

壓電式觸發量測系統開發

本研究開發一種使用壓電觸發測頭的量測系統。該測頭結構包括上殼、下殼、壓電式內部機構和防水接頭。內部結構由壓電元件、彈簧、三腳架和圓柱球座組成。

五軸工具機實驗結果顯示，將壓電受力設定的觸發訊號閾值設定為 55mV。測力計實驗結果顯示，該系統在 Z 軸上的觸發力為 0.2 N，X 軸和 Y 軸上的觸發力為 0.5 N。在 XY 平面雷達圖顯示出較低且幾乎均勻向各個方向量測，觸發位移在 XY 平面為 $4.8\ \mu\text{m}$ ，而 Z 軸的觸發位移為 $0.32\ \mu\text{m}$ 。而在重複性數據分析結果：XY 平面全方位兩倍標準差為 $0.34\ \mu\text{m}$ 、Z 軸兩倍標準差為 $0.12\ \mu\text{m}$ ，以此達到三軸測頭觸發與測頭重複性。

■ 李淙榆、李哲維、劉建宏

關鍵詞：觸發式測頭、壓電致動器、重複性

研究目的

觸發式訊號量測技術是接觸式測頭系統的核心。通過觸發機制，接觸式測頭可以實現在特定事件或條件下進行測量，從而提高測量效率和準確性。觸發機制可以基於力、壓力、電阻變化等物理量實現，並通過數據採集、訊號處理和分析方法進行分析和評估。這些技術使接觸式測頭能夠應對不同應用場景中的動態測量需求，例如材料力學測試、加工量測監測和生物醫學應用等。

本論文提出壓電技術和量測技術相結合，提供了一種高精確度、高靈敏度和快速響應的測量和控制解決方案，並評估其在各個領域中的應用和挑戰。通過對相關文獻和實驗研究的綜合分析，我們將分析這種結合的性能、優點和侷限性，並提出未來的研究方向和改進策略。透過本研究，我們將提供有關觸發式訊號量測技術與接觸式測頭結合的深入理解，並為其在相關領域中的應用和發展提供有價值的參考。

文獻回顧

2017 年 Qiangxian Huang^[1] 提出一種實現在微 / 奈米坐標測量機上進行具有接近奈米解析度和非常低觸發力的真實三維奈米測量，提出一種新的基於石英調諧叉的三維共振觸發測頭。2017 年 Adam Wozniak^[2] 等人探討數值校正方法對於 CNC 機床中運動學接觸式測頭精度提升的影響。2018 年 Micha Jankowski^[3] 提出觸發訊號過濾引起的延遲是否對 CNC 加工精度的影響。2019 年 Weikang Zheng^[4] 等人提出探頭核心結構具有由單片 Hexflex 板、觸針和三個電容傳感器組成。2019 年 Yamin Li^[5] 等人提出運動學觸發式測頭 (KTTP) 的動態模型，高可靠性和低成本。2020 年 P. Xu, R. J. Li^[6] 發展一種新型的微 / 奈米觸發式探針，使用光電傳感器和楔形棱鏡實現三維檢測。2020 年 Ali Bastas 等人^[7] 提出坐標測量機的測頭系統，包括掃描式測頭和觸發式測頭。作者介紹了這兩種系統的優缺點，並通過實驗

研究比較了它們在測量時間、精度和不確定性方面的表現。2021 年 Zheng, W.^[8] 提出一種基於 PZT 驅動的柔性振動探針系統，該系統由 PZT 驅動器、探針和訊號檢測器三部分組成。該系統具有高靈敏度、高精度和可調節性等優點，在低頻振動測量和分析方面具有重要的理論意義和實際應用價值。2021 年 Wen-Shu Jiang^[9] 等人提出基於光學感應系統的觸發式測頭，具有一定的創新性和實用性。它採用了簡單而有效的結構，通過光電二極體和彈性元件的組合，實現了對光點位置的測量和反饋控制。2021 年 Guillem Quintana^[10] 等人探討了齒輪測量中的測頭觸發後運動特性。研究發現，觸發訊號的傳輸時間、減速時間和測量速度與機床之間存在著關聯。2022 年 Xiao-Yu Feng^[11] 等人提出了一種基於改進的光學槓桿方法的新型高分辨率觸發式探針。探頭系統設計由軸、探頭球體、激光二極管 (LD)、PSD、包括板簧和浮板的彈性機構以及鏡子組成。2022 年 Chunxia Lu^[12] 等人提出主要針對掃描測頭在齒輪測量中的動態特性進行研究，並提出了一個雙質量彈簧阻尼系統的二自由度動力學模型，以描述探頭的動態行為。

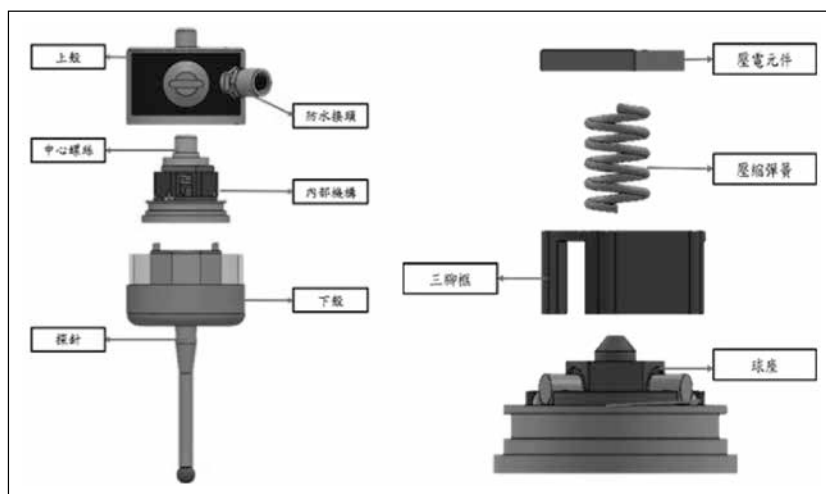
2023 年 Tom Hovell^[13] 等人提出接觸式測量技術在三維計量中的應用。作者介紹接觸式測量技術的基本原理和應用，並討論其優點和缺點。其中振動探頭的使用已被證明在低觸發力和減少黏附影響方面具有優勢。這些系統通常具有較小的操作範圍，需

要較慢的掃描速度和對環境變化的更高的敏感性。2023 年 Weikang Zheng^[14] 等人開發一種探頭系統，由彈性變形機構和測針組成，綜合動態解析度為 $0.11\ \mu\text{m}$ ，單向重複精度為 $0.4\ \mu\text{m}$ 。2023 年 Yijun Shen^[15] 等人提出接觸式測量的關鍵感測器是接觸式探頭系統。探頭系統安裝在不同類型的儀器上，用於不同的量測方法。

研究方法

一、壓電式觸發測頭架構

本研究壓電式觸發測頭在結構上主要是分為三大部分：上殼、壓電式機構內部以及下殼，如圖一。其中，壓電式內部機構為當探針發生位移時，彈簧會產生一反力使壓電式內部機構維持力平衡狀態，都能使測頭返回原始位置。壓電制動器作為電壓訊號觸發開關之觸發點，經由量測系統量測到電壓變化，而主體機構設計設置防水接頭於電池座和探針與下座連接處加裝防塵套，並隔絕測頭外部對此壓電式觸發測頭造成的雜訊干擾，可達到防塵防水之效果。

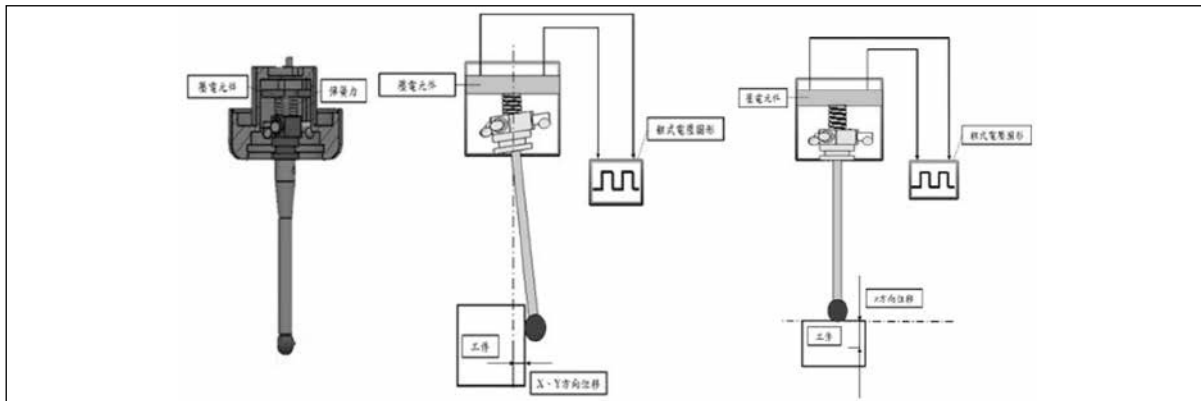


圖一 測頭系統組合及內部示意圖

二、壓電式觸發測頭量測原理

本研究設計壓電式測頭量測系統的原理為，透過裝有壓電元件的測頭，在量測時使內部彈簧直接受壓，利用壓電效應，使壓電制動器產生相對應的電流，再經由傳輸自動化資料擷取系統，進行訊號整理及分析，最後由電腦呈現明顯的電壓訊號，而在內部彈

簧受壓力時得到由壓電制動器所產生出的變化訊號，就能使用此訊號來分析，進而得到測頭重複性。這種觸發式量測方法具有高靈敏度和準確性，能有效量測測頭的性能和重複性，並提供重要的數據和信息，有助於了解測頭的測量特性和可靠性，三軸觸發原理如圖二。



圖二 X、Y 方向觸發原理

三、系統驗證流程圖

在系統驗證實驗中，我們使用壓電式觸發測頭進行量測，該測頭架設在 Pioneer 三次元量測儀上。首先，在進行實驗之前，我們使用自動量測系統檢測可能存在的雜訊干擾，以確保量測結果的準確性。確定無雜訊干擾後，我們將測頭架設在三次元量測儀平台上，以 Z 軸為進給方向進行量測。我們使用不同深度分別為 0.001 mm、0.005 mm 和 0.01 mm 的進給量，進給速度為 8 mm/s，每 2 秒進行一次量測。接著，我們將測頭抬高至指定高度，再給予深度，並通過自動量測系統偵測其位置。我們將重複這個步驟 5 次，共計進行 3 組量測，並記錄電壓變化量，以評估測頭的觸發訊號可行性。

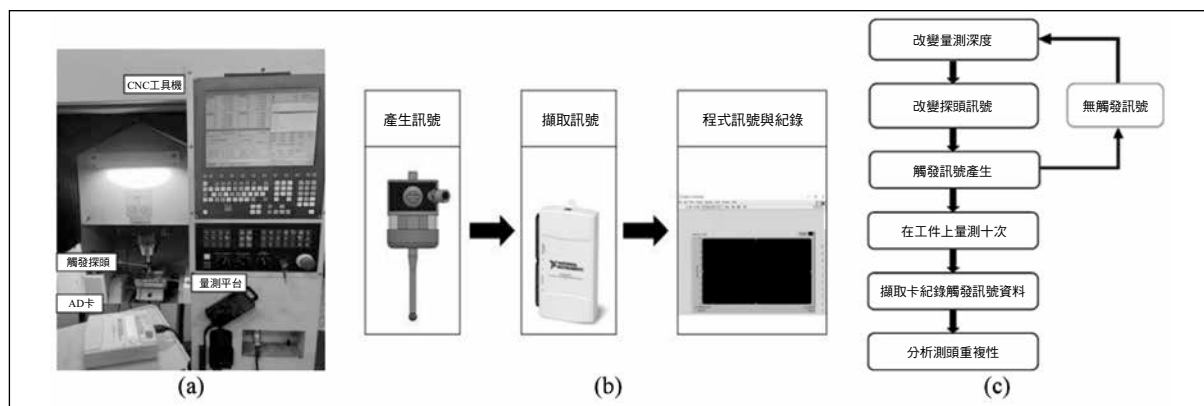
四、工具機實驗架構與流程

上機實際實驗流程為先將壓電式觸發測頭裝置在五軸加工機 (HM3025L) 主軸上，壓電式觸發測頭正負極透過防水接頭銜接 NI 擷取卡，NI 擷取卡負責接收觸發訊號並記錄觸發訊號，量測過程會把量測物件固定在機台上，並使用虎鉗鎖緊，避免量測時脫落，接著按照設定好的量測參數進行校正與量測，量測過程會記錄測頭的觸發訊號，再由訊號進行分析，找出壓電式觸發量測系統的重複性，證明此壓電式觸發量測系統的可用性，其實驗架設實際圖如圖三(a)所示。

在上機實際實驗中，壓電式觸發測頭應用於五軸加工機 (HM3025L) 上進行量測。在實驗前，我們同樣使用自動量測系統檢測

可能存在的雜訊干擾，以確保量測結果的準確性。然後，我們將工件固定在機台虎鉗上，進行實際量測我們記錄電壓變化數據，以評估實際測頭的性能。透過系統驗

證和上機實際實驗量測，我們能夠獲得有關壓電式觸發測頭重複性的結果。系統架構如圖三 (b)，實驗流程如圖三 (c) 所示。



圖三 實際量測示意 (a)、系統架構圖 (b)、實驗流程圖 (c)

實驗結果

一、系統驗證實驗

(一) X、Y 軸電壓觸發圖

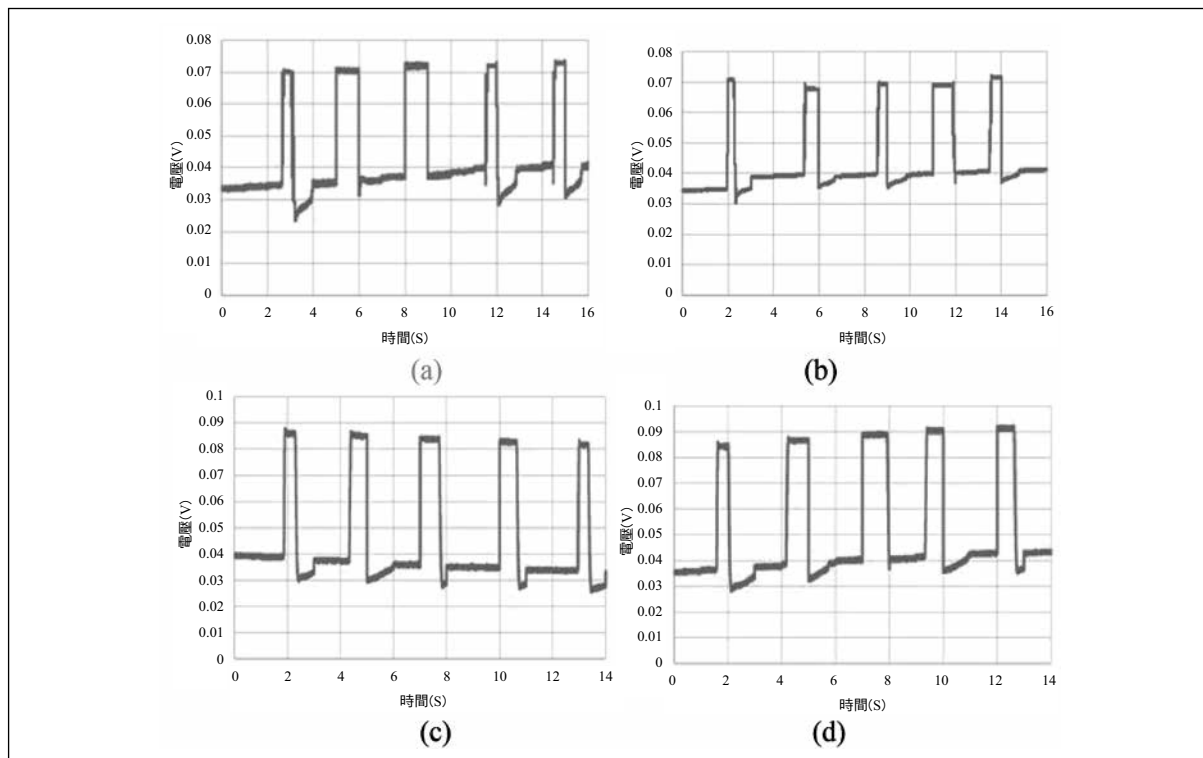
在 X、Y 軸觸發訊號分別在深度下 0.001 mm、0.05 mm 和 0.01 mm 的進給量，以 8 mm/s 的進給速度進行量測。每 3 秒進行一次量測，共重複進行 5 次量測，總計 3 組。而經由實驗結果，發現在 X、Y 軸在給予深度 0.01mm 下電壓訊號值無觸發訊號產生，因此我們進行測頭內部機構設計改善，初始彈簧的彈簧係數為 0.3 N/mm 與線徑為 0.45mm，而我們更換線性為 0.8mm、彈性係數為 0.6 N/mm 的改善彈簧，透過增加彈簧剛度，使減少彈簧側變形，進行 X、Y 軸在不同深度下測試，以 8 mm/s 的進給速度進行量測，共重複進行 5 次量測，總計 2 組。

由上述實驗結果得知，彈簧剛度對壓電式量測系統的影響，實驗結果顯示，在機台速度為 8mm/s 的情況下，初始彈簧因彈簧係數較低，需要較深的深度才能使得系

統觸發且觸發訊號不穩定，說明此彈簧的靈敏度較低。然而，經由改善彈簧增加彈簧剛度後，在深度 0.01mm 下產生觸發訊號且訊號的穩定性得到改善，證明此彈簧對壓電式量測系統產生訊號的靈敏度也提高，如圖四 (a)(b)。而改善彈簧在 X、Y 軸深度 0.01mm 下，根據圖四 (a)(b) 的觸發訊號值約在 30~35mv，而在更小深度的觸發訊號會因過小電壓訊號值與雜訊接似，造成觸發量測系統無法判斷是雜訊或觸發訊號，此量測系統在 X、Y 軸精度在 0.01mm。

(二) Z 軸電壓觸發圖

本次實驗是用來在不同深度下驗證電壓觸發訊號，因此使用三種不同的深度來進行比較，我們以 Z 軸為進給方向，分別在不同深度下 0.001 mm、0.05 mm 和 0.01mm 的進給量，以 8 mm/s 的進給速度進行量測。每 2 秒進行一次量測，共重複進行 5 次量測，總計 2 組。



圖四 改善彈簧 X 方向深度 0.01mm 電壓圖 (a)、改善彈簧 Y 方向深度 0.01mm 電壓圖 (b)、Z 軸觸碰深度 0.001mm(c) 及 Z 軸觸碰深度 0.005mm(d) 電壓圖

由上述實驗可得：從圖四 (b)(c) 不同深度下，透過結果分析，觸發訊號值約在 47~52mV，此系統 Z 軸精度在 0.001mm。此外，可以透過電壓圖看出電壓值與電壓脈衝寬度的不穩定造成我們此系統的重複性不佳，而會造成此現象，我們經由相關文獻參考，統整出影響三種重要因素：觸發力、機台速度、觸發訊號傳輸時間。

(三) 位移最大變形輸出

量測此系統位移最大變形輸出電壓，以量測工件固定在量測平台上，測頭以安置主軸上，並進行校正。而量測範圍從 $1\mu\text{m}$ 至 $10\mu\text{m}$ ，以 8 mm/s 的進給速度，每次移動 $1\mu\text{m}$ 碰觸，觀測此系統所產生的電壓訊號值，如圖 5(a)。實驗數據說明，在量測範圍 $1\mu\text{m}$ 至 $10\mu\text{m}$ 的電壓趨勢平緩，而最大電壓差距約 4mV，說明此系統電壓已接近位移最大變形電壓輸出。

二、系統影響因素

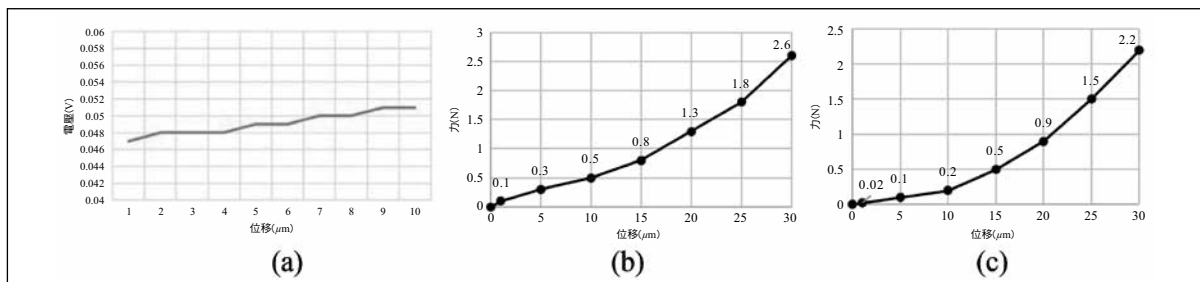
探討觸發力、機台速度、觸發訊號傳輸時間對系統影響，分別對觸發力、機台速度、觸發訊號時間與彈簧剛度分別進行兩組實驗比較，在觸發力實驗中，在相同觸發訊號傳輸時間，分別對機台速度 4 mm/s、8 mm/s 下，進行深度 0 ~ 30 μm 觸發力量測，在機台速度 4 mm/s、8 mm/s 下，進行相同深度、相同觸發訊號傳輸時間，進行十組電壓訊號量測，經由自動量測系統分析是否產生穩定傳輸電壓訊號，得到較佳機台速度參數。其次，在觸發訊號時間改變下，我們利用得到較佳機台速度和相同深度，進行十組電壓訊號量測，經由自動量測系統分析是否產生完整電壓波形，得到較佳觸發訊號時間。

(一) 觸發力

透過測力計實驗測試，根據圖五 (b)(c) 比較，在機台速度 8mm/s 得知深度 $1\mu\text{m}$ 、5

$1\mu\text{m}$ 和 $10\mu\text{m}$ 的觸發力大小，分別為 0.1N 、 0.3N 和 0.5N ，然而在機台速度 4mm/s 得知

深度 $1\mu\text{m}$ 、 $5\mu\text{m}$ 和 $10\mu\text{m}$ 的觸發力大小，分別為 0.02N 、 0.1N 和 0.2N 。



圖五 Z 軸位移最大變形電壓輸出 (a)、機台速度 8 mm/s (b)、機台速度 4 mm/s (c)

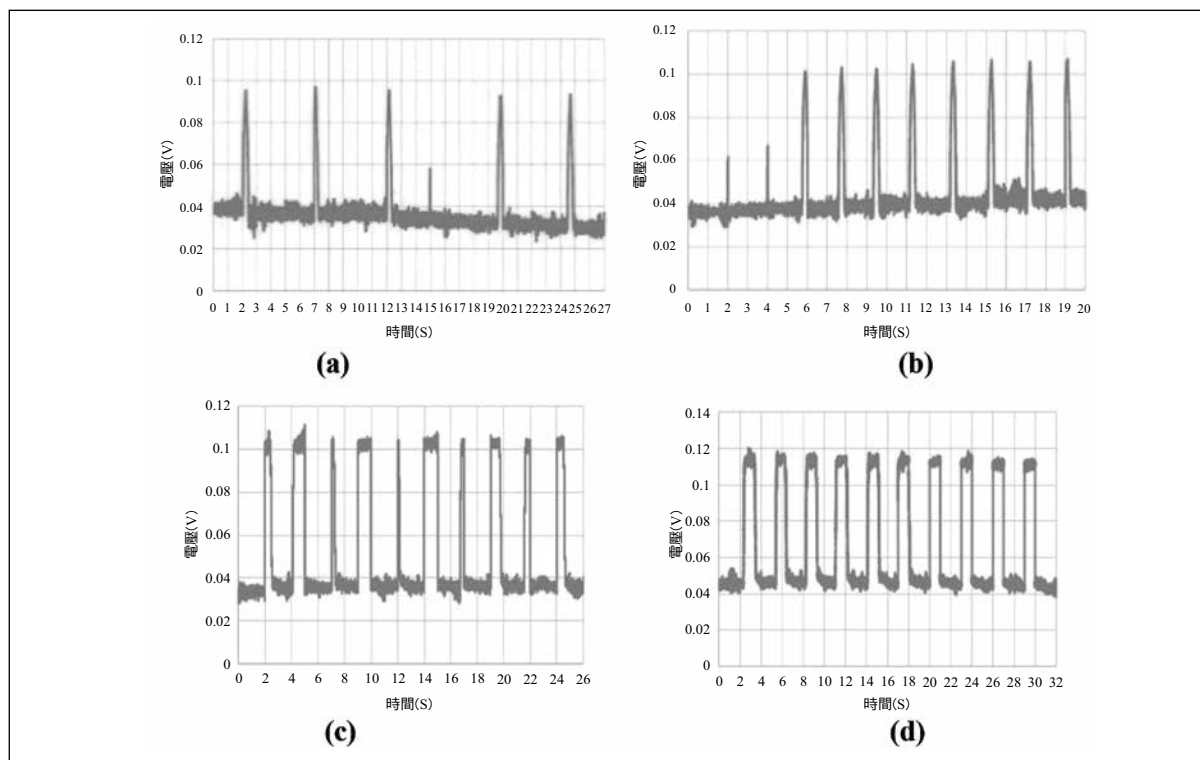
(二) 機台速度

根據圖六 (a)(b) 比較，可以發現在機台速度 4 mm/s 下，在電壓訊號十組區間中，在區間只產生六組電壓訊號，其因觸發力過小，使量測系統無法量測到其他四組電壓訊號，而在機台速度 8 mm/s 下，因觸發力較大，使量測系統完整量測每組電壓訊號，因此在機台速度 8 mm/s 下，有較穩定電壓訊號傳輸。

(三) 觸發訊號傳輸時間

根據圖六 (c) 顯示，在機台速度 8 mm/s ，在機台速度 8 mm/s ，可以發現在觸發訊號時間下，電壓脈衝寬度訊號在 7 s 、 12 s 、 17 s 發生電壓尖端變化。

而在圖六 (d) 顯示，在觸發訊號時間延遲 1 s 下，在觸發訊號時間區間達到脈衝寬度的穩定，電壓訊號也有所提升，因此在觸發訊號時間 1 s 下，有較佳穩定脈衝寬度。



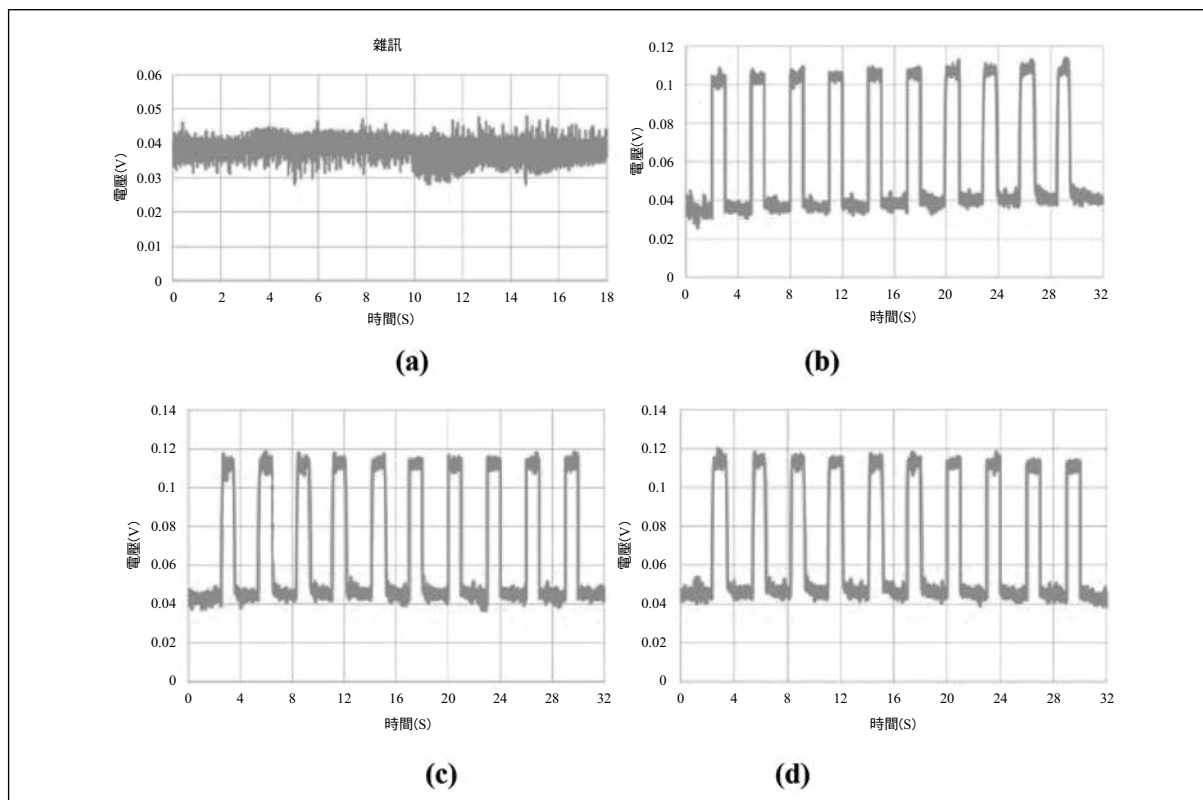
圖六 機台速度 4 mm/s (a)、 8 mm/s (b) 電壓圖、瞬間觸發 (c) 對比延遲 1 s 觸發 (d) 對電壓比較圖

三、工具機實驗

(一) Z 軸不同深度觸發位移與重複性分析

接下來將較佳的操作參數應用五軸工具機上進行實測，我們使用自動量測系統檢測雜訊干擾，透過雜訊基線測量得到雜訊大約 30~50 mV，如圖七 (a) 所示。確認雜訊干

擾不影響觀測值後，以 Z 軸為進給方向，使用深度 0.001mm、0.05 mm 和 0.01mm 的進給量，上述實驗得到參數，給予機台 8 mm/s 的進給速度、觸發訊號時間延遲 1 秒進行量測，共重複進行 10 次量測，總計 3 組。以圖七 (b)~(d) 表示。



圖七 無量測電壓 (a)、深度 0.001mm 電壓圖 (b)、深度 0.005mm(c) 電壓圖、深度 0.01mm(d) 電壓圖

量測此系統 Z 軸觸發位移與重複性，利用五軸工具機進行實際量測，根據上述實驗中不同深度的觸發電壓圖進行分析，如表一，我們預設電壓 90 mV 為觸發訊號閾值，發現在工具機實際量測 0.001 mm、0.05 mm 和 0.01 mm 的深度下，而在 Z 軸觸發位移得到 0.98~1.02 μm ，而重複性分析結果顯示在不同深度下的標準差分別為 0.18 μm 、0.18 μm 、0.17 μm ，證明壓電式量測系統重複性。而在給予不同深度下，Z 軸量測精度可達到為 0.001 mm。

(二) 三軸觸發位移與重複性分析

由上述實驗原理與分析，在五軸工具機 (HM3025L) 上進行實測，確認無雜訊干擾後，我們 XY 軸為進給方向 0.01 mm、Z 軸為進給方向使用 0.001 mm 的進給量，經由上述實驗得到參數，給予機台 8 mm/s 的進給速度、觸發訊號時間 1 秒，XY 軸進行在 30° 處採集 12 個點繞一圈，共 12 次量測，Z 軸重複進行 10 次量測，如圖八 (a)(b)。

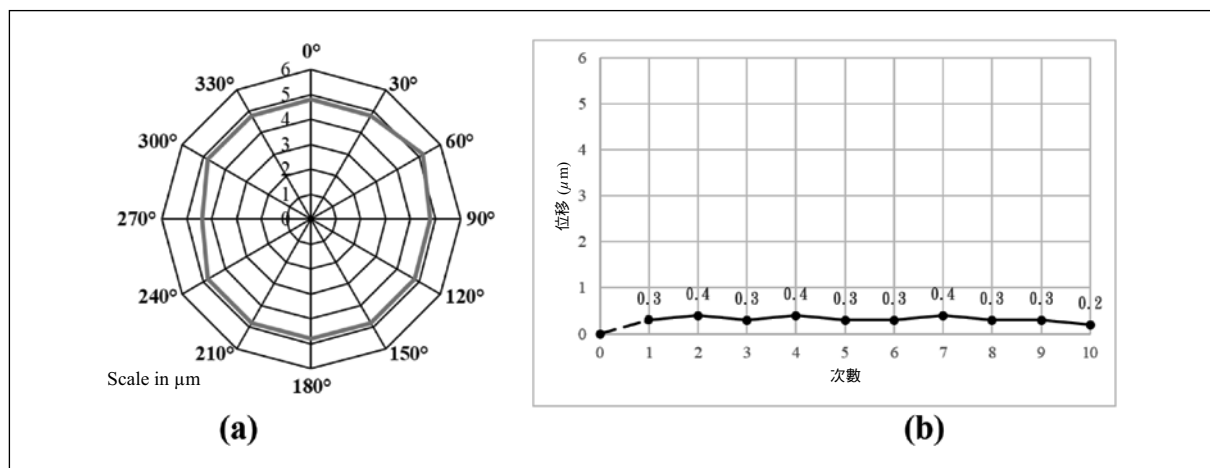
由上述實驗結果分析，如表二。透過實驗數據分析，我們預設電壓 55mV 為觸發訊

號閾值，XY 平面經由雷達圖對於我們此開發系統進行量測。實驗結果在 XY 平面顯示出較低且幾乎均勻向各個方向量測，觸發位

移在 XY 平面中為 $4.8\ \mu\text{m}$ 。而 Z 軸的觸發位移為 $0.32\ \mu\text{m}$ 。在數據分析結果：XY 平面全方位為 $0.34\ \mu\text{m}$ 、Z 軸為 $0.12\ \mu\text{m}$ 。

表一 Z 軸不同深度重複性分析

次數 \ 深度	1 μm 觸發位移 (μm)	5 μm 觸發位移 (μm)	10 μm 觸發位移 (μm)
1	0.8	1.1	1.1
2	1.0	1.0	1.0
3	1.0	1.0	1.0
4	0.9	1.0	1.1
5	1.0	1.1	0.9
6	1.0	1.0	0.9
7	1.0	1.0	0.9
8	1.1	0.9	1.1
9	1.1	0.9	1.1
10	1.1	0.8	1.1
平均值	1.00	0.98	1.02
標準差	0.089	0.088	0.087



圖八 XY 軸位移雷達圖 (a)、Z 軸觸發位移圖 (b)

表二 XY 軸重複性分析 (a)、Z 軸重複性分析 (b)

次數 (角度)	XY 軸	觸發位移 (μm)
0°		4.8
30°		4.8
60°		5.2
90°		4.8
120°		4.8
150°		4.8
180°		4.8
210°		4.8
240°		4.8
270°		4.4
300°		4.8
330°		4.8
平均值		4.8
標準差		0.17

次數	Z 軸	觸發位移 (μm)
1		0.3
2		0.4
3		0.3
4		0.4
5		0.3
6		0.3
7		0.4
8		0.3
9		0.3
10		0.2
平均值		0.32
標準差		0.06

(三) 系統測頭比較

本研究量測系統開發一種簡單機構的三軸觸發式測頭，與傳統觸發式測頭相比，其設計更加簡化而不失效能。傳統觸發式測頭常常採用複雜的機構設計，增加系統的複雜性和成本。相反，本研究的觸發式測頭採用

簡單的機構設計，使系統更易於操作和維護。

該觸發式測頭採用壓電技術，這種技術使得觸發力得以極大地降低，同時保持高度的量測準確度。相比於市面上的其他觸發式測頭，本研究所開發的測頭不僅價格更加低廉，而且能夠提供同樣量測精確度。

表三 市面觸發式測頭比較表

				
廠商	BLUM	HEIDENHAIN	RENISHAW	NCHU
型號	TC52	TS 740	RMP600	
傳輸方式	無線	紅外線	無線	有線
量測重複性 (2σ)	0.3 μ m	0.25 μ m	0.25 μ m	0.34 μ m
XY 平面觸發力	2.3 N	0.2N	0.2N	0.5N
Z 方向觸發力	0.65N	0.6N	1.9N	0.2N

結論

本研究開發一種具有壓電式觸發量測系統，該測頭結構包含上殼、下殼、壓電式內部機構和防水接頭。內部結構由壓電元件搭配彈簧、三腳架和鋼柱圓柱球座組成，提供了堅固性和環境保護功能，確保可靠且一致的量測結果。壓電元件、彈簧和鋼柱圓柱球座的結合在量測過程中產生觸發的響應和穩定性。

本研究的結果和分析表明，在壓電式觸發量測系統中，測頭的重複性是一個重要的考慮因素。觸發訊號時間、機台速度和彈簧剛度在測頭重複性方面發揮了關鍵作用。適當的觸發訊號時間可以確保測頭的穩定性和準確性，本研究中的最佳觸發訊號時間為延遲 1 秒。快速且穩定的機台運行速度有助於減少量測過程中的振動和不穩定性，進而提高測頭的重複性，本研究中的最佳機台速度為 8 mm/s。經由更換彈性係數較高的彈簧可以增加彈簧剛度並減少彈簧側變形，從而提高系統的靈敏度。

接下來我們利用工具機實際量測，進一步的實驗結果表明，在不同深度的量測中，我們的測頭具有良好的重複性和精度。在 Z 軸觸發位移方面，我們預設電壓 90mV 為觸發訊號閾值，量測系統在不同深度下達到了 0.98~1.02 μ m 的量測結果。重複性分析結果顯示，在不同深度下的標準差為 0.18 μ m、0.18 μ m 和 0.17 μ m，這證明測頭的重複性。

透過三軸實驗結果分析，測力計實驗結果顯示，該系統在 Z 軸上的觸發力為 0.2 N，X 軸和 Y 軸上的觸發力為 0.5 N。而我們預設電壓 55mv 為觸發訊號閾值，在 XY 平面雷達圖顯示出較低且幾乎均勻向各個方向量測，觸發位移在 XY 平面中為 4.8 μ m，而 Z 軸的觸發位移為

0.32 μm 。而在數據分析結果：XY 平面全方位標準差為 0.34 μm 、Z 軸標準差為 0.12 μm ，以此達到三軸測頭觸發與測頭重複性。

本研究開發一種壓電式觸發量測系統具有低觸發力、價格低廉和高量測準確度等優勢，並應用於 CNC 工具機上。該系統能夠自動處理壓電產生的電壓訊號，並透過自主開發的量測軟體將數據圖像化進行分析。未來研究可以進一步優化測頭設計和操作參數，以提高精度。

參考文獻

1. Huang, Q., Chen, C., Wu, K., Zhang, L., Li, R., & Fan, K. C. (2017). A three-dimensional resonant triggering probe for micro-CMM. *Applied Sciences*, 7(4), 403.
2. Wozniak, A., & Jankowski, M. (2017). Variable speed compensation method of errors of probes for CNC machine tools. *Precision Engineering*, 49, 316-321.
3. Jankowski, M., & Wozniak, A. (2018). Testing of the delay time of wireless communication of CNC machine tools' probes and controller. *Metrology and Measurement Systems*.
4. Weikang Zheng, Junkang Guo, Zhigang Liu., "A flexible-hinge touch probe using a 3D parametric model and positioning method.", *Measurement Science and Technology*, vol.30, no.1, 2019.
5. Li, Y., Zeng, L., Tang, K., & Li, S. (2019). A dynamic pre-travel error prediction model for the kinematic touch trigger probe. *Measurement*, 146, 689-704.
6. Xu, P., Li, R. J., Jin, X. W., Wang, P. Y., Chen, L. J., & Fan, K. C. (2020). A new micro/nano-touch-trigger probe using an optoelectronic sensor with a wedge prism. *Review of Scientific Instruments*, 91(7), 076103.
7. Bastas, A. (2020). Comparing the probing systems of coordinate measurement machine: Scanning probe versus touch-trigger probe. *Measurement*, 156, 107604.
8. Zheng, W., Tian, K., Guo, J., Liu, Z., & Hong, J. (2021). A flexible vibration probe based on PZT low-frequency drive mode. *IEEE Access*, 9, 78823-78834.
9. Jiang, W. S., Cheng, Z. Y., Gong, W. C., Yu, L., Li, R. J., & Huang, Q. X. (2021). A novel dynamic compensation method for a contact probe based on Bayesian inversion. *Measurement*, 186, 110143.
10. Li, S., Feng, P., Zeng, L., Wang, S., Li, Y., & Zhang, S. (2021). A rigid-flexible coupling pretravel error model for a touch-trigger probe in an on-machine inspection system. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 114, 2991-3003.
11. Feng, X. Y., Xu, P., Li, R. J., Lei, Y. J., Zhang, L. S., Wang, B., & Huang, Q. X. (2022). Development of a high-resolution touch trigger probe based on an optical lever for measuring micro components. *IEEE Sensors Journal*, 22(7), 6466-6475.
12. Lu, C., Wang, J., Aili, A., Li, S., & Hou, Z. (2022). Dynamics model of scanning probe on GMC. *Measurement*, 199, 111472.
13. Hovell, T., Petzing, J., Guo, W., Gill, C., Justham, L., Lohse, N., & Kinnell, P. (2023). Measurement Techniques for Three-Dimensional Metrology of High Aspect Ratio Internal Features—A Review. *Metrology*, 3(2), 139-168.
14. Zheng, W., Wang, X., Li, B., Gao, R., Shao, W., & Liu, Z. (2023). Nonlinear resonance suppression method of 3D contact probe based on dynamic TSVD inversion. *Measurement*, 207, 112412.
15. Shen, Y., Ren, J., Huang, N., Zhang, Y., Zhang, X., & Zhu, L. (2023). Surface form inspection with contact coordinate measurement: a review. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 5(2), 022006.

作者簡介

李淙榆 / 國立中興大學 機械工程學系

李哲維 / 國立中興大學 機械工程學系

劉建宏 / 國立中興大學 機械工程學系 / 指導老師

