



*Grup de Recerca en Òptica Física*  
*Departament de Física Aplicada i Òptica*  
*Universitat de Barcelona*

**Análisis de la influencia de las aberraciones del sistema  
difractor en el reconocimiento de imágenes por  
correlación óptica**

Julio D. Pérez Tudela  
Junio de 2006





UNIVERSITAT DE BARCELONA



Departament de Física Aplicada i Òptica  
Programa d'Enginyeria i Materials Electrònics i Òptica  
Bienni 1996 - 1998

# **ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LAS ABERRACIONES DEL SISTEMA DIFRACTOR EN EL RECONOCIMIENTO DE IMÁGENES POR CORRELACIÓN ÓPTICA**

Memoria presentada para optar al título de Doctor en Ciències Físiques

Directores: Dr. Ignasi Juvells i Prades  
Dr. Mario Montes Usategui

**Julio D. Pérez Tudela**  
**Barcelona, Junio de 2006**



# Agradecimientos

Si la elaboración de una Tesis, según mi entender, conlleva asociado un proceso de maduración y reflexión no tan sólo académico, sino también personal, debo agradecer especialmente a un grupo de personas los momentos que hemos compartido a lo largo de este largo viaje. Lo que me han aportado en estos años constituye para mí la primera y más importante conclusión de este trabajo:

A mis directores de Tesis, Dr. Ignasi Juvells y Dr. Mario Montes. Sin sus consejos y orientación hubiese resultado muy difícil que este trabajo llegase a buen fin.

A los Drs. Artur Carnicer y Santiago Vallmitjana, pues su generosa contribución de tiempo, dedicación y buenas ideas ha sido determinante en varios momentos del desarrollo del trabajo. Debo también agradecer al Dr. José Ramón de Francisco Moneo sus indicaciones y sus trabajos previos en simulación de sistemas ópticos y programas de trazado de rayos, los cuales fueron la semilla que hizo posible el inicio de esta investigación.

Una mención especial merecen el Dr. Ignasi Labastida, la Dra. Estela Martín Badosa, el Dr. Raul Tudela, Encarni Pleguezuelos y Jordi Andilla, que han ayudado a que tantas y tantas tardes no se hiciesen eternas. Sin olvidar al Dr. Salvador Bosch, al Dr. Josep Ferré y al resto de personas que en un momento u otro han formado parte en estos años del grupo del Laboratori d'Òptica de la UB.

A dos físicos, una matemática y una ingeniera industrial, por seguir estando ahí.

A mi familia, por no dejar de confiar en que algún día llegaría este momento.

Evidentemente, a Sandra. Por todo. Sin ella es muy probable que hoy no estuviese escribiendo estas líneas.



*Hay una fuerza motriz más poderosa  
que el vapor, la electricidad y la energía atómica:  
la voluntad.*

Albert Einstein



# Índice general

<b>Introducción</b>	<b>1</b>
<b>I Fundamentación teórica</b>	<b>9</b>
<b>1. Reconocimiento de formas por correlación óptica</b>	<b>11</b>
1.1. Introducción . . . . .	11
1.2. Fundamentos de la correlación óptica . . . . .	12
1.3. Difractómetros . . . . .	13
1.3.1. Objeto anterior a la lente . . . . .	15
1.3.2. Objeto posterior a la lente . . . . .	17
1.4. Arquitecturas básicas de correlación . . . . .	18
1.4.1. Correlador 4f y correlador convergente . . . . .	18
1.4.2. Generación de filtros . . . . .	21
1.4.3. Correlador de transformadas conjuntas . . . . .	22
<b>2. Aberraciones geométricas en sistemas ópticos</b>	<b>25</b>
2.1. Aberraciones de rayo y onda . . . . .	26
2.1.1. Relación entre aberración de rayo y aberración de onda . . . . .	28
2.2. Función de aberración de un sistema con simetría de revolución . . . . .	31
2.2.1. Polinomios y coeficientes de Zernike . . . . .	33
2.3. Propagación de imágenes aberradas . . . . .	34
2.3.1. Distribución de luz en la pupila de salida . . . . .	35
2.3.2. Distribución de luz en un plano arbitrario . . . . .	37
<b>II Implementación computacional y validación del método de</b>	

<b>análisis</b>	<b>41</b>
<b>3. Desarrollo y comprobación experimental</b>	<b>43</b>
3.1. Obtención del polinomio de aberración . . . . .	44
3.2. Validación de los resultados . . . . .	45
3.2.1. Comparación con un programa comercial . . . . .	46
3.2.2. Análisis interferométrico del polinomio de aberración . . . . .	53
<b>III Influencia de las aberraciones en el proceso de correlación</b>	<b>61</b>
<b>4. Correlador de transformadas conjuntas</b>	<b>63</b>
4.1. Proceso de correlación en el JTC . . . . .	64
4.2. Descripción de los sistemas ópticos y la configuración experimental . .	67
4.3. Análisis de las aberraciones del sistema menisco . . . . .	71
4.3.1. Influencia de la aberración del primer difractor . . . . .	74
4.3.2. Influencia de la aberración del segundo difractor . . . . .	80
4.3.3. Influencia de la aberración considerada en el proceso global . .	82
4.3.4. Optimización de la posición del plano de captación . . . . .	87
4.4. Análisis de las aberraciones del sistema Meopta . . . . .	88
4.4.1. Influencia de la aberración del primer difractor . . . . .	89
4.4.2. Influencia de la aberración del segundo difractor . . . . .	93
4.4.3. Influencia de la aberración considerada en el proceso global . .	93
4.4.4. Optimización de la posición del plano de captación . . . . .	95
4.5. Análisis de las aberraciones del sistema USP311 . . . . .	96
4.5.1. Influencia de la aberración del primer difractor . . . . .	100
4.5.2. Influencia de la aberración del segundo difractor . . . . .	101
4.5.3. Influencia de la aberración considerada en el proceso global . .	102
4.5.4. Optimización de la posición del plano de captación . . . . .	104
4.6. Consideraciones generales . . . . .	106
4.6.1. Análisis de los sistemas ópticos . . . . .	106
4.6.2. Influencia de la aberración en el proceso de correlación en un JTC. Aspectos generales . . . . .	109
<b>5. Correlador convergente de Vander Lugt</b>	<b>113</b>
5.1. Proceso de correlación en el correlador de Vander Lugt . . . . .	114
5.1.1. Filtros clásicos de correlación . . . . .	116
5.2. Descripción del correlador. Diseño básico . . . . .	118

5.3. Análisis de la influencia de los difractómetros . . . . .	121
5.3.1. Influencia del primer difractómetro . . . . .	121
5.3.2. Influencia del segundo difractómetro . . . . .	123
5.3.3. Análisis del proceso global . . . . .	124
5.4. Influencia de la posición de los moduladores respecto de los sistemas ópticos . . . . .	126
5.5. Generación de filtros adaptados a sistemas ópticos aberrados . . . . .	132
5.6. Diseño de un correlador de Vander Lugt óptimo . . . . .	135
5.7. Consideraciones generales . . . . .	147
<b>IV Conclusiones</b>	<b>151</b>
<b>Conclusiones</b>	<b>153</b>
<b>V Apéndices y bibliografía</b>	<b>159</b>
<b>A. Publicaciones relacionadas con el trabajo</b>	<b>161</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>165</b>



# Índice de figuras

1.1. Configuraciones básicas de difractómetros. . . . .	14
1.2. Esquema del correlador 4f. . . . .	18
1.3. Esquema del correlador convergente de Vander Lugt. . . . .	20
1.4. Generación de un filtro de VanderLugt. . . . .	21
1.5. Esquema del correlador de transformadas conjuntas convencional. . . . .	23
2.1. Frente de onda aberrado para un objeto puntual situado sobre el eje óptico. . . . .	27
2.2. Esfera de referencia (ER) y frente de onda (FO). . . . .	29
2.3. Esquema de formación de la imagen gaussiana para un objeto puntual. . . . .	35
2.4. Sistema de coordenadas en la pupila de salida, en el plano de imagen gaussiana y en un plano imagen cualquiera. . . . .	36
2.5. Propagación de una onda. Cálculo de la amplitud compleja en el plano $z$ a partir de la amplitud compleja en el plano $z = 0$ . . . . .	37
3.1. Esferómetro. . . . .	47
3.2. Medida de radios de curvatura y espesor de una lente con un esferómetro. . . . .	48
3.3. Polinomios de aberración para diferentes posiciones de la pupila de salida. . . . .	51
3.4. Comparación del perfil del polinomio de aberración para diferentes posiciones de la pupila de salida mediante un programa comercial y la aplicación desarrollada. . . . .	52
3.5. Diferencias entre los valores del polinomio de aberración calculado me- diante el programa ZEMAX y el ajuste propio. . . . .	53
3.6. Esquema de un interferómetro de Mach-Zehnder. . . . .	54
3.7. Dispositivo interferométrico utilizado para la validación experimental del cálculo del polinomio de aberración. . . . .	55

3.8. Medida de la posición del plano de captación y del radio de la esfera de referencia. . . . .	57
3.9. Comparación entre los interferogramas experimentales y los simulados obtenidos para una distancia objeto $s = 495$ mm, modificando la fase inicial. . . . .	58
3.10. Comparación entre el interferograma experimental y el simulado para una distancia objeto $s = 352$ mm. . . . .	58
4.1. Esquema de un correlador de transformadas conjuntas convencional. . .	64
4.2. Esquema de un correlador de transformadas conjuntas monobanco. . .	65
4.3. Situación de las imágenes en el modulador. . . . .	69
4.4. Determinación del diámetro de la pupila de salida en función del área iluminada en el modulador. . . . .	70
4.5. Configuraciones básicas de los sistemas ópticos utilizados en el análisis del JTC. . . . .	72
4.6. Imagen utilizada como referencia en el proceso de detección en el JTC.	73
4.7. Imagen generada mediante la superposición del objeto a detectar y las diferentes escenas. . . . .	73
4.8. Polinomio de aberración para diferentes posiciones del plano imagen. Las líneas verticales indican las diferentes posiciones de la imagen a detectar. Sistema menisco. . . . .	75
4.9. Interferogramas simulados para diferentes posiciones del plano imagen. Sistema menisco. . . . .	76
4.10. Ejemplos de imágenes de entrada: posiciones 1, 4 y 7 de la escena. . .	77
4.11. Altura relativa a la correlación ideal de los picos de correlación simulados y experimentales para diferentes posiciones del plano de captación considerando únicamente la aberración del primer difractor. Sistema menisco. . . . .	79
4.12. Representaciones tridimensionales de la intensidad de la correlación simulada para las posiciones 1, 4 y 7 de la escena considerando únicamente la aberración del primer difractor. Sistema menisco. . . . .	80
4.13. Altura relativa a la correlación ideal de los picos de correlación simulados para diferentes posiciones del plano de captación considerando únicamente la aberración del segundo difractor. Sistema menisco. . . . .	81
4.14. Representaciones tridimensionales de la intensidad de la correlación simulada para las posiciones 1, 4 y 7 de la escena considerando únicamente la aberración del segundo difractor. Sistema menisco. . . . .	82

4.15. Ejemplos de JPS experimentales para las posiciones 1, 4 y 7 de la escena correspondientes a la captación en el plano $d = 0$ mm (paraxial) y en el plano $d = -15$ mm. . . . .	83
4.16. Imágenes de correlación simuladas y experimentales para las posiciones 1, 4 y 7 de la escena correspondientes a los planos $d = 0$ mm (paraxial) y $d = -15$ mm considerando la aberración del proceso global. . . . .	84
4.17. Altura relativa a la correlación ideal de los picos de correlación simulados y experimentales para diferentes posiciones del plano de captación considerando la aberración del proceso global. Sistema menisco. . . . .	85
4.18. Representaciones tridimensionales de la intensidad de la correlación simulada para las posiciones 1, 4, y 7 de la escena considerando la aberración del proceso global. Sistema menisco. . . . .	86
4.19. Altura relativa a la correlación ideal de los picos de correlación simulados modificando el plano de captación de la primera y la segunda transformada. Sistema menisco. . . . .	87
4.20. Representaciones tridimensionales de la intensidad de la correlación simulada para las posiciones 1, 4, y 7 de la escena modificando el plano de captación de la primera y la segunda transformada. Sistema menisco. . . . .	88
4.21. Polinomio de aberración para diferentes posiciones del plano imagen. Las líneas verticales indican las diferentes posiciones de la imagen a detectar. Sistema Meopta. . . . .	90
4.22. Interferogramas simulados para diferentes posiciones del plano imagen. Sistema Meopta. . . . .	91
4.23. Altura relativa de los picos de correlación simulados para diferentes posiciones del plano de captación considerando únicamente la aberración del primer difractor. Sistema Meopta. . . . .	92
4.24. Representaciones tridimensionales de la intensidad de la correlación simulada para las posiciones 1, 4 y 7 de la escena considerando únicamente la aberración del primer difractor. Sistema Meopta. . . . .	92
4.25. Altura relativa a la correlación ideal de los picos de correlación simulados para diferentes posiciones del plano de captación considerando únicamente la aberración del segundo difractor. Sistema Meopta. . . . .	94
4.26. Representaciones tridimensionales de la intensidad de la correlación simulada para las posiciones 1, 4 y 7 de la escena considerando únicamente la aberración del segundo difractor. Sistema Meopta. . . . .	94

4.27. Altura relativa a la correlación ideal de los picos de correlación simulados para diferentes posiciones del plano de captación considerando la aberración del proceso global. Sistema Meopta. . . . .	95
4.28. Representaciones tridimensionales de la intensidad de la correlación simulada para las posiciones 1, 4 y 7 de la escena considerando la aberración del proceso global. Sistema Meopta. . . . .	96
4.29. Altura relativa a la correlación ideal de los picos de correlación simulados modificando el plano de captación de la primera y la segunda transformada. Sistema Meopta. . . . .	97
4.30. Representaciones tridimensionales de la intensidad de la correlación simulada para las posiciones 1, 4 y 7 de la escena modificando el plano de captación de la primera y la segunda transformada. Sistema Meopta.	97
4.31. Polinomio de aberración para diferentes posiciones del plano imagen. Las líneas verticales indican las diferentes posiciones de la imagen a detectar. Sistema USP311. . . . .	98
4.32. Interferogramas simulados para diferentes posiciones del plano imagen. Sistema USP311. . . . .	99
4.33. Altura relativa a la correlación ideal de los picos de correlación simulados para diferentes posiciones del plano de captación considerando únicamente la aberración del primer difractor. Sistema USP311. . . . .	100
4.34. Representaciones tridimensionales de la intensidad de la correlación simulada para las posiciones 1, 4 y 7 de la escena considerando únicamente la aberración del primer difractor. Sistema USP311. . . . .	101
4.35. Altura relativa a la correlación ideal de los picos de correlación simulados para diferentes posiciones del plano de captación considerando únicamente la aberración del segundo difractor. Sistema USP311.	102
4.36. Representaciones tridimensionales de la intensidad de la correlación simulada para las posiciones 1, 4 y 7 de la escena considerando únicamente la aberración del segundo difractor. Sistema USP311. . . . .	103
4.37. Altura relativa a la correlación ideal de los picos de correlación simulados para diferentes posiciones del plano de captación considerando la aberración del proceso global. Sistema USP311. . . . .	103
4.38. Representaciones tridimensionales de la intensidad de la correlación simulada para las posiciones 1, 4 y 7 de la escena considerando la aberración del proceso global. Sistema USP311. . . . .	104

4.39. Altura relativa de los picos de correlación simulados modificando el plano de captación de la primera y la segunda transformada. Sistema USP311. . . . .	105
4.40. Representaciones tridimensionales de la intensidad de la correlación simulada para las posiciones 1, 4 y 7 de la escena modificando el plano de captación de la primera y la segunda transformada. Sistema USP311.	105
5.1. Esquema de un correlador convergente de Vander Lugt. . . . .	115
5.2. Configuración básica del correlador de Vander Lugt analizado. Configuración 1. . . . .	119
5.3. Objeto a detectar y escenas. Correlador de Vander Lugt. . . . .	120
5.4. Configuración 2 del correlador de Vander Lugt. Aberraciones similares en ambos difractómetros. . . . .	121
5.5. Configuración 3 del correlador de Vander Lugt. Aberración superior en el segundo difractómetro. . . . .	121
5.6. Alturas relativas a la correlación ideal de los picos de correlación simulados considerando únicamente la aberración del primer difractómetro. Configuración 1. . . . .	122
5.7. Alturas relativas a la correlación ideal de los picos de correlación simulados considerando únicamente la aberración del segundo difractómetro. Configuraciones 1, 2 y 3. . . . .	124
5.8. Alturas relativas a la correlación ideal de los picos de correlación simulados considerando la aberración de ambos difractómetros. Configuraciones 1, 2 y 3. . . . .	125
5.9. Representaciones tridimensionales de la intensidad de la correlación simulada para las tres posiciones de la escena y cuatro supuestos: a) correlación ideal, b) correlación considerando únicamente la aberración del primer difractómetro, c) correlación considerando únicamente la aberración del segundo difractómetro, d) correlación considerando la aberración del primer y del segundo difractómetros. Configuración 1. . . . .	127
5.10. Representaciones tridimensionales de la intensidad de la correlación simulada para las tres posiciones de la escena y cuatro supuestos: a) correlación ideal, b) correlación considerando únicamente la aberración del primer difractómetro, c) correlación considerando únicamente la aberración del segundo difractómetro, d) correlación considerando la aberración del primer y del segundo difractómetros. Configuración 2. . . . .	128

- 5.11. Representaciones tridimensionales de la intensidad de la correlación simulada para las tres posiciones de la escena y cuatro supuestos: a) correlación ideal, b) correlación considerando únicamente la aberración del primer difractor, c) correlación considerando únicamente la aberración del segundo difractor, d) correlación considerando la aberración del primer y del segundo difractors. Configuración 3. . . . . 129
- 5.12. Evolución de la altura relativa a la correlación ideal de los picos de correlación simulados en función de la posición relativa de los moduladores respecto de los sistemas ópticos considerando la aberración de ambos difractors. . . . . 131
- 5.13. Alturas relativas a la correlación ideal de los picos de correlación simulados para las tres posiciones de la escena y tres supuestos: correlación considerando únicamente la aberración del primer difractor, únicamente la del segundo difractor, o la de ambos, mediante la utilización de filtros generados incluyendo la aberración del primer difractor, del segundo o la del proceso global. Configuración 2. . . . . 134
- 5.14. Representaciones tridimensionales de la intensidad de la correlación simulada para las tres posiciones de la escena y cuatro supuestos: a) correlación ideal, b) correlación considerando únicamente la aberración del primer difractor, c) correlación considerando únicamente la aberración del segundo difractor, d) correlación considerando la aberración del primer y del segundo difractors. Filtros generados a partir de la imagen sin aberración. Configuración 2. . . . . 136
- 5.15. Representaciones tridimensionales de la intensidad de la correlación simulada para las tres posiciones de la escena y cuatro supuestos: a) correlación ideal, b) correlación considerando únicamente la aberración del primer difractor, c) correlación considerando únicamente la aberración del segundo difractor (sin trascendencia real, en este caso), d) correlación considerando la aberración del primer y del segundo difractors. Filtros generados a partir de la imagen afectada por la aberración del primer difractor. Configuración 2. . . . . 137

5.16. Representaciones tridimensionales de la intensidad de la correlación simulada para las tres posiciones de la escena y cuatro supuestos: a) correlación ideal, b) correlación considerando únicamente la aberración del primer difractor (sin trascendencia real, en este caso), c) correlación considerando únicamente la aberración del segundo difractor, d) correlación considerando la aberración del primer y del segundo difractors. Filtros generados a partir de la imagen afectada por la aberración del segundo difractor. Configuración 2. 138

5.17. Representaciones tridimensionales de la intensidad de la correlación simulada para las tres posiciones de la escena y cuatro supuestos: a) correlación ideal, b) correlación considerando únicamente la aberración del primer difractor, c) correlación considerando únicamente la aberración del segundo difractor d) correlación considerando la aberración del primer y del segundo difractors. Filtros generados a partir de la imagen afectada por la aberración de ambos difractors. Configuración 2. . . . . 139

5.18. Configuración óptima del correlador de Vander Lugt. . . . . 140

5.19. Alturas relativas a la correlación ideal de los picos de correlación simulados para las tres posiciones de la escena y tres supuestos: correlación considerando únicamente la aberración del primer difractor, únicamente la del segundo difractor, o la de ambos, mediante la utilización de filtros generados incluyendo la aberración del primer difractor, del segundo o la del proceso global. Configuración óptima del correlador. . . . . 141

5.20. Representaciones tridimensionales de la intensidad de la correlación simulada para las tres posiciones de la escena y cuatro supuestos: a) correlación ideal, b) correlación considerando únicamente la aberración del primer difractor, c) correlación considerando únicamente la aberración del segundo difractor, d) correlación considerando la aberración del primer y del segundo difractors. Filtros generados a partir de la imagen sin aberración. Configuración óptima del correlador. 143

- 5.21. Representaciones tridimensionales de la intensidad de la correlación simulada para las tres posiciones de la escena y cuatro supuestos: a) correlación ideal, b) correlación considerando únicamente la aberración del primer difractor, c) correlación considerando únicamente la aberración del segundo difractor (sin trascendencia real, en este caso), d) correlación considerando la aberración del primer y del segundo difractor. Filtros generados a partir de la imagen afectada por la aberración del primer difractor. Configuración óptima del correlador. . . . . 144
- 5.22. Representaciones tridimensionales de la intensidad de la correlación simulada para las tres posiciones de la escena y cuatro supuestos: a) correlación ideal, b) correlación considerando únicamente la aberración del primer difractor (sin trascendencia real, en este caso), c) correlación considerando únicamente la aberración del segundo difractor, d) correlación considerando la aberración del primer y del segundo difractor. Filtros generados a partir de la imagen afectada por la aberración del segundo difractor. Configuración óptima del correlador. . . . . 145
- 5.23. Representaciones tridimensionales de la intensidad de la correlación simulada para las tres posiciones de la escena y cuatro supuestos: a) correlación ideal, b) correlación considerando únicamente la aberración del primer difractor, c) correlación considerando únicamente la aberración del segundo difractor, d) correlación considerando la aberración del primer y del segundo difractor. Filtros generados a partir de la imagen afectada por la aberración de ambos difractor. Configuración óptima del correlador. . . . . 146

# Índice de tablas

2.1. Aberraciones ortonormales de Zernike ( $n \leq 4$ ). . . . .	34
3.1. Sistema menisco: medidas con esferómetro. . . . .	48
3.2. Sistema menisco: comparación entre las medidas experimentales y los datos del fabricante . . . . .	48
3.3. Configuraciones del sistema óptico para la evaluación del método de cálculo del polinomio de aberración. . . . .	49
3.4. Expresiones de los coeficientes de Zernike no nulos calculados por el programa ZEMAX. . . . .	50
3.5. Características del dispositivo optoelectrónico de captación. . . . .	56
4.1. Datos del sistema menisco. . . . .	67
4.2. Datos del sistema Meopta. . . . .	68
4.3. Datos del sistema USP311. . . . .	69
4.4. Diámetros de la pupila de salida para cada uno de los sistemas utilizados.	70
5.1. Características básicas de los sistemas ópticos utilizados en el correla- dor de Vander Lugt. . . . .	119



# Introducción

El trabajo que aquí se presenta se engloba dentro de la línea de investigación que el *Grup de Recerca en Òptica Física* del *Departament de Física Aplicada i Òptica* de la *Universitat de Barcelona* desarrolla en el campo del procesado de imágenes, con especial incidencia en el uso de la correlación como herramienta para el reconocimiento de imágenes. Por otra parte, el método de análisis que se presentará en los capítulos siguientes se basa en trabajos previos de diseño y optimización de sistemas ópticos a partir del trazado exacto de rayos. Por lo tanto, este trabajo pretende aunar la experiencia acumulada por el grupo en estos dos campos, y, mediante la utilización de técnicas basadas en el trazado exacto de rayos, analizar el comportamiento de las dos arquitecturas ópticas principales utilizadas como instrumentos para el reconocimiento de imágenes.

El objetivo de este capítulo es triple: en primer lugar, se realizará una breve introducción histórica a la evolución de las técnicas de reconocimiento de imágenes basadas en la correlación óptica, con especial atención al tratamiento que en este campo ha tenido el análisis de la influencia de las aberraciones de los sistemas ópticos en el proceso de correlación. Seguidamente, se describirán los trabajos previos desarrollados por los miembros del grupo de investigación y que han desembocado, de forma natural, en la realización de este trabajo. Finalmente se presentará la estructura de la memoria.

## Aproximación histórica

Desde los trabajos iniciales de E. Abbe [Abb73] en 1873 y A. B. Porter [Por06] en 1906 hasta las últimas técnicas para verificación biométrica o reconocimiento facial [KSX<sup>+</sup>04, AA05], los métodos de reconocimiento de objetos o formas han experimentado una notable evolución. Los primeros intentos dentro del campo de procesado de imágenes se basaban en la modificación directa del espectro de Fourier de un objeto

determinado, mediante la inclusión en el recorrido de la luz de diferentes tipos de oberturas u obstáculos, técnica que posteriormente se denominó filtrado espacial. No fue hasta bien entrado el s. XX cuando A. B. Vander Lugt propuso [Lug64] el diseño que lleva su nombre, el correlador clásico de Vander Lugt, o 4f. Esta arquitectura se basa en la realización de dos transformadas de Fourier (TF) ópticas consecutivas y la utilización de una imagen compleja, o filtro, creada mediante el registro holográfico del patrón de interferencias entre la transformada de Fourier del objeto a detectar y una onda plana de referencia [Lug64]. Pocos años más tarde, en 1966, Rau [Rau66] y Weaver y Goodman [WG66] propusieron de forma independiente un método alternativo para realizar el reconocimiento de imágenes, el denominado correlador de transformadas conjuntas, o JTC<sup>1</sup>. Este método se caracteriza principalmente por suprimir la necesidad de un filtro complejo situado en el plano de Fourier, y por situar en el mismo plano de entrada tanto la escena como la imagen a detectar, de las cuales se realiza su transformada de Fourier óptica. La intensidad de esta transformada, denominada espectro de potencia conjunto o JPS<sup>2</sup>, es registrada mediante algún procedimiento fotográfico intermedio y nuevamente transformada para obtener finalmente la correlación entre escena e imagen.

Estas dos arquitecturas han sido, y son en la actualidad, la base de la mayor parte de los sistemas ópticos utilizados para el reconocimiento de imágenes. Desde su introducción se han sucedido los estudios comparativos cuyo propósito principal era analizar las diferencias y semejanzas entre ambas, y tratar de delimitar las ventajas e inconvenientes de cada una de ellas [LYG90, YSCG90, YG96, PY97]. De forma simple, podríamos decir que, mientras que el correlador de Vander Lugt presenta un mejor comportamiento en escenas ruidosas y multiobjeto, el correlador de transformadas conjuntas resulta más adecuado en aplicaciones reales, puesto que no necesita de un filtro generado previamente, y no presenta los problemas de alineación entre la escena y el filtro característicos del correlador de Vander Lugt.

Por otro lado, rápidamente se introdujeron modificaciones en los diseños originales encaminadas a mejorar su comportamiento como sistemas de reconocimiento de imágenes, y que podemos dividir en dos grandes grupos: aquellas que afectan a la estructura física del montaje, y aquellas que se refieren al procesado de la información previo o posterior al proceso de correlación. En el primer conjunto se pueden distinguir, por

---

<sup>1</sup>*Joint Transform Correlator*

<sup>2</sup>*Joint Power Spectrum*

su parte, dos grandes líneas de actuación: por un lado, la introducción en el diseño de Vander Lugt de lentes convergentes y teleobjetivos en vez de la utilización de iluminación paralela, consiguiendo de este modo reducir considerablemente la longitud total del sistema. Así, ya el mismo año 1964 encontramos el denominado correlador convergente de Vander Lugt, propuesto por Taylor y Lipson y basado en la utilización de difractómetros convergentes. Este montaje no sólo simplifica el diseño original, sino que también obtiene resultados sensiblemente mejores [JL82]. Posteriormente se introdujeron teleobjetivos sustituyendo a las lentes convergentes simples, reduciendo considerablemente la longitud de los montajes [FBLC86, BVJFM92, JVB92]. Este intento por miniaturizar al máximo los correladores tiene su base en poder incorporarlos plenamente a aplicaciones industriales [GK88, CGC91, RBR<sup>+</sup>92, CMDM98].

Dentro de las modificaciones estructurales, podemos destacar también los cambios que se han ido introduciendo en los dispositivos utilizados para mostrar las imágenes. En los inicios las imágenes se visualizaban mediante registros fotográficos u holográficos, lo que se traducía en un elevado coste temporal. Con la llegada de los moduladores espaciales de luz, o SLM<sup>3</sup>, se consiguió que los procesos de reconocimiento de imágenes se realizasen prácticamente en "tiempo real", lo que se tradujo en una revitalización del JTC, puesto que eliminaba el proceso fotográfico para el registro del JPS [YL84]. Respecto a los SLM, baste decir que estos elementos permiten controlar la transmisión compleja de la luz que los atraviesa o que se refleja en ellos, a la vez que consiguen que las imágenes se visualicen a gran velocidad [CMDM98, LL00]. Un detallado y completo estudio de la evolución y las características de funcionamiento de estos dispositivos se puede encontrar en [MB98, Lab00].

Por lo que respecta a los métodos de tratamiento de las imágenes, debemos diferenciarlos en función de la arquitectura a la que estén enfocados. Así, los que se aplican en el JTC se basan principalmente en la modificación del JPS mediante la introducción de no-linealidades, tales como su binarización [Jav89], que aunque en algún caso provoca la aparición de picos correspondientes a detecciones erróneas [YCTG89, CJV92], se puede mejorar mediante la sofisticación del método de binarización [WJ94]. Otras técnicas utilizadas son el preprocesado de la imagen del objeto a reconocer [VCMBJ95] o la modificación de la configuración del modulador de entrada [LY96, LICY98]. Finalmente, la gran mayoría de las modificaciones introducidas en los correladores de Vander Lugt se refieren al diseño de los filtros utilizados para

---

<sup>3</sup>*Spatial Light Modulators*

reconocer el objeto a detectar. Los primeros filtros se generaban a partir de la transformada de Fourier conjugada del motivo a detectar, y así encontramos el filtro clásico adaptado [Lug64], el filtro de fase [HG84] o el inverso [AKJ90, KH90], los cuales presentan propiedades que los hacen más o menos adecuados en función de las características del proceso de correlación que se vaya a llevar a cabo. Una generalización de estos filtros fue la introducción de los filtros óptimos [Réf91], que se caracterizan por comportarse de forma óptima para los tres parámetros de calidad más habituales en el reconocimiento de imágenes: la relación señal-ruido, el cociente entre la energía contenida en el pico de correlación y la del plano de correlación, y la eficiencia luminosa del filtro. Las constantes mejoras en el campo de los dispositivos utilizados para mostrar los filtros, así como la posibilidad de hallar una función que mejore algunos de los aspectos de la correlación (detección de varios objetos, detección de objetos de diferentes tamaños, orientaciones o posiciones ...) hacen que el diseño de filtros sea una disciplina en continua evolución.

En la actualidad, los métodos de reconocimiento de imágenes dirigen sus esfuerzos principalmente a la detección de imágenes tridimensionales [Ros98, LR02, GVF03, JPDH06], o bien a la de imágenes policromáticas [MCRY95, ETPG<sup>+</sup>04].

Frente a esta gran cantidad de estudios generados en las dos o tres últimas décadas respecto al uso de los correladores como herramientas de reconocimiento de imágenes, los dedicados al análisis de las aberraciones que afectan a los sistemas ópticos que realizan las transformadas de Fourier han sido escasos. En pocos casos se estudia la influencia de estas aberraciones sobre el proceso de correlación, y en ningún caso se ha abordado el problema de una manera rigurosa y sistemática.

En el campo de la correlación, los primeros análisis de sistemas ópticos aberrados se centraron en estudiar de forma general las prestaciones de los mismos no como elementos con los que formar imagen, sino como generadores de transformadas de Fourier [Bie71]. Con la incorporación de los moduladores a los montajes de correlación se empezó a analizar de forma específica la posible influencia de las aberraciones de los sistemas ópticos, aunque siempre considerada en relación a la resolución de los moduladores. Encontramos estudios referidos a correladores clásicos de Vander Lugt [Lan88], donde presentan más relevancia los efectos difractivos, o bien a correladores más compactos [GCFM90, CGC91], en los que deben tenerse en consideración principalmente la aberración esférica y los problemas generados por la falta de alineación.

En general, los estudios realizados hasta la fecha son incompletos, puesto que, o bien se centran en el análisis de un aspecto parcial, como por ejemplo la primera etapa de un correlador de transformadas conjuntas [Com95], o la de un correlador convergente de Vander Lugt [PTMUJV00], o bien analizan únicamente una arquitectura en concreto [PTJMU<sup>+</sup>04]. Incluso los métodos más recientes desarrollados para evaluar y corregir las aberraciones de correladores convergentes [IMNC03], no analizan en profundidad los efectos de la aberración de los sistemas ópticos, puesto que utilizan la distribución de fase global, generada por los diferentes elementos (lentes, moduladores ...) presentes en el correlador.

El presente trabajo amplía y completa estos análisis previos, a partir de un estudio minucioso y detallado de la influencia de la aberración de los sistemas ópticos en el proceso de correlación para las dos arquitecturas anteriormente mencionadas: el correlador convergente de Vander Lugt y el correlador de transformadas conjuntas.

## Estudios previos

Tal y como se ha comentado anteriormente, este trabajo se engloba dentro de la línea de investigación del grupo dentro del reconocimiento de imágenes, y pretende complementar trabajos anteriores realizados en este ámbito. Inicialmente se llevaron a cabo estudios para mejorar los montajes de Vander Lugt, bien mediante la introducción de teleobjetivos [BVJFM92, JVB92] o con la utilización de nuevos métodos de codificación holográfica [VBJR86]. Con la aparición de los primeros moduladores se empezó a trabajar con los montajes tipo JTC [Car93, MB98], con la inclusión de fenómenos no lineales en el JPS, al mismo tiempo que se diseñaban filtros capaces de detectar simultáneamente más de un objeto [MU95]. Un aspecto destacado de esta etapa fue el análisis y la caracterización de los dispositivos de cristal líquido y las cámaras CCD utilizadas en ambas arquitecturas [MB98], lo cual permitió su introducción en el correlador de Vander Lugt en sustitución de los soportes fotográficos [LCMB<sup>+</sup>98]. La evolución de esta línea de investigación desembocó en el análisis del diseño de un correlador óptico compacto y de alta velocidad que combinase ambas arquitecturas [Lab00].

Es en este punto, al intentar diseñar un correlador de dimensiones reducidas en el que los sistemas ópticos trabajasen en condiciones forzadas, donde surgió la necesidad de evaluar la influencia que la aberración de estos sistemas podía tener en la correlación

final, así como sus posibles correcciones. Para ello se partió de la experiencia previa del grupo dentro del estudio dentro del campo de estudio de sistemas y corrección de aberraciones a través del trazado exacto de rayos. En un primer momento, a partir de los trabajos de H. H. Hopkins [Hop50] sobre las aberraciones de tercer orden y el desarrollo de algoritmos de marcha exacta de rayos [Oña66], se iniciaron los estudios de análisis y corrección automática de sistemas ópticos, ya fuera hasta tercer orden [Abb73], o bien de forma exacta [Juv77]. Estos trabajos se centraban en las aberraciones de punto, y fueron posteriormente ampliados a objetos extensos, mediante el estudio y corrección de la curvatura y la distorsión [Ser81].

El trabajo que aquí se presenta pretende combinar ambas líneas de investigación, de manera que los algoritmos y métodos de cálculo desarrollados para el análisis de sistemas ópticos se utilicen para analizar el comportamiento de los mismos como componentes de una arquitectura de reconocimiento de imágenes, ya sea un correlador de transformadas conjuntas o un correlador de Vander Lugt.

## Estructura de la memoria

La presente memoria se divide en cuatro partes: una primera donde se sientan las bases teóricas para el desarrollo del trabajo, un segundo bloque donde se describe el método desarrollado para el cálculo de la aberración de onda, seguido de un tercer apartado correspondiente a las aplicaciones, en el que se analiza la influencia de las aberraciones en el proceso de correlación. Finalmente, el cuarto bloque se dedica a la presentación de las conclusiones del trabajo.

El primer bloque lo componen los dos capítulos iniciales, el primero de los cuales pretende ser una introducción a los fundamentos de la correlación óptica como técnica para el reconocimiento de imágenes. En él se describen las configuraciones básicas para la realización de transformadas de Fourier ópticas, puesto que es el instrumento principal en el proceso de correlación, así como dos de las arquitecturas de correladores más utilizadas: el correlador de Vander Lugt y el JTC. En ambos casos se describe cualitativa y analíticamente el proceso que se sigue hasta la obtención de la correlación final.

El capítulo 2 empieza definiendo los conceptos de aberración de rayo y aberración de onda, así como la relación entre ambas, para pasar posteriormente a analizar las

aberraciones de un sistema óptico con simetría de revolución. El primer paso será expresar analíticamente la aberración de onda, ya sea en coordenadas cartesianas o en coordenadas polares mediante los coeficientes de Zernike. Una vez hallada esta expresión, se incorporan los efectos difractivos, agrupándolos de forma global en la pupila de salida, y se calcula la distribución de luz en este plano, para posteriormente realizar su propagación hasta un plano arbitrario.

Una vez fundamentado el método de cálculo de la aberración de onda, el capítulo 3 incide especialmente en los aspectos más concretos de la obtención del polinomio de aberración, así como la posterior validación de los resultados obtenidos, la cual se realizó mediante dos procedimientos alternativos. En primer lugar se describe la comparación de los polinomios de aberración calculados mediante el algoritmo propio con los calculados por un programa comercial de diseño de sistemas ópticos. Por otra parte, se presenta otro método evaluativo basado en el análisis de las figuras de interferencia obtenidas experimentalmente con un interferómetro de Mach-Zender, y su posterior comparación con los interferogramas simulados.

Por lo que respecta al apartado de aplicaciones, éste se encuentra compuesto por dos capítulos: el capítulo 4, en el cual se analiza el proceso de correlación para un JTC monobanco, y el capítulo 5, donde se muestran los resultados obtenidos al analizar un correlador convergente de Vander Lugt. En el primero de ellos se describe brevemente el proceso de correlación en una arquitectura de estas características, y se analiza de forma independiente el comportamiento de tres sistemas ópticos diferentes al ser utilizados como sistemas difractivos en un correlador de este tipo. Para cada uno de los sistemas se estudia la influencia que tiene en la correlación final la inclusión de la aberración de cada uno de los difractómetros por separado, así como el considerar la aberración en el proceso global. En el primero de los sistemas analizados, una lente simple tipo menisco, se realiza una comparación entre los resultados simulados con los obtenidos experimentalmente. Finalmente, para los tres sistemas se propone modificar el diseño original de los correladores a fin de optimizar su comportamiento. Esta modificación se basa en el análisis de la evolución de los picos de correlación en función de la posición de los planos de captación del JPS y de la correlación final, a partir del cual es posible hallar una combinación de posiciones, desplazadas respecto de la correspondiente al plano paraxial, que mejoran sensiblemente los valores de los picos de correlación. La parte final del capítulo la constituye un sumario de los principales resultados obtenidos en el estudio de cada sistema óptico.

El capítulo 5, correspondiente al estudio del correlador convergente de Vander Lugt, se inicia con la descripción del proceso de correlación en este tipo de dispositivos, así como de los principales filtros utilizados. Posteriormente, de forma similar al estudio realizado para el JTC, se analiza la influencia en la correlación final de la aberración de cada uno de los difractómetros, tanto de forma aislada como considerando la aberración en todo el proceso. Una vez descritos los efectos principales de la aberración, se estudia cómo afecta a la correlación la posición en eje de los moduladores respecto de los sistemas ópticos, así como su relación con los valores de la aberración. Un tercer apartado lo constituye el diseño de filtros que incorporen información sobre las aberraciones de los sistemas ópticos. Debe tenerse en cuenta que, generalmente, los filtros de reconocimiento de imágenes suelen estar implementados a partir de la imagen a detectar, entendiendo como tal la imagen ideal, libre de aberración. Sin embargo, si tenemos en cuenta que dicho filtro será utilizado en un correlador real, la información que se superpondrá con el mismo no corresponde a esta imagen sin aberrar, sino que se encuentra modificada por las aberraciones introducidas por el primer difractómetro. Además, posteriormente, el producto del filtro por la transformada de la imagen aberrada se verá a su vez alterado por la aberración del segundo difractómetro. Parece por tanto adecuado realizar un diseño de filtros más específico para el correlador con el que estemos trabajando, teniendo en cuenta este aspecto, y por lo tanto partiendo de la imagen una vez ha sido modificada por las aberraciones de los sistemas ópticos que componen el correlador. En primer lugar se explica el proceso de generación de estos filtros, y se presentan los resultados obtenidos en la correlación, comparándolos con los correspondientes al caso clásico en que los filtros se generen a partir de la imagen libre de aberración. Para finalizar, y condensando las diferentes conclusiones obtenidas a lo largo de este capítulo, se presenta un diseño de correlador que optimiza los valores de correlación, acercándolos considerablemente a la configuración libre de aberración.

Finalmente, se presentan las conclusiones a las que se ha llegado tras la realización del trabajo, y se comenta brevemente la inclusión de esta investigación y sus resultados dentro de la línea actual del grupo.