

桃園創新技術學院教師專題研究計畫
成果報告

應用雷射光學讀取頭於
微奈米級高度量測儀之研製

計畫編號：教專研 103P-042

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：童景賢

執行單位：機械系

中華民國一〇三年十二月三十一日

應用雷射光學讀取頭於微奈米級高度量測儀之研製

童景賢
機械工程系

摘要

科技的日新月異，半導體產業、精密機械工業、生物工程領域等方面，皆朝微小化、精密化的方向前進，所以對於量測系統的精度要求越來越高，為了提升產品的品質與可靠度，必須要有高於加工等級的精密檢測儀器來檢測。基於工業技術水準所限制，以前無法產出高穩定性與高精度的量測儀，因此在『奈米革命』的背景下，大多舊式的量測儀在奈米等級的量測已不符使用。本研究從此處切入，設計一組具有奈米級的高度量測系統。此系統主要可分為四模組：傳動系統、量測系統、控制系統與訊號細分系統。各模組描述如下：傳動系統是由一微型滾珠導螺桿和一個高精密級線性滑軌所組成，達成一個自由度之運動；量測系統由雷射光學讀取頭結合機構所組成的線性繞射式光學尺(LDGI)、光柵(1200 grooves/mm)、高精密級線性滑軌和紅寶石探頭所構成；控制系統是選用嵌入式的 AVR 單晶片，並搭配驅動放大電路和搖桿來控制直流馬達；訊號細分系統是由 NI 6016 擷取卡擷取 LDGI 訊號並進行訊號細分與運算，最後將量測值顯示在電腦螢幕上並紀錄，其細分後之訊號解析度可達 1.72nm。此奈米級高度計經過雷射干涉儀校正後對一組 DIN 1 級塊規分別進行單點重覆性實驗和 1mm~10mm 高度量測實驗(每 1mm 為一組)，單點重覆性實驗的標準差為 1.78nm；1mm~10mm 高度量測的標準差在 80 奈米以下，皆符合合理的公差標準。

壹、緒論

一、研究動機

在現代化工業中，由於高精度的產品需求，使得加工製程中，對於製造精度的要求也愈趨嚴格，因此微機電和奈米技術逐漸受到重視，相對的高精度的量測技術也愈顯重要。近年來，科技的日新月異，半導體產業、精密機械工業、生物工程領域、光電系統、

顯微機構、表面工程等方面，皆朝微小化、精密化的方向前進，所以對於量測系統的精度要求越來越高，為了提升產品的品質與可靠度，必須要有高於加工等級的精密檢測儀器來檢測。以前因為基於工業技術水準所限制，所以無法產出高穩定性與高精度的量測儀，因此在人類史上第四次工業革命『奈米革命』的背景下，大多舊式的量測儀在奈米等級的量測已不符使用。

二、研究目的

從 1890 年美國人 B. C. Ames 發展出最早原型後 [1]，19 世紀 20 年代以後，開始有很多國家的研究人員開始研發這一類的量具，如百分表、內徑千分表... 等等，這些量具都是運用機械的機構或構造來細分，所以當要提高量測精度時，必然之遭遇到相當多的困難，因此隨後就有人提出運用光電的裝置來代替一般傳同機械的細分系統[2]，並達到一般機械無法達到的量測精度。

本計畫是應用雷射光學讀取頭於微奈米級高度量測儀之研製，此高度量測儀是使用雷射讀取頭組合成位移感測器，用以量測光柵之刻度數量，並轉換為距離尺度，用來測量微奈米微動位移量，以取代售價昂貴之雷射干涉儀。因此，本研究將從雷射探頭製作位移感測器著手，再將此自行研製之位移感測器固定於微奈米級高度量測儀之平台上，並以嵌入式 AVR 單晶片作系統之控制，以達到低成本即時監控之目標。

貳、文獻探討

雷射讀取頭與多重光學鏡片組件技術便不斷的更新與發展，截至今日已相當成熟。從雷射光源、光路設計以及光感測器等，其系統整合之完整度及聚焦之特性，使得應用雷射讀取頭於光學檢測上是可行的，以下為相關之研究文獻評述。

一、雷射讀取頭部分

Benschop 與 Rosmalen [3]將 CD 光學讀取頭的雷射源摘除，另外以大功率雷射透過光纖當作新的光源，發展成為一套光學掃瞄顯微鏡。利用讀取頭上的四象限感測器，配合自動聚焦功能，感測物體表面的振幅；同時在遠端雷射光源處，增加一共焦感測器，感應物體表面反射光的相位變化，完成物體表面狀況的掃瞄。林勤喻 [4]發展一套精密的

表面粗糙度量測方法。其作法是將讀取頭的音圈馬達鎖死，再把反射面切入 S 曲線，利用 S 曲線線性區中，失焦量與失焦訊號一對一的關係，可精確地量測出物體表面的高度變化。其量測精度可達 34 nm，範圍為 10 μm 。林威自 [5] 利用 CD-ROM 讀取頭發展表面粗糙度儀。其作法是切入 S 曲線，用類比式的 PD 控制器來進行聚焦控制，利用伺服失焦訊號與物鏡的位移量，在數百微米的範圍內呈現一對一的線性關係，可量測出物體表面的高度變化。其具有 200 μm 的量測範圍，量測精度可達 0.2 μm 。陳柏廷 [6] 利用 DVD 讀取頭發展表面輪廓量測儀，其作法是切入 S 曲線，利用自動聚焦曲線與位移的線性關係，配合磁滯補償，可得出物體表面高度變化。其量測解析度達 40 nm，量測範圍達 1.4 mm。

二、奈米高度計部分

由於產業與學界皆往奈米尺度發展，為了符合與促進工業水平的發展，因此本計畫研製此奈米級高度計；為了解現今全世界各國高精密度級的高度計的性能現況，所以特別製作表 1，可作為奈米高度計相關參考與比較。

表 1 各國奈米高度計

研發單位	產品型號	規格
標普耐米	LG10-0001	Measuring Range 10 mm、Resolution 0.001 μm Accuracy $\pm(0.03+0.003L)$ μm
成都遠恒	TG541/TG543	Measuring Range 5 mm、Resolution 0.1 μm 、Accuracy 0.4 μm 、Repeatability 0.3 μm
台灣大學	Prototype of Nano-scale Height measuring Machine	Measuring Range 15 mm、Resolution 0.001 μm 、Accuracy 0.04 μm 、Repeatability 0.02 μm
Heidenhain	HEIDENHAIN-CERTO CT-2500	Accuracy $\pm 100\text{nm}$ 、Plunger actuation motor Measuring Range 25 mm
Mahr	P1526	Accuracy $\pm 0.2 \mu\text{m}$ 、Measuring Range 25 mm
SIOS	Model LM 20	Measuring Range 25 mm、Resolution 1 nm
Mitutoyo	Installing VL-50A	Measuring Range 50 mm、Resolution 10

		nm、Accuracy (0.5 + L/100) μm 、 Repeatability 50nm
Sony	DG810	Measuring Range 10 mm、Resolution 0.5 μm 、Accuracy 2 μm
Tesa	TG30	Measuring Range 30 mm、Accuracy 1 μm

綜觀相關的研究，採用雷射的非接觸式量測法，能夠在不破壞工件的情況下，達到高精度的位移量測。且一般市售商用 DVD 光碟機之雷射讀取頭，不但內含雷射二極體光源，且光路中之光柵、分光鏡、四分之一波片，與內建的光檢測 IC、聚焦物鏡、音圈馬達驅動器等，都已經利用成熟的技術將其整體化、微小化，因此非常適合應用在本計畫的研究方向上。

參、研究方法及原理

一、研究方法

基於具有低成本、小體積、容易取得等優點，本研究主要是使用市售的精密 DVD 讀取頭 (Pickup head) 來做為製作雷射探頭之主要依據。

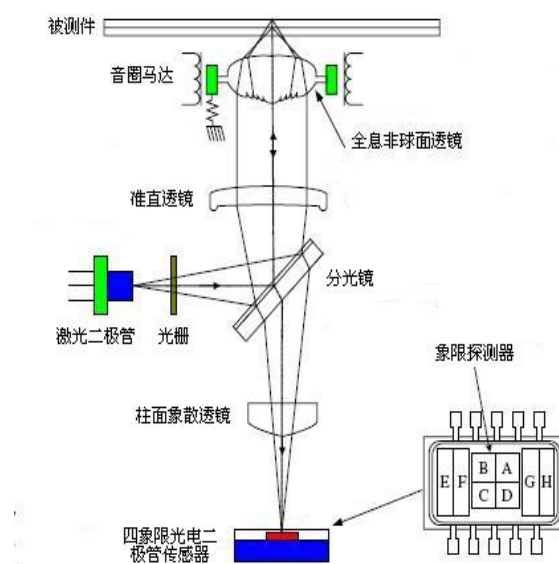


圖 1 DVD 讀取頭之外觀及內部結構圖

DVD 讀取頭其內部除了含有讀取 DVD 所使用的雷射二極體光源 (波長約為 650 nm) 之外，其他的相關光學元件及其外觀及結構，如圖 1 所示。應用自動功率控制電路使鐳射二極體發射約 0.5mW 的 650nm 波長的紅鐳射光束，經光柵衍射後形成三束檢測光，再

經分光鏡、准直透鏡，將雷射光束變成准直光束，准直光束經過聚焦透鏡後彙聚在被測件上、經被測件反射的光再分別經過聚焦透鏡、准直透鏡、分光鏡和像散透鏡後，投射到四象限感測器（four-quadrant photo detector）上。四象限感測器會根據光點在四個象限上的分佈，輸出一個聚焦誤差電壓信號 FES (Focus Error Signal) $(B+D)-(A+C)$ 。這個聚焦誤差信號經過運算放大、補償處理，驅動音圈電機 VCM (Voice Coil Motor) 並帶動聚焦透鏡一起沿光軸方向運動，直到聚焦點恰好反射面重合，從而達到自動鎖焦的目的。

二、原理與電路

由於雷射探頭在本計畫中主要作為高度量測儀之位移測距，其重要性實為量測準確度之關鍵；因此，將雷射探頭之研究重要部分並詳述於後。

（一）雷射 APC 電路

在本研究中，雷射探頭系統需要一個穩定功率的雷射光源，因此在 APC (Automatic Power Control) 電路上的設計其重要性不言可喻。在 APC 電路之初始狀態下，先提供一個基準的參考電壓源，而在系統作動的同時將當時 PD 所接受的訊號與此進行比較。兩個訊號相減之後經過放大電路進而推動 LD 的驅動電路，驅動電路本身是利用一電晶體作類似開關的動作，來控制 LD 電流大小。因此在任何情況之下經由此 APC 電路的監視之下，雷射都能夠得到穩定的功率供給。

（二）光感測器

光偵測器 (Photo -detector) 是將光訊號轉換為電訊號，而在經由後續對於其轉換而成之電子訊號的量測得知原始的光訊號。另外，將檢測出入射光的能量，轉換成光電流的形式，搭配適當的阻抗，可以將之轉換成電壓值。因此光檢測器可以藉著電壓訊號的強弱，判斷出入射光的位置。

在本計畫中，雷射探頭內部的感測器是由四片面積相同且光電性質相同的光感測器所組成的為四象限感測器 (Quadrant detector)，如圖 2。材料一般為矽，中央之間隔只有 2 到 12 微米，當光點打在檢測器上時，光點落在各檢測元件的能量不一，因此其訊號輸出

也不一，利用電子線路，比較各檢測元件之輸出，就可獲知光點位置差。

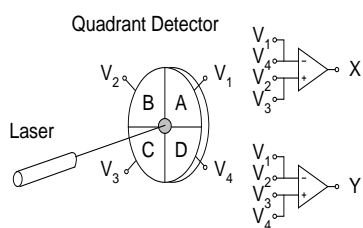


圖 2 象限感測器位置與電壓之關係

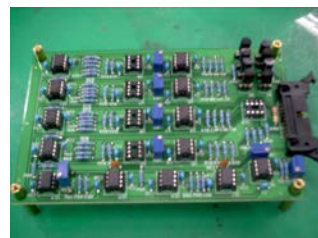


圖 3 光感測器訊號處理電路

在圖 2 中，A，B，C 與 D 分別代表在第一、二、三、四象限所接收到光強訊號，而 K 則表示感測器系統中的比例常數。雷射讀取頭即是利用四象限感測器來偵測四個象限分別的受光強度，並進而經由後續的電路訊號處理來計算失焦訊號 FES(Focus Error Signal) 其值等於 $(A+C) - (B+D)$ ，而在某特定區段經由此方式，即可得到雷射探頭之 S 曲線的電壓-位移之特性圖。至於光感測器訊號處理電路原型測試板，則如圖 3 所示。

(三) S 曲線

若將 DVD 光學讀取頭中的音圈馬達固定，使聚焦透鏡固定不動，則系統輸出的聚焦誤差信號與聚焦點偏離反射面的距離在一定範圍內呈線性關係，如圖 4 所示。由於聚焦誤差信號具有高解析度與高精度的特性，適合用來發展奈米級的位移感測系統[7]。

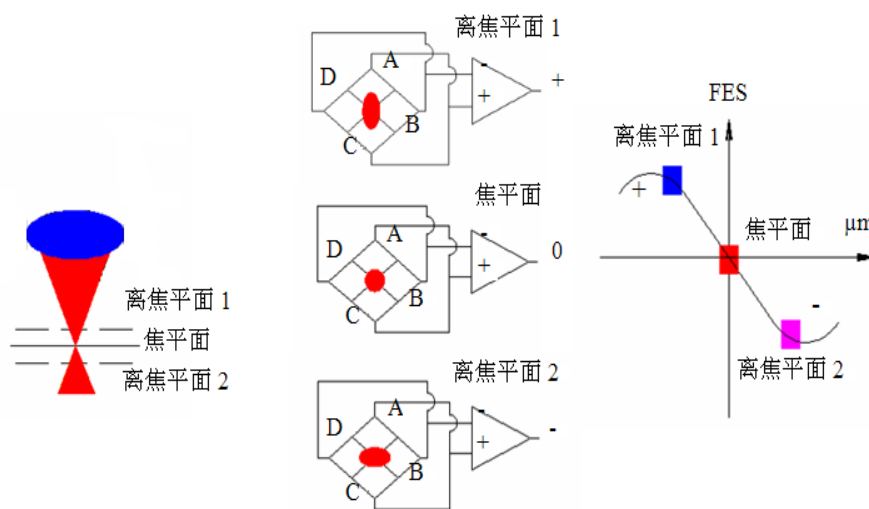


圖 4 自動聚焦雷射探頭量測範圍曲線圖

肆、傳動與量測

一、傳動與量測機構

傳動機構是由直流馬達、滾珠螺桿、線性滑軌、螺桿支撐座、定滑輪和所組成，並達成一自由度之運動，經由鋼繩與量測機構連接，就可組成高度計的主要運動機構部份。量測機構則是由光柵微調座、線性滑軌、紅寶石探頭和光柵所組成。

為了避免馬達在運轉時所產生的震動傳達到量測主軸，而造成訊號細分上的計數誤差，因此在量測機構與傳動機構連結上，運用鋼繩與特製連接器來克服這個問題。此外為了減少量測接觸力，因此設計一個約等重量的配重塊來解決這個問題，假若接觸力過大必然會造成待測物體或紅寶石探頭的彈性變形，最終導致量測誤差，其傳動機構與示意圖，如圖 5 所示：

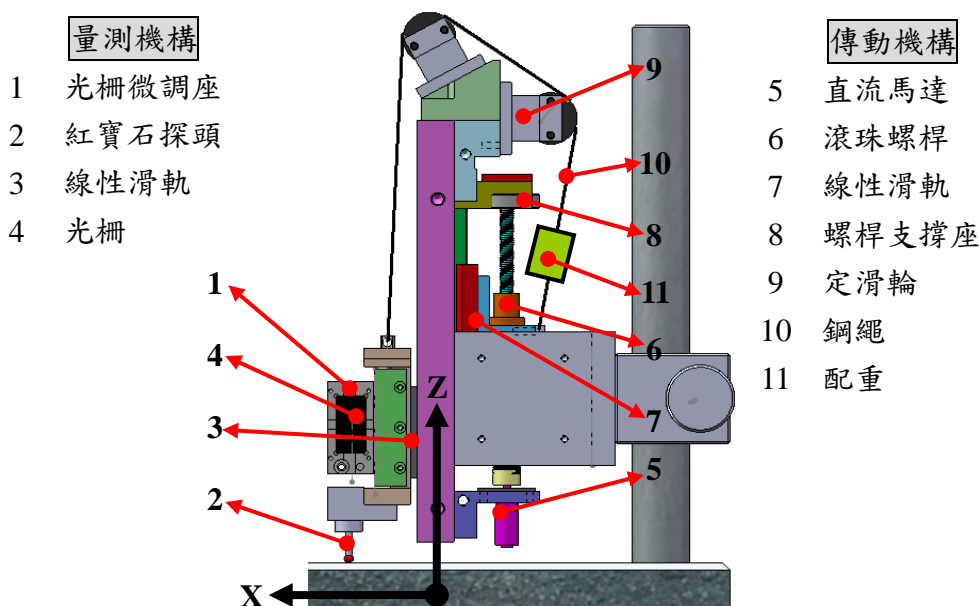


圖 5 傳動系統與量測系統示意圖

二、量測光路設計分析

奈米高度計的位移感測器是由多種光學元件所組成，其原件主要為斜方稜鏡(RHP)、四分之一波板(Quarter Waveplate)、直角稜鏡(RAP)、無偏振分束器(NPBS)和偏振分束器(PBS)所組成。因為奈米光學尺採用全對稱設計，且利用光學軟體 lighttool 模擬其光學元件擺放的容許誤差，所以在調整上有極大的容許誤差。因為本設計的光學元件

固定在調整板上再經由螺絲去進行調校，所以不會遇到運用膠水黏合光學元件，所產生的黏合劑硬化收縮而導致鏡片偏位的問題，因此在製作與組裝上，較為簡易方便且較能快速的製作完成。其光路設計架構如圖 6 所示。

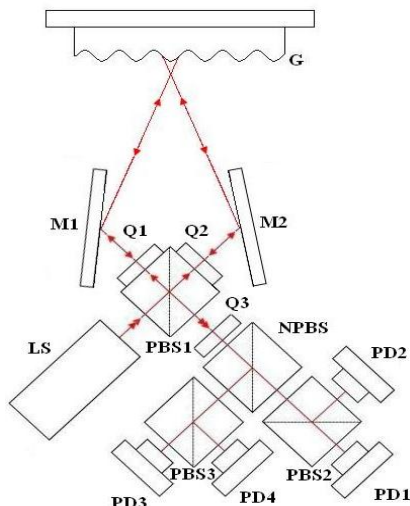


圖 6 量測光路設計

至於光路行程之分析，則如下所示：

$$\text{左光路: } LS \rightarrow \text{PBS1} \rightarrow Q1 \rightarrow M1 \rightarrow G \rightarrow M1 \rightarrow Q1 \rightarrow \text{PBS1} \rightarrow Q3 \quad (1)$$

$$\text{右光路: } LS \rightarrow \text{PBS1} \rightarrow Q2 \rightarrow M2 \rightarrow G \rightarrow M2 \rightarrow Q2 \rightarrow \text{PBS1} \rightarrow Q3 \quad (2)$$

可用 Jones Vector 組成，因公式冗長不再此細列。

由 Q3 出來的光場分別為：

$$\text{左光路: } E_{Q3}^L = \frac{a}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\text{右光路: } E_{Q3}^R = \frac{-a}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ i \end{bmatrix} \quad (4)$$

再經由 NPBS 及 PBS2 與 PBS3 射到四顆光感應器(PD)的輸出電流分別為：

$$I_{PD1} = 2A^2[1 + \cos(\Delta\omega t)] \quad (5)$$

$$I_{PD2} = 2A^2[1 - \cos(\Delta\omega t)] \quad (6)$$

$$I_{PD3} = 2A^2[1 + \sin(\Delta\omega t)] \quad (7)$$

$$I_{PD4} = 2A^2[1 - \sin(\Delta\omega t)] \tag{8}$$

上述各式中的 $\Delta\omega$ 和光柵尺的運動速度有關，濾除直流(A)後的四個訊號理論上具有正交性，可以用一般光學尺解碼原理的 Up/down counter 及細分割技術來算出位移量(Δx)。

$$\Delta\Phi = \frac{4\pi m}{d} \Delta x \tag{9}$$

三、馬達控制

在馬達速度的控制上，選用 ATmega 16 晶片嵌入的 PWM 模組去控制其直流馬達的速度，因此由於一般單晶片的輸出控制電流相當小，所以必須建構如達林頓放大電流的電路模組。為了節省電路板空間和增加其定性，所以改選用市售的 L293D 晶片；由單晶片輸出並經由 L293D 放大後的電流，可使直流馬達正常運轉，並讓整個模組在傳動運作時更加完善。

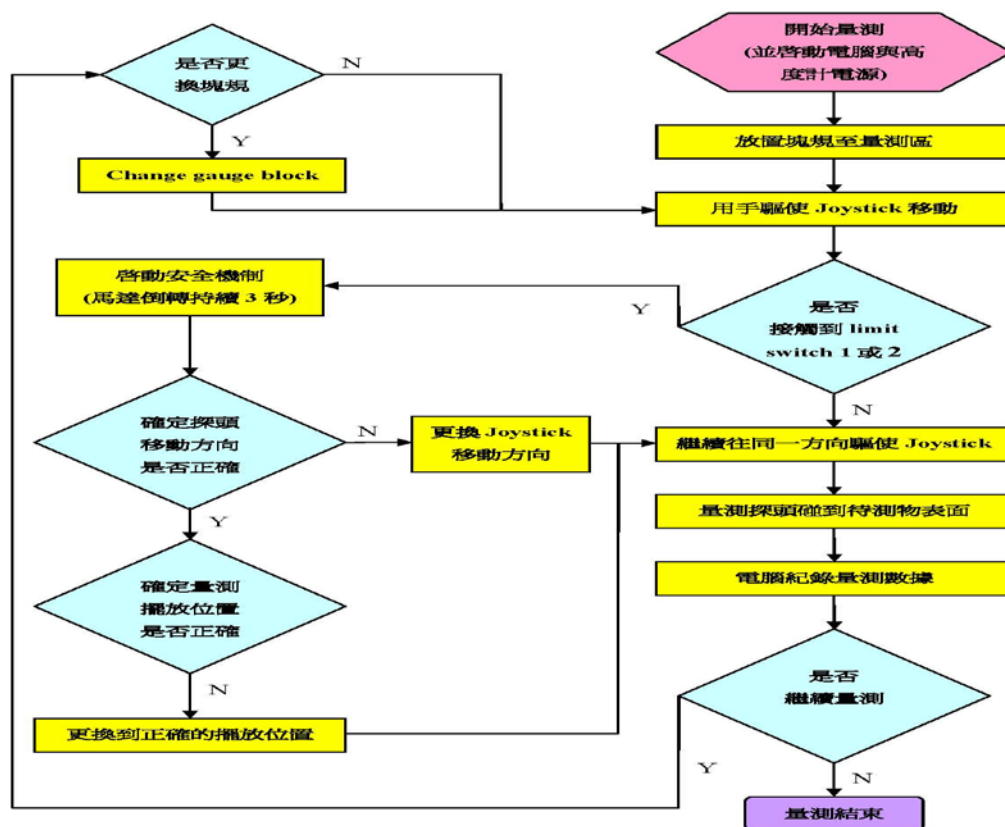


圖 7 微奈米高度計操作流程

至於馬達 PWM 模組的速率調整模式是藉由單晶片偵測 8 個兩段式指撥開關的 ON 或 OFF 來決定。將其相關控制語法寫入單晶片(ATmega 16)並搭配搖桿，即可以達到操縱搖桿驅使馬達上下的運動；為了防止使用者操作不慎，在傳動機構的行程上下兩端各裝有極限開關，其可以防止運轉過行程而產生傳動原件的碰撞。假若有碰觸到極限開關，馬達會立即反轉，並往原本運轉前進的反方向運轉三秒後，操作者才可以繼續運用搖桿去操控馬達，圖 7 為微奈米高度計操作流程。

伍、結果與討論

奈米光學尺經過訊號處理後獲得利薩爾圓(Lissajous' circle)，並以 NI6016 DAQ 卡擷取 LDGI 訊號，在利用實驗室開發再 Labview 環境下的細分程式進行訊號細分與量測結果呈現，經細分後的訊號解析度可達 1.56nm，即可獲得奈米級的位置解析，其奈米光學尺的信號如圖 8 與圖 9 所示。

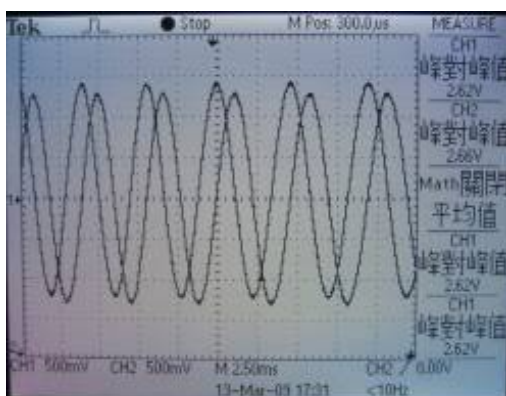


圖 8 輸出的 Sin 及 Cos 訊號

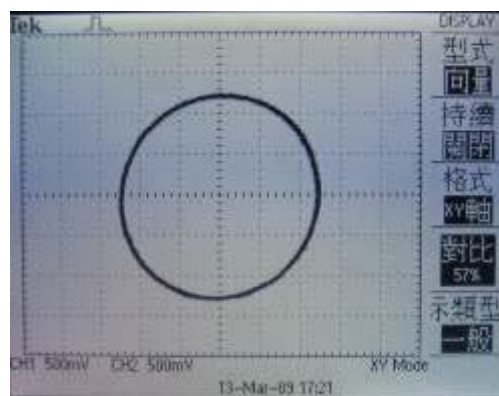


圖 9 利薩爾圓(Lissajous' circle)訊號

一、量測誤差分析

在設計高精度的量測或加工機時，其是否符滿足阿貝誤差(Abbes error)，變的相當重要[8,9]，而且是關鍵因素之一。若量測或加工機無法符合此原則，其該機器的量測或加工不確定度精度是不可能到達 500 奈米以下，所以在設計時應該相當注意此點。另外若有原件組立或配合，也應當考慮到原件的形狀誤差與幾何誤差之間的搭配，此外再原件材料的選擇上也須相當講究[10]，其原因當原件若受熱後會造成原件熱應變，而且一

定會帶來量測或加工誤差，上述這幾點都是在奈米級量測應當考慮的項目。

以下所述量測誤差分析是在不考慮細分誤差和熱誤差的情況，其可能造成的量測誤差結果，如下式(10)所述。另外，參數的定義，請參考表 2。

$$\begin{aligned}
 & \text{組裝上所造成的量測誤差} = \\
 & (\text{Cosine 誤差}) + (\text{X 方向 Abbes offset 誤差}) + (\text{Y 方向 Abbes offset 誤差}) + [\text{滑塊} \\
 & \text{的 Pitch 與探頭量測臂長度導致在 Z 方向的二階誤差(忽略)}] + [\text{滑塊的 Yaw 與探頭} \\
 & \text{量測臂長度所導致在 Z 方向的二階誤差(忽略)}] = \\
 & L \times \text{Cos} \theta + X_{\text{abbe_offset}} \times \text{Sin}(\text{Pitch}) + Y_{\text{abbe_offset}} \times \text{Sin}(\text{Yaw}) \quad (10)
 \end{aligned}$$

表 2 參數定義表

參數	說明	參數	說明
L	量測中，量測頭移動的距離	$X_{\text{abbe_offset}}$	X 方向 Abbes offset
θ	量測軸和運動軸間的夾角	$Y_{\text{abbe_offset}}$	Y 方向 Abbes offset
Pitch	滑塊的 Pitch 角度(繞 Y 軸旋轉)	Yaw	滑塊的 Yaw 角度(繞 X 軸旋轉)

當 $\theta=1$ ，且 X 方向 Abbes offset = 小於 1 mm (組裝誤差)與 Y 方向 Abbes offset = 小於 1 mm (組裝誤差)，一併將上面的已知因子與表 3 的 Pitch 和 Yaw 帶入公式(10)後，即可以求得出表 4 的結果。

表 3 線性滑軌的 pitch 和 yaw 角度變化

	2 mm	4 mm	6 mm	8 mm	10 mm	12 mm
Pitch	0.94"	-2.20"	1.08"	0.60"	1.22"	2.66"
Yaw	0.44"	2.84"	-2.80"	1.38"	-3.90"	-2.54"

表 4 組裝上所造成的量測誤差

	2 mm	4 mm	6 mm	8 mm	10 mm	12 mm
Cosine error (nm)	9.7	19.4	29.1	38.8	48.5	58.2
X 方向 Abbes offset 誤差 (nm)	4.8	-10.6	4.8	2.9	5.9	12.9
Y 方向 Abbes offset	2.9	13.8	-13.6	6.5	-18.9	-12.5

誤差 (nm)						
Total error (nm)	17.4	22.6	20.3	48.2	35.5	58.6

由上計算過程中，可以得知，當 Abbes offset 很小時，其主要誤差是來至於 Cosine error；雖然本設計是完全符合 Abbes 原理，但因組裝原件的公差，會有 Abbes offset 的產生，因此為了減少因組裝產生的 Abbes offset，在原件規劃公差分配時應當注意，並達到可以減少其誤差的產生。

二、撓曲機構最佳化分析

早於 1897，有學者運用撓性機構在機構裝置的細部調整上[11]。此外於 1965 年，Paros and Weisbord 首先探討到撓性鉸鏈的理論模型[12]。近年來由於半導體產業的精確定位需要，因此激發許多學者研究不同構造的撓性機構[13]，並且這些機構，主要是用來精密微調角度和短行程精密程定位，有的特殊撓性機構，甚至可達六個自由度。

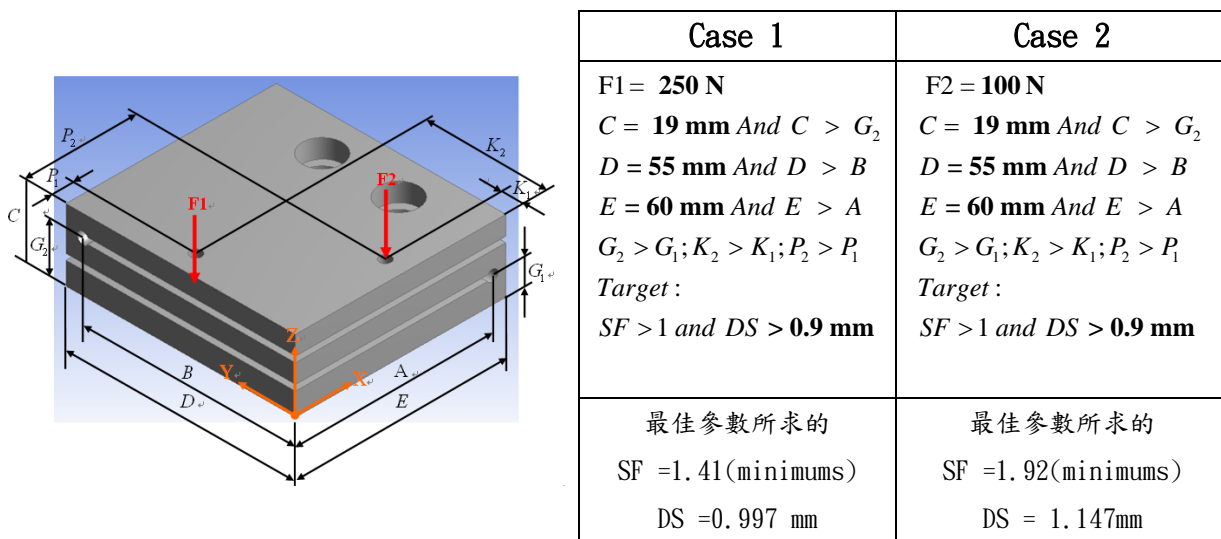


圖 10 LDGI 調整座參數定義圖及實驗參數定義與優化結果

本研究的撓曲機構，主要是運用兩個撓性鉸鍊來堆疊而成此撓性機構(撓性鉸鍊-1與撓性鉸鍊-2)，並且藉由獨立的調整螺絲可使其機構達成兩個微小角度的微調(兩自由度)。因為是利用內六角沉頭螺絲和止覆螺絲的鬆與緊來迫使撓性機構角度的改變，所以撓性機構與調整螺絲上會受到剪應力、拉與壓應力，最後在設計時必須考慮是否有超過容許的抗剪、抗拉與抗壓的應力範圍。其撓性鉸鍊-1 受 F1 施力時，會產生繞 Y 軸選轉的

角度產生(pitch angle)，則若在撓性鉸鍊-2 受 F2 施力時，則會產生繞 X 軸選轉的角度產生(roll angle)，其撓性機構相關參數定義，如圖 10 所示。

接著特地運用商用軟件 ANSYS 之 Design Exploration[14]模組和田口法(Taguchi method) [15] 的目的是為了獲得重要的設計因子與最佳設計參數，此外也可增加原件的可靠度與了解其機構特性。此微調座是藉由座落在機構上兩個不同位置的螺絲的鬆或鎖，來改變其角度，因此施力的 F1 和 F2 是獨立的兩個因子，所以需要分別用 case 1 與 case 2 來討論撓性鉸鍊-1 與撓性鉸鍊-2 上應力、應變與安全因數狀態，最後做出綜合性探討 case 1 與 case 2 的模擬結果，並求的得最佳的設計參數。進行分析前，訂定 8 個主要控制因子，且 case 1 與 case 2 的設計目標為：

1. 整體機構最小的安全係數需滿足 $SF > 1$ ；
2. 撓性鉸鍊受力後的最大位移需要滿足 $DS > 0.9 \text{ mm}$ 。其最終獲得的最佳參數為 $A = 51.5, B = 57, G_1 = 6, G_2 = 12.5, K_1 = 4, K_2 = 30, P_1 = 4, P_2 = 27.5 \text{ (mm)}$ ，並且也獲得重要設計參數分別為 A、B、 P_1 、 K_1 ，其相關實驗設計與結果呈現表，請參考表 5 及表 6。

表 5 實驗控制因子水準表

因子	說明	Level 1	Level 2	Level 3
A	X-Y 平面到圓心的距離	30.5	41	51.5
B	X-Y 平面到圓心的距離	41	46.5	57
G_1	Y-Z 平面到圓心的距離	4	6	8
G_2	X-Z 平面到圓心的距離	10.5	12.5	14.5
K_1	X-Z 平面到圓心的距離	4	8	12
K_2	X-Z 平面到圓心的距離	25	30	35
P_1	X-Z 平面到圓心的距離	4	8	12
P_2	X-Z 平面到圓心的距離	22.5	27.5	32.5

表 6 實驗直角表

實驗	A	B	G_1	G_2	K_1	K_2	P_1	P_2
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3	3	3
4	1	2	1	1	2	2	3	3

5	1	2	2	2	3	3	1	1
6	1	2	3	3	1	1	2	2
7	2	3	1	2	1	3	2	3
8	2	3	2	3	2	1	3	1
9	2	3	3	1	3	2	1	2
10	2	1	1	3	3	2	2	1
11	2	1	2	1	1	3	3	2
12	2	1	3	2	2	1	1	3
13	3	2	1	2	3	1	3	2
14	3	2	2	3	1	2	1	3
15	3	2	3	1	2	3	2	1
16	3	3	1	3	2	3	1	2
17	3	3	2	1	3	1	2	3
18	3	3	3	2	1	2	3	1

三、實驗測試結果

本研究之系統組裝並調校完成後，進行以下兩個實驗，實驗系統示意圖，請參考圖 11。基本上，量測實驗是以重複性實驗為主，針對二個不同高度做重現度量測，以測試系統的量測穩定性。

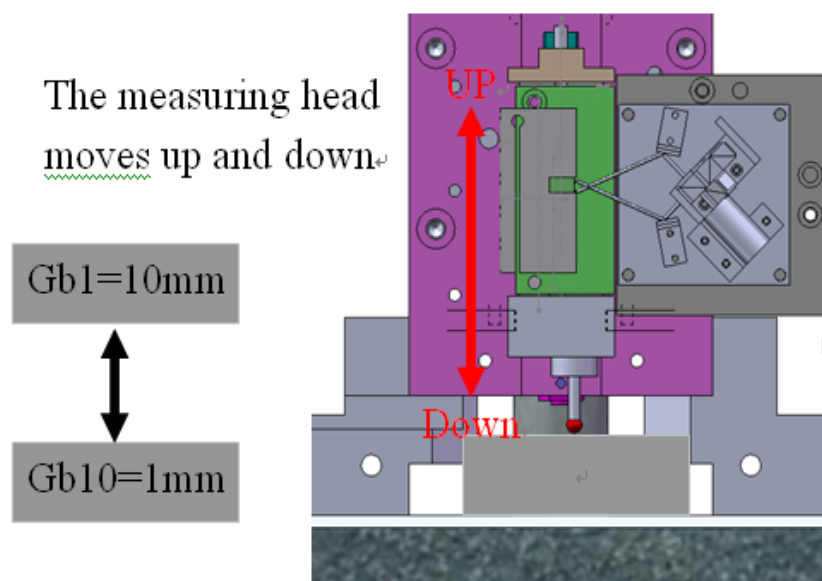


圖 11 實驗系統架構示意圖

此系統所做的第一個實驗是以花崗岩平板為量測原點，做 10 次重複性實驗，以得到其量測結果的重複性。第二個是以花崗岩平板為基準線，進行一級塊規 1~10mm 的高度量測實驗；一樣做重複性實驗，其實驗結果，請參考表 7 及表 8；另外，一級塊規公差，如表 9 所示。此外圖 12 為運用 Labview 程式，進行訊號細分並紀錄量測結果呈現。

表 7 原點重複性實驗

Times	1	2	3	4	5	6
Result(nm)	0	2	2	2	1	4
Times	7	8	9	10	Average(nm)	STD(nm)
Result(nm)	1	0	5	4	2.1	1.72

表 8 高度量測結果(1 mm ~ 10 mm)

	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm	6 mm	7 mm	8 mm	9 mm	10 mm
1.0 (nm)	172	205	266	235	166	319	258	266	170	125
2.0 (nm)	291	119	236	181	162	246	361	177	154	163
3.0 (nm)	225	162	298	203	143	355	338	255	252	162
4.0 (nm)	255	361	285	212	122	322	290	108	271	245
5.0 (nm)	219	152	342	236	134	240	316	80	162	141
6.0 (nm)	259	214	335	203	128	312	200	116	205	142
7.0 (nm)	297	288	233	215	129	309	177	94	207	152
8.0 (nm)	302	195	248	253	119	299	272	173	132	103
9.0 (nm)	264	202	345	193	157	264	189	94	100	95
10.0 (nm)	343	334	348	243	72	209	248	188	120	207
Average (nm)	262.7	223.2	293.6	217.4	133.2	287.5	264.9	155.1	177.3	153.5
STD (nm)	49.0	79.4	46.6	23.4	27.3	45.5	63.2	67.5	55.9	45.3

表 9 一級塊規容許公差表

	尺寸公差(μm)	平行公差(μm)
0.5~10 mm	± 0.2	0.16
10 ~ 25 mm	± 0.3	0.16
25 ~ 50 mm	± 0.4	0.18



圖 12 Labview 量測介面示意圖

陸、結論

本計畫自行研製了一套基於雷射光學讀取頭，可用於微奈米三維接觸式探頭測力的測微力計。其中運用了自行研製的 LDGI 奈米級光學尺、量測與微調機構、馬達控制模組與訊號細分程式，構成此論文探討的奈米級的高度位移量測計，在馬達的控制方面，藉由 ATmega 16 晶片內建的 PWN 控制模組並且搭配 L293D 與搖桿，達成操控馬達的正反轉向的操控；另外運用 ANSYS 軟件並搭配田口法求出 LDGI 調整座的主要設計因子與將其機構最佳化。最終的高度量測實驗，第一個已花崗岩平面為原點的重複性實驗，其標準差為 1.72nm，另外第二個 1~10mm 的 1 級塊規高度量測實驗，其重複性可到達 80nm 以下。

參考文獻

- [1] John Piotrowski, Shaft Alignment Handbook 2Rd, Marcel Dekkar Inc., NY, 1995.
- [2] 鄒自強，超級千分表的發展，儀器儀表學報，Vol. 27, No. 2, 2006.
- [3] J. Benschop, G.V. Rosmalen, “Confocal compact scanning optical microscope based on compact disc technology”, Applied Optics, Apr. 1, Vol. 30, No. 10, pp. 1179-1184, 1991.
- [4] 林勤喻，超精密雷射聚焦探頭之研製，國立台灣大學機械工程研究所碩士論文，1998。
- [5] 林威自，超精密雷射自動聚焦探頭及系統之研製，國立台灣大學機械工程研究所碩士論文，1999。
- [6] 陳柏廷，DVD 光學自動聚焦探頭非線性系統之研究，國立台灣大學機械工程研究所

碩士論文，2002。

- [7] 朱志良，奈米級三次元量測儀之研製，臺灣大學機械工程研究所博士論文，2002.
- [8] Abbe E. (1890), “Meßapparate für Physiker”, *Zeitschrift für Instrumentenkunde*, 10. (In German)
- [9] Bryan J. B. (1979), “The Abbe Principle revisited: An Updated Interpretation”, *Precision Engineering*, No. 3.
- [10] M. M. P. A. Vermeulen, P. C. J. N. Rosielle and P. H. J. Schellekens, (1998).” Design of a high-precision 3D-coordinate measuring machine”, *Annals of the CIRP* 47 (1), pp. 447 - 450.
- [11] J. C. Maxwell, *Kensington Museum Science Handbook* ~Chapman and Hall, London, 1897.
- [12] J. M. Paros and L. Weisbord, (1965), “How to design flexure hinge”, *Machine Design*, Vol. 37, pp. 151-157, 1965.
- [13] Ralph C Merkle, (1997), “A new family of six degrees of freedom positional devices”, *Nanotechnology*, vol. 8, pp. 47-52, 1997
- [14] *Structural ANSYS Tutorials*, V 12.
- [15] Ross, P. J., *Taguchi Techniques for Quality*, Engineering, McGraw-Hill Inc., NY, 1996.