

ESTRATEGÍAS DE MEDICIÓN DE GRANDES VOLUMENES MEDIANTE FOTOGRAMETRÍA

P. Puerto⁽¹⁾ D. Heißelmann ⁽²⁾ S. Müller ^(2,3) A. Mendikute ⁽¹⁾

⁽¹⁾ IDEKO, Basque Research and Technology Alliance (BRTA), Diseño e ingeniería de precisión, Elgoibar

⁽²⁾ Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Braunschweig, Germany

⁽³⁾ Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, Germany

RESUMEN: La creciente importancia de la metrología de grandes volúmenes Large Volume Metrology (LVM) en las aplicaciones industriales exige que se aborden retos como el coste de la medición y las tecnologías fáciles de usar, manteniendo la incertidumbre del proceso de medición y la fiabilidad de las soluciones establecidas. En sectores tan críticos con el transporte (aeronáutico y ferrocarril), bienes de servicio u obras civiles, requieren de un revulsivo para liberar carga de trabajo en sus departamentos metrológicos.

En este trabajo, el Reference Wall del PTB, artefacto usado para evaluar en grandes volúmenes la incertidumbre de sistemas láser, se utiliza como referencia para estudiar las capacidades de medición de la fotogrametría portátil, en función de las diferentes condiciones de medición y simulando el comportamiento de los usuarios inexpertos y expertos. Para ello, previamente se ha realizado una serie de pruebas a pequeña escala para demostrar las normas básicas de la fotogrametría para llevar a cabo medidas.

1. INTRODUCCIÓN

La medición de volúmenes de gran tamaño (a partir de 3 m³) con gran precisión (menos de k=1 +/-0,1 mm) () es un reto para varias industrias, como la aeroespacial, la de bienes de equipo, la energética y la de ingeniería en general[1]. Todos ellos necesitan una tecnología fiable, por lo que suelen confiar en los sistemas de medición basados en el láser tracker. La precisión de dicho sistema no se pone en duda debido a que la norma ISO 10360-10:2016 lo respalda [2]. Los inconvenientes de dicha tecnología son el coste del equipo y que requiere además de usuarios formados para su uso e interpretación de resultados [3],[4].

Una alternativa es la fotogrametría portable usando marcadores ópticos. Estos sistemas son menos costosos y no requieren de una formación exhaustiva. Debido a que no son tan extendidos a nivel industrial, las comparativas entre sistemas se basan en una guía de uso VDI/VDE 2634 parte1. Esta guía indica como crear un artefacto en forma de cubo compuesto de barras calibradas. Sin embargo, las exigencias de precisión para estas barras complican la construcción de artefactos mayores de 2 metros de longitud [5]. Este es el primer inconveniente que frena la expansión de esta tecnología, ya que los clientes requieren conocer la incertidumbre del proceso de medición en similares condiciones a las reales. A diferencia de otras tecnologías donde la extrapolación es posible, en este caso no es válida, ya que se puede ver afectada por la estrategia de medición seguida.

La estrategia de medición es el segundo aspecto clave a superar por esta tecnología para su implantación en los departamentos metrológicos. Se requiere de un análisis de dicha incertidumbre al medir en grandes distancias en función de las estrategias de medición seleccionadas.

En esta investigación, se afrontan ambos retos: la medición de un artefacto de suficiente longitud y el estudio de la influencia de las estrategias de medición en la incertidumbre del proceso. IDEKO aporta el sistema fotogramétrico VSet y Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) realiza las mediciones en su instalación, en concreto en el *Reference Wall*. Este artefacto consta

de varias barras, entre las que destacan dos de sus diagonales de aproximadamente 12 m, y además permite el uso de marcadores ópticos.

Este documento se divide en una primera sección, donde se presenta el instrumental utilizado, a continuación se describen los ensayos realizados, los resultados obtenidos y se cierra con un apartado de conclusiones.

2. DESCRIPCIÓN DEL INSTRUMENTAL

Antes de explicar la metodología seguida y los resultados obtenidos, se describe brevemente el instrumental utilizado. Se ha empleado el sistema fotogramétrico desarrollado por IDEKO para SORALUCE pero tanto los componentes como las reglas aplicadas son comunes a otros sistemas fotogramétricos del mercado.

El elemento de medición es una cámara digital que toma imágenes de marcadores, es una cámara réflex Nikon D500 con un flash macro que se auto calibra durante el proceso de medición [6]. Parte de estos marcadores son codificados para facilitar la resolución de la posición de la cámara y el emparejamiento entre imágenes. En el caso del Vset, se ha optado por unas piezas con forma de semiesfera con marcadores en toda su superficie para facilitar el emparejamiento (ver Figura 1 a). Además hay marcadores no codificados que normalmente se utilizan para medir las superficies de interés. Para facilitar la segmentación de la imagen se utilizan marcadores retro-reflectantes y la iluminación del flash, esta combinación consigue captar los marcadores sobre un fondo prácticamente negro. Estos marcadores pueden utilizarse en formato pegatina o magnético. Para esta investigación se han utilizado unas semiesferas de la empresa HUBBS que pueden utilizarse en los nidos del artefacto (ver Figura 1 b).

Los elementos que aportan la trazabilidad a la medida son las barras de escala que previamente se han medido. El VSet está compuesto por 6 barras de escala, que se pueden utilizar por dos lados por lo que dan un total de 12 barras. En este caso se han medido en un tridimensional con un cabezal de visión (ver Figura 1 d).

El último elemento es la cruceta, que es el origen de la medición (ver Figura 1 c): Está compuesta por 6 marcadores para definir los ejes XYZ, este elemento está medido en una máquina tridimensional y ayuda en las fases previas de la resolución, pero no aporta trazabilidad a la medida.

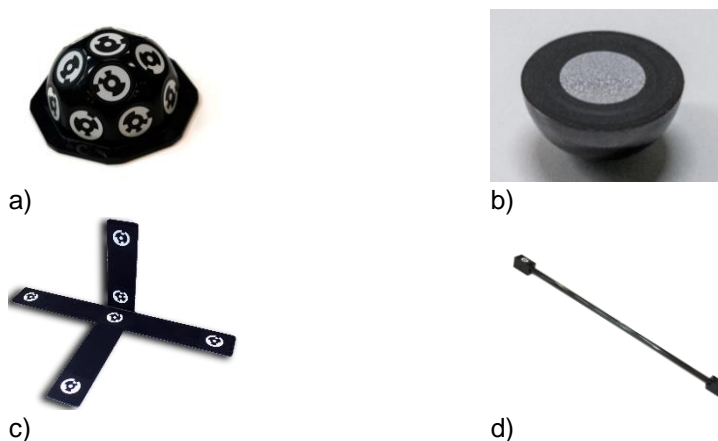


Figura 1. Elementos que conforman un sistema fotogramétrico: a) El elemento auxiliar en forma de iglú con marcadores codificados. En la parte inferior hay tres imanes para la fijación en piezas de acero. b) Un marcador retro-reflectante en una semiesfera para el uso con los nidos de la *Reference Wall*. c) Cruceta que proporciona el origen del sistema de

coordenadas. d) Las barras de escala se miden previamente, y su función es garantizar la escala correcta de la escena

Para la contrastación experimental se ha empleado el *Reference Wall* en las instalaciones del PTB. Desde 2011, PTB ha utilizado una antigua instalación nuclear para evaluar las capacidades de medición de longitud de los láser trackers, que son sistemas de medición de coordenadas (CMS), populares en la metrología de gran volumen. Las pruebas del error de medición de longitud siguen la norma establecida ISO 10360-10:2016 y la directriz VDI/VDE 2617, parte 10. Ambas requieren mediciones de artefactos que abarcan un volumen definido, realizadas desde una única posición, o la medición de artefactos 2D desde al menos siete posiciones especificadas para derivar un error de medición de longitud volumétrica del láser tracker. PTB ha optado por aplicar este último método. La llamada *Reference Wall* comprende un conjunto de 15 nidos magnéticos montados en una pared dedicada en el edificio del reactor nuclear retirado de PTB, creando así un artefacto 2D a gran escala (véase la Figura 2). Los nidos magnéticos se fijan a la pared mediante un conjunto de diferentes elementos de resorte para garantizar un montaje sin tensiones, mientras que están conectados por varillas huecas reforzadas con fibra de carbono, que poseen tanto un bajo peso como un coeficiente de dilatación térmica muy bajo de sólo $\alpha = -1,0 \cdot 10^{-6} \dots -1,2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Cada uno de los nidos magnéticos está diseñado para albergar un objetivo esférico de 1,5" de diámetro, que puede ser posicionado de forma repetible en tres cuñas en su perímetro. Para las diferentes aplicaciones se dispone de una variedad de objetivos, como esferas de acero pulidas y grabadas, esferas recubiertas de tiza y retro-reflectantes montados en esferas.



Figura 2. Una fotografía del muro de referencia de PTB con los objetivos y marcadores instalados para el sistema de fotogrametría probado. La longitud máxima es de aproximadamente 12 m (diagonales).

La construcción del *Reference Wall* permite calibrar las longitudes entre los nidos con una incertidumbre de calibración comparativamente baja a su longitud. Para ello, las longitudes individuales se unen en 5 grupos, que representan una línea vertical (línea A), dos líneas diagonales (líneas B y C), así como dos líneas horizontales (líneas D y E) a diferentes alturas de la pared. Las líneas combinan tres o cuatro nidos, es decir, dos o tres longitudes calibradas, respectivamente. La longitud de cada una de las líneas diagonales B y C es de aproximadamente 12 m, mientras que las líneas A, D y E son de unos 3 m, 10 m y 6 m, respectivamente.

La calibración de las longitudes se realiza mediante un interferómetro láser de seguimiento automático. El interferómetro está equipado con un sistema de monitorización ambiental que incluye sensores de temperatura del aire, presión ambiental y humedad relativa. Estos sensores

y la frecuencia de la fuente de luz del láser se calibran periódicamente en los laboratorios de PTB, garantizando así un resultado de calibración trazable. Las longitudes medidas se corrigen en función de las influencias ambientales sobre el índice de refracción del aire siguiendo el trabajo de Edlén, [7] y las ecuaciones refinadas de Bönsch & Potulski [8]. La incertidumbre de calibración de las longitudes de la pared de referencia es de 20 μm ($k = 2$) o mejor. En ningún caso PTB cede estas mediciones por lo que IDEKO solo conoció las desviaciones en absoluto.

3. METODOLOGÍA

Para el uso correcto de la fotogrametría se requiere de la aplicación de una serie de reglas básicas para obtener la menor incertidumbre que pueda alcanzar este equipo. En esta investigación se van a centrar en dos reglas en concreto. La disposición de elementos auxiliares para una correcta resolución de la posición de la cámara y la adquisición de imágenes desde un ángulo de vista suficiente.

En el primer caso, los elementos auxiliares permiten la medición de marcadores fuera de la escena inicial. Se debe conseguir un suficiente solape entre los nuevos elementos y los iniciales para que las nuevas áreas medidas estén correctamente referenciadas. Además, la disposición de los mismo debe cubrir en la medida de lo posible toda la imagen.

Además se requiere que el ángulo entre imágenes sea lo suficientemente abierto para poder calcular la perspectiva de la escena. En caso de adquirir fotos desde el mismo punto de vista, se pierde la información para poder calcular la perspectiva del mismo modo que a un francotirador o a un fotógrafo de larga distancia le cuesta indicar la distancia a la que está el elemento observado.

Se han realizado una serie de pruebas a pequeña escala para demostrar estos dos conceptos. En primer lugar se ha realizado una prueba utilizando elementos auxiliares concentrados en una esquina de la imagen (ver Figura 3 a))o repartidos a lo largo de la imagen al captar un extremo de la imagen(ver Figura 3 b)).

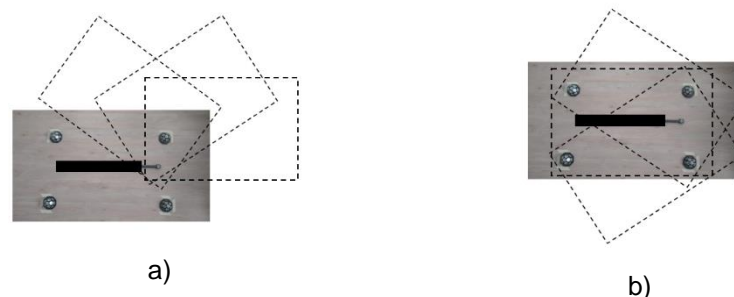


Figura 3. Relevancia de los elementos auxiliares: a) La pose de cámara débil se resuelve a partir del uso de un elemento auxiliar. b) Sólo se puede obtener una pose de cámara robusta, cuando se han tomado tres o más elementos auxiliares en las fotografías (líneas discontinuas)

Los resultados de la Tabla 1 muestran la relevancia del uso de esta regla. Es cierto que se ha forzado un caso extremo al ejecutar estas mediciones.

LME σ (+/- mm) k=2	
Utilización <u>incorrecta</u> de los elementos auxiliares	0.662
Utilización <u>correcta</u> de los elementos auxiliares	0.102
\bar{x} (mm)	
Utilización <u>incorrecta</u> de los elementos auxiliares	-0.110
Utilización <u>correcta</u> de los elementos auxiliares	-0.039

Tabla 1. Comparación para comprobar la influencia de los elementos auxiliares con respecto a la desviación estándar del LME máximo y la media del error máximo

En segundo lugar, se ha realizado una prueba sacando fotos desde prácticamente el mismo punto de vista y a continuación se han tomado fotos formando virtualmente un cono con el vértice en la zona de medición. IDEKO está desarrollando un sistema de visualización de la incertidumbre que muestra la dirección de la misma debido al punto de vista, durante el proceso de adquisición. Es una herramienta muy útil para cumplir esta recomendación de adquisición (ver Figura 4).

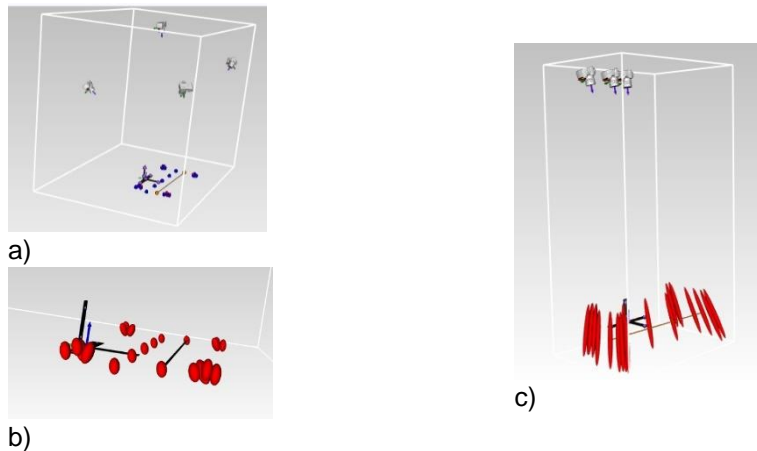


Figura 4. Relevancia de la disposición de la cámara. a) Una disposición eficiente genera una incertidumbre estrecha (elipses rojas) b) Zoom de a). c) Mide elementos como a) pero una red deficiente y produce una incertidumbre considerablemente mayor

Los resultados mostrados en la Tabla 2 muestran una menor influencia que con la regla anterior pero la diferencia en un escenario tan pequeño muestra la relevancia de esta norma.

LME σ (+/- mm) k=2	
Deficiente punto de vista	0.236
Eficiente punto de vista	0.074
\bar{x} (mm)	
Deficiente punto de vista	0.264
Eficiente punto de vista	0.072

Tabla 2. Comparación entre los ensayos experimentales y los simulados para comprobar la influencia del punto de vista captado de las imágenes

Una vez comprobadas ambas reglas, se procede al diseño de los diferentes escenarios para medir el *Reference Wall*. En la Tabla 3 se muestran los cuatro escenarios estudiados donde se combinaron dos a dos cada una de las reglas indicadas:

Elementos auxiliares:

- En el caso de la utilización incorrecta de los elementos auxiliares, se puso un número alto de elementos auxiliares para tener la oportunidad de sacar cada marcador a resolver, solo utilizando un elemento auxiliar (ver Figura 1 a).
- En el caso de uso correcto de los elementos auxiliares, se forzó la casuística opuesta. Se dispondrá de pocos elementos auxiliares para que se resuelva cada posición de los marcadores con elementos auxiliares separados.

Punto de vista:

- Para realizar un eficiente punto de vista, se intentó resolver cada posición del *Reference Wall* con puntos de vista en forma de cono (ver Figura 4).
- En el caso opuesto, se tomaron las fotos desde prácticamente la misma posición.

	Eficiente punto de vista	Deficiente punto de vista
Utilización <u>incorrecta</u> de los elementos auxiliares	Escenario 1	Escenario 2
Utilización <u>correcta</u> de los elementos auxiliares	Escenario 3	Escenario 4

Tabla 3. Los escenarios planteados

Para analizar la repetibilidad del proceso, se repetirá cada escenario 3 veces.

Se debe apuntar que por la normativa interna del PTB no se conoce el sentido del error cometido. Por esta razón, se considerará que no hay errores sistemáticos y los errores provienen de fuentes aleatorias.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 5 se muestra un histograma de los errores de las tres tandas para cada uno de los escenarios. El mejor resultado se obtiene en el escenario 3, que consta de una técnica de captura de imágenes desde un punto de vista eficiente y un uso correcto de los elementos. El *length maximum error* (LME) es de 0.729 mm siendo de 0.382 mm en el mejor caso de los tres con una desviación $K=2$ de 0.190 mm. En el lado opuesto es el escenario 2 con una utilización incorrecta de los elementos auxiliares y una toma de imágenes desde similares puntos de vista. Para este escenario los peores resultados son 0.701mm de desviación $k=2$ y 1.281mm de error máximo. De tres a cuatro veces peores que el mejor escenario.

Estos resultados demuestran la influencia de la estrategia de medida en la incertidumbre de medición.

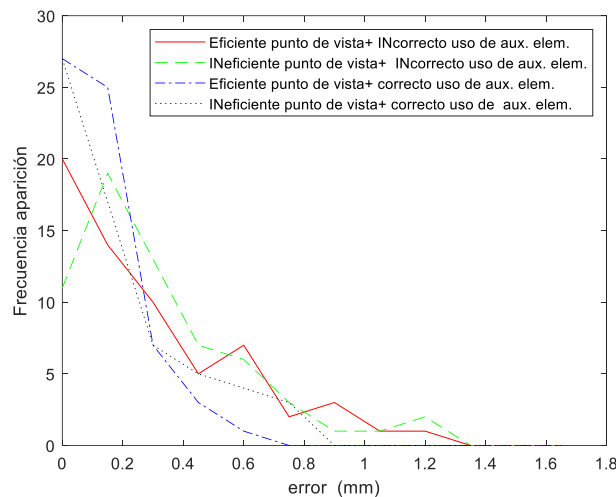


Figura 5. Histórico del error cometido en las medidas del RW utilizando fotogrametría bajo cuatro supuestos.

Para el cálculo de la incertidumbre de este sistema se han considerado la resolución, la incertidumbre de la medición y la incertidumbre del patrón.

La división de escala del sistema se considera despreciable frente al resto de incertidumbre del sistema. En cuanto la incertidumbre del patrón se debe no solo considerar la incertidumbre de las barras sino también la incertidumbre del marcador. Esta incertidumbre del marcador se estima menor de 0,0127 mm y debido a que son dos se debe sumar esta desviación. En lo relativo a la incertidumbre de medición es la mencionada en el punto de arriba.

$$U = k \sqrt{u_0^2 + s_d^2 + \frac{E^2}{12}}$$

$$U = 2\sqrt{0.00245^2 + 0.095^2} = 0.190 \text{ mm}$$

5. CONCLUSIONES

En este artículo sobre fotogrametría portable se presenta un estudio de diferentes metodologías y su reflejo en la incertidumbre del proceso de medición de piezas de grandes volúmenes. Se parte de un estudio de las reglas básicas de medición mediante esta técnica y como aplicarlas en un artefacto de dimensiones conocidas.

Se observa que tanto la distribución de los elementos auxiliares como el punto de vista de la cámara es relevante para la incertidumbre del sistema. En el primer caso, se debe utilizar correctamente los elementos auxiliares para evitar una incorrecta asociación entre diferentes imágenes. En segundo lugar, se debe tomar imágenes desde diferentes puntos de vista de los objetos a medir para reducir la incertidumbre del proceso de medición.

Se concluye este artículo con la propuesta de cálculo de incertidumbre de este sistema fotogramétrico que puede ser trasladable a otros sistemas fotogramétricos. Esta propuesta sugiere una nueva metodología para el cálculo de la incertidumbre en sistemas fotogramétricos,

utilizando un elemento de referencia para actualmente se usa para verificar sistemas capaces de medir en el mismo rango dimensional.

6. REFERENCIAS

- [1] Savio, E. , Chiffre, L. De , and Schmitt, R. Metrology of freeform shaped parts. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 2007, 56, 810–835.
- [2] Hughes, B., Forbes, A., Sun, W., Veal, D., and Nasr, K. Determination of misalignment and angular scale errors of a laser tracker using a new geometric model and a multi-target network approach. (2011).
- [3] Luhmann, T.; Robson, S.; Stephen, K.; and Harley, I. Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging. De Gruyter: 2013.
- [4] Galetto, M. , Mastrogiacomo, L. , and Pralio, B. MScMS-II: An innovative IR-based indoor coordinate measuring system for large-scale metrology applications. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2011, 52, 291–302.
- [5] Martin, O. C. , Robson, S. , Kayani, A. , Muelaner, J. E. , Dhokia, V. , and Maropoulos, P. G. Comparative Performance between Two Photogrammetric Systems and a Reference Laser Tracker Network for Large-Volume Industrial Measurement. *Photogrammetric Record* 2016, 31, 348–360.
- [6] Mendikute, A. , Leizea, I. , Yagüe-Fabra, J. A. , and Zatarain, M. Self-calibration technique for on-machine spindle-mounted vision systems. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation* 2018, 113, 71–81.
- [7] Edlén, B. The refractive index of air. *Metrologia* 1966, 2, 71–80.
- [8] Bönsch, G. and Potulski, E. Measurement of the refractive index of air and comparison with modified Edlén's formulae. *Metrologia*. , 35(2) , 133–139. (1998).

7. AGRADECIMIENTOS

Se agradece a SORALUCE por la cesión del equipo para la realización de las pruebas realizadas en las instalaciones del PTB.