

經濟部科技專案期末成果報告書

112 年度智慧機械產業智慧化線上計量標準建置 計畫

全程計畫: 自 112 年 02 月至 115 年 12 月止

本年度計畫: 自 112 年 02 月至 112 年 12 月止

中華民國 112 年 12 月

目錄

壹、基本摘要	1
貳、計畫目標與產業需求	6
一、全程計畫目標.....	6
二、國家度量衡標準實驗室定位與任務.....	10
三、產業需求.....	11
四、全程計畫架構.....	12
五、實施方法與產業效益.....	14
六、分年度技術建立目標及時程.....	16
參、年度計畫目標及執行情形	22
一、線上量測與組裝調校分項.....	26
二、工具機品質長效量測與評估分項.....	78
三、量測標準平台與產業合作分項.....	101
四、研發技術導入示範案.....	117
五、本年度技術亮點.....	131
六、後續成果應用與服務之擴散規劃.....	137
七、委託執行情況.....	138
肆、資源運用情形	140
伍、計畫變更說明	143
陸、成果說明	144
附錄一、參考文獻.....	167
附錄二、資本門設備說明.....	169
附錄三、審查意見回覆.....	170

圖目錄

圖 0-1 工具機發展趨勢.....	6
圖 0-2 工具機產業鏈-目標產業	8
圖 0-3 計畫發展方向.....	10
圖 0-4 計畫規劃內容與產業政策之關聯.....	12
圖 1-1-1 量測參考示意圖.....	29
圖 1-1-2 量測光學架構.....	30
圖 1-1-3 高斯光束成像示意圖	30
圖 1-1-4 半導體雷射光源.....	31
圖 1-1-5 高斯光學傳遞系統示意圖	31
圖 1-1-6 焦長 (a) 15 mm、(b) 20 mm、(c) 25 mm	32
圖 1-1-7 焦長與 0.1"解析度對應位置解析度關係.....	33
圖 1-1-8 感測器模型示意圖	34
圖 1-1-9 感測範圍與規格參數(a) 20 mm × 20 mm、(b) 10 mm × 10 mm、(c) 4 mm × 4 mm	35
圖 1-1-10 感測器響應曲線.....	36
圖 1-1-11 量測系統設計	37
圖 1-1-12 量測模組光學系統分析	37
圖 1-1-13 耦合光學分析(a) Y 偏心與 Y 離軸耦合、(b) X 偏心與 Y 離軸耦合	38
圖 1-1-14 感測器訊號處理架構.....	38
圖 1-1-15 PD 雜訊 Spice 模型(由之前推算參數建立) (a)電流雜訊密度以及 (b)5 kHz 的 SNR.....	39
圖 1-1-16 類比訊號處理之 SNR 分析.....	40
圖 1-1-17 類比訊號處理頻率響應分析，-3 dB 頻寬為 3 kHz	40
圖 1-1-18 機台滑軌組裝誤差量測場域應用圖	40
圖 1-1-19 以奈米定位平台，進行位移 0.1 μm 步階直線度解析測試.....	41
圖 1-1-20 以高精度旋轉定位台，進行模組的 0.1"角度步階定位測試解析度.....	41
圖 1-1-21 0.1"角度步階解析度測試，白色為轉台角度(Yaw)，紅色為傾斜(Pitch)沒有對應的響應量	42
圖 1-1-22 量測儀器線性度分析 (a)直線度線性位移 (b)角度位移	42
圖 1-1-23 重複性驗證測試(花崗岩基準面為標的).....	43
圖 1-1-24 高鋒場域量測	45
圖 1-1-25 高鋒場域量測.....	45
圖 1-1-26 場域測試的重複性	45
圖 1-2-1 力量感測器結構設計圖	48
圖 1-2-2 有限元素分析模型及邊界條件.....	49
圖 1-2-3 力量感測器變形量分布結果.....	49
圖 1-2-4 10 kN 受力力量感測器應變量分布結果	50
圖 1-2-5 10 N 受力力量感測器應變量分布結果	50
圖 1-2-6 應變規貼附位置示意圖	51
圖 1-2-7 應變規電橋示意圖	51

圖 1-2- 8 後端電路架構圖.....	52
圖 1-2- 9 主軸預壓力量感測器安裝至力量校正機實測畫面.....	54
圖 1-2- 10 主軸預壓力量感測器透過法碼施力實測畫面.....	55
圖 1-2- 11 主軸預壓力量感測器的力量量測範圍驗證結果.....	56
圖 1-2- 12 主軸預壓力量感測器的力量量測解析度驗證結果.....	57
圖 1-2- 13 微型定點囊相變化模型的計算結果分析.....	59
圖 1-2- 14 主軸結構示意圖與內置型主軸溫度感測器的位置.....	60
圖 1-2- 15 自校型溫度感測器的結構設計圖.....	60
圖 1-2- 16 主軸自校型溫度感測器的熱傳途徑.....	61
圖 1-2- 17 主軸自校型溫度感測器的等效熱迴路與溫度分布.....	61
圖 1-2- 18 微型定點囊設計圖.....	62
圖 1-2- 19 不同比例的低熔點合金(Bi/Sn/In)配置 ^{[1-2-8][1-2-9]}	63
圖 1-2- 20 不同比例的低熔點合金(Bi/Sn/In)溫度的性能測試.....	63
圖 1-2- 21 轉折點溫度評估的方法.....	64
圖 1-2- 22 低溫合金與鋁定點微型定點囊的功能驗證.....	65
圖 1-2- 23 主軸自校型溫度感測器的實體圖.....	65
圖 1-2- 24 主軸自校型溫度感測器的溫度自校實施.....	66
圖 1-2- 25 自校型溫度感測器與主軸之實際整合完成圖.....	66
圖 1-3- 1 BBT40 內藏式主軸結構圖.....	68
圖 1-3- 2 主軸迴轉誤差量測模組原型設計圖.....	70
圖 1-3- 3 主軸迴轉誤差量測模組原型製作.....	71
圖 1-3- 4 組裝流程圖.....	72
圖 1-3- 5 量測結果圖.....	72
圖 1-3- 6 主軸迴轉誤差分析演算流程圖.....	73
圖 1-3- 7 主軸迴轉誤差 E_A , E_B 及 E_X , E_Y 分析結果.....	73
圖 1-3- 8 主軸迴轉誤差 E_Z 分析結果.....	74
圖 1-3- 9 Piezo 位移平台與讀頭量測示意圖.....	74
圖 1-3- 10 Reinshaw 讀頭角度讀值.....	75
圖 1-3- 11 AMO 量測模組.....	76
圖 1-3- 12 AMO 量測模組實體.....	76
圖 2-1- 1 線性軸各部位的組裝品質公差.....	81
圖 2-1- 2 線性軸組裝公差連接圖.....	81
圖 2-1- 3 線性軸之 6 項幾何誤差.....	82
圖 2-1- 4 在線性軸整個行程下，z 方向之旋轉誤差 γ 之允收範圍.....	83
圖 2-1- 5 各組裝公差對線性誤差 v 之貢獻度百分比.....	84
圖 2-1- 6 線性軸組裝品質分析之人機操作介面.....	84
圖 2-1- 7 組裝品質參數補償效果評估.....	85
圖 2-1- 8 於場域進行模型判定係數之試驗流程圖.....	86
圖 2-1- 9 於場域進行主軌與副軌真直度及平行度之量測架構.....	86
圖 2-1- 10 使用分析軟體之介面.....	86

圖 2-1- 11 模型判定係數試驗結果.....	87
圖 2-2- 1 快速查核件硬體設計示意圖	89
圖 2-2- 2 快速查核件兩端施力(4 kg 自重)情況下的變形量模擬結果(模擬操作人員取用與夾持)	89
圖 2-2- 3 快速查核件受針觸發測力施力(0.04 N)的變形量模擬結果.....	90
圖 2-2- 4 快速查核件設計圖	90
圖 2-2- 5 三線性軸幾何誤差示意圖	91
圖 2-2- 6 以雷射干涉儀當標準件量測查核件	93
圖 2-2- 7 雷射干涉儀量測查核件實驗	94
圖 2-2- 8 座標量測儀量測查核件實際圖	94
圖 2-2- 9 文件編號: N407EA1220-D300-01.....	95
圖 2-2- 10 具機量測程序流程圖	96
圖 2-2- 11 工具機 E_{XX} , E_{YY} 及 E_{COY} 幾何誤差分析結果.....	96
圖 2-2- 12 工具機 E_{YY} 幾何誤差量測結果	97
圖 2-2- 13 實驗測試，進行五軸工具機量測	98
圖 2-2- 14 自動化量測流程	98
圖 3-1- 1 國際 XCT 參考標準件	102
圖 3-1- 2 XCT 量測系統示意圖	102
圖 3-1- 3 XCT 參考標準件設計圖	103
圖 3-1- 4 XCT 探針連接桿選用 Carbon fiber 剛性特性模擬結果.....	104
圖 3-1- 5 XCT 基座選用 Invar 溫度膨脹特性模擬結果.....	104
圖 3-1- 6 XCT 參考標準件探針部分尺寸與材料	104
圖 3-1- 7 XCT 量測系統參考標準件實體照片	105
圖 3-1- 8 XCT 參考標準件治具設計三視圖圖面	106
圖 3-1- 9 QUINDOS 7 圖示	107
圖 3-1- 10 量測模式選擇視窗	107
圖 3-1- 11 量測操作程序介面.....	108
圖 3-1- 12 調整座標量測儀參數視窗圖示	108
圖 3-1- 13 探針對準標準球視窗圖示	108
圖 3-1- 14 探針校驗視窗圖示	109
圖 3-1- 15 量測圓視窗圖示	109
圖 3-1- 16 圓量測結果	109
圖 3-1- 17 量測球操作視窗圖示	110
圖 3-1- 18 球量測結果	110
圖 3-1- 19 量測直線操作視窗圖示	111
圖 3-1- 20 直線量測結果	111
圖 3-1- 21 A 為噴氣裝置的產品，B 實際透過 XCT 系統量測，C 微結構形貌重建結果	115
圖 4-1- 1 高鋒現場場域量測應用狀況	118
圖 4-1- 2 亞崙現場場域量測應用狀況	119

圖 4-2-1 感測器與主軸之實際整合完成圖	119
圖 4-2-2 自校型溫度感測器與主軸之實際整合完成圖	120
圖 4-6-1 使用 XCT 參考標準件進行 TomoScope XS PL 150 XCT 系統驗證.....	126
圖 4-6-2 XCT 參考標準件標準球編號	128
圖 4-6-3 TomoScope XS PL 150 XCT 系統球心距量測驗證結果(註:紅色線條代表 MPE).....	128
圖 4-6-4 使用 XCT 參考標準件進行 TomoScope XS FOV XCT 系統驗證	129
圖 4-6-5 XCT 參考標準件標準球編號	131
圖 4-6-6 TomoScope XS FOV XCT 系統球心距量測驗證結果(註:紅色線條代表 MPE)	131
圖 5-1-1 高鋒與亞崑場域量測現況圖	132
圖 5-1-2 場域應用案例說明	132
圖 5-2-1 普森主軸場域試驗現場量測示意圖	133
圖 5-2-2 普森精密案例說明	134
圖 5-3-1 主軸迴轉誤差量測模組	135
圖 5-4-1 完成組裝品質精度補償設計分析軟體整合至台中精機之 MES 系統之流程	135
圖 5-5-1 快速查核件案例說明	136
圖 5-6-1 建立國內自有 XCT 參考標準件追溯與 XCT 系統驗證技術導入國內產業前後比較圖	137
圖 5-6-2 國內自有 XCT 參考標準件追溯與 XCT 系統驗證技術說明	137

表目錄

表 0-1 工具機及其關鍵零組件產業具體需求.....	9
表 0-2 全程技術發展時程規劃.....	13
表 1-1-1 感測器類型比較.....	33
表 1-1-2 On-trak 感測器 SNR 之評估計算值與需求值.....	36
表 1-1-3 直線度線性位移統計資訊.....	44
表 1-1-4 角度統計資訊.....	44
表 1-1-5 場域 31 次重覆性量測統計資訊.....	46
表 1-2-1 相關技術比較表 ^[1-2-1]	48
表 1-2-2 力量感測器之尺寸與材質表.....	49
表 1-2-3 放大器的輸出電壓之影響.....	53
表 1-2-4 不同振幅雜訊對電橋輸出電壓之影響.....	53
表 1-2-5 不同振幅雜訊對經放大器的輸出電壓之影響.....	53
表 1-2-6 主軸預壓力量感測器的力量量測範圍驗證數據.....	55
表 1-2-7 主軸預壓力量感測器的力量量測解析度驗證數據.....	56
表 1-2-8 領先技術之自校型熱電偶溫度感測器比較表.....	67
表 1-3-1 目前市售之主軸或旋轉軸迴轉誤差量測設備與功能.....	77
表 2-1-1 線性軸的 10 項組裝品質參數.....	80
表 2-1-2 在線性軸之 500 mm 位置上，各項幾何誤差之平均值和標準差.....	82
表 2-2-1 計畫工作項目及產出指標.....	88
表 2-2-2 查核件模擬材料參數.....	89
表 2-2-3 雷射干涉儀量測查核件之量測結果.....	94
表 2-2-4 座標量測儀量測查核件之實驗結果.....	94
表 2-2-5 工具機測查核件之實驗結果.....	97

壹、基本摘要

科資中心編號				
計畫名稱	112 年智慧機械產業智慧化線上計量標準建置計畫			
主管機關	經濟部標準檢驗局	計畫編號		
執行單位	財團法人工業技術研究院量測技術發展中心	審議編號		
本期期間	112 年 02 月 21 日至 112 年 12 月 31 日			
計畫經費	49,228,000 元			
執行進度		預定進度%	實際進度%	落後比率 ¹
	當年	100	100	0
	全程	100	100	0
經費支用		預定支用經費 (A)	實際支用經費 ² (B)	(C=B/A)支用比率 (%)
	當年	49,228,000 元	45,828,682 元	93.1
	全程	49,228,000 元	45,828,682 元	93.1
註:				
1. 計畫至期末實際完成 24 個查核點項目，佔全年度預訂 24 個查核點之 100%，符合預訂進度 100%之目標，落後比率為 0。				
2. 經費支用為累計至 112 年 11 月 30 日之統計值。				
中文關鍵詞	計量標準；校正與追溯；量測			
英文關鍵詞	Metrology; Calibration and Traceability; Measurement			
研究人員	中文姓名	英文姓名		
	傅尉恩	Wei-En Fu		
	陳生瑞	Sheng-Jui Chen		
	陳文仁	Wen-Jen Chen		
	陳智榮	Jr-Rung Chen		
年度執行成果	<p>一、線上量測與組裝調校分項：</p> <p>(一)數位式線軌組裝調校量測技術</p> <ul style="list-style-type: none"> ●年度目標： -線軌行程範圍 L: (0 ~ 2) m； -直線度量測解析度 $\leq 0.1 \mu\text{m}$； -直線度重複性不確定度 $\leq (0.5 \mu\text{m} + 10^{-7} \times L)$； -角度量測解析度 $\leq 0.1''$ -角度重複性不確定度 $\leq (0.5 + 10^{-1} \text{m}^{-1} \times L)''$ -直線度量測適用範圍在 100 μm ~ 200 μm -角度量測適用範圍 $\leq 100''$ -適用環境溫度為 $\leq \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ 			

●執行成果：

- 測試行程範圍 L : (0 ~ 2) m ;
- 符合直線度量測解析度 $\leq 0.1 \mu\text{m}$;
- 符合直線度重複性不確定度 $\leq (0.5 \mu\text{m} + 10^{-7} \times L)$;
- 符合角度度量測解析度 $\leq 0.1''$
- 符合角度重複性不確定度 $\leq (0.5 + 10^{-1} \text{m}^{-1} \times L)''$
- 符合直線度量測適用範圍在 $100 \mu\text{m} \sim 200 \mu\text{m}$
- 符合角度度量測適用範圍 $\leq 100''$
- 適用環境溫度為 $\leq \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$

【產業需求】

精密等級工具機組裝現況規格約(10 ~ 15) $\mu\text{m}/\text{m}$ ，需要提高到 5 $\mu\text{m}/\text{m}$

●完成後之影響與產業效益：

計畫建立數位式線軌組裝調校量測技術完成後，能夠提供產業較為輕便且有效率的量測技術，改善直規等較為笨重的量具使用、準直儀等需要位置疊對的問題以及干涉儀等不允許中斷量測的操作不變等問題。較傳統的量測方法能夠提高量測精度，同時能提供直線度與角度等分別的誤差資訊，而不是總誤差量，有助於廠商針對誤差的來源以及影響能夠更清楚的釐清，有助於機台的精度誤差來源釐清以及機台精度的改善方向訂定。

(二)主軸狀態監測技術

●年度目標：

-高速主軸軸承預壓力監測技術：

- 力量量測範圍達 10 kN
- 解析度 $\leq 10 \text{ N}$

-微型定點囊的開發與製作：

- 鋁定點溫度 $660 \text{ }^\circ\text{C}$
- 相變化時間 $\geq 30 \text{ s}$
- 溫度穩定度 $\leq 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$
- 溫度量測範圍 $0 \text{ }^\circ\text{C} \sim 660 \text{ }^\circ\text{C}$
- 量測解析度 $0.1 \text{ }^\circ\text{C}$

●執行成果：

-高速主軸軸承預壓力監測技術：

- 完成結構設計與有限元素分析: 分析結果所得到之剛性達 $15923 \text{ N}/\mu\text{m}$ ，大於所訂定之目標值 $33 \text{ N}/\mu\text{m}$ ，符合原先所訂之軸向的剛性要求；於應變分布的結果可得知應變量出現最大值的位置於內側凹槽處，符合預期中理想位置。
- 後端電路模擬: 解析度經過計算與雜訊模擬分析完成後，確認符合原先計畫規格。
- 完成場域試驗: 完成感測器雛型製作並與普森公司共同合作，將我方開發之主軸預壓力量感測器整合至普森主軸，進行靜止主軸預壓力量測與主軸於低速運轉時預壓監控。

-微型定點囊的開發與製作：

- 鋁定點溫度 $660 \text{ }^\circ\text{C}$
- 相變化時間 $\geq 125 \text{ s}$ (超目標)
- 溫度穩定度 $\leq 0.2 \text{ }^\circ\text{C}$ (超目標)

- 低溫合金溫度 62 °C (超目標)
- 相變化時間 ≥ 140 s (超目標)
- 溫度穩定度 ≤ 0.2 °C (超目標)
- 溫度量測範圍 0 °C ~ 660 °C
- 量測解析度 0.1 °C

【產業需求】

-高速主軸軸承預壓力監測技術:

商用工具機主軸預壓力量範圍 3 kN ~ 8 kN，正常預壓變化量約為 10 % ~ 15 %

-微型定點囊的開發與製作:

溫度量測範圍 0 °C ~ 660 °C；溫度穩定度 ≤ 1.0 °C

•完成後之影響與產業效益：

軸承之預壓力異常會導致主軸運行時產生異音或振動，本技術之可提供工具機廠、主軸廠與終端使用者有效的預壓力之監控，可作為主軸運行狀態的參考指標並提早發現異常現象。

溫度量測常被應用於主軸的熱變位補償與健康診斷，本計畫建立之自校型溫度感測器技術，透過微型定點囊與純金屬型熱電偶技術，使溫度量測不確定度可長期控制在 0.5 °C 以內。解決傳統溫度感測器因內部材質受物理/化學環境影響而逐漸產生漂移，造成工具機的主軸熱變位補償錯誤而過熱磨損的問題。同時，可提前掌控主軸溫度感測器的失效風險，並監測主軸工作溫度，以作為主軸加工健康度的判斷依據。改善傳統需定期校正過程所造成的停機、拆裝、傳遞時間與校正費用的成本損失。

(三)主軸線上量測技術

•年度目標：

-具備主軸 5 項迴轉量測能力(角度: E_A, E_B 、線性: E_X, E_Y, E_Z)

-量測模組解析度:角度 $\leq 0.1''$ 、線性 ≤ 0.2 μm

•執行成果：

-完成主軸迴轉誤差量測模組，可量測出 5 項迴轉誤差(角度: E_A, E_B 、線性: E_X, E_Y, E_Z)

-量測模組解析度:角度 $0.065'' \leq 0.1''$ 、線性 0.062 $\mu\text{m} \leq 0.2$ μm (超目標)

【產業需求】

主軸 5 項迴轉誤差即時現場(in-situ)量測；量測規格(角度 $\leq 20''$ 、線性 ≤ 10 μm)。

•完成後之影響與產業效益：

發展主軸迴轉誤差量測模組原型，提供國內主軸製造商 5 項迴轉誤差量測技術，相較於商用量測設備(LION, Spindle Error Analyzer)，需要停機狀態下，於刀具端進行 5 項迴轉誤差量測，發展技術建立組裝流程及量測確認方式，可安裝主軸裡面，在主軸不停機狀態下，即時量測 5 項迴轉誤差，滿足現場量測迴轉誤差(In-situ measurement)需求。

二、工具機品質長效量測與評估分項：

(一)工具機組裝品質智慧分析與精度補償

•年度目標：

-至少 4 項組裝品質參數

- 可分析線性軸 6 項幾何誤差，與依影響程度排列組裝品質參數
- 關鍵組裝品質參數預測模型判定係數 $R^2 > 0.7$

●執行成果：

- 完成線性軸組裝品質模型，輸入至少 4 項組裝品質參數，分析線性軸 6 項幾何誤差，並依影響程度排列組裝品質參數
- 完成關鍵組裝品質參數預測模型判定係數 $R^2 > 0.7$

【產業需求】

改善零組件組裝精度提升 $> 10\%$ (依據調查台中精機的需求)

●完成後之影響與產業效益：

在工業生產製造過程中，機械成品組裝的品質優劣決定整機之精度和性能，本計畫開發工具機組裝品質智慧分析技術可協助工具機製造商針對組裝生產線進行組裝品質之提升，以數學模型之理論基礎為依據，取代原先經由人員經驗判定之方法，提供組裝品質之允收範圍和組裝過程中之關鍵組裝品質參數，尤其組裝過程可掌握關鍵組裝參數來進行機台除錯，可協助業者縮短約 30% 以上機台除錯時間(原 1 個月 4 台，現 3 個月 18 台)，滿足廠商在組裝生產線之品質穩定性和設計開發人員之參考指標，協助國內工具機製造商的競爭力的提升。

(二)整機空間精度監測策略

●年度目標：

- 線性軸用快速查核件-設計與製作:適用工作臺盤面直徑: ≤ 660 mm
- 線性軸用快速查核件-幾何誤差分析:兩線性軸之 3 項幾何誤差；量測程序報告 1 份；幾何誤差參數分析結果重複性 $\leq 5 \mu\text{m}$

●執行成果：

- 完成線性軸用快速查核件-設計與製作:適用工作臺盤面直徑: ≤ 660 mm
- 完成性軸用快速查核件-幾何誤差分析:兩線性軸之 3 項幾何誤差；量測程序報告 1 份；幾何誤差參數分析結果重複性 $\leq 5 \mu\text{m}$ ；場域試煉兩處

【產業需求】

關鍵幾何誤差分析，量測時間控制在 20 min 內(產業調查)，滿足 ISO 10791-4 要求重複性 $15 \mu\text{m}$ 機台。

●完成後之影響與產業效益：

提供國內工具機終端使用者的量測需求，對於工具機使用者，工具機長時間加工使用後，工具機的加工精度會隨著時間推移而變差，缺乏方便查核方法來確認整機的空間精度與維持工具機加工能力，其中以工具機的線性定位及垂直度幾何誤差尤為重要。本子項開發快速查核件用於量測工具機的線性軸及垂直度幾何誤差，快速查核件尺寸為 $330 \text{ mm} \times 330 \text{ mm}$ ，可滿足工具機工作臺盤面直徑 $\leq 660 \text{ mm}$ ，使用鎳鐵合金材料作為快速查核件底座，鎳鐵合金具低熱膨脹係數特性，可降低產線環境溫度變異對於快速查核件影響。由工具機刀具置換為量測測頭功能可量測快速查核件的各個標準值座標，分析線性定位和垂直度的幾何誤差提供工具機終端使用者隨時掌握工具機的精度狀況，滿足國內工具機終端使用者的量測需求。

三、量測標準平台與產業合作分項：

(一) 工業用 XCT 校正技術

●年度目標：

	<p>-標準件尺寸範圍 ≥ 20 mm</p> <p>-標準不確定度 ≤ 1.6 μm</p> <p>●執行成果：</p> <p>-完成 XCT 參考標準件設計與製作： 符合 VDI 2630 規範 3 層 22 球設計，標準件尺寸範圍(最大球心距)59.58 mm (達成標準件尺寸範圍 ≥ 20 mm 目標)</p> <p>-完成 XCT 參考標準件不確定度評估技術：標準不確定度= 1.16 μm (達成標準不確定度 ≤ 1.6 μm 目標)</p> <p>【產業需求】</p> <p>3D 列印(積層製造)、電池與航太零組件等多具備內層結構與微結構，其量測與檢測之需要促成 XCT 的應用價值提升，但國內尚缺 XCT 系統的量測能力校正追溯以及符合規範之功能驗證技術及標準件。</p> <p>●完成後之影響與產業效益：</p> <p>XCT 量測/檢測技術因具有非破壞性與高解析度等特性，工業上常應用 XCT 進行工件內部結構或缺陷精密量測與檢測，進而促使工業 XCT 掃描於近期快速發展；鑒於 XCT 於精密工業應用上的重要性日漸提升，藉由發展 XCT 設備校正/驗證技術，協助國內 XCT 設備使用者與製造廠商確保設備量測性能符合國際規範的要求與精密量測之能力。</p> <p>四、其他</p> <p>(一) 技轉與智財授權: 已將訊號擷取分析驗證技術、線上加工尺寸量測技術、線上尺寸量測與幾何誤差不確定度評估技術...等技術移轉至台灣檢驗、台鐵、速聯...等 20 家次業者，繳庫 4,000 仟元繳庫。</p> <p>(二) 產學研合作: 分包台大機械系研究 1 案，全年總金額 550 仟元；與精機中心共同合作，健全智慧機械產業量測追溯架構；運用全國工業總會廣大產業能量，進行計畫服務之推廣宣傳。</p> <p>(三) 規劃拜訪 10 家次相關業者(實際完成 22 家次)，說明計畫服務並提供諮詢，增強橫向連結。</p> <p>(四) 規劃 12 件示範案例，實際完成 14 家次的研發技術導入應用場域。</p>
報告頁數	178 頁
使用語言	中文

貳、計畫目標與產業需求

一、全程計畫目標

根據工研院產科國際所，預估工具機市場於 2021 ~ 2024 年間，均可維持成長；2021 年全球工具機消費金額約為 800 億美元，預計於 2025 年，全球工具機消費金額將達到 873 億美元。帶動市場成長因素，包含中國與新興國家經濟持續發展、全球製造基地移轉帶動生產設備投資，以及多元化產業應用促使工具機需求擴張等。在國內市場需求方面，也因國機國造及國艦國造、半導體設備與零組件、航太產業、風電與零組件國產化等趨勢，亦將帶動工具機市場需求。另一方面，由於電動車市場快速成長，已成為全球汽機車產業發展重要趨勢。汽車產業是工具機最主要應用領域，由於電動車與燃油車在動力系統零組件製造上，對工具機需求有重大差異，新型工具機之市場需求也將隨電動車產業需求而提升。電動車衍生新工具機產品應用需求，包含電動馬達加工、電動車動力系統、減速齒輪加工、電池箱零組件製造與輕量化零組件加工等。國內工具機產業將可藉此新興需求切入中高階工具機市場，並與智慧科技融合，透過智慧化、數位化產品、服務與創新商業模式，提升產業與企業競爭力；對應的挑戰，則包含提升關鍵零組件品質、工具機組裝與測試能力提升，以及零組件、整機與資通訊技術與智慧科技整合等。

圖 0-1 為工具機發展趨勢，依據市場發展，例如，半導體設備與零組件、航太產業、風電與零組件國產化、電動車動力系統、減速齒輪加工等，及國機國造與國艦國造的政策推動，新型、高階工具機之市場需求也將隨產業需求而提升。因此，藉此新興需求，國內工具機產業莫不提升工具機品質，或是並與智慧科技融合，強化智慧化功能，以競逐中高階工具機市場。為實現此目標，需提高工具機產業附加價值，包含數位化整合及建立智慧化量測技術，同時也須提高關鍵零組件品質、工具機組裝與測試能力，提升組裝品質及整機精度，才能趕上德、日中高階工具機之水準。

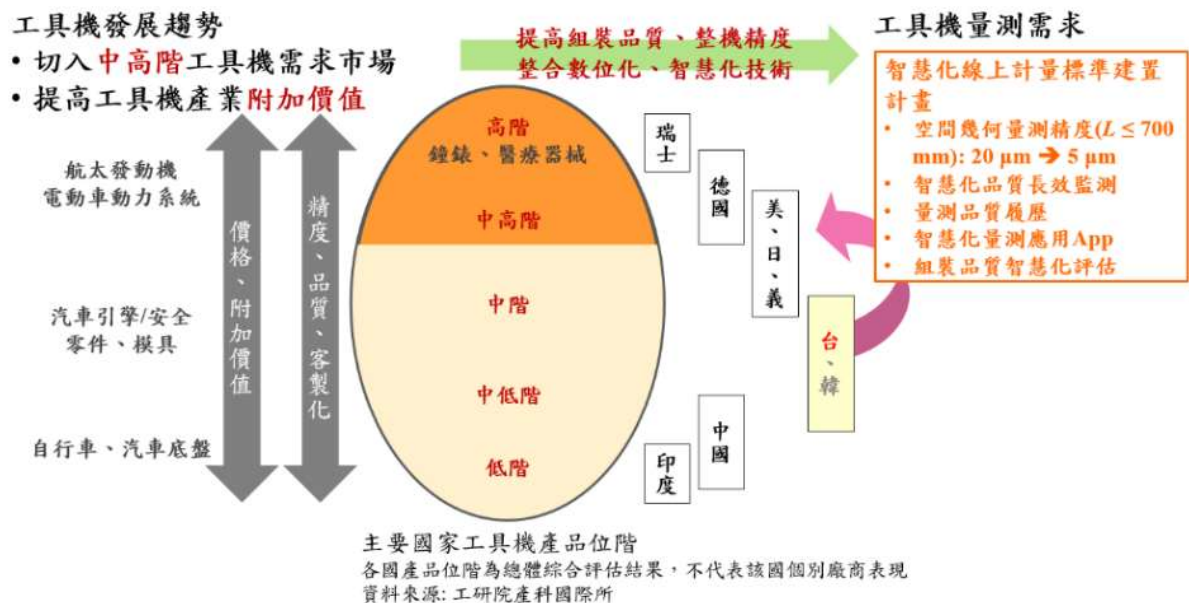


圖 0-1 工具機發展趨勢

本「智慧機械產業智慧化線上計量標準建置」計畫將針對高階工具機產業之量測需求，包含整機空間幾何量測、關鍵零組件檢測、工具機組裝產線線上量測、工具機品質長效評估技術等，發展量測技術、協助建立檢測內容與規格。工具機產業鏈，如下圖 0-2，涵蓋工具機整機廠、零組件製造廠及下游應用產業。在與國內代表性廠商如台中精機(創立於 1954 年)、永進(成立於 1954 年)、友嘉(創立於 1979 年)等加工工具機組裝大廠進行訪談得知，以工具機整機廠而言，精確且可追溯之線上量測、組裝產線線上量測、工具機品質確效等，有其迫切的需要。因此，建立幾何誤差量測及組裝公差智慧化監測關鍵技術，且導入量測不確定度概念，有助於工具機設計、零組件製造、機台組裝到最後整機檢測測試，使組裝品質提升，進而提升工具機整機的精度。另外，就國產工具機關鍵零組件製造廠，如上銀(生產滾珠螺桿、線性滑軌等產品)、德川(生產高精度旋轉工作台)、普森(精密主軸)等，提供一個合適且能量測出關鍵零組件幾何誤差量測技術，使關鍵零組件的品質得以掌握，建立組裝產線所需之量測履歷，進而達到關鍵零組件及工具機組裝品質提升之成效。而計畫也預期將線上量測技術成果推廣、應用到工具機最大終端應用市場，包含汽車零組件、航空與國防產品等製造業，如漢翔(航太產業)、揚明光學(光學模具加工)及富田電機(電動車馬達產業)等代表性廠商，提供工具機主軸、線軌及整機品質長效量測方法，及精進工具機整機品質長效量測方法與評估機制，躍升智慧化品質長效。

隨著 AI 的蓬勃發展，試圖轉型的製造商，已開始使用 AI 來應對這些諸多挑戰。依據“AI index 2018 report”，在世界各地的各個部門、職能和地區，正廣泛採用不同的 AI 技術，如圖 0-2。依據資料顯示，大約一半的公司已經將 AI 嵌入到企業業務流程中。即使如此，AI 在製造所衍生的價值和應用，仍在非常初期的階段，其價值並未展現。而要導入 AI，第一步即是數據的截取與建立，不過要跨出這正確的第一步並不容易，許多系統設計者與導入企業，常常忽略數據擷取及資料正確的重要性，AI 不會是泛用於各種產業的平台，各種產業都有其專業，因此數據的種類需求與擷取方式也大不相同。此外，隨著智慧化的過程、物聯網的使用，將帶來前所未見的巨量資料，例如來自各種不同來源:如感測器、機器、加工製造、供應鏈及企業營運的資料，以及人工智慧技術(AI)高計算能力所產生的資料。在這“巨量資料”(Big Data)中，資料可靠性，成為關鍵，因為如果儲存了不受信任、不正確的資訊，而這些資訊無法說明理解複雜的現實，則收集的大量資料及其分析將完全無用。因此，“計量”扮演極其關鍵的作用-確保量測資料的“可靠性”與“正確性”。並進一步將“計量”嵌入製造流程中，使用共通“可靠”與“正確”的資訊，貫穿整個加工程序，實現智慧製造及 AI 應用。

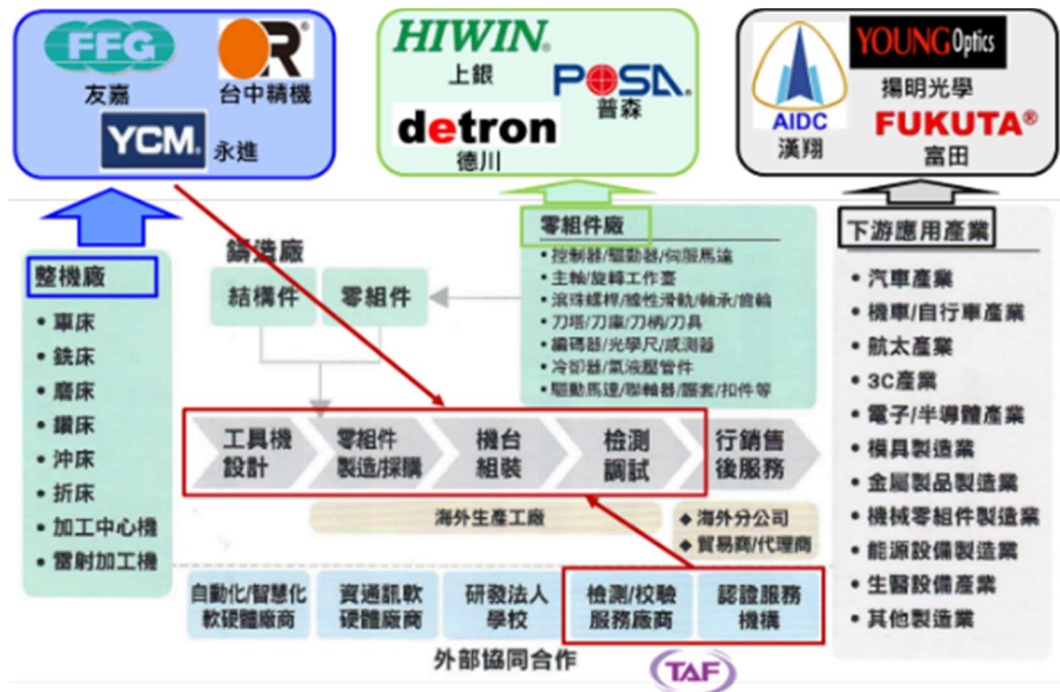


圖 0-2 工具機產業鏈-目標產業

依據產業訪談結果(工具機、電動車動力系統製造、航太等產業)，綜整需求如下表 0-1。其中，目前整機空間幾何誤差量測與補償的技術，德國工具機製造商導入自動追蹤雷射測距儀(LaserTracer, Etalon, 德國)，針對整機包含三軸及五軸幾何空間進行補償，量測精度可達 $5\ \mu\text{m}$ ，且空間補償效果可達 $50\% \sim 60\%$ 。而工具機機台組裝過程所使用的量具，多使用價格低廉之量表或量規，量測精度僅 $3\ \mu\text{m}$ 。若以 Renishaw XL-80，加上 Agilent 5530A 光學鏡組取代，則在線軌組裝的量測能力可達 $\pm 1\ \mu\text{m}$ ，但僅能確認單一維度誤差，且需在不遮斷下連續量測。若遭遮斷，需重新進行歸零及重新量測。其它關鍵零組件項目如主軸，目前國內業界常用的量具來自 LION，量測精度可達 $1\ \mu\text{m}$ ，主要應用在主軸研發過程用來瞭解不同主軸轉動特性，但無法提供主軸(旋轉軸)偏轉量測。另一鑄件孔位量測，則使用光學檢測方式需求規格可參考表 0-1。綜整工具機產業智慧製造的需求為

- 整機幾何量測精度提升至 $10\ \mu\text{m}$
- 關鍵零組件精度線上量測
- 組裝測試線上量測與數位化
- 工具機品質長效
- 量測不確定度與組裝公差分析

表 0-1 工具機及其關鍵零組件產業具體需求

量測項目	目前量測能量	量測需求	技術領先公司	技術領先規格
空間幾何誤差	量測精度 ≥ 30 μm	量測精度 ≤ 10 μm	Etalon	量測精度 ≤ 5 μm
空間幾何誤差補償(五軸)	補償效果 ≈ 30% ~ 50%	補償效果 ≥ 70%	Etalon	補償效果 ≈ 50% ~ 60%
線軌組裝	真直度量測精度 約 ≥ 8 μm	真直度量測精度 ≤ 3 μm	RENISHAW	真直度量測精度 ± 1 μm
鑄件孔位	量測精度約 1 mm	量測精度 ≤ 50 μm	gom	量測精度 ≥ 38 μm
主軸	軸向/徑向誤差	量測精度 ≤ ± 1 μm	LION	量測精度 ≤ ± 1 μm
旋轉軸幾何誤差	3 項幾何誤差 (線性: E_{XC} , E_{YC} 、 角度定位 E_{CC}) 角度定位: ± 0.5"	6 項幾何誤差 (線性: E_{XC} , E_{YC} , E_{ZC} 、角度: E_{AC} , E_{BC} 、角度定位 E_{CC})	RENISHAW	1 項幾何誤差 (角度定位 E_{CC}) 角度定位: ± 1"

綜合與智機產業訪談之結果，以計量技術發展為基礎，配合「智慧機械產業推動方案」及「2030 產業規劃藍圖暨重點產業發展策略與措施研討會」兩項產業政策，針對我國智慧機械發展所衍生之計量需求，規劃「智慧機械產業智慧化線上計量標準建置計畫」，建立智慧化高精度線上校正與量測(in-process “smart” calibration/measurement)技術，提升我國工具機、關鍵零組件之組裝與測試能力，以達到德國工具機水準；建立品質長效評估技術，整合量測技術與智慧科技，確保加工品質；建構智慧化量測標準平台，提供校正追溯及線上量測履歷，提升產線整合智慧化診斷、監控能力，強化智慧生產品質。本計畫發展方向如圖 0-3，技術建置涵蓋產業應用的智慧化量測系統、建立量測品質履歷、提供工具機空間幾何精度提升與關鍵組件可靠及準確具追溯之信賴數據，及促進關鍵零組件、整機、系統之技術發展，並延續前期(FY108 ~ FY111)成果，計畫規劃方向為

- 建立智慧化高精度線上量測技術，提升我國工具機、關鍵零組件之組裝、測試能力，達到德國水準
- 建立品質長效評估技術，整合量測技術及智慧科技，確保加工品質
- 建構量測標準平台，提供校正追溯及線上量測履歷，提升產線整合智慧化診斷、監控能力，強化智慧生產品質

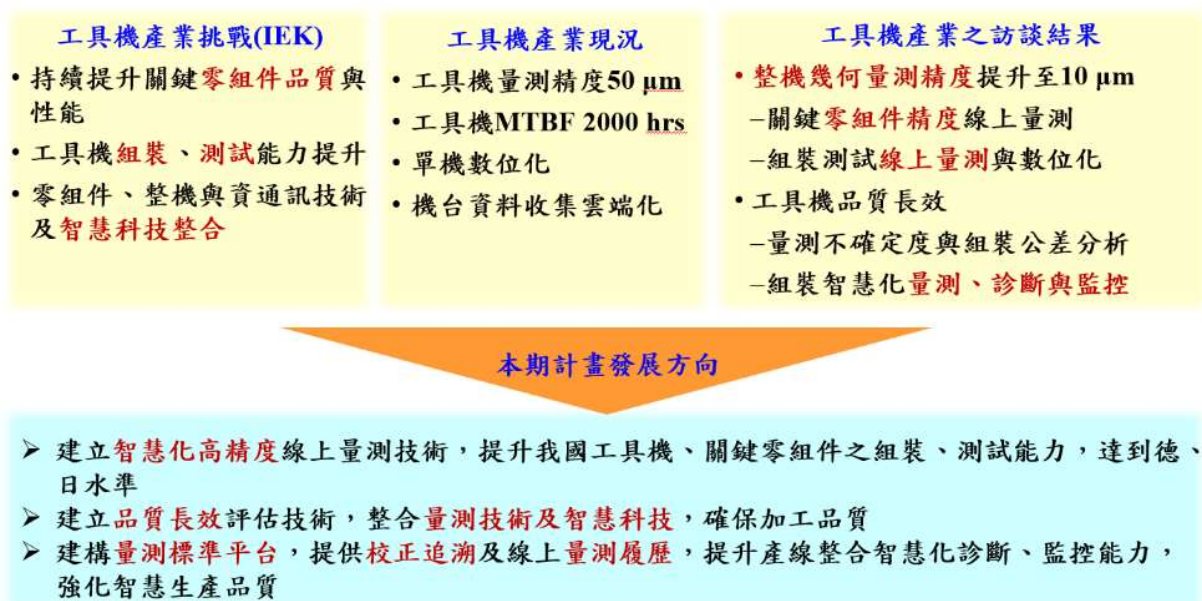


圖 0-3 計畫發展方向

預期計畫完成後，可以滿足高階工具機及智慧製造產業的品質要求，建立數位化整機高精度量測技術、組裝品質精度量測方法、零組件量測技術等，協助工具機智慧製造達成平均故障間隔(MTBF)目標及量測履歷收集及雲端化，達成持續提升關鍵零組件品質與性能，增進工具機組裝、測試能力，及整合零組件、整機與資通訊技術及智慧科技於製造產線。

工具機為主之機械產業對於我國的經濟發展具有舉足輕重的地位，伴隨著國內整體工業發展的腳步一同成長，其中工具機產業更是各種基礎加工與精密加工不可或缺的機械設備。在發展不到一世紀，就成為我國重要的出口產業，其出口表現為全球第五大，在全球工具機產業供應鏈扮演重要地位。但與另兩大出口國德國及日本比較，其在高生產成本中，外銷金額與利潤仍遠勝過臺灣。

以歐日領導廠商為標竿，開發國產五軸加工機關鍵零組件生產與五軸工具機整合之關鍵線上量測技術，提升我國工具機及其相關產業之全球競爭力；一般業界定義工具機的 MTBF 之定義為稼動時間/叫修次數，藉由 MTBF 來確認量測技術所提升之工具機「生產品質」，使 MTBF 得以延長；建立完善的量測校正追溯標準基礎，數據的正確性與可靠度將可作為分析與判斷的依據，達到產品的生產品質確認及製程條件的量測監測，並且以衡量製程能力相關指標(如: Cpk)，來確保最終產品的品質與一致性以及量率的提升，將是產業面對的挑戰與市場機會，促使精密機械加速升級為智慧機械。

二、國家度量衡標準實驗室定位與任務

依據我國度量衡法第 4 條第 1 項、第 2 項及國家度量衡標準實驗室業務委託辦法第 2 條規定，國家度量衡標準實驗室之法定業務及行政委託範圍，包括全國度量衡最高標準之研究實驗、建立、維持、保管、供應、校正及其他相關事宜。其中關於「其他相關事宜」部分，如屬與執行

全國度量衡最高標準之研究實驗、建立、維持、保管、供應或校正有關之事項，解釋上均屬上開規定得行政委託之範圍。中央政府度量衡專責機關-經濟部標準檢驗局於民國 78 年起以委辦計畫方式委託工研院量測中心建立並維持國家度量衡標準實驗室(National Measurement Laboratory, NML)之運作，執行至今已 30 年餘，NML 除持續建立與維持我國國家計量標準外，也積極接軌國際尋求我國計量標準的國際等同與相互承認，多年來計已達成若干重要里程碑，例如：進入國際度量衡大會(CGPM)成為仲會員(Associate Member)，簽署國際度量衡委員會(CIPM)主辦之國家計量標準相互承認協議(Mutual Recognition Arrangement, MRA)，使得 NML 校正報告得以通行全球。而透過國際度量衡局(Bureau international des poids et mesures, BIPM)的關鍵比對(Key Comparison, KC)除可直接證明 NML 之量測能力外，亦維持國際度量衡委員會相互承認協議(CIPM MRA)之效力，促使國家品質基磐與國際接軌，協助產業界在邁向全球貿易之過程，減少技術貿易障礙(Technical Barriers to Trade, TBT)。計量標準提供我國生產經營服務活動所需的最高檢測依據，可以實現準確量測，保證產品品質安全，協助推動科技進步和技術創新，保障國家經濟社會發展。

三、產業需求

面對全球工業 4.0 的浪潮，行政院於 105 年 7 月 21 日第 3507 次院會通過「智慧機械產業推動方案」，以「連結在地」、「連結未來」及「連結國際」三大推動策略推動智慧機械產業發展，協助國內機械產業、終端應用製造業邁向智慧化升級。110 年 4 月 9 日由經濟部林次長主持的會議中，更確認本期的智慧機械產業推動方案(智機 2.0)，對準「亞洲高階製造中心」政策目標，其內涵包含提升附加價值、建立完整產業供應鏈以及成為智慧製造基地。在推動方向上，區分為智慧機械、及智慧製造。智慧機械是延續過去精密機械的成果逐步邁向智慧機械，而智慧製造則是將生產製造過程導入智慧化技術，兩者相輔相成。另外，除了延續過去連結在地、連結未來、連結國際等 3 項具體策略外，更進一步細分了基盤扎根化、服務整合化、系統智慧化、應用雲端化、平台國際化、市場全球化等 6 個精進作法。這 6 個精進作法，相較於過去所提基盤扎根化(IaaS)、平台國際化(PaaS)、應用雲端化(SaaS)的架構，基盤扎根化對應到 IaaS，其內涵包含扎根基礎工藝與計量標準、強化技術自主以及培育跨領域人才等，國家度量衡標準實驗室配合智慧機械產業推動方案，提供感測器、量測儀器及機台或組裝產線上相關量測技術與系統開發，藉由專業人員於計量標準之建置，確保可靠及準確之信賴數據，提升產業產品品質之競爭力；而在平台國際化可對應至 PaaS，內涵包含推動國際平台智慧製造模組功能與我國機械設備整合及鏈結國際量測標準，介接國際；而 SaaS 應用服務模組的部分，即由應用雲端化建立雲端應用模組，並推展機械雲加值，期待能以市場全球化為目標，將具備 IaaS、PaaS、SaaS 特色的解決方案，鏈結國際市場需求，並切入全球高階市場。

國家度量衡標準實驗室配合智慧機械產業推動方案下之基盤扎根化、平台國際化二項精進作法，規劃執行智慧機械產業計量標準建置加值計畫(前期智機計畫，FY108~FY111)，針對國內智慧機械產業，進行計量標準建置，建立與國際等同的量測標準，提供感測器、量具及線上量測系統可靠及準確之信賴數據，確保產業產品生產與組裝所需之品質；亦針對工具機相關領域發展參考標準件，開發具追溯之線上量測技術，將「計量」嵌入製造流程，即時提供「可靠」與「正確」的資訊，以提升組裝品質管理效率及產品品質，促使工具機空間量測精度提升至 20 μm ；並透過

與國際先進計量單位之合作，發展共通的量測語言及與國際規範對接，使智慧機械產品的相關量測、性能檢測等結果，能與國際市場接軌。

本計畫(FY112~FY115)除延續前期計畫依據基盤扎根化、平台國際化二項精進作法外，更納入服務整合化、系統智慧化、應用雲端化三項精進作法的精神，規劃執行智慧機械產業智慧化線上計量標準建置(本期智機計畫)，建立智慧化高精度線上量測技術(空間量測精度由 20 μm 提升至 5 μm)，提升我國工具機、關鍵零組件之組裝、測試量測能力，達到德國水準；亦建立品質長效評估技術，整合量測技術及智慧科技，確保加工品質；並建置計量標準，提供校正追溯及線上量測履歷，提升產線監控能力，強化智慧生產品質；以與國際規範對接的量測標準平台支援服務中高階工具機、關鍵零組件及智慧產線，展開智慧化量測應用，落實智慧機械與智慧製造。

- 行政院於105年7月21日第3507次院會通過「智慧機械產業推動方案」，以「連結在地」、「連結未來」及「連結國際」三大推動策略推動智慧機械產業發展。
- 110年4月9日由經濟部林次長主持的會議中確認新一期程的**智慧機械產業推動方案(智機2.0)**，將對準「**亞洲高階製造中心**」政策目標，以「**智慧機械**」及「**智慧製造**」兩大推動方向，最終以市場全球化為目標，將具備 **IaaS(基盤扎根化)**、**PaaS(平台國際化)**、**SaaS(應用雲端化)**特色的解決方案，**切入全球高階市場**。



圖 0-4 計畫規劃內容與產業政策之關聯

四、全程計畫架構

本計畫以「亞洲高階製造中心」政策目標、「智慧機械」及「智慧製造」兩大推動方向，全程以「線上量測與組裝調校」、「工具機品質長效量測與評估」及「量測標準平台與產業合作」三個分項執行。

其中「線上量測與組裝調校」分項，目的為完善五軸工具機關鍵零組件線上量測精度關鍵技術及模組，提升工具機空間幾何量測精度，建立線上校正、組裝調校量測技術，提供智慧化產線品質監控；「工具機品質長效量測與評估」分項主要為完善品質長效量測方法，建立幾何誤差量測及組裝公差智慧化監測關鍵技術，降低量測所引起的組裝誤差，改善組裝後量測精度；「量測標準平台與產業合作」分項則是建置線上量測關鍵技術及品質長效量測機制示範案例，協助工具機產

業建立智慧產線(量測履歷、品質監控)，推動高階線上量測儀器研發。全程技術發展時程規劃列於表 0-2。

表 0-2 全程技術發展時程規劃

分項	子項	FY112	FY113	FY114	FY115
一、線上量測與組裝調校	數位式線軌組裝調校量測技術				
	主軸狀態監測技術開發				
	主軸線上量測技術研發				
二、工具機品質長效量測與評估	工具機組裝品質智慧分析與精度補償				
	整機空間精度監測策略				
三、量測標準平台與產業合作	工業用 XCT 校正技術				

五、實施方法與產業效益

為導入智慧化線上校正與量測(in-process “smart” calibration/measurement)技術，建立工具機經時精度監控，提升機械加工智慧化製造品質，支撐亞洲高階製造中心之建置，分為線上量測與組裝調校、工具機品質長效量測與評估及量測標準平台與產業合作，共三個分項執行，分項一、線上量測與組裝調校:主要任務為提升工具機空間幾何量測精度，包含工作項目有感測器線上校正技術、工具機組裝品質智慧化分析與精度補償；分項二、工具機品質長效量測與評估:主要為建立工具機品質長效量測與評估方法，包含智慧化品質長效監測與評估、組裝品質智慧化評估及適用線上查核件研製；分項三、量測標準平台與產業合作:主要任務為研發成果應用與推廣，完成多個產業之場域驗證。依據計畫全程目標，訂定之各年度關鍵里程碑如下

計畫全程總目標(end point)				
全程總目標	目標一: 建置及維持國內產業與民生之量測校正溯源體系；並推動量測技術導入智慧製造產業應用，促進產業升級 目標二: 躍升五軸工具機空間幾何線上量測精度，完善品質長效線上量測能力，與德國高階工具機相當，引領工具機產業搶占高階智慧製造市場 目標三: 強化我國智慧機械及系統整合業者之智慧化能力，帶動製造產業智慧升級，增加國際競爭力，切入高階國際級客戶的供應鏈			
與重點政策方案之連結說明				
政策連結	<ul style="list-style-type: none"> 以「亞洲高階製造中心」政策目標，「智慧機械」及「智慧製造」推動方向，建構與國際鏈結之度量衡基礎環境，帶動製造產業智慧升級，切入全球高階市場 配合六大核心戰略產業政策，優化國家度量衡標準基礎環境，支撐產業發展 			
里程碑(milestone)				
年度	第一年 民國 112 年	第二年 民國 113 年	第三年 民國 114 年	第四年 民國 115 年
核定數 經費(仟 元)	49,228	-	-	-
年度 目標	完善五軸工具機關鍵零組件線上量測精度關鍵技術及模組	精進五軸工具機空間幾何線上量測精度由 30 μm 提升至 15 μm	精進五軸工具機空間幾何線上量測精度提升至 10 μm	精進五軸工具機空間幾何線上量測精度提升至 5 μm，與德國高階工具機廠量測能力相當
	建置品質長效評估機制與量測方法，提升平均故障間隔(MTBF)監測與預警能力	建置工具機旋轉軸 MTBF 達 2,500 小時之監測技術	建置工具機主軸及線軌 MTBF 達 2,500 小時之監測技術	精進工具機整機 MTBF 達 4,000 小時之監測技術，與高階工具機相當

	建置線上量測關鍵技術示範案例，進行品質長效機制示範案例	導入線上量測關鍵技術示範案例，持續進行品質長效技術應用案例	持續導入線上量測關鍵技術示範案例，完成品質長效技術應用案例	擴大導入線上量測關鍵技術示範案例，精進品質長效技術應用案例，滿足高階智慧製造市場需求
預期關鍵成果	1-1. 完成工具機線軌組裝量測模組原型及量測履歷，建置主軸狀態線上量測技術，提升五軸工具機精度	1-1. 完成工具機線軌組裝調校設備及主軸預壓與溫度感測技術 2 項，提升空間幾何線上量測精度至 15 μm	1-1. 完成工具機組裝與主軸狀態監控線上量測智慧分析與溯源技術，空間幾何線上量測精度至 10 μm	1-1. 應用量測履歷及主軸狀態監控技術，完成智慧化機台空間精度補償技術，達成空間幾何線上量測精度至 5 μm
	2-1. 建立線性軸幾何誤差量測及組裝公差監測關鍵技術，訂定品質長效評估機制綱要，建置平均故障間隔 (MTBF) 監測與預警能力	2-1. 建立旋轉軸品質長效量測方法與評估機制，協助工具機旋轉軸智慧化品質長效提升，完成 MTBF 達 2,500 小時之監測測試	2-1. 整合主軸、線軌及旋轉軸品質長效量測方法與評估機制 3 項，完成智慧化量測 SaaS 服務模式，完善智慧化品質長效 MTBF 達 2,500 小時之監測技術	2-1. 精進工具機整機品質長效量測方法與評估機制，躍升智慧化品質長效 MTBF 達 4,000 小時之監測技術
	3-1. 建置線上量測關鍵技術示範案例 10 案 3-2. 進行品質長效示範案例 2 案	3-1. 導入線上量測關鍵技術示範案例累計 18 案 3-2. 持續進行品質長效技術應用案例 1 案	3-1. 導入線上量測關鍵技術示範案例累計 26 案 3-2. 完成品質長效技術應用案例 1 案	3-1. 導入線上量測關鍵技術示範案例累計 34 案，量測時間縮短 60 %，組裝產量提升 50 % 3-2. 精進品質長效技術應用案例 1 案

六、分年度技術建立目標及時程

分項一：線上量測與組裝調校

1-1 數位式線軌組裝調校量測技術子計畫

年度目標			
112 年度	113 年度	114 年度	115 年度
<p>線軌多自由度量測模組原型開發</p> <ul style="list-style-type: none"> • 建立量測原型，進行關鍵設計與分析，多自由度絕對參考誤差量測技術設計 • 直線度量測解析度 $\leq 0.1 \mu\text{m}$；角度量測解析度 $\leq 0.1''$ • 進行感測關鍵零組件設計與驗證 • 模組零組件設計滿足相關解析度，與重複性規格 • 直線度重複性不確定度 $\leq (0.5 \mu\text{m} + 10^{-7} \times L)$；角度重複性不確定度 $\leq (0.5 + 10^{-1} \text{m}^{-1} \times L)''$；$L$ 為線軌行程範圍(0~2) m • 直線度量測適用範圍在 100~200 μm • 角度量測適用範圍 $\leq 100''$ • 適用環境溫度為 $\leq \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$ 	<p>線軌多自由度量測模組不確定度評估</p> <ul style="list-style-type: none"> • 進行量測模組光機電系統整合設計製作與應用軟體整合開發 • 線性量測解析度 $0.1 \mu\text{m}$，標準不確定度 $\leq (0.5 \mu\text{m} + 5 \times 10^{-7} \times L)$；角度量測解析度 $0.05''$，標準不確定度 $\leq (0.5 + 5 \times 10^{-1} \text{m}^{-1} \times L)''$；$L$ 為量測長度，驗證行程範圍(0~2) m，驗證量測環境溫度 $(20.0 \pm 1.0) \text{ }^\circ\text{C}$。 • 感測器端模組尺寸小於 70 mm × 70 mm × 250 mm (不含治具)，進行模組系統規格驗證 	<p>線軌經時精度長時間監測模組技術開發</p> <ul style="list-style-type: none"> • 建立機台線上長時間經時精度檢測系統開發 • 導入 1~2 家組裝示範場域(模組安裝) • 長時間 8~12 hrs 連續量測，包含整機待校機台的影響 • 量測模組單軸直線度解析度 $0.1 \mu\text{m}$，標準不確定度 $(0.5 \mu\text{m} + 8 \times 10^{-7} \times L)$；單軸角度量測解析度 $0.1''$，標準不確定度 $(0.5 + 5 \times 10^{-1} \text{m}^{-1} \times L)''$；$L$ 為線軌行程範圍(0~2) m 	<p>線軌經時精度長時間監測系統技術建置</p> <ul style="list-style-type: none"> • 開發經時精度檢測、紀錄與示警系統與軟體 • 開發感測器與控制器連接整合系統一套 • 導入 1~2 家組裝示範場域(量測資料擷取與控制系統整合) • 單軸直線度精度監測與補償技術，實現單軸直線度 • 量測模組單軸直線度解析度 $0.1 \mu\text{m}$，標準不確定度 $(0.5 \mu\text{m} + 5 \times 10^{-7} \times L)$；單軸角度解析度 $0.05''$，標準不確定度 $(0.5 + 2.5 \times 10^{-1} \text{m}^{-1} \times L)''$；$L$ 為線軌行程範圍(0~2) m
關鍵技術			
<p>1. 虛擬多自由度誤差量測框架技術</p>	<p>1. 多自由度量測應用軟體開發 2. 多自由度誤差量測標準不確定度評估技術</p>	<p>1. 單軸多自由度經時精度監測技術</p>	<p>1. 單軸多自由度經時精度監測分析技術</p>

效益			
1. 2~3 家關鍵工具機廠詳細訪談，深入了解訂定明確需求規格與介面	1. 建立多自由度量測驗證與不確定度評估技術 2. 原型量測模組導入廠商試驗 2 件	1. 多自由度量測模組導入廠商試驗 7 件	1. 多自由度經時精度監測實機試驗，導入廠商試驗 1 件

1-2 主軸狀態監測技術開發子計畫

年度目標			
112 年度	113 年度	114 年度	115 年度
<p>高速主軸軸承預壓力監測技術</p> <ul style="list-style-type: none"> 完成主軸預壓力量感測器原型設計，並以有限元素分析與電路模擬驗證設計規格達力量量測範圍 10 kN，解析度 ≤ 10 N <p>工具機微型定點囊的開發與製作</p> <ul style="list-style-type: none"> 鋁定點溫度 660°C 相變化時間 ≥ 30 s 溫度穩定度 $\leq 0.5^{\circ}\text{C}$ 溫度量測範圍 $0^{\circ}\text{C} \sim 660^{\circ}\text{C}$ 量測解析度 0.1°C 	<p>高速主軸軸承預壓力監測技術</p> <ul style="list-style-type: none"> 完成主軸預壓力量感測器製作，力量感測器力量量測範圍達 10 kN，解析度 $\leq 0.1\%$ (10 N) <p>主軸最佳工作溫度的監測與自校技術</p> <ul style="list-style-type: none"> 設計內置式自校型溫度感測器及外部控制模組設計製作，並建立主軸工作溫度的監測技術 溫度校正點 $(62 \pm 1)^{\circ}\text{C}$ 溫度校正時間 ≤ 30 分鐘 溫度穩定度 $\leq 0.5^{\circ}\text{C}$ 主軸溫度範圍 $\leq 62^{\circ}\text{C}$ <p>驗證溫度與預壓感測器可於主軸工作環境正常運作，即主軸溫度 40°C 以內，轉速達 20,000 rpm 狀態下，完成連續 1 小時工件切削之監測數據</p>	<p>高速主軸軸承預壓力監測技術</p> <ul style="list-style-type: none"> 完成主軸預壓力量感測器量測不確定度評估，預壓力量測相對標準不確定度 $< 1\%$ <p>主軸最佳工作溫度的監測與自校技術</p> <ul style="list-style-type: none"> 主軸自校型溫度感測器演算模型建置，準確度：$\leq 0.5^{\circ}\text{C}$ 	<p>高速主軸軸承預壓力監測技術</p> <ul style="list-style-type: none"> 完成主軸預壓力監測與主軸軸承異常判斷模型，異常判斷準確率 $> 90\%$ <p>主軸最佳工作溫度的監測與自校技術</p> <ul style="list-style-type: none"> 主軸加工溫度異常診斷技術 主軸熱分佈的模型建置技術 主軸溫度最高固定點：62°C 量測不確定度 $\leq 1^{\circ}\text{C}$

關鍵技術			
1. 主軸預壓力量感測器設計與模擬 2. 微型定點囊的開發技術	1. 主軸預壓力量感測器製作技術 2. 高速主軸預壓量測技術 3. 主軸內置式自校型溫度感測器技術	1. 力量感測器量測不確定度分析 2. 主軸內溫度自校演算模型技術	1. 預壓力監測與主軸軸承異常判斷技術 2. 主軸最佳工作溫度的監測技術及熱分佈診斷技術
效益			
1. 建立力量感測器的參數化設計流程 2. 完成溫度標準微型定點囊的設計與開發，擴充溫度領域新的標準傳遞方式	1. 建立應變式力量感測器開發技術 2. 提供工具機製造商及客戶端判斷主軸健康度之參考依據 3. 通過加裝主軸預壓力量感測器監測主軸，並提前預測可能因預壓力異常所造成停機或故障，進而避免無謂成本消耗	1. 提前掌控主軸過溫失效風險，並提高產品零組件的加工精度 2. 自校型溫度感測器技術及演算模型技術導入廠商試驗 1 家	1. 解決產線人力不足，並傳承現場人員視診即觸診經驗，以實現線上主軸溫度診斷功能 2. 最佳工作溫度的監測與自校技術，導入國內主軸業者 1 家

1-3 主軸線上量測技術研發子計畫

年度目標			
112 年度	113 年度	114 年度	115 年度
主軸迴轉誤差量測模組原型開發 <ul style="list-style-type: none"> 具備分析主軸 5 項迴轉誤差能力(角度: E_A, E_B、線性: E_X, E_Y, E_Z) 量測模組解析度: 角度 $\leq 0.1''$、線性 $\leq 0.2 \mu m$ 	-	-	-
關鍵技術			
1. 主軸迴轉誤差量測模組原型，及主軸 5 項迴轉誤差分析演算法	-	-	-
效益			
1. 完成主軸 5 項迴轉誤差分析演算法，	-	-	-

可線上量測主軸迴轉誤差，並導入場域試驗 1 家			
-------------------------	--	--	--

分項二：工具機品質長效量測與評估

2-1 工具機組裝品質智慧分析與精度補償子計畫

年度目標			
112 年度	113 年度	114 年度	115 年度
線性軸組裝品質模組研發 <ul style="list-style-type: none"> • 建立線性軸關鍵組裝品質參數分析技術 • 推導線性軸組裝品質數學模型 <ul style="list-style-type: none"> - 組裝品質參數: 4 項以上 - 可分析幾何誤差項次: 6 項 - 組裝品質參數影響程度排列 - 模型準確度 $R^2 > 0.7$ 	旋轉軸組裝品質智慧分析技術研發 <ul style="list-style-type: none"> • 建立旋轉軸關鍵組裝品質參數分析技術 • 推導旋轉軸組裝品質數學模型 <ul style="list-style-type: none"> - 組裝品質檢驗參數: 4 項以上 - 可分析幾何誤差項次: 6 項 - 組裝品質參數影響程度排列 - 組裝量測精密度提升 $> 10\%$ 	三軸機數位化滾動式品質管理系統研發 <ul style="list-style-type: none"> • 三軸組裝允收標準智慧化分析，製程能力指標 $Cpk \geq 1.33$ • 三軸組裝量測精度改善 $> 10\%$ 	五軸機數位化滾動式品質管理系統研發 <ul style="list-style-type: none"> • 五軸組裝允收標準智慧化分析，製程能力指標 $Cpk \geq 1.33$ • 五軸組裝量測精度改善 $> 10\%$
關鍵技術			
1. 線性軸組裝多體運動學分析量測技術 2. 蒙地卡羅搜尋線性軸關鍵組裝品質參數之技術	1. 旋轉軸組裝多體運動學分析量測技術 2. 蒙地卡羅搜尋旋轉軸關鍵組裝品質參數之技術	1. 三軸機數位化滾動式品質管理	1. 五軸機數位化滾動式品質管理系統
效益			
1. 建構一套線性軸組裝品質數學模型 2. 利用蒙地卡羅分析法，找出各組裝品質參數對線性軸之靈敏性(影響程度)分析	1. 建構一套旋轉軸組裝品質數學模型 2. 利用蒙地卡羅分析法，找出各組裝品質參數對旋轉軸之靈敏性(影響程度)分析	1. 建構一套三軸機數位化滾動式品質管理系統-補償三軸機的幾何誤差組裝品質 2. 輔導廠商導入使用三軸機數位化滾動式品質管理，至少 1 家	1. 建構一套五軸機數位化滾動式品質管理系統-補償五軸機的幾何誤差組裝品質 2. 輔導廠商導入使用五軸機數位化滾動式品質管理，至少 1 家

2-2 整機空間精度監測策略子計畫

年度目標			
112 年度	113 年度	114 年度	115 年度
線性軸用快速查核件設計與製作開發 <ul style="list-style-type: none"> • 適用工作盤面直徑：≤ 660 mm • 量測時間：≤ 20 分鐘 線性軸用快速查核件量測誤差分析技術 <ul style="list-style-type: none"> • 一次量測可分析幾何誤差項：兩線性軸之 3 項幾何誤差 • 幾何誤差參數重複性 ≤ 5 μm 	旋轉軸用快速查核件技術研發 <ul style="list-style-type: none"> • 適用工作盤面直徑：330 mm \leq 直徑 ≤ 660 mm 之五軸工具機 • 量測時間：≤ 20 分鐘 旋轉軸用快速查核件量測誤差分析技術 <ul style="list-style-type: none"> • 可分析幾何誤差項：旋轉軸 4 項幾何誤差 • 旋轉軸線性幾何誤差參數重複性 ≤ 5 μm 	五軸工具機空間幾何精度品質長效量測與評估機制 <ul style="list-style-type: none"> • 即時監測 App 一套 • 實現工具機 MTBF 2500 小時 	精進五軸工具機整機空間幾何精度品質長效 <ul style="list-style-type: none"> • 即時監測 App 一套 • 提升工具機至 MTBF 4000 小時
關鍵技術			
1. 線性軸幾何誤差線上快速查核程序、分析演算法 2. 接觸式幾何誤差量測 3. 線性軸現場用之查核件設計	1. 旋轉軸幾何誤差線上快速查核測程序、分析演算法 <ul style="list-style-type: none"> • 接觸式/非接觸式幾何誤差量測 2. 旋轉軸現場用之查核件設計	1. 工具機整機多體運動學分析演算法 2. 五軸工具機幾何誤差分析	1. 工具機整機多體運動學分析演算法 2. 五軸工具機幾何誤差分析
效益			
1. 開發線性軸用線上快速查核件，作為五軸工具機標準值傳遞，可提供國內工具機產業使用	1. 開發旋轉軸用線上快速查核件，作為五軸工具機標準傳遞，可提供國內工具機產業追溯	1. 開發品質長效監測用 APP，進行品質管理，解決工具機穩定性不足問題，提高工具機精度與品質	1. 進行品質管理，解決工具機穩定性不足問題，提高工具機精度與品質 2. 輔導廠商導入使用即時監測 App，至少 1 家

分項三：量測標準平台與產業合作

3-1 工業用 XCT 校正技術子計畫

年度目標			
112 年度	113 年度	114 年度	115 年度
研製 XCT 參考標準件 • 標準件尺寸範圍 ≥ 20 mm • 標準不確定度 ≤ 1.6 μm	建立 XCT 系統尺寸量測校正技術 • 球心距量測範圍 4.9 mm \leq 量測範圍 ≤ 113 mm，標準不確定度 ≤ 7 μm (不含待校件) • 球徑量測範圍 1 mm \leq 量測範圍 ≤ 25 mm，標準不確定度 ≤ 7 μm (不含待校件)	完成系統查驗 • 完成 XCT 系統尺寸量測校正程序書 • 完成系統不確定度評估報告	/
關鍵技術			
1. X 光參考標準件幾何參數量測技術 2. CMM 與 XCT 不確定度關聯鏈結建立	1. XCT 校正程序 2. XCT 量測不確定度評估技術	1. XCT 標準件查核技術	/
效益			
1. 提供 XCT 參考標準件量測技術服務，以符合國內追溯需求	1. 滿足至少 4 間以上國內單位追溯需求	1. 廠商服務件數至少 1 件(如福宮、馬路科技等)	/

參、年度計畫目標及執行情形

計畫研發成果、與國際現況、及產業需求對照如下

子項名稱	數位式線軌組裝調校量測技術	主軸狀態監測技術	主軸線上量測技術研發	工具機組裝品質智慧分析與精度補償	整機空間精度監測策略	工業用 XCT 校正技術
計畫研發成果	<p>線軌多自由度誤差量測技術</p> <ul style="list-style-type: none"> 量測自由度 Y(水平)、Z(垂直)直線度與 Yaw、Pitch 角度誤差 直線度量測解析度 $\leq 0.1 \mu\text{m}$；角度量測解析度 $\leq 0.1''$ 直線度重複性不確定度 $\leq (0.5 \mu\text{m} + 10^{-7} \times L)$；角度重複性不確定度 $\leq (0.5 + 10^{-1} \text{m}^{-1} \times L)''$；L 為線軌行程範圍(0~2) 直線度量測適用範圍在 100~200 μm 角度量測適用範圍 	<p>高速主軸軸承預壓力監測技術</p> <ul style="list-style-type: none"> 完成主軸預壓力量感測器原型設計，並以有限元素分析與電路模擬驗證設計規格達力量量測範圍 10 kN，解析度 $\leq 10 \text{N}$ 導入場域測試 1 家廠商(普森精密主軸公司) <p>主軸自校型溫度感測技術性能</p> <ul style="list-style-type: none"> 溫度校正：鋁定點溫度 660 $^{\circ}\text{C}$ 與低溫合金溫度 62 $^{\circ}\text{C}$ 	<p>主軸線上量測技術研發</p> <ul style="list-style-type: none"> 具備主軸 5 項迴轉量測能力(角度：E_A, E_B、線性：E_X, E_Y, E_Z) 量測模組解析度：角度 $\leq 0.1''$、線性 $\leq 0.2 \mu\text{m}$ 	<p>線性軸組裝誤差分析技術研發</p> <ul style="list-style-type: none"> 完成關鍵組裝品質參數分析技術及推導線性軸組裝品質數學模型，輸入至少 4 項組裝品質參數，分析線性軸 6 項幾何誤差，並依影響程度排列組裝品質參數 完成模型關鍵組裝品質參數預測模型判定係數 $R^2 > 0.7$ 	<p>整機空間精度監測策略</p> <ul style="list-style-type: none"> 完成快速查核件硬體及架設治具設計，能滿足工具機工作臺盤面直徑 $\leq 660 \text{mm}$ 完成查核件量測技術-誤差分析之演算法開發，可分析出 3 項幾何誤差 建立整機空間精度監測策略，含量測程序及量測路徑規劃評估報告 1 份 	<p>XCT 參考標準件設計與製作</p> <ul style="list-style-type: none"> 開發之標準件不同方向最大球心距皆符合 $\geq 59.58 \text{mm}$，且最小球心距符合 $\leq 30 \text{mm}$，符合 VDI 2630 規範 邊界有足夠的灰階差異足以準確判定邊界位置滿足驗證需要 剛性規格達成最大球心距形變量為 0.02 μm，小於 0.16 μm 目標 熱膨脹特性規格達成最大球心距形變

	<p>≤100"</p> <ul style="list-style-type: none"> • 適用環境溫度為 ±3 °C • 場域試驗 2 家 	<ul style="list-style-type: none"> • 相變化時間 ≥ 120 s；溫度穩定度 ≤ 0.2 °C；量測解析度 0.1 °C • 導入場域測試/應用 2 家廠商 (普森精密、永進機械) • 校正時間 ≤ 60 min 			<ul style="list-style-type: none"> • 完成五軸工具機快速查核件實際量測及場域試驗一處，幾何誤差分析結果之重複性 ≤ 5 μm 	<p>量為 0.101 μm，小於 0.24 μm 之目標 (T = 19~21 °C)</p> <p>XCT 參考標準件不確定度評估:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 建立 XCT 標準件校正追溯程序 • 標準件經評估後之標準不確定度 1.16 μm
國際現況	<p>領導廠牌 Renishaw XK 10，可量測線軌 Y 與 Z 直線度，量測精度為 (± 0.01A ± 1) μm，A 為顯示讀值，單位為 μm，如果調校於全程顯示於 15 μm 的範圍，相當於 ± 1.15 μm 的精度</p>	<p>NTN(日本)力量量測範圍: 4 Kn；適用之主軸轉速範圍 15,000 rpm</p> <p>NPL(英國)：溫度校正: 高溫合金共晶點 961 °C ~ 2290 °C；相變化時間 ≥ 1200 s；溫度穩定度 ≤ 0.5 °C；校正時間 < 6 hour</p>	<p>Spindle Error Analyzer (LION)，離線量測 (off-line)，準確度: ≤ 1 μm</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 誤差源分析 • MAG(友嘉) 利用 Error Budget (Lawrence Livermore National Laboratory)，提供機台除錯指引，縮短除錯時間 • 組裝精度改善 • 上海交通大學估算零件之尺寸公差與組裝誤差之關係，改善組裝品質 7% 	<ul style="list-style-type: none"> • DKD 與 PTB 計量領域的專家正合作落實校正數位化並於 Mass 領域有良好的做法 • 歐盟正在發展數位產品護照，可用來獲取產品的相關資訊，如原料、產地、二氧化碳排放量及安全評鑑等等相關資訊 	<p>國際 XCT 廠商具多球 XCT 參考標準件設計與製作能力，以 WERTH 27 球參考標準件，球心距不確定度為 0.1 + L / 500 μm (L in mm)</p>

產業需求	<p>滿足線軌組裝 $5\ \mu\text{m}/\text{m}$ 精度需求，且需考慮到安裝過程操作所需的實務性，必須能夠間斷性的操作，以及能夠有效的掌握線軌整體誤差狀況</p>	<p>滿足目前商用工具機主軸預壓力量量測需求，量測範圍 $3\ \text{kN}\sim 8\ \text{kN}$，合理預壓變化量約設定值為 $10\%\sim 15\%$，主軸預壓力量感測器可作為主軸運行健康度的參考指標並提早發現異常現象，可用於主軸組裝、工具機使用中各階段進行即時監控</p> <p>提供工具機主軸工作溫度的監測與自我校正技術，可應用於主軸溫度 $62\ ^\circ\text{C}$ 以內，相變化時間 $\geq 120\ \text{s}$，溫度穩定度 $\leq 0.2\ ^\circ\text{C}$。自校過程無需停機、拆裝與後送校正實驗室，校正時間 $60\ \text{min}$ 內，可提前掌控主軸溫度</p>	<p>滿足主軸線上量測技術需求，實現主軸迴轉誤差現場量測。已建立分析 5 項迴轉誤差量測能力(角度: E_A, E_B、線性: E_X, E_Y, E_Z)。模組解析度: 角度 $\leq 0.1''$、線性 $\leq 0.2\ \mu\text{m}$</p>	<p>滿足機械製造業對精密產品之加工工具機及工具機用之零組件精度提升需求，掌握。本計畫為滿足工具機組裝品質智慧分析與精度補償技術需求，開發線性軸組裝品質分析模組，透過雅可比旋量理論推導線性組裝過程可掌握關鍵組裝參數對線性軸 6 項幾何誤差之預測，且關鍵參數的改變預期可提升機台精度達 10% 以上，使協助業者掌握除錯方向，使縮短機台除錯時間</p>	<p>產業進行數位化轉型，將計量資訊導入至量測設備，藉此簡化誤差補償程序與縮短時間，有效整合廠內眾多硬體設備及應用系統，以利產業之數位化及智慧化之發展</p>	<p>國內無具公信力的第三方單位提供 XCT 設備長度量測性能驗證，國產化 XCT 設備發展遭遇設備性能驗證的瓶頸待解決</p>
------	--	--	--	--	---	--

		感測器的失效風險				
--	--	----------	--	--	--	--

一、線上量測與組裝調校分項

本分項全程計畫的目標主要為完善五軸工具機關鍵零組件線上量測精度關鍵技術及模組，提升工具機空間幾何量測精度，建立線上校正、組裝調校量測技術，提供智慧化產線品質監控。預期提供工具機在組裝階段與加工運轉所需之線上量測技術與計量標準與追溯，確保精密加工、智慧製造等生產線機台量測能力與數據正確性，並根據工具機之整機與關鍵零組件之狀態監測進行製程參數優化與產程調配等工作。112 年度的分項計畫目標主要是建立數位式線軌組裝調校量測技術、主軸狀態監測技術以及主軸線上量測技術。

數位式線軌組裝調校量測技術，本年度將進行線軌多自由度量測模組原型開發，透過光學與感測器之關鍵零組件的設計、實驗與分析，以及模組系統的誤差預算分析，導入模組系統設計，以確定設計能夠滿足量測規格，快速掌握完整的幾何誤差資訊，協助產業發展數位化生產品質履歷，建立業界線性滑軌組裝精度品質檢驗的標準量測方法，提高機台組裝精度驗證能力。

主軸狀態監測技術，本年度將研發高速主軸軸承預壓力監測技術和微型定點囊開發，滿足國內主軸、工具機製造商及終端使用者對於主軸預壓力量測的需求。預期主軸預壓力量感測器的力量量測範圍可達 10 kN，解析度 ≤ 10 N；另外，微型定點囊的開發與製作技術，將發展金屬熔煉製程與評估以相變化溫度的轉折點方式來界定溫度定義定點，實現具溫度標準追溯之微型定點囊技術。

主軸線上量測技術因應智慧機械需求，整合加工及量測之現場量測(In-situ)技術，發展主軸迴轉誤差量測模組，並將其安裝於主軸內，以實現主軸迴轉誤差現場量測，即時蒐集數據，進而掌握加工異常訊號及預估主軸零組件使用壽命，維持加工精度及穩定性，主軸預期具備 5 項迴轉量測能力(角度: E_A, E_B 、線性: E_X, E_Y, E_Z)，且量測模組解析度達角度 $\leq 0.1''$ ，線性 $\leq 0.2 \mu\text{m}$ 。

各子項之年度執行查核點說明如下：

查核點 編號	內容說明	預定完成日期	實際完成日期	差異說明
數位式線軌組裝調校量測技術				
A1-1	• 完成初步系統架構與關鍵零組件選用	112.03.31	112.03.31	無差異
A1-2	• 完成系統關鍵零組件驅動設計，與系統設計 • 完成兩家以上廠商的應用情境討論	112.06.30	112.06.30	無差異
A1-3	• 完成組件規格評估與驗證，分析系統解析度能夠達到直線度 0.1 μm ，角度解析度 0.1"	112.09.30	112.09.30	無差異
A1-4	• 完成原型系統架設與查驗查驗，系統重複性不確定度(0.5 $\mu\text{m} + 10^{-7} \times L$) μm ；角度量測解析度 0.1"，重複性不確定度(0.5 + $10^{-1} \text{m}^{-1} \times L$)"	112.11.30	112.11.30	無差異
主軸狀態監測技術開發				
A2-1	• 完成力量感測器結構有限元素分析，產出有限元素分析報告一份 • 完成微型定點囊體積與維持相變化時間的計算模型報告一份	112.03.31	112.03.31	無差異
A2-2	• 完成力量感測器設計(包含機構設計、應變規貼附位置，後端電路規劃)，產出感測器設計報告一份 • 完成微型定點囊的設計(包含微型定點囊結構設計、低熔點合金的填充規劃、溫度計貼附位置)，產出微型定點囊設計報告一份	112.06.30	112.06.30	無差異
A2-3	• 完成低熔點合金的溫度 • 調查與調配比例報告一份	112.09.30	112.09.30	無差異
A2-4	• 完成力量感測器功能驗證，力量量測範圍 10 kN，解析度 $\leq 10 \text{N}$ • 完成微型定點囊的功能驗證，低熔點合金相變化溫度(62 ± 1) $^{\circ}\text{C}$ ，相變化維持時間 $\geq 20 \text{s}$	112.11.30	112.11.30	無差異
主軸線上量測技術研發				
A3-1	完成主軸迴轉誤差量測模組原型設計 • 直徑： $\leq 200 \text{mm}$ • 高度： $\leq 100 \text{mm}$	112.03.31	112.03.31	無差異
A3-2	完成主軸迴轉誤差量測模組原型製作 • 環形編碼器：2 顆 • 讀頭：6 個	112.06.30	112.06.30	無差異
A3-3	完成主軸迴轉誤差分析 5 項迴轉誤差(角度： E_A, E_B 、線性： E_X, E_Y, E_Z)	112.09.30	112.09.30	無差異
A3-4	完成主軸迴轉誤差量測模組原型 解析度：角度 $\leq 0.1''$ 、線性 $\leq 0.2 \mu\text{m}$	112.11.30	112.11.30	無差異

1. 數位式線軌組裝調校量測技術

目前工具機設備業普遍使用直規與量表進行線性滑軌基準面與滑塊組裝的直線度公差檢驗作為品質標準的管控檢驗，多為中低階工具機供應廠家，以 3 m 行程內工具機組裝水準：通常需滿足使用量表對直規的示值誤差每米為 $2\ \mu\text{m}$ 變化內(表視誤差)，而目前實際情況約為 $5\ \mu\text{m}/1000\ \text{mm}$ ，然而在使用該方法時，其中還包含量表與直規本身的誤差與安裝量測誤差(如阿貝、布萊恩誤差等)，且以量表所得為綜合性誤差，並不易同時獲得單一位置完整的角度與線性誤差資訊及數位化資訊。而在滑軌安裝基準面，對精度要求較高之廠商會使用視準儀行角度誤差的確認，以避免過量的角度誤差造成工具機組裝後的誤差放大，使用這些量測方式幾何誤差常無法快速同時被量測以及分離出來，對於要提高組裝精度，缺乏滿足精度與解析度的有效生產量測的關鍵品質工具。

數位式線軌組裝調校量測模組技術，旨在取代傳統直規的參考基準的量測方式，而改採用光學準直性作為參考基準，由於過往使用直規基準作為參考基準，就少了實體化的機械結構參考框架，故又稱為虛擬量測框架，感測則透過光電轉換獲得高解析度與精度的數位量測，且與直規相比較容易拓展整個量測行程長度，量測距離越長也相對具有量測成本與便利性的優勢。同時，可以簡化架設與使用實體量規可能因人員操作造成基準的異動，且具有半絕對(對於相對零點具有絕對特性，不需要每次重新歸零)的量測特性，一旦建立光軸的基準後，參考此光軸的量測為絕對值，干涉儀需連續時間量測，不用擔心使用過程中遮斷或者修整時，需重新進行歸零，能夠改善使用的效率與方便性，旨在提供組裝人員一個有效的的工具來滿足線軌高精度組裝品質檢驗需求。

【執行成果】

(1) 完成初步系統架構與關鍵零組件選用 (查核點編號 A1-1)

數位式線軌組裝調校量測模組技術，量測原理主要利用雷射光準直性作為參考基準，並透過準焦與離焦的高斯光學成像系統，將參考準直光成像於光學感測器，以解出對應參考準直光之相對姿態誤差，其量測自由度定義如圖 1-1-1，開發量測模組可同時量測垂直(V)與水平(H)方向直線度誤差，與 Pitch 及 Yaw 角運動誤差，量測模組量測的誤差基於參考光軸為絕對值的誤差，量測裝置能更適用於線軌組裝過程常需要重複安裝的需求。

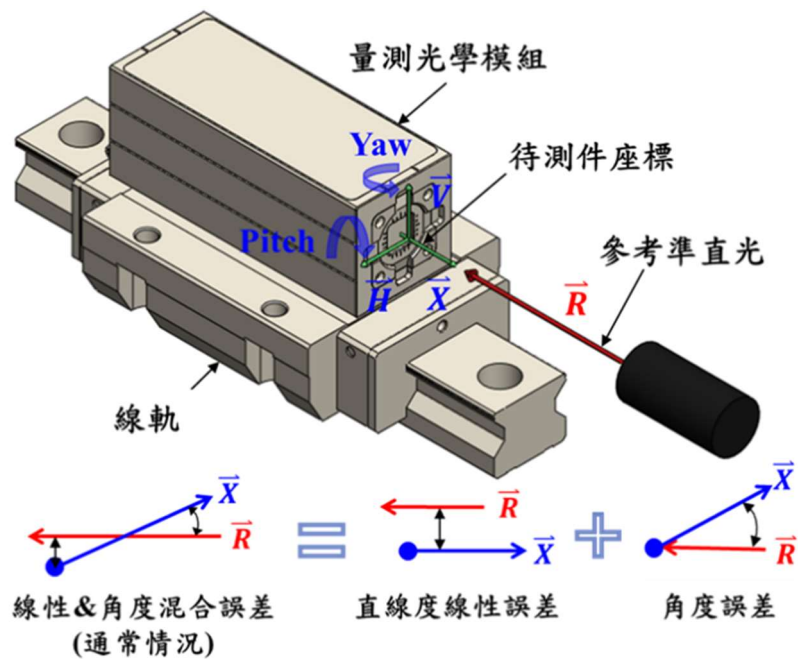


圖 1-1-1 量測參考示意圖

系統的初部架構如圖 1-1-2 所示，量測原理主要利用準焦光學成像的訊號只對角度敏感，透過設計之等效焦距可以轉換為感測器上的位置變化，並轉換成訊號輸出，故可以透過等效焦距的設計來調整感測靈敏度(參考圖 1-1-2)， α 為入射夾角， f_α 為等效焦距， s_α 為對應感測器之位移訊號變動量。

$$s_\alpha = f_\alpha \cdot \alpha$$

而在線性位移可利用光點直接投射於感測器上，或經過倍率光學來提高解析能力，其中一種光學設計方式為遠心鏡設計，可以獲得提高解析的倍率，其耦合角度可以透過已知的角度感測量來進行解耦合，其中 d 為直線度線性偏移， M_d 為直線度的放大倍率，其中 L_1 為等效的成像距離，此光學系統亦可以導入平行擴束設計來提供放大倍率時，同時降低直線與角度耦合之改善設計。

$$s_d = -M_d \cdot d + L_1 \cdot \alpha$$

由以上可知，系統之誤差來源包含準直光源之穩定性、感測器光學系統成像誤差，感測器與訊號處理輸出訊雜比等，為確認最終量測系統能夠滿足解析度需求，首先先針對關鍵零組件感測器進行參數評估選用。

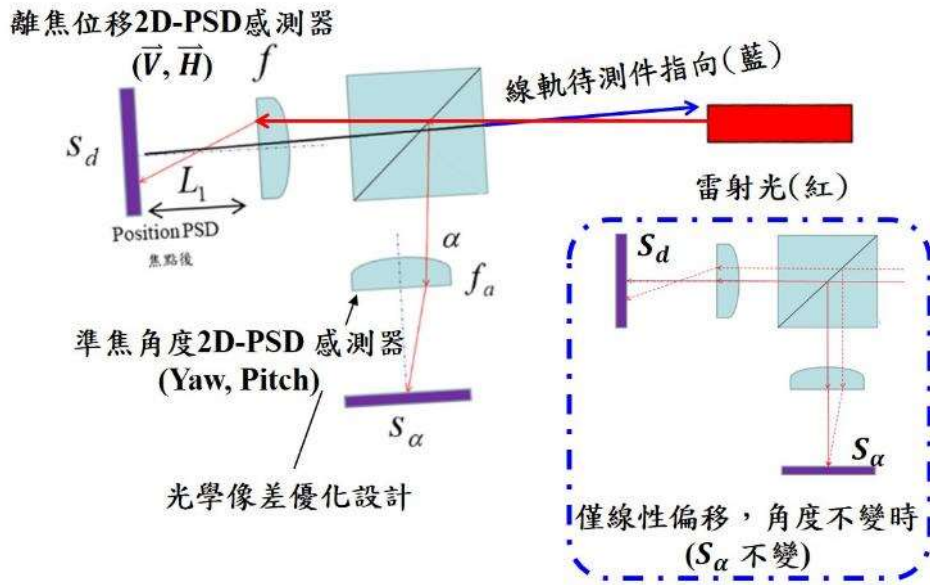


圖 1-1-2 量測光學架構

• 光源評估:

計畫以 2 m 為量程，位置解析度 $0.1 \mu\text{m}$ ，角度解析度為了能夠獲得良好指向性與成像設計，系統採用雷射作為指向參考光源，系統採用高斯光束光學設計，如圖 1-1-3 所示，考慮到發散角的大小及光波前相位穩定性，依據條件先考慮光源條件如下，

Beam 參數假設:

- $\lambda = 633 \text{ nm}$
- $M^2 \leq 1.2$
- Rayleigh 距離 $\geq 3 \text{ m}$

設計光束參數:

- Beam Size: 3 mm (2 m)
- 發散角: 0.323 mrad
- $Z_r = 9.3 > 3 \text{ [m]}$

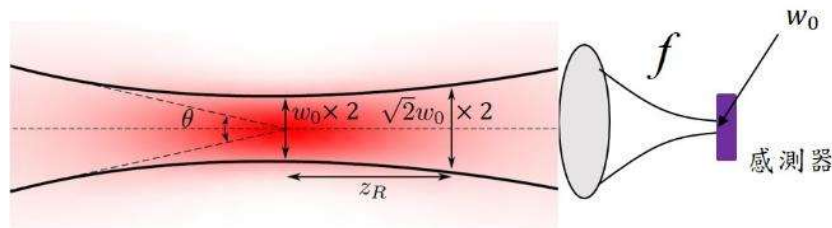


圖 1-1-3 高斯光束成像示意圖

在光源選用上，以半導體雷射耦合光纖為設計，採用光纖一來可以作為被動光學組件，作為一個隔離的裝置，隔離相互的干擾源，以提高雷射的指向穩定性，同時光源強度與驅動感測器訊號電流大小相關，為使感測器能夠達到預期的訊雜比，設定單一感測器的光源強度能達 1 mW 為目標，因此，光源的最大輸出應大於 2 mW，選用的規格如圖 1-1-4 為例，為

ipslaser 蝶形光纖耦合雷射 I0633SB0025P，其光源規格範圍如下，光源透過金屬殼加強散熱，輸出光強有回授控制以穩定光源輸出功率大小，合適的操作溫度為(24~30) °C。

- Max. Power 25 mW
- Spectra Linewidth < 100 kHz
- Stabilized output spectrum < 0.007 nm / °C
- Gaussian TEM00 Beam Quality $M^2 < 1.1$
- SMSR 70 dB (With line filter)
- PER 20 dB (typical)
- MFD 4.3 μm

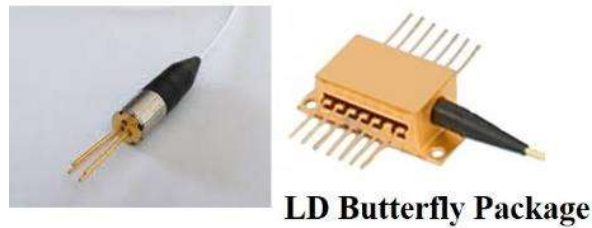


圖 1-1-4 半導體雷射光源

• 光學系統:

出口光源經過準直光學系統設計，以等效焦長的薄透鏡計算，如圖 1-1-5 所示，計算焦長 15、20 及 25 mm 之光斑直徑隨傳播距離的變化，計算之結果如圖 1-1-6，其中，3 mm 的光源經過 200 mm 焦長聚焦後，光斑直徑 0.062 mm，角度量測範圍暫定為 $\pm 100''$ 計算所需範圍為 0.194 mm，整體要求範圍應大於 0.25 mm，加上安全係數，2 mm 感測系統即可應對，但考慮到擴充性，則以 4 mm 感測器為評估，而圖 1-1-7 顯示以 0.1" 角度解析度對應不同焦長所需之位置解析度需求。直線度感測器量測範圍為 $\pm 100 \mu\text{m}$ ，光斑直徑估計為 3.5 mm~4.2 mm，考慮到可能導入光學放大設計(定為 1~2x)，整體量測範圍應大於 7.4 mm，若採用鏡像放大則為 3.9 mm，但由於裝置角度誤差具有耦合效應，加上餘弦誤差放大，所以應加大量測範圍，故直線度感測器評估範圍達 10 mm 或 20 mm 感測器。

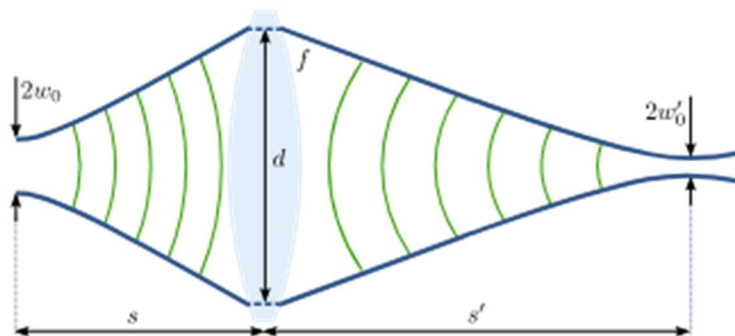
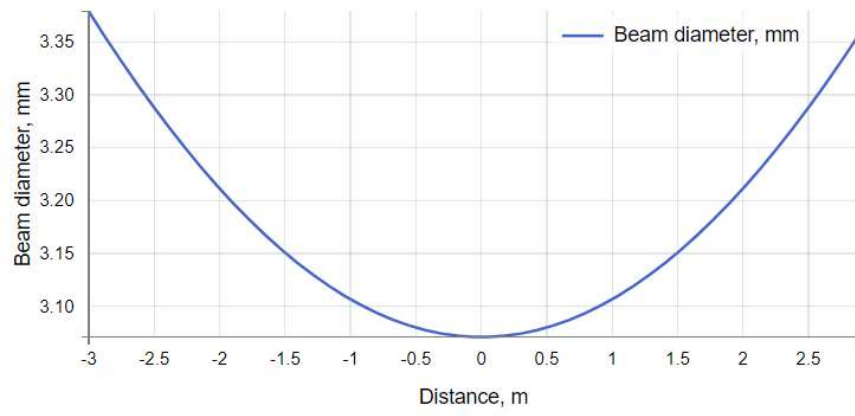
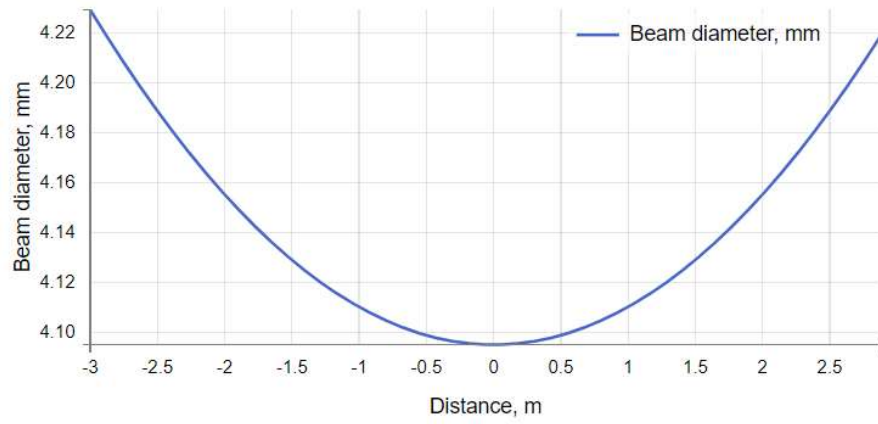


圖 1-1-5 高斯光學傳遞系統示意圖

(a)



(b)



(c)



圖 1-1-6 焦長 (a) 15 mm、(b) 20 mm、(c) 25 mm

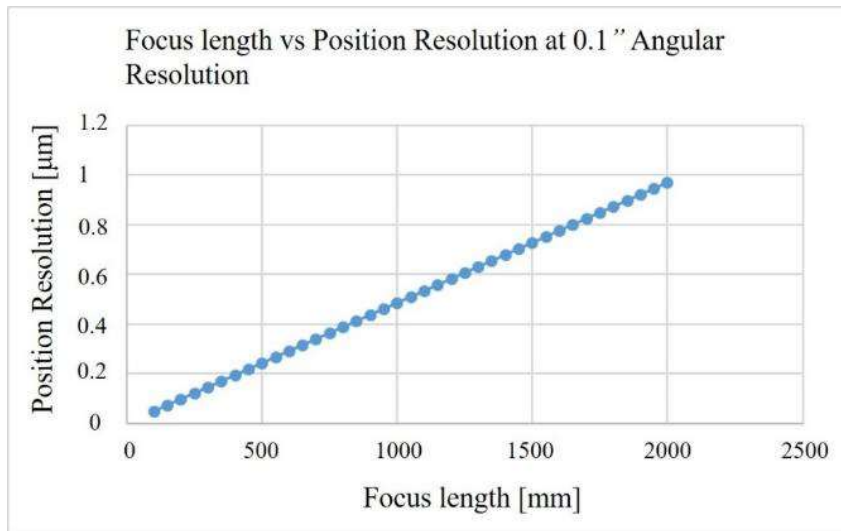


圖 1-1-7 焦長與 0.1'' 解析度對應位置解析度關係

經由上述光源與系統量測範圍估算後，接下來評估感測器的選用，主要評估是否能夠滿足所需解析度的要求，因為現階段主要評估光源感測器本身誤差源，而未加入其他誤差，例如電路雜訊等，因此，在設計上取一半需求解析度當成訊雜比(SNR)之需求定義，取 0.05 μm 為需求規格。因成本考量，系統不採主動追蹤系統設計，而採用被動式的設計，因此，對於感測器之線性度與可用量測行程與受光幾何限制之影響程度變得相對重要，如表 1-1-1 所示，以無縫型感測器為主要選擇。

表 1-1-1 感測器類型比較

	分割型感測器	無縫型感測器
類性		
優點	<ul style="list-style-type: none"> • 敏感度高 • 響應快 • 雜訊較低 	<ul style="list-style-type: none"> • 線性度好 • 光斑大小變化不影響 • 可量測範圍大，不受光斑形狀影響
缺點	<ul style="list-style-type: none"> • 受光斑大小與形狀分佈影響大 • 光點不可尺寸過小，會造成錯誤 • 可量測範圍受限制 (過大或過小光斑) • 具有較高的非線性影響精度 	<ul style="list-style-type: none"> • 串聯阻抗較大 • 受大面積高電容與電阻限制，響應較慢 • 暗電流、雜訊較高 • 光強度耐受度較低

圖 1-1-8 表示感測器模型示意圖，由 PN 介面受光照，在感測位置由光電效應產生光電流源，此電流源透過傳導電阻傳遞，依據光斑的位置造成電阻分佈，電流會依並聯電阻分流傳導，因此可以計算光斑之位置，如下計算，

$$\Delta x = \frac{L_x}{2} \cdot \frac{I_{x2} - I_{x1}}{I_{x2} + I_{x1}}, \quad \Delta y = \frac{L_y}{2} \cdot \frac{I_{y2} - I_{y1}}{I_{y2} + I_{y1}}$$

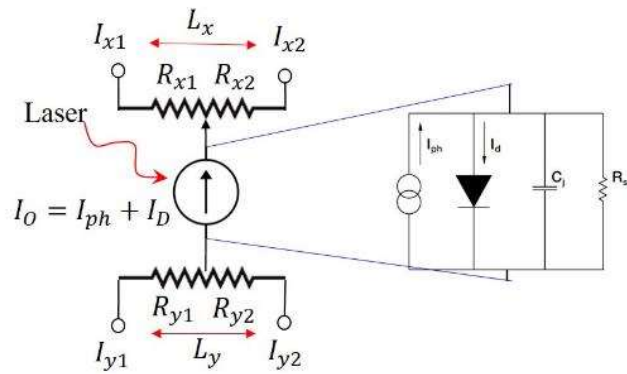


圖 1-1-8 感測器模型示意圖

而依據光感測器半導體，計算其主要的雜訊干擾源，主要考慮暗電流(Dark Current)、散粒雜訊(Shot Noise)與熱雜訊(Johnson - Nyquist Noise)，暗電流因為具備低頻的直流特性，因此，是可以被補償的，補償方式包括量測暗電流特性，並利用分時受光量測，以區分背景暗電流特性，並進行背景電流的補償，但是由入射光產生之光電子與暗電流產生之總和電流，會產生 Shot Noise，以及內部的介面電阻會產生熱雜訊 Johnson Noise，此兩種雜訊為隨機雜訊，並與頻寬之設計有關，在透過計算總體雜訊後，與訊號進行感測器自身 SNR 的計算，評估是否能具備足夠解析能力，電流[單位，A]雜訊的計算方式如下，該計算未考慮整合電路之設計值，

Shot Noise: $I_s = \sqrt{2q \cdot (I_p + I_D) \cdot BW}$ [A]， q 電荷常數， I_p 光電流， I_D 暗電流， BW 為頻寬

Johnson Noise: $I_j = \sqrt{\frac{4KT \cdot BW}{R_{ie}}}$ [A]， K 波之曼常數， T 絕對溫度， R_{ie} 內部串聯電阻

Total Noise: $I_n = \sqrt{I_s^2 + I_j^2}$ [A]

依據前述之解析度需求定義為 0.05 μm ，由感測器感測範圍、感測光電流與上述感測原理計算，依據矩型分佈計算，大致上可以計算出 SNR 需求，10 mm 感測範圍 SNRreq 需求要大於 95 dB，20 mm 感測範圍 SNRreq 需求要大於 101 dB，角度感測需求 SNRreq 為 87 dB。圖 1-1-9 為 On-trak PSM 2 系列 4 mm、10 mm 與 20 mm 感測器的規格值，

(a)

Parameter	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit
Active area			20 x 20		mm ²
Position non-linearity			0.3	0.8	%(±)
Detector resistance	R _{det}	7	10	16	k Ω
Dark current	I _d		200	2000	nA
Noise current	I _{noise}		1.5	3.5	pA/√Hz
Responsivity	r		0.63		A/W
Capacitance	C _j		360	430	pF
Rise time (10-90%)	t _r		1.6	3.0	µs
Reverse voltage (bias)	V _r	5	15	20	V
Thermal drift			40	200	ppm/°C
Maximum ratings					
Reverse voltage	V _{R-max}			30	V
Operating temperature	T _{oper}			70	°C
Storage temperature	T _{stg}			100	°C

(b)

Parameter	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit
Active area			10 x 10		mm ²
Position non-linearity			0.3	0.8	%(±)
Detector resistance	R _{det}	7	10	16	k Ω
Dark current	I _d		100	500	nA
Noise current	I _{noise}		1.3	2.5	pA/√Hz
Responsivity	r		0.63		A/W
Capacitance	C _j		90	110	pF
Rise time (10-90%)	t _r		400	800	ns
Reverse voltage (bias)	V _r	5	15	20	V
Thermal drift			40	200	ppm/°C
Maximum ratings					
Reverse voltage	V _{R-max}			30	V
Operating temperature	T _{oper}			70	°C
Storage temperature	T _{stg}			100	°C

(c)

Parameter	Symbol	Min.	Typ.	Max.	Unit
Active area			4 x 4		mm ²
Position non-linearity			0.3	0.8	%(±)
Detector resistance	R _{det}	7	10	16	k Ω
Dark current	I _d		50	200	nA
Noise current	I _{noise}		1.3	2.5	pA/√Hz
Responsivity	r		0.63		A/W
Capacitance	C _j		20	25	pF
Rise time (10-90%)	t _r		80	160	ns
Reverse voltage (bias)	V _r	5	15	20	V
Thermal drift			40	200	ppm/°C
Maximum ratings					
Reverse voltage	V _{R-max}			30	V
Operating temperature	T _{oper}			70	°C
Storage temperature	T _{stg}			100	°C

圖 1-1-9 感測範圍與規格參數(a) 20 mm × 20 mm、(b) 10 mm × 10 mm、(c) 4 mm × 4 mm

而依據輸入光的條件，與預估頻寬範圍等，這裡假設輸入光選用波長 633 nm 紅光，光強為 1 mW，頻寬為 5 kHz，溫度為 25 °C，依據圖 1-1-10 的響應曲線，可查響應度約為 0.414 A/W，經由上述之雜訊計算，計算結果如表 1-1-2 所列，能滿足預估之 SNR_{req} 的需求。

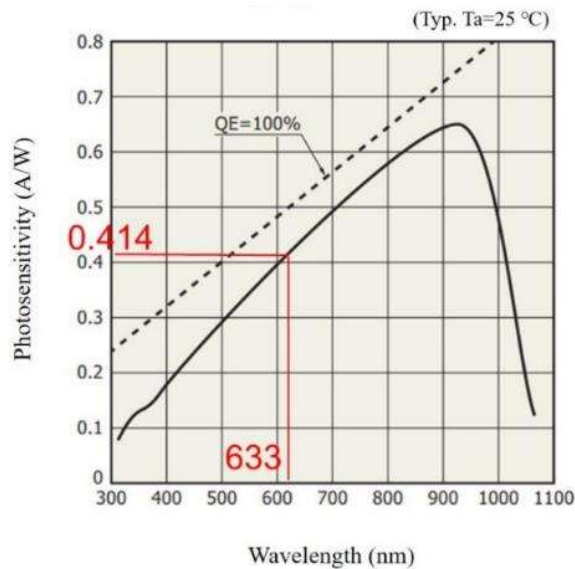


圖 1-1- 10 感測器響應曲線

表 1-1-2 On-trak 感測器 SNR 之評估計算值與需求值

SNR 估算	20 mm × 20 mm	10 mm × 10 mm	4 mm × 4 mm
(光電流) I_p [mA]	0.414	0.414	0.414
(散粒雜訊) I_s [nA]	0.816	0.815	0.815
(電阻熱雜訊) I_j [pA]	71.7	71.7	71.7
I_n [pA/ \sqrt{Hz}]	11.57	11.57	11.57
(總和) $I_{n_{BW}}$ [nA]	0.819	0.818	0.818
(電流訊雜比) SNR [dB]	114.1	114.1	114.1
SNRreq [dB]@0.05 μm	106.0	100.0	92.1

(2) 完成系統關鍵零組件驅動設計，與系統設計：完成兩家以上廠商的應用情境討論 (查核點編號 A1-2)

為達成上述多自由度模組量測，量測系統設計如圖 1-1-11 所示，拆分成光源與感測器模組以及分析的電腦裝置，光源主要目的為產生一參考光源，而感測器則包含，感測光學系統將模組姿態與光學參考，進行光學轉換成相關位移與角度的感測器成像位置，感測器將成像位置轉換為電流相關訊號，最後由感測器的驅動電路轉換為電壓訊號，經過 ADC 輸入到控制器並與電腦進行資料通訊。

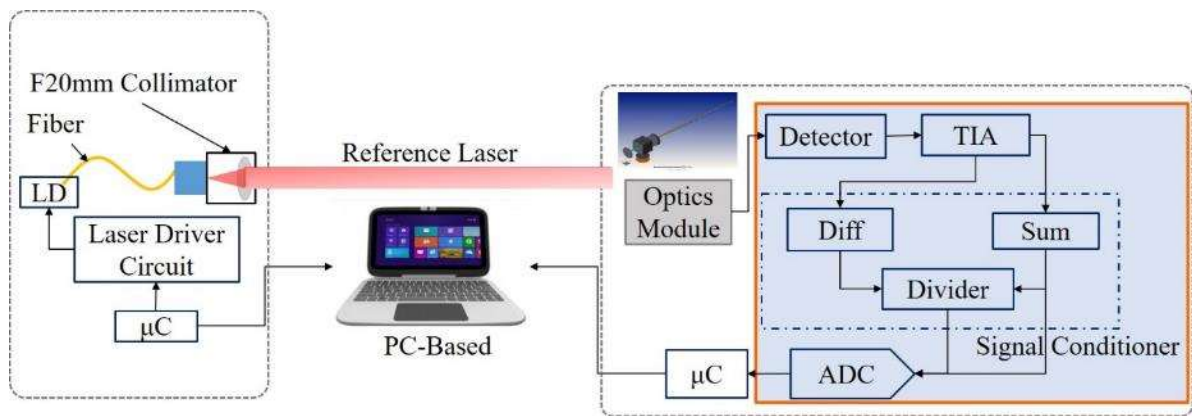


圖 1-1- 11 量測系統設計

其中，感測器光學系統將指向參考光與量測模組姿態，經過光學模組產生分離之對應關係成像到感測器，而由感測器的評估，感測器的解析能力在未經過光學倍率可以達到 $0.1 \mu\text{m}$ 直線度解析度量測需求，故直線度可以採用一倍光學，架構如圖 1-1-12，角度的等效的焦長選擇 200 mm，換算為角度變換量為 $0.97 \mu\text{m}/\text{arcsec}$ 。

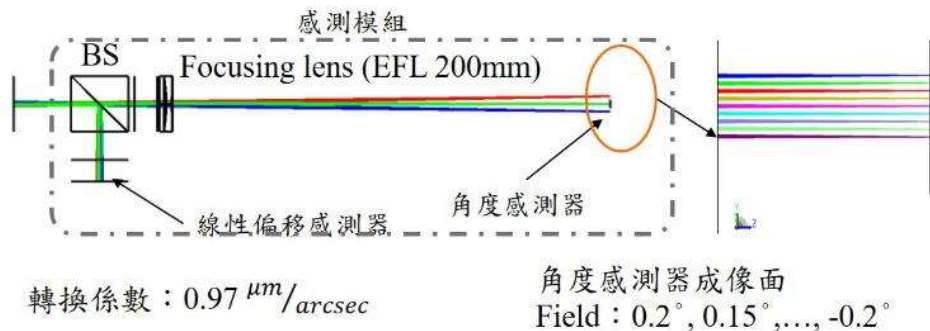


圖 1-1- 12 量測模組光學系統分析

為了掌握感測器光學系統的耦合特性，針對光學模組建立模型，並進行其成像光斑重心位置分析感測器光學的成像誤差，分析方式係藉由產生光速與感測器相對應的離軸與偏心，範圍分別為 Y 離軸角度 -0.2° 到 0.2° ，X 及 Y 偏心 $0 \text{ mm} \sim 2 \text{ mm}$ ，經過光斑重心位置的分析計算後，可以分別得到其對應的耦合分佈，如圖 1-1-13，由圖(b)表明由正交 X 軸向偏心造成角度計算誤差量均在 $\pm 0.1 \mu\text{m}$ (換算約 $0.1''$) 以內，而 Y 同軸向偏心造成角度耦合偏差隨偏心距離而加大，最大誤差為 $1.2 \mu\text{m}$ (換算約為 $1.2''$)，此為耦合之關係，若在量測範圍 $\pm 200 \mu\text{m}$ 與 $\pm 100''$ 內，光學系統分析表明偏差小於 $\pm 0.1''$ 。

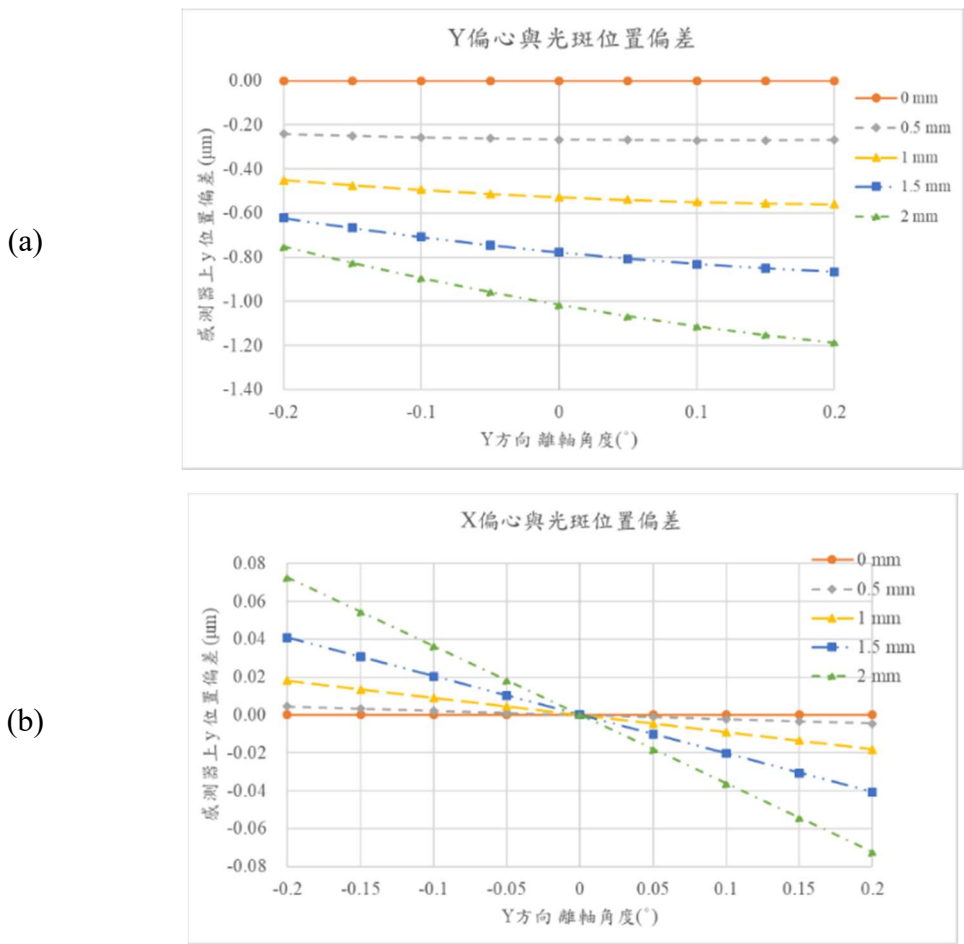


圖 1-1- 13 耦合光學分析(a) Y 偏心與 Y 離軸耦合、(b) X 偏心與 Y 離軸耦合

感測器光學系統之後，為感測器及其驅動電路，其驅動功能方塊如圖 1-1-14，經過轉阻放大器 TIA、差動放大器、加法器與正規化除法器等類比訊號處理後，計算出 X 與 Y 方向的位置量測，而由正規化除法可以消除或降低光源功率變動造成的影響，由 ADC 擷取為數位化訊號，在通訊到 PC 進行後續的計算分析。

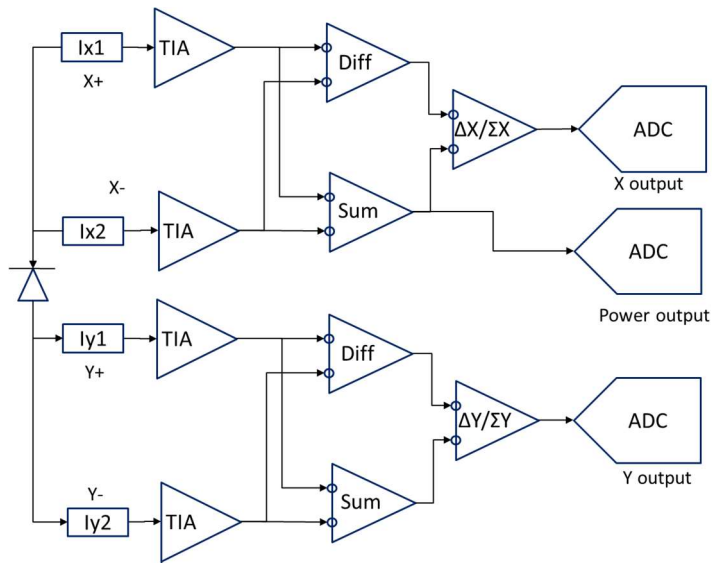


圖 1-1- 14 感測器訊號處理架構

依據前述 PD 雜訊評估之 Shot noise 計算結果，建立 PD 感測器的參數與其雜訊 Spice 模型，驗證如圖 1-1-15 所示，與推算的感測器響應電流雜訊計算雜訊頻譜密度及，在 5 kHz 時之 SNR，均與計算模型相當吻合，以帶入後續的電路設計分析。而就 TIA 需要考慮的雜訊包括前述的 PD，光電流產生的 shot noise 以及感測器內阻產生的熱雜訊，以及放大器設計引入的電流雜訊，電壓雜訊與電阻熱雜訊等，需要匹配參數計算雜訊誤差量，以滿足感測所需之解析度。

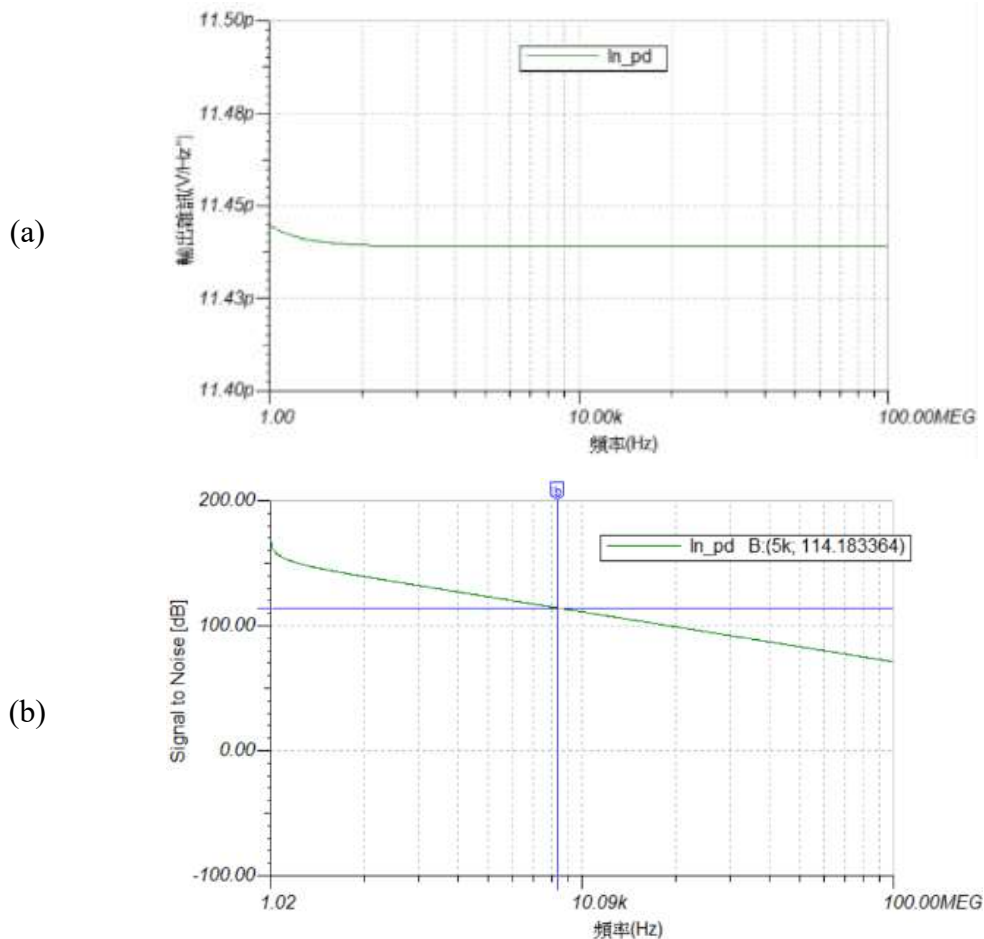


圖 1-1- 15 PD 雜訊 Spice 模型(由之前推算參數建立) (a)電流雜訊密度以及 (b)5 kHz 的 SNR

光感測器雜訊經由類比電路轉組放大器、差動與加法處理後，並利用乘法器進行負回授反饋設計，實作正規化除法架構，以消除有效訊號光強變動造成之影響，類比電路 SNR 分析(如圖 1-1-16)在 5 kHz 頻寬約為 112 dB，為了消除高頻雜訊端的輸出，在後端緩衝輸出加入一級一到二階被動濾波來抑制高頻雜訊，整體輸出訊雜比 SNR 約 114 dB，以滿足所需之解析度需求，若加以考慮雜訊分佈對解析度矩行分佈統計計算關聯性，則應該至少預留約 5 dB 的裕度，參考表 1-1-2，以最大 20 mm 量測範圍為驅動電路設計參考規範，應高於 106.2 dB 為宜，而在此條件之設計能夠滿足此需求，此時之 -3 dB 頻寬如圖 1-1-17 約略為 3 kHz，比預期的 5 kHz 略微降低，但仍有相當設計裕度可以作為緩衝。

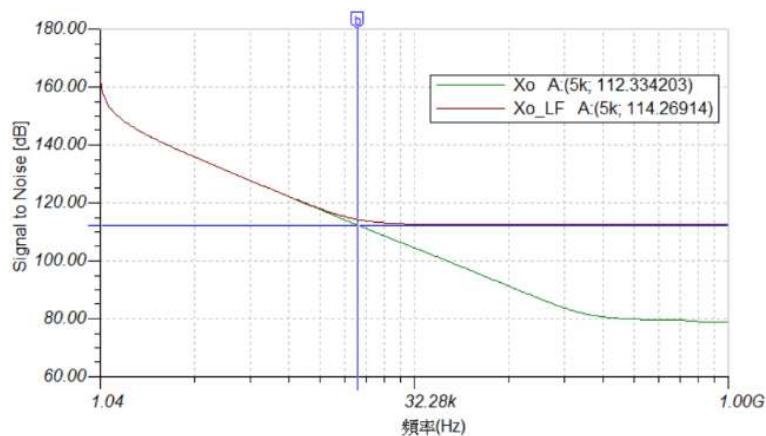


圖 1-1- 16 類比訊號處理之 SNR 分析

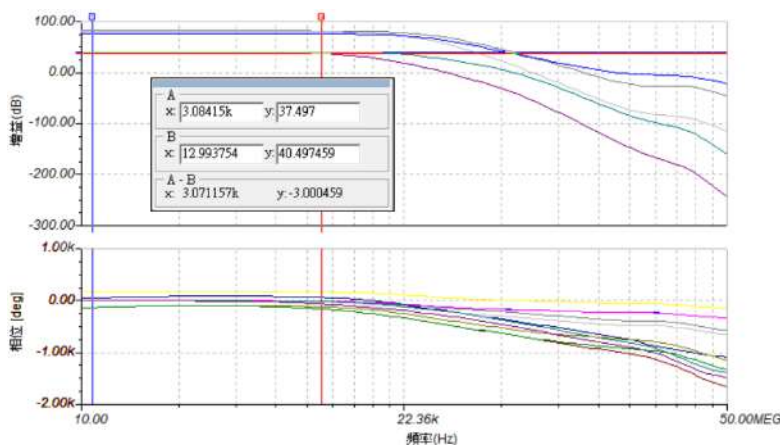


圖 1-1- 17 類比訊號處理頻率響應分析，-3 dB 頻寬為 3 kHz

訪視二家廠商亞崙與高鋒，也同時規劃為場域驗證廠商。已與亞崙機電和高鋒討論組裝量測與品質的場域合作，場域為應用於線軌組裝過程的運動誤差檢測與完成後台面的運動誤差檢測，運動誤差量測同時包含 Z、Y 的直線度及 Pitch、Yaw 的角度誤差，如圖 1-1-18 所示，應用檢驗的部份包含滑軌組裝的基準面、完成組裝滑軌的滑塊運行檢測，以及完成鞍座或檯面等三個部份。

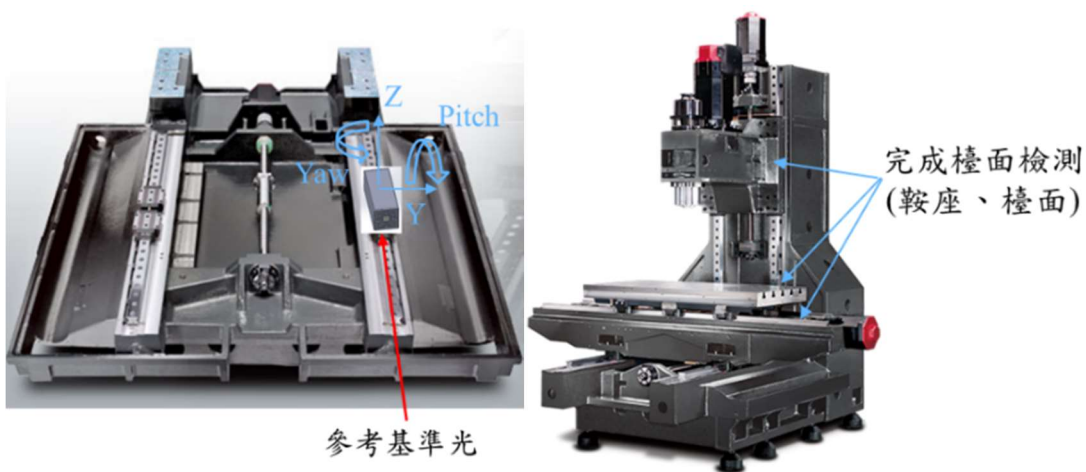


圖 1-1- 18 機台滑軌組裝誤差量測場域應用圖

(3) 完成組件規格評估與驗證，分析系統解析度能夠達到直線度 $0.1 \mu\text{m}$ ，角度解析度 $0.1''$ (查核點編號 A1-3)

線性度感測解析度，以奈米定位平台進行 $0.1 \mu\text{m}$ 步階動作方式，進行其解析度測試驗證，如下圖所示。以靜止狀態進行數據量測並計算其標準差，線性位移 10 mm 量測範圍，對應 24 bit ADC 取值，相對解析度為 0.6 nm ，量測平均值 -0.8975 mm ，標準差為 $0.0088 \mu\text{m}$ ，取 6 倍標準差 $6\sigma = 0.053 \mu\text{m} (< 0.1 \mu\text{m})$ 為解析度驗證值，將儀器有效位數訂為 $0.1 \mu\text{m}$ ，線性靜態輸出 6σ 為 $0.053 \mu\text{m}$ ， σ 為量測值計算標準差，可滿足分辨 $0.1 \mu\text{m}$ 的解析度。

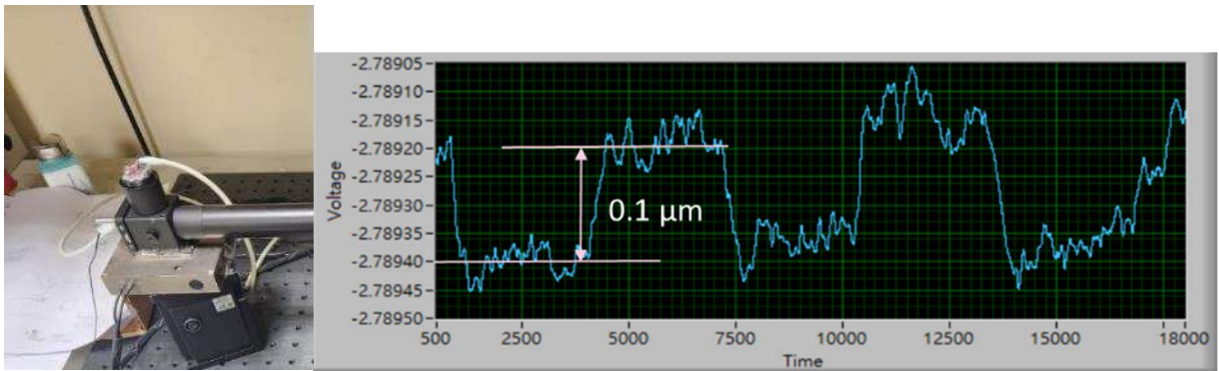


圖 1-1- 19 以奈米定位平台，進行位移 $0.1 \mu\text{m}$ 步階直線度解析測試

角度解析度使用 E-motionsystem. / SCMS-127 SelfA 精密定位轉台進行測試，如圖 1-1-20 將量測儀器安裝於旋轉檯上後，以 $0.1''$ 的步階角度進行解析度測試，由圖 1-1-21，可以看出水平方向旋轉 $0.1''$ 步階響應的狀況，同時，紅色表示為傾斜狀態的輸出，沒有看到明顯的耦合變化。角度位移 $4641''$ 量測範圍，對應 24 bit ADC 取值，相對解析度為 $0.00028''$ ，量測平均值 $56.11''$ ，標準差為 $0.0058''$ ，取 6 倍標準差 $6\sigma = 0.035'' (< 0.1'')$ 為解析度驗證值，將儀器有效位數訂為 $0.1''$ ，靜態輸出 6σ 為 $0.035''$ ， σ 為量測值計算標準差，可滿足分辨 $0.1''$ 解析度。

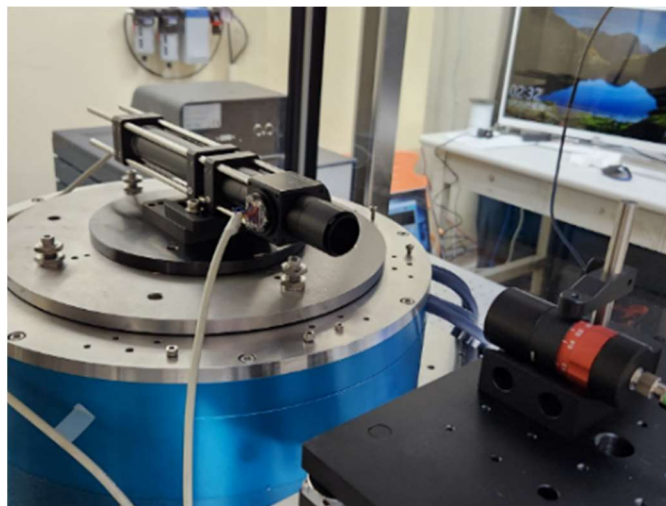


圖 1-1- 20 以高精度旋轉定位台，進行模組的 $0.1''$ 角度步階定位測試解析度

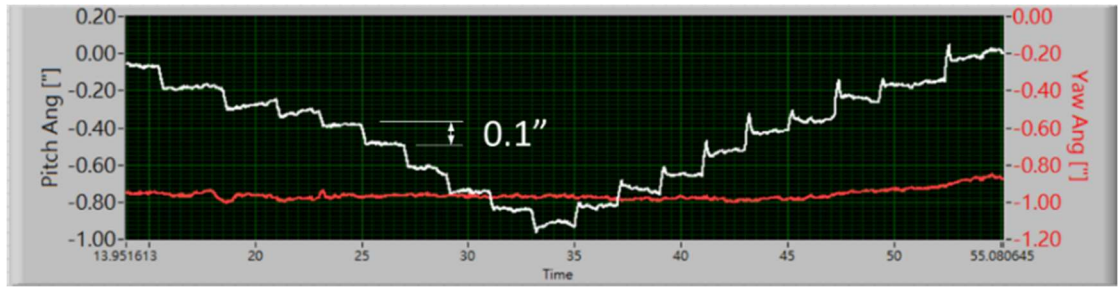
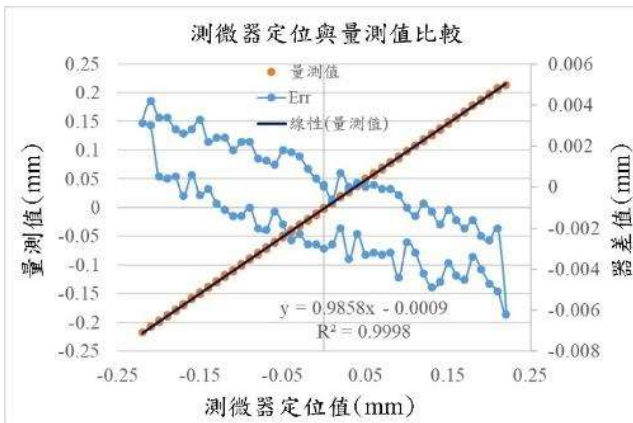


圖 1-1-21 0.1'' 角度步階解析度測試，白色為轉台角度(Yaw)，紅色為傾斜(Pitch)沒有對應的響應量

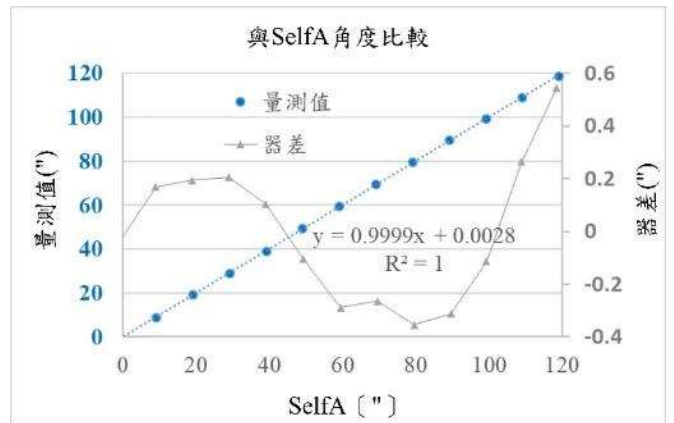
量測 Y 的標準差計算為 $0.0088 \mu\text{m}$ ，最大與最小值差為 $0.0369 \mu\text{m}$ (約 4.2 倍標準差)；量測 Z 的標準差計算為 $0.0078 \mu\text{m}$ ，最大與最小值差為 $0.0295 \mu\text{m}$ (約 3.8 倍標準差)；Yaw 角度的標準差計算為 $0.0058''$ ，最大與最小值差為 $0.022''$ (約 3.8 倍標準差)，最大與最小值差角度的標準差計算為 $0.0058''$ ，最大與最小值差為 $0.026''$ (約 4.5 倍標準差)，大致上最大與最小差值(全距)約為 4 倍的標準差，皆落於 6 倍標準差之內，感測器量測數值算是相當穩定。其它廠牌儀器，線性位移可參考 Renishaw XK10 解析度亦為 $0.1 \mu\text{m}$ ，角度部分可參考準直儀 ELCOMAT 3000，最高解析度可達到 $0.005''$ 。

(4) 完成原型系統架設與查驗，系統重複性不確定度 $(0.5 \mu\text{m} + 10^{-7} \times L) \mu\text{m}$ ；角度量測解析度 $0.1''$ ，重複性不確定度 $(0.5 + 10^{-1} \text{m}^{-1} \times L)''$ (查核點編號 A1-4)

比對校正為明年度規劃重要工作，線性位移規劃將以 Agilent 或 Renishaw 干涉儀校正，角度將以 MÖLLER-WEDEL OPTICAL 自動視準儀校正。今年度對感測器量測範圍進行線性度分析以確認量測尺度的正確性，量測儀器的線性位移轉換係數為 0.5mm/V ，角度轉換係數為 $232.05''/\text{V}$ ，線性位移使用測微器進行定位，如圖 1-1-22(a)，測試範圍為 $\pm 220 \mu\text{m}$ ，橘色為測微器值與量測值輸出(參考左側標籤)，線性迴歸線 $R^2 > 0.99$ 。角度位移的精度比較在原級系統 SelfA 精密迴轉台(不確定度 $0.05''$)上進行比較，量測範圍 $(0 \sim 120)''$ ，如圖 1-1-22 (b)，線性度迴歸 $R^2 > 0.99$ ，右側顯示為校正前器差值，最大小於 $0.6''$ 。



(a) 直線度線性位移



(b) 角度位移

圖 1-1-22 量測儀器線性度分析 (a) 直線度線性位移 (b) 角度位移

重複性不確定度試驗在實驗室內進行，以花崗岩平台為量測標的，配合治具進行重複性測試，如圖 1-1-23，量測距離由 0 m 到 2 m，每 0.25 m 進行測試，可同時量測 Y 軸、Z 軸直

線度與 Yaw 及 Pitch 旋轉角度等四個物理量；每個位置量測 31 筆資料，進行統計分析，以樣本統計之標準差作為重複性不確定度值。

平均值計算方式如下，其中 $n = 31$ ， x 變數分別由 Y、Z、Yaw 及 Pitch 等四個量測物理量進行計算，

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

以樣本標準差計算如下，作為重複性標準不確定度值，

$$s(x) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

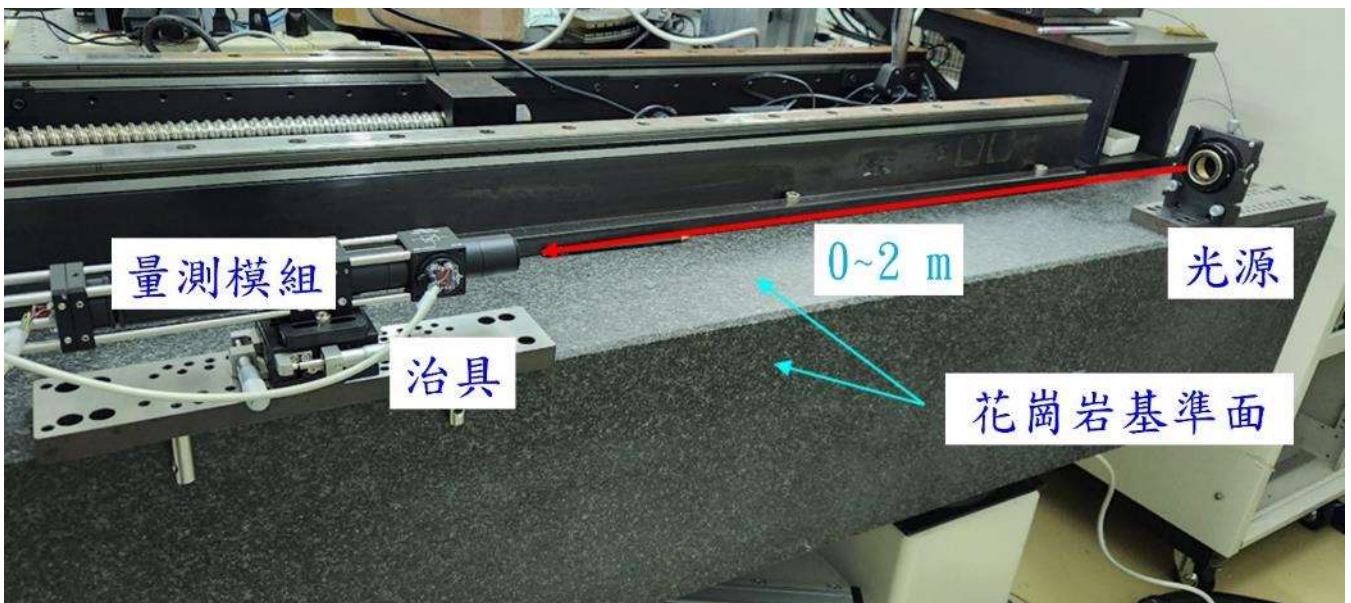


圖 1-1-23 重複性驗證測試(花崗岩基準面為標的)

計劃書之目標規格，直線度量測重複性不確定度 $\leq (0.5 \mu\text{m} + 10^{-7} \times L)$ ， L 為量測距離從 (0 ~ 2) m。表 1-1-3 為直線度位移量測統計結果，第一欄為量測點位置，第二、五欄為統計平均值，第三、六欄為 Y 軸、Z 軸直線度位移量測值之重複性不確定度，第四、七欄為 Y 軸、Z 軸直線度計畫目標值(計劃書規格)，由量測值結果來看重複性的值如規格描述，隨著距離增加而增大，在 2 m 距離時最大的直線度位移量測重複性不確定度為 $0.413 \mu\text{m} (< 0.5 \mu\text{m})$ ，直線度位移量測重複性不確定度評估符合計畫預訂規格。

角度重複性不確定度 $\leq (0.5 + 10^{-1} \text{m}^{-1} \times L)''$ ， L 為量測距離從(0 ~ 2) m，表 1-1-4 為量測角度統計結果，第一欄為量測點位置，第二、五欄為統計平均值，第三、六欄為 Yaw、Pitch 角度量測值之重複性不確定度，第四、七欄為 Yaw、Pitch 角度計畫目標值(計劃書規格)，角度的量測重複性不確定度大致上也是隨著距離的增加而增加，在 2 m 最遠距離，角度重複性不確定度為 $0.097'' (< 0.5'')$ ，角度量測重複性不確定度評估符合計畫預訂規格。

各位置的估算與規格值，可參照表 1-1-3、1-1-4，各位置點之 Y 軸、Z 軸直線度與 YAW、PITCH 角度量測重複性不確定度均小於計畫目標值，符合計畫書目標規格。

表 1-1-3 直線度線性位移統計資訊

L Dis. 位置 (m)	\bar{x}_Y Y 平均值 (mm)	$s(x)_Y$ Y 重複性 (mm)	Y Spec. Y 計畫規格 (mm)	\bar{x}_Z Z 平均值 (mm)	$s(x)_Z$ Z 重複性 (mm)	Z Spec. Z 計畫規格 (mm)
0.00	0.2907722	0.0000164	0.000500	-0.1569291	0.0000147	0.000500
0.25	0.2790167	0.0000306	0.000525	-0.1277219	0.0000370	0.000525
0.50	0.3141400	0.0000358	0.000550	-0.1054020	0.0000467	0.000550
0.75	0.4784437	0.0000853	0.000575	-0.0763829	0.0000900	0.000575
1.00	0.5216006	0.0001246	0.000600	-0.0523032	0.0001407	0.000600
1.25	0.4305189	0.0001559	0.000625	-0.0320587	0.0001450	0.000625
1.50	0.2861826	0.0002274	0.000650	-0.0141261	0.0002200	0.000650
1.75	-0.0127952	0.0002755	0.000675	-0.0011997	0.0002741	0.000675
2.00	-0.3048003	0.0003568	0.000700	0.0110127	0.0004126	0.000700

表 1-1-4 角度統計資訊

L Dis. 位置 (m)	\bar{x}_{Yaw} Yaw 平均值 ($^{\circ}$)	$s(x)_{Yaw}$ Yaw 重複性 ($^{\circ}$)	Yaw Spec. Yaw 計畫規格 ($^{\circ}$)	\bar{x}_{Pitch} Pitch 平均值 ($^{\circ}$)	$s(x)_{Pitch}$ Pitch 重複性 ($^{\circ}$)	Pitch Spec. Pitch 計畫規格 ($^{\circ}$)
0.00	111.704	0.013	0.500	-478.013	0.017	0.500
0.25	253.372	0.014	0.525	-473.506	0.020	0.525
0.50	363.184	0.036	0.550	-473.078	0.051	0.550
0.75	127.461	0.053	0.575	-477.400	0.071	0.575
1.00	131.492	0.023	0.600	-475.291	0.026	0.600
1.25	137.834	0.048	0.625	-476.004	0.055	0.625
1.50	-154.973	0.067	0.650	-478.243	0.088	0.650
1.75	-39.993	0.041	0.675	-476.513	0.056	0.675
2.00	-62.863	0.085	0.700	-476.585	0.097	0.700

工具機場域現場應用案例如圖 1-1-24，應用於 X 軸線軌組裝之量測，進行安裝前底座安裝面與線軌組裝後之量測，該機型量測距離為 1.6 m，每 0.16 m 間隔位置進行一點量測，各位置量測 31 次統計資訊如表 1-1-5，各位置點之 Y 軸、Z 軸直線度與 YAW、PITCH 角度量測重複性不確定度均小於計畫重複性規格。依據量測結果計算直線度如圖 1-1-25 所示，橘色曲線表示組裝前之機座底面直線度線性位移值，藍色曲線為線軌組裝後之直線度線性位移值，線軌組裝設計上，在機座安裝底面研磨時，就有預變形量設計，橘色曲線為組裝基準面兩端在組裝前量測到約 17 μm 的預變形量，以補償組裝後之重力與鎖緊力所造成變形，實際量測時可明顯看出兩端預變形程度與修正後之結果，藍色曲線為組裝後的直線度分佈，量測直線度分佈小於 8 μm ，圖 1-1-26 為現場測試之重複性不確定度結果。



圖 1-1- 24 高鋒場域量測

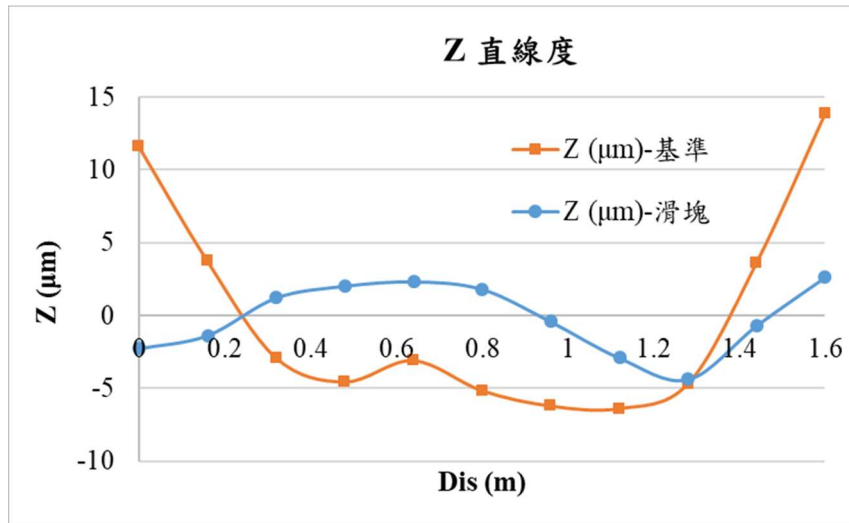


圖 1-1- 25 高鋒場域量測

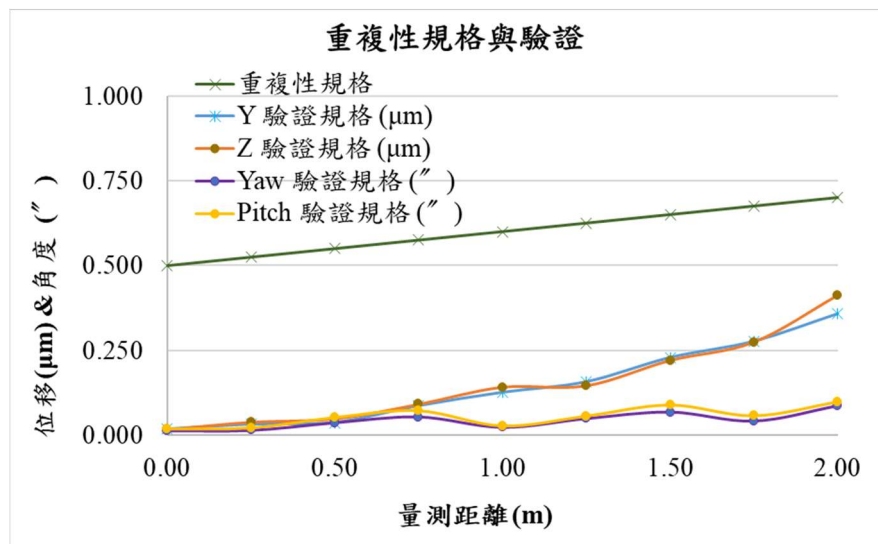


圖 1-1- 26 場域測試的重複性

表 1-1-5 場域 31 次重覆性量測統計資訊

Dis. (m)	\bar{x}_Y (mm)	$s(x)_Y$ (mm)	\bar{x}_Z (mm)	$s(x)_Z$ (mm)	\bar{x}_{Yaw} (")	$s(x)_{Ya}$ w (")	\bar{x}_{Pitch} (")	$s(x)_{Pitch}$ (")
0.00	-0.356938	0.0000088	-0.287240	0.0000100	-2.17	0.027	922.48	0.037
0.16	-0.320854	0.0000107	-0.165601	0.0000218	-2.07	0.020	919.18	0.027
0.32	-0.285752	0.0000144	-0.042307	0.0000270	0.87	0.015	919.50	0.041
0.48	-0.250276	0.0000297	0.079237	0.0000301	-0.72	0.016	919.16	0.027
0.64	-0.216484	0.0000253	0.200249	0.0000461	1.07	0.013	921.14	0.029
0.80	-0.182941	0.0000426	0.320445	0.0000580	-0.34	0.023	920.12	0.038
0.96	-0.149126	0.0000763	0.439035	0.0001016	-0.50	0.026	919.80	0.039
1.12	-0.115345	0.0000795	0.557305	0.0001520	-10.92	0.024	924.51	0.044
1.28	-0.088425	0.0000812	0.676485	0.0001223	-0.51	0.075	914.70	0.053
1.44	-0.050143	0.0000776	0.800961	0.0001640	11.10	0.041	912.73	0.035
1.60	-0.010510	0.0001405	0.924880	0.0001613	5.33	0.029	922.61	0.044

對於線軌檢查量測方法的比較，數位式線軌組裝調校量測技術主要為了方便檢驗與安裝過程操作之量測驗證功能，因此，考慮到能夠方便使用，包含同時線性位移與角度等多個自由度維度的同時量測，同時，亦要考慮可以方便操作的斷續與任意位置可以進行量測(與角度轉成直線度方式相比)，目前商售儀器功能最接近者為 Renishaw XK10，可同時針對兩個維度的線性位移同時進行量測，角度則為自動視準儀功能近似，計劃書內有與直規、干涉儀、準直儀…等量測方法之比較，比較表 1-1-6 如下。^{[1-1-1][1-1-2][1-1-3]}

量測設備	量測參數 (幾何誤差)	量測規格	量測情境 (量測參數)
計畫研發成果	YZ 直線度、Yaw、Pitch	直線度重複性不確定度: $(0.5 \mu\text{m} + 10^{-7} \times L)$ 角度重複性不確定度: $(0.5 + 10^{-1} \text{m}^{-1} \times L)''$ L 為量測距離(單位 m)	同時 4 個自由度 (可遮斷)
Renishaw XL-80/Agilent 5530A+光學鏡組	YZ 直線度、Yaw、Pitch	直線度不確定度: $(0.005 \times A + 0.5 + 0.15 \times L^2) \mu\text{m}$ 角度準確度: $(0.0004 \times A + 0.5 + 0.02 \times L)''$ A 為顯示值； L 為量測距離(單位 m)	每次單一維度誤差 (不可遮斷)
Renishaw XM-60	YZ 直線度、Yaw、Pitch、Roll	直線度不確定度: $(0.01 \times A + L) \mu\text{m}$ Yaw/Pitch 不確定度: $[0.0008 \times A + (0.1 + 0.055 \times L)]''$ Roll 不確定度: $(0.002 \times A + 1.25)''$ A 為顯示值； L 為量測距離(單位 m)	同時 5 個自由度 (不可遮斷)
Renishaw XK10 (PSD)	Y、Z 直線度	直線度不確定度: $(0.01 \times A + L) \mu\text{m}$ A 為顯示值； L 為量測距離(單位 m)	每次兩個自由度 (可遮斷)

Autocollimator	Pitch、Yaw 角度	不確定度:0.2" 直線度計算需透過重疊接觸位置量測積分展開，具有誤差的積分效應。	每次兩個自由度 (可遮斷)
量規&量錶	單維直線度	直線度不確定度: $(3 \mu\text{m} + 1.75 \times 10^{-6} \times L)$	目前最常使用，可斷續解析度及精度較低

【突破瓶頸】

建立多自由度誤差量測系統之架構、光學與感測器驅動電子設計，以參考準直光為基準，藉由加入光學解耦器，能夠鑑別量測模組運動時的多自由度誤差，並達成絕對式的量測，以有助於改善工具機組裝現場的量測操作，能夠取代笨重且不易操作的直規，延伸量測長度，並同時獲得直線位移與角度運動誤差，絕對式的量測，讓現場操作不用擔心遮斷影響，也方便可以配合治具進行重複拆裝，以進行調整作業，能夠提高組裝量測的精確度。

【本年度結論】

FY112 完成多自由度感測器之架構設計以及原型量測模組，包含光學設計分析，確認其光源光斑高斯傳遞特性，以及光學轉換模組之分析，確定光學系統的解耦分析，最後依據架構之設計進行關鍵零組件感測器的驅動設計，確認其 EDA 設計分析 SNR 114 dB (> 110 dB)，能夠達解析度 0.05 μm 需求之設計參數，並進行原型模組的解析度測試驗證，符合計畫目標 0.1 μm 直線度誤差解析度與 0.1" 角度誤差解析度的規格。建立原型模組進行操作於(0~2) m 量程之重複性不確定度之驗證，驗證結果如表 1-1-3 至表 1-1-4，滿足計畫書重複性不確定之規格，多自由度量測模組規格如下，並進行兩家工具機廠場域試驗。

- 量測模組水平/垂直線性度位移：
量測解析度 0.1 μm
重複性不確定度 $(0.5 \mu\text{m} + 10^{-7} \times L) \mu\text{m}$ ；
- 量測模組 Yaw/Pitch 角度：
量測解析度 0.1"
重複性不確定度 $(0.5 + 10^{-1} \text{m}^{-1} \times L)"$
- L 驗證距離 (0~2) m

2. 主軸狀態監測技術

A. 高速主軸軸承預壓力監測技術

本年度計畫目標完成主軸預壓力量感測器設計與模擬驗證，滿足國內主軸、工具機製造商及終端使用者對於主軸預壓力量測的需求，力量感測器規格如下：

- 力量量測範圍達 10 kN
- 解析度 $\leq 10 \text{ N}$

本計畫開發技術與之主要規格與達成方法主要與廠商(NTN)進行比較如表 1-2-1，本計畫所開發量測技術具備較佳之量測之範圍與解析度規格。

表 1-2-1 相關技術比較表^[1-2-1]

量測設備名稱	相關技術現況	本研究目前開發技術狀況
預壓力量感測器	NTN(日本)	
力量量測範圍	4 kN	10 kN
解析度	N/A	10 N

本計畫於 112 年度完成預壓力量感測器設計與模擬驗證，應用於工具機主軸預壓力量測，滿足業界預壓量測需求，並與工具機廠商進行合作，完成技術應用示範案例一案。

【執行成果】

(1) 完成力量感測器結構有限元素分析，產出有限元素分析報告一份 (查核點編號 A2-1)

今年度開發之主軸預壓力量感測器之量測，原理是將主軸內軸承其搭配的外環墊圈進行改良，加入力量感測元件，達成預壓力量測的目標。考量未來開發完成後須與主軸整合，需確認以下項目：移除部分本體之外環墊圈其剛性仍能高於主軸整體軸向剛性；較佳之應變規貼附位置。因此使用有限元素分析評估力量感測器之結構的剛性以及應變分布之情形，避免後續安裝可能因精度不佳影響主軸性能的狀況，下半年亦會以此設計進行製作感測器原型，確認目前之設計是否符合要求。

有限元素分析之項目有以下：力量感測器之剛性分析與力量感測器受力之應變分布。首先根據永進機械所提供軸承規格進行初步設計，設計與軸承可搭配之環型結構，並預留未來內嵌應變規與感測電路空間，如圖 1-2-1 所示。外環墊圈尺寸與材料參數則如表 1-2-2 所示，目前之外環墊圈設計為凹字形結構，圖中之藍色部分為未來內嵌應變規與讀取電路所預留區域。後續之模擬分析僅考慮結構本身受軸向力作用，並不考慮應變規貼附時膠合等等可能產生之細微效應，因此有限元素分析之架構相對單純，根據前述內容與規格可建立剛性分析之模型、應變量分析模型與對應之邊界條件如圖 1-2-2 所示。

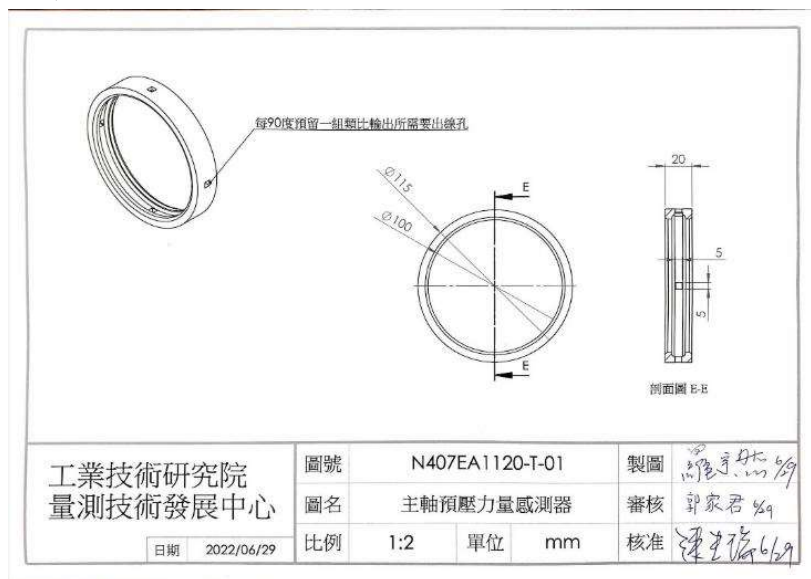


圖 1-2-1 力量感測器結構設計圖

表 1-2-2 力量感測器之尺寸與材質表

力量感測器尺寸	內圈直徑	100 mm
	外圈直徑	115 mm
材質		Stainless steel

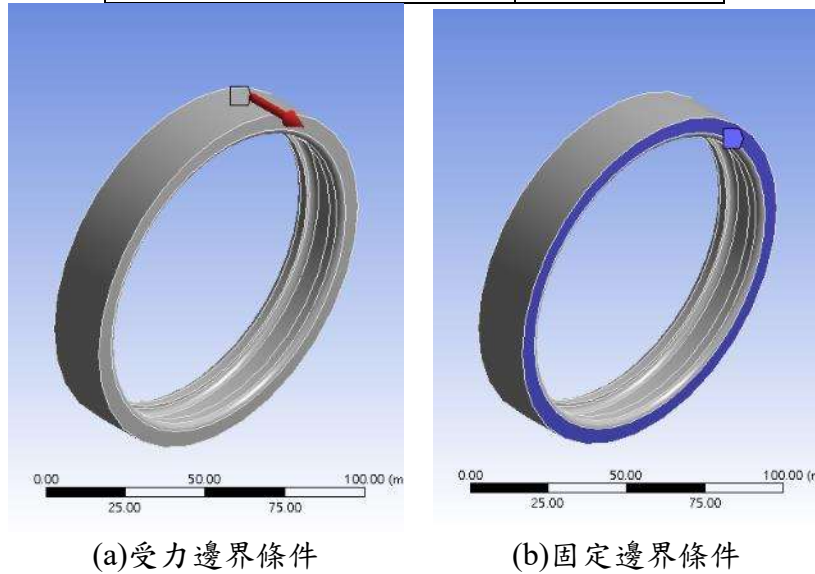


圖 1-2-2 有限元素分析模型及邊界條件

a. 力量感測器之剛性分析

力量感測器之剛性分析目標為得到感測器結構受到軸向力之變形量，即可計算出其軸向之剛性，目標為 33 N/μm。在模型中給予 10 kN 軸向外力，模擬力量感測器受到全幅力量時所產生變形量，即可根據外力與變形量之關係計算出力量感測器之剛性，由計算結果可得到力量感測器之最大變形量為 6.28×10^{-4} mm，如圖 1-2-3 所示，因此可計算出外環墊圈結構之軸向剛性為 15923 N/μm。原先所訂之目標剛性為 33 N/μm，滿足所訂規格。

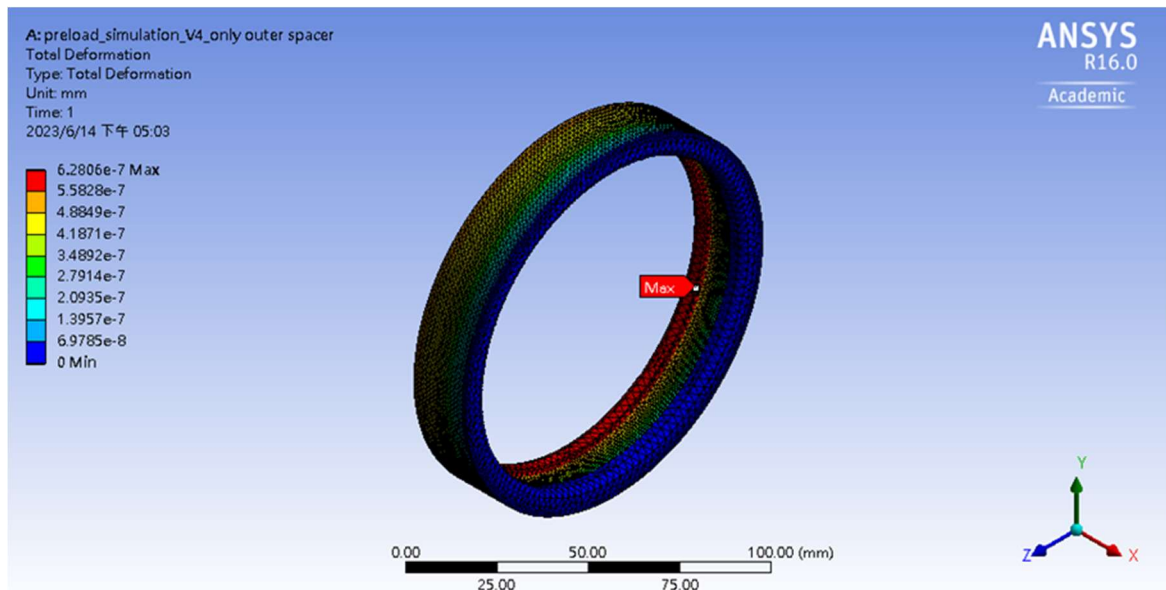


圖 1-2-3 力量感測器變形量分布結果

b. 力量感測器之應變量分析

為了評估外環墊圈受力之應變分布情形，同樣在模型中給予 10 kN 與 10 N 外力，應變分布結果如圖 1-2-4 與圖 1-2-5 所示，應變量最大值的發生位置在力量感測器的內壁部分，外環墊圈的內壁為理想位置，因此目前之力量感測器之設計符合要求。在此處位置嵌入應變規與訊號讀取電路，應變規配置目前採取一組貼附 2 片應變規組成半橋之方式，為了方便後續內容說明，應變規分別以 R1、R2 表示，如圖 1-2-6 所示。

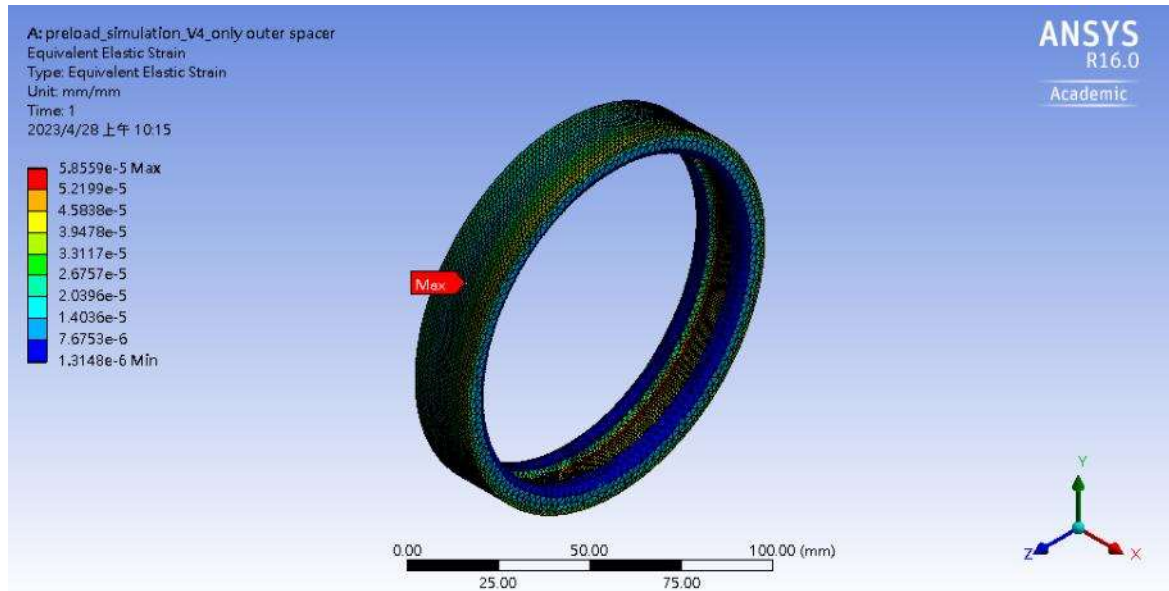


圖 1-2- 4 10 kN 受力力量感測器應變量分布結果

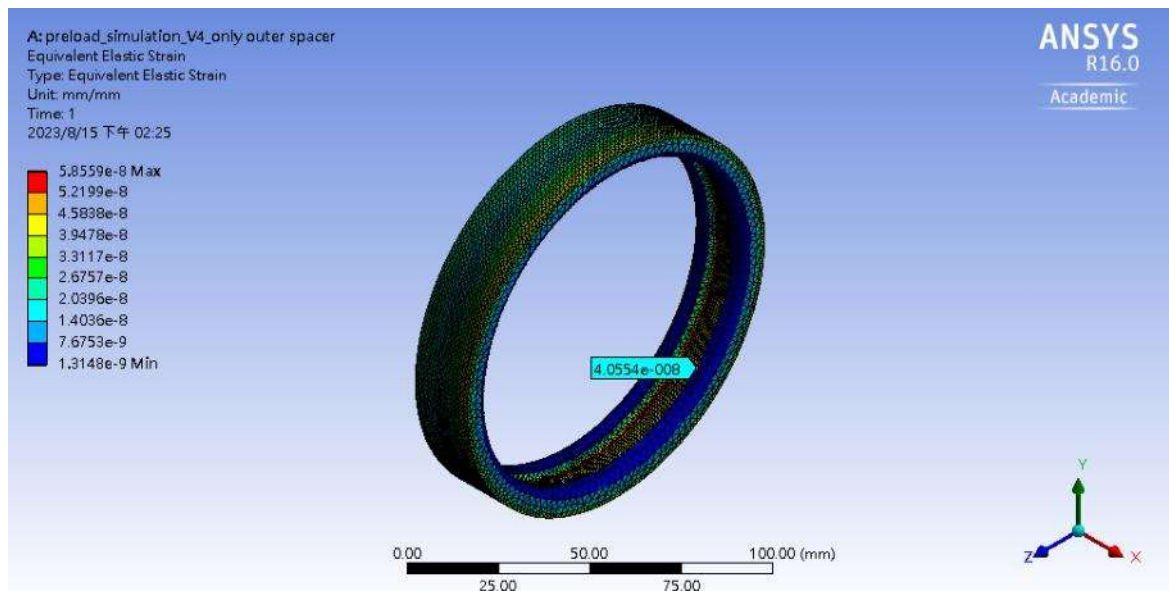


圖 1-2- 5 10 N 受力力量感測器應變量分布結果

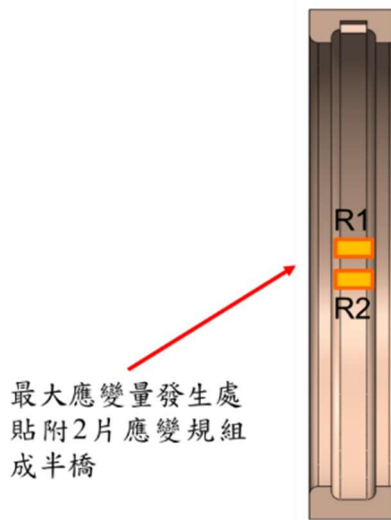


圖 1-2-6 應變規貼附位置示意圖

(2) 完成力量感測器設計(包含機構設計、應變規貼附位置，後端電路規劃)，產出感測器設計報告一份 (查核點編號 A2-2)

力量感測器之剛性分析可確認力量感測器可滿足所訂定之力量量程要求，力量感測器解析度則需搭配力量感測器之應變分析後與應變規電橋之輸出、電路雜訊相互搭配評估，確認電橋之電壓輸出是否滿足力量感測器之解析度 10 N 要求。

首先須確認選用的應變規規格，目前選用 350 Ω 規格應變規^[1-2-2]，其優點包含：消耗功率較小，不易有發熱情形，有利應變量測等，為市面上較常使用之應變規規格。接下來即說明應變規應變量對電橋電壓輸出的評估計算。

應變規電橋的架構圖如圖 1-2-7 所示，其中 V_{ex} 為應變規電橋激發電壓、 V_{out} 為應變規電橋輸出電壓與 R_0 配置於電橋中的一般電阻，電阻大小因為電橋平衡之特性，電阻值同樣為 350 Ω 。

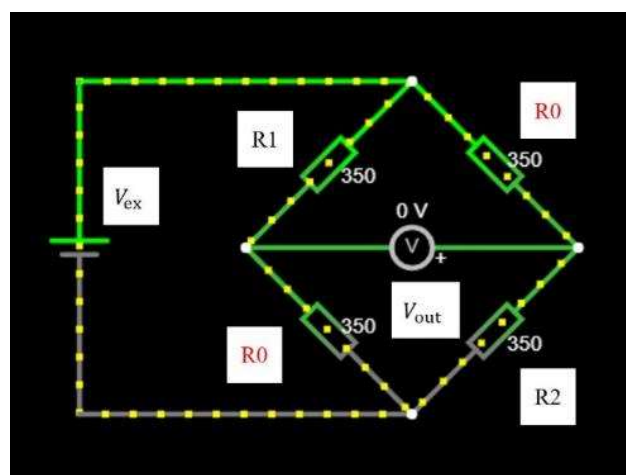


圖 1-2-7 應變規電橋示意圖

根據圖 1-2-8 有限元素分析之結果可知，當結構受 10 N 力量作用時，R1、R2 應變率為 4.0×10^{-8} ，Gauge Factor 為 2，則 R1、R2 電阻變化量分別為 $2.8 \times 10^{-5} \Omega$ ；當結構受 20 N 力

量作用時，R1、R2 應變率為 8.0×10^{-8} ，Gauge Factor 為 2，則 R1、R2 電阻變化量為 5.6×10^{-8} 。

根據上述之應變規電阻變化與電橋的電壓輸出公式可由式 1-2-1 計算出電橋之電壓輸出：

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_0 + R_2} V_{ex} - \frac{R_0}{R_0 + R_1} V_{ex} \quad (1-2-1)$$

則電橋於 10 N、20 N 受力之電壓輸出根據計算後，分別為 2.0×10^{-7} V 與 4.0×10^{-7} V，電橋在 10 N 的力量變化量，具 2.0×10^{-7} V 電壓變化，接下來需對電橋加上後段電路所可能產生雜訊大小進行評估，確認輸出訊號與雜訊之訊雜比，若滿足規格，則說明目前設計可達成計畫目標所訂之解析度。

根據目前所參考之文獻以及電子零件規格，應變規電橋加上後段電路的雜訊主要有為兩大來源：電阻本身具備的熱雜訊(Thermal Noise or Nyquist Noise)^[1-2-3]與 IC 元件供應電壓的不穩定所造成雜訊。

其中熱雜訊可由式 1-2-2 計算得出：

$$V_{Nyquist} = \sqrt{4kTRB} \quad (1-2-2)$$

其中 k 為波茲曼常數(1.38×10^{-23})，並以下列條件進行評估：T 為室溫，R 為應變規規格 350 Ω ，B 為頻寬 1 kHz，因此可計算出此雜訊貢獻約為 3.8×10^{-8} 。

接下來計算後端電路中參考電壓源不穩定所造成雜訊，目前之電路架構如圖 1-2-8，目前電路僅考慮參考電壓源、應變規所組成電橋與儀表放大器 AD623^[1-2-4]，目前使用 Analog Deivce 官方之 LTspice 電路模擬分析軟體，儀表放大器之放大倍率目前訂為 1000($R_1 = 100$)，在此條件之下進行雜訊影響之評估，並參考電壓源 IC 之規格^[1-2-5]，其輸出電壓雜訊最大為 10×10^{-6} V，因此在模擬模型中的 INPUT 端加入相同振幅之白噪音進行模擬並觀察電橋輸出電壓(V(v+)-V(v-))與經過放大器後的電壓輸出(V(OUT))分別的雜訊，是否會影響感測器的解析度。

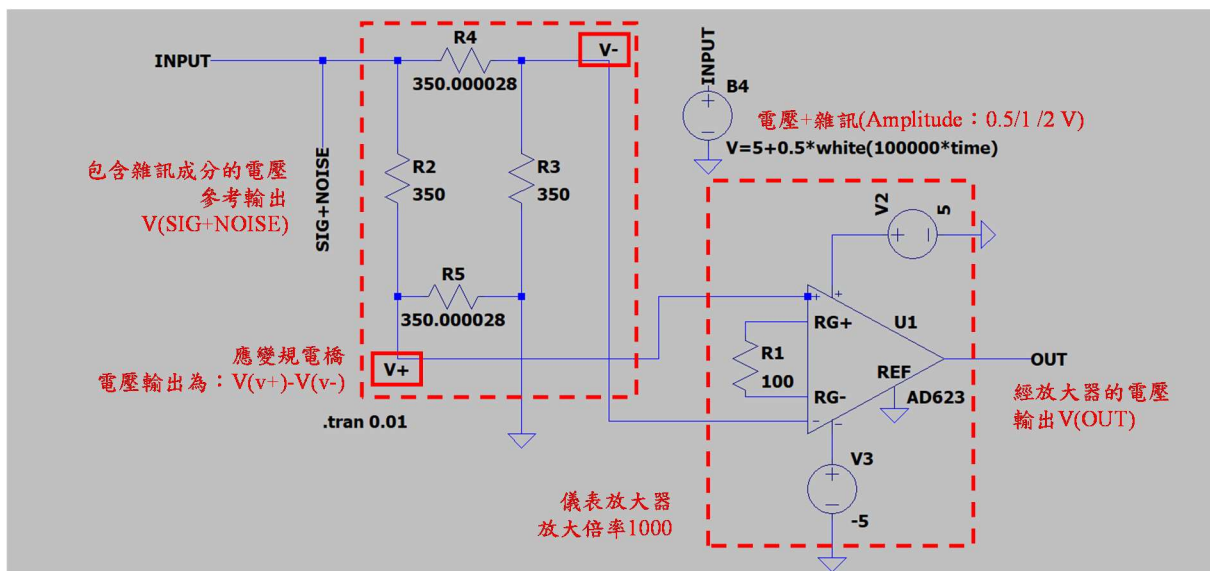


圖 1-2-8 後端電路架構圖

在初步分析模擬結果中可得知當受力 10 N 時，放大器的輸出訊號約 14 mV，如表 1-2-3 所示，並給予電壓源大至 0.5 V 之雜訊，此時放大器之電壓雜訊約 0.006 mV，訊雜比相當高，已經可將 0.5 V 白噪音雜訊視為無影響。若考慮 10×10^{-6} V 之白噪音雜訊，理論上影響量將

更小，實際上也無須進行評估。但由於電路設計所採用之電壓參考 IC 雜訊規格即為 10×10^{-6} V，已超出軟體設定下限，故僅以簡單之線性比例方式估算。

根據上述前提，在分析過程發現電橋訊號變化、經放大器的電壓輸出與參考電壓呈現一定程度之線性變化，因此可根據 2 V、1 V、0.5 V 振幅雜訊之模擬結果評估 10×10^{-6} V 雜訊對輸出訊號的影響，模擬結果如表 1-2-4 與表 1-2-5 所示，由表中數據得知，於 10 N 力量變化時，對電橋輸出電壓之雜訊貢獻約為 40×10^{-10} μ V，對放大器的輸出雜訊貢獻約為 12×10^{-11} mV。

根據前述所計算得知目前力量感測器在 10 N 的力量變化量，具 2.0×10^{-7} V 電壓變化，而熱雜訊為 3.8×10^{-8} V，電橋輸出端之雜訊為 40×10^{-10} μ V，以 3 倍訊雜比作為解析度估算基準，滿足 10 N 解析度之設計要求；若評估經放大器過後之電壓輸出與雜訊之關係，力量感測器在 10 N 的力量變化量下，放大器輸出端具 2.0×10^{-4} V 電壓變化，雜訊大小為 12×10^{-11} mV 變化，同樣滿足 10 N 解析度要求。

根據電路分析之結果，可確定目前之電路之設計架構符合原先所訂之規格，並且可作為未來後端電路實際開發時之重要參考依據。

表 1-2-3 放大器的輸出電壓之影響

受力大小	10 kN	5 kN	10 N
10 kN	24	13	0.024
10 kN	24	13	0.024
10 kN	12	6.6	0.012

表 1-2-4 不同振幅雜訊對電橋輸出電壓之影響

受力大小	10 kN	5 kN	10 N
電壓源 5 V	電橋輸出雜訊大小(μ V)		
電壓源雜訊大小 2 V	80	40	0.08
電壓源雜訊大小 1 V	40	20	0.04
電壓源雜訊大小 0.5 V	20	10	0.02
電壓源雜訊大小 10 μ V	40×10^{-7}	20×10^{-7}	40×10^{-10}

表 1-2-5 不同振幅雜訊對經放大器的輸出電壓之影響

受力大小	10 kN	5 kN	10 N
電壓源 5 V	經放大器的輸出雜訊大小(mV)		
電壓源雜訊大小 2 V	24	13	0.024
電壓源雜訊大小 1 V	12	6.6	0.012
電壓源雜訊大小 0.5 V	6	3	0.006
電壓源雜訊大小 10 μ V	12×10^{-8}	6.6×10^{-8}	12×10^{-11}

(3) 完成力量感測器功能驗證，力量量測範圍 10 kN，解析度 ≤ 10 N (查核點編號 A2-4)

力量感測器之功能驗證包含力量量測範圍與解析度兩部分的驗證，力量量測範圍是透過國家度量衡標準實驗室的力量校正機(系統編號: N01、N02)進行 1 kN 至 10 kN 的施力測試，而解析度的驗證方式是透過放置法碼進行 10 N 至 50 N 的施力測試，感測器的實際測試畫面如圖 1-2-9 與圖 1-2-10 所示。

力量校正機為靜法碼系統，因此施力的單位為 kgf，今年度力量量測範圍的目標為 10 kN，因此將透過力量校正機施加 100 kgf 至 1200 kgf 的力量大小，若能確認感測器能夠於機台給予 1200 kgf (≥ 10 kN) 力量時產生對應之力量變化，則可確認感測器符合 10 kN 力量量測範圍規格，感測器的量測數據與結果如表 1-2-6 與圖 1-2-11 所示，於 10 kN 受力可產生 1.9×10^{-2} mV/V 電壓變化(搭配之放大器解析度 1.0×10^{-5} mV/V)，重複性不確定度 $\leq 2.3 \times 10^{-3}$ mV/V，根據量測結果可確認感測器達成 10 kN 力量量測範圍規格。



圖 1-2-9 主軸預壓力量感測器安裝至力量校正機實測畫面

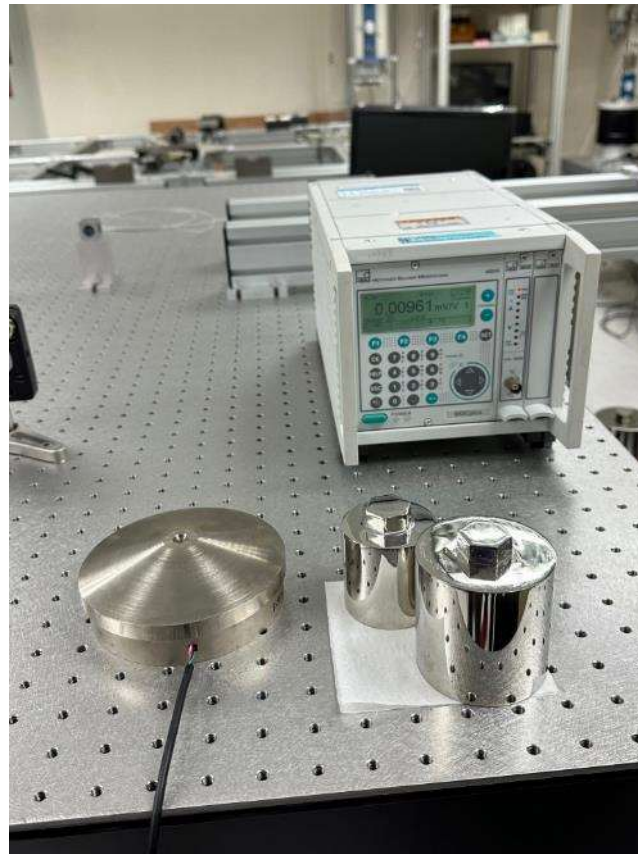


圖 1-2- 10 主軸預壓力量感測器透過法碼施力實測畫面

表 1-2- 6 主軸預壓力量感測器的力量量測範圍驗證數據

量測次數	1	2	3
力量(kgf)	電壓(mV/V)	電壓(mV/V)	電壓(mV/V)
0	0.00907	0.00915	0.00917
100	0.0131	0.01335	0.01483
200	0.01617	0.01701	0.01941
300	0.01805	0.01975	0.02242
400	0.01969	0.02116	0.02361
500	0.02099	0.02307	0.0251
600	0.02219	0.02387	0.02562
700	0.02339	0.02488	0.0273
800	0.02421	0.02573	0.02748
900	0.02508	0.02654	0.02768
1200	0.02739	0.02832	0.02892

預壓力量感測器_力量量測範圍驗證

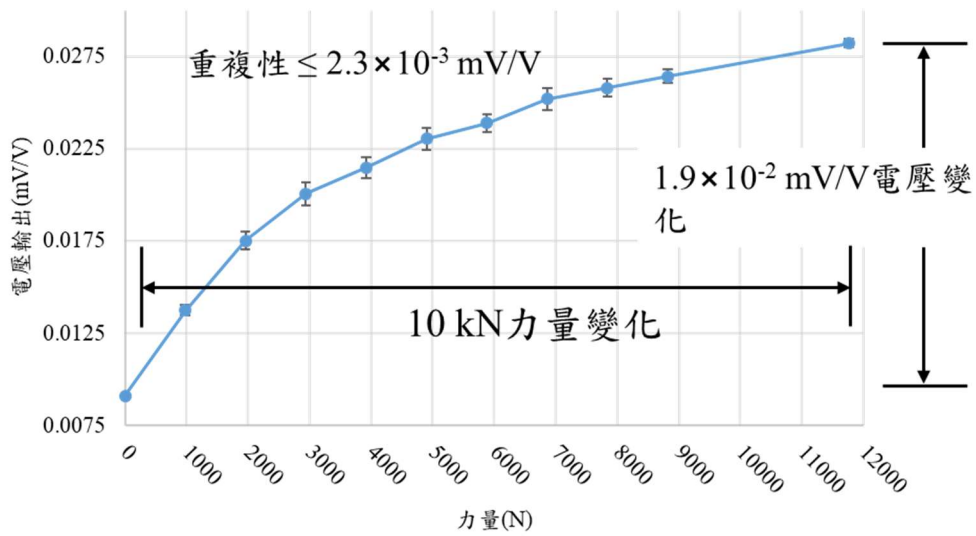


圖 1-2- 11 主軸預壓力量感測器的力量量測範圍驗證結果

在力量量測解析度驗證的部分，因同樣使用法碼作為力量來源，因此施力的單位為 kgf，透過放置不同質量法碼施加 1 kgf、2 kgf 與 5 kgf 的力量，今年度力量量測解析度的目標為 10 N，若能確認感測器能夠於法碼給予 1 kgf(≤ 10 N)力量時產生對應之力量變化，則可確認感測器符合 10 N 力量量測解析度範圍規格，感測器的量測數據與結果如表 1-2-7 與圖 1-2-12 所示，於 10 N 受力可產生 6×10^{-5} mV/V 電壓變化(搭配之放大器解析度 1.0×10^{-5} mV/V)，重複性不確定度 $\leq 2.2 \times 10^{-5}$ mV/V，根據量測結果可確認感測器達成 10 N 力量量測解析度規格。

表 1-2-7 主軸預壓力量感測器的力量量測解析度驗證數據

量測次數	1	2	3
力量(kgf)	電壓(mV/V)	電壓(mV/V)	電壓(mV/V)
0	0.00960	0.00959	0.00959
1	0.00965	0.00962	0.00962
2	0.00969	0.00969	0.00970
5	0.00986	0.00993	0.00987

預壓力量感測器_力量量測解析度驗證

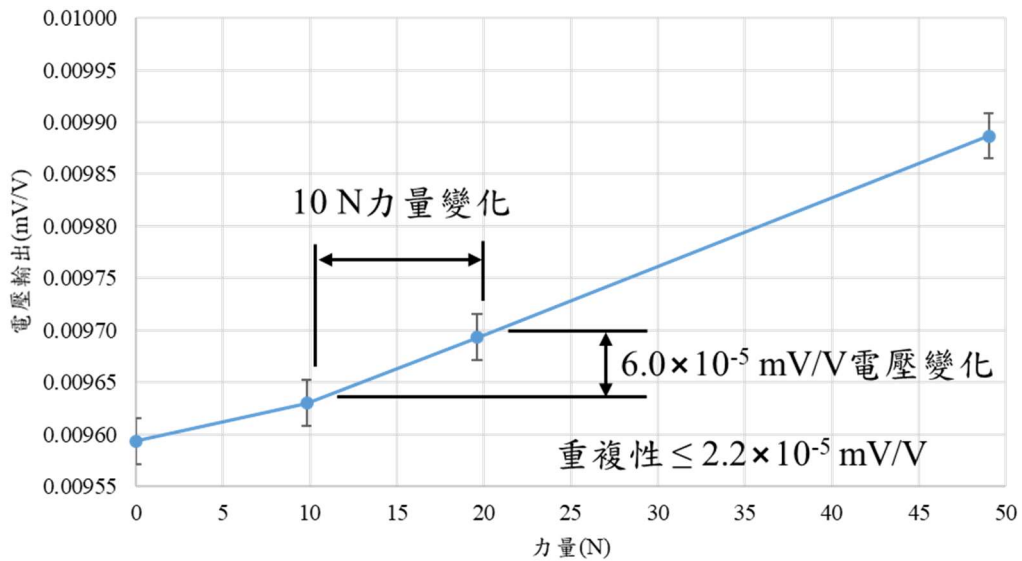


圖 1-2- 12 主軸預壓力量感測器的力量量測解析度驗證結果

除完成感測器的功能驗證，本子項也於第四季開始進行場域試驗的執行，目前的合作對象為普森精密主軸工業有限公司，詳細執行進度詳見研發技術導入示範案章節所述。

【突破瓶頸】

完成可整合至主軸內部之預壓感測器設計，建立主軸軸承預壓量測技術，作為主軸運行健康度的領先參考指標並提早發現異常現象，建立之感測模組可用於主軸組裝、工具機製造及工具機終端使用各階段，並進行技術實際應用，完成場域試驗一案。

【本年度結論】

今年度完成主軸預壓力量感測器結構設計、剛性與應變量模擬分析、後端電路模擬分析，確認感測器量測範圍與解析度符合規格，並完成場域試驗一案。

1. 結構設計與剛性分析: 完成主軸預壓力量感測器設計，感測器內徑 100 mm、外徑 115 mm，厚度 115 mm。於有限元素分析 10 kN 受力時所得到最大變形量為 6.28×10^{-4} mm，剛性達 15923 N/ μ m，大於所訂定之目標值 33 N/ μ m，符合原先所訂之軸向的剛性要求與計畫規格量測範圍 10 kN；
2. 應變量與最大應變發生位置分析: 於應變分布的結果可得知應變量出現最大值的位置於內側凹槽處，符合預期中理想位置，且最大應變量為 4.0×10^{-8} 。
3. 後端電路模擬分析: 感測器於 10 N 受力時應變規電橋輸出端可產生 0.2 μ V 電壓變化，電橋之雜訊為 0.04 μ V，目前設計之訊號輸出應可大於雜訊之 3 倍以上，可有效量測受力時所產生電壓變化，因此判定滿足 10 N 解析度之計畫所要求規格。
4. 感測器功能驗證: 放大器之顯示解析度為 0.00001 mV/V，於 1200 kgf (≥ 10 kN) 受力下感測器可產生 0.019 mV/V 電壓變化；於 1 kgf (≤ 10 N) 力量變化下感測器可產生 0.0005 mV/V 電壓變化，於放大器顯示界面皆可判讀訊號之變化，因此確認力量量測範圍與解析度達成今年度原訂規格。

5. 場域試驗: 將技術導入實際場域, 與普森精密主軸工業有限公司合作進行場域試驗, 完成感測器與主軸的整合, 目前已確認於主軸轉速達 8000 RPM 時, 主軸的動態平衡皆正常, 將持續進行主軸靜止與低速運轉時預壓量測。

B. 微型定點囊的開發與製作

本年度主軸狀態溫度監測技術開發的計畫, 建立溫度微型定點囊的開發與製作技術^[1-2-6], 並發展金屬熔煉製程與評估以相變化溫度的轉折點方式來界定溫度定義定點, 實現具溫度標準追溯之微型定點囊技術。同時, 研製純金屬型熱電偶, 改善基底金屬型熱電偶易受合金線材非均勻性影響所造成的溫度漂移, 依據當前工機具主軸規格進行溫度感測器的設計, 建立微型定點囊的開發與製作流程。本年度計畫目標如下:

- 完成溫度標準微型定點囊的開發, 規格為鋁定點溫度 660 °C 與低溫合金溫度 62 °C ; 相變化時間 ≥ 30 s ; 溫度穩定度 ≤ 0.5 °C ;
- 完成研製純金屬型熱電偶的技術, 規格為溫度量測範圍 0 °C ~ 660 °C ; 量測解析度 0.1 °C

預計於 112 年完成溫度標準微型定點囊的設計與開發技術, 應用於國內工具機主軸、加熱爐及終端使用者對於溫度自我校正的需求場合, 實現擴充溫度領域新的標準傳遞方式。

【執行成果】

(1) 完成微型定點囊體積與維持相變化時間的計算模型報告一份 (查核點編號 A2-1)

本年度自校型熱電偶溫度感測器技術, 建立微型定點囊的開發與製作技術。為了能清楚辨識微型定點囊相變化時的標準溫度, 因此需要有足夠的相變化維持時間。本次查核點進度將藉由一維能量守恆方程式的解析解建立微型定點囊的相變化的理論模型, 透過已知的微型定點囊的體積、不同的金屬熱物性質與加熱速率來分析相變化時間 ≥ 30 s 的最佳參數。由於微型定點囊內含相變化物質, 軟體模擬內並沒有特殊低溫合金(二相流)材料資料庫。因此, 計畫初期的分析主要利用能量守恆方程式計算, 建立熱平衡後已知溫度的相變化模型, 評估維持相變化的時間。

透過訪談國內工具機主軸生產大廠的需求, 目前工具機主軸溫度狀態監測的使用溫度範圍與規格如下, 本次查核點將先選定以永進公司/普森公司所提供的主軸溫度計規格為例, 來進行微型定點囊的設計與計算。

- 主軸溫度使用範圍: 室溫+25 °C (標準範圍), 重切削甚至 60 °C 。
- 主軸溫度計規格: 螺旋式溫度感測器(微型定點囊的直徑 < 8 mm 與長度 < 45 mm)。

微型定點囊的相變化計算模型的建立, 主要原理是根據下述的能量守恆方程式 1-2-3 所完成, 藉由輸入微型定點囊的幾何參數、材料性質與所選用的金屬熱物性質並代入公式 1-2-4, 可快速預測微型定點囊的相變化維持時間。

$$Q_{in} = Q_{ms} + Q_{ph} + Q_{ml} + Q_{cc} \quad 1-2-3$$

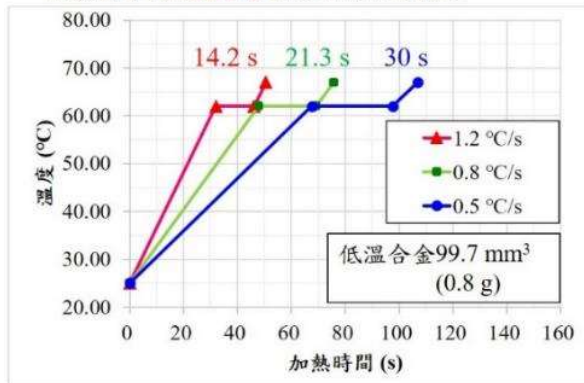
式中, Q_{in} 為外部的加熱能量、 Q_{ms} 為固態金屬溫度變化所需的熱量、 Q_{ph} 為金屬相變化所需的熱量、 Q_{ml} 為液態金屬溫度變化所需的熱量, 以及 Q_{cc} 為氧化鋁坩堝溫度變化所需的熱量,

對應於公式 1-2-3 展開後, 如下式 1-2-4:

$$P \cdot t_{\text{total}} = mc_p(T_m - T_0) + mh_{\text{SL}} + mc_p(T_L - T_m) + m_a c_{p,a}(T_L - T_0) \quad 1-2-4$$

式中， $P \cdot t_{\text{total}}$ 為外部加熱能量 Q_{in} ； P 為加熱功率； t_{total} 為總加熱時間。 $mc_p(T_m - T_0)$ 為固態金屬溫度變化所需的顯熱 Q_{ms} ； m 為金屬物質質量； c_p 為金屬的比熱容； T_m 為熔點溫度， T_0 為室溫溫度。 mh_{SL} 為金屬相變化的潛熱 Q_{ph} ； m 為金屬物質質量； h_{SL} 為單位質量相變化時所需要的熱量。 $mc_p(T_L - T_m)$ 為液態金屬溫度變化所需的顯熱 Q_{ml} ； m 為金屬物質質量； c_p 為金屬的比熱容； T_L 為最高設定溫度， T_m 為熔點溫度。 $m_a c_{p,a}(T_L - T_0)$ 為氧化鋁坩堝溫度變化所需的顯熱 Q_{cc} ； m_a 為氧化鋁坩堝質量； $c_{p,a}$ 為氧化鋁坩堝的比熱容； T_L 為最高設定溫度， T_0 為室溫溫度。

• 加熱速率對低溫合金相變化時間的影響



• 加熱速率對鋁定點相變化時間的影響

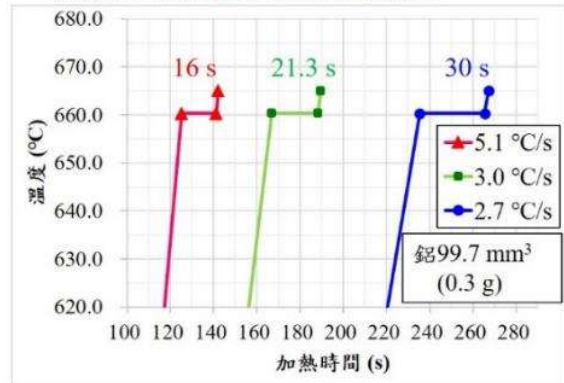


圖 1-2- 13 微型定點囊相變化模型的計算結果分析

圖 1-2-13 為透過微型定點囊相變化模型的分析結果。根據主軸溫度計尺寸規格限制下的已知微型定點囊體積為 99.7 mm^3 。藉由改變不同的加熱速率對金屬相變化時間的影響得知，對低溫合金而言，所對應的微型定點囊體積計算後質量為 0.8 g ，若要維持相變化溫度 $62 \text{ }^\circ\text{C}$ 並持續相變化時間 $\geq 30 \text{ s}$ ，則加熱速率需 $\leq 0.5 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 。另外，對鋁定點而言，所對應的計算質量為 0.3 g ，若要維持相變化溫度 $660 \text{ }^\circ\text{C}$ 並持續相變化時間 $\geq 30 \text{ s}$ ，則加熱速率需 $\leq 2.7 \text{ }^\circ\text{C/s}$ 。

微型定點囊若要符合主軸溫度計規格，並有足夠的相變化時間 $\geq 30 \text{ s}$ ，除了盡量提高微型定點囊內部的體積與金屬質量外，亦可藉由減少加熱瓦數達到降低加熱速率，來延長微型定點囊的相變化時間。

(2) 完成微型定點囊的設計(包含微型定點囊結構設計、低熔點合金的填充規劃、溫度計貼附位置)，產出微型定點囊設計報告一份 (查核點編號 A2-2)

由於主軸在高速運轉時，其前/後軸承內的滾珠會支撐負荷並與軸承內外圈摩擦、以及內置的主軸心軸損耗會產生大量熱。這些熱量主要會透過前/後軸承以熱傳導方式向主軸各個部件傳遞，進而造成不同程度的熱變形，影響加工精度。因此，主軸溫度計大多貼附位置在前/後軸承外側，以監測主軸工作溫度，如圖 1-2-14 所示。

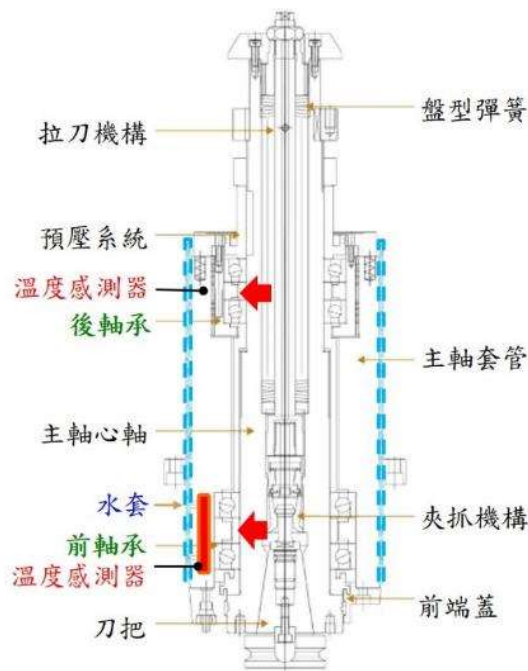


圖 1-2-14 主軸結構示意圖與內置型主軸溫度感測器的位置

為了在主軸內實現自校型溫度感測器技術，其結構需包含微型定點囊(含相變化金屬材料部分)、純金屬型熱電偶、微型坩堝、加熱絲與溫度計保護套，如圖 1-2-15 所示。其設計原理首先在於利用微型定點囊內相變化的溫度作為溫度的參考標準，並將微型定點囊封裝內置貼附在溫度感測器底部。利用微型定點囊內金屬相變化的熔化點或凝固點溫度對周圍產生潛熱變化的影響，使溫度感測器發生特徵性的時間延遲變化。從這些特徵時間變化中，可以在定點溫度下獲得溫度感測器的校正值^[1-2-7]。

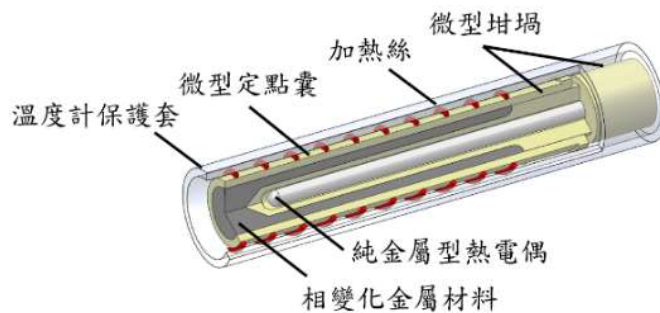


圖 1-2-15 自校型溫度感測器的結構設計圖

然而，在實際設計時為了有足夠的相變化時間 $\geq 30\text{ s}$ ，除了要考慮微型定點囊所需的相變化金屬質量與加熱速率外，尚需納入溫度感測器周圍的主軸本身與水套的熱損失，並考慮熱傳過程中的熱阻模型，如圖 1-2-16，以建構微型定點囊的熱模型分析，計算出微型定點囊的幾何參數、溫度分布與所需的加熱功率。

藉由微型定點囊的熱模型計算，如公式 1-2-5，並代入微型定點囊的設計幾何參數，其分析結果如圖 1-2-17 所示。

首先，將微型定點囊的熱模型公式 1-2-5 的各元件熱傳途徑的熱阻(水套、主軸管壁、微型定點囊)展開，與各元件的幾何參數與熱導率有直接關係，如圓柱座標熱阻公式所示， $R = (\ln(r_o/r_i))/2\pi KL$ ，其中 r_o/r_i 為外/內半徑， L 為圓柱體長度， K 為圓柱體材料熱導率。代入與

修正微型定點囊的設計圖(圖 1-2-17)幾何參數，即可分析出適當的主軸溫度計溫度分布結果(圖 1-2-16)作為依據。

微型定點囊若要有 30 s 以上的相變化時間且內部溫度熱平衡控制在 0.5 °C 以內，以低溫合金材料為例，其加熱絲溫度不可超過 62.2 °C 且加熱絲功率不可超過 2.8 W，當中水套熱損失約 2.1 W，僅有 0.7 W 會輸入微型定點囊中，而且低溫合金需質量 ≥ 0.8 g，內部微型坩堝需體積 ≥ 99.7 mm³。

$$Q_{heater} = Q_{loss} + Q_{in} = \frac{T_{heater} - T_{water}}{R_{water} + R_{sp} + R_{ss}} + \frac{T_{heater} - T_{sensor}}{R_{cr1} + R_{metal} + R_{cr2} + R_{Al203}} \quad 1-2-5$$

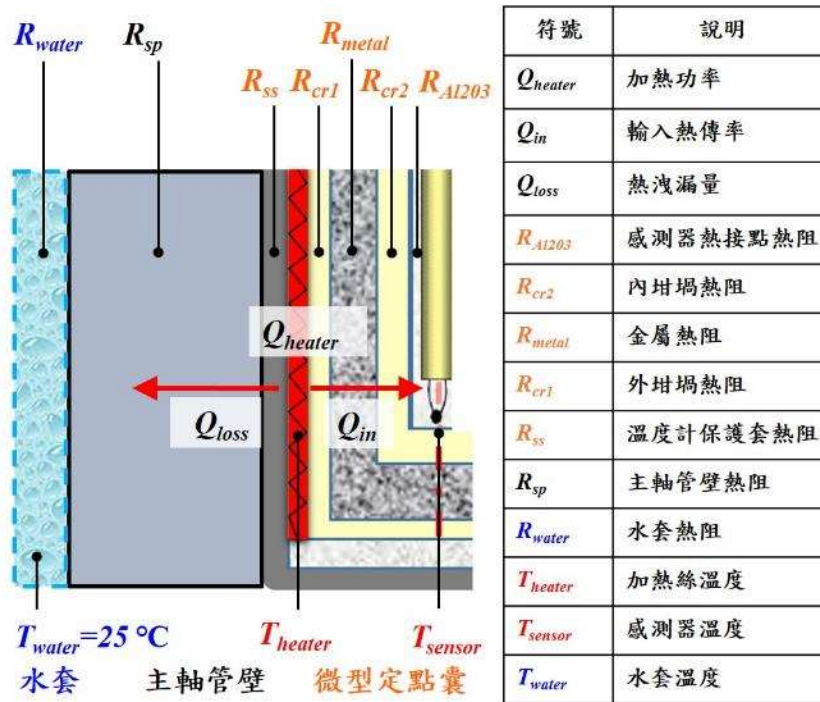


圖 1-2-16 主軸自校型溫度感測器的熱傳途徑

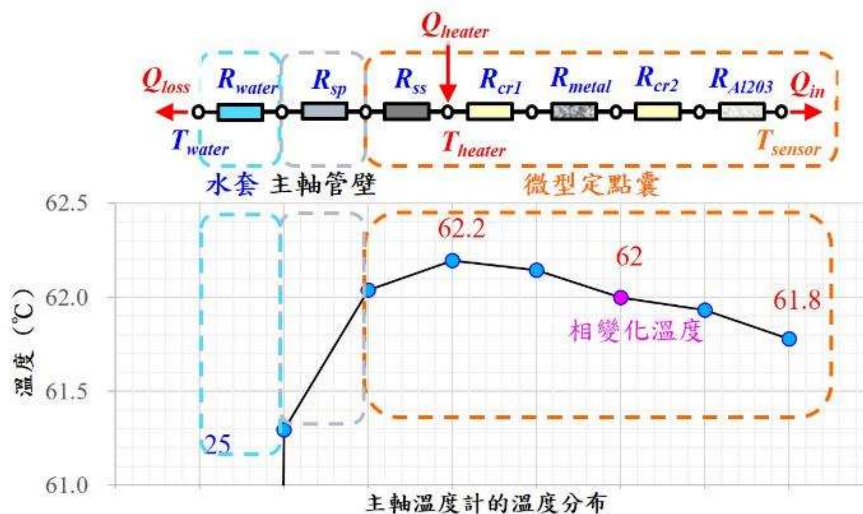


圖 1-2-17 主軸自校型溫度感測器的等效熱迴路與溫度分布

綜合以上微型定點囊的熱模型分析與設計，現已完成查核點編號 A2-2，即完成微型定點囊的設計，產出設計圖 1 份(圖 1-2-18)，設計圖編號為 N407EA1120-S-05。

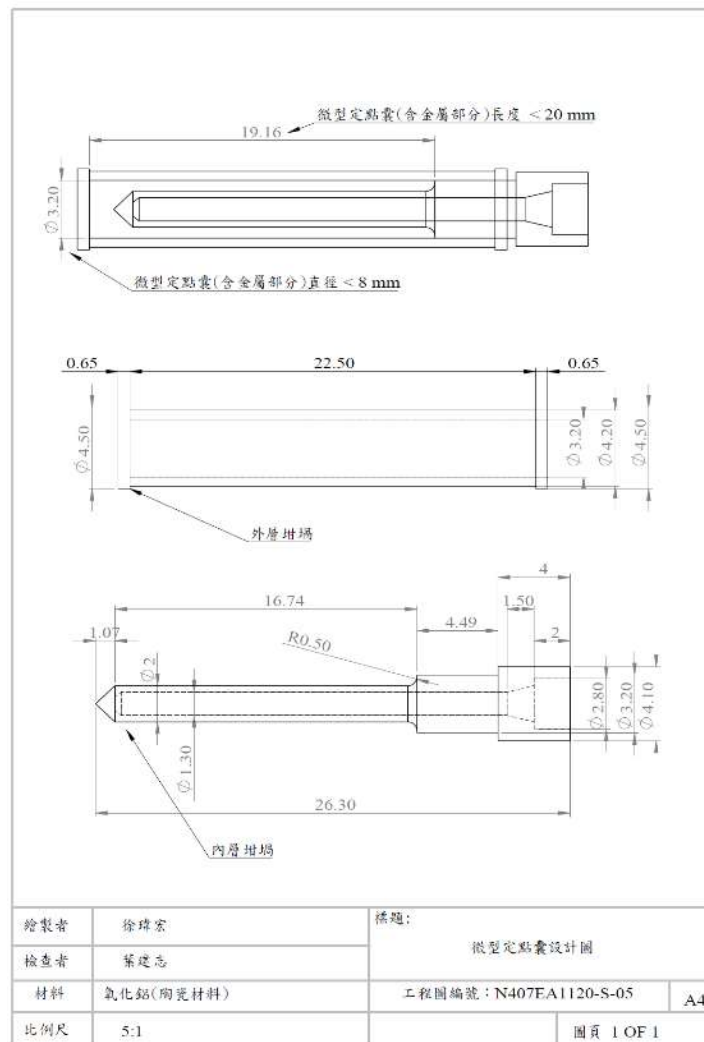


圖 1-2-18 微型定點囊設計圖

(3) 完成低熔點合金的溫度及調查與調配比例報告一份(查核點編號 A2-3)

完成不同比例的低熔點合金(Bi/Sn/In)配置，並比較其熔點溫度的差異。

當鈹、錫、銢以特定比例量混合時，由於各成分原子半徑的差異，因此原本各成分獨特有序的晶體排列方式遭受扭曲破壞而使彼此間引力變弱，混合溶液的熔點因此降低。如圖 1-2-19 所示，透過 Sn-Bi-In 三元相圖分析可以得知，在低熔點合金(Bi/Sn/In)比例分別為 (32.5/16.5/51) wt%與(42/13.5/44.5) wt%時，會有穩定的共晶點出現，其熔點溫度範圍約在 59 °C至 64 °C，符合主軸溫度 62 °C的上限設定。

• Sn-Bi-In三元相圖

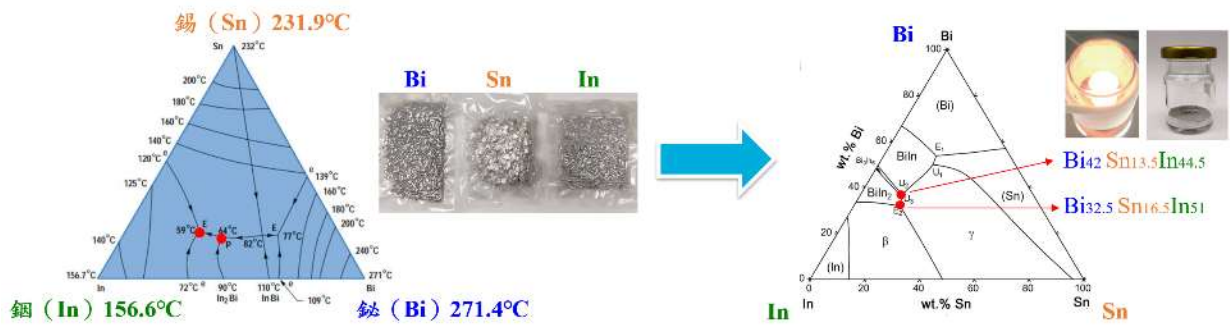
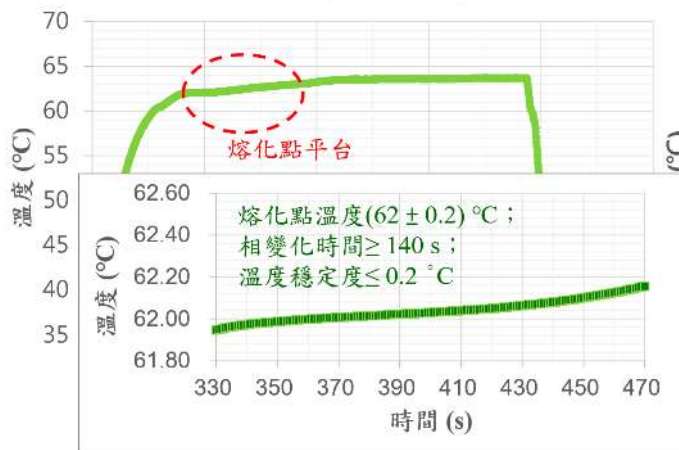


圖 1-2- 19 不同比例的低熔點合金(Bi/Sn/In)配置^{[1-2-8][1-2-9]}

藉由上述的 Sn-Bi-In 三元相圖分析，可配置不同比例的低熔點合金(Bi/Sn/In)，並比較其熔點溫度的差異。實驗結果顯示低熔點合金(Bi/Sn/In)比例為(32.5/16.5/51) wt%時，其相變化溫度在 61.5 °C；低熔點合金(Bi/Sn/In)比例為(42/13.5/44.5) wt %時，其相變化溫度在 62 °C，相變化時間皆可 ≥ 30 s；溫度穩定度 ≤ 0.5 °C，如圖 1-2-20。

● 低溫合金比例 Bi/Sn/In = (42/13.5/44.5) wt%



● 低溫合金比例 Bi/Sn/In = (32.5 / 16.5 / 51) wt%

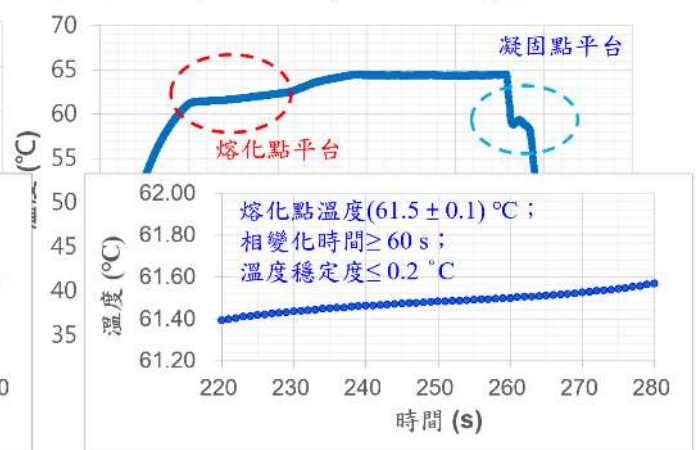


圖 1-2- 20 不同比例的低熔點合金(Bi/Sn/In)溫度的性能測試

完成 9 月份量測資訊期刊的刊登，題目:自校型溫度感測技術與應用介紹(技資編號: 075B20028)。

(4) 完成微型定點囊的功能驗證，低熔點合金相變化溫度(62±1) °C，相變化維持時間 ≥ 20 s(查核點編號 A2-4)

由於低溫合金的熔化曲線平台不如純金屬凝固曲線的平台，可利用三階多項式來擬合熔化曲線，並評估多項式二階導數為零的溫度作為定義參考溫度點。首先利用三階多項式擬合金屬的熔化曲線，接著選取熔化曲線的範圍與其對稱性(一階導微為零，即為極值點)，最後再決定轉折點(二階導數微零，即為反曲點)。

轉折點的計算可透過三階多項式 $T=at^3+bt^2+ct+d$ ，擬合金屬熔化曲線段，並進行兩次微分以評估 $d^2T/dt^2=0$ 所得函數，以確定 $t=-b/3a$ 的時間，將此值代入三階多項式以求得相對應的轉折點溫度，如圖 1-2-21 所示。同樣，有關純鋁金屬凝固曲線的分析，亦可利用此方法來標定凝固轉折點溫度

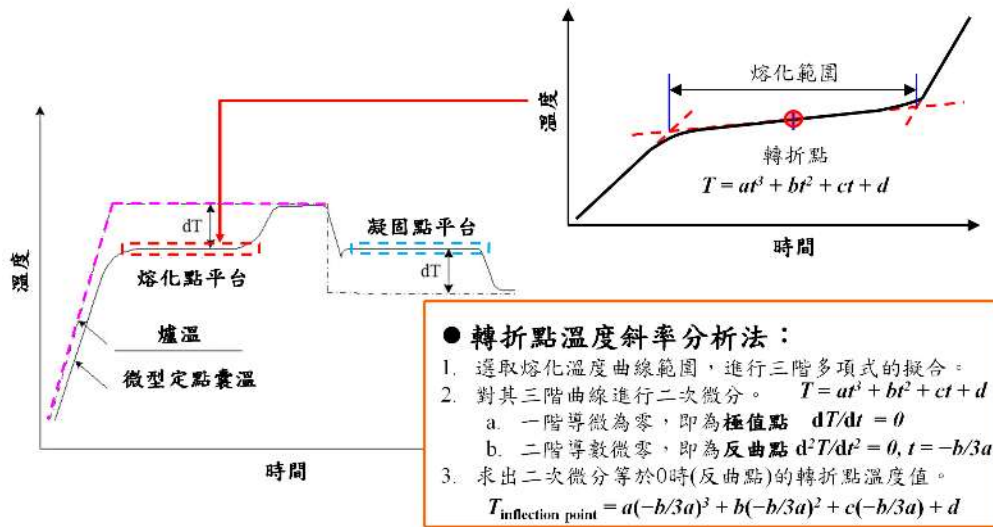
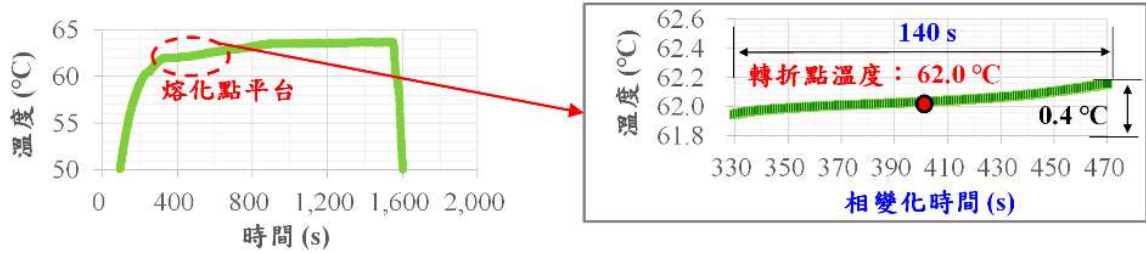


圖 1-2- 21 轉折點溫度評估的方法

轉折點的計算可透過三階多項式 $T=at^3+bt^2+ct+d$ ，擬合金屬熔化曲線段，並進行兩次微分以評估 $d^2T/dt^2=0$ 所得函數，確定 $t=-b/3a$ 的時間，將此值代入三階多項式以求得相對應的轉折點溫度，如圖 1-2-21 所示。同樣，有關純鋁金屬凝固曲線的分析，亦可利用此方法來標定凝固轉折點溫度。

透過上述轉折點溫度評估的方法針對低溫合金與鋁定點微型定點囊進行分析，實驗結果顯示低溫合金(Bi/ Sn/ In) 比例為(42/ 13.5/ 44.5) wt %時，其相變化溫度在 62 °C，相變化時間皆可達 140 s，溫度穩定度 ≤ 0.2 °C，轉折點溫度為 62.0 °C；鋁定點 (> 99.999 wt %)，其相變化溫度在 660.3 °C，相變化時間皆可達 125 s，溫度穩定度 ≤ 0.2 °C，轉折點溫度為 660.3 °C，如圖 1-2-22 所示。

-低溫合金：Bi/Sn/In = (42/13.5/44.5) wt%，實現 $(62.0 \pm 0.2)^\circ\text{C}$ ，轉折點溫度： 62.0°C



-鋁定點：Al(>99.999 wt%)，實現 $(660.3 \pm 0.2)^\circ\text{C}$ ，轉折點溫度： 660.3°C

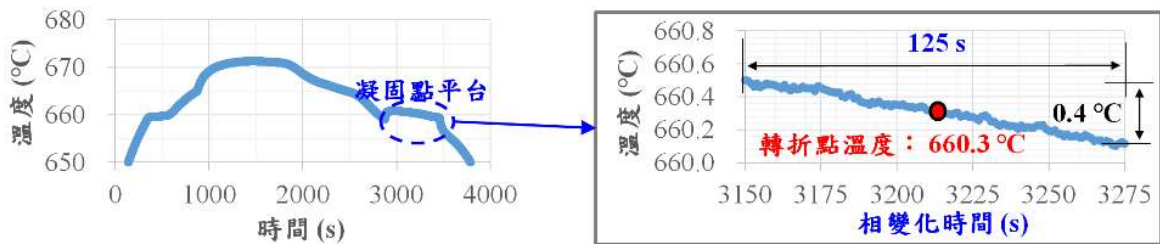


圖 1-2- 22 低溫合金與鋁定點微型定點囊的功能驗證

如圖 1-2-23，主要根據場域試驗工具機主軸溫度計的規格進行設計，將溫度標準微型定點囊、加熱絲與溫度感測器整合在黃銅保護套管(微型定點囊的直徑 $< 8\text{mm}$ 與長度 $< 45\text{mm}$)內。之後，進行低溫合金與鋁定點微型定點囊的功能驗證測試，其測試結果如上述圖 1-2-20 所示，已能達成 FY112 所設定的目標，即鋁定點溫度 660°C 與低溫合金溫度 62°C 、相變化時間 $\geq 30\text{s}$ 、溫度穩定度 $\leq 0.5^\circ\text{C}$ 、溫度量測範圍 $0^\circ\text{C} \sim 660^\circ\text{C}$ 、量測解析度 0.1°C 。之後內置在主軸軸承外側並在主軸跑和平台上監測主軸工作溫度，而溫度自校的實施則是利用微型定點囊內金屬相變化的熔點 T_s 溫度對周圍產生潛熱變化的影響，使溫度感測器 T_m 發生特徵性的時間延遲。從這些時間延遲變化中，可以在已知定點溫度下獲得溫度感測器的修正值 ΔT ，如圖 1-2-24。在場域試驗方面，如圖 1-2-25 所示，已完成自校型溫度感測器與普森精密主軸的整合，並在主軸跑和平台上確認轉速達 8000rpm 時，主軸的動態平衡正常，而且可量測到溫度訊號並能執行溫度校正。

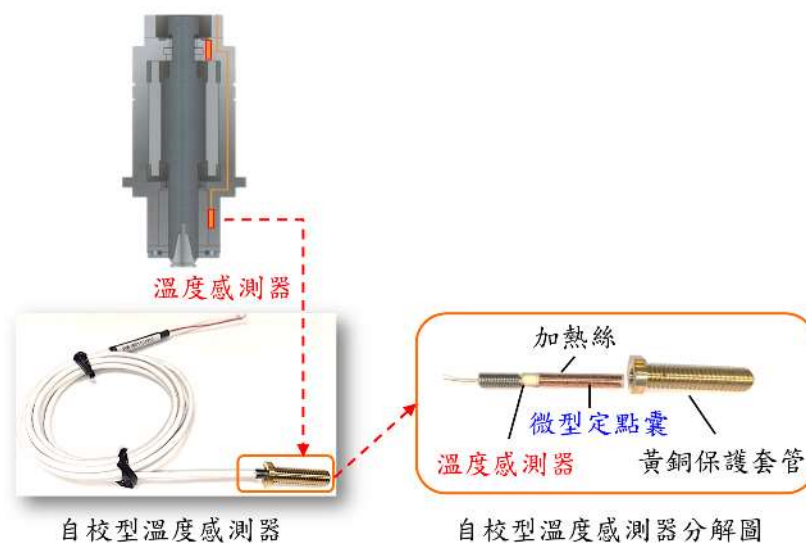


圖 1-2- 23 主軸自校型溫度感測器的實體圖

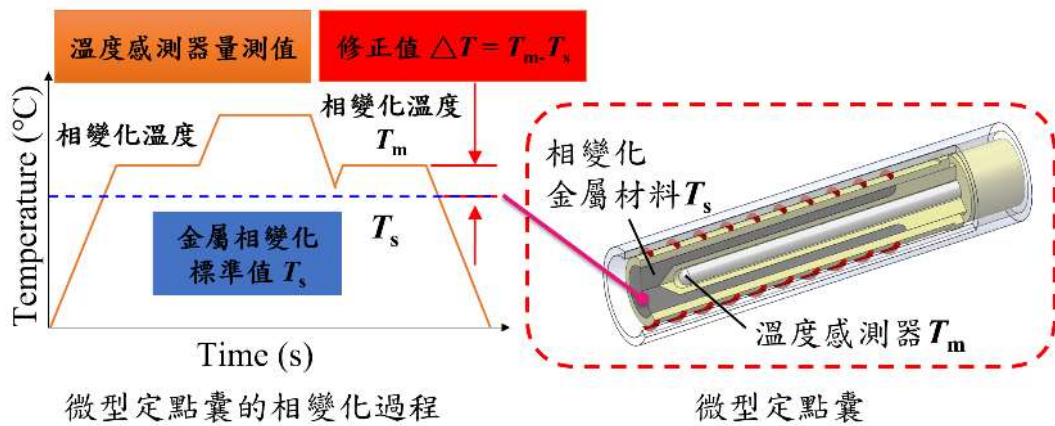
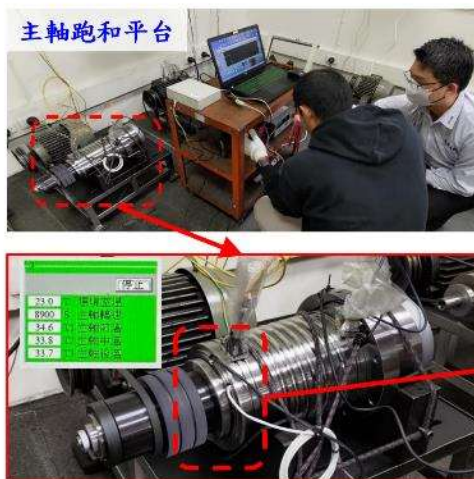


圖 1-2- 24 主軸自校型溫度感測器的溫度自校實施

• 場域試驗設備



• 場域試驗測試結果

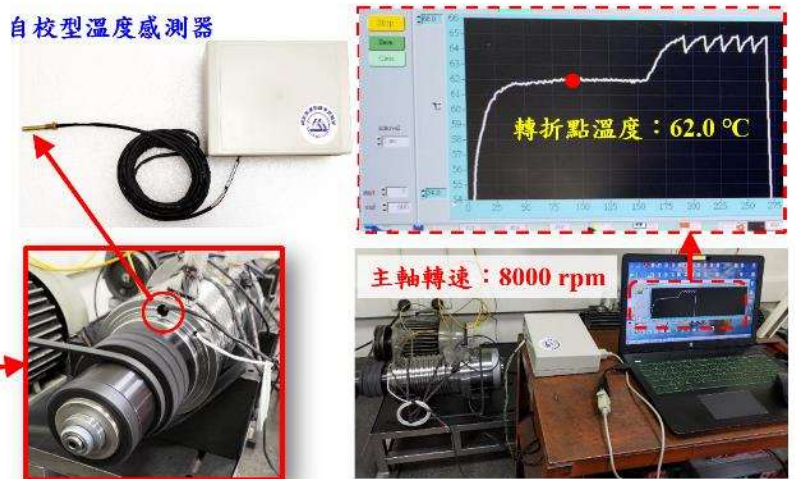


圖 1-2- 25 自校型溫度感測器與主軸之實際整合完成圖

【突破瓶頸】

本子計畫於全年度執行成果，主要突破瓶頸有下列幾項：(1)建立微型定點囊的相變化模型，可藉由輸入微型定點囊的幾何參數、材料性質與所選用的金屬熱物性質，快速預測微型定點囊的體積與金屬性質對相變化維持時間的影響，使本子計畫得以設計出符合主軸溫度感測器的微型化定點囊結構；(2)發展金屬熔煉製程技術，可配置不同比例的低熔點合金，以符合工具機主軸溫度當下需求的溫度點，實現低熔點合金的相變化溫度(62±1)°C；(3)建構轉折點溫度評估的方法，解決低溫合金熔化曲線平台不易標定參考溫度點的問題；(4)開發自校型溫度感測器的初期控制模組，得以從實驗室環境轉移到工具機場域中實施，完成微型定點囊現場可調整參數的輸出，實現較佳的相變化平台，並建立主軸工作溫度的監測技術。

國外雖有類似技術但大多針對特殊溫度與場合設計，如衛星溫度感測器的校正上，以及具有高風險核廢料存放的溫度監控場合與高溫熱處理爐溫度線上校正等，但尚未運用到工具機研究上，且大部分的研究皆需藉助外部環境提供穩定熱源加熱，來達到金屬的相變化過程，

所以尚未完整的達到智慧化功能。為了能進一步讓自校型溫度感測器運用於不同環境與對象，113 年度挑戰目標將發展智能化自校型溫度感測器的控制模組，使其針對不同使用場域環境具適應性調控等的需求功能。112 年度已完成自校型溫度感測器的開發與原型製作，與本研究所要開發之技術比較表如表 1-2-7 所示。

表 1-2- 8 領先技術之自校型熱電偶溫度感測器比較表

量測設備名稱	相關技術現況	CMS 建置後技術狀況
自校型溫度感測器	NPL(英國)	
線上校正功能	人工	自動化
熱電偶類型	熱電偶	熱電偶/PT100
校正加熱方式	需外部環境加熱	具備自我加熱
溫度範圍	961 °C ~ 2290 °C	0 °C ~ 660 °C (依工具機需求設定)
微型定點囊尺寸	Ø14 mm × 26.7 mm	Ø4.5 mm × 19.2 mm
解析度	≤ 0.1 °C	≤ 0.1 °C
不確定度	≤ 1.6 °C	≤ 0.5 °C
校正時間	< 6 hour	< 60 min

【本年度結論】

上半年度完成微型定點囊的熱模型分析，可透過已知的微型定點囊的體積、不同的金屬熱物性質與加熱速率來計算相變化時間 ≥ 30 s 的最佳參數，並建立微型定點囊的設計與製作技術，在微型定點囊相變化模型中，增加熱阻模型，藉此計算出微型定點囊的溫度分布圖，並完成微型定點囊的幾何參數設計。同時，發展研製純金屬型熱電偶的技術，已有自製微型定點囊的能力，未來可提供不同溫度定點的標準，並可滿足工具機、鋼鐵業與半導體產業線上溫度校正的需求。

下半年度則建立真空熔煉設備，掌握純鋁金屬與不同比例的低溫合金(Bi/Sn/In)的配置技術，並完成微型定點囊的填充方式，實現相變化溫度純鋁定點 660 °C 與低溫合金 62 °C，相變化時間皆可 ≥ 30 s；溫度穩定度 ≤ 0.5 °C。同時，發展相變化曲線的轉折點溫度評估方法，來標定純鋁定點與低溫合金的轉折點溫度作為標準參考值。最後，依據主軸溫度計的規格，設計與組合溫度標準微型定點囊、加熱絲與溫度感測器至主軸溫度計內，以進行溫度量測與微型定點囊溫度相變化功能的測試，以實現溫度領域新的標準傳遞方式，完成線上即時校正的功能。

3. 主軸線上量測技術

主軸作為工具機的心臟，屬於工具機裡面核心組件，迴轉誤差是評估主軸精度重要指標，直接影響工具機加工工件精度，目前國內主軸或工具機廠商，主軸迴轉誤差量測方法皆屬於離線量測(Off-line measurement)，量測設備架設於主軸刀具端進行迴轉誤差量測，因應智慧機械需求，目前國內工具機產業界對於主軸的量測要求更加嚴格，使主軸實現現場量測迴轉誤

差(In-situ measurement)為一研究議題，因此子項計畫發展主軸迴轉誤差量測模組原型，其安裝於主軸內及實現主軸迴轉誤差現場量測，以下說明子項計畫至期中執行進度及主軸迴轉誤差量測商用場域等內容。

本年度計畫目標如下：

1. 主軸迴轉誤差量測模組原型開發

- 具備主軸 5 項迴轉量測能力(角度: E_A, E_B 、線性: E_X, E_Y, E_Z)
- 量測模組解析度: 角度 $\leq 0.1''$ 、線性 $\leq 0.2 \mu\text{m}$

【執行成果】

(1) 完成主軸迴轉誤差量測模組原型設計(直徑: $\leq 200 \text{ mm}$ 、高度: $\leq 100 \text{ mm}$) (查核點編號 A3-1)

圖 1-3-1 及圖 1-3-2 分別為 BBT40 內藏式主軸結構圖及主軸迴轉誤差量測模組原型設計圖，軸承座內有 4 個軸承(外徑:115 mm、內徑:75 mm 及厚度:20 mm)，軸承之間皆會搭配連接環，透過上下隔環固定 4 個軸承，整個軸承座尺寸(高度:200 mm 及直徑:150 mm)，主軸迴轉誤差量測模組原型安裝位置為 BBT 40 主軸軸承座下側，因此軸承座規格設計迴轉誤差量測模組原型。此外，軸承座外側會安裝 1 顆環形編碼器，應用於主軸轉速控制，這顆環形編碼器會由迴轉誤差量測模組原型取代，使迴轉誤差量測模組原型同時具備轉速控制及迴轉誤差量測功能；迴轉誤差量測模組原型設計圖總共有 7 個結構，上外殼安裝三個讀頭(S1~S3)，讀頭安裝角度位置依序為 0° 、 120° 及 240° ，下讀頭轉接板安裝三個讀頭(S4~S6)，讀頭安裝角度位置分別為 60° 、 180° 及 300° ，中外殼連接上讀頭轉接板及下讀頭轉接板，此外，透過下外殼及下版將六個讀頭於主軸內隔絕，降低主軸內其他結構對於主軸迴轉誤差量測模組原型影響，上述五個結構於內藏式主軸內皆固定不動，另外，上下旋轉機構用於安裝兩顆環形編碼器(R1~R2)，內藏式主軸旋轉時，帶動兩顆環形編碼器同時旋轉，六個讀頭同時讀取角度量測值，主軸迴轉誤差量測模組原型尺寸直徑為 150 mm 及高度為 100 mm，符合查核點需求。

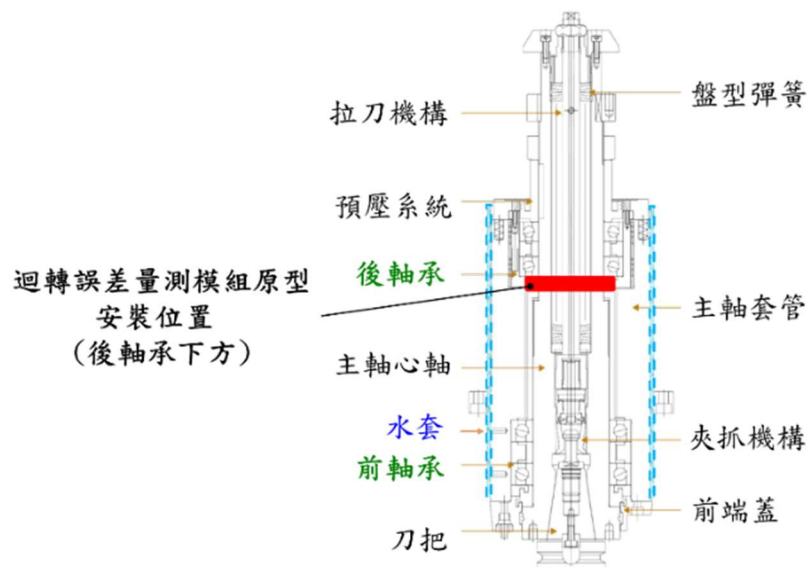
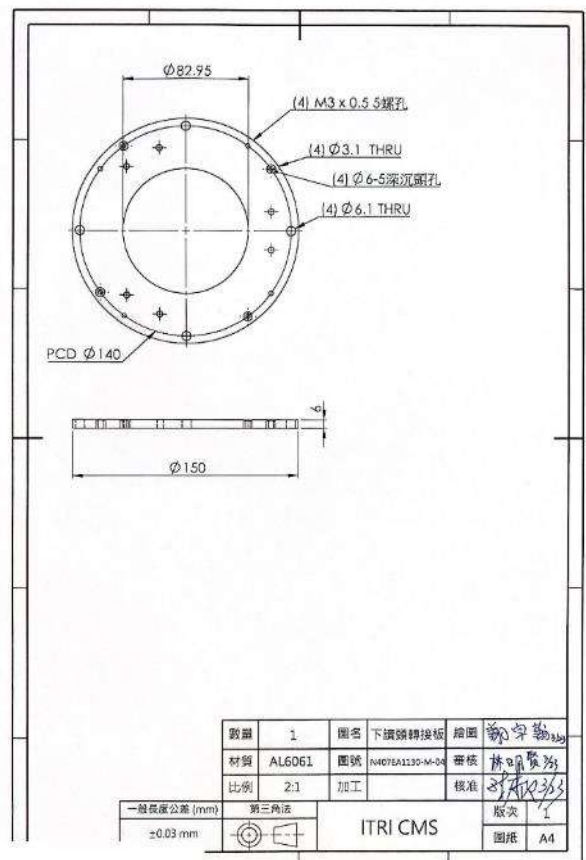
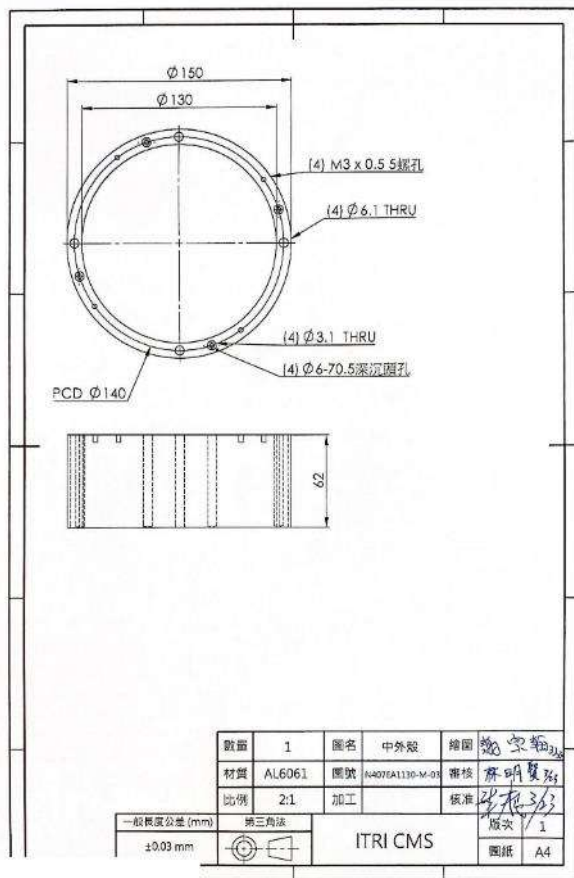
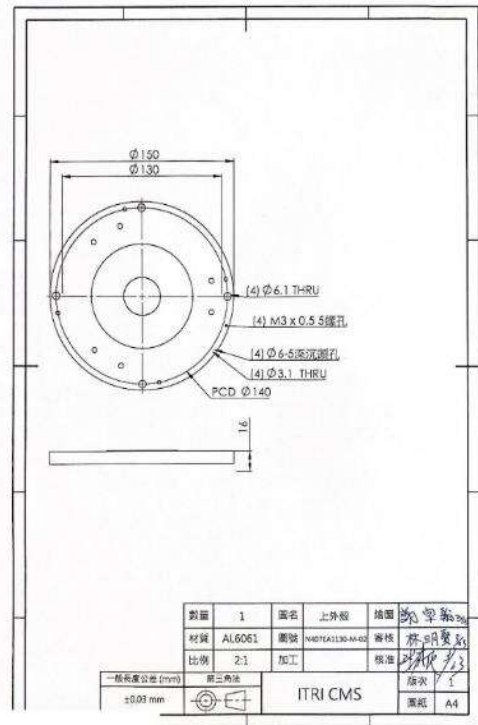
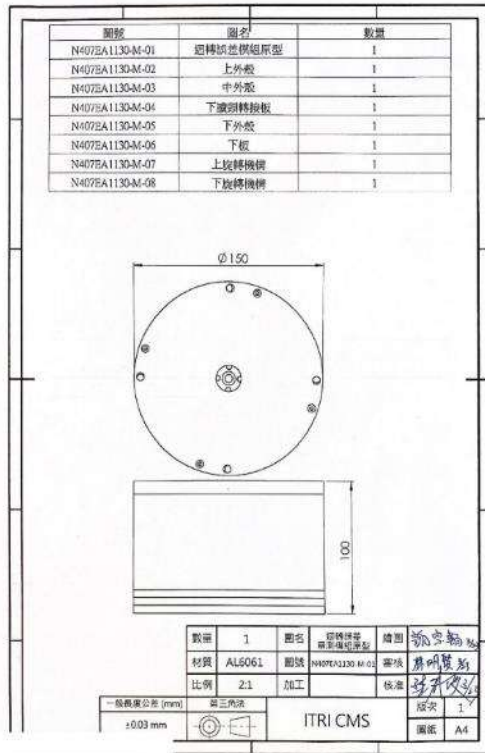


圖 1-3-1 BBT40 內藏式主軸結構圖



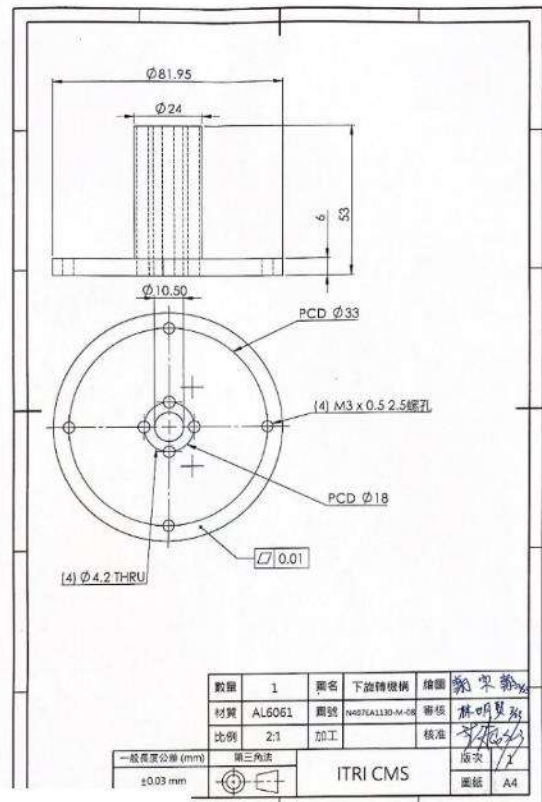
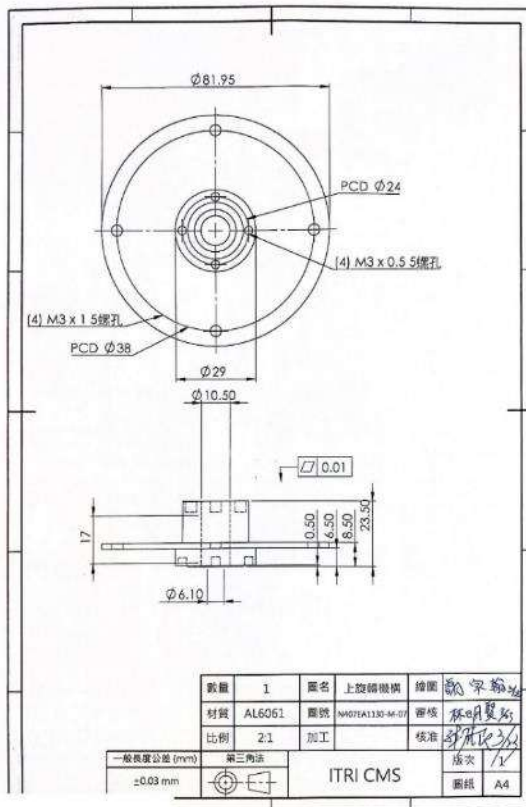
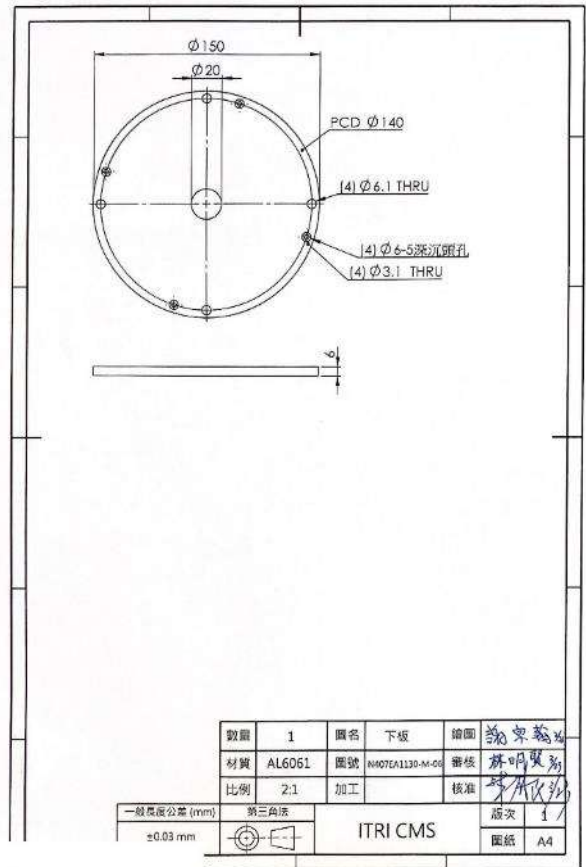
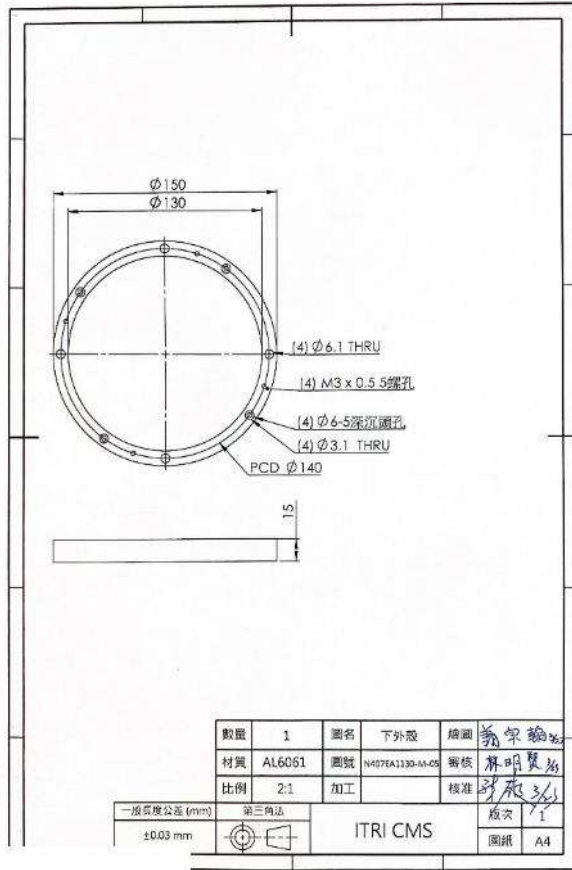


圖 1-3-2 主軸迴轉誤差量測模組原型設計圖

由迴轉誤差量測模組原型設計尺寸，可初步估算量測模組解析度(查核點 A3-4)，解析度受量測解析度及尺寸規格影響，量測解析度由環形編碼器刻線數(刻線數: 256)及電子細分割(分割數:16384)，由此估算量測解析度為 0.3"，由環形編碼器直徑規格為 81.95 mm，可估算長度及角度轉換比例為 0.2 $\mu\text{m}/''$ ，因此分析線性迴轉誤差解析度為 0.1 μm ，可滿足線性小於 0.2 μm 計畫要求(查核點 A3-4)；由圖 1-3-2 可知，兩顆環形編碼器間距為 80 mm，此間距規格設計符合 ISO 230-7 國際規範，以目前國產主軸通孔直徑約為 120 mm 以下，依據 ISO 230-7 國際規範^[1-3-1]要求兩顆環形編碼器最小間距為 80 mm，由環形編碼器直徑規格，可計算兩顆讀頭對角線距離為 114.52 mm，由線性迴轉誤差分析解析度及對角線距離，可計算分析角度迴轉誤差解析度為 0.1"，可滿足角度小於 0.2"計畫要求(查核點 A3-4)，此計算為利用設計尺寸估算量測模組解析度，查核點 A3-4 查核方式會以實際量測結果進行評估。

(2) 完成主軸迴轉誤差量測模組原型製作(環形編碼器: 2 顆、讀頭: 6 個)(查核點編號 A3-2)

完成主軸迴轉誤差量測模組原型製作，如圖 1-3-3 所示，包含二顆環形編碼器及六個讀頭，分成兩組，第一組一顆環形編碼器及三個讀頭(廠牌: Renishaw)，安裝於馬達上方，三個讀頭安裝角度位置為 0°、120°及 240°，以等角度間距排列，第二組一顆環形編碼器及三個讀頭(廠牌: Heidenhain)，安裝於第二顆環形編碼器上方，三個讀頭安裝角度位置為 60°、180°及 300°，依據組裝流程圖將兩顆環形編碼器及六個讀頭安裝於馬達上，如圖 1-3-4 所示。

首先，需將環形編碼器安裝於馬達上，調整徑向位置，表示馬達與環形編碼器兩者之間中心位置，根據環形編碼器原廠規格要求，Renishaw 環形編碼器徑向位置調整小於 30 μm ，Heidenhain 環形編碼器徑向位置則為小於 50 μm ，接著安裝六個讀頭，馬達旋轉 1 圈，六個讀頭皆能讀取量測訊號，因兩個廠牌讀頭的輸出介面不同，無可直接使用的 DAQ 模組。因此必須將各讀頭的輸出訊號線分離出來接至 NI 的 DAQ 卡，再將 DAQ 卡接至 NI 的控制箱中，最後由控制箱將訊號輸入到 NB 端中的演算法進行後端資料分析。根據環形編碼器原廠規格要求，二顆環形編碼器之器差值(讀頭量測值-旋轉角度)皆小於 $\pm 5''$ ，六個讀頭量測結果如圖 1-3-5，皆符合原廠規格要求。

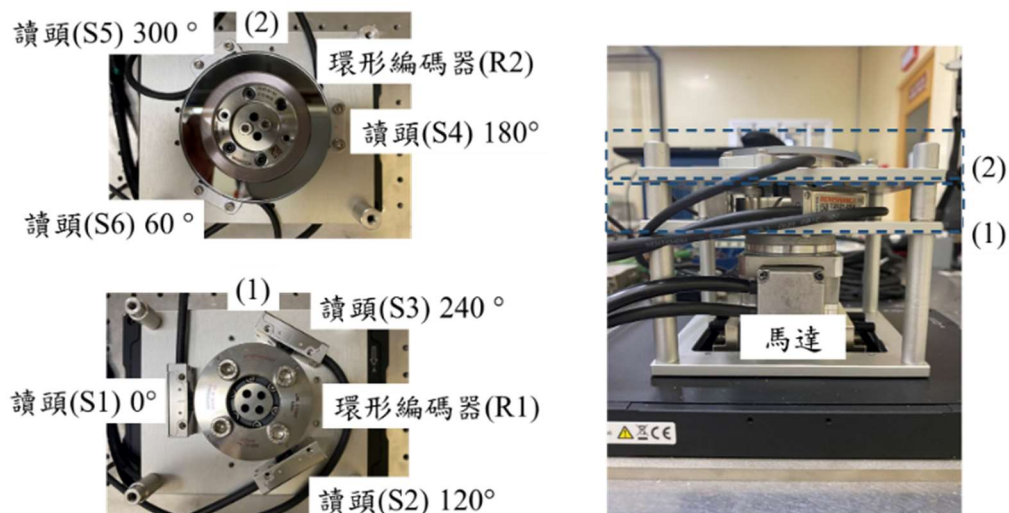


圖 1-3-3 主軸迴轉誤差量測模組原型製作

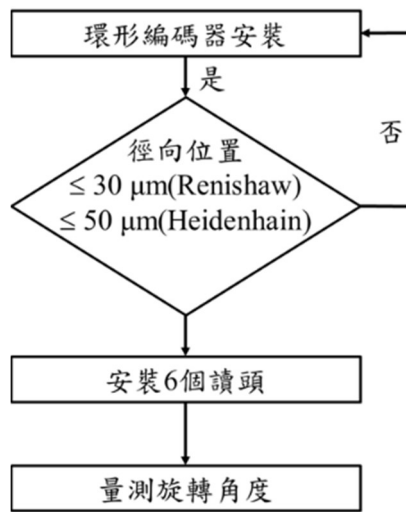


圖 1-3-4 組裝流程圖

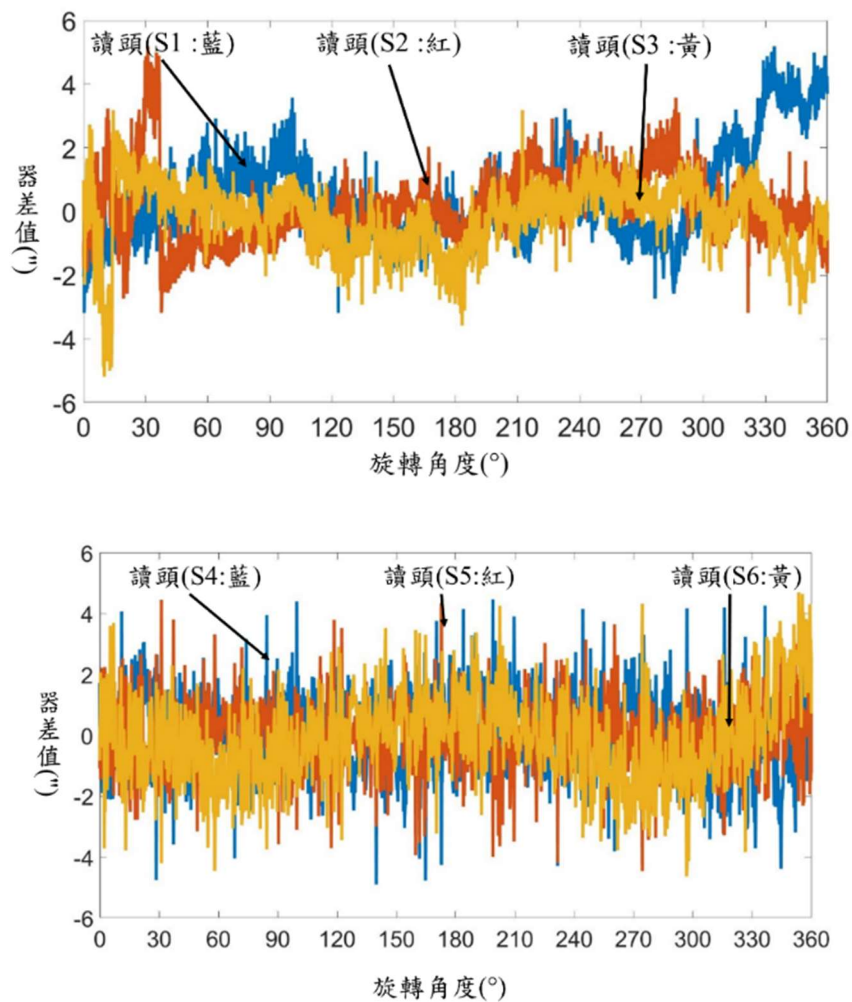


圖 1-3-5 量測結果圖

下半年使用的 AMO 讀頭有其對應的 Heidenhain DAQ 模組，讀頭訊號可直接由 Heidenhain DAQ 模組輸入到 NB 端進行後端資料分析。

(3) 完成主軸迴轉誤差分析(5項迴轉誤差(角度: E_A, E_B 、線性: E_X, E_Y, E_Z) (查核點編號 A3-3))

6個讀頭的訊號透過NIDAQ結合Labview將角度量測值彙整成.txt檔，.txt檔匯入Matlab進行數據處理，如：得到角度器差值以及將不同角度位置的角度器差值平移到同一個起始點(0°)，得到線性及角度迴轉誤差，結果如下兩點。

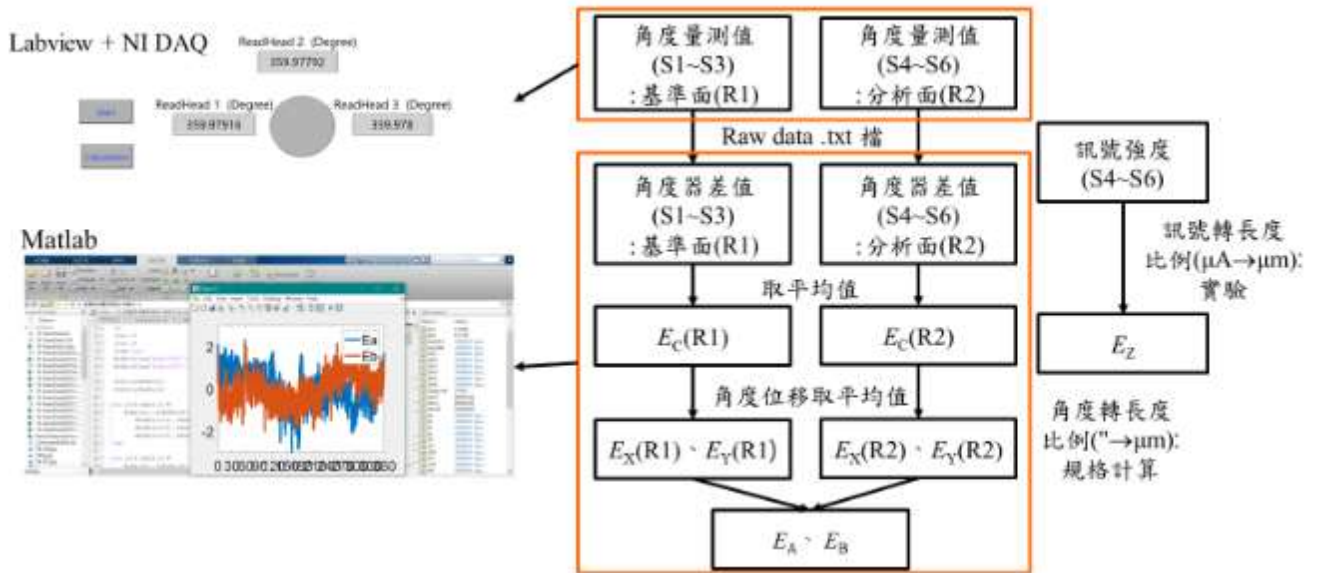


圖 1-3- 6 主軸迴轉誤差分析演算流程圖

1. 迴轉誤差量測模組原型含 2 個環形編碼器及 6 個讀頭組裝成基準面及分析面，各含 1 個環形編碼器及 3 個讀頭。將基準面及分析面的角度量測值代入演算法中，得到 4 項迴轉誤差(角度: E_A, E_B 、線性: E_X, E_Y)，結果如下圖。

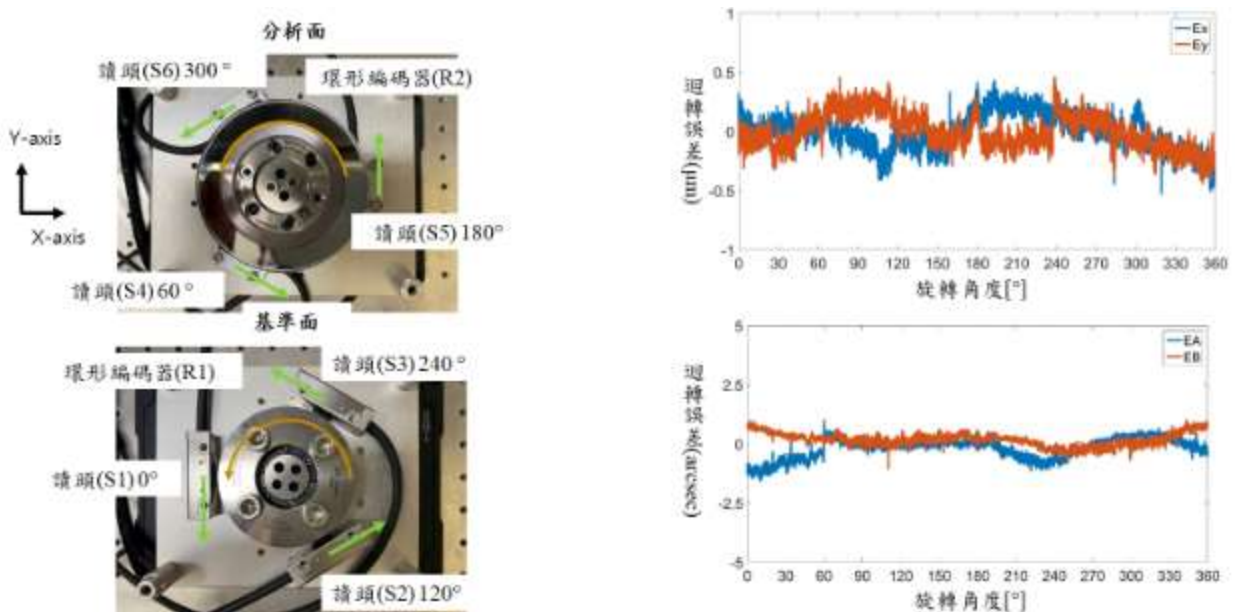


圖 1-3- 7 主軸迴轉誤差 E_A, E_B 及 E_X, E_Y 分析結果

2. 分析面讀頭訊號強度轉長度比例得到迴轉誤差 E_z ，結果如下圖。

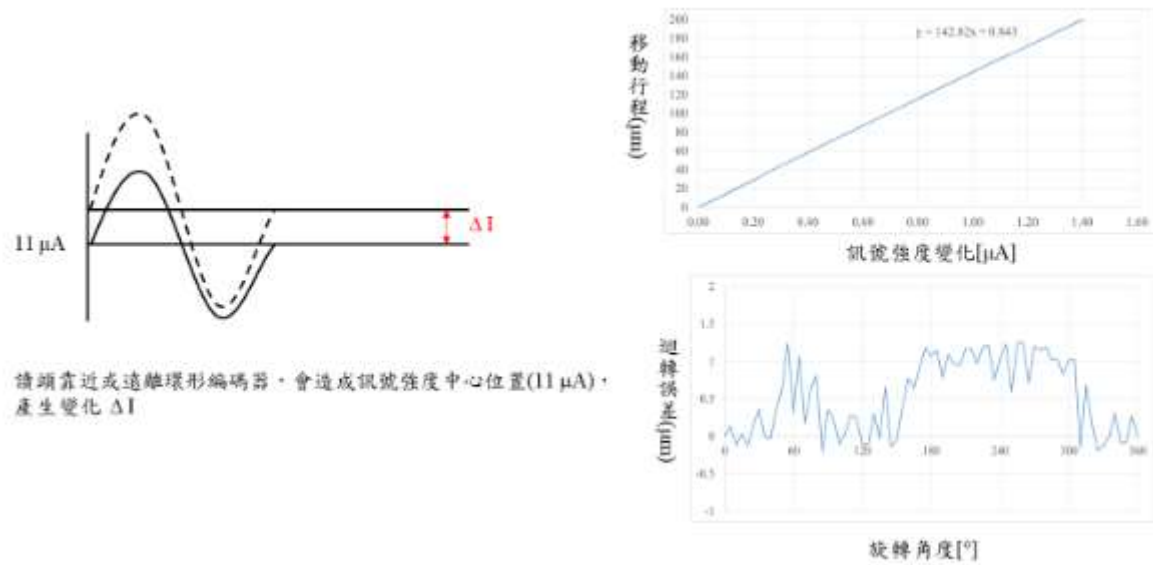


圖 1-3-8 主軸迴轉誤差 E_z 分析結果

如上佐證資料，透過迴轉誤差量測模組原型配合演算法，完成主軸迴轉誤差分析: 5 項迴轉誤差(角度: E_A, E_B 、線性: E_X, E_Y, E_Z)

(4) 完成主軸迴轉誤差量測模組原型(解析度: 角度 $\leq 0.1''$ 、線性 $\leq 0.2 \mu m$) (查核點編號 A3-4)

透過驅動主軸迴轉誤差量測模組原型下方的 Piezo 位移平台，驗證線性解析度，該位移平台解析度可達奈米等級。Piezo 位移平台移動時，模組中的 6 個讀頭會跟著移動，驅動 Piezo 位移平台以 $0.08 \mu m$ 的步階移動，記錄與移動平台 y 軸平行的 Reinshaw 讀頭角度值，量測示意圖如下。

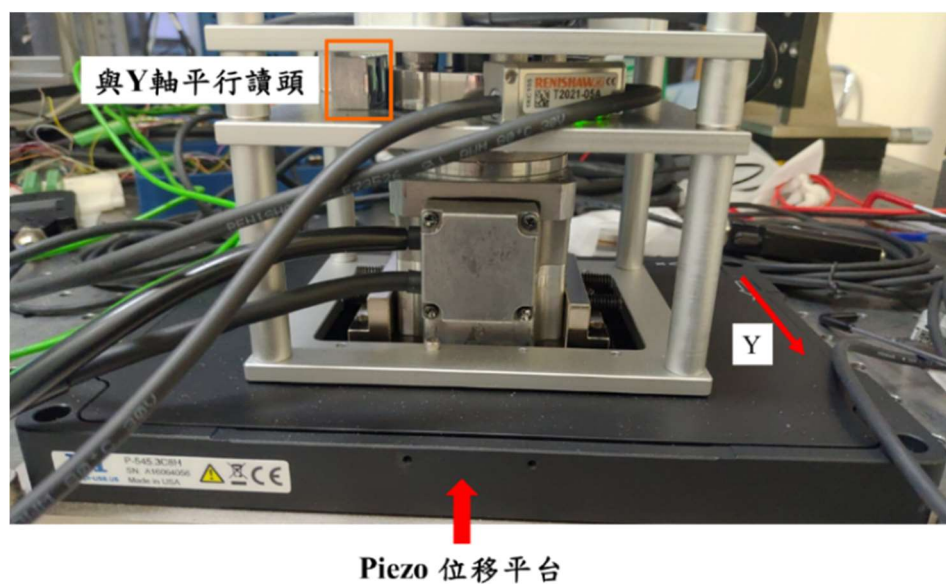


圖 1-3-9 Piezo 位移平台與讀頭量測示意圖

結果如下圖，Reinshaw 讀頭角度讀值每個步階的差值皆為 0.00016° ，將 0.00016° 轉換為角秒，並乘上由 Reinshaw 環形編碼器規格計算出長度及角度轉換比例，可得到線性位移量。

$$\text{長度及角度轉換比例: } \frac{\text{圓周長}}{\text{一圈角度}(")} = \frac{57400(\mu\text{m}) \times \pi}{1296000(")} = 0.14 \mu\text{m}/"$$

$$\begin{aligned} 0.00016^\circ \times 3600 \times \text{長度及角度轉換比例} &= 0.00016^\circ \times 3600 \times 0.14(\mu\text{m}/") \\ &= 0.0806 \mu\text{m} \end{aligned}$$

由上述可驗證主軸迴轉誤差量測模組原型線性解析度約為 $0.08 \mu\text{m} < 0.2 \mu\text{m}$ (符合計畫目標)。

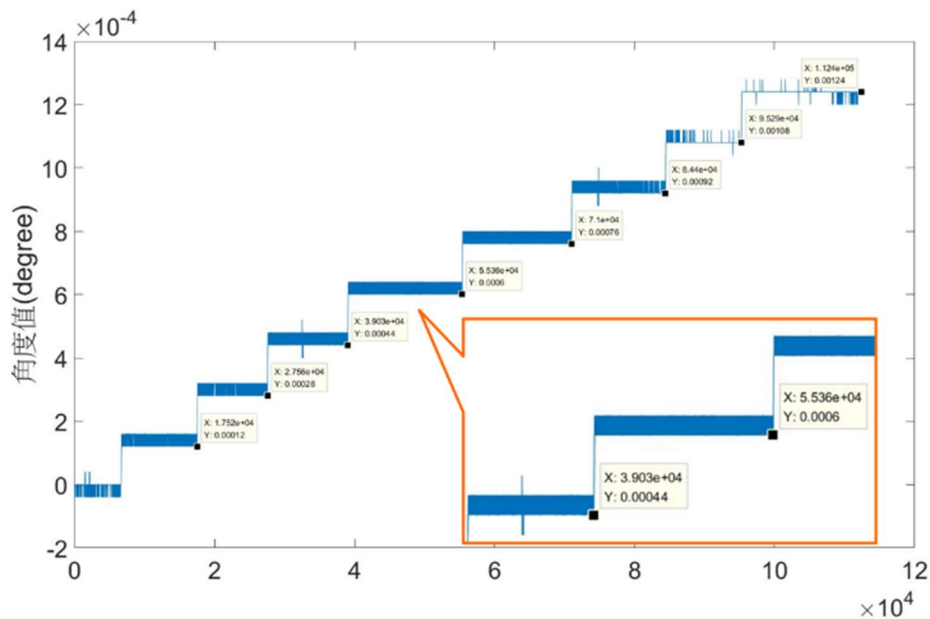


圖 1-3- 10 Reinshaw 讀頭角度讀值

角度迴轉誤差計算方式為線性迴轉誤差與對角線距離的夾角，即為線性解析度除以對角線距離的反正弦函數，得到角度解析度為 $0.083'' < 0.1''$ (符合計畫目標)。

$$\text{角度解析度: } \sin^{-1}\left(\frac{\text{線性解析度}(\mu\text{m})}{\text{對角線距離}(\mu\text{m})}\right) \times 3600 = \sin^{-1}\left(\frac{0.08(\mu\text{m})}{198000(\mu\text{m})}\right) \times 3600 = 0.083''$$

驗證完主軸迴轉誤差量測模組原型後，為了使模組更容易安裝至主軸廠商的主軸上，製作了使用 AMO 環形編碼器與讀頭的量測模組。此量測模組使用 AMO 環形編碼器(刻線數: 256、直徑: 81.95 mm)、讀頭，搭配 Heidenhain 資料處理器(電子細分割: 16384)將讀頭的角度量測值透過乙太網路介面傳輸至 PC 進行後續迴轉誤差分析。

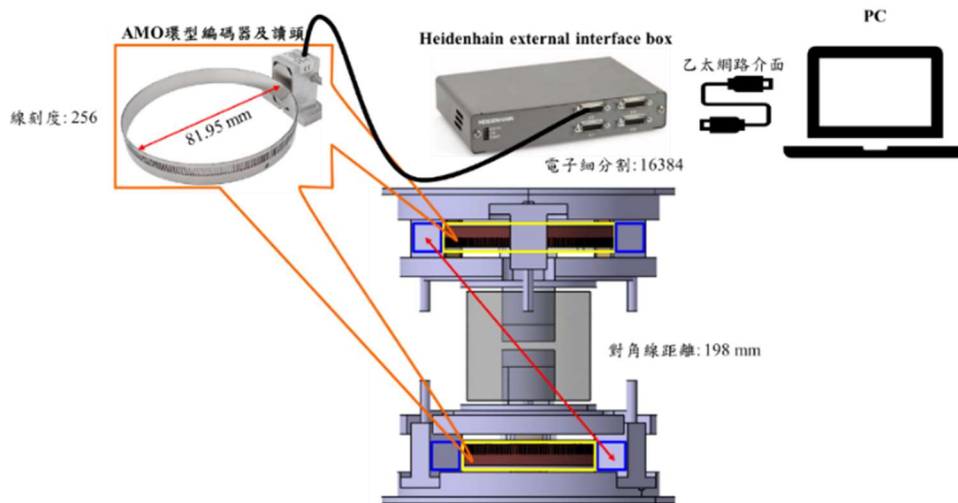


圖 1-3- 11 AMO 量測模組

根據所使用的元件規格進行解析度計算。首先為量測解析度，即讀頭的角度量測訊號經過資料處理器電子細分割後的角度量測值解析度，得到量測解析度為 0.31"。接著，PC 端會對角度量測值進行處理，分析出線性及角度迴轉誤差。線性解析度需將量測解析度進行單位轉換，乘上長度及角度轉換比例(單位角秒多少 μm)，得到線性解析度為 $0.062 \mu\text{m} < 0.2 \mu\text{m}$ (符合計畫目標)。最後，角度迴轉誤差計算方式為線性迴轉誤差與對角線距離的夾角，即為線性解析度除以對角線距離的反正弦，得到角度解析度為 $0.065" < 0.1"$ (符合計畫目標)。使用 AMO 的量測模組規格也可符合計畫目標，AMO 量測模組實體如圖 1-3-12。

$$\text{量測解析度: } \frac{\text{一圈角度}(\text{''})}{\text{環形編碼器刻線數} \times \text{電子細分割}} = \frac{1296000(\text{''})}{256 \times 16384} = 0.31''$$

$$\text{長度及角度轉換比例: } \frac{\text{圓周長}}{\text{一圈角度}(\text{''})} = \frac{81950(\mu\text{m}) \times \pi}{1296000(\text{''})} = 0.2 \mu\text{m}/''$$

$$\text{線性解析度: 量測解析度} \times \text{長度及角度轉換比例} = 0.31(\text{''}) \times 0.2(\mu\text{m}/'') = 0.062 \mu\text{m}$$

$$\text{角度解析度: } \sin^{-1}\left(\frac{\text{線性解析度}(\mu\text{m})}{\text{對角線距離}(\mu\text{m})}\right) \times 3600 = \sin^{-1}\left(\frac{0.062(\mu\text{m})}{198000(\mu\text{m})}\right) \times 3600 = 0.065''$$

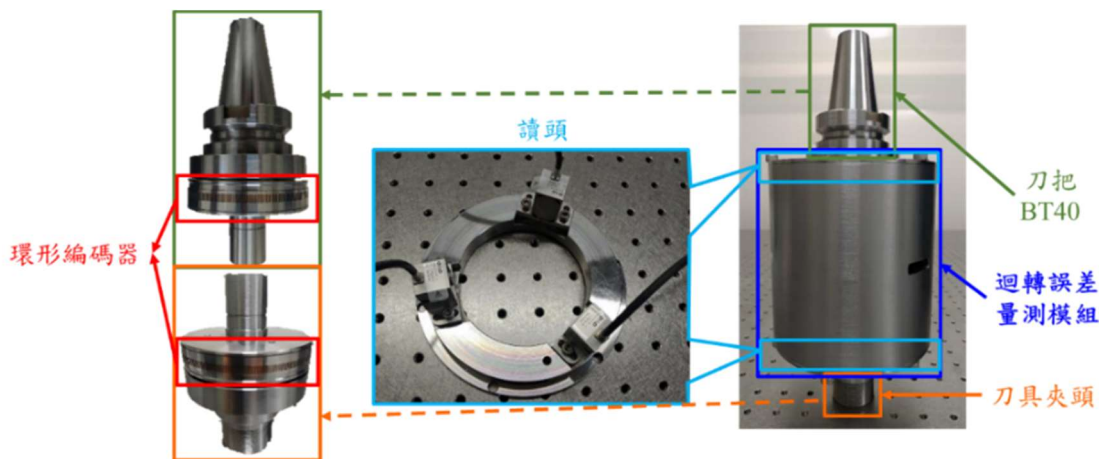


圖 1-3- 12 AMO 量測模組實體

【突破瓶頸】

本子計畫於執行成果中，主要突破瓶頸為開發主軸線上量測技術。包含設計及製作主軸迴轉誤差量測模組原型，相關原理參考文獻^[1-3-1]，設計規格需求參考國際規範 ISO 230-7^[1-3-2]，實現現場量測迴轉誤差(In-situ measurement)，可分析 5 項迴轉誤差(角度: E_A, E_B 、線性: E_X, E_Y, E_Z)，且解析度角度 $\leq 0.1''$ 、線性 $\leq 0.2 \mu\text{m}$ ，可作為主軸狀態監測及品質評估技術。例如當主軸迴轉誤差量測值出現異常時，可快速停機，保護主軸避免損壞，並可長期蒐集主軸迴轉誤差數據，判斷主軸狀態，讓主軸使用者了解主軸品質評估趨勢。與商用儀器應用於旋轉軸或主軸迴轉誤差量測，比較表整理於表 1-3-1，目前國內廠商大多使用 LION 主軸迴轉精度分析儀(Spindle Error Analyzer)，僅能離線量測(off-line measurement)情況下進行主軸迴轉誤差量測；另外，關於旋轉軸迴轉誤差量測，國內廠商使用 Renishaw 開發旋轉軸校正儀(XR-20W)為大宗，其他商用儀器，包含德日工具機大廠 DMG MORI 開發 SET-HD 100，或德國感測器大廠 HEIDENHAIN 開發 RVM 4000，上述 3 項商用量測設備，僅能於離線量測(off-line measurement)情況下，進行旋轉軸角度定位迴轉誤差量測。

表 1-3-1 目前市售之主軸或旋轉軸迴轉誤差量測設備與功能

量測技術	主軸迴轉誤差量測模組原型 (子項計畫發展技術)	Spindle Error Analyzer (LION) ^[1-3-3]	XR-20W (Renishaw)	SET-HD 100 (DMG MORI)	RVM 4000 (HEIDENHAIN)
量測對象	主軸		旋轉軸		
使用情境	現場量測(In-situ measurement)	離線量測(off-line)			
迴轉誤差項目	5 項(角度: E_A, E_B 、線性: E_X, E_Y, E_Z)	5 項(角度: E_A, E_B 、線性: E_X, E_Y, E_Z)	1 項(角度: E_C)	1 項(角度: E_C)	1 項(角度: E_C)
儀器規格	解析度: 角度 $\leq 0.1''$ 、線性 $\leq 0.2 \mu\text{m}$	準確度: $\leq 1 \mu\text{m}$	準確度: $\pm 1''$	準確度: $\pm 0.1''$	準確度: $\pm 1''$

【本年度結論】

完成主軸迴轉誤差量測模組原型設計及製作。

1. 主軸迴轉誤差量測模組原型設計: 量測模組原型設計尺寸規格直徑值為 150 mm 及高度值為 100 mm，安裝 2 顆環形編碼器(R1~R2)及 6 個讀頭。確認符合計畫規格。
2. 主軸迴轉誤差量測模組原型製作: 包含二顆環形編碼器及六個讀頭(Renishaw 及 Heidenhain)。兩顆環形編碼器上下排列，環形編碼器安裝與馬達徑向位置小於 50 μm (Heidenhain)及 30 μm (Renishaw)。六個讀頭安裝角度位置為 0° 、 60° 、 120° 、 180° 、 240° 及 300° 。量測模組實際量測角度，器差值(讀頭量測值-旋轉角度)皆小於 $\pm 5''$ ，皆符合原廠規格要求。

3. 主軸迴轉誤差分析(5 項迴轉誤差(角度: E_A, E_B 、線性: E_X, E_Y, E_Z): 將主軸迴轉誤差量測模組得到的角度量測值，結合 Labview 及 Matlab 分析出 5 項迴轉誤差(角度: E_A, E_B 、線性: E_X, E_Y, E_Z)。
4. 主軸迴轉誤差量測模組: 使用 AMO 的環形編碼器、讀頭，搭配 Heidenhain 資料處理器，分析 5 項迴轉誤差，解析度角度 $0.065'' \leq 0.1''$ 、線性解析度 $0.062 \mu\text{m} \leq 0.2 \mu\text{m}$ 。

本年度完成主軸迴轉誤差量測模組。模組安裝於刀把與刀具間實現主軸迴轉誤差現場量測，分析 5 項迴轉誤差(角度: E_A, E_B 、線性: E_X, E_Y, E_Z)，且角度解析度 $\leq 0.1''$ ，線性解析度 $\leq 0.2 \mu\text{m}$ (符合目標)。並與普森精密主軸合作，將主軸迴轉誤差模組於現場安裝、測試，在其跑合平台上，以不同轉速分析出 5 項迴轉誤差(角度: E_A, E_B 、線性: E_X, E_Y, E_Z)，滿足現場量測迴轉誤差(In-situ measurement)需求。

二、工具機品質長效量測與評估分項

本分項全程計畫的目標為完善品質長效量測方法，建立幾何誤差量測及組裝公差智慧化監測關鍵技術，降低量測所引起的組裝誤差，改善組裝後量測精度，給予使用端有便利之操作程序，以快速獲得機台關鍵幾何誤差參數來瞭解機台健康狀態，達品質長效量測與評估之目的。112 年度的分項計畫目標主要是建立工具機組裝品質智慧分析與精度補償能力以及執行整機空間精度監測策略技術開發，建立五軸工具機快速查核件之線上量測能力。

工具機組裝品質智慧分析與精度補償，以生產線性軸之組裝工序為出發點，透過各零件尺寸/組裝誤差於裝配過程中之誤差傳遞和疊加，建立線性軸組裝品質模型，提供至少 4 項組裝品質參數及能分析 6 項幾何誤差，依影響程度排列組裝品質參數，並達成模型判定準確度 $R^2 \geq 0.7$ 之目標^[2-1-1]，統計各項誤差源對整體綜合誤差之貢獻程度，提供工具機產業在裝配過程進行精度控制調整及品質提升與穩定性。

整機空間精度監測策略於 112 年度參考 CNS 14637-2 (ISO 230-2: Test code for machine tools — Part 2: Determination of accuracy and repeatability of positioning of numerically controlled axes) 工具機國際標準建立工具機使用之查核件量測技術^[2-2-1]，滿足工具機業界的量測需求。參考目前國產中行程五軸工具機線上量測範圍，本技術量測範圍為工作盤面直徑 $\leq 660 \text{ mm}$ 之五軸工具機，幾何誤差項為兩線性軸之 3 項幾何誤差，幾何誤差量測重複性 $\leq 5 \mu\text{m}$ 。各子項之年度執行查核點說明如下：

查核點編號	內容說明	預定完成日期	實際完成日期	差異說明
工具機組裝品質智慧分析與精度補償				
B1-1	<ul style="list-style-type: none"> • 完成線性軸組裝品質數學模型推導，至少含 4 項組裝品質參數之輸入項，及可輸出線性軸 6 項次幾何誤差之結果 	112.03.31	112.03.31	無差異

B1-2	• 完成關鍵組裝品質參數分析技術，並產出演算法開發程式一套，依輸入至少 4 項組裝品質參數進行分析，並依影響程度進行排列	112.06.30	112.06.30	無差異
B1-3	• 完成組裝品質參數補償效果評估，改變關鍵組裝品質參數後可提升線性軸組裝量測精度 > 10 %	112.09.30	112.09.30	無差異
B1-4	• 完成場域試驗一處，模型判定係數 $R^2 \geq 0.7$	112.11.30	112.11.30	無差異
整機空間精度監測策略				
B2-1	• 完成快速查核件硬體及架設治具設計，能滿足工具機工作臺盤面直徑 ≤ 660 mm	112.03.31	112.03.31	無差異
B2-2	• 完成查核件量測技術-誤差分析之演算法開發，可分析出 3 項幾何誤差	112.06.30	112.06.30	無差異
B2-3	• 建立整機空間精度監測策略，含量測程序及量測路徑規劃評估報告 1 份	112.09.30	112.09.30	無差異
B2-4	• 完成五軸工具機快速查核件實際量測及場域試驗一處，幾何誤差分析結果之重複性 $\leq 5 \mu\text{m}$	112.11.30	112.11.30	無差異

1. 工具機組裝品質智慧分析與精度補償

為協助工具機製造商提升工具機之整機精度品質，並確保產線上組裝之品質穩定性，本子計畫開發工具機組裝品質智慧分析技術，透過雅可比旋量理論模型的坐標系轉換和利用小變形量之特性，將其應用於工具機組裝品質分析(包含訂定允收公差範圍、關鍵公差參數影響排列和精度補償策略)。目前的推廣規劃為幫助台中精機建立工具機組裝品質分析模組，並結合廠商內部的製造執行系統(MES)，提供工具機製造商在機台設計端之允收公差訂定，及在組裝產線中之關鍵公差參數判定，藉由前端在工具機之公差設計和中端在生產線之關鍵公差參數影響排列，提升工具機整機精度品質，也期望可在全期計畫執行過程中，可透過提升單線性軸的靜態組裝精度品質進而提升多軸同動測試的精度。本年度計畫目標如下：

2. 線性軸組裝品質模組研發

- 建立線性軸組裝品質數學模型
- 分析線性軸 6 項幾何誤差
- 依影響程度排列關鍵組裝品質參數
- 預測模型判定係數 $R^2 > 0.7$

3. 線性軸精度補償技術

- 改善零組件組裝精度提升 > 10 %

預計於本年度計畫結案時完成工具機組裝品質智慧分析與精度補償技術開發，應用於工具機製造商於組裝產線及設計開發端之作業，達成零組件組裝精度提升 > 10 %和模型判定係數 $R^2 > 0.7$ ，滿足國內工具機業者於製造上之整機精度提升。

【執行成果】

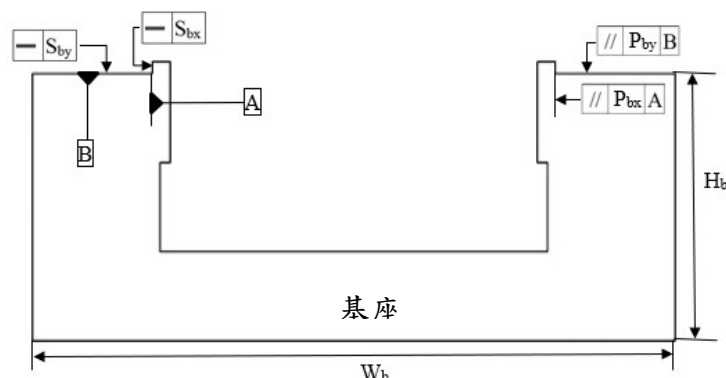
本年度計畫著重於滿足工具機製造商對提升整機空間精度之需求，建立工具機組裝品質智慧分析與精度補償技術。年度成果將包含訂定組裝允收公差範圍、關鍵組裝公差參數影響排列和精度補償策略。藉由公差訂定和關鍵組裝公差搜尋，實現工具機精度品質之提升目的。整年度完成之查核點及執行成果如下：

(1) 完成線性軸組裝品質數學模型推導，至少含 4 項組裝品質參數之輸入項，及可輸出線性軸 6 項幾何誤差之結果 (查核點編號 B1-1)

以台中精機五軸加工機之機種為例，建立線性軸組裝品質數學模型。藉由線性軸的組裝流程，利用雅可比旋量理論模擬各零件之公差經組裝後對整體精度之影響。雅可比旋量理論建模是一種可分析三維結構之幾何公差方法，此理論主要藉由結合雅可比矩陣和小位移旋量所構成，常被用於模擬組裝品之品質分析。其中，雅可比矩陣為局部參考系相對於全局參考系的方向和位置；小位移旋量是由三個旋轉分量和三個平移分量所組成的向量，其向量用於表示相對於標稱位置的方向和位置。依據組裝標準程序書確認線性軸各部位的組裝品質公差(如圖 2-1-1)，透過已知的 10 項組裝品質公差(包含基座、滑軌和滑塊之間的真直度與平行度)，如表 2-1-1 所示，完成線性軸組裝品質模型並推導出線性軸的 6 項幾何誤差(3 個線性誤差和 3 個旋轉誤差)。

表 2-1-1 線性軸的 10 項組裝品質參數

部件	公差項目
基座	主軌真直度 S_{bx}
	主軌真直度 S_{by}
	副軌平行度 P_{bx}
	副軌平行度 P_{by}
主軌	製造真直度 M_1
	x 方向的安裝真直度 S_{1x}
	y 方向的安裝真直度 S_{1y}
副軌	製造真直度 M_1
	x 方向的平行度 P_{2x}
	y 方向的平行度 P_{2y}



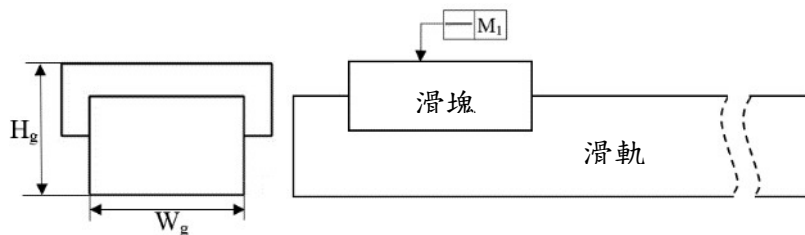


圖 2-1-1 線性軸各部位的組裝品質公差

將線性軸各部位的組裝品質公差代入雅可比旋量理論，繪製組裝公差連接圖，如圖 2-1-2，得到線性軸之雅可比旋量模型，如式 2-1-1 所示。

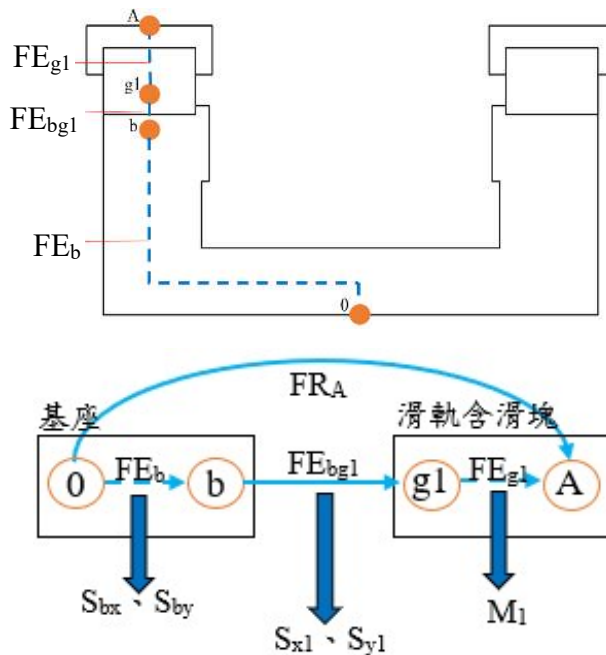


圖 2-1-2 線性軸組裝公差連接圖

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} = [J_b \quad J_{bg1} \quad J_{g1}]_{6 \times 18} \begin{bmatrix} T_b \\ T_{bg1} \\ T_{g1} \end{bmatrix}_{18 \times 1} \quad (2-1-1)$$

式 2-1-1 中， J_i 為各零件之座標轉換矩陣； T_i 為零件公差所造成之誤差向量，其中 $u, v, w, \alpha, \beta, \gamma$ 為線性軸之 6 項幾何誤差(前三項為線性誤差、後三項為旋轉誤差)，如圖 2-1-3。最後利用 Matlab 程式語言進行線性軸組裝品質數學模組編碼，得到輸入 10 項組裝品質公差並計算出 6 項幾何誤差。

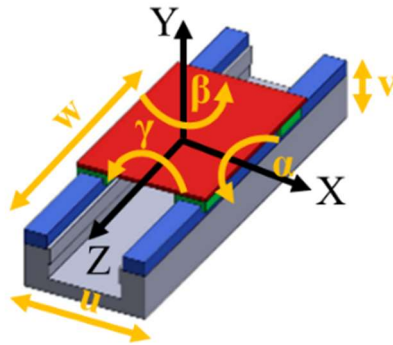


圖 2-1-3 線性軸之 6 項幾何誤差

- (2) 完成關鍵組裝品質參數分析技術，並產出演算法開發程式一套，依輸入至少 4 項組裝品質參數進行分析，並依影響程度進行排列

依據線性軸組裝模型進行分析，計算線性軸 6 項幾何誤差之允收範圍和關鍵組裝品質參數分析。首先，根據 6σ 公差分析法，其加工公差之均值落在 $[-1.96\sigma, +1.96\sigma]$ 區間內約佔 95% 左右(不合格率為 5%)，訂定線性軸組裝過程各公差之常態分佈範圍。藉由蒙地卡羅法進行模擬分析，經由給定表 2-1-1 之各公差值後，計算組裝後線性軸幾何誤差之允收範圍(平均值和標準差)，如表 2-1-2 所示。從表中可以發現在線性誤差中，z 方向之線性誤差 w 的標準差最小，表示在線性軸組裝過程所考慮的公差項對整體在 w 幾何誤差影響為小；在旋轉誤差中，z 方向之旋轉誤差 γ 的標準差最大，表示在線性軸組裝過程所考慮的公差項對整體在 w 幾何誤差影響為大。最後，計算線性軸在整個行程下各項幾何誤差之允收範圍。圖 2-1-4 為 z 方向之旋轉誤差 γ 之允收範圍，其中 Up limit = 平均值 + 3 倍標準差、low limit = 平均值 - 3 倍標準差。

表 2-1-2 在線性軸之 500 mm 位置上，各項幾何誤差之平均值和標準差

線性誤差	u	平均值: -12.8 nm 標準差: 1.47 μm
	v	平均值: -10.4 nm 標準差: 1.51 μm
	w	平均值: -8.42 nm 標準差: 0.405 μm
旋轉誤差	α	平均值: -0.47×10^{-3} arcsec 標準差: 2.14 arcsec
	β	平均值: 9.7×10^{-3} arcsec 標準差: 1.30 arcsec
	γ	平均值: 14.9×10^{-3} arcsec 標準差: 4.46 arcsec

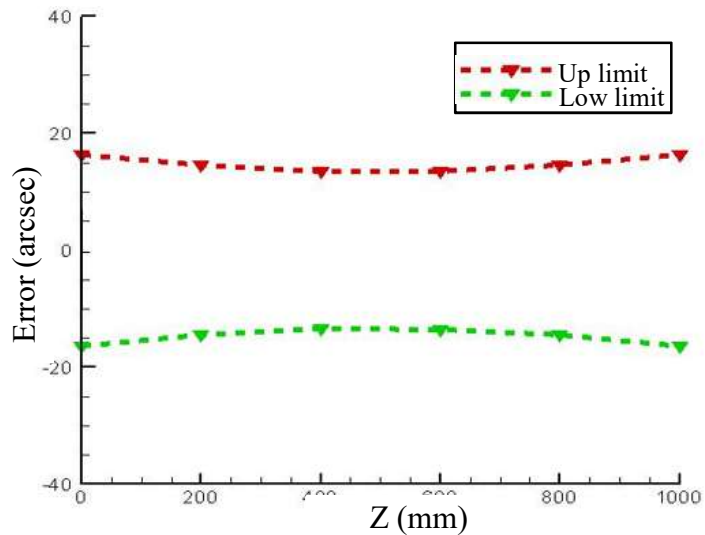


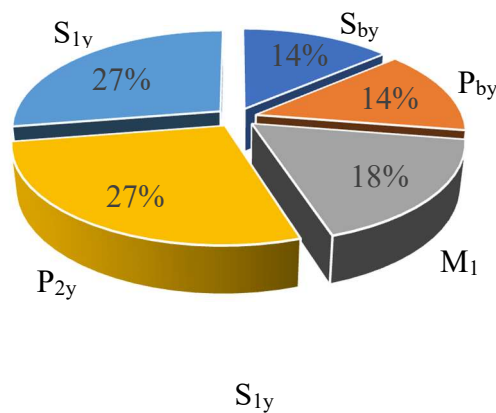
圖 2-1-4 在線性軸整個行程下，z 方向之旋轉誤差 γ 之允收範圍

為了瞭解各項組裝公差對線性軸 6 項幾何誤差之貢獻度，將式 2-1-1 改寫為式 2-1-2，並透過 Root Sum Square (RSS) 方法計算各組裝流程相對幾何誤差之貢獻度，並找出關鍵組裝品質參數，其數學式可表示為式 2-1-3。最後，利用控制變量法找出各項組裝公差對幾何誤差之貢獻度。圖 2-1-5 為各項組裝公差對線性誤差 v 之貢獻度。為了方便現場使用者之操作，將線性軸 6 項幾何誤差之允收範圍和關鍵組裝品質參數分析規劃建立人機操作介面，如圖 2-1-6。

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix}_{FR} = FE_b + FE_{bg1} + FE_{g1} \quad (2-1-2)$$

$$\%PC_{FE_i} = \frac{\sigma_{FE_i}^2}{\sigma_{FR}^2} \quad (2-1-3)$$

其中 $FE_i = J_i \times T_i$ 、 σ 為標準差、 $\%PC$ 為貢獻度百分比。



主軌y方向的安裝真直度	27%
副軌y方向的平行度 P_{2y}	27%
主/副軌之製造真直度 M_1	18%
基座 - 主軌y方向真直度 S_{by}	14%
基座 - 副軌y方向平行度 P_{by}	14%

圖 2-1-5 各組裝公差對線性誤差 v 之貢獻度百分比

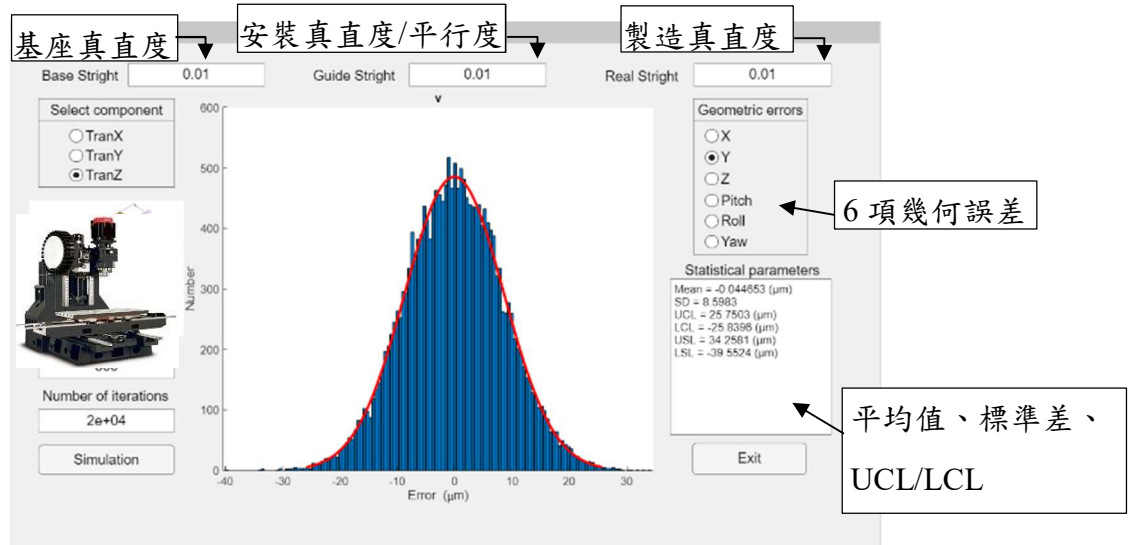


圖 2-1-6 線性軸組裝品質分析之人機操作介面

(3) 完成組裝品質參數補償效果評估，改變關鍵組裝品質參數後可提升線性軸組裝量測精度 > 10 % (查核點編號 B1-3)

組裝品質分析軟體除可給使用者各組裝參數的貢獻度排序功能外，可進一步針對關鍵組裝參數重新評估並提供建議值。本查核點主要確認軟體所輸出之建議值對品質參數補償效果，參考下圖。

首先第一步，於分析軟體中給定降低 10% 線性誤差 v 之數值作為補償效果目標值，組裝品質分析軟體將優先改變關鍵組裝品質參數，並輸出新的建議值(第二步)，於此，可從場域中的組裝歷史數據來判斷建議值是否給定合理(第三步)，從實際組裝場域的歷史資料中確認，真直度與平行度分布約為(0.004 ~ 0.016) mm，而建議值為 0.0083 mm，因此軟體輸出地建議值可落在參考場域的組裝歷史資料分布範圍內，確認評估結果可提升線性軸組裝量測精度達 13%，亦符合 10% 之目標值，詳細內容如下。本執行成果主要可提供工具機廠商的設計端來決定合適的設計公差或製造允收值，及能透過關鍵參數來進行除錯，如更換高一級零件或更換合適之量具，使能從組裝階段即能進行優化。

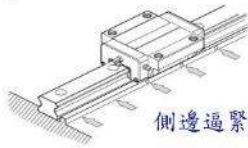
組裝品質精度補償設計分析- 補償效果確認

STEP1: 最終精度檢測項目有 v 跟 α , 假定 v 為改善目標。

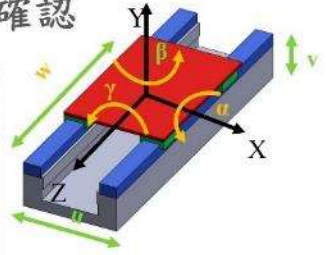
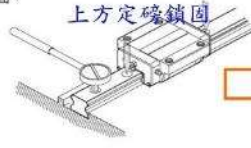


STEP3: 建議值和理性判斷。

4. 使用側向固定螺釘，按順序將滑軌側邊基準面鎖緊來台側邊裝配面，以確定滑軌位置。



5. 使用扭力扳手，以特定扭力按順序鎖緊裝配螺絲，將滑軌底部基準面鎖緊床台底部裝配面。



STEP2: 分析軟體建議線軌組裝之真直度與平行度要求在 0.0083 mm。

- 真直度 0.007 mm ~ 0.013 mm
- 平行度 0.004 mm ~ 0.016 mm

建議值在可實現範圍，可接受!!

Ref: Hiwin 手冊、台中 OR 作業程序書

圖 2-1-7 組裝品質參數補償效果評估

(4) 完成場域試驗一處，模型判定係數 $R^2 \geq 0.7$ (查核點編號 B1-4)

以台中精機五軸加工機做為試驗場域，判定係數之流程如圖 2-1-8 所示，依循組裝程序書的步驟及現場組裝線軌站的量測歷史資訊來進行估算，估算方式乃代入直規及搭配槓桿表所得到之數據，組裝現場所使用量測工具包括直規及槓桿量表(規格 0.002 mm/dev)，而最終檢驗用量具為使用水平儀(規格 0.02 mm/m)，直規搭配槓桿量表所得到的真直度與平行度為確實驗證特別每 200 mm 間隔記錄一個值(圖 2-1-9)，並將所取的值對應位置代入軟體(圖 2-1-10)中，最後與最終檢驗的數值進行比較，結果顯示前後(參圖 2-1-7 Step1)的 R-square 為 0.76，而左右(參圖 2-1-7 Step1)的 R-square 為 0.88，因此模型判定係數可大於 0.7(圖 2-1-11，參考文獻 2-1-1 制定)，滿足工具機業者所想知道的各位點趨勢(中凸或中凹)是否如設計預期。

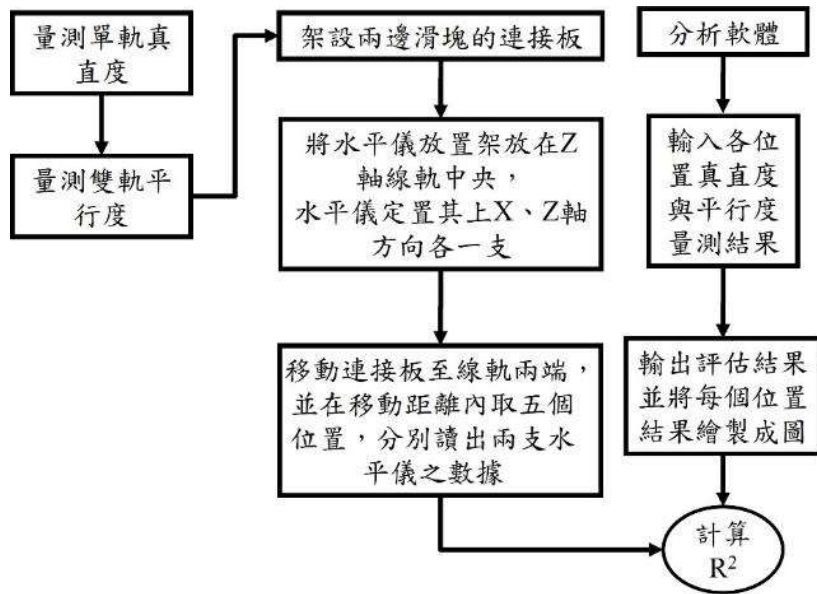


圖 2-1-8 於場域進行模型判定係數之試驗流程圖

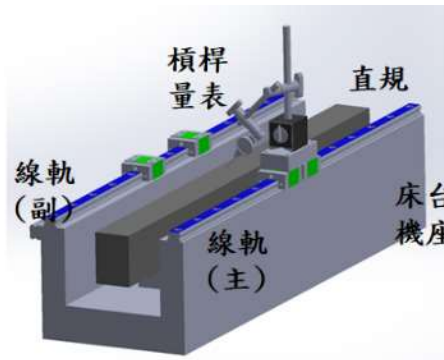


圖 2-1-9 於場域進行主軌與副軌真直度及平行度之量測架構

• 操作步驟

Step 1 組裝品質參數

Step 2 三個線性軸

Step 3 模擬分析位置

Step 4 模擬

設計公差通常是來至於設計者經驗值，無科學方法知道設計公差是否正確

提供功能

製造公差：滑軌滑塊尺寸公差

組裝公差 = 安裝公差

6 項幾何誤差

幾何誤差之理論值 (平均值、標準差...)

基座的真直度和平行度		主軌	副軌
X方向公差:	0.005	製造公差: 0.003	製造公差: 0.003
Y方向公差:	0.005	安裝公差: 0.01	安裝公差: 0.01

幾何誤差

- X方向線性誤差 u
- Y方向線性誤差 v
- Z方向線性誤差 w
- X方向轉動誤差 α
- Y方向線性誤差 β
- Z方向線性誤差 γ

理論參數值

Mean = 0.001687 (μm)
 SD = 1.1736
 UCL = 3.5225 (μm)
 LCL = -3.5191 (μm)
 USL = 4.3931 (μm)
 LSL = -4.3513 (μm)

圖 2-1-10 使用分析軟體之介面

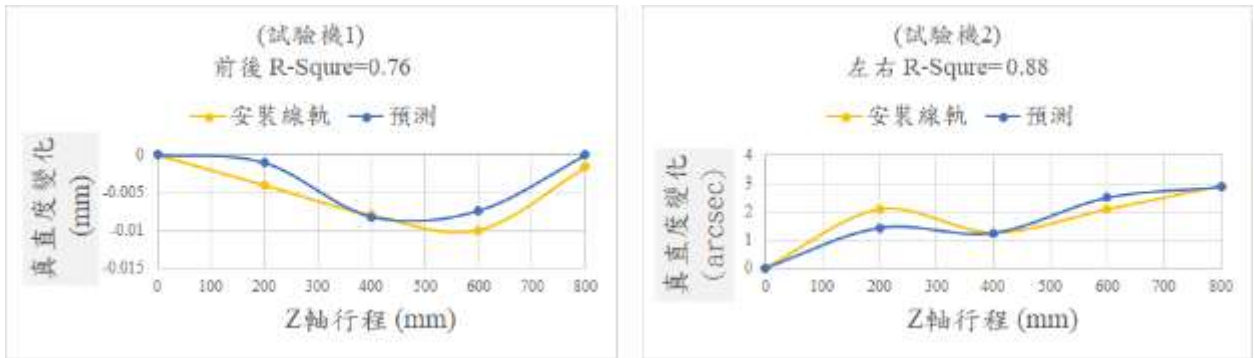


圖 2-1- 11 模型判定係數試驗結果

【突破瓶頸】

隨著機械製造業在各領域之加工產品於高精密化品質需求下，對整機和零組件精度要求相繼提高，且在淨零碳排和數位雙生的趨勢下，如何在設計和製造階段，預測和提升工具機加工精度之技術並利用數位模型和數值分析技術進行優化管理和製造、強化產品的可靠度、可用度及可維修度，是越來越多業者們所高度重視和研究之議題。本計畫為滿足工具機組裝品質智慧分析與精度補償技術需求，開發線性軸組裝品質分析模組，透過雅可比旋量理論推導線性軸組裝品質數學模型和統計方法分析貢獻度並找關鍵組裝品質參數之技術，尤其組裝過程可掌握關鍵組裝參數來進行機台除錯，可協助業者縮短約 30% 以上機台除錯時間(實際場域應用後原 1 個月 4 台，現 3 個月 18 台)，滿足廠商在組裝生產線之品質穩定性和設計開發人員之參考指標，協助國內工具機製造商的競爭力的提升，此模組可使工具機製造商能夠在組裝階段就來使產品改良優化，並藉由組裝品質分析模組提供之理論依據來降低時間和人力資源於現場透過實際機台進行反覆試誤方式釐清問題之成本。

【本年度結論】

上半年度完成線性軸組裝品質分析模組，透過已知的 10 項組裝品質公差(包含基座、滑軌和滑塊之間的真直度與平行度)，完成線性軸組裝品質模型並推導出線性軸的 6 項幾何誤差(3 個線性誤差和 3 個旋轉誤差)，及提供線性軸幾何誤差之允收範圍和關鍵組裝品質參數搜尋技術，並產出演算法開發程式一套，含可依影響程度排列組裝品質參數之功能，滿足工具機製造商在設計端和現場組裝端之需求。

下半年度開發精度補償技術於組裝品質分析中，完成線性軸組裝品質智慧分析與精度補償之模組。此外，與台中精機和奕達精機合作，完成台中精機提供之線軌組裝品質分析，下半年度也針對奕達精機提供之車床機型機台進行組裝品質建模與分析，完成今年度 2 個場域試驗範例，針對線性軸在組裝品質之 6 項幾何誤差和貢獻度分析與精度補償技術評估。

2. 整機空間精度監測策略

五軸工具機搭配 3D 量測測頭已是基本配備，可使五軸工具機同時具備加工製造及線上量測功能，對工具機使用者而言，如何維持線上加工能力為一重要課題，本子項計畫為執行整機空間精度監測策略技術開發，建立五軸工具機快速查核件之線上量測能力，本子計畫於 112 年度參考 CNS 14637-2 (ISO 230-2: Test code for machine tools — Part 2: Determination of

accuracy and repeatability of positioning of numerically controlled axes)工具機國際標準建立工具機使用之查核件量測技術^[2-2-1]，滿足工具機業界的量測需求。參考目前國產中行程五軸工具機線上量測範圍，本技術制定如下，量測範圍為工作盤面直徑 ≤ 660 mm 之五軸工具機，幾何誤差項為兩線性軸之 3 項幾何誤差，幾何誤差量測重複性 $\leq 5 \mu\text{m}$ 。下表為本年度之工作項目及產出指標：

表 2-2-1 計畫工作項目及產出指標

工作項目	說明	產出指標
線性軸用快速查核件-設計與製作	參考 ISO 230-2，以五軸工具機之線性軸為量測對象，設計與製作線性軸用快速查核件。	<ul style="list-style-type: none"> • 適用工作臺盤面直徑: ≤ 660 mm
線性軸用快速查核件-幾何誤差分析	建立工具機線性軸量測技術，量測兩個線性軸中的 3 項幾何誤差，設計快速查核件的量測流程，此技術可提供工具機產業應用於工具機線性軸快速查核使用。	<ul style="list-style-type: none"> • 兩線性軸之 3 項幾何誤差 • 量測程序報告 1 份 • 幾何誤差參數分析結果重複性 $\leq 5 \mu\text{m}$

【執行成果】

(1) 完成快速查核件硬體及架設治具設計，能滿足工具機工作臺盤面直徑 ≤ 660 mm (查核點編號 B2-1)

本年度計畫著重於滿足業界工具機終端使用者對工具機做精度確認，得以快速監測機台狀態，確保工具機的加工精度的需求，參考國際規範 ISO 230-2 發展幾何誤差的量測技術發展快速查核件，如圖 2-2-1 所示，快速查核件尺寸為 $330 \text{ mm} \times 330 \text{ mm}$ ，可滿足工具機工作臺盤面直徑 ≤ 660 mm，快速查核件中有 3 顆標準球，標準球應用於線性軸幾何誤差量測，直徑標稱值為 19.8 mm ，標準球間距標稱值為 300 mm ，其中為了滿足工具機業者溫度環境 (24 ± 6) °C 之需求，本計畫使用鎳鐵合金(Invar)材料作為快速查核件底座及球柱座，鎳鐵合金具低熱膨脹係數，可降低產線環境溫度變異對於快速查核件影響，同時降低量測時的量測不確定度，標準球材料選用氮化矽，快速查核件以球心座標位置作為標準座標位置進行量測及幾何誤差分析。

考慮實際使用情境，球距尺寸受整體剛性設計影響最大，首先進行查核件重力變形分析，因此模擬情境為工具機業者拿取查核件時產生的變形量，模擬條件為將手持左右兩端面視為固定端，評估查核件受自重影響時產生最大的重力變形。進行模擬條件與設定時，首先須使用有限元素分析軟體繪製模型，並對位移量進行網格收斂性測試，然後根據邊界條件和參數設定進行模擬分析，以確保查核件的變形量是否過大而影響後續的重複性實驗結果。

進行有限元素法分析時，查核件底座兩端設定為固定端，考慮重力場影響為 9.81 m/s^2 。在材料參數方面，查核件底座、球柱座及標準球之熱膨脹係數、材料之楊氏模數、普松比、質量密度，如表 2-2-2 所示。據此條件建立之模型，可計算出查核件受重力變形之變化量，模擬結果如圖 2-2-2 所示，最大變形量為 $0.514 \mu\text{m}$ 。

另一模擬情境為將查核件置放於工具機工作台上，查核件受工具機探針碰觸進行量測時所造成的變形量。進行有限元素法分析時，同樣在模型中考慮重力場影響為 9.81 m/s^2 ，在材料參數方面如表 2-2-2 所示，查核件底座的底部設定為固定端，並且於左右兩端中間面模擬壓板對查核件進行固定於工作台面，避免查核件產生滑動，左右兩端面之壓板作用力設定為 20 N(大於查核件自重造成的作用力)。為了評估查核件受探針觸發測力之變形量，參考 CMM 手冊資料，將探針觸發測力設定為 0.04 N 進行評估，分析探針觸發測力對查核件施力造成的變形量，模擬結果如圖 2-2-3 所示，探針側向觸發力造成的變形量為 $0.489 \mu\text{m}$ 。球距變化為重複性其中一項影響因素，小於量測重複性目標 $5 \mu\text{m}$ ，並在確認設計後產出快速查核件設計圖後，已發包製作完成。

綜合以上，經過評估與分析，現已完成查核點編號 B2-1，即完成線性軸用快速查核件-設計與製作，產出設計圖 1 份(圖 2-2-3)，設計之尺寸可滿足直徑 $\leq 660 \text{ mm}$ 的工作臺盤面，並完成設計圖一份，設計圖編號: 快速查核件組合圖 N407EA1220-N-01; 快速查核件底座 N407EA1220-M-01; 球柱座 N407EA1220-M-02; 標準球 N407EA1220- M-03。

表 2-2-2 查核件模擬材料參數

	熱膨脹係數	楊氏模數	普松比	質量密度
底座(Invar)	$1.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	137 GPa	0.28	8.1 g/cm^3
球柱(Invar)	$1.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	137 GPa	0.28	8.1 g/cm^3
標準球(氮化矽)	$3.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$	300 GPa	0.26	3.2 g/cm^3

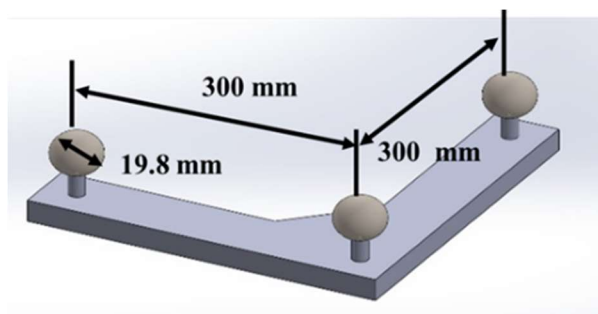


圖 2-2-1 快速查核件硬體設計示意圖

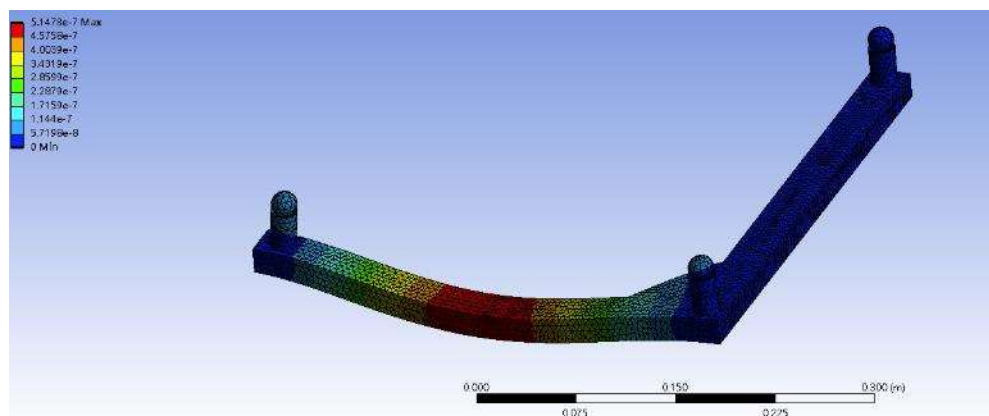


圖 2-2-2 快速查核件兩端施力(4 kg 自重)情況下的變形量模擬結果(模擬操作人員取用與夾持)

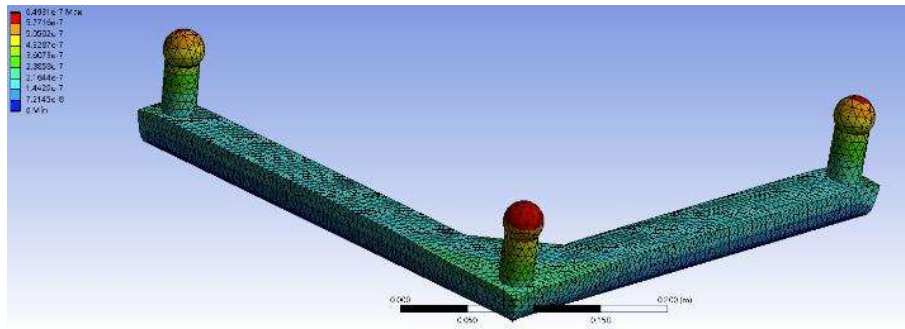


圖 2-2-3 快速查核件受針觸發測力施力(0.04 N)的變形量模擬結果

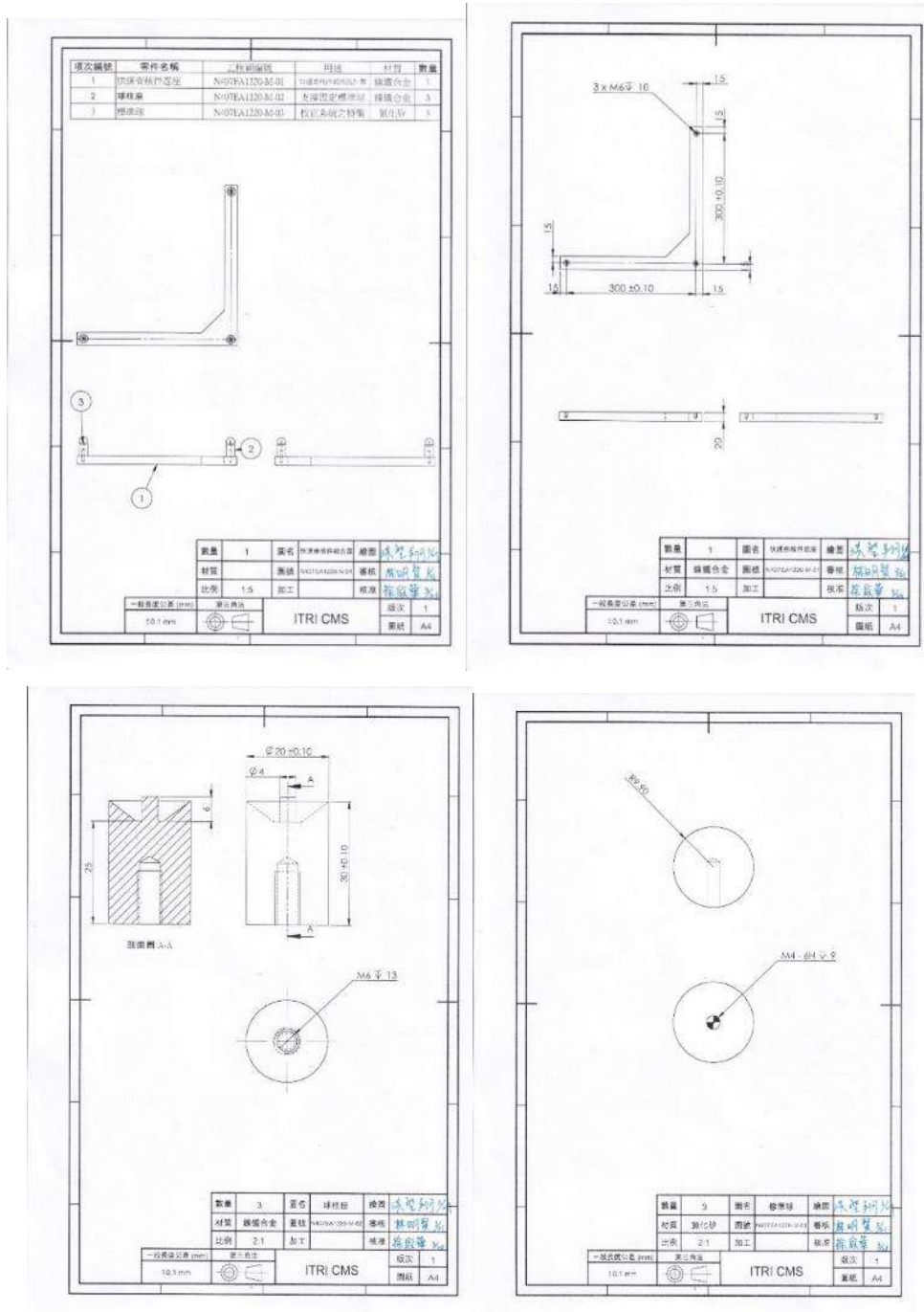


圖 2-2-4 快速查核件設計圖

(2) 完成查核件量測技術-誤差分析之演算法開發，可分析出 3 項幾何誤差 (查核點編號 B2-2)

本計畫執行整機空間精度監測策略技術開發，利用工具機上的刀具交換系統，將刀具置換為 3D 量測測頭後，可量測快速查核件的各個特徵之座標與分析幾何誤差技術，協助工具機客戶端能快速取得工具機關鍵幾何誤差之需求。針對幾何誤差進行量測技術發展，滿足工具機業界的量測需求，應用球直徑、球心距之幾何尺寸進行幾何誤差實驗，由 3D 量測探頭量測快速查核件之量測結果，分析而得兩個線性軸中的 3 項幾何誤差，協助五軸工具機客戶端能快速取得工具機的幾何誤差，提供工具機終端使用者(航太業、加工業)可靠、快速且符合現有規範要求的量測結果，維持工具機的健康狀態。為滿足業界工具機終端使用者之需求，本計畫前期實驗先以實驗室座標量測儀作為實驗對象，分析三軸線性軸 3 項幾何誤差。實驗中以雷射干涉儀對快速查核件線性定位進行校正得到標準值，目的是希望依據快速查核件的標準值作為標準值傳遞，再以座標量測儀量測快速查核件得到座標量測儀的幾何誤差。三軸線性軸幾何誤差說明如下

參考國際規範 CNS 14637-1 (ISO 230-1^[2-2-2])，定義三個互相正交的線性軸分別為 X 軸、Y 軸及 Z 軸，每一個線性軸有六個幾何誤差及因兩軸間不垂直造成影響的幾何誤差，分別為一個沿著線性軸本身移動方向的線性定位幾何誤差(Positioning Geometric Error)、線性軸本身垂直方向上的兩個直線度幾何誤差(Horizontal Straightness Geometric Error, Vertical Straightness Geometric Error)、線性軸對應三個旋轉角度幾何誤差(Roll Geometric Error, Pitch Geometric Error, Yaw Geometric Error)及兩兩不同軸之間垂直度幾何誤差(Squareness Geometric Error)，總共七項幾何誤差，故在三個線性軸所組成的座標系統總共含有二十一項誤差，如圖 2-2-4 所示。

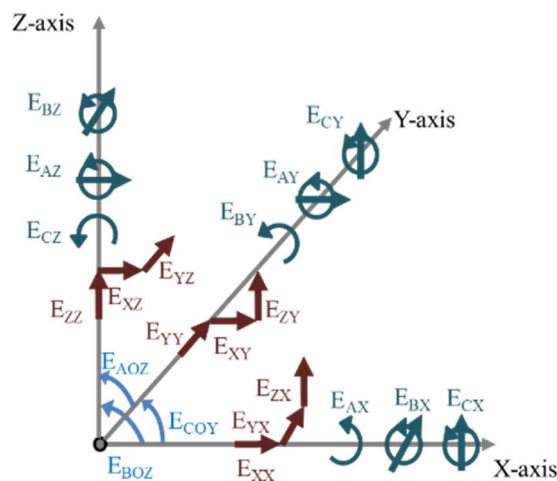


圖 2-2-5 三線性軸幾何誤差示意圖

其中各符號可表示為

E_{AX} : X 軸運動造成 A 軸方向旋轉角度幾何誤差(Roll Geometric Error)

E_{BX} : X 軸運動造成 B 軸方向旋轉角度幾何誤差(Pitch Geometric Error)

E_{CX} : X 軸運動造成 C 軸方向旋轉角度幾何誤差(Yaw Geometric Error)

E_{XX} : X 軸運動造成 X 軸方向的線性定位幾何誤差(Positioning Geometric Error)

E_{YX} : X 軸運動造成 Y 軸方向的直線度幾何誤差(Horizontal Straightness Geometric Error)

E_{ZX} : X 軸運動造成 Z 軸方向的直線度幾何誤差(Vertical Straightness Geometric Error)

E_{AY} : Y 軸運動造成 A 軸方向旋轉角度幾何誤差(Roll Geometric Error)

E_{BY} : Y 軸運動造成 B 軸方向旋轉角度幾何誤差(Pitch Geometric Error)

E_{CY} : Y 軸運動造成 C 軸方向旋轉角度幾何誤差(Yaw Geometric Error)

E_{XY} : Y 軸運動造成 X 軸方向的直線度幾何誤差(Positioning Geometric Error)

E_{YY} : Y 軸運動造成 Y 軸方向的線性定位幾何誤差(Horizontal Straightness Geometric Error)

E_{ZY} : Y 軸運動造成 Z 軸方向的直線度幾何誤差(Vertical Straightness Geometric Error)

E_{AZ} : Z 軸運動造成 A 軸方向旋轉角度幾何誤差(Roll Geometric Error)

E_{BZ} : Z 軸運動造成 B 軸方向旋轉角度幾何誤差(Pitch Geometric Error)

E_{CZ} : Z 軸運動造成 C 軸方向旋轉角度幾何誤差(Yaw Geometric Error)

E_{XZ} : Z 軸運動造成 X 軸方向的直線度幾何誤差(Positioning Geometric Error)

E_{YZ} : Z 軸運動造成 Y 軸方向的直線度幾何誤差(Horizontal Straightness Geometric Error)

E_{ZZ} : Z 軸運動造成 Z 軸方向的線性定位幾何誤差(Vertical Straightness Geometric Error)

E_{COY} : X 軸至 Y 軸的垂直度幾何誤差(Squareness Geometric Error)

E_{AOZ} : Z 軸至 Y 軸的垂直度幾何誤差(Squareness Geometric Error)

E_{BOZ} : Z 軸至 X 軸的垂直度幾何誤差(Squareness Geometric Error)

使用齊次座標轉換矩陣(Homogeneous Transform Matrix, HTM)建立分析方程式，其中 ${}^P T_X$ 表示快速查核件座標位置相對於 X 軸之齊次座標轉換矩陣，依序 ${}^P T_Z$ 表示工具機刀尖點相對於 Z 軸移動系統之齊次座標轉換矩陣，內含 Z 軸 6 項幾何誤差(E_{XZ} 、 E_{YZ} 、 E_{ZZ} 、 E_{AZ} 、 E_{BZ} 、 E_{CZ})， ${}^Z T_Y$ 表示 Z 軸移動系統相對於 Y 軸移動系統之齊次座標轉換矩陣，內含 Y 軸 6 項幾何誤差(E_{XY} 、 E_{YY} 、 E_{ZY} 、 E_{AY} 、 E_{BY} 、 E_{CY})， ${}^Y T_X$ 表示 Y 軸移動系統相對於 X 軸移動系統之齊次座標轉換矩陣，內含 X 軸 6 項幾何誤差(E_{XX} 、 E_{YX} 、 E_{ZX} 、 E_{AX} 、 E_{BX} 、 E_{CX})。利用量測測頭量測查核件標準球的中心座標位置，由量測所得到之標準球的座標位置，計算理想查核件之標準球的座標位置與實際查核件之標準球的座標位置之間的器差值，其器差值顯示量測機台於此座標點整體誤差結果。不考慮轉動跟偏擺誤差情況下，精簡化後可得到線性定位誤差 E_{XX} 、 E_{YY} 、 E_{ZZ} ，其方程式如(2-2-4)所示

$${}^P T_Z = \begin{bmatrix} 1 & -E_{CZ} & E_{BZ} & E_{XZ} \\ E_{CZ} & 1 & -E_{AZ} & E_{YZ} \\ -E_{BZ} & E_{AZ} & 1 & E_{ZZ} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-2-1)$$

$${}^Z T_Y = \begin{bmatrix} 1 & -E_{CY} & E_{BY} & E_{XY} \\ E_{CY} & 1 & -E_{AY} & E_{YY} \\ -E_{BY} & E_{AY} & 1 & E_{ZY} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-2-2)$$

$${}^Y T_X = \begin{bmatrix} 1 & -E_{CX} & E_{BX} & E_{XX} \\ E_{CX} & 1 & -E_{AX} & E_{YX} \\ -E_{BX} & E_{AX} & 1 & E_{ZX} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-2-3)$$

$${}^P T_X = {}^P T_Z {}^Z T_Y {}^Y T_X = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & E_{ZZ} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & E_{YY} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & E_{XX} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & E_{XX} \\ 0 & 1 & 0 & E_{YY} \\ 0 & 0 & 1 & E_{ZZ} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-2-4)$$

快速查核件是由快速查核件底座、球柱座及三個標準球所組成，如圖 2-2-1 所示，以雷射干涉儀對快速查核件進行量測，取得快速查核件傳遞標準座標。雷射干涉儀標準值量測流程如圖 2-2-5(a)所示，首先將光學鏡組架設於座標量測測頭上並進行探針校驗，再將雷射干涉儀及查核件架設於座標量測儀並進行校正實驗，雷射干涉儀量測查核件實際圖如圖 2-2-6 所示，校正完後進行量測路徑規劃及執行量測，量測路徑規劃由座標量測儀軟體(QUINDOS 7)自動生成所有標準球量測路徑，透過演算法計算線性軸標準值。

由雷射干涉儀量測快速查核件得到標準值，再透過查核件及 LaserTRACER 量測座標量測儀並進行線性定位誤差比對可得到 En 值為 0.49，En 值 ≤ 1 表示比對結果符合滿意標準。接下來以 CMM 量測快速查核件，CMM 量測快速查核件流程如圖 2-2-5(b)所示，首先進行 CMM 的探針安裝及執行探針校驗，再將查核件架設於座標量測儀上並進行架設校正，座標量測儀量測查核件實際圖如圖 2-2-7 所示，校正完後進行量測路徑規劃及執行量測，量測路徑規劃由座標量測儀軟體(QUINDOS 7)自動生成所有標準球量測路徑，由座標量測儀軟體即可得到量測值，量測結果整理於表 2-2-2 及表 2-2-3，將查核件標準值與 CMM 量測值比較，計算 CMM 之幾何誤差 E_{XX} 、 E_{YY} 及 E_{COY} 。目前規劃於期末時，查核件會在實際工具機上量測並進行場域測試，將透過 NC 人機介面對機台之控制器(國內常見三大廠牌，西門子、海德漢跟 Fanuc)所對應通訊節點進行通訊，來完成讀取或寫入控制器 PLC 參數記憶體位置。

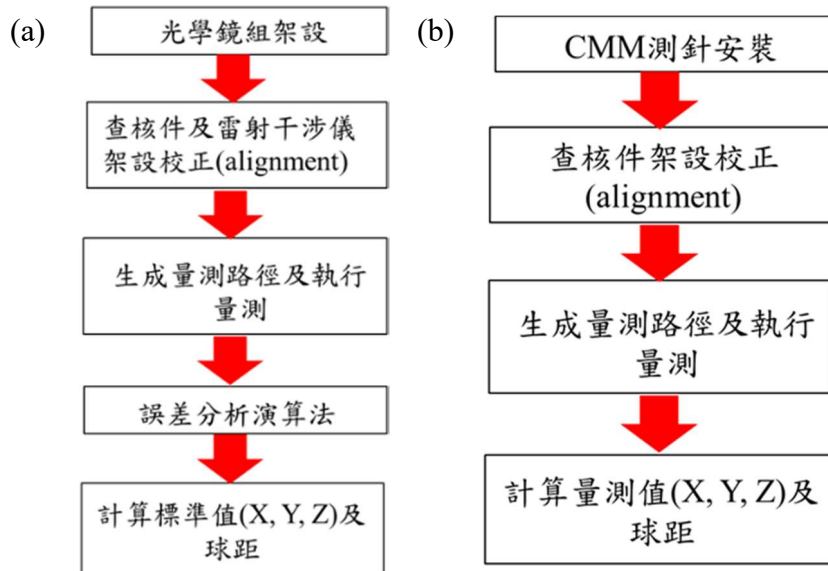


圖 2-2-6 以雷射干涉儀當標準件量測查核件

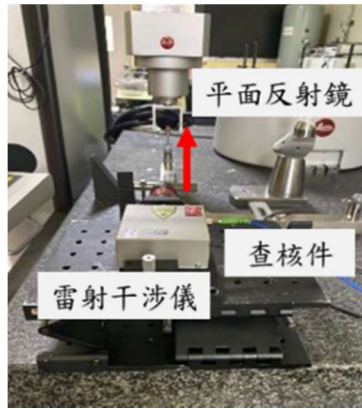


圖 2-2-7 雷射干涉儀量測查核件實驗

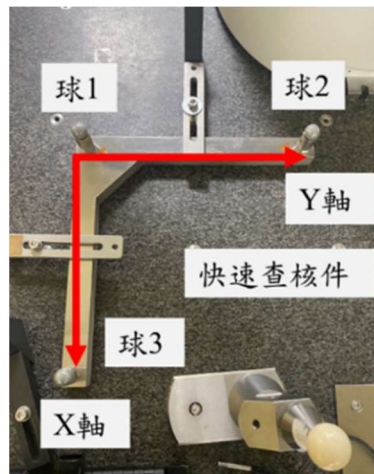


圖 2-2-8 座標量測儀量測查核件實際圖

表 2-2-3 雷射干涉儀量測查核件之量測結果

	雷射干涉儀量測查核件之標準值
球 1 座標	(0, 0, 0)
球 2 座標	(0.01822, 299.98863, 0.19856)
球 3 座標	(300.03674, -0.28560, 0.02245)
球距(球 1-球 2) Y 軸	299.98869
球距(球 1-球 3) X 軸	300.03687

表 2-2-4 座標量測儀量測查核件之實驗結果

	X 軸	Y 軸
CMM 量測值	300.03822 mm	299.99003 mm
查核件標準值	300.03687 mm	299.98869 mm
幾何誤差	$E_{XX} : 1.34 \mu\text{m}$	$E_{YY} : 1.35 \mu\text{m}$
	$E_{COY} : -23.03''$	

(3) 建立整機空間精度監測策略，含量測程序及量測路徑規劃評估報告 1 份 (查核點編號 B2-3)

完成整機空間精度監測策略，含量測程序及量測路徑規劃評估報告 1 份(文件編號: N407EA1220-D300-01，如圖 2-2-9)。

實驗測試以虎尾科技大學工具機(Quaser MF400)為量測對象，量測時需將快速查核件於床台上進行架設及量測，量測時須先進行測針校驗，接著針對標準球進行量測得到粗略 XYZ 座標值，再透過控制器旋轉 A 軸及 C 軸將兩標準球之座標自動校準後，生成量測路徑及進行量測得到量測值，流程如圖 2-2-10 所示。整機空間精度監測策略之量測程序可提供工具機終端使用者使用查核件對工具機進行查核，透過五軸機刀具置換功能量測查核件，量測工具機線性定位與垂直度，透過使用快速查核件對工具機進行定期查核得到機台精度之健康狀況。目前在工廠端，經常使用之量測方法為向母機廠叫修，對工具機進行精度量測，等待時間約一個月，而常使用量測工具機精度設備仍使用雷射干涉儀量測工具機之線性定位誤差，量測時間約 60 分鐘。此整機空間精度監測策略更具快速且具有自動化量測路徑規劃，使用快速查核件搭配工具機控制器，可同時降低了操作難度和操作時間，整個量測程序進行量測及評估後，能夠在約 10 分鐘內完成對工具機關鍵幾何誤差如線性定位和垂直度之量測，有助於增進工具機業者的生產效能。



限制
RESTRICTED

智慧機械產業計量標準建置加值計畫
FY112 年度 工具機線上校正技術建立

整機空間精度監測策略
量測程序及量測路徑規劃

文件編號：N407EA1220-D300-01

撰寫人：林明賢

計畫主持人：林明賢

上階主管核准：陳智榮

制定日期：112 年 09 月 26 日

標準球位置自動校準



標準球量測值

R 100	0
R 101	-96.51929
R 102	-96.4983
R 103	-383.90693378214
R 104	103.36496
R 105	-96.48022
R 106	-384.13524378214
R 107	103.97892
R 108	102.61945
R 109	-383.61439378214



西門子控制器執行量測程式碼

```

PROC BP9700(INT BP_1, INT BP_2, REAL BP_19, REAL BP_24, REAL BP_25, REAL BP_26, INT BP_23, REAL BP_3, REAL BP_6, REAL BP_7, REAL BP_17, REAL BP_18, INT BP_13, INT BP_3, REAL BP_11, REAL BP_21, REAL BP_3, BP9700(A, INTER, S, X, Y, Z, W, T, E, I, J, K, D, Q, R, M, C, R, O, V)
; OTCSTART Pmc/11.12.2015 CB COPYRIGHT BOM KNOWLEDGE (2013)
DEF INT BP_10, BP_COUNTER, BP_OPTBIT_MEASURE, BP_OPTBIT_SETTINGS
IF ((BP_SEARCH) OR (BP_SIR) OR (BP_ARCHIV)) GOTO LBL9999

LBL200: IF (BP_SUBPAR(1))=FALSE GOTO LBL201
BP_1=9999
LBL201: IF (BP_SUBPAR(2))=FALSE GOTO LBL202
BP_2=9999
LBL202: IF (BP_SUBPAR(3))=FALSE GOTO LBL203
BP_3=9999
LBL203: IF (BP_SUBPAR(4))=FALSE GOTO LBL204
BP_4=9999
LBL204: IF (BP_SUBPAR(5))=FALSE GOTO LBL205
BP_5=9999
LBL205: IF (BP_SUBPAR(6))=FALSE GOTO LBL206
BP_6=9999
LBL206: IF (BP_SUBPAR(7))=FALSE GOTO LBL207
BP_7=9999
LBL207: IF (BP_SUBPAR(8))=FALSE GOTO LBL208
BP_8=9999
LBL208: IF (BP_SUBPAR(9))=FALSE GOTO LBL209
BP_9=9999
LBL209: IF (BP_SUBPAR(10))=FALSE GOTO LBL210
BP_10=9999
LBL210: IF (BP_SUBPAR(11))=FALSE GOTO LBL211
BP_11=9999
LBL211: IF (BP_SUBPAR(12))=FALSE GOTO LBL212
BP_12=9999
LBL212: IF (BP_SUBPAR(13))=FALSE GOTO LBL213
BP_13=9999
LBL213: IF (BP_SUBPAR(14))=FALSE GOTO LBL214
BP_14=9999
LBL214: IF (BP_SUBPAR(15))=FALSE GOTO LBL215
BP_15=9999
LBL215: IF (BP_SUBPAR(16))=FALSE GOTO LBL216
BP_16=9999
LBL216: IF (BP_SUBPAR(17))=FALSE GOTO LBL217
BP_17=9999
LBL217: IF (BP_SUBPAR(18))=FALSE GOTO LBL218
BP_18=9999
LBL218: IF (BP_SUBPAR(19))=FALSE GOTO LBL219
BP_19=9999
LBL219: IF (BP_SUBPAR(20))=FALSE GOTO LBL220
    
```

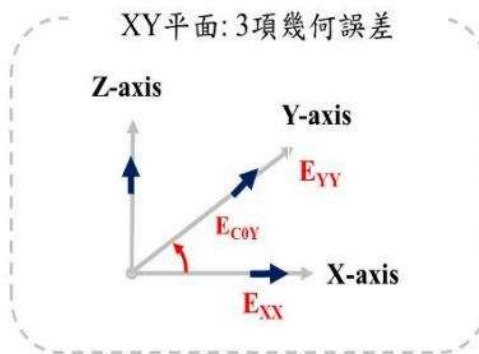
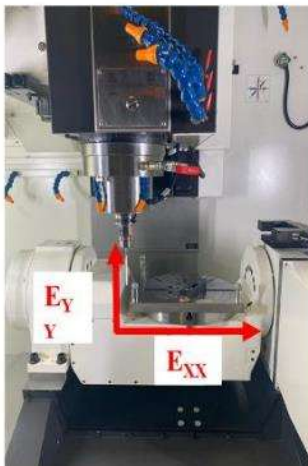
圖 2-2- 10 具機量測程序流程圖

查核件量測技術幾何誤差分析，以永進工具機(型號:NFX400A)作為實驗機台，透過量測座標值及 Matlab 演算法計算幾何誤差，分析線性軸三項幾何誤差(E_{XX} , E_{YY} 及 E_{COY})，分析結果如圖 2-2-11 所示。

永進場域實驗測試

查核件架設-XY平面

- 控制器: HEIDENHAIN TNC640
- 量測測頭: BLUM NT-A2
- 溫度變化: 24.8 °C ~ 25.5 °C



量測XY平面幾何誤差

	X軸	Y軸	垂直度
幾何誤差	$E_{XX} : -8.6 \mu\text{m}$	$E_{YY} : 7.1 \mu\text{m}$	$E_{COY} : 12.1 \text{ ''}$
重複性	$0.2 \mu\text{m}$	$0.3 \mu\text{m}$	0.2 ''

圖 2-2- 11 工具機 E_{XX} , E_{YY} 及 E_{COY} 幾何誤差分析結果

(4) 完成五軸工具機快速查核件實際量測及場域試驗一處，幾何誤差分析結果之重複性 $\leq 5 \mu\text{m}$ (查核點編號 B2-4)

今年快速查核件實際量測及場域試驗智能機械與智慧製造研究中心工具機(Quaser MF400)為量測對象，查核件幾何誤差量測結果與雷射干涉儀量測結果相互比較，查核件幾何誤差分析結果整理於表 2-2-5，X 軸線性定位重複性為 $0.8 \mu\text{m}$ 、Y 軸線性定位重複性為 $0.9 \mu\text{m}$ ，垂直度重複性為 $0.8''$ ，符合計畫目標。雷射干涉儀量測結果如圖 2-2-12 所示，查核件量測結果與雷射干涉儀量測結果之線性誤差差異值為 $1.2 \mu\text{m}$ 。實驗流程如圖 2-2-13 所示，自動化量測流程如圖 2-2-14，發展技術全程操作時間約為 10 分鐘，操作流程為將查核件及校正用標準球放置工具機轉盤上，查核件放置位置為工具機經常加工之區域或接近工具機座標原點位置，接下來進行探針校驗，探針校驗結束後進行手動量測標準球座標值得到標準球粗略位置座標值，接下來透過控制器執行查核件位置自動校準後自動執行量測查核件座標球位置，量測結束後卸載查核件。

表 2-2-5 工具機測查核件之實驗結果

	X 軸	Y 軸	垂直度
幾何誤差	$E_{XX}: -6.3 \mu\text{m}$	$E_{YY}: 10.2 \mu\text{m}$	$E_{COY}: 21.2''$
重複性	$0.8 \mu\text{m}$	$0.9 \mu\text{m}$	$0.8'' (1.1 \mu\text{m})$

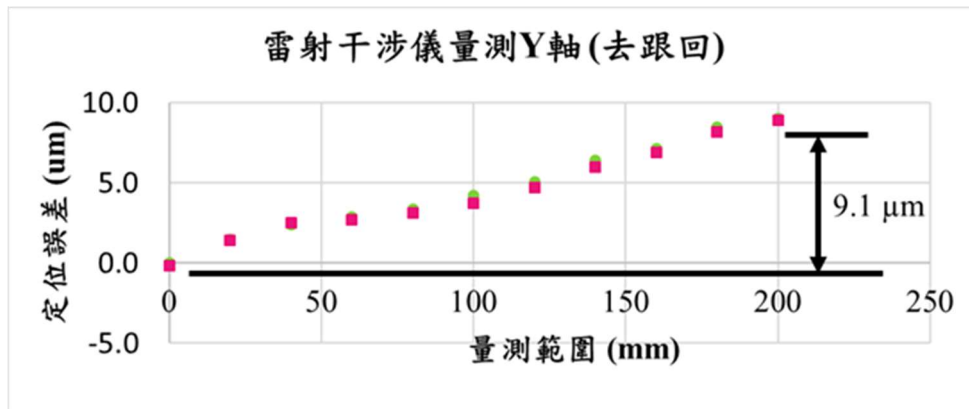


圖 2-2-12 工具機 E_{YY} 幾何誤差量測結果

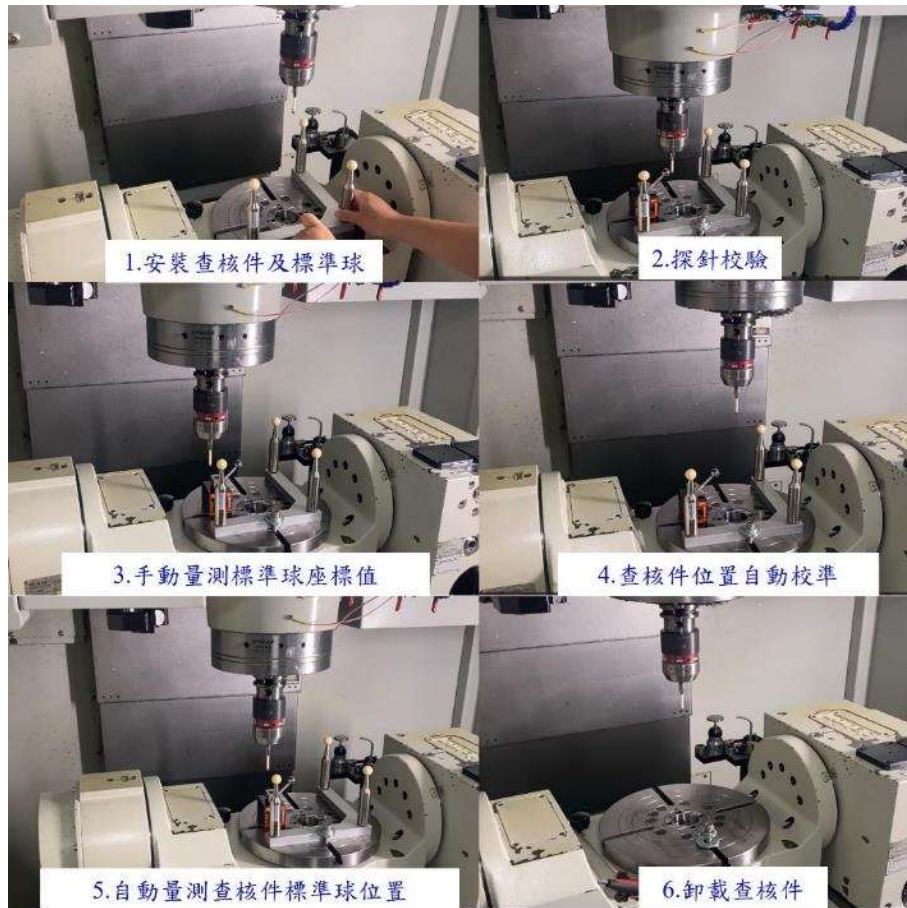


圖 2-2- 13 實驗測試，進行五軸工具機量測

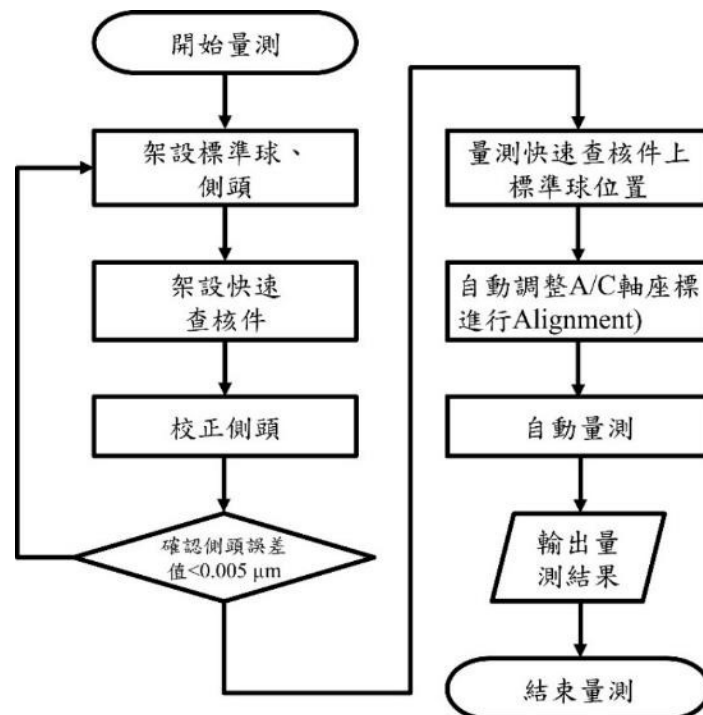


圖 2-2- 14 自動化量測流程

【突破瓶頸】

我國於全球工具機產業鏈中一直佔有重要的角色，現為全球第七大工具機製造國，出口量位居全球第 5，僅次於德國、日本、中國大陸、義大利。現今五軸工具機已被廣泛應用於幾何形狀複雜、高精度且高效率的製造應用中，相較於傳統三軸工具機，五軸工具機具有更優秀的性能。且現在五軸工具機通常都搭配量測測頭作為基本配置，使得五軸工具機能同時進行加工製造和量測，為工具機使用者提供便利的檢測方式，用於確認工具機的空間精度與加工能力。

然而，工具機長期加工使用後缺乏方便查核方法來確認工具機的空間精度與加工能力是一常見問題，因此整機空間精度監測策略參考國際規範 ISO 230-2 建立工具機使用之查核件量測技術，符合 ISO 230-2 使用球距當作標準值進行量測，國內常見中小機型為工作臺盤面直徑 ≤ 660 mm 之五軸工具機。對於國內工具機使用者，工具機維持加工一段時間後，工具機的空間精度與加工能力會隨著時間推移而變差，因此需要定期進行工具機精度的檢查和維護確保工具機的加工能力，其中以線性定位及垂直度精度尤為重要。整機空間精度監測發展之快速查核件用於量測工具機的線性軸及垂直度幾何誤差，查核件的設計標準值可實現尺寸傳遞標準同時滿足現場端量測的需求，工具機現場端使用者可直接透過工具機刀具置換為量測測頭的功能進行量測程序，量測查核件的各個標準值座標並分析線性定位和垂直度的幾何誤差，隨時掌握工具機的精度狀況，以滿足國內工具機終端使用者的量測需求。

計畫於執行過程中主要突破瓶頸為執行查核件自動量測之技術開發，可自動化量測線性軸幾何誤差，就使用便利性來討論，國內工具機廠商而言，常使用市售量測設備雷射干涉儀搭配光學鏡組，使用上需重複架設且耗時，且因設備成本昂貴，國內僅有研究或法人機構擁有此量測設備，量測時間耗時；因此，所發展之技術可突破此量測限制，僅需單一查核件搭配五軸工具機中已有 3D 量測測頭，無須搭配額外裝置，省去多種架設及程式設定等的繁複步驟，並可快速量測關鍵幾何誤差，方便使用者隨時對工具機精度進行查核，可提早發現工具機精度異常，並進行必要的維護，確保工具機的長期運作。

【本年度結論】

完成以應力分析軟體模組模擬分析完成快速查核件硬體及架設治具設計、發包製作及快速查核件量測技術-誤差分析演算法開發、整機空間精度監測量測程序及量測路徑規劃、進行場域試煉兩處，量測工具機之重複性結果皆小於 $5\ \mu\text{m}$ ，滿足工具機精度確認與工具機狀態監測之需求。

1. 軟體模組模擬分析: 快速查核件受尺寸剛性設計影響最大，因此首先分析球距在極端情況下的變形狀況(模擬操作人員取用與夾持)，根據分析結果可得到球距最大變化量為 $0.514\ \mu\text{m}$ ，為重複性中的一項影響因素，遠小於量測重複性目標 $5\ \mu\text{m}$ 。快速查核件設計之尺寸可滿足直徑 ≤ 660 mm 的工作臺盤面，設計圖編號: 快速查核件組合圖 N407EA1220-N-01; 快速查核件底座 N407EA1220-M-01; 球柱座 N407EA1220-M-02; 標準球 N407EA1220-M-03。
2. 幾何誤差分析之演算法開發: 參考國際規範 ISO 230-2 建立工具機使用之查核件量測技術，應用球心距之幾何尺寸進行幾何誤差計算，程式碼編號: N407EA1220-V01，以座標量測儀量測查核件得到量測值，幾何誤差 E_{xx} 、 E_{yy} 及 E_{COY} 分別為 $1.34\ \mu\text{m}$ 、 $1.30\ \mu\text{m}$ 及 $23.05''$ 。

3. 完成整機空間精度監測量測程序及量測路徑規劃評估(技資編號: 07-3-B2-0169)，量測時需將快速查核件於床台上進行架設及量測，量測時須先進行測針校驗，接著針對標準球進行量測得到粗略 XYZ 座標值，再透過控制器旋轉 A 軸及 C 軸將兩標準球之座標自動校準後，生成量測路徑及進行量測。
4. 完成場域試煉兩處，一處為永進機械，量測結果如圖 2-2-11 所示，一處為智能機械與智慧製造研究中心(地點為虎尾科技大學)，量測結果如表 2-2-5 所示，量測工具機之重複性結果皆小於 $5\ \mu\text{m}$ 。

三、量測標準平台與產業合作分項

本分項 112 年度的分項計畫目標主要是建立工業用 XCT 校正技術。工業用 XCT 校正技術參考 VDI/VDE 2630 規範，規劃建立 XCT 量測儀器校正標準件，預期滿足標準件尺寸 ≥ 20 mm，標準不確定度 $\leq 1.6 \mu\text{m}$ ，並使用經過校正之三次元座標量測儀(CMM)校正研製之標準件，達到不確定度追溯之有效性。同時，透過將計畫發展之相關技術於實際場域示範應用，彰顯技術可行性並促成解決產業應用 XCT 精密計量需求。

子項之年度執行查核點說明如下：

查核點 編號	內容說明	預定完成日期	實際完成日期	差異說明
量測標準平台與產業合作				
C1-1	• 完成標準件尺寸範圍 ≥ 20 mm，產出設計圖 1 份	112.03.31	112.03.31	無差異
C1-2	• 完成標準件發包製作	112.06.30	112.06.30	無差異
C1-3	• 完成標準件校正程序標準化建立	112.09.30	112.09.30	無差異
C1-4	• 完成標準件量測不確定度評估: $\leq 1.6 \mu\text{m}$	112.11.30	112.11.30	無差異

1. 工業用 XCT 校正技術

目前已有多國研發機構(德國 PTB、英國 NPL、丹麥 DTU 等)嘗試開發建立 XCT 參考標準件(如圖 3-1-1 所示)，並且評估研製之參考標準件對 XCT 量測精度之影響。但目前 XCT 調校技術都掌握於國外設備大廠中，若國內購買國外大廠之 XCT 設備時，國外大廠僅提供特製標準件供國內代理商協助機台校正，而相關資料須回傳至原廠進行分析，最後再回傳至機台回饋調整，XCT 調校技術並不對外提供服務，且調校技術為各廠商之機密。目前國內並無經 TAF 認證之合格 XCT 校正實驗室，使得國內發展 XCT 設備無從找尋機台校正之單位，使得國產化 XCT 設備發展遭遇瓶頸。再者，為解決目前國內缺乏 XCT 校正追溯能力的問題，本子計畫將參考 VDI/VDE 2630^[3-1-1]與市售 XCT 量測設備規格，研發國內 XCT 參考標準件與驗證及校正技術，並評估校正後的量測不確定度，使其滿足 XCT 量測設備校正的追溯性，以此提供使用者(航太業、金屬加工業、設備開發商)或國內 XCT 檢測設備商可靠、快速且符合現有規範要求的校正結果，確保量測結果準確可靠。此外，也將持續關注相關國際規範^{[3-1-1] [3-1-2] [3-1-3] [3-1-4]}訂定內容，以利後續產業導入使用。

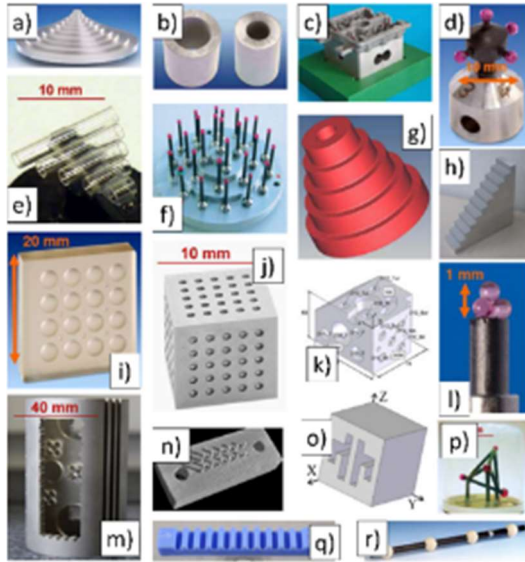


圖 3-1-1 國際 XCT 參考標準件

【執行成果】

(1) 完成標準件尺寸範圍 ≥ 20 mm，產出設計圖 1 份 (查核點編號 C1-1)

依據 VDI/VDE 2630 規範之 XCT 機台驗證要求，基本上必須滿足：

- 測量 5 個長度，7 個空間方向。
- 最小測試長度 ≤ 30 mm。
- 最大測試長度 \geq 測量空間對角線的 66 %。

參考本年度規劃購置之 Werth 型號 TOMOSCOPE XS PLUS plus 200 產品規格，sensor size diagonal 180.54 mm，以 $SDD : SRD = 2$ 的條件下如圖 3-1-2 measurement space diagonal 為 90 mm，依照規範之 66 % 要求即為 59.58 mm，因此參考標準件之最大球距以 60 mm 設計，22 球體直徑 3 mm，連接桿直徑 2 mm，設計如圖 3-1-3，對應不同國際廠商之 XCT 設備規格皆可調整操作倍率，滿足規範要求。

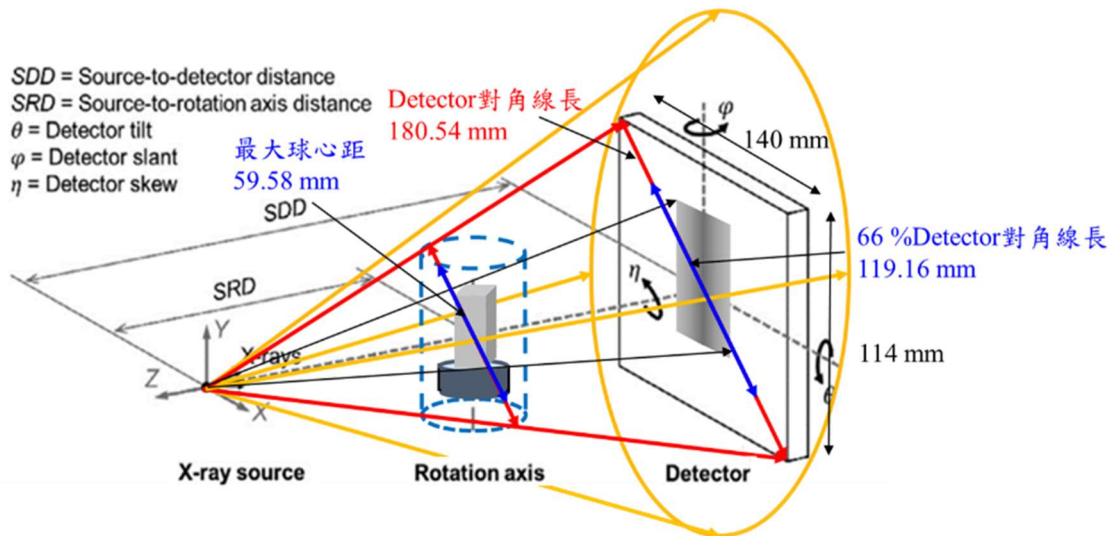


圖 3-1-2 XCT 量測系統示意圖

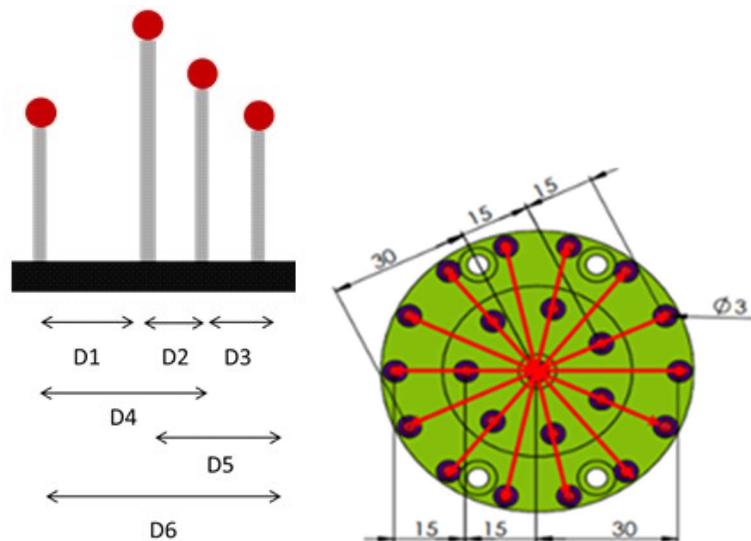
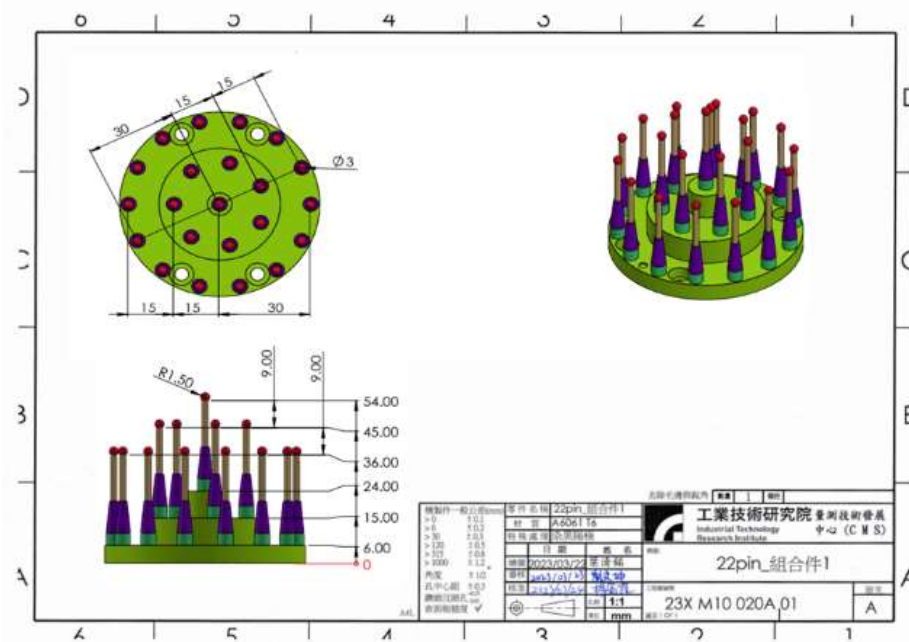


圖 3-1-3 XCT 參考標準件設計圖

XCT 標準件材質選用(評估剛性與溫度膨脹特性)

1. 探針連接桿材料選用 Carbon fiber，受 CMM 施力之形變量為 $0.017 \mu\text{m}$ 如圖 3-1-4 (CMM Force = 0.002 (N))。換言之，施力形變量為 MPE $1.6 \mu\text{m}$ 的 1.9%，符合設計目標 10% 以下的形變量規格
2. 基座材料選用 Invar，溫度變化引入的形變量為 $0.22 \mu\text{m}$ 如圖 3-1-5 ($T = 22 \text{ }^\circ\text{C} \sim 24 \text{ }^\circ\text{C}$)。換言之，形變量為 MPE $1.6 \mu\text{m}$ 的 13.75%，符合設計目標 15% 以下的形變量規格。

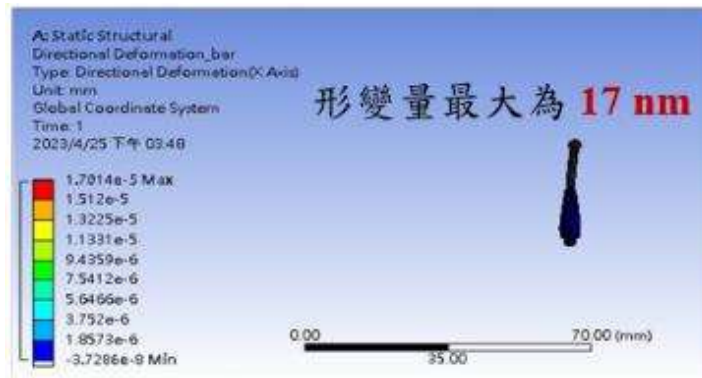


圖 3-1- 4 XCT 探針連接桿選用 Carbon fiber 剛性特性模擬結果

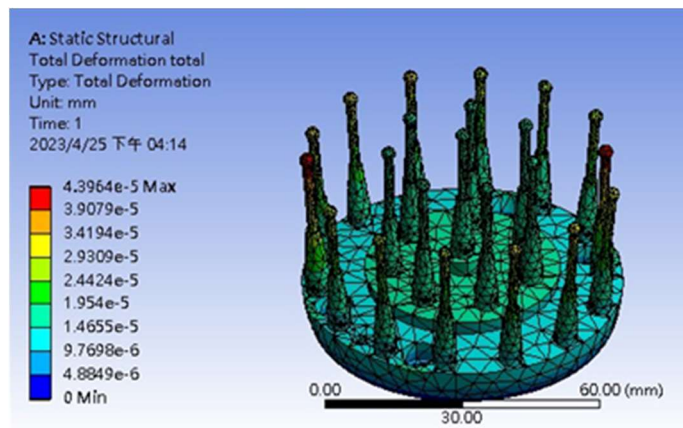


圖 3-1- 5 XCT 基座選用 Invar 溫度膨脹特性模擬結果

(2) 完成標準件發包製作 (查核點編號 C1-2)

➤ XCT 參考標準件發包製作

- 探針規格與交期

1. 廠商:德國 ITP
2. 探針: M3 牙、直徑 3.0 mm、長度 42 mm，如圖 3-1-6
3. 規格: M3:3.0; DK:3.0; L:42; ML:33.0; DS2.0; DG5.0 (mm)，如圖 3-1-6
4. 材質: Titanium base, thermostable carbon fiber stem, ruby ball
5. 交貨日: 2023/07/21
6. Ball form error (球型誤差) $\leq 10 \mu\text{m}$

- 底座與治具發包交期

1. Invar 已購入，交貨日: 2023/06/27

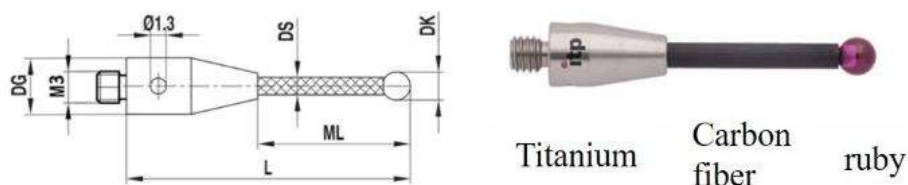


圖 3-1- 6 XCT 參考標準件探針部分尺寸與材料

此次標準件之發包製作與驗收確認方式如下說明(如圖 3-1-7)：

- Probes 採購(包含 Ruby ball、Carbon fiber stem、Titanium base)：(廠商:德國 ITP)
 1. 球徑使用 CMM (三次元座標量測儀)抽測確認符合球徑與球形規格要求。
實測結果: Ruby ball 直徑($2997.12 \mu \pm 0.10 \mu\text{m}$)
 2. Stem 與 Titanium base 尺寸使用游標卡尺量測確認符合規格要求。
實測結果: Stem 直徑(2.00 ± 0.01) mm，長度(33.00 ± 0.05)；Titanium base 直徑(5.00 ± 0.01) mm，長度 (9.00 ± 0.05) mm
 3. Ruby 材質是使用 XRF 系統檢測並確認。
實測結果: 球材質為 Ruby(Al 40.5 %，Cr 0.45 %)
- 自行委外製作 Invar(鈹鋼)基座：以游標卡尺量測關鍵形貌與位置，確認符合設計目標。
- Probes 與基座組裝：以 CMM 量測 22 球的空間座標，確認符合 22 個個球的空間位置設計目標。
 1. 7 個方向最大球心距實測結果: (60.35 mm、60.16 mm、60.03 mm、60.04 mm、59.87 mm、59.90 mm、59.59 mm)皆符合設計目標大於 59.58 mm 設計目標。
 2. 7 個方向最小球心距實測結果: (17.10 mm~17.74 mm)，皆符合小於 30.00 mm 設計目標。

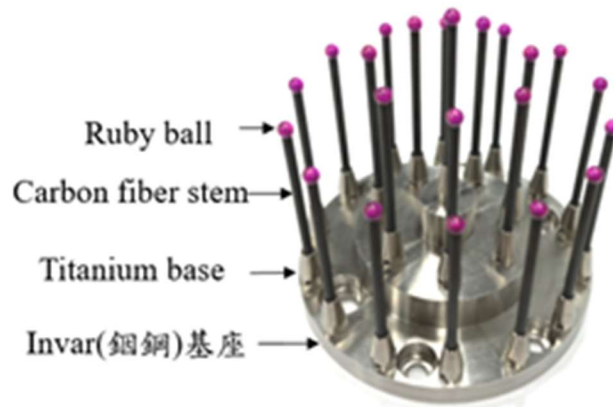


圖 3-1-7 XCT 量測系統參考標準件實體照片

基於 XCT 參考標準件設計，因應公制、英制的 XCT 載台，完成公英制相容的治具設計與發包製作，材質為 Invar，治具外徑 90 mm，如圖 3-1-8。

- 公制部分: 共四個 M6 螺絲孔以治具中心為中心成正四邊形排列，孔間距 50 mm
- 英制部分: 共四個 1/4 螺絲孔以治具中心為中心成正四邊形排列與公制孔於治具中心為旋轉軸順時針旋轉 45 度，孔間距 50.8 mm。

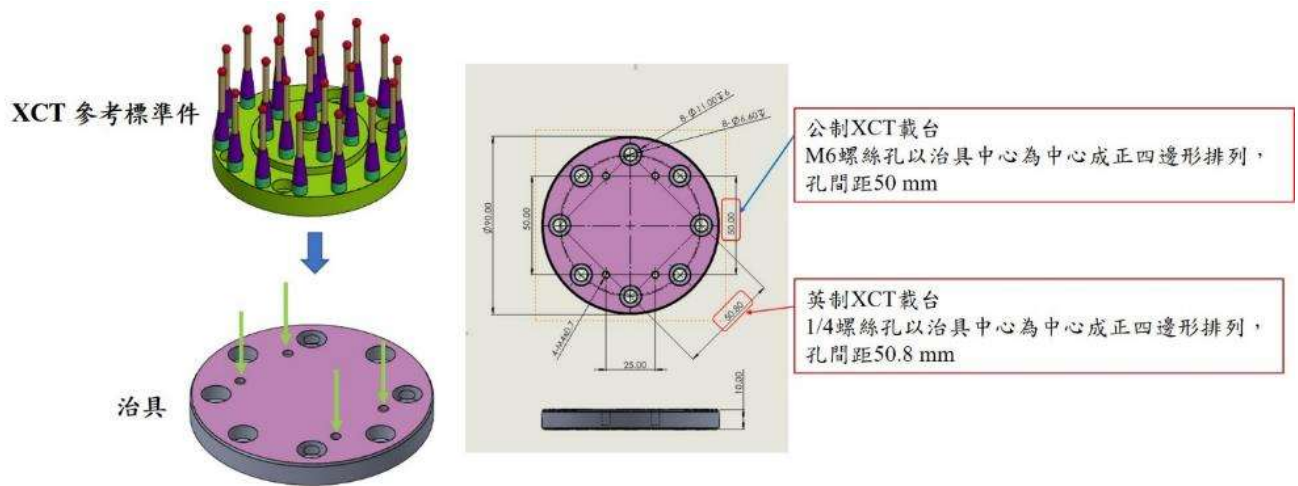


圖 3-1-8 XCT 參考標準件治具設計三視圖圖面

(3) 完成標準件校正程序標準化建立 (查核點編號 C1-3)

- 完成確認 XCT 標準件校正程序。[3-1-5][3-1-6]

3.1 概述

- 目的及適用範圍

本量測程序提供本實驗室同仁使用座標量測儀對 XCT 待校工件實施量測之操作依據，適用於待測工件尺寸在 1200 mm × 1000 mm × 700 mm (含)以下進行量測。

- 待測工件規格說明

待測件名稱	項目及規格	量測方法
工件	量測範圍: 1200 mm × 1000 mm × 700 mm	以座標量測儀作為標準件，對待測工件實施不同尺寸參數量測。

3.2 測試儀具需求

儀器需求如下表所示:

名稱	廠牌	型號	序號	數量	規格	用途
座標量測儀	Leitz	PMM-C Ultra	571	1	• 量測行程1200 mm × 1000 mm × 700 mm	座標量測
溫度計	STS Sensor Technik Sirnach AG.	8370 Sirnach	LT00092	1	• 解析度為0.01 °C	標準件，環境溫度監測
濕度計	STS Sensor Technik Sirnach AG.	8370 Sirnach	DS 009390214	1	• 量測範圍:(0 ~ 95) % (非冷凝狀態)	標準件，環境濕度監測
電腦	Acer	V3-571G	NXM6ATA 0043483143 33400	1	• Intel Core i7 • 4 GB DDR3 • 1 TB HDD	量測資料收集

3.3 準備事項

- 環境需求

量測時的環境溫度必須記錄，環境溫度在 $(20.0 \pm 1.0) ^\circ\text{C}$ 內，相對濕度在 $(45 \pm 10) \%$ 內。

- 工件準備

待測工件自保護箱／盒內取出使用時，須避免撞擊，並檢查待測工件是否有會影響量測結果之汙損，若有油膜或髒汙，則須利用吹球或其它清潔氣體將灰塵清除，同時可利用乾淨的擦拭紙沾上酒精(99.5%或以上)進行擦拭。整個清潔過程必須儘量遠離座標量測儀，避免汙染床台與導軌表面。

- 暖機與恆溫時間

為避免溫度變異影響待測工件的量測結果，須將待測工件放置於座標量測儀床台上及座標量測儀開機後，進行隔夜恆溫，量測期間溫度變異量需評估於量測不確定度中。

3.4 量測步驟

- 探針校正

- 將標準球安裝於座標量測儀床台上，挑選探針安裝於座標量測儀吸盤上。

- 選擇電腦桌面上 QUINDOS 7 如圖 3-1-9 所示，雙擊這個圖示以開啟操作軟體，並選擇進入軟體介面。



圖 3-1-9 QUINDOS 7 圖示

- 操作軟體開啟後會跳出量測模式視窗，如圖 3-1-10 所示。依序選擇 Zeroing the machine → Set active tool/sensor，然後點擊量測操作程序介面進入量測操作程序介面，如圖 3-1-11 所示。

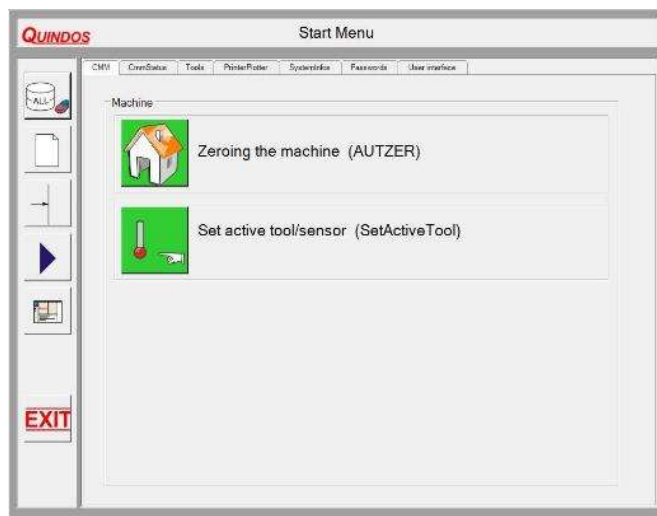


圖 3-1-10 量測模式選擇視窗

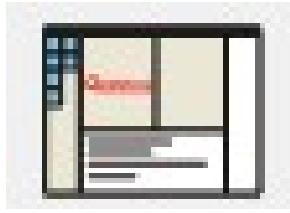


圖 3-1- 11 量測操作程序介面

- 將選擇好之探針安裝於座標量測儀吸盤後，於操作程序介面操作介面下點選 Modify CMM parameters 選項，如圖 3-1-12 所示，依照步驟調整探針之接近距離(Approach distance)、搜尋距離(Search distance)及各軸之接近速度(Speed(X,Y,Z))，再點選 Edit Qualification Artefact 選項，如圖 3-1-13 所示，依照步驟調整使座標量測儀對準於標準球上準備進行測針校驗，點選工作欄 Qualify Tool 介面選擇 PRB(1)，再於選項單上依序輸入 Elevation、Azimuth 及測針直徑 Probe diameter 等參數後，然後再點選工作欄之 Continue 選項執行探針之歸零動作，如圖 3-1-14 所示。

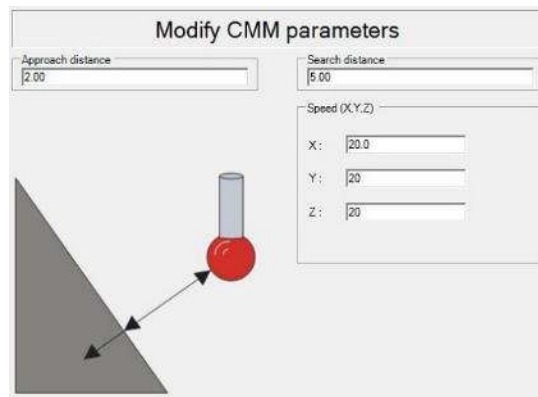


圖 3-1- 12 調整座標量測儀參數視窗圖示

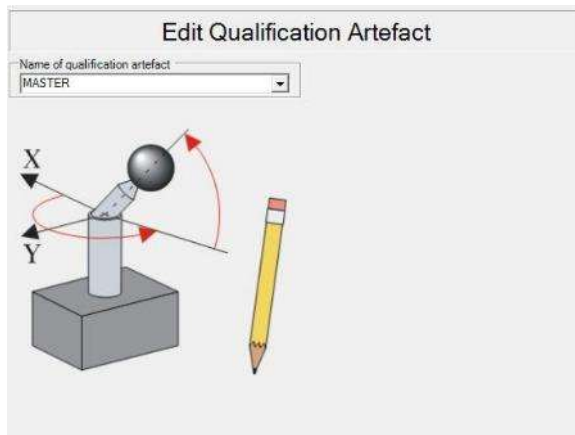


圖 3-1- 13 探針對準標準球視窗圖示

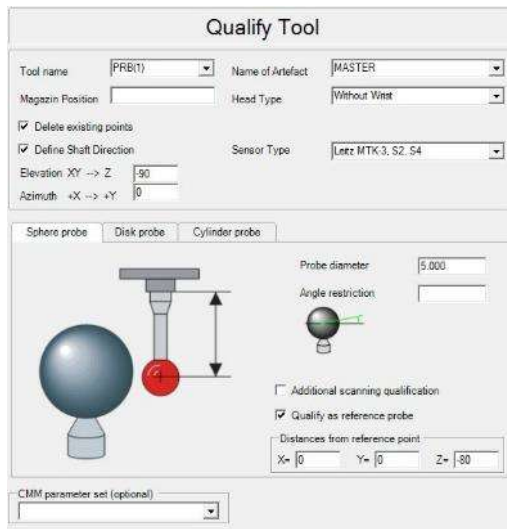


圖 3-1- 14 探針校驗視窗圖示

- 量測圓(中心位置、直徑)
 - 將待測圓之工件安置在載台上後，回到 QUINDOS 7 操作軟體介面，點選工作欄之 MECIR 選項，將測針手動對待測件量測圓心座標後，再點選工作欄於選項單上依序輸入圓心座標(Center coordinate of circle)、圓直徑(Circle diameter)、量測點數(Number of points)、圓類型(Circle type)及量測角度範圍(Start angle of arc 及 End angle of arc)等參數後，然後再點選工作欄之 Continue 選項後開始下針量測，如圖 3-1-15 所示。

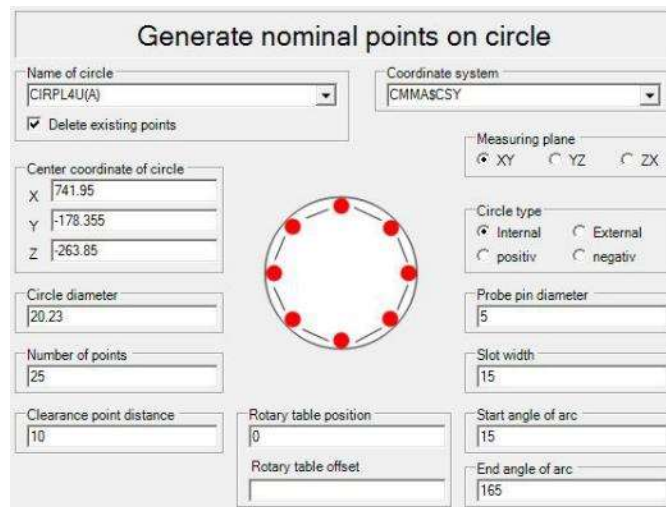


圖 3-1- 15 量測圓視窗圖示

- 量測完成後，如圖 3-1-16 所示，顯示圓心座標(Center coordinates of circle)及圓直徑(Circle diameter)。

	EvaluationSymbol	NominalValu	Nom.Tol	UpperTolerance	LowerTolerance	ActualValue	Act-Nom	Tol/Deviation
	FORM	0.0000		0.0500000	0.0000000	0.0073	0.0073	-0.0000
■	DM	0.0000		0.0500000	-0.0500000	20.2441	20.2441	20.1941
■	RA	0.0000		0.0500000	-0.0500000	10.1221	10.1221	10.0721
■	X	0.0000		0.0500000	-0.0500000	741.9553	741.9553	741.9053
■	Y	0.0000		0.0500000	-0.0500000	-178.3613	178.3613	178.3113
■	Z	0.0000		0.0500000	-0.0500000	-263.8496	263.8496	263.7996

圖 3-1- 16 圓量測結果

- 量測球(中心位置、直徑)

- 將待測球之工件安置在載台上後，回到 QUINDOS 7 操作軟體介面，點選工作欄之 MESPHER 選項，將測針手動對待測件量測球心座標後，再點選工作欄於選項單上依序輸入球心座標(Center of sphere)、球直徑(Sphere diameter)、量測點數(Codenumbr of points)、球類型(Sphere type)及量測角度範圍(Start angle Phi of arc、End angle Phi of arc、Start angle Theta of arc 及 End angle Theta of arc)等參數後，然後再點選工作欄之 Continue 選項開始下針量測，如圖 3-1-17 所示。

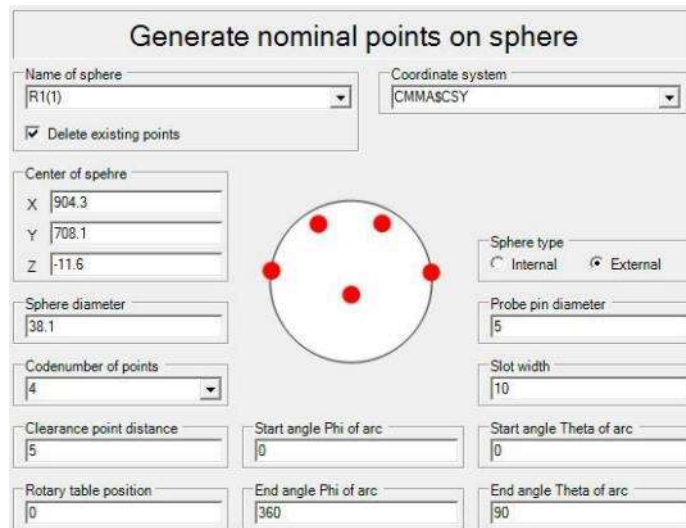


圖 3-1- 17 量測球操作視窗圖示

- 量測完成後，如圖 3-1-18 所示，顯示球心座標(Center coordinates of sphere)及球直徑(Sphere diameter)。

	EvaluationSymbol	NominalValu	Nom.Tol.	UpperTolerance	LowerTolerance	ActualValue	Act-Nom	TolDeviatio
	FORM	0.0000		0.0500000	-0.0000000	0.0029	0.0029	-0.0000
■	DM	0.0000		0.0500000	-0.0500000	38.1105	38.1105	38.0605
■	RA	0.0000		0.0500000	-0.0500000	19.0552	19.0552	19.0052
■	X	0.0000		0.0500000	-0.0500000	904.3168	904.3168	904.2668
■	Y	0.0000		0.0500000	-0.0500000	708.1383	708.1383	708.0883
■	Z	0.0000		0.0500000	-0.0500000	-11.6533	-11.6533	-11.6033

圖 3-1- 18 球量測結果

- 量測直線

- 將待測直線之工件安置在載台上後，回到 QUINDOS 7 操作軟體介面，點選工作欄之 MEAXI 選項，將測針手動對焦待測件量測工件 P1 座標及 P2 座標之後點選工作欄選項單上依序輸入 P1 座標(Coordinate of first point)及 P2 座標(Coordinate for last point)及量測點數(Number of points)後，然後再點選工作欄之 Continue 選項開始下針量測，如圖 3-1-19 所示。

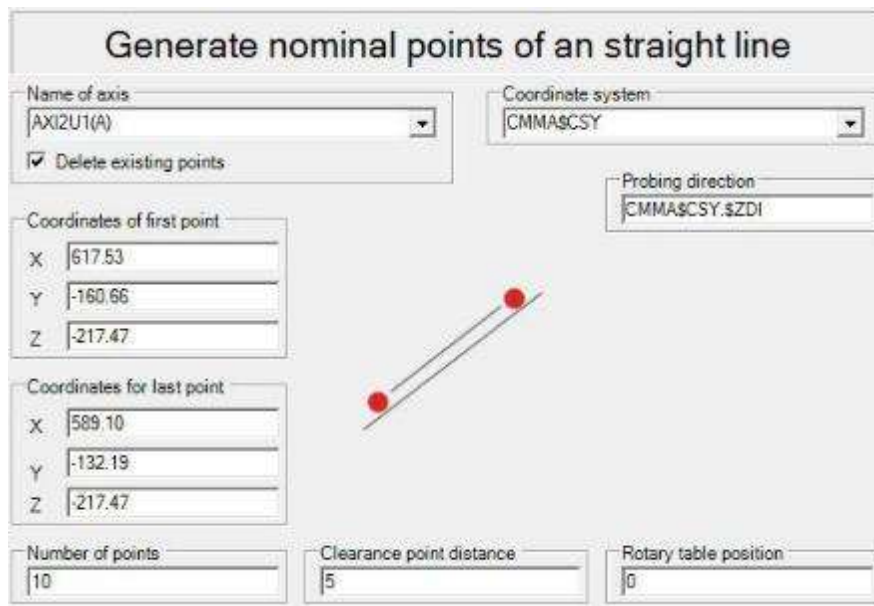


圖 3-1- 19 量測直線操作視窗圖示

- 量測完成後，如圖 3-1-20 所示，顯示線座標(Line coordinates)及直線度(Line Form)。

	EvaluationSymbol	NominalValu	Nom.Tol.	UpperTolerance	LowerTolerance	ActualValue	Act-Nom	ToiDeviatio
	FORM	0.0000		0.0500000	0.0000000	0.0077	0.0077	-0.0000
■	X	0.0000		0.0500000	-0.0500000	603.3153	603.3153	603.2653
■	Y	0.0000		0.0500000	-0.0500000	-146.4225	146.4225	146.3725
■	Z	0.0000		0.0500000	-0.0500000	-217.4659	217.4659	217.4159

圖 3-1- 20 直線量測結果

3.5 完成量測後應有步驟

- 關閉座標量測儀之軟體及電源。
- 量測完畢之待測工件放置於量測完畢區域存放，以待客戶取件。

3.6 測試報告格式



測試名稱：
廠 牌：
型 號：
序 號：

測試結果與說明

I. 測試結果

球編號	球心座標		
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
1	-0.22607	0.27256	0.00395
2	-15.22946	0.35818	-9.01657
3	-9.39599	12.08954	-9.01183
4	3.23445	14.99444	-8.96333
5	13.21936	6.52266	-8.96034
6	13.21233	-6.51686	-8.98409
7	2.86945	-14.52620	-8.99744
8	-9.92316	-11.44492	-9.01428
9	-30.50803	0.56896	-18.02025
10	-27.05202	13.32507	-18.00804
11	-18.57640	24.12699	-18.01170
12	-6.65252	29.40722	-18.00364
13	6.93849	29.31512	-17.98917
14	18.78593	23.27841	-17.97099
15	27.00837	12.76945	-17.96912
16	29.83672	-0.17086	-17.97875
17	26.62259	-13.19480	-17.98975
18	18.27905	-23.42639	-17.99496
19	5.96202	-29.14834	-18.01136
20	-7.41340	-28.97730	-18.01924
21	-18.87213	-22.90144	-18.01493
22	-27.49457	-12.42510	-18.04553



II. 測試說明

1. 測試日期與地點

本測試作業係○○○○年○○月○○日至○○○○年○○月○○日期間於新竹市光復路二段 321 號量測技術發展中心執行。

2. 測試方法

2.1 本報告所列的測試項目及測試方法，經委託單位及工業技術研究院雙方同意，進行測試工作。

2.2 本測試之實施依據為座標量測儀量測程序¹。

3. 測試環境條件

本測試作業係於下述之環境條件中執行。

環境溫度： $(20.0 \pm 1.0) ^\circ\text{C}$

相對濕度： $(45 \pm 10) \%$

4. 測試用儀器

儀器	序號	追溯機構	追溯編號	追溯日期 (校正週期)
座標量測儀	571	國家度量衡 標準實驗室	D210598A	2021/11/19 (2年)
溫度感測器	2734818 2734878 2734879	國家度量衡 標準實驗室	D200566B	2020/10/19 (2年)

III. 參考資料

1. 座標量測儀量測程序，07-3-B1-0141，初版，工研院量測技術發展中心，2022年。



XCT 標準件實施校正程序照片

(4) 完成標準件量測不確定度評估： $\leq 1.6 \mu\text{m}$ (查核點編號 C1-4)

- 量測不確定度來源評估：

- 座標量測儀之量測不確定度 $u(S)$ 。
- 長度量測重複性 $u(L)$ 。
- 溫度產生之長度不確定度 $u(T)$ ；溫度不確定度包括感測器之量測不確定度 $u(t)$ ，量測過程中溫度變化(Δt)之不確定度 $u(\Delta t)$ ，以及環境溫度變化值($t, \text{envi.}$)取 $1 ^\circ\text{C}$ ，不確定度為 $u(t, \text{envi.})$ 。

$$u_{(T)} = \sqrt{(u_{(t)})^2 + (u_{(\Delta t)})^2 + (u_{(t,envi.)})^2} \times L \times \alpha$$

其中 L 為量測長度， α 為材料之熱膨脹係數。

• 標準件量測不確定度評估結果:

- 座標量測儀之校正結果如下，涵蓋因子($k=1.97$)，校正長度為 1200 mm。

校正項目		定位誤差 (μm)	擴充不確定度 (μm)
定位 (Positioning)	E_X	2.2	1.4
	E_Y	1.6	1.3
	E_Z	0.8	1.0

量測不確定度

$$u_{(s)} = \sqrt{\left(2.2 * \frac{60}{1200}\right)^2 + \left(1.6 * \frac{60}{1200}\right)^2 + \left(0.8 * \frac{60}{1200}\right)^2 + \left(\frac{1.4}{1.97}\right)^2 + \left(\frac{1.3}{1.97}\right)^2 + \left(\frac{1.0}{1.97}\right)^2}$$

$$= 1.10 \mu\text{m}$$

- 22 顆球之座標位置重複性最大值為 0.24 μm ，則長度量測重複性為

$$u_{(L)} = \sqrt{(0.24)^2 + (0.24)^2} = 0.34 \mu\text{m}$$

- 溫度感測器之校正結果如下

標準值 ($^{\circ}\text{C}$)	器示值 ($^{\circ}\text{C}$)	器差值 ($^{\circ}\text{C}$)	涵蓋因子 k	擴充不確定度 ($^{\circ}\text{C}$)
14.97	14.97	0.00	1.98	0.08
20.08	20.09	0.01	1.98	0.08
30.06	30.08	0.02	1.98	0.08

量測不確定度 $u_{(t)} = 0.08/1.98 = 0.04 \text{ }^{\circ}\text{C}$

量測過程中溫度變化由 19.98 $^{\circ}\text{C}$ 上升至 20.04 $^{\circ}\text{C}$ ， $\Delta t = 0.08 \text{ }^{\circ}\text{C}$

環境溫度變化值 $T, \text{environment} = 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$$u_{(T)} = \sqrt{(0.04)^2 + (0.08/\sqrt{2})^2 + (1/\sqrt{2})^2} \times 60 \text{ mm} \times 2 \times 10^{-6} = 0.09 \mu\text{m}$$

其中 $L = 60 \text{ mm}$ ，Invar 之熱膨脹係數 $\alpha = 2 \times 10^{-6}$

組合標準不確定度 u ($k=1$ 時) 計算結果如下:

$$u = \sqrt{(u_{(s)})^2 + (u_{(L)})^2 + (u_{(T)})^2} = \sqrt{(1.10)^2 + (0.34)^2 + (0.09)^2} = 1.16 \mu\text{m}$$

第四季也至承鼎精密股份有限公司實際使用團隊所建立 XCT 參考標準件驗證過的 XCT 系統，分析噴氣裝置的微結構形貌。承鼎精密公司目前正開發與銷售半導體設備中噴氣裝置

的產品，其產品由噴氣裝置的內部結構設計達成噴氣氣流的規格，由於實際製造的成品其內部結構無法使用傳統 AOI 系統量測，以致無法驗證實際產品內部結構與設計的差異，所以期望透過委託本團隊使用 XCT 系統解決兩個關鍵問題，第一，驗證製程的正確性(微結構尺寸形貌)以回饋製程參數；第二，透過量測的微結構與氣流特性實驗結果提供分析與回饋，以利未來產品設計與優化，分析噴氣裝置的微結構形貌如圖 3-1-21。

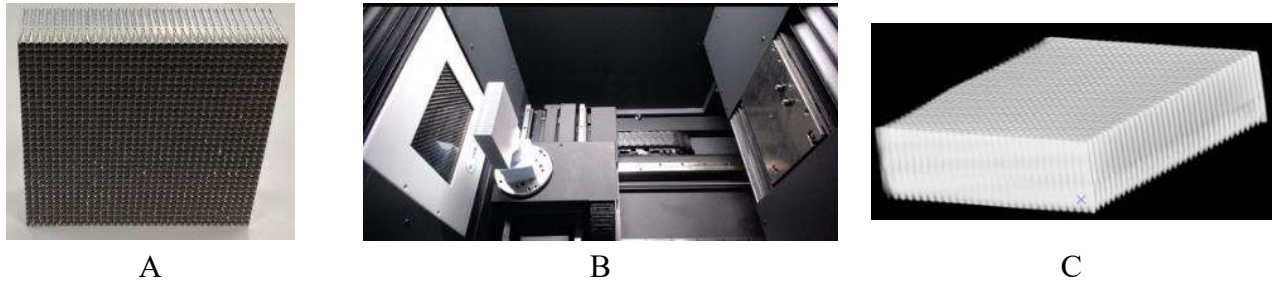


圖 3-1- 21 A 為噴氣裝置的產品，B 實際透過 XCT 系統量測，C 微結構形貌重建結果

傳統的 AOI 無法驗證內層結構尺寸，也無法回饋製程參數，產品設計、優化與開發更要耗費數月。透過 XCT 系統驗可證製程的正確性(微結構尺寸形貌)並實現回饋製程參數，將微結構與實驗氣流結果進行分析與回饋，協助未來產品設計與優化縮短至數周內。

【突破瓶頸】

目前國內 XCT 產業包含使用廠商、代理商與國內自主開發設備廠商，國內自主開發設備廠商仍在產品開發中，鑒於國際大廠有完整的驗證與校正能量，建立 XCT 參考標準件與標準驗證程序，突破國內無驗證的能量，未來以第三方驗證的角色協助國內自主開發設備廠商提供驗證服務，於國內自主開發 XCT 設備產業的發展做出具體的貢獻。

【本年度結論】

1. 評估確認以 VDI 2630 規範為 XCT 標準件設計依據。

分析比較 VDI 2630、ISO 10360-11、ASME B89.4.23 三個標準文件，相關 XCT 系統校正/功能驗證方法建議與規定包含四個關鍵部分分別為(1) XCT 參考標準件設計依據，包含標準件結構、最大球心距、球徑、材質、支撐方式、熱膨脹係數、放置位置、固定方式、測試球距數等規格；(2)測試項目與定義，規範球形誤差量測、球徑誤差量測、球心距誤差量測；(3)不確定度分析方法，規範球徑量測不確定度、球心距量測不確定度；(4)測試結果呈現方式，規範量測誤差與 MPE (maximum permissible error)整合呈現方式。考量目前國際上相對通用的規範為 VDI/ 2630，因此本計畫選用 VDI 2630 規範並依據此規範完成 XCT 參考標準件形式的設計。

2. 完成標準件之形貌設計與材料滿足 XCT 系統驗證以及追溯 CMM。

標準件探針材料長度與球徑設計件包含四個關鍵部分分別為(1)選用適合的標準球與支架直徑；(2)影像需具足夠的灰階差異；(3)XCT 標準件剛性必須足夠；(4)使用低熱膨脹係數的材質。完成標準件之設計與製作。

3. 建立 XCT 標準件驗證方法與實際驗證。

依據 XCT 標準件設計，驗證部分包含四個關鍵部分(1)透過 CMM 量測 22 標準球球徑與球心距確認設計尺寸；(2)使用 2D X-ray 影像系統拍攝標準件的支架確認 Ruby ball 影像的對比度；(3)使用 CMM 量測單球 probe 25 個點，量測 22 個球取得球心座標位置及球直徑，分析重複量測 10 次的變異性以確認標準件剛性；(4)透過 Invar 材料文獻與模擬及溫度種確認溫度變異對尺寸的影響符合設計目標。經驗證後確認設計製作之標準滿足設計規格與達成計畫目標。

4. 建立 XCT 標準件球心距不確定度評估方法與計算。

XCT 參考標準件量測不確定度來源評估包含(1)座標量測儀之量測不確定度 $u(s)$ ；(2)長度量測重複性 $u(L)$ ；(3)溫度產生之長度不確定度 $u(T)$ ；溫度不確定度包括感測器之量測不確定度 $u(t)$ ，量測過程中溫度變化(Δt)之不確定度 $u(\Delta t)$ ，以及環境溫度變化值($t, \text{envi.}$)取 1°C ，不確定度為 $u(t, \text{envi.})$ 。經計算後取得 XCT 標準件不確定度為 $1.16 \mu\text{m} \leq 1.6 \mu\text{m}$ 達成計畫目標。

四、研發技術導入示範案

(1) 數位式線軌組裝調校量測技術

案例一：

A. 廠商名：高鋒工業

B. 產業的需求與問題：

1. 如何在線軌安裝過程中能夠有效的量測線軌組裝兩基準面之直線度，與組裝完後的線軌滑況兩方向直線度。
2. 對於元件之受力剛性與受扭轉力之剛性希望能夠作為未來有效的評估工具。

C. 技術導入執行情形：導入量測方法可以有效提高量測的便利性，同時可以作為廠商評估力剛性與扭轉剛性的評估工具。

D. 廠商預期獲益(相較原狀況改善點)：

(a) 效益：直觀的誤差數值顯示，且能同時獲得多維度誤差資料，使用光線作維虛擬的參考框架，可省去量規的架設與空間限制，量測儀器絕對性的量測，可以重複取放有助於現場的操作，同時數位化也有助於未來結合資訊自動化，滿足高效的品質管理。

(b) 導入前後量化效益比較：

項目	直規/準直儀量測檢驗方式 導入前	多自由度數位式線軌幾何誤差量測 (子項計畫發展技術) 導入後
1. 功能	<ul style="list-style-type: none"> • 減重與體積(2 m 花崗岩直規重量大於 115 kg)，1 個線性，操作需翻面 • 不同尺寸機台可能需要不同尺寸直規，且需注意損傷 • 準直儀(2 個角度)具誤差積分效應 	<ul style="list-style-type: none"> • 垂直與水平直線度與角度誤差誤差同時量測(2 個線性、2 個角度)，體積小(感測器長度 < 350 mm)與重量輕(< 5 kg) • 無積分誤差效應 • 任意點可以測，快速顯示
2. 檢測時間	<p>調整時間較長</p> <p>量測 Y、Z、Yaw、Pitch 四個自由度需要 2 小時 ~ 3 小時</p>	<p>縮短安裝調整時間 (改善 30% ~ 50%)</p> <p>可同時量測 4 個自由度，1 個小時內</p>
3. 成本	<ul style="list-style-type: none"> • 一般長度直規成本較低，但隨量測距離增加，成本快速增加，需要多種尺寸規格 • 準直儀成本高 	<ul style="list-style-type: none"> • 成本中等，適用尺寸範圍廣，可用於多種不同量測工作階段



(a)場域量測機台 X 軸



(b)組裝基準面量測



(c)線性滑軌組裝後量測

圖 4-1-1 高鋒現場場域量測應用狀況

案例二：

A. 廠商名：亞歲機電

B. 產業的需求與問題：比較應用於線軌基準面與線軌組裝後之精度量測，看是否能夠有更有效率與便利的量測。

C. 技術導入執行情形：可避免直規的量測笨重，改善損傷與架設變形及調整問題，且省去翻面的問題與造成的誤差。改善較長行程使用準直儀的量測方式，需要精密的對其點位的問題，況且準直儀於滑塊的使用並不完全符合誤差疊加展開的理論，是必須考慮的地方。

D. 廠商預期獲益(相較原狀況改善點)：

(a)效益：直觀的誤差數值顯示，且能同時獲得多維度誤差資料，使用光線作維虛擬的參考框架，可省去量規的架設與空間限制，量測儀器絕對性的量測，可以重複取放有助於現場的操作，同時數位化也有助於未來結合資訊自動化，滿足高效的品質管理。未來並可以擴充到平行度與垂直度的量測，較現有方法提供擴充的功能，但是與供應鏈間的比對方式與效率，需要長期研究。

(b)導入前後量化效益比較：

項目	直規/準直儀量測檢驗方式 導入前	多自由度數位式線軌幾何誤差量測 (子項計畫發展技術) 導入後
1.功能	<ul style="list-style-type: none"> 減重與體積(2 m 花崗岩直規重量大於 115 kg)，操作需翻面 不同尺寸機台可能需要不同尺寸直規，且需注意損傷 準直儀具誤差積分效應 	<ul style="list-style-type: none"> 垂直與水平直線度與角度誤差誤差同時量測，體機與重量小 無積分誤差效應 任意點可以測，快速顯示
2.檢測時間	調整時間	縮短安裝調整時間 改善 30 %
3.成本	<ul style="list-style-type: none"> 一般長度直規成本較低，隨量測距離增加，成本快速增加，需要多種尺寸規格 準直儀成本高 	<ul style="list-style-type: none"> 成本中等，適用尺寸範圍廣，可用於多種不同量測工作階段



圖 4-1-2 亞崑現場場域量測應用狀況

(2) 主軸狀態監測技術

案例一：

A. 廠商名：普森精密

B. 產業的需求與問題：主軸與軸承之健康度通常以外掛加速規模組進行振動量測與分析，且振動訊號為落後指標，無法於早期偵測異常現象，且一般之振動量測模組雖易於安裝且為常用之技術，但軸承預壓為異常振動、異常溫度產生之主要原因，在實際場域中並無可直接量化預壓大小之監控設備。

C. 技術導入執行情形：已完成感測器與主軸之整合，並進行主軸的動態平衡測試，目前已確認轉速達 8000 RPM 時主軸之動態性能皆正常，將持續於普森廠內跑合室進行感測器與主軸之整合、靜止主軸預壓力量測與主軸於低速運轉時預壓監控，感測器與主軸之實際整合畫面如圖 4-2-1 所示。

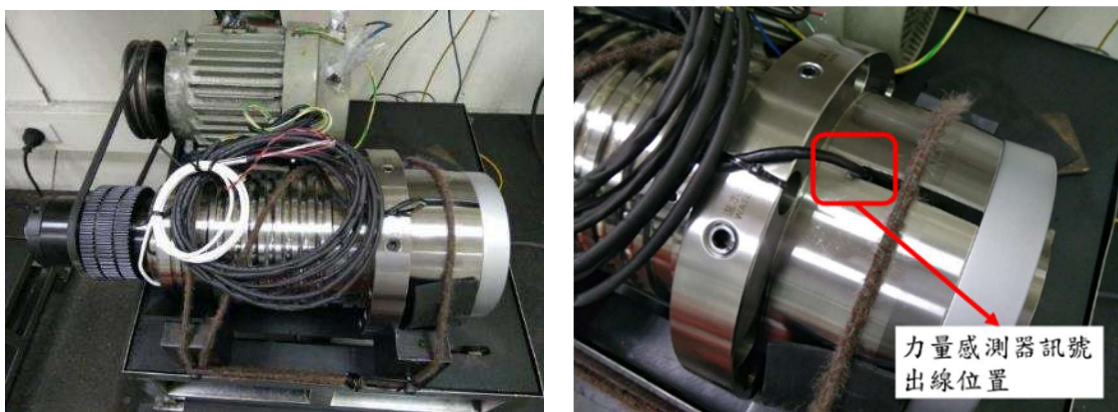


圖 4-2-1 感測器與主軸之實際整合完成圖

D. 廠商預期獲益(相較原狀況改善點)：

- (a) 效益: 直接量測主軸運行時的軸承預壓狀態，相比振動量測為領先指標，可作為主軸運行健康度的參考指標並提早發現異常現象。且內嵌式感測模組除可用於主軸組裝也可應用於工具機使用中各階段。
- (b) 導入前後量化效益比較:

項目	導入前	導入後
1. 預壓評估方法	主軸安裝完成後進行動平衡測試，並根據是否有異音判斷預壓是否正確	使用主軸預壓力量感測器直接量測預壓力量大小
2. 主軸預壓力量測範圍	無	10 kN
3. 主軸預壓力量測解析度	無	10 N
4. 主軸健康度判定	振動量測與溫度監控 (落後指標)	預壓異常判斷搭配振動量測與溫度監控 (領先指標)

案例二：

- A. 廠商名: 普森精密
- B. 產業的需求與問題: 溫度感測器缺乏線上校正方案，加工期間品質難以掌控，品檢需停機、拆裝與後送校正實驗室，需費時約 12 天左右。
- C. 技術導入執行情形: 利用金屬相變化的時間延遲來完成微型定點囊的開發，並可長期作為溫度的傳遞標準，實現自校型溫度感測器的技術。

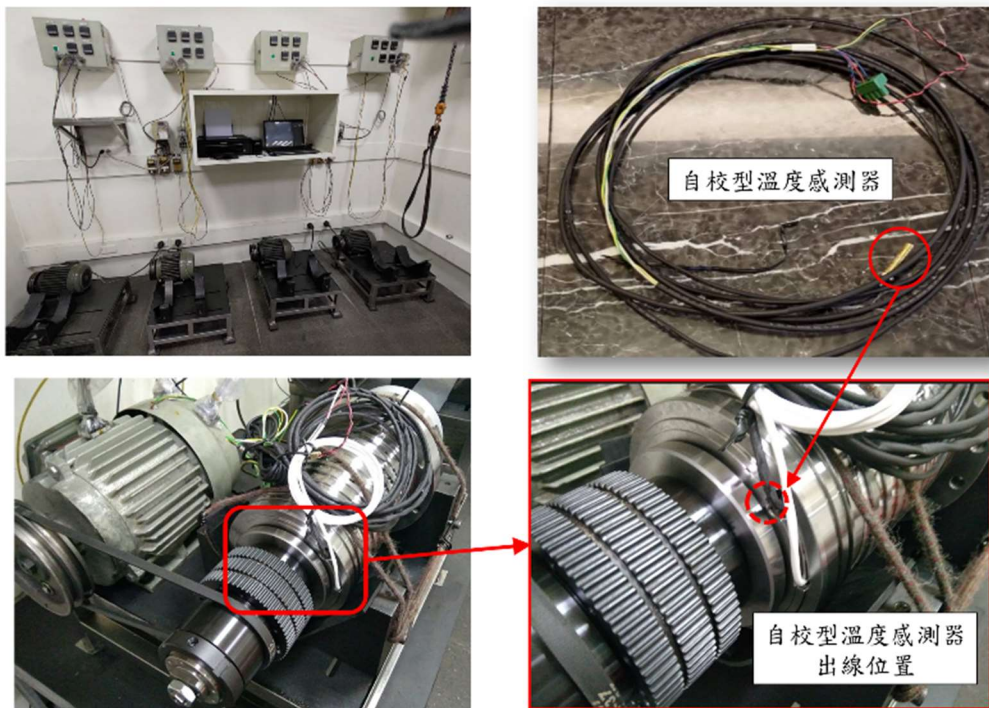


圖 4-2-2 自校型溫度感測器與主軸之實際整合完成圖

D. 廠商預期獲益(相較原狀況改善點):

(a) 效益: (1)能即時校正,可在 60 分鐘內完成,縮短校正時間 99%;(2)準確度可長期控制在 0.5 °C 以內;(3)微型定點囊較傳統溫度校正爐降低耗能 83%、體積縮減 99%。

(b) 導入前後量化效益比較:

項目	傳統溫度校正爐 導入前	主軸狀態監測技術開發 (自校型溫度感測器) 導入後
1.溫度準確度	≤ 1.0 °C	≤ 0.5 °C
2.校正時間	12 天	60 分鐘
3.校正成本	5,000 元/次	100 元/次

案例三:

A. 廠商名: 永進機械

B. 產業的需求與問題: 軸承預壓為異常振動、異常溫度產生之主要原因,在實際場域中並無可直接量化預壓大小之監控設備,會因此造成主軸與軸承之健康度的誤判。

C. 技術導入執行情形: 我方已提供廠商應變規貼附與出線所需資訊,目前規劃由廠商完成間隔環設計,我方模擬確認後進行加工製作,交給我方進行應變規貼附,廠商完成研磨確認工件精度後完成感測器與主軸整合。

D. 廠商預期獲益(相較原狀況改善點):

(a) 效益: 直接量測主軸運行時的軸承預壓狀態,相比振動量測為領先指標,可作為主軸運行健康度的參考指標並提早發現異常現象。且內嵌式感測模組除可用於主軸組裝也可應用於工具機使用中各階段。

(b) 導入前後量化效益比較:

項目	導入前	導入後
1.預壓評估方法	量測軸承安裝後產生負間隙判斷 預壓大小	使用主軸預壓力量感測器直接量測 預壓力量大小
2.主軸預壓力量測範圍	無	10 kN
3.主軸預壓力量測解析度	無	10 N
4.主軸健康度判定	振動量測與溫度監控 (落後指標)	預壓異常判斷搭配振動量測與溫度 監控 (領先指標)

案例四:

A. 廠商名: 永進機械

B. 產業的需求與問題: 溫度感測器會逐漸產生漂移,造成熱變位補償錯誤,無法即時修正。

C. 技術導入執行情形: 利用自校型溫度感測器的技術,可即時在 60 分鐘內完成自我校正,達到正確的熱變位補償值,確保加工精度。

D. 廠商預期獲益(相較原狀況改善點):

(a) 效益: 能即時校正, 可在 60 分鐘內完成, 縮短校正時間 99%; 能有效掌握熱變位補償值, 提高加工精度, 節省加工成本。

(b) 導入前後量化效益比較:

項目	傳統溫度感測器 導入前	主軸狀態監測技術開發 (自校型溫度感測器) 導入後
1. 線上校正	無	可
2. 校正時間	12 天	60 分鐘
3. 加工精度	較不可控制	可控制

(3) 主軸線上量測技術

案例一:

A. 廠商名: 普森精密

B. 產業的需求與問題: 目前國內主軸迴轉誤差量測方法皆屬於離線量測(Off-line measurement), 量測設備架設於主軸刀具端進行迴轉誤差量測, 缺少主軸現場量測迴轉誤差(In-situ measurement)技術。

C. 技術導入執行情形: 已確認與普森精密主軸合作, 普森提供主軸型式 BT40 的主軸。於普森精密主軸現場安裝主軸迴轉誤差量測模組。主軸迴轉誤差量測模組安裝於刀把與刀具間, 在主軸不停機狀態下, 即時量測 5 項迴轉誤差, 滿足現場量測迴轉誤差。

D. 廠商預期獲益(相較原狀況改善點):

(a) 效益: 主軸迴轉誤差量測模組原型可提供給主軸製造商, 量測技術安裝於刀把與刀具間, 可量測 5 項迴轉誤差, 滿足現場量測迴轉誤差(In-situ measurement)需求。

(b) 導入前後量化效益比較:

項目	Spindle Error Analyzer (LION) 導入前	主軸迴轉誤差量測模組 (子項計畫發展技術) 導入後
1. 迴轉誤差	5 項	5 項
2. 檢測時間	離線量測(Off-line measurement): 需停機	現場量測(In-situ measurement): 不需停機
3. 成本	1 百萬以上	十萬以下

案例二:

A. 廠商名: 永進機械

B. 產業的需求與問題: 目前國內主軸迴轉誤差量測方法皆屬於離線量測(Off-line measurement), 量測設備架設於主軸刀具端進行迴轉誤差量測, 缺少主軸現場量測迴轉誤差(In-situ measurement)技術。

C. 技術導入執行情形: 已確認與永進機械合作, 永進提供主軸型式 HSK-A63, 轉速可達 20000 rpm 的主軸。於永進現場安裝主軸迴轉誤差量測模組。主軸迴轉誤差量測模組安裝於刀把與刀具間, 主軸在主軸不停機狀態下, 即時量測 5 項迴轉誤差, 滿足現場量測迴轉誤差。

D. 廠商預期獲益(相較原狀況改善點):

(a) 效益: 主軸迴轉誤差量測模組原型可提供給主軸製造商, 量測技術安裝於刀把與刀具間, 可量測 5 項迴轉誤差, 滿足現場量測迴轉誤差(In-situ measurement)需求。

(b) 導入前後量化效益比較:

項目	Spindle Error Analyzer (LION) 導入前	主軸迴轉誤差量測模組 (子項計畫發展技術) 導入後
1.迴轉誤差	5 項	5 項
2.檢測時間	離線量測(Off-line measurement): 需停機	現場量測(In-situ measurement): 不需停機
3.成本	1 百萬以上	十萬以下

(4) 工具機組裝品質智慧分析與精度補償技術

案例一:

A. 廠商名: 台中精機

B. 產業的需求與問題: 如何在製造執行系統(MES)中, 透過統計製程管制(SPC)了解生產線之品質, 找出合理的允收標準和關鍵的組裝品質參數, 藉由組裝品質能力的提升, 進而提升工具機製造商之整機加工精度。

C. 技術導入執行情形: 目前將組裝品質智慧分析技術與台中精機的設計和組裝部門進行討論和確認, 並針對人機操作介面之呈現和嵌入製造執行系統(MES)進行後續討論規劃。

D. 廠商預期獲益(相較原狀況改善點):

(a) 效益: 藉由數位模型和數值分析所開發之組裝品質智慧分析技術, 藉由找出合適的允收標準和關鍵組裝品質參數, 提升工具機之組裝品質。

(b) 導入前後量化效益比較:

項目	導入前	導入前
1.除錯時間	3 小時	1 小時
2.除錯方式	試誤法	智慧分析估算方法取得關鍵參數並 優先改善

案例二:

A. 廠商名: 奕達精機

B. 產業的需求與問題: 從設計端希望能夠掌握關鍵組裝參數及設定之允收目標值, 進而掌握工具機組裝後最終精度。

C. 技術導入執行情形: 藉由數位模型和數值分析所開發之組裝品質智慧分析技術, 依公司生產車床之線性軸組裝流程代入設計參數, 評估出關鍵組裝品質參數, 提供業者確認設計參數之設定合理性。

D. 廠商預期獲益(相較原狀況改善點):

(a) 效益: 分析提供關鍵參數, 使可在組裝流程中決定應留意的組裝站別, 並透過歷史數據中評估應可提升約 10 % 組裝精度。

(b) 導入前後量化效益比較:

項目	導入前	導入後
1.組裝流程 應優先改善目標	無法掌握	透過關鍵參數之改善， 預期可提升精度 10 %

(5) 整機空間精度監測策略技術

案例一：

A. 廠商名: 永進機械

B. 產業的需求與問題:

1. 現有工具機量測設備，雷射干涉儀適用於工具機製造商廠內組裝品質檢測用，缺乏適用於工具機終端使用者工具機的檢測需求。
2. 工具機使用者長期加工使用後，缺少便利查核方法確認整機空間精度。
3. 查核件之使用便利性與準確度影響加工現場端之接受度。

C. 技術導入執行情形: 查核件標準值設計可簡化量測且能實現尺寸標準傳遞，提供現場端量測參考使用，利用工具機刀具轉換功能將加工用刀具置換為量測測頭，量測查核件的各個標準值座標與分析幾何誤差。

D. 廠商預期獲益(相較原狀況改善點):

(a) 效益: 方便工具機終端使用者對工具機精度確認，以查核方式得以快速監測機台狀態，確保工具機的加工精度，隨時掌握工具機的精度狀況。

(b) 導入前後量化效益比較:

項目	導入前 循圓測試儀 (QC20)	導入前 雷射干涉儀 (XM-60)	導入後 (快速查核件)
1. 檢測時間	20 分鐘	50 分鐘	20 分鐘
2. 成本	30 萬	200 萬	20 萬
3. 幾何誤差	垂直度 1 項	線性定位、真直度及 垂直度共 6 項	線性定位及垂直度共 3 項

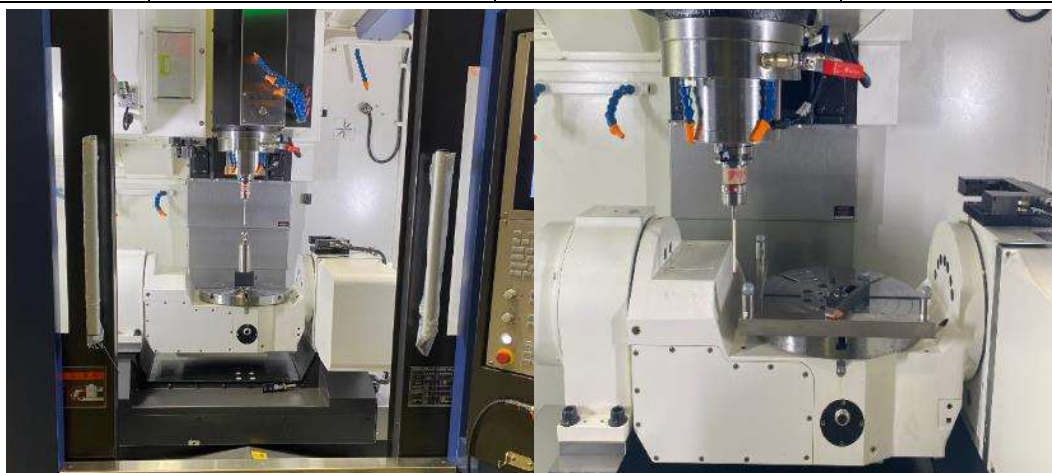


圖 4-5-1 永進機械場域試煉現場量測應用狀況

案例二：

A. 廠商名：智能機械與智慧製造研究中心

B. 產業的需求與問題：智能機械與智慧製造研究中心團隊有多年控制器連線的經驗，為進行更多的智慧機械相關應用，因此在虎尾科大機台進行場域測試，也邀請 Blum 經理至智能機械與智慧製造研究中心討論場域成果，因 Blum 現為全世界探頭製造大廠，然而探頭僅僅只是感測器，需搭配完善的量測標準件與快速查核件等，如此才能結合 Blum 現有探頭硬體設備，期望能提供工具業者或是精密加工業，完善的量測方案，增加客戶購買、及選用 Blum 探頭的誘因。

C. 技術導入執行情形：10/20 完成人機介面軟體，至虎尾科大跟台大團隊討論人機介面軟體與功能展示場域試煉成果，亦將向 Blum 廠商進行成果說明與推廣。

D. 廠商預期獲益(相較原狀況改善點)：

(a) 效益：提供完整的量測方案可以簡化客戶的工作流程，並減少工具機加工錯誤的可能性，提供額外的附加價值，使其更有可能購買並推薦給其他業者。

(b) 導入前後量化效益比較：

項目	導入前 循圓測試儀 (QC20)	導入前 雷射干涉儀 (XM-60)	導入後 (快速查核件)
1. 檢測時間	20 分鐘	50 分鐘	20 分鐘
2. 成本	30 萬	200 萬	20 萬
3. 幾何誤差	垂直度 1 項	線性定位、真直度及 垂直度共 6 項	線性定位及垂直度共 3 項



圖 4-5-2 智能機械與智慧製造研究中心場域試煉現場量測應用狀況

(6) 工業用 XCT 校正技術

案例一：

A. 廠商名：福宮通商

B. 產業的需求與問題基於國內無第三方公正單位可提供驗證與校正服務，故本計畫即以此為出發點使用本子項發展的 XCT 參考標準件，協助福宮通商公司使用中之 XCT 量測系統於國內進行第三方驗證。

C. 技術導入執行情形: 透過 XCT 參考標準件, 針對 TomoScope XS PL 150 系統進行球心距量測能力驗證如圖 4-6-1, 42 組不同距離球心距三次量測與參考標準件的數值(表 4-6-1)進行比較分析部分器差數據, 顯示大於系統 MPE(最大容許誤差)如圖 4-6-3。



圖 4-6-1 使用 XCT 參考標準件進行 TomoScope XS PL 150 XCT 系統驗證

表 4-6-1 42 組不同距離球心距三次量測與參考標準件的數值(器差 = 平均值 - 標準值)

球心編號	標準值 (mm)	量測值(mm)			平均值 (mm)	標準差 (μm)	器差 (μm)
		第 1 組	第 2 組	第 3 組			
2-9	17.7354	17.7358	17.7334	17.7327	17.7340	1.6	-1.5
1-2	17.5065	17.5088	17.5085	17.5084	17.5086	0.2	2.0
3-11	17.6119	17.6041	17.6053	17.605	17.6048	0.6	-7.1
1-3	17.4646	17.4611	17.4613	17.4611	17.4612	0.1	-3.4
4-13	17.3282	17.3414	17.3404	17.3405	17.3408	0.6	12.5
1-4	17.5818	17.5868	17.586	17.5855	17.5861	0.7	4.3
5-15	17.6158	17.6218	17.6206	17.6214	17.6213	0.6	5.4
1-5	17.3263	17.3307	17.3297	17.3292	17.3299	0.8	3.5
6-17	17.4795	17.478	17.4789	17.4796	17.4788	0.8	-0.6
1-6	17.5349	17.5322	17.5318	17.5314	17.5318	0.4	-3.1
7-19	17.4534	17.4539	17.452	17.451	17.4523	1.5	-1.1
1-7	17.5958	17.5945	17.594	17.5947	17.5944	0.4	-1.4
8-21	17.0982	17.1108	17.1125	17.1132	17.1122	1.2	14.0
1-8	17.6822	17.6855	17.6857	17.6854	17.6855	0.2	3.3

球心編號	標準值 (mm)	量測值(mm)			平均值 (mm)	標準差 (μm)	器差 (μm)
		第 1 組	第 2 組	第 3 組			
1-9	35.2414	35.2441	35.2414	35.2406	35.2420	1.8	0.6
1-16	35.0335	35.0363	35.0313	35.0319	35.0332	2.7	-0.3
1-11	35.0761	35.0649	35.0662	35.0658	35.0656	0.7	-10.5

1-18	35.0434	35.0337	35.0352	35.036	35.0350	1.2	-8.4
1-13	34.9078	34.9258	34.9239	34.9236	34.9244	1.2	16.6
1-20	35.1005	35.1108	35.1094	35.1095	35.1099	0.8	9.4
1-15	34.9416	34.952	34.9499	34.9502	34.9507	1.1	9.1
1-22	35.0797	35.0918	35.0897	35.089	35.0902	1.5	10.5
1-17	35.0142	35.01	35.0105	35.0108	35.0104	0.4	-3.8
1-10	34.8487	34.8417	34.8437	34.8436	34.8430	1.1	-5.7
1-19	35.0490	35.0482	35.0459	35.0455	35.0465	1.5	-2.5
1-12	34.8483	34.8472	34.8436	34.8432	34.8447	2.2	-3.6
1-21	34.7763	34.792	34.7939	34.7944	34.7934	1.3	17.1
1-14	34.8400	34.8644	34.8667	34.8669	34.8660	1.4	26.0

球心編號	標準值 (mm)	量測值(mm)			平均值 (mm)	標準差 (μm)	器差 (μm)
		第 1 組	第 2 組	第 3 組			
2-16	45.9517	45.9577	45.9522	45.9528	45.9542	3.0	2.5
3-18	45.9128	45.9005	45.9024	45.9029	45.9019	1.6	-1.5
4-20	46.1400	46.1563	46.1548	46.1541	46.1551	1.1	15.1
5-22	45.8168	45.8338	45.8311	45.83	45.8316	2.0	14.8
6-10	45.7859	45.7767	45.7791	45.7782	45.7780	1.2	-7.9
7-12	45.8468	45.845	45.8413	45.8411	45.8425	2.2	-4.3
8-14	45.9363	45.9654	45.9691	45.969	45.9678	2.1	31.5

球心編號	標準值 (mm)	量測值(mm)			平均值 (mm)	標準差 (μm)	器差 (μm)
		第 1 組	第 2 組	第 3 組			
9-16	60.3493	60.3532	60.3451	60.3446	60.3476	4.8	-1.7
11-18	60.1635	60.1425	60.1464	60.1469	60.1453	2.4	-18.2
13-20	60.0332	60.0606	60.0584	60.0574	60.0588	1.6	25.6
15-22	60.0445	60.0659	60.0622	60.0619	60.0633	2.2	18.8
17-10	59.8688	59.8571	59.8606	59.8606	59.8594	2.0	-9.3
19-12	59.8989	59.8985	59.8923	59.8911	59.8940	4.0	-5.0
21-14	59.5878	59.6272	59.6333	59.6339	59.6315	3.7	43.6

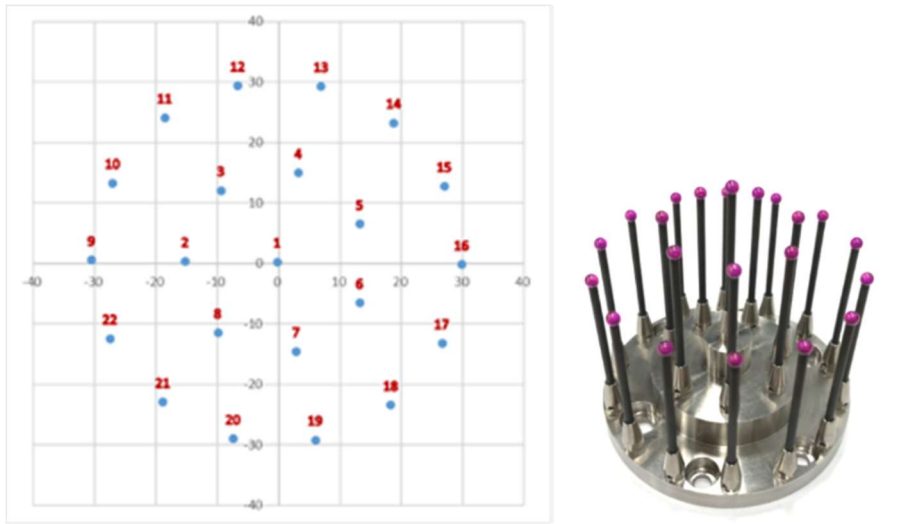


圖 4-6-2 XCT 參考標準件標準球編號

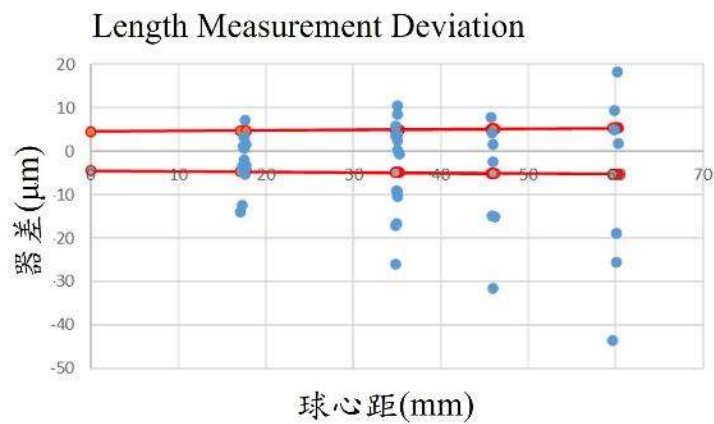


圖 4-6-3 TomoScope XS PL 150 XCT 系統球心距量測驗證結果(註:紅色線條代表 MPE)

D. 廠商預期獲益(相較原狀況改善點):

- (a) 效益:透過 XCT 參考標準件,針對國內 XCT 系統代理商於 2 個工作天內完成系統尺寸量測驗證的服務。
- (b) 導入前後量化效益比較:

項目	導入前	導入後
XCT 系統球心距量測功效 驗證所需時間	1 個月	2 個工作天

案例二:

A. 廠商名: 光賀國際

B. 產業的需求與問題: 基於國內無第三方公正單位可提供驗證與校正服務,故本計畫即以此為出發點使用本子項發展的 XCT 參考標準件,協助光賀國際公司使用中之 XCT 量測系統於國內進行第三方驗證。

C. 技術導入執行情形: 透過 XCT 參考標準件, 針對 TomoScope XS FOV 系統進行球心距量測能力驗證如圖 4-6-4, 42 組不同距離球心距三次量測與參考標準件的數值進行比較分析部分器差數據顯示大於系統 MPE(最大容許誤差)如圖 4-6-6。



圖 4-6-4 使用 XCT 參考標準件進行 TomoScope XS FOV XCT 系統驗證

表 4-6-2 42 組不同距離球心距三次量測與參考標準件的數值(器差 = 平均值 - 標準值)

球心編號	標準值 (mm)	量測值(mm)			平均值 (mm)	標準差 (μm)	器差 (μm)
		第 1 組	第 2 組	第 3 組			
2-9	17.7354	17.7341	17.734	17.7336	17.7339	0.3	-1.5
1-2	17.5065	17.5049	17.5056	17.5067	17.5057	0.9	-0.8
3-11	17.6119	17.6066	17.6045	17.6078	17.6063	1.7	-5.6
1-3	17.4646	17.4603	17.4609	17.4583	17.4598	1.4	-4.8
4-13	17.3282	17.3389	17.3384	17.3389	17.3387	0.3	10.5
1-4	17.5818	17.5833	17.5833	17.5822	17.5829	0.6	1.1
5-15	17.6158	17.6233	17.6225	17.6211	17.6223	1.1	6.5
1-5	17.3263	17.3285	17.3291	17.3275	17.3284	0.8	2.0
6-17	17.4795	17.4775	17.4783	17.4787	17.4782	0.6	-1.3
1-6	17.5349	17.5323	17.5313	17.5309	17.5315	0.7	-3.4
7-19	17.4534	17.4536	17.4537	17.4532	17.4535	0.3	0.1
1-7	17.5958	17.5943	17.5929	17.5932	17.5935	0.7	-2.3
8-21	17.0982	17.1116	17.1129	17.1135	17.1127	1.0	14.5
1-8	17.6822	17.684	17.6831	17.684	17.6837	0.5	1.5

球心編號	標準值 (mm)	量測值(mm)			平均值 (mm)	標準差 (μm)	器差 (μm)
		第 1 組	第 2 組	第 3 組			
1-9	35.2414	35.2385	35.2391	35.2398	35.2391	0.7	-2.3
1-16	35.0335	35.032	35.0323	35.03	35.0314	1.3	-2.1

1-11	35.0761	35.0666	35.0651	35.0657	35.0658	0.8	-10.3
1-18	35.0434	35.0371	35.0369	35.0365	35.0368	0.3	-6.6
1-13	34.9078	34.9198	34.9193	34.9188	34.9193	0.5	11.5
1-20	35.1005	35.1068	35.1072	35.1065	35.1068	0.4	6.3
1-15	34.9416	34.9513	34.9511	34.9481	34.9502	1.8	8.5
1-22	35.0797	35.0883	35.0887	35.0892	35.0887	0.5	9.0
1-17	35.0142	35.0097	35.0094	35.0094	35.0095	0.2	-4.7
1-10	34.8487	34.8401	34.8394	34.8409	34.8401	0.8	-8.6
1-19	35.0490	35.0478	35.0465	35.0462	35.0468	0.9	-2.2
1-12	34.8483	34.842	34.8432	34.8414	34.8422	0.9	-6.1
1-21	34.7763	34.7914	34.7918	34.7932	34.7921	0.9	15.8
1-14	34.8400	34.8654	34.8645	34.8624	34.8641	1.5	24.1

球心編號	標準值 (mm)	量測值(mm)			平均值 (mm)	標準差 (μm)	器差 (μm)
		第 1 組	第 2 組	第 3 組			
2-16	45.9517	45.9461	45.9482	45.9473	45.9472	1.1	-4.5
3-18	45.9128	45.8995	45.8997	45.8984	45.8992	0.7	-13.6
4-20	46.1400	46.1465	46.1459	46.145	46.1458	0.8	5.8
5-22	45.8168	45.8257	45.826	45.8257	45.8258	0.2	9.0
6-10	45.7859	45.7712	45.7709	45.7715	45.7712	0.3	-14.7
7-12	45.8468	45.8357	45.836	45.8343	45.8353	0.9	-11.4
8-14	45.9363	45.9621	45.9605	45.9606	45.9611	0.9	24.8

球心編號	標準值 (mm)	量測值(mm)			平均值 (mm)	標準差 (μm)	器差 (μm)
		第 1 組	第 2 組	第 3 組			
9-16	60.3493	60.3377	60.3382	60.3385	60.3381	0.4	-11.2
11-18	60.1635	60.1432	60.1413	60.1432	60.1426	1.1	-20.9
13-20	60.0332	60.0461	60.0456	60.0453	60.0457	0.4	12.5
15-22	60.0445	60.0565	60.0569	60.054	60.0558	1.6	11.3
17-10	59.8688	59.8494	59.8506	59.8514	59.8505	1.0	-18.3
19-12	59.8989	59.8873	59.8875	59.8859	59.8869	0.9	-12.0
21-14	59.5878	59.6224	59.6227	59.6224	59.6225	0.2	34.7

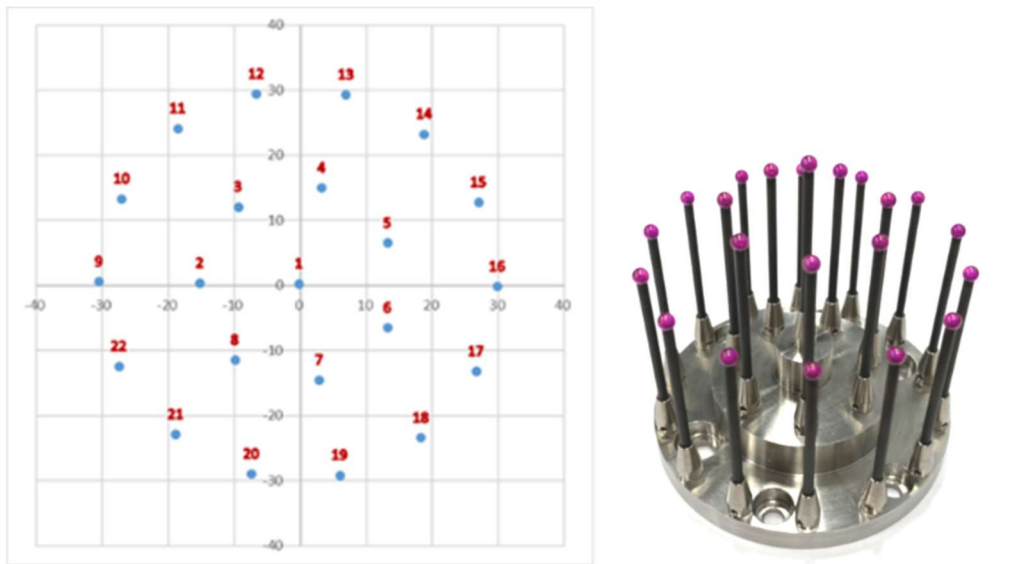


圖 4-6- 5 XCT 參考標準件標準球編號

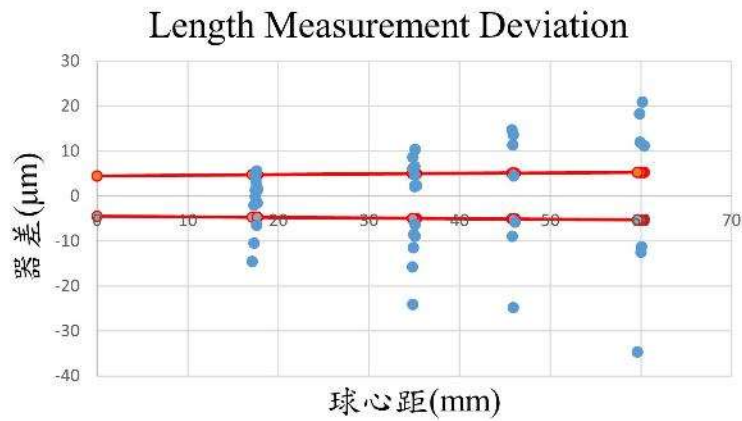


圖 4-6- 6TomoScope XS FOV XCT 系統球心距量測驗證結果(註:紅色線條代表 MPE)

D. 廠商預期獲益(相較原狀況改善點):

- (a) 效益:透過 XCT 參考標準件,針對國內 XCT 系統使用廠商於 2 個工作天內完成系統尺寸量測驗證的服務。
- (b) 導入前後量化效益比較:

項目	導入前	導入後
XCT 系統球心距量測功效 驗證所需時間	1 個月	2 個工作天

五、本年度技術亮點

(一) 數位式線軌組裝調校量測技術

為提升工具機組裝之幾何誤差品質檢測工具,本子計畫開發多自由度誤差量測技術,基於準直光為參考,進行線性運動的水平與垂直方向直線度線性誤差,與俯仰與搖擺的角度誤差的同時

量測與解耦，以提供完整寫效率較高的量測方法，儀器具備半絕對特性，可移開重複量測，以對正到現場調整使用的操作需求。

應用方面，由於使用了光為參考的虛擬基準，避免掉笨重直規的安裝、調整操作、重力變形、翻面與損傷等問題，於各樣機台尺寸的操作上也較為便利，可使用單一量測儀器，而省略了需調多種直規尺寸的問題。在較長行程與準直儀比較，開發技術可以任意點量測，避開了使用角度量測直線度，克服了角度量測直線度需要固定點位的重疊與積分誤差的問題，可以縮短量測時間與品檢的完整性，未來可持續精進平行度與垂直度的量測功能，這是使用準直儀不容易進行的量測。圖 5-1-1 為場域應用實地現況，圖 5-1-2 說明導入前使用方法，與導入後使用方法以及其預期差異。



圖 5-1-1 高鋒與亞崙場域量測現況圖

Before	After
<p style="color: red;">高低誤差或角度誤差？ 阿貝誤差、直規彎曲 (如何修正?修正值多少?)</p> <p>使用 000 級直規 (3 $\mu\text{m}/\text{m}$) 搭配量錶的組裝 (允收規格為 10~15 $\mu\text{m}/\text{m}$ 或 7 $\mu\text{m}/300\text{mm}$)</p>	<p style="text-align: center;">測試雛形</p> <p>應用範圍：</p> <ul style="list-style-type: none"> • 線軌或硬軌安裝基準面 • 線軌組裝檢測 • 組裝後滑台 • 擴充至平行度、垂直度檢驗 預計構型 60 x 60 mm <p style="text-align: center;">解析度 0.1 μm, 0.1" ; 工件直線度期望 $\leq 5 \mu\text{m}/\text{m}$</p>

圖 5-1-2 場域應用案例說明

(二) 主軸狀態監測技術

- **高速主軸軸承預壓力監測技術**

主軸與軸承之健康度通常以外掛式模組進行振動量測與分析，且振動訊號為落後指標，無法提早偵測異常現象，且一般之振動量測模組雖常用且易於安裝，但事實上軸承預壓為異常振動、異常溫度產生之主要原因，在實際場域中並無可直接量化預壓大小之監控設備，需要透過利用荷重元與位移計(接觸式)來得知力與位移之關係間接量測預壓。本技術所開發之預壓力量感測器可直接量測主軸運行時的軸承預壓狀態，相比振動量測為領先指標，可作為主軸運行健康度的參考指標並提早發現異常現象。本技術除可用於主軸組裝也可應用於工具機使用中各階段。本年度已完成感測器設計與分析結果，相關規格皆符合計畫要求與廠商需求。並將技術導入實際場域，與普森精密主軸工業有限公司合作進行場域試驗，可於主軸安裝時進行預壓的大小確認與低速運轉時進行預壓量測。

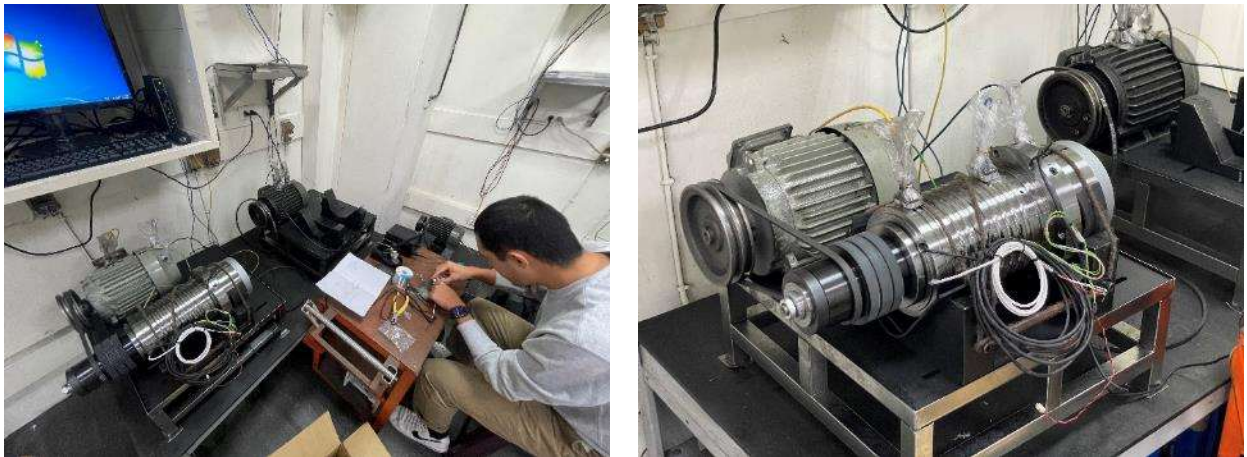


圖 5-2-1 普森主軸場域試驗現場量測示意圖

- **微型定點囊的開發與製作**

技術導入前:

智慧化主軸的溫度感測器大多安裝於前/後軸承附近，以監測主軸工作溫度。然而，主軸溫度感測器因內部所使用的材質易受主軸長期物理振動或油封等化學環境影響而逐漸產生漂移，造成主軸熱變位補償錯誤與過熱磨損，影響加工精度。因此，需要定期拆卸溫度感測器進行校正。目前溫度感測器缺乏線上校正方案，加工期間品質難以掌控，品檢需停機、拆裝與後送校正實驗室，整體耗時可達 12 天左右。另一方面，工業型溫度感測器大多使用傳統溫度加熱爐來進行比較校正，準確度在 1.0℃ 以內，不僅加熱時間久，而且爐體體積大並有高耗能的缺點。此外，溫度感測器的拆裝機也不方便，對一般使用者更是棘手問題。為了協助國內產業掌握線上製程品質與提升國際競爭力，執行團隊研發自校型溫度感測器來滿足線上校正之需求，改善廠商或使用者在校正所需的成本及時間。

技術導入後:

自校型溫度感測器利用微型定點囊技術，可直接追溯至溫度原級標準校正，並將溫度標準送至業界使用者最前端，準確度可長期控制在 0.5℃ 以內。此外，比起傳統加熱爐而言，可降低耗能 83%，有助於節能減碳的實施；對於業界使用者而言，則不僅可有效掌控溫度感測器失效的風險並提高生產品質，更能減少停機、拆裝、傳遞感測器所耗費的時間與成本，可在 60 分鐘內完成，縮短校正時間 99%。同時，也能進一步實現遠端監控與線上校正的功

能，逐漸取代實驗室校正與現場遊校的效益，特別適合應用在極端場合的環境監控下，如核電廠、航太元件、半導體設備、國防裝備儲存等。

成果:

目前執行團隊已完成內嵌式微型定點囊技術的開發與製作，並整合進內藏式主軸溫度感測器內，進行溫度量測與微型定點囊溫度相變化功能的測試，以實現溫度領域新的標準傳遞方式，改善因溫度感測器漂移所造成的主軸熱變位補償錯誤與加工精度，使生產線精度邁向智慧化製造。未來將進一步提供不同溫度定點的標準，擴大應用到鋼鐵業與半導體產業線上溫度校正的需求。

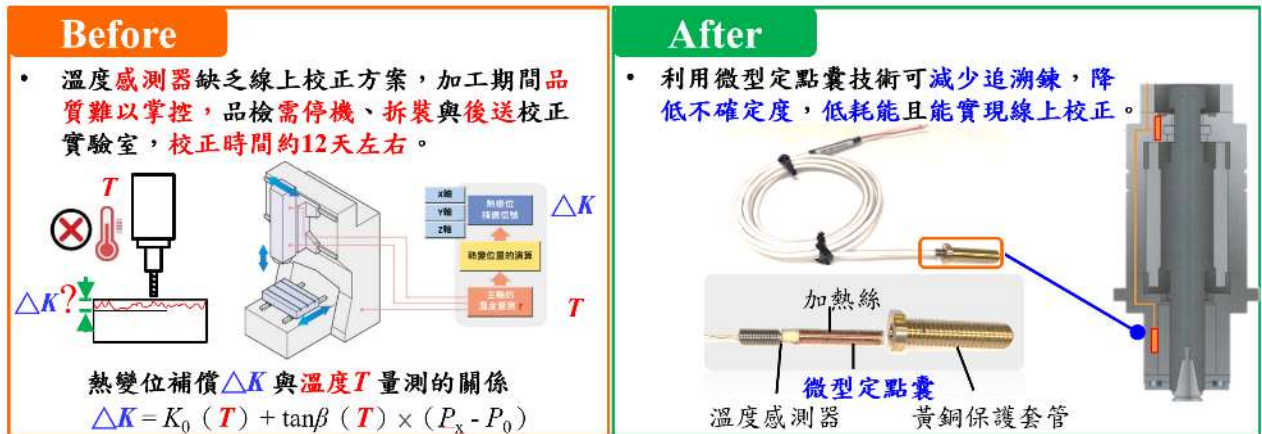


圖 5-2-2 普森精密案例說明

(三) 主軸線上量測技術

主軸作為工具機的心臟，屬於工具機裡面核心組件，迴轉誤差是評估主軸精度重要指標，直接影響工具機加工工件精度。現有商用量測技術，將標準球與位移感測器固定於主軸刀具上，進行主軸迴轉誤差量測，仍屬於離線(Off-line measurement)量測方法，尚未有商用產品可實際應用於現場量測(In-situ measurement)。

計畫發展主軸線上量測技術，參考國際規範 ISO 230-7 設計、製作主軸迴轉誤差量測模組，將現有使用標準球與位移感測器的離線量測方法，改為透過環形編碼器搭配讀頭，安裝於刀把與刀具間，解決主軸迴轉誤差現場量測需求。主軸迴轉誤差量測模組的設計考慮到廠商所使用的主軸型式不一，可依據不同主軸型式變更上板尺寸，上板規格符合對應的主軸型式即可安裝使用，如普森主軸型式為 BT40，需將上板更改為符合 BT40 的規格進行安裝。主軸迴轉誤差量測模組內的環形編碼器及讀頭量測主軸旋轉角度值，再由演算法對角度量測值進一步分析得到 5 項迴轉誤差(角度: E_A, E_B 、線性: E_X, E_Y, E_Z)。依據所使用的環形編碼器、讀頭與資料處理器規格，主軸迴轉誤差量測模組解析度可達角度 $\leq 0.1''$ 、線性 $\leq 0.2 \mu\text{m}$ ，可滿足 ISO 10791-2^[1-3-4] 規範檢驗所需解析度，其內容說明主軸規格靜態檢驗許可值線性需小於 $20 \mu\text{m}$ 及角度需小於 $15''$ 。此技術已向普森精密主軸推廣，將主軸迴轉誤差量測模組安裝於普森提供的主軸跑合平台上，由低轉速(500 rpm)慢慢拉高轉速，分析不同轉速下的迴轉誤差，實現主軸迴轉誤差現場量測需求。

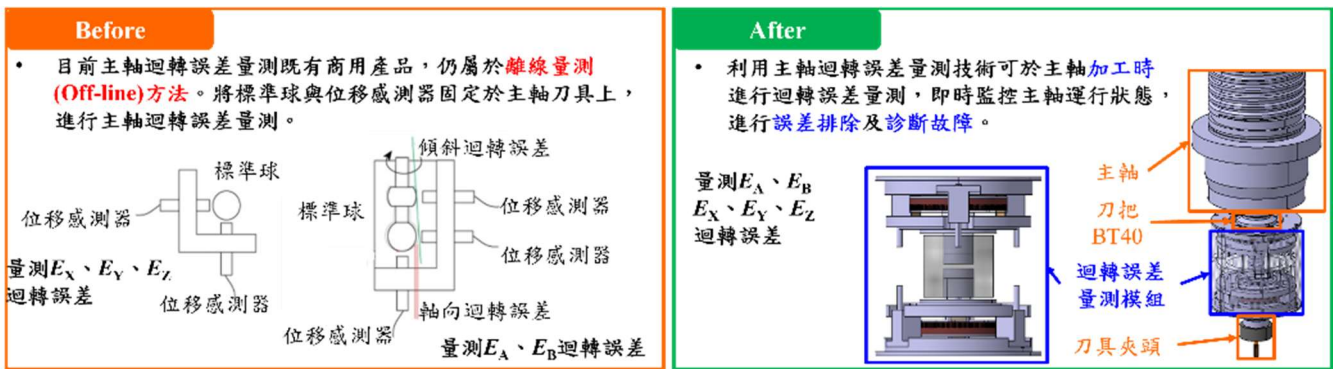


圖 5-3-1 主軸迴轉誤差量測模組

(四) 工具機組裝品質智慧分析與精度補償

為協助工具機製造商提升工具機之整機精度品質，並確保產線上組裝之品質穩定性，本子計畫開發工具機組裝品質智慧分析技術，透過雅可比旋量理論模型的坐標系轉換和利用小變形量之特性，將其應用於工具機組裝品質分析(包含訂定允收公差範圍、關鍵公差參數影響排列和精度補償策略)。目前的推廣規劃為幫助台中精機建立工具機組裝品質分析模組，並結合廠商內部的製造執行系統(MES)，提供工具機製造商在機台設計端之允收公差訂定，及在組裝產線中之關鍵公差參數判定，藉由前端在工具機之公差設計和中端在生產線之關鍵公差參數影響排列，提升工具機整機精度品質。

導入成果包括完成建立多體系統、組裝公差及量測不確定度變化模擬系統。進行零件及組裝關鍵公差與量測不確定度排序，協助擬定量測方案改善，提升整機靜態幾何精度至少 5%。

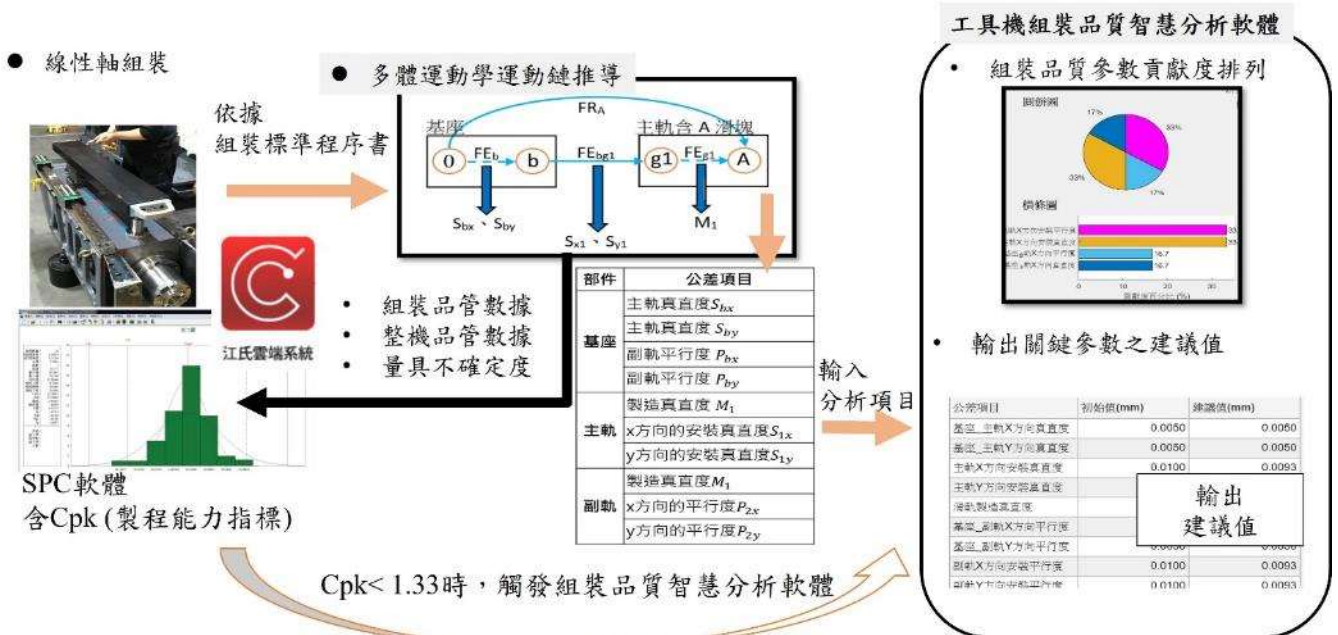


圖 5-4-1 完成組裝品質精度補償設計分析軟體整合至台中精機之 MES 系統之流程

(五) 機空間精度監測策略

本計畫的主要目標是滿足工具機終端使用者對工具機精度的確認需求，得以快速監測機台狀態，確保工具機的加工精度。計畫參考國際規範 ISO 230-2，致力於發展幾何誤差的量測技術，並提出快速查核件技術開發，能直接量測線性軸中的三項幾何誤差。既有工廠端量測方法，需搭配

不同量具或標準件，目前常使用幾何誤差商用量測設備為 Renishaw 雷射干涉儀，量測使用上需搭配多套量測設備使用且需要更換不同光學鏡組，增加了成本和時間。為了解決這些問題，本計畫發展整機空間精度監測策略技術，參考 ISO 230-2，以五軸工具機之線性軸為量測對象，設計與製作線性軸用快速查核件，透過利用工具機上的刀具交換系統，將刀具置換為 3D 量測測頭，可以快速量測查核件的各個特徵座標，並進行幾何誤差分析。這種方法將協助工具機客戶端迅速取得工具機的關鍵幾何誤差需求，同時改善了廠商量測所需的成本和時間。目前與國內五軸工具機廠商永進機械及虎尾科技大學已展開合作並進行場域試煉，將該技術應用於五軸工具機機型，以量測關鍵的線性定位與垂直度幾何誤差，提供工具機使用者現場快速查核幾何誤差的需求，整個量測過程於 10 分鐘完成即時量測，且滿足計畫目標量測重複性小於 5 μm ，並可提供使用者隨時對工具機精度進行查核，可提早發現工具機精度異常，確保工具機的長期運作。

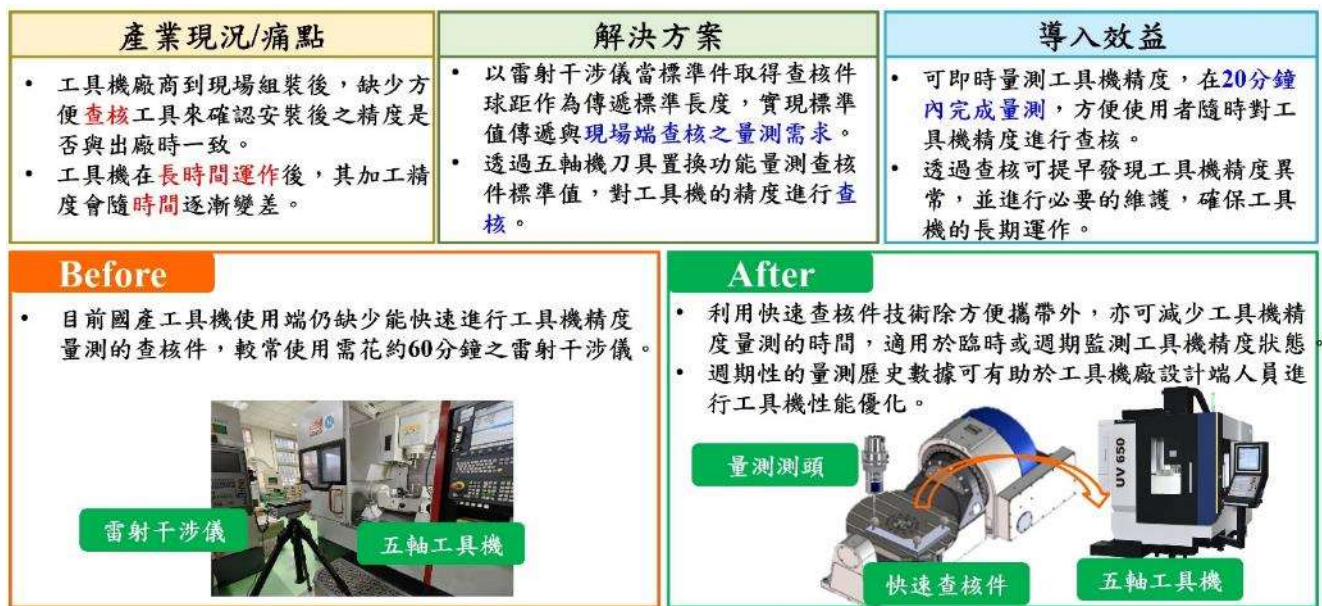


圖 5-5-1 快速查核件案例說明

(六) 工業用 XCT 校正技術

XCT (X-ray Computed Tomography, X 光電腦斷層掃描儀) 檢測量測技術因具有非破壞性與高解析度等特性，工業上常應用 XCT 進行工件內部結構量測與檢測，要如何驗證量測結果的準確性與不確定度 XCT 設備性能驗證與校正是重要的課題，本計畫工業 XCT 校正技術 FY112 年建立 XCT 參考標準件與 XCT 設備性能驗證方法，解決 XCT 設備開發廠商長久以來國內並無具公信力的第三方單位提供 XCT 設備性能驗證的瓶頸，同時能提供 XCT 設備使用廠商即時驗證服務，縮短 XCT 設備性能驗證校正時間(1 個月縮短至 1 天內完成)，具體促進國內產業應用 XCT 系統於精密製造與量測，同時可協助日後 XCT 系統開發之產業發展。

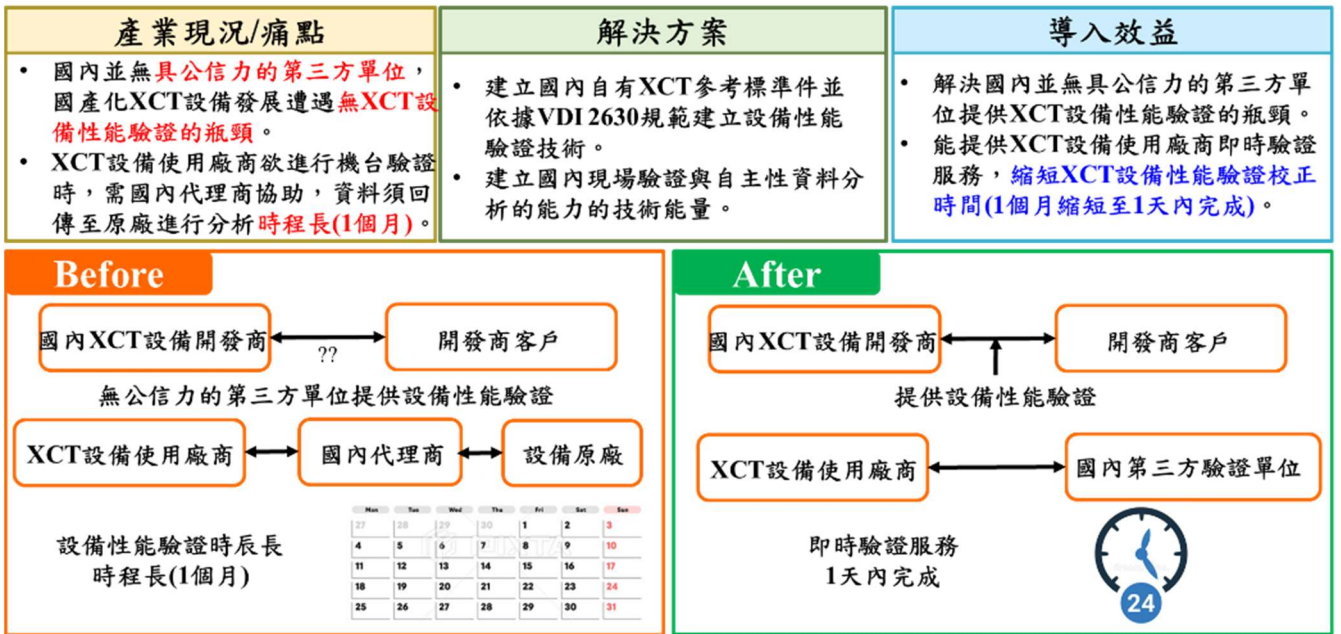


圖 5-6-1 建立國內自有 XCT 參考標準件追溯與 XCT 系統驗證技術導入國內產業前後比較圖



圖 5-6-2 國內自有 XCT 參考標準件追溯與 XCT 系統驗證技術說明

六、後續成果應用與服務之擴散規劃

整體計畫面仍持續以座談會、研討會等進行廣宣，同時與公會、PMC 等合作，直接與產業進行連結，將量測技術深耕於產業，各技術項目後續之應用與服務擴散規劃如下：

- 數位式線軌組裝調校量測技術：技術成果除提供產業對於工具機線軌組裝與床台直線運動的應用，實際上也應用於高精度的光柵檢測平台與精微雷射加工應用，後續將持續進行技術應用推廣，以及完善使用者量測功能開發、校正與效度的確認，以及跨領域的創新應用。
- 主軸狀態監測技術：將持續與相關廠商合作，達成技術的應用與推廣，由目前合作的主軸廠拓展至其他工具機廠，提供更有效的預壓量測技術。另外，自校行溫度感測器技術，持續進行技術可行性驗證，後續可導向遠端溫度線上監測/校正設備開發，並逐步取代傳統校正方式

的冗長作業程序，特別是在極端環境下的應用，如核電廠、航太元件、半導體設備、國防裝備儲存等的環境監控上。

- 主軸線上量測技術：持續推廣至工具機業者與主軸製造廠商，可於主軸加工時進行迴轉誤差量測，即時監控主軸運行狀態，進行誤差排除及診斷故障。未來也可將此技術應用至主軸以外的旋轉軸迴轉誤差量測。
- 工具機組裝品質智慧分析與精度補償：持續推廣讓更多工具機業者能掌握組裝後整機幾何誤差之表現，並持續將組裝品質分析軟體整合至組裝產線(MES)系統上，來提升組裝精度及達品質長效之效果。
- 整機空間精度監測策略：此技術後續會持續推廣讓更多工具機業者完成幾何誤差量測與分析，未來亦可將量測分析結果整合至人機介面，透過電腦與控制器進行資料傳輸與執行進行即時量測工具機精度，方便使用者隨時對工具機精度進行查核。
- 工業用 XCT 校正技術：此技術後續會配合計畫所開發之可攜式 XCT 標準件與驗證方法，推廣協助國內 XCT 設備開發商提供第三方 XCT 設備性能驗證，並提供國內 XCT 設備使用廠商即時驗證服務，再者也可服務產業之微結構非破壞量測與檢測。

七、委託執行情況

本年度計畫委託各單位持續進行瞭解產業界需求並進行相關成果技術推廣，各委託項目與工作成果如下說明。

(一) 全國工業總會：智慧機械計量政策與產業發展推廣服務

本計畫智慧機械產業及其他相關產業計量政策與技術領域宣導與溝通事項等，以向廠商進行量測標準或技術發展之推廣。

- 協助辦理國家標準制修訂業務，瞭解產業界對國家標準是否有相關需求。
- 協助佈達商品列檢及檢驗規定制修訂訊息至相關公會與業者。
- 協助辦理智慧機械產業及其他相關產業計量政策與技術領域宣導與溝通事項。推廣智慧機械產業及其他產業活動，將重要計量(度量衡)技術與法規、管理措施、知識登載於全國工總電子及紙本刊物(如工商季刊或產業雜誌)，以周知相關公協會與廠商了解或運用，本年度透過工總傳達業者本局業務資訊或業者回饋之相關資訊達 21 項(件)次。
- 協助業者排除出口技術性貿易障礙，宣導「TBT 資訊暨強制性商品檢驗規定資料庫」，使業者更容易取得各國法規變動資訊，也辦理「印度 ISI 認證檢驗流程線上說明會」，協助業者充分瞭解印度 ISI 認證，申請資格、檢驗流程與注意事項。

(二) 精密機械研究發展中心：智機產業技術推動及服務

本計畫為整合國內工具機及相關零組件產業能量，綜整國內專家學者與指標性廠商之建議，分析國內外產業趨勢及臺灣相關零件廠商能量，盤點國內可能必要發展之工具機及相關零組件產業技術項目，規劃後續技術應用與發展策略，並鏈結公協學會及各廠進行諮詢與線上量測標準與校正技術推動。

- 結合相關法人、學者專家組成服務團隊，涵蓋工具機組裝量具與數位履歷、整機與關鍵零組件狀態監測技術、整機和零組件 MTBF 定義方式與監測技術三議題，針對工具機及相關零組件業者進行需求訪視，瞭解廠商需求，掌握業者對相關技術的實際需求與技術期待；透過問卷調查方式，共收集 20 家次廠商，並分析其線上量測標準與校正需求。

- 協助 4 項草案進行「徵求意見」及「審查」兩階段工作，標準草案為 ISO 11090-1:2014 雕模放電加工機(雕模 EDM)試驗條件 - 第一部、ISO 11090-2:2014 雕模放電加工機(雕模 EDM)試驗條件 - 第二部、ISO 13041-1:2020 數值控制車床及車削中心機之試驗條件—第一部、ISO 13041-2:2020 數值控制車床及車削中心機之試驗條件—第二部，共計辦理 14 場次審查會議。
- 協助計畫技術成果真正落實於工具機產業，完成技術導入工具機製造直接相關之廠商應用 2 家次，產業服務收入金額為新台幣 70 萬元整(含稅)。
- 辦理「智慧機械產業智慧化線上計量標準建置計畫問卷調查線上說明會」，向與會廠家業者代表推廣及介紹「智慧機械產業智慧化線上計量標準建置計畫」計畫資訊，以輔導、補助等方向，系統性介紹計畫資源及申請程序，協助有參與意願的業者以標準合作運作機制為基礎，共同深化智慧製造相關領域測試與數據分析，共計 5 個單位共 6 人次參加。
- 辦理「五軸工具機幾何量測技術應用研討會」，議題鎖定精度議題，安排介紹五軸工具機幾何精度檢測技術與五軸工具機旋轉軸幾何誤差補償，讓參與廠商瞭解工具機精度檢測技術的重要性，同時透過現場經驗交流，讓參與廠商可以重新檢視廠內工具機精度檢測方式的適切性，有助於提升工具機加工品質及加工效率，進而增加臺灣工具機產業的整體競爭力，共 11 個單位共 24 人次參加。
- 辦理「智慧機械產業智慧化線上計量標準建置計畫專家座談會」1 場次，本次活動分享計量標準建置計畫、問卷統計結果及 MTBF 定義及監測方法，並交流相關對於產業提升之建議同時，以祈提升台灣工具機產業建立線上量測與即時校正能量。會中總共 27 個單位，共計 65 人次參加，其中產業界共 19 個單位，主辦及承辦共 3 個單位，公會共 3 個單位，學界共 2 個單位。

(三) 國立台灣大學工學院機械工程學系: 工具機之 NC 代碼量測程序開發

本計畫為協助量測中心將快速查核件於五軸工具機量測(搖擺床優先)，完成空間精度監測作業，開發一種工具機控制器補償人機介面，未來使用者可以透過此介面完成 NC 路徑修改及上傳，並且連結各大控制器中，如 Siemens，軟體能與工具機業者常用之控制器進行連線作為功能示範。由這次研究計畫開發，將 NC 代碼匯入至工具機控制器，進行幾何誤差量測，有助於完成快速查核量測實例，運用於工具機產業中。

- 協助提供 CNC 量測路徑生成介面一套。目前多家工具機對於參數修正或 NC 加工都是使用手動人工方式進行，在時間上會有很多不便之處，因此團隊搭配資通訊人才，針對目前業界需求開發出一套 NC 碼上下載軟體，並可搭配快速檢驗件，能夠有效簡化補償時間。
- 協助與工具機業者常用之控制器進行連線作為功能示範。完成場域 NC code 生長及上下載測試，場域於國立虎尾科技大學智能機械與智慧製造技術研究中心，百德 MF-400 siemens 控制器立式銑床加工機進行測試。
- 提供介面操作技術報告一份。

肆、資源運用情形

一、人力運用情形

- 人力配置

主持人	計畫名稱	預計人年	實際人年
傅尉恩	智慧機械產業智慧化線上計量標準建置計畫	16	12.17

- 計畫人力

單位:人年

分類		職稱					學歷					
年度	達成情形	研究員級以上	副研究員級	助理研究員	研究助理員級	研究員助理員級以下	博士	碩士	學士	專科	其他	合計
112	預計	12.9	2.6	0.5	0	0	5.91	7.52	1.73	0.84		16
	實際	9.13	2.12	0.92	0	0	3.35	6.91	1.23	0.68		12.17

註：以上為累計至 112 年 11 月 30 日之動支統計值；預估至 12/30 約為 15 人年。

二、經費運用情形

- 歲出預算執行情形

單位:元

會計科目	預算數		實際數	
	金額(B)	佔預算數總計% (C=B/A)	金額(D)	佔實際數總計% (E=D/A)
(一)經常支出				
1.直接費用				
(1)直接薪資	20,434,000	41.50	17,297,682	37.74
(2)管理費	4,902,000	9.96	4,652,000	10.15
(3)其它直接費用	13,992,600	28.51	13,992,600	30.53
2.公費	244,000	0.50	231,000	0.50
經常支出小計	39,572,600	80.47	36,173,282	78.93
(二)資本支出				
1.土地				
2.房屋建築及設備				
3.機械設備	9,608,000	19.52	9,608,000	20.97
4.交通運輸設備				
5.資訊設備				
6.雜項設備				
7.其他權利	47,400	0.01	47,400	0.10
資本支出小計	9,655,400	19.53	9,655,400	21.07
合計(A)	49,228,000	100.00	45,828,682	100

註：以上為累計至 112 年 11 月 30 日之動支統計值。

• 歲入繳庫情形

• 單位:元

科 目		本年度預算數	實際繳庫數	差異說明
財產收入				
不動產租金		-	-	
動產租金		-	-	
廢舊物資售價		-	-	
權 利 售 價	專利授權金 ^註	-	-	
	權利金	-	-	
	技術授權金 ^{註1}	4,000,000	4,000,000	
	製程使用	-	-	
	其他-專戶利息收入	-	-	
罰金罰鍰收入				
罰金罰鍰		-		
其他收入				
審查費(校正服務費)		-	-	
供應收入-資料書刊費		-	-	
服務收入-教育學術服務技術服務		-	-	
業界合作廠商配合款		-	-	
收回以前年度歲出		-	-	
其他雜項		-	-	
合 計		4,000,000	4,000,000	

伍、計畫變更說明

年度辦理計畫變更情形如下:

項次	變更內容	申請變更文號	標準局回覆同意備查文號
1	因應計畫專利獲證，辦理資本門項下之機器儀器設備科目預算流用47.4千元至其他權利科目，以支應專利獲證。及新增人力一員。	112.4.19 工研量字第1120007580號	112.5.1 經標四字第11200023910號
2	因應計畫執行人員離職及新進，調整執行人員名單，辦理計畫執行人員變更	112.8.16 工研量字第1120017986號函	112.8.21 經標四字第11200671470號

註:有關出國事宜經濟部102年10月起授於各局處管理，如出國任務、地點、時間、天數、項次之預算增加及配合調減勻支給該項次之項目，均需向局辦理變更報准同意。

陸、成果說明

一、量化成果彙總表

成果		預定	實際達成
論文	論文投稿(含 1 篇 SCI)	7	11 (3 篇 SCI)
合作團隊(計畫)養成	機構內跨領域合作團隊(計畫)數	2	2
博碩士培育	博士	5	0
	碩士		6
研究報告	技術報告(含 ICT/MSVP 撰寫修訂)	7	23
專利	申請與獲得合計	3	5
技術研討會(含專家座談會)	場次	6	6
技轉與智財授權	技術/專利運用繳庫(仟元)	4,000	4,000
科研設施建置及服務	量測標準系統擴建(套)	1	1
	建立線上量測技術(項)	3	4
參與國內外相關標準訂定研究(件)		3	4(註 2)
分包研究(註 1)	件數	1	1
	金額-仟元	550	550
研發技術導入示範案例	示範案例(案)	10	12
	品質長效示範案例(案)	2	2
廠商訪視推廣(家次)		10	22

註 1：產學研合作分包案 1 件 550 仟元為與台大機械工程學系共同合作的成果案例，臺灣大學已經深耕在工具機檢測以及補償多年，可透由這次研究計畫開發出將 NC 代碼匯入至工具機控制器，進行幾何誤差量測，將有助於完成快速查核量測實例，運用於工具機產業中。

註 2：協助標準局一組進行 4 項草案的審查相關程序，分別為：

- (1)ISO 11090-1: 2014 雕模放電加工機(雕模 EDM)試驗條件—準確度測試—第 1 部：單柱機。
- (2)ISO 11090-2: 2014 雕模放電加工機(雕模 EDM)試驗條件—準確度測試—第 2 部：雙柱機。
- (3)ISO 13041-1: 2020 數值控制車床及車削中心機之試驗條件—第 1 部：臥式工件夾持主軸工具機之幾何試驗。
- (4)ISO 13041-2: 2020 數值控制車床及車削中心機之試驗條件—第 2 部：立式工件夾持主軸工具機之幾何試驗。

二、計畫購置儀器設備彙總表

機關(學校)名稱:經濟部標準檢驗局

單位:元

編號	儀器名稱 (英文名稱)	使用單位	單位	數量	單價	優先 順序	儀器廠牌及 型號
1	工業用 X 光斷層 掃瞄儀-XCT 機台 本體	工研院 量測中心	台	1	9,608,000	1	廠牌: Werth 型號: TomoScope XS Plus 200

填表說明:

- 1.本表中儀器名稱以中文為主，英文為輔。
- 2.依契約本計畫新臺幣 300 萬以下設備，由執行單位自行籌款購置，計畫編列設備使用費分年攤提。
- 3.本設備於 112.11.24 經獲 4 位委員審查同意通過，完成資本設備驗收。

三、國外出差人員一覽表

短期訓練

計畫書 項次	主要內容	出差 國家	期間	參加人員 姓名	在本計畫擔任 之工作	對本計畫之助益
1	參加 EUSPEN 2023 研討會 發表論文	丹麥	06/10 ~ 06/18	林明賢	子計畫主持人	發表論文，並且蒐集歐洲計量組織和業界於計量議題發展以及相關最新研發成果。
2	參加 2023 ICMT 研討會 發表論文	南韓	10/17 ~ 10/22	沈世家	主軸狀態監測 技術子計畫研 究人員	發表論文，並蒐集國際上先進機電技術於工具機及主軸等相關應用與發展趨勢，以及機電感測應用於工業製造(如工具機或主軸等)相關精密監測技術。
3	參加 2023 dXCT 研討 會、拜訪 NPL	英國	06/24 ~ 07/02	陳文仁	分項主持人	蒐集相關國際技術與標準發展趨勢，與 NPL 交流 dimensional metrology 相關產業需求與技術發展，評估後續合作的可能性與機會。
4	參加 2023 漢諾威 EMO 工具機展及 拜訪 PTB	德國	09/16 ~ 9/24	林明賢	整機空間精度 監測策略子項 計畫主持人	參訪工具機展展覽，了解國際大廠之工具機精度水平、品質長效和健康監測策略等各領域現有技術及發展趨勢。

計畫書 項次	主要內容	出差 國家	期間	參加人員 姓名	在本計畫擔任 之工作	對本計畫之助益
5	參加 Smart Production Solutions 2023	德國	11/12 ~ 11/18	陳生瑞	協同計畫主持人暨線上量測與組裝調整分項主持人	蒐集相關最新發展技術與產品資訊，了解工具機智慧化與自動化之計量技術與未來研究方向，作為計畫後續執行與規劃之參考。

長期訓練

項次	出差性質	主要內容	出差 機構/ 國家	期間	參加人 員姓名	在本計畫擔 任之工作	對本計畫之助益
無							

四、研究成果統計

成果 項目	專利權 (項數)		著作 權 (項數)	論文 (篇數)		一般研究報 告(篇數)			技術創新(項數)				技術 引進 (項數)	技術移轉 或 專利應用		技術 (校正) 服務		研討會		
	獲證	申請		期刊	研 討 會	技 術	調 查	訓 練	產 品	製 程	應 用 軟 體	技 術		件 次	家 次	項	家 次	場 次	人 數	日 數
智慧機械產業智慧化線上 計量標準建置計畫	1	4	-	5	6	23	-	-	-	-	-	-	-	20	17	-	-	6	172	0.6

註:(1) 技術創新一欄中所謂產品係指模型機、零組件、新材料等。

(2) 專利權及著作權項數以當年度核准項目為主，若為申請中案件則於次年度中列報。

(3) 研討會含在職訓練、成果發表會、說明會、論壇。出國情形一覽表

五、技術/專利應用一覽表

◎全年度累計簽約金額計 5,577,995 元，已完成收款數計 5,457,064 元，繳庫 4,000,000 元

項次	技術項目	廠商	運用模式	授權案與計畫建立的關鍵技術之關聯性	合約數 (元)	累計收入數 (元)	累計繳庫金 額(元)	簽約 年度	備 註
1	奈米壓痕液下環境與 拉伸機械性質量測技 術運用服務	東海大學	技術授權	運用計畫建立之「小力量校正技術研發」的產業應用案，客戶利用該技術，以奈米壓痕量測薄膜材料之機械性質以調整研發中產品的製程參數改善或提升良率，加速其產品開發效率準確與精密的量測能力；或以小力量拉伸機械性質(≤ 500 mN)量測服務以滿足檢測需求。	108,000	108,000	64,800	112	
2	半導體量測技術運用	穩懋半導體股份有限公司	技術授權	運用計畫建立之「線上加工尺寸量測技術」的產業應用案，滿足工廠內探針式儀器需藉由不同尺寸標準件來進行校正之需求，並將標準追溯至技術所發展幾何標準件，滿足標準件需校正追溯需求。	70,000	70,000	42,000	112	
3	軌道線形量測儀感測器 技術自我運用	台灣檢驗科技股份有限公司	技術授權	運用計畫建立之「線上加工尺寸量測技術」的產業應用案，研發中心內座標量測儀中不同尺寸標準件，追溯至技術項目所需之	285,000	285,000	171,000	112	

項次	技術項目	廠商	運用模式	授權案與計畫建立的關鍵技術之關聯性	合約數(元)	累計收入數(元)	累計繳庫金額(元)	簽約年度	備註
				尺寸標準件，滿足標準件需校正追溯需求。					
4	座標量測儀之量測不確定度評估能力輔導	愛爾蘭商速聯股份有限公司台灣分公司	技術授權	運用計畫建立之「線上加工尺寸量測技術」的產業應用案，研發中心內座標量測儀中不同尺寸標準件，可將標準追溯至技術所發展幾何標準件，滿足標準件需校正追溯需求。	400,000	400,000	240,000	112	
5	半導體檢測機台環境檢測技術成果運用服務	大量科技股份有限公司	技術授權	運用計畫建立之「主軸狀態溫度監測技術」的產業應用案，協助國內廠商開發半導體檢測機台的環境溫度監測技術，改善機台內發熱功率過高的元件，以提升檢測參數的穩定性，並滿足溫度標準的追溯需求。	305,000	305,000	183,000	112	
6	量測金屬板校正技術自我運用	法樂適電業有限公司	技術授權	運用計畫建立之「線上加工尺寸量測技術」的產業應用案，滿足工廠內儀器需藉由不同尺寸標準件來進行校正之需求，並將標準追溯至技術所發展幾何標準件，滿足標準件需校正追溯需求。	44,000	44,000	26,400	112	

項次	技術項目	廠商	運用模式	授權案與計畫建立的關鍵技術之關聯性	合約數(元)	累計收入數(元)	累計繳庫金額(元)	簽約年度	備註
7	Dynamic fatigue test of TRA Diesel-electric Locomotive	瑞士商施泰德股份有限公司台灣分公司	技術授權	運用計畫建立之「主軸狀態溫度監測技術」的產業應用案，協助廠商進行軌道車輛的環境溫度監測技術，改善車廂內空調的均溫性與溫度分布，並滿足溫度標準的追溯需求。	100,000	100,000	60,000	112	
8	Dynamic behavior and comfort test of TRA Diesel-electric Locomotive	瑞士商施泰德股份有限公司台灣分公司	技術授權	運用計畫建立之「主軸狀態溫度監測技術」的產業應用案，協助廠商進行軌道車輛的環境溫度監測技術，改善車廂內空調的均溫性與溫度分布，並滿足溫度標準的追溯需求。	100,000	100,000	60,000	112	
9	耳溫計標準器-單定點	泓鈺實業股份有限公司	技術授權	運用計畫建立之「主軸狀態溫度監測技術」的產業應用案，藉由校正過的溫度感測器對溫度校正器進行黑體溫度的確認，將溫度標準直接傳遞至儀器上，滿足現場溫度計的校正需求。	20,000	20,000	1,200	112	
10	8吋晶圓形貌機台設計製作 ICP-FR-K203	承湘科技股份有限公司	技術授權	運用計畫建立之「晶圓形貌量測技術」的產業應用案，協助國內廠商開發半導體晶圓翹曲量測技術，監控晶圓因研磨或鍍膜產生應力翹曲，追溯至技術項目所	600,000	600,000	360,000	112	

項次	技術項目	廠商	運用模式	授權案與計畫建立的關鍵技術之關聯性	合約數(元)	累計收入數(元)	累計繳庫金額(元)	簽約年度	備註
				需之平面度標準，滿足標準件需校正追溯需求。					
11	2023-2025 年軌道巡檢機車及量測儀器維護修繕檢驗服務	台灣高速鐵路股份有限公司	技術授權	運用計畫建立之「線上加工尺寸量測技術」的產業應用案，研發中心內座標量測儀中不同尺寸標準件，追溯至技術項目所需之尺寸標準件，滿足標準件需校正追溯需求。	1,500,000	1,500,000	1,389,896	112	
12	五軸工具機幾何誤差量測及組裝公差智慧化分析計畫	台中精機股份有限公司	技術授權	運用計畫建立之「線上加工尺寸量測技術」的產業應用案，工廠內座標量測儀中不同尺寸標準件，可將標準追溯至技術所發展幾何標準件，滿足標準件需校正追溯需求。	117,000	102,000	61,200	111	
13	實驗室品質管理及校正／測試系統建置暨顧問服務計畫	馬路科技顧問股份有限公司	技術授權	利用計畫發展之視覺 3D 尺寸量測系統校正技術輔導廠商發展其量測儀器之校正實驗室能量。	238,095	204,764	122,858	111	
14	軌道光學式建築界限量測設備國產化開發設計	台灣高速鐵路股份有限公司	技術授權	運用計畫建立之「線上加工尺寸量測技術」的產業應用案，研發中心內座標量測儀中不同尺寸標準件，追溯至技術項目所需之	450,000	435,000	261,000	111	

項次	技術項目	廠商	運用模式	授權案與計畫建立的關鍵技術之關聯性	合約數(元)	累計收入數(元)	累計繳庫金額(元)	簽約年度	備註
				尺寸標準件，滿足標準件需校正追溯需求。					
15	座標量測儀之量測不確定度評估能力輔導	愛爾蘭商速聯股份有限公司台灣分公司	技術授權	運用計畫建立之「線上加工尺寸量測技術」的產業應用案，研發中心內座標量測儀中不同尺寸標準件，可將標準追溯至技術所發展幾何標準件，滿足標準件需校正追溯需求。	70,000	70,000	42,000	111	
16	溫度校正器(溫度校正爐)可攜帶式技術運用服務	長庚醫學科技股份有限公司	技術授權	運用計畫建立之「主軸狀態溫度監測技術」的產業應用案，藉由校正過的溫度感測器對溫度校正器進行黑體溫度的確認，將溫度標準直接傳遞至儀器上，滿足現場溫度計的校正需求。	338,400	338,400	203,040	111	
17	鋼軌探傷車採購與審驗委託專業服務	交通部台灣鐵路管理局	技術授權	運用計畫建立之「線上加工尺寸量測技術」的產業應用案，利用校正過的座標量測儀對驗證軌進行形貌確認，因此可將標準傳遞至業者所採購的設備，滿足業者驗收需求。	120,000	62,400	37,440	110	
18	PVC 發泡厚度線上量測系統開發計畫委託技術服務	普裕興股份有限公司	技術授權	運用計畫建立之「高反光物件量測技術」進行產業應用，廠商利用該技術，建立線上自動化的量	12,500	12,500	7,500	110	

項次	技術項目	廠商	運用模式	授權案與計畫建立的關鍵技術之關聯性	合約數 (元)	累計收入數 (元)	累計繳庫金 額(元)	簽約 年度	備 註
		有限公司		測產線，實現金屬反光物(導輪)、漫反射白紙(離型紙)、不同顏色樹脂(PVC)共三種反射率表面的輪廓量測，改善原有的手動、接觸式量測方法，建立更完整的製程管理數據以防止品質異常。					
19	旋轉軸的幾何誤差的獲取方法與獲取設備專利授權	森準精密有限公司	技術授權	運用計畫建立之「單旋轉軸快速量測標準件」的產業應用案，廠商利用該技術進行單旋轉軸角度定位誤差快速量測，滿足單旋轉軸產品檢測時角度定位誤差需校正要求。	450,000	450,000	428,571		
20	旋轉軸的幾何誤差的獲取方法與獲取設備專利授權	鴻碩精密電工股份有限公司	技術授權	運用計畫建立之「單旋轉軸快速量測標準件」的產業應用案，廠商利用該技術進行單旋轉軸角度定位誤差快速量測，滿足單旋轉軸產品檢測時角度定位誤差需校正要求。	250,000	250,000	238,095		
合計					5,577,995	5,457,064	4,000,000		

※目前收入數：表示已認列數。 ※目前繳庫金額：表示收入數依據合約規定比例(60%)進行繳庫。

六、成果清冊

1. 期刊論文 5 篇(含 3 篇 SCI)、研討會論文 6 篇，總計 11 篇

項次	名稱	作者	會議/期刊名稱	發表日	頁數	國別	類別
1	Calibration of a Rotary Encoder and a Polygon Using a Two-Autocollimator Method	謝宗翰、林明賢、葉冠霆、渡部司	Applied Sciences	20230131	12	瑞士	國外期刊 (SCI) (Impact Factor: 2.7)
2	A Novel Measurement Method for Determining Geometric Errors of Rotary Tables by Using LaserTRACER and Reflectors	徐啟華、陳智榮	Applied Sciences	20230213	14	瑞士	國外期刊 (SCI) (Impact Factor: 2.7)
3	Geometric Error Parameterization of a CMM via Calibrated Hole Plate Archived Utilizing DCC Formatting	林明賢、謝宗翰	Applied Sciences	20230522	15	瑞士	國外期刊 (SCI) (Impact Factor: 2.7)
4	The combined multistep measurement for the roundness error separation with prime numbers	林明賢、謝宗翰	Euspen 2023	20230614	2	丹麥	國際研討會
5	自校型溫度感測器的技術與應用介紹	葉建志、柯心怡、徐瑋宏、董書屏	量測資訊雙月刊	20230928	7	台灣	國內期刊
6	高精度內螺紋攻牙製程監控與成品品質檢測技術	林宗儒、蔡得民	機械工業雜誌	20231001	12	台灣	國內期刊
7	在高頻負載下力量傳感器訊號輸出的動態效應	沈世家	26th International Conference on Mechatronics Technology	20231018	3	南韓	國外研討會
8	直規用於精密量測中的變異探討	陳智榮、黃煌琦、林明賢、徐啟華	全國力學會議	20231117	1	台灣	國內研討會
9	查核件運用於座標量測儀之量測	林明賢、陳廷翰	全國力學會議	20231117	1	台灣	國內研討會
10	自校型溫度感測技術的開發	葉建志、柯心怡、郭晉榮、徐瑋宏	全國力學會議	20231117	2	台灣	國內研討會

項次	名稱	作者	會議/期刊名稱	發表日	頁數	國別	類別
11	X ray tube 操作條件對 XCT 影像之影響分析	吳玉忻、楊富程、簡麗珍	中國機械工程學會	20231201	1	台灣	國內研討會

2. 研究報告一覽表

項次	資料名稱	產生日期	院文件編碼	語文	機密等級	作者/修訂者	頁數
1	微型定點囊的相變化模型	2023/04/10	073B20073	中文	非機密	葉建志	5
2	微型定點囊的設計	2023/06/21	073B20111	中文	非機密	葉建志	10
3	感測器結構剛性有限元素分析報告	2023/04/11	073B20071	中文	非機密	羅宇然	6
4	主軸預壓力量感測器設計報告	2023/06/21	073B20110	中文	機密	羅宇然	12
5	Euspen 2023 國際會議與展覽出國報告	2023/07/20	073B20118	中文	非機密	林明賢	26
6	關鍵組裝品質分析技術程序報告	2023/08/02	073B20120	中文	機密	徐啟華、陳智榮	19
7	工具機之 NC 代碼量測程序開發期中報告	2023/09/13	073B20135	中文	非機密	林明賢、陳智榮	13
8	量測程序及量測路徑規劃評估報告	2023/10/04	073B20169	中文	非機密	林明賢	5
9	多自由度量測系統設計報告	2023/07/26	073B20122	中文	機密	陳建文	23
10	組件解析度規格評估與驗證報告	2023/10/13	073B20191	中文	限閱	黃煥祺、陳建文	8
11	研討會出國報告	2023/11/14	073B20217	中文	非機密	沈世家	29
12	主軸迴轉誤差量測模組解析評估報告	2023/12/06	073B20221	中文	機密	洪聖翔	13
13	關鍵組裝品質補償技術程序報告	2023/11/22	073B20223	中文	非機密	陳智榮、徐啟華	11
14	工具機之 NC 代碼量測程序開發開發期末執行報告	2023/11/20	073B20224	中文	非機密	林明賢、陳智榮	19
15	XCT 標準件設計與校正	2023/10/26	073B20222	中文	非機密	劉定坤	9
16	XCT 性能與影響因素分析	2023/11/30	073B20240	中文	非機密	楊富程	9
17	低熔點合金的溫度、調查與調配比例報告	2023/10/04	073B20173	中文	非機密	葉建志	2

項次	資料名稱	產生日期	院文件編碼	語文	機密等級	作者/修訂者	頁數
19	智慧機械計量政策與產業發展推廣服務案期末工作報告	2023/11/15	073B20245	中文	非機密	于心怡	180
20	智機產業技術推動及服務計畫期末成果報告書	2023/11/15	073B20246	中文	非機密	吳相儒	76
21	主軸預壓力量感測器功能驗證報告	2023/12/01	073B20230	中文	非機密	羅宇然	10
22	塞規校正程序－使用 Labmaster 1000 M 雷射測長儀	2023/11/28	073B20192	中文	非機密	唐忠基、洪聖翔	17
23	塞規校正系統評估報告－使用 Labmaster 1000M 雷射測長儀	2023/11/28	073B20194	中文	非機密	唐忠基、洪聖翔	13

3. 專利申請成果統計

項次	申請日期	專利名稱	申請人	類型	申請國家	件編號
1	2023/06/20	震撞指示器	羅宇然	發明	中華民國	P07110013TW
2	2023/06/20	震撞指示器	羅宇然	發明	美國	P07110013US
3	2023/09/28	一種手持高溫計校正裝置及校正程序	董書屏	發明	中華民國	P07120005TW
4	2023/11/03	迴轉誤差量測模組	洪聖翔	發明	中華民國	P07120006TW

4. 專利獲證

項次	件編號	中文專利名稱	發明人	官方申請日	申請案號	專利證號	專利分類	獲准日
1	P07100012TW	旋轉軸的幾何誤差的獲取方法與獲取設備	謝宗翰,許博爾,林明賢	2021/12/01	110144733	I791343	發明	2023/02/01

5. 技術活動一覽表

項次	名稱	舉辦期間(起~迄)	舉辦地點	廠商家數	參加人數
1	工具機品質長效量測與評估研討會	9/1 9:30 ~ 11:30	台中中興大學機械系館	16	24

項次	名稱	舉辦期間 (起~迄)	舉辦地點	廠商家數	參加人數
2	智慧機械產業智慧化線上計量標準建置計畫問卷調查線上說明會	9/11 9:30 ~ 10:30	線上會議	5	6
3	工業用 X-ray/XCT 尺寸量測技術研討會	9/12 9:00 ~ 11:50	光復院區 16 館 121	24	45
4	五軸工具機幾何量測技術應用研討會	10/3 13:00 ~ 16:45	PMC 二辦一樓 工廠訓練教室	11	24
5	工具機關鍵模組智慧監測技術研討會	10/12 9:30 ~ 11:50	台中文心會議室	4	8
6	智機專家座談會	10/31 9:30 ~ 12:00	PMC 二辦一樓 工廠訓練教室	27	65

效益說明:

- (1) 工具機品質長效量測與評估研討會: 與會者包括工具機產業、熱處理產業、協會, 反應課程對其目前設計及組裝人員有助益, 並建議團隊可多聽聽產業需求來增加軟體分析之功能。
- (2) 智慧機械產業智慧化線上計量標準建置計畫問卷調查線上說明會: 與會者包括精密機械業、工具機製造業、機械製造修配業者, 計畫執行團隊推廣及介紹「智慧機械產業智慧化線上計量標準建置計畫」計畫資訊, 以輔導、補助等方向, 系統性介紹計畫資源及申請程序, 協助有參與意願的業者以標準合作運作機制為基礎, 共同深化智慧製造相關領域測試與數據分析, 並邀請與會廠家填答計畫問卷提供寶貴經驗, 透過收集業界先進意見, 分析現有產業瓶頸與未來發展重點。
- (3) 工業用 X-ray/XCT 尺寸量測技術研討會: 與會者包括機械產業、設備產業、半導體產業、設備代理商的副總、處長、經理、研發與品保部門人員, 反應課程對其產業了解 XCT 的應用、發展趨勢及限制以利未來在各自產業能有效的評估與導入 X-ray/XCT 精密尺寸的量測有助益。
- (4) 五軸工具機幾何量測技術應用研討會: 與會者主要為機械產業業者, 包含專用生產機械製造修配業、金屬加工用機械製造修配業等, 讓廠商更深入瞭解工具機幾何精度量測技術及重要性透過現場經驗交流, 重新檢視廠內工具機精度檢測方式的適切性, 有助於提升工具機加工品質及加工效率, 進而增加臺灣工具機產業的整體競爭力。
- (5) 工具機關鍵模組智慧監測技術研討會: 與會者包括專用生產機械製造修配業、機械組裝製造業、精密儀器相關製造, 品保、生技、應用部門人員, 反應課程對其先進之工具機狀態監測、診斷甚至預測技術有助益, 了解在工具機關鍵模組/零組件相關狀態監測技術。
- (6) 智機專家座談會: 包括業界代表 19 家廠家 23 人次; 學界代表 6 位; 臺灣機械工業同業公會、台灣工具機暨零組件工業同業公會、台灣智慧自動化與機器人協會 3 位公會代表; 及標準局賴副局長等 5 人、量測中心代表 15 人與精機中心代表 13 人與會, 會議針對 MTBF 使用定義與監測方法及評估機制討論外並進行智慧機械產業智慧化線上計量標準建置計畫成果說明與展示, 會議討論摘要:
 - 計量追溯與校正能量需配合國家發展趨勢與產業需求同時達到系統整合, 驗證中心驗證方法應考慮重現性, 可先從法人計畫中進行整合, 並保有市場競爭力已滿足業者需求。
 - 五加二產業創新計畫對工具機產業非常重要, MAZKA 已導入智慧化生產與智慧化調教組裝技術, 贊成標準計量計畫推動與執行成果, 對空間精度發展有正向幫助。
 - 工具機產業期待合作與計劃支持, 建議如欲成立驗政中心需要相關標準與計量技術支持, 對於產業高階機種與發展, 希望能串連各展會能量。
 - 國產機器精度應可持續挑戰, 例如 1 米立方, 30 um 精度或許太鬆, 國內目前在空間精度驗證仍以 ISO 10791-6 為大宗, 建議可推廣 S-curve, 另外調查問券內容可持續加深。

- 建議驗證中心，驗證方法、規範、對應機型應完整，精度分為動態與靜態，建議須考量到機種、控制器與對應之補償措施，建議可參考對應的測試工件，以符合使用者需求。
- 支持成立驗證中心但建議以 MTBF 失效為主，精度重現性為重要依據，建議可優先納入考量。
- 精度重現性很重要，建議考量。五軸市場規模占比相較三軸與五面機種小，建議江三軸與五面機種的精度也納入考量。ESG 節能議題是未來趨勢，建議納入考量。
- 目前五軸相關檢驗規範仍有補足空間，建議相關單位可持續補足(搖擺頭檢驗規範)。各機種 MTBF 定義是否統一，需思考。
- 精度與重複性要達到相當精度具十足挑戰性，機台空載與實際切削狀況仍需考慮。
- 空間精度測試方法與校正工件對於大型機台適應性仍有進步空間，建議相關計畫可支持空間精度相關檢驗經費，以利推廣技術。
- 產業中，終端使用者往往比製造者還專業，建議可結合相關技術能量。

七、碩博士生培育

●線上量測與組裝調整分項：

- (1) 曾瀚皜(中央大學機械工程研究所)/碩士/8-12 月：協助幾何誤差分析之資料整理，誤差分析軟體撰寫與資料分析等工作，不定期以報告方式分享工作進度，已完成相關機構鍊螺旋理論建模與關鍵軸幾何誤差計算流程，並可與實際量測誤差回饋建立全域最小誤差非線性求解關鍵軸幾何誤差的計算。實習過程中讓同學可以了解實務機台，學習如何透過理論數學模型進行相關建模，及如何將物理與數學應用於實務求解問題，實習的過程中也讓同學接觸計量追溯的相關知識，培養計量追溯之觀念及其重要性，有助於其碩士學術研究工作之能力提升。
- (2) 金楚恩(清華大學工程與系統科學研究所)/碩士/8-12 月：協助完成微型定點囊的製作與開發，並學習高週波真空熔煉技術，不定期以口頭方式報告工作進度。目前已完成熔煉爐系統相關手冊的研讀與編寫，熟悉高週波真空熔煉爐的運作原理與操作，可完成微型定點囊的製作，使同學藉此實習學習到理論與實務面的整合應用，有助於其碩士論文之研究及撰寫。
- (3) 洪東耀(虎尾科技大學機械工程研究所)/碩士/8-11 月：協助完成主軸迴轉誤差量測模組的儀器操作、實驗數據擷取等工作，不定期以口頭方式報告工作進度。已完成迴轉誤差量測相關文獻的研讀，熟悉系統運作原理，可完成實驗數據之分析，使同學可藉由實作了解教科書所學習到的理論如何應用至實務面，實習的過程中也讓同學接觸計量追溯的相關知識，培養計量追溯之觀念及其重要性，也可讓同學增加執行計畫的經驗，有助於其碩士論文之研究及撰寫。

●工具機品質長效量測與評估分項：

- (1) 劉玳菱(虎尾科技大學機械工程研究所)/碩士/8-10 月：執行計畫所需之工具機相關文獻搜集及整理，包含 MTBF 資訊、工具機壽命測試，並協助繪製投稿所需之 3D 示意圖，將有助於其碩士論文之研究與撰寫。
- (2) 陳廷翰(虎尾科技大學機械工程研究所)/碩士 7-9 月：協助計畫執行工具機量測查核件之 NC 程式碼開發、查核件量測之程序架構與協助工具機執行量測動作，並協助計畫所需之研究與開發，有助於其碩士論文研究與撰寫。

●量測標準平台與產業合作分項：

- (1) 王皓丞(高雄科技大學電機工程研究所)/碩士/10-11 月：執行計畫所需執行 XCT 參考標準件進行設備驗證相關計算分析工作，每週以線上會議報告進度，已完成如量測資料分析與統計等工作任務，除了協助計畫執行不確定度評估所需之研究與開發外，亦有助於其碩士論文之研究與撰寫。

八、廠商訪視

●線上量測與組裝調校分項：

(1) 普森精密主軸

A.時間: 112 年 02 月 08 日

B.廠商受訪人員: 謝明宏 經理、彭秉傑 特助

C.訪談內容: 普森公司首先分享主軸在運行之溫度變化範圍在標準範圍約室溫+25 °C, 但若是重切削情況甚至會達 60 °C, 也說明主軸溫度計目前是使用螺旋式 PT100 溫度感測器, 目前是架設於前/後軸承(2 支)與馬達(1~3 支)進行溫度的量測, 最後則是提到了價格相關問題, 彭特助提到目前螺旋式 PT100 溫度感測器成本約在數千元以內, 建議微型定點囊成本不要太高, 否則廠商實際導入使用會有困難。廠內當前的研究重點較著重在溫度、預壓、振動、聲音訊號的分析與整合, 較少著重在主軸預壓或是熱伸長量相關的量測, 目前普森廠內做的預壓量測是透過位移量推估, 並且是於主軸組裝時進行測量, 尚未進展到組裝完成後進行長時間量測。普森目前是使用特殊製作治具確保軸承安裝時零件間的接合平衡, 普森也有提到東培公司有進行相關研究, 可再詢問看看。除就提案內容進行回饋, 最後普森也提出目前工具機產業使用各種感測器進行狀態監測行之有年, 但缺乏將訊號整合並判斷主軸狀態的智慧診斷模組(Smart box), 除了國內無此技術, 國外廠商也不願意進口, 為台灣工具機產業的痛點, 可就此議題進行更多的相關研究。

D.執行團隊後續因應: 執行團隊會持續精進技術, 並持續與普森公司保持聯繫, 爭取未來團隊所開發感測模組整合至普森公司的機會。

(2) 東台精機

A.時間: 112 年 03 月 15 日

B.廠商受訪人員: 馮威強 副理

C.訪談內容: 首先向馮副理介紹我方今年度所提出相關主軸量測技術, 並請教馮副理關於東台精機目前工具機上溫度量測技術的方向, 目前廠內已經有建立溫度監控的相關技術, 可透過自行開發的溫補軟體對工具機參數進行調整, 過去也有與學校合作進行溫升補償之相關研究。在主軸預壓量測的部分, 馮副理認為預壓量測有其必要性也有很多可以應用的方向, 除了量測主軸或許也可以考慮將此方法應用在線性軸, 線性軸也是工具機中關鍵部位, 因機構較為複雜, 從線性軸下手或許可以更順利地將技術整合至工具機內。結合溫度與預壓量測, 藉由量測數據的回饋, 工具機甚至可以達成更進階的自適應切削, 幫助加工品質的提升。最後馮副理也提出目前工具機產業的最大困難點還是在於原始資料的運用難度高, 未來也希望可以在這一點更加精進。

D.執行團隊後續因應: 執行團隊會持續精進技術, 並考量馮副理所提出建議座位未來可能可加入的技術發展項目, 我方也會持續與東台公司保持聯繫, 爭取未來團隊所開發感測模組整合至東台工具機的機會。

(3) 亞崙機電

A.時間: 112 年 04 月 19 日

B.廠商受訪人員: 李昆諺 副廠長、陳明正 副理

C.訪談內容: 本次拜訪亞崙機電為了發展工具機組裝品質提升之技術合作與推廣。對於工具機組裝的精度誤差溯源, 亞崙非常認同與需要的, 特別是延伸到五軸機的組裝誤差, 由於其機構鍊的複雜堆疊, 更是不容易抓到關鍵問題, 副廠長也常叮囑生產人員, 不要以組裝規範之規格為限, 若能夠提高其組裝精度就盡量的提高水準, 以期盼獲得整機的空間精度表現, 特別針對五軸加工機。對於提供有關

組裝的量測技術與組裝誤差的分析，也符合其未來公司對於機台特性掌握所需之關鍵技術相符合，因此，也願意提供相關的廠域來進行相關研究之開發。

D.執行團隊後續因應：預計年底完成導入線軌組裝調校技術，完成今年度場域試驗。

(4) 永進機械

A.時間：112年05月16日

B.廠商受訪人員：劉旻欣 副理、潘奕呂 高師、廖紘誼 組長

C.訪談內容：(1)與永進機械合作製作一支內藏式主軸，最高轉速為20,000 rpm，符合明年度計畫目標要求，裡面安裝3項發展技術(溫度、預壓力及迴轉誤差)，安裝位置初步規畫：溫度(上下軸承)、預壓力(下軸承)及迴轉誤差(上軸承)。
(2)永進機械主軸上軸承會安裝環形編碼器(VS Sensorik 或 LENORD+BAUER)，應用於轉速控制，規劃替換為迴轉誤差量測模組原型。(3)發展技術測試完成後，主軸會安裝於永進機械工具機上，進行上機驗證或實切。

D.執行團隊後續因應：預計年底完成內藏式主軸製作與迴轉誤差量測模組原型安裝，完成今年度場域試驗。

(5) 台灣積體電路製造股份有限公司

A.時間：112年05月25日

B.廠商受訪人員：吳信達 工程師

C.訪談內容：本次拜訪台積電為未來開發的自校型溫度感測器技術進行推廣，該公司內部的檢驗實驗室有多項的熱分析儀器，熱分析有助於量測半導體材料隨著溫度或時間而產生變化的許多特性與轉移。目前商用的熱分析儀器因其爐內封閉性而不易拆拔內部的溫度感測器進行校正，需要藉由量測施加在相變化時金屬塊上的機械位移變化量來進行溫度間接的校正。該方式雖然簡單，但無法追溯至溫度標準，且容易受到施力位置、加熱爐均溫性與機械位移量飄移等因素影響，造成熱分析儀器維持溫控品質不易，影響半導體新材料的熱機械分析結果。吳工程師表示未來若能有線上溫度校正技術，將有助於提升熱分析進料檢驗的品質。

D.執行團隊後續因應：預計年底在完成溫度微型定點囊的性能測試與驗證之後，將到台積電現場說明如何運用溫度微型定點囊進行校正，爭取後續導入實機測試的合作可能性。

(6) 高鋒工業

A.時間：112年06月15日

B.廠商受訪人員：吳勝墩

C.訪談內容：與高鋒說明於線軌組裝幾何誤差量測工具與品質分析技術，並有意應用於機台滑軌組裝過程的場域應用。

D.執行團隊後續因應：安排於7月與高鋒進一步討論應用的機型，預計年底完成導入線軌組裝調校技術，完成今年度場域試驗。

(7) 普森精密主軸

A.時間：112年08月21日

B.廠商受訪人員：彭秉樑特助、謝明宏技術部經理

C.訪談內容：討論有關自校型溫度感測器技術、預壓力量感測器技術與迴轉誤差量測模組導入內藏式主軸的設計製造與相關事宜，以下為本次討論摘錄重點：

自校型溫度感測器技術：

- 主軸溫度計內嵌位置: 主要貼附位置在前/後軸承外側, 以監測主軸工作溫度, 由前/後軸承內滾珠與軸承內外圈高速摩擦所產生大量的熱所導致。
- 主軸溫度計安裝方位: 溫度感測器需平行前/後軸承外側。
- 主軸溫度計能否提供額外的直流電源線路: 溫度計內嵌主軸時, 可同時額外再提供 2 W 以內的直流電源線路給自校型溫度感測器的加熱絲使用。
- 技術導入難易度評估: 初期研究即以普森公司所提供的主軸溫度計規格(直徑 8 mm 與長度 30 mm)進行設計, 因此僅是替換原來常規的主軸溫度計, 無需更動主軸內部的結構設計, 技術導入實現度高。

預壓力量感測器技術

- 普森目前評估本技術導入到主軸中可行, 但需要解決走線以及訊號傳輸問題, 若依照目前有額外出線的架構進行, 需要增加主軸外殼的厚度, 並預留走線槽。
- 若整合至主軸中, 預壓力量感測器將安裝於前軸承組之間之位置。
- 根據普森所建議, 未來需要改善感測器傳輸方式與走線方式, 最佳情況是可透過無線傳輸方式進行, 如此一來則不需考慮走線問題。
- 原先之感測器設計皆是以東台公司所提供軸承規格(內徑: 75 mm)進行設計, 普森公司所使用的軸承規格為內徑 70 mm, 需要依照此規格重新設計。
- 依照我方需求可選擇之主軸規格及型式被限縮, 需要額外考慮感測器受到油氣的干擾。

迴轉誤差量測模組

- 因目前為量測刀把端之誤差情形, 故量測模組裝配於主軸前軸承之位置; 然而, 需考慮普森之馬達放於主軸內部, 所以空間範圍將受限, 需調整兩讀頭距離。
- 因計畫目標為主軸轉速須達 20,000 rpm, 且先前採購之環形編碼器直徑為 80 mm, 然而, 普森建議主軸直徑需修改為 70 mm, 方能達成 20,000 rpm。因此, 可採取兩方案擇一實行: (1) 重新採購 70 mm 之環形編碼器, 會於下訂完成後 15 周交貨, 時程有超過之疑慮。(2) 設計階段式套筒, 銜接於主軸軸心, 此方案須考慮套筒之同心度與安裝偏心之問題, 需後續詳細評估。
- 確認讀頭為密封設計, 且感測方式為磁性感測, 故可確認不受油氣之影響。然而, 馬達所產生之溫度為 120 °C, 而購買之讀頭可承受至 130 °C, 需後續評估是否會影響。

綜合:

目前普森公司特規的主軸設計製造與跑合平台交期至少需 15 週, 報價約在 100 萬元以內, 但詳細價格仍需我方提供進一步的尺寸與規格設計才能判斷。另外, 亦需同步評估跑合的需求項目以判斷自建或是跟普森租借。如: 場地設備氣壓源、油霧回收、佔地面積以及實驗所需設備或條件。

D. 執行團隊後續因應: 雙方持續進行設計規格確認以利後續合作進行。

(8) 普森精密主軸

A. 時間: 112 年 9 月 6 日與 112 年 11 月 15 日

B. 廠商受訪人員: 謝明宏經理、彭秉傑特助

C. 訪談內容: 已與普森公司達成場域測試合作共識, 並依據普森公司所提供的內藏式主軸產品進行主軸感測器的場域測試, 項目包含溫度、預壓、迴轉誤差。執行團隊已依據其主軸規格完成主軸感測器的開發, 並進行組裝、修改、測試。最後, 普森也再次提出工具機產業使用各種感測器進行狀態監測行之有年, 但缺乏將訊號整合並判斷主軸狀態的智慧診斷模組(Smart box)技術。

D.執行團隊後續因應: 預計年底完成場域試驗導入主軸感測器技術。執行團隊將根據其需求, 後續將協助訊號整合與 Smart box 開發, 爭取未來團隊所開發感測模組整合至普森公司的機會。

(9) 永進機械

A.時間: 112 年 09 月 18 日

B.廠商受訪人員: 劉旻欣副理、康建發副理、林育舟課長、廖紘誼組長、潘奕呂高師、林姿吟

C.訪談內容: 討論有關自校型溫度感測器技術、預壓力量感測器技術與迴轉誤差量測模組導入內藏式主軸的設計製造與相關事宜, 以下為本次討論摘錄重點:

自校型溫度感測技術

- 請永進確認主軸溫度計的出線直徑大小, 若線徑可以符合, 則內藏; 若線徑過大或有干擾, 則建議外拉。
- 主軸測試平台, 主要是直立式。
- 主軸溫度計規格為 PT100/三線式, 主要裝置在主軸前軸承。
- 須注意實際測試時, 溫度計是否能抗主軸電磁干擾。

預壓力量感測器技術

- ITRI 確認 Strain gauge 組裝貼附之製程溫度與 IP 等級後, 提供給永進。
- ITRI 後續提供 Strain gauge 厚度、安裝、走線與出線之配置圖, 並確認出線組數(能否控制在一處)與線材外徑。
- 此次討論得知永進軸承間隔環須具備排油氣之功能設計, 且材質、剛性與精度皆須符合永進要求, 由 ITRI 提供加工件替換現有間隔環的方式可能會遭遇困難。
- 目前確定之作法為 ITRI 提供 Strain Gauge 貼附與出線所需之設計, 再由永進完成最終間隔環設計圖面, 並提供 ITRI 進行模擬確認, 雙方確認後再由永進製作, 並於進行研磨製程前由 ITRI 完成間隔環之 strain gauge 貼附與出線製程。

迴轉誤差量測模組

- 確認使用刀把型號 HSK-A63, 會以此型號規格細修迴轉誤差量測模組安裝治具。
- 考量到刀把本身的精度最大為(3 ~ 4) μm , 建議迴轉誤差量測模組安裝治具上下模組間直接以剛性連接。若透過聯軸器連接, 可能會使精度大於 4 μm 。此項會再評估以剛性連接是否可滿足所欲量測的情境, 再決定是否更改原先設計。
- 迴轉誤差量測模組治具加工可洽刀桿廠商進行製作, 建議廠商為台中的安威機具。

D.執行團隊後續因應: 雙方持續進行設計規格確認以利後續合作進行。

(10) 高鋒工業

A.時間: 112 年 10 月 15 日

B.廠商受訪人員: 吳勝墩

C.訪談內容: 與高鋒說明於線軌組裝幾何誤差量測工具與品質分析技術, 並有意應用於機台滑軌組裝過程的場域應用, 同時討論到相關規格, 以及應用範圍等議題。

D.執行團隊後續因應: 11/20 進行場域試驗。

(11) 台灣積體電路製造股份有限公司

A.時間: 112 年 10 月 27 日

B.廠商受訪人員: 吳信達工程師

C.訪談內容: 該公司內部的檢驗實驗室有多項的熱分析儀器, 諸如常見 TMA、TGA、DSG、DMA 等。目前這些熱分析儀器皆有爐內封閉性而不易拆拔溫度感測器校正的問

題，若不定期送回原廠校正，則會影響進料檢驗的品質。但若送回原廠校正或請原廠外派人員進行遊校則有時間與費用上的限制。

D.執行團隊後續因應：預計年底在完成溫度微型定點囊的性能測試與驗證之後，將到現場展示自校型溫度感測器技術，爭取導入實機測試的機會。

• **工具機品質長效量測與評估分項：**

(1) 永進機械

A.時間: 112 年 04 月 14 日

B.廠商受訪人員: 劉旻欣副理

C.訪談內容: 拜訪永進機械，介紹快速查核件於幾何誤差量測及分析技術，可應用於分析工具機之線性定位及垂直度幾何誤差，用於整機健康監測。會後建議快速查核件往輕量化、方便性及容易操作等發展。

D.執行團隊後續因應: 規劃與永進機械合作，於永進機械廠內使用快速查核件於工具機針對線性軸線性定位及垂直度進行量測，雙方持續進行技術合作交流以利確認合作之可能性。

(2) 台中精機

A.時間: 112 年 05 月 31 日

B.廠商受訪人員: 黃騰毅副理、鄭弘武工程師

C.訪談內容: 介紹線性軸組裝品質模組，針對建構模組之方法進行說明。展示此模組之允收範圍訂定和關鍵組裝品質參數之判定功能，並藉由模擬分析出來之幾何誤差，與現場實際量測之幾何誤差進行比較和討論。針對未來使用組裝品質模組情境進行討論，規劃藉由 ISO 檢測規範找出五軸工具機之三線性軸和兩旋轉軸中，影響檢測精度最大之部件。

D.執行團隊後續因應: 規劃與歐權科技合作討論五軸工具機中之旋轉軸的組裝品質建模。

(3) 奕達精機

A.時間: 112 年 10 月 18 日

B.廠商受訪人員:

C.訪談內容: 希望從設計端就能夠掌握關鍵組裝參數及設定之允收目標值，進而掌握工具機組裝後最終精度。

D.執行團隊後續因應: 藉由數位模型和數值分析所開發之組裝品質智慧分析技術，依公司生產車床之線性軸組裝流程代入設計參數，評估出關鍵組裝品質參數，提供業者確認設計參數之設定合理性。

(4) Blum

A.時間: 112 年 10 月 20 日

B.廠商受訪人員: 鄭時閔經理

C.訪談內容: 介紹快速查核件技術，針對查核件於虎尾科技大學場域測試內容進行說明。向 Blum 公司說明與展示工研院量測中心跟台大團隊合作於虎尾科大測試的內容並進行分享與討論，藉由量測工具機的關鍵幾何誤差用來確認工具機精度，方便現場使用者對工具機精度進行查核。

D.執行團隊後續因應: 規劃與 Blum 持續合作，持續進行於查核件的技術發展，希望能夠將團隊開發的量測模組整合至 Blum 公司之中。

• 量測標準平台與產業合作分項:

(1) 築富科技

A.時間: 112 年 05 月 29 日

B.廠商受訪人員: 樓修成副總

C.訪談內容: 本次拜訪築富科技目的為了解其公司的需求並推廣 XCT 設備相關驗證技術, 該公司為得力富公司轉投資以半導體 X-ray 3D 內層影像量測分析為主業的公司, 主要業務是開發 XCT 量測系統。目前已掌握光源、X-ray、旋轉台與重建軟體等 XCT 系統整合技術, 考量未來銷售客服的問題, 需要具公信力的三方單位協助驗證 XCT 設備的性能, 因此未來有合作的機會, 由 CMS 擔任公信力的三方單位協助築富科技 XCT 設備校正/驗證。

D.執行團隊後續因應: 預計下半年完成 XCT 參考標準件與標準校正/驗證程序, 協助築富科技 XCT 設備校正/驗證。

(2) Comet (yxlon)公司

A.時間: 112 年 07 月 12 日

B.廠商受訪人員: 周哲甫總經理、林尚謙業務經理、黃兆全經理

C.訪談內容: 本次拜訪 Comet (yxlon)公司目的為, 了解其公司的需求並推廣 XCT 設備相關驗證技術, 該公司主要業務是銷售 XCT 量測系統及接受業界委託測試服務。

會議資訊如下:

- 國內銷售量 15 台/年, 客戶為漢翔、中科院等
- 其客戶不會購買 XCT 參考標準件, 有關驗證與調校工作由 Comet 直接服務 (並簽售後服務約每年 10 萬元)
- 90 %客戶以 inspection 的應用(國內多為代工廠,主控權由品牌廠決定)
- 針對 XCT 量測不確定度部分, 採嚴格規範測試環境以降低量測不確定度
- Task-specific measurement 部分, 由使用者製造透過經第三方認證的實際產品驗證為依據
- 半導體應用部分, 因空間解析度的限制目前用於封裝段 Micro bump 測試(5 μm 以上的內層結構)
- 有建立 Micro bump 解析能力標準需求

D.執行團隊後續因應: 以半導體業需解析尺寸 5 μm 的結構與我們預設產業對解析度的需求不同, 因此目前暫時無法服務。

(3) 科傳服務公司

A.時間: 112 年 07 月 21 日

B.廠商受訪人員: 古慶順總經理、林家賢資深軟體工程師

C.訪談內容: 本次拜訪科傳服務公司目的為, 了解其公司的需求並推廣 XCT 設備相關驗證技術, 該公司主要業務是銷售 XCT 量測系統及接受業界委託測試服務。

會議資訊如下:

- 對 XCT 系統驗證方式採不同 Tools 比對的方式(如實際樣品外觀尺寸與 SEM 比對,由此取信其客戶內層量測的信賴)
- 客戶需分析 1.需逆向工程的客戶要準確量測, 2.如何提供高解析度內層資訊協助解決問題
- 對於 VDI 2630 與 XCT 標準件的看法 1.系統 FOV 小無法使用 2.系統要求為次微米的驗證無法使用
- 有建立 100 nm spatial resolution 的參考標準件需求

D.執行團隊後續因應：以科傳公司所需標準件尺寸為 0.1 μm 與我們預設產業對解析度的需求不同，因此目前暫時無法服務。

(4) 德律科技公司

A.時間: 112 年 08 月 11 日

B.廠商受訪人員: 李孟坤 AXI 研發部資深經理、鄭天佑 光學主任工程師、陳世宗 AXI 研發部經理

C.訪談內容: 本次拜德律科技公司目的為了解其公司的需求並推廣 XCT 設備相關驗證技術，該公司部門主要業務是銷售 X ray 2.5 D 量測系統給國內 PCB 廠商。

會議資訊如下:

- 目前 X ray 2.5 系統需求為如何確認系統誤差與誤差來源(因良率不高，欲針對機構對位、光源偵測器相對位置、系統演算法及對應品質確認方法是否有不足需改善的解決方案)
- 需要 X ray 光源進料品檢系統建置於德律

D.執行團隊後續因應：以德律公司所需標準件要能應用於 PCB 內層結構量測與我們預設產業對工件的形式不同，因此目前暫時無法服務。

(5) 惠茲科技公司

A.時間: 112 年 08 月 28 日

B.廠商受訪人員: 謝靖豪 代表人

C.訪談內容: 本次拜訪科惠茲科技公司目的為了解其公司的需求並推廣 XCT 設備相關驗證技術，該公司主要業務是銷售 XCT 量測系統給國內機械業廠商。

會議資訊如下:

- 目前以機械業內層結構量測應用為主，需針對金屬件內部結構進行量測與檢測，因此與 VDI 2630 XCT 標準件驗證的條件不同較難使用
- 目前已有自行建立的標準件

D.執行團隊後續因應：以惠茲科技所需標準件要能應用於金屬件內部結構內層結構量測與我們的標準件驗證的條件不同，因此目前暫時無法服務。

(6) 承鼎精密股份有限公司

A.時間: 112 年 11 月 24 日

B.廠商受訪人員: 許博爾經理

C.訪談內容: 承鼎精密公司目前正開發與銷售導體設備中噴氣裝置的產品，由噴氣裝置的機械微結構達成噴氣氣流的規格，由於實際製造的成品內部結構無法使用傳統 AOI 系統量測，無法驗證實際產品內部結構與設計的差異，所以期望透過委託本團隊使用 XCT 系統解決以下兩個關鍵問題。

- 驗證製程的正確性(微結構尺寸形貌)以回饋製程參數
- 透過量測的微結構與實驗結果分析回饋，以利未來產品設計與優化

D.執行團隊後續因應：已針對送來的產品進行測試，已有初步的結果，後續會針對測試的結果進行討論並討論未來合作模式。

(7) 福宮通商公司

A.時間: 112 年 11 月 28 日

B.廠商受訪人員: 李俊明副總經理

C.訪談內容: 使用本計畫所製作的 XCT 參考標準件驗證福宮通商不同型號 XCT 機台，並分析 systematic deviation。

D.執行團隊後續因應: 經實驗測試結果, 不同球心距測試結果重複性 $\leq 3 \mu\text{m}$, 不同球心距平均 systematic deviation 皆為正, 以 60 mm 的球心距偏差 $15 \mu\text{m}$, 且偏差的特性與球心距成正比, 據當測試時溫度條件高於 XCT 參考標準件追溯時的溫度, 經理論計算溫差引入標準件的誤差小於 $1 \mu\text{m}$, 由此推論可能是因溫度上升導致 XCT 機台內部機構膨脹, 產生倍率誤差所致, 後續會再與李副總討論分析的結果並討論未來合作模式。


附錄

附錄一、參考文獻

項次	編碼	說明
1	1-1-1	Xiangxu Meng etc., “Six-Degree-of-Freedom Posture Measurement Technologies Using Position Sensitive Detectors (PSDs): State of the Art”, <i>Micromachines</i> 2022, 13 (11) , 1903
2	1-1-2	Elmelegy, A.; Zahwi, S. Comparative study of error determination of machine tools. <i>Int. J. Adv. Manuf. Technol.</i> 2023, 124, 4575–4602.
3	1-1-3	ISO 230-1 (2012) Test code for machine tools – Part 1: geometric accuracy of machines operating under no-load or quasi-static conditions. International Organization for Standardization, Geneva
4	1-2-1	S. Hashizume, Y. Shibuya, D. Kondo, Y. Yamamoto, H. Iwanaga, “Development of Sensor Integrated Bearing Unit for Machine Tool Spindles,” <i>NTN TECHNICAL REVIEW</i> , no.88.
5	1-2-2	Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Strain Gauges for Transducer Manufacturers
6	1-2-3	Analog Devices, Inc., AD623 datasheet, Single and Dual-Supply, Rail-to-Rail, Low Cost Instrumentation Amplifier.
7	1-2-4	M. A. Khan, G. Dumstorff, C. Winkelmann ¹ , W. Lang, “Investigations on Noise Level in AC- and DC-Bridge Circuits for Sensor Measurement system,” <i>18th GMA / ITG Conference Sensors and Measurement Systems 2016</i> , 2016.
8	1-2-5	Texas Instruments, Inc., REF02, +5V Precision VOLTAGE REFERENCE
9	1-2-6	Edler, F., Kim, Y. G., Machin, G., Pearc, J. and White, D. R., Guide on secondary thermometry: specialized fixed points above 0 °C, Bureau International des Poids et Mesures, pp. 1-36, 2018.
10	1-2-7	Elliott, C. J., Pearce, J. V., Machin, G., Schwarz, C. and Lindner, R., Self-validating Thermocouples for Assured Temperature Measurement Confidence and Extended Useful Life. Proc. 12th European Conference on Spacecraft Structures, Materials and Environmental Testing, 2012.
11	1-2-8	I. Manasijević, Lj. Balanović, T. Holjevac Grgurić, D. Minić, M. Gorgievski: Study of microstructure and thermal properties of the low melting Bi-In-Sn eutectic alloys, <i>Materials Research</i> 21, No. 6, pp. 1–8, 2018.
12	1-2-9	Y. Liu and K.N. Tu, Low melting point solders based on Sn, Bi, and In elements. <i>Materials Today Advances</i> , Vol. 8, No. 1 ,2020.
13	1-3-1	Lou, Zhi-Feng, et al. "A self-calibration method for rotary tables' five degrees-of-freedom error motions." <i>Measurement</i> 174 (2021): 109067.
14	1-3-2	ISO 230-7:Test code for machine tools — Part 7: Geometric accuracy of axes of rotation (2015)
15	1-3-3	J. Józwiak, Dynamic Measurement of Spindle Errors of CNC Machine Tools by Capacitive Sensors During Aircraft Parts Machining, 2018 5th IEEE International Workshop on Metrology for AeroSpace (MetroAeroSpace), pp. 398-402, 2018.
16	1-3-4	ISO 10791-2 Test conditions for machining centres -Part 2: Geometric tests for machines with vertical spindle or universal heads with vertical primary rotary axis (vertical 2-axis)(2001)
17	2-1-1	Hui, Y., Mei, X., Jiang, G. et al. Assembly quality evaluation for linear axis of machine tool using data-driven modeling approach. <i>J Intell Manuf</i> 33, 753–769 (2022).

18	2-2-1	ISO 230-1: Test code for machine tools - Part 1: Geometric accuracy of machines operating under no-load or quasi-static conditions (2012)
1920	2-2-2	ISO 230-1: Test code for machine tools - Part 1: Geometric accuracy of machines operating under no-load or quasi-static conditions (2012)
21	3-1-1	International Organization for Standardization (2021) Draft ISO/DIS 10360-11- Geometrical product specifications (GPS)-Acceptance and reverification tests for coordinate measuring systems (CMS)-Part 11: CMSs using the principle of X-ray
22	3-1-2	computed tomography (CT) (International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland). American Society of Mechanical Engineers (2020) ASME B89.4.23-X-ray computed tomography (CT) performance evaluation.
23	3-1-3	Association of German Engineers/Association of German Electrical Engineers (2011) VDI/VDE 2630-1.3-Computed tomography in dimensional measurement-Guideline for the application of DIN EN ISO 10360 for coordinate measuring machines with CT-sensors.
24	3-1-4	NISTIR 8393 Sensitivity to X-Ray Computed Tomography Instrument Geometry Errors as a Function of Rotation Stage Position, Detector Position, and Detector Size.
25	3-1-5	QUINDOS 7 Basic Course 1st Edition, Messtechnik Wetzlar GmbH, 2009.
26	3-1-6	ISO 1101:2017, Geometrical product specifications (GPS) — Geometrical tolerancing — Tolerances of form, orientation, location and run-out.

附錄二、資本門設備說明

資本門 設備項目	設備對計畫效益	佐證設備照片
工業用 X 光 斷層掃瞄 儀-XCT 機 台本體	XCT 機台本體，其中包含高能量 輻射防護腔體、電路系統與控制 單元等。主要用途為建置一適合 XCT 檢測之輻防櫃體，以供配置 X 光光源、X 光偵測器與相關精 密位移平台使用之控制電路。	

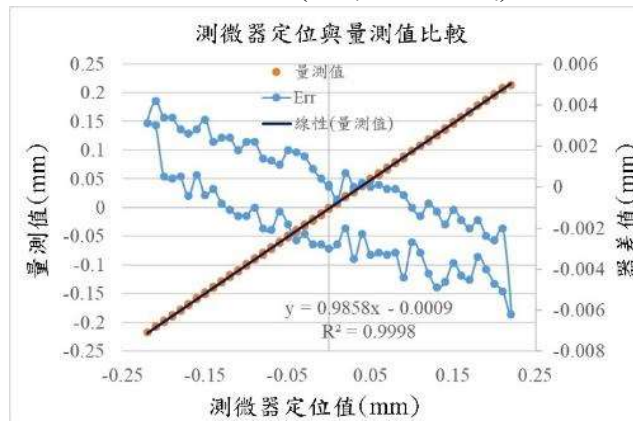
附錄三、審查意見回覆

建議事項	委辦單位回復說明
A 委員	
<p>1. 依報告書 P1 內容, 累計至 112 年 11 月 30 日經費支用比率為 93.1%, 另於 P27 各子項之年度執行查核點說明表中亦載明各子項執行進度與原規劃進度並無差異。若有, 請補充本月份(12月)相關各子項精進之內容。</p>	<p>感謝委員的肯定與支持。本第一版結案報告, 經費動支為累計至 11/30 的動支值, 亦於年初規劃時要求各子項於 11/30 前完成研究工作, 12 月份進行報告整理或部份工作精進, 於會後第二版結案報告, 會將更新或精進的工作成果補充於內。</p>
<p>2. 於本年度技術亮點說明內容中, 可確實感受到執行團隊已能將實驗室技術能量導入產業實務中, 執行團隊表現值得稱許。</p>	<p>感謝委員的肯定與支持。</p>
<p>3. 各子項之產出除達成需求規範書內容, 亦有部分子項產出超過原需求, 執行成效良好。</p>	<p>感謝委員的肯定與支持。</p>
<p>4. 各項量化重要績效指標(KPI)均有達標。</p>	<p>感謝委員的肯定與支持。</p>
<p>5. 請釐清 P122 案例二: A. 福宮通商之需求。(福宮通應是國外量測儀器在台之代理商)。</p>	<p>感謝委員建議, 福宮通商除了是國外量測儀器在台之代理商之外, 本身也使用 XCT 設備對外界提供量測服務。基於國內無第三方公正單位可提供驗證與校正服務, 故本計畫即以此為出發點使用本子項發展的 XCT 參考標準件, 協助福宮通商公司使用中之 XCT 量測系統於國內進行第三方驗證, 日後亦有機會擴大對此類型代理商引進國內之 XCT 系統提供驗證與校正服務。</p>
B 委員	
<p>6. 數位式線軌組裝調校量測技術於評估驗證系統直線度與度解析度:(1)未說明量測時各別使用的解析度, 無法確認量測數據的有效位數。(2)決定量測系統的解析度除標準差之外, 量測數據的最大與最小值的差值也是決定因素, 差值過大則代表系統數值不穩定。</p>	<p>線性位移 10 mm 量測範圍, 對應 24 bit ADC 取值, 相對解析度為 0.6 nm, 量測平均值-0.8975 mm, 標準差為 0.0088 μm, 取 6 倍標準差 0.053 μm (< 0.1 μm) 為解析度驗證值, 將儀器有效位數訂為 0.1 μm。</p> <p>角度位移 4641" 量測範圍, 對應 24 bit ADC 取值, 相對解析度為 0.00028", 量測平均值 56.11", 標準差為 0.0058", 取 6 倍標準差 0.035" (< 0.1") 為解析度驗證值, 將儀器有效位數訂為 0.1"。</p> <p>量測 Y 的標準差計算為 0.0088 μm, 最大與最小值差為 0.0369 μm (約 4.2 倍標準差); 量測 Z 的標準差計算為 0.0078 μm, 最大與最小值差為 0.0295 μm (約 3.8 倍標準差); Yaw 角度的標準差計算為 0.0058", 最大與最小值差為 0.022" (約 3.8 倍標準差), 最大與最小值差角度的標準差計算為 0.0058", 最大與最小值差為 0.026" (約 4.5 倍標準差), 大致上最大最小全距值約為 4 倍標準差, 皆落於 6 倍標準差之內。再以重複性量測結果來看, 無論是</p>

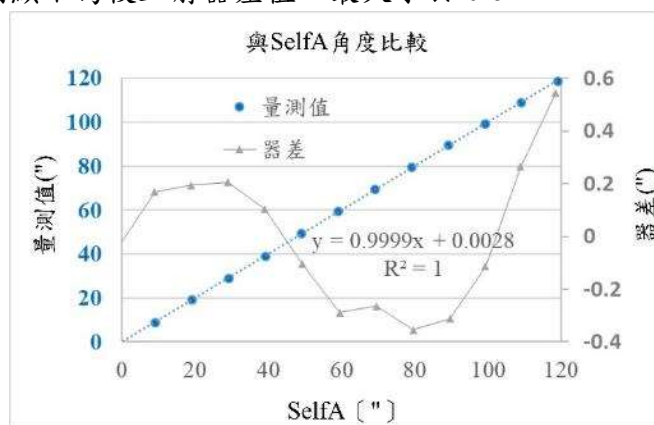
建議事項	委辦單位回復說明
	直線或角度之量測結果，其變異係數(標準差除以平均值)皆在 0.1 以下，感測器量測數值算是相當穩定。
7. 高速主軸軸承預壓力監測技術，使用 Strain Gauge 為感測元，因 Strain Gauge 使用 Epoxy 貼合，而預壓力監測為長期性，應考慮再加測最大負載下的 Creep 效應。	感謝委員建議，FY113 之執行重點即為預壓感測器整體性能實測評估，將按委員建議於 FY113 計畫中，將 Creep 效應納入測試與評估的項目中。

C 委員

8. 線上量測與組裝調校分項 1. 數位式線軌組裝調校量測技術之設計精度驗證是否可以與國際技術領先產品如 RENISHAW, ETALON 進行量測方法與精度比較。	<p>感謝委員的建議，比對校正為明年度規劃重要工作，線性位移規劃將以 Agilent 或 Renishaw 干涉儀校正，角度將以 MÖLLER-WEDEL OPTICAL 自動視準儀校正。</p> <p>開發過程中亦先進行相關的量測範圍與線性度分析來確認正確性，線性位移使用測微器進行定位，測試範圍為±220 μm，橘色為測微器值與量測值輸出(參考左側標籤)，線性迴歸線 $R^2 > 0.99$。</p>
--	---

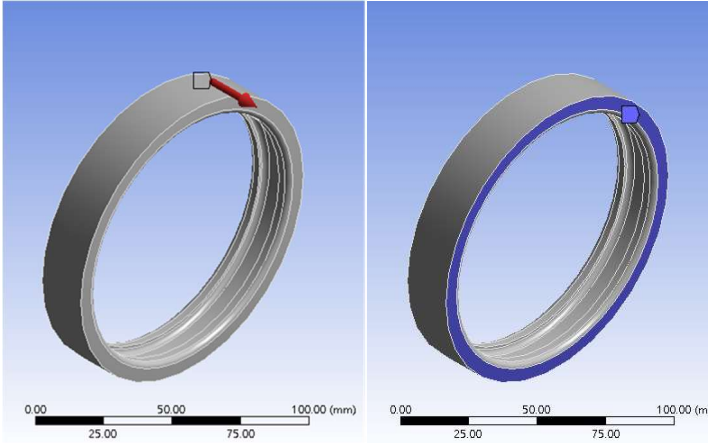


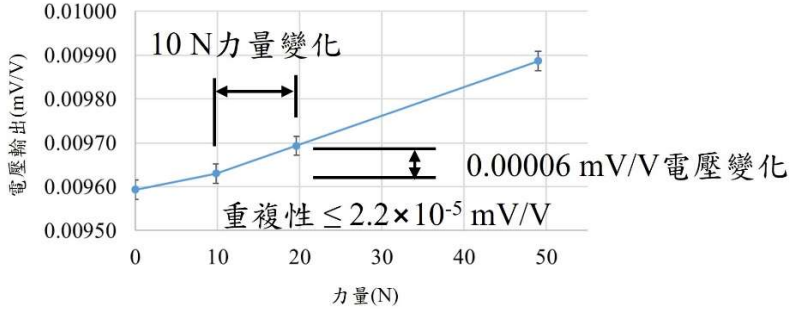
角度位移的精度比較在原級系統 SelfA 精密迴轉台(不確定度 0.05")上有進行比較，量測範圍(0~120)"，線性度迴歸 $R^2 > 0.99$ ，右側顯示為校正前器差值，最大小於 0.6"。



量測方法比較，數位式線軌組裝調校量測技術主要為了方便檢驗與安裝過程操作之量測驗證功能，因此，考慮到能夠方便使用，包含同時線性位移與角度等多個自由度維度的同時量測，同時，亦要考慮可以方便操作的斷續與任意位置可以進行量測(與角度

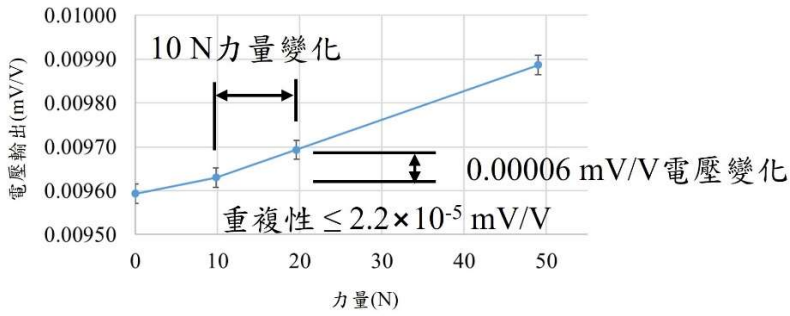
建議事項	委辦單位回復說明			
	轉成直線度方式相比)，目前商售儀器功能最接近者為 Renishaw XK10，可同時針對兩個維度的線性位移同時進行量測，角度則為自動視準儀功能近似，計劃書內有與直規、干涉儀、準直儀...等量測方法之比較，比較表如下，供委員參考。			
	量測設備	量測參數 (幾何誤差)	量測規格	量測情境 (量測參數)
	計畫研發成果	YZ 直線度、Yaw、Pitch	直線度重複性不確定度： $(0.5 \mu\text{m} + 10^{-7} \times L)$ 角度重複性不確定度： $(0.5 + 10^{-1} \text{m}^{-1} \times L)''$ L 為量測距離(單位 m)	同時 4 個自由度 (可遮斷)
	RENISHAW XL-80/ AGILENT 5530A+光學鏡組	YZ 直線度、Yaw、Pitch	直線度不確定度： $(0.005 \times A + 0.5 + 0.15 \times L^2) \mu\text{m}$ 角度準確度： $(0.0004 \times A + 0.5 + 0.02 \times L)''$ A 為顯示值； L 為量測距離(單位 m)	每次單一維度誤差 (不可遮斷)
	RENISHAW XM-60	YZ 直線度、Yaw、Pitch、Roll	直線度不確定度： $(0.01 \times A + L) \mu\text{m}$ Yaw/Pitch 不確定度： $[0.0008 \times A + (0.1 + 0.055 \times L)]''$ Roll 不確定度： $(0.002 \times A + 1.25)''$ A 為顯示值； L 為量測距離(單位 m)	同時 5 個自由度 (不可遮斷)
	RENISHAW XK10 (PSD)	Y、Z 直線度	直線度不確定度： $(0.01 \times A + L) \mu\text{m}$ A 為顯示值； L 為量測距離(單位 m)	每次兩個自由度 (可遮斷)
	AUTOCOLLIMATOR	Pitch、Yaw 角度	不確定度： $0.2''$	每次兩個自由度

建議事項	委辦單位回復說明											
			直線度計算需透過重疊接觸位置量測積分展開，具有誤差的積分效應。	(可遮斷)								
	量規&量錶	直線度	直線度不確定度: $(3 \mu\text{m} + 1.75 \times 10^{-6} \times L)$	目前最常使用，可斷續解析度及精度較低								
<p>9. 軸狀態監測技術分項進行主軸預壓力量感測器設計與模擬驗證，滿足國內主軸、工具機製造商及終端使用者對於主軸預壓力量測的需求，然而有限元素模擬部分模型設計與分析部分，主軸預壓力量感測器之量測，原理是將主軸內軸承其搭配的外環墊圈進行改良，加入力量感測元件，然後所有的模擬皆以簡易的外環墊圈進行 FEA 分析，尺寸與材料參數及分析模型邊界條件之模型與材料設定部分是否可以再詳細提供？</p>	<p>感謝委員指導，模擬僅考慮結構本身受軸向力作用並不考慮應變規貼附時膠合等等可能產生之細微效應，因此 FEA 分析之架構相對單純。結構分析之尺寸、材料參數、分析模型邊界條件資訊提供如下：</p> <table border="1" data-bbox="727 741 1350 875"> <tr> <td rowspan="2">力量感測器尺寸</td> <td>內圈直徑</td> <td>100 mm</td> </tr> <tr> <td>外圈直徑</td> <td>115 mm</td> </tr> <tr> <td colspan="2">材質</td> <td>Stainless steel</td> </tr> </table> <p>再依 FEA 結果，搭配應變規規格進行電路模擬分析，完成感測器設計模擬驗證。此外，本期亦按此設計完成了感測器雛形製作，並以力量標準機實際驗證了感測器之量測範圍與解析度規格，與設計目標相符。</p>  <p style="text-align: center;">固定邊界與施力條件位置</p>				力量感測器尺寸	內圈直徑	100 mm	外圈直徑	115 mm	材質		Stainless steel
力量感測器尺寸	內圈直徑	100 mm										
	外圈直徑	115 mm										
材質		Stainless steel										
<p>10. 主軸預壓力量感測器的力量量測範圍驗證結果以及主軸預壓力量感測器的力量量測範圍透過法碼施力實測驗證結果。Round1, 2, 3 仍有差異，有關再現性與一致性部分如何確保？</p>	<p>感謝委員指導，感測器受力時搭配治具使用，可確保施力的穩定性；實際上根據法碼施力的測試結果，於 10 N 受力下感測器具 6×10^{-5} mV/V 電壓變化，其重複性不確定度為 2.2×10^{-6} mV/V，可確認感測器之一致性，量測數據如下圖所示。</p>											

建議事項	委辦單位回復說明
	<p style="text-align: center;">預壓力量感測器_力量量測解析度驗證</p> 
<p>11.由微型定點囊的熱模型計算，並代入微型定點囊的設計幾何參數，其分析結果衍生微型定點囊的熱模型分析與設計設計圖 1 份，微型定點囊相變化模型的計算結果分析，相關設計模型計算看似以一維方程式計算?又以三維方式演算?是以何種軟體模擬還是程式演算法計算請補充說明</p>	<p>謝謝委員的建議，目前微型定點囊的熱模型分析僅以一維方程式的解析解計算，由於微型定點囊內含相變化物質，軟體模擬內並沒有特殊低溫合金(二相流)材料資料庫。因此，計畫初期的分析主要利用能量守恆方程式計算，建立熱平衡後已知溫度的相變化模型，評估維持相變化的時間。</p>
<p>12.自校型溫度感測器可再針對溫度條件及溫度使用壽命條件等進行進一步研究。</p>	<p>感謝委員的指導，FY113 會將主軸運作時的操作溫度納入啟動條件進行測試，同時也會以主軸廠溫度感測器的校正週期作為依據，評估自校型溫度感測器可使用的壽命時間。</p>
D 委員	
<p>13.報告書第 2 頁所載「分析結果所得到之剛性達 15923 N/μm，於所訂定之目標值 33 N/μm，符合原先所訂之軸向的剛性要求」，分析結果之剛性與目標值相差達 482 倍，請說明其原因為何?</p>	<p>當初訂定剛性需求乃參考市售高速主軸(GMN)之整體軸向剛性 33 N/μm 訂定，內部之元件剛性皆須高於此規格，故先以此規格作為設計目標。實際分析後也發現，外環墊圈即使在部分本體移除後，其結構剛性仍遠大於此規格，並非影響軸向剛性之關鍵元件。</p>
<p>14.報告書第 16 頁及第 22 頁所載「L 為線軌行程範圍(0~2)」，應修正為「L 為線軌行程範圍(0~2)m」</p>	<p>感謝委員的指導，將待文件後續進版調整時修訂內容。</p>
<p>15.報告書第 82 頁所載「從實際組裝場域的歷史資料中確認，真直度與平行度分布約為(0.004~0.016)mm，而建議值為 0.083 mm，因此軟體輸出地建議值可落在參考場域的組裝歷史資料分布範圍」，該建議值為 0.083 mm 是否有誤?</p>	<p>感謝委員指正。圖 2-1-7 之評估結果中，STEP 2 應為 0.0083 mm，為誤植數字，將待文件後續進版調整時修訂內容。</p>
E 委員	

建議事項	委辦單位回復說明
<p>16.本「智慧機械產業智慧化線上計量標準建置」計畫將針對高階工具機產業之量測需求，包含整機空間幾何量測、關鍵零組件檢測、工具機組裝產線線上量測、工具機品質長效評估技術等，發展量測技術、協助建立檢測內容與規格。成果產出及重要績效指標(KPI)等八項大致符合績效要求。第一期計畫期末成果說明中，全數達成 KPI 之需求；成果尚佳。唯相關內容為基礎模擬分析，建議多列出參考文獻資料，以利技術追蹤與最新技術資料掌握。</p>	<p>感謝委員的肯定與支持。計畫會於會後第二版結案報告中補充列出參考文獻資料。</p>
<p>17.建立 XCT 參考標準件與標準驗證程序，此部分是量測中心的其一重要研究方向，已經驗證到其他特殊內尺寸工件設計；另亦可建構 DIC (Digital Image Correlation)技術，以擴大 3D 形變與應變分析研究的服務對象；可開放給相關產學研付費使用服務。</p>	<p>感謝委員的肯定，成立 XCT 子項計畫係基於國內無第三方公正單位可提供系統長度量測能力之驗證與校正服務，除了購置 XCT 系統作為量測與校正服務之外，另一額外效益即如委員所言對於 XCT 相關技術進行研究。Digital Image Correlation 技術是高速時變性 3D 形變與應變分析最適合的方法，後續歡迎與學研單位交流合作，讓計畫建置之設備發揮最大效用，謝謝委員的建議與指導。</p>
<p>18.以台中精機五軸加工機做為試驗場域所示，模型判定係數 $R^2 \geq 0.7$；依循組裝程序書的步驟及現場組裝線軌站的量測歷史資訊來進行估算。模型判定係數試驗結果，如：安裝線軌與預測值，如何建構，請詳述預測值模型。此預測模組如何使工具機製造商能夠在組裝階段使產品改良優化？</p>	<p>模型建構乃依循組裝程序書中之組裝程序先推導建構機構鏈，並依設計圖輸入零件幾何尺寸、依進料檢驗的數值來輸入製造公差部分、依各組裝站的量測歷史資料來輸入組裝公差部分，最後完成 Jacobian-Torsor 數學模型建構，並進一步透過蒙地卡羅方式來輸出組裝後幾何誤差表現合理範圍之預測，並透過單變數控制方式來排序組裝品質參數對幾何誤差影響貢獻程度，讓工具機廠商的設計端決定合適設計公差值或製造允收值及能透過關鍵參數來進行除錯，或更換高一級零件或更換合適之量具等，使能夠在組裝階段就進行優化。</p> <p>計畫中為了確認數學模型的準確程度使用 R-square 之量化指標，乃透過模型預測得到在每個位置的幾何誤差數值，來比較於現場實際量測結果，若數值越接近於 1 則表示數學模型預測越貼近實際，但此驗證會受到零件進料檢驗、現場組裝師傅實際量測取值等不確定度影響，因此計畫目標將判定係數保守估計為 0.7，另除此量化指標外也進一步確認各點差異是否落在不確定度範圍內，來確定模型正確程度。</p>
<p>19.計畫發展主軸線上量測技術，參考國際規範 ISO 230-7 設</p>	<p>主軸迴轉誤差量測模組選用 AMO 環型編碼器及讀頭，依照其規格可量測到的最高轉速達 62500 rpm。若欲量測到最高轉速目前</p>

建議事項	委辦單位回復說明
<p>計、製作主軸迴轉誤差量測模組，將現有使用標準球與位移感測器的離線量測方法，改為透過環形編碼器搭配讀頭，安裝於刀把與刀具間，解決主軸迴轉誤差現場量測需求。此技術已向普森精密主軸推廣，由低轉速(500 rpm)慢慢拉高轉速，分析不同轉速下的迴轉誤差，實現主軸迴轉誤差現場量測需求。然高速至多少轉速，為其極限?如何進一步突破?</p>	<p>考慮到有以下兩點須突破。第一點為須確保主軸迴轉誤差量測模組的結構於高轉速下仍能與主軸保持動平衡。第二點為後端演算法的處理速度。若需維持現有的解析度規格，當主軸轉速越高，讀頭每秒接收的資料量越大，若超過演算法負荷會導致延遲，甚至會有預期之外的 bug 產生。欲解決此問題，可透過提升硬體規格或開發類似邊緣運算硬體架構來加快演算法處理速度，以提高主軸迴轉誤差量測模組可量測的最高轉速。</p>
<p>20. 雖有許多技術突破，然最為關鍵並可與世界級技術媲美的創新設計是否可詳述之?</p>	<p>感謝委員的意見，雖然微型定點囊的技術可實現溫度標準的即時傳遞功能，但國外大部分的研究皆需藉助外部環境提供穩定熱源加熱，來達到金屬的相變化過程，因此需要經過多次的人為調控外部升降溫測試後，才能找出較適合自校型溫度感測器的加熱參數來實現，所以尚未完整的達到自校功能。為了能進一步讓自校型溫度感測器運用於不同環境與對象，本次開發設計時，即將微型定點囊結合局部自我加溫元件與控制模組，能進一步達到微型定點囊的相變化平台調整功能，無需借助外部環境熱源，更能適應各種環境應用對象。低溫合金的微型定點囊設計是首次被應用於工具機的溫度標準傳遞。</p> <p>在工業生產製造過程中，機械成品組裝的品質優劣決定整機之精度和性能，本計畫開發工具機組裝品質智慧分析技術可提供工具機廠一"組裝品質智慧分析技術"來協助工具機製造商針對組裝生產線進行組裝品質之提升，此技術以數學統計模型之理論基礎為依據，取代原先經由人員經驗判定之方法或需大量數據分析方式，提供組裝品質之允收範圍和組裝過程中之關鍵組裝品質參數，尤其從組裝過程即掌握關鍵組裝參數來進行機台除錯，能協助業者縮短 30 % 以上機台除錯時間，滿足廠商在從組裝開始改善，進而使組裝後整機之品質穩定性提升，協助國內工具機製造商的競爭力的提升。</p>
<p>21. XCT 對不同材料的校正可再確認。</p>	<p>因應不同樣品的材質需考量 XCT 影像邊界是否有足夠量能，判斷可否適用的關鍵，未來團隊會再進行探討。</p>
<p>22. 高速主軸的模態分析可再確認，力量感測器結構設計與剛性分析可再整體評估。</p>	<p>感謝委員建議，新一年度計畫執行之主要目標即為感測器的性能驗證，將持續與配合之廠商討論，更進一步取得主軸細部結構，以進行主軸模態分析，分析結果作為改良感測器結構設計與改善剛性分析的評估依據。</p>
<p>23. 自校型溫度感測器設計之不同材料的熱阻可進行優化。</p>	<p>感謝委員的意見，在報告中 p60 已有自校型溫度感測器的熱阻分析，之後會尋找可絕緣且高熱導率的填充材料，優化內部可能的溫度差問題。</p>
<p>F 委員</p>	
<p>24. 整體執行成果符合產業發展</p>	<p>感謝委員的肯定與支持。</p>

建議事項	委辦單位回復說明
方向，並符合需求規範書之要求。	
25.P1:年度執行成果第一項應該是“(一)數位式線軌組裝調校量測技術”，而非“(一)力量感測器校正技術”。	感謝委員的指正，誤植處會在第二版結案報告中修正。
26.P41 中提到線性度感測解析度靜態輸出 6σ 為 $0.053\ \mu\text{m}$ 可滿足分辨 $0.1\ \mu\text{m}$ 的解析度、角度解析度靜態輸出 6σ 為 $0.03''$ 可滿足分辨 $0.1''$ 解析度，請問有無其他廠牌資料來比較佐證其解析度的能力？	其他廠牌儀器，線性位移可參考 Renishaw XK10 解析度亦為 $0.1\ \mu\text{m}$ ，角度部分可參考準直儀 ELCOMAT 3000，最高解析度可達到 $0.005''$ 。
27.P43 中提到“在 2 m 距離時最大的直線度位移量測重複性為 $0.413\ \mu\text{m}$ ”，是否將“重複性”修正為“重複性不確定度”以與前文及需求規範書相符；另“角度重複性為 $0.097''$ ”也建議一併修正為“角度重複性不確定度”。	感謝委員的指正，將於第二版結案報告中修正。
28.P54 中回合的測試量測出來的結果有明顯差距，雖最終結果滿足計畫要求 10 N 解析度，但能否補充說明該感知器的重複性或不確定度如何？	<p>感謝委員指導，關於 10 N 之測試結果，不同點位在三次測試的重複性不確定度最大為 $2.2 \times 10^{-5}\ \text{mV/V}$，如下圖所示。</p> <p style="text-align: center;">預壓力量感測器_力量量測解析度驗證</p> 
29.P75 表 1-3-1 中，市售參考規格中的儀器規格皆以準確度表示，唯計畫中是以解析度表示，雖符合計畫需求規範，但能否進一步評估此量測系統的準確度為何？	感謝委員的意見。計畫中會先以解析度為指標，目的為在可接受的成本範圍內，評估並驗證主軸迴轉誤差量測模組可達到的最佳解析度。目前解析度已驗證完畢，未來會與市售儀器於同樣的條件下比較，進一步評估主軸迴轉誤差量測模組的準確度。
30.P84 有關“線性軸組裝品質分析模組”的需求規範中有提到需能“依影響程度排列組裝品質參數”，結案報告中並沒有看到明顯的陳述，能否請補充	感謝委員建議，依影響程度排列組裝品質參數詳細說明在執行成果的(1)跟(2)，會再摘要陳述並補充於本年度結論中。

建議事項	委辦單位回復說明
說明。	
31.P96:“整機空間精度監測”分項中，本年度著重於系統的建立與量測能力，未來計畫期望能看到與其他量測系統的比較與實際工件切削與量測的比對規劃來佐證其能力。	謝謝委員的指導，未來會規劃使用不同量測儀器的量測精度結果比較，及規劃未來會透過不同量測設備進行精度補償後，依據NAS 979 或 ISO 10791-7 等相關測試規範進行實際工件切削與量測，並將結果進行比對。