雷射探頭自動聚焦系統之即時控制研究

童景賢*、黃元瑞、廖威量、蕭順清、沈柏夆

桃園創新技術學院機械工程系

摘要

本研究使用 DVD 光學讀取頭來研製精密位移感測器(簡稱雷射探頭)，使能測量軸向之微小位移量。雷射探頭之聚焦機構，若透過控制法則操控光學讀取頭上之四弦型聚焦系統，可以延長量測距離。在控制實務上，數學模型為系統控制之基本要項，本文以雷射探頭之自動聚焦控制為目標，推導出系統轉移函數之數學模型，並以數位訊號處理器(DSP)做為控制器，以控制四弦型機構自動聚焦。此模型於後續之位移曲線量測實驗結果顯示，經過 PID 聚焦控制後，量測位移可由原來之直線範圍 7 μm，進一步延長至 1150 μm，可更為強化雷射探頭之量測能力，使其應用更為寬廣。

關鍵字： DVD 光學讀取頭、數學模型、PID 控制、數位訊號處理器(DSP)

*Email : jstorng@tiit.edu.tw ; Tel : 03-4361070 ext 6302; Fax : 03-4384670

AN INVESTIGATION INTO LASER PROBE ON REAL-TIME AUTOFOCUSING CONTROL

Jingsyan Torng*, Yuan-Ruey Huang, Wei-Liang Liaw
Shuen-Ching Hsiao and Bo-Fong Shen

Department of Mechanical Engineering

Taoyuan Innovation Institute of Technology

Abstract

This study was developed a precision displacement sensor (referred to as laser probe) by using a DVD optical pick-head for micrometer-scale displacement measurement. Through modern control laws, the focusing system with four string mechanism of optical pickup-head is able to manipulate for extending the measurement range. On the control practices, the mathematical model for control system is one of the key elements for control processes. This research is aimed at the control of auto-focusing laser probe. Firstly, the transfer function of the mathematical model was derived. Secondly, a digital signal processor(DSP) was utilized as a controller. Finally, the experimental results showed that this model is able to extend the measuring range from 7 μm to 1150 μm. It can more strengthen the measurement capability of the laser probe and broader its industrial applications.

Keywords: Optical pickup-head, Mathematical model, PID control, Digital signal processor(DSP)

*Email : jstorng@tiit.edu.tw ; Tel : 03-4361070 ext 6302; Fax : 03-4384670

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。

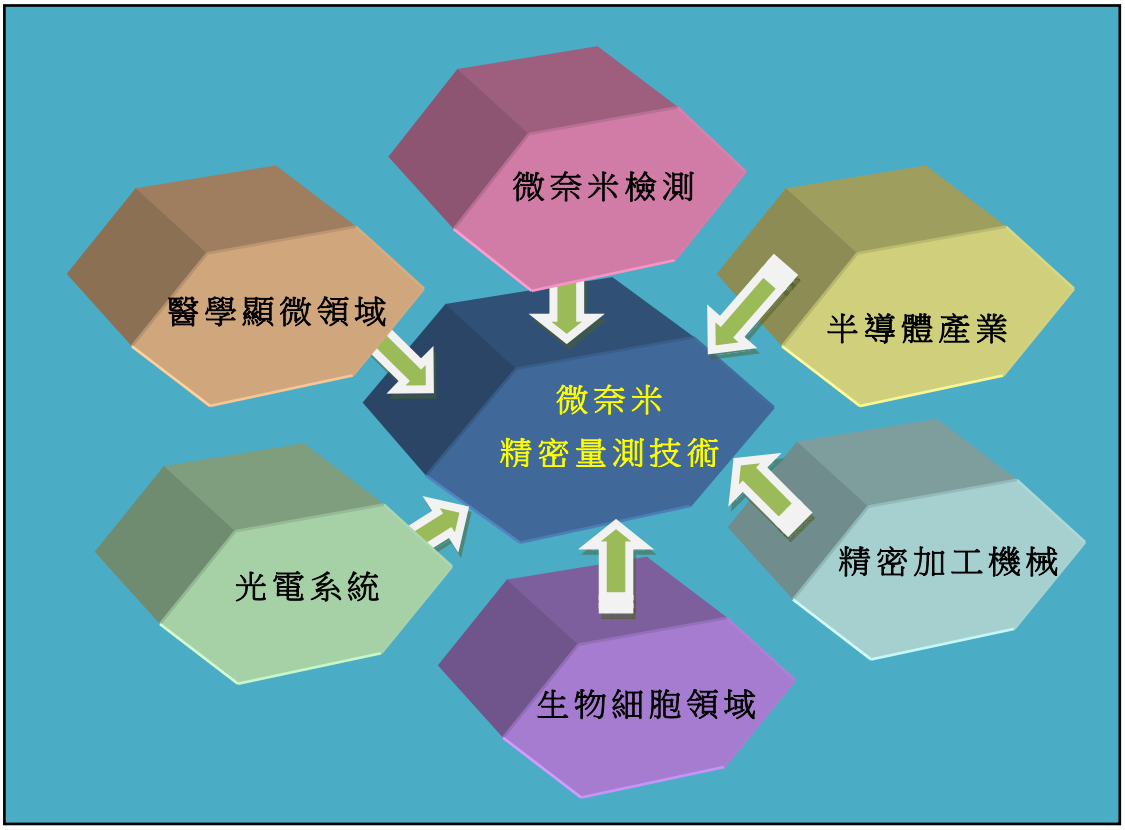

圖 1 精密量測技術支援之各相關領域

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，並受到極大的重視。

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，因此最能符合精密量測的檢測需求，所以非接觸式量測已成為精密工業量測之趨勢。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 Microtrak II，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量測系統上。

一般而言， DVD 是利用紅光雷射去讀取光碟片軌道上的資料，而主要是利用光學讀取頭(Optical pickup-head)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 之售價可低於壹仟元台幣，非常適用於低成本雷射探頭之發展。

二、 研究目的

一般微動系統之位移量，幾乎都以雷射干涉儀來測量，並據以進行即時(real time)回授控制，以達到精密定位之目的；此類系統因使用雷射干涉儀，故量測精度等級約可達±50 奈米。但其售價動輒上百萬台幣，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位移定位系統上。因此，本研究從 DVD 光學讀取頭著手，據以研製雷射探頭，並從光學讀取頭之機構模組，推導出聚焦系統之數學模型，再以數位訊號處理器(DSP)做系統之控制，以達到低成本即時聚焦控制之目

的。

貳、文獻探討

從光碟機開始發展以來，其內部之光學讀取頭技術便不斷的更新與發展，截至今日已相當成熟。光學讀取頭為 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，使得應用光學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 等(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四弦型聚焦系統鎖死，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 10μm。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，補償四弦型聚焦系統之左右偏擺（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四弦型聚焦系統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，由於四弦型聚焦系統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，並得到極佳的效果。

綜觀歷年相關的研究，採用光學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 DVD 光碟機之光學讀取頭，不但內含雷射二極體光源，且光路中之鏡片模組與內建的光檢測 IC、聚焦物鏡、四弦型聚焦系統驅動器等，都已經成熟的將其整體化、微小化，因此非常適合應用在本研究上。

參、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。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）及光學元件包括穿透式光柵、分光鏡、四分之一波片、聚焦物鏡、光感測器之外，機構部分主要為四懸臂之聚焦透鏡，其光路構造及外觀如圖 2 所示。

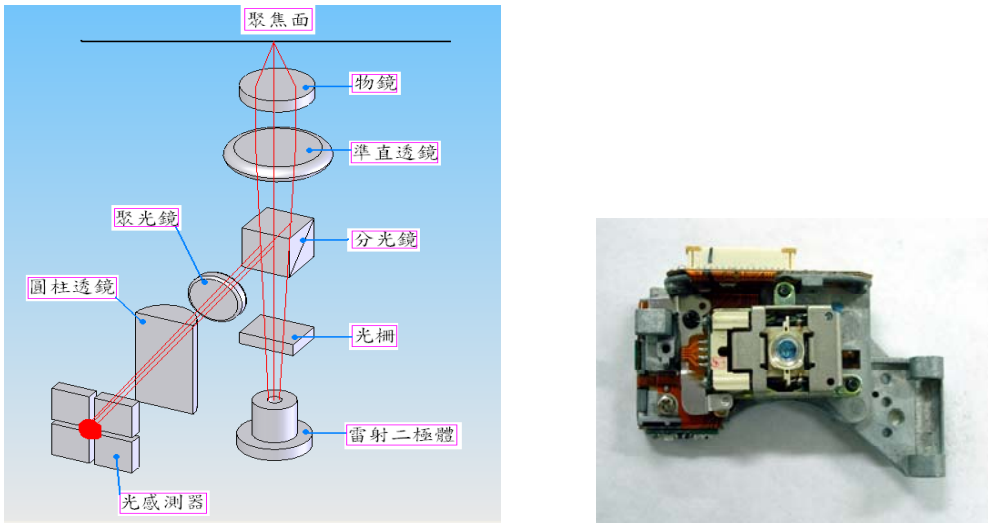

圖 2 光學讀取頭之光路構造及外觀圖

一. 四弦型聚焦系統

由於 DVD 雷射探頭在本研究中主要作為微小測距儀，而聚焦系統之重要性實為量測成敗之關鍵，故本研究專注於聚焦機構之即時控制。DVD 雷射探頭聚焦控

制之系統之機構及動力模型，請參考圖 3 及圖 4。

二. 系統之數學模式

四弦型聚焦系統是用於光碟機來讀取數位訊號的驅動部份，本研究應用之自動聚焦系統是以四弦型機構作為驅動器，以帶動前端聚焦透鏡來完成自動鎖焦行為，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。

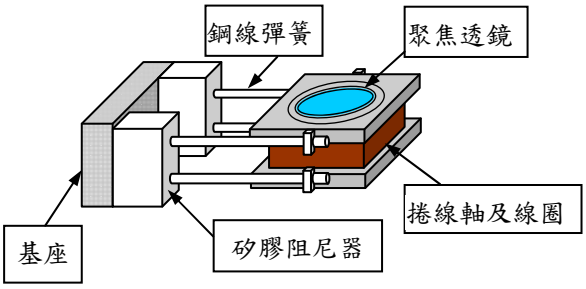

圖 3 光學讀取頭之四弦型聚焦系統機構圖

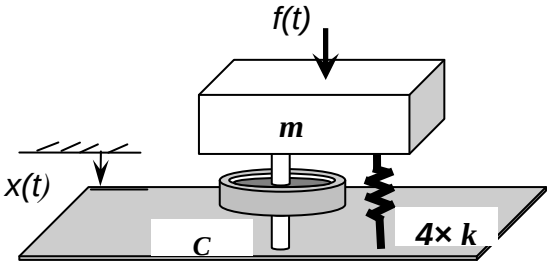

圖 4 四弦型聚焦系統之動力模型

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；若受到一外加力 $f(t)$的作用，受力方向位移為 $x(t)$，則其動力方程式可以表示為：

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

接著，將四弦型懸臂彈簧系統轉換為等效函數，此四弦型系統可用一串聯電阻與電感之 RC 電路來描述，故系統轉移函數可表為：

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

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。式中 R 表線圈之電阻；L 表線圈之電感；$E(s)$與 $X(s)$表線圈之激勵電壓及位移之轉移函數。

由於公式(2)為二階系統，現在考慮一標準二階系統，其中 ζ 為阻尼比，ω_n 為

自然共振頻率。若假設 $s=j\omega$，且定義正規化共振頻率為 $\Omega=\omega_r\omega_n^{-1}$，其中 ω_r 為共振頻率，經過推導後，可得到共振振幅函數為：

$$M(\omega) = \|Q(j\omega)\| = \left[(1-\Omega^2)^2 + (2\zeta\Omega)^2\right]^{-\frac{1}{2}} \tag{3}$$

因為共振振幅之峯值發生於振幅函數之極值，令 $dM/d\Omega = 0$，求出共振峯值(即最大值)。最後，可解得 k，C 與 α：

$$k = 0.25m\omega_n^2 \ ; \ C = 2\zeta m\omega_n \ ; \ \alpha = \frac{nlB}{mR\omega_n^2} \tag{4}$$

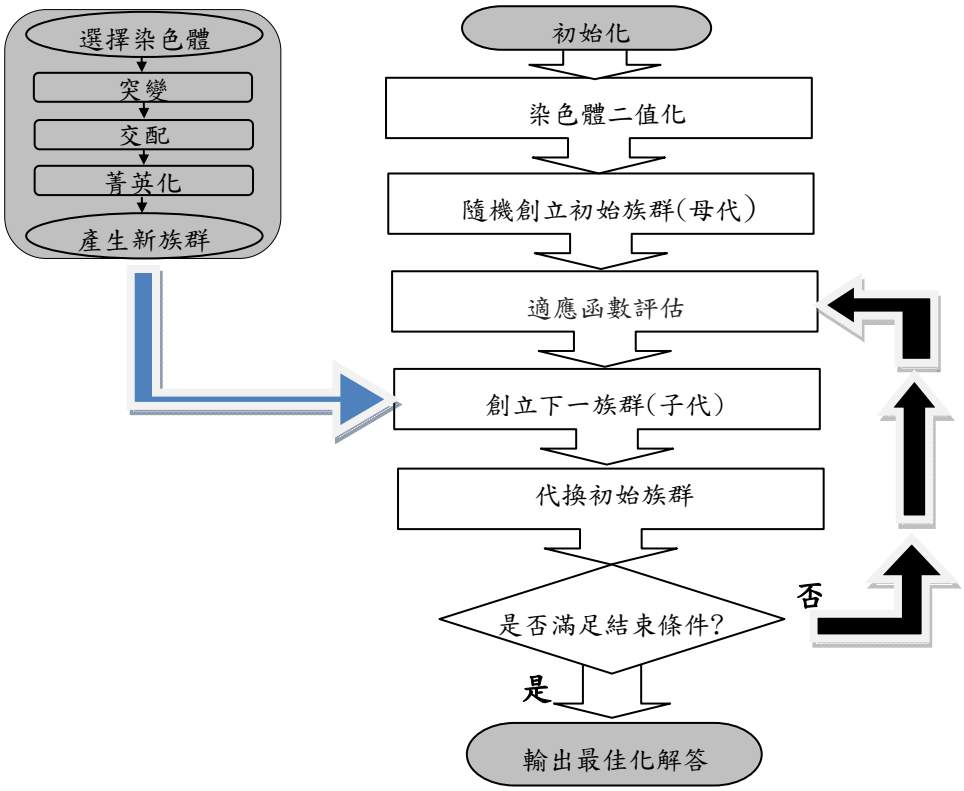

圖 5 基因演算法之運算流程圖

三. PID 控制器設計

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，所以基因演算法是一種合適的最佳化運算工具。

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 5。

由於 PID 控制器的結構簡單、性能優良和對大部分的製程應用均有效。傳統上，PID 的增益調整是一項既麻煩又耗時的嘗試錯誤測試程序，這不僅是因為控制器本身即存在有比例、積分、微分三項控制作用之交互影響，同時在調整時也受到系統動態、干擾、及迴路交互等影響，所以 PID 控制器的參數調整一直是個令人困擾的問題。為解決此一問題，本研究採用基因演算法來調整最佳化之 PID 控制器，應用 MATLAB 軟體來撰寫基因演算法之程式，用以搜尋 PID 控制器之參數 Kp、Ki 與 Kd。SIMULINK 之 PID 控制系統，如圖 6 所示。圖 6 中之 *a*、*b* 及 *c* 為二階轉移函數係數，將設定上下限範圍，以方便 PID 參數搜尋。

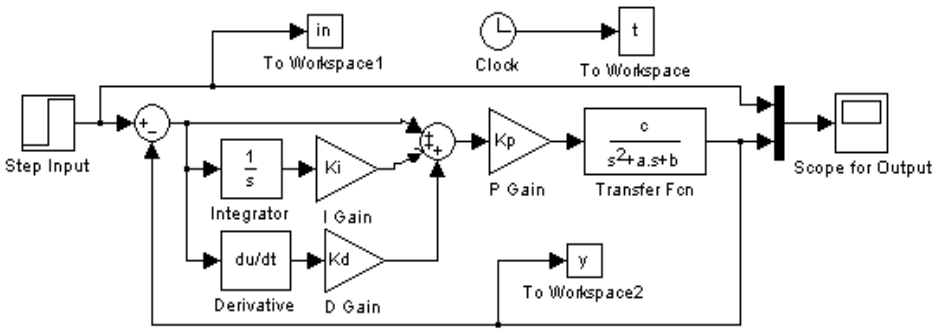

圖 6 PID 控制器流程圖(MATLAB/SIMULINK)

四. 數位化 PID 控制器

數位信號處理器（Digital signal processing, DSP）具有快速的運算速度，大儲存空間的高速定址能力，功能很強又很靈活的指令系統等特點。因此，數位訊號處理可以非正式的定義為：一種數學、演算法及技術的應用，以便處理經過轉換為數位形式的大量信號。DSP 還具有很強而又很靈活的介面與通訊能力，便於組織多處理器平行運算、平行管線作業以及資源共享，使處理速度與精確度提高，因此應用於本研究之即時聚焦控制上，具有足夠之運算速度能力。PID 控制器結合 PI 和 PD 控制器的優點，能改善閉迴路系統之相對穩定度，使暫態響應變得更快，

並減少穩態誤差。在連續時間輸入 *e(t)*和輸出 *u(t)*之間的 PID 控制演算法如下式:

$$u(t)=K_p e(t)+K_i\int_0^t e(\tau)d\tau+K_d\frac{de(t)}{dt} \tag{5}$$

其中誤差訊號 $e(t) = r(t) - c(t)$，為設定值 *r(t)*與量測值 *c(t)*的差；Kp 為比例增益，Ki 為積分增益，Kd 為微分增益。習慣上將(5)式呈現如下：

$$u(t)=K_p\left[e(t)+1/T_i\int_0^t e(\tau)d\tau+T_d\frac{de(t)}{dt}\right] \tag{6}$$

其中 Ti 稱為重置時間（Reset time），Td 稱為微分時間。

為了便於數位控制，所以必須將 PID 控制器加以離散化，亦即將連續形式的微分方程式，化成離散式的差分方程式，同時各類比量也離散化為數位量。在離散化的過程中，必須對信號依固定的取樣週期 Ts（Sampling time）進行取樣，*k* 為取樣序號；直接數位化為按序號 *k* 的順序，在取樣週期 Ts 內進行控制。由於將取樣週期 Ts 設的很小，所以取樣週期 Ts 相對於信號的變化週期是很小的，如此可以運用向後差分代替微分，即令

$$\int_0^t e(\tau)d\tau=\sum_{i=0}^{k}eT_s\ ;\qquad \frac{de(t)}{dt}=\frac{e(k)-e(k-1)}{T_s} \tag{7}$$

則(7)式可以改寫為：

$$u(k)=K_p\left[e(k)+\frac{1}{T_i}\sum_{i=0}^{k}e(i)T_s+T_d\frac{e(k)-e(k-1)}{T_s}\right]$$

$$=K_p e(k)+K_i\sum_{i=0}^{k}e(i)+K_d\left[e(k)-e(k-1)\right] \tag{8}$$

其中 *u(k)*為取樣 *k* 序號時控制器的輸出，*e(k)*為取樣序號 *k* 時控制器的誤差，*e(k-1)*為取樣序號 *k-1* 時控制器的誤差。

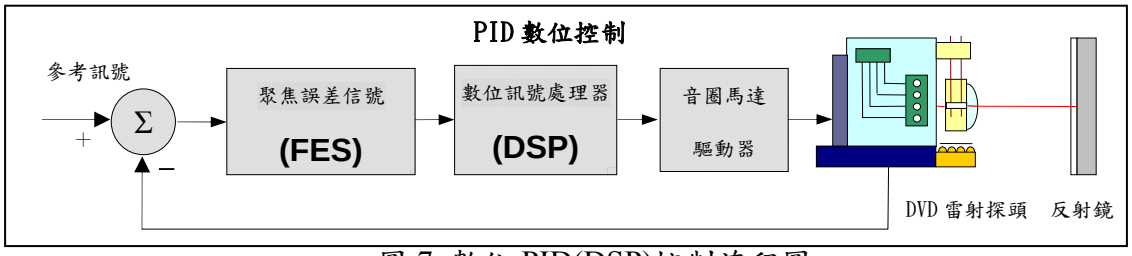

圖 7 數位 PID(DSP)控制流程圖

公式(8)已將連續信號離散化為差分方程式的運算式。而相關的控制運算，本研究將採用由德州儀器所開發的 DSP 作為整體運算的核心，其具平行處理等相關功能，促使微處理機整體運算能力大幅地提升，對於本研究中即時控制的運算處理是相當足夠。數位 PID (DSP)控制器結合光學讀取頭之控制流程，如圖 7 所示。

肆、結果與討論

雷射探頭之動力方程式經推導出各係數後，將實際量測的四弦型聚焦系統懸臂機構之質量 m 及自然共振頻率 ω_n 代入公式(4)，即可得到系統之轉移函數模型，其結果詳列於表 1。當以基因演算法搜尋最佳化增益，得到之 Kp、Kd、Ki 值列於表 2，其中包含圖 6 之 a、b 及 c 轉移函數係數。

表 1、四弦型聚焦系統之動力方程式

自然頻率	質量	彈簧係數	阻尼係數	開迴路轉移函數(動力方程式)
ω_n (Hz)	M (Kg)	K (N/m)	C (N-m/s)	$G(s)$ (μm/volt)
58	3.25×10^4	10.79	0.0119	$\dfrac{5.1282\times10^8}{s^2+37.1713s+1.3281\times10^5}$
50	3.25×10^4	8.016	0.0102	$\dfrac{5.1282\times10^8}{s^2+32.0442s+9.8696\times10^4}$
42	3.25×10^4	5.658	0.0086	$\dfrac{5.1282\times10^8}{s^2+26.9171s+6.9640\times10^4}$

表 2、基因演算法搜尋最佳化增益

增益及係數	*Kp*	*Ki*	*Kd*	*a*	*b*	*c*
初始值	*0.2*	*0.005*	*0.015*	*32.0442*	*98696*	*5.1282e+8*
上限值	*0.5*	*0.0005*	*0.015*	*37.1713*	*132810*	*5.1282e+8*
下限值	*0.001*	*0.00001*	*0.0001*	*26.9171*	*69640*	*5.1282e+8*
最佳值	***0.4999***	***0.0004***	***0.005***	***29.591***	***130433.05***	***5.1282e+8***

雷射探頭包含數位 DSP 控制器、放大電路板、DVD 光學讀取頭、聚焦透鏡、杜邦接頭及排線等，其中更包括二極體雷射 APC 電路、光偵測器控制電路；最後雷射探頭系統架構圖，整合如圖 8 所示。最後，以鍍銀平面鏡做為雷射訊號之反射鏡，雷射探頭經過 PID 聚焦控制後，量測位移由未加控制器時的 7 μm 測量值(如圖 9 之直線部分)，延長至控制後的 1150 μm 測量值，如圖 10 所示。

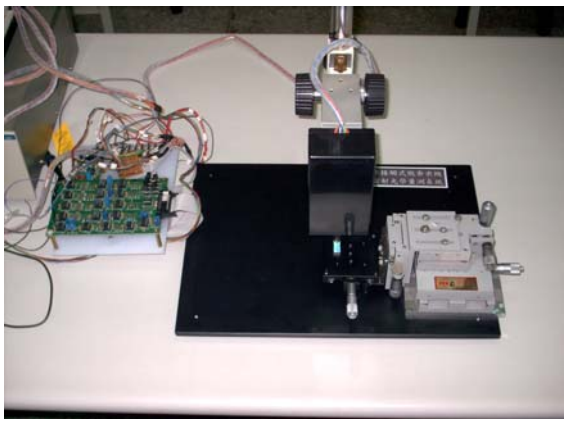

圖 8 系統實體圖

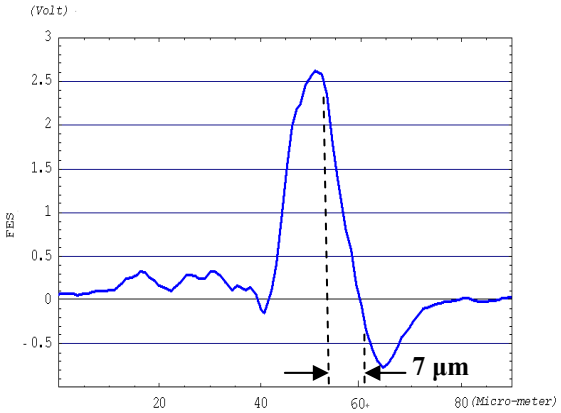

圖 9 聚焦誤差信號曲線(FES)

直線部分量測範圍為 7 μm

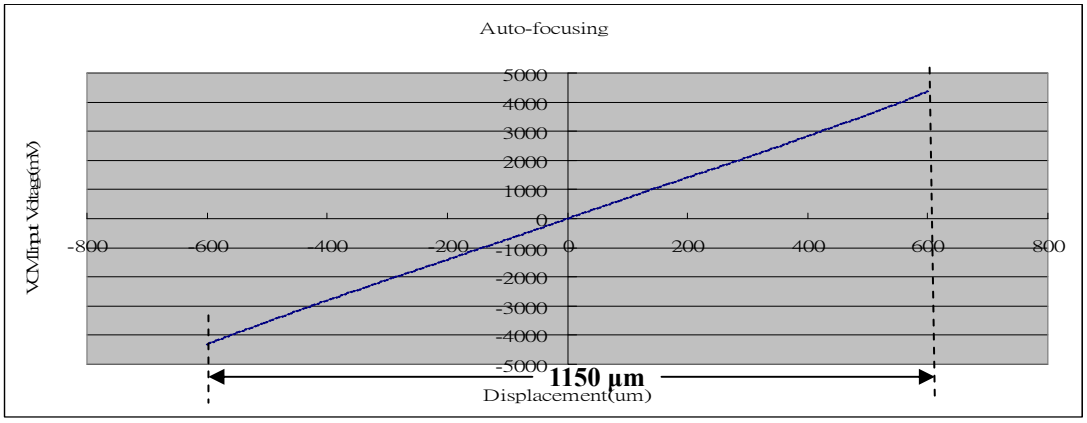

圖 10 雷射探頭量測範圍延長至 1150 μm

伍、結論

本研究是使用市面上 DVD 光學讀取頭來研製精密位移感測器即雷射探頭，而本文重點是鎖定於自動聚焦控制，其程序包括：系統數學模式之建構、 PID 控制器設計、控制參數 Kp、Kd、Ki 之搜尋、數位控制器 DSP 之設立、量測系統之建立等。此推導系統數學模型於後續之實驗結果顯示，經過 PID 聚焦控制後，量測位移，由原來之直線範圍 7 μm，進一步延長至 1150 μm，如此可更為強化雷射探頭之量測能力，使其應用更為寬廣。

參考文獻

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

【2】 林勤喻，1998，《超精密雷射聚焦探頭之研製》，台灣，國立台灣大學機械工程研究所碩士論文。

【3】 林威自，1999，《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。

【4】 陳柏廷，2002，《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。

【5】 Nanying He, Weipu Jia, Dingwen, Lei Huang, Mali Gong, 2004, ”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.

【6】 Paul C.-P Chao, Cheng-Liang, Jeng-Sheng Huang, 2003, ”Nonlinear dynamic analysis and actuation strategy for a three-DOF four-wire type optical pickup”, *Sensors and Actuators*, A.105 , pp.171-182.

【7】 Sam-Nyol Hong, In-Ho Choi, Young-Joong Kim, Min-Suk Suh and Jin-Yong Kim, 2001, ”Force Characteristics of Slim Pickup Actuator to Improve Actuating Performances”, *Journal of the Japan Society of Applied Physics*, Vol. 40, pp.1771-1774.

【8】 Changsoo Han, Junghyun LEE, Soohyun, 2000, ”Digital Versatile Disc/Compact Disc-Compatible Pickup Head with Dual-Lens Lever Actuator for Next-Generation Applications”, *Journal of the Japan Society of Applied Physics*, Vol. 39, pp.2630-2634.

【9】 K.-T Lee, C.-J Kim, N.-C Park, Y.-P Park, 2003, ”Improvement of dynamic characteristics for optical pickup actuator by magnetic circuit”, *Microsystem Technologies*, Vol.9, pp.232-242.