

AOI 機台精度檢測與調校

范光照
台大機械系
fan@ntu.edu.tw

王志雄
台大機械系
r99522701@ntu.edu.tw

溫光浦
德律科技
kuangpuw@tri.com.tw

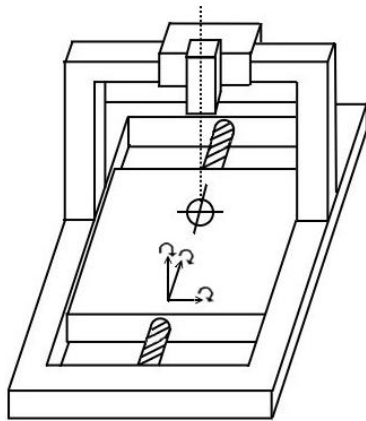
摘要

精密機械的精度與其結構設計、零組件加工、以及機台的組裝有關。長期以來，雖然精密設計與製造技術一直在改進中，但組裝技術仍沿用傳統的簡易量規與量具的方式，如果無法確保每一階段的組裝精度，完成後的機台必定會有無法掌控的定位誤差。本報告針對常用的橋架式 AOI 機台依據精密機械原理，利用自製光學量測儀器，可量測 AOI 機台的各個組裝誤差，並提出一套直線度、平行度、垂直度的檢測方法，可大幅改善機台組裝後的精度。其中本研究提出的直線度感測器之精度，與市售 HP 雷射干涉儀進行比對，在 60 cm 量測範圍內，其比對誤差在 $\pm 1.5 \mu\text{m}$ 內。經過本研究提出之誤差檢驗方法與 AOI 機台組裝檢驗的標準流程，調校過後的機台定位誤差，可由 100 μm 進步到在 20 μm 內。

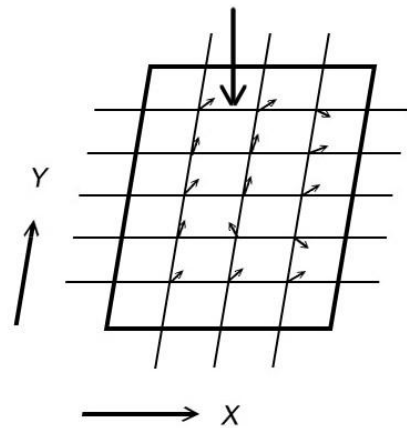
關鍵字：機台組裝，精度檢測，幾何誤差，阿貝原理，布萊恩原理。

壹、前言

常見的精密機械以直角座標(或稱 Cartesian 座標)為基準，均由三軸、或兩軸半、或兩軸的運動機台所組成，再配置不同的功能模組，如工具機、量測儀器、曝光機、雷射加工機等等。雙軸運動平台是自動化光學檢測設備中基本模組之一，其目的在提供定位點的檢測。一般的雙軸移動平台均為兩個線性運動軸搭配而成，各軸在獨立運動時都會有不可避免的六自由度誤差(圖一)，包括三個線性誤差和三個偏角誤差。兩軸運動共有 12 項誤差，再加上兩軸垂直度裝配誤差，故共計 13 項誤差，通稱為機台的幾何誤差(Geometrical errors) [1]。這些誤差都會造成正確定位點的偏移，其中偏角誤差及垂直度誤差更會因阿貝原理而放大[2]，是誤差來源中主要的成因。在移動平台上由各個誤差源所分佈組成的空間稱做的面誤差(Surface Errors)，如圖二所示。



圖一: AOI 機台每軸的六自由度誤差



圖二: 雙軸 AOI 機台的面定位誤差

欲提高機台的精度則必須減少各軸的幾何誤差，這是在機台組裝時以精密儀器檢測並調校來達到的。機台組裝及調校主要有: (1)各線性導軌的直線度，(2)兩線性導軌間的平行度，及(3)兩正交導軌間的直線度等三種，現有的組裝調校方法都以 ISO230-1 規範的工具機幾何精度檢測法實施[3]，最常用的直線精度檢測及調校是採用直規(straightedge)與量錶(dial indicator)方式、平行度檢測則用平行規與量錶方式、垂直度檢測則用直角規與量錶方式，雖然操作簡單但違反布萊恩原理[4]，即使調校合格，機台的面誤差仍然很大，無法和國外的設備相比。

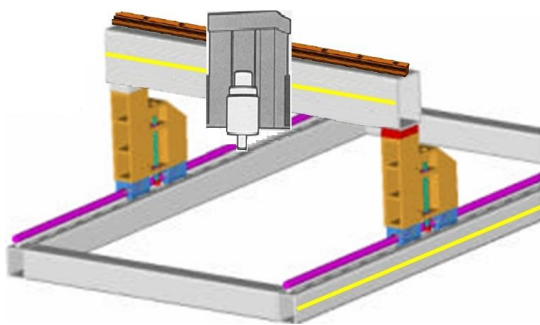
本研究因此提出一套符合布萊恩原理的幾何誤差檢測方法，針對常用的橋架式 AOI 機台，利用自製光學量測儀器，可量測 AOI 機台的各個組裝誤差。本研究發現，橋架的 yaw 角度為面誤差的主要成因，且常用的直線度與平行度調校法無法改進 yaw 誤差量，因此提出一套以調校 yaw 誤差的直線度、平行度、垂直度檢測方法，可大幅改善機台組裝後的精度。

貳、AOI 機台的定位誤差成因

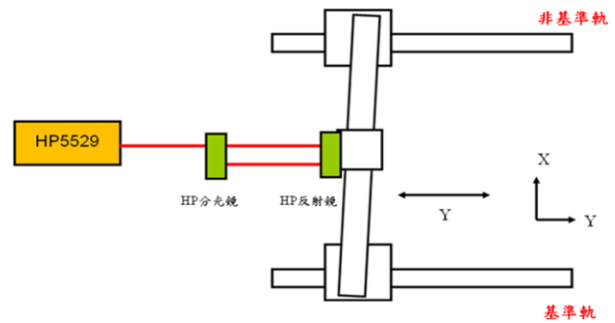
自動光學檢測(AOI)設備之機台最常見的是如圖三(a)所示的龍門型(Gantry type)，由雙導軌支撐移動橋架(moving bridge)，CCD 固定在 Z 主軸上，光學尺(黃色帶)裝置於一側的基準軌上以感測縱向(Y)軸的位移。由於兩導軌的不平行度誤差使得橋架在移動中會有偏擺(yaw)角度產生(圖三(b))，使得在遠離基準軌處的 Y 軸定位誤差經常會大於靠近基準軌處的定位誤差，此即所謂的阿貝誤差(Abbé error)，其公式可表達為：

$$\delta_y(y) = -X \times \varepsilon_z(y) \quad (1)$$

欲製作一高精度的 AOI 機台，此 yaw 角度誤差在機台組裝時必須要調整得愈小愈好。此機台組裝技術包括了各導軌的直線精度、兩導軌間的平行精度、以及橋架裝置後的 yaw 角度精度。

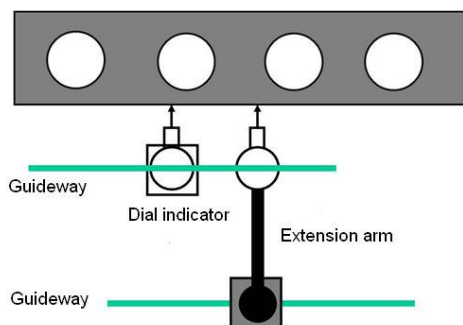


圖三(a): 常見的 AOI 門型機台



圖三(b): Yaw 角度產生的定位誤差

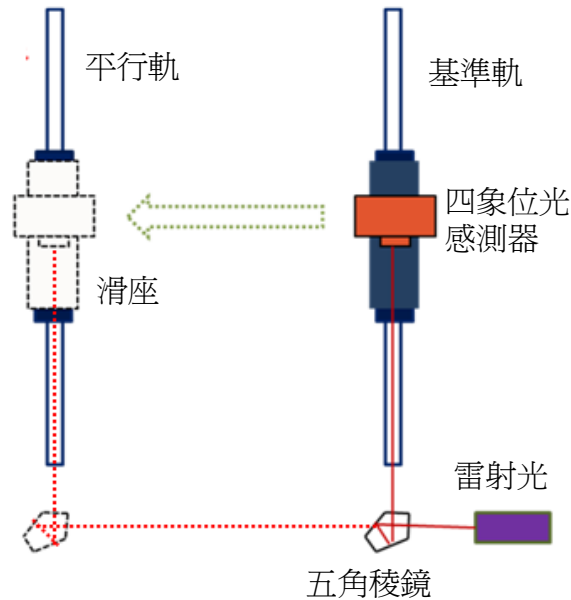
傳統式的線性導軌(linear guide)直線度組裝調整常用直規及量錶方法，圖四(a)所示的原理可看出量錶的不同臂長會影響導軌的直線度，原因發生在量錶懸臂的底座隨著線性導軌上的滑座移動，而滑座在移動中會有 yaw 及 pitch 角度的發生，因而產生了隱藏的阿貝誤差，使得導軌的直線度並非如理想的直規直線度，此即所謂的布萊恩原理(Bryan Principle) [4]: 直線度校正時的參考軸必須和待測軸同軸，否則會有阿貝誤差產生。圖四(b)顯示導軌在直線度組裝時的實際現象是不符布萊恩原理的。同理可知，兩導軌用傳統的平行塊及量表的平行度調整法也是違背了布萊恩原理，兩導軌永遠無法調整出好的平行度。從這項問題的發現可以對傳統式的直線度組裝調整或校正方式，如果用直規及量錶的方法，不論是移動量錶或移動直規都是不正確的，正確的方式應該是將參考軸和待測軸同軸，此原則也適用於平行度及垂直度的調整及校正上。



圖四(a): 用直規及量表做直度檢測的方法

圖四(b): 實際直度組裝調整照片

本研究所提出的方法如圖五原理所示，先用五角稜鏡(pentagon)將準直雷射光 collimated laser beam 轉到基準軸上(光軸愈低愈好)進行直度調整，再平移五角稜鏡到非基準軸端點處調整其平行度。



圖五: 導軌直線度與平行度的雷射光測量法原理

參、雷射準直儀研製

一、四象限光位置感測原理

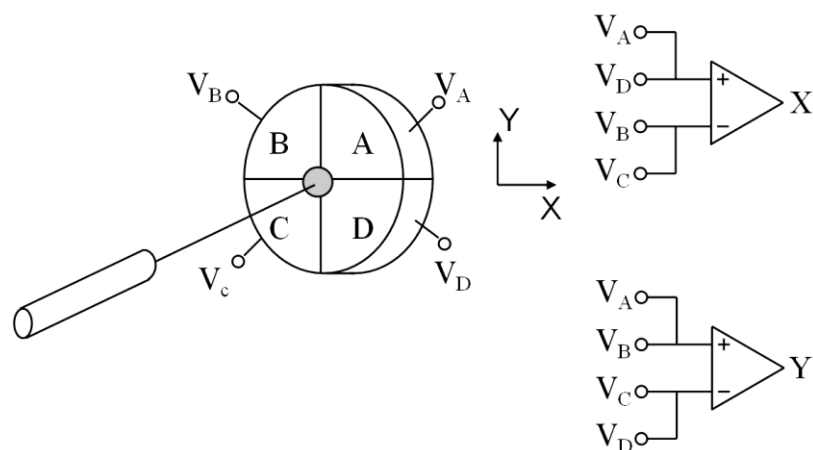
光電感測器(photo detector)包含感光二極體(photodiode)與積體電路(integrated circuits)兩部份，簡稱為 PDIC。感光二極體主要功能是將光訊號轉換為電流訊號，照射在感光二極體上的光強度決定了電流的輸出大小，而積體電路則是將電流放大，並轉換成電壓訊號。

四象限光感測器(QPD, Quadrant Photodetector)是由四片面積接近，且光電性質相同的光感測器所組成，如圖六所示，其主要材料為矽，中央間隔約為 2 至 12 μm 。當光點投射在感測器上時，隨著光點的位置不同，光感測象限接收到的光強不同，訊號輸出也將不同。可利用簡單的電路對各感測器的輸出做處理，即可得知光點的位置差異，如式(2)、(3)所示。

於訊號處理部份，需先透過運算放大器進行電流-電壓轉換，四個電壓訊號經過差動放大器(Differential Amplifier)、加法放大器(Summing amplifier)即可計算光點位置。

$$X = \frac{(V_A + V_D) - (V_C + V_B)}{V_A + V_B + V_C + V_D} \quad (2)$$

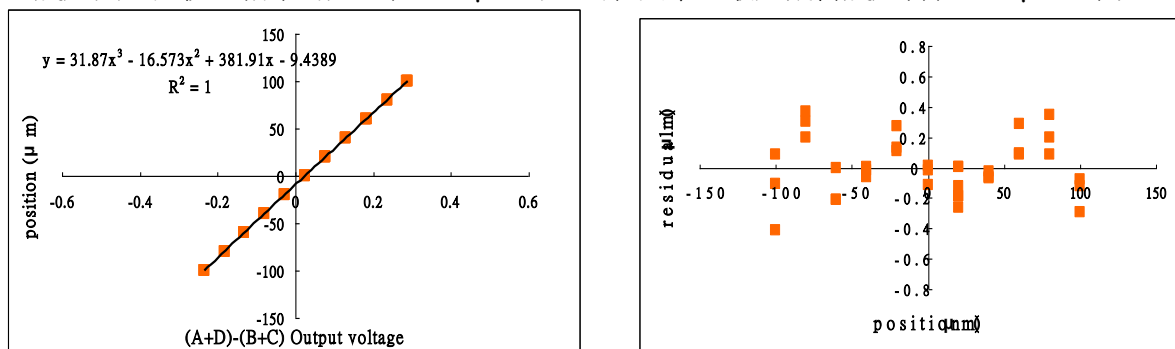
$$Y = \frac{(V_A + V_B) - (V_C + V_D)}{V_A + V_B + V_C + V_D} \quad (3)$$



圖六: 四象限感測器光點位置與輸出電壓關係圖

二、雷射準直儀之精度校正：

整個校正系統利用 SIGMA KOKI 公司之精密微動平台 SGSP60-10ZF 來提供微小位移，並在平台上方架設四象限與雷射干涉儀(HP5529)的反射鏡組。當精密微動平台產生位移時，透過 HP 干涉儀量得平台實際運動距離，同時紀錄四象限感測器的輸出電壓的變化。透過線性擬合的方式，即可得到電壓值與實際運動距離之間的關係。圖七為水平方向校正結果及擬合殘差圖，由校正結果可知，在 200 μm 的量測範圍中，最大擬合殘差皆在 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 以內。

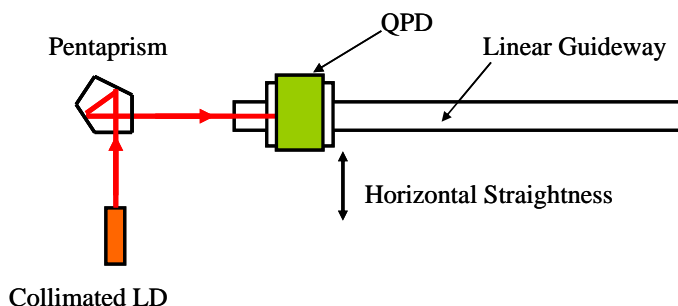


圖七: 水平方向直線度校正結果, (左)線性度, (右)殘差

肆、AOI 雛型機台組裝檢測與調校

一、直線度檢測

準直雷射與四象限光感測器的組合可用來量測直線度，實驗架設如圖八，四象限感測器固定在線軌滑座上，當線軌有不直度時，光點在四象限的位置就會改變。在本架構中使用五角稜鏡(Pentaprism)，它能让光進行方向改變 90 度，在此使用的目的，是為了平行度檢測(下節會提到)。

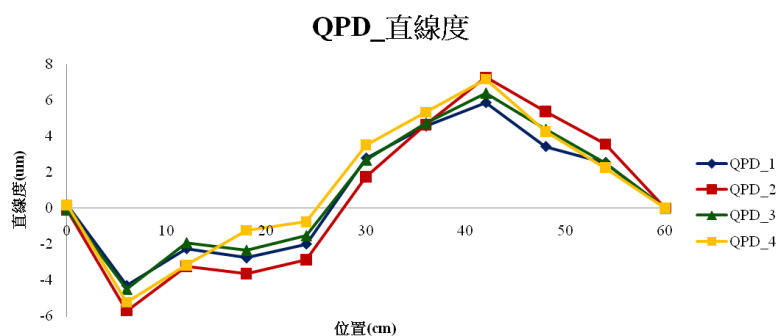


圖八: 直線度檢測架構圖

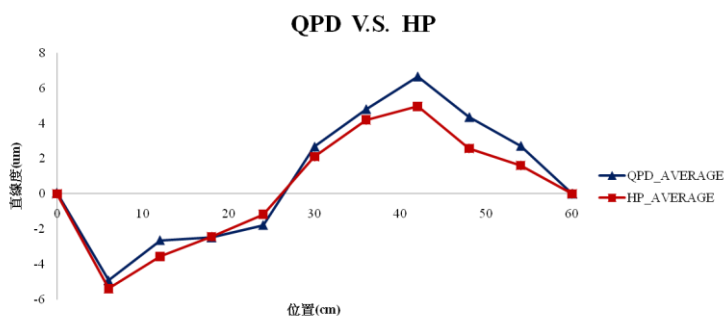
為驗證本研究提出的雷射準直儀之精度，本研究使用 HP 直度干涉儀作比對，圖九為雷射準直儀量測四次的實驗結果，重覆性良好。將四次結果取平均，並和 HP 直度干涉儀方法作比對，如圖十，在 60cm 量測範圍，誤差約 $\pm 1.5\mu\text{m}$ ，其原因如下：

1. QPD 系統校正誤差約 $\pm 0.5\mu\text{m}$

2. 所有的測量位移方法(例如雷射干涉儀測位移/直線度、四象限位置感測、千分量錶)，其選擇的量測軸線會受到餘弦誤差、阿貝誤差(角度誤差)影響，亦即，兩種方法的實驗條件必須相同(須在同一量測軸線作比對)，分批次進行比對，此可能是誤差來源之一。



圖九: 雷射準直儀對基準軌直線度量測結果

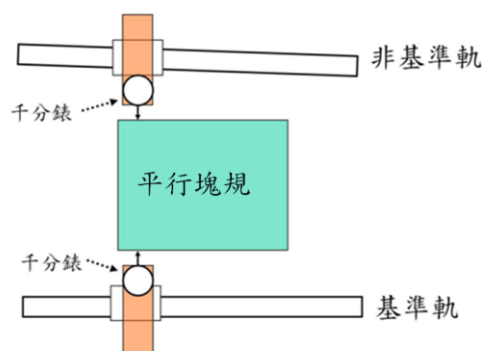


圖十: 兩種方法比對結果

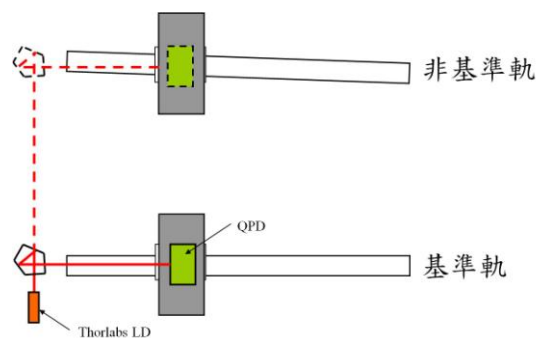
二、平行度檢測

工業界習用的方法如圖十一所示，違反布萊恩原理。本研究提出的光電法如圖十二所示，兩支線性導軌的平行度量測方法分為兩步驟：

1. 按照直線度量測方法，量測基準軌的直線度，如圖十二實線部份所示。
2. 將五角稜鏡從基準軌移至非基準軌，四象限光感測器裝在非基準軌的滑台上，量測直線度，如圖十二虛線部份所示。

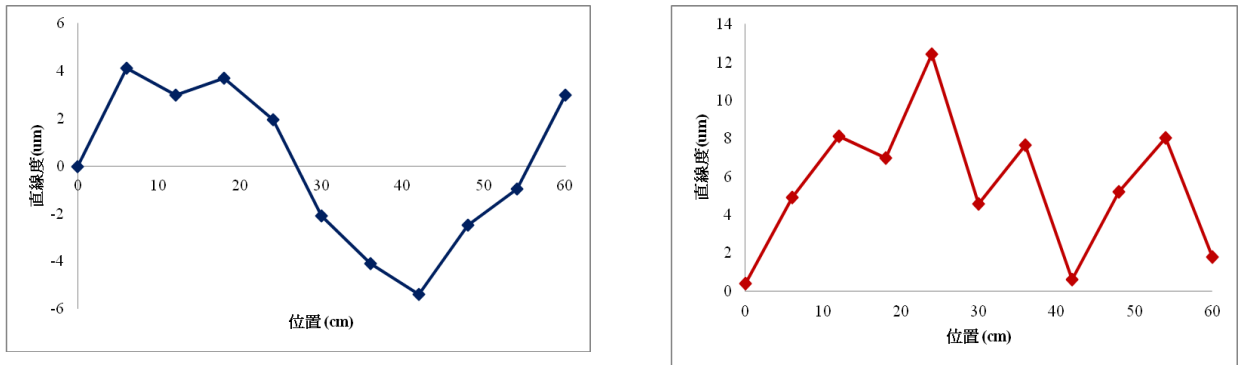


圖十一: 傳統使用平行塊的檢測方式



圖十二: 兩線性導軌平行度光電檢測方式

整個量測過程使用同一顆五角稜鏡，可比對兩支線軌的直線度結果，亦可得到兩支線軌的平行度。圖十三為經過直線度與平行度的調校後基準軌與非基準軌的直線度，兩軸頭尾的平行度誤差可調到約 $1\ \mu\text{m}$ 左右，這是使用傳統的平行塊與量錶調校法無法達到的精度。



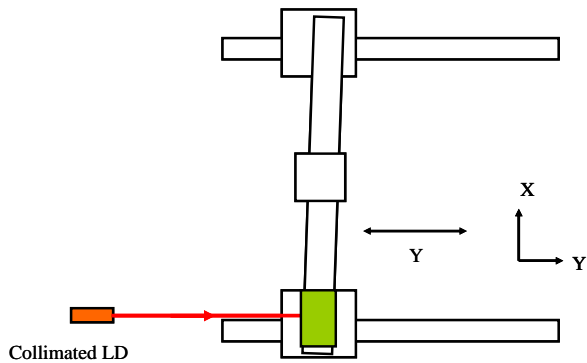
圖十三：兩平行導軌相對直線度的調校結果，(左)基準軌 (右)非基準軌

三、垂直度檢測

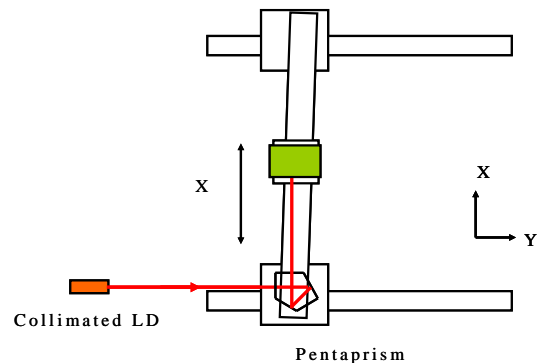
兩正交運動軸的垂直度量測方法仍須用雷射準直儀搭配五角稜鏡來操作，分為兩步驟：

1. 四象限光感測器裝在基準軸與橫樑的交點上，量測基準軸的直線度，以此為基準，如圖十四(a)；
2. 將五角稜鏡置於橫樑上，四象限感測器裝在橫樑的移動平台上，量測非基準軸的直線度，如圖十四(b)。

從步驟 1,2，即可得到兩軸向的垂直度。相較於平行度量測方法，因五角稜鏡於步驟 2 才放置，因此五角稜鏡的精度會影響垂直度的量測結果。



圖十四(a): 垂直度步驟一

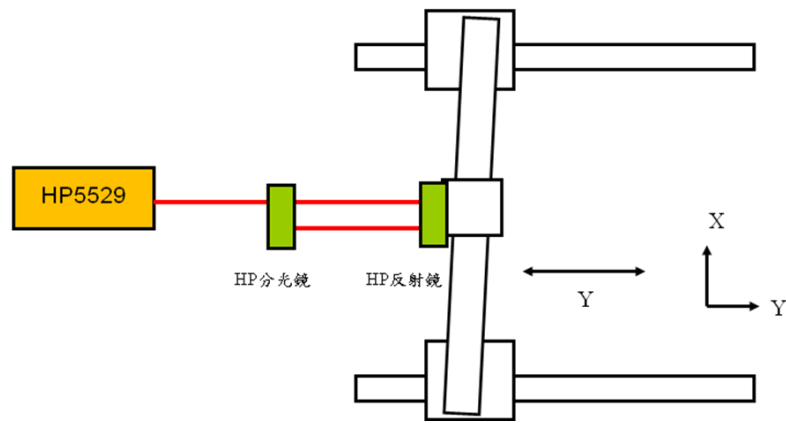


圖十四(b): 垂直度步驟二

同樣於平行度，花崗岩方規搭配量錶可用來測量垂直度，不過受限於架設方法，目前架設均存在阿貝誤差影響，因此並不是一個可參考依據；本研究調校過 XY 軸垂直度約 $2\ \mu\text{m}$ 。

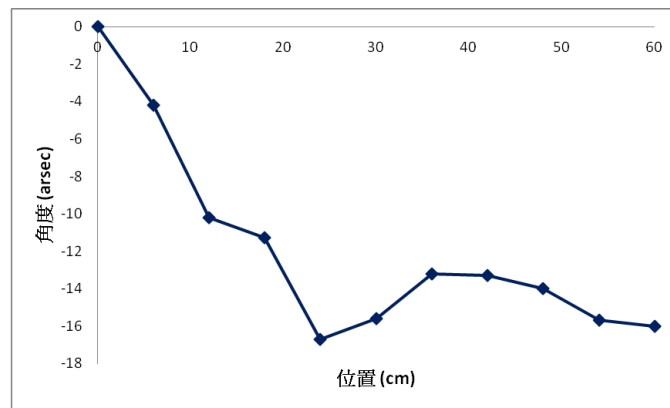
四、機台定位精度檢測

將機台之直線度、平行度調校完畢，預期總行程定位精度兩軸可在 $20\ \mu\text{m}$ 內。本研究利用 HP 雷射干涉儀，量測 X 軸在 y 方向行走時，所造成之 yaw 角度，如圖十五，而此 X 軸的 yaw 角度正可代表基準軸與非基準軸兩軸間的定位誤差，如公式(1)所示。



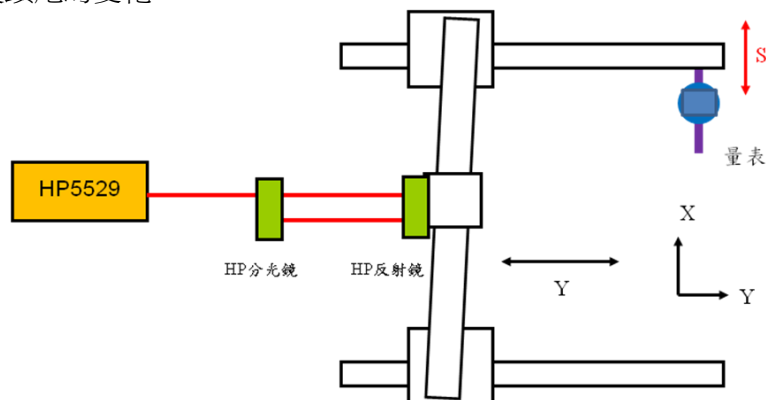
圖十五: 橫樑沿 Y 軸運動中角度精度檢驗

將上述調整過的機台，量取 X 軸的 yaw 角度，如圖十六。發現其角度還是偏大，如此機台的橫樑長為 1m，其左右邊相對最大定位精度誤差約達 $80\ \mu\text{m}$ 。



圖十六: 橫樑沿 Y 軸運動中量得的 yaw 角度

由上述研究發現，調校過直線度與平行度的機台，其兩軸之定位精度無法有效的控制在 $20\ \mu\text{m}$ 以內。因此設計一實驗，探討平行度與兩軸之定位精度的關係。如圖十七，利用量錶架設在非基準軸的調整端，並微調此端產生一偏位 S ，觀察當偏位 S 產生時(平行度改變)，其 X 軸 yaw 角度頭尾的變化。



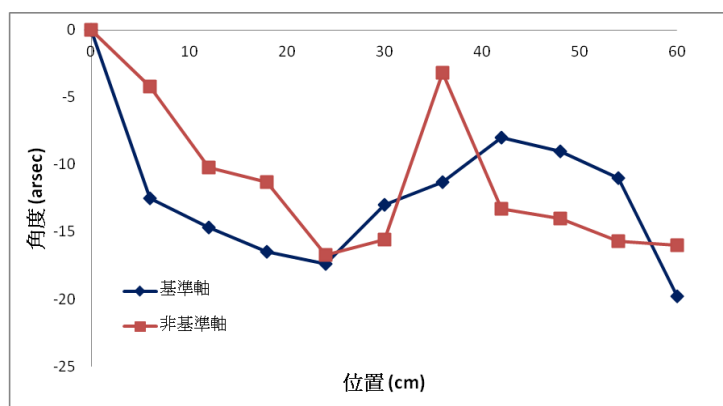
圖十七: 平行度與兩軸之定位精度的關係

由表一中可發現， S 偏位與 X 軸頭尾的 yaw 角度似乎沒有明顯的絕對關係，因此大膽的推測兩軸間的平行度對兩軸之定位精度沒有絕對的影響。而因為 X 軸 yaw 角度是受到基準軸與非基準軸兩軸滑塊所牽引互相影響，因此推測 X 軸的 yaw 角度，主要是受到兩軸滑塊在行走時，各自所產生之 yaw 互相影響而生成。所以分別再去量測基準軸與非基準軸之滑塊

yaw，如圖十八，可以得知兩軸滑塊 yaw 角度最大還有 20 sec 的誤差。

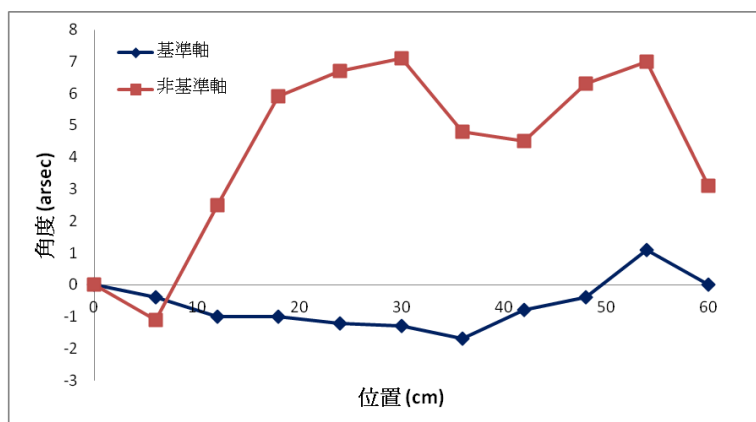
表一: 量錶 S 偏位與 X 軸頭尾的 yaw 角度關係

量錶偏位S(μm)	0	50	100	150	200	250	-50	-100	-150	-200	-250
X軸頭尾yaw (sec)	17.2	16.5	17	18.5	20.1	19.5	17.5	16.1	16.6	16	18

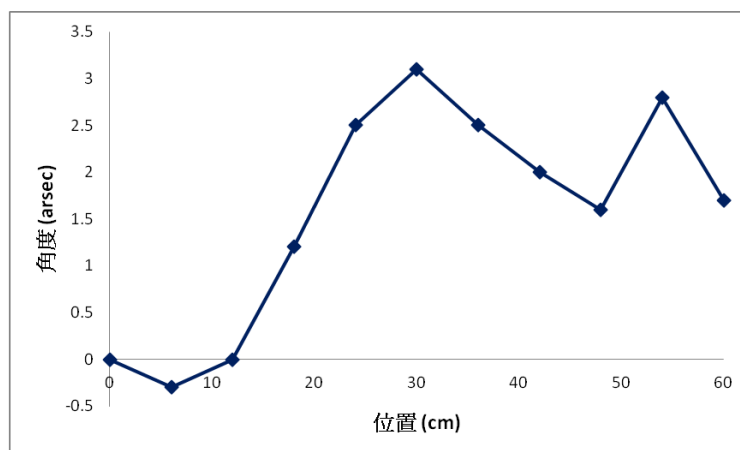


圖十八: 平行度調校後基準軸與非基準軸 yaw

本研究因此重新調校基準軸、非基準軸兩軸線軌，利用兩線軌之 yaw 為依據，使其越小越好，如圖十九。而當兩軸 yaw 角度都調校完成後，重新量測 X 軸 yaw 角度，如圖二十，可發現 yaw 角度明顯的變小，最大 yaw 約是 3sec，相對應兩導軌的定位誤差最大約 15 μm ，與原來的 80 μm 相比已有大幅度的改善。



圖十九: 基準軸與非基準軸 yaw(重新調校)



圖二十: 橫樑運動時 yaw 角度(重新調校)

伍、結論與建議

本研究從精度理論探討常用橋架式 AOI 機台組裝後定位精度不良的原因，推翻傳統的使用量規與量錶來調校機台組裝時的直線度、平行度及垂直度方法，提出了應符合布萊恩原理的光電檢測法。研究中發現線性導軌及橋架移動的 yaw 角度為影響機台定位誤差的主要原因，因此建議在直線度與平行度組裝調校時須同時調校 yaw 角度誤差，調整後的 AOI 機台定位精度可提高 3 倍以上。本機台組裝時的調校方法亦適用於任何精密的移動台上。

參考文獻

- [1] Tlustý J, (1980) Technologies of machine tools, Supplement volume.
- [2] Abbé E, (1890) Meßapparate für physiker. Zeitschrift für Instrumentenkunde 10: 446–448
- [3] ISO230-1, (1988) Acceptance codes for machine tool.
- [4] Bryan JB, (1979) The Abbé principle revisited: An updated interpretation. Precision Engineering 1: 129–132