

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

結合尖端機電技術與資訊智慧之開放式控制器

Integration of advanced mechatronics systems and information intelligence to construct an open-structured controller

計畫編號：NSC 88-2212-E-009-026

執行期限：87年08月01日至88年7月31日

主持人：徐保羅 國立交通大學電機與控制工程研究所

一、中文摘要

運動控制器要提高精密度，主要是要降低加工中產生之輪廓誤差（contouring error），及路徑命令之誤差。整合式運動控制系統（integrated motion control system）將零相位誤差追跡控制器（ZPETC）及交叉耦合控制器（CCC）整合起來，分別改善追跡誤差（tracking error）及輪廓誤差，得到良好的運動精度。命令軌跡座標架構（task coordinate frame approach）的方法，將追跡誤差轉換為命令軌跡之切線方向誤差及法線方向誤差，成為誤差調整的問題。降低切線方向誤差將改善追跡誤差；降低法線方向誤差將改善追跡誤差及輪廓誤差。整合式運動控制以 SISO 的手法得到穩健的輪廓控制精度。軌跡座標方法以 MIMO 的設計同時達成降低軌跡及輪廓誤差。本文深入研究兩種控制方式之控制器設計並比較兩者對於運動精度之影響。並實現於實際的加工機上，改良其加工精度。

另一方面，本文實現 NURBS 插值器於運動控制系統之中。實驗結果指出，定速度參數迭代之 NURBS 插值器達成精密之位置命令精度及速度命令精度，配合上精密之運動控制系統，可達成精密之軌跡精度。

關鍵詞：整合式運動控制系統、命令軌跡座標方法、非一致性比率 B 型曲線

Abstract

To improve the motion accuracy, efforts were put mainly on reduction of contouring error and inaccuracy of the path command. In the past the integrated motion control system

combines the zero phase error tracking controller (ZPETC) and the cross couple controller (CCC), to simultaneously reduce the tracking error and contouring error, to achieve high motion accuracy. On the other hand, the task coordinate frame (TCF) approach transfers the tracking error into the normal error and tangential error in a moving task coordinate frame. Then the contouring motion can be viewed as a regulation problem on the coordinate. The normal error is approximated to the contouring error to be reduced. Moreover, to reduce the tangential error will improve tracking performance. In this paper, performance of the two different precise motion control laws is compared on the DYNA 1007 machining center.

Furthermore, the non-uniform rational B-spline (NURBS) interpolator in the motion control system is included. Results indicate that, the constant-speed NURBS combined with precise motion controller will achieve the highest tracking and contouring accuracy, and the least velocity variation.

Keywords: integrated motion control system, task coordinate frame approach, non-uniform ratio B-spline (NURBS)

二、緒論

傳統工具機的運動控制方式是使用各軸獨立控制並減少各軸所造成的位置誤差（Position Error）或稱為追跡誤差（Tracking Error），但是此法卻不能有效減少因各軸動態特性不一致或外界負載干擾所引起的輪廓誤差（Contouring Error）(Koren and Lo,1992)。為了改善或降低因

運動控制不適當而產生的輪廓誤差，Koren (1980) 提出利用交叉耦合控制器 (Cross Coupling Controller) 的架構，藉著協調各軸的伺服位置誤差以消除兩軸所產生的輪廓誤差。爾後 Koren and Lo (1991) 又提出新的交叉耦合控制器架構，稱為可變增益交叉耦合控制器 (Variable Gain Cross Coupling Controller) 。

除了上述的交叉耦合控制器外，尚可使用前置控制器的設計方式，藉由適當的極點 (pole) 與零點 (zero) 對消而提高伺服系統的動態特性，改善伺服系統的追蹤性能 (Tomizuka,1987 ; Weck,1990 ; Haack,1991 ; Tung,1991) 。然而，對實際的數位控制而言不穩定的零點時常會發生 (Chaug and Liu,1992) 。因此 Tomizuka (1987) 提出零相位誤差追蹤控制器，ZPETC (zero phase error tracking controller)，的設計方式改善系統的追蹤性能。

綜合上述，CCC 可以有效的改善刀具路徑的輪廓誤差，而 ZPETC 可以改善系統的追蹤性能。因此 Houg and Hsu (1996) 提出了整合運動控制系統的觀念，同時能改善刀具路徑的輪廓誤差及追蹤性能；以 ZPETC 提高各軸的頻寬、減少各軸的相位誤差，因而改善各軸的追蹤性能。再利用 CCC 直接補償輪廓誤差，因而達成了精密控制的目的。接著由 Yeh and Hsu (1997) 提出了穩健交叉耦合控制器的設計方法。

之後，Chiu and Tomizuka (1998) 提出了由命令軌跡座標架構 (Task Coordinate Frame) 來控制輪廓誤差的方法，將追蹤誤差投影為命令軌跡之切線向量方向，法線向量方向及副法線向量的分量。將系統解耦為切線、法線及副法線誤差調整的問題。以控制法線方向的誤差來減少運動之軌跡誤差；控制切線方向的誤差來減少追蹤誤差。將可同時減小追蹤及速度的誤差。

傳統的插值方式是先由系統對所欲加工的工件輪廓曲線進行大致上的插值 (粗插) 產生刀具點 (cutter location)，而後在兩刀具點間以直線或圓弧來近似曲線路徑。通常刀具點可由 CAD/CAM 系統產生，再

轉成直線或圓弧的加工碼 (G-Code)，再由工具機之插值器產生刀具命令。但如此將形成大量的命令。也因此有記憶體不足及傳輸過程受到干擾的問題。若能將工件輪廓曲線直接以曲線形式輸入插值器，直接以演算法計算出刀具命令，便可以用較少的命令行數表達曲線路徑。

演算法則是對參數作迭代的動作後由參數計算產生座標位置，雖然參數迭代會造成參數計算上的誤差，但是對參數化的曲線而言，即使參數存在誤差仍能使計算後的位置維持在曲線上而沒有誤差。反之，使用非參數化曲線作為輪廓路徑的描述，在命令產生的過程中，則會因為演算法則的計算而引入較大的徑向誤差。

隨著每次迭代產生的輪廓命令要配合所設定的進給率，傳統的插值方式，只要依照進給率計算出每次命令的增加量。而曲線的插值法則要求出每一時序的參數值。最常使用的參數計算法格式為：

$$u_{i+1} = u_i + \Delta(u_i)$$

其中， u_{i+1} 表示下一時序的參數， u_i 表示現在時序的參數， $\Delta(u_i)$ 表示與現在時序相關的計算量。在參數化曲線下， u_i 表示曲線的參數，因此必須將該參數代入曲線的數學表示式才能獲得該時序時的命令位置。在非參數化曲線下， u_i 即表示各軸在該時序的位置。在參數化曲線的計算法上，Yang (1992, 1992, 1994)，Lo (1997) 及 Bedi (1993) 均有相關的討論，而在非參數化曲線的計算法上，Koren (1988)，Lo (1997) 及 Papaioannou (1996) 亦分別提出相關的討論。

三、整合運動控制架構

本節將介紹整合運動控制系統之架構及設計方法。整合運動控制系統架構如圖 1，由於 ZPETC 的設計與交叉耦合控制器可以無關 (Yeh and Hsu, 1999)，所以可以先設計 ZPETC 再設計交叉耦合控制器。

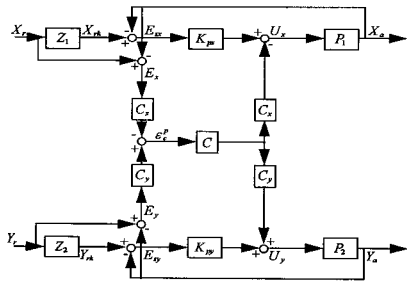


圖 1 整合運動控制架構

ZPETC 設計的基本概念是將所有位置迴路系統的可對消極、零點消去，而對於不可對消的零點則利用其共軛零點補償其相位，使得系統在所有的頻率中，實際位置輸出與理想位置輸出間無相位差；並保證其穩態增益為 1(unity gain)。

ZPETC 為前饋控制器的一種類型，其基本架構如圖 2 所示。

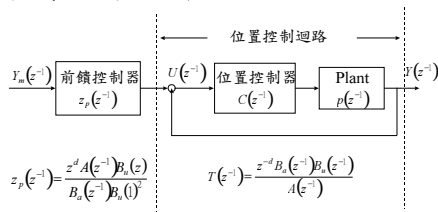


圖 2 ZPETC 的基本架構

然而，ZPETC 於使用時需要較準確的受控體動態響應模式 (model) 是其最大缺點，因為任何計算系統模式皆存在一定的模式誤差 (modeling error)，所以 ZPETC 在使用時須選擇較小模式誤差的模組進行設計。若在此架構前加入前置濾波器設計則可成為最佳化之 ZPETC (Yeh and Hsu, 1998)。

在交叉耦合控制器，有兩個極為重要的部份：1. 輪廓誤差模組的建立。2. 補償器的設計。該控制器架構如圖 3 所示。控制器會依不同的軌跡形式適度的調整輪廓誤差模組增益值 C_x , C_y ，以有效的降低輪廓誤差。

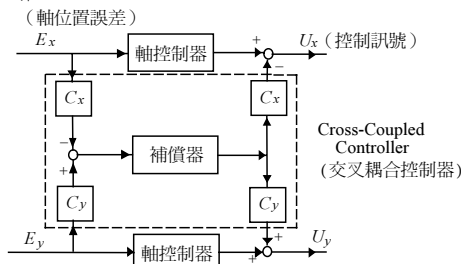


圖 3 交叉耦合控制器

四、命令軌跡座標架構方法

若由所設計的路徑 (desired contour) 來看，路徑之切線、法線及副法線向量所構成之移動之命令軌跡座標 (moving task coordinate)，可將追蹤誤差轉換為切線 (tangent) 方向及法線 (normal) 方向。加工的誤差將解耦 (de-couple) 為單純的誤差調整的問題。

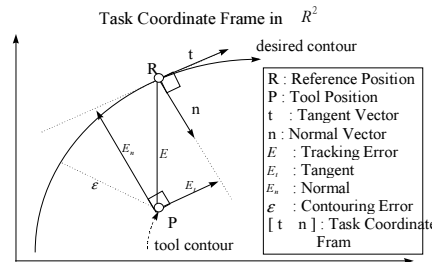


圖 4 命令軌跡座標架構

在此，我們討論一個二軸的運動控制系統，我們可以得其各軸之運動位置及速度命令，則可將系統命令定義為下式之含有四個單元 (element) 的向量：

$$x_p(t) = \begin{bmatrix} x_{pd}(t) \\ x_{vd}(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

經由所設計的路徑可以得到對應之單位切線向量及單位法線向量，為 $t(t)$ 及 $n(t)$ 。

$t(t)$ 及 $n(t)$ 為兩正交向量，將之定義為新的座標系統，則我們可以得到一個隨命令移動的座標架構 (moving coordinate frame) F ，稱之為命令軌跡座標。而座標將隨著命令之推移而變動，此座標系統定義為以下形式：

$$F = [t \quad n] \quad (2)$$

為一個 2×2 的陣列。由於 F 為單式矩陣 (unitary)，所以 $F^{-1} = F^T$ ，且由於 F 將隨著命令軌跡推移而變動，則自然座標及命令座標之轉換方程式我們可以狀態空間表示法表示如下：

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_F \\ \frac{d}{dt} x_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F^T & 0 \\ vRF^T & F^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \frac{d}{dt} x \end{bmatrix} \quad (3)$$

在上式中 $R = \begin{bmatrix} 0 & k(t) \\ -k(t) & 0 \end{bmatrix}$ ， $k(t)$ 為路徑之曲率， v 為設計好的進給速率定義為 $\|x_{vd}(t)\|$ 。

今考慮一二軸的系統，系統動態特性如下式：

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (4)$$

其中

在式 4 中， u 為 2×1 之位置、速度及輸入向量， A_p 、 A_v 及 B_m 為 2×2 之陣列，並且由此定義誤差向量為式 6：

$$e(t) = \begin{bmatrix} e_p(t) \\ e_v(t) \end{bmatrix} = x_d(t) - x(t) = \begin{bmatrix} x_{pd}(t) - x_p(t) \\ x_{vd}(t) - x_v(t) \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中 e_p 及 e_v 分別定義為兩軸的位置誤差及速度誤差。

由式 4 及式 6，我們可以得到誤差之動態程式為：

$$\begin{aligned} \dot{e}(t) &= \dot{x}_d(t) - \dot{x}(t) \\ &= A(x_d(t) - x(t)) - Bu + \dot{x}_d(t) - Ax_d(t) \\ &= Ae - Bu + w_d \end{aligned} \quad (7)$$

其中 $w_d = (sI - A)x_d$ 。式 7 也就是在自然座標系中之誤差動態方程式。

經由座標轉換，將在自然座標中之追跡誤差轉換為命令軌跡座標中的誤差向量，可以得到下式：

$$e_T(t) = T(t)e(t) \quad (8)$$

其中

$$e_T(t) = \begin{bmatrix} e_{pT}(t) \\ e_{vT}(t) \end{bmatrix}$$

$$T(t) = \begin{bmatrix} F^T(t) & 0 \\ vR(t)F^T(t) & F^T(t) \end{bmatrix}$$

經過座標轉換 $e_{pT}(t)$ 的第一個元素為切線方向的誤差、第二個元素為法線方向的誤差， $e_{vT}(t)$ 則為 $e_{pT}(t)$ 即為切線及法線向誤差的微分。則由此可推導出軌跡座標中之誤差向量的導數為

$$\begin{aligned} \dot{e}_T &= \dot{T}e + T\dot{e} \\ &= (vR_{2m} + \Delta)Te + T(Ae - Bu + w_d) \end{aligned} \quad (9)$$

其中 $R_{2m} = \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix}$ ， $\Delta = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{d}{dt}(vR) & 0 \end{bmatrix}$ 。由式 9，我們可以將之視為在命令軌跡座標中之系統誤差動態方程式為下式：

$$\begin{aligned} \dot{e}_T &= (TAT^{-1} + vR_{2m} + \Delta)e_T - TBu + Tw_d \\ & \quad (10) \end{aligned}$$

我們得到命令軌跡座標之控制法則，來解決系統追跡的問題。經由以上的推

導，若我們將工作座標中誤差之動態響應設定如下式

$$\dot{e}_T = A_{Td}e_T \quad (11)$$

將式 10 代入式 11 可得

$$A_{Td}e_T = (TAT^{-1} + vR_{2m} + \Delta)e_T - TBu + Tw_d \quad (12)$$

由此可以得到系統的輸入為上式之最小平方解 (least-squares solutions)

$$\begin{aligned} \hat{u} &= B^+T^{-1}(TAT^{-1} + vR_{2m} + \Delta - A_{Td})e_T + B^+w_d \\ &= B^+T^{-1}K_T e_T + B^+w_d \\ &= B^+(Ke + w_d) \end{aligned}$$

其中 $B^+ = (B^T B)^{-1} B^T$ 。如此我們得到此一控制法則為

$$u(t) = B^+(K(t)e(t) + w_d(t)) \quad (13)$$

而系統之迴饋增饋增益為

$$K = (A + vT^{-1}R_{2m}T + T^{-1}\Delta T - T^{-1}A_{Td}T) \quad (14)$$

而由此可得系統控制法則，此控制器包含了一個前置控制器及一個迴授控制器；由上式， w_d 在命令中加入了速度命令的估計誤差，為此控制器的前置控制器，而 K 即為此控制器之 PD 迴授控制器；在控制器的演算過程中，我們還需要命令之進給速度、加速度及曲率，這些資訊可由命令插值的過程中產生。而在前饋補償的部分，需要有位置命令的一次及二次微分，因此我們的命令需經過加減速，以免出現不可微分的現象。且在 K 及 w_d 中需用到系統之二階模形，可以由系統判別或機械動態方程式之推導求得。

五、NURBS

NURBS 在 CAD/CAM 的整合加工系統中被快速且廣泛的接受與應用，但是 NURBS 在命令產生器的應用上卻沒有相同的際遇，原因是 NURBS 需負擔較大量的運算，對於需及時操作的命令產生器而言是一項極重的負擔。因此縱然 NURBS 有諸多的優點，在命令產生器的實現上並不普遍。目前以 FANUC 來說，僅有 15 系列與 16 系列提供此項功能。其指令格式為：

$$G06.2 X_Y_Z_R_K_;$$

其中， X, Y, Z 為控制點位置座標， R 為權重 (weight)， K 為節點 (knot)。

在 NURBS 實現命令產生器的設計上必須降低求值過程的計算量。在本章裡，我們將先描述 NURBS 曲線的數學模型與特性，然後再實現 NURBS 命令產生器並與精密運動控制器整合應用。

為詳細分析 NURBS 曲線的計算方式，因此將 NURBS 的數學模型先行描述如下 (L. Piegl, 1991)：

$$C(u) = \frac{\sum_{i=0}^n w_i P_i N_{i,p}(u)}{\sum_{i=0}^n w_i N_{i,p}(u)} \quad (18)$$

其中， n 為加法性總和的上標 (upper index of sum)， $(n+1)$ 為控制點的個數。 w_i 稱之為權重 (weight)，而權重參數所形成的向量表示式 $W = [w_0 \ w_1 \ \dots \ w_n]^T$ 稱之為權重向量 (weight vector)。 P_i 為控制點，一般為向量形式。 p 為的 NURBS 曲線的級數 (degree)。 $N_{i,p}(u)$ 為基本函數 (basis function)，並且符合下式之數學格式：

$$N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1 & \text{if } u_i \leq u < u_{i+1} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$N_{i,p}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+p} - u_i} N_{i,p-1}(u) + \frac{u_{i+1} - u}{u_{i+1} - u_{i+p-1}} N_{i+1,p-1}(u)$$

其中 u_i 稱為節點 (knot)，且節點所形成的向量 $U = [u_0 \ u_1 \ \dots \ u_m]^T$ 形式稱為節點向量 (knot vector)。

六、實驗結果

在這一節，我們將進行有關控制器精度比較及 NURBS 應用的實驗，首先我們對我們的實驗平台作一個介紹，之後我們針對整合運動控制架構及軌跡座標方法在輸入不同之速度的圓命令後，觀察兩者之追跡誤差及輪廓誤差，用以比較其特性及精密度。之後以 NURBS 為插值器，產生命令，以完加工路徑之產生。並比較兩種不同的插值方式對運動控制的影響。

我們在 DYNA 公司生的 DM1007 型綜合加工機完成實驗；X 軸及 Y 軸的致動器，我們使用的為機台原有的的三相交流伺服馬達，並使用其原有的功率放大器，來控制馬達的扭力。在平台和實驗用電腦的溝通上，我們使用 ISA 介面卡。我們以

研華的 726AD/DA 實驗卡輸出電壓作為扭力命令，並以自製之 2020 解碼實驗卡讀入馬達位置編碼器的脈沖訊號，加以計數以得到兩軸之位置。控制器架構實現在 486 等級的個人電腦上。系統控制程式的取樣週期為 1msec。

系統各軸之位置迴路的頻寬約為 9 rad/sec (1.5Hz)，為測試在高速命令下控制器之效能，故分別輸入半徑皆為 10mm 經加減速之三個不同速度之走圓命令，速度分別為 1.25 m/min、2.5 m/min 及 5 m/min，亦即命令之頻率分別為 2.083 rad/sec (1/3Hz)、4.167 rad/sec (2/3 Hz) 及 8.333 rad/sec (4/3Hz)，來量測整合式運動控制器之追跡誤差並依此計算輪廓誤差及速率之變動，以得到其效能。

表 1 不同控制架構之效能 I (TE: tracking error, CE: contouring error, 單位 μm)

	1.25 m/min		2.5 m/min		5 m/min	
	TE	CE	TE	CE	TE	CE
P	305.18	40.54	556.46	70.61	1030.44	132.00
ZPETC+P	40.58	19.58	34.51	18.39	30.97	22.21
CCC+P	298.26	2.09	543.58	4.39	1006.06	12.69
Integrated	35.84	1.65	29.60	2.45	21.08	3.64
TCF	11.56	6.93	7.99	6.40	30.14	10.18
DYNA		7.93		11.54		21.08

表 2 不同控制架構之效能 II (VV: velocity variance, 單位 $\mu m / sec$)

	1.25 m/min	2.5 m/min	5 m/min
	VV	VV	VV
P	225.66	410.38	1103.80
ZPETC+P	202.56	271.44	283.72
CCC+P	267.11	656.50	2203.10
Integrated	203.01	300.06	364.14
TCF	105.2952	143.8484	258.3305
DYNA	427.40	436.78	536.56

在 NURBS 插值器整合，我們進行進行了兩種不同參數迭代方式之比較並應用在平台上作為控制器之插值器進行實際的實驗，並以實作來証實其可行性。在參數曲線的設定上，本文採用 NURBS 參數化曲線產生圓之命令路徑。同時採用不同的參數迭代方式以比較其間的命令誤差與速度變動的情形並討論其對控制器的影響。在此本文將比較均勻及定速度之參數迭代的方式，對運動控制之影響，尤其針對，命令所產生的速度變動 (velocity variance)；將和控制器之伺服追跡誤差及控制器所造成的速度變動，作一比較。所使用的命令路徑為半徑 10 mm 的圓形命

令。

均勻之參數迭代法計算參數，參數間距設為 0.0015，即每次取樣時間，參數增加 0.0015。定速度之參數迭代法計算參數，命令速度為 1.25 m/min、2.5 m/min 及 5 m/min。基本上 NURBS 參數迭代所產生的命令，並沒有徑向誤差，完全在圓上，但會有速度上的誤差。實驗結果如下

表 3 輪廓誤差、追跡誤差和速度變動之之比較

NURBS 均勻參數迭代方式			
	追跡誤差 μm	輪廓誤差 μm	速度變動 $\mu\text{m/sec}$
Integrated	67.64	4.08	18583
TCF	91.40	15.39	18305
P	1141.06	152.86	18688
NURBS 定速度參數迭代 (速度: 5m/m)			
	追跡誤差 μm	輪廓誤差 μm	速度變動 $\mu\text{m/s}$
Integrated	22.66	3.55	360.95
TCF	25.64	12.37	258.33
P	1018.00	132.88	1103.8
NURBS 定速度參數迭代 (速度: 2.5m/m)			
	追跡誤差 μm	輪廓誤差 μm	速度變動 $\mu\text{m/s}$
Integrated	32.63	2.38	270.19
TCF	8.93	7.56	143.85
P	552.40	71.00	410.38
NURBS 定速度參數迭代 (速度: 1.25m/m)			
	追跡誤差 μm	輪廓誤差 μm	速度變動 $\mu\text{m/s}$
Integrated	39.37	1.66	169.35
TCF	9.97	6.90	105.30
P	303.43	40.78	225.66

一、結論

1. 在控制器設計方面：在低速運動時整合運動控制架構有較小的輪廓誤差；命令軌跡座標方法有較小的追跡誤差及速度變動。而在高速時整合運動控制架構有較小的輪廓誤差及追跡誤差，而命令軌跡座標方法之追跡及輪廓誤差皆加大，因高速之命令將引進其誤差動態方程式之誤差耦合項（式 3.2.11）及較大的模型誤差。
2. 由插值器的觀點來看，在均勻參數 NURBS 之循環實驗中，命令的速度有很大的波動，也由於速度命令波動的影響，系統的響應也將隨之波動，影響運動之精度。
3. 由不同之控制架構來看，在均勻的參數

迭代的 NURBS 插值器下，系統之速度變動將為命令之速度變動及控制器所造成的速度變動之共同效應。在 P 控制架構下，其追跡誤差、輪廓誤差及速率變動均相當大。但在較好的控制架構下，雖仍有很大的速度變動，但仍可以有較小的追跡誤差及輪廓誤差。尤以整合運動架構為佳，其輪廓誤差為 P 控制器之 2.67%，追跡誤差為 P 控制器之 5.93%。

4. 再換上定速度之 NURBS 插值器後，命令的速度變動和控制器所造成的速度變動相較之下，非常的小，因此相較於均勻參數迭代 NURBS 之響應，定速度之 NURBS 之響應可以有較小的速度波動。在使用 P 控制器的情況下，速度變動減小到 1/10。而整合運動控制架構及命令軌跡方法在定速度下之速度波動減小到 1/60 以下，以命令軌跡方法之速度控制更佳。在加工精度方面，P 器制在高速之命令下其追跡誤差及輪廓誤差均相當大，在此看不出使用不同插值器之差別；在較低的速度下才用較好之加工精度。而較好之控制架構，在加工精度上均有改善。在輪廓誤差以整合式運動控制架構改善較多，在追跡誤差上以命令軌跡方法改善較多。

另本文將以上控制架構實現在國產 DYNA1007 工具機上，整合運動控制架構改善了 80%的輪廓誤差及 30%的速度變動。；而命令軌跡方法改善了 60%的輪廓誤差及 50%的速度變動。在循跡精度方面，整合運動控制架構較佳。

一、參考文獻

- [1] Chaung, H.Y., and Liu, C.H., "Cross-Coupled Adaptive Feedrate Control for Multi-axis Machine Tools," ASME Trans. Journal of Dynamic System, Measurement and Control, Vol. 113, No. 3, pp. 451-457 (1991).
- [2] Chiu, George, T.C., and Tomizuka, M., "Contouring Control of Machine Tool Feed Drive Systems: A Task Coordinate

- Frame Approach,” to be published on IEEE TCST
- [3] Haack B., and Tomizuka, M., “The Effect of Adding Zeros to Feedforward Controllers,” ASME Trans. Journal of Dynamic System, Measurement and Control, Vol. 113, pp. 6-10 (1991).
- [4] Houg, Y.C., and Hsu, P.L., “An Integrated Controller Design for CNC Motion Control,” CIRP, Manufacturing Systems, Vol. 25, No. 1, pp. 91-96 (1996).
- [5] Koren, Y., “Cross-Coupled Biaxial Computer for Manufacturing Systems,” ASME Trans. Journal of Dynamic System, Measurement and Control, Vol. 102, No. 4, pp. 265-272 (1980).
- [6] Koren, Y., and Lo, C.C., “Variable Gain Cross Coupling Controller for Contouring,” Annals of the CIRP, Vol. 40, pp. 371-374 (1991).
- [7] Koren, Y., and Lo, C.C., “Advanced Controller for Feed Drivers,” Annals of the CIRP, Vol. 41, pp. 689-698 (1992).
- [8] Koren, Y. Computer control of manufacturing systems, McGraw-Hill INC, 1988.
- [9] Lo, C. C. and Chung, C. Y. “Curve generation and control for biaxial machine tools”, J. of CSME, vol. 18, no. 2, pp. 175-182, 1997.
- [10] Shpitalui, M. Koren, Y. and Lo, C. C. “Realtime curve interpolators”, Computer-Aided Design, vol. 26, no. 11, pp. 832-838, 1994
- [11] Tomizuka, M., “Zero Phase Error Tracking Algorithm for Digital Control,” ASME Trans. Journal of Dynamic System, Measurement and Control, Vol. 109, pp. 65-68 (1987).
- [12] Tung, E.D., and Tomizuka, M., “Feedforward Tracking Controller Design Based on Identification of Low Frequency Dynamics,” ASME Trans. Journal of Dynamic System, Measurement and Control, Vol. 115, pp. 348-356 (1991).
- [13] Weck, M., and Ye, G., “Sharp Corner Tracking Using the IKF Control Strategy,” Annals of the CIRP, Vol. 39, pp. 437-441 (1990).
- [14] Yeh, S.S., and Hsu, P.L., “Theory and Application of the Robust Cross-Coupled Control Design,” 1997 American Control Conference, New Mexico, pp. 791-795 (1997).
- [15] Yeh, S.S., and Hsu, P.L., “An Optimal and Adaptive Design of the Feedforward Motion Controller,” 1998 Automatic Control Conference, pp. 165-170 (1998).
- [16] Yeh, S.S., and Hsu, P.L., “Analysis and Design of the Integrated Controller for Precise Motion Systems” to be published in IEEE TCST.