerasimaitė, R., Rodilla-Ramirez, C., Nguyễn, V. T., Vicidomini, G., ... & Testa, I. (2024). Stimulated emission depletion microscopy. Nature Reviews Methods Primers, 4(1), 56.

[6] Mehra, D., & Puchner, E. M. (2023). Correlative Conventional and Super-resolution Photoactivated Localization Microscopy (PALM) Imaging to Characterize Chromatin Structure and Dynamics in Live Mammalian Cells. Bio-protocol, 13(20).

[7] Codron, P., Letournel, F., Marty, S., Renaud, L., Bodin, A., Duchesne, M., ... & Chevrollier, A. (2021). STochastic Optical Reconstruction Microscopy (STORM) reveals the nanoscale organization of pathological aggregates in human brain. Neuropathology and applied neurobiology, 47(1), 127-142.

[8] Egerton, R. F. (2005). Physical principles of electron microscopy (Vol. 56). New York: Springer.

[9] Binnig, G., Quate, C. F., & Gerber, C. (1986). Atomic force microscope. Physical review letters, 56(9), 930.

[10] Batey, D. J., Van Assche, F., Vanheule, S., Boone, M. N., Parnell, A. J., Mykhaylyk, O. O., ... & Cipiccia, S. (2021). X-ray Ptychography with a Laboratory Source. Physical Review Letters, 126(19), 193902.

[11] Chen, Z., Jiang, Y., Shao, Y. T., Holtz, M. E., Odstrčil, M., Guizar-Sicairos, M., ... & Muller, D. A. (2021). Electron ptychography achieves atomic-resolution limits set by lattice vibrations. Science, 372(6544), 826-831.

[12] Hu, Z., Zhang, Y., Li, P., Batey, D., & Maiden, A. (2023). Near-field multi-slice ptychography: quantitative phase imaging of optically thick samples with visible light and X-rays. Optics Express, 31(10), 15791-15809.

[13] Zheng, G., Horstmeyer, R., & Yang, C. (2013). Wide-field, high-resolution Fourier ptychographic microscopy. Nature photonics, 7(9), 739-745.

[14] Rodenburg, J. M., & Faulkner, H. M. (2004). A phase retrieval algorithm for shifting illumination. Applied physics letters, 85(20), 4795-4797.

[15] Tianbo Wang, Shaowei Jiang, Pengming Song, Ruihai Wang, Liming Yang, Terrance Zhang, Guoan Zheng. (2023). "Optical ptychography for biomedical imaging: recent progress and future directions [Invited]," Biomed. Opt. Express 14, 489-532

[16] Katkovnik, V., & Astola, J. (2013). Sparse ptychographical coherent diffractive imaging from noisy measurements. JOSA A, 30(3), 367-379.

[17] Song, P., Jiang, S., Zhang, H., Bian, Z., Guo, C., Hoshino, K., & Zheng, G. (2019). Super-resolution microscopy via ptychographic structured modulation of a diffuser. Optics letters, 44(15), 3645-3648.

[18] Wang, T., Song, P., Jiang, S., Wang, R., Yang, L., Guo, C., ... & Zheng, G. (2023). Remote referencing strategy for high-resolution coded ptychographic imaging. Optics Letters, 48(2), 485-488.

[19] Zhang, H., Jiang, S., Liao, J., Deng, J., Liu, J., Zhang, Y., & Zheng, G. (2019). Near-field Fourier ptychography: super-resolution phase retrieval via speckle illumination. Optics express, 27(5), 7498-7512.

[20] Xu, F., Wu, Z., Tan, C., Liao, Y., Wang, Z., Chen, K., & Pan, A. (2024). Fourier Ptychographic Microscopy 10 Years on: A Review. Cells, 13(4), 324.

[21] Chapman, H. N., Barty, A., Marchesini, S., Noy, A., Hau-Riege, S. P., Cui, C., ... & Shapiro, D. (2006). High-resolution ab initio three-dimensional x-ray diffraction microscopy. JOSA A, 23(5), 1179-1200.

[22] Mei, W. (2024). Iterative Algorithms for Ptychography (Doctoral dissertation, University of Sheffield).

[23] Aidukas, T., Eckert, R., Harvey, A. R., Waller, L., & Konda, P. C. (2019). Low-cost, sub-micron resolution, wide-field computational microscopy using opensource hardware. Scientific reports, 9(1), 7457.

[24] Zheng, G., Shen, C., Jiang, S., Song, P., & Yang, C. (2021). Concept, implementations and applications of Fourier ptychography. Nature Reviews Physics, 3(3), 207-223.

[25] Zuo, C., Sun, J., Li, J., Asundi, A., & Chen, Q. (2020). Wide-field high-resolution 3D microscopy with Fourier ptychographic diffraction tomography. Optics and Lasers in Engineering, 128, 106003.

[26] Dong, S., Guo, K., Nanda, P., Shiradkar, R., & Zheng, G. (2014). FPscope: a field-portable high-resolution microscope using a cellphone lens. Biomedical optics express, 5(10), 3305-3310.