

桃園創新技術學院教師專題研究計畫
成果報告

雙軸式光學雷射振動儀之研製

計畫編號：教專研 104P-028

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：童景賢

執行單位：機械工程系

中華民國一〇四年十二月三十一日

雙軸式光學雷射振動儀之研製

童景賢
機械工程系

摘要

DVD 雷射頭是 DVD 光碟機中的重要元件，由於價格便宜，因此本計劃將利用此 DVD 雷射頭來發展這一套精密的振動量量測系統，以達到此計劃的目標。DVD 雷射頭是由雷射二極體(LD)、分光鏡、物鏡、光檢測元件、繞射光柵與圓柱透鏡等六個元件所組成的。而雷射讀取頭中的紅光雷射二極體之波長約為 650nm，具有體積小、重量輕、消耗的功率小、單一的輸出光譜、有較寬的波長範圍可選擇，且具有高可靠性等等特點，這些特點符合本計劃量測振動量的需求，並且取得容易，因此可作為量測的主要依據。

DVD 雷射頭內部有一個感測器是以同樣的光電材料以及四個面積相同的光感測器所組成的，稱為四象限感測器(Quadrant photo-detector)，主要是接收待測物上反射鏡之反射光的受光強度，藉以量測各別不同受光的訊號 ABCD，而本研究就是利用這四個訊號相加減， $(A+C)-(B+D)$ ，所形成之 S-curve 線性直線部分(約 $7\mu\text{m}$)之中點作為參考點，來判斷物件的微小振動量為何。

因為振動的方向不可能是單一方向的，有可能從四面八方產生，所以本研究設計可以量測雙軸(X 軸及 Y 軸)的振動量，以進一步了解振動的方向。在振動儀機構部分是以兩片呈九十度角之彈簧鋼片相連接，以量測上下(Y 軸)與左右(X 軸)兩方向之振動量，片狀彈簧可使振動方向朝向 X 與 Y 軸運動，並且避免產生任意旋轉之現象。另外，在片狀彈簧尾端裝置適當荷重，以即時反應兩軸之振動。

最後再以 DAQ 卡擷取 DVD 雷射頭所讀取的訊號傳到電腦，再配合圖控式軟體 Labview 及時顯現圖形。

壹、緒論

一、研究動機

近年來，精密工業發展蓬勃，無論是通訊、光電、生物科技、精密機械或半導體等相關的產業，都有趨向小型化、精密化及細微化，因此對於微米、次微米甚至於奈米的量測精度之要求亦日漸提昇。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。

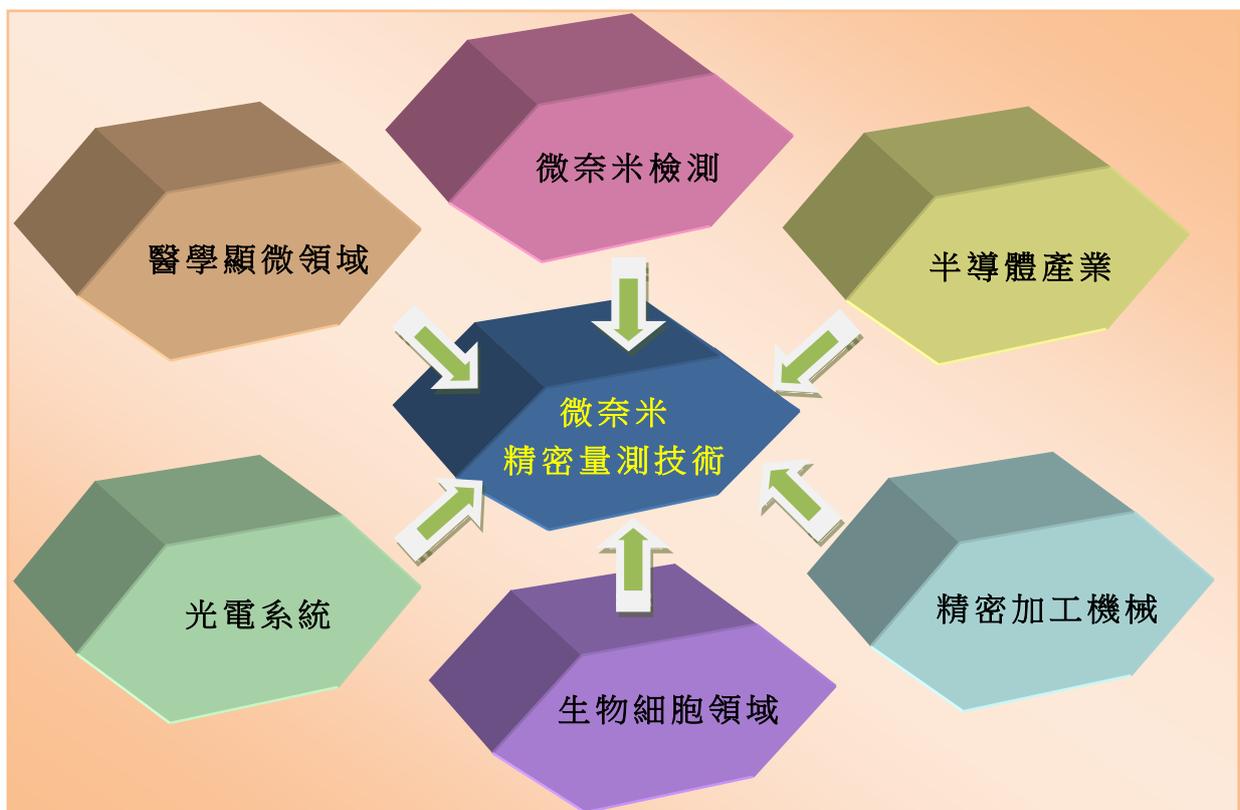


圖 1 - 精密量測技術支援之各相關領域

目前我國的半導體製造業之製程設計與技術，已由微米級導入奈米等級，亦即在實際製程上已要求達到奈米等級的量測與製造精度。在 2003 年時，”九十奈米製程”已是主流技術；而所謂九十奈米，是指電晶體的線寬和間距，亦即每單位面積所能容納之電晶體數。依據最著名的半導體『摩爾定律』：每間隔兩年，半導體之製程可將單位晶圓上電晶體的數量增加一倍。由於奈米級顯影科技和製作技術，使得製程從次微米進入了奈米；依照摩爾定律，每兩年的線寬要再縮小至 0.7 倍，於 2012 年時，製程技術已提升至

22 奈米，而預計到 2016 年可提升至 10 奈米製程。當製程技術由次微米進入奈米製程時，精密量測技術作為微奈米製程中一項重要的支援技術，將更顯重要。

精密量測技術在產業方面的應用極為廣泛，(如圖 1)，例如工具機、醫學顯微儀器、精密量測儀器等，同時在奈米科技領域裡面亦是不可缺的技術，其產業價值無可限量。精密量測技術是精密產品製造、精密尺寸測量、精密機械檢測與運轉之關鍵技術。隨著精密工程的不斷進步，不論是半導體產業、精密機械工業、生物細胞領域、光電系統、顯微機構、表面工程、STM、SPM 等方面，皆朝微小化、精密化的方向前進，而且與精密量測系統息息相關，並扮演著重要關鍵的角色，因此對於精密量測技術，有著越來越高的要求。

二、研究目的

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。精密量測技術是所有精密機械的基礎，而其應用方面之實現之一項為「雷射量測」。因此，本計畫擬專注於應用雷射光學讀取頭於『雙軸式光學雷射振動儀』之研究，以使用於極微小振動量之測量應用上。

由於本研究是利用 DVD 光碟機上的雷射讀取頭，來研製這一套精密的雙軸式光學雷射振動儀量測系統，因此要對雷射讀取頭其運作的原理，以及讀取頭內部各個元件的功能，都要完全的深入探討與瞭解。自從光碟機開始發展以來，其內部之光學雷射讀取頭(Pickup head)技術就不斷往上延續發展，到目前為止雷射讀取頭的技術已經相當的成熟了。雷射讀取頭為 DVD 光碟機裡的重要元件，從雷射光源、光路設計以及光感測器等，其系統整合的完整度及其聚焦的特性，都適合應用雷射讀取頭於本研究所研製的振動儀上來量測微小振動量，因此是相當實用的一項元件。

本研究中使用雷射光學讀取頭來研製精密微奈米級光學雷射振動儀，並透過當代控制法則，控制雷射光學讀取頭上之音圈馬達，使微動系統之軸向位移量，轉換為電壓值；同時將以 LabVIEW 程式自行開發一套軟體，使能測量系統微小高度轉換之電壓訊號，以便即時將量測結果輸出於螢幕，並更進一步作系統資料分析。

三、本研究之重要性

精密工業所生產的高科技產品，在其製造的過程中，無法承受較大的環境振動。超過容許範圍的振動量，對於生產製程以及產品品質有很大的影響，尤其是半導體產業對於環境振動的要求，更為嚴格。

以實例來說，台灣高鐵在興建時，因為車速是以三百公里行進，所以會使軌道與地面摩擦形成強烈且快速的振動，這對於南部科學園區內知名的半導體和光電大廠影響很大，因此要做「高鐵環境影響評估」。在環境評估報告中有提到：「振動之高頻部分以距高鐵中心線兩百公尺處四十五點八分貝做為振動標準，低頻部分以六十八分貝為標準」。由於高鐵公司放棄歐規系統改採日本系統，國科會擔心振動問題更嚴重，開始研究減振方案。後來華邦電子以振動過高為由，宣布撤離南科，引起震撼，國科會隨即正式提出將橋墩跨距由卅公尺縮短為六公尺的建議。

由此可見，微小的振動量對半導體業的製造程序、流程及產品品質之影響是非常大。所以本研究就構想以雷射光學讀取頭研製一套量測微小振動量的系統，即雙軸式光學雷射振動儀。此自行研製之振動儀，將可大為降低成本，以使相關應用更為普及。

貳、文獻探討

雷射光學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應用上是可行的，其相關之研究文獻評述於下。

Benschop 與 Rosmalen(1991)【1】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(1998)【2】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(1999)【3】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(2002)【4】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。

He 等(2004)【5】製作一種三軸之微小聚焦透鏡致動器，補償音圈馬達之左右偏擺 (tilt) 方向所產生之像差。Chao 等(2003)【6】以一種新的機制—滑軌控制模式 (Sliding mode control) 來對具有三自由度傳統四彈簧音圈馬達驅動器進行精密定位，除了能夠達到更好之聚焦與尋軌之精準度之外，亦能無視偏擺 (Tilting) 而達到更快的資料擷取速度以及更好的精確度。Hong (2001)【7】等提出了一種線圈懸吊式 (Wire-Spring-Suspension-Type) 之致動器，以消除在全行程中機械偏擺所導致之誤差，也以一個流程的方式去正確的分析驅動力，並且將減少在薄型讀取頭之驅動器中因共振所產生之相位破壞 (Phase Disturbance)。Han 等(2000)【8】提出一個有雙透鏡之致動器 (透鏡在不同方向) 且製造出一個初始原型系統，能夠應用符合高速運轉以及高儲存密度之 DVD/CD 雙系統，由於音圈馬達之驅動力將誘使在高頻中運轉之動件 (Moving part) 產生彈性模態 (Flexible Mode)。Lee 等(2003)【9】利用電磁場及線圈之設計，來抑制此彈性模態之產生，並得到級佳的效果。

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。

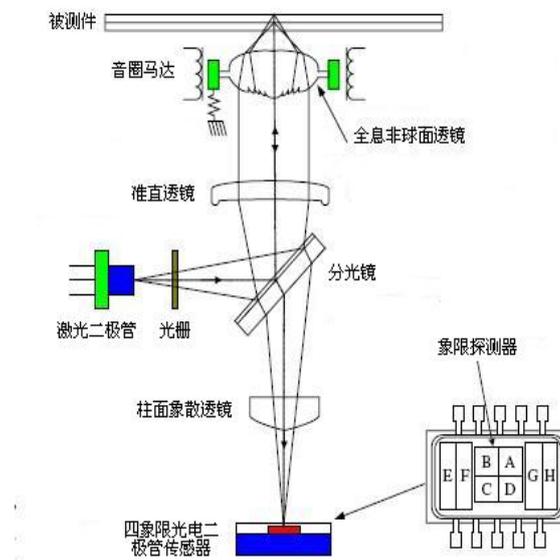


圖 2 - DVD 讀取頭之外觀及內部結構圖

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 2 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振動量測儀之位移測距，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。本研究所製作之 APC 線路圖及電路板，請參閱圖 3 及圖 4。

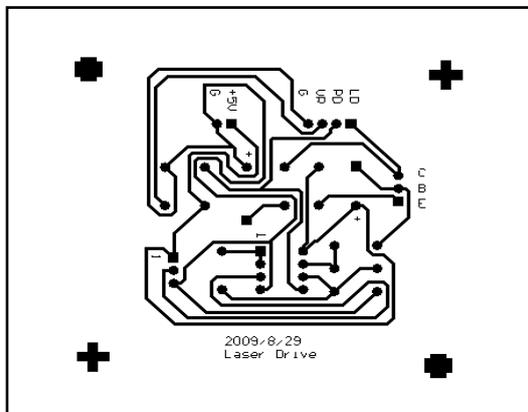


圖 3 - 雷射 APC 線路圖

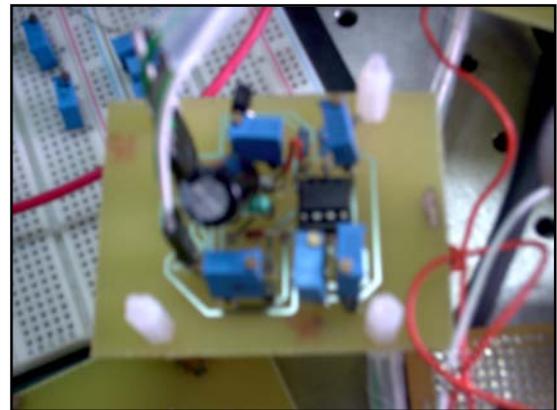


圖 4 - 雷射 APC 電路板

(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 5。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。

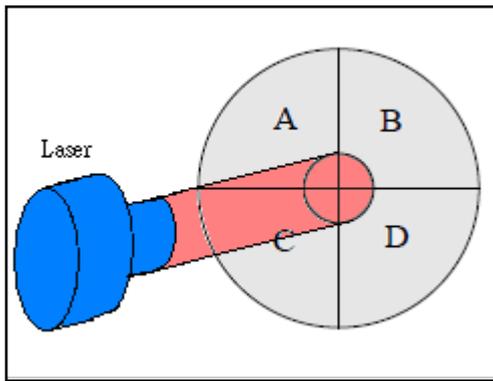


圖 5 - 象限感測器位置與電壓之關係

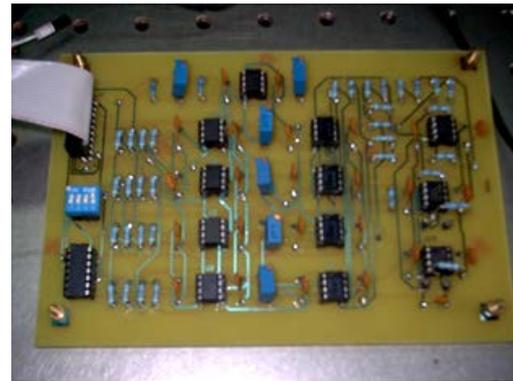


圖 6 - 光感測器訊號處理電路

在圖 5 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 6 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，又稱為 S-曲線，如圖 7 所示。

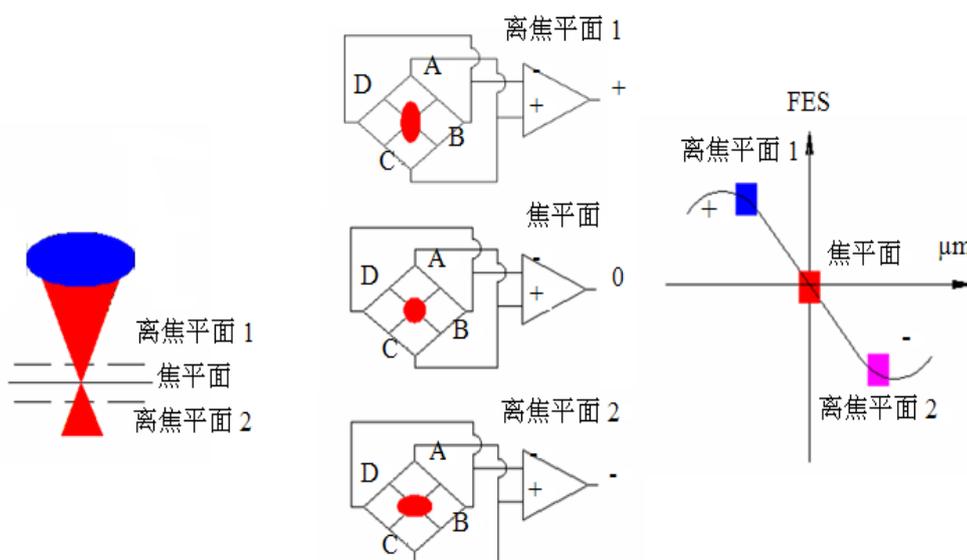


圖 7 - 自動聚焦雷射探頭量測範圍曲線圖

S-曲線之直線部分其電壓-位移量之比值為 $1\text{volt} / 1\mu\text{m}$ ，而 S-曲線直線部分總位移量為 $15\mu\text{m}$ 。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振動量測系統。

(四) 資料擷取方式：Labview 程式配合 DAQ 卡

Labview(縮寫為 Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench)不僅可以用來做資料擷取(DAQ)、資料分析與結果呈現，還提供量測後的數學分析與顯示功能。它是一種圖控式語言，幾乎都是用圖像(ICON)組合來完成程式編輯，不像其他程式需要一堆文字組合。除了上述這些功能之外，還可以用來做”控制”，像是模糊控制、伺服控制…等。

DAQ卡之基本任務是將真實世界轉換成物理訊號。在將訊號”引入”電腦之前，先透過感測器來轉換成電子訊號(如電流和電壓)，然後透過DAQ卡來擷取，進入電腦中處理。

本研究中對於四象限感測器所感測到的訊號(電壓)，先用電路板將訊號放大，經由DAQ卡來接收光感測器發出的訊號，再透過USB線將資料傳入電腦裡，由Labview圖控式語言來進行訊號擷取分析與量測，如圖8所示。圖9則為振動儀之研製流程。

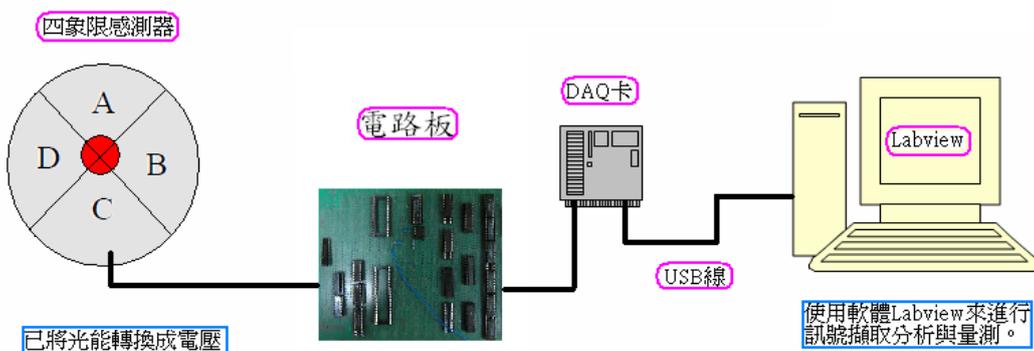


圖 8 - 資料擷取方式示意圖

DAQ卡之基本任務是將真實世界轉換成物理訊號。在將訊號”引入”電腦之前，先透過感測器來轉換成電子訊號(如電流和電壓)，然後透過DAQ卡來擷取，進入電腦中處理。

本研究中對於四象限感測器所感測到的訊號(電壓)，先用電路板將訊號放大，經由DAQ卡來接收光感測器發出的訊號，再透過USB線將資料傳入電腦裡，由Labview圖控式語言來進行訊號擷取分析與量測，如圖8所示。圖9則為振動儀之研製流程。

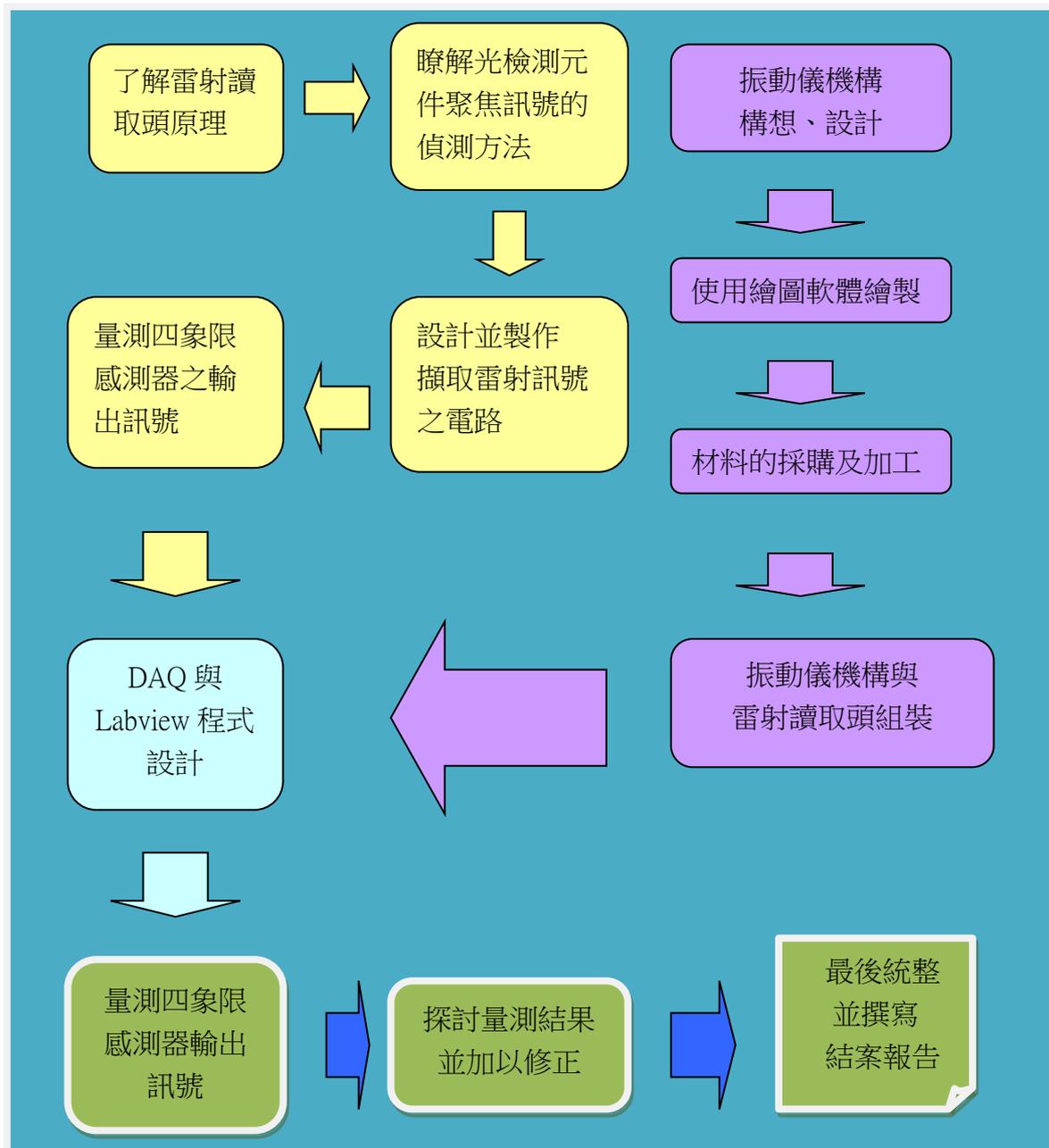


圖 9 - 振動儀製作流程

肆、機構與光路設計分析

(一) 振動量測系統之機構設計

振動儀之機構是由彈簧鋼、導桿、定位螺絲及配重塊所組成，並達成二個自由度之運動，經由彈簧鋼與量測機構連接，就可組成振動儀的主要運動機構部份，其量測機構是由兩組光學讀取系統所組成。其機構與量測系統之初始設計圖，如圖 10 所示。

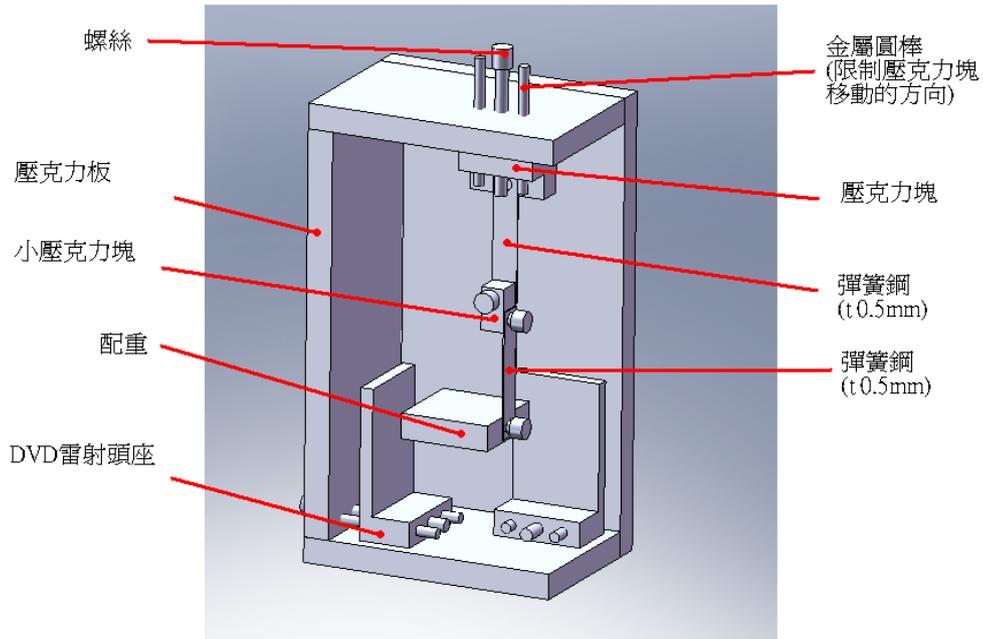


圖 10 - 振動儀之機構設計

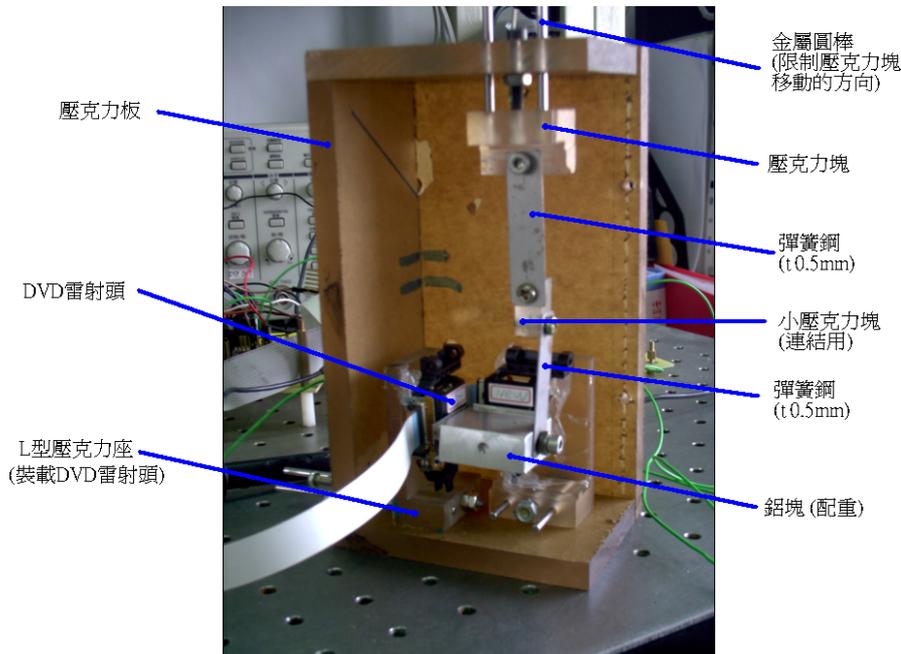


圖 11 - 振動儀外觀機構成品圖

圖 11 為本研究之外觀機構，除了中間兩片彈簧鋼片、配重(鉛塊)以及限制壓克力(座)移動方向的金屬圓棒之外，其餘材料大部分都是使用壓克力製做。

(二) 量測光路設計分析

振動儀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 12 所示。至於光路行程之分析，則如下所示：

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

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

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：

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

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

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

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

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)。

$$\Delta\Phi = \frac{4\pi n}{d} \Delta x \quad (9)$$

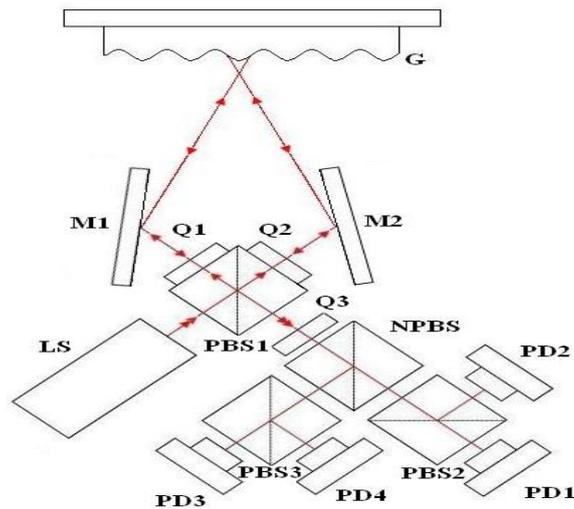


圖 12 - 量測光路設計

伍、結果與討論

DVD 雷射頭在使用時必須注意所流過的電流大小，一旦超過 50 毫安培，則雷射頭會立即燒壞，進而失去作用，所以雷射 APC 電路的設計是很重要的。本研究在雷射 APC 電路的修改上花了不少的時間，最後在電阻值的更換中，發現有一個電阻值會直接影響所流過的電流大小，將其換成可變電阻後，才完成這組雷射 APC 電路。微振動儀系統外觀與光感測電路整合圖，詳見圖 13。

圖 14 為光感測電路訊號處理後，所得到的失焦訊號(FES)，也就是 S-曲線。由於光感測電路板是自己製作的，所以雜訊可能會比較多，也會影響 S-曲線的能見度，所以在電路中放大器的兩旁多加了電容，進而去濾波，以得到完整的 S-曲線。

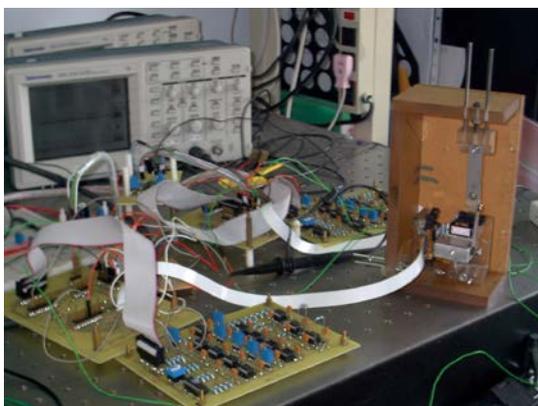


圖 13 - 外觀與光感測電路整合圖

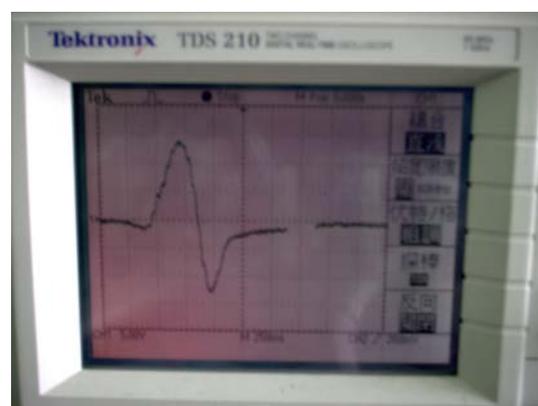


圖 14 - S-曲線實際測量結果

在 DAQ 卡將訊號傳入電腦後，會經由 Labview 程式裡的虛擬儀表顯示出來。當施以外力輕碰振動儀左右方向的實驗平台上六次時，Labview 的儀表介面會及時的反應出來，如圖 15、圖 16 所示。以振動儀正面為基準，左右方向為 X 軸，前後方向為 Y 軸。

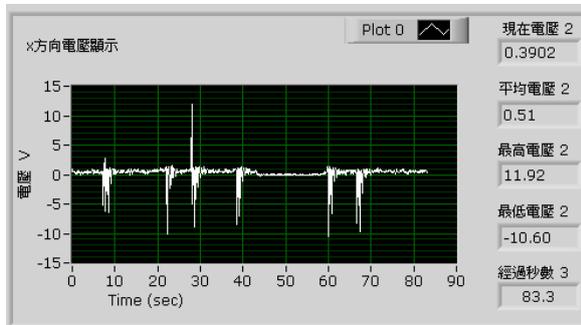


圖 15 - X 軸方向電壓顯示圖

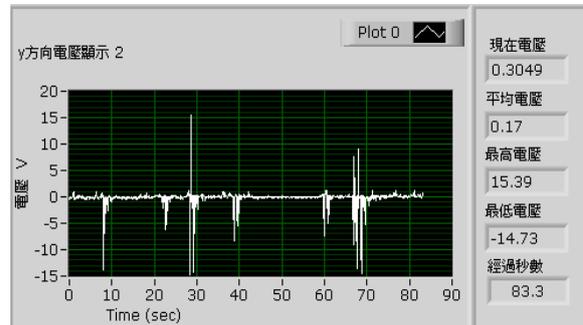


圖 16 - Y 軸方向電壓顯示圖

Labview 虛擬儀表裡所顯示的電壓大小表示振幅，之間的關係是 $1V=1\mu m$ 。圖 17 是在第 8 秒時，給予一次振動所量測到的數據，Y 方向所量測到的最大振幅為 $5.87\mu m$ 。在第 8 秒到第 10 秒之間共產生三次振動，經過計算，所得到量測到的頻率為 $1.5Hz$ 。X 方向所量測到的最大振幅為 $3.73\mu m$ 。在第 8 秒到第 10 秒之間共產生三次振動，經過計算，所得到量測到的頻率為 $1.5Hz$ 。

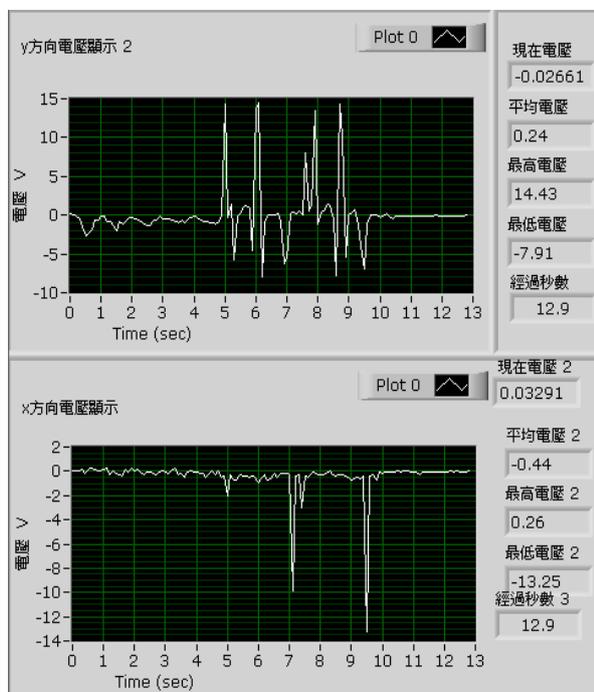


圖 17 - 雙軸方向電壓顯示圖

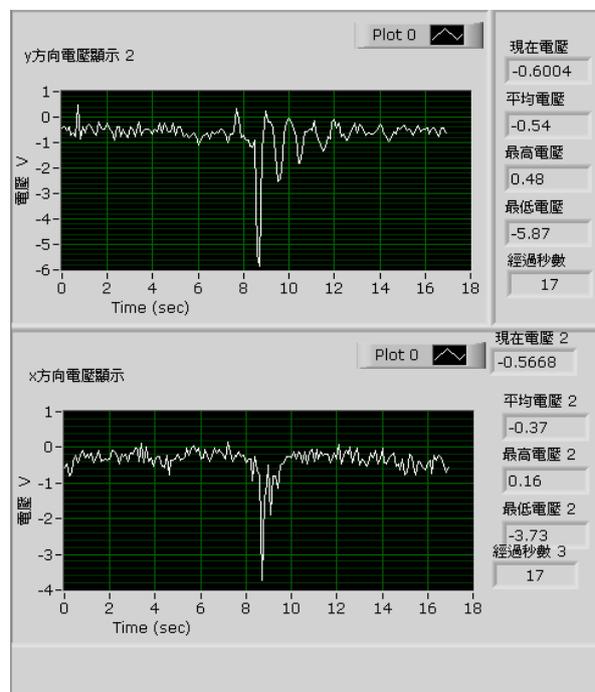


圖 18 - 雙軸方向電壓顯示圖

圖 18 為第 5 秒到第 10 秒之間，給予五次(一秒一次)振動所量測之數據。Y 方向所量

測到的最大振幅為 14.43 μm 。在第 5 秒到第 10 秒之間共產生十次振動，計算後所得到能量測到的頻率為 2Hz。X 方向所量測到的最大振幅為 13.25 μm 。在第 5 秒到第 10 秒之間共產生四次振動，少於研究中所給予的振動次數，關於此問題，經由數次測試之後發現，X 軸方向所量測到的數據會比 Y 軸所量測到的有所減少，甚至會和研究中所給予的振動次數有點差距，在經過多次測試後，發現此差距是由機構設計上所產生的。在多次測試的結果來看，證明 X 軸方向的彈簧片較不易於產生和 Y 軸一樣靈敏的振動，固在機構的設計部分還是有再修改的空間。

不過，S-曲線太過靈敏也有缺點，就是在實驗室裡走動的脚步，也會使 S-曲線作動，以及在調整 S-曲線的時候，手不能抖，要不然會出現一點雜訊。所以使得研究的過程中，需要掌握周邊任何會產生振動的情況，進而確保本研究的精準度。最後由所量測到的數據統整出的結果表示，本研究雙軸式光學雷射振動儀可量測的最大振幅為 15 μm ，頻率最高為 2Hz。

陸、結論

本研究『雙軸式光學雷射振動儀系統』裡的 DVD 雷射頭是從 DVD 光碟機裡拆下來的，在成本上差不多壹千元，如果能夠直接廠商購買 DVD 雷射頭零件，成本可大為降低。此『雙軸式光學雷射振動儀』精度高達 15 μm ，雖然比不上市面上售價昂貴之光學振動儀，不過在如此低成本的研製上，能夠量測如此高精度的儀器，到是很適合業界上之需要，相信能被業界更為普及的使用

參考文獻

- 【1】 Benschop, J., Rosmalen, G.V., “Confocal compact scanning optical microscope based on compact disc technology”, *Applied Optics*, Apr. 1, Vol. 30, No. 10, pp. 1179-1184, 1991.
- 【2】 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。

- 【3】 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。
- 【4】 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。
- 【5】 Nanying He, Weipu Jia, Dingwen, Lei Huang, Mali Gong, ” A novel type of 3-axis lens actuator with tilt compensation for high-density optical disc system” , *Sensors and Actuators*, A. 115, pp. 126-132, 2004
- 【6】 Paul C.-P Chao, Cheng-Liang, Jeng-Sheng Huang, ” Nonlinear dynamic analysis and actuation strategy for a three-DOF four-wire type optical pickup” , *Sensors and Actuators*, A. 105 , pp. 171-182, 2003
- 【7】 Sam-Nyol Hong. In-Ho CHOI, Young-Joong KIM, Min-Suk SUH and Jin-Yong KIM, ” Force Characteristics of Slim Pickup Actuator to Improve Actuating Performances” , *The Japan Society of Applied Physics*, Vol. 40, pp. 1771-1774, 2001
- 【8】 Changsoo Han, Junghyun LEE, Soohyun, ” Digital Versatile Disc/Compact Disc-Compatible Pickup Head with Dual-Lens Lever Actuator for Next-Generation Applications” , *The Japan Society of Applied Physics*, Vol. 39, pp. 2630-2634, 2000
- 【9】 K.-T Lee, C.-J Kim, N.-C Park, Y.-P, Park, ” Improvement of dynamic characteristics for optical pickup actuator by magnetic circuit” , *Microsystem Technologies*, Vol. 9, pp. 232-242, 2003