

桃園創新技術學院教師專題研究計畫
成果報告

雙頻雷射干涉儀之空間量測技術研究

計畫編號：教專研 104P-001

計畫類別：個別型計畫

執行年度：104 年度

執行期間：104 年 1 月 1 日至 104 年 12 月 31 日

計畫主持人：胡雅慧

執行單位：機械工程系

中華民國 104 年 1 2 月 31 日

雙頻雷射干涉儀之空間量測技術研究

胡雅慧

機械工程系

摘要

隨著科技的進步與時代的改變，在現代的工業應用上，製造業對工作母機精度的要求也愈來愈高，且在微型化原件的需求下，製造複雜及微小 3D 元件的微型工具機的發展已成為必然的趨勢，過去已有很多學者在工具機上量測及誤差補償系統做過許多的研究，但其研究均以傳統尺寸的機台與工件為考量，較不適用於微型工具機及其成品之檢驗。

本研究係根據微型尺寸加工的特性，以微型加工機台與加工件的精度驗證為導向，設計一套應用於微型工具機上之六自由度的量測模組，此模組主要是運用 AGILENT 公司的 HP5529A 雙頻雷射干涉儀及自製小型誤差量測模組，以達到量測微型工具機之移動誤差。自製小型誤差量測模組尺寸為 35 mm × 35 mm × 30 mm，係由多組光學元件及接收感測器所組成的，其中，量測核心為 5mm × 5mm × 5mm 的立方體，量測時放置於微型工具機的移動平台上，即可同步量測到三方向六自由度之位移。光路設計主要係將雷射光束以非偏極之分鏡分為三道互為垂直的光束，並經過一個雙孔遮罩分成六道光束，再經由立方體之三個互為垂直的反射鏡反射，即可藉由干涉訊號透過感測器來接收，並使用分析軟體計算直線與角度位移量，便能同時量測機台六自由度之位移訊息。

壹、緒論

一、研究動機

近年來隨著微型機械技術和精密加工技術的快速發展及應用，工業界對於工具機加工精度的要求日益提升，然而改善加工精度的方法有兩大類，第一類是改善工具機本身硬體的製造過程來提升工具機的加工精度，但是有一定的限度，因為工具機的加工精度無法超過其本身零件的精度與製造過程中的裝配精度；第二類是是使用檢測技術檢測位移誤差，其使用方法是利用量測技術來進行工具機的位移誤差檢驗，再配合誤差補償的技術，就可以達到所需的加工精度，所以有關物體的微小位移的精確量測漸漸被人們廣泛的重視。一般量測應用之感測元件有光學尺、應變規、線性變化差動變壓器、電容式位移感測器及雷射干涉儀等，但其中可達到長行程以及高精度的要求的應只有光學尺與雷射干涉儀了，但光學尺受限於位移速度與量測長度上的略為不足，或許就是為什麼現今半導體設備有許多是使用雷射干涉儀當位置回授裝置的原因。

在微型化原件的需求下，製造複雜及微小 3D 元件的微型工具機的發展是必然的趨勢，雖然現在市面上已經有微型工具機，但是仍有一些問題需要去克服解決，其中最主要的就是如何驗證工具機與工件加工的精度，雖然過去已有很多學者對於工具機機上量測及誤差補償系統做過許多的研究，但其研究均以傳統尺寸的機台與工件為考量，並不

適用於微型工具機及其成型品的檢驗，最先開發出來從事微型工具機的量測及誤差補償的系統，每次只能量測一軸的誤差量，而且量測時間非常的耗時間。所以才逐漸發展到能同時量測多軸的誤差量測系統，可以同時量測線性與旋轉位移量的多軸量測系統。本研究即以微型加工機台與加工件的精度驗證為導向，設計機台精度誤差量測與校正系統，以達到同時量測機台六自由度誤差量之目的。

貳、文獻探討

1989年，Sommargren等學者發展了雙重量測干涉儀同時測量晶圓平台的直線位移及角位移[1]。1992年，由J.Ni等人發展的多自由度量測系統，可以同時量測座標測量機的二個真直度及三個旋轉誤差，其系統包含兩個量測真直度的單元及決定旋轉誤差的自動光學瞄準儀。光學系統是採用氦氖雷射，並利用菱鏡的反射及折射，再將獲得的資料分別計算後就可以得到所需的真直度及旋轉誤差，如圖1為其系統光路圖。其真直度的準確度達到1mm以下，而旋轉角誤差，更可達到0.5mm以下[2]。

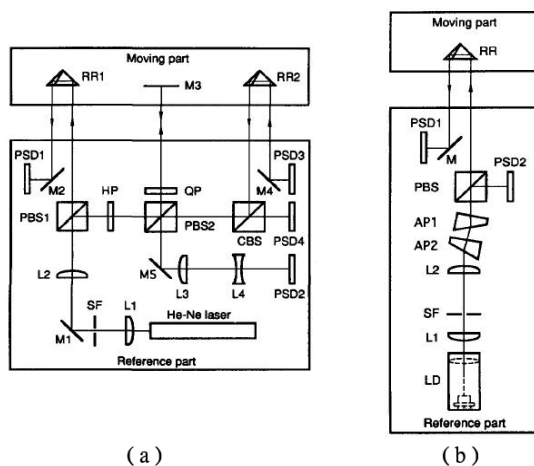


圖1 MDFM系統 (a)X、Y軸光路圖 (b)Z軸光路圖

1993年，Nakamura等人利用四個干擾儀和角立方體提議了一個3維座標顯微掃瞄平台測量方法[3]。1994年，Shimizu等人在6DOF中也為運動錯誤差提議了一個測定的方法，其方法是使用三個象限相片檢波器和一個單一軸干涉系統[4]。1997年，Chou等人利用多自由度測量系統去修正座標測量機具的幾何誤差，其研究是利用傅立葉相位移動技巧，讀取雷射光點在傅立葉空間的點分布函數，使CCD具有次畫素解析的能力，其系統利用HP5529干涉儀去校正CCD的直線性誤差，進而校正系統的擺動、滾動、打轉等方向誤差，使系統的穩定性達到 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ ，並可同時隔離高頻與低頻雜訊，在對於直流偏移較不靈敏，在空間解析線性反應上，使用圓形對稱光點則可達到次微米的精度。圖2為CCD-based MDFM系統光路圖 [5]。

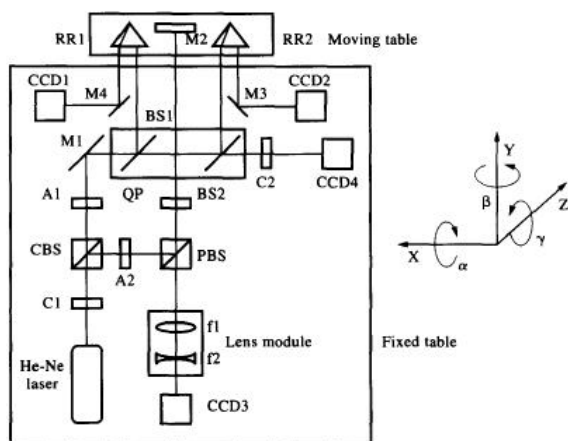


圖2 CCD-based MDFM系統光路圖

1997年，范光照等學者所發展的6DOF量測系統是利用了三個測長雷射及二個四象限相片檢波器去量測六個線性運動誤差運用在線性平台上，如圖3所示。其位移誤差在10mm的範圍內為 $\pm 0.01 \mu\text{m}$ ，其垂直直線誤差量在 $\pm 0.1\text{mm}$ 量測範圍內為 $1 \mu\text{m}$ ，其轉動誤差量在 $\pm 50\text{arcsec}$ 量測範圍內為 $\pm 1\text{arcsec}$ [6]。

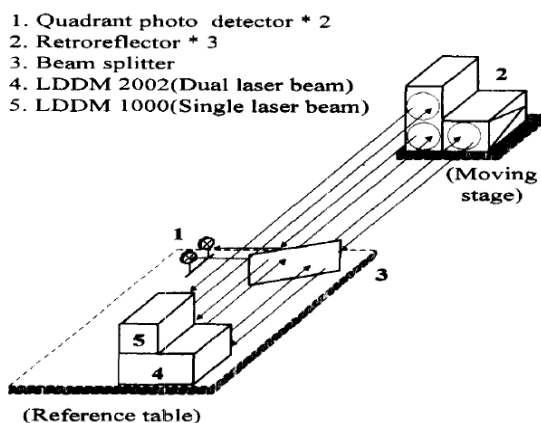


圖3 6DFM量測系統示意圖

2000年，范光照等學者也在，利用了四個雷射都普勒測長儀、二個四象限相片檢波器以及多個光學鏡組，作為其六自由度量測系統去量測X-Y定位平台的位移誤差和轉動3 誤差，如圖4所示。相較於HP5528A的量測系統，此線性量測系統的位移誤差在200mm的範圍內可降低 $\pm 0.1 \mu\text{m}$ 誤差，其垂直直線誤差量在 $\pm 0.5\text{mm}$ 量測範圍內可降低 $\pm 1.5 \mu\text{m}$ 誤差，其偏轉及螺距誤差可降低 $\pm 1\text{arcsec}$ 誤差，轉動誤差量在 $\pm 50\text{arcsec}$ 量測範圍內可降低 $\pm 3\text{arcsec}$ 誤差 [7]。

2001年，Eui Won Bae等學者所發明的多自由多量測系統是利用光學光線偏轉方法和三角測量為基礎，如圖5所示。他們使用一個繞射光柵作為一個反射的物件，將雷射光分散到三個檢波器中去分析其數值就可以得到六個自由度的誤差值，其實驗結果在2m的距離內誤差量在 $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 之間[8]

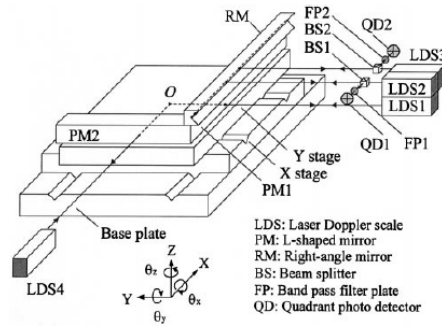


圖4 X-Y軸量測系統架構示意圖

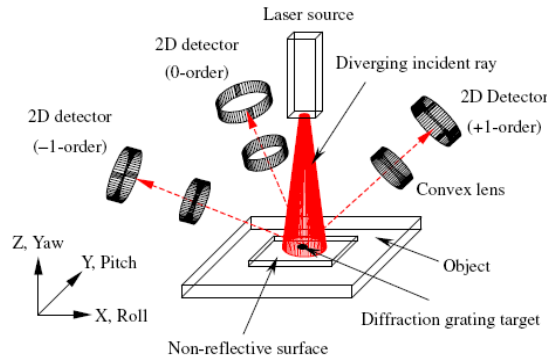


圖5 量測系統架構

2005年，Kuang等學者提出了利用光纖耦合雷射模組，其模組只有後向反射鏡的角立方體和分光鏡用來量測移動目標的直線誤差及角誤差，可以同時量測水平和垂直的偏轉及螺距誤差，與API五維雷射測量系統比較起來，其直線誤差在範圍 $\pm 500 \mu m$ 誤差量在 $\pm 2.5 \mu m$ ，角誤差在範圍 $\pm 400 \text{ arcsec}$ 誤差量在 $\pm 3 \text{ arcsec}$ 之內[9]，如圖6所示。

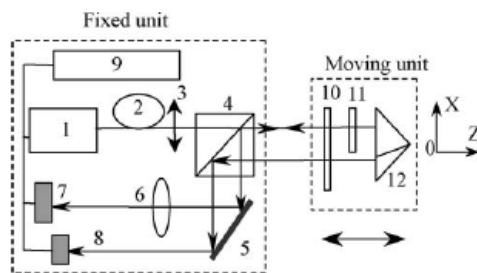


圖6 FDMS系統光路圖

2005年，Kuang等學者提出四自由度的量測系統，系統使用一個雷射模組及一個反射鏡和分光鏡，可同時量測位置誤差及角誤差，此四軸量測系統（FDMS）在2m的移動範圍內其位置位差小於 $0.1 \mu m$ ，角誤差小於 0.5 arcsec [10]。

2005年，李等學者所發展的微型工具機六自由度位置誤差量測，其系統是利用二個分光鏡和一個雷射二極體的雷射模組、三個二維位置感測器（PSDs）所組成的，在 meso-scale machine tool(mMT)測試平台的雷射模組產生了二條垂直的雷射，其中一條在分光鏡又再次被分成二條雷射光束，這三條光束分別被PSDs接收，其雷射模組可同時測

量微型工具機的前進和倒轉運動，此系統的位置誤差與角度誤差準確度範圍在 $\pm 0.6 \mu\text{m}$ 和 $\pm 0.6 \text{arcsec}$ [11]。

2007年，章明等學者發展出一套可應用於微型工具機的六自由度移動誤差量測系統，如圖7所示，主要是使用一準直雙頻的雷射光源，再搭配一個由多個光學元件及感測接受器組成的小型量測模組為 $(90 \times 40 \times 25) \text{mm}^3$ 來量測微型工具機的誤差。量測座落於微型工具機移動平台上的正立方體 $(30 \times 30 \times 30) \text{mm}^3$ ，可同步於三個方向量測各自由度的誤差，可適用的平台移動空間約為 $(20 \times 20 \times 20) \text{mm}^3$ ；光路的設計是根據同時接收從待測體的三個垂直面上反射回來的六個訊號來考量，干涉訊號係透過接受器來接收，如此便能同時提供機台六自由度的高解析度移位訊息。此系統的位置誤差與角度誤差準確度範圍在 $\pm 0.06 \mu\text{m}$ 和 $\pm 0.04 \text{arcsec}$ [12]。此系統之光學元件較為複雜成本較高。

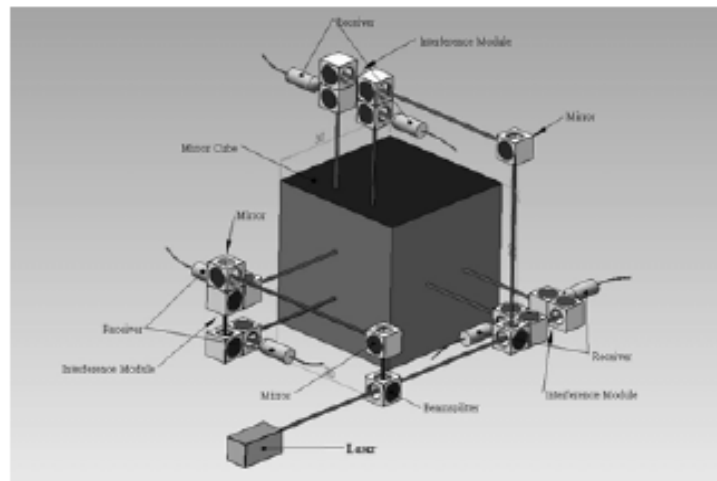


圖7 六自由度移動誤差量測系統架構示意圖

安捷倫發展出了一種多軸量測系統，如圖8(a)所示。其光學系統使用了雙頻雷射、一個分光鏡、二個Agilent 10737R/L，如圖8(b)所示。其光路設計利用雙頻雷射將光源射入分光鏡使一道雷射光束分成兩道雷射光束，再利用Agilent 10737R 分別將雷射分成分成三道雷射光束，如此就能同時量測多個自由度的誤差[13]。此元件可提供運動控制之回授裝置，但由於使用角鏡反射光束所以體積大小有所限制，無法用在微型機台量測。

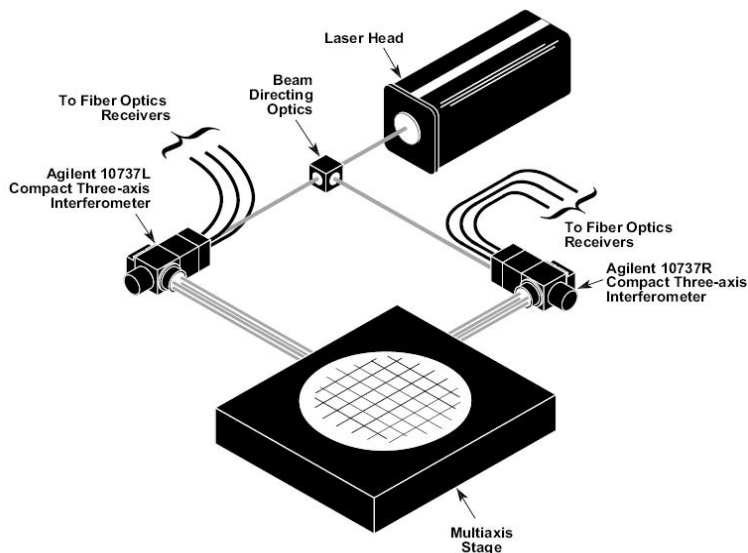


圖8 安捷倫多軸量測系統示意圖

參、研究方法

一、研究方法

本研究根據微型尺寸加工的特性，以微型加工機台與加工件的精度驗證為導向，設計一套應用於微型工具機六自由度的量測系統。系統架構圖如圖9所示，主要是運用 Agilent公司的HP5529A雙頻雷射干涉儀、多個光學元件以及感測接收器所組成的小型誤差量測模組35mm×35mm×30mm 來量測微型工具機的移動誤差。其中量測核心為5mm×5mm×5mm之立方體，放置於微型工具機的移動平台上，可同步量測於待測物三個方向的六個自由度位移。

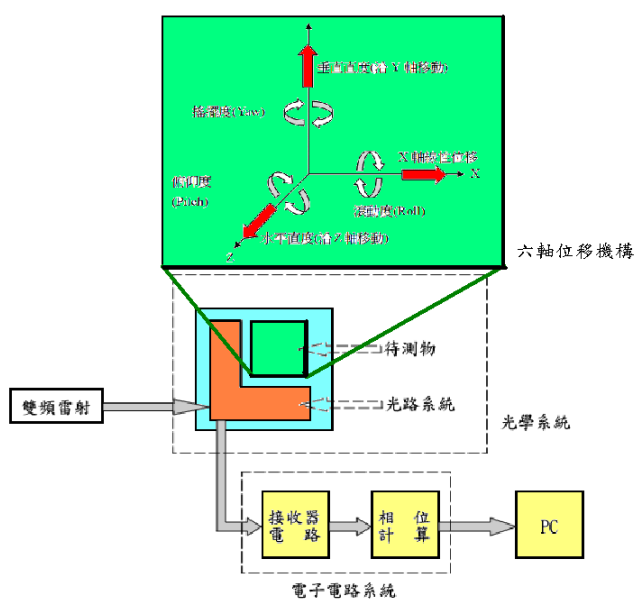


圖9 雙波長雷射干涉儀之六軸量測系統架構圖

光路的設計主要將雷射光束以非偏極的分鏡分為三道互為垂直的光束，並經過一個雙孔的遮罩成為六道光束，再經由立方體之三個互為垂直的反射鏡反射，由干涉訊號係透過接受器來接收，使用分析軟體計算直線與角度位移量，如此便能同時提供機台六自由度的移位訊息。圖10為光學模組架構示意圖。

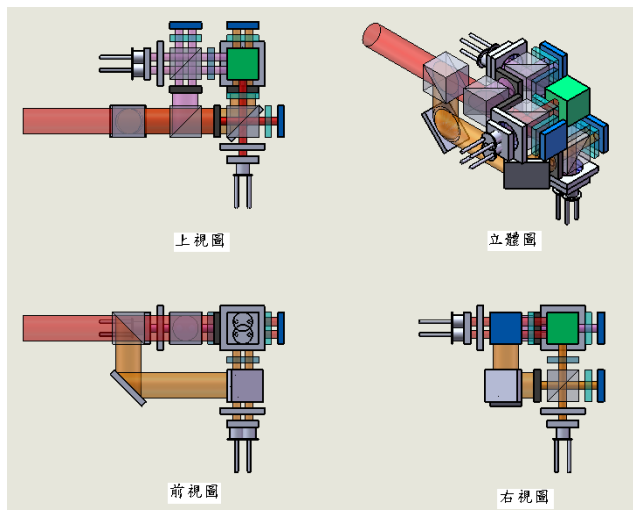


圖10 雙波長雷射干涉儀之六軸量測系之光學模組架構示意圖

(一) 雙頻雷射干涉量測原理

雙頻雷射線性位置量測原理的示意圖，如圖11所示。這個干涉模組包含了一個雙頻雷射之光源、一個分光鏡、一個反射鏡、二個 $\lambda/4$ 波板及一個接收器所組成的。當雷射穿過分光鏡被劃分成二道雷射光分別為垂直方向雷射(S)與平行方向雷射(P)，當S雷射透過 $\lambda/4$ 波板到反射鏡反射回 $\lambda/4$ 波板再穿透過分光鏡至接收器，此雷射光就是位置的參考雷射光訊號，而P雷射相同的透過 $\lambda/4$ 波板到待測物上反射回來，再經由 $\lambda/4$ 波板到分光鏡再傳至接收器。當兩條雷射光束經偏極板後同時傳送到接收器時會產生干涉條紋，由干涉光強弱變化的計數就可以得知待測物體的線性位移量。

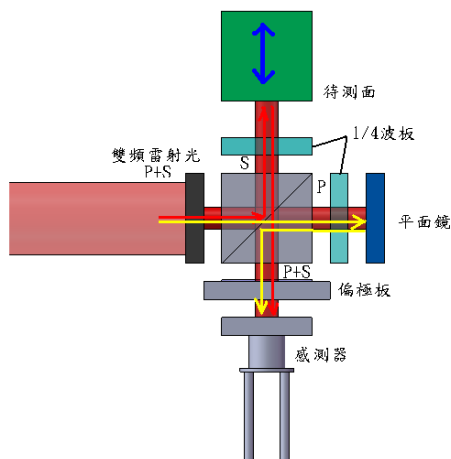


圖11 雙頻雷射線性位置量測原理的示意圖

偏移角度的量測，利用兩組干涉元件模組，如圖12所示當待測面偏轉 θ 角時，由已知兩干涉元件模組之中心距 S 及兩接受器所得到兩光程的差 d ，透過三角函數的計算，就可以量到旋轉軸的偏移角 θ ，其中 $\theta = \tan^{-1}(d/(s/2))$ 。

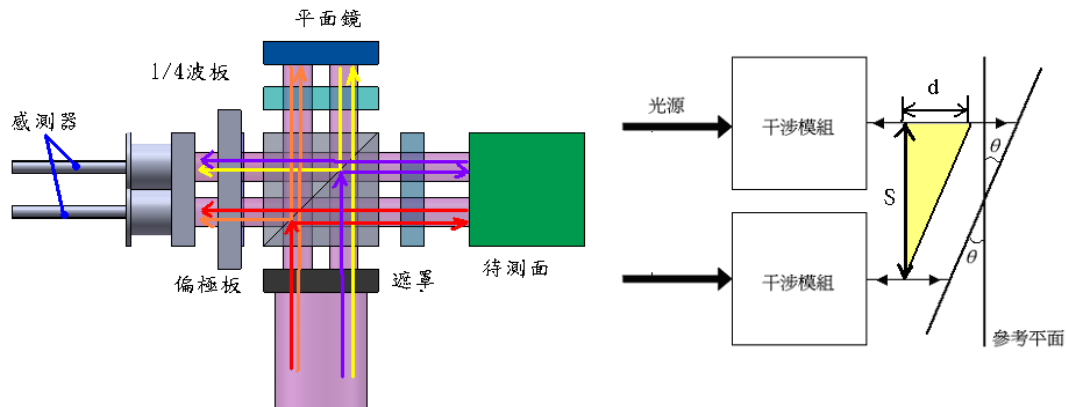


圖12 雙頻雷射角度量測示意圖

(二) 誤差量測模組光路設計

本研究所提出之三軸六自由度雙頻雷射干涉儀的誤差量測模組如圖13所示。當雙頻雷射光源入射XY/Z非偏極分光鏡NPBS後，將入射光一分為二，一為XY軸光束，另外為Z軸光束。XY軸光束在經X/Y非偏極分光鏡NPBS穿透光後，再分為X軸光束與Y軸光束，所以共有三組同樣的光干涉模組分別對三運動軸做量測。

以X軸模組來說明，如圖14所示，X軸光束經過遮罩後成為兩道平行XY平面的雷射光束，當兩道雷射穿過偏極分光鏡PBS後被劃分成二道雷射光分別為垂直方向雷射光束(S)與平行方向雷射光束(P)，當S雷射光束透過 $\lambda/4$ 波板到反射鏡反射回 $\lambda/4$ 波板再穿透過分光鏡偏極板至接收器。如此可以量測X軸線性位移與Z軸旋轉量。同理，Y軸模組可以量測Y軸線性位移與X軸旋轉量，Z軸模組可以量測Z軸線性位移與Y軸旋轉量。如此就能同時做三軸六個自由度的位移量測。

本系統之雷射光束約為直徑5mm，所以光學分光鏡使用(5 mm×5 mm×5mm)，使得整體光機系統設計尺寸約為(35mm×35mm×30mm)，在本系統中雷射光束直徑會限制量測的範圍，若有需要雷射光束可經擴展光路成較大直徑之光束。其中遮罩光欄孔徑大小為1.25mm間距圖2.0mm，相關位置如圖15所示，由於移動檢測物體是使用平面反射鏡的關係，所以只能適用於小角度的量測這與光欄孔徑及移動檢測物體到感測器的距離有關，所以約略估計可使用的角度為 ± 0.7 度，直線運動為 ± 1 mm。

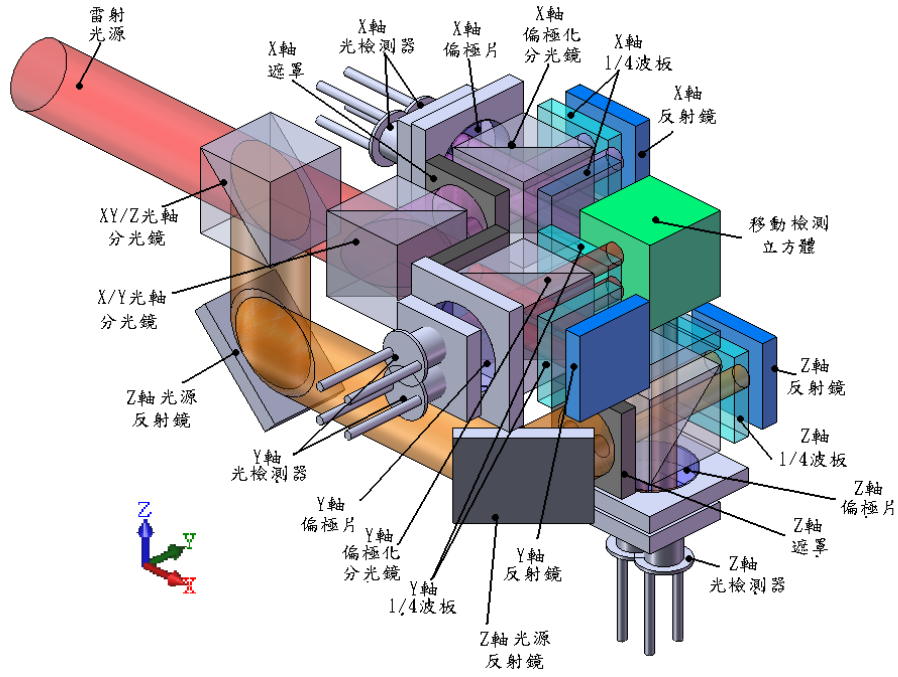


圖13 三軸六自由度量測光路設計圖

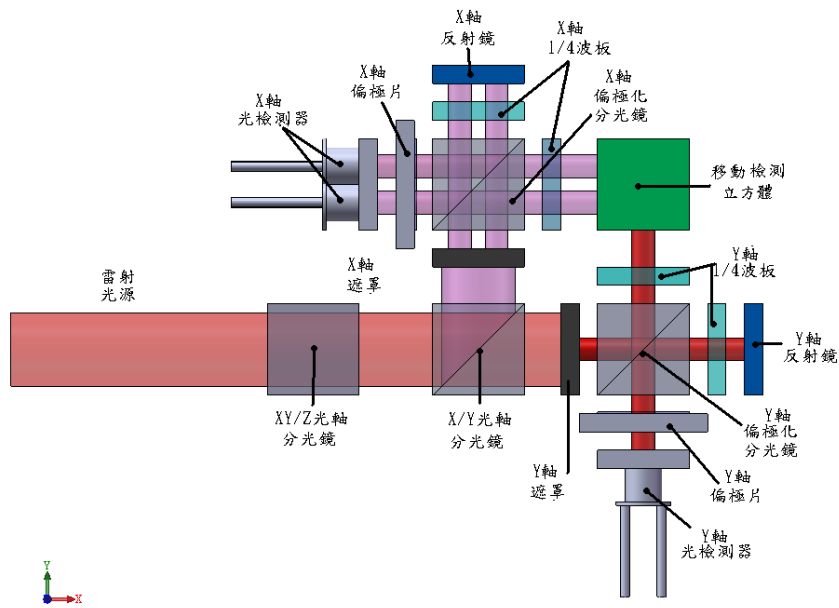


圖14 XY平面光路設計圖

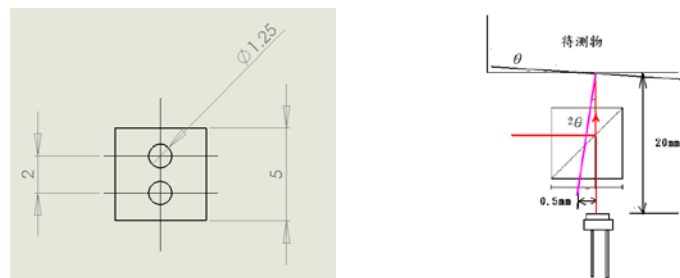


圖15 光欄孔徑大小間距圖與旋轉角度計算示意圖

(三) 電子電路設計

當雙頻雷射光經由分光鏡將光束一分為二，其頻率為(f_1, f_2)一束射向固定反射鏡此為參考路徑，其參考訊號頻率為($f_2 - f_1$)，另一束光射向可移動反射鏡行成量測路徑，其頻率為($f_1 \pm \Delta f_1$)，故兩束光合併後成為($f_2, f_1 \pm \Delta f_1$)，由此兩光束所產生干涉條紋為一差頻($f_2 - f_1 \pm \Delta f_1$)量測訊號，此參考訊號與量測訊號經光檢感測器轉換為光強訊號經由計數器分別計數得到 m_r 與 m_d 的計數值，經由減法器可得到實際移動之 $1/2$ 波長之干涉條紋數 m ，則移動距離= $m * (\text{雷射波長})/2$ ，如圖16所示。

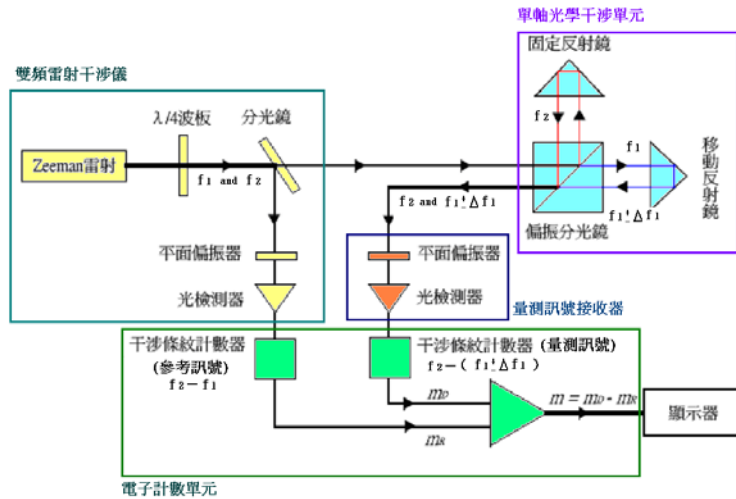


圖16 雙波長雷射干涉儀位置量測計數器量測原理示意圖

但目前量測技術主要多以量測單軸干涉訊號為主，其量測解析度可達 0.1nm ，因此在本研究中需製作一多軸量測計數器，其設計概念主要適增加光學干涉單元訊號接收器與量測訊號計數器，並將各組訊號整何計算，應可達到多軸量測的目的，其設計概念如圖17所示。

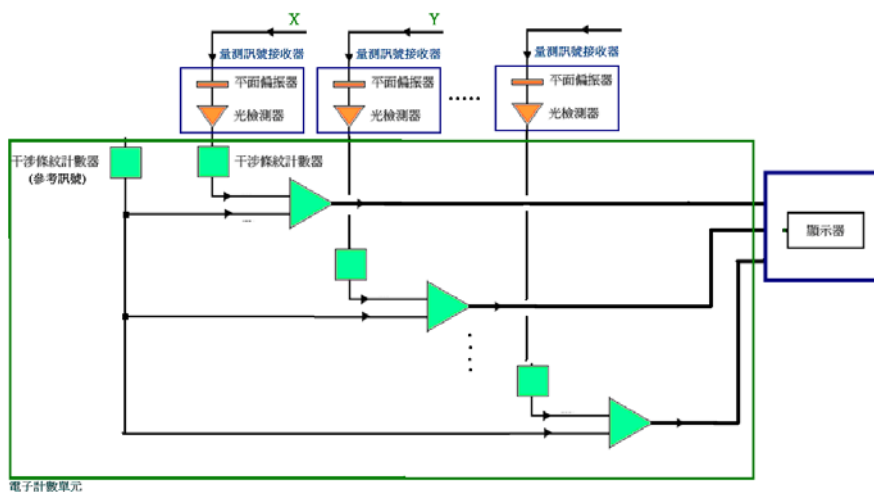


圖17 多軸量測計數電路設計概念圖

(四) 量測分析軟體

在進行多軸之量測時，必須有人機介面作為資料輸出與輸入的顯示，因此，本計畫設計一動態校正儀量測軟體，其主要包含有六軸量測資料之輸入、線性量測與角度量測之轉換、運動姿態的空間座標轉換等，其中更需要有校驗程序的設定與處理，量測分析軟體架構示意圖如圖18所示，以USB2.0為傳輸介面，同時讀取計數卡並作環境補償校正，並藉由人機介面進行動態量測，可直接顯示線性量測結果與角度量測結果，達到即時量測即時顯示的效果。

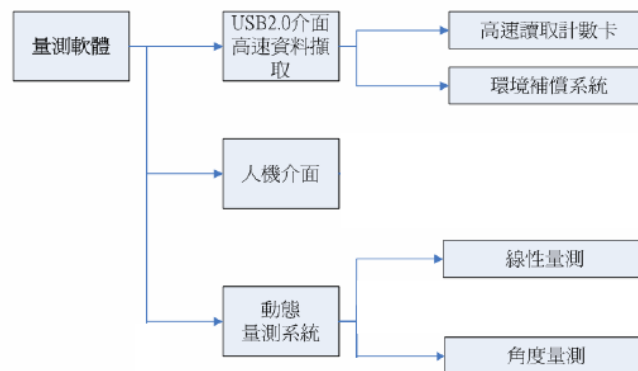


圖18 量測分析軟體架構圖

肆、結果與討論

為進行雷射干涉儀之多軸量測，本研究設計之量測系統有硬體及軟體兩部份，其中硬體架構如圖19所示，主要是運用Agilent公司的HP5529A雙頻雷射干涉儀、多個光學元件以及感測接收器所組成的小型誤差量測模組35mm×35mm×30mm 來量測微型工具機的移動誤差。其中量測核心為5mm×5mm×5mm之立方體，放置於CNC工具機的移動平台上，可同步量測於待測物三個方向的六個自由度位移。



軟體系統架構主要包含有四大部分(1) USB2.0介面高速資料擷取，(2)人機介面，(3)多功能量測及(4)量測結果分析系統。

(一) USB 2.0 介面高速資料擷取

USB 2.0傳輸速率可達480 Mbps，適用於高速的資料傳輸，由於目前之電子配備均以USB 2.0作為傳輸介面，故在攜帶、安裝與使用上均相當方便最重要的功能是可直接與筆記型電腦連接使用，為一方便攜帶型之量測設備。

在本系統中包含有高速讀取計數卡與環境補償系統兩部份資料的傳輸。高速讀取計數卡資料規格如下：2.472 nm解析度(632.8nm/2/128)、USB 2.0 傳輸介面、1MHz 資料更新及100 KHz / 24Bytes資料傳輸。光學尺AB相位訊號同步輸入量測由於量測模式的差異在資料傳輸量的設計分為兩種模式，不間斷的時間高速資料傳輸模式(100KHz)與位置模式(1KHz)兩種。

環境補償系統部份由於雷射干涉儀的量測精度取決於雷射波長的穩定度以及空氣中的折射率，其中雷射波長的穩定度由製造廠商利用工作環境恆溫控制，使得輸出穩定。而空氣中的折射率可由下式的Edlen公式中環境溫度、空氣溼度以及大氣壓力等影響來做修正。此資料的擷取速度大約每5秒修正一次即可。圖19為環境補償系統程式設計例。

$$n_{air} = 0.3836391P \times \left[\frac{1 + 10^{-6}P(0.817 - 0.0133T)}{1 + 0.0036610T} \right] - 3.033 \times 10^{-3} Re^{0.057627T}$$

$$n = \frac{n_{air} + 10^6}{10^6}$$



(a) Edlen修正公式

(b) 環境補償介面圖

圖19 環境補償系統程式設計例

量測資料的傳輸方式在舊式的HP 5529雷射干涉儀介面中是使用AT BUS對PC進行資料之傳輸，其傳輸速率為10M Bytes，然而由於在使用時必須將介面卡插置於PC所帶來之不便外，主要是目前PC所使用之主機板多為PCI BUS，均已不支援AT BUS，故造成業者與使用者在操作上的困擾，故本計畫使用CYPRESS公司出產的CY7C68013 積體電路晶片，其內部電路設計主要有加強型8051微處理器及USB2.0之的傳輸介面，傳輸端點有四種可規劃模式(BULK/INTERRUPT/ISOCHRONOUS)，傳輸速率可達480 Mbps，適用於高

速的資料傳輸，雖本量測無需高速的傳輸，但由於目前之電子配備均以USB2.0作為傳輸介面，故在攜帶、安裝與使用上的考量，另最重要的功能是可直接與筆記型電腦連接使用，為一方便攜帶型之量測設備，本研究之USB2.0量測計數器開發板如圖20所示。

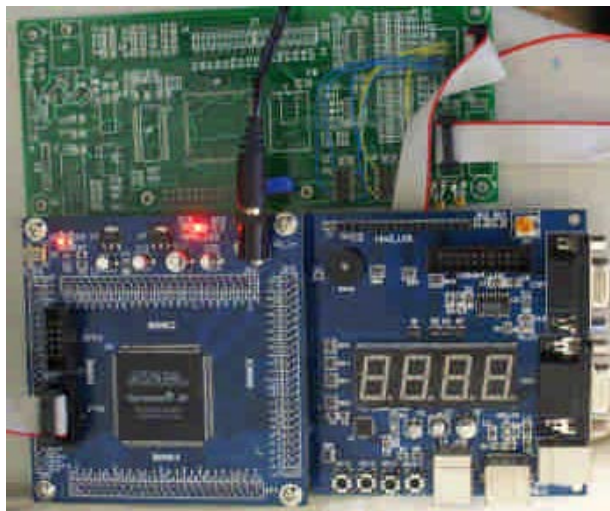


圖20 USB2.0量測計數器開發板實體圖

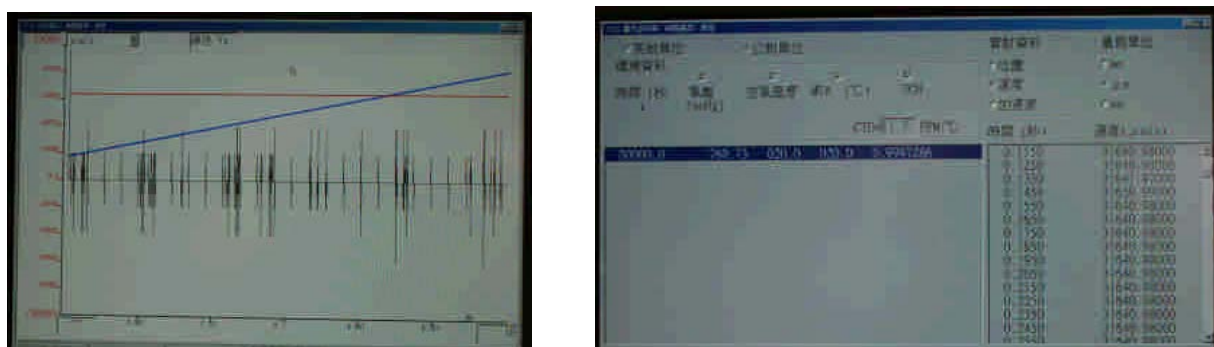


圖21 1MHz 差頻模擬輸出量測結果圖

環境補償量測板初步整合完成，配合校正過的Agilent公司雙頻雷射干涉儀環境補償量測系統(10886A)同時實際執行測試工作，來驗證電路設計正確性，並測試資料傳輸時執行的速度、解析度、精度及檢測能力等。本計畫主要針對兩部分設計驗證其正確性，其一為高解析度，利用環境控制箱之環境控制來與量測儀器進行相同檢測之比對，以確定本系統之準確性並進行系統的環境溫度影響穩定度及誤差評估。實驗設置如圖22所示，圖22(a)為原有的Agilent環境補償量測系統(10886A)校正卡，圖22(b)為溫度溼度實驗，圖22(b)為壓力實驗。

為了要進行環境補償之量測，故進行環境補償之介面設計與撰寫，如圖23所示，主要針對溫度及濕度進行量測，並顯示目前狀態，同時進行溫度與濕度之補償，溫度量測實驗設置是將兩組溫度感測器在密閉的環控保溫箱內，約在攝氏22度與12度時每秒量測

一次各約1300次與3500次之結果，如圖24所示，統計得知量測相對誤差在0.05度以內標準差在0.01度以內，符合系統需求。而高精度的量測有賴於校正的程序及標準的追溯，將進一步交由廠商測試量測之效能。



(a) Agilent 環境補償量測系統(10886A) (b)溫度溼度實驗(c)壓力實驗

圖22 環境補償量測圖

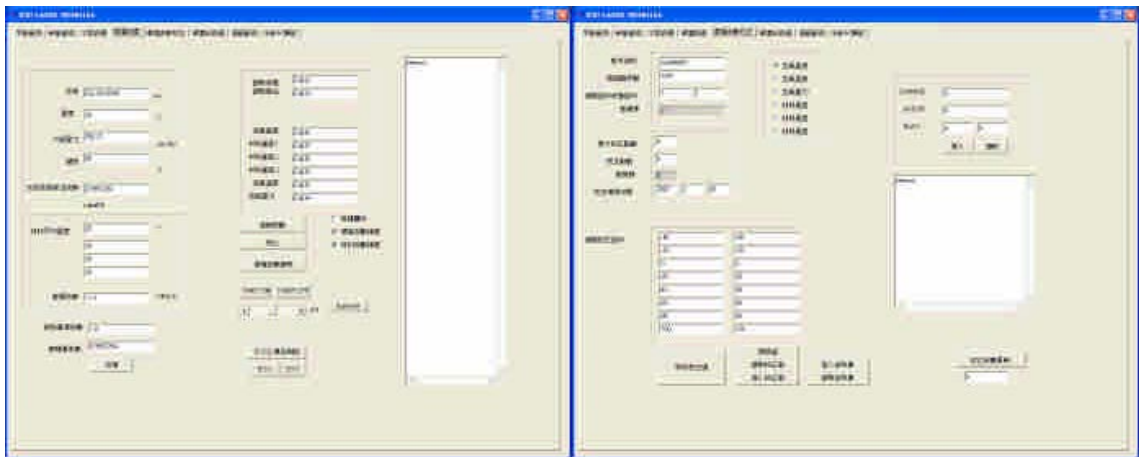
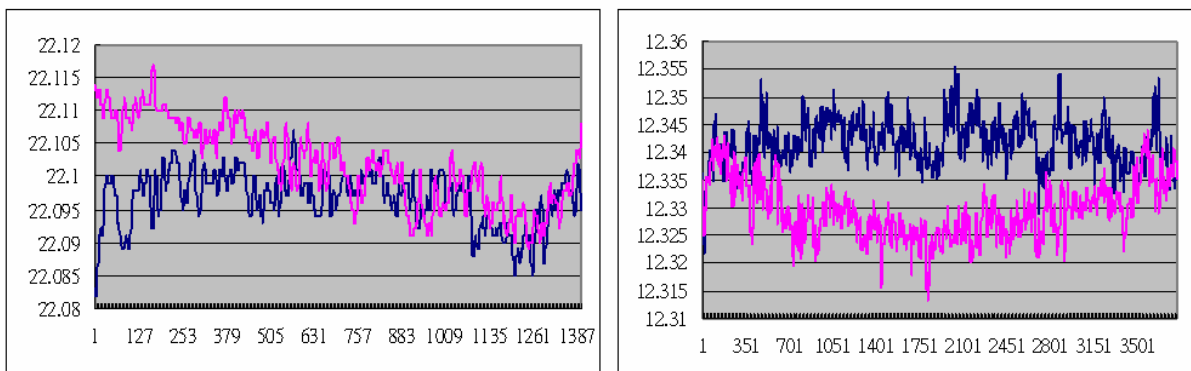


圖23 環境補償量測介面圖



(a) 攝氏22 度時之量測結果(b) 攝氏12 度時之量測結果

圖24 溫度量測結果圖

(二) 人機介面

人機介面程式設計的考量包含有(1)語系切換程式 (2)HELP文件程式 (3)資料檔案輸出入程式等，其主畫面如圖25所示，主要的操作環境先設定為WINDOWS XP /2000等視窗環境，未來可擴展為LINUX系統。



圖25 人機介面程式設計例

其中，動態量測系統之量測模式可分為(1)線性量測 (2)角度量測 (3)直線度量測 (4)直角度量測(5)平行度量測 (6)導軌直線度量測 (7)平面度量測 (8)時間基準量測 (9)對角量測等，其各個量測程序各有差異性，光學之架設亦有所不同，量測程式必須一一處理。因此在撰寫此部份之軟體程式時，必須同步進行雷射干涉儀裝置之架設，以確認程式撰寫步驟的順序。圖26為動態量測系統程式設計例。圖27為線性量測與時間基準量測之量測介面圖。圖28維量測結果分析系統程式介面圖。



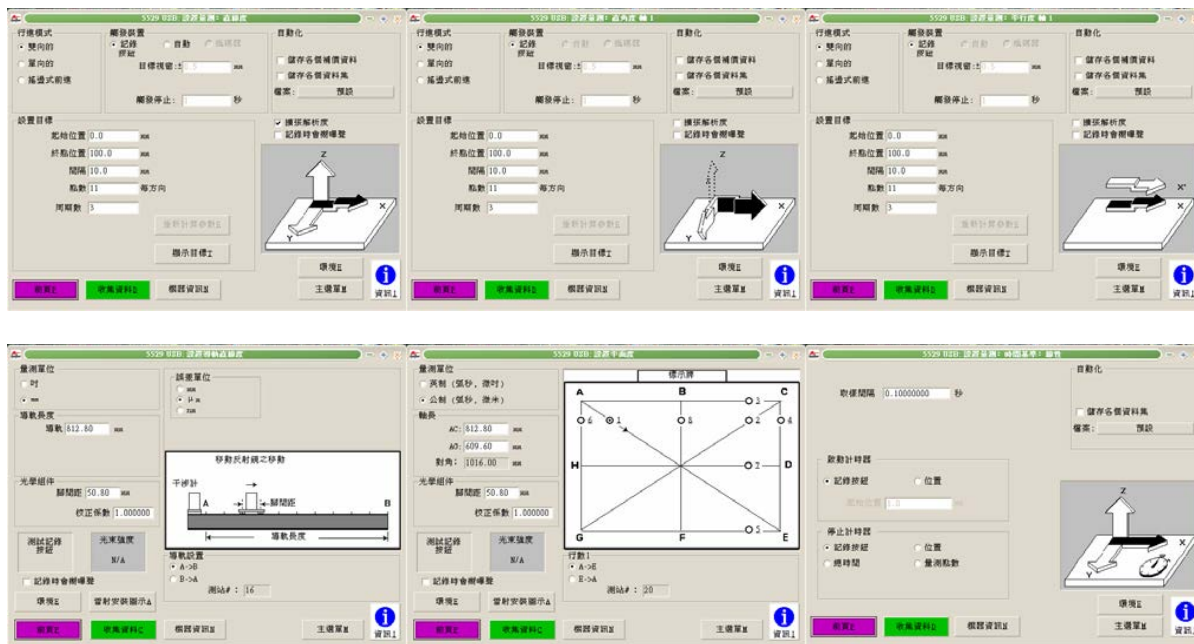


圖26 動態量測系統程式設計例

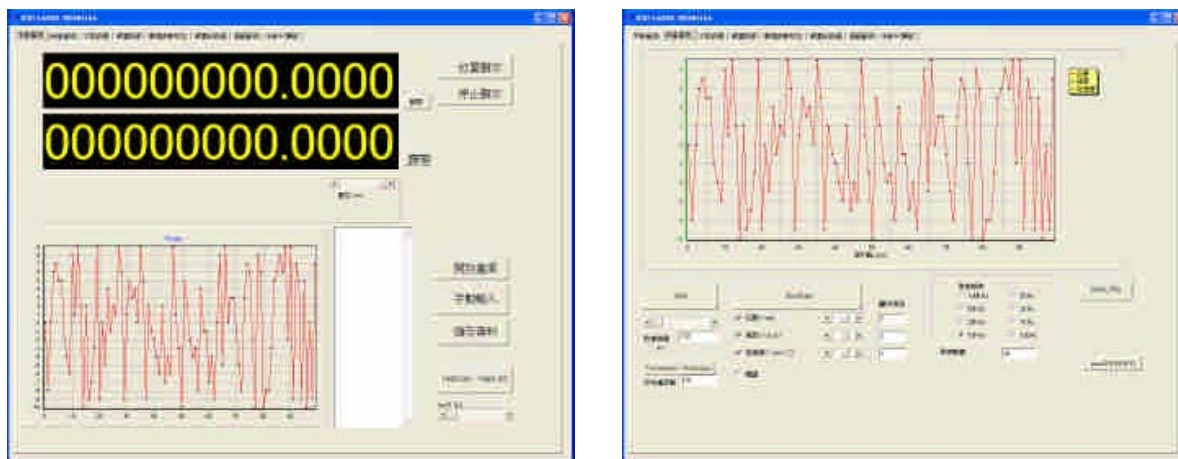


圖27 線性量測與時間基準量測介面圖



圖28 量測結果分析系統程式介面圖

伍、結論

本研究係根據微型尺寸加工的特性，以微型加工機台與加工件的精度驗證為導向，設計一套應用於微型工具機上之六自由度的量測模組，此模組主要是運用AGILENT公司的HP5529A雙頻雷射干涉儀及自製小型誤差量測模組，以達到量測微型工具機之移動誤差。自製小型誤差量測模組尺寸為35 mm × 35 mm × 30 mm，係由多組光學元件及接收感測器所組成的，其中，量測核心為5mm × 5mm × 5mm的立方體，量測時放置於微型工具機的移動平台上，即可同步量測到三方向六自由度之位移。光路設計主要係將雷射光束以非偏極之分鏡分為三道互為垂直的光束，並經過一個雙孔遮罩分成六道光束，再經由立方體之三個互為垂直的反射鏡反射，即可藉由干涉訊號透過感測器來接收，並使用分析軟體計算直線與角度位移量，便能同時量測機台六自由度之位移訊息。

參考文獻

1. Sommargren GE. "Linear/angular displacement interferometer for wafer stage metrology". Proc SPIE, 1088: 268–72, 1989.
2. J. Ni, S. M. Wu, "An On-Line Measurement Technique of Machine Volumetric Error Compensation," J. Eng. Ind., 115, pp. 85-92, 1993.
3. Nakamura O, Goto M. "Microscopic coordinate measurement by four-beam laser interferometry". J Japan Soc Prec Eng, 59: 155– 60, 1993.
4. Shimizu S, Lee, HS, Imai N. "Simultaneous measuring method of table motion errors in 6 degrees of freedom". Int J Japan Soc Prec Eng, 28: 273–4, 1994.
5. Chou C, Chou LY, Peng CK, Fan KC. "CCD-based CMM geometrical error measurement using Fourier phase shift algorithm". Int J Mach Tools Manufact, 37: 579–90,1997.
6. Fan KC, Chen MJ, Huang WM. "A six-degree-of-freedom measurement system for the motion accuracy of linear stages". Int J ach Tools Manufact, 38: 155–64, 1998.
7. Fan KC, Chen MJ. "A 6-degree-of-freedom measurement system for the accuracy of X-Y stages". Precision Engineering, Vol. 24, No. 1, pp. 15-23, 2000.
8. E. W. Bae, J. A. Kim and S. H. Kim, "Multi-Degree-of-Freedom Displacement Measurement System for Milli-structures," Meas. Sci. Technol., 12(9), pp. 1495-1502, 2001.
9. Cui Fang Kuang, Qibo Feng, Bin Zhang, Bin Liu, Shiqian Chen, Zhifeng Zhang. "A four-degree-of-freedom laser measurement system (FDMS) using a single-mode fiber-coupled laser module". Sensors and Actuators A 125, 100–108, 2005.
10. Kuang, Cui-Fang; Feng, Qi-Bo; Zhang, Bin; Chen, Shi-Qian. "Study of the method for measuring four-degree-of-freedom geometric errors of a linear stage". Zhongguo

Jiguang,P1266–1270,2005.

11. S. W. Lee, R. Mayor, J. Ni, “Development of a Six-Degree-of-Freedom Geometric Error Measurement System for a Meso-Scale Machine Tool,” Journal of Manufacturing Science and Engineering, 127, 857, 2005.
12. C. T. Tzeng , J. R. Deka and M. Chang , “Development of Six-degrees-of-freedom Motion Errors Measurement System for Micro-scale Machine Tools” 中國機械工程學會第二十四屆全國學術研討會論文集, D12-0035,2007.
13. Agilent,“Laser and Optics User's Manual, Chapter 70, Compact three-axis interferometers”.