

**MEDIDA DE MICRODESPLAZAMIENTOS MEDIANTE CORRELACIÓN
CONJUNTA DE PATRONES *SPECKLE***

LUIS GABRIEL VALDIVIESO GONZÁLEZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE FÍSICA
BUCARAMANGA
2005**

**MEDIDA DE MICRODESPLAZAMIENTOS MEDIANTE CORRELACIÓN
CONJUNTA DE PATRONES *SPECKLE***

LUIS GABRIEL VALDIVIESO GONZÁLEZ

**Trabajo de grado para optar al título de
FÍSICO**

Director

**JÁDER ENRIQUE GUERRERO BERMÚDEZ
Doctor en Ciencias Naturales (Física)**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE FÍSICA
BUCARAMANGA
2005**

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos a:

Dios por haberme permitido culminar mis estudios universitarios

Dr. Jáder E. Guerrero Bermúdez, director de esta tesis por su orientación, guía y dedicación.

Mis padres y hermanos por el apoyo incondicional en el logro de mis metas

Dr. Arturo Plata por sus consejos y por la consecución de Matlab® 7.0 sin el cual no habría sido posible realizar mediciones en tiempo cuasi-real

Dr. Yezid Torres y Dr. Luis René Salazar por sus observaciones y aportes a esta tesis.

Dr. Jaime Meneses y Dra. Maria del Carmen Lasprilla por sus consejos.

Todos los compañeros del Grupo de Óptica y Tratamiento de Señales por la discusión académica.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	13
1. FUNDAMENTOS DE LA METROLOGÍA <i>SPECKLE</i>	15
1.1 FENÓMENO <i>SPECKLE</i>	15
1.2 ESTADÍSTICA DE PRIMER ORDEN DE LOS PATRONES DE <i>SPECKLE</i>	18
1.3 FOTOGRAFÍA <i>SPECKLE</i> DE DOBLE EXPOSICIÓN (DESP)	20
2. CORRELADOR DE TRANSFORMADA CONJUNTA	24
2.1 CORRELADOR DE TRANSFORMADA CONJUNTA LINEAL	24
2.2 CORRELADOR DE TRANSFORMADA CONJUNTA NO LINEAL	28
3. MEDIDA DE MICRODESPLAZAMIENTOS MEDIANTE CORRELACIÓN CONJUNTA DE PATRONES <i>SPECKLE</i>	34
3.1 DESCRIPCIÓN DEL MONTAJE	34
3.2 DETERMINACIÓN DEL RANGO DE MEDIDA	39
3.3 ENSAYOS DE IMPLEMENTACIÓN DE LA TÉCNICA EN TIEMPO REAL	42
4. RESULTADOS	43
4.1 DESPLAZAMIENTOS HORIZONTALES	43
4.2 DESPLAZAMIENTOS VERTICALES	55
4.3 TRAZADO DE TRAYECTORIAS (<i>Tracking</i>)	61
4.3.1 TRAYECTORIAS RECTILINEAS	62
4.3.2 TRAYECTORIAS SEMICIRCULARES Y CIRCULARES	64
4.4 MEDICIONES EN TIEMPO REAL	65

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	69
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70
ANEXO 1, CODIGO UTILIZADO	73

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Patrón de <i>speckle</i>	17
Figura 2. Distribución de probabilidad de la intensidad	20
Figura 3. Procesamiento coherente para la fotografía <i>speckle</i> de doble exposición	21
Figura 4. Patrón de franjas obtenidas en el plano focal	22
Figura 5. Plano de entrada del JTC	25
Figura 6. Plano de salida del JTC lineal	27
Figura 7. La transformación no lineal	30
Figura 8. Transformación no lineal de un coseno para diferentes umbrales	31
Figura 9. Plano de salida del JTC no lineal	33
Figura 10. Esquema del montaje utilizado	35
Figura 11. Construcción de la recta de calibración	38
Figura 12. Rectificación de la calibración	38
Figura 13. Determinación del criterio del rango de la medida de microdesplazamientos para distancia muestra-sensor 7 [cm]	39
Figura 14. Determinación del criterio del rango de la medida de microdesplazamientos para distancia muestra-sensor 9 [cm]	40

Figura 15. Determinación del criterio del rango de la medida de microdesplazamientos para distancia muestra-sensor 11 [cm]	41
Figura 16. Desplazamientos horizontales, distancia muestra-sensor 7 [cm], $\lambda = 543.5$ [nm]	44
Figura 17. Desplazamientos horizontales, distancia muestra-sensor 8 [cm], $\lambda = 543.5$ [nm]	45
Figura 18. Desplazamientos horizontales, distancia muestra-sensor 9 [cm], $\lambda = 543.5$ [nm]	46
Figura 19. Desplazamientos horizontales, distancia muestra-sensor 10 [cm], $\lambda = 543.5$ [nm]	47
Figura 20. Desplazamientos horizontales, distancia muestra-sensor 11 [cm], $\lambda = 543.5$ [nm]	48
Figura 21. Desplazamientos horizontales, distancia muestra-sensor 12 [cm], $\lambda = 543.5$ [nm]	49
Figura 22. Desplazamientos horizontales, distancia muestra-sensor 13 [cm], $\lambda = 543.5$ [nm]	50
Figura 23. Desplazamientos horizontales, distancia muestra-sensor 14 [cm], $\lambda = 543.5$ [nm]	51
Figura 24. Desplazamientos horizontales, distancia muestra-sensor 6 [cm], $\lambda = 632.8$ [nm]	52
Figura 25. Desplazamientos horizontales, distancia muestra-sensor 7 [cm], $\lambda = 632.8$ [nm]	53

Figura 26. Desplazamientos horizontales, distancia muestra-sensor 11 [cm], $\lambda = 632.8$ [nm]	54
Figura 27. Desplazamientos verticales, distancia muestra-sensor 7 [cm], $\lambda = 543.5$ [nm]	55
Figura 28. Desplazamientos verticales, distancia muestra-sensor 8 [cm], $\lambda = 543.5$ [nm]	56
Figura 29. Desplazamientos verticales, distancia muestra-sensor 9 [cm], $\lambda = 543.5$ [nm]	57
Figura 30. Desplazamientos verticales, distancia muestra-sensor 10 [cm], $\lambda = 543.5$ [nm]	58
Figura 31. Desplazamientos verticales, distancia muestra-sensor 11 [cm], $\lambda = 543.5$ [nm]	59
Figura 32. Desplazamientos verticales, distancia muestra-sensor 12 [cm], $\lambda = 543.5$ [nm]	60
Figura 33. Trayectoria rectilínea con ángulo de 45° respecto al eje positivo de las x	62
Figura 34. Trayectoria rectilínea con ángulo de 53.13° respecto al eje positivo de las x	62
Figura 35. Trayectoria rectilínea con ángulo de 36.87° respecto al eje positivo de las x	62
Figura 36. Semicírculo de radio 225 [μm] a intervalos angulares de 15°	64
Figura 37. Semicírculo de radio 200 [μm] a intervalos angulares de 30°	65
Figura 38. Círculo de radio 225 [μm] a intervalos angulares de 30°	65

LISTA DE VIDEOS

	Pág.
Clip de video 1. Desplazamientos horizontales	66
Clip de video 2. Desplazamientos verticales	67
Clip de video 3. Trayectoria rectilínea con ángulo de 33.69° respecto al eje positivo de las x	67
Clip de video 4. Semicírculo de $225 [\mu m]$ de radio	68

**TITULO: MEDIDA DE MICRODESPLAZAMIENTOS MEDIANTE CORRELACIÓN
CONJUNTA DE PATRONES *SPECKLE* ***

AUTOR: LUIS GABRIEL VALDIVIESO GONZALEZ**

**PALABRAS CLAVES: Speckle, Correlador de transformada conjunta,
Microdesplazamientos, Transformada de Fourier.**

RESUMEN

En este trabajo se presenta un procedimiento alternativo para la medida de desplazamientos en el rango de las decenas de micrones (aproximadamente 20 a 450 [μm]) basado en la correlación entre dos patrones *speckle* mediante un correlador de transformada conjunta bipolar digital. El método consiste en obtener dos patrones de *speckle* objetivo; uno antes y otro después del desplazamiento de una superficie difusora, que se colocan en el plano de entrada del correlador.

La transformación no lineal del espectro de potencia conjunto permite un pico de correlación más agudo y una alta relación señal-ruido. Las coordenadas del pico de autocorrelación del primer patrón se fijan como referencia para la medida del desplazamiento de los picos de correlación cruzada.

El rango de medida se obtiene comparando la energía en el origen de la autocorrelación con la energía del pico de correlación cruzada.

Inicialmente el proceso de calibración es mostrado para las direcciones horizontal y vertical. Se presentan resultados experimentales para diferentes distancias muestra-sensor y longitudes de onda del haz utilizado. También se muestra la implementación de la técnica en tiempo cuasi real.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ciencias, Escuela de Física, Director: Dr. Jáder E. Guerrero Bermúdez

TITLE: MICRO-DISPLACEMENT MEASURE BY MEANS JOINT TRANSFORM CORRELATOR OF SPECKLE PATTERNS*

AUTHOR: LUIS GABRIEL VALDIVIESO GONZALEZ**

KEY WORDS: Speckle, Joint Transform Correlator, Micro-displacements, Fourier Transform

ABSTRACT

This work presents an alternative procedure for measuring displacements of tens micrometer (roughly 20 to 450 [μm]) based on the correlation between two speckle patterns by means of a digital bipolar joint transform correlator.

Two objective speckle patterns are obtained –one before and one after the object has been moved- and are placed in the input plane of a digital nonlinear joint transform correlator.

Nonlinear transformation of the joint power spectrum permits a sharper correlation peak and a high signal to noise ratio. The autocorrelation peak coordinates of the first pattern are set as a reference for measuring displacements of the cross-correlation peak, and also, the calibration of the measurement system is performed.

Experimental results related with the different distances sample-sensor and different wavelengths of illumination are presented. Also quasi real-time implementation of the procedure is shown.

* Undergrade Project

** Facultad de Ciencias, Escuela de Física, Director: Dr. Jáder E. Guerrero Bermúdez

INTRODUCCIÓN

La medida de microdesplazamientos y el posicionamiento preciso de objetos son operaciones requeridas en sectores muy diversos y demandan técnicas con manejo de alta resolución, exactitud, prontitud y el menor contacto con el entorno. En este sentido la correlación conjunta de patrones de *speckle*, se ofrece como un procedimiento alternativo para realizar estas operaciones.

En este trabajo se miden microdesplazamientos (en el rango de los 20 [μm]- 450 [μm]) mediante la correlación conjunta discreta de dos patrones de *speckle* que corresponden a dos posiciones de una superficie difusora. El procedimiento consiste en detectar el movimiento de un patrón de *speckle* que ha sido discretizado mediante una cámara de estado sólido. Esto implica definir el sistema óptico para la formación del patrón de *speckle*, establecer la tasa de muestreo óptima del patrón, el desarrollo del software para realizar el procesamiento de las imágenes y el cálculo de la correlación conjunta, finalmente asociar el resultado de la correlación con la medida de los microdesplazamientos.

De acuerdo a lo anterior este documento se organiza así: En el capítulo 1 se define el origen físico del fenómeno *speckle*, y se desarrollan algunos aspectos de su estadística de primer orden, además se describen algunas técnicas de medida *speckle*.

El formalismo matemático necesario para entender el correlador de transformada conjunta lineal y no lineal se describe en el capítulo 2, incluyendo la definición del valor umbral que maximiza el rendimiento del correlador de transformada conjunta

bipolar, que constituye una de las variantes del correlador no lineal. En el capítulo 3, se describe la forma en que se implementó este último a la medida de microdesplazamientos. Se incluyen en este capítulo tópicos como el proceso de calibración y el criterio utilizado para definir el rango máximo de medida posible con el procedimiento propuesto. Los resultados obtenidos para diversos desplazamientos se muestran en el capítulo 4. Por último en el capítulo 5 se presentan las conclusiones y recomendaciones para ulteriores desarrollos relativos al procedimiento propuesto.

1. FUNDAMENTOS DE LA METROLOGÍA *SPECKLE*

El *speckle* es común a los fenómenos ondulatorios donde existe un considerable grado de coherencia. En particular en el dominio de la óptica su aparición fue inicialmente considerada indeseable, pero muy prontamente se convertiría en una herramienta valiosa en diversas operaciones de metrología óptica y al mismo tiempo en un elemento clave en la comprensión de diversos conceptos del tratamiento óptico parcialmente coherente e incoherente. En este capítulo inicialmente se definirá el origen físico del patrón de *speckle*, posteriormente mencionaremos aspectos de su estadística de primer orden y finalmente discutiremos algunas técnicas de medida *speckle*.

1.1 FENÓMENO *SPECKLE*

La metrología *speckle* puede definirse como la rama de la óptica en la que el fenómeno *speckle* es utilizado para determinar y cuantificar desplazamientos, deformaciones y velocidades de objetos difusores, gradientes del índice de refracción de un medio, etc. [Pom94]. Ella comprende una cantidad relativamente extensa de técnicas, las que generalmente resultan incluidas en una de las dos siguientes categorías: la fotografía *speckle* o la interferometría *speckle*, de la primera se hablará brevemente más adelante.

El fenómeno *speckle* cobró importancia alrededor de los años sesenta cuando estuvieron disponibles los primeros láseres de venta comercial. Los primeros investigadores que trabajaron con estos elementos notaron que cuando se iluminaba una pared con luz láser se producía un patrón granular que podía ser visto, por cualquiera que observara el punto de dispersión.

Pronto fue evidente que este fenómeno y su aleatoriedad se debían a la rugosidad de la superficie que era iluminada por el haz láser. Para que se produzca un patrón de *speckle*, la rugosidad de la superficie debe ser del orden de la longitud de onda con que se ilumina. En la práctica casi cualquier elemento del mundo real produce *speckle*.

El origen físico del *speckle* es simple; cuando una superficie rugosa es iluminada por luz altamente coherente, se producen una cantidad de haces, cada uno originándose desde un elemento diferente de la superficie. Estos haces poseen tanto amplitudes como fases aleatorias. La superposición de estos haces produce puntos brillantes y oscuros debido a interferencias constructivas y destructivas, constituyéndose así un patrón granular de intensidad [Goo04], [Erf78], [Kep04].

El *speckle* se da incluso sin necesidad de formar una imagen del objeto, en este caso se dice que hay *speckle* objetivo o *speckle* de propagación libre. Cuando se forma la imagen del patrón de *speckle*, mediante el uso de una lente se dice que hay *speckle* subjetivo o *speckle* imagen. El tamaño promedio del grano de un patrón de *speckle* objetivo está dado por

$$b_s = 1.22 \left(\frac{\lambda z}{D} \right). \quad (1)$$

En la ecuación anterior λ es la longitud de onda con que se ilumina el objeto; z es la distancia entre la superficie difusora y la pantalla de observación y D es el diámetro del haz láser. El factor 1.22 es resultado de la difracción.

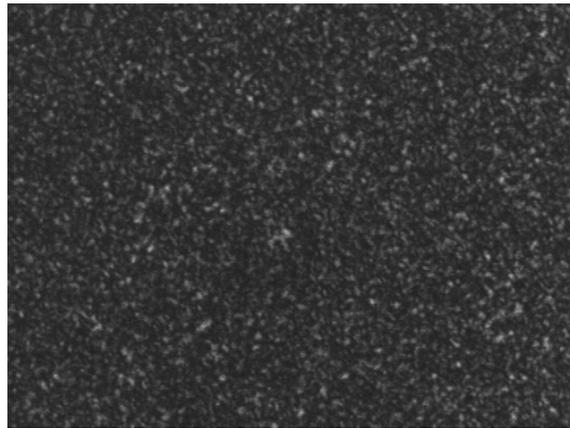
En el caso del *speckle* subjetivo, D es el diámetro de la lente con que se forma la imagen de la superficie difusora, el tamaño del grano del *speckle* subjetivo es

$$b_s \approx 1.22 \left(\frac{\lambda f}{D} \right) (1 + M) \quad (2)$$

donde M es el aumento introducido por la lente y f es su distancia focal. Para los fines de este trabajo sólo trataremos el patrón de *speckle* objetivo [Erf78], [Kep04].

En la Figura 1 se muestra la imagen de un patrón de *speckle* objetivo generado con un haz láser de 543.5 [nm] de longitud de onda, al iluminar una superficie metálica a una distancia muestra-sensor de 11 [cm].

Figura 1. Patrón de *speckle*



Los granos que conforman un patrón de *speckle* existen en el espacio, es decir, tienen una forma tridimensional semejante a un cigarro. Esta estructura tridimensional depende de las propiedades de coherencia de la fuente de iluminación y de las características de la superficie del objeto [Bar04].

1.2 ESTADISTICA DE PRIMER ORDEN DE LOS PATRONES DE SPECKLE

La estadística de primer orden de un patrón de *speckle* determina la probabilidad de la distribución de amplitud, A , e intensidad, I de los granos de *speckle*.

Como se mencionó anteriormente, el fenómeno *speckle* se origina por la superposición de múltiples componentes complejas elementales con fase aleatoria [Erf78], [Goo04]. Así, para un punto en el espacio se tiene que la amplitud compleja viene dada por,

$$A = Ae^{j\theta} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N \mathbf{a}_n = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N a_n e^{j\phi_n} \quad (3)$$

donde \mathbf{a}_n es la n -ésima componente compleja del fasor, con longitud a_n y fase ϕ_n . $1/\sqrt{N}$ es un factor de normalización. De acuerdo a la ecuación (3), la intensidad del patrón será $I = |A|^2$.

El teorema del límite central establece que el resultado de la suma de una gran cantidad de variables aleatorias independientes constituye una distribución Gaussiana en el límite cuando el número de componentes tiende a infinito. En este caso la función de densidad de probabilidad para la amplitud está dada por [Bar04], [Dai91], [Car04]

$$P(A) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{|A|^2}{2\sigma^2}\right] \quad (4)$$

con varianza,

$$\sigma^2 = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{\langle |a_n|^2 \rangle}{2} = \frac{\langle I \rangle}{2}. \quad (5)$$

Si se establecen las siguientes condiciones:

- Un número grande de dispersores
- Independencia de las componentes real e imaginaria de la amplitud A .

Es posible concluir que la intensidad I del patrón de *speckle* tiene una distribución de probabilidad exponencial negativa

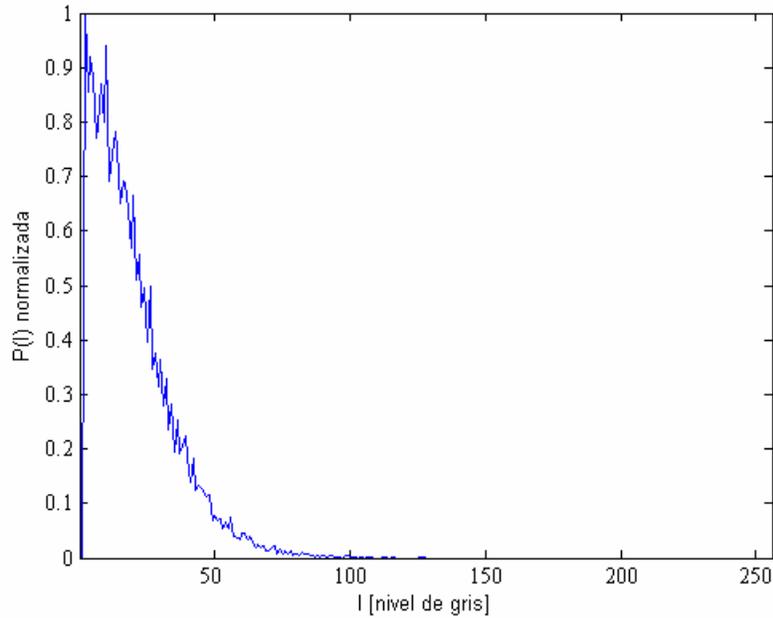
$$P(I) = \frac{1}{\langle I \rangle} \exp\left(-\frac{I}{\langle I \rangle}\right) \quad (6)$$

y la fase asociada ϕ presenta una distribución uniforme en el intervalo $(-\pi, \pi)$ con valor

$$P(\phi) = \frac{1}{2\pi}. \quad (7)$$

En la Figura 2 se muestra la distribución de probabilidad típica de la intensidad, o histograma de un patrón *speckle*.

Figura 2. Ejemplo de distribución de probabilidad de la intensidad de un patrón de *speckle*.



La varianza de la distribución de probabilidad de la intensidad es

$$\sigma_I^2(I) = \langle I^2 \rangle - \langle I \rangle^2 \quad (8)$$

Un cantidad observable de la estadística de primer orden de un patrón de *speckle* lo constituye el contraste C , el cual se define como

$$C = \frac{\sigma_I(I)}{\langle I \rangle} \quad (9)$$

1.3 FOTOGRAFIA SPECKLE DE DOBLE EXPOSICIÓN (DESP¹)

La fotografía *speckle* de doble exposición es una de las técnicas utilizadas para medir translaciones, esfuerzos y rotaciones en el plano, además de vibraciones *in*

¹ Del inglés: *Double exposure speckle photography*

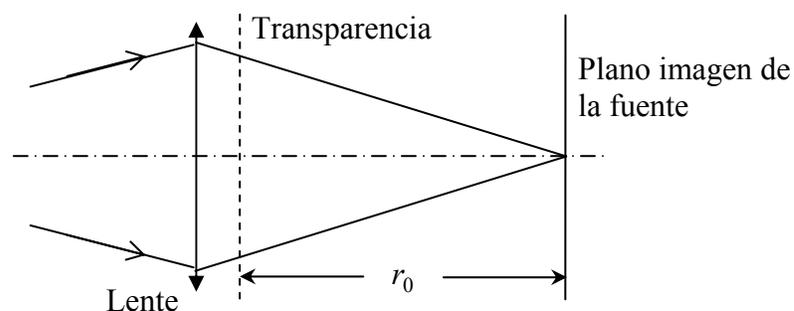
plane y fuera del plano [Wya04]. Su principal atractivo consiste en la simplicidad de los sistemas ópticos y la relativa facilidad para interpretar los resultados.

Esta técnica consiste en formar una imagen de la superficie del objeto que se desplaza, en el plano de una película fotográfica. La imagen consta de un patrón aleatorio de intensidad llamado *speckle* con un tamaño de grano característico, b_s dado en la ecuación (1). Cuando el objeto es desplazado una distancia d_1 , así también el patrón *speckle* se desplazará una cantidad

$$d = M d_1, \quad (10)$$

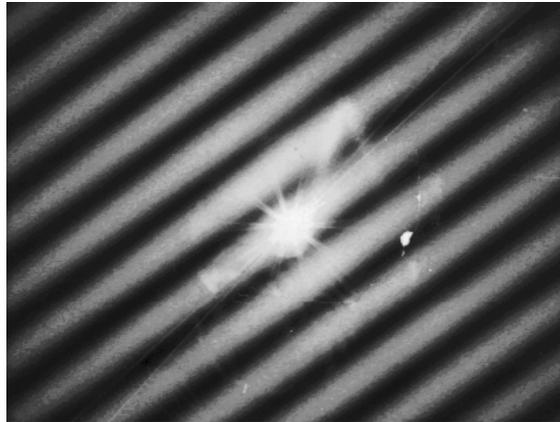
donde M es la amplificación lateral de la lente [Kep04]. El desplazamiento d_1 debe ser mayor que el grano promedio de la emulsión fotográfica y menor que la longitud de correlación de los patrones de *speckle*. Para medir un desplazamiento en el plano, se expone la película al patrón *speckle* dos veces, una antes y otra después del desplazamiento. La película desarrollada contendrá entonces un par de patrones *speckle* idénticos separados por una distancia d . Esta distancia puede ser medida por medio de la lectura de la película mediante un haz coherente, típicamente un láser, como se muestra en la Figura 3.

Figura 3 Procesamiento coherente para la fotografía *speckle* de doble exposición



En el plano imagen de la fuente se obtiene un patrón de franjas debido a la interferencia de Young como se muestra en la Figura 4. [Wya04]

Figura 4 Ejemplo de patrón de franjas obtenidas en el plano imagen de la fuente



El brillo central es debido a luz sin difractar que pasa por la transparencia. Las franjas cosenoidales se producen porque, como ya se dijo, la transparencia está conformada por pares idénticos de granos *speckle* separados por una distancia d , que actúan como fuentes de Young y las franjas resultantes se llaman franjas de Young.

Si no existen deformaciones todas las franjas tienen el mismo paso y orientación resultando en un solo patrón de franjas, con paso

$$p = \frac{\lambda r_0}{d} \quad (11)$$

donde r_0 es la distancia a la pantalla y λ es la longitud de onda con que se ilumina. Estas franjas están orientadas de manera normal a la dirección del desplazamiento en el plano.

Para determinar la distancia real que se desplazó el objeto sólo hay que reemplazar la ecuación (10) en (11) y despejar d_1 , luego

$$d_1 = \frac{\lambda r_0}{M p}. \quad (12)$$

En el caso del estudio de deformaciones se interroga localmente la transparencia doblemente expuesta mediante el haz coherente ó alternativamente se puede recurrir a las técnicas de filtrado en el plano de Fourier para determinar la magnitud y dirección de los desplazamientos de la superficie objeto.

La DESP tiene ciertas ventajas como: la alta sensibilidad, buena resolución y capacidad de retener la información registrada durante largos periodos sin que ésta se altere [Pom94], pero el hecho de necesitar métodos de revelado hace que sea una técnica muy lenta. Cuando se requiere hacer medidas en tiempo real utilizando la fotografía *speckle* de doble exposición suele recurrirse a moduladores espaciales de luz como los cristales fotorrefractivos BGO o BSO, películas termoplásticas que reemplazan a las películas fotográficas en el proceso de registro de los patrones *speckle*. Sin embargo el principal inconveniente de este método y la motivación para el trabajo realizado, es que la DESP presenta ambigüedad en la determinación del sentido del vector desplazamiento.

2. CORRELADOR DE TRANSFORMADA CONJUNTA

El correlador de transformada conjunta (JTC)² es muy frecuentemente utilizado en el campo del reconocimiento y clasificación óptico, digital e híbrido óptico-digital de objetos. Una de las muchas modificaciones al correlador de transformada conjunta clásico (o lineal) consiste en la transformación no lineal del espectro de potencia conjunto [Nau98]. El correlador de transformada conjunta no lineal exhibe picos muy agudos en el plano de salida disminuyendo la incertidumbre en la localización del blanco de interés.

Inicialmente en este capítulo se tratará el correlador de transformada conjunta lineal; mostrando fundamentalmente sus deficiencias, para dar paso al correlador de transformada conjunta no lineal, que reduce estas deficiencias. Particularmente para el correlador de transformada conjunta bipolar se hará una discusión sobre la función umbral que da un óptimo rendimiento a este tipo de correlador.

2.1 CORRELADOR DE TRANSFORMADA CONJUNTA LINEAL

Cuando es necesario el reconocimiento óptico e híbrido óptico-digital de patrones se cuenta con herramientas tales como los procesadores basados en filtros espaciales o los correladores de transformada conjunta [Jav94].

El correlador de transformada conjunta fue introducido por Weaver y Goodman en 1966 [Goo96], y presenta las siguientes ventajas [Tok04]:

² JTC del inglés *Joint Transform Correlator*

- No es necesaria la síntesis de un filtro en el espacio de Fourier
- Es apropiado en aplicaciones en tiempo real.
- Es robusto contra vibraciones y desalineamiento comparado con un correlador basado en filtros (filtros colocados en el plano de Fourier).

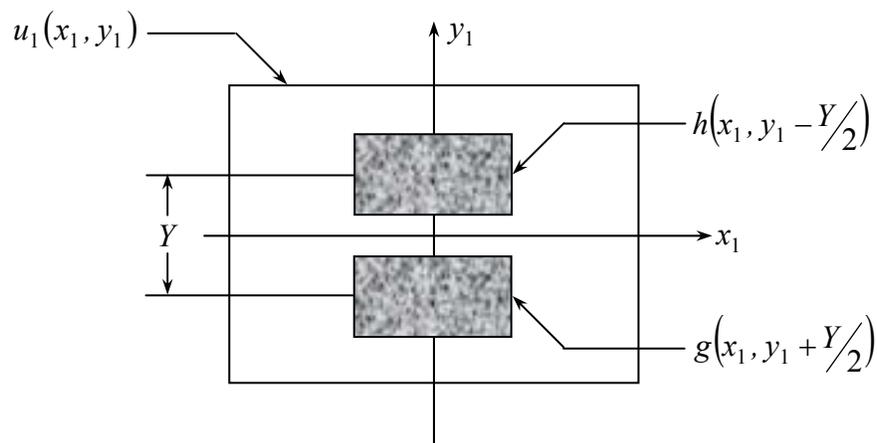
El JTC clásico presenta las siguientes desventajas:

- Notable disminución del producto efectivo ancho de banda-espacio.
- Presencia de lóbulos laterales anchos que deterioran la razón señal-ruido y aumentan la incertidumbre en la localización de los picos de correlación.

El plano de entrada $u_1(x_1, y_1)$ de un JTC, se compone de un patrón de referencia $h(x_1, y_1)$ junto a una escena de entrada $g(x_1, y_1)$, ubicados simultáneamente, en las posiciones $+Y/2$ y $-Y/2$, esto es [Goo96]:

$$u_1(x_1, y_1) = h(x_1, y_1 - Y/2) + g(x_1, y_1 + Y/2). \quad (13)$$

Figura 5 Plano de entrada del JTC



Este plano de entrada es transformado al espacio de Fourier (óptica o digitalmente), lo que conduce a una distribución de amplitud $u_2(x_2, y_2)$, expresada como

$$u_2(x_2, y_2) = cH(cx_2, cy_2)\exp(-j\pi cy_2 Y) + cG(cx_2, cy_2)\exp(j\pi cy_2 Y).$$

En la ecuación (14), $H(cx_2, cy_2)$ y $G(cx_2, cy_2)$ son las transformadas de Fourier, escaladas en un factor c de la referencia $h(x_1, y_1)$ y la escena de entrada $g(x_1, y_1)$ respectivamente. Cuando el correlador JTC es solamente óptico $c = 1/\lambda f$, donde λ es la longitud de onda de la iluminación utilizada y f es la longitud focal de la lente que trae a su plano focal la transformada de Fourier del plano de entrada.

El espectro de potencia conjunto (JPS)³ $I(x_2, y_2)$, resulta en:

$$\begin{aligned} I(x_2, y_2) = |u_2(cx_2, cy_2)|^2 = c^2 |H(cx_2, cy_2)|^2 + c^2 |G(cx_2, cy_2)|^2 + \\ c^2 H(cx_2, cy_2)G^*(cx_2, cy_2)\exp(-j2\pi cy_2 Y) + \\ c^2 H^*(cx_2, cy_2)G(cx_2, cy_2)\exp(j2\pi cy_2 Y). \end{aligned} \quad (15)$$

Esto constituye la intensidad de la transformada de Fourier del plano de entrada. Experimentalmente podría ser obtenida usando un dispositivo sensible a la intensidad entre los cuales encontramos los sensores tipo CCD⁴ o CMOS⁵, que presentan una detección proporcional al cuadrado del módulo de la distribución de amplitud $u_2(x_2, y_2)$.

Para obtener la distribución de correlación es necesario calcular la transformada de Fourier de esta densidad espectral conjunta. La distribución de amplitud en el plano de salida del correlador, $u_3(x_3, y_3)$ será

³ JPS del ingles *Joint Power Spectrum*

⁴ CCD del ingles *Charge Coupled Device*

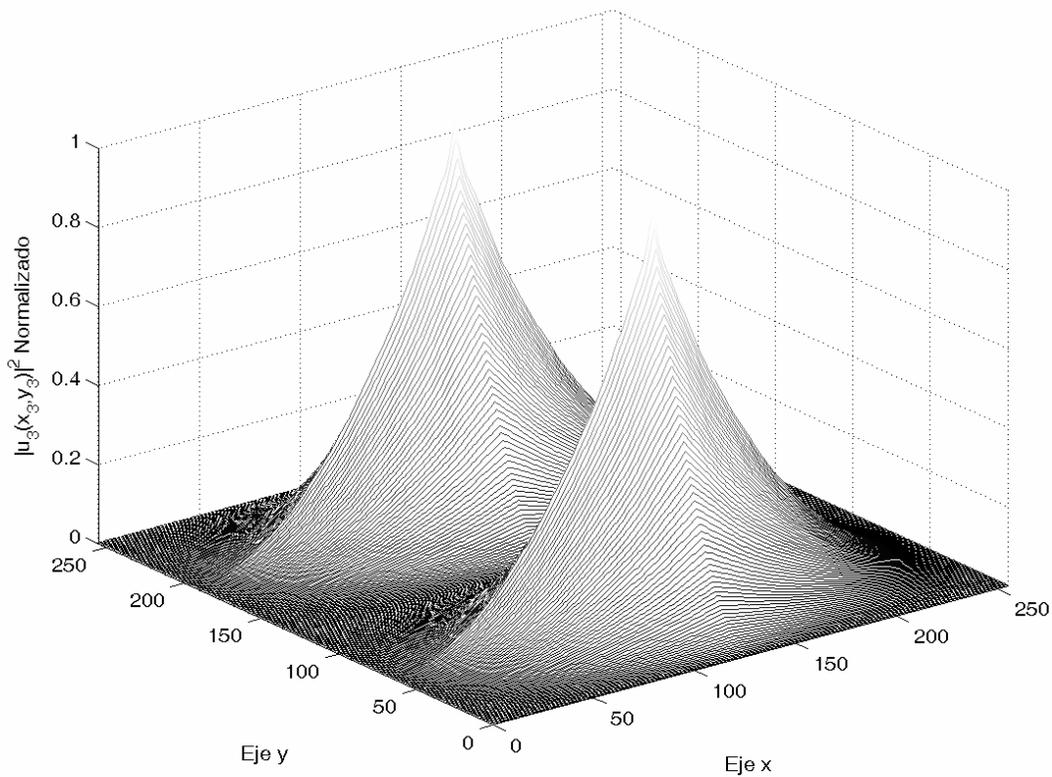
⁵ CMOS del ingles *Complementary Metal Oxide Semiconductor*

$$\begin{aligned}
u_3(x_3, y_3) = c & \left[h(x_3, y_3) \otimes h^*(-x_3, -y_3) + g(x_3, y_3) \otimes g^*(-x_3, -y_3) + \right. \\
& h(x_3, y_3) \otimes g^*(-x_3, -y_3) \otimes \delta(x_3, y_3 - Y) + \\
& \left. h^*(-x_3, -y_3) \otimes g(x_3, y_3) \otimes \delta(x_3, y_3 + Y) \right]
\end{aligned} \tag{16}$$

El primer y segundo término de la parte derecha de la ecuación (16), constituye la componente directa de la transformada, y el tercer y cuarto término son las correlaciones cruzadas de las funciones g y h , centradas en $(0, Y)$ y $(0, -Y)$ sobre el plano de salida del correlador.

Las posiciones de los picos de correlación en el plano de salida están únicamente determinados por la configuración de las imágenes en el plano de entrada y dan cuenta de la probable presencia y la posición de la referencia en la escena de entrada.

Figura 6 Plano de salida del JTC lineal



Como ya se dijo, una de las principales desventajas del JTC lineal es que su plano de salida presenta picos de correlación con lóbulos laterales anchos. Esto se hace evidente en la Figura 6, la cual muestra a manera de ejemplo el plano de salida de la autocorrelación de un patrón *speckle*, donde se ha restado la componente de fondo continuo.

2.2 CORRELADOR DE TRANSFORMADA CONJUNTA NO LINEAL

El uso de transformaciones no lineales en el correlador de transformada conjunta, mejora su desempeño en las tareas de detección de los objetos de interés en la escena de entrada atendiendo a alguno de los siguientes criterios: aumento de la razón señal-ruido, aumento de la razón de discriminación y estreches de picos de la autocorrelación.

Se entiende por correlador de transformada conjunta no lineal aquel JTC cuya densidad espectral de energía conjunta I , es modificada por operaciones no lineales. Dentro de las transformaciones no lineales más comunes encontramos la ley k -ésima, la binarización y la función signo, dando esta última origen al JTC bipolar que preserva el valor cero de la JPS.

El JTC no lineal de ley k -ésima responde a una transformación, $T[\cdot]$, de la forma:

$$T(I) = |I|^k \text{sign}(I), \quad (17)$$

donde *sign* es la función signo y k es un coeficiente que define el grado de linealidad. El valor $k = 1$ corresponde a un JTC lineal, mientras que el valor $k = 0$, corresponde a un JTC bipolar [Jav94].

La densidad espectral conjunta en el JTC bipolar se transforma según

$$T(I) = \begin{cases} 1; & I > V_T \\ -1; & I < V_T \\ 0; & I = V_T \end{cases} \quad (18)$$

Donde V_T es un valor umbral, que debe escogerse de modo que maximice la intensidad de los picos de autocorrelación y al mismo tiempo reduzca la altura de los picos de orden superior.

Si los espectros $H(cx_2, cy_2)$ y $G(cx_2, cy_2)$ se escriben en forma compleja; $H(cx_2, cy_2) = |H| \exp(j\varphi_H)$ y $G(cx_2, cy_2) = |G| \exp(j\varphi_G)$, donde φ_H y φ_G son las fases de los espectros del patrón de referencia y de la escena de entrada respectivamente, la ecuación (15) toma la forma

$$I(x_2, y_2) = c^2 |H|^2 + c^2 |G|^2 + 2c^2 |H||G| \cos(2\pi cy_2 Y + \varphi_G - \varphi_H). \quad (19)$$

Una transformación no lineal del tipo mostrado en la ecuación (18), convierte la JPS dada en (19) en una señal periódica a lo largo del eje y_2 , constituida por pulsos rectangulares cuyo ancho depende del umbral seleccionado. En la figura 7, se muestra un perfil en intensidad a lo largo del eje y_2 de la JPS transformada según (18) y en la figura 8, se muestra el ancho de pulso para diferentes umbrales.

Debido a la periodicidad a lo largo del eje y_2 de la JPS transformada no linealmente, ésta puede aproximarse mediante una serie de Fourier

$$T(y_2) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_k \exp\left(j \frac{2\pi k y_2}{L}\right) \quad (20)$$

donde k es un entero y $L = \frac{1}{cY}$ es el periodo de la señal. Los coeficientes C_k de la serie son obtenidos de acuerdo a la figura 7 mediante,

$$C_k = \frac{1}{L} \int_{\delta}^{L+\delta} T(y_2) \exp\left(-j \frac{2\pi k y_2}{L}\right) dy_2 \quad (21)$$

Donde $\delta = \varphi_H - \varphi_G$.

Explícitamente la ecuación (21) puede escribirse como

$$C_k = \frac{1}{L} \left[\int_{\delta}^{\delta+d} \exp\left(-j \frac{2\pi k y_2}{L}\right) dy_2 - \int_{\delta+d}^{\delta+L} \exp\left(-j \frac{2\pi k y_2}{L}\right) dy_2 \right] \quad (22)$$

Resolviendo las integrales dadas en la ecuación anterior se muestra que los valores de C_k son:

$$C_k = \begin{cases} \frac{2d}{L} - 1 & ; k = 0 \\ \frac{2}{\pi k} \operatorname{sen}\left(\pi k \frac{d}{L}\right) \exp\left(-j \pi k \left(\frac{2\delta+d}{L}\right)\right) & ; k \neq 0 \end{cases} \quad (23)$$

Figura 7 La transformación no lineal de la JPS

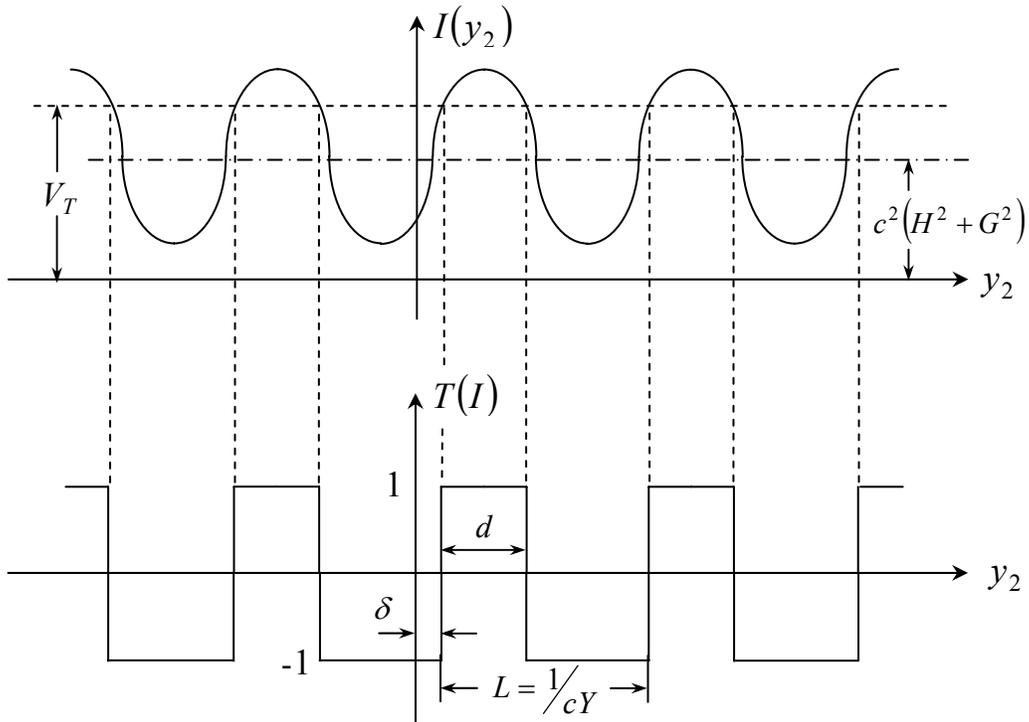
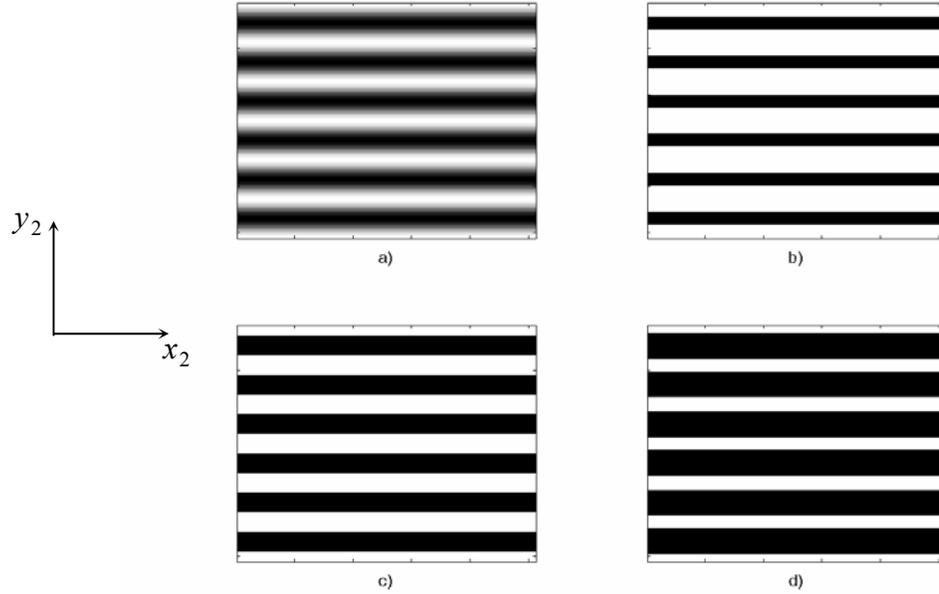


Figura 8 Transformación no lineal de un coseno para diferentes umbrales.

a) Coseno sin ninguna transformación, b) Umbral a 50% del valor del fondo continuo c) Umbral a 100% del valor del fondo continuo d) Umbral a 150% del fondo continuo



Reemplazando la ecuación (23) en la ecuación (20) se tiene

$$T(y_2) = 2 \frac{d}{L} - 1 + \sum_{k=-\infty}^{-1} \frac{2}{\pi k} \text{sen} \left(\pi k \frac{d}{L} \right) \exp \left(-j \pi k \left(\frac{2\delta + d}{L} \right) \right) \exp \left(j \frac{2\pi k y_2}{L} \right) + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2}{\pi k} \text{sen} \left(\pi k \frac{d}{L} \right) \exp \left(-j \pi k \left(\frac{2\delta + d}{L} \right) \right) \exp \left(j \frac{2\pi k y_2}{L} \right), \quad (24)$$

Si se sustituye $k \rightarrow -k$ en la primera sumatoria de (24), entonces

$$T(y_2) = 2 \frac{d}{L} - 1 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{4}{\pi k} \text{sen} \left(\pi k \frac{d}{L} \right) \cos \left(\pi k \left(\frac{2y_2 - 2\delta - d}{L} \right) \right). \quad (25)$$

La ecuación (25) muestra que la densidad espectral conjunta puede ser aproximada mediante una suma de términos armónicos. La transformada de

Fourier de $T(y_2)$ estará constituida por una serie de distribuciones deltas de Dirac equiespaciadas en el plano de correlación. Para nuestros propósitos sólo consideremos el primer término armónico $k = 1$.

El interés es maximizar el cociente entre el pico de primer orden de la autocorrelación, respecto a la energía del fondo continuo, esto se logra si la amplitud,

$$A_1 = \frac{4}{\pi} \text{sen}\left(\pi \frac{d}{L}\right) \quad (26)$$

se maximiza. La amplitud A_1 es máxima cuando el ancho del pulso es igual a medio período.

$$d = L/2 = 1/2cY. \quad (27)$$

El umbral óptimo, V_T , en el sentido que proporciona la mejor razón entre la energía del pico de autocorrelación y la componente directa será

$$V_T = c^2 |H|^2 + c^2 |G|^2 \quad (28)$$

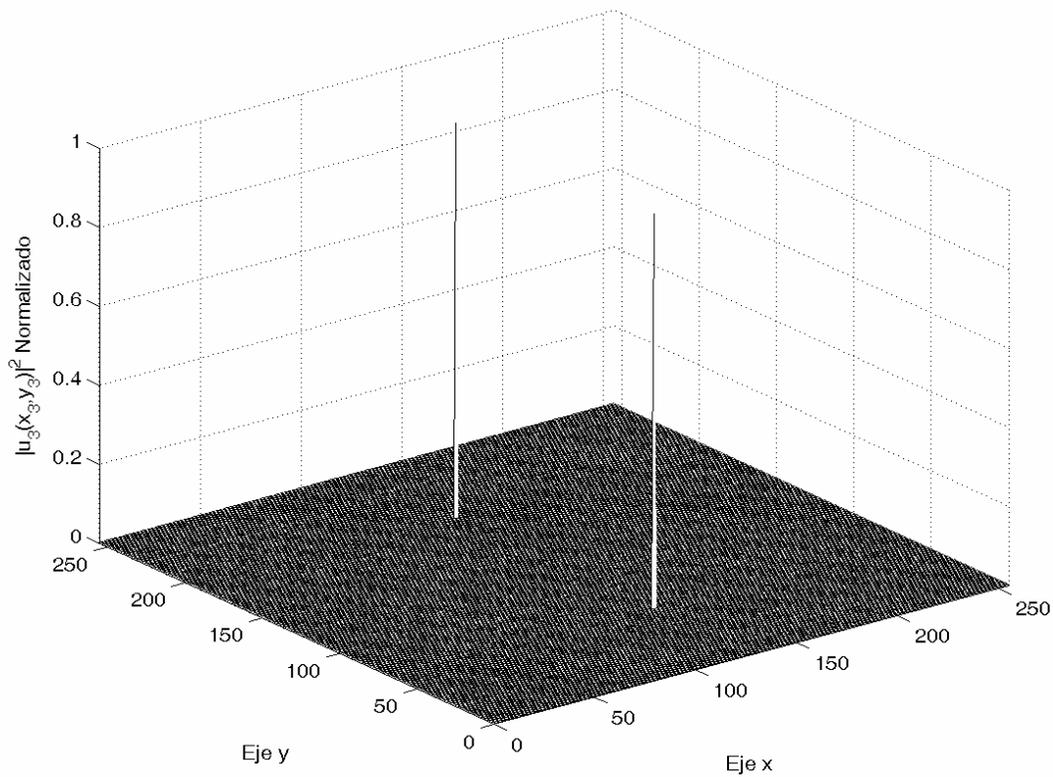
que no es otra cosa que el fondo continuo de la JPS. La ecuación (28), puede deducirse directamente del valor de intensidad dado en la ecuación (19), para $y_2 = d/2$, con $\varphi_G - \varphi_H = 0$, lo cual es característico de la autocorrelación.

Finalmente la salida del correlador $u_3(x_3, y_3)$ será proporcional a la transformada de Fourier del término coseno que aparece en la ecuación (25) para $k = 1$, lo cual resulta en:

$$u_3(x_3, y_3) \approx \text{cte}(\delta(x_3, y_3 - Y) + \delta(x_3, y_3 + Y)) \quad (29)$$

De manera que la distribución de correlación cuando la JPS es transformada no linealmente, tomando como umbral la función umbral óptimo consta de dos distribuciones delta ubicadas en las posiciones $(0, Y)$ y $(0, -Y)$ del plano de salida.

Figura 9 Plano de salida del JTC no lineal



3. MEDIDA DE MICRODESPLAZAMIENTOS MEDIANTE CORRELACIÓN CONJUNTA DE PATRONES DE SPECKLE: DESCRIPCIÓN DE LA TÉCNICA

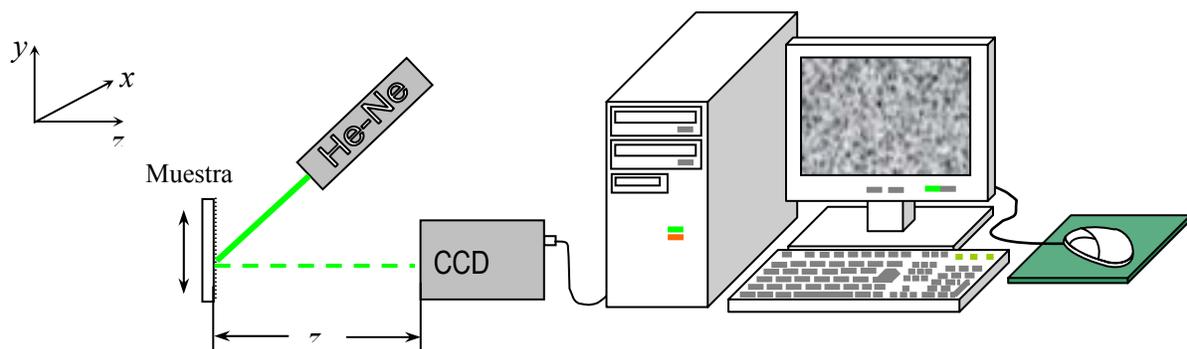
Previamente se introdujo el formalismo de la correlación conjunta no lineal presentando las ventajas que ofrece en la detección y la localización de un objeto de interés en una escena de entrada. En este capítulo se muestra cómo la correlación conjunta no lineal puede ser utilizada para la medida de microdesplazamientos. Inicialmente se describe el montaje utilizado, posteriormente se presenta el procedimiento de calibración y la generación de los patrones de *speckle*, luego se discute el criterio utilizado para definir el rango de la medida y finalmente se mencionan algunas características de los ensayos en tiempo real implementados.

3.1 DESCRIPCIÓN DEL MONTAJE

La luz coherente de un haz láser de He-Ne con longitud de onda 543.5 [nm] [Uni04] ilumina la superficie de la muestra, la cual se encuentra sobre una estación de microdesplazamientos (x, y) , ver figura 10. La componente difusa de la luz reflejada por la muestra es registrada por un sensor desnudo (desprovisto de óptica) de una cámara *CCD* monocromática. Este registro constituye un patrón de *speckle* objetivo.

Para garantizar el registro de un patrón de *speckle* bien desarrollado, la superficie de la muestra debe presentar una reflectancia adecuada y su rugosidad promedio debe ser del orden o mayor que la longitud de onda de la luz utilizada.

Figura 10. Esquema del montaje utilizado



El procedimiento de calibración requiere un muestreo óptimo del patrón de *speckle*, el tamaño efectivo del píxel es de $14 \times 14 \text{ } [\mu\text{m}^2]$ ⁶, de manera que atendiendo al teorema del muestreo, el tamaño del grano de *speckle* correctamente sensado será mínimo $28 \times 28 \text{ } [\mu\text{m}^2]$. Para lograr este tamaño de grano de *speckle* recurrimos a la ecuación (1), que permite determinar la distancia mínima entre el sensor y la muestra.

Estimando un diámetro de *spot* de 1.5 [mm], la distancia muestra-sensor mínima para un óptimo muestreo, con longitudes de onda de 543.5 [nm] y 632.8 [nm] [Unip04] son 6.33 [cm] y 5.44 [cm] respectivamente.

El patrón de *speckle* registrado por la CCD es discretizado mediante una tarjeta digitalizadora de video, Meteor II Matrox™, a 8 bits y tamaño de imagen de 512×512 píxeles cuadrados.

El paso inicial de la calibración consiste en la definición de un origen de coordenadas, con respecto al cual se determinará el vector desplazamiento del pico del primer orden de la correlación conjunta no lineal entre patrones de *speckle* correspondientes a los desplazamientos de la muestra. El origen será

⁶ Físicamente el tamaño vertical de los fotodiodos es de 14 [μm] y su tamaño horizontal, considerando procesos de integración se estimó en 14 [μm]

ubicado en la posición correspondiente al pico de la autocorrelación del patrón de *speckle* con desplazamiento nulo de la muestra.

El plano de entrada del correlador está conformado por la referencia, que es el patrón de *speckle* correspondiente a la muestra sin desplazar, y la escena de entrada, constituida por el *speckle* producido por la muestra y que cambia con cada desplazamiento de ésta. Al desplazar la muestra sucesivamente se registra el patrón y se realizan sendas correlaciones entre la escena y la referencia.

Para la elaboración de una recta de calibración, se calculan los desplazamientos promedios del pico de primer orden de correlación y se grafican versus los desplazamientos reales de la muestra. La pendiente de esta recta está asociada con el inverso del tamaño del píxel, corroborando su tamaño de aproximadamente 14 [μm]. En el caso de la figura 11, los desplazamientos de la muestra han sido en dirección horizontal y con una distancia muestra-sensor de 7 [cm]. El proceso de calibración debe ser realizado tanto para la dirección x como para la dirección y .

Una vez determinada la relación entre los desplazamientos reales de la muestra y el número de píxeles que se desplaza el pico del primer orden de correlación, se rectifica la calibración, ver figura 12, que muestra la relación entre los desplazamientos reales y los desplazamientos calculados.

Figura 11. Construcción de la recta de calibración.

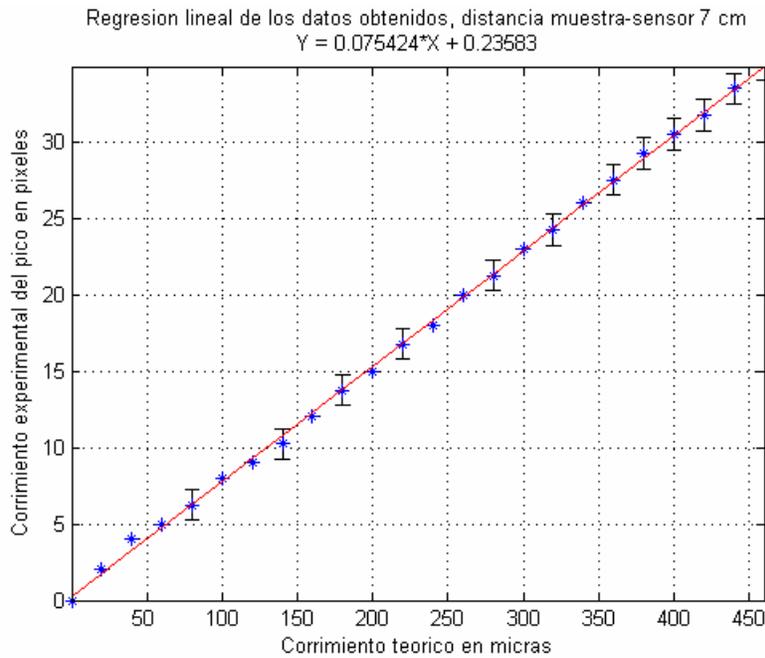
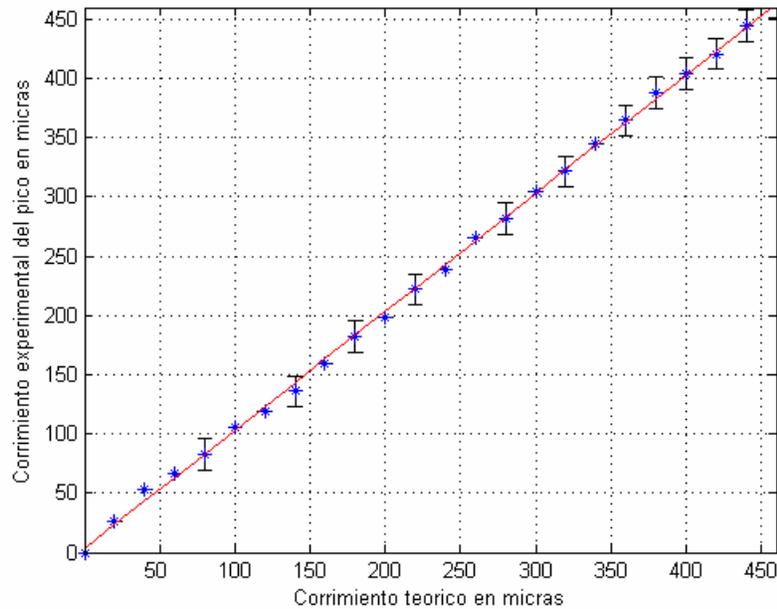


Figura 12. Rectificación de la calibración



Ciertamente en la figuras 11 y 12 se presentan los promedios del desplazamiento calculado de la muestra y su incertidumbre a una desviación típica. En todos los casos la desviación típica estuvo por debajo de la resolución del sistema, lo cual implica que efectivamente la resolución de la medida la impone el tamaño del píxel, $14 [\mu m]$; esto resulta valido tanto para los desplazamientos horizontales y

verticales. Con desviaciones típicas de este orden se infiere que el método es altamente repetible.

3.2 DETERMINACION DEL RANGO DE MEDIDA

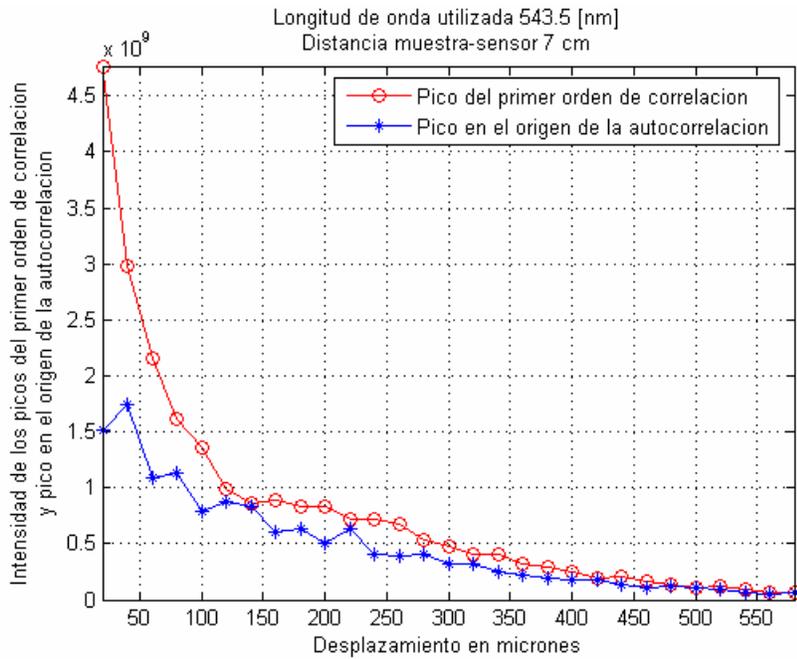
Anteriormente hemos mencionado que la resolución del procedimiento de medida propuesto básicamente se encuentra limitada por el tamaño efectivo de los píxeles, ahora la discusión estará centrada sobre el rango de la medida, es decir, cual es el desplazamiento máximo que puede ser medido de manera confiable y qué criterio debe ser seleccionado para determinarlo.

El criterio empleado en la determinación del rango confiable de la medida de microdesplazamientos, requiere el cálculo de la intensidad del primer orden de correlación y la intensidad en el punto que previamente se ha determinado como el origen (que coincide con las coordenadas del máximo de la autocorrelación de los patrones de *speckle*). De manera que cuando la intensidad de la correlación del patrón de referencia y el patrón de entrada resulta igual o menor que la intensidad en el origen, la medida del microdesplazamiento arroja falsos valores. En la figura 13 a), se muestra la intensidad del pico de primer orden y la intensidad en el origen versus los desplazamientos en el rango de 0 a 600 [μm], para una distancia muestra-sensor de 7 [cm] obsérvese que cerca de los 480 [μm] en la figura 13 b), la medida resulta incorrecta y con una altísima incertidumbre, coincidiendo con el inicio de la región en la que los valores de la intensidad en el origen de la autocorrelación igualan y ligeramente superan a la intensidad del pico de primer orden de la correlación conjunta no lineal.

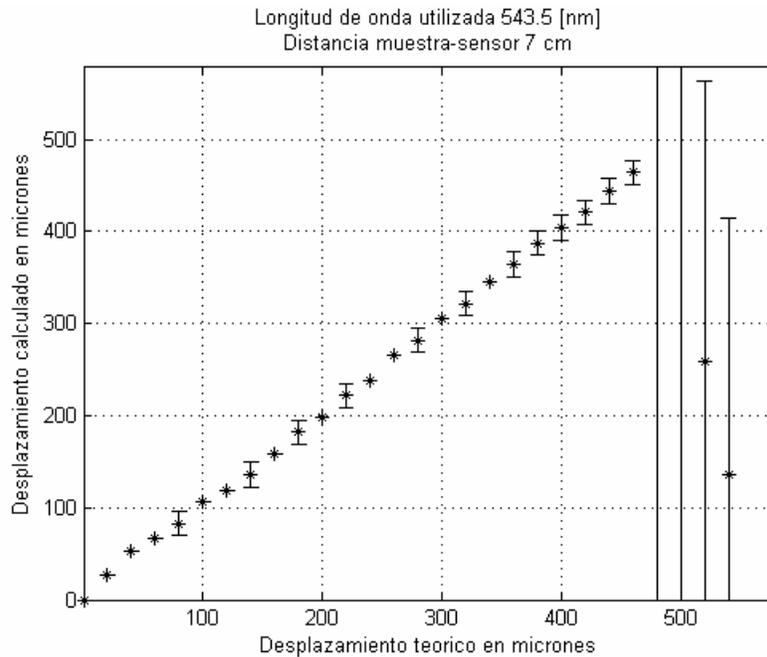
El rango de la medida resulta afectado por la distancia muestra-sensor, cuando esta distancia aumenta, el rango disminuye como se evidencia en las figuras 13 y 14. Esto obedece principalmente a la fuerte decorrelación de los bordes de los granos de *speckle*, que son resaltados por el filtrado de sólo fase característico de

la correlación no lineal, al salir parcialmente de la ventana de observación en el plano de entrada del correlador.

Figura 13. Determinación del criterio del rango de la medida de microdesplazamientos para distancia muestra-sensor 7 [cm]. a) Grafica del criterio, b.) Desplazamientos calculados

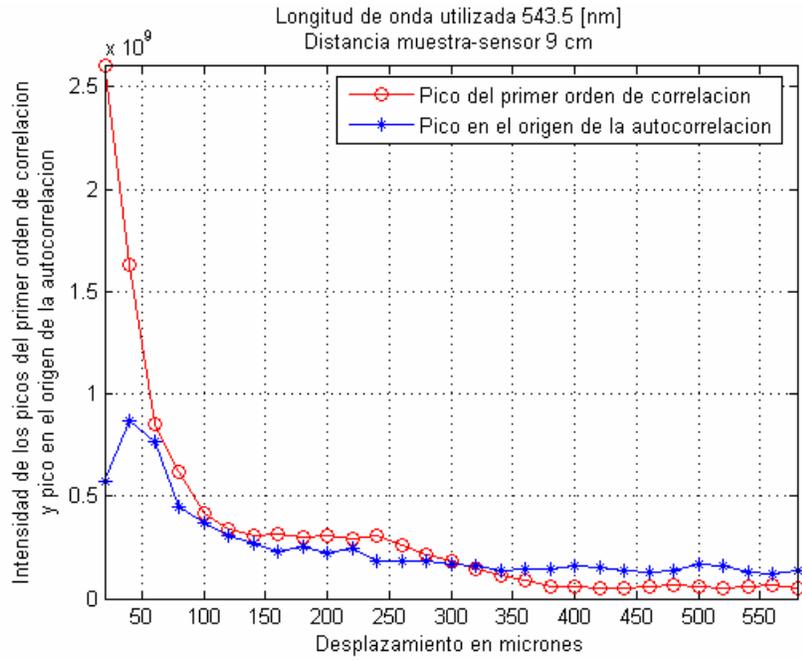


a)

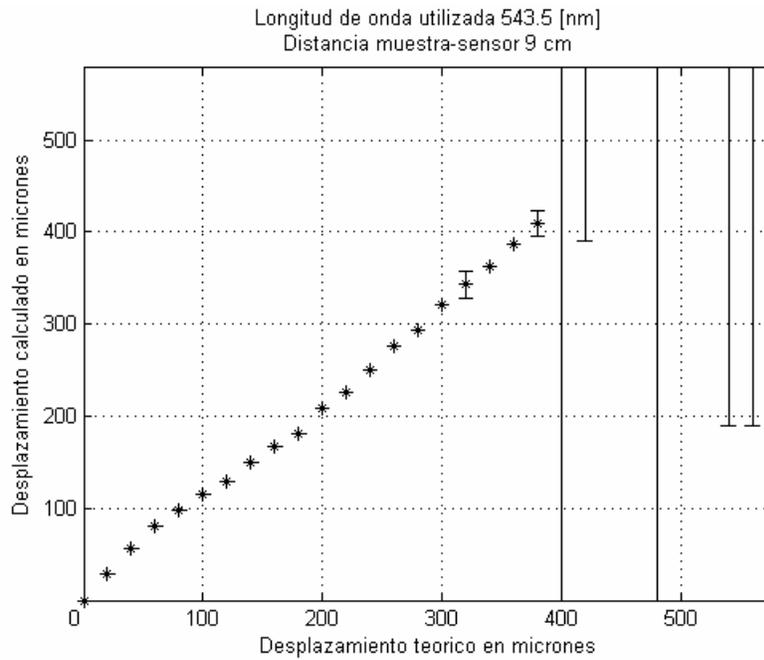


b)

Figura 14. Determinación del criterio del rango de la medida de microdesplazamientos para distancia muestra-sensor 9 [cm], a) Grafica del criterio, b) Resultados

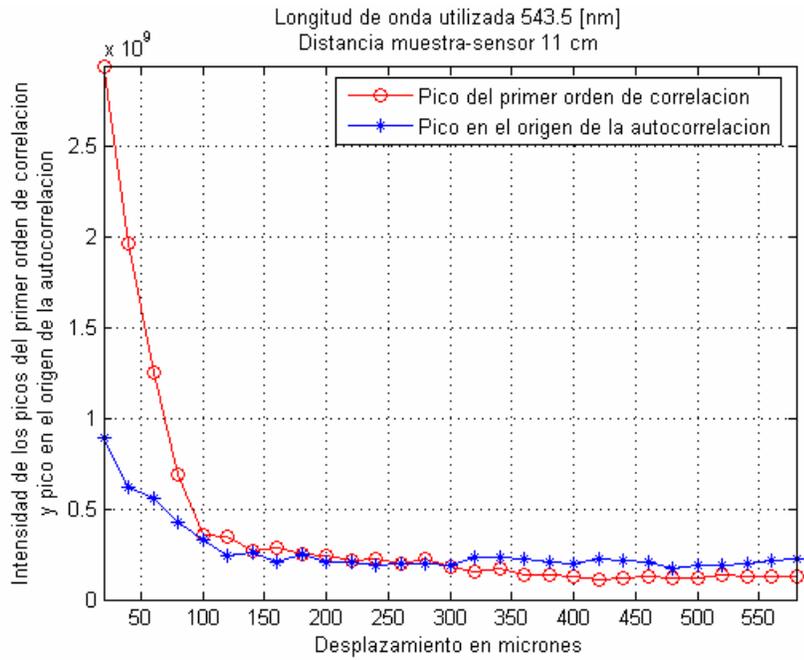


a)

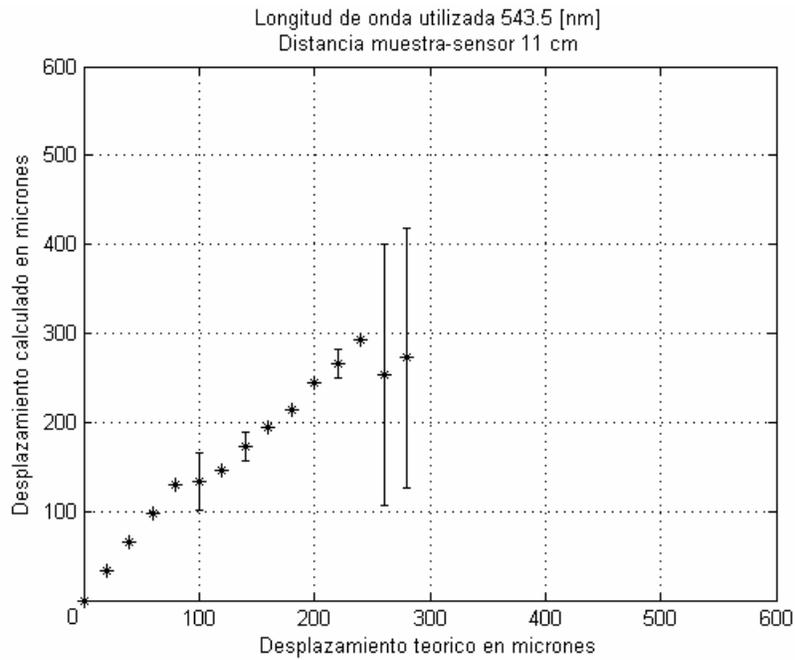


b)

Figura 15. Determinación del criterio del rango de la medida de microdesplazamientos para distancia muestra-sensor 11 [cm], a) Grafica del criterio, b) Resultados



a)



b)

3.3 ENSAYOS DE IMPLEMENTACIÓN DE LA TÉCNICA EN TIEMPO REAL

Mediante la implementación de algoritmos de captura de imágenes en Matlab® 7.0, y equipos medianamente veloces fue posible la realización de medidas en tiempo cuasireal de los desplazamientos de los patrones *speckle*.

El procedimiento implementado realiza aproximadamente 10 correlaciones por segundo (una correlación cada 0.0962 [s]). Esta frecuencia resulta ser pequeña comparada con el potencial de la correlación óptica, que se estima típicamente alrededor de las 400 correlaciones por segundo y podría competir con las correlaciones híbridas óptico-digital de los procesadores de propósito específico actuales que manejan típicamente 40 correlaciones por segundo [Psa90].

4. RESULTADOS

En el capítulo anterior fue descrito el procedimiento de medida de microdesplazamientos mediante la correlación de transformada conjunta no lineal discreta. A continuación se muestran algunos de los resultados obtenidos.

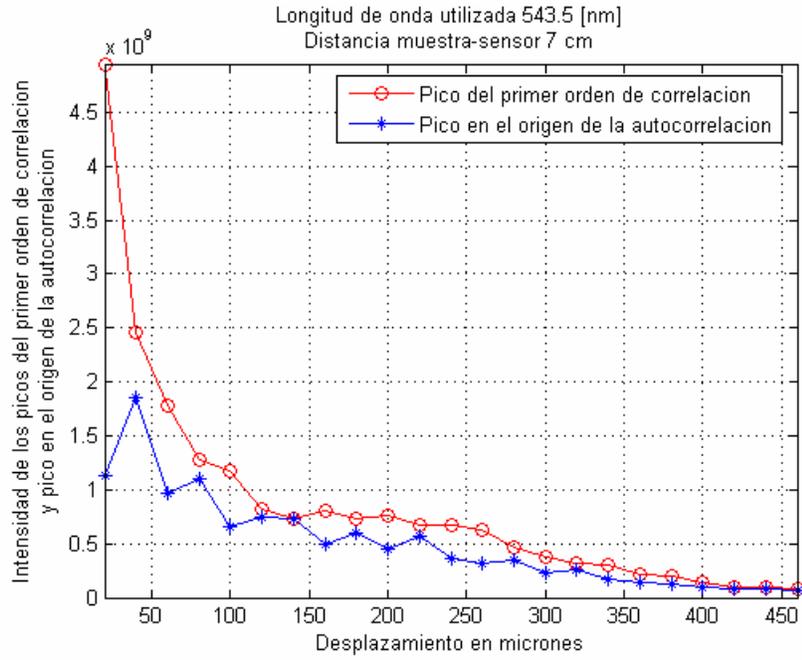
Las medidas realizadas corresponden a desplazamientos en dos direcciones mutuamente perpendiculares, que llamaremos desplazamientos horizontales y desplazamientos verticales. A diferencia de la técnica de fotografía *speckle* de doble exposición, mencionada en el capítulo 1, el procedimiento propuesto permite encontrar el vector desplazamiento con respecto a un origen previamente establecido, es decir el problema de la ambigüedad del sentido (izquierdo-derecho y arriba-abajo) es eliminado.

Otro grupo de medidas incluyen desplazamientos en el plano, permitiendo un seguimiento (*tracking*) para establecer trayectorias bidimensionales.

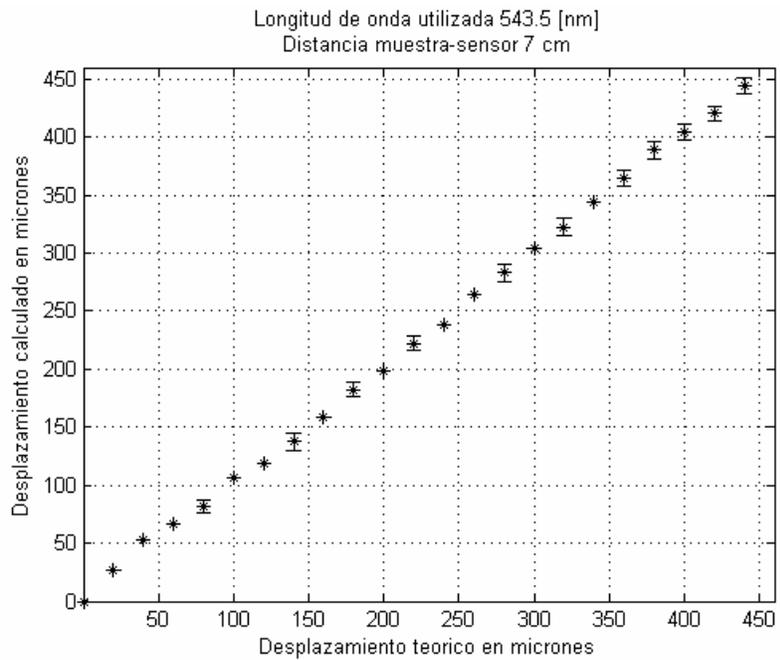
4.1 DESPLAZAMIENTOS HORIZONTALES

En las figuras 16 a) a 23 a) se determinan los rangos de confiabilidad de la medida de microdesplazamientos, basados en el criterio descrito en el capítulo 3, y en las figuras 16 b) a 23 b) se presentan los desplazamientos calculados versus los desplazamientos teóricos, variando la distancia muestra-sensor, entre los 7 [cm] y los 14 [cm] a incrementos de 1 [cm]. La muestra metálica es iluminada con un haz láser de longitud de onda $\lambda = 543.5$ [nm], (ver numeral 3.1, sobre descripción de la técnica).

Figura 16. Desplazamientos horizontales, distancia muestra-sensor 7 [cm], $\lambda = 543.5$ [nm]. a) Grafica del criterio, b) Desplazamientos calculados versus desplazamientos teóricos.

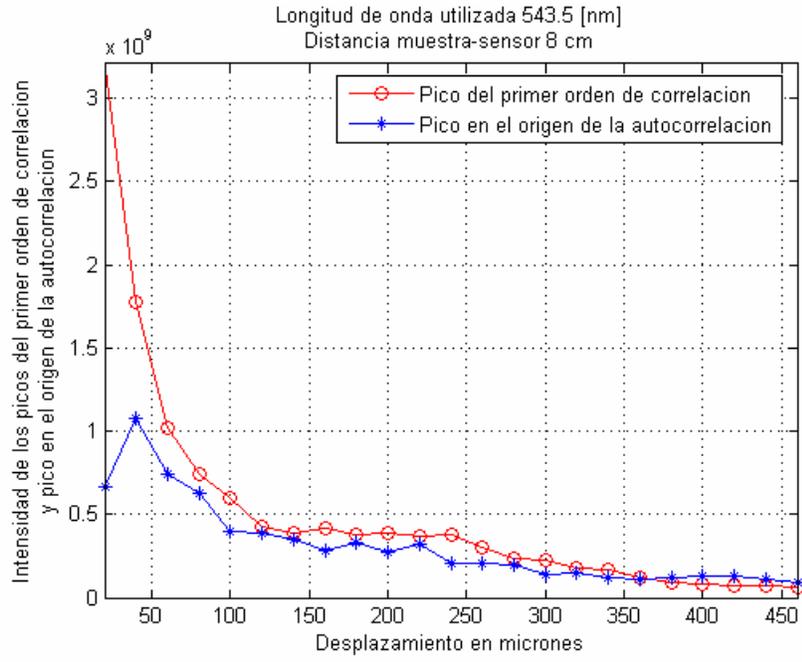


a)

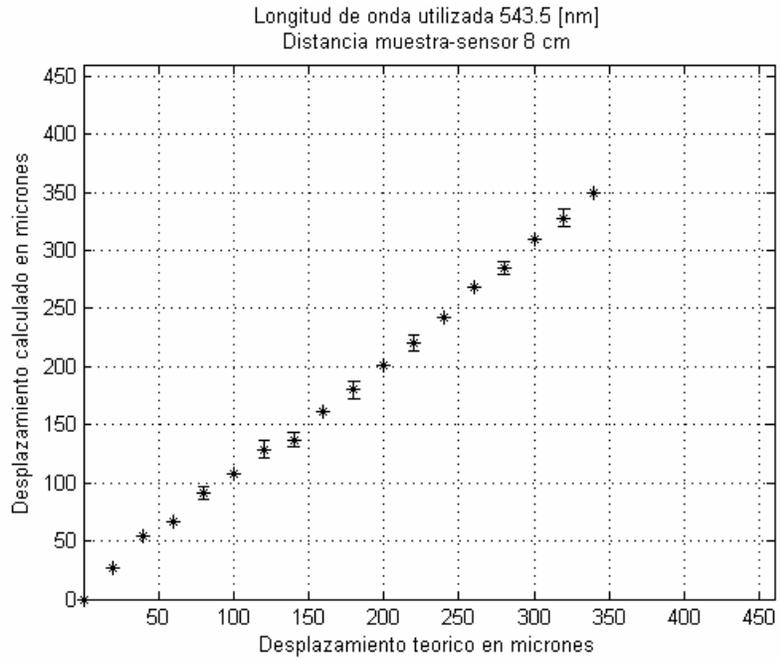


b)

Figura 17. Desplazamientos horizontales, distancia muestra-sensor 8 [cm], $\lambda = 543.5$ [nm]. a) Grafica del criterio, b) Desplazamientos calculados versus desplazamientos teóricos.

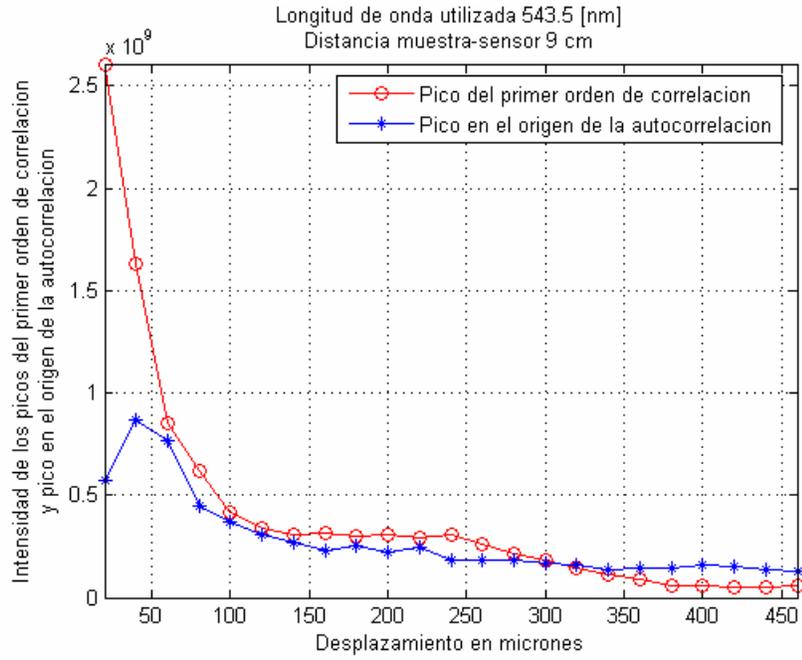


a)

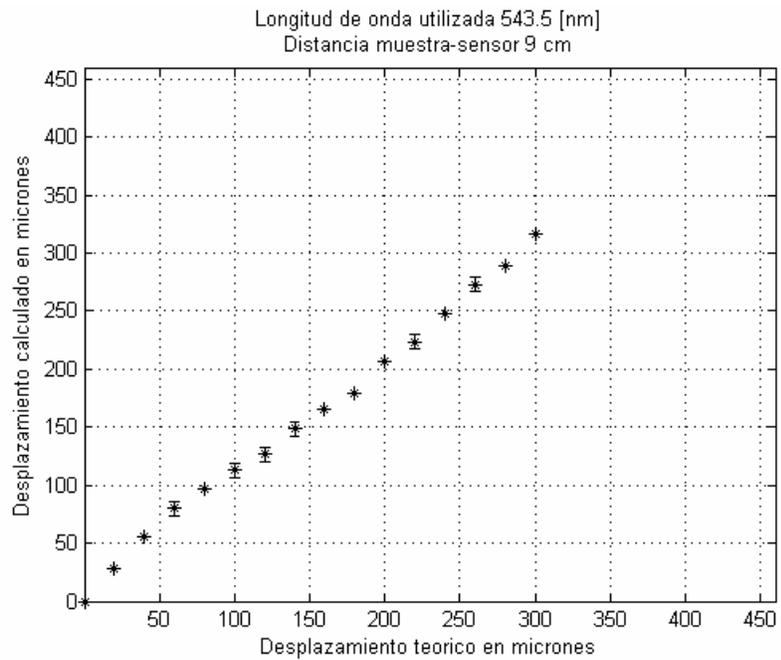


b)

Figura 18. Desplazamientos horizontales, distancia muestra-sensor 9 [cm], $\lambda = 543.5$ [nm]. a) Grafica del criterio, b) Desplazamientos calculados versus desplazamientos teóricos.

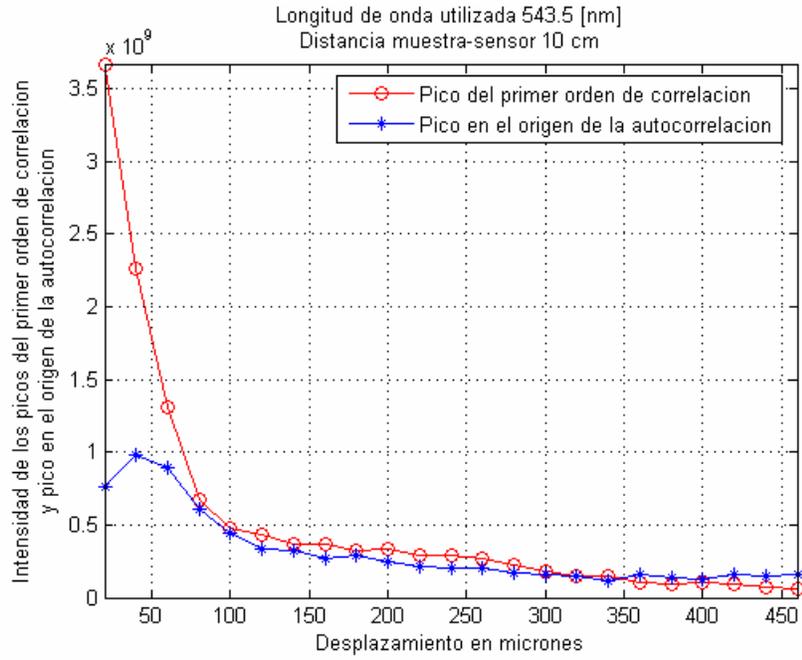


a)

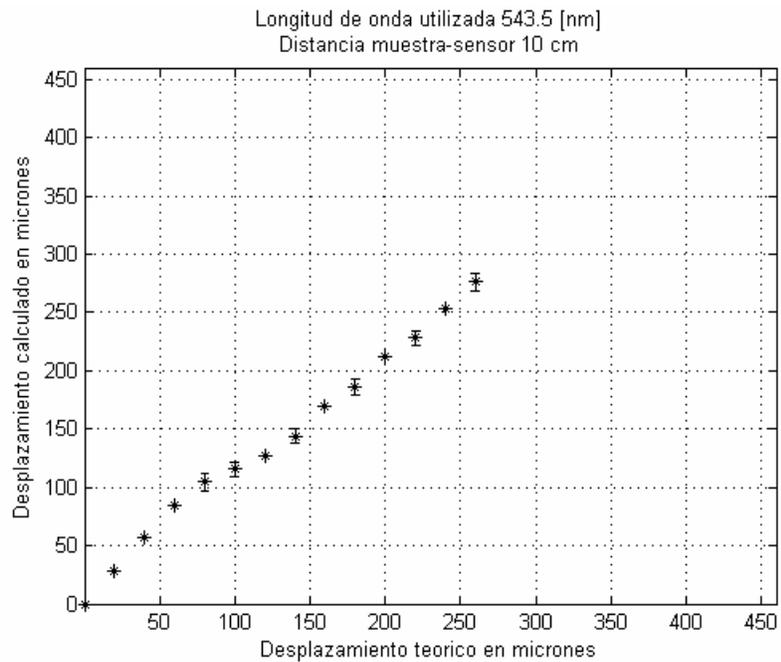


b)

Figura 19. Desplazamientos horizontales, distancia muestra-sensor 10 [cm], $\lambda = 543.5$ [nm]. a) Grafica del criterio, b) Desplazamientos calculados versus desplazamientos teóricos.

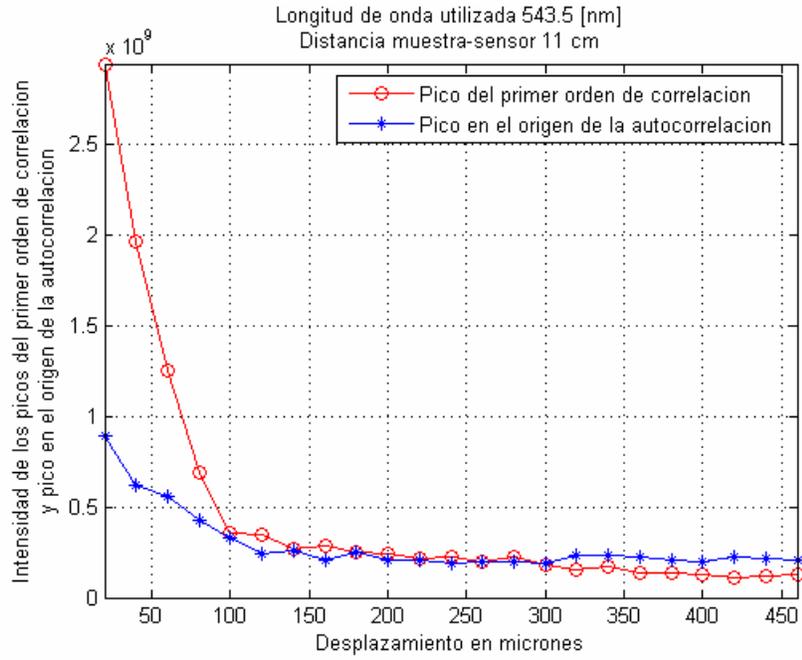


a)

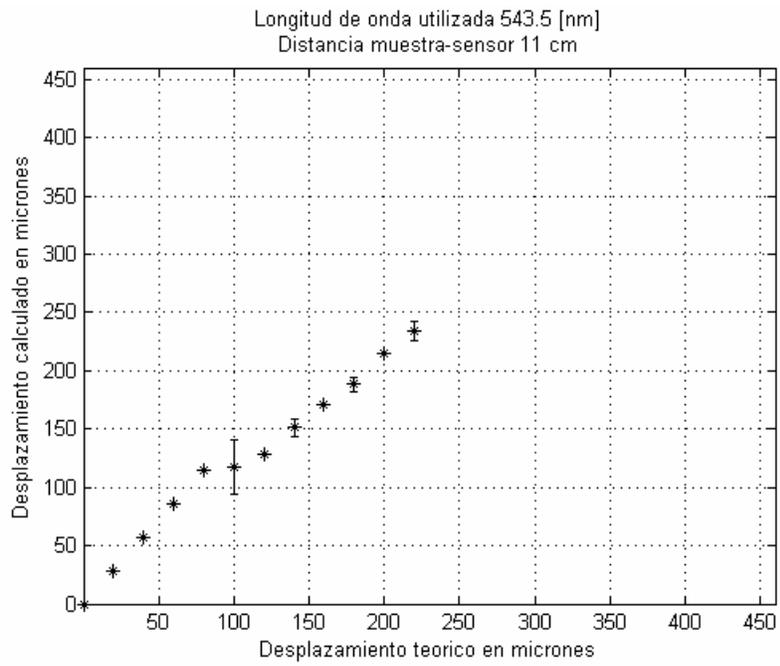


b)

Figura 20. Desplazamientos horizontales, distancia muestra-sensor 11 [cm], $\lambda = 543.5$ [nm]. a) Grafica del criterio, b) Desplazamientos calculados versus desplazamientos teóricos.

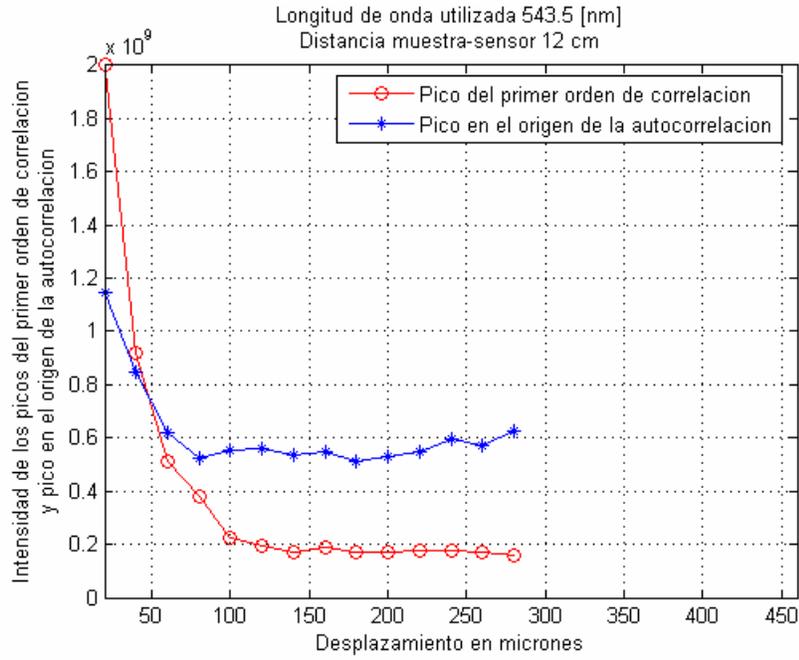


a)

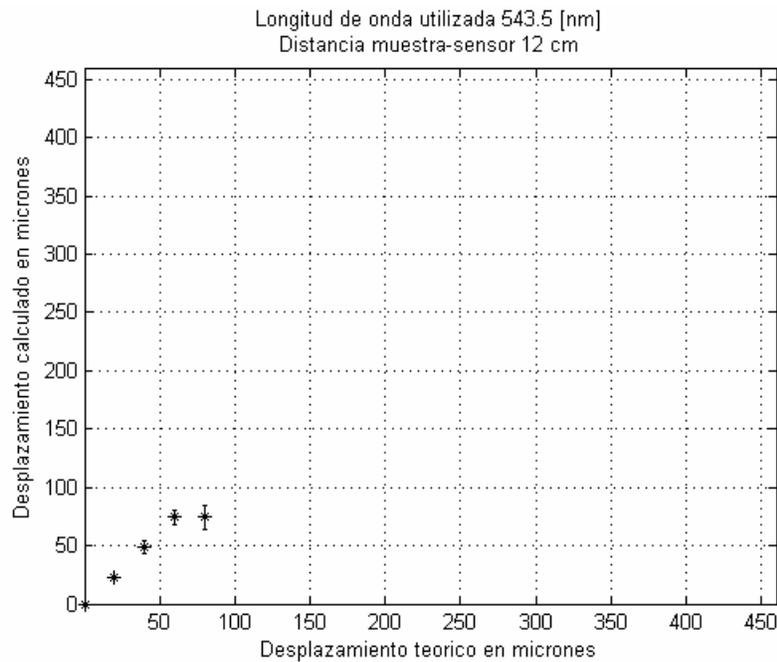


b)

Figura 21. Desplazamientos horizontales, distancia muestra-sensor 12 [cm], $\lambda = 543.5$ [nm]. a) Grafica del criterio, b) Desplazamientos calculados versus desplazamientos teóricos.

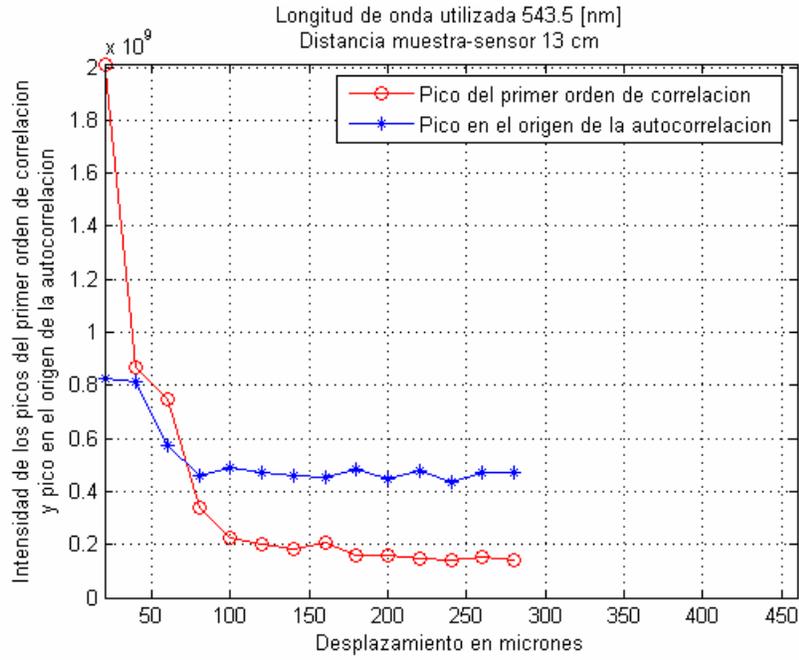


a)

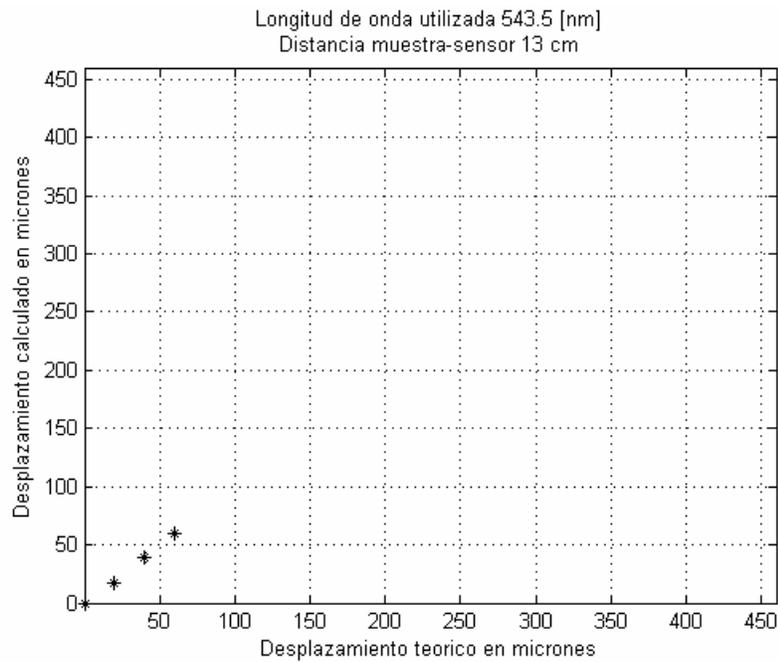


b)

Figura 22. Desplazamientos horizontales, distancia muestra-sensor 13 [cm], $\lambda = 543.5$ [nm]. a) Grafica del criterio, b) Desplazamientos calculados versus desplazamientos teóricos.

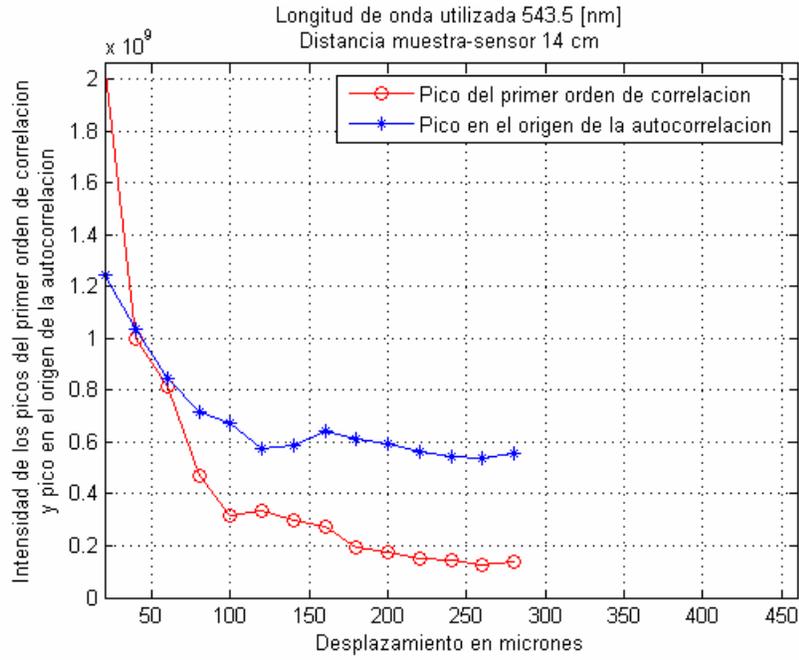


a)

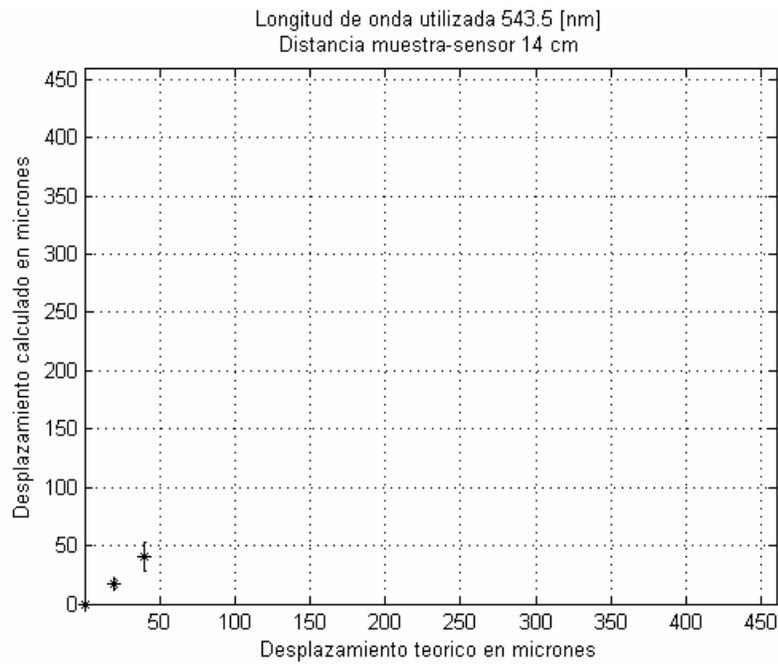


b)

Figura 23. Desplazamientos horizontales, distancia muestra-sensor 14 [cm], $\lambda = 543.5$ [nm]. a) Grafica del criterio, b) Desplazamientos calculados versus desplazamientos teóricos.



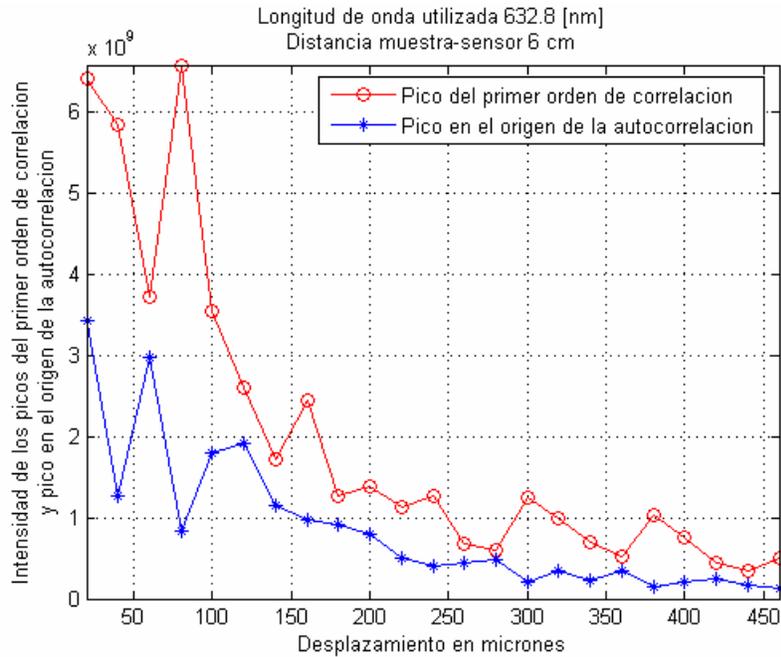
a)



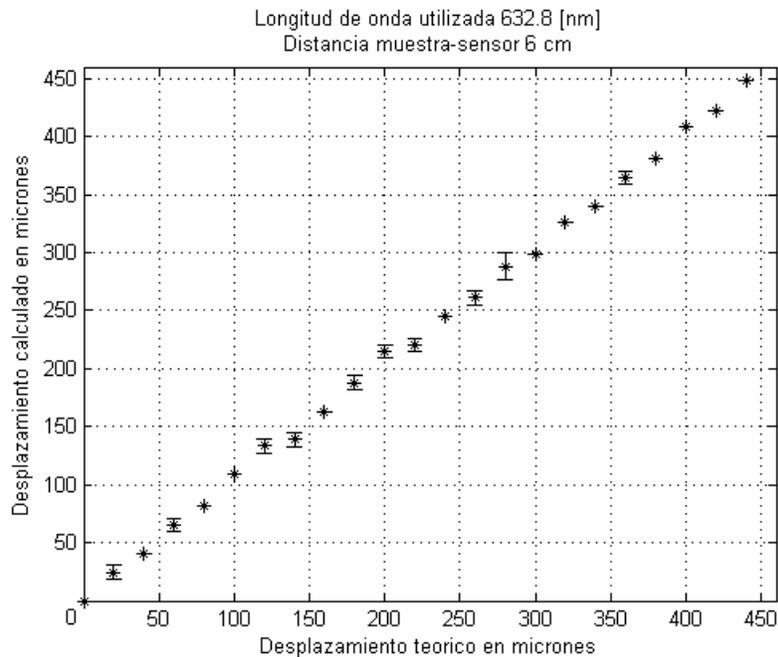
b)

El ejercicio anterior se repite para un haz láser de longitud de onda 632.8 [nm] para las distancias muestra-sensor de 6 [cm], 7[cm] y 11 [cm].

Figura 24. Desplazamientos horizontales, distancia muestra-sensor 6 [cm], $\lambda = 632.8$ [nm]. a) Grafica del criterio, b) Desplazamientos calculados versus desplazamientos teóricos.

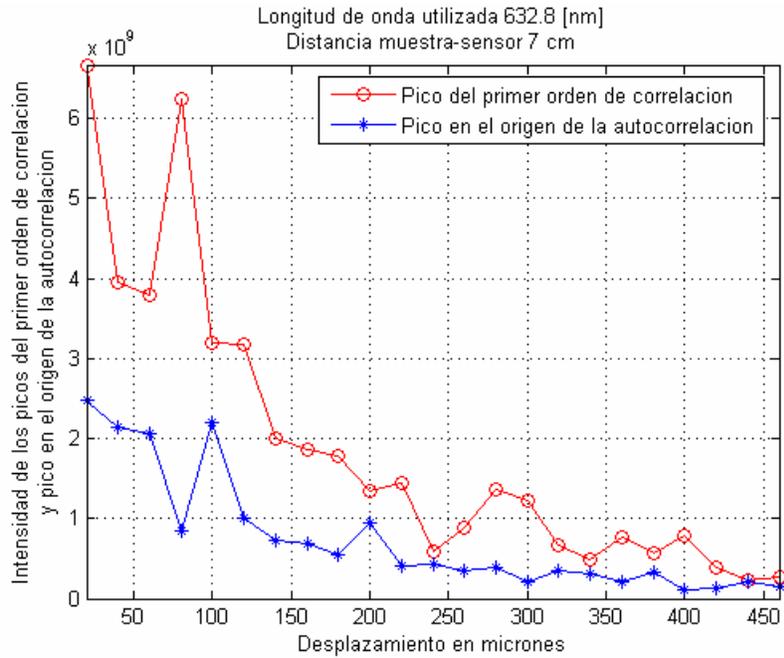


a)

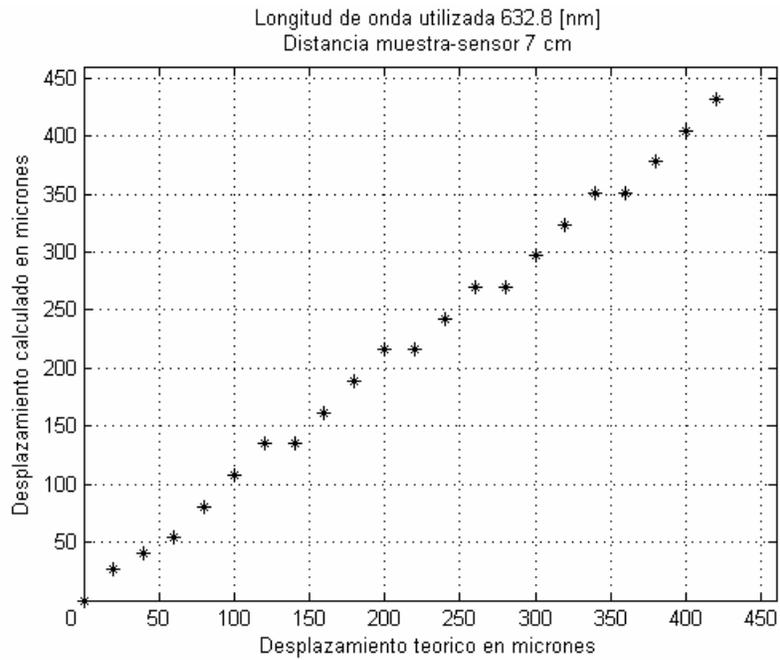


b)

Figura 25. Desplazamientos horizontales, distancia muestra-sensor 7 [cm], $\lambda = 632.8$ [nm]. a) Grafica del criterio, b) Desplazamientos calculados versus desplazamientos teóricos.

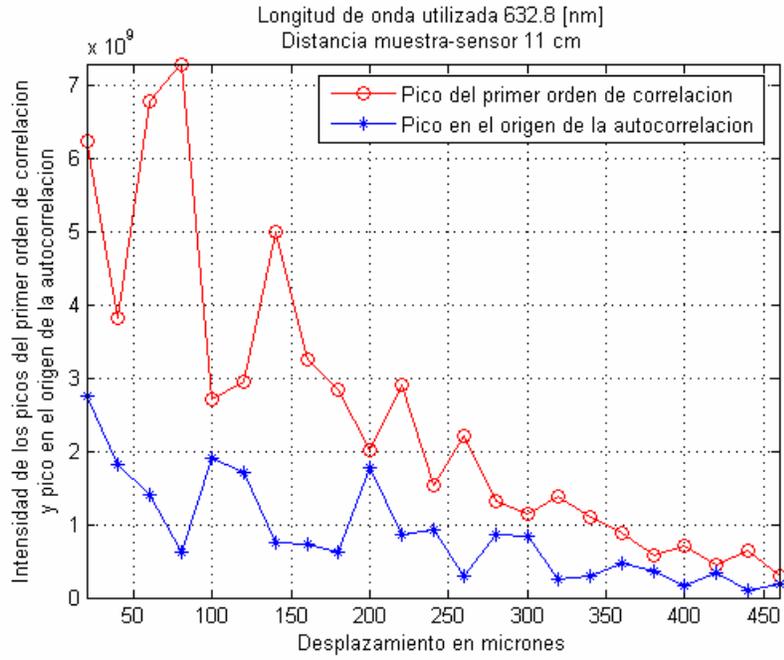


a)

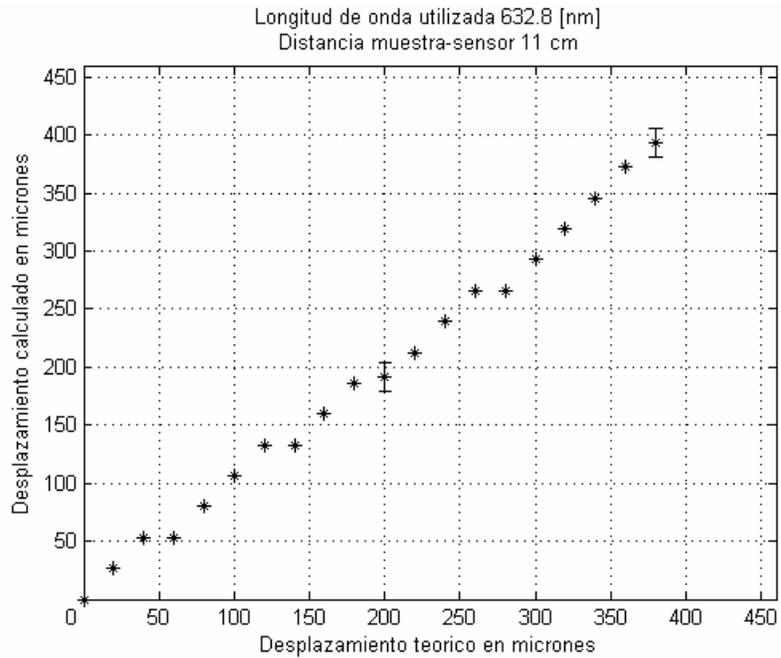


b)

Figura 26. Desplazamientos horizontales, distancia muestra-sensor 11 [cm], $\lambda = 632.8$ [nm]. a) Grafica del criterio, b) Desplazamientos calculados versus desplazamientos teóricos.



a)



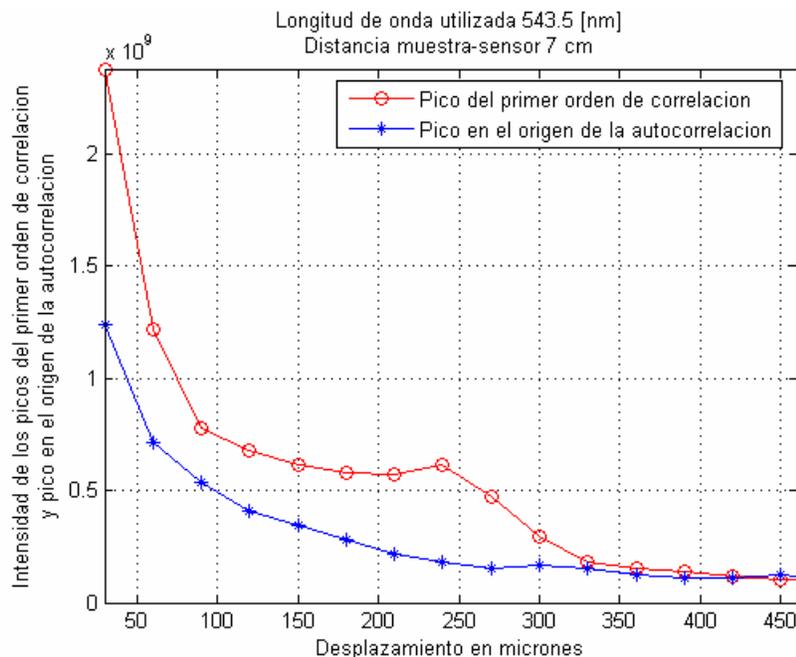
b)

Las graficas anteriores corroboran la disminución del rango de medida, independiente de la longitud de onda de la luz utilizada, con el aumento de la distancia muestra-sensor, esto se había justificado en el numeral 3.2.

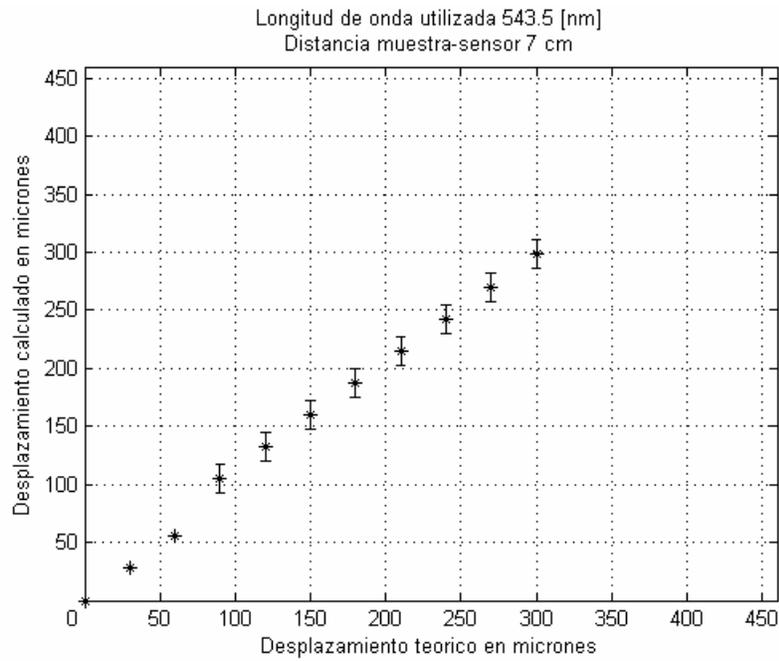
4.2 DESPLAZAMIENTOS VERTICALES

En las figuras 27 a 31, la muestra es sometida a desplazamientos perpendiculares a la dirección anterior, estos constituyen desplazamientos verticales. La longitud de onda utilizada es de 543.5 [nm] y las distancias muestra-sensor está comprendida entre los 7 [cm] y los 12 [cm], registrándose la misma tendencia de la disminución del rango con el aumento de la distancia muestra-sensor.

Figura 27. Desplazamientos verticales, distancia muestra-sensor 7 [cm], $\lambda = 543.5$ [nm]. a) Grafica del criterio, b) Desplazamientos calculados versus desplazamientos teóricos.

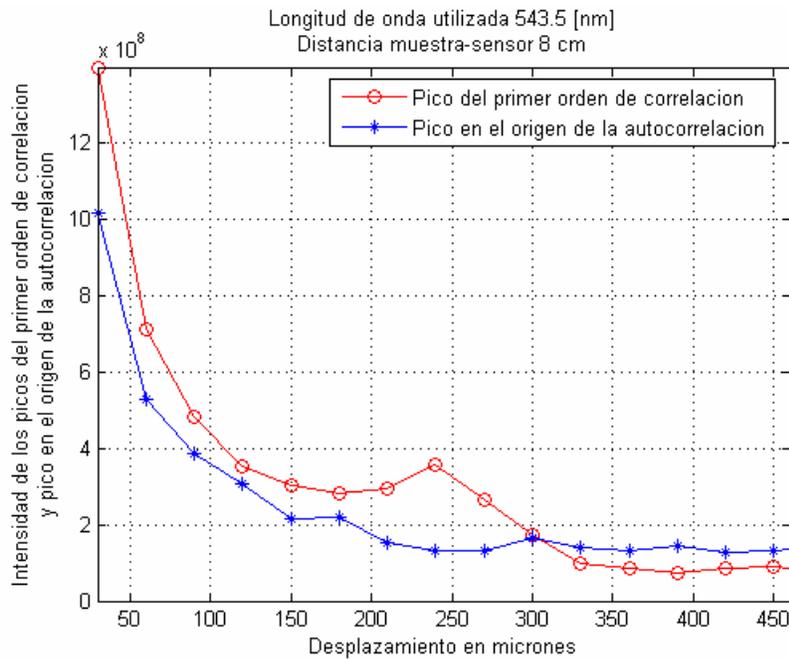


a)

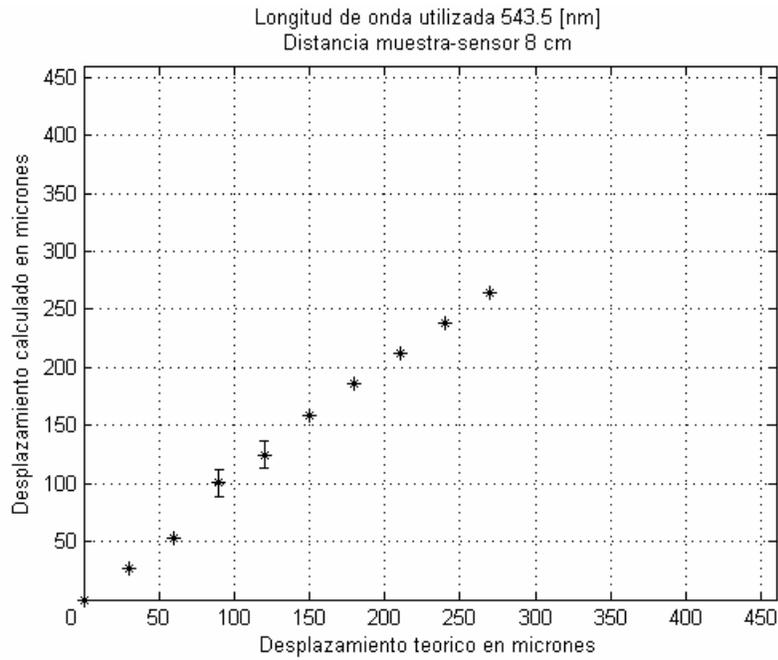


b)

Figura 28. Desplazamientos verticales, distancia muestra-sensor 8 [cm], $\lambda = 543.5$ [nm]. a) Grafica del criterio, b) Desplazamientos calculados versus desplazamientos teóricos.

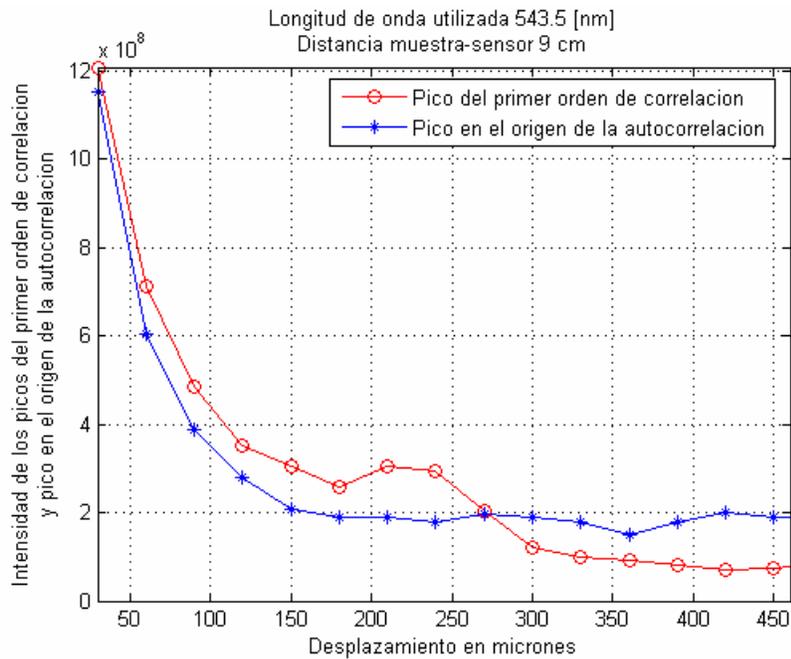


a)

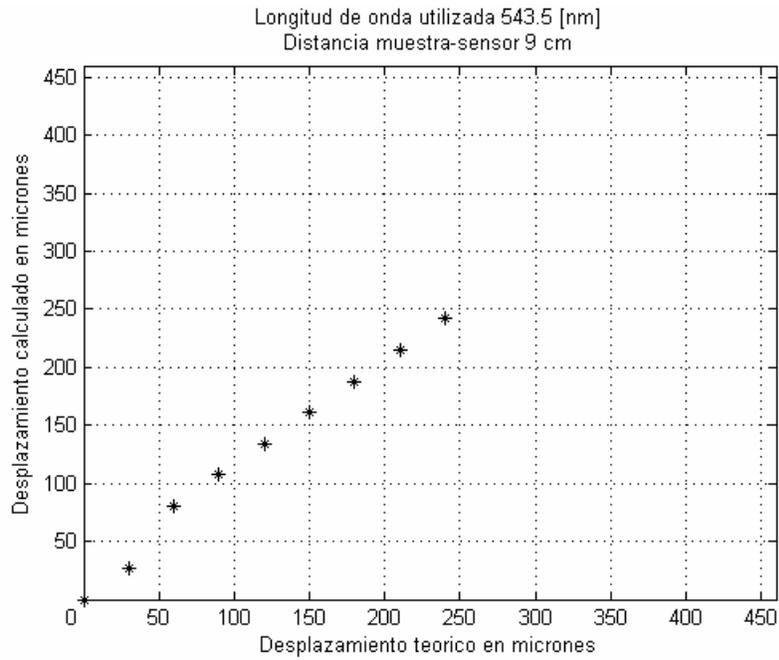


b)

Figura 29. Desplazamientos verticales, distancia muestra-sensor 9 [cm], $\lambda = 543.5$ [nm]. a) Grafica del criterio, b) Desplazamientos calculados versus desplazamientos teóricos.

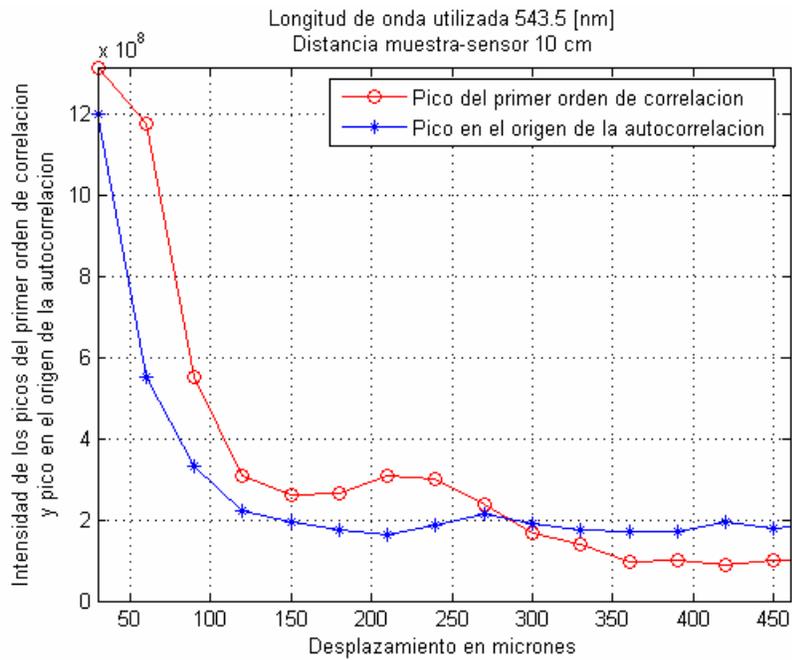


a)

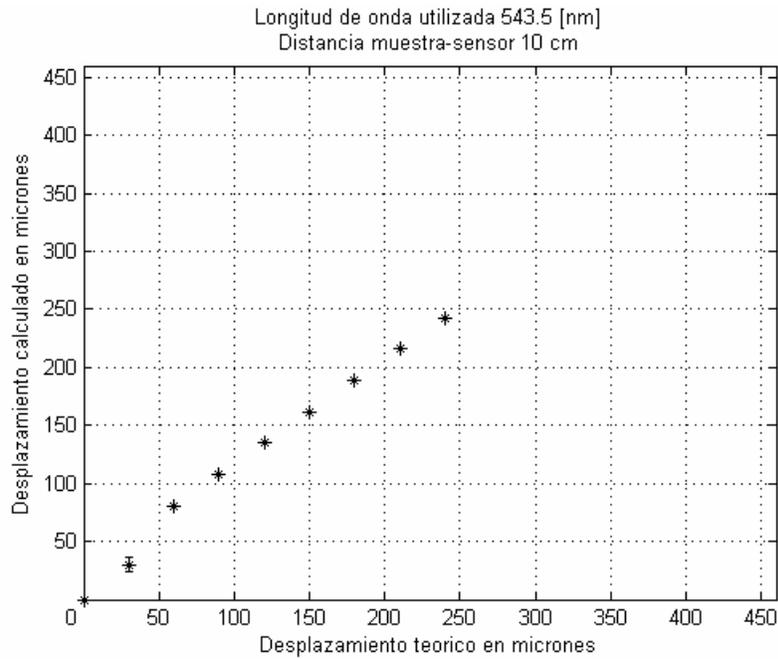


b)

Figura 30. Desplazamientos verticales, distancia muestra-sensor 10 [cm], $\lambda = 543.5$ [nm]. a) Grafica del criterio, b) Desplazamientos calculados versus desplazamientos teóricos.

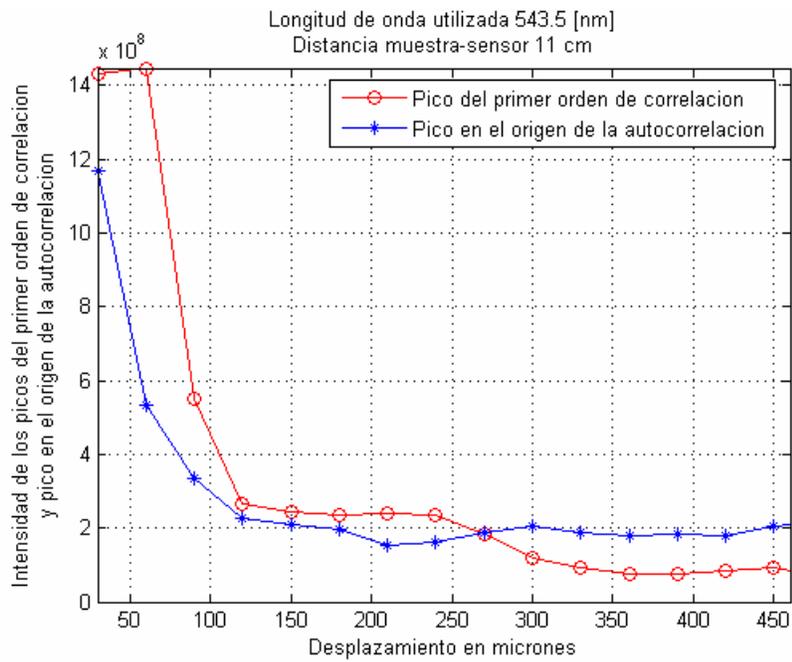


a)

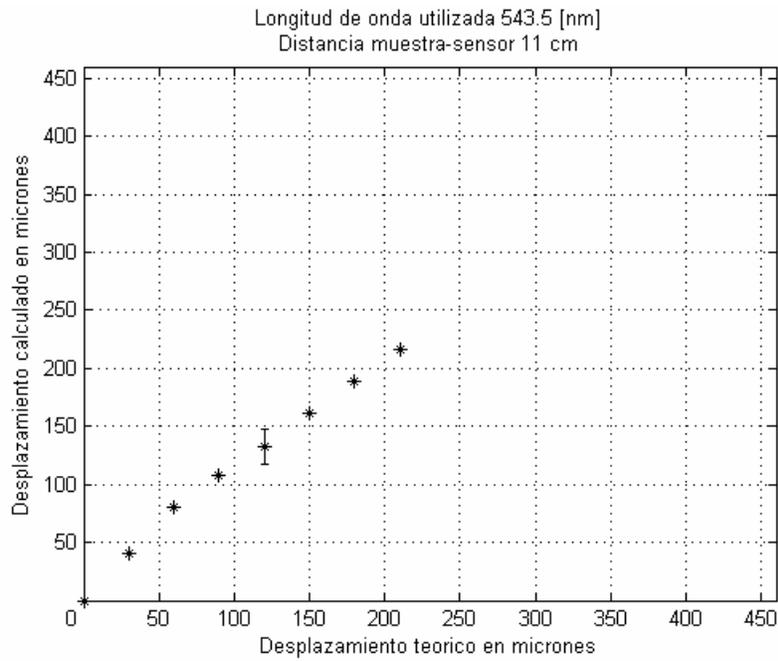


b)

Figura 31. Desplazamientos verticales, distancia muestra-sensor 11 [cm], $\lambda = 543.5$ [nm]. a) Grafica del criterio, b) Desplazamientos calculados versus desplazamientos teóricos.

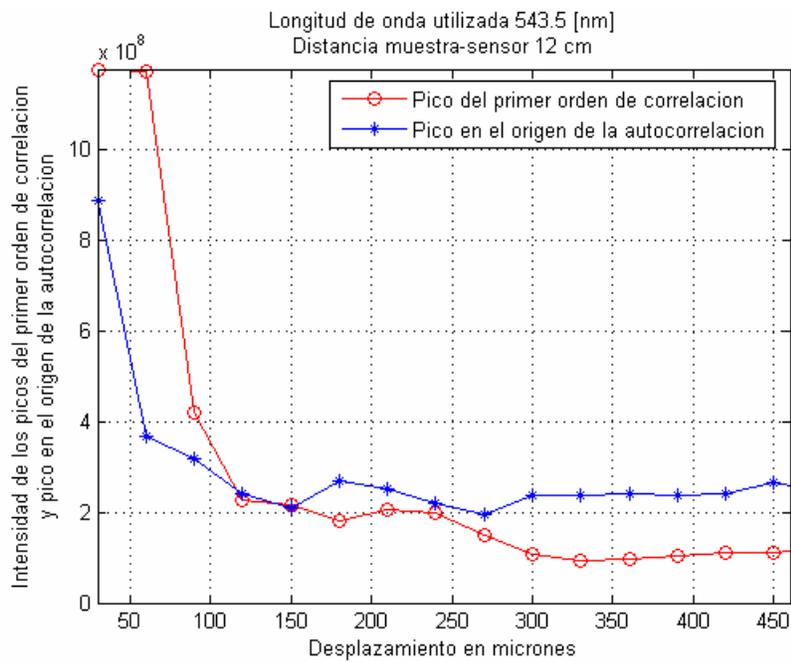


a)

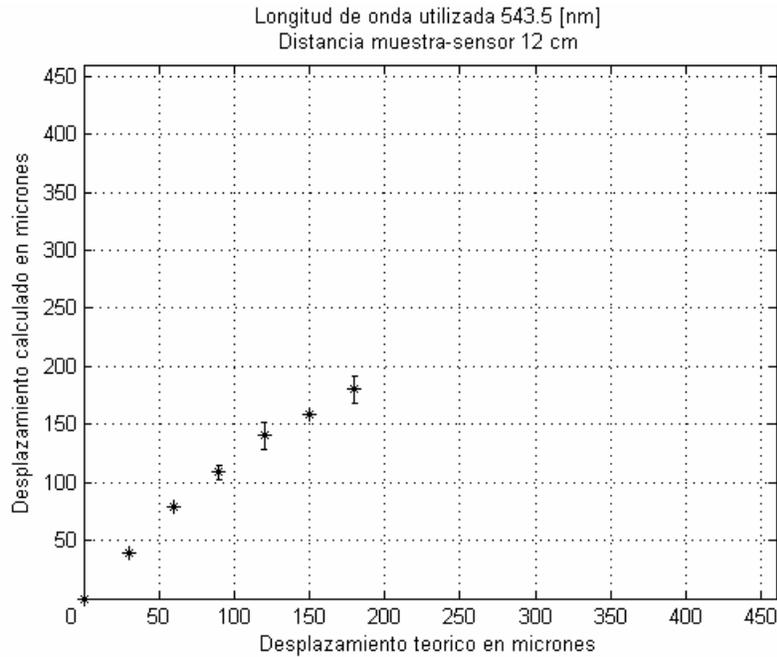


b)

Figura 32. Desplazamientos verticales, distancia muestra-sensor 12 [cm], $\lambda = 543.5$ [nm]. a) Grafica del criterio, b) Desplazamientos calculados versus desplazamientos teóricos.



a)



b)

Se presentan algunas discrepancias en el rango alcanzado para la medida de los microdesplazamientos en la dirección horizontal y en la dirección vertical, por ejemplo para una distancia muestra-sensor de 7 [cm], $\lambda = 543.5$ [nm] la diferencia en el rango es aproximadamente 100 [μm]. Esto se debe a que en el plano de entrada la sección tomada de la imagen de *speckle* se encuentra sobre una ventana rectangular. Igualmente la diferencia en el rango es debida a la asimetría del grano de *speckle* y a la posición relativa de la cámara respecto al desplazamiento.

4.3 TRAZADO DE TRAYECTORIAS (*Tracking*)

Establecidos los rangos de medida confiable tanto en la dirección vertical como horizontal, se describieron trayectorias rectilíneas, circulares y semicirculares.

Para tomar los datos que se muestran a continuación, se mantuvo la longitud de onda de 543.5 [nm] y la distancia muestra-sensor de 7 [cm].

4.3.1 TRAYECTORIAS RECTILINEAS

La forma más sencilla de desplazamientos 2D es el trazado de rectas ya que para estas solo es necesario variar el paso de los motores según el ángulo deseado. Se trazaron rectas con ángulos respecto al eje positivo de las x a 45° , 53.1° y 36.9° . Las trayectorias calculadas fueron rectas con ángulos de 43.4° , 52.5° y 34.8° respectivamente.

Figura 33. Trayectoria rectilínea con ángulo de 45° respecto al eje positivo de las x

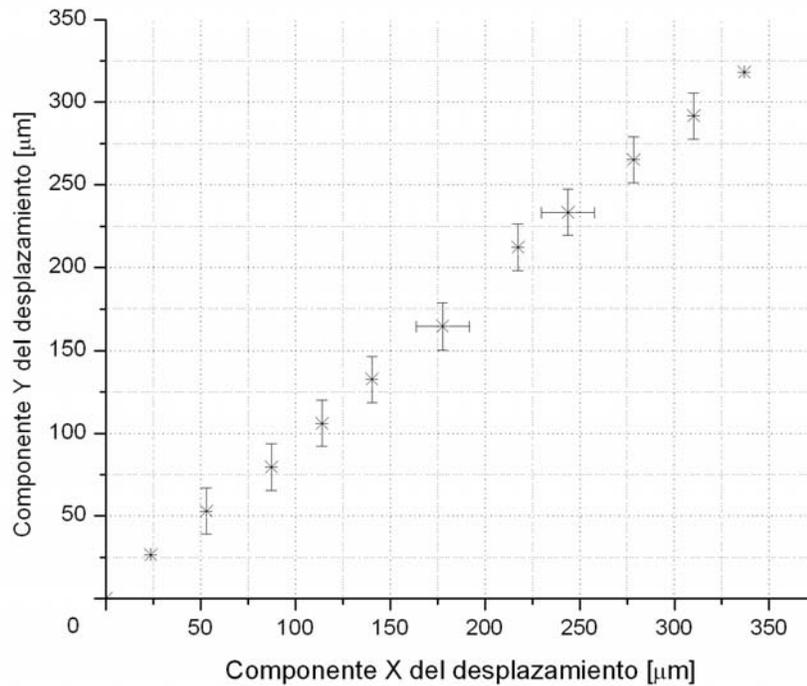


Figura 34. Trayectoria rectilínea con ángulo de 53.1° respecto al eje positivo de las x

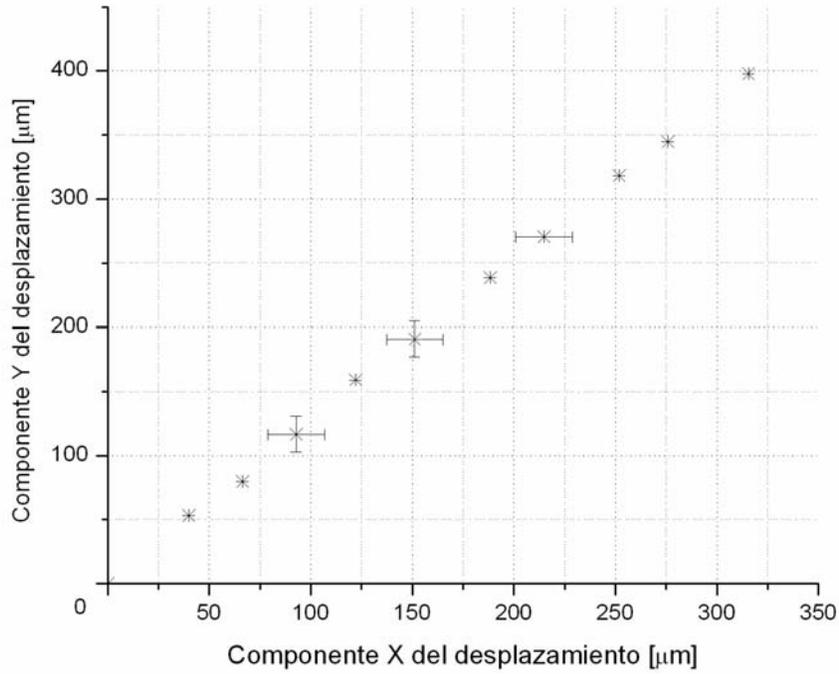
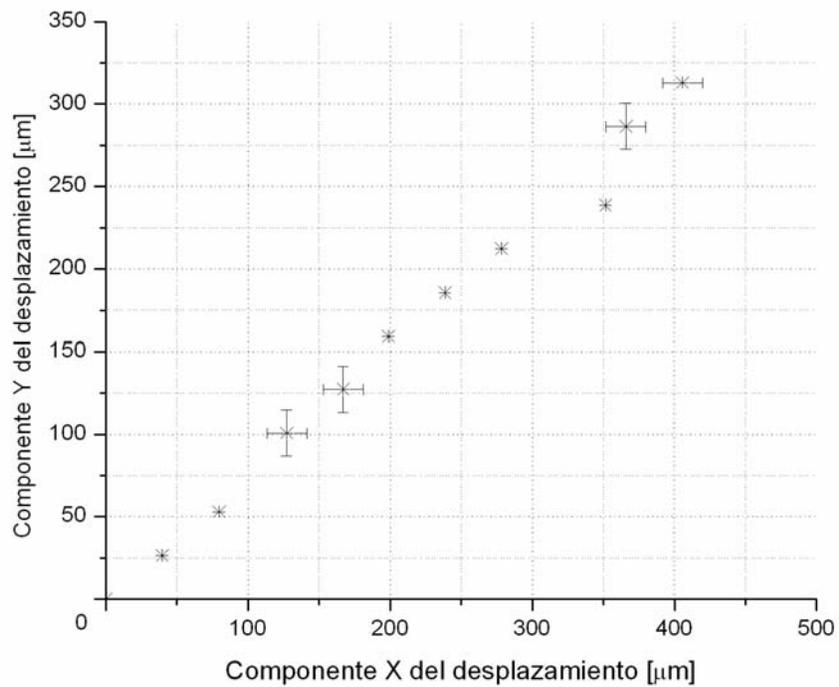


Figura 35. Trayectoria rectilínea con ángulo de 36.9° respecto al eje positivo de las x



4.3.2 TRAYECTORIAS SEMICIRCULARES Y CIRCULARES

Las figuras 36 y 37 corresponden a dos trayectorias semicirculares cuyos radios son $225 \text{ } [\mu\text{m}]$ y $200 \text{ } [\mu\text{m}]$ respectivamente. Los desplazamientos fueron realizados a intervalos angulares de 15° y 30° respectivamente. Debe anotarse que algunos desplazamientos reales resultan más pequeños que el límite de resolución tanto vertical como horizontal del sistema y naturalmente no pueden ser medidos por el sistema.

Figura 36. Semicircunferencia de radio $225 \text{ } [\mu\text{m}]$ a intervalos angulares de 15°

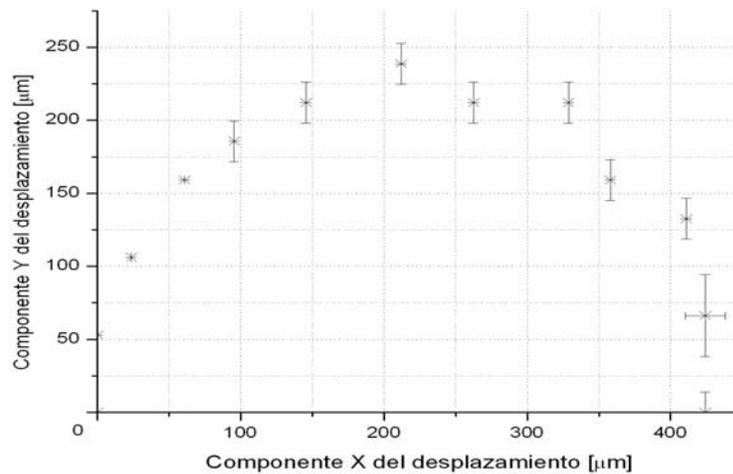
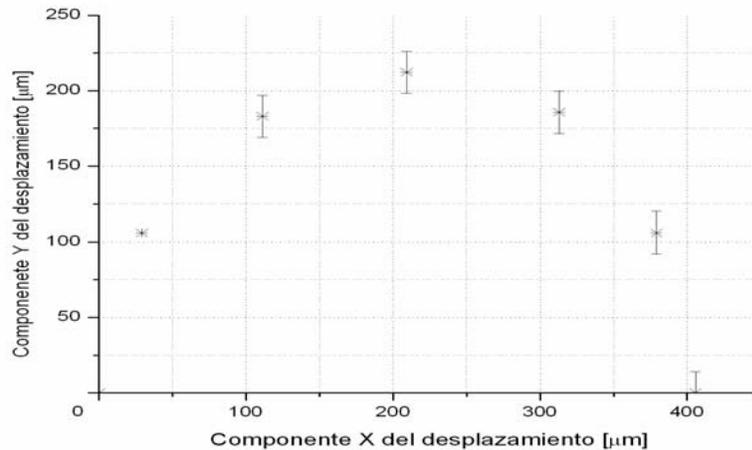


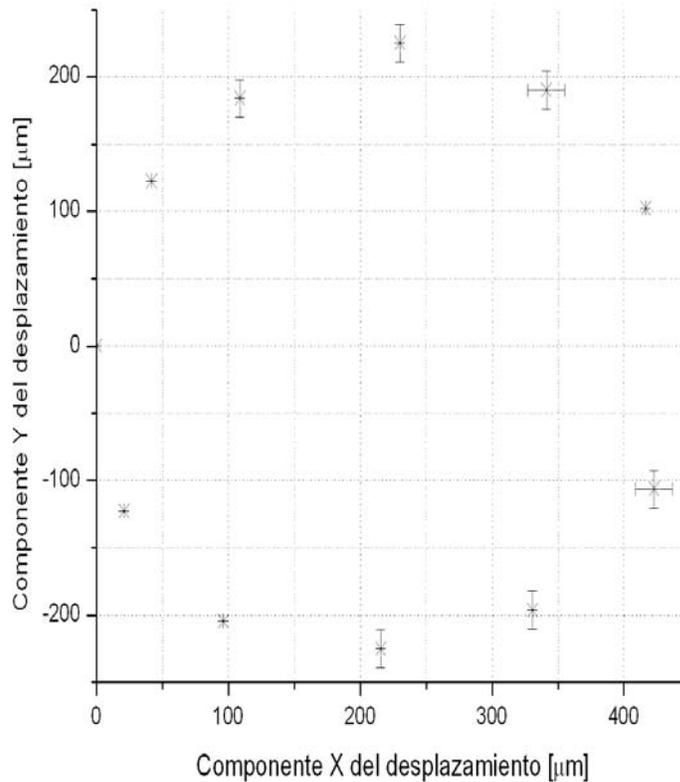
Figura 37. Semicircunferencia de radio $200 \text{ } [\mu\text{m}]$ a intervalos angulares de 30°



Para la trayectoria circular se estimó conveniente un radio de 225 [μm] a intervalos angulares de 30°.

I

Figura 38. Circulo de radio 225 [μm] a intervalos angulares de 30°



4.4 MEDICIONES EN TIEMPO REAL

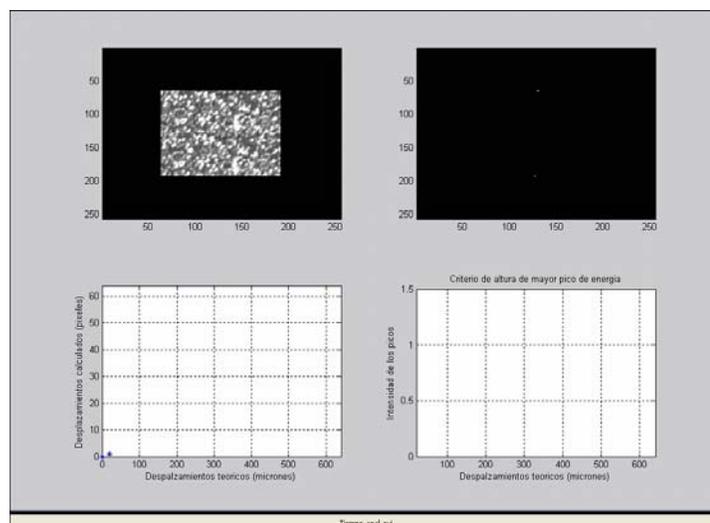
Los desplazamientos que se utilizaron para las mediciones en tiempo real, son básicamente los mismos desplazamientos expuestos anteriormente, estos son: movimiento horizontal, movimiento vertical, trayectoria rectilínea y una trayectoria semicircular. El propósito único de esta sección es mostrar la posibilidad de las medidas en tiempo real del procedimiento propuesto.

Los resultados obtenidos con las mediciones en tiempo real son presentados en video clip formato *avi*. El video clip es una sucesión de *frames* capturados

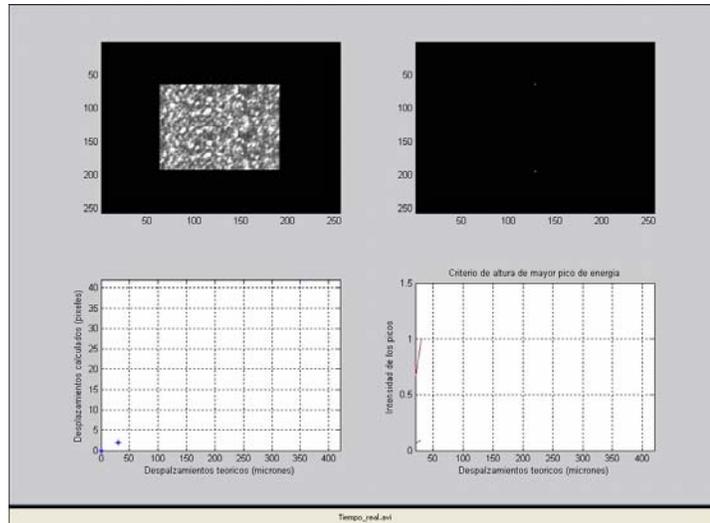
mediante el software Matlab®. Cada *frame* corresponde a una figura que consta de lo siguiente: En la parte superior de la columna izquierda de la figura aparece el plano de entrada del correlador, a la derecha de éste su plano de salida. Para los videos 1 y 2 en la parte inferior de la columna izquierda aparecen los desplazamientos calculados y a la derecha el criterio para determinar el rango de la medida. Para los videos 3 y 4 la parte inferior de la columna izquierda muestra el desplazamiento teórico de los motores y a su derecha el desplazamiento calculado para una trayectoria recta y una trayectoria curva respectivamente. La escala temporal en el despliegue de los vídeos no corresponde a la escala real del proceso de medida.

Los desplazamientos calculados abajo se presentan en píxeles; para obtener el valor en micrones deben ser multiplicados por el tamaño efectivo del píxel (14 [μm]). En todos los casos la distancia muestra-sensor es de 7 [cm] y la longitud de onda del haz utilizado es $\lambda = 543.5$ [nm].

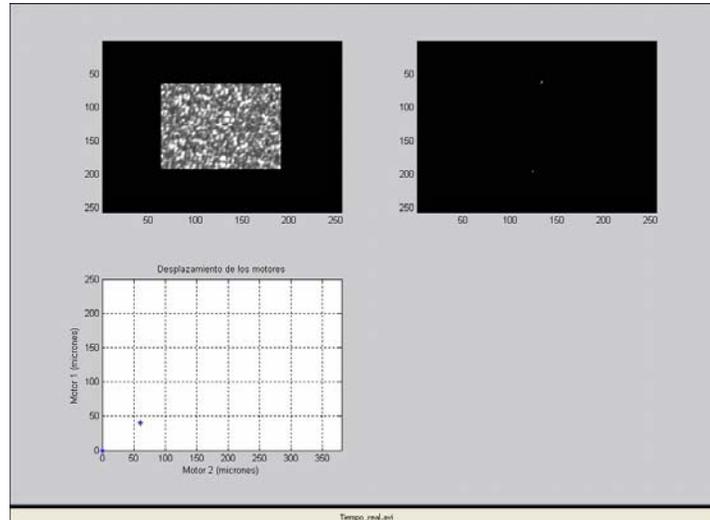
Clip de video 1. Desplazamientos horizontales



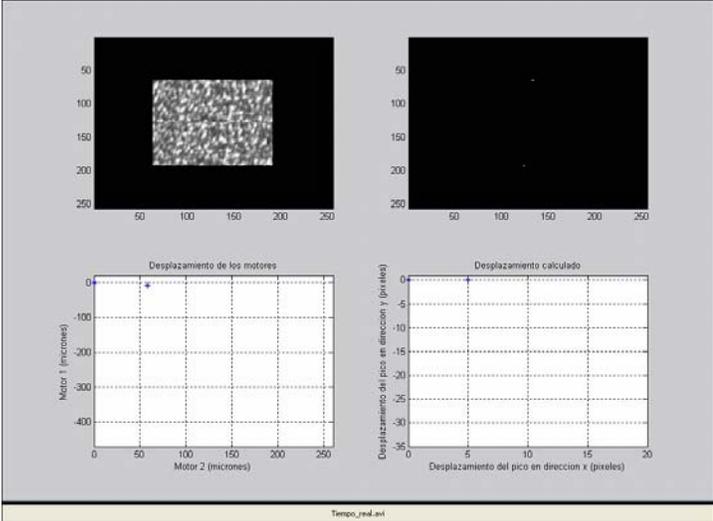
Clip de video 2. Desplazamientos verticales



Clip de video 3. Trayectoria rectilínea con ángulo de 33.69° respecto al eje positivo de las x



Clip de video 4. Semicírculo de 225 [μm] de radio



5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo a lo desarrollado en este trabajo puede concluirse que el correlador de transformada conjunta no lineal es adecuado para la medida de los microdesplazamientos en el rango comprendido entre 20 [μm] y 450 [μm] a pasos discretos impuestos por el tamaño del sensor. Se demostró que el mejor rango para las medidas hechas en este trabajo se obtiene para una distancia muestra-sensor de 7 [cm] para el láser de 543.5 [nm] de longitud de onda y de 6 [cm] para el láser de 632.8 [nm] de longitud de onda lo cual es coherente con los criterios de muestreo óptimo. Las mediciones hechas por debajo de la distancia óptima muestra-sensor, exhiben el problema del alias característico del submuestreo.

También se demostró la capacidad del JTC, en particular el no lineal, para aliviar el problema de la ambigüedad del sentido de los desplazamientos, facilitando el trazado de trayectorias (*Tracking*).

Dentro de las recomendaciones y perspectivas, se espera que con el incremento en las capacidades de los sistemas digitales, e híbridos óptico-digital se reduzcan los tiempos de cálculo aumentando potencialmente el empleo de la técnica propuesta en un entorno industrial, por fuera de las condiciones de laboratorio.

Dado que la resolución del sistema está limitada por el tamaño de los píxeles de la cámara, explorar técnicas subpíxel de interpolación podrían eventualmente mejorar el desempeño del sistema.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [Bar04] BARJ, E. M. et al. *Wavelet phase evaluation extended to digital speckle pattern interferometry*. M. J. Condensed matter volume 5, number 2. en <http://www.fsr.ac.ma/MJCM/vol5-n2art26.pdf> a 31 de septiembre de 2004
- [Car04] CARABALLO, Dorian. Estudio de técnicas de interferometría *speckle* en un cristal fotorrefractivo BGO, Tesis de grado, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga 2004. 36 p.
- [Dai75] DAINTY, J. C. *Laser speckle and related phenomena* en *Topics in applied physics*. New York : Springer-Verlag, 1975. 286 p.
- [Erf78] ERF, Robert. *Speckle metrology*. New York : Academic Press Inc, 1978. 331 p.
- [Goo68] GOODMAN, Joseph. *Introduction to Fourier optics*. New York : McGraw-Hill Book Company, 1968. 287 p.
- [Goo96] _____. _____. 2ed. New York : McGraw-Hill Companies, 1996. 441 p.
- [Goo04] _____. *Speckle phenomena in optics : Theory and applications* en <http://www-ee.stanford.edu/~goodman/speckle.pdf> a 31 de septiembre de 2004
- [Gue98] GUERRERO, Jáder et al. *Micro-displacement by means of optoelectronic nonlinear joint transform correlator of speckle pattern*. Engineering and Laboratory notes, 1998

- [Jav94] JAVIDI, B. *Nonlinear joint transform correlator in real time optical information processing*. San Diego : Academic Press, Inc., 1994. p. 115-183.
- [Kep04] KEPRT, Jirí. y BARTONEK, Ludek. *Measurement of small deformations by laser speckle interferometry*. en <http://publib.upol.cz/~obd/fulltext/physic38/physic38-11.pdf> a 11 de marzo de 2004
- [Nau04] NAUGHTON, Thomas, KLIMA, Milos y ROTT, Jirí. *Improved joint transform correlator performance through spectral domain thresholding*. en <http://www.cs.may.ie/~toughton/pubs/abstracts/tjn199809oesijtc.html> a 10 de marzo de 2004
- [New95] NEWPORT CORPORATION, *MM3000 motion controller/drivers user's manual*. 1995
- [Pom94] POMARICO, Juan. *Interferometría speckle e interferometría speckle digital*, Curso LOI CIOP 1994. 57 p-
- [Psa90] PSALTIS, D et al. *Optical memory disks in optical information processing*. A. O. vol 29, No. 10, 1990. p. 2038-2057
- [Tok04] TOKÉS, S. et al. *An optical CNN implementation with stored programmability*. en http://www.sztaki.hu/~orzo/abstracts_files/ocnniscas.pdf a 21 de octubre de 2004

[Wya04] WYANT James. *Speckle interferometry.* en [http://www.optics.arizona.edu/jcwyant/Optics505\(2000\)/ChapterNotes/Chapter18/speckle.pdf](http://www.optics.arizona.edu/jcwyant/Optics505(2000)/ChapterNotes/Chapter18/speckle.pdf) a 31 de septiembre de 2004

[Uni04] UNIPHASE. *Product bulletin : green, yellow and orange Helium-Neon 1600 series.* en <http://www.pspic.com/datasheets/jdsu/JUhene1600.pdf> a 25 de noviembre de 2004

[Unip04] UNIPHASE. *Product bulletin : green, Helium-Neon lasers heads 1100 series.* en <http://www.pspic.com/datasheets/jdsu/JUhene1100.pdf> a 25 de noviembre de 2004

ANEXO

CODIGO PROGRAMADO EN MATLAB

```

clear all
close all

% DEFINICION DE PARAMETROS-----
N=13; % Cantidad de desplazamientos a realizar
p=20; % Paso en micras de los motores
P=[0:p:(N-1)*p]; % Vector de paso de los motores

% INICIALIZAR CAMARA-----
vidobj=videoinput('Matrox',1);
set(vidobj,'FramesperTrigger',inf);

% INICIALIZAR MOTORES-----
s=serial('COM1');
set(s,'Terminator','CR');
fopen(s);

% IMAGEN DE REFERENCIA-----
start(vidobj); % Iniciar captura
y=getsnapshot(vidobj); % Capturo la imagen 1
stop(vidobj); % Terminar captura
y1=y(208:271,256:383); % Corto la imagen 1
marco1=zeros(256); % Defino marco para el JTC
marco1(128:191,64:191)=y1; % Coloco la imagen 1 en el marco
subplot(2,2,1),imagesc(marco1),colormap gray; % Muestro el plano de entrada
F1=abs(fftshift(fft2(fftshift(marco1)))).^2; % Densidad espectral de la imagen 1

% AUTOCORRELACION-----
autoc=zeros(256); % Marco para la autocorrelacion
autoc(128:191,64:191)=y1; % Ubico las imagenes en el marco
autoc(64:127,64:191)=y1;
subplot(2,2,1),drawnow,colormap gray,imagesc(autoc); % Muestro el plano de entrada
Tautoc=abs(fftshift(fft2(fftshift(autoc)))).^2; % Espectro de potencia conjunto
Fautoc=sign(Tautoc-2*F1); % Resto el fondo continuo y umbralizo
Rautoc=abs(fftshift(fft2(fftshift(Fautoc)))).^2; % Plano de salida de la autocorrelacion
Rautoc=Rautoc(2:120,2:256); % Corto el plano de salida
Mautoc=max(max(Rautoc)); % Hallo el maximo de la autocorrelacion
[Ay,Ax]=find(Rautoc==Mautoc); % Ubico el maximo de autocorrelacion

mov=avifile('Tiempo_real.avi');
mov.Quality=100;
mov.fps=4;

% IMAGENES DE ENTRADA-----
for i=2:N
    fprintf(s,'2pr2000'); % Muevo el motor 2, 20 micrones
    start(vidobj); % Iniciar captura
    y=getsnapshot(vidobj); % Capturo la imagen 2
    stop(vidobj); % Detener captura
    y2=y(208:271,256:383); % Corto la imagen 1
    marco2=zeros(256); % Defino marco para el JTC
    marco2(64:127,64:191)=y2; % Coloco la imagen 2 en el marco
    F2=abs(fftshift(fft2(fftshift(marco2)))).^2; % Densidad espectral de la imagen 2

```

```

% CORRELACION CRUZADA-----
marco=marco1+marco2; % Marco completo para el JTC
subplot(2,2,1),drawnow,colormap gray,imagesc(marco); % Muestro el plano de entrada
F=F1+F2; % Fondo continuo
I=abs(fftshift(fft2(fftshift(marco))))).^2; % Espectro de potencia conjunto
fl=sign(I-F); % Resto el fondo continuo y umbralizo
Res=abs(fftshift(fft2(fftshift(fl))))).^2; % Plano de salida del JTC
subplot(2,2,2),drawnow,colormap gray,imagesc(Res); % Muestro el plano de salida del JTC

% ANALISIS DE DATOS-----
JTC1=Res; % Copia de seguridad
JTC1=JTC1(2:120,2:256); % Corto el plano de salida
MJTC=max(max(JTC1)); % Hallo el maximo del JTC
[Jy,Jx]=find(JTC1==MJTC); % Ubico el maximo del JTC
Res=Res(2:120,2:256); % Corto el plano de salida (copia de seguridad)
Res(Jy,Jx)=0; % Quito los picos de correlaciones cruzadas
ME=max(max(Res)); % Hallo el maximo de la energia
X=Jx-Ax; % Corrimiento del pico de correlacion en X(PC)
Y=Jy-Ay; % Corrimiento del pico de correlacion en Y(PC)
alt(i,:)= [MJTC,ME]; % Guardo las alturas de JTC y energia
pos(i,:)= [X,Y]; % Guardo las posiciones relativas del pico de JTC
T=[0:p:(i-1)*p]; % Vector de paso de los motores temporal

subplot(2,2,3),drawnow,plot(T,pos(:,1),'b*'),axis([0 max(P) 0 max(P)/10]),grid,
xlabel('Desplazamientos teoricos (micrones)'),ylabel('Desplazamientos calculados (pixeles)');

subplot(2,2,4),drawnow,plot(T,alt(:,1)/alt(2,1),'r-',T,alt(:,2)/alt(2,1),'b-'),axis([20 max(P) 0 1.5]),grid,
xlabel('Desplazamientos teoricos (micrones)'),ylabel('Alturas de los picos'),
title('Criterio de altura de mayor pico de energia');

F=getframe(gcf);
mov=addframe(mov,F);
end

% REGRESION LINEAL-----
RI=polyfit(P,pos(:,1),1); % Regresion lineal de los resultados
Ry=polyval(RI,P); % Hallo los valores en el eje y de la regresion lineal

% GRAFICA DE RESULTADOS-----

subplot(2,2,3),drawnow,plot(P,(1/RI(1))*pos(:,1),'b*',P,(1/RI(1))*Ry,'r-'),
axis([0 max(P) 0 (1/RI(1))*(max(P)/10)]),grid,xlabel('Desplazamientos teoricos (micrones)'),
ylabel('Desplazamientos calculados (micrones)'),
title(['Tamaño de pixel = ',num2str(1/RI(1)), ' micrones']); % Grafica de los corrimientos de los picos

subplot(2,2,4),drawnow,plot(T,alt(:,1)/alt(2,1),'r-',T,alt(:,2)/alt(2,1),'b-'),
axis([20 max(P) 0 1.5]),grid,xlabel('Desplazamientos teoricos (micrones)'),
ylabel('Alturas de los picos'),title('Criterio de altura de mayor pico de energia'),
legend('Picos de correlacion cruzada','Picos de la energia'); % Grafica del criterio de intensidad del
mayor pico

F=getframe(gcf);
mov=addframe(mov,F);
mov=close(mov);

% FINALIZAR CAMARA-----

```

```
delete(vidobj);
```

```
% FINALIZAR MOTORES-----
```

```
fclose(s);
```

```
delete(s);
```

```
clear s;
```