

METROLOGÍA DE UN REFLECTOR DESPLEGABLE PARA EL ESPACIO CON FOTOGRAMETRÍA DE CORTO ALCANCE Y LIDAR DE ALTA PRECISIÓN

José Luis Lerma⁽¹⁾, Iván Bravo⁽²⁾, Miriam Cabrelles⁽¹⁾, José Luis Rubio⁽²⁾, Eduardo Margallo⁽²⁾, Jorge Pinazo⁽³⁾ y Grégory Pandraud⁽²⁾

⁽¹⁾ Grupo de Investigación en Fotogrametría y Láser Escáner (GIFLE), Dept. Ing. Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Universitat Politècnica de València, Cº de Vera, s/n, 46022 Valencia

⁽²⁾ Ommatidia LiDAR, Calle Faraday, 7, 28049 Madrid

⁽³⁾ COMET Ingeniería, Carrer del Convent dels Carmelites, 2, 46010 Valencia

(*)963877007 Ext. 75532 – jllerma@cgf.upv.es

RESUMEN: En este trabajo exponemos los resultados de un proyecto lanzado en 2020 por la Agencia Espacial Europea (ESA) “*In-Orbit Surface Metrology for Large Deployable Reflectors*”, cuyo objetivo fue el desarrollo de un instrumento de metrología compacto, de alta precisión, largo alcance y sin partes móviles, para la futura monitorización en tiempo real de antenas desplegadas en el espacio. El objetivo de este trabajo es mostrar las capacidades para la caracterización de un reflector desplegable de 4.4 m de diámetro de banda L de dos técnicas de medida, la fotogrametría de corto alcance y el radar láser multicanal desarrollado en el proyecto de la ESA. El objetivo es mostrar y comparar los resultados de la caracterización del reflector en los que se abordaron medidas con precisiones en el rango de las 10-100 µm a distancias de 4 m.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, existe una tendencia al desarrollo de reflectores desplegables para el espacio con el fin de reducir las limitaciones y los costes asociados a la puesta en órbita de los reflectores rígidos [1, 2]. De hecho, este tipo de reflectores ya han sido incluidos en algunas misiones europeas (CIMR, ROSE-L) para observación terrestre [3]. La tecnología de los reflectores desplegables permite disponer en órbita de reflectores de grandes dimensiones que de otra manera no podrían lanzarse con las dimensiones de los lanzadores actuales. En este sentido, conocer con precisión la forma y apuntamiento del reflector tras el desplegado en órbita es clave para la correcta funcionalidad y precisión del reflector. La monitorización del reflector en tiempo real permite a su vez identificar posibles cambios en el espacio y realizar, en consecuencia, reapuntamientos y cambios de forma que puedan ser necesarios para la misión. Aunque existen muchos instrumentos de metrología que ofrecen buenas prestaciones para caracterización de objetos grandes e incluso antenas desplegables [1, 4, 5], no existe ningún instrumento de medida apropiado para funcionar en el espacio, ya sea por las partes mecánicas/móviles que sufren durante lanzamiento, como por la necesidad de un operador o incluso por el excesivo volumen o masa del instrumento. Además, los instrumentos deben trabajar en condiciones muy extremas, propias del espacio, y su diseño y funcionamiento está restringido a la limitación de recursos como puede ser el consumo de potencia eléctrica [6].

A la vista de la necesidad de caracterizar este tipo de reflectores desplegables en órbita, la Agencia Espacial Europea (ESA) lanzó un proyecto con el objetivo de desarrollar un instrumento, con nivel 4 de madurez tecnológica espacial (TRL 4), que cumpliera con los requisitos de caracterización de reflectores en el espacio, “*In-Orbit Surface Metrology for Large Deployable Reflectors*”. Este proyecto fue concedido al consorcio formado por Ommatidia LiDAR [7] y COMET Ingeniería [8], comenzando en 2020 y con una duración de dos años. Durante el transcurso del proyecto, Ommatidia LiDAR ha desarrollado un instrumento de metrología (radar láser multicanal) compacto, de alta precisión, largo alcance y sin partes

móviles, cumpliendo así los requisitos para la futura monitorización en tiempo real de antenas desplegables en el espacio. Sus prestaciones han sido probadas con la caracterización de un reflector desplegable de banda L fabricado por COMET Ingeniería y PROSIX Engineering e instalado en el centro tecnológico y de investigación Tekniker (Eibar, País Vasco) [9]. Además, para comprobar las prestaciones del nuevo instrumento de metrología desarrollado, la antena desplegable fue caracterizada, en primer lugar, por fotogrametría de corto alcance que ofrece la posibilidad de medir con muy alta precisión, realizada por el Grupo de Investigación en Fotogrametría y Láser Escáner (GIFLE) de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV). Es importante destacar que esta técnica de medida ofreció una precisión muy alta, necesaria para validar los resultados del láser radar multicanal desarrollado. Las capacidades y metodología de caracterización de un reflector desplegable, así como los resultados obtenidos con ambas tecnologías se analizan como parte de los resultados de este trabajo.

2. DESARROLLO/DESCRIPCIÓN

Con el objetivo final de desarrollar un instrumento de metrología para caracterizar grandes estructuras, en este caso reflectores desplegables, Ommatidia LiDAR hizo uso de su tecnología patentada [10] adaptándola a las necesidades de funcionamiento en órbita en el espacio. En este apartado, describiremos el principio de funcionamiento del instrumento, así como sus diferentes partes y la metodología de las medidas. Además, detallaremos el instrumental y metodología de fotogrametría de corto alcance, para estas medidas de alta precisión.

Reflector desplegable

El reflector diseñado y fabricado por COMET Ingeniería y Prosix Ingeniería, que fue instalado en el laboratorio de alta precisión de Tekniker, se muestra en la Fig. 1. El conjunto del reflector está colgado de una estructura de aluminio, anclada al techo mediante cables, filtrando de esta forma posibles vibraciones procedentes de la estructura del edificio. El reflector parabólico está formado por un anillo rígido de 6 m de diámetro construido a partir de tubos de fibra de carbono y una malla reflectora fabricada en acero inoxidable a partir de hilo de 30 micras de diámetro, que queda tensada sobre el anillo. Esta malla tiene 4.4 m de diámetro y en ella se colocaron 100 marcadores codificados retroreflectantes (40 mm de lado), puntos donde la fotogrametría y el radar láser multicanal realizarían sus medidas. Además, marcadores adicionales y más pequeños se colocaron para obtener medidas más precisas con fotogrametría.

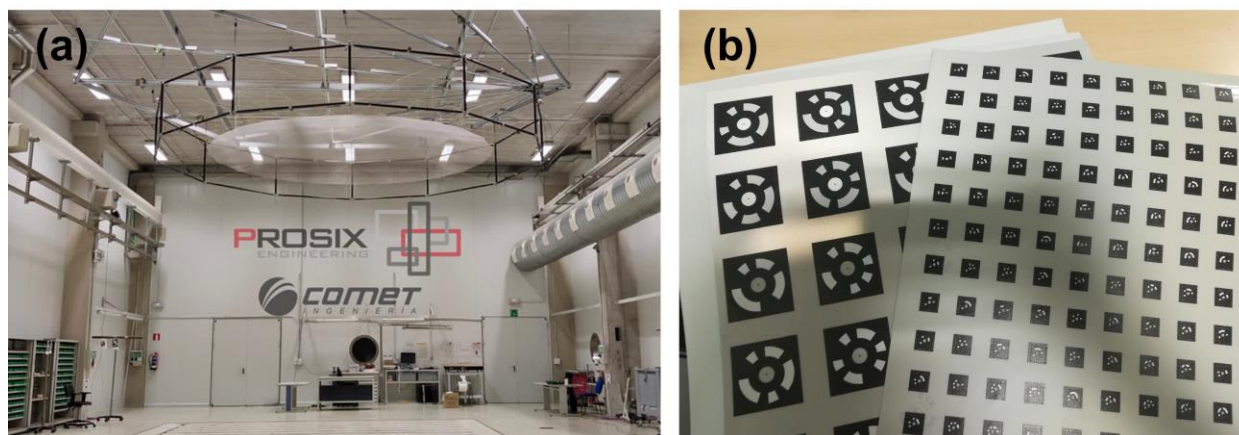


Figura 1. (a) Reflector desplegable. (b) Marcadores codificados retroreflectantes.

Radar láser multicanal para espacio

El radar láser multicanal desarrollado por Ommatidia LiDAR para este proyecto se basa en la habilidad para realizar simultáneamente una gran cantidad de medidas de distancia, con alta precisión, en diferentes puntos (más de 100) de un objeto. Esto se consigue a través de la medida de la amplitud y la fase del campo electromagnético realizada por más de 100 interferómetros que se encuentran dentro de un solo chip o sensor fotónico, gracias a la fotónica integrada. De esta forma, el radar láser multicanal es capaz de medir en paralelo más de 100 puntos, sin necesidad de un escáner mecánico, y con una precisión interferométrica, por debajo de las 100 μm . Además, al fabricarse el sensor fotónico a través de la óptica integrada (de modo análogo a los circuitos integrados en la electrónica), permite la reducción del sistema enormemente. A modo de ejemplo, el sensor fotónico descrito aquí, que contiene más de 100 interferómetros en su interior, tiene unas dimensiones de 5 mm x 12 mm (Fig. 2(a)).

En la versión desarrollada para la ESA, el instrumento de metrología está formado principalmente por un emisor (en este caso una fuente láser de onda continua y frecuencia modulada) y el receptor (el sensor fotónico propiedad de Ommatidia LiDAR). De esta forma, el láser se encarga de iluminar el objeto a medir en los puntos de interés, mientras que el sensor fotónico recibe la luz reflejada por el objeto, que posteriormente se convertirá en una medida de distancia para cada uno de los puntos iluminados.

En breve, describimos en detalle el proceso de obtención de la medida de distancia. Al contrario de otros LiDAR o láser escáner en el mercado, en los que se obtiene la medida de distancia midiendo el tiempo que tarda un pulso láser en volver al sensor (*"Time-of-Flight"* - ToF), la tecnología de Ommatidia LiDAR se basa en el principio de *"Frequency Modulated Continuous Wave"* (FMCW) [11]. Este principio se basa en la extracción de la frecuencia de batido resultante de la mezcla de una onda de frecuencia modulada de referencia (directamente del láser) y la onda reflejada por el objeto (desfasada temporalmente, pero con la misma modulación en frecuencia). Así, la medida de distancia es obtenida a través de la frecuencia de batido resultante de la mezcla (relacionada con el desfase de ambas ondas). Este principio es utilizado más allá por Ommatidia LiDAR, realizando medidas basadas en el principio de FMCW, pero en cientos de puntos en paralelo [10]. Así, pueden conseguirse medidas de más de 100 puntos de objeto, simultáneamente y casi en tiempo real, con las ventajas que el principio de FMCW ofrece con respecto al LiDAR ToF convencional.

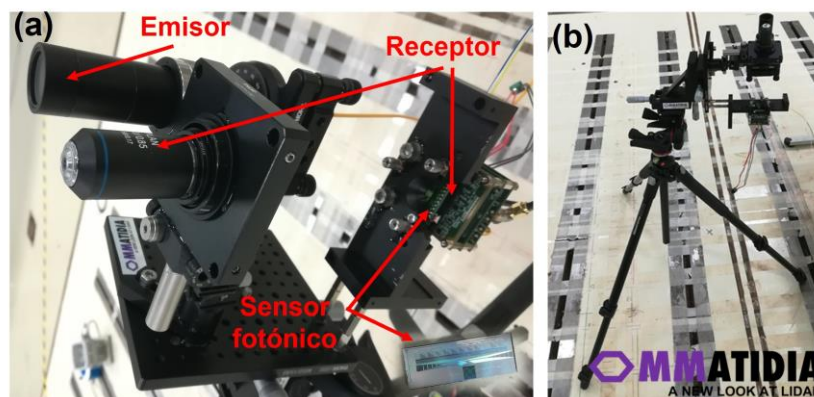


Figura 2. (a) Partes principales del radar láser multicanal (incluyendo imagen del sensor fotónico) y (b) posición de medida del instrumento.

En la Fig. 2, se muestra la configuración del radar láser multicanal, donde se pueden ver todos sus elementos. El emisor, formado por un láser continuo con frecuencia modulada, un

colimador y un elemento óptico difractivo, que se encarga de iluminar el reflector con 100 haces (10x10 haces) de luz infrarroja. La luz reflejada en los 100 puntos iluminados del reflector es detectada por el receptor, formado por un objetivo estándar, para aumentar el campo de visión del instrumento, y el sensor fotónico que recibirá la luz del objetivo y la mezclará con la luz de referencia. El acople de la luz reflejada, el guiado y mezclado de esta en el interior del chip se lleva a cabo mediante acopladores y guías de onda que forman parte del sensor fotónico. Finalmente, la mezcla se envía a un fotodetector para llevar a cabo el procesamiento de señal en un miniordenador, que dará lugar a una medida de distancia para cada uno de los 100 puntos iluminados. La Fig. 2(b) muestra el instrumento en su posición de medida. Este se encuentra en el suelo, a 4 m del centro del reflector y apuntando hacia arriba. Además, se utilizó un trípode para su mayor estabilidad.

La toma de medidas se realizó en remoto, desde un ordenador externo conectado al miniordenador del radar láser multicanal. Para ello, una vez alineados todos los haces con los marcadores colocados en el reflector, el instrumento quedó fijo y la toma de medidas y los parámetros de estas, tales como potencia óptica, tiempo de integración, frecuencia de modulación, etc. pueden variarse en remoto desde el software de control del instrumento. La toma de medidas de los 100 puntos podía variar entre 0.5 s a 2 s, aunque se realizaron tomas más largas de hasta 10 minutos para el análisis de la estadística de las medidas, en el que se analiza la repetibilidad de la distancia medida de un conjunto de muestras para cada uno de los 100 puntos adquiridos. Finalmente, como resultado, se obtienen medidas de distancia para cada uno de los 100 puntos, que con las direcciones conocidas de los 100 haces de luz, se determinan sus coordenadas (X, Y, Z). Esto se realiza en el miniordenador del instrumento.

Fotogrametría de alta precisión de corto alcance

La fotogrametría de rango cercano realizada por la UPV ha sido utilizada para reconstrucciones 3D de distintos tipos de escenarios, como por ejemplo de patrimonio cultural arqueológico [12, 13]. La fotogrametría de corto alcance ofrece la posibilidad de medir con muy alta precisión si se ejecuta una adecuada planificación y equipamiento.

Así, con el reto que supone la caracterización de reflectores desplegados grandes, el instrumental seleccionado para ello fue el siguiente: Cámara Canon EOS 5DS R, con sensor CMOS de tamaño completo, 50 MP de resolución, teleobjetivo Canon EF 70-300 mm, una línea base estereoscópica de 0.80 m, cabezales panorámicos y un juego de mira invar de aproximadamente 1 m (un carro elevador fue necesario para colocar la barra invar cerca del reflector) (Fig. 3(a)).

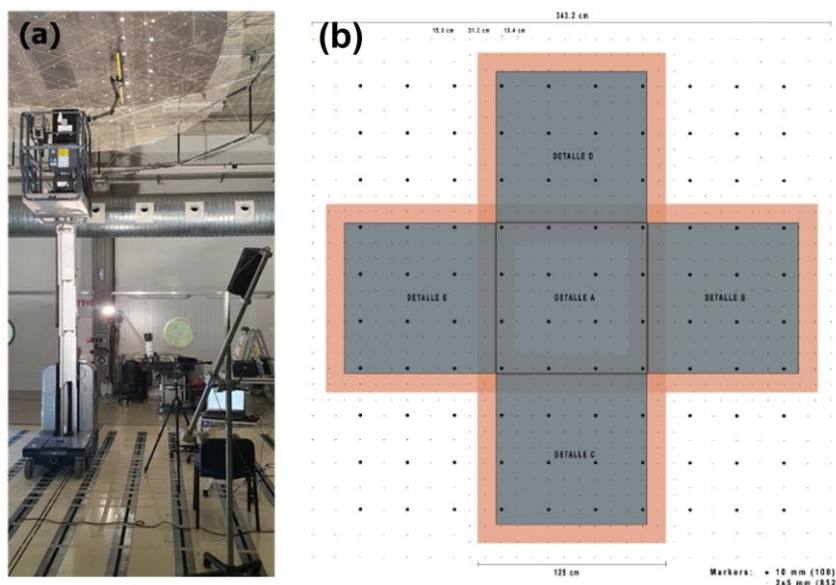


Figura 3. (a) Equipamiento para la toma de medidas de fotogrametría. (b) Distribución de los 10x10 marcadores y planificación de la toma de medidas en 5 sectores.

Además, la captura de datos se planificó teniendo en cuenta que el diseño de la misma condiciona la calidad de los resultados obtenidos posteriormente en la fase de procesamiento. Con el fin de alcanzar la mayor precisión posible, se requirió de un elevado número de imágenes capturadas, por lo que la toma de datos se dividió en 5 sectores, mostrados en la Fig. 3(b). Como resultado, el número de imágenes tomadas para cada sector varió desde 350 a 440 imágenes, haciendo un total de 1877 imágenes. Cada uno de los sectores requirió un tiempo de medida de unas 8 horas de toma de imágenes.

Después de la captura de datos, se procedió con el procesamiento de estos sectores, hasta orientar todas las imágenes adquiridas de los 5 sectores medidos y su fusión en una única solución. Posteriormente, se realizó el ajuste de haces en FOTOGIFLE, un software fotogramétrico para la construcción de modelos 3D desarrollado por el grupo de la UPV [14]. Finalmente se procede a la orientación absoluta del modelo mediante una transformación afín y la obtención de las coordenadas (X, Y, Z) de cada uno de los centros de los 64 marcadores medidos. Los errores para cada punto se obtienen a través de la matriz varianza-covarianza del ajuste de haces de rayos, derivándose la desviación estándar de las coordenadas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección, analizamos y discutiremos los resultados obtenidos en las campañas de medida con el radar láser multicanal para el espacio y la fotogrametría de corto alcance.

Primeramente, es importante aclarar que con la fotogrametría de corto alcance se obtuvieron medidas de las coordenadas de los centros de los marcadores codificados, mostrados en la Fig. 1(b). Sin embargo, con el radar láser multicanal se obtuvieron las coordenadas de puntos dentro de cada uno de los marcadores, no necesariamente coincidentes con los puntos medidos con fotogrametría. Por lo tanto, la comparativa entre ambas técnicas contra los marcadores fue descartada y se mostrarán los errores de medida asociados a cada una de las técnicas por separado. En trabajos posteriores, se trabajará para hacer una comparativa entre ambas técnicas con el fin de establecer una calibración del nuevo instrumento desarrollado.

En la campaña de medidas con el sistema de fotogrametría de corto alcance de la UPV, los resultados obtenidos en los 64 puntos medidos (5 zonas, 4 x 4 marcas) muestran una media de alrededor de 4 μm de error (desviación estándar) en distancia, con errores máximos de menos de 8 μm . Estos excelentes resultados fueron obtenidos haciendo uso de una minuciosa planificación e instrumentación de alta calidad, así como dos operadores expertos y sesiones de hasta 8 horas. Aunque para caracterización en tierra, esta tecnología ofrece muy buenas prestaciones, es claramente incompatible con medidas en órbita.

Por su lado, los resultados del radar láser multicanal ofrece unos resultados prometedores, no muy lejos de los ofrecidos por la fotogrametría. Sin embargo, se requiere algo más de madurez del instrumento para obtener su máximo potencial. Aunque el instrumento es capaz de medir 100 puntos, correspondiente a los 100 marcadores colocados sobre el reflector, solo se muestran los errores de medida en los mismos 64 puntos obtenidos con fotogrametría. En la Fig. 4 se muestran la nube de puntos generada. Como se muestra en la Fig. 4, la gran mayoría de los puntos tienen repetibilidades por debajo de las 150 μm . Aunque ahora mismo estos errores son mayores de los que se obtiene con la fotogrametría de corto alcance, el potencial del instrumento se muestra en puntos donde el error en distancia se encuentra por debajo de las 50 μm (más de la mitad), llegando incluso a las 10 μm . Otros puntos con errores por encima del milímetro están asociados a puntos donde la intensidad de la luz reflejada y capturada por el sensor no fue suficiente para producir resultados fiables. Estos puntos muestran una relación señal-ruido por debajo de los 20 dB con respecto al punto de mayor intensidad. De hecho, en estos casos el comportamiento de la estadística se desvía del gaussiano, lo cual resulta en la variabilidad mayor que se observa.

En cualquier caso, las ventajas de este instrumento para su uso en el espacio con respecto a otros comerciales son su capacidad de realizar medidas en remoto y casi en tiempo real (menos de 2 s), sin partes móviles, así como sus reducidas dimensiones y peso (<3 kg) requeridos para un sistema de medida espacial. Además, es importante destacar que adquisiciones de 100 puntos de forma paralela no es el límite de la tecnología, sino que depende de la plataforma utilizada para la fabricación del sensor de fotónica integrada. Para este proyecto el sensor fotónico ha sido fabricado en nitrato de silicio, pero diseños preliminares en silicio muestran que el número de puntos de medida puede llegar hasta los 12000 puntos.

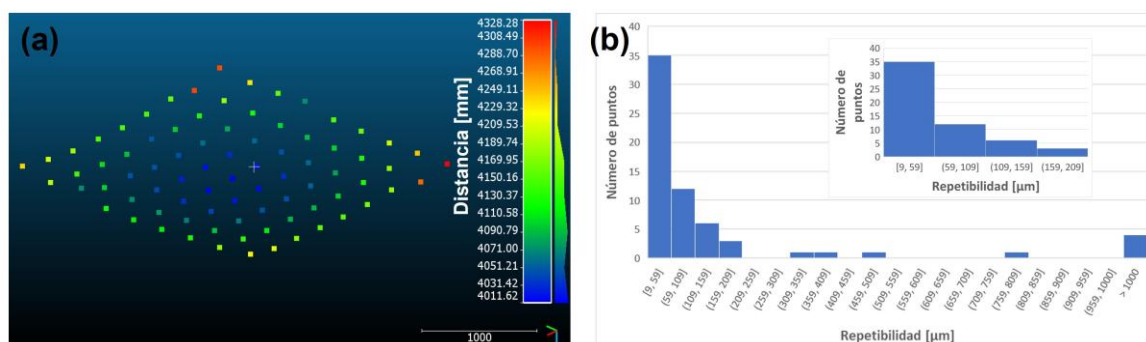


Figura 4. (a) Nube de puntos del reflector desplegable obtenida con el radar láser multicanal. (b) Resultados de repetibilidad del instrumento.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo hemos demostrado las capacidades de dos instrumentos de metrología para medir grandes reflectores desplegables a distancias largas. Se ha demostrado que, con la instrumentación y planificación adecuada, la fotogrametría de corto alcance de la UPV es

capaz de obtener errores de medida por debajo de las 8 μm . Por su lado, con el radar láser multicanal, desarrollado para TRL 4 en el espacio, se obtuvieron errores de medida por debajo de las 150 μm , llegando incluso a las 10 μm en los puntos con mayor intensidad. La completa caracterización del reflector se realizó en cuestión de segundos y las medidas pueden hacerse en remoto por un operador no experto. El desarrollo de este instrumento de metrología espacial es un paso hacia adelante para la caracterización de reflectores desplegables en órbita. Sigüientes pasos incluyen nuevas medidas en condiciones más significativas de operación en el espacio, incluyendo su operación en condiciones de radiación o en cámaras de vacío térmico.

5. REFERENCIAS

- [1] K. N. Urata, J. T. Sri Sumantyo, C. E. Santosa, and T. Viscor. "Development of an L-band SAR microsatellite antenna for earth observation". Aerospace, 5(4) (2018).
- [2] M. Chandra, et al. "A review on developments of deployable membrane-based reflector antennas." Advances in Space Research 68.9 (2021).
- [3] Copernicus Sentinel.
www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Copernicus_Sentinel_Expansion_missions
- [4] X. Qi, H. Huang, B. Li, and Z. Deng. "A large ring deployable mechanism for space satellite antenna". Aerospace Science and Technology, 58, 498-510 (2016).
- [5] J. J. Dumm, M. P. Boyle, and J. P. Clancy. "High-Fidelity Antenna Pattern Modeling with Lidar Characterization". Johns Hopkins APL Technical Digest, 31(3) (2013).
- [6] ESA Space Resources Strategy from sci.esa.int/documents/34161/35992/1567260390250-ESA_Space_Resources_Strategy.pdf
- [7] Página web de Ommatidia LiDAR. <https://ommatidia-lidar.com/>
- [8] Página web de COMET Ingeniería. <https://comet-ingenieria.es/>
- [9] Página web de Tekniker. <https://www.tekniker.es/>
- [10] E. Margallo Balbas, "Apparatus and method for managing coherent detection from multiple apertures in a LiDAR system", U.S. patent 11016195B2 (25 May 2021).
- [11] A. Martin, Aude, et al. "Photonic integrated circuit-based FMCW coherent LiDAR." Journal of Lightwave Technology 36.19 (2018).
- [12] J. L. Lerma, S. Navarro, M. Cabrelles, and V. Villaverd. "Terrestrial laser scanning and close-range photogrammetry for 3D archaeological documentation: the Upper Palaeolithic Cave of Parpalló as a case study". Journal of Archaeological Science, 37(3), 499-507 (2010).
- [13] J. L. Lerma, et al. "Integration of laser scanning and imagery for photorealistic 3D architectural documentation." Laser scanning, theory and applications, 414-430 (2011).
- [14] FOTOGIFLE. https://aplicat.upv.es/exploraupv/ficha-tecnologia/patente_software/15087

6. AGRADECIMIENTOS

El proyecto ha sido financiado por la Agencia Espacial Europea a través del proyecto "In-Orbit Surface Metrology for Large Deployable Reflectors" (Número de contrato: 4000130881/20/NL/RA), en el que se ha desarrollado el instrumento de metrología. Así, los autores agradecen la colaboración durante el proyecto de otras entidades como El Centro de Tecnología e Investigación, Tekniker, y a todos los integrantes, en especial a Borja Pozo y Unai Multiba por su ayuda durante el periodo de medidas en sus instalaciones.