

※※※

※

※ 高精密多軸加工機控制器研發 ※

※

※

※※※

執行期間： 88 年 8 月 1 日至 89 年 7 月 31 日

共同主持人：黃道祥

- ☐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

中 華 民 國 89 年 10 月 31 日

一、中文摘要

在本文中，我們將應用數位干擾觀測器 (Kempf, C.J.; Kobayashi, S.1999) 於整合式精密運動控制器上，以提升運動控制系統在實用上的精密度，為解決以上的問題，我們設計了一個新的數位式干擾觀測器 (Digital Disturbance Observer)，在設計上是直接在離散時間的系統上設計，且在架構上沒有反向受控體，因此大為增加其應用範圍。接著，在實驗上我們加上前置控制器 ZPETC 以補償追跡誤差 (tracking error)，可以發現數位式干擾觀測器降低了干擾對系統的影響而補償了輪廓誤差，並且更提昇了 ZPETC 的效能。而在應用到整合式運動控制器中，更得到最精密之運動精度。

關鍵詞：DDOB，運動精度，整合式控制器

Abstract

Most advanced motion control design algorithms are model-based approaches. However, model uncertainties and external disturbance are unavoidable. Thus, a digital disturbance observer (DDOB) is designed in this paper for reducing those undesirable dynamic effects. In this paper, we also applied the developed DDOB to ZPETC, CCC, and integrated controllers. All results show that the DDOB is effective in ZPETC. Furthermore, the integrated control with the DDOB achieves the best motion accuracy.

Keywords: DDOB, motion accuracy, integrated controller

二、計畫緣由及目的

精準的追跡在運動控制上是非常重要的，尤其是講求品質的現今生活中，對加工的精密度要求很嚴格，因此，降低追跡誤差就成了一個課題。在降低追跡誤差上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 (Tomizuka, 1987; Weck, 1990; Haack, 1991; Tung, 1991)。然而，對實際的數位控制而言，當連續時間系統的受控體 (plant) 之相對階數大於 3，或取樣時間太小時，離散時間系統常成為非最小相位系統 (non-minimum phase system)，亦即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，使包含前置控制器的整合系統能在所有的頻率中維持實際位置輸出與理想位置輸出間無相位差而改善系統的追跡性能。但因為對於不可消除的零點只補償其產生的相位差，ZPETC 並不能保證系統的增益響應。所以 Hsu and Yeh (1998) 提出最佳化之零相位誤差追跡控制器，以改善系統之增益響應。

近年來，disturbance observer (DOB) 漸被應用於運動控制上，因為它在降低外在的干擾上提供了良好的性能，其基本架構如圖 1-1-1 所示。對於干擾 (disturbance) 和參數變化 (parametric variation) 非常敏感的馬達如：直接驅動

的馬達(Direct Drive motor)，在控制上是相當不易的。因此，為了獲得更快且精準的運動控制，對干擾和參數變化的補償是必須的。

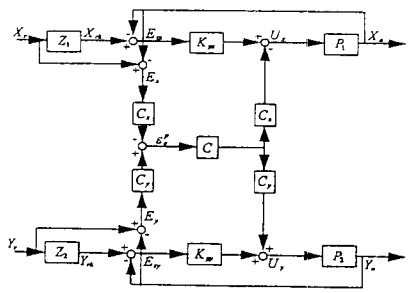
藉由簡單的運算，observer 可以估算出馬達的干擾和參數變化，估算出來的干擾包含了接觸造成的負載變化、轉矩連波、磨擦力、反作用力等，還有相互作用的力如萬有引力。而 DOB 是將所有干擾視為未知來進行估測補償，因此，如果轉矩連波、磨擦力等不是必須知道的話，那 DOB 可以提供很好的效能。

在克服外界的干擾如磨擦力等，最常見的就是以整體系統來設計觀測器(observer)以改變馬達扭力的方式進行補償，有許多的理論可應用，如模糊理論(fuzzy)、類神經網路(neural network)、適應控制(adaptive control)與穩健控制(robust control)。而 DOB 是一種設計簡單，能提供良好效能並且降低外在雜訊干擾的一種方法。1996 年 Tomizuka 提出連續時間系統下的 DOB，但其在實現上，存在著一些問題，有人提出了 digital disturbance observer (DDOB) 的設計方式，直接在離散時間系統下設計 (Kempf, C.J.; Kobayashi, S.1999)，但其存在反向受控體 (inverse plant) $G_n^{-1}(z^{-1})$ ，會限制了系統的模型的選取，而降低了 DDOB 的應用範圍。在本文中，提出一個新的 DDOB 設計方式，直接在離散時間系統下設計，以解決以往在連續時間系統下設計的缺點。並且提出新的架構，解決反向系統的穩定問題，使整個架構能符合各種系統的模型，而能應用於各種不同的機台上，不受限制。

二、研究方法

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

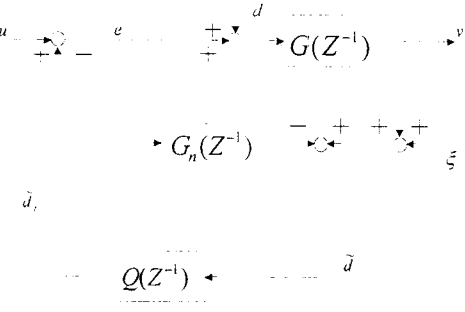
交叉耦合控制器。



圖一、 整合運動控制架構

● 新的 DDOB 架構與設計

考慮圖二，我們假設輸入命令為 u ，系統速度輸出為 v



圖二、 新的 DDOB 架構

$$v = G(z^{-1})(e + \delta)$$

$$e = u - Q(z^{-1})(v + \xi - G_n(z^{-1})e)$$

如此可推導得

$$e = \frac{u}{1 - Q(z^{-1})G_n(z^{-1})} - \frac{Q(z^{-1})}{1 - Q(z^{-1})G_n(z^{-1})}v - \frac{Q(z^{-1})}{1 - Q(z^{-1})G_n(z^{-1})}\xi$$

$$v = \frac{G(z^{-1})}{1 - Q(z^{-1})G_n(z^{-1}) + Q(z^{-1})G(z^{-1})}u + \frac{G(z^{-1})(1 - Q(z^{-1})G_n(z^{-1}))}{1 - Q(z^{-1})G_n(z^{-1}) + Q(z^{-1})G(z^{-1})}\delta + \frac{Q(z^{-1})G(z^{-1})}{1 - Q(z^{-1})G_n(z^{-1}) + Q(z^{-1})G(z^{-1})}\xi$$

如果 filter $Q(z^{-1})$ 設計成 $Q(z^{-1})G_n(z^{-1}) = 1$

$$\text{則 } v = G_n(z^{-1})u - \xi$$

如果 filter $Q(z^{-1})$ 設計成

$$Q(z^{-1})G_n(z^{-1}) = 0$$

$$\text{則 } v = G(z^{-1})u - G(z^{-1})\delta$$

因此，filter $Q(z^{-1})$ 就必須被設計成如下所示

$$\begin{cases} Q(z^{-1})G_n(z^{-1}) = 1 & , \text{在低頻區域} \\ Q(z^{-1})G_n(z^{-1}) = 0 & , \text{在高頻區域} \end{cases}$$

以便消除外在干擾與量測雜訊。而 $Q(z^{-1})$ 又跟一般受控體 $G_n(z^{-1})$ 有關，所以 $Q(z^{-1})$ 的設計包含三個功能 (1)極零點對消 (pole-zero cancellations) (2)全通濾波器(all-pass filter) (3)低通濾波器 (low-pass filter)[15]。

$$\text{令 } G_n(z^{-1}) = \frac{N_n(z^{-1})}{D_n(z^{-1})}$$

分解一般受控體的分子 $N_n(z^{-1})$ 如下

$$N_n(z^{-1}) = N_n^a(z^{-1})N_n^u(z^{-1})$$

其中

$N_n^a(z^{-1})$ ：為可接受多項式(Acceptable Polynomial)，是由 $N_n(z^{-1})$ 多項式中穩定的零點所組成的多項式

$N_n^u(z^{-1})$ ：為不可接受多項(Unacceptable Polynomial)，是由 $N_n(z^{-1})$ 多項式中不穩定的零點所組成的多項式

假設不可接受多項式(Unacceptable Polynomial) $N_n^u(z^{-1})$ 可以表示如下：

$$\begin{aligned} N_n^u(z^{-1}) &= b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_m z^{-m} \\ &= z^{-m} (b_1 z^{m-1} + b_2 z^{m-2} + \dots + b_m) \\ &= z^{-m} \hat{N}_n^u(z) \end{aligned}$$

如此就可以設計 filter $Q(z^{-1})$ 如下：

$$Q(z^{-1}) = \frac{D_n(z^{-1})}{N_n^a(z^{-1}) \cdot [\hat{N}_n^u(z)]^*} \cdot LPF(z^{-1})$$

而 $[\bullet]^*$ 表示複數共軛運算子(complex conjugate operator)

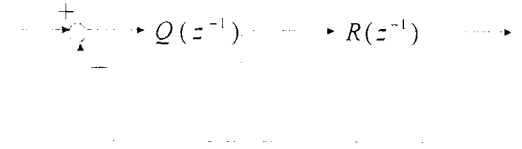
$$[\hat{N}_n^u(z)]^* = (b_1 z^{-(m-1)} + b_2 z^{-(m-2)} + \dots + b_m)$$

是穩定且可實現的。且 $\frac{N_n^u(z^{-1})}{[\hat{N}_n^u(z)]^*}$ 形成

一個穩定的全通濾波器。

$$Q(z^{-1}) \cdot G_n(z^{-1}) = \frac{N_n^u(z^{-1})}{[\hat{N}_n^u(z)]^*} \cdot LPF(z^{-1})$$

就可以獲得我們想要得到的頻率響應。



圖三、等效回授系統 S

四、結論與成果

我們將進行 DDOB 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 DDOB 在輸入不同之速度的圓命令後，觀察其之追蹤誤差及輪廓誤差，用以比較其特性。之後再比較各個控制器對運動控制的影響，觀察其結果。我們所比較的控制器有(1)傳統 P 迴授控制器 (2)P+DDOB(3)P+CCC(4)P+ZPETC+DDOB(5) 整合運動控制器 (P+ZPETC+CCC)(6) P+ZPETC+CCC +DDOB。最後，我們加上負載作測試，探討負載對各控制器造成的影響為何。

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，並以本實驗室自製之 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。

表一、二為各控制器的比較，由此表中我們可以很輕易的知道各控制器的精密度是否改善以及其受負載的影響與否。其中，以

P+ZPETC+CCC+DDOB 之複合式 (Hybrid) 控制器能達成最佳精度並且不受負載影響。

表一、不同速度下，不同控制架構之效能 (TE: tracking error, CE: contouring error, 單位: mm)

		P	P+ DDOB	P+ ZPETC	P+ CCC	P+ ZPETC+ DDOB	P+ ZPETC+ CCC	P+ ZPETC+ CCC+ DDOB
1200mm/min								
TE	RMS	0.1843	0.1665	0.0274	0.1812	0.0023	0.0165	0.0017
	Max	0.1991	0.1753	0.0535	0.1957	0.0170	0.0419	0.0099
CE	RMS	0.0227	0.0019	0.0157	0.0021	0.0019	0.001	0.0009
	Max	0.0460	0.0042	0.0408	0.0057	0.0043	0.0044	0.0065
Roundness		0.0995	0.0204	0.0923	0.0135	0.0212	0.012	0.0111
2500mm/min								
TE	RMS	0.3229	0.3392	0.0288	0.3207	0.0032	0.0140	0.0022
	Max	0.3471	0.3596	0.0597	0.3476	0.0217	0.041	0.0121
CE	RMS	0.0208	0.0025	0.0210	0.0034	0.0025	0.003	0.0013
	Max	0.0400	0.0049	0.0421	0.0067	0.0049	0.003	0.0070
Roundness		0.0922	0.0277	0.0944	0.0141	0.0257	0.010	0.0139
5000mm/min								
TE	RMS	0.5733	0.6503	0.0856	0.5682	0.0055	0.034	0.0037
	Max	0.6386	0.7162	0.1164	0.6346	0.0265	0.139	0.0207
CE	RMS	0.0213	0.0036	0.0222	0.0038	0.0032	0.004	0.0021
	Max	0.0435	0.0125	0.0405	0.0073	0.0094	0.003	0.0077
Roundness		0.0926	0.0307	0.0940	0.0201	0.0311	0.012	0.0168

表二、速度 1200mm/min，加上負載後，不同控制架構之效能

		P	P+L+D B	P+ ZPETC	P+CCC	P+ ZPETC+ DDOB	P+ ZPETC+ CCC	P+ ZPETC+ CCC+ DDOB
TE	RMS	0.1843	0.1665	0.0274	0.1812	0.0023	0.0165	0.0017
	Max	0.1991	0.1753	0.0535	0.1957	0.0170	0.0419	0.0099
	RMS	0.1875	0.1665	0.0366	0.1841	0.0026	0.0197	0.0019
	Max	0.2055	0.1751	0.0752	0.2006	0.0267	0.0662	0.0138
CE	RMS	0.0159	0.0019	0.0157	0.0021	0.0019	0.001	0.0009
	Max	0.0460	0.0042	0.0408	0.0057	0.0043	0.0044	0.0065
	RMS	0.0304	0.0023	0.0306	0.0022	0.0022	0.0012	0.0011
	Max	0.0694	0.0055	0.0725	0.0054	0.0051	0.0037	0.0075
Rn	未加	0.0995	0.0204	0.0928	0.0135	0.0212	0.0142	0.0111
	加載	0.1404	0.0305	0.1460	0.0162	0.0318	0.0152	0.0130

計畫結果自評：

1.P+ZPETC 能確實改善追跡誤差，但並不一定能改善輪廓誤差，且在加上負載後，因為 ZPETC 是 model-base 的控制器，所以當有外在因素

造成模型的不一至時，會降低 ZPETC 的效能。所以其追跡誤差及輪廓誤差都明顯受到負載影響而變大。

- 2.P+CCC 可以明確的改善輪廓誤差，但並不一定能改善追跡誤差，而在加上負載後，對追跡誤差以及輪廓誤差的影響並不大。
- 3.P+ZPETC+DDOB 的控制架構，因為加入了 DDOB 抑制了干擾對系統所造成的影響，因此輪廓誤差有明顯的改善，並降低了干擾造成的模型不準確性，使得 ZPETC 更能發揮效能，對於追跡誤差有更顯著的改善，且加上負載後的影響都不大。
- 4.整合運動控制器則是結合 ZPETC 以及 CCC 兩者的優點所設計出來的控制架構，對於追跡誤差以及輪廓誤差都有顯著的改善，而加上負載後的影響也不大。
- 5.在結合整合運動控制器以及 DDOB 後，可以發現，在追跡誤差以及輪廓誤差上都有極顯著的改善，且負載對其影響都不大。
- 5.速度增加時，追跡誤差明顯的也增大，而 P+ZPETC+DDOB 以及整合運動控制器+DDOB 因為有良好的追跡精度，所以增加幅度並不明顯。
- 6.在輪廓誤差上，速度增加，輪廓誤差的增加幅度並不明顯，而在高速時，我們發現整合運動控制+DDOB 的輪廓誤差精度反而稍差於整合運動控制器。顯然，速度越高時，其模式之不準確性以及各軸間的匹配問題益形重要。整體而言，比較整合運動控制器以及 P+ZPETC+DDOB，後者的輪廓誤差精度是前者的一倍，而追跡誤差則僅為前者的 1/5，且架構也易設計。因此，如果對兩者要求都極嚴格，則 P+ZPETC+DDOB 的架構是個不錯的選擇，或進一步可選擇結合整合運動控制器+DDOB 的架構。

7.本研究計畫成功的設計了精密的運動控制系統，並在有負率之情況下，仍能達成運動精度。

六、參考資料

- [1] 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).
- [2] 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).
- [3] 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).
- [4] Kempf, C.J.; Kobayashi, S. "Disturbance observer and feedforward design for a high-speed direct-drive positioning table" Control Systems Technology, IEEE Transactions on Volume: 7 5, Sept. 1999, Page(s): 513 -526
- [5] S.Endo,H.Kobayashi,C.J.Kempf,S. Kobayashi,M.Tomizuka and Y.Hori "Robust Digital Tracking Controller Design for High-speed Positioning Systems" Control Eng. Practice, Vol .4,No.4 pp.527-536,1996
- [6] Ho Seong Lee; Tomizuka, M. "Robust motion controller design for high-accuracy positioning systems" Industrial Electronics, IEEE Trans. Volume: 43, No. 1, Feb. 1996, Page(s): 48 -55
- [7] Komada, S.; Ishida, M.; Ohtsuki, K.; Hori, T. "Disturbance observer-based motion control of direct drive motors" Energy Conversion, IEEE Transactions on Volume: 6 3, Sept. 1991, Page(s): 553 -559
- [8] Pierre E.Dupont "Avoiding Stick-slip Through PD control" IEEE Transactions on Automatic Control Vol.39, No.5, May 1994
- [9] Hamada, Y.; Otsuki, H. "Repetitive learning control system using disturbance observer for head positioning control system of magnetic disk drives" Magnetics, IEEE Transactions on Volume: 32 5 2, Sept. 1996, Page:5019 -5021
- [10] Komada, S.; Nomura, K.; Ishida, M.; Hori, T. "Robust force control based on compensation for parameter variations of dynamic environment" Industrial Electronics, IEEE Transactions on Volume: 40 1, Feb. 1993, Page(s): 89 -95
- [11] Iwasaki, M.; Shibata, T.; Matsui, N. "Disturbance observer-based nonlinear friction compensation in table drive system" Advanced Motion Control.1998. AMC '98-Coimbra., 1998 5th International Workshop on, 1998, Page(s): 299 -304
- [12] Ishikawa, J.; Tomizuka, M. "Pivot friction compensation using an accelerometer and a disturbance observer for hard disk drives" Mechatronics, IEEE/ASME Trans. on Volume: 3 3, Sept. 1998, Page(s): 194 -201
- [13] White, M.T.; Tomizuka, M.; Smith, C. "Improved track following in magnetic disk drives using a disturbance observer", Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on Volume: 5, March 2000, Page(s) : 3 - 11
- [14] 張裕淵, "整合精密運動控制器與NURBS插值器之CNC設計", 交通大學電機與控制工程系碩士論文, 民國88年
- [15] 葉賜旭, 「多軸運動系統之整合式控制器及參數化插值器設計」, 國立交通大學, 博士論文, 民國89年
- [16] Satoshi Komada, Noriyoshi Machii, and Takamasa Hori "Control of Redundant Manipulators Considering Order of Disturbance Observer" Industrial Electronics, IEEE Transactions on, Volume: 47, No. 2, April 2000 413.