



UNIVERSITAT DE BARCELONA



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

Parte IV

Conclusiones

Conclusiones

En este trabajo se ha implementado un método basado en el trazado exacto de rayos para calcular la expresión analítica del polinomio de aberración en la pupila de salida para un objeto puntual. Este cálculo ha permitido estudiar el comportamiento de difractómetros convergentes en presencia de aberraciones, así como la influencia de éstas en el proceso de correlación en dos dispositivos: el correlador de transformadas conjuntas monobanco y el correlador convergente de Vander Lugt. Tanto en el cálculo del polinomio de aberración como en el estudio del comportamiento del correlador de transformadas conjuntas los resultados simulados se han contrastado mediante pruebas experimentales.

Las conclusiones que pueden extraerse de este estudio son las siguientes:

Cálculo del polinomio de aberración

El primer apartado del trabajo lo constituye la implementación del método de cálculo de la aberración de onda, así como la posterior comprobación de la fiabilidad de los resultados obtenidos.

- Se ha desarrollado una aplicación informática que calcula la aberración de onda asociada a un sistema óptico para un objeto puntual situado sobre el eje óptico a partir de la marcha exacta de rayos. El cálculo de los coeficientes del polinomio de aberración se efectúa mediante las relaciones entre la aberración de rayo y la aberración de onda, y se basa en la teoría de formación de imagen de Abbe - Rayleigh, que agrupa todos los efectos difractivos en las pupilas del sistema, ya sea en la de entrada o en la de salida, y el resto del proceso de propagación de la luz lo realiza mediante óptica geométrica.
- Se han comparado los coeficientes obtenidos para diferentes sistemas mediante este algoritmo con los proporcionados por un programa comercial de diseño y

evaluación de sistemas ópticos. Las discrepancias máximas entre ambos conjuntos de coeficientes no exceden de $\frac{\lambda}{200}$.

- Se ha comprobado experimentalmente la validez del método de cálculo mediante un procedimiento interferométrico. Para ello se ha utilizado un interferómetro de Mach-Zender, en uno de cuyos brazos se sitúa el sistema a analizar y en el otro un sistema altamente corregido, que actúa como sistema de referencia. De este modo se han simulado los patrones de interferencia para diferentes configuraciones de trabajo del sistema óptico problema y se han comparado con los obtenidos en el laboratorio en las mismas condiciones. La similitud entre los interferogramas obtenidos mediante el procedimiento experimental y los resultantes de la simulación corrobora la validez del método propuesto.

Análisis de la influencia de la aberración en un correlador de transformadas conjuntas monobanco

La primera aplicación del método anterior tuvo como objetivo el estudio de los efectos que la aberración de los sistemas difractivos provocaba en la correlación final para un correlador de transformadas conjuntas. Para simplificar el problema y reducir las variables que pueden intervenir en la modificación de la altura o la forma de los picos de correlación respecto del caso libre de aberración se ha trabajado con un correlador monobanco, que utiliza un único sistema óptico en ambas etapas de la correlación.

- Se han analizado tres sistemas ópticos: una lente simple tipo menisco (sistema menisco), y dos sistemas complejos de mayor calidad (sistema Meopta y sistema USP311). Utilizando estos sistemas, se han diseñado tres correladores de transformadas conjuntas monobanco trabajando en las mismas condiciones. La imagen a detectar corresponde a un pez con 256 niveles de gris, que se ha situado en 8 diferentes posiciones del plano de entrada para conseguir con ello que sea afectado por diversos grados de aberración. Para mostrar esta imagen se ha simulado la utilización de pantallas LCD de resolución VGA, correspondientes a un videoprojector comercial EPSON EMP-3000, y una cámara CCD PULNIX TM-765 para recoger la imagen del espectro de potencia conjunto y de la correlación final.
- Como paso previo al análisis de las aberraciones de cada sistema, se ha calculado el polinomio de aberración para diferentes posiciones del plano imagen,

así como el interferograma correspondiente a estos planos. Para los tres sistemas considerados el plano paraxial, a la vista del perfil del polinomio de aberración y del interferograma asociado, no resulta ser el que presente un comportamiento más adecuado.

- Se ha simulado un correlador que utilice como sistema difractivo cada uno de los tres sistemas analizados, y se ha supuesto que únicamente presenta aberración en la primera etapa de la correlación, es decir, la correspondiente a la formación del espectro de potencia conjunto, mientras que la segunda etapa se ha supuesto ideal. Del análisis de la altura de los picos se concluye que la aberración del primer difractor introduce una gran varianza espacial, independientemente del plano de captación que se utilice. Así, a medida que la imagen del pez se aleja del centro de la escena, el valor del pico de correlación disminuye de forma drástica respecto del correspondiente al caso en que la correlación sea ideal. Sin embargo, en todos los casos es posible encontrar un plano para el cual los picos de correlación presentan una mayor estabilidad.
- En el análisis de las aberraciones introducidas por el segundo difractor, se ha comprobado cómo lo que se produce es una variación de la altura de los picos de correlación que afecta por igual a todas las posiciones de la escena, y que depende de la posición del plano de captación. Nuevamente, no es el plano paraxial el que presenta el comportamiento óptimo, sino que el valor más alto para la correlación se obtiene para una posición diferente.
- Mientras que en los casos anteriores se ha analizado el comportamiento de cada uno de los difractores de forma independiente, el caso real equivale a considerar la aberración en ambas etapas. El análisis de los resultados permite apreciar cómo para cualquier plano considerado se mantiene la varianza espacial de la altura de los picos debido a la influencia de la aberración del primer difractor, al mismo tiempo que se produce un descenso generalizado de la misma, causado por la aberración del segundo difractor. Sin embargo, situar la cámara en el plano paraxial no es la mejor opción, puesto que desplazándola respecto de este plano se puede obtener una mayor estabilidad en los picos así como valores más elevados de los mismos.
- Para el sistema menisco, se ha diseñado un correlador real y se han comparado los valores simulados con los obtenidos experimentalmente. En el caso de considerar únicamente la aberración del primer difractor, se ha realizado un

proceso fotográfico para obtener las imágenes de entrada en forma de negativo fotográfico. Una vez captado el JPS experimental es digitalizado mediante una tarjeta MATROX PIP-1024 y se calcula su transformada de Fourier exacta utilizando un algoritmo FFT. Por otra parte, al considerar la aberración introducida por ambos difractómetros, el JPS captado por la cámara se transforma en un negativo fotográfico, el cual actúa como nueva imagen de entrada en el segundo difractómetro. De la comparación de los resultados así obtenidos con los simulados previamente se concluye que el comportamiento previsto en la simulación se ajusta plenamente al comportamiento real del correlador.

- A partir de los resultados obtenidos en el análisis de la evolución de la altura de los picos de correlación a medida que se desplaza el plano de captación, se ha propuesto un método para optimizar la detección, tanto en lo que respecta a la estabilidad de los picos a medida que desplazamos la imagen del pez por el plano de la escena, como en lo que se refiere a la altura relativa respecto del pico calculado en el caso ideal. Dicho método se basa en la modificación del plano de captación del JPS y de la correlación final, situándolos en las posiciones que arrojen mejores resultados al efectuar el estudio parcial de la influencia de la aberración de cada etapa del difractómetro.

Análisis de la influencia de la aberración en un correlador convergente de Vander Lugt

En una segunda etapa del estudio se analizó cómo las aberraciones de los sistemas difractivos afectaban al proceso de correlación en un correlador convergente de Vander Lugt. Para ello se simuló un correlador formado por dos lentes biconvexas, donde la imagen a detectar correspondía a un pez con 256 niveles de gris, el cual era mostrado utilizando moduladores BNS de 128×128 píxeles. Las diferentes escenas se generaron colocando la imagen del pez en tres posiciones diferentes del plano de entrada, consiguiendo con ello que la imagen se viera afectada por diferentes grados de aberración.

- En primer lugar se analizó la influencia de la aberración de cada difractómetro en la correlación final. Para aislar el efecto de los difractómetros se simularon tres configuraciones diferentes, modificando la distancia objeto para el segundo difractómetro y manteniendo fija la distancia entre ambos moduladores. De este modo se han podido analizar tres parejas de difractómetros con aberraciones relativas significativamente diferentes.

- Para todas las configuraciones utilizadas se ha comprobado que la aberración de ambos difractómetros modifica el pico de correlación de forma similar a como lo hacía en la arquitectura JTC. Así, la aberración del primer difractómetro disminuye la altura relativa del pico de correlación a medida que la imagen a detectar se aleja del centro de la escena, y se ve afectada por valores más altos de aberración. Por otra parte, la aberración debida al segundo difractómetro mantiene la invarianza espacial, pero disminuye de forma global el valor de los picos de correlación. Finalmente, considerar la aberración en ambos difractómetros equivale a disminuir de manera general la altura de los picos, a la vez que se disminuye según la distancia del motivo al centro de la escena.
- Se ha analizado también cómo la distancia entre los moduladores y los sistemas ópticos influye en la altura de los picos de correlación. Para ello se han calculado, para la configuración en la que ambos difractómetros presentaban valores de aberración similares, la evolución de la altura de los picos de correlación respecto a esta distancia. Se ha comprobado cómo, en general, la detección mejora a medida que se reduce la separación entre los sistemas ópticos y el conjunto de ambos correladores. En concreto, la aberración del segundo difractómetro llega prácticamente a anularse para posiciones muy cercanas al segundo modulador.
- Se ha incorporado la información sobre la aberración de los difractómetros al diseño de filtros. Para ello se han generado filtros adaptados, de fase e inversos a partir de la imagen centrada afectada por la aberración de ambos difractómetros. Incluso para los filtros más sensibles y las posiciones de la imagen más alejadas del centro de la escena se han obtenido resultados superiores a los obtenidos con los filtros generados a partir de la imagen ideal. En el caso de la imagen centrada, los resultados obtenidos recuperan el caso ideal, libre de aberración.
- Teniendo en cuenta los resultados anteriores, se ha propuesto un diseño de arquitectura de Vander Lugt modificando la configuración inicial con aberraciones similares en ambos difractómetros. Mediante la variación de las distancias relativas entre los sistemas ópticos y los dispositivos optoelectrónicos, y la utilización de filtros que anulen el efecto de las aberraciones introducidas por los difractómetros, los picos de correlación que se han obtenido mejoran sensiblemente los correspondientes a la configuración original, reproduciendo incluso los obtenidos para la correlación ideal.

Conclusión final y continuidad del trabajo

Como conclusión final del trabajo llevado a cabo podemos decir que se ha desarrollado un método de cálculo de la aberración de onda de un sistema óptico para un objeto puntual situado sobre el eje óptico a partir del trazado exacto de rayos, y basado en la teoría de formación de imagen de Abbe-Rayleigh. La fiabilidad del método se ha contrastado mediante técnicas interferométricas y la comparación con programas comerciales de diseño y evaluación de sistemas ópticos. El método se ha utilizado para estudiar la influencia de las aberraciones de los sistemas difractivos en la correlación, y para ello se han analizado de manera exhaustiva dos arquitecturas: el correlador de transformadas conjuntas monobanco y el correlador convergente de Vander Lugt.

En su momento, el trabajo quedaba enmarcado dentro de una línea de investigación encaminada al diseño de un correlador compacto que combinase las dos arquitecturas anteriormente mencionadas, y cuya aplicación principal debía ser el reconocimiento de objetos tridimensionales. Sin embargo, disponer de una herramienta propia de cálculo exacto de la aberración de onda introducida por un determinado sistema óptico, así como de un método de análisis y evaluación de sus efectos permite, mediante las modificaciones adecuadas, su utilización en otros ámbitos.

Actualmente se está desarrollando una nueva línea de investigación para el desarrollo de aplicaciones [MUPAMB06] dentro del campo de los denominados *optical tweezers*, o pinzas ópticas, las cuales permiten manipular partículas de pequeño tamaño [AD87] como células, bacterias o moléculas sin ejercer contacto mecánico sobre ellas. Esta manipulación se lleva a cabo mediante la focalización de un haz láser de elevada potencia, utilizando para ello, generalmente, un microscopio invertido modificado [FA97]. La utilización de moduladores ópticos (SLM) para codificar hologramas digitales que modifiquen el frente de onda de forma previa a la focalización ha ampliado de forma sustancial las posibilidades de uso de estos dispositivos [RHWT99, CKG02], puesto que de esta manera se consigue un control completo del frente de onda que interactúa con la muestra. El análisis de las aberraciones de los sistemas ópticos que se utilizan, así como de sus efectos y métodos de corrección de las mismas, ha sido y es objeto de numerosos estudios [RS02, RWGG06, VWSS06, WCC⁺06], y es una línea de trabajo en la que los algoritmos y estudios desarrollados en esta investigación se podrían incluir de forma natural.

Parte V

Apéndices y bibliografía

Apéndice A

Publicaciones relacionadas con el trabajo

Este apéndice muestra el listado de aquellas publicaciones en revistas especializadas así como las comunicaciones a congresos nacionales e internacionales elaboradas durante el desarrollo de este trabajo.

Publicaciones en revistas

- J. Pérez-Tudela, M. Montes-Usategui, I. Juvells and S. Vallmitjana, “Analysis of the influence of aberrated convergent Fourier-transform setups in optical correlation”, *Opt. Commun.*, **184**, 345-355, 2000.
- J. Pérez-Tudela, I. Juvells, S. Vallmitjana and M. Montes-Usategui, “Analysis and optimization of converging beams Fourier-transform setups for optical correlators”, *Proc. SPIE*, **4089**, 152-162, 2000.
- J. Pérez-Tudela, M. Montes-Usategui, I. Juvells, A. Carnicer and S. Vallmitjana, “Influence of the aberrations of optical Fourier-transform systems in a joint transform correlator”, *Proc. SPIE*, **4435**, 42-49, 2001.
- J. Perez-Tudela, I. Juvells, M. Montes-Usategui, A. Carnicer and S. Vallmitjana, “Variance of correlation peak heights in a JTC due to an aberrated optical Fourier-transform system”, *Proc. SPIE*, **4829**, 456-457, 2003.
- J. Pérez-Tudela, I. Juvells, M. Montes-Usategui, S. Vallmitjana and A. Carnicer, “Reduction of the effect of aberrations in a joint-transform correlator”, *Appl. Opt.*, **43**, 841-849, 2004.

Comunicaciones a congresos

- J. Pérez-Tudela, M. Montes-Usategui, I. Juvells and J. R. de F. Moneo, “Analysis and Evaluation of converging Diffractometers for Optical Correlators”, Europhysics Conference on Computational Physics, Granada, septiembre 1998.
- J. Pérez-Tudela, I. Juvells, S. Vallmitjana and M. Montes-Usategui, “Analysis and optimization of converging beams Fourier-transform setups for optical correlators”, International Topical Meeting on Optics in Computing, OC’2000, Quebec (Quebec), junio 2000.
- J. Pérez-Tudela, M. Montes-Usategui, I. Juvells, S. Vallmitjana y J.R. de F. Moneo, “Efecto de las aberraciones del sistema difractor en el reconocimiento por correlación óptica”, VI Reunión Nacional de Óptica, Medina del Campo (Valladolid), septiembre 2000.
- J. R. de F. Moneo, I. Juvells, S. Vallmitjana, A. Carnicer, M. Montes, E. Martín, I. Labastida, J. Pérez, F. J. Rodríguez, R. Tudela, “Reconocimiento de objetos tridimensionales mediante correlación óptica”, VI Reunión Nacional de Óptica, Medina del Campo (Valladolid), septiembre 2000.
- J. Pérez-Tudela, M. Montes-Usategui, I. Juvells, S. Vallmitjana and A. Carnicer, “Dependence of correlation peak heights in aberrated Fourier transform systems”, 4th Euro-American Workshop on Optoelectronic Information, Valencia, mayo 2001.
- J. Pérez-Tudela, M. Montes-Usategui, I. Juvells, A. Carnicer and S. Vallmitjana, “Influence of the aberrations of optical Fourier-transform systems in a joint transform correlator”, International Symposium on Optical Science and Technology, San Diego, agosto 2001.
- J. Pérez-Tudela, I. Juvells, M. Montes-Usategui, A. Carnicer and S. Vallmitjana, “Variance of correlation peak heights in a JTC due to an aberrated optical Fourier-transform system”, ICO XIX, Florencia (Italia), agosto 2002.
- J. Pérez-Tudela, S. Vallmitjana, M. Montes-Usategui, I. Juvells and A. Carnicer, “Dependence of Correlation Peak Heights on the Aberrations of the Optical System”, III Jornada Internacional de la Xarxa Temàtica de Processament Òptic d’Ímatges, Terrassa, enero 2003.

- J. Pérez-Tudela, S. Vallmitjana, I. Juvells, M. Montes-Usategui y A. Carnicer, “Análisis de la influencia de las aberraciones del sistema difractor en un correlador de transformadas conjuntas”, VII Reunión Nacional de Óptica, Santander, septiembre 2003.
- J. Pérez-Tudela, I. Juvells y M. Montes-Usategui, “Filtros adaptados a las aberraciones de los sistemas ópticos de un correlador de Vander Lugt”, VIII Reunión Nacional de Óptica, Alicante, septiembre 2006. (aceptado)

Bibliografía

- [AA05] A. Alsamman and Mohammad S. Alam, ‘Comparative study of face recognition techniques that use joint transform correlation and principal component analysis’, *Appl. Opt.* **44**, 688–692 (2005).
- [Abb73] E. Abbe, ‘Beiträge zur Theorie des Mikroskops und der Mikroskopischen wahrnehmung’, *Archiv für Mikroskopische Anatomie* **9**, 413–468 (1873).
- [Abb73] F. Abbad. *Estudios de criterios de optimización para el cálculo automático de sistemas ópticos*. Tesis Doctoral, Universitat de Barcelona (1973).
- [AD87] A. Ashkin and J. M. Dziedzic, ‘Optical trapping and manipulation of viruses and bacteria’, *Science* **235**, 1517–1520 (1987).
- [AKJ90] A. A. S. Awwal, M. A. Karim and S. R. Jahan, ‘Improved correlation discrimination using an amplitude modulated phase-only filter’, *Appl. Opt.* **29**, 233–236 (1990).
- [Bie71] K. von Bieren, ‘Lens Design For Optical Fourier Transform Systems’, *Appl. Opt.* **10**, 2739–2742 (1971).
- [BVJFM92] S. Bosch, S. Vallmitjana, I. Juvells and J. R. de F. Moneo, ‘Scale-tunable diffractometer for spatial light modulators. a design procedure’, *Proc. SPIE* **1780**, 592–601 (1992).
- [BW99] M. Born and E. Wolf. *Principles of Optics, 7th. ed..* Pergamon Press, New York (1999).
- [Car93] A. Carnicer. *Reconocimiento óptico de formas en tiempo real mediante un correlador de transformadas conjuntas. Análisis de fenómenos no lineales*. Tesis Doctoral, Universitat de Barcelona (1993).

- [Cau82] H. J. Caulfield, 'Role of horner efficiency in the optimization of spatial filters for optical pattern recognition', *Appl. Opt.* **21**, 4391–4392 (1982).
- [CGC91] C. M. Crandall, M. K. Giles and N. Clark, 'Performance limitations of miniature optical correlators', *Proc. SPIE* **1564**, 98–109 (1991).
- [CH53] R. Courant and D. Hilbert. *Methods of Mathematical Physics, 1st. English ed., Vol I*. Interscience publishers, New York (1953).
- [CJV92] A. Carnicer, I. Juvells and S. Vallmitjana, 'Effects of thresholding level variation in fringe binarization of multiobject joint transform correlation', *Appl. Opt.* **31**, 1012–1014 (1992).
- [CKG02] J. E. Curtis, B. A. Koss and D. G. Grier, 'Dynamic holographic optical tweezers', *Opt. Commun.* **207**, 169–175 (2002).
- [CL78a] D. Casasent and T. Luu, 'Performance measurement techniques for simple Fourier transform lenses', *Appl. Opt.* **17**, 2973–2980 (1978).
- [CL78b] D. Casasent and T. Luu, 'Phase error model for simple Fourier transform lenses', *Appl. Opt.* **17**, 1701–1708 (1978).
- [CMDM98] D. T. Carrott, G. Mallaley, R. B. Dydyk and S. A. Mills, 'Third generation Miniaturized Ruggedized Optical Correlator (MROC) model', *Proc. SPIE* **3386**, 38–44 (1998).
- [Com95] S. A. Comastri, 'Joint transform correlator: expansion of the aberration function for a compact design', *Pure Appl. Opt.* **4**, 753–770 (1995).
- [CP76] D. Casasent and D. Psaltis, 'Position, rotation and scale invariant optical correlation', *Appl. Opt.* **15**, 1795–1799 (1976).
- [CSF97] S. A. Comastri, J. M. Simon and F. Fucci, 'Joint transform correlator: aberrations in the joint spectrum and their influence on the correlation peak', *Pure Appl. Opt.* **6**, 173–189 (1997).
- [Dit98] R. Dittion. *Modern geometrical optics*. John Wiley & Sons, Inc., New York (1998).

- [ETPG⁺04] J. J. Esteve-Taboada, N. Palmer, J-C. Giannessini, J. García and C. Ferreira, ‘Recognition of polychromatic three-dimensional objects’, *Appl. Opt.* **43**, 433–441 (2004).
- [FA97] E. Fällman and O. Axner, ‘Design for fully steerable dual-trap optical tweezers’, *Appl. Opt.* **36**, 2107–2113 (1997).
- [FBLC86] D. L. Flannery, A. M. Biernacki, J. S. Loomis and S. L. Cartwright, ‘Real-time coherent correlator using binary magneto-optic spatial light modulators at input and Fourier planes’, *Appl. Opt.* **25**, 466–466 (1986).
- [FH89] D. L. Flannery and J. L. Horner, ‘Fourier optical signal processors’, *Proc. IEEE* **77**, 1511–1527 (1989).
- [FH90] K. H. Fielding and J. L. Horner, ‘1-f binary joint transform correlator’, *Opt. Eng.* **29**, 1081–1087 (1990).
- [Fra68] M. Françon. *Optical interferometry*. Academic Press (1968).
- [Gab49] D. Gabor, ‘Microscopy by reconstructed wavefronts’, *Proc. Roy. Soc. A* **197**, 454–487 (1949).
- [GCFM90] R. Gebelein, S. Connely, L. Foo and A. Ma, ‘Aberration Control in Compact Optical Correlators’, *Proc. SPIE* **1347**, 634–642 (1990).
- [GK88] D. A. Gregory and J. C. Kirsch, ‘Compact Optical Correlators’, *Proc. SPIE* **960**, 66–85 (1988).
- [Goo68] J. W. Goodman. *Introduction to Fourier Optics*. McGraw-Hill (1968).
- [GVF03] J. García, J. J. Vallés and C. Ferreira, ‘Detection of three-dimensional objects under arbitrary rotations based on range images’, *Opt. Express* **11**, 3352–3358 (2003).
- [HA82a] Y.N. Hsu and H. H. Arsenault, ‘Aberrations of diffracted wave fields’, *Appl. Opt.* **21**, 4012–4016 (1982).
- [HA82b] Y.N. Hsu and H. H. Arsenault, ‘Aberrations of diffracted wave fields’, *Appl. Opt.* **21**, 4016–4019 (1982).
- [Har85] P. Hariharan. *Optical interferometry*. Academic Press Inc. (1985).

- [Hec00] E. Hecht. *Optica*. Addison Wesley Iberoamericana, Madrid (2000).
- [HG78] E. W. Hansen and J. W. Goodman, ‘Optical reconstruction from projections via circulars harmonic expansion’, *Opt. Commun.* **24**, 268–272 (1978).
- [HG84] J. L. Horner and P. D. Gianino, ‘Phase-only matched filtering’, *Appl. Opt.* **23**, 812–816 (1984).
- [Hop50] H. H. Hopkins. *Wave Theory of Aberrations*. Clarendon Press, Oxford (1950).
- [HS78] J. E. Harvey and R. V. Shack, ‘Aberrations of diffracted wave fields’, *Appl. Opt.* **17**, 3003–3009 (1978).
- [HY70] H. H. Hopkins and M. J. Yzuel, ‘The computation of diffraction patterns in the presence of aberrations’, *Optica Acta* **17**, 157–182 (1970).
- [IMNC03] C. Iemmi, A. Moreno, J. Nicolás and J. Campos, ‘Evaluation and correction of aberrations in an optical correlator by phase-shifting interferometry’, *Opt. Lett.* **28**, 1117–1119 (2003).
- [Jav89] B. Javidi, ‘Nonlinear joint power spectrum based optical correlation’, *Appl. Opt.* **28**, 2358–2367 (1989).
- [JH89] B. Javidi and J. L. Horner, ‘Single spatial light modulator joint transform correlator’, *Appl. Opt.* **28**, 1027–1032 (1989).
- [JL82] D. Joyeux and S. Lowenthal, ‘Optical Fourier transform: what is the optimal setup?’, *Appl. Opt.* **21**, 4368–4372 (1982).
- [JPDH06] B. Javidi, R. Ponce-Díaz and S. H. Hong, ‘Three dimensional recognition of occluded objects by using computational integral imaging’, *Opt. Lett.* **31**, 1106–1108 (2006).
- [Juv77] I. Juvells. *Corrección automática de sistemas ópticos mediante marchas exactas de rayos*. Tesis Doctoral, Universitat de Barcelona (1977).
- [JVB92] I. Juvells, S. Vallmitjana and S. Bosch, ‘Analysis of a scale tunable telephoto lens diffractometer and its use in optical correlation’, *J. Mod. Optics* **39**, 1107–1115 (1992).

- [JWT91] B. Javidi, J. Wang and Q. Tang, ‘Multiple-object binary joint transform correlation using multiple level threshold crossing’, *Appl. Opt.* **30**, 4234–4244 (1991).
- [KH90] B. V. K. V. Kumar and L. Hassebrook, ‘Performance measures for correlation filters’, *Appl. Opt.* **29**, 2997–3006 (1990).
- [KSX⁺04] B. V. K. V. Kumar, M. Savvides, C. Xie, K. Venkataramani, J. Thornton and A. Mahalanobis, ‘Biometric verification with correlation filters’, *Appl. Opt.* **43**, 391–402 (2004).
- [Lab00] I. Labastida. *Disseny i construcció d’un correlador òptic dual integrant les arquitectures de VanderLugt i de transformades conjuntes*. Tesis Doctoral, Universitat de Barcelona (2000).
- [Lan88] D. J. Lanteigne, ‘Optical Aberrations of Correlators’, *Proc. SPIE* **938**, 36–39 (1988).
- [LCMB⁺98] I. Labastida, A. Carnicer, E. Martín-Badosa, S. Vallmitjana and I. Juvells, ‘Control of a vander lugt correlator using a single 8-bit frame grabber’, *Opt. Commun.* **153**, 331–338 (1998).
- [LICY98] S. Ledesma, C. Iemmi, J. Campos and M. J. Yzuel, ‘Joint transform correlator architecture with a single LCTV operating in phase-mostly mode’, *Opt. Commun.* **151**, 101–109 (1998).
- [LL00] B. S. Lowans and M.F. Lewis, ‘Hybrid correlator employing a chirp-encoded binary phase-only filter’, *Opt. Lett.* **25**, 1195–1197 (2000).
- [LR02] Y. Li and J. Rosen, ‘Object recognition using three-dimensional optical quasi-correlation’, *J. Opt. Soc. Am. A* **19**, 1755–1762 (2002).
- [LT85] P. Lancaster and M. Tismenetsky. *The Theory of Matrices*. Academic Press (1985).
- [Lug64] A. B. Vander Lugt, ‘Signal Detection By Complex Spatial Filtering’, *IEEE Trans. Inform. Theory* **IT-10**, 139–145 (1964).
- [Lug66] A. B. Vander Lugt, ‘Operational notation for the analysis of optical data-processing systems’, *Appl. Opt.* **5**, 1055–1062 (1966).
- [Lug92] A. B. Vander Lugt. *Optical Signal Processing*. John Wiley and Sons, New York (1992).

- [LY96] G. Lu and F. T. S. Yu, 'Performance of a phase-transformed input joint transform correlator', *Appl. Opt.* **35**, 304–313 (1996).
- [LYG90] X. J. Lu, F. T. S. Yu and D. A. Gregory, 'Comparison of Vander Lugt and Joint Transform Correlators', *Appl. Phys. B* **51**, 153–164 (1990).
- [Mah98] V.N. Mahajan. *Optical Imaging and Aberrations. Ray geometrical optics*. SPIE Optical Engineering Press (1998).
- [Mah01] V.N. Mahajan. *Optical Imaging and Aberrations. Wave diffraction optics*. SPIE Optical Engineering Press (2001).
- [Mal92] D. Malacara. *Optical Shop Testing, 2nd ed.*. John Wiley and Sons (1992).
- [MB98] E. Martín-Badosa. *Correlador óptico para el reconocimiento de objetos basado en las propiedades de modulación de los dispositivos de cristal líquido*. Tesis Doctoral, Universitat de Barcelona (1998).
- [MCRY95] M. S. Millán, M. Corbalán, J. Romero and M. J. Yzuel, 'Optical pattern recognition based on color vision models', *Opt. Lett.* **20**, 1722–1724 (1995).
- [MM04] D. Malacara and Z. Malacara. *Handbook of Optical Design, 2nd ed.*. Marcel Dekker, Inc (2004).
- [MU95] M. Montes-Usategui. *Multichannel optical correlators: analysis, evaluation, and development of procedures for optical recognition*. Tesis Doctoral, Universitat de Barcelona (1995).
- [MUMJ97] M. Montes-Usategui, S. E. Monroe and R. D. Juday, 'Automated self-alignment procedure for optical correlators', *Opt. Eng.* **36**, 1782–1791 (1997).
- [MUPAMB06] M. Montes-Usategui, E. Pleguezuelos, J. Andilla and E. Martín-Badosa, 'Fast generation of holographic optical tweezers by random mask encoding of fourier components', *Opt. Express* **14**, 2101–2107 (2006).
- [MWW88] G. G. Mu, X. M. Wang and Z. Q. Wang, 'Amplitude compensated matched filtering', *Appl. Opt.* **27**, 3461–3463 (1988).

- [Nij43] B.R.A. Nijboer, ‘The diffraction theory of optical aberrations. Part I: General discussion of the geometrical aberrations’, *Physica* **10**, 679–692 (1943).
- [Nij47] B.R.A. Nijboer, ‘The diffraction theory of optical aberrations. Part II: Diffraction pattern in the presence of small aberrations’, *Physica* **13**, 605–620 (1947).
- [Oña66] C. Oñate. *Comportamiento de la luz extrameridiana en los sistemas ópticos*. Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias de Zaragoza (1966).
- [OL81] A. V. Oppenheim and J. S. Lim, ‘The importance of phase in signals’, *Proc. IEEE* **69**, 529–541 (1981).
- [Por06] A. B. Porter, ‘On the diffraction theory of microscope vision’, *Phil. Mag.* **11**, 154 (1906).
- [PTJMU⁺04] J. Pérez-Tudela, I. Juvells, M. Montes-Usategui, S. Vallmitjana and A. Carnicer, ‘Reduction of the effect of aberrations in a joint-transform correlator’, *Appl. Opt.* **43**, 841–849 (2004).
- [PTMUJ⁺01] J. Pérez-Tudela, M. Montes-Usategui, I. Juvells, A. Carnicer and S. Vallmitjana, ‘Influence of the aberrations of optical Fourier-transform systems in a joint transform correlator’, *Proc. SPIE* **4435**, 42–49 (2001).
- [PTMUJV00] J. Pérez-Tudela, M. Montes-Usategui, I. Juvells and S. Vallmitjana, ‘Analysis of the influence of aberrated convergent Fourier-transform setups in optical correlation’, *Opt. Commun.* **184**, 345–355 (2000).
- [PTVF92] W. H. Press, S. A. Teukolsky, W.T. Vetterling and B.P. Flannery. *Numerical recipes in C*. Cambridge University Press, Cambridge (1992).
- [PY97] P. Purwosumarto and F. T. S. Yu, ‘Robustness of joint transform correlator versus Vander Lugt correlator’, *Opt. Eng.* **36**, 2775–2780 (1997).
- [Rau66] J. E. Rau, ‘Detection of differences in real distributions’, *J. Opt. Soc. Am.* **56**, 1490–1494 (1966).
- [Ray96] Lord Rayleigh, ‘On the theory of optical images, with special references to the microscope’, *Phil. Mag. (5)* **46**, 167 (1896).

- [Ray64] J. L. Rayces, ‘Exact relation between wave aberration and ray aberration’, *Optica Acta* **11**, 85–88 (1964).
- [RBR⁺92] H. Rajbenbach, S. Bann, P. Réfrégier, P. Joffre, J-P. Huignard, H-S. Buchkremer, A. S. Jensen, E. Rasmussen, K-H. Brenner and G. Lohman, ‘Compact photorefractive correlator for robotic applications’, *Appl. Opt.* **31**, 5666–5674 (1992).
- [Réf91] Ph. Réfrégier, ‘Optimal trade-off filters for noise robustness, sharpness of the correlation peak, and Horner efficiency’, *Opt. Lett.* **16**, 829–831 (1991).
- [RHWT99] M. Reicherter, T. Haist, E. Wagemann and H. Tiziani, ‘Optical particle trapping with computer-generated holograms written on a liquid-crystal display’, *Opt. Lett.* **24**, 608–610 (1999).
- [Ros98] J. Rosen, ‘Three-dimensional electro-optical correlation’, *J. Opt. Soc. Am. A* **15**, 430–438 (1998).
- [RS02] A. Rohrbach and E. H. K. Stelzer, ‘Trapping forces, force constants, and potential depths for dielectric spheres in the presence of spherical aberrations’, *Appl. Opt.* **41**, 2494–2507 (2002).
- [RWGG06] Y. Roichman, A. Waldron, E. Gardel and D. G. Grier, ‘Optical traps with geometric aberrations’, *Appl. Opt.* **45**, 3425–3429 (2006).
- [SC94] J. M. Simon and S. A. Comastri, ‘Seidel aberrations in optical processors due to diffraction of a quasi-spherical wavefront’, *J. Mod. Opt.* **41**, 137–150 (1994).
- [Ser81] A. Serra. *Corrección exacta de sistemas ópticos para objeto extenso*. Tesis Doctoral, Universitat de Barcelona (1981).
- [TL64] C. A. Taylor and H. Lipson. *Optical Transforms*. Bell (1964).
- [Tol55] S. Tolansky. *An introduction to interferometry*. Longmans, Green and co. (1955).
- [VBJR86] S. Vallmitjana, S. Bosch, I. Juvells and D. Ros, ‘New multiple matched filter: design and experimental realization’, *Appl. Opt.* **25**, 4473–4475 (1986).

- [VCMBJ95] S. Vallmitjana, A. Carnicer, E. Martín-Badosa and I. Juvells, ‘Nonlinear filtering in object and Fourier space in an joint transform optical correlator: comparison and experimental realization’, *Appl. Opt.* **34**, 3942–3949 (1995).
- [VWSS06] K. C. Vermeulen, G. J. L. Wuite, G. J. M. Stienen and C. F. Schmidt, ‘Optical trap stiffness in the presence and absence of spherical aberrations’, *Appl. Opt.* **45**, 1812–1819 (2006).
- [WCC⁺06] K. D. Wulff, D. G. Cole, R. L. Clark, R. DiLeonardo, J. Leach, J. Cooper, G. Gibson and M. J. Padgett, ‘Aberration correction in holographic optical tweezers’, *Opt. Express* **14**, 4169–4174 (2006).
- [Wel91] W. T. Welford. *Aberrations of optical systems*. Adam Hilger Ltd, Boston (1991).
- [WG66] C. S. Weaver and J. W. Goodman, ‘A Technique for Optically Convolution Two Functions’, *Appl. Opt.* **5**, 1248–1249 (1966).
- [WJ94] J. Wang and B. Javidi, ‘Multiobject detection using the binary joint transform correlator with different type of thresholding methods’, *Opt. Eng.* **33**, 1793–1805 (1994).
- [YCTG89] F. T. S. Yu, F. Cheng, T. Nagata and D. A. Gregory, ‘Effects of fringe binarization of multiobject joint transform correlation’, *Appl. Opt.* **28**, 2988–2990 (1989).
- [YG96] F. T. S. Yu and D. A. Gregory, ‘Optical Pattern Recognition: Architectures and Techniques’, *Proc. IEEE* **84**, 733–752 (1996).
- [YJLG87] F. T. S. Yu, S. Jutamulia, T. W. Lin and D. A. Gregory, ‘Adaptive real-time pattern recognition using a liquid crystal tv based transform correlator’, *Appl. Opt.* **26**, 1370–1372 (1987).
- [YL84] F. T. S. Yu and X. J. Lu, ‘A real-time programmable joint transform correlator’, *Opt. Commun.* **52**, 10–16 (1984).
- [YSCG90] F. T. S. Yu, Q. W. Song, Y. S. Cheng and D. A. Gregory, ‘Comparison of detection efficiencies for Vander Lugt and joint transform correlators’, *Appl. Opt.* **29**, 225–232 (1990).

- [zem96] *ZEMAX Optical Design Program User's Guide*. Focus Software Inc., Tucson, AZ (1996).
- [Zer34] F. Zernike, 'Beugungstheorie des Schneidenverfahrens und seiner verbesserten Form, der Phasenkontrastmethod', *Physica* **1**, 689 (1934).