國產全數位智慧化車銑複合加工中心機開發

Development of All Digital and Intelligent Domestic Multitasking Turning Center

[1] 鄭志平 / [2] 麥朝創 / [3] 蒲宏彥 / [4] 蔡坤龍 / [5] 陳宗明

[1] 工業技術研究院 智慧機械科技中心

[2] 工業技術研究院 智慧機械科技中心

[3] 奕達精機股份有限公司

[4] 龍馬精密科技股份有限公司

[5] 正頻企業股份有限公司

摘要：本開發以全數位通訊界面及高階多軸控制之國產個人電腦控制器(PC-based controller)為基礎，搭配具備振動偵測及多位點溫度監控之內藏式智能主軸與高解析度回授之 CS (C-axis control by spindle motor)主軸驅動器，進行國產全數位智慧化車銑複合加工機之整合開發，期能符合工業 4.0 整合式系統架構，以因應國內工具機高速性能及多樣性之需求。同時亦利用個人電腦控制器開放式平台之特性，整合其他加值智能模組，將對話式加工程式編輯、遠端監控、加工時間預估及快速加工擬等加值智能模組，補足高階車銑複合加工機智能化輔助功能之缺口。透過本開發之成功案例建構國內同業於全數位系統應用信心。進一步可協助扎根中高等級工具機之全國產化之供應鏈與國際產業技術水準銜接。

Abstract：The project was based on a domestic PC-based controller, which features full-digital communication interfaces and multitasking control. Equipped with the smart built-in motor spindle with vibration detection, multi-point temperature monitoring, and high-resolution feedback CS spindle driver, the domestic full-digital intelligent multitasking turning center was integrated and developed. Additionally, its full-digital communication interface, which is able to conform to the integrated system architecture for Industry 4.0, meets the need of high speed performance and diversity of machine tools. By taking the advantage of open platform of PC-based controller, many modules were added to fill out the gap of the intelligent assisting features toward high-end machine tools, such as chatter suppression, conversational editing, remote monitoring, machining time estimation and quick machining simulation. Through the success of this project, the confidence level was increased for domestic industry to build up the full-digital systems. Furthermore, the project helped to build the foundation for supply chains of fully-domestic high-end machine tools and made domestic controllers more competitive in the global competition.

關鍵詞：車銑複合加工中心機、內藏式主軸、CS 主軸驅動器

Keywords：Multitasking Turning Center, Built-in Motor Spindle, CS Spindle Driver

開發目的

縱觀歷年國內各大工具機展，眾多廠商所展出之高階多軸工具機，代表台灣國內專業的 CNC (computer numerical control)車銑複合加工機製造廠商對於多軸複合加工機之機械設計製造、市場實務應用經驗及完整之機電整合已具備相當的能力。然而於展場中發現，高階多軸複合工具機其關鍵模組幾乎全搭配國外大廠之產品，諸如多軸 CNC 控制器，高階內藏式主軸及其相關之主軸驅動模組[1]。有鑑於此，本開發目的著重於高階多軸複合加工機之市場競爭力、中堅企業高值活化及生產力 4.0 的基礎能量提升，預計導入國產全數位控制介面、智能主軸系統及智慧機台模組三者同時達到產品全面數位化的目標，依此軟硬體功能的提升，推進產品朝智慧製造的方向前進，讓客戶能有更多智能化功能的選擇與應用。總體開發之核心著重於整合全數位機電核心與關鍵模組之搭配，其目的為達成自主研發與高值活化之標的。假以時日當可突破國際大廠對於關鍵模組的壟斷，減少國外進口的依賴度，進而減少國內工具機的整體開發成本，提高其市場競爭力。

產品標的設定

1. 國產全數位控制器導入

真正高階多軸控制器的取得十分不易，價格居高不下更是影響銷售的主因。以日系控制器為例，含選配加值功能價格高達 100 萬以上(7 軸型-單刀塔雙主軸車銑複合加工機)，佔整機成本居高不下，致使台灣高階多軸工具機的競爭力相對較弱。有鑑於此，在整個產業環境迫切需求下，國產控制器已於國內法人單位與學術研發單位的合作，經歷多年的研發與效能驗證下，其高速高精之多軸控制技術已可與國際大廠並駕而驅。因此，整合國內自製之高階控制器與多軸加工機之製造以達成熟運用之契機。發揮國產個人電腦控制器的開放介面之優點，結合企業應用經驗及產品特色，進一步透過服務化加值使整機售價大幅提昇，一舉突破國產中高階多軸設備之銷售市場限制，讓我國工具機產業建構更完整的產業價值鏈並獲得更大的產業效益。

2. 智能化內藏式主軸

日本與歐洲的工具機廠大都已經全面採用內藏式主軸，但台灣卻仍受限於控制器之限制，內藏式馬達的採購成本居高不下。縱使內藏式馬達的製造成本比一般馬達便宜，但是控制器廠商仍不願意降價給台灣的工具機廠。至使台灣工具機廠只能繼續用皮帶式主軸或是直結式主軸，一直無法將國產工具機升級到高性能的內藏式主軸機款。為了突破馬達與編碼器被壟斷的困境，本開發案擬自主開發全國產自製之內藏式主軸並嵌入國產加速度規與溫度感知器，最後再與國產主軸馬達驅動器及控制器整合，達到完全國產化的智慧型主軸系統，以實際的產品證明國產零組件整合後可以創造高性能高可靠度的主軸。

3. 全數位 CS 主軸驅動器

現行國內之車銑複合工具機其控制系統皆由國外把持，國內雖然已有相應之控制器系統，但仍無法擴增市場佔有率，其中一關鍵因素，國內無法提供高性能主軸驅動器可執行車銑複合製程加工中之 CS 軸加工應用。為解決上述問題，本開發內容核心項目之一為進行主軸驅動器自主開發。本案的高頻寬響應的 CS 主軸驅動器，其主要目標為與上控端採用高速的串列通信，提高驅動器速度頻寬響應為 100 Hz 來提升命令的頻寬；結合高解析度編碼器(20 bits/rev 以上)回授控制，期能達到車銑複合工具機所需要的 CS 軸功能。此外針對目前市場趨勢對全數位控制的要求，提出全數位乙太網控制自動化技術(ethernet control automation technology, EtherCAT)之數位通訊界面主軸驅動器規格，可使國內控制系統性能與價格比提昇到更高一層次。

4. 控制器內嵌智能化製程模組

高階車銑複合工具機除了機械精度，於智能製程加值競爭面上，軟體開發能力成為工具機產業下一波的競爭重點。多軸複合化加工機運動模式複雜，終端使用者無法以傳統三軸加工的直覺方式思考執行操作，故於操作使用上存在有過多的保護性，一旦操作經驗傳承未能即時銜接，總體壽命與設備利用率將備受考驗。因此高階高值設備須要有親合性的製程加值模組，以發揮多軸複合加工機的最大化價值與操作安全性。

本開發案考量生產力 4.0 數位製造的產業需求，以全數位個人電腦控制器為核心開發基礎，將切削顫振判斷演算模組嵌入於控制器內，並以控制器 EtherCAT 數位傳輸之介面(100 Mbps 全數位串列控制介面)，利用其高響應及全數位之特性與加速度規擷取之振動訊號整合，使機電之間的傳訊更迅速正確並，達成線上即時的顫振抑制與修正;亦藉由車銑複合線上編輯(computer aided design/manufacturing, CAD/CAM)軟體輔助模組、遠端監控、切削路徑快速模擬、工時估算及主軸狀態檢知，等控制器內嵌加值功能，使機台能具備多元的製程輔助與監控機能，使之能快速且正確的加工完成各項零件。

產品規格設定與比較

因應歐日大廠以及大陸東歐聯盟所開發具低價優勢機種的競爭，於企業發展策略上已朝向自動化、高速化、智慧化機種之開發，用以強化競爭優勢及產品形象與價值。本開發以全數位通訊介面及高階多軸控制之國產個人電腦控制器為基礎，搭配具備振動偵測與多位點溫度監控之內藏式智能主軸與高解析度回授(頻寬響應為 100 Hz、20 bits/rev、EtherCAT 介面)之 CS 主軸驅動器，進行國產全數位智慧化車銑複合加工機之整合開發。針對工具機智能加值功能之開發，達成線上即時的顫振抑制與修正；同時亦利用個人電腦控制器開放式平台之特性，整合其他加值智能模組，如車銑複合線上 CAD/CAM 軟體輔助模組、遠端監控、切削路徑快速模擬、工時估算及主軸狀態檢知等加值智能模組嵌入於控制器內，補足高階車銑複合加工機智能化製程輔助功能之缺口，成為國內首部全數位智慧化車銑複合加工中心機[2, 3]。

1. 標竿機型設定

有鑑於未來多軸複合加工設備需求大增，相對應用的市場需求也會日益變多。本開發產品之主力聚焦於雙主軸車銑複合高端加工件需求，一次性加

表 1　標竿機型主要架構規格表

	項　　目	規格
工作範圍	最大旋徑	Ø 600 mm
	最大加工直徑	Ø 220 mm
	最大工件加工長度	340 mm
	床鞍與水平傾斜度	60°(30°+30°)
床身	X 軸最大行程	160 (110+50) mm
	X 軸伺服馬達	3 kW
	X 軸快速進給率	20 M/min
	Y 軸最大行程	±30 mm
	Y 軸伺服馬達	3 kW
	Y 軸快速進給率	20 m/min
	Z 軸最大行程	500 mm
	Z 軸伺服馬達	3 kW
	Z 軸快速進給率	20 m/min
	W 軸最大行程	450 mm
	W 軸伺服馬達	3 kW
	W 軸快速進給率	20 m/min
	C 軸行程	360°
	C 軸快速進給率	33 rpm
	F 軸行程	360°
	F 軸快速進給率	33 rpm
刀塔	型式	動力刀塔
	刀具數	12 支
	型號	TBMR200
	刀柄尺寸	25×25 mm
	內徑刀柄直徑	Ø 40 mm
	刀塔旋轉時間(0~180°)	1.5 sec

表 2　控制器性能規格比較表

	FANUC 31I (日本)	SIEMENS 840D (德國)	本案控制器
全數位 IO 及伺服	FSSB(光纖)+ IO LINK	Drive-LCIQ(100MHz)+ ProfiBus	開放式 EtherCAT(100MHz)
M2M 連結	IO LINK 或 ProfiBus/ EtheCAT/CC-link 等	ProfiBus/Profinet	標準 EtherCAT
路徑控制數	4	8	2
Lookahead 單節數	1000 blocks	500 blocks	500 blocks
插值解析度	奈米插值	奈米插值	奈米插值
前饋	速度前饋/加速度前饋	速度前饋/加速度前饋	速度前饋/加速度前饋
Nurbs 擬合/ 轉角自動加減速	有	有	有
平滑化背隙補償	有	有	有
控制器輸出命令	未說明	速度	速度
人機介面 O.S.	標準為自家封閉式介面	Microsoft Windows	Microsoft Windows
第三方軟體整合	封閉，不易整合	封閉，不易整合 (需認證之配合廠商)	第三方軟體易整合

工完成減少上下料時間及少量多樣化之重要零組件生產，達成智慧化生產的基礎加工設備。機型主要架構如**表 1** 所示。

2. 控制器規格需求

傳統伺服控制其傳輸頻寬有限且易受限於配線繁多及雜訊干擾等問題，而無法提升控制解析度，造成 CNC 精密設備在高精度與多軸複合化應用時，面臨多軸同步與即時控制性能不佳之問題。全數位伺服控制已成為下一波工具機競爭之必備條件。以數位串流技術為基礎，建構主控端(master)與受控端(slave)網路通訊模組，提供最佳性價比之全數位多軸驅動及遠端監控應用，邁入智能智造設備供應鍊之門檻。再者，於全數位控制器的架構下，伺服及主軸驅動器參數及模式可線上更新，在不同加工應用下，可採用不同模式及不同參數，達到最佳控制效果，而伺服參數的上下傳，皆可透過 EtherCAT 通訊由控制器直接進行，方便製造廠出機設定及售後服務時遠端更新。另外，驅動器各式警報也可即時傳回控制器，確認警報內容。因 EtherCAT 為國際標準通訊，製造商可依需求選用不同的伺服及主軸零組件，提供使用者更多的選擇，有效降低成本，形成完整的國產全數位伺服零組件供應鏈。控制器人機操作介面端採用開放式 Windows 作業系統，不僅容易整合第三方軟體及週邊硬體，也較容易與各研究單位所開發之加值功能進行整合。

本案之核心標的為開發國內第一台全國產化車銑複合加工機，為擺脫國外大廠關鍵技術「多軸 CNC 控制器」的箝制狀況與深耕自主整合技術能量，控制器採用全國產之產品。**表 2** 為本案採用之控制器與其他各廠控制器之比較表。

3. 智能化內藏式主軸需求

智能化主軸的目的是提供主軸的相關訊息給控制器進行判斷，提早發現問題並解決問題。加速規的用途是提供主軸端的振動幅度回授給控制器進行判斷主軸目前的振動量，作為判斷機器是否需調整切削條件或是主軸有損毀的現象，提早預作售後服務準備，可以大幅減少售後服務的等待時間。溫度計的主要功能是監測主軸軸承的溫度，確保主軸軸承溫度異常時能提早發現，輔助監測功能監測

主軸油冷裝置是否正常運作[4]。

本開發標的之內藏式主軸，除了主軸本身的結構設計及智能化功能外，尚包含車床專用的內藏式廣域馬達的採用。而所謂的廣域主軸馬達，可於一般馬達 1/2 轉速時即達到全馬力輸出，所以可提供 2 倍於一般馬達之高扭矩值，能在於較低轉速作業區間提供重切削能力，並提供 C 軸低速循跡加工時，較佳的控制性。計畫開發之廣域式內藏主軸馬達在額定轉速 600 rpm 即可輸出全功率，所以廣域式主軸馬達在低速可擁有更好的加減速，對做為車床 C 軸加工功能而言，可有更好響應速度及較大的保持力矩。智能化內藏式主軸產品其主要特色描述如下，產品開發規格如**表 3**。

A. 國內所開發之主軸內嵌溫度及振動監測功能能見度不高。國內目前車銑複合工具機所用之內藏式主軸，其內藏式主軸馬達的轉子、定子以及主軸馬達驅動器皆採用 FANUC 提供的封閉式配套組件，並無法與國產全數位控制器搭配。

B. 以智能化內藏式主軸而言(如 Mikron/Step-Tec)，大部份皆集中於銑削主軸之開發與應用，對於車床用主軸，能見度稍低。

C. 如 Mazak, Mikron 及 DMG 所推出之智慧主軸，透過預先埋藏在主軸內的溫度、振動和位移感測器，不斷的監控主軸的狀況，擷取資訊提供給操作者作為主軸是否異常的判斷依據。亦可讓使用者真實瞭解主軸負載振動狀態，定義合宜之加工參數。

4. 全數位 CS 主軸驅動器

國內車銑複合工具機之 CS 主軸驅動器的部分，現階段多以國外驅動器為主，國內還沒有做出此類之產品。於本開發案中，為滿足 CS 主軸高響應之需求，採用 d-q 解耦之向量控制技術，目標為達到速度響應頻寬 100 Hz 以上。其次，以雙回授訊號為主(A,B,Z 及 SIN/COS 雙回授機制)，主軸回饋解析度可達 20 bits/rev 以上，滿足 CS 主軸高解析度之需求。驅動器具雙迴授控制，除了可搭配本案發展的內藏式主軸外，因具第二迴授，也可應用在有減速比的 CS 主軸上。此外，於驅動器的通訊介面上，亦納入 EtherCAT Slave 功能，達成主軸(包括兩個工件主軸及刀具主軸)和伺服軸間的精密同動控制。其主要特色描述如下，產品開發規格如**表 4**。

表 3　智能化內藏式主軸產品開發規格表

名稱	規格
主軸形式	A2-6
主軸馬力	11/15 kW
最高轉速	6000 rpm
基底轉速	600 rpm
鼻端偏擺	0.002 mm
主軸端防水	迷宮加氣幕
主軸冷卻需求	油冷 3 kW 以上
振動量(未含夾頭)	1 mm/sec 以下
剎車模式	碟剎
分度精度	±10 秒
主軸加減速時間	1500 rpm/秒
熱溫昇監測功能	軸向溫度偵測(PT100)
振動監測功能	三軸向振動量測範圍 1-150 mm/s

A. 由速度迴路頻寬分析，頻率響應頻寬影響主軸運轉時的穩定度，100 Hz 的速度響應頻寬可提供穩定的馬達控制。再加上 20 bits/rev 高解析度編碼器回授，使控制器可更加精準的控制馬達轉速及相位，尤其有利於低轉速的 C 軸加工控制，C 軸控制精度可達 0.001°。

B. 為了提升主軸端的扭力輸出及控制性，兩者之間通常會有一減速比。為達成精確的定位控制，主軸端必須裝設光學編碼器及磁性環，提供位置控制使用。本案為了增加主軸驅動器的應用範圍，不管是驅動器自行控制位置迴路或只是將第二迴路之位置迴授值經 EtherCAT 回傳給

表 4　全數位 CS 主軸驅動器產品開發規格表

項目	規格說明
輸入電壓	三相 AC 220 V
電流	90 A (22 KW)
容許電壓變動率	+/- 10 %
輸出頻率範圍	0 ~ 1000 Hz
載波頻率	8 KHz
回授格式	A,B,Z(二相式回授) SIN/COS (可達 20 bits/rev)
回授方式	雙回授機制
Touch Probe	支援 Index Latch
冷卻方式	強制風扇
通訊介面	EtherCAT 通訊
控制模式	CSV (Cyclic Sync Velocity)
DC Time(通訊週期)	Up to 250 us
過溫度保護	KTY84 溫度偵測保護
輸出電流	可達輸出額定電流 200%

上位控制器，因此主軸驅動器設計有雙迴授功能。

5. 智能化人機操作需求

目前國際大廠不只朝單機或是多機的智能化的發展，更結合設備物聯網與預兆診斷巨量分析技術，協助終端客戶提昇製程效率分析及運算模組自行演化等應用服務，創造主動售後應用服務收入，朝向工業 4.0 的運用領域進行開發。使用者於操作層面的要求上希望愈簡單愈好，希望能達到單鍵式親善化操作，因此智能加值輔助功能之整合，實為中高階工具機控制器發展策略及佈局之重點。改善原有高階車銑複合加工輔助性能之不足，並由人機介面改良更為友善性之操作方式，使複雜的加工能更簡便、更有效率且加工出品質更優良的工件。

A. 切削顫振抑制功能：本案於切削顫振抑制模組之開發上，將偵測與控制法則內建於控制器內，以精簡型機電配線達成成本降低，同時完成智能切削加工功能開發。透過分析比較建立顫振判別法則，快速抑制，達到穩定加工。

B. CAD/CAM 編輯模組：強化 CAD/CAM 編輯模組操作功能，採以全 ISO (International Organization for Standardization)規格刀具資料庫導入，並以圖控式人機界面進行操作。另將針對機械行程之特色，於該 CAD/CAM 模組執行 3D 實體模擬時，同步進行行程檢查協助使用者確認並輸出加工指令。

C. 切削路徑快速模擬：透過切削路徑的圖形化，可協助現場操作人員快速評估製程程序，讓使用者可快速分析加工情境及分析討論，協助解決第一線開發人員的實際瓶頸及交換修正意見。

D. 製程時間估算：針對生產效率，人員的稼動，訂單的進度等資訊，唯有取得完整的製程時間的生產資訊，才有辦法進行成本的準確估算以及生產進度掌握，進而彈性的調配產線上的機台，提升整廠生產效能。

E. 遠端監控：遠端監控功能具備控制器與遠端的雙向溝通，可於遠端平台執行受控端資訊監控與管理之功能。需具備監看控制器之狀態資訊如主軸及伺服軸負荷、轉速、進給率，目前加工程式，操作歷史、警報歷史等等資訊，雙端加工程式進行上傳下載，監控端可執行稼動率分析記錄與圖表化。

開發成果

1. 整機構形精度驗證

本開發案聚焦於製造市場對於未來多軸複合加工設備需求大增，故本次開發所選定之標竿機型設定為 7 軸型之雙主軸車銑複合工具機。該標竿機型的主要靜態與動態精度，描述如**表 5**。實機外形如**圖 1** 所示。

表 5　標竿機型之精度與性能測試

X、Y、Z 軸平行度與垂直度	主軸偏轉 0.002 mm	
	主軸凸緣端面之偏差 0.002 mm	
	主軸中心線與鞍座 Z 軸方向運動之平行度 垂直面(0.01/300) 水平面(0.01/300)	垂直面 正主軸 0.003 mm　副主軸 0.009 mm 水平面 正主軸 0.008 mm　副主軸 0.005 mm
	橫滑台運動與主軸中心線之垂直度(0.01/300)	0.002/160
定位精度(註 1)	X 軸 0.003 mm、Y 軸 0.002 mm、Z 軸 0.006 mm、A 軸 15.0 秒、C 軸 10.6 秒	
重複精度(註 1)	X 軸 0.002 mm、Y 軸 0.001 mm、Z 軸 0.004 mm、A 軸 12.0 秒、C 軸 8.6 秒	
換刀時間	小於 3K：3 秒 3~7Kg：5 秒	2Kg：1.4 秒 6Kg：1.9 秒
加工精度(註 2)	IT7 級、Cp 值：1.77	
噪音(註 3)	正主軸 4500 rpm：67.6 dB 副主軸 6000 rpm：63.8 dB	
高速長時間無負荷溫升(註 4)	正主軸：31.1-33.1 度 副主軸：28.9-31.2 度	
動態循跡測試	雙向真圓度偏差 G(b) 8.5 μm	

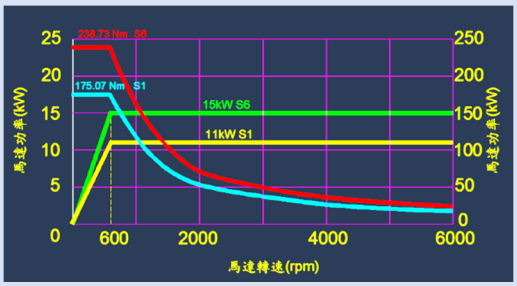
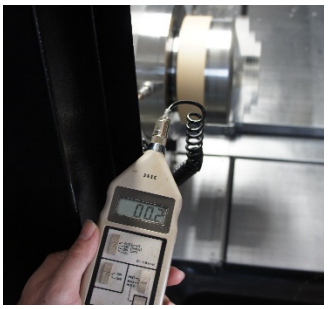
註 1：定位精度採以雷射干涉儀搭配角度分割儀進行量測，量測結果以 ISO-230-2 標準分析。
註 2：加工精度測試採精切削 20 個工件，進行加工精度分析
註 3：噪音測試之測驗環境噪音為 58.4 dB
註 4：主軸具冷卻裝置。主軸以最高轉速無負荷狀態下，採每 5 min 取樣一次，連續運轉 40 min
註 5：同時控制 X 軸與 Z 軸 1000 mm/min 進給，移動半徑為 100 mm 之圓軌跡，量測結果採 ISO-230-4 分析

圖 1　實機外觀照片

2. 智能化內藏式主軸成果

本開發之智能化內藏式主軸，其各項檢驗成果說明如下：**表 6** 為正副主軸各項主要檢驗指標結果。主軸檢知功能頁面如**圖 2** 所示。本案所開發之內藏式主軸全面採用國產化的軸承、馬達、加速度規與驅動器，並具備溫度與振動監控，提早異常警報，降低售服時間。擺脫高階車床主軸被日本與歐洲大廠的種種限制，實現車床內藏式主軸低成本化、普及化的目標。

表 6　正副主軸各項主要檢驗指標結果

主軸馬力 基底轉速	由圖當主軸轉速到達 600 rpm 時，馬力達到大功率表現，同時亦為主軸扭力最大輸出。	
主軸振動測試	控制正主軸以 500 rpm 為一增幅達最刀高轉速，以振動計執行量測。正主軸最大振動量為 0.2 mm/sec	
正副主軸加減速	JOINT-Programmer 軟體分別控制正主軸 1500 rpm 及副主軸 3000 rpm 之加減速動作，擷取速度與時間關係圖。正主軸 1500 rpm 下，加減訴速度分為 968 ms 及 976 ms。副主軸 3000 rpm 下，加減速分別為 1960 ms/1988 ms。	
溫度與振度檢知及警示功能	1. 溫度解析度 0.1℃ 2. 加速度解析度(shock)：0.00001 g 3. 速度解析度(vibration)：0.00001 mm/s (RMS) 4. 顯示介面：溫度為 0.1 加速度與振動：0.001 5. 具溫度過載警示記錄及振動過載警示記錄及警示資料下載功能	

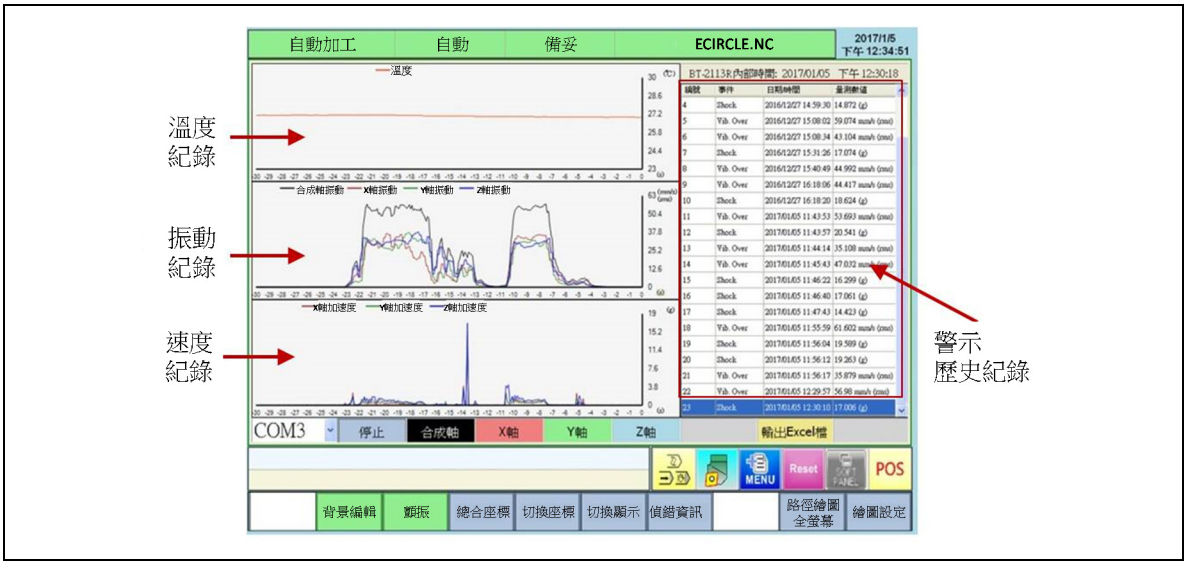


圖 2　主軸溫度與振動檢知功能頁面

表 7　CS 主軸驅動器性能驗證說明表

項目	開發成果
輸入電壓	三相輸入 AC 225 V - 228 V
電流	以軟體控制驅動器電流輸出為 100 %，經電流表實測為 90.5 A (22.5 KW)
輸出頻率範圍	以軟體控制驅動器輸出頻率，再以示波器量測 UVW 端子之頻率，量測值為 1000 Hz
載波頻率	以示波器量測 UVW 端子，其開關頻率量測值為 8 KHz
回授格式 通訊介面 回授方式	模擬外部參考點訊號，再以 EtherCAT 通訊方式執行參考點擷取(index latch)，接續以示波器分別量測方波與弦波之訊號，讀取弦波訊號之計數(count)。主軸轉一圈兩次取得編碼器 Index 解析值之差值為 22673306-17758106=4915200，遠大於 20 bits (2^{20}=1048576)
控制模式	以軟體控制馬達運轉 100 rpm，運轉中切換速度控制模式及週期同步速度模式(pofile velocity / cyclic synchronous velocity, PV/CSV)，PV 控制模式為 3 通道、SCV 控制模式為 9 通道。
通訊週期	以示波器執行同步更新周期檢測，可達 250 us
輸出電流	以軟體控制驅動器電流輸出為 200 %，確認驅動器無異常狀況，經電流表實測為 182.8 A

3. CS 主軸驅動器開發成果

主軸驅動器之各項數據量測與驗證成果，描述於**表 7**。CS 主軸驅動具備傳統主軸變頻器之基本控制特性，且在零速時，可將電機激磁在固定角度上，以維持定位精度。其主要特性具備有追蹤響應快及震盪小，可確保切削的精度、加工表面光滑度。

4. 智能加值項目成果

A. 於切削顫振抑制模組開發上，**圖 3** 為設定操作頁面。抑制模組透過加工振動訊號量測與分析，建立顫振判別法則(準確率可達到 95 %)。顫振發生後由控制器改變切削轉速直至抑制完成。本案顫振抑制模組，可在 0.5 秒內感測振紋的產生，並於 2 秒結束抑制動作，達到穩定加工。

B. 車銑複合線上 CAD/CAM 軟體模組：車銑複合對話式 CAD/CAM 模組，整合標準 ISO 規格之刀具資料庫，可省略系統繁瑣設定之要求(如：刀具幾何資料、刀具補償設定及替代刀號設定)，解決多軸車銑複合加工程式編程之親善化。於 3D 切削模擬檢視上，具備有實體切削模擬、刀具路徑顯示、多視角檢視、1/4 剖面檢視及實機行程檢查，讓使用者容易確認加工程式正確與否。控制器功能頁面如**圖 4**~**圖 6**。經由本模組所編輯之工件程式，其加工實體範例如**圖 7**。

C. 切削路徑快速模擬：採以路徑模擬功能計算出簡化後的路徑特徵點，將座標點送至由繪圖模組，繪製於圖形上。因不必由運動控制模組逐點計算插值及維護各個座標系統，如此可大量簡少核心運算時間，並達成加工路徑快速模擬之功能。使用者可依檢視需求進行 5 段式速度調整，最大模擬速度為 200 單節/秒。

圖 3　顫振抑制模組功能頁面

圖 4　圖控制刀具資料庫

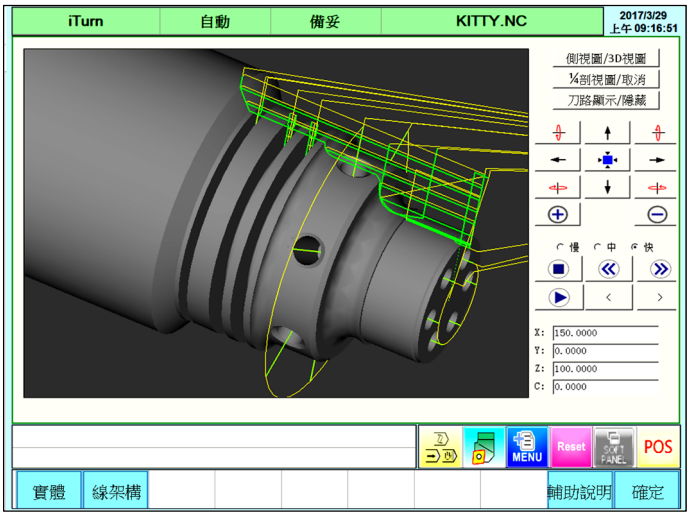


圖 5　切削路徑與實體顯示

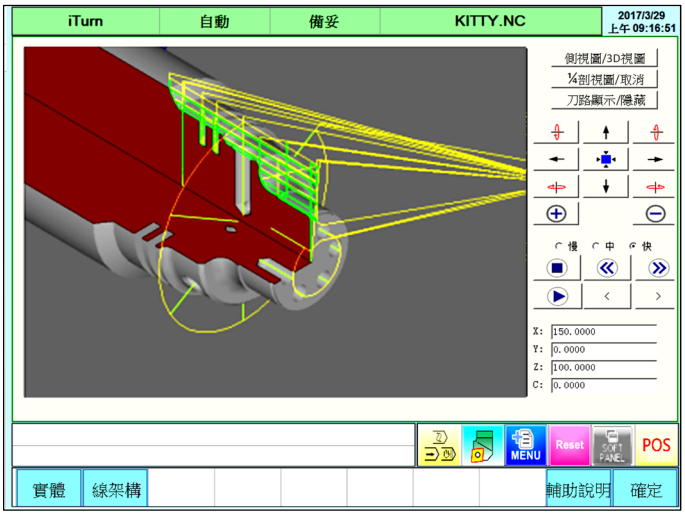


圖 6　1/4 剖面檢視

圖 7　加工實體

D .工時估算：該項功能整合於路徑快速模擬介面，讀取加工系統之運動參數核心，利用運動學估算每單節所需花費的時間。最後將各單節所花費的時間做累計，亦同時完成估算加工時間。控制器內嵌之切削路徑快速模擬與工時估算模組，其功能頁面如**圖 8** 所示。

E. 遠端監控：遠端監控平台可執行對遠端設備之控制器連線，檢視受控機台端之狀態資訊如主軸及伺服軸負荷、轉速、進給率，目前加工程式，操作歷史、警報歷史等等資訊，必可依加工操作之需求進行雙端之加工程式程式之上傳下載。於稼動率的管理上，可在遠端平台即時顯示對應機台之稼動率稼動率分析記錄與圖表化輸出。遠端平台之稼動率分析功能頁面如**圖 9** 所示。

結語

面對大陸市場的競爭及限制條件，以德國 Industry 4.0 為基礎在國內發展智慧機械的政策主導下，自動化智能化

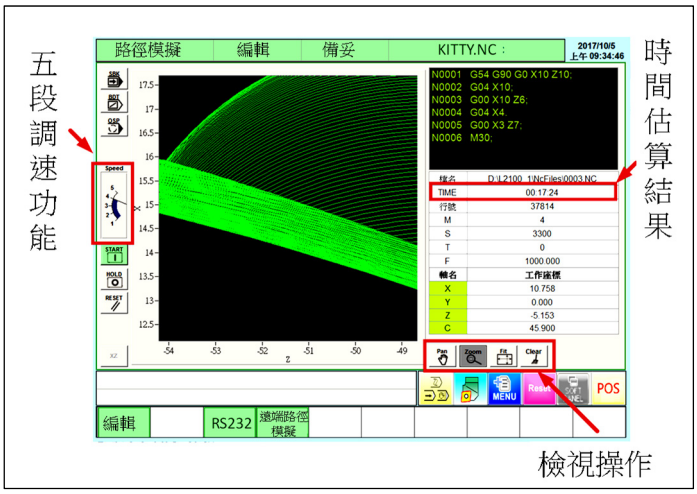


圖 8　快速路徑模擬及加工時間估測功能整合頁面

(模擬速度最大≧200 單節/秒、時間估算誤差量<10%)

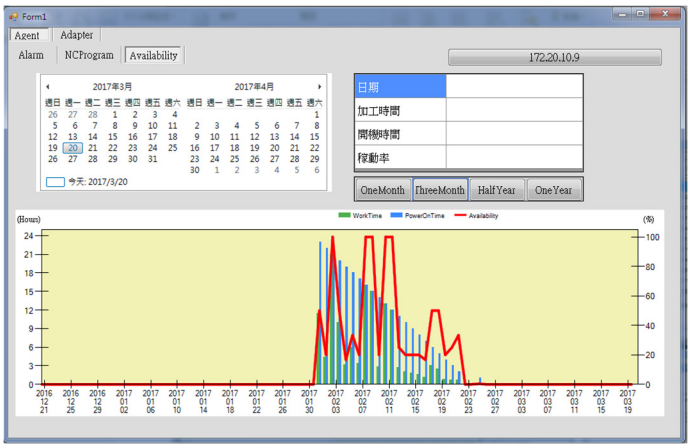


圖 9　遠端平台稼動率分析頁面(單日/單月/季/年)

國產化的智慧機台產生勢在必行。全數位系統除可提供多系統車銑複合加工應用之外，對於各種分散式的自動化系統應用，更可兼顧週邊裝置之即時性控制及溝通需求，提供國內同業應用信心。開放式智慧控制器及軟體供應服務聚落，讓業界從硬體製造進入軟體或系統服務。亦可透過後續產品之技術服務，藉由使用者之回饋，強健整體機電系統之成熟度及可靠度，並建立市場口碑逐步提升市佔率。藉由關鍵模組在台製造，設備在地生產，使國內相關中堅產業能增加新產能以提升整體產值，突破國外供應鍊不穩定與高價之困境。再者，產業界共同開發之技術，透過密切交流與溝通討論，深耕車銑複合加工設備應用市場，進而提高工具機區域集體品牌產品效應，增加國際競爭力。

誌謝

本開發案感謝經濟部科技研究發展專案小型企業創新研發計畫(SBIR 計劃編號 2Z1042021)之支持，使本計畫得以順利進行，特此致上感謝之意。

參考文獻

[1] 鄭志平、麥朝創，“智能化工具機之發展”，機械工業雜誌，380 期，第 110-126 頁，2014 年。

[2] 梁碩芃、林錦德、陳韻巧、王培寧、謝男凱，“工具機智能軟體的發展方法-以顫振抑制技術為例”，機械工業雜誌，404 期，第 17-31 頁，2016 年。

[3] 蔡孟勳、曾翔駿、洪茂棋，“CNC 智能化人機介面開發”，機械工業雜誌，404 期，49-58 頁，2016 年。

[4] 鄭芳田、楊浩青，“開發智能化加工狀態估測與診斷系統研究成果報告”，行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告，2011 年。

■