

國立臺灣大學工學院機械工程學系

碩士論文

Department of Mechanical Engineering

College of Engineering


National Taiwan University

Master Thesis

三軸閉迴路奈米定位致動系統之

設計開發與特性研究

Design and Development of a 3-axes Close-looped
Nano-scale Positioning System



劉信廷

Hsin-Ting, Liu

指導教授：黃光裕 博士

Advisor: Kuang-Yuh Huang, Dr.-Ing.

中華民國 97 年 6 月

June, 2008

國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書

三軸閉迴路奈米定位致動系統之
設計開發與特性研究

Design and Development of a 3-axes Close-looped
Nano-scale Positioning System

本論文係劉信廷君 (R95522617) 在國立臺灣大學機械
工程研究所完成之碩士學位論文，於民國 97 年 6 月 2 日承
下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明



口試委員： (指導教授)

黃光裕

黃光裕

蔡得民

蔡得民

林沛群

林沛群

系主任、所長

黃漢邦

黃漢邦

誌謝

在這裡我要感謝所有指導與鼓勵我的人。謝謝！

第一個要感謝的是指導教授黃光裕老師從大三以來的細心教導，讓我從一顆小螺絲開始真正學習到機械工程這門學問，而從工程圖中的一筆一劃感受到一個人該有的細心、負責與一絲不苟，並且在論文進行的過程中，犧牲睡眠時間而不辭辛勞的指導我，有了老師的幫助，才使的我的論文得以誕生；同時也感謝老師讓我有機會見識了德國，受益匪淺。並且感謝蔡得民教授與林沛群教授，對於論文的不吝指正與提供寶貴的建議，使本論文的內容更臻完善，在此致上由衷的感佩。另一方面更感謝中研院的黃英碩老師，每週對我的研究進度做叮嚀與指導，讓我在實驗茫茫中找到出路。也感謝李世光教授、黃君偉老師及施錫富教授在不同的時間點，在知識上的傾囊相授而幫助我在光學路上順利行走。

感謝中研院的恩德學長、博景學長、先順學長、紹剛學長以及正清學長的栽培，給了我很大的學習機會也給了我研究的空間以及在論文進行時的對我的慷慨相助。再來要感謝佳霖學長和岳良學長在緊要關頭的指導和補救，讓我能順利畢業。也要感謝彥旭學長和建龍學長從專題的合作過程中讓我一點點成長。更感謝念祖和阿斌學長給我的光學啟蒙以及欣怡學姐給我的光學小解答。

感謝以上大家犧牲自己的時間而對我的認真栽培，多虧了你們，我得以茁壯。而站在你們的肩膀上，讓我看的更遠。

感謝兩年來共同前進的垠宇、宇杰、碩彥和逸鵬，一起做實驗、打論文和連線，此謂同甘苦而共享樂，讓在論文之艱澀字裡行間爬行的我，不覺孤單反而喜樂。感謝應力所同學們及機械所同學們，總是要被我的問題打擾。還要感謝國贊、G包、大明、修哥和小黑學弟們的陪伴以及駿緯的羽伶在儀器上的協助。

最後，感謝我家人的支持、鼓勵與肯定，讓我能有信心的自由邁進；感謝一路陪伴我走來的有望，你讓苦澀的日子也過來甘醇，並且在每一次我遲疑迷惑時，成為我的糧食與動力，讓我產生勇氣而再度飛翔。謝謝你們陪在我的身邊。

沒有你們，這篇論文無法完成；有了你們，讓我不單只是完成了我的論文。

摘要

高精度定位平台伴隨精密科技之發展，奈米級解析度的定位平台更扮演了奈米科技發展之重要角色。本論文以壓電元件作為致動系統，而以全像術 DVD 讀取頭做為量測系統，開發三軸定位平台。壓電元件常被運用到微米以下的致動器上，經由精確的電壓控制亦可獲得奈米級的位移解析，但最大行程卻受限於其幾何尺寸。為了擴大致動行程，本論文採用無背隙之撓性結構來放大壓電元件之行程，並透過理論分析以及軟體模擬來探討行程放大效果與撓性結構幾何外形之關係。為了迎合致動行程之放大，像散式位移量測系統也利用改變物鏡焦長方式，來提昇其位移量測範圍。除此之外，並採用體積極為緊緻的全像光碟機讀取頭作為位移感測器，使整體系統體積更多縮小，更有力於奈米定位平台之運用和推廣。定位平台之行程、線性誤差、重現性誤差及解析度等特性也透過實驗測試方式予以驗證。

關鍵字：全像術 DVD 讀取頭、壓電致動器、位移量測、聚焦誤差訊號、線性範圍、撓性結構

Design and Development of a 3-axes Close-looped Nano-scale Positioning System

Liu, Hsin-Ting

Abstract

High-resolution position stage is the footstone of the precision technology. A nano-level resolution positioning stage plays a important role in the development of nanotechnology. This paper proposes a 3-axis positioning stage built up by piezoelectric actuators as the actuating system and HOE-DVD pickup head as the displacement measurement system. Piezoelectric units are often used in micro-level actuator; by using the precise voltage control piezoelectric units can also fulfill a nano-level actuation. In order to increase the stroke of piezoelectric actuator, a flexible structure without backlash and friction is utilized. Its relationship between the displacement amplifying effect and the geometric parameters of flexible structure is studied by the theoretical analysis and the finite element analysis. For matching the actuation stroke, the optical displacement measurement system is modified by varying focal length of the lens. Besides, the elaborate application of the miniature HOE pickup head makes the whole system more compact to promote the widespreading application of the nano-level positioning systems. Furthermore, diverse properties of the positioning stage including stroke, linearity, repeatability and resolution are verified by experimental testings.

Keywords: HOE-DVD pickup head, piezoelectric actuators, displacement measurement, focus error signal, linear range, flexible structure

目 錄

口試委員會審定書.....	i
誌謝.....	ii
中文摘要.....	iii
英文摘要.....	iv
目錄.....	V
表目錄	VII
圖目錄.....	VIIIi
符號表	XI
第一章 緒論	1
1.1 研究背景與動機	1
1.2 相關文獻回顧	3
1.2.1 壓電致動系統	3
1.2.2 非接觸式量測系統	4
1.3 研究目標	6
1.4 內容簡介	7
第二章 三軸位移定位系統	8
2.1 功能與構想	8
2.2 整體架構	13
第三章 壓電式致動子系統	16
3.1 壓電原理與材料特性	16
3.1.1 壓電效應	16
3.1.2 壓電材料之非線性特性	17
3.1.3 壓電材料的剛性	19
3.1.4 壓電元件應變表現式	21
3.2 位移放大壓電致動器之幾何構形設計	25



3.2.1 撓性位移放大結構	25
3.2.2 菱形位移放大結構	25
3.2.3 圓形彈簧鋼片之位移放大機構	30
3.2.4 橢圓形彈簧鋼片之位移放大機構	35
3.2.5 橢圓形位移放大機構之壓電致動器	41
3.2.6 位移放大壓電致動器位移對電壓關係	42
第四章 光學式量測子系統	43
4.1 光學讀取頭聚焦量測之原理	43
4.1.1 光學讀取頭原理及光學元件功能介紹	43
4.1.2 雷射光束和能量密度分佈	46
4.1.3 以幾何光學計算光點成像位置與形狀	48
4.2 全像雷射整合之 DVD 讀取頭	54
4.2.1 全像光學 DVD 讀取頭	54
4.3 全像雷射讀取頭之構型與應用	59
4.3.1 全像雷射讀取頭量測光路	59
4.3.2 全像雷射讀取頭模組化構型	62
第五章 三軸定位系統之設計開發與控制程式	64
5.1 總系統架構	64
5.2 電路架構與程式	67
第六章 三軸閉迴路奈米定位致動系統之系統性能	69
第七章 結論與未來展望	81
參考文獻	83
附錄	86

表目錄

表 2.1	致動器種類及特性	9
表 3.1	撓性位移放大機構之幾何關係	40
表 4.1	模擬光點成像與物鏡位置關係	57
表 4.2	透鏡組合之光學量側性能	63
表 6.1	透鏡搭配與線性範圍關係	70
表 6.2	驅動電壓 V_{IN} 對位移量及 U_{RES} 之關係	72
表 6.3	三軸致動器之步階響應特性	75
表 6.4	三軸致動器之頻譜分析結果	77
表 6.5	三軸式奈米級定位平台之致動性能	80
表 6.6	三軸式奈米級定位平台之性能比較	80



圖目錄

圖 1.1	壓電位移放大器	3
圖 1.2	雷射位移感測器之量測原理[16]	4
圖 1.3	SIOS 開發之奈米級三維掃描系統[17]	5
圖 1.4	AFM 探針量測系統[21]	6
圖 2.1	慣性滯滑式步進致動原理.....	10
圖 2.2	連續式致動原理.....	11
圖 2.3	光學像散式量測光電組件.....	12
圖 2.4	總系統.....	13
圖 2.5	平行簧片導引子系統.....	13
圖 2.6	致動子系統和撓性放大結構.....	14
圖 2.7	量測子系統.....	14
圖 2.8	三軸結構.....	15
圖 3.1	壓電材料之極化性質.....	16
圖 3.2	壓電材料之能量轉換[22].....	17
圖 3.3	磁滯現象[23].....	18
圖 3.4	潛變現象[23].....	19
圖 3.5	壓電元件伸長與負荷關係[23]	20
圖 3.6	壓電元件伸長量與出力關係[23]	21
圖 3.7	積層式壓電元件	23
圖 3.8	菱形位移放大結構.....	25
圖 3.9	位移輸出與幾何外型關係.....	27
圖 3.10	菱形框架上之作用力平衡圖.....	28
圖 3.11	力量輸出與幾何外形關係.....	28
圖 3.12	菱形位移放大結構之外型.....	29

圖 3.13	位移放大結構之模擬分析成果.....	30
圖 3.14	圓形彈簧鋼片之位移放大結構.....	31
圖 3.15	圓柱薄殼變形情況.....	32
圖 3.16	圓形薄殼受受力與變形應力關係.....	34
圖 3.17	橢圓形薄殼的外形與參數定義.....	35
圖 3.18	橢圓形薄殼變形示意圖.....	36
圖 3.19	輸出位移與輸入位移的關係.....	37
圖 3.20	變數 a、b 與變形量關係.....	38
圖 3.21	橢圓形位移放大結構之幾何尺寸.....	39
圖 3.22	輸入位於與輸出位移關係.....	39
圖 3.23	放大機構所受應力與安全性係數分布.....	40
圖 3.24	橢圓薄殼元件應力應變關係.....	41
圖 3.25	壓電致動器輸入電壓與輸出位移關係.....	42
圖 4.1	DVD 讀取頭元件配置.....	43
圖 4.2	圓柱透鏡.....	43
圖 4.3	像散與光點形狀[16].....	44
圖 4.4	光電二極體的輸出代號.....	44
圖 4.5	DVD 讀取頭聚焦位置改變情形.....	45
圖 4.6	S-curve.....	46
圖 4.7	雷射光束之高斯強度分佈圖[25].....	47
圖 4.8	雷射光束聚焦點附近光束直徑的變化[25].....	47
圖 4.9	雙片物鏡與光電二極體成像關係.....	48
圖 4.10	像散光點的幾何關係.....	49
圖 4.11	成像光點尺寸和點光源位置之關係.....	51
圖 4.12	輸出電壓 U_S 和點光源位置關係.....	52
圖 4.13	失焦訊號 U_{FES} 與點光源位置的關係.....	52

圖 4.14	可感測範圍和數值光圈倒數的關係.....	53
圖 4.15	可感測範圍和數值光圈倒數 $1/NA$ 的關係.....	53
圖 4.16	全像光學式 DVD 讀取頭 HOE[26].....	54
圖 4.17	正旋光柵.....	55
圖 4.18	光電二極體 PDIC 的詳細配置[26].....	55
圖 4.19	S-curve 之線性區[26]	56
圖 4.20	全像光學元件模擬光路系統.....	56
圖 4.21	模擬分析所得輸出電壓訊號和反射鏡位置關係.....	58
圖 4.22	全像光電元件 HOE 之量測光路	59
圖 4.23	實驗架構.....	59
圖 4.24	失焦訊號 U_{FES} 與失焦距離關係	60
圖 4.25	線性度與線性誤差.....	61
圖 4.26	全像雷射讀取頭之組成.....	62
圖 5.1	三軸閉迴路奈米級定位致動系統.....	64
圖 5.2	單軸位移定位平台.....	65
圖 5.3	一體成型之平行導引結構之應力分佈情形.....	66
圖 5.4	X 方向平台受力之應力分佈圖.....	66
圖 5.5	系統架構與控制流程.....	68
圖 5.6	控制程式介面.....	68
圖 6.1	讀取頭和透鏡組之性能量測架構.....	69
圖 6.2	定位平台效能測試實驗架構.....	71
圖 6.3	位移量測訊號 U_{FES} 和位移量 ΔL 之關係	73
圖 6.4	定位平台頻率響應測試實驗架構.....	76
圖 6.5	受振動干擾之位移情形.....	79
圖 6.6	閉迴路步進定位.....	80

符號表

符號	說明	單位
L_0	壓電元件原始長度	Mm
ΔL	壓電元件變形量	μm
ΔL_0	壓電元件無復載時變形量	μm
γ	壓電元件潛變係數	
t	單位時間	sec
K_s	彈簧剛性係數	N/m
V_{IN}	驅動電壓	V
K_T	壓電元件剛性係數	N/m
F	壓電元件力量輸出	N
S	壓電應變	
D	電位移	
k_d	壓電耦合係數	
E	壓電元件所受外加電場	
θ	撓性位移放大機構之幾何外形角度	degree
ω	法線方向的位移	
ν	切線方向的位移	
ϕ	圓形薄殼上特定點之連心線與 Y 軸之夾角	degree
$d\phi$	圓形薄殼上特定兩點連心線與 Y 軸之夾角間差異量	degree
χ	圓形薄殼之曲率變化	
ε_ϕ	圓形薄殼之受力應變	
U	應變能	J
c_k	單位輸入電壓下所產生之壓電出力	N
C	位移放大機構之放大常數	
a	橢圓半短軸長	Mm
b	橢圓半長軸長	Mm
M	外加扭力	N · m

I	慣性矩	
E_C	彈性模數	
L_E	橢圓周長	mm
ΔL_{out}	位移放大機構之輸出位移	μm
ΔL_{in}	位移放大機構之輸入位移	μm
U_{FES}	聚焦誤差訊號	V
U_A	四象限感光二極體 A 象限之電壓	V
U_B	四象限感光二極體 B 象限之電壓	V
U_C	四象限感光二極體 C 象限之電壓	V
U_D	四象限感光二極體 D 象限之電壓	V
λ	波長	nm
NA	數值孔徑	
I	光強度	
I_0	光點中心的光強度	
r	光點半徑	mm
r_0	光點中心之半徑	mm
d_0	最小光點半徑	mm
f_0	物鏡焦長	mm
f_c	準直透鏡焦長	mm
u	光源位置	mm
Δu	光源移動量, 反射鏡位移量	μm
v	成像位置	mm
L_z	物鏡與準直透鏡間距	mm
L_P	準直透鏡與光電二極體間距	mm
r_α	短軸光點半徑	mm
r_β	長軸光點半徑	mm
E_l	雷射光源發散之總能量	
Φ	成像光點面積內之能量密度	



A	橢圓面積	mm^2
σ	最大光點半徑	mm
ε_p	光電二極體之光電轉換率	
U_{SUM}	橢圓形雷射光點所產生之電壓總值	
$f_{c\alpha}$	準直透鏡短軸之焦距	mm
$f_{c\beta}$	準直透鏡長軸之焦距	mm
D_n	光電二極體之單一分割	
ΔL^*	以最大位移量為基準求得之無因次位移比率	μm
ΔL_{max}	壓電位移放大致動器最大頻率響應量	μm
f	壓電振動頻率	Hz



第一章 緒論

1.1 研究背景與動機

隨著時代的邁進與科技的進步，產品的設計逐漸以小體積和高密度為導向，讓工業技術踏入奈米時代的大門。在奈米的尺度下進行加工生產，相關配合的量測儀器或生產製造裝置之性能要求也相對應地提高了。精密微小定位與量測技術重要性也因此日漸提升。

傳統傳動方法使用精密導螺桿配合馬達可以達到奈米級解析度的位移，但是受限於背隙問題，卻無法達到高精度定位的目標。1991年 Kanai 等人利用液壓式致動器[1]以及搭配平面軸承導引(Plain bearing guideways)，完成 1nm 的定位解析度，但是過於龐大的架構卻影響其適用性。目前奈米級精密定位中，壓電陶瓷元件(Piezoelectric ceramic)因為其優點如可達次原子級的高位移解析度，緊緻的體積、低密度以及高響應速度等特性而被廣泛應用；配合良好的檢測系統就能將壓電陶瓷元件的熱膨脹效應、非線性變形、遲滯現象(Hysteresis)和潛變(Creep)等現象所造成的不確定誤差，進而提升位移準確度。

在定位系統中精密位移感測系統是不可或缺的關鍵裝置，為了避免感測器系統對被量測系統產生負載效應>Loading effect)，高精密定位系統都是採用非接觸式位移量測裝置，其中以電容量測原理(1990 Goddenhenrich et al., [2]; 1990 Neubauer et al., [3])、磁性量測原理(1997 Dworak et al. [4])、穿隧電流量測原理(1986 Binnig et al. [5])、光干涉原理(1987 McClelland et al. [6]; 1988 Erlandsson et al. [7]; 1989 den Boef [8])與光槓桿原理(1988 Meyer and Amer [9]; 1989 Alexander et al. [10]; 1990 Ducker et al. [11])等最具代表性。其中電容、磁性、穿隧電流等之量測原理很容易受到電磁訊號的干擾，同時電場和電磁作用力也會對被量測系統有較高的負載效應，這些量測原理還受到設備小型化的限制，隨著電極或磁極的微小化，訊噪比(Signal/Noise ratio)也將大為降低，使量測範圍大為縮小。光學量測原理則

具有低負載效應與低電磁波干擾的優勢，光學式量測法又可區分為穿透式與反射式，穿透式量測是光源穿透待測物而進行觀察，反射式量測則是光源打在待測物表面經由反射回來的訊號來進行觀察分析。各種系統的最高解析度範圍從 100 微米到 1 奈米，因檢測系統之最大檢測範圍而定；量測範圍越小者則可達到較高解析度。

本論文利用壓電致動器作為位移致動元件，配合 DVD 讀取頭做為量測系統，設計開發出閉迴路式高精密度多軸定位系統，以達成緊緻且一體化的奈米精度之位移致動裝置。



1.2 相關文獻回顧

1.2.1 壓電致動系統

壓電致動致動的優點是體積小、精度高且出力大，壓電致動器大量使用在精密位移既定系統中，有許多的驅動方式，包括尺蠖式、摩擦式及連續式等，尺蠖式馬達致動器由複數之壓電致動器構成，由一組壓電致動器往復伸縮產生位移，另外的壓電致動器負責挾持被移動件；摩擦式之壓電致動器利用被驅動件表面之靜摩擦與動摩擦係數之差異，利用壓電元件快速往復運動來推動被驅動件；連續式使用壓電元件直接推動物體[12]。連續式壓電致動器具有致動時無振動產生之優點，適用於精密的定位。

壓電材料的行程與其層數有關，層數越多則行程越大，以 Kenji Uchino 發表的論文為例[13]，100 層的壓電材料，施以 100V 的電壓，會有約 10 μ m 的行程。

1987 年由 T. Inoue 和 T. Nada 等人，開發出以撓性體構成的壓電位移放大器，由變化橢圓機械結構之長軸，造成短軸輸出位移的放大[14]。此外 CEDRAT PIEZO PRODUCTS 等公司也有推出商業化之壓電位移放大器[15]，以分析模擬方法來針對位移放大量進行模擬，配合不同的幾何構型，達成各種放大率的實現。



圖 1.1 壓電位移放大器

1.2.2 非接觸式量測系統

非接觸式的量測系統主要是利用具有能量或發射性的媒介如雷射光源、電磁或是 X 射線等，來探測待測物的表面或性質，電子顯微鏡與雷射位移感測器都屬於此類型裝置。圖 1.2 展示一種雷射位移感測器的原理利用光學的三角量測法 (Triangulation)。雷射光束投射在被測表面，反射光點經過透鏡的聚焦後投影在光電感測器上。當待測表面作一上下 Δy 的位移量時，反射光點隨著反射雷射光束之移動，而在光電感測器移動 Δx ，光電感測器則會將光點位置變化 Δx 轉換成電壓訊號 $U\Delta x$ ，電壓訊號 $U\Delta x$ 與被測物之位移 Δx 成正比關係。常用雷射位移感測器量測範圍在 $100\mu\text{m}$ 至 1m 之間，解析度則在 $0.01\mu\text{m}$ 到 $0.2\mu\text{m}$ 之間。

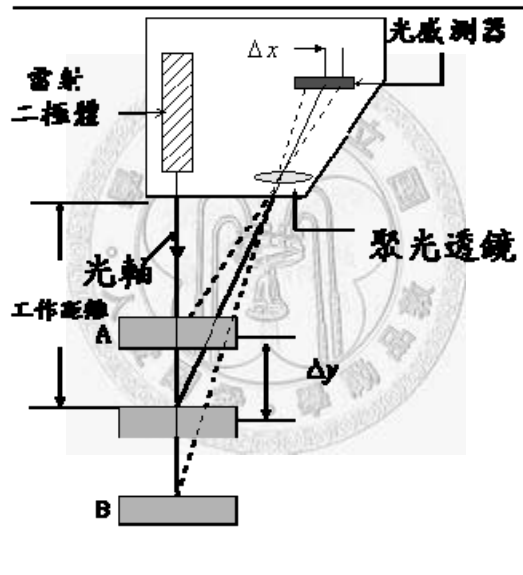


圖 1.2 雷射位移感測器之量測原理[16]

DVD 讀取頭在近年來也成為一種優良的非接觸式量測，其微小的體積和絕佳的解析度，使其在距離量測的自由性和廣度極高。

2006 年 Chu 和 Lin 等人開發出整合 DVD 讀取頭之雙軸向加速度量測器 [17]，利用讀取頭來感測撓性機械結構受力變形，藉以反推外來之加速度，可以測得到 3mg 之所受外力加速。1998 年由施錫富開發雙波長之全像術 DVD 讀取頭模組 [18]，將光電二極體、雷射二極體及運算電路整合在單一 IC 中，大幅減少傳統 DVD 讀取頭之體積，擴大了使用空間。2005 年 B. Hnilička 和 A. Voda

利用幾何光學方式，配合數值分析法建立 DVD 讀取頭量測距離與透鏡參數之間的關係[19]，使得量測範圍可以透過計算而得出。2005 年 Rostyslav Mastylo 和 Denis Dontsov 等人利用 HOE 做為零點量測元件，開發出奈米級三維掃描平台(圖 1.3)，Z 軸解析度 1nm，掃描面積達 576mm²。

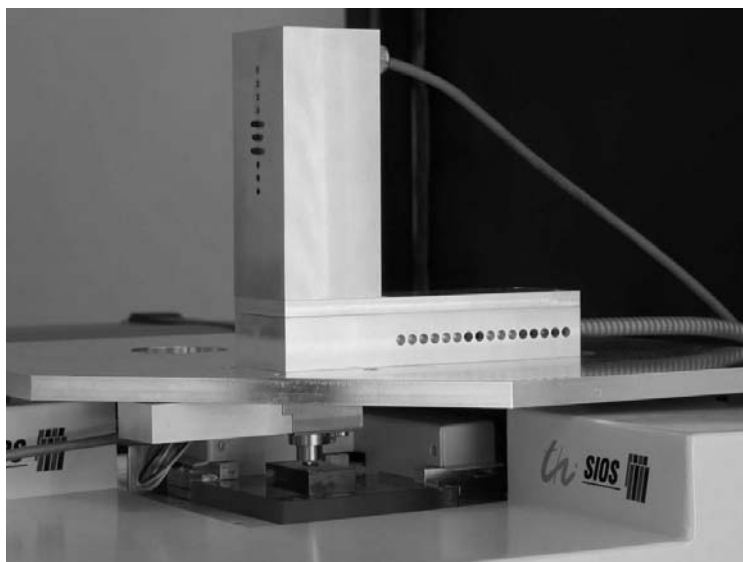


圖 1.3 SIOS 開發之奈米級三維掃描系統[20]

2006 年，台灣大學機械所和中研院物理所 Hwu 和 Huang 等人共同開發出整合 CD/DVD 讀取頭之原子力顯微鏡系統[21]，系統架構如圖 1.4 所示，AFM 探針夾具與讀取頭完整結合在一起，提供極穩固量測架構，可以進行 AFM 的接觸式(Contact Mode)和輕敲式(Tapping Mode)掃描量測，量測解析度更高達石墨的單原子台階(0.35nm)。

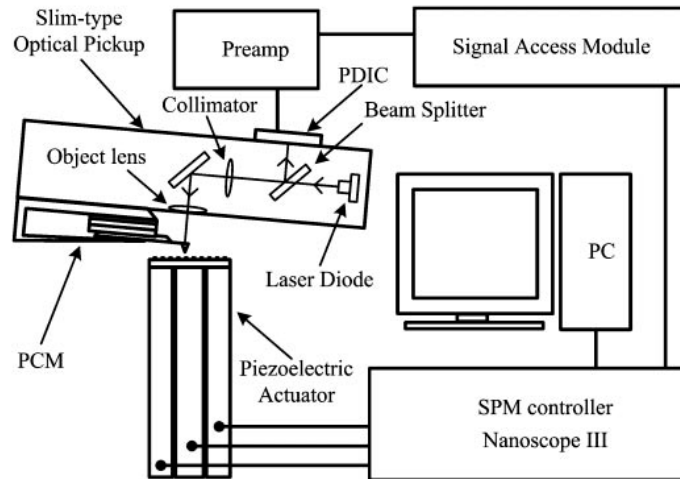


圖 1.4 Hwu 和 Huang 等人應用 DVD 讀取頭所開發之 AFM 探針量測系統[21]

1.3 研究目標

精密微定位平台用途日益增長，應用於各式系統中，如工具機、精密加工機、光纖與波導器自動對準系統、三次元量測儀、掃瞄式穿隧電流顯微儀、掃瞄式探針顯微儀、及原子力顯微儀等。

本研究目標在於設計開發三軸閉迴路定位平台，其中包含致動子系統、量測子系統及控制程式。致動子系統將以壓電元件作為致動源，為了達到精密且較長之致動，以連續性驅動方式，並透過撓性放大結構來放大壓電元件行程。量測子系統採用微小型全像式 HOE 讀取頭，建構出長行程量測且高解析度兼顧之位移量測系統。三軸中 X 和 Y 軸已交錯堆疊架構來減少結構空間，Z 軸也採用潛入結構來節省整體高度。

1.4 內容簡介

本論文分為七章，本章為緒論部分，主要為介紹其研究背景和相關參考文獻以及此研究的動機和目標。

第二章將介紹各種精密致動系統和量測系統，其中將針對現有已開發之壓電致動系統與非接觸光學式量測系統作全盤搜尋與分析探討，進而說明本論文之研究目的以及初步設計方案。

第三章從系統架構探討分析致動子系統之功能和性能，以及達成長行程和高精度之致動性能的設計方案。

第四章呈現為應用全像式 HOE 讀取頭開發之光學位移量測系統以及透過透鏡焦距之變化達成增加位移量測範圍之效果。

第五章為三軸閉迴路奈米級位移致動平台之整體系統機構設計，並探討機構剛性對致動器性能之影響，以及達成系統性能所需之控制架構。

第六章透過實驗測試方式分析三軸定位平台系統之動靜態性能，其中包括致動行程、解析度、重現性誤差、線性誤差以及動態響應等。

第七章總結整體之研究成果以及貢獻，並提出改進的方針，最後討論後續發展方向與未來展望。

第二章 三軸位移定位系統

2.1 功能與構想

2.1.1 系統定義

本論文的目的在於架構一個具有奈米級定位功能的三軸移動平台，用於承載輕量樣本作精密定位動作。研發之主要動機，在於解決愈來愈多的高精度、有空間限制、特殊環境如超高真空等的伺服致動需求，例如在 AFM、STM 等顯微鏡的實驗環境下，定位系統承載樣本時之位移必須穩定，也必須達到奈米級的定位精度 1nm~100nm 之範圍內的定位。同時為了使此定位平台也能在有限空間條件下操作，系統架構因此必須採用緊緻集約化的設計。系統分為致動子系統和量測子系統。致動子系統負責整體系統之三軸向位移功能，量測子系統負責量測平台的位置，透過位移回饋控制系統達成高精度定位目標，三軸向 X、Y 和 Z 方向的位移形成分別以 50 μm 、50 μm 和 5 μm 為系統目標規格。

2.1.2 致動子系統

致動器的功能是在於輸入的能量轉換為致動能量，即是位移和出力。致動器依動作原理可以分為數機械式、電磁式、氣壓式及壓電式等。但要達到奈米級之致動，致動機構就必須具有穩定、無間隙的特性。

機械式致動器由電動馬達配合機構構成，行程由機構型式決定，出力則與馬達之輸出扭力有關，透過減速機構可以將位移解析度提升。機械式致動器具有大行程和自鎖功能，在不供應電時仍能保持原始位置；但是背隙問題卻是往復致動任務上常需面臨的棘手問題。

電磁式致動器由導磁心軸和電磁線圈構成，由電磁線圈將輸入電流轉換成能對導磁心軸產生作用力的磁能，控制電流可以控制磁能，進而影響導磁心軸之位移解析度，屬於連續位移致動器。能夠達到極精確的致動位移。但是線圈的電阻

熱損耗卻又是影響致動精度的關鍵因素，無自鎖功能也影響致動器的配置姿態。

氣壓式致動器藉由變化氣室之壓力或體積產生位移致動，行程和出力則由氣壓源以及氣室幾何形狀決定。可壓縮性和電壓穩定性關鍵著致動精度，屬於連續位移致動器，同時氣體也具有減震阻尼功能，能抑制外來震動。氣壓源又限制了致動器配置活動性。

壓電式致動器由壓電元件和機械結構構成，壓電元件將電壓轉換形變能，機械結構則將其再轉換適當形式的致動能，位移和出力與壓電元件之幾何形狀、性質以及驅動電能有關係。通常屬於連續式位移致動器，透過適當致動機構的也可以產生步進致動位移。由於精準電壓控制技術使高精度位移致動也能達成，連續位移致動器通常不具備自鎖功能，高電壓運作則需要好的電絕緣配合。

表 2.1 致動器種類及特性

致動方式	機械式	電磁式	氣壓式	壓電式
最小步進量	連續式／ 步進式	連續式	連續式	連續式／步進式
阻尼效應	無	感應電動勢	氣體可壓縮性	無
自鎖功能	有	無	無	無
使用限制	機構背隙 問題	大電阻熱耗 損大	氣體可壓性和 高壓氣源	高電壓驅動高溫 失效

以上四種致動方式如表 2.1 所示。皆能以各自的方式達到奈米級致動。在穩定致動的考量下，機械式有背隙衝擊振動問題，電磁式則有高電阻耗損的問題，以及氣壓式致動器必須有空壓氣體備置的問題，壓電致動器則具有結構簡單以及高動態性能等優點。

壓電致動器又可以分為步進式與連續式。常用步進致動原理包含尺蠖式、衝擊式以及慣性滯滑式，慣性滯滑式可以產生較高位移解析度，而且結構較為簡單，已不對稱式驅動電壓波形即可產生微小致動位移。慣性滯滑原理，如圖 2.1 所示，藉由致動元件之間動摩擦係數與靜摩擦係數的差異以及快進後回的作用方式，使致動元件得以步進方式位移，行程也得以超過壓電元件之最大位移致動量。連續式致動方式中致動位移量由驅動電壓和壓電元件之幾何尺寸決定，有最大行程之限制，以控制驅動電壓來產生連續位移變化，如圖 2.1 所示。位移的解析度受限於驅動電壓的解析度，放大或是縮小位移量可以透過機械槓桿原理。

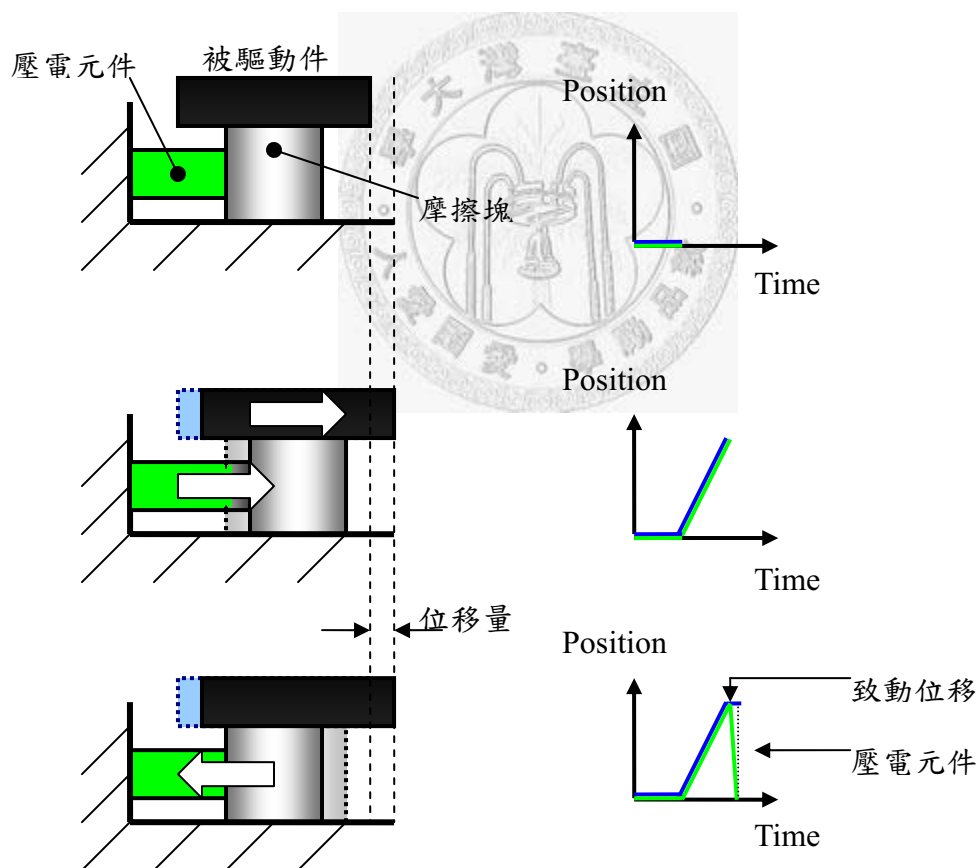


圖 2.1 慣性滯滑式步進致動原理

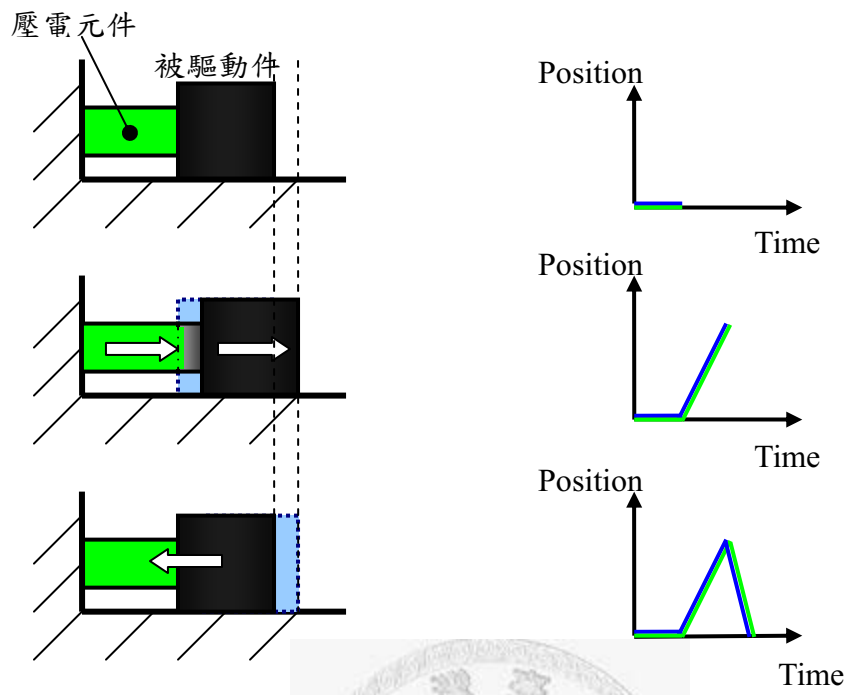


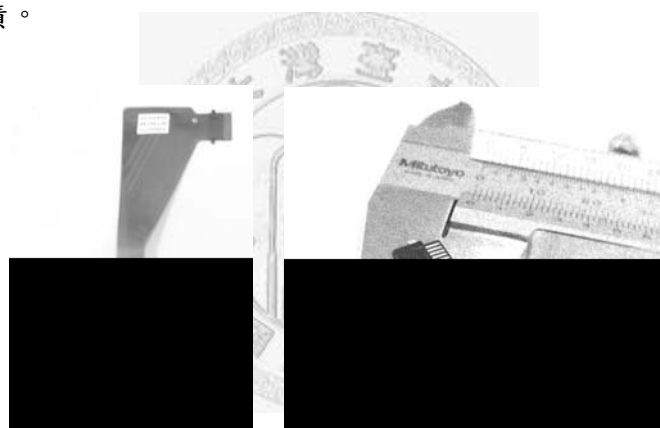
圖 2.2 連續式致動原理



2.1.3 位移量測子系統

位移量測器可分為接觸式以及非接觸式兩種，非接觸式量測原理對於被測系統負載及干擾最少，包含電容式、電磁式及光學式。其中光學式又包含了編碼式、干涉儀及像散式等方法。而編碼式需要有體積龐大的光學尺，干涉儀的光路系統也頗具規模，目前以像散式量測原理具有最小體積規模，DVD 讀取頭的光路設計即為像散式量測原理。其中又以干涉儀和像散式可以達到奈米量測等級。像散式量測光電組件以 DVD 讀取頭最為普遍，價格也很合理。新型 DVD 讀取頭更採用了全像術技術，元件體積更遠小於傳統 DVD 讀取頭。

圖 2.3 即為本研究採用的 SHARP 公司全像式讀取頭，可以大幅縮減位移量測子系統的體積。



a) 傳統讀取頭

b) 全像式讀取頭

圖 2.3 光學像散式量測光電組件

2.2 整體架構

總系統分為致動子系統、量測子系統、導引子系統及操作端的控制子系統(圖 2.4)。各個子系統以模組化設計為前提，並且每一軸有獨立的致動及檢測系統。X 和 Y 軸採用相同模組架構以簡化系統結構。利用三軸交錯的方式，來提升內部空間的使用效率。

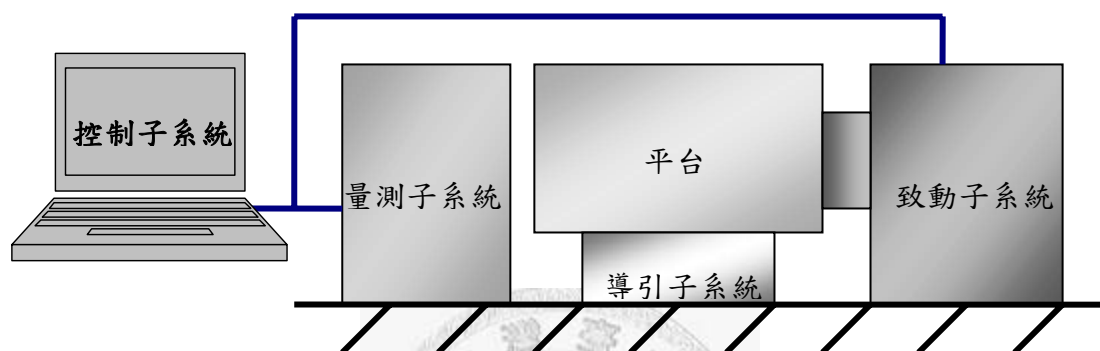


圖 2.4 總系統

單軸模組的主要結構由內框、外框及導引子系統所構成。導引子系統由撓性體構成，採用平行簧片導引的原理達成單軸向平行導引的目的，如圖 2.5 所示。此種導引方式具有無外摩擦、無餘隙、無背隙以及無需潤滑等特性，特別適用於精密定位系統。

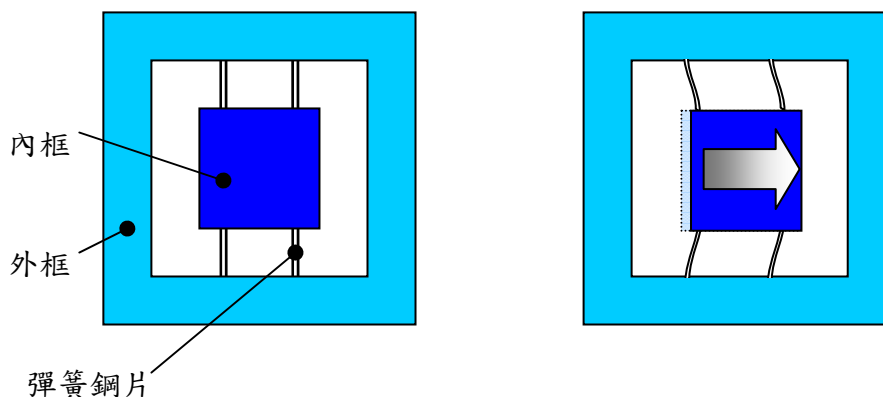


圖 2.5 平行簧片導引子系統

致動子系統以壓電元件配合行程放大機構，放大機構採用撓性結構包覆住壓電元件之外，如圖 2.6 所示當壓電元件伸長致動時，撓性結構兩側向內收縮，當壓電元件縮短時，撓性結構能因為本身彈性回復至原始形狀，其特性包含無摩擦、無餘隙、無背隙以及無需潤滑等。

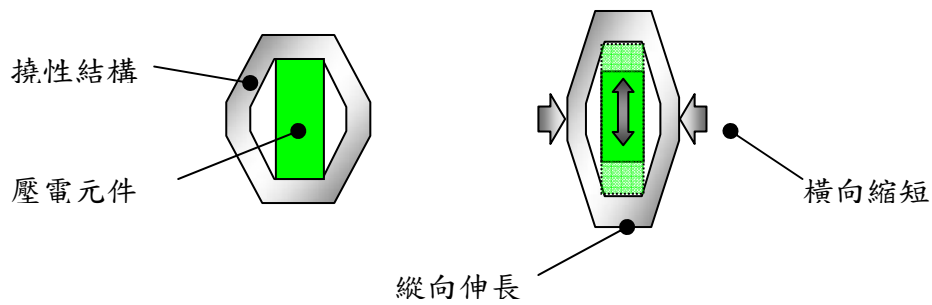


圖 2.6 致動子系統和撓性放大結構

量測子系統由全像式讀取頭配合上透鏡組組成，固定在一个套筒內。配合在待測物體上的反射鏡，能夠形成完整的測距光路(圖 2.7)。

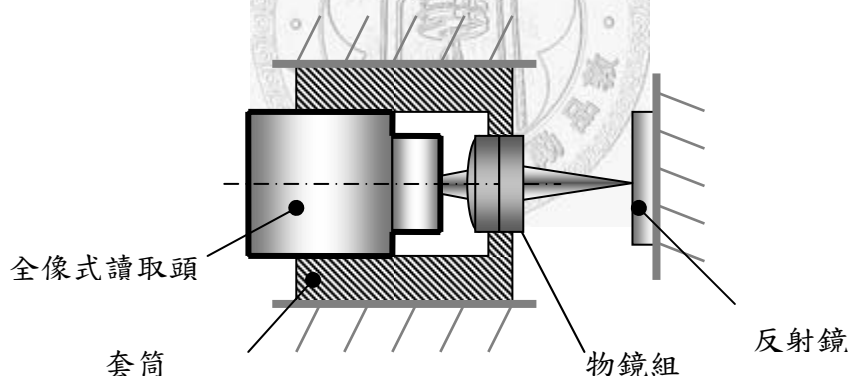


圖 2.7 量測子系統

將兩個單軸模組以不同的方向結合時，即構成 X、Y 方向定位平台。而 Z 軸定位平台則放置在其上下；Z 軸致動子系統由壓電元件直接推動，帶動一反射鏡做上下移動，在最底下的是支撐本體的底座，而量測子系統則安置在平台內部，則為一完整三軸閉迴路奈米級定位致動系統，如圖 2.8。

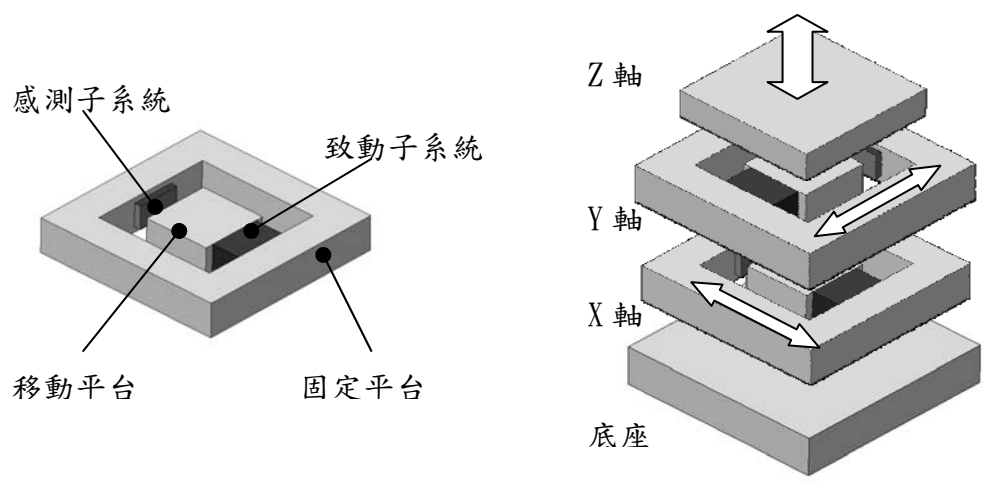


圖 2.8 三軸結構



第三章 壓電式致動子系統

3.1 壓電原理與材料特性

3.1.1 壓電效應

壓電效應是材料中機械能與電能之前的能量轉換現象，根據介電理論，在電場作用下的介電質中，不同電性的電荷會產生相對位移，使介電質內存在電極或雙極(dipole)，此種現象即為極化現象(polarization)。壓電材料除了可以由電場產生極化作用之位，也能有機械能產生極化現象。在材料表面上產生電荷之密度與機械能成正比，這種由機械能作用而產生的電荷極化現象即為壓電效應 (piezoelectric effect)[22]。

構成壓電材料的先決條件為材料結構具有不對稱性(centrosymmetry)，亦即是正電荷中心與負電荷中心不在一起，而具備極化性質(圖 3.1)。壓電材料具有位移小、響應快、出力大、能量轉換率高與無電磁干擾(EMI)等特性。壓電材料作用時，涉及機械能、電能與熱量三個能量場之間的交替轉換(圖 3.2)，利用三個能量場的轉換可以設計開發出各種致動器與感測器。

壓電材料主要分為五大類：單晶體、薄膜類、聚合物類、陶瓷類與複合材料，各有其特性，其中以壓電陶瓷材料最為推廣，具有穩定壓電效應、製造類型廣、質量輕及電偶合係數高等優點。1995 年美國國家標準局(National Bureau of Standards) Jetta. B 等人發表鉛鈦酸鉛($PbTiO_3 \sim PbZrO_3$ ，簡稱 PZT)系列的壓電陶瓷材料，已經陸續成為主要的壓電材料。

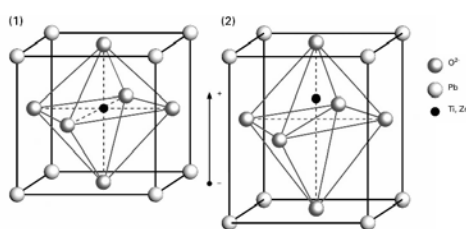


圖 3.1 壓電材料之極化性質

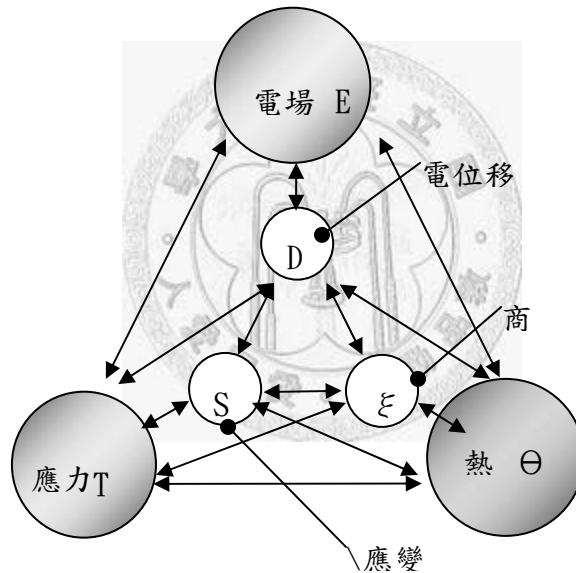
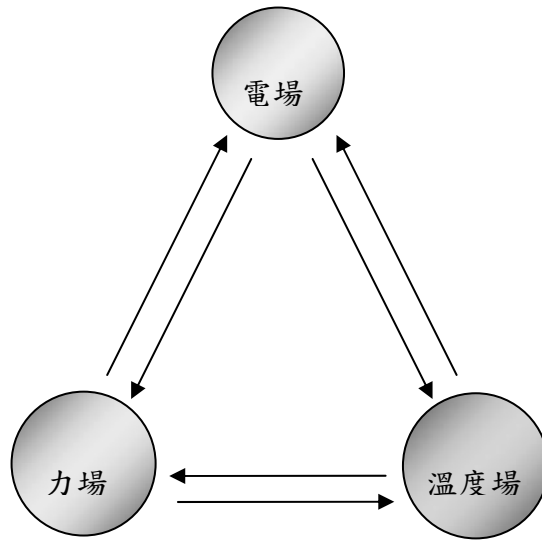


圖 3.2 壓電材料之能量轉換[22]

3.1.2 壓電材料之非線性特性

壓電材料作為線性致動器時將面臨到兩種主要的非線性現象：遲滯現象 (hysteresis)及潛變(creep)現象[23]。

遲滯現象是當壓電致動器受到供給電壓而伸長之後，當供給電壓消失時壓電致動器無法完全回復原始長度的情形，乃由於壓電材料中分子間相互作用力以及

晶格內極性所致，其浪費掉的能量則由分子間的內摩擦轉為熱能散失。遲滯現象的量隨著供給電壓的大小而改變，在供給電壓增大的情況下，遲滯現象也會隨著提高。由圖 3.3 可見在小訊號的供給電壓作動下，遲滯現象大約為 2%，隨著供給電壓的提高，甚至會使遲滯現象提升到 10%或是 15%。但是即使遲滯現象會使壓電致動器無法回到原長度，仍然能有優良的重複性。在開迴路控制中，遲滯現象造成的影響較大，會使定位失去精度；在閉迴路中，則可以藉由檢測系統來進行補償。

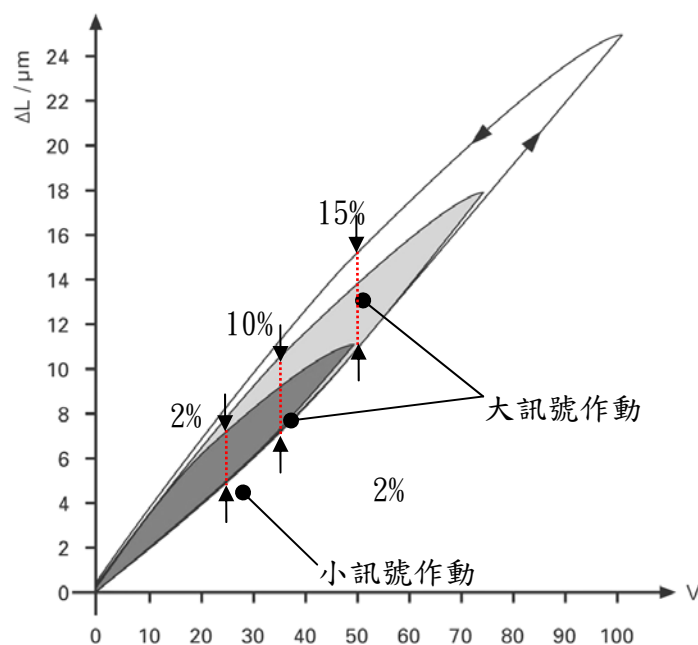


圖 3.3 磁滯現象[23]

潛變現象是壓電致動器在供給固定電壓之下，伸長量隨時間漸漸微小增加的情況（圖 3.4）。潛變率隨著時間成對數式增加，可以用下式表示為時間的函數：

$$\Delta L(t) \approx \Delta L_{(t=0.1)} \left[1 + \gamma \cdot \log\left(\frac{t}{0.1}\right) \right] \quad (3-1)$$

其中 t 為時間，

$\Delta L(t)$ 為在特定時間(t)時的壓電致動器伸長量，

$\Delta L_{t=0.1}$ 為在電壓完全改變完畢後 0.1 秒的壓電致動器伸長量，

γ 為潛變率，由壓電致動器的材料性質所影響。

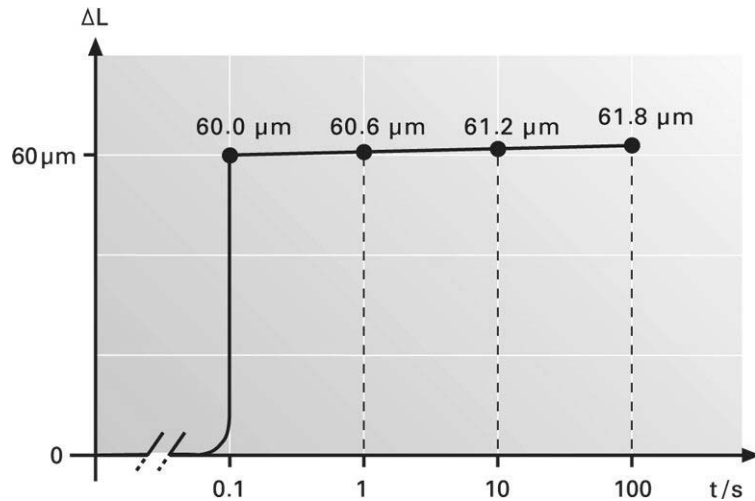


圖 3.4 潛變現象[23]

3.1.3 壓電材料的剛性

陶瓷性之壓電元件可以承受高至 250MPa 的壓力而不破壞，但是受壓力達最大可承受壓力的 20%~30%時，壓電元件將會失去極性，成為了壓電元件的受力極限。跟所有材料一樣，壓電元件也具有彈性，受外力將產生變形。在作為一個出力元件的時候，壓電元件的伸長量將會比自由伸長時來的小。在圖 3.5 中顯示了壓電元件受負荷與伸長量的關係，其中 L_0 為壓電元件原始長度， ΔL_{IN} 為壓電元件在受特定驅動電壓 V_{IN} 時的伸長量，A 為自由伸長的情況，B 為壓電材料出力壓縮一彈性為 K_s 的彈簧的情況，可以發現提升驅動電壓 U 時，壓電元件 A 與 B 將會有不同的伸長量，最終 B 的伸長量與 A 相差一 ΔL_R 。出力大小與伸長量成反比關係，在輸出力量最大的時候，壓電材料的伸長量將全部轉為彈力變形而掉為零（圖 3.6）。

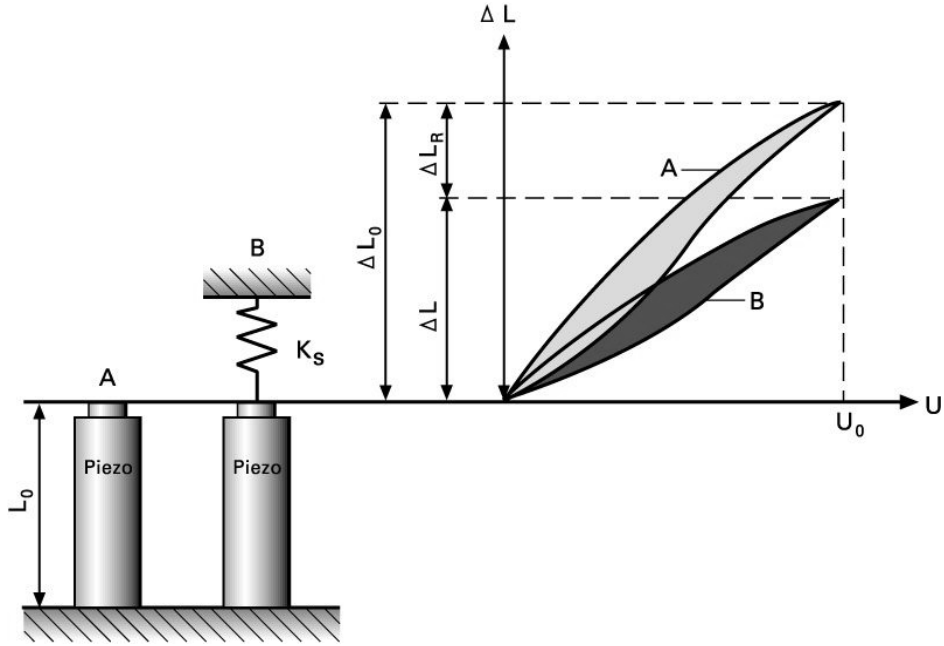


圖 3.5 壓電元件伸長與負荷關係[23]

定義壓電元件的力量輸出為 F ，剛性係數為 K_T ，無受力時之伸長量為 ΔL_0 ，則壓電元件的最大力量 $F = K_T \cdot \Delta L_0$ 輸出可為

$$F_{\max} = K_T \cdot \Delta L_0 \quad (3-2)$$

但是在一般使用的情況下，壓電元件將作為致動器來推動機構進行位移，在外接機構之剛性為 K_S 的情況下，壓電元件的有效最大力量輸出 F_{\max} 將變成為

$$F_{\max} = K_T \cdot \Delta L_0 \left(1 - \frac{K_T}{K_T + K_S} \right) \quad (3-3)$$

另一方面，壓電元件的伸長量 ΔL 將會有若干減少

$$\Delta L = \Delta L_0 \left(\frac{K_T}{K_T + K_S} \right) \quad (3-4)$$

因此， K_T 與 K_S 之大小差異將決定了壓電元件的出力與伸長量，在選擇壓電元件作為致動器時同時也要考慮到整體機構的剛性。

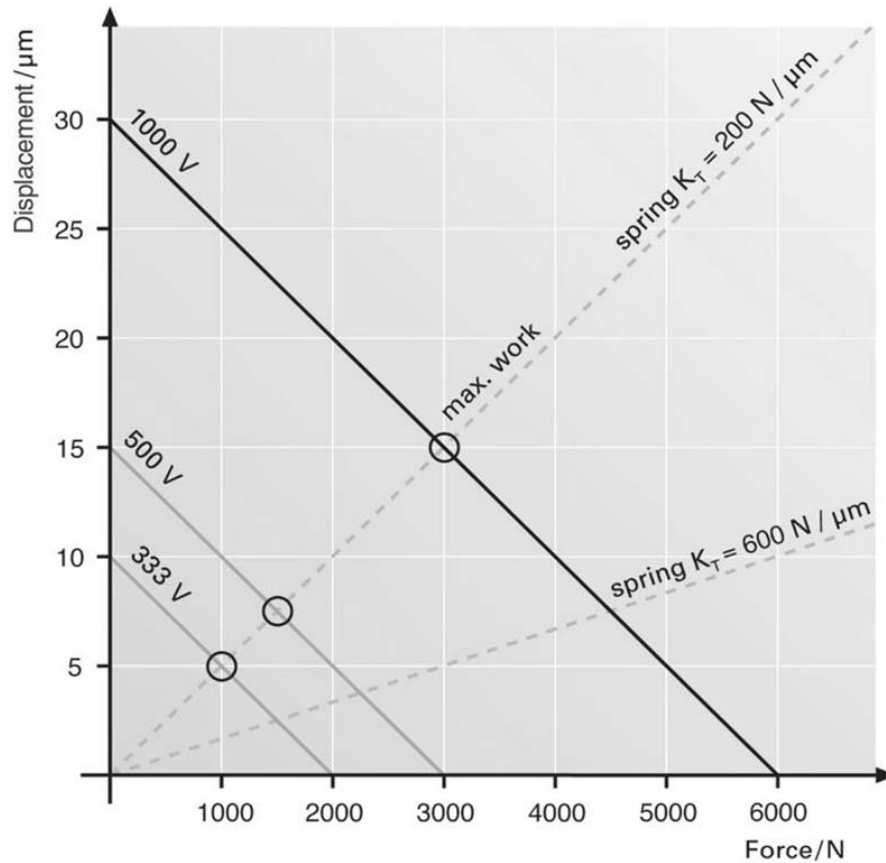


圖 3.6 壓電元件伸長量與出力關係[23]

3.1.4 壓電元件應變表現式

基本壓電效應公式中描述電場能量與應力應變之間關係公式，如公式(3-5)[24]。

$$S_p = S_{pq}^E T_q + d_{pj} E_j$$

$$D_i = d_{iq} T_q + \varepsilon_{ij}^T E_j$$

(3-5)

其中， S 為應變， D 為電位移，上標符號 E 與 T 分別代表定常電廠與定常應力，下標符號 p 和 $q=1、2、\dots、6$ ； i 和 $j=1、2、3$ 。其中 S_1 和 S_2 代表不同方向的橫

向應變， S_3 代表縱向應變， S_4 、 S_5 和 S_6 代表剪應變。在本篇論文中主要利用的 S_{33} 的縱向應變，下標符號第一個指標表示應變所作用或引致的面之法線方向，下標符號第二個指標代表應力或應變的作用或引致方向。在方程式(3-5)中， S_{pq}^E 為柔性常數， ε_{ij}^T 代表介電常數。 d_{ij} 是壓電應變常數(Piezoelectric Strain Constant)，在機電耦合或結合時，是一個相當重要的參考指標，其定義為壓電材料在外加電場下所產生的位移。下標符號第一個指標代表電場所施加之電極表面或電場方向，下標符號第二個指標代表壓電材料致動或變形方向。假設電荷位移 D 很小可以忽略的情況下，由基本壓電效應公式(3-5)可以推倒出應力、應變與電場的關係如 3-6。

$$\begin{aligned} S(E) &= d \left[\frac{k_d^2 - 1}{k_d^2} \right] E \\ T(S) &= -\frac{\varepsilon^T}{d} E \end{aligned} \quad (3-6)$$

其中耦合係數 $k_d^2 = \frac{d^2}{S^E \varepsilon^T}$ 、電場 $E = \frac{V_{IN}}{L}$ ， V_{IN} 為電壓， L 為兩電極的距離。由於壓電材料的對稱性，壓電材料只有六個獨立的壓電係數。介電係數為一方陣，僅有對角線上的常數不為零，若為六方晶系的壓電陶瓷，其介電常數對角方陣如 3-7 所式。

$$[\varepsilon^T]_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \quad (3-7)$$

柔性常數矩陣 $[S^E]$ 為一 6X6 階方陣，是機電耦合常數中一個主要參數。六方晶系的壓電陶瓷其柔性常數矩陣如下所示。

$$[S^T]_{6 \times 6} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{11} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{13} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \quad (3-8)$$

令壓電元件為積層式，外型為一方柱，如圖 3.7。其中 P 為極化方向， L 為沿著極化方向的長度， E 為電場在 3 的方向。

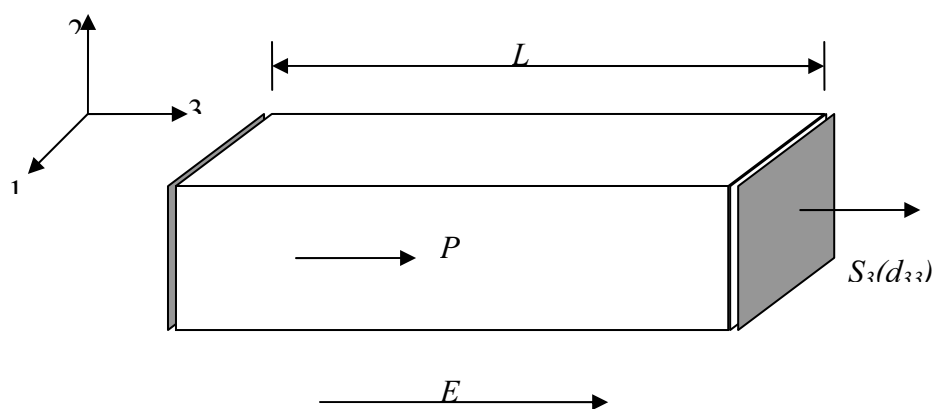


圖 3.7 積層式壓電元件

施加電場在 3 的方向，會使壓電元件在同方向產生拉伸變形。由下式可以求得變形率

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{11} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{13} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & d_{31} \\ 0 & 0 & d_{32} \\ 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & d_{15} & 0 \\ d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (3-9)$$

在不施加外加應力的情況下，又 1、2 方向無電場，即 $T=0$ 、 $E_1=0$ 、 $E_2=0$ 則原式可化簡為

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{31}E_3 \\ d_{32}E_3 \\ d_{33}E_3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3-10)$$

則在電場施加方向之變形率 $S_3=d_{33}E_3$ ，令 $S=\Delta L/L$ ， ΔL 為壓電變形量。可得下式

$$S_3 = d_{33}E_3 = \frac{\Delta L}{L} \quad (3-11)$$
$$\Delta L = d_{33}E_3L$$

在忽略磁滯現象的情況下，可以定義壓電伸長量與供給電壓成正比。但壓電材料內之電場有飽和極限，因此無法無限制的加大供給電壓，來使壓電材料無限變形，因此每個壓電致動器將有其伸長量的限制，因此若是要將壓電元件做為大行程的致動器時，需要配合機械結構來做位移放大。



3.2 位移放大壓電致動器之幾何構形設計

3.2.1 撓性位移放大結構

直接使用單一壓電元件的情況下，將面臨變型位移不足的問題，所以在此採用了機械結構來增加位移量。本論文中將以三種不同幾何形狀之構型，包含一體式菱形結構、圓形及橢圓形，來比較各種撓性結構間之特點。

3.2.2 菱形位移放大結構

在一體式菱形結構四連桿框架中，壓電元件驅動撓性結構的最長邊，則短邊會有縮短的變形位移產生，如圖 3.8A 所示。經過適當的幾何形狀的設計可以將 AC 方向的變形位移量，在 BD 方向產生放大的變形位移。

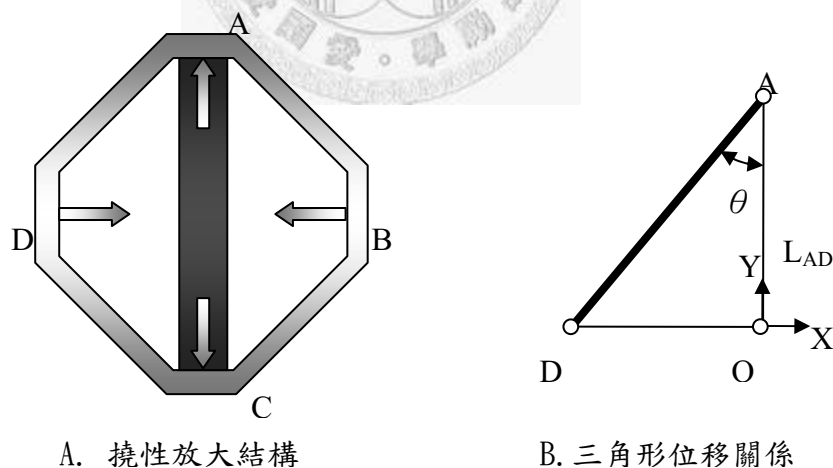


圖 3.8 菱形位移放大結構

由於撓性結構具有對稱結構，所以將框架簡化成三角形。在三角形 AOD 中，壓電元件施力在 A 點上使之移動，O 點為菱形兩對角線之交點，D 點為位移輸出端，AD 與 AO 之間夾角為 θ ，AO 為 1/2 壓電元件長 L_{AD} (圖 3.8B)。

則 AD 長 L_{AD} 可由三角函數得

$$L_{AD} = \frac{L_{OA}}{\cos \theta} \quad (3-12)$$

當壓電元件伸長 ΔL_{OA} 時，將使 A 點朝 +Y 方向移動，即 AO 長變為 L'_{OA} ，

$$L'_{OA} = L_{OA} + \Delta L_{OA} \quad (3-13)$$

由於封密結構之影響，D 點的位移會沿著 OD 方向，OD 長度必縮減為 L'_{OD} ，可得，

$$L'_{OD} = \sqrt{L_{AD}^2 - L'_{OA}{}^2} = \sqrt{\left(\frac{L_{OA}}{\cos \theta}\right)^2 - (L_{OA} + \Delta L_{OA})^2} \quad (3-14)$$

又 OD 之原始長度 L_{OD} 可以三角函數表示為 $L_{OD} = L_{OA} \cdot \tan \theta$ ，則 D 點的位移距離為 ΔL_{OD}

$$\Delta L_{OD} = L_{OD} - L'_{OD} = L_{OA} \cdot \tan \theta - \sqrt{\left(\frac{L_{OA}}{\cos \theta}\right)^2 - (L_{OA} + \Delta L_{OA})^2} \quad (3-15)$$

BD 的總位移量則為

$$2\Delta L_{OD} = 2 \cdot (L_{OD} - L'_{OD}) = 2 \cdot \left(L_{OA} \cdot \tan \theta - \sqrt{\left(\frac{L_{OA}}{\cos \theta}\right)^2 - (L_{OA} + \Delta L_{OA})^2} \right) \quad (3-16)$$

BD 的總位移量受到夾角 θ 、壓電元件之長度 L_{OA} 和致動位移量 ΔL_{OA} 之影響。

以壓電元件原長 $L_{OA}=5\text{mm}$ 及伸長量 $\Delta L_{OA}=5\mu\text{m}$ 代入式，在不同的角度 θ 之下可得 D 點的位移量如圖 3.10。

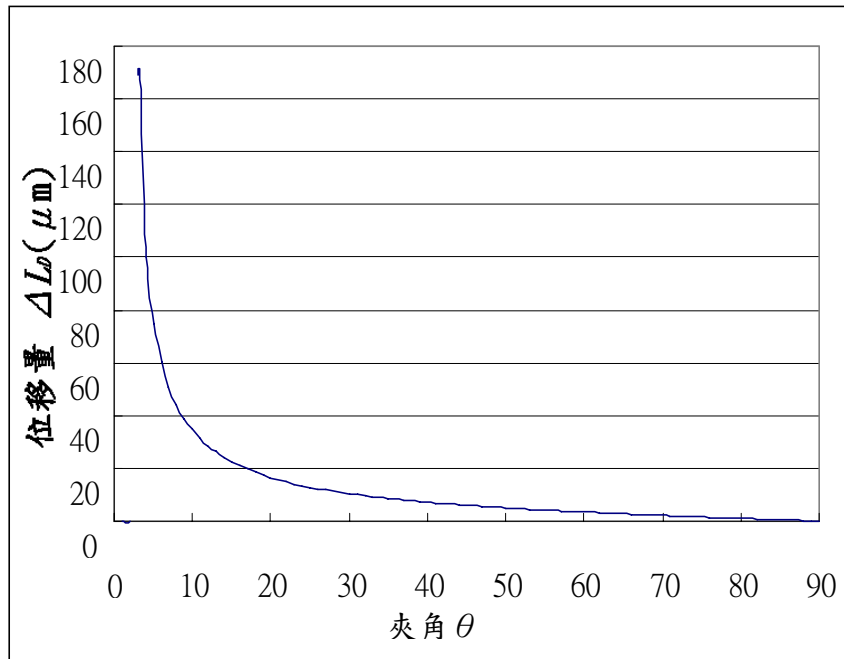


圖 3.9 位移輸出與幾何外型關係

由圖 3.10 中可以得知，在夾角大於特定值(4°)之情況下，夾角越小，能有越小的位移量；並且當夾角為 45° 時，輸出之位移量恰相等於輸入之位移，夾角小於 45° ，則輸出之位移量較原始輸入位移小。因此，作為一合適之位移放大機構，在幾何形狀上之設計選用較小夾角為佳。

在不同的菱形框架角度 θ 情形下，對兩端點 A 和 C 之施力會產生不同的 B 和 D 之力量輸出。壓電致動器之出力為 F_{OA} ， F_{DA} 和 F_{DO} 則分別為不同方向上的分力，<三者關係如圖 3.11 所示，

$$F_{DO} = F_{DA} \sin \theta = (F_{OA} \cos \theta) \sin \theta \quad (3-17)$$

根據對稱關係可得菱形框架端點 D 之總推力輸出則為，

$$F_D = 2 \cdot F_{DO} = 2 \cdot (F_{OA} \cos \theta) \sin \theta \quad (3-18)$$

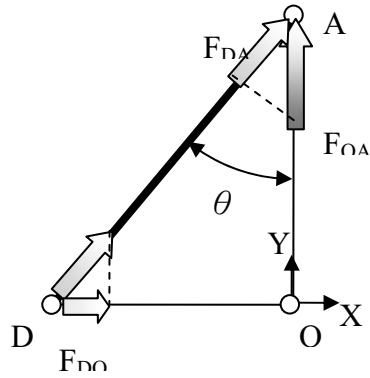


圖 3.10 菱形框架上之作用力平衡圖

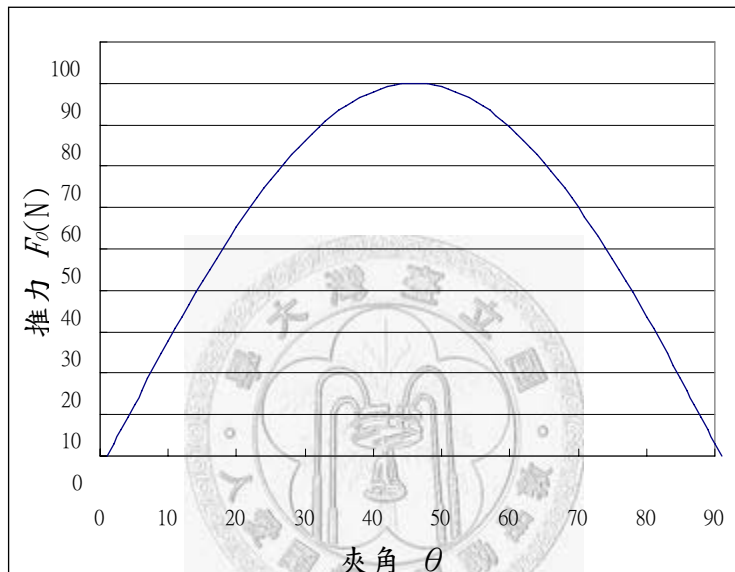


圖 3.11 力量輸出與幾何外形關係

以推力 $F_{0A}=180\text{N}$ 代入式，可以求得 D 點總力量輸出 F_D 與幾何外形之關係。由圖 3.12 中可以得知，在夾角為 45° 時，有最大推力 $F_{\theta}=90\text{N}$ ，而夾角越接近 0° 與 90° 時，推力呈現遞減之趨勢。總和圖 3.11 與 3.12，可以發現最大位移量與最大推力無法共存，因此將最佳之夾角定義在位移量與推力之平衡點，約為 4° 。

圖 3.13 中是以壓電元件原長 5mm 及壓電致動器總伸長量 $10\mu\text{m}$ ，撓性結構夾角 $\theta=4^\circ$ 。

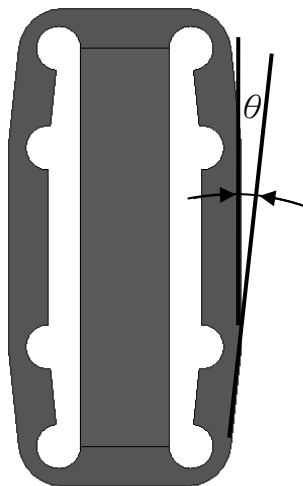


圖 3.12 菱形位移放大結構之外型

圖 3.13 為在壓電伸長量 $10\ \mu\text{m}$ 的情況下，使用 CAE 軟體進行對菱形位移放大結構在受壓電元件推動時，位移與應力分佈之關係，其中菱形位移放大結構之以固定端定義位移為零，致動端令其自由變形，以 +X 軸向之變形量定義為位移輸出。由 3.13(a) 之變形位移分佈圖，可以得知最大位移量為 $18\ \mu\text{m}$ ，有效地將壓電元件的伸長量放大了 1.8 倍。在圖 3.13(b) 中，在黑色範圍應力超出材料降伏強度，即在鉸鏈處即使以圓形幾何外型之設計，也無法避免之應力存在，而產生永久變形的危機。

菱形位移放大結構，雖能達成位移輸出放大的功能，但是在給定之壓電伸長量 $10\ \mu\text{m}$ 之情況下，沒有辦法將行程放大至 $50\ \mu\text{m}$ ，無法完成預定之設計目標，並且存在無法避免之應力集中，有使用上之限制。

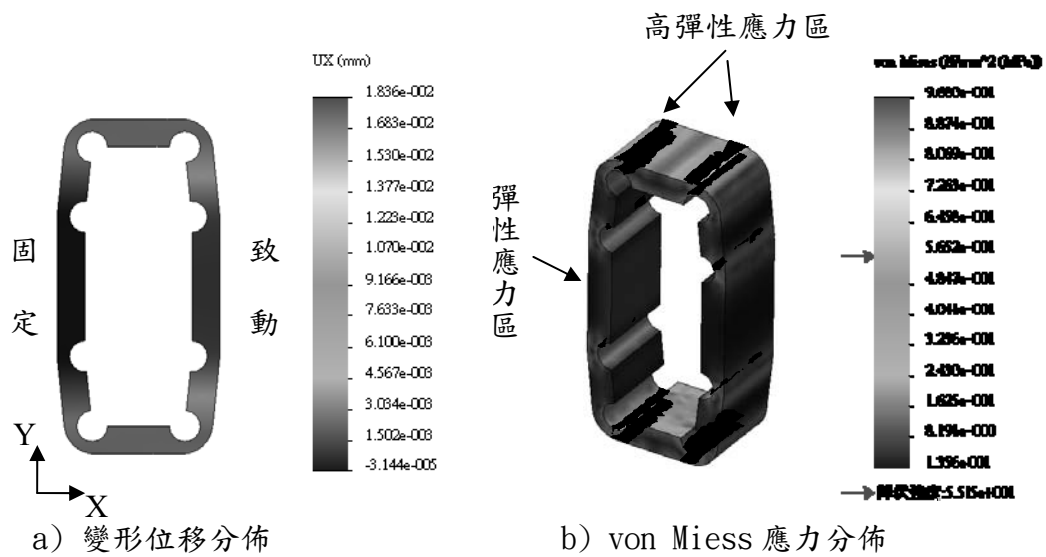


圖 3.13 位移放大結構之模擬分析成果



3.2.3 圓形彈簧鋼片之位移放大機構

為了避免位移放大機構之應力集中現象，改採用彈簧鋼片作為位移放大機構，製成圓形外形。當圓形彈簧鋼片的上下兩端受力時，鋼片則產生彈性變形，致使圓形簧片左右兩端產生變型位移。圓形彈簧鋼片相較於一體菱形結構省去了切削加工步驟，一方面可以減少加工殘留應力，遠離疲勞破壞的問題。另一方面因為彈簧鋼片表面平整且厚度一致，所以可以將應力平均分佈傳導到簧片上，如圖 3.14(a)。

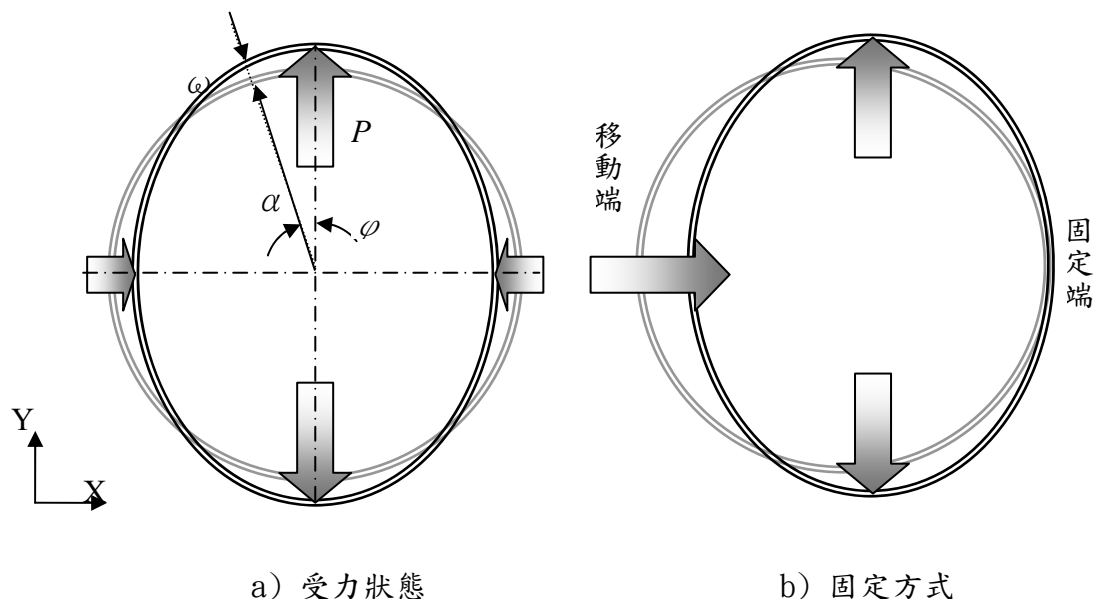


圖 3.14 圓形彈簧鋼片之位移放大結構

圓形彈簧鋼片是一個圓柱薄殼，Y 軸受壓電推力 F，而 X 軸變形位移為輸出位移 ΔL_x 。圖 3.16 展示，薄殼圓柱體之部分的彎曲梁，當彎曲力矩作用時，彎曲梁上的一點 C 移動至 C' 點，的法線方向的位移為 ω ，切線方向的位移為 ν 。C 點的法線，依位移 ω 而有 $\left(\frac{d\omega}{ds}\right)$ 迴轉，依位移 ν 而有 $\left(\frac{\nu}{R}\right)$ 的迴轉，故 C 點的法線有

$\left(\frac{\nu}{R} + \frac{d\omega}{ds}\right)$ 的迴轉，由 C 點至距離 ds 的 D 點，其法線有 $\left(\frac{\nu}{R} + \frac{d\omega}{ds}\right) + \frac{d}{ds}\left(\frac{\nu}{R} + \frac{d\omega}{ds}\right)ds$

迴轉，所以 C 及 D 點的法線角 $d\varphi$ 變化為 $(d\varphi + \Delta d\varphi)$ ，而為

$$\Delta d\varphi = \frac{d}{ds}\left(\frac{\nu}{R} + \frac{d\omega}{ds}\right)ds = \frac{1}{R^2}\left(\frac{d\nu}{d\varphi} + \frac{d^2\omega}{d\varphi^2}\right)ds \quad (3-19)$$

曲率變化 χ 則為

$$\chi = \frac{1}{R'} - \frac{1}{R} = \frac{\Delta d\varphi}{ds} = \frac{1}{R^2}\left(\frac{d\nu}{d\varphi} + \frac{d^2\omega}{d\varphi^2}\right) \quad (3-20)$$

切線方向的應變為 ε_φ 則為

$$\varepsilon_\phi = \frac{1}{ds} \left\{ \left(v + \frac{dv}{ds} ds \right) - v \right\} - \frac{\omega}{R} = \frac{1}{R} \left(\frac{dv}{d\phi} - \omega \right) \quad (3-21)$$

假設簧片總長不便，所以 $\varepsilon_\phi = 0$ 時，則可以推得為 $\frac{dv}{d\phi} = \omega$

將其式代入式(3-20)，同時 $x = -\frac{M}{E_c I}$ 時，則得撓度微分方程式

$$\frac{d^2 \omega}{d\phi^2} + \omega = -\frac{MR^2}{EI} \quad (3-22)$$

定義圓周上任一點與圓心連線與正 Y 軸之夾角為 ϕ ，應變能則可以由下式表示

$$U = \frac{1}{2EI} \int_0^{\phi_0} M^2 R d\phi = \frac{EI}{2} \int_0^{\phi_0} \frac{1}{R^3} \left(\frac{d^2 \omega}{d\phi^2} + \omega \right)^2 d\phi \quad (3-23)$$

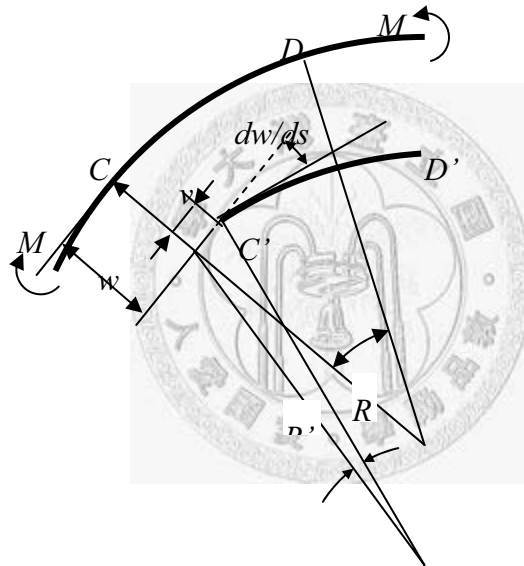


圖 3.15 圓柱薄殼變形情況

當一個圓環受到如圖 3.14(a)所示之一對集中負荷 P 作用時，圓輪則變成橢圓形，假設法線方向的變形位移為 ω ，並且令

$$\omega = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos 2n\phi \quad (3-24)$$

圓環的應變能為

$$\begin{aligned}
U &= \frac{EI}{2a^3} \int_0^{2\pi} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} (4n^2 - 1) \cos 2n\varphi \right\}^2 d\varphi \\
&= \frac{\pi EI}{2a^3} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} (4n^2 - 1)^2 a_n^2 \right\}
\end{aligned} \tag{3-25}$$

外力所作的功為 $W = 2F \sum_{n=1}^{\infty} a_n$ ，由能量守衡， $\frac{\partial(U-W)}{\partial a_n} = 0$

$$\text{則 } a_n = \frac{2a^3}{\pi EI(4n^2 - 1)^2} F \tag{3-26}$$

因此將上式代入式 3-24，則可得圓環上任何位置上法線方向的變形位移

$$\omega = \frac{2a^3 F}{\pi EI} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(4n^2 - 1)^2} \cos 2n\varphi \tag{3-27}$$

將上式代入式 3-25 則可求得彎曲力矩，荷重點 $\varphi=0$ 的變形位移為

$$\begin{aligned}
\omega_{\varphi=0} &= \frac{2a^3 F}{\pi EI} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(4n^2 - 1)^2} = \frac{a^3 F}{EI} \left(\frac{\pi}{8} - \frac{1}{\pi} \right) \\
&= 0.074 \frac{a^3 F}{EI}
\end{aligned} \tag{3-28}$$

垂直於負荷方向的輸出總變形位移為

$$\begin{aligned}
\omega_{\varphi=90} = \omega_{\varphi=270} &= \frac{2a^3 F}{\pi EI} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(4n^2 - 1)^2} = -\frac{a^3 F}{EI} \left(\frac{1}{\pi} - \frac{1}{4} \right) \\
&= 0.068 \frac{a^3 F}{EI}
\end{aligned} \tag{3-29}$$

輸出變形位移與作用力 F 之間關係可用以簡化成下列關係。

$$\omega = c \cdot F \tag{3-30}$$

其中 c 則為放大機構之常數，而壓電出力和輸入電壓也有近似正比關係，則輸入電壓 V_{in} 與輸出變形位移之間關係為

$$\omega = c \cdot F = c \cdot c_k \cdot V_{in} \tag{3-31}$$

其中 $F = c_k \cdot V_{in}$ ， c_k 為單位輸入電壓下所產生之壓電出力。

除了理論分析推導外，在此應用 CAE 分析軟體推導 0.2mm 厚的不鏽鋼圓形薄殼之負荷和變形關係以進行比較驗證分析，定義位移量為移動端之總變形位移。

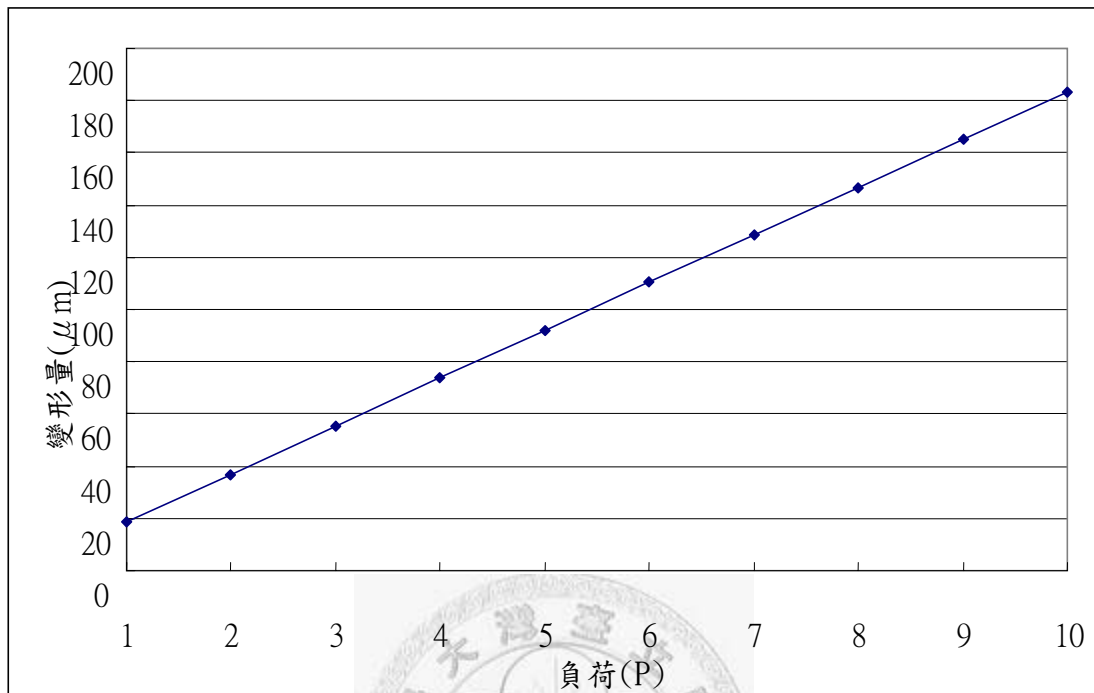


圖 3.16 圓形薄殼受受力與變形應力關係

圖 3.16 中 CAE 模擬分析所得變形與受力成線性關係，與理論公式有相同的結果。因此可以確定圓形薄殼，可藉由線性控制方式來轉化作用力成為輸出變形位移。但根據式(3.28)及(3.29)中之受力點位移 $\omega_{\varphi=0}$ 作為輸入位移，總位移 $\omega_{\varphi=90,270}$ 作為輸出位移時，位移放大率 c 約為 1，並無位移放大的功能，仍無法滿足設計目標。

3.2.4 橢圓形彈簧鋼片之位移放大機構

圓形薄殼可以減少應力集中的情形，也有良好的線性轉換功能，但是其位移放大率 $c = 0.074/0.068 = 1.09$ 倍；在有限的壓電致動位移 $15 \mu\text{m}$ 情形下，只能產生 $16.35 \mu\text{m}$ 的輸出位移。為了提升輸出位移量，採用橢圓形彈簧鋼片作為位移放大機構，利用橢圓長短軸之差異來創造更大的位移放大功能。

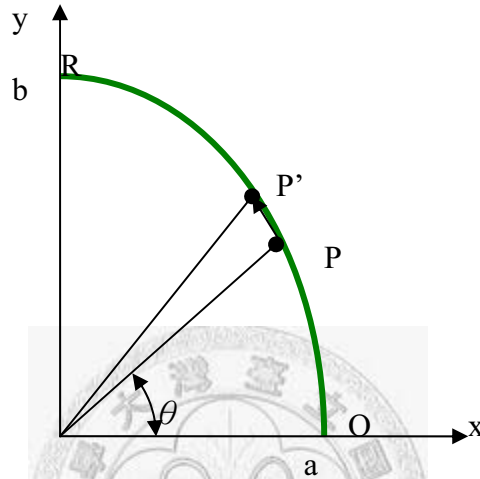


圖 3.17 橢圓形薄殼的外形與參數定義

橢圓形薄殼的短軸為 $2a$ ，長軸為 $2b$ ，橢圓形狀方程式

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (3-32)$$

橢圓上任一點 P 座標

$$p(x, y) = (a \cos \theta, b \sin \theta) \quad (3-33)$$

其中 θ 為點 P 與橢圓中心向量和 x 軸之夾角，點 P 與中心相距

$$\sqrt{(a \cos \theta)^2 + (b \sin \theta)^2} ,$$

$\overline{PP'}$ 弧長 $L_{PP'}$ 為

$$L_{PP'} = \sqrt{(a \cos \theta)^2 + (b \sin \theta)^2} \cdot d\theta \quad (3-34)$$

QA 弧長 L_{QA}

$$L_{QA} = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{(a \cos \theta)^2 + (b \sin \theta)^2} \cdot d\theta \quad (3-35)$$

所以橢圓之周長 L_E 可以表示為

$$L_E = 4 \int_0^{\pi/2} \sqrt{(a \cos \theta)^2 + (b \sin \theta)^2} \cdot d\theta$$

$$\cong 2\pi \sqrt{\frac{a^2 + b^2}{2}} \quad (3-36)$$

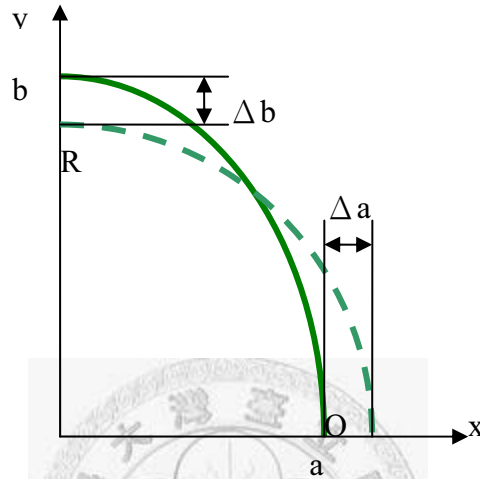


圖 3.18 橢圓形薄殼變形示意圖

圖 3.18 為橢圓形薄殼變形示意圖，當 Q 點向 X 軸正方向移動 Δa 的長度， R 點則向 y 軸負方向移動 Δb 。位移後的橢圓周長 L_E' ，必須和未位移前的橢圓周長 C

相同，

$$L_E' = 2\pi \sqrt{\frac{(a + \Delta a)^2 + (b - \Delta b)^2}{2}} = 2\pi \sqrt{\frac{a^2 + b^2}{2}} \quad (3-37)$$

即可得等式

$$a^2 + b^2 = (a + \Delta a)^2 + (b - \Delta b)^2 \quad (3-38)$$

化簡可得位移 Δb

$$\Delta b = b - \sqrt{b^2 - 2a\Delta a - \Delta a^2} \quad (3-39)$$

則輸出位移與輸入位移之放大率 C 為

$$C = \frac{\Delta b}{\Delta a} = \frac{b - \sqrt{b^2 - 2a\Delta a - \Delta a^2}}{\Delta a} \quad (3-40)$$

定義輸入位移為 $\Delta L_{in} = \Delta a$ 與輸出位移 $\Delta L_{out} = \Delta b$ 之 以無因次運算方式推導放大倍率關係，以 $a = 5x$ 、 $b = x$ 及 $\Delta a = 0.01 \sim 0.1x$ 代入(3-40)式，得圖 3.19 之輸出位移 ΔL_{out} 對輸入位移 ΔL_{in} 的關係，圖顯示在輸入位移極小時，輸出位移與輸入位移成線性關係，而當輸入位移接近 0.1 時輸出位移將會劇增。位移放大率可達 5 倍以上，高於圓型薄殼機構放大倍率。

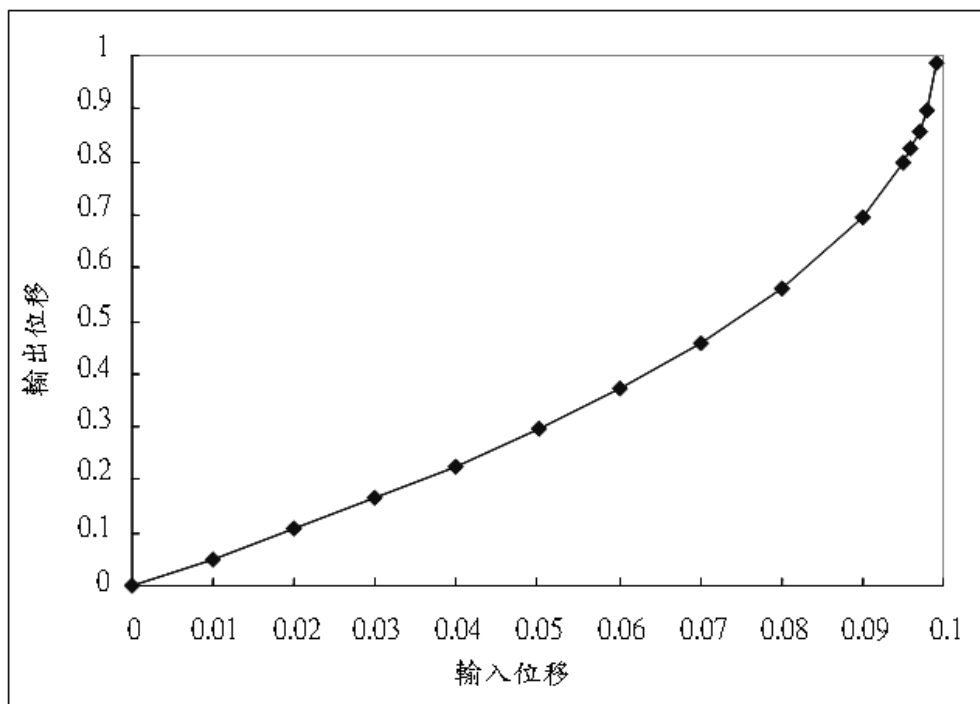


圖 3.19 輸出位移與輸入位移的關係

配合壓電材料推動長軸上之兩端點，可以改變長短軸之長度關係來決定短軸輸出位移之放大倍率；在有限的壓電元件單邊位移量 $5 \mu\text{m}$ 的情況下，必須讓短軸端點的位移量達 $50 \mu\text{m}$ 以上，在考慮到機構元件間的摩擦與材料的不穩定等因素下，將設計安全係數設在 1.5~2 之間，定義輸出位移的目標為 $75 \sim 100 \mu\text{m}$ ，位移放大倍率必須為 7.5~10 倍。以 CAE 方式求取在橢圓形構型下的輸出位移對與長短軸之長度關係，橢圓長軸 b 設定在 25~50mm 之間，短軸 a 設定在 6~10mm。

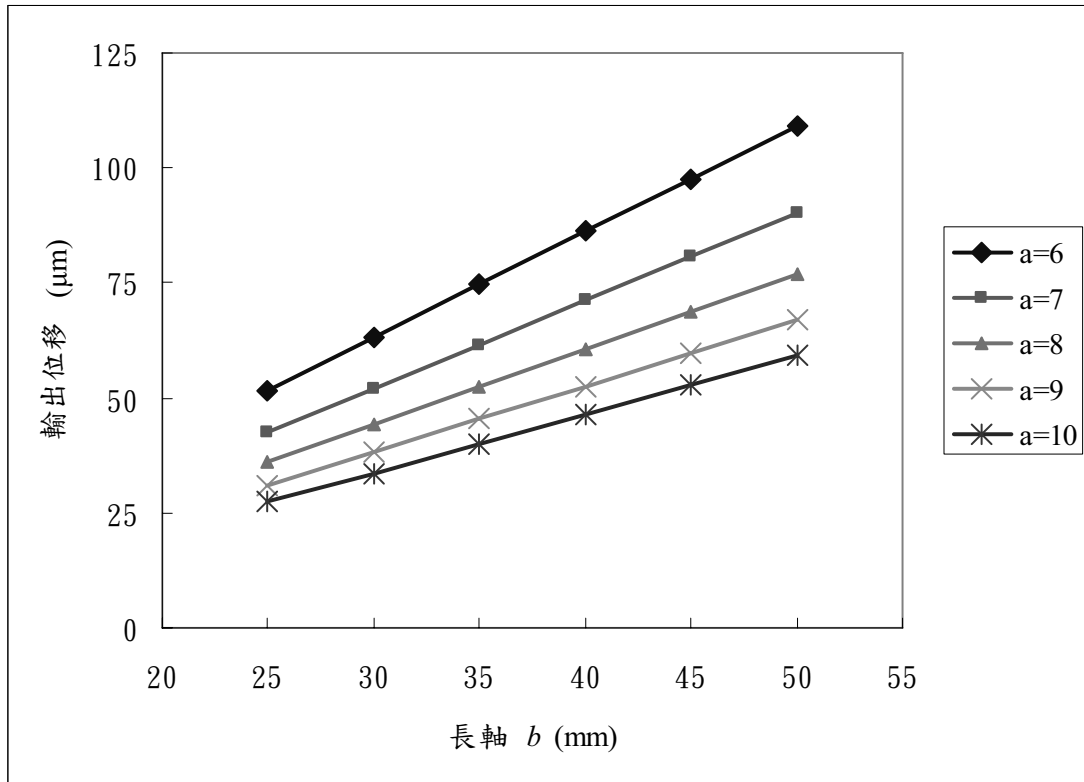


圖 3.20 變數 a、b 與變形量關係

由圖 3.20 的分析成果可以發現，當長軸 b 增加時可以提升輸出位移量，同時當短軸 a=6mm，輸出變形量可達 80 μm，而當短軸 a=7mm，輸出變形量則也超過 60 μm，但是輸出變形量會隨著短軸的增加而降低。當短軸 a 增加時橢圓的曲率變化越平緩，內部應力集中情況越小；當長軸 b 增加時，整個位移放大機構的體積會增加。在顧及緊緻體積、放大倍率需求以及應力分布等條件下，取 2a=7mm 以及 2b=35 為符合設計目標之幾何形狀，如圖 3.21 所示。圖 3.22 為此結構進行模擬所得之輸入位移 ΔL_{in} 與輸出位移 ΔL_{out} 之關係圖，其中定義輸入位移 ΔL_{in} 為單邊長軸上之位移變化量，輸出位移 ΔL_{out} 為自由端之位移，當輸入位移 ΔL_{in} 為 5 μm 時，可以創造出輸出位移達 82 μm。將輸入位移 $\Delta L_{in}=5 \mu\text{m}$ 換算為壓電元件之伸長量為 10 μm，則位移放大率為 8.2 倍。

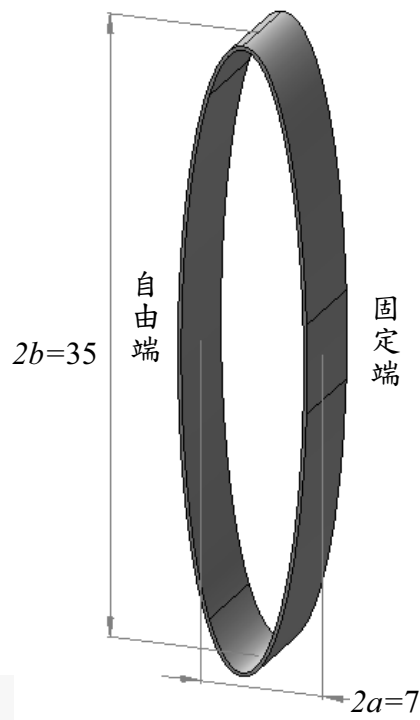


圖 3.21 橢圓形位移放大結構之幾何尺寸

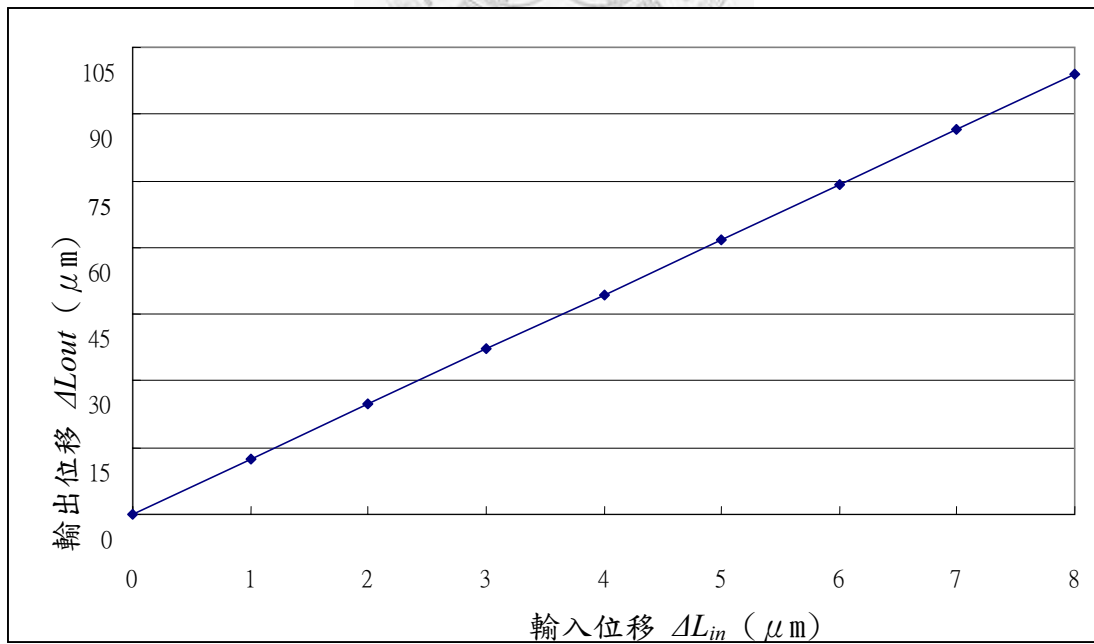


圖 3.22 輸入位於與輸出位移關係

圖 3.23 顯示位移放大機構形變時所受之 von Miess 應力，可以發現整體的應力分佈平均而且沒有應力集中的現象，僅有若干及小範圍些微超越降伏強度。

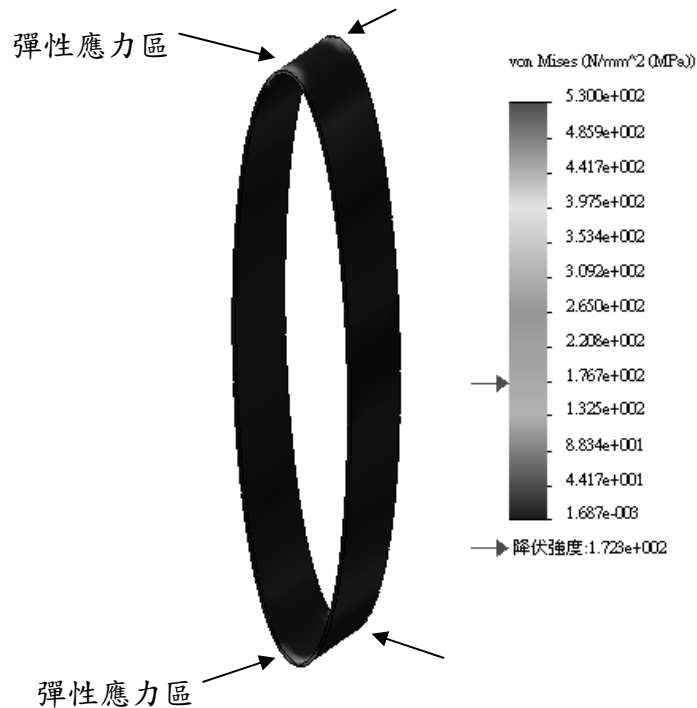


圖 3.23 放大機構所受應力與安全性係數分布

根據前述之菱形、圓形及橢圓形位移放大機構，可以歸納出表 3.1。在考量位移放大率與應力集中下，橢圓形之位移放大機構是能夠滿足設計目標的選擇，因此本論文將選用此機構作為位移致動子系統之幾何構型。

表 3.1 撓性位移放大機構之幾何關係

幾何形狀	菱形	圓形	橢圓形
位移放大率	1.8 倍	1 倍	8 倍
應力集中情形	局部塑性變形	彈性變形	彈性變形

3.2.5 橢圓形位移放大機構之壓電致動器

圖 3.24 為以 CAE 模擬而得橢圓位移性放大機構的變形量和負荷之關係，可求得機構剛性係數 K_s 為 $1.0567\text{N}/\mu\text{m}$ ，而壓電元件之剛性係數 K_s 為 $120\text{N}/\mu\text{m}$ ，代入式(3-4)中，可以求得壓電元件之實際致動變形量

$$\Delta L = \Delta L_0 \left(\frac{K_T}{K_T + K_S} \right) = \Delta L_0 \left(\frac{120}{120 + 1.0567} \right) = \Delta L_0 \cdot 99.13\% \quad (3-41)$$

實際致動變形量是自由變形量 ΔL_0 的 99.13%。

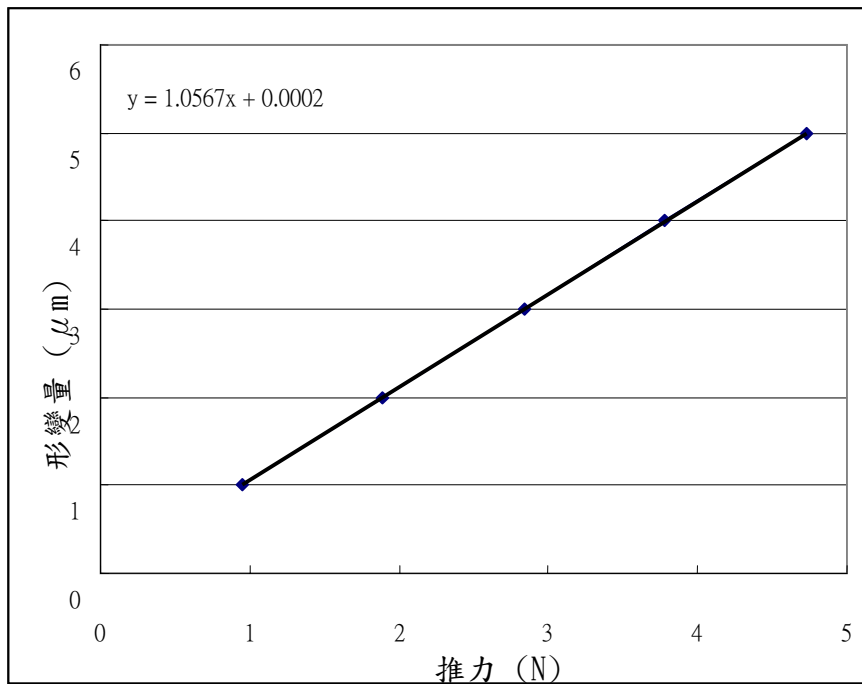


圖 3.24 橢圓薄殼元件應力應變關係

所需要壓電致動變形量為 $5\mu\text{m}$ 之情況下，壓電元件之自由變形量 ΔL_0 則為

$$\Delta L_0 = \frac{\Delta L}{99.13\%} = \frac{5}{0.9913} = 5.043\mu\text{m} \quad (3-42)$$

考慮到雙向，則總伸長量必須為 $10.086\mu\text{m}$ 。而壓電元件 PSt 150/5x5/7 可以提供自由伸長量為 $15\mu\text{m}$ ，滿足致動位移需求。

3.2.6 位移放大壓電致動器位移對電壓關係

在壓電極板間具與壓電元件總長相等之情況下，由式 3-11 積層式壓電元件在電場施加方向之變形量為 $\Delta L_0 = d_{33} E_3 L = d_{33} \cdot \frac{V_{IN}}{h} L = d_{33} \cdot V_{IN}$ ，則壓電致動位移

$$\text{量 } \Delta L \text{ 為 } \Delta L = \Delta L_0 \left(\frac{K_T}{K_T + K_S} \right) = \frac{d_{33} K_T}{K_T + K_S} V_{IN} \quad (3-45)$$

橢圓薄殼位移放大機構之放大率為 $C = \frac{\Delta L_{out}}{\Delta L_{in}}$ ，將 ΔL_{in} 以 ΔL 代入就能得到在考慮機構剛性的情況下，壓電元件作為一致動器之輸入電壓 V_{IN} 與輸出位移 ΔL_{out} 的關係

$$\Delta L_{out} = \Delta L \cdot C = \frac{C d_{33} K_T}{K_T + K_S} V_{IN} \quad (3-46)$$

分別將壓電元件剛性 K_T 、橢圓薄殼位移放大機構之剛性 K_S 、放大率 C 以及 d_{33} 的數值代入上式，則 $\Delta L_{out} = 0.818 \cdot V_{IN}$ 。圖 3.25 呈現致動性能之線性關係，在輸入電壓 V_{in} 範圍為 $0V \sim 150V$ 的情況下，壓電致動器位移輸出範圍為 $0 \mu m \sim 122.7 \mu m$ ，斜率為 $0.818 \frac{\mu m}{V}$ 。

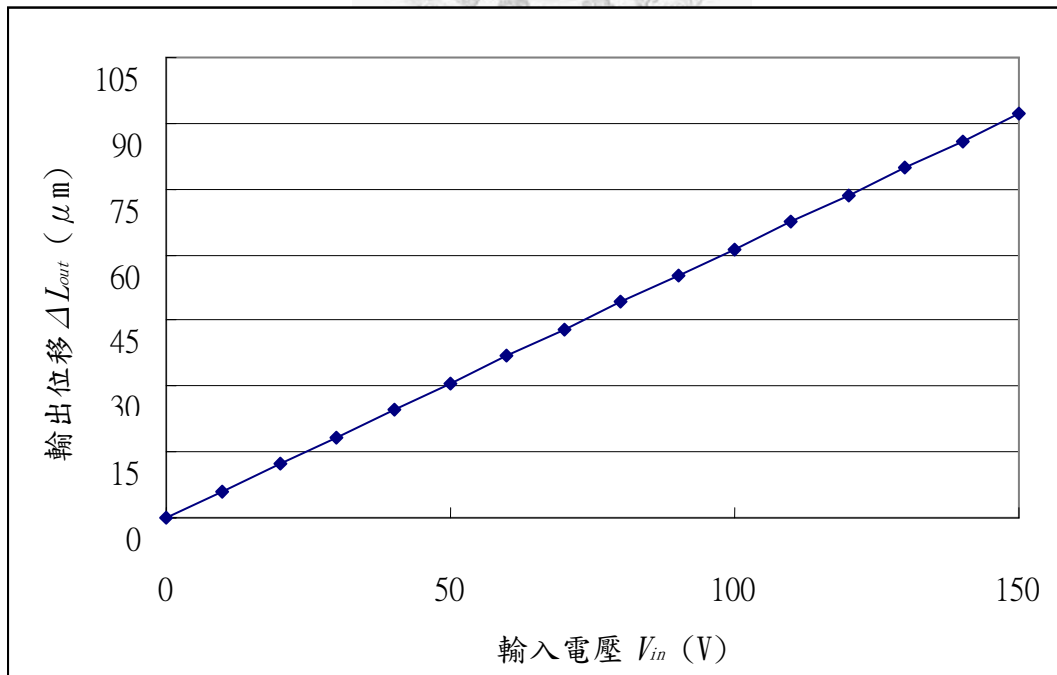


圖 3.25 壓電致動器輸入電壓與輸出位移關係

第四章 光學式量測子系統

4.1 光學讀取頭聚焦量測之原理

4.1.1 光學讀取頭原理及光學元件功能介紹

在光學量測領域中，DVD 讀取頭之光學量測光路是最普及且高精度的一項設計，通用之 DVD 讀取頭為的量測範圍為 $6\mu\text{m}$ ，精度可達 1nm 。其光路架構如圖 4.1 所示，包含雷射二極體、準直透鏡、分光鏡、聚焦物鏡、圓柱透鏡，以及光電二極體。

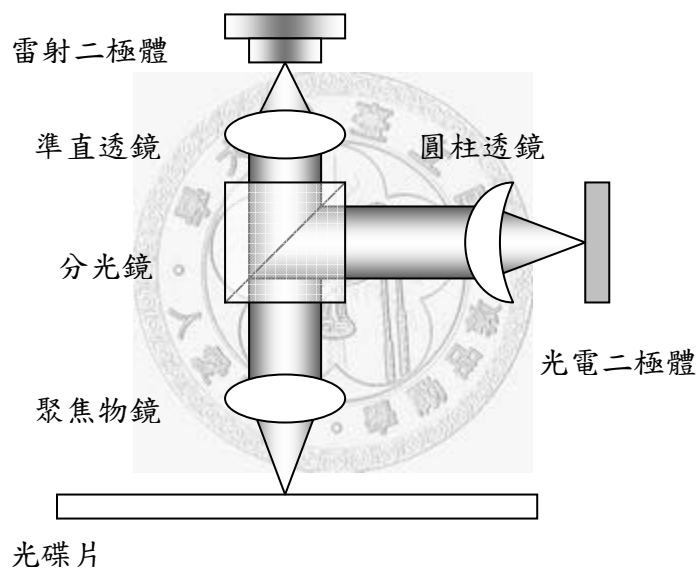


圖 4.1 DVD 讀取頭元件配置



圖 4.2 圓柱透鏡

雷射二極體產生紅外線 650nm 的光束，準直透鏡的功用在於將雷射光束轉換為平行光，聚焦物鏡再將平行光聚焦投射在光碟片的表面上。圓柱透鏡 X、Y 方向的曲率半徑不相等，如圖 4.2 所示。為 DVD 讀取頭中造成像散的主要光學元件，藉由其橫向和縱向的表面曲率不同，因此橫向與縱向之焦距長度將有所差異，當光束透過此透鏡時，會造成兩軸的聚焦位置不同，而有像散的效果，如圖 4.3 所示[16]，圓形光源之成像會隨著光源位置變化。光源遠在離圓柱透鏡時形成直橢圓成像，光源在在圓柱透鏡焦點上時則有圓形成像，接近圓柱透鏡時則為橫橢圓。

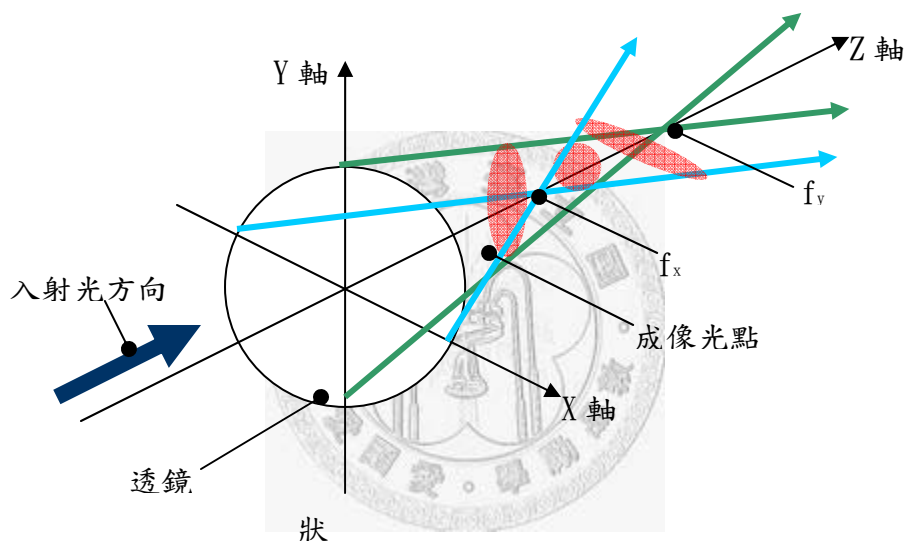


圖 4.3 像散與光點形狀[16]

分光鏡將雷射光束的投射路徑和反射路徑與予隔離。光電二極體由四個象限光電二極體組成，每一象限可以獨立進行光電能量之轉換，為了測得聚焦像散效果，必須將四象限之光電二極體所獲得像散電壓訊號以失焦訊號公式

$U_{FES} = (U_A + U_C) - (U_B + U_D)$ 進行運算，以求得被測平面失焦情形。

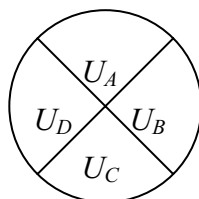


圖 4.4 光電二極體的輸出代號

在圖 4.5 中，雷射由雷射二極體射出後，通過了準直透鏡被調整為平行光，通過分光鏡及聚焦物鏡聚焦，當光碟片恰在聚焦物鏡的焦點上時，光點會經由光碟片反射回聚焦物鏡，被分光鏡轉向圓柱透鏡後在光電二極體上形成焦點。如果光碟片的位置較近或較遠，光點由光碟片反射而通過聚焦物鏡時，不會回覆為平行光，因此在通過圓柱透鏡時無法會聚成一圓形光點而成為橢圓形光點。

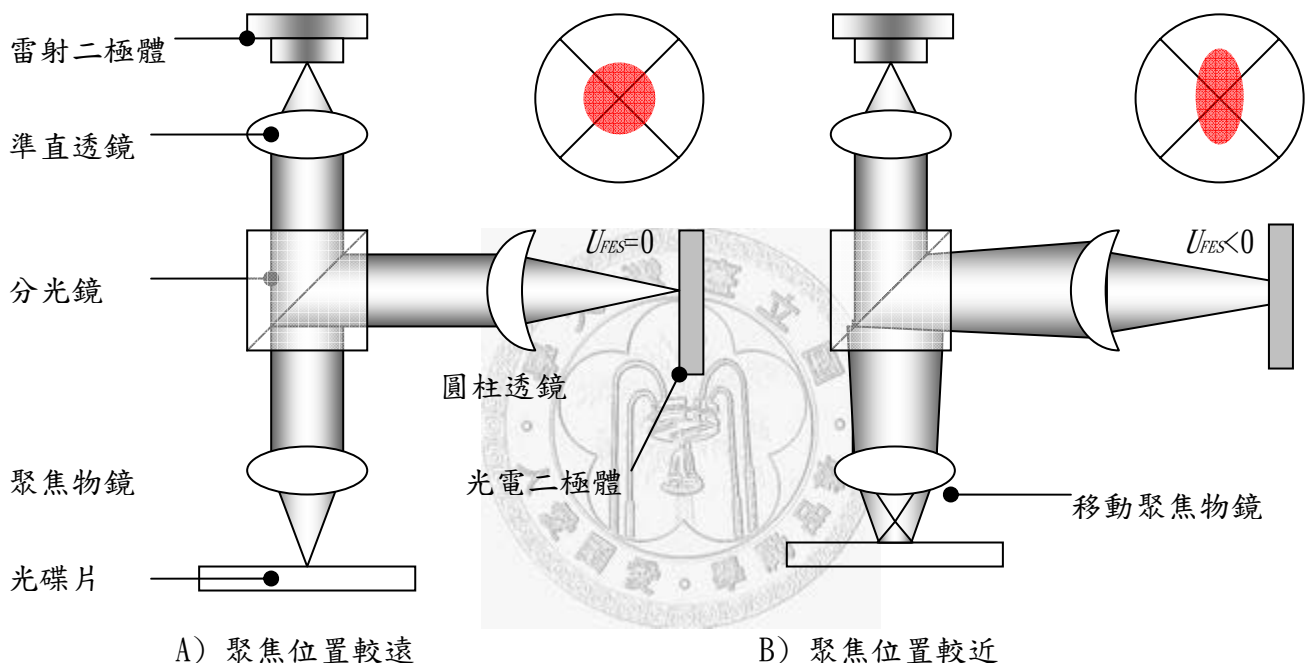


圖 4.5 DVD 讀取頭聚焦位置改變情形

圖 4.6 為光碟片與聚焦物鏡的距離變化對 U_{FES} 值電壓變化關係圖，即所謂 S-curve，圖中線性區域是光電位移感測範圍。

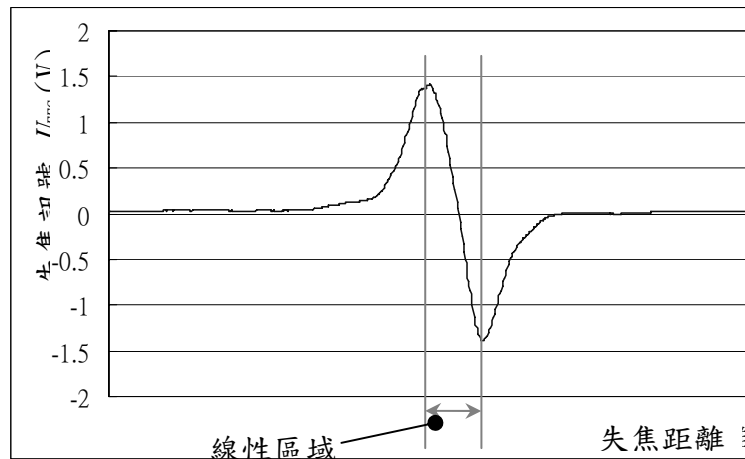


圖 4.6 S-curve

而 S-curve 中的線性區與物鏡焦距有關係，焦距越長著數值孔徑越小，光束的聚焦角度越小，因此可以增長線性區域。



4.1.2 雷射光束和能量密度分佈

雷射光束受到繞射極限(Diffraction Limited)的影響，聚焦光點的最小直徑為 $0.61 \times \frac{\lambda}{NA}$ ，其中 λ 是光束的波長，NA 為數值孔徑(Numerical Aperture)，而數值孔徑又與透鏡焦距成反比[25]。

假設雷射光束只有基模態(Fundamental Mode, TEM₀₀)能量分佈，高斯能量分佈之光束(Gaussian Beam)不同於一般可見光之聚焦光點的艾里光斑(Airy Pattern)。雷射光束經過透鏡後呈現如圖 4.7 所示的高斯強度分佈(Gaussian Intensity Distribution)。

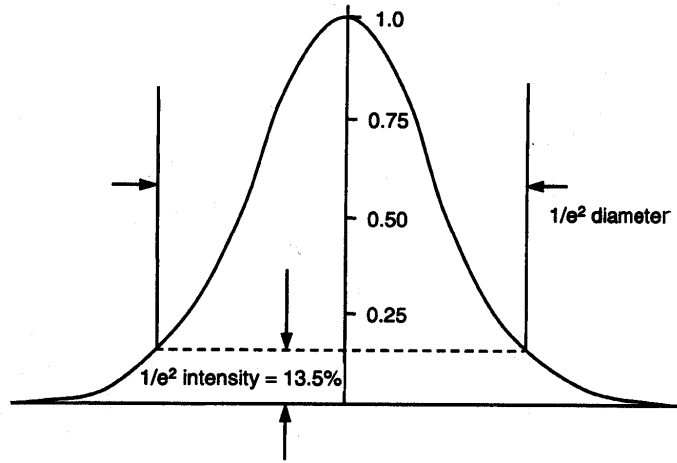


圖 4.7 雷射光束之高斯強度分佈圖[25]

雷射光點之光強度分佈為高斯函數

$$I(r) = I_0 \exp\left(-2 \frac{r^2}{r_0^2}\right) \quad (4-1)$$

其中 I_0 為光點中心的光強度， r_0 為光點半徑，定義為 I_0 的 $\left(\frac{1}{e^2}\right)$ 倍強度之位置，光軸位置有最大光強度，光強度隨著遠離光軸而衰減。聚焦雷射光點之最小光點直徑為

$$d_0 = \frac{2\lambda}{\pi\theta} \quad (4-2)$$

其所在位置稱為光腰(Beam Waist)， θ 為聚焦光束與光軸之夾角。

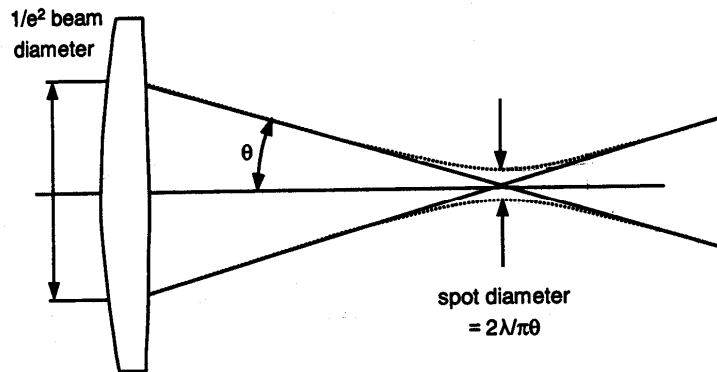


圖 4.8 雷射光束聚焦點附近光束直徑的變化[25]

4.1.3 以幾何光學計算光點成像位置與形狀

DVD 讀取頭的光路由焦長 f_o 的物鏡和焦長 f_c 的準直透鏡，間距為 L_z ，當點光源位在物鏡的焦點上時，成像光點會落在準直透鏡後距離 f_c 處，如圖 4.9 所示。若點光源 u 向 Z 軸負方向移動距離 Δu 成像光點位置 v 則會向 Z 軸負方向移動。首先物鏡的成像位置為 v_o 可以由下式求得

$$\frac{1}{v_o} + \frac{1}{f_o + d} = \frac{1}{f_o}$$

$$v_o = \frac{f_o(f_o + \Delta u)}{\Delta u} \quad (4-3)$$

再經過準直透鏡的成像，最終成像點位置 v 即為

$$v = \frac{f_c f_o^2 + f_c f_o \Delta u - L_z \Delta u}{f_o^2 + f_o \Delta u + f_c \Delta u - L_z \Delta u} \quad (4-4)$$

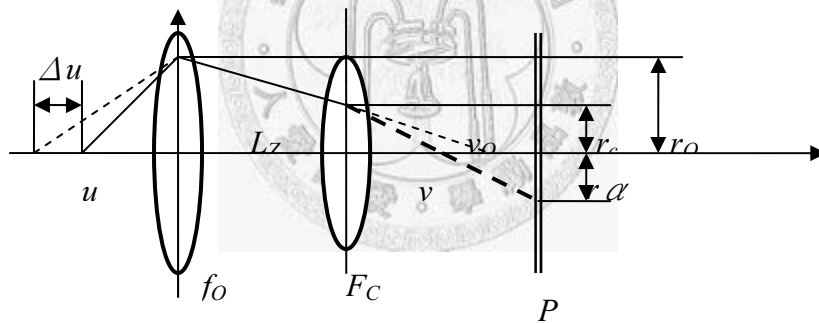


圖 4.9 雙片物鏡與光電二極體成像關係

在準直透鏡後 P 點上放置光電二極體作為屏幕，成像光點半徑為 r_a 的圓落在屏幕，如圖 4.9 所示，其和光學鏡片的幾何與特性參數的關係如下式所示

$$\frac{r_c}{v} = \frac{r_a}{f_c - v}, \quad r_a = \frac{r_c}{v} (L_p - v) \quad (4-5)$$

其中 r_c 又有下列關係式

$$\frac{r_c}{v_o} = \frac{r_o}{L_z + v_o} \quad (4-6)$$

所以成像光點半徑重新寫成

$$r_\alpha = \frac{r_c}{v} (L_P - v) = r_o \frac{v_o (L_P - v)}{v(L + v_o)} \quad (4-7)$$

圓柱透鏡利用兩垂直軸之焦距相異的方式來造成象散，x 軸之焦距為 $f_{c\alpha}$ 、y 軸之焦距為 $f_{c\beta}$ ，並且 $f_{c\beta}$ 大於 $f_{c\alpha}$ 。則 x 軸之光點高度 r_α 為

$$\alpha = R_o \frac{v_o (L_P - v_{cA})}{v_{cA} (L_Z + v_o)} = \frac{r_o f_o (f_o + \Delta u)}{(L_Z \Delta u + f_o (f_o + \Delta u))} \frac{(L_P - v_{cA})}{v_{cA}} \quad (4-8)$$

y 軸之光點高度 r_β 則滿足

$$r_\beta = r_o \frac{v_o (v_{c\beta} - L_P)}{v_{c\beta} (L_Z + v_o)} = \frac{R_o f_o (f_o + \Delta u)}{(L_Z \Delta u + f_o (f_o + \Delta u))} \frac{(v_{c\beta} - L_P)}{v_{c\beta}} \quad (4-10)$$

計算光點面積 A 為 $\pi \alpha \beta$

$$A = \pi \left(\frac{r_o f_o (f_o + \Delta u)}{(L_Z \Delta u + f_o (f_o + \Delta u))} \right)^2 \frac{(L_P - v_{cA}) \cdot (v_{c\beta} - L_P)}{v_{cA} \cdot v_{c\beta}} \quad (4-11)$$

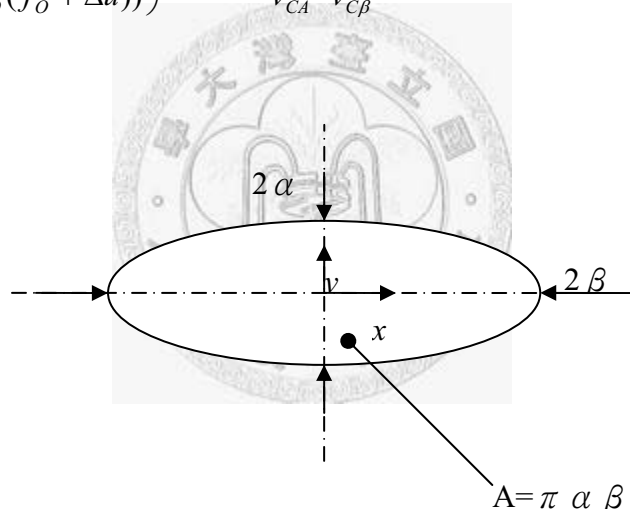


圖 4.11 像散光點的幾何關係

雷射光源具有固定能量 E_l ，光點面積內之能量密度 Φ 與光點面積 A 成反比，

滿足 $E = \Phi \cdot A$ 的關係，將雷射光束之強度分佈， $I(r) = I_0 \exp\left(-2 \frac{r^2}{r_0^2}\right)$ ，積分後即

可得光點內之能量密度

$$\Phi(r) = \int I(r) dr = \Phi_0 \left(\frac{r}{\sigma}\right) \quad (4-12)$$

其中 Φ_0 為最大能量密度， σ 為最大光點半徑。

將能量密度極低的外圍部份去除，此時 r/σ 之比值為 0.8，在此特定範圍下之雷射光點能量密度為，

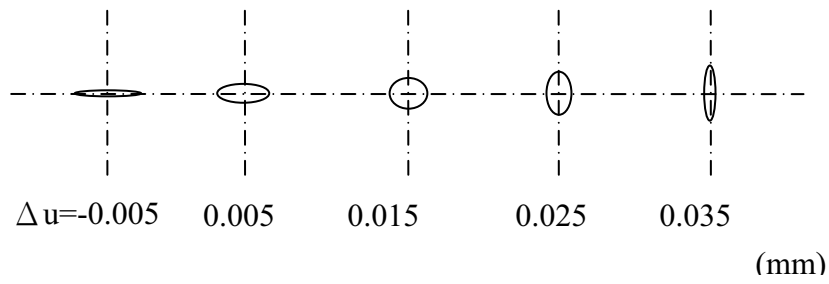
$$\phi_A = \frac{r}{\sigma} \cdot \frac{E}{A} = 0.8 \cdot \frac{E}{A} \quad (4-13)$$

光電二極體之光電轉換率為 ε_P ，橢圓形雷射光點所產生之電壓值 U_{SUM} 為

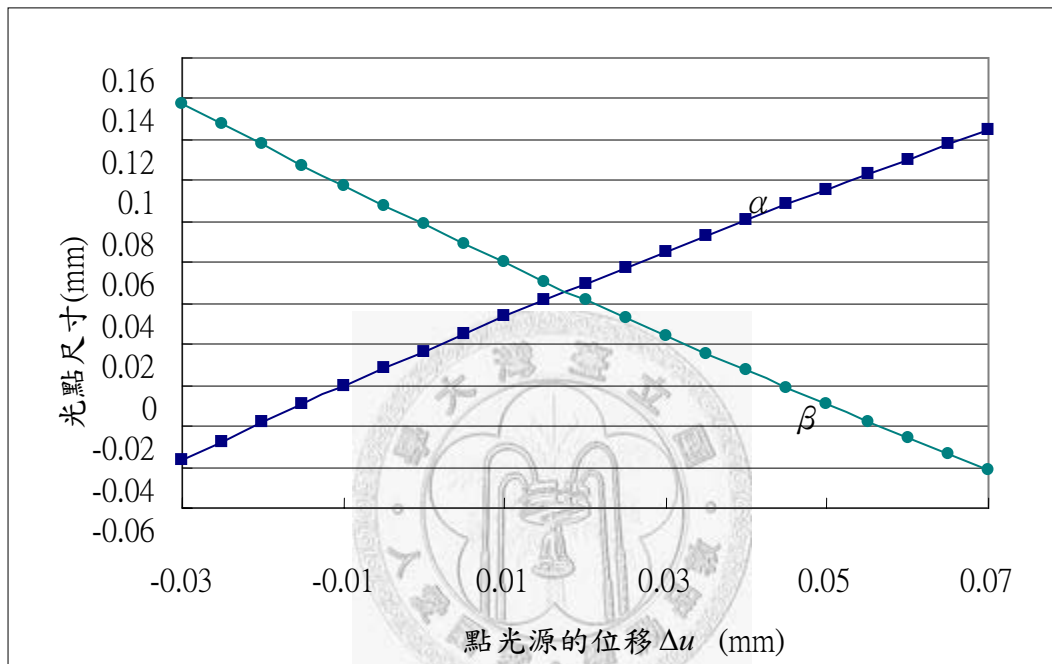
$$U_{SUM} = \phi_A \cdot \varepsilon_P = \frac{0.8\varepsilon_P E}{\pi \left(\frac{R_o f_o (f_o + \Delta u)}{(L_z \Delta u + f_o (f_o + \Delta u))} \right)^2 \frac{(f_{c\beta} - f_{c\alpha}) (f_{c\alpha} - v)}{f_{c\beta} v}} \quad (4-14)$$

改變光源的位置 Δu ，可以觀察到像散光點的形狀變化，隨著 Δu 值增加，橢圓形光點 r_α 尺寸增加， r_β 尺寸則減少，在 $\Delta u = 0.02\text{mm}$ 時， $r_\alpha = r_\beta$ ，像散光點呈現圓形，如圖 4.11。





a) 成像光點形狀



(b) 成像光點尺寸

圖 4.11 成像光點尺寸和點光源位置之關係

在一定的光電轉換率的情形，圖 4.12 展示點光源位移 Δu 對輸出電壓 U_s ，計算 $\Delta u = 0.02\text{mm}$ 在聚焦情形下，輸出電壓 U_{sum} 有最大值。隨著失焦增加光點呈現橢圓形變化，同時輸出電壓 U_{sum} 也漸漸變小。

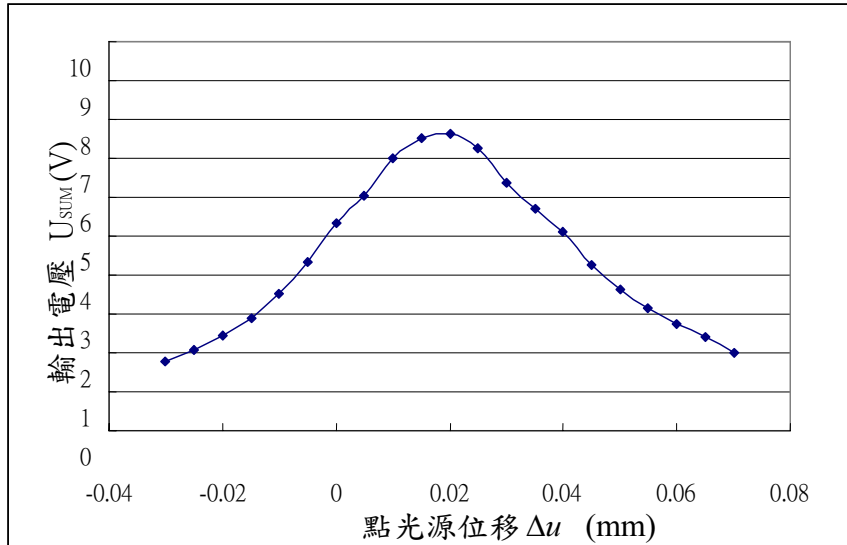


圖 4.12 輸出電壓 U_s 和點光源位置 Δu 關係

圖 4.13 為失焦訊號 U_{FES} 對 d 關係圖。 U_{FES} 點光源位置 Δu 之關係，呈現 S 型曲線，上下不對稱曲線的成因來自於光束未準確投射在圓柱透鏡的正中央。

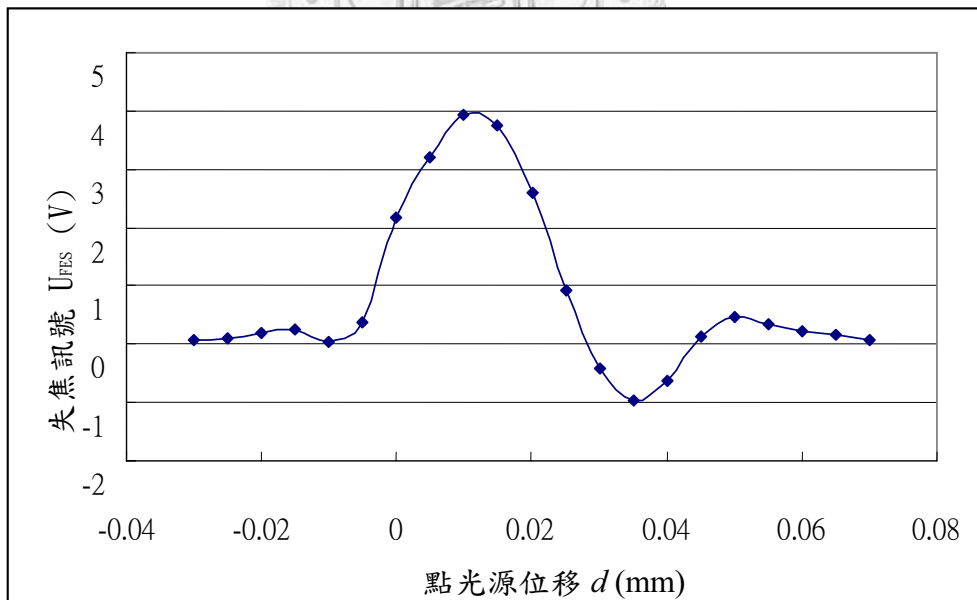


圖 4.13 失焦訊號 U_{FES} 與點光源位置 Δu 的關係

以物鏡焦長 $f_0 = 3.3\text{mm}$ 的可感測範圍為 $R^* = 1$ ，圖 4.14 為可感測範圍和數值光圈倒數 $1/NA$ 的關係，數值光圈越大可感測範圍越小，而數值光圈小者，可感測範圍越大。

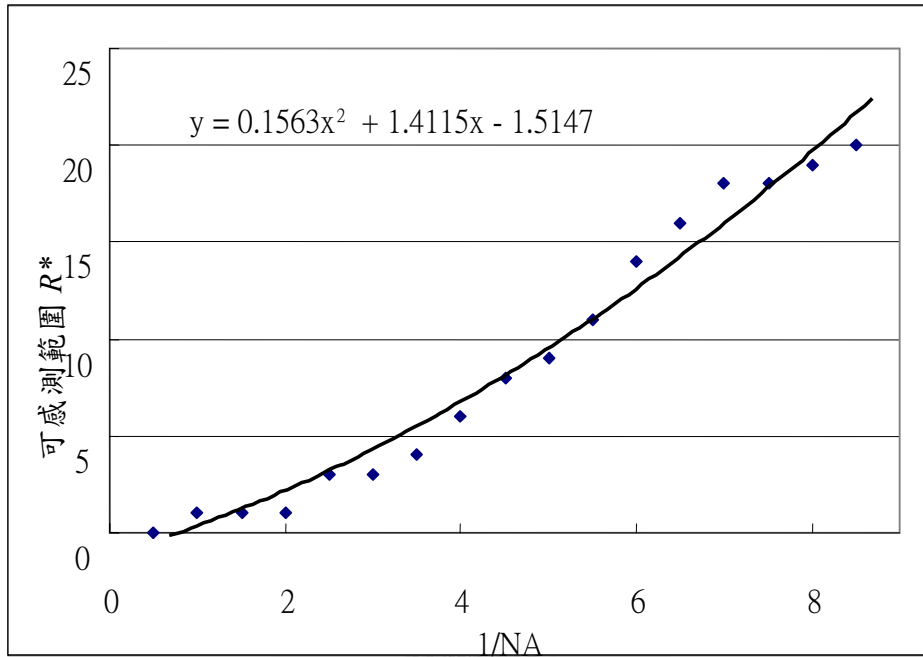


圖 4.14 可感測範圍和數值光圈倒數的關係

圖 4.15 為 TOPRAY 公司之 1300DVD 讀取頭，可感測範圍和數值光圈倒數(1/NA) 的實驗所得關係，物鏡焦距為 2.3~30mm，可感測範圍則為 6~1000 μm 。透過改變物鏡焦距或著數值光圈 NA 值，可以改變可感測範圍，增加位移感測運用範圍。

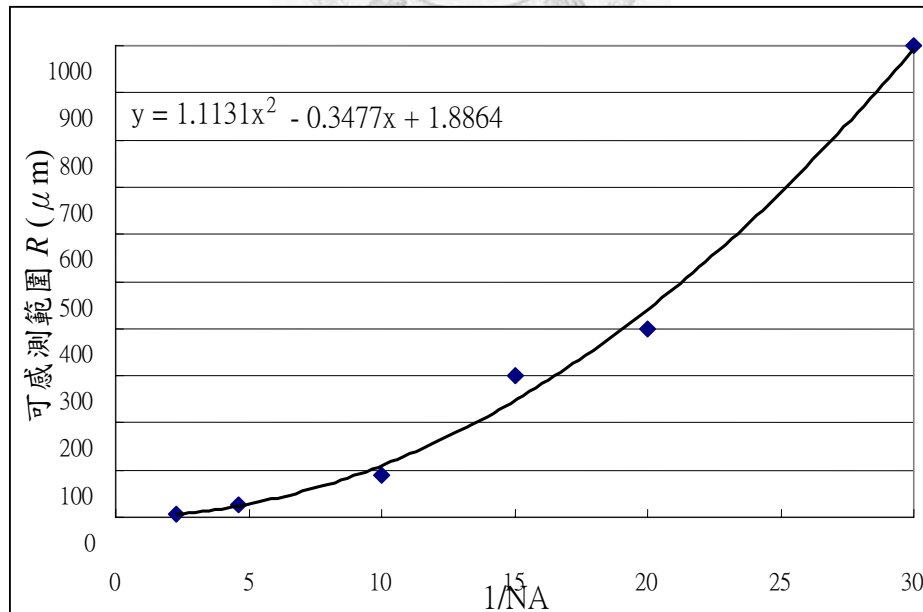


圖 4.15 可感測範圍和數值光圈倒數 1/NA 的關係

4.2 全像雷射整合之 DVD 讀取頭.....

4.2.1 全像光學 DVD 讀取頭.....

DVD 讀取頭架構由多種光學元件所組成，零件間的相對位置必須精準組裝才能獲得重現性高誤差小的品質。在系統組裝需要很多精密製具和調校。

全像雷射整合之 DVD 讀取頭(HOE)將雷射二極體、光電感測器、光柵與全像光學元件全部整合在一顆 IC 上，體積僅有原始 DVD 讀取頭尺寸的十分之一，改善了系統組裝調教的問題。

HOE 內部呈現垂直結構，雷射光由雷射二極體發出之後穿過光柵及全像光學元件，配合額外的物鏡和準直徑，反射光線由原全像學元件進入後偏折至光電二極體上（圖 4.16）[26]。

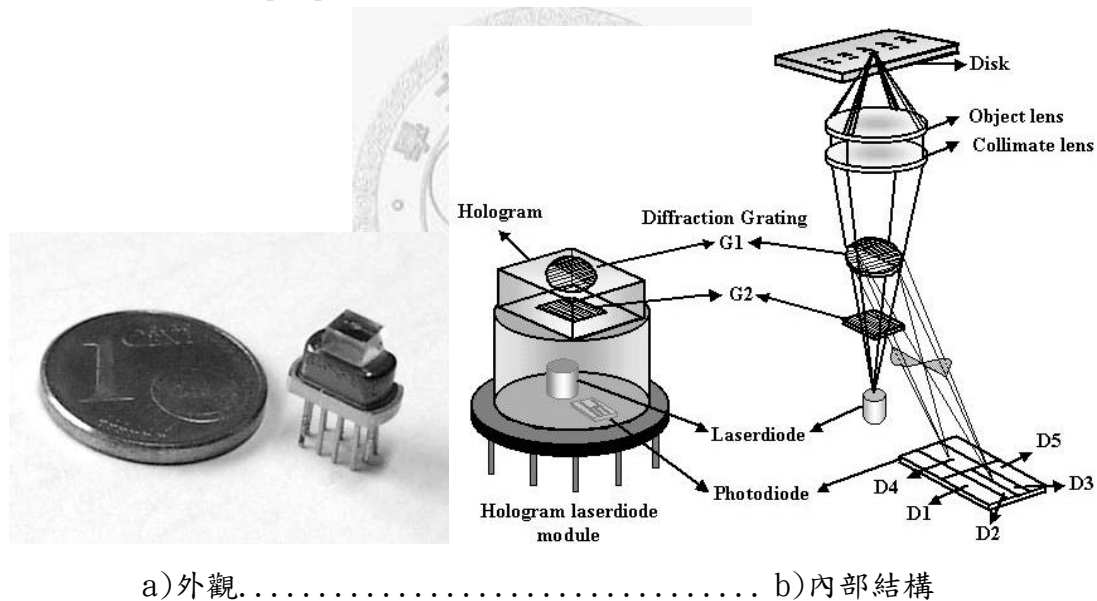


圖 4.16 全像光學式 DVD 讀取頭 HOE[26]

HOE 讀取頭中的全像光學元件則利用蝕刻的方式將透鏡表面進行無數波長等級的刻紋，是周相光柵(phase grating)中的正弦光柵(sine grating)，相當於一個完整的斜面，如圖 4.17 所示，其功能相似於傾斜放置的平板玻璃，對通過光束產生 X 和 Y 方向差異聚焦效果，如此即能產生像散作用，其效果如同圓柱透鏡一般，除此外還以不同刻紋密度使單光束分為三道光束，最邊緣兩道光束則用於光碟片循軌任務。

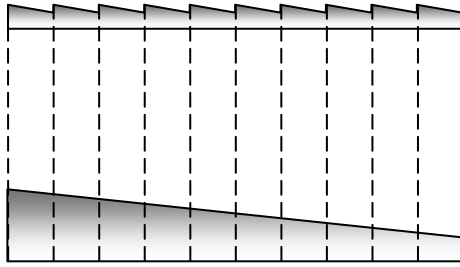


圖 4.17 正弦光柵

本論文採用 SHARP 公司生產的 HOE DVD 讀取頭，從光碟片表面反射回來的三道雷射光束投射到六分割的光電二極體上，如圖 4.18 所示。三道光束為主光束和兩道副光束，主光束做為 DVD 的資料讀取，副光束做為 DDP 循軌功能的依據。

圖 4.23 中定義 $D1$ 、 $D2$ 、 $D3$ 、 $D4$ 、 $D5$ 及 $D6$ 六個分割光電二極體。失焦訊號

$$U_{FES} = (\bar{U}_2 + \bar{U}_4) - (\bar{U}_3 + \bar{U}_5)$$

$$U_{RES} = \bar{U}_1 + \bar{U}_2 + \bar{U}_3 + \bar{U}_4 + \bar{U}_5 + \bar{U}_6$$

用於讀取光碟片資料。

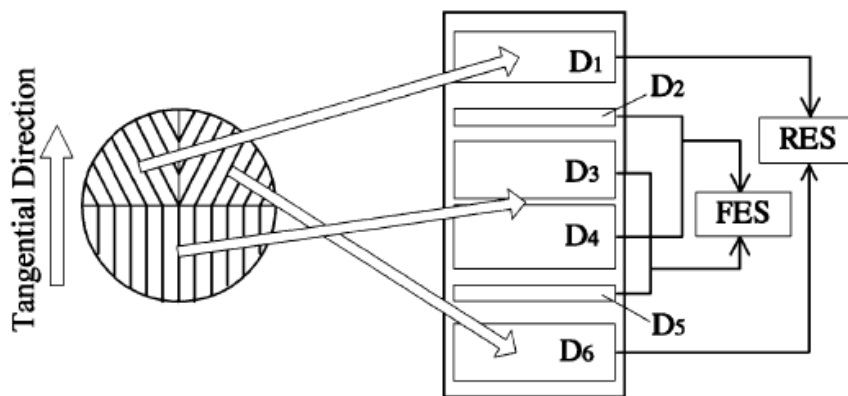


圖 4.18 SHARP 公司的光電二極體 PDIC 的詳細配置[26]

失焦訊號 U_{FES} 為 S 型電壓訊號(S-curve)，可分成曲線區和線性區，線性區失焦訊號正比於失焦距離，在反推失焦距離時運算較為容易。而區線區失焦訊號和失焦距離呈現非線性關係，亦能透過電腦強大運算內插功能解決非線性運算問題。

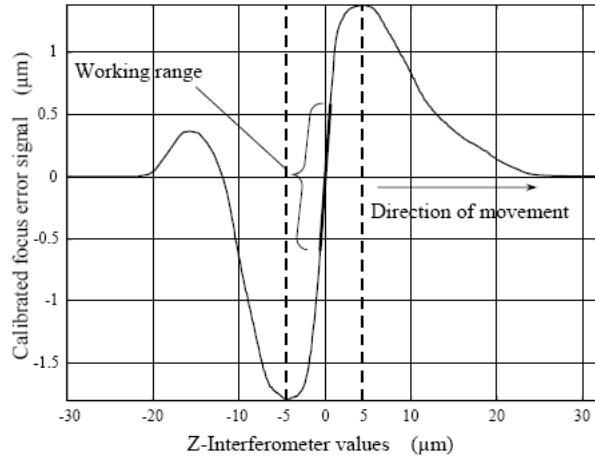


圖 4.19 S-curve 之線性區[26]

本研究使用 LightTools 光學模擬軟體深入探討光學系統。建立光路模型。圖 4.20 是依據 GH6C605B5A 型號之 HOE 讀取頭尺寸建構之 DVD 讀取頭光路系統。在此處使用一斜板替代全像光學元件，並以一個物鏡來取代物鏡和準直鏡。

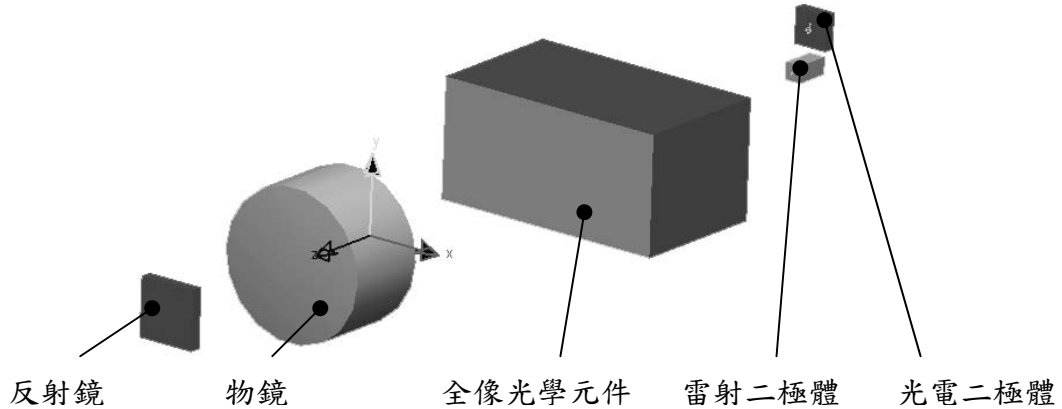
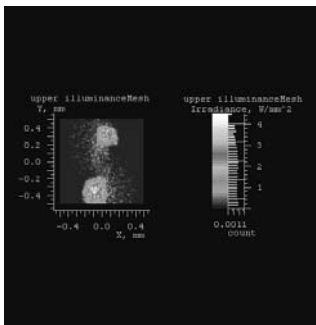
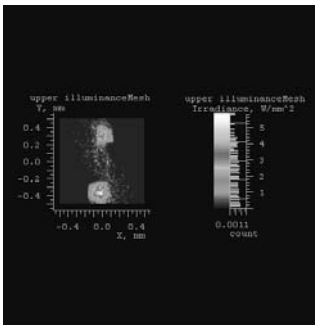
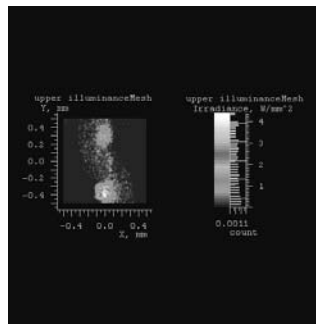
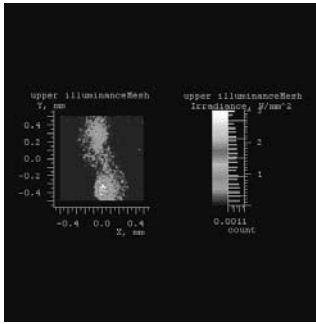
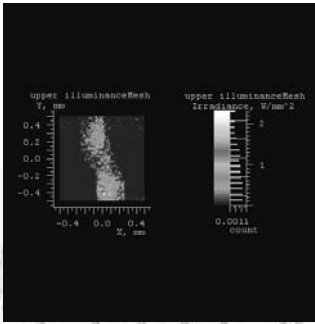
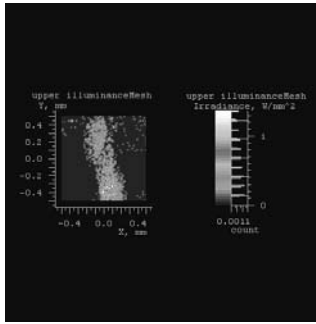


圖 4.20 全像光學元件模擬光路系統

表 4.1 是反射鏡從遠離物鏡焦點逐漸向物鏡移動的光點變化過程。由於全像光學元件上兩邊刻紋寬度相異，將光束分成兩光點，離物鏡焦點越遠者，兩光點擴散的情形越大；離焦點太遠時光束完全沒有聚焦，光強度極低。近焦或是離焦，光強度都有不對稱變化的情形，是因為全像光學元件無法平均地分配兩光點之像散。

表 4.1 模擬光點成像與物鏡位置關係

距離物鏡焦點-0.2mm	距離物鏡焦點-0.1mm	距離物鏡焦點 0 mm
		
距離物鏡焦點 0.1mm	距離物鏡焦點 0.2mm	距離物鏡焦點 0.3mm
		

HOE 中光電二極體由兩區塊組成，其輸出電壓為 U_A 、 U_B ，失焦訊號 U_{fes} 和總和訊號 U_{sum} ，

$$U_{FES} = U_A - U_B \dots\dots\dots (4-20)$$

$$U_{sum} = U_A + U_B \dots\dots\dots (4-21)$$

將由 LightTools 光學模擬軟體分析而得之光強度做計算，可求得 U_{FES} 與 U_{SUM} 如圖 4.21。

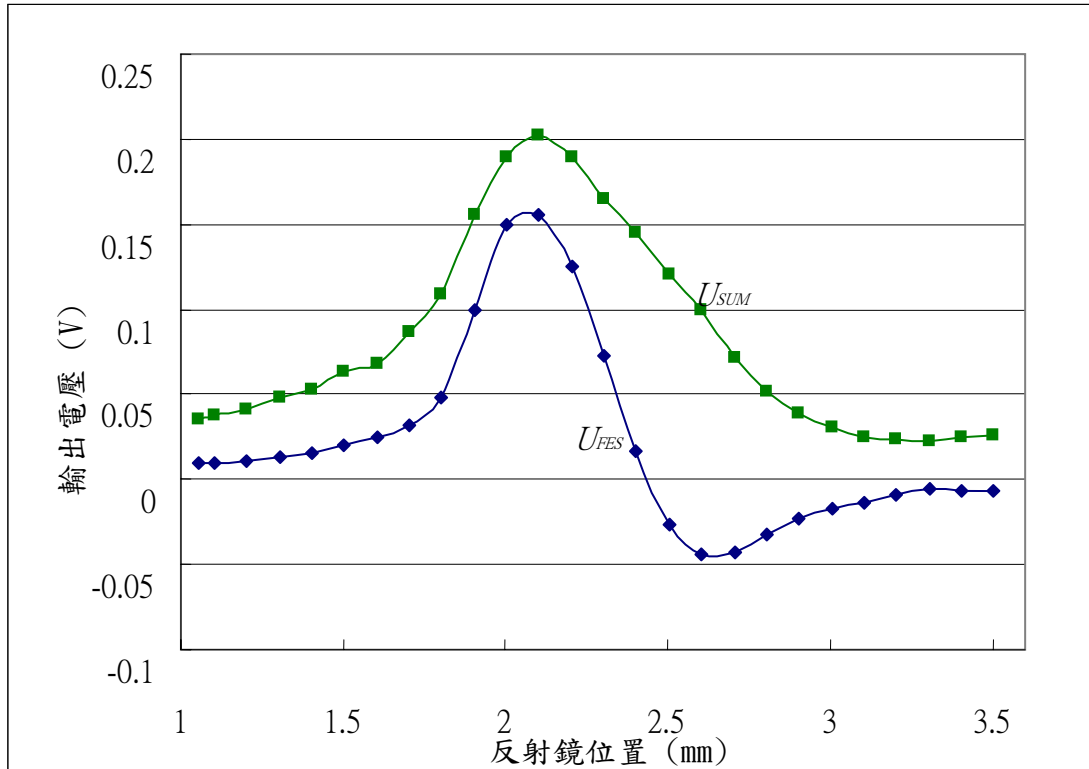


圖 4.21 模擬分析所得輸出電壓訊號和反射鏡位置關係

由圖 4.21 中可以發現 U_{FES} 呈現一 S-curve，代表在模擬結果中也一樣能夠反映出 HOE 讀取頭之量測動作，並且 S-curve 非完全對稱，此乃由於全像元件對於兩光軸之影響不相等所致。在焦點附近， U_{SUM} 較高，代表此處光點極小，模擬結果能確實達到聚焦的動作。

4.3 全像雷射讀取頭之構型與應用

4.3.1 全像雷射讀取頭量測光路

全像雷射讀取頭會搭配一準直鏡以及一物鏡來達到 DVD 光學檢測的目的，其量測範圍為 $6\mu\text{m}$ ，解析度為 1nm 。HOE 雷射之發散角為 20° ，相當於數值光圈 $\text{NA}=0.13$ ，搭配相同數值光圈 $\text{NA}=0.13$ 之凸面透鏡，則能將雷射光轉為平行光，再由物鏡投射到量測面上，物鏡的數值光圈為 $\text{NA}=0.6$ 。

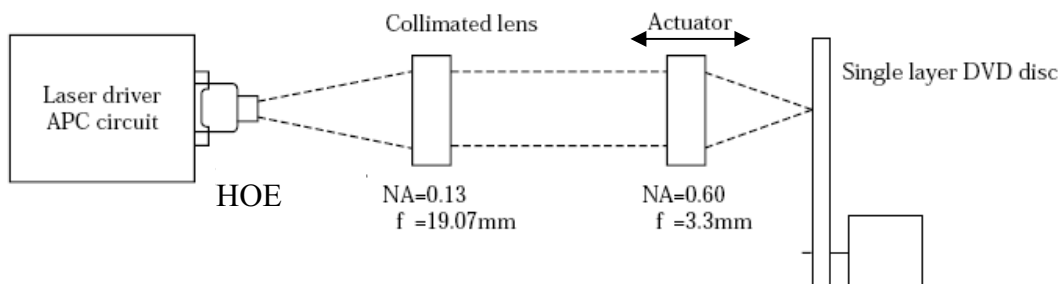


圖 4.22 全像光電元件 HOE 之量測光路

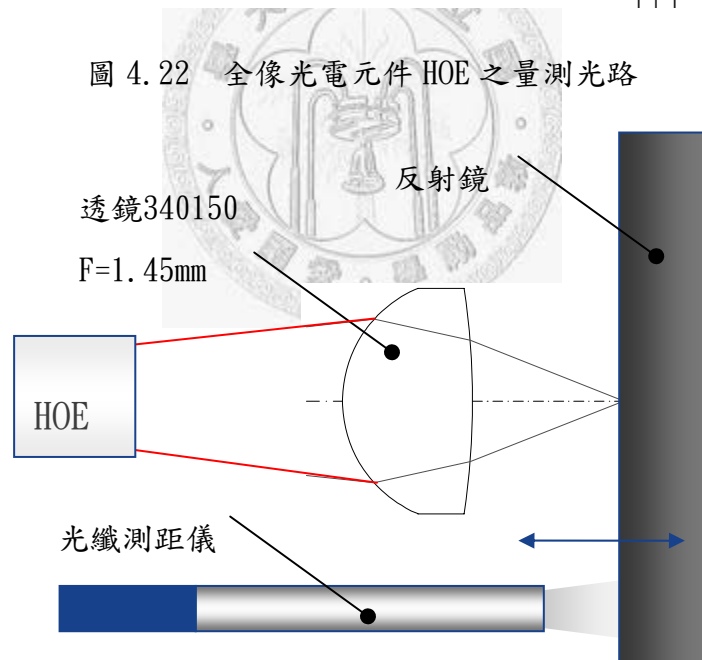
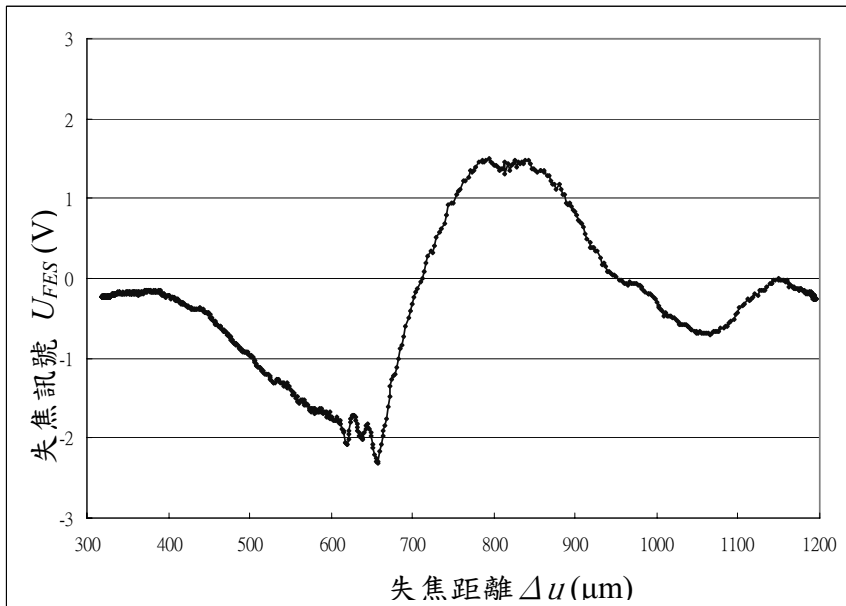
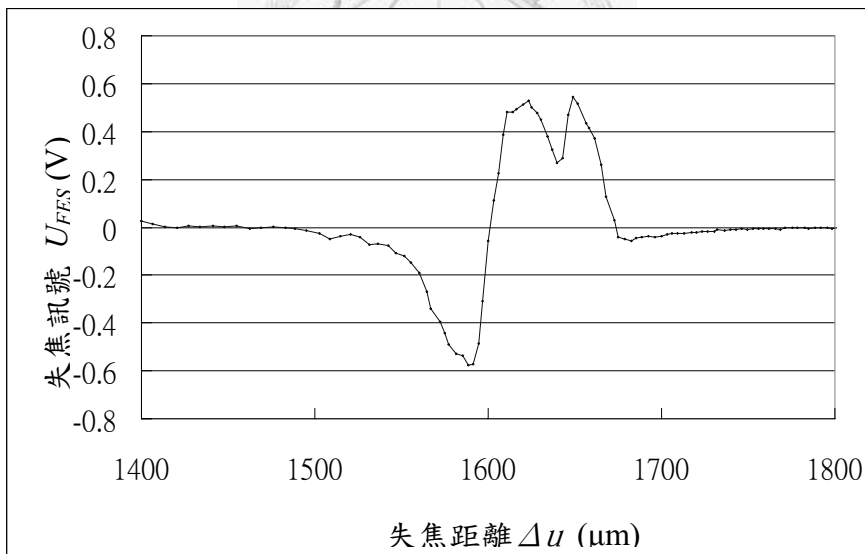


圖 4.23 實驗架構

圖 4.22 為採用單獨物鏡的量測光路。圖 4.24 為失焦訊號 U_{FES} 與失焦訊號的關係，其中一條曲線，採用單獨物鏡，另一條採用物鏡和準直鏡，兩組失焦訊號都是 S 型曲線，但線性有些差異，物鏡焦距為 2mm ，以及數值光圈 $\text{NA}=0.5$ ，準直透鏡焦距為 20mm 以及數值光圈 $\text{NA}=0.13$ 。



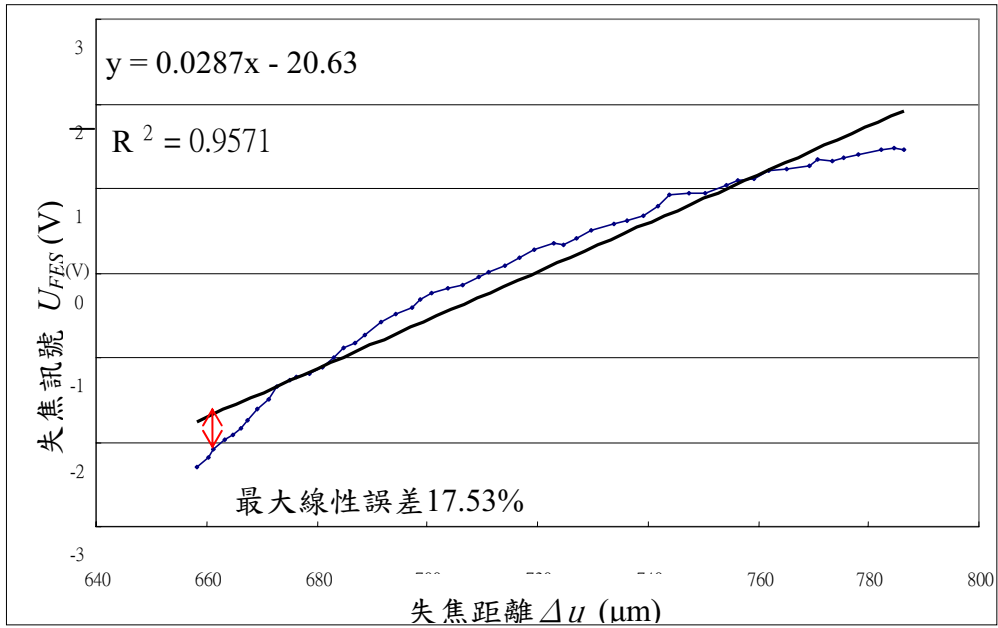
a)透鏡



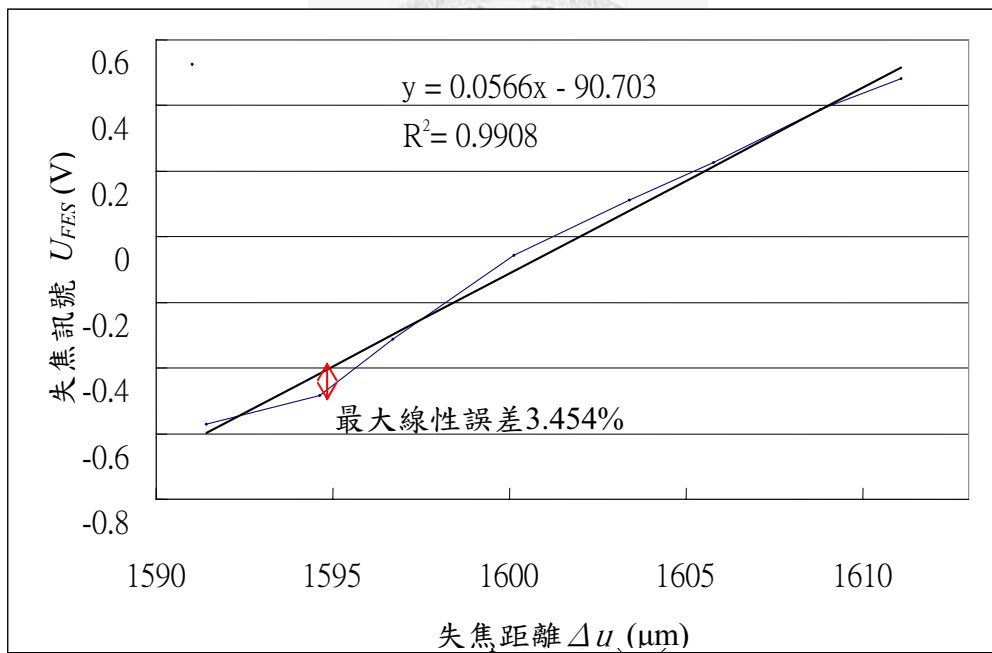
b)透鏡和準直透鏡

圖 4.24 失焦訊號 U_{FES} 與失焦距離關係

單獨物鏡所得線性區之最大線性誤差為 17.5%， R^2 值為 0.9571；透鏡和準直透鏡所得之最大線性誤差為 3.4%， R^2 值為 0.9908。物鏡配合準直透鏡可以構成線性度較佳的光路，如圖 4.25 所示。



a) 透鏡組 A-透鏡 350150



b) 透鏡組 B-透鏡 350150+準直透鏡

圖 4.25 線性度與線性誤差

4.3.2 全像雷射讀取頭模組化構型

光學測量單元中必須包含物鏡、準直透鏡以及 HOE。圖 4.26 為全像雷射讀取頭之組成，在此採用圓筒狀結構作為主要支撐元件，為配合物鏡與準透鏡之不同直徑，以內孔肩部來區隔和定位，後端長方孔用以固定全像光電元件 HOE。除了內孔配合之外，還以膠固定所用光學元件

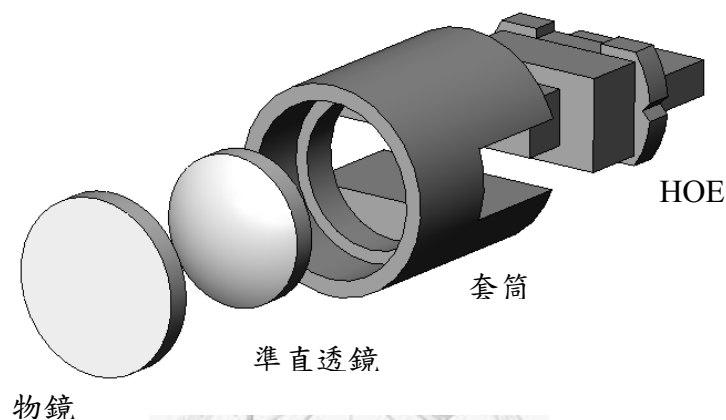
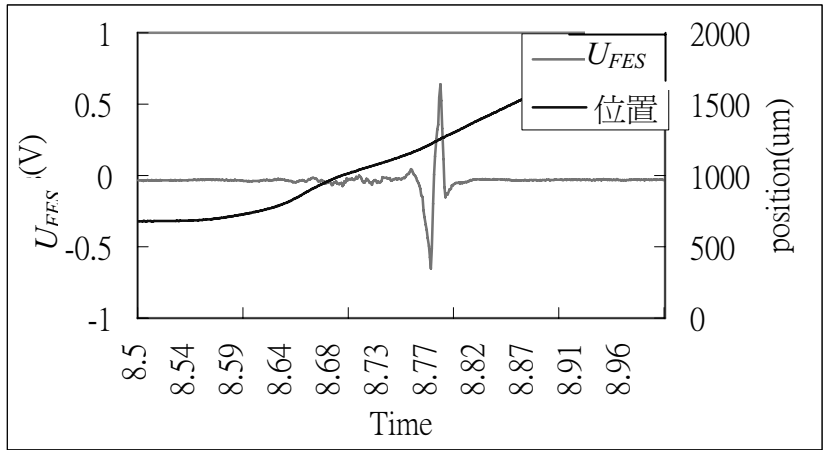
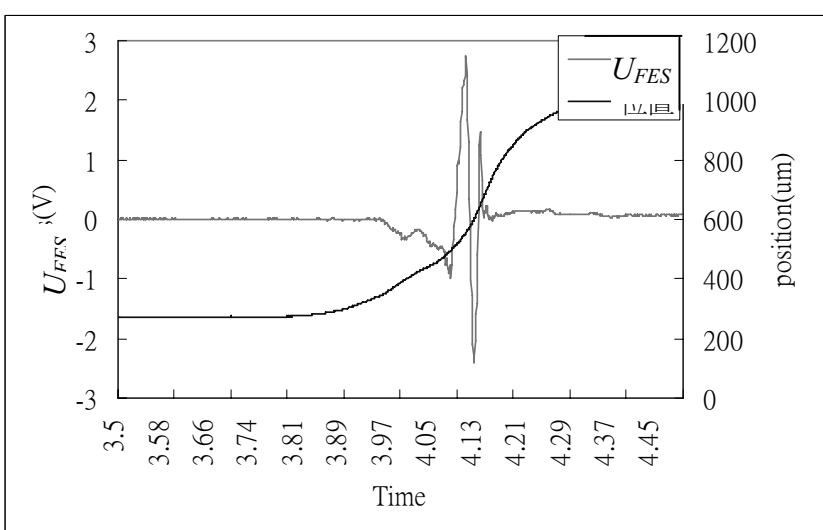
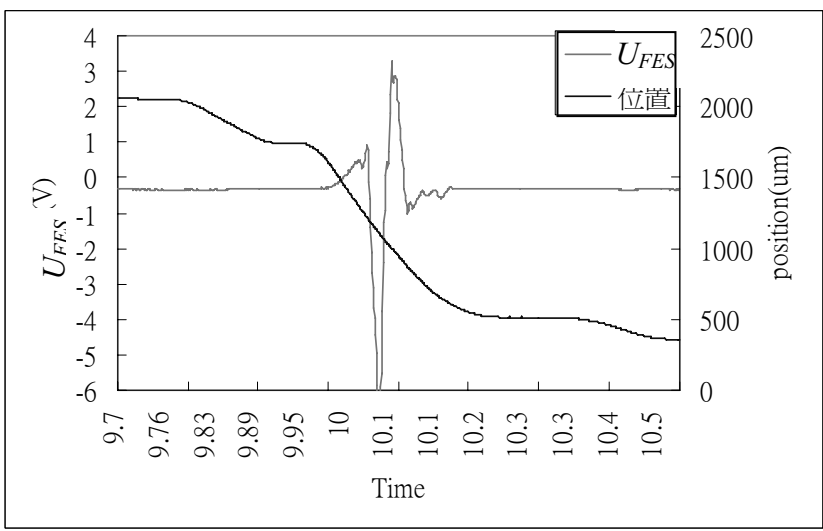


圖 4.26 全像雷射讀取頭之組成

表 4.2 為三種透鏡組合之光學量測性能，可以獲得三種線性以及最大量測解析度。以光學測量單元搭配不同焦距之物鏡進行實驗求得各種組合下的 FES 訊號，以 THORLAB 之 350150 以及 TOPRAY 之物鏡相互搭配可以取得由 $30\ \mu\text{m}$ 至 $100\ \mu\text{m}$ 不等之線性範圍(圖 4.33)。配合電腦端之 AD 卡，將 FES 電壓訊號轉為電子訊號，並且細分為 2^{16} 等分，可以得到如表 4.2 所示不同之極限解析度。

表 4.2 透鏡組合之光學量測性能

透鏡組合	U_{FES} 訊號與位置關係圖
<p>350150+準直鏡</p> <p>線性範圍 33.8 (μm)</p> <p>解析度 1.7 (μm)</p>	
<p>TOPRAY F2.33</p> <p>線性範圍 47.4 (μm)</p> <p>解析度 2.4 (μm)</p>	
<p>350150</p> <p>線性範圍 118.0 (μm)</p> <p>解析度 5.9 (μm)</p>	

第五章 三軸定位系統之設計開發與控制程式

5.1 總系統架構

圖 5.1 為三軸閉迴路奈米級定位致動系統之整體架構，由兩組模組化之單軸位移定位平台構成 X、Y 方向平台與 Z 方向平台所構成，單軸位移平台內包含致動子系統、感測子系統及導引系統，由內框和外框所組成。致動子系統由壓電位移放大致動器構成，感測子系統由透鏡組與 HOE 構成，並且以彈簧鋼片作為導引系統，如圖 5.2 所示。

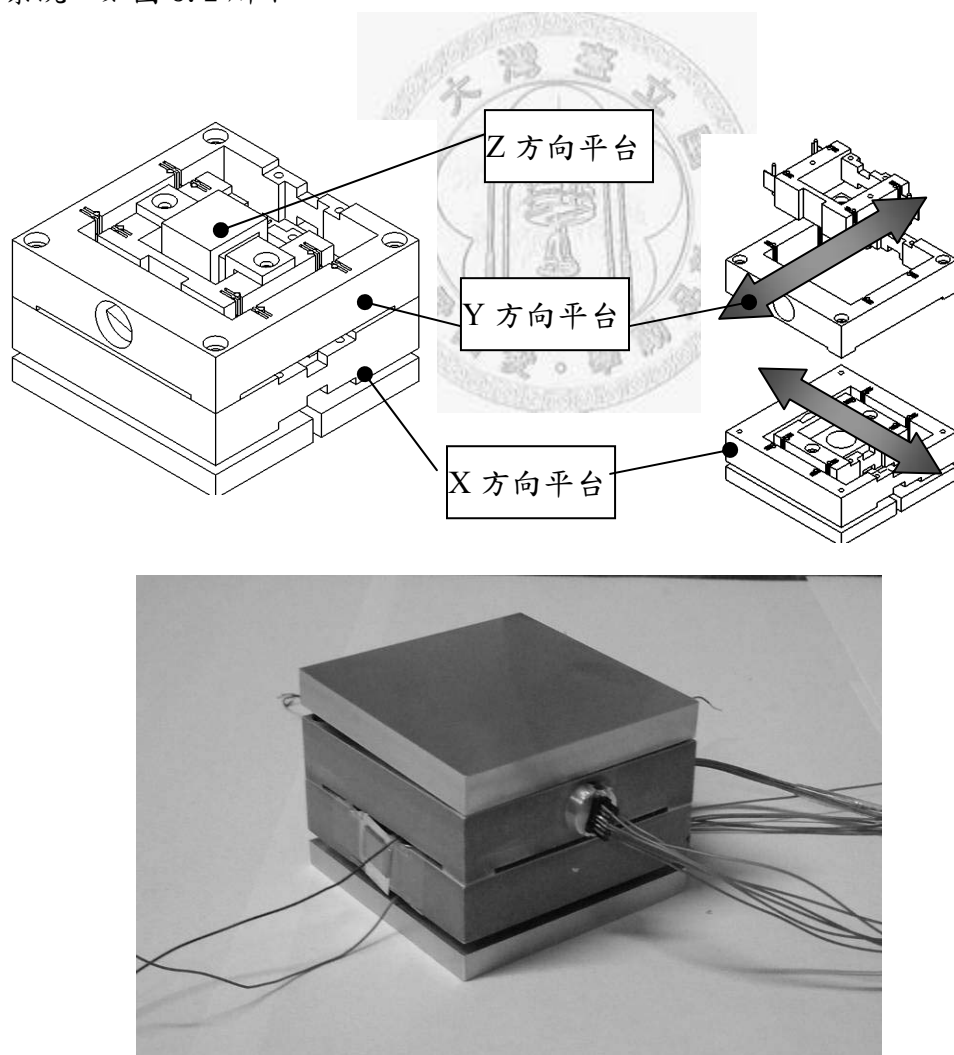


圖 5.1 三軸閉迴路奈米級定位致動系統

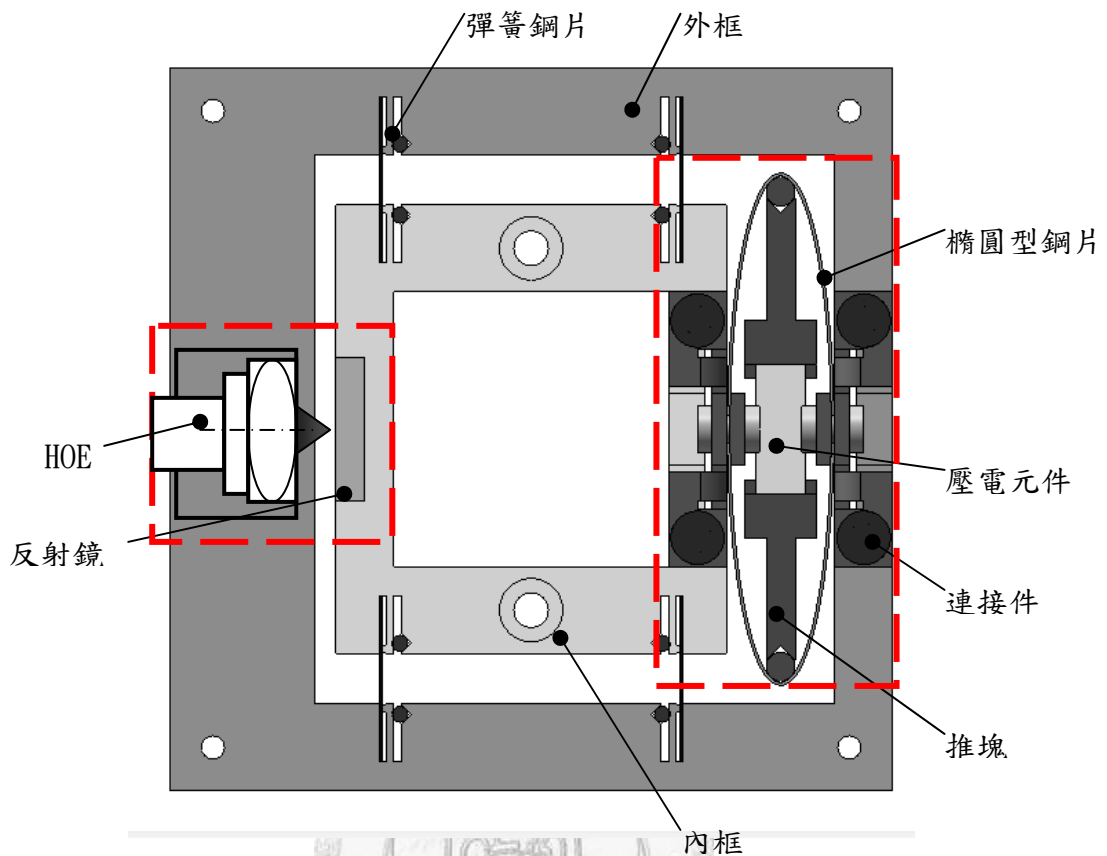


圖 5.2 單軸位移定位平台

圖 5.2 為單軸位移定位平台之詳細組成，致動子系統以壓電元件、橢圓形鋼片和連接件構成。壓電元件使用的是 piezomechanik 公司 150/3.5x3.5/7 型號積層式壓電元件，行程為 $15\ \mu\text{m}$ ，最大推力達 800N ；橢圓形鋼片之短軸為 7mm ，長軸為 35mm ，位移放大率 6 倍，致動規劃行程為 $90\ \mu\text{m}$ 。壓電元件透過推塊來驅動橢圓形鋼片，推塊前端形狀搭配橢圓形鋼片的形狀以平均分散接觸力。

導引子系統使用四片平行之鋼片連結內框與外框，當受橫向外力時，兩側對稱變形，使內框平行移動。連結處使用夾持方式來固定鋼片，而不使用一體成型的方式目的在於避免應力集中，由圖 5.3 可知在內框位移 $50\ \mu\text{m}$ 的情況下，一體成型導引會有最大應力達 $103.53\text{N}/\text{mm}^2$ ，應力集中在撓性結構的轉折處，經過造型變化並無法改善應力集中的現象。夾持鋼片的導引方案，應力會均勻分佈在鋼

片上，應力並不會超過材料的降伏強度，所以夾持鋼片的導引方式是較佳的設計方案。

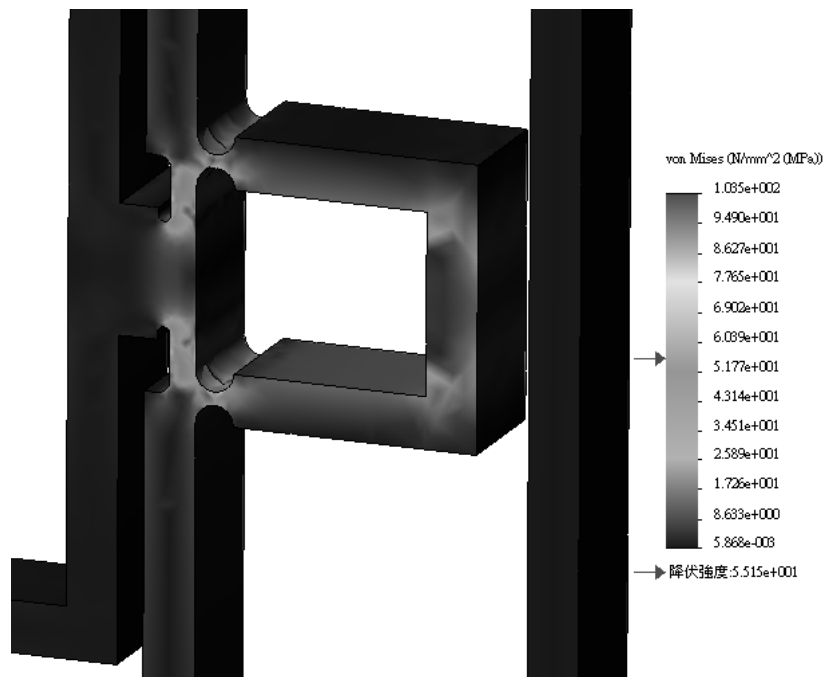


圖 5.3 一體成型之平行導引結構之應力分佈情形

定位平台以 Z 軸底座連結 X 方向平台之內框，所以整體重量是由 X 方向平台內平行導引鋼片來承受，導引鋼片以擠壓夾持方式固定，相當於以 0.94N 的作用力則會以剪力方式，作用在連結處，透過 CAE 應力分析發現連結處的最大應力皆低於降伏強度，不會有破壞的情況發生，如圖 5.4 所示。

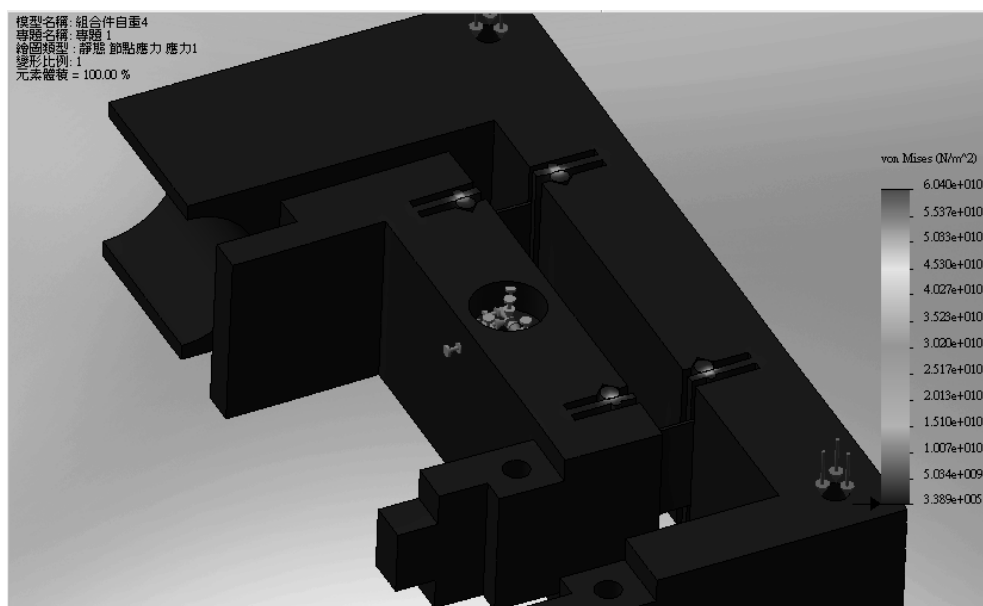


圖 5.4 X 方向平台受 0.94N 作用力之下應力分佈圖

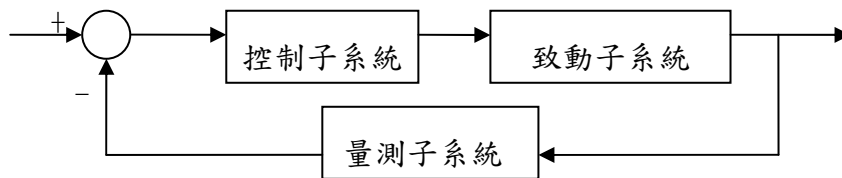
5.2 電路架構與程式

類比數位轉換卡採用 16Bit NI-6061AD 卡，進行雙向之輸入輸出轉換，電壓範圍為-10V~10V，最小解析為 0.3V。壓電元件之驅動電壓範圍為-30V~150V，AD 卡之輸出電壓經過壓電放大器 PiezomechanikSVR150/3 放大 15 倍後才能夠驅動壓電元件作全行程的制動。HOE 輸出之 FES 訊號僅有 $\pm 0.8V$ ，首先經過二級放大及濾波電路將訊號放大至 $\pm 8V$ ，以提升量測精度與解析度。電腦端使用 LabView 來作為使用者介面與運算軟體，圖控式介面方便操作，也可以用內建 Bluid 功能來產生獨立執行檔。

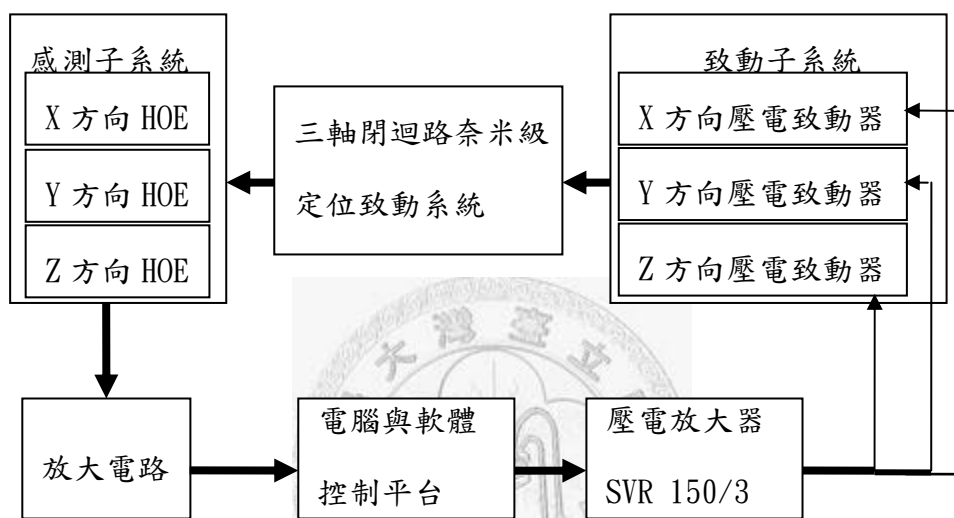
利用閉迴路控制方法來消除壓電元件遲滯和非線性誤差，圖 5.5 是控制系統流程，量測子系統提供位置訊號作為回授，控制子系統依據目標位置的指示，將致動子系統控制至回授位置和目標位置之間誤差消除為止。

圖 5.6 為控制程式之操作介面。人機介面的輸入面板方便使用者輸入定位位置，控制方式可選用閉迴路與開迴路方式，參數設定與存檔則以分頁顯示方式配置。圖表用來表達三軸實際致動，同時以 3D 顯示平台展示致動器之空間位置。

回饋控制採用 PID 控制方式，PID 參數使用 Ziegler-Nichols method 來進行調整，使實際致動動作在到達目標定位時不會有過衝現象及振動，以確實達到精密致動的品質。



(a) 流程方塊圖



(b) 詳細流程

圖 5.5 系統架構和控制流程

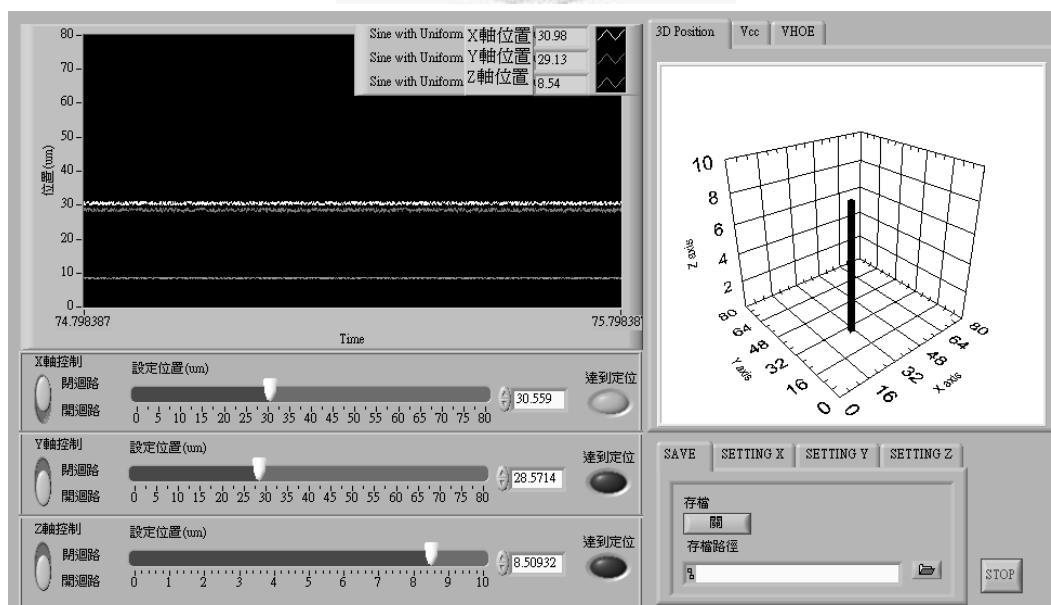


圖 5.6 控制程式介面

第六章 三軸閉迴路奈米定位致動系統之系統性能

在量測子系統中，透過物鏡與準直透鏡的搭配，可以得到不同的量測範圍。在三軸定位致動平台中，X、Y 兩軸的行程為 $50\ \mu\text{m}$ ，Z 軸的行程為 $5\ \mu\text{m}$ ，量測子系統之線性量測範圍必須涵蓋所需行程，長行程透鏡組 A 是由焦距 3.3mm 的物鏡搭配焦距 10mm 的準直透鏡，短行程透鏡組 B 則由焦距 3.3mm 的物鏡以及焦距 18.3mm 的準直透鏡組成。

實驗架構如圖 6.1 所示，全像光學式讀取頭 HOE 和光纖位移計設定在精密位移平台的同一側，由 HOE 讀取頭測得之 U_{VES} 訊號，將與光纖位移計量測得位移訊號進行比較，為了減少量測位置差異所造成量測偏差，兩者固定在同一水平面上。

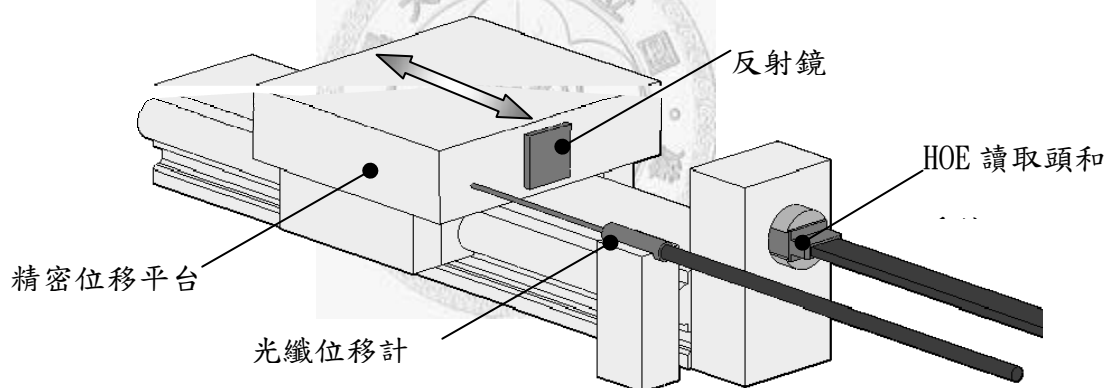


圖 6.1 讀取頭和透鏡組之性能量測架構

實驗結果如表 6.1，長行程透鏡組 A 之線性範圍為 $100\ \mu\text{m}$ ，短行程透鏡組 B 之線性範圍為 $24\ \mu\text{m}$ ，分別滿足位移量測範圍的需求。在增益值 100 的放大器作用下，分別可得最大電壓分別為 $\pm 4\text{V}$ 與 $\pm 8\text{V}$ ，兩組透鏡組有不同匯聚能力以及透鏡穿透性，訊號放大器的增益值，必須作適當搭配才能獲得較佳的訊號輸出。

表 6.1 透鏡搭配與線性範圍關係

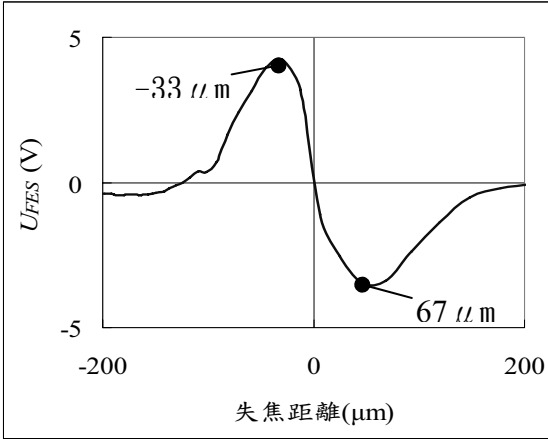
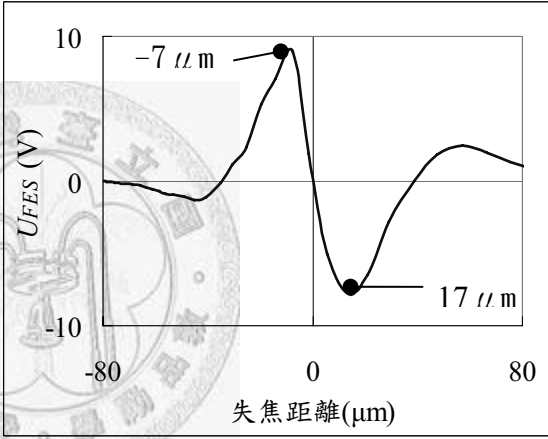
透鏡參數	失焦距離對 U_{FES} 值之關係圖
<p>長行程透鏡組 A</p> <p>物鏡焦距 3.3mm</p> <p>準直鏡焦距 10mm</p> <p>線性範圍 100 μm</p> <p>U_{FES} 訊號輸出範圍 $\pm 4\text{ V}$</p>	
<p>長行程透鏡組 B</p> <p>物鏡焦距 3.3mm</p> <p>準直鏡焦距 18.3mm</p> <p>線性範圍 24 μm</p> <p>U_{FES} 訊號輸出範圍 $\pm 8\text{ V}$</p>	

圖 6.2 為致動子系統之性能檢測架構，致動子系統由 Labview 以正弦波形式輸出驅動電壓 V_{IN} ，再經由高電壓放大器來驅動致動子系統。同時以光纖位移計和 HOE 讀取頭來量測平台之位移。

壓電放大器之零點偏移設定為 -25V ，並將增益值設定為 35 倍，使訊號擷取卡輸出電壓 $0\sim 5\text{V}$ 可以放大壓電致動器所需之驅動電壓為 $-25\sim 150\text{V}$ 。訊號放大器之增益值設定為 100 倍，使 HOE 輸出訊號控制在 $\pm 15\text{V}$ 內。訊號擷取卡之解析度為 0.3mV ，擷取速度設定為 1 kHz ，輸入輸出訊號之範圍為 $\pm 10\text{V}$ 。光纖位移計之位移量測精度為 1 nm 。

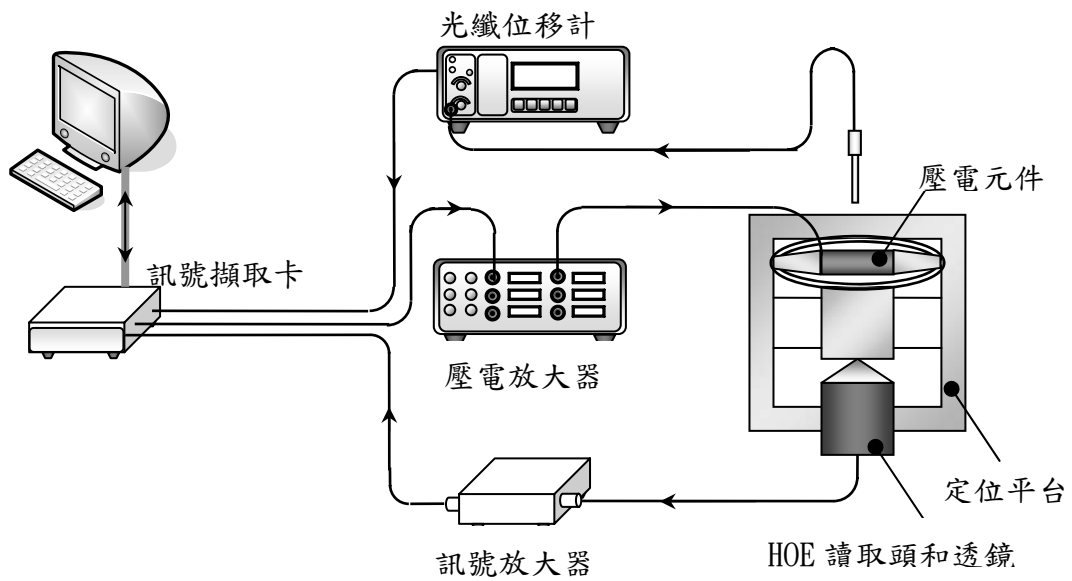


圖 6.2 定位平台效能測試實驗架構

表 6.2 為 X、Y 和 Z 軸致動器之致動性能表現，則在驅動電壓 V_{IN} 為 $-30V \sim 150V$ 的情況下，X、Y 及 Z 軸之最大行程分別為 $84 \mu m$ 、 $86 \mu m$ 及 $16 \mu m$ ，已經滿足三軸致動器所需之行程 $50 \mu m$ 、 $50 \mu m$ 和 $5 \mu m$ 。位移重現性誤差定義為驅動致動器時在同樣之驅動電壓下所產生位移量誤差，三軸之位移重現性誤差分別為 0.6%、0.5% 及 2.2%；而線性誤差為正向驅動致動器，致動位移量與擬合直線之差距，線性誤差則為 3.5%、5.1% 及 2.1%。

表 6.2 驅動電壓 V_{IN} 對位移量及 U_{FES} 之關係

	位移量 ΔL 與驅動電壓 V_{IN} 關係圖	量測訊號 U_{FES} 與驅動電壓 V_{IN} 關係圖
X 軸		
Y 軸		
Z 軸		

Z 軸之行程即為壓電元件之行程，X 軸之位移放大率為 $84/16=5.25$ ，Y 軸之位移放大率為 $86/16=5.375$ ，與預設理論值 6 倍無異，三軸位移皆有些許非線性情況，此原因在於撓性放大結構忠實將壓電元件之非線性放大所造成。

圖 6.3 為位移量測訊號 U_{FES} 和位移量 ΔL 之關係，藉由兩者之關係，可以利用位移量測訊號 U_{FES} 反推得位移量 ΔL 。訊號與位移之取得情況為反覆驅動壓電元件，致使平台來回移動，同時紀錄位移量測訊號 U_{FE} 和由光纖位移計測得之位移量 ΔL_s ，由於兩訊號紀錄的只是平台的瞬時位置，所以壓電元件之遲滯效應對位置訊號之影響將被完全排除。在最佳之情況下，位移量測訊號 U_{FES} 和位移量 ΔL 應呈現線性關係，但在圖 6.3 中，關係曲線為二次曲線，原因在於位移量測訊號 U_{FES} 在量測範圍中，待測物之位置變化與 U_{FES} 訊號並非完美線性關係，並且在越接近量測範圍之上下界時將更加明顯，此非線性關係也直接地反應到位移量測訊號 U_{FES} 和位移量 ΔL 之關係上，因此在 U_{FES} 越大時，曲率變化越明顯。需透過校正與公式來換算，才能做完整之位移量測。

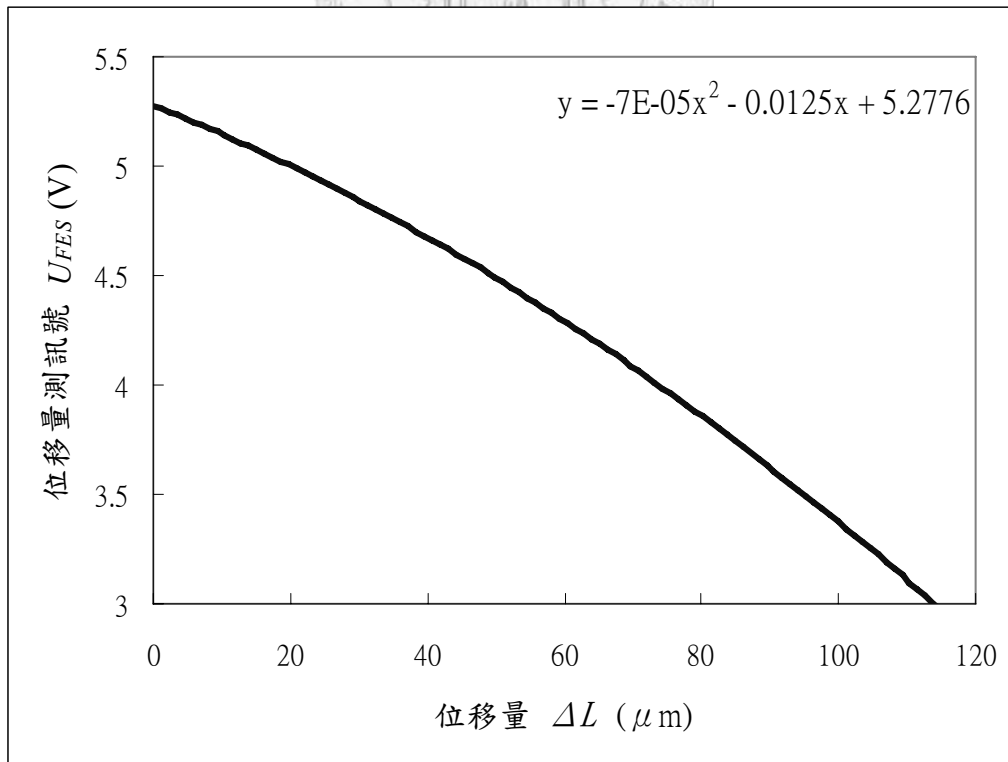


圖 6.3 位移量測訊號 U_{FES} 和位移量 ΔL 之關係

$\pm 150\text{V}$ 反覆驅動電壓作用下，致動器有明顯遲滯現象，X 和 Y 兩軸有 $15\mu\text{m}$ 的遲滯偏移，由 Z 軸 $3\mu\text{m}$ 的遲滯偏移，僅有 1.75% 之些微差距，可以得知出現 X、Y 兩軸之遲滯現象主要來源為壓電元件本身，以及小部分由零件間的摩擦所造成。此遲滯現象可以利用量測子系統之回饋訊號進行補償。

X、Y 與 Z 軸之解析度由 HOE 之最小雜訊影響，將放大器增益值進行適當之設定，理論上能有無限之解析度。但由於訊號擷取卡擷取範圍 $\pm 10\text{V}$ 之限制，則在雜訊為 1mV 情況下，僅能將全行程細分為兩萬份，則最高解析度分別為 4.2、4.3 及 0.8nm ，位移量測解析度受到擷取訊號範圍以及數位解析度之影響。

相較於 X、Y 兩軸之重現性誤差 0.6% 及 0.5%，Z 軸則有較大重現性誤差 2.2%，可能原因是 Z 軸壓電元件致動變形時有微小不協調偏轉變形。

表 6.3 為步階響應測試結果，以 150V 驅動電壓驅動定位平台，X、Y 與 Z 軸之時間常數 (Time constant) 為 6.5ms 、 6.7ms 及 6.5ms 。最高致動速度分別為 6.3 mm/s 、 6.2 mm/s 及 1.1 mm/s 。縮回致動有明顯殘振，可能是由於壓電元件和撓性放大結構之間接合膠之彈性行為以及三軸定位平台的慣性質量效應交替作用下所產生的振動行為。Z 軸往復致動都有振動現象產生，接合膠延展和壓縮彈性促使殘振產生。

表 6.3 三軸致動器之步階響應特性

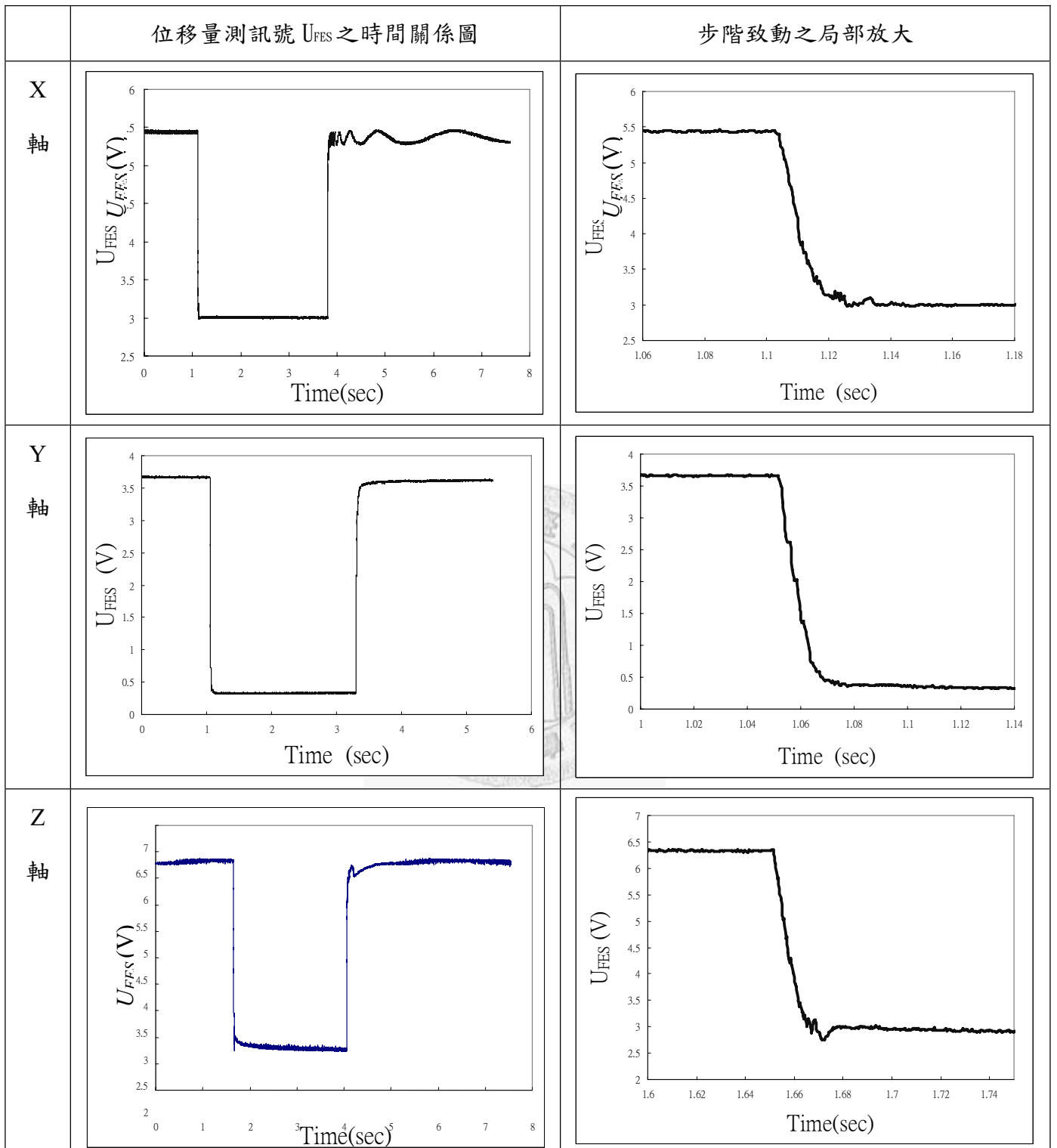


圖 6.4 為致動器之共振頻率測試架構，由訊號擷取卡輸出 0~10V 之電壓至訊號產生器之電壓控制頻率 VCF，以變動頻率的±10V 正弦波驅動壓電致動器，由 HOE 讀取頭量測位移變化，以找出致動器之自然頻率。

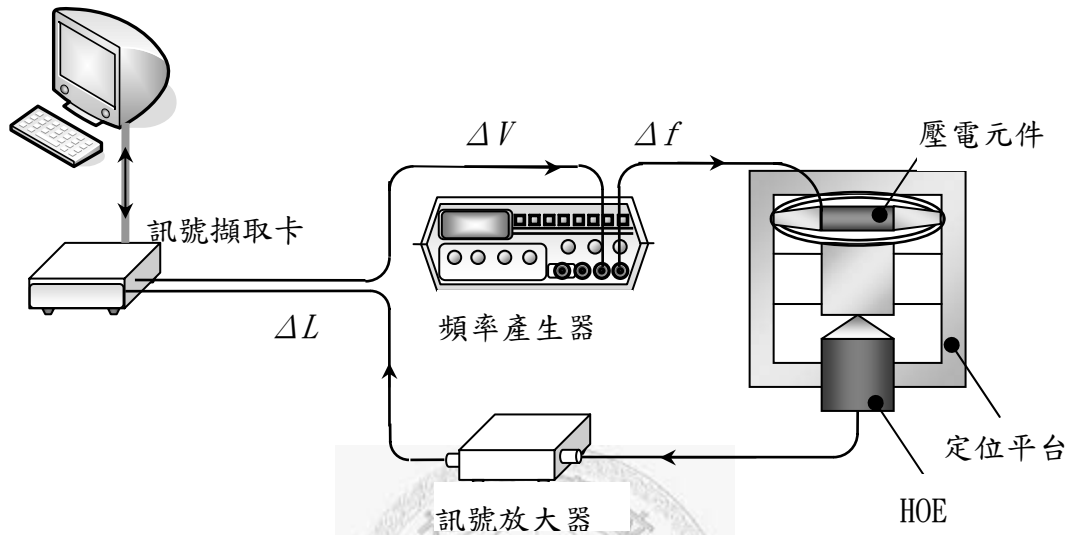


圖 6.4 定位平台頻率響應測試實驗架構

表 6.4 為三軸致動器自然頻率實驗量測結果，無因次位移量 ΔL^* 是以最大位移量 ΔL_{max} 為基準求得之無因次位移比率，則 X、Y 及 Z 軸之自然頻率分別為 102Hz、217Hz 及 4024Hz，由於 X 軸所承載之質量較 Y 軸大，所以壓低了自然頻率。Z 軸承載質量低，再加上壓電元件之剛性，所以有最高的自然頻率。

表 6.4 三軸致動器之頻譜分析結果

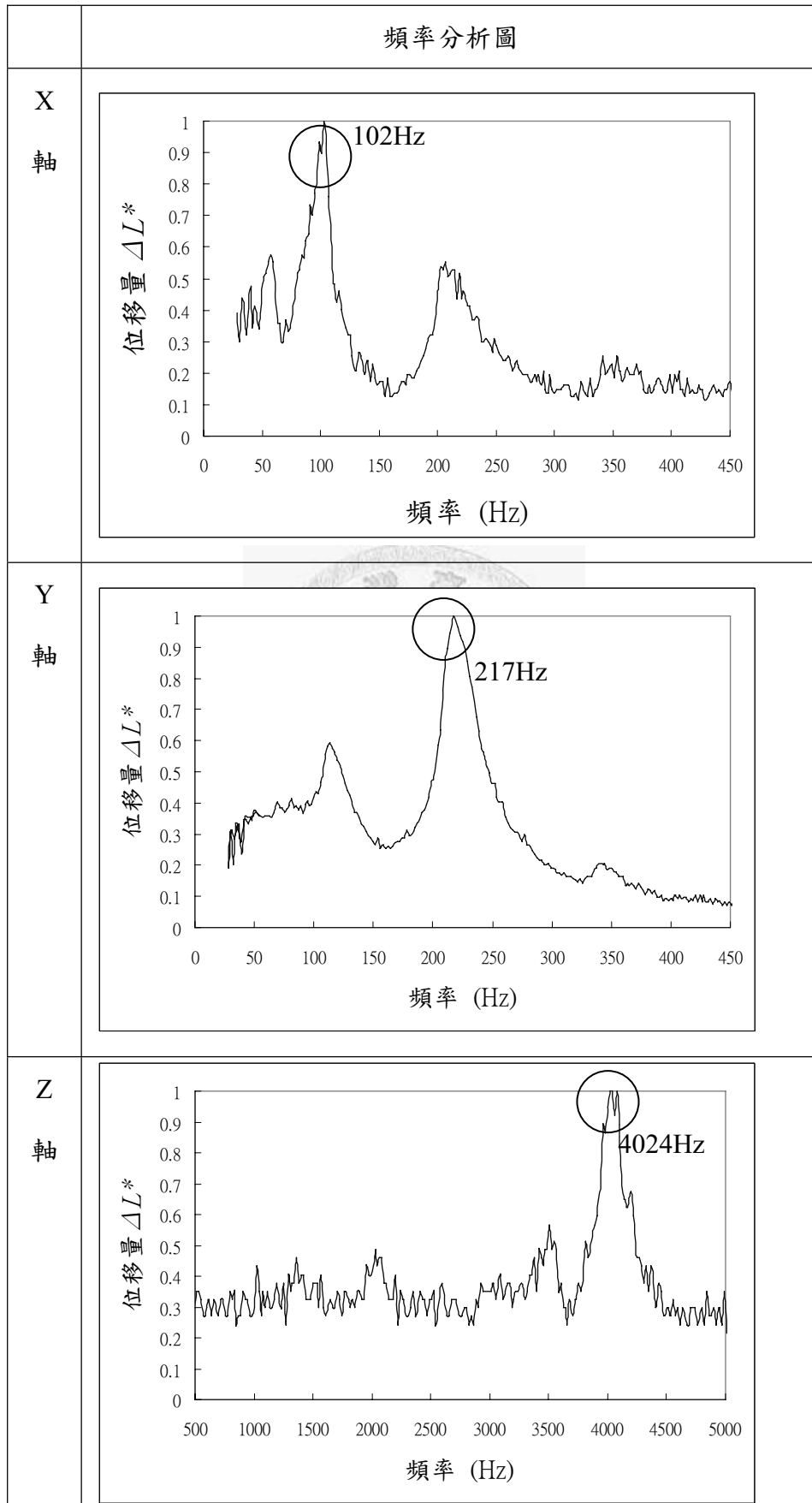


圖 6.5 顯示機械振動對三軸位移平台中 Y 軸的影響，外界之振動能直接傳入定位平台中，即三軸定位平台之剛性結構無法隔離外界振動干擾，因此在使用時必須搭配減振平台來阻隔外來振動。

圖 6.6(a)閉迴路控制下，對致動器給予一步階致動訊號，Y 軸定位平台之致動響應情形。在適當的 PI 值設定下，定位平台需要 0.5s 的時間反應才能完成定位動作，往復致動皆無過衝或振動現象，圖 6.5(b)為給予一個三角波致動訊號下，目標位移與實際致動的動態關係，致動器可以即時跟上目標位移作指令，除了些微相位差之外，致動運動曲線呈現線性與致動訊號相符。

表 6.5 是本論文設計開發完成之三軸定位系統之性能，三軸行程皆超過原始設計目標 $50\mu\text{m}$ 、 $50\mu\text{m}$ 及 $5\mu\text{m}$ 之 2 至 3 倍；三軸位移皆達到奈米級之標準，Z 軸甚至可以達到 0.7nm 次奈米級解析度。表 6.6 是本系統與市售產品之性能比較，進行比較的是平台為致動行程與致動方式相近之 Thorlab - APB301 致動器，在解析度、重量及尺寸項目上，所開發之致動系統皆超越市售產品之性能。

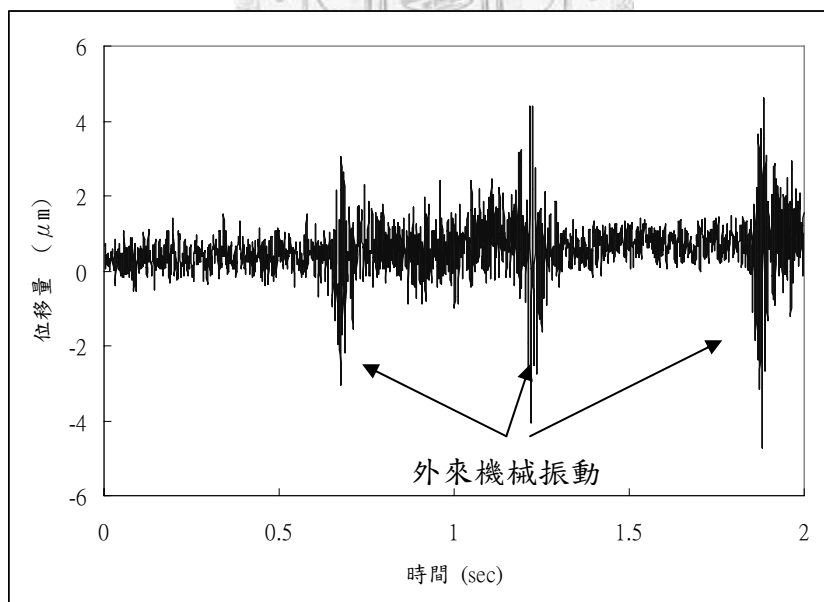
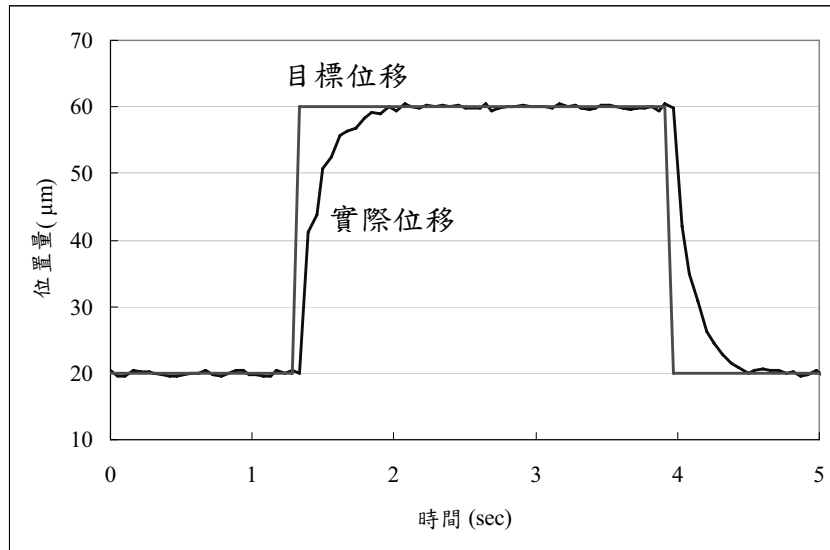
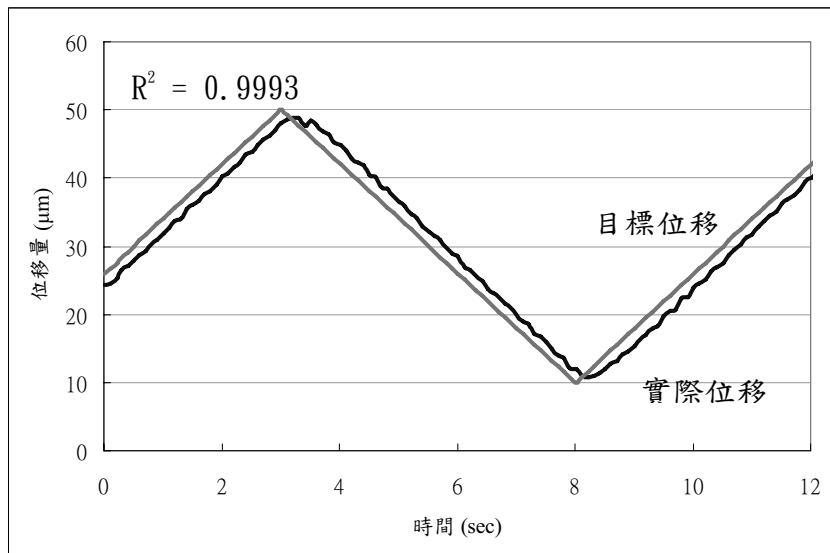


圖 6.5 受振動干擾之位移情形



a) 閉迴路步進定位



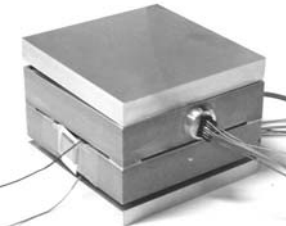

b) 目標位移與實際位移之關係

圖 6.6 閉迴路致動性能表現

表 6.5 三軸式奈米級定位平台之致動性能

	X 軸	Y 軸	Z 軸
行程	84 μm	86 μm	14 μm
解析度	4.2 nm	4.3 nm	0.7 nm
重現性誤差	0.6%	0.5%	3.5%
線性誤差	3.5%	5.1%	2.5%
時間常數	0.033 sec	0.029 sec	0.027 sec
最高移動速度	6.3 mm/s	6.2 mm/s	1.1 mm/s
共振頻率	102 Hz	207 Hz	4024 Hz

表 6.6 三軸式奈米級定位平台之性能比較

	三軸閉迴路奈米定位致動系統	Thorlab – APB301
XYZ 行程 (μm)	50、50、5 (84、86、14)	90、90、90
解析度 (nm)	4.2、4.3、0.7	25、25、25
共振頻率 (Hz)	102、207、4024	>150
重量 (Kg)	0.2	0.3
尺寸 (mm)	50×50×37	55×55×55
外形		

第七章 結論與未來展望

本論文整合壓電位移放大機構與全像術 HOE 讀取頭開發出閉迴路奈米級三軸定位平台，行程滿足 X、Y、Z 三方向為 $50\ \mu\text{m}$ 、 $50\ \mu\text{m}$ 、 $5\ \mu\text{m}$ 之目標。X、Y 軸精度達 4nm ，Z 軸精度可達 1nm 以下。

在本研究中利用橢圓形鋼片來達到體積小、無塑性變形並且仍能保有大行程之位移放大機構，放大率為 6 倍。另一方面，藉由模擬分析方法來推估 HOE 讀取頭和不同焦距透鏡組之線性量測範圍與數值光圈之關係，成功地變化線性量測範圍以滿足長程行程位移量測的功能。

本論文之研究貢獻如下：

1. 運用交錯堆疊結構以及平行簧片導引機構，成功設計開發出系統結構緊緻且無致動背隙的三軸閉迴路奈米級位移定位平台。
2. 成功設計開發撓性位移放大機構，有效地放大壓電致動位移，提供高精度長行程之致動。
3. 運用為小型全像術 HOE 讀取頭以及搭配不同焦距鏡頭，成功設計開發出高精度且兼具長程行程之位移量測系統。
4. 建構完整的高精度閉迴路致動系統之設計開發系統。包含概念設計、理論和有限元素分析、實驗測試、訊號處理和系統控制等。

要完成奈米級高精度的定位系統，除了干擾少的工作環境外，還必須有穩定的電能供給。系統小型化、緊緻化和模組化之追求，也可以有效減少慣性作用以及品質之提升。

未來研究方向：

1. 探討位移致動解析度和精確度之提升方法。
2. 探討提升動態性能的方法。
3. 開發全像術 HOE 讀取頭之工程應用。

4. 探討高精度多軸模組化致動系統之可行性。
5. 探討三軸閉迴路奈米級位移定位平台在精緻加工運用之可行性。



參考文獻

- [1] Kanai, A., Sano, H., Yoshioka, J., and Miyashita, M., “ Positioning of a 200 Kg Carriage on Plain Bearing Ruideways to Nanometer Accuracy with a Force-Operated Linear Actuator,” *Nanotechnology*, Vol. 2, 1991, pp.43-51.
- [2] Göddenhenrich, T., Lemke, H., Hartmann, U., and Heiden, C. “Probe Calibration in Magnetic Force Microscopy,” *Applied Physics Letters*, Vol. 57, Issue24, 1990, pp.2612-2614.
- [3] Neubauer, G., Cohen, S. R., McClelland, G. M., Horne, D., and Mate, C. M., “Force Microscopy with A Bidirectional Capacitance Sensor,” *Review of Scientific Instrument*, Vol. 61, Issue9, 1990, pp.2296-2308.
- [4] Dworak, V., Pitzius, P., and Hartmann, U., “Ultrahigh-resolution Scanning SQUID Microscopy,” *Proceeding of ISEC'97(International Superconducting Electronics Conference, Berlin, Germany, 1997.*
- [5] Binnig, G., Quate, C. F., and Gerber, Ch., “Atomic Force Microscope,” *Physics Review Letters.*, Vol. 56, Issue9, 1986, pp.930-933.
- [6] McClelland, G. M., Erlandsson, R., and Chiang, S., “Review of Progress in Quantitative Non-Destructive Evaluation,” Thompson, D. O. and Chimenti, D. E., Eds. (*Plenum, New York*) vol. 6, 1987, p. 307..
- [7] Erlandsson, R., Hadziioannou, G., Mate, C. M., McClelland, G. M., and Chiang, S., “Atomic Scale Friction between The Muscovite Mica Cleavage Plane and A Tungsten Tip,” *Journal of Chemical Physics*, Vol. 89, Issue8, 1988, pp.5190-5193.
- [8] den Boef, A. J., “Scanning Force Microscopy Using a Simple Low-noise Interferometer,” *Applied Physics Letter*, Vol. 55, 1989, pp. 439-411.
- [9] Meyer, G. and Amer, N. M., “Novel Optical Approach to Atomic Force

- Microscopy,” *Applied Physics Letter*, Vol. 53, 1988, pp. 1045.
- [10] Alexander, S., Hellemans, L., Marti, O., Schneir, J., Elings, V., Hansma, P. K., Longmire, M., and Gurley, J., “An Atomic-Resolution Atomic-force Microscope Implemented Using An Optical Lever,” *Journal of Applied Physics*, Vol. 65, Issue1, 1989, pp.164-167.
- [11] Ducker, W. A., Cook, R. F., and Clarke, D. R., “Force Measurement Using An AC Atomic Force Microscope” *Journal of Applied Physics*, Vol. 67, Issue9, 1990, pp.4045-4052.
- [12] 游鴻修，“奈米定位平台系統識別之探討”，*機械工業雜誌*，第255期，1994，pp.176-185。
- [13] Uchino, K., “Recent Trend of Piezoelectric Actuator Developments”, *International Symposium on Micromechatronics and Human Science*, 1999, pp.3-9.
- [14] Inoue, T., Nada, T., Miyama, T., Sugiuchi, K., and Takahashi, S., “Low-frequency Flexensional Piezoelectric transmitter with Displacement Amplifier”, *Ultrasonics Symposium*, 1987, pp.765-770.
- [15] “PIEZO ACTUATORS & ELECTRONICS”, *Cedrat Piezo, Inc.*
- [16] 錢正清，“變焦光學讀取頭對精密位移量測性能之影響探討”，*國立台灣大學機械工程學研究所碩士論文*，2007。
- [17] Chu, C. L., Lin C. H., and Fan, K. C., “Development of a two-dimensional optical accelerometer using a DVD pick-up head”, *Proc. of SPIE*, Vol. 6280, 2006, pp.62801M1-62801M6.
- [18] Shin, H. F., “Optical Head with Two Wavelengths in Single Path Using Holographic Optical Element”, *The Japan Society of Applied Physics*, Vol. 44, 2005, pp. 1797-1802.
- [19] Hnilčkaa, B., Vodaa, A., and Schröderb, H.-J., “Modelling the characteristics

of a photodetector in a DVD player”, *Sensors and Actuators*, A 120, 2005, pp. 494 -506.

[20] Rostyslav Mastlyo, Denis Dontsov, Eberhard Manske, and Gerd Jäger, “A focus sensor for an application in a nanopositioning and nanomeasuring machine”, *Proc. of SPIE*, Vol. 5856, 2005, pp. 238-244.

[21] Hwu, E. T., Huang, K. Y., Hung, S. K., and Hwang, I. S., “Measurement of Cantilever Displacement Using a Compact Disk/Digital Versatile Disk Pickup Head”, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 45, No. 3B, 2006, pp.2368-2371.

[22] 周卓明 ， “基本壓電力學” ，全華科技圖書股份有限公司，2003。

[23] Physik Instrumente (PI) GmbH & Co.,
<http://www.physikinstrumente.com/en/index.php> , 2008.

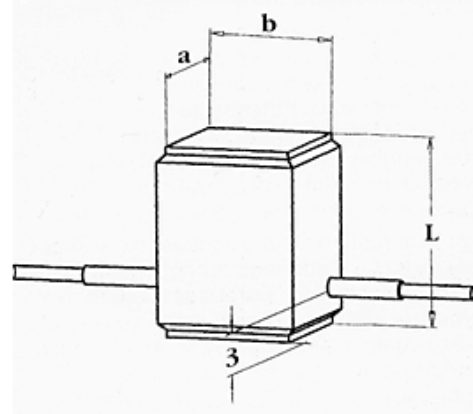
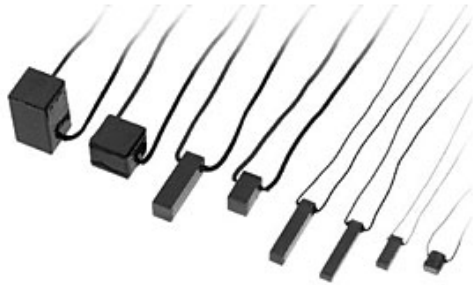
[24] 吳俊男，“剪力式壓電驅動多軸球型致動器之設計開發與性能分析”，國立台灣大學機械工程學研究所碩士論文，2006。

[25] 周欣怡，“整合原子力顯微鏡式和光學式微小形變量測系統之設計開發與性能測試分析”，國立台灣大學機械工程學研究所碩士論文，2006。

[26] “Hologram Lasers Specifications : GH6C605BXX/GH6D307BXA”, *SHARP, Inc.*

附録 A 圧電元件規格與特性

低電圧仕様
A. Stack type piezo actuators
Low voltage types for OEM purposes
(no casing, bare stacks)



オープンループ感度

1mVノイズが150/V/7に変わった場合:約 0.05 nm

1mVノイズが150/V/20に変わった場合:約0.1 nm

最大コーティング厚さ0.5 mm

Type	寸法 (mm)	最大伸び (μm)	静電容量 (nF)	剛性・硬さ (N/μm)	共振周波数 (kHz)	最大発動力 (N)	最大荷重 (N)
Pst 150/2×3/ 5	2×3×L = 5	5	70	45	120	300	300
Pst 150/2×3/ 7	2×3×L = 9	9	170	25	70	300	300
Pst 150/2×3/20	2×3×L = 18	20	340	12	35	300	300
Pst 150/3.5×3.5/7	3.5×3.5×L = 9	9	350	50	70	800	800
Pst 150/3.5×3.5/20	3.5×3.5×L = 18	20	800	25	35	800	800
Pst 150/5×5/ 7	5×5×L = 9	9	700	120	70	1800	2000
Pst 150/5×5/20	5×5×L = 18	20	1800	60	35	1800	2000
Pst 150/7×7/20	7×7×L = 18	20	3600	120	35	3500	4000
Pst 150/10×10/ 7	10×10×L = 9	9	3600	500	70	7000	8000
Pst 150/10×10/20	10×10×L = 18	20	7200	250	35	7000	8000
Pst 150/14×14/18	14×14×L = 20	18	10500	500	32	11000	15000
-Special design- Pst 150 /2×10/20	2×10×L = 20	20	1000	40	35	1000	1000

最大伸びは、0~150V時



A worldwide leader in precision measurement solutions

MTI-2100

FOTONIC
SENSOR™

High resolution, non-contact
measurement of vibration
and displacement

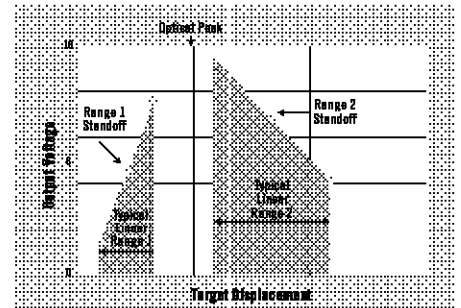


Standard Fotonic Probe

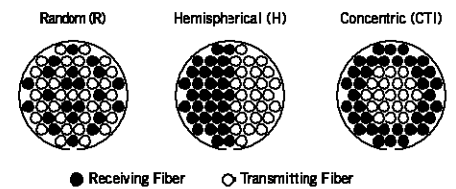
Operating Principle

Each MTI-2100 Fotonic probe contains a set of light transmitting and light receiving fibers, which can be arranged in three different configurations (random, hemispherical or concentric). A tungsten halogen lamp feeds light down the transmit fibers, where it exits the probe tip and hits the target. Light that is reflected from the target is captured by the receive fibers and transmitted to the MTI-2100. The light intensity is monitored, which is proportional to the distance between the probe tip and the target being measured. At contact, no light is exiting or received by the fibers, giving an output

signal of zero. As the probe-to-target distance increases, increasing amounts of light are proportionally captured by the receive fibers. The result is a very sensitive, linear output response (Range 1) from the MTI-2100. As the distance is further increased, the amount of light received approaches the maximum or "optical peak." After the optical peak is reached, a continued increase in probe gap will proportionally reduce the amount of light received. This results in a sensitive, linear output response (Range 2) with a large measurement range and standoff distance.



Fiber Distribution



Probe Module Model No.	Probe Tip Diameter in. (mm)		Cable Length in. (mm)	Maximum Frequency Response (-3 dB) kHz	Output Signal Noise: mV p-p	Meter Resolution ^{1,2} μ m. (μ m)		Range 1 Characteristics			Range 2 Characteristics			Optical Peak ³ mils (mm)	
	Total	Active				Range 1	Range 2	Sensitivity ⁴	Linear Range ⁵	Standoff ⁶	Sensitivity ⁴	Linear Range ⁵	Standoff ⁶	Mid-point ⁷	Range ⁸
								$\frac{\mu$ m.}{mV}	mils (mm)	mils (mm)	$\frac{\mu$ m.}{mV}	mils (mm)	mils (mm)		
MTI-2020R	0.020 ⁹ (0.508)	0.007 (0.178)	54 (1372)	120	30	1.0 (0.01)	1.0 (0.1)	0.65 (0.016)	4.0 (0.102)	5.0 (0.127)	3.0 (0.076)	12.0 (0.305)	20.0 (0.508)	12.0 (0.305)	5.0 (0.127)
MTI-2032R	0.032 ⁹ (0.813)	0.019 (0.483)	54 (1372)	120	20	1.0 (0.01)	10.0 (0.1)	0.74 (0.019)	5.0 (0.127)	5.0 (0.127)	5.0 (0.127)	29.0 (0.737)	35.0 (0.889)	20.0 (0.508)	5.0 (0.127)
MTI-2047R	0.047 (1.194)	0.027 (0.686)	54 (1372)	130	10	1.0 (0.01)	10.0 (0.1)	0.80 (0.020)	5.0 (0.127)	5.0 (0.127)	8.0 (0.203)	40.0 (1.016)	44.0 (1.118)	18.0 (0.457)	5.0 (0.127)
MTI-2062R	0.063 (1.600)	0.047 (1.194)	54 (1372)	150	5	1.0 (0.1)	10.0 (0.1)	1.0 (0.025)	6.0 (0.152)	5.0 (0.127)	15.0 (0.381)	60.0 (1.524)	70.0 (1.778)	26.0 (0.660)	9.0 (0.229)
MTI-2062H	0.063 (1.600)	0.047 (1.194)	54 (1372)	150	5	10.0 (1.0)	10.0 (1.0)	5.0 (0.127)	30.0 (0.762)	30.0 (0.762)	20.0 (0.508)	75.0 (1.905)	150.0 (3.810)	100.0 (2.540)	14.0 (0.356)
MTI-2125R	0.125 (3.175)	0.090 (2.286)	54 (1372)	190	3	1.0 (0.1)	10.0 (1.0)	1.0 (0.025)	6.0 (0.152)	7.0 (0.178)	30.0 (0.762)	140.0 (3.556)	120.0 (3.048)	32.0 (0.813)	14.0 (0.356)
MTI-2125CTI	0.125 (3.175)	0.090 (2.286)	54 (1372)	150	3	10.0 (1.0)	10.0 (1.0)	7.0 (0.178)	20.0 (0.508)	30.0 (0.762)	30.0 (0.762)	140.0 (3.556)	220.0 (5.588)	100.0 (2.540)	20.0 (0.508)
MTI-2125H	0.125 (3.175)	0.090 (2.286)	54 (1372)	150	3	10.0 (1.0)	10.0 (1.0)	13.0 (0.330)	70.0 (1.778)	50.0 (1.270)	40.0 (1.016)	175.0 (4.445)	300.0 (7.620)	180.0 (4.572)	50.0 (1.270)
						Range X1	Range X10	Range 1 Characteristics			Range 2 Characteristics				
MTI-2032RX	0.032 (0.813)	0.019 (0.483)	54 (1372)	100	30	1.0 (0.01)	0.1 (0.001)	0.20 (0.005)	1.4 (0.036)	1.5 (0.038)	0.02 (0.0005)	0.4 (0.010)	1.50 (0.038)	5.0 (0.127)	1.50 (0.038)

1. When measuring to a 2 μ m. AA electroformed, GMR surface-finish comparator block. Noise given is with low pass adjustable filter set at "wide band." Noise decreases as lower filter settings are selected. 2. The analog output resolution is a product of the sensitivity and the noise. 3. Nominal value \pm 13%. 4. For approximate \pm 1% linear range, multiply by 0.75. 5. Nominal value \pm 10%. 6. Optimal standoff for reflectivity/surface finish measurements. 7. Nominal value \pm 15%. 8. Displacement range producing 5% change from peak output when making reflectivity/surface finish measurements. 9. Highest possible meter resolution shown for intrinsic English and intrinsic metric engineering units. Probe module's intrinsic (English or metric) engineering units must be specified at the time probe module is ordered. Alternate engineering units selected via the front panel "UNITS" button offer reduced meter resolution. 10. MTI-2020R and MTI-2032R probe modules use a 0.062" diameter sleeve starting 0.250" (6.35 mm) back from the probe tip.

Low-Cost M Series Multifunction DAQ – 16-Bit, 250 kS/s, up to 80 Analog Inputs

NI M Series – Low-Cost

- NI recommends high-speed M Series for 5X faster sampling rates, high-accuracy M Series for 4X higher resolution, or industrial M Series for 10X better noise rejection
- 16, 32, or 80 analog inputs at 16 bits, 250 kS/s
- Up to 4 analog outputs at 16 bits, 833 kS/s (6 μ s full-scale settling time)
- Programmable input range (± 10 , ± 5 , ± 1 , ± 0.2 V) per channel
- Up to 48 TTL/CMOS digital I/O lines (up to 32 hardware-timed at 1 MHz)
- Two 32-bit, 80 MHz counter/timers
- Digital triggering
- NI-MCal calibration technology for improved measurement accuracy
- 6 DMA channels for fast data throughput
- X1, X2, or X4 quadrature encoder inputs

Operating Systems

- Windows Vista/XP/2000
- Mac OS X
- Linux[®]

Recommended Software

- LabVIEW
- LabWindows[™]/CVI
- Measurement Studio

Other Compatible Software

- LabVIEW SignalExpress
- ANSI C/C++
- C# and Visual Basic .NET
- Visual Basic 6.0

Measurement Services

Software (included)¹

- NI-DAQmx driver software
- Measurement & Automation Explorer configuration utility
- LabVIEW SignalExpress LE data-logging software

¹Mac OS X users must download NI-DAQmx base driver.



Family	Bus	Analog Inputs	Analog Input Resolution (bits)	Analog Outputs	Output Resolution (bits)	Max Output Rate (kS/s)	Analog Output Range (V)	Digital I/O	Correlated Collected DIO
NI 6220	PCI, PXI	16	16	—	—	—	—	24	8, up to 1 MHz
NI 6221	PCI, PXI, USB	16	16	2	16	833	± 10	24	8, up to 1 MHz
NI 6221 (37-Pin) ¹	PCI	16	16	2	16	833	± 10	10	2, up to 1 MHz
NI 6224	PCI, PXI	32	16	—	—	—	—	48	32, up to 1 MHz
NI 6225 ²	PCI, PXI, USB	80	16	2	16	833	± 10	24	8, up to 1 MHz
NI 6225 ²	PCI, PXI, USB	32	16	4	16	833	± 10	48	32, up to 1 MHz

¹37-Pin multifunction DAQ devices are not compatible with NI SCC or SCXI platforms. ²USB devices are not compatible with SCXI signal conditioning.

Table 1. Low-Cost M Series Selection Guide

Overview and Applications

National Instruments M Series low-cost multifunction data acquisition (DAQ) devices provide optimized functionality for cost-sensitive applications. Low-cost M Series devices have up to 80 analog inputs, 48 digital I/O lines, four analog outputs, two counter/timers, and digital triggering. Low-cost M Series devices have a one-year calibration interval. For better accuracy, faster speeds, and an extended two-year calibration service, consider the high-speed and high-accuracy M Series devices.

M Series for Test

For test, you can use 16-bit, 250 kS/s analog inputs and 1 MHz digital lines with NI signal conditioning for applications including data logging and sensor measurements. Low-cost M Series devices are compatible with National Instruments SCC and SCXI signal conditioning platforms, which provide amplification, filtering, and power for virtually every type of sensor. These platforms also are compliant with IEEE 1451.4 smart transducer electronic data sheet (TEDS) sensors, which provide digital storage for sensor data sheet information.