

Caracterización de desplazamientos en un sistema de translación por métodos ópticos

Hernán M. Miranda, Martín Coronel y Jorge R. Torga

Centro de Fotónica Aplicada

Facultad Regional Delta

Universidad Tecnológica Nacional

2804 San Martín 1171 Campana, Buenos Aires Argentina

Tel.: 54-03489-420400 int. 136

Correo electrónico: hmiranda@frd.utn.edu.ar

Resumen.

Se presenta un equipo para caracterización de movimientos de translación en un eje por métodos ópticos. El sistema montado utiliza una combinación de mediciones por interferometría y procesamiento de imágenes para la obtención de las características del desplazamiento (distancia absoluta, intervalos de aceleración y desaceleración, velocidad y uniformidad de movimiento). En forma simultánea se busca determinar las imperfecciones en el desplazamiento, ocasionadas por desviaciones angulares y de translación lateral, generadas en el propio sistema mecánico. Se presentan resultados en distintos sistemas de desplazamientos: un sistema accionado por un motor de corriente continua y un sistema similar controlado por un motor por pasos.

El dispositivo armado consiste en una fuente láser, un interferómetro Michelson y una cámara incorporada. El interferómetro tiene una rama de referencia y una rama móvil que es solidaria al sistema de translación en estudio. La señal de interferencia es detectada con un fotodiodo de silicio rápido, cuya señal de salida es analizada y procesada por un software diseñado para ese fin. Una reflexión en la rama móvil es enviada en forma simultánea a la cámara que adquiere imágenes a medida que se realiza el desplazamiento. Se presentan resultados y se muestran valores característicos en un caso típico de movimiento (aceleración, velocidad, desplazamiento absoluto). Se presenta también un análisis de los errores típicos de la medición y los algoritmos de procesamiento propuesto.

Palabras claves: caracterización de desplazamiento, interferometría, procesamiento de imágenes, sistema de translación.

1. Introducción

La caracterización del desplazamiento en elementos de translación es un tema de creciente importancia debido a la demanda en sistemas de este tipo con necesidades y exigencias cada vez más rigurosas. En la mayoría de las aplicaciones es de importancia disponer de sistemas repetitivos, de alta exactitud en el posicionamiento y con alta calidad en su movimiento. Para elementos de translación en un eje es crucial el conocimiento de cómo es el desplazamiento en función del tiempo y cuanto se aleja el movimiento real del ideal rectilíneo.

Existen una variedad de técnicas utilizadas para realizar este tipo de mediciones, entre las más frecuentes se encuentran los sistemas ópticos. En este caso los sistemas utilizados varían en diseño y técnicas empleadas dependiendo del rango dinámico y precisión requeridas. Una descripción de los sistemas convencionales puede encontrarse en ^{(1), (2), (3)}.

El objetivo de este trabajo es desarrollar un sistema que permita realizar una caracterización del movimiento con un solo desplazamiento del sistema en estudio. Esta caracterización se hace a través de la medición simultánea de la posición en función del tiempo y el desvío de la dirección rectilínea ideal. Para la obtención de la posición en función del tiempo se utiliza una medición interferométrica y para la caracterización del desvío de la dirección rectilínea se utilizó una técnica basada en la evolución de la posición del spot de un láser después de reflejado en el sistema a medir.

2. Discusión teórica

El dispositivo para realizar las mediciones de desplazamiento se basa en un esquema interferométrico. Como es bien conocido estos sistemas permiten medir la distancia absoluta en el desplazamiento en términos de la longitud de onda de la fuente emisora de luz. La intensidad total I en un interferómetro tipo Michelson es ⁽⁴⁾:

$$I = I_1 + I_2 + 2 \cdot \sqrt{I_1 \cdot I_2} \cdot \cos \delta \quad (1)$$

donde I_1 es la intensidad de la rama de referencia, I_2 es la intensidad de la rama móvil y δ es la diferencia de fase entre las dos ramas del interferómetro.

En el caso que tratamos en este trabajo la rama de referencia esta fija y el extremo de la rama muestra es un espejo montado sobre el sistema de translación en estudio. Luego la expresión para δ esta dada por:

$$\delta = k \cdot [r_1(t) - r_2] \quad (2)$$

Donde r_1 es la posición de un espejo o retrorreflector fijo a la rama muestra y r_2 es la posición de la rama de referencia fija. La diferencia de camino óptico entre ambas ramas del interferómetro (en aire) corresponde al doble del desplazamiento del sistema de translación.

$$r_1(t) - r_2 = 2 \cdot \Delta d(t) = n \cdot \lambda \quad (3)$$

donde $\Delta d(t)$ es el desplazamiento a medir, λ es la longitud de onda de la fuente de luz monocromática utilizada y n es el número y fracción de franjas de interferencia medidas. Los resultados obtenidos en este trabajo se basan en la determinación del desplazamiento del sistema móvil en función del tiempo a partir de la medición de la fase y la implementación de un algoritmo que permita un ajuste de la señal de interferencia obtenida. Se ensayaron sistemas de translación utilizando distintas configuraciones y sistemas de accionamiento.

Para el estudio del desvío de la dirección rectilínea del desplazamiento o uniformidad del movimiento se midió las desviaciones angulares y laterales del desplazamiento. Para este tipo de mediciones se utilizó una técnica basada en la detección de la posición del spot del láser a medida que se desliza el sistema muestra. El spot se registra con un

cámara digital y posteriormente se realiza el análisis de su evolución por dos métodos distintos: primero siguiendo el desplazamiento del centroide de la imagen del haz sobre la cámara ^{(5), (6)} y luego por medio de algoritmos para ajustes de bloques, en particular con el método de búsqueda exhaustiva ⁽⁷⁾.

3. Disposición experimental

En la figura 1 puede verse la disposición de los elementos utilizados en el experimento. Se trata de un interferómetro Michelson. Como fuente de luz se utilizó un láser de He-Ne y un láser de diodo ($\lambda = 658 \text{ nm}$) que se divide en DH1. Uno de los haces (R_{EF}) incide luego sobre un espejo fijo (EF) y el otro (R_{EM}) sobre un espejo (EM) montado en un sistema móvil, que es el sistema muestra. Los rayos R_{EF} y R_{EM} , luego de reflejarse en EF y EM respectivamente, se superponen en un fotodiodo de silicio rápido (F). La señal es digitalizada por un osciloscopio y almacenada en una PC mediante una comunicación RS-232. La señal es digitalizada por un osciloscopio y almacenada en una PC mediante una comunicación RS-232.

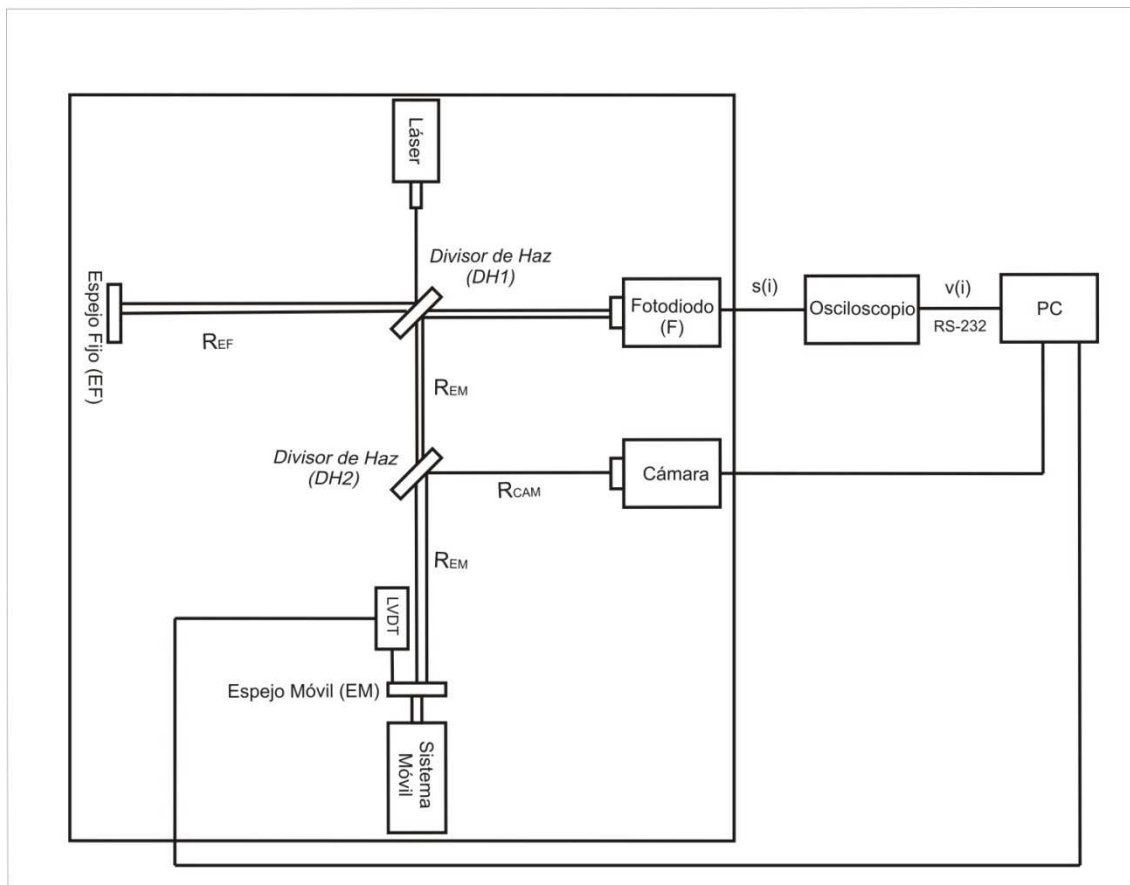


Figura 1. Esquema experimental. Diagrama en bloques que muestra la disposición y conexiones entre los elementos.

Se coloca también un segundo divisor de haz (DH2) cuya reflexión (R_{CAM}) es enviada a una cámara web para estudiar la alineación del movimiento. Sobre el sistema de

posicionamiento de la rama móvil se halla montado un LVDT que permite obtener una medición complementaria y absoluta del desplazamiento del sistema móvil.

4. Desarrollo

4.1 Determinación del número de franjas de interferencia

La señal $s(i)$ proveniente del fotodiodo (F en la figura 1) es procesada para obtener la medida de $r_1(t)$ según (3). Un ejemplo típico de una medición de desplazamiento se muestra en la figura 2 donde se representa la señal digitalizada en función del tiempo. En el mismo gráfico se muestra la señal filtrada. El filtro pasabajos aplicado es un filtro de promedio móviles de rango ρ ⁽⁸⁾. Si representamos cada punto de la señal original muestreada por $v(i)$, entonces la señal filtrada $\tilde{v}(i)$, sigue la ecuación:

$$\tilde{v}(i) = \frac{\sum_{k=i-\rho}^{i+\rho} v(k)}{2\rho+1} \quad (4)$$

Para detectar los picos se utiliza un algoritmo de detección de ceros. Y la expresión (3) para obtener el valor del desplazamiento.

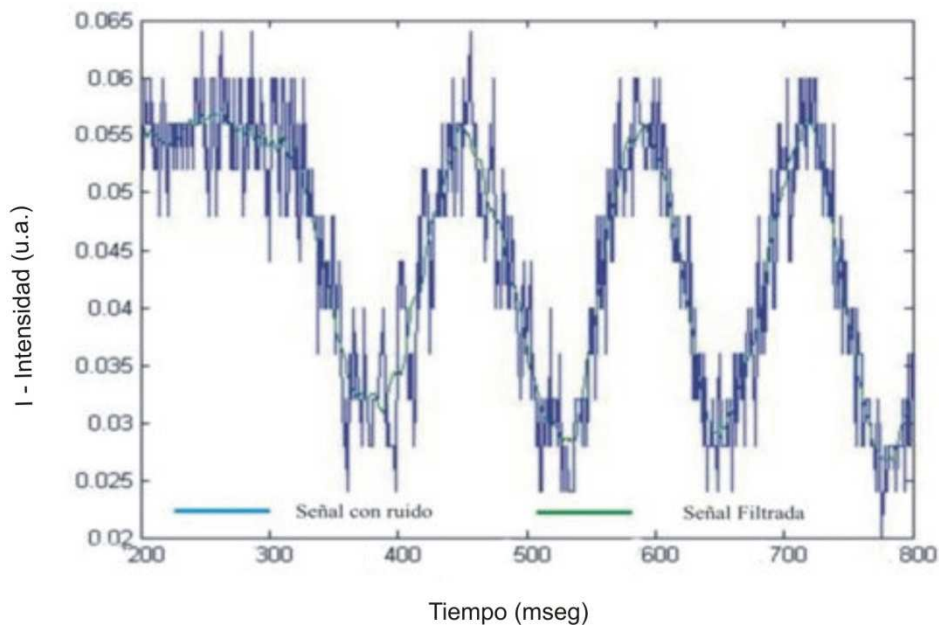


Figura 2. Señal de interferencia. Pueden observarse la señal original y filtrada.

Por las características del algoritmo y la relación señal / ruido la resolución de la medición es menor a $\lambda/2$, en nuestro sistema 320 nanómetros.

4.2 Caracterización de la alineación del movimiento mediante un único punto

La señal R_{EM} (ver figura 1) es enviada a la cámara donde se obtiene una secuencia de imágenes del spot del láser (Figura 3) mientras dura el movimiento de la muestra.

Si disponemos de una imagen con f filas y c columnas y si $I(i, j)$ representa la intensidad del píxel (i, j) , entonces para cada fila i y columna j , se computa su centro de intensidad de acuerdo a:

$$\varphi_i = \frac{\sum_{j=1}^c I(i, j) \cdot j}{I_t}, \quad \tau_j = \frac{\sum_{i=1}^f I(i, j) \cdot i}{I_t} \quad (5)$$

donde $I_t = \sum_{i=1}^f \sum_{j=1}^c I(i, j)$, es la intensidad total de la imagen. Entonces se define el centroide de la imagen:

$$\varphi = \frac{\sum_{i=1}^f \varphi_i}{f}, \quad \tau = \frac{\sum_{j=1}^c \tau_j}{c} \quad (6)$$

Para eliminar la influencia de los píxeles oscuros alrededor del spot se establece un nivel mínimo x de forma que en el cálculo del centroide solo se computan aquellos píxeles de la imagen tales que $I(i, j) \geq x$.

Tomando el centroide de la primera imagen sucesivos centroides se comparan con el de referencia. Así se puede obtener su desplazamiento con respecto a la posición original.

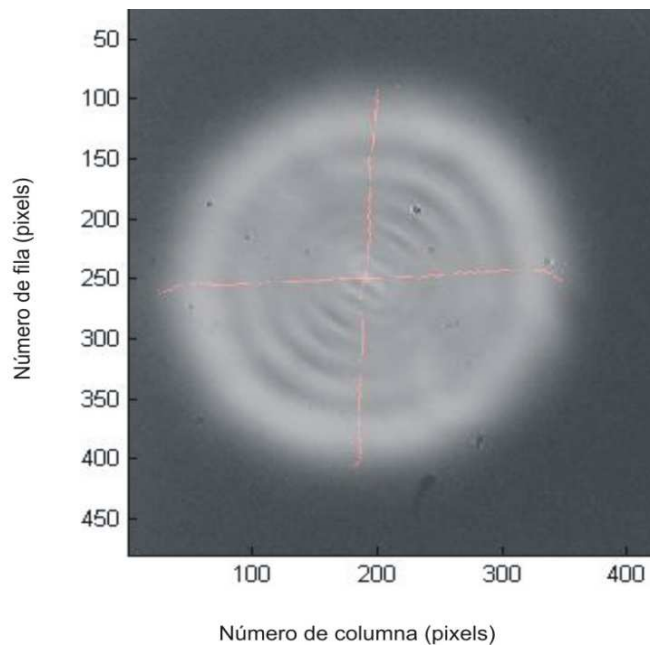


Figura 3. Ejemplo de una imagen capturada con la cámara. La cruz representa el valor de esperanza de intensidad para cada fila y columna.

4.3 Caracterización de la alineación del movimiento mediante algoritmos de ajuste de bloques.

Otra forma de analizar el desvío del movimiento lineal es utilizando algoritmos por ajuste de bloques. En este caso se hace una búsqueda de los patrones relacionados con cierto objeto y su fondo en una imagen y se mide el desplazamiento de esos patrones en

las imágenes correspondientes al sistema desplazado. Se define un área de búsqueda a partir de la posición original del bloque y para comparar un bloque con otro se utiliza una función de costo que se calcula para el bloque original con respecto a todos los que están en el área de búsqueda. Se minimiza el costo para seleccionar el bloque que mejor ajusta. En este caso tomando como K el tamaño de un bloque, $I(i, j)$, la intensidad de un pixel en la imagen actual e $N(i, j)$ la intensidad de un pixel en la imagen siguiente, se utiliza como función de costo la diferencia absoluta media dada por:

$$MAD = \frac{1}{K^2} \cdot \sum_{i=0}^{K-1} \sum_{j=0}^{K-1} |I(i, j) - N(i, j)| \quad (7)$$

Con este procedimiento se obtienen los vectores de movimiento para cada uno de los bloques que se consideran. Estos vectores son de la forma $v(i) = [vx; vy]$ donde vx es el desplazamiento en filas y vy en columnas para el bloque i -ésimo.

5. Resultados

5.1 Resultados del movimiento de un carro de traslación accionado por un motor de corriente continua.

En la figura 5 puede observarse un ejemplo de la curva obtenida para la señal de interferencia para un desplazamiento típico, puede ser procesada de acuerdo a lo descrito en la sección 4.1.

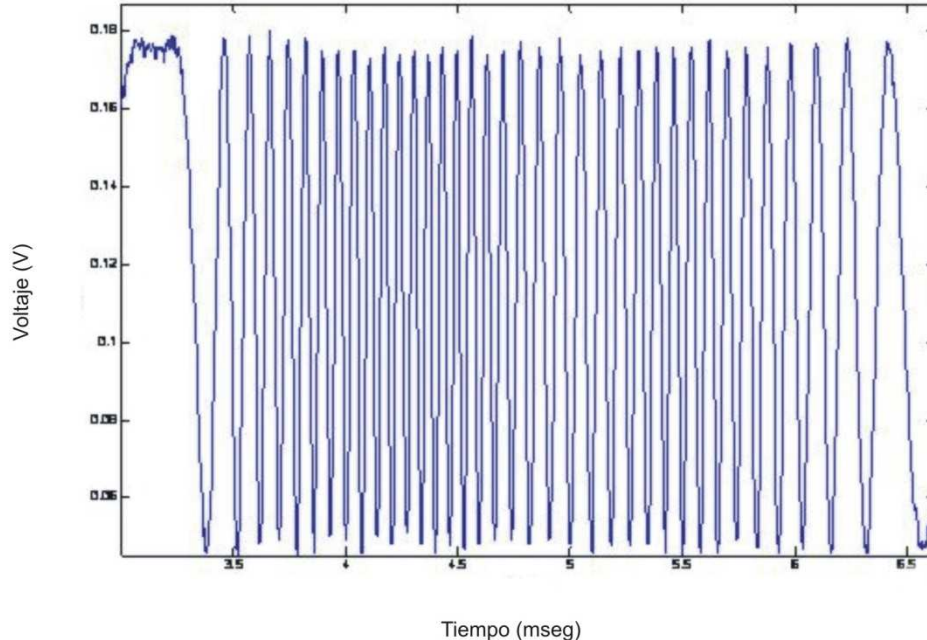


Figura 5. Grafico de intensidad vs tiempo para un ejemplo de desplazamiento con un motor de corriente continúa.

5.2 Resultados del movimiento de un sistema de traslación accionado por un motor por pasos.

A partir de la señal de interferencia registrada se puede determinar la ecuación de posición $\Delta d(t)$ (ecuación 3) del sistema de traslación. A través del algoritmo mencionado en la sección 4.1 se obtiene el siguiente gráfico.

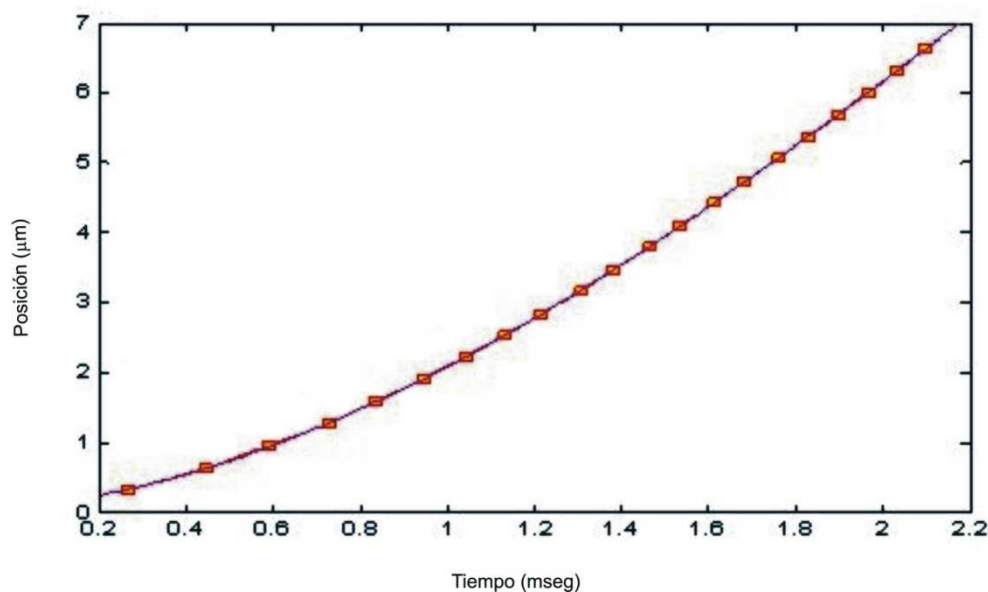


Figura 6. Grafico de posición vs tiempo para un desplazamiento con un motor por pasos.

La ecuación que responde a esa curva es:

$$\Delta d(t) = -206,84 \cdot t^3 + 1,644 \cdot t^2 + 0,0006 \cdot t \quad (8)$$

Donde $\Delta d(t)$ está en μm si t se mide en segundos. A partir de la expresión (8) se puede obtener la velocidad y la aceleración del sistema de traslación.

$$v(t) = -620 \cdot t^2 + 3,28 \cdot t \quad (9)$$

$$a(t) = -1241,04 \cdot t + 3,28 \quad (10)$$

Nuevamente las unidades de $v(t)$ y $a(t)$ son $\mu\text{m}/\text{seg}$ y $\mu\text{m}/\text{seg}^2$ respectivamente si t se mide en segundos. A modo de verificación del método se muestra en la figura 9, la superposición de la señal de interferencia medida con la curva obtenida del ajuste.

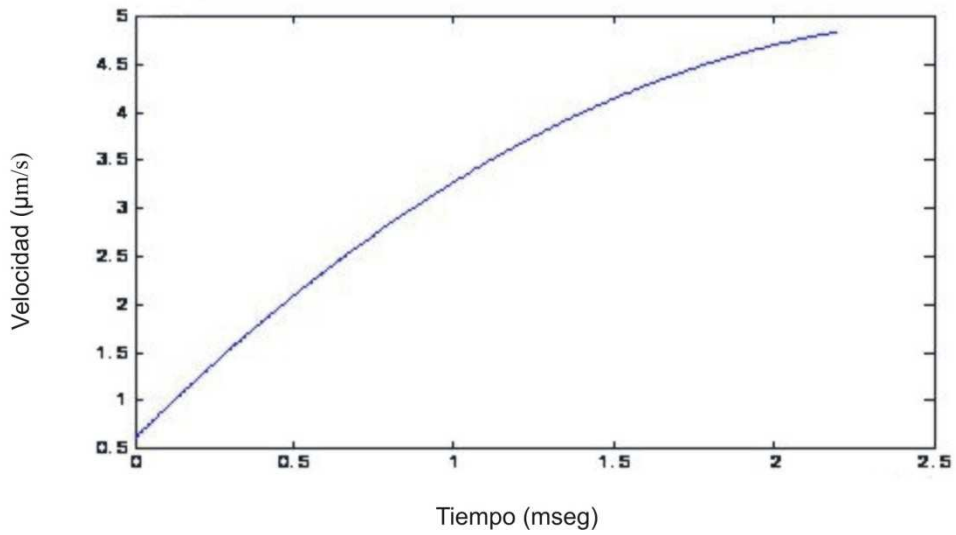


Figura 7. Velocidad vs. tiempo para el desplazamiento de la Figura 6.

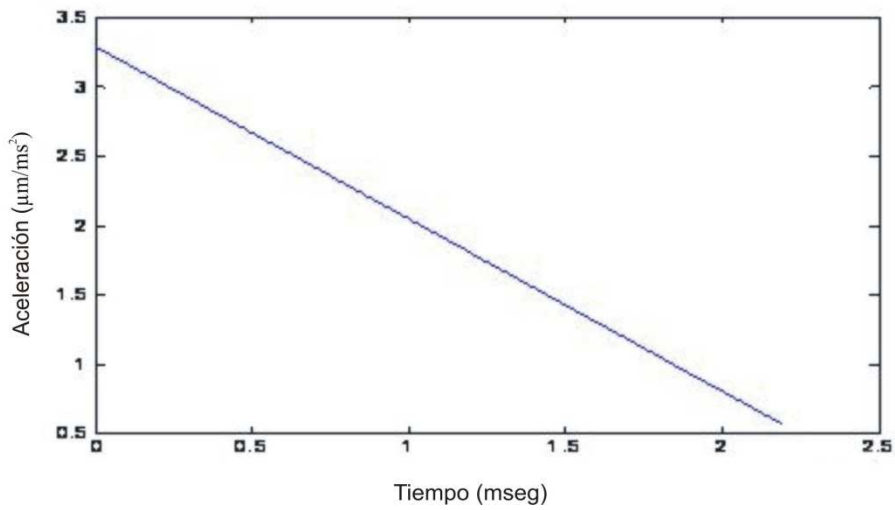


Figura 8. Aceleración vs. tiempo para el mismo desplazamiento.

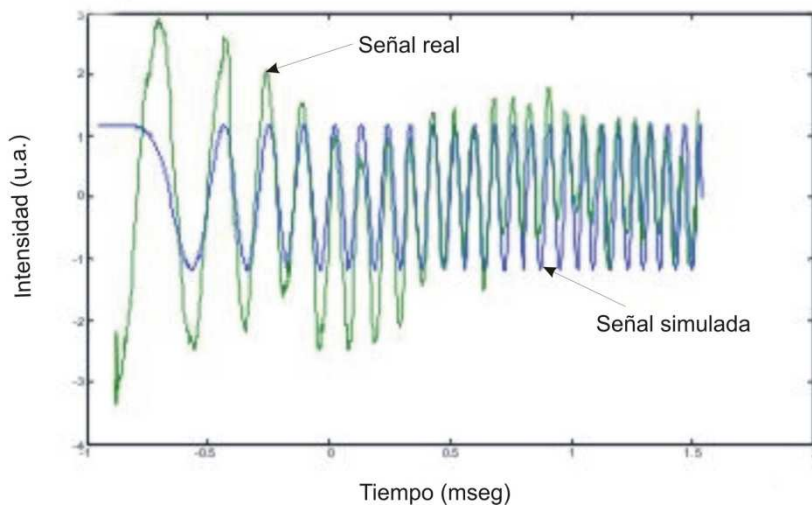


Figura 9. Grafico comparativo entre la señal de interferencia real y la obtenida del ajuste.

5.2.1 Medición de desplazamiento de un sistema controlado por un motor por pasos

Este ejemplo muestra que el método propuesto permite caracterizar el desplazamiento de un sistema de translación accionado por un motor por pasos. El mismo permite pasos completos de 5° de rotación que equivale, en nuestro sistema, a un desplazamiento lineal de 14,6 micrones.

Los resultados obtenidos con mediciones sucesivas de desplazamiento resultaron en $X_{prom} = 14,88 \mu m$ con un desvío estándar $S_{n-1} = \pm 1,886 \mu m$.

En este caso las mediciones se complementaron con un LVDT que permite indicar el sentido de avance y retroceso. Un ejemplo típico de medición se muestra en la figura 10. A partir de las señales combinadas se puede obtener el rango de desplazamientos y velocidades involucradas.

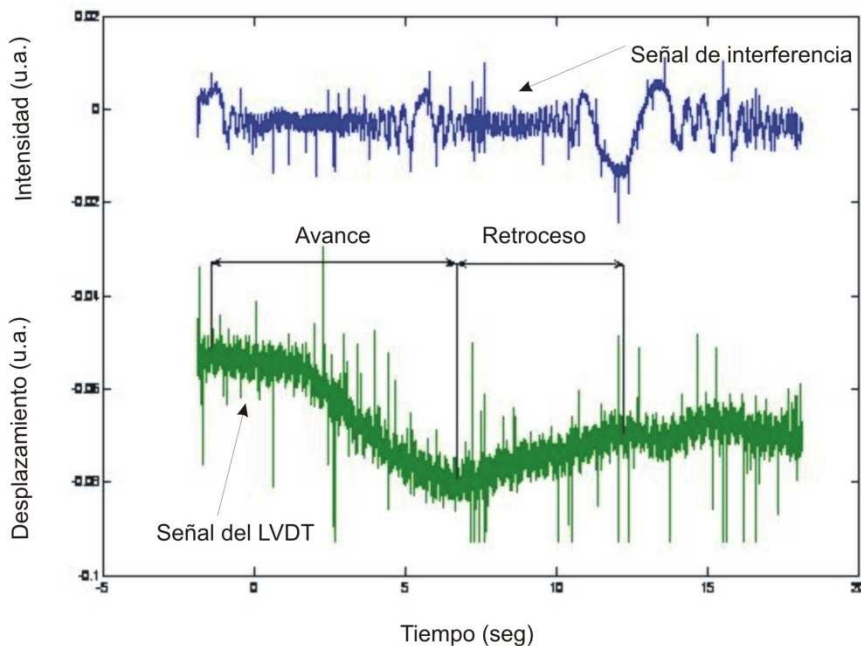


Figura 10. Grafico comparativo con la señal de interferencia y la señal del LVDT.

Es muy interesante comprobar que con este método es posible observar el movimiento de avance y retroceso del sistema, ocasionado por la oscilación que experimenta el sistema de translación cuando realiza un paso antes de detenerse.

5.3 Resultados de la caracterización del desvío mediante un único punto

En la figura 11 puede verse el resultado del análisis realizado para la medición del desvío con respecto a una trayectoria lineal. El resultado se obtiene a partir del análisis de 400 marcos, consistiendo cada uno en una imagen de 480 x 640 píxeles. Se muestra en el gráfico la posición de la columna del centroide de cada imagen, esto es una medida del desplazamiento horizontal con respecto a la posición inicial.

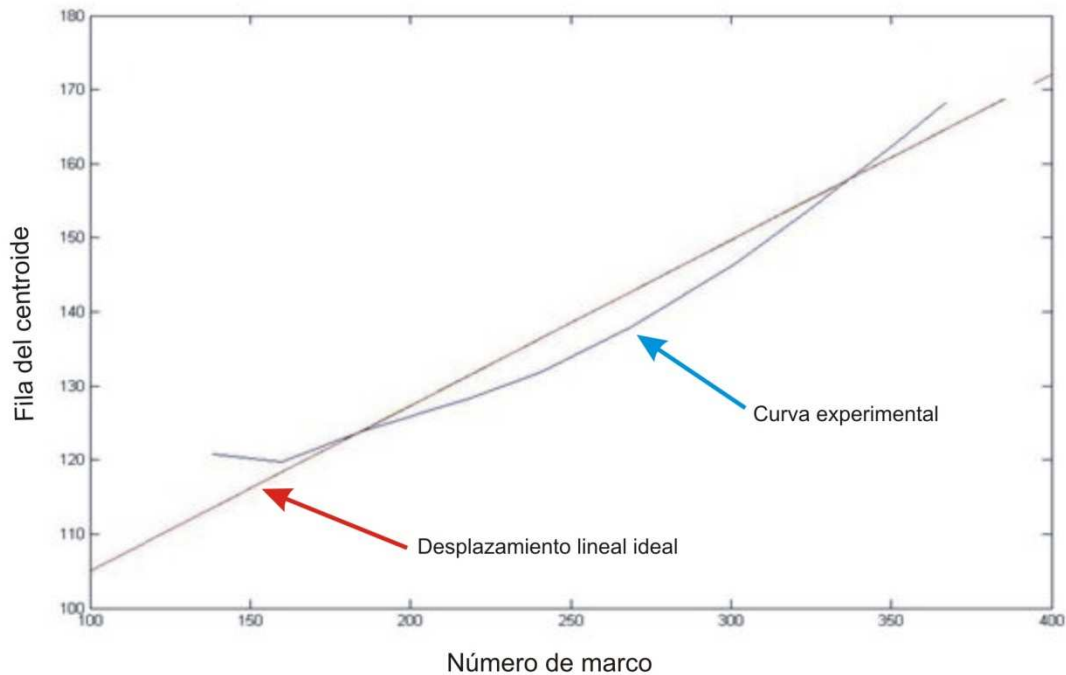


Figura 11. Grafico de posición de columnas del centroide vs número de imagen.

Para estimar el error del método, se determinó el centroide para 20 imágenes consecutivas con el spot del láser fijo y luego se calculó la desviación estándar sobre dichas mediciones. El error es menor a una décima de pixel es decir $0,7 \mu\text{m}$ y es debido al ruido propio del láser junto con el error en la adquisición de la cámara.

5.4 Resultados de la caracterización del desvío mediante algoritmos de ajuste por bloques

En la figura 12 puede observarse la predicción del desvío para un bloque realizado por el algoritmo antes descrito. En este caso el resultado del algoritmo es $[-7;-7]$, indicando que el spot del láser se desplazó 7 pixeles hacia la izquierda y 7 hacia arriba como se aprecia en la figura.

En las dos técnicas antes mencionadas, el desvío lateral aquí obtenido puede tener dos componentes principales, un desplazamiento angular puro y un desplazamiento horizontal puro. Para separar uno del otro se puede proceder de la siguiente manera: tomando siempre el mismo eje de acción, se coloca la cámara a distintas distancias L del divisor de haz (DH2, en la figura 1). Para cada caso se registra el desplazamiento horizontal $\Delta x = \Delta x_\alpha + \Delta x_h$, donde Δx_α es el desplazamiento horizontal debido a un desplazamiento angular puro α y Δx_h es el desplazamiento horizontal puro. Luego se procede a estimar el valor de α y Δx_h .

Aún no se han obtenido resultados sobre lo antes comentado, pero ya se planificó su verificación en futuros experimentos.

Con ambas técnicas se mostró que es posible medir desvíos en el orden del micrón.

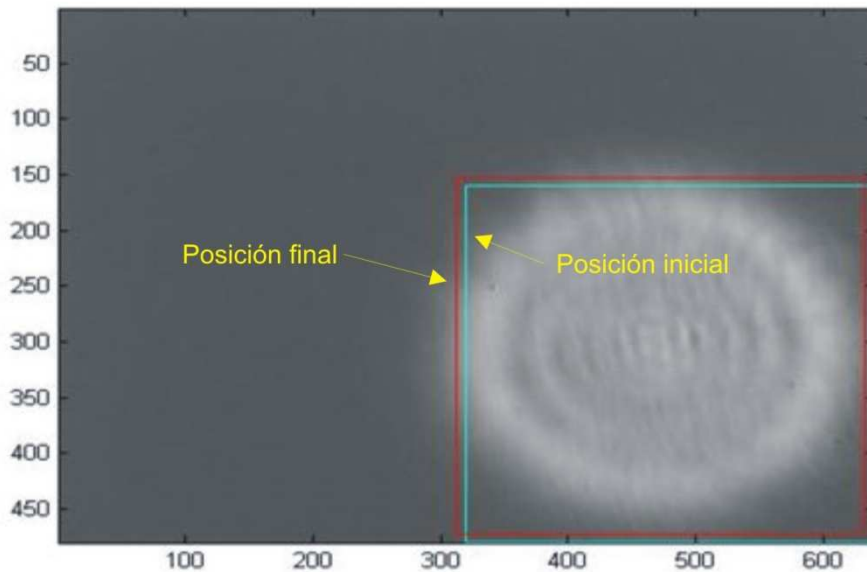


Figura 12. Movimiento de un bloque calculado por medio del método de búsqueda exhaustiva.

6. Conclusiones

Se ha presentado una técnica de medición que permite caracterizar desplazamientos de sistemas de translación a través de la medición de la posición en función del tiempo y el desvío de una dirección rectilínea ideal. Se ha comprobado que el sistema armado permite realizar mediciones de posición con un rango superior al cm y un error inferior a los 300 nm. Las velocidades están limitadas por el tiempo de respuesta del sistema que en nuestro equipo permite velocidades inferiores a 10 m/seg.

Los algoritmos presentados para la determinación del desvío angular y lateral del sistema de translación muestran que es posible su utilización para estimar el error en el desplazamiento, sin embargo la separación entre el desvío angular y el lateral requiere de mediciones extras.

El sistema es sencillo en su diseño y no requiere equipamiento sofisticado para alcanzar un desempeño similar al que se presentan en este trabajo.

Con los algoritmos presentados es posible encontrar un ajuste de la señal de interferencia compatible con los errores que se presentan en el trabajo. Sin embargo es parte de la tarea futura mejorar estos algoritmos y poder incrementar la precisión del ajuste para la obtención de la posición en función del tiempo y la medición del desvío angular y lateral.

Los resultados obtenidos muestran que la técnica permite un estudio detallado de la calidad del sistema de acople motor/ tornillo y tornillo/elemento de translación. Es nuestra intención continuar en esta línea de trabajo y poder extender la técnica para poder caracterizar distintos elementos de translación y sistemas mas complejos en dos y tres ejes.

7. Referencias

1. Norman Bobroff, "Recent advances in displacement measuring interferometry", *Meas. Sci. Technology*, 4, (1993), 907-926.
2. Shyh-Tsong Lin "Three-dimensional displacement measurement using a newly designed moiré interferometer", *Opt. Eng.* 40(5), (May 2001), 822-826.
3. Won Shik Park "Measurement of fine 6-degrees-of-freedom displacement of rigid bodies through splitting a laser beam", *Opt. Eng.* 41(4), (April 2002), 860-871.
4. E. Hetch, "Óptica", Editorial Addison Wesley, Madrid, 3ª Edición, 2000.
5. Zhiling Jiang, Shunsheng Gong, Yang Dai, "Numerical study of centroid detection accuracy for Shack-Hartmann wavefront sensor", *Optics & Laser Technology*, 38, (2006), 614-619.
6. Steven H. Low, Nicholas F. Maxemchuk, Aleta M. Lapone, "Document identification for copyright protection using centroid detection", *IEEE Transactions on communications*, 46 (3), (March 1998).
7. Aroh Barjatya, "Block matching algorithms for motion estimation", DIP 6620 Spring 2004 Final Project Paper.
8. Alan V. Oppenheim, Alan S. Willsky and S. Hamid Nawab, "Señales y Sistemas", Editorial Prentice Hall Iberoamericana SA, 2ª Edición, 1998.