

Compensador de curvatura de campo de un analizador holográfico

LUIS MANUEL MURILLO-MORA Y CRISTINA SOLANO SOSA

*Centro de Investigaciones en Optica, A.C.
Apartado postal 948, 37000 León, Gto., México*

Recibido el 25 de noviembre de 1991; aceptado el 19 de octubre de 1992

RESUMEN. El presente trabajo expone un estudio del analizador cilíndrico donde se propone una forma de corregir la curvatura de campo inherente en este tipo de analizadores [1], introduciendo una pequeña cantidad de aberración esférica en el momento del registro y utilizando lentes simples.

ABSTRACT. The present work shows a way of correcting the field curvature in the cylindrical scanner by introducing a small amount of spherical aberration. This aberration is introduced by using non corrected lenses.

PACS: 42.40.Kw

1. INTRODUCCIÓN

En este trabajo se discutirá la forma de corregir la curvatura de campo inherente en un analizador [1] láser. Podemos definir un analizador láser como un elemento óptico que realiza la función de dirigir o desviar un haz luminoso siguiendo determinada trayectoria. Mediante un trazo sencillo y dependiendo de los detalles de la tarea a realizar, se puede efectuar la lectura y/o escritura de un documento, el corte de un material, la localización de una pieza, etc. Existen varios tipos de analizadores: galvanómetros, polígonos rotantes, deflectores acusto-ópticos u hologramas, todos ellos requieren que el punto analizador de rastreo posea la alta irradiancia que ofrece el láser, pero no todos requieren de la coherencia de éste. Dependiendo de la velocidad y resolución de rastreo el analizador tendrá diferentes aplicaciones, desde los sofisticados sistemas de reconocimiento y artes gráficas, como las impresoras y los sistemas lectores de código de barras. En base a estas aplicaciones, el campo se ha dividido en tres categorías como se observa en la Tabla I, las que permiten hacer una diferencia de las necesidades de resolución de imagen y velocidad para diferentes disciplinas.

El analizador holográfico de configuración cilíndrica, estudiado principalmente por Pole e Ishii [2,3], tiene las mismas propiedades cuando éste está construido con hologramas de transmisión registrados sobre un cilindro de vidrio de 3 mm de espesor [2], o por hologramas de reflexión dispuestos en las caras de un polígono (Fig. 1). Para obtener el rastreo se ilumina el holograma en movimiento con un haz de abertura limitada, de tal forma que se iluminen diferentes porciones del holograma.

Las características más importantes de este diseño son la posibilidad de realizar un rastreo siguiendo una línea recta sin ninguna óptica adicional y que el haz de rastreo

TABLA I. Diferentes categorías de sistemas analizadores láser.

Categoría	Resolución*	Velocidad # Píxeles/Seg.	Ejemplos de Aplicaciones
Alta	> 10,000 < 50,000	> 20, < 50	Artes gráficas Reconocimiento Control de Calidad
Media	> 2,000 < 10,000	> 2, < 20	Análisis de Imagen
Baja	> 500 < 2,000	< 10	Video, código de barras

*La resolución se define por el número N de puntos elementales que son posibles resolver en una revolución.

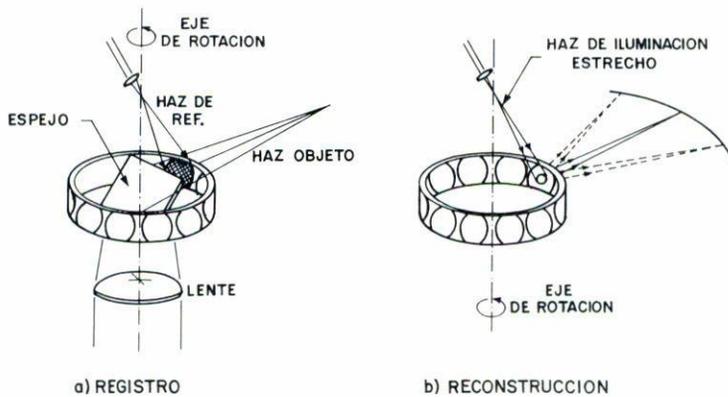


FIGURA 1. Analizador holográfico (Pole, 1975).

se encuentra siempre perpendicular al eje de giro, lo que simplifica su diseño. Una de sus desventajas es su baja posibilidad de replicación y que el rastreo se realiza sobre una superficie curva, esto es, existe curvatura de campo. Todos los diseños sobre este analizador se abocan a la tarea de eliminar esta curvatura de campo o de reducirla al mínimo, así como de lograr linealidad en el rastreo. Entre las propuestas para eliminar esta curvatura de campo está la de Ishii [3] quien sugirió la utilización de un holograma generado por computadora en la formación del frente de onda objeto. White [3] sugirió apartarse de la simetría radial en el registro y en la reiluminación de los hologramas,

aunque sus resultados no fueron satisfactorios. Otras proposiciones requieren el uso de lentes muy grandes para que sea posible enfocar en todo el plano de análisis durante la reconstrucción [4] o diseñan una lente especial para variar el frente de onda del objeto durante el registro del analizador [5]. Es esta última proposición la que más se acerca a la propuesta en el presente trabajo, ya que en este caso se encuentra que para corregir las aberraciones introducidas por el cambio en la longitud de onda de reconstrucción y obtener un rastreo sobre un plano es necesario diseñar un doblete colocado fuera de eje para generar el frente de onda objeto.

El presente trabajo tiene como objetivo el demostrar que con cualquier conjunto de lentes (en este caso particular se utilizaron una lente biconvexa y un menisco negativo) es posible corregir la curvatura de campo existente en el analizador. Esto se realiza cambiando el espaciamiento entre ellas, obteniendo un frente de onda con una pequeña cantidad de aberración esférica; este efecto reduce la curvatura de campo existente en el analizador. Debido a las facilidades presentes en nuestro laboratorio se decidió realizar hologramas de transmisión registrados en facetas planas y no en un cilindro.

2. MODIFICACIONES PROPUESTAS PARA UN ANALIZADOR HOLOGRÁFICO CILÍNDRICO

La Fig. 2 muestra una vista lateral del rastreo que realiza un sistema perfecto, donde xyz es el sistema coordenado del holograma de tal forma que el plano $z = 0$ coincide con la superficie de éste y ϕ es el ángulo de giro. Cuando se ilumina una pequeña porción del holograma, éste describe una línea recta sobre una superficie cilíndrica (REAL). Para que el rastreo se efectúe sobre un plano (IDEAL), en este trabajo se propone introducir en el frente de onda proveniente del objeto una aberración esférica positiva.

La Fig. 3 muestra el arreglo experimental utilizado en este caso, donde r es el radio de giro y β el ángulo al que se encuentra la fuente de referencia respecto al plano normal del holograma.

El cálculo de la localización de la imagen se realiza por el conocimiento de los cosenos directores de los frentes de onda objeto, referencia y reconstrucción, en un punto dado del holograma. En la reconstrucción utilizamos un frente de onda de diámetro pequeño, el cual, al girar el holograma, sigue una trayectoria definida por $x(y)$ (Fig. 4). Por esta razón, se calculan los cosenos directores de los frentes de onda involucrados sólo en cada punto de esta trayectoria y de esta forma es posible conocer la curva que describe el haz de reconstrucción sobre un sistema de coordenadas $x - y - z$ colocado en el plano del holograma utilizando relaciones trigonométricas sencillas. La curva que describe un haz de luz de reconstrucción, se encuentra dado por la fórmula

$$x(y) = \left(\sqrt{y^2 + r^2} - r \right) \tan \beta. \quad (1)$$

El frente de onda objeto está formado por un sistema óptico que consiste en dos lentes gruesas, una positiva y otra negativa, las aberraciones introducidas por este sistema son las que permiten realizar el rastreo sobre la superficie que se desee (ya sea plana o de otra forma). El grado de aberración se puede modificar cambiando la separación entre las dos lentes y de la posición de la fuente S .

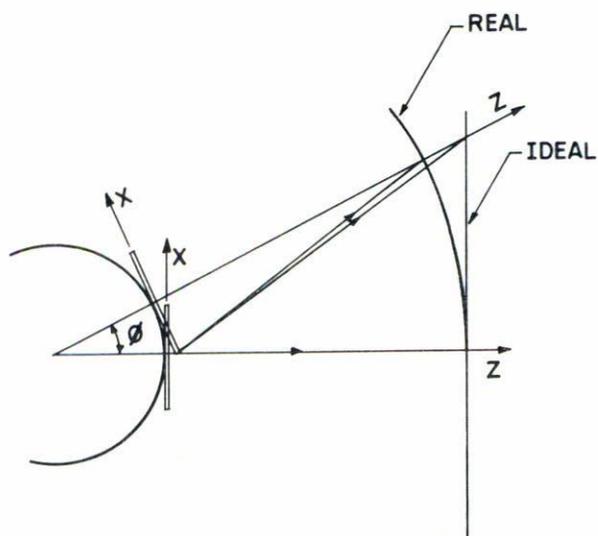


FIGURA 2. Rastreo sobre un arco y sobre un plano en un analizador holográfico cilíndrico.

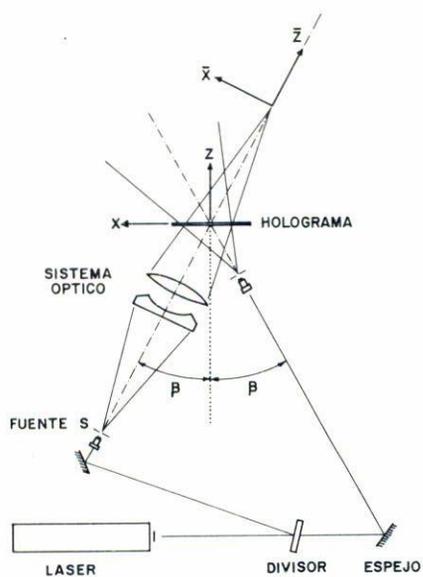


FIGURA 3. Dispositivo experimental utilizado durante el registro del holograma que compone el analizador.

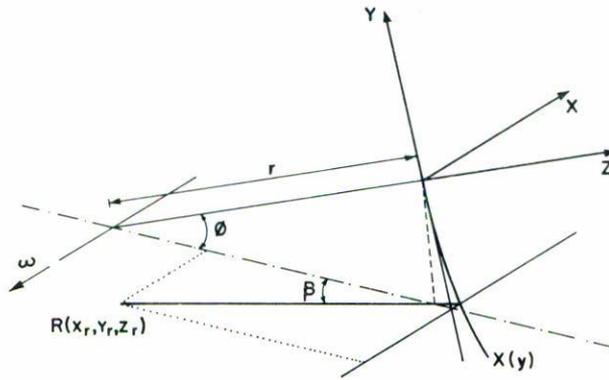


FIGURA 4. Curva descrita por un haz de reconstrucción al rotar el holograma.

El valor de los cosenos directores en cada punto del holograma se calcula numéricamente con el trazo exacto de rayos a través del sistema óptico, ya que, por el hecho de utilizar lentes gruesas en la formación del frente de onda objeto, es imposible dar una expresión analítica para los cosenos directores l_0, m_0, n_0 , en cada punto (x, y) del holograma. En el cálculo hay que considerar que el eje óptico del sistema subtiende un ángulo β con el eje z en el holograma, como se observa en la Fig. 3.

El frente de onda de referencia se forma con una fuente puntual colocada en $R(x_r, y_r, z_r)$. Los cosenos directores l_r, m_r y n_r del rayo que parte del punto R y llega al punto $P(x, y, z = 0)$ en el holograma, están dados por las expresiones [6]

$$\begin{aligned}
 l_r &= (x - x_r)/|RP|, \\
 m_r &= (y - y_r)/|RP|, \\
 n_r &= (z - z_r)/|RP|,
 \end{aligned}$$

donde

$$RP = (-1)\sqrt{(x - x_r)^2 + (y - y_r)^2 + (z - z_r)^2} \tag{2}$$

que por convención es negativa, ya que el rayo que une los puntos R y P no cruza el origen [7].

Es importante hacer notar que la fuente de referencia se considera que se encuentra colocada muy cerca del eje de giro del holograma, de manera que en la reconstrucción no surjan problemas ocasionados por errores en el centrado.

El frente de onda de reconstrucción se forma también por una fuente puntual en la misma posición de referencia, con un diámetro menor al utilizado durante el registro. Los cosenos directores pueden calcularse como en la ecuación anterior [Ec. (2)]. El movimiento del holograma con la fuente de reconstrucción fija puede ser interpretado como

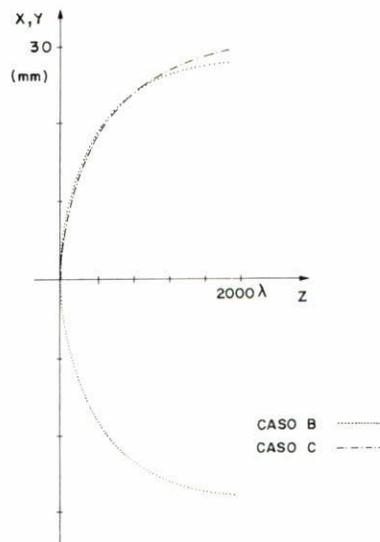


FIGURA 5. Frentes de onda objeto registrados en el holograma. Casos B y C.

un movimiento de la fuente de reconstrucción con el holograma fijo, lo cual simplifica el cálculo.

3. CASOS PARTICULARES TOMADOS EN CONSIDERACIÓN PARA EL ANÁLISIS

Para mostrar las características de rastreo que ofrecen los diferentes frentes de onda objeto que se pueden registrar con el sistema formado por dos lentes gruesas, presentamos los resultados para tres diferentes frentes de onda.

- A. Frente de onda con aberración esférica negativa.
- B. Frente de onda con una aberración esférica positiva grande.
- C. Frente de onda con aberración esférica positiva cercana a la ideal, para la realización de un rastreo en un plano.

Los arreglos experimentales para obtener los diferentes frentes de onda A, B y C, son idénticos excepto por la separación de los componentes del sistema óptico. Las características de estos sistemas se muestran en la Tabla II.

La Fig. 6 muestra gráficamente la forma de los frentes de onda objeto que se registran en los hologramas para los casos B y C. Los cálculos se realizaron con la ayuda del paquete de Diseño Optico Super-Oslo (Sinclair Opt. Inc., 1989). En las Figs. 6a, b y c, se encuentran los resultados de la localización de la mejor imagen en función del ángulo de giro del holograma (posiciones $x(\phi)$, $y(\phi)$ y $z(\phi)$) respecto al sistema de coordenadas $\bar{x}\bar{y}\bar{z}$, con centro en el punto imagen paraxial del sistema óptico.

En la Fig. 6a se muestra el comportamiento del punto de enfoque en la dirección x como función de ϕ . La curvatura que se tiene en los casos A, B y C, es debida al ángulo

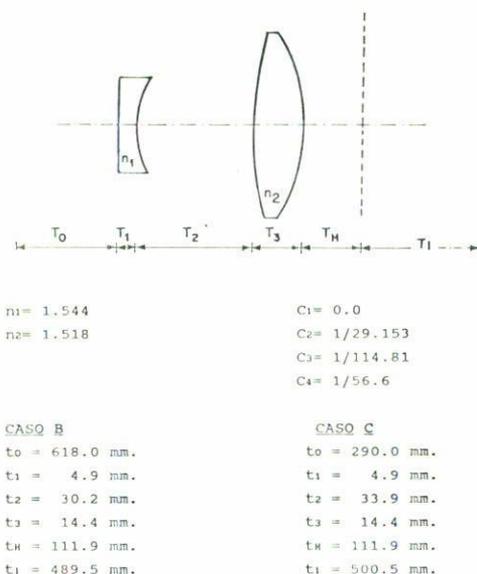


TABLA II. Valores experimentales utilizados.

al cual incide el frente de onda objeto sobre el holograma. Esta curvatura se elimina si el haz objeto incide perpendicularmente al holograma.

La Fig. 6b corresponde a la posición de enfoque del holograma en función del ángulo de giro del holograma, ϕ . Esta nos indica la distancia que se mueve el punto de rastreo con respecto a la posición original, cuando el holograma se gira un ángulo ϕ . De ella podemos saber qué tan lineal es el movimiento del punto de enfoque. En los casos A y B las gráficas nos dicen que el rastreo no es lineal. Sin embargo, para el caso C, el rastreo que se realiza se encuentra cercano a uno lineal.

En el tercer conjunto de gráficas (Fig. 6c) se muestra la posición z de la mejor imagen como función de ϕ . Las gráficas indican la distancia del plano $z = 0$ a la que se enfoca el haz de rastreo. Para los casos A y B, se tiene que el haz imagen se enfoca muy lejos del plano del holograma debido a la gran aberración que se introdujo en ambos casos con el sistema óptico. Para el caso B se muestra que la aberración introducida en el holograma corrige en la posición de enfocamiento, acercándola al plano $z = 0$. La corrección que se muestra no es total, pero sí muestra que se puede obtener un rastreo sobre un plano cambiando las características del sistema óptico del haz objeto.

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Los resultados experimentales que se muestran a continuación para un analizador cilíndrico, se realizaron utilizando como material de registro placas 649F de Kodak. Se trabajó con este material porque tanto el sustrato como la emulsión son de buena calidad; en cuanto a planicidad, el espesor de la emulsión es de $15 \mu\text{m}$.

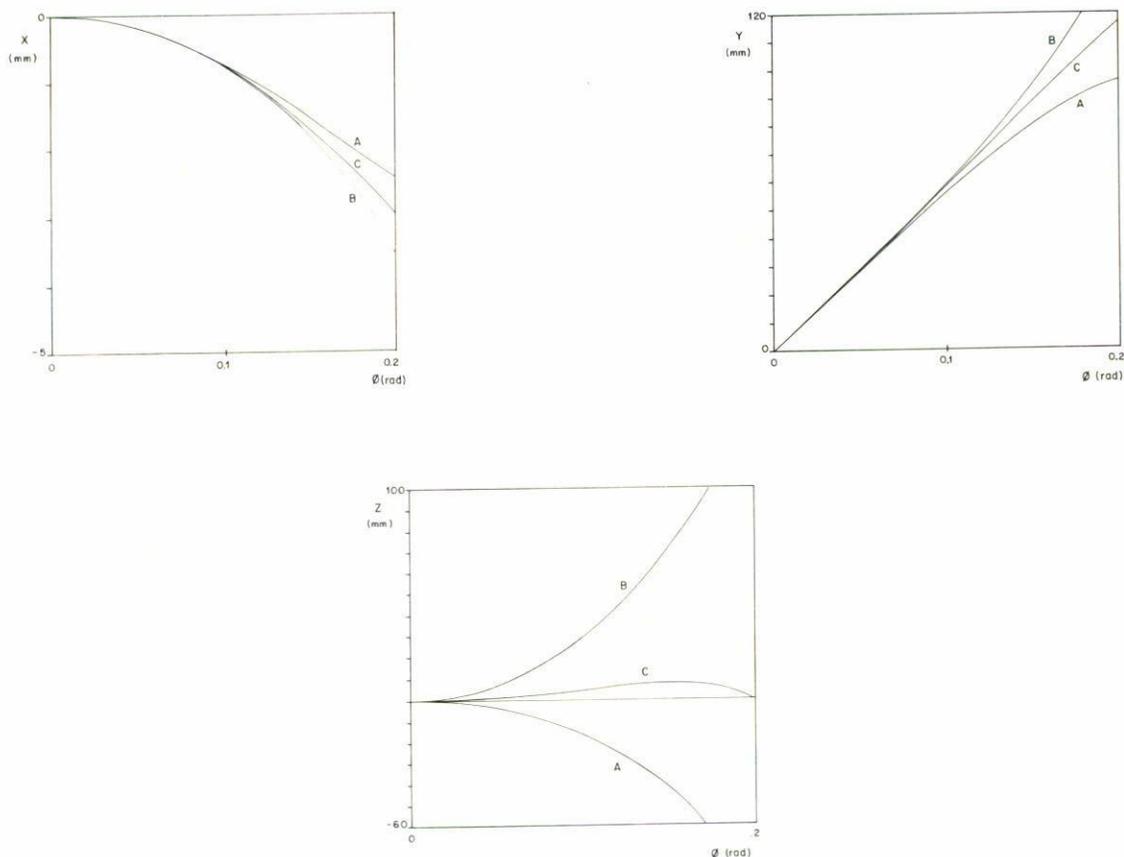


FIGURA 6. a) Posición x en función de ϕ para la mejor imagen. b) Posición y en función de ϕ para la mejor imagen. c) Posición z en función de ϕ para la mejor imagen. Casos A, B y C.

Los hologramas registrados fueron hologramas de amplitud de transmisión y para minimizar las alteraciones en la emulsión no se utilizaron procesos de blanqueado.

Se utilizó un goniómetro para incrementar la precisión en la rotación. El reposicionamiento del holograma, después de revelado, se verificó observando el interferograma del haz objeto original y el haz imagen reconstruido [8]. El número de franjas obtenidas en el interferograma siempre fue menor de 3 con una separación entre ellas de 15 mm a una distancia del punto focal de 500 nm, lo que nos permite decir que el error en la colocación del holograma es menor a 21 μm . Esta medición se realizó con el fin de determinar la exactitud de nuestros resultados experimentales se cree que el error en el reposicionamiento se debe principalmente a que la montura utilizada no tenía la precisión suficiente.

Se presentan los resultados experimentales obtenidos para los casos del frente de onda objeto que se estudiaron matemáticamente en la sección anterior. Los resultados experimentales que corresponden a la localización del mejor foco para y, z en función de ϕ , se encuentran graficados en la Fig. 7a-c. La forma de estas curvas es la misma que para los cálculos teóricos mostrados en las otras figuras. La diferencia en los valores entre estas gráficas se debe principalmente a que no se pudo medir con la precisión requerida el índice

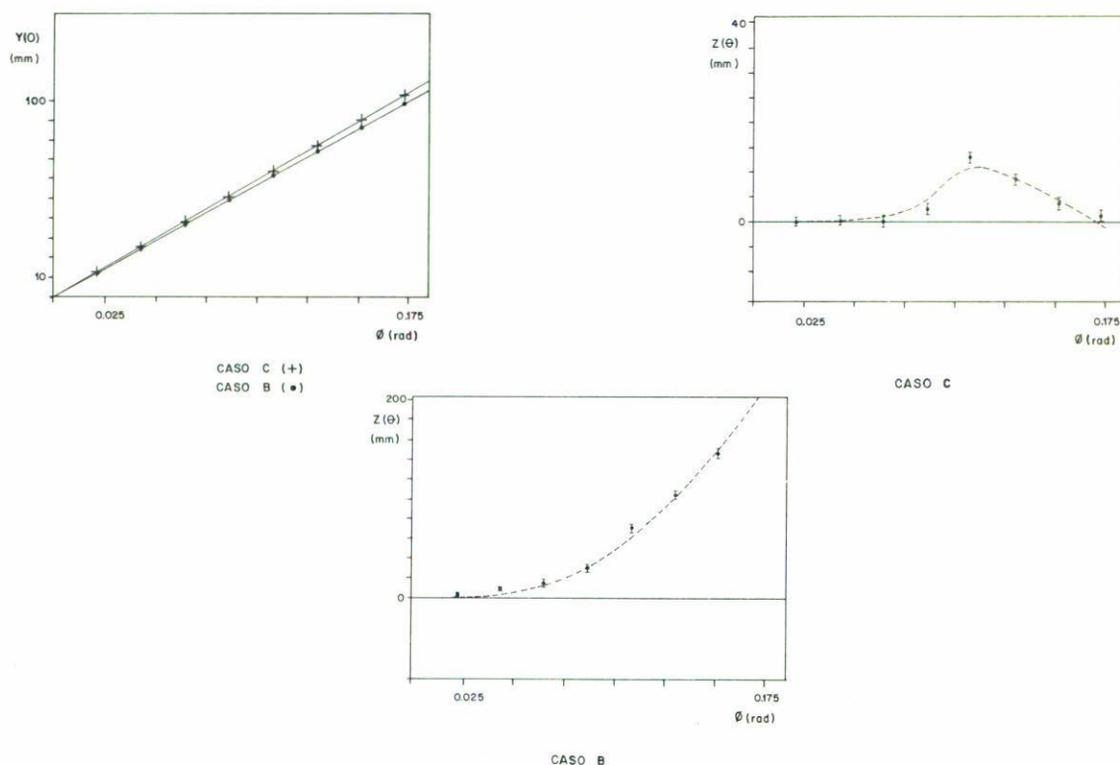


FIGURA 7. a) Resultados experimentales para la posición y en función de ϕ . Casos B y C. Resultados experimentales para la posición z en función de ϕ , b) Casos C y c) Caso B.

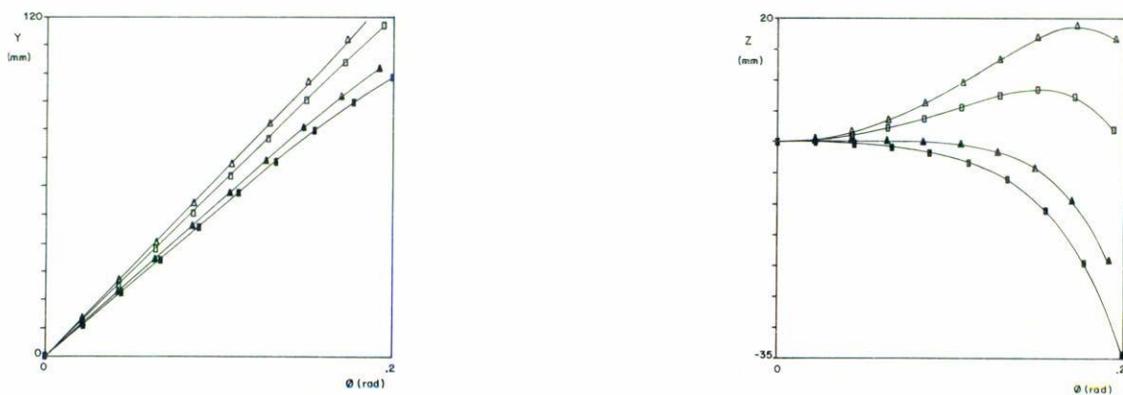


FIGURA 8. a) Cambio en la localización $y(\phi)$ para la mejor imagen debido a la modificación de la distancia entre las lentes en 1 mm, Caso C. b) Presente las mismas variaciones de 1 mm en el eje $z(\phi)$. Caso C. $\Delta = -1$ mm, $\square = -0.5$ mm, $\blacksquare = 1$ mm y $\blacktriangle = 0.5$ mm.

de refracción de las lentes utilizadas y la precisión en la separación entre las lentes, para obtener la posición ideal. Esto último se puede comprobar observando las Figs. 8a y b en las que se muestra el comportamiento del analizador para ligeros cambios en la separación entre las lentes, aunque no se realizó un estudio teórico similar para pequeños cambios en el índice de refracción.

5. CONCLUSIONES

Los resultados experimentales muestran que el sistema funciona de acuerdo a las predicciones teóricas y que la curva del campo que describe el punto de enfoque se puede corregir con sistemas ópticos convencionales de manera sencilla. De esta forma se logró compensar la curvatura de campo normal que tiene el sistema. Si bien la compensación no es ideal, ya que el punto focal muestra astigmatismo en el plano de análisis, existe una mejoría en la calidad de la imagen con respecto a la que se obtiene sin sistema compensador.

Entre los problemas presentes en la imagen observada se encuentran:

1. La presencia de aberraciones, principalmente astigmatismo y coma, que se incrementan proporcionalmente con el ángulo ϕ . Aumentando hasta el 60% del tamaño de la imagen a un ángulo $\phi = 10^\circ$ con respecto al que tenía en $\phi = 0^\circ$. Como continuación al trabajo sería interesante introducir otra clase de aberraciones al frente de onda del objeto para estudiar la calidad de la imagen en estos casos.

2. La eficiencia de difracción de los hologramas utilizados fue de 1.9% en su parte central, y al girar el holograma este valor varió a 1.88% ($\phi = 0.064$), 1.0% ($\phi = 0.127$) y 0.14% ($\phi = 0.170$). La razón de este cambio se debe principalmente a que la iluminación con el haz de referencia no es uniforme en todo el holograma, aun cuando se utilizó un objetivo de potencia alta (60X).

De acuerdo con los datos mostrados en la Tabla I podemos ver que debido a su resolución el analizador propuesto se puede utilizar para lectura del código de barras, para su uso en impresoras láser es necesario incrementar la calidad de los hologramas mejorando los materiales de registro y posiblemente realizando hologramas de reflexión, pero en cuanto a la longitud de rastreo es adecuada para este tipo de aplicaciones.

AGRADECIMIENTOS

L. Murillo-Mora desea agradecer la beca de maestría otorgada por el CONACYT.

REFERENCIAS

1. En inglés estos sistemas son conocidos como *scanners*. Esta palabra tiene varios significados y es por ello que puede utilizarse indistintamente para nombrar sistemas que realicen diferentes tareas. Sin embargo, no existe una palabra en español que sirva de la misma forma, por lo que es necesario dar una traducción a cada labor que realice el sistema. Labores tan distintas como las de análisis, rastreo, inspección, seguimiento de una figura, deflexión, etc. Este trabajo versa sobre un *scanner* referido sólo como sistema analizador.

2. R.V. Pole, H.P. Wollenman, *Appl. Opt.* **14** (1975) 976; R.V. Pole, H.W. Werlich and R.J. Krushe, *Appl. Opt.* **17** (1978) 3294.
3. Y. Ishii, *Appl. Opt.* **22** (1983) 3491; J.M. White, Patente (EUA) No. 4, **121** (1978) 882.
4. H. Funato, *Proc. SPIE* **390** (1983) 174.
5. M. Rimmer, *Proc. SPIE* **103** (1977) 86.
6. D.E. Bourne and P.C. Kendall, *Análisis vectorial y tensores cartesianos*, Ed. Limusa, (1980).
7. J.F. Miles, *JOSA* **55** (1972) 165.
8. J. Ojeda-Castañeda, E. Jara, J. Ibarra, *Appl. Opt.* **29** (1990) 949.