Congr. Int. en Ing. Electrónica. Mem. ELECTRO, Vol. 39, pp. 177-181, Oct 2017, Chihuahua, Chih. México
http://electro.itchihuahua.edu.mx/memorias_electro/MemoriaElectro2017.zip
ISSN 1405-2172

# OBTENCIÓN TOPOGRÁFICA DESDE UN VEHÍCULO AÉREO CONTROLADO REMOTAMENTE

Alan Erubiel García Guevara, Marcelino Anguiano Morales, Gerardo Trujillo Schiaffino, Didia P. Salas Peimbert, L. Francisco Corral Martínez, e Ismael Garduño Wilches.

*Instituto Tecnológico de Chihuahua— División de Estudios de Posgrado e Investigación, Av. Tecnológico No 2909, Chihuahua, Chih., México 31310*

manguiano2604@gmail.com

**RESUMEN**

**Las técnicas de imagen aérea utilizadas antes de la aparición de vehículos aéreos no tripulados (UAVs) tienen varias limitaciones tales como maniobrabilidad restringida, en algunas situaciones de baja resolución, y a menudo costosas. A través de satélites artificiales, se pueden registrar imágenes de tamaño gigantesco, cubriendo grandes áreas de la superficie terrestre. Sin embargo, la adquisición es muy lenta y sólo es posible bajo condiciones climáticas sin nubosidad. Además, hay situaciones en las que las imágenes de alta resolución son difíciles de obtener a través de un satélite, ya que a medida que aumenta la cobertura, el nivel de detalle de las imágenes obtenidas disminuye.**

**Con el fin de obtener imágenes aéreas de áreas pequeñas con gran detalle, sin perturbaciones producidas por fenómenos atmosféricos como nubes o niebla, se propone el uso de dispositivos aéreos controlados remotamente para obtener la topografía de una región de interés.**

**Las mediciones tridimensionales pueden realizarse mediante la combinación de técnicas de perfilometría óptica y de un vehículo aéreo controlado por un operador en tierra. Proponemos el uso de un vehículo aéreo equipado con una cámara digital y un proyector miniaturizado adaptados a un UAV para obtener información visual y mediante procesamiento digital de esta información visual generar un mapa tridimensional de regiones pequeñas con alta resolución.**

**Palabras Clave: perfilometría óptica, proyección de franjas, drone.**

**ABSTRACT**

**Aerial imaging techniques used before the emergence of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) have several limitations such restricted maneuverability, in some situations low resolution, and often costly. Through artificial satellites, gigantic-sized images can be collected, covering vast areas of the earth's surface. However, the acquisition is very slow and only possible under clear weather conditions. In addition, there are situations where high resolution images are difficult to obtain through a satellite, because as the coverage increases, the level of detail of the images obtained decreases.**

**In order to obtain aerial images of small areas in great detail, without perturbations caused by atmospheric phenomena such as clouds or fog, is proposed to the use remotely controlled aerial devices to obtain the topography of the region of interest.**

**Three-dimensional measurements can perform by means of the combination of optical profilometry techniques and a remote controlled air vehicle by an operator on the ground. We propose the use of an aerial vehicle equipped with a digital camera and a miniaturized projector attached to a UAV to obtain visual information and through digital processing of this visual information to generate a three-dimensional map of small regions with high resolution**.

**Keywords: Optical profilometry, fringe projection, drone**

## 1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años podemos afirmar que el creciente uso de sistemas pilotados remotamente equipado con cámaras ha mejorado su papel en la competitividad y eficiencia en el campo de obtención topográfica 3D adquiridos por cámaras adaptadas en drones comerciales de bajo costo.

La palabra "drones" evoca una mezcla de imágenes desde acciones militares hasta operaciones corporativas. Los drones, son más formalmente identificados como UAVs (Unmanned Aerial Vehículos). Los UAV son pequeños, portátiles y más asequibles que nunca. Actualmente se utilizan en la agricultura, cine, búsqueda y rescate, energía, bienes raíces, seguridad pública, áreas de investigación arqueológica entre otras. A nivel mundial, el mercado de UAV genera aproximadamente 8.000 millones de dólares al año y se prevé que la tasa de crecimiento anual sea de 19 por ciento durante los próximos cinco años.

Las técnicas de adquisición de imágenes aéreas utilizadas hasta antes de la aparición de los vehículos aéreos no tripulados poseen varias limitaciones tales como altos costes de vuelo, maniobrabilidad restringida y baja resolución. La recopilación de imágenes mediante satélites artificiales nos permite registrar imágenes aéreas de grandes dimensiones, que cubren vastas áreas de la superficie de la Tierra. Sin embargo, su adquisición es muy lenta y solo posible con condiciones meteorológicas favorables. Además, existen situaciones en que se necesitan imágenes de alta resolución difícil de obtener a través de un satélite, debido a que a medida que aumenta la cobertura disminuye el nivel de detalle de las imágenes obtenidas.

Con el fin de obtener imágenes aéreas de áreas pequeñas, la implementación de sistemas aéreos no tripulados permite obtener imágenes con gran detalle y a menudo las imágenes

obtenidas no sufren perturbaciones producidas por fenómenos atmosféricos como nubes o niebla.

En este trabajo se propone el uso de un vehículo aéreo equipado con una cámara digital y un proyector miniaturizado conectado a un UAV para obtener información visual y mediante procesamiento digital de esta información visual poder generar un mapa tridimensional de pequeñas regiones. En este trabajo, nos enfocaremos en la técnica de luz estructurada. Esta es un método *óptico activo*, el cual es muy similar al método de visión estéreo, donde se intercambia una de las cámaras por una cámara invertida (un proyector). Actualmente, su alto desempeño puede estar limitado a su uso en interiores, debido a la necesidad de proyectar patrones codificados con un alto contraste de luz visible. Una de nuestras metas es optimizar el proyector miniaturizado. Existen diferentes áreas de aplicación de nuestro proyecto, tales como la exploración de sitios inaccesibles, documentación arqueológica, restauración etc. para las cuales la utilización de un modelo tridimensional resulta de gran ayuda.

## 2. MARCO TEÓRICO

Para reconstruir el perfil tridimensional (3D) de la superficie de un objeto existe una amplia variedad de métodos, que de manera general pueden clasificarse en dos principales categorías: contacto y no-contacto.

Las técnicas de contacto [1] basan su funcionamiento en el uso de un dispositivo mecánico que hace contacto con la superficie del objeto que se quiere inspeccionar, mientras que las técnicas de no-contacto utilizan un sensor localizado a una distancia específica del objeto a medir, preservándolo del riesgo de daño o desgaste inherente a las técnicas de contacto, lo cual representa una ventaja importante frente a las mismas.

El avance tecnológico actual ha propiciado un elevado desarrollo en el área de perfilometría [2], en la cual las técnicas ópticas destacan por su gran desempeño y confiabilidad, convirtiéndose en una opción primordial en diversas aplicaciones de la ciencia y la tecnología.

Proyección de luz estructurada es una técnica óptica de no-contacto de gran eficacia, ampliamente utilizada en el área, cuya implementación es relativamente sencilla en comparación con otras técnicas que requieren de equipo más sofisticado para su funcionamiento.

Considerando una aplicación típica de esta técnica, en donde la unidad de adquisición de imagen y el proyector se encuentran en el mismo medio, se tiene que un patrón de iluminación estructurado es proyectado sobre una escena de interés [3]; la imagen resultante es registrada por una cámara para ser procesada posteriormente.

Si la escena es una superficie plana, el patrón registrado es similar al patrón proyectado. Sin embargo, si un objeto se coloca sobre la escena, su forma geométrica provocará una distorsión en dicho patrón. El principio de luz estructurada consiste en extraer la forma geométrica del objeto de interés con base en la información obtenida de la distorsión del patrón proyectado. La relación geométrica entre la unidad de adquisición de imagen, el patrón de franjas y la superficie del objeto es expresada matemáticamente por el principio de triangulación.

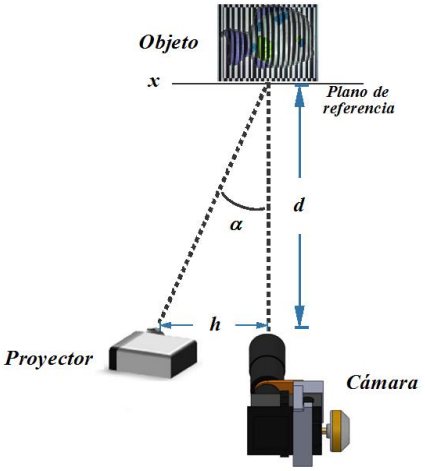



**Figura 1.** Geometría de la técnica de proyección de franjas

En la Figura 1 se muestra una configuración típica de esta técnica, donde el proyector y la cámara se encuentran en el mismo plano a una distancia $h$ entre ambos; el plano cámara-proyector se localiza a una distancia $d$ del plano de referencia; $\alpha$ es el ángulo de intersección entre el eje de proyección y el de observación. El patrón cosenoidal proyectado es modelado como sigue:

$$I(x,y) = a(x,y) + b(x,y)\ \cos\left[2\pi\ f_0(x,y) + \phi(x,y)\right] \quad (1)$$

donde $I(x,y)$ es la intensidad observada del patrón de franjas, $a(x,y)$ representa la iluminación de fondo, $b(x,y)$ representa las variaciones de reflectancia del objeto, y $\varphi(x,y)$ es la fase óptica que está dada por:

$$\varphi(x,y) = 2\pi f_0(x,y) + \phi(x,y) \quad (2)$$

donde $f_0(x,y)$ corresponde a la frecuencia espacial de la señal portadora y $\phi(x,y)$ es el término asociado de fase, mismo que será utilizado para aproximar la forma del objeto. Los algoritmos de extracción de fase, como el de la transformada de Fourier [4] y el de corrimiento de fase [5], pueden utilizarse para extraer la fase envuelta de uno o varios patrones de franjas. Un proceso de desenvolvimiento de fase puede usarse después para obtener una distribución continua de fase conteniendo tanto la fase relacionada con la forma del objeto

$\varphi(x,y)$, como la fase relacionada con el término de la señal portadora $2\pi f_0(x,y)$.

Finalmente el mapeo y escalamiento desde la fase desenvuelta, $\varphi(x,y)$, la altura local de la superficie en función del ángulo $\alpha$ entre el proyector y la cámara es obtenida de la siguiente ecuación [6, 7]:

$$z(x,y) = \frac{p_x}{2\pi \operatorname{Sen}\alpha}\Delta\phi(x,y) \tag{3}$$

donde $z(x,y)$ representa la altura del objeto medido desde el plano de referencia. $p_x$ es el periodo observado del patrón de franjas. El patrón de intensidad contiene la información de la forma del objeto en las regiones donde se proyecta el patrón de luz.

## 3. DRONE

Los prototipos de aeronaves controladas por radio, tiene sus orígenes alrededor del año 1930. La idea principal de este proyecto era construir un prototipo miniaturizado realista de un avión, hacer que volara, y controlarlo remotamente a través de frecuencias de radio. Después de que la Unión Soviética derribó un avión espía U-2 y capturó a su piloto, la Fuerza Aérea de los Estados Unidos empezó nuevamente a experimentar con UAVs para misiones de reconocimiento en el año de 1962. Durante la Guerra de Vietnam, también se utilizó pequeños UAVs capaces de grabar vídeo en tiempo real y registrar fotografías. Con el surgimiento de los programas de espionaje por satélite en los años 70, el programa de la Fuerza Aérea relacionado con UAVs fue terminada.

La marina americana reintrodujo el uso de los UAVs para reconocimiento durante el año de 1985, cuando compró una docena de UAVs tácticos a Israel. El éxito de esta plataforma en el conflicto yugoslavo de los años noventa promovió una importante inversión en tecnología relacionada con UAVs.

**Figura 2.** Drone Walkera Scout X4, con una cámara y un proyector miniaturizado adaptados.

Aunque los drones inicialmente se implementaron como medios de transporte de armas y entrega de explosivos en conflictos bélicos. Hoy en día, los investigadores han mostrado un creciente interés en la utilización de sistemas UAVs para la realización de diferentes aplicaciones no militares. Su pequeño tamaño ofrece una gran flexibilidad en la programación de vuelos, permite una amplia gama de aplicaciones, tales como medidas biológicas, vigilancia, inspección, búsqueda y rescate. El dispositivo aéreo usado en este trabajo fue un Walkera Scout X4, algunas especificaciones son: motor: WK-WS-34-002, diámetro del rotor principal: 233 mm, peso: 1770g, batería: 22.2V 5400mAh Li-Po, transmisor: DEVO F12E, y un receptor: DEVO-RX707 (CE) / RX709 (FCC).

## 4. ADAPTACIONES AL DISPOSITIVO AÉREO

A menos que el UAV sea potente y permita cargas pesadas, el peso del sistema de proyección será una limitante para la obtención topográfica implementando perfilometría óptica.

El proyector ideal para un UAV necesita ser pequeño, ligero, pero lo más importante, poseer baterías de litio duraderas. En este trabajo se propone un proyector de bajo costo, diseñado mediante software CAD y una impresora 3D. En este trabajo, todas las herramientas de medición se adaptan al drone en bases diseñadas por software 3D.

Debido a que nuestro trabajo se basa en una técnica digital de proyección de la franja, utilizaremos un proyector miniaturizado para proyectar un patrón de franja sobre el área de interés. La cámara y el proyector pueden activarse remotamente en tiempo real desde la estación de tierra para asegurar la cobertura del área de destino.

El proyector está compuesto por las siguientes componentes: un reflector cónico, un LED con un consumo de energía muy bajo que es considerado como fuente de luz, dos lentes ópticas con la misma curvatura en ambos lados, y una rejilla de Ronchi.

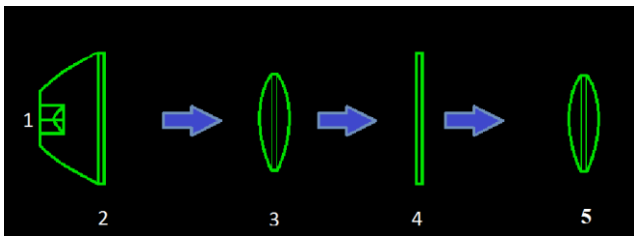



**Figura 3.** Mapa de las componentes ópticas en el diseño de proyector (1) LED, (2) reflector, (3) Lente condensadora, (4) rejilla de Ronchi y (5) lente magnificadora.

La Figura 3 muestra un diagrama del sistema de proyección, un reflector redirige la mayor parte de la luz hacia una lente condensadora esta lente concentra la luz reflejada y la hace incidir en una rejilla de Ronchi, la intensidad a través de la pantalla es aproximadamente uniforme. El patrón generado por la rejilla, incide hacia una lente magnificadora, que amplifica el

patrón de franjas. La rejilla se coloca lo más cerca del punto focal de la lente positiva cuya distancia focal es muy pequeña.
Las componentes ópticas del sistema mostrado en la Figura 1 se pueden insertar en la carcasa diseñada por el software CAD. La carcasa se fabricó utilizando una impresora tridimensional, utilizando el software Solid word. La impresión 3D permite la fabricación del proyector de manera sencilla y además de bajo costo. La Figura 2 (a) muestra el modelo CAD de la carcasa y la carcasa impresa de plástico fundido se puede observar en la Figura 2 (b).

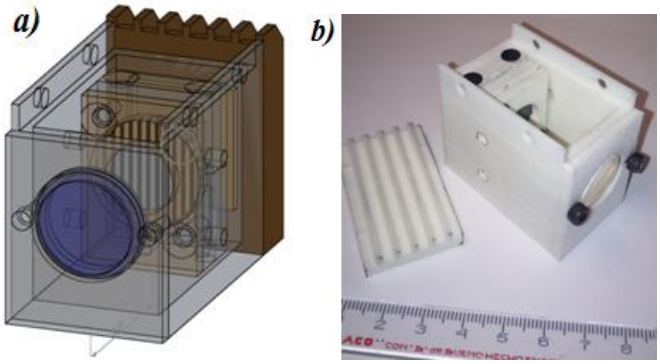
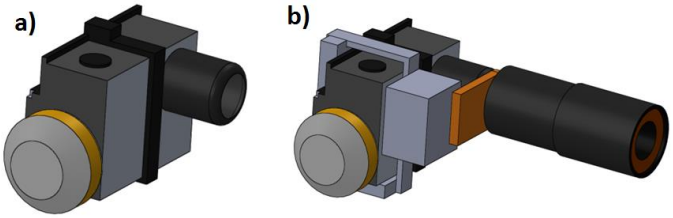



**Figura 4.** (a) Diseño CAD de carcasa, (b) Carcasa impresa de plástico fundido.

Por otro lado, la elección de una cámara digital debe cumplir con una serie de requisitos procedentes de los algoritmos de reconstrucción 3D. Por tanto, las imágenes registradas deben cumplir con algunos requisitos como calidad y resolución.




**3. Figura 5. Esquema de cámara sin y con el telescopio adaptado**

El drone Walkera Scout X4 viene con una cámara digital integrada (ver Figura 2), adaptada al cuerpo del drone a través de un cardán de estabilización. El cardán de estabilización cuenta con 3 ejes de rotación, lo que significa que la cámara se mantendrá estable y enfocada cuando el drone gire a lo largo de sus tres ejes [21].
Es importante recordar, que grandes aberturas están relacionadas con una menor profundidad de campo y nitidez, mientras que una apertura pequeña obtiene una mayor profundidad de campo y claridad en la fotografía resultante. La cámara iLook + tiene 150 grados de gran angular. Como estamos interesados en registrar pequeñas regiones, adaptamos un pequeño telescopio a la lente de la cámara para sobreponer esta desventaja. En la Figura 5 se muestra un diseño de la cámara sin y con el telescopio adaptado.
En nuestro caso, una imagen con una magnificación de 6x para un objeto de ancho 4 cm cubre 36 pixeles, esto genera una resolución de 0.11 cm/pixel.

## 5. RECONSTRUCCIÓN TRIDIMENSIONAL

En esta sección presentamos algunos resultados experimentales del sistema de perfilometría de proyección de franjas utilizado para recuperar la forma tridimensional de un objeto, utilizando nuestro dispositivo aéreo de baja altitud controlado remotamente.
Durante el registro de datos, el drone vuela a una altura constante de 15 m. El proyector adaptado al drone, el cual es controlado por un motor de paso Arduino a vía WFI. La unidad de proyección proyecta a un ángulo elegido previamente. La cámara con transmisor de video incorporado es responsable de capturar las imágenes de franjas deformadas. La cámara y el proyector están montados en paralelo con algún ángulo y pueden activarse remotamente en tiempo real desde la estación en tierra.
Un sensor de ultrasonido proporciona medidas de altitud, el sensor de ultrasonido está conectado en la parte inferior del drone y apunta hacia abajo para medir la distancia entre la cámara y el suelo.
Entonces, un único patrón de franja deformado, que está relacionado con la forma del objeto, es registrado por la cámara y guardado en una computadora. Posteriormente, la técnica de transformada de Fourier se puede utilizar para recuperar la fase envuelta del patrón de franja proyectada [19]. Para desenvolver la fase del objeto, pixel por píxel, se requiere el uso de un algoritmo de desenvolvimiento de fase para generar un mapa de elevación digital 3D.
La técnica de Fourier se puede describir simplemente como sigue: Se proyecta un patrón con una frecuencia espacial conocida sobre el objeto bajo prueba, de la imagen resultante una Transformada de Fourier bidimensional se calcula. El espectro que resulta de esta proyección tiene dos Picos, centrados en la frecuencia portadora.
A fin de eliminar la portadora y así obtener una expresión de las variaciones de fase, proporcional al perfil del objeto en cada punto de imagen, una cierta cantidad de frecuencias rodean la portadora que es necesario filtrar con una ventana adecuada. Esta ventana es entonces desplazada hacia el centro del espectro, entonces una Transformada de Fourier inversa es aplicada a las frecuencias seleccionadas. Esta transformada inversa contiene la información de fase que finalmente se puede calcular mediante el algoritmo de un simple cálculo del tangente inverso.
La Figura 6 (a) muestra las franjas deformadas, las cuales fueron capturadas por la cámara y salvadas en una computadora, posteriormente procesadas en el software Matlab.

En la Figura 6 (c) podemos apreciar la fase desenvuelta que contiene la información topográfica del terreno del que se quiere construir un mapa de elevación. En la Figura 7 se aprecia el mapa topográfico obtenido a partir de la fase desenvuelta.

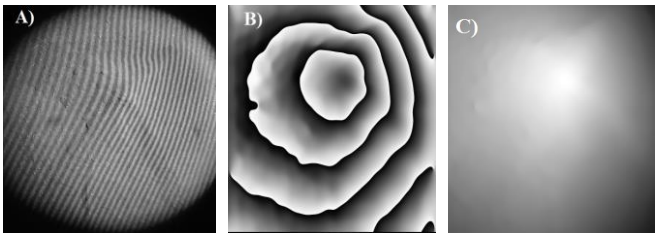



**Figura 6.** (a) imagen capturada por la cámara del patrón de franjas, (b) imagen de la fase envuelta, (c) mapa de fase desenvuelta.

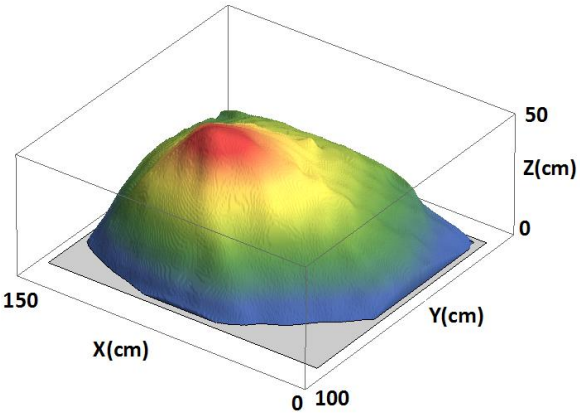



**Figura 7.** Mapa topográfico 3D de una región de interés.

## 6. CONCLUSIONES

Varias investigaciones han demostrado las ventajas de los drones en comparación con los globos meteorológicos, aeronaves o satelitales artificiales. Su bajo costo y gran flexibilidad en la programación de vuelos, hacen de la tecnología de UAVs una herramienta adecuada de mapeo alternativa versátil y de bajo costo. En este trabajo se ha mostrado que es posible implementar técnicas ópticas de no contacto en la reconstrucción de zonas de interés desde dispositivos controlados remotamente, además de implementar un proyector de patrones de luz miniaturizado portátil que puede portar el drone sin ninguna complicación.

Actualmente las aplicaciones de vehículos aéreos no tripulados (UAV) en aplicaciones de detección remota en el área de perfilometría óptica se encuentra todavía en una fase inicial, pero es razonable anticipar el papel de la detección remota mediante técnicas ópticas adaptadas a drones ya que creemos que en un futuro próximo superará a los aviones con tripulación.

## 7. REFERENCIAS

[1] L.F. Johnson, D.E. Roczen, S.K. Youkhana, R.R. Nemani, D.F. Bosch , “Mapping vineyard leaf area with multispectral satellite imagery, Computers and Electronics in Agriculture,” **38,** pp. 33-44 (2003).

[2] C. Fraser, “High-Resolution Satellite Imagery: A Review of Metric Aspects,” Int. Archives of Photogrammetry Remote Sens., **33**, pp. 452-459 (2000).

[3] M. Miyamoto, K. Yoshino, T. Nagano, T. Ishida, and Y. Sato, “Use of balloon aerial photography for classification of Kushiro wetland vegetation,” Wetlands, **24**, pp. 701–710 (2004), Northeastern Japan.

[4] D. Noli, “Low-altitude aerial-photography from a tethered balloon,”Journal of Field Archaeology, **12**, pp. 497–501 (1985).

[5] Lina Tang, Guofan Shao, “Drone remote sensing for forestry research and practices,” J. For. Res. **26**, pp. 791–797 (2015).

[6] Daniele Ventura , Michele Bruno, Giovanna Jona Lasinio, Andrea Belluscio, Giandomenico Ardizzone, “ A low-cost drone based application for identifying and mapping of coastal fish nursery grounds,” Estuarine, Coastal and Shelf Science **171** pp. 85-98(2016).

[7] Francesco Nex, and Fabio Remondino, “UAV for 3D mapping applications: a review,” Appl Geomat, **6**, pp. 1–15 (2014).

[8] Shreyansh Daftry, Christof Hoppe, and Horst Bischof, “Building with Drones: Accurate 3D Facade Reconstruction using MAVs,” IEEE International Conference on Robotics and Automation 3487-3494 (2015).

[9] I. Yamaguchi, J. Kato, and S. Ohta: "Surface shape measurement by phase-shifting digital holography", Opt. Rev, **8**, pp. 85-89 (2001)

[10] I. Yamaguchi, T. Ida, M. Yokota, and K. Yamashita: Surface shape measurement by phase-shifting digital holography with a wavelength shift, Appl. Opt. **45**, pp. 7610-7616 (2006)

[11] Malkiel, E.; Alquaddoomi, O.; Katz, J. “Measurements of plankton distribution in the ocean using submersible holography” Measurement Science & 136 Technology, **10**, pp 1142-52, (1999)

[12] Popescu, Gabriel; Deflores, Lauren P.; Vaughan, Joshua C.; Badizadegan, Kamran; Iwai, Hidenao; Dasari, Ramachandra R.; Feld, Michael S. “Fourier phase microscopy for investigation of biological structures and dynamics” Optics Letters, **29**, p p 2503-2505, (2004)

[13] Adams, M.; Kreis, T.M.; Juptner, W.P.O. “Particle size and position measurement with digital holography” Proceedings of the SPIE - The International Society for Optical Engineering, **3098**, pp 234-40, (1997)

[14] R. B. Owen and A. A. Zozulya, “In-line digital holographic sensor for monitoring and characterizing marine particulates,” Opt. Eng. **39**, pp 2187–2197 (2000).

[15] S. Murata and S. N. Yasuda, “Potential of digital holography in particle measurement,” Opt. Laser Technol. **32**, pp 567–574 (2000).

[16] S. Tang and Y. Y. Hung, “Fast profilometer for the automatic measurement of 3-D object shapes,” Appl. Opt., **29**, pp. 3012-3018, (1990).

[17] Wei-Hung Su, Chun-Hsiang Hsu, Wei-Chia Su, and Jung-Ping Liu “Projected fringe profilometry using a liquid crystal spatial light modulator to extend the depth measuring range,” Opt. Express, **19**, pp 3272-3283, (2011).

[18] Tyler Bell and Song Zhang, “Toward superfast three-dimensional optical metrology with digital micromirror device platforms,” Opt. Eng. **53**, pp 112206-1 (2014).

[19] Takeda M, Mutoh K “Fourier transform profilometry for the automatic measurement of 3D object shapes,” Appl Opt **22** pp 3977-3982 (1983).

[20] Gerardo Gutiérrez and Michael T. Searcy,” Introduction to the UAV special edition,” *The Magazine of the Society for American Archaeology* **16**, pp 6-9 (2016).

[21] http://www.walkera.com/index.php/Goods/info/id/37.html.