

高性能PC_based 運動控制器之設計與發展 (II)

Design and Development of High Performance PC Based Motion Controller

計畫編號：NSC 89-2212-E-009-026

執行期限：88年8月 - 89年7月

主持人：李安謙 E-mail: aclee@cc.nctu.edu.tw

執行單位：交通大學機械系

一、中文摘要(關鍵詞：運動控制器、即時控制核心，前饋控制器)

本計畫為二年期之計劃，目標是發展一高性能運動控制器。此運動控制器可支援與運動控制有關之產業機械，如 CNC 工具機、放電加工機、工業機器人，甚至次微米精密定位的半導體製程設備。計畫中以雙CPU (PC 及 DSP) 之主僕 (Master and Slave) 架構來發展一即時運動控制系統，其中 slave CPU 主要負責細插值及運動控制之工作，而 master CPU 主要負責粗插值及人機界面之工作。

第二年的研究偏重於系統之實現及實機測試，包含五部份：(1) 路徑插值及加減速之實現；(2) 迴授控制器、前饋控制器之實現；(3) 系統鑑別法則建立與實現；(4) 迴授控制器、前饋控制器之調適法則建立與實現；(5) 即時控制核心軟體、路徑插值、加減速及控制法則之實機測試。

英文摘要(Keyword: motion controller, real-time kernel, Feedforward controller)

This project is a two-year project. The objective of this project is to develop a high performance motion controller which supports the related industrial motion-control mechanical systems such as the CNC machine tools, EDM, industrial robots and the semiconductor manufacturing equipment, etc.. This project will develop a real-time motion control system based on dual-CPU architecture – a master CPU and a slave one.

The master CPU is the PC which handles the man-machine interface, contour coarse interpolation, parameters setting of feedback and feedforward controller. And the slave CPU is a DSP which handles the contour fine interpolation and the servo control.

In the second year, we will finish the following objects: (1) the realization and testing of contour interpolation and Acceleration/Deceleration design; (2) the realization and testing of feedback and feedforward controller; (3) investigation and software realization of system identification; (4) parameters tuning of feedback and feedforward controller; (5) experimental verification for the above work in the first and second year.

二、計劃緣由與目的

運動控制器支援與運動控制有關之產業機械，如 CNC 工具機、放電加工機、工業機器人及次微米精密定位的半導體製程設備。而經濟部「發展關鍵零組件及產品推動小組」所擬定的關鍵零組件及產品中就有多項與本計畫密切相關，如電腦數值控制器、機械人、線切割放電加工機等。

近年來，半導體產業發展迅速，PC 功能也隨之日益強大，PC_Based 控制器的發展也漸漸成為全世界控制器研發的主流【1~3】，如1991年歐洲開始了一項控制系統計畫 O S A C A (Open System Architecture for Control with Automation

Systems)，目標是研製出自動化系統中的開放式控制系統結構；美國各主力工業控制器廠商也採用 PC_Based 之架構，如 DELTA TAU 公司推出 PMAC 運動控制器，採用 PC 平台及 Windows 系統【4】。台灣 PC 產業十分蓬勃，無論硬體或軟體開發資源都容易取得，國內產業界應掌握台灣擁有 PC 眾多資源之優勢，積極發展 PC_Based 控制器。

由於 DSP 微處理器計算能力強大，因此，要求高速、高精度之運動控制已使用 DSP 為中央處理器（CPU）【4, 5~7】。本計畫將以雙 CPU（PC 及 DSP）之主僕（Master and Slave）架構來發展一即時運動控制系統【4~18】，其中 slave CPU 為德州儀器之 DSP TMS320C52，主要負責細插值及運動控制之工作，而 master CPU 為 PC，主要負責粗插值及人機界面之工作。

本計畫乃針對國內工具機及產業機械之需求，擬發展一以 PC 為基礎之高性能運動控制核心技術，利用 PC 價格低廉的優勢，在其匯流排上加上控制板，達到 CNC 之功能，計畫完成後，對於往後工業界在開發高性能 PC_based 運動控制器時，能提供研發之經驗與相關之技術，縮短其研發摸索之時間，提升我國工業運動控制器之自主性。

三、研究方法及成果

第二年之研究目標著重於第一年研究成果之實現及實機測試。首先，粗插值法則以 C++ 語言實現、細插值法則以 DSP 組語實現、加減速法則以 C++ 語言實現、迴授控制器及前饋控制器以 DSP 組語實現。伺服更新時間為 250 ~sec。

除了上述控制法則之實現外，從伺服控制系統的角度來看，控制效果的好壞，決定於控制架構的選擇及控制參數的設定，而控制法則要達成高速、高精度之運動控制，必須提升原來迴授控制系統之追蹤能

力，所以本計畫採考慮迴授系統之影響及控制法則之簡單化【19,20】，提出並實現一改良型前饋控制器 - 直接速度、加速度前饋控制器（DVAFF），除了能提高追蹤能力外，由於架構簡單，無形中縮短了控制法則之計算時間，且當系統存在出力極限時，可調整直接速度、加速度前饋控制器之增益來減少響應之超越量。針對此迴授控制器與前饋控制器，本計畫發展出一套有效率之控制參數的設定與調適法則，大致可分為二個步驟：

1. 鑑別系統模型，以此模型，依據使用者制定的規格自動設計出 PID 控制器參數。本計畫之系統轉移函數及控制器的設計都是在 s-domain 下，因此系統鑑別的目的是要得到受控體在 s-domain 下的轉移函數。先以測試訊號為 Pseudo-random Binary Sequence (PRBS) 輸入，以時域的 Least Squared 法則來鑑別出系統的 z-domain 轉移函數，然後再透過頻域 curve-fitting 的方式，來得到 s-domain 的轉移函數。此法有經模擬來驗證其正確性。而 PRBS 訊號產生迴路如圖一所示

伺服控制迴路如圖二所示：

其中

$$G_p(s) = \frac{b}{s(s+a)} \quad (1)$$

K_p : 位置誤差增益

K_D : 微分項增益

系統的閉迴路轉移函數為

$$G(S) = \frac{bK_p}{s^2 + (a+bK_p)s + bK_p} \quad (2)$$

很明顯地，系統為一標準二階系統，其中

$$\begin{cases} a + bK_D = 2\zeta\tilde{S}_n \\ bK_p = \tilde{S}_n^2 \end{cases} \quad (3)$$

$$\Rightarrow \begin{cases} K_p = \frac{\tilde{S}_n^2}{b} \\ K_D = \frac{2\zeta\tilde{S}_n - a}{b} \end{cases} \quad (4)$$

由於路徑追蹤的過程中，希望系統有較快

的反應，且無過衝(overshoot)，因此設計系統為臨界阻尼，亦即 $\zeta = 1$ ，所以

$$\begin{cases} K_p = \frac{\zeta_n^2}{b} \\ K_D = \frac{2\zeta_n - a}{b} \end{cases} \quad (5)$$

由於 ζ_n 與系統頻寬成正比，而當我們拉大系統頻寬時，系統響應也跟著變快，因此造成 D/A 容易趨近飽和。因此我們以 D/A 的輸出大小為標準，來決定是否繼續拉大系統頻寬。另積分控制以克服摩擦力消除穩態誤差為目標，經推導為

$$\begin{aligned} K_I &= \frac{6.4359}{2f} \zeta_n \cdot K_p \\ &= \frac{6.4359 \zeta_n^3}{2fb} \end{aligned} \quad (6)$$

在數控工具機單軸控制器的設計中，為了增加控制系統的追縱精度，經常採用命令前饋控制器(command feedforward controller)，控制系統方塊圖如圖三所示。其中 $G_p(s)$ 為包含驅動器、馬達和機台的數學模型， $G_{c1}(s)$ 為回授的比例控制器， $G_{c2}(s)$ 為回授用的微分控制器

$$G_p(s) = \frac{b}{s(s+a)} \quad (7)$$

$$G_{c1}(s) = K_p$$

$$G_{c2}(s) = K_D \cdot s$$

F(s):前饋控制器

則整個系統的閉迴路轉移函數為：

$$\frac{y(s)}{u(s)} = \frac{F(s) \cdot G_p(s) + G_{c1}(s) \cdot G_p(s)}{1 + G_{c1}(s) \cdot G_p(s) + G_{c2}(s) \cdot G_p(s)} \quad (8)$$

若前饋控制器為

$$F(s) = \frac{1}{G_p(s)} + G_{c2}(s)$$

(9)

則

$$y(s) = u(s) \quad (10)$$

可使實際位置的輸出等於位置命令的輸

入。因此設計前饋控制器為

$$\begin{aligned} F(s) &= \frac{1}{G_p(s)} + G_{c2}(s) \\ &= \frac{1}{\frac{b}{s(s+a)}} + K_D \cdot s \\ &= \frac{1}{b} s^2 + \left(\frac{a}{b} + K_D\right) s \\ &= K_A \cdot s^2 + K_V \cdot s \end{aligned} \quad (11)$$

基本上前饋控制為一開迴路控制，控制的精度取決於受控體轉移函數鑑別的正確性。控制上的誤差可由閉迴路控制器 $G_{c1}(s)$ 、 $G_{c2}(s)$ 來補償。

由於前饋控制器的加入，往往會使系統發生過衝(overshoot)的現象，因此我們必須針對前饋控制器參數作調適的工作。調適的結構是在原來的速度、加速度前饋控制器之前，分別放上增益 P_V 、 P_A ，其中 P_V 、 P_A 的值介於 0 與 1 之間如圖四所示，藉由調整 P_V 、 P_A 的值來降低響應的過衝(overshoot)量。由圖五很明顯的可以看出 P_V 對系統的影響比 P_A 大，因此在作前饋控制器的參數調適時，先調整 P_V ，然後再調整 P_A 。

最後將對所發展之高性能運動控制器進行實機驗證。圖六、七分別為控制器調適前的系統響應圖與跟隨誤差圖；圖八、九分別為控制器調適後的系統響應圖與跟隨誤差圖。用此實驗平台可驗證即時控制核心之可靠度與分析各種控制法則之性能及控制軌跡之精度。

四、結論與討論

在本次研究中，雙CPU (PC 及 DSP) 之主僕 (Master and Slave) 架構來發展一即時運動控制系統，多工核心軟體設計提供複雜的整合介面與伺服控制程式。另外也完成路徑插值、加減速法則、迴授控制器與前饋控制器設計、模擬與實驗。控制效果由實驗驗證獲得極大的改善。

五、參考文獻

[1] "PC-Based CNC 控制器與伺服系統應用技術", 工業技術研究院, 機械工程研究所研討會講義, 84年4月14日

[2] Kolluri, Surya and Tseng, "Simulation of CNC Controller Features in Graphics-Based Programming", Computers in Industry, V. 11, No. 2, pp. 135~146, Jan. 1989

[3] Halpert and David E., "Object Oriented Programming for Motion Control", IEEE Conference of Electrical Engineering Problems in the Rubber and Plastics Industries, Piscataway, NJ, USA., pp. 58~68, 1991

[4] "PMAC User's Manual," Delta Tau Data Systems Inc., CA, 1992

[5] Yasuhiko D., "Servo Motor and Motion Control Using Digital Signal Processors," Prentice Hall and TEXAS Instruments, 1990

[6] Meshkat S., "Parallel DSPs in Open System Improve Machining Accuracy", PCIM, pp. 78~82 Feb., 1995

[7] Meshkat S., "Quantifying System Performance VS DSP MIPS-It's About Time", PCIM, pp. 34~46, May. 1994

[8] David M. A., "Real-Time Software for Control : Program Examples in C," Prentice Hall, 1990

[9] Tzafestas, Spyros G. and Pal J. K., "Real Time Microcomputer Control of Industrial Processes," Dordrecht Kluwer Academic Pub., 1990

[10] Stuart B., "Real-time Computer Control," Prentice Hall, 1994.

[11] Koren Y., and Masory O., "Reference-Pluse Circular Interpolators for CNC Systems ", ASME Journal of Engineering for Industry, vol.103, Feb., pp131-136, 1981

[12] Masory O., and Koren Y., "Reference-Word Circular Interpolators for CNC systems", ASME Journal of Engineering for Industry, vol.104, Nov., pp.400-405, 1982

[13] Koren Y., "Computer Control of Manufacturing System ", McGraw-Hill Co., 1983

[14] Chou J.J., and Yang D.C.H., "Command Generation For Three-Axis CNC Machining", ASME Journal of Engineering for Industry, vol.113, Aug., pp.305-310, 1991,

[15] Chou J.J., and Yang D.C.H., "On the Generation of Coordinated Motion of Five-Axis CNC/CMM Machines", ASME Journal of Engineering for Industry, vol.114, Feb., pp.15-22, 1992

[16] Wilson C. S., " Consideration for Motion Controller Trajectory Generators", intelligent Motion, Proceeding, pp.1-14, Oct., 1990

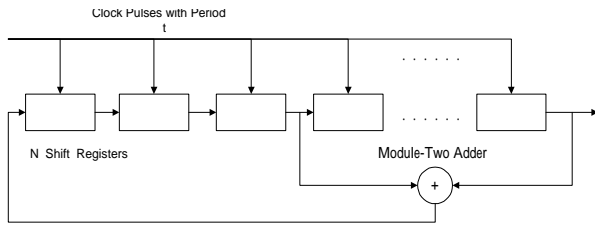
[17] Dharma S. K., "High Performance Motion Control Trajectory Commands Based on The Convolution Integral and Digital Filtering ", Intelligent Motion, Proceeding, pp.54-64, Oct., 1990

[18] Chen C.S. and Lee A. C., "Design of Acceleration/Deceleration Profiles in Motion Control Based on Digital FIR Filters," Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 38, No. 7, pp. 799-825, 1998

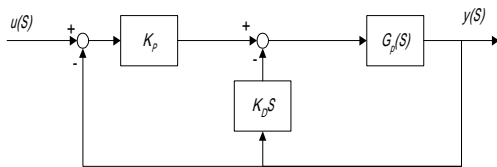
[19] 張道弘, "PID控制理論與實務", 全華科技圖書, 1997

[20] Masory O., "Improving Contouring Accuracy of NC/CNC Systems with Additional Velocity Feed Forward Loop", ASME Journal of Engineering for Industry, vol.108, pp.227-230, 1986

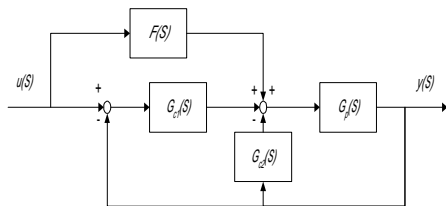
六、圖表



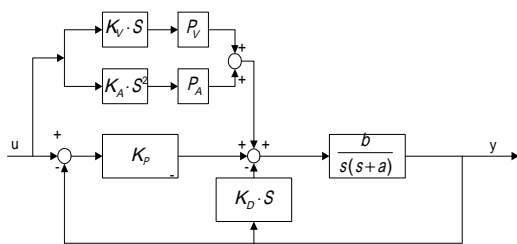
圖一 PRBS 訊號產生迴路



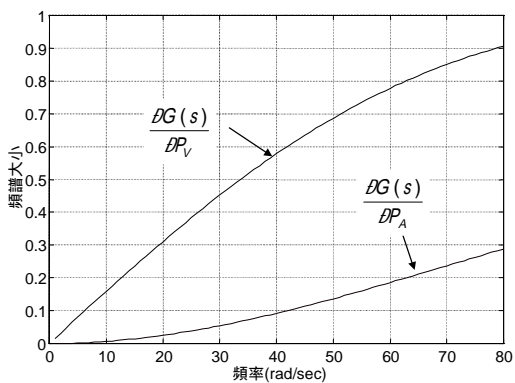
圖二 P-D 伺服控制迴路



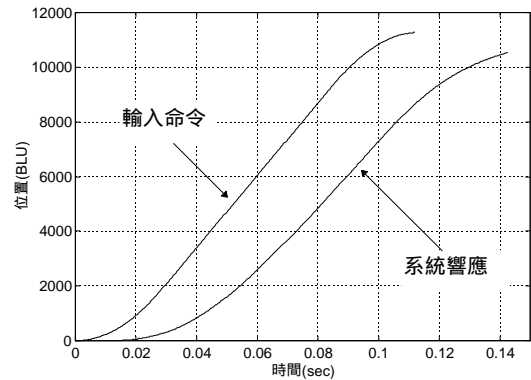
圖三 速度、加速度型前饋控制器伺服迴路



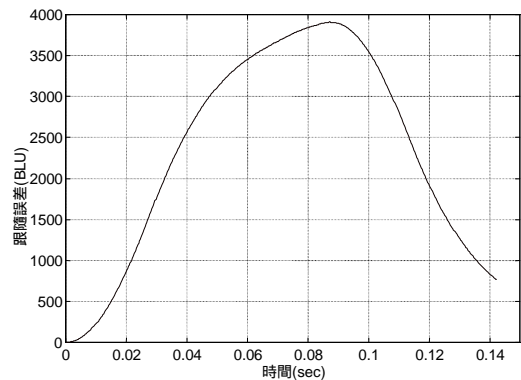
圖四 前饋控制器參數調適結構圖



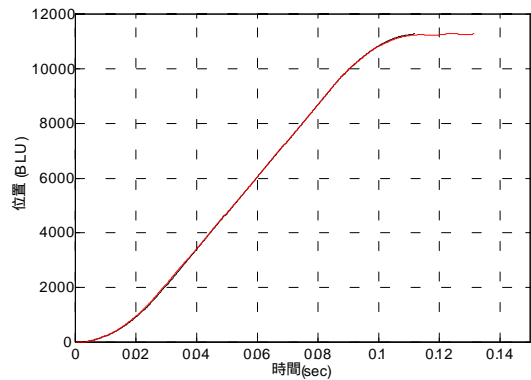
圖五 系統對 P_V 與 P_A 的敏感度頻譜圖



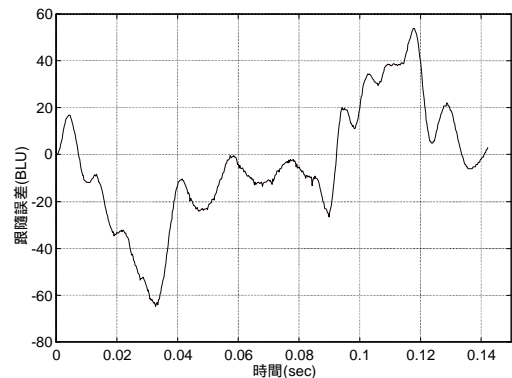
圖六 控制器調適前的系統響應圖



圖七 調適前的跟隨誤差圖



圖八 控制器調適後的系統響應圖



圖九 調適後的跟隨誤差圖