

TESIS DEFENDIDA POR

PEDRO PIZÁ RUIZ

Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ

DR. VÍCTOR RUIZ CORTÉS

Director del Comité

DR. DIANA TENTORI SANTACRUZ

Miembro del Comité

DR. MODESTO ORTIZ FIGUEROA

Miembro del Comité

DR. SERGUEI MIRIDONOV

Miembro del Comité

**DR. PEDRO NEGRETE
REGAGNON**

Miembro del Comité

**DR. ROGER SEAN CUDNEY
BUENO**
*Coordinador del programa de posgrado en
Óptica*

**DR. DAVID HILARIO
COVARRUBIAS ROSALES**
*Encargado del despacho de la
dirección de Estudios de Posgrado*

30 de Noviembre de 2007

CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN
SUPERIOR DE ENSENADA



PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS
EN ÓPTICA

OPERACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN ESPEJO DEFORMABLE

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta:

Pedro Pizá Ruiz

Ensenada, Baja California, México, Noviembre del 2007.

RESUMEN de la tesis de **Pedro Pizá Ruiz**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS en Óptica. Ensenada Baja California, México. Noviembre 2007.

OPERACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN ESPEJO DEFORMABLE

Resumen aprobado por:

DR. VÍCTOR RUIZ CORTÉS

Director del Comité

En este trabajo se presenta la operación y caracterización de un espejo deformable de membrana de la compañía OKO Technologies con 37 electrodos y un diámetro de 15mm. Se describen las componentes que conforman todo el sistema y sus interconexiones para la operación del espejo deformable. Para la caracterización y evaluación del desempeño del espejo de membrana se utiliza un interferómetro ZYGO y mediante el análisis de los interferogramas se extrae la información de la deformación de la membrana del espejo. Mediante programas computacionales se generan deformaciones primarias que son asociadas a los primeros polinomios de Zernike y éstas son enviadas al espejo deformable. Se analiza la función de punto extendido cuando las deformaciones generadas por el espejo deformable están presentes en un sistema óptico. Numéricamente se obtiene la función de punto extendido y de esta manera se comparan los resultados teóricos con experimentales. Aunque existen otros moduladores espaciales de luz, un espejo deformable permite un aprovechamiento de casi 99% de la intensidad del haz incidente y no presenta histéresis, puede corregir las deformaciones de bajo orden que son las que más peso estadístico tienen en los frentes de onda deformados y permite modular la fase de un frente de onda de manera controlada. Debido a estas ventajas los espejos deformables tienen una gran cantidad de aplicaciones como la de corrección de imágenes en áreas que van desde la astronomía hasta la microscopía.

Palabras Clave: Espejo Deformable, Caracterización, Óptica Adaptativa.

ABSTRACT of the thesis presented by **Pedro Pizá Ruiz** as a partial requirement to obtain the MASTER OF SCIENCE degree in OPTICS. Ensenada, Baja California, Mexico. November 2007.

OPERATION AND CHARACTERIZATION OF A DEFORMABLE MIRROR

In this work we present the operation and characterization of a deformable mirror from the company OKO Technologies with 37 electrodes and a diameter of 15mm. We described all the components that are part of the system and their interconnections needed to operate the deformable mirror. For the characterization and evaluation of the performance of the mirror, we used a ZYGO interferometer and through the analysis of the interferograms we obtained the information about the deformation on the mirror membrane. With the used of computational programs we generate the primary deformations that are identify with the Zernike polynomials and then send to the deformable mirror. The point spread function is analyzed when the deformations generated by the deformable mirror are in an optical system. We obtain numerically the point spread function and in this way we compare numerical and experimental results. There are other space light modulators, but, a deformable mirror has the advantage of which it allows us to use almost 99% of the incident beam intensity, it does not present hysteresis, its able to correct low order deformations, which have higher statistical weight and finally it allow us to modulate the wave-front phase in a controlled way. Due to these advantages the deformable mirrors have a great amount of applications such image correction from astronomy to microscopy.

Key words: Deformable mirror, characterization, Adaptive Optics.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres Pilar Ruiz Azuara y José Pizá Martínez, a mi hermano Daniel Pizá Ruiz, por el apoyo para que completara los estudios de maestría.

Agradezco al director de tesis el Dr. Víctor Ruiz Cortés, a los sinodales, la Dra. Diana Tentori Santacruz, al Dr. Modesto Ortiz Figueroa, al Dr. Serguei Miridonov, al Dr. Pedro Negrete Regagnon, por sus comentarios y sugerencias durante la realización de esta tesis.

Extiendo mi agradecimiento por el apoyo técnico brindado en la realización de esta tesis a Francisco Javier Dávalos Gutiérrez, Miguel de Jesús Farfán Sánchez, Marcia Patricia Padilla Castillo, Pedro Antonio Leree Acevedo e Isaac Reyes Fimbres Valenzuela.

Agradezco a mis amigos y compañeros, David, Héctor, Felipe, Raul, Ernesto, Gaby, Fernando y Josué, por el tiempo que compartimos estos años.

Agradezco a CONACYT por la beca otorgada durante la realización de los estudios de maestría y tesis llevados a cabo en el CICESE.

CONTENIDO

Capítulo	Página
I Introducción.....	2
I.1 Objetivos.....	3
I.2 Estructura de la tesis	3
I.3 Antecedentes.....	5
I.4 Aplicaciones.....	7
I.4.1 Pinzas ópticas.....	7
I.4.2 Microscopio confocal y microscopía de dos fotones.....	8
I.4.3 Astronomía.....	10
I.4.4 Acoplamiento de luz en fibras ópticas o multiplexor de fibras ópticas.	12
I.4.5 Oftalmología.....	12
I.4.6 Compresión de pulsos.....	14
I.4.7 Sintonización de cavidades láser de alta potencia.	15
II Moduladores espaciales de luz	18
II.1 No Dinámicos	19
II.1.1 Vidrio o Cristal	19
II.1.2 Plásticos	20
II.1.3 Fotolitografía:	20
II.1.4 Hologramas.....	20
II.1.5 Película fotográfica (amplitud y fase).....	21
II.2 Dinámicos	21
II.2.1 Actuador discreto.....	21
II.2.2 Segmentados ED y LCD.....	22
II.2.3 Espejos de membrana	23
II.2.4 Espejos bimorfos.....	23
II.3 Parámetros de selección.....	25
III Técnicas de caracterización de un espejo deformable	28
III.1 Métodos de caracterización	28
III.1.1 Sensor de frente de onda Shack-Hartman (SH).....	28
III.1.2 Generador de frentes de onda	30
III.1.3 Método interferométrico	31
IV Operación y caracterización del espejo deformable	35
IV.1 Sistema del espejo deformable	35
IV.2 Obtención del interferograma	37
IV.3 Análisis del interferograma.....	38
IV.3.1 Digitalización del interferograma	39
IV.3.2 Procesado de la imagen.....	40

CONTENIDO (continuación)

Capítulo	Página
V Modelos de control de espejos deformables	49
V.1 Modos de vibración y la ecuación de Bessel para una membrana circular	49
V.2 Polinomios de Zernike	54
VI Obtención de la matriz de control	57
VII Resultados y discusión	64
VII.1 Proceso experimental para obtener la matriz de influencia	65
VII.2 Respuesta de un sistema óptico a un haz deformado por el espejo deformable. ...	70
VIII Conclusiones	81
Bibliografía	85
Apéndices	
Apéndice A	
Fabricación de un espejo deformable	89
Apéndice B	
Caracterización de la imagen de interferencia	92
Apéndice C	
Montaje y configuración del equipo	96
Apéndice D	
Funciones de punto extendido generadas por el espejo deformable	101
Apéndice E	
Control de lazo abierto y cerrado	105

Lista de figuras

Figura	Página
1. Ejemplo del sistema adaptativo utilizado por los griegos ajustando el reflejo de sus espejos individuales a un barco (Freeman and Pearson, 1982)	5
2. Arreglo experimental de pinzas ópticas que utiliza un espejo deformable para confinar y manipular partículas (Ota <i>et al.</i> 2003).....	8
3. Arreglo experimental para microscopía confocal de dos fotones propuesto por Albert <i>et al.</i> (2000). Utiliza un espejo deformable para corregir deformaciones y mejorar la calidad del sistema.	10
4. Arreglo experimental de un telescopio con sistema de óptica adaptativa (Iris AO), para corrección de distorsiones causadas por turbulencia, el sistema mide la magnitud y forma de la distorsión y manda la información al espejo, el cual modifica su superficie, introduciendo una fase conjugada al frente de onda distorsionado, logrando un frente de onda libre de distorsiones.	11
5. Arreglo óptico que conforma un conmutador óptico para comunicaciones con fibras ópticas usando un espejo deformable.	12
6. Arreglo experimental propuesto por Enrique (Enrique y Artal, 2003) para la evaluación de deformaciones presentes en el ojo humano.	13
7. Ejemplo de un espejo deformable para compresión de pulsos, marca OKO Technologies de 10×50 mm.....	14
8. Ejemplo de un arreglo óptico para la compresión de pulsos, utilizando un espejo deformable para modificar el camino óptico que recorren las diferentes longitudes de onda que componen el pulso original.	15
9. Ilustración de los patrones de iluminación o distribución de modos transversales, formados por cavidades láser, (a) Estos se pueden simular por computadora por medio de los polinomios de Laguerre y se denominan TEM(polares) (b) Se pueden simular por computadora por medio de los polinomios de Hermite y se denominan TEM(cartesianos).	16
10. Combinación de espejos para cavidades láser , (a) Plano Paralelo, (b) Concéntrico, (Esférico), (c) Confocal, (d) Hemisférico y (e) Cóncavo-Convexo	16

Lista de figuras (continuación)

Figura	Página
11. Espejos deformables (a) Espejos continuos con actuadores discretos. (b) Espejo segmentado, actuador de pistón, (c) Espejo segmentado, actuador de Pistón-Tip-Tilt o Pistón con inclinación. (d) Espejo de membrana, en esta configuración la membrana está suspendida sobre un arreglo de electrodos, la membrana tiene una película de aluminio que actúa como electrodo común. (e) Espejo bimorfo consiste en un sándwich de materiales piezoeléctricos en la parte superior se encuentra el electrodo común, y en la parte inferior se encuentra el arreglo de electrodos. (Porter <i>et al.</i> 2006)	24
12. Diagrama esquemático para un arreglo óptico con sensor Shack-Hartman, cuando se ilumina con (a) un frente de onda plano (b) frente de onda no plano.....	29
13. Diagrama esquemático de un sistema para caracterización en base a un generador de frentes de ondas.....	31
14. Diagrama esquemático de un sistema de caracterización interferométrica, utilizando un interferómetro en configuración Fizeau.....	32
15. Configuración hexagonal de los 37 electrodos del espejo deformable marca OKO Technologies.	35
16. Configuración del sistema de control del espejo deformable, el sistema puede trabajar con los primeros 19 electrodos utilizando una tarjeta PCI DAC y una tarjeta amplificadora, o utilizando los 37 electrodos usando el sistema completo.....	36
17. Interior del interferómetro Zygo utilizado para caracterizar el espejo deformable, en rojo se resalta el camino óptico que viaja la luz desde el láser hasta el plano imagen donde se forma la imagen y se resaltan los principales elementos que componen el interferómetro.	38
18. Imagen obtenida del interferograma, cuando al espejo se le aplica 180 V en el electrodo E1.	39
19. Interferograma sin frecuencia portadora.....	40

Lista de figuras (continuación)

Figura	Página
20. Representación gráfica el algoritmo propuesto por Takeda <i>et al.</i> (1982). (a) Se identifican los elementos de la ecuación (3) que componen el espectro, (b) Se determina el valor de f_0 , (c) Como el termino A no contiene información de fase, y C^* contiene la misma información que C, las removemos por lo que sólo nos quedamos con el término $C(f+ f_0,y)$. (d) A $C(f+ f_0,y)$, se le resta f_0 por lo que queda desplazado al centro del espectro.	43
21. Proceso de obtención de fase de la superficie del ED (a) Interferograma, (b) Fase extraída por medio del método de Fourier explicado anteriormente, (c) Resultado de desdoblar la fase obtenida del interferograma.	45
22. (a) Haz incidiendo en el espejo relajado, (b) Haz incidiendo en el espejo deformado cuando se aplica un voltaje, la línea punteada indica la diferencia de camino óptico.	46
23. (a) La luz incide en la superficie del espejo. (b) La luz se refleja en la superficie, por lo que la DCO recorre dos veces el mismo camino.	46
24. Reconstrucción de la (a) diferencia de fase y (b) superficie, donde la superficie tiene la mitad de la magnitud que la fase pero con signo negativo. La figura se obtuvo de la reconstrucción del interferograma en la Figura 21a.	47
25. Gráficas de las primeras cuatro raíces de la solución de la ecuación de onda.	53
26. Gráfica de los primeros polinomios de Zernike y el nombre asignado a la deformación asociada a ellos.	55
27. Ejemplo de dos diferentes electrodos activados individualmente, aplicando 150V, (a) Electrodo 1, (b) Electrodo 11	58
28. Representación (a) gráfica y (b) matricial de la ecuación (28), donde ϕ es la fase reconstruida del interferograma, cuando activamos el electrodo E1, a_i es el coeficiente del respectivo índice de Zernike y Z_i es el i polinomio de Zernike.	59
29. (a) Representación gráfica de la construcción de una MFI en función de los coeficientes de Zernike de cada una de las FI que contribuyen a la deformación de toda la membrana. (b) Distribución de los coeficientes de Zernike en función de los electrodos, dentro de una MFI	60
30. Reconstrucción de fase que la superficie del espejo introduce en el haz incidente cuando ninguno de sus electrodos ha sido activado.	64

Lista de figuras (continuación)

Figura	Página
31. Secuencia para obtener la FI para el electrodo 1, (a) Interferograma cuando el electrodo 1 ha sido activado, (b) Fase introducida por el electrodo 1 cuando ha sido activado, (c) Coeficientes de Zernike que son necesarios para representar la fase obtenida.....	65
32. Secuencia para obtener la FI para el electrodo 13, (a) Interferograma cuando el electrodo 13 ha sido activado, (b) Fase introducida por el electrodo 13 cuando ha sido activado, (c) Coeficientes de Zernike que son necesarios para representar la fase obtenida.....	66
33. Secuencia para obtener la FI para el electrodo 17, (a) interferograma cuando el electrodo 17 ha sido activado, (b) Fase introducida por el electrodo 17 cuando ha sido activado, (c) Coeficientes de Zernike que son necesarios para representar la fase obtenida.....	66
34. Matriz MFI. Gráfica de falso color donde se identificará qué polinomios son los dominantes en las FI del espejo. Se puede apreciar que hay dos franjas o renglones con falso color “rojo”, lo que significa que son polinomios que tienen coeficientes altos con respecto a otros polinomios.	67
35. Representación gráfica de la matriz MFI. Por medio de esta representación grafica se puede apreciar cuales son los polinomios que tienen más peso.	68
36. Esta gráfica muestra la amplificación que tuvo que aplicarse a las respectivas matrices de voltajes para cada polinomio.	69
37. Arreglo experimental para obtener la respuesta del espejo deformable a la función de punto extendido.....	70
38. Respuesta del arreglo óptico de la Figura 37 a la función de punto extendido cuando el espejo no ha sido activado.....	71
39. Respuesta del sistema óptico cuando se ha introducido una deformación de desenfoque, (a) Polinomio de Zernike de índice 4, asociado a un desenfoque o defoco. (b) Función de punto extendido utilizando la deformación del inciso (a), (c) Fase reconstruida del espejo deformable al adoptar la forma del Polinomio de Zernike de índice 4, (d) Imagen de la función de punto extendido en el plano focal obtenida numéricamente mediante la fase del inciso (c), (e) Electrodo activados en el ED para generar la fase del inciso (c), (f) Imagen de la cámara en el plano focal del arreglo de la Figura 37.....	73

Lista de figuras (continuación)

Figura	Página
40. Respuesta del sistema óptico cuando se ha introducido una deformación de astigmatismo, (a) Polinomio de Zernike de índice 12, asociado a un astigmatismo, (b) Función de punto extendido utilizando la deformación del inciso (a), (c) Fase reconstruida del espejo deformable al adoptar la forma del Polinomio de Zernike de índice 12, (d) Imagen de la función de punto extendido en el plano focal obtenida numéricamente mediante la fase del inciso (c), (e) Electrodo activados en el ED para generar la fase del inciso (c), (f) Imagen de la cámara en el plano focal del arreglo de la Figura 37.....	74
41. Respuesta del sistema óptico cuando se ha introducido una deformación de coma, (a) Polinomio de Zernike de índice 17, asociado a una coma, (b) Función de punto extendido utilizando la deformación del inciso (a), (c) Fase reconstruida del espejo deformable al adoptar la forma del Polinomio de Zernike de índice 17, (d) Imagen de la función de punto extendido en el plano focal obtenida numéricamente mediante la fase del inciso (c), (e) Electrodo activados en el ED para generar la fase del inciso (c), (f) Imagen de la cámara en el plano focal del arreglo de la Figura 37.	76
42. Respuesta del sistema óptico cuando se ha introducido una deformación de tricoide, (a) Polinomio de Zernike de índice 19, asociado a un tricoide, (b) Función de punto extendido utilizando la deformación del inciso (a), (c) Fase reconstruida del espejo deformable al adoptar la forma del Polinomio de Zernike de índice 19, (d) Imagen de la función de punto extendido en el plano focal obtenida numéricamente mediante la fase del inciso (c), (e) Electrodo activados en el ED para generar la fase del inciso (c), (f) Imagen de la cámara en el plano focal del arreglo de la Figura 37.	77
43. Proceso de fabricación de espejo deformable (a) Oblea de Si, (b) Oblea con máscara de foto-resina, (c) La oblea se expone a N gaseoso a alta temperatura, (d) Estructura de Si ₃ N ₄ , se remueve la máscara de foto-resina.....	89
44. Proceso de fabricación de espejo deformable (a) La oblea es expuesta a una solución de KOH, la cual remueve el Si, (b) Perfil que resulta de la aplicación del KOH, (c) Se evapora una película de Al, (d) Se coloca el espejo terminado en una placa PCB con sus espaciadores y contactos necesarios.....	90
45. Imagen de la abertura colocada frente al espejo deformable de tamaño (a) 0.05'' (b) 0.200'' (c) 0.300'' (d) 0.550''	92

Lista de figuras (continuación)

Figura	Página
46. Seleccionamos un renglón de la imagen y contamos cuantos píxeles son iluminados para cierta apertura.....	93
47. Por medio de FWHM como parámetro obtenemos la cantidad de píxeles iluminados.....	93
48. Imagen resultante al colocar una abertura que varia verticalmente, se selecciona una columna de la imagen para obtener el número de píxeles iluminados por la abertura.	94
49. Variación de la distancia que un píxel representa, en función del número de muestras tomadas.....	94
50. Tarjeta PCI DAC de 8 bits de resolución con 24 salidas analógicas, el voltaje puede ser ajustado entre 2.5 y 10Vmax para todos los canales	96
51. Tarjeta amplificadora, cuenta con 20 canales y un factor de amplificación de 56.	97
52. Espejo deformable	97
53. Configuración entre los contactos del conector y su interconexión con los electrodos en el espejo, visto desde atrás del espejo.....	98
54. Vista superior del espejo, protegido por una caja de acrílico.	98
55. Diagrama esquemático de elementos que componen el sistema control y caracterización para el espejo.	99
56. Diagrama esquemático, que muestra los bloques necesarios para implementar (a) un sistema de control de lazo abierto. (b) un sistema de control de lazo cerrado, para el espejo deformable.	106

Lista de Tablas

Tabla	Página
I. Configuración de electrodos en función de las tarjetas PCI DAC.....	100
II. Comparación de resultados de introducir polinomios 2 al 19 en el espejo	102

Capítulo I

Introducción

I Introducción

Los moduladores espaciales de luz son dispositivos que permiten variar, de manera controlada, la distribución espacial de fase y/o amplitud de un haz que ha sido reflejado o refractado por este dispositivo. Existen varios dispositivos que permiten variar la distribución espacial de la fase y/o amplitud que utilizan diferentes principios para lograr los cambios deseados, entre estos principios se encuentra la reflexión, refracción, birrefringencia y cambios de polarización.

Una de las áreas que recientemente ha crecido gracias al desarrollo de moduladores espaciales de luz, es la óptica adaptativa (OA). La OA es una técnica para mejorar el funcionamiento de los sistemas ópticos, principalmente reduciendo los efectos de las distorsiones ópticas variantes en el tiempo. La OA funciona midiendo la distorsión del haz incidente y retroalimentando esta información al modulador espacial que modifica la fase o amplitud, para lograr la fase y/o amplitud deseada.

Aunque la teoría de corrección de aberraciones o deformaciones ópticas estaba establecida desde hace mucho tiempo, fue sólo hasta 1990 que los avances en la computación permitieron poner en práctica esta tecnología. La forma más simple de la OA, es la corrección de lo que se conoce como tip-tilt, que es la inclinación en el eje X y Y de la fase, y también el adelanto y retraso de todo el frente de onda por medio de un desplazamiento total del espejo, componente constante en la fase (“offset”).

I.1 Objetivos

Objetivos:

- Montaje del sistema para operar un espejo deformable de 39 electrodos marca OKO.
- Realización de programas computacionales para el manejo del espejo deformable.
- Operación del espejo deformable
- Caracterización del espejo deformable
- Modelaje del sistema de modificación de fase (espejo deformable) para el diseño de distribuciones de campo, y por consecuencia de intensidad, en una región del espacio.

I.2 Estructura de la tesis

Capítulo I

En este capítulo se hace una introducción al tema de los espejos deformables, se definen los objetivos de la tesis, sus antecedentes y principales áreas de aplicación.

Capítulo II

En este capítulo se clasifican los diferentes elementos ópticos utilizados para modular la luz y se ubican los espejos deformables en esta clasificación. Se mencionan los parámetros de selección para los espejos deformables.

Capítulo III

En este capítulo se mencionan las diferentes herramientas que se pueden utilizar para caracterizar el espejo deformable, midiendo la deformación que el espejo sufre cuando se aplica una señal de control.

Capítulo IV

En este capítulo se describe el espejo deformable utilizado y los elementos necesarios para su funcionamiento, así como su interconexión. Se aplica el método interferométrico y se describe el algoritmo para el análisis de un interferograma.

Capítulo V

En este capítulo se describen los modelos para analizar el comportamiento del espejo. Se discuten los modos de vibración de la membrana y los polinomios de Zernike.

Capítulo VI

En este capítulo se utilizan los polinomios de Zernike para modelar el comportamiento del espejo y generar una expresión matemática que permite controlar el espejo. Con esta expresión se obtienen los voltajes necesarios para que el espejo genere la deformación propuesta.

Capítulo VII

En este capítulo se muestran y discuten los principales resultados de este trabajo. Se comparan las funciones de punto extendido ideales con las experimentales.

Capítulo VIII

En este capítulo se presentan las conclusiones y se sugiere ampliar este trabajo, incluyendo el aprovechamiento de una mayor superficie del espejo y el control dinámico del mismo.

I.3 Antecedentes

Históricamente el primer sistema de óptica adaptativa, fue el arreglo propuesto por Arquímedes alrededor del año 211 A.C., donde un ejército de griegos usando metales pulidos apuntaban los reflejos del sol a un mismo barco romano (Figura 1), con la intención de concentrar la suficiente energía para incendiar la embarcación.

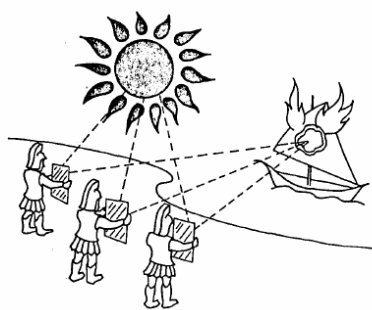


Figura 1. Ejemplo del sistema adaptativo utilizado por los griegos ajustando el reflejo de sus espejos individuales a un barco (Freeman y Pearson, 1982)

Aunque las bases fundamentales que rigen la óptica adaptativa son conocidas desde hace mucho tiempo, no fue sino hasta 1960 (Bustillo *et al.* 1998), que se pudieron unir los elementos necesarios para llevar a cabo esta teoría de manera práctica y automatizada para que pudiera responder en tiempo real a los cambios del ambiente o del sistema óptico. Al principio sólo estuvo disponible para uso militar y para los observatorios de gran presupuesto, debido a los costos que implicaba tanto la fabricación de los espejos deformables como de los enormes equipos de cómputo necesarios para realizar las operaciones que requiere el sistema de control. Actualmente, gracias a los avances en los

procesos de fabricación, es posible adquirir espejos deformables de bajo costo, y el sistema de cómputo puede ser una computadora personal (PC por sus siglas en inglés).

Debido a las ventajas que poseen los espejos deformables, varios grupos de trabajo han diseñado una serie de pasos y técnicas específicas para poder caracterizar y controlar con cierto grado de exactitud estos moduladores espaciales.

Una de las primeras aplicaciones que dieron auge a esta clase de moduladores espaciales, fue la intención de corregir las distorsiones o deformaciones producidas por la atmósfera en las imágenes astronómicas (Gonglewski *et al.* 2002). Las áreas que abarca actualmente la óptica adaptativa de los espejos deformables es muy amplia, algunos ejemplos son:

- Astronomía: para remover distorsiones inducidas por la atmósfera.
- Industria: para el mejoramiento de arreglos ópticos variantes en el tiempo, también puede ser usado en cortadoras láser de alta potencia.
- Medicina: para estudiar las deformaciones presentes en el ojo,
- Microscopía: para simplificar arreglos de microscopios, reduciendo la cantidad de piezas móviles.
- Micro-tecnología: en pinzas ópticas, donde los espejos deformables y otros moduladores espaciales de luz, permiten la optimización de asimiento óptico, lo cual reduce la necesidad de fuentes ópticas de mayor potencia, entre otras aplicaciones.

I.4 Aplicaciones

I.4.1 Pinzas ópticas

Desde su invención y desarrollo en 1986, (Chang *et al.* 2006), las pinzas ópticas son el método de manipulación y medición más popular, una de sus principales ventajas es la manipulación de células y organismos vivos, sin necesidad de manipularlos por contacto físico, por lo que la muestra puede permanecer estéril. Así como las pinzas maltratan a los objetos que manipulan si se aplica mucha fuerza, las pinzas ópticas pueden deteriorar o matar la muestra que sujetan si no se tiene cuidado con la potencia óptica que se aplica sobre la muestra. Originalmente sólo se usaban haces gaussianos, pero no todas las células o muestras son circulares, por lo que un perfil gaussiano no es la manera óptima de confinar, por lo que es necesario aumentar la potencia óptica para lograr el confinamiento de la muestra. Con la llegada de los moduladores espaciales de luz, como los espejos deformables, el diseño de perfiles de intensidad permite diseñar y modificar en tiempo real el haz con el que se confina la muestra, permitiendo a su vez distribuir de manera óptima la fuerza de confinamiento sin necesidad de aumentar la potencia óptica, (Ota *et al.* 2003).

Una segunda ventaja de los espejos deformables en las pinzas ópticas, es que el espejo puede permitir el desplazamiento de las muestras a lo largo del campo visual del microscopio, sin necesidad de monturas mecánicas, así como desplazar en profundidad la muestra, sin necesidad de mover la distancia focal del microscopio (Figura 2)

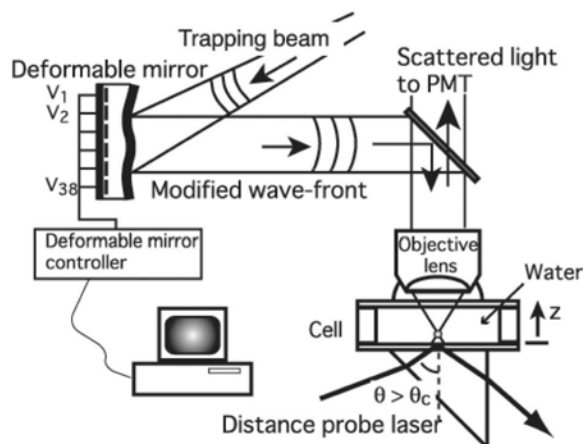


Figura 2. Arreglo experimental de pinzas ópticas que utiliza un espejo deformable para confinar y manipular partículas (Ota *et al.* 2003)

I.4.2 Microscopio confocal y microscopía de dos fotones

La microscopía confocal tiene varias aplicaciones, una es la reconstrucción tridimensional de una muestra como puede ser el caso de una célula. Mediante la utilización de una fuente puntual de iluminación y un foto-detector puntual, se puede eliminar la luz que está fuera de foco, con esto se pueden lograr imágenes de gran calidad en el plano focal. Barriendo bidimensionalmente un plano y cambiando el plano focal, se puede reconstruir imágenes tridimensionales. Esta técnica también es utilizada en la industria para inspeccionar superficies así como para leer la información en los CD ó DVD, donde una lente enfoca en la superficie del disco e interpreta las discontinuidades en la superficie como información.

Como es sabido, para algunos materiales que emiten luz cuando son iluminados, la frecuencia de emisión es igual al doble de la frecuencia de la luz original. Esto se logra utilizando un arreglo parecido al de la microscopía confocal, en el que se ha sustituido el divisor de haz por un espejo dielectrico, el cual refleja la longitud de onda de la fuente y deja pasar a la cámara la emisión espontánea resultante de la muestra (Albert *et al.* 2000). Por medio de este método, se puede obtener un mapa químico de la muestra. Donde hay más material que absorba dos fotones de la fuente de iluminación y por fluorescencia emita un fotón de una segunda longitud de onda, la intensidad será mayor y viceversa, donde no hay materia que absorba, no habrá emisión de la segunda longitud de onda.

Actualmente estos dos arreglos de microscopía confocal, requieren de motores muy finos, piezoeléctricos o trabajan por atracción o repulsión electromagnética con bobinas e imanes, pero si se sustituye la lente y su mecanismo de posicionamiento por un espejo deformable se eliminarían todos los elementos móviles y el espejo tomaría la concavidad necesaria para enfocar la luz en el plano deseado (Figura 3). De esta manera inclusive las dimensiones del equipo se podrían reducir. El espejo deformable no produce vibraciones no deseadas como las generadas por los engranes y no produciría interacción magnética como lo hacen las bobinas, con la segunda ventaja de que no se necesita un mecanismo de nanoposicionamiento para la muestra, debido a que el espejo puede producir las inclinaciones necesarias y cambiar el plano focal para barrer todo el plano de una muestra sin necesidad de desplazar la muestra.

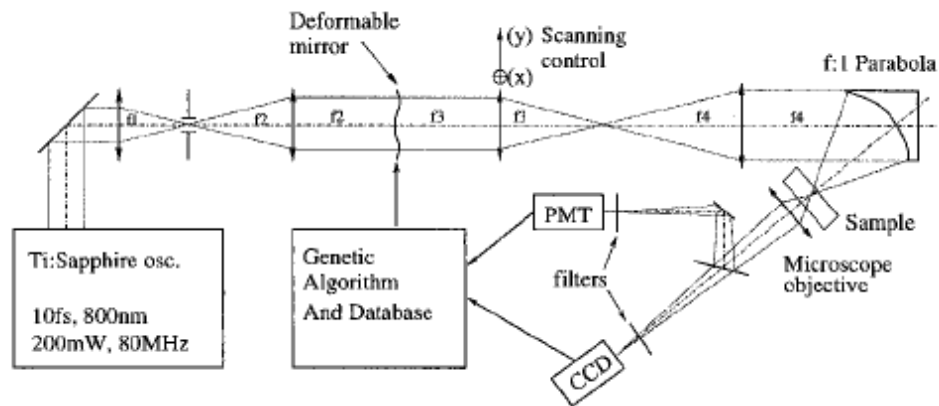


Figura 3. Arreglo experimental para microscopía confocal de dos fotones propuesto por Albert *et al.* (2000). Utiliza un espejo deformable para corregir deformaciones y mejorar la calidad del sistema.

I.4.3 Astronomía

Los espejos deformables tuvieron su primera aplicación en los observatorios astronómicos para corregir las distorsiones ópticas presentes en imágenes astronómicas (Dayton *et al.* 2002). La necesidad de desarrollar espejos deformables se debe a que no conviene utilizar elementos ópticos adicionales que introduzcan pérdidas de intensidad. Los espejos pueden reflejar casi el 99% de la intensidad incidente, por lo que pueden mejorar la imagen y no introducen pérdidas al sistema óptico del telescopio.

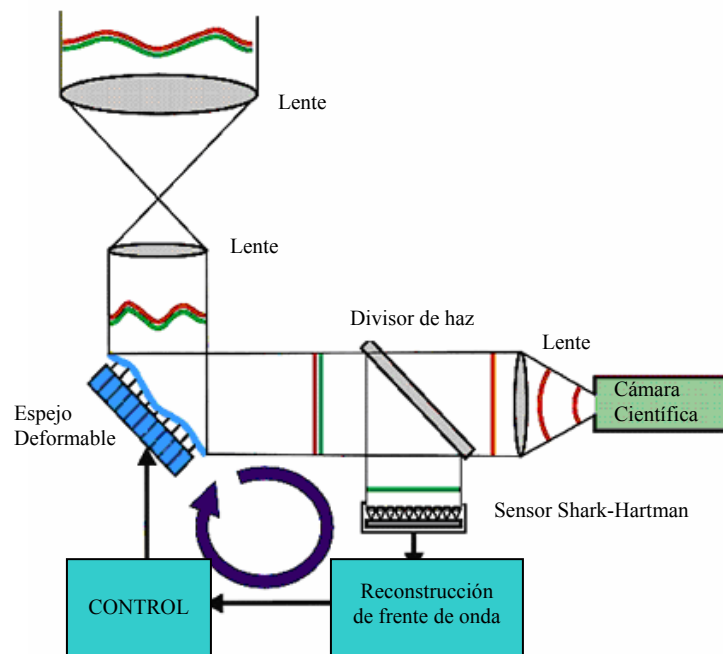


Figura 4. Arreglo experimental de un telescopio con sistema de óptica adaptativa (Iris AO), para corrección de distorsiones causadas por turbulencia, el sistema mide la magnitud y forma de la distorsión y manda la información al espejo, el cual modifica su superficie, introduciendo una fase conjugada al frente de onda distorsionado, logrando un frente de onda libre de distorsiones.

Su implementación requiere introducir dos elementos en el sistema óptico del telescopio (Figura 4). El primero es el modulador o espejo deformable y el segundo es un sensor de frente de onda. El sensor de frente de onda mide la distorsión presente en el frente de onda incidente, esta información se retroalimenta al sistema, el cual genera una fase conjugada. El espejo toma la forma de la fase conjugada, por lo que el resultado es un frente de onda sin distorsiones.

I.4.4 Acoplamiento de luz en fibras ópticas o multiplexor de fibras ópticas.

Actualmente los conmutadores ópticos operados con lentes y monturas mecánicas, tienen algunas limitaciones como son: pérdidas por acoplamiento, un tiempo de respuesta lento y un volumen limitado de fibras que puede manejar. Los espejos deformables permiten corregir deformaciones ópticas, operar con bajas pérdidas logrando acoplamientos de entre 6 y 3 dB y pueden operar hasta 3019 canales de fibra óptica (Meter *et al.* 2002). Un ejemplo de un conmutador de fibra óptica que utiliza un espejo deformable se muestra en la Figura 5.

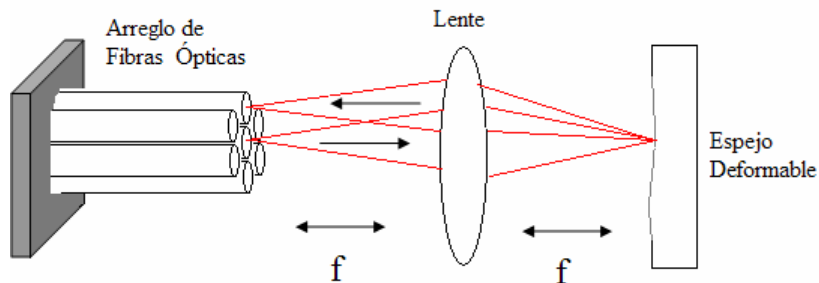


Figura 5. Arreglo óptico que conforma un conmutador óptico para comunicaciones con fibras ópticas usando un espejo deformable.

I.4.5 Oftalmología.

Los espejos deformables están adquiriendo mayor importancia en la medicina, específicamente para la detección y diagnóstico de problemas como astigmatismo, miopía, hipermetropía, entre otras. Anteriormente se utilizaba un foróptero para hacer un

diagnóstico en el ojo. Este método tiene el problema de depender de lo que el paciente considere como una mejor o peor imagen, además de que el oculista sólo tiene un conjunto de varias decenas de lentes para probar la combinación de lentes adecuada para el paciente. En la actualidad, un sólo equipo (Figura 6), puede medir las deformaciones presentes en la córnea y por medio de un espejo deformable proyectar una imagen con la conjugada de la deformación del ojo para obtener una imagen correctamente proyectada en la retina del ojo (Enrique y Artal, 2003). De esta manera, se elimina el error humano de que el paciente califique si ve mejor o no y se puede enviar la información pertinente al fabricante de lentes para que fabrique la lente específica.

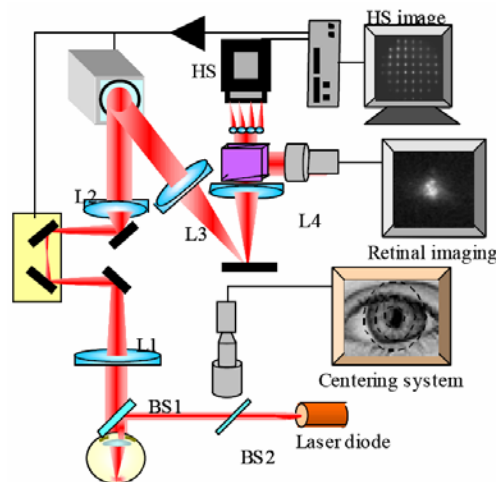


Figura 6. Arreglo experimental propuesto por Enrique (Enrique y Artal, 2003) para la evaluación de deformaciones presentes en el ojo humano.

Otros autores que están trabajando con espejos deformables aplicados a visión humana son Elizabeth Daly *et al.* (2006) y Lijun Zhu *et al.* (1999).

I.4.6 Compresión de pulsos

Como es sabido, diferentes longitudes de onda no viajan a la misma velocidad en el mismo medio por lo que unas longitudes de onda se adelantan o cambian su relación de fase con respecto a otras. Para compensar los cambios de fase se introduce un arreglo de rejillas de difracción que separan las diferentes longitudes de onda y les permite viajar separadas, pero de manera paralela, de esta manera podemos compensar de manera individual esas variaciones de fase y lograr compensar la dispersión cromática. Por medio de un espejo deformable, con variaciones unidimensionales (Figura 7), podemos ajustar continuamente la diferencia de camino óptico para cada una de las longitudes de onda que inciden en el espejo y de esa manera lograr pulsos más comprimidos, (Figura 8). Este tipo de experimentos ha sido empleado por Pfeifer *et al.* (2003); Wnuk *et al.* (2005); Zeek *et al.* (1999) y Chériaux *et al.* (2001).



Figura 7. Ejemplo de un espejo deformable para compresión de pulsos, marca OKO Technologies de 10×50 mm.

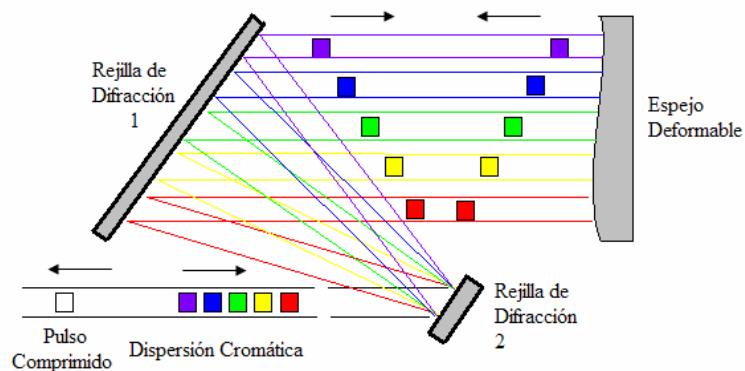


Figura 8 Ejemplo de un arreglo óptico para la compresión de pulsos, utilizando un espejo deformable para modificar el camino óptico que recorren las diferentes longitudes de onda que componen el pulso original.

I.4.7 Sintonización de cavidades láser de alta potencia.

En óptica no lineal existe el fenómeno conocido como auto-enfoque que sucede cuando un haz de alta potencia cambia la temperatura del material por el que viaja. El material se calienta y cambia su índice de refracción. Normalmente el perfil de intensidad de un haz láser tiene una distribución gaussiana, el centro es más intenso y la intensidad decrece hacia las orillas. Si a mayor intensidad mayor cambio en el índice de refracción, se puede decir que se forma una lente convexa, que hace converger el haz a un punto focal. Si el foco de esta lente temporal se encuentra dentro del material, se puede producir un daño irreparable en el interior del material.

Para poder apreciar ciertos fenómenos no lineales en óptica, se requieren haces potentes que llegan a producir este efecto no deseado. Para poder utilizar haces potentes se pueden

diseñar perfiles de intensidad, Figura 9, que no permitan al material modificar su temperatura, de tal manera que no cambie el índice de refracción y permitan que el material disipe de manera segura la temperatura acumulada por la absorción. Uno de estos perfiles es el de dona, en el cual no hay intensidad en el centro por lo que no se produce el efecto de un lente dentro del material (Cherezova *et al.* 1998). La teoría de cavidades láser nos permite predecir las posibles combinaciones de espejos, Figura 10, que cumplen la condición de estabilidad, de manera que podemos predecir la forma que tiene que adoptar el espejo para formar el perfil de dona o toroide.

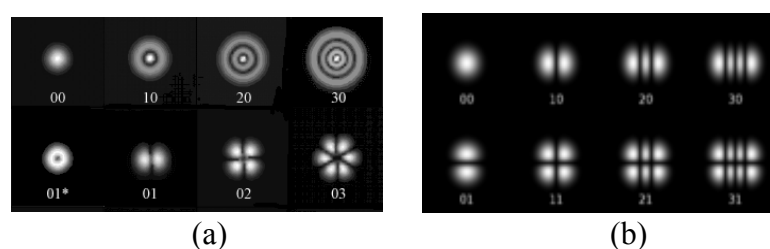


Figura 9. Ilustración de los patrones de iluminación o distribución de modos transversales, formados por cavidades láser, (a) Estos se pueden simular por computadora por medio de los polinomios de Laguerre y se denominan TEM(polares) (b) Se pueden simular por computadora por medio de los polinomios de Hermite y se denominan TEM(cartesianos).

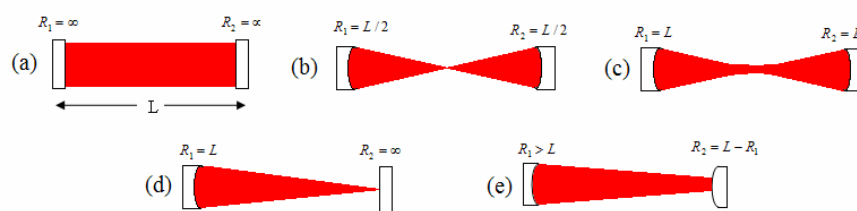


Figura 10. Combinación de espejos para cavidades láser, (a) Plano Paralelo, (b) Concéntrico, (Esférico), (c) Confocal, (d) Hemisférico y (e) Cóncavo-Convexo

Capítulo II

Moduladores espaciales de luz

II Moduladores espaciales de luz

Los moduladores espaciales de luz son elementos o dispositivos que modifican el perfil de fase y/o amplitud de un frente de onda incidente, ya sea cambiando el camino óptico o el índice de refracción del medio en que la luz se propaga.

Existen varios tipos de moduladores ópticos como pueden ser:

No Dinámicos

-Transmisión, y se pueden clasificar por:

-Material: Vidrio, Cristal y Plásticos

-Proceso de Fabricación: Fotolitografía, Hologramas y Película Fotográfica

(Amplitud y Fase)

Dinámicos ó Variantes en el tiempo

-Transmisión: Pantallas de cristal líquido (LCD por sus siglas en inglés) transmisión

(Fase y/o Amplitud) y los moduladores acusto-ópticos

-Reflexión

LCD de reflexión y los espejos deformables (ED), los cuales se dividen en:

- Segmentados de superficies planas, actuador independiente por segmento y múltiples actuadores por segmento
- Continuos como son los, piezoeléctricos monolíticos, actuadores discretos hidráulicos, magnéticos, electrostáticos y bimorfos.

A continuación se describirá brevemente el principio de funcionamiento de algunos de estos moduladores. Cabe mencionar que en todos ellos la función es modificar el frente de onda en amplitud y/o fase.

II.1 No dinámicos

Son moduladores espaciales cuya capacidad de modular no varía con el tiempo.

II.1.1 Vidrio o Cristal

Pueden ser de vidrio, cuarzo, así como otros cristales que sean transparentes a la longitud de onda en que se desean utilizar, también es importante que puedan ser pulidos o maquinados para darles la forma que se desea.

II.1.2 Plásticos

Con métodos de inyección de plástico se producen lentes con arreglos complejos, como arreglos matriciales de lentes para sensores Shack-Hartman, homogenizadores para proyectores, lentes Fresnel, entre otros.

II.1.3 Fotolitografía:

Con este método (originalmente diseñado para producir circuitos eléctricos integrados), se pueden crear mascarillas de fase con calidad nanométrica. La técnica implica depositar una película de fotorresina sobre un sustrato y luego utilizando una mascarilla e iluminado con una lámpara UV, se proyecta la imagen de la mascarilla sobre el sustrato, y finalmente se revela y se obtiene el relieve deseado.

II.1.4 Hologramas

El método para grabar los hologramas es por medio de la interferencia de dos frentes de onda coherentes. Por ejemplo, si se utiliza un frente plano y otro esférico, se produce un holograma con características como una lente plano convexa, y si se utilizan dos frentes esféricos, se produce un holograma con características de una lente biconvexa, y con dos frentes de onda planos, se produce lo que se conoce como una rejilla de Bragg. Entre otras aplicaciones con patrones más complejos.

II.1.5 Película fotográfica (amplitud y fase)

A diferencia de los hologramas, los elementos ópticos difractivos (EOD) de película fotográfica no requieren luz coherente, la transmitancia es directamente proporcional a la intensidad a la que se le expuso. Una vez que la película se expone al patrón de iluminación deseado, puede ser revelado para ser un EOD de amplitud, por lo que el negativo se revela con el mismo proceso que una fotografía. Si se desea un EOD de fase con película fotográfica, el proceso de revelado debe ser modificado para lograr el blanqueado de la película lo que produce una película transparente y con cambios fase de amplitud.

II.2 Dinámicos

Los espejos deformables y los moduladores LCD, son EOD variantes en el tiempo y se pueden agrupar en cuatro categorías (Porter *et al.* 2006), que se describen a continuación.

II.2.1 Actuador discreto

Los espejos de este tipo son superficies continuas, cuyo perfil es controlado por un arreglo de electrodos. Estos pueden ser pistones hidráulicos, magnéticos, piezoeléctricos o electrodos que actúan por atracción electrostática, Figura 11a. Activando uno de los electrodos se produce una deflexión que se asemeja a un perfil gaussiano en la superficie del espejo. La principal característica de estos espejos deformables continuos es que presentan un coeficiente de acoplamiento alto, lo que significa que la deformación

producida por un actuador se extiende a los electrodos adyacentes, modificando el perfil del 10% al 15% de la deflexión máxima del electrodo activado.

II.2.2 Segmentados ED y LCD.

Espejo deformable segmentado.- Es un arreglo de segmentos de espejos planos, controlados de manera independiente.

Existen dos clases de espejos segmentados:

- Pistón: Estos espejos sólo ofrecen un grado de libertad que corresponde al desplazamiento vertical del pistón Figura 11b.

- Pistón con Inclinación (tip-tilt): A diferencia de los anteriores, poseen dos grados más de libertad, lo que permite lograr el mismo factor de fase que los espejos segmentados de “Pistón”, pero con menos segmentos, Figura 11c.

Los LCD también se catalogan como segmentados debido a la configuración matricial e individual para cada uno de sus píxeles, los cuales están separados físicamente por un aislante y afectan homogéneamente el área del píxel que se activa, de manera que no afecta a los píxeles adyacentes.

II.2.3 Espejos de membrana

Los espejos de este tipo consisten en una membrana flexible, reflectiva que se encuentra anclada o sujeta en su borde exterior por un marco rígido, el cual suspende a la membrana de un arreglo de electrodos en la parte inferior. Al aplicar un voltaje en los electrodos se induce atracción electrostática, lo que produce una deformación en el espejo. Debido a que la membrana está sujeta por el borde exterior sólo dos terceras partes del área central son útiles Figura 11d. Existen otras variantes de espejos de membrana que utilizan efectos térmicos, magnéticos y electromagnéticos.

Algunas de las ventajas de los espejos deformables es que son: acromáticos, inducen pocas pérdidas en el sistema óptico debido a su naturaleza reflectiva y si la superficie es tratada con películas, puede modificar haces de muy alta potencia a diferencia de los moduladores de transmisión.

II.2.4 Espejos bimorfos

Este dispositivo de corrección modal, consiste en un sandwich de capas, empieza con una o dos capas de material piezoeléctrico. En la capa superior del sandwich, se encuentra un electrodo continuo en toda la superficie, mientras que en la parte inferior se coloca un arreglo de electrodos. La magnitud de la deformación depende de la intensidad del campo eléctrico y de las propiedades dieléctricas del material o materiales piezoeléctricos. Estos espejos Figura 11e, son muy útiles para inducir deformaciones de bajo orden y tienen un rango dinámico amplio.

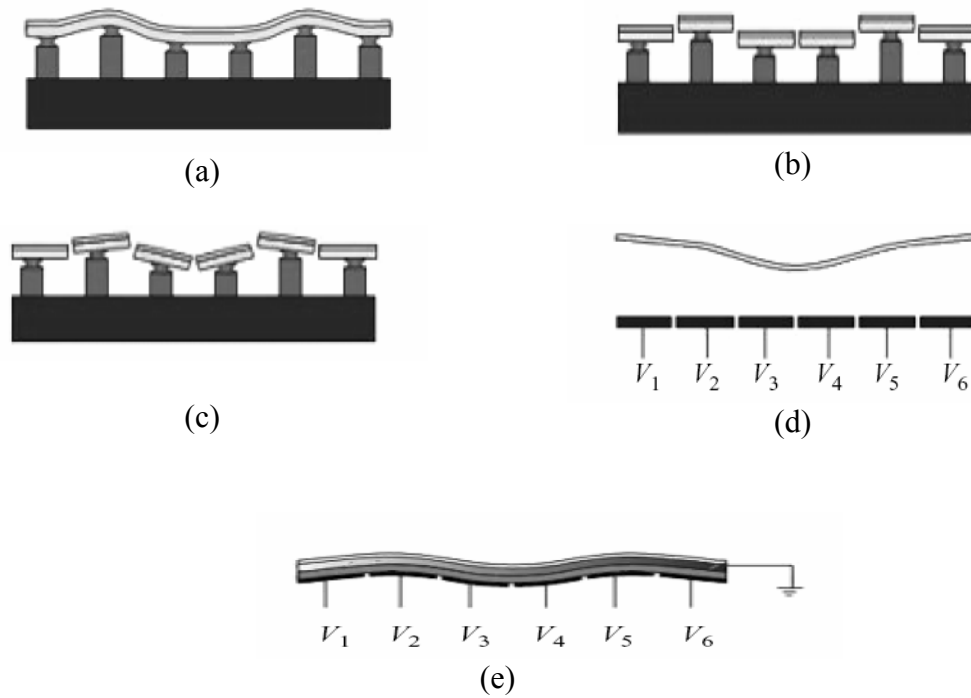


Figura 11. Espejos deformables (a) Espejos continuos con actuadores discretos. (b) Espejo segmentado, actuator de pistón, (c) Espejo segmentado, actuator de Pistón-Tip-Tilt o Pistón con inclinación. (d) Espejo de membrana, en esta configuración la membrana está suspendida sobre un arreglo de electrodos, la membrana tiene una película de aluminio que actúa como electrodo común. (e) Espejo bimorfo consiste en un sándwich de materiales piezoeléctricos en la parte superior se encuentra el electrodo común, y en la parte inferior se encuentra el arreglo de electrodos. (Porter *et al.* 2006)

II.3 Parámetros de selección

A continuación, se mencionan algunos parámetros importantes a resaltar en la selección adecuada de un ED de acuerdo a su aplicación:

-Número de actuadores: Este parámetro determina el número de grados de libertad que el espejo puede corregir, y está directamente relacionado con la separación entre electrodos.

-Separación entre actuadores: Es la distancia entre los centros de los actuadores, se puede definir como la resolución espacial que el espejo tiene para reproducir ó corregir las deformaciones de mayor orden.

-Desplazamiento del actuador: Es el máximo desplazamiento con el que el actuador puede deformar al superficie del espejo. El movimiento se extiende de ± 1 a $\pm 10 \mu m$. El desplazamiento libre del actuador limita la amplitud máxima del frente de onda corregido.

-Acoplamiento del actuador: Esta característica es única en espejos continuos ya que el desplazamiento que produce un actuador afecta a sus vecinos. Todos los espejos “modales” tienen interconexión grande, lo que asegura la alta calidad de la corrección de las deformaciones ópticas de orden inferior que tienen generalmente el peso estadístico más alto.

-Tiempo de respuesta o de reacción: Es el tiempo que le toma al espejo, desde que se aplica la señal de control hasta que se logra deformar la superficie. Este es un parámetro muy importante para sistemas variantes en el tiempo, ya que el espejo es el elemento limitador en el caso de corrección de deformaciones en tiempo real.

-Histéresis y el arrastre: Son efectos no lineales que disminuyen la precisión de la respuesta del espejo deformable. La histéresis puede variar de prácticamente 0% para los espejos electrostáticos de membrana, al 10% para los espejos con los actuadores piezoeléctricos. La histéresis es una característica de los sistemas, que no reacciona inmediatamente a las fuerzas aplicadas, la reacción es lenta o no vuelven totalmente a su estado original, lo cual limita la capacidad del espejo al trabajo en un sistema de control de lazo cerrado.

Capítulo III

Técnicas de caracterización de un espejo deformable

III Técnicas de caracterización de un espejo deformable

En esta sección se describirán los métodos comúnmente empleados para la caracterización de espejos deformables.

III.1 Métodos de caracterización

A grandes rasgos existen tres técnicas para la caracterización de espejos deformables:

- Sensor de frente de onda Shack-Hartman
- Generador de Frentes de Onda
- Interferométrico

III.1.1 Sensor de frente de onda Shack-Hartman (SH)

Este método parte de la idea de que cualquier frente de onda se puede aproximar a un arreglo discreto de pendientes en dos ejes (“tips” y “tilts”). Un sensor SH, consiste en un arreglo matricial de $m \times n$ lentes a una distancia focal frente a una cámara CCD. Si el frente de onda que incide en cada una de las lentes es plano y perpendicular al eje óptico, se proyecta un punto a la distancia focal en el eje óptico, Figura 12a. Pero si el frente de onda que incide en cada una de las lentes está deformado, no se logra formar un punto sino una mancha la cual no se proyecta sobre el eje óptico, Figura 12b. Si la mancha

correspondiente a cada lente se analiza, se obtiene un centroide, midiendo el desplazamiento de este centroide con respecto al centro del eje óptico, se puede calcular el tip-tilt discreto de cada lente, obteniendo la información de tip-tilt de todas las lentes del arreglo se puede reconstruir el frente de onda que incidió en el sensor.

Este método es el más utilizado en aplicaciones astronómicas (Véran y Herriot, 2000), debido a que no requiere de ningún haz de referencia, en el caso de la caracterización de espejos deformables, sólo se ilumina el espejo con un frente de onda plano y la reflexión del espejo se proyecta en el sensor Shack-Hartman.

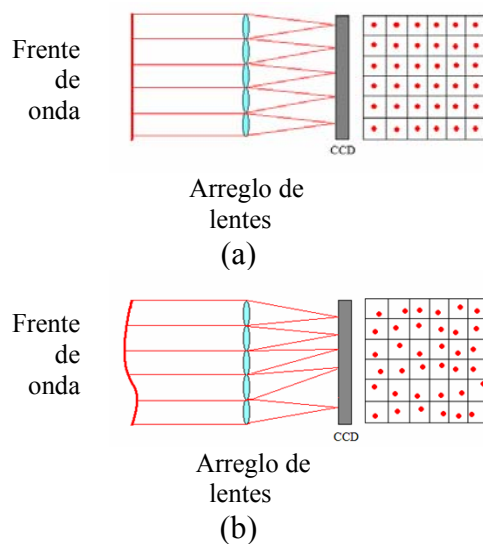


Figura 12. Diagrama esquemático para un arreglo óptico con sensor Shack-Hartman, cuando se ilumina con (a) un frente de onda plano (b) frente de onda no plano.

III.1.2 Generador de frentes de onda

Este arreglo consta de un modulador espacial de luz (puede ser un LCD o un espejo deformable previamente caracterizado), que genera frentes de onda de manera controlada. Estos frentes son proyectados al espejo deformable que se quiere caracterizar, y la reflexión generada por la superficie del espejo deformable es proyectada a una lente que enfoca en un foto-detector como se muestra en la Figura 13, (Booth *et al.* 2005). La finalidad de este arreglo es que cuando el frente de onda que se proyecta sobre el espejo es el conjugado de la superficie del espejo, la reflexión del espejo será un frente de onda plano que al pasar por la lente frente al foto-detector enfocará la mayor parte de la luz en el foto-detector. Cuando esto sucede, la señal eléctrica que entrega el foto-detector será más grande que la señal eléctrica generada por cualquier otra superficie producida por el espejo deformable. La información de los voltajes aplicados a los electrodos del espejo, los cuales representan la mejor aproximación del conjugado del frente de onda que se proyectó en la superficie del espejo, es almacenada para su futuro uso en la construcción de la matriz de control del espejo.

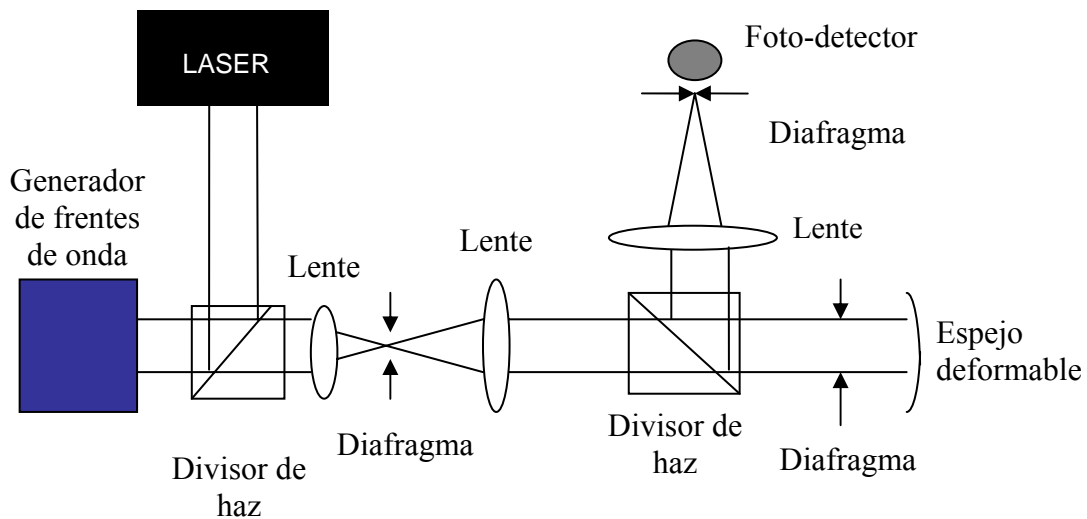


Figura 13. Diagrama esquemático de un sistema para caracterización en base a un generador de frentes de ondas

Este arreglo es muy simple pero como se mencionó anteriormente, se requiere de un modulador espacial previamente caracterizado.

III.1.3 Método interferométrico

El método interferométrico, como su nombre lo indica, hace uso de un interferómetro o arreglo que usa el fenómeno de interferencia para medir la diferencia de fase. El interferómetro es un arreglo que se encarga de representar diferencias de camino óptico entre dos frentes de onda y esas diferencias son representadas como variaciones de intensidad. Para producir dos haces de luz a partir de una misma fuente de luz, se utiliza un divisor de haz, este puede ser un cubo de vidrio o una placa de vidrio plano paralela,

colocada en la trayectoria del haz, a un ángulo deseado. La selección de cualquiera de estos elementos está en función de la clase de superficie que vamos a estudiar. En este caso se utilizó la superficie plano paralela, llamada superficie de referencia, la cual tiene un pulido de alta calidad en sus superficies. El diagrama del interferómetro utilizado se muestra en la Figura 14.

El haz láser es enviado hacia un sistema de lentes que coliman y expanden el haz, este haz es proyectado hacia la superficie de referencia, donde un porcentaje del haz es reflejado; a este primer haz lo llamaremos de referencia. El otro porcentaje que logra transmitirse llega hasta el espejo donde se refleja y vuelve a pasar por la superficie de referencia, este será el haz objeto, el cual lleva en su fase la diferencia de camino óptico, el haz referencia y el haz objeto, interfieren en el plano imagen, que es donde se encuentra la cámara CCD.

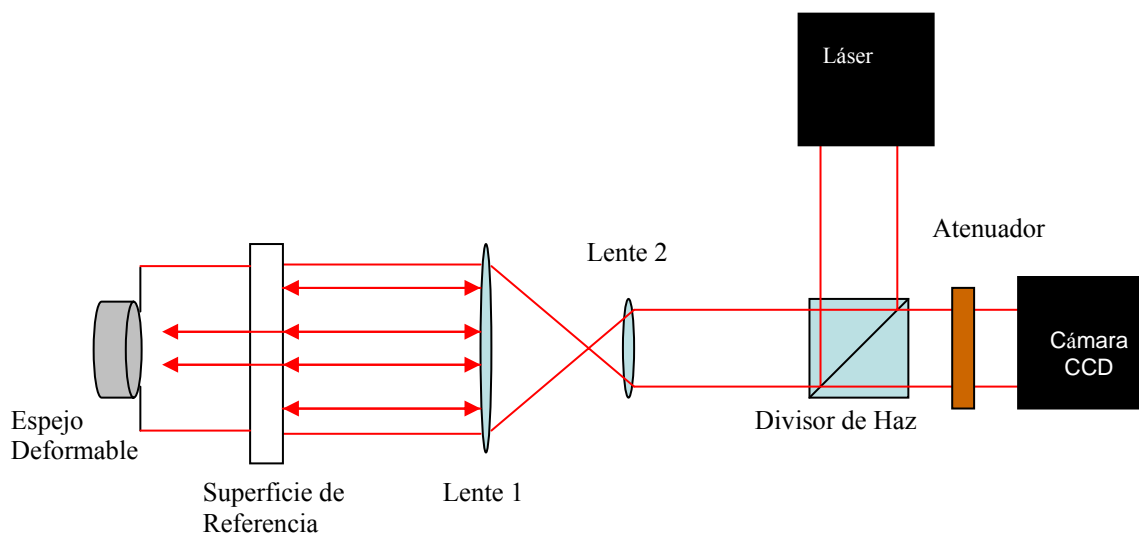


Figura 14. Diagrama esquemático de un sistema de caracterización interferométrica, utilizando un interferómetro en configuración Fizeau.

El método interferométrico nos permite observar y medir desviaciones de la superficie de prueba con respecto a una superficie de referencia, con gran precisión en toda la superficie de prueba.

El método interferométrico consta de dos pasos principales:

- a) Obtención del interferograma
- b) Análisis del interferograma, para inferir la topografía de la superficie de prueba.

En el siguiente capítulo se explicará la metodología para analizar el interferograma y su aplicación para obtener la superficie del espejo.

Cabe mencionar que aunque el método de caracterización del sensor Shack-Hartman es más utilizado (debido a su simplicidad), para sistemas de control de espejos deformables en lazo cerrado, el método interferométrico también se puede implementar para aplicaciones en control de lazo cerrado como lo muestra Cheung *et al.* (2003).

Capítulo IV

Operación y caracterización del espejo deformable

IV Operación y caracterización del espejo deformable

En este capítulo se describe el tipo de espejo deformable utilizado y la técnica empleada para su caracterización.

IV.1 Sistema del espejo deformable

El espejo deformable a utilizar es un espejo de membrana de la marca OKO Technologies. Este es un espejo fabricado en una oblea de silicio mediante técnicas fotolitográficas (los detalles en apéndice A). Cuenta con un arreglo de 37 electrodos distribuidos en forma hexagonal, Figura 15.

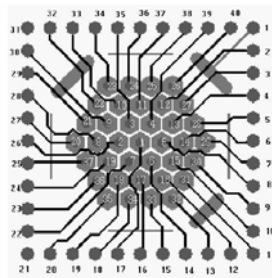


Figura 15. Configuración hexagonal de los 37 electrodos del espejo deformable marca OKO Technologies.

El sistema completo para la operación del espejo deformable cuenta con los siguientes componentes.

- 2 Tarjetas analógicas PCI DAC de 24 canales analógicos c/u.
- 2 Tarjetas amplificadoras de 250Vdc de 20 canales c/u.

- 1 Fuente de voltaje 250Vdc .25mA
- 1 Fuente de voltaje $\pm 15Vdc$
- Espejo Deformable Marca “OKO Technologies” de 37 Electroodos. Fabricado en una membrana de Si y cubierto de Al.

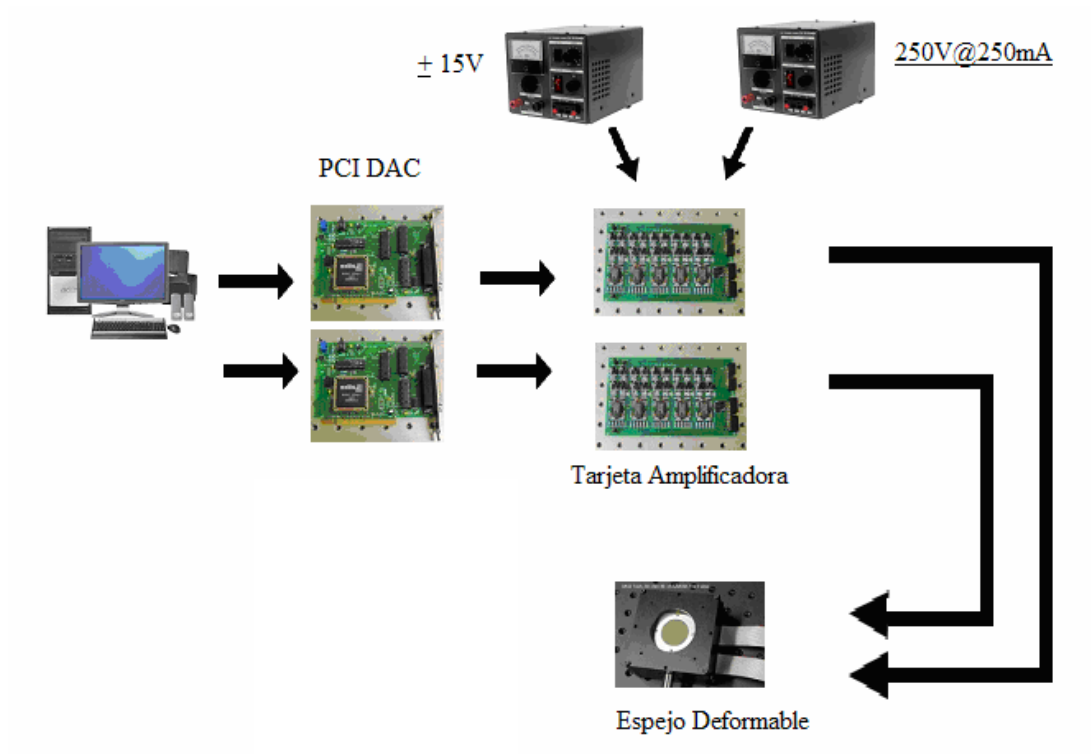


Figura 16. Configuración del sistema de control del espejo deformable, el sistema puede trabajar con los primeros 19 electrodos utilizando una tarjeta PCI DAC y una tarjeta amplificadora, o utilizando los 37 electrodos usando el sistema completo.

Por medio de un par de tarjetas PCI DAC, la información que genera la computadora se traduce a voltajes, estas señales no cuentan con la potencia ni amplitud necesaria para la operación del espejo. Esta señal de voltaje es amplificada y reforzada por medio de una tarjeta amplificadora, la cual está alimentada por dos fuentes de voltaje, una de 15V para el funcionamiento de la tarjeta amplificadora y otra de 250V para amplificar la señal

proveniente de la computadora. La señal amplificada tiene las características para producir el efecto electrostático necesario para la deformación del espejo deformable. El conjunto de los componentes del sistema de espejo deformable se muestra en la Figura 16.

Una vez que el espejo deformable de membrana está en operación, es necesario caracterizarlo para su funcionamiento óptimo. Para lo anterior, se optó por el método interferométrico como técnica de caracterización.

Como se mencionó en el capítulo anterior, el método interferométrico consta de dos pasos: obtención del interferograma y análisis de interferograma.

IV.2 Obtención del interferograma

Se utilizó un interferómetro marca ZYGO modelo MARK II (Figura 17), el cual tiene un arreglo en configuración Fizeau. El interferómetro utiliza un haz láser de He-Ne de longitud de onda 632.8nm y una superficie de referencia plana para generar el interferograma. Para obtener una imagen digitalizada del interferograma fue necesario colocar una cámara CCD, en el plano donde se proyecta el patrón de interferencia. Debido a que el interferómetro utiliza una cámara analógica y no una digital fue necesario conocer algunos parámetros de la imagen, ver apéndice B.

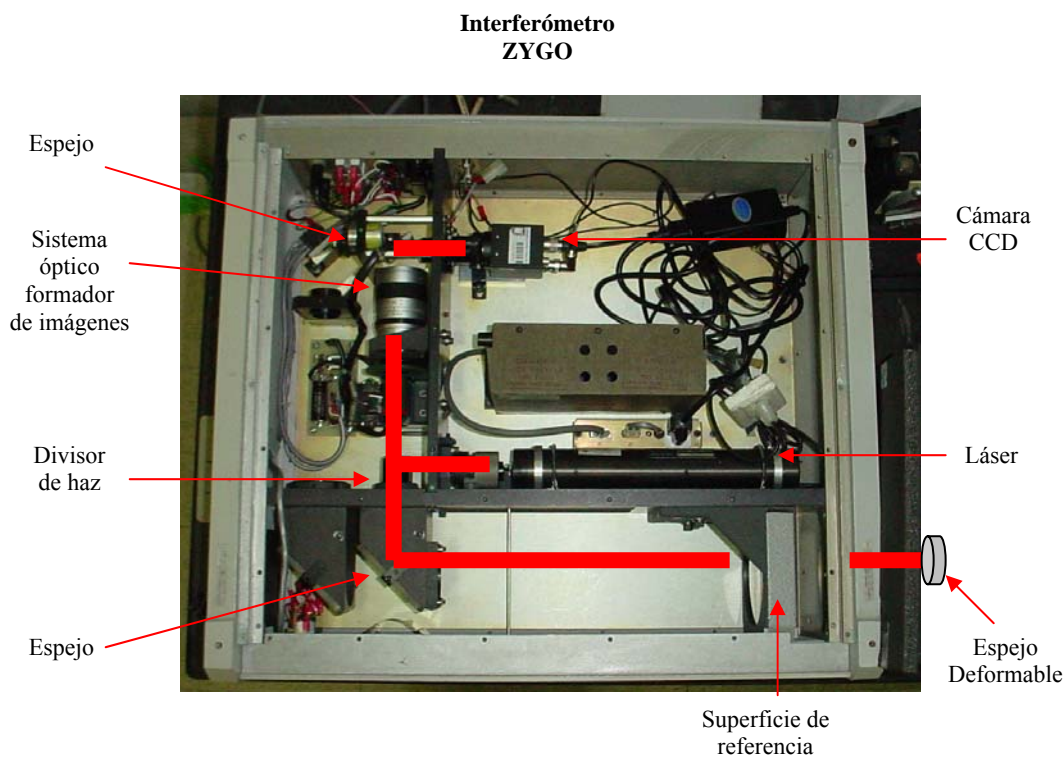


Figura 17. Interior del interferómetro Zygo utilizado para caracterizar el espejo deformable, en rojo se resalta el camino óptico que viaja la luz desde el láser hasta el plano imagen donde se forma la imagen y se resaltan los principales elementos que componen el interferómetro.

IV.3 Análisis del interferograma

En esta sección se describirá la metodología seguida para la interpretación de los interferogramas, de los cuales obtendremos información sobre el desplazamiento de la membrana y por lo tanto del cambio de fase que el espejo introduce.

Debido al potencial de la interferometría para el estudio de la calidad de las superficies, se establecieron una serie de pasos bien definidos para poder interpretar de manera

automática, la información contenida en un interferograma, los cuales son: digitalización del interferograma, procesado de la imagen, obtención de la fase y reconstrucción de la superficie que generó el patrón de interferencia, en este caso el espejo de membrana.

IV.3.1 Digitalización del interferograma

Como se explicó anteriormente, el interferómetro cuenta con una cámara que entrega una señal analógica, por lo que es necesario digitalizar la información para procesarla.

Este interferómetro cuenta con una cámara de video B/N, Marca Pulnix Modelo “TM-7CN”, y por medio de una tarjeta de captura de video USB marca “Adaptec GameBridge TV” modelo “AVC-1410” podemos obtener las imágenes del interferómetro con una buena calidad. Las imágenes obtenidas con esta tarjeta tienen una resolución de 740x480 píxeles. Un ejemplo de un patrón de interferencia obtenido, después de digitalizar la imagen se muestra en la Figura 18.

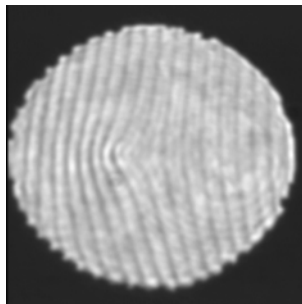


Figura 18. Imagen obtenida del interferograma, cuando al espejo se le aplica 180 V en el electrodo E1.

IV.3.2 Procesado de la imagen

Para poder procesar la imagen con la información del interferograma es necesario asegurarse de algunas características de la imagen tales como que la imagen no se encuentra saturada, que el patrón está contenido en el área de la imagen, buena visibilidad del patrón y seleccionar el área de la imagen que nos interesa para hacer más eficiente el procesamiento de la imagen.

Para el análisis del interferograma se utilizará el algoritmo propuesto por Takeda *et al.* (1982). Este método utiliza la transformada de Fourier y para esto necesitamos incluir una frecuencia portadora en el interferograma, misma que logramos introducir mediante una inclinación al espejo deformable. En la Figura 18, se muestra la imagen de un interferograma cuando a la superficie de prueba se le ha agregado una ligera inclinación (frecuencia portadora), en contraste con el interferograma sin frecuencia portadora mostrado en la Figura 19.

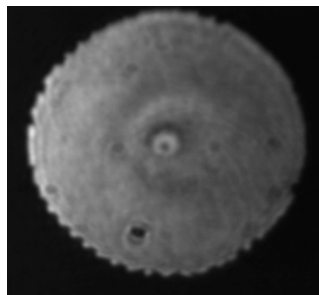


Figura 19. Interferograma sin frecuencia portadora.

Después de ajustar la imagen, procedemos al análisis matemático de la imagen.

El patrón de interferencia g_o puede ser escrito en la forma (Takeda *et al.* 1982):

$$g_o(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[2\pi f_o x + \phi(x, y)], \quad (1)$$

donde $\phi(x, y)$ representa las variaciones de fase que contiene la información de la superficie del espejo, $a(x, y)$ y $b(x, y)$ representan variaciones de intensidad que no contienen información útil para la reconstrucción de la superficie del espejo, f_o es la frecuencia portadora que varía más rápido que $\phi(x, y)$, $a(x, y)$ y $b(x, y)$, y está relacionado con la inclinación que se introdujo en el espejo.

Removiendo la frecuencia portadora (f_o), podemos extraer la información de fase. Esto es:

$$g_o(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[\phi(x, y)]. \quad (2)$$

Pero ¿Por qué no tomar el interferograma sin “tilt” y por lo tanto sin frecuencia portadora, como el de la Figura 19? Esto es, porque un interferograma como el de la Figura 19, sólo nos indica que hay variaciones en la superficie del espejo pero no indica una diferencia de camino mayor o menor, solo que hay una diferencia de camino. En cambio, en un interferograma con frecuencia portadora como el de la Figura 18, si las franjas se corren a la izquierda, la diferencia de camino es mayor, por lo tanto el espejo formó una concavidad en su superficie lo que ocasiona que el haz recorra una diferencia de camino óptico mayor,

y viceversa si las franjas fueran desviadas hacia la derecha nos indican que el espejo está formando una convexidad, lo que indica que el camino óptico es menor. Esta teoría se asemeja a la modulación de fase (PM) en comunicaciones, el cual es un caso particular de la modulación de frecuencia (FM).

Para poder extraer la fase, se realizará un análisis matemático del interferograma. Reescribimos la ecuación (1) como:

$$g(x, y) = a(x, y) + c(x, y)e^{(2\pi ifox)} + c^*(x, y)e^{(-2\pi ifox)}, \quad (3)$$

donde $c(x, y) = (1/2)be^{(i\phi(x,y))}$.

Como el algoritmo de Takeda *et al.* (1982) lo indica, procedemos a obtener la transformada de Fourier de la ecuación (3), de lo que se obtiene:

$$\mathfrak{F}\{g(x, y)\} = G(f, y) = A(f, y) + C(f - fo, y) + C^*(f + fo, y). \quad (4)$$

En este caso, el espectro consta de tres partes, donde las funciones $C(f-fo,y)$ y $C(f+ fo,y)$ contienen la misma información sólo que una es el conjugado de la otra, y $A(f,y)$ no contiene información de fase relevante para la reconstrucción de la superficie, ya que la información está modulada por la frecuencia espacial fo .

Dado que $C^*(f+fo,y)$ contiene la misma información que $C(f-fo,y)$ y $A(f,y)$ no contiene información de fase y continuando con el algoritmo de Takeda *et al.* (1982), se eliminan estos términos por lo que reescribimos la ecuación (4) como:

$$G(f, y) = C(f - fo, y). \quad (5)$$

Una vez que se determina el valor de fo la función $C(f-fo,y)$ puede ser reescrita por:

$$G(f, y) = C(f, y), \quad (6)$$

De una manera gráfica, el algoritmo de Takeda *et al.* (1982), se muestra en la Figura 20.

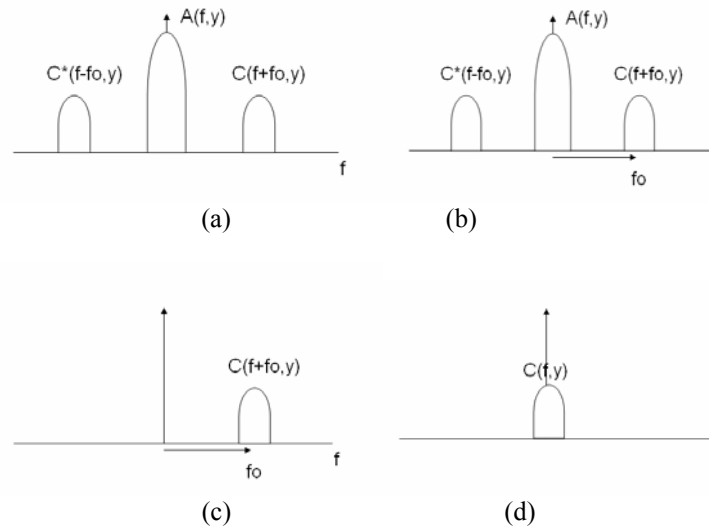


Figura 20. Representación gráfica el algoritmo propuesto por Takeda *et al.* (1982). (a) Se identifican los elementos de la ecuación (3) que componen el espectro, (b) Se determina el valor de fo , (c) Como el término A no contiene información de fase, y C^* contiene la misma información que C , las removemos por lo que sólo nos quedamos con el término $C(f+fo,y)$. (d) A $C(f+fo,y)$ se le resta fo por lo que queda desplazado al centro del espectro.

Una vez que se ha removido la frecuencia f_0 , Figura 20d, se aplica la transformada inversa de Fourier en la ecuación (6) para pasar del espacio de frecuencias al espacial, por lo que se tiene:

$$\mathfrak{F}^{-1}\{G(f, y)\} = c(x, y) = (1/2)b(x, y) + e^{i(\phi)}. \quad (7)$$

Como último paso para obtener la fase $\phi(x, y)$, aplicamos el logaritmo natural en la ecuación y se obtiene:

$$\log(c(x, y)) = \log((1/2)b(x, y)) + i(\phi). \quad (8)$$

En la Figura 21, se muestra el proceso de análisis del patrón de franjas. En la Figura 21a, el interferograma del espejo deformable, al cual se le ha aplicado un voltaje de 150 V a los electrodos E7 y E8. Se puede observar claramente las franjas (debido a la inclinación del espejo), y la deformación introducida al activar los electrodos. En la Figura 21b se muestra la fase obtenida mediante el algoritmo de Takeda *et al.* (1982) y se observa que la fase está acotada entre $\pm \pi$, lo que resulta en una superficie con discontinuidades. Para eliminar este problema y para que la superficie reconstruida sea continua, se aplica una serie de componentes lineales, de manera que las discontinuidades se unan, formando una señal o función continua Figura 21c.

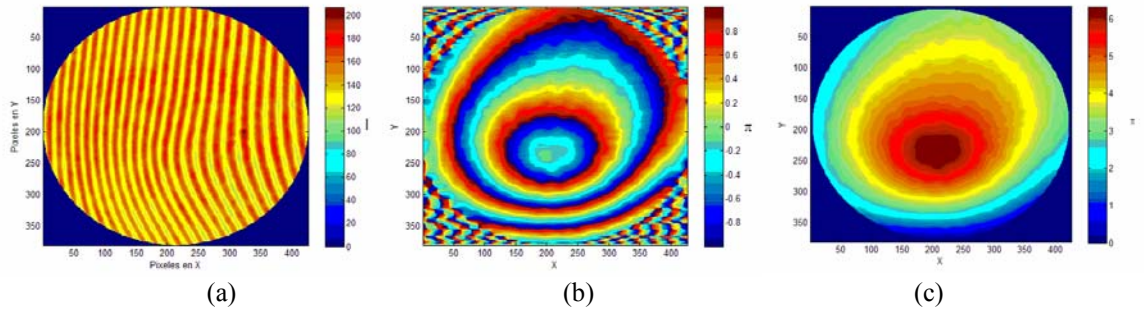


Figura 21. Proceso de obtención de fase de la superficie del ED (a) Interferograma, (b) Fase extraída por medio del método de Fourier explicado anteriormente, (c) Resultado de desdoblar la fase obtenida del interferograma.

Hasta este punto se ha obtenido información de la fase que introduce el espejo, sin embargo, es necesario asociarlo a un desplazamiento del espejo, mediante la expresión:

$$D = \frac{-S}{2k}, \quad (9)$$

donde D es el desplazamiento del espejo, S es la fase que obtuvimos del análisis interferométrico, k es el vector de onda $\frac{2\pi}{\lambda}$, donde λ es la longitud de onda con la que iluminamos el espejo para formar el interferograma.

El término $\frac{S}{2}$ se obtiene al analizar el camino óptico de la luz, cuando se activa alguno de los electrodos se produce un atracción electrostática, lo que ocasiona que el espejo produzca una concavidad en su superficie. Cuando un haz incide en el espejo, este haz recorre un camino mayor, como se ilustra en la Figura 22.

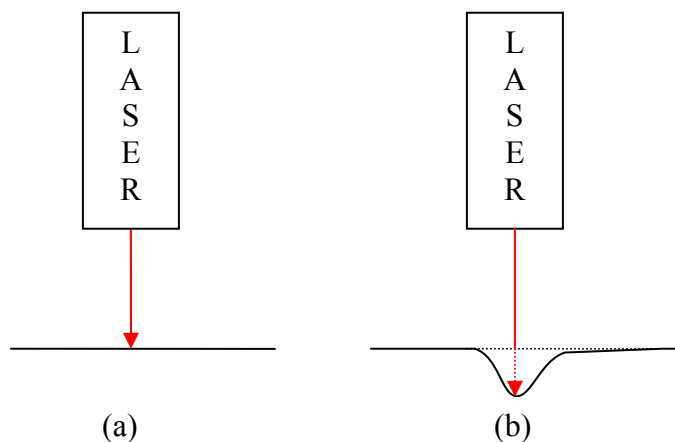


Figura 22. (a) Haz incidiendo en el espejo relajado, (b) Haz incidiendo en el espejo deformado cuando se aplica un voltaje, la línea punteada indica la diferencia de camino óptico.

Como se aprecia en la Figura 22b, el haz recorre una mayor distancia con respecto a la Figura 22a, La diferencia de camino óptico (DCO), es lo que se interpreta en el interferograma como cambio de intensidad, de aquí obtenemos S . El $\frac{1}{2}$ se obtiene de analizar la reflexión del haz en el espejo como se muestra en la Figura 23.

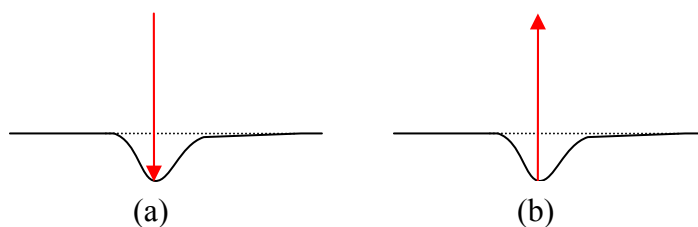


Figura 23. (a) La luz incide en la superficie del espejo. (b) La luz se refleja en la superficie, por lo que la luz recorre dos veces la DCO.

El número de onda k nos permite asociar a un periodo de 2π de la luz, una distancia en función de su longitud de onda, en nuestro caso 632.8 nm .

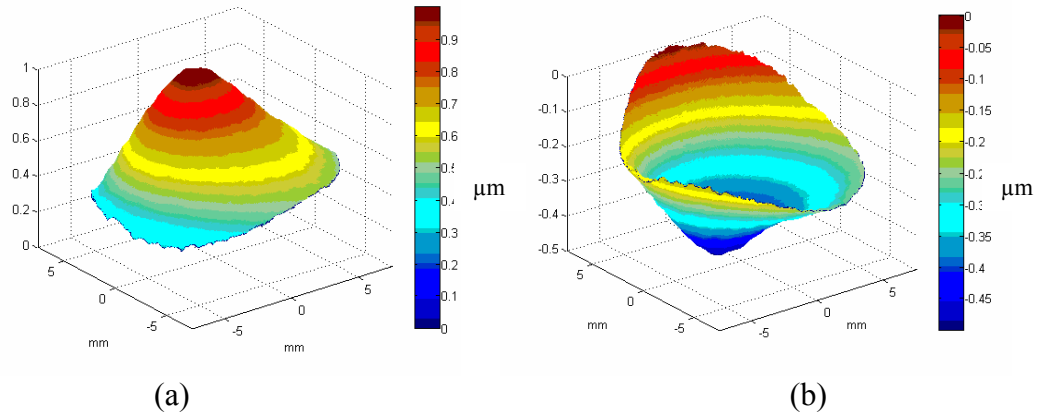


Figura 24. Reconstrucción de la (a) diferencia de fase y (b) superficie, donde la superficie tiene la mitad de la magnitud que la fase pero con signo negativo. La figura se obtuvo de la reconstrucción del interferograma en la Figura 21a.

Capítulo V

Modelos de control de espejos deformables

V Modelos de control de espejos deformables

Existen dos técnicas para modelar los espejos deformables, uno por medio de los modos de vibración de la membrana circular (Paterson *et al*, 2000) y el otro es por medio de los polinomios de Zernike.

Este trabajo se enfocará en el modelaje de espejos deformables por medio de los Polinomios de Zernike, ya que éstos son utilizados para caracterizar elementos ópticos con pupila circular, y es un método utilizado por varios autores, como se menciona en la sección V.2. Sin embargo, se explicará brevemente la utilización de los modos de vibración como técnica para modelar los espejos deformables.

V.1 Modos de vibración y la ecuación de Bessel para una membrana circular

Un espejo deformable con forma circular se puede describir como la solución a la ecuación de onda bidimensional, especialmente el caso de las membranas circulares y veremos que el resultado a esta ecuación es la ecuación de Bessel. Debido a la naturaleza circular del problema, éste se tratará en coordenadas polares, definidas por $x = r \cdot \cos \phi$ y $y = r \cdot \sin \phi$, por lo que la ecuación bidimensional de onda en coordenadas polares se representa (Simons. 1977):

$$\frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = c^2 \left(\frac{\partial^2 z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial z}{\partial r} + \frac{\partial^2 z}{\partial \phi^2} \right), \quad (10)$$

donde $c^2 = \frac{T}{\rho}$, T es la tensión en la membrana y ρ es la masa por área de la membrana y $z(r, \phi, t)$ es la superficie de la membrana.

Aplicando el método de separación de variables (Simons, 1977):

$$z(r, \phi, t) = u(r)v(\phi)w(t), \quad (11)$$

obtenemos:

$$\frac{u''(r)}{u(r)} + \frac{1}{r} \frac{u'(r)}{u(r)} + \frac{1}{r^2} \frac{v''(\phi)}{v(\phi)} = \frac{1}{c^2} \frac{w''(t)}{w(t)}. \quad (12)$$

Del lado derecho la ecuación depende de t y del lado izquierdo de r y ϕ , por lo que ambos lados se pueden igualar a una constante, por conveniencia se propone $-\lambda^2$.

$$\frac{u''(r)}{u(r)} + \frac{1}{r} \frac{u'(r)}{u(r)} + \frac{1}{r^2} \frac{v''(\phi)}{v(\phi)} = \frac{1}{c^2} \frac{w''(t)}{w(t)} = -\lambda^2. \quad (13)$$

Despejando de la ecuación (13) obtenemos:

$$w''(t) + \lambda^2 a^2 w(t) = 0. \quad (14)$$

$$\frac{u''(r)}{u(r)} + \frac{1}{r} \frac{u'(r)}{u(r)} + \frac{1}{r^2} \frac{v''(\phi)}{v(\phi)} = -\lambda^2. \quad (15)$$

Donde la solución de la ecuación (13) es:

$$w(t) = c_1 \cos(\lambda at) + c_2 \text{sen}(\lambda at). \quad (16)$$

Como solución general de la ecuación (16):

$$r^2 \frac{u''(r)}{u(r)} + r \frac{u'(r)}{u(r)} + \lambda^2 r^2 = -\frac{v''(\phi)}{v(\phi)}. \quad (17)$$

Como observamos nuevamente tenemos que igualar a una constante:

$$r^2 \frac{u''(r)}{u(r)} + r \frac{u'(r)}{u(r)} + \lambda^2 r^2 = -\frac{v''(\phi)}{v(\phi)} = n^2. \quad (18)$$

Por lo que obtenemos las siguientes ecuaciones:

$$v''(\phi) + n^2 v(\phi) = 0 \quad (19)$$

$$r^2 u''(r) + r u'(r) + (\lambda^2 r^2 - n^2) u(r) = 0, \quad (20)$$

una solución a la ecuación (19), de acuerdo con Simons (1977) es:

$$v(\phi) = d_1 \cos(\phi n) + d_2 \text{sen}(\phi n), \quad (21)$$

y la ecuación (20) tiene la siguiente solución:

$$u(r) = k_1 J_n(\lambda r) + k_2 Y_m(\lambda r). \quad (22)$$

Donde $Y_m(\lambda r)$ es una función Bessel de segunda clase, y está sujeta en el centro de la membrana y nuestro espejo no, por lo que se hace $k_2=0$.

Reescribiendo las soluciones generales de cada una de las ecuaciones resultantes del método de separación de variables,

$$z(r, \phi, t) = k J_n(\lambda r) (d_1 \cos \phi n + d_2 \text{sen} \phi n) ((c_1 \cos \lambda at + c_2 \text{sen} \lambda at)), \quad (23)$$

donde $n = 0, 1, 2, 3, \dots$

Por conveniencia el espejo tiene un radio $R=1$,

$$z(1, \phi, t) = 0. \quad (24)$$

De aquí se deduce que:

$$J_n(\alpha) = 0, \quad (25)$$

donde α corresponde a las raíces positivas, con lo que se cumple la condición a la frontera de $R=1$. En nuestro caso, considerando que el espejo está estático, se sustituye $\lambda=0$ en la ecuación (23).

En la Figura 25, se muestran gráficamente cuatro posibles soluciones a la ecuación (25), que satisfacen las condiciones de frontera.

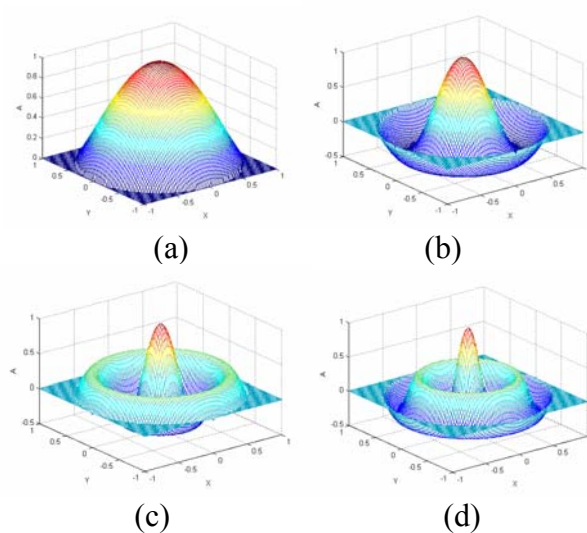


Figura 25. Gráficas de las primeras cuatro raíces de la solución de la ecuación de onda

Aunque algunos autores utilizan los modos de vibración de una membrana, decidimos no utilizar este método y utilizar los polinomios de Zernike.

V.2 Polinomios de Zernike

Los polinomios de Zernike son un conjunto de polinomios ortogonales, que han sido ampliamente utilizados para la expansión de frentes de onda y la cuantificación de deformaciones ópticas en sistemas ópticos con pupilas circulares.

La expresión general para los polinomios es (Schwiegerling, 2002):

$$\begin{aligned} {}^p Z_n^m(\rho, \phi) &= R_n^m(\rho) \operatorname{sen}(m\phi) \\ {}^l Z_n^m(\rho, \phi) &= R_n^m(\rho) \operatorname{cos}(m\phi) \end{aligned} \quad (26)$$

donde P son pares e I son impares, donde $n \geq m \geq 0$, ϕ es el ángulo azimutal que va de $0 \leq \phi < 2\pi$ y $R_n^m(\rho)$ está definido por:

$$R_n^m(\rho) = \begin{cases} \sum_{l=0}^{(n-m)/2} \frac{(-1)^l (n-l)! \rho^{n-2l}}{l! [\frac{1}{2}(n+m)-l]! [\frac{1}{2}(n-m)-l]!} & \text{para } n-m \text{ par} \\ 0 & \text{para } n-m \text{ impar} \end{cases}, \quad (27)$$

donde ρ es la distancia radial $0 \leq \rho \leq 1$. En este intervalo de ρ , se cumple la ortogonalidad de los polinomios.

Los primeros polinomios de Zernike, están asociados a deformaciones presentes en sistemas ópticos y a estos se les ha asignado un nombre que está relacionado con la forma que adquiere la respuesta de la deformación a la función de punto extendido. Por ejemplo, los polinomios $Z(2)$ y $Z(3)$ se denominan “tip” y “tilt” y están asociados a un elemento óptico que está inclinado como se muestra en la Figura 26b y Figura 26c, el polinomio $Z(4)$ se denomina desenfoque, y produce un punto extendido y difuso, de la misma forma que un sistema óptico que está desenfocado.

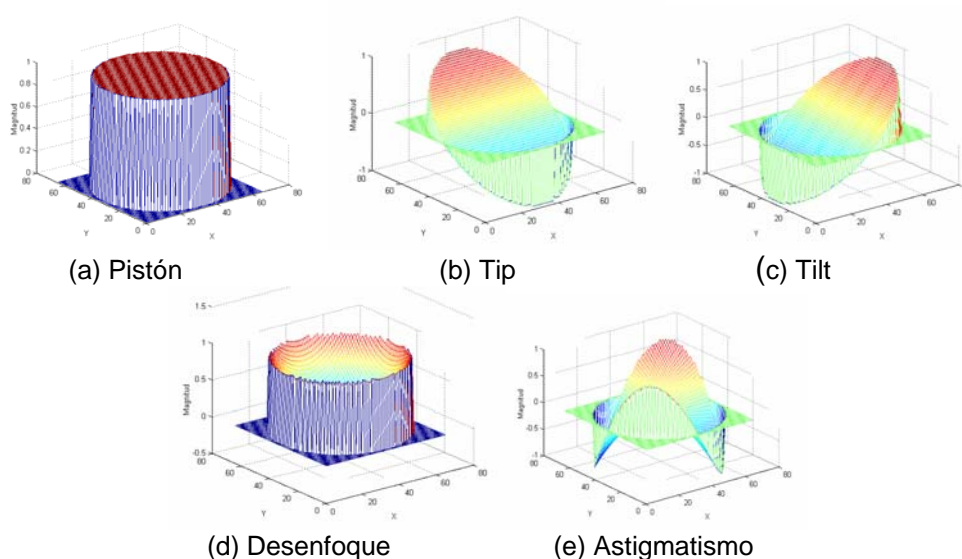


Figura 26. Gráfica de los primeros polinomios de Zernike y el nombre asignado a la deformación asociada a ellos.

Como se mencionó, los polinomios de Zernike son ampliamente utilizados (Love, 1997; Wang y Silva, 1980; Zhu *et al*, 1999; Dai, 2006 y Alda y Bareman, 1993), en la interpretación y corrección de frentes de onda, ya sea para espejos deformables o LCD.

Capítulo VI

Obtención de la Matriz de Control

VI Obtención de la Matriz de Control

En esta sección se presentará el proceso para obtener los voltajes que se necesita aplicar en cada electrodo del espejo deformable para generar un frente de onda con una fase arbitraria predeterminada.

Considérese un frente de onda plano, donde la diferencia de fase en todos los puntos del mismo frente es cero. Ahora, considérese que se genera un nuevo frente de onda debido a que, por alguna causa, se introdujo una diferencia de fase. La diferencia de fase introducida puede ser representada como una combinación lineal de los primeros N polinomios de Zernike y esto se puede representar de la forma:

$$\phi(x, y) = \sum_{i=0}^N a_i Z_i(x, y), \quad (28)$$

donde ϕ es la diferencia de fase del frente de onda modificado y el frente de onda plano, Z es la función que representa los polinomios de Zernike de índice i y α es un vector de coeficientes que contiene la información de la amplitud de los polinomios de Zernike. Entonces cualquier variación de fase que se desea introducir a un frente de onda plano puede ser representada por la ecuación (28).

Suponiendo que la deformación total del espejo es una superposición lineal de la deformación causada por cada uno de los electrodos del espejo cuando éstos son activados individualmente, es posible encontrar una expresión que permita controlar de manera

adecuada el espejo deformable (ED). A la deformación que causa la activación de un solo electrodo en toda la membrana se le conoce como función de influencia (FI).

Se necesita obtener N funciones de influencia, donde N es el número de electrodos, en este caso 37. Esto se logra enviando una señal de control a cada uno de los N electrodos, Figura 27, en nuestro caso se usó 150V, como señal de control. Con lo anterior se obtienen N superficies, que permiten obtener información de cómo la activación de un solo electrodo afecta a toda la membrana.

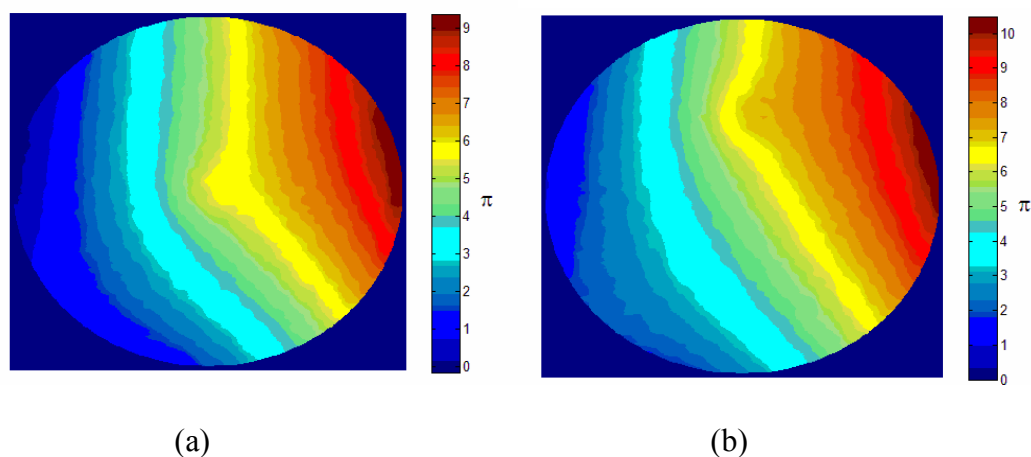
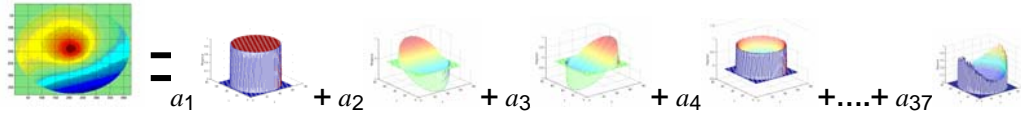


Figura 27. Ejemplo de dos diferentes electrodos activados individualmente, aplicando 150V, (a) Electrodo 1, (b) Electrodo 11

El siguiente paso en la caracterización por medio de los polinomios de Zernike consiste en representar los perfiles de fase de cada FI como una combinación lineal de los primeros N polinomios de Zernike, como se mencionó anteriormente y se resumen según la ecuación

(28). En la Figura 28, se representa de manera gráfica el proceso para obtener los coeficientes de los polinomios de Zernike de un perfil de fase determinado.



$$\phi = a_1 Z_1 + a_2 Z_2 + a_3 Z_3 + a_4 Z_4 + \dots + a_{37} Z_{37}$$

(a)

$$\phi = \left\{ Z_1 \quad Z_2 \quad Z_3 \quad \dots \quad Z_{37} \right\} \begin{Bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ \vdots \\ a_{37} \end{Bmatrix}$$

$$\phi = \vec{Z} \cdot \vec{a}$$

(b)

Figura 28. Representación (a) gráfica y (b) matricial de la ecuación (28), donde ϕ es la fase reconstruida del interferograma, cuando activamos el electrodo E1, a_i es el coeficiente del respectivo índice de Zernike y Z_i es el i polinomio de Zernike.

De esa manera se obtienen N funciones de influencia que contienen los coeficientes de los primeros N polinomios de Zernike, para cada uno de los electrodos. Todas las columnas que contienen los coeficientes de los polinomios de cada electrodo, se agrupan para formar una matriz conocida como Matriz de Funciones de Influencia (MFI), en nuestro caso de (N Electrodo x N Polinomios), Figura 29.

La MFI es la matriz que representa virtualmente al espejo, por medio de ésta conocemos la superficie que adoptará el espejo si introducimos un arreglo de voltajes en los electrodos del ED.

Como se había mencionado, si se considera la deformación total del espejo y por lo tanto la fase que introduce, como una superposición lineal de la deformación generada por cada electrodo se puede escribir:

$$\vec{a}_\phi = MFI * \vec{V} \quad (29)$$

donde \vec{a}_ϕ es el vector de coeficientes de los polinomios de Zernike, de la fase que resulta de aplicar el vector de voltajes \vec{V} al espejo.

Si lo que se desea es que el espejo adopte una superficie arbitraria, es necesario despejar de la ecuación (29) el vector de voltajes \vec{V} (N), de forma que la ecuación queda en términos del perfil de fase que necesitamos reproducir y la información que contiene la MFI.

Como se aprecia en la ecuación (29), es necesario despejar la matriz MFI, para poder obtener los valores de voltajes que se requieren para lograr la superficie deseada.

Para eso se utilizará el método de descomposición de Valores Singulares (SVD, por sus siglas en inglés), según la cual cualquier matriz A puede ser descompuesta en el producto de otras tres matrices (Golub *et al.* 1991):

$$A = U * W * V^T, \quad (30)$$

donde U y V son matrices ortogonales y W contiene los valores singulares de la matriz A.

Para obtener la inversa de la matriz aplicamos la siguiente fórmula (Gene H. Golub *et al*, 1991):

$$A^{-1} = V * [diag[\frac{1}{W_H}]] * U^T. \quad (31)$$

Como se aprecia en la expresión, el proceso de inversión siempre puede realizarse salvo que algunos de los valores singulares sea cero, en tal caso, se fuerza a cero el inverso.

Aplicando el método de descomposición en valores singulares a la matriz MFI, se reescribe la expresión como:

$$\vec{V} = CM * \vec{a}_\phi, \quad (32)$$

donde $CM = \frac{1}{IFM}$.

Por medio de la ecuación (32), obtenemos el vector de voltajes necesario para generar el vector de coeficientes de Zernike, que representa el perfil de fase que se requiere.

Capítulo VII

Resultados y discusión

VII Resultados y discusión

En esta sección se presentarán algunos de los resultados principales encontrados en el proceso de caracterización del espejo deformable.

El primer resultado que se presenta, es una reconstrucción de la fase que el espejo introduce cuando se encuentra relajado, es decir cuando no se ha aplicado ningún voltaje,

Figura 30. Se puede apreciar que hay un astigmatismo, como deformación natural del espejo.

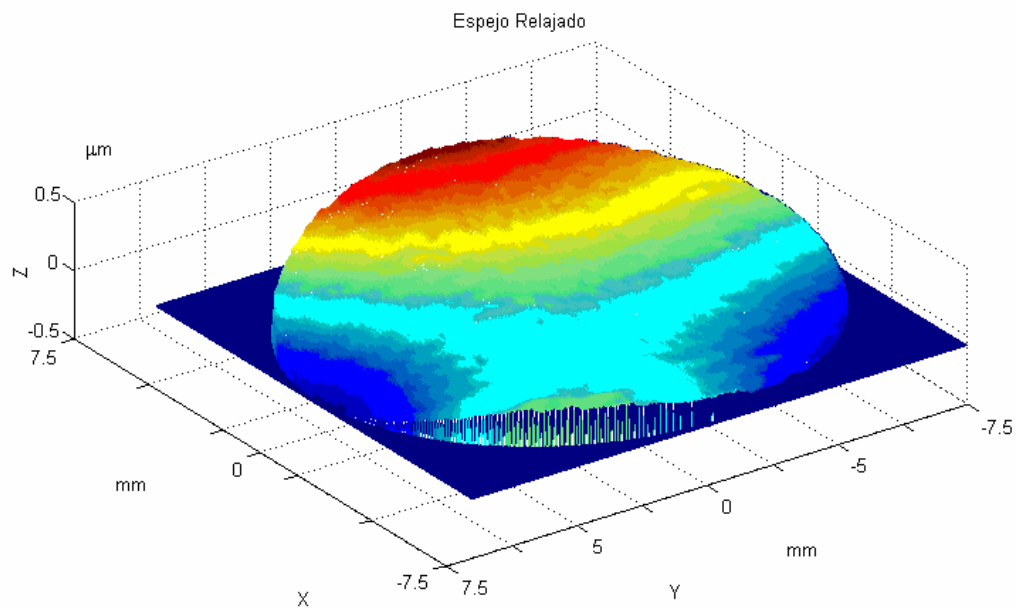


Figura 30. Reconstrucción de fase que la superficie del espejo introduce en el haz incidente cuando ninguno de sus electrodos ha sido activado.

VII.1 Proceso experimental para obtener la matriz de influencia

Como se había mencionado en el capítulo anterior, es necesario conocer las FI de cada electrodo, para la matriz de funciones de influencia que permitirá obtener la matriz de control. Como se mencionó anteriormente, las FI se obtienen aplicando una señal de control a cada uno de los electrodos del espejo y obteniendo los coeficientes de Zernike que reproducen la fase introducida. A continuación se muestra la secuencia de pasos para obtener las FI en función de los coeficientes de Zernike.

Como primer ejemplo, en la Figura 31 se muestra el proceso para obtener la FI para el electrodo 1. En la Figura 31a se muestra el interferograma cuando se activa el electrodo 1 con un voltaje de 150V. En la Figura 31b se muestra la fase que es introducida cuando el interferograma es analizado por el método descrito en el capítulo IV. En la Figura 31c se muestra la magnitud de los coeficientes de Zernike necesarios para representar la función de fase introducida cuando el electrodo 1 ha sido activado y que son los componentes del vector de influencia para el electrodo 1.

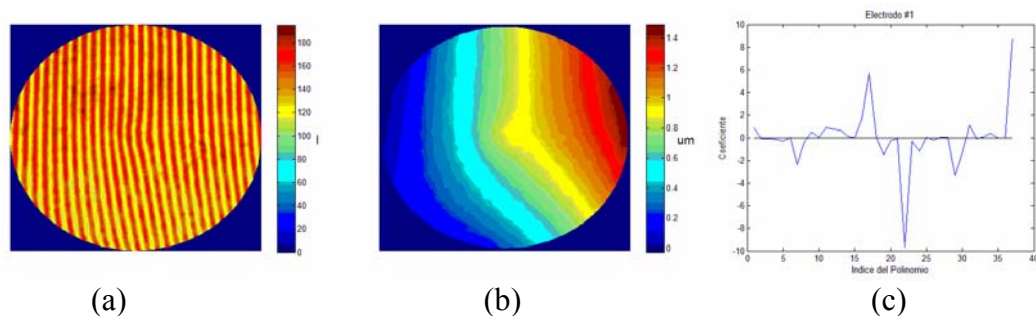


Figura 31. Secuencia para obtener la FI para el electrodo 1, (a) Interferograma cuando el electrodo 1 ha sido activado, (b) Fase introducida por el electrodo 1 cuando ha sido activado, (c) Coeficientes de Zernike que son necesarios para representar la fase obtenida.

De manera semejante se continúa con todos los electrodos del espejo para completar la matriz de funciones de influencia (Figura 32, electrodo 13 y Figura 33 electrodo 17). Con base en esta matriz que determina la matriz de control (como se mencionó en el capítulo VI), que permitirá obtener el vector de voltajes necesario para que el espejo genere la fase deseada.

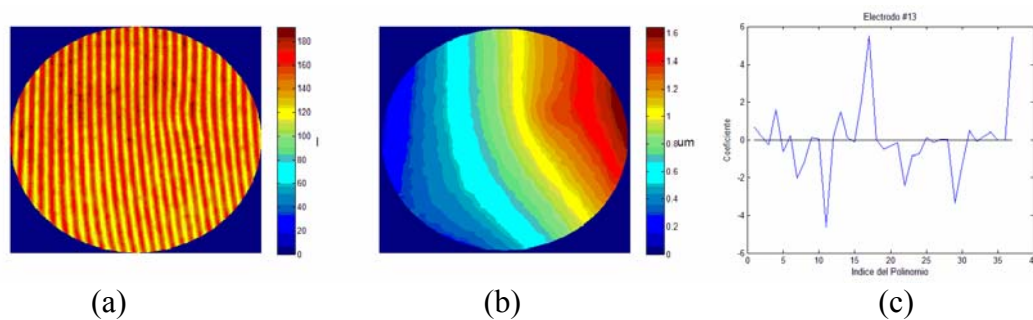


Figura 32. Secuencia para obtener la FI para el electrodo 13, (a) Interferograma cuando el electrodo 13 ha sido activado, (b) Fase introducida por el electrodo 13 cuando ha sido activado, (c) Coeficientes de Zernike que son necesarios para representar la fase obtenida.

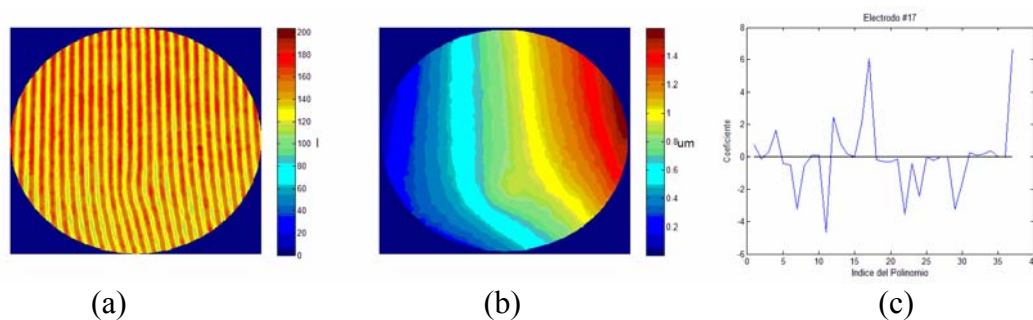


Figura 33. Secuencia para obtener la FI para el electrodo 17, (a) interferograma cuando el electrodo 17 ha sido activado, (b) Fase introducida por el electrodo 17 cuando ha sido activado, (c) Coeficientes de Zernike que son necesarios para representar la fase obtenida.

Uno de los resultados más importantes que se presentan es la matriz MFI, la cual es una representación matemática del comportamiento del espejo. Puede predecir, con cierto grado de precisión como responderá el espejo a una señal de control.

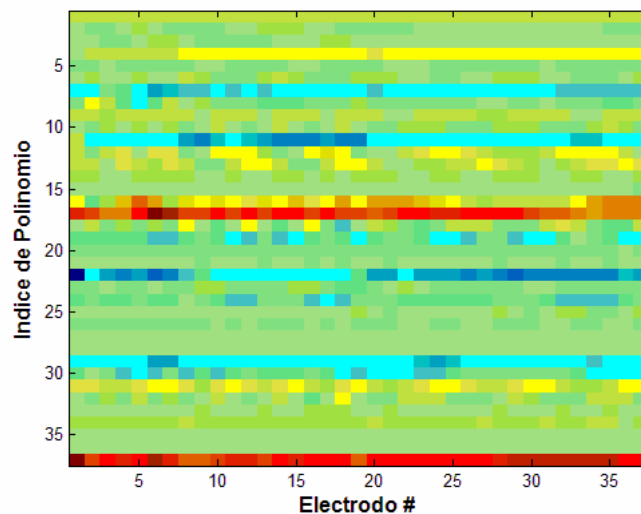


Figura 34. Matriz MFI. Gráfica de falso color donde se identificará qué polinomios son los dominantes en las FI del espejo. Se puede apreciar que hay dos franjas o renglones con falso color “rojo”, lo que significa que son polinomios que tienen coeficientes altos con respecto a otros polinomios.

En la Figura 34, se representa a la MFI mediante una imagen en falso color donde el eje horizontal es el número del electrodo, el eje vertical el índice del polinomio de Zernike y el color representa la magnitud del coeficiente de Zernike.

En esta figura se puede observar el peso que tiene cada uno de los polinomios de Zernike en cada uno de los electrodos. Colores entre amarillo y verde denotan polinomios de Zernike que en magnitud no influirán o tendrán poca presencia cuando determinado

electrodo sea activado. Mientras que regiones en colores rojo y azul, denotan coeficientes de polinomios de Zernike con un gran peso cuando se desea generar un perfil de fase determinado.

Otra forma de representar los resultados es por medio de una gráfica de relieves (Figura 35), donde se aprecia que ciertos polinomios están presentes con una magnitud muy semejante en todas las FI.

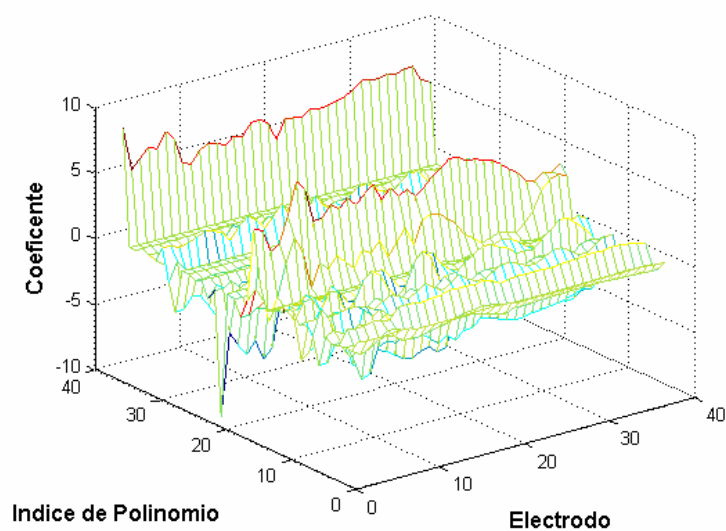


Figura 35. Representación gráfica de la matriz MFI. Por medio de esta representación grafica se puede apreciar cuales son los polinomios que tienen más peso.

Hasta ahora sólo se ha mostrado como se comporta cada una de las FI de manera individual, a continuación se muestra como responde el conjunto de 37 FI que conforman el

espejo. Se estudia con qué facilidad el espejo logra adoptar la forma de un polinomio arbitrario.

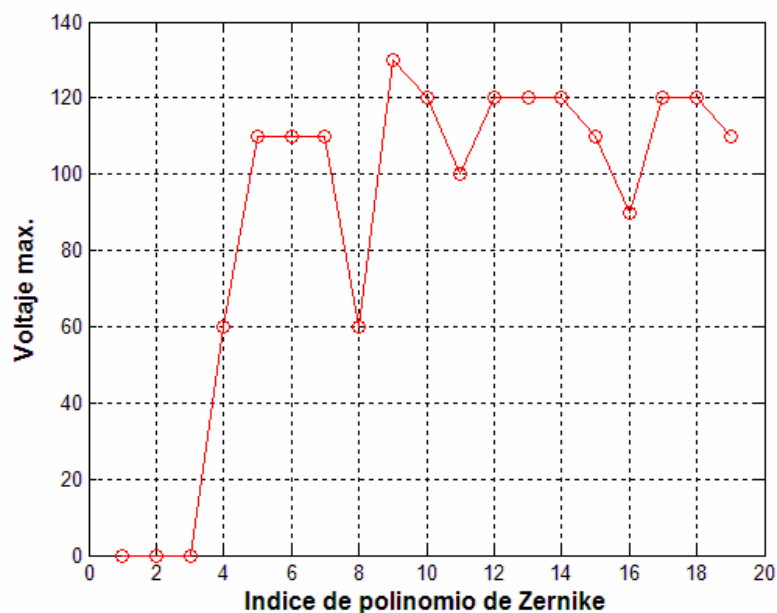


Figura 36. Esta gráfica muestra la amplificación que tuvo que aplicarse a las respectivas matrices de voltajes para cada polinomio.

La Figura 36, se muestra la amplificación que se aplicó a cada uno de los vectores de control para lograr que el espejo adoptara la forma correcta. Si el valor del voltaje necesario para producir los polinomios es alto, esto implica un mayor esfuerzo sobre la membrana para reproducirlo. Como se aprecia los polinomios de Zernike 4 y 8, desenfoque y coma respectivamente, son los polinomios que el espejo adopta con mayor facilidad, mientras que el polinomio de Zernike número 9, conocido como tricoide, es uno de los que requiere más esfuerzo para reproducir.

VII.2 Respuesta de un sistema óptico a un haz deformado por el espejo deformable.

En esta sección se presentan los resultados de controlar la deformación del espejo deformable e introducir una fase arbitraria pero predeterminada. La manera de evaluarlo será conociendo la respuesta de un sistema óptico, Figura 37, cuando éste se ilumina con un frente de onda que ha sido modificado (deformado) de manera controlada por el espejo deformable.

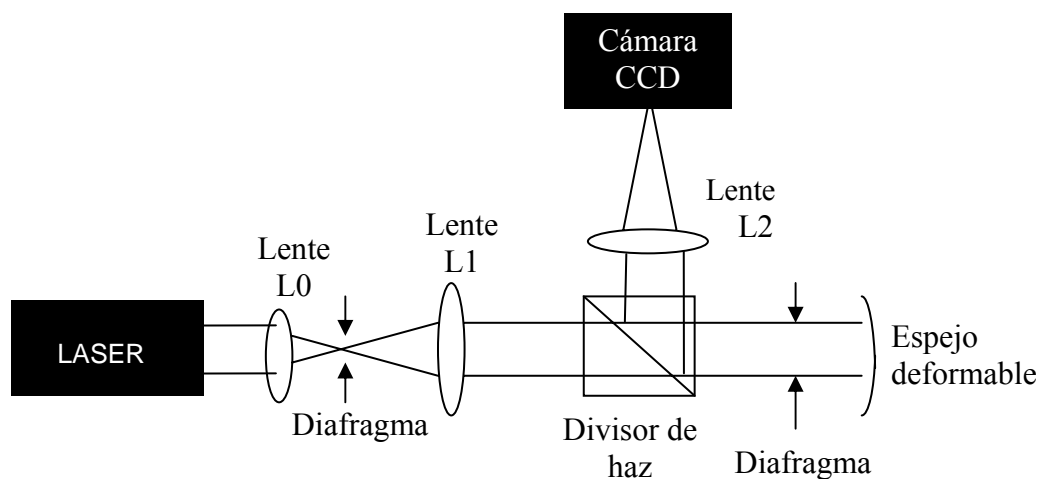


Figura 37. Arreglo experimental para obtener la respuesta del espejo deformable a la función de punto extendido.

En la Figura 37, se muestra el arreglo experimental utilizado para estos experimentos. El haz de un láser He-Ne es expandido y colimado (haz con frente de onda plano), éste se hace incidir en el espejo deformable el cual modificará la fase del frente de onda de manera controlada por la electrónica del sistema. Después de que el haz ha sido modificado por el

espejo, éste se hace incidir sobre una lente y en el plano focal se coloca una cámara CCD para observar las variaciones que sufre la función de punto extendido.

En la Figura 38 se muestra la imagen en el plano focal cuando el espejo está relajado (no se ha aplicado ningún voltaje a los electrodos). Se puede observar que la imagen corresponde a un lóbulo circular uniforme de luz que puede ser considerado la respuesta del sistema sin deformación y es la función de punto extendido.

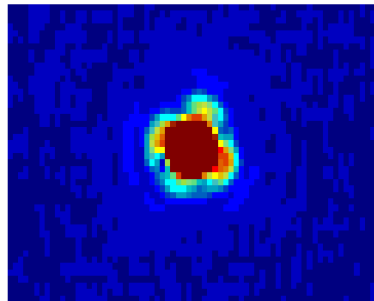


Figura 38. Respuesta del arreglo óptico de la Figura 37 a la función de punto extendido cuando el espejo no ha sido activado.

En las siguientes figuras se muestran algunos de los resultados principales al programar en el espejo deformable la introducción de una fase que genere algunas de las deformaciones ópticas más conocidas.

La función de punto extendido que un sistema óptico libre de deformaciones forma es un disco de Airy. Una manera de calificar la calidad del sistema óptico es comparando la función de punto extendido de un sistema óptico que ha sido iluminado con un frente de onda deformado y otro libre de deformaciones.

En la primera imagen de las Figura 39 a la 42, marcada con el inciso (a), se muestra la diferencia de fase que se ha programado en el espejo deformable (Polinomio de Zernike ideal). En la imagen (b) se muestra la simulación de la función de punto extendido para la deformación del inciso (a), en el inciso (c) se muestra la diferencia de fase que el espejo introdujo experimentalmente al arreglo de la Figura 37 y que se obtuvo utilizando el método descrito en el capítulo IV, en la imagen (d) se muestra la función de punto extendido para la fase que introdujo el espejo. En la imagen (e) se muestran los electrodos que han sido activados en el espejo deformable para poder introducir la diferencia de fase deseada. En la imagen (f) se muestra la imagen obtenida en el plano focal de la lente L2 de la Figura 37.

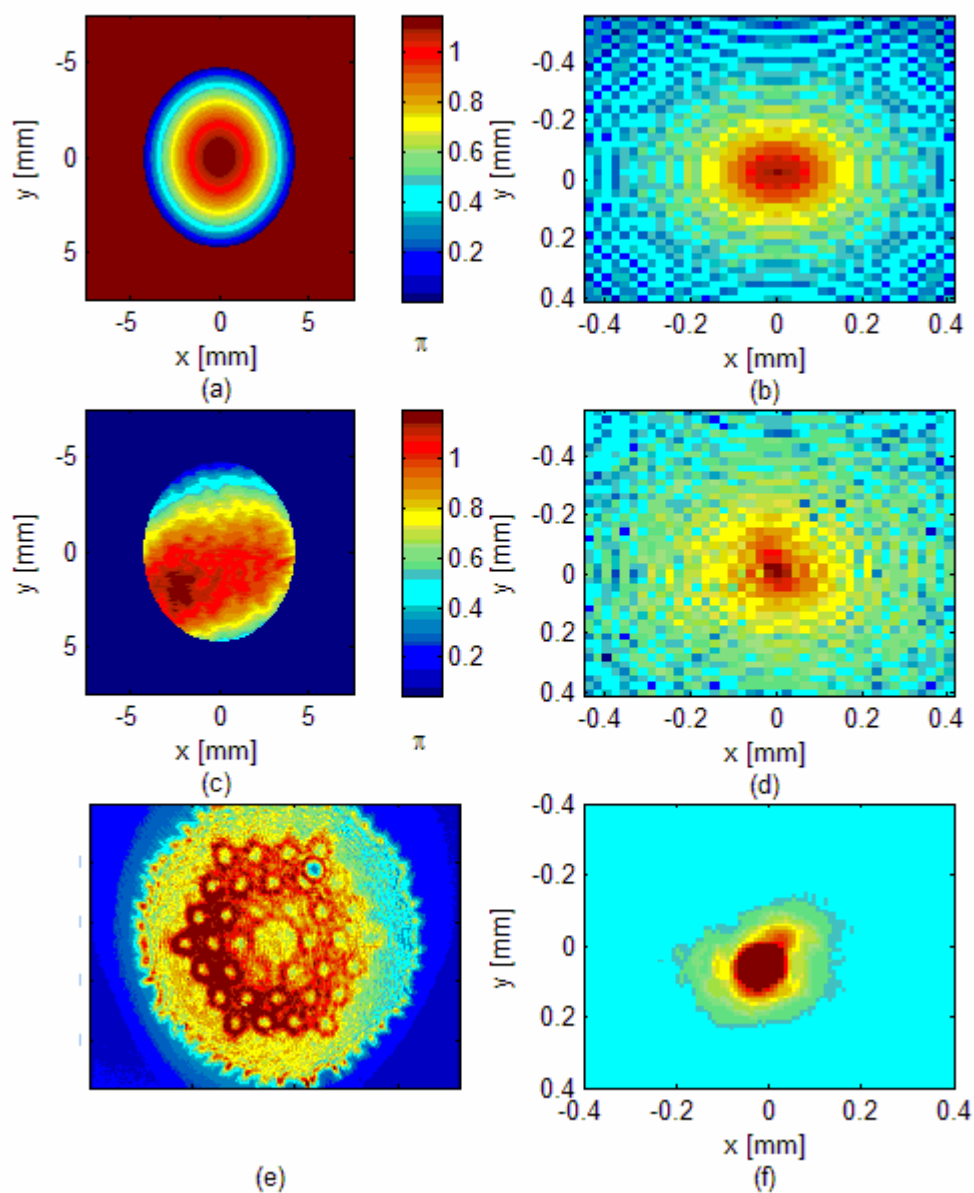


Figura 39. Respuesta del sistema óptico cuando se ha introducido una deformación de desenfoque, (a) Polinomio de Zernike de índice 4, asociado a un desenfoque o defoco. (b) Función de punto extendido utilizando la deformación del inciso (a), (c) Fase reconstruida del espejo deformable al adoptar la forma del Polinomio de Zernike de índice 4, (d) Imagen de la función de punto extendido en el plano focal obtenida numéricamente mediante la fase del inciso (c), (e) Electrodo activados en el ED para generar la fase del inciso (c), (f) Imagen de la cámara en el plano focal del arreglo de la Figura 37.

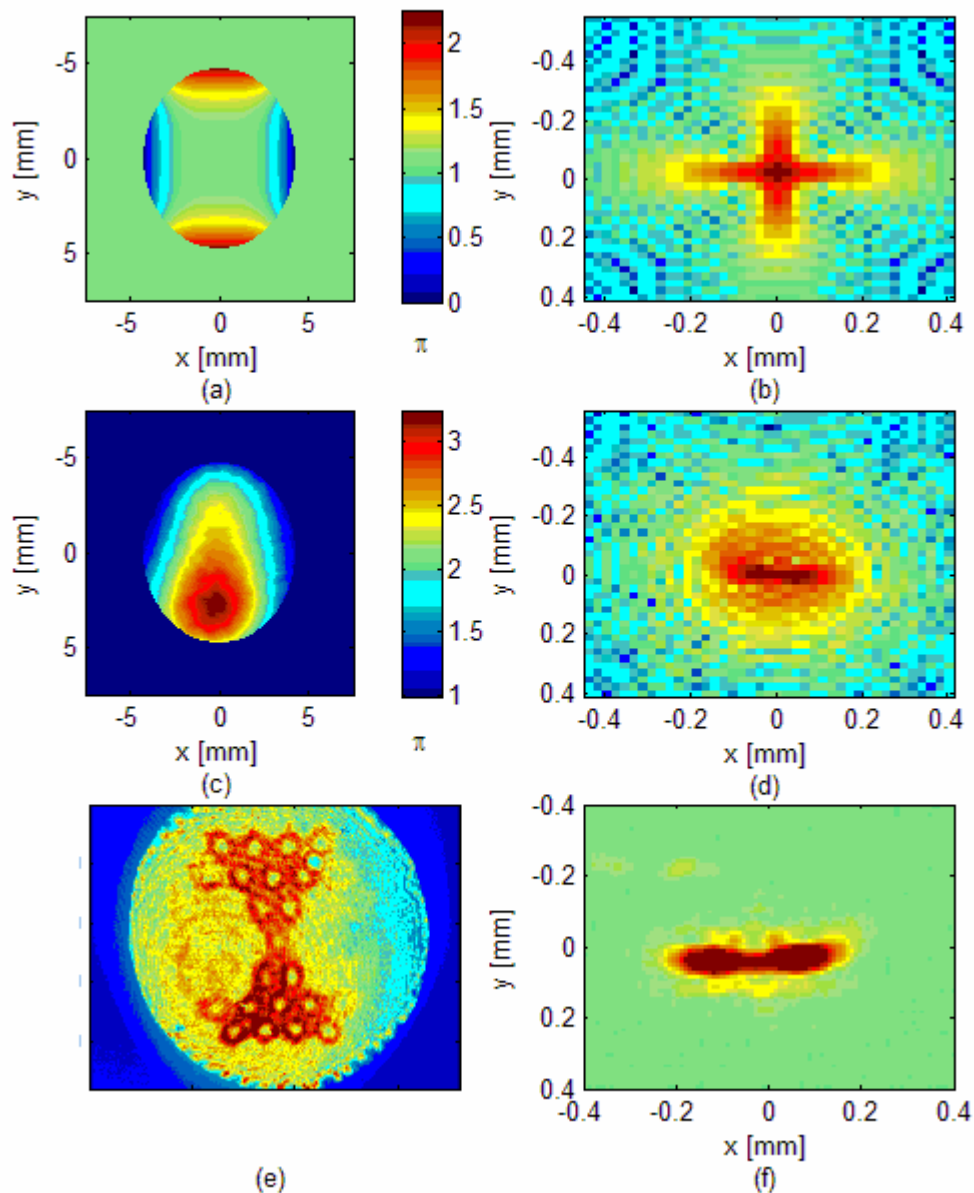


Figura 40. Respuesta del sistema óptico cuando se ha introducido una deformación de astigmatismo, (a) Polinomio de Zernike de índice 12, asociado a un astigmatismo, (b) Función de punto extendido utilizando la deformación del inciso (a), (c) Fase reconstruida del espejo deformable al adoptar la forma del Polinomio de Zernike de índice 12, (d) Imagen de la función de punto extendido en el plano focal obtenida numéricamente mediante la fase del inciso (c), (e) Electrodo activados en el ED para generar la fase del inciso (c), (f) Imagen de la cámara en el plano focal del arreglo de la Figura 37.

Defoco o deformación de desenfoque, es la deformación que se introduce al sistema óptico y los resultados se muestran en la Figura 39. La función de punto extendido numérica Figura 39a y experimental Figura 39f muestran cambios al aplicar desenfoque al sistema. Se aprecia que deja de ser un círculo bien definido (región roja) y empieza a distribuir intensidad fuera del centro (color amarillo). En la Figura 39d se muestra una simulación numérica del sistema óptico cuando se introduce la fase que se obtuvo del interferograma. Se puede apreciar una predisposición a crecer más rápido verticalmente que horizontalmente Figura 39d y Figura 39f, esto se puede deber al astigmatismo natural que tiene el espejo deformable desde su construcción, que afecta de manera más directa a deformaciones con simetría radial como el desenfoque. En el inciso (e), se muestra que el espejo activó todos los electrodos de sus últimos tres anillos externos. Sin embargo, la fase reconstruida inciso (c), no es exactamente la ideal inciso (a). Se considera que es el astigmatismo natural de espejo que introduce este problema.

Astigmatismo: En la Figura 40, se presentan los resultados de introducir astigmatismo al sistema óptico. En la Figura 40d se aprecia que el astigmatismo no logra completar el patrón de la función de punto extendido ideal del inciso (b). Como se muestra en el inciso (a) de la Figura 40, el astigmatismo requiere que la zona roja sea levantada y que la zona azul sea jalada, pero el espejo trabaja electro-estáticamente y sólo funciona con voltajes positivos, por lo que en esta configuración sólo produce atracción electroestática, falta una componente que empuje el espejo lejos de los electrodos, debido a esto el espejo no logra

completar el patrón de la función de punto extendido ideal con una amplitud muy grande, sólo reproduce astigmatismos muy ligeros.

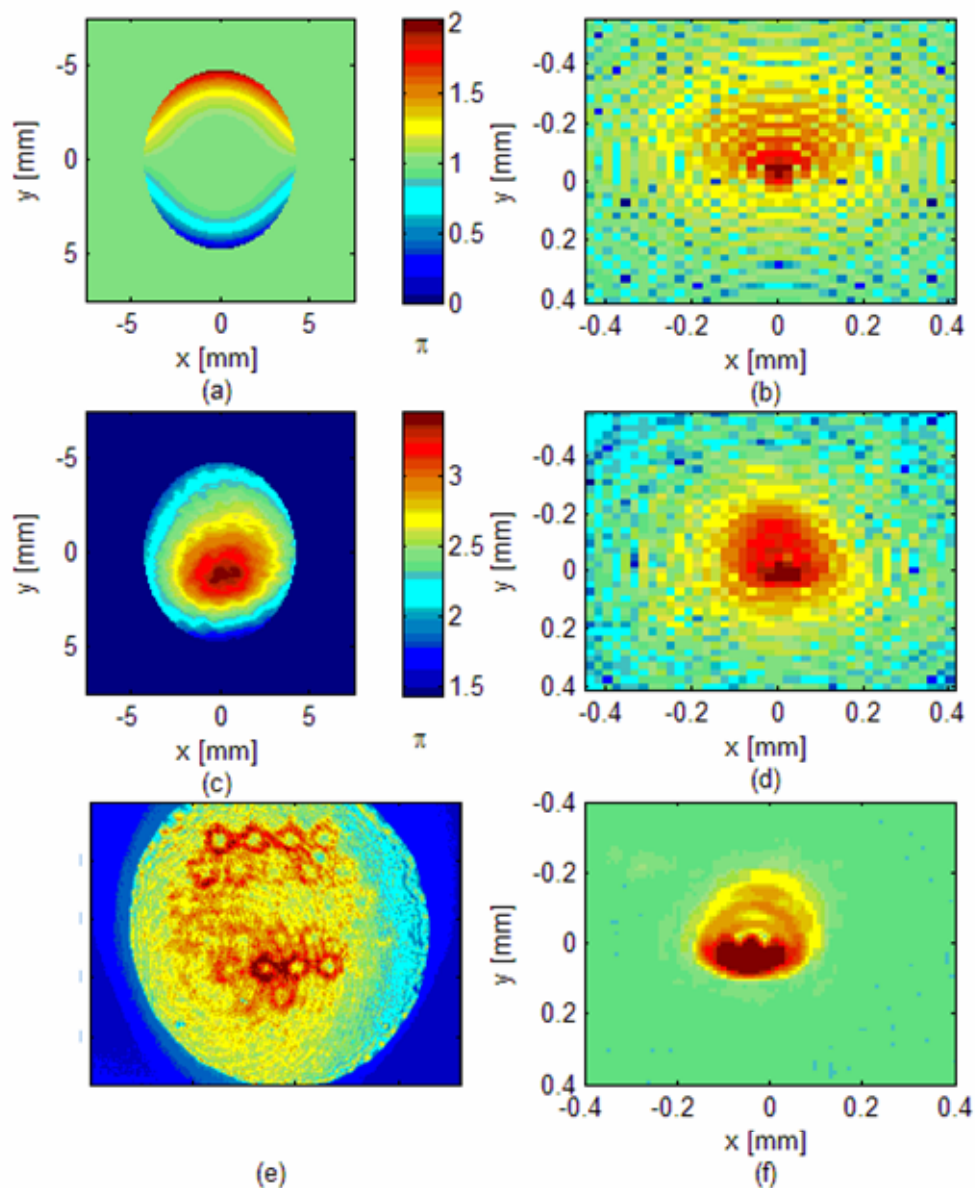


Figura 41. Respuesta del sistema óptico cuando se ha introducido una deformación de coma, (a) Polinomio de Zernike de índice 17, asociado a una coma, (b) Función de punto extendido utilizando la deformación del inciso (a), (c) Fase reconstruida del espejo deformable al adoptar la forma del Polinomio de Zernike de índice 17, (d) Imagen de la función de punto extendido en el plano focal obtenida numéricamente mediante la fase del inciso (c), (e) Electrodo activados en el ED para generar la fase del inciso (c), (f) Imagen de la cámara en el plano focal del arreglo de la Figura 37.

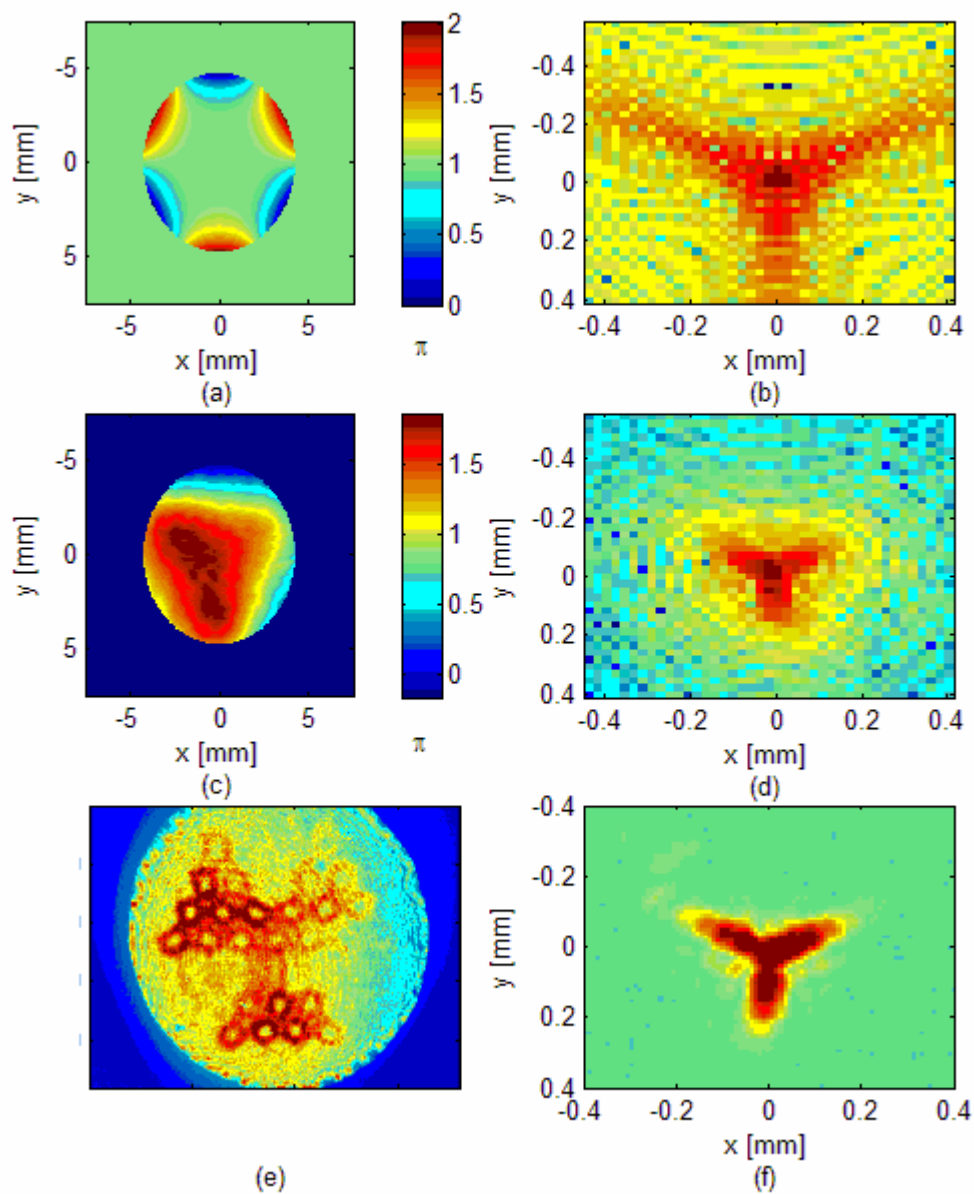


Figura 42. Respuesta del sistema óptico cuando se ha introducido una deformación de tricoides, (a) Polinomio de Zernike de índice 19, asociado a un tricoides, (b) Función de punto extendido utilizando la deformación del inciso (a), (c) Fase reconstruida del espejo deformable al adoptar la forma del Polinomio de Zernike de índice 19, (d) Imagen de la función de punto extendido en el plano focal obtenida numéricamente mediante la fase del inciso (c), (e) Electrodo activados en el ED para generar la fase del inciso (c), (f) Imagen de la cámara en el plano focal del arreglo de la Figura 37.

Coma: En este caso la deformación introducida al sistema óptico es coma. Los resultados se presentan en la Figura 41. Comparando la Figura 38 con la Figura 41d, en ésta se aprecia lo que son los anillos de Airy, donde el centro ha sido trasladado hacia abajo, en otras palabras el centro fue dislocado sufriendo una deformación. En la simulación numérica se aprecia que el punto más intenso se desplaza y deforma, dejando de ser un punto, se puede resumir que la deformación de coma, produce un desenfoque en una dirección definida.

Tricoide: en la Figura 42, se muestra la deformación introducida conocida como tricoide, la cual desvía intensidad del centro hacia fuera en forma de tres extremidades distribuidas equitativamente alrededor de un centro común. La simulación concuerda con lo que se obtuvo en los resultados experimentales aunque la función de punto extendido de la fase ideal abarca más área, el espejo logra reproducir las tres extremidades.

En el Apéndice D, se muestra de manera extensa los 17 polinomios que el espejo puede representar.

En general se considera que el espejo deformable ha sido capaz de reproducir frentes de onda deformados que corresponden a polinomios de Zernike de índice 4 al 19. Sin embargo la magnitud de las deformaciones debe ser pequeña para su mejor reproducción. El astigmatismo propio del sistema debe corregirse o compararse para evitar problemas de introducir una doble deformación.

Si se puede introducir fases o deformaciones arbitrarias en un sistema óptico, no sólo se puede deteriorar la imagen sino también se puede utilizar para corregir deformaciones presentes en el sistema óptico sin espejo deformable y mejorar la calidad de las imágenes.

Capítulo VII

Conclusiones

VIII Conclusiones

Se realizó una investigación sobre los diferentes tipos de espejos deformables y sus aplicaciones. El propósito fue conocer los parámetros más importantes para el control de un espejo deformable y estudiar las técnicas de operación y caracterización que permiten obtener el mayor rango dinámico de operación con la finalidad de modificar el frente de onda de un haz incidente y obtener uno con un perfil de fase arbitrario que el usuario desee.

Se logró operar y caracterizar el espejo deformable de membrana de la marca OKO Technologies. Este espejo tiene un diámetro de 15mm, 37 electrodos y rango dinámico de voltaje para su operación de 250V.

Fue posible reproducir deformaciones primarias asociadas a los polinomios de Zernike del orden 4 al 19, utilizando el 40% de la superficie del espejo deformable, en una configuración sin retroalimentación. En esta configuración no fue posible obtener “tip” y “tilt”, asociados a los polinomios 2 y 3 de Zernike. Esto porque la membrana se encuentra anclada en el borde exterior, por lo que si se requiere reproducir estos polinomios hay que utilizar un área más pequeña que el 40% de la superficie de la membrana, pero se reducirá la capacidad del sistema para reproducir los otros 16 polinomios (4 al 19). Se recomienda implementar a futuro un sistema de control de lazo cerrado, lo que permitirá reproducir de manera correcta estos dos polinomios.

Para el proceso de caracterización y operación del espejo deformable fue necesario desarrollar los programas computacionales que a continuación se describen:

Polinomios de Zernike: (Matlab) Se cuenta con un programa que genera cualquier polinomio de Zernike orden n , aunque solo se requiere que se generen del 1 al N (donde N es el número de electrodos que tiene el espejo deformable) como máximo.

Control del espejo: (LabView) Con este programa se puede identificar la dirección de memoria que corresponde a cada electrodo, de esta manera se genera la tabla de direcciones que contienen el vector de datos que representan los voltajes que se aplicarán en los electrodos del espejo.

Captura de datos: (LabView) Este programa permite obtener los datos para generar la MFI. La operación de este programa es en dos etapas: la primera, controla el espejo activando un electrodo a la vez, lo que produce una FI en el espejo. En la segunda etapa el programa envía una señal para que por medio de la tarjeta de captura de video, se digitalice la imagen del interferograma obtenido al activar un electrodo. La imagen es almacenada en formato BMP para que no sea comprimida y que cada píxel represente fielmente la intensidad asociada al patrón de interferencia. Las imágenes de los interferogramas son almacenadas con nombres secuenciales.

Análisis Interferométrico: (Matlab) Una analogía en términos de electrónica para describir este programa, es el equivalente a demodular una señal de radio que ha sido modulada en

fase (PM por sus siglas en inglés). El programa encuentra la fase que modula el patrón de franjas por lo tanto la inclinación “tip” que se introduce al alinear (o desalinear) el arreglo interferométrico. Esta es la referencia o frecuencia portadora y la deformación del espejo introduce las diferencias de fase que modulan el patrón de franjas (frecuencia portadora).

Descomposición de fase en coeficientes de Zernike: (Matlab) Por medio del método SVD, obtenemos un vector de coeficientes que representa la fase o superficie del espejo que deseamos.

Matriz de Control: (Matlab) Después del programa de análisis interferométrico y la captura de datos, la cual genera la MFI, se necesita generar la matriz de control del espejo a partir de la pseudo-inversa de la MFI, lo que genera 3 matrices más, que representan la matriz de control. Por medio de estas matrices obtenemos el vector de control o voltaje que permitirá al espejo tomar la forma que deseamos.

Caracterización del sistema: (LabView) Una vez que se puede controlar el espejo para que adopte la forma que se desea, es necesario evaluar la capacidad del espejo para reproducir la superficie deseada. Mediante un arreglo experimental, fue posible observar la función de punto extendido del sistema e introduciendo la señal adecuada a los electrodos, fue posible observar los cambios en la función de punto extendido cuando el frente de onda ha sido deformado por el espejo.

Trabajo Futuro.

Es conveniente aprovechar un área mayor en la superficie del espejo. Se ha encontrado reportado, que con un sistema de control de lazo cerrado, se ha aprovechado aproximadamente el 60% de la superficie de la membrana (Lijun Zhu *et al.*, 1999), lo cual mejora la resolución del espejo para reproducir superficies.

Si se requiere producir un término constante de fase en toda la membrana por medio del primer polinomio de Zernike conocido como Pistón, se recomienda que se genere una subrutina de programación que active al mismo tiempo todos los electrodos exteriores, electrodos E20 al E37. De esta forma ningún electrodo del centro E1 al E19, estaría activado, y no se forma un desenfoque.

Estudiar las características dinámicas del espejo, para aplicaciones como astronomía donde es importante conocer cual es la frecuencia a la que el espejo responderá para cambiar su superficie y adaptarse a los cambios atmosféricos. Al igual que en pinzas ópticas donde se requiere modificar constantemente la superficie del espejo para manipular partículas y muestras, multiplexores de fibras ópticas, etc.

Bibliografía

Albert O., L. Sherman, G. Mourou, T. B. Norris y G. Vdovin, 2000, "Smart microscope: an adaptive optics learning system for aberration correction in multiphoton confocal microscopy", OPTICS LETTERS 25(1):52-54

Booth M., T. Wilson, Hong-Bo S., Taisuke O. y Satoshi K., 2005, "Methods for the characterization of deformable membrane mirrors", Applied Optics, 44(24): 5131-5139

Bustillo James M., R. Howe, T. Fellow y R. S. Muller, Life Fellow, 1998, "Surface Micromachining for Microelectromechanical Systems", Proceedings of the IEEE, 86 (8):1552-1574

Chang Yi-Ren, Long H., y Sien C., 2006, "Optical trapping of a spherically symmetric sphere in the ray-optics regime: a model for optical tweezers upon cells", APPLIED OPTICS, 45(16):3885-3892

Cherezova T. Yu., S. S. Chesnokov, L. N. Kaptsov y A. V. Kudryashov, 1998, "Doughnut-like laser beam output formation by intracavity flexible controlled mirror" OPTICS EXPRESS, 3(5):180-189

Chériaux G., Albert O., V. Wänman, J.P. Chambaret, Félix C. y G. Mourou, 2001, "Temporal control of amplified femtosecond pulses with a deformable mirror in a stretcher", Optics Letters, 26(3):169-171

Cheung, T.H. Barnes, T.G. Harskell, 2003, "Feedback interferometry with membrane mirror for adaptive optics", Optics Communications 218:33-41

Daly E., E. Dalimer y C. Dainty, 2006, "Requirements for MEMS mirror for adaptive optics in the eye", SPIE 6113:611309-1-611309-8

-

Dayton D., J. Gonglewski, S. Restaino, M. Jeffrey, J. Phillips, M. Hartman, S. Browne, P. Kervin, J. Snodgrass, N. Heimann, M. Shilko, R. Pohle, B. Carrion, S. Clint y D. Thiel, 2002, "Demonstration of new technology MEMS and liquid crystal adaptive optics on bright astronomical objects and satellites", Optics Express, 10(25):1508-1519

Fernández E. J. y P. Artal, 2003, "Membrane deformable mirror for adaptive optics: performance limits in visual optics", OPTICS EXPRESS, 11(9):1056-1069

Freeman R.H. y J.E. Pearson, 1982, "Deformable mirrors for all seasons and reasons", Applied Optics 21(4):580-588

Gene H. G., C. F. y V. Loan, 1991, "Matrix Computation", Johns Hopkins, Baltimore USA, Segunda Edición, 642 paginas.

Iris AO, http://www.irisao.com/adaptive_optics.html, Noviembre 2007.

Javier A. y G. D. Bareman, 1993, “Zernike-based matrix model of deformable mirrors: optimization of aperture size”, *Applied Optics*, 32(13):2431-2438

Meter Y., F. Gonté, P. Herzig Hans y R. Dändliker, 2002, “Micro-optical Fiber Switch for a large number of interconnects using a deformable mirror”, *IEEE Photonics technology letter*, 14(3):301-303

Ota T., S. Kawata, T. Sugiura, M. J. Booth, Mark A. Neil, Rimantas Juskaitis, y Tony Wilson, 2003, “Dynamic axial-position control of a laser-trapped particle by wave-front modification”, *OPTICS LETTERS*, 28(6):465-467

Paterson C., I. Munro y J.C. Dainty, 2000, “A low cost adaptive optics system using a membrane mirror.”, *Optics Express*, 6(9):175-185

Porter Jason, H. M. Queener, J. E. Lin, K. Thorn, y A. Awwal, 2006, “Adaptive Optics for Vision Science Principles, Practices, Design, and Applications” Editorial WILEY INTERSCIENCE, USA, 591 paginas

Schwiegerling J., 2002, “Scaling Zernike expansion coefficients to different pupil size”, *J. OSA*, 19(10):1937-1945

Simons F., 1977, “Ecuaciones Diferenciales con aplicaciones y notas históricas”, Mac Graw-Hill, México, 794 pag.

T. Pfeifer, U. Weichmann, S. Zipfel y G. Gerber, 2003, “Compression and shaping of a self-phase-modulated laser pulse with a deformable mirror device”, *Journal of modern optics*, 50(3/4):705–710

Takeda M., H. Ina y S. Kobayashi, 1982, “Fourier-Transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry”, *JOSA*, 72(1):156-161

Véran J. y G. Herriot, 2000, “Centroid gain compensation in Shack–Hartmann adaptive optics systems with natural or laser guide star”, *JOSA A*, 17(8):1430-1439

Wang J. Y. y D. E. Silva, 1980, “Wave-front interpretation with Zernike polynomials”, *Applied Optics*, 19(9): 1510-1519

Wnuk P., C. Radzewicz y J. S. Krasinski, 2005, “Bimorph piezo deformable mirror for femtosecond pulse shaping”, *OPTICS EXPRESS*, 13(11):4154-4159

Zeek E., K. Maginnis, S. Backus, U. Russek, M. Murnane, G. Mourou, H. Kapteyn y G. Vdovin, 1999, “Pulse compression by use of deformable mirrors”, *OPTICS LETTERS*, 24(7):493-495

Zhu L., P. Sun, D. Bartsch, W. R. Freeman y Y. Fainman. 1999, "Wave-front generation of Zernike polynomial modes whit a micromachined membrane deformable mirror", *Applied Optics*, 38(28):6019-6026

Apéndices

Apéndice A

Fabricación de un espejo deformable

El proceso de fabricación inicia con una oblea de Silicio (Si), Figura 43a. Por medio de la técnica de deposición por centrifugado (“spin-coating” en inglés), se deposita una capa de fotorresina, con la forma del espejo en la cara superior, Figura 43b. Posteriormente se coloca la oblea con la máscara de fotorresina en una cámara al vacío y se introduce Nitrógeno (N) en estado gaseoso. Como paso siguiente se calienta la oblea. Con el Si a altas temperaturas, se genera una reacción química que da como resultado una estructura cristalina de Si_3N_4 , Figura 43c. Se forma una película de nitrato de silicio con grosor de 500nm en ambos lados de la oblea, excepto donde se encuentra la foto resina. Se remueve la resina, por lo que el Si queda expuesto en esta “ventana”, Figura 43d.

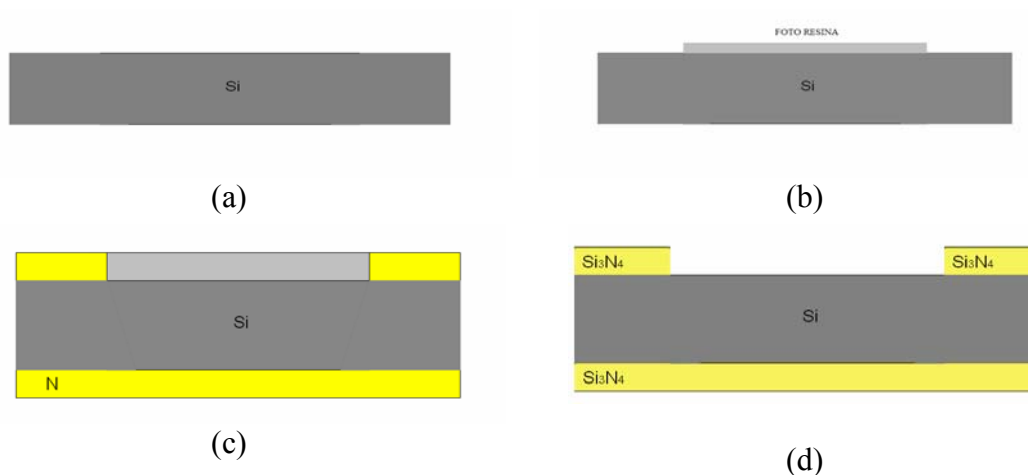


Figura 43. Proceso de fabricación de espejo deformable (a) Oblea de Si, (b) Oblea con máscara de fotorresina, (c) La oblea se expone a N gaseoso a alta temperatura, (d) Estructura de Si_3N_4 , se remueve la máscara de foto-resina.

Por medio de un baño de hidróxido de potasio (KOH), Figura 44a, el Si expuesto es removido hasta llegar a la cara inferior de la oblea, y se detiene al llegar la estructura inferior de Si_3N_4 , la cual no se ve afectada por el KOH, Figura 44b. La técnica aprovecha la propiedad de la estructura cristalina del Si, ya que en algunos cristales uno de los ejes cristalográficos es removido con mayor rapidez que otro. A veces, la diferencia entre un eje y otro puede ser a una razón de 1000:1, esto es que remueve un átomo en una dirección del cristal, cuando ya se removieron 1000 átomos en otra dirección del cristal. Por esto, esta técnica de fabricación depende de que el cristal esté bien cortado o clivado.

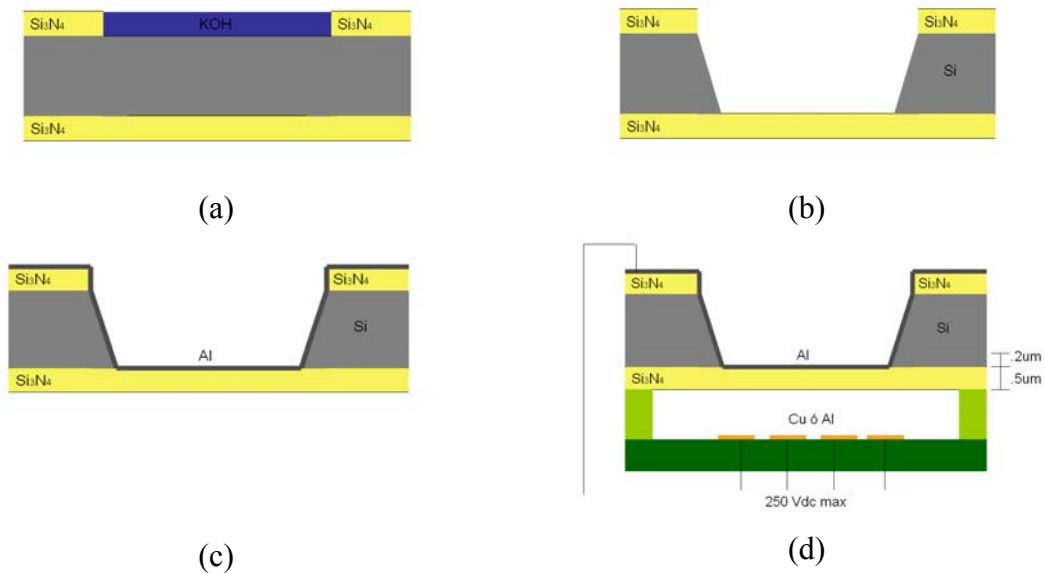


Figura 44. Proceso de fabricación de espejo deformable (a) La oblea es expuesta a una solución de KOH, la cual remueve el Si, (b) Perfil que resulta de la aplicación del KOH, (c) Se evapora una película de Al, (d) Se coloca el espejo terminado en una placa PCB con sus espaciadores y contactos necesarios.

Debido a que el baño de KOH estuvo más tiempo presente en la cara superior de la oblea que en la inferior, se forma un perfil en diagonal entre la cara superior y la inferior Figura 44b. Este es el marco de silicio que sostiene la membrana de Si_3N_4 con un grosor 500nm. A continuación se limpia la superficie y se evapora una capa de aluminio de 200nm de espesor, en la membrana de nitrato de silicio, Figura 44c. Esta será la superficie del espejo y aprovechando las propiedades conductoras del aluminio será el electrodo común. Se cortan los diferentes espejos que pueden salir de una oblea de silicio. Ya cortados y separados los espejos son colocados sobre placas de PCB donde se encuentran los electrodos, el espejo se encuentra suspendido a una distancia de $40 \mu\text{m}$ de la placa PCB por medio de unos separadores Figura 44d.

Apéndice B

Caracterización de la imagen de interferencia

Para caracterizar la imagen que estamos procesando, es necesario conocer la relación que hay entre las dimensiones físicas del espejo y las dimensiones obtenidas en la imagen detectada por la cámara CCD. Es decir, es necesario conocer por ejemplo, el equivalente en píxeles de un milímetro con la superficie del espejo. Se procede a colocar una obstrucción controlada entre el espejo y el interferómetro, en este caso un vernier. El procedimiento es ir abriendo el vernier a intervalos controlados en este caso en intervalos de 0.50 milésimas de pulgada, hasta que deje de obstruir al espejo, como se muestra en la Figura 45.

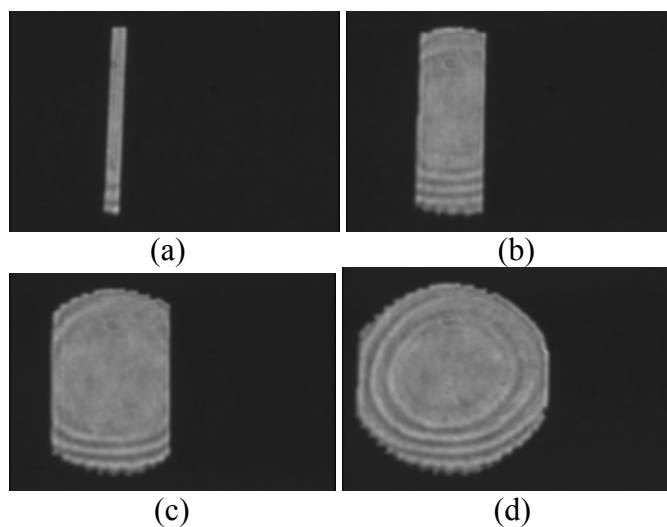


Figura 45. Imagen de la abertura colocada frente al espejo deformable de tamaño (a) 0.05'' (b) 0.200'' (c) 0.300'' (d) 0.550''

Luego se cuenta el número de píxeles iluminados en cada imagen con aberturas diferentes, Figura 46.



Figura 46. Seleccionamos un renglón de la imagen y contamos cuantos píxeles son iluminados para cierta apertura.

Se realizó un programa que analiza, de manera automática, las fotos de las respectivas aberturas, se reúne la información de todas las fotos y se procesan. Como parámetro de control se utilizará el parámetro conocido como ancho en función de la mitad del máximo o “Full width at half maximum” (FWHM por sus siglas en inglés).

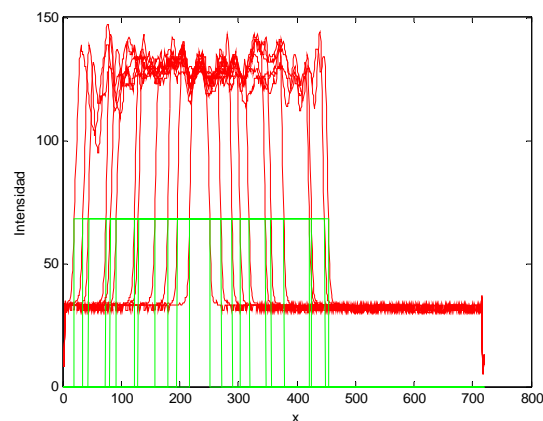


Figura 47. Por medio de FWHM como parámetro obtenemos la cantidad de píxeles iluminados.

La misma técnica se aplica para las dimensiones horizontal y vertical de la imagen.

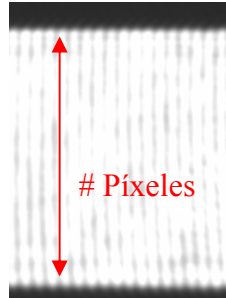


Figura 48. Imagen resultante al colocar una abertura que varía verticalmente, se selecciona una columna de la imagen para obtener el número de píxeles iluminados por la abertura.

La distancia lineal física que un píxel representa está dada por:

$$\Delta x = \left(\frac{A}{P} \right) * \frac{2.54cm}{lin} \quad (33)$$

donde A es la abertura del vernier (en pulgadas), P es el número de píxeles.

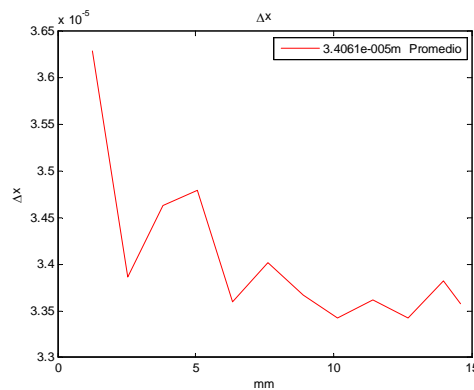


Figura 49. Variación de la distancia que un píxel representa, en función del número de muestras tomadas.

Los resultados obtenidos para cada una de las mediciones se muestran en la Figura 49. Se promedian los valores obtenidos y se concluye que la distancia que un píxel representa en la imagen es:

- 1 píxel en x = 34.061 μm en el plano del espejo.
- 1 píxel en y = 36.999 μm en el plano del espejo

Apéndice C

Montaje y configuración del equipo

En esta sección se indican los componentes que se utilizaron para controlar y caracterizar el espejo deformable, así como su interconexión.

Este sistema está conformado por:

- 2 Tarjetas PCI de 20 Canales Analógicos.
- 2 Tarjetas Amplificadoras de 250Vdc de 20 Canales c/u.
- 1 Fuente de voltaje 250Vdc .25mA
- 1 Fuente de voltaje ± 15 Vdc
- 1 Espejo Deformable Marca “OKO” de 37 Electrodo. Fabricado en una membrana de Si y cubierto de Al.
- Interferómetro ZYGO, modelo Mark II.
- 1 Computadora Control
- 1 Computadora para adquisición de video.

El sistema consta de un par de tarjetas DAC, Figura 50, las cuales convierten los datos de información de la computadora y los representan en voltajes,



Figura 50. Tarjeta PCI DAC de 8 bits de resolución con 24 salidas analógicas, el voltaje puede ser ajustado entre 2.5 y 10Vmax para todos los canales

Las señales provenientes de las tarjetas DAC, no tienen la potencia suficiente y no tienen los rangos de voltaje adecuados para ser utilizadas en el espejo, por lo que la señal es amplificada por una tarjeta de potencia, Figura 51. La señal amplificada es enviada a los electrodos del espejo deformable, Figura 52.



Figura 51. Tarjeta amplificadora, cuenta con 20 canales y un factor de amplificación de 56.

Por medio de las tarjetas anteriores tenemos un sistema de control apto para producir la deflexión electrostática necesaria para que el espejo funcione.

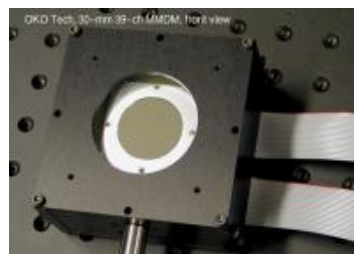


Figura 52. Espejo deformable

El espejo puede funcionar con una o dos series de tarjetas de control, la serie uno controla los primeros 19 electrodos al centro del espejo, y la segunda tarjeta controla los últimos 18 electrodos externos en el espejo. Como se muestra en la Figura 53.

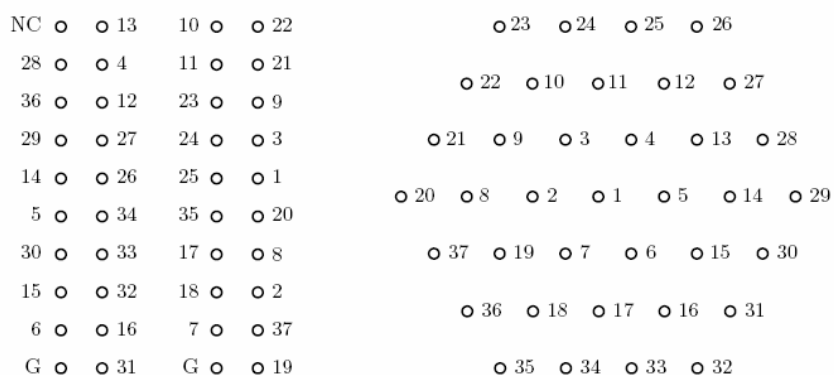


Figura 53. Configuración entre los contactos del conector y su interconexión con los electrodos en el espejo, visto desde atrás del espejo.

Debido a que nuestro modelo de espejo no tiene una cubierta protectora. Figura 54, construimos una cubierta temporal, la cual integra una tapa deslizable para proteger la superficie del espejo mientras no se usa, los tornillos posteriores permiten posicionar la altura e inclinación del espejo para alinearlos en el arreglo interferométrico.

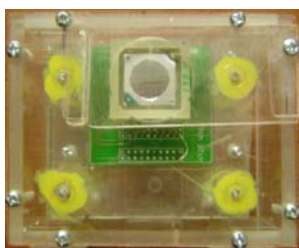


Figura 54. Vista superior del espejo, protegido por una caja de acrílico.

La interconexión de los diferentes componentes se muestra en la Figura 55. Con una computadora personal se conectan las tarjetas PCI DAC y éstas a su vez alimentan a las dos tarjetas amplificadoras. Estas tarjetas amplificadoras requieren dos fuentes de alimentación una de ± 15 volts para su funcionamiento y una segunda fuente de 250 volts para alimentar los electrodos del espejo. La deformación del espejo será medida por medio de un interferómetro, el patrón de interferencia es registrado por una cámara CCD y la imagen de la cámara es digitalizada por medio de una tarjeta de video la cual almacena la digitalización en una computadora personal para ser procesada.

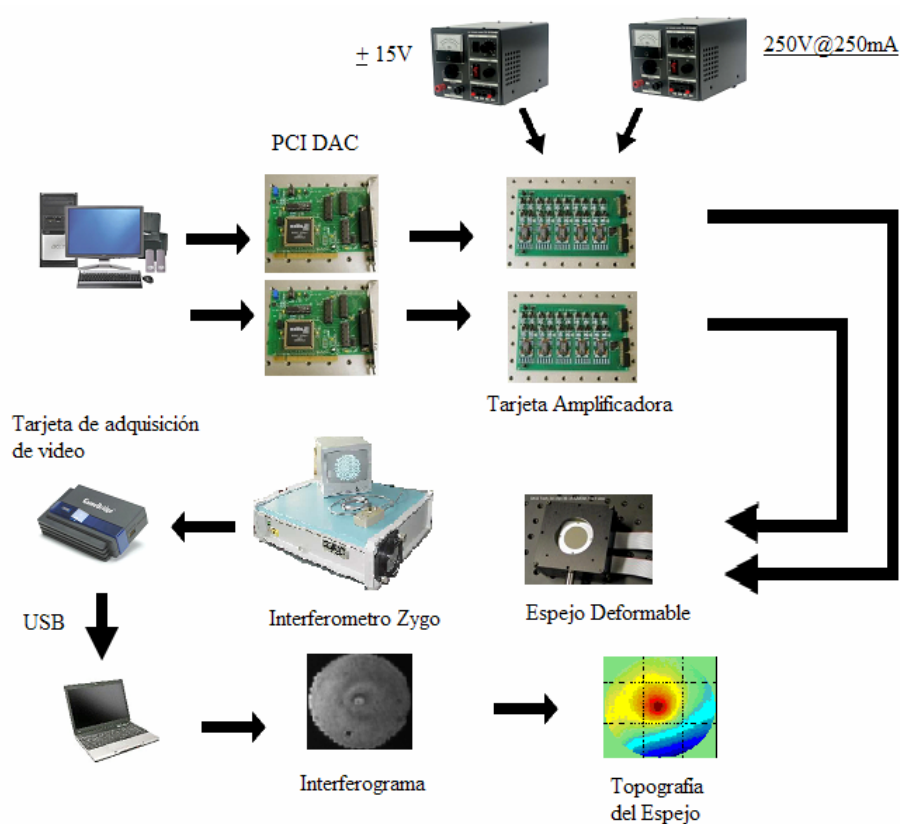


Figura 55. Diagrama esquemático de elementos que componen el sistema control y caracterización para el espejo.

Cada electrodo del espejo deformable tiene asociado una dirección de memoria en las tarjetas PCI DAC, y a cada electrodo se accede a través de un conector, donde cada una de las puntas de contacto está numerada. En la Tabla I, se muestra la relación entre el número de electrodo, el canal al que corresponde el electrodo en la tarjeta, el número de tarjeta y la dirección que tiene asignada la tarjeta PCI DAC.

Tabla I. Configuración de electrodos en función de las tarjetas PCI DAC.

Electrodo	Canal	Tarjeta	Dirección de la tarjeta
1	14	0	7000H
2	3	0	7000H
3	2	0	7000H
4	10	0	7000H
5	22	0	7000H
6	11	0	7000H
7	15	0	7000H
8	6	0	7000H
9	4	0	7000H
10	1	0	7000H
11	16	0	7000H
12	9	0	7000H
13	24	0	7000H
14	21	0	7000H
15	23	0	7000H
16	12	0	7000H
17	13	0	7000H
18	8	0	7000H
19	5	0	7000H
20	4	1	7400H

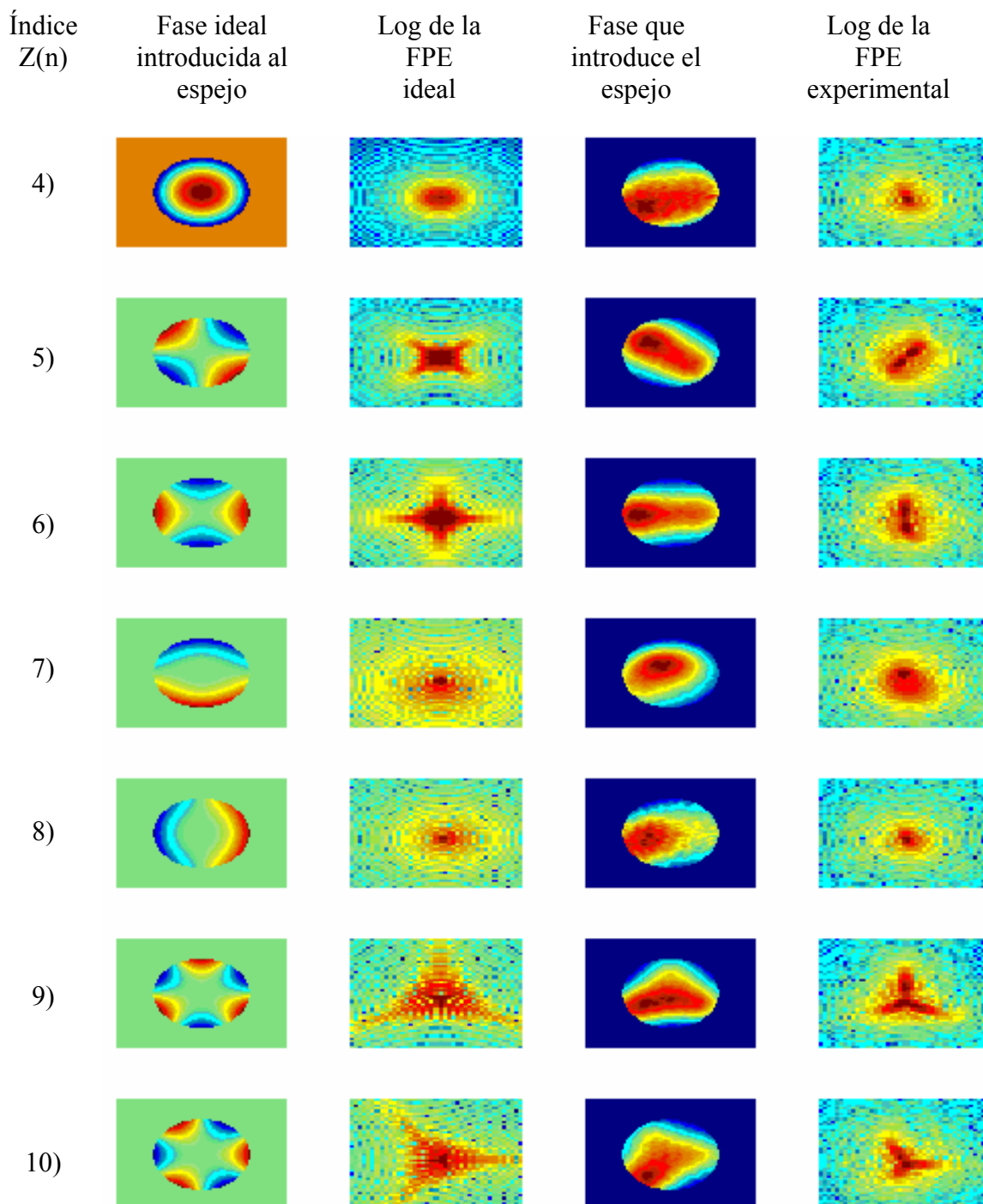
Electrodo	Canal	Tarjeta	Dirección de la tarjeta
21	2	1	7400H
22	1	1	7400H
23	16	1	7400H
24	15	1	7400H
25	14	1	7400H
26	13	1	7400H
27	12	1	7400H
28	11	1	7400H
29	10	1	7400H
30	24	1	7400H
31	23	1	7400H
32	22	1	7400H
33	9	1	7400H
34	5	1	7400H
35	3	1	7400H
36	8	1	7400H
37	6	1	7400H

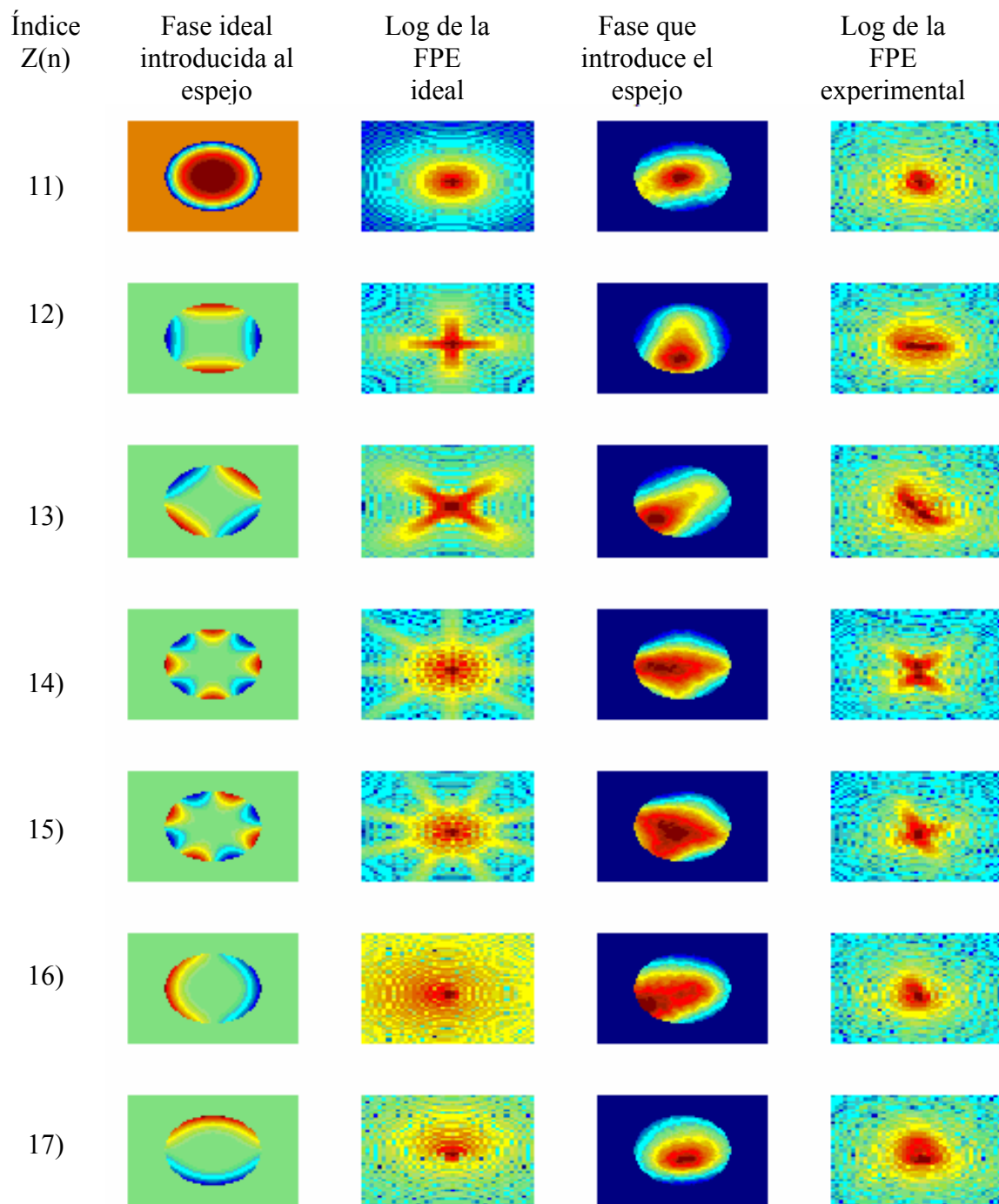
Apéndice D

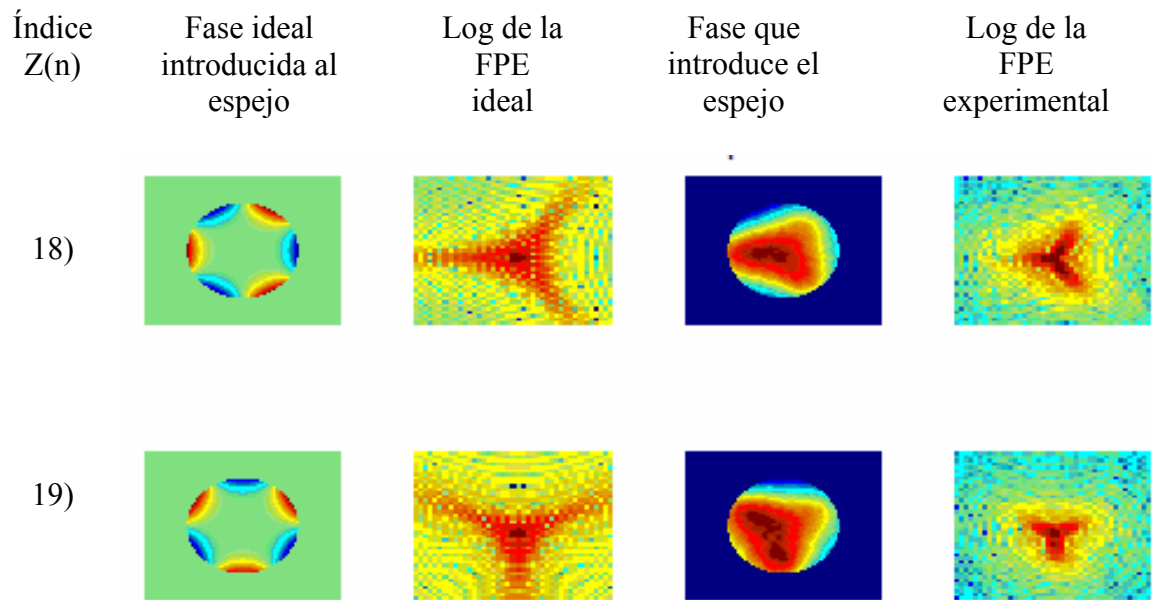
Funciones de punto extendido generadas por el espejo deformable

En la Tabla II se muestran las funciones de punto extendido de las deformaciones introducidas mediante los polinomios de Zernike en el espejo deformable.

En la primer columna se muestra el índice del polinomio. En la segunda columna se muestra la figura en falso color de la fase que introduce el respectivo polinomio, donde el azul representa menor DCO y el rojo mayor DCO. En la tercera columna se muestra la función de punto extendido resultante de introducir la fase representada en la columna dos. En la columna cuatro se muestra el resultado de extraer la fase que el espejo introduce experimentalmente al adoptar la firma del polinomio indicado en la columna uno. En la columna cinco se muestra la función de punto extendido cuando el espejo adopta la forma del polinomio indicado en la columna uno.

Tabla II. Comparación de resultados de introducir los polinomios 2 al 19 en el espejo.





Apéndice E

Control de lazo abierto y cerrado

Existen a grandes rasgos dos modelos de control, el sistema de control de lazo cerrado y el sistema de control de lazo abierto. La calidad de un sistema óptico con control de lazo cerrado puede llegar a tener una calidad de $\lambda/20$ rms mientras que un sistema óptico con control de lazo abierto puede lograr una calidad de $\lambda/4$ rms. La diferencia es que un sistema de control de lazo abierto, funciona a partir de una función o un arreglo de datos, que representan el comportamiento del elemento óptico, en este caso el espejo deformable. En el espejo se introduce una señal eléctrica y se obtiene un desplazamiento o deformación en la superficie del espejo. En teoría, mientras el espejo no se dañe o deteriore, siempre que se aplique el mismo voltaje se obtendrá el mismo desplazamiento. Por lo que se considera repetible la manera en que el espejo se deformará, Figura 56a, En un sistema de control de lazo cerrado, hay un segundo dispositivo que se encarga de verificar que el desplazamiento en el espejo se realizó dentro de parámetros que se especificaron. Si no se logró el desplazamiento deseado, el sistema retroalimenta información al sistema de control, para que ajuste los voltajes hasta que se logre la meta, Figura 56b. Esto aumenta el costo del sistema, pero si la aplicación requiere alta precisión, esta es la única forma de asegurar la deformación deseada en el espejo.

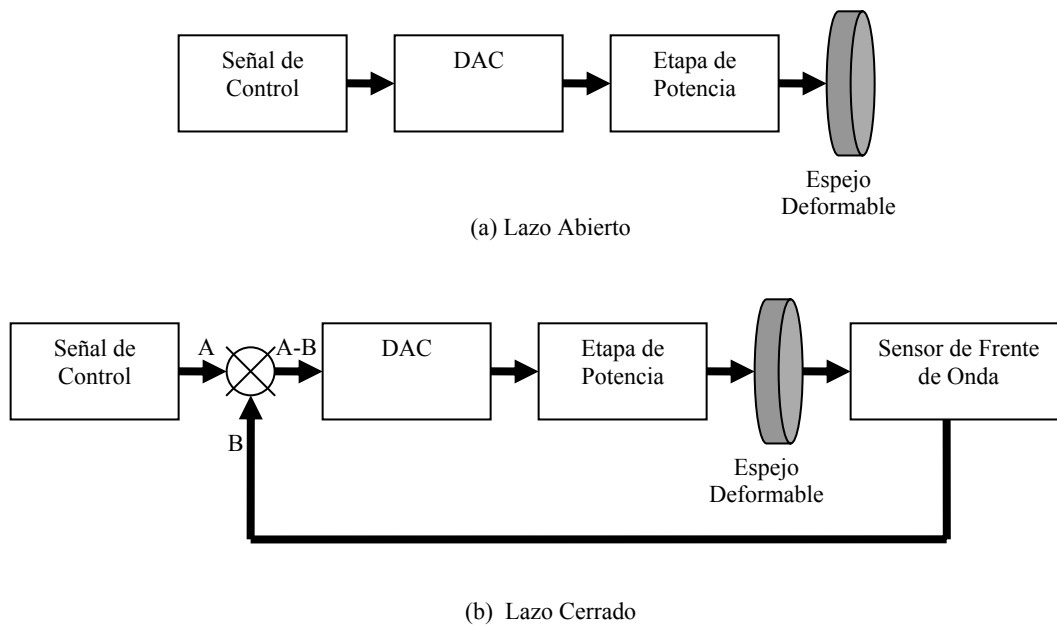


Figura 56. Diagrama esquemático, que muestra los bloques necesarios para implementar (a) un sistema de control de lazo abierto. (b) un sistema de control de lazo cerrado, para el espejo deformable.

Ambos sistema tienen en común los siguientes bloques, como son:

- Señal de control: Señal que contiene la deformación que se desea introducir en el espejo.
- Etapa DAC: Se encarga de convertir la señal digital de control en un voltaje proporcional a la deformación deseada.
- Etapa de Potencia: Amplifica, refuerza y ajusta la señal de la etapa DAC para que tenga los niveles de voltaje con los que opera el espejo.

- El modulador espacial: en nuestro caso un espejo deformable.

La única diferencia es que el sistema de control de lazo cerrado utiliza un:

- Sensor de frente de onda que interpreta el haz reflejado por el modulador, para medir la deformación actual del espejo y retroalimentar la información al sistema. De esa manera el sistema sabe que logró la deformación deseada.