

國立交通大學

機械工程學系

碩士論文

快速三維奈米定位器之設計與特性研究

**The Design and Characteristic Research of a Fast 3-dimensional
Nano-positioner**

研究生：王佑麒

指導教授：洪紹剛 博士

中華民國 九十九年 六月

快速三維奈米定位器之設計與特性研究

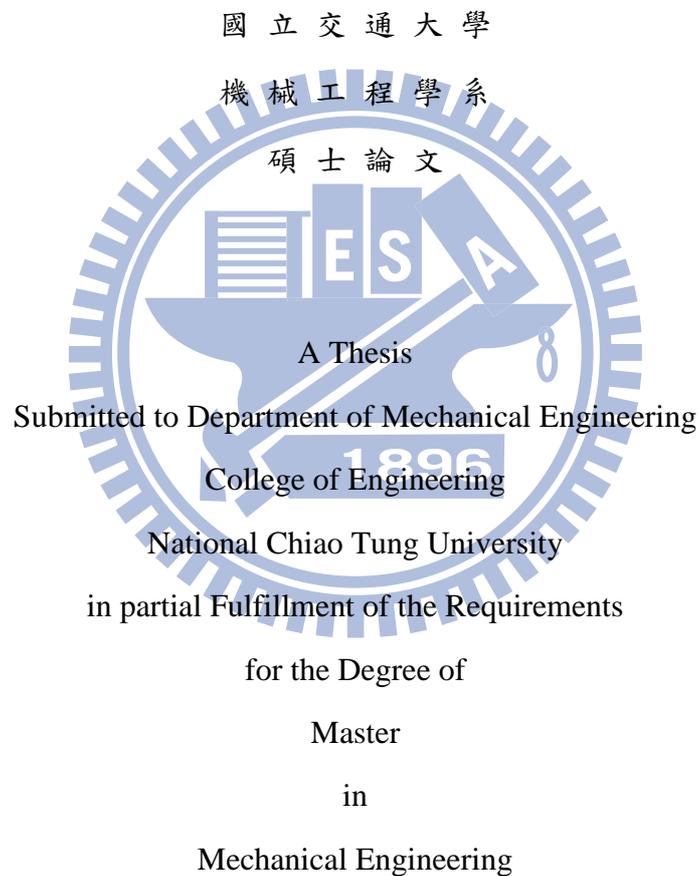
The Design and Characteristic Research of a Fast 3-dimensional
Nano-positioner

研 究 生：王佑麒

Student：Yu-Chi Wang

指導教授：洪紹剛 博士

Advisor：Dr. Shao-Kang Hung



June 2010

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國 九十九年 六月

快速三維奈米定位器之設計與特性研究

學生：王佑麒

指導教授：洪紹剛

國立交通大學機械工程學系（研究所）碩士班

摘要

本論文介紹了三自由度運動的“平行細柱群”導引和多致動器並聯機構之機械設計方法，並使多致動器並聯機構被用於奈米定位器的平面運動。本研究之三維奈米定位器具有高定位精度、緊密性，以及較低的製造成本等多項優點。其應用範圍如掃描探針顯微鏡、超精密加工及光學工程等。

“平行細柱群”的機構設計上我們利用了有限元素法分析。組裝完成之奈米定位器系統透過了一系列的實驗，展現了系統性能。奈米定位器在 X 軸向、Y 軸向與 Z 軸向的掃描範圍都是 $5\mu\text{m}$ 。此外，在 X 軸向與 Z 軸向的解析度為 11nm (rms) 、在 Y 軸向的解析度為 13nm (rms) ，其最大工作頻率為 150Hz 。

The Design and Characteristic Research of a Fast 3-dimensional Nano-positioner

student : Yu-Chi Wang

Advisors : Shao-Kang Hung, Ph.D.

Department (Institute) of Mechanical Engineering
National Chiao Tung University

ABSTRACT

This thesis presents a mechanical design method of “thin column group” guidance and multi-actuator parallel mechanism for a three degree-of-freedom translational nano-positioner. Multi-actuator parallel mechanism is utilized to implement planar motions which are general requirements for nano-positioners. The three-dimensional nano-positioner has several advantages such as high-precision, compactness, and low-cost. This nano-positioner can be applied to scanning probe microscopy, ultra-precision machining, and optical engineering.

The critical dimensions of “thin column group” are designed by the assistance of finite element analysis. The nano-positioner system is built up and tested successfully by a series of experiments. The traveling range of this nano-positioner is 5 μm in the X-, Y-directions as well as in the Z-direction. Also, the resolution of this nano-positioner is 11 nm (rms) in the X-, Z-directions and 13 nm (rms) in the Y-direction. Its maximum working frequency is 150 Hz.

致謝

研究所兩年的訓練，首先要感謝 洪紹剛 博士指導，他總是不厭其煩的指導我們，跟我們討論進度，也指點我們研究專題的方向與目標，每次和老師做研究進度的討論，讓我的研究更完善，這也是完成我的研究的主要助力。

感謝口試委員 徐文祥 博士與 陳美勇 博士於百忙之中抽空前來指導，並對本論文提供寶貴的建議與指正，使本論文更趨於完善，在此深致謝意。

此外，在研究期間還要感謝所有精密機電工程實驗室的成員，同學建宇、日韋、彥菘，學弟喬華、盧奕、立岡、杰緯在課業上相互切磋及生活上的相互鼓勵，在此致上萬分的謝意。

再來要感謝女友亞欣不斷的從旁支持與鼓勵，使我總是充滿信心能夠面對挫折與挑戰，並且和我一起分享每一段成就與喜悅，讓我在大學與研究所的生涯顯得多采多姿。

最深厚的感謝與祝福要獻給我的父母，感謝他們對我的栽培與養育之恩，並給了我最好的生活環境，使我能夠無憂無慮的從事研究工作，我的父母也是我最堅強的堡壘，僅以這本論文所帶來的成果獻給我最愛的父母與家人。

王佑麒

精密機電工程實驗室

目錄

中文摘要	i
英文摘要	ii
致謝	iii
目錄	I
圖目錄	III
表目錄	IV
一、 緒論	1
1.1 研究背景與動機	1
1.2 文獻回顧	1
1.3 研究目標	9
1.4 論文結構與研究主題流程	9
二、 定位器組成元件與原理	11
2.1 壓電致動器	12
2.1.1 壓電效應	14
2.1.2 磁滯現象	16
2.1.3 潛變(creep)	16
2.1.4 壓電材料組成律	17
2.1.5 壓電特性參數	20
2.2 導引機構	22
三、 奈米定位器設計	24
3.1 平行細柱群導引機構	24
3.2 有限元素輔助設計	25
3.2.1 有限元素法簡介	25
3.2.2 以 ANSYS 分析「平行細柱群」	27
3.2.3 「平行細柱群」機構設計	33
3.3 系統整合	41
3.3.1 控制軟體(MATLAB/Simulink)	42
3.3.2 資料擷取卡	43
3.3.3 Real-Time Workshop	45
3.3.4 控制器設計	45
四、 實驗	47
4.1 量測流程與設備	47

4.2	-30V~30V 驅動電壓	48
4.2.1	大範圍步階響應測試	48
4.2.2	連續小步階響應測試	51
4.2.3	正弦波測試	51
4.2.4	三角波測試	53
4.2.5	圓軌跡測試	54
4.2.6	螺旋軌跡測試	55
4.3	0V~150V 驅動電壓	56
4.3.1	大範圍步階響應測試	56
4.3.2	連續小步階響應測試	58
4.3.3	正弦波測試	58
4.3.4	三角波測試	59
4.3.5	圓軌跡測試	60
4.3.6	螺旋軌跡測試	61
五、	結論與未來展望	62
六、	參考文獻	64



圖目錄

圖 1-1	微位移平台[6].....	3
圖 1-2	微步進直線定位裝置實體圖(a)、(b)[7].....	3
圖 1-3	蜈蚣運動機構運動原理[10].....	4
圖 1-4	蜈蚣微系統示意圖.....	4
圖 1-5	蜈蚣平台運動流程圖.....	5
圖 1-6	Scire 與 Teague 將兩組槓桿機構轉換撓性結構實體[14].....	6
圖 1-7	XY0z 微定位平台[17-18].....	6
圖 1-8	x-y 精密微定位平台示意結構圖[19].....	7
圖 1-9	Hansma 研究群在 2004 年使用 FEA 第一共振頻率模擬圖[20].....	7
圖 1-10	壓電驅動撓性機構[21].....	7
圖 1-11	平行薄板群為導引機構之奈米定位平台[22].....	8
圖 1-12	研究主題流程.....	10
圖 2-1	定位平台的組成元件.....	11
圖 2-2	壓電致動器的類型.....	13
圖 2-3	正壓電效應.....	15
圖 2-4	逆壓電效應.....	15
圖 2-5	壓電致動器磁滯曲線.....	16
圖 2-6	壓電致動器潛變現象.....	17
圖 2-7	壓電材料方向表示法.....	19
圖 2-8	X 與 Y 方向的平行薄板群示意圖[20, 22].....	23
圖 3-1	灰色為「平行細柱群」機構，綠色為壓電致動器.....	24
圖 3-2	新式三軸奈米定位器的 3D 模型圖.....	25
圖 3-3	奈米定位器之(a)SolidWorks 模型及(b)實體照片.....	25
圖 3-4	壓電致動器(PSt 150).....	27
圖 3-5	ANSYS 模型分析圖.....	29
圖 3-6	微定位平台網格建立圖.....	31
圖 3-7	邊界條件設定圖.....	32
圖 3-8	細柱群尺寸代號圖.....	34
圖 3-9	機構設計分析後之 x 向應力圖.....	37
圖 3-10	機構設計分析後之 y 向應力圖.....	37
圖 3-11	機構設計分析後之 z 向應力圖.....	38
圖 3-12	機構設計分析後之 x 向應變圖.....	38
圖 3-13	機構設計分析後之 y 向應變圖.....	39
圖 3-14	機構設計分析後之 z 向應變圖.....	39
圖 3-15	單軸施加正負 30V 之平台位移圖.....	40
圖 3-16	雙軸施加正負 30V 之平台位移圖.....	40
圖 3-17	Z 軸施加 30V 之平台位移圖.....	41
圖 3-18	實驗儀器量測架設圖.....	42
圖 3-19	NI PCIe-6259 資料擷取卡與外接式端子台.....	44
圖 3-20	訊號控制及紀錄.....	45
圖 4-1	快速三維奈米定位器實體圖.....	47
圖 4-2	三維奈米定位器量測流程圖.....	48
圖 4-3	X 軸大範圍步階響應測試，(a)X 軸狀態，(b)圖 4-3(a)穩定以後的解析度約為 11nm (rms)，(c)上升時間約為 10ms。.....	49
圖 4-4	Y 軸大範圍步階響應測試，(a)Y 軸狀態，(b)圖 4-4(a)穩定以後的解析度約為 22nm (rms)，(c)上升時間約為 10ms。.....	50
圖 4-5	Z 軸大範圍步階響應測試，(a)Z 軸狀態，(b)圖 4-4(a)穩定以後的解析度約為 11nm (rms)，(c)上升時間約為 2.5ms。.....	50
圖 4-6	(a)X 軸連續小步階響應，(b)Y 軸連續小步階響應。.....	51
圖 4-7	X 軸正弦波各種頻率追蹤響應圖，(a)1Hz、(b)5Hz、(c)10Hz、(d)30Hz、(e)60Hz、(f)100Hz、(g)130Hz、(h)140Hz、(i)150Hz。.....	52

圖 4-8 Y 軸正弦波各種頻率追蹤響應圖， (a)1Hz、(b)5Hz、(c)10Hz、(d)30Hz、(e)60Hz、(f)100Hz、(g)130Hz、(h)140Hz、(i)150Hz。	52
圖 4-9 X 軸三角波各種頻率追蹤響應圖， (a)1Hz、(b)5Hz、(c)10Hz、(d)30Hz、(e)60Hz、(f)100Hz、(g)130Hz、(h)140Hz、(i)150Hz。	53
圖 4-10 Y 軸三角波各種頻率追蹤響應圖， (a)1Hz、(b)5Hz、(c)10Hz、(d)30Hz、(e)60Hz、(f)100Hz、(g)130Hz、(h)140Hz、(i)150Hz。	54
圖 4-11 圓軌跡測試圖(a)1Hz、(b)10Hz。	55
圖 4-12 螺旋軌跡測試圖(a)1Hz、(b)10Hz。	55
圖 4-13 X 軸大範圍步階響應測試，(a)X 軸狀態，(b)圖 4-13(a)穩定以後的解析度約為 11nm (rms)，(c)上升時間約為 5ms。	57
圖 4-14 Y 軸大範圍步階響應測試，(a)Y 軸狀態，(b)圖 4-4(a)穩定以後的解析度約為 13nm (rms)，(c)上升時間約為 5ms。	57
圖 4-15 (a)X 軸連續小步階響應，(b)Y 軸連續小步階響應。	58
圖 4-16 X 軸正弦波各種頻率追蹤響應圖，(a)1Hz、(b)5Hz、(c)10Hz	59
圖 4-17 Y 軸正弦波各種頻率追蹤響應圖，(a)1Hz、(b)5Hz、(c)10Hz	59
圖 4-18 X 軸三角波各種頻率追蹤響應圖，(a)1Hz、(b)5Hz、(c)10Hz。	60
圖 4-19 Y 軸三角波各種頻率追蹤響應圖，(a)1Hz、(b)5Hz、(c)10Hz。	60
圖 4-20 圓軌跡測試圖(a)1Hz、(b)10Hz。	61
圖 4-21 螺旋軌跡測試圖(a)1Hz、(b)10Hz。	61

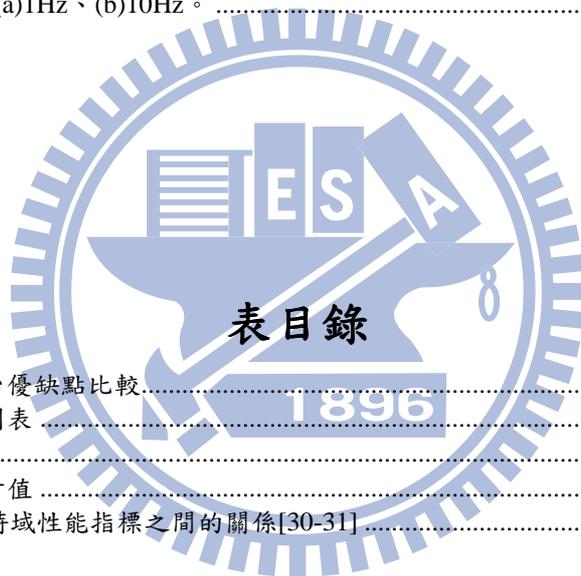


表 1-1 三類壓電致動平台優缺點比較	8
表 3-1 設計參數設定範圍表	35
表 3-2 T6-6061 特性表	35
表 3-3 分析後的各個尺寸值	36
表 3-4 PID 參數與系統時域性能指標之間的關係[30-31]	46

一、緒論

1.1 研究背景與動機

近幾年來，由於科技不斷的進步，許多科技產業都陸續的朝著精密化及微小化的趨勢發展，機械產業自然也是如此。傳統的舊式機械設備其在驅動上所使用到的致動器大多為氣壓、液壓致動器或是其他各類的馬達，但是這些驅動器由於其結構特性的關係，大都很難達到我們所需求的微小化。就奈米定位器而言，其控制致動器之精準度需要相當高，傳統的致動器完全無法符合需求，因此一般奈米定位器的致動器常使用壓電式致動器(piezoelectric actuator)，壓電式致動器具有下列優點：體積小精度高、反應速率快、機電轉換效率高、位移解析度大、熱膨脹補償很小、產生推力大、不會產生電磁訊號干擾。

奈米定位器被廣泛使用在顯微術、精密量測、微加工，微操控等領域，其中一種重要的應用便是原子力顯微術[1]。原子力顯微術利用微懸臂探針靠近樣品表面，當探針與樣品接近時，針尖與樣品作用力使探針產生偏移，雷射光被反射至光感測器，經過放大電路轉成電壓訊號後，利用回饋電路，使作用力在掃描過程中維持固定，而記錄掃描器垂直軸在掃描過程中的變化，便可得到樣品表面型貌。

1.2 文獻回顧

奈米定位平台有許多種驅動與進給方式，利用不同進給方式，可以使得平台達到的定位行程和解析度有所不同。目前奈米定位平台的驅動方式有壓電致動器驅動、磁力驅

動、摩擦驅動...等，其中壓電致動器因為具有發熱少、機電轉換效率高、體積小等優點，所以較常被使用在奈米定位平台上。目前對於以壓電致動器驅動之奈米定位平台，主要分為三大類型，分別為：(1)利用摩擦滯滑現象的摩擦驅動平台、(2)利用夾持力的蜈蚣(Inchworm)式平台、(3)利用撓性結構的材料彈性變形原理的形變式定位平台。

在摩擦驅動平台方面，1987年 Matey[2]等人利用雙層壓電晶片之壓電材料組成的結構體設計出 X-Y-Z 三軸之精密定位機構，其變形量為 $0.3V/\mu\text{m}$ ，三軸的運動範圍均為 $\pm 60\mu\text{m}$ 。同年 Pohl[3]利用慣性力與摩擦力搭配合的原理設計出解析度 $0.04\sim 0.2\mu\text{m}$ ，速度 0.2mm/s 的長行程直線壓電驅動位移平台，其驅動力來自底面機構。1988年 Niedermann[4]利用壓電薄板於施加電壓下產生材料剪力變形的方式來作為致動器，並採以滯滑摩擦原理方式驅動平台移動，而使定位平台可達 10nm 之步進解析度，速度為 0.4mm/s 。1990年 Renner[5]等亦利用慣性力與摩擦力搭配合的原理，使用擺線波形之輸入電壓驅動壓電致動器，發展出解析度為 3nm 、速度為 0.2mm/s 之垂直定位機構。1998年 Chang 和 Li[6]將傳統 Scott-Russell 直線機構轉換應用於微步進直線定位裝置的設計上，並利用滯滑摩擦原理，經訊號控制後使 V-groove 上的滑塊具有 $0.05\sim 120\mu\text{m}$ 步階大小的移動能力，其全行程有 $100\mu\text{m}$ 並可達到 $0.04\mu\text{m}$ 的定位解析度，如圖 1-1 所示。2006年 Chu[7]利用所研製之微步進直線定位裝置具有高倍率放大位移輸出與極小角度偏差量之特性，搭配滯滑摩擦效應驅動平台，利用精密圓棒作為直線導引，以步進運動模式做長行程無位移範圍限制的移動。使其於步進運動模式下可於 $70\text{nm}\sim 35\mu\text{m}$ 的步階大小範圍內驅動平台做長行程的精密定位，而於掃描運動模式下，平台可於 $50\mu\text{m}$ 的範圍內做掃描，並具有 10nm 的最小位移解析度，如圖 1-2(a)、(b)。

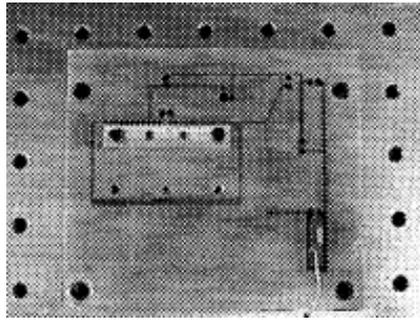
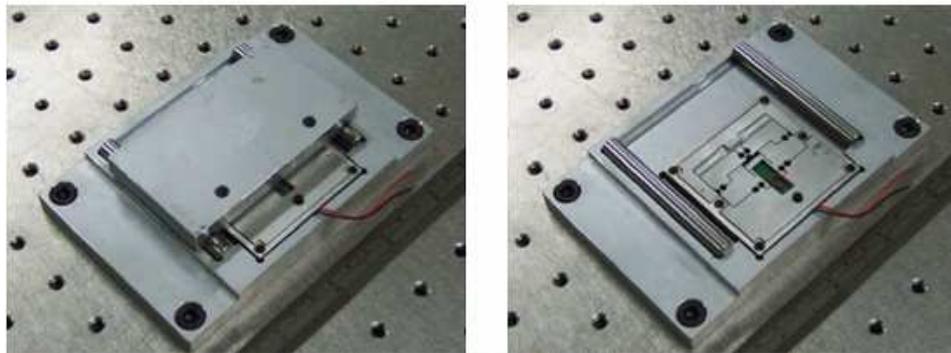


圖 1-1 微位移平台[6]



(a) (b)

圖 1-2 微步進直線定位裝置實體圖(a)、(b)[7]

在蜈蚣式的定位平台方面，1985 年 Mamin[8]等屬於壓電致動蜈蚣式定位平台方面，利用雙層壓電晶片壓電陶瓷致動器的變形，配合具有靜電吸引力的腳座，設計出單步位移 25~400nm 之二軸長行程奈米定位機構，其定位速度最快可達 $40\mu\text{m/s}$ 。1996 年 Aoyama[9]設計一組具有模組化結構的微小機械人，其運動方式主要是以蜈蚣運動進行各式定位運動。1997 年 Shamoto 與 Moriwaki[10]設計一組由壓電致動器所製作的蜈蚣運動機構，其最小可解析步階能力約為 5nm、反應時間為 5nm/ms，圖 1-3 為該蜈蚣運動機構原理。2000 年，Cusin[11]等以 Inchworm 摩擦致滑原理製作單軸精密定位平台，利用微機電製程加工，其行程可達 4 mm，解析度可達 40nm，最大速度為 $300\mu\text{m/s}$ 。Shutov 與 Howard[12]等人於 2003 年時利用靜電力推動的方式來取代了壓電致動器作蜈蚣運動，經過實驗驗證，此種方式之定位平台最大行程可達 50 mm 以上，所能達到之定

位精度為 $0.05\mu\text{m}$ ，圖 1-4 為蜈蚣運動平台的示意圖。隔年，在 Tenzer 與 Mrad[13]的研究中，針對蜈蚣式定位平台的設計提出一完整的平台設計流程，此研究所得定位平台速度可達 8 mm/s ，最高速可達 20 mm/s ，圖 1-5 為蜈蚣平台的運動流程圖。

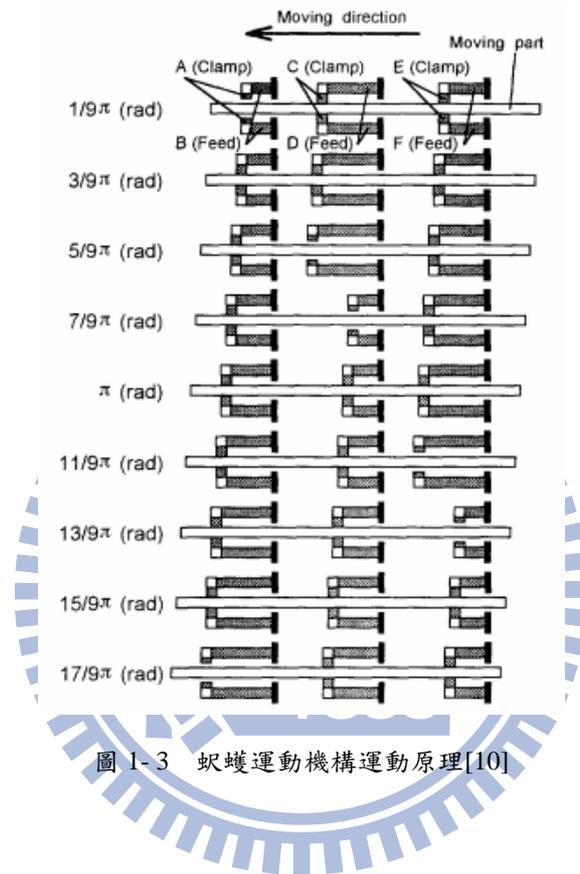


圖 1-3 蜈蚣運動機構運動原理[10]

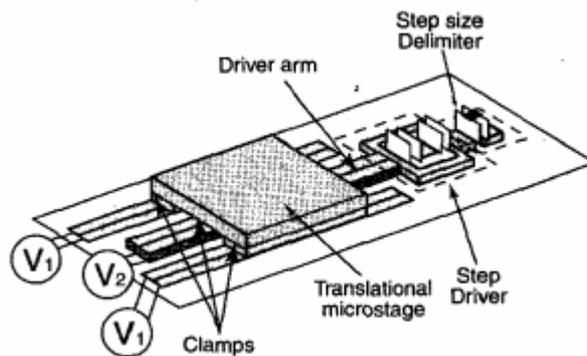


圖 1-4 蜈蚣微系統示意圖

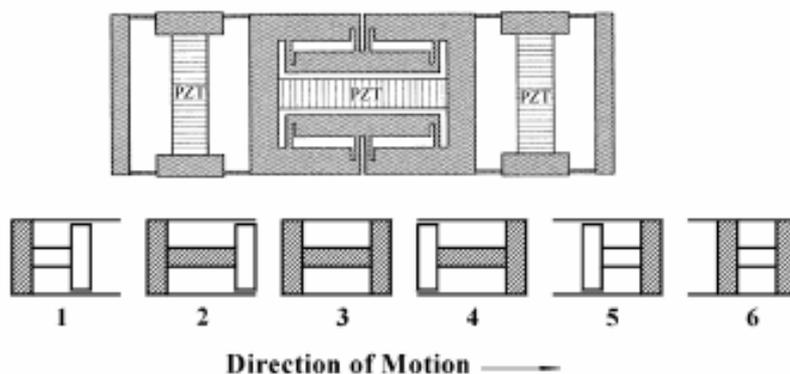


圖 1-5 蚘蠖平台運動流程圖

在形變式定位平台方面，1978 年，Scire 與 Teague[14]利用槓桿原理，將兩組槓桿機構轉換為撓性結構，使壓電致動器行程放大 30.3 倍，具有 $50\mu\text{m}$ 的行程，但須使用 1000V 之驅動電壓，使用上並不方便，其實體圖如圖 1-6。1991 年 Dudnikov[15]等利用壓電元件變形加上具有電磁力的腳座，設計出具有 $0.05\mu\text{m}$ 定位精度、200mm 行程、4mm/s 速度之高精度 XY θ z 定位機構。1994 年 Smith[16]等使用壓電元件產生一脈衝力來驅動平台，發展出兩軸高精密度定位機構，解析度為 10nm。1997 年 Ryu[17]等成功開發出一 XY θ z 奈米定位平台，其採用複合槓桿機構設計出一致動器，將此致動器相隔 120° 配置而完成此三軸定位平台設計，其總位移行程 x、y 軸分別達 $41.5\mu\text{m}$ 及 $47.8\mu\text{m}$ ，如圖 1-7。1999 年 Ryu 和 Lee[18]等人，設計類似之三自由度奈米定位平台，但利用複合撓性鉸鍊增加壓電致動器的致動量，使用逆向運動學的模型來操控此奈米定位平台。1999 年 Gao[19]等在設計 XY 平台時採用兩階段放大的對稱性機構，如圖 1-8，經過靜態及動態特性分析之後，可降低非線性的誤差產生，XY 方向分別可移動 $45\mu\text{m}$ 及 $40\mu\text{m}$ ，最高位移解析度分別為 20nm 和 18nm，共振頻率分別為 525Hz 及 558Hz。2004 年 Hansma[20]研究群特別為高速化原子力顯微鏡所設計的壓電掃描器，它的速度比起一般市售商品化的奈米定位器快得多，可以達到 85Hz 的線掃描率，若影像畫素為 250×250 ，相當於

0.34frame/s，但對於即時顯像（30frame/s）的目標仍有一段差距，圖 1-9 為 FEA 第一共振頻率模擬圖。2005 年 Zettl[21]等人藉由壓電式致動器推動撓性機構，順從機構把直線位移轉換成平面 x-y 致動。此類致動器具有大輸出力和小輸出位移的特性，固將之當作為順從放大機構的輸入源，如此之結合設計可得到所謂的智慧型機構，如圖 1-10。2006 年 Hansma[22]研究群再為高速化原子力顯微鏡所設計的新型壓電掃描器，如圖 1-11，它的速度比起 2004 年該研究團隊所設計的的奈米定位器增加了數十倍，若影像畫素為 256×256 可以達到 2060Hz 線掃描率，相當於 8frame/s。韓國的 Choi[23]等人於 2008 年設計了一款利用積層式壓電材料作為驅動器的雙軸奈米定位平台，該平台的定位範圍為 $30\mu\text{m} \times 30\mu\text{m}$ ，定位穩定時間約略小於 $6\mu\text{s}$ 。

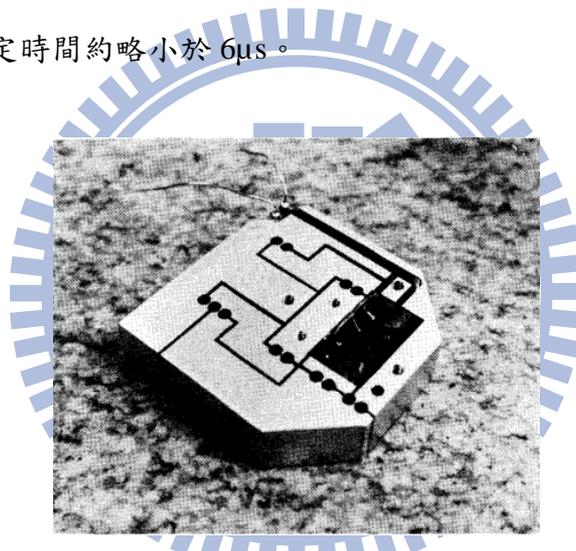


圖 1-6 Scire 與 Teague 將兩組槓桿機構轉換撓性結構實體[14]

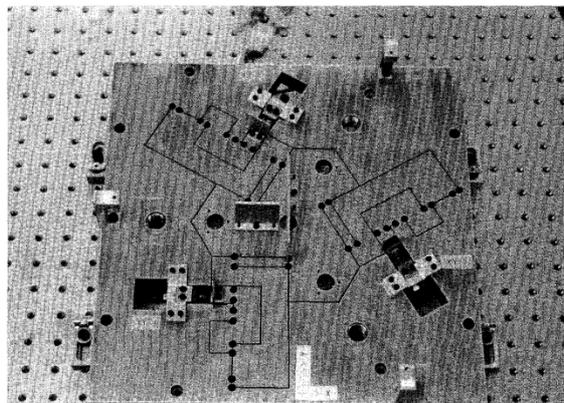


圖 1-7 XYθz 微定位平台[17-18]

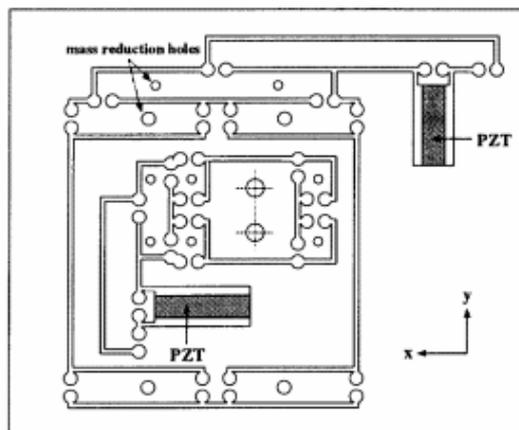


圖 1-8 x-y 精密微定位平台示意結構圖[19]

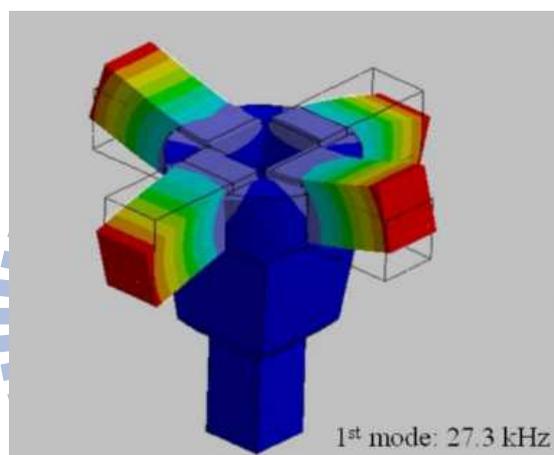


圖 1-9 Hansma 研究群在 2004 年使用 FEA 第一共振頻率模擬圖[20]

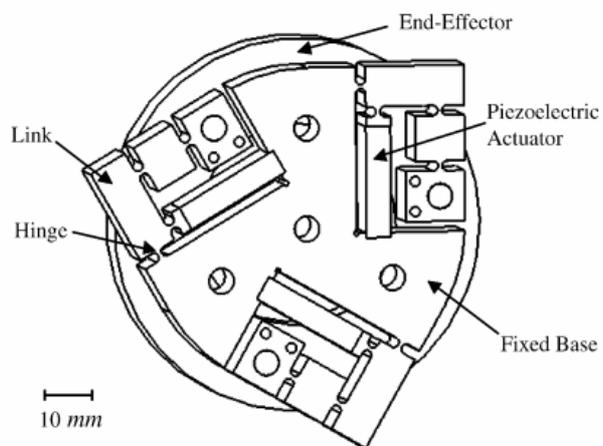


圖 1-10 壓電驅動撓性機構[21]

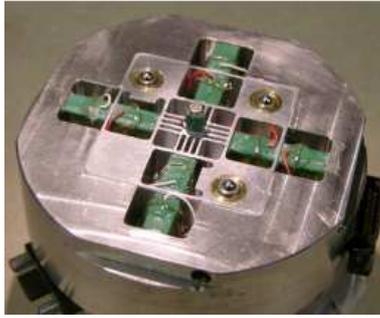


圖 1-11 平行薄板群為導引機構之奈米定位平台[22]

綜觀上述三類以壓電致動器驅動之定位平台，在摩擦驅動平台中，雖然可以達到長行程的效果，但是此方式對於摩擦力還沒有完整的模型可以使用，因此在操控上往往會造成重複性不佳的情形；而蜈蚣式定位平台雖然也同樣可以達到長行程的效果，但是在單軸方向的移動需要較多的致動器才能達成，這樣會使的控制困難且成本提高。因此，本論文將著眼於利用材料彈性變形原理設計的形變式定位平台。所謂形變式的定位平台係利用材料在彈性限度內，受到拉應力、剪應力與彎曲應力時材料會產生變形，當外力去除後材料的變形可恢復至原狀。為了符合奈米操作平台的高運動解析度，因此本論文將以形變式定位平台為主，利用此觀念並以壓電為致動器，設計出的三維奈米定位器。

結構	優點	缺點
摩擦驅動定位平台	結構簡單	摩擦力影響定位精度且操控重複性不佳
蜈蚣式定位平台	定位行程較長	控制複雜且平台移動速度較慢
形變式定位平台	定位精度較高	可達到的最大行程較小

表 1-1 三類壓電致動平台優缺點比較

1.3 研究目標

本論文的研究中，主要為嘗試設計並製作出一個快速化的三維奈米定位器。壓電材料具有機電轉換能力，有著質量輕、體積小、反應快及產生力大等優點，因此由壓電材料所做成的壓電致動器便成為此定位器所需致動器之理想選擇。

1.4 論文結構與研究主題流程

第一章 緒論

本章主要內容先由研究的動機與預期之目的著手，搜集國內外相關文獻研究，並進一步構思相關的研究方法，最後說明本論文之架構。

第二章 定位器組成元件與原理

將定位平台所使用到的各種元件，分成五個部份，分別介紹其特性與原理。

第三章 奈米定位器設計

將奈米定位器中最重要的傳動暨導引元件(平行細柱群)，利用 ANSYS 模擬軟體進行微定位平台最佳化分析。

第四章 實驗

經由分析所得到的最佳化尺寸並加工完成後，以閉迴路控制系統及雷射位移感測器測試平台特性，並測試奈米定位平台的解析度與最大行程。

第五章 結論與展望

最後本章說明研究之心得與結論，並提出一些未來可研究的方向與相關建議，以供後續研究人員作參考依據。

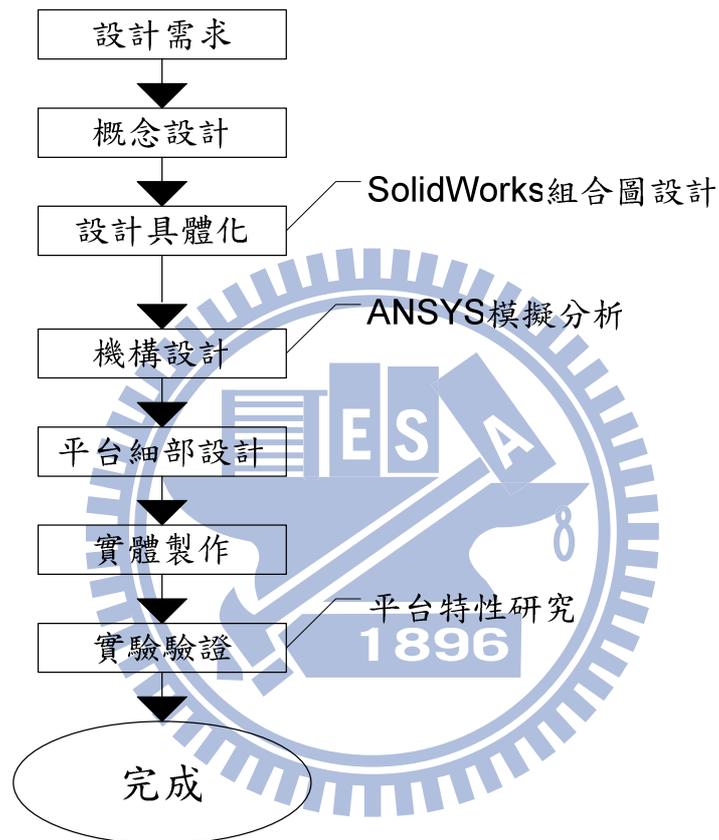


圖 1-12 研究主題流程

二、 定位器組成元件與原理

在本研究中，定位器所使用到的各種元件，可以分成如圖 2-1 所示的五個部份，其各別的特性與原理將依續介紹於後面小節中。

(1)致動：壓電致動器，負責提供驅動力給定位平台。

(2)位移感測：KEYENCE 公司 LK-G5000 系列的雷射位移感測器。測量定位平台的位移量。

(3)控制軟體：電腦架構(PC-Based)。使用 MATLAB/Simulink Real Time Windows Target 作為控制器的撰寫軟體。

(4)擷取設備：Data Acquisition (DAQ) Card 擷取卡。負責控制器、致動器與位移感測器三者之間的訊號傳遞及接收，本論文使用的是 NI 公司 PCIe-6259 的 DAQ 擷取卡。

(5)導引：撓曲平行導引機構。將致動器所提供的驅動力傳遞給定位平台。

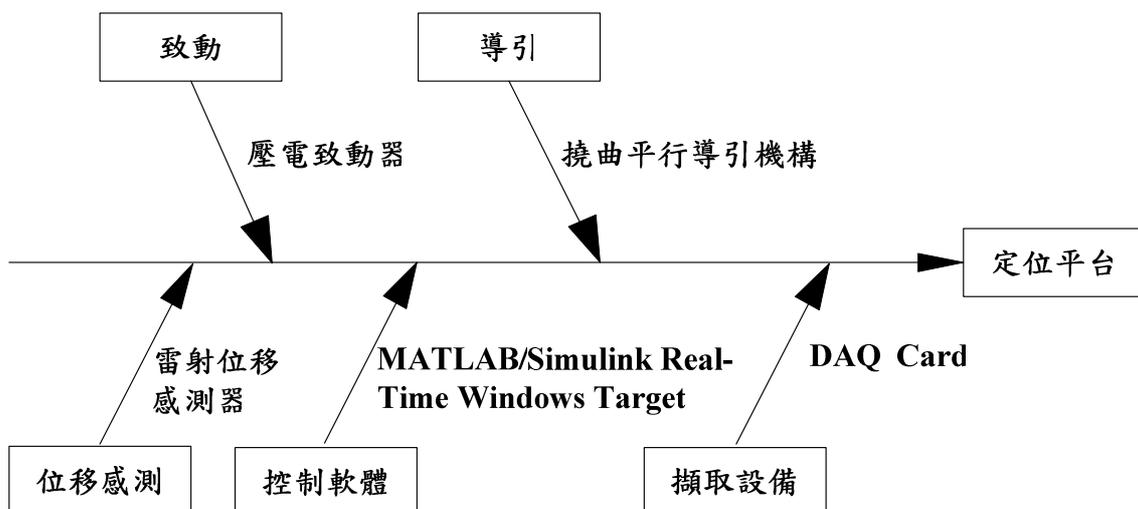


圖 2-1 定位平台的組成元件

2.1 壓電致動器

壓電致動器[24-26]具有快速的頻率響應、可達到奈米級的高精度定位能力、高機電轉換效率、尺寸小和做動時有較小的發熱等優點，而被廣泛地應用在奈米定位系統內，但是壓電致動器的磁滯現象與較短的運動行程，會影響定位平台的性能。因此在高精密產業中，一個具有高解析度的定位系統變得越來越重要，因為其能決定製程與加工的精度。由於壓電致動器本身是由鐵電性材料所組成，這使的它在對應一個電場的回應過程中基本上是呈現非線性的，也就是說在位移和輸入電場之間的存在一個非線性的磁滯效應。

壓電材料之優點為體積小、生熱小、精度高、反應快，有極佳的解析度、機電轉換效率高可以產生極大的力量及不會產生電磁訊號干擾。壓電材料之缺點為總位移量小、脆性大、不能承受剪力、彎曲應力，耐水性差、有磁滯現象及電場/應變關係為非線性。

壓電致動器依照其應用，一般可粗略分成兩種類型：第一種類型為直線縱向運動型：此種類型利用壓電元件的縱效應與橫效應所產生之單純線性位移，其作動可視為具有微／奈米級微動能力之線性馬達，其構造包含單層元件、積層元件與管狀元件等，其具有高剛性與軸向推力大的優點，壓電致動器大都使用此種元件。第二種類型為彎曲橫向運動型：其可產生較大位移的複合彎曲位移，一般由壓電元件與其他彈性材料所組成，其種類包含單層壓電晶片(unimorph)、雙層壓電晶片(bimorph)等，此種運動方式之元件可產生較大的位移空間，多應用於超音波馬達。

單層型壓電元件之構造較為簡單，但是位移量非常小。一般單層型壓電元件其厚度約在 0.1~1 mm 之間，產生之位移量約為 100 nm。單層型壓電元件之極化方向(P)為其厚

度方向如圖 2-2(a)，驅動方式是在壓電元件之厚度方向(T)施加電壓，使材料內部發生電荷分極(polarization)或極化，因而產生長度方向(L)伸縮變形。

積層型壓電元件是由數個單層型壓電元件加以重疊所組成，每層間皆以薄膜絕緣，一般層數由數十至數百層，故能夠得到比單層型壓電元件更大之位移量，位移量從數微米增疊加到數十微米，自然頻率約在數 kHz 到數 10kHz。積層型壓電元件之構造如圖 2-2(b)所示，在每個單層型壓電元件之間以電極間隔，並使每個單層型壓電元件的極化方向與相鄰的單層型壓電元件的極化方向各相差 180 度，因此在機械結構上雖屬於串聯型式，但在電氣特性上是屬於並聯型式。其驅動方式是在每個單層型壓電元件同時施加電壓，使其在極化方向產生位移變化。

雙層壓電晶片其組成方式，是將兩枚壓電晶片貼合。其驅動方式為一邊之壓電元件伸長時，另一邊之壓電元件做相反之收縮動作，使整體產生彎曲位移之變形，如圖 2-1(c)所示。

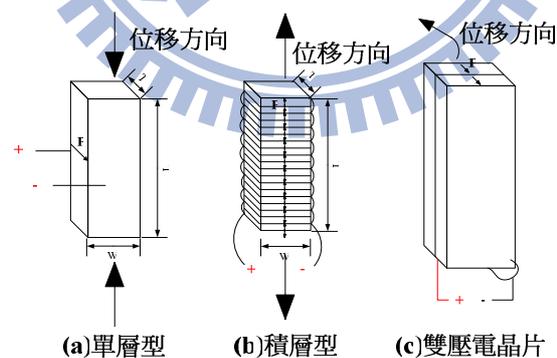


圖 2-2 壓電致動器的類型

2.1.1 壓電效應

壓電效應(Piezoelectric Effect)[26]是在西元 1880 年由法國科學家皮爾居里(Pierre Curie)與傑克斯居里(Jacques Curie)他們倆兄弟所發現的。他們在研究晶體一些現象時,偶然發現某一特殊處理過的晶體在受到外界壓力時,它的表面會產生電荷,而且壓力越大所產生的電荷就越多,這種現象便是「壓電效應」。

在此之後,西元 1881 年李普曼(G.Lippmann)在研究熱力學原理時,發現這種對晶體施加壓力而使其表面產生電荷形成電極化的現象是可逆的,而在同一年,居里兄弟做實驗證明了李普曼的這個發現。也就是當晶體放置於由外部所施予之電場時,其晶體會產生形變的現象。

壓電性(piezoelectric)為一種機電能量互換的現象,其作用包括正壓電效應及逆壓電效應兩種,分別描述如下:

正壓電效應(direct piezoelectric effect)

當陶瓷體極化後,其內部由電偶極矩同向排列形成的極化強度,在陶瓷體的一端會出現正束縛電荷,另一端則出現負束縛電荷,在陶瓷體束縛電荷的作用下,將於電極面上吸附一層來自外界的自由電荷。

如圖 2-3 所示,於陶瓷體上沿極化方向施一壓力 F ,陶瓷體將出現壓縮變形,使得正負束縛電荷間的距離縮短,極化強度減弱,於是原本吸附在電極面上來自外界的自由電荷,將有一部份被釋放而產生放電的現象;壓力 F 去除後,又將重新充電,此種機械能轉換成電能的現象稱為正壓電效應。

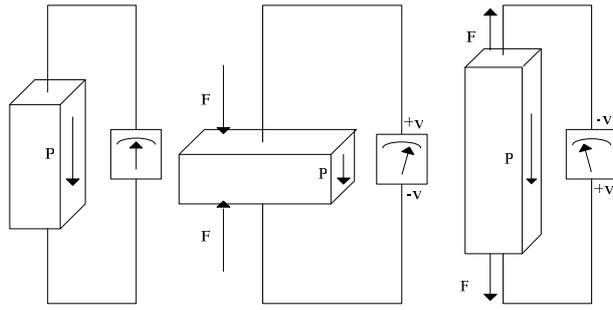


圖 2-3 正壓電效應

逆壓電效應(converse piezoelectric effect)

如圖 2-4 所示，於陶瓷體上加以與極化方向相同的電場，會使得極化強度增強，此時陶瓷體將會沿著極化方向伸長變形；若是在陶瓷體上加以與極化方向相反的電場，則極化強度減弱，因而造成反方向的形變。當輸入電場為交流電時，物體的形變方向會隨著電場的正負週期做收縮與膨脹的交互變換，而當交流電場的頻率等於材料本身的自然共振頻率時，其形變的幅度會達到最大。此種電能轉換成機械能的現象稱為逆壓電效應。

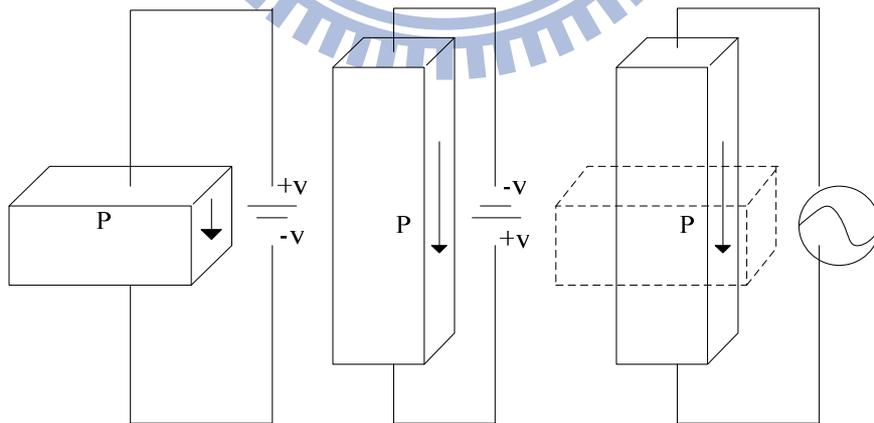


圖 2-4 逆壓電效應

2.1.2 磁滯現象

當操作電壓升高再慢慢降下時，壓電致動器的伸長量與電壓的關係曲線並非為線性曲線，同時也不是同一條路徑，如圖 2-5 所示，此現象稱為磁滯現象(hysteresis)[24-25]。而壓電致動器基本上是鐵電材料，當然無法避免遲滯現象的發生，而磁滯所造成的誤差即可高達全行程的 10~15%。磁滯現象是壓電致動器控制上最令人困擾的問題，其消除的方式通常是利用回授控制的方法加以補償。

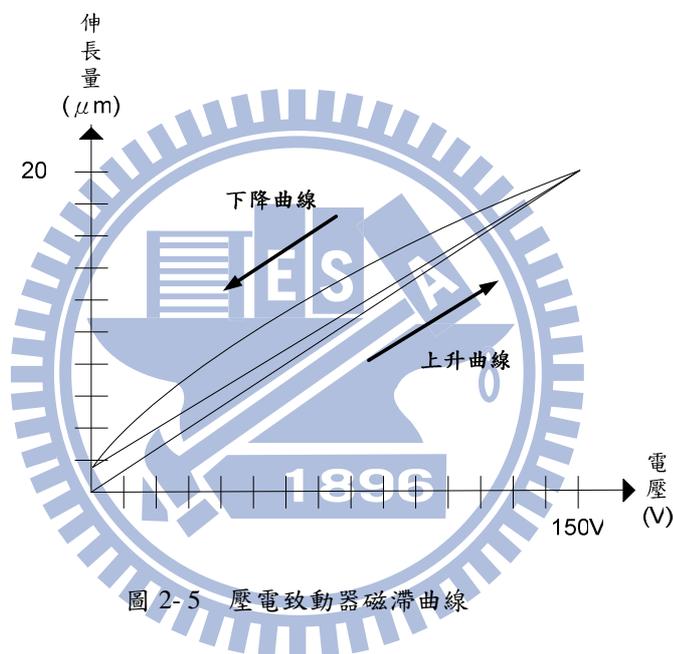


圖 2-5 壓電致動器磁滯曲線

2.1.3 潛變(creep)

當驅動電壓達一定值固定不變後，壓電致動器內的極性會繼續增加或減少，因此即使電壓沒有變化，壓電致動器的長度也會緩緩增加或減少，此現象稱為潛變[26]，如圖 2-6 所示。而其長度與時間的關係式如(2.1)所示，其中 ΔL 表示壓電致動器的變化量， γ 表示壓電致動器的潛變因子，一般壓電致動器的潛變因子值約在 0.01~0.02 之間。

$$\Delta L(t) = \Delta(1 + \gamma \times \log(t/0.1)) \quad (2.1)$$

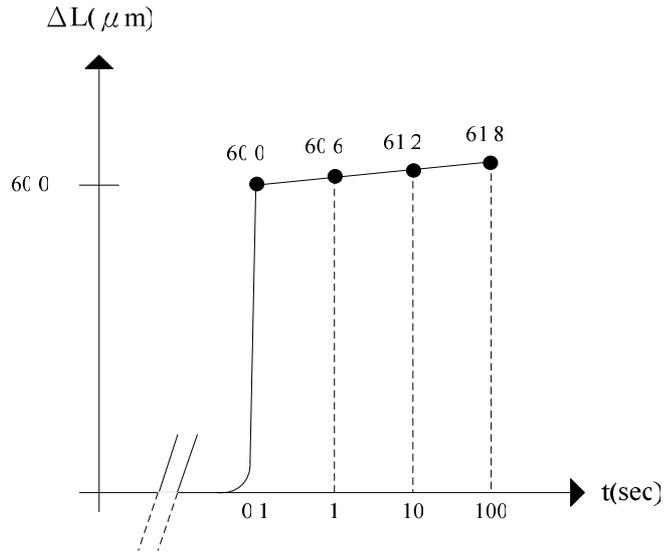


圖 2-6 壓電致動器潛變現象

2.1.4 壓電材料組成律

壓電性所涉及者為機械能與電能之間的互換，而所涉及的變數有四個，其中兩個為機械彈性量，即應力(T)與應變(S)；而另外兩個為介電量，即電場(E)與電位移或電通量密度(D)；這四個參數之間的關聯可以用壓電方程式[26]來表示，依所選擇變數的不同，壓電方程式有四種不同的形式，分別為：

$$\begin{cases} \mathbf{S} = \mathbf{s}^E \mathbf{T} + \mathbf{d} \mathbf{E} \\ \mathbf{D} = \mathbf{d} \mathbf{T} + \boldsymbol{\epsilon}^T \mathbf{E} \end{cases} \quad \text{d 型態} \quad (2.2)$$

$$\begin{cases} \mathbf{T} = \mathbf{c}^E \mathbf{S} + \mathbf{e} \mathbf{E} \\ \mathbf{D} = \mathbf{e} \mathbf{S} + \boldsymbol{\epsilon}^S \mathbf{E} \end{cases} \quad \text{e 型態} \quad (2.3)$$

$$\begin{cases} \mathbf{S} = \mathbf{s}^D \mathbf{T} + \mathbf{g} \mathbf{D} \\ \mathbf{E} = -\mathbf{g} \mathbf{T} + \boldsymbol{\beta}^T \mathbf{D} \end{cases} \quad \text{g 型態} \quad (2.4)$$

$$\begin{cases} \mathbf{T} = \mathbf{c}^D \mathbf{S} - \mathbf{h} \mathbf{D} \\ \mathbf{E} = -\mathbf{h} \mathbf{S} + \boldsymbol{\beta}^S \mathbf{D} \end{cases} \quad \text{h 型態} \quad (2.5)$$

其中 s^E 及 c^E 分別表示在定電場時的柔度(compliance)及剛度(stiffness)常數。

s^D 及 c^D 分別表示在定位移時的柔度(compliance)及剛度(stiffness)常數。

ϵ^T 及 β^T 分別表示在定應力時的介電(permittivity)及反介電(impermeability)係數。

ϵ^S 及 β^S 分別表示在定應變時的介電(permittivity)及反介電(impermeability)係數。

d, e, g 及 h 分別表示在不同邊界條件時的壓電參數。

以 d 型態作為例子，若不考慮熱效應及磁效應，並以電場、應力為獨立變數，則張量形式的壓電組成律可寫成：

$$S_i = s_{ij}^E \cdot T_j + d_{kj} \cdot E_k \quad (2.6)$$

$$D_m = d_{mj} \cdot T_j + \epsilon_{mk}^T \cdot E_k \quad (2.7)$$

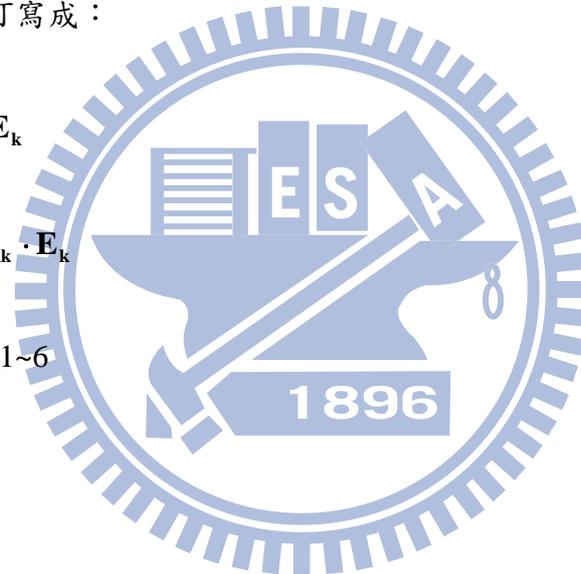
k, m=1~3; i, j=1~6

其中

$$s^E = \left(\frac{\partial S}{\partial T} \right)_{E=\text{const}} \quad (\text{compliance constant})$$

$$d = \left(\frac{\partial S}{\partial E} \right)_{T=\text{const}} = \left(\frac{\partial D}{\partial T} \right)_{E=\text{const}} \quad (\text{piezoelectric strain constant})$$

$$\epsilon^T = \left(\frac{\partial D}{\partial E} \right)_{T=\text{const}} \quad (\text{permittivity constant})$$



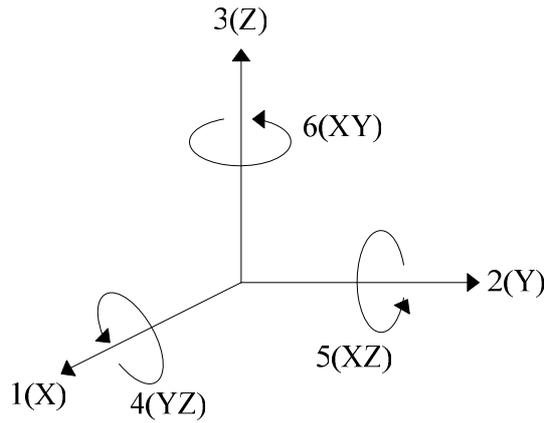


圖 2-7 壓電材料方向表示法

張量下標如圖 2-7 所示，其中 1、2、3 各代表 X、Y、Z 軸方向，4 方向、5 方向、6 方向分別表示 YZ 方向剪力、XZ 方向剪力及 YX 方向剪力。不同的獨立變數亦構成不同的組成律，共有 4 組，並且其係數互相具有轉換關係，在此僅考慮壓電組成律的線性關係，亦即在所有壓電方程式中，其係數均為常數(忽略磁滯現象的影響)。

由於壓電材料在晶體的結構上為具有對稱性的六角晶系，利用晶體結構的對稱性可將材料常數簡化成 10 個獨立變數，通常極化方向為 Z 軸，其壓電組成律矩陣關係如下

(2.8)：

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \\ D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11}^E & s_{12}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{31} \\ s_{12}^E & s_{11}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{31} \\ s_{13}^E & s_{13}^E & s_{33}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & 0 & 0 & s_{44}^E & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{44}^E & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & \epsilon_{11}^T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 & 0 & \epsilon_{11}^T & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \epsilon_{33}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \\ E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

另外，本論文所設計的奈米定位器為三軸皆使用壓電致動器，故在模擬分析時亦需使用到 X 軸向為極化方向之壓電材料參數矩陣(2.9)及 Y 軸向為極化方向之壓電材料參數矩陣(2.10)。

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \\ D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11}^E & s_{12}^E & s_{12}^E & 0 & 0 & 0 & d_{11} & 0 & 0 \\ s_{12}^E & s_{22}^E & s_{23}^E & 0 & 0 & 0 & d_{12} & 0 & 0 \\ s_{12}^E & s_{23}^E & s_{22}^E & 0 & 0 & 0 & d_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{44}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{55}^E & 0 & 0 & 0 & d_{26} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{55}^E & 0 & d_{26} & 0 \\ d_{11} & d_{12} & d_{12} & 0 & 0 & 0 & \epsilon_{11}^T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{26} & 0 & \epsilon_{22}^T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{26} & 0 & 0 & 0 & \epsilon_{22}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \\ E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \\ D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{33}^E & s_{23}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{23} & 0 \\ s_{23}^E & s_{22}^E & s_{23}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{22} & 0 \\ s_{13}^E & s_{23}^E & s_{33}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{23} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & s_{66}^E & 0 & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{55}^E & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66}^E & 0 & 0 & d_{14} \\ 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 & 0 & \epsilon_{33}^T & 0 & 0 \\ d_{23} & d_{22} & d_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & \epsilon_{22}^T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{14} & 0 & 0 & \epsilon_{33}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \\ E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

2.1.5 壓電特性參數

機電耦合因數(electro-mechanical coupling factor, K_d)

機電耦合因數 K_d 表示了壓電陶瓷在共振時，機械能與電氣能之間的轉換率，其可定義為機電耦合能量密度與機械能(或彈性能)密度及介電能密度幾何平均之比，也可以定義為儲存的機械能(電能)與輸入總電能(機械能)比值的平方根。

$$K_d = \frac{\text{機電耦合能量密度}}{\sqrt{(\text{機械能密度})(\text{介電能密度})}} = \frac{U_m}{\sqrt{U_e U_d}} \quad (2.11)$$

$$K_d = \frac{\text{儲存的機械能}}{\text{輸入的總電能}} \quad (2.12)$$

$$K_d = \frac{\text{儲存的電能}}{\text{輸入的總電能}} \quad (2.13)$$

此外，同一壓電材料之機電耦合因數並非為一定值，而是隨著所使用的振動模態 (vibration mode) 及操作頻率而變的參數。一般而言，機電耦合因數越大代表該壓電材料之壓電性越好。

機械品質因數(mechanical quality factor, Q_m)

當壓電陶瓷作機械振動時，由於晶格的形變會造成陶瓷體內部磨擦而有能量的損耗，機械品質因數就表示了壓電陶瓷體在共振時機械損耗的大小。機械品質因數(Q_m)的定義如下：

$$Q_m = 2\pi \times \frac{\text{共振時所儲存的機械能}}{\text{共振時每週期機械損失之能量}} \quad (2.14)$$

機械品質因數和震動模式有關，機械品質因數越低代表機械損耗越大。

介電常數(dielectric constant, ϵ_r)

其又稱為相對介電係數，其係壓電材料之電荷密度 q_b 與單純金屬層間電荷密度 q_f 相對於單純金屬層間電荷密度 q_f 之比，其定義為：

$$\epsilon_r = \left(\frac{q_b + q_f}{q_f} \right) \quad (2.15)$$

其中 ϵ_r 為無因次之介電常數。相對介電常數 ϵ_r 越大，代表壓電材料的電容量 ($C=\epsilon_0\epsilon_r A_0/d$ ， ϵ_0 、 A_0 、 d 分別代表真空狀態下的介電率 $8.854 \times 10^{-12} \text{F/m}$ 、感應面積以及兩金屬層間之距離) 越大。

壓電應變常數(piezoelectric strain constant, d_{ij})

其定義為壓電材料在外加電場下，所產生的位移。該壓電應變常數係壓電材料於機電耦合或結合時，一個重要的參考常數與特性。另外，壓電材料在相同方向施加電場時，其壓電應變常數也會有所差異。壓電陶瓷與石英其壓電應變常數 $d_{31}=d_{32}$ ，壓電聚合物其壓電應變常數 $d_{31} \neq d_{32}$ ，其中壓電聚合物之壓電應變常數不等的因素來自於製造過程之輓壓拉伸時所造成的。

2.2 導引機構

要使定位平台在有限的運動範圍內達到精密定位，必須提供高精度的定位能力，平行導引機構即為常常使用的方法之一。將外力施加在已知剛性的導引結構，達到控制微小的運動位移，應用導引結構製做精密微動定位平台，其優點如下：

- (1) 動作平順且具連續性。
- (2) 無磨耗且擁有高穩定性。

以上幾點克服了以往傳統機構所產生的磨擦與間隙問題，使得定位系統可達到奈米級的定位精確度。此外，在設計時需考慮：

- (1) 材料之楊氏係數，

- (2) 機構之共振頻率，
- (3) 壓電材料所能推動之最大位移，
- (4) 結構本身所能承受之最大變形(位移量)。

在多自由度的定位器設計中，並聯式機構設計較串聯式快速，這是由於並聯式機構中多組致動器可以直接對負載施力，但是串聯式中某軸的致動器必須背負其他軸的致動器因此縮減了頻寬。

2007 年 Hansma[20, 22]研究群設計的新一代壓電掃描器採用了薄板簧片平行導引 (flexure guide) 的方法，可以用線切割放電加工來實現。下圖 2-8，它在 XY 方向是並聯式設計，背負著 Z 軸致動器為串聯式設計，如此一來 XY 方向的頻寬極可能會較 Z 方向慢。在這個設計上，單就橫向的平行薄板群而言，在 X 方向剛性很高，可以傳遞 X 方向的致動器到可動件上貢獻 X 方向的位移；對縱向平行薄板群而言，他們在 X 方向的剛性相對低得多，當 X 軸致動器運動時不會抵抗，而達到撓曲 (deflection) 對稱導引的作用。此種設計方式利用了兩個致動器負責一軸的運動，也就是所謂的推拉對 (push-pull pair)，這樣的設計除了能抵銷部份的壓電磁滯現象，亦能加倍出力提高頻寬。

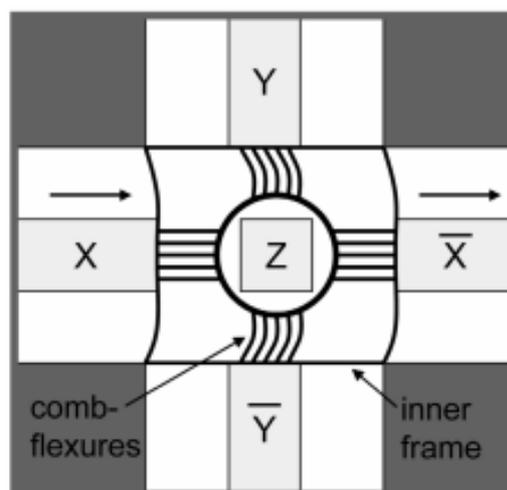


圖 2-8 X 與 Y 方向的平行薄板群示意圖[20, 22]

三、 奈米定位器設計

3.1 平行細柱群導引機構

為了達成 XYZ 三軸向皆為完全並聯式，「平行薄板群」[22]（兩個方向高剛性，一個方向低剛性）在此研究已不適用。所以我們需要一個方向是高剛性，兩個方向是低剛性的「平行細柱群」機構，如圖 3-1。

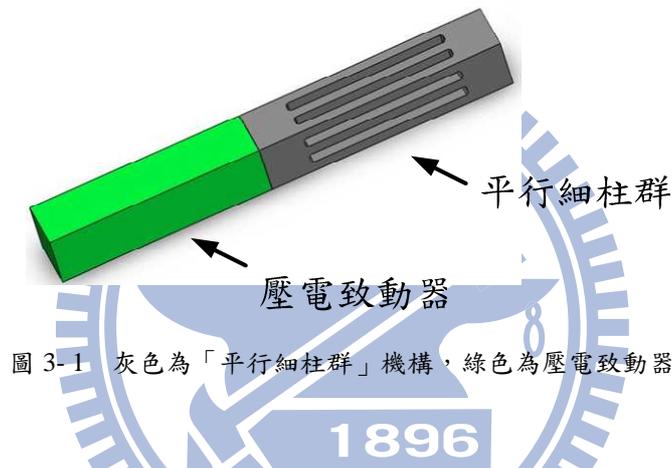


圖 3-1 灰色為「平行細柱群」機構，綠色為壓電致動器

由於「平行細柱群」機構在軸向屬於高剛性，當壓電致動器伸長時，可將致動器所產生的位移給予右方的平台；但「平行細柱群」機構在另兩個垂直方向是屬於低剛性，所以產生了類似撓曲導引的作用，此處的原理與「平行薄板群」機構的原理相似。

「平行細柱群」機構雖然具有了許多優點，但是其製造不易。由於需要做兩個方向的線切割放電加工，因此需先製成「平行薄板群」，之後將薄板群轉 90 度再做一次線切割放電加工製作成「平行細柱群」。圖 3-2 為利用上述概念設計出的新式奈米定位器，其中綠色為壓電致動器、灰色為「平行細柱群」加位移平台。圖 3-3 為 SolidWorks 模型及實體的比較圖。

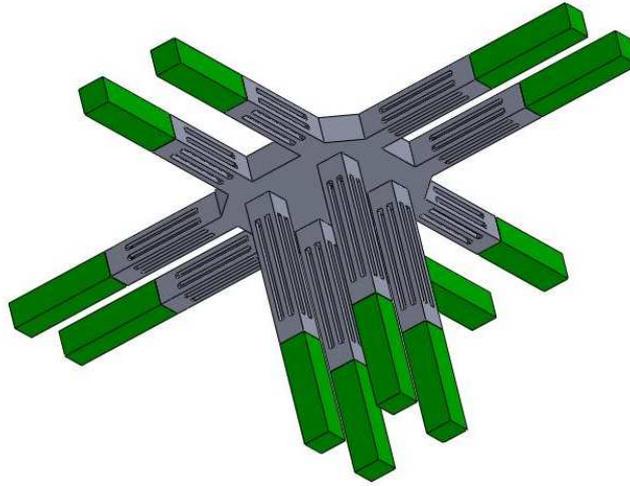


圖 3-2 新式三軸奈米定位器的 3D 模型圖

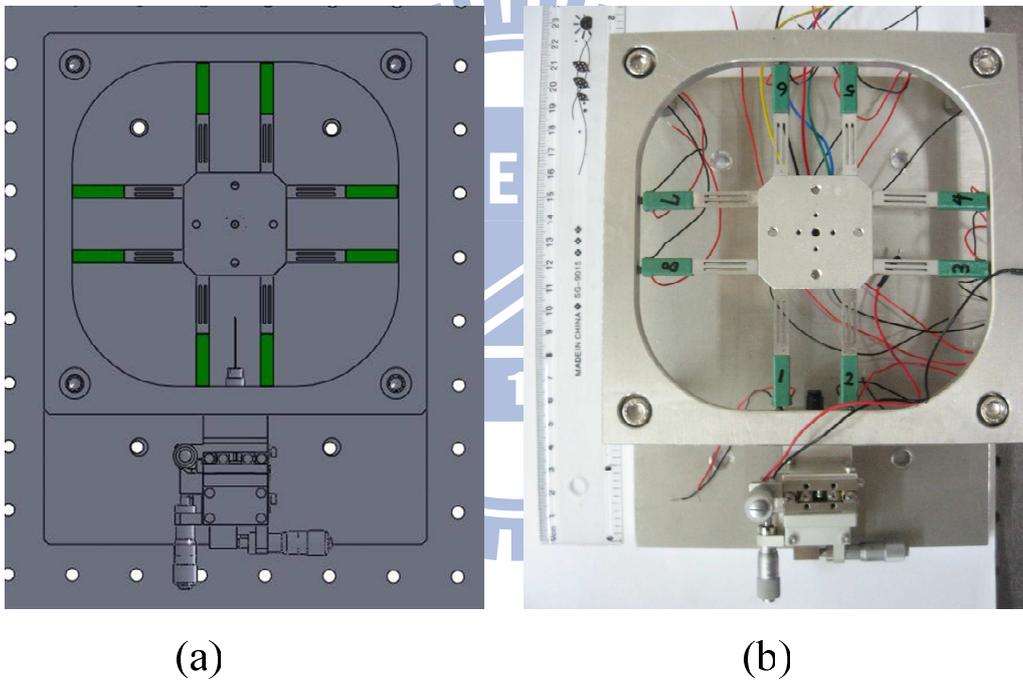


圖 3-3 奈米定位器之(a)SolidWorks 模型及(b)實體照片

3.2 有限元素輔助設計

3.2.1 有限元素法簡介

有限元素法[27]是一個數值的程序，可以用來求解像是包含應力分析、振動分析等廣泛的工程問題，有很多實際的工程問題我們無法獲得精確解，這種難以獲得解答可歸因於複雜的統御微分方程式或是難以處理的邊界和初始條件，要處理這類的問題，只能訴諸於數值解的近似值。與解析解做對比，解析解顯示系統內任一點精確的行為，它可應用到各種的工程問題上以獲得解答。穩態、暫態、線性或非線性問題的應力分析等問題，都可以用有限元素法來分析。

有限元素法的原理是將幾何形狀，如點、線、面、體積，切成好幾個區域，而每個區域稱之為元素，元素和元素之間是用節點來連結，而外力除了壓力外，全都是施加在節點上，每個節點上會有不同的自由度和作用力，將所有元素上的作用方程式聯立起來，求出每個節點的變量解。

一般有限元素分析的流程大約可分成三部份：前處理(Pre-processing)、分析(Solution)及後處理(Post-processing)。

前處理：

前處理是只創建實體模型以及有限元素模型。它包括創建實體模型、定義元素屬性、劃分網格、修正模型等幾項內容。現今大部分的有限元素模型都是用實體模型建模，例如 SolidWorks，ANSYS 以數學的方式表達結構的幾何形狀，然後在裡面劃分節點和元素，還可以在幾何模型邊界上施加所需的負荷，但實體模型並不參予有限元素分析，所以施加在幾何實體邊界上的負荷或拘束必須最終傳遞到有限元素模型上(節點)進行求解。

分析：

首先需要確定分析的類型以及方式，接著就是施加負荷和邊界條件，之後就可以近
案例分析及求解。

有幾點是需要特別注意的：

1. 元素類型和材料性質參數的設定以及統一的單位系統。
2. 元素實常數和材料類型的設置、實體模型的質量特性。
3. 確保模型中不存在隙縫(特別是從 CAD 轉檔)。
4. 集中載荷和體積載荷、面載荷的方向。
5. 溫度場的分布和範圍、熱膨脹分析的參考溫度。

後處理：

後處理是用來看分析出來的結果，可得位移、電壓、應力等資料。

3.2.2 以 ANSYS 分析「平行細柱群」

本文所使用的是 Piezomechanik 公司出產的積層式壓電陶瓷 PSt 150 / 5×5 / 20 為致
動器(圖 3-4)，因此本研究以 ANSYS11 進行上述平行細柱群的結構模態分析時，亦須同
時針對壓電結構進行分析與比較。詳細 PSt 150 材料參數見附錄 A



圖 3-4 壓電致動器(PSt 150)

使用 ANSYS 11[27]模擬壓電材料有以下幾個步驟：1.元素選用，2.彈性係數設定，3.密度設定，4.介電係數設定，5.壓電係數設定，任何一項參數設定錯誤都將影響到模擬結果的正確性。

模擬壓電材料的元素有很多種類，包括 2D 的 PLANE13，3D 的 SOLID5、SOLID98 等，依照分析的項目選用適當之元素，如 PLANE13 適合用於能以 2D 型式表達的結構；SOLID5 為立方體元素，適合用於 3D 方形結構；SOLID98 為三角錐形具有邊節點之元素，適合用於圓形結構。

壓電材料為線性非等向性材料，所輸入之材料彈性係數為 6×6 矩陣，彈性矩陣的設定分為兩類：1.彈性韌性 s 、2.彈性剛性 c ，一般依照所選用之壓電參數來決定輸入之彈性係數種類。當選用 d-type 壓電係數時，輸入彈性韌性 s ，選擇 Flexibility form。當選用 e-type 壓電係數時，輸入彈性剛性 c ，選擇 Stiffness form。

壓電材料密度設定，一般壓電材料密度介於 $7000 \sim 8000 \text{ kg/m}^3$ 之間，本文選用之材料密度為 8000 kg/m^3

壓電材料介電係數設定，一般文獻中所提到的介電係數如圖 3-4 中提到的介電係數 5400 為 ϵ^T / ϵ_0 ，須乘以真空介電係數 $\epsilon_0 (8.854 \times 10^{-12})$ ，得到的 ϵ^T 為軟體中所輸入的介電係數。

由於本分析是選用以 d-型態的壓電方程式來定義壓電材料的各項係數，因此在作包含壓電材料的分析時，須定義壓電材料性質的三個係數矩陣： 6×6 的彈性係數矩陣 $[s]$ 、 3×6 的壓電常數矩陣 $[d]$ 、 3×3 的介電常數矩陣 $[\epsilon]$ 。其中，壓電係數之選用可依分析項目參考公式(2.8)、(2.9)、(2.10)選擇各項壓電參數。

前處理

在前置處理器中可分四步驟來進行，分別為建模、參數設定、網格建立、邊界條件設定。以下分別介紹各個步驟：

一、建模：

在 ANSYS 分析之前須先繪製出所設計的模式，因此以 3.1 章節所設計的機構圖為主，利用 ANSYS 繪圖功能建構出分析圖，如圖 3-5 所示。

在建圖時，可利用 Preprocessor → Modeling 中的各項功能來編輯與修改圖形，而在圖形的線架構上最好為連續的線段，可在 Preprocessor → Modeling → Operate → Booleans 下做修改，如此在做網格建立時才能使網格平均的將面積做分割。

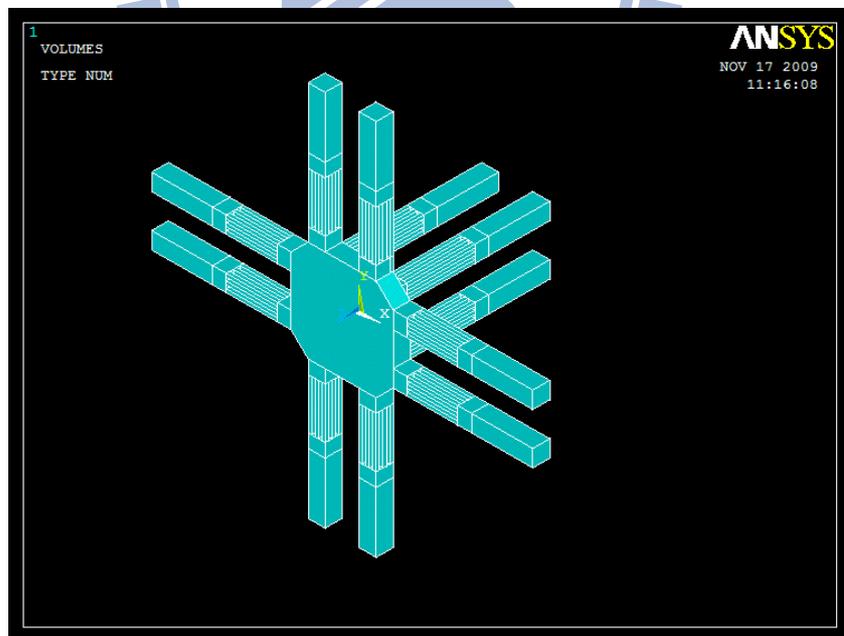


圖 3-5 ANSYS 模型分析圖

二、參數設定：

當圖形建構完成後便要對結構做各項的設定，共有兩項設定：元素型式(element type)、材料性質(material properties)。

1.元素型式(element type)：在本論文中模擬的「平行細柱群」結構屬於 3D，所以使用之元素類型為 SOLID5 3-D Coupled-Field Solid；另外，壓電材料所使用的元素類型為 SOLID186 3-D 20-Node Structural Solid or Layered Solid。

2.材料性質(material properties)：「平行細柱群」結構材料屬於等向性(isotropic)，必須定義楊氏係數 EX 值及浦松比 PRXY；另外，值得注意的是在彈性分析中，浦松比不可設定為 0.5，因為這會使得結構體之剛性係數(bulk modulus)變成無限大，程式將無法執行。塑性分析中則無此限制，因為塑性力學將材料視為不可壓縮，只能因剪力而變形。在此我們將 EX 值設定為 7.1×10^{10} ，PRXY 設定為 0.33。而壓電材料所使用的參數參照公式(2.8)、(2.9)、(2.10)。

三、網格建立：

在幾何模型建立完成後，即可進行模型的網格化，亦即將其離散化。在無誤差累積的情況下，網格分的越細，所計算的結果誤差越小，但所需的分析時間越長。

對於複雜的結構，網格化後會產生重疊的節點，必須消除重疊或位置十分接近的節點，以免產生不連續的元素以及奇異點(singularities)，可使用 Merge 功能來消除之。還要使用壓縮節點編號指令，來減少矩陣之主自由度(master degrees of freedom)，以節省計算時間。因為微定位平台變形較大的部份在「平行細柱群」，因此，在此處的網格將細分得較細密，如圖 3-6 所示。

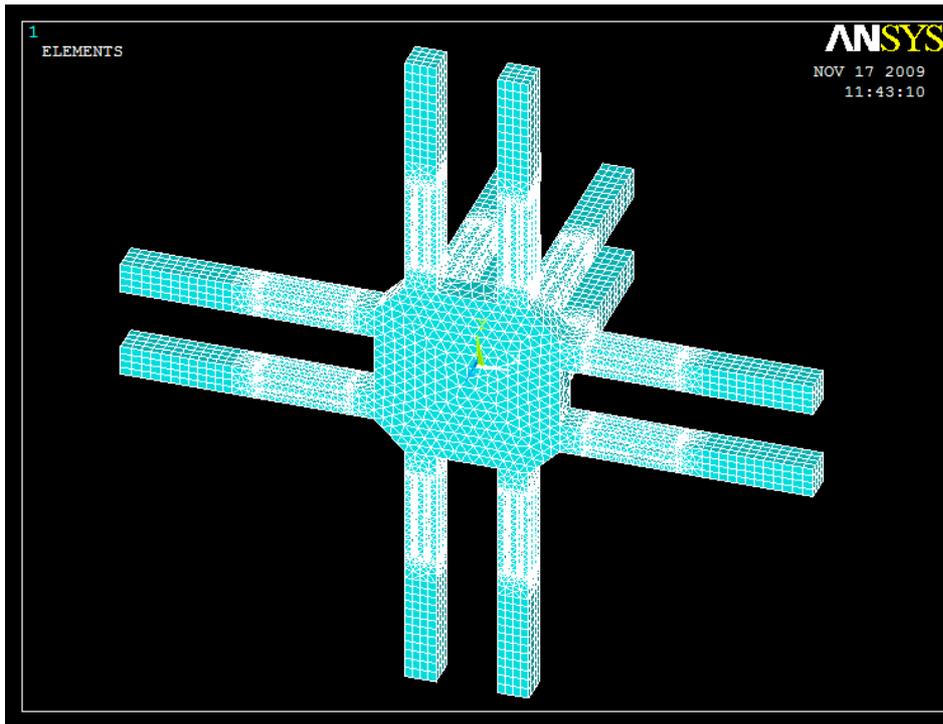


圖 3-6 微定位平台網格建立圖

四、 邊界條件設定：

邊界條件設定包含施加拘束(constraints)或稱邊界條件(boundary conditions, BC)及負載荷重(loads)之指令。拘束是定義一個結構體之固定條件；荷重可包含集中力、分布力、加速度以及預存應變(pre-strain)等。例如，結構問題可定義位移邊界條件及受力，或熱傳遞問題可定義邊界溫度或表面熱對流。另外，在線性問題中的多重負載狀況(multiple load cases)則可以分別定義，並於後置處理程序中以各種比例組合輸出結果。

設計上，奈米定位器分別將 X、Y、Z 三個方向的壓電材料固定邊界，另外再分別依照需求對各個軸向的壓電材料施加適當的電壓，如下圖 3-7。

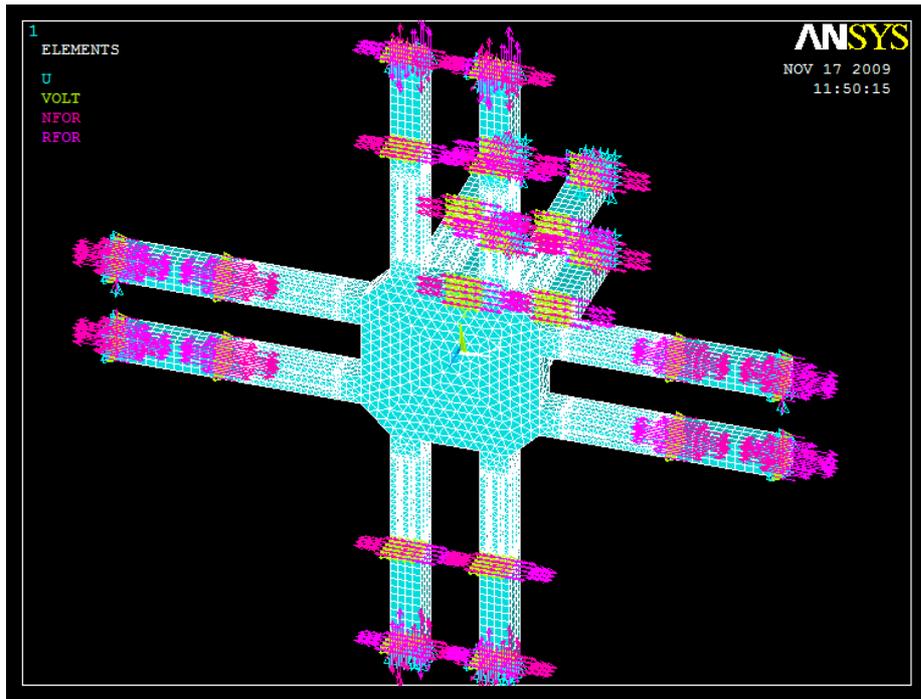


圖 3-7 邊界條件設定圖

分析

當有限元素模型建立完成後，便可進入求解處理器(SOLU)。進入求解處理器之後接著就該宣告分析的型態(ANTYPE, Analysis TYPE)，而常用的分析型態如下：

1. ANTYPE=STATIC 或 0 時為靜態分析。
2. ANTYPE=BUCKLE 或 1 時為挫屈分析。
3. ANTYPE=MODAL 或 2 時為振動模態分析。
4. ANTYPE=HARMIC 或 3 時為調和外力動力系統分析。
5. ANTYPE=TRANS 或 4 時為暫態動力系統分析。

當模型完成建構、負載定義完成、分析型態也已宣告時，接下來就可下達 SOLVE 指令開始解題，求解的過程包含電腦大量的計算，所以須要花費不少的時間，而過程中，質量矩陣、剛度矩陣、負載等資料都會儲存在相關檔案中。

ANSYS 求解之結果內容，包含節點結果與元素結果，結果的輸出可寫入輸出檔案 (Output File)，資料庫及結果檔(*.rst, *.rfl, *.rth, *.rmg)。在交談模式中，輸出檔案即為將結果顯示於輸出視窗中，由於每個元素的結果相當多，系統自定是不將結果列於輸出視窗中，否則當模組非常大時，要耗費相當多的顯示時間，但是可利用 OUTPR 指令，設定顯示結果的內容於輸出視窗中。而將結果存入資料庫及結果檔，主要是用於後處理器(POST1)中各種結果圖形之顯示，系統之自訂為全部結果存入該檔。

因為求解處理器已內定在靜態分析模式下了，所以直接選擇 Solve → Curent LS 求解。

後處理

後處理是指檢查分析的結果，這是分析中最重要的一環，因為可以搞清楚作用載荷如何影響設計、元素劃分得好壞等。另外，後置處理器 POST1 是應用於靜力或穩態問題方面的。

經求解處理器求解後，下一步則進行機構設計分析，找出合適的尺寸值，而後再由後置處理器(POST1)顯示分析後的各個狀態情形。

3.2.3 「平行細柱群」機構設計

機構之尺寸係依據其位置與運動範圍來設計。在這裡的機構設計，指的是一種方案可以滿足所有的設計要求，而且所需的支出（如重量，面積，體積，應力等）最小。

對於一個設計方案來說，許多方面都是可以設計分析的，比如：尺寸（如厚度）、形狀、支撐位置、自然頻率、材料特性等。實際上，所有可以參數化的 ANSYS 選項都可以作機構設計分析。

在進行機構設計分析時要先聲明分析的變量，即設計變數、狀態變數和目標函數三項，以下介紹各個設定。

設計變數(Design Variables)

設計變數 (DVs) 是機構設計分析中的獨立變數，分析結果的取得就是通過改變設計變數的數值來實現的。每個設計變數都有上下限，它定義了設計變數的變化範圍。常見的設計變數，如長度、厚度、半徑或節點，分為單一設計參數及多設計變數。

設計變數項目如圖 3-8 中的三個尺寸值，為 z 軸細柱群的長度(SLz)，x 與 y 軸細柱群的長度(SLx)，x、y 與 z 軸細柱群的寬度(SW)，而表 3-1 即為設計參數的設定範圍值。

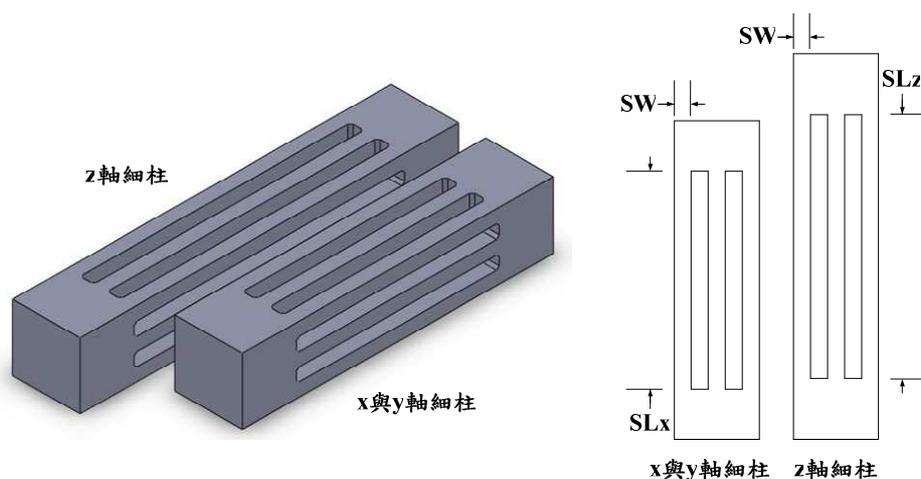


圖 3-8 細柱群尺寸代號圖

設計變數項目	範圍值(mm)
z 軸細柱群的長度(SLz)	5~25
x 與 y 軸細柱群的長度(SLx)	5~25
x、y 與 z 軸細柱群的寬度(SW)	0.5~1.5

表 3-1 設計參數設定範圍表

狀態變數(State Variables)

狀態變數 (SVs) 是指約束設計的數值。在尋找設計問題時，設計者常常會受到許多設計的限制，如應力、溫度、熱流率、頻率、變形等，然而設計分析經由這些限制條件限制後，根本無法找到最佳解，如材料的減少與應力的降低往往無法同時滿足，這些限制條件又稱為狀態變數，為設計參數的一種。若設計問題中加入限制條件，則該問題變成限制條件設計問題，一般限制條件分為等式限制條件及不等式限制條件。在這邊我們設定材料的降伏應力為 270MPa，參考表 3-2。

項目	楊氏係數	密度	降伏應力(σ_y)	浦松比
數值	71 GPa	$2700 \times 10^{-9} \text{kg/mm}^3$	270 MPa	0.33

表 3-2 T6-6061 特性表

目標函數(Objective Function)

目標函數是指機構設計所要分析的數值。它必須是設計變數的函數，也就是說，改變設計變數的數值將改變目標函數的數值。在 ANSYS 分析中，只能設置一個目標函數，其值必須為正。

本論文中的目標函數為定位平台的位移量，由於壓電致動器的運作範圍在-30V～+30V 之間，因此設計上希望每個軸向皆能達到 8 μ m，也就是 $\pm 4\mu$ m 位移量，故設定值為 4×10^{-6} 。

經過機構設計分析後即可得到所要的合適尺寸，並由後處理器顯示材料的最大應力、應變值及所施加的壓力值，而表 3-3 即為經機構設計分析後的合適尺寸值。

設計項目	合適尺寸(mm)
z 軸細柱群的長度(SLz)	20
x 與 y 軸細柱群的長度(SLx)	15
x、y 與 z 軸細柱群的寬度(SW)	1

表 3-3 分析後的各個尺寸值

將所得到的合適尺寸重新由前處理器建模、參數設定、網格建立及邊界條件設定，再進入求解器求解出應力、應變及位移值，最後再由後置處理器(POST1)顯示出應力、應變及最大位移圖。圖 3-9 到圖 3-17 所示即為「平行細柱群」機構設計分析後所得尺寸之模擬的應力、應變及位移圖。

圖 3-9 到圖 3-11 為「平行細柱群」機構設計後合適尺寸的各軸向應力圖，其最大應力約為 3MPa，遠遠小於降伏應力 270MPa，其安全係數約為 90。

圖 3-15 和圖 3-16 分別為分析後的單軸及雙軸位移圖，從圖 3-15 上面可發現模擬出來的單軸最大位移量約為 4 μ m，符合我們所預期。圖 3-17 為 Z 軸施加 30V 之平台位移圖。

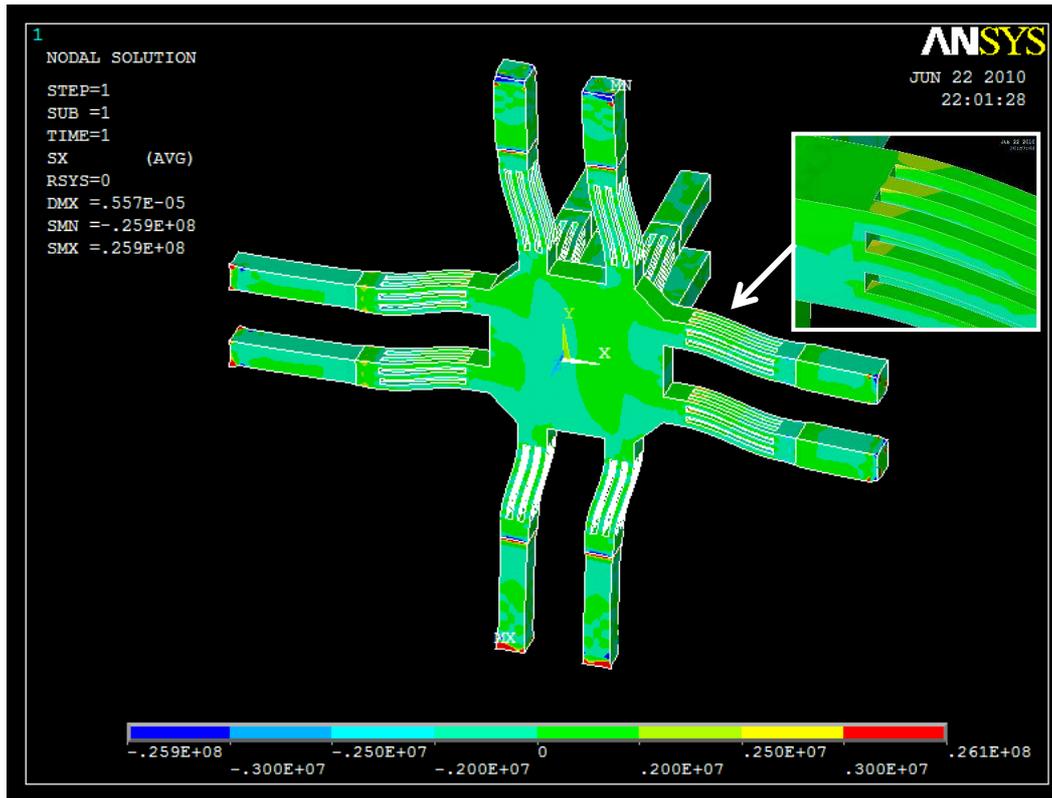


圖 3-9 機構設計分析後之 x 向應力圖

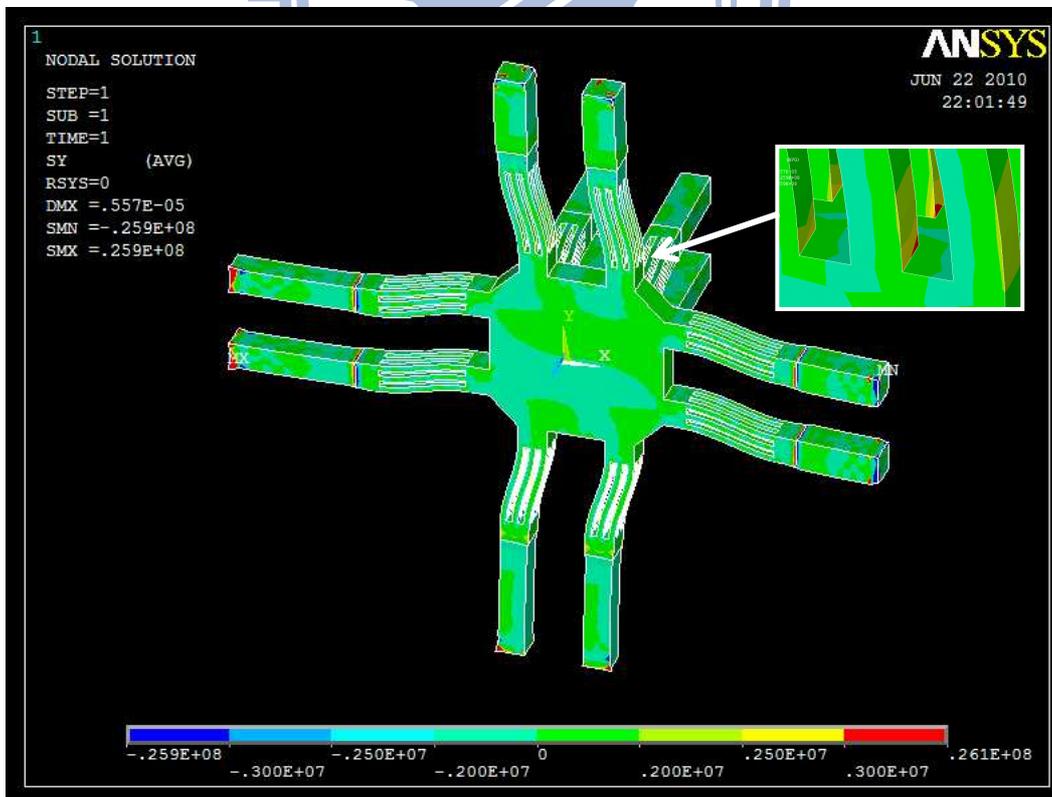


圖 3-10 機構設計分析後之 y 向應力圖

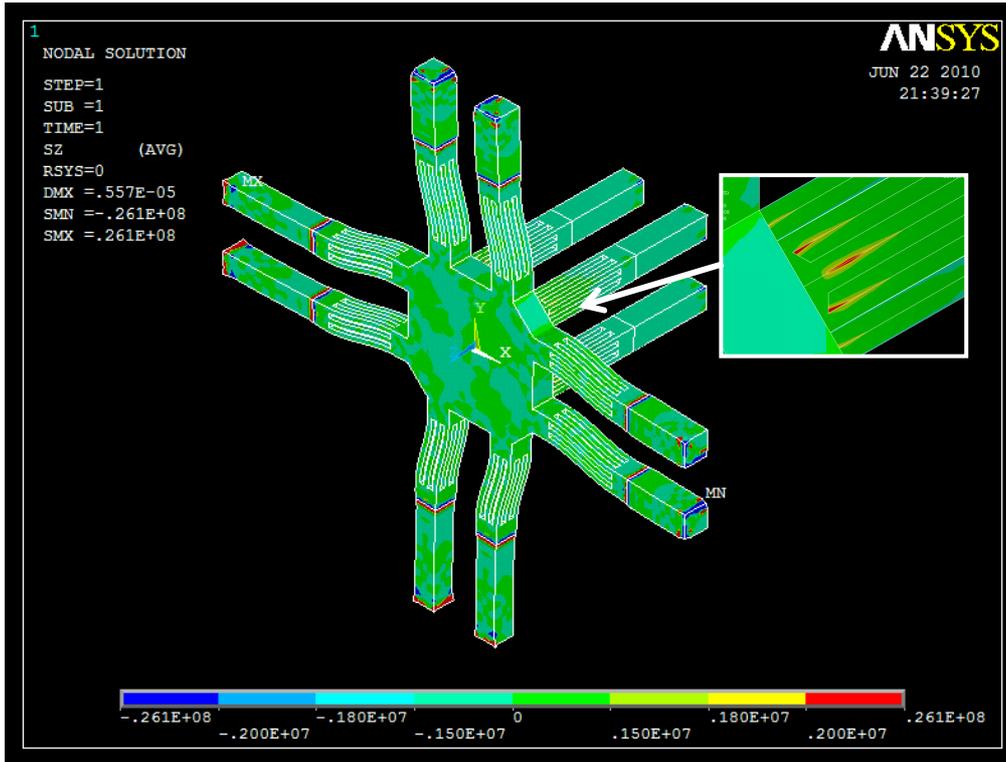


圖 3-11 機構設計分析後之 z 向應力圖

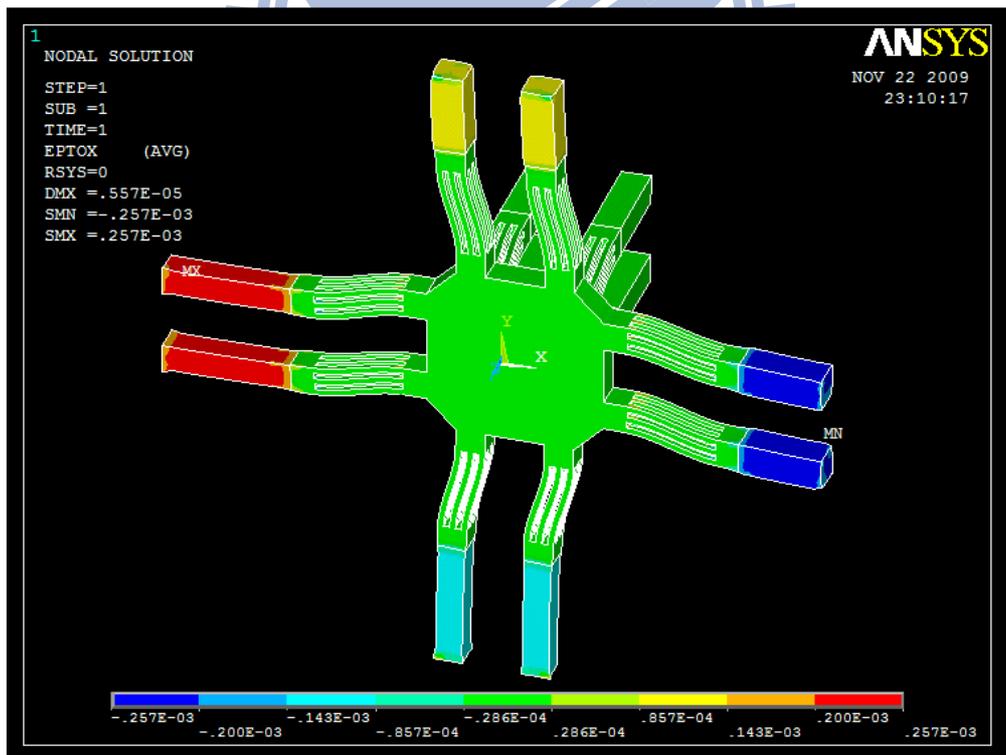


圖 3-12 機構設計分析後之 x 向應變圖

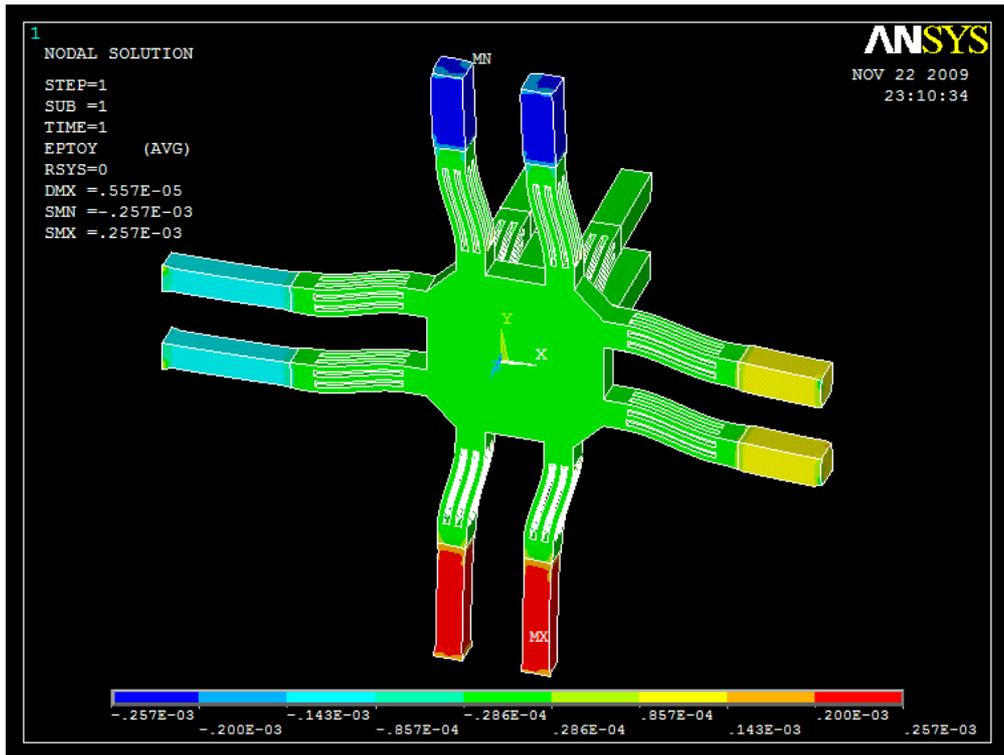


圖 3-13 機構設計分析後之 y 向應變圖

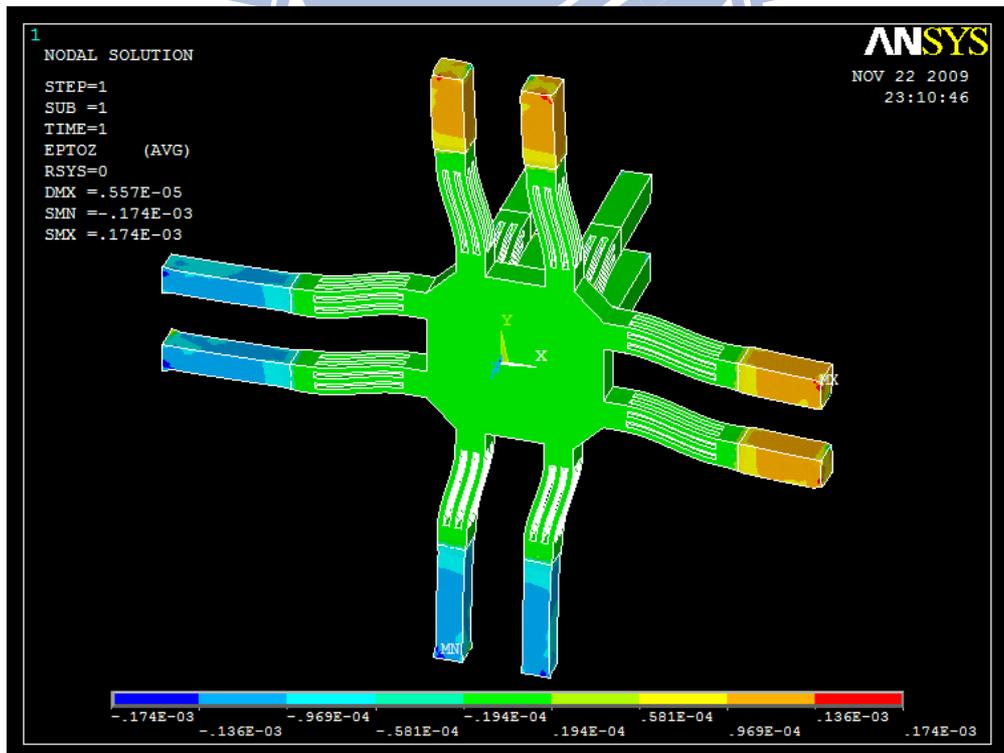


圖 3-14 機構設計分析後之 z 向應變圖

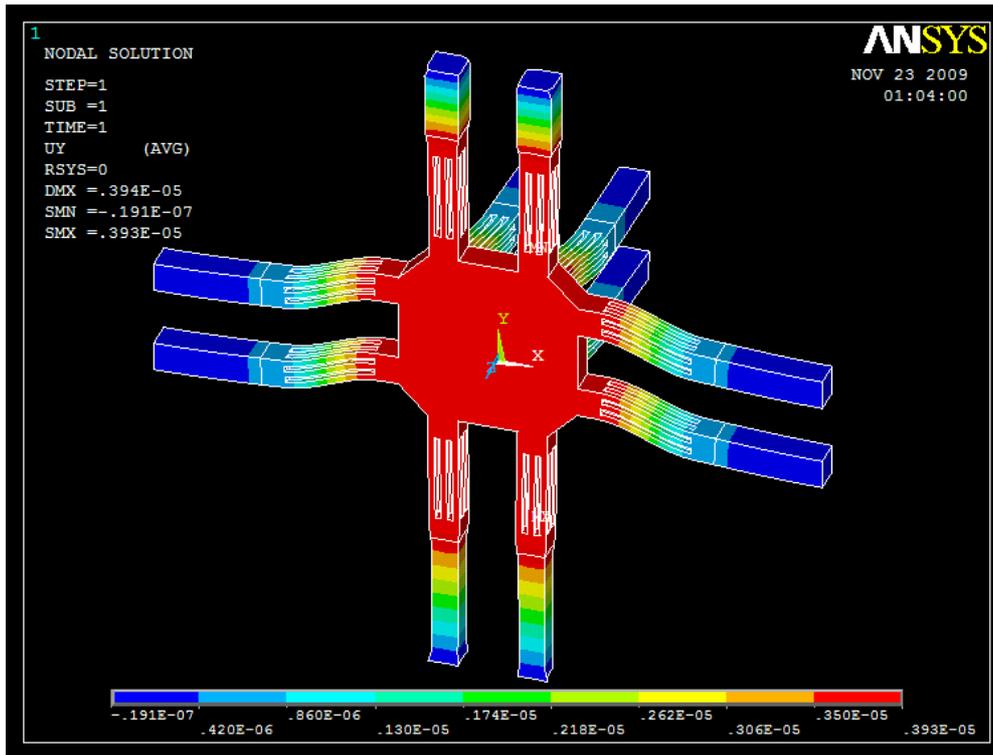


圖 3-15 單軸施加正負 30V 之平台位移圖

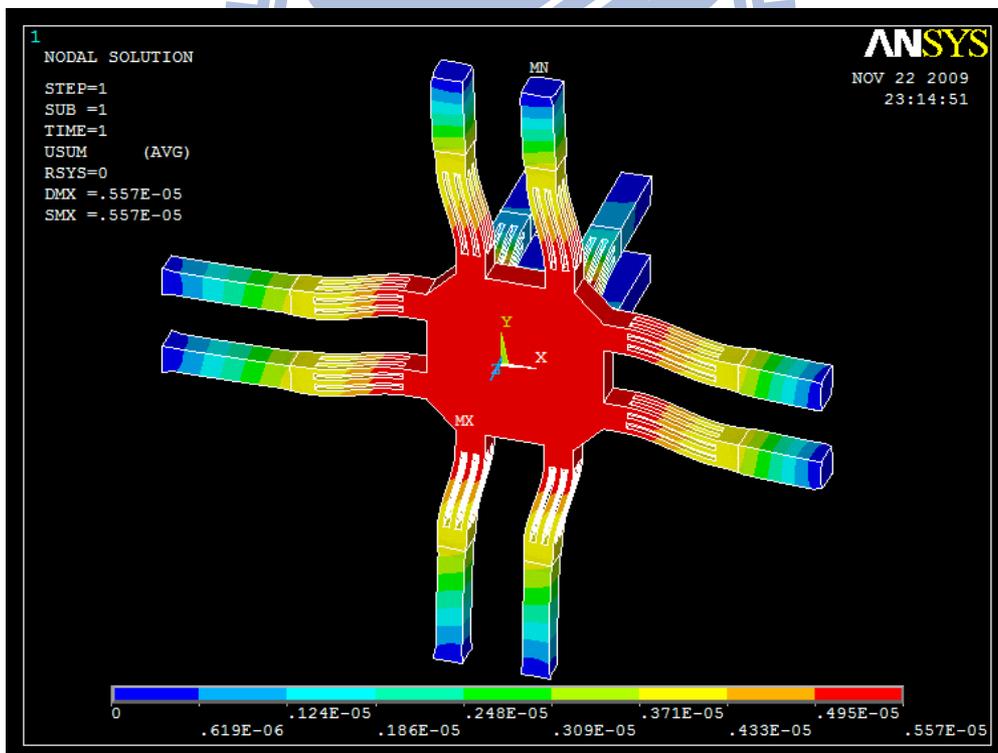


圖 3-16 雙軸施加正負 30V 之平台位移圖

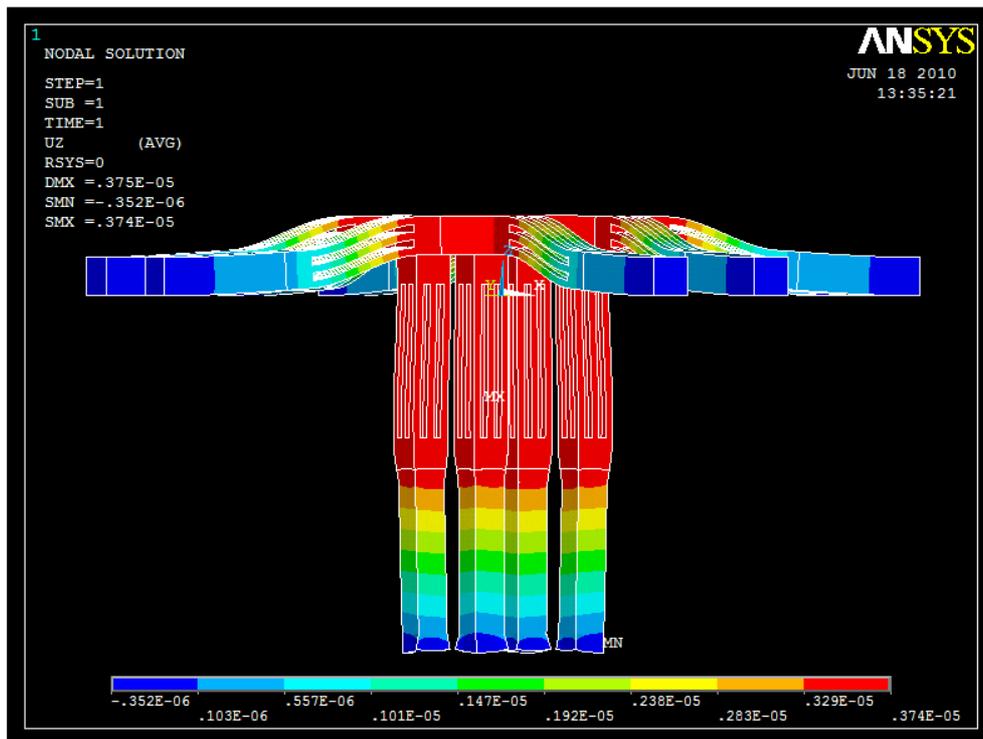


圖 3-17 Z 軸施加 30V 之平台位移圖

3.3 系統整合

圖 3-18 所示為實驗儀器量測流程圖，由於必須同時操控三種不同電壓訊號的壓電致動器，所以使用 National Instrument (NI)所製造的 PCIe-6259 資料擷取卡來作為電壓訊號的擷取轉換，並且利用 MATLAB/Simulink 來產生所需的訊號以及回授訊號的處理。

由於資料擷取卡僅能產生 $\pm 10V$ 的電壓，與我們所希望的 $\pm 30V$ 驅動電壓有相當的差異，因此使用自製高壓放大器來達到加大電壓訊號的功能，接著使用 Keyence 公司所生產的雷射位移感測器來做為控制器的回授訊號。

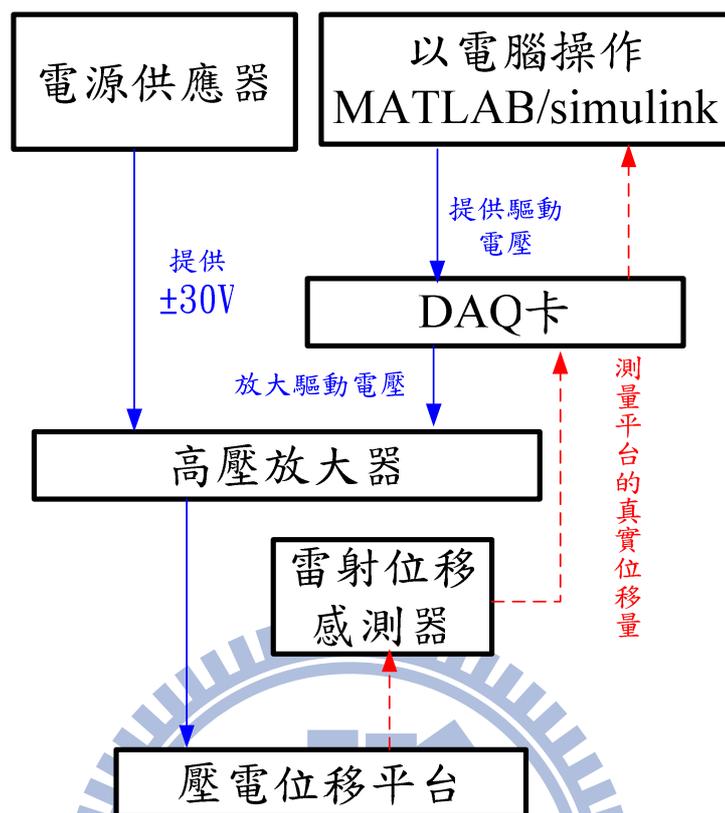


圖 3-18 實驗儀器量測架設圖

3.3.1 控制軟體(MATLAB/Simulink)

MATLAB[28]是由美國 MathWorks, Inc.公司推出的套裝軟體，其名稱是「矩陣實驗室」(MATrix LABoratory)所合成，因此可知其最早的發展理念是提供一套非常完善的矩陣運算指令，但隨著數值運算需求的演變，MATLAB 已成為各種動態系統模擬、數位訊號處理、科學計算的標準語言。MATLAB 是一種計算核心，圍繞著這個計算核心，有許多針對不同應用所開發的應用程式，稱為工具箱(Toolboxes)，這些工具箱包羅萬象，從線性代數、數值分析、通訊、自動控制、數位訊號處理等。為了使用上的方便建模，MATLAB 後續推出了 Simulink 視覺建模[29-30]的程式設計法，藉由已定義好的方塊，可快速建構出自己所需要的系統模型。

本論文使用 MATLAB 為控制器快速原型的開發工具，並應用下述幾項特點：

1. 程式撰寫簡易：在程式上的撰寫非常自由，不需向某些程式語言必須遵循嚴謹的規則，對於許多人而言，可以節省許多程式 debug 的時間，能讓我們能更加專注於工作亦或者其他問題。
2. 豐富的函式庫：MATLAB 具有相當豐富的函式庫，這使得程式使用上變得非常簡潔，往往幾行的程式，便能達到其所需目的，對於初學者來說是較容易上手。
3. 動態系統的模型化：MATLAB 環境下提供了 Simulink 圖形化操作介面，Simulink 是一種對動態系統進行模型化、模擬及分析的軟體。在此操作介面下，所有的控制演算法、硬體的驅動程式皆被視為一方塊，使用者可以快速應用這些方塊建立一控制系統的模型，並對此控制系統作模擬與分析。
4. Real-Time Workshop：將使用者設計好的控制系統模型經由 Real-Time Workshop (RTW) 功能，使用者可在不需撰寫程式碼的情形下，直接轉為目標控制器所使用的控制碼。

3.3.2 資料擷取卡

類比訊號轉數位訊號之轉換方式大致為將類比訊號作取樣及保持，再執行量化與編碼轉成數位訊號，此動作稱為 A/D 轉換，再由電腦讀入作分析。為了要使輸入之類比訊號能忠實地還原，因此其 A/D 轉換速度要夠快，即一般所稱之取樣率(sampling rate)。

對系統下達電壓控制是利用 NI PCIe-6259 DAQ Card，如圖 3-19 內之類比輸出功能，配合 MATLAB/Simulink 軟體之撰寫，如圖 3-20，將類比命令由軟體下達給 DAQ-Card。

本實驗中所使用之 A/D 轉換器為 National Instrument 公司生產的 M 系列多功能資料擷取卡，其產品名稱為 PCIe-6259 DAQ Card，如圖 3-19，此卡集類比、數位 I/O、計數器/計時器等功能，有相當優異的資料擷取能力。

其相關規格特性如下：

- λ 1 倍 PCI Express 介面可提升頻寬
- λ 可提升量測精確度的 NI-MCal 校準技術
- λ 4 個 16 位元解析度的類比輸出(2.86MS/s 取樣率)
- λ 32 個 16 位元解析度的類比輸入(1.25MS/s 取樣率)
- λ 類比輸入/輸出電壓範圍為(-10V~10V)
- λ 48 個數位 I/O；32 位元計數器
- λ 相關 DIO (32 個時脈通道、10MHz)；類比與數位觸發
- λ 可向下相容針對 PCI 撰寫的軟體
- λ NI-DAQmx 驅動軟體與 NI LabVIEW SignalExpress 互動式資料記錄軟體



圖 3-19 NI PCIe-6259 資料擷取卡與外接式端子台

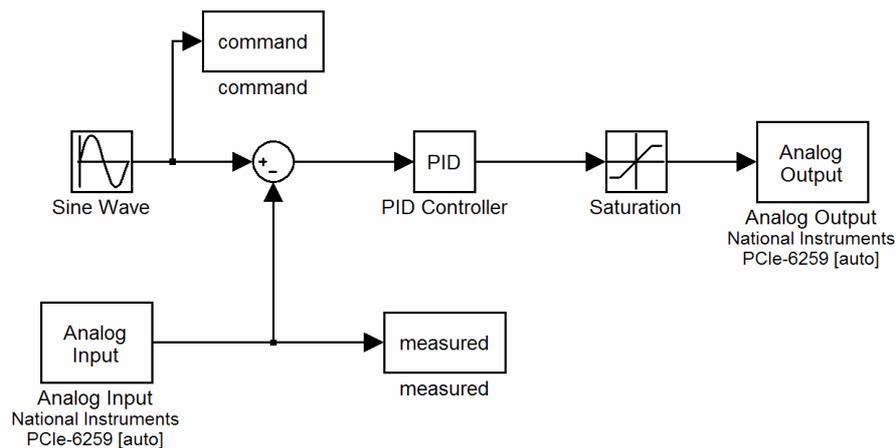


圖 3-20 訊號控制及紀錄

3.3.3 Real-Time Workshop

MATLAB/Simulink 之所以可作為控制器快速原型的開發工具，在於它提供了 Real-Time Workshop 工具軟體，在 RTW 框架下使用者可以對不同的目標硬體進行平台的開發。RTW 功能對於嵌入式控制器的使用者來說可以節省許多程式開發時間，對相關工程師而言，此技術更可提升控制器模型研發的良率，避免控制工程師與軟體工程師的溝通缺陷，使控制器模型成為產品的效率提高許多。RTW 功能能自動產生程式碼，避免了手工拼寫錯誤和對建構者的設計誤解。

RTW 程式碼自動產生流程大約可分為三個階段，分別是 Simulink 控制模型的建立與對應模型 Work M-File 的撰寫以及程式碼自動產生及可執行 C 程式碼產生。

為了使得控制程式達到即時控制的需求，本論文採用 Real-Time Windows Target 方式作為控制器的開發。

3.3.4 控制器設計

控制的理論發展至今已經相當多年，在工業控制上以比例積分微分(PID)控制方法[30]應用最為廣泛，主要原因是 PID 控制運算式相當簡單，容易實現，在調整所需的參數後，便能得到所期待之良好的控制效果，因此本論文利用個人電腦為基礎介面(PC Based)設計一個 PID 控制器當作控制介面。

PID 控制器是以比例-積分-微分(Proportion-Integral-Derivative，PID)控制所組成。

比例控制為一可調之增益元件，由增益的改變可調整系統的穩態誤差及相對穩定度，當增益變大時可降低穩態誤差，但會破壞相對穩定度；當增益變小時，可增加相對穩定度，但也會增加穩態誤差。

積分控制可消除穩態誤差，並有利於雜訊的抑制，但也可能會使得系統不穩定或者暫態響應性能變得比較差，與比例控制相結合即為 PI 控制器，具有改善穩態響應與雜訊抑制的特性。

微分控制可改善系統的阻尼特性及暫態響應，並能增加相對穩定度，但不利於高頻雜訊干擾，且無法改善穩態的誤差，與比例控制相結合即為 PD 控制器，具有改善相對穩定度與暫態響應的特性。

在本研究中，要使用到高頻訊號量測，由於微分控制會造成高頻雜訊干擾，因此在這裡我們只選擇了使用 PI 控制器作為定位器之控制器。

參數	上升時間	上升超越量	安定時間	穩態誤差	穩定性
KP	減少	增加	微小改變	減少	降低
KI	減少	增加	增加	消除	降低
KD	微小改變	減少	減少	微小改變	改善

表 3-4 PID 參數與系統時域性能指標之間的關係[31]

四、 實驗

為了檢驗所設計的定位平台的性能，以下將依序進行各種測試，分別為(1)大範圍步階響應測試、(2)連續小步階測試、(3)正弦波測試、(4)三角波測試、(5)圓軌跡測試、(6)螺旋軌跡測試。

4.1 量測流程與設備

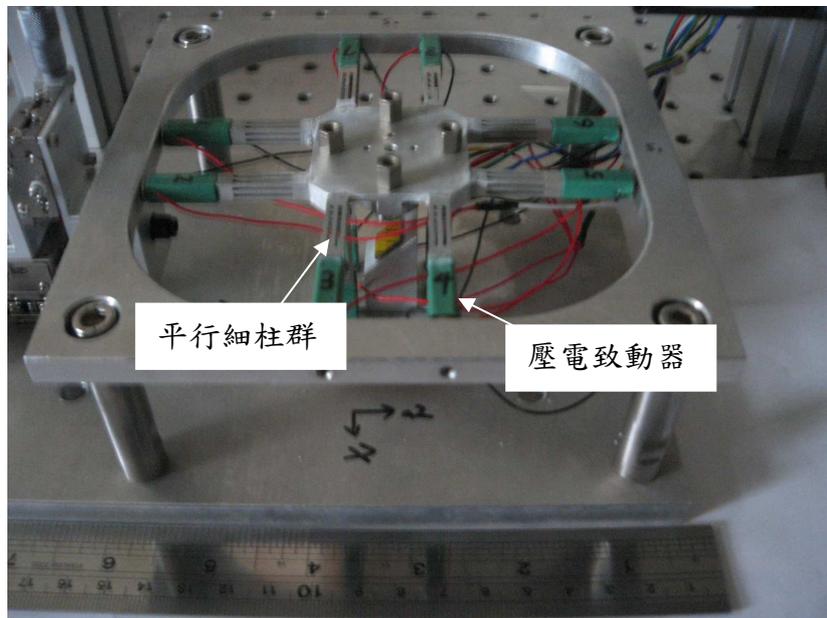


圖 4-1 快速三維奈米定位器實體圖

三維奈米定位器量測流程如圖 4-2 所示，首先從電腦送出訊號，透過數位/類比訊號轉換器(D/A)傳送訊號，訊號經由電壓放大器將電壓放大，再傳送給壓電致動器，由壓電致動器驅動定位平台機構的輸入端來改變其輸出位移，利用雷射位移感測器量測平台的輸出位移量，並將量測到位移訊號轉換成電壓訊號，並經由類比/數位訊號轉換器(A/D)傳回給電腦，電腦再將訊號給記錄下來。

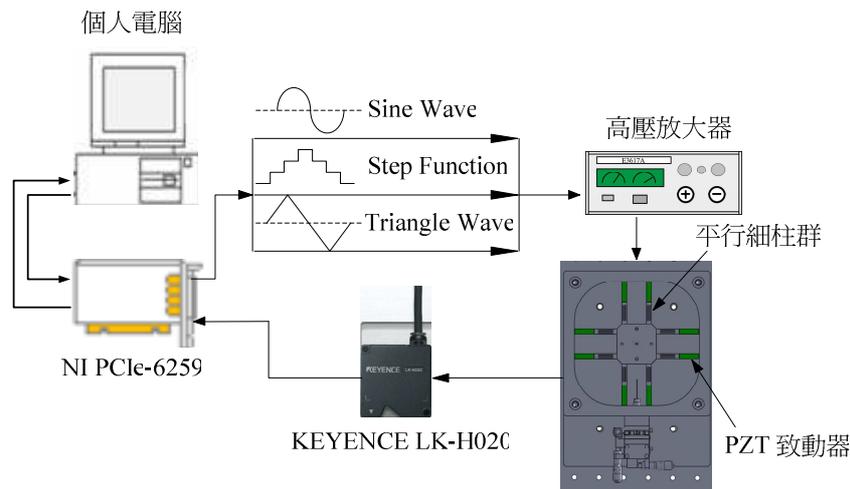


圖 4-2 三維奈米定位器量測流程圖

本實驗量測時所需的設備有：

1. NI 公司 PCIe-6259 的 DAQ 擷取卡，輸出電壓命令範圍為 $\pm 10V$ 之間。
2. 電壓放大器，使用的是高功率運算放大器 OPA541 搭配設計電路，以達到放大倍率為 3.75 倍。詳細電路圖參見附錄 B。
3. KEYENCE 公司的 LK-G5000 系列的控制器以及 LK-H020 雷射位移感測器。

本研究之實驗軟體使 MATLAB/Simulink 所提供之 Real-Time Windows Target 環境。

4.2 -30V~30V 驅動電壓

為了測試我們所設計的定位器各項性能，我們先將各個軸向的驅動電壓都設定為 -30V~30V，並且進行以下各種實驗以測試定位器性能。

4.2.1 大範圍步階響應測試

為了檢驗定位器的大範圍移動性能，我們對定位器的 XYZ 三個軸向分別做大範圍步階響應測試，我們分別將平台在 XY 平面上做點對點的位置運動。先測試 X 軸向的位移，設定初始點為 $X=-2.5\mu\text{m}$ 、 $Y=0\mu\text{m}$ 、 $Z=0\mu\text{m}$ ，接著透過調整適當的 PI 參數使整個平台達到收斂點為 $X=2.5\mu\text{m}$ 、 $Y=0\mu\text{m}$ 、 $Z=0\mu\text{m}$ 。實驗數據顯示在圖 4-3。

Y 軸向的大範圍步階響應同樣也設定初始點為 $X=0\mu\text{m}$ 、 $Y=-2.5\mu\text{m}$ 、 $Z=0\mu\text{m}$ ，並調整 PI 參數後使整個平台達到收斂點為 $X=0\mu\text{m}$ 、 $Y=2.5\mu\text{m}$ 、 $Z=0\mu\text{m}$ 。實驗數據顯示在圖 4-4，由圖 4-3(c)及圖 4-4(c)可發現上升時間皆為接近 10ms。

再來考慮 Z 軸的響應性能並設定初始點為 $X=0\mu\text{m}$ 、 $Y=0\mu\text{m}$ 、 $Z=-2.5\mu\text{m}$ 。實驗中，我們調整適當的 PI 參數使平台能達到收斂點為 $X=0\mu\text{m}$ 、 $Y=0\mu\text{m}$ 、 $Z=2.5\mu\text{m}$ 。圖 4-5 為經由適當的 PI 控制器所紀錄之大範圍步階響應測試。

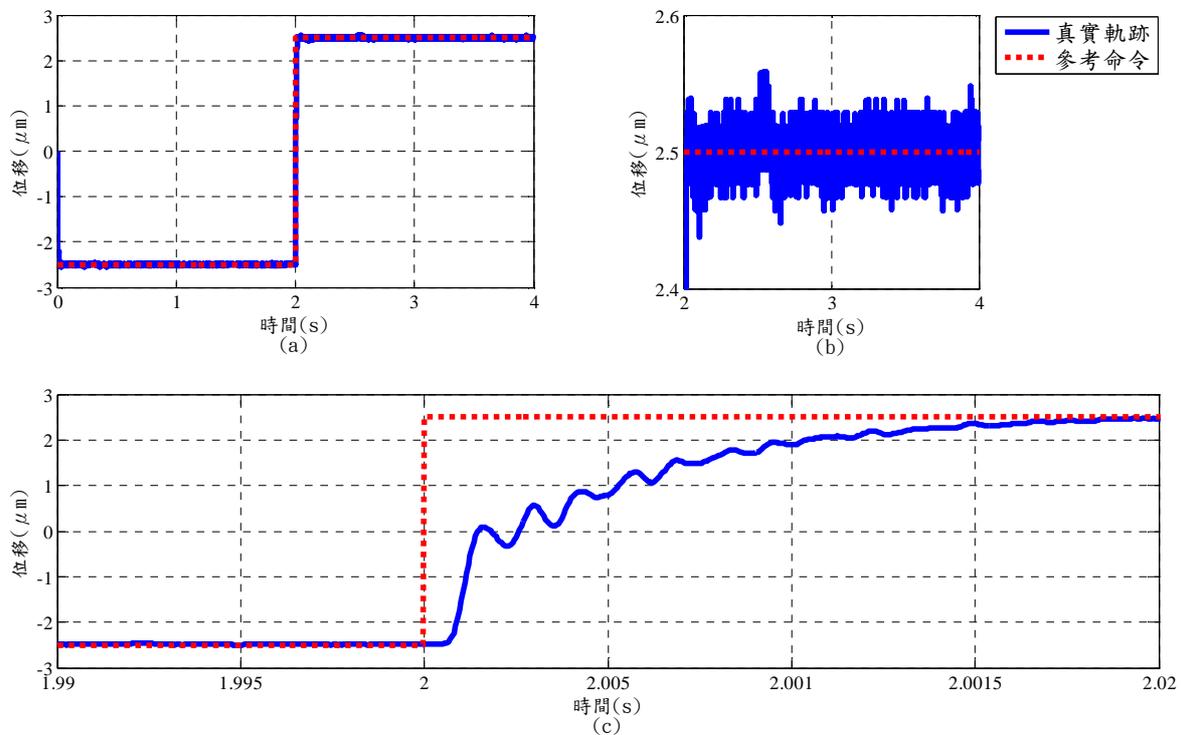


圖 4-3 X 軸大範圍步階響應測試，(a)X 軸狀態，(b)圖 4-3(a)穩定以後的解析度約為 11nm (rms)，(c)上升時間約為 10ms。

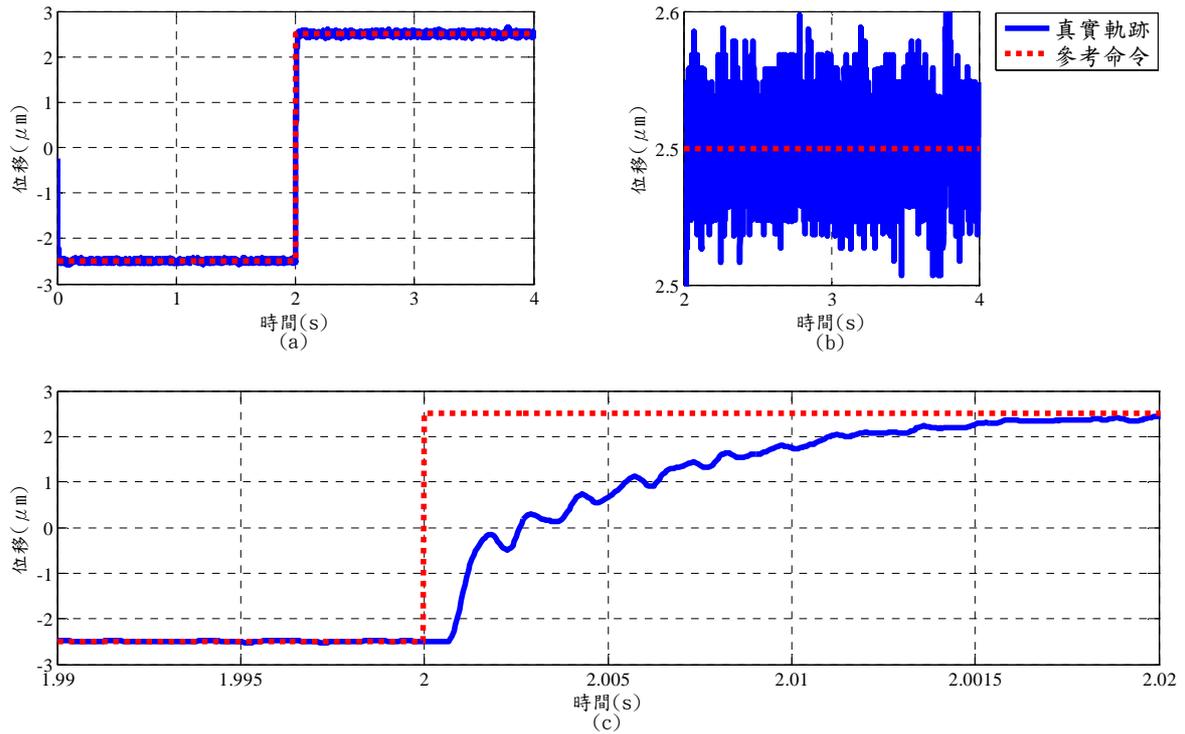


圖 4-4 Y 軸大範圍步階響應測試，(a)Y 軸狀態，(b)圖 4-4(a)穩定以後的解析度約為 13 nm (rms) ，(c)上升時間約為 10 ms 。

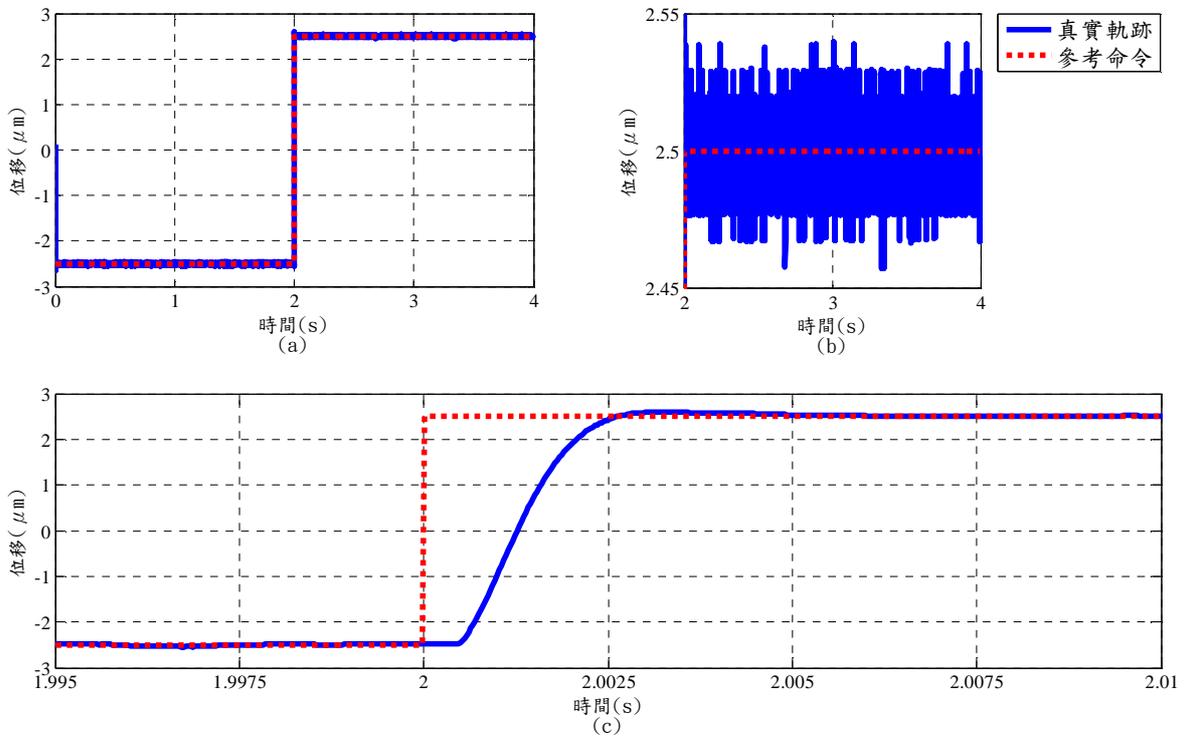


圖 4-5 Z 軸大範圍步階響應測試，(a)Z 軸狀態，(b)圖 4-4(a)穩定以後的解析度約為 11 nm (rms) ，(c)上升時間約為 2.5 ms 。

4.2.2 連續小步階響應測試

連續小步階響應在工業上是一種常見的定位方式，特別是運用在半導體製程上。因此為了驗證定位器在實際應用上的可行性，我們調整了適當的 PI 參數後分別對平台之 X 軸與 Y 軸做每次下降 500nm 且全行程為 5 μ m 的連續步階實驗。圖 4-6 分別顯示了 X 軸與 Y 軸的連續小步階實驗結果。

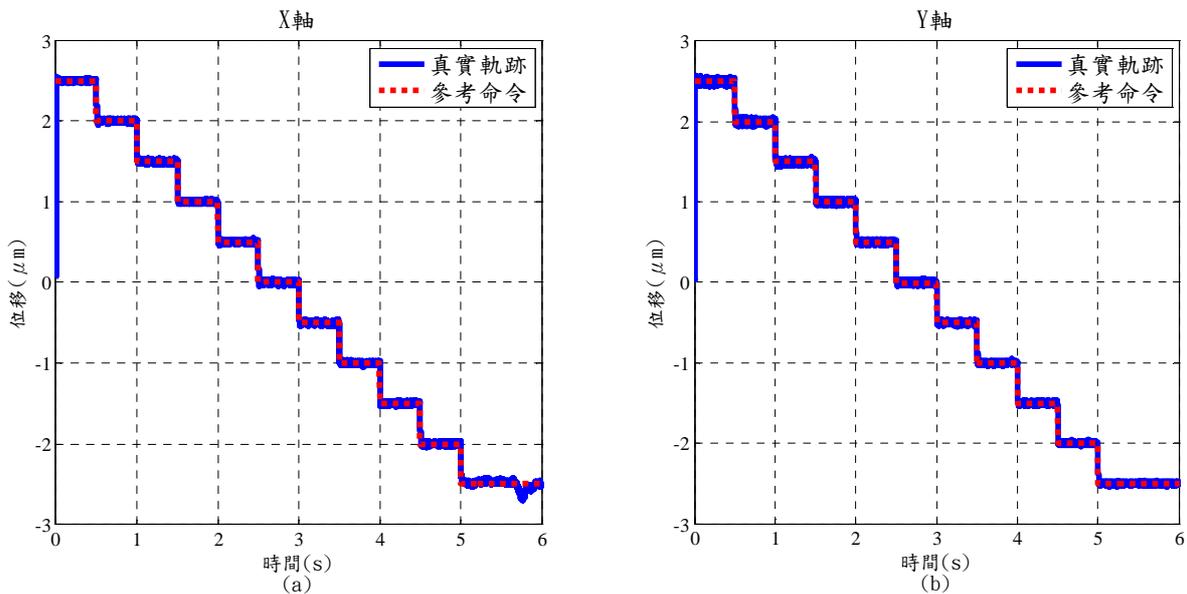


圖 4-6 (a)X 軸連續小步階響應，(b)Y 軸連續小步階響應。

4.2.3 正弦波測試

為了測試定位器的軌跡追蹤特性，我們調整合適的 PI 參數後利用振幅 2.5 μ m 的正弦波分別來對 X 軸以及 Y 軸做各種不同頻率下的波形測試。

圖 4-7 及圖 4-8 中分別測試頻率為 1Hz、5Hz、10Hz、30Hz、60Hz、100Hz、130Hz、140Hz 以及 150Hz 的正弦波實驗結果。由圖 4-7 和圖 4-8 可發現當頻率越高時，所產生的延遲越明顯；當使用 150Hz 高頻正弦波型輸出時，可以明顯的發現了不論 X 軸亦或者是 Y 軸皆產生了約 1.5ms 的時間延遲。

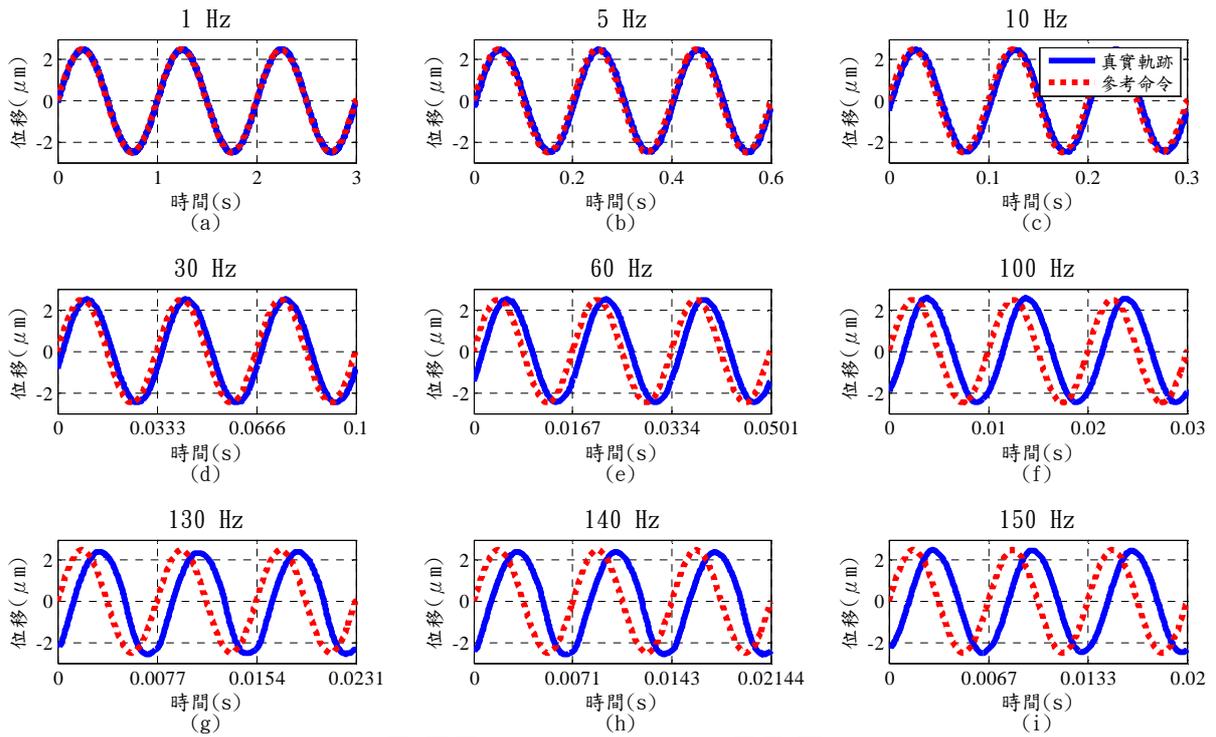


圖 4-7 X 軸正弦波各種頻率追蹤響應圖，
 (a)1Hz、(b)5Hz、(c)10Hz、(d)30Hz、(e)60Hz、(f)100Hz、(g)130Hz、(h)140Hz、(i)150Hz。

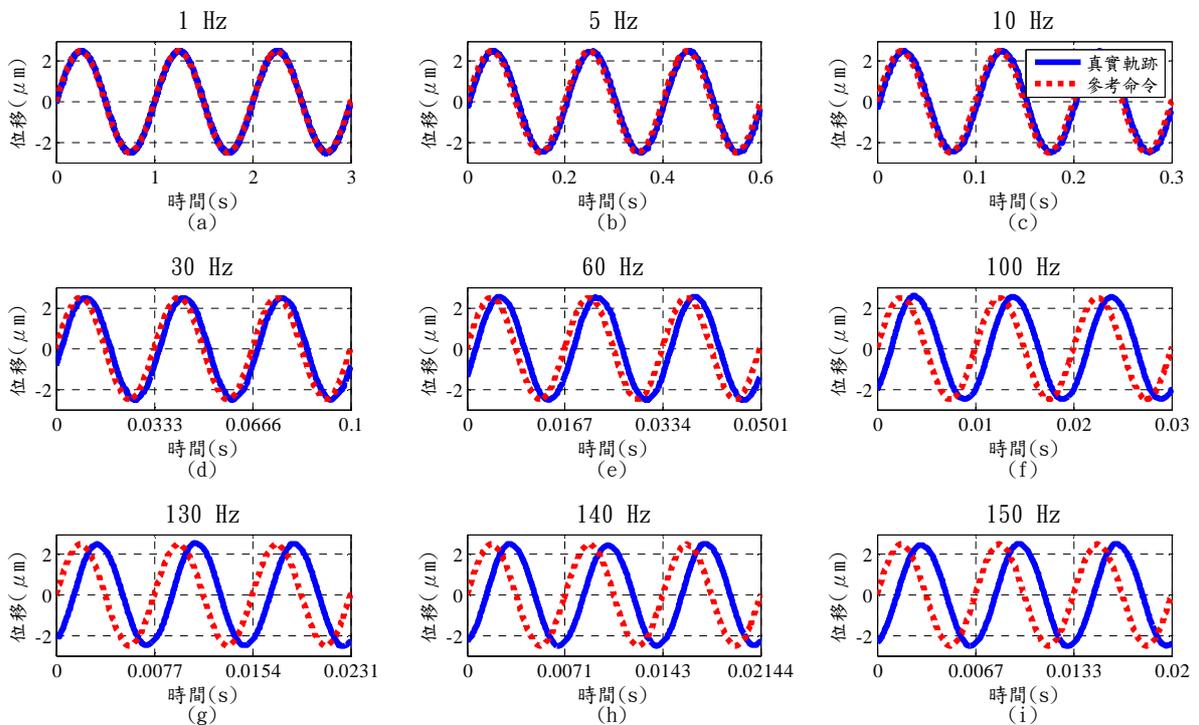


圖 4-8 Y 軸正弦波各種頻率追蹤響應圖，
 (a)1Hz、(b)5Hz、(c)10Hz、(d)30Hz、(e)60Hz、(f)100Hz、(g)130Hz、(h)140Hz、(i)150Hz。

4.2.4 三角波測試

本研究預期貢獻之一是製作一可供原子力顯微鏡使用之快速奈米定位器，其中原子力顯微鏡掃描樣品時所使用之波形形式為三角波，因此這裡也測試了各種頻率下三角波波形狀況，以了解所設計之定位器是否符合所需之要求。

圖 4-9 和圖 4-10 分別為 X 軸及 Y 軸經過調整適當的 PI 參數後的三角波測試結果，此處三角波之振幅 $2.5\mu\text{m}$ 。由圖可知，當頻率超過 100Hz 時，三角波波峰處之轉折會變的較為圓滑，此現象至測試頻率最大値之 150Hz 時尚在可接受範圍中。

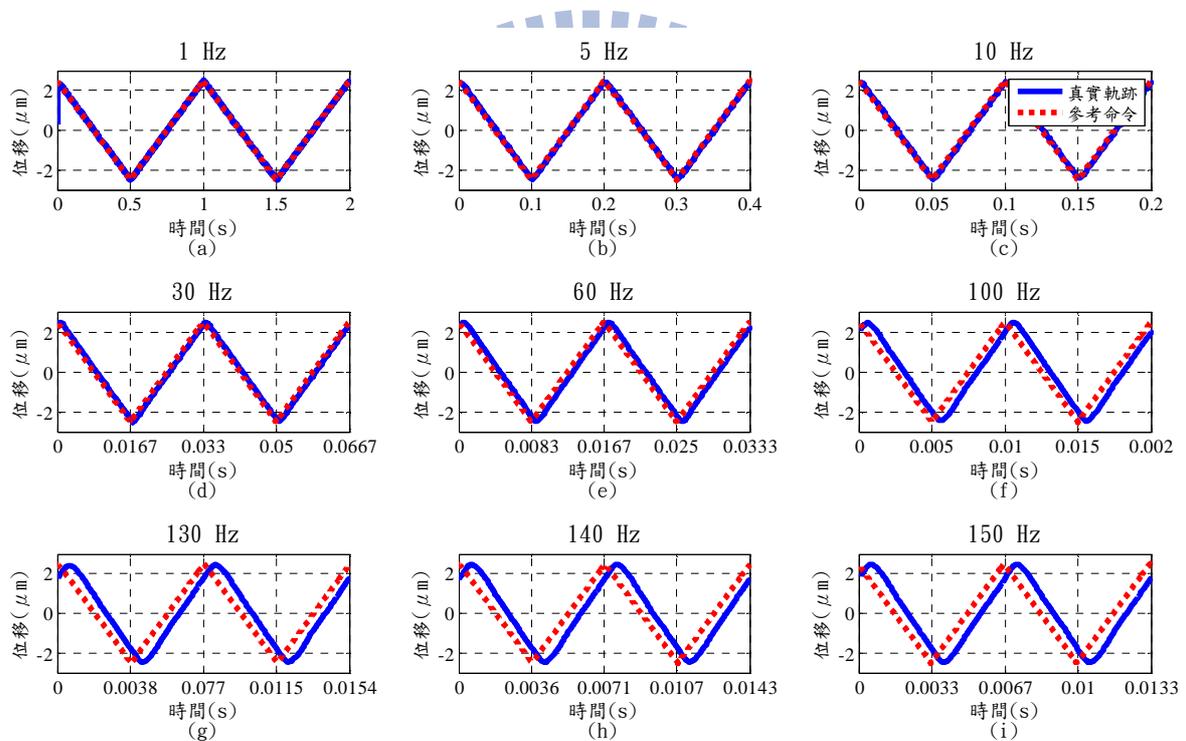


圖 4-9 X 軸三角波各種頻率追蹤響應圖，
(a)1Hz、(b)5Hz、(c)10Hz、(d)30Hz、(e)60Hz、(f)100Hz、(g)130Hz、(h)140Hz、(i)150Hz。

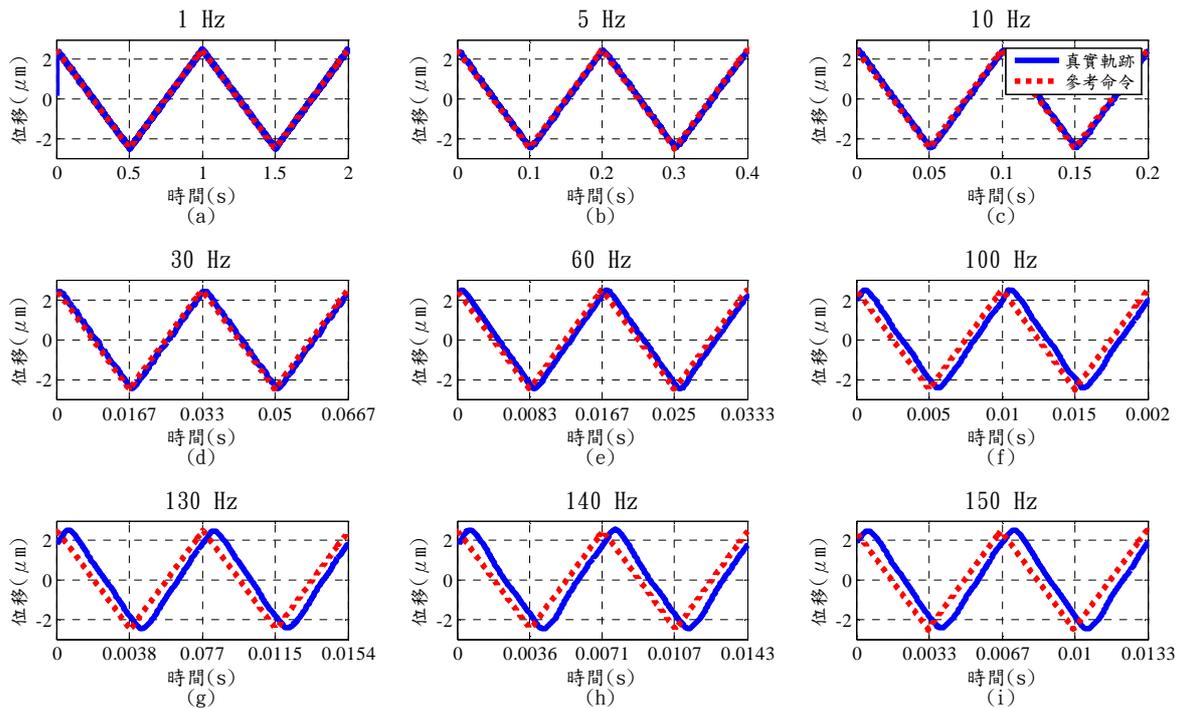


圖 4-10 Y 軸三角波各種頻率追蹤響應圖，
 (a)1Hz、(b)5Hz、(c)10Hz、(d)30Hz、(e)60Hz、(f)100Hz、(g)130Hz、(h)140Hz、(i)150Hz。

4.2.5 圓軌跡測試

圓軌跡測試是使定位器以等速率循著圓形的目標軌跡運動，實驗的目的是為了瞭解平台 X 軸與 Y 軸同時追蹤軌跡的能力。實驗的測試信號 X 軸為一個等速的正弦波波形，而 Y 軸是一個等速的餘弦波波形。圖 4-11 中分別是半徑為 $2.5\mu\text{m}$ 時，1Hz 和 10Hz 之圓軌跡測試結果。

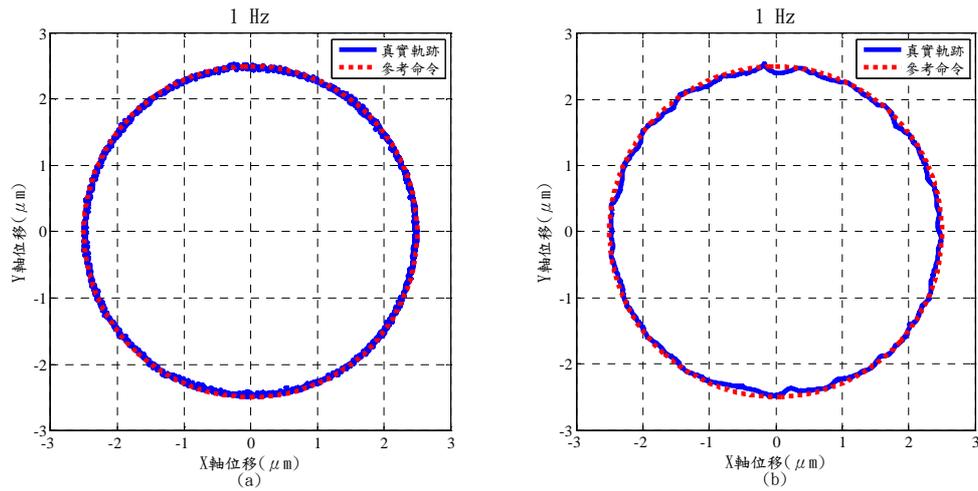


圖 4-11 圓軌跡測試圖(a)1Hz、(b)10Hz。

4.2.6 螺旋軌跡測試

螺旋軌跡測試是使定位器以等角速度但不同振幅大小循著圓形的目標軌跡運動，實驗的測試信號 X 軸為一個等速但振幅慢慢加大的正弦波波形，而 Y 軸則是一個振幅慢慢加大的餘弦波波形，其中 X 軸與 Y 軸之振幅最大值皆為 $2.5\mu\text{m}$ 。從這個實驗中我們證明了定位器是可以完成螺旋軌跡跟蹤。圖 4-12 分別是最大半徑為 $2.5\mu\text{m}$ 時，1Hz 和 10Hz 之螺旋軌跡測試結果。

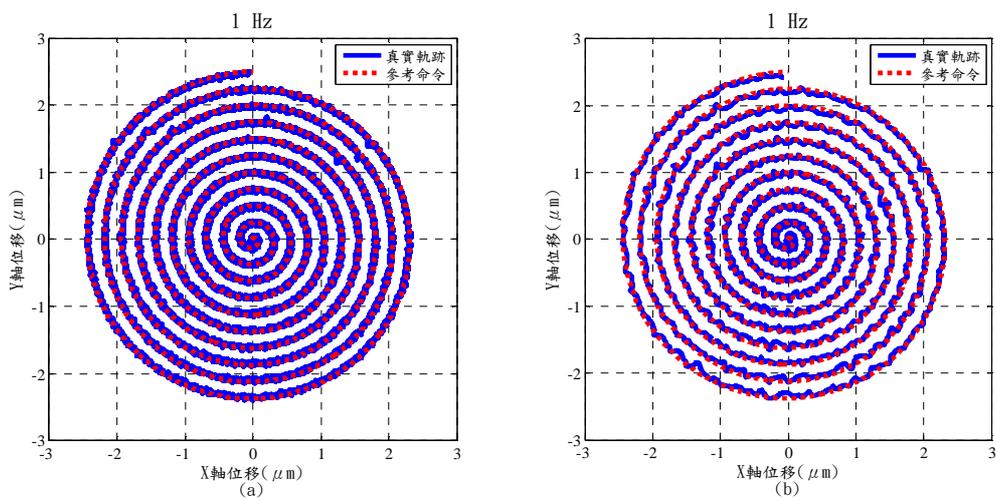


圖 4-12 螺旋軌跡測試圖(a)1Hz、(b)10Hz。

4.3 0V~150V 驅動電壓

在這個章節裡，我們為了增加定位器在 X 軸與 Y 軸的位移能力，我們將定位器的 X 軸與 Y 軸的電壓驅動範圍由 -30V~30V 的驅動方式改成 0V~150V 的驅動方式，以期達到更大的位移能力。

4.3.1 大範圍步階響應測試

為了檢驗定位器的大範圍移動性能，我們對定位器的 XY 兩個軸向分別做大範圍步階響應測試，我們分別將平台在 XY 平面上做點對點的位置運動。先測試 X 軸向的位移，設定初始點為 $X = -7\mu\text{m}$ 、 $Y = 0\mu\text{m}$ 、 $Z = 0\mu\text{m}$ ，接著透過調整適當的 PI 參數使整個平台達到收斂點為 $X = 7\mu\text{m}$ 、 $Y = 0\mu\text{m}$ 、 $Z = 0\mu\text{m}$ 。實驗數據顯示在圖 4-13。

Y 軸向的大範圍步階響應同樣也設定初始點為 $X = 0\mu\text{m}$ 、 $Y = -7\mu\text{m}$ 、 $Z = 0\mu\text{m}$ ，並調整 PI 參數後使整個平台達到收斂點為 $X = 0\mu\text{m}$ 、 $Y = 7\mu\text{m}$ 、 $Z = 0\mu\text{m}$ 。實驗數據顯示在圖 4-14，由圖 4-13(c)及圖 4-14(c)可發現上升時間皆為接近 5ms。

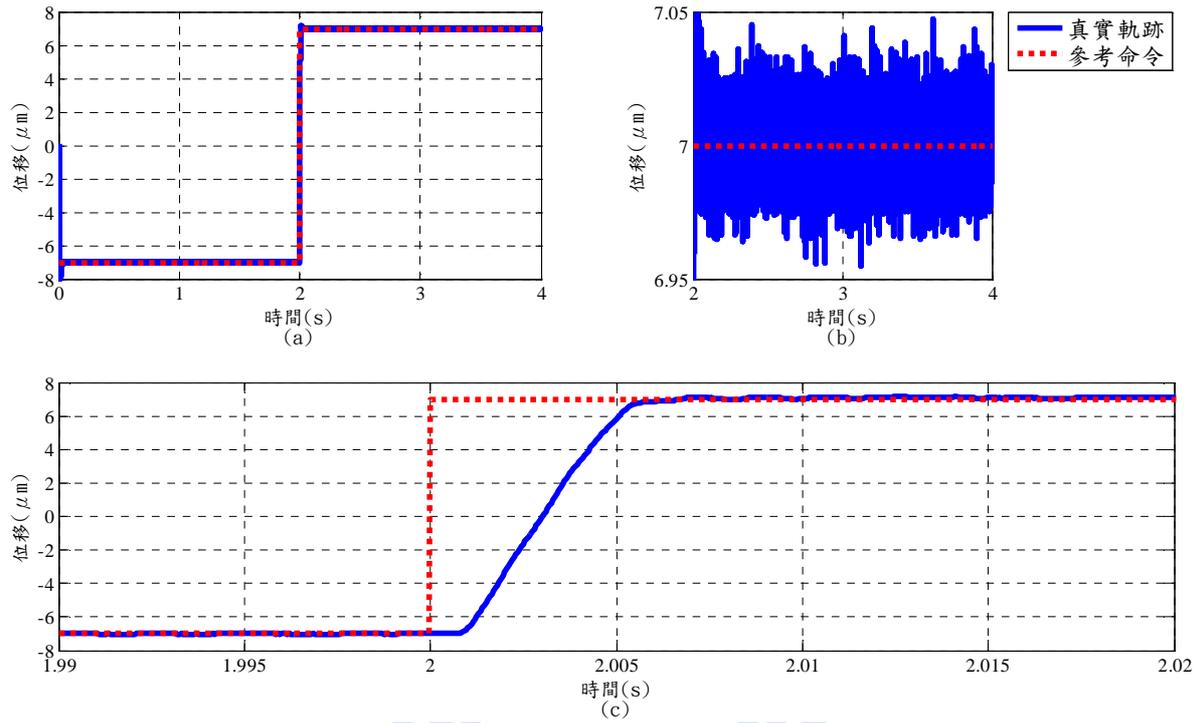


圖 4-13 X 軸大範圍步階響應測試，(a)X 軸狀態，(b)圖 4-13(a)穩定以後的解析度約為 $11\ \text{nm}$ (rms)，(c)上升時間約為 $5\ \text{ms}$ 。

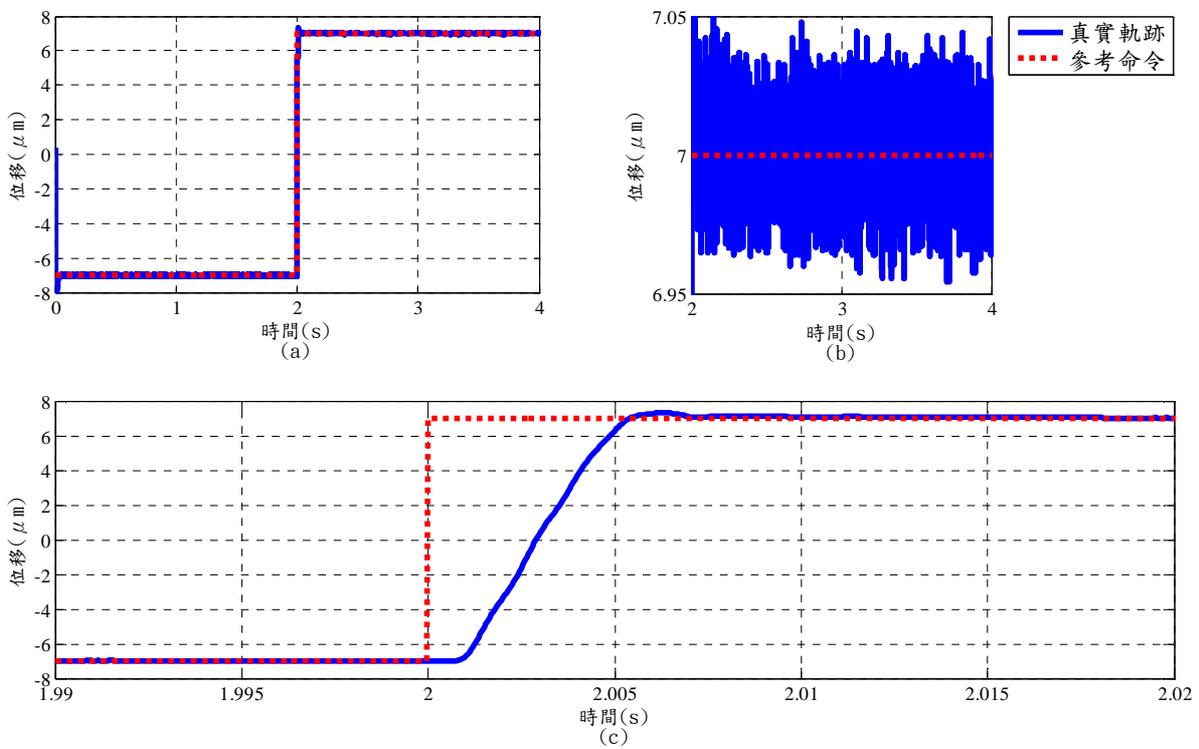


圖 4-14 Y 軸大範圍步階響應測試，(a)Y 軸狀態，(b)圖 4-14(a)穩定以後的解析度約為 $13\ \text{nm}$ (rms)，(c)上升時間約為 $5\ \text{ms}$ 。

4.3.2 連續小步階響應測試

連續小步階響應在工業上是一種常見的定位方式，特別是運用在半導體製程上。因此為了驗證定位器在實際應用上的可行性，我們調整了適當的PI參數後分別對平台之X軸與Y軸做每次下降500nm且全行程為14 μm 的連續步階實驗。圖4-15分別顯示了X軸與Y軸的連續小步階實驗結果。

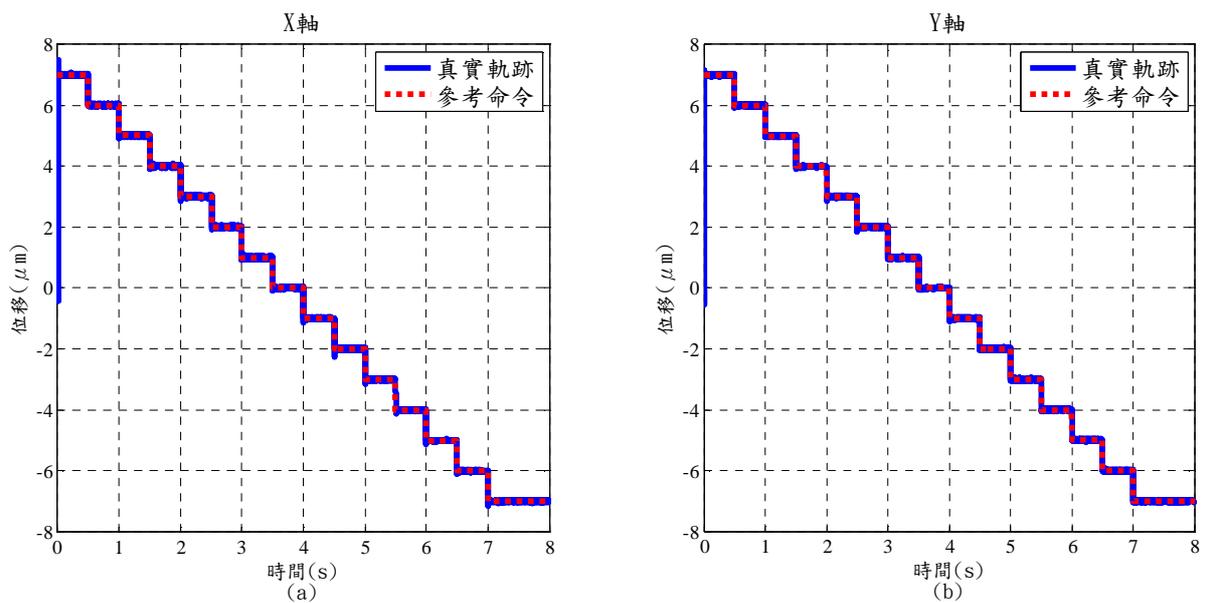


圖 4-15 (a)X 軸連續小步階響應，(b)Y 軸連續小步階響應。

4.3.3 正弦波測試

為了測試定位器的軌跡追蹤特性，我們調整合適的PI參數後利用振幅7 μm 的正弦波分別來對X軸以及Y軸做各種不同頻率下的波形測試。圖4-16及圖4-17中分別測試頻率為1Hz、5Hz和10Hz的正弦波實驗結果。

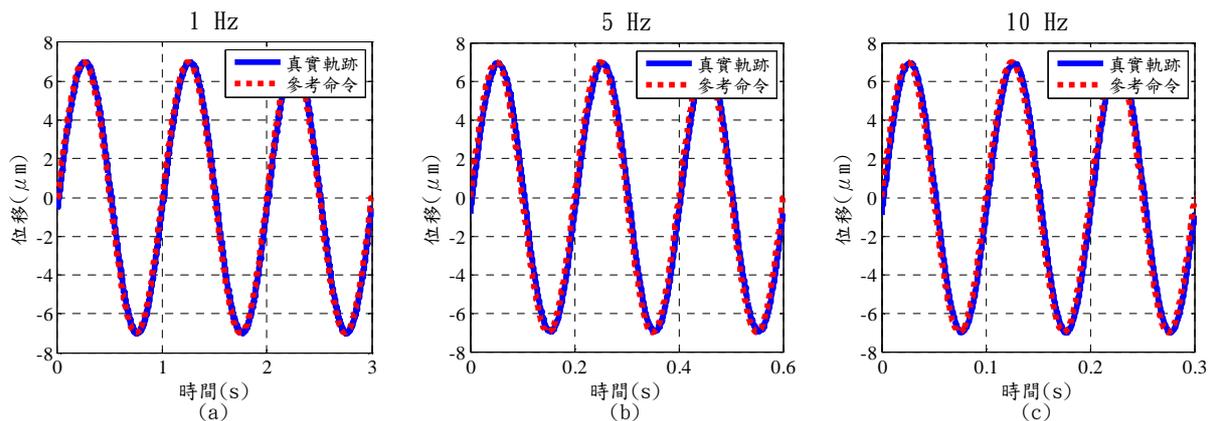


圖 4-16 X 軸正弦波各種頻率追蹤響應圖，(a)1Hz、(b)5Hz、(c)10Hz

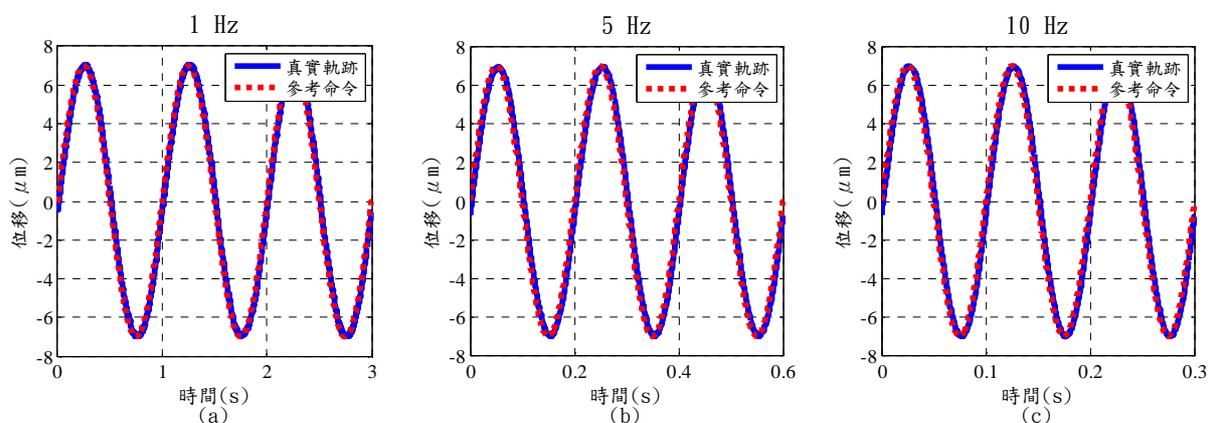


圖 4-17 Y 軸正弦波各種頻率追蹤響應圖，(a)1Hz、(b)5Hz、(c)10Hz

4.3.4 三角波測試

本研究預期貢獻之一是製作一可供原子力顯微鏡使用之快速奈米定位器，其中原子力顯微鏡掃描樣品時所使用之波形形式為三角波，因此這裡我們測試了 1Hz、5Hz 和 10Hz 頻率下三角波波形狀況，以了解所設計之定位器是否符合所需之要求。

圖 4-18 和圖 4-19 分別為 X 軸及 Y 軸經過調整適當的 PI 參數後的三角波測試結果，此處三角波之振幅 $7\mu\text{m}$ 。由圖可知，當測試頻率達到 10Hz 時，皆在實驗可接受範圍內。

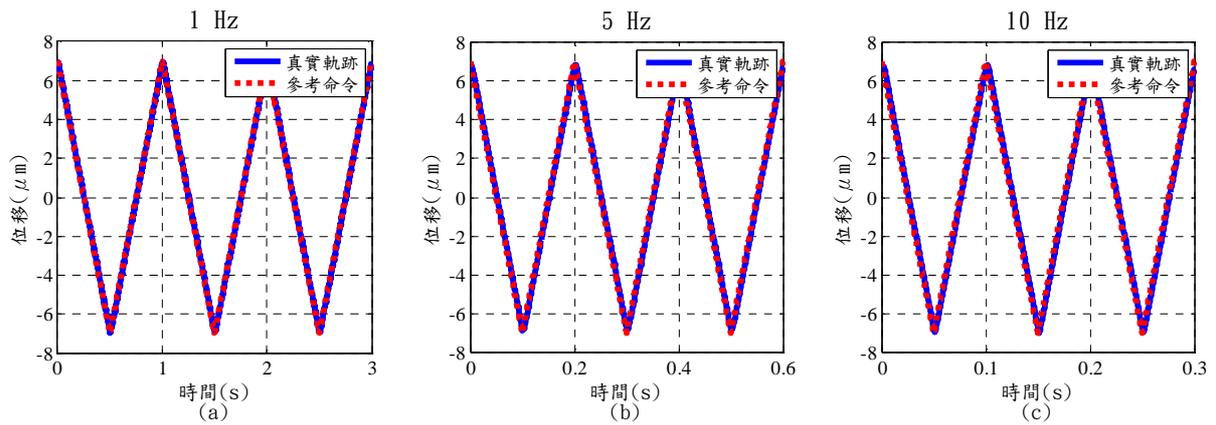


圖 4-18 X 軸三角波各種頻率追蹤響應圖，(a)1Hz、(b)5Hz、(c)10Hz。

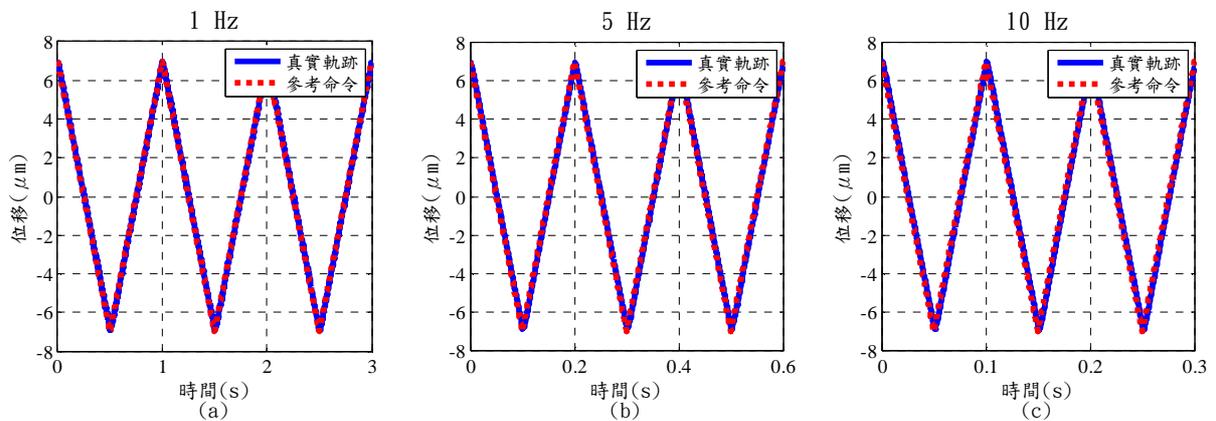


圖 4-19 Y 軸三角波各種頻率追蹤響應圖，(a)1Hz、(b)5Hz、(c)10Hz。

4.3.5 圓軌跡測試

圓軌跡測試是使定位器以等速率循著圓形的目標軌跡運動，實驗的目的是為了瞭解平台 X 軸與 Y 軸同時追蹤軌跡的能力。實驗的測試信號 X 軸為一個等速的正弦波波形，而 Y 軸是一個等速的餘弦波波形。圖 4-20 中分別是半徑為 $7\mu\text{m}$ 時，1Hz 和 10Hz 之圓軌跡測試結果。

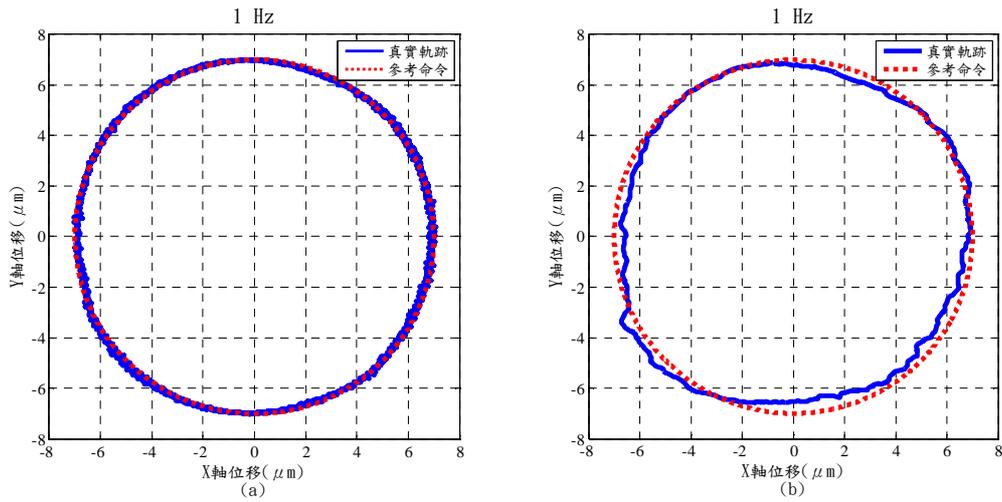


圖 4-20 圓軌跡測試圖(a)1Hz、(b)10Hz。

4.3.6 螺旋軌跡測試

螺旋軌跡測試是使定位器以等角速度但不同振幅大小循著圓形的目標軌跡運動，實驗的測試信號 X 軸為一個等速但振幅慢慢加大的正弦波波形，而 Y 軸則是一個振幅慢慢加大的餘弦波波形，其中 X 軸與 Y 軸之振幅最大值皆為 $7\mu\text{m}$ 。從這個實驗中我們證明了定位器是可以完成螺旋軌跡跟蹤。圖 4-21 分別是最大半徑為 $7\mu\text{m}$ 時，1Hz 和 10Hz 之螺旋軌跡測試結果。

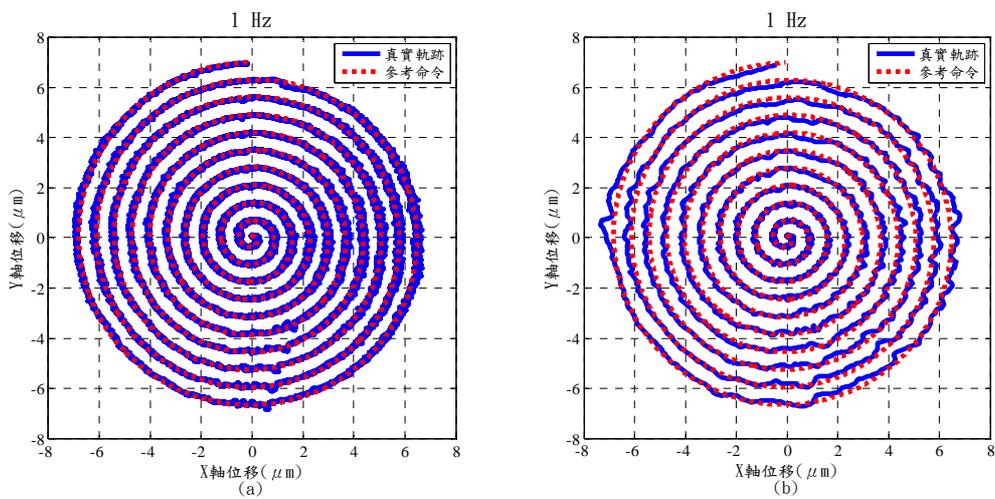


圖 4-21 螺旋軌跡測試圖(a)1Hz、(b)10Hz。

五、 結論與未來展望

近幾年來，隨著工具機、各種產業機械、量測機器等的高精度化，進而要求精密定位技術，微小化和精密化已為時勢所趨，在這發展的要求之下，奈米的定位系統之研究與技術開發，將會扮演極為重要且不可或缺的角色。

本論文成功設計出完全並聯式的三維奈米定位器，並在精密線放電切割的加工考量下，以電腦輔助設計的實體模型系統將所定義之並聯式機構實體化，然後透過參數化的有限元素分析法，分析此奈米定位器的特性，並且經由實驗驗證其性能。

根據實驗量測結果，所研製之快速三維奈米定位器，在驅動電壓 $-30V\sim 30V$ 內具有三個軸向 $5\mu m$ 的位移量與 X 軸 $11nm$ (rms)、Y 軸 $13nm$ (rms)、Z 軸 $11nm$ (rms) 的解析度，已是所使用位移感測器的極限。而在驅動電壓 $0V\sim 150V$ 內，X 及 Y 軸向為 $14\mu m$ 的位移量與 X 軸 $11nm$ (rms)、Y 軸 $13nm$ (rms) 的解析度。其壓電致動器所產生的非線性與磁滯問題，已使用回授控制方法來加以解決。

在設計奈米定位器時，設計的主要關鍵點為各個軸向間連結平台與壓電致動器之間的「平行細柱群」，其一個方向是高剛性、兩個方向是低剛性的特性，正是達成 XYZ 三軸皆為完全並聯式的最好樞紐。

在未來發展上，本論文的研究中，在平台微動調整的部分並沒有作深入的討論，但是對於一個精密定位系統來說，系統解析度的好壞主要取決於平台的微調控制，因此在未來的研究中，可以針對定位器之定位控制與控制法則的部分進行更深入的探討與研究。

另外，亦可在平台下方安裝一個四象限位移感測器作為定位器內建之位移量測，用以取代當前實驗所使用的雷射位移感測器，可使定位器在使用上更為方便。



六、 參考文獻

- [1] G. Binnig, C. F. Quate, and C. Gerber, "Atomic Force Microscope," *Physical Review Letters*, vol. 56, pp. 930-933, 1986.
- [2] J. R. Matey, R. S. Crandall, B. Brycki, and G. A. D. Briggs, "Bimorph-driven x--y--z translation stage for scanned image microscopy," *Review of Scientific Instruments*, vol. 58, pp. 567-570, 1987.
- [3] D. W. Pohl, "Dynamic piezoelectric translation devices," *Review of Scientific Instruments*, vol. 58, pp. 54-57, 1987.
- [4] P. Niedermann, R. Emch, and P. Descouts, "Simple piezoelectric translation device," *Review of Scientific Instruments*, vol. 59, pp. 368-369, 1988.
- [5] C. Renner, P. Niedermann, A. D. Kent, and O. Fischer, "A vertical piezoelectric inertial slider," *Review of Scientific Instruments*, vol. 61, pp. 965-967, 1990.
- [6] S. H. Chang and B. C. Du, "A precision piezodriven micropositioner mechanism with large travel range," *Review of Scientific Instruments*, vol. 69, pp. 1785-1791, 1998.
- [7] C. L. Chu and S. H. Fan, "A novel long-travel piezoelectric-driven linear nanopositioning stage," *Precision Engineering*, vol. 30, pp. 85-95, 2006.
- [8] H. J. Mamin, D. W. Abraham, E. Ganz, and J. Clarke, "Two-dimensional, remote micropositioner for a scanning tunneling microscope," *Review of Scientific Instruments*, vol. 56, pp. 2168-2170, 1985.
- [9] H. Aoyama, F. Iwata, and A. Sasaki, "Miniature robots for a desktop flexible micro manufacturing system," *Control Systems Magazine, IEEE*, vol. 16, pp. 6-12, 1996.
- [10] E. Shamoto and T. Moriwaki, "Development of a walking drive ultraprecision positioner," vol. 20, 1997.
- [11] P. Cusin, T. Sawai, and S. Konishi, "Compact and precise positioner based on the Inchworm principle," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 10, p. 516, 2000.
- [12] M. V. Shutov, D. L. Howard, E. E. Sandoz, R. L. Smith, and S. D. Collins, "Electrostatic actuators with long range translation," in *TRANSDUCERS, Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, 12th International Conference on, 2003*, 2003, pp. 356-359 vol.351.
- [13] P. E. Tenzer and R. B. Mrad, "A systematic procedure for the design of piezoelectric inchworm precision positioners," *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, vol. 9, pp. 427-435, 2004.
- [14] F. E. Scire and E. C. Teague, "Piezodriven 50- μ m range stage with subnanometer resolution," *Review of Scientific Instruments*, vol. 49, pp. 1735-1740, 1978.
- [15] V. G. Dudnikov, D. V. Kovalevsky, and A. L. Shabalin, "Simple, high precision linear-motor-driven XY Theta positioner (Walker)," *Review of Scientific Instruments*, vol. 62, p. 2492, 1991.
- [16] A. R. Smith, S. Gwo, and C. K. Shih, "A new high-resolution two-dimensional micropositioning device for scanning probe microscopy applications," *Review of Scientific Instruments*, vol. 65, pp. 3216-3219, 1994.
- [17] J. W. Ryu, D. G. Gweon, and K. S. Moon, "Optimal design of a flexure hinge based XY[phi] wafer stage," *Precision Engineering*, vol. 21, pp. 18-28, 1997.
- [18] J. W. Ryu, S. Q. Lee, D. G. Gweon, and K. S. Moon, "Inverse kinematic modeling of a coupled flexure hinge mechanism," *Mechatronics*, vol. 9, pp. 657-674, 1999.

- [19] P. Gao, S. M. Swei, and Z. Yuan, "A new piezodriven precision micropositioning stage utilizing flexure hinges," *Nanotechnology*, vol. 10, pp. 394-398, 1999.
- [20] J. H. Kindt, G. E. Fantner, J. A. Cutroni, and P. K. Hansma, "Rigid design of fast scanning probe microscopes using finite element analysis," *Ultramicroscopy*, vol. 100, pp. 259-265, 2004.
- [21] B. Zettl, W. Szyszkowski, and W. J. Zhang, "Accurate low DOF modeling of a planar compliant mechanism with flexure hinges: the equivalent beam methodology," *Precision Engineering*, vol. 29, pp. 237-245, 2005.
- [22] G. Schitter, K. J. Åström, B. DeMartini, G. E. Fantner, K. Turner, P. J. Thurner, and P. K. Hansma, "Design and modeling of a high-speed scanner for atomic force microscopy," in *American Control Conference, 2006*, 2006, p. 6 pp.
- [23] K. B. Choi, J. J. Lee, and G. H. Kim, "A miniaturized nano-motion stage driven by piezo stacks," in *Control, Automation and Systems, 2008. ICCAS 2008. International Conference on*, 2008, pp. 1321-1324.
- [24] 許溢適, 壓電/電歪致動器 文笙書局, 1996.
- [25] 許溢適, 壓電陶瓷新技術. 文笙書局, 1993.
- [26] 周卓明, 壓電力學 全華科技圖書股份有限公司, 2003.
- [27] 段進, 倪棟, 王國業, ANSYS10.0 結構分析從入門到精通: 北京科海電子出版社, 2006.
- [28] 張智星, MATLAB 程式設計【入門篇】: 鈦思科技, 2004.
- [29] 鈦思科技公司, 視覺化建模環境: Simulink 入門與進階 鈦思科技, 2001.
- [30] 張啟勳, 自動控制-用 MATLAB/SIMULINK: 儒林, 2008.
- [31] K. H. Ang, G. Chong, and Y. Li, "PID control system analysis, design, and technology," *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, vol. 13, pp. 559-576, 2005.



附錄 A PSt150 之材料參數

3.1 Piezo-stack PSt 150, Piezo-rings HPSt 150, osi-type

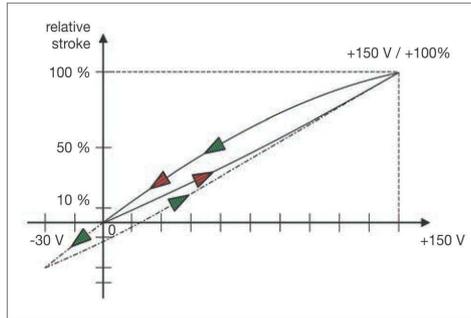


Fig. 23: Stroke / voltage diagram
 ▲ uni-polar operation 0 V/(+)150 V
 ▼ semi-bipolar operation (-)30 V/(+)150 V

Options

Position sensing by strain gages

Spherical end-pieces

(up to cross-sections 10 x 10 mm) (Fig. 24)

Low temperature operation

Cryo option 1: special coating

Cryo option 2: electrical contact by kapton-insulated Manganin wires for minimizing heat load

Other characteristics:

Temperature range

-273 °C thru approx. +120 °C (depends on coating, see below)
 (beyond 100 °C, PZT-performance degrades reversibly)

Coatings

standard: green, high quality powder epoxy-based encapsulation
 temperature range -50 °C thru +120 °C
 vacuum / UHV grade thickness up to 0.5 mm
 Special coatings optional eg. for cryo applications
 thin coatings for stack packaging (thickness < 50 µm)

Properties of PZT-ceramic

Piezo electric charge constants

d_{31} -290 picometer/Volt

d_{33} +640 picometer/Volt

rel. dielectric constant ϵ 5400

Curie temperature TC: 155 °C

(modified PZT for TC = 190 °C on request)

Density: 8 g/cm³

Elastic compliance s_{33} 18×10^{-12} m²/N

(valid for short-circuited electrodes or voltage control)

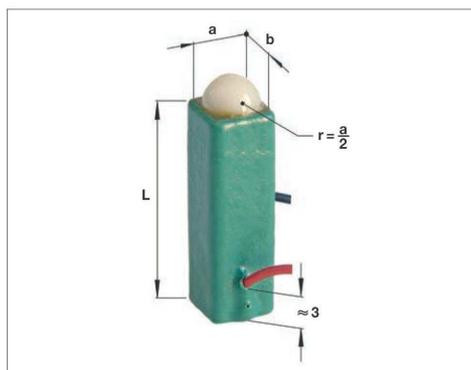
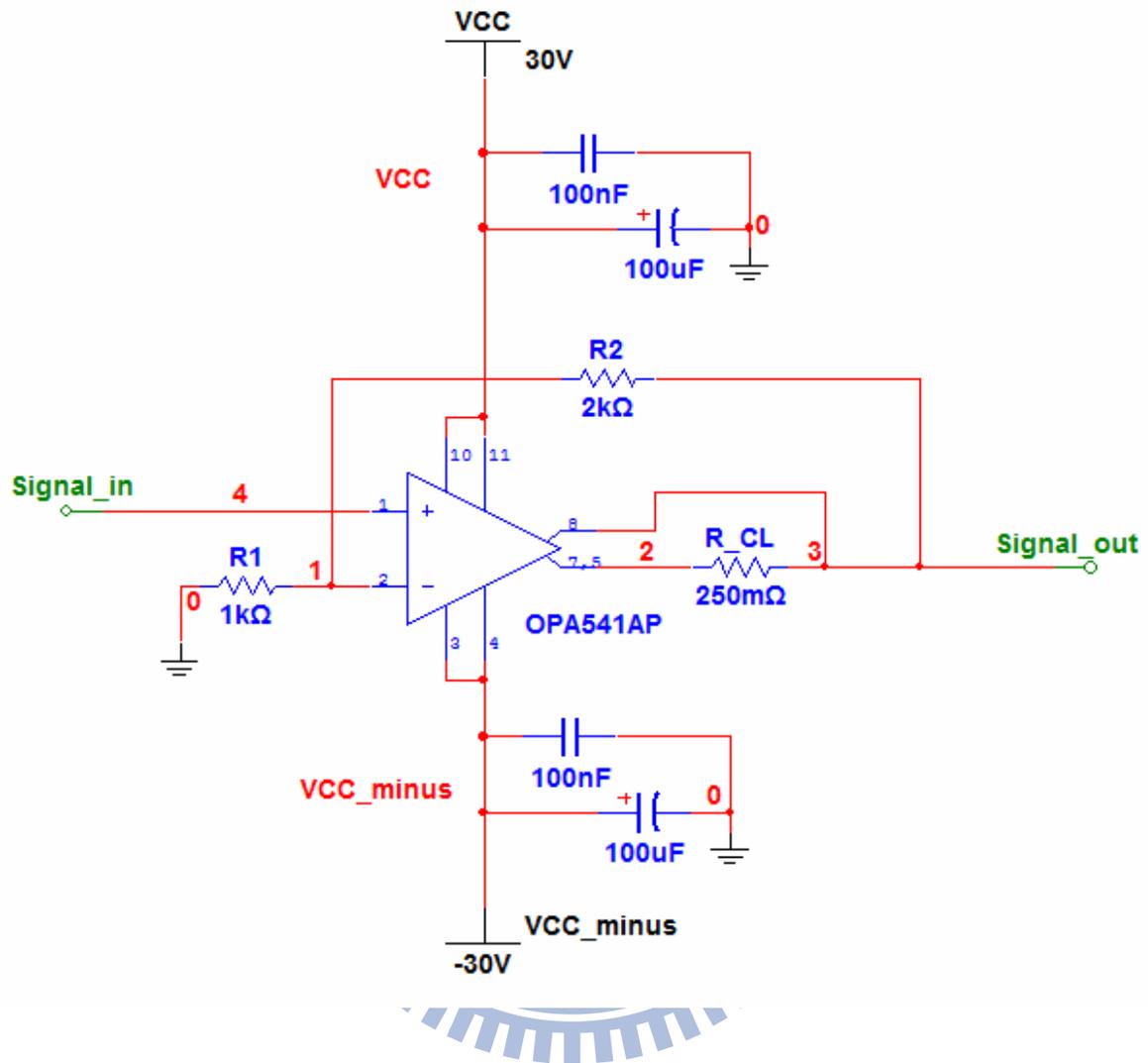


Fig. 24: Actor with spherical end-pieces

附錄 B OPA541 電路圖



作者簡介

姓 名：王佑麒

籍 貫：台灣省雲林縣

出生日期：民國 74 年 5 月 6 日

學 歷：

國立交通大學 機械工程研究所 設計製造組

國立海洋大學 河海工程學系

縣立三重中學 高中部

縣立三重中學 國中部

