

明新科技大學 校內專題研究計畫成果報告

整合 X-Y 平台與壓電微動平台之六自由度定位誤差補償
6-DOF Positioning Error Compensation by Integrating X-Y
Stage and Piezoelectric Micro Stage

計畫類別： 整合型計畫 個人計畫

計畫編號：MUST-97 機械-04

執行期間： 97 年 1 月 1 日至 97 年 9 月 30 日

計畫主持人：陳木榮

共同主持人：

計畫參與人員：林于舜、劉則南

處理方式：除涉及專利或其他智慧財產權外得立即公開，
唯必要時本校得展延發表時限。

可立即對外提供參考
(請打√) 一年後可對外提供參考
兩年後可對外提供參考

執行單位：明新科技大學機械工程系

中 華 民 國 97 年 10 月 25 日

目錄

一、中、英文摘要	2
二、前言	3
三、研究目的	4
四、研究方法	4
五、結果與討論	7
1.結果	7
2.討論	10
六、實驗部份	12
1.多光軸雷射量測系統	12
2.多光軸量測系統光束調整	14
七、結論	15
八、參考文獻	15

圖表目錄

圖 1.雙軸線性平台之定位誤差補償系統	5
圖 2.定位平台之閉迴路方塊圖	5
圖 3.大行程平台及 PZT 微動平台座標系統圖	6
圖 4.微定位補償機構示意圖	8
圖 5.大行程平台和 6-DOF 微動平台之閉迴路方塊圖	8
圖 6.壓電平台定位之實驗測試	9
圖 7.微動平台沿X運動軸的線性位移	9
圖 8.微動平台沿X運動軸的俯仰運動	10
圖 9.微動平台沿X運動軸的偏搖運動	10
圖 10.整合 X-Y 平台與壓電微動平台之六自由度定位誤差補償實驗	11
圖 11.整合 X-Y 平台與壓電微動平台之線性位移誤差補償	11
圖 12.整合 X-Y 平台與壓電微動平台之偏搖度誤差補償	12
圖 13.三光軸干涉鏡	12
圖 14.三光軸干涉儀之光纖連接	13
圖 15.三平行光束的平行度校正	15
表 1.雷射干涉儀的誤差來源	14

明新科技大學校內專題研究計畫成果報告

整合 X-Y 平台與壓電微動平台之六自由度定位誤差補償

6-DOF Positioning Error Compensation by Integrating X-Y Stage and Piezoelectric Micro Stage

計畫編號：MUST-97 機械-04

執行期限：97 年 1 月 1 日至 97 年 9 月 30 日

主持人：陳木榮 明新科技大學機械工程系

計畫參與人員：林于舜、劉則南 明新科技大學機密機電工程研究所

一、中、英文摘要

本計畫主要在發展精密 X-Y 運動平台的定位誤差補償技術及系統，其可應用在 X-Y 定位平台的六個自由度運動誤差補償，包括三個線性誤差，亦即 X、Y 及 Z 線性位移，以及三個角度誤差，亦即偏搖度、俯仰度及滾動度。預期經由本系統之量測及補償後，位移及線性誤差之準確度可優於 $0.1 \mu\text{m}$ ，角度誤差之準確度優於 1 秒。本研究以一小行程的微動平台安置於一大行程的線性平台上，所發展之誤差補償方法可分為粗/細行程二階段誤差補償，粗行程誤差補償為藉由先以一雷射干涉儀量測一雙軸線性平台之各軸的線性、水平直線度、正交度、偏搖度、俯仰度及滾動度等幾何誤差，再以曲線綴合方法建立各幾何誤差補償方程式，以及透過軟體誤差補償方法進行大行程平台之雙軸線性定位誤差補償。細行程誤差補償則另藉由一安置於大行程的 XY 平台上的六自由度 PZT 壓電微動平台，進行雙線性軸之殘餘線性誤差、偏搖度、俯仰度及滾動度誤差補償。此外，並以六自由度量測系統對微動平台進行六軸之間耦合或相互干涉的測試，並將此結果建構在控制程式中，以利精確算出各致動器的補償量。最後，並以所發展的誤差補償技術對一 X-Y 運動平台進行定位誤差補償，並以 HP5529 干涉儀量測所發展出的誤差補償系統，以評估整個補償系統之性能。

關鍵詞：定位誤差補償、壓電控制、精密定位平台、運動準確度。

Abstract

This project proposes the research of six degree-of-freedom positioning error compensation technology and system for X-Y positioning stages. By using coarse and fine compensations, this position error compensation system has the capability to compensate six motion errors of an XY stage, including three linear errors (X, Y and Z linear displacements) and three angular errors (a yaw error). The accuracy of the developing system could be better than $0.1 \mu\text{m}$ for the displacement and linear compensations, and 1 arcsec for the angular compensations. A six-degree-of-freedom micro motion stage actuated by piezoelectric actuators was mounted on the top of an XY linear stage. In the coarse compensation, a laser interferometer was employed to measure the geometric errors for the two long-stroke stages. By using the software error compensation and constructing the curve-fitting equations for the geometric errors, the coarse error compensation of the long-stroke stage can be accomplished. In the fine compensation, by mounting a 6-dof piezoelectric micro stage onto the XY long-stroke stage, the residual linear positioning errors, yaw, pitch, and roll errors can be effectively enhanced. Through the above coarse and fine error compensations, the accuracy of

the two-dimensional stage combined with the micro stages can be improved to the order of the repeatability of the long-stroke stage. In addition, the developed 6-DOF measurement system was used to perform the coupling or interference tests among the motions of these actuator axes. The result was built into the program to obtain more accurate compensation output for each piezoelectric actuator. Finally, the compensation system was mounted onto an XY stage with long-stroke to perform the error compensation, and the compensation system performance was evaluated by an HP5529 interferometer.

Keywords: positioning error compensation, piezoelectric control, precision positioning stage, motion accuracy.

二、前言

XY 平台為精密定位機械的關鍵性設備，並廣泛應用於高精度的應用領域，如微細加工、微影術(lithography)、檢測、半導體製程及其他自動化工業，而其間所用 XY 平台的特性會影響整台機械的精度與產品的品質。任何精密的雙軸平台須具備沿直線軌跡、理想平面運動及精密定位的功能，但實際上一個平台的真實運動軌跡會偏離各理想直線及此一理想平面，而產生運動誤差。一沿著某一特定平面(如 XY 平面)行進的運動平台將產生六個自由度誤差，亦即三個線性誤差(X,Y 二個線性定位和一個 Z 方向的線性誤差)，以及三個角度誤差，即俯仰度(pitch)、偏搖度(yaw)與滾動度(roll)。[1]。

由於近年來工具機、各種產業機械及量測設備的高精度化，定位技術的要求日趨精密，尤其最近以超精密加工機、半導體製造裝置、微機電設備、電子資訊機器為主的相關高精度定位技術的發展，定位技術之重要性急速增加。依據一由工研院經資中心於 2000 年對國內調查所提出的報告，報告中預測指出在所調查之包含 IC、LCD 製程設備及微機械等 52 項具發展潛力機械產品中，至 2006-2010 年間線性馬達及線性滑軌將分居產品產值成長率之排名的第一及第四位[2]，由此可見高精度線性定位機械在精密機械及自動化產業的重要性及發展潛力。而隨著半導體之積體電路密集度日益增加，在此類積體電路的製程上，所使用的光蝕刻製程的曝光裝置所要求的精密度也日益提高。另一方面，基於產能的需求，晶圓(wafer)的尺寸勢必增加。依此發展趨勢，由於承載工件之工作平台的運動行程增加，工作平台的方位(orientation)變動也會對各目標點產生覆疊誤差(overlay error)[3]。因此需要具備定位精度極高的各種機器和裝置，除了原有之線性運動的位置誤差外，運動體在運動中所產生之其他的自由度誤差也需要併入考慮，並且也希望能夠進行誤差補償。

就一般多軸機器來說，其結構係以一運動軸建立在另一運動軸的方式組裝形成，因此整個定位平台的定位準確度除了需要考慮各運動軸的幾何誤差外，另外也需考慮相鄰軸之間的正交度誤差(squareness error)，再藉著體積誤差運算以求出目標點的定位誤差[4,5]，此種補償方法為先以離線方式個別量出各項誤差[6,7]，再藉軟體補償方法來提升運動台的精度[8]。然而使用此方法僅適用於線性位置誤差的補償，且不包含角度誤差的補償。

由於近年來工具機、各種產業機械、量測機器的高精度化，定位技術的要求日趨精密，尤其最近以超精密加工機、半導體製造裝置、電子資訊機器為主的相關高精度定位技術的發展，定位技術之重要性急速增加，其間使用了許多需要在同一平面上運動，及以步進與重複(step & repeat)方式進行高精度定位運動的雙軸線性定位平台。就雙軸線性定位平台，除了原有的雙軸位置誤差之外，其他的自由度誤差也需要併入考慮，以降低工作平台因方位變動對各目標點所產生的覆疊誤差 [9,10]。由於現代製造業朝向精密化

的發展，新一代的定位平台除了必須有長距離及高精密度定位能力外，甚至必須具備多自由度微調的能力[11,12]。

傳統上，使用伺服馬達和導螺桿的定位平台雖然有相當大範圍的行程，但由於其導螺桿中所使用的滾珠具有非線性彈簧效應(nonlinear spring effect)和黏滑(stick-slip)行為[13]，而這些行為並不易消除，因此通常很少單獨使用伺服馬達和導螺桿的平台來進行次微米定位。而在微細定位方面，一般係使用壓電致動器或尺蠖運動(inchworm motion)來達微細定位的功能[14, 15]。而此方面的研究大部分主要為發展微小位移之定位平台，大部分以電容感測器或 LVDT 感測器針對運動物體進行單軸或多軸運動小行程的量測[16,17]。

目前在高精密定位領域一種實用的方法為採用結合大行程平台(coarse stage)及微動平台(fine stage)的粗/細平台(coarse/fine stage)或雙重致動器(dual-actuator)平台[18-20]，大行程平台可作數十至數百 mm 大行程快速定位及數微米之準確度定位，微動平台則可作次微米以下之準確度定位。Okazaki[21]等發展出一粗/細平台(coarse/fine stage)，及採用雷射干涉儀作為位移量測。Sakuta[22]等發展將一 PZT 致動器裝置在一摩擦驅動平台上的雙伺服機構(dual servo mechanism)，其位移運動採用一種尺蠖運動(inchworm motion)方式來達成微細定位的功能。Pahk 等[23]也發展一結合伺服馬達及 PZT 致動器的單軸定位平台。以上研究主要為發展具有雙重致動器的粗/細定位平台，其中大部分微細定位的相關研究則主要在針對單軸線性定位誤差進行即時補償及控制，此其間所採用之雙重致動器的定位系統則需另安裝昂貴的雷射干涉儀於工作平台的上方。而本研究所發展的補償方法為以二階段方式進行雙軸定位平台的精密位置及偏搖度補償，第一階段的誤差補償為先量測各運動軸的線性、水平直線度、正交度、偏搖度、俯仰度及滾動度等幾何誤差，再以曲線綴合方法重新建立各幾何誤差補償方程式，進行大行程平台之雙軸線性定位誤差補償。第二階段的誤差補償為重新量測上述幾何誤差，再以曲線綴合方法建立各幾何誤差補償方程式，以及以一六自由度微細壓電平台補償經先前粗行程補償後所殘餘的線性定位誤差及偏搖度誤差。

三、研究目的

現代製造業朝向高速化及精密化的發展，具有高精度的量測及定位方法為科技工業上迫切需要的技術，此方法適用於一般裝設光學尺或旋轉編碼器(rotary encoder)之大行程 XY 平台的定位誤差補償，且不需另於平台上方裝設雷射干涉儀設備及更改大行程平台的感測器系統，因此具有其實用性，並且可藉由微細壓電平台直接有效地改善先前粗行程補償後所殘餘的微小線性定位誤差，以及進行偏搖度、俯仰度及滾動度等角度誤差補償。此外，在六自由度微細運動中，由於多軸微細運動係利用結構變形以形成整個結構體或組合結構體之運動，以致各致動器彼此之間所產生的運動也會產生耦合(coupling)或干涉的現象。因此，本研究亦以此量測系統放置於所設計的微動平台上，進行各軸干涉的測試，並將此測試結果納入誤差補償程式之控制演算法中，以更精確計算出各壓電致動器的補償量。因此本計畫為整合雙線性大行程運動平台及六自由度壓電微動平台之系統，以發展更具高精度之六自由度誤差補償技術。因此計畫之成果對精密科技及自動化工業均具有其發展與應用價值。

四、研究方法

本研究所發展的 XY 定位平台定位誤差補償系統架構如圖 1 所示。此定位誤差補償系統的組成主要可區分成誤差量測系統及微動平台系統，以及另外搭配一大行程平

台以對其進行六自由度之誤差補償。整個定位系統之量測及控制架構如圖 2 所示。茲分別敘述於下：

大行程運動平台為一可進行高速微步進(micro stepping)定位控制的 XY 平台，行程為 200 x 200 mm，Y 平台安裝在 X 平台上面，各運動軸並加裝的解析度為 0.1 μm 的光學尺。在微動平台方面採用積層式 PZT 壓電陶瓷材料(multilayer PZT piezoelectric actuator)作為致動器，壓電材料為目前一般微動定位平台最常用的致動器，其具有體積小、反應快、出力大產生熱量低等優點。雖然壓電元件受材料遲滯(hysteresis)現象的影響，其在電壓輸入對位移輸出上的關係並非呈現理想的線性行為，但經由硬體電路作迴授控制後，仍可達到 10nm 的解析度微動平台採用積層式 PZT 壓電致動器(multilayer PZT piezoelectric actuator)驅動微動平台。微動定位平台可進行 X、Y 和 Z 方向線性運動(行程為 800 x 800 μm)及偏搖度、俯仰度和滾動度運動(行程為 $\pm 500 \mu\text{rad}$)，並使用解析度為 8 nm 的電容感測器，及以壓電放大器及控制器(PI 公司所製造)進行閉迴路控制。

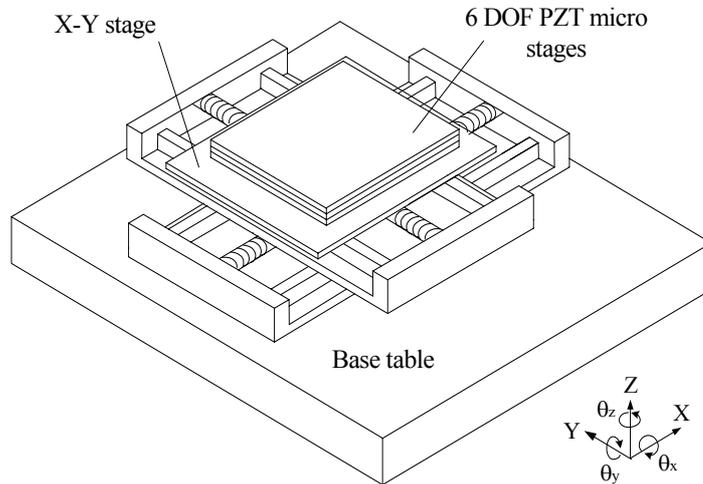


圖 1. 雙軸線性平台之定位誤差補償系統

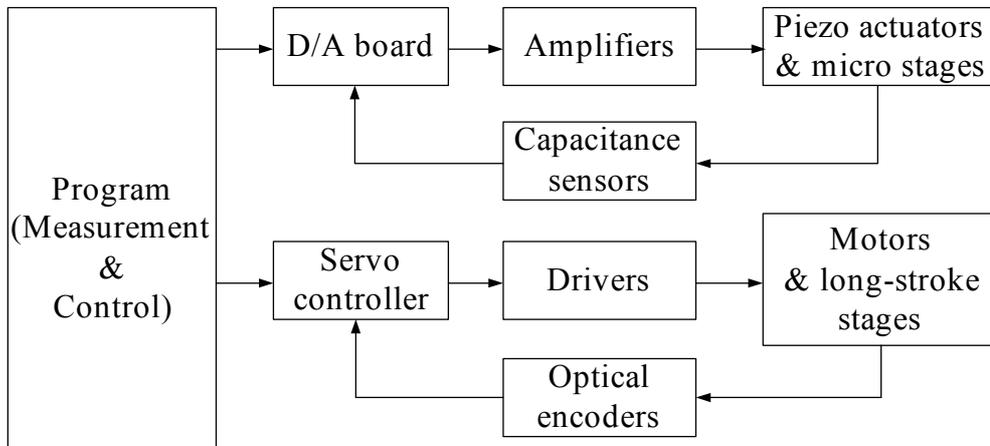


圖 2. 定位平台之閉迴路方塊圖

本系統針對 x 、 y 、 z 、 θ_x 、 θ_y 及 θ_z 六自由度運動進行閉迴路控制，並量測其對遲滯效應的降低情形、閉迴路控制之頻率響應，以及利用 MATLAB 軟體中的 frequency-domain system identification toolbox 進行系統識別，求出各致動軸之轉移函數(transfer function)。此外，由於當微動平台進行各軸運動時，彼此互相造成的運動耦合或干涉，亦採用齊性轉換矩陣(homogeneous transformation matrix, HTM)以反推各平台位置點應補償的誤差量及採用適當的控制運算法(如 PID 控制)，透過電腦計算出各壓電致動器的驅動量，以針對量測系統所獲得之六自由度誤差補償。

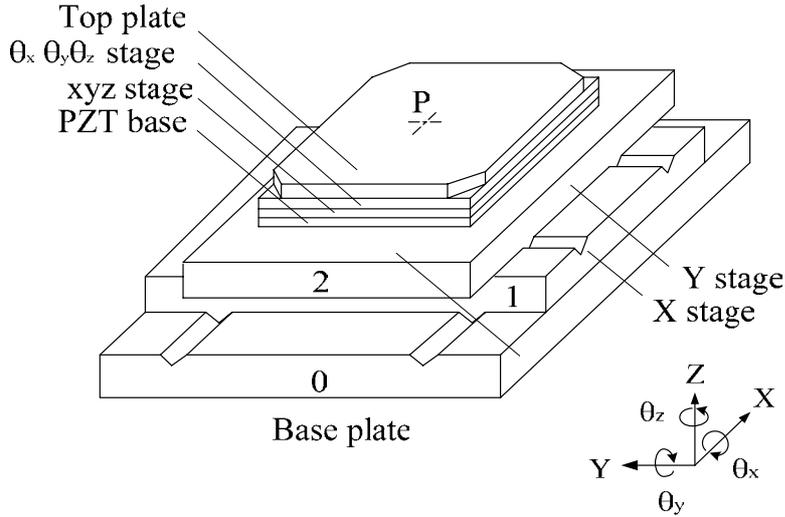


圖 3.大行程平台及 PZT 微動平台座標系統圖

為了決定空間中任意物體之間的相對位置及方位，本章依序敘述由粗細運動平台(coarse and fine moving stages)所組成之多運動軸系統的誤差模型。在誤差模型的建立過程中，假設粗細運動平台之各軸運動均為剛體運動，藉著剛體運動學及使用齊次轉換矩陣來推導多軸運動機器的幾何誤差。圖 3 為大行程平台及 PZT 壓電微動平台的座標系統圖，藉此座標系統圖可進行高精度定位平台的幾何誤差分析，假設運動平台之花崗岩底座的座標系為 T_0 ，X 軸運動平台相對於花崗岩固定底座的座標系為 T_{10} ，Y 軸運動平台相對於 X 軸運動平台的座標系為 T_{21} ，大行程平台及微動平台上之平板(top plate)相對於 Y 軸運動平台的座標系為 T_{p2} 。應用齊次轉換矩陣並假設各轉動誤差均為小誤差量。經由齊次轉換矩陣運算，點 P 相對於花崗岩固定底座的座標可表示為：

$$T_p = T_{01} T_{21} T_{p2} \quad (1)$$

因此由 T_p 的位置向量，可獲得 Y 平台上之點 P 相對於固定底座的位置座標分量及點 P 的座標位置誤差。由 T_p 的旋轉向量可獲得上平板相對於花崗岩固定底座的旋轉分量。可得上平板之偏搖度(θ_z)、 θ_y 及 θ_x 等角度誤差分別為：

$$\theta_z = \varepsilon_z(x) + \varepsilon_z(y) \quad (2)$$

$$\theta_y = \varepsilon_y(x) + \varepsilon_y(y) \quad (3)$$

$$\theta_x = \varepsilon_x(x) + \varepsilon_x(y) \quad (4)$$

其中 $\varepsilon_z(x)$ 、 $\varepsilon_y(x)$ 和 $\varepsilon_x(x)$ 分別為平台沿著 X 軸之偏搖度、俯仰度及滾動度， $\varepsilon_z(y)$ 、 $\varepsilon_y(y)$ 和

$\varepsilon_y(y)$ 分別為平台沿著 Y 軸之偏搖度、俯仰度及滾動度。經由上述方法所建立之雙軸平台的誤差模型可用來計算誤差補償量。X 軸及 Y 軸之線性誤差、直線度及偏搖度誤差可分別視平台之誤差特性採用二次或三次方程式以進行各誤差項之曲線綴合方程式 (curve fitting equation)。採用之方法為以如式(9)之曲線綴合方程式求出各目標的預期定位誤差。

在獲得各誤差項之方程式後，即可經由式(1)計算出工作平台之上平板上某一位置點預期的位置誤差，本研究之實驗測試將以上平板的中心點作為此一位置點，因此經由電腦計算及送出最佳位置指令至大行程平台之控制器，可使大行程平台獲得數微米的定位準確度，以利後續之微細誤差補償。

在進行第一階段之粗行程補償後，藉由重新量測定位平台的各幾何誤差值，及經由各曲線綴合方程式，求出平台之上平板的某一位置點的殘餘定位誤差，以微動平台進行 X 和 Y 軸方向的殘餘線性定位誤差補償；以及以式(2)至(4)求出平台到達位置點時上平板的預期角度誤差，以進行三個角度誤差的補償。

因此，整個平台的三自由度定位誤差可以藉由此粗/細二階段之誤差補償而獲得更好的準確度，使得定位台在準確度的性能可被提升至接近大行程平台之重覆性精度的等級。由於第二階段的線性誤差屬於微細行程的運動，因此經由第一階段的誤差補償後，才可使大行程平台的誤差縮小至微動平台可補償的行程範圍，以利進行細行程的誤差補償。

五、結果與討論

1. 結果

1. 結果

大行程運動平台為一可進行高速定位控制的 XY 平台，行程為 200 x 200 mm，Y 平台安裝在 X 平台上面，如圖 4 所示，各運動軸並加裝的解析度為 0.1 μm 的光學尺。微動定位平台可進行 X 與 Y 方向線性運動(行程為 800 x 800 μm)及偏搖度運動(行程為 $\pm 500 \mu\text{rad}$)，並使用壓電放大器(輸出為 -20VDC 至 VDC)及控制器進行閉迴路控制，如圖 5 所示。

圖 6 為壓電平台定位之實驗測試照片，圖 7 至 9 所示為 PZT 壓電平台的線性定位、偏搖度、俯仰度及偏搖度誤差的測試結果。圖 10 為整合 X-Y 平台與壓電微動平台之六自由度定位誤差補償實驗情形，經由實驗測試，在線性位移的補償，可達 0.05 μm ，角度位移的補償可達 0.3 arcsec 的準確度，圖 11 為整合 X-Y 平台與壓電微動平台之線性位移及偏搖度誤差補償之前及之後補償的結果，在補償前大行程定位平台的 X 和 Y 軸線性位移的最大準確度誤差分別為 12 μm 和 9 μm ，經由以微動平台進行即時誤差補償所得到的結果，二軸均優於 0.01 μm 。圖 12 為 X 軸補償前後的偏搖度準確度，在補償前準確度約為 12 arcsec，而補償後被改進為優於 0.3 arcsec 的等級。

2. 討論

本研究所完成的項目可歸納如下：

1. 完成雙重致動器誤差補償系統之光學及機構之架設及精密對準。
2. 設計及製作六自由度之微動平台，及建立此微動平台的運動模型及結構體運動

分析。

3. 以六自由度量測系統對微動平台進行各致動器軸間運動干涉的測試，建立耦合矩陣(coupling matrix)，並將此結果建構在控制程式中以利精確算出各致動器的補償量，並與所分析的運動模型進行比對。
4. 建立壓電微動平台之控制系統模型及控制系統識別與分析，及藉閉迴路控制降低壓電元件遲滯現象的影響，撰寫微動平台控制運算程式，以計算各致動器之輸出變形量。
5. 降低機器振動或環境因素帶來之誤差或雜訊，以增加系統本身對外界干擾的強健性。
6. 將此誤差補償系統安置於一雙軸線性平台(行程為 200mm)進行定位誤差的補償，並以 HP5529 雷射干涉儀進行同步檢測，以評估所發展出的誤差補償系統的性能。

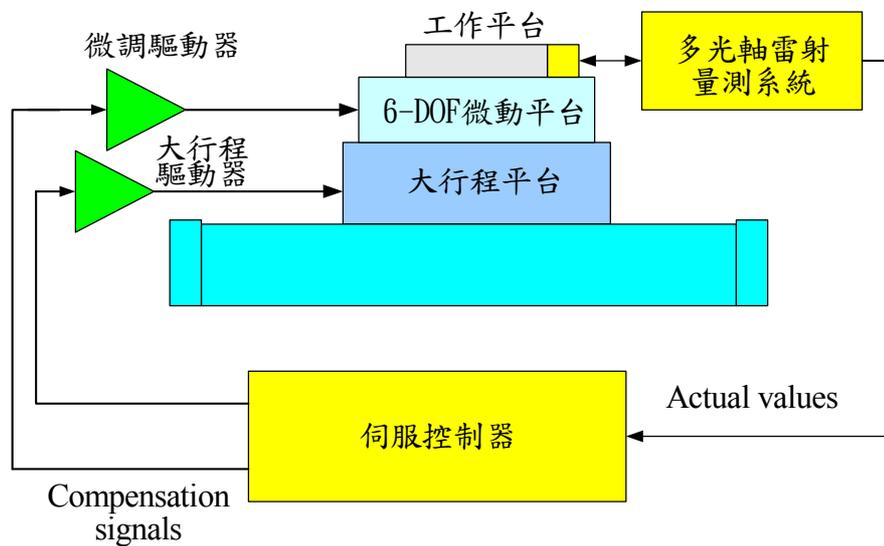


圖 4. 微定位補償機構示意圖

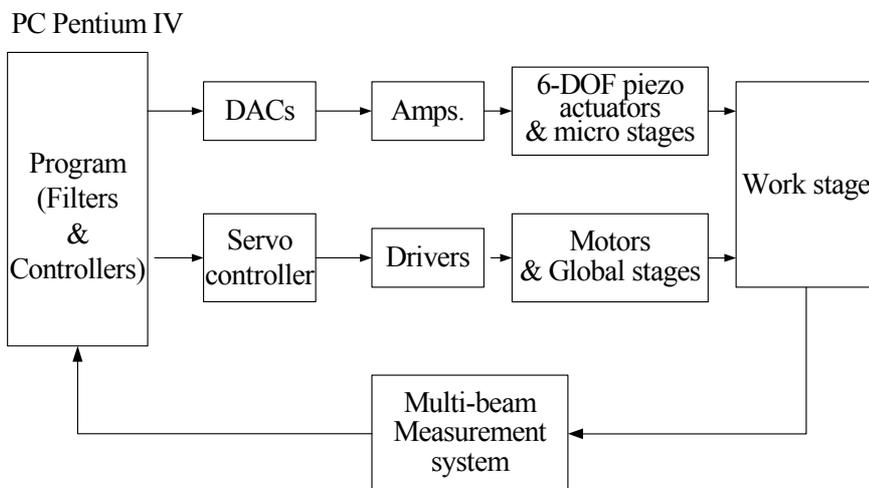


圖 5. 大行程平台 and 6-DOF 微動平台之之閉迴路方塊圖



圖 6.壓電平台定位之實驗測試

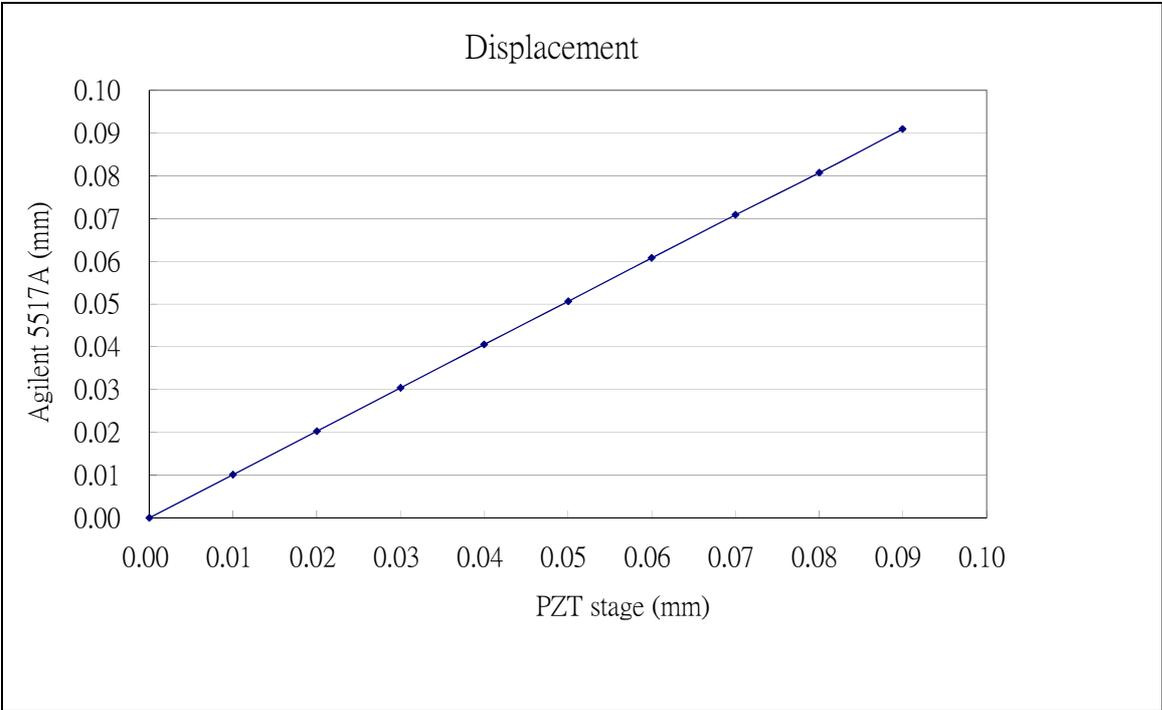


圖 7.微動平台沿X 運動軸的線性位移

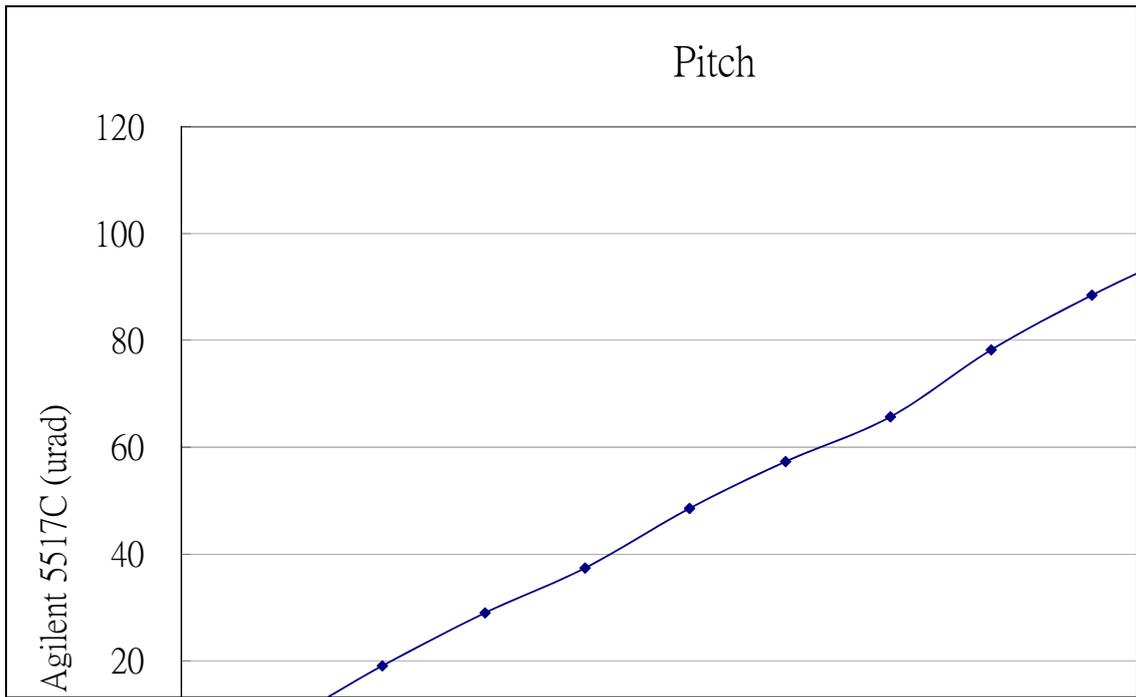


圖 8.微動平台沿X 運動軸的俯仰運動

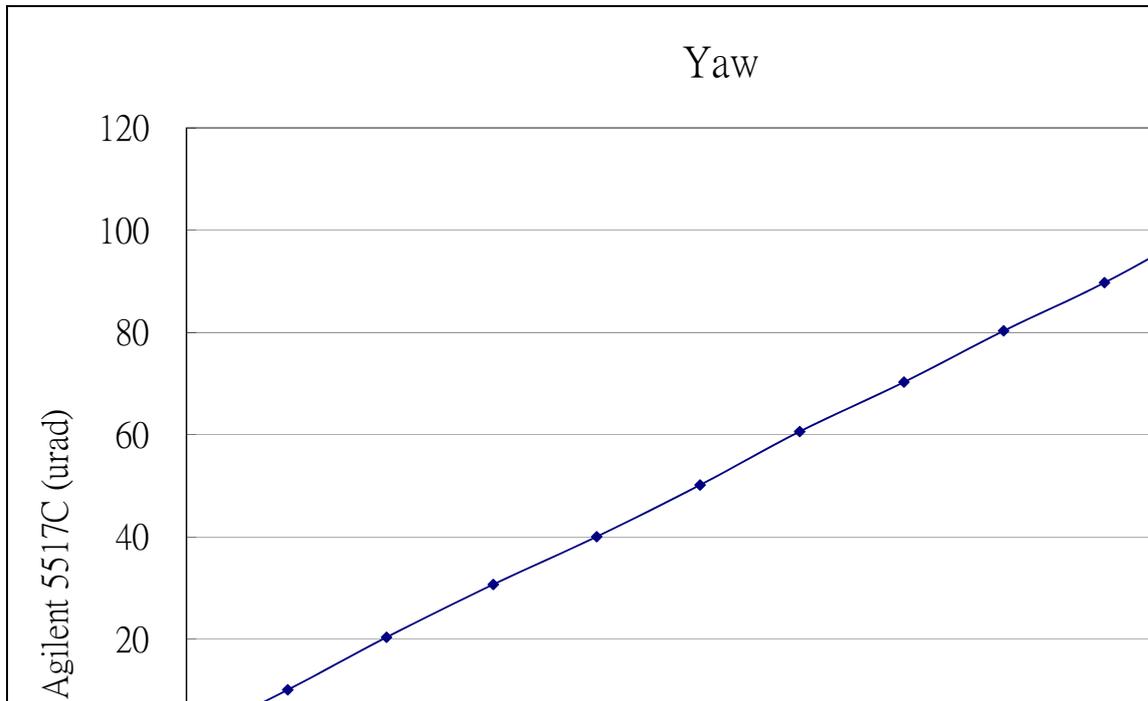


圖 9.微動平台沿X 運動軸的偏搖運動

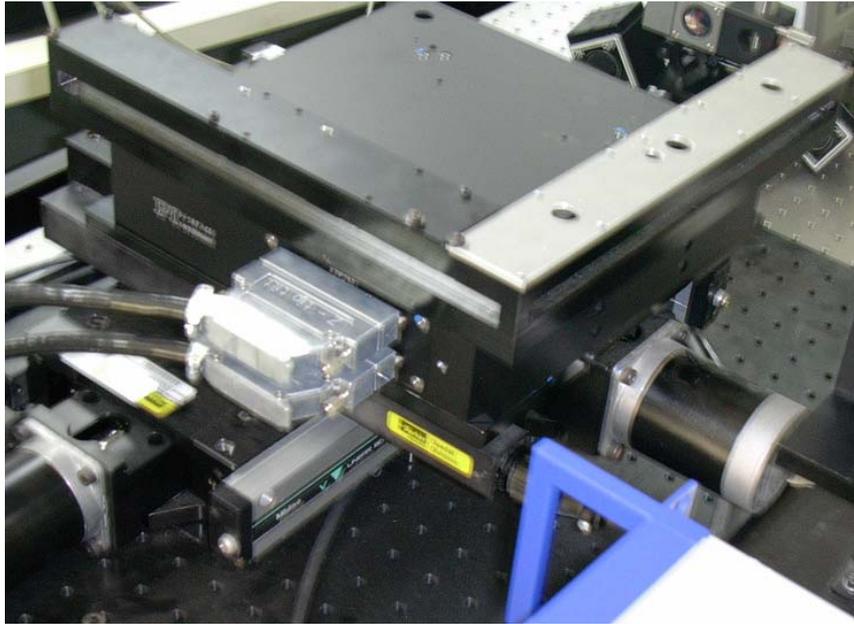


圖 10. 整合 X-Y 平台與壓電微動平台之六自由度定位誤差補償實驗

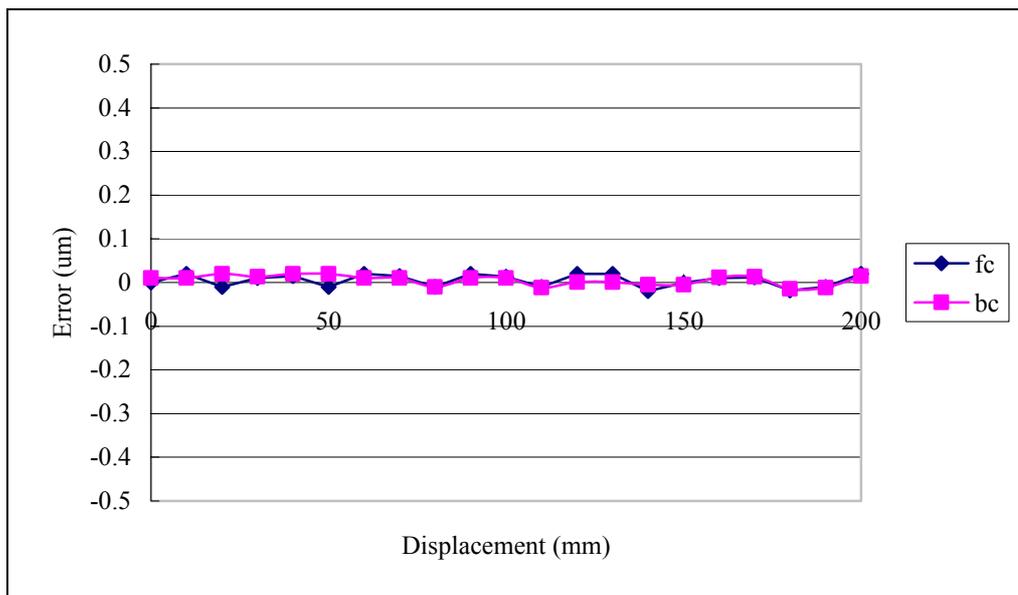


圖 11. 整合 X-Y 平台與壓電微動平台之線性位移誤差補償

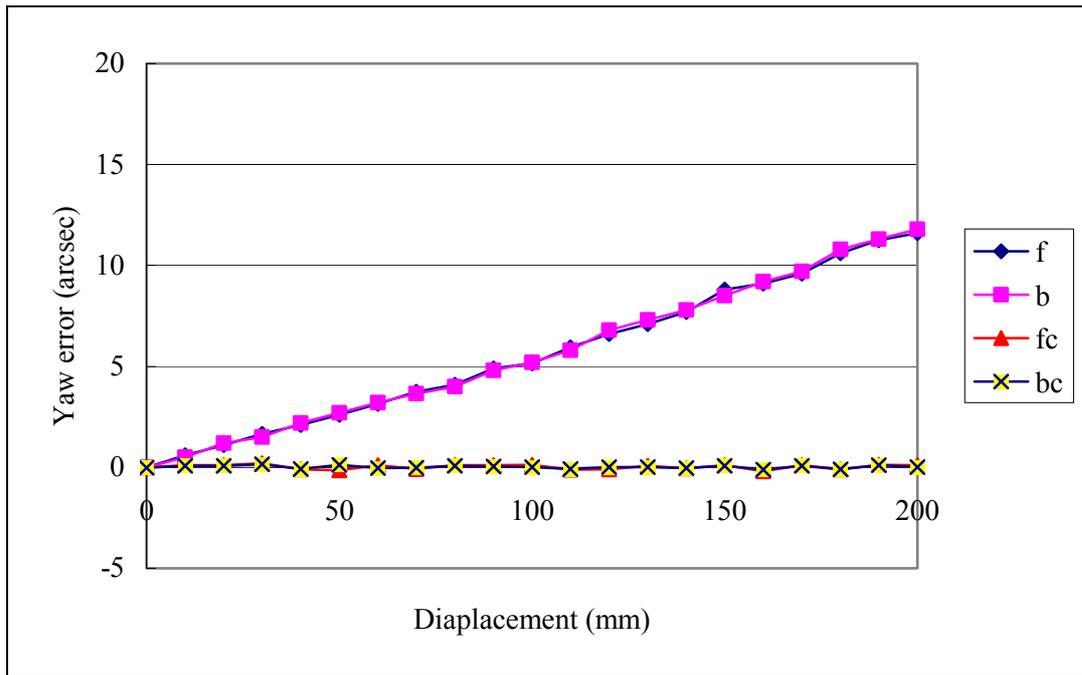


圖 12.整合 X-Y 平台與壓電微動平台之偏搖度誤差補償

六、實驗部份

1. 多光軸雷射量測系統

多光軸雷射量測系統之干涉鏡及光纖連接如圖 12 及 13 所示。雷射系統的量測準確度及重覆性精度主要由以下表 1 的誤差項目所決定。

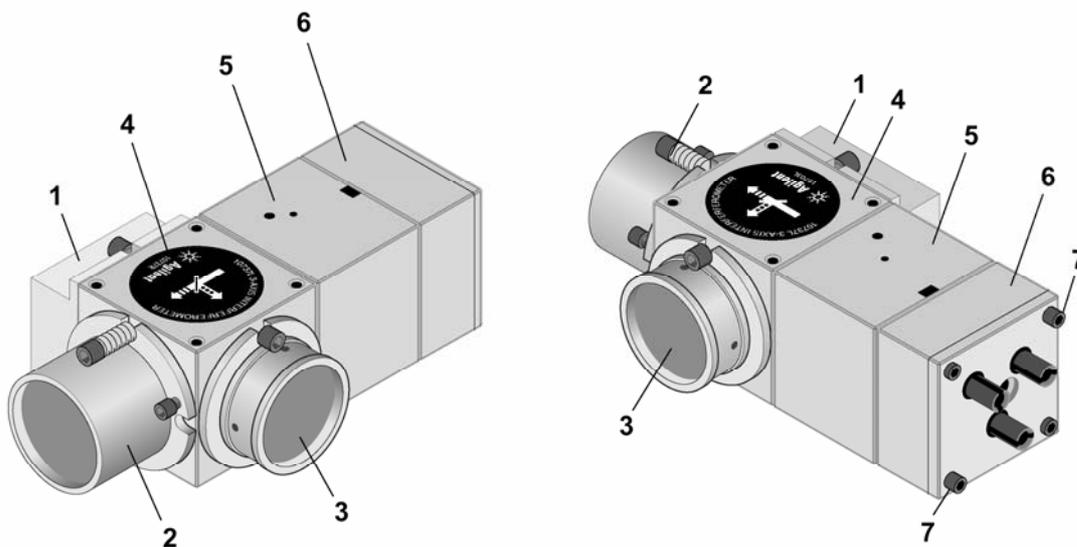


圖 13.三光軸干涉鏡

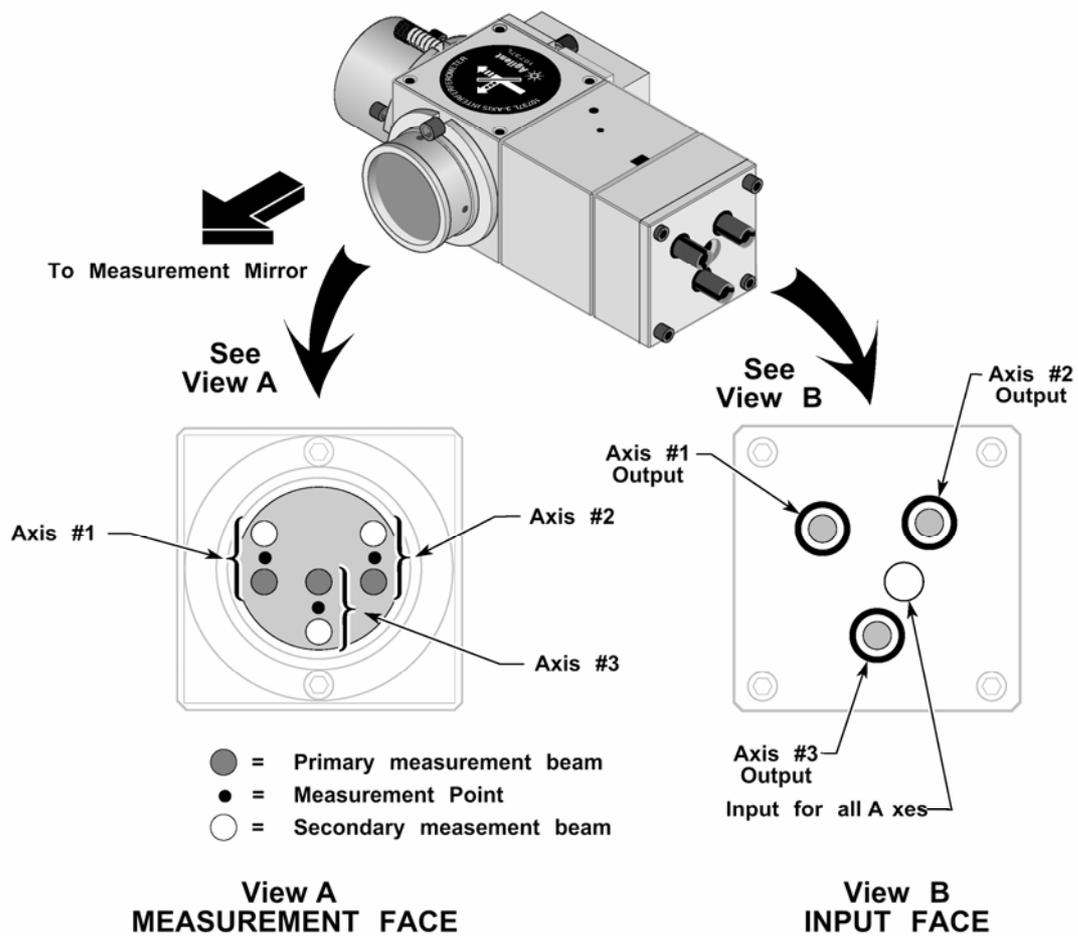


圖 14.三光軸干涉儀之光纖連接

為了達到最佳的量測準確度，必需確保環境的溫度和濕度控制，以及進行大氣壓力和材料影響的補償，定位雷射頭使得 dead-path 和阿貝偏移可以降至最小。若使用環境因素以軟體補償，則全部位移誤差可忽略環境的影響。

表 1.雷射干涉儀的誤差來源

分類	誤差來源	量測距離之比 例函數
系統	波長穩定性	是
	電子裝置誤差	否
	訊號細分割線性度	否
量測環境	溫度、氣壓、氣流和 濕度引起波長變化	是
	工件熱膨脹	是
	光學熱飄移	否
	振動	否
安裝	Dead-path 誤差	是
	阿貝誤差	否
	餘弦誤差	是

2.量測系統的安裝與對準

在量測系統的安裝與對準方面，安裝雷射頭單元時，需讓三平行光束的餘弦誤差降至最小，以確保量測俯仰度及偏搖度的準確度，此三平行光束的平行度須作精密的調整。其對準方法如圖15所示，藉由三次元量測儀及四象限光感測器，可以三平行光束在四象限光感測器的位置，再調整個各雷射光束的方位，直到各位置四象限光感測器的所接收的左右及上下偏差電壓值，即可精密調整所有光束的方位。

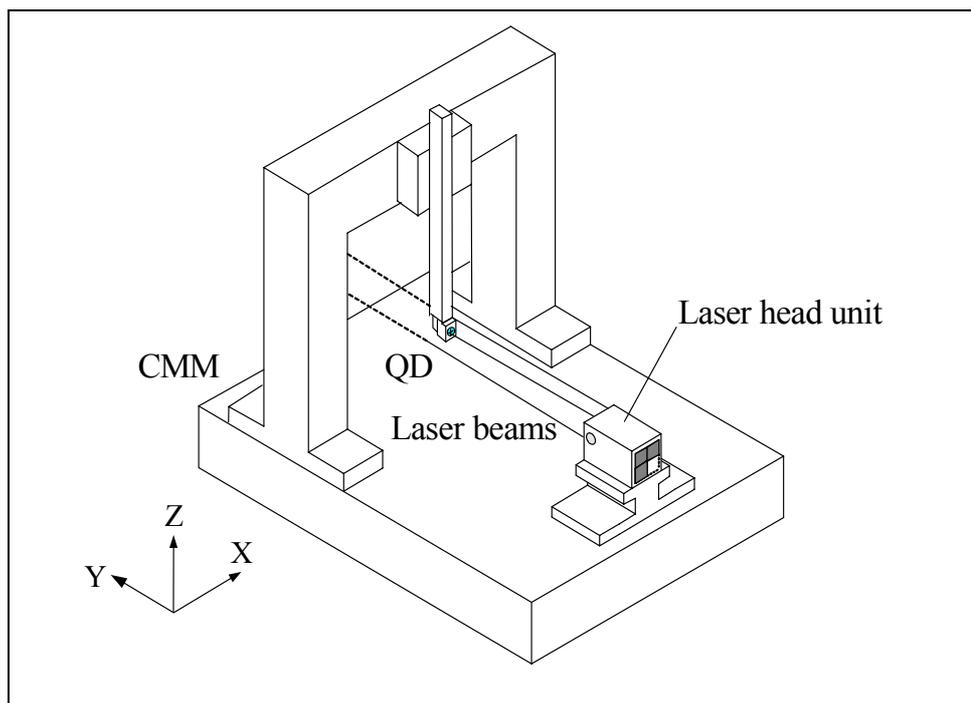


圖15. 三平行光束的平行度校正

七、結論

本計畫已發展出一個結合壓電平台之六自由度誤差補償系統，經測試結果已可使用於一行程為 200mm x 200mm 之雙軸線性平台的定位誤差補償。經由全部採用壓電微動平台之設計，有效地補償了一線性平台之定位誤差及三個角度誤差。在研究過程中也建立了高精度、大行程之六自由度誤差補償定位系統所需面臨的一些光學精密對準技術。本研究所獲得成果屬於一先進的精密定位誤差補償系統，適合置放於各種驅動方式的 X-Y 平台上方，以進行即時定位六自由度定位誤差補償。

八、參考文獻

1. G. Zhang, R. Ouyang, B. Lu, R. Hocken, R. Veale and A. Donmez, "A Displacement Method for Machine Geometry Calibration," Annals of CIRP, Vol.37, pp.515, 1988.
2. 王建彬, "我國機械工業競爭力分析暨發展策略芻議,"中國機械工程學會會刊, 第240期, pp.42-70, 2001.
3. T.E. Zavecz, "Machine Models for Lithography," Micro-lithography World, pp.14-20, 1995.
4. R. Silver, J. Potzick, F. Scire and R. Larrabee, "High Accuracy Overlay Measurements," Proc. SPIE, Vol. 2725, pp.320-329, 1996.
5. Ji-Hun Jung, Jin-Phil Choi, Sang-Jo Lee, "Machining accuracy enhancement by compensating for volumetric errors of a machine tool and on-machine measurement," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 174, pp. 56-66, 2006.

6. H. Pahk, J. Kim and K. Lee, "Integrated Real Time Compensation System for Errors Introduced by Measurement Probe and Machine Geometry in Commercial CMMs," *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, Vol.36, pp.1045-1058, 1996.
7. H.F.F. Castro, M. Burdekin, "Dynamic calibration of the positioning accuracy of machine tools and coordinate measuring machines using a laser interferometer," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol.43, pp.947-954, 2003.
8. M.A. Donmez, D.S. Blowquist, "A General Metrology for Machine Tool Accuracy Enhancement by Error Compensation," *Precision Engineering*, Vol.8, pp.186, 1986.
9. T.E. Zavecz, "Machine Models for Lithography," *Micro-lithography World*, pp.14-20, 1995.
10. R. Silver, J. Potzick, F. Scire and R. Larrabee, "High Accuracy Overlay Measurements," *Proc. SPIE*, Vol. 2725, pp.320-329, 1996.
11. Matthias Wagner, Andreas Roosen, Hendrikus Oostra, Roderik Hoepfener, Martin de Moya, et. al., "Miniature accordion-shaped low voltage piezo actuators for high displacements," *Journal of the European Ceramic Society*, Vol: 25 Issue: 12, pp: 2463-2466, 2005.
12. K.C. Fan, M.J. Chen, "A Six-degree-of-freedom Measurement System for the Accuracy of X-Y stages," *Precision Engineering*, Vol.24,pp.15-23, 2000.
13. J. Otsuka, S. Fukada, Y. Kawase, N. Lida and Y. Aoki, "Ultraprecision positioning using lead screw drive (2nd report)," *Int. J. Japan Soc. Prec. Eng.*, Vol.27, pp.142-147, 1993.
14. S.H. Chang and Y.C. Tung, "A Novel Design of Piezo-Driven Dual-Dimension Optical Scanning Mechanism," *Review of Scientific Instrument*, Vol. 69, pp.3277-3282, 1998.
15. Shuichi Dejima, Wei Gao, Hiroki Shimizu, Satoshi Kiyono, Yoshiyuki Tomita, "Precision positioning of a five degree-of-freedom planar motion stage," *Mechatronics* Vol. 15, Issue: 8, pp. 969-987, 2005
16. Hwee Choo Liaw, Bijan Shirinzadeh, Julian Smith, "Robust motion tracking control of piezo-driven flexure-based four-bar mechanism for micro/nano manipulation," *Mechatronics*, Vol. 18, Issue 2, pp. 111-120, 2008
17. Hwee Choo Liaw, Bijan Shirinzadeh, Julian Smith, "Robust motion tracking control of piezo-driven flexure-based four-bar mechanism for micro/nano manipulation," *Mechatronics*, Vol. 18, Issue 2, pp. 111-120, 2008
18. J.A. Kim, E.W. Bae, S.H. Kim, Y.K. Kwak, "Design methods for six-degree-of-freedom measurement system using cooperative target," *Precision Engineering*, Vol.26, pp.99-104, 2002.
19. John A. Chandy, "Dual actuator logging disk architecture and modeling," *Journal of Systems Architecture* Volume: 53, Issue: 12, 2007, pp. 913-926, 2007.
20. Tae Won Seo, Hwa Soo Kim, Deuk Soo Kang, Jongwon Kim, "Gain-scheduled robust control of a novel 3-DOF micro parallel positioning platform via a dual stage servo system," *Mechatronics*, Vol. 18, Issue 9, November 2008, pp. 495-505
21. Y. Okazaki, S. Asano and T. Goto, "Dual-servo Mechanical Stage for Continuous Positioning," *Int. J. Japan Soc. Prec. Eng.* Vol. 27, pp.172-173, 1993.

22. S. Sakuta, K. Okawa, K. Ueda, "Experimental Studies on Ultra-Precision Positioning – an Inchworm Movement Method Using Fine and Coarse Positionings," *Int. J. Japan Soc. Prec. Eng.* Vol. 27, pp.235-240, 1993.
23. H.J. Pahk, D.S. Lee and J.H. Park, "Ultra Precision Positioning System for Servo Motor-Piezo Actuator Using the Dual servo Loop and Digital Filter Implementation," *Int. J. of Mach. Tools & Manufacture*, Vol. 41, pp.51-63, 2001.