

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

## 子計畫一：微影步進機之 IDM 定位機構動力模型分析與最佳 控制(I)

計畫類別：整合型計畫

計畫編號：NSC92-2212-E-009-024-

執行期間：92年08月01日至93年07月31日

執行單位：國立交通大學機械工程研究所

計畫主持人：成維華

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 93 年 11 月 24 日

# 行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

子計劃一：微影步進機之 IDM 定位機構動力模型分析與最佳控制

計畫類別：個別型計畫      整合型計畫

計畫編號：NSC 92-2212-E-009-024-

執行期間： 92 年 8 月 1 日至 93 年 7 月 31 日

計畫主持人：成維華

共同主持人：

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

執行單位：國立交通大學機械工程學系

中 華 民 國 93 年 9 月 30 日

# 行政院國家科學委員會專題研究計畫年度報告

## 自動化學門專題計畫

### (Development of an Automatic)

計畫編號: NSC92-2212-E-009-024

執行期限: 92年8月1日至93年7月31日

主持人: 成維華 交通大學機械工程學系

Email: [whc@cc.nctu.edu.tw](mailto:whc@cc.nctu.edu.tw)

研究人員: 張國樑、陳立明

#### 一、中文摘要

本計畫主要考慮衝量致動器機構 IDM (Impact Drive Mechanism) 振動行為進行研究, IDM 之原理係利用物體之慣性與摩擦力間產生次微米步進運動, 利用 Pro/E 建立壓電致動器及 IDM 機構之 3D 模型, 結合 NASTRAN 及 PATRAN 軟體進行有限元素法分析, 以期獲得此致動器及機構振動模態, 進而分析其對步進解析度 (Resolution) 之影響。

關鍵詞: 壓電元件 PZT、FEM 有限元素分析、衝量致動機構

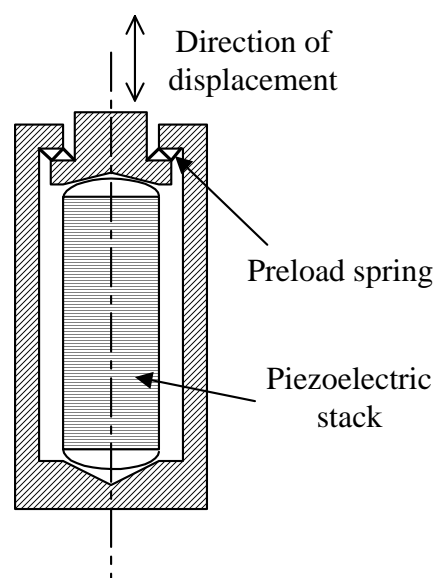
#### Abstract

In this project, Impact Drive Mechanism (IDM) vibration behavior will be taken into account. The principle of IDM is to move in sub-micrometer stepping utilizing the inertia of mass and the friction between mass and surface. An IDM mechanism Pro/E 3D model and vibration mode are constructed, and the influence of vibration dynamics for stepping resolution is analyzed by FEM method via NASTRAN and PATRAN software simulations.

**Keywords :** PZT, FEM, Impact Drive Mechanism

#### 二、計畫原由與目的

本研究先期著眼在利用有限元素法 FEM 分析壓電致動器如圖一所示:



圖一、壓電致動器構造圖

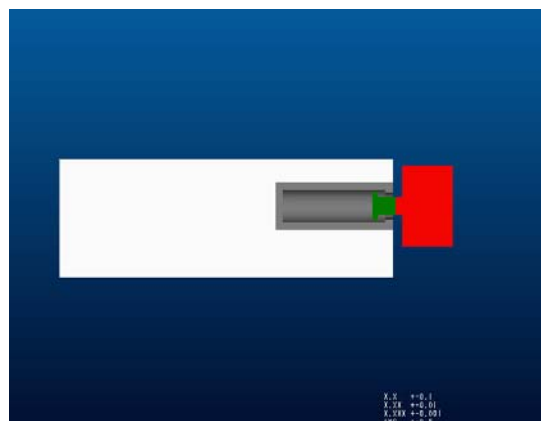
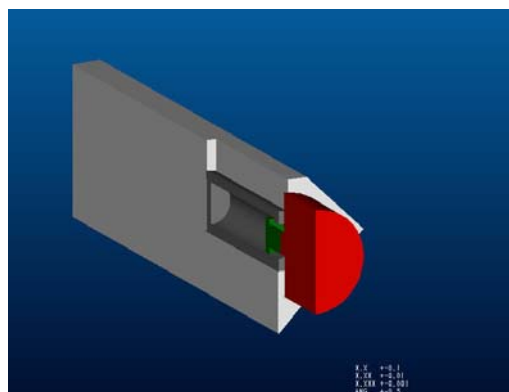
利用壓電陶瓷具有次微米變形量、高頻率響應、高輸出功率及低耗能的特性, 在精密定位高規格需求下, 各元件的設計與製造, 都必須有周延的分析與設計, 才有可能提昇其精度。IDM 機構的驅動元件-壓電致動器就成為重要探討的元件。首先本研究希望深

入了解現有商品壓電致動器的構造，探討壓電材質在伸展收縮時與螺絲結合孔座間產生之碰撞問題。另外螺絲結合孔座與外罩(Housing)是以一彈簧(Preload-spring)結合，當負載Counter-mass(紅色方塊)加入時會有彎曲力量作用於彈簧上，如此在運動時，所造成動態效應與伸展收縮方向耦合的振動問題，從有限元素分析中了解其結構自然頻率、振動模態及暫態響應等。本計劃利用 Pro/E 建立 3D model，並將模型提供至 PATRAN( Pre-process)軟體建立格點(Mesh)，根據所提供的邊界條件及負載，將結果提供至 NASTRAN(Solver)，得到自然頻率(Nature Frequency)及振動模態(Mode Shape)，最後結果再送至 PATRAN( Post-process)將結果動態顯示。如此可了解壓電致動器的振動模式，是否會影響步進精度[2]。

### 三、研究方法

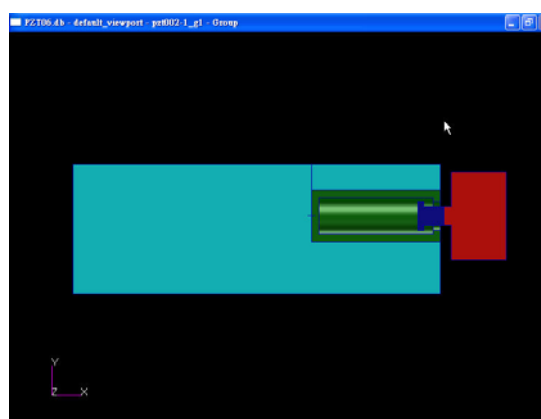
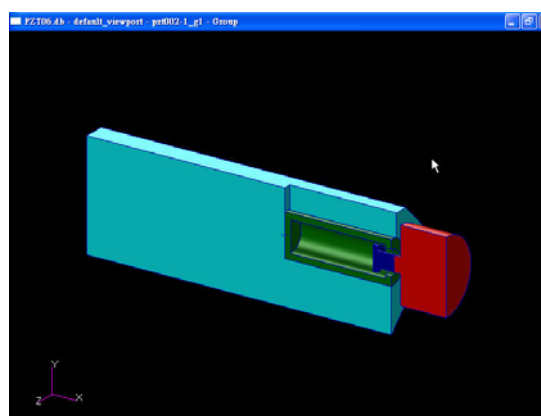
#### 1、模型建立

首先利用 CAD 軟體 Pro-Engineer 建立壓電致動器模組的幾何外型，由於致動器模組為對稱外型，故為了簡化計算及便於觀察，幾何模型以中間對稱面建立二分之一外型，其 Pro/E 模型如圖二所示：



圖二、Pro-Engineer model

幾何外型建立完成後，便透過 MSC Patran 的 ProE 介面，將幾何外型匯入 MSC Patran 中，以便於建立有限元素模型，進而透過 MSC Nastran 進行有限元素的分析計算，匯入 Patran 的幾何模型如圖三所示：

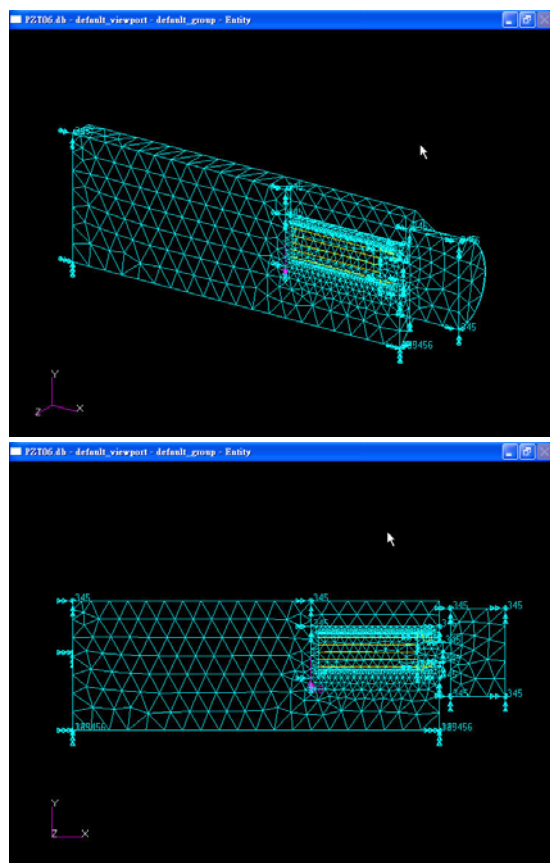


圖三、MSC Patran model

#### 2、網格化

幾何模型分為四個 groups，分別為致動器外罩、致動器前端座、鐵弗

龍底座及鐵弗龍質量塊，分別透過 Patran 網格化建立有限元素模型，因為匯入的幾何為不規則實體，故以正四面體實體元素模擬 (Tet4 Solid element)，而致動器內的環形彈簧及壓電致動器本身則以一維的彈簧阻尼元素模擬 (1D Spring Damper element)，其有限元素模型如圖四所示：



圖四、FEM model

### 3、邊界條件

在模型邊界條件的設定上，假設鐵弗龍底座與軌道的接觸斜面為固定面，也就是設定為固定端 (Fix end)，對 XYZ 三軸的移動及轉動自由度皆為零。而 XY 平面為對稱面，故在所有位於對稱面上的元素設定為 XY 平面對稱，也就是對 Z 軸的移動自由度及對 XY 軸的轉動自由度為零。

### 4、材料參數與元素特性[3]

在材料參數方面：

**致動器外罩與致動器前端座**

$$E = 2.1 \times 10^{11} \text{ Pa} \quad \text{楊氏係數}$$

$$\nu = 0.3 \quad \text{蒲松比}$$

$$\rho = 7850 \text{ kg/m}^3 \quad \text{密度}$$

**鐵弗龍底座及鐵弗龍質量塊**

$$E = 1.4 \times 10^9 \text{ Pa} \quad \text{楊氏係數}$$

$$\nu = 0.4 \quad \text{蒲松比}$$

$$\rho = 1400 \text{ kg/m}^3 \quad \text{密度}$$

彈簧阻尼元素特性方面：

**環形彈簧**

$$k = 2.572 \times 10^9 \text{ N/m} \quad \text{彈性係數}$$

**壓電致動器**

$$k = 6 \times 10^6 \text{ N/m} \quad \text{彈性係數}$$

$$c = 1.5 \times 10^2 \text{ N-s/m} \quad \text{阻尼係數}$$

### 5、模態分析

對建立的有限元素模型進行模態分析，進而求出其自然頻率及模態形狀，以便於瞭解此結構物的振動特性。

## 四、結論與成果

經進行軟體分析得此機構之模態形狀及自然頻率，其中前五個自然頻率分別為

Mode 1 845.2Hz 如圖五所示

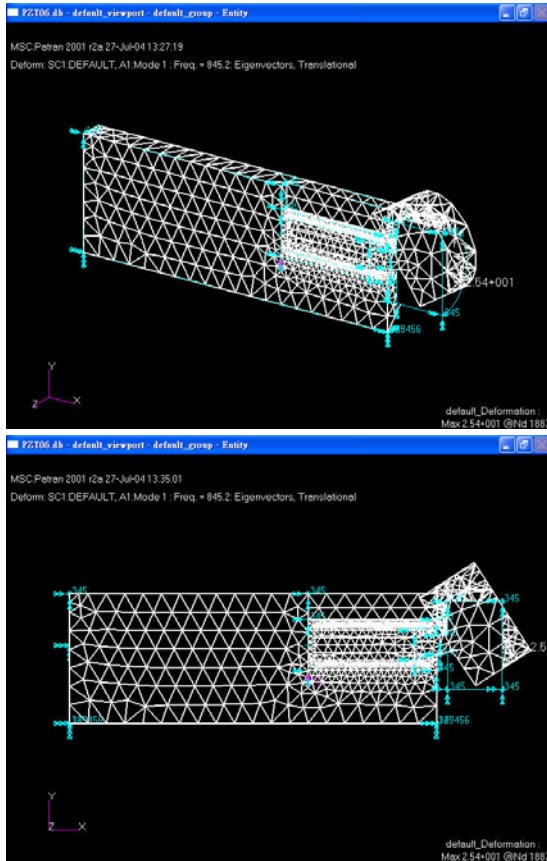
Mode 2 4269.3Hz

Mode 3 5151.9Hz

Mode 4 6754.6Hz

Mode 5 7509.3Hz

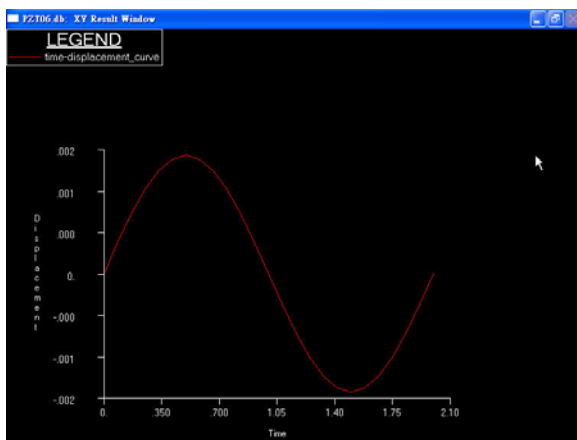
結果為 5K Hz 以下的頻率，其模態大多屬於致動器前端座與鐵弗龍質量塊藉由環形彈簧及壓電致動器的彈簧阻尼效應作用下的振動模態，而 5K Hz 以上則屬於高頻的結構局部模態，故壓電致動器的理想激發頻域因位於 500 至 5000Hz 之間。



圖五、振動模態 Mode 1 845.2Hz

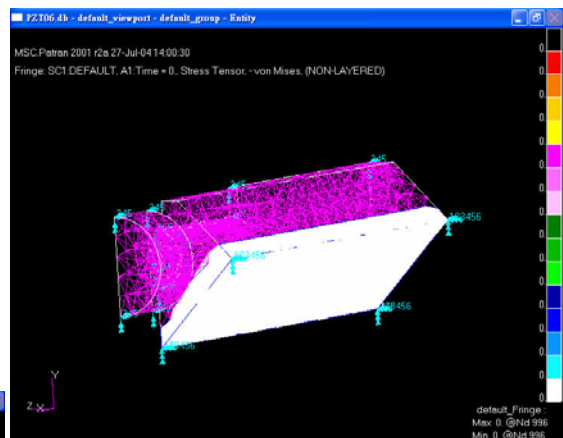
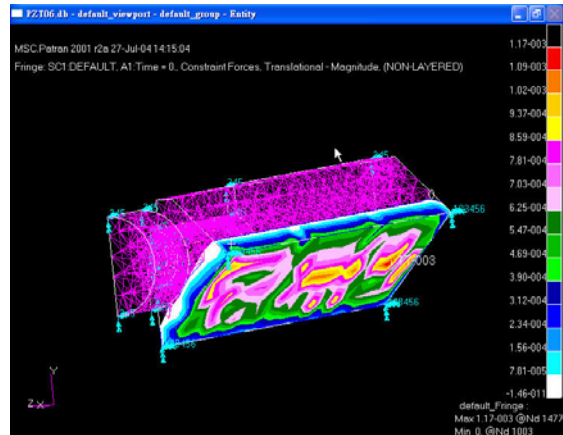
### 1、暫態分析

對所建立的有限元素模型進行暫態分析，分析時間為 2 秒，作用外力為對致動器前端座後端面施以強制位移，且此位移為正弦函數如圖五所示。  
Case 1：外力頻率 0.5Hz（週期 2 秒）

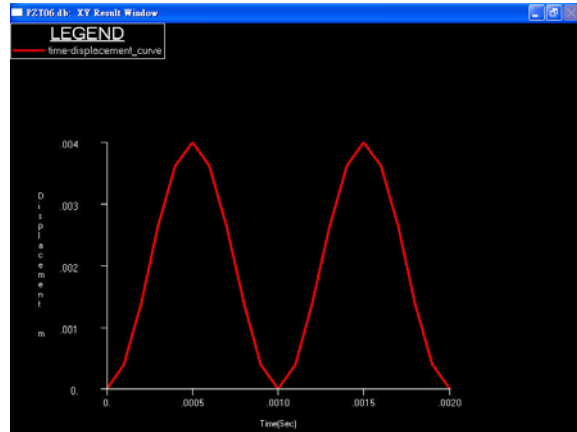
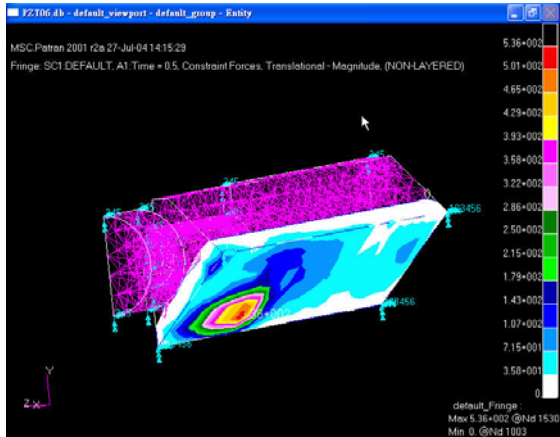


圖五、輸入壓電致動器位移經過 MSC Nastran 計算後，擷取

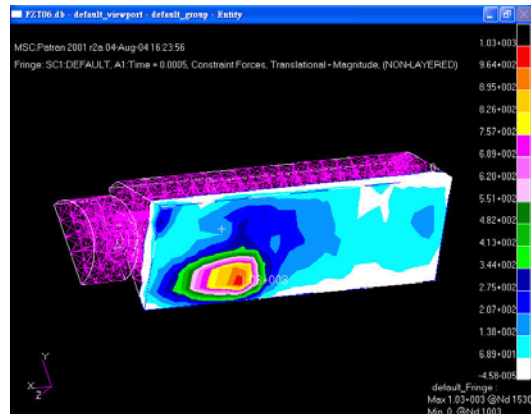
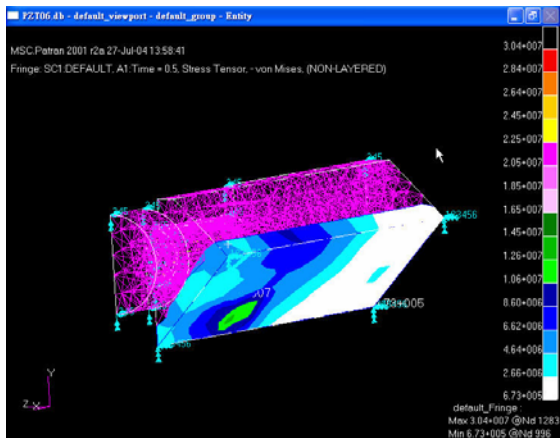
鐵弗龍底座與軌道接觸的底面元素作為觀察的目標，觀察此一致動器模組在致動器內部有振動行為發生時，振動經過傳遞在鐵弗龍底座與軌道接觸的底面元素上的分佈情形。分別擷取觀察目標在時間為 0、0.5 秒時的束制力分佈及元素應力分佈狀況，結果如圖六、七所示：



圖六、時間 T=0.0 sec Constraint Force 及 Stress Tensor



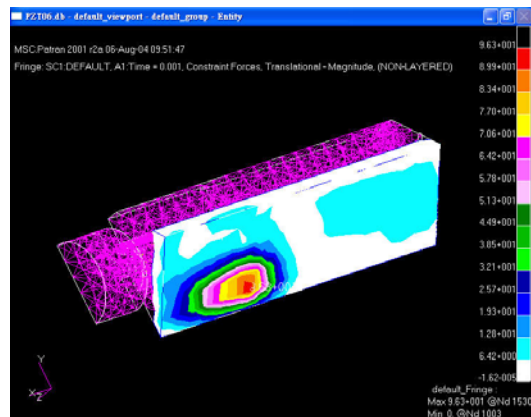
圖八、Input Sinewave 1000Hz



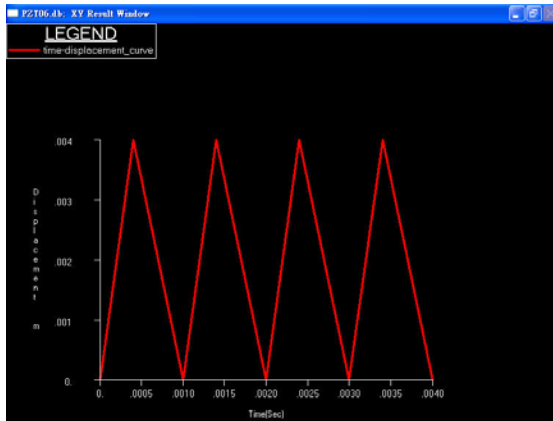
圖九、時間 T=0.0005 sec Constraint Force

圖七、時間 T=0.5 sec Constraint Force 及 Stress Tensor

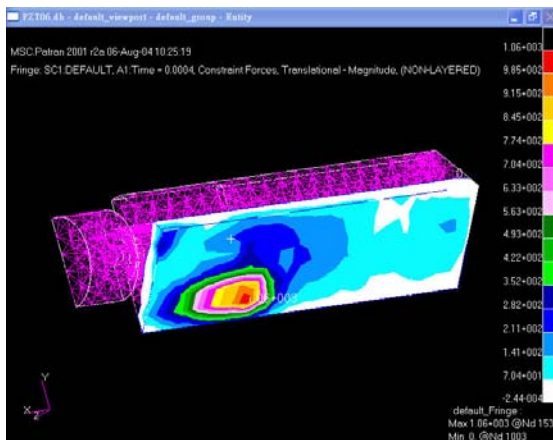
Case 2：分析輸入頻率為 1000Hz Sinewave 圖形如圖八所示，圖九為在波峰(0.0005sec)及波谷(0.001sec)，機構與導軌接觸面之 Constraint force 分佈情形。接近波峰位置時，Constraint force 及 Stress Tensor 在特定一個 element 出現最大，Constraint force 最大值與最小值差異可達 2 個 order，Stress Tensor 最大值與最小值差異可達 1 個 order，在波谷時 Constraint force 及 Stress Tensor 則恢復均勻分佈，與上一個分析現象相似。從時間軸變化觀察，其 Constraint force 及 Stress Tensor 會逐漸增加並在波峰時最大，然後逐漸減少在波谷出現最小值。如此周期性出現。



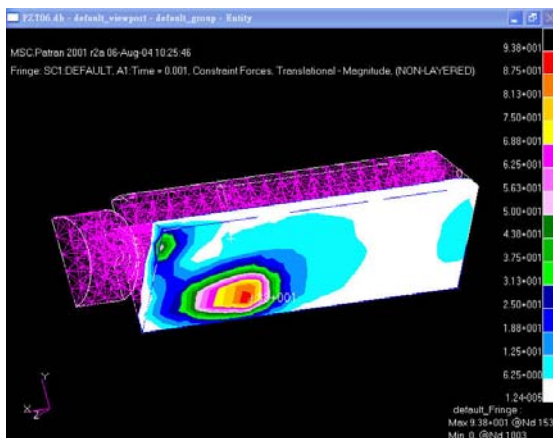
圖十、T=0.001sec Constraint Force  
Case 3：將輸入頻率改為 1000Hz 鋸齒波如圖十一所示，圖十二及十三分別為在波峰及波谷，機構與導軌接觸面之 Constraint force 分佈情形。結果與 Sinewave 結果相似。



圖十一、Input Sawwave 1000Hz



圖十二、T=0.0004sec Constraint Force



圖十三、T=0.001sec Constraint Force

經由動態分析結果可以看出壓電致動器在強制位移外力的作用下，產生前後方向的往復振動行為，因而使振動力藉由結構本身傳遞至鐵弗龍底座，觀察其在鐵弗龍底座與軌道接觸

面的元素束制力及應力分佈，極值皆出現在鄰近致動器的位置固定一位置，且在壓電致動器位移最大時，底座表面力量也分佈最不公平，故會產生力量不平衡的集中現象，由此可知其對軌道接觸面摩擦力所產生的正向力亦不公平。

在輸入位移頻率為 845.2Hz，結果對極值的差異有些許提升約為  $5.42 \times 10^2 \text{ N}$ ，與 0.5Hz 的結果之極值  $5.36 \times 10^2 \text{ N}$  比較並無顯著改變，原因為第一個模態為鐵弗龍質量塊的上下擺動模態，與輸入位移的前後擺動並非相對應模態，故其放大效應結果較不顯著。因此可針對前後擺動的相對應模態加以計算，其極值差異的放大效果將較為明顯。

另外分別比較 1000Hz 之 Sine 波及鋸齒波的現象。其結果極為類似，分別會在波峰(壓電致動器位移最大)出現最大值，然後在波谷(壓電致動器位移回到原點)恢復均勻分佈，如此週而復始變化。

從電腦模擬結果可觀察出壓電致動器機構本身振動行為確實會與導軌間發生相對運動，所以兩者間的摩擦力變化將是一個複雜的問題，未來將繼續建立更精確之模型來分析機構的動態行為，並以實驗來驗證模擬結果。

## 五、參考文獻

- [1] T. Higuchi, Y. Yamagata, K. Furutani, and K. Kudoh, "Precise Positioning Mechanism Utilizing Rapid Deformations of Piezoelectric Elements", IEEE Micro Electro Mechanical System, pp. 222-226, 1990.



- [2] Han J.M.T.A. Adriaens, Willem L. de Koning, and Reinder Banning, "Modeling Piezoelectric Actuators", IEEE/ASME Transactions On Mechatronics, Vol 5, No.4, December 2000.
- [3] M. Goldfarb, N. Celanovic, "A Lumped Parameter Electromechanical Model for Describing the Nonlinear Behavior of Piezoelectric Actuators", Transactions of the ASME, Vol. 119, September 1997.