

「國研盃 i-ONE 國際儀器科技創新獎」

得獎作品介紹

2020 年專上組首獎

工具機智能化線上水平精度量測系統

Intelligent Online Level Accuracy Measurement System for Machine Tools

國立勤益科技大學機械工程所團隊：曹家鑫、簡瑞克、張茗祐、林祐瑜、廖子豪
指導教授：陳紹賢

一、摘要

近代高精度工具機在結構精度上不斷提升，而工具機在水平度校正完成後常常因為外部震動導致水平產生變化，且過大的外部載重也會有水平誤差產生，水平誤差產生雖不會立即影響機台精度，但卻會逐步影響工具機之幾何誤差。工具機水平是機台精度的基礎，如果水平產生誤差就會影響機台幾何精度，嚴重水平誤差則會導致機台壽命降低，以往機台在使用時常常會忽略水平所造成的影響，而水平誤差的產生原因可分為以下幾種，如圖 1 所示：

- (a) 外部震動源：如地震或其他外力都會影響工具機的水平誤差。
- (b) 外力載重：當載重放置於工作台上移至不同位置時也會使工具機水平造成變化，放置重量與工件放置位置不同對水平的影響就不同，因此容易因重力造成機械本體擠壓變形。
- (c) 結構潛變 (內應力)：工具機在長時間使用後會產生內應力，內應力便會使結構產生潛變，致使工具機之幾何關係產生變化。

為此本研究開發一解析度 0.0001° 電子式水平儀，將其安裝於工具機之工作台平面，長時間監測工具機之水平變化狀態，以無線傳輸訊號的方式搭配物聯網技術，供其他行動裝置隨時隨地了解水平精度的狀況，並透過人機介面可以量測與紀錄工具機之直線度、平面度、定位精度等其他相關幾何誤差狀態。

藉由此技術結合氣泡式水平儀的構想，應用在大型工具機之地腳調校，可藉由隨身 IPC 在各地腳旁進行水平調校，減少傳統調校時需來回觀察氣泡刻度與調校螺絲的時間，且以數位化顯示方式降低人為觀察的誤差。

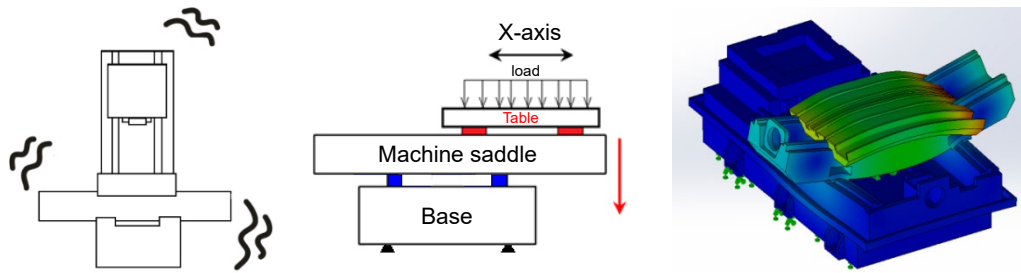


圖 1. 水平誤差產生原因。

二、目的

工具機誤差可分為靜態誤差、結構誤差、驅動誤差、荷重誤差等，如圖 2 所示。眾多誤差的堆疊將直接影響工具機之加工性能，其中以靜態誤差為工具機主要誤差，其包含熱誤差與幾何誤差。這不僅造成了工具機精度降低外，亦減少工具機之壽命。

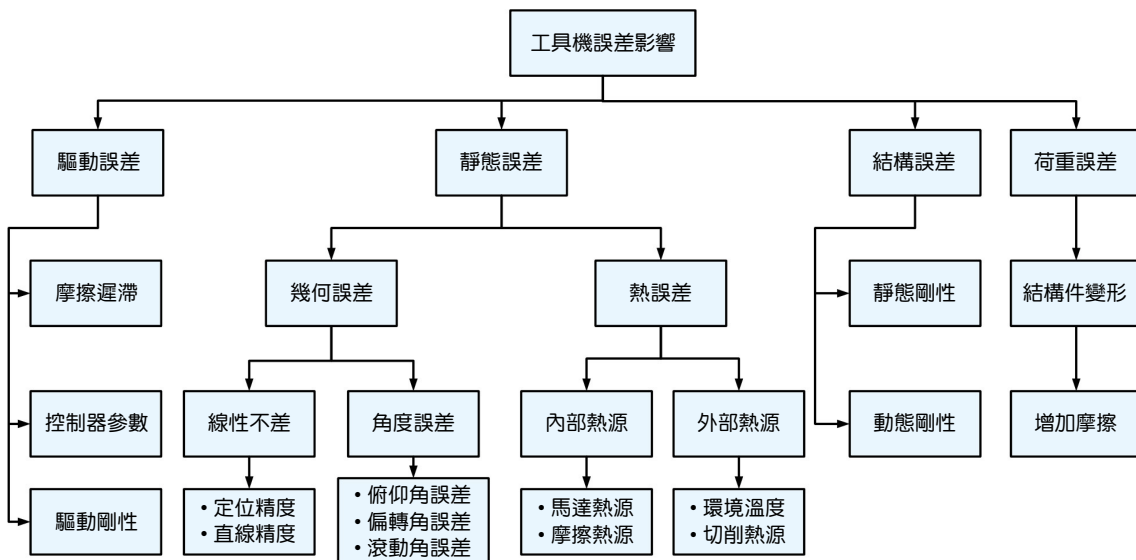


圖 2. 誤差影響關係圖。

除了工具機地腳校正外，工具機會定期在 3 到 6 個月進行一次水平檢驗，在這段期間內不能保證水平精度不會因加工震動、地震或是溫度的影響有所改變，往往都在工件檢驗出 NG 品後才回推於工具機水平精度變化影響。為此本研究開發一長時間安裝於機器工作平台上的電子水平儀，在加工前可先行進行水平誤差量測或在地震後與機器撞機後立即進行檢測，以確保水平精度的誤差問題。並將此技術結合氣泡式水平儀用法之構想，其增加相關功能。

目前工具機在水平調校依然使用氣泡式水平儀進行調校，且調校過程常因人為觀察誤差致使水平調校不準確，以及精度為 (0.02 mm/m) 限制，更不易進一步改善工具機水平調校後精度，致使國內工具機無法往高精度發展。且大型工具機在調校時，調整人員在調整完地腳後需回到工作平台觀察氣泡式水平儀數值，因地腳與工作平台距離過遠，導致浪費相當多的時間，如圖 3 所示。

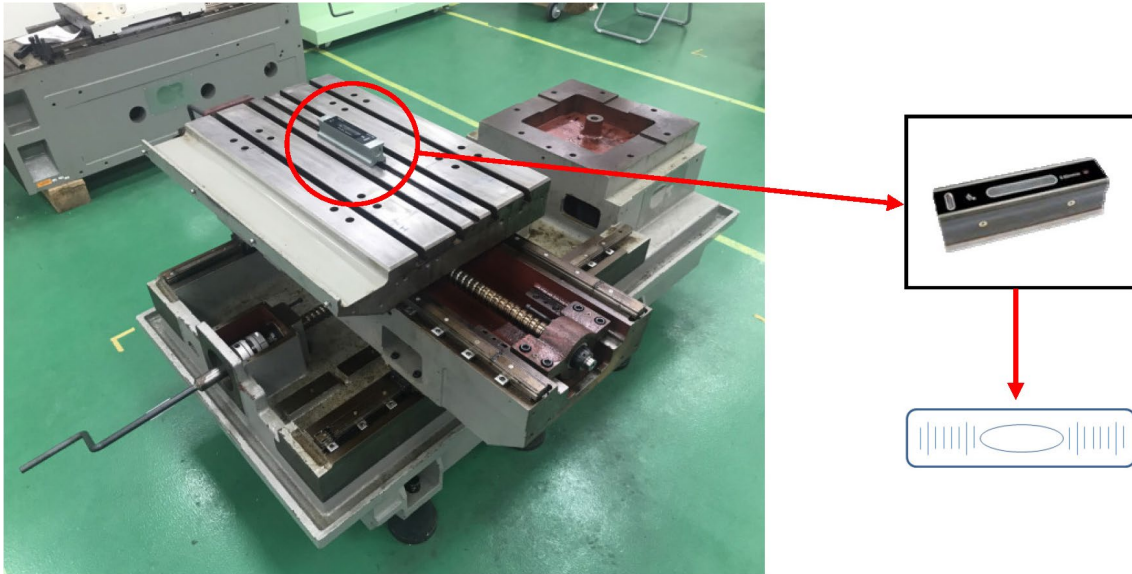


圖 3. 工具機地腳調校示意圖。

三、背景介紹

伴隨著工業的進步，工業之母工具機以工業 4.0 為目標不斷向前，持續向電腦化、數位化與智能化邁進，為配合未來無人化之工廠，機器與周邊設備都以採用物聯網技術將數據傳至雲端中，以提供其他裝置進行取閱功能。

工具機之水平精度是工具機最基礎也是最重要的重點之一，水平精度影響的範圍不僅是加工的品質，也會影響工具機的使用壽命時間。在水平精度檢驗這方面，目前大部分都還是以定期之檢測方式，但定期檢驗方式往往容易發生機器水平精度已變化過大，卻繼續加工之問題，都需等到加工件出問題後才回推至工具機水平精度問題。為此，若可以在每次加工前都先量測機台水平精度，不僅可以提前預防機器加工品質，同時降低不良率的發生。

四、作品實現之過程與步驟

本設備開發程序主要分成三個部分，如圖 4 所示，分為硬體開發、韌體開發、軟體開發。首先設計韌體架構並進行測試後，再搭配軟體測試進行監測作用，最後配合硬體組裝後與量測儀器進行比對測試並做校正，詳細內容如下：

1. 韌體開發設計：包括線路設計、電路板設計、微控制器設計以及訊號處理等。首要步驟為設計韌體並建立基本架構，加強其雜訊抑制以確保日後訊號的穩定性。
2. 硬體開發設計：包括治具設計、機構設計與加工製造。設計方面使用繪圖軟體，針對治具其受應力變形進行分析。
3. 軟體開發設計：本設備係使用 Visual Studio2019 設計而成之人機介面軟體，藉由本軟體開發可以監測機器工作檯的水平變化狀況，可即時性的回報在 UI 介面上告知操作人員。

本研究主要採用電解液式電傾斜感測器，由擷取卡將類比訊號轉為數位訊號後，再經過微控制器 (MCU) 藉由 WiFi 無線傳輸與物聯網技術將資料傳至 PC 端，最後讀取資料數值顯

示於人機介面上，以數位顯示方式呈現機器水平誤差狀況，與使用人機介面功能配合工具量測與地腳校正，如圖 5 所示。

有關本設備之韌體開發項目說明如下：

本設備所使用的傾斜感測器為美國 Fredericks 公司所生產之單軸電解液式傾斜角度感測器，相關規格如圖 6 與表 1 所示。

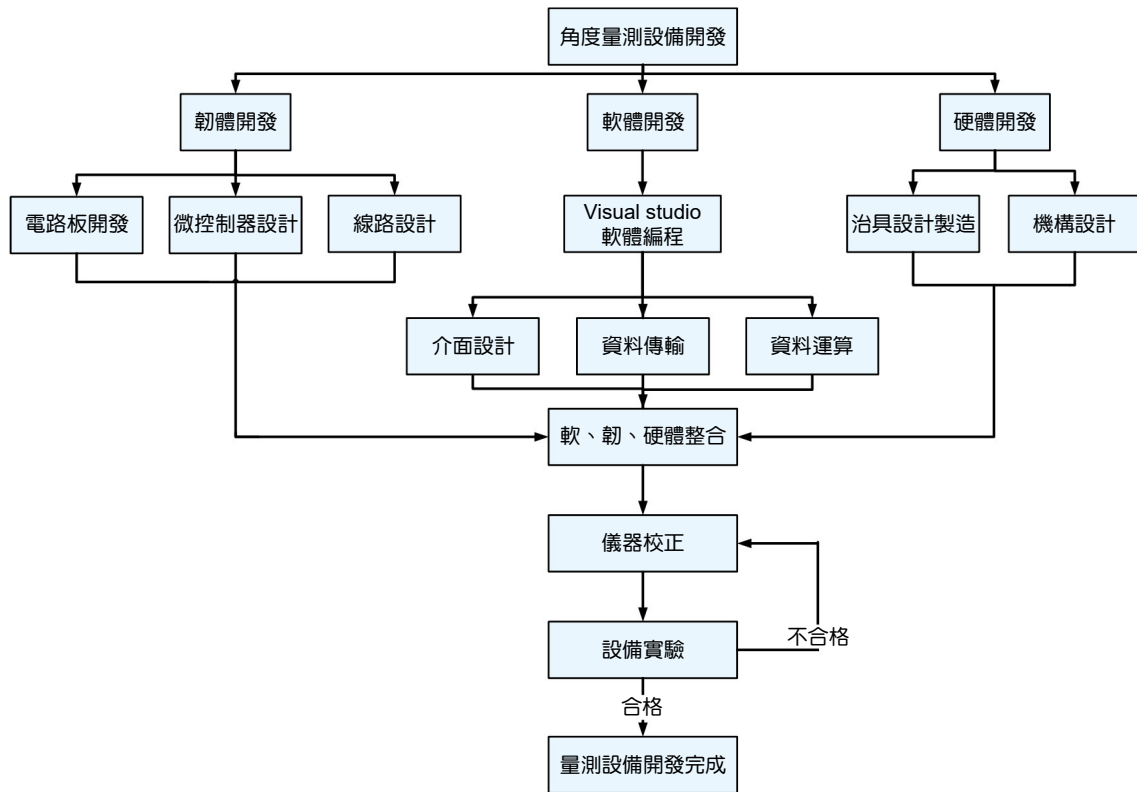


圖 4. 設備開發流程圖。

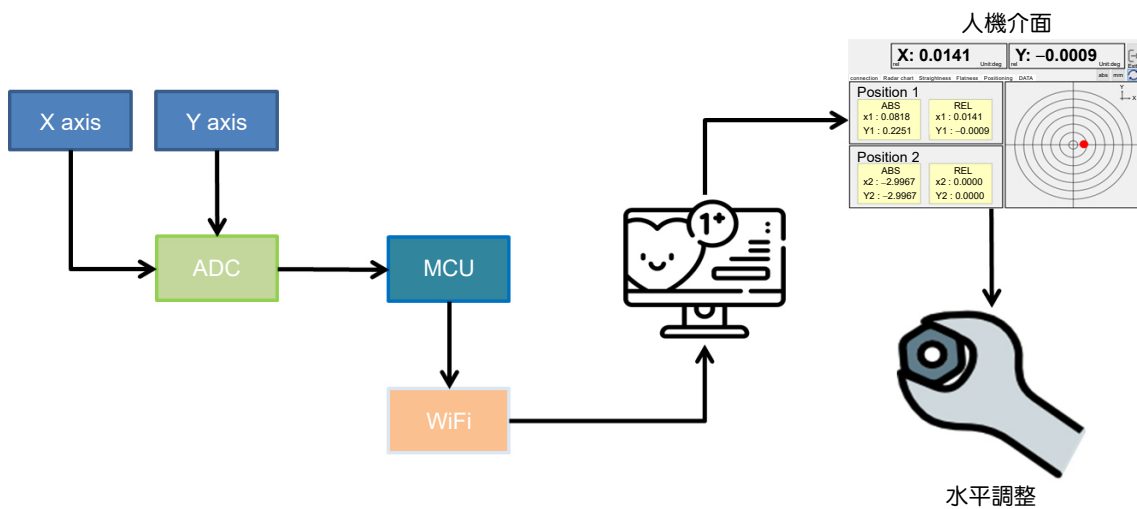


圖 5. 整體架構圖。



圖 6. 單軸電解液式傾斜角度感測器。

表 1. 單軸電解液式傾斜角度感測器 0703-0711-99 規格：

量測範圍	$\pm 3^\circ$
輸入訊號源	$\pm 5V$ 交流訊號
輸出訊號類型	類比訊號
解析度	≤ 1 arc second
重複度	≤ 5 arc seconds
24 小時穩定性	≤ 5 arc seconds
線性度	$\leq 3\%$
操作溫度	$-20^\circ\text{C} - 50^\circ\text{C}$

本設備所使用之擷取卡也為美國 Fredericks 公司所生產，其數據經由訊號放大器 LMC6485 後傳入 A/D 轉換內，相關規格如圖 7 與表 2 所示。

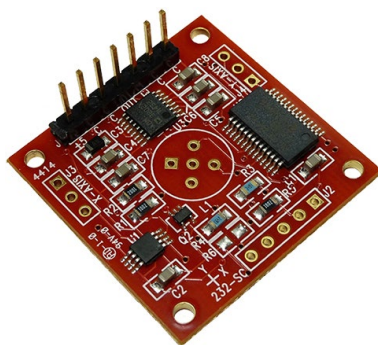


圖 7. 微小訊號處理板。

表 2. 微小訊號處理板 1-6200-006 之規格：

輸入電壓	3 – 5 VDC
輸入電流	16mA@5VDC 11mA@3.3VDC
輸出訊號	數位
通信介面	RS232
通訊協定碼	ASCII
類比範圍	0 – 100% 之感測器範圍
解析位元數	16 bits (0 – 65535)
操作溫度	$-40^\circ\text{C} - 85^\circ\text{C}$

本設備為透過無線傳輸功能，而採用了 WiFi 進行傳輸功能，其 MCU 開發板採用市售 ESP-12E WiFi 模組，相關規格如圖 8 與表 3 所示。

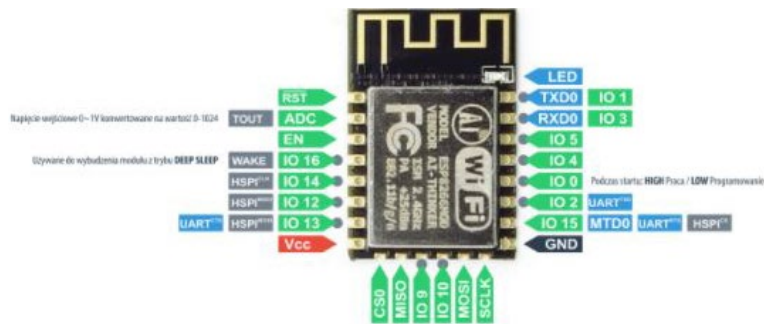
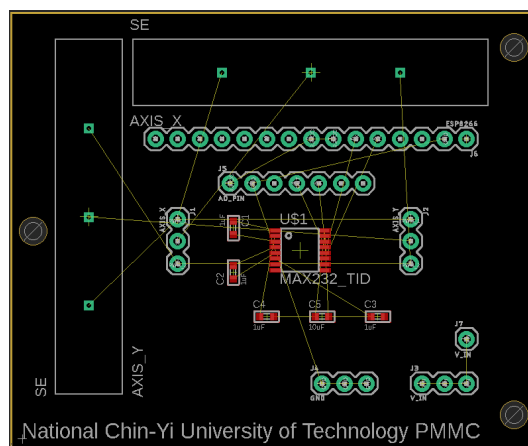


圖 8. ESP-12E 接腳分布圖。

表 3. ESP12E 規格表。

工作電壓	3 – 3.6 VDC
尺寸	16*24*3
工作頻路	2.4 GHz
通信電平	最大 3.6V DC
發射功率	20dBm
實測距離	100 米 (晴朗空曠，最大功率)
AT 支持	內置智能化處理
Wi-Fi 版本	802.11b/g/n
通信接口	UART 串口
天線形式	PCB 板載天線 (50 歐姆性阻抗)
工作溫度	-40 °C – 85 °C

設備電路板則為自行設計開發，其 PCB 之走線部分採用軟體後處理製作，再轉寄給代工廠製作成型。相關內容如圖 9 所示。



本設備主要為 MCU 透過 WiFi 無線功能將感測器訊號傳輸，藉由 Visual Studio 2019 以 .NET C# windows form 設計人機介面並透過 MQTT 協定 (如圖所示) 接收感測器原始訊號，如圖 10 所示，並在軟體內進行訊號率波功能，降低感測器噪聲，提高設備量測精準性。

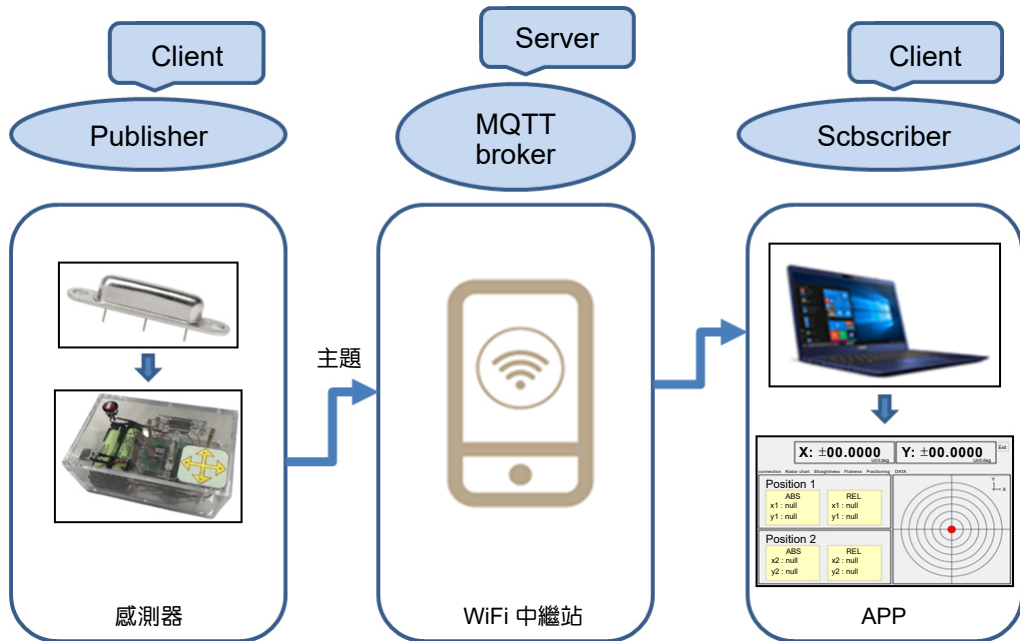


圖 10. MQTT協定示意圖。

有關本設備之硬體開發項目說明如下：

本設備之硬體部分自行設計，設備之底座採用鋁合金而外殼則採用透明壓克力，且底座與外殼須取決於韌體組裝後的空間大小，使整體呈現一完整比例，方便使用。相關外型如圖 11 所示。

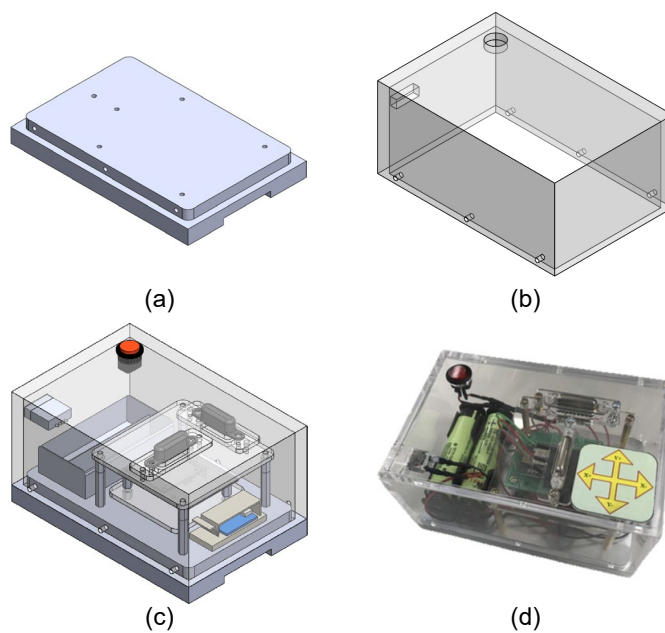


圖 11. (a) 設備外殼、(b) 設備底座、(c) 設備示意圖、(d) 設備實體圖。

有關本設備之軟體開發項目說明如下：

本設備軟體採用 Visual Studio2019 設計而成之人機介面軟體，藉由介面上排按鍵可做切換頁面功能，且每個頁面會有各自的功能所在，包含 WiFi 傳輸或藍芽傳輸連線系統，以及本設備水平監測與量測系統等等其他功能，簡單且方便讓操作者使用，如圖 12 所示。

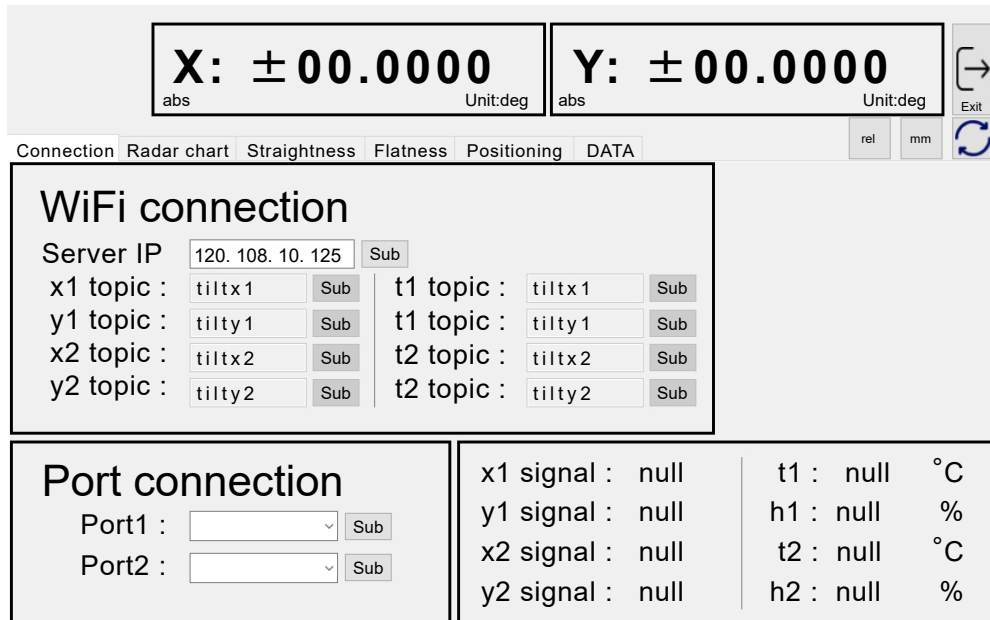


圖 12. 人機介面量測功能。

有關本設備之驗證說明如下：

本設備與國外市售電子式水平儀進行兩方驗證比較，以確保本設備量測數據之可靠性，由解析度比較，可發現其本設備解析度與市售水平儀之趨勢相同，解析度高達 0.0001° ，如圖 13、表 4 所示。而測試本設備之重複性，如表 5 所示，由重複測試 7 次之統計數值，其重複性 Ca 值最大為 10%，最小為 6%，最大差異為 0.0001° ，藉由 Ca 值等級分類表可得，如表 6 所示，本儀器之等級為 B 級以上。並且與國外市售電子式水平儀與國內常用氣泡式水平儀之競爭力比較分析，其有較高的 CP 值與競爭力，如表 7 所示。

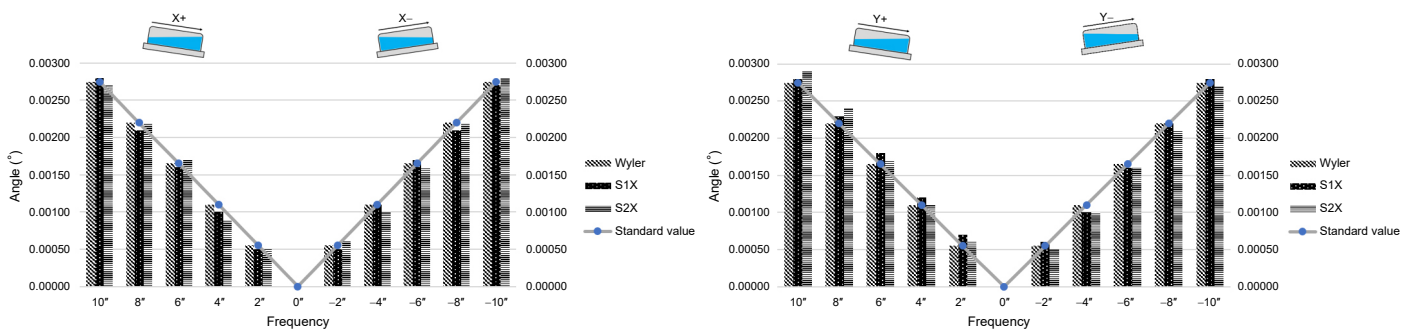


圖 13. X、Y 軸解析度散佈圖。

表 4. 解析度測試實驗數據資料。

standard value	-10"	-8"	-6"	-4"	-2"	0"	2"	4"	6"	8"	10"
wyler	-0.00275	-0.0022	-0.00165	-0.0011	-0.00055	0	0.00055	0.0011	0.00165	0.0022	0.00275
sensor1_X	-0.0027	-0.0021	-0.0017	-0.0011	-0.0005	0	0.0005	0.0010	0.0016	0.0021	0.0028
sensor1_Y	-0.0028	-0.0022	-0.0016	-0.0010	-0.0005	0	0.0006	0.0012	0.0016	0.0021	0.0027
準確率	98%	95%	97%	100%	91%	100%	91%	91%	97%	95%	98%

表 5. X、Y 軸重複性比較。

Sensor1_X							
Point1	0	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0	0.0001
point2	0.0013	0.0013	0.0014	0.0013	0.0014	0.0014	0.0014
Sensor1_Y							
Point1	0	0.0001	0.0001	0	0	0.0001	0.0001
point2	0.0012	0.0011	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0011

表 6. 重複性測試之 Ca 值。

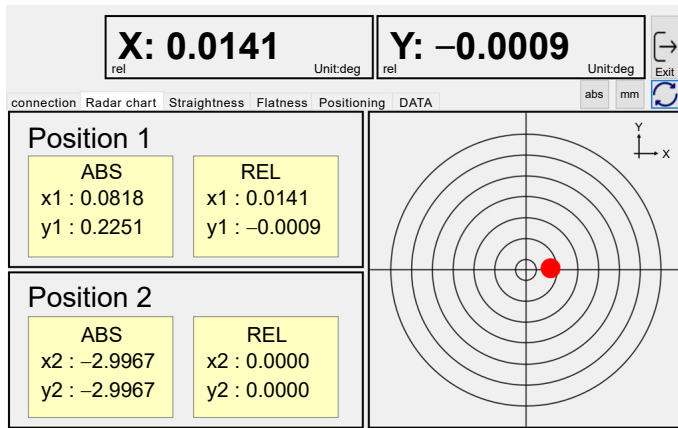
	Sensor1_X	Sensor1_Y
平均值	0.00135	0.00117
最大差異	0.0001	0.0001
Ca 值	10%	6%

表 7. 與其他相同設備性質比較。

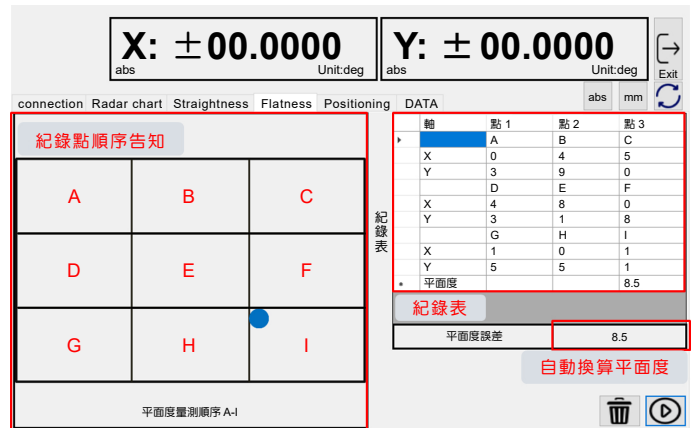
	氣泡式水平儀	市售電子式水平儀	本設備
量測精度	0.02 mm/m	0.001 mm/m	0.001 mm/m
量測軸數	1 軸	1 軸	2 軸
輸出訊號	無	數位	數位
顯示方式	目測	介面顯示數位值	介面顯示數位值 可配合需求修改
機台內部安裝	不可行	不可行	可行
價格	1 萬以內	30 萬以上	5 萬以內

伍、作品成果展現

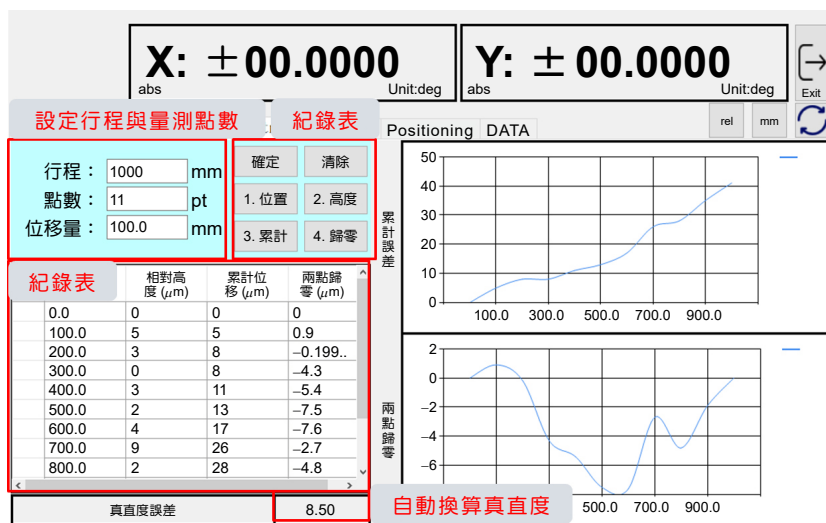
應用本研究所開發之設備配合人機介面內之量測功能，進行工具機水平精度的量測與校正作用，可在遠距離下即時透過 WiFi 傳輸來了解工具機的水平精度狀態，並透過人機介面進行量測與校正等等…。由人機介面便可了解機台的水平狀態，並使用人機介面快速記錄與自動換算真直度與平面度的幾何誤差，如圖 14 所示。



(a) 雷達圖



(b) 平面度量測



(c) 真直度量測

圖 14. 人機介面功能說明。

六、結論

本研究主要為針對工具機幾何誤差量測與校正進行探討，藉由自行開發解析度高達 0.0001° 之電子式水平儀與自行開發之人機介面進行實驗測試，結合了物聯網技術，透過網路可隨時分享水平儀之資訊供其他行動裝置，即時了解機器水平狀況。

將電子式水平儀長時間安裝於工具機之工作平面上，透過控制器與 IPC 進行串接，當在加工之前使用 G、M 碼使工具機自動量測動作，當幾何誤差過大時即時警告人員，達到智慧製造的目標。

目前市面上使用廣泛的水平校正儀器為氣泡式水平儀，解析度為 0.02 mm/M ，在大型工具機地腳螺絲與高精度機器水平校正時，其難以達到快速調校與水平誤差的降低，為此開發本設備來解決目前工具機的問題所在。

七、未來展望

目前工具機已邁入工業 4.0 方向，各家工廠都朝向智慧製造為目標，為此推廣本研究之技術於各工具機廠商，工具機配合此研究之技術，不僅提升工具機附加價值，也為未來無人工廠之工具機的水平精度檢測奠定基礎。

此研究所開發之設備在現階段與氣泡式水平儀相較，雖然精度為氣泡是水平儀的 10 倍之高，但在價格上因感測器為購買國外之商品，整體售價略高。未來可以尋找相關規格且價格較低之感測器來壓低整體售價，或尋找感測器相關技術自行研發，取代目前所使用之氣泡式水平儀。

參考文獻

1. 柯任鴻, 工具機方向誤差自我檢測智能化模組開發設計, 國立勤益科技大學碩士論文, (2015).
2. 呂建緯, 工具機幾何誤差補正系統開發, 國立勤益科技大學碩士論文, (2017).
3. 李季洵, 精密機械於不同溫度場域之幾何精度預測, 國立勤益科技大學碩士論文, (2019).
4. 紀綺麗, 水平精度對運動真值度之影響分析, 國立勤益科技大學碩士論文, (2019).

作者簡介

曹家鑫先生現為國立勤益科技大學機械工程所碩士生。

Jia-Xin Tsao is currently a M.S. student in Department of Mechanical Engineering at National Chin-Yi University of Technology.

簡瑞克先生現為國立勤益科技大學機械工程所碩士生。

Ruei-Ke Jian is currently a M.S. student in Department of Mechanical Engineering at National Chin-Yi University of Technology.

林祐瑜先生現為國立勤益科技大學機械工程所碩士生。

Yu-Yu Lin is currently a M.S. student in Department of Mechanical Engineering at National Chin-Yi University of Technology.

張茗桔先生現為國立勤益科技大學機械工程所碩士生。

Ming-Jie Zhang is currently a M.S. student in Department of Mechanical Engineering at National Chin-Yi University of Technology.

廖子豪先生現為國立勤益科技大學機械工程所碩士生。

Tzu-Hao Liao is currently a M.S. student in Department of Mechanical Engineering at National Chin-Yi University of Technology.

陳紹賢先生為國立中正大學機械所博士，現為國立勤益科技大學機械系副教授。

Shao-Hsien Chen received his Ph.D. in Mechanical Engineering from National Chung Cheng University. He is currently an associate professor in Department of Mechanical Engineering at National Chin-Yi University of Technology.