

國立交通大學

機械工程學系

碩士論文

雙模式慣性馬達之設計與特性研究

The Design and Characteristic Research of a  
Dual-mode Inertia Motor

研究生：鄭喬華

指導教授：洪紹剛 博士

中華民國一百年六月

双模式慣性馬達之設計與特性研究

The Design and Characteristic Research of a  
Dual-mode Inertia Motor

研究生：鄭喬華

Student : Chiao-Hua Cheng

指導教授：洪紹剛

Advisors : Dr. Shao- Kang Hung



A Thesis  
Submitted to Department of Mechanical Engineering  
College of Engineering  
National Chiao Tung University  
In partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master  
in

Mechanical Engineering  
June 2011  
Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國一十年六月

# 双模式慣性馬達之設計與特性研究

學生：鄭喬華

指導教授：洪紹剛

國立交通大學機械工程學系

## 摘要

本論文提出一種双模式慣性馬達，內含兩個並聯的壓電元件，同動模式下可以造成平移運動，差動模式下可以造成旋轉運動，進而具有兩個自由度，相較於傳統串聯式的設計具有多項優勢。本論文再以實驗方法探討此双模式慣性馬達的各項性能，例如速率、解析度、線性度、推力、扭矩等，再利用實驗結果決定適當的操作條件。

# The Design and Characteristic Research of a Dual-mode Inertia Motor

Student : Chiao-Hua Cheng

Advisors : Dr. Shao- Kang Hung

Department of Mechanical Engineering  
National Chiao Tung University

## Abstract

The design of a dual-mode inertia motor involves an actuator that can generate translational and rotational motion without connecting the actuators serially.

The dual-mode inertia motor embeds two parallel piezoelectric elements. Translational motion is generated when these two piezoelectric elements act in the same direction; rotational motion is generated when these two piezoelectric elements act in the opposite direction.

Traditionally, translational or rotational actuators should be stacked serially to have multi-axis degrees-of-freedom. This thesis presents performance characteristics such as linearity, resolution, velocity and appropriate operating frequency.

## 誌謝

碩士班兩年的時間倏忽即逝，兩年來有歡笑、有歷練，先在此深深感謝每個曾經幫助過我的人。最大的感謝是指導教授 洪紹剛老師，老師以亦師亦友的教學方式，讓我在研究精神和待人處事方面有很大幫助；也感謝口試委員呂宗熙教授、鍾添淦教授對我的指教，使我有更進步的空間，使自己的研究更完善。這兩年來也感謝我的家人，沒有你們也就沒有這碩士學位，尤其感謝姊姊惠憶，在我生活開銷方面的支持及學費的贊助，對家人們獻上深深的祝福。

第一屆的學長們，建宇哥、佑麒王、瓜瓜、菘大，在程式撰寫、硬體電路和設備使用方面，感謝你們耐心的教導我，一年的相處時光卻讓我有豐富的生活，尤其是建宇哥，特別感謝你分享學習和人生的經驗；同屆的盧奕棒、小鋼砲，學弟正龍、尼歐、碰北、建樺、承燁，一起相處的時光讓實驗室更加多采多姿，還有學妹小菁讓實驗室增添了女性的活力氣息；當然還有大學的朋友，感謝你們填補了我生活缺乏的元素，讓這兩年生活很充實；還有寵物魯小喵及她的朋友糖糖，謝謝妳們的格鬥秀和幫忙家裡打蟑螂。

最後，感謝的人太多了，我只好誠摯的獻上我的祝福，感謝每個幫助過我的人，祝福大家一路順風、鵬程萬里。

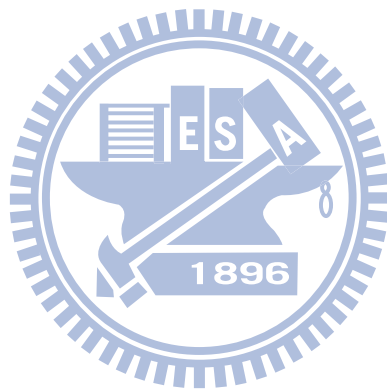
# 目錄

摘要.....	i
Abstract.....	ii
誌謝.....	iii
目錄.....	iv
圖目錄.....	v
表目錄.....	vii
一、緒論.....	1
1.1 研究背景及研究動機.....	1
1.2 文獻回顧.....	2
1.3 研究目標.....	6
1.4 論文結構.....	7
二、預備知識.....	8
2.1 壓電材料.....	8
2.2 壓電效應原理及其非線性現象.....	9
2.2.1 磁滯效應.....	13
2.2.2 潛變現象.....	14
2.2.3 響鈴殘振.....	15
2.3 慣性馬達致動基本原理.....	16
三、系統設計.....	18
3.1 系統架構.....	18
3.2 致動器結構.....	19
3.2.1 平移運動.....	20
3.2.2 旋轉運動.....	23
3.2.3 驅動電路設計.....	25
3.3 系統整合.....	27
四、初步實驗成果.....	28
4.1 解析度系統架構.....	28
4.2 線性度系統架構.....	30
4.3 推力及扭矩系統架構.....	32
4.4 平均步長與整體結構共振頻率.....	35
五、結論與展望.....	40
六、參考文獻.....	42

## 圖目錄

圖 1-1	S. H. Chang 和 B. C. Du 奈米位移平台 .....	3
圖 1-2	單軸滯滑摩擦致動器 .....	4
圖 1-3	Chee Kian Lim 設計之線性導軌.....	5
圖 1-4	三軸奈米位移平台 .....	6
圖 2-1 (a)	材料未極化前 .....	10
圖 2-1 (b)	材料加一向上電場極化之後 .....	10
圖 2-2	正壓電效應 .....	11
圖 2-3	逆壓電效應 .....	12
圖 2-4	磁滯效應 .....	13
圖 2-5	潛變現象 .....	14
圖 2-6	響鈴殘振 .....	15
圖 2-7	慣性馬達致動基本原理 .....	16
圖 3-1	實體架構圖 .....	18
圖 3-2	Solidworks 整體架構圖 .....	18
圖 3-3	致動器結構 .....	19
圖 3-4	運動自由度示意圖 .....	20
圖 3-5	平移運動結構 .....	21
圖 3-6 (a)	平移運動前進之致動方式 .....	22
圖 3-6 (b)	平移運動後退之致動方式 .....	22
圖 3-7	旋轉運動結構 .....	23
圖 3-8 (a)	旋轉運動順時針示意圖 .....	24
圖 3-8 (b)	旋轉運動逆時針示意圖 .....	25
圖 3-9 (a)	驅動電路平移運動用 .....	26
圖 3-9 (b)	驅動電路旋轉運動用 .....	26
圖 3-10	實驗量測架構圖 .....	27
圖 4-1 (a)	平移運動解析度為 0.1 ( $\mu\text{m}$ ) .....	29
圖 4-1 (b)	旋轉運動解析度為 0.04 (degree) .....	30
圖 4-2 (a)	平移運動線性度觀察 .....	31
圖 4-2 (b)	旋轉運動線性度觀察 .....	31
圖 4-3	懸臂之力和撓度示意圖 .....	32
圖 4-4	實驗用之懸臂 .....	33
圖 4-5	量測推力 (a) 及扭矩 (b) 之實驗架設 .....	33
圖 4-6	量測計算扭矩簡單示意圖 .....	34
圖 4-7 (a)	在不同頻率下，平移運動之速度 .....	36
圖 4-7 (b)	在不同頻率下，平移運動之平均步長 .....	37
圖 4-8 (a)	在不同頻率下，旋轉運動之角速度 .....	38

圖 4-8 (b) 在不同頻率下，旋轉運動之平均旋轉角 .....39





## 表目錄

表 2-1	具壓電現象之材料 .....	9
表 4-1	懸臂之規格 .....	32
表 4-2	最大推力和最大扭矩 .....	34
表 4-3	不同頻率下之速度和平均步長 .....	35



# 一、緒論

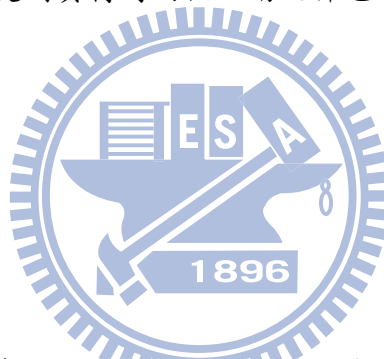
## 1.1 研究背景及研究動機

在微觀的世界裡，其致動器之精準度要相當高，精度甚至須達到奈米等級，這種奈米級的精度有：原子力顯微鏡（atomic force microscope, AFM）[1]或掃描穿隧式顯微鏡（scanning tunneling microscope, STM）[2]等。而致動器以傳統的設計大部分無法符合上述需求。因此，一般奈米級的定位器最常用的是壓電致動器。

壓電致動器大致有下列優點：體積小、反應速率快、機電能轉換效率高、每步位移量小、精度高、推力大、不會有電磁干擾等等。比如說在電子顯微鏡的操作環境中，若要進行物體的精密操控，此時就需要位移致動器。但是若使用電磁馬達的話，會干擾磁場而且會有線圈散熱不良的問題，若因為這些熱而蒸發了污染物，便會破壞真空的環境，故使用壓電致動器勢在必行。其中壓電致動器的應用之一，是利用物體的慣性力和摩擦力原理[3]，來使物體位移的致動器，大家習稱為慣性馬達或是超音波馬達。利用上述慣性力和摩擦力原理便可使物體達成直線或是旋轉的目的。慣性馬達常見的是一軸僅代表一種位移運動，要多軸位移運動就必須以疊加多個來達成。比如一個平移致動器與旋轉致動器必須相互串聯疊加，才能同時擁有平移及旋轉自由度，但是這樣的串聯組合可能會導致體積過於龐大或使之剛性降低等缺點，使得它的精度劣化。

因此本研究是內建兩個並聯式的壓電致動元件，當它同動時可以產生平移運動；差動時便可產生旋轉運動。這樣便是一個裝置即具有兩軸的運動，無須串聯、疊加而造成上述之缺點。且特殊的輸出電壓波形與電路[4]也被設計出來以達成上述功能。

並聯式設計跟串聯式比較起來，剛性較串聯式高，對外界的震動相對而言較為固定，且其結構穩、精度佳、結構緊緻、體積小、一個裝置同時具備兩個自由度平移與旋轉。且無論平移或旋轉，兩個致動元件都有貢獻，如此一來可以產生更大的推力或是速度，且受到負荷時兩個致動元件也可以互相分擔，讓使用壽命延長。



## 1.2 文獻回顧

在精密儀器產業中，奈米定位平台的解析度要高，因此需要移動距離微小化的步進馬達（stepping motor）。一般常見的有慣性馬達（inertia motor）、尺蠖式步進器（inchworm）[5]、及摩擦力馬達（friction motor）等。而驅動方法也多樣化，常見的有壓電式致動、電磁力致動、摩擦力驅動等，其中以壓電式致動為最大宗，就前述之優點如體積小、反應快、機電能轉換效率高、位移量小、精度高、推力大、不會有電磁干擾，是優於其他致動方法的。

因為壓電致動器位移量小，為提高它的行程便需要一放大機構，一般是使用線切割之製作方法，做出撓性槓桿放大機構。但是撓性放大機構之設計，對於一軸之致動器來說是不太有影響，但如果做在同一平面上的兩軸位移運動，因為撓性結構之關係，很容易發生平台有微微轉動之情形。S. H. Chang 和 B. C. Du 在 1998 年，設計一線切割之致動平台[6]，改善傳統 Scott-Rossell 直線機構轉換，使得全行程可以有  $100\mu\text{m}$ ，解析度為  $0.04\mu\text{m}$ ，且使得因耦合旋轉的角度的偏差量小於  $31.1\mu\text{rad}$ ，共振頻率為  $80\text{Hz}$ ，其奈米位移平台外觀如圖 1-1 所示，其圖右下方接線部分即為壓電致動器。

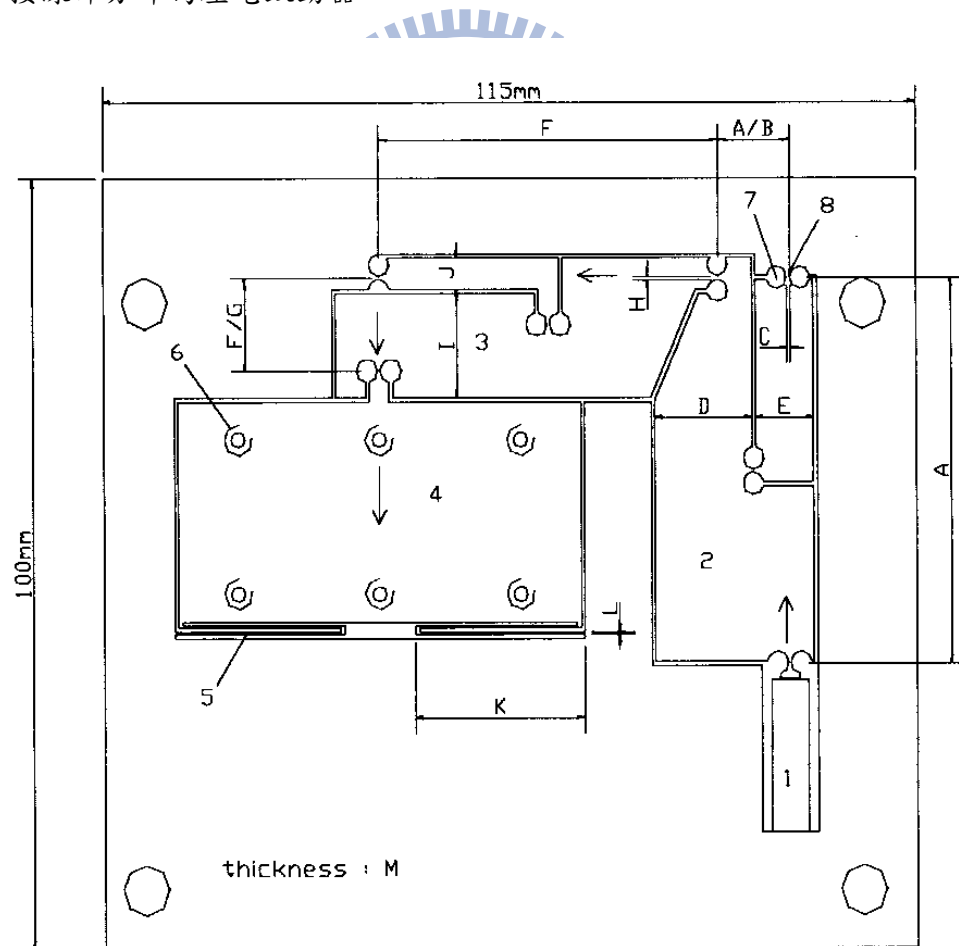


圖 1-1 S. H. Chang 和 B. C. Du 奈米位移平台

而另一種提高行程之方法是增加致動器的數量和加大質量塊。Jean-Marc Breguet 和 Reymontl Clavel [7]，在 1998 年，使用三個壓電致動器，並以滯滑（stick-slip）摩擦移動一滑塊，是為單軸運動。壓電致動器上乘載著一滑塊，以滑塊本身的重量來當作慣性力，其中慣性馬達的特性便是要有一當作慣性力之質量塊。在三個致動器中，兩個當作導引用的角色，一個當作防止旋轉運動發生，如圖 1-2 所示。而滑塊長度為 40mm，其行程為 $\pm 7.5\text{mm}$ 。

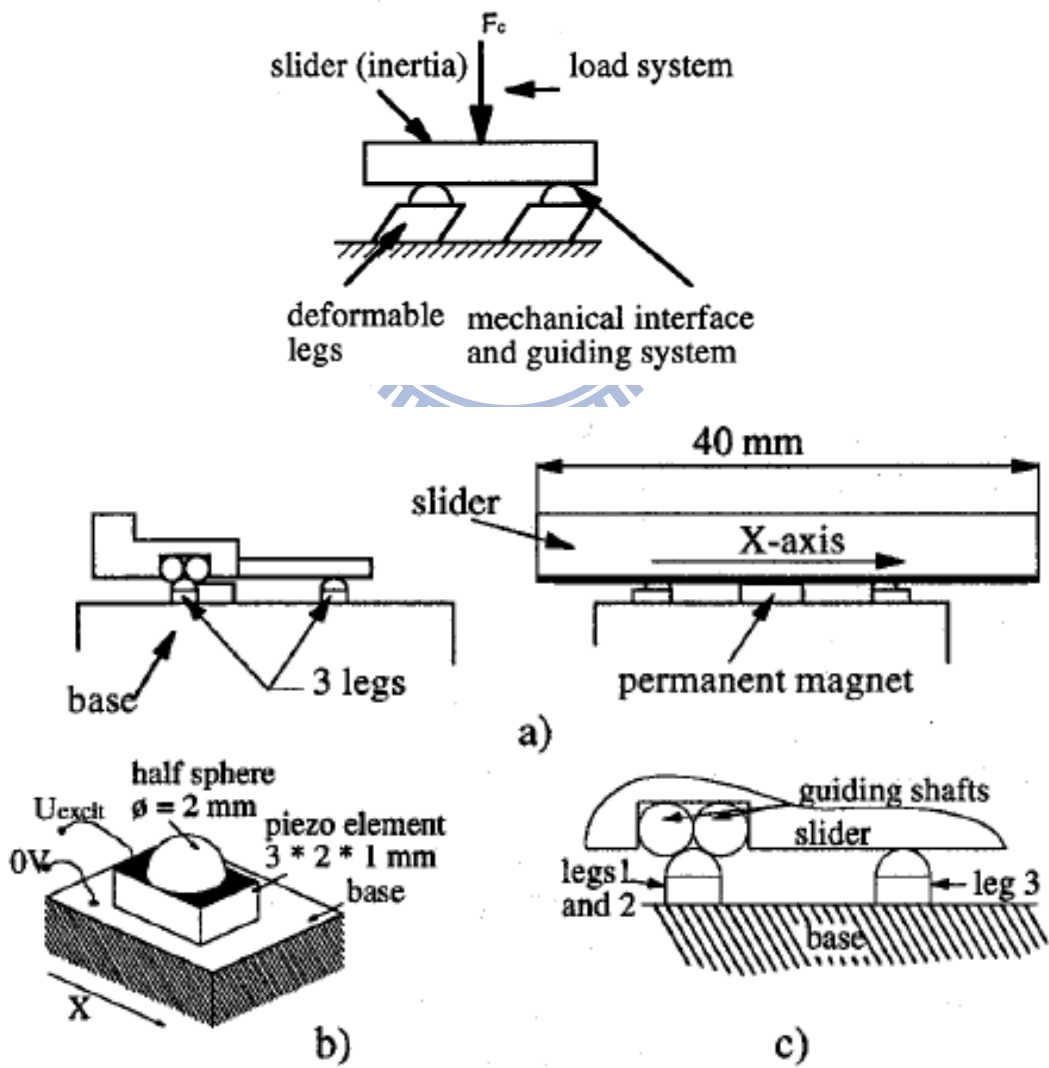


圖 1-2 單軸滯滑摩擦致動器

提高行程之方法除前面所提，也可讓壓電元件來推動一線性導軌，而無須設計撓性放大機構抑或是加大移動平台。Chee Kian Lim，在 1999 年設計一線性導軌[8]，其壓電致動器和位移滑塊是在同一體的，意即線性導軌始終是定子，滑塊跟致動器是一起移動的，此種設計其行程，理論上可以無限，只要導軌長度夠長的話。在圖 1-3 的實驗裡導軌長 220mm，意即全行程為 220mm，解析度為 50nm。在圖 1-3 中的下圖，為了要有雙軸之移動，因此必須把導軌結合起來。

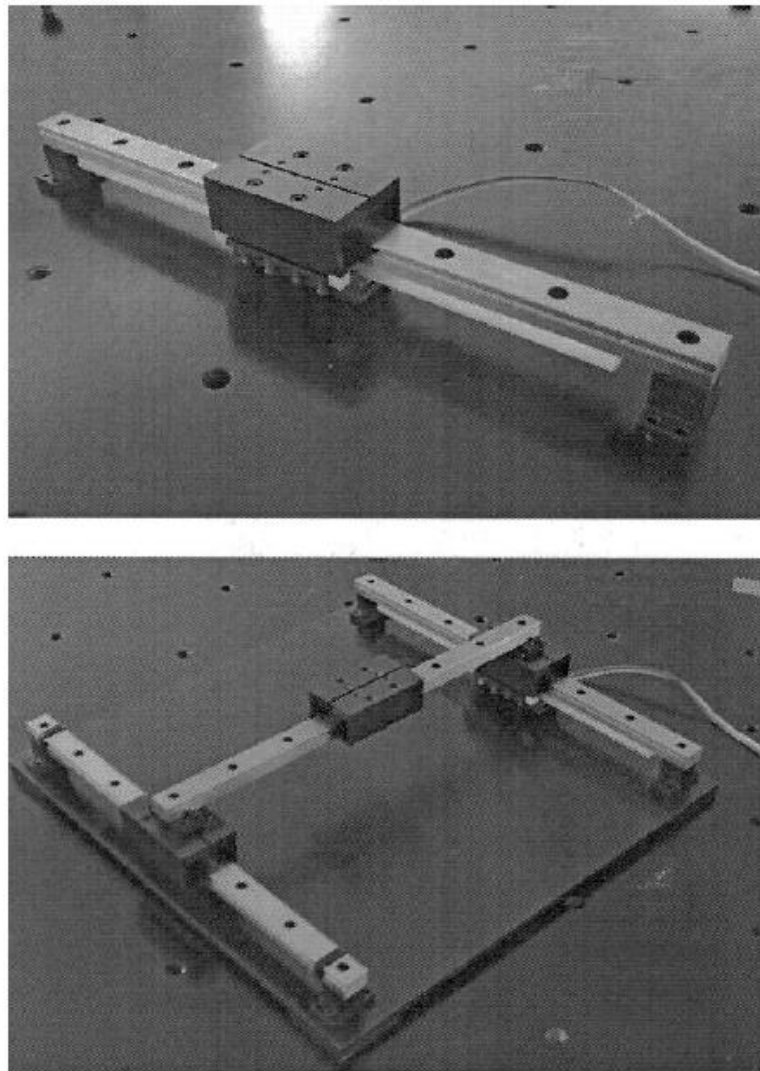


圖 1-3 Chee Kian Lim 設計之線性導軌

在西元 1995 年，S. Kleindiek 利用剪力模式之壓電材料並用慣性馬達原理，設計一個三軸奈米位移平台[9]，如圖 1-4 所示。S. Kleindiek 為了要有三軸之運動，堆疊了三組位移致動器，Z 方向的慣性致動器經過精巧的設計，將 Z 軸置於 X 和 Y 軸之中心，讓體積變為較小，其體積為  $2 \times 2 \times 1.1 \text{cm}$ 。

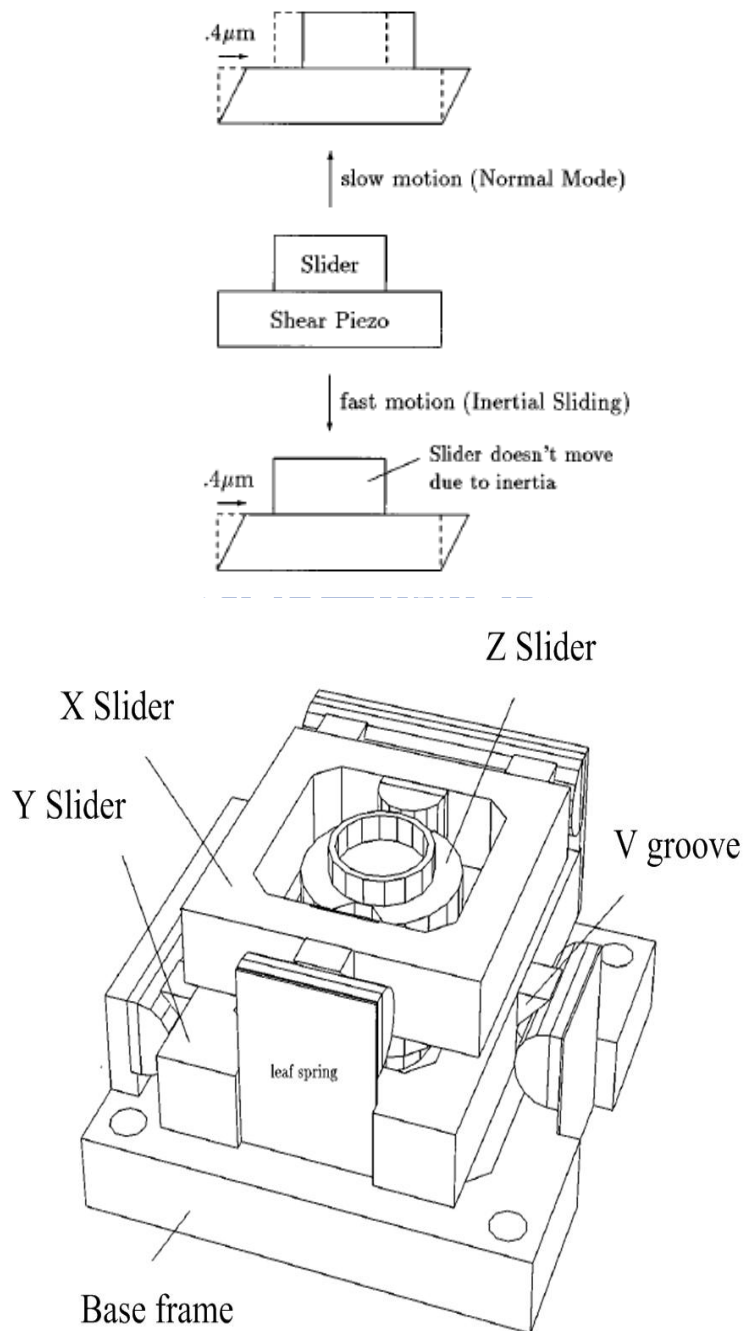


圖 1-4 三軸奈米位移平台

### 1.3 研究目標

本研究中，嘗試設計並製作出一個雙軸的慣性馬達。且不僅如此，還要找出它最佳的致動條件以及各項特性分析，例如：共振頻率、速度、解析度、推力、扭矩、線性度等。





## 二、預備知識

在本章節中首先介紹致動器所使用之壓電材料之應用範圍、材料特性以及其應用限制，其次介紹所設計之輸入電壓波形，使得此致動器以慣性原理來達到步進之效果。

### 2.1 壓電材料

壓電材料應用範圍廣泛，隨時可見於我們的日常生活中，比如：超音波斷層影像診斷裝置、穿隧掃描式顯微鏡(scanning tunneling microscope, STM)、霧化器、金屬等的非破壞檢查裝置、石英鐘錶、噴墨頭、奈米定位器、壓電變壓器等。

本論文著重之重點是放在壓電材料在感測、致動方面的應用。壓電材料有別於一般的傳統致動器，壓電材料具有良好的機電能轉換效率、快速的頻率響應、尺寸及位移量小、發熱量小、精度高等，因此使得它被廣泛應用在奈米級的高精度定位系統。簡略的比較其優缺點，總體來說，一般壓電材料之優點為體積小、發熱小、反應速度快、解析度高、機電轉換效率高、出力大、不受電磁訊號的干擾；但其缺點為總位移量小、材質易脆、難承受非均勻力，以及非線性現象如：磁滯現象、潛變、響鈴殘振等。

具有壓電現象之材料種類繁多，包含了天然晶體比如石英、電氣石，以及人造材料比如高分子材料的聚偏氟乙烯 (Polyvinylidene Fluoride, PVDF)。在 1942 年，科學家們發現鈦酸鋇 ( $\text{BaTiO}_3$ ) 具有壓電性質後，緊接著陸續發現各種種類之具壓電性質之材料，一般可大約的分類成下頁表 2-1 之四類：

表 2-1 具壓電現象之材料

陶瓷類 (ceramic)	鈦酸鋇、鋁鈦酸鉛
單晶類 (single crystal)	電氣石、鉍酸鉀、石英
薄膜類 (thin film)	氧化鋅、氮化鋁
聚合物 (polymer)	聚氯乙烯、聚偏氟乙烯

## 2.2 壓電效應原理及其非線性現象

是一種機械能與電能互換之現象，此現象最早被發現是在西元1880年，由法國科學家，居里兄弟 (Jacques Curie, 1855-1941；Pierre Curie, 1859-1906) 發現了壓電效應[10](piezoelectricity)。居里兄弟在研究熱電性與晶體對稱性的現象時，發現有些天然礦物晶體受到壓力因而改變體積時，在晶體的表面會產生微小的電荷。這種現象便稱之為壓電效應，這現象形成之原因是因為材料晶格內，特殊的原子間排列方式，使得材料具有應力場與電場耦合之效應。又在西元1881年，他們實驗證實了這種現象也是可逆的，也就是晶體置於電場中時也會造成體積上的變化。

此即是所謂的壓電性 (piezoelectricity)，是為一種機電能互相轉換之效應。後來科學家們經過更詳細的研究後，便把材料因應力、應變的變化而造成電場的變化稱之為「正壓電效應」。反之，材料因加入一個電場而造成應力、應變的變化便稱之為「逆壓電效應」，而具有壓電效應的材料便統稱為「壓電材料」。

壓電材料會有其極化的方向，有些未極化前的壓電材料，是不具壓電效應的。

因為材料內部結晶為等向性 (isotropic)，使得偶極矩的方向是隨機分布，互相平衡抵銷下使得材料不具壓電性，如圖2-1 (a) 所示。因此就需要極化之處理，使得晶體內原本平均分布的偶極矩依極化電場去做排列，如圖2-1 (b) 所示，使之產生異向性 (anisotropic) 而有壓電效應。

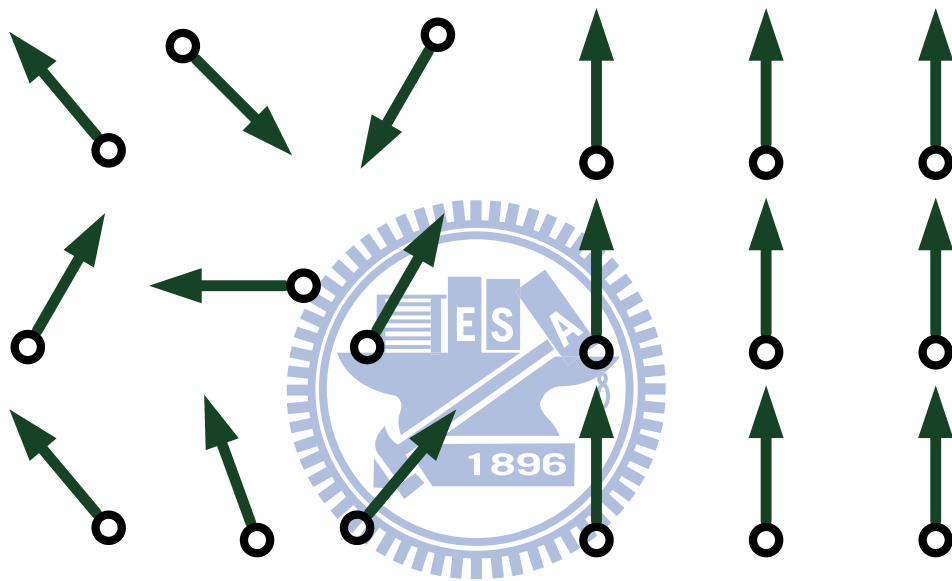


圖2-1 (a) 材料未極化前

圖2-1 (b) 材料加一向上電場極化之後

且在使用上也必須注意幾項事情。比如一般使用之壓電材料為鐵磁性材料，當鐵磁性之壓電材料使用時功率過高而發熱時，隨著溫度一直升高，壓電性便會逐漸減弱，一直到溫度高於居禮溫度時 (如鈦酸鋇陶瓷約為 $130^{\circ}\text{C}$ )，便會永久喪失其壓電性；或施加電場之方向與極性方向相反時，會造成去極化，而失去壓電效應；或是施加的電壓值和外力過大也會造成壓電材料之毀損。

## 正壓電效應 (direct piezoelectric effect)

如圖2-2所示，對一壓電材料施以物理應力時，使壓電材料變形，極化強度因偶極矩縮短而減弱，因此一部份的電荷被釋放產生一電場來抵抗這趨勢，以保持原始狀態。此機電能轉換是為機械能轉換為電能。

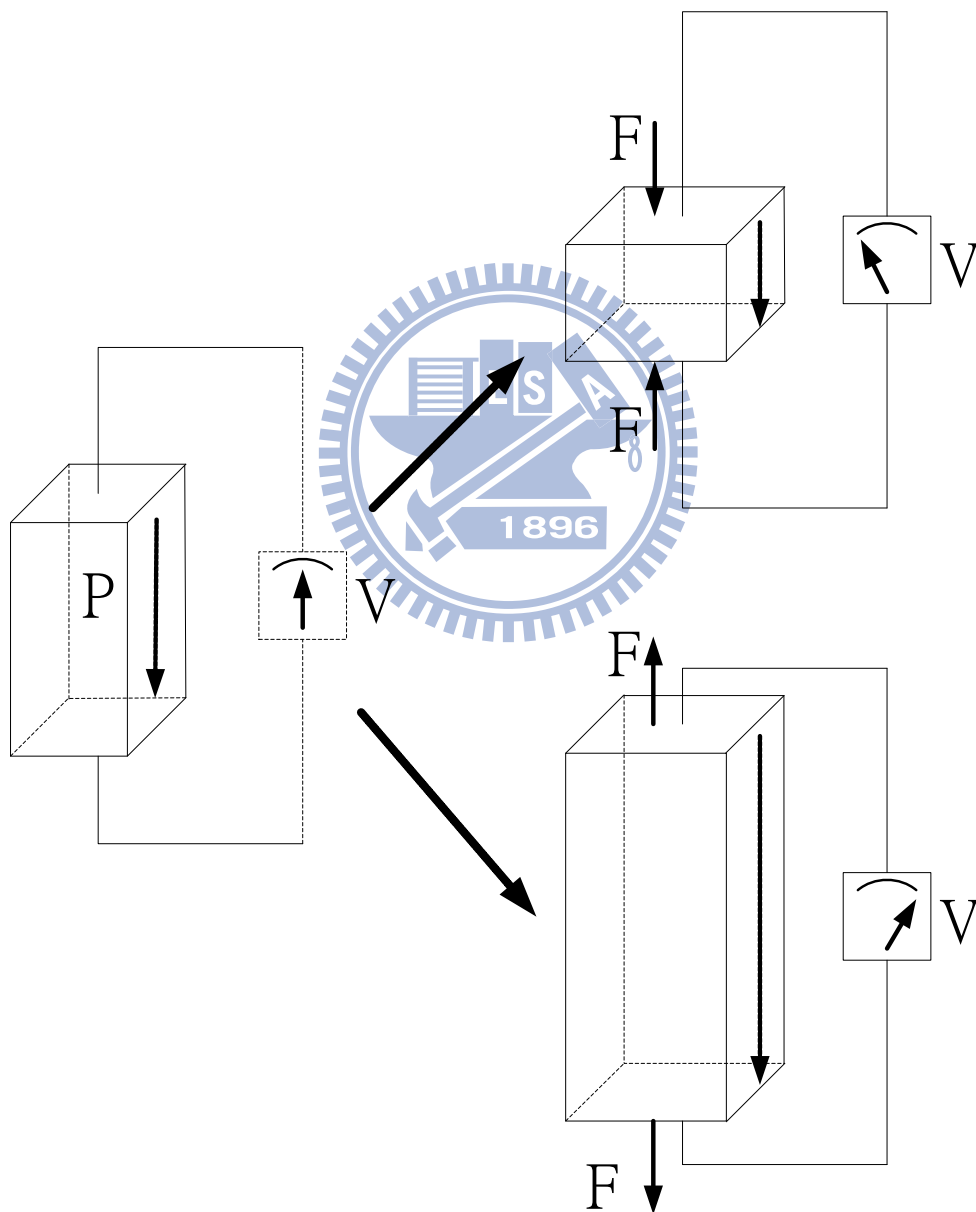


圖2-2 正壓電效應

### 逆壓電效應 (converse piezoelectric effect)

如圖2-3所示，對一壓電材料施加與極化方向相同之電場時，極化之強度因偶極矩變長而增強，因此壓電材料為抵抗這趨勢而沿著電場方向伸長以保持原始狀態。此機電能轉換是為電能轉換為機械能。

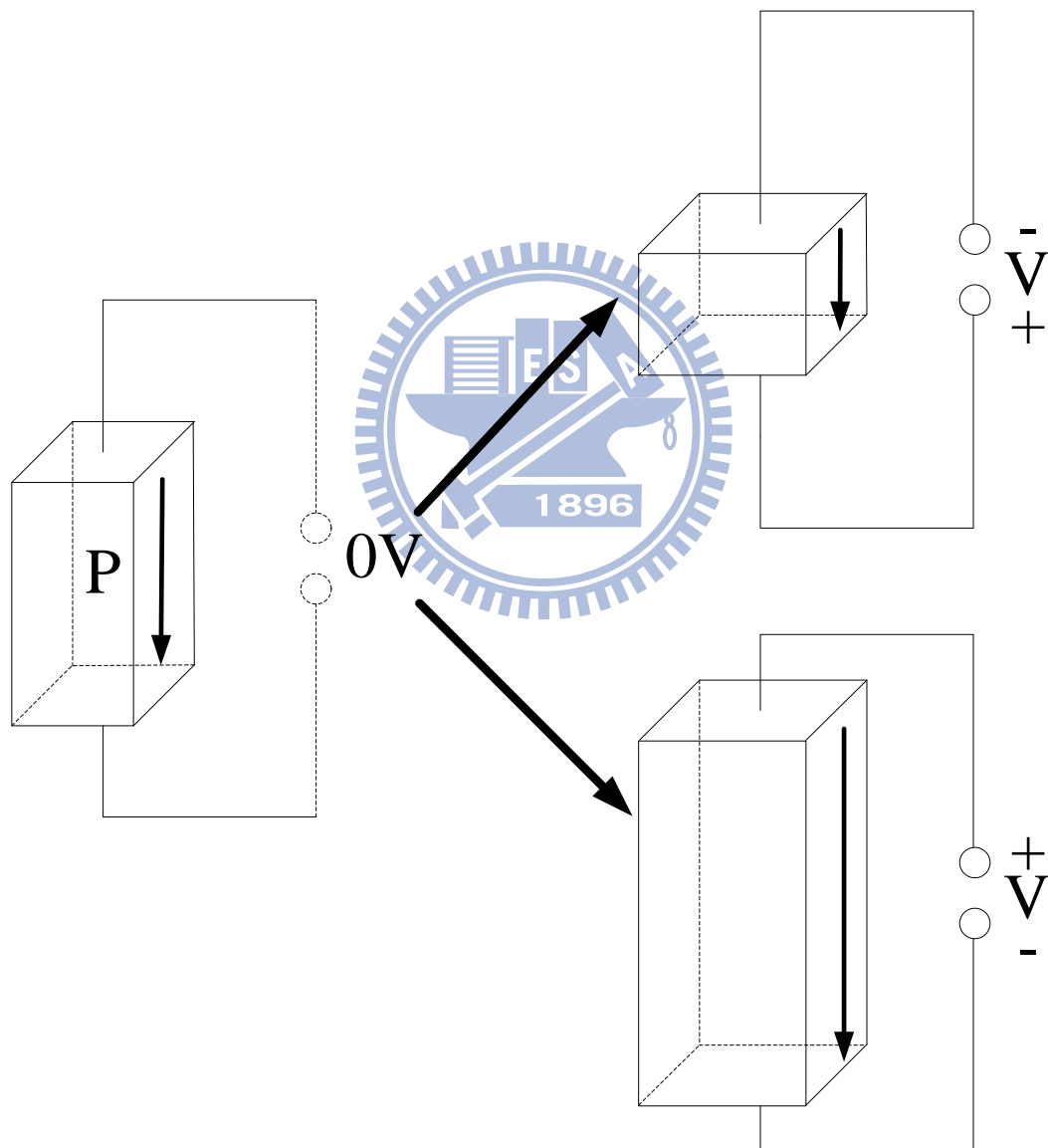


圖2-3 逆壓電效應

## 2.2.1 磁滯效應 (hysteresis)

此為壓電材料的非現象之一。如圖2-4所示，當輸入之電壓訊號由 0V 升高至某定值後，再降低回到 0V 時，可以發現電壓和位移量並沒有一線性關係，而且不是順著同一條路徑回來，而是偏移了一個位移量 $\Delta x$ ，這種現象便稱之為磁滯效應 (hysteresis)，且此現象會隨著輸入電壓的升高而變得更加明顯。由於鐵電材料所做成的壓電致動器，無法有效的避免磁滯效應的發生，而且磁滯效應所造成的誤差會高達全行程的10~15%，這在利用壓電材料應用於奈米級精密定位上是個令人相當困擾的現象。消除磁滯現象方法可以是選擇適當的壓電材料和其合適的工作電壓，使工作電壓盡量不落在磁滯曲線區內。但一般消除此現象的方式，大多還是利用回授控制補償方法來解決。

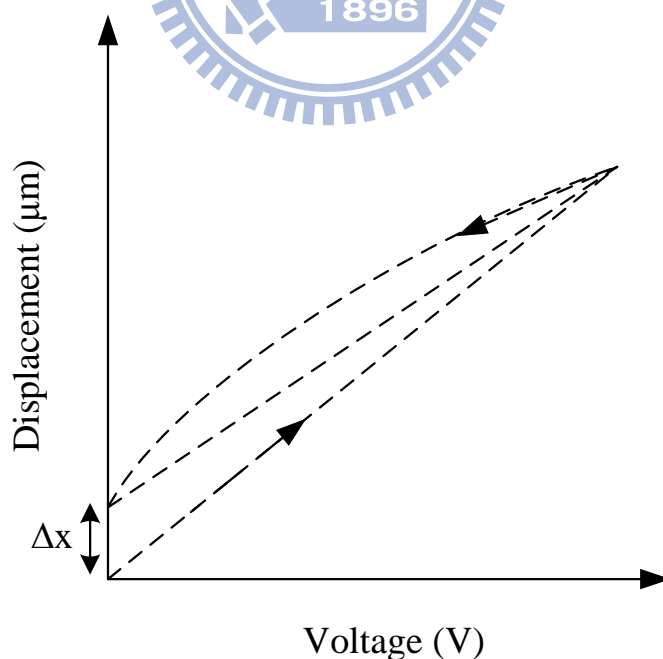


圖2-4 磁滯效應

## 2.2.2 潛變現象 (creep)

此為壓電材料的非現象之一。如圖2-5所示，當輸入一固定電壓值保持不變後，伸長量 $\Delta L$ 理應保持不變。但是由於壓電材料內的極性持續的增加，即使電壓保持固定，壓電材料也會隨著時間愈長而緩緩的伸長一小距離，這種現象便稱為潛變 (creep)。其伸長量 $\Delta L$ 和時間的關係式 (2.1) 為：

$$\Delta L \doteq \Delta [ 1 + \gamma \times \log (10t) ] \quad \text{式(2.1)}$$

其中

$\gamma$  = 壓電材料之潛變因子 (creep factor)

$t$  = 時間

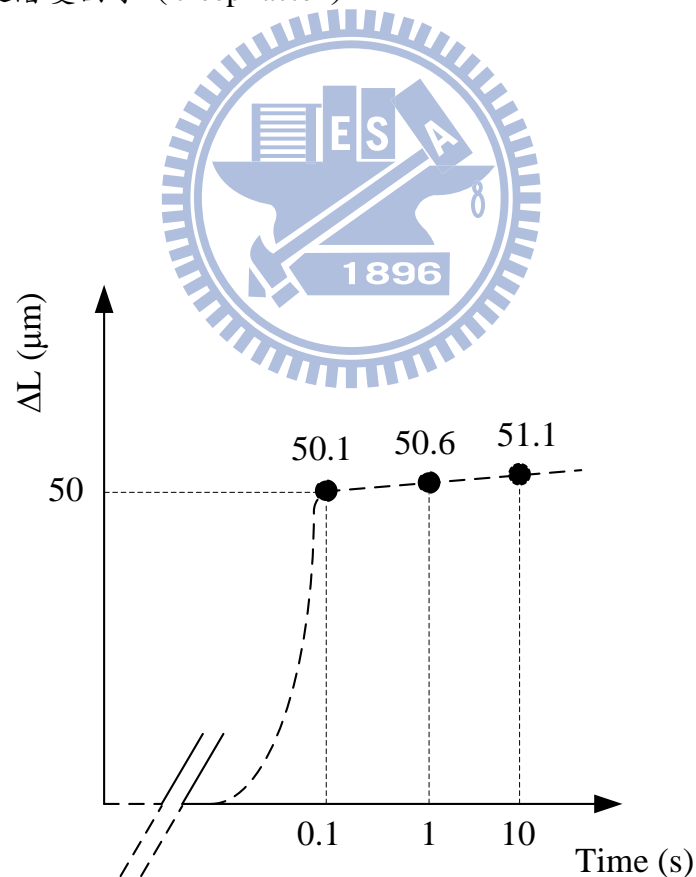


圖2-5 潛變現象

### 2.2.3 響鈴殘振 (ringing)

圖2-6為響鈴殘振，此為壓電材料的非現象之一。操作在一共振頻率下，所產生的一種無阻尼響應，此現象稱之為響鈴殘振 (ringing)。在到達目標伸長量前持續震動，隨時間增長後漸漸到達目標伸長量，欲消除此現象可用回饋控制來解決。

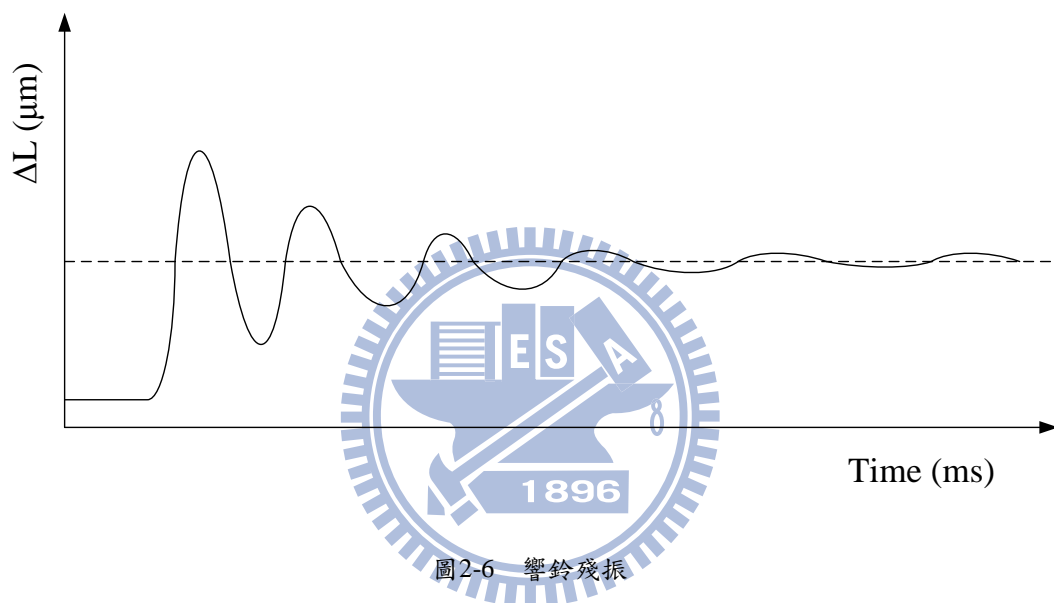


圖2-6 響鈴殘振



## 2.3 慣性馬達致動基本原理

本研究是使用壓電材料作為慣性馬達之致動器，其步進基本原理示意圖如圖

2-7 所示。

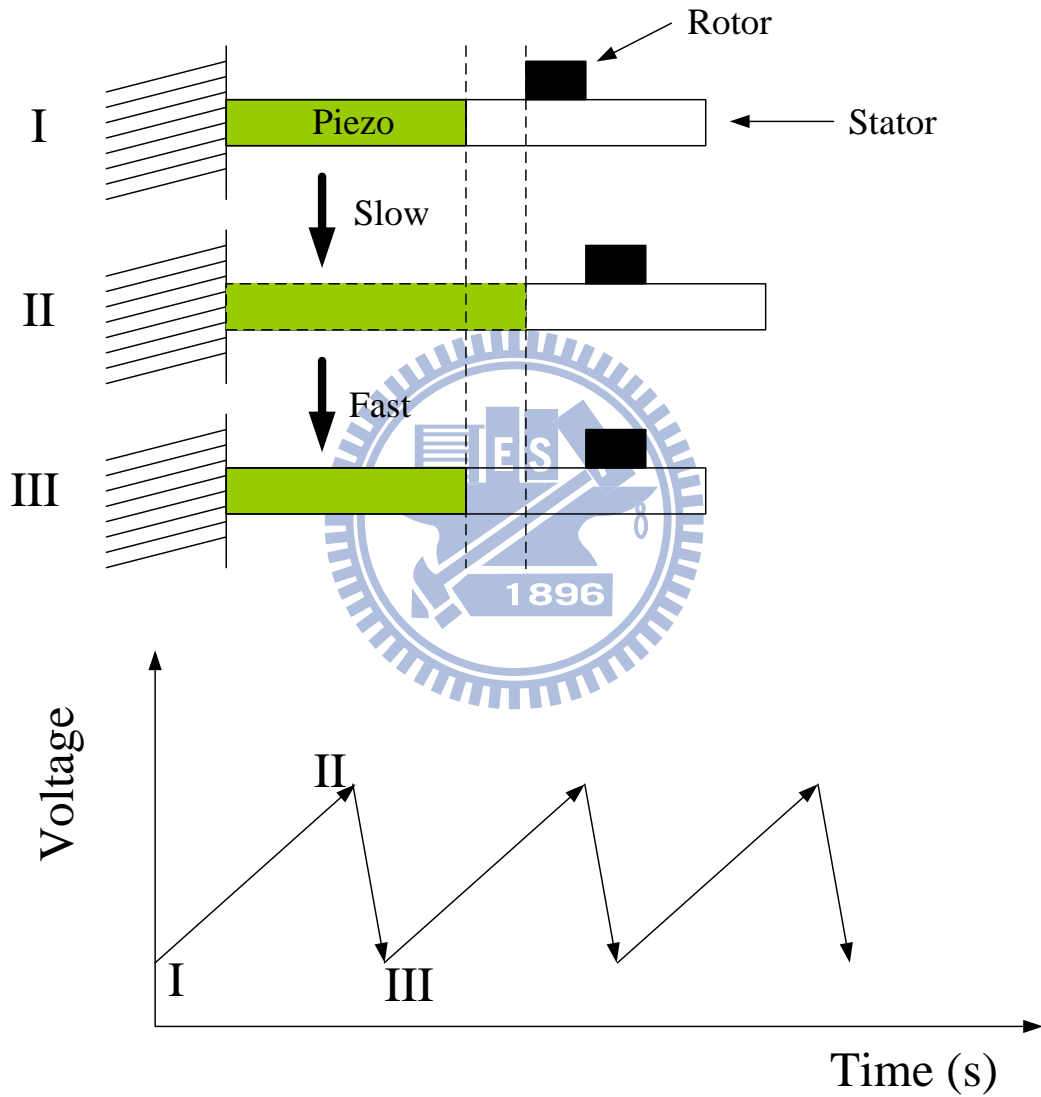


圖 2-7 慣性馬達致動基本原理

其驅動原理對照圖 2-7 來說明，其定子 (stator) 緊黏在壓電材料上，而動子 (rotor) 則置放於定子之上，慣性馬達其電壓驅動波形是以鋸齒波來驅動，初始狀態是 I。當壓電材料被以緩緩升高之電壓驅動時便緩緩伸長，而動子和定子會因兩者之間的靜摩擦力而被帶動一小段距離，如狀態 II 所示。接著壓電材料被以較陡之陡降的電壓驅動時便快速縮短，動子會因本身質量產生的慣性力而仍停留在原地，如狀態 III 所示。其慣性力和兩者表面靜摩擦力 ( $F_{\text{friction}}$ ) 關係如式 (2.2) 所示，其中  $m$  和  $a$  分別為動子的質量及壓電材料快速縮短時造成動子的加速度：

$$a > \frac{F_{\text{friction}}}{m}$$



式 (2.2)

由式 (2.2) 可看出慣性力小於兩者間靜摩擦力時便會形成狀態 II，慣性力大於兩者間摩擦力時便會形成狀態 III。

經過前述之步驟，如此一來動子便達成了前進的目的。此時的狀態 III 其意義變成與狀態 I 的意義是同樣道理，接著重複的輸入此鋸齒波形便可使慣性致動器達到步進的效果。

### 三、系統設計

#### 3.1 系統架構

圖 3-1 和圖 3-2 所示分別為本系統之整體實體圖和 Solidworks 軟體建構的架構圖。

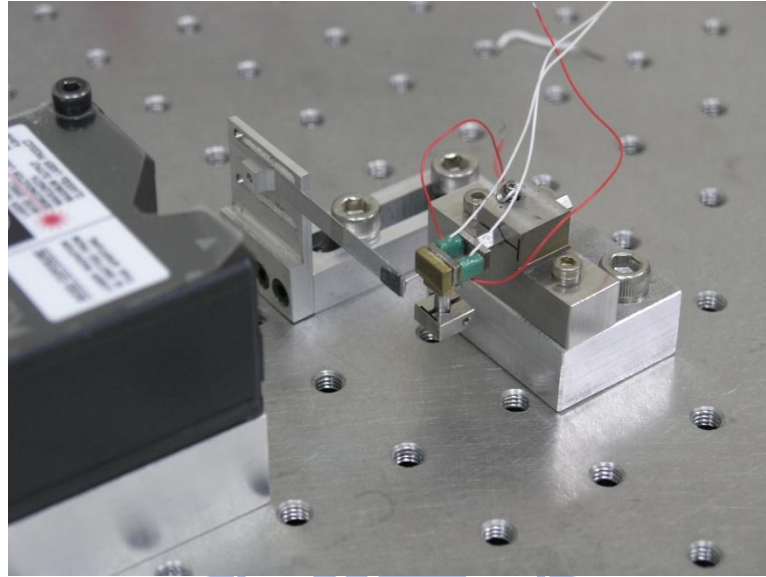


圖 3-1 實體架構圖

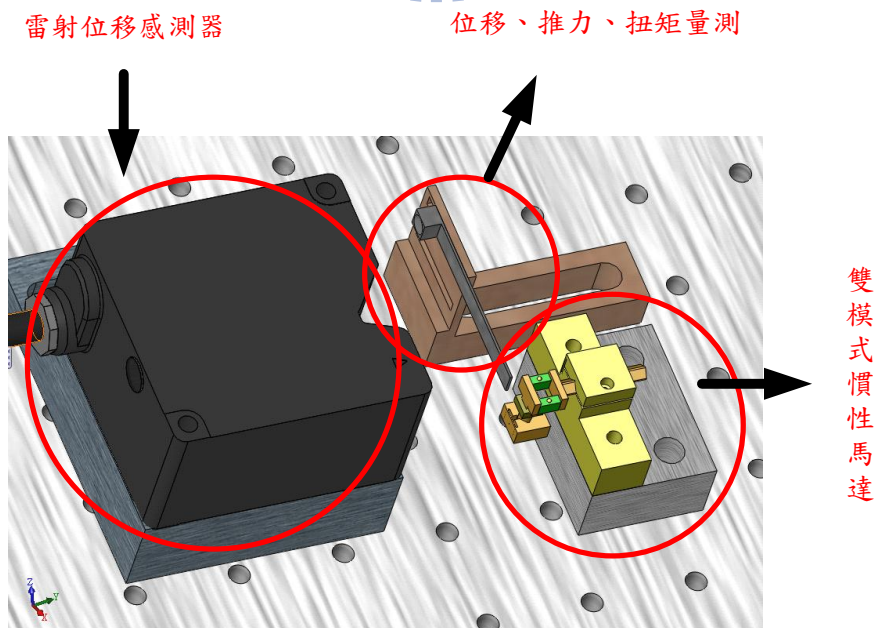


圖 3-2 Solidworks 整體架構圖

## 3.2 致動器結構

本研究設計之致動器—雙模式慣性馬達，包含兩種運動：平移以及旋轉運動。

先說明本設計之雙模式慣性馬達的結構，如圖 3-3 所示，包含的物件及結構特徵有：基座（base frame）、平行運動之長柱（column）、夾持平行運動之長柱的 V 型槽（V groove）、撓性結構（flexure structure）、旋轉運動之平台（platform）、作為旋轉軸心之圓柱（cylinder）、兩壓電元件（piezoelectric elements）以及搭配撓性結構來夾持平行運動之長柱力道大小用的彈簧螺絲組（screw and spring）。

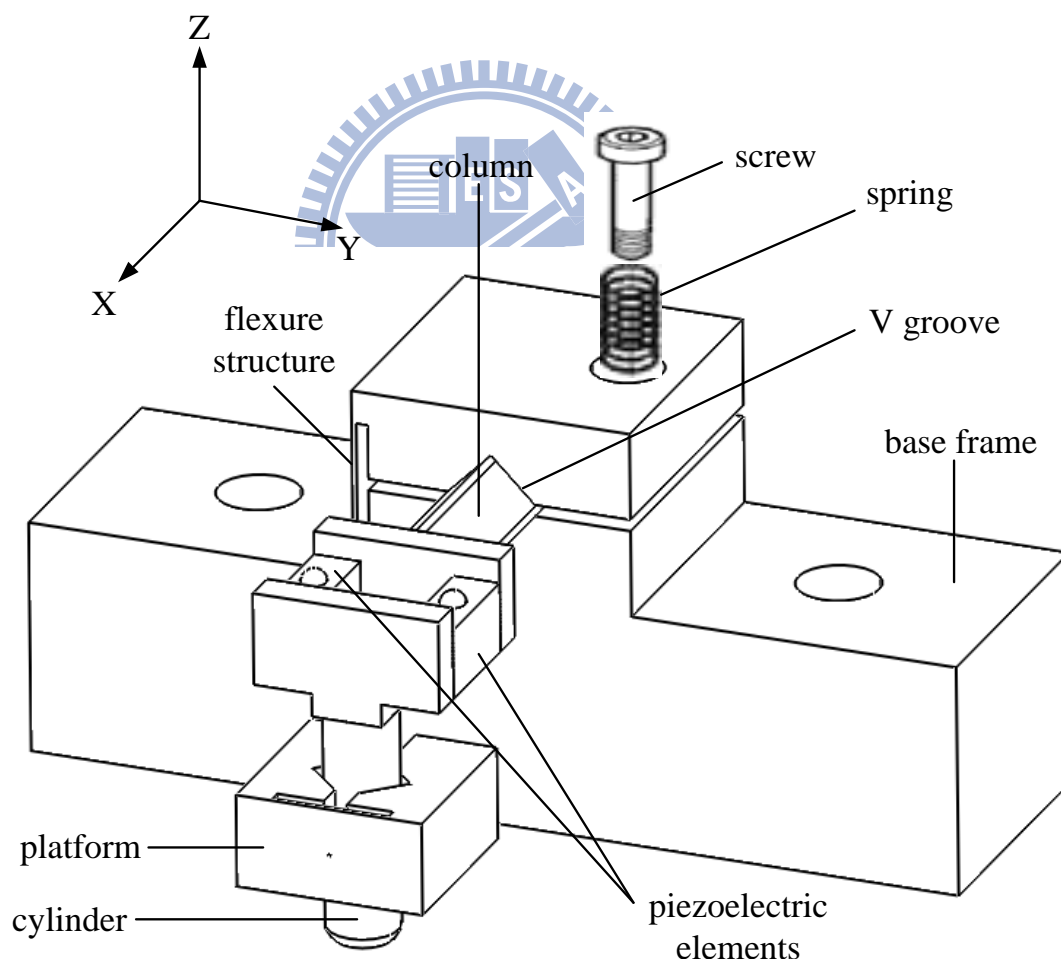


圖 3-3 致動器結構

前述之雙模式慣性馬達包含了兩種運動：平移以及旋轉運動，其運動自由度示意圖如圖 3-4 所示，接著分別介紹平移及旋轉運動的設計和致動方法。

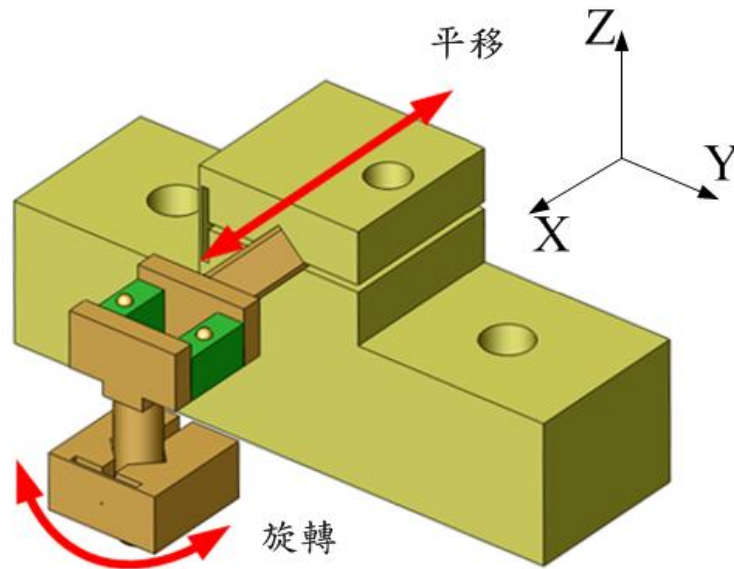


圖 3-4 運動自由度示意圖

### 3.2.1 平移運動 (translational motion)

如下頁圖 3-5 所示，完成平移運動之結構主要是一基座、一長柱、一彈簧螺絲組以及一對壓電元件。其中基座的設計，它一端是為撓性結構，另一端為彈簧螺絲組，中間之上下兩端 V 型槽方形是為夾持長柱用，此處的長柱端是為動子，而壓電元件端是為定子。彈簧螺絲組可用螺絲轉進的深度來控制彈簧壓縮量的大小，進而控制 V 型槽夾持長柱的力道大小，才能使平移運動順利完成。夾持的力道太大或是太小都沒辦法使平移運動完成，因為夾持力道直接影響了長柱和 V 型槽間的摩擦力，在這整個設計中，夾持力道大小的控制，是最為重要且須注意的地方。

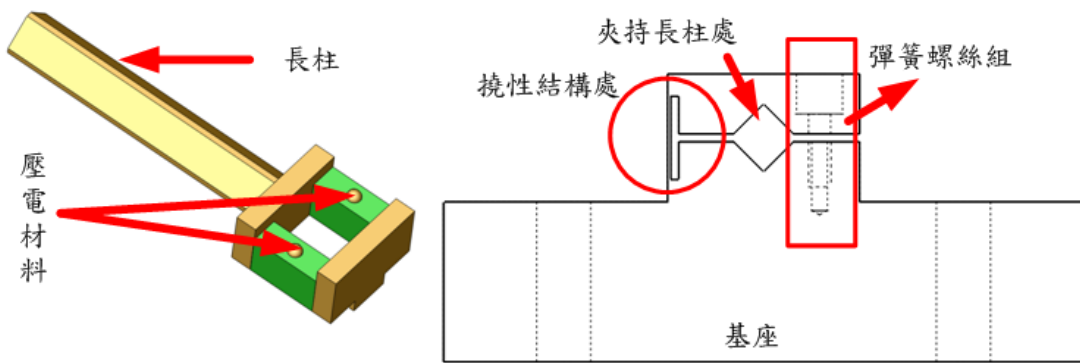


圖 3-5 平移運動結構

其致動原理是以壓電元件用**同動**的方式致動。參閱圖 3-6，此為致動器之仰視圖。首先是平移運動前進的動作，對照圖 3-6 (a)，波形的 1、2、3 狀態分別對照圖示的 1、2、3 狀態。一開始先對壓電元件 A 和 B 分別輸入如圖 3-6 (a) 之電壓波形，當輸入電壓波形跑到 2 之狀態時，因為是緩緩上升之電壓，所以平移運動之長柱端和 V 型槽夾持處會因靜摩擦力作用而使長柱原地不動，而另一邊的壓電元件端便向前伸長，所以使壓電元件 A 和 B 緩緩伸長形成圖 3-6 (a)—2；接著當電壓波形跑到 3 之狀態時，因為是陡降的電壓，壓電元件快速縮回，又因為平移運動的壓電元件端比較重，使得壓電元件端的慣性力大於長柱端和 V 型槽夾持處的靜摩擦力，所以壓電元件端停留在原處，這樣便使長柱前移形成圖 3-6 (a)—3，輸入電壓波形之狀態 2 和狀態 3 完成時，狀態 3 其意義便跟狀態 1 一樣，即是重複前述之動作，所以壓電元件 A 和 B **同動**的重複動作便使致動器完成步進前進的動作。

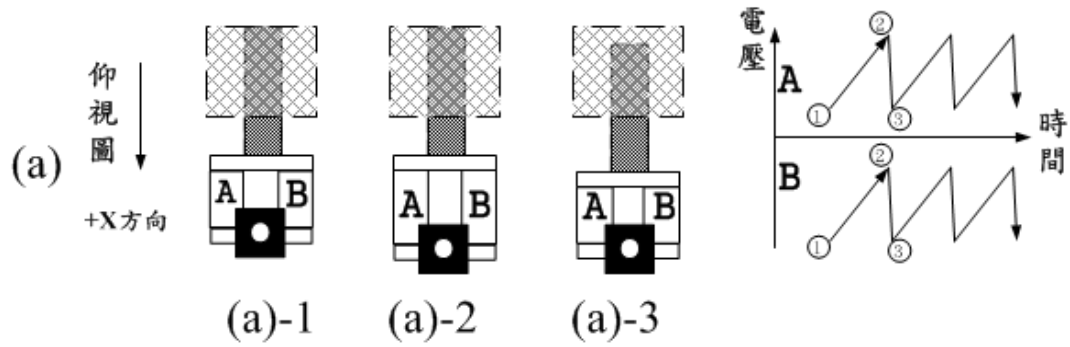


圖 3-6 (a) 平移運動前進之致動方式

反之，若要完成後退的動作，參閱圖 3-6 (b)，一開始先對壓電元件 A 和 B 分別輸入如圖 3-6 (b) 之電壓波形，當輸入電壓波形跑到 2 之狀態時，因為是急速上升之電壓，又壓電元件端較重，所以壓電元件端的慣性力大於長柱端和 V 型槽夾持處的靜摩擦力，壓電元件端停留在原處，長柱端向後退，這樣便形成圖 3-6 (b)—2；接著當電壓波形跑到 3 之狀態時，因為是緩降的電壓，所以平移運動之長柱端和 V 型槽夾持處會因靜摩擦力作用而使長柱原地不動，而另一邊的壓電元件端緩緩縮短，壓電元件 A 和 B 緩慢縮短便形成了圖 3-6 (b)—3。輸入電壓波形之狀態 2 和狀態 3 完成時，狀態 3 其意義便跟狀態 1 一樣，即是重複前述之動作，所以壓電元件 A 和 B 同動的重複動作便使致動器完成步進後退的動作。

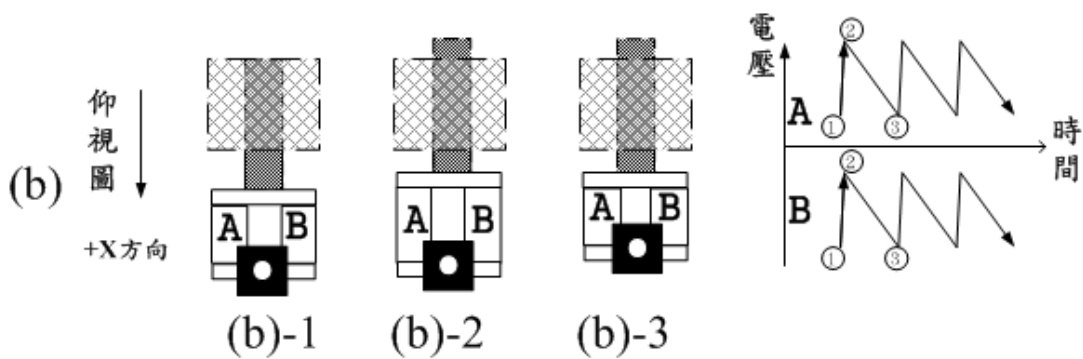


圖 3-6 (b) 平移運動後退之致動方式



### 3.2.2 旋轉運動 (rotational motion)

如圖 3-7 所示，旋轉運動之結構主要是一圓柱、一對壓電材料，以及一旋轉運動之平台 (platform)。其致動原理是以壓電元件用**差動**的方式致動。同樣的，旋轉運動平台中間之 V 型槽是夾持圓柱用，此處的圓柱是為定子，而旋轉運動平台是為動子。彈簧螺絲組也是用來控制 V 型槽夾持圓柱的力道大小。

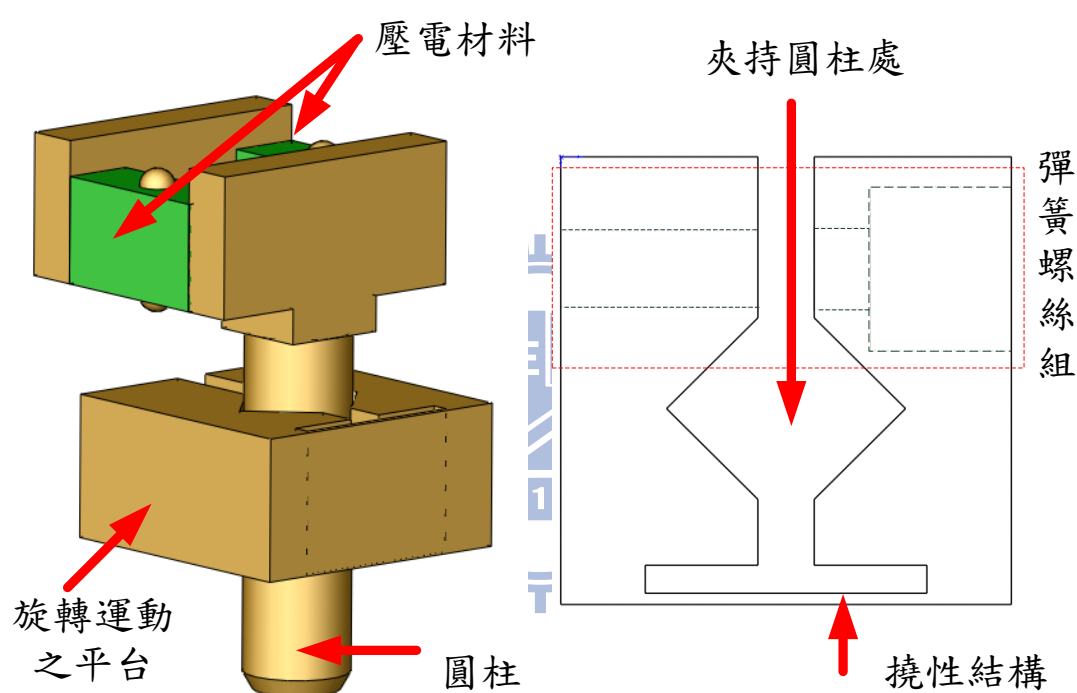


圖 3-7 旋轉運動結構

首先是旋轉運動順時針旋轉之動作，對照圖 3-8 (a)。一開始對壓電元件 A 和 B 分別輸入 A、B 之電壓波形，A 電壓波形之狀態 1 到狀態 2 使得壓電元件 A 緩緩縮短，B 電壓波形之狀態 1 到狀態 2 使得壓電元件 B 緩緩伸長，由於旋轉運動之平台夾持圓柱間的靜摩擦力作用，所以旋轉運動平台被帶動，順時針旋轉一角度，成為圖 3-8 (a)—2；接著壓電元件 A 在電壓波形之狀態 2 到狀態 3 間快速



伸長，壓電元件 B 在電壓波形之狀態 2 到狀態 3 間快速縮回，因為旋轉運動平台本身質量產生的慣性力大於圓柱夾持處的靜摩擦力，所以旋轉運動平台停留在原處，壓電元件 A 和 B 回到快速回到原來長度成為圖 3-8 (a)—3。輸入電壓波形之狀態 2 和狀態 3 完成時，狀態 3 其意義便跟狀態 1 一樣，即是重複前述之動作，所以壓電元件 A 和 B 差動的重複動作便使致動器完成順時針旋轉運動。

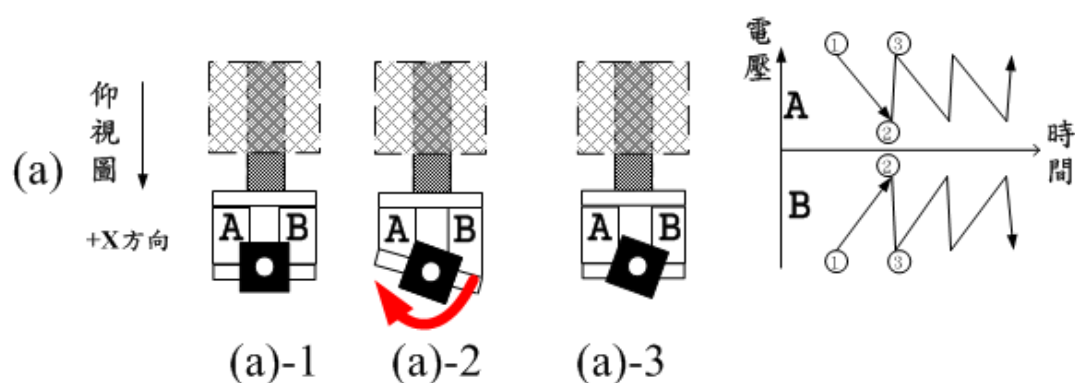


圖 3-8 (a) 旋轉運動順時針示意圖

反之，欲完成旋轉運動之逆時針旋轉之動作，對照圖 3-8 (b)。一開始對壓電元件 A 和 B 分別輸入 A、B 之電壓波形，A 電壓波形之狀態 1 到狀態 2 使得壓電元件 A 緩緩伸長，B 電壓波形之狀態 1 到狀態 2 使得壓電元件 B 緩緩縮短，由於旋轉運動平台夾持圓柱間的靜摩擦力作用，所以旋轉運動平台被帶動逆時針旋轉一角度，成為圖 3-8 (a)—2；接著壓電元件 A 在電壓波形之狀態 2 到狀態 3 間快速縮短，壓電元件 B 在電壓波形之狀態 2 到狀態 3 間快速伸長，因為旋轉運動平台本身質量產生的慣性力大於圓柱夾持處的靜摩擦力，所以旋轉運動平台停留在原處，壓電元件 A 和 B 回到快速回到原來長度成為圖 3-8 (a)—3。

輸入電壓波形之狀態 2 和狀態 3 完成時，狀態 3 其意義便跟狀態 1 一樣，即是重複前述之動作，所以壓電元件 A 和 B 差動的重複動作便使致動器完成逆時針旋轉運動。

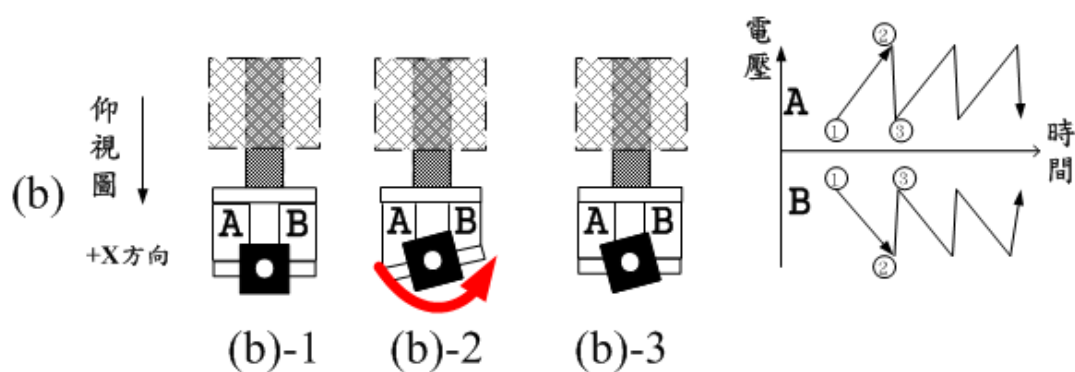


圖 3-8 (b) 旋轉運動逆時針示意圖

### 3.2.3 驅動電路設計

圖 3-9 (a) (b) 所示為此雙模式慣性馬達的驅動電路圖，輸入訊號經由軟體 LabVIEW 送出後，經放大器送出驅動，A、B 兩壓電元件之跨壓皆為 60V。圖 3-9 (a) 所示為平行運動之驅動電路，因為要使兩壓電元件同時運作，所以 A、B 兩壓電元件必須是以並聯方式連結，若是兩壓電元件沒有同時致動，而存在一個時間差，則慣性馬達的致動情形可能會不符預期或無法作動。而圖 3-9 (b) 所示為旋轉運動之驅動電路，為了使兩壓電元件同時運作，所以 A、B 兩壓電元件必須是以串聯方式連結，同樣的，如果存在著時間差，會使旋轉運動不符預期或無法作動。以平移運動來說，兩壓電元件必須同時伸長或同時縮短；以旋轉運動來說，兩壓電元件必須同時一前一後，故用此電路來達成同動、差動。

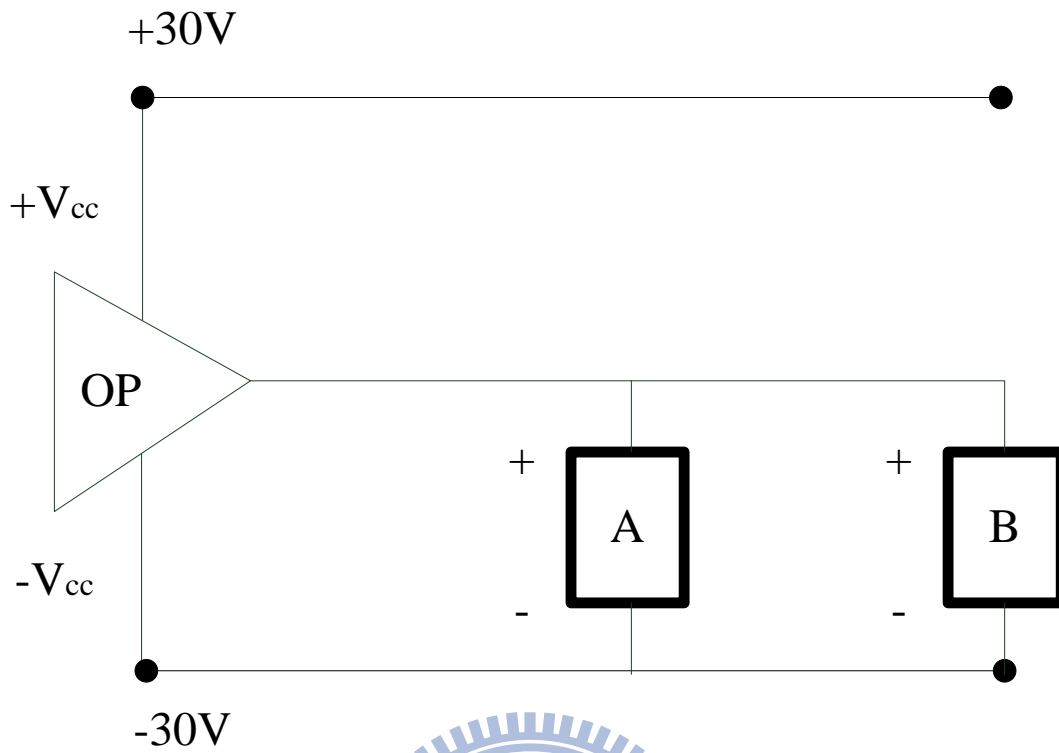


圖 3-9 (a) 驅動電路平移運動用

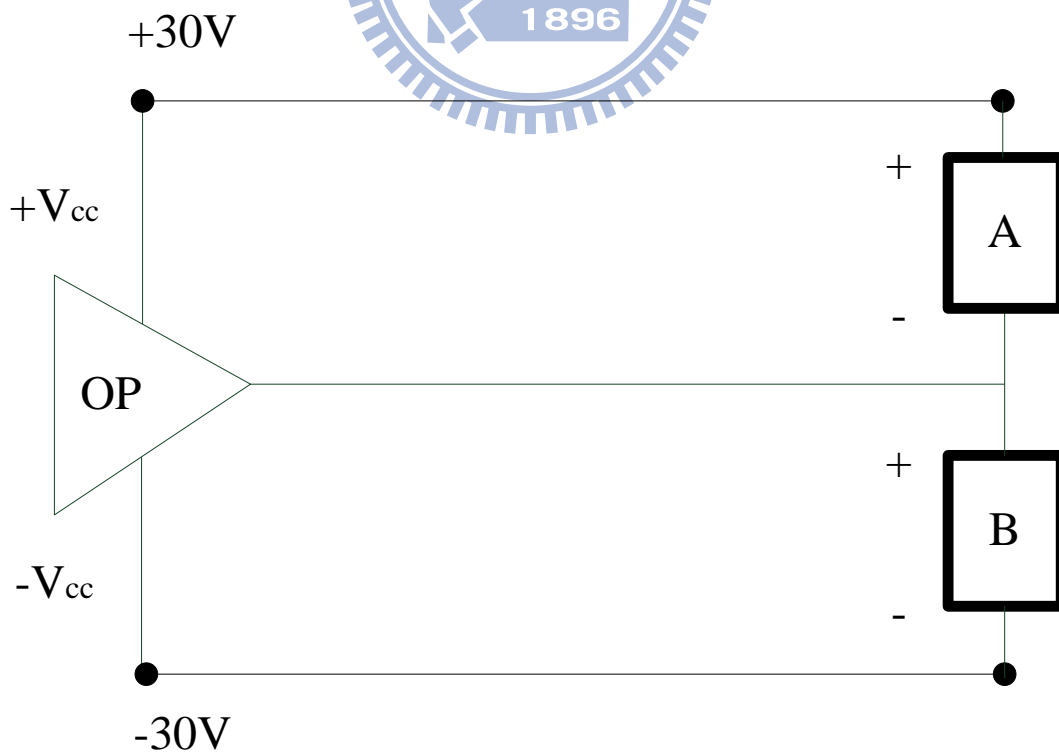


圖 3-9 (b) 驅動電路旋轉運動用

### 3.3 系統整合

圖 3-10 為整個實驗量測架構圖，在 PC 上由 LabVIEW 軟體送出致動器所需之鋸齒波形，再經由美商公司 National Instrument (NI) 製造之資料擷取卡 (Data Acquisition, DAQ) 送到運算放大器再去驅動本研究的双模式慣性馬達。位移量測方面則是使用 KEYENCE 公司製造的雷射位移感測器 LK-H020 來測量位移量，其量測範圍最大為 6mm。

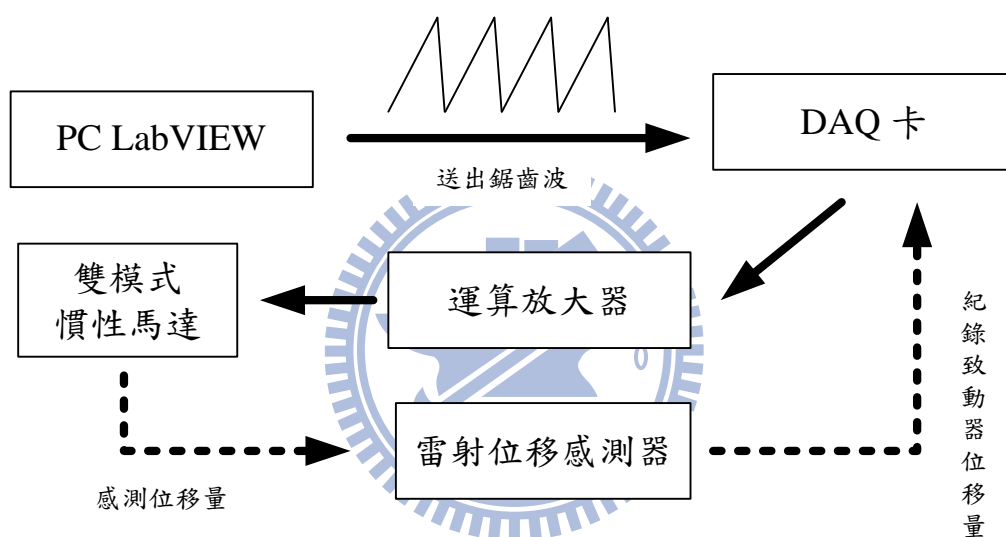


圖 3-10 實驗量測架構圖

## 四、實驗結果

本研究之實驗測試雙模式慣性馬達的一些性能：解析度、最大推力、最大扭矩、平移及旋轉運動的共振頻率、線性度、平均步長、速率，並藉此來找出適當的致動方法，使此雙模式慣性馬達發揮最好的效能。而在最大扭矩以及最大推力的量測方面，則是會搭配一剛性適當的懸臂樑，與其懸臂樑的撓曲來輔助計算其推力和扭矩。以下會分別以數據和圖表，來表示在平移運動及旋轉運動下的各項性能。

### 4.1 解析度




圖 4-1 (a) 及圖 4-1 (b) 分別代表平移運動和旋轉運動的解析度，觀察每步的最小位移。首先觀察圖 4-1 (a)，在低頻下(20Hz)，輸入一鋸齒波形(60V)，使雙模式慣性馬達緩緩前進，由圖中可以觀察出位移和時間的關係。由圖中可以觀察到，位移隨時間的變化呈一鋸齒狀，事實上是因為當雙模式慣性馬達因動子和定子間的靜摩擦力的帶動前進一小段距離後，接著雙模式慣性馬達是以慣性力大於靜摩力來停留在原處，但由於動子和定子之間不可能為完全沒有摩擦力，所以動子會被摩擦力拉回一小段距離，因此位移隨時間的變化會呈一鋸齒狀，這樣的圖示是合理的。如此一來，致動器前進後又被稍微拉回來之間的距離差，便是此雙模式慣性馬達平移運動的解析度，由圖 4-1 (a) 可以輕易的觀察到其平移運動之解析度為  $0.1\mu\text{m}$ 。

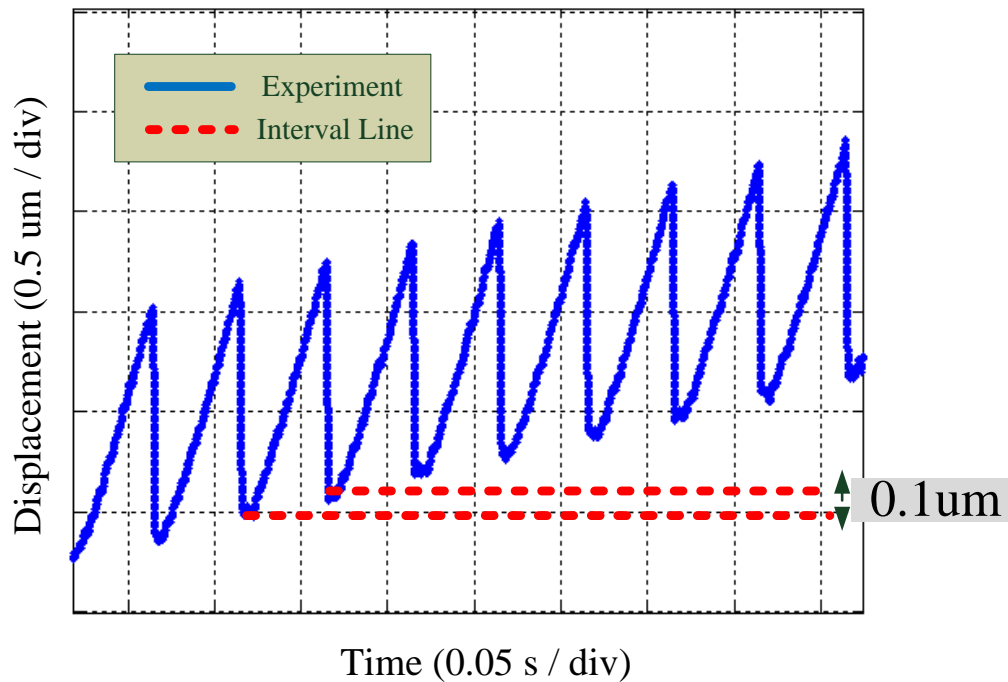


圖 4-1 (a) 平移運動解析度為 0.1 (μm)

接著是旋轉運動之解析度，觀察圖 4-1 (b)，同樣的在低頻下 (20Hz)，輸入一鋸齒波形 (60V)，使雙模式慣性馬達順時針或逆時針旋轉，圖 4-1 (b) 是為順時針旋轉模式。由圖中可以觀察出旋轉角度 (degree) 和時間的關係。同樣的由圖中可以觀察到，旋轉角度和時間的變化仍呈一鋸齒狀，這原因和上述之平移運動一樣，皆為圓柱和撓性元件 (platform) 夾持處之間存在著摩擦力，因此旋轉角度隨時間的變化才會呈一鋸齒狀。如此一來，順時針旋轉後再被逆時針稍稍拉回之間的角度差，便是此雙模式慣性馬達旋轉運動的解析度，其解析度為 0.04 (degree)。

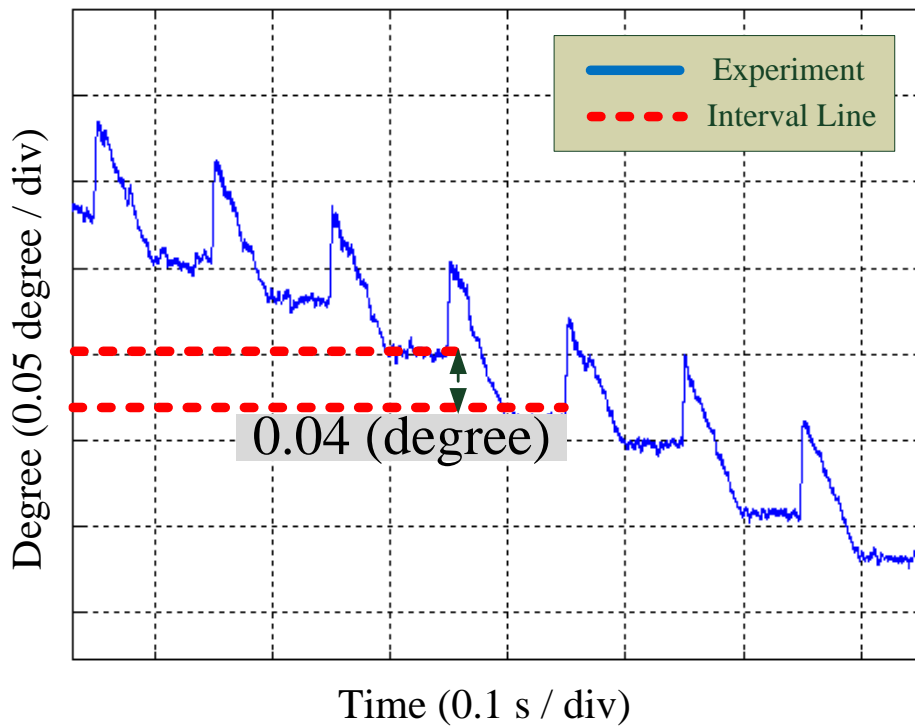


圖 4-1 (b) 旋轉運動解析度為 0.04 (degree)



## 4.2 線性度

欲觀察雙模式慣性馬達之線性度，故輸入一固定電壓訊號 60V，100Hz 來觀察。圖 4-2 (a) 代表平移運動的位移對時間之關係圖；圖 4-2 (b) 代表旋轉運動的旋轉角度對時間之關係圖。首先先觀察平移運動，由圖 4-2 (a) 中可明顯看出，位移對時間的關係是一條近乎於直線的關係，幾乎與相關係數 (Regression, R) 重疊，其 R 值為 0.999。代表此雙模式慣性馬達在平移運動下，其線性度相當高。

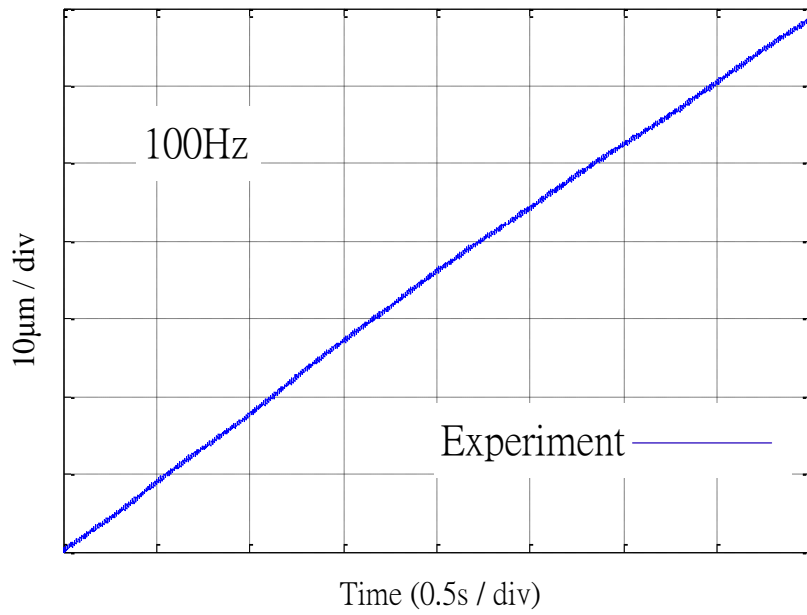


圖 4-2 (a) 平移運動線性度觀察

接著來觀察旋轉運動，見圖 4-2 (b)。由圖中也可明顯看出，旋轉角度對時間的關係也是近乎直線，其相關係數 (Regression, R) R 值為 0.976。代表此雙模式慣性馬達在旋轉運動下，其線性度也是相當優異。

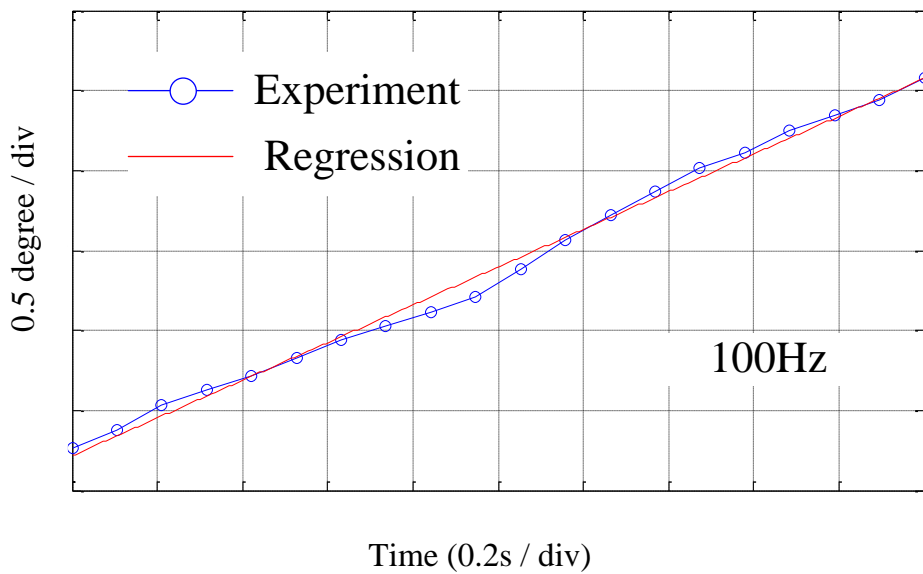


圖 4-2 (b) 旋轉運動線性度觀察



### 4.3 推力及扭矩

見圖 4-3，由材料力學，懸臂之撓度和施力之關係可由式 (3.1) 得知。經由雷射位移感測器量測懸臂之撓曲變形後，再經由式 (3.1) 計算即可算出致動器之出力大小。而實驗用之懸臂規格如表 4-1 所示。

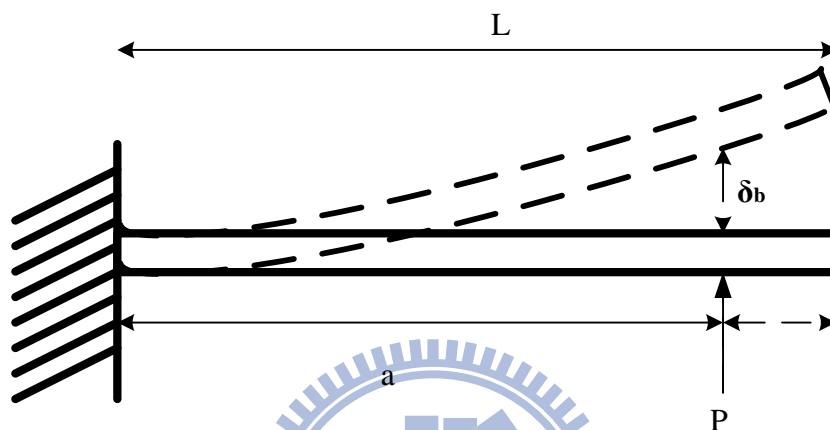


圖 4-3 懸臂之力和撓度示意圖

$\delta_b$ ：懸臂之撓曲

P：施力

a：固定端到施力點之距離

$$\delta_b = \frac{P a^2}{6EI} (3L - a)$$

E：懸臂之楊氏系數 (Young's Modulus)

式(3.1)

I：懸臂之截面慣性矩

L：懸臂全長

表 4-1 懸臂之規格

材料	楊氏系數 (Young's Modulus)	長度
A6061-T6	69GPa	5mm

圖 4-4 為實驗量測用之懸臂，右端是為固定端。由圖中可以見到懸臂前端有一針狀物，是用來當作施力點。此針狀物可以確保施力處是為一點的狀態且讓施力不會偏移掉。而圖 4-5 是如何量測推力及扭矩之實驗擺設方法示意圖。



圖 4-4 實驗用之懸臂

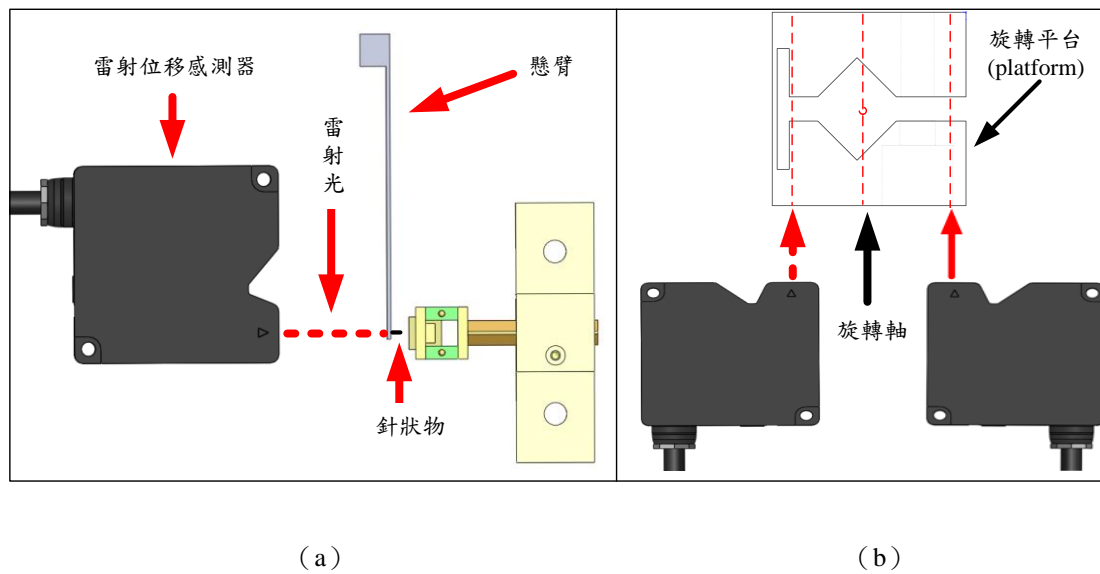


圖 4-5 量測推力 (a) 及扭矩 (b) 之實驗架設

而扭矩及旋轉角度和角速度之計算可以用個簡單示意圖來幫助理解如圖 4-6 所示，其方形即為旋轉運動之平台（platform），其邊長為  $2R$ ，經由兩個雷射位移感測頭量測出位移  $A$ 、 $B$  後， $D$ 、 $d$  為雷射光與中心軸之距離，但雷射光與中心軸之距離較難以量測，不過兩道雷射光之距離  $D+d$  經由實驗之擺設可以輕易得知，再經由圖 4-6 右方之簡圖輔助，用三角函數計算便可得其旋轉角度  $\theta$ ，以式 (3.2) 表示。最後經由實驗結果計算，其最大推力和最大扭矩為表 4-2。

表 4-2 最大推力和最大扭矩

最大推力	最大扭矩
0.11N	$1.6 \times 10^{-5} \text{Nm}$

$$\theta = \frac{180^\circ}{\pi} \times \tan^{-1} \left( \frac{A+B}{D+d} \right) \text{ (degree)} \quad \text{式(3.2)}$$

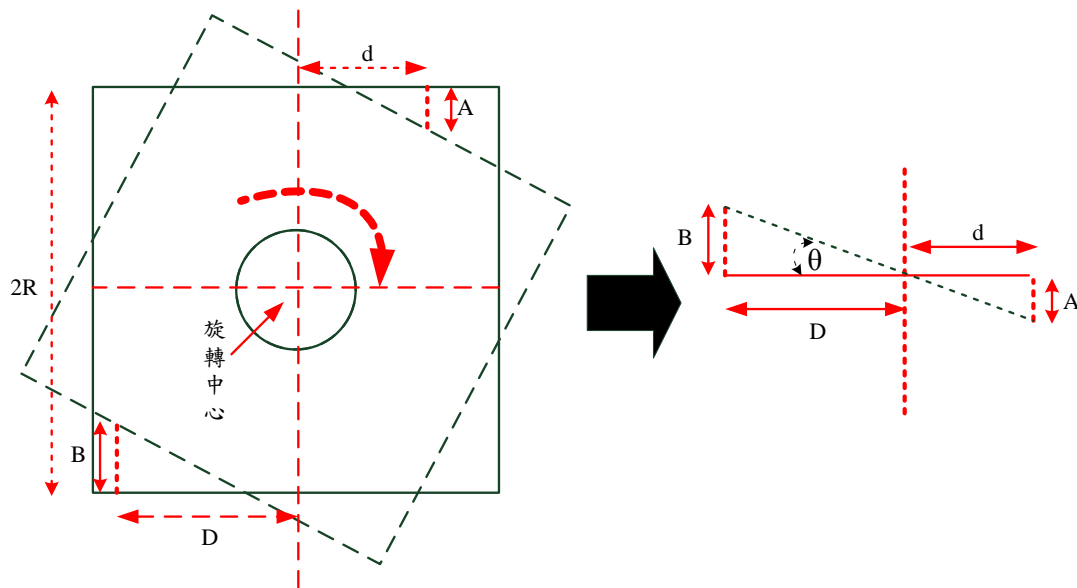


圖 4-6 量測計算扭矩簡單示意圖

## 4.4 平均步長與整體結構共振頻率

在測量致動器速度過程中，發現了速度並沒有與輸入電壓之頻率呈線性關係，反而在某區間速度是比較大的。在固定輸電壓 60V 時，比較不同頻率下之速度和平均步長，如表 4-3 所示。

表 4-3 不同頻率下之速度和平均步長

驅動頻率 (Hz)	速度 ( $\mu\text{m/s}$ )	平均步長 ( $\mu\text{m}$ )
100	17.23	0.172
200	42.85	0.214

就理論上來說，輸入電壓的頻率愈高，致動器的速度應該要愈快。故 200Hz 之速度理應為 100Hz 之速度的兩倍。但觀察其結果卻發現，當頻率升到 200Hz 時，其速度卻是 100Hz 的 2.48 倍，推測其原因，可能是結構本身可能本來精度就不高所以造成誤差，但其實主要的原因還是此頻率的區間附近，是為整體結構的共振頻率。

概略來說，當一直調整由低到高輸入電壓的頻率，一直到了某個頻率點，便會發現致動器的每一步的平均步長達到了最大值。其原因便是當操作至此頻率時，此頻率便是為共振頻率點。因為共振頻率的關係，使得致動器的整體結構共振了起來，使致動器整體結構震動得更猛烈，因此讓致動器的每一步的步長距離變大了。

## 平移運動之共振頻率

輸入一固定電壓 60V，接著逐漸的升高頻率來進行掃頻之動作，進而找出致動器整體結構共振頻率，由前述可知，共振點即為平均步長的最大值，圖 4-7(a) 是為頻率與平移運動的速度之關係圖，為證明其實驗有重複性，因此做了多組數據來驗證，經由實驗結果顯示此實驗是有重複性的。因此挑出三組數據 data1、data2、data3 來表示其速度與頻率關係圖。理論上當頻率逐漸升高時，速度也要跟著增加，圖 4-7 (a) 之結果顯示是支持的，這使得接下來的平均步長的結果，圖 4-7 (b) 是為合理的。

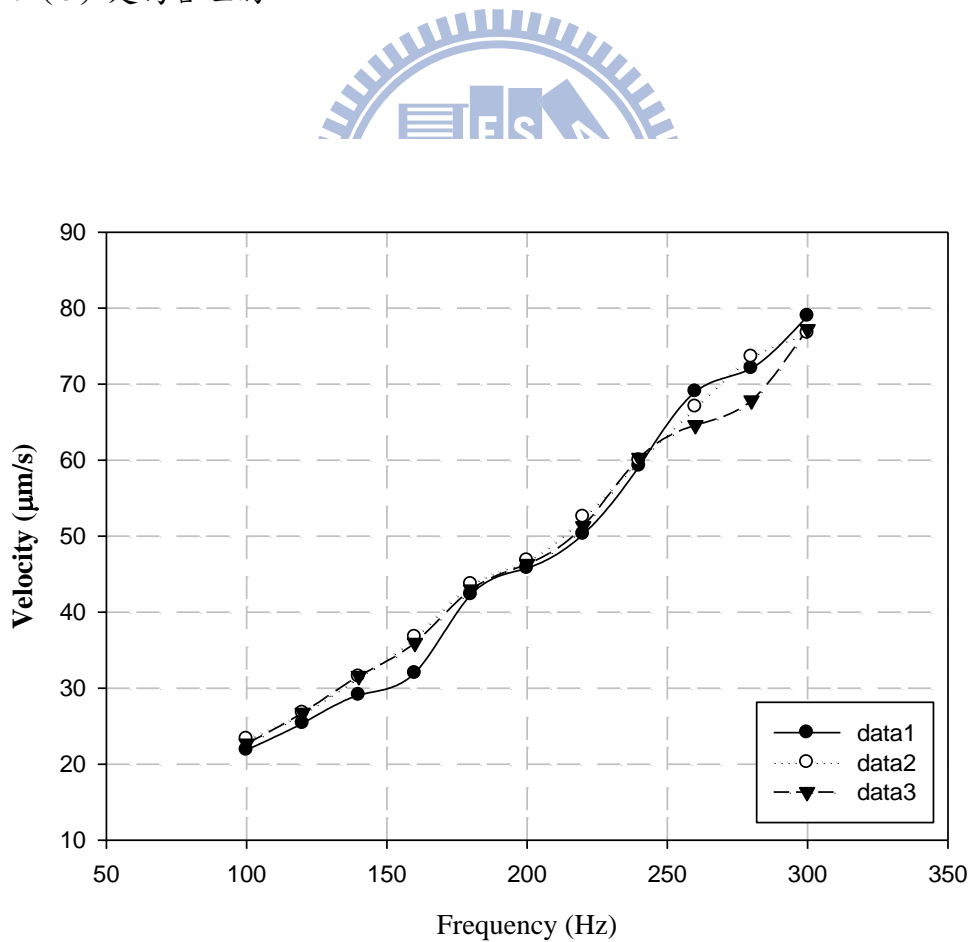


圖 4-7 (a) 在不同頻率下，平移運動之速度

圖 4-7 (b) 為在不同頻率下之平均步長 (average step length)。由圖上可觀察到，在驅動頻率 180Hz 和 260Hz 處，平均步長有峰值。此為旋轉運動之共振頻率。而頻率 300Hz 以上雖與 260Hz 之平均步長的值相距不遠，但當施加頻率超過 300Hz 後，速度雖然變得更快了，但卻變成沒有穩定性可言。在前述之章節 3.2 的致動器結構中有提到，夾持力道是一項很重要的因素，300Hz 以上的頻率會使夾持力不穩，而使得此致動器失去可靠度。

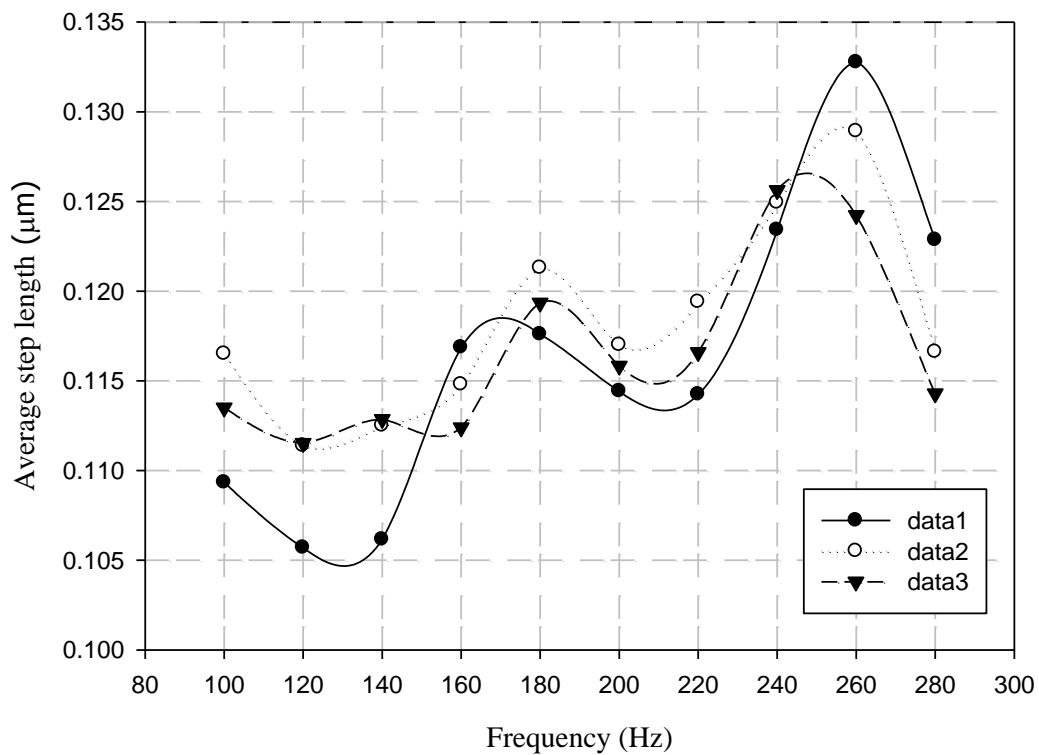


圖 4-7 (b) 在不同頻率下，平移運動之平均步長

### 旋轉運動之共振頻率

圖 4-8 (a) 是驅動頻率與旋轉運動的角速度之關係圖。同樣的，實驗是有重複性的，因此挑出三組數據 data4、data5、data6 來表示其角速度與頻率關係圖。理論上當頻率逐漸升高時，角速度也要跟著增加，圖 4-8 (a) 之結果顯示是支持的，這使得接下來的平均旋轉角的結果，圖 4-8 (b) 是為合理的。

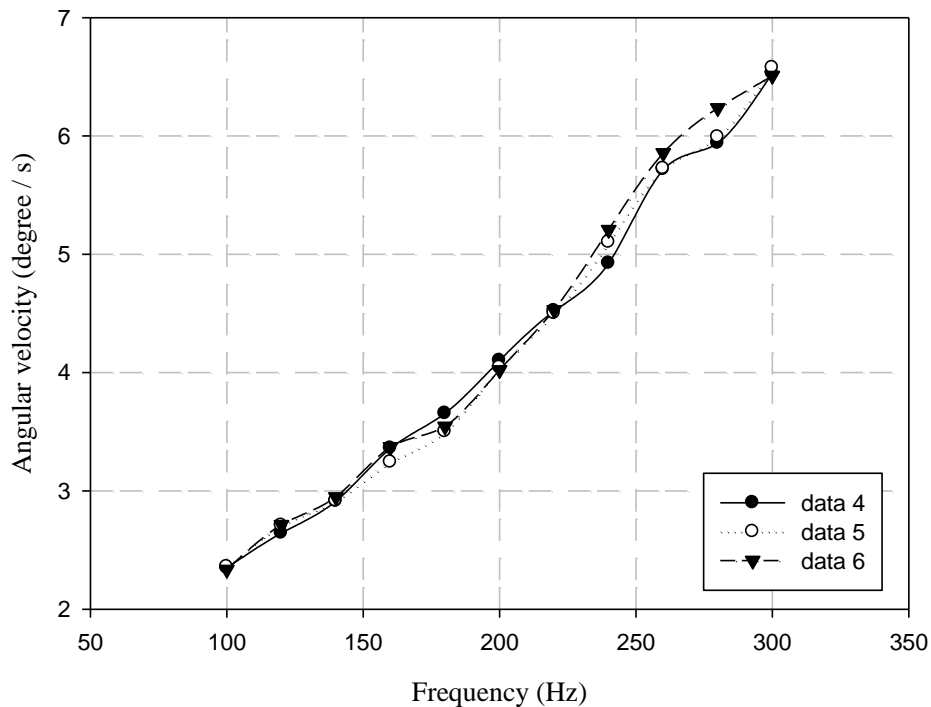


圖 4-8 (a) 在不同頻率下，旋轉運動之角速度

圖 4-8 (b) 為在不同頻率下之平均旋轉角 (average angle of rotation)。由圖上可觀察到，在頻率 260Hz 處，平均旋轉角有峰值。此即為旋轉模式下的共振頻率。而驅動頻率為 100Hz 時，雖與 260Hz 之平均旋轉角之值相距不遠，但因為角速度在 100Hz 時，其速度太慢了不符效率。

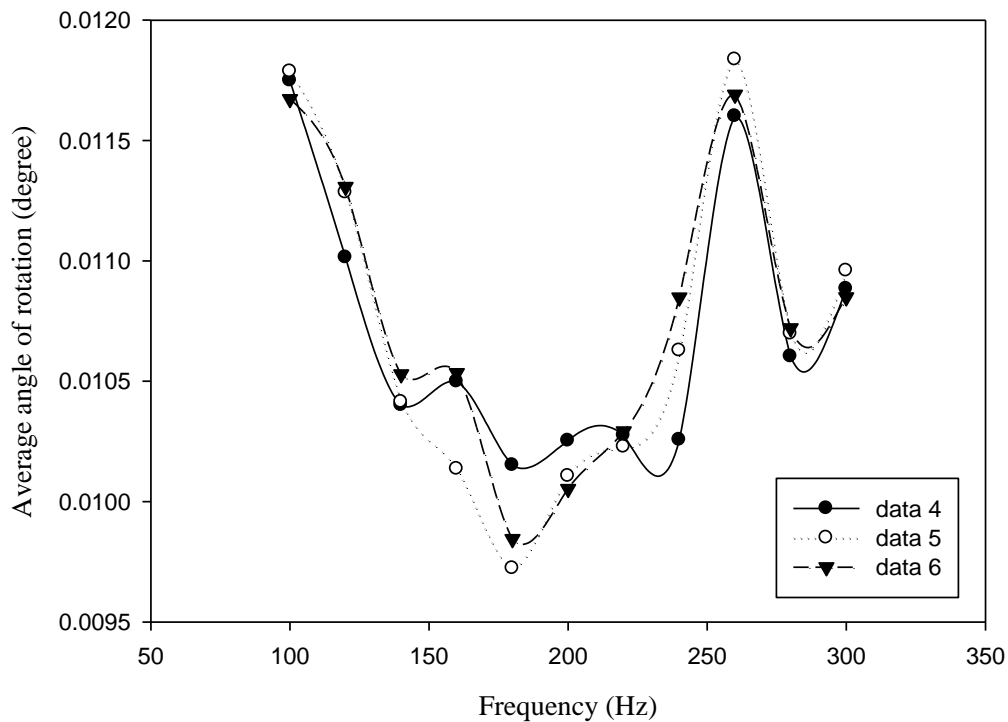


圖 4-8 (b) 在不同頻率下，旋轉運動之平均旋轉角

由以上所述之，平移運動的共振頻率為 180Hz 以及 260Hz，而旋轉運動之共振頻率為 260Hz，會發現其兩者有重疊現象。因此如果致動在 260Hz 時便會發生耦合現象，意思就是當致動於平移運動時，旋轉平台受到共振影響也產生了轉動，使定位精度降低。為避免此情形，因此必須操作平移運動時，施以 180Hz 的驅動電壓，操作旋轉運動時便要避開 260Hz 的驅動電壓，以防止耦合現象產生。



## 五、結論與展望

本研究雙模式慣性馬達已成功的被設計出來，在平行運動上其行程理論上是無限的，因為其行程的決定因素是在於平行運動之長柱 (column)，長柱愈長，行程愈大；而旋轉運動方面，旋轉運動之平台 (platform) 也能做一個 360 度旋轉的運動。

本研究運用並聯式的壓電元件，利用其差動和同動而成功的設計出一個具有兩個自由度之致動器，而無須做疊加的動作。因為以往的設計即一軸僅代表一種位移，需要多軸運動便需要將致動器疊加起來。並聯式設計之剛性比串聯式高，因此優點有精度佳、結構緊緻、體積小，一個裝置同時具有兩個自由度，且無論平移或旋轉，兩個壓電致動元件都有貢獻，而且受到負荷時，兩個致動元件可以共同分擔其負載，延長使用壽命。

設計出此雙模式慣性馬達後，量測其主要判斷致動器優劣的各項性能。本研究在平移及旋轉運動之步進解析度分別為 0.1 ( $\mu\text{m}$ ) 和 0.04 (degree)，而平移推力以及旋轉扭矩分別為 0.11N 和  $1.6 \times 10^{-5} \text{Nm}$ 。再經由掃頻得知，在平移運動模式下，共振頻率為 180Hz 和 260Hz，在這兩共振頻率下，有最大的平均步長；而在旋轉運動模式中，其共振頻率為 260Hz，在此共振點有最大的平均旋轉角。但由於共振頻率重疊，因此操作時需避開 260Hz，在 180Hz 時操作平移運動模式，在旋轉運動模式則避開 260Hz 致動。

無論平移和旋轉運動，其最為重要的是夾持的力道大小控制。因為夾持的力道直接影響了動子和定子之間的靜摩擦力大小，太大或者是太小皆無法使致動器運作或是會使其性能極差。

在未來發展方面，動子與定子接觸面間摩擦力大小的控制，是一項重要的課題，經由能更方便的調整彈簧螺絲組改變夾持力後，相信致動器的可靠度能大大提高，或許進而精進致動器速度、解析度。



## 六、參考文獻

- [1] G. Binnig, et al., "Atomic Force Microscope," *Physical Review Letters*, Vol. 56, 1986.
- [2] G. Binnig, H. Rohrer, C. Gerber, and E. Weibel, "Scanning Tunneling Microscope," *Physical Review Letters*, Vol. 56, pp.57-61, 1986.
- [3] D. W. Pohl, "Dynamic piezoelectric translation devices," *Review of Scientific Instruments*, vol. 58, pp. 54-57, 1987.
- [4] L. M. Eng, et al., "Inexpensive, reliable control electronics for stick-slip motion in air and ultrahigh vacuum," *American Institute of Physics*, Vol. 67, No. 2, pp. 401-405, February 1996.
- [5] E. Shamoto and T. Moriwaki, "Development of a walking drive ultraprecision positioner," vol.20, 1997
- [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] Jean-Marc Breguet, Reymontl Clavel, "Stick and Slip Actuators: design, control, performances and applications," *IEEE MicroMechatronics and human science*, pp. 89-95, 1998.
- [8] Chee Kian Lim, et al., "Piezo-on-Slider Type Linear Ultrasonic Motor for the Application of Positioning Stages," *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp 106-108, September19-23, 1999.
- [9] S. Kleindiek, et al., "Miniature three-axis micropositioner for scanning proximal probe and other applications," *American Vacuum Society*, B 13, pp. 2653-2656, Nov/Dec 1995.
- [10] 許溢适, "壓電陶瓷新技術," 文笙書局, 1993.
- [11] Ngoi Kok, et al., "A new linear piezoelectric motor with selflock feature," *Jpn. J. Appl. Phys*, Vol. 39 (2000) Pt. 2, No. 12B, pp. 1311-1313 November 6, 2000.
- [12] P. Ge and J. Musa, "Tracking control of a piezoceramic actuator," *Control Systems Technology*, IEEE Transactions on, vol.4, pp. 209-216, 1996.
- [13] S. Kuiper and G. Schitter, "Active damping of a piezoelectric tube scanner using self-sensing piezo actuation," *Mechatronics*, vol. 20, pp. 656-665, Sep.
- [14] M. Hunstig and T. Hemsel, "Drive Signals for Maximizing the Velocity of Piezoelectric Inertia Motors," *Journal of the Korean Physical Society*, vol. 57, pp. 938-941, Oct.
- [15] S. Salapaka, A. Sebastian, J. P. Cleveland, M. V. Salapaka, and A. C. C. Acc, "Design, identification and control of a fast nanopositioning device," in *Proceedings of the 2002 American Control Conference, Vols 1-6* New York:

Ieee, 2002, pp. 1966-1971.

- [16] W. Yu-Chi, C. Li-Kang, and H. Shao-Kang, "The Design and Characteristic Study of a 3-dimensional Piezoelectric Nano-positioner," in *SICE 2010 - 49th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan*, Taipei, Taiwan, pp. 3179-3183.
- [17] S. H. Chung and E. H. K. Fung, "A nonlinear finite element model of a piezoelectric tube actuator with hysteresis and creep," *Smart Materials and Structures*, vol. 19, pp. 045028 (19 pp.)-045028 (19 pp.), April.
- [18] P. J. Gawthrop, B. Bhikkaji, and S. O. R. Moheimani, "Physical-model-based control of a piezoelectric tube for nano-scale positioning applications," *Mechatronics*, vol. 20, pp. 74-84, February.
- [19] S. Mori, Y. Sato, A. Sakurada, A. Naganawa, Y. Shibuya, and G. Obinata, "Nano-Motion Stage for High-Speed and Precision Positioning on an X-Y Plane," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 45, pp. 4972-4978, Nov 2

