

桃院創新技術學院教師專題研究計畫
成果報告

光纖對光系統之運動控制器研製

計畫編號：教專研 103P - 007

計畫類別：個別型計畫

執行年度：103 年度

執行期間：103 年 1 月 1 日至 103 年 12 月 31 日

計畫主持人：胡雅慧

執行單位：機械系

中華民國 103 年 12 月 31 日

光纖對光系統之運動控制器研製

胡雅慧

機械系

摘要

DWDM光通訊元件的製作技術上，平面光波導(PLC)已逐漸成為未來製作光通訊元件的主要技術。目前國內投入平面光波導自動化構裝技術與設備研發之廠商或研究單位相當少，均以進口國外設備及相關技術人員進行組裝為主。本計畫主要以「光纖對光系統」為基礎，藉由製作其運動控制系統，提高機組之速度、精度與重現度，以符合產業界線上量產使用所需。

本計畫所研製之運動控制器於運動控制系統中主要採用ARM Cortex-M4作為微處理器，以PicoC開發其運動控制程式語言，並利用自行開發之曲線補間演算法，進行單、雙光軸之搜尋程序，此外亦同步進行影像擷取與計算以驗證其精確性，藉由跨領域之技術研究，以光電檢測、機構設計與人機介面整合技術為基礎，有效簡化系統的複雜性，大幅降低原本高價位元件成本，以達低成本、高精度之自動化對光系統研發之目標。

壹、緒論

由於網際網路的迅速發展與資料傳輸需求的快速成長，光纖網路系統係成為通信網路中重要的基礎建設，亦為唯一可以解決頻寬問題的通訊產品。光纖通訊因為具備高頻寬、大容量、高傳輸速率、不受干擾及長距離訊號傳遞等特質，符合多媒體資料所需的龐大傳輸能力，因此光纖通訊的發展已躍為通訊領域的重要發展方向。在傳輸速率及遠距傳輸的考量下，傳統的網際網路多使用乙太網路(Ethernet)的技術作為區域網路，然而光纖傳輸將會促使乙太網路取代目前的ADSL或Cable Model等技術，達到都會區網路與廣域網路的普遍化，其中又以光纖網路結合DWDM(高密度波長多工分工器為Dense Wavelength Division Multiplexer的簡稱)技術可達最佳之頻寬提升效果。

在DWDM光通訊元件的製作技術上，平面光波導(Planar Lightwave Circuit, PLC)已逐漸成為未來製作光通訊元件的主要技術。平面光波導是運用過去半導體製程技術來大量製作功能複雜的積體光學元件，以生產具有光波導功能的光通訊元件，由於此技術係由製作半導體元件轉至光通訊元件，除了需要更高精度與品質穩定性的要求，更需符合未來輕薄短小及低成本的趨勢。

過去在光纖與光波導的耦合技術上，主要係採用單一光纖與單通道波導進行耦合，然而由於平面光波導技術的不斷進步，不但在單一光纖與單通道波導耦合上有較高的完成率，更朝著高密度之多光纖或陣列式光纖與多通道波導之耦合發展。一般而言，對於DWDM光通訊元件其波導的輸入端僅有一處而輸出端為等間距之出口，因此在波導與光纖的耦合上，輸入端屬於單一耦合而輸出端則為多通道耦合，如圖1所示為光纖與光波導之耦合位置排列實體圖，其中包含有左側輸入端光波導元件與單光纖連接與右側輸出端光波導元件與陣列光纖連接位置。然而由於輸入端與輸出端係位於基底平面之兩端，且通道波導的中心是以等間距排列在輸出端平面，因此在陣列式光纖與多通道波導之耦合上便無法採用單一光纖與單通道波導之耦合方式，而採用光纖陣列與波導對接方式。

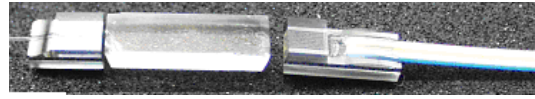


圖1 光纖與光波導之耦合位置排列實體圖

光纖陣列主要是將光纖透過精密定位方式置入等間距之陣列V型槽中，此V型槽係利用單晶矽在{1 0 0}之晶面，透過濕蝕刻之化學腐蝕方法製作出槽相同深寬比且等間距之陣列V型槽，因此各光纖中心亦會以等間距位置排列於同一平面上。藉由光纖陣列與多通道波導相同間距之位置排列，即可確保每一個光纖陣列與光波導陣列在連接時可具有最高的耦合率。由於此V型槽的尺寸均為微米等級，無法由人眼進行判斷與對位，故需採用法學檢測方式輔助對位。其中光波導的耦合中有兩個基本條件：1. phase match condition：只有當兩個模組具有相同或相差極小的傳播係數時，才能產生耦合現象。2. adiabatic transition：當兩波導間的距離在行進方向上的變化量足夠小時，光訊號會保持在自身的模組中，才不會耦合至其他模組。因此不但需要高精度的光纖陣列與光波導製程技術，更需要高品質且穩定性佳的對位系統。

在過去的十年間已有許多專家學者投入在平面光波導的產業中，因此不論是元件的製作或是其檢測設備方面之技術均已相當成熟。平面光波導的自動化構裝技術與設備，國外已經完成機構開發並實際應用，而目前國內卻仍鮮少有廠商或研究單位投入當中，均係進口價格昂貴之國外設備或是人工進行元件組裝。然而台灣若是希望在通訊領域上亦佔有一席之地，勢必在光纖陣列與光波導自動構裝系統上投入相當多的人力與時間，以整合半導體製程、光波導設計、模擬與超精密機構定位的人才與技術，未來將可降低系統成本，更可降低平面光波導元件構裝過程中人為的誤差影響，達成量產時的高品質要求。此外，對於光纖對光系統的運動控制系統，係系統量測速度及測精度的關鍵原因。

故本計畫主要以「光纖對光系統」為基礎，藉由製作運動控制系統，提高機組之速度、精度與重現度，以符合產業界線上量產使用所需。於運動控制系統中主要採用ARM Cortex-M4作為微處理器，以PicoC開發其運動控制程式語言，並利用自行開發之曲線補間演算法，進行單、雙光軸之搜尋程序，藉由跨領域之技術研究，以光電檢測、機構設計與人機介面整合技術為基礎，有效簡化系統的複雜性，大幅降低原本高價位元件成本，

以達低成本、高精度之自動化對光系統研發之目標。

由於目前市面上現有的控制器及驅動器並無法達到高速移動及多軸連續控制等功能，故本計畫結合採用現代化之晶片，可達同步投射光源、影像擷取與機構對位等功能，不但可縮短光通訊元件的對位時間，更可降低人為造成的誤差以提升精度，其對國內之光通訊產業應用技術實具相當大的改革與突破。加上設備成本較低，可為此領域業者所接受，實務應用性極高、潛力十足，其具體技術主要有：

1. 運動控制之軌跡規劃除傳統提供之直線及圓弧外，亦加入直線補間、圓弧補間及曲線補間之運算，其中補間運動演算法係採用自行開發之新型B-Spline與Catmull-Rom Splines數位整數演算法，可大幅度提高演算速度。
2. 採用電腦連線控制之視窗圖控介面，此簡易人機界面，將可有效簡化操作者之操作，並具自製設備有可修改彈性高之特性。
3. 本研究發展之多軸運動控制系統以目前最新穎之ARM嵌入式微處理器為核心，其脈波輸出最高為20KPPS，包含極限之輸入線性補間、位置液晶顯示及RS232命令控制等。可與光度及影像感測器連線，達到自動檢測之目標。

貳、研究方法

本計畫主要擬完成一套運動控制系統以應用於「光纖對光系統」上。整體系統規劃如圖2所示，包含有人機介面、運動命令模組及運動控制模組等三部分。

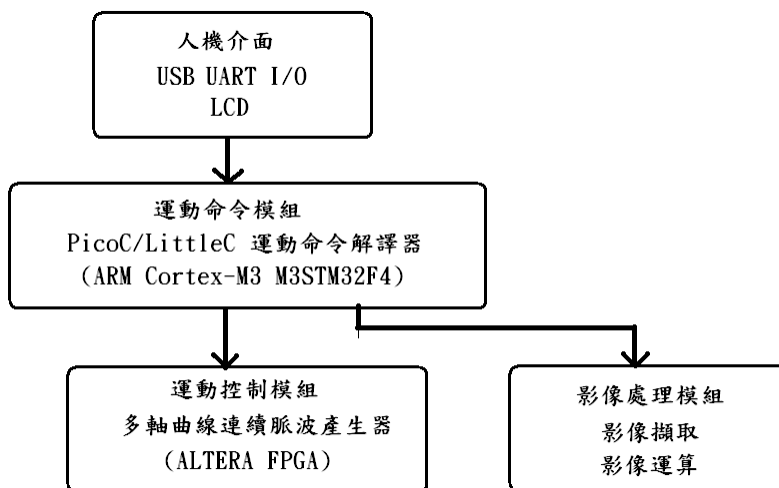


圖 2 運動控制系統與量測系統規劃示意圖

1. 運動控制系統

六軸平台控制系統關係著此對光系統能否達到高精度與短時間檢測的主要機構，由於光纖核心僅有9 μm ，而外核直徑仍只有125 μm ，因此在光纖陣列的對位上，XY軸係屬於光纖端面之平面，故其移動精度至少需要0.1~0.5 μm ，移動解析度須達25 nm以下，Z軸移動軸由於係控制接合端之距離，故精度及解析度可較低，其精度可達1 μm ，移動解析度則達200 nm左右。

1-1 多軸連續控制器之開發

本研究採用美商ALTER公司為數位訊號處理器所生產之FPGA晶片作為程式化規劃元件，此類晶片具有快速計算能力及多個可使用I/O，並可嵌入多個軟核心處理器，因此很適合做為發展全數位化控制之晶片。另外，微處理器則採用目前32位元微控制器最新穎的ARM Cortex-M4。

Cortex-M4核心由於是以硬體來支援各種DSP演算法，和Cortex-M3核心只能以軟體實現DSP演算相比，效率與性能均呈現大幅成長，因此，對於馬達控制、嵌入式音訊、數位電源等側重DSP性能的應用而言，採用Cortex-M4 MCU，將是更理想的選擇。此外，Cortex-M4 處理器內建單一週期乘加 (MAC) 單元、最佳化的單一指令多重資料 (SIMD) 單元、飽和算術指令 (saturating arithmetic instructions) 及選用的單精度浮點協處理器單元 (single precision FPU)。這些數位訊號控制功能皆採用 ARM Cortex-M 系列處理器的創新技術。這些功能包括可達 1.25DMIPS/MHz 的 32 位元高效能、最佳程式碼密度的 Thumb®-2 指令、可達絕佳中斷處理的巢狀向量中斷控制器 (Nested Vector Interrupt Controller)、選用的記憶體保護單元、低成本除錯/追蹤，以及整合的休眠狀態。嵌入式開發人員也可迅速開發最多功能且功耗與尺寸最低的絕佳終端產品。

1-2 多軸連續控制器之語言設計

運動命令模組之一般運動控制系統可分為電腦連線控制與獨立控制兩種，電腦連線控制通常須有人機介面，現在通常使用視窗圖控界面操作，對於運動路徑控制通常使用標準的NC碼或圖形檔輸入，而獨立控制器除對運動路徑控制外，也常要檢知周邊硬體的狀態，傳統CNC使用PLC與M碼來做為控制，但其有許多的限制，如通訊圖形影像等高階應用。

本計畫則以PicoC自行研發運動控制程式語言，PicoC是一個非常小的C語言直譯器，其核心C源代碼是大約4000行之代碼，雖然它不是一個完整的ISO C，但卻包含所有的要件。因此，編譯時只需要幾k的代碼空間和數據空間，故相當適合應用於小型式嵌入設備。

圖3為v2.1版PicoC以Borland C++ Builder 6編譯軟體，在標準C模式下編譯成功之主程式，其執行結果如圖4所示。

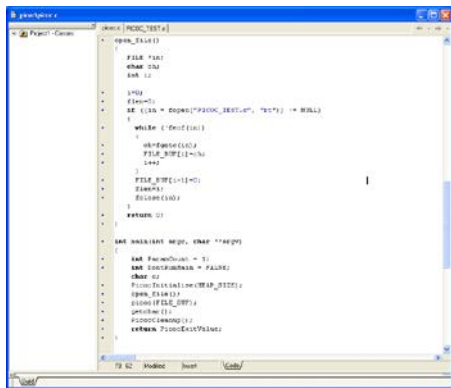


圖 3 PicoC 主程式畫面圖

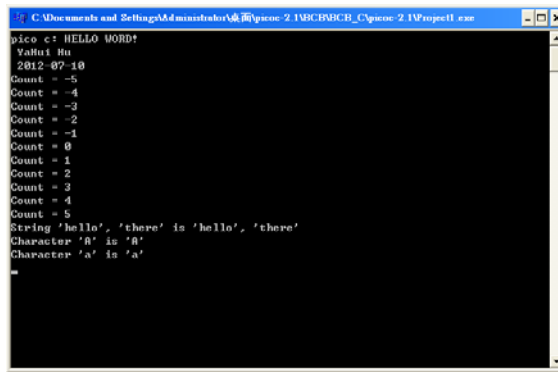


圖 4 PicoC 程式執行結果圖

2. 演算法

2-1 曲線補間演算法

本自行開發之新型演算法，先取圖5上之三個控制點為P1, P04, P08，則二次B'ezier 曲線上的點P(t)為

$$P(t)=(1-t)^2*P1+2*(1-t)*t*P04+t^2*P08----(1)$$

$$P(t)=(1-2*t+t^2)*P1+(2*t-2*t^2)P04+t^2*P08$$

$$P(t)=P1+2*(P1-P04)*t+(P1-2*P04+P08)*t^2 ----(2)$$

$$\text{當令向量 } V1=P04-P1, V2=P08-P04 ---(3)$$

$$\text{則(3)代入位置方程式(2)為 } P(t)=P1+2*V1*t+(V2-V1)*t^2 ---(4)$$

將位置對時間微分得到速度方程式為

$$v(t)=d P(t)/dt=2*V1+2*(V2-V1)*t ----(5)$$

將速度對時間微分得到加速度方程式為

$$a=d v(t)/dt=2*(V2-V1) ----(6)$$

$$v(t)=2*P04+2*(P08-2*P04)*t ----(7)$$

$$a=2*(P08-2*P04) ----(8)$$

則位置之計算改為積分形式

$$v(n+1)=v(n)+a*dt \quad \text{---(9)}$$

$$s(n+1)=s(n)+v(n)*dt \quad \text{---(10)}$$

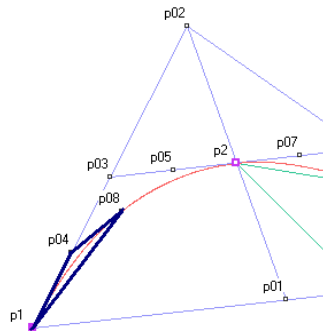


圖 5 多軸連續路徑示意圖

若要使用像素級單步演算法時，函數最好是嚴格遞增函數，故令 $t = 0.5$ 進行分段，並代入(4)式，可得 $P(0.5)=(3/4)V1+(1/4)V2=(P08+2*P04)/4$ ----(11)

其中，為將系統改為整數之運算，故將位置座標放大2倍，並乘以一正整數N，此N值取用分段位置之最大長度分量值，為了達到整數運算，故所有程式設計中之所有公式均作整數運算之修正。其中運動控制系統之程式設計碼如表1所示，初步經本演算法計算得出之路徑如圖6所示。

表 1 運動控制系統之程式設計碼

	定義曲線上的三點	P0 為相對座標
程 式 碼	$bcurve[0][X]=0;$ $bcurve[0][Y]=0;$ $bcurve[1][X]=75;$ $bcurve[1][Y]=50;$ $bcurve[2][X]=100;$ $bcurve[2][Y]=0;$	$p1x=bcurve[1][X]-bcurve[0][X];$ $p2x=bcurve[2][X]-bcurve[0][X];$ $p1y=bcurve[1][Y]-bcurve[0][Y];$ $p2y=bcurve[2][Y]-bcurve[0][Y];$
	初始值：速度、單位	分段點位置
程 式 碼	$v(t)=2*P1+2*(P2-2*P1)*t$ $a=2*(P2-2*P1)$ $int\ v1x=4*p1x;$	$int\ dpx=(2*p1x+p2x);$ $int\ dpy=(2*p1y+p2y);$

<pre>int v1y=4*p1y; int alx=2*p2x-4*p1x; int aly=2*p2y-4*p1y;</pre>

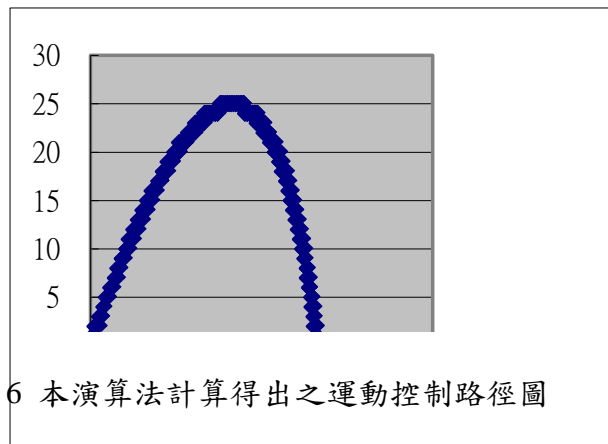


圖 6 本演算法計算得出之運動控制路徑圖

2-2 單光軸搜尋程序

在處理單光軸對準時，分為三個主要步驟，第一為梯度搜尋，第二為二次擬合搜尋，第三為PID控制搜尋，分述如下：

搜尋第一次時係使用兩點量測之梯度搜尋法，各軸分別移動一小位移量，由攝影機擷取影像計算亮度值作為回授的評估值，如此六軸共計六次，若六軸機構的位移與影像擷取處理的時間可於1/15秒完成，則可在0.5秒內推算各軸下一次的位移方向，如圖7所示。

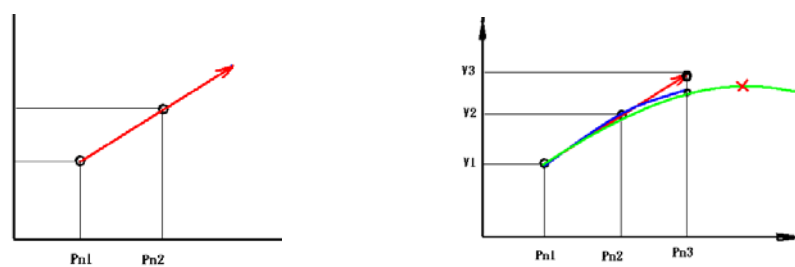


圖 7 單光軸搜尋結果示意圖

第二步驟，各軸依次位移至Pn3的位置，共計六次約，每次約0.5秒完成，各軸可得到三點的回授值，利用二次曲線擬合演算，估算得到最高回授值的位置。

第三步驟，使用PID之控制方法，對各軸之位移進行搜尋控制，對於回授值，使用最高回授值附近之三點位置進行步驟二之推算，最後在容許誤差內，完成最佳值之追蹤。

2-3 多光軸搜尋程序

多光軸搜尋係利用多次的單光軸對準程序，只是回授的裝置改用光功率計，第一次針對最外側的光軸進行校正，完成後紀錄六軸之空間位置，第二次針對另一最外側的光軸進行校正，完成後亦紀錄六軸之空間位置，如此將此兩位置之平均值作為初步之校正值。

第二步驟移動輸入的單光軸與輸出的多光軸六軸平台，量測各光軸的光功率值，加總作為整體的回授值進行最佳值搜尋。

若第二步驟完成時各光軸之量測未能全部進入規格要求內，則將輸入之單光軸與輸出的單光軸分別校正但紀錄各光軸的回授值，最後利用所搜尋的光功率分布求得最佳值。

參、系統架構

本控制器採用ARM Cortex-M4 STM32F4微處理器，STM32F4是屬於低價硬體之開發平台，配備USB介面的開發板，可透過USB線直接連接個人電腦，其具有快速的運算能力，對於同步資料的運算與處理具有極強的能力，能夠以軟體實現複雜的控制法則而不需要藉由複雜的類比路設計、可經由軟體程式修改而實現不同的控制方法，無需硬體電的更改、可降低體積、重量與消耗之功率，價格也較為便宜、具有較高的可靠度且易於維修與測試、對雜訊與干擾有較強的免疫力以及可大幅減少元件的數目而易於製造並提高可靠度。

本控制器完成的系統架構包含有三軸運動控制核心模組、LCD 顯示等，其特點如下，三軸控制器之電路設計圖、PC板繪製圖及控制器實體圖分別如圖8、9及10所示。

- STM32F407VGT6 LQFP100封裝的微控制器具有32位的ARM Cortex - M4F核心，1 MB閃存，192 KB的RAM

- 上板ST-LINK/V2與模式選擇開關使用作為一個獨立 ST-LINK/V2的套件
- 主板上的電源供應器：通過 USB總線或外部的5 V電源電壓
- 外部應用電源：3 V和5 V
- LIS302DL，ST MEMS運動傳感器，3軸數字輸出加速計
- MP45DT02，意法半導體 MEMS音頻傳感器，全方位的數位麥克風
- CS43L22集成了D類揚聲器驅動器，音頻 DAC
- 八個發光二極管：
- 兩個按鈕（用戶和復位）
- 微型AB連接器的USB OTG FS
- 為原型板的快速連接頭為 LQFP100所有的I/O擴展和易於探測

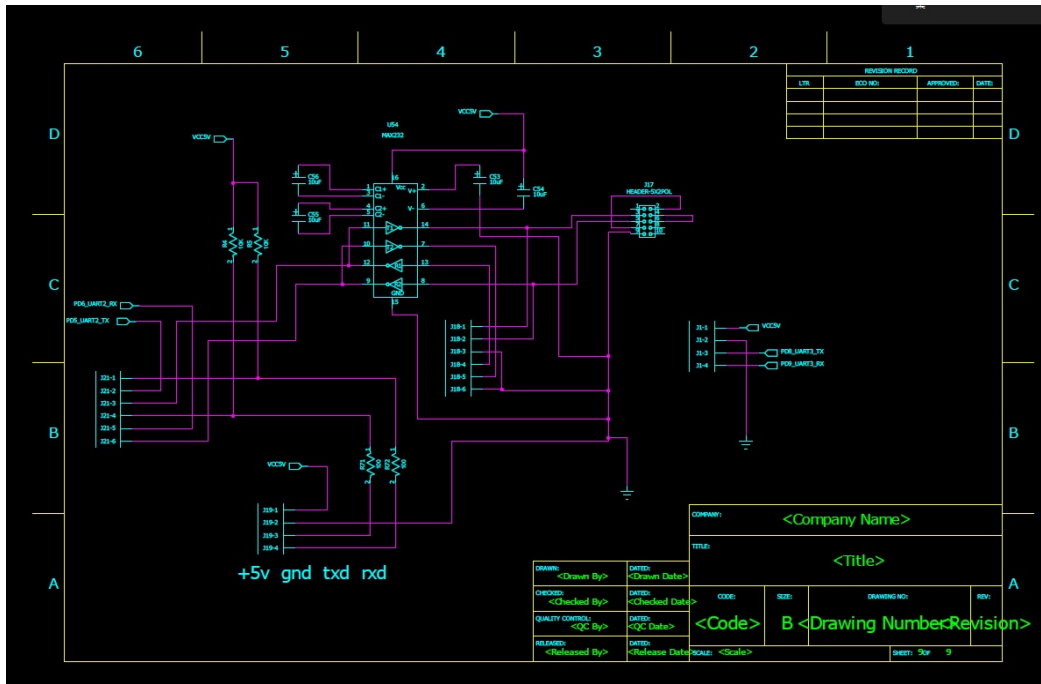


圖 8 三軸運動控制器電路設計圖

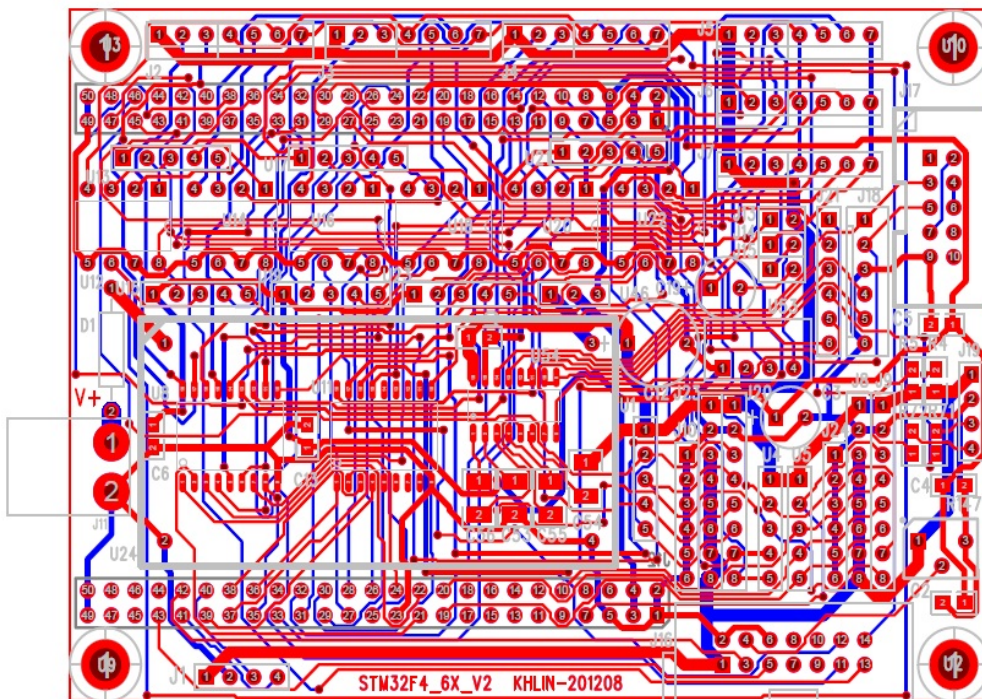


圖 9 三軸運動控制器 PC 板繪製圖

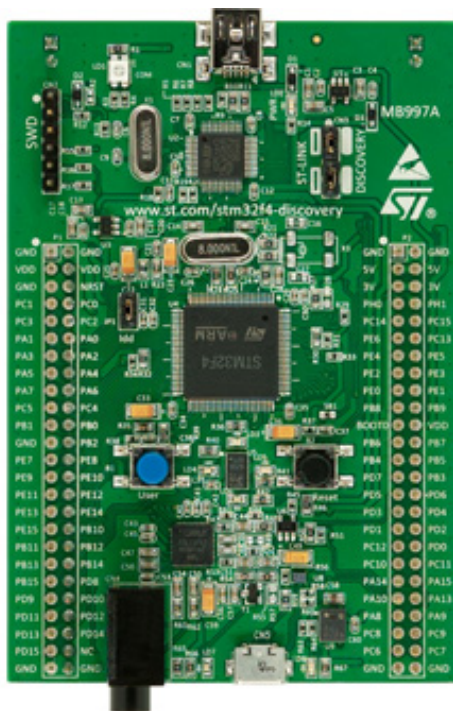


圖 10 三軸運動控制器實體圖

本控制器之操作步驟如下：在執行應用程序前，必須先透過USB與STM32F4 DISCOVERY板連接。其中，USB A型的Mini - B線與電源板（通過 USB接口CN1）是從PC主機連接，嵌入式ST-LINK/V2編程是以外部的燒錄器，進行程式的燒錄。連線與燒錄實體圖如圖11所示。

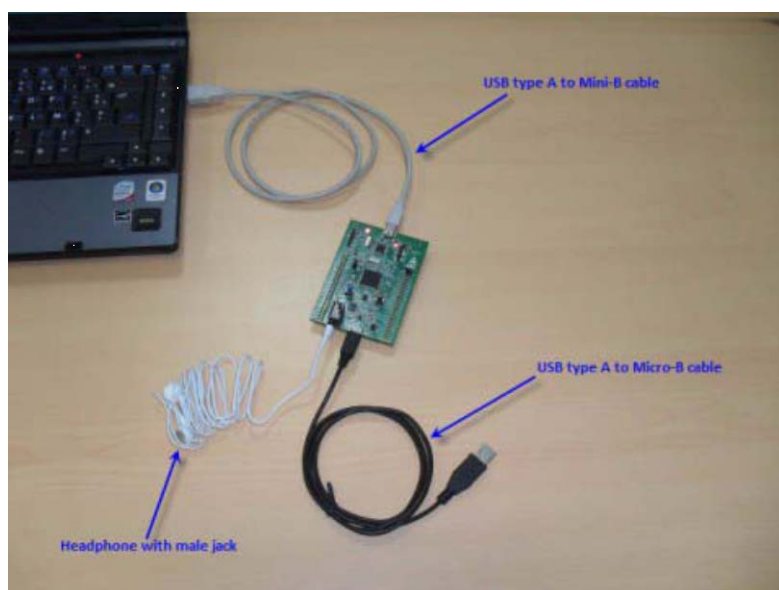


圖 11 三軸運動控制器連線圖

完成連線後，需繼續針對連線情形進行相關設定，其步驟大致如下：

- 檢查，CN3（愉選定）在黑板上，JP1跳線位置。
- 連接與 STM32F4DISCOVERY板到PC的USB A型的Mini - B “通過 USB電纜連接 CN1的電源板。紅色 LED LD2（PWR），然後亮起。
- B1和B2之間的LED閃爍。
- 按用戶按鈕 B1，然後啟用 MEMS傳感器，移動板和觀察四個指示燈閃爍的運動方向和速度。

肆、實驗方法

本計畫之「光纖對光系統」如圖12所示，主要系藉由所製作之運動控制系統，提高機組之速度、精度與重現度，以符合產業界線上量產使用所需。在實驗過程中，將光纖線放置於光纖承載盤上，並利用影像定位與影像擷取方式檢測光纖端面，最後顯示量測結果，影像擷取圖如圖13所示。

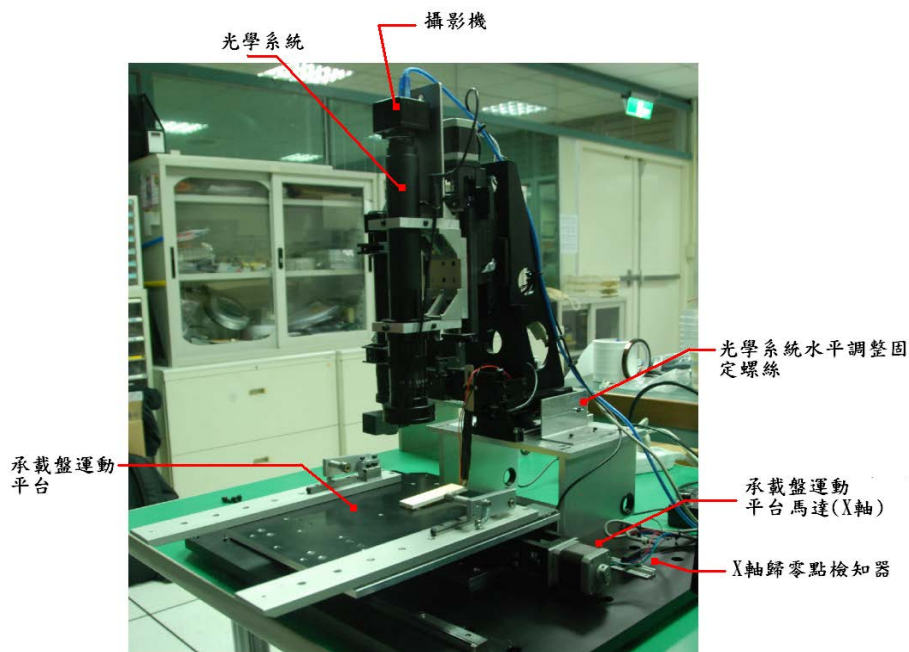


圖 12 光纖對光系統實體圖

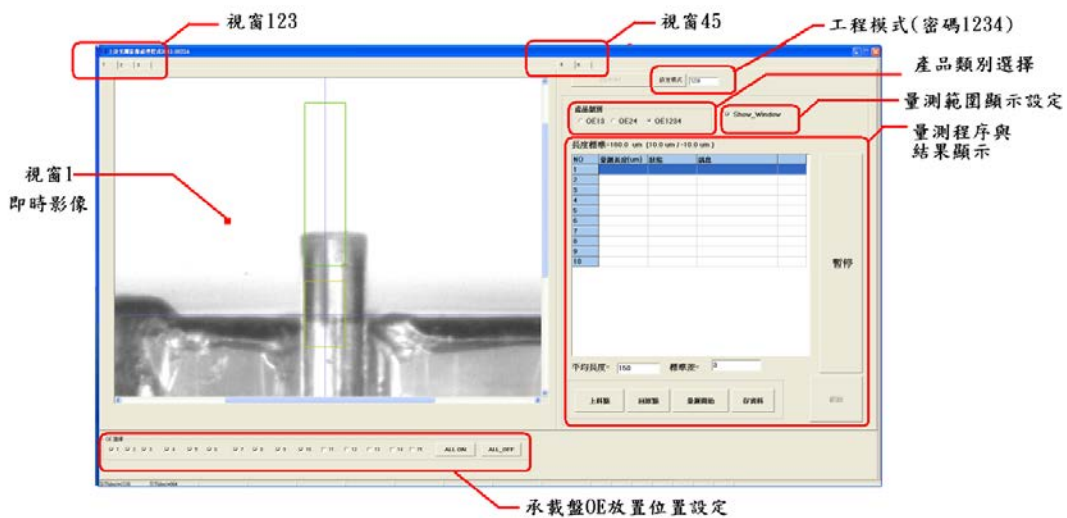


圖 13 光纖量測影像圖

伍、結果與討論

本計畫針對一組八根不同光纖斷面進行固定位置之靜態量測，每組光纖斷面經過十次之結果資料如表1，分析圖如圖14所示。可得到單一位置量測標準差為1um以下。

表1：一組光纖斷面之量測結果

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	標準差
光纖 1	0.161	0.161	0.161	0.162	0.162	0.162	0.162	0.162	0.161	0.162	0.0005164
光纖 2	0.165	0.166	0.166	0.166	0.167	0.167	0.166	0.167	0.166	0.167	0.00067495
光纖 3	0.166	0.166	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167	0.168	0.167	0.167	0.00056765
光纖 4	0.167	0.167	0.167	0.168	0.168	0.168	0.168	0.168	0.168	0.168	0.00048305
光纖 5	0.154	0.155	0.155	0.156	0.155	0.156	0.156	0.155	0.156	0.155	0.00067495
光纖 6	0.156	0.158	0.157	0.157	0.158	0.157	0.157	0.158	0.157	0.157	0.00063246
光纖 7	0.154	0.154	0.154	0.155	0.155	0.155	0.155	0.155	0.155	0.155	0.00048305
光纖 8	0.154	0.155	0.155	0.155	0.155	0.155	0.155	0.155	0.155	0.155	0.00031623

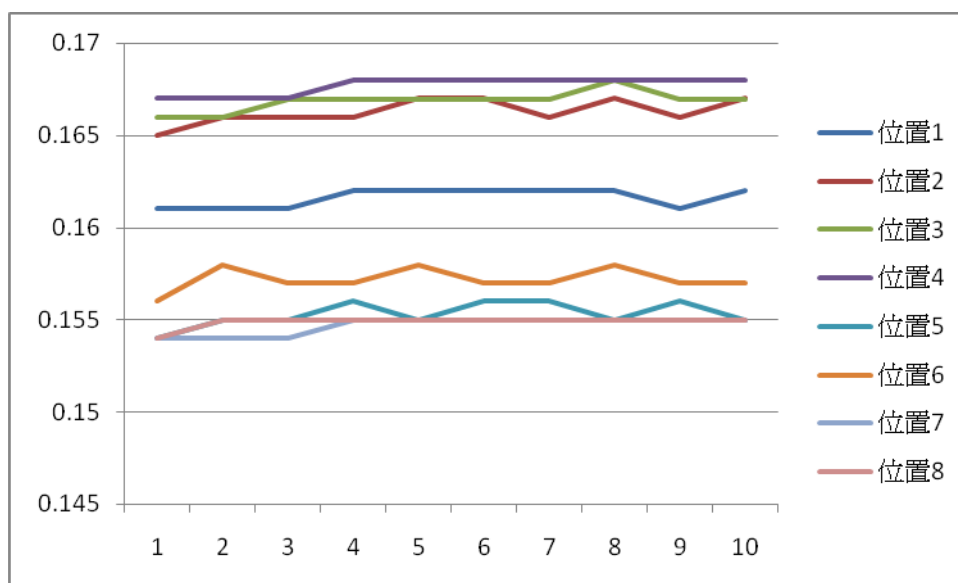


圖14 一組光纖斷面之量測結果

陸、結論

本計畫以「光纖對光系統」為機構系統，藉由運動控制系統之製作與對機構系統之整合，提高機組之速度、精度與重現度，以符合產業界線上量產使用所需。於運動控制系統中主要採用ARM Cortex-M4作為微處理器，以PicoC開發其運動控制程式語言，並利用自行開發之曲線補間演算法，進行單、雙光軸之搜尋程序，藉由跨領域之技術研究，以光電檢測、機構設計與人機介面整合技術為基礎，有效簡化系統的複雜性，大幅降低原本高價位元件成本，以達低成本、高精度之自動化對光系統研發之目標。

由於目前市面上現有的控制器及驅動器並無法達到高速移動及多軸連續控制等功能，故本計畫結合採用現代化之晶片，可達同步投射光源、影像擷取與機構對位等功能，不但可縮短光通訊元件的對位時間，更可降低人為造成的誤差以提升精度，其對國內之光通訊產業應用技術實具相當大的改革與突破。

參考文獻

1. D.M.C. Santos, A.E.M. Pertence and P. R. Cetlin, "The development of 3D models through rapid prototyping concepts," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.168, pp.270-272, 2005.
2. P. Haipeng and Zhou Tianrui, "Generation and optimization of slice profile data in rapid prototyping and manufacturing," *Journal of Materials Processing Technology* Vol.187-188, pp. 623-626, 2007.
3. A. Mirahmadi, S. Saedodin and Y. Shanjani, "Feasibility study of high frequency plasma aided rapid prototyping," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol.47, pp.722-728, 2007.
4. W. Cao and Y. Myiamoto, "Direct slicing from AutoCAD solid models for rapid prototyping," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* Vol.21, pp.739-742, 2003.
5. V. Canellidis, V. Dedoussis, N. Mantzouratos and S. Sofianopoulou, "Pre-processing methodology for optimizing stereolithography apparatus build performance," Vol.57, pp.424-436, 2006.
6. Y.S. Liao, H.C. Li and M.T. Chen, "The study of rapid prototyping process with embedded functional inserts," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.192-193, pp.68-74,

2007.

7. J.L. Song, Y.T. Li, Q.L. Deng and D.J. Hu, "Rapid prototyping manufacturing of silica sand patterns based on selective laser sintering," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.192-193, pp.68-74, 2007.
8. P. Rochusa, J.Y. Plesseriaa, M.V. Elsenb, J.P. Kruthb, R. Carrusc and T. Dormalc, "New applications of rapid prototyping and rapid manufacturing technologies for space instrumentation," *Acta Astronautica*, Vol.61, pp.352-359, 2007.
9. H. Mae, X. Teng, Y. Bai and T. Wierzbicki, "Comparison of ductile fracture properties of aluminum castings: Sand mold vs. metal mold," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 45, pp. 1430-1444, 2008.
10. X.J. Liu, S.H. Bhavnani and R.A. Overfelt, "Simulation of EPS foam decomposition in the lost foam casting process," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 182, pp. 333-342, 2007.