

結合尖端機電技術與資訊智慧之開放式控制器

(總計畫，第二年)

Integration of Advanced Mechatronics Systems and Information Intelligence to
Construct an Open-Structured Controller

計畫編號：NSC 89-2212-E-009-015

執行期間：88/08/01 ~ 89/07/31

主持人：徐保羅 E-mail: plhsu@cc.nctu.edu.tw

執行單位：國立交通大學

一、中文摘要

精密運動控制主要考慮運動控制器的設計與命令精度。本文利用 TI 32 位元浮點數位訊號處理器，配合 FPGA、RS232C 與完整的週邊，架構一個經濟實用的精密運動控制板。其中，交叉耦合控制器與零相位追跡誤差控制器，分別針對輪廓(Contouring)與追跡(Tracking)來設計，結合成整合型運動控制器後，可同時改善 CNC 工具機的輪廓誤差與追跡誤差。定參數 NURBS 可提高傳統 G 碼的命令精度，但卻無法有效控制速度的變動，在此，藉由一階近似模型完成定速度 NURBS，命令進給可以維持等速的插值。本研究成功的將 NURBS 命令插值器與整合型運動控制器成功地應用在 DSP-Based 精密運動控制系統上，使得國產 DYNA 1007 CNC 銑削中心輪廓誤差改進 2.5 至 5.4 倍之間，速度波動減少 15%。

Abstract

Industrial CNC controllers generally apply feedback control loops to obtain motion precision. Recent studies reported that the integrated controller which combines all (1) feedback, (2) feedforward, and (3) cross-coupled control leads to reliable and

accurate performance in all tracking, contouring, and feed. However, its computation load is much heavier than those in traditional CNC controllers. This paper applies the TI 32030 floating point DSP processors together with FPGA and RS 232C to implement the advanced motion controller.

Moreover, manufacturing with non-uniform rational B-spline (NURBS) parametric curves becomes more popular in modern CAD/CAM and CNC systems, but its computation is time-consuming. A constant-speed NURBS is further designed to improve manufacturing quality. In this paper, both the integrated motion controller and the constant-speed NURBS interpolator were implemented on a floating-point TI C32031 DSP processor. Experimental results on a CNC machining center indicate that the proposed motion control is feasible and it achieves 250%-540% improvement in contouring and 15% less in velocity variation.

二、計畫緣由及目的

我國工具機產業近十年來發展迅速，現在已是我國一般機械產業中產值及出口值最大的產業，加上工業自動化的潮流驅使，數值工具機 (CNC) 的相關研究亟需進行。當中，DSP 以其強大的运算速度與功能，使得 DSP-based 運動控制器成為自動化控制器的主流。

運動控制精度通常考慮輪廓誤差與追跡誤差，追跡誤差也就是位置誤差係指刀具實際位置到命令位置的距離，而輪廓誤差則係指刀具實際位置到命令路徑的最短距離。Kren和Lo [1] 為了改善或降低因運動控制不適當而產生的輪廓誤差，提出利用可變增益交叉耦合控制器 (Variable Gain 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。

降低輪廓誤差所採用的控制器，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，改善伺服系統的追跡性能。因此 Tomizuka [2] 提出零相位誤差追跡控制器，ZPETC (zero phase error tracking controller) 的設計方式，將位置迴路中可消去的極零點消去，而對於不可消除的零點則補償其產生的相位差。

爾後，Houng 和 Hsu [3] 提出了整合運動控制系統的觀念，結合 CCC 與 ZPETC 同時能改善刀具路徑的輪廓誤差及追跡性能。在工具機中，命令路徑的產生若能將工件輪廓曲線直接以參數化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。參數化曲線 (parametric curve) 常見的有：NURBS (non-uniform rational B-spline)、cubic spline、Bezier curve、B spline 等。

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。在參數化曲線的計算法上，有許多相關的討論 [5、7]。本文採用一階近似模型作為定速度 NURBS 迭代法則，以改善定參數 NURBS 的速度變動。 $\Delta(u_i)$ 若為定值，則稱為定參數 NURBS。

三、研究方法

● 整合運動控制架構

整合運動控制系統架構如圖 1，包含了各軸的位置迴授比例控制器、零相位誤差追跡控制器以及交叉耦合控制器。位置迴授比例控制器將減少各軸之模式誤差 (Modeling error)，以利零相位誤差追跡控制器之設計。零相位誤差追跡控制器可以減少各軸之追跡誤差及相位誤差，交叉耦合控制器則可以減少輪廓誤差。

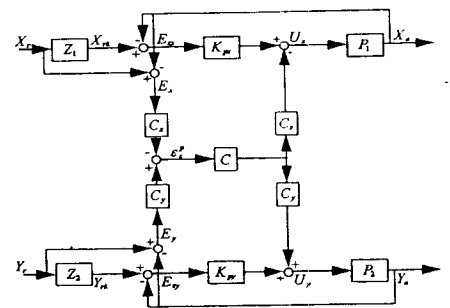


圖 2 整合運動控制架構

● Non-Uniform Rational B-Spline (NURBS)

NURBS 可精確簡單地同時表示可解析曲線與自由型曲線，並且經由控制點與權重的操縱，可提供曲線多樣、彈性的設計 [7]。NURBS 的數學模型描述如下：

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

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。 $N_{i,p}(u)$ 為基本函數 (basis function)，並且符合下式之數學格式：

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

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

其中 u_i 稱為節點 (knot)， p 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)。

本文利用一階近似模型 [5] 來產生定速度 NURBS，如式 (4)，

$$u_{i+1} = u_i + \frac{du}{dt} \Big|_{t=t_i} \cdot (t_{i+1} - t_i)$$

其中，

$$\frac{du}{dt} \Big|_{t=t_i} = \left\| \frac{dC(u)}{du} \right\|_{u=u_i}$$

$V(u_i)$ 為參數 $u = u_i$ 時的速度大小指定值，

$$\left\| \frac{dC(u)}{du} \right\|_{u=u_i} = \sqrt{\left(\frac{dC_x(u)}{du} \right)^2 + \left(\frac{dC_y(u)}{du} \right)^2}$$

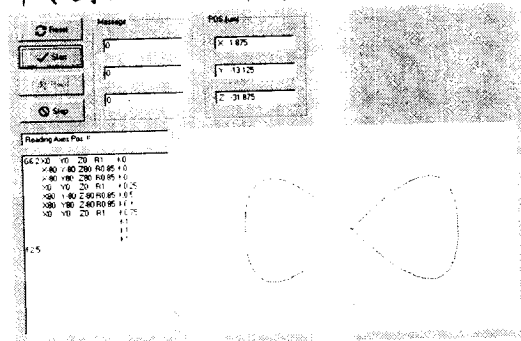
● DSP-Based 運動控制系統設計

為了有效實現定速度 NURBS 與整合運動控制器計算繁複的缺點，本文選用 TI C31 DSP 作為運動控制器的運算核心，主要因為 DSP 是未來發展趨勢，並具有高速運算能力、高性能的伺服與運動軌跡控制、低成本等優點 [6]：

整個系統分為硬體與軟體來介紹。首先，說明硬體的設計。TI C31 是一顆 32 位元浮點運算的 DSP 單晶片，工作頻率在 50 MHz，具有 40 ns 指令週期與 4 層 pipeline。C31

DSK(DSP Starter Kit)為以並列埠作為發展 C31 DSP 除錯界面的學習板，再配合 CPLD、RS232C、DAC 完成一實用的精密運動控制板。CPLD 採用 Altera EPF10K10LC84，用來解碼各週邊電路的記憶體位置，並且以 VHDL 設計馬達位置編碼訊號之解碼器，與極限開關前端過濾雜訊的數位濾波器。SRAM 擴充外部記憶體 128K words，以方便記錄實驗數據，供判斷控制器的效能。DAC 為 8 位元精度，-5V~5V 的輸出電壓。RS232C 採用 TL16C750，內含 64 位元組的傳送接收暫存器，最高傳送速率為 1 MHz Baud Rate。

建構好硬體平台後，如何為實現精密運動的精華落到軟體設計部份，包括 NURBS 插值器、整合運動控制器及 PC 傳輸的運作。本文在 PC 設計了一套人機界面，主要用以下載 NURBS 命令到 DSP，以即時顯示各軸的置。



人機界面圖

四、結論與成果

本章將進行有關 NURBS 應用與整合運動控制器效能的實驗，路徑為半徑 10 mm 的圓。本文設計之 CCC 補償器採用比例控制器，值為 0.9

交叉耦合控制器改善比率為比例控制器輪廓誤差均方根值 8.8 至 9.0 倍之間，零相位追跡誤差控制器改善比率為比例控制器追跡誤差均方根值 7.3 至 21.5 倍之間，結合成整合運動控制器之後，改善比率更分別提高至 12.3 倍與 26.6 倍。相同的，利用 DYNA 1007 工具機本身的控制器，量測出輪廓誤

差。相互比較建成表 1。證明利用本文控制系統可顯著改善工具機本身的運動精度。

表 1 輪廓誤差比較(誤差單位： μm ，CE 輪廓誤差均方根值，Roundness 為真圓度)

Velocity (m/min)		1.25	2.5	5
DYNA 1007 CNC Center	CE	7.93	11.54	21.08
	Roundness	23.30	34.55	60.73
DSP-Based 精密運動控制器	CE	2.01	2.14	2.51
	Roundness	9.24	10.00	11.32
改善率	CE	3.9 倍	5.4 倍	8.4 倍
	Roundness	2.5 倍	3.4 倍	5.4 倍

整體來說，追跡誤差變異量在不同控制架構仍可維持一定，真圓度較定參數 NURBS 插值改善 10%。表 2 將 DYNA 1007 工具機的速度變動、與本文定參數、定速度 NURBS 速度響應來比較。

表 2 速度波動比較(單位： $\mu m/sec$)

System	DYNA 1007 CNC Center	DSP-Based 精密運動控制系統	
Controllers	PID	Integrated	迭代法則
Velocity Variation	436.78	371.1	定速度 NURBS
		8627.25	定參數 NURBS

定速度 NURBS 改善工具機速度波動 15%，改善定參數 NURBS 速度波動 23 倍。表三為匹配與不匹配設計。結果顯示，整核示運動控制器不受不匹配之影響。

表 3 現有匹配 DSP-Based 與不匹配

PC-Based 運動控制器效能比較

	1.25 m/min		2.5 m/min		5 m/min	
	TE	CE	TE	CE	TE	CE
P	227.49	17.4 3*	407.16	20.4 1*	714.62	30.9 1*
	305.18	40.5 4*	556.46	70.6 1*	1032.4	132.0*
	ZPE T-C	31.3 5	17.2 8	30.8 9	18.1 7	33.1 8
	40.5 8	19.5 8	34.5 1	18.3 9	30.9 7	22.2 1
CC C	226.94	1.99	406.07	2.27 *	712.52	3.42 *
	298.26	2.09	543.56	4.39 *	1006.0	12.6 9*
Integrated	26.3 6	2.01	25.4 3	2.14	26.8 4	2.51
	35.8 4	1.65	29.6 0	2.45	21.0 8	3.64

*：輪廓誤差顯著差異

表 4 為 TMS320C31 與 486 DX2-66 PC 實現各種控制器的運算時間的整理。DSP 計算定速度 NURBS 與整合運動控制器須 $82 \mu sec$ ，而 PC 需要 $450 \mu sec$ ，因此 DSP 運算速度比 PC 快 4 倍。就 $1 ms$ 的取樣週期來說，PC 的計算覆載幾乎佔掉 1 半，這對於運動控制效能是有很大影響的，並且多軸擴充與人機界面的運作有些困難。反觀 DSP 尚有很多的時間來處理。

表 4 各種控制器的運算時間整理

	486 DX2-66 (μsec)	TI C31 DSP (μsec)
比例控制器	10	4
零相位追跡誤差控制器	90	27
交叉耦合控制器	50	14
整合型運動控制器	120	32
定參數 NURBS	100	24
定速度 NURBS	230	50

● 計畫結果自評

1. 本文採用 TMS320C31 32 bits floating DSP 來作為系統運算核心，配合 FPGA 連結回授迴路，解碼馬達位置編碼器，以 8 bits DAC 作為扭力輸出，完成經濟的高精度 CNC 控制器。並且利用組合語言完成整合運動控制器與定速度 NURBS 插值器的煩瑣冗長運算，每一取樣時間的複雜等速插值與控制運算僅需 $82 \mu\text{sec}$ 。因此，對於 1 ms 取樣時間，三軸即時控制勝任有餘，順利將整個控制流程由高成本的 PC 實驗帶入低成本高效率的 DSP 技術層面。

2. 整合運動控制器結合交叉耦合控制器與零相位追蹤誤差控制器，同時改進比例控制器下的輪廓誤差與追蹤誤差均方根值分別達 8.7 至 12.3 倍與 8.6 至 26.6 倍的改善比率。並且在此架構下，整合運動控制器的設計可以降低受控體比例控制器設計的嚴格度，並且命令速度也不會對控制效能造成大影響，所以整合運動控制器具有穩健控制設計的特性。

3. 定速度移動在實際加工過程是相當重要的。本文藉由一階近似模型產生定速度的 NURBS 迭代，使得速度波動均方根控制在 $371 \mu\text{m/sec}$ ，較原本 DYNA 1007 CNC Center 速度波動 $436.78 \mu\text{m/sec}$ 改善 15%，更改善定參數 NURBS 速度波動達 23 倍，並且誤差變動也隨之變小。雖然整個運算由 $24 \mu\text{sec}$ 增加至 $50 \mu\text{sec}$ ，提高了 1 倍的時間，但整體的效能卻能夠更符合實際加工要求，達成速度的精度控制，而增加的 $26 \mu\text{sec}$ 並不會對 DSP 的運算負載造成影響。綜合言之，DSP-Based 精密運動控制器可以同時達成位置與速度的精密度。

五、子計畫研究說明

● 子計畫一完成了以 CAN bus 設計的系統。各運動獨立模組可藉由網

路連結，成為一個開放式的控制系統架構。

- 子計畫二完成了以 DSP 為核心的伺服馬達驅動器。電子電路的單晶化，使控制系統更為精準。
- 子計畫三隊於伺服系統的參數估測及控制，建立了合乎規格的控制設計，可使運動系統達到穩健性及精確性。
- 總計畫將控制設計成果，以 DYNA 之 CNC 加工中心實現出來。

六、參考文獻

- [1] Koren, Y., and Lo, C.C., "Advanced Controller for Feed Drivers," Annals of the CIRP, Vol. 41, pp. 689-698 (1992).
- [2] 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).
- [3] 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).
- [4] Yeh, S.S., and Hsu, P.L., "Analysis and Design of the Integrated Controller for Precise Motion Systems" to be pop in IEEE TCST.
- [5] Yang, D. C. H. and Kong, T. "Parametric interpolator versus linear interpolator for precision CNC machining", Computer-Aided Design, vol. 26, no. 3, pp. 225-233, 1994.
- [6] 呂龍騰，「DSP-Based 精密運動控制板之製作與應用」，國立交通大學，碩士論文，民國 87 年。
- [7] Piegl, L. "On NURBS: A Survey", IEEE Computer Graphics & Applications, pp. 55-71, 1991.