

ESTIMACIÓN DE INCERTIDUMBRES EN EL PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES, ASOCIADA A LA MEDICIÓN INTERFEROMÉTRICA DE DESVÍO DE PLANITUD

ESTIMATION OF UNCERTAINTIES ASSOCIATED WITH INTERFEROMETRIC MEASUREMENT OF FLATNESS BY MEANS OF DIGITAL IMAGE PROCESSING

F. YAPUR, L. ALVAREZ, K. BASTIDA

Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI)
e-mail: fyapur@inti.gob.ar

Recibido: 15/12/12; Aceptado: 08/07/13

El método de medición de desvío de planitud consiste en la comparación entre una superficie de referencia o patrón y la superficie de prueba a calibrar. En INTI – Física y Metrología, esta medición se realiza utilizando un interferómetro de Fizeau y con el objeto de automatizar el método de calibración, se diseñó una rutina basada en procesamiento digital de imágenes. En este trabajo se presenta un estudio estadístico aplicando método de Monte Carlo que permite analizar las incertidumbres y la repetibilidad asociadas al mencionado procesamiento. Por otro lado también se consideran las influencias de las condiciones ambientales tales como temperatura, presión y humedad en el método de medición. Los resultados del desvío de planitud y su incertidumbre obtenidos se encuadran en el intervalo establecido por calibraciones previas. A su vez este trabajo proporciona un método de verificación de las superficies patrón que se utilizan actualmente en INTI-Física y Metrología para la calibración de desvío de planitud, lo que permitió extender su período de calibración.

Palabras Claves: desvío de planitud, interferómetro de Fizeau, metrología dimensional, método de Monte Carlo, incertidumbre de medición.

The flatness deviation measurement method is based in the comparison between a reference surface and the test surface or pattern to calibrate. In INTI – Física y Metrología, this measurement is performed by using a Fizeau interferometer. In order to build up a system of automation for the calibration method, we designed a routine based on digital image processing. This paper presents a statistical study using Monte Carlo method to analyze the uncertainties and the repeatability associated. On the other hand we consider the influences of ambient conditions on the experimental setup, such as temperature, pressure and moisture. The results of flatness deviation and its uncertainties obtained are agree with the range established by previous calibrations. This work provides a method for testing the flatness standard currently used in INTI-Física y Metrología for flatness calibration, allowing extends its calibration period.

Key Word: flatness measurement, Fizeau interferometer, dimensional metrology, Monte Carlo method, measurement uncertainty.

I. INTRODUCCIÓN

En metrología, la medición del desvío en planitud de una superficie es de suma importancia en la calidad de fabricación de espejos, lentes, fibras ópticas, micrómetros, etc., ya que numerosas ramas de la industria necesitan de estos insumos. Por lo tanto, una de las líneas de trabajo dentro de INTI -Física y Metrología, es la medición del desvío en planitud y la calibración de Planos Ópticos, así como también el desarrollo de ciencia y tecnología aplicada a esta área de la óptica.

El desvío en planitud de una superficie es una magnitud relativa, y por lo tanto, es necesaria una superficie patrón o Plano Óptico para este mesurando. Un Plano Óptico es un disco de cristal, con una o ambas caras pulidas, cuyo desvío en planitud es del orden de los nm. Se utilizan iluminándolos con una luz monocromática para determinar por interferencia la planitud de otras superficies ópticas, cuyo desvío es mayor.

Existen varios métodos para la calibración de planos ópticos, pero solo nos centraremos en uno de ellos. Este método utiliza un plano óptico de referencia y un interferómetro de Fizeau para realizar la medición.

Descripción del interferómetro de Fizeau

El dispositivo usado en este trabajo para medir el desvío en planitud (ξ) es un interferómetro de Fizeau⁽¹⁾, como el que se esquematiza en la Figura 1.

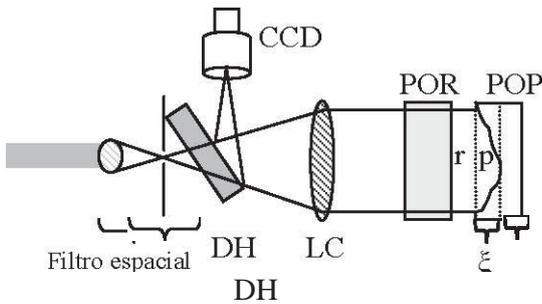


Figura 1. Esquema del interferómetro de Fizeau, donde r es la superficie de referencia, p es la superficie a calibrar, ξ es el desvío en planitud, DH divisor de haz, LC lente colimadora, POR plano óptico referencia, POP plano óptico de prueba, CCD cámara.

La fuente de luz utilizada es un láser He-Ne de 2 mW de potencia y 632,82 nm de longitud de onda. Se hace pasar al haz por un filtro espacial, formado por un objetivo de microscopio de 4 mm de foco y un pinhole de 10 μ m de diámetro. Luego el haz filtrado pasa por una lente colimadora de 250 mm de foco, que forma un sistema confocal con el objetivo de microscopio. El haz sale paralelo y se refleja en los cristales ópticos. Estos están montados sobre soportes con tornillos de paso fino. Este montaje permite alinear las dos superficies, de tal manera que las reflexiones en la segunda cara del plano óptico de referencia (POR) y en la primera cara del plano óptico de prueba (POP) coincidan, para luego se dirigidas mediante un divisor de haz a una cámara CCD de 1396x1040 pixeles. Las demás reflexiones son desviadas por la falta de paralelismo de los cristales de interferencia. Así se obtiene un interferograma que será procesado mediante un software de procesamiento digital de imágenes.

Modelo matemático

La medición del desvío en planitud viene dada por una comparación entre una superficie de referencia, idealmente plana, y la superficie de prueba cuyo desvío en planitud es mayor. La información es registrada por la cámara CCD como intensidad luminosa, este registro es el interferograma. Las diferencias de caminos ópticos (DCO) entre las dos caras generan las franjas de interferencia; si ambas superficies fueran perfectamente planas no se formarían franjas. Por lo tanto dentro del interferograma esta la información del desvío de una superficie con respecto a la otra.

Mediante la teoría⁽¹⁾, podemos obtener el desvío en planitud de la superficie de prueba mediante el análisis del interferograma, donde está involucrada la interfranja (I) que es la distancia entre centros de franjas, la flecha (F) o cuerda que es el máximo apartamiento de una franja con respecto a la vertical y la longitud de onda del láser (λ):

$$F \propto I^2$$

$$\propto m \quad (1)$$

La Ec. (1) muestra como se relacionan estas

magnitudes. Se eligió trabajar con la razón (m) entre F e I para evitar la correlación entre estas dos magnitudes.

Método de Monte Carlo

Para evaluar las incertidumbres asociadas al procesamiento digital de imágenes se decidió trabajar con el método de simulación numérica llamado Monte Carlo⁽²⁾. Este método consiste en identificar las variables que participan del modelo, en este caso m y λ . Luego de realizar una serie de n mediciones de cada variable (m_n, λ_n), se obtienen en ambos casos, las distribuciones, valores medios y desviaciones estándar. Luego se generan numéricamente dos series de N ($N \gg n$) datos (m_N, λ_N) que responden a las distribuciones medidas. Estos datos se ingresan en el modelo y se obtienen N resultados (ξ_N) con los cuales se realiza un histograma obteniendo la desviación estándar del método de medición. En la Fig. 2 vemos un esquema del método

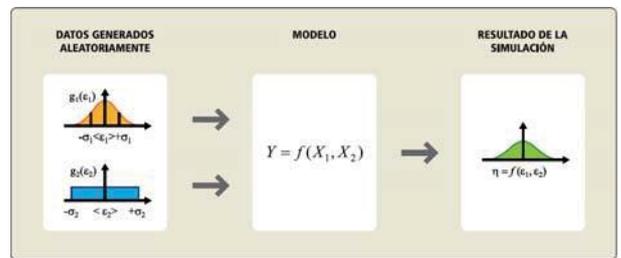


Figura 2. Esquema que ilustra el funcionamiento del método de Monte Carlo

II. DESARROLLO EXPERIMENTAL

El interferómetro fue montado en una mesa antivibratoria. Una vez alineado, se realizaron pruebas de estabilidad en función de la temperatura, presión y humedad. Se concluyó que las variaciones en temperatura eran la principal causa de inestabilidad, por lo tanto se optó por trabajar en un rango de temperatura de $(20,2 \pm 0,5)$ °C. Se estudió la estabilidad temporal de láser mediante varianza de Allan⁽³⁾, y se fijó un intervalo de 60 s para adquirir las imágenes.

Se midió la longitud de onda del láser usado mediante un método de batidos⁽⁴⁾ y se obtuvo $\lambda = (632,82 \pm 0,01)$ nm.

Se eligieron dos cristales de interferencia calibrados en el PTB contra un espejo de mercurio, cuyas dimensiones son de 51 mm de diámetro y 16 mm de espesor. Teniendo en cuenta los certificados de los planos ópticos, se eligió el de menor desvío como plano de referencia y el de mayor desvío como cristal de prueba. Una vez montados y alineados los planos ópticos, se tomaron a lo largo de 3 días 1200 interferogramas divididos en 4 series de 300, cada serie con distinta cantidad de franjas: 4, 7, 9 y 12. Esto se logró variando el ángulo de la cuña formada entre las dos superficies mediante los tornillos de paso fino.

Procesamiento digital de imágenes

El análisis de las secuencias de interferogramas se realizó mediante un algoritmo de procesamiento digital de imágenes, que fue exclusivamente diseñado para este

trabajo bajo entorno Visual Basic. A partir de este procesamiento se obtienen F e I en forma automática para cada serie de interferogramas. El esquema general del algoritmo consta de la secuencia que se muestra en la Figura 3.



Figura 3. Secuencia que muestra el procesamiento digital de imágenes para el cálculo de F e I .

Primero se aplica un filtro mediante transformada de Fourier, luego se binariza la imagen y se rota hasta que las franjas queden perpendiculares a la horizontal, se encuentran los centros de las franjas (cruz blanca) y los puntos más alejados de la vertical (cruz roja). Por último se calcula F e I .

Los resultados de las mediciones de λ y m se pueden ver en la tabla 1.

Tabla 1: Resultado de mediciones experimentales de λ y m .

	Nº de mediciones	Distribución	Valor medio e incertidumbre
λ	65000	rectangular	$\langle \lambda \rangle = 632,82 \text{ nm}$ $\sigma_\lambda = 0,01 \text{ nm}$
m	1200	normal	$\langle m \rangle = 0,20$ $\sigma_m = 0,03$

III. RESULTADOS

Desvío en planitud

En la Figura 4 se muestran las mediciones realizadas para la obtención del desvío en planitud haciendo uso de la ec. (1).

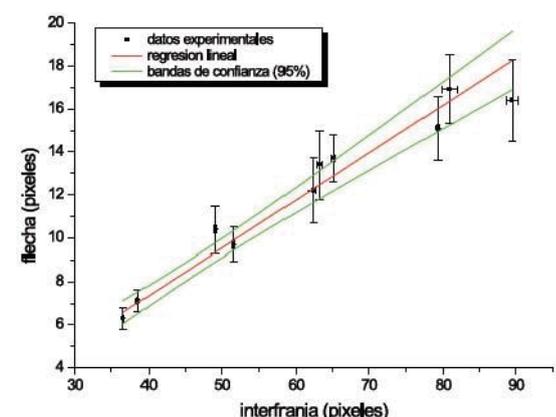


Figura 4. Determinación de ξ_p a partir de la relación F e I mediante una regresión lineal.

En este caso la evaluación de la incertidumbre se realiza siguiendo la ley de propagación de incertidumbres que establece la GUM⁽⁵⁾, con lo cual se obtiene una

incertidumbre asociada al procesamiento de 6 nm para un factor de cobertura $k=1$. Por lo tanto, sumando en cuadratura la incertidumbre asociada al plano óptico patrón informada por su certificado de 10 nm, se tiene que $\xi_p = (70 \pm 24) \text{ nm}$ para $k=2$.

Estimación de incertidumbres mediante Monte Carlo

Con los datos experimentales de m y λ que se muestran en la tabla 1 se realizaron en entorno MATLAB dos simulaciones numéricas (con sus respectivas distribuciones) con un muestreo de 10^5 para cada una. Luego mediante la Ec 1. se obtuvieron los valores del desvío y se realizó el histograma que vemos en la Figura 5.

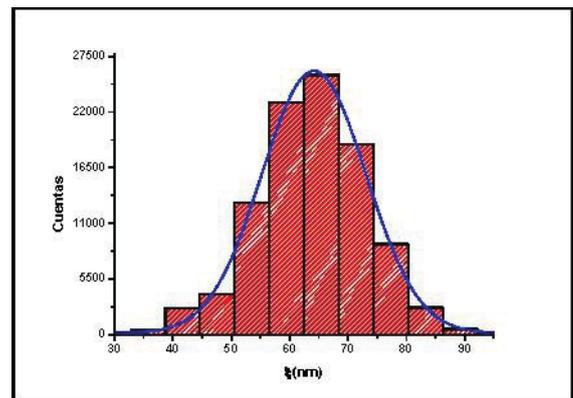


Figura 5. Histograma del desvío en planitud obtenido mediante la simulación numérica por Monte Carlo.

Del histograma se obtiene una incertidumbre de 9 nm para $k=1$. Sumando en cuadratura la incertidumbre del plano óptico patrón de 10 nm, se tiene que el desvío calculado mediante Monte Carlo es $\xi_p = (64 \pm 26) \text{ nm}$ para $k=2$.

IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se montó y alineó un interferómetro de Fizeau. Esto permitió el registro de interferogramas con nitidez, contraste y resolución necesarias para su posterior procesamiento. Así mismo, se desarrolló un algoritmo que permitió automatizar el procesamiento digital de imágenes, y así obtener el desvío en planitud.

Con el objetivo de validar mediante el Método de Monte Carlo el modelo matemático utilizado, se realizó un estudio estadístico de las variables de influencia, a fin de conocer sus distribuciones de probabilidad. El resultado obtenido por el método de Monte Carlo para el cálculo de la incertidumbre asociada al procesamiento digital de imágenes, es consistente con lo obtenido siguiendo los lineamientos de la GUM. Esto valida el modelo empleado para la determinación del desvío en planitud.

Como corolario de este trabajo, se han verificado las superficies patrón que se utilizan actualmente en INTI-Física y Metrología para la calibración del desvío en planitud, lo que permite extender su período de calibración. Esto forma parte del plan de mantenimiento de patrones que realiza INTI – Física y Metrología.

V. AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer la colaboración en este trabajo a todos los compañeros de Física y Metrología en especial a la UT-Óptica, así como también a E. Scatena, D. Luna, A. Zinzallari y M. Nicola.

VI. REFERENCIAS

- 1-Daniel Malacara, Optical Shop Testing, Wiley & Sons, Inc., Publication. New Jersey (2007).
- 2-JCGM 101:2008 Evaluation of measurement data – Supplement 1 to the GUM – Propagation of distributions using Monte Carlo method.
- 3-W. J. Riley. Handbook of Frequency Stability Analysis. Nist Special Publication. 1065, (2008).
- 4-Mingolla G., Alvarez J., Bastida K.. Calibración de frecuencias ópticas por sistemas de batidos. Anales AFA, 20, 48-52 (2008).
- 5-JCGM 100:2008 Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement.