



智能化工具機技術

文/陳政雄

前言

根據美國工具機協會的調查顯示全球工具機年產值有將近一半是賣到汽機車零組件生產線，而3C產品生產線則是工具機產品中成長速度最快的一塊市場，這種高使用率工具機的市場約佔了60%的工具機全球總產值。我國工具機年產值以綜合加工機為最大宗年產量將近1萬5千台，年產值近300億元，但客戶仍以單機作業的機械加工廠居多，對於汽機車零組件與3C產品的金屬機殼加工生產線所需的量產型高使用率的鑽孔攻牙中心機與綜合加工機，則仍為日本與歐洲廠商天下，因為量產型高使用率工具機最重要的性能指標是高加工效能、高穩定性與高可靠度，而這正是國內工具機業者最欠缺的技術環節。

雖然近幾年來我國工具機業者在高速主軸、高速進給系統甚至車銑複合加工技術上已有些突破，但是實際加工效能還是往往不如國外大廠，經深入探討與分析原因後，國外大廠已經紛紛利用控制器與軟體技術來使機器具有智能化的學習控制(learning control)功能，因為對於固定製程的重複性加工(repetitive machining) (汽機車零件通常是數十萬件

/年，而3C金屬機殼則可超過百萬件/年)，機器可以經由初始的幾個工件的加工資訊，在CNC控制器上透過學習控制技術將加工效能逐漸提高，根據國外業者的經驗(例如FANUC公司^[1, 2])經由4到5次的工件加工學習後，加工效能可以提升200%以上。

穩定性(例如機器精度的熱穩定性)與可靠度(例如主軸軸承與刀具負載異常的線上監控)是國產工具機另一個無法和國外相比的項目。國外工具機大廠已經使用線上監控與補償技術來提升機器的可靠度與穩定性，其中又以線上熱誤差補償和切削監控的著墨最深。前者如Mikron的智能化熱控制(intelligent thermal control)、MAZAK的智能化熱遮罩(intelligent thermal shield)、Okuma的熱變形補償(thermal deformation compensation system)，…不勝枚舉；而後者如Mikron的主軸保護系統(spindle protection system)，FANUC ROBODRILL的智能化刀具管理與監控(AI tool life monitoring)等等。

國內外技術現況

智能化工具機技術目前的領導廠商

如下：三軸鑽孔攻牙加工中心機的領導廠商為日本Brother與Fanuc公司，五軸綜合加工機的領導廠商為瑞士Mikron公司，而車銑複合加工機的領導廠商為日本Mazak公司，而圖1、圖2和圖3分別為其智能化程度的整理圖。三軸工具機的智能化重點在於線上熱誤差補償與刀具監控，和以學習控制技術提升機器的加工效能。五軸綜合加工機由於加工軸數複雜且機台結構剛性變化較大，因此除了前述的溫度與刀具監控外，必須再加入旋轉軸熱變位補償 (例如圖2中的ITC-5X模組)、切削振動監控(例如圖2中的APS模組)與切削參數最佳化調整策略 (例如圖2中的OSS模組)。智能化程度最高者應該是車銑複合加工機，由於加工軸數最複雜且具有非圓對稱性的旋轉工件，因此主動式平衡技術 (例如圖3中的IBA模組)與防碰撞監控技術(例如圖4

中的ISS模組)是必要技術。

智能化工具機技術的效益

利用智能化工具機技術預期可以改善工具機的加工效能、精度穩定性與可靠度，以下是以幾個國外廠商發表的範例來說明。

加工效能提升

智能化技術可以在重複性加工製程的生產線上提升加工效能200%以上，以FANUC公司^[1, 2]公司的學習控制(learning control)技術為例，FANUC公司利用學習控制使剛性攻牙速度由2500rpm提升為5000rpm，且攻牙精度由第二級提升到第一級(參考圖4)。學習控制也可以使多軸同動加工速度提升，以圖5的多軸同動為例，未學習前的加工週期為5.5秒，但



圖1 三軸鑽孔攻牙中心機的智能化程度 (Fanuc RoboDrill)

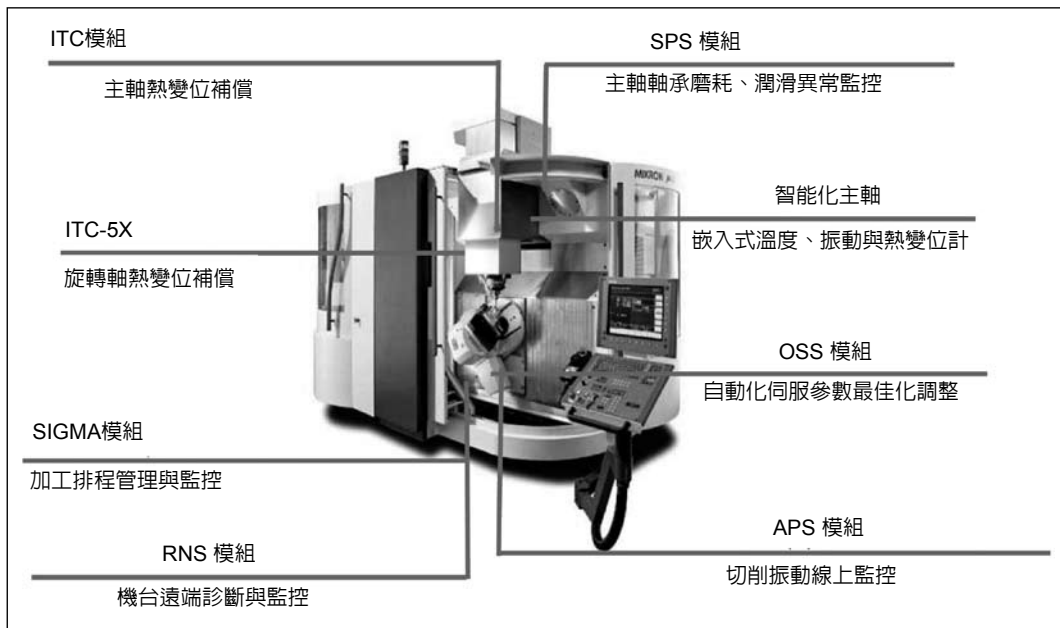


圖2 五軸CNC綜合加工機的智能程度 (Mikron)



圖3 車銑複合加工機的智能程度(Mazak)

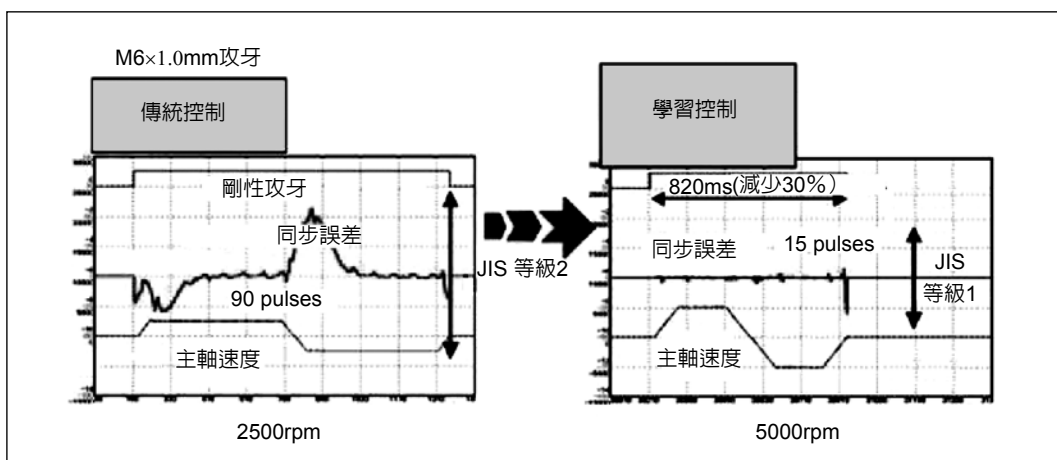


圖4 利用學習控制提升剛性攻牙的速度與精度

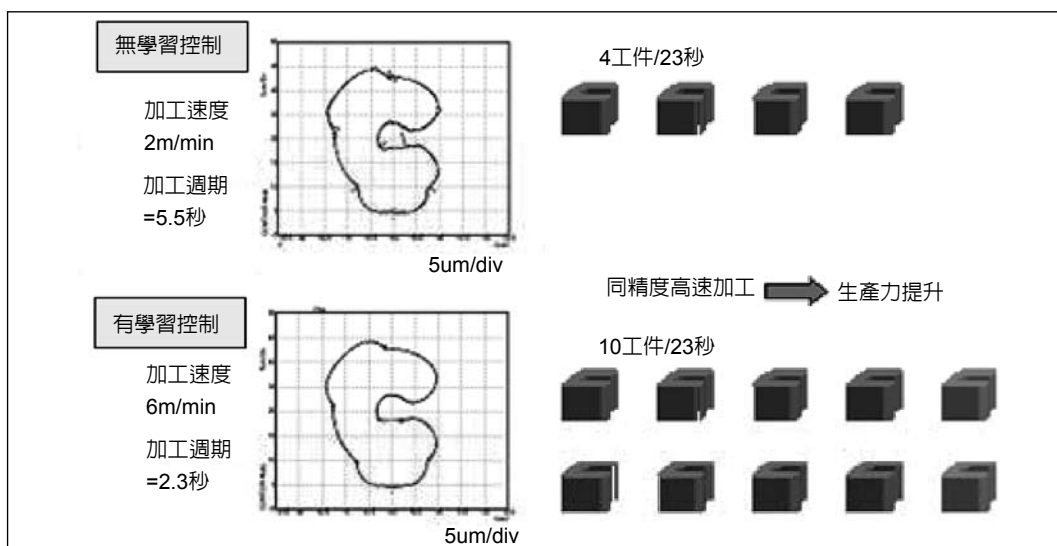


圖5 利用學習控制提升多軸同動加工速度與精度

學習控制後降為2.3秒，加工效率的提升將近220%。

另以瑞士Mikron公司的智能化加工系統(smart machining system)的操作者支援模組OSS(Operator Support System)模組為範例，OSS模組將加工目標分為速

度(time)、精度(accuracy)和表面粗糙度(surface quality)組成一個三角形目標，加工技術人員可在這個三角形內任意設定加工目標並由OSS自動調整最佳加工參數。以模具粗加工為例，最高的材料去除率(亦即最短的加工時間)是最重要加

工目標，因此設成圖6.a狀態；若是加工目標是形狀精度為第一優先則設定為圖6.b狀態，也可同時考量精度與表面粗糙度，設定為圖6.c狀態，根據Mikron公司的經驗，OSS模組可以提升機器效能數十%以上甚至到2倍。

機器精度穩定性提升

以Mikron公司的智能化主軸(嵌入式熱變位計，如圖7.a)與ITC模組為例(如圖7.b)，利用熱誤差補償技術可以大幅改善機器的熱精度，縱然機器加工條件在作動態變化，例如改變加工條件(鑽孔、銑削或換刀與更換工作台)，可以將主軸的動態熱誤差由動態熱誤差補償技術，動態熱誤差在20微米以內。而國內的法人單位所開發出來的主軸熱變位補償技術僅能補償主軸的類靜態熱誤差(quasi-static thermal growth)，尚無動態熱誤差補償技術。

機器可靠度提升

日本FANUC與Brother公司都已經開發出利用主軸馬達電流監控刀具破損與負載異常的技術，以圖8的FANUC公司的智能化刀具管理與監控(AI tool life management/AI tool monitoring)為例，可以線上監控刀具斷裂與刀具負載異常狀況。而瑞士Mikron公司則利用智能化主軸(嵌入溫度計與加速度計，如圖9所示)而開發出主軸軸承異常線上監控的SPS(Spindle Protection System)與切削振動監控的APS(Advanced Process System)模組，前者利用嵌入式溫度計可以監控主軸軸承磨耗與潤滑異常，而後者則利用嵌入式加速規可以監控切削振動，並進行切削條件最佳化調整，由於過度的切削震動會惡化主軸軸承壽命、刀具磨耗速度與工件的表面粗糙度，APS可以利用切削振動信號再兼顧加工效率與機器的可靠度。

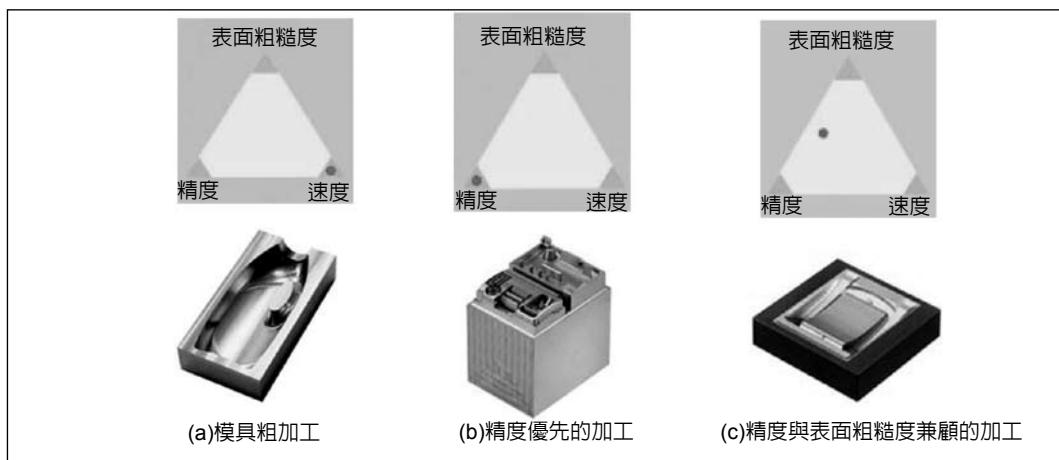


圖6 Mikron公司的OSS模組

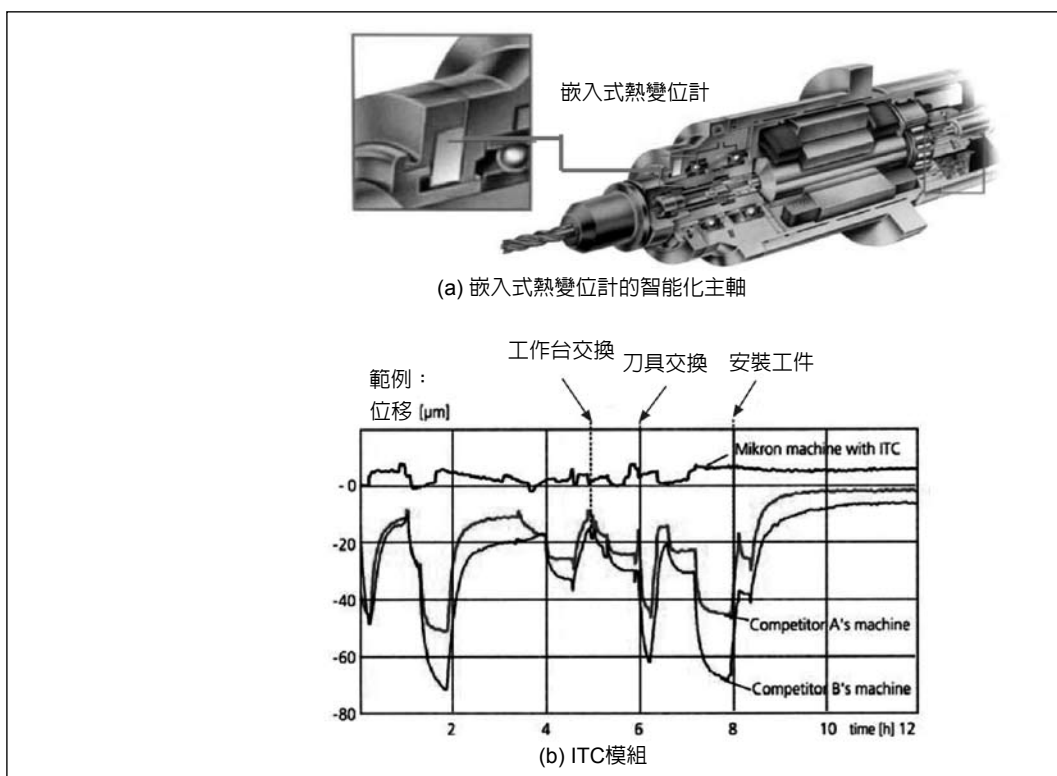


圖7 Mirkon公司的智能化主軸與ITC模組

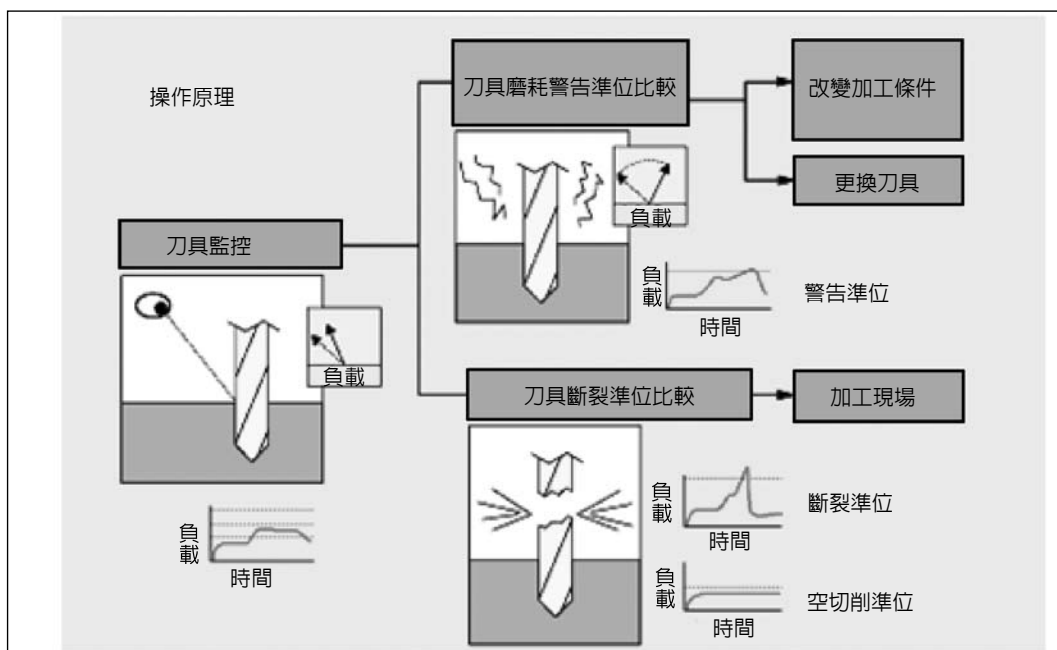


圖8 日本Fanuc公司的智能化刀具監控與管理技術

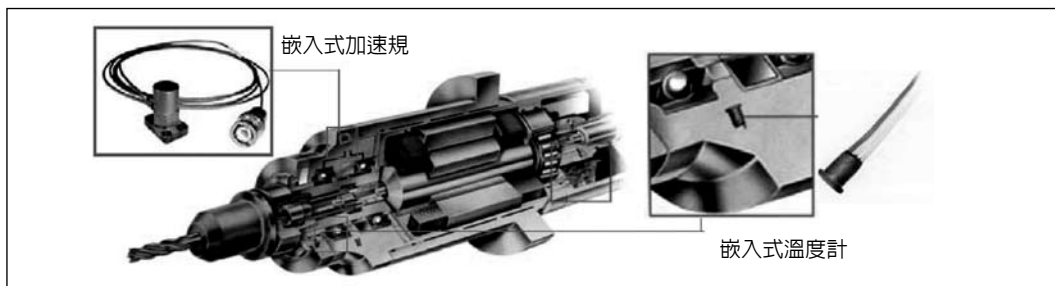


圖9 Mikron公司的智能化主軸與線上切削監控技術

結語

隨者電子、感測器、無線通訊、網路和軟體技術的快速發展，智能化工具機技術已經在業界實用化了，例如歐洲的Step-tech、Mikron、日本的Fanuc、Mazak、Makino、Mori-Seiki，美國的Drake Manufacturing等紛紛將智能化技術實現在主軸、磨床、塘孔加工機、鑽孔攻牙中心機、五軸綜合加工機、車銑複合加工機等產品上。在這些智能化的技術中，以線上熱誤差補償與線上刀具監控是所有廠商技術的共同焦點，其他次要的智能化技術項目包括學習控制、切削震動監控、切削條件最佳化、主軸軸承健康監控、主軸與工件的主動式動平衡、五軸與車銑複合加工機的防碰撞、自動化生產排程管理等。由國外的案例已經證明智能化工具機可以有效的提升工具機的加工效能、精度穩定性與可靠度，這對於汽機車零組件與3C產品的金屬機殼加工生產線所需的量產型高使用率的綜合加工機是重要的性能指標。雖然我國工具機業者目前在智能

化工具機技術仍相當陌生與薄弱，但是台灣具有雄厚的資訊與電子產業技術底子，如果能善用並結合我國資訊與電子業的實力，智能化工具機技術或許反而可以成為我國工具機業者在國際市場的競爭利器。■

參考資料

1. Fanuc公司, “Parts Learning Control to Realize High-speed and High-precision Machining,” 網址：www.fanuc.co.jp/en/product/new_product/2004/0404/partslearning.html.
2. MMS Online, “Repetitive Part Cutting: Improve Productivity by Learning Path Error,” 網址：<http://www.mmsonline.com/articles/0507ex2.html>.

作者簡介

陳政雄現任職國立中正大學機械系暨國立中正大學先進工具機技術研究中心主任

專長：

- 工具機
- 光機電整合系統