

# 五自由度測量系統的開發與應用

## Development and Application of Five-degree-of-freedom Measurement System

魏承弘、范光照、何昭慶

Cheng-Hung Wei, Kuang-Chao Fan, Chao-Ching Ho

任一運動軸由於元件製造與組裝誤差，都存在六種自由度的幾何誤差。傳統對精密機器的幾何誤差測量方法都是逐項一一量測，不僅費時費力，價格也昂貴。本文介紹了自行開發的五自由度測量系統。藉由精心設計過的光學組件相互搭配，可以實現移動目標的五個幾何誤差同時量測，且只需用到位移檢測的單光束雷射，包含了定位誤差、水平與垂直兩個方向的直線度誤差以及偏轉和俯仰兩個角度誤差。本多自由度誤差量測系統因使用 60 MHz 的調頻光，具有高速度、高精度等特性，且可以進行長距離的實時測量，其直線度誤差測量精度為  $\pm 1 \mu\text{m}$ 、角度誤差測量精度為  $\pm 1 \text{ arc-sec}$ ，定位誤差測量分辨率為  $0.01 \mu\text{m}$ 、測量精度優於 2 ppm。而在光軸與移動軸的校準上，透過可調式的折射鏡可快速地進行雷射光軸的對齊校準。該系統還具有結構簡單容易安裝與成本低等優點，本研究在一台光學檢測機台上驗證了其可行性。

Due to the manufacturing and assembly errors of any motion axis, there are six degrees of freedom geometric errors. The traditional method of measuring geometric errors of precision machines is to measure each item one by one, which is not only time-consuming but also expensive. In this paper, we introduce a self-developed five-degree-of-freedom measurement system. By combining well-designed optical components, five geometric errors of moving targets can be measured simultaneously, and only a single-beam laser for displacement detection is required, including positioning errors, straightness errors in both horizontal and vertical directions, and angular errors in both deflection and pitch. This multi-degree-of-freedom error measurement system uses a 60 MHz frequency modulated light with high speed and high accuracy, and can perform real-time measurements over long distances. The geometric error of each axis of motion has six degrees of freedom due to component manufacturing and assembly errors. The traditional method of measuring geometric errors of precision machines is to measure each item one by one, which is not only time consuming but also expensive. In this paper, we introduce a self-developed five-degree-of-freedom measurement system. By combining well-designed optical components, five geometric errors of moving targets can be measured simultaneously, and only a single-beam laser for displacement detection is required, including positioning errors, straightness errors in

both horizontal and vertical directions, and angular errors in both deflection and pitch. This multi-degree-of-freedom error measurement system uses 60 MHz frequency modulated light with high speed and high accuracy, and can perform long-distance real-time measurements with an accuracy of  $\pm 1 \mu\text{m}$  for straightness error,  $\pm 1$  arc-sec for angular error, and  $0.01 \mu\text{m}$  for positioning error with a resolution of better than 2 ppm. The system also has a simple and easy-to-use structure. The system has the advantages of simple structure, easy installation, and low cost, and its feasibility was verified on an optical inspection machine. The system also has the advantages of simple structure, easy installation and low cost, and its feasibility was verified on an optical inspection machine.

## 一、前言

近年來，隨著機械製造的不斷發展，對於高精度測量的需求與日俱增。其中，幾何誤差作為機床的基本性能指標，對其進行的測量結果是判斷精度 (precision) 和可靠性 (reliability) 的重要因素之一。幾何誤差 (geometric error) 是由於機械結構的製造精度、變形、磨損、機械振動或是裝配誤差等多種因素影響所產生的<sup>(1)</sup>。這些因素可能會使機械系統的實際運動軌跡與理想軌跡之間存在偏差，進而導致幾何誤差的產生，幾何誤差包括平行度誤差、直線度誤差、垂直度誤差、角度誤差等，而任何軸向都具有六個自由度誤差，即三個線性誤差和三個角度誤差。傳統的幾何誤差測量方法主要是使用量錶、卡尺等進行逐個測量，會耗費大量時間，而自從微機電系統技術以及精密製造技術的發展，幾何誤差的測量和控制也變得更加精確，各種多自由度測量系統也被學者們提出<sup>(2-4)</sup>。不過眾多系統還是存在著一些不足，例如：昂貴的雷射源使得測量成本高昂，難以負荷；複雜的光路設計，使得結構過於複雜且龐大，也讓光路校準的工作變得困難；部分具有高精度滾動角誤差 (roll error) 測量功能的系統，需產生兩個參考平行光束進行檢測，但兩光束的平行度較不易調整。

本文提出一種新型的五自由度測量系統，結合了雷射都卜勒位移干涉儀 (laser doppler displacement meter)、雷射準直儀 (laser straightness measuring system) 以及自動視準儀 (autocollimator)。該系統分為固定雷射模組與移動測量模組兩部分，以雷射都卜勒位移干涉儀作為雷射光源，移動測量模組包含了雷射準直儀、自動視準儀以及測量定位誤差 (positioning error) 所設計的分光鏡結構與角耦反射鏡 (corner cube reflector)。雷射準直儀和自動視準儀的訊號透過藍芽模組傳輸，位移訊號則透過角耦反射鏡沿著原光路反射回都卜勒位移干涉儀進行接收。該系統可以藉由單一雷射光源達到五自由度測量的目的，有別於多光束的測量系統，可以大幅降低在光軸校準 (alignment) 上的困難度，進而提升測量的效率。

## 二、線性移動台幾何誤差

線性移動台可以實現物體在直線方向的精確移動和定位控制，但因機械、控制與環境等問題，其運動時會無法避免六個自由度幾何誤差，分別是三個線性誤差：一個定位誤差及兩個直線度誤差包括水平與垂直方向，以及三個角度誤差：俯仰角 (pitch error)、偏轉角 (yaw error)、滾動角 (roll error)，如圖 1 所示。測量幾何誤差就能評估線性移動台的性能，並確定移動台在不同位置的誤差分布，這有助於制定校正和補償的策略，以減少幾何誤差對系統的影響，提高移動台的可靠性。

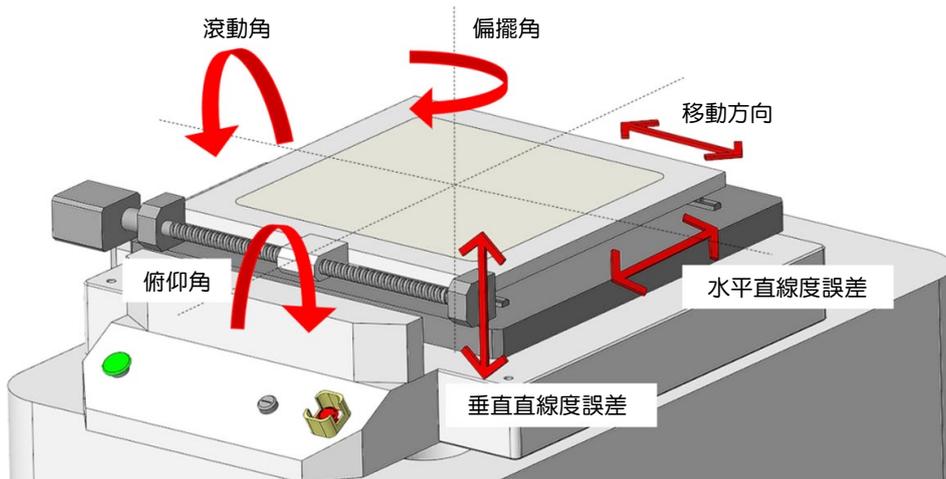


圖 1. 移動台六自由度誤差方向。

為了可以有效率的進行測量，將五自由度測量系統置於移動台上，如圖 2，並進行測量光軸與移動台運動軸的同軸校準，系統校準歸零後即可進行測量，當線性移動台沿著測量路徑移動時，測量讀值即為移動台的直線度與角度誤差值，而雷射干涉儀讀值與移動台本身的光學尺 (linear optical scale) 讀值相減則為定位誤差值。

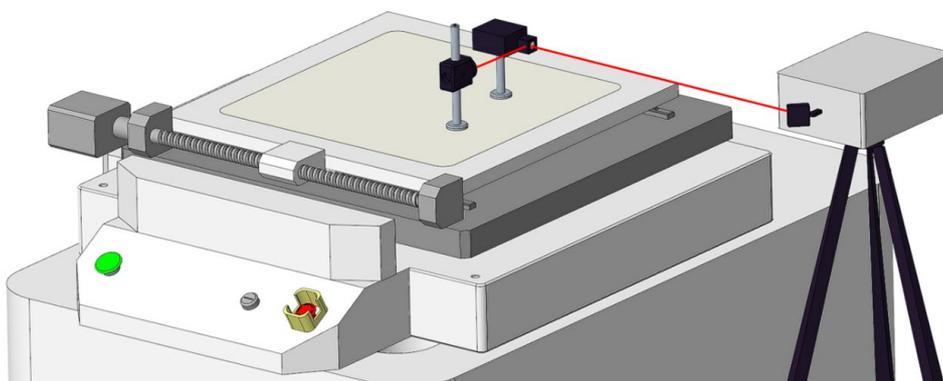


圖 2. 五自由度測量實驗架構。

### 三、測量工作原理

雷射準直儀<sup>(1)</sup> 由雷射光源與四象限感測器 (quadrant photodetector) 所組成如圖 3。四象限感測器是一種常見的位置感測器，由四個面積相同且光電性質相同的象限感光二極體 (photodiode) 組成，中間再由微小間隙隔出四個有效地感測區域，而雷射光具有高度的方向性且經過光擴束器 (beam expander)，當雷射光入射至感測器中心時，四個光電感測器所產生的電流應該會相同，而因投射在感光二極體上的雷射光束強度會影響電流的大小，當入射的雷射光束偏移四象限的中心點，會造成輸出的電流不相同，就可以透過處理感測器的輸出訊號，式 (1)、(2) 表示，得到光點的偏移情況。

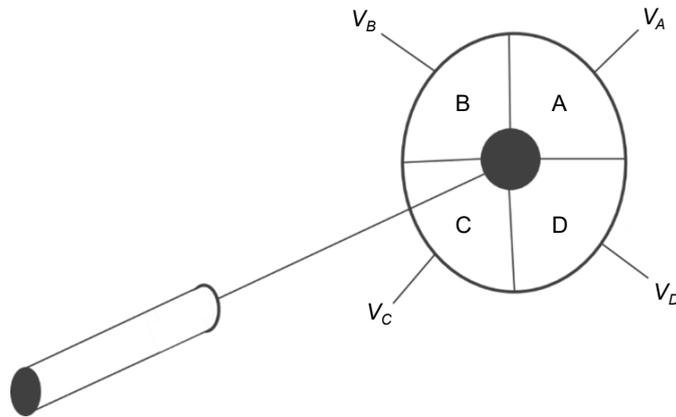


圖 3. 四象限感測器示意圖。

$$X = \frac{(V_A + V_D) - (V_C + V_B)}{V_A + V_B + V_C + V_D} \quad (1)$$

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

自動視準儀<sup>(1, 5)</sup> 可以測量微小的角度，圖 4 是其工作原理，入射光被反射後會沿著原光路回到入射處，如反射鏡與光線成  $\theta$  角度傾斜時，反射光會以  $2\theta$  之角度反射，再通過同視準透鏡使光束再集中到聚焦平面上。所以測量出光點的上下偏移量，就能換算出反射鏡的俯仰角。同理，光點的左右偏移量可得到反射鏡的偏轉角。

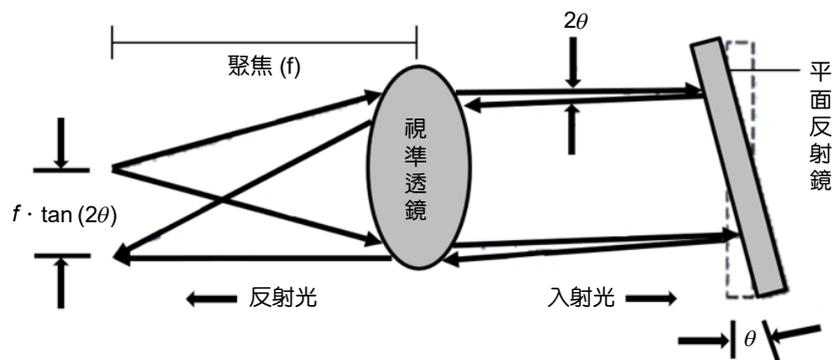


圖 4. 自動視準儀原理。

雷射都卜勒位移干涉儀<sup>(1, 6)</sup> 主要用於位移的測量，穩頻氦氖雷射 (stabilized He-Ne laser) 射出後透過聲光調製器賦予雷射光束一個載波，擁有載波的雷射光束可以抵抗環境的干擾，再經過校準透鏡組可以將光束擴大且準直。光束射出後會經由可移動的角耦反射鏡反射回到感測器接收訊號，進一步比較訊號後可以解出位移值。圖 5 為雷射都卜勒位移干涉儀原理圖。

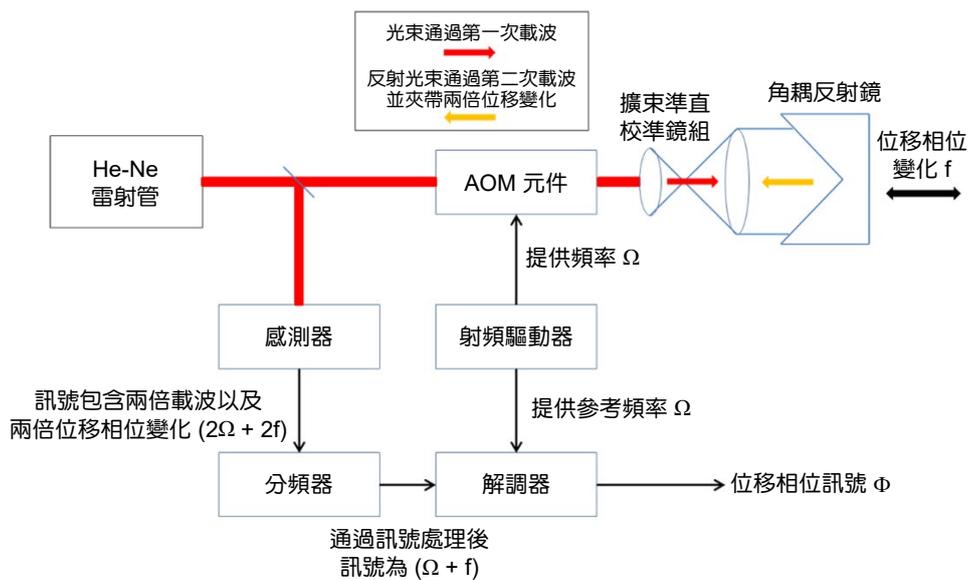


圖 5. 雷射都卜勒位移干涉儀原理圖。

#### 四、系統架構

該五自由度測量系統架構如圖 6 所示，分別為圖 6(a) 移動測量模組與圖 6(b) 固定雷射模組兩部分，用於測量定位誤差、水平和垂直直線度等三個線性誤差，以及偏轉角和傾角兩個角度誤差。定位誤差測量基於都卜勒效應 (Doppler effect) 所測量得知移動目標的位移量；直線度誤差是使用四象限感測器檢測移動目標相對於準直的雷射光束的水平與垂直運動；角度誤差是由自動視準儀的原理，藉由解析探測器上的水平與垂直訊號，來測量偏轉和傾角誤差。測量訊號則透過 USB 1208HS 以及藍芽模組進行傳輸。

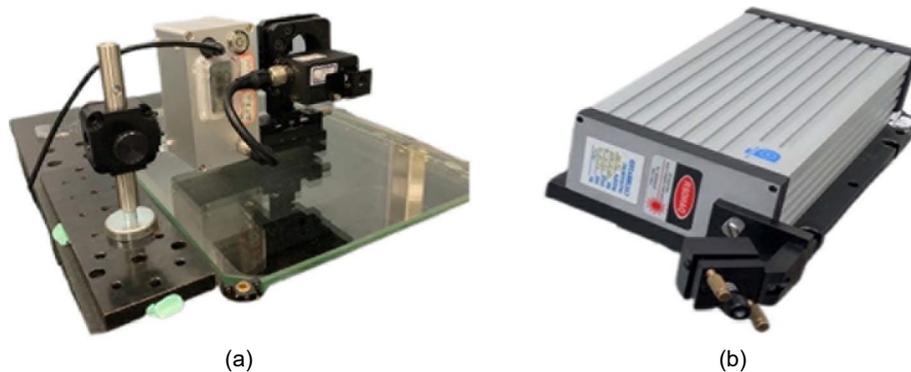


圖 6. 五自由度測量系統架構圖：(a) 移動測量模組，(b) 固定雷射模組。

該系統的光學配置如圖 7 所示，包含了一個固定雷射模組和一個安裝於移動目標上的測量模組。固定雷射模組的光源由雷射都卜勒位移干涉儀提供，替代原先四自由度測量系統的光纖雷射光源，使定位誤差得以測量，而在使用雷射進行測量前，必須進行雷射光軸的校

準，使其與移動台運動軸同軸，故有一 45 度微調反射鏡架安裝在干涉儀上，可以調整反射鏡架的微調螺絲，當雷射光點可以落於測量行程中近端與遠端的四象限感測器中心，即完成雷射光軸與目標物運動軸的校準。

在測量模組中，入射的參考光束會被分光鏡 1 分成兩路徑，反射光會被角耦反射鏡接收並再次反射回干涉儀，由干涉儀內部的感測器所接收並進行位移訊號處理及傳輸，穿透光則會被分光鏡 2 再次分成兩路徑。第二次分光的反射光被自動視準儀用於測量偏轉和傾角誤差，該反射光會聚焦在聚焦透鏡的焦點上，即角度誤差感測器。第二次分光的穿透光則被直線度感測器接收，用於測量移動目標的水平和垂直直線度。直線度與角度誤差的訊號會由藍芽模組傳送至電腦進行訊號處理。

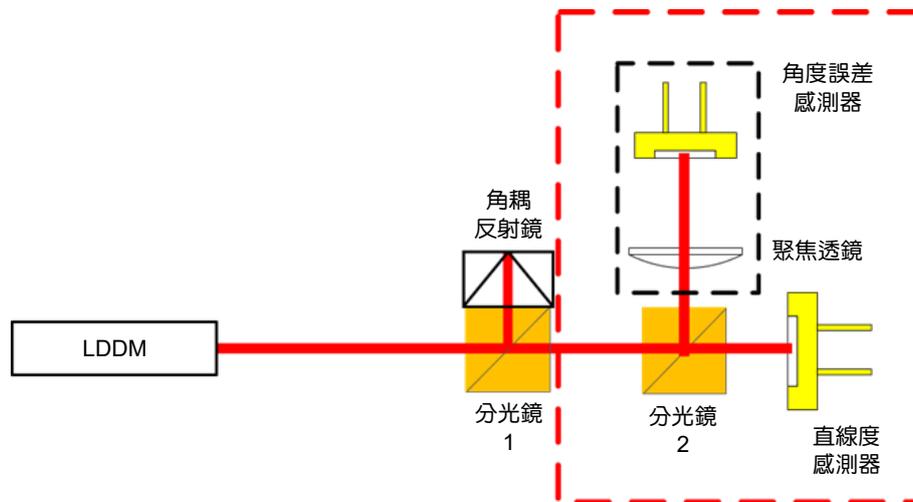


圖 7. 五自由度測量系統光學配置。

## 五、系統校正

該系統的直線度測量與角度測量為自行開發，故分別對兩個直線度誤差和兩個角度誤差進行精度校正，而進行定位誤差測量的雷射都卜勒位移干涉儀是使用 Optodyne Inc. USA 的 LICS-100，商用儀器其性能在出廠時已經過檢驗。

直線度誤差的校準參考使用了 Optodyne Inc. USA 所生產的雷射都卜勒測量儀 (laser Doppler displacement meter, LDDM)，使用型號為 LICS-100。水平直線度的校正實驗設置如圖 8(a) 所示，在校正過程中，靜止部分和運動部分之間的距離為 450 mm。為了校正垂直直線度誤差，LDDM 的雷射光束通過五稜鏡從頂部向下彎曲 90 度，如圖 8(a) 右下方的子圖所示，然後垂直平台逐步移動。對於角度誤差的校正，使用由 AutoMAT Co. 生產的自準直儀 (型號為 5000U) 做為參考。圖 8(b) 為校正俯仰和偏轉誤差的實驗設置。兩個角度平台包括俯仰以及偏轉平台，提供四自由度測量系統與自準直儀進行相對測量。

圖 9 表示了校正結果，在  $\pm 100 \mu\text{m}$  範圍內的兩個直線度誤差的殘差 (residual) 都在  $\pm 0.5 \mu\text{m}$  內，而在  $\pm 100 \text{ arc-sec}$  範圍內的兩個角度誤差的殘差都在  $\pm 0.6 \text{ arc-sec}$ ，這個結果表明該四自由度測量系統的性能是可以接受的。

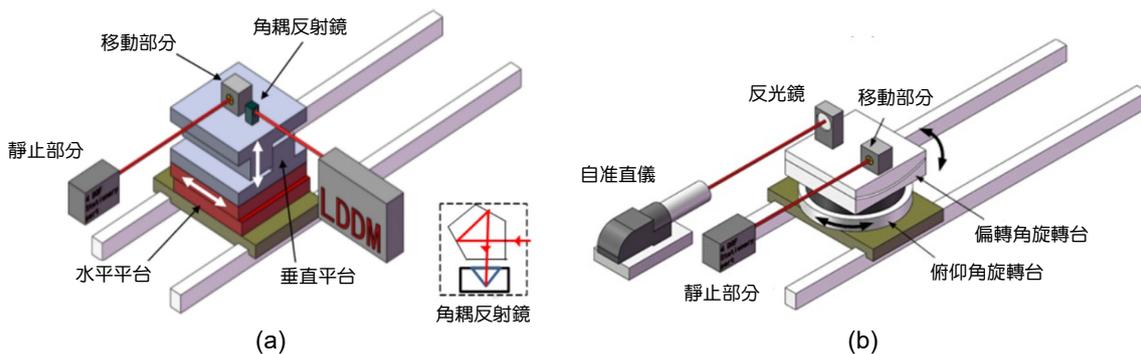


圖 8. 校正實驗設置：(a) 直線度，(b) 偏轉角、俯仰角。

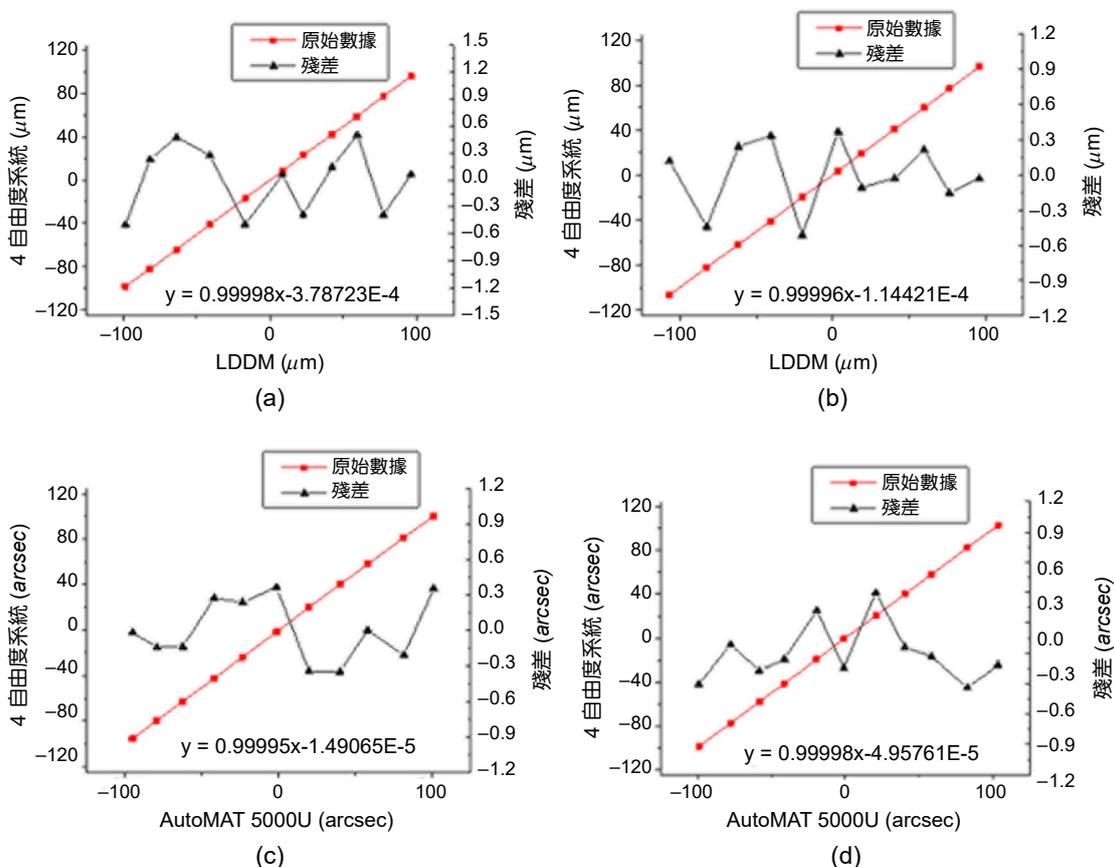


圖 9. 校正結果：(a) 水平直線度，(b) 垂直直線度，(c) 偏轉角，(d) 俯仰角。

## 六、測量實驗與結果

定位誤差因運動軸通常與位置感測軸不同軸而產生阿貝誤差 (Abbe error)，該誤差會造成實際位置與理想位置的誤差，可以透過比較線性移動平台的位移與干涉儀的測量值來得知該平台的定位誤差。

直線度誤差與角度誤差，指加工的軸線或是任何機械結構的軸線與理論上應遵循的直線軌跡或角度之間的偏差，機械加工產生的公差、設備安裝不當或是外部環境因素都會造成該誤差的產生。

實驗在一般商用 AOI 平台進行單軸的測量，會測量定位誤差、兩個直線度誤差以及偏轉和傾角兩個角度誤差。在測量時須先讓機器進行暖機 (warm-up) 的動作，每個測量行程至少需要包含 8 個測量點，且進行來回 5 次的測量。一般移動平台都由滾珠導螺桿作為帶動的零件，而滾珠導螺桿在進行反向運動時會產生反向誤差，故在每次運動的起點與終點都須在往前與往後一段距離再回到測量位置。

實驗照片如圖 10 所示，將五自由度測量系統固定至 AOI 設備的測量平台上，而該次實驗取 10 個點進行測量，每個測量點相互等距且同高的分佈在測量軸上，圖 11 至圖 13 顯示了測量結果，分別獲得直線度誤差、角度誤差以及定位誤差的測量結果。依測量結果可以得知一般自動化設備的精度較差，移動平台的總平均定位誤差逐漸變大，最大的誤差約來到  $85\ \mu\text{m}$ 。



圖 10. 實驗照片。

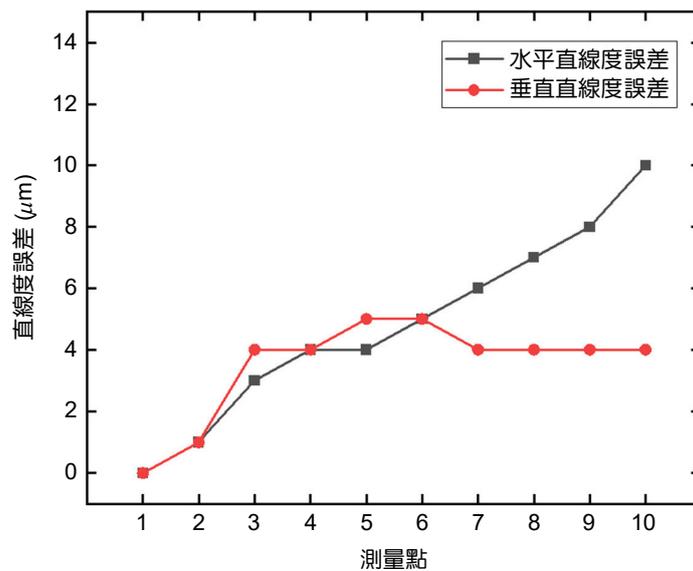


圖 11. 直線度誤差測量結果。

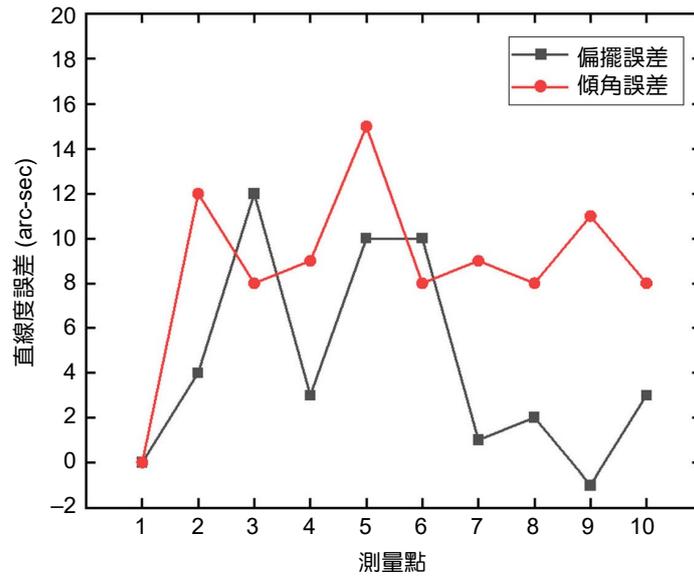


圖 12. 角度誤差測量結果。

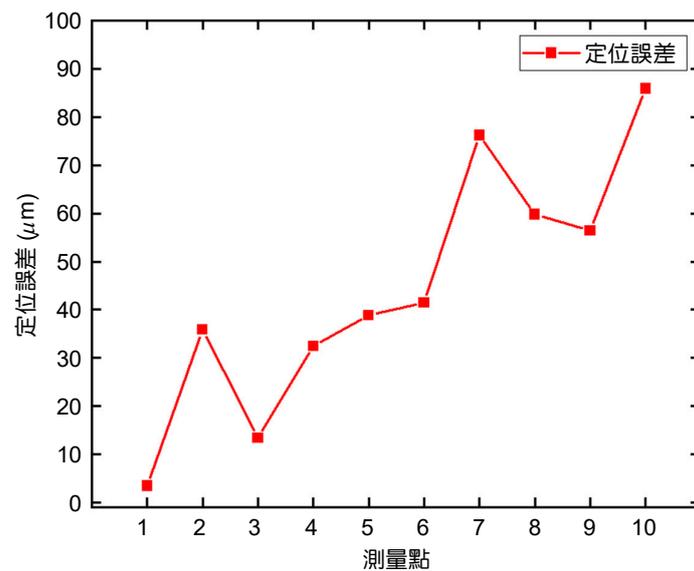


圖 13. 定位誤差測量結果。

## 七、結論

本研究開發了一種新型的五自由度測量系統，可以進行高速、高精度 (precision) 的測量，並在商用 AOI 平台進行測試。該系統可以同時測量運動軸的定位誤差、直線度誤差以及角度誤差等五自由度幾何誤差，所設計的系統結構簡單，可以方便的安裝在測量平台上，單雷射光束的設計也使得在光軸校準上變得容易，且直線度誤差測量精度達  $\pm 1 \mu\text{m}$ 、角度誤差測量精度達  $\pm 1 \text{ arc-sec}$ ，定位誤差測量分辨率為  $0.01 \mu\text{m}$ 、測量精度優於  $2 \text{ ppm}$ 。未來可以拓展至六自由度測量系統，但測量滾動誤差會用到平行光束，光束的平行度如何方便調整是一個需要注意的問題。

## 參考文獻

1. 范光照, 曾百由, 精密機械精度基礎, 初版, 新北: 高立, (2018).
2. C. H. Liu, W. Y. Jywe, I. C. Chen, L. L. Duan, H. H. Jwo, et al., *Tech. Mess.*, **76**, 245 (2009).
3. C. Kuang, E. Hong and J. Ni, *Rev. Sci. Instrum.*, **78**, 0950105 (2007).
4. W. Jywe, Y. R. Jeng, C. H. Liu, Y. F. Teng, *Part B: Journal of Engineering Manufacture*, **223** (4), 443 (2009).
5. 何傑, 科儀新知, **128**, 68 (2002).
6. Charles C. P. Wang, Rancho Palos Verdes; Joe S. B. Zhou, Monterey Park, both of Calif. Interferometer requiring no critical component alignment, United States Patent, 5116126, (1992).

## 作者簡介

魏承弘先生現為國立臺北科技大學製造科技研究所碩士生。

Cheng-Hung Wei is currently a M.S. student in the Graduate Institute of Manufacturing Technology at National Taipei University of Technology.

范光照先生為英國曼徹斯特科技大學機械工程博士，現為國立臺灣大學機械系名譽教授。

Kuang-Chao Fan received his Ph.D. in Mechanical Engineering from Manchester University, UK. He is currently an Emeritus Professor in the Department of Mechanical Engineering at National Taiwan University.

何昭慶先生為臺灣科技大學電機工程博士，現為國立臺北科技大學機械工程系暨製造科技研究所教授。

Chao-Ching Ho received his Ph.D. in Electrical Engineering from National Taiwan University of Science and Technology. He is currently a Professor in the Department of Mechanical Engineering and Graduate Institute of Manufacturing Technology at National Taipei University of Technology.