

行政院國家科學委員會

補助提升產業技術及人才培育研究計畫成果報告

工業用低頻壓電致動器驅動裝置設計

Drive Instrument Design for Industrial low Frequency Piezo-actuator

計畫編號：NSC91-2622-E-002-056-CC3

執行期限：91 年 12 月 1 日至 92 年 11 月 30 日

主持人：宋家驥 國立台灣大學 工程科學及海洋工程學系

一、中文摘要

利用壓電致動器在控制微小精密定位、振動抑制控制、輸送裝置 等等工業上的應用已經非常的普遍。本研究將透過壓電材料的基本特性，針對雙壓電晶體型 (Bimorph) 致動器作為驅動研究對象，理論分析先探討雙壓電晶體型 (bimorph) 致動器以了解其基本之運動特性。並設計該型致動器的驅動器，以得到致動器最大終端位移及最高能量轉換為設計原則。

關鍵詞：壓電致動器、壓電驅動裝置、雙壓電晶體。

二、理論分析

2.1 壓電材料基本特性

當機械力加入於一壓電材料時，材料兩端會伴隨著產生一個與應力大小成比例的電荷(或電壓)，當應力方向相反時，電荷的極性(亦即電壓的極性)亦會隨之而逆反，稱之正壓電效應如圖一所示，當一直流電場加入材料兩端時，材料的形變會隨著電場的大小改變，而當此電場的方向逆反時，材料的形變方向也隨之改變。當有一交流電場加入時，材料的形變方向會隨著電場的正及負半週作收縮及膨脹的交互變化，而當輸入的交流電場的頻率造成形變的幅度為最大時，即為材料本身的自然共振頻率 (natural resonance frequency)，稱之為逆壓電效應如圖二所示。

2.2 致動器運動特性[1]

本研究針對的壓電致動器運用對象為一壓電驅動式輸送系統如圖三，其驅動源為兩組雙壓電晶體 (bimorph) 制動器，在各致動器上端搭配剛度較低的撓性板組合成振動板。各振動板之固定端以下傾角連結板固定於系統基座上，而其自由端則以上傾角連結板與輸送道結合。傾角連結板可使輸送軌道做前後及上下的往覆運動，如圖四為系統中其中一片 Bimorph 致動器與撓性板組合示意圖。

壓電驅動式 bimorph 驅動元件使用 31 方向之壓電陶瓷片如圖五，假設位移僅為軸向(1 方向)位置的函數，則可視為三層複合板結構之純彎曲問題來解。而其左端為固定端，右端為自由端。外加之 DC 電壓使各壓電陶瓷片在厚度方向(3 方向)出現電位差 V 。當樑結構發生純彎曲變形後，其中心軸之曲率半徑為 r ，則

$$l = r\phi \quad (1)$$

其中 l 為 bimorph 本體的總長
如果在 Bimorph 致動器外加一電壓 V 後，其軸向應變為

$$\delta_1 = \frac{d_{31}V}{t_{pz1}} \quad (2)$$

其中， δ_1 為 bimorph 結構之軸向應變， d_{31} 為壓電陶瓷片之 31 方向壓電常數， t_{pz1} 為壓電陶瓷片厚度。

則由式 (1) 及式 (2)，可得於

$$X_2 = t_{pz} + \frac{t_b}{2} \text{ 之軸向應為}$$

$$\delta_1 = \frac{\left[r + \left(t_{pz} + \frac{t_b}{2} \right) \right] \phi - r\phi}{r\phi} \quad (3)$$

其中 t_b 為中間金屬板厚度

再由式(2)及式(3)，可得彎曲時中心軸之曲率半徑 r 及形成之弦角 ϕ 分別如下：

$$r = \frac{\left(t_{pz} + \frac{t_b}{2} \right) t_{pz}}{d_{31}V} \quad (4)$$

$$\phi = \frac{d_{31}Vl}{\left(t_{pz} + \frac{t_b}{2} \right) t_{pz}} \quad (5)$$

考慮端點之撓度 u_3 ，則由式(4)及式(5)可求得

$$u_3 = r(1 - \cos \phi) = \frac{\left(t_{pz} + \frac{t_b}{2} \right) t_{pz}}{d_{31}V} \left(1 - \cos \left[\frac{d_{31}Vl}{\left(t_{pz} + \frac{t_b}{2} \right) t_{pz}} \right] \right) \quad (6)$$

由式(6)，可得到靜態下忽略壓電遲滯效應(hysteresis effect)時壓電驅動型 bimorph 驅動器受外加電壓 V 之自由端位移。

2.3 驅動電路

(a) 激發訊號：

當給予 Bimorph 致動器一個固定的電壓，我們從前一節的分析知道 Bimorph 致動器將會有某單一方向形變如圖六所示，同理當我們給同值反向電壓時，Bimorph 致動器則會產生反方向的形變，因此，在選擇驅動訊號上，如選用弦波訊號來驅動 Bimorph 致動器，則端點位移為脈衝訊號的雙倍。並且省卻考慮脈衝訊號發射週期的問題。

方形波係由多個不同頻率的訊號所組成，而弦波訊號則為單一頻率訊號，因此藉由調控帶通濾波器(Bandpass filter)將不合適的頻率去除即可得到所需的弦波訊號，所以本研究將採用 50% 方形波訊號濾波成弦波訊號的方式來取得[3]。

在現實中有多種電路可以震盪出方形波，在本研究中的方形波則是利用 555I.C. 震盪出非 50% duty cycle 的方形波如圖七[4]，再利用正反器(Flip Flop)時間延遲的特性整合出所需的方形波[5]，其好處是這兩

種 I.C 係屬於常見使用，不但取得來源相當廣泛，價格上也普遍低廉，對於壓低成本(cost down)有實際的幫助，並且在架構上也相當的精簡

(b) 等效電路

在擇定了驅動訊號後，要考慮的就是能量轉換的效率，Bimorph 致動器做為一個壓電換能器(電能轉換為機械能)，其等效電路可以由圖八所示的電路來模擬[2]，其中 c 代表的是壓電材料的靜電容， R 代表壓電材質振動的摩擦與被驅動體相結合而成的負載；在共振狀態下，借由串聯諧振的理論[6]，可以將圖九中 C_0 與 L 所形成的阻抗視為零，因此我們可以將其等效電路簡化成如圖八所示，由電路理論來看，電容本身會儲存能量，並不做功，唯有電阻才會將輸入的能量消耗做功，因此從等效電路電容與電阻並聯的狀況，如果容抗(Z_C)遠小於電阻(Z_R)，那麼等效電路中的電容將處於一個主導的地位，也就是說大多數的電流將往電容流入，造成實際的輸出做功不大，也就是說 Bimorph 致動器與整體輸送系統將呈現能量轉換低落的現象；此時需要將增加電容部分轉換成阻抗無限大，使效率提昇，反之則不用。

基於此，我們必須量測其整體阻抗值(Z_t)與其相位(θ)以計算出 Z_C 、 Z_R 來決定相關元件的設計。相關推導公式如下：

$$Z_t = \frac{1}{j\omega C + \frac{1}{R}} = (\text{real}) + j(\text{image}) = Z_R + jZ_C$$

其中

$$Z_R = Z_t \cos(\theta), \quad Z_C = Z_t \sin(\theta)$$

C : 電容值 R : 電阻值 為欲求的數值

將 Z_t 取倒數 得 Y_t

$$Y_t = \frac{1}{Z_R + jZ_C} = j\omega C + \frac{1}{R}$$

因為 Z_R 、 Z_C 為已知數，借由分母的實部化，可以將 Y_t 明確分為實部與虛部。藉由實部與虛部的分別，可以分別得到 C 、 R 的值。

(c) 偏壓(offset)機制

另外當驅動訊號加入一個偏壓，

Bimorph 致動器將呈現變形振幅相同,但是非對稱的形變,這種模式的運動狀態是否能提昇輸送速度,仍待研究,因此本研究將提供一個偏壓功能,驅動訊號與偏壓的架構如圖十所示。

偏壓的機制是要將直流電壓加在致動器上,但也要避免對激發訊號的影響;在圖十中的 C1 可以阻擋直流偏壓的通過,避免造成訊號端的破壞;同樣地,也要避免訊號對直流供應端造成影響,因此提供一個電阻可以避免因為短路造成弦波訊號全數通往直流供應端,並藉由電容 C2 將部分通往直流供應端的弦波訊號導掉。

另外在弦波產生後,會經過一個功率放大器(Power Amp.)的放大才進入圖十的架構,為了避免突發的雜訊經過功率放大器的放大後影響弦波形成非預期的偏壓狀態,加入一個電容 C3 過濾。

(d)直流的供應

目前直接由台電所接受的電源為頻率 60HZ 的交流電源,如果說要自行製作一個發電機產生適用的直流電,顯然是頗為麻煩且成本較高,另外採用交流電整流的方式,將很容易取得的交流電,轉換成所需的直流電係另一較可考量的方案,在圖十一中,明確的指出交流變換成直流的過程。

三、結果與討論

依據上述研究方法,首先就針對 Bimorph 致動器的運動特性與阻抗量測結果進行分析如下:

3.1 Bimorph 致動器的運動特性

由式(6)經數值計算後可繪出圖十二,由圖中趨勢可看出驅動電壓與 Bimorph 致動器自由端變位 約成一個線性的關係。這與壓電材料的基本理論性質(圖十三)相同。因此明白指出藉由控制驅動訊號的大小可以明確的掌握端點變位。

3.2 阻抗量測

經由 hp4192A 阻抗分析儀對整個被驅動系統的阻抗量測可以繪出被驅動系統隨頻率的增加阻抗的變化情形,圖十四是依據量測出的數據所繪製,由圖十四可以看出阻抗隨著頻率的增加而漸次減小,就物理現象來看當壓電材料產生形變時,表面是充斥著電荷,在 Bimorph 致動器而言,就如同電容一般,從容抗的公式 $X_C = 1 / j\omega C$

來看,當頻率越高時,容抗將自然的越來越低,所以在量測上所顯示的趨勢是沒有問題的。

另外,從圖十四上,可以看到一個明顯的震盪,那麼可以讓我們找出共振點位於 46Hz,該頻率的決定將有助於驅動電路的設計。此外,如前所述,就低頻而言,所以造成的現象就是阻抗相對的就大,由圖十四看出,在共振點上阻抗達到 100k 歐姆,而阻抗大,所造成的電流就小,因此所消耗的功率也就相對的小。

在阻抗量測的同時,也一併得知了相位,相位的情況就頗為平穩,幾乎沒有什麼變化,並且集中接近負 90 度,這說明了 Bimorph 致動器幾乎在每一個頻率下都呈現了電容的特性,第一這再次印正了之前的分析,第二這造成能量幾乎無法轉換的問題。因此在電路的設計看似免不了要做諧調(tune)的功能。

3.3 諧調(tune)功能的取舍

依據第二節所提到的計算方式可以計算出 $Z_C=98.8K$ 歐姆, $Z_R=1.4M$ 歐姆,因此多數的電流要流入等效電路的電容,形成能量難以轉換,此時等效電路的電容值為 35nf,如果給於諧調(tune)使其並聯共振時為阻抗無限大[6],所需要的電感值超過 300H,若真的實現,將造成驅動器體積相當的大,成本也大幅度的暴增,在原本功率消耗就不大的因素下,因此在最後的設計中,選擇捨棄了此項功能,以符合低成本製造的原則。

3.4 直流的取得:

利用上一節所提及的轉換流程來作為直流的取得,在這裡因為是要取得數百伏特的高電壓,因此在變壓器的部分係採用升壓的方式,將市電轉換成更高壓,因此需採用特殊規格的變壓器,以達耐高壓的性質,無法自市面量產規格選購。

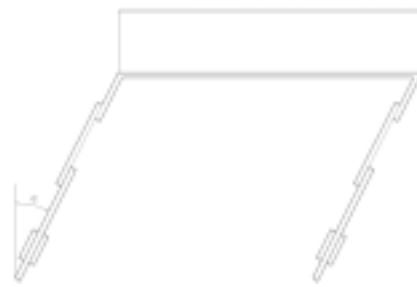
在整流部分,選定耐 800Vdc 的橋氏整流 I.C. 並加上耐高壓的 AC 啟動電容一併達成濾波功能,可以得到一帶有漣波(ripple)的直流,依照圖十一的流程,需要一穩壓電路來達成較完整性的直流;但是因為普遍取得的穩壓零件多運用於低電壓(十幾伏特),所以如要硬要採用特殊規格零件,勢必暴增成本,不過由於所取得直流係數

百伏特等級，漣波相對應起來就顯的微小，影響可在容許範圍，因此在穩壓這部分可以不去考量。

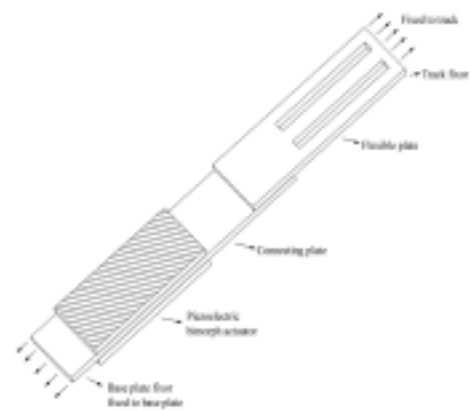
3.5 濾波結果與討論

如前所述，所需的驅動訊號將由方形波經濾波後取得，在圖十五中呈現的是所設計的低通濾波器的頻譜，而圖十六則是方形波經過濾波後與濾波前的的頻譜比較，從圖十六可以觀察到原本有無限個頻率的方形波已經被大幅濾波剩下有限個頻率。

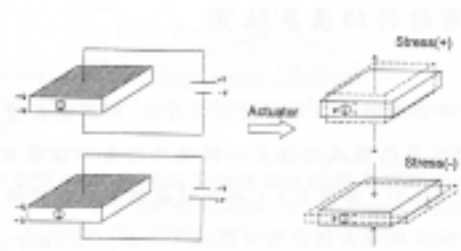
因為此時的波形仍由數個不同頻率所組成，所以驅動訊號並沒有呈現一個純粹的弦波訊號，這是採用低通濾波器所會呈現的缺失，但是這產生的訊號在驅動致動器前會在透過功率放大器的放大，這些非主頻的部分會因為雜訊的影響而更小，在經放大器呈現後，對於主頻的影響，更顯微不足道，因此捨棄較為複雜昂貴的帶通濾波器的設計。



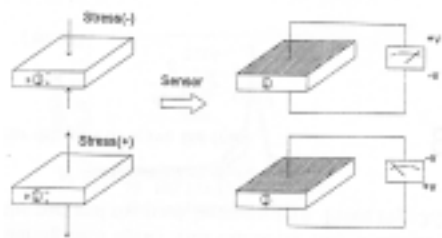
圖三振動板與輸送道組合示意圖



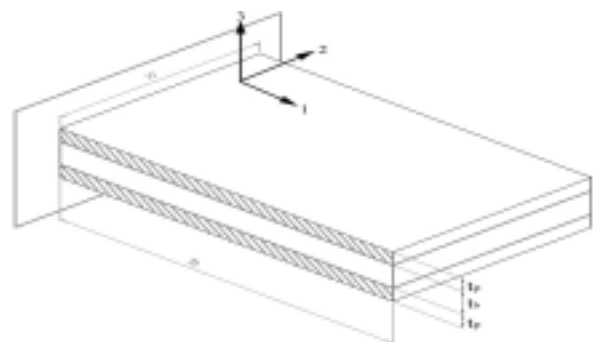
圖四 Bimorph 致動器與撓性板組合示意圖



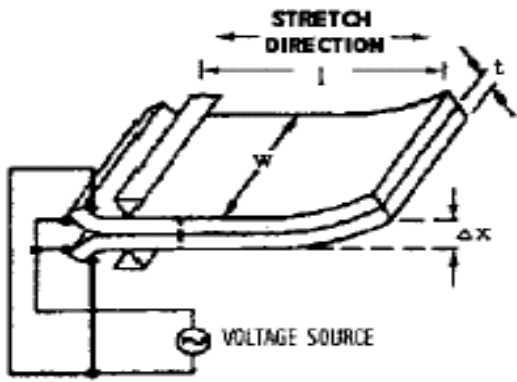
圖一 正壓電效應



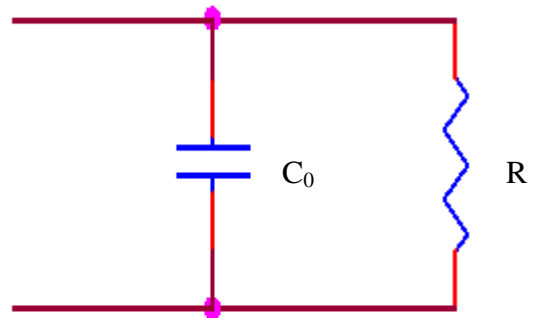
圖二 逆壓電效應



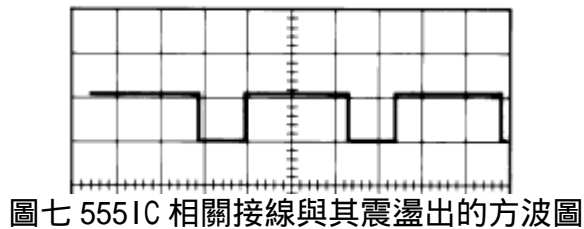
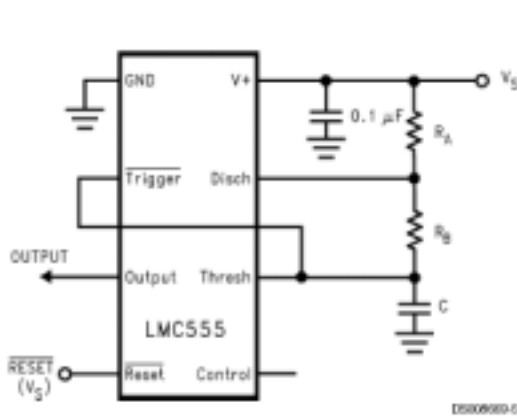
圖五 Bimorph 致動器之複合結構



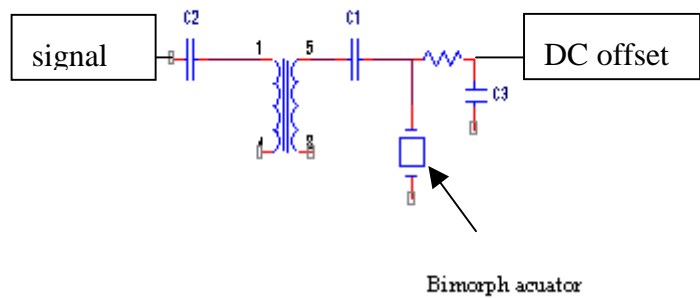
圖六 Bimorph 致動器形變圖



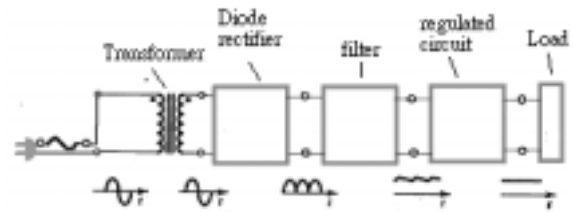
圖九壓電致動器在共振時等效電路



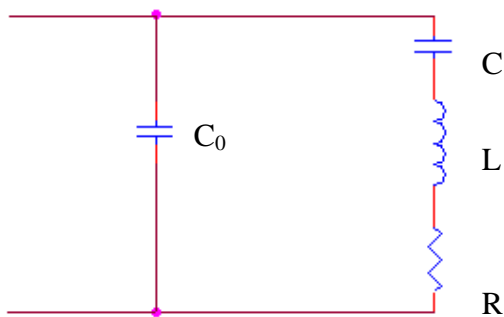
圖七 555 IC 相關接線與其震盪出的方波圖



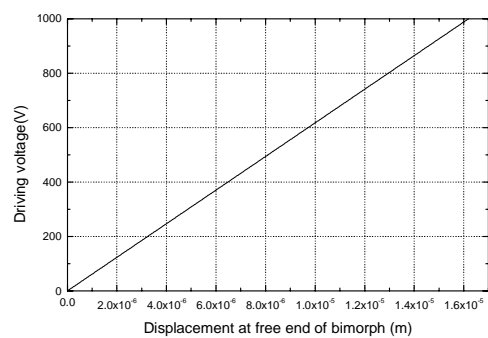
圖十 驅動訊號與直流偏壓連接架構



圖十一 取得直流電壓的流程圖

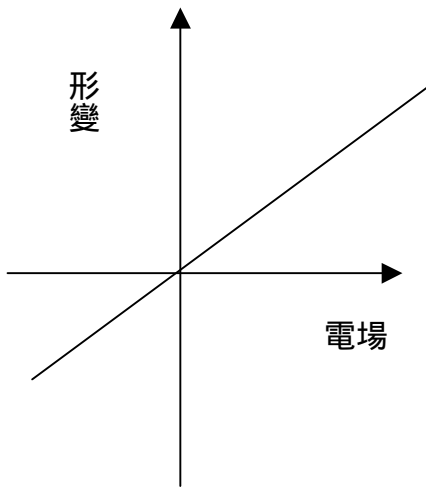


圖八壓電致動器的等效電路

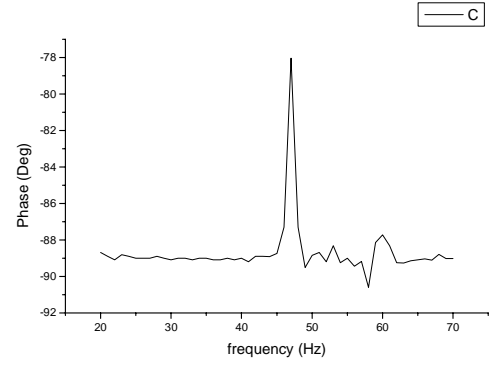


圖十二 Bimorph 致動器驅動電壓

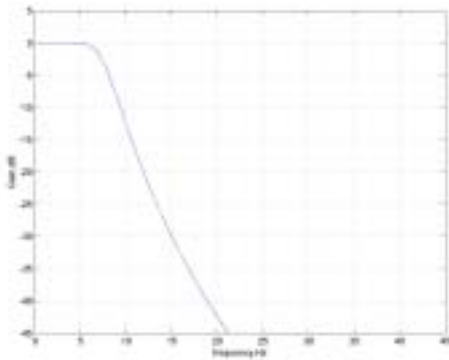
與靜態自由端位移關係圖



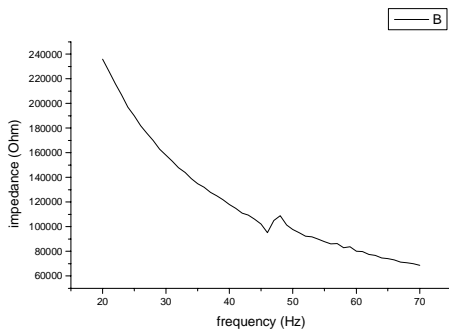
圖十三壓電材料形變與電場的關係圖



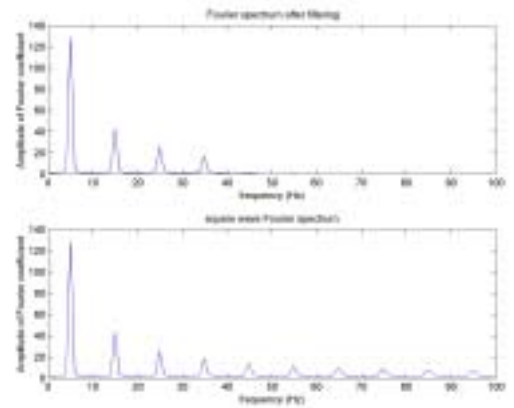
圖十五 被驅動體相位與頻率關係圖



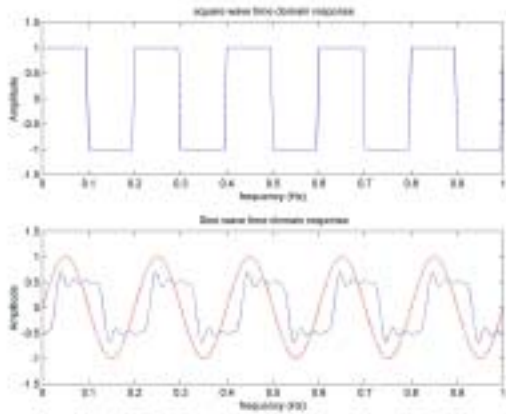
圖十五 低通濾波器



圖十四阻抗趨勢圖



圖十六方波濾波前後的頻譜比較



圖十七濾波後的波型與純弦波的比較

四、結論

本研究針對 Bimorph 致動器所具有的特性進行分析之後，設計出合適的驅動電路，但對於能量效率轉換的焦點上，在耗能的大小與驅動器成本高低的取捨之間，未能達成高能量轉換的標的，原因出於整體被驅動體有著先天上的物理特性限制。

由於壓電致動器本身的物理性質，關切的驅動電路的設計難度，因此未來在壓電致動器與驅動電路的機電整合之間最佳化取捨，仍有研究發展空間。

誌謝

本研究感謝國科會計劃編號 NSC91-2622-E-002-056-CC3 及聲博科技的經費贊助，得以完成。

參考文獻

1. 楊庭璋,壓電驅動振動式輸送裝置之設計與研究,碩士論文,台灣大學機械工程研究所(1998)
2. 吳朗, '電子陶瓷 – 壓電' 全欣科技,1994
3. Sedra Smith, “Microelectronic circuit”,Oxford,1998.
4. “LMC555 COMS Timer datasheet” National Semiconductor, March,2002
5. “MC14013B Dual Type D Flip-Flop datasheet”, On Semiconductor, Aug.,2000
6. Tony R. Kuphaldt, “Lessons In Electric