



# 工具機伺服系統自動調機技術發展

## Introduction of Auto Tuning Technology of Servo System in Machine Tool

郭晨暉 / 蓋震宇

工研院智慧機械中心 智慧製造技術組 數位製造技術部

**摘要：**工具機是機械結構、伺服系統和控制器三者的結合，通常機台在出廠前為了符合性能指標會經過調教，出廠後機械經過長時間運作，會造成性能的劣化而需要重新調教，其中伺服參數的調整，是過程最為繁複卻也影響重大，因此商用控制器的廠商多數都有開發自動調機的功能。本文介紹目前工具機控制器關於伺服參數的自動調試技術與發展方向，另外工研院智慧機械中心藉由模擬控制器的軌跡，可預測參數對運動軌跡的影響，分析參數調整是否符合需求，並發展出可根據使用者加工需求，自動調整參數的技術，期望目標是簡化並建立參數調整的標準流程。

**Abstract :** A machine tool is a combination of mechanical structure, servo systems and controllers. It is turned before delivering to the customer to make sure it meets all requirements. After a certain period of operation, the performance degrades and the machine tool requires re-tuning. During the process, parameter adjustment is the most complicated procedure and is crucial to the controller. Thus, most commercial controllers equip automatic tuning feature. This paper introduces the current development and trend of the auto tuning technology for the servo parameters of the controller. ITRI's Intelligent Machinery Technology Center has developed a technology to predict the impact of the parameters of the tool trajectory by simulating the trajectory from the controller. The parameter adjustment is analyzed to see whether it meets the requirement. The technology that automatically adjusts parameters according to the user's machining needs was developed. The goal is to simplify and establish a standard process for parameter adjustment.

**關鍵詞：**伺服系統、參數自動調整、最佳化

**Keywords :** Servo System, Parameter Auto-Tuning, Optimization

### 前言

工具機的控制系統，簡單來說，是由運動控制器、伺服系統與馬達和機械結構等部分而組成，其中，運動控制器負責將切削程式經過解譯，轉換為位置命令，經過伺服系統的驅動器控制馬達與機構動作，直到完成切削程式，最上層的運動路徑、加

減速曲線與時間由控制器規劃，其中的插值器產生位置脈波命令，送給伺服端的驅動器，轉換成扭矩命令以驅動馬達，一般伺服系統採用環狀多迴路架構，從最內圈的電流迴路到外圍的速度、位置迴路，並包含前饋補償以及陷波濾波器等附加功能，以增進穩態與暫態的控制性能。一般控制器的調整，包



含運動軌跡命令的加速度大小、加減速時間、加加速度限制，以及伺服系統的迴路增益、前饋補償與過衝補償等參數，以上眾多且複雜的調整，主要是為了對應機台操作者多樣化的加工需求(如工件精度、表面粗糙度、加工速度等設定)，機台運作同時還必須考量如機械結構剛性、共振頻率、模態振型、阻尼比與馬達特性等動態響應，以及進給系統所引起的摩擦力與背隙等非線性影響。

調機技術是一門必備且重要的專業知識，除了要對控制參數的類別、作用有深入的了解，還要同時能兼顧整機的動態性能，目前世界上的工具機和控制器大廠，皆有發展自己的自動調機技術，期望目標就是要能整合運動控制、伺服調整與加工參數等影響，並將三者最佳化，以科學化的流程建立參數調整的標準步驟，取代原本依靠人為經驗或試誤的方法作調變。而工研院智慧機械科技中心，針對調機流程中影響最大的運動控制器、伺服系統與機械結構，進行模擬與模型建立。其中運動控制模擬器可以模擬 FANUC 控制器的生成軌跡，事先預測參數調變對運動軌跡的影響，並進一步分析參數調整是否符合需求。並提出一可彈性依操作者切削設定，建構調整參數類別與特性的方法，以此方法搭配軟體的自動調整程序，可以快速將軸向動態誤差、幾何精度等目標值收斂至最佳，大幅提升機台的動態性能與工件切削品質。

## 工具機自動調機技術與發展

如何提高伺服驅動系統的動態特性，是維修及調試人員必須要做的一項重要工作。伺服系統優化的目的就是讓機電系統的匹配達到最佳化，以獲得優異的穩定性和動態性能。在數控工具機中，機電系統的不匹配通常會引起機台振動、加工零件表面過切、表面紋路不均等問題。尤其在模具加工中，對伺服驅動的優化更是要求。

因為伺服參數的調校，關係工具機整機的切削動態性能與穩定性，自動調機技術更是機器智能化

技術的重點項目之一，因此許多工具機和控制器大廠皆針對此發展特有技術，介紹如下：

### 1. Fanuc

日本 Fanuc 公司的 Servo Guide，是在 PC 上使用之伺服、主軸調整軟體，軟體介面如圖 1。功能包含迴避共振的濾波器設定、速度迴路增益設定等，同時具有參數自動調整機能，可以作到簡單的調整工作[1]。自動調整機能包含：

- 1.快速進給參數的自動調整機能：經由簡單的操作，可設定馬達扭力與最有效的快速進給參數，可縮短加工循環的時間。
- 2.為壓制圓弧切削時發生象限突起現象，具有參數自動調整機能：經由數次圓弧動作，自動計算出補償參數，可提高精度及大幅度減少調機時間。
- 3.自動調整速度環增益和濾波器的功能：支援控制器高速、高精度的功能設置，透過測量移動軸速度迴路的頻率響應，能自動確定速度環增益與諧振消除濾波器的參數，也可以微調所指定的參數值和檢查微調的效果。
- 4.可生成方圓、圓角等測試程式：在高速、高精度功能開啟下，調整參數並檢查有無過衝現象，可微調相關參數。並提供數組推薦參數，包含速度優先等級和精度優先等級，若需使用中間值參數，可以透過調整滑塊加以選擇。

利用 Servo Guide 軟體所提供的各種測量、自動調整機能、可配合機台狀況，讓其產品之性能在「短時間」內達到「最佳」之效果[2]。另外在 2016 日本 JIMTOF 展，FANUC 展出的 CNC 設定工具 (CNC startup tool)，此為一自動化之調機軟體，宣稱僅需三步驟，可幫助使用者以自動化的方式進行初步調機工作，第一步於 PC 上操作軟體並定義機台軸的數量及各軸方向；第二步連線到機台，即會自動掃頻並進行調整控制迴路各軸增益值以及濾波器的設定，主要判定調機狀態，是以循圓的表現為基準；第三步針對工件加工需求條件進行調整，主

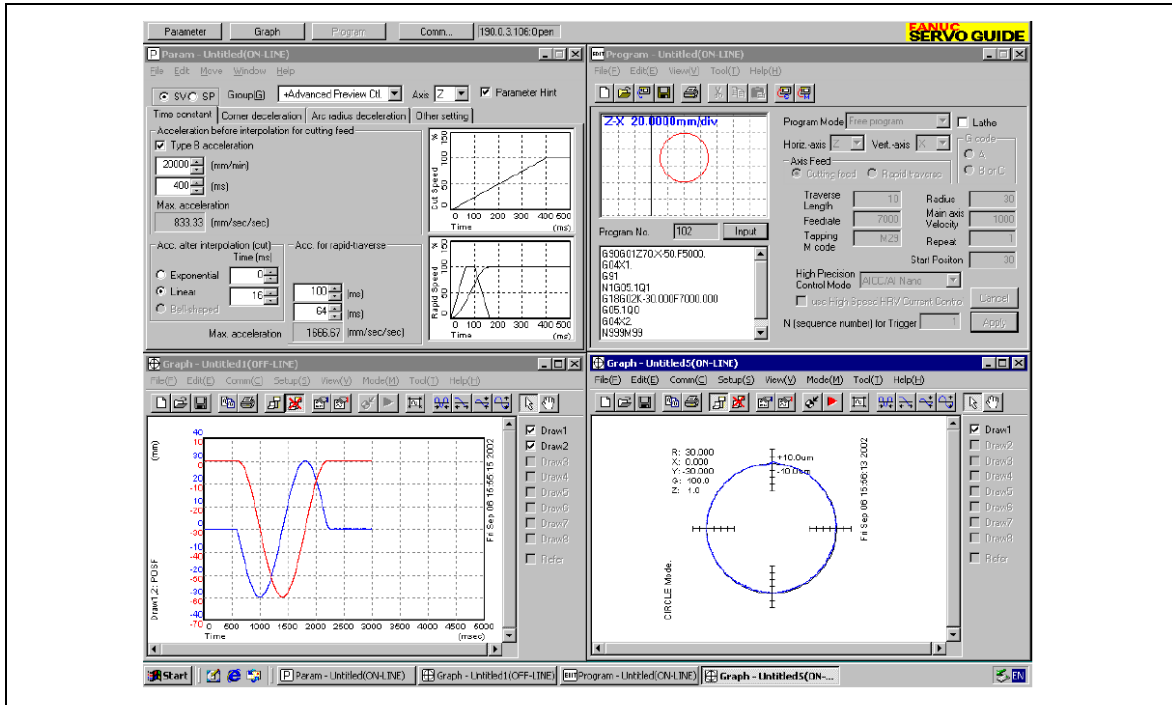


圖 1 Fanuc Servo Guide 軟體介面

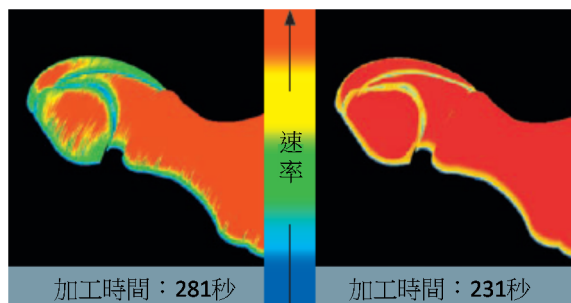
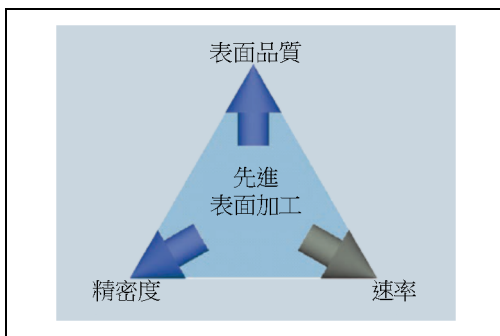


圖 2 SIEMENS 先進表面加工功能之示意

圖 3 SIEMENS 先進表面加工功能之效果

要有三種情境可供選擇：粗切(roughing)、中切(semi finish)及精修(finishing)，如此即完成初步的調整工作，此調機軟體可幫助調機者快速找出調機之起始點(minimum parameters required)，以減少試誤的等待時間。

## 2. SIEMENS

SIEMENS 的工具機控制器，內建最佳化及診斷功能，自動伺服調校(auto servo tuning)功能只要

按一下，即可讓機械軸自動最佳化。這樣可確保在機台的完整壽命期間，達到最高的加工精度。SIEMENS 的 810/840D 系統，具有自動優化功能，由驅動系統在負載狀態下自動測試和分析調節器的頻率特性，以確保調節器的比例增益和積分時間常數[3]。若自動優化結果不理想，達不到工具機最佳控制效果，在此基礎上可依需要進行手動優化。

另外，先進表面加工(advanced surface)可達到最高的機台效能，在實體機台臨界值進行銑削，提

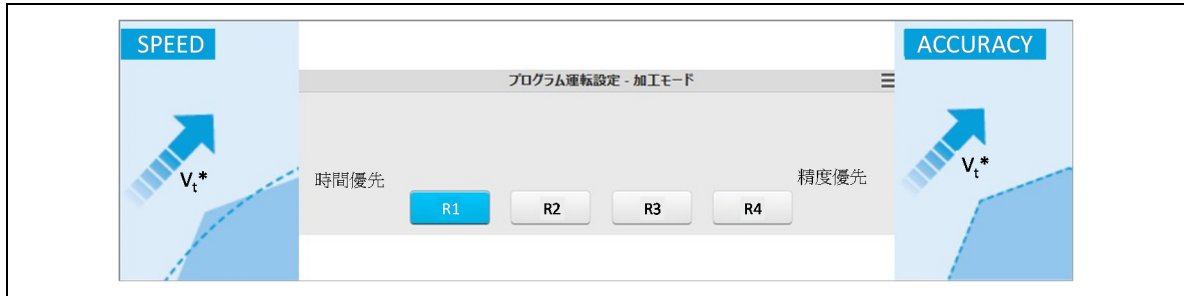


圖 4 DMG 的自動切削循環功能設定

供最高的速率和精密度，以及最佳的表面品質，其設定如圖 2 所示，實際加工效果如圖 3，可以縮短加工時間[4]。並且不僅適用於模具製造，還能實現最高等級的 5 軸加工，SIEMENS 標榜的 SINUMERIK MDynamics 技術，其高速設定及動態轉換，可提供其控制器高效能操作及程式設計，並以全方位的技术組合及測量循環，創造一組獨特的重要參數，可因應繁重且精密的切削需求。

### 3. DMG/MORI SEIKI

DMG/MORI SEIKI 的自動切削循環(application tuning cycle, ATC)功能設定，如圖 4 所示，提供加工模式與工件重量的設定，預設三種模式選項：最佳表面、最佳速度、最佳精度等最佳化的加工參數，並可於工件程式中自由的調整這些設定[5]。目前這項功能，國內也有許多廠家以客製化的畫面，提供操作者進行加工條件的選擇。這是 DMG/MORI SEIKI「技術循環」的功能之一，可以調整預視插值法的平滑度。操作人員可以簡單的根據加工表面品質，選擇時間優先模式或精度優先模式，來設定最佳切削方式[6]。獨特功能有：

1.減少加工時間：彎曲表面上的切削路徑由點和點的序列組成，並且以這樣的方式建立切削程序，以便預視切割軌跡，並且從一點到另一點移動刀具。當優先考慮時間時，加工速度優先，可以平滑地加工工件尖角；當優先考慮精度時，高精度輪廓線將以低速進行，並將重點放在指定點上。對於需要輪廓精度的加工，如側面、凹槽和模具

的切削，粗加工會以較低的精度進行高速銑削，而精加工以低速高精度進行。可以達到減少加工時間的效果。

- 2.易於單觸式的操作：操作人員可以透過在其控制器 CELOS 介面的 ATC 設置畫面上，選擇四種加工模式之一，根據工件設置最佳的切削方式。因單鍵操作，使用者可以不需要特殊的編程知識。
- 3.整合至加工程序：ATC 可嵌入至加工程序。根據待加工工件的表面品質，在加工過程中，切削模式可以從速度優先模式切換到精度優先模式。操作人員只需輸入參數即可，無需專門知識就可以設定程序。

### 4. MAZAK

MAZAK 的滑順化技術(smooth technology)，可針對加工精度與速度進行調整，稱作滑順化機台設定(smooth machining configuration)，並整合為新的機器智能化功能[7]，滑順化機台設定(smooth machining configuration)與 Fanuc 的 CNC 設定工具(CNC startup tool)有點相似，其主要操作面上有三組拖拉式捲軸，分別為切削時間(cut time)、平滑度(smooth)與精度(accuracy)，且 MAZAK 建議搭配其他的智能化功能一起使用，使用者依據對加工件之需求及加工方式，可進行此三選項之調整，此功能對於處理複雜工件外型有相當之效益，當加工件之需求達成時，可使用記憶功能儲存此加工參數條件，使加工成品的品質更趨穩定，以鋁製渦輪葉片為例，MAZAK 宣稱使用此功能可減少 10~20%的

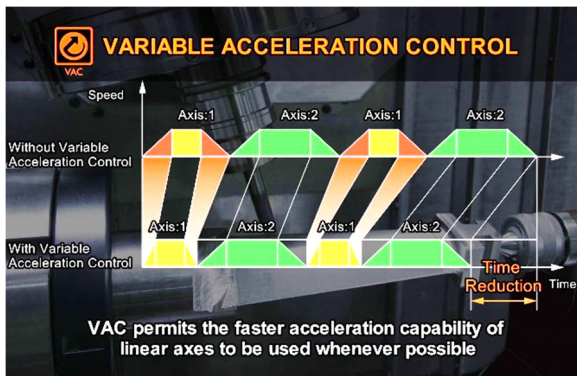


圖 5 MAZAK 控制可變加速度功能示意

加工時間，而搭配之控制可變加速度(variable acceleration control)亦為新開發之功能，此功能讓機台之加速度變為可變式的，於直線加工時使用較高之機台加速度，而在旋轉時則用較低之機台加速度，有別於以往機台僅能使用同一大小之機台加速度，此功能可縮短機台之加工時間，如圖 5 所示。

關於 MAZAK 控制器新加工功能說明如下：

- 1.控制轉角滑順度(smooth corner control)：轉角路徑滑順部份機能，可減少不必要的加減速，在於轉角處不須轉直角，因為轉直角會造成大的加減速落差，可滑順且平穩的控制轉角路徑，在轉角處以參數設定一允許之轉圓弧角的的公差量，就不會造成原本轉直角的路徑造成加減速之時間浪費，如圖 6。
- 2.控制可變加速度(variable acceleration control)：5 軸連動加工進給速度之新加工機能，以往一般直線加工軸軸向移動，其它軸會以進給最慢的軸向速度為基準來移動，現在新的 VAC(請列出中文名稱、英文全名)機能能在同一條程式當中，自動判斷 3 軸時，自動快速進給移動，5 軸時，會以最慢進給軸之速度來移動。
- 3.滑順加工設定(smooth machining configuration)：模具加工機能有 10 個等級，可依模具形狀在程式中加入 M 碼呼叫來搭配加工修改，如圖 7。

另外 MAZAK 還有一特殊之智慧型功能，為智慧化平衡分析器(intelligent balance analyzer)，可偵

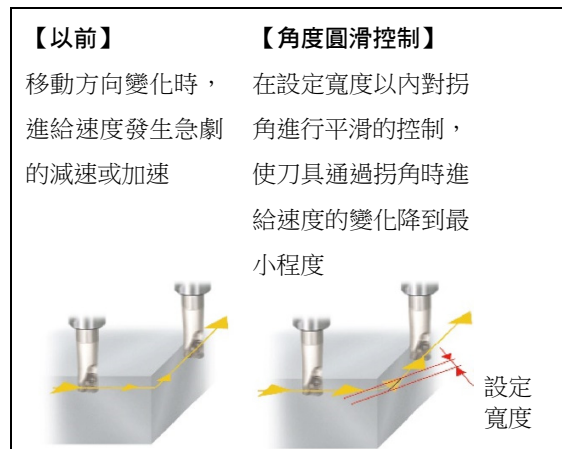


圖 6 MAZAK 控制轉角滑順度功能示意

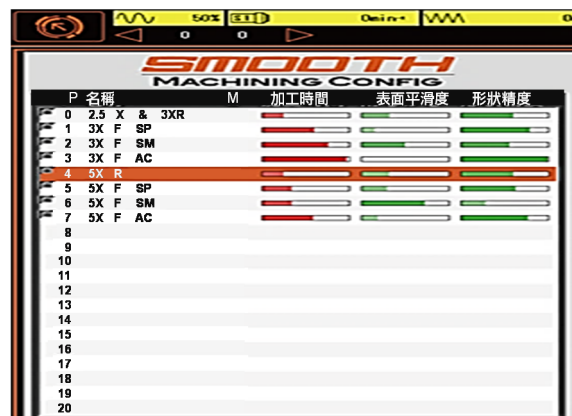


圖 7 MAZAK 加工參數精細調整功能示意

測工作台擺上工件後所造成之不平衡量，並給出建議填加之質量與位置，給使用者進行補償，降低不平衡量，提升加工品質並避免不必要的振動[8]。

## 5. OKUMA

在控制人機介面功能開發上，OKUMA 則以伺服控制優化技術(ServoNavi)為主要亮點，ServoNavi 以達成機台長期加工精度與工件表面品質為目標，依功能目標分作 ServoNavi AI，主要為自動辨識及調變機台特性為主，包含自動偵測工件重量(work weight auto setting)及自動偵測慣量(auto inertia setting)；另一項為針對延長機台使用期之 ServoNavi SF，包含自動調整反向突波(reversal spike



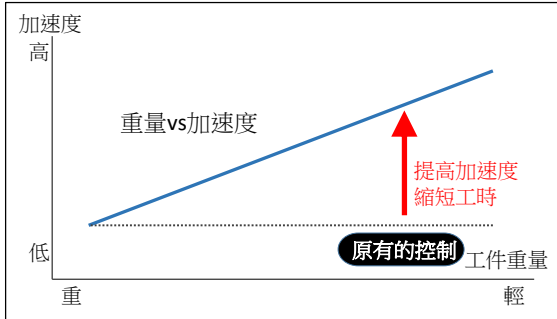


圖 8 OKUMA 自動偵測工件重量功能示意

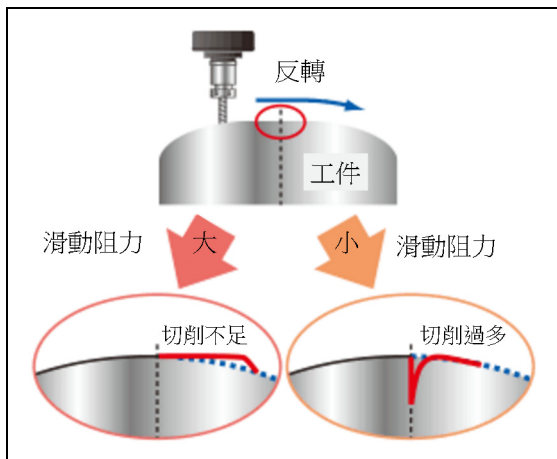


圖 9 OKUMA 自動調整反向突波功能示意

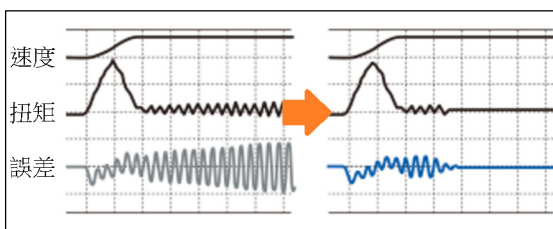


圖 10 OKUMA 自動抑制振動功能示意

auto adjustment) 及自動抑制振動 (vibration auto adjustment)[9]。

開啟自動偵測工件重量 (work weight auto setting) 功能，可依據工件、治具與工作台之重量自動進行伺服參數中機台加速度的調整，目標在不改變機台精度的狀況下，進行縮短製程循環的時間，

此功能應用於模具加工，可縮短約 12% 之時間，如圖 8 所示。開啟自動偵測慣量 (auto inertia setting) 功能，其可考慮夾治具及工件之慣量，自動進行伺服參數，包含機台速度的調整，以達更高加工精度及加工穩定性之目標。開啟自動調整反向突波 (reversal spike auto adjustment) 功能，當機台使用過一段時間後，機台會因螺桿磨耗而影響加工品質，此功能針對使用一段時間之機台進行測試，以循環為例，此功能可自動調整控制參數，補償循環尖角的誤差，進而提升加工精度與表面品質，如圖 9 所示。開啟自動抑制振動 (vibration auto adjustment) 功能，可自行抑制機台振動，延長機台與進給系統之壽命，如圖 10 所示。

## 6. Mikron

Mikron 的操作者支援系統 (operator support system, OSS)，可存取 CNC 控制器的內部參數，並允許使用簡單易懂的用戶介面設定目標值，包含速度、精度和表面品質，可提升工件生產量及精度 [10]。可設定優先權，使用者可自行依操作需求，透過 OSS 介面定義機台設定，可以選擇 12 或更多組參數，如圖 11 和圖 12 所示。時間優先的設定，只有在粗加工時才有效，如果操作員選擇時間作為最高優先，則 OSS 會擴展公差帶。除此之外，控制系統將自動調整速度曲線，以適應於待處理的幾何形狀。表面品質優先的設定，為了盡可能保持工件表面品質，原始的 NC 程式將被修改，公差帶被擴大，並且程式會被平滑化。精度優先的設定，如果工件要求極高的精度，所選公差帶將更窄，以達到要求的精度。控制系統會被重新設定，以保證最佳且可能的幾何精度。另外，用戶自行定義的設定，可保存額外的設定值，以便隨時再次呼叫使用。在表面品質、精度和時間的兩個極端之間，可以自行選擇幾個位置作設定 [11]。原廠強調以下優點：

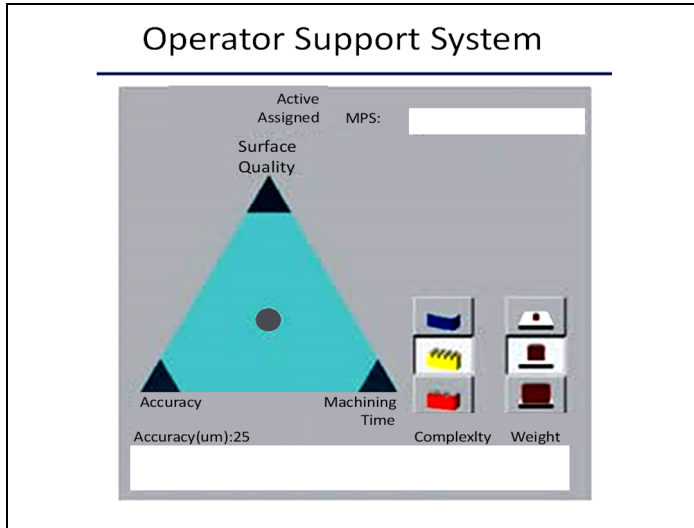


圖 11 Mikron 操作者支援系統(OSS)之不同的優先設定示意

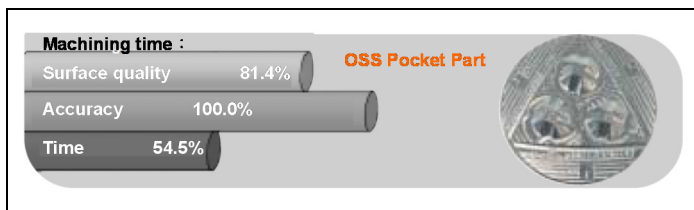


圖 12 Mikron 操作者支援系統(OSS)之工件切削設定

1. 智能系統可根據工件要求，精確設定機器的動態特性
2. 可縮短加工時間
3. 更好的加工表面品質
4. 直覺式的設定複雜的功能
5. 可降低設定工件時的複雜性

## 工研院機電整合伺服優化技術

工研院的智慧機械科技中心，針對調機流程中影響最大的運動控制器與伺服系統，進行模擬與模型建立。其中運動控制模擬器可以模擬 FANUC 控制器的生成軌跡，預測參數調整對運動軌跡的影響，如圖 13 所示，分別模擬控制器的補間前與補間後加減速功能開啟的效果，以及運行直線往復、直線轉直角與直線轉圓弧等不同測試路徑的位置、速度和加速度命令，將此模擬結果與真實控制器記錄的軌跡作比較，準確率高達 95% 以上。伺服系統的建模包含位置、速度、電流控制等迴路，藉由模擬器生成的軌跡，可以比較不同馬達與伺服參數對於伺服系統的影響。同時為獲得精確的系統模型，還必須建立一套系統鑑別的流程，所以本中心另外也發展了工具機動態分析模擬基礎技術，可模擬機械結構的動態特形，建立工具機動態模型，此模型可匯入運動控制模擬器的運動軌跡，模擬加減速對機械結構所產生的響應，也可以模擬伺服控制系統，對傳動機構引起的摩擦與背隙的補償效果作深入探討，或者對結構振動抑制的成效[12, 13]。

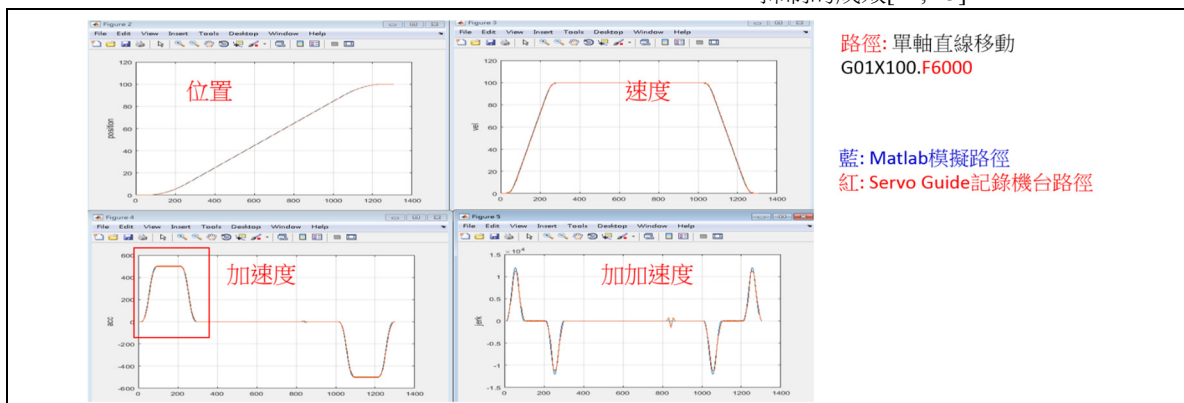


圖 13 FANUC 控制器軌跡模擬器

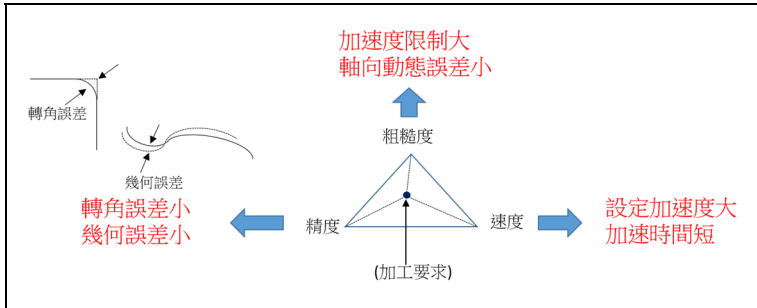


圖 14 伺服參數自動調整之設定



圖 15 機電整合伺服優化技術

另外，此技術還規畫了控制器加速度參數自動調整與優化流程，一般而言加工要求有三種類型：

- 1.表面粗糙度：即工件表面亮度，表面粗糙度越好，軸向加速度限制要越大，即加工中盡量少減速，對應的是軸向動態誤差要小。
- 2.精度：即路徑誤差，主要是加工的轉角誤差與曲線的幾何誤差。
- 3.速度：即加工循環時間的長短，加速度越大、加減速時間短，則加工時間越短。

因為這三種要求幾乎互相抵觸，所以只能夠依照不同的加工需求尋找平衡點，綜合上述的各種加工要求，可轉換成對應的參數性能指標，即軸向動態位置誤差、轉角誤差與幾何誤差，然後根據參數性能指標，決定控制器在不同切削路徑下的不同加速度參數。如圖 14 所示的伺服參數自動調整設定，可依加工需求找出最終符合誤差設定的參數，儲存

到控制器內，再經過切削程式的實際驗證，預期將可以大幅提升機台的加工性能與表現[14]。

控制器的參數可以輕易調整，而且可以直接展現在機台的性能表現上。但前提是，調整者需要相當熟悉控制器功能，並且了解機台性能，同時由必須對機台設計與加工製程有一定的專業知識。因此除了具備機械背景，還需要電控專長，在業界要培養這樣的人才實為不易。因此本技術以深耕工具機基礎技術為出發點，發展可以根據機台特性與加工需求，自動調整控制器參數的自動調機技術，其流程如圖 15 所示，同時提供調整人員方便與快速的輔助工具，除了增進調整的精準度與提升機台的性能，更可作為教育訓練、人才培育的基礎工具[15, 16]。

## 結論

工具機的伺服調整技術，位居整個工具機產業供應鏈的下游，並且直接與客戶使用需求相關，每部機台不論在出廠前或已到客戶端上線使用，都會需要經過調試的階段。機台自動調整技術是機台性能是否完全展現的關鍵，不同的調教下，會產生不同的性能差異，也因此機台調整不僅可提升機台出廠的附加價值，更可以延伸後續的客製化服務，滿足客戶需求同時提升服務品質。目前國外大廠的自動調機技術，雖然起步較早，且有專利布局，但其方法較為簡易，且在設定上的彈性較少；而國內的機台調整機制，較為目標導向，機台調整多憑調整者感覺，在試加工後觀察工件表面，依個人經驗判斷是否符合客戶需求，較無標準流程或驗證機制，因此調機技術難以擴散傳承，期望未來工研院發展





的工具機電整合同步優化技術，除了自動調機外，更可以此作為訓練專業人員的流程[17, 18]。

## 誌謝

感謝工業技術研究院智慧機械科技中心的支持，使本計畫得以順利進行，特此致上感謝之意。

## 參考文獻

- [1] Fanuc AC Servo Motor Parameter Manual, 9th ed., Fanuc Co., Oshino-mura, Yamanashi Prefecture, JP, 2015.
- [2] Fanuc Servo Guide Operator's Manual, Fanuc Co., Oshino-mura, Yamanashi Prefecture, JP, 2017
- [3] Siemens Sinumerik 840D SL Introduction, Siemens Ltd. Taiwan, TW, 2016.
- [4] Siemens Sinumerik Operate V4.5: Servo Optimization Manual, Siemens Ltd. Taiwan, TW, 2016.
- [5] DMG MORI, "ATC(Application Turning Cycle)," <https://www.dmgmori.co.jp/en/products/machine/id=2692>
- [6] DMG MORI Technology Cycles Introduction, DMG MORI CO., LTD., Nagoya, JP, 2016.
- [7] INTEGREX IV Series Introduction, Yamazaki MAZAK Corp., Takeda, JP, 2015.
- [8] MAZAK, "Smooth Technology," <https://www.mazak.com.tw/>
- [9] OKUMA, "Servo-Navi : Optimized servo control," <http://www.okumathai.com/english/onlyone/servo-navi/>
- [10]+GF+,"Smart Machine : OSS technology," [http://www.gfms.com/country\\_US/en/Products/Milling/smart-machine/oss.html](http://www.gfms.com/country_US/en/Products/Milling/smart-machine/oss.html)
- [11] Operator Support System Introduction, Mikron Agie Charmilles AG, Ipsachstrasse 16CH-2560 Nidau, 2015.
- [12] 蔡孟勳, "何謂智慧機械(工具機篇)", 機械資訊月刊, 710期, 第4-7頁, 2016年4月
- [13] 羅佐良、林錦德、梁碩芃, "何謂智慧機械(工具機篇)", 機械資訊月刊, 710期, 第8-14頁, 2016年4月。
- [14] 陳政雄, "智能化工具機技術", 機械月刊, 第34卷, 第3期, 第66-72頁, 2008年5月。
- [15] D. M. Auslander, A. C. Huang, and M. Lemkin, "A design and implementation methodology for real time control of mechanical systems," *Mechatronics*, vol. 5, no.7, pp. 811-832, 1995.
- [16] E. Kaan, and Y. Altintas, "High speed CNC system design. Part I: jerk limited trajectory generation and quintic spline interpolation," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 41, iss. 9, pp. 1323-1345, 2001.
- [17] E. Kaan, and Y. Altintas, "High speed CNC system design. Part II: modeling and identification of feed drives," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 41, iss. 10, pp. 1487-1509, 2001.
- [18] S. H. Suh, S. K. Kang, D. H. Chung, I. Stroud, *Theory and Design of CNC Systems*, Springer Science & Business Media, 2008.

