

Trazabilidad en Microscopía Tridimensional en Entornos Industriales

Alberto Mínguez-Martínez ^{(1,2)*}, Jesús de Vicente y Oliva ^(1,2)

⁽¹⁾ Laboratorio de Metrología y Metrotecnica (LMM), ETSI Industriales de Madrid (ETSII), Universidad Politécnica de Madrid, José Gutiérrez Abascal, 2, 28006 Madrid, España.

⁽²⁾ Centro Láser, Universidad Politécnica de Madrid, Campus Sur, Edificio "La Arboleda", c./Alan Turing, 1, 28031 Madrid, España.

* Teléfono: 637197575; Correo electrónico: a.minguezm@upm.es.

RESUMEN: La tendencia actual en la industria es a obtener componentes con unas dimensiones cada vez menores. Por ello, tanto en los centros de investigación como en la industria se está extendiendo el uso de instrumentos de medida ópticos 2,5D, es decir, microscopios de medida que permiten llevar a cabo mediciones en el plano XY, como un microscopio convencional, pero incorporando un campo de medida más reducido en el eje Z. Debido a esto, uno de los retos a los que se va a tener que enfrentar la metrología dimensional en los próximos años será dotar de una trazabilidad adecuada a este tipo de instrumentos de medida. En este documento se expone una posible solución al problema de dotar de trazabilidad adecuada a las medidas dimensionales llevadas a cabo en microscopios 2,5D en entornos industriales. Este procedimiento está basado en la determinación de una función modelo y el cálculo de las incertidumbres de uso para estas medidas.

1. INTRODUCCIÓN

Durante la revolución electrónica que tuvo lugar entre finales de la década de 1960 y principios de la década de 1970 nació el concepto de miniaturización [1, 2]. La introducción de este concepto hizo que los procesos de fabricación tuvieran que ser adaptados para poder producir piezas y productos con dimensiones inferiores al milímetro con suficiente calidad. Como respuesta a esta necesidad, se desarrollaron tecnologías como, por ejemplo, la Fabricación Aditiva (FA), que nació en la década de 1980 [3].

Antes de poder ser usados, los diferentes productos deben someterse a un control de calidad. Este proceso, entre otros pasos, incluye un análisis dimensional, paso en el que se pretende determinar si las diferentes características dimensionales de las piezas coinciden con las del modelo o plano de referencia. De acuerdo con Sladek en [4], esta situación hace que los fabricantes hayan tenido que manejar conceptos como incertidumbre, calibración y trazabilidad metrológica. Estos conceptos se definen en el Vocabulario Internacional de Metrología (VIM) [5] como:

- La **incertidumbre de medida** se define como “*el parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores atribuibles a un mensurando, a partir de la información que se utiliza*”.
- La **calibración** se define como “*operación que bajo condiciones especificadas establece, una relación entre los valores y sus incertidumbres de medida asociadas obtenidas a partir de los patrones de medida, y las correspondientes indicaciones con sus incertidumbres asociadas y utiliza esta información para establecer una relación que permita obtener un resultado de medida a partir de una indicación*”.
- La **trazabilidad** se define como “*la propiedad de un resultado de medida por la cual el resultado puede relacionarse con una referencia mediante una cadena ininterrumpida y documentada de calibraciones*”.

Uno de los métodos de medida más utilizado es la Medición por Coordenadas (MC). De acuerdo con las definiciones recogidas en la norma ISO 10360-1 [6], la MC consiste en determinar las coordenadas espaciales de la superficie de las piezas. Los instrumentos de medida que funcionan bajo este principio se denominan Máquinas de Medición por Coordenadas (MMC). Con una MMC es posible realizar casi cualquier tarea metrológica. Sin embargo, como establecen Leach y Smith en [7], no se puede asegurar que los datos obtenidos midiendo con una MMC son trazables. Para dar trazabilidad “completa” a la MMC sería necesario estimar la incertidumbre de medida para cada una de las tareas metrológicas, lo cual es imposible en la práctica.

A nivel industrial, el problema de dotar de una adecuada trazabilidad a la referencia a las medidas realizadas con un instrumento de medida tiene dos soluciones, principalmente, y varios caminos:

- Trazabilidad a través de piezas patrón. Este es el **método de comparación** está muy extendido para la comparación de bloques patrón longitudinales (BPLs), tal y como se recoge en la norma ISO 3650 [8], y utilizando pizas patrón con respecto a las que se compara en las Máquinas de Medición por Coordenadas (MMCs), siguiendo los principios recogidos en la norma ISO 15530-3 [9]. Consiste en tomar una pieza cuyas dimensiones, características dimensionales e incertidumbres son bien conocidas y se determinan las diferencias existentes con las del mensurando.
- Trazabilidad a través de patrones habituales y estimación de incertidumbres para cada tarea metrológica. Esto se lleva a cabo realizando **medidas directas** sobre las piezas. Para las tareas metrológicas realizadas en MMCs, encontramos tres caminos diferentes, de acuerdo con Płowucha and Jakubiec in [10]:
 - El **método de análisis estadístico**, recogido en la norma ISO 15530-2 que está en desarrollo [11, 12], y que consiste en la repetición de medidas en diferentes condiciones de medida. El problema que presenta este método es que, normalmente, se realizan un número limitado de medidas (usualmente, entorno a 10 repeticiones por cada posición) para la estimación de las incertidumbres.
 - El **método de simulación**, recogido en la norma ISO/DTS 15530-4 [13], consiste en realizar una serie de simulaciones en las que se varían las condiciones de medida y, por el método de MonteCarlo, se estima la incertidumbre. Este método permite obtener muchas más medidas para unas mismas condiciones de medida de forma más económica.
 - El **método del juicio de expertos**, que iba a estar recogido en la actualmente abandonada ISO/TS 15530-5 [14], que es el método GUM tradicional, y que busca determinar una función modelo a partir de la cual se pueda propagar incertidumbres. De acuerdo con la Guía ISO-GUM (JCGM 100:2008) para la expresión de la incertidumbre de medida, los datos experimentales se utilizan para estimar una incertidumbre Tipo B para tareas metrológicas similares [15].

Para trabajar en escalas micro y nano, el problema no tiene una solución clara por el momento, aunque hay varias propuestas. Como establecen el equipo de Cao en [16] y Takaya y Michihata en [17], una posible solución es utilizar micro-MMC, es decir, MMC que pueden obtener medidas tridimensionales por debajo del mm con incertidumbres bajas y gran precisión, como establecen Claverley y Leach en [18]. Sin embargo, estos métodos hay que tener en cuenta que no siempre pueden usarse puesto que el contacto con la pieza puede dañar o modificar la superficie de esta.

Es por eso por lo que, cada vez está más extendido el uso de instrumentos de medida ópticos 2,5D y podrían considerarse una MMC a escala micro. Es importante recordar que la denominación de microscopios ópticos 2,5D hace referencia a que, aunque es un instrumento de medida tridimensional, el campo de medida a lo largo del eje Z es reducido. En este trabajo se utilizará un microscopio confocal LEICA DCM3D con el software SensoSCAN 3.41.0 de SENSOFAR.

Por otro lado, uno de los problemas que hay que afrontar es la disponibilidad de patrones de medida con suficiente precisión, estabilidad dimensional y que se puedan obtener y calibrar con un coste razonable.

En este documento se exponen los resultados que hemos obtenido tanto en los artículos [19] y [20] como en la tesis doctoral [21]. Se trata de una posible solución al problema de dotar de trazabilidad dimensional adecuada a las escalas de un microscopio confocal en entornos industriales. Para ello, se busca una función modelo y se calculan las incertidumbres de uso.

2. DESARROLLO/DESCRIPCIÓN

Para poder dotar de trazabilidad a las escalas de un microscopio confocal, la medida total se descompuso en dos: la medida realizada de manera óptica, en la que solo se mide con el sistema óptico (volumen de medida $1270 \times 952 \times 100 \mu\text{m}^3$), y el sistema mecánico, que incluye la mesa de trabajo y la columna que sostiene el cabezal del microscopio (volumen de medida $80 \times 80 \times 25 \text{ mm}^3$). Como establecemos en [21], la medida global se considerará que es la suma vectorial de las medidas óptica y mecánica. Para cada una de las medidas se propuso una función modelo matricial equivalente, en la cual se tenían que determinar diferentes parámetros para cada medida:

- c_{xy} : que es la desviación relativa de la anchura del píxel respecto al nominal.
- a : que es la diferencia relativa entre las anchuras del píxel entre los ejes X e Y.
- θ : que es el defecto de perpendicularidad entre los ejes X e Y.
- c_z : que es la corrección que hay en el eje Z.

Para estimar estos parámetros, la toma de datos se dividió en tres partes y se conservó la misma estructura:

- Verificación de planitud.
- Calibración de las medidas realizadas en el plano XY.
- Calibración del eje Z.

Una vez estimados los parámetros y definida la función modelo, se llevaba a cabo el balance de incertidumbres para determinar las incertidumbres de uso.

2.1 Medida óptica

En la Figura 1 se muestran los patrones de referencia utilizados para la medida óptica y las posiciones en las que se utilizaron. Estos fueron:

- Para la **verificación de planitud** se usó un patrón plano-paralelo de vidrio (Fig. 1a).
- Para la **calibración del plano XY** se usó una regla patrón de trazos metálica de 1 mm (Fig. 1b).
- Para la **calibración del eje Z** se usó una esfera metálica con un diámetro de 4 mm. Para más información sobre por qué se escogió, consultar el artículo [19] (Fig.1c).

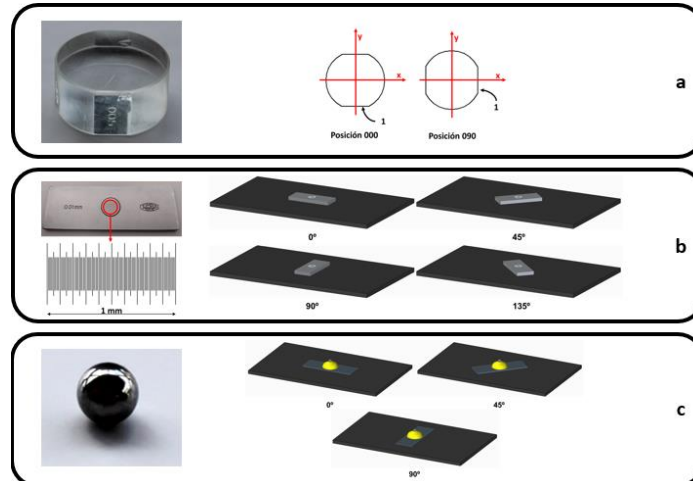


Figura 1. Patrones utilizados en la calibración de la medida óptica

2.2 Medida mecánica

En la Figura 2 se muestran los patrones de referencia utilizados para la medida óptica y las posiciones en las que se utilizaron. Estos fueron:

- Para la **verificación de planitud** se usó un patrón de planitud de vidrio (Fig. 2a).
- Para la **calibración del plano XY**, como al intentar usar una regla patrón de trazos más larga se detectó que la incertidumbre introducida era muy alta, se usó un patrón fabricado a medida diseñado para esta aplicación (Fig. 2b). El motivo se grabó sobre una oblea de silicio monocristalino y pulido mediante tecnología láser y se calibró en un proyector de perfiles.
- Para la **calibración del eje Z** se usó, por un lado, el mismo patrón plano-paralelo de vidrio y, por otro lado, la misma esfera metálica que se utilizó en la calibración de la medida óptica, pero elevándolos con bloques patrón longitudinales que abarcasen todo el recorrido (Fig. 2c).

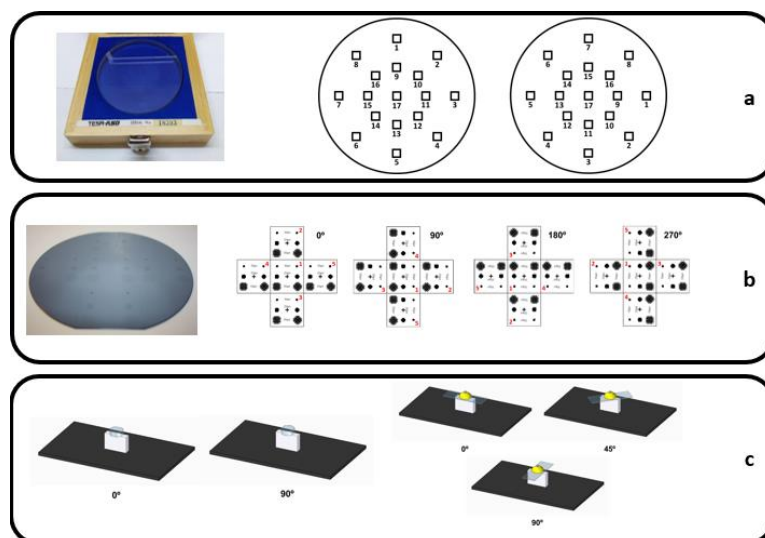


Figura 2. Patrones utilizados en la calibración de la medida mecánica

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados obtenidos

Tras estimar las dos funciones modelo, se estimaron las incertidumbres de uso para cada medida por separado. Se utilizó un factor de cobertura de $k=2$ tal que, de acuerdo con la GUM y con el documento EA 4/02 M 2013 [22].

- Para la **medida óptica** los resultados obtenidos fueron: $U(L_{xy}) \leq 1,9 \mu\text{m} + L_{xy}/1600$ para las medidas punto a punto en el plano XY y $U(h) \leq 2,2 \mu\text{m} + h/120$ para las medidas punto a punto a lo largo del eje Z.
- Para la **medida mecánica** los resultados obtenidos fueron: $U(L_{xy}) \leq 7,8 \mu\text{m} + L_{xy}/3500$ para las medidas punto a punto en el plano XY y $U(h) \leq 2,6 \mu\text{m} + h/133$ para las medidas punto a punto a lo largo del eje Z.
- Posteriormente, se propagaron incertidumbres y se calculó la incertidumbre de uso para la **medida global**. Los resultados obtenidos fueron: $U(L_{xy}) \leq 9,7 \mu\text{m} + L_{xy}/1100$ para las medidas punto a punto en el plano XY y para las medidas punto a punto a lo largo del eje Z no es necesario calcular la incertidumbre expandida porque en la medida mecánica ya está incluida la incertidumbre del objetivo.

3.2 Discusión

Se ha presentado un método de calibración completo que dota de una trazabilidad adecuada a las escalas para las medidas de longitud punto a punto realizadas con un microscopio confocal:

- El procedimiento de calibración es razonablemente simple.
- Se utilizan patrones de referencia fáciles de encontrar y calibrar.
- El procedimiento permite estimar los coeficientes de amplificación, defectos de linealidad y planitud, errores de perpendicularidad, repetibilidades y la diferencia relativa entre las dimensiones del píxel en los ejes X e Y.
- Se consigue una fórmula que da una solución al problema de estimar las incertidumbres para un número finito de tareas metrológicas.
- Permite realizar medidas trazables aprovechando el volumen de medida del instrumento.
- Pone de manifiesto las grandes incertidumbres que puede llegar a introducir el movimiento de la mesa. Las incertidumbres introducidas por el movimiento de la mesa dependen directamente de la calidad de esta.

La metodología propuesta podría usarse para:

- Dotar de trazabilidad a otros instrumentos de medida similares, es decir, que trabajen con imágenes representadas por vóxeles (variación de foco y máquinas de visión).
- Dotar de trazabilidad a las medidas realizadas con instrumentos ópticos 3D en entornos industriales.
- Ofrecer servicios de calibración a la industria.
- Acreditar medidas dimensionales con instrumentación óptica 3D en laboratorios de calibración.

4. CONCLUSIONES

Dada la tendencia actual que existe en entornos industrial a la miniaturización, es necesario utilizar instrumentos de medida capaces de realizar medidas con precisiones entorno al micrómetro. Como los instrumentos de medida por contacto pueden dañar la superficie de las muestras, cada vez está más extendido el uso de instrumentos de medida ópticos (microscopios) capaces de tomar medidas a lo largo del eje Z. Como el campo de medida en Z suele ser reducido, se conocen como microscopios 2,5D. Sin embargo, el problema de dotar de una trazabilidad adecuada a las medidas realizadas con estos instrumentos está aún por resolver.

En este artículo se propone un método de calibración de un microscopio confocal, utilizando patrones fáciles de encontrar y calibrar en entornos industriales, y se presentan los resultados obtenidos del balance de incertidumbres, determinando las incertidumbres de uso para los diferentes tipos de medidas que se pueden realizar con los microscopios confocales.

El procedimiento, que pretende ser sencillo y accesible, pone de manifiesto las grandes incertidumbres que introduce la mesa cuando se mueve. Probablemente, con una mesa mejor, las incertidumbres obtenidas sean más reducidas.

5. REFERENCIAS

- [1] A. Frazier, R. Warrington y C. Friedrich, "The miniaturization technologies: past, present, and future", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 42, nº 5, pp. 423 - 430, 1995.
- [2] M. Madou, "Scaling, Actuators, and Power in Miniaturized Systems" de *Fundamentals of Microfabrication, The Science of Miniaturization*, 2nd edition ed., Boca Raton, CRC Press, 2002, pp. 407-448.
- [3] K. Wong y A. Hernandez, "A Review of Additive Manufacturing" *ISRN Mechanical Engineering*, vol. 2012, nº Article ID 208760, p. 10, 2012.
- [4] J. Sladek, *Coordinate Metrology. Accuracy of Systems and Measurements*, 1 ed., Berlin: Springer, 2016.
- [5] Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM), *International Vocabulary of Metrology (VIM)*, 3 ed., Paris: JCGM Publications, 2012.
- [6] International Organization for Standardization (ISO), *10360-1:2000 - Geometrical Product Specifications (GPS). Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM). Part 1: Vocabulary*, Geneva: ISO Publications, 2000.
- [7] R. Leach y S. Smith, *Basics of Precision Engineering*, CRC Press, 2018.
- [8] International Organization for Standardization (ISO), *3650:1998 - Geometrical Product Specifications (GPS) - Length standards- Gauge blocks*, Geneva: ISO Publications, 1998.
- [9] International Organization for Standardization (ISO), *15530-3:2004 (ISO/TS) - Geometrical product specifications (GPS). Coordinate measuring machines (CMM): Technique for determining the uncertainty of measurement. Part 3: Use of calibrated workpieces or standards*, Geneva: ISO Publications, 2005.
- [10] W. Płowucha y W. Jakubiec, "Proposal for changes in the ISO 15530 series of standards", Cluj-Napoca, Romania, 2012.
- [11] International Organization for Standardization (ISO), *15530-2 (ISO/DTS) - Geometrical product specifications (GPS). Coordinate measuring machines (CMM): Technique for determining the uncertainty of measurement. Part 2: Use of multiple measurement strategies in measurements of artefacts*, Geneva: ISO Publications.
- [12] M. Bartscher, M. Neukamm, U. Hilpert, U. Neuschaefer-Rube, F. Härtig, K. Kniel, K. Ehrig, A. Staude y J. Goebbels, "Achieving Traceability of Industrial Computed Tomography", *Key Engineering Materials*, vol. 437, pp. 79-83, 2010.

- [13] International Organization for Standardization (ISO), *15530-4:2008 (ISO/TS) - Geometrical product specifications (GPS). Coordinate measuring machines (CMM): Technique for determining the uncertainty of measurement. Part 4: Evaluating task-specific measurement uncertainty using simulation*, Geneva: ISO Publications, 2008.
- [14] Evaluating Uncertainty in Coordinate Measurement (EUCOM), “Objectives”, EUCOM-EMPIR, [En línea]. Available: <https://eucom-empir.eu/about/objectives/>. [Último acceso: 02 03 2022].
- [15] Joint Committee for Guides in Metrology, Working Group 1 (JCGM/WG1), “JCGM 100:2008 Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM)”, Paris: JCGM Publications, 2008.
- [16] S. Cao, U. K.-B. T. Brand, W. Hoffmann, H. Schwenke, S. Bütefisch y S. Büttgenbach, “Recent developments in dimensional metrology for microsystem components”, *Microsystem Technologies*, vol. 8, pp. 3-6, 2002.
- [17] Y. Takaya y M. Michihata, “Optical Micro-CMM”, de *Metrology. Precision Manufacturing.*, Singapore, Springer, 2019.
- [18] J. Claverley y R. Leach, “A review of the existing performance verification infrastructure for micro-CMMs”, *Precision Engineering*, vol. 39, pp. 1-15, 2015.
- [19] A. Mínguez Martínez y J. de Vicente y Oliva, “Industrial Calibration Procedure for Confocal Microscopes”, *Materials*, vol. 12, nº 4137, 2019.
- [20] A. Mínguez Martínez, C. Gómez Pérez, D. Canteli Pérez-Caballero, L. Carcedo Cerezo y J. de Vicente y Oliva, “Design of Industrial Standards for the Calibration of Optical Microscopes”, *Materials*, vol. 14 (1), nº 29, 2021.
- [21] A. Mínguez-Martínez, “*Traceability of 3D optical measuring instruments in industrial environments using customized material standards*”, Madrid, 2021.
- [22] European Accreditation (EA), EA-4/02 M 2013 - Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration, EA Publications, 2013.