

Jornadas de Automática

Metodología de navegación autónoma precisa para aplicaciones de fotogrametría aérea

Jiménez, A.^{a,*}, Martín, D.^a, de la Escalera, A.^a, Armingol, JM.^a

^a Laboratorio de Sistemas Inteligentes (LSI), Universidad Carlos III de Madrid, Av. de la Universidad 30, 28911, Leganés, España.

To cite this article: Jiménez, A., Martín, D., de la Escalera, A., Armingol, JM. 2024. A precise autonomous navigation methodology for aerial photogrammetry applications. *Jornadas de Automática*, 45. <https://doi.org/10.17979/ja-cea.2024.45.10831>

Resumen

En la última década, el uso de vehículos aéreos no tripulados para aplicaciones civiles ha crecido exponencialmente. La irrupción de los sistemas autónomos y la inteligencia artificial ha abierto nuevas áreas de investigación para el desarrollo de aplicaciones industriales aéreas. Este trabajo presenta una metodología basada en un hexacóptero cautivo para realizar aplicaciones de fotogrametría aérea mediante una navegación totalmente autónoma. El dron ha sido configurado con una selección específica de sus componentes para lograr un posicionamiento de elevada precisión, junto a hardware de fotogrametría para la captura de imágenes georreferenciadas. La navegación autónoma de la aeronave se basa en la información generada en tiempo real por el conjunto de sensores a bordo, calibrados minuciosamente. Todo el control de las operaciones autónomas se realiza desde una estación terrestre en constante conexión con el dron, mediante la ejecución de aplicaciones desarrolladas específicamente para misiones de fotogrametría. La metodología aplicada ha proporcionado resultados fotogramétricos precisos mediante la navegación autónoma desarrollada.

Palabras clave: VANT, Vehículos autónomos, Sistemas de posicionamiento, Localización, Navegación, Programación y visión, Percepción.

A precise autonomous navigation methodology for aerial photogrammetry applications

Abstract

In the last decade, the use of unmanned aerial vehicles for civilian applications has grown exponentially. The irruption of autonomous systems and artificial intelligence has opened new research areas for the development of aerial industrial applications. This paper presents a methodology based on a tethered hexacopter to perform aerial photogrammetry applications through a fully autonomous navigation. The drone has been configured with a specific selection of its components to achieve a high position positioning, together with photogrammetry hardware for the capture of georeferenced images. The autonomous navigation of the aircraft is based on the information generated in real time by the set of sensors on board, minutely calibrated. All the control of the autonomous operations is performed from a ground station in constant connection with the drone, by running specific applications developed for photogrammetry missions. The applied methodology has achieved accurate photogrammetric results through the autonomous navigation developed.

Keywords: UAVs, Autonomous Vehicles, Positioning Systems, Localization, Navigation, Programming and Vision, Sensing.

1. Introducción

En los últimos años, el uso de vehículos aéreos no tripulados (UAV, del inglés *Unmanned Aerial Vehicles*) para aplicaciones de metrología ha mostrado un mayor índice de resultados, donde se ha potenciado la generación automática de trayectorias para navegación y el posicionamiento preciso (Mahendran, S. et al., 2023). Actualmente, el desarrollo de UAV ha avanzado

significativamente en las aplicaciones civiles y comerciales basadas en estos vehículos aéreos, cumpliendo las correspondientes normas internacionales en términos de precisión (Ismael, R. Q., Henari, Q. Z., 2019). Los UAV son idóneos para multitud de aplicaciones debido a su maniobrabilidad, rapidez, versatilidad y rentabilidad. En función de su capacidad y misión, pueden transportar diversas cargas útiles, como cámaras de vídeo de alta resolución, receptores del Sistema Global de Navegación por

*Autor para correspondencia: albejime@pa.uc3m.es

Formato de citación: APA (American Psychological Association)

Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

Satélite (GNSS, del inglés *Global Navigation Satellite System*) y sensores sofisticados como Lidar o cámaras térmicas, entre otros, que permiten el acceso a información crítica desde la distancia. A modo de ejemplo, en relación con los sensores, (Li, M. -S. et al., 2023) presentan un método para la supervisión de zonas de deslizamiento de tierras a gran escala, mediante escaneado láser 3D y fotogrametría aérea no tripulada. En relación con las aplicaciones fotogramétricas, la principal aplicación de los UAV es la detección, vigilancia y cartografía de diferentes terrenos (Kumari, R., Dubey, D., 2023). Por otra parte, trabajos recientes utilizan los satélites Galileo y el sistema EGNOS de aumento basado en satélites (SBAS, del inglés *Satellite-Based Augmentation System*), entre otras señales GNSS para mejorar el posicionamiento preciso. Además, estudios como el de (Elkhrachy, I., 2021) demuestran la alta precisión obtenida en fotogrametría aérea no tripulada utilizando técnicas cinemáticas en tiempo real (RTK, del inglés *Real Time Kinematic*) de una forma económica.

Los datos sensoriales de los UAV son procesados por unidades de adquisición de hardware y software, y transmitidos a la estación de control terrestre (GCS, del inglés *Ground Control Station*) como información telemétrica para su aplicación en metrología, inspecciones y análisis (Marques, A. et al., 2021), (Subramanian, J. A. et al., 2024). Del mismo modo, se utiliza un telemando para transmitir información de control desde el GCS al UAV y efectuar operaciones como el cambio del plan de ruta, configuración de la cámara o Lidar, selección de parámetros para el posicionamiento preciso, etc. Además, existen UAV que procesan los datos de fotogrametría a bordo, para tomar decisiones en base a ellos. Por ejemplo, (Torres-Sánchez, J. et al., 2023) presentan un método que logra una localización precisa de la zona objetivo de aterrizaje y genera una trayectoria para aterrizar con precisión utilizando un sistema de visión por ordenador.

La planificación de misiones es vital en la fotogrametría aérea no tripulada, ya que permite a los operadores designar zonas de despegue y aterrizaje, establecer puntos de ruta de vuelo y navegar por zonas de interés para obtener una cobertura completa. Recientemente se han desarrollado algoritmos de planificación de vuelo para fotogrametría, con el fin de mejorar la gestión de las misiones en tierra, donde las operaciones se encuentran bajo la estricta supervisión de un módulo integrado de alto nivel que garantiza la seguridad en tiempo real. Estos módulos se han diseñado utilizando *Run-Time Assurance* (RTA) (ASTM, 2021), una arquitectura de control en la que un controlador avanzado pero potencialmente impredecible opera bajo la supervisión de un módulo que puede transferir el control a un controlador más sencillo y fiable cada vez que el comportamiento del sistema supere algún límite predefinido, o incluso transferir el control total al usuario.

El presente artículo presenta una metodología basada en la navegación autónoma precisa de un dron cautivo para aplicaciones de fotogrametría aérea. Con este objetivo, es necesario sincronizar el control del UAV y la adquisición y procesamiento de imágenes en tiempo real, así como registrar las coordenadas y pose del dron en cada toma (Carvajal-Ramírez, F. et al., 2021). El resto del artículo se organiza de

la siguiente manera: la sección 2 describe el dron cautivo y la configuración del sistema, la sección 3 discute la metodología de posicionamiento preciso para la navegación autónoma, la sección 4 presenta la fotogrametría y los resultados, y la sección 5 las conclusiones de este trabajo.

2. Configuración del sistema – Dron cautivo

Una navegación totalmente autónoma para fotogrametría aérea requiere un dron estable y preciso, capaz de despegar y aterrizar verticalmente, así como de mantenerse estático en puntos clave de la misión. El UAV seleccionado para el presente trabajo se trata de un dron cautivo. Este tipo de sistemas conllevan limitaciones en cuanto al área de operación, restringida por la longitud del cable (hasta 150 metros), aunque puede solventarse con una plataforma terrestre móvil o montada en un vehículo. A pesar de un despliegue más lento y la complejidad añadida por la plataforma terrestre, el coste adicional de un sistema cautivo se justifica por sus ventajas frente a un dron no cautivo:

- Tiempo de vuelo ilimitado. Los drones cautivos pueden volar de forma continua, a diferencia de los drones con batería cuyo tiempo de vuelo es muy limitado.
- Reducción de peso. Sin baterías a bordo, los drones cautivos son más ligeros, lo que mejora su agilidad, estabilidad y capacidad de carga.
- Transmisión de datos por cable. La conexión cableada permite una transmisión de datos rápida y en tiempo real, además de evitar interferencias inalámbricas.
- Comunicaciones seguras. Sin señales inalámbricas que puedan ser intervenidas, son inmunes a la piratería.
- Operaciones seguras. El anclaje a tierra del dron cautivo limita su perímetro de vuelo, garantizando la seguridad del entorno frente a errores humanos y fallos técnicos.

Por lo tanto, con un sistema cautivo el dron puede llevar a cabo misiones de adquisición de datos fotogramétricos de forma eficiente, sin el tiempo como factor limitante en la captura de imágenes, además de permitir una comunicación por cable estable con el segmento terrestre, con transferencia de datos en tiempo real, de forma constante y bidireccional.

De acuerdo con estas características, en este epígrafe se presenta la configuración de un dron cautivo y sus diferentes sistemas orientados a la fotogrametría aérea.

Como base del sistema robótico, se utiliza un fuselaje de hexacóptero comercial, con un peso total, incluyendo el resto de componentes añadidos, de 2,155 kg. La estructura física de la aeronave, aerodinámica y de baja densidad, combina ligereza con resistencia y rigidez, gracias a un compartimento central fabricado con resinas compuestas de baja densidad, con cubiertas de fibra de carbono. Los brazos que soportan los 6 motores del hexacóptero son huecos y de fibra de carbono, unidos al chasis central mediante juntas de plástico de baja densidad. En cuanto a la morfología de la parte central, ésta es ovalada, conduciendo mejor el flujo de aire y ofreciendo menos resistencia al movimiento de la aeronave. El fuselaje del hexacóptero tiene una disposición en X, con una distancia longitudinal entre motores mayor que la transversal. Este tipo de distribución favorece un comportamiento estable del dron durante el vuelo, tanto a

bajas como a altas velocidades, permitiendo vuelos cambiantes y controlados con un menor ángulo de ataque.

El sistema de alimentación del dron cautivo se basa en una conexión física a tierra para el suministro de energía. Está compuesto por 2 módulos de fabricación comercial: la estación base terrestre y el módulo a bordo. La estación base de alimentación consta de una batería de 36 V con una capacidad de 40Ah, que permite varios días de misiones aéreas sin necesidad de ser cargada, aunque el sistema también puede ser conectado directamente a la red eléctrica (230 V / 50 Hz). La estación terrestre envía al dron corriente alterna, a una tensión de 230 V, con la finalidad de reducir las pérdidas en el transporte de energía. Esta corriente llega al módulo de alimentación a bordo, que contiene un rectificador encargado de convertirla en corriente continua, a la tensión de funcionamiento del dron, 17 V. El módulo de a bordo también cuenta con una pequeña batería de reserva, la cual proporciona una tensión de 15,2 V para poder aterrizar con seguridad en caso de que se interrumpa el suministro eléctrico por cable.

El sistema de propulsión del dron está formado por 6 motores sin escobillas con sus hélices, y el controlador electrónico de velocidad (ESC, del inglés *Electronic Speed Controller*), el cual sincroniza las bobinas de los motores para alcanzar las velocidades requeridas, siguiendo las directrices del controlador de vuelo. Los motores tienen una potencia de 260 W, un empuje de 1,293 kg y un par máximo de 0,18 Nm. Conocido el peso total del hexacóptero (2,155 kg), se puede calcular su ratio empuje/peso, en (1):

$$\text{Ratio empuje/peso} = \frac{6 \text{ motor} \cdot 1,293 \text{ kg/motor}}{2,155 \text{ kg}} = 3,6:1 \quad (1)$$

Relaciones entre 3:1 y 4:1 son óptimas para fotogrametría, ya que permiten un control preciso del vuelo y una gran flexibilidad para añadir cargas útiles adicionales. La acción combinada de los componentes del sistema de propulsión otorga al hexacóptero un peso máximo al despegue (MTOW, del inglés *Maximum Take-Off Weight*) de 3,8 kg, y le permite generar un empuje máximo de 7,7 kg, soportando velocidades de viento de hasta 10 m/s.

El sistema de control del hexacóptero está formado por el controlador de vuelo y un conjunto de sensores, internos y externos, que le permiten conocer su pose en tiempo real. El controlador de vuelo Pixhawk Hex Cube actúa como cerebro del dron, interpretando las señales de navegación recibidas del radiocontrol (RC) o del programa de navegación autónoma en ejecución para generar en tiempo real las señales de actuación de los motores. El controlador integra un sistema triple de unidad de medida inercial (IMU, del inglés *Inertial Measurement Unit*). Cada IMU dispone de un acelerómetro para medir aceleraciones lineales y angulares, un giroscopio que mide la velocidad de rotación en 3 ejes y un magnetómetro que determina la orientación del dron. A partir de la información proporcionada por estos sensores, el hexacóptero puede determinar sus cambios de posición, inclinación y orientación con respecto a su estado anterior, a una frecuencia de 32 kHz.

La transmisión de datos entre la estación terrestre y el dron se realiza físicamente a través de una conexión de bus serie universal (USB, del inglés *Universal Serial Bus*),

utilizando el protocolo MAVLink, que contiene un conjunto de mensajes de alto nivel definidos para el intercambio de datos entre dispositivos. Las comunicaciones son extremadamente fiables gracias a su capacidad para detectar la pérdida de paquetes o datos corruptos, además de contar con un proceso de autenticación de datos. El protocolo se utiliza tanto para comunicaciones internas como externas y permite la conexión en tiempo real entre el controlador de vuelo y el programa de navegación autónoma que se ejecuta en el sistema informático de tierra. A través del cableado USB y utilizando el protocolo MAVLink, también se envía la telemetría de vuelo al software GCS, QGroundControl, para monitorizar en tiempo real la posición de la aeronave, su navegación autónoma y el estado de sus sensores.

El dron también está equipado con un sistema de radiocontrol para tomar de forma inmediata el control manual ante una situación que lo requiera. El sistema está compuesto por el transmisor RC (segmento de tierra) y el receptor RC (segmento de aire), con una conexión de radiofrecuencia entre ambos que sigue el protocolo TX D16, permitiendo una comunicación directa entre dron y operador de vuelo con transmisión de telemetría en tiempo real.

La Figura 1 muestra el dron cautivo en vuelo con la configuración del sistema descrita.

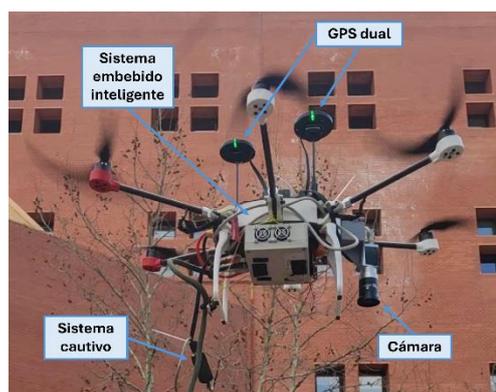


Figura 1: Configuración del sistema – Dron cautivo.

3. Metodología de posicionamiento preciso para la navegación autónoma

El desarrollo de una navegación autónoma para aplicaciones de fotogrametría aérea requiere un conjunto de software personalizado para controlar el dron en modo autónomo, con el fin de desarrollar misiones no tripuladas para la adquisición de datos fotogramétricos. Los vuelos, programados manual o automáticamente, deben ser estables y altamente precisos, mediante una calibración meticulosa de sus sensores y con dispositivos externos dedicados al geoposicionamiento y la toma de fotografías.

Los instrumentos y hardware a bordo del hexacóptero cautivo están controlados por el firmware PX4 del controlador de vuelo. Se trata de un software específico para realizar misiones aéreas con control en tiempo real de la aeronave, adaptado al tipo de fuselaje del hexacóptero. PX4 recibe como entradas los comandos del control manual por radiofrecuencia o las instrucciones del programa de navegación autónoma, controlando los diferentes componentes del dron para llevar a cabo los objetivos de cada misión, teniendo en cuenta la información recibida en

tiempo real por los sensores embarcados. Su arquitectura modular permite integrar periféricos externos con los componentes hardware internos para dirigir correctamente la navegación fotogramétrica autónoma. Este firmware de código abierto ha sido integrado directamente con la estación de control terrestre, utilizando el protocolo de comunicación MAVLink y compatibilizándolo con bibliotecas de programación en Python para aplicaciones avanzadas a través de MAVSDK. Este kit de desarrollo de software (SDK, del inglés *Software Development Kit*) permite interactuar con la telemetría del dron y controlarlo mediante comandos de movimiento o misiones complejas. MAVSDK se ejecuta en el sistema informático de la estación de tierra, garantizando su conexión en tiempo real con el dron a través de la conexión USB por cable.

Las operaciones de navegación autónoma requieren una calibración extremadamente precisa de todos los sensores internos y externos utilizados para el análisis en tiempo real de la situación del dron con respecto a su entorno. El firmware dispone de una serie de parámetros internos que especifican la orientación de cada módulo sensorial a bordo de la aeronave, basándose en la desviación angular de cada componente con respecto a los ejes de cabeceo, balanceo y guiñada. Además de establecerse las orientaciones de los sensores, estos deben ser calibrados individualmente para garantizar que proporcionan mediciones precisas que permiten estimar con exactitud la posición y orientación del dron con respecto marco global “mundo”.

El sistema de navegación autónoma para aplicaciones de fotogrametría aérea requiere un posicionamiento geográfico de la aeronave en cada instante de la misión. Para lograr este geoposicionamiento global, se utiliza un receptor del sistema de posicionamiento global (GPS, del inglés *Global Positioning System*) de alta precisión a bordo del dron. Además de una IMU integrada, el módulo GPS implementa un GNSS, cuyo funcionamiento se basa en el posicionamiento geoespacial de la aeronave utilizando la cobertura global proporcionada por las constelaciones de satélites GPS, GLONASS, BeiDou y Galileo. El módulo proporciona al controlador de vuelo información sensorial y de geolocalización con una frecuencia de actualización de 8 Hz, a través de protocolo CAN bus. Su montaje a bordo del dron cautivo se realiza sobre un soporte elevado, con el fin de mantenerlo alejado de las líneas de alimentación para evitar interferencias electromagnéticas. Aunque el módulo GPS es compatible con RTK, tecnología que ofrece alta precisión en el geoposicionamiento mediante la combinación del sistema GNSS y la comunicación directa con una estación terrestre geolocalizada, el dron autónomo cautivo no incorpora su implementación, para no comprometer la versatilidad intrínseca del sistema. Para compensar la indisponibilidad de RTK y poder obtener un geoposicionamiento altamente preciso de la aeronave, se implementa un sistema GPS dual. En las aplicaciones de fotogrametría aérea es sumamente importante disponer de una localización por satélite estable, precisa y con el mínimo error, para obtener fotografías georreferenciadas con el lugar exacto de captura. Con la adición de otro módulo GPS al hexacóptero, es posible localizar la aeronave reduciendo significativamente la incertidumbre,

combinando los datos de ambos receptores mediante un algoritmo específico que pondera los datos en función de la precisión individual reportada. Para un funcionamiento óptimo y eficiente del algoritmo, los 2 módulos GPS son el mismo modelo y tienen la misma configuración, lo que permite al firmware PX4 combinar su información de velocidad, posición horizontal y posición vertical de la aeronave. Ambos están conectados al controlador de vuelo a través de una conexión transmisor-receptor asíncrono universal (UART, del inglés *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*).

Las misiones aéreas totalmente autónomas requieren sólidas funciones de seguridad para proteger el entorno de trabajo y garantizar la recuperación de la aeronave en caso de fallo de algún componente o de condiciones de vuelo inesperadas. El firmware de control PX4 implementa funciones de seguridad que se ejecutan automáticamente en diversas situaciones de emergencia. Una de estas funciones es el modo de seguridad por batería baja, que se activa si falla la alimentación por cable del dron cautivo, ordenando a la aeronave que regrese a su punto de despegue inicial utilizando la batería de reserva. Otro modo de seguridad se activa en caso de pérdida de la comunicación por radio, haciendo que la aeronave regrese automáticamente al punto de despegue si la conexión no se restablece en 15 segundos. Del mismo modo, se activa un mecanismo de seguridad si se pierde la comunicación con la estación de control en tierra, iniciándose el regreso autónomo del dron a menos que se restablezca la conexión. En estos modos de emergencia, el vuelo de regreso se realiza en línea recta a una altitud mínima de 4 metros, manteniendo la orientación de la aeronave para evitar rotaciones innecesarias. Como última medida de seguridad, en caso de pérdida del posicionamiento GPS dual, el algoritmo de mezcla conmuta a un posicionamiento GPS individual. Si ambos módulos GPS pierden el posicionamiento, el dron entra en un modo de navegación segura, estabilizando su posición basándose en la información del resto de sensores y manteniendo la altitud mediante el sensor de presión barométrica.

4. Fotogrametría y resultados

La fotogrametría aérea requiere la toma de fotografías georreferenciadas de forma consecutiva y homogénea. Es esencial disponer de una navegación autónoma con un geoposicionamiento preciso y de un número suficiente de imágenes para garantizar el solapamiento, tanto longitudinal como lateral, entre imágenes consecutivas.

Las operaciones de fotogrametría aérea a través de misiones autónomas están dirigidas por el controlador de vuelo, el cual ejecuta un programa específico para la navegación, encargado también de controlar el disparo de cámara. Una de las cámaras utilizadas, mostrada en la Figura 1, se trata de la Basler acA2040-35gc con un sensor Sony IMX265, capaz de capturar fotografías con una profundidad de color de 12 bits/pixel y una resolución de 3,2 MP, a una velocidad 36 fotogramas por segundo. El control de disparo coordina la captura de imágenes con las diferentes etapas del programa de navegación. El controlador de vuelo genera una señal de disparo con una frecuencia que garantiza siempre el solapamiento entre imágenes. La frecuencia de captura es

ajustada en función de la aplicación fotogramétrica, siendo generalmente establecida en valores de tiempo (s) o distancia (m). La señal generada por el controlador de vuelo es acondicionada mediante un microcontrolador programable Arduino, para compatibilizarla con el tipo de señal detectada por la cámara. La señal acondicionada se envía a la cámara a través de una entrada octoacoplada, aislando la línea de del resto de circuitos eléctricos y evitando así interferencias.

La georreferenciación precisa de las imágenes es fundamental para obtener mediciones fotogramétricas y análisis espaciales exactos. El controlador de vuelo del dron registra durante las misiones autónomas todos los datos de navegación y órdenes de disparo de la cámara. Los datos de geotiquetado del registro de vuelo se utilizan en la estación de control terrestre para georreferenciar las imágenes capturadas, garantizando una elevada precisión del estudio. En esta etapa de georreferenciación, se debería tener en cuenta la translación (x, y, z) entre el punto central entre ambos módulos GPS, que es aproximadamente el punto geoposicionado, y la cámara.

La conexión directa entre el controlador de vuelo a bordo y el software GCS permite crear misiones fotogramétricas a través de su herramienta de planificación de vuelos. Este software de código abierto, QGroundControl, permite planificar misiones detalladas con waypoints precisos y eventos específicos, como cambios de orientación, velocidad, altitud y acciones de la cámara, superando las capacidades de otras aplicaciones comerciales. Como ejemplo de aplicación de fotogrametría aérea planificada, se presenta un modelo de reconstrucción tridimensional (3D, del inglés *Three-Dimensional*), de una estructura de 1,50 m de altura, mediante una trayectoria circular de radio 1 m y la cámara orientada hacia la estructura durante toda la misión, con una frecuencia de disparo de 2 Hz (cada 0,5s). Los datos recogidos se procesan con el software eyesCloud3D, especializado en la generación de modelos 3D a partir de imágenes 2D. Impulsado por inteligencia artificial, el software analiza automáticamente los puntos comunes entre las imágenes para crear un entorno virtual y generar un volumen 3D a partir de distintas perspectivas fotográficas. La Figura 2 muestra una captura del modelo 3D obtenido a partir de las imágenes tomadas durante esta misión.



Figura 2: Modelado 3D de estructura a partir de misión de vuelo específica.

Las aplicaciones de fotogrametría más complejas requieren la captura de numerosas fotografías desde diferentes ángulos y altitudes. Para realizar este tipo de operaciones de forma rápida y eficiente, se han desarrollado un conjunto de programas autónomos de fotogrametría aérea en Python. Su funcionamiento se basa en la

planificación y creación automática de misiones fotogramétricas avanzadas con MAVSDK, así como el control del dron durante el vuelo. Con estos scripts se elimina la necesidad de planificar manualmente las misiones de navegación, ahorrando una gran cantidad de tiempo y recursos gracias a la creación automática de las diferentes trayectorias de vuelo que se necesitan para reconstruir el área de estudio. Los programas desarrollados pueden realizar de forma automática todo el proceso de preparación y control del vuelo, generando las rutas desde las coordenadas iniciales del dron, a partir de las cuales se establecen el resto de puntos de la misión mediante diferentes incrementos de latitud y longitud. Una vez generados los puntos de ruta, se crean diferentes trayectorias entre ellos en ambos sentidos y a diferentes altitudes, con el fin de obtener abundantes datos fotogramétricos de la zona de estudio. La Figura 3 muestra el funcionamiento de un script para misiones avanzadas de fotogrametría aérea.

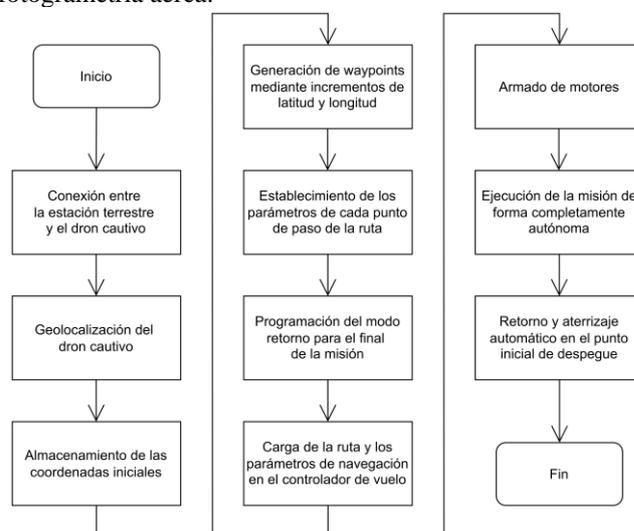


Figura 3: Diagrama de flujo de un script para misiones avanzadas de fotogrametría aérea.

Como ejemplo de aplicación avanzada de fotogrametría aérea con planificación automática, se presenta una reconstrucción 3D geolocalizada de un área de estudio rectangular, con una longitud mayor de 45 m. El objetivo es obtener una reconstrucción virtual de la región modelando el entorno con la geometría, volumen y localización geográfica reales. Para este estudio fotogramétrico, se utilizan los scripts desarrollados para fotogrametría aérea autónoma avanzada. La captura de imágenes durante la misión está controlada por el programa de navegación autónoma, que envía una señal de disparo en cada punto de captura, generados con una distancia entre sí inferior a 0,5 m. Los datos recogidos tras la misión son procesados con el software Agisoft Metashape Pro, el cual genera un entorno virtual mediante nubes de puntos a partir de las regiones comunes entre las diversas fotografías. Utilizando la información de georreferenciación de las imágenes, el software permite obtener reconstrucciones en 3D para aplicaciones directas de fotogrametría, proporcionando distancias reales, medidas volumétricas e información geográfica del entorno. La Figura 4 muestra los resultados fotogramétricos obtenidos en esta misión autónoma avanzada, que incluyen la reconstrucción 3D de la región estudiada y la adquisición de medidas reales.

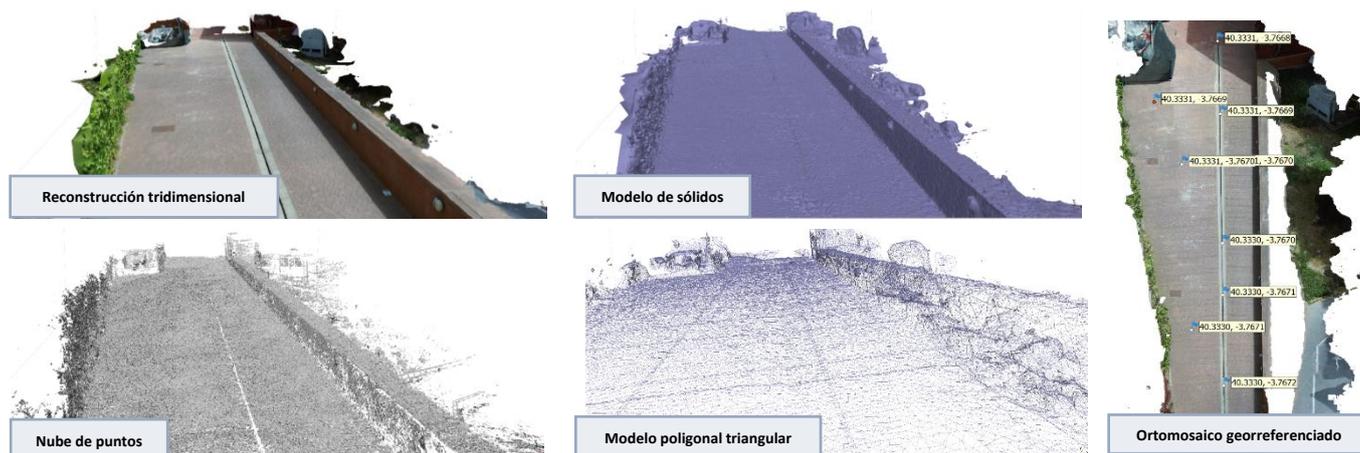


Figura 4: Resultados obtenidos en la misión avanzada de fotogrametría aérea autónoma y mediciones precisas siguiendo la metodología presentada.

5. Conclusiones

El objetivo principal de este trabajo consiste en el desarrollo de una metodología basada en un dron cautivo para realizar aplicaciones de fotogrametría aérea, mediante una navegación precisa y totalmente autónoma. Los resultados obtenidos demuestran el éxito de la metodología desarrollada, logrando misiones fotogramétricas de alta precisión de una forma segura y fiable.

Estos resultados también validan la configuración de hardware seleccionada para el hexacóptero, que asegura una alta estabilidad de vuelo y el mantenimiento preciso de una posición estática. El control en tiempo real de su posición y orientación, unido al sistema de GPS dual, permite un geoposicionamiento preciso para operaciones autónomas de fotogrametría aérea. Además, el sistema de mando por radiofrecuencia posibilita un control manual e inmediato en caso necesario, garantizando la seguridad durante las misiones. La configuración de dron cautivo proporciona una gran autonomía de vuelo y una comunicación estable con la estación terrestre. La conexión cableada ofrece una comunicación segura entre los segmentos aéreo y terrestre, permitiendo el procesamiento en tiempo real de las medidas tomadas por los sistemas a bordo. Esta forma de procesamiento ha demostrado gran eficacia y versatilidad, en comparación con soluciones de procesamiento externo o en la nube.

Por otra parte, el controlador de vuelo ha sido programado para adaptarse a los requisitos de la fotogrametría aérea, permitiendo operaciones autónomas de navegación, despegue y aterrizaje en distintos escenarios. Adicionalmente, se han añadido un conjunto de acciones de seguridad de activación automática, para afrontar averías o emergencias en vuelo, mejorando la fiabilidad operativa durante las misiones aéreas.

Como conclusión final, se ha desarrollado con éxito una metodología integral basada en un sistema aéreo para aplicaciones de fotogrametría. Con ella se han obtenido resultados de alta calidad, caracterizados por la simplicidad, eficiencia y elevada precisión de las operaciones. La metodología desarrollada es directamente aplicable a estudios metrológicos, donde las operaciones de fotogrametría son cada vez más importantes.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido respaldado por el Gobierno español mediante las subvenciones: PID2021-124335OB-C21, PID2022-140554OB-C32 y PDC2022-133684-C31 financiadas por MCIN/AEI/10.13039/501100011033.

Referencias

- ASTM (2021). *Standard practice for methods to safely bound behavior of aircraft systems containing complex functions using run-time assurance*. DOI: 10.1520/F3269-21
- Carvajal-Ramírez, F. et al. (2021). *UAV photogrammetry and remote sensing*. MDPI - Multidisciplinary Digital Publishing Institute, Switzerland. DOI: 10.3390/books978-3-0365-1453-6
- Elkhrachy, I. (2021). Accuracy assessment of low-cost unmanned aerial vehicle (UAV) photogrammetry. *Alexandria Eng. J., vol. 60, n.o 6*, 5579–5590. DOI: 10.1016/j.aej.2021.04.011
- Ismael, R. Q., Henari, Q. Z. (2019). Accuracy assessment of UAV photogrammetry for large scale topographic mapping. *Proc. 5th Int. Eng. Conf. IEC 2019*, 1–5. DOI: 10.1109/IEC47844.2019.8950607
- Kumari, R., Dubey, D. (2023). A review of various image processing techniques for UAV based photogrammetry. *2023 International Conference on IoT, Communication and Automation Technology (ICICAT)*, 1–5. DOI: 10.1109/ICICAT57735.2023.10263713
- Li, M. -S. et al. (2023). Using unmanned laser scanning and aerial photogrammetry for potential large-scale landslide area monitoring. *2023 IEEE 5th Eurasia Conference on IOT, Communication and Engineering (ECICE)*, 863–865. DOI: 10.1109/ECICE59523.2023.10383168
- Mahendran, S. et al. (2023). Experimental investigations to enhance precision and accuracy in UAV photogrammetry of 3D model. *2023 International Conference on Electrical, Electronics, Communication and Computers (ELEXCOM)*, 1–6. DOI: 10.1109/ELEXCOM58812.2023.10370555
- Marques, A. et al. (2021). Deep learning application for fracture segmentation over outcrop images from UAV-based digital photogrammetry. *2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS*, 4692–4695. DOI: 10.1109/IGARSS47720.2021.9553232
- Subramanian, J. A. et al. (2024). Integrating computer vision and photogrammetry for autonomous aerial vehicle landing in static environment. *IEEE Access, vol. 12*, 4532–4543. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3349419
- Torres-Sánchez, J. et al. (2023). Mobile terrestrial laser scanner vs. UAV photogrammetry to estimate woody crop canopy parameters – Part 2: Comparison for different crops and training systems. *Computers and Electronics in Agriculture, vol. 212*, 1–10. DOI: 10.1016/j.compag.2023.108083