二維自由度DVD雷射量測PZT微動定位系統之研製

童景賢* 黃元瑞 戴仲賢

南亞技術學院機械工程系

摘　要

隨著科技的日新月異，已經從微米時代走入了奈米時代，而在奈米科技領域中， 有許多的應用都需要高精度的微定位平台為載具。對微定位平台的研究，一般都以壓電陶瓷來驅動平台以移動工件，此類平台僅提供幾十微米以下的短行程微動位移，而對微奈米長行程的研究，則須要較長行程的定位平台來移動試件，一般需要幾公分的位移及 10 奈米左右的精度。

近年來在長行程奈米定位平台的研究以一維居多，且以長行程的粗位移加上微動位移的兩段式定位為主，而位移量幾乎都以雷射干涉儀進行回授控制。但因雷射干涉儀價格昂貴，使得線上檢測極為耗費成本且部分平台結構及傳動元件取自工業成品，使得誤差源無法避免，故定位準確度或精密度約只能達到 1μm 至 0.1μm。

本計劃所研製之『二維自由度 DVD 雷射量測 PZT 微動定位系統』是使用市面上售價低於兩千元台幣之 DVD player，並利用其雷射光學讀寫頭製作兩套 DVD 雷射探頭，以取代售價昂貴之雷射干涉儀，並用來測量定位系統上 XY 兩軸之位移量。此兩套自行研製 DVD 雷射探頭的成本約只有一套市面上雷射干涉儀售價的二百分之一，而其精度可達到±100 奈米，如此將可大為降低購置成本，以使產業界之相關應用更為普及。

關鍵字：DVD、雷射讀取頭、PID 控制、微動平台

*Email：jstorng@nanya.edu.tw　Tel：03-4361070 ext.6603　Fax：03-4384670

DEVELOPMENT OF A 2-DOF DVD LASER PROBING PZT MICRO POSITIONING SYSTEM

Jingsyan Torng*, Yuan-Ruey Huang, J.S.Dai

Department of Mechanical Engineering

Nanya Institute of Technology

Abstract

The rapid growing of nano-technology in the industry has lead the micro-motion stages being widely used in various applications, such as semiconductor industry, bio-medical industry and micro/nano inspection. Normally, micro stages use PZTs as the actuators to move and it normally offers the displacement of tens of micrometer. For long displacement micro-motion, the resolution requirement of few centimeters displacement is about 10 nanometers.

The research on long displacement nano-technology is normally focused on one-degree-of-freedom displacement with two-step method that combines the coarse distance adjustment and the fine displacement. As for measuring the displacement, Laser Interferometer (LI) is regarded as the feedback sensor for probing the micro stage position. However, the cost of LI is nevertheless too high.

This project has established a two-degree-of-freedom DVD laser probing PZT micro positioning system which applied the optical pickup head of a commercialized DVD player which costs only less than NT$2000. The two sets of home made DVD laser probe are able to substitute the costly LIs to measure the displacement of X-Y positioning stage and the accuracy can reach ±100nm with only 0.05% of Laser Interferometer's cost. With the cost down, it has more advantage of applying laser probe on micro stage.

Keywords: DVD, Laser pickup head, PID control, Micro-stage

*Email：jstorng@nanya.edu.tw　Tel：03-4361070 ext. 6603　Fax：03-4384670

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，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定位精度之要求亦日漸提昇。

精密定位技術在產業方面的應用極為廣泛，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。

（一）精密定位平台方面

微奈米精密定位技術之研究，一般是以壓電驅動平台來移動工件，此類型平台可提供數十微米之微動位移;而對較長行程範圍微奈米位移之研究，則需長行程平台來移動工件，一般可提供幾厘米的位移量及數十奈米之精度。

近年來，長行程奈米定位平台之研究以一維自由度居多，且以長行程的粗位移加上微動位移的兩段式定位為主，如此可同時解決微動行程位移時間過久與長行程定位精度不足之問題。兩段式定位之第一段的長行程可由伺服馬達驅動導螺桿，或線性馬達再加上空氣軸承及導軌，或音圈馬達配上導軌等機台來達成；第二段之微動位移平台則多以壓電陶磁驅動，也有使用 PZT 驅動位移平台以類似於尺蠖蟲蠕動的方式(Inch-worm Motion)來達到精密定位的要求。除此之外，亦可利用摩擦驅動(Friction drive)直接作長行程的定位。

上述之各種方式所產生的位移量，幾乎都以雷射干涉儀測量並據以進行回饋控制。此類平台因使用雷射干涉儀，故位置解析度可到奈米等級；但由於雷射干涉儀價格昂貴，使得利用雷射干涉儀線上檢測極為耗費成本。。

（二）DVD雷射探頭

由於非接觸式量測在測量時不會對工件造成損害，且在處理大量點資料上具有較佳效率，因此最能符合工業界的檢測需求，所以非接觸式量測已成為工業量測之趨勢。現階段的非接觸式量測技術常見的有: 光學切換式(Optical switching sensor) 、CCD 取像技術及位置敏銳偵測法(Position sensitive detector, PSD)。其中位置敏銳偵測法因為精度高，因此對於微奈米級量測之需求，最為合適。

市面上之非接觸式光學量測儀，例如光纖位移計 MTI KD-300 精度只能達 5

微米，售價就需十萬元；例如雷射位移量測系統 MTI MicrotrakII，精度能達 1 微米，其售價至少三十多萬元；而雷射干涉儀 HP5529A，其售價甚至於達壹佰多萬元，其精度能達 50 奈米。由此可知，微奈米等級之光學量測儀之售價極為昂貴，較難使用於一般較低成本微動定位系統上。

一般而言，DVD 是利用紅光雷射去讀取光碟片軌道上的資料，而主要是利用雷射讀取頭來達成。

紅光雷射光學讀取技術經過二十多年來的演進，讀取範圍已從 CD 的 1.6 微米軌距進步到 DVD 的 0.74 微米，而目前一套紅光雷射 DVD Player 之售價可低於兩千台幣，非常適用於低成本雷射探頭之發展。

目前光學讀取技術的發展已經非常成熟，而雷射讀寫頭上之已有之光路設計與聚焦特性已足夠應用於光學量測上。因此本計劃擬使用 DVD 上之紅光雷射光學讀取頭應用於微定位平台之測距上。

由於市面上一套雷射干涉儀之售價動輒七、八十萬甚至於上百萬台幣，尤其若與定位機構結合成一完整之微奈米級定位系統，以二維自由度微動定位系統為例，兩套雷射干涉儀再加上微定位機構，其成本至少超過壹百伍拾萬台幣。以如此高價位之投資成本，必定無法應用於相關產業之精密定位系統上。因此，本計畫將從 DVD 雷射探頭製作著手，以期大幅降低線上檢測之成本。

貳、參考文獻評述

本計劃擬研發之『二維自由度 DVD 雷射量測 PZT 微動定位系統』架構包括兩大部分:微動定位平台與 DVD 雷射探頭，在此將國內外相關研究之情況與重要參考文獻再此作一評述。

一、微動定位平台方面

微動定位平台的種類很多，其結構及驅動方式亦有所不同，以下將針對各種不同微動平台之相關文獻作一研究。

Kanai 等(1991)[1]利用液壓（hydraulic）致動器，配合平面軸承導引（plain bearing guideways）在 200KG 之荷重下，達成 1nm 的定位解析度。Wang 和 Busch-Vishniac (1992)[2]利用磁變形材料，以 1.5A 墊流通於磁變形材料上的線圈，使材料發生形變達到精密定位的目的，定位精度為兩軸，解析度可達 50nm 定位的範圍為 100×100 μm。Heil 等(1996)[3]利用平版葉片彈簧和金屬線所組成的平行四邊行結構，設計出三軸微定位機構，總行程為 2mm，精度為微米級。Sakuta

(1998) [4]利用摩擦驅動完成一行程 200mm 準確度 10nm 的系統。

壓電材料具有體積小、反應快機電轉換效率高、生熱小等優點，常作為微定位平台之致動器[5]，理論上具有無限的解析度，使用壓電致動形式常見有三種：形變式、尺蠖蟲式及摩擦式。

二、DVD雷射探頭方面

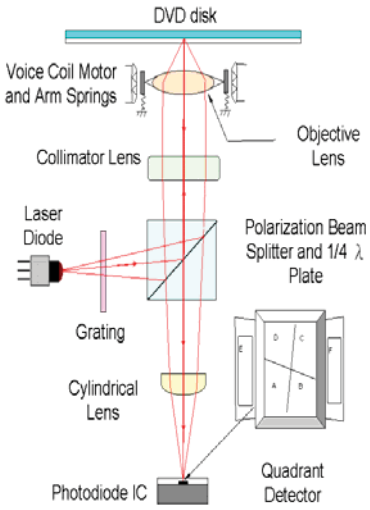
光學雷射讀取頭為 DVD Player 之關鍵組件，從雷射光源、光路設計以及光感測器等，其系統整合之完整度及聚焦之特性，使得應用雷射讀取頭於光學檢測上是可行的，以下為相關之研究文獻評述。

Benschop 與 Rosmalen(1991)[6]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) [7]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) [8]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) [9]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) [10]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。

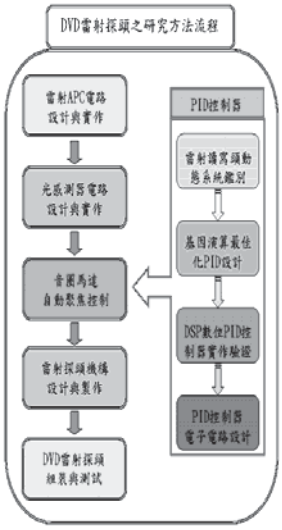
綜觀歷年相關的研究，採用雷射讀取頭的非接觸式量測法，能夠在不破壞工件的情況下，達到高精度的位移量測。且一般市售商用光碟機之雷射讀取頭，不但內含雷射二極體光源，且光路中之光柵、分光鏡、四分之一波片，與內建的光檢測 IC、聚焦物鏡、音圈馬達驅動器等，都已經利用成熟的技術將其整體化、微小化，因此非常適合應用在本計劃的研究方向上。至於二維自由度定位平台部分，由於堆疊式平台結構產生之較大幾何誤差與阿貝誤差不易縮減，故改採用單層之雙軸定位平台結構為本研究之應用平台。

參、研究方法及步驟

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。



圖一、DVD 讀取頭之外觀及內部結構圖



圖二、DVD 雷射探頭之研製方法流程圖

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包括穿透式光柵、分光鏡、四分之一波片、聚焦物鏡、光感測器等，其外觀及結構(圖一) 。

由於 DVD 雷射探頭在本計劃中主要作為微動平台之測距儀，其重要性實為定位系統成敗之關鍵。因此以下將 DVD 雷射探頭之研究方法流程及步驟(圖二)詳述於後。

一、雷射APC電路

一般二極體雷射的內部都有功率監控之光感測器（Power Monitor, PD）隨時對當時之輸出功率進行即時的回饋補償。此外瞬間所產生的電流對於二極體雷射是個致命傷，電源開啟之瞬間，其巨大的電流常造成二極體雷射的損壞。因此在其電源控制上通常都具備一個能夠是供應電流緩慢增加（Slow start）的機制來保護其二極體雷射。

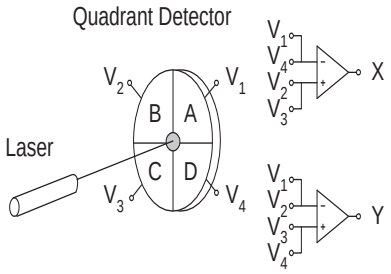
在本研究中，雷射探頭系統需要一個穩定功率的雷射光源，因此在 APC （Automatic Power Control）電路上的設計其重要性不言可喻。二極體雷射對外提供

三個腳位，分別是 LD、PD 與 GND。LD 為雷射光源端，PD 為其內部光檢測器的輸出腳位，GND 則為接地。雷射功率控制之基本原理在於利用 PD 的輸出訊號來判斷當時雷射的輸出功率，並進而將此作為回饋源，以提供 LD 的電流大小之即時回授控制。

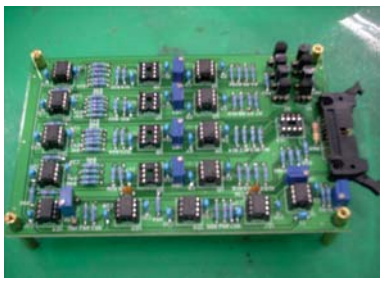
在 APC 電路之初始狀態下，先提供一個基準的參考電壓源，而在系統作動的同時將當時 PD 所接受的訊號與此進行比較。兩個訊號相減之後經過放大電路進而推動 LD 的驅動電路，驅動電路本身是利用一電晶體作類似開關的動作，來控制 LD 電流大小。因此在任何情況之下經由此 APC 電路的監視之下，雷射都能夠得到穩定的功率供給。

二、光感測器

光感測器是利用光敏元件將光訊號轉換為電訊號之感測器。依照輸出的形式來分，主要分成兩種模式：光電流模式（Photo-amperic type）及光電壓模式（Photo-voltaic type）。在光電流的模式中，整個是形成一個回路，使得光二極體保持零偏壓或逆向偏壓，適合用於光源亮度較小之情形；而光電壓模式中，則是在輸出端成一開路，適合用於光源亮度較大之情形。基本上，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。



圖三、四象限感測器位置與電壓之關係



圖四、光感測器電路板

在本計劃中，DVD 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），如圖三。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。

在圖三中，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 DVD 探頭之 S 曲線的特性。光感測器電路則如圖四所示。

三、音圈馬達自動聚焦控制

音圈馬達（Voice coil motor，VCM），是使用於光碟機中用來存取數位訊號的直接存取元件（Direct access storage devices，簡稱 DASDs）的驅動部份。

音圈馬達的構造主要包含了永久磁鐵、導磁材料以及線圈三部分。基本上，驅動音圈馬達之動力主要是由溝槽內可移動的線圈，以及提供直流磁場的永久磁鐵所組成。當電流通過一圈圈纏繞的線圈時，產生羅倫茲力（Lorentz force）造成音圈馬達運動，而其移動方向是由通過線圈的電流流向來決定（佛來明左手定則，Fleming’s left hand rule）。因為是用來推動讀寫頭，所以音圈馬達的運動是以「停及走」（Stop and go）的模式呈現。本研究中應用到之自動聚焦系統，即是以音圈馬達作為驅動器，帶動前端聚焦透鏡來完成鎖焦行為，因而此機構運動的穩定性、精確性、速度以及頻率的反應，都直接關係到系統的精確度及穩定性。

（一）音圈馬達之動態系統鑑別

一般而言，振動機械動態系統之鑑別，可藉由頻譜分析儀，利用其正弦波掃描功能，以獲得動態系統之頻域響應波德圖，進而找出系統之轉移函數。

由於頻譜分析儀只針對單一雷射讀取頭，進行動態系統鑑別，再依據鑑別之結果，來推導動力方程式，以便設計最佳化之控制器。

因此若使用同一型號的另一個雷射讀取頭時，因製造及組裝過程之差異，將推導出不同的動力方程式；所以必須針對個別讀取頭，重做系統鑑別及最佳化控制器設計的工作。亦即原先之最佳化控制器將不適用於其他雷射讀取頭上，而必須針對個別讀取頭來設計最佳化控制器，如此將增加 DVD 雷射探頭之製造時程加長。

為改善此缺點，本計劃直接利用製造廠商所提供之規格書，以雷射讀取頭之自然共振頻率正負值範圍直接代入，以推導動力方程式，如此將得到上下範圍之兩個動力方程式。由於此兩個動力方程式恰好可滿足，以基因演算法搜尋最佳化 PID 控制器時，轉移函數之未知數(Uncertainties)範圍之解法；而以此種方法所求

出之最佳化 PID 控制器，將可滿足製造廠商生產同一型號之所有 DVD 雷射讀取頭之自動聚焦控制使用。

（二）動力方程式之推導

在 DVD 光學讀取頭內，音圈馬達之彈簧系統不僅提供彈性恢復力使得音圈馬達的磁力與之平衡外，亦用來搭載聚焦物鏡、馬達線圈，故其動態系統於自動聚焦的過程中，佔有極重要的地位。欲推導 DVD 讀取頭動力方程式，首先將音圈馬達之四弦型懸臂樑彈簧系統的實體做等效函數轉換。

系統中的負載部份包括線圈、聚焦物鏡及結構剛體的部分，令其總質量為 m；彈簧之等效係數 k，緩衝阻尼係數 C，受到一外加力 $f(x)$的作用，受力方向位移 $x(t)$為，則其動力方程式可以表示為：

$$m\ddot{x}(t)+C\dot{x}(t)+kx(t)=f(t) \tag{1}$$

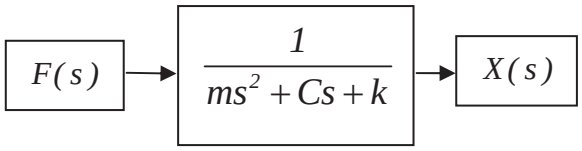
對(1)式取拉氏轉換，並令其初始值為零，可得

$$(ms^2+Cs+k)X(s)=F(s) \tag{2}$$

則此四弦型彈簧系統的轉移函數為

$$\frac{X(s)}{F(s)}=\frac{1}{ms^2+Cs+k} \tag{3}$$

將其關係以方塊圖來表示，如圖五。



圖五、二階質量-彈簧-阻尼系統方塊圖

由於音圈馬達線圈部分受到 Lorentz force 的作用，故此力之轉移函數為：

$$F(s)=n*l*B*I(s) \tag{4}$$

其中 n 表線圈之匝數；l 表線圈之總長度；B 表磁場密度；$I(s)$表流經線圈電流之轉移函數。

從電子學的觀點，音圈馬達線圈可用一串聯電阻與電感之電路來描述；再利用歐姆定律，音圈馬達線圈轉移函數可表為：

$$E(s)=(Ls+R)I(s) \tag{5}$$

式中 R 表線圈之電阻；L 表線圈之電感；$E(s)$與 $I(s)$表線圈之激勵電壓及電流。

接著，將上兩式代入（2）式可得：

$$\frac{X(s)}{E(s)} = \left[\frac{\left(nlB/mR\right)}{s^2 + \left(C/m\right)s + 4\left(k/m\right)}\right] \tag{6}$$

由於音圈馬達的轉移函數近似於二階系統，現在考慮一標準二階系統，其中 ζ 為阻尼比（Damping ratio），ω_n 為自然共振頻率（Natural resonant frequency）。典型的標準二階系統轉移函數可表示為：

$$G(s) = \frac{U(s)}{P(s)} = \frac{\alpha\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n + \omega_n^2} \tag{7}$$

式中 $U(s)$及 $P(s)$ 表輸出與輸入之轉移函數；α 為增益常數。

若假設 $s=j\omega$，且定義正規化共振頻率(Normalized resonant frequency)為 $\Omega = \omega_r\omega_n^{-1}$，其中 ω_r 為共振頻率(Resonant frequency)

經過推導後可以得共振振幅函數為：

$$M(\omega) = \left\|Q(j\omega)\right\| = \left[(1-\Omega^2)^2 + (2\zeta\Omega)^2\right]^{-\frac{1}{2}} \tag{8}$$

因為共振振幅之峯值發生於振幅函數之極值時，故可令 $dM/d\Omega = 0$ 以求出共振峯值(最大值):

$$M_r = M(\omega_r) = \left[(1-\zeta^2)^{1/2}(2\zeta)\right]^{-1} \tag{9}$$

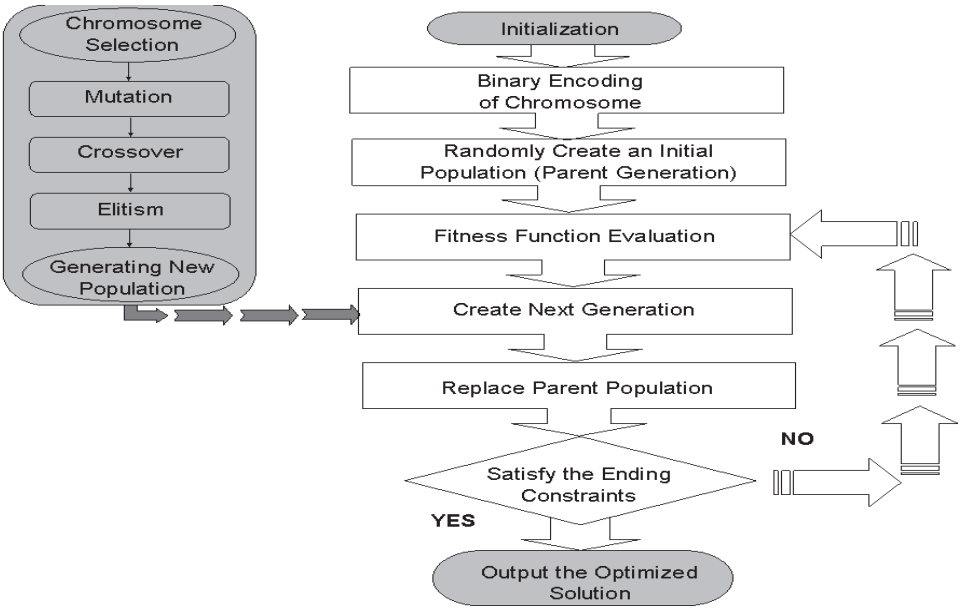
最後，可解得 k, C 與 α：

$$k = 0.25m\omega_n^2\ ;\ C = 2\zeta m\omega_n\ ;\ \alpha = \frac{nlB}{mR\omega_n^2} \tag{10}$$

（三）遺傳基因演算最佳化PID控制器設計

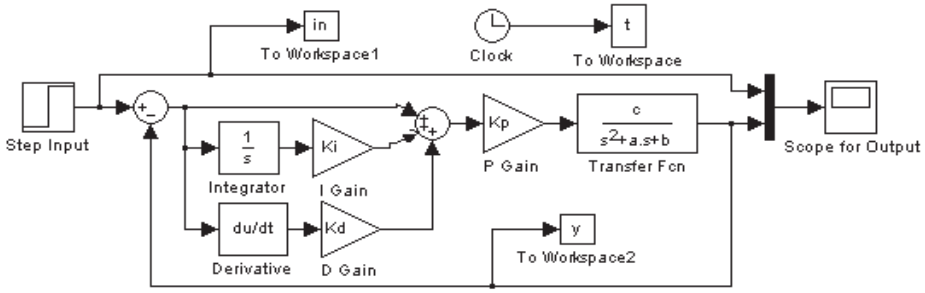
遺傳基因演算法源自達爾文之『物競天擇，適者生存』學說，主要依據物種間的生存競爭存活者得以繁衍下一代的觀念，應用於工程領域最佳化之演算。其方法主要是同時以隨機方式產生多組解，其中較佳的解將被挑選再做運算，經過多次挑選及演算，即可求出最佳解。

由於其他演算法極可能找到局部最佳解，且不能保證是真正最佳解，相對於基因演算法則是以隨機方式產生許多解，因在每一次演算過程皆挑選相對的最佳解，故最後總能找到最接近之最佳解，所以基因演算法可說是一種相當不錯的最佳化運算工具。



圖六、基因演算法之運算流程圖

基因演算法具有主要的三個運算子：挑選（Selection）、交配（Crossover）及突變（Mutation），應用此運算子即可完成基因演算法之運算。基因演算法之運算流程詳如圖六。本計劃最後將此圖使用 MATLAB 程式來撰寫遺以傳基因演算法來搜尋最佳化 PID 控制器增益 kp，Ki 及 kd 之電腦運算程式，如圖七。



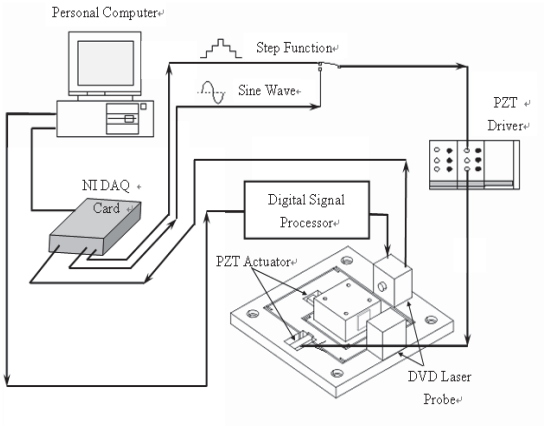
圖七、PID 控制器流程圖(MATLAB/SIMULINK)

肆、結果與討論

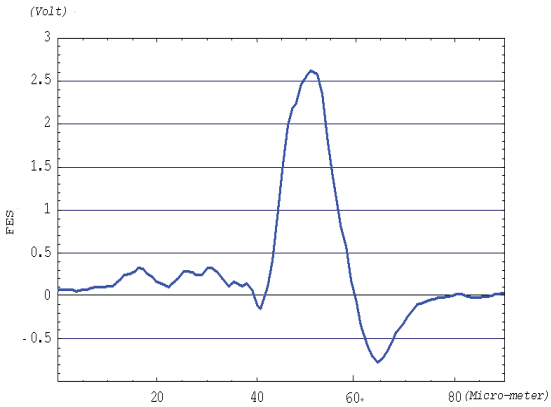
本計畫自行研製兩組 DVD 雷射探頭，並與二維平台結合成一套「二維自由度 DVD 雷射量測 PZT 微動定位系統」，其系統結構整合圖則如圖七所示。至於 DVD 雷射探頭，其自動聚焦控制之音圈馬達動力方程式，經數學推導結果，詳如表一。本計劃中使用 MATLAB 程式，以遺傳基因演算法來搜尋，最佳化 PID 控

制器增益 kp、Ki 及 kd 之值，其結果則列於表二，表中 a、b 與 c 則代表系統轉移函數之係數。另外，失焦訊號 FES (A+C) －(B+D)實際測量結果之 S-曲線，如圖八所示。

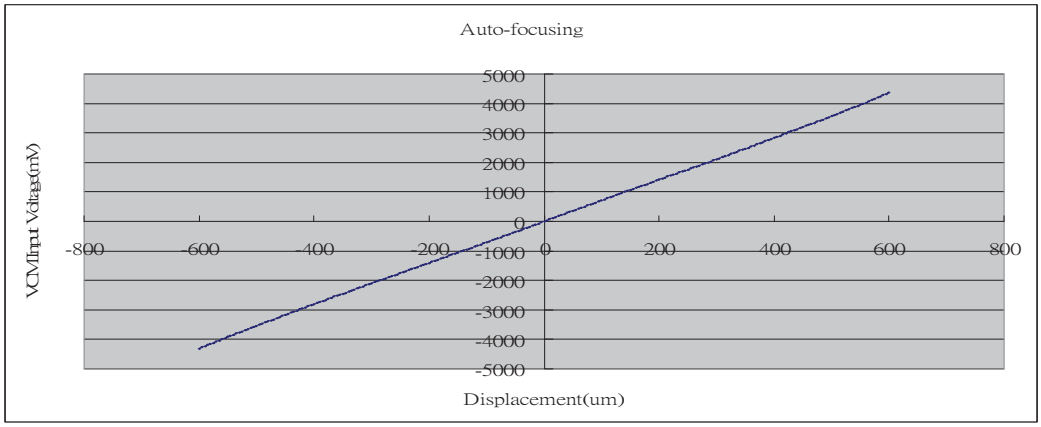
至於 DVD 雷射探頭經過自動聚焦控制後，電壓與位移曲線量測結果，則顯示於圖九上。最後，圖十及圖十一則顯示針對微動平台之 X 軸與 Y 軸定位能力以階梯函數來測試之結果，其精度可達到±100 奈米。



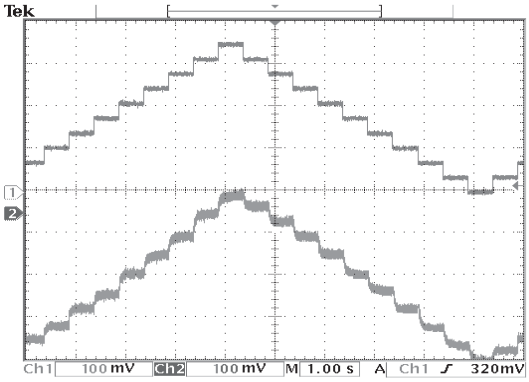
圖七、測試硬體整合結構圖



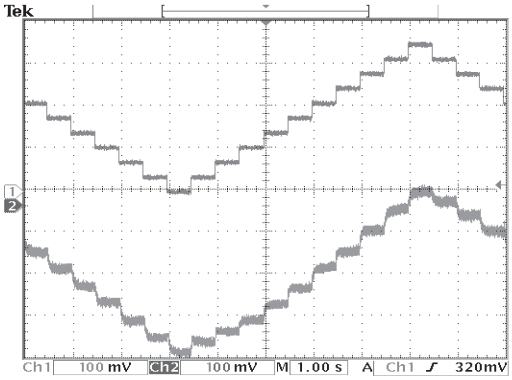
圖八、S-曲線實際測量結果



圖九、自動聚焦雷射探頭量測範圍曲線圖



圖十、以階梯函數測試 X 軸之定位能力



圖十一、以階梯函數測試 Y 軸之定位能力

表一、音圈馬達之動力方程式

Natural Frequency	Mass	Stiffness	Damper Viscosity	Open-loop Transfer function (Dynamic Equation)
ωn	m	k	C	$G(s)$
58 Hz	3.25×10^{-4} Kg	10.79 N/m	0.0119 N-m/s	$\frac{5.1282\times10^{8}}{s^2+37.1713s+1.3281\times10^{5}}\frac{\mu m}{volt}$
50 Hz	3.25×10^{-4} Kg	8.016 N/m	0.0102 N-m/s	$\frac{5.1282\times10^{8}}{s^2+32.0442s+9.8696\times10^{4}}\frac{\mu m}{volt}$
42 Hz	3.25×10^{-4} Kg	5.658 N/m	0.0086 N-m/s	$\frac{5.1282\times10^{8}}{s^2+26.9171s+6.9640\times10^{4}}\frac{\mu m}{volt}$

表二、以遺傳基因演算法 PID 最佳化增益搜尋之結果

Gains and uncertainties	*Kp*	*Ki*	*Kd*	*a*	*b*	*c*
Initial values	0.2	0.005	0.015	32.0442	98696	5.1282e+8
Lower bound	0.001	0.00001	0.0001	26.9171	69640	5.1282e+8
Upper bound	0.5	0.0005	0.015	37.1713	132810	5.1282e+8
Best Gene. occurred at #26	***0.4999***	***0.0004***	***0.005***	***29.591***	***130433.05***	***5.1282e+8***

伍、結論

本計劃所研製之『二維自由度 DVD 雷射量測 PZT 微動定位系統』是使用市面上售價低於兩千元台幣之 DVD player，並利用其上之雷射光學讀寫頭來自行研製兩套 DVD 雷射探頭，以取代售價昂貴之雷射干涉儀並用來測量定位系統上 XY

兩軸之位移量。其精度可達到±100 奈米，如此將可大為降低購置成本，以使產業界之相關應用更為普及。

陸、參考文獻

1. A. Kanai, H. Sano, J. Yoshioka, and M. Miyashita, "Positioning of a 200 kg Carriage on Plain Bearing Guideways to Nanometer Accuracy with a Force-operated Linear Actuator," Nanotechnology, Vol. 2, pp. 43-51, 1991.
2. Waniun Wang and Ilene Busch-Vishniac, "A High Precision Micropositioner based on Magnetostriction Principle," Rev. Sci. Instrum., Vol. 63, No. 1, 1992.
3. Takehiko Nomura and Ryouichi Suzuki, "Six-axis Controlled Nanometer-order Positioning Stage for Microfabrication," Nanotechnology, Vol. 3, pp. 21-28, 1992.
4. J. Heil, A. Bohm, M. Primke, and P. Wyter, "Versatile Three-Dimensional Cryogenic Micropositioning Device," Rev. Sci. Instrum., Vol. 67, No. 1, 1996.
5. Shigeru Sakuta, Mikio Adachi, Kiyoshi Ogawa, Katsunobu Ueda, Noboru Takasu, Kozo Taira, and Toshiyuki Nakano, "Precision Table Control System Using Friction Drive for Optical Disk Mastering Machine," Int. J. Japan Soc. Prec. Eng., Vol. 32, No. 2, pp. 122-126, 1998.
6. 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.
7. 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。
8. 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。
9. 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。
10. 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