

# Correcció de les aberracions d'un dispositiu de pinces òptiques hologràfiques mitjançant un sensor Shack-Hartmann

Carol López i Estela Martín

Departament de Física Aplicada i Òptica, Facultat de Física, Universitat de Barcelona

Martí i Franquès 1, 08028 Barcelona

carol\_lopez@ub.edu

## Resum

En aquest treball es presenten els principis físics de la captura de partícules micromètriques mitjançant les pinces òptiques hologràfiques, així com el sistema experimental que ho fa possible. La representació d'hologrames en un modulador espacial de llum permet generar patrons de trampes de manera dinàmica. Malauradament, aquest dispositiu introdueix aberracions òptiques que deterioren la qualitat de la trampa i poden impossibilitar la captura estable de partícules. S'han mesurat aquestes aberracions amb un sensor d'ones Shack-Hartmann, i s'ha calculat l'holograma que, escrit en el mateix modulador, permeti compensar-les. Això ha permès capturar i desplaçar partícules micromètriques de manera efectiva.

## 1 Introducció

Les pinces òptiques són feixos làser altament focalitzats capaços d'atrapar i desplaçar partícules de mides compreses entre els nanòmetres i els micròmetres mitjançant la transferència de moment de llum. Quan la mida de la mostra considerada és inferior a la longitud d'ona utilitzada, podem descriure el fenomen amb òptica de raigs, considerant la mostra com un objecte refractor i reflector de la llum que produeix un canvi de moment dels fotons incidents (figura 1). Per la tercera llei de Newton, aquest

de dispersió en la direcció de propagació de la llum, que tendeix a empènyer la partícula; en canvi, de la llum refractada en resulta una força de gradient dirigida cap al punt de més intensitat de llum (el focus). La captura de la mostra serà possible sempre que la contribució de la força de gradient sigui superior a la de la força de dispersió. En aquest cas, la partícula queda atrapada de manera estable en el focus de llum, que constitueix l'anomenada *trampa òptica*. A partir d'una anàlisi més detallada, es pot comprovar que els raigs que incideixen a la part més externa de la lent són els que més contribueixen a la força de gradient; per tant, caldrà utilitzar un objectiu d'alta obertura numèrica perquè es compleixi la condició de captura. Per això, en els sistemes de pinces òptiques el feix es focalitza mitjançant objectius d'immersió, típicament utilitzats en microscòpia.

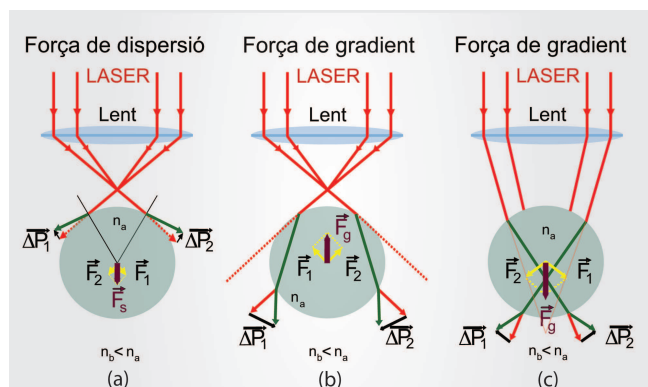


Figura 1: Diagrama de forces en el règim d'òptica de raigs ( $\Delta P_i$ : canvi de moment dels fotons,  $F_i$ : força aplicada sobre la partícula). (a) Força de dispersió i (b), (c) força de gradient

canvi de moment es tradueix en una força aplicada sobre la partícula: així, la reflexió de la llum produeix una força

### 1.1 Pinces òptiques hologràfiques

Un feix làser focalitzat produeix una trampa òptica única, que es pot desplaçar movent algun dels elements òptics del sistema. Això permet, de manera senzilla, moure (manipular) la partícula atrapada a conveniència. Tanmateix, l'obtenció de N trampes simultàniament requereix focalitzar N feixos làser, la qual cosa complica el muntatge experimental de manera considerable, especialment si cadascuna de les trampes es vol controlar independentment.

Per assolir aquest objectiu, les pinces òptiques hologràfiques utilitzen hologrames generats per ordinador, que s'introdueixen en el camí òptic en un suport físic anomenat *modulador espacial de llum* (SLM, *spatial light modulator*). Aquest dispositiu permet modificar l'amplitud i

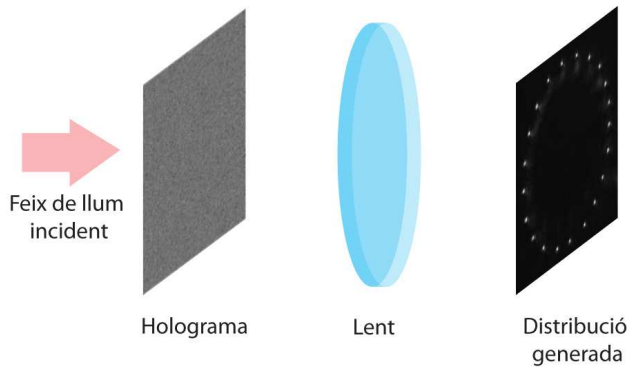


Figura 2: Formació de patrons de llum a partir d'hologrames digitals

la fase del feix incident, i per tant la generació de distribucions arbitràries de llum quan el feix es propaga (figura 2).

El càlcul d'hologrames, basat en la teoria escalar de la difracció, consisteix en la determinació dels valors complexos del camp elèctric escalar en qualsevol punt a partir del seu valor en un altre pla. Per això cal conèixer els detalls del sistema òptic a tractar, ja que aquests determinen la relació entre el pla de l'holograma i el pla on es vol generar el patró de trampes. En el nostre cas, el modulador espacial de llum se situa abans de l'objectiu de microscopi i les trampes es generen en el pla focal d'aquest, per la qual cosa la relació és la d'una transformada de Fourier. Per tant, l'holograma introduït serà la transformada inversa de Fourier del patró de trampes desitjat.

### 1.2 Moduladors espacials de llum

Els moduladors espacials de llum són uns dispositius que fan possible la variació espacial del front d'ona que transmeten o reflecteixen, produint alteracions en la fase, en l'amplitud o en la polarització de la llum. En el nostre cas, utilitzarem un modulador de cristall líquid que opera per reflexió (model Holoeye LCR-2500). Els cristalls líquids són un tipus especial d'agregació de la matèria que té propietats de les fases líquida i sòlida. Així, poden presentar l'ordenació típica dels sòlids i, a la vegada, certa fluïdesa. Aquesta natura fa que presentin un forta anisotropia en les seves propietats, tant mecàniques com elèctriques, magnètiques i òptiques.

Les molècules dels cristalls líquids nemàtics, típicament allargades, estan distribuïdes aleatòriament però orientades amb els seus eixos directors paral·lels entre si. Aquestes se situen dins d'una cel·la amb elèctrodes en les seves cares externes, que permeten aplicar un voltatge a cadascun dels píxels en què està dividida la pantalla. Així, cada nivell de gris d'una imatge a l'ordinador equival, enviant el senyal elèctric a través de la seva targeta gràfica, a un voltatge aplicat diferent. Aquest voltatge produeix un canvi en l'orientació de les

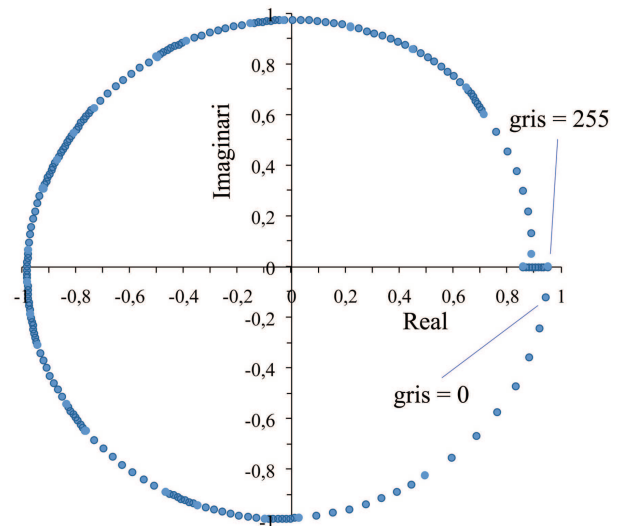


Figura 3: Corba operativa de fase de la pantalla de cristall líquid Holoeye LCR-2500

molècules de cristall líquid i, per tant, modifica com queda afectada la llum que es reflecteix a la pantalla. Aquest fenomen s'anomena modulació òptica, i permet controlar les característiques de la llum reflectida en cada punt, depenent de la imatge en nivells de gris enviada des de l'ordinador. A més, el fet de poder refrescar la pantalla a freqüència de vídeo permet realitzar la modulació de forma dinàmica.

Per tal de poder utilitzar el modulador com a suport per a l'holograma, cal fer-ne una caracterització prèvia, és a dir, conèixer la resposta en modulació del dispositiu en la configuració concreta en la qual treballarà. En altres paraules, per controlar el front d'ona que es reflecteix a la pantalla, cal determinar els valors de l'amplitud i de la fase que corresponen a cada nivell de gris (o voltatge) aplicat al dispositiu. La modulació en amplitud s'obté a partir de la mesura del quocient de la intensitat de la llum abans i després que la llum es reflecteixi a la pantalla, enviant imatges uniformes de cada nivell de gris. Per a la caracterització de la modulació en fase, la pantalla és incorporada en un dels braços d'un interferòmetre. Les imatges enviades a la pantalla tenen la primera meitat en un nivell de gris de referència i l'altra meitat en el nivell del qual es vol determinar la fase. La fase relativa de cada nivell de gris respecte al de referència es determina a partir del desplaçament de les franges d'interferència obtingudes, en comparació amb el seu període.

El resultat de la caracterització pel nostre modulador es mostra en la figura 3, que relaciona el nivell de gris enviat a la pantalla (de 0 a 255) amb el valor complex amb el qual modula la llum que s'hi reflecteix. Per cada punt de la corba, el mòdul del vector des de l'origen de coordenades fins al punt considerat ens dona la modulació en amplitud, mentre que l'angle que forma amb l'eix x

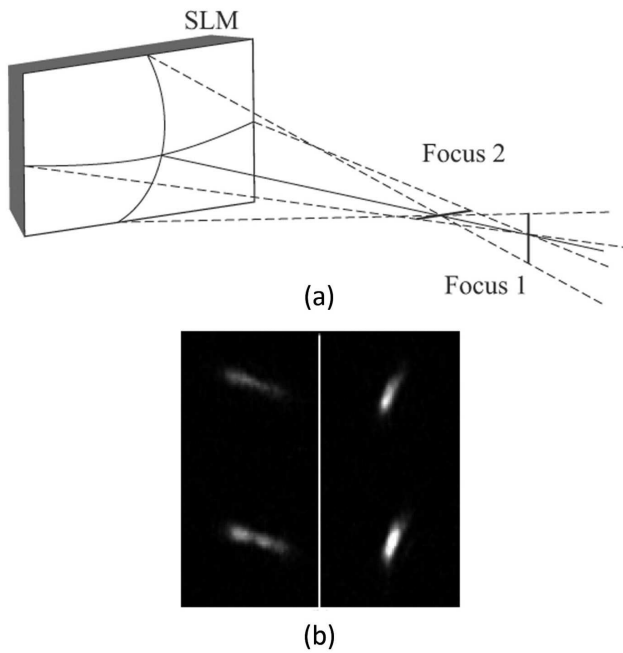


Figura 4: (a) Llum reflectida pel modulador que convergeix en dues focals diferents, (b) Intensitat de llum de dues trampes a dues focals diferents. (E. Martín-Badosa et al., 2007)

positiu correspon a la fase relativa. La corba operativa de la figura 3 se sol anomenar de quasifase, ja que l'amplitud es manté pràcticament constant per a tots els nivells de gris, mentre que la fase varia entre 0 i gairebé 360 graus. Els hologrames calculats a partir del patró de trampes desitjat mitjançant una transformada de Fourier inversa seran, en general, complexos. Atès que els moduladors estan limitats a un conjunt de 256 valors complexos de la reflectància, caldrà limitar amb algorismes adients els valors de l'holograma als accessibles pel modulador.

### 1.3 Aberracions i sensor de front d'ona Shack-Hartmann

Tot i que el procés de fabricació de les pantalles és molt acurat, la gran majoria no queden perfectament planes, sinó que presenten lleus inclinacions o curvatures. La llum que s'hi reflecteix estarà afectada per aquest defecte, en concret una ona plana incident deixarà de ser-ho. Això introduirà aberracions òptiques que afectaran la qualitat de la imatge final, en el nostre cas de les trampes òptiques. En particular, en focalitzar el feix que es reflecteix al nostre modulador, es poden observar dues línies, perpendiculars entre elles, a diferents distàncies, en comptes d'un focus puntual (figura 4). Aquest comportament és similar als efectes de l'aberració d'astigmatisme i impedeix que el sistema de pinces òptiques pugui fer captures de manera estable.

Per solucionar aquest problema, es va intentar en pri-

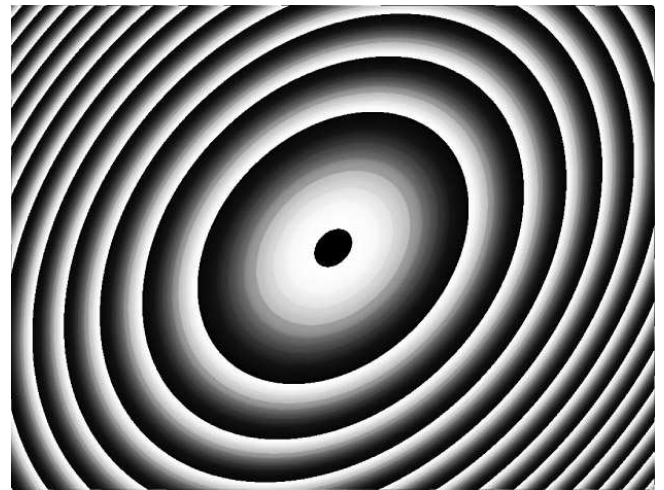


Figura 5: Fase el·líptica modelitzada per a la correcció de les aberracions introduïdes pel modulador (E. Martín-Badosa et al., 2007)

mera instància un mètode aproximat, consistent a trobar per prova i error una funció de fase que, afegida a l'holograma que defineix el patró de trampes, contrarestés els efectes de l'aberració. La figura 5 mostra la correcció manual obtinguda amb aquest mètode, que va donar una millora notable en la qualitat de les trampes, tot i que a base d'il·luminar només la part central del modulador (no es va aconseguir corregir les aberracions de la pantalla completa). Per obtenir resultats més acurats, vam considerar la utilització del sensor de fronts d'ona Shack-Hartmann per a la mesura de les aberracions del sistema òptic de pinces hologràfiques. Això permet fer-ne una correcció de manera més exacta i repetitiva.

El sensor Shack-Hartmann és un sensor de mesura directa de fronts d'ona. Està constituït per dos elements bàsics: una matriu de microlents de la mateixa focal i una

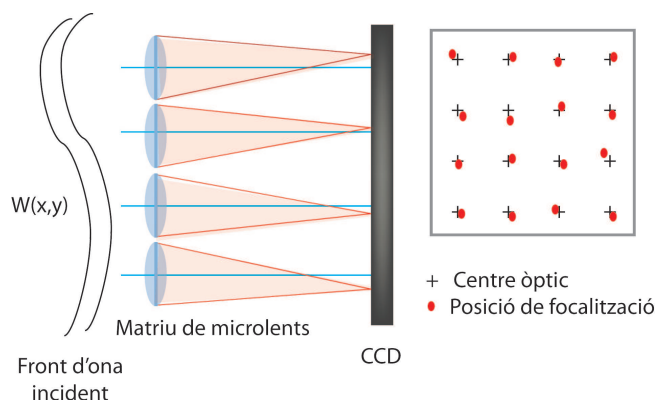


Figura 6: Esquema del sensor Shack-Hartmann. Si un front d'ona aberrat incideix sobre la matriu de microlents, la imatge formada estarà desplaçada respecte el centre òptic de cada microlent

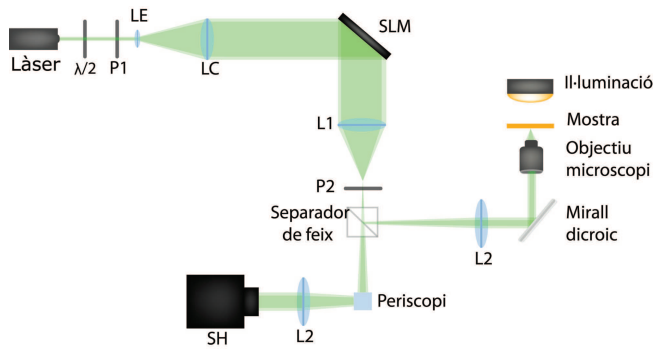


Figura 7: Dispositiu experimental utilitzat per la correcció de les aberracions introduïdes pel modulador

càmera CCD com a sistema detector (figura 6). Quan incideix un front d'ona pla sobre el sensor, aquest és dividit, en passar a través de la matriu, en petits segments que focalitzaran en un punt, al pla on es troba la CCD. Si el front d'ona incident és aberrat, els punts de focalització quedaran desplaçats respecte del centre òptic, i de manera que s'obté una matriu de punts distorsionada respecte de l'anterior. La mesura del desplaçament de cada punt proporciona informació dels pendents locals del front d'ona i, per tant, permet caracteritzar-lo, per exemple en termes de les aberracions.

## 2 Dispositiu experimental

La figura 7 mostra el dispositiu experimental que combina les pinces òptiques hologràfiques amb l'òptica adaptativa per a la correcció d'aberracions. Un làser de Nd:YVO4 ( $\lambda=532$  nm) és expandit mitjançant una lent de focal 7,5 mm (LE), i col·limat amb una lent de focal 125 mm (LC). El feix resultant incideix sobre la pantalla Holoeye LCR-2500, que es troba orientada a  $45^\circ$  respecte de l'eix òptic i està situada entre dos polaritzadors (P1 i P2) amb l'orientació adient per tenir modulació en fase (corba operativa de la figura 3).

La mesura de l'aberració i posterior correcció i la implementació del sistema de pinces òptiques hologràfiques seran possibles amb la incorporació d'un separador de feix. D'aquesta manera, podrem comprovar els efectes de l'aplicació de la correcció introduïda observant el punt làser focalitzat al microscopi. El microscopi utilitzat és el model Motic AE-31, equipat amb un objectiu d'immersió en oli Motic Plan-Achromatic 100x d'obertura numèrica 1,25.

Les lents L1 i L2 formen un telescopi, de manera que la llum a la sortida continua sent paral·lela però amb un diàmetre diferent, depenent dels augments. Aquest sistema òptic és necessari per reduir la grandària del modulador i adaptar-la al diàmetre de la pupil·la de l'objectiu del microscopi, d'una banda, i a la grandària del sensor de Shack-Hartmann, d'altra. Hem utilitzat lents de focals  $f_{L1}=400$  mm i  $f_{L2}=100$  mm, que donen un factor

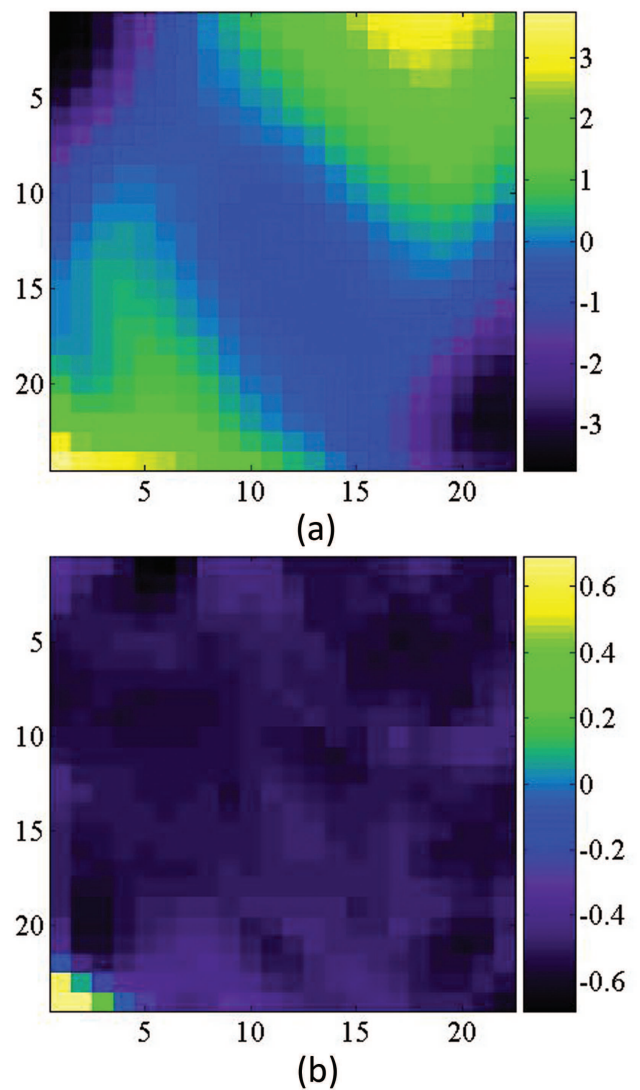


Figura 8: Front d'ona mesurat al pla de l'SLM, (a) abans i (b) després d'aplicar nou iteracions

de reducció  $f_{L2}/f_{L1} = 1/4$ , adient per omplir tota l'obertura numèrica de l'objectiu del microscopi i a la vegada encabir la imatge del modulador sobre el sensor de Shack-Hartmann. Aquesta mesura del front d'ona reflectit per la pantalla, idealment un front d'ona pla.

Abans de mesurar, cal alinear el sensor i la resta del sistema òptic amb molta cura, minimitzant la inclinació i la col·limació (paral·lelisme) del front d'ona incident sobre el sensor, perquè no influeixen en la mesura de les aberracions del modulador. La mesura dona una matriu de  $24 \times 22$  elements (vegeu figura 8a), que descriu el front d'ona reflectit pel modulador; en el cas d'un front d'ona pla, la matriu hauria de ser constant. El primer pas per fer possible la correcció consisteix en relacionar els valors obtinguts, expressats en diferències de camí òptic (unitats de longitud), amb valors de fase: expressem cada element

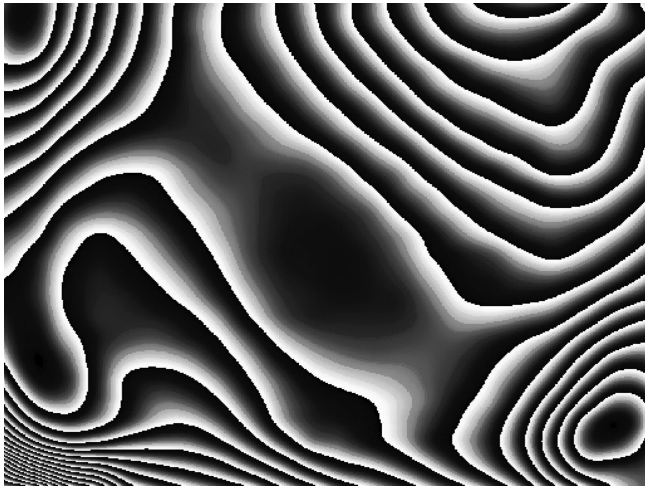


Figura 9: Holograma introduït a la pantalla per a la correcció de les seves aberracions

de la matriu en unitats de longitud d'ona i apliquem que a una longitud d'ona li correspon un desfasament de  $2\pi$ . Per corregir les aberracions, haurem d'introduir al modulador una distribució de fase que la compensi, per tant hi aplicarem un canvi de signe, i així obtindrem el front d'ona conjugat. Finalment, la matriu és interpolada a  $1024 \times 768$  píxels, que correspon a les dimensions de la pantalla, i els valors de fase són traduïts a nivells de gris mitjançant la corba operativa de la figura 3. En els resultats presentats en aquest treball s'han fet nou correccions successives, per avaluar la màxima correcció que es pot aconseguir amb el mètode descrit.

### 3 Resultats i discussió

L'anàlisi dels fronts d'ona s'ha dut a terme a partir de la mesura del valor RMS (*root mean square*). L'RMS d'un senyal  $\Delta_i$  amb  $N$  punts es defineix com:

$$RMS = \sqrt{\frac{(\Delta_i^2 - \bar{\Delta}^2)}{N}} ; \quad \bar{\Delta} = \sum_i \frac{\Delta_i}{N} \quad (1)$$

on  $\bar{\Delta}$  és el valor mitjà del senyal. Per tant, la mesura de l'RMS ens donarà idea de la uniformitat dels fronts d'ona; en concret, un front d'ona pla, amb un valor de la fase constant, tindrà un RMS nul, mentre que l'RMS serà més gran com més aberrat estigui el front d'ona (més lluny del front d'ona pla ideal).

A més a més, també s'ha considerat la descomposició dels fronts d'ona mesurats en termes dels polinomis de Zernike, un conjunt de funcions ortogonals definides sobre una pupil·la de radi unitat. Els polinomis de Zernike resulten de gran utilitat per a la representació matemàtica dels fronts d'ona en sistemes òptics, atès que la gran part de sistemes òptics presenten pupil·les circulars. A més, cadascun dels coeficients que acompanya cada polinomi representa una aberració òptica.

La figura 8a mostra el front d'ona reflectit pel modulador (quan s'hi envia una imatge uniforme), amb un valor RMS d' $1,4 \lambda$ . Aplicant el procés de correcció descrit en la secció anterior, després de 9 iteracions, s'obté l'holograma necessari per compensar les aberracions (figura 9). El front d'ona final, quan sobre el modulador es representa aquest holograma, té unes desviacions RMS molt menors de  $0,1 \lambda$  (figura 8b). En el dispositiu experimental de pinces òptiques hologràfiques, amb la finalitat d'evitar efectes de difracció de l'àrea rectangular de la pantalla a través de l'objectiu de microscopi, s'acostuma a seleccionar una pupil·la circular inscrita en l'àrea de la pantalla. Si en l'anàlisi del front d'ones només considerem aquesta regió i no tenim en compte els efectes de les vores del modulador, que en la pràctica no passen per l'objectiu, s'aconsegueix una reducció del 92 % en la desviació RMS del front d'ona, i passa d'un valor inicial de  $0,8 \lambda$  a un valor final de  $\lambda/16$ .

Podem fer una anàlisi més detallada de les aberracions presents en el sistema utilitzant els polinomis de Zernike, a partir de la descomposició dels fronts d'ona mesurats sobre la pupil·la circular anterior (de 700 píxels de diàmetre aproximadament). La taula 1 mostra els coeficients de Zernike més significatius. L'aberració predominant al front d'ona inicial és l'astigmatisme (tercer i cinquè ordre) seguida de l'aberració esfèrica de tercer ordre. Per una altra banda, després d'aplicar la correcció, tots els coeficients de Zernike presenten valors inferiors a  $\lambda/20$ .

La figura 10 mostra imatges de la trampa, en diferents plans perpendiculars a l'eix òptic, abans i després d'aplicar la correcció. Inicialment, la trampa exhibeix una manca d'asimetria, tret característic de l'astigmatisme. Un cop finalitzat el procés de correcció, la trampa presenta simetria de revolució. Amb les trampes corregides,

Aberracions	Abans de corregir ( $\lambda$ )	Després de corregir( $\lambda$ )
Astigmatisme a $0^\circ$	0,40	-0,04
Astigmatisme a $45^\circ$	1,66	-0,04
Coma a $0^\circ$	0,04	0,00
Coma a $45^\circ$	0,00	-0,02
3r ordre esfèrica	-0,42	0,00
Trefoil a $0^\circ$	-0,11	0,05
Trefoil a $45^\circ$	0,14	-0,05
5è ordre astigmatisme a $0^\circ$	0,48	0,00
5è ordre astigmatisme a $45^\circ$	0,19	0,00

Taula 1: Coeficients dels polinomis de Zernike abans i després de l'aplicació de les correccions en unitats de  $\lambda=532$  nm

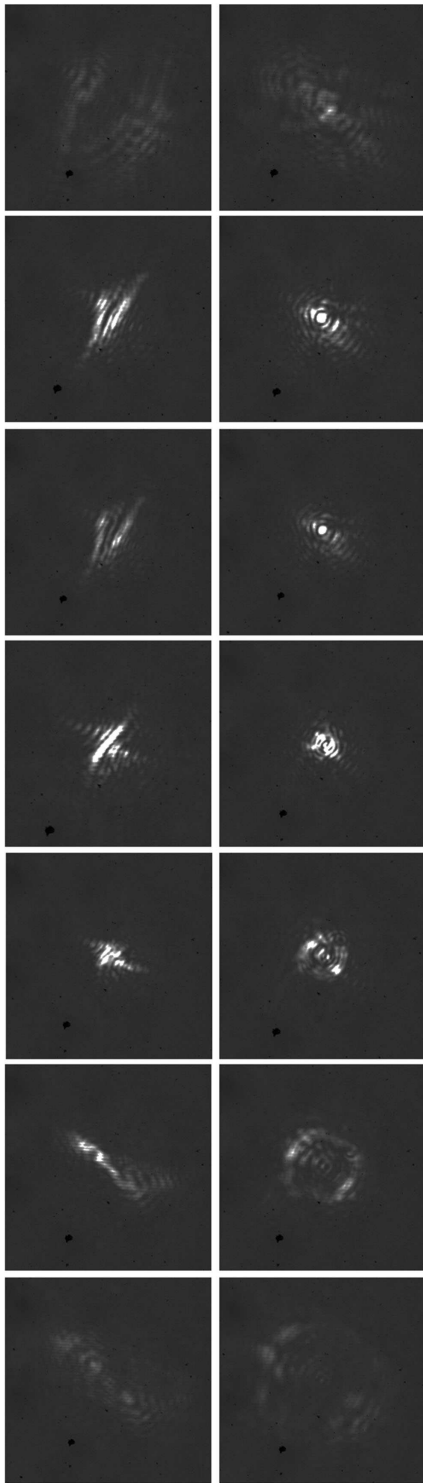


Figura 10: *Imatges d'una trampa per a diferents plans de l'eix òptic, abans de corregir (esquerra) i després de corregir (dreta). La distància entre els plans inferior i superior és aproximadament d'un micròmetre*

s'han pogut capturar i desplaçar amb èxit microesferes de poliestirè de  $5 \mu\text{m}$  de diàmetre (figura 11).

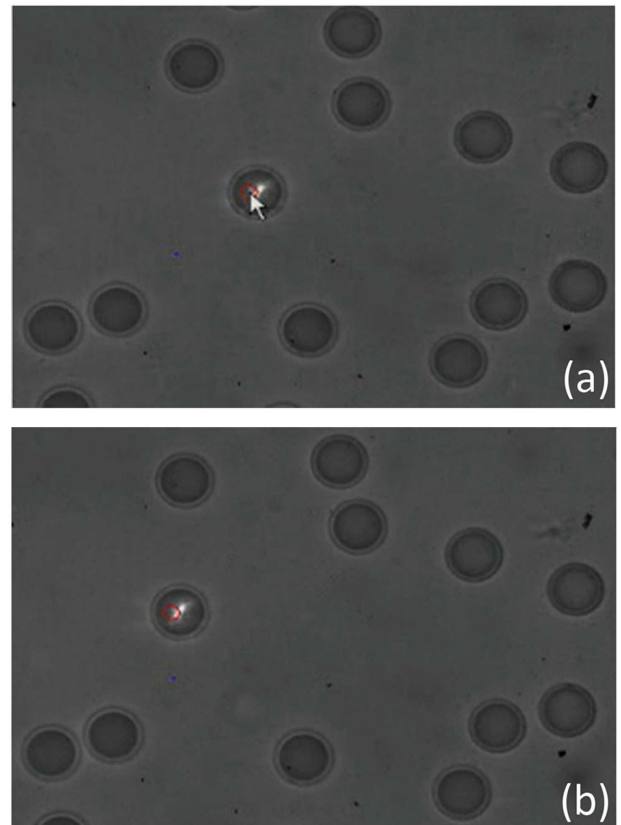


Figura 11: *Seqüència de vídeo de la captura d'una partícula de poliestirè de  $5 \mu\text{m}$  de diàmetre (a) La partícula és capturada i (b) desplaçada per la trampa*

## 4 Conclusions

En aquest treball s'ha presentat la correcció de les aberracions d'un dispositiu experimental de pinces òptiques hologràfiques mitjançant un sensor de fronts d'ona Shack-Hartmann. El procediment es basa en la mesura del front d'ona al pla on es troba situat el modulador espacial de llum i en la posterior introducció del conjugat d'aquest en la pantalla. Després d'aplicar nou iteracions, amb aquest mètode hem aconseguit un front d'ona amb un RMS de  $\lambda/10$ , que es redueix a  $\lambda/16$  si no es considera la contribució de les vores del modulador. Aquesta millora permet generar trampes òptiques dinàmiques per capturar i desplaçar partícules de poliestirè de  $5 \mu\text{m}$  de diàmetre.

## Agraïments

Aquest treball ha estat finançat pel Ministerio de Educación y Ciencia, amb els projectes FIS2007-65880 i NAN2004-09348-C04-03.

## Bibliografia

ANDILLA, J.; MARTÍN-BADOSA, E. ; VALLMITJANA, S. "Prediction of phase-mostly modulation for holograp-

hic optical tweezers ". *Optics Communications*. Vol. 281 (2008), p. 3786–3791.

ASHKIN, A. et al. "Observation of a single-beam gradient force optical trap for dielectric particles". *Optics Letters*. Vol. 11 (1986), p. 288–290.

GOODMAN, J.W., *Introduction to Fourier Optics*, Singapore: McGraw-Hill, 1996).

MARTÍN-BADOSA, E. et al. "Complex modulation characterization of liquid crystals devices by interferometric data correlation". *Measurement Science & Technology*. Vol. 8 (1997), 764–772.

MARTÍN-BADOSA, E. et al. "Design strategies for optimizing holographic optical tweezers set-ups". *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*. Vol. 9 (2007), p. S267–S277.

REICHESTER, M. et al. "Optical particle trapping with computer generated holograms written on a liquid-crystal-display". *Optics Letters*. Vol. 24 (1999), p. 608–610.