

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

視覺回授與馬達控制整合系統之設計與實現

計畫編號: NSC 91-2213-E-019-005

執行期限: 91/8/1 - 92/7/31

主持人: 鄭智湧 海洋大學電機系

摘要

本計畫結合電腦視覺技術與馬達運動控制, 其中利用影像的回授, 達到即時控制的目的。計畫中所架設的桿上球系統, 為一非線性且不穩定的系統, 因此更可以驗證計畫中控制法則之實用性。

關鍵詞

視覺回授, 即時控制系統, 非線性不穩定系統, 直流無刷馬達控制, 控制器設計。

1 研究動機

機電整合與馬達控制一直是工業生產中一個重要的環節, 而回授的技術與控制器的設計更是達到高性能控制的關鍵。而本論文的方向即是希望利用電腦視覺或影像取得回授之資訊, 來完成即時控制的目標。另外為了研究視覺回授架構的可行性, 本論文設立一桿上球的系統, 此為一非線性且不穩定的系統, 因此更加可以驗證視覺回授即時控制的目標。

引進電腦視覺或影像資料來做回授, 最明顯而直接的優點, 就是我們甚至不需接觸或接近受控體本身。因此利用此方式不會影響系統原本的運作, 也免除了傳統架構中有時因遷就感測器裝置的方便而使受控體受到限制的狀況。又因為影像高精密度的感測, 更可以達到肉眼難以辨識的高精密控制。

影像的利用在工業界中也有許多的應用。例如影像定位可利用在一些不利於人類工作的環境中, 如高溫或具高危險性的焊接或組裝工程, 可以利用影像的輔助來完成工作。但本論文中對視覺或影像回授, 除了量測精密度的要求外, 更增加了即時的需求, 因此有更高的挑戰性。

2 系統架構

為了能夠實際的驗證影像回授在運動控制中的功能, 本論文建立以下之桿上球實驗平台。我們將系統硬體的架構, 由上而下, 分為幾個層次來說明, 如 Figure 1 所示:

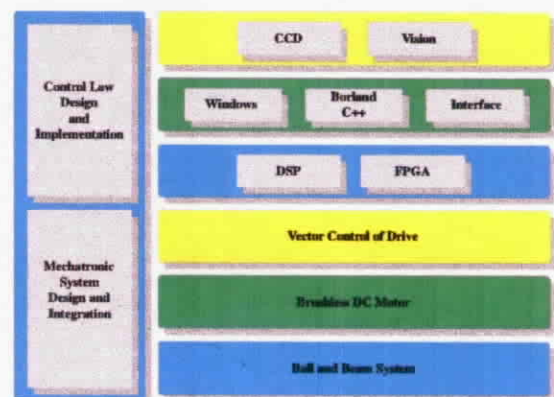


Figure 1: 視覺回授控制系統硬體架構圖

將此系統硬體的架構, 簡單地以方塊圖表示各子系統如何連接形成回授的控制系統, 如 Figure 2 所示。



Figure 2: 視覺回授控制系統方塊圖

3 馬達伺服控制

此論文的受控體是以直流無刷馬達做為驅動的機制。一般的直流馬達，由於其中的電刷及換相器的接觸，造成磨損與火花，不但降低電動機的壽命，也會引起電氣雜訊或其他的危險。直流無刷馬達，它藉由非接觸式的位置檢測器，和半導體元件，來完成電流的換相。也由於其特殊的結構，直流無刷馬達不管在驅動與運動控制上的難度，也較一般的直流馬達相對的提升。為了達到直流無刷馬達位置與速度的控制，將採用向量控制的方式。也因為此理論的主要基礎是藉著座標轉換技巧，適當控制馬達中的電流，其中包含的運算較為複雜，因此在馬達控制的部分，將使用數位訊號處理器(DSP) 來處理。

本論文中的馬達驅動控制採用如 Figure 3 的架構，其中由內而外包括電流，向量，速度，與位置等四大迴路加以回授並控制之。

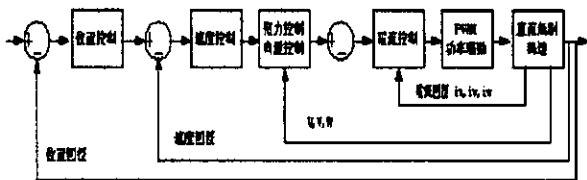


Figure 3: 直流無刷馬達控制系統方塊圖

在本論文的硬體架構中，所使用的直流無刷馬達是 Dynamo 公司所生產的，型號為 (130- 300MS-ZK- L2)，具有 375W/ 0.5HP, 12 cm-Kg, 3000 rmp 等特性。而使用的控制晶片，則是 TI 所生產的 TMS320F243。TI 的 24X 系列是針對馬達控制所設計的 DSP，其除了具備傳統微處理器外，更外加類比/數位轉換器 (ADC)，脈波寬調變器 (PWM)，計數器，計時器，及 QEP 電路，可以加速我們的研發過程。

4 電腦視覺與回授

在論文中的桿上球控制系統控制器可細分為兩個階層，一為較底層的向量控制驅動控制器，已在前一節中討論，另一則為較上層的運動控制器，我們將利用視覺回授的架構完成。而由於桿上球系統基本上是個不穩定而且是非線性的系統，使用視覺回授即時資訊的運動控制器設計，在此扮演著非常重要的角色。

引進電腦視覺或影像資料來做回授，最明顯而直接的優點，就是我們甚至不需接觸或接近受控體本身。但是相對的，視覺回授的最大疑慮，來自於當感測快

速移動中的物體可能引起的延遲。由於受到影像取樣的限制，我們所謂即時，指的是在相鄰兩次影像取樣中間的時間中，能夠完成將回授資訊處理並計算出所需的控制量的運算。為了考慮到即時的需求，除了將影像處理的運算盡量簡化外，並將一些計算的工作分配，由個人電腦處理影像和主體控制的部分，數位訊號處理器處理馬達控制的部分。

在本論文硬體實現中，使用 CCD Camera 搭配影像擷取卡的架構。採用的 CCD 是 HITACHI 的 KP-M2，其輸出為標準的 NTSC 黑白視訊。而影像擷取卡是 Matrox 所生產的 Meteor-2/Multi-Channel，它的通訊介面透過 PCI 插槽有 4 個輸入通道，其數位化後的資料寬度為 8bits，最高傳輸速度更可達到 130MB/sec。至於影像處理和控制器補償的程式部分則以 Borland C++ Builder 為工具。

所以取樣速度受到視窗作業系統資源分配的影響，因此，在影像處理的程序上勢必盡其簡單，以最少的處理時間取得所需要的資訊。我們除了在桿子和馬達之間加上黑色帷幕，以避免複雜的影像分離運算外，光源投射的角度也要經過仔細的考量，以避免因為光場的不均勻而造成不必要陰影，直接影響到影像的判讀。整個系統架構如 Figure 4 所示。

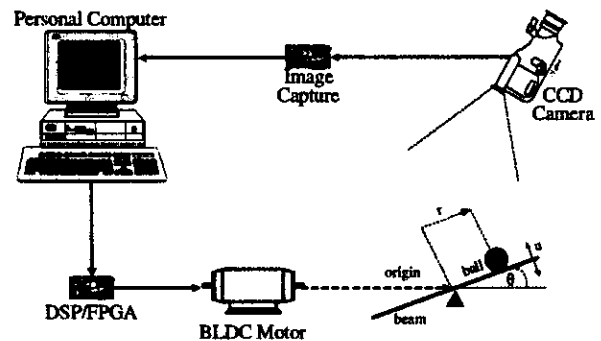


Figure 4: 視覺回授控制系統硬體架構圖

4.1 影像處理

當我們透過 CCD Camera 攝像，再經過影像擷取卡數位化後所取得的數位影像，除了包括我們所需要的資訊外，同時也夾雜了相當的雜訊。所以判別資訊之前，要先將原始影像做先期的影像處理作業，以去除雜訊並且將目標物和背景順利的分開。在處理的程序和方法上，因為馬達和桿上球機構之間存在著帷幕，所以事實上目標物和背景之間已經有著某種程度的區隔。在時間的考量下，我們只執行幾個必要且簡潔的前期影像處理。如二值化，反白運算，和開閉運算。

經實驗結果證明，此一程序能夠順利達到影像分離的目的。

由於處理影像目的的不同，其所需的處理方法也不同，所以針對不同目的建立相關的影像表示及處理模式是非常重要的。一般影像可以用空間領域和頻率領域表示。由於一般頻率領域的表示需要再經過轉換，鑑於即時處理的需求，本論文所採用的方法為在空間領域中的影像上直接找尋影像的特性，以縮短所需的時間。

4.2 視覺回授

在完成影像擷取與前期的影像處理後，我們已經可以把目標物體與背景分離(如 Figure 5 所示，且目標物上所有的像素值為 0，背景的像素值為 255)，接下來的目標就是資料的判別了，以求得我們所需要的回授資訊。

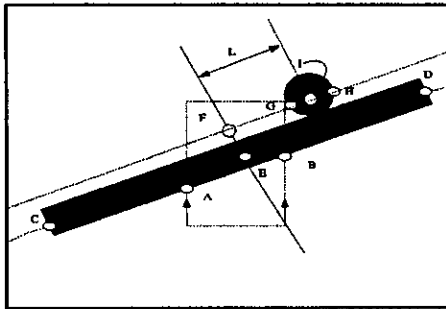


Figure 5: 視覺圖樣判別法則

對於一個桿上球系統而言，所需要的回授信號是桿子的角度和球的位置。為了減少影像處理的時間，輸入的影像大小為 320×240 。在此固定解析度之下，如果桿子在影像中所顯示的面積越大，則判斷出來的桿子角度和球位置的精確度越高。因此要調整焦距直至一個 360 度旋轉的桿子影像能充滿整個畫面，可是卻又不至於突出畫面為止。

首先，可以假設桿子的中心點必然離影像的中心點不遠。因此我們可以先以影像的中心點為一虛擬矩形的形心，並依此矩形左右兩邊的點同時由下往上搜尋第一個黑點（像素值為 0），而得到了如圖 5 所示的“ A ”、“ B ”兩點。因為“ A ”、“ B ”兩點皆為桿子下緣的點，所以可以藉由簡單的計算即可得到第一個整個系統迴路中的回授值—桿子的角度。

在找到了桿子的角度以後，我們以 \overline{AB} 為標的，在其上方兩像素距離的地方劃一平行線。此平行線左起影像的左邊緣，右至影像的右邊緣，所以此一線段必定貫穿桿子的影像。當我們自左邊依序點搜尋

時，當找到第一個黑點時標定為“ C ”，在“ C ”點之後遇到的第一個白點標示為“ D ”。由圖 5 可以觀察到，“ C ”、“ D ”兩點即是桿子的兩端，因此我們可以經計算後求出桿子實際所佔的像素長度並標示出“ E ”點，也就是桿子的中心。

求出了桿子的中心後，我們以其為標的，繪出垂直於 \overline{AB} 的中垂線，並且將在距 \overline{AB} 上方 15 像素距離的點標示為“ F ”點。“ F ”點應該會出現在桿子的上方，我們如畫出貫穿桿子影像的線段一樣，也以 \overline{AB} 為標的劃出平行線，如果此時桿子上有球存在的話，那此一線段必定會貫穿球的影像。就猶如圖 5 所標示的一樣，透過找尋桿子中心點的方法，同樣地可以標示出“ G ”、“ H ”兩點。當然，球的中心點 I 也就順利的搜尋出來了。至於第二個整個系統迴路中的回授值—球的位置，也就是 \overline{FI} 的長度“ L ”了。

以上是視覺判別法則的基本架構，若有其他的考量，也可以此為基礎加以修改。Figure 6 顯示了幾種不同的角度下，此法則運作的狀況。

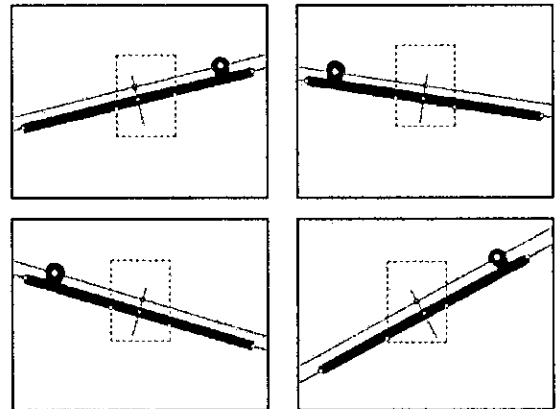


Figure 6: 實際影像判別圖

5 控制器設計與實驗結果

在硬體完成之後，接著要設計的，就是如何實現視覺回授桿上球系統的控制器了。一般來說，對非線性不嚴重的系統，我們可以首先在平衡點附近，利用線性化的方法，找出其線性的模式，接著可利用線性控制的方式設計出局部穩定的線性控制器。

但如果系統本身有著較顯著的非線性，或是系統控制目標是大範圍的控制，當系統跑出線性的範圍之後，非線性的特性逐漸主導系統，使得線性的控制器不敷使用。因此想要在平衡點附近做更大區域的控制，非線性控制器的使用可能很難避免。

在本論文中，我們嘗試去使用切換式的控制器來將系統操作的範圍擴大。其基本的概念是類似粗微調的方式，當此時的狀態離開我們理想的軌跡尚有極大的差距，先使用粗調的控制器，目標只是將狀態向正確的大方向引導，當系統的狀態進入到追蹤軌跡的附近，再啟動微調控制器，使追蹤軌跡的工作能達到更精密的境界。在此，我們嘗試了幾種不同的控制方法：PID 控制器、切換式 PID 控制器、模糊控制器、模糊-積分控制器，結果我們分述如下。

5.1 傳統PID 控制器

因為桿上球系統先天的不穩定性，我們可以先利用 PD 控制器使系統趨於穩定，再利用積分控制器得到較佳的收斂結果。實驗的結果如 Figure 7 所示。由

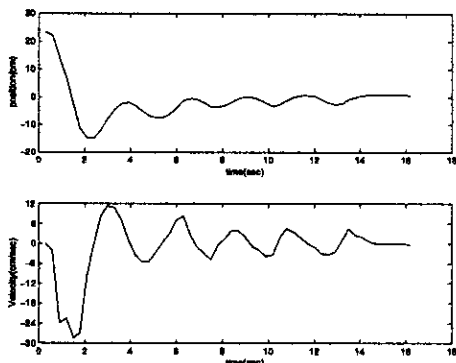


Figure 7: PID 控制器實驗結果

於 PID 控制器為一線性的控制器，它的缺點是當球的初始位置離中心點太遠時，球的軌跡會有很大的超越量，甚至系統會產生不穩定的現象，而使得球滾出桿子。

5.2 切換式PID 控制器

在上一小節的 PID 響應圖中，我們發現其最大超越量約百分之五十到七十之間，這是因為積分控制從起始點開始積分，當上升曲線第一次通過命令線的時候，必須先抵消掉先前的積分量，所以才會發生如此的現象。為改善這個情形，我們把積分器的啟動時間延遲到上升曲線第一次通過命令線的時候，希望既能保有暫態的優點，又以積分控制來改善穩態誤差，此簡單的概念如 Figure 8 所示。

Figure 9 是改良型 PID 控制器的響應圖。我們可以觀察到，其響應的最大超越量已有改善，從百分之五十以上下降到百分之二十以內。

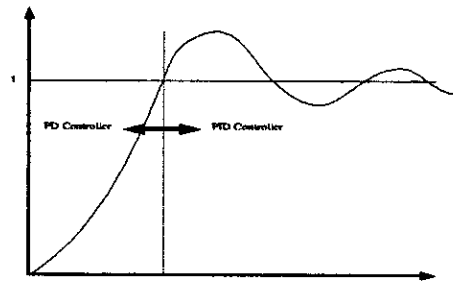


Figure 8: 切換式PID 控制器示意圖

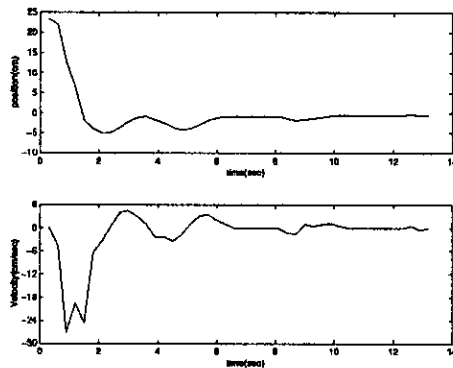


Figure 9: 切換式PID 控制器實驗結果

5.3 模糊控制器

模糊控制理論提供了將經驗規則轉成控制演算法的架構。由一些實際的應用中顯示，模糊控制器在受控體非常複雜或者數學模式難以求得的情況下，提供設計者另一項選擇或思考方向。本論文中所採用的模糊規則如 Figure 10 所示。

	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
PV	-18	-12	-6	0	6	12	18
NB	45	NB	NM	NM	NS	ZO	PS
NM	30	NB	NM	NS	NS	PS	PS
NS	15	NM	NM	NS	ZO	PS	PM
ZO	0	NM	NM	NS	ZO	PS	PM
PS	15	NS	NS	ZO	PS	PM	PB
PM	30	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PB	45	NS	ZO	PS	PM	PM	PB

Figure 10: 模糊控制法則

Figure 11 是模糊控制器的響應圖。由圖上可以觀察到，波形震盪區域大約介於 (0,-10) 之間，即使有收斂的傾向，也非收斂於 0 的位置，明顯存在著穩態誤差。會發生這個結果的原因，在於我們控制器的輸入量為位置和速度，所以此一控制器類似於增益控制和微分控制，雖然可以將系統穩定，卻無法有效消除穩態誤差。

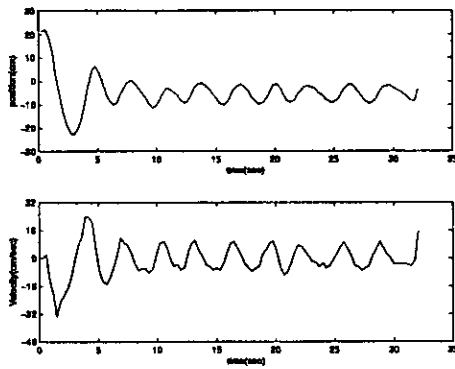


Figure 11: 模糊控制器實驗結果

5.4 模糊-積分控制器

前一小節所設計的模糊控制器，事實上是一PD型模糊控制器，而我們在實際應用時可以發現其輸出波形存在著穩態誤差，為改善此一情況所以在模糊控制器外部並聯加了一個積分(I)控制器。

會產生穩態誤差的原因，除了PD型模糊控制器本來就會有穩態誤差存在外，最重要的因素在於我們沒有辦法肯定 CCD Camera 所攝取的影像中“X”軸是真正的水準線。這個現象會造成在我們從影像中判斷桿子的角度值會存在於固定的誤差，每次移動過設備後誤差值也跟著改變，而使球在滾動的時候有偏重於某一邊的傾向，甚至無法收斂到一定的範圍內。因此加入一個積分控制以消除此一誤差值。Figure 12 即是增加積分控制的響應。由實際的響應圖可以觀察的到，積分控制的影響十分顯著。

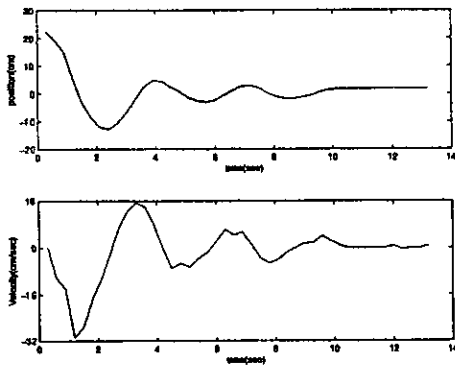


Figure 12: 模糊-積分控制器實驗結果

References

- [1] S. Hutchinson, G. D. Hager, and P. I. Corke, "A Tutorial on Visual Servo Control," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 12, pp. 651-670, 1996.
- [2] "Dynamic Effects in Visual Closed-loop Systems," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 12, pp. 671-683, 1996.
- [3] J. R. Parker, *Algorithms for Image Processing and Computer Vision*, John Wiley & Sons, 1997.
- [4] P. Vas, *Vector Control of AC Machines*, Oxford University Press, 1990.
- [5] W. Leonhard, *Control of Electrical Drives*, Springer-Verlag, 1997.
- [6] J. Hauser, S. Sastry, and P. V. Kokotovic, "Nonlinear Control via Approximate Input-Output Linearization: The Ball and Beam Example," *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 37, pp. 392-398, 1992.
- [7] R. Sepulchre, M. Jankovic, and P. V. Kokotovic, *Constructive Nonlinear Control*, Springer-Verlag, 1997.
- [8] K. Zhou, J. C. Doyle, and K. Glover, *Robust and Optimal Control*, Prentice Hall, 1996.
- [9] R. N. Shorten and K. S. Narendra, "Investigating the Stability of a Class of Hybrid System," *Computing & Control Engineering Journal*, pp. 81-88, April, 1998.
- [10] D. Liberzon and A. S. Morse, "Basic Problems in Stability and Design of Switched Systems," *IEEE Control Systems Magazine*, pp. 59-70, Oct. 1999.