

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

考慮主軸結構動態之切削進給整合研究

Study on Integrated cutting and Feeding Process with consideration of Spindle Dynamics

計畫類別：個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：90-2212-E-009-060-

執行期間：90年8月1日至91年7月31日

計畫主持人：秦繼華

本成果報告包括以下應繳交之附件：

赴國外出差或研習心得報告一份

赴大陸地區出差或研習心得報告一份

出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份

國際合作研究計畫國外研究報告書一份

執行單位：國立交通大學機械工程學系

中 華 民 國 91 年 10 月 30 日

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

考慮主軸結構動態之切削進給整合研究

Study on Integrated cutting and Feeding Process with consideration of Spindle Dynamics

計畫編號：90-2212-E-009-060-

執行期限：90年8月1日至91年7月31日

主持人：秦繼華 教授 國立交通大學機械工程學系

一、中文摘要

銑削加工精度，不論是表面精度或輪廓精度，都是切削、進給及工具機結構總合作用的結果。表面精度已有許多學者由切削動態過程中進行控制，但在輪廓精度方面單由切削動態控制或由軌跡控制都不足，需結合兩者一並研究。因此在研究中運用敲擊法及系統辨識法，分別求得工具機主軸參數及 x-y 平台的轉移函數，並以切削實驗驗證平台轉移函數的準確性，並發展軌跡控制法與切削動態系統的結合，以模擬預測真實切削輪廓時，工件的輪廓精度、誤差值及切削力。並比較不同軌跡控制法及最佳切削參數的選擇。

關鍵詞：切削力、切削動態、軌跡誤差、交叉耦合裕補償法、系統辨識

Abstract

CNC machining has been studied in a split way in the past: either from cutting or from feeding. But machining quality is the outcome of both. This study investigated the contour errors on the basis of complete CNC machine system. A system model was built to cover all function groups including: trajectory planning, trajectory tracking, cutting process, and machine structure. The analysis revealed shortcomings of traditional way of studies. The dependence of contour errors on trajectory curvature, feedrate, cutting depth and different tracking controls were investigated. A new vision on the CNC machining on a complete basis was built.

Keywords：Cutting Force、Cutting

Dynamics、Contour error、Cross-Couple Precompensation Method (CCPM)、System Identification

二、緣由與目的

銑削加工是精密製造系統中不可缺少的一部份，怎樣使加工品質達到精度一直是學術界及工業界重要的課題。銑削過程中刀具切削工件產生的切削力是主要重要因素之一，因此 Martelloti[1]及 Tlustý[2]對切削提出基本分析及建立銑刀切削力模型，之後許多學者依不同的刀具形狀、幾何角度及工件材料等發展端銑刀[3-4]、面銑刀[5-6]、球刀[7]等不同刀具的切削力模型以預測切削力，並由切削力的大小決定切削條件的最佳參數。

Sutherland et.[8]、Altintas et.[9-10]及 Ismail et.[11]運用切削力模型結合工具機主軸及工件發展切削動態系統，以預測加工工件表面的粗糙度及表面精度。但在銑削加工過程中，工件的表面精度固然重要，但工件的輪廓精度亦不可忽略。而在輪廓加工方面單由切削動態系統考量是不足的，需結合軌跡進給控制才能使工件輪廓切削達到精度值。

在進給控制方面的研究主要著重於循軌演算結構的發展與改良。自 Sarachik 與 Ragazzini[12]提出交叉耦合系統後，交叉耦合結構歷經不斷改良、演化，此種方法已成為運動控制中廣為使用的一種方法。其中 Koren[13-14]提出一種對稱的交叉耦合系統，證實在雙軸控制系統上使用交叉耦合結構可以改善輪廓誤差。Kulkarni 與

Srinivasan[15]針對多軸進給伺服機制提出交叉耦合補償器，由實驗證實可以藉此改善輪廓誤差。由Chin與Lin[16]提出的交叉耦合預補償法於高速進給的工作環境下具有優異的表現，特別適用於現今高速加工的需求。

近幾年來銑削工具機一直朝高速切削發展，高速切削不只提高主軸轉速外亦需提高進給系統。在高速切削過程中，切削動態、軌跡控制與輪廓誤差是目前研究的方向之一，因此Kaan et.[17] and Xuesong et.[18]提出高速進給切削過程使用預補償摩擦力減少工件輪廓誤差，但他們卻忽略切削過程中切削力對切削動態系統的影響而將切削力視為干擾值。因此本研究將探討切削工件輪廓過程中，運用軌跡控制法時，切削動態對工件輪廓精度的影響性及預測真實切削輪廓時，工件的輪廓精度及誤差值。

三、研究方法

本計劃主要以圖1為主要架構，探討軌跡控制和切削動態的結合，以符合真實切削軌跡加工過程。在研究中軌跡控制方法以交叉耦合預補償系統為架構(CCPM)，切削動態系統包含切削力模型及工具機結構模型。

(1) 切削力模型推導

切削力模型[2]的推導主要是將刀具切削工件時的軸向切深L分成n段，即(n+1)個切削元素，而每個切削元素高度為dz，如圖2。每個切削元素視為一個獨立的切削過程，將刀具上所有切削元素上產生的切削力向量相加總和，即為該刀具的切削力。

圖3為刀刃切削示意圖，切削產生的切削力可分成切線分量 dF_t 與徑向分量 dF_r ，則切削力的切線分量與徑向分量可寫成：

$$dF_{tj}(t) = K_t \cdot dz \cdot h_{ij}(t)$$

$$dF_{rj}(t) = K_r \cdot dF_{tj}(t)$$

$$K_t = K_T h_a^{-p}$$

$$K_r = K_R h_a^{-q}$$

$$h_a = \frac{c}{2\pi}$$

其中i為切齒的編號，j為切削元素的編號，

如圖2所示。而 K_T 、 K_R 、 p 、 q 與工件材料有關，必須經由切削實驗獲得[3]。 $h_{ij}(t)$ 為未切除切屑厚度(uncut chip thickness)與每齒進給量c以及當時該切刃元素與動座標y軸夾角有關，可表示成如下：

$$h_{ij}(t) = c \cdot \sin \phi_{ij}(t)$$

$$\phi_{ij}(t) = \theta(t) + i \cdot \phi_p - (j-1) \cdot d\theta$$

$$\theta(t) = \omega \cdot t$$

ϕ_p 為刀具節角(pitch angle)，即圓週角除

以刀具齒數， $\phi_p = \frac{2\pi}{m}$ ，m為切齒數， ω 為主軸轉數。 $d\theta$ 為切刃投影在圓周上的角度如圖2所示：

$$s = r \cdot d\theta \Rightarrow d\theta = \frac{\tan \beta}{r} \cdot dz$$

β 為刀具螺旋角，r為刀具半徑，s為相應弧長。

將切刃元素產生的切線及徑向切削力轉換成動座標x-y系統，則可表示成：

$$\begin{bmatrix} dF_{xij}(t) \\ dF_{yij}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi_{ij}(t) & \sin \phi_{ij}(t) \\ -\sin \phi_{ij}(t) & \cos \phi_{ij}(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dF_{tj}(t) \\ dF_{rj}(t) \end{bmatrix}$$

將所有切刃元素的切削力向量總和，可表示成下列：

$$F_x(t) = \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=1}^{n+1} dF_{xij}(t), \quad F_y(t) = \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=1}^{n+1} dF_{yij}(t)$$

由上式可計算刀具切削工件時的切削力。

(2) 工具機結構

一個完整的切削動態系統模型，包含切削力與工具機結構轉移函數；而工具機的結構主要分成刀具主軸轉動系統圖3及平台進給系統圖4兩部份，因此在論文中將分別探討切削力對兩者之間的影响。而一般工具機為一個多自由度且非線性結構系統，要建造結構模型相當困難，因此在(19)研究中將簡化工具機刀具主軸及平台系統在(20)和Y方向為二階線性系統。而刀具動態系統可表示成下列二階線性微分方程式：

$$\begin{cases} M_{ix} \ddot{X}_t(t) + C_{ix} \dot{X}_t(t) + K_{ix} X_t(t) = F_x(t) \\ M_{iy} \ddot{Y}_t(t) + C_{iy} \dot{Y}_t(t) + K_{iy} Y_t(t) = F_y(t) \end{cases} \quad (22)$$

則平台結構系統可表示成下列二階線性微分

方程式：

$$\begin{cases} M_{wx} \ddot{X}_w(t) + C_{wx} \dot{X}_w(t) + K_{wx} X_w(t) = F_x(t) \\ M_{wy} \ddot{Y}_w(t) + C_{wy} \dot{Y}_w(t) + K_{wy} Y_w(t) = F_y(t) \end{cases}$$

其中 M_i 為刀具質量， C_i 為刀具阻尼， K_i 為刀具剛性， X_i 為刀具在 X 方向的位移向量， Y_i 為刀具在 Y 方向的位移向量， $F(t)$ 為切削力向量，而系統參數值 C_i 和 K_i 將由實驗獲得。 M_w 為平台質量， C_w 為平台阻尼， K_w 為平台剛性，而平台二階線性方程式將由系統辨識求得。

四、結果與討論

實驗中以泰納 DM2800 工具機切削 Al6061 的工件，切削刀具為直徑 10mm 的四刃高速剛。刀具切削工件時產生的切削力由 260A 力量規量測，並運用 HP3560A 動態頻譜分析儀紀錄切削力，將量測的切削力與第二章切削力模型模擬的切削力比較，則可驗證切削力模型的準確性。而切削力造成工具機床台偏移植，則由光學尺得知並運用 ENC9266 紀錄。

實驗中將以主軸轉數 1200rpm、進給率 600mm/min 軸向切深 1mm 及徑向切寬 5mm 的切削條件。圖 5 為沿 X 軸方向的切削時，分別量測 X 軸和 Y 軸方向的切削力，圖中虛線 (blue) 為量測真實切削力，實線 (red) 為切削力模型所模擬的切削力，由圖中可看出模擬切削力非常接近真實切削力，因此可運用切削力模型計算不同切削條件下，切削力的預測。

工具機刀具動態系統參數及床台的轉移函數是將加速規黏貼於主軸箱並用榔頭敲擊刀具，而榔頭產生的敲擊力及加速規產生的振動值由頻譜分析儀擷取，並運用 FFT 計算刀具動態頻率響應如圖 6。在圖 6 中可看出 X 軸方向在 880Hz 時，頻率響應的實數部份為零且虛數最大值所以為共振頻率值，Y 軸方向共振頻率在 965Hz。運用 the quadrature method 計算刀具動態系統參數值。工具機平台轉移函數實驗，利用榔頭產生的敲擊力使

床台產生位移，而位移值由光學尺讀出並由 ENC9266 紀錄。為驗證辨識後的轉移函數與真實系統符合，因此將量測到的敲擊力輸入到辨識後的轉移函數與實際量測位移植比較如圖 8，由圖中可得知 X 及 Y 辨識後的位移植與真實符合。

本計劃將實驗法驗證的切削力模型及求得刀具動態系統參數和工具機床台轉移函數後，結合馬達參數 $\tau_x = 0.04$ 、 $\tau_y = 0.045$ 、 $Kc \cdot Kx = 10.3$ 和 $Kc \cdot Ky = 10$ ，代入切削動態預補償系統架構圖 1，進行模擬刀具以不同切削條件，切削圓弧曲線時，切削力所產生的切削動態對路徑軌跡追蹤的影響進行切削輪廓誤差的預測，並比較不同控制方法的優異性及不同曲率的比較。在模擬系統架構中的增益值將運用 Chin [16] 的方法，求得最佳的參數。

在輪廓誤差控制中 Dr. Koren[14] 以可變增益機交叉耦合控制器來改善輪廓精度，但卻忽略真實切削輪廓過程時切削動態對系統的影響性。因此圖 9 以切削條件 (進給速度 200mm/sec、切削深度 2mm、切削寬度 5mm、主軸轉速 4800rpm) 切削曲率半徑 10mm 的圓，比較三種不同軌跡控制方法，在針對單純循軌控制和考慮軌跡控制與切削動態系統兩者作比較。圖 9a 為比較一般工具機未考慮軌跡控制 (US) 時，純循軌 (實線) 與真實加工 (虛線) 所產生的輪廓誤差值。由於軌跡曲率關係，使得控制命令速度在 45 度及 225 度時最大值，因此最大輪廓誤差值座落於此二點。而真實加工過程中，刀具切削工件時所產生的切削力與摩擦力，會使平台進給產生過阻尼現象，使得這兩點的輪廓誤差增大。而圖 9b 為比較 Dr. Koren 交叉耦合控制方法 (CCS) 與結合切削動態系統 (CCS + Cutting dynamics) 的比較，實線為純交叉耦合的輪廓誤差值明顯改善 US 系統的輪廓誤差，但運用 CCS 於切削輪廓時，其切削力會使輪廓誤差增大但最大輪廓誤差值亦在 45 度及 225 度。圖 9c 為比較 Chin[16]CCPM (實線) 和 CCPM 結合切削動態 (虛線) 的輪廓誤差。在圖中 CCPM 雖有效降低輪廓誤差值但亦不可忽略真實加工輪廓過程中切削動態

系統對輪廓誤差的影響性。

五、參考文獻

- [1] M. E. Martelloti, An analysis of the milling process, Transactions ASME, 1941, 63, 677.
- [2] J. Tlustý, Dynamics of Cutting Forces in End Milling, Annals of the CIRP, Vol. 24, 1975.
- [3] Y. S. Tarn, C. I. Cheng and J. Y. Kao, Modeling of three-dimensional numerically controlled end milling operations, Int. J. Mach. Tools manufact. Vol. 35, No. 7, pp.939-950, 1995.
- [4] L. Zheng, Y. S. Chiou and S. Y. Liang, Three dimensional cutting force analysis in end milling, Int. J. Mech. Sci. Vol. 38, No. 3, pp.259-269, 1996.
- [5] H. S. Kim and K. F. Ehmann, A cutting force model for face milling operations, Int. J. Mach. Tools manufact. Vol. 33, No. 5, pp.651-673, 1993.
- [6] P. J. Cheng, J. T. Tsay and S. C. Lin, A study on instantaneous cutting force coefficients in face milling, Int. J. Mach. Tools manufact. Vol. 37, No. 10, pp.1393-1408, 1997.
- [7] G. Yucesan and Y. Altintas, Prediction of ball end milling force, Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry Vol. 118, February 1996, pp.95-103.
- [8] J. W. Sutherland and R. E. DeVor, An improved method for cutting force and surface error prediction in flexible end milingsystem, Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry Vol. 108, November 1986, pp.269-279.
- [9] D. Montgomery and Y. Altintas, Mechanism of cutting force and surface generation in dynamic milling, Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry Vol. 113, May 1991, pp.160-168.
- [10] E. Budak and Y. Altintas, Peripheral milling conditions for improved dimensional accuracy, Int. J. Mach. Tools manufact. Vol. 34, No. 7, pp.907-918, 1994.
- [11] F. Ismail, M. A. Elbestawi, R. Du and K. Urbasik, Generation of milled surfaces including tool dynamics and wear, Transactions of the ASME, Journal of Engineering for Industry Vol. 115, August 1993, pp.245-252.
- [12] P. Sarachik and J. R. Ragazzini, A two dimensional feedback control system, Transactions of the AIEE 76, 55-61, 1957.
- [13] Y. Koren, Cross-coupled biaxial computer control for manufacturing, Transactions of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control 112, 225-232, 1980.
- [14] Y. Koren, Variable-gain cross-coupling controller for contouring, Annals of the CIRP, Vol. 40 /1/1991, pp371-374.
- [15] P. K. Kulkarni and K. Srinivasan, Cross-coupled control of biaxial feed drive servomechanisms, ASME Transactions, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control 112, 265-272, 1980.
- [16] Chin and Lin, Cross-coupled precompensation method for the contouring accuracy of computer numerically controlled machine tools, Int. J. Mach. Tools manufact. Vol. 37, No. 7, pp.947-967, 1997.
- [17] K. Erkorkmaz and Y. Altintas, High speed CNC system design. Part III: high speed tracking and contouring control of feed drives, International Journal of Machine Tools Manufacture 41 (2001) 1637-1658.
- [18] X. Mei, M. Tsutsumi, T. Yamazaki and N. Sun, Study of the friction error for a high-speed high precision table, International Journal of Machine Tools Manufacture 41 (2001) 1405-1415.

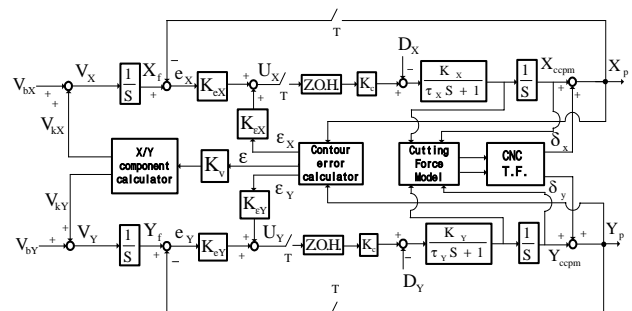


圖 1 切削動態預補償系統架構圖

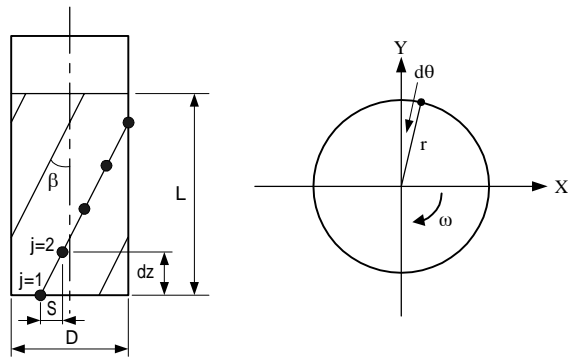


圖 2、刀刀幾何關係圖

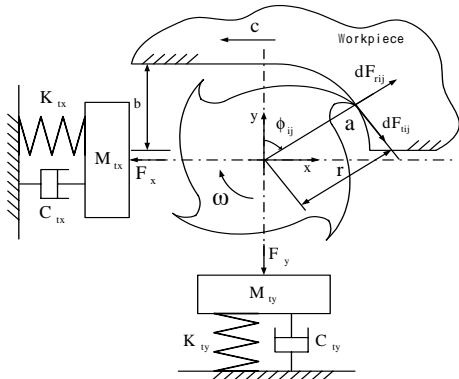


圖 3、刀刀切削示意圖

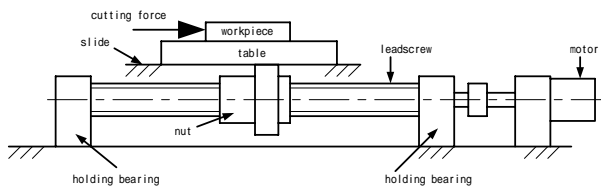


圖 4、工具機進給系統

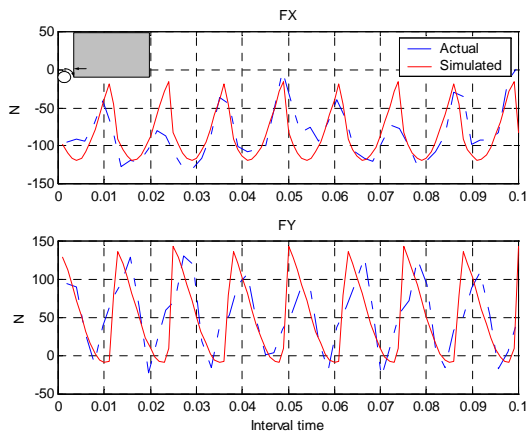


圖 5、比較真實切削力與模擬切削力

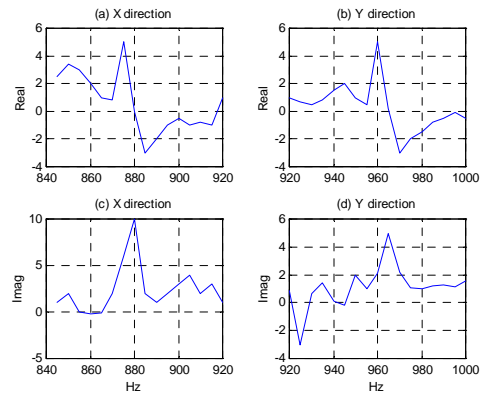


圖 6、刀具 X、Y 方向的頻率響應圖

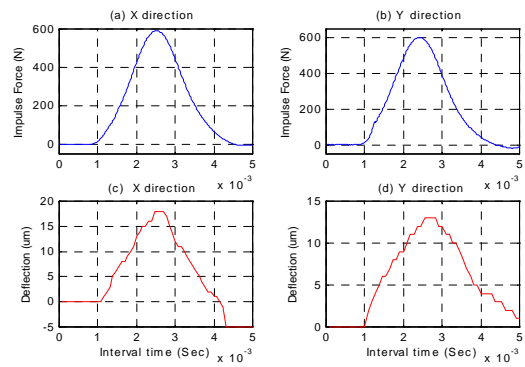


圖 7、平台 X、Y 方向的敲擊力與位移關係圖

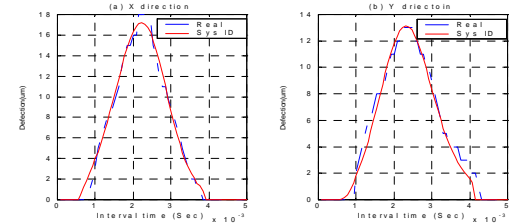


圖 8 比較實際位移值與辨識位移值

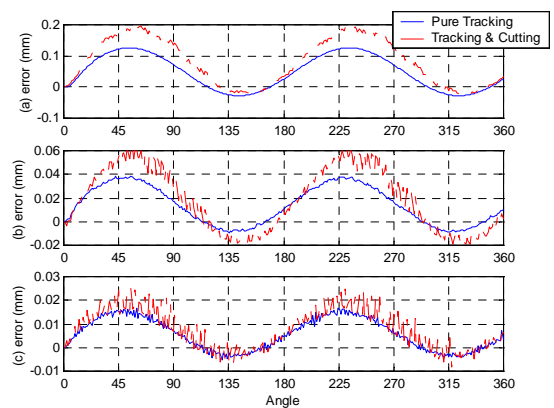


圖 9、比較純循軌和循軌結合切削之圓弧輪廓誤差對三種控制法則 (a)US (b)CCS (c) CCPM ; 切削條件 (feed : 200mm/sec、S : 4800rpm、Axial depth of cut 2mm、Radial depth of 5mm)