

三次元接觸式掃描探頭之研製

Development of a Three Dimensional Scanning Touch Probe

朱志良、陳泓錡、柯志憲

Chih-Liang Chu, Hung-Chi Chen, Jih-Sian Ke

本研究主要目的是在發展一三次元接觸式掃描探頭。在機構設計上，Z 軸系統利用薄彈片之特性達到 Z 軸垂直移動。XY 軸系統採用微細樑之設計，針對所選擇特定接觸力來設計微細樑的長、寬、厚度與彈片的相關尺寸，並在結構中心安裝一頂針，以抑制 Z 軸位移誤差，達成整體三自由度之特色。光路設計選用雷射二極體、一維 PSD 與二維 PSD 作為感測元件使用，經由感測器記錄此位移量或角度偏擺量，再與三軸定位平台作座標定位，便能得到待測物的尺寸與三維形貌。經實驗證實後，X/Y/Z 軸具有 $\pm 1 \text{ mm} \times \pm 1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的量測範圍，不確定度為 $0.7 \mu\text{m}$ ，X/Y/Z 方向的接觸力分別為 0.26 N/mm 、 0.26 N/mm 與 0.4 N/mm 。

This study develops a three dimensional scanning touch probe. In the mechanism, the Z-axis system achieves its vertical movement by taking advantage of the characteristics of leaf springs. For the design of the XY-axis system, the length, width and thickness of a micro beam and the relevant size of a spring are designed to meet specific contact force. A live center is installed in the center of the structure to inhibit the Z-axis displacement error, so as to achieve the characteristics of three degrees of freedom. In the optical path design, a laser diode, a single-axis PSD (Position Sensor Detector) and a two-axis PSD are adopted as sensing components, then will be able to obtain the size and profile of the workpiece. Based on the validation of experiments, the measuring ranges in the X, Y and Z-axis of the scanning touch probe are $\pm 1 \text{ mm} \times \pm 1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ and an uncertainty of $0.7 \mu\text{m}$, while the probe contact force in the X, Y and Z-axis are about 0.26 N/mm , 0.26 N/mm , 0.4 N/mm , respectively.

一、前言

自從六〇年代起，由於電子、電腦及感測技術的快速發展，促使三次元量測儀 (coordinate measuring machine, CMM) 的功能及應用有了很大的改進。快速發展及擴展中的製造工業也催生出高品質、高效率及多功能的量測系統，三次元量測儀也因此廣泛地應用在工業中。且在品質控制部門，為了達到工件的尺寸、幾何、輪廓快速及精確的量

測，三次元量測儀更是一個不可或缺的工具。

就機械工程的觀點而言，不同尺度的製造技術如圖 1 所示⁽¹⁾，其加工元件的大小仍然以巨／介觀尺寸 (meso- to macro-scale) 為主。針對巨觀的元件，使用傳統的三次元量測儀已能成功地進行三維尺寸的量測，然而對於介觀尺寸的元件，現今在量測領域上，仍然存在技術上的瓶頸，如圖 2 所示⁽²⁾。從三維尺寸量測的技術來看，相對於工業界急速開發中的微工件，其幾何特徵尺寸多集中於介觀

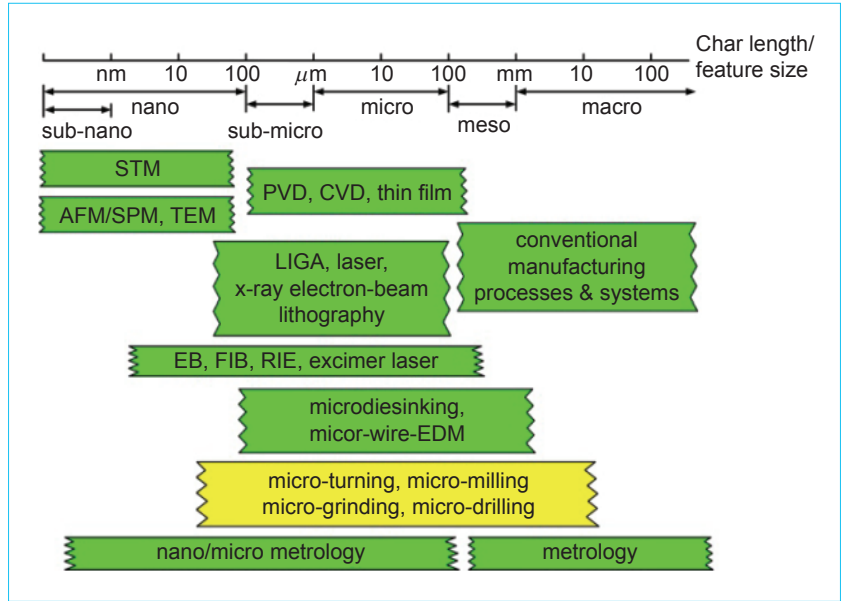


圖 1. 各種尺度的加工技術。

範圍 (meso-scale, 數毫米到數微米)，而精度參數多為微奈米數量級 (micro/nano-scale, 數微米到 10 nm)，如微齒輪、微透鏡等。

就現今的工程量測技術而言，針對量測範圍由次毫米 (sub-millimeter) 的微機電元件至幾米長的機械元件，使用傳統的三次元量測儀所具備的機台幾何精度與探頭性能，對於中等機構元件尺寸已完全能達到大多數的尺寸精度要求，然而對於量測微小工件尺寸 ($\ll 1\text{ mm}$) 和大型工件尺寸 ($\gg 1\text{ m}$)，卻往往無法得到較高的精度，其原因在於量測大型工件時，量測機台的幾何精度與機台穩定性為造成量測不確定度的主要來源，而對於微小工件量測，

則受限於探頭系統的性能，如圖 3 所示。

也正因為在微小工件量測時，量測探頭扮演極重要的角色，因此在比較接觸式與非接觸式探頭的優缺點之後⁽³⁾，得知光學非接觸式探頭適合量測軟薄的工件，對於待測工件脆弱的表面，亦不會造成磨耗損害，而接觸式探頭適合量測大角度或斷面曲率變化大的工件，且不易受工件反射率的影響。由於現階段微機電的製程仍然是 2.5D，亦即所需要的量測探頭仍以非接觸式之 2D 與 2.5D 的量測探頭為主。同時，隨著 3D 製程技術的漸漸地提升，一些 3D 的元件，如微模具 (micro-mold)、微光柵 (micro-grating)、微透鏡 (micro-lens)、微孔洞 (micro-hole) 與微結構 (micro-structure) 等，急迫地需要具有奈米級的 3D 量測探頭來進行檢測工作，此類工件的斷面曲率變化大，於量測探頭的選用上，一般則以接觸式的量測探頭為主。

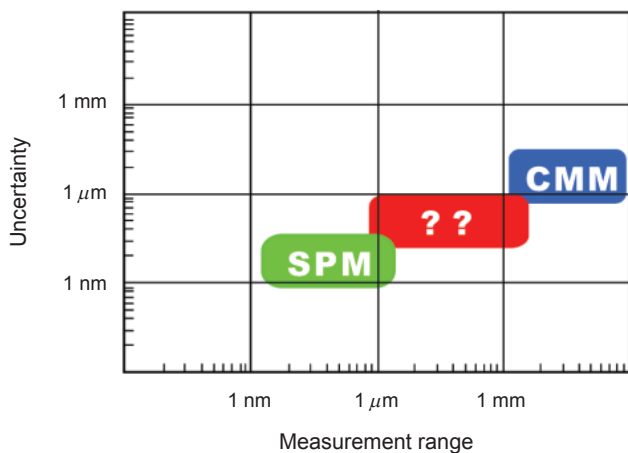


圖 2. 量測技術的瓶頸。

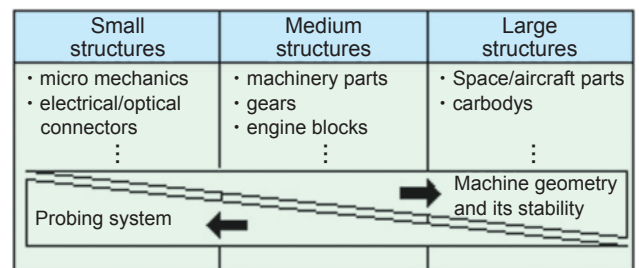


圖 3. 三次元量測儀之量測不確定度來源。

如前所述，接觸式探頭的研究是影響三次元量測儀精度最關鍵的部份，因此這幾年來漸漸地有相關研究單位與學者投入體積小與高精度的接觸式探頭研究。茲將這幾年來各國投入接觸式探頭的文獻資料整理如下：

英國 National Physical Laboratory (NPL)⁽⁴⁻⁵⁾ 利用三個直徑 3 mm 厚度 1 mm 的鋁盤與三根碳化鎢管、三條鈹銅合金線與三個電容感應器組成三組呈 120° 的接觸式探頭，該探頭的重量為 370 g、球直徑 1 mm、量測範圍 $\pm 20 \mu\text{m}$ 、解析度 3 nm，且於量測桿變形 10 μm 時其探頭接觸力小於 0.1 mN。荷蘭 Eindhoven 大學⁽⁶⁻⁷⁾ 利用機械加工與微機電 (MEMS) 技術製作完成量測探頭，其設計方式類似於英國 NPL 的量測探頭設計，不同處在於此探頭設計採四象位光學感測元件作為量測數據的輸出，該量測探頭的球直徑為 0.3 mm、量測範圍 100 μm 、量測不確定度小於 25 nm。德國 Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)⁽⁸⁻⁹⁾，利用光纖末端自行形成所謂的「probe pin」作為量測接觸圓球，此圓球的直徑為 25 μm ，在配合光路設計與 CCD 取像後，此 2D 與 3D 光纖接觸式量測探頭具 0.1 μm 的量測不確定度與小於 1 μN 的探頭接觸力。日本 Mitutoyo⁽¹⁰⁾ 施加一微小的振動量於探針的方式，製作一量測探頭其型號為 UMAP 130，利用微機電製程將前端的圓球直徑縮小至 30 μm ，當探針前端圓球接觸到物體將會抑制振動，產生一觸發訊號，探針長度為 2 mm、解析度為 0.01 μm 、重複性小於 0.1 μm ，量測範圍 200 μm ，3D 不確定度為 200 nm。瑞士 METAS, Meil⁽¹¹⁾ 等人，利用特殊的平行撓性鉸鏈製作此一機構，並屏除了旋轉自由度的轉動，設計出只具有 X-Y-Z 方向平移的感測探頭，此探頭的設計是以磁吸式的方式固定於機構下方，易於更換不同尺寸的探頭，其探頭直徑為 0.1 至 0.3 mm、探頭觸發力小於 0.5 mN、重複性為 0.5 nm、3D 不確定度為 30 nm、量測範圍為 200 μm 。瑞士 IWF, Liebrich⁽¹²⁾ 製作一具微細撓性鉸鏈之探頭，此探頭之撓性鉸鏈是由雷射加工與焊接所完成，並與包含一探針之基座相互結合。量測上，利用雷射干涉儀在量測面與參考面所產生的干涉條紋，以影像量測的方式計算干涉條紋相對的 XY 軸

角度位移與 Z 軸垂直位移。此探頭具有 XY 軸 0.1 μm 與 Z 軸 0.04 μm 的解析度，觸發力為 0.06 N/mm。英國 Renishaw 公司⁽¹³⁾ 設計一型號為 SP80 的掃描探頭，在機構上使用了三個平行彈簧機構所組成的彈簧盒機構，此機構能將各軸的位移獨立，可以有效地去除各軸間的誤差，感測器安裝於機構的上方，利用讀取光柵格數的方式以確認目前探針的位移狀態，量測範圍為 $\pm 2.5 \text{ mm}$ 、解析度為 0.02 μm 、量測力為 1.8 N/mm。

綜觀三次元探頭的發展，大部分量測探頭之開發是針對小型待測物所設計之觸發探頭，而用於大範圍量測之掃描探頭之文獻則是以商業行為為主。因此，本研究將以大範圍量測與高精度低觸力為特色開發一掃描探頭，針對所選擇探定的接觸力與剛性來設計微細樑長、寬、厚度等相關尺寸，並藉由有限元素分析軟體 ANSYS 分析驗證，確認所設計之結構具有高重複性、低誤差，並搭配雷射二極體與 PSD 位置感測器，經由光路之設計，能量測 Z 軸位移與 XY 軸角度變化，能在量測上達到大範圍的掃描量測，使形貌量測更加準確，也同時能減少觸發式量測可能發生的局部尺寸誤差，並達成微奈米級的量測精度。

二、機構設計

1. Z 軸系統

Z 軸設計如圖 4 所示，圖 5 為位移示意圖，將需要接合之兩部分分為上基座與下基座。其上下兩

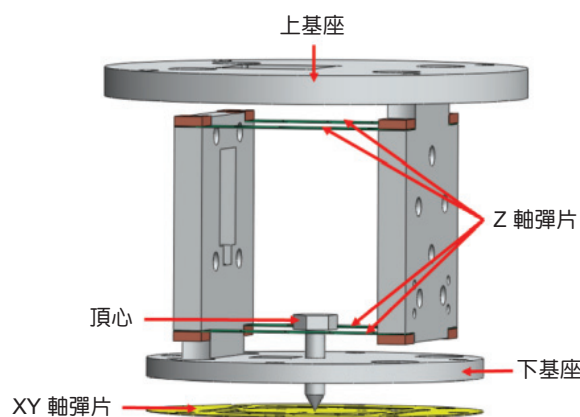


圖 4. Z 軸之設計。

基座則以四片長薄彈片加以連接，上基座保持固定不動，僅造成下基座有位移之變化，此設計不但能將自由度有效拘束，使結構產生單純的上下位移，所需之接觸力也能夠控制在所設計之範圍內。

2. XY 軸系統

XY 軸之設計如圖 6 所示，彈簧片之設計理念來自於微細樑之彎曲變形。位移示意圖如圖 7 所示，此結構是依靠探針頂端之圓球受作用力影響而使結構產生角度變化。因此位於旋轉點之 A 點只能有旋轉位移量，而不能有其他軸向之位移，如 A 點產生位移之變化，將會造成量測誤差。所以在設計上必須為對稱式設計，使得各相對之微細梁變化時，能使 A 點保持不動。由於掃描探頭在接觸工件上與觸發探頭不同，接觸的方式不同，因此所造成的接觸力也不同，但過大的接觸力會造成待測物的塑性變形，也容易造成彈片發生塑性變形或產生破壞，而過小之接觸力，則會使彈片容易受自然頻率影響，因此必須針對所需之接觸力來設計微細樑之長、寬、高的尺寸大小。此設計方式能將結構之自由度限制為三個 (Z 軸位移、X 與 Y 軸旋轉)。但在此設計上，彈片之 Z 軸位移會影響到 Z 軸系統，並使誤差產生，因此在結構中心安裝一頂心，如圖 6 所示。此設計不但能抑制 Z 軸位移誤差，還能將 Z 軸向之作用力引導至 Z 軸系統，使結構僅剩 X 與 Y 軸角度變化與 Z 軸垂直位移，達成機構整體三自由度之特色。

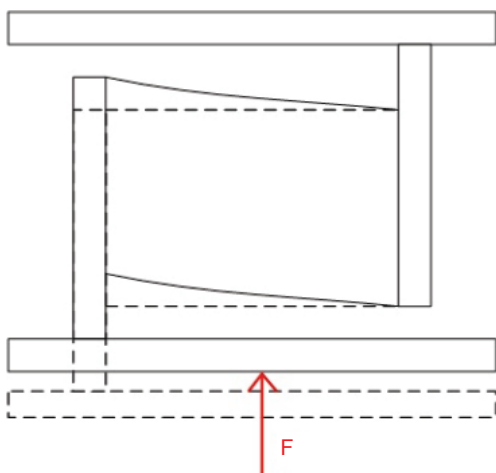


圖 5. Z 軸位移示意圖。

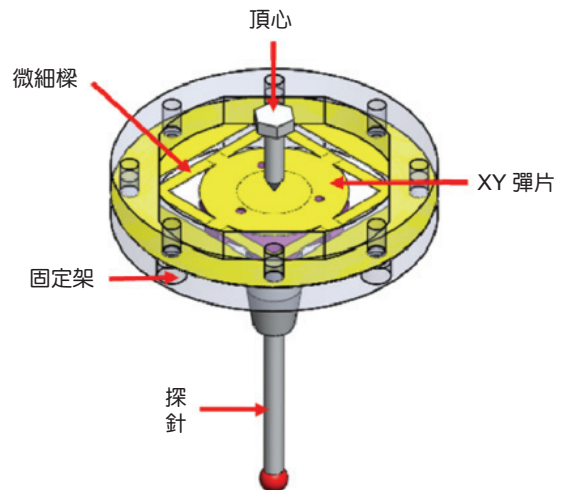


圖 6. XY 軸之設計。

3. 探針機構

使用三次元量測儀對工件進行尺寸與形貌量測時，會因工件尺寸與種類不同更換不同的探針，因此設計一探針機構，如圖 8 所示，此機構分為上下兩部分，兩部分分別安裝至 XY 彈片的上下兩側，並設計定位點，以方便安裝時固定之用，而兩邊分別設置磁鐵，以方便探針作快速交換之用。

4. 機構整體

圖 9 為所設計完成之探頭結構，所設計之機構為 Z 軸系統、XY 軸系統與探針機構三者相互結合後，完成一具有三自由度特色三元接觸式掃描探頭。

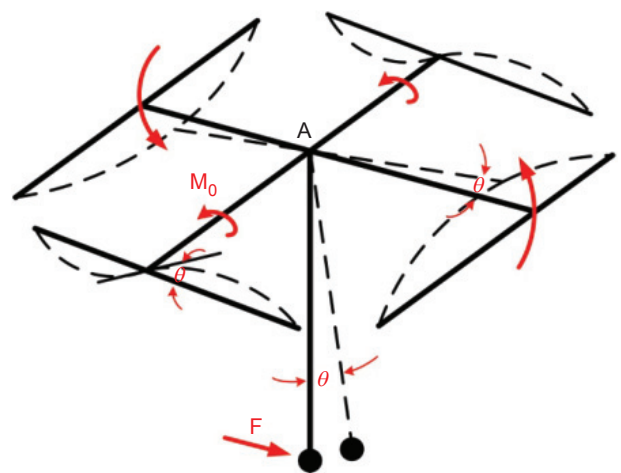


圖 7. XY 軸位移示意圖。

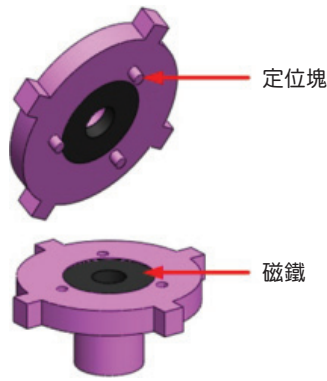


圖 8. 探針機構。

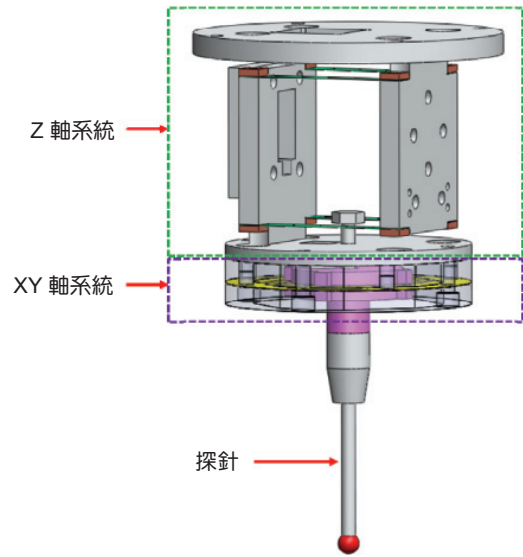


圖 9. 探頭整體設計。

三、有限元素分析

將設計完成之探頭機構以商用有限元素分析軟體 ANSYS 建立 3D 幾何模型分析，元素種類採用 Solid186 20 個節點立體結構元素作為元素種類來進行分析。所選用之材料，上下基座與頂針採用鋁

表 1. 材料分析參數。

Specification	6061-T6	SK-2
Elastic Modulus (N/m ²)	73×10 ⁹	203×10 ⁹
Poisson's ratio (ν)	0.31	0.3
Density (ρ, kg/m ³)	2700	7860
Yield Stress (S, N/m ²)	255×10 ⁶	1090×10 ⁶

合金，Z 軸彈片與 XY 彈片則使用工具鋼，材料之分析參數如表 1 所示。由於探頭之設計需要在量測範圍、彈片之變形率與彈片之降伏應力三者之間維持在設計所需之範圍內，因此在研究上將設定 X、Y 與 Z 軸之量測範圍為 ±1 mm，當作分析上基準之一。將條件設為探球位移 1 mm 所需之力量，分別對探球施加 X、Y 與 Z 軸三軸施加力量，並找出較為接近之數據，以判斷分析之結果是否符合設計之要求。ANSYS 模擬分析之情況如圖 10、圖 11 與

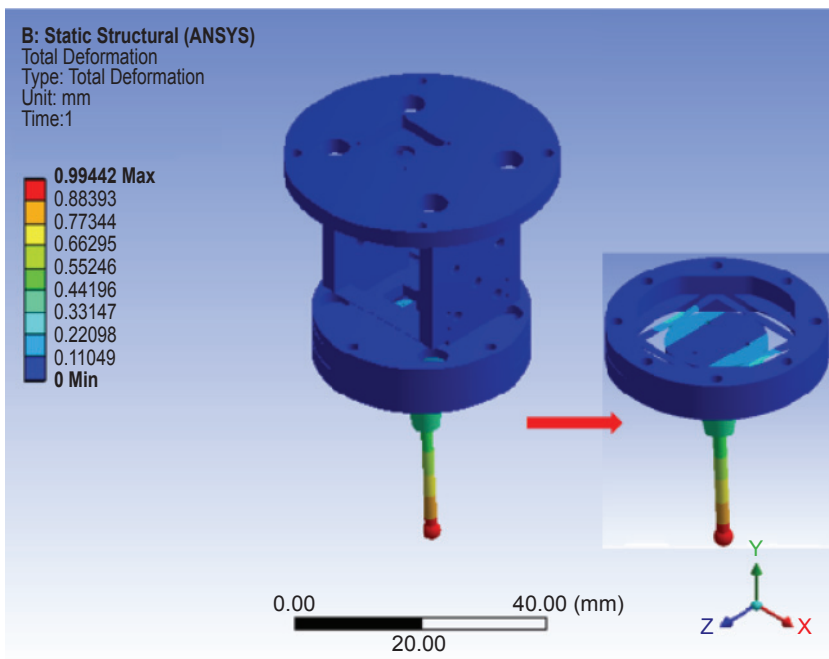


圖 10. X 軸位移之分析。

圖 12 所示，表 2 為分析之結果。由表 2 可以得知所設計之量測範圍內，彈片所承受之最大應力值，此應力值小於所選用材料之降伏係數，以避免在正常使用下造成彈片產生塑性變形，同時接觸力也低於市售之三次元掃描探頭，將有效降低量測時對工件造成的塑性變形。

表 2. 最大位移與應力分析之結果。

	接觸力 (N/mm)	彈片承受之應力 (MPa)
X 軸	0.26	278.52
Y 軸	0.26	278.1
Z 軸	0.4	161.42

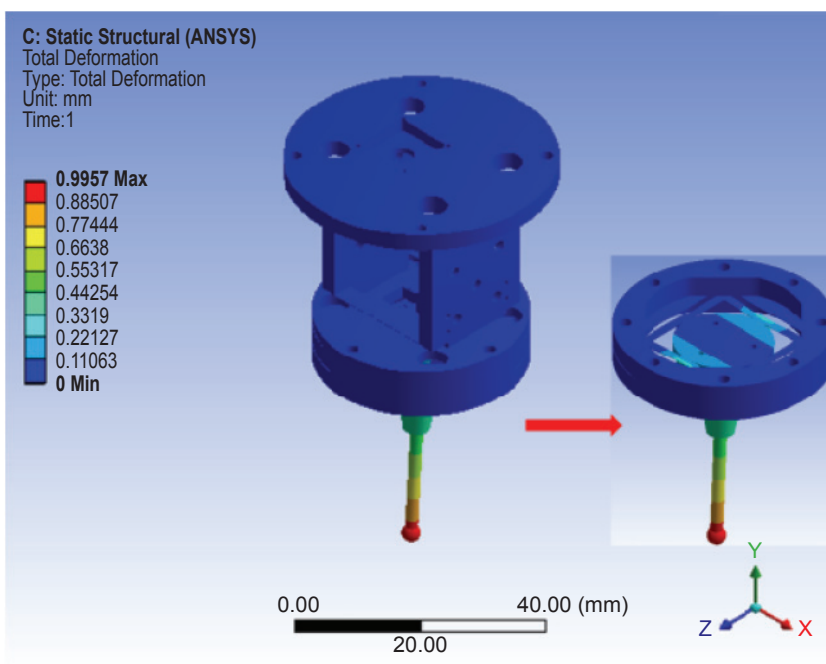


圖 11.
Y 軸位移之分析。

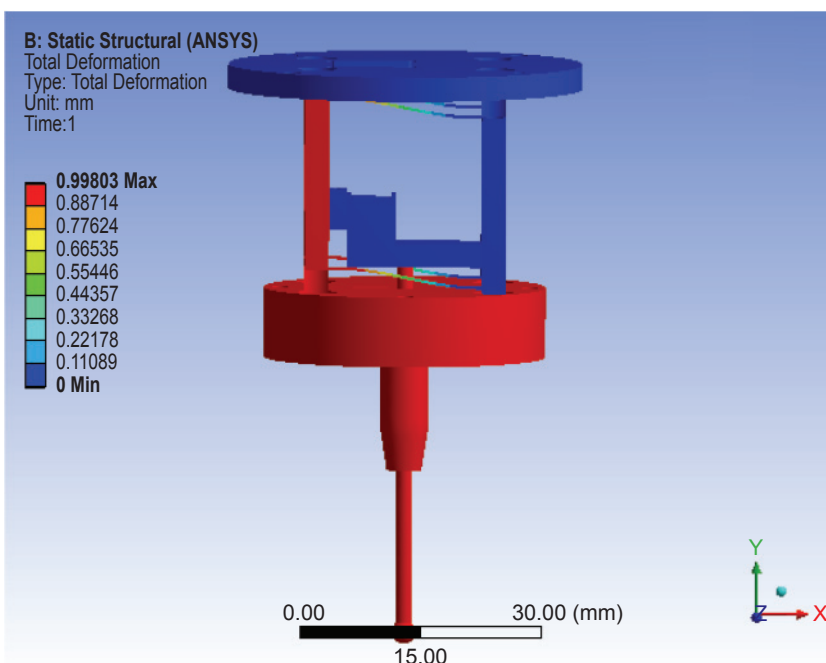


圖 12.
Z 軸位移之分析。

表 3. 有限元素分析結果 ($\varphi = 90^\circ, \theta = 0^\circ - 90^\circ$)。

direction angle (degree)	Displacement (μm)			Angle (mrad)			Displacement (μm)			
	δ_{Ax}	δ_{Ay}	δ_{Az}	θ_x	θ_y	θ_z	δ_{Bx}	δ_{By}	δ_{Bz}	δ_B
0°	-1.24	-0.001	-0.46	0.03	27.7	0	994.5	0.09	38.3	995.2
15°	-1.2	-0.32	-0.62	7.1	26.7	0	959.7	255.5	38.4	993.9
30°	-1.08	-0.65	-0.58	13.9	23.9	0	859.4	499.6	38.4	994.8
45°	-0.88	-0.88	-0.52	19.6	19.6	0	702.3	703.2	38.5	994.5
60°	-0.62	-1.08	-0.48	23.9	13.9	0	498.1	861.1	38.5	994.6
75°	-0.32	-1.21	-0.46	26.7	7.1	0	255.3	960.1	38.7	994.7
90°	-0.001	-1.24	-0.42	27.7	0.03	0	0.09	994.5	38.4	995.2

圖 13 為 XY 系統的自由體圖， F_p 為施力於探針前端圓球的作用力， φ 為 F_p 作用力與 F_z 的夾角， θ 為 F_p 作用力與 F_x 的夾角， F_x 、 F_y 與 F_z 為 F_p 作用力的分量。由於 XY 軸之機構設計為對稱式的結構設計，因此在分析上對探球施加一 0.26 N 的作用力於 $\varphi = 90^\circ, \theta = 0^\circ - 90^\circ$ 的方向，即可得知 $\varphi = 90^\circ, \theta = 0^\circ - 360^\circ$ 的結構變化，並了解探球於最大位移時，中心結構所產生之誤差值為多少。將機構的運動變形作一六自由度誤差分析，確認探針前端圓球受作用力時，機構所抑制的三自由度的

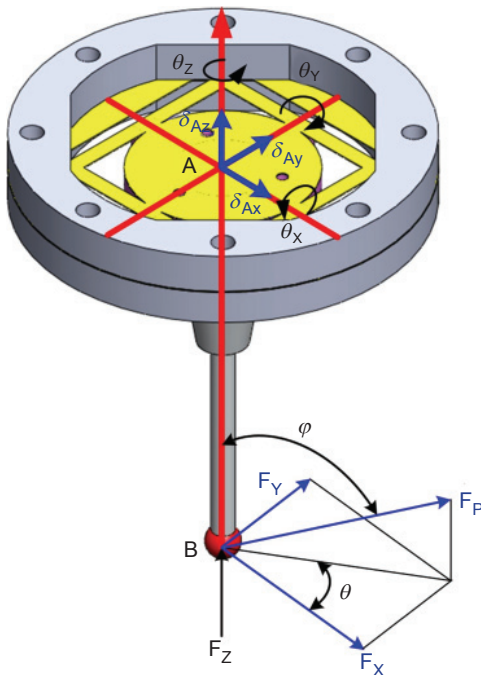


圖 13. XY 系統之自由體圖。

變形量是否會造成感測器於量測上的誤差，而影響掃描探頭的精度，於表 3 所示， δ_A 為自由體圖 A 點所產生之變形誤差，可知在 0.26 N 作用力下，欲抑制的兩個位移自由度可由 δ_{Ax} 與 δ_{Ay} 表示，其最大位移量為 $1.24 \mu\text{m}$ ，而另一個旋轉自由度 θ_z 的最大值為 $7.38 \times 10^{-5} \mu\text{rad}$ ，因為有限元素軟體是將結構假設為彈性體進行分析，當結構受到作用力的影響進而產生運動變形，會因為材料的側向應變與軸向應變的不同，以至於作用力 $\varphi = 90^\circ, \theta = 0^\circ$ 的方向 θ_x 有 0.03 mrad 的角度產生，其數值模擬誤差來源微結構切割網格密度與網格對稱性有關。從 δ_{Bx} 與 δ_{By} 的分析結果可以發現位移量呈現為對稱的數據，故可知所設計之 XY 系統具有 XY 方向等剛性。探針前端圓球施加 0.26 N 作用力於 $\theta = 90^\circ, \varphi = 0^\circ - 90^\circ$ 方向，經由 ANSYS 分析後所得之結果。如表 4 所示。受 0.26 N 作用力的探針前端圓球位移量 δ_B 隨著角度上升而位移量增加，這是由於 XY 軸系統與 Z 軸系統的剛性不同，因此相同的作用力於 $\varphi = 90^\circ, \theta = 0^\circ - 90^\circ$ 方向之位移會隨著角度而有所變化。

四、量測系統

圖 14 與圖 15 為本研究所設計之感測器配置與光路設計，所使用之元件為雷射二極體 (laser diode)、分光鏡 (beam splitter)、一維位置感測器 (1D-PSD)、二維位置感測器 (2D-PSD)、反射鏡 (mirror)。整體光路流程為雷射二極體發射光束，

表 4. 有限元素分析結果 ($\varphi = 0^\circ - 90^\circ, \theta = 0^\circ$)。

direction angle (degree)	Displacement (μm)			Angle (μrad)			Displacement (μm)			
	δ_{Ax}	δ_{Ay}	δ_{Az}	θ_x	θ_y	θ_z	δ_{Bx}	δ_{By}	δ_{Bz}	δ_B
0°	-0.45	0.001	603.4	0.1	0.02	0	0.81	0.01	606.4	606.4
15°	-0.4	0.001	592.6	2.2	7.3	0	261.4	0.02	595.5	648.6
30°	-0.31	0.001	542	2	14.2	0	508.3	0.05	544.4	736.4
45°	-0.21	0.001	456.2	1.7	20	0	719.3	0.02	456.4	840.7
60°	-0.08	0.001	336.1	1.3	24.5	0	881	0.03	337.1	932.5
75°	-0.03	0.001	193.6	0.7	27.4	0	954.2	0.06	194	977.5
φ	-0.001	-1.24	-0.42	27.7	0.03	0	0.09	994.5	38.4	995.2

經由分光鏡將光束分為兩道，一道經過聚焦透鏡將光束聚焦至一維位置感測器上，經由機構帶動感測器產生垂直上下移動，藉此使感測器能夠得到 Z 軸位移變化量。另一道光束則投射至位於探針機構上的反射鏡，再經由分光鏡將光投射至二維位置感測器上，探針機構如產生角度變化，便可使光點產

生位移，藉此即可得知探針底端圓球之 XY 軸位移變化量。當有位移產生時，一維 PSD 與二維 PSD 便會產生電流訊號，經過訊號處理器處理過後，將電壓之變化與位移距離經過比對後，便能得知兩者間的關係，藉此即可得知探針前方圓球之位移。

PSD 為一種光檢測器，當光照射至其感測區域時，會產生電壓訊號以判斷光點位置，如圖 15 之 1D-PSD 與 2D-PSD 所示，以 1D-PSD 為例，其 A、B 兩端各會產生一 V_1 、 V_2 電壓訊號，因此藉由方程式：

$$Z = \frac{V_1 - V_2}{V_1 + V_2} \quad (1)$$

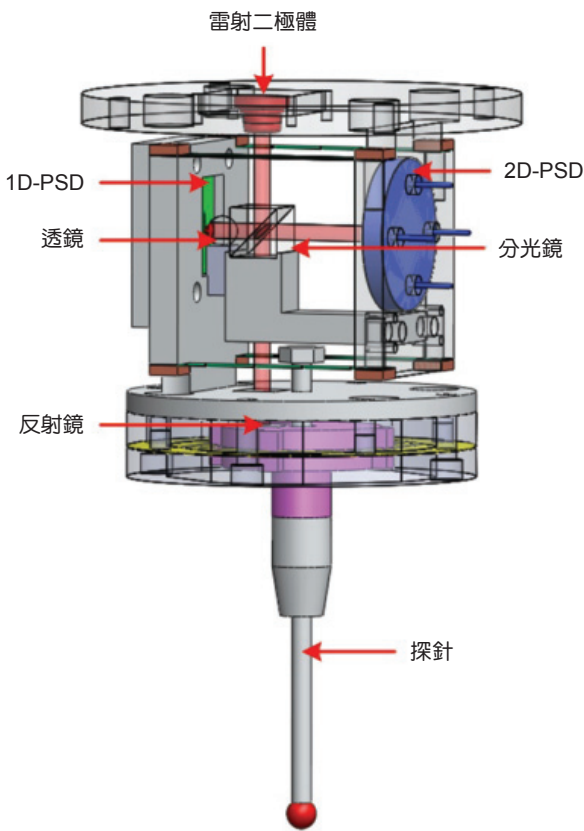


圖 14. 感測器配置圖。

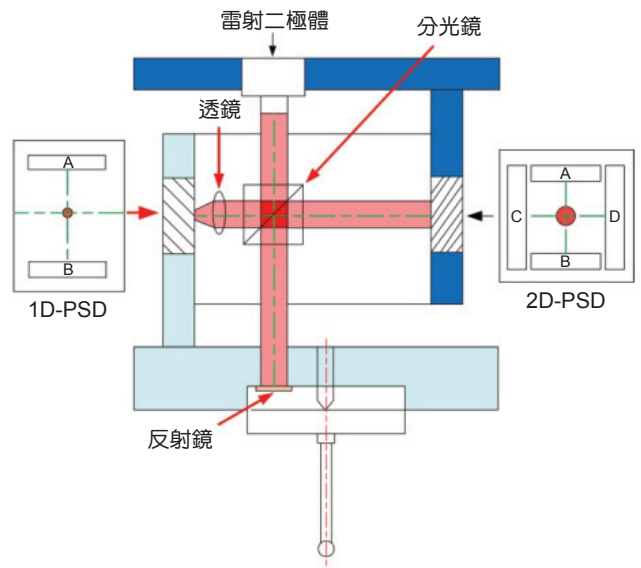


圖 15. 光路示意圖。

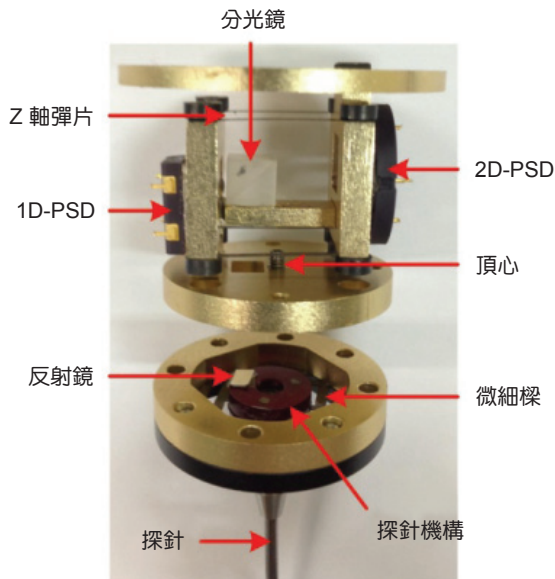


圖 16. 探頭內部架構。

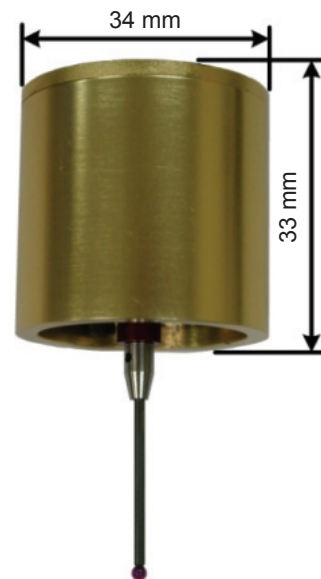


圖 17. 探頭實體圖。

帶入此方程式後，PSD 之中心便為零點，當光點位移時會產生一 S 曲線之電壓以判斷光點之位置，因此能得到 Z 軸向之位移，以此類推，當光點位於 2D-PSD 時，A、B、C、D 四端產生之電壓訊號 V_1 、 V_2 、 V_3 、 V_4 為其方程式為：

$$X = \frac{V_1 - V_2}{V_1 + V_2} \quad (2)$$

$$Y = \frac{V_3 - V_4}{V_3 + V_4} \quad (3)$$

圖 16 與圖 17 分別為探頭內部架構與探頭實體圖，探頭整體大小為直徑 34 mm，長 33 mm。

五、實驗架設與測試結果

前述探頭機構以有限元素軟體 ANSYS 的分析驗證，表示此機構具有良好而穩定之彈性變形量，為驗證掃描探頭之性能與特性，並確認彈片的變形量與感測裝置輸出是否符合前述之分析。本研究以線性馬達當作驅動軸推動探針前端圓球，並且使用都普勒雷射干涉儀量測此線性馬達與雷射干涉儀之間的距離，並將感測器訊號利用放大器與訊號處理電路加以處理，最後以 National Instruments 公司的 PCI-6013 資料擷取卡進行 A/D 轉換，再以電腦

讀值加以記錄，其實驗架設如圖 18 所示。整體量測以電腦為中心，先將線性馬達的平台移至適當位置，而後往前 1 mm，同時擷取雷射干涉儀所量測到的步進馬達位移值與掃描探頭中感測裝置的輸出訊號，並分別針對探頭的三軸向做測試，所測出的結果如圖 19、圖 20 與圖 21 所示。由圖可知掃描探頭具有良好的線性度，這表示當擷取到量測時感測裝置的輸出訊號，可由訊號變化量之間的關係，求得探棒前端圓球之位移量、作用力大小、移動方向與結構變形量。由所求得之實驗數據可知，本研究研發之三次元接觸式掃描探頭具有 $\pm 1 \text{ mm} \times \pm 1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的 X/Y/Z 軸量測範圍。

量測探頭的精準度測試上首重於重複性，此實驗所測得知數據為不確定度，其數值越低表示此探頭的量測精準度越高，其誤差的因素包含彈片的彈性變形，量測時馬達的移動速度，環境溫度與振動的影響等。實驗架設示意圖如圖 18 所示，使用線性馬達 (linear motor) 當作驅動軸水平推動探棒前端圓球，並且使用都普勒雷射干涉儀 (型號 MCV-500) 量測此精密步進馬達與干涉儀之間的距離，其干涉儀的解析度可達 0.1 nm，且具有壓力與溫度補償裝置，可以精準的測量定位，減低量測上的誤差。將電壓訊號利用放大器與訊號處理電路加以處理，最後以 National Instruments 公司的 PCI-

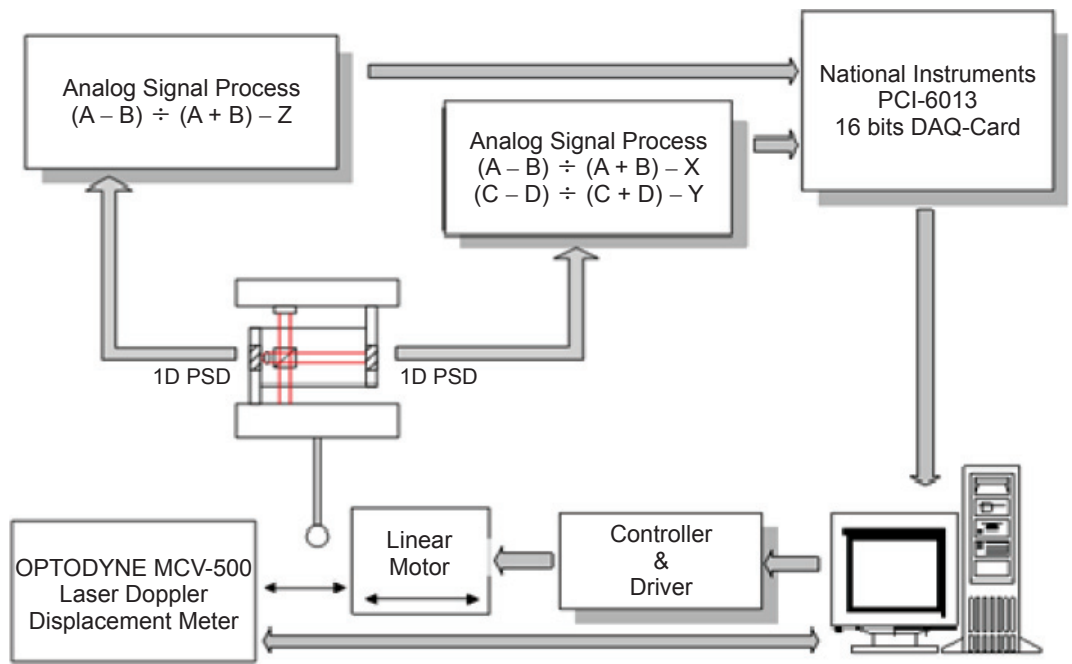


圖 18. 實驗架設示意圖。

6013 資料擷取介面卡進行 A/D 轉換，再以電腦讀值加以紀錄。整體量測以電腦為中心，首先將線性馬達的平臺移至適當位置，而後往前移動 $10\ \mu\text{m}$ ，同時觀察探頭 X 軸、Y 軸與 Z 軸的輸出訊號，當平台到達定位時觸發 A/D，擷取定位平台各軸向位移量的依據，並且重複此一測試過程，綜合多次紀錄的觸發位移量，整理如表 5 所示，由表 5 可知此量測探頭的單方向重複性測試數據，經計算後其 X 軸、Y 軸與 Z 軸的標準差 σ 分別為 $0.3\ \mu\text{m}$ 、 $0.32\ \mu\text{m}$ 與 $0.39\ \mu\text{m}$ ，在常態分布中 95% 的觀測值、落

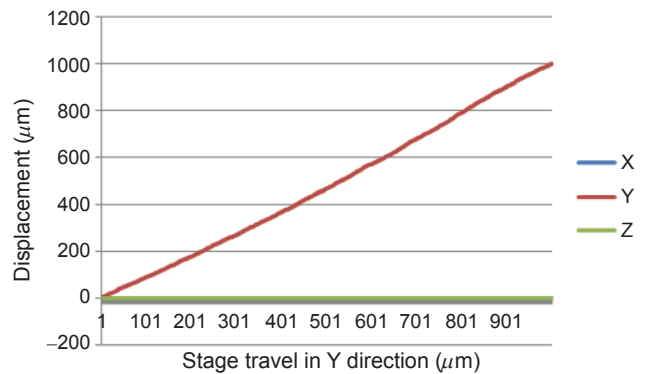


圖 20. Y 軸方向位移之感測訊號輸出。

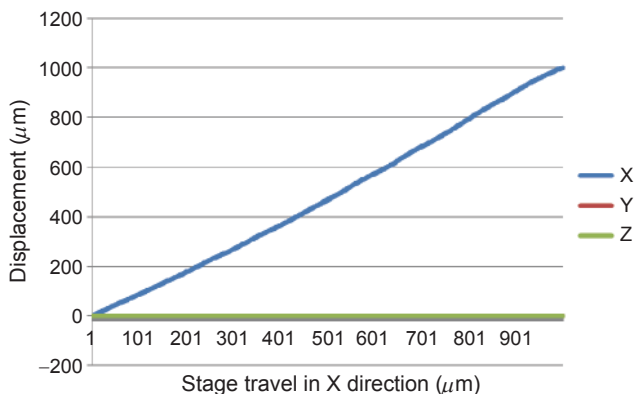


圖 19. X 軸方向位移之感測訊號輸出。

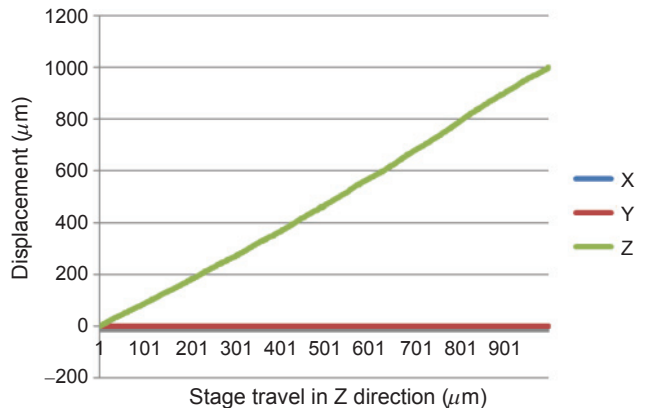


圖 21. Z 軸方向位移之感測訊號輸出。

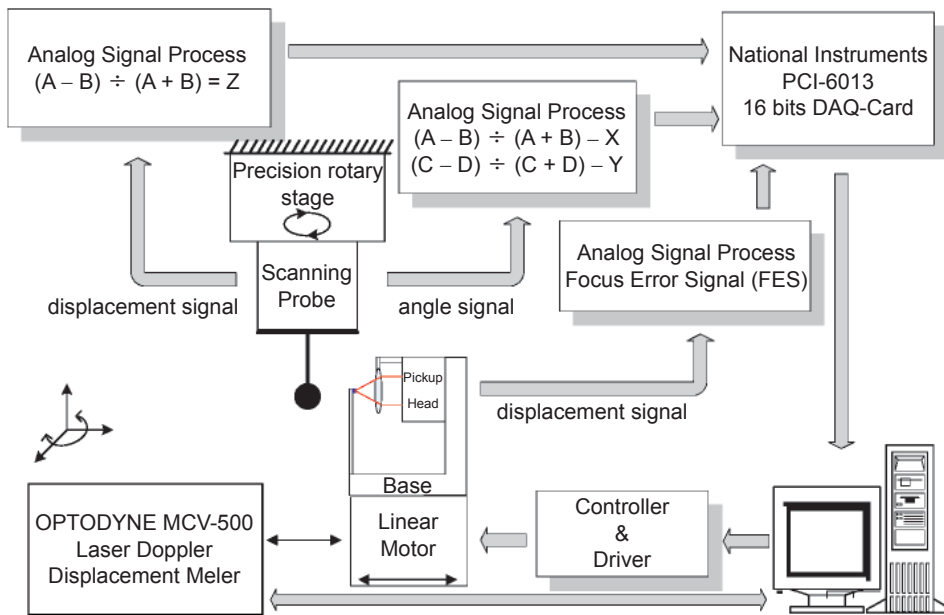


圖 22. 接觸力實驗架設示意圖。

在距平均數兩個標準差的範圍內，此範圍即為量測探頭的不確定度，因此，本研究所完成之接觸式掃描探頭在 $10\ \mu\text{m}$ 的距離下，其不確定度為 $0.7\ \mu\text{m}$ ($\pm\sigma$, confidence level 95%)。

由前文可知，三次元接觸式掃描探頭於量測過程中，探針前端圓球與待測物表面之間的作用力會隨著掃描範圍而增加。而探頭在量測時所受的作用力，可由微力檢測器測試得知，其實驗架設如圖 22 所示，於線性馬達上方放置一微力檢測器⁽¹⁴⁾，將探針前端圓球碰觸微力檢測器中懸臂量末端的推動使圓球位移達到 $1\ \text{mm}$ ，同時抓取感測器的位移輸出訊號與微力檢測器的輸出訊號，三軸的接觸力

表 5. 三軸方向重複性。

次數	X 軸 (μm)	Y 軸 (μm)	Z 軸 (μm)
1	9.7	9.8	9.5
2	10.3	10.5	9.4
3	10	10.3	9.9
4	10.3	10.1	10.2
5	10.2	9.5	10
6	10	9.8	9.4
7	9.5	10.2	9.7
8	9.6	10.1	10.4
9	10.2	9.7	10.3
平均	9.97	10	9.91
標準差 σ	0.3	0.32	0.39

量測整理如下圖 23、圖 24 與圖 25 所示。從得到之實驗結果，X 軸、Y 軸與 Z 軸於圓球位移達到 $1\ \text{mm}$ 時的接觸力分別為 $0.263\ \text{N/mm}$ 、 $0.261\ \text{N/mm}$ 與 $0.413\ \text{N/mm}$ ，與前文之分析結果相比較後符合分析之結果。

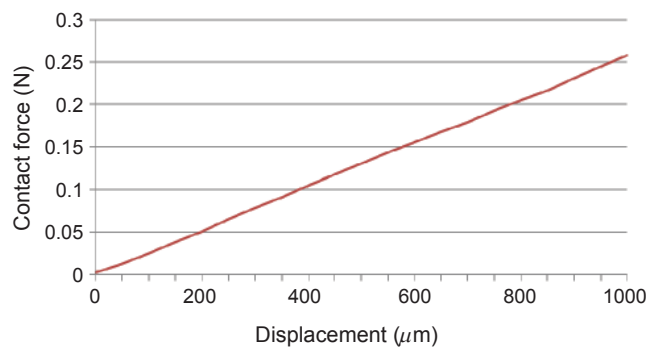


圖 23. X 軸向接觸力。

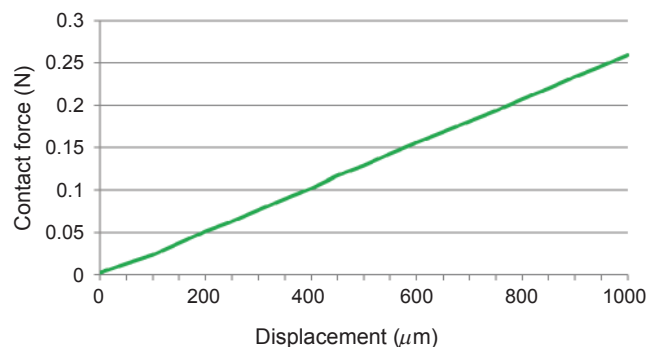


圖 24. Y 軸向接觸力。

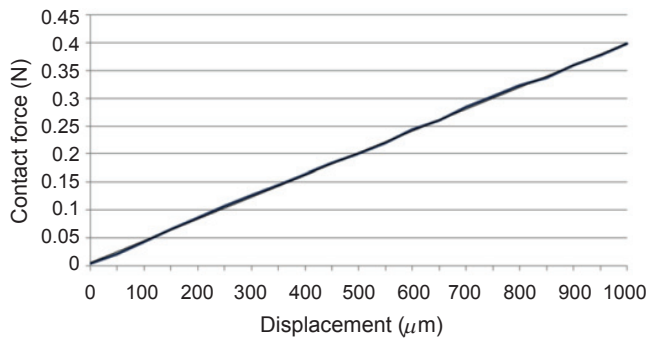


圖 25. Z 軸向接觸力。

六、結論

本研究設計一具有三自由度運動特性並搭配具有連續感測能力之位置感測器，研製一高精度低觸力的三次元接觸式掃描探頭，在設計上考慮各種影響探頭精度之因素，如接觸力、剛性、量測範圍等，所設計出之掃描探頭整體結構以 Z 軸系統與 XY 軸系統結合而成，其特色在於將結構之自由度限制為三個。利用有限元素軟體 ANSYS 對此結構加以驗證，模擬分析 Z 軸系統與 XY 軸系統之位移、彈片變形率與所承受之最大應力是否如設計之要求，並對探頭之位移進行誤差分析。量測系統以雷射二極體與 PSD 位置感測器作為感測裝置，並搭配光路系統設計，能量測 Z 軸位移與 XY 軸的角度偏擺，完成一具高精度低觸力的三次元接觸式掃描探頭。所完成的掃描探頭經由實驗驗證，具有 $\pm 1 \text{ mm} \times \pm 1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 的量測範圍，不確定度為 $0.7 \mu\text{m}$ ，且三軸之接觸力 XY 軸為 0.26 N/mm ，Z 軸為 0.4 N/mm 。

誌謝

本研究承蒙行政院國科會 (計畫編號 NSC99-2632-E-218-001-MY3) 支持研究經費，特此感謝。

參考文獻

1. S. Liang, *Proceeding of SPIE*, **6280**, 628002 (2006).
2. C. C. Wu, *Proposal of Discovery Frontier Research*, ITRI, Taiwan (2004).
3. D. J. Whitehouse, *Annals of the CIRP*, **37**, Feb (1988).

4. R. Leach, *Nanotechnology*, **12**, R1 (2001).
5. G. N. Peggs, A. J. Lewis, and S. Oldfield, *Annals of the CIRP*, **1**, 417 (1999).
6. W. O. Pril, *Proc. Of 16th ASPE*, 438 (1997).
7. H. Haitjema, *Annals of the CIRP*, **50**, 365 (2001).
8. H. Schwenke, *Proc. Of IDW Workshop 2001*, Knoxville, 2, May (2001).
9. H. Schwenke, *Annals of the CIRP*, **50**, 361 (2001).
10. Official Website of Mitutoyo : <http://www.mitutoyo.co.jp>
11. F. Meli, M. Fracheboud, S. Bottinelli, M. Bieri, R. Thalmann, J-M. Breguet, and R. Clavel, *Euspen Int. Topical Conference*, Aachen, Germany, May (2003).
12. T. Liebrich and W. Knapp, *Annals of the CIRP*, **55**, 745 (2010).
13. Official Website of Renishaw : <http://www.renishaw.com/>
14. 邱偵祐, 奈米級三次元接觸式量測探頭之研製, 南台科技大學機械工程研究所碩士論文 (2006).



朱志良先生為國立台灣大學機械工程博士，現任南台科技大學機械工程系教授。

Chih-Liang Chu received his Ph.D. in mechanical engineering from Nation Taiwan University. He is currently a professor in the Department of Mechanical Engineering at Southern Taiwan University of Science and Technology.



陳泓錡先生為南台科技大學機械工程系碩士，現為南台科技大學機械工程系博士候選人。

Hung-Chi Chen received his M.S. in mechanical engineering from Southern Taiwan University of Science and Technology. He is currently a Ph.D. candidate in the Department of Mechanical Engineering at Southern Taiwan University of Science and Technology.



柯志憲先生為南台科技大學機械工程系碩士。

Jhieh-Sian Ke received his M.S. in mechanical engineering from Southern Taiwan University of Science and Technology.