機械工廠內之異質機臺連網整合與應用

Integration of Heterogeneous Machines and Its Applications in a Machining Factory

李維楨、鍾俊輝、劉孟昆、郭重顯、項天瑞、楊朝龍、羅乃維
Wei-chen Lee, Chunhui Chung, Meng-Kun Liu, Chung-Hsien Kuo, Tien-Ruey Hsiang, Chao-Lung Yang, Nai-Wei Lo

在工業 4.0 的推動下，智慧製造及智慧工廠的概念遍植於臺灣的工業界。大家期待智慧工廠對環境的改變能夠自動回應，並收集工廠中生成的大量資訊以進行資料分析。為了實現這一點，如何在工廠內連接各式機臺是當務之急。在本研究中，我們使用了各種通訊的方法來連接各式機臺，並在生產過程中監控機臺，以收集機臺資訊，並將其上傳到雲端伺服器。在應用的部份，本研究中將機臺進行線上量測所取得的量測資料用來進行誤差補償，可降低標準差達 30 % 以上。

With the advocate of Industry 4.0, the wave of smart manufacturing and the smart factory has swept through the industry in Taiwan. It is expected that the smart factories can automatically respond to the change of the environment, and collect massive information generated in the factories for data analytics. To achieve this, how to connect various machines in a machine shop is a top priority. In this research, we used various communication methods to connect the machines on the shop floor, monitored them during the production process, collected their information, and then uploaded to the cloud server. Regarding the application of the data collected, we used the on-line measurement data for error compensation. The experimental results showed that the proposed method reduced the standard deviation by at least 30%.

一、前言

本研究將工業 4.0 之重要元素導入臺科大機械系實習工廠，以提供研究與教學所需。本研究主要實現了異質機臺 (即工廠內不同廠牌或不同年代的機臺) 連網並建構可應用之網實整合系統，亦藉此完成 AR 協作、生產管理、刀具管理與預防性維護等應用，研究架構如圖 1 所示。我們首先整合了新舊機臺，並建構完備的 IoT 系統架構，將資訊透過各種通訊標準傳至 SCADA 伺服器上的資料庫，再上傳至雲端伺服器所建構的資料庫。實際生產過程中，將透過本研究所開發之製造執行系統 (manufacturing execution system, MES) 作為流程控制中

心，並下接 SCADA 伺服器進行現場資訊之監視與控制。現場人員可透過擴增實境技術從資料庫中取出資訊並即時顯示於手機或智慧眼鏡中輔助操作。

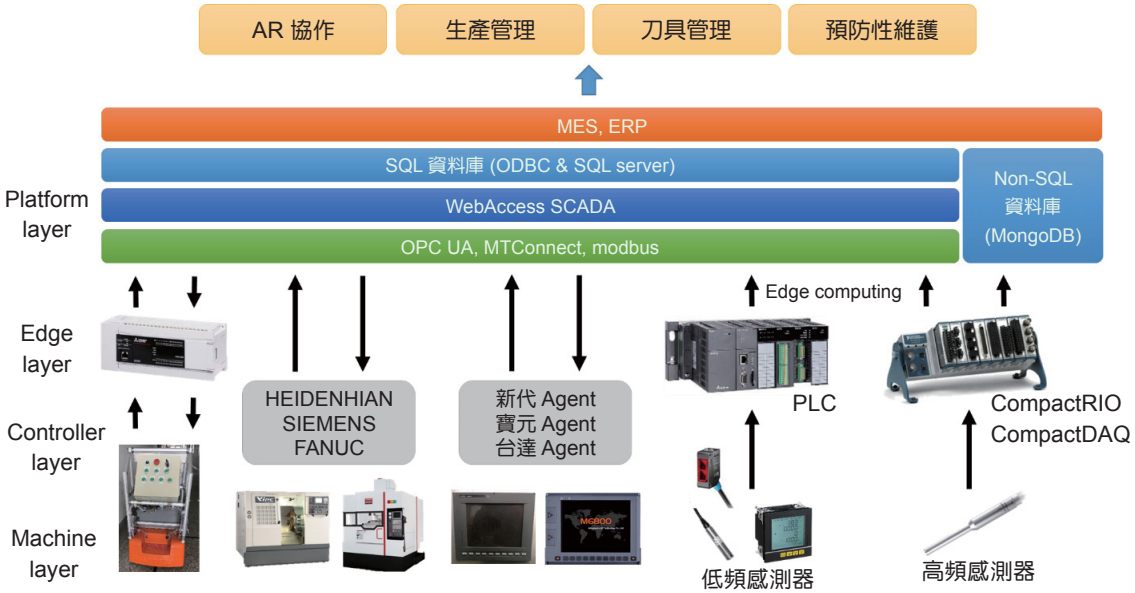


圖 1. 異質機臺網實系統架構。

二、IoT系統架構

目前主流的加工機臺通訊協定包含 OPC UA、MTConnect 與 Modbus 等，而部分機臺則僅支援其所開放之軟體開發套件 (software development kit, SDK) 進行通訊。為進行異質機臺之 IoT 系統建構，必須先了解各家廠商設備所適合之通訊協定，進一步採用針對其所開發之 Adapter 進行連網。本研究已建構了一個異質機臺連網之 IoT 系統架構，所支援之通訊協定與其示範設備如表 1 所示。連網的設備包含 HEIDENHAIN 控制器、FANUC 控制器、寶元控制器、SIEMENS 控制器、新代控制器、OMAX 水刀切割機、三菱可程式控制器以及台達可程式控制器。不可直接連線之傳統機臺則可以透過 PLC 作為媒介，以將傳統機臺上外加的感測器資訊送至 SCADA 伺服器。本研究採用研華科技的 WebAccess 做為 SCADA 伺服器之監控軟體，以進行各種設備資訊接收與監控中心，並實現各種設備的資訊可視化。此架構之優勢在於可擴展性，僅需增加 PLC 設備之類比與數位輸入模組，即可擴增現場之感測器數目。此外，可透過 PLC 於 Edge 端進行邊緣計算，減少 SCADA 不必要的數據接收，亦可經由 SCADA 中心遠端控制現場，達到網實整合系統資訊監視與控制之目的。

三、製造執行系統

完整建構 IoT 之系統後，系統 SCADA Server 即可監控現場之製造資訊，然而還需要一個管控生產流程之製造執行系統，才能促使生產過程之有效管理。本研究所開發之製造執行系統分為兩個部分，人機介面以及後端製造執行系統。人機介面採用網頁方式呈現，使用 Laravel 框架建立。後端製造執行系統使用 Python 做為程式語言。兩者透過 TCP/IP 中的

表 1. 本研究已連線之設備與其連線方式。

Controllers/Machine	Communication
HEIDENHAIN	RemoTool SDK
FANUC	FANUC FOCAS
SIEMENS	OPC UA
LNC	Modbus
SYNTEC	OPC UA
DynaPath	MTConnect
OMAX Waterjet	MTConnect
SIEMENS PLC	Modbus
MITSUBISHI PLC	Modbus
DELTA PLC	Modbus
FATEK PLC	Modbus

HTTP 協定來溝通，並以 SQL server 作為儲存資料的工具。後端製造執行方面則使用 socket 和 Modbus 來與安裝 NX CAM 軟體以生成加工路徑的電腦以及工廠的倉儲系統和 AGV 溝通。在 NX CAM 方面是使用 socket 搭配 JSON 格式與其溝通，socket 的優點在於簡單以及快速，且容易嵌入其他應用程式中。在倉儲以及 AGV 方面則採用 Modbus 來做為溝通的格式，會採用 Modbus 是因為倉儲及 AGV 皆是由 PLC 做為控制單元，而 Modbus 在 PLC 上的應用成熟且穩定。整體架構設計透過將不同工站切割為互不干擾之小區塊，並由同一系統做觸發的判斷，來簡化發生錯誤修正的複雜度以及增加修改的彈性。透過此製造執行系統可以執行現場之自動化流程，並與系統之 SCADA server 連線溝通，透過 SCADA 取得現場之製造資訊，以執行接下來的製造流程。若需與現場配合，則可透過下指令的方式給 SCADA，由前述所建構之 IoT 系統與現場邊緣端之控制器進行溝通，藉此即時監控現場之生產流程。舉例來說，本系統可與現場之 AGV 與倉儲系統溝通，確認前站生產流程完成後，即可透過 IoT 系統通知 AGV 由第一個倉儲取料，並運送至第二個倉儲進行下一個生產流程。

四、IoT系統架構實務應用與後台分析

本研究之資料流架構如圖 2 所示，我們收集的資料來源分別為機臺控制器、可程式化邏輯控制器 (PLC) 以及音訊擷取設備，加工資料經由 PLC 以及研華科技所開發的 WebAccess/SCADA (supervisory control and data acquisition) 軟體架構存放於 SCADA 伺服器，並定期備份至後端伺服器儲存，儲存前將資料篩選，過濾出較具參考價值或分析價值之資料，再存入MS SQL 伺服器。此外，考慮未來工廠規模的擴展，將可能產生非結構化之資料，因此我們將切削音訊透過 LabVIEW 儲存至 MongoDB 伺服器 (資料量大時)，以因應未來資料儲存可能會面臨的挑戰。隨著未來工廠的規模日漸擴大，資料量亦有增無減，為了滿足未來資料分析所需的運算能力，本研究設計出兩種資料分析的方式，分別為單台伺服器分析運算與分散式分析運算平台。當資料量較大時即採用分散式分析運算平台，透過 Hadoop 平台可將數台電腦整合，並採用分散式檔案系統 (hadoop distributed file system, HDFS) 來儲存資料。此外，還使用 MapReduce 平行運算架構，該架構類似於演算法中的個別擊破 (divide and

conquer)，也就是將問題分成各個小部分之後再作整合。反之，若資料量較小，則使用單台伺服器分析運算即可滿足其運算需求。最後，分析運算的結果將會透過資料視覺化呈現至資料分析暨資源整合平台。

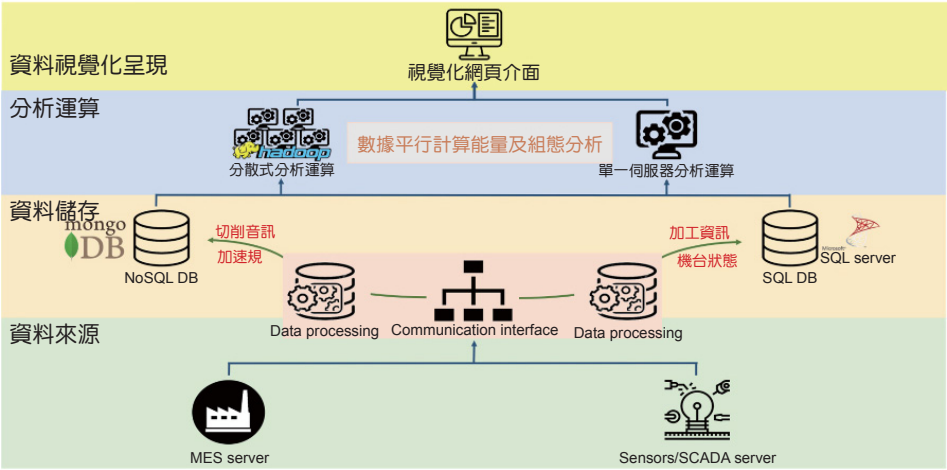


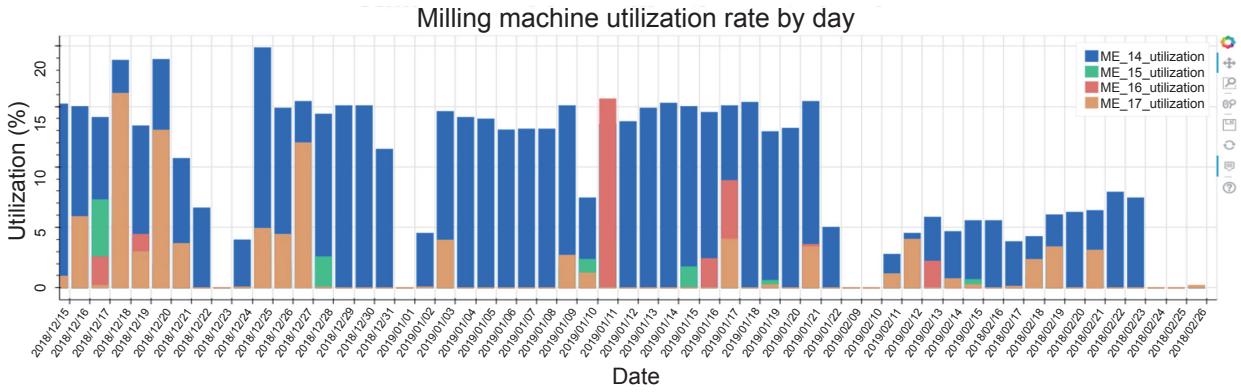
圖 2. 資料流架構。

根據前述之連網架構，實際在傳統工廠 (即臺科大機械系實習工廠) 進行架設及驗證。感測層部分運用紅外線感測器及智慧電錶以接收傳統車床及銑床之主軸轉速以及機臺電力相關資訊；接收層部分選擇三菱可程式控制器收集感測層中所獲得的資訊，經過初步運算後透過網路連線功能與監控軟體相互溝通。監控層部分藉由研華的監控軟體 WebAccess / SCADA 進行監控頁面顯示。驗證結果可實際透過 SCADA 進行數據監控，其中機臺電力資訊除了電壓、電流、功率外，也包括每小時的耗電量等資訊，這些資訊最終可以蒐集起來進行如稼動率等分析。圖 3 所示為於實習工廠之 4 部銑床在二個月內之稼動率，由圖 3 可知使用最多的銑床為標號 ME_14 的這部銑床，且大部份時間僅一部或二部銑床有運作。

五、智動刀具路徑規劃、線上量測與誤差補償系統

應用上述所開發之 IoT 與 MES 系統，本研究開發了智動刀具路徑規劃及線上量測與誤差補償系統，其架構如圖 4 所示，MES 將可透過前述之系統架構與 FTP server、API server 與 CNC 控制器進行溝通，藉此達到路徑規劃、線上量測與誤差補償等實務應用。當 MES 系統接收到產品製造下單後，即會與後台之 API server 溝通，將相關之零件檔由 FTP server 下載至 API server 開啟。此時 API server 即可透過本研究所開發之二次開發程式，於 Siemens NX CAM 軟體中自動化生成刀具路徑與量測路徑，並可考量現場之刀具管理進行路徑生成匹配。完成後則經由 MES 下達指令傳輸相關執行 NC 檔至現場控制器，並經由 IoT 系統下達加工執行指令，即可完成最基本的自動化加工。然而此自動化加工並無法控制現場之加工品質，因此本研究亦開發了線上量測與誤差補償系統。現場機臺會透過線上量測系統量測工件各個尺寸並儲存量測資訊於控制器中，透過 MES 溝通以 API server 下載量測資訊，即可透過所開發之二次開發程式，以量測資訊為基礎產生對應的誤差補償之刀具路徑，

傳統機台電能分析



藉由裝設智慧電錶於傳統銑床上，收集其電能使用狀況，依照電能的變化可以得知機台的操作狀況、使用頻率及稼動率，此資訊可供人員進行機台作業分配，以期達產能最大化。

圖 3. 實習工廠之四部銑床之稼動率分析。

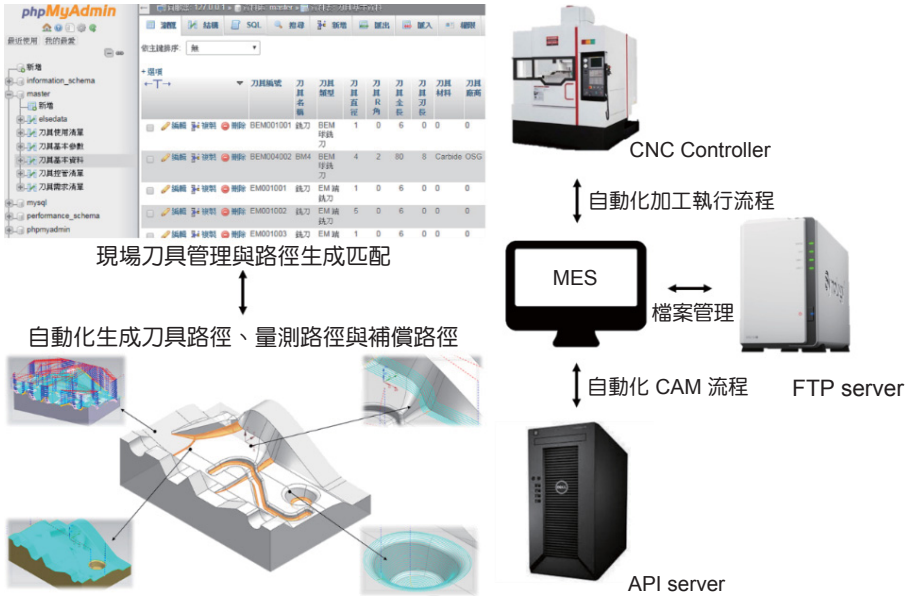


圖 4. 智動刀具路徑規劃、線上量測與誤差補償系統架構。

而後即可再次執行此誤差補償刀具路徑並進行最後的尺寸量測。

在網實系統中，一項重要的概念是操作軟體的自動化，這是和過去以硬體自動化為主的工業 3.0 最大的不同。本研究中自動化刀具路徑規劃系統運作流程如圖 5 所示，首先在零件 CAD 模型匯入 NX 軟體後，使用特徵辨識功能找出 Z 軸單位向量為負方向的平面特徵，系統會判斷其為零件的底部基準面，並將底部基準面以及與此特徵相鄰的面全部抓取，得出剩

餘的面為待加工部位，並且使用不同的顏色區分加工區域與非加工區域，其中加工區域的顏色指定為藍色。接著將這些面特徵區分為兩大類：平面與曲面，藉由向量再將所有平面細部化分為底面、壁面及斜面特徵，曲面則劃分為圓角、球面、圓錐面及造型曲面，並將細部劃分的面結果各存成不同面組。系統可自動分辨特徵是屬於開放或是封閉型態，亦針對曲面特徵區分凹型或凸型，並依此分別產生對應之刀具路徑。經過工法演算法判斷後，可以判斷適合的粗加工方式，例如型腔銑的跟隨零件方式適合開放型的零件凸島特徵。而針對曲面特徵系統將會自動計算曲率半徑，藉此尋找適合大小之刀具，同樣也會選擇適合之精加工方式，例如環繞方式加工適合凸型的圓球曲面。透過建立許多不同的演算法，系統可自動匹配現場之刀具管理資料庫，根據所辨識之特徵自動規畫適合的刀具路徑。

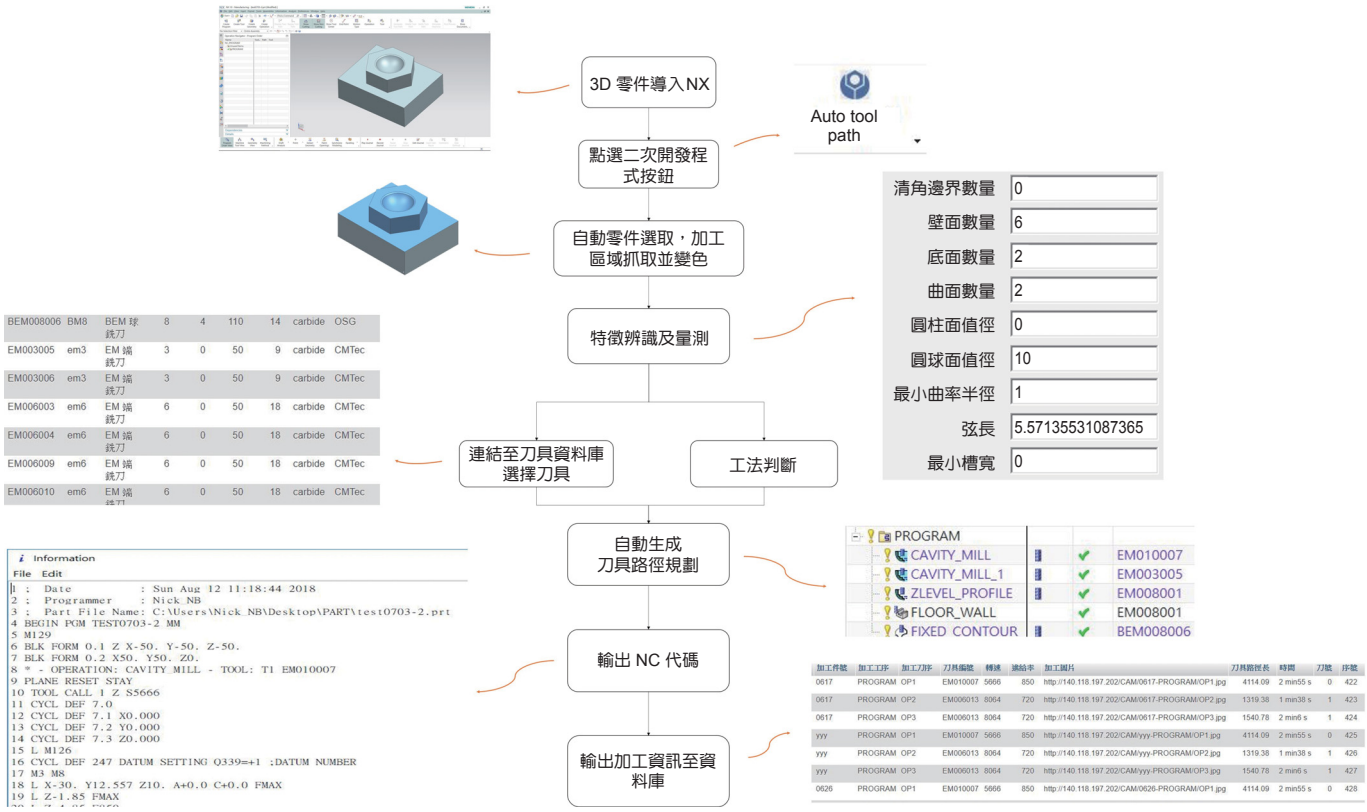


圖 5. 自動刀具路徑規劃系統流程示意圖。

利用前述之 MES 系統與自動化刀具路徑規劃系統可於 CNC 工作站配合，進行自動化線上量測與加工誤差補償之作業，整個自動化加工流程如圖 6 所示。於粗加工及中加工後，機臺將自動以接觸式探針進行曲面檢測，每次檢測點數據將自動寫入控制器內部之量測檔中，包含理想量測點與實際量測點之 X、Y、Z 座標值，以及兩點偏差值。量測結束後，SCADA 將會擷取到控制器中的特定 PLC 暫存器的值，並將此值傳給 MES 系統，以告知 MES 系統量測工作結束，可進行下一步流程。

對機械加工業來說，工業 4.0 最常見的問題是機臺連網得到機臺數據後要做什麼？本研究開發了利用線上量測數據的自動誤差補償程式，可節省每次規劃補償路徑的工時達 1 小時

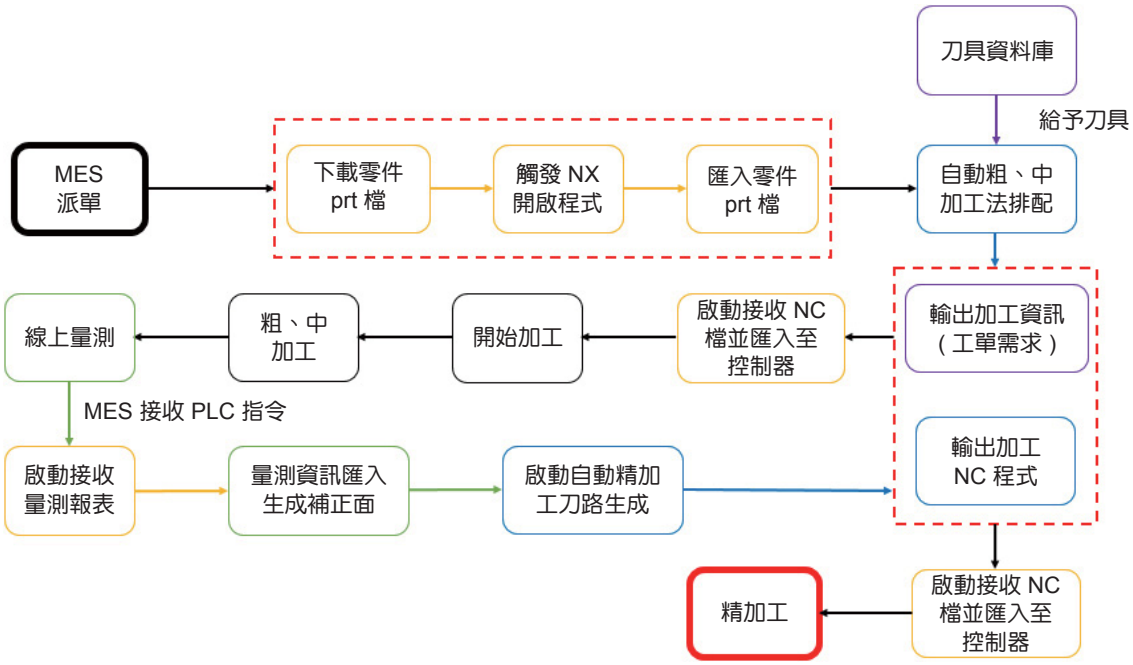


圖 6. 自動化線上量測與加工誤差補償流程。

以上並避免人為錯誤，其做法大略如下：MES 系統會通知本機端的 API server 至控制器下載量測數據檔案，並啟動本研究所開發之自動補償二次開發程式，以進行補償之精加工路徑生成。此自動補償二次開發程式是將數據點之 X、Y、Z 座標值以點的型態建立於 NX 模型上，先將數據點投影至曲面上，而後再進行鏡射補償方法以取得補償點。取得補償點之後，根據曲面方向建立擬合曲線，再以 NURBS 理論進行曲面擬合。最後自動重建曲面模型，以生成補償精加工路徑及精加工量測工法。實際驗證結果如圖 7 所示，其藍點為曲面中加工之量測偏差結果，左圖中紅點為使用傳統半徑補償之精加工量測結果，右圖中紅點為使用本研究之鏡射補償之精加工量測結果，由左右兩圖可知，標準差可改善 30% 以上。由此可知中加工後，曲面偏差值變化不均勻，除了有尺寸偏離零點之問題，亦有尺寸歪斜問題。但透過本研究之自動補償系統，可將整體尺寸偏移至零點，亦可修正尺寸歪斜問題。

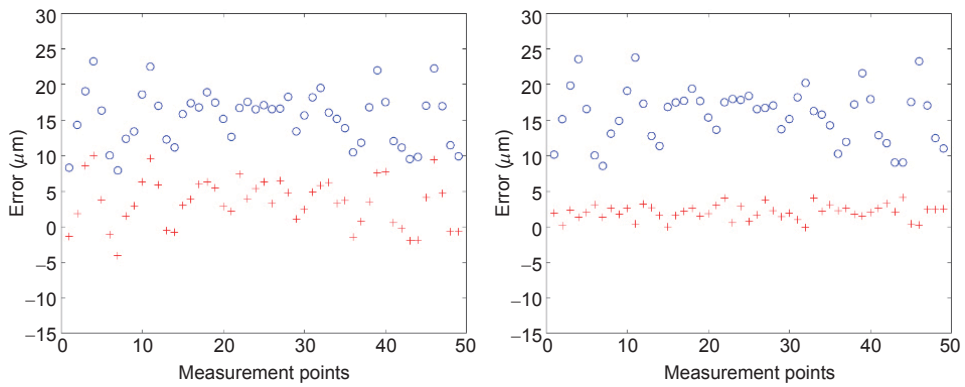


圖 7. 中加工 (藍色) 後與精加工 (紅色) 後之曲面誤差量測結果，左圖精加工為單純使用半徑補償，右圖精加工為使用本研究之自動補償方式。

六、結論

本研究架構了一個整合異質機臺之 IoT 系統，可以透過各種通訊標準或方法連接各種加工機臺，傳統無連網功能之機臺則是以感測器配合 PLC 連接，所有資訊皆會傳輸至 SCADA 伺服器，並上傳 SQL 伺服器紀錄以備後續分析。此外，為了日趨複雜且龐大的資料，亦設計兩種資料儲存形式，包含一般的 SQL 伺服器與 Mongo DB 伺服器。為了滿足龐大數據資料分析所需之運算能力，亦設計出兩種資料分析方式，分別為單台伺服器與分散式分析運算平台。透過 Hadoop 平台可將數台電腦整合應用運算提升效能，並採用分散式檔案系統儲存資料。分析運算的結果將會透過資料視覺化呈現至本研究所開發的資料分析暨資源整合平台。

運用前述所架構之 IoT 系統於臺科大機械系工廠，本研究已成功進行機臺連網，其中感測層部分包含了各種感測器，舉例來說可透過紅外線感測器及智慧電錶以接收主軸轉速以及機臺電力相關資訊。再透過接收層的 PLC 收集感測器之資訊，將初步運算之重要資訊傳至 SCADA 伺服器。最後資料可透過資料分析平台進行稼動率及用電量等分析，提供網實整合系統更為準確的判斷以提升加工效率並減少能源損耗。

本研究亦開發了一 MES 製造執行系統，可下接 SCADA 伺服器取得現場資訊，進行廠房之生產流程控制。以無人車與倉儲系統為例，工件上方會有 QR code 紀錄其生產履歷，人員掃描此 QR code 以後將工件入庫，MES 即可透過倉儲系統之 PLC 知道目前之儲物狀況。接著若 MES 系統之生產流程需前往下一站，可自動呼叫無人車至該倉儲取料，並運送至下一個工站之倉儲。此 MES 系統成功地透過 SCADA 與異質機臺溝通，除了可達到自動化生產流程控制之目的，亦可藉由現場生產資訊監控並彈性化執行生產流程，達到真正的智慧製造。

本研究亦成功以 CNC 自動路徑規劃、量測與誤差補償展示了智慧自動化之應用。整個智動化流程是以 MES 系統為中控中心，接收產品下單後即開始製造流程，MES 系統會與 API 伺服器溝通進行 CAM 軟體開啟與零件匯入。接著所開發之自動刀具路徑規劃系統即會針對此零件進行分析，經過特徵辨識後，根據現場刀具管理資料庫匹配切削刀具，並以適當的路徑參數計算粗、中與精加工。除此之外，亦將排配該加工零件之線上量測路徑，此路徑將會於加工完成後，自動以線上量測探針進行特徵的尺寸與點座標量測。量測完畢後，API 伺服器會自動下載量測檔案，並匯入誤差補償之程式。此程式將會以鏡射補償方法取得補償點，接著則是以最佳階數演算法來擬合曲線，再擬合出最適之補償曲面，最後則是以此補償曲面重新計算精加工並生成加工路徑。補償後標準差可下降達 30% 以上，驗證可透過此自動誤差補償系統修正業界無法解決之尺寸誤差問題。

本研究之研究成果充分運用了機臺連線取得的數據，進行加工誤差補償、加工條件修正等自動化，實現了具實用價值的工業 4.0 網實整合系統。

作者簡介

李維楨先生為美國加州大學柏克萊分校機械工程博士，曾於鴻海精密公司服務八年多，現為國立臺灣科技大學機械系副教授兼全校不分系主任。

Wei-chen Lee received his Ph.D. in Mechanical Engineering from University of California at Berkeley. He worked in Hon Hai Precision (Foxconn) for more than eight years. He is currently an associate professor

in Department of Mechanical Engineering and chairman of the Inter-Disciplinary Bachelor's Program at National Taiwan University of Science and Technology.

鍾俊輝先生為美國紐約州立大學石溪分校機械工程博士，現為國立成功大學機械系副教授。
Chunhui Chung received his Ph.D. in Mechanical Engineering from Stony Brook University. He is currently an associate professor in Department of Mechanical Engineering at National Cheng Kung University.

劉孟昆先生為美國德州農工大學機械工程博士，現為國立臺灣科技大學機械系助理教授。
Meng-Kun Liu received his Ph.D. in Mechanical Engineering from Texas A&M University. He is currently an assistant professor in Department of Mechanical Engineering at National Taiwan University of Science and Technology.

郭重顯先生為國立臺灣大學機械工程博士，現為國立臺灣科技大學電機系教授兼主任。
Chung-Hsien Kuo received his Ph.D. in Mechanical Engineering from National Taiwan University. He is currently a professor and chairman in Department of Electrical Engineering at National Taiwan University of Science and Technology.

項天瑞先生為美國紐約州立大學石溪分校應用數學博士，現為國立臺灣科技大學資工系副教授。
Tien-Ruey Hsiang received his Ph.D. in Applied Mathematics from Stony Brook University. He is currently an associate professor in Department of Computer Science and Information Engineering at National Taiwan University of Science and Technology.

楊朝龍先生為美國普渡大學工業工程博士，現為國立臺灣科技大學工管系副教授。
Chao-Lung Yang received his Ph.D. in Industrial Engineering from Purdue University. He is currently an associate professor in Department of Industrial Management at National Taiwan University of Science and Technology.

羅乃維先生為美國紐約州立大學石溪分校電機工程博士，現為國立臺灣科技大學資管系教授兼主任。
Nai-Wei Lo received his Ph.D. in Electrical Engineering from Stony Brook University. He is currently a professor and chairman in Department of Information Management at National Taiwan University of Science and Technology.