

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

六自由度超精密奈米定位平台研製(2/2)

Design and Study a Six Degree-of-freedom Nanometer Resolution

Micro-Positioning Stage (2/2)

計畫編號：NSC 90-2212-E-198 002-198

執行期限：89年08月01日至91年07月31日

主持人：張所銘 國立台灣大學機械工程學研究所

一、中文摘要

本文研製出一並聯式六自由度微動平台，首先找出合適的六自由度並聯式機構，研究其運動學特性，採用撓性鉸鍊將此機構微型化，然後經由精密線放電加工將此機構實體化，使用積層式壓電致動器驅動。在設計分析時，建立參數化之實體化模型與有限元素模型，並模擬平台之靜態與動態特性，在考量整體之體積最小，並同時考慮加工可行性等要求，設計出最佳之並聯式六自由度奈米定位平台。完成之平台以雷射干涉儀，及個人電腦加以整合，測試其性能，包括靜態與動態性能，運動精度及共振頻率等。

所設計之奈米定位平台各軸具有最大移動行程 $8\ \mu\text{m}$ 與 $8\ \text{nm}$ 解析度，最大旋轉行程 $200\ \mu\text{rad}$ ，各軸間干涉量小於 5%。

關鍵詞：奈米定位平台、並聯式六自由度機構、積層式壓電致動器

Abstract

A parallel six degrees-of-freedom (6-dof) nano-positioning stage were designed, fabricated, and tested. Firstly a parallel 6-dof mechanism was searched and analyzed. Using flexure hinges and wire electric discharge machining to substantiation the mechanism. The stage was driven by multilayer PZT. Solid model system CAD and finite element analysis CAE were chosen to design and analyze the performance of the stage. Take the simulated results to optimally design the dimensions of the flexibility structures. Laser interferometer and PC were combined to measure the performance of the system including the static and dynamic characteristics, resonance frequency. The nano-positioning stage has maximum $8\ \mu\text{m}$ translation range, $8\ \text{nm}$ resolution, and maximum $200\ \mu\text{rad}$ rotation range. Axis interferences are less than 5%.

Keywords: nano-positioning stage, parallel six degrees-of-freedom mechanism, piezoelectric actuator

二、前言

二十一世紀將會是「奈米科技」的一個重大發展的世紀，其中在 2002 年~2007 年要推動五年期國家型奈米科技研究計畫，要完成一個世界級的奈

米科技研發與擴散的環境，其中奈米定位平台是奈米技術發展的關鍵與基礎，因為具有微米級甚至於釐米級的運動範圍與奈米級甚至於次奈米級解析度的奈米操作平台是製造奈米元件、量測奈米尺寸與運轉奈米機器的關鍵技術，例如在半導體工程的曝光製程、微機電工程的深蝕刻製程、光電通訊工程的光纖自動組裝技術、電腦周邊工程的高密度資料存取技術與掃瞄探針顯微鏡的探針掃瞄機構，皆需要利用奈米定位技術。綜合以上所述，必須建立國內奈米操作平台的研發與製造技術，研製具高可靠性、大操作範圍、高解析度與高操作頻寬的奈米操作平台，以提昇國內產、學、研的競爭力。

由於壓電材料具有體積小、反應快、機電轉換效率高、生熱少且具理論上無限的解析度，常用於奈米操作平台的致動器。

有關並聯式微定位平台的相關研究，在 1997 年，Merkle[1]討論了數種可達六自由度運動之機構，這些機構在使用上各有優缺點，考量不同的狀況，可以採用不同設計的六自由度機構。同年，瑞士科技聯邦機構，Clavel[2]等人提出設計並聯式微機械人的設計原則與應用實例，並提供數種將機構以撓性鉸鍊微型化的形式，可以作為本文設計微型化機構的參考。在 1999 年張與李[3-4]利用機構拓撲學的方法設計一並聯式三自由度 $XY\theta_z$ 奈米定位平台，具有最大位移行程 $10\ \mu\text{m}$ 與旋轉角度 $300\ \mu\text{rad}$ 。同年，劉與李[5]等人，設計相同之三自由度奈米定位平台，但利用復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。自 1996 年起，日本通產省的工業技術院發展以並聯式三自由度奈米定位平台組成的二指機器人[6]，模擬人使用筷子的動作，用來夾取微米級尺寸以下的東西並移動此物件。

三、機構設計與分析

自從西元 1965 年 Gough 與 Stewart 發表一並聯式六自由度機構後，因為並聯式機構的封閉回路較串聯式機構的開放回路剛性較高、負載能力大，開啟了並聯式機構的研究，在近半個世紀的研究中提出了數以千百計的形式，圖 1 所示為 Hexaglide 形式的並聯式六自由度機構，此架構將可以簡單的以精密線放電加工製造，且易於一體成型的加工或是將組裝的數量減少，進而減少組裝誤差，且所有的滑動接點(prismatic joint)可以置於同一平面上，因此可以增加精密線放電加工的精度。

由於對稱性常是設計奈米定位平台重要的考量，不僅可以消除熱誤差、組裝誤差與雜訊的影響，且易於分析與製造，因此將六個滑動接點的滑動方向分為三對，即其中的兩個滑動接點其滑動方向在同一直線上，根據三個直線在平面中的交點情形可以分為三種機構配置，如圖 2 所示，但是(a)與(b)的配置為奇異狀態，無法對其做操控，因此考慮(c)的配置，其各接點座標如圖 3 所示， $B_1 \square B_6$ ：滑動對與球窩接點的接合位置， $D_1 \square D_3$ ：球窩接點與移動平台的接合位置， $T_1 \square T_3$ ：3 對滑動對滑動方向的 3 個相交點位置， O ：固定座標之原點， O' ：附體座標之原點， h ：移動平台與固定地面的高度， R ： $T_1 \square T_3$ 所構成之正三角形外接圓半徑， r ： $D_1 \square D_3$ 所構成之正三角形外接圓半徑。因此 $T_1 \square T_3$ 在固定座標的位置為 $T_1(\frac{\sqrt{3}}{2}R \quad \frac{R}{2} \quad 0)$ 、 $T_2(0 \quad R \quad 0)$ 、 $T_3(\frac{-\sqrt{3}}{2}R \quad \frac{-R}{2} \quad 0)$ ，所以 B_1 與 B_2 滑動對的移動方向為 $\overline{T_1 T_3}: y = \frac{-R}{2}$ ，故假設 B_1 與 B_2 在固定座標的位置為 $B_1(X_1 \quad \frac{-R}{2} \quad 0)$ 、 $B_2(X_2 \quad \frac{-R}{2} \quad 0)$ ，同理 B_3 與 B_4 滑動對的移動方向為 $\overline{T_1 T_2}: y = R - \sqrt{3}x$ ，故假設 B_3 與 B_4 在固定座標的位置為 $B_3(X_3 \quad R - \sqrt{3}X_3 \quad 0)$ 、 $B_4(X_4 \quad R - \sqrt{3}X_4 \quad 0)$ ， B_5 與 B_6 滑動對的移動方向為 $\overline{T_2 T_3}: y = R + \sqrt{3}x$ ，故假設 B_5 與 B_6 在固定座標的位置為 $B_5(X_5 \quad R + \sqrt{3}X_5 \quad 0)$ 、 $B_6(X_6 \quad R + \sqrt{3}X_6 \quad 0)$ 。 $D_1 \square D_3$ 在附體座標的位置為 $D_1'(0 \quad -r \quad 0)$ 、 $D_2'(\frac{\sqrt{3}}{2}r \quad \frac{r}{2} \quad 0)$ 、 $D_3'(\frac{-\sqrt{3}}{2}r \quad \frac{r}{2} \quad 0)$ ，由座標轉換方法 $D_i = O' + [T]D_i'$ ， $i=1 \square 3$ ，可得 $D_1 \square D_3$ 在固定座標的位置如下式所示，其中 $[T]$ 為座標轉換矩陣，因此腳長 $L_{i:i=1 \square 6}$ 可以表示為： $L_1^2 = \|B_1 D_1\|^2$ 、 $L_2^2 = \|B_2 D_1\|^2$ 、 $L_3^2 = \|B_3 D_2\|^2$ 、 $L_4^2 = \|B_4 D_2\|^2$ 、 $L_5^2 = \|B_5 D_3\|^2$ 、 $L_6^2 = \|B_6 D_3\|^2$ ，因為 $B_1 \square B_6$ 是滑動接點的滑動端，因此只有一個自由度的變化，在此配置下，其變數為 $X_{i:i=1 \square 6}$ ，且 $D_1 \square D_3$ 的位置隨著移動平台的姿態而改變，而平台的姿態是由描述附體座標的原點 O' 位置與其繞固定座標的各個軸的旋轉量決定，因此腳長可以如下的參數表示： $L_i^2 = f(\alpha \quad X \quad Y \quad Z \quad \theta_X \quad \theta_Y \quad \theta_Z)$ ， $i=1 \square 6$ ，因為腳長在運動時不變，因此對上式做全微分可得 $0 = dL_i = \frac{\partial L_i}{\partial X_i} \Delta X_i + \frac{\partial L_i}{\partial X} \Delta X + \frac{\partial L_i}{\partial Y} \Delta Y + \frac{\partial L_i}{\partial Z} \Delta Z + \frac{\partial L_i}{\partial \theta_X} \Delta \theta_X + \frac{\partial L_i}{\partial \theta_Y} \Delta \theta_Y + \frac{\partial L_i}{\partial \theta_Z} \Delta \theta_Z$ ， $i=1 \square 6$ 。現在考慮 $r=R/2$ ，如圖 4 所示，如此則 $\square B_1 D_1 B_2$ 、 $\square B_3 D_2 B_4$ 、 $\square B_5 D_3 B_6$ 垂直固定座標 $Z=0$ 的平面，所以在線放電加工上容易，且易於一體成型，或是組裝上也方便，為了減少熱誤差，所以此機構的幾何形狀配置需要對稱性，因此假設 B_1 與 B_2 對稱於固定座標原點 O 與 T_2 的連線，因此 $X_2 = -X_1$ ，同理

假設 B_3 與 B_4 對稱於固定座標原點 O 與 T_3 的連線，因此 $X_4 = \frac{\sqrt{3}}{2}R - X_3$ ， B_5 與 B_6 對稱於固定座標原點 O 與 T_1 的連線，因此 $X_6 = \frac{-\sqrt{3}}{2}R - X_5$ ，又假設等腰三角形 $\square B_1 D_1 B_2$ 、 $\square B_3 D_2 B_4$ 、 $\square B_5 D_3 B_6$ 其腰邊與固定座標 $Z=0$ 平面的夾角為 α 度，其中 $0^\circ \leq \alpha < 360^\circ$ ，因此 $X_1 = -h \cot(\alpha)$ 、 $X_3 = \frac{\sqrt{3}}{4}R + \frac{1}{2}h \cot(\alpha)$ 、 $X_5 = \frac{-\sqrt{3}}{4}R + \frac{1}{2}h \cot(\alpha)$ ，因為 $\Delta X_{i:i=1 \square 6}$ 是由積層式壓電致動器輸入，令 $\Delta PZT_{i:i=1 \square 6}$ 表示積層式壓電致動器的長度變化量，由圖 4 可知 $(\Delta PZT_1 \quad \Delta PZT_2 \quad \Delta PZT_3 \quad \Delta PZT_4 \quad \Delta PZT_5 \quad \Delta PZT_6)^T$ 假設積層式壓電致動器的長度變化量 $\Delta PZT_{i:i=1 \square 6}$ 與施加於其上的電壓變化 $\Delta V_{i:i=1 \square 6}$ 成正比，即 $\Delta PZT_i = k \Delta V_{i:i=1 \square 6}$ ，在本文中將以 $\alpha=45^\circ$ 來做設計，因此可得輸入壓電致動的電壓與奈米定位平台姿態的關係式如下所示，因此在設計時要符合上述所設定之限制條件，則可利用關係式操控此奈米定位平台。

$$\begin{pmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \\ \Delta V_4 \\ \Delta V_5 \\ \Delta V_6 \end{pmatrix} \frac{1}{k} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & -0.5R & 0 & 0.5R \\ -1 & 0 & 1 & -0.5R & 0 & -0.5R \\ -0.5 & 0.866 & 1 & 0.25R & -0.433R & 0.5R \\ 0.5 & -0.866 & 1 & 0.25R & -0.433R & -0.5R \\ -0.5 & -0.866 & 1 & 0.25R & 0.433R & 0.5R \\ 0.5 & 0.866 & 1 & 0.25R & 0.433R & -0.5R \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta \theta_x \\ \Delta \theta_y \\ \Delta \theta_z \end{pmatrix} \quad (1)$$

在機構的實體化時，將以撓性鉸鍊實現所設計機構的接點功能，概念上即將材料六個方向剛性的大小類比至機構接點的運動自由度，藉由改變材料相對的剛性大小來展現機構接點所呈現的自由度，圖 5 所示為圖 4 之實體模型，其中為了量測方便，所以在移動台上加上一量測方塊，圖 6 所示為平台之實體照片，平台所用的材料為低溫模具鋼 (SKD11)，所使用的積層式壓電致動器為日本 NEC TOKIN 所製造，大小為 $5 \times 5 \times 20$ mm，在無負載下施加 DC100 V 可以伸長 11.6 μm 。

四、有限元素分析

由於使用撓性鉸鍊的彈性變形來實現機構接點功能，且所使用的撓性鉸鍊幾何形狀複雜，所以使用有限元素分析法來設計與分析整體平台的性能，並檢驗平台是否符合所推導之關係式(1)，圖 7 所示為所建立之有限元素模型，為了簡化分析所以不建立固定不動的部分，其尺寸是根據實體模型制訂一些特徵的幾何形狀尺寸，然後予以參數化，所以可以依照實體模型設計的結果，立即建立有限元素分析模型。根據關係式(1)可知，平台若想往 X 軸向移動即 $(\Delta X \quad \Delta Y \quad \Delta Z \quad \Delta \theta_X \quad \Delta \theta_Y \quad \Delta \theta_Z)^T = (\Delta X \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0)^T$ 則

$$\begin{pmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \\ \Delta V_4 \\ \Delta V_5 \\ \Delta V_6 \end{pmatrix}^T = \text{輸入電壓} \begin{pmatrix} \frac{\Delta X}{k} & \frac{-\Delta X}{k} & \frac{-0.5\Delta X}{k} & \frac{0.5\Delta X}{k} & \frac{-0.5\Delta X}{k} & \frac{0.5\Delta X}{k} \end{pmatrix}^T, \text{輸入}$$

電壓比例 $\Delta V_1:\Delta V_2:\Delta V_3:\Delta V_4:\Delta V_5:\Delta V_6 = 1:-1:-0.5:0.5:-0.5:0.5$ 假設輸入電壓最大為 100V，則輸入壓電致動器的電壓

$(\Delta V_1 \Delta V_2 \Delta V_3 \Delta V_4 \Delta V_5 \Delta V_6)^T = (100V \ -100V \ -50V \ 50V \ -50V \ 50V)^T$ ，將此電壓輸入有限元素模型中，即可得其往 X 軸向移動結果，同理其它各軸的移動與旋轉也如此找出輸入電壓，其分析結果如圖 8 所示，將六組輸入電壓與輸出位移帶入關係式(1)中可計算得有限元素分析的輸入電壓與輸出位移的關係式為：

$$\begin{pmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \\ \Delta V_4 \\ \Delta V_5 \\ \Delta V_6 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 11.806 & 0 & 12.180 & -0.485 & 0 & 0.398 \\ 11.806 & 0 & 12.180 & -0.485 & 0 & -0.398 \\ -5.903 & 10.204 & 12.180 & 0.243 & -0.420 & 0.398 \\ 5.903 & -10.204 & 12.180 & 0.243 & -0.420 & -0.398 \\ -5.903 & -10.204 & 12.180 & 0.243 & 0.420 & 0.398 \\ 5.903 & 10.204 & 12.180 & 0.243 & 0.420 & -0.398 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta \theta_x \\ \Delta \theta_y \\ \Delta \theta_z \end{pmatrix} \quad (2)$$

五、實驗量測

為驗證分析結果以及量測微定位平台之性能及特性，因此設計實驗項目，並選用適當的實驗量測儀器，擷取量測數據加以分析討論，圖 9 所示為位移量與解析度量測實驗架設，由於必須同時操控六個積層式壓電致動器，所以使用 National Instrument (NI)所製造之八個通道數位訊號轉類比訊號的資料擷取卡，利用同樣是 NI 所開發之套裝軟體 LabView 來撰寫所需的訊號。在位移量的量測所輸出的訊號為頻率 10 Hz，其大小與有限元素分析時所輸入的電壓訊號一致，將資料擷取卡所同時產生的六個訊號經由 10 倍放大的驅動器，然後輸入到微定位平台的六個積層式壓電致動器，微定位平台所產生的位移則經由干涉式雷射位移感測器量測，其量測結果如表 1 所示，會造成分析與量測誤差的原因為，分析的模型為一體成型的模型，而實際上實體為組裝的，因此有限元素模型沒有將此列入考量而造成誤差，同樣由六組輸入電壓與輸出電壓的關係可以得到如下的關係式：

$$\begin{pmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \\ \Delta V_4 \\ \Delta V_5 \\ \Delta V_6 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 13.154 & 0.204 & 10.994 & -0.453 & 0.005 & 0.495 \\ -12.382 & 0.496 & 10.357 & -0.462 & 0.006 & -0.486 \\ -7.367 & 13.205 & 12.216 & 0.245 & -0.408 & 0.492 \\ 8.302 & -12.526 & 12.043 & 0.232 & -0.411 & -0.494 \\ -6.293 & -11.095 & 11.659 & 0.235 & 0.419 & 0.482 \\ 7.214 & 12.032 & 11.210 & 0.222 & 0.399 & -0.509 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta \theta_x \\ \Delta \theta_y \\ \Delta \theta_z \end{pmatrix} \quad (3)$$

在解析度量測所輸出的訊號為頻率 0.5 Hz 十步階的階梯波，藉由縮小階梯波每一階之間的大小，然後經由干涉式雷射位移感測器量測微定位平台所能移動的最小步階為何，因為只有單一軸向干涉式雷射位移感測器，而旋轉量需經過換算才能得到，因此將只做三個軸向的解析度量測，其量測結果如圖 10 所示，量測結果最小的解析度為 8 nm。

在圓軌跡量測所使用的實驗架設如圖 11 所示，一軸移動為 sine 形式，另一軸移動為 cosine 形式，用來合成圓軌跡，然後根據位移量量測的結果所得的關係式(3)來計算輸入積層式壓電致動器的電壓，用 Labview 撰寫所需輸入訊號的程式，然後用兩個單軸干涉式雷射位移感測器量測 XY 平面上的圓軌跡，圖 12 所示為量測結果。

六、結論

本文成功的找出合適的並聯式六自由度的奈米級微定位機構，並推導其運動學的特性，推導出輸入電壓與輸出位移的關係式，以作為分析與實際操作時的輸入訊號。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，然後由參數化的有限元素分析

法，分析此奈米定位平台的靜態與動態特性，然後經由實驗驗證 CAD 設計與 CAE 分析的正確性。

根據實驗量測結果，所研製之並聯式奈米級微定位平台，在電壓 100 V 下具有三個軸向 8 μm 的位移量與 8 nm 的解析度，三個旋轉方向 200 μrad 的旋轉量。

在未來發展上，為的達到更精密的定位，必須使用閉回路的控制系統，所以要選擇一合適之精密六自由度位移感測器，才能有精密的閉回路定位控制系統，如此才能達到奈米操作平台的工作需求。

七、參考文獻

- [1] Ralph C Merkle, "A new family of six degrees of freedom positional devices," *Nanotechnology*, vol. 8, pp. 47-52, 1997.
- [2] Pernette Eric, Henein Simon, Magnani Ivo, Clavel Reymond, "Design of parallel robots in microrobotics," *Robotica*, vol. 15, no. 4, pp. 417-420, July-Aug, 1997.
- [3] 張所鉉, 李振邦, 劉霆, "平面式三自由度微定位平台設計", 中國機械工程學會第十六屆全國學術研討會論文集, 新竹市, Dec. 3-4, 1999.
- [4] 張所鉉, 李振邦, "單層三自由度微定位平台", 中華民國專利 431249 號.
- [5] Ryu Jae W., Lee Sung-Q, Gweon Dae-Gab, Moon Kee S, "Inverse kinematic modeling of a coupled flexure hinge mechanism," *Mechatronics*, vol. 9, no. 6, pp. 657-674, 1999.
- [6] Tanikawa T, Kawai M, Koyachi N, Arai T, Ide T, Kaneko S, Ohta R, Hirose T, "Force control system for autonomous micro manipulation," *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 610-615, Seoul, May 21-26 2001.

八、圖表彙整

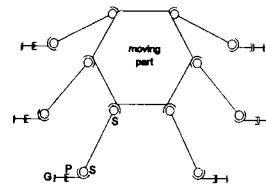
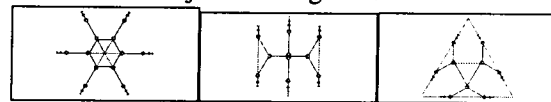


圖 1. Hexaglide 機構, S: spherical joint, P: prismatic joint, G: ground



(a) 交於一點 (b) 互相平行 (c) 相交三點

圖 2. 機構之幾何配置形式

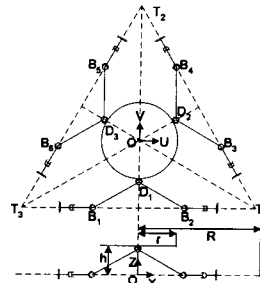


圖 3. 相交三點之機構座標系統

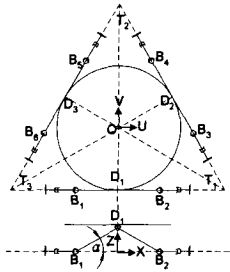


圖 4. 相交三點之機構配置, $r=R/2$

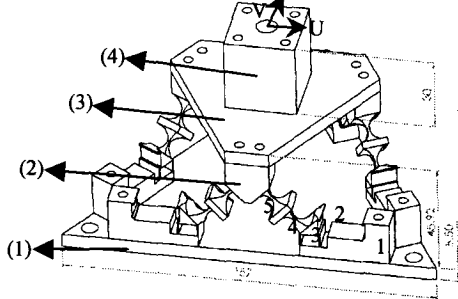


圖 5. 相交三點機構之實體模型, 1: ground、2: 積層式壓電致動器放置處(此為 PZT₂)、3: prismatic flexure joint、4: spherical flexure joint、5: spherical flexure joint, (1): 固定座, (2): 一對 PSS 機構, (3): 移動平台, (4): 量測塊

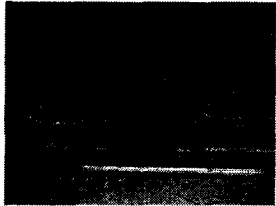


圖 6. 相交三點機構之實體照片

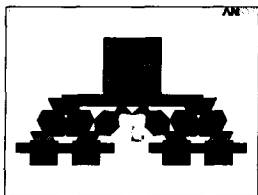


圖 7. 有限元素模型

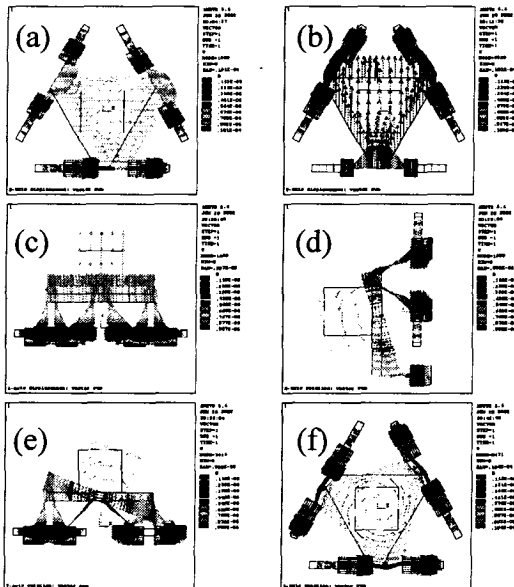


圖 8. 有限元素分析結果, (a)X 軸向位移 $8.47\mu\text{m}$,

(b) Y 軸向位移 $9.80\mu\text{m}$, (c) Z 軸向位移 $8.21\mu\text{m}$,
(d) X 軸向旋轉 $206\mu\text{rad}$, (e) Y 軸向旋轉 $238\mu\text{rad}$,
(f) Z 軸向旋轉 $251\mu\text{rad}$

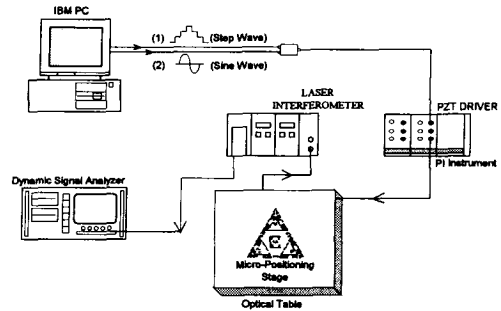
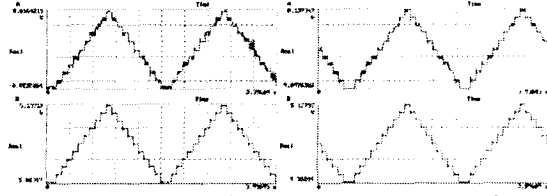


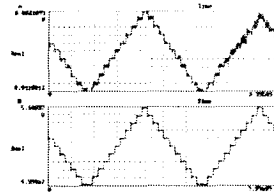
圖 9. 位移量與解析度量測實驗架設圖

表 1. 實驗量測值與有限元素分析值比較

	ΔX μm	ΔY μm	ΔZ μm	$\Delta\theta_x$ μrad	$\Delta\theta_y$ μrad	$\Delta\theta_z$ μrad
FEM	8.47	9.80	8.21	206	238	251
Exp.	7.49	8.22	8.79	205	245	202



(a) X 軸向解析度 (b) Y 軸向解析度



(c) Z 軸向解析度

圖 10. 解析度量測結果, A 訊號: 干涉式雷射位移感測器量測訊號 ($2\mu\text{m/V}$), B 訊號: 資料擷取卡輸出訊號

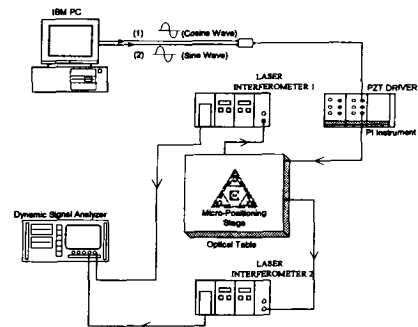
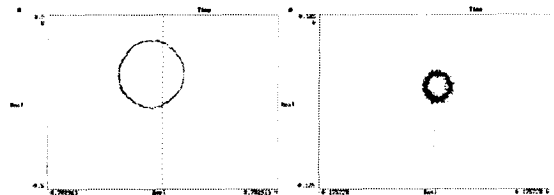


圖 11. 奈米定位平台之圓軌跡實驗量測架設圖



(a) 半徑 $R = 500\text{nm}$, (b) 半徑 $R = 50\text{nm}$,

圖 12. XY 平面圓軌跡量測結果, $2\mu\text{m/V}$