

# 具液晶移相干涉儀之適應性光學系統

## Adaptive Optics Systems with Liquid-Crystal Phase-Shift Interferometers

鍾政英、卓粳佶、張智強、閻偉中、陳顯禎

Cheng-Ying Chung, Keng-Chi Cho, Chih-chiang Chang, Wei-Chung Yen, Shean-Jen Chen

本文研發出具有液晶移相干涉術之 Mach-Zehnder 徑向剪切式干涉儀來動態偵測光波前的適應性光學系統，可即時地修正因外來擾動所造成之像差。LCD 經由一精準相位校正方式與瞬間向列驅動方法，可精確快速地於 5 ms 內完成三步 PSI 動作，重建波前相位變化情形。此干涉式波前偵測器之相位資訊即時回饋至嵌入式數位訊號處理器，經由比例積分微分控制法計算出控制訊號，再經由驅動可調變聚焦鏡來動態修正波前。此適應性光學系統目前於五個輸出入通道下，控制迴圈速度可達 30 Hz 以上。在數 Hz 熱干擾下，雜訊可被抑制 20 dB 以上，穩態相位標準差低於  $0.02 \pi$  rms。輸出光的 Strehl ratio 可從 0.5 大幅升至 0.9，明顯增加輸出光之聚焦效率，成功地降低因外來干擾所造成之像差問題。

An adaptive optics system has been developed to real-time correct optical aberrations due to external disturbances. In wavefront sensing, a novel wavefront sensing system based on liquid-crystal phase-shift interferometry is proposed to precisely and fast detect optical wavefront variation with the helps of precise phase correction and transient nematic driving methods. A home-made digital signal processing controller using the feedback wavefront information from the phase-shift interferometry wavefront sensor drives deformable mirrors to reduce optical aberrations successfully. The developed multichannel adaptive optics system has the dynamic bandwidth of control loop up to 30 Hz. The experimental results to compensate several hertz thermal turbulence demonstrate that the steady state error of the wavefront phase was under  $0.02 \pi$  rms and the signal-to-noise ratio improvement is better than 20 dB. Also, the Strehl ratio of the focusing spot can be increased from 0.5 to 0.9.

### 一、前言

適應性光學 (adaptive optics) 利用可調變的主動式光學元件，配合波前感測器，經由控制器即時地去補償修正因外來擾動造成波前改變的控制系統，

其在天文科學及國防上已被大量研究與應用<sup>(1-3)</sup>。隨著製程的進步與改變，將系統作得更精確與簡易，使其在其他領域皆能有效應用，像雷射加工 (laser machining)、自由空間雷射通訊及眼科手術等<sup>(4-6)</sup>。因此針對此目標研發一套適應性光學系統，以

期能解決雷射因外來干擾影響到聚焦的效率問題。

本研究結合了薄膜式可調變聚焦鏡 (deformable mirror, DM) 之波前修正器、徑向剪切式 (radial shearing) Mach-Zehnder 液晶 (liquid crystal device, LCD) 移相干涉術 (phase-shift interferometry, PSI) 之波前感測器、數位訊號處理器 (digital signal processor, DSP) 即時回饋控制系統等相關技術<sup>(7-9)</sup>，發展出一套嶄新具有 LCD、PSI 的適應性光學系統。波前感測部分有直接量測相位的空間梯度 (斜率) 大小，將得到之波前導數經相位重建方式運算得到波前相位的方法，如 Shack-Hartmann 波前感測器，但其價格昂貴且須經常校正，所以剪切式干涉術作為波前感測系統被採用<sup>(10,11)</sup>。此干涉術以 Mach-Zehnder 干涉儀為主架構，將入射的擾動波前一分為二，分別對其作擴束與縮束，當擴束光遠大於縮束光時，干涉圖形可即時的反應入射波前相位，此方式在光路設計上可避免 Sagnac 架構波前

耦合問題<sup>(12,13)</sup>，經 LCD 作三步 PSI 得到三張干涉圖形，即時重建波前相位變化情形。在波前的修正與補償控制機制上，採用 DSP 即時回饋控制系統，調整最佳之比例積分微分 (proportional-integral-derivative, PID) 參數運算出控制訊號，輸出至可調變聚焦鏡將擾動迅速消除。目前適應性光學系統在修正因外來低頻擾動所造成的像差方面已能發揮不錯的效能，有效地將聚焦光點的 Strehl ratio 從 0.5 提升至 0.9 以上。

## 二、適應性光學系統與控制機制

### 1. 適應性光學系統

本適應性光學系統架構如圖 1 所示，使用 He-Ne 雷射為光源，經過物鏡聚焦和 10  $\mu\text{m}$  的小孔後，再經由傅氏透鏡 (Fourier transform lens) 做平行光，可降低發散張角及提供足夠探測陣列的口徑

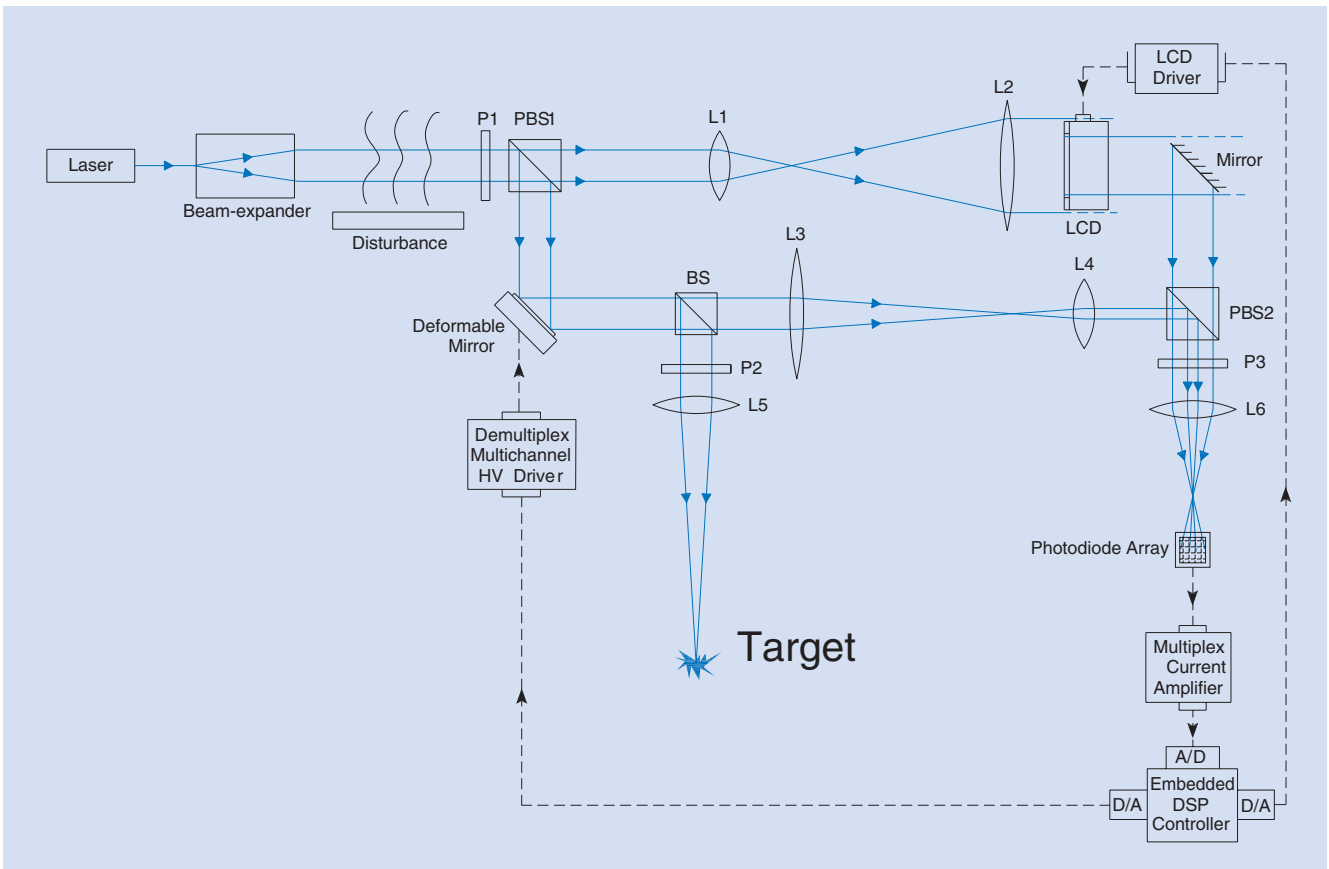


圖 1. 回饋控制架構下之適應性光學系統。

(約 50 mm)。經過以功率電阻產生熱擾動使波前扭曲，擾動後的波前進入 PSI 系統。以偏振分光鏡 (PBS1) 將光分為反射的 TE 偏振光與穿透的 TM 偏振光，其中 TM 偏振光經過擴束做為參考光，其偏振方向與 LCD 的慢軸平行，施加適當電壓至 LCD 以達到移相作用。TE 偏振光入射到 DM 上，經過縮束做為訊號光，最後由另一偏振分光鏡 (PBS2) 經線性偏振片 (P3) 產生干涉圖形再由透鏡 (L6) 成像於光二極體陣列 (photodiode array, PA) 上，干涉圖形可經由調整線性偏振器 P1 與 P3 得到最佳的對比度，稱此為徑向剪切式 Mach-Zehnder PSI。DM 後經過分光鏡 (BS) 分出一道光，這道光經過透鏡 (L5) 聚焦為系統的輸出，以 CCD 照相機觀測。觀測此聚焦點的強度與半高寬可以判斷系統抑制干擾的程度。PA 的訊號經多工器 (multiplexer) 傳至 DSP 的類比轉數位器 (analog-to-digital, A/D) 轉換，經 DSP 控制處理後，透過數位轉類比器 (digital-to-analog, D/A) 輸出至 DM。

在設計光束縮放比  $R$  值時，理論上若縮束光與擴束光比例相差愈小，則參考波前相對於訊號波前是愈平整的，也愈接近理想的平面波，如此便可以經由 PA 量測到波前相位資訊。但  $R$  值太小時，其擴束光越弱，干涉強度也會越弱，量測的訊噪比 (signal-to-noise ratio, SNR) 則可能變小，或是因為需要更大的後級放大，而降低了 PA 的動態頻寬，所以在理論與實際運用上，為達到最好的效益，實驗上規劃透鏡 (L3) 的焦距  $f = 60 \text{ mm}$  與透鏡 (L4) 為  $f = 150 \text{ mm}$  的光縮束鏡組，以達到 2.5 倍的縮小比例，配合光擴束 3.33 倍的放大，整體的  $R$  值為 0.12。

## 2. 控制回饋機制

有關控制系統的部分，利用  $5 \times 5$  像素之 PA (S7585, Hamamatsu, Japan) 量測到干涉光強訊號，經電流轉電壓放大器後由多工器送至十六位元之 A/D，而相位資料經自製嵌入式三十二位元浮點數位訊號處理器 (TMS320VC33, TIVSA) 計算後得知，控制器則以 PID 運算法則運算出數位的控制值，再由十六位元之 D/A 送出控制電壓於解多工器 (demultiplexer)，經由自製高壓驅動器放大電壓 35 倍後，對 37 個元件的 DM (25-37 Multi,

AgilOptics, USA) 做波前相位的調變。圖 2 分別為 (a) 二維光強感測器；(b) DSP 控制器；(c) DM 致動器。圖 3 為控制系統的方塊圖。實驗設定的數位相位  $\phi_{des}(m,n)$ ，控制訊號為  $u(m,n)$ ，而此處 Plant 為經由 D/A、高壓驅動器、DM、PSI 至 A/D 之整體數位模態， $\phi_{out}(m,n)$  為經過徑向剪切式干涉儀後得到的數位相位，而不同通道的數位控制值經由 PID

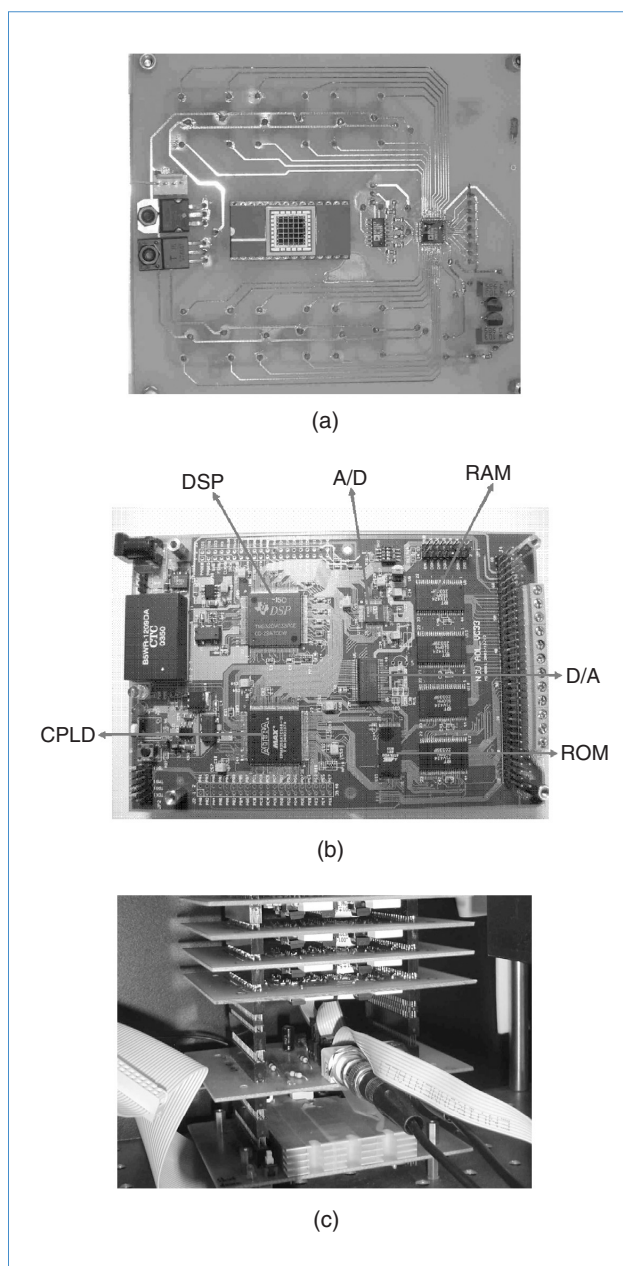


圖 2. 分別為 (a) 二維光強感測器；(b) DSP 控制器；(c) DM 致動器。

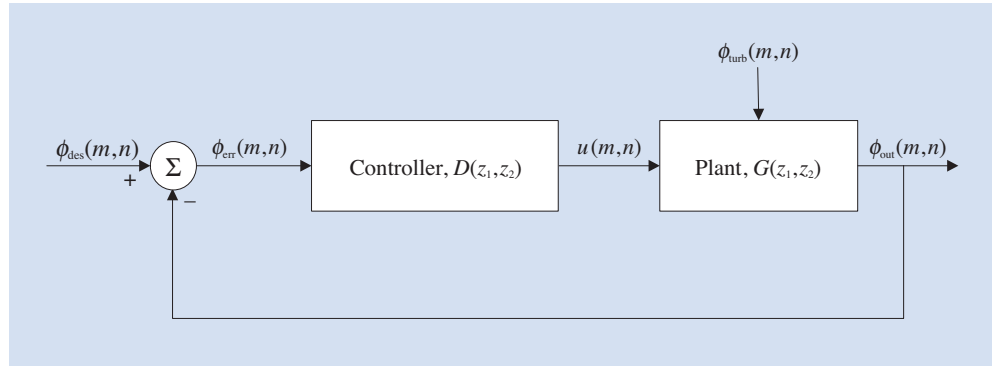


圖 3. 相位回饋控制系統方塊圖。

控制器可分別計算出來。實驗上設計以 PA 配合 LCD (LRC, Meadowlark, USA) 使用 PSI 技術量測相位  $\phi_{out}(m,n)$ ，將此相位與期望的相位  $\phi_{des}(m,n)$  相減可以得到誤差相位  $\phi_{err}(m,n)$ ，這誤差相位經控制器後，求得 DM 的控制訊號  $u(m,n)$ ，輸出此控制訊號給 DM 而產生相對應的相位調變，此調變量會隨擾動波前  $\phi_{turb}(m,n)$  變化。藉著調整 PID 控制器的參數，使  $\phi_{err}(m,n)$  能快速且穩定的趨近於零，使輸出相位修正到預設的參考相位。

本系統設計之多通道控制器對多通道偵測器為互相獨立，首先要做到空間中控制點與偵測點的定位校正，實驗規劃如圖 4 所示，DM 架設上為 45 度，所以在其  $x$  軸方向上會相對被壓縮，經放大特定比例 DM 的五個驅動點分別對應至 PA 的中間點與角落四個點，以此五個通道做互相獨立的 PID 回饋控制。

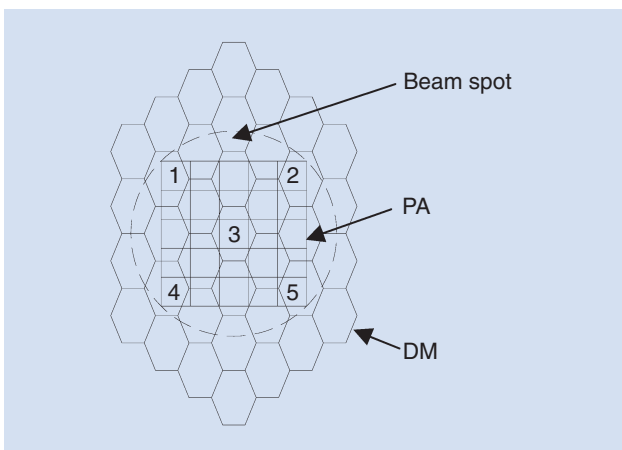


圖 4. PA 像素與 DM 通道對應關係，其中 1-5 為系統回饋控制點。

### 三、具液晶之動態移相干涉術

干涉技術量測相位可以利用多張干涉影像，以 PSI 技術還原解出相位。此技術除不需判別條紋的方向外，在移相還原的過程中也會將大部分的雜訊拿掉以獲得較佳之相位資訊<sup>(14)</sup>。本研究使用較輕巧方便的 LCD 來達到動態移相目的。由於此元件之非線性電壓驅動與晶體反應速度限制，因此提出一精準相位校正方式與瞬間向列驅動方法，以真正達到動態移相干涉之量測目的<sup>(15,16)</sup>。

#### 1. 高速 LCD 驅動

在液晶的響應速度方面，利用施加超過原本預期的電壓值可使其提前達到相同的相位延遲量，此可以使反應速度變快，稱為瞬間向列晶體效應 (transient nematic effect)。因此當欲上升電壓減少相位延遲量時，可提升超過預期的電壓，待其快速的達到所要求的相位量時再將電壓降回對應的值，此方式稱為過壓驅動 (overdrive)，反之稱為 undershoot。實驗中使用三步 PSI 技術，累加所需步階時間從 90 ms 減少到 5 ms，如表 1 所示，波前偵測反應速度提升 18 倍。

表 1. LCD 有無過壓驅動之反應時間比較。

| Phase-shift step \ Overdrive | 1→2 step | 2→3 step | 3→1 step |
|------------------------------|----------|----------|----------|
| No                           | 60.0 ms  | 30.0 ms  | 60.0 ms  |
| Yes                          | 2.5 ms   | 2.5 ms   | 23.5 ms  |

## 2. 相位移的校正

由於液晶的相位改變與驅動電壓不是線性的關係，且液晶有較嚴重的磁滯現象，因此需要對移相干涉的條紋做比對，以找出所要相位移的電壓值。實驗中選擇  $0$ 、 $\pi/2$  與  $\pi$  作三步 PSI，其電壓尋找方式如下：

- (1)  $\pi/2$  的驅動電壓：可由  $\sin^2\theta + \cos^2\theta = 1$  和  $\cos^2\theta = \sin^2(\theta + \pi/2)$  得知，可以利用交流項平方相加比較其變異數是否局部最小。
- (2)  $\pi$  的驅動電壓：可以利用強度相加比較其變異數是否為最小值。

在相位移校正方面，實驗中利用五張移相干涉圖計算二維相位移量  $\Delta\alpha$  並做數量的統計，其中愈接近  $90$  度時，其空間上還原校正得愈正確<sup>(17)</sup>。最後，利用 LCD 之徑向剪切式 Mach-Zehnder 移相干涉術，將三張干涉光強經由下式運算，即可求出波前相位變化  $\Delta\phi$ 。

$$\Delta\phi = \tan^{-1} \left[ \frac{I(\alpha_1) - I(\alpha_3)}{2I(\alpha_2) - I(\alpha_1) - I(\alpha_3)} \right] \quad (1)$$

其中  $I(\alpha_1)$ 、 $I(\alpha_2)$  及  $I(\alpha_3)$  分別為移相  $0$ 、 $\pi/2$  與  $\pi$  時的二維干涉光強。

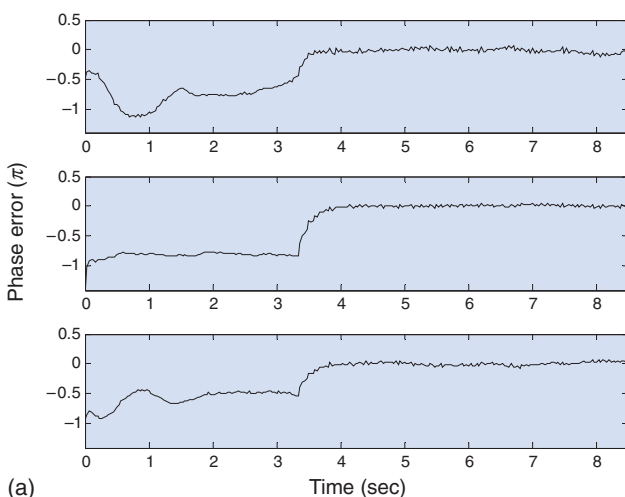


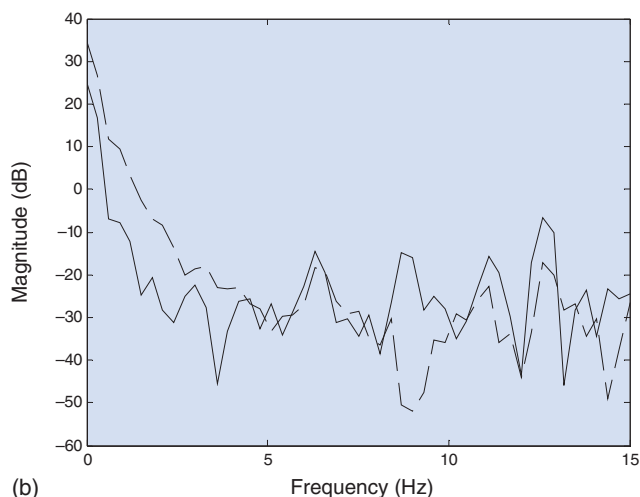
圖 5. (a) 系統回饋控制前後之相位誤差訊號，由上而下分別對應至 PA 像素 1、3 與 5；(b) PA 像素 1 之輸出訊號頻譜分析：虛線為控制前頻譜大小，實線為控制後頻譜大小。

## 四、實驗結果

使用回饋控制方式，藉由徑向剪切式 Mach-Zehnder PSI 技術來獲取波前資訊，將得到的電壓訊號經 DSP 的 PID 控制，運算出數位的控制值，再經由高壓驅動器放大電壓後，輸入至 DM 做波前相位的修正。PID 控制的動態修正速度與穩態誤差 (steady state error) 大小，主要取決於  $K_p$ 、 $K_i$  與  $K_d$  等參數。

將熱干擾加入系統中，控制前後的相位變化情形如圖 5(a) 所示。控制器在 3.3 秒後開啟。實驗結果顯現出控制器開啟後相位擾動量迅速地被消除，標準差在控制前平均是  $0.2 \pi$  rms，控制器開啟後約為  $0.02 \pi$  rms。圖 5(b) 為其中一點於控制前後訊號的頻譜大小。從圖中可以看出雜訊消去的程度，在控制迴圈設定為 30 Hz 下，在 5 Hz 以下雜訊最大可以降低 20 dB，也就是低頻的雜訊最大可降低至 1/10 的程度，顯示此控制器發揮了不錯的效能。

圖 6 為系統聚焦輸出部分，經由 CCD 觀測聚焦情形的圖形。圖 6(a) 為受熱干擾且控制器未開啟時擾動波前的聚焦情形。上圖為二維光強分布情形，下圖為三維光強圖形。圖中顯示除了聚焦點不會在偵測面中心 (平面波的聚焦點)，焦點的強度也因為熱散焦的關係強度變弱且不集中，圖 6(b) 為



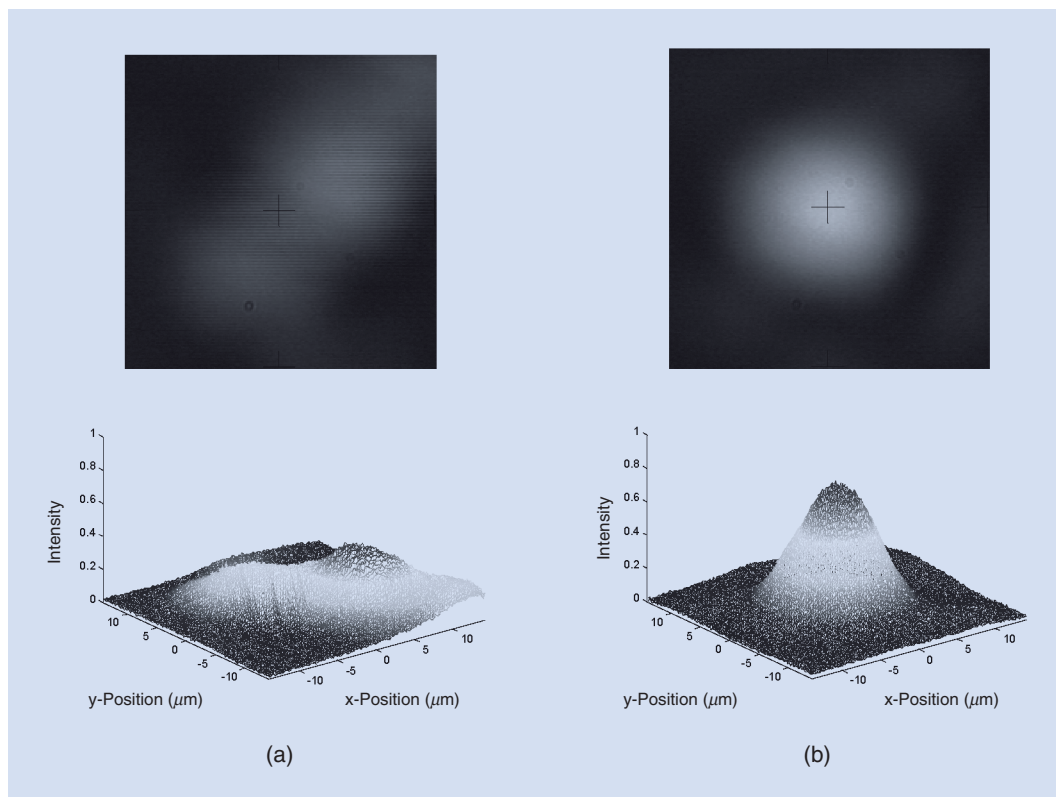


圖6. 波前修正前後聚焦點影像圖形：  
(a) 控制前；(b) 控制後。

控制器打開後聚焦點往中心集中且強度增加，可明顯看出聚焦點的光強度分布在控制後向中心點集中，降低了熱干擾造成的不良影響。

若將未干擾下五點控制至穩態時的系統輸出視為系統無干擾下的聚焦輸出，依照 **Strehl ratio** 定義<sup>(18)</sup>，在熱干擾下控制前後聚焦圖形的峰值除上未干擾聚焦圖形的峰值即為 **Strehl ratio**。圖 7 為將三種聚焦情形扣除 CCD 量測時的背景光 (約 0.1 V)，並使用成像比例將 CCD 的像素轉換為實際大小做為橫座標，以未干擾聚焦圖形的峰值正規化為 1 之高斯擬合曲線 (點線) 熱干擾下控制前後之輸出，可得到兩條曲線 (虛線與實線分別為控制前後的曲線)。控制後 **Strehl ratio** 從約為 0.5 上升至 0.9 以上，系統修正擾動的變化量改善了約 1.8 倍。

## 五、結論

筆者提出一具有 LCD PSI 適應性光學系統，其經由一精準相位校正方式與瞬間向列驅動方法，可正確快速地達到移相干涉目的，亦可即時偵測光

之波前相位改變情形。利用此波前感測器所偵測之相位資訊，回饋至具有數位訊號處理能力之控制補償器，再經由 **DM** 作即時波前的修正，成功地降低因外來干擾所造成之像差。利用五個控制通道對

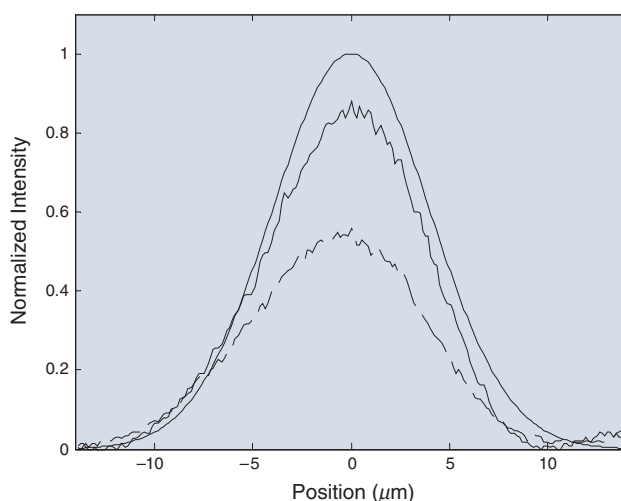


圖 7. 系統輸出聚焦點 **Strehl ratio** 分析：點線為無擾動修正後之高斯擬合曲線；虛線為控制前聚焦點剖面；實線為控制後聚焦點剖面。

應五個偵測通道相互獨立下的 PID 回饋控制器，成功的以 30 Hz 的控制迴圈將 5 Hz 以下的低頻擾動降低 20 dB 以下。此外，系統穩態誤差的標準差低於  $0.02 \pi$ ，輸出聚焦光點的 Strehl ratio 亦有顯著的改善，故此系統對相關研究之應用將有所助益。

## 誌謝

本研究計畫承蒙中山科學研究院材料暨光電研究所委託支持。

## 參考文獻

1. N. Hubin and L. Noethe, *Science*, **262**, 1390 (1993).
2. R. K. Tyson, *Principles of Adaptive Optics*, 2nd ed., San Diego: Academic Press (1998).
3. P. Kern, *Proc. SPIE*, **1271**, 243 (1990).
4. A. Greenaway and J. Burnett, *Industrial and Medical Applications of Adaptive Optics*, Bristol: IOP Publishing Ltd., UK (2004).
5. R. K. Tyson, *J. Opt. Soc. Am. A*, **19**, 753 (2002).
6. J. Porter et al. eds., *Adaptive Optics for Vision Science: Principles, Practices, Design, and Applications*, New York: Wiley & Sons Inc. (2005).
7. M. A. Vorontsov and G. W. Carhart, *Opt. Lett.*, **22**, 907 (1997).
8. T. G. Bifano, J. Perreault, R. K. Mali, and M. N. Horenstein, *IEEE J. Quant. Electro.*, **5**, 83 (1999).
9. M. Horenstein, T. Bifano, R. K. Mali, and N. Vandelli, *J. Electrostat.*, **42**, 1 (1997).
10. D. Malacara ed., *Optical Shop Testing*, Wiley (1992).
11. S.-K. Park, S.-H. Baik, C.-J. Kim, and S. W. Ra, *Optics & Laser Technology*, **34**, 687 (2002).
12. D. C. L. Cheung, T. H. Barnes, A. R. D. Somervell, and T. G. Haskell, *Optics & Laser Technology*, **41**, 113 (2004).
13. D. C. L. Cheung, T. H. Barnes, and T. G. Haskell, *Optics Communications*, **218**, 33 (2003).
14. D. Malacara, M. Servin, and Z. Malacara, *Interferogram Analysis for Optical Testing*, Marcel Dekker (1998).
15. D. W. Griffin, *Opt. Lett.*, **26**, 140 (2001).
16. Y.-Y. Cheng and J. C. Wyant, *App. Opt.*, **24**, 3049 (1985).
17. K.-H. Chang, A.-C. Hsu, and J.-L. Chern, *Opt. Lett.*, **27**, 509 (2002).
18. J. Herrmann, *J. Opt. Soc. Am. A*, **9**, 2257 (1992).

- 鍾政英先生為國立中央大學機械工程碩士。
- 卓稷信先生為國立成功大學工程科學研究所碩士班學生。
- 張智強先生為國立中央大學機械工程碩士。
- 閻偉中先生為國立中央大學光電科學博士，現任中山科學研究院材料暨光電研究所技正。
- 陳顯禎先生為美國加州大學洛杉磯分校機械工程博士，現任國立成功大學工程科學系副教授。
- Cheng-Ying Chung received his M.S. in mechanical engineering from National Central University.
- Keng-Chi Cho is a master student in the Institute of Engineering Science at National Cheng Kung University.
- Chih-chiang Chang received his M.S. in mechanical engineering from National Central University.
- Wei-Chung Yen received his Ph.D. in optical science from National Central University. He is currently a specialist in the Materials and Electro-Optics Research Division at Chung-Shan Institute of Science and Technology.
- Shean-Jen Chen received his Ph.D. in mechanical engineering from the University of California, Los Angeles, USA. He is currently an associate professor in the Department of Engineering Science at National Cheng Kung University.