

# 光開關自動校正檢測

## Automatic Inspection of Optical Switch

范光照、林武郎、王宏瑜

Kuang-Chao Fan, Wu-Lang Lin, Hung-Yu Wang

近年來對網路頻寬需求日益增加，光纖通訊產業將是未來蓬勃發展的新興產業，光開關元件在光纖通訊中具有極重要之關鍵地位，然目前光通訊元件多採人工對光，無法自動化大量生產，因此，本文將介紹光開關自動化組裝系統最新研究，並藉由設計一組光纖直接對位的機械式光開關，研究以微三維量測及 CCD 影像處理定位技術，發展光纖自動化耦合對準與封裝技術，製作出符合國際 Bellcore 測試規範之光開關。

In recent years, the requirement of communication bandwidth increases rapidly. The optical-fiber communications industry will be the vigorous new industry in the future. The optical switch component plays an extremely important role in the optical-fiber communications. Most of the optical communication components are, however, aligned and assembled manually. They are unable to mass product automatically. For this reason, this article will introduce the latest research of the optical switch automation assembly system and design the mechanical type Fiber-To-Fiber optical switch. By the micro three-dimension measurement and CCD image processing alignment techniques, we will develop automatic coupling of optical fiber and assembly technique to fabricate the optical switch conforming to the international Bellcore testing standards.

### 一、前言

由於網際網路及個人通訊的普及，全世界光纖網路的頻寬需求平均以每九個月增倍的速度成長，DWDM (高密度多工分波器) 的技術可在既有的光纖網路中，輕易的將光纖的傳輸容量增加到數十倍，是擴增光纖骨幹網路頻寬最佳的方式。如果將光通訊網路比擬為一條道路，資料流量比擬為車流量，則 DWDM 可說是增加道路寬度 (即網路頻寬) 的重要技術。但是如果不能將此增加出來的「路寬」與

「車流量」做適當的調度，則極有可能產生有些車道大塞車，有些車道毫無車流的窘境。因此，為了充分發揮 DWDM 技術的功能，就必須在光纖通訊網路中使用光開關 (optical switch) 元件，作為流量調度的功能<sup>(1)</sup>。

以往的光開關元件是將光纖的訊號先轉成電子訊號，再將電子訊號經由電子交換器轉接到適當的頻道後，再轉成光訊號耦合至光纖中進行傳遞<sup>(2)</sup>。這型的光開關元件不但價錢昂貴、光損耗大、串音大、製造成本高，亦不利於未來光纖網路的普及，

且其技術已漸無法處理複雜的 DWDM 光訊號要求。因此，光纖網路未來必朝向所謂「全光網路」發展<sup>(9)</sup>。在全光網路中的光開關元件，現多屬於機械式的光開關，所佔比重分別為稜鏡機械式 84%、微機電式 7%、光纖機械式 9% [CIR、Fuji Chimera、In-Stat 2003]。此型光開關的特性是在不進行光／電轉換下，就能切換光訊號傳輸的通路。然而，在日益複雜化的光纖網路系統中，許多傳統機械式光開關元件已漸無法滿足日漸成長的容量及嚴刻的 Bellcore 測試規範要求。因此，研究以新製造技術發展新一代的光開關元件，並達到自動化組裝生產，解決光通訊最後一哩 (last mile) 之發展瓶頸是未來必然趨勢。

## 二、光開關介紹與研究內容

### 1. 光開關種類

光纖通訊所用光開關元件主要型式有：傳統機械稜鏡式<sup>(4)</sup> 是利用步進馬達等機械動力元件來移動光纖或其他反射元件 (如反射鏡)，缺點是切換速度過慢、元件外觀尺寸大、不易與其他光通訊元件整合使用等，無法滿足光通訊的高效率需求及密集性要求。微機電式<sup>(5)</sup> 是利用微機電製程，製作可將其尺寸體積縮小，但在目前技術上尚無法突破長時間使用高低溫及可靠度的測試等，且成本高、良率低、組裝封裝技術待提升是其缺點。液晶式光開關<sup>(6)</sup> 是利用外加電場控制液晶分子的排列方式，藉由液晶改變光的方向來達到開關切換的動作。聲光式光開關<sup>(7)</sup> 是利用聲波在物件表面傳遞時，改變物件的表面性質來切換光的偏折角，達到光路開關切換的動作。全像式光開關<sup>(8)</sup> 是由布拉格光柵 (Bragg grating) 與不同折射常數的材料所組成，利用外加電場控制光柵引導光線方向來達成開關切換的動作。熱光式光開關<sup>(9)</sup> 是利用材料熱變形來改變有效的折射率，但是只能用在連接埠較少的光開關 (如 1×1、1×2、2×2 等)，連接埠較多時甚少使用。

### 2. 研究內容

光開關在操作過程中通常會遇到當光開關光路切換操作時，因輸入驅動電流導致線圈發熱或受週

遭環境溫度變化影響，使整個光開關組件因溫度分佈不均而導致熱脹冷縮變形，使輸出、輸入光纖之光軸錯位，造成光纖中光傳輸能量損失 (optical loss)。因此，希望輸入與輸出光纖之尖端 (tip) 在軸向、徑向距離與兩軸線偏轉角度在高低溫變化下始終保持固定。因此，藉由求出光開關系統結構之熱變形補償及最佳化設計，以進行錯位誤差光損耗補償。

### 3. 微／奈米 1×2 機構式光開關

為驗證自動化組裝之可行性，先設計一組創新型 1×2 光開關，採兩光纖直接對位 (fiber-to-fiber) 方式，如圖 1 所示。機構式切換方式中取代了以往在裸光纖 (bare-fiber) 前端加裝一光準直器 (collimator)，先將光波導成平行光後，再藉由稜鏡 (prism) 的反射或穿透來進行光路切換。另外，亦取代以微反射鏡 (micro-mirror) 作光路切換之微機電式光開關。

本 1×2 光開關具有下列優點：(1) 相較於目前應用最廣的傳統機構式光開關，省略了光準直器 (collimator) 與反射稜鏡 (prism) 等，可使光傳輸路徑變短、體積及成本大幅降低。(2) 相較於目前研究最廣的微機電 (MEMS) 型式光開關，可節省複雜與昂貴的微機電製程程序。(3) 採用同軸心之光纖直線對位方式，減少因曲線對位導致光損耗增大，降低錯位敏感度。(4) 利用傳統加工與組裝技術可達到微／奈米定位精度 1×2 光開關。(5) 運用自動校正檢測技術，使光通訊元件製造可自動化大量生產。(6) 低熱膨脹係數 Invar 材料之使用，並配合有限元素法分析與模擬，求出最佳化之設計參數，可使兩對位光纖因熱脹冷縮產生之光軸錯位：軸向降為 0.354  $\mu\text{m}$ 、徑向降為 0.659  $\mu\text{m}$ 。微奈／米 1×2 光開關如圖 2 所示。

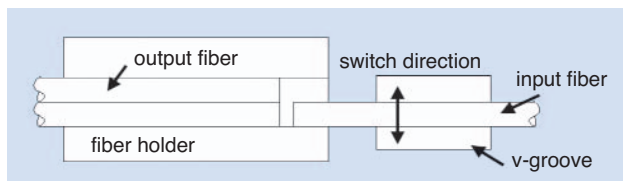


圖 1. 光纖直接對位式示意圖。

### 三、自動校正檢測之系統架構

目前光開關量產製程中，對光技術是一大技術瓶頸。因此，研究光開關自動化組裝與檢測校正是本文探討之重點，首先，使用二組六軸微／奈米級微動平台 (stage)，搭配光功率計 (power meter)、紫外 (UV) 光源和 CCD 影像視覺系統，進行光耦合對準與自動化系統開發，以進行 1 × 2 光開關組裝。其中，利用自行撰寫之 LabVIEW 控制程式，將所有的設備功能整合，藉人機界面程式控制，達到光開關快速對位及封裝要求。光耦合對準架構與組裝系統配置圖，如圖 3 及圖 4 所示。

電腦程式可將 D/A 卡輸入的信號經壓電放大器放大以驅動 PZT 壓電平台<sup>(10)</sup>，調整兩光纖光軸對位誤差，並從光功率計回饋光損耗訊號，經由 RS232 序列埠傳送至電腦比對原存於資料庫內的訊號與光纖位置偏置關係圖，進一步調整 PZT 壓電平台的位置偏量，以達到兩光纖快速對準的目的，如圖 5 所示。

設計上，兩 CCD 組成之光學影像系統可初步達到第一階段光纖影像對準功能，將對位範圍微調到 10 μm 以內，再由光功率計上可以檢測出 ASE 光源所發出的 1550 nm 波長之雷射光能量，經光纖耦合對位系統後所產生的光功率損失，檢測兩光纖對準對位偏差程度，再比對電腦內之位置損耗偏置圖，驅動 PZT 壓電平台以進行後續奈米等級位移

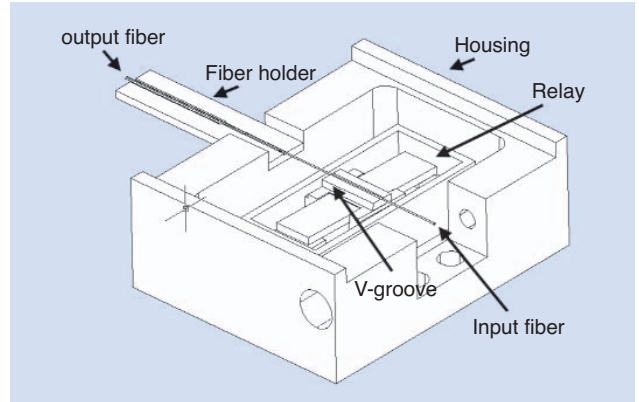


圖 2. 微／奈米 1 × 2 機構式光開關。

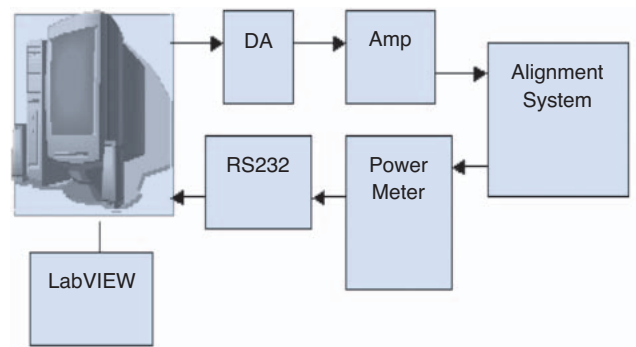
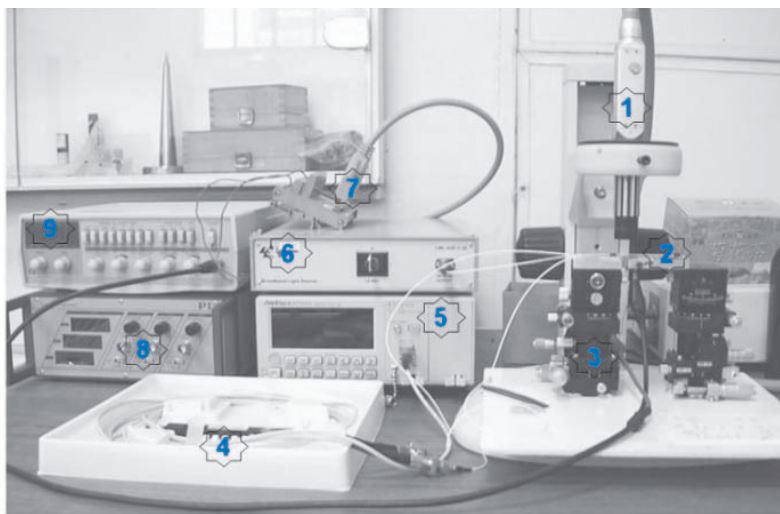


圖 3. 光纖耦合對準系統架構圖。

補償，當耦合光損耗值達到 1 dB 內，即利用 UV 膠或 laser-welding 固著技術固定<sup>(11)</sup>，完成 1 × 2 光開關之封裝對準工作。



1. CCD
2. 光開關
3. 六軸移動平台
4. 1 × 2 Coupler
5. Power meter
6. ASE 光源
7. PZT 連接器
8. 電壓放大器
9. 函數產生器

圖 4. 光開關組裝系統配置圖。

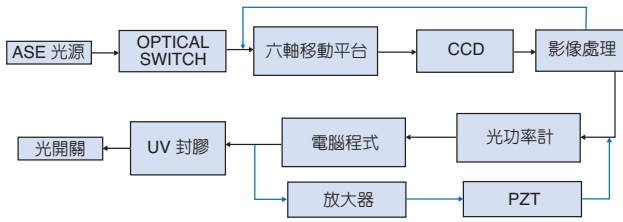


圖 5. 光開關影像檢測與回饋系統圖。

## 四、組裝校準與實驗測試

對微／奈米光纖定位元件的精確量測，採用白光干涉儀垂直掃描技術<sup>(12)</sup>，基本原理是利用分光鏡將入射光分成兩路，一束光投射至工件表面反射回的光波與另一束投射至參考表面反射回的參考光波重疊產生干涉條紋，經由條紋的影像解析可計算出工件表面各對應點的相對高度。光纖對位損耗將針對三大項目進行探討，包括：軸向錯位、徑向錯位與角度偏位。

### 1. 白光干涉儀

最基本的干涉原理為邁克森干涉法 (Michelson interferometry)，如圖 6(a) 所示，所產生的干涉條紋會因工件表面之外形而變化，同一條紋位置代表等高線，相鄰條紋位置代表高度差半個波長，工件表面輪廓即可由逐步累積相對高度而得出。干涉原理的優點為：非接觸量測、三維表面量測、可變換

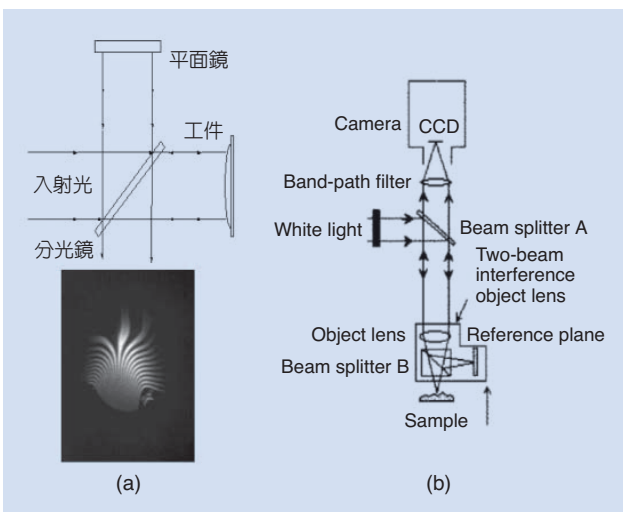


圖 6. (a) Michelson 干涉原理，(b) 微小物件量測。

鏡頭量測不同大小之表面、相位及垂直掃描技術可達奈米級解析度、量測快速、操作容易等等。圖 6(b) 加的壓電驅動器 (PZT) 是為了讓參考鏡做微步移動，此種以量測光波振幅變化的原理可設計不同的光路而得到不同的輪廓干涉儀，如圖 7 所示 Mirau 干涉儀及圖 8 的 Linnik 干涉儀兩種。

接下來利用白光干涉儀之垂直掃描技術量測出 MEMS 製程製作之 fiber holder 前端與後端的 3D 概括圖以及深度與寬度尺寸，前端量測如圖 9 與圖 10，後端量測圖 11 與圖 12 所示。MEMS 量測尺寸如表 1 所示。

表 1. MEMS 量測尺寸。

	MEMS 製程
寬 (前端)	255 $\mu\text{m}$
深 (前端)	125.69 $\mu\text{m}$
寬 (後端)	507 $\mu\text{m}$
深 (後端)	125.6 $\mu\text{m}$

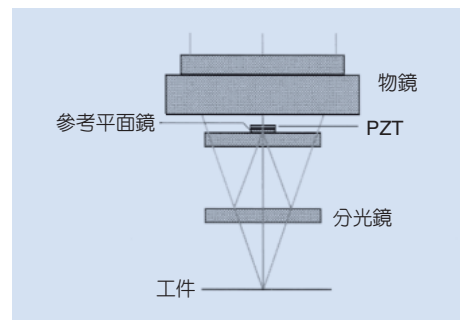


圖 7. Mirau 干涉儀。

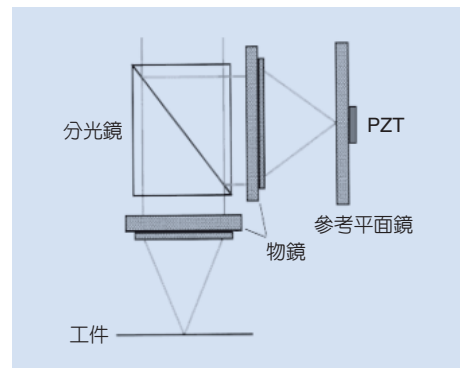


圖 8. Linnik 干涉儀。

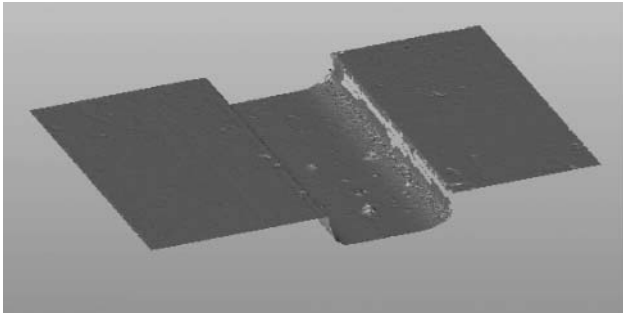


圖 9. MEMS fiber holder 前端 3D 量測圖。

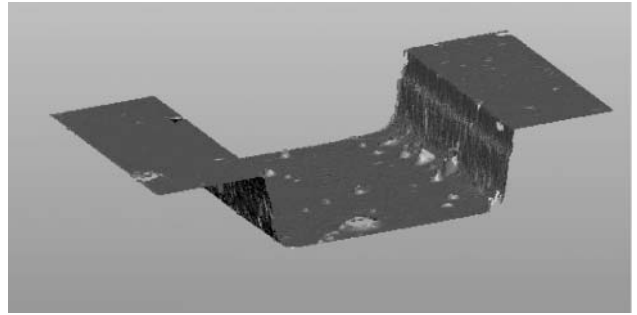


圖 11. MEMS fiber holder 後端 3D 量測圖。

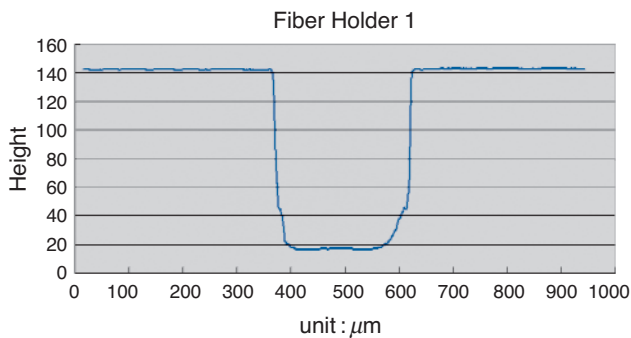


圖 10. MEMS fiber holder 前端寬度深度圖。

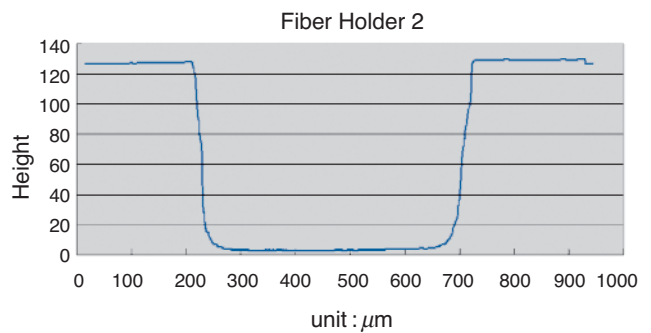


圖 12. MEMS fiber holder 後端寬度深度圖。

另外，在對位損耗方面，須先建構光纖光軸錯位與光損耗關係圖，光纖使用規格條件：SMF28 單膜光纖外徑  $125\ \mu\text{m}$ ，纖核 (core)  $9\ \mu\text{m}$ 、端面切 0 度角、未鍍抗反射膜。實驗項目包括：軸向錯位、橫向錯位與角度偏位<sup>(13)</sup>，並將此實驗數據存於電腦資料庫中當作位置偏差比對值。

## 2. 光纖錯位損失實驗

### (1) 二光纖軸向位移對光功率損失實驗

討論二裸光纖 (bare fiber) 自互相接觸逐漸分開時，其光損耗值為軸向距離之函數，並且隨著距離增大，損耗值劇烈增大。如圖 13 所示。

### (2) 二光纖徑向位移對光功率損失實驗

討論二光纖自軸心逐漸徑向分開，其光損耗值為徑向距離的函數，並且隨著距離增大，損耗值將大幅增大。由實驗結果，我們可發現徑向偏差所造成的光損耗值比軸向偏差所造成的損耗值來得更加嚴重，如圖 14 所示。

### (3) 二光纖旋轉角度對光功率損失實驗

討論二光纖在軸線產生角度差 (tilt) 狀況下之損耗值，將一光纖固定，另一個光纖以  $z$  軸方向旋轉，其光損耗值為旋轉角度的函數，隨著軸線交叉角的增大，損耗值將劇烈增大。由實驗結果，我們可發現旋轉偏差所造成的光損耗值與徑向偏差所造成的損耗值同樣明顯。如圖 15 所示。

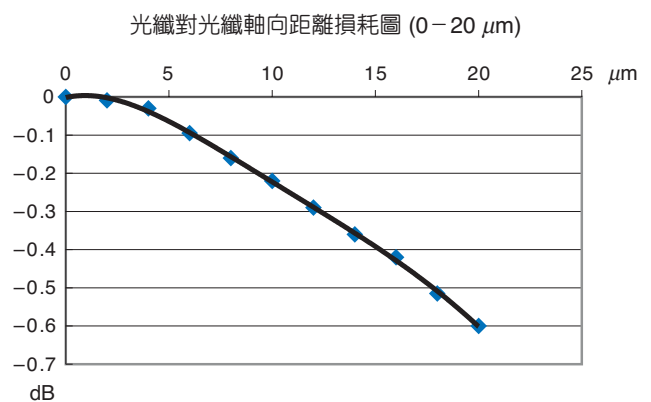


圖 13. 光功率損失與軸向位移圖。

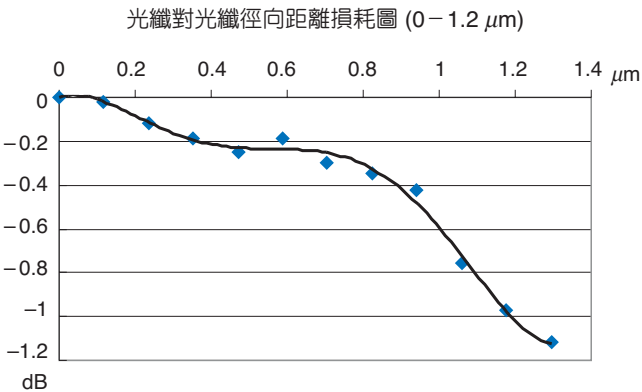
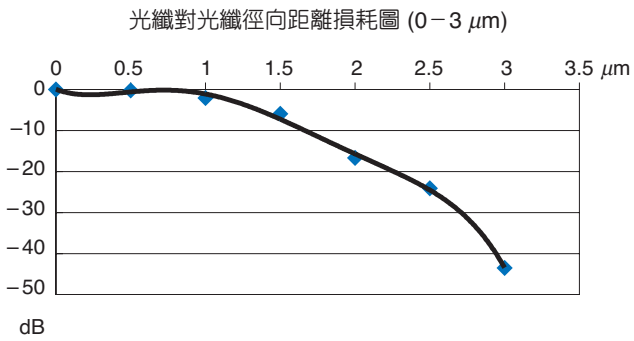


圖 14. 光功率損失與徑向位移關係圖。

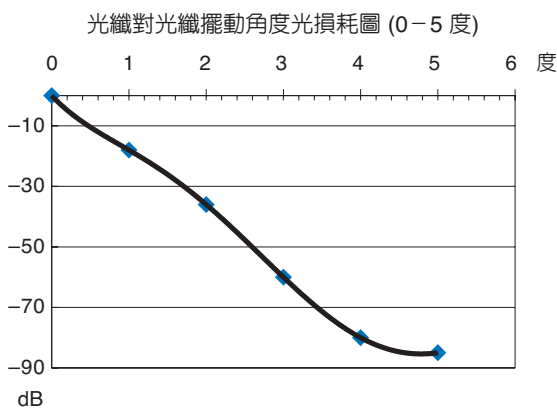


圖 15. 光功率損失與旋轉角度圖。

### 3. PZT 磁滯現象之位移量測分析

首先，為驗證 PZT 確實受輸入電壓驅動，須先建構 PZT 位置與輸入電壓關係圖。選用先寧公司製造之 N-1030 N-BOXTM PZT，並設計 LabVIEW 控制介面來控制電壓輸出的大小，利用雷射干涉儀先量測輸入電壓與 PZT 位移關係圖，如圖 16 所示，此程式介面最多可以輸出 8 個通道 (channel)，因此對於左右兩個 PZT 的三軸向驅動而言，只需

使用到六個通道，另外的通道將可應用來撰寫輸出 5 V 的正弦波，主要用於繼電器 (relay) 的驅動。

實驗時將雷射干涉儀的可移動反射鏡架設於 PZT 上，利用 LabVIEW 介面控制電壓，再觀察由干涉儀所量測之距離，並且分別做出短行程及長行程實驗，來觀察實驗移動時的 PZT 磁滯現象。如圖 17 與圖 18 所示。

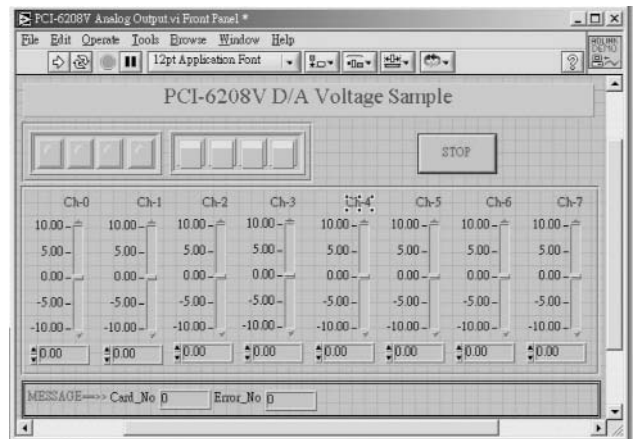


圖 16. PCI-6208 驅動電壓介面。

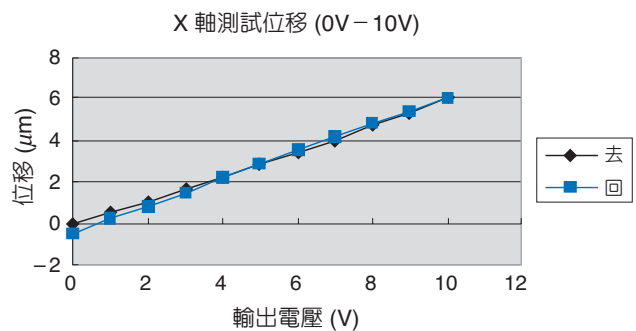


圖 17. 輸出電壓與短位移關係圖。

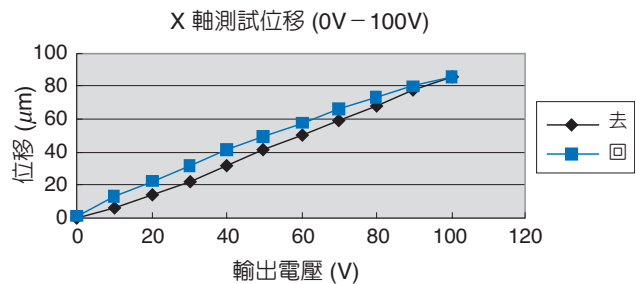


圖 18. 輸出電壓與長位移關係圖。

#### 4. CCD 影像定位與 PZT 補償光纖對位

藉由整合 CCD 影像處理、定位與 PZT 位置補償來組裝  $1 \times 2$  光開關，利用影像的擷取以及配合壓電式平台自動化的回授，達到快速光纖對位組裝，光開關組裝架構圖如圖 19 所示。

如上圖所示，架設兩組 CCD 鏡頭以擷取兩對位光纖影像，如圖 20 所示，首先進行粗調步驟：

- (1) 首先將輸入與輸出端光纖利用光纖切割機切割成 0 度。
- (2) 再利用 LabVIEW 程式的人機化介面中影像擷取部分，將輸入與輸出端之光纖端面以六軸手動平台，輔以 CCD 光學系統大致對準，擷取影像。
- (3) 首先先調 y 方向，獲得目前此軸方向最佳值。
- (4) 再調 z 方向，獲得目前此軸方向最佳值。
- (5) 在調整 x 方向時，須配合 y 或 z 方向檢測，避免兩

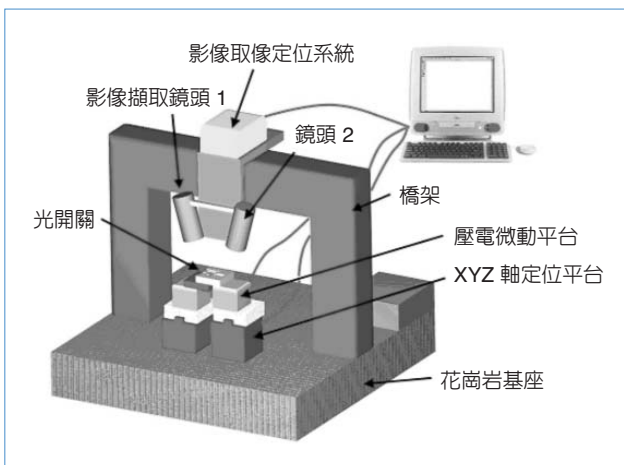


圖 19. 光開關動化對準架構圖。

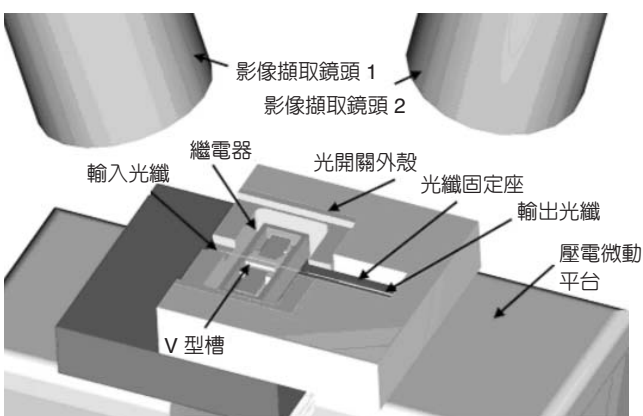


圖 20. 光開關組裝細部示意圖。

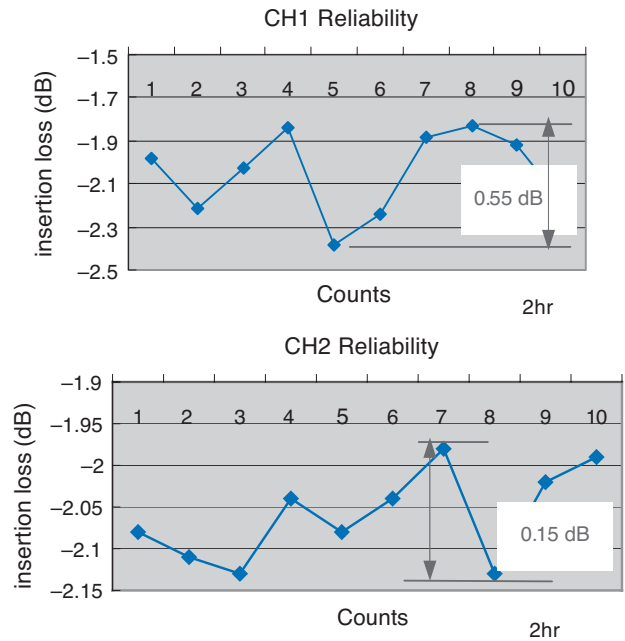


圖 21. 光開關長時間穩態測試值。

光纖端面互相推擠。微調步驟：當  $x, y, z$  的微調精度都已無法獲得更佳的損耗值時，接下來利用 LabVIEW 程式的人機化介面以及 PZT (壓電驅動平台) 配合由 RS-232 傳輸介面擷取光功率值，來做奈米等級驅動使光纖損耗 (loss) 值降至最小，(驅動方式與粗調相同，僅不同於驅動方式是由手調改為 PZT 驅動)，對位基準由影像改由功率計 (power meter) 所擷取的光損耗值來進行補償。

#### 5. 組裝測試結果

光開關初步組裝完成後，將先進行光損耗長時間穩態測試值，以驗證組裝結果。測試結果如圖 21 所示，圖中顯示撥切長時間穩定度在 ch 1 為 0.55 dB、ch 2 為 0.15 dB，對長時間室溫撥切穩定度而言，已證明可符合 Bellcore 設定值 (1 dB 以下)。

### 五、結論與討論

本文主要探討如何開發出一套光開關自動校正檢測技術，研究利用兩組六軸微動平台，輔以兩組 CCD 影像處理與抓取系統、藉由 LabVIEW 程式的人機介面控制，以達到光開關光纖自動化校正對位的目的。

利用光纖直接對位 (fiber-to-fiber) 的光路設計光開關已開發成功，由上述實驗結果可證明本研製成功之微／奈米機構式光開關可大幅簡化光機構之設計，並可使光開關之自動化生產變為可行。1×2 光開關外觀尺寸為 7.5×16×20 mm，為目前機構式光開關中體積最小、機構設計最為簡單者，其中製造成本 (不考慮良率)，約為傳統機構式的 1/20、微機電式的 1/100。未來光開關的自動校正檢測技術發展，將朝向光纖更快速精確對準之目標前進。

## 參考文獻

1. J. J. Pan, 1999 *Digest of the LEOS Summer Topical Meetings*, II5 (1997).
  2. S. Kobayashi, *Proceedings of the 4th Asian Symposium on Information Display*, 1 (1997).
  3. P. O. Hedekvist, M. Karlsson, and P. A. Andrekson, *Journal of Lightwave Technology*, **15**, 2051 (1997).
  4. M. Hoffmann, P. Kopka, and E. Voges, *Proceedings of the Optical Fiber Communication Conference*, **3**, 250 (2000).
  5. N. R. Jankowski, C. Bobcowski, D. Zipkin, R. R. Krchnavek, and R. D. Chamberlain, *Proceedings of the 6th International Conference on Parallel Interconnects*, 149 (1999).
  6. M. Herding, F. Richardt, and P. Woias, *Proceedings of 2003 IEEE/LEOS International Conference on Optical MEMS*, 141 (2003).
  7. D. Enguang, W. Deming, and X. Anshi, *Proceedings of SPIE*, **3896**, 403 (2000).
  8. I. G. Manolis, T. D. Wilkinson, M. M. Redmond, and W. A. Crossland, *IEEE Photonics Technology Letters*, **14**, 801 (2002).
  9. M. K. Davis and M. J. F. Digonnet, *IEEE Photonics Technology Letters*, **11**, 1256 (1999).
  10. P. D. Atherton, Y. Xu, and M. McConnel, *Proceedings of SPIE's Annual Meeting*, Denver, USA, 15 (1996).
  11. S.-G. Kang, M.-K. Song, S.-S. Park, S.-H. Lee, N. Hwang, H.-T. Lee, K.-R. Oh, G.-C. Joo, and D. Lee, *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, **23**, 672 (2000).
  12. 葉易霖, 白光干涉垂直掃描之研究, 國立台灣大學機械工程研究所碩士論文 (2004).
  13. J. Sin, D. Popa, and H. E. Stephanou, *Proceedings of the FiberOptic Automation Conference*, San, Jose, CA, 415 (2002).
- 
- 范光照教授為英國曼徹斯特科技大學機械工程博士，目前為國立台灣大學機械工程系教授。
  - 林武郎現就讀國立台灣大學機械研究所博士班。
  - 王宏瑜現就讀國立台灣大學機械工程系碩士班。
  - Kuang-Chao Fan received his Ph.D. in mechanical engineering from the University of Manchester Institute of Science and Technology, UK. He is currently a professor in the Department of Mechanical Engineering at National Taiwan University.
  - Wu-Lang Lin is a Ph.D. student in the Department of Mechanical Engineering at National Taiwan University
  - Hung-Yu Wang is a M.Sc. student in the Department of Mechanical Engineering at National Taiwan University