

# 國立交通大學

## 電機與控制工程研究所 碩士論文

發展先進運動控制之 CAD 及其於精密 CNC 之實現  
Development of the CAD for Advanced Motion Control  
and Its Realization on High-Precision CNC

研究生：蔡政宏

指導教授：徐保羅 博士

中華民國九十三年七月

發展先進運動控制之CAD及其於精密CNC之實現

Development of the CAD for Advanced Motion Control and Its  
Realization on High-Precision CNC

研 究 生：蔡 政 宏

Student : Zheng-Hong Tsai

指 導 教 授：徐 保 羅 博 士

Advisor : Prof. Pau-Lo Hsu

國 立 交 通 大 學

電 機 與 控 制 工 程 學 系



Submitted to Department of Electrical and Control Engineering

College of Electrical Engineering and Computer Science

National Chiao-Tung University

in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master

in

Electrical and Control Engineering

September 2001

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中 華 民 國 九 十 三 年 七 月

# 發展先進運動控制之 CAD 及其於精密 CNC 之實現

研 究 生：蔡政宏

指 導 教 授：徐保羅

國立交通大學電機與控制工程研究所

## 摘 要

近年來，許多相當成功的控制理論紛紛問世，然而工業界的運動控制當中，大部份均停留於使用 PID 控制器階段，其不採用先進控制理論之原因眾多，其中之一乃為迄今無一橋樑聯絡學術與工業界之間的隔閡。本文提出一電腦輔助之控制器設計與模擬軟體 CAD，透過低價位之定點 DSP 實現於 CNC 機台，完成精密運動控制，使控制系統具備良好的追跡能力、輪廓精度以及抗擾動能力。

本文採用前置控制器以改善控制系統的追跡性能。繼而為了對付各軸不一致的動態響應，加上交叉耦合控制器(cross coupled control, CCC)以降低其輪廓誤差。而為了確保所設計的控制器在實用上能有效降低模式誤差及外在負載等因素，進一步引入數位式擾動觀測器(digital disturbance observer, DDOB)。線性運動控制器固然有高的頻寬及穩健性，可在高速運轉下保有良好的運動精密度，但卻無法消除因為摩擦力所產生的非線性 slip-stick 現象，本文發展了摩擦力識別與補償器(nonlinear friction compensator, NFC)，將非線性的誤差進一步消除。

本文所設計之 CAD 軟體包含三個線性控制器及一個非線性摩擦力補償器之設計，並與德州儀器公司之 Code Composer Studio 結合，自動產生 DSP TMS320F2812 控制器函式實現在 DYNA MYTE 1007 CNC 工具機上，實驗結果指出其精密度遠勝過一般工業用控制器，工具機輪廓誤差能有效的由原有的  $18.2\ \mu m$  達到  $4\ \mu m$  的精密運動控制效能。

# Development of the CAD for Advanced Motion Control and Its Realization on High-Precision CNC

Student : Zheng-Hong Tsai

Advisor : Prof. Pau-Lo Hsu

Institute of Electrical and Control Engineering  
National Chiao Tung University

## ABSTRACT

Although many modern control algorithms were proposed recently, manufacturing still prefers the PID control because of its easy and reliable applications. In this thesis, a user-friendly computer aided design (CAD) software for advanced motion control is proposed and the DSP code is automatically generated for computerized numerical control (CNC) machine tools to achieve both tracking and contouring accuracy against external disturbance and mechanical friction. The feedforward controller is adopted to improve tracking performance and the cross-coupling control (CCC) is employed to cope with the contouring error. Moreover, the digital disturbance observer (DDOB) is included to decrease the modeling error and the effect of external disturbance. However, the slip-stick and quadrant glitches phenomena still cannot be successfully eliminated by applying the linear controllers. Therefore, a non-linear frictional compensator (NFC) is developed in this thesis to effectively reduce the contouring error caused by friction.

In this thesis, the present CAD software includes controller design and simulation of three linear controllers and one non-linear frictional compensator. The code of Texas Instrument TMS320F2812 DSP microcontroller is automatically generated by the developed CAD to implement the control algorithms. Experimental results of a DYNA MYTE 1007 CNC machine indicate that both tracking and contouring errors are significantly reduced by applying the present advanced motion control design.

## 誌謝

碩士論文的完成，首先要感謝的是指導教授徐保羅博士在兩年研究生活上的諄諄教，使我能順利的完成碩士學位，在此表達我最深誠的敬意與感謝。

亦感謝博士班李俊賢學長、王安平學長、謝鎮洲學長、幸琮政學長和已畢業學長葉賜旭，平時給我許多寶貴的意見及解感，實驗室同學政沂、伊婷及學弟景文、議寬和學妹尚玲在學業上及生活上的切磋與支持。

感謝我的父母、姐姐和妹妹及女友怡嵐給我的支持與鼓勵，使我專注於功課與研究工作。最後感謝曾經在大學時代指導過我的老師，周宏亮博士與蔡超人博士，沒有您的栽培，就沒有今天的我，願將此榮耀和喜悅與他們一起分享。



感謝所有曾經幫助過我與默默為我禱告的教會弟兄姐妹，謝謝你們，願主與你們同在。

# 目 錄

|                         | 頁 次       |
|-------------------------|-----------|
| 中文摘要                    | i         |
| 英文摘要                    | ii        |
| 誌謝                      | iii       |
| 目錄                      | iv        |
| 表目錄                     | v         |
| 圖目錄                     | vi        |
| <br>                    |           |
| <b>第一章 緒論</b>           | <b>1</b>  |
| <br>                    |           |
| 1-1 前言                  | 1         |
| 1-2 文獻回顧                | 2         |
| 1-3 問題陳述                | 5         |
| 1-4 研究方法                | 6         |
| <br>                    |           |
| <b>第二章 整合型運動控制器</b>     | <b>7</b>  |
| <br>                    |           |
| 2-1 前置控制器               | 7         |
| 2-1-1 零相位誤差追跡控制器        | 7         |
| 2-1-2 零振幅誤差追跡控制器        | 12        |
| 2-2 交叉耦合控制器             | 17        |
| 2-2-1 走直線與圓之交叉耦合控制器     | 18        |
| 2-2-2 一般化交叉耦合控制器        | 20        |
| 2-3 整型運動控制器架構           | 25        |
| <br>                    |           |
| <b>第三章 擾動觀測器與摩擦力補償器</b> | <b>30</b> |



|                               |           |
|-------------------------------|-----------|
| 3-1 數位式擾動觀測器                  | 30        |
| 3-1-1 傳統的擾動觀測器                | 30        |
| 3-1-2 數位式擾動觀測器                | 32        |
| 3-2 非線性補償器                    | 37        |
| 3-2-1 摩擦力模型簡介                 | 37        |
| 3-2-2 摩擦力造成的原因與對系統產生的影響       | 38        |
| 3-2-3 非線性補償器之探討               | 41        |
| 3-3 DDOB 與 NFC 之結論            | 43        |
| <br>                          |           |
| <b>第四章 高精密運動控制之 DSP 硬體實現</b>  | <b>44</b> |
| 4-1 實驗系統之硬體架構                 | 44        |
| 4-2 TMS320F2812 之功能介紹         | 46        |
| 4-3 TMS320F2812 週邊電路設計        | 48        |
| <br>                          |           |
| <b>第五章 CAD 先進運動控制器設計軟體之實現</b> | <b>55</b> |
| 5-1 CAD 先進運動控制器設計軟體介紹         | 55        |
| 5-2 運動系統識別之方法                 | 56        |
| 5-2-1 速度與位置迴路之識別方法            | 57        |
| 5-2-2 非線性摩擦力之識別方法             | 58        |
| 5-3 取得機 CNC 台識別資訊方法           | 59        |
| 5-4 線性控制器與非線性摩擦力補償器設計         | 62        |
| 5-4-1 已存在機台識別資訊               | 62        |
| 5-4-2 使用者定義機台模型               | 63        |
| 5-5 控制器模擬                     | 67        |
| 5-6 設計實例                      | 74        |

|                                     |            |
|-------------------------------------|------------|
| <b>第六章 實驗結果</b>                     | <b>82</b>  |
| 6-1 不同控制器實驗結果                       | 82         |
| 6-1-1 Matched DC-gain 實驗            | 82         |
| 6-1-2 ZPETC 實驗                      | 84         |
| 6-1-3 DDOB 實驗                       | 86         |
| 6-1-4 ZPETC + DDOB 實驗               | 88         |
| 6-1-5 整合型控制器(ZPETC+CCC)實驗           | 90         |
| 6-1-6 ZPETC + CCC + DDOB 實驗         | 92         |
| 6-2 加上非線性摩擦力補償器之實驗結果                | 95         |
| 6-2-1 Matched DC-gain + N.F.C.實驗    | 95         |
| 6-2-2 ZPETC+N.F.C. + N.F.C.實驗       | 96         |
| 6-2-3 DDOB + N.F.C.實驗               | 97         |
| 6-2-4 ZPETC + DDOB + N.F.C.實驗       | 98         |
| 6-2-5 ZPETC + CCC + N.F.C.實驗        | 99         |
| 6-2-6 ZPETC + CCC + DDOB + N.F.C.實驗 | 100        |
| 6-3 實驗結果分析                          | 101        |
| <br>                                |            |
| <b>第七章 結論</b>                       | <b>105</b> |
| <br>                                |            |
| 附錄 A TMS320F2812 功能簡介               | 106        |
| 附錄 B TMS320F2812 DSK 板功能簡介          | 113        |
| 參考文獻                                | 120        |

# 表 目 錄

|       |                         | 頁次  |
|-------|-------------------------|-----|
| 表 5-1 | ZPETC 控制器引入 DSP 控制程式之流程 | 80  |
| 表 6-1 | 不同控制器之實驗結果數據            | 102 |
| 表 6-2 | 加上非線性摩擦力補償器後之實驗結果數據     | 103 |
| 表 B-1 | F2812 Ez DSK 板各連接器功能    | 115 |
| 表 B-2 | JTAG 各接腳之功能定義           | 116 |
| 表 B-3 | 擴充接腳功能定義                | 117 |
| 表 B-4 | I/O 接腳功能定義              | 118 |
| 表 B-5 | 類比介面接腳功能定義              | 119 |



# 圖 目 錄

|          | 頁次  |
|----------|---|
| 圖 1-1    | 位置誤差與輪廓誤差.....2                                 |
| 圖 2-1    | ZPETC 基本架構圖.....7                               |
| 圖 2-2(a) | 例一之原系統波德圖.....10                                |
| 圖 2-2(b) | 例一加入 ZPETC 後之系統波德圖.....10                       |
| 圖 2-3(a) | 例二之原系統波德圖.....11                                |
| 圖 2-3(b) | 例二加入 ZPETC 後之系統波德圖.....11                       |
| 圖 2-4    | 零振幅誤差追跡控制器的架構.....12                            |
| 圖 2-5(a) | 例三之原系統波德圖.....15                                |
| 圖 2-5(b) | 例三加入 ZMETC 後之系統波德圖.....15                       |
| 圖 2-6(a) | 例四之原系統波德圖.....16                                |
| 圖 2-6(b) | 例四加入 ZMETC 後之系統波德圖.....16                       |
| 圖 2-7    | 交叉耦合控制器結構圖.....17                               |
| 圖 2-8    | 直線路徑之輪廓誤差.....18                                |
| 圖 2-9    | 圓路徑之輪廓誤差.....19                                 |
| 圖 2-10   | 直線的輪廓描述.....21                                  |
| 圖 2-11   | 雙軸運動控制的幾何關係.....22                              |
| 圖 2-12   | 三軸運動控制的幾何關係.....24                              |
| 圖 2-13   | 多軸運動控制系統之 CCC 補償架構.....24                       |
| 圖 2-14   | 整合型運動控制器架構圖.....25                              |
| 圖 2-15   | 等效之 SISO 控制系統.....26                            |
| 圖 2-16   | C 值為 100 時系統之 gain margin 和 phase margin.....27 |
| 圖 2-17   | C 值為 100 時之模擬結果.....28                          |

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 圖 2-18 | C 值為 310 時系統之 gain margin 和 phase margin.....   | 28 |
| 圖 2-19 | C 值為 310 時之模擬結果.....                            | 29 |
| 圖 3-1  | 包含 DOB 的控制系統.....                               | 31 |
| 圖 3-2  | DDOB 控制架構.....                                  | 32 |
| 圖 3-3  | 新的 DDOB 架構.....                                 | 34 |
| 圖 3-4  | 不同的模擦力模型.....                                   | 38 |
| 圖 3-5  | Quadrant glitches.....                          | 39 |
| 圖 3-6  | 摩擦力與運動速度之關係.....                                | 39 |
| 圖 3-7  | 靜摩擦力與動摩擦力之不同.....                               | 40 |
| 圖 3-8  | Slip-Stick 現象所產生之輪廓誤差.....                      | 40 |
| 圖 3-9  | 一般馬達控制之速度迴路.....                                | 42 |
| 圖 3-10 | 前饋式非線性摩擦力補償器架構.....                             | 42 |
| 圖 4-1  | 實驗系統之硬體架構.....                                  | 45 |
| 圖 4-2  | 實驗環境.....                                       | 45 |
| 圖 4-3  | TMS320F2812 架構方塊.....                           | 47 |
| 圖 4-4  | DAC7625 內部方塊圖.....                              | 48 |
| 圖 4-5  | DAC7625 設計示意圖.....                              | 49 |
| 圖 4-6  | DAC7625 之參考電壓設計.....                            | 50 |
| 圖 4-7  | DAC7625 外部放大電路.....                             | 50 |
| 圖 4-8  | RS-232 transceiver MAX3223 接線圖.....             | 51 |
| 圖 4-9  | AM26LV32 RS-422 Receiver 接線圖.....               | 52 |
| 圖 4-10 | 典型的 CAN bus 架構.....                             | 54 |
| 圖 4-11 | SN65HVD230 CAN transceiver 與 F2812 間之接線示意圖..... | 54 |
| 圖 5-1  | 電腦輔助控制器設計軟體主畫面.....                             | 56 |
| 圖 5-2  | 電腦輔助控制器設計軟體主畫面流程.....                           | 56 |
| 圖 5-3  | 取得機台資訊畫面.....                                   | 60 |

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 圖 5-4  | 取得機台資訊之操作流程.....  | 61 |
| 圖 5-5  | 對已存在的機台識別資訊進行控制器設計之 G.U.I.....                          | 63 |
| 圖 5-6  | 對已存在的機台識別資訊進行控制器設計之操作流程.....                            | 64 |
| 圖 5-7  | 使用者自行定義機台 model 之 G.U.I.....                            | 65 |
| 圖 5-8  | 使用者自行定義機台 model 之 G.U.I.操作流程.....                       | 66 |
| 圖 5-9  | 控制器與補償器設計之 G.U.I.....                                   | 68 |
| 圖 5-10 | 控制器與補償器設計之 G.U.I.操作流程.....                              | 69 |
| 圖 5-11 | 模擬控制器與補償器效果之 G.U.I.....                                 | 71 |
| 圖 5-12 | 不同控制器之模擬結果.....   | 72 |
| 圖 5-13 | 不同控制器模擬結果之條狀圖.....                                      | 72 |
| 圖 5-14 | 模擬控制器與補償器效果之 G.U.I.操作流程.....                            | 73 |
| 圖 5-15 | 取得機台線性識別之資訊畫面.....                                      | 74 |
| 圖 5-16 | 按下”Launch CCS and load program”後即自動開啟 CCS....           | 75 |
| 圖 5-17 | 完成識別工作並讀取回授資料後所出現之畫面.....                               | 75 |
| 圖 5-18 | 速度迴路識別與 DDOB 設計後之畫面.....                                | 77 |
| 圖 5-19 | 位置迴路識別與 ZPETC 設計後之畫面.....                               | 78 |
| 圖 5-20 | 載入非線性摩擦力識別資料.....                                       | 81 |
| 圖 5-21 | 各區段之資料與曲線揉合結果.....                                      | 81 |
| 圖 6-1  | X 軸的追跡誤差.....   | 83 |
| 圖 6-2  | Y 軸的追跡誤差.....   | 83 |
| 圖 6-3  | Matched DC-gain control 的輪廓誤差.....                      | 83 |
| 圖 6-4  | Matched DC-gain control 的循圓軌跡誤差與標準圓<br>(50mm,黑線)比較..... | 84 |
| 圖 6-5  | 系統加入 ZPETC 後 X 軸的追跡誤差.....                              | 85 |
| 圖 6-6  | 系統加入 ZPETC 後 Y 軸的追跡誤差.....                              | 85 |
| 圖 6-7  | 系統加入 ZPETC 後的輪廓誤差.....                                  | 85 |

|        |  |    |
|--------|--|----|
| 圖 6-8  | 系統加入 ZPETC 的循圓軌跡誤差.....                | 86 |
| 圖 6-9  | 系統加入 DDOB 後 X 軸的追跡誤差.....              | 87 |
| 圖 6-10 | 系統加入 DDOB 後 Y 軸的追跡誤差.....              | 87 |
| 圖 6-11 | 系統加入 DDOB 後的輪廓誤差.....                  | 87 |
| 圖 6-12 | 系統加入 DDOB 的循圓軌跡誤差.....                 | 88 |
| 圖 6-13 | 系統加入 ZPETC+DDOB 後 X 軸的追跡誤差.....        | 89 |
| 圖 6-14 | 系統加入 ZPETC+DDOB 後 Y 軸的追跡誤差.....        | 89 |
| 圖 6-15 | 系統加入 ZPETC+DDOB 的輪廓誤差.....             | 89 |
| 圖 6-16 | 系統加入 ZPETC+DDOB 的循圓軌跡誤差.....           | 90 |
| 圖 6-17 | 系統加入 ZPETC+CCC 後 X 軸的追跡誤差.....         | 91 |
| 圖 6-18 | 系統加入 ZPETC+CCC 後 Y 軸的追跡誤差.....         | 91 |
| 圖 6-19 | 系統加入 ZPETC+CCC 的輪廓誤差.....              | 91 |
| 圖 6-20 | 系統加入 ZPETC+CCC 的循圓軌跡誤差.....            | 92 |
| 圖 6-21 | 系統加入 ZPETC+CCC+DDOB 後 X 軸的追跡誤差.....    | 93 |
| 圖 6-22 | 系統加入 ZPETC+CCC+DDOB 後 Y 軸的追跡誤差.....    | 93 |
| 圖 6-23 | 系統加入 ZPETC+CCC+DDOB 的輪廓誤差.....         | 93 |
| 圖 6-24 | 系統加入 ZPETC+CCC+DDOB 的循圓軌跡誤差.....       | 94 |
| 圖 6-25 | Matched DC-gain + N.F.C.的輪廓誤差.....     | 95 |
| 圖 6-26 | Matched DC-gain + N.F.C 的循圓軌跡誤差.....   | 95 |
| 圖 6-27 | 系統加入 ZPETC + N.F.C.的輪廓誤差.....          | 96 |
| 圖 6-28 | 系統加入 ZPETC + N.F.C 的循圓軌跡誤差.....        | 96 |
| 圖 6-29 | 系統加入 DDOB + N.F.C.的輪廓誤差.....           | 97 |
| 圖 6-30 | 系統加入 DDOB + N.F.C 的循圓軌跡誤差.....         | 97 |
| 圖 6-31 | 系統加入 ZPEZTC + DDOB + N.F.C.的輪廓誤差.....  | 98 |
| 圖 6-32 | 系統加入 ZPETC + DDOB + N.F.C 的循圓軌跡誤差..... | 98 |
| 圖 6-33 | 系統加入 ZPEZTC + CCC + N.F.C.的輪廓誤差.....   | 99 |

|        |   |     |
|--------|---|-----|
| 圖 6-34 | 系統加入 ZPETC +CCC+ N.F.C 的循圓軌跡誤差.....     | 99  |
| 圖 6-35 | 系統加入 N.F.C.+ZPETC+CCC+DDOB 的輪廓誤差.....   | 100 |
| 圖 6-36 | 系統加入 N.F.C.+ZPETC+CCC+DDOB 的循圓軌跡誤差..... | 100 |
| 圖 6-37 | 各控制器之最大輪廓誤差比較圖.....                     | 102 |
| 圖 6-38 | 各控制器之廓誤誤差 RMS 值比較圖.....                 | 103 |
| 圖 6-39 | 加入非線性摩擦力補償器後各控制器之最大輪廓誤<br>差比較圖.....     | 104 |
| 圖 6-40 | 加入非線性摩擦力補償器後各控制器之廓誤誤差<br>RMS 值比較圖.....  | 104 |
| 圖 A-1  | TMS320F2812 記憶體規畫.....                  | 108 |
| 圖 A-2  | 事件管理模組方塊圖.....                          | 111 |
| 圖 A-3  | eCAN 方塊圖與其介面.....                       | 112 |
| 圖 B-1  | F2812 Ez DSK 板.....                     | 113 |
| 圖 B-2  | F2812 Ez DSK 板功能方塊圖.....                | 114 |
| 圖 B-3  | F2812 Ez DSK 板各連接器位置.....               | 115 |
| 圖 B-4  | JTAG 接腳位置.....                          | 116 |
| 圖 B-5  | 擴充接腳位置.....                             | 116 |
| 圖 B-6  | I/O 接腳位置.....                           | 117 |
| 圖 B-7  | 類比介面接腳位置.....                           | 119 |
| 圖 B-8  | 電源接頭.....                               | 119 |

# 第一章 緒 論

## 1-1 前言 (Introduction)

自八零年代以來，微電腦／微處理機運算能力的發展一日千里，普及率以驚人的速度成長著，因而帶來性能優異的軟／硬體與低廉的成本，也連帶地使得具有快速且精確的製造能力的數控工具機 (computerized numerical control, CNC) 在工業製造界備受矚目。然而，人們不斷地提高品質標準，追求更高的生產力，促使數控工具機必須同時兼顧高精密度、高速以及高穩健性的加工能力，但由於傳統的數控工具機受到伺服驅動系統架構的限制，如何改善數控工具機的加工精度，就成為運動控制設計一項重要的課題。

一般而言，加工精度取決於三個因素：機械結構、命令路徑的精確度，以及控制架構與控制器設計。除機械結構外，後兩者都屬於運動控制領域討論的範疇。伺服運動控制領域面對的兩個基本問題是定點式控制 (point-to-point, PTP) 及追跡控制 (tracking/continuous-path, CP)。定點式控制關心如何將控制物從某一點移動到另一點，其精度取決於每個定位點間的相對位置精確程度，因此點與點間的暫態路徑並不重要。而循軌控制則要求控制物必須循著給定的軌跡 (contour) 移動，其精度即循跡的整體表現，所以從起點到終點間的路徑精確度都很重要。

本文不考慮機械結構的設計，並假設已有合適的命令路徑，關注的焦點是如何透過控制架構與控制器的設計，改善追跡控制的性能，以提高運

動控制系統的追跡能力，降低追跡控制的暫態及穩態誤差，並確保控制系統的穩健性。

## 1-2 文獻回顧 (General Review)

傳統提升（多軸）伺服平台系統精密度的方式，是獨立設計各軸控制器，個別地降低各軸的追跡誤差（tracking error），以提高整體精度。但這種控制概念並不一定能改善另一個衡量運動控制精密度的重要指標——輪廓誤差（contouring error），尤其是高速運動時特別明顯。所謂追跡／位置誤差是指刀具實際位置到命令位置的距離，而輪廓誤差則是刀具實際位置到命令路徑的最短距離，圖 1-1 說明了位置誤差與輪廓誤差的差別。

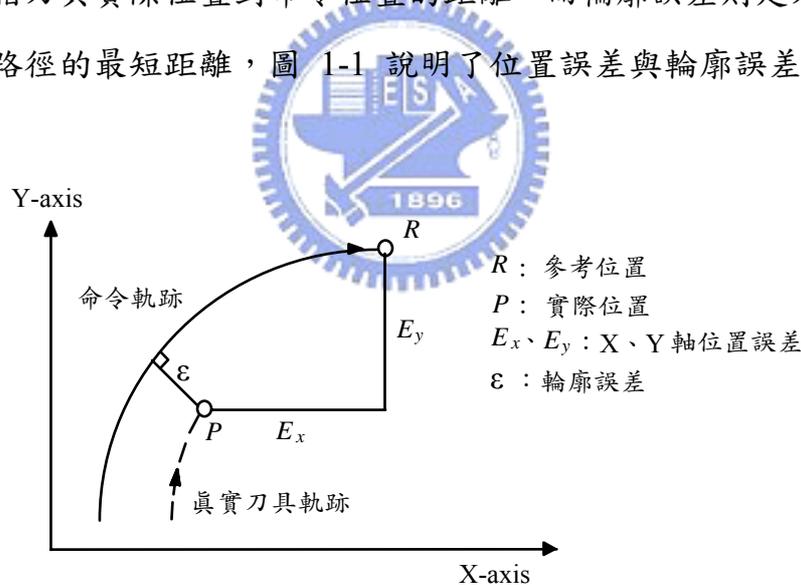


圖 1-1 二軸運動之位置誤差與輪廓誤差

Koren and Lo (1992) 詳細分析輪廓誤差後發現，除了機械硬體結構的缺陷，不良的控制器與進給驅動系統也是造成輪廓誤差的主要來源，包括不當的控制迴路增益、各軸動態響應不一致、各軸不同的伺服落後誤差

(servo lag error)、非線性的命令路徑的外型輪廓、負載與外界擾動等因素 [1]。

前置控制器 (feedforward controller) 是典型的提升控制系統追跡能力的控制方法。其設計概念是以極零點對消 (pole-zero cancellation) 的技巧改善控制系統的動態特性，使伺服控制系統對位置位準 (position reference) 有迅速而且精確的反應。最理想的情況是前置控制器能夠對消迴授系統所有的極點與零點，如此一來整體伺服控制系統的轉移函數即為單純的單位增益 (unit gain)。但是因系統傳輸落後 (transportation lag)、無反應時間 (dead time)、取樣時間 (sampling time) 太小、非整數的傳輸延遲 (fractional transport delay) 等因素，使得數位迴授系統往往具有不穩定及振盪零點，以致無法完全對消 [2-5]。

在為數眾多的前置控制器中，Tomizuka (1987) 提出的零相位誤差追跡控制器 (zero phase error tracking controller, ZPETC) 能有效地降低追跡誤差 [6]，近年來較被廣泛地採用以提高追跡控制的精密度。ZPETC 的設計理念是藉由補償全頻率的相位偏移並維持零頻率處為單位增益，因此能大幅地降低控制系統的追跡誤差。但由於 ZPETC 仰賴極零點對消的技巧，其追跡能力對模式誤差 (modeling error)、受控體參數變化 (plant parameter variation)、外界擾動等因素極為敏感。換句話說，ZPETC 的追跡精確度很容易受系統不確定性 (system uncertainty) 及擾動的影響。

對多軸控制系統來說，除了提高各軸的追跡能力，如何讓獨立驅動的各運動軸產生協調運動 (coordinated movement)，以降低輪廓誤差，得到良好的輪廓精度，也是一個重要的課題。在這個前提下，Koren (1980) 提出了 (雙軸的) 交叉耦合控制器 (cross-coupled controller, CCC) 的控制架構 [7]，而後，Koren and Lo (1991) 又進一步地在這個架構下提出可變增益交叉耦合控制器 (variable gain cross coupling controller) [8]。交叉耦合控制器並不直接改善各軸的運動控制迴路，而是在軸與軸間建立補償

器，根據各軸的追跡誤差建立即時的輪廓誤差模組（contouring error model），並經由補償器回饋修正訊號至各軸以調整各軸的馬達轉速，協調各軸的追跡誤差，以消除整體的輪廓誤差。

除了系統不確定性，外界擾動是另一個考驗控制系統穩健性的因素。一般來說，外界擾動包括摩擦力、慣量（inertia）、切削力、量測雜訊（measurement noise）、轉矩漣波（torque ripple）等。摩擦力是運動控制系統中的主要擾動，尤其在低速時影響更顯著。傳統消除擾動的方式是以 PI 為速度伺服控制。但對定點式控制來說，在速度接近零的目標點附近，速度伺服控制的積分動作（I-action）會造成一個圍繞著目標點振盪的極限圈（limit cycle）；而對追跡控制來說，在運動方向方向反轉時（即速度命令變號時），速度降低，摩擦力的效應變大，於是造成運動方向變換得不平滑（non-smooth），這時無法瞬間變號的積分動作反而會放大追跡誤差。事實上，PI 控制只能處理定擾動（constant disturbance），即消除穩態誤差，而不合適用以處理高頻擾動 [9-10]。

為了抑制擾動，增加控制系統的穩健性，Ohnishi（1987）提出了擾動觀測器（Disturbance Observer, DOB）的控制架構 [11]，並隨後由 Umeno and Hori 進一步深化 [12-14]。DOB 將系統不確定性與外界擾動（摩擦力、負載變化等）都視為未知的擾動力矩（disturbance torque）並加以估測，再透過選取適當的濾波器（Q-filter），消除低頻的擾動與高頻的雜訊，使控制系統的動態特性趨於名義模式（nominal model）。於是 DOB 既能消除外界擾動，又等於提供精準的受控體模式，無疑地滿足了系統穩健性的要求。而後的研究更發展出直接在離散時間域（discrete-time domain）進行設計的數位擾動觀測器（digital disturbance observer, DDOB），以減少在轉換過程中產生的種種問題 [15-16, 33, 35]。

綜合以上所述，前置控制器可以改善控制系統的追跡性能，CCC 及完美匹配設計法能夠提升刀具路徑的輪廓精度，而 DOB 則可抑制擾動對

控制系統的影響。因此 Houngh and Hsu (1994) 提出整合運動控制 (Integrated Control) 的觀念 [32]，結合 ZPETC 與 CCC，分別提升各軸的追跡性能，並協調補償輪廓誤差。接著 Yeh and Hsu (2000) 針對多軸運動系統，以包含 DDOB 的完美匹配迴授控制(perfectly matched feedback control)、最佳化及完美匹配 ZPETC (optimal and perfectly matched ZPETC control) 與穩健多軸 CCC (robust multi-axis CCC) 構成多軸運動系統之整合式控制器 [35]。而近年來結合 ZPETC 與 DOB/DDOB 以兼顧高精密度與高穩健性的研究，在研究成果上更是具體 [9, 15-19, 33]。

### 1-3 問題陳述 (Problem Statement)



由於受到動態特性頻寬的限制，傳統的工具機在高速工作時無法達到高精密度的要求，因此需要更進步的控制架構與控制器，例如前置控制器，或整合性／複合性的控制架構。能提升運動控制系統追跡能力的控制器類型中首推前置控制器，其中又以 ZPETC 的效果最廣為採納，然而其追跡性能容易受系統不確定性、外界擾動與負載變動等因素影響而惡化；且對輪廓精度的改善有限；另外，ZPETC 雖然有將控制系統補償為零相位誤差（無時間延遲）的優點，但並不保證能達成理想的振幅響應（特別是在高頻處），僅能使控制系統在零頻率附近為單位增益，這個缺點影響其在高速運動控制時的表現，限制了 ZPETC 的應用範圍。而屬於迴授補償器的 CCC 雖然能大幅降低輪廓誤差，但需仰賴即時計算之輪廓誤差以協調各軸的追跡誤差之補償，一旦系統參數改變，如加工路徑不同，其穩健性就受到考驗。而且，其設計法則對三軸以上的運動控制系統嫌過於繁

複。對於抗擾動方面，首推以DDOB應付之，其能有效地消除部份因摩擦力所產生之非線性現象，但無法完全將之消除。

以上之所提之控制器，均需熟悉該理論之基礎才能進行設計及調整設計參數，對於許多無相關控制背景之工業界人士，想使用先進控制設計於本身的應用中，實在不得其門而入，事實上，缺乏一適當的橋樑介於工業界與學術界之間，使得學術界發展出來的控制理論，不得廣為工業界所採用，是一個須努力的目標。

#### 1-4 研究方法 (Proposed Approach)

為了使工業界能容易地設計出控制器，並了解各控制器之優點，本文提出一電腦輔助先進運動控制器設計軟體 CAD，其包含各種先進控制器設計、模擬與實作，並自動產生 DSP 控制器程式能實際應用於 CNC 機台，達到精密運動控制之效果。

由於線性控制器無法完全消除系統摩擦力所產生之非線性現象，本文提出結合 ZPETC、CCC、DDOB 與非線性摩擦力補償器(non-linear frictional compensator)之運動控制架構，不僅可以達到高追跡效能，提升輪廓誤差精密密度，對於摩擦力所產生之非線性效應亦能有效地消除，展現出高度精密密度之運動控制。

本文使用 CAD 配合低價位之定點 DSP，與自製之週邊運動控制介面達成精密 CNC 控制器，不僅使得節省製作成本，亦可使整個系統之控制器設計速度更為快速有效率。在本文第二章中，介紹前置控制器與交叉耦合補償器。第三章為介紹數位擾動觀測器及摩擦力補償器。第四章為 DSP 硬體電路之設計。第五章是 CAD 軟體之功能介紹與其使用方法。第六章為實驗結果與分析。最後一章則為結論。

## 第二章 整合型運動控制器

使用整合型運動控制器來進行控制，可以同時獲得良好的位置響應與輪廓精密度，本章將介紹其設計原理及提供設計範例。基本上，整合型運動控制器包含兩部分：前置控制器(feedforward controller)以及交叉耦合控制器(CCC)。

### 2-1 前置控制器

以控制的觀點來看，控制系統的極點與零點分別代表系統對輸出訊號的回歸(regress)效應與輸入訊號對系統的耦合(couple)效應，因此，經過適當設計的前置控制器能夠調整控制系統的極點與零點，使伺服位置控制系統具有良好的追跡能力。此節中即介紹兩種前置控制器，一為零相位誤差追跡控制器(ZPETC)，另一個為零振幅誤差追跡控制器(zero magnitude error tracking controller, ZMETC)。

#### 2-1-1 零相位誤差追跡控制器

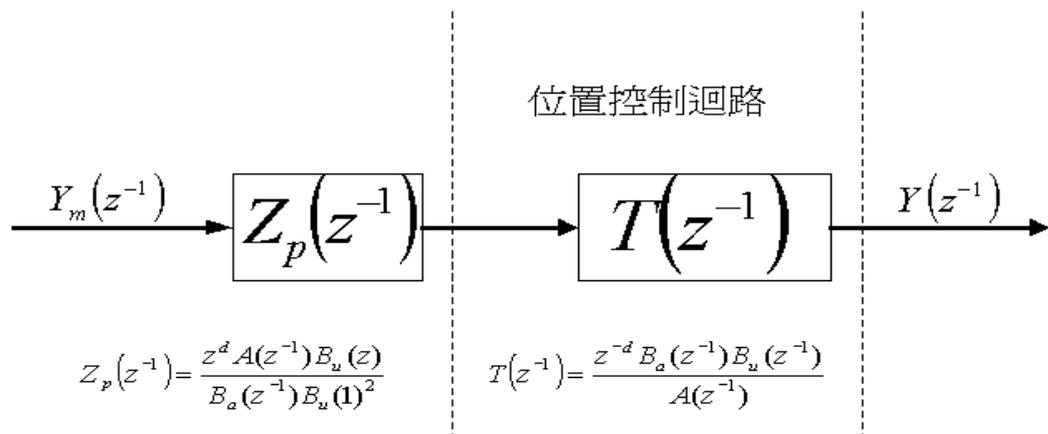


圖 2-1 ZPETC 基本架構圖

其基本的設計概念是將位置迴路中所有可以對消的極、零點消去，而對於不可對消的零點則利用共軛零點來補償其相位，使得系統在所有頻率中，實際位置輸出與理想位置輸出間沒有相位差。假設位置迴路的轉移函數：

$$T(z^{-1}) = \frac{z^{-d} \cdot B(z^{-1})}{A(z^{-1})} = \frac{z^{-d} \cdot B_a(z^{-1})B_u(z^{-1})}{A(z^{-1})} \quad (2-1)$$

其中

$A(z^{-1}) = 1 + \alpha_1 z^{-1} + \alpha_2 z^{-2} + \dots + \alpha_n z^{-n}$ ，並且  $A(z^{-1})$  為穩定多項式

$B(z^{-1}) = b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_m z^{-m}$ ， $b_0 \neq 0$ ，

$z^{-d}$  為  $d$  階延遲 (d-step delay)

$B_a(z^{-1}) = b_0^a + b_1^a z^{-1} + b_2^a z^{-2} + \dots + b_q^a z^{-q}$ ， $b_0^a \neq 0$ ，並且  $B_a(z^{-1})$  為可

接受多項式 (Acceptable Polynomial)，是由  $B(z^{-1})$  多項式中穩定且較少震盪的零點所組成的多項式。

$B_u(z^{-1}) = b_0^u + b_1^u z^{-1} + b_2^u z^{-2} + \dots + b_p^u z^{-p}$ ， $b_0^u \neq 0$ ，並且  $B_u(z^{-1})$  為不

可接受多項式 (Unacceptable Polynomial)，是由  $B(z^{-1})$  多項式中不穩定且震盪較多的零點所組成的多項式。

其中  $p+q=m$ ，因此，所設計之前置控制器所具備的轉移函數為：

$$Z_p(z^{-1}) = \frac{z^d \cdot A(z^{-1}) \cdot B_u(z)}{B_a(z^{-1}) \cdot B_u(1)^2} \quad (2-2)$$

可得全部系統的轉移函數  $Y(z^{-1})$ ：

$$Y(z^{-1}) = Z_p(z^{-1}) \cdot T(z^{-1}) = \frac{B_u(z)B_u(z^{-1})}{B_u(1)^2} = \frac{|B_u(z^{-1})|^2}{B_u(1)^2} \quad (2-3)$$

對於所有的頻率而言，整體控制回路系統的頻率響應無任何的相位落後的情況產生，並且在零頻率的附近增益響應響應接近於一。然而，需要準確的受控體動態響應模型（model），是 ZPETC 使用上的最大缺點，因為任何系統模型皆存在一定的誤差。所以使用時需選取誤差最小的模型來進行設計。設計實例如下：

例一：

$$\text{若 } T(z^{-1}) = \frac{10^{-3}(9.709z^{-2} - 1.36z^{-3} + 6.271z^{-4})}{1 - 1.8918z^{-1} + 1.1768z^{-2} - 0.2705z^{-3}}$$

$$\text{則 } B_u(z^{-1}) = 9.709 \times 10^{-3}(1 - 0.1401z^{-1} + 0.6459z^{-2}), \text{ poles} = 0.0000700 \pm 0.0008006i$$

$$B_u(z) = 1$$

由式(2-2)獲得之 ZPETC 控制器為

$$Z_p(z^{-1}) = \frac{102.9962z^2 - 194.8481z + 121.2059 - 27.8636z^{-1}}{1 - 0.14008z^{-1} + 0.64586z^{-2}}$$

由式(2-3)可得  $Y(z^{-1}) = 1$

圖 2-2(a)為原統之波德圖，(b)為加入 ZPETC 之後系統之波德圖，因為沒有不可接受之零點，所以其振幅響應非常理想。

例二：

$$\text{若 } T(z^{-1}) = \frac{10^{-3}(7.23z^{-2} + 4.044z^{-3} + 1.13z^{-4} + 6527z^{-5})}{1 - 1.5089z^{-1} + 0.5278z^{-2}}$$

$$\text{則 } B_u(z^{-1}) = 1 - 0.5696z^{-1} + 0.7996z^{-2}, \text{ poles} = 0.2849 \pm 0.8476i$$

$$B_u(z^{-1}) = 1 + 1.12904z^{-1}, \text{ pole} = -1.12904$$

$$B_u(z) = 1 + 1.12904z$$

由式(2-2)獲得之 ZPETC model 為

$$Z_p(z^{-1}) = \frac{34.4509z^3 - 21.4726z^2 - 27.858z + 16.107}{1 - 0.5696z^{-1} + 0.7996z^{-2}}$$

由式(2-3)可得  $Y(z^{-1}) = 0.24908z + 0.606 + 0.24908z^{-1}$

圖 2-3(a)為原統之波德圖，(b)為加入 ZPETC 之後系統之波德圖，即使有不可接受之零點，其相位響應非常理想。

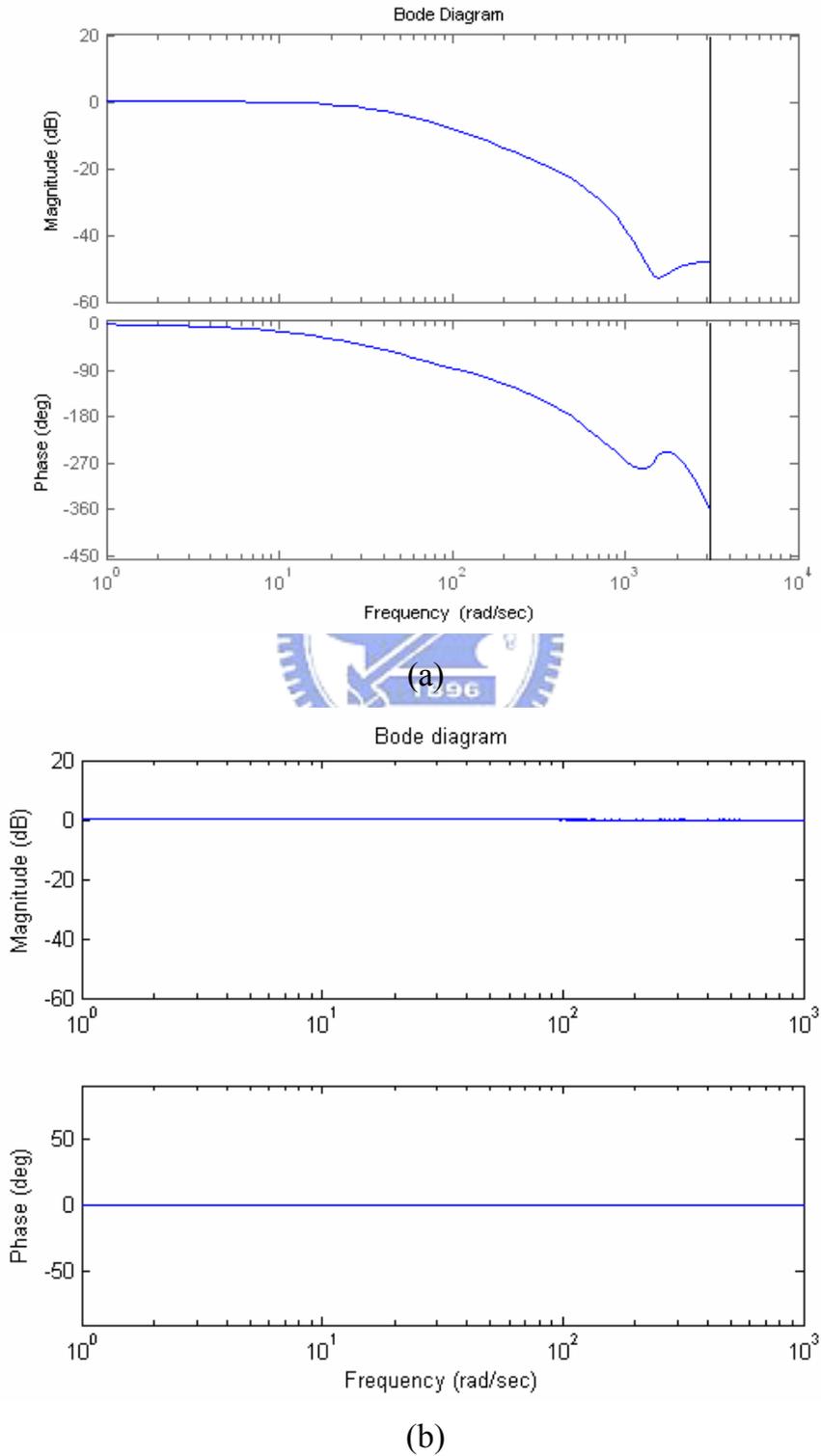
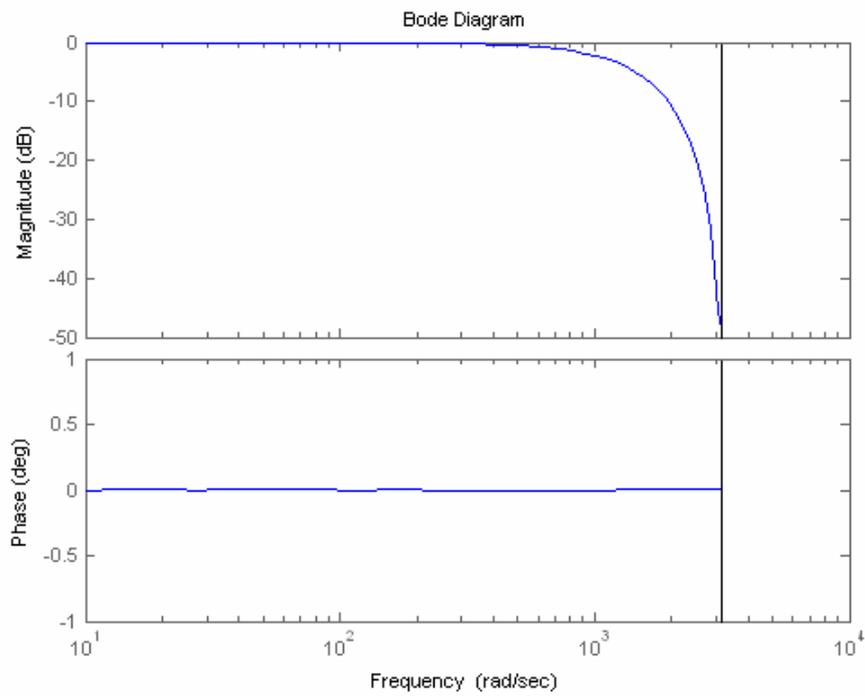
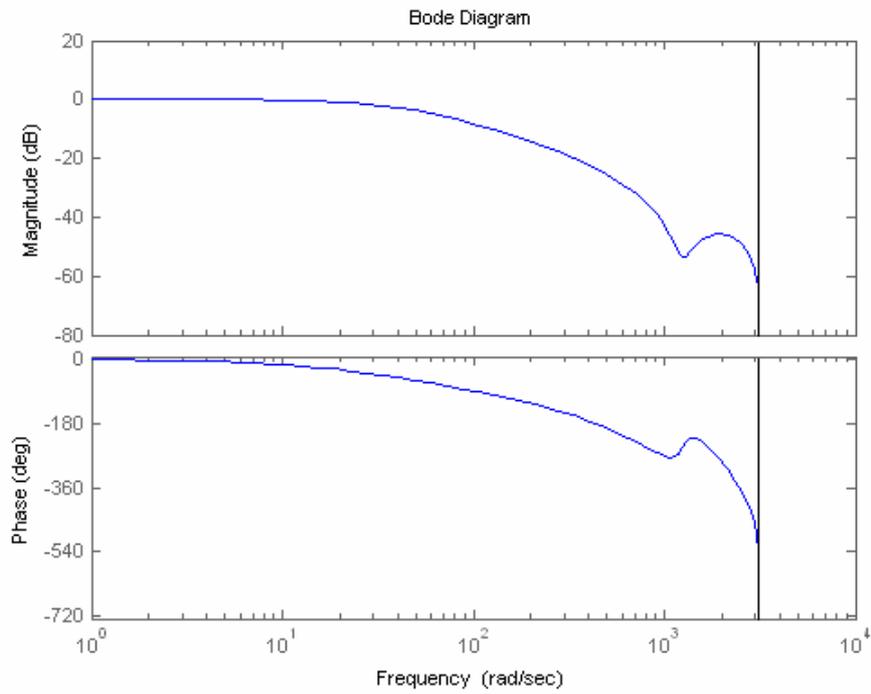


圖 2-2 例一之波德圖 (a)原系統； (b)加入 ZPETC 後



(b)

圖 2-3 例二之波德圖 (a)原系統； (b)加入 ZPETC 後

## 2-1-2 零振幅誤差追跡控制器 [36]

為了降低追跡誤差／輪廓誤差，提升控制系統的追跡精密度，需要更優秀的前置控制器。有別於零相位誤差追跡控制器（ZPETC）以補償位置迴授控制系統的相位誤差的方式提高精密度，零振幅誤差追跡控制器（ZMETC）設計理念是以互補的觀點（complementary point of view），搭配極零點對消與極零點配置（pole-zero placement）的技巧，消去位置迴授控制系統可對消的極點與零點，對於不可對消（在單位圓以外）的零點，則以其共軛零點補償振幅誤差，從而減少追跡誤差。其架構如圖 2-4 所示。

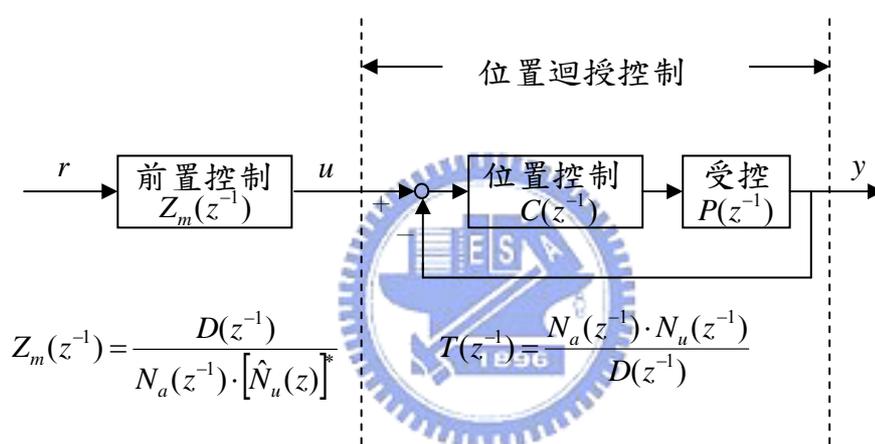


圖 2-4 零振幅誤差追跡控制器的架構

首先考慮位置迴授控制系統  $T(z^{-1})$  的表示式

$$T(z^{-1}) = \frac{C(z^{-1}) \cdot P(z^{-1})}{1 + C(z^{-1}) \cdot P(z^{-1})} = \frac{N(z^{-1})}{D(z^{-1})} = \frac{N_a(z^{-1}) \cdot N_u(z^{-1})}{D(z^{-1})}$$

其中

$C(z^{-1})$  為位置控制器。

$P(z^{-1})$  為受控體。

$D(z^{-1}) = 1 + d_1 z^{-1} + d_2 z^{-2} + \dots + d_n z^{-n}$ ，為穩定多項式。

$N(z^{-1}) = n_0 + n_1 z^{-1} + n_2 z^{-2} + \dots + n_m z^{-m}$ 。

$N_a(z^{-1}) = n_0^a + n_1^a z^{-1} + n_2^a z^{-2} + \dots + n_q^a z^{-q}$ ，為可接受多項式 (acceptable polynomial)，是由  $N(z^{-1})$  多項式中穩定且較少震盪的零點所組成的多項式。

$N_u(z^{-1}) = n_0^u + n_1^u z^{-1} + n_2^u z^{-2} + \dots + n_p^u z^{-p}$ ，不可接受多項式 (unacceptable polynomial)，是由  $N(z^{-1})$  多項式中不穩定或震盪劇烈的零點所組成的多項式。

$$p + q = m \text{。}$$

而  $N_u(z^{-1})$  又可進一步化為

$$\begin{aligned} N_u(z^{-1}) &= n_0^u + n_1^u z^{-1} + n_2^u z^{-2} + \dots + n_p^u z^{-p} \\ &= z^{-p} (n_0^u z^p + n_1^u z^{p-1} + n_2^u z^{p-2} + \dots + n_p^u) \\ &= z^{-p} \hat{N}_u(z) \end{aligned}$$

於是，可以得到 ZMETC 的一般式

$$Z_m(z^{-1}) = \frac{D(z^{-1})}{N_a(z^{-1}) \cdot [\hat{N}_u(z)]^*} \quad (2-4)$$

其中

$$[\hat{N}_u(z)]^* = (n_0^u z^{-p} + n_1^u z^{-(p-1)} + n_2^u z^{-(p-2)} + \dots + n_p^u) \text{，} [\cdot]^* \text{表示複數共軛}$$

運

運算元 (complex conjugate operator)。

如此一來，整個控制系統的轉移函數  $R(z^{-1})$  成為

$$R(z^{-1}) = T(z^{-1}) \cdot Z_m(z^{-1}) = \frac{N_u(z^{-1})}{[\hat{N}_u(z)]^*} \quad (2-5)$$

上式顯示經 ZMETC 補償過後的控制系統，在任何頻率都沒有振幅誤差，振幅響應皆為單位增益。換句話說，ZMETC 能將控制系統補償成一個全通濾波器 (all-pass filter)，在理論上，經 ZMETC 補償過的控制系統將具有無限大的頻寬。然而，雖然 ZMETC 的振幅響應十分理想，但其頻率響應卻存在相位誤差。設計實例如下：

例三：

$$\text{若 } T(z^{-1}) = \frac{10^{-3}(9.709z^{-2} - 1.36z^{-3} + 6.271z^{-4})}{1 - 1.8918z^{-1} + 1.1768z^{-2} - 0.2705z^{-3}}$$

$$\text{則 } N_a(z^{-1}) = 9.709 \times 10^{-3} (1 - 0.1401z^{-1} + 0.6459z^{-2})$$

$$N_u(z) = 1$$

由式(2-4)獲得之 ZMETC model 為

$$Z_m(z^{-1}) = \frac{1 - 1.8918z^{-1} + 1.1768z^{-2} - 0.2705z^{-3}}{10^{-3}(9.709z^{-2} - 1.36z^{-3} + 6.271z^{-4})}$$

由式(2-5)，可得  $R(z^{-1})=1$

圖 2-5(a)為原統之波德圖，(b)為加入 ZMETC 之後系統之波德圖，因為沒有不可接受之零點，所以其振幅與相位均響應非常理想。

例四：

$$\text{若 } T(z^{-1}) = \frac{10^{-3}(7.23z^{-2} + 4.044z^{-3} + 1.13z^{-4} + 6527z^{-5})}{1 - 1.5089z^{-1} + 0.5278z^{-2}}$$

$$\text{則 } N_a(z^{-1}) = 1 - 0.5696z^{-1} + 0.7996z^{-2}$$

$$N_u(z^{-1}) = 1 + 1.12904z^{-1}$$

$$\hat{N}_u(z) = z + 1.12904$$

$$[\hat{N}_u(z)]^* = z^{-1} + 1.12904$$

由式(2-4)獲得之 ZMETC model 為

$$Z_m(z^{-1}) = \frac{z^{-1} - 1.509z^{-2} + 0.5279z^{-3}}{10^{-3}(7.23 + 4.044z^{-1} + 1.131z^{-2} + 6.527z^{-3})}$$

由式(2-5)，可得 $R(z^{-1}) = \frac{1 + 1.12904z^{-1}}{z^{-1} + 1.12904}$

圖 2-6(a)為原統之波德圖，(b)為加入 ZMETC 之後系統之波德圖，其振幅響應非常理想。

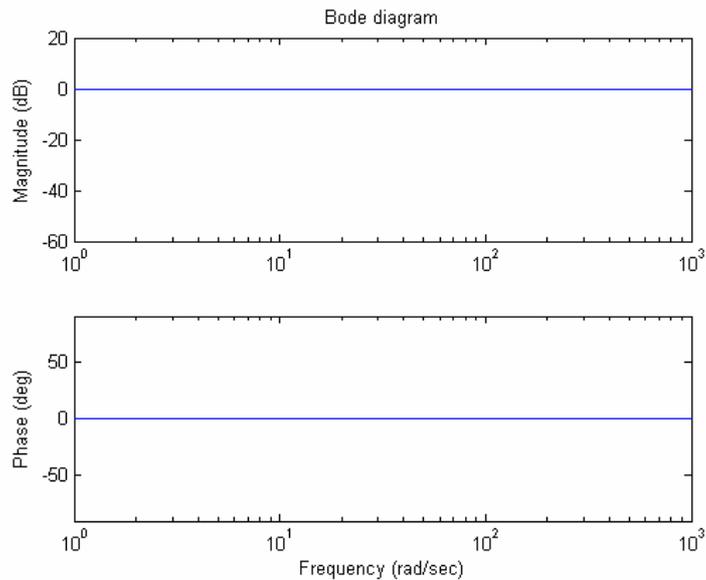
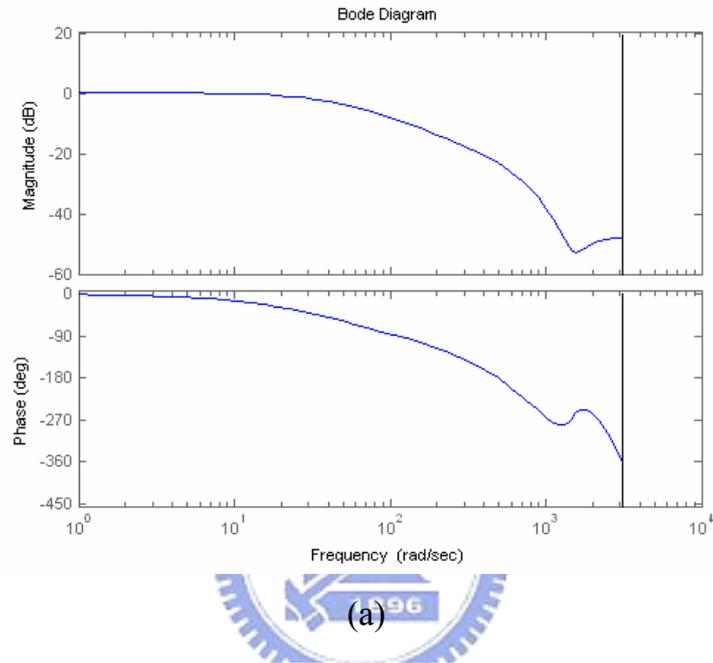
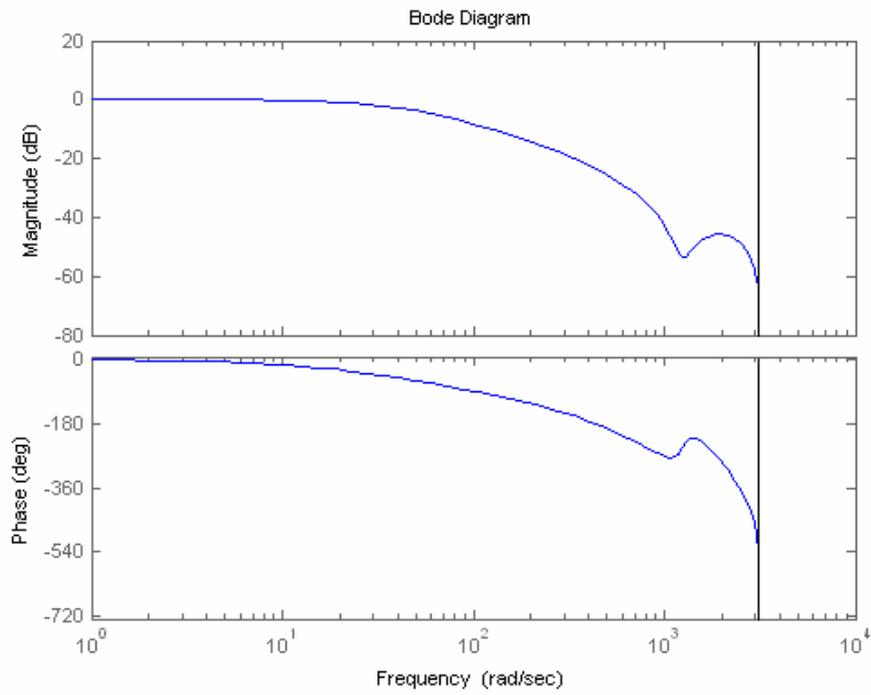
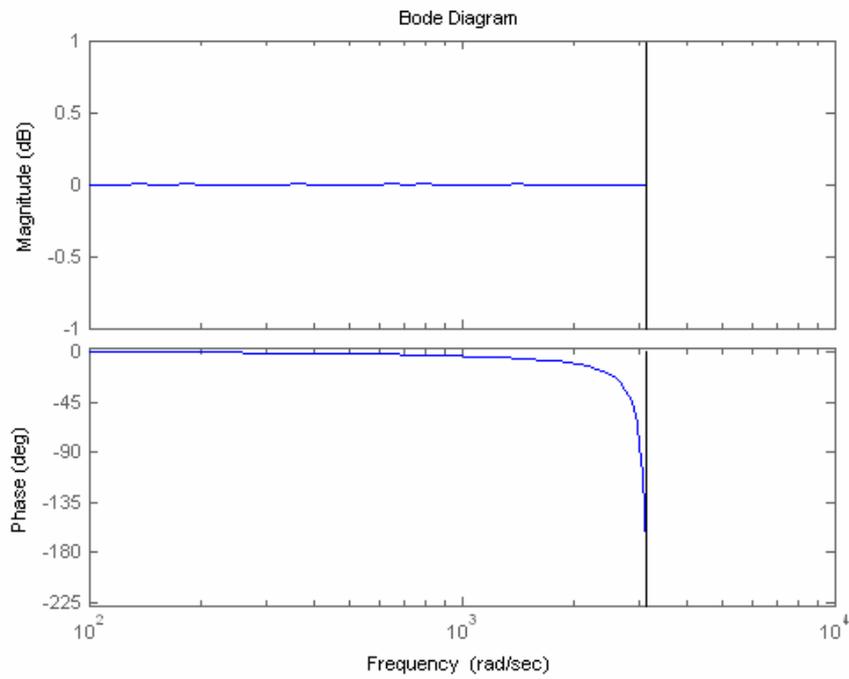


圖 2-5 例三之波德圖 (a)原系統； (b)加入 ZMETC 後



(a)



(b)

圖 2-6 例四之波德圖 (a)原系統； (b)加入 ZMETC 後

## 2-2 交叉耦合控制器

交叉耦合控制的目的是協調各軸的位置誤差以改善輪廓誤差。交叉耦合控制器並不直接改變各軸的運動控制迴路，而是在軸與軸的控制迴路間加上補償器，藉由補償器產生適當的迴授信號送至各軸而使得各軸的動態響應能夠匹配。在此所採用的是可變增益交叉耦合控制器架構。其結構如下圖所示。

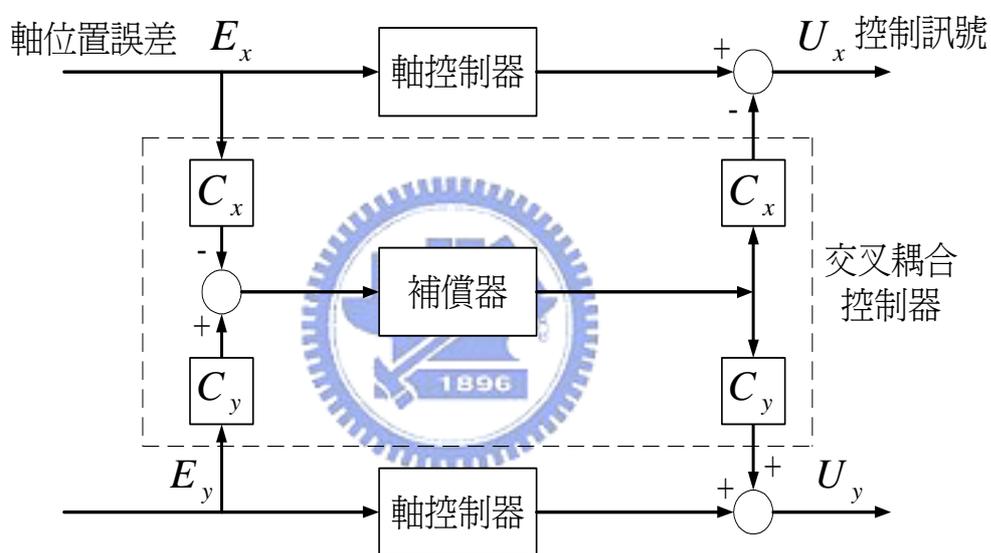


圖 2-7 交叉耦合控制器結構圖

之所以稱為可變增益的原因，是控制器會隨著不同的軌跡形式適度的調整輪廓誤差模組增益值  $C_x$  及  $C_y$ 。以有效的降低輪廓誤差。

## 2-2-1 走直線與圓之交叉耦合控制器

輪廓誤差之計算：

a. 直線路徑：

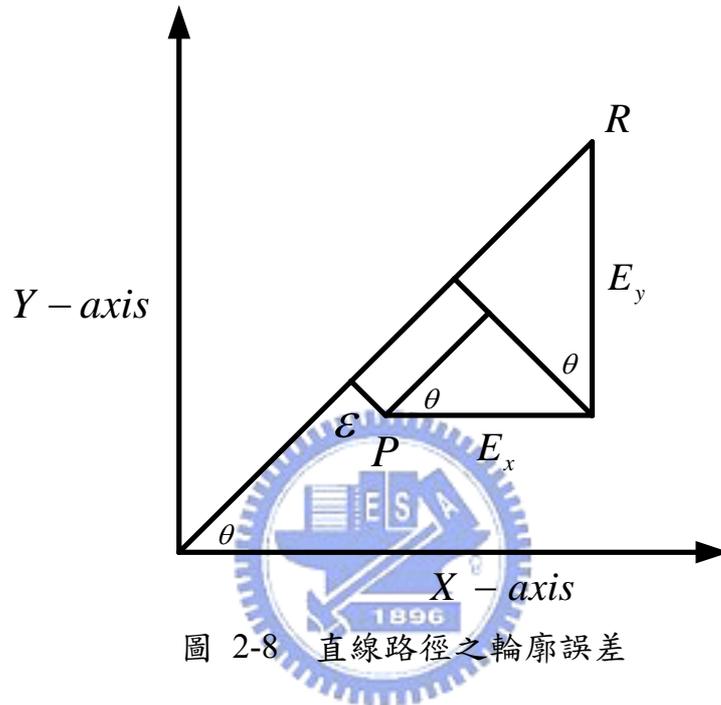


圖 2-8 直線路徑之輪廓誤差

由圖的直線路徑幾何形狀可知其輪廓誤差  $\varepsilon$  為：

$$\varepsilon = -E_x \sin \theta + E_y \cos \theta$$

且由於  $\sin \theta = \frac{V_y}{V}$ ， $\cos \theta = \frac{V_x}{V}$ ，輪廓誤差可改寫為

$$\varepsilon = \frac{-E_x V_y + E_y V_x}{V} = -\frac{V_y}{V} E_x + \frac{V_x}{V} E_y,$$

並由上圖架構可知  $\varepsilon = -C_x E_x + C_y E_y$ ，

$$C_x = \sin \theta = \frac{V_y}{V} \quad (2-6a)$$

$$C_y = \cos \theta = \frac{V_x}{V} \quad (2-6b)$$

輪廓誤差模組增益會隨著直線路徑的角度不同而調整。

b. 圓路徑：

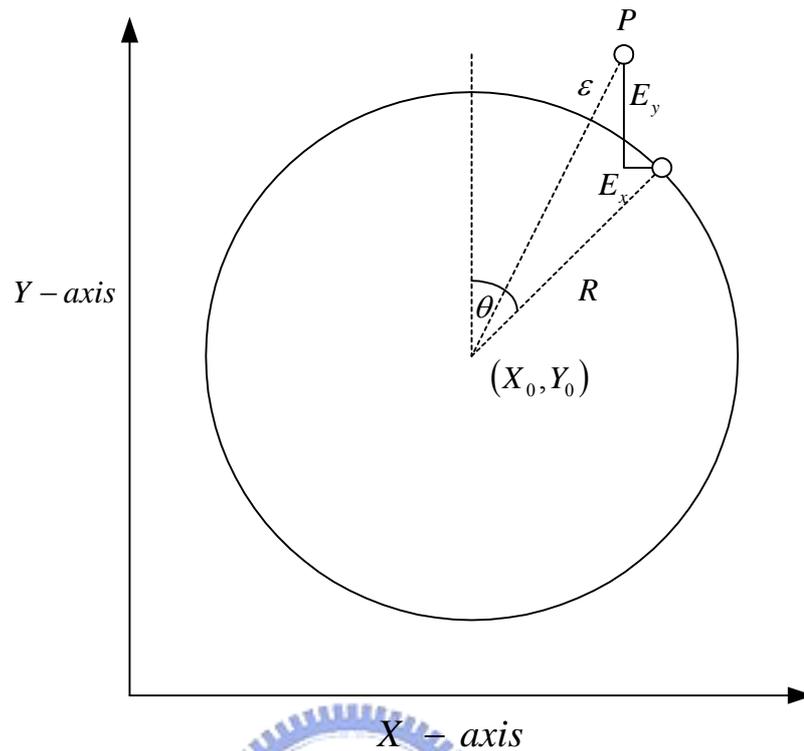


圖 2-9 圓路徑之輪廓誤差

輪廓誤差  $\varepsilon$  為：
$$\varepsilon = \sqrt{(P_x - X_0)^2 + (P_y - Y_0)^2} - R$$

其中刀具實際位置  $(P_x, P_y)$  可以由軸位置誤差  $(E_x, E_y)$  與命令軌跡來表示，即：

$$P_x = R \sin \theta + X_0 - E_x$$

$$P_y = R \cos \theta + Y_0 + E_y$$

$$\text{可得 } \varepsilon = \sqrt{(R \sin \theta - E_x)^2 - (R \cos \theta + E_y)^2} - R$$

將上式以泰勒展開式展開並假設輪廓誤差遠小於軸位置誤差且軸位置誤差遠小於圓半徑。輪廓誤差可以改寫為：

$$\varepsilon = \left( \cos \theta + \frac{E_y}{2R} \right) E_y - \left( \sin \theta - \frac{E_x}{2R} \right) E_x$$

由上式可知可變增益交叉耦合控制的輪廓誤差增益模組增益值為：

$$C_x = \left( \sin \theta - \frac{E_x}{2R} \right) \quad (2-7a)$$

$$C_y = \left( \cos \theta + \frac{E_y}{2R} \right) \quad (2-7b)$$

## 2-2-2 一般化交叉耦合控制器 [21]

然而若以 2-2-1 節的設計方式來實際應用於控制上，則會發生三個問題，第一、機台在走圓與走直線時，Cross-Coupled Control 的  $C_x$  與  $C_y$  值是不同的，在走直線時， $C_x = \sin \theta$ ， $C_y = \cos \theta$ ；在走圓時， $C_x = (\sin \theta - E_x/2R)$ ， $C_y = (\cos \theta + E_y/2R)$ ，表示控制器要知道現在的命令是要走直線還是走圓才可以決定此時的  $C_x$  與  $C_y$  值需為何值才能達到好的效果。第二、若命令是走曲線時，則  $C_x$  與  $C_y$  的值即難以決定，無法達到好的輪廓誤差。第三、為多軸運動時，傳統的雙軸 CCC 架構無法使用。

為了改善這些缺點，Yeh and Hsu (2002) [35] 提出了預測輪廓誤差向量的方式來得到  $C_x$  與  $C_y$  的值。

對於雙軸的運動控制，假設可變增益向量  $\vec{C} = \begin{bmatrix} -C_x \\ C_y \end{bmatrix}$ ，首先考慮直線的輪廓，如圖 2-10 所示， $\theta$  為直線之傾斜角度，此直線的正規化切線向量為  $\vec{t} = \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix}$ ，而正交於此向量的正規化向量  $\vec{n} = \begin{bmatrix} -\sin \theta \\ \cos \theta \end{bmatrix}$ ， $E_x$  與  $E_y$  則為各軸的追蹤誤差，所以追蹤誤差向量為  $\vec{e} = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}$ 。由圖中可以得知輪廓誤差為

$$\varepsilon = \cos \theta \cdot E_y - \sin \theta \cdot E_x = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} -\sin \theta \\ \cos \theta \end{bmatrix} = \langle \vec{e}, \vec{n} \rangle。因此可以定義輪廓誤差向$$

量  $\vec{\varepsilon}$  為實際位置 P 到最接近輪廓軌跡的向量，即

$$\vec{\varepsilon} = \varepsilon \cdot \vec{n} = \langle \vec{e}, \vec{n} \rangle \cdot \vec{n} \quad (2-8)$$

此向量為輪廓誤差  $\varepsilon$  與方向  $\vec{n}$  所組成。更近一步的說，輪廓誤差  $\varepsilon$  為追跡誤差向量  $\vec{e}$  與正規化的正交相向  $\vec{n}$  的內積 (Inner product)。

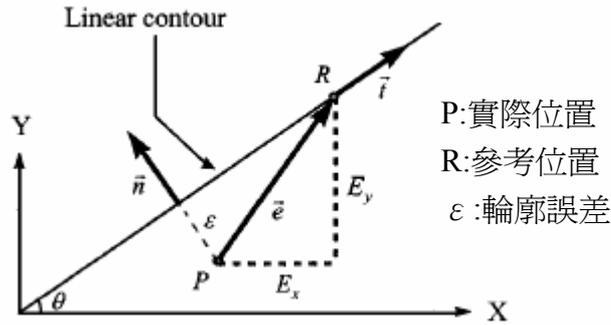


圖 2-10 直線的輪廓描述

比較 Cross-Coupling gain  $\vec{C} = \begin{bmatrix} -Cx \\ Cy \end{bmatrix}$  於式(2-6a)與(2-6b)和正規化正交向量  $\vec{n} = \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \end{bmatrix}$ ，可以得知這 cross-coupling gain 向量包含對應於在正規化正交向量  $\vec{n}$  中的元素，也就是

$$\vec{n} = \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\theta \\ \cos\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -Cx \\ Cy \end{bmatrix} = \vec{C} \quad (2-9)$$

有了這些關係，直線的輪廓誤差向量就可以直接由式(2-8)獲得。對於任意輪廓命令的應用，在雙軸的運動控制中，命令、實際位置 P 與參考位置 R 的幾何關係如圖 2-11 所示。預測的輪廓誤差向量  $\hat{\varepsilon}$  被定義成由實際位置 P 到通過參考位置 R 的單位切線向量  $\vec{t}$  型成之直線的向量。在系統擁有良好的追跡誤差下，預測的輪廓誤差向量  $\hat{\varepsilon}$  近似於輪廓誤差向量  $\varepsilon$ 。由於預測的輪廓誤差向量  $\hat{\varepsilon}$  平行於在參考點 R 的正規化正交向量  $\vec{n}$ ，所以  $\hat{\varepsilon}$  的大小  $\hat{\varepsilon}$  可以被定義為追跡誤差向量  $\vec{e}$  與正規化正交向量  $\vec{n}$  的內積。

令正規化切線向量  $\vec{t} = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix}$ ，正規化正交向量  $\vec{n} = \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \end{bmatrix}$ ，此向量  $\vec{n}$  可以表示成為

$$\vec{n} = \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-t_y}{\sqrt{t_x^2 + t_y^2}} \\ \frac{t_x}{\sqrt{t_x^2 + t_y^2}} \end{bmatrix} \quad (2-10)$$

預測的輪廓誤差可以表示成  $\hat{e} = \langle \vec{e}, \vec{n} \rangle$ ，而預測的輪廓誤差向量則為

$$\vec{\hat{\epsilon}} = \hat{\epsilon} \cdot \vec{n} = \langle \vec{e}, \vec{n} \rangle \cdot \vec{n} \quad (2-11)$$

藉由比較式(2-11)與(2-8)，此 cross-coupling gains (-Cx, Cy)可以經由式正規化正交向量  $\vec{n} = (n_x, n_y)$  中的元素來取代，如式(2-9)所示。

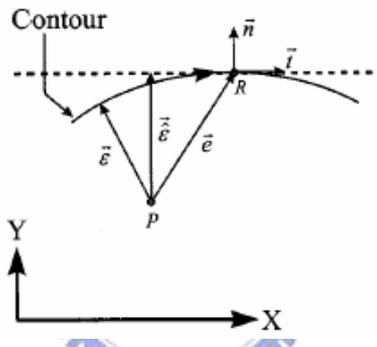


圖 2-11 雙軸運動控制的幾何關係

圖 2-11 顯示了雙軸運動控制的幾何關係，其中

$\vec{\epsilon}$ : 輪廓誤差向量

$\vec{\hat{\epsilon}}$ : 預測的輪廓誤差向量

$\vec{e}$ : 追跡誤差向量

$\vec{t}$ : 正規化切線向量

$\vec{n}$ : 正規化正交向量

P: 實際位置

R: 參考位置

此輪廓誤差向量預測法可將 CCC 之架構應用至多軸上，三軸之運動控幾何關係如圖 2-12 所示，定義正規化輪廓誤差向量

$$\vec{n} = \alpha_1 \vec{t} + \alpha_2 \vec{e} \quad (2-12)$$

其中

$$\langle \vec{n}, \vec{t} \rangle = 0 \quad (2-13)$$

$$\|\vec{n}\| = 1 \quad \text{or} \quad \langle \vec{n}, \vec{n} \rangle = 1 \quad (2-14)$$

$$\|\vec{t}\| = 1 \quad (2-15)$$

$\alpha_1$  和  $\alpha_2$  之間的關係可以由(2-13)與(2-15)兩式推導得知

$$\alpha_1 = -\alpha_2 \cdot \langle \vec{e}, \vec{t} \rangle \quad (2-16)$$

由(2-14)與(2-16)相減可得到  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  為

$$\alpha_1 = \mp \frac{\langle \vec{e}, \vec{t} \rangle}{\sqrt{\|\vec{e}\|^2 - \langle \vec{e}, \vec{t} \rangle^2}} \quad (2-17)$$

$$\alpha_2 = \pm \frac{1}{\sqrt{\|\vec{e}\|^2 - \langle \vec{e}, \vec{t} \rangle^2}} \quad (2-18)$$



式中  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  的符號決定正規化輪廓誤差向量  $\vec{n}$  的方向，因為介於  $\vec{n}$  和  $\vec{e}$  之間的角度是在  $[-90^\circ, +90^\circ]$ ，因此下列的條件永遠存在

$$\langle \vec{n}, \vec{e} \rangle \geq 0 \quad (2-19)$$

由(2-19)，可以進一步決定

$$\alpha_1 = -\frac{\langle \vec{e}, \vec{t} \rangle}{\sqrt{\|\vec{e}\|^2 - \langle \vec{e}, \vec{t} \rangle^2}} \quad (2-20)$$

$$\alpha_2 = \frac{1}{\sqrt{\|\vec{e}\|^2 - \langle \vec{e}, \vec{t} \rangle^2}} \quad (2-21)$$

多軸之 CCC 補償架構如圖 2-13 所示，若正規化輪廓誤差向量

$\vec{n} = [n_x \ n_y \ n_z \ \dots]^T$ ，則 cross-coupling gain ( $C_x, C_y, C_z, \dots$ ) 為

$$C_i = n_i, \quad i = x, y, z, \dots$$

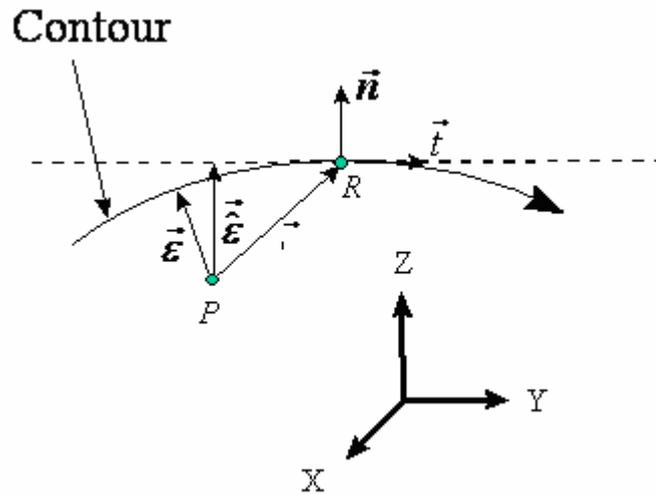


圖 2-12 三軸運動控制的幾何關係 [35]

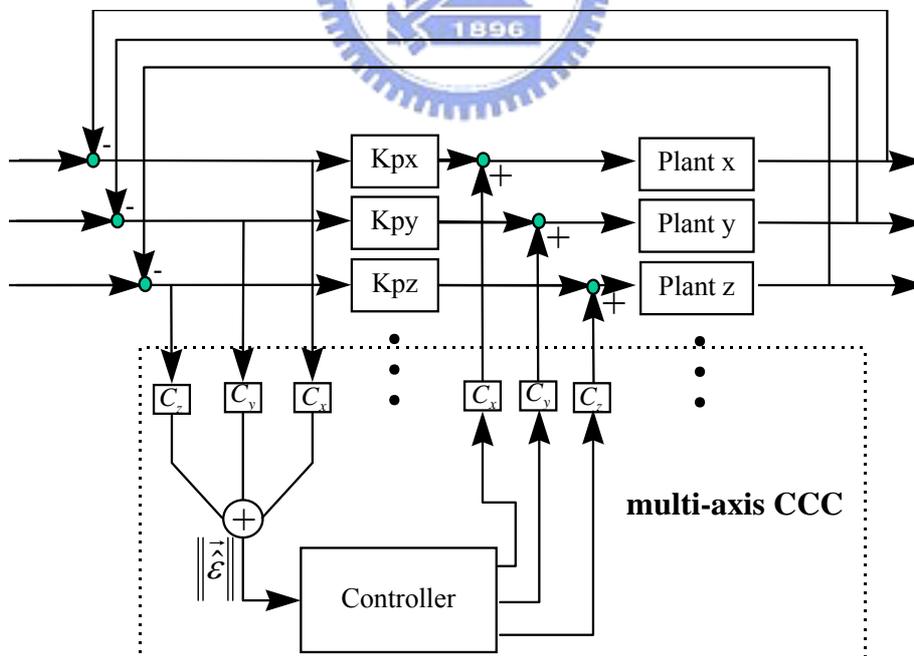


圖 2-13 多軸運動控制系統之 CCC 補償架構 [35]



由(2-22)與(2-23)，此二式間存在一重要的關係，即

$$\varepsilon_c^p = \frac{1}{1+CK} \varepsilon_o^p = H \cdot \varepsilon_o^p \quad (2-24)$$

其中 
$$K = \frac{(1+K_{px}P_1)C_yC_yP_2 + (1+K_{py}P_2)C_xC_xP_1}{(1+K_{px}P_1)(1+K_{py}P_2)}$$

C:設計之 CCC 增益值

$H = \frac{1}{1+CK}$  : 輪廓誤差轉移函式(contouring error transfer function, CETF)

依據(2-24)，整合型控制器之設計程序可被簡化成下列二點：

1. CETF 描述介於有加 CCC 與無加 CCC 之間的輪廓誤差。
2. CETF 等效於圖 2-3-2 中 SISO 控制系統的 sensitivity function。

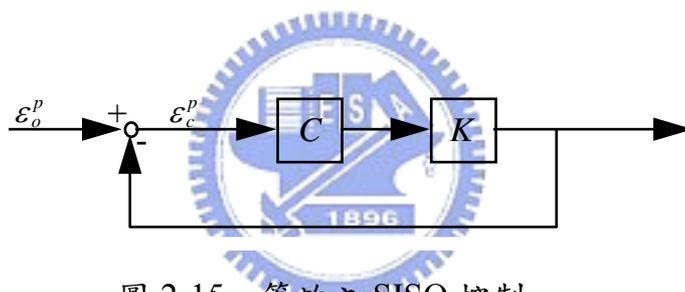


圖 2-15 等效之 SISO 控制

也就是說，CK 的設計是為了使  $\frac{1}{1+CK}$  趨近於零，亦為傳統控制系統中，CK 的設計是為了使得  $\frac{CK}{1+CK} \rightarrow 1$ ，因此我們可以由 CK 的波德圖得知此加入 CCC 後的系統等效剩餘之 gain margin 和 phase margin，也可以由  $1+CK$  算出導至系統不穩定時之 C 值為何。

若

$$P_1(z^{-1}) = \frac{10^{-3}(0.30554z^2 - 0.023766z^3 + 0.11104z^4 + 0.028834z^5 - 0.012243z^6 + 0.020811z^7 - 0.089113z^8)}{1 - 1.7067z^{-1} + 0.9001z^{-2} - 0.3445z^{-3} + 0.1255z^{-4} + 0.0537z^{-5} - 0.028z^{-6}}$$

$$P_2(z^{-1}) = \frac{10^{-3}(0.26392z^2 + 0.11496z^3 + 0.073546z^4 + 0.076593z^5 + 0.09831z^6)}{1 - 1.5147z^{-1} + 0.706z^{-2} - 0.311z^{-3} + 0.1289z^{-4} + 0.0132z^{-5} - 0.0269z^{-6} + 0.0438z^{-7} - 0.0393z^{-8}}$$

$$K_{px} = K_{py} = 30$$

$C_x$  與  $C_y$  固定為 0.707 時，可得  $K$  為

$$K = \frac{10^{-6}(284.6z^{-3} - 410.9z^{-4} + 238.7z^{-5} - 141.3z^{-6} + 49.13z^{-7} - 33.24z^{-8} - 29.91z^{-9} + 75.64z^{-10} - 35.74z^{-11} + 18.92z^{-12} - 8.573z^{-13} - 1.887z^{-14} + 1.751z^{-15} - 2.622z^{-16} + 1.751z^{-17})}{1 - 3.211z^{-1} + 4.191z^{-2} - 3.207z^{-3} + 1.918z^{-4} - 0.852z^{-5} + 0.1445z^{-6} + 0.1014z^{-7} - 0.1651z^{-8} + 0.1312z^{-9} - 0.05224z^{-10} + 0.01507z^{-11} - 0.0006849z^{-12} - 0.003845z^{-13} + 0.0009934z^{-14} + 0.0001094z^{-15} - 0.0001495z^{-16} + 0.0001051z^{-17}}$$

若輸入之  $C$  值為 100 時，其 gain margin 為 11.4dB，phase margin 為  $79.7^\circ$ ，如圖 2-16 所示，模擬結果如圖 2-17 所示。由  $1+CK$  可算出最大允許之  $C$  值為 372，若選擇一接近此邊界值之  $C=310$  時，其波德圖如圖 2-18 所示，其 gain margin 為 1.56dB，phase margin 為  $12.7^\circ$ ，其模擬結果如圖 2-19 所示，已經接近不穩定，證明所算之  $C$  邊界值為正確。

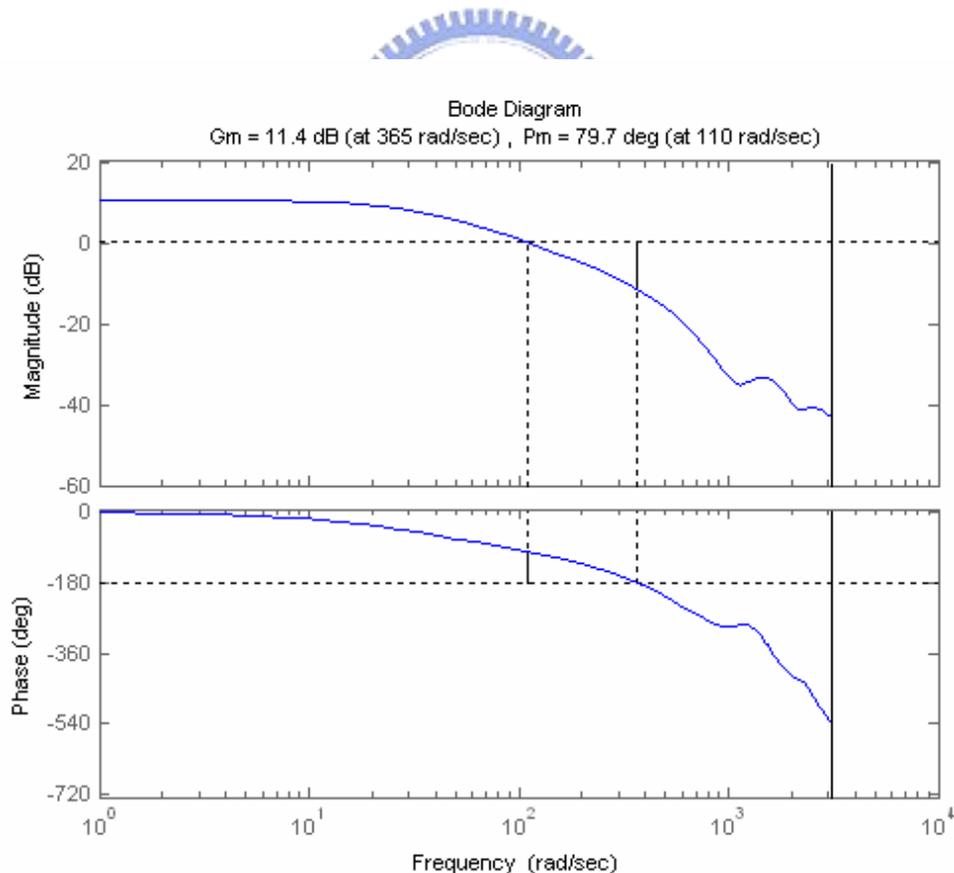


圖 2-16  $C$  值為 100 時系統之 gain margin 和 phase margin

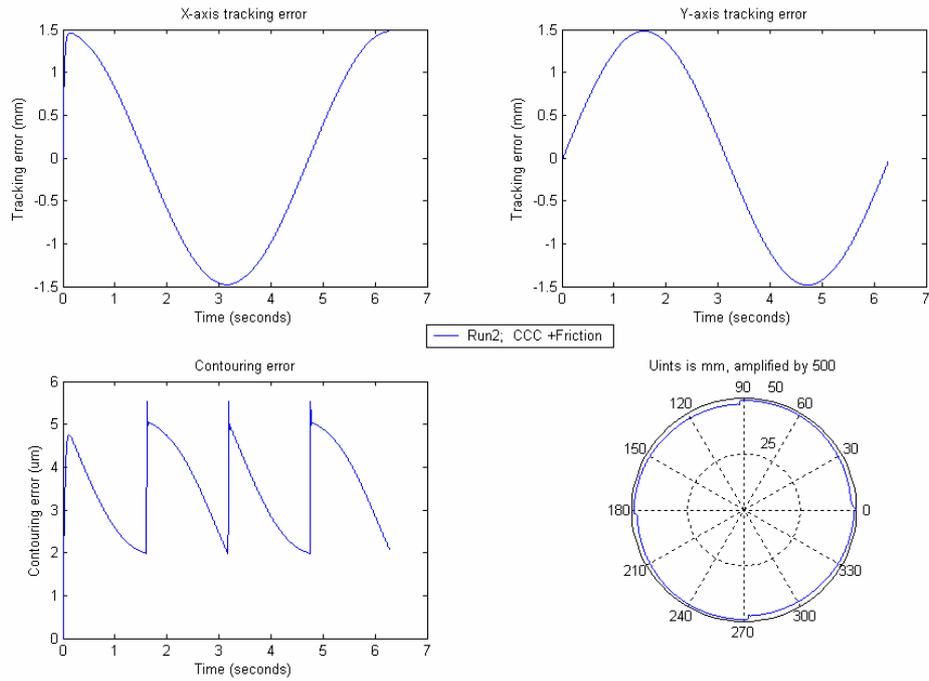


圖 2-17  $C$  值為 100 時之模擬結果

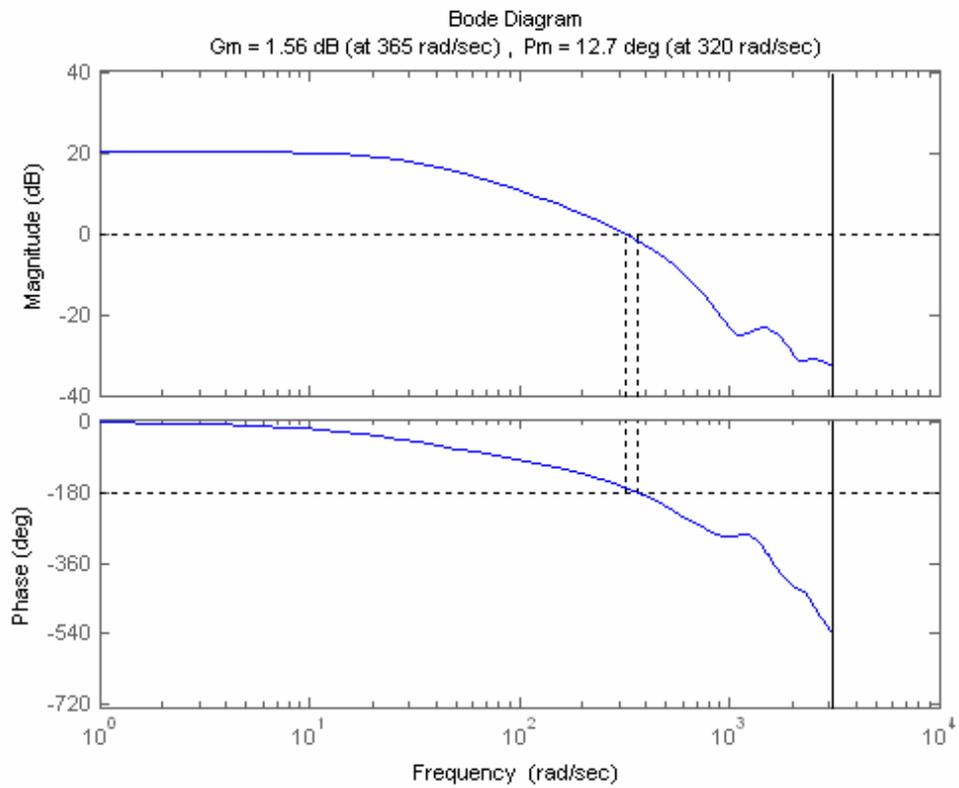


圖 3-18  $C$  值為 310 時系統之 gain margin 和 phase margin

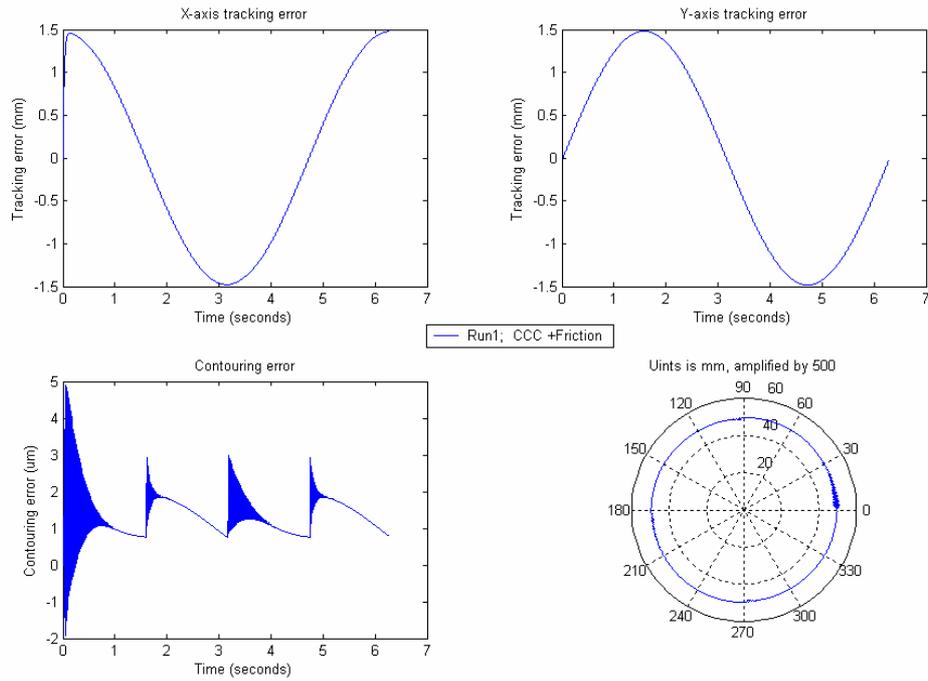


圖 2-19 C 值為 310 時之模擬結果

此結果為固定  $C_x$  與  $C_y$  為定值時所算出之結果，然實際在跑圓時， $C_x$  和  $C_y$  是隨著時間而變的，在低頻時看不出其差異，但在高頻時， $C$  邊界值之計算應更為保守，才能確保系統之穩定，也就是應當選取大的 gain margin 和 phase margin。

## 第三章 擾動觀測器與摩擦力補償器

在本章中將介紹數位式擾動觀測器DDOB，並說明其設計方式與分析其穩定度。最後則介紹系統的非線性現象，其造成的影響與探討以非線性摩擦力補償器NFC作為解決的方法。

### 3-1 數位式擾動觀測器

擾動觀測器 (DOB) 被廣泛地用於降低外界擾動對控制系統的影響。過去的 DOB 多半是在連續時間域 (continuous-time domain) 進行設計，再轉換至離散時間域 (discrete-time domain)，為了減少在轉換過程中實現 (implement) 上的差異，以及取樣時間 (sampling time) 的限制，近年來出現直接在離散時間域進行設計的 DOB，即數位式擾動觀測器 (DDOB)。本章首先就傳統式 DOB 的發展與基本原理作一考察，並分析其在設計過程中出現的問題。接著介紹 Yeh and Hsu (2000) 提出的 DDOB 的控制架構，包括原理推導與系統化的設計法則；並且針對 DDOB 的穩定性做分析。

#### 3-1-1 傳統的擾動觀測器 (Traditional DOB)

由於外界擾動與無可避免的模式誤差 (modeling error)，以模式為基礎的控制器設計 (model-based controller) 其性能往往因此惡化而不如預期的效計效果，於是，DOB 常被應用於控制系統中以抑制擾動，提供精準的受控體模式 (model)，其架構如圖 3-1 所示。



phase system)，其反模式 (inverse model) 有實現上的困難，這也就大幅限制了 DOB 的應用範圍。

### 3-1-2 數位式擾動觀測器 (digital disturbance observer)

為了避免 DOB 在連續時間域進行設計 (以致於出現種種問題)，以及克服反模式的實現困難，Yeh and Hsu (2000) 提出了數位式擾動觀測器 (DDOB) 的設計方法 [35]。

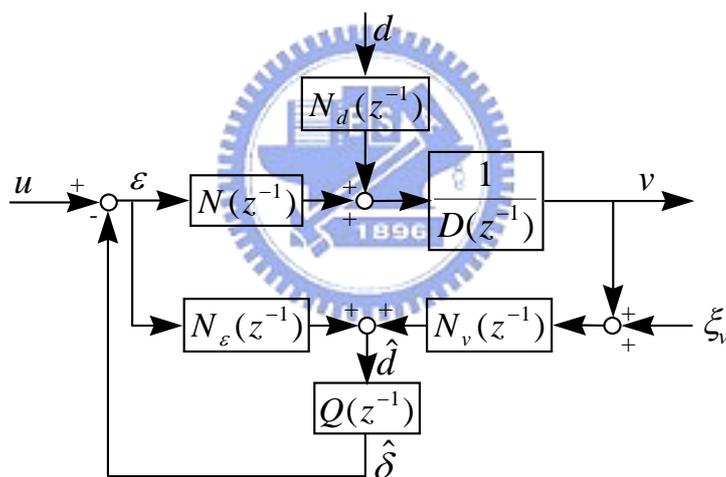


圖 3-2 DDOB 控制架構

圖 3-2 顯示了 DDOB 的控制系統架構，其中

$u$ ：位置命令。

$\varepsilon$ ：驅動力 (driving force)。

$v$ ：系統速度輸出。

$d$ ：摩擦力、負載等低頻的外界擾動 (external disturbance)。

$\xi_v$ ：高頻的量測雜訊 (measurement noise)。

$\tilde{d}$  : 估測到的擾動訊號。

$\hat{\delta}$  : 迴授訊號。

$N(z^{-1}), D(z^{-1})$  : 受控體轉移函式之分子與分母。

$N_d(z^{-1})$  : 外部干擾之結構。

$N_\varepsilon(z^{-1}), N_v(z^{-1})$  : 輸入之 FIR 濾波器。

$Q(z^{-1})$  : 輸出濾波器。

首先進行系統架構的分析。由於

$$v = \frac{N}{D} \varepsilon + \frac{N_d}{D} d \quad (3-1a)$$

$$\varepsilon = u - Q[N_\varepsilon \varepsilon + N_v v] \quad (3-1b)$$

經過整理之後，可以得到速度輸出  $v$  的表示式

$$\begin{aligned} v &= \frac{N}{D(1+N_\varepsilon Q) + NN_v Q} u + \frac{N_d(1+N_\varepsilon Q)}{D(1+N_\varepsilon Q) + NN_v Q} d \\ &= \frac{N}{D} \frac{1}{(1+N_\varepsilon Q) + \frac{N}{D} N_v Q} u + \frac{N_d}{D} \frac{(1+N_\varepsilon Q)}{(1+N_\varepsilon Q) + \frac{N}{D} N_v Q} d \end{aligned} \quad (3-2)$$

假設 Q filter 被設計成

$$1 + N_\varepsilon Q = 0 \quad (3-3)$$

則式(3-1-2-2)變成

$$v = \frac{N}{D} \frac{1}{\frac{N}{D} N_v Q} u = \frac{1}{N_v Q} u = \frac{-N_\varepsilon}{N_v} u$$

設定速度迴路之轉移函式為名義模式，也就是

$$\frac{v}{u} = \frac{-N_\varepsilon}{N_v} = \frac{N_n}{D_n}$$

接下來輸入的 FIR 濾波器  $N_\varepsilon(z^{-1})$  和  $N_v(z^{-1})$  被設計成

$$N_\varepsilon(z^{-1}) = -N_n(z^{-1})$$

$$N_v(z^{-1}) = D_n(z^{-1})$$

此時(3-3)的假設變成

$$N_n(z^{-1})Q(z^{-1}) = 1$$

新的 DDOB 架構即可獲得，如圖 3-3 所示，所有在此 DDOB 內的子系統是穩定的，且名義模式  $P_n^v(z^{-1}) = \frac{N_n(z^{-1})}{D_n(z^{-1})}$  可以是含有不穩定之分子的任意穩定系統。

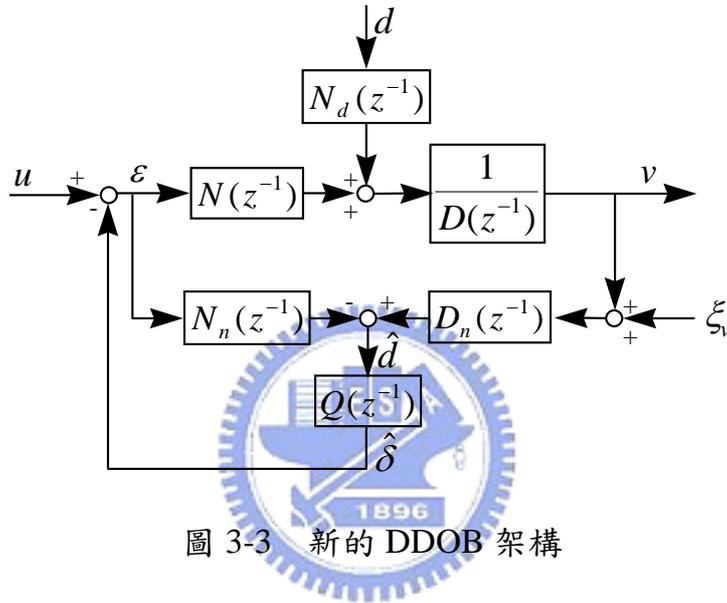


圖 3-3 新的 DDOB 架構

藉由考慮量測雜訊  $\xi_v$ ，此 DDOB 的速度響應為

$$\begin{aligned} v &= \frac{N}{D(1-N_nQ)+ND_nQ}u + \frac{N_d(1-N_nQ)}{D(1-N_nQ)+ND_nQ}d - \frac{NQD_n}{D(1-N_nQ)+ND_nQ}\xi_v \\ &= \frac{N}{D} \frac{1}{(1-N_nQ)+\frac{N}{D}D_nQ}u + \frac{N_d}{D} \frac{(1-N_nQ)}{(1-N_nQ)+\frac{N}{D}D_nQ}d - \frac{N}{D} \frac{D_nQ}{(1-N_nQ)+\frac{N}{D}D_nQ}\xi_v \end{aligned} \quad (3-4)$$

如果 Q 濾波器被設計成  $N_n(z^{-1})Q(z^{-1}) = 1$ ，則

$$v = \frac{N_n}{D}u - \xi_v$$

然而，如果 Q 濾波器被設計成  $N_n(z^{-1})Q(z^{-1}) = 0$ ，則

$$v = \frac{N}{D}u + \frac{N_d}{D}d$$

因此，Q 濾波器必須被設計成

$$\begin{cases} N_n(z^{-1})Q(z^{-1}) = 1, \text{ in the lower frequency region} \\ N_n(z^{-1})Q(z^{-1}) = 0, \text{ in the higher frequency region} \end{cases} \quad (3-5)$$

此設計是為了減低外在干擾並且防止量測雜訊。由於Q濾波器之設計與名義模式緊緊相關，Q濾波器之設計包含三個重點：

1. 穩定之極零點對消被直接應用到濾波器之設計。
2. 全通濾波器被應用於重整頻率響應。
3. DDOB內之低通濾波器是被應用於達到如式(3-5)之頻率響應。

藉由分離名義模式之分子  $N_n(z^{-1})$  成

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

其中

$N_n^a(z^{-1})$ ：為可接受多項式 (acceptable polynomial)，是由  $N_n(z^{-1})$  多項式中穩定且較少震盪的零點所組成的多項式。

$N_n^u(z^{-1})$ ：為不可接受多項式 (unacceptable polynomial)，是由  $N_n(z^{-1})$  多項式中不穩定或震盪劇烈的零點所組成的多項式。

假設不可接受之分子多項式  $N_n^u(z^{-1})$  被表示成

$$N_n^u(z^{-1}) = b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + \dots + b_mz^{-m} = z^{-m}(b_1z^{m-1} + b_2z^{m-2} + \dots + b_m) = z^{-m} \cdot \hat{N}_n^u(z)$$

則Q濾波器被設計成

$$Q(z^{-1}) = \frac{1}{N_n^a(z^{-1}) \cdot [\hat{N}_n^u(z)]^*} \cdot LPF(z^{-1}) \quad (3-6)$$

其中  $[\cdot]^*$  表示複數共軛運算子，且

$$[\hat{N}_n^u(z)]^* = (b_1z^{-(m-1)} + b_2z^{-(m-2)} + \dots + b_m) \quad (3-7)$$

上式是可穩定且可以實現的，且  $\frac{N_n^u(z^{-1})}{[\hat{N}_n^u(z)]^*}$  形成一穩定之全通濾波器

低通濾波器  $LPF(z^{-1})$  是任意的低通濾波器，其設計可以使得

$$Q(z^{-1}) \cdot N_n(z^{-1}) = \frac{N_n^u(z^{-1})}{[\hat{N}_n^u(z)]^*} \cdot LPF(z^{-1}) \quad (3-8)$$

達到(3-5)想要的頻率響應。設計實例如下：

例五：

若速度回路轉移函式為

$$V_x(z^{-1}) = \frac{10^{-2}(30.56z^{-2} - 2.377z^{-3} + 11.10z^{-4} + 2.883z^{-5} - 1.224z^{-6} + 2.0811z^{-7} - 8.911z^{-8})}{1 - 0.70669z^{-1} + 0.1934z^{-2} - 0.15112z^{-3} - 0.02566z^{-4} + 0.028011z^{-5}}$$

則

$$N_n^a(z^{-1}) = 1 - 0.0778z^{-1} + 0.3634z^{-2} + 0.0944z^{-3} - 0.0401z^{-4} + 0.0681z^{-5} - 0.2917z^{-6}$$

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

可得Q濾波器之model為

$$Q(z^{-1}) = \frac{3.2729 \times LPF(z^{-1})}{1 - 0.077784z^{-1} + 0.36342z^{-2} + 0.094373z^{-3} - 0.040071z^{-4} + 0.068114z^{-5} - 0.29166z^{-6}}$$

其中  $LPF(z^{-1})$  可依照想要的頻率響應設計，若以Butterworth之方式設計截止頻率為 30Hz 之 3 階低通濾波器，則

$$LPF(z^{-1}) = \frac{0.00069935 + 0.002098z^{-1} + 0.002098z^{-2} + 0.00069935z^{-3}}{1 - 2.6236z^{-1} + 2.3147z^{-2} - 0.68554z^{-3}}$$

## 3-2 非線性摩擦力補償器

在此節中會說明摩擦力模型的簡介，其對於系統的影響，與其造的原因為何，並探討如何解決之。

### 3-2-1 摩擦力模型簡介

摩擦力以某種程度的影響力存在於所有的機械設備，在許多運動控制應用中，摩擦力一直是侷限系統性能的主要因素之一，但是因為非線性是它的自然特性，所以摩擦力通常都會被乎略或是使用一般控制器不當的補償它 [20]。

許多關於摩擦力方面的討論與文獻，例如摩擦力的模型、識別摩擦力模型參數與補償的方法，均已非常豐富。四個摩擦力對於速度關係的模型如圖 3-4 所示。圖 3-4 (a)是一個簡單的「Relay」特性的模型來描述庫倫(Coulomb)摩擦力。圖 3-4 (b)則是有分叉(Breakway)摩擦力或定(stiction)摩擦力，也就是黏滯阻尼(viscous damping)。圖 3-4 (c)包含了一個指數(exponential)的模型，它在低速時的斜率是負的。圖 3-4 (d)則是Karnopp's 摩擦力模型，它有一個小的區間速度是被定義為零，在此 $\pm \Delta \omega$ 的區間內，摩擦力平衡掉作用於此系統的淨力。此平衡一直保持到超過分叉力，這系統才會進入滑動(slip)區域。

除了這些模型之外，當然系統的摩擦力可能不是對稱的，也就是在正的速度下和在負的速度下，其動摩擦力是不一樣的，也有一些文獻是在討論這個話題 [23]。這些模型來看，它們基本上都有共通的問題，就是它們都是非因果的(not causal)，也就是說，在速度為零時，有一明顯的中斷存在，其斜率接近於無窮大。這使得不當的補償，也許會導致系統的不穩定，因為回授的速度估測，並無法得知系統真正「零速度」下的反應。

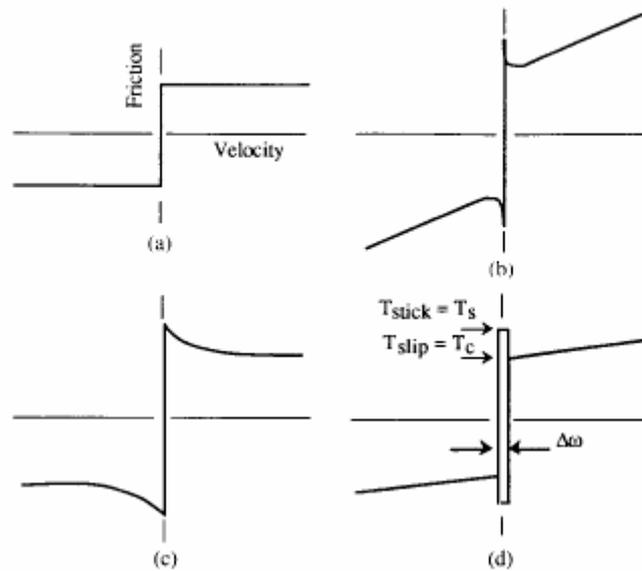


圖 3-4 不同的摩擦力模型 [20]

### 3-2-2 摩擦力造成的原因與對系統產生的影響

摩擦力對工具機所會產生的影響大約可分為 quadrant glitches 與 slip-stick，其分別說明如下：

#### 1. Quadrant glitches

當進行循圓運動時，當機械進給軸反向運重，因靜摩擦、動摩擦及摩擦力反向之發生，馬達的輸出扭力比摩擦力小，而使軸向進給於反向運動時停止，此時，另一同動軸依然繼續運動，這種狀態將於循圓換向運動時造成圓半徑之凸起誤差，此種現象稱為 Quadrant glitches (Armstrong-Helouvry, P. Dupont, and C. Canudas de Wit, 1994)，如圖 3-5 所示。

更進一步的說明，如圖 3-6 所示，摩擦力必定與物體運動的方向相反，如圖 3-6(a)當進行加速度運動時，摩擦力與推動物體前進的力量反向，將

因此而使運動速度不如預期的上升；如圖 3-6(b)當進行減速運動時，摩擦力與使物體減速的力量同向，因而使得運動速度較預期的快速下降。發生 quadrant glitches 時，則是屬於(a)的狀態，但此時的運動速度為零。

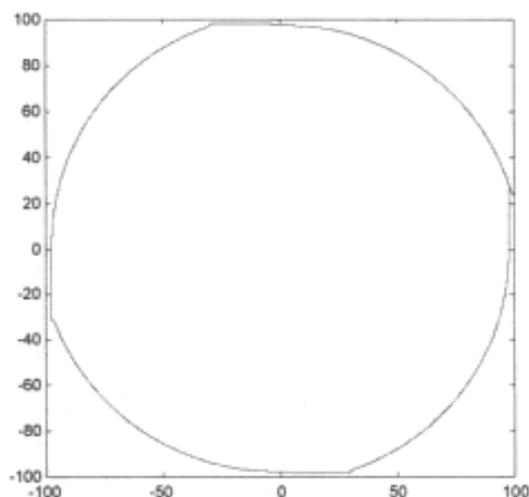


圖 3-5 Quadrant glitches

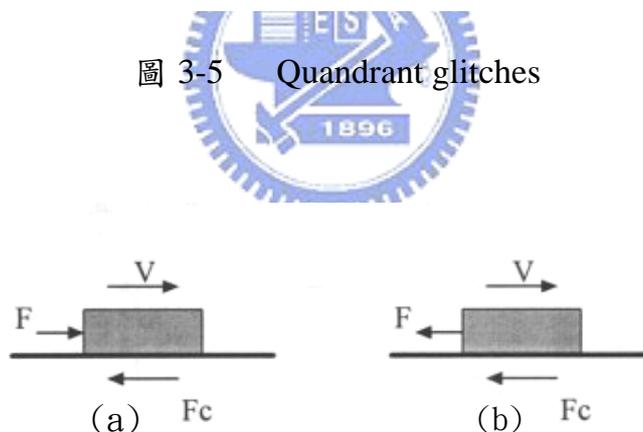


圖 3-6 摩擦力與運動速度之關係

## 2. Slip-stick 現象

另一在運動控制系統中常見有關於摩擦力的現象為 slip-stick，其成因是因為靜摩擦力與動摩擦力的不同，如圖 3-7 所示；因為運動過程中須先克服較大的靜摩擦而後開始運動，但開始運動後由於動摩擦力較小故速度

會突然加快，因而造成位置誤差突然增加，如圖 3-8 所示。此種現象稱之為 slip-stick (G. W. Younkin, 1991)。

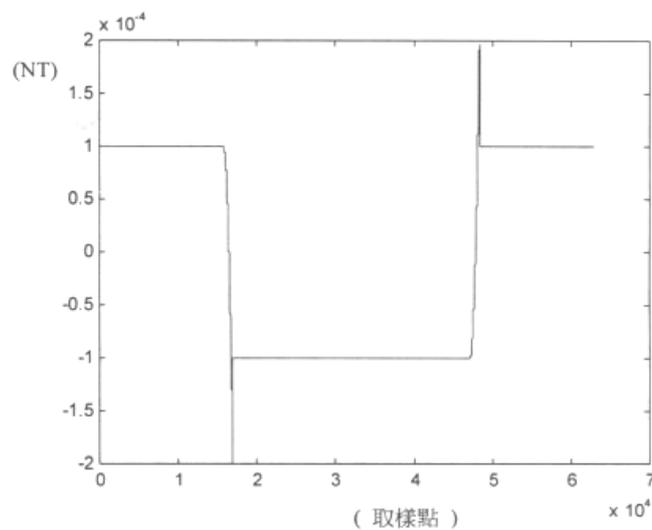


圖 3-7 靜摩擦力與動摩擦力之不同

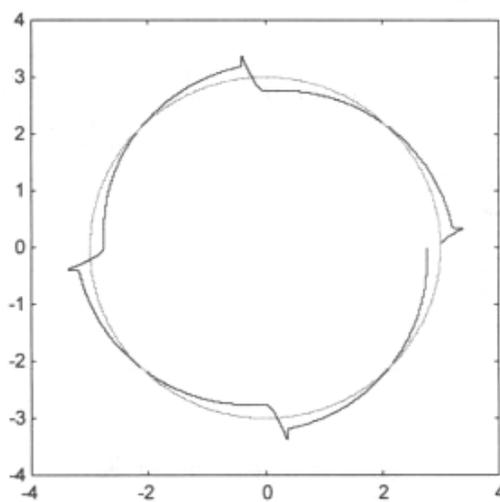


圖 3-8 slip-stick 現象所產生之輪廓誤差

### 3-2-3 非線性摩擦力補償器之探討

在 model-based 的非線性補償方式中，大多是發展出一個非線性的模型，或是套用已發表於文獻中的模型，再識別模型中各個參數，以符合這些模型的需求。但往往得到的真實機台非線性模型並非和特定的非線性模型類似，或是找不到適當的模型參數以適合真實機台的非線性曲線。尤其是當模型的參數高達 5 至 6 個時，此種方式即難以使用。

一般的馬達控制方塊如圖 3-9 所示，由圖可以得知，實際送給馬的轉矩是扣除掉摩擦力和外在干擾，使得由電流產生的扭矩命令與實際馬達產生的扭矩不同，以至於系統無法達到精密運動的需求。

圖 3-9 中，命令轉矩  $\tau_{cmd}$  是速度命令  $\omega^*$  經由 PI 控制器所產生，實際送到馬達的轉矩為  $\tau_{act}$ ，而  $\tau_{act} = \tau_{cmd} - \tau_{friction} - \tau_{Disturbance}$ ，在無切削力的情況下，我們若忽略掉  $\tau_{Disturbance}$ ，整個方程式變為  $\tau_{act} = \tau_{cmd} - \tau_{friction}$ 。由於

$$J\alpha = \tau_{act} = \tau_{cmd} - \tau_{friction} \quad (3-9)$$

其中  $\alpha = d\omega/dt$ ，所以式(3-9)變為

$$J(d\omega/dt) = \tau_{cmd} - \tau_{friction} \quad (3-10)$$

由於許多的伺服馬達實驗機台，其控制模式可以調為扭矩輸入式，所以在等速度命令下，由式(3-10)為零時，可由測得的  $\tau_{cmd}$  而得知  $\tau_{friction}$ 。所以我們採用的方式為送入不同速度命令，在其速度到達穩態時，量取平均的轉矩命令。這樣我們就可以得到  $\tau_{friction}$  對 velocity command 的曲線。補償架構如圖 3-10 所示，採用前饋式非線性摩擦力補償器。

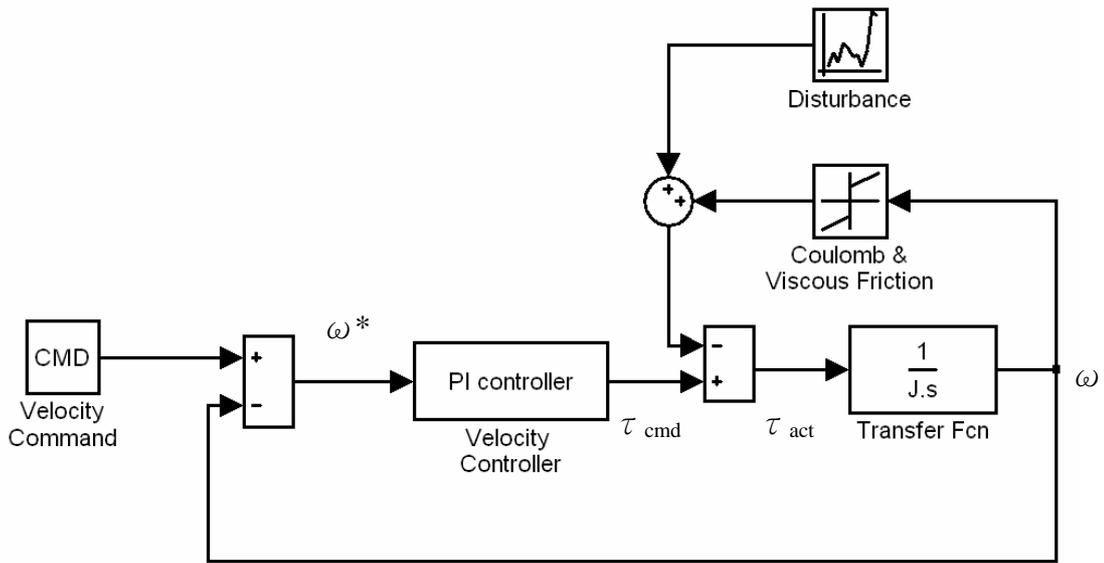


圖 3-9 無摩擦力補償之一般馬達控制之速度迴路

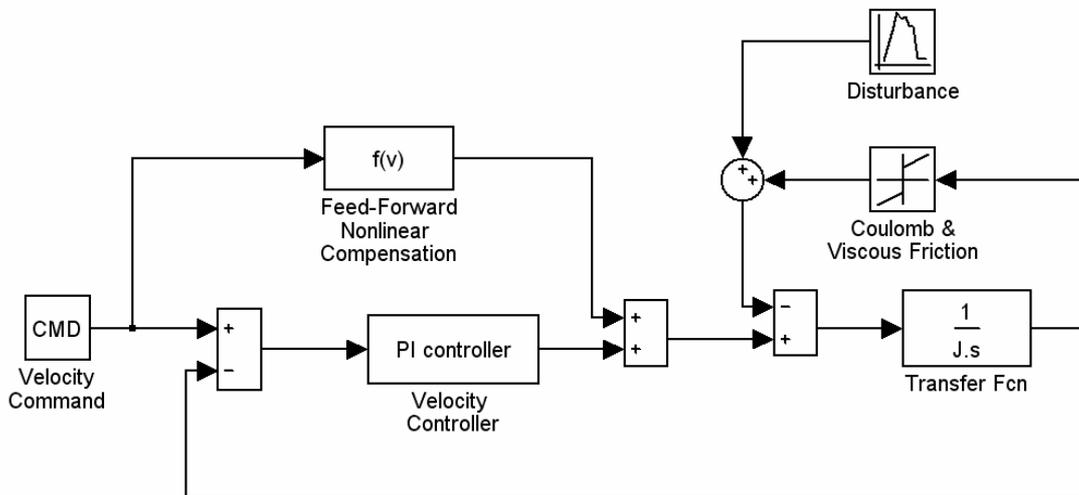


圖 3-10 前饋式非線性摩擦力補償器架構

### 3-3 DDOB與NFC之結論 (Summary)

本章介紹 DDOB 的架構、設計的理念與設計方法。透過適當地選取 Q 濾波器，DDOB 能消除低頻擾動與高頻雜訊，並使受控體表現的如同名義模式一般，進而解決了系統不確定性的問題。DDOB 與傳統式 DOB 的主要差異在於傳統式 DOB 是在連續時間域進行設計，而 DDOB 是直接設計於離散時間域，這使得 DDOB 能避免 DOB 在設計過程中產生的轉換誤差、取樣時間的限制……等問題。

另外，DDOB 的架構作了改善，不需要實現名義模式的反模式，因此避免了非最小相位系統無法實現反模式的難題，使得 DDOB 的應用範圍不再受到限制。而由於控制架構的更動，Q 濾波器不再只是單純的低通濾波器，而是肩負三個功能：極零點對消 (pole-zero cancellation)、全通濾波器與低通濾波器。

最後則是分析機台的非線性現象、摩擦力的種類簡介與其補償方式的探討，雖然摩擦力的補償模型非常的多，每種都有其優缺點，但最適當的還是實測於該機台的模型，與取得機台摩擦力的方式，這樣對於摩擦力的補償才會是恰到好處。

## 第四章 高精度運動控制之 DSP 硬體實現

本章中將介紹 DSP 運動控制板之製作與功能。在第一節中將對整個實驗的硬體架構做說明，在第二節中將介紹實現本文控制架構的德州儀器公司(Texas Instrument)出產之 TMS320F2812 DSP 晶片，第三節為介紹此 DSP 之週邊電路設計。

### 4-1 實驗系統之硬體架構

近幾年來由於超大型積體電路(VLSI)技術的蓬勃發展，使得數位訊號處理器(digital signal processor, DSP)的運算速度及週邊處理的功能有大幅的改善，它更取代了傳統的微處理器(micro processor)的市場，在各種應用場合如行動通訊、資訊家電與馬達驅動器都被廣泛的使用。因此本論文採用 TMS320F2812 這顆 DSP 做為控制器，它是德州儀器公司最新研發出來專門針對馬達控制而設計的一顆定點 16 與 32 位元並容的運算單晶片，其執行速度較早期的 TMS320F240 DSP 晶片快 7 倍以上(指令週期為 150MHz)，其有二種針對換流器的六個開關元件所設計的 PWM 輸出通道，可以經由設定改變換流器每一支臂上下開關的空白時間(dead time)；也可以外接數位／類比轉換器與光學編碼器的輸入介面做轉矩模式的控制，使得馬達的控制變得較為簡單易行。以此顆 DSP 當作控制器的核心配合週邊電路與馬達驅動器(driver)即構成一完整的機台控制器，完整的硬體架構如圖 4-1 所示，實驗環境如圖 4-2。

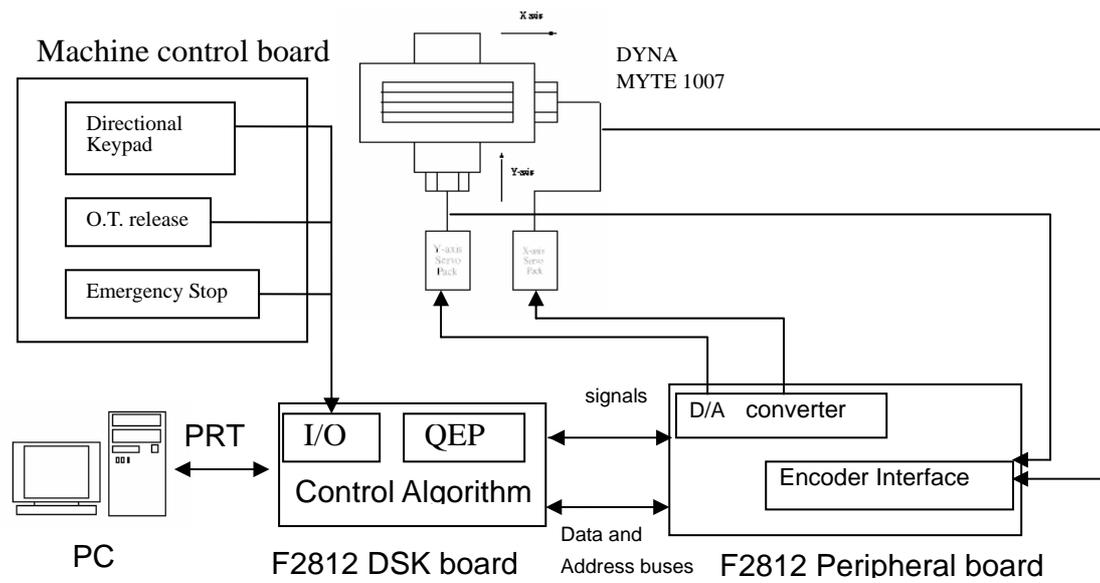


圖 4-1 實驗系統之硬體架構



圖 4-2 實驗 CNC 及其週邊控制設備

## 4-2 TMS320F2812 之功能介紹

應用 DSP 於運動控制，主要就是希望充份利用 DSP 強大的數學運算功能，而以最少的硬體週邊元件來實現馬達控制所需的所有功能。在此條件下，能充份了解系統所需實現的功能以及 DSP 軟硬體設計的配合就顯得格外重要。本文所使用的 TMS320F2812 DSP 晶片是德州儀器公司生產'C2x 系列 DSP 控制器中目前最高等級的元件，專為馬達控制所設計，因此它訂了一套單晶片數位式控制的標準。'F2812 可以在一秒鐘執行 15,000 萬個指令(150MIPS)，幾乎所有指令都可以在單一 6.67ns 的時脈週期內執行完畢，速度是 TI 早期出產之 DSP 'C240 的 7 倍，約為傳統 8051 單晶片之 600 倍左右。與一般處理器比較，微處理器都有一個固定的架構：廣大的記憶體空間，多樣的定址模式豐富的指令集等。而 DSP 晶片卻有較少的定址空間，有限的定址模式，少量且特殊的指令集以及特殊的硬體架構。較舊型的 DSP 大部份是採用分離式的程式記憶體與資料記憶體，甚至還有 I/O 記憶體，但近年來新的 DSP 卻走向單獨的記憶體空間，裡頭包含了這三種記憶體，使用起來更為有彈性，也可減少不同記憶體之間搬動資料的指令集。F2812 所採取的硬體架構是以 16 位元與 32 位元共容的資料處理單元，採用 32 位元的資料、位置匯流排與暫存器，其核心為 32 位元的算術運算邏輯單元(ALU)與累積器(ACC)，並以硬體方式來實現不同的功能，如乘法器、位移器，以提升其計算速度。在整數計算方面，為了減少數值計算所衍生的問題如溢位(overflow)，採用硬體式的位移暫存器來提高軟體執行的精確度，這些位移暫存器可以配合其他指令一起使用，並不需要耗費額外的執行時間。為了加快其計算速度，在指令集的設計上也加入許多巧思，以配合高速信號處理的需求。數位運算中的位時間延遲運算元(operator)可以單一指令 DMOV 完成，而 MACD 指令則可以同時完成四個操作：兩個數的相乘、移動資料與前一筆資料累加、載入下一個暫存器。

TMS320 系列 DSP 的乘法器是以硬體方式實現，僅要一個指令週期 (instruction cycle) 即可完成乘法運算。此外 TMS320 系列 DSP 以累加器飽和模式來解決溢位的問題，使數值運算更為穩定。

TMS320F2812 除了有一般數位訊號處理器的快速運算能力外，最重要的是它還有和一般微處理器和微控制器一樣的強大週邊支援能力，如 UART 序列通訊、控制區域網路(control area network, CAN)、串列週邊介面(Serial Peripheral Interface, SPI)、多通道緩衝串列埠(multichannel buffered serial port, McBSP)、A/D converter 和一般用途 I/O(general purpose I/O, GPIO)，其架構方塊如圖 4-3 所示。論細說明請看附錄 A。

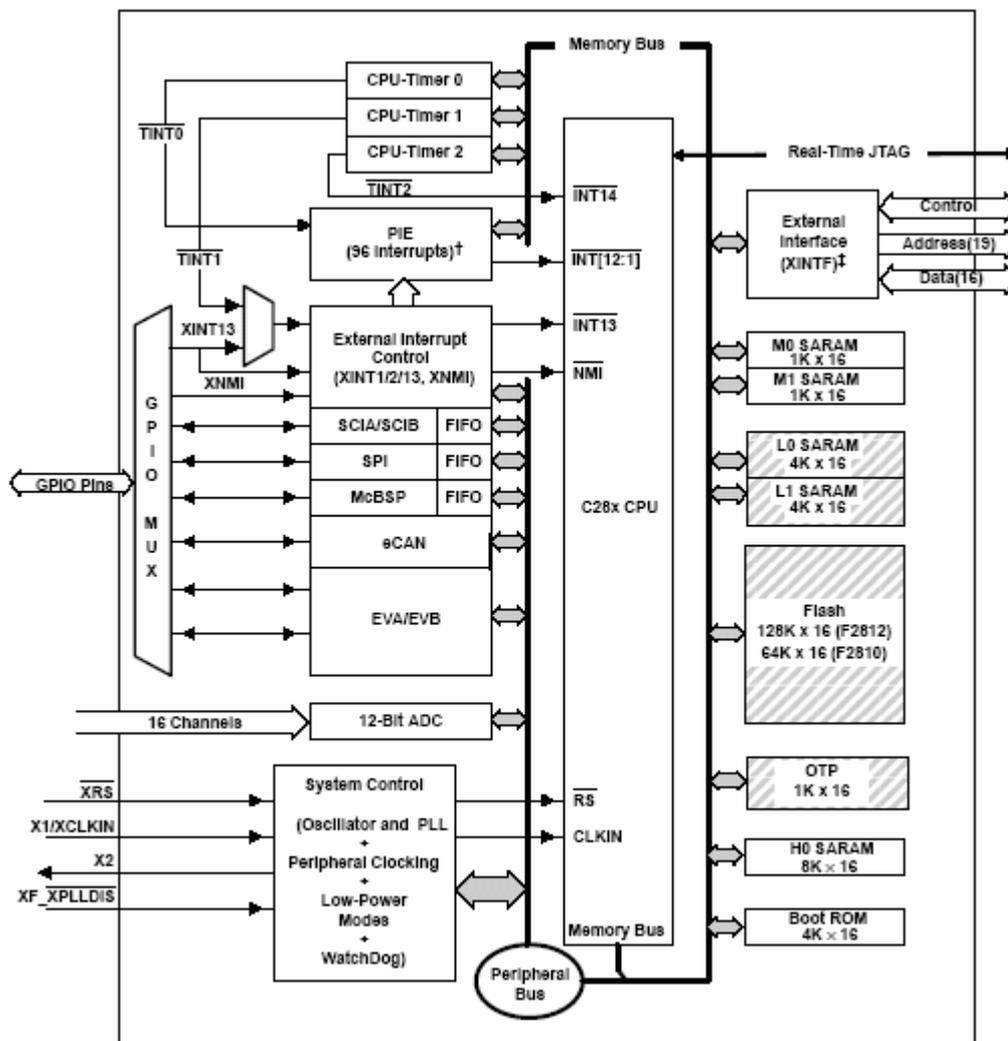


圖 4-3 TMS320F2812 架構方塊

### 4-3 TMS320F2812 週邊電路設計

因為 F2812 Ez DSK 板的功能較為陽春(詳細 DSK 板功能請看附錄 B)，週邊電路並不像 EVM 板那樣的完整，若要達到可以控制機台的目標，則必需外加 D/A 轉換器及光耦合介面電路。但為了往後的應用用途，在週邊電路設計使其能更完整，因此多增加了 RS-232 通訊介面及 CAN 介面。

#### ■ D/A 轉換器電路製作：

本文所採用之 D/A 轉換器為 Burr-Brown 公司出產專門用於馬達控制用途之 DAC7625，內部方塊圖如圖 4-4 所示，其主要的特色如下：

- 單極性(unipolar)與雙極性(bipolar)運作模式。
- 穩定時間(settling time)為 10us。
- 12 位元，4 通道。
- 資料讀回(data readback)功能。
- 雙緩衝(double-buffered)資料輸入區。

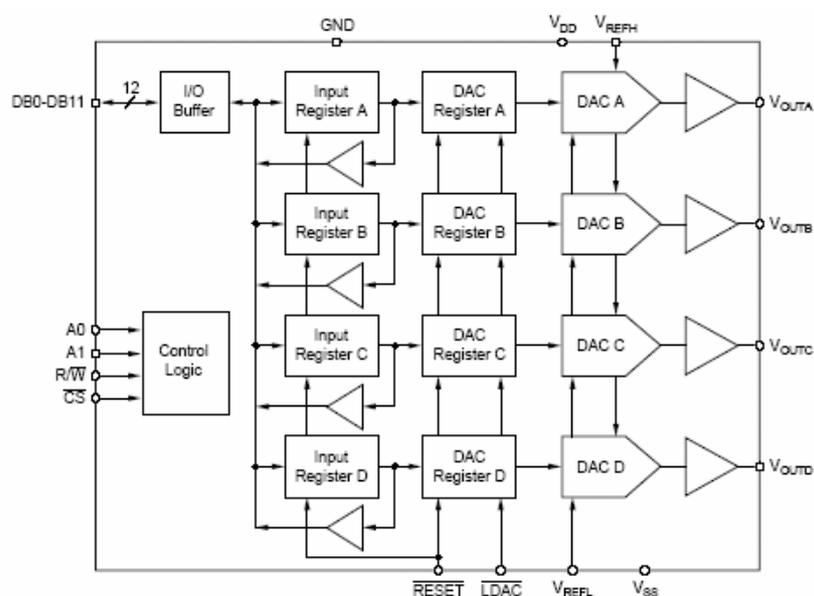


圖 4-4 DAC7625 內部方塊圖

因為此 DAC 數位端的輸出電壓為 5V，而 DSP 的擴充週邊接腳只允許 3.3V 的電壓輸入，所以在 DAC 和 DSP 之間必須做電壓轉換，在本文中為使用 74LVTH245 bus transceivers 來完成此工作，它允許 5V 的輸入電壓，而輸出則轉為 3.3V。

本文中將此 DAC 設計在 DSP 外部擴充介面的 Zone 0，在 DSP 的設計中，外部週邊 Zone 0 和 Zone 1 是共同使用一個 chip select 訊號，只有在指令存取此 Zone 0 或 Zone 1 資料時，XZCS0AND1n-訊號才會被拉為 Low。又因 DAC 俱有 4 個通道，故須 2 條位址線來指示選擇哪一個通道，在本設計中，Zone 1 並沒有用到，所以可以直接把 DSP 位址訊號 A0 和 A1 直接拿來當成通道的選擇訊號。其系統接法如圖 4-5 所示。

在 DAC7625 的設計中，其高參考電壓( $V_{REFH}$ )與低參考電壓( $V_{REFL}$ )分別對應到資料匯流排的 0x3FF 和 0x000。參考電壓的設計如圖 4-6 所示因為本文主要為控制 CNC 機台，而 DYNA 機台的 Driver 在轉矩模式下其輸入電壓的範圍為 +10V ~ -10V，因此 DAC7625 的  $V_{REFH}$  給 +2V， $V_{REFL}$  給 -2V，再經由外部 OP 電路放大五倍，即可以得到最大範圍。如圖 4-7 所示。

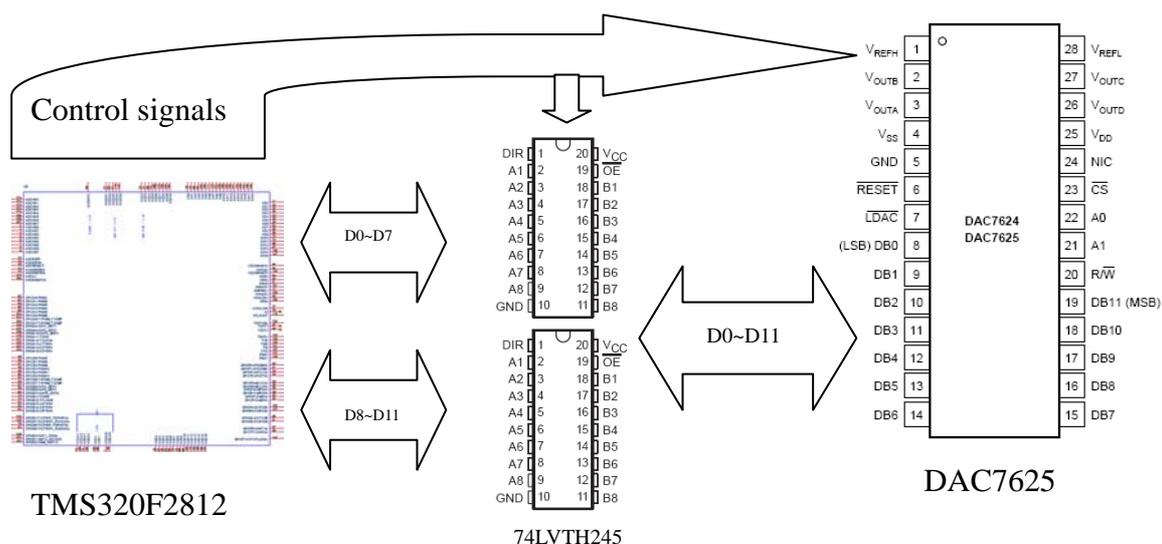


圖 4-5 DAC7625 設計示意圖

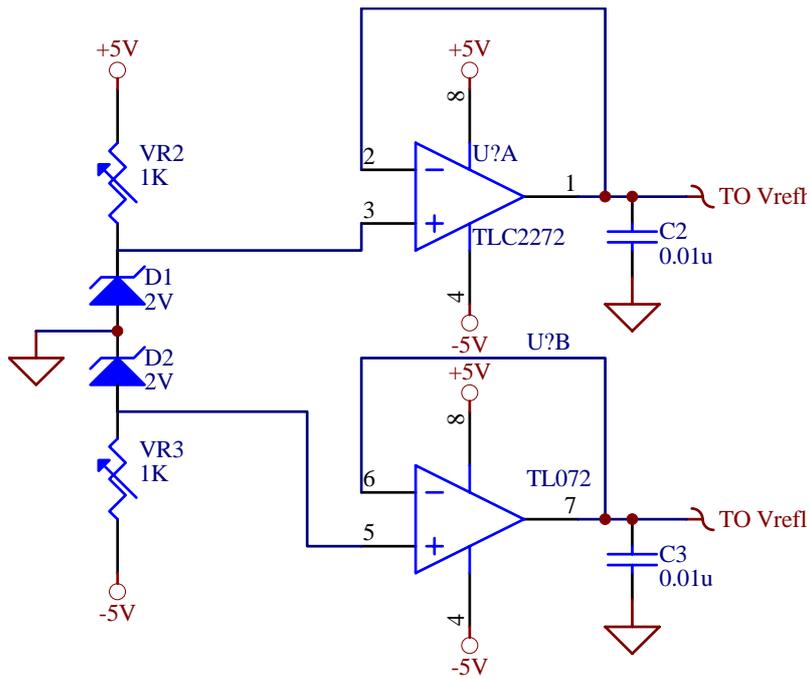


圖 4-6 DAC7625 之參考電壓設計

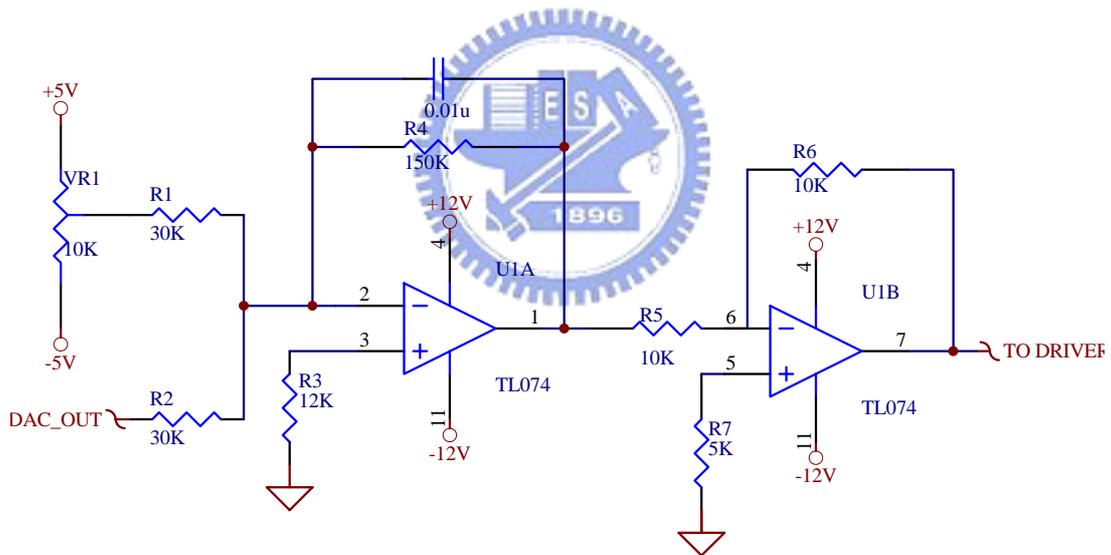


圖 4-7 DAC7625 外部放大電路

■ RS-232 通訊介面製作：

本文所採用之 RS-232 transceiver 為德州儀器(TI)公司出產之 MAX3223，選用此類 IC 的原因為此 IC 是 3.3V-compatible，可與 F2812 Ez DSK 板直接溝通，不須電壓轉換，接線如圖 4-8 所示，其主要的特色如下：

- $\pm 15\text{KV}$  之 ESD 保護。
- 符合 TIA/EIA-232-F and ITU v.28 標準。
- 運作電壓可為 3.3V 至 5.5V 之間。
- 最高傳輸率為 250kbit/s。
- 兩組接收器與發射器。
- 1 $\mu\text{A}$  的待運轉(Standby)電流。
- 在 3.3V 的運作電壓下允許 5V 電壓之輸入。
- 需外接 4 個 0.1 $\mu\text{F}$  的電容器。
- 俱有電源管理模組，可設定成 auto-powerdown，當 RS-232 接頭拔除時會自動 powerdown，當偵測到正常的傳輸訊號時會自動 power-on。
- 偵測到異常訊號時，會由 Invalid 接腳發出訊號，使用者即可知道有錯誤訊號產生。

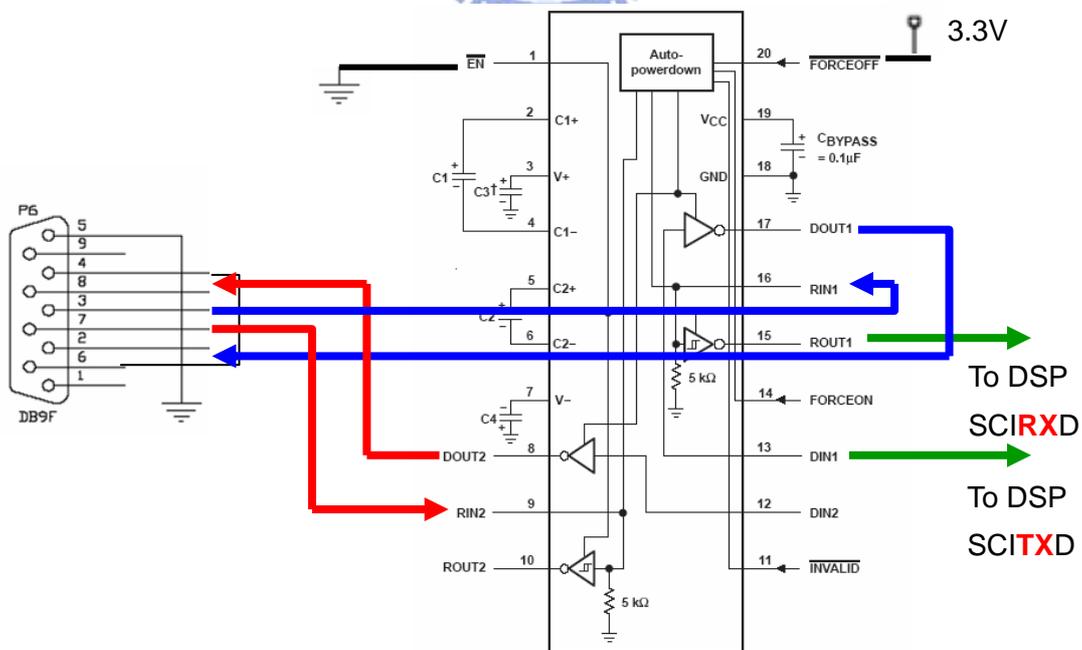


圖 4-8 RS-232 transceiver MAX3223 接線圖

## Encoder 介面製作：

本文所使用的 encoder 介面為德州儀器(TI)公司所出產之 AM26LV32，主要的功能為將馬達光耦合介面所產生之 RS-422 訊號，轉換成為 single-end 3.3V 訊號，才能送至 DSP 的接腳，接線如圖 4-9 所示，其主要特色如下：

- 切換率(witching rates)高達 32MHz。
- 3.3V 運作電壓。
- 超低(ultra-low)功率消耗，典型消耗功率為 27mW。
- 開路、短路和終端 Fail-Safe 功能。
- -0.3V to 5.5V 共模範圍。
- 在 3.3V 的運作電壓下容許 5V 邏輯電壓輸入。
- 輸入磁滯電壓典型值為 50mV。
- 4 個 receiver 一起運作在 32MHz 底下只消耗 235mW。

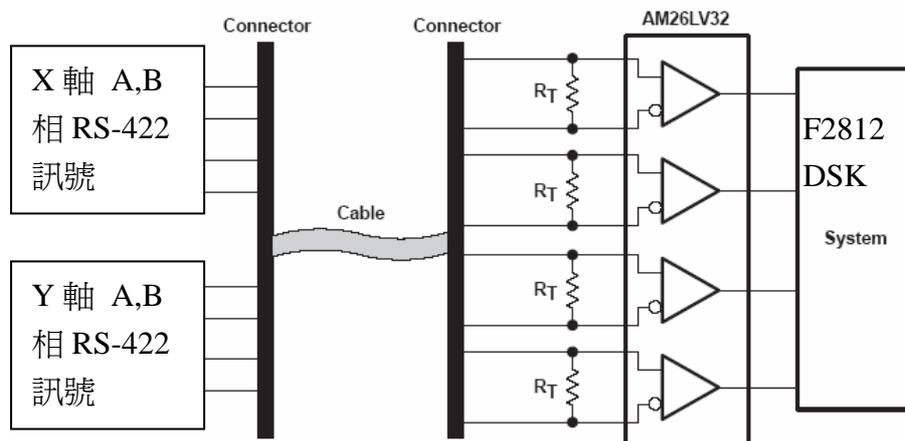


圖 4-9 AM26LV32 RS-422 Receiver 接線圖

## ■ CAN 介面製作：

在現今的工業界，常常在控制的過程中不容許發生錯誤，然而若需使用到分散式控制時，目前較受歡迎的即為 CAN bus，典型的 CAN bus 架構如圖 4-10 所示，其最主要的優點仍為可靠。本文 DSP 週邊的設計中亦將此 CAN bus 放在設計中，因 F2812 已經把 CAN 的控制器都 embedded 在晶片裡，所以我們只要接上 CAN 的 transceiver 即可，使用的為 TI 公司出產之 3.3V CAN transceiver SN65HVD230，接線示意圖如圖 4-11 所示，其主要特點如下：

- 3.3V 工作電壓。
- Bus/Pin ESD 保護超過 16KV。
- 高輸入阻抗，容許一條 bus 線有 120 個節點。
- 被控制的驅動器輸出轉換時間，以增加訊號品質。
- 未供給電源的節點不會干擾 bus。
- 相容於 ISO 11898 標準的需求。
- 低等待(standby)模式電流，典型值為 370uA。
- 低睡眠模式(sleep mode)電流，典型值為 40nA。
- 最高傳輸率為 1Mbit/second(Mbps)。
- 過熱自動 shutdown 保護。
- 開路 fail-safe 設計。
- glitch-free 的 power-up 與 power-down 保護，可用於熱插(hot-plugging)應用。

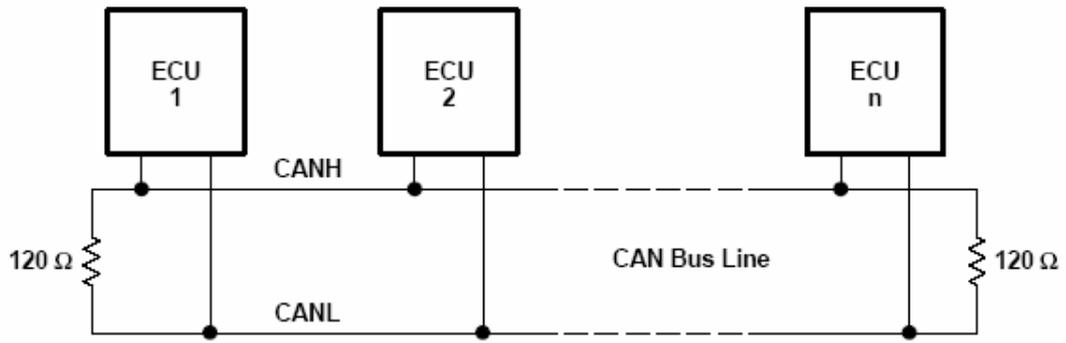


圖 4-10 典型的 CAN bus 架構

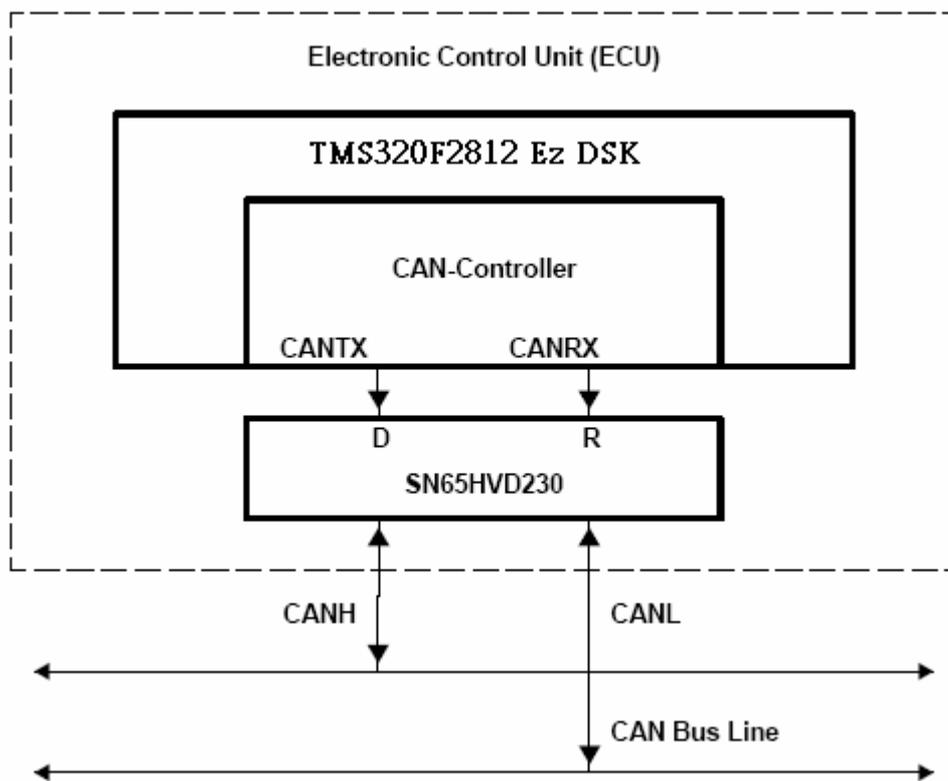


圖 4-11 SN65HVD230 CAN transceiver 與 F2812 間之接線示意圖

## 第五章 CAD 先進運動控制器設計軟體之實現

本章中將介紹電腦輔助設計軟體之內容、實現方法、執行方式與其執行結果，此軟體包含了自動系統識別、線性控制器設計、非線性摩擦力補償器設計與控制系統模擬等功能。第一節為簡介此軟體的功能、操作方式和其製作方法。第二節將介紹本軟體所使用的系統識別方法。第三節為介紹如何使用此軟體連結 Coder Composer Studio 自動取得機台系統識別資訊。第四節介紹如何使用已取得的機台系統識別資訊或使用者自行輸入的 model 來設計線性控制器和非線性摩擦力補償器。第五節為介紹此軟體的控制器和補償器之模擬功能。最後一節則為實例說明。

### 5-1 CAD 先進運動控制器設計軟體介紹

此軟體由 Matlab 語法所建立，其架構在 Matlab 的平臺上，所以必須電腦系統有 Matlab 軟體才可使用。此軟體包含三個部份，第一個部份為連結 DSP F2812 硬體以取得機台識別資訊；第二個部份為線性控制器和非線性摩擦力補償器設計，其 model 的來源可以是機台取得的資訊或是使用者自行輸入的 model；第三個部份為線性控制器與非線性摩擦力補償器模擬。

此軟體的開始如圖 5-1 所示，有三個選項，第一個選項”Model”是使用者可以自行填寫速度迴路的 model、馬達的參數與位置迴路的 model 來進行線性控制器或非線性摩擦力補償器設計，進而模擬其控制與補償器的效果。第二個選項”Sampled data”為使用已經存在的機台識別資訊來進行線性控制器或非線性摩擦力補償器設計。第三個選項”On-line sampling data”為連結 Code Composer Studio 以透過 DSP F2812 進行機台的系統識別程序，取得資訊後，軟體會直接進入第二個選項進行控制器的設計。其主畫面 (Main G.U.I.)之程式的流程圖如圖 5-2 所示。

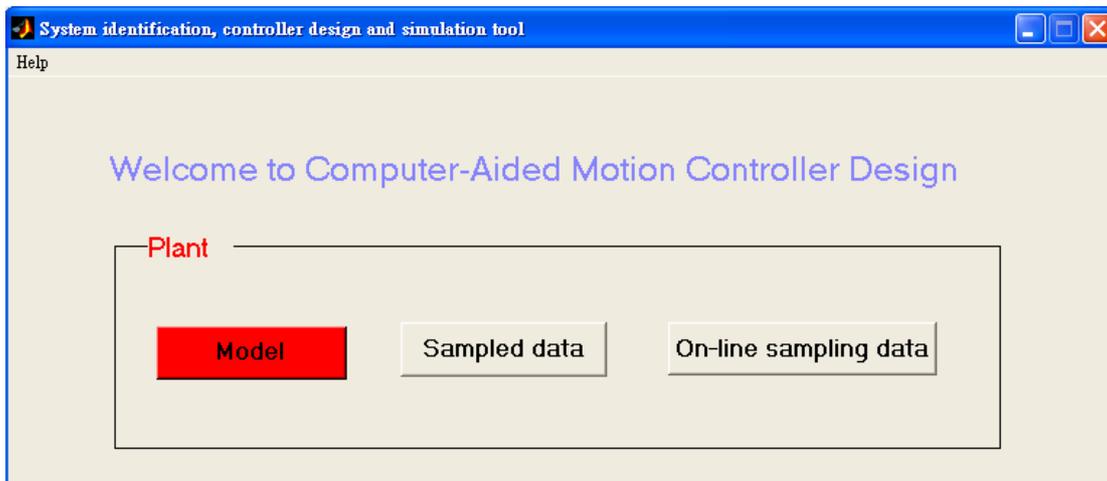


圖 5-1 電腦輔助控制器設計軟體主畫面

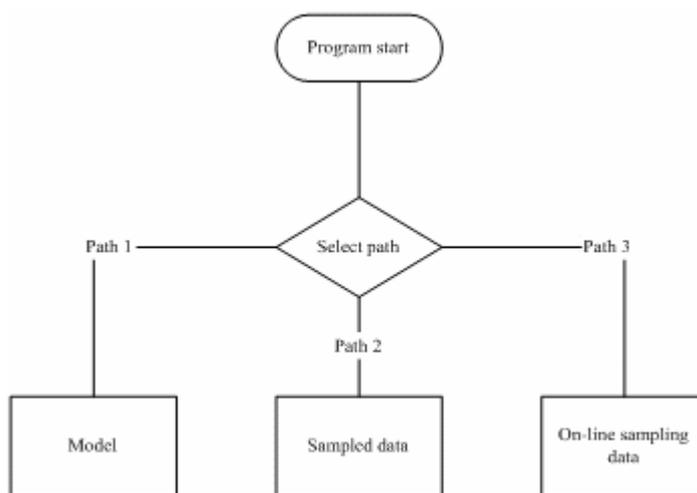


圖 5-2 電腦輔助控制器設計軟體主畫面流程

## 5-2 運動系統識別之方法

在本軟體中有線性控制器與非線性摩擦力補償器設計，本節將介紹此軟體中所用到的速度迴路與位置迴路之識別方法與非線性摩擦力補償器的識別方式。

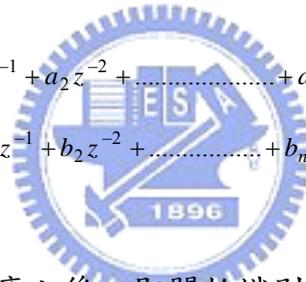
### 5-2-1 速度迴路與位置迴路之識別方法

在軟體中速度迴路與位置迴路 model 參數的取得，是採取送虛擬隨機二進訊號(pseudo random binary sequence, PRBS)的法式，獲得輸出的響應，再利用 ARX 模式以得到速度或位置迴路的 model。而 PRBS 的範圍則需取決於機台的實際物理參數，在本 CAD 中之預設值為速度迴路的製作方式以±1500mm/min 為其測試之基準，位置迴路則是以±1000 pulses 範圍為其測試之基準。ARX 的數學模式為：

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t - n_k)$$

其中， $z$  表示位移運算子， $n_k$  為系統延遲時間， $A(\cdot)$ 與  $B(\cdot)$ 分別為  $z^{-1}$  的多項式：

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_{n_a} z^{-n_a}$$
$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_{n_b} z^{-n_b}$$



在取得馬達的輸出響應之後，即開始識別之工作，整個識別的步驟依序為：

1. 首先設定  $n_a=30$  與  $n_b=1$ 。
2. 依照不同的 delay  $k$  值，送至 normal equation，找出產生最小 loss function 的  $k$  值。
3. 使用步驟 2 求得的  $k$  值，搭配不同的  $n_a+n_b$  值，經由 normal equation 計算，依照不同的  $n_a+n_b$  的值，選取最小的 loss function。
4. 決定  $n_a$  與  $n_b$  各別的值為何。
5. 獲得最後的 model 為

$$z^{-k} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_{n_b-1} z^{-(n_b-1)}}{1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_{n_a} z^{-n_a}}$$

## 5-2-2 非線性摩擦力之識別方法

在非線性摩擦力的識別方面，如第 3-2-3 節之討論，本軟體是採用送入不同速度命令，在速度到達穩態時量得其輸出轉矩為其摩擦力。在實際的應用方面，在速度命令較小時，其非線性的成份較大，故在送速度命令時，低速的命令間隔較小。本軟體將摩擦力的曲線分為 5 段，第一段為 -5RPM~+5RPM，第二段為 +5RPM~+(F3000/mm\_Rev)RPM，第三段為 -5RPM~-(F3000/mm\_Rev)RPM，第四段為 +(F3000/mm\_Rev)RPM 以上，最後一段則為 -(F3000/mm\_Rev)RPM 以下，其中 mm\_Rev 為馬達每轉一圈機台的移動距離。每一段均使用最小平方法曲線揉合(least square curve fitting)的方式得到其模型，在第一段到第三段為使用五階的模型，在第 4 段及第 5 段則是使用一階的模型，其式子分別為

第 1 段到第 3 段:

$$\tau(v) = P_0 + P_1 \cdot v + P_2 \cdot v^2 + P_3 \cdot v^3 + P_4 \cdot v^4 + P_5 \cdot v^5$$

第 4 段到第 5 段:

$$\tau(v) = P_0 + P_1 \cdot v$$

其中  $v$  : 速度輸入

$P_0 \sim P_5$  : 多項式係數

$\tau(v)$  : 對應於速度  $v$  的摩擦力

### 5-3 取得 CNC 機台識別資訊方法

此節將介紹如何使用此軟體連結 Coder Composer Studio 自動取得機台的系統識別資訊。當在圖 5-1 的 G.U.I. 中按下”On-line sampling data”時，會出現如圖 5-3 的畫面。畫面中分成二個部份，第一部份為輸入機台的相關資料與使用者欲執行哪一種識別。在識別的型式(Identification type)中分為線性識別 (Linear identification) 與非線性摩擦力識別 (Non-linear identification)；在識別迴路(Identification loop)中，使用者可以選擇速度迴路或是位置迴路，此選項只對於線性識別有效；在選擇軸方面，使用者可以選擇要進行哪一軸的識別工作。

為了使此軟體可以在其它不同的機台上應用，使用者必須輸入機台相關的參數，像是馬達每轉一圈其 encoder 的 pulses 數是多少(在 DSP 的應用中須將此 pulses 數乘 4)；馬達每轉一圈機台移動的距離是多遠與識別程序中 PRBS 的範圍是多大，這些輸入欄只允許輸入數字，若使用者填入非數字符號，軟體將會出現錯誤訊息。在速度迴路的識別方面，其預設的值是以 feedrate 為 3000 mm/min 時當成標準；在位置迴路其預設值則是以馬達的十分之一圈為其識別時之範圍。

當輸入完所有機台資訊並選擇好要識別的項目後，按下”OK”鍵，則在畫面右邊的”File Saves”裡二個欄位會被填入檔名，一個為命令檔，另一個為迴授檔。這二個檔案為之後要進行系統識別工作時所須用到的檔案。當使用使按下”Launch CCS and load program”時，此軟體會自動開啟 Code Composer Studio，並且自動載入程式，按下”Start ID”時，機台即啟動識別動作，等識別完畢後，按下”Close CCS Project”即可關閉 CCS project。整個操作流程如圖 5-4 所示。

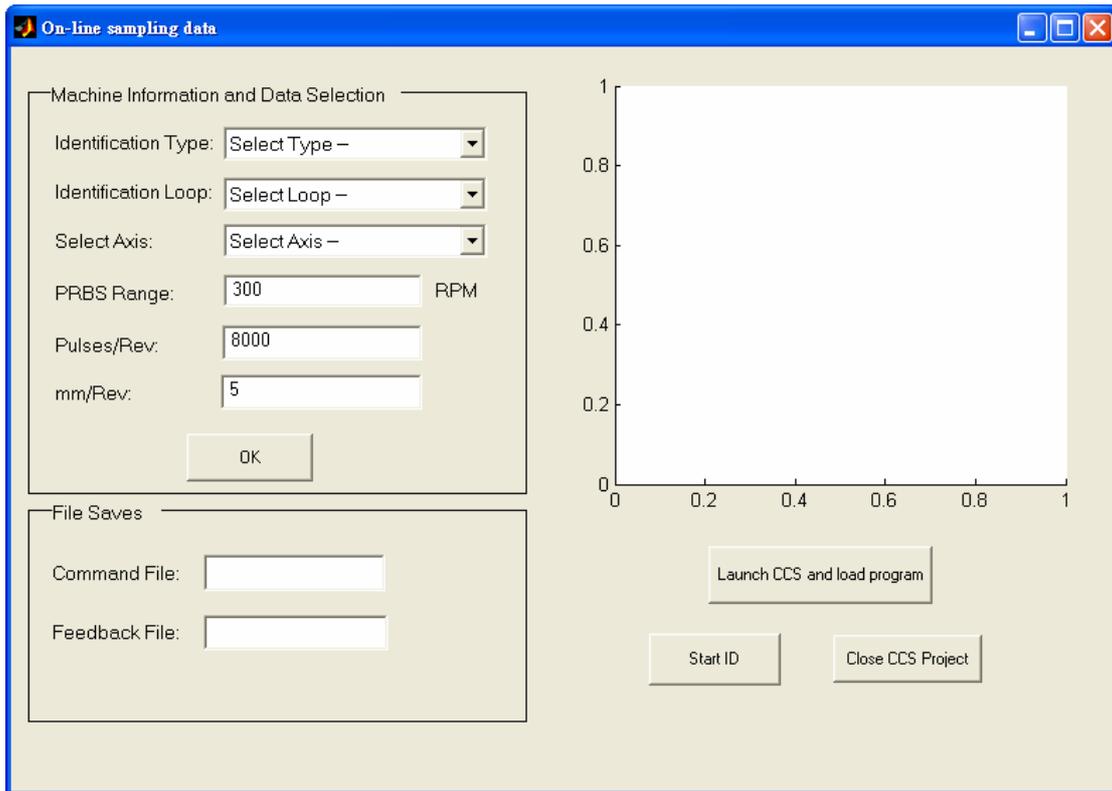


圖 5-3 取得機台資訊畫面



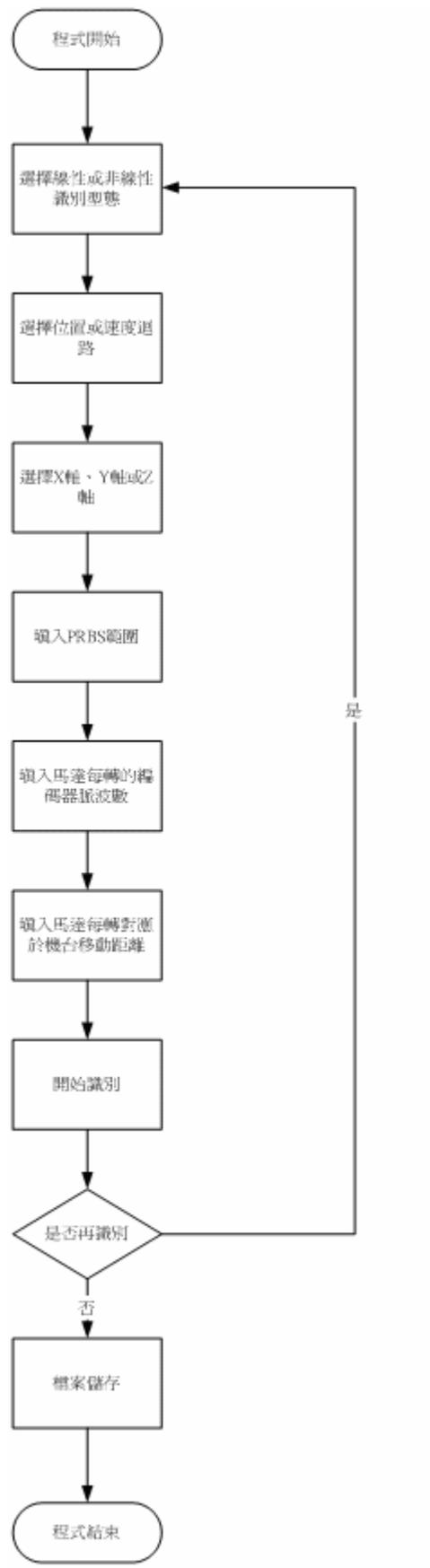


圖 5-4 取得機台資訊之操作流程

## 5-4 線性控制器與非線性摩擦力補償器設計

在線性控制器與非線性摩擦力補償器設計方面，可以有二個方式進行。第一個方式為已經有機台的識別資料，即 Main G.U.I.中的”Sampled data”，第二個方式為使用者自行輸入各軸的 model，即 Main G.U.I.中的”Model”，以下就此二種情形做說明。

### 5-4-1 已存在機台識別資料

當使用者在軟體主畫面選擇”Sampled data”時，即會出現如圖 5-5 之 G.U.I.畫面。在此畫面出現的同時也會出現一對話方塊，詢問是否進入 default mode，若進入 default mode，軟體會以改變按鍵顏色之方法引導使用者。在此 G.U.I.中，Type selection 框架中可以選擇線性識別或非線性摩擦力識別、速度迴路或位置迴路與欲設計哪一軸的控制器或補償器。在選定資料後，按下”Select Type”鍵，軟體即會把預設的檔名填入”File selection”內各欄的值。在按下”Load File”後，被識別的資料將繪於左下角的繪圖區中。之後即進行識別工作，取得 model 之後，在 Message 視窗內會出現此 model 的轉移函式。若使用者選擇速度迴路的識別，此時就會出現 DDOB 鍵，按下此鍵後軟體會產生 DDOB 的設計結果，並將 model 的轉移函式呈現在 Message 視窗；若使用者選擇的為位置迴路的識別，此時即會出現 ZPETC 鍵，按下此鍵後軟體會產生 ZPETC 的 model，並將 model 的轉移函式列於 Message 視窗。使用者也可按下”CCC”鍵指定 CCC 控制器的增益值。按下”Save >> simulation”，這些產生的 model 將會存成\*.c 與 \*.h，並前往模擬的 G.U.I.。使用者在實作上只要簡單的 include 這些檔案，即可以做精密運動控制。整個程式的操作流程如圖 5-6。

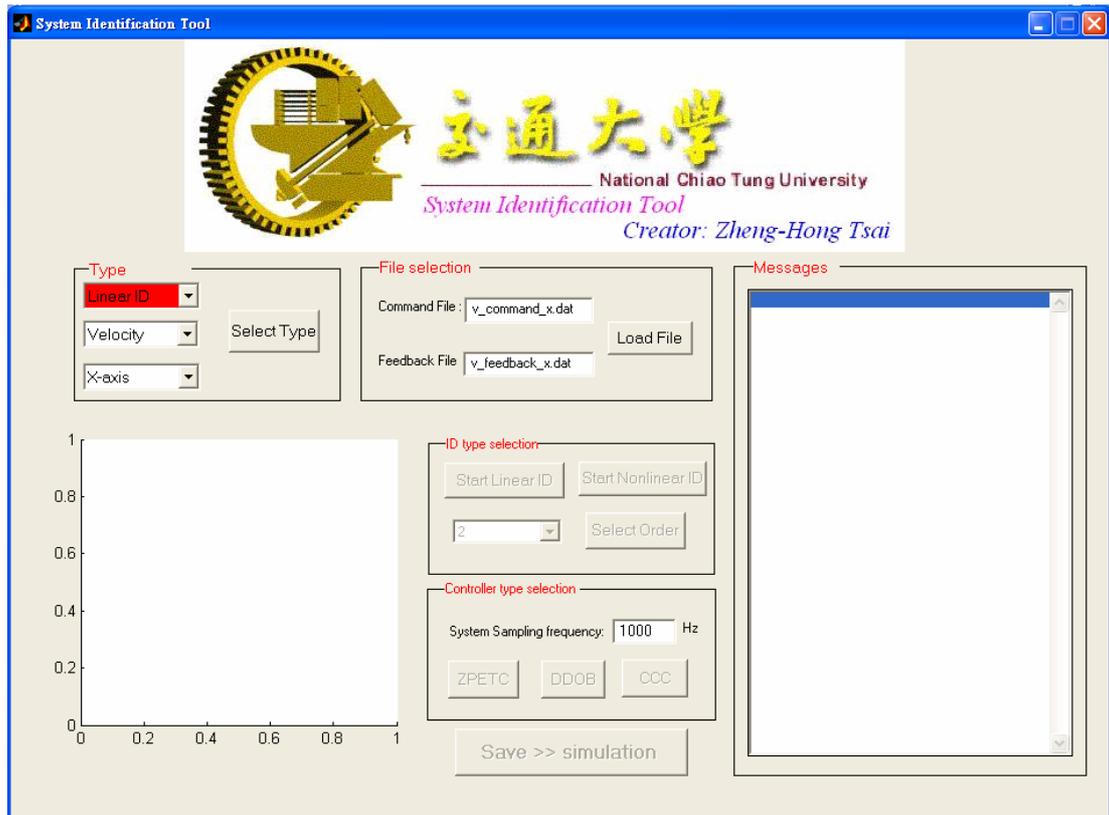


圖 5-5 對已存在的機台識別資訊進行控制器設計之 G.U.I.

#### 5-4-2 使用者定義機台模型

若使用者只是想用於模擬功能，則可在主畫面中按下”Model”鍵即可自行輸入機台的 model，其畫面如圖 5-7 所示。此 G.U.I.在亦設計了 default case，分為二種，一種為 default model，一種為 default parameter。使用者若選擇 default case，則軟體為自動改變字體的顏色引導使用者使用之。輸入資料的方式分為兩種，一種為輸入轉移函式(Model)，另一個為輸入馬達與機台之參數(Parameter)。若使用者選擇輸入轉移函式，則馬達的相關參數欄位將會 disable，反之亦然。當使用者填完了馬達與機台之參數後，須按下”Modeling”，此時軟體將會把這些參數化成 block 的型式，並送入 PRBS 訊號作系統識別工作，出現 loss function 的條狀圖，由使用者選擇要使用哪一組階次的 model，最後會在 Numerator 與 Denominator 欄位自動填入識

別出來的速度迴路轉移函式。

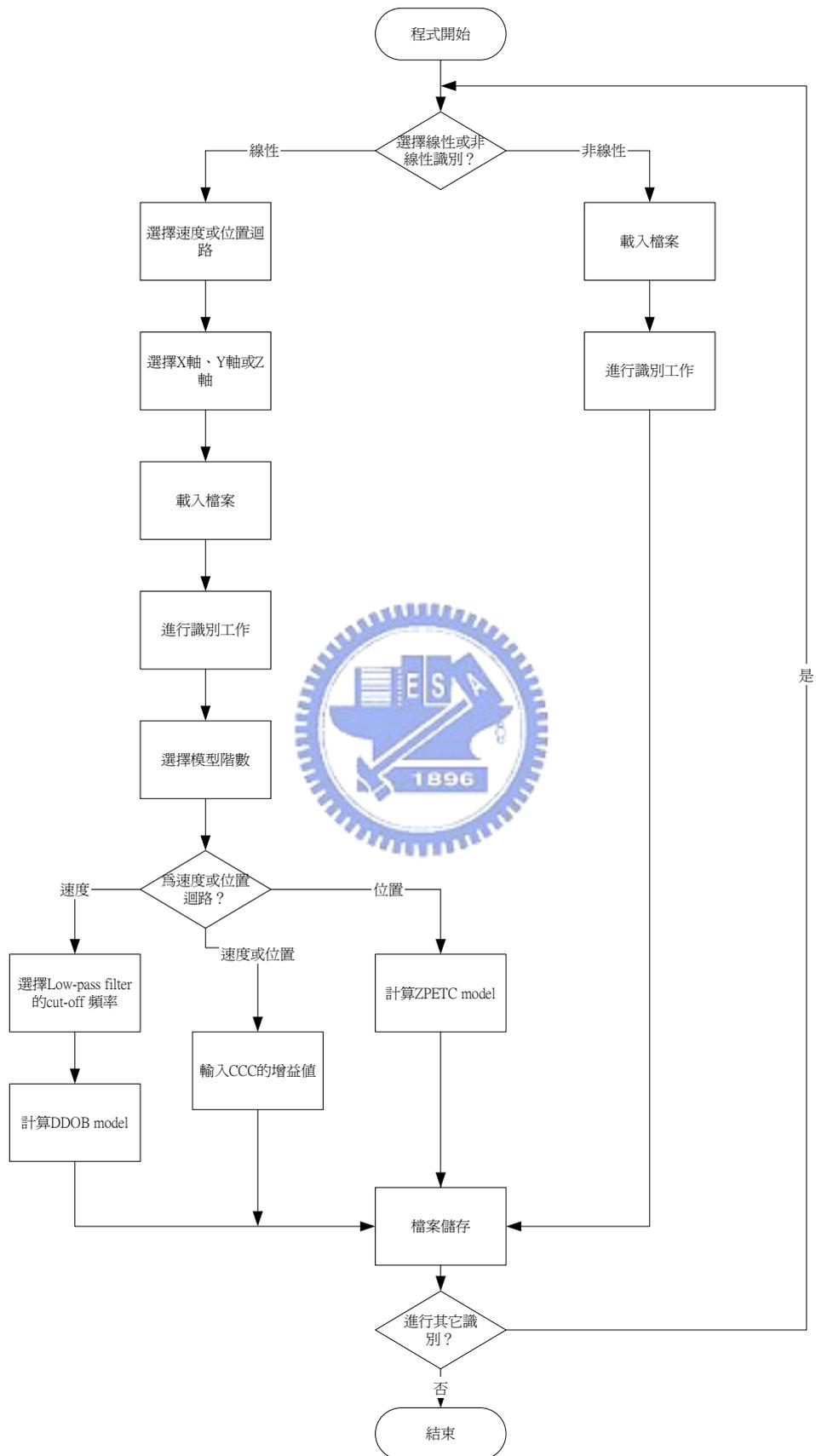


圖 5-6 對已存在的機台識別資訊進行控制器設計之操作流程

在位置迴路方面亦是有二種方式可供使用者選擇，第一種為輸入位置迴路的轉移函式(Model)，另一種為輸入位置迴路的 PI 控制器參數值(PI controller)，若選擇其中一種時，另外一種的欄位亦會被軟體自動 disable。最後使用者可以設定要加入多少的摩擦力，摩擦力可分為庫倫(Coulomb)摩擦力與黏滯(Viscous)摩擦力。

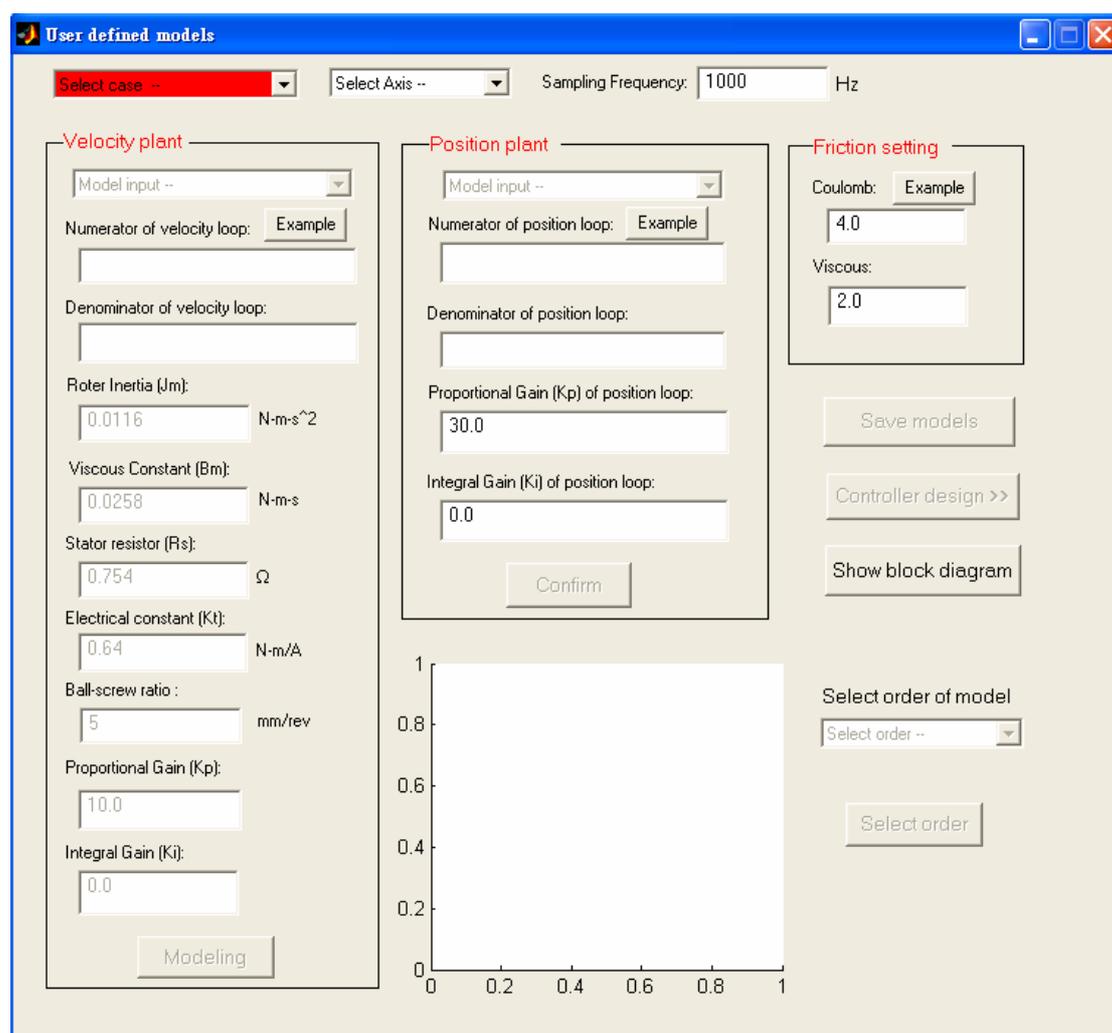


圖 5-7 使用者自行定義機台 model 之 G.U.I.

當使用者選定好之後，即可按下”Save n-axis models”來儲存已經設定好的資料，其中的 n 為使用者所選定的軸。此資料會被存成”user\_define\_models.dat”檔，爾後若要在不變更 model 的情況下重新設計

控制器時，即可直接叫出此檔，不須再重新輸入一次。整個操作流程如圖 5-8 所示。最後按下 Controller design >>”鍵進入控制器設計階段。

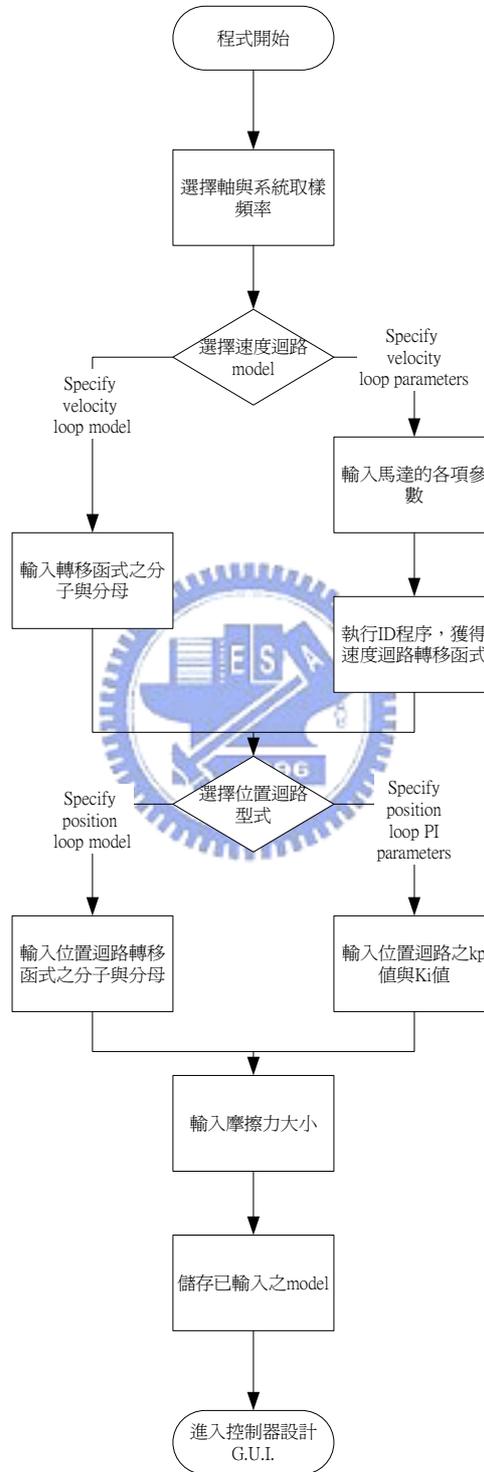


圖 5-8 使用者自行定義機台 model 之 G.U.I.操作流程

圖 5-9 為控制器設計之畫面，軟體會自動載入剛才已儲存的機台資訊檔”user\_define\_models.dat”，也可以在 File 選單下選”Load models”選不同之 model 檔。首先選擇要設計哪一軸的控制器或補償器，再選擇要設計哪一個控制器，此軟體提供了 ZPETC、CCC 與 DDOB 等三種線性控制器與一種非線性摩擦力補償器用於模擬，只要依序點選各軸所要加的控制器或補償器即可，軟體會將該控制器之架構顯示於下方。若選擇了 CCC 架構，則在使用者輸入 CCC 的增益值之後，會出現其加入 CCC 之後，系統剩下的 gain margin 和 phase margin，亦會提供最大的 CCC 增益值，若超過此值，系統將會不穩定。若選擇了 DDOB，軟體會出現 Low-pass filter 的截止頻率對談方塊，使用者必須輸入 low-pass filter 的截止頻率，所得的 model 將出現於右方的 Message box 中。使用者也可以選擇”Default”鍵，軟體會自動設計所有的控制器。使用者若選擇了非線性摩擦力補償器設計，則軟體會先做此系統的摩擦力識別，然後再進行補償器之設計。當這些程序都完成時，會將實際的摩擦力、量測到的摩擦力與補償器的輸出值繪在同一張圖上，且每一個控制器或補償器的 models 顯示於右方的 Message box 中。整個操作流程如圖 5-10 所示。

## 5-5 控制器模擬

從 5-3 節到 5-4 節的控制器設計 G.U.I.最後均可進入到軟體模擬的階段，其畫面如圖 5-11 所示。在軟體模擬方面，使用者必需在”Parameter”框架中輸入相關的機台與欲模擬的參數，像是模擬機台跑圓的進給速度和跑圓的半徑等等。在此軟體中為了增加模擬的彈性，另外有”Friction setting”和”Change value”等按鍵，其中”Friction setting”可以改變之前在”Model”階段所設定的摩擦力，使用者可以觀察在改變摩擦力的情

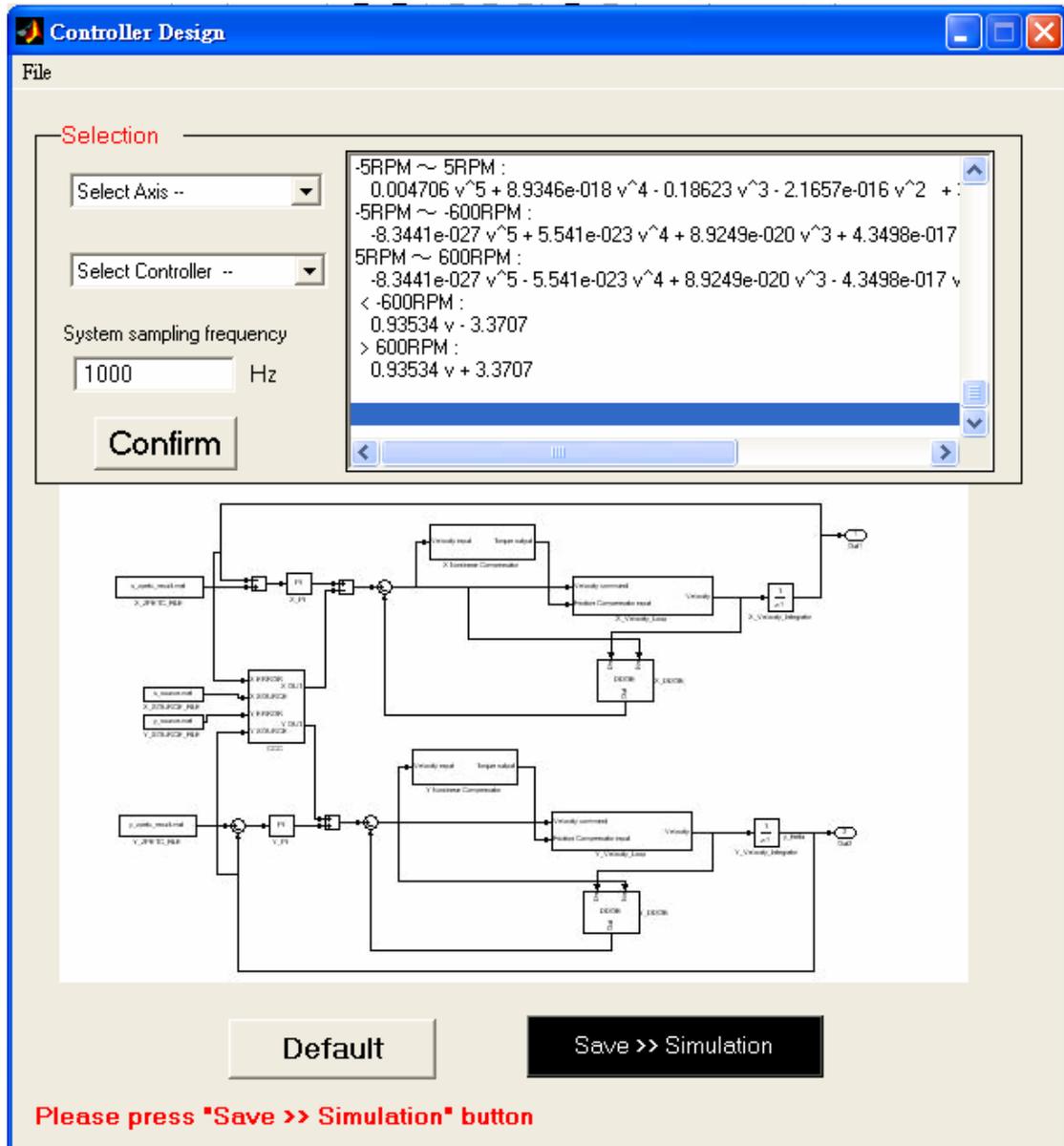


圖 5-9 控制器與補償器設計之 GUI.

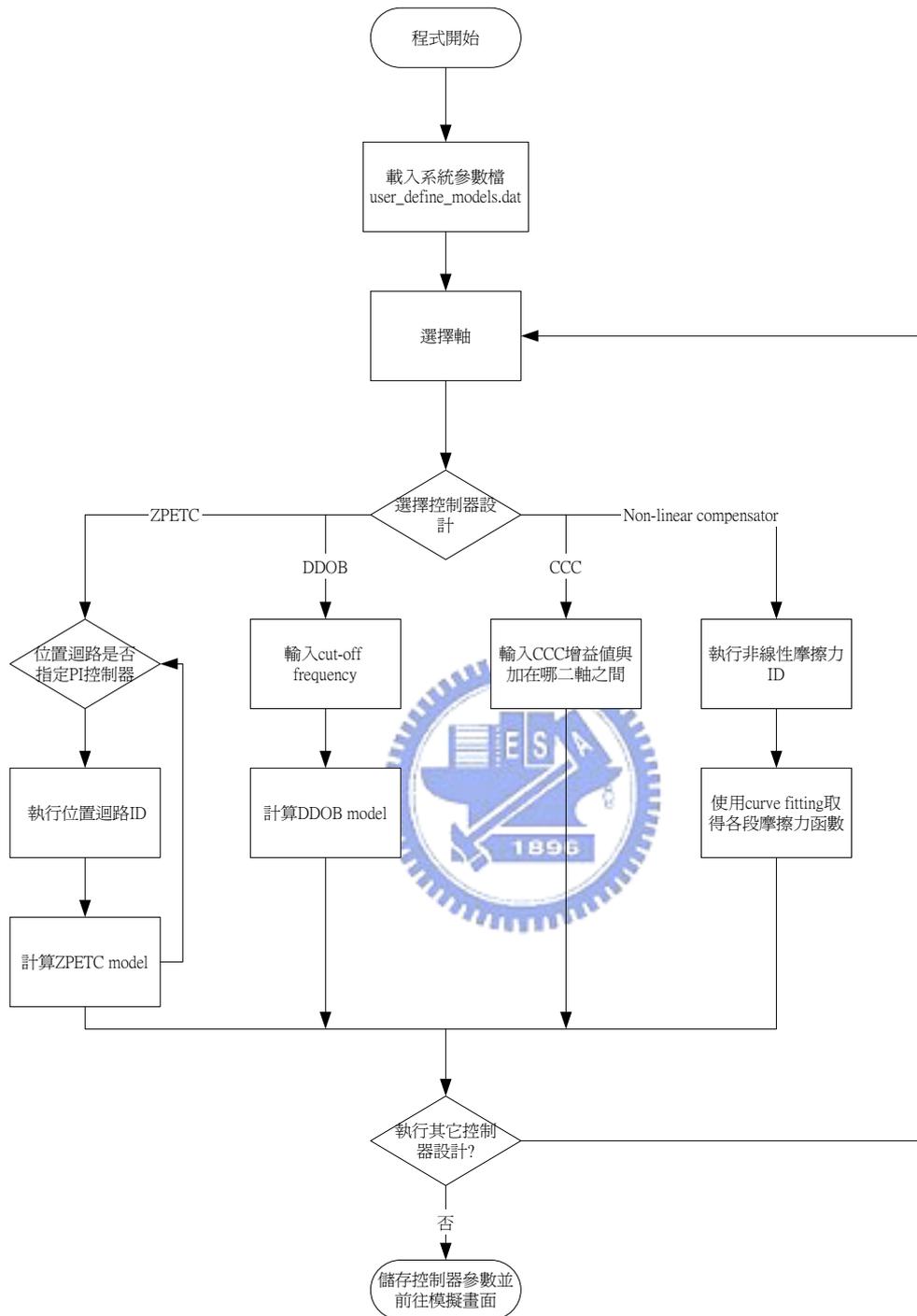


圖 5-10 控制器與補償器設計之 G.U.I.操作流程

況下，控制器與補償器的強健程度如何。Change value 則可以改變位置迴路的  $K_p$  值、CCC 的增益值和 DDOB 的 cut-off frequency 等，使用者可觀察不同的 CCC 增益值與 DDOB 的 cut-off frequency 其控制效果如何，以做進一步比較。

在此模擬畫面中，使用者可以在”Controllers”框架中選擇欲模擬的控制器或補償器，可以選擇一個或是多個控制器。按下”Start simulation”鍵即開始模擬，此時會出現 Simulink 的圖，有使用到的控制器或補償器將會以黃色的方塊顯示，其餘未用到的則為白色方塊。當模擬完成時，模擬結果會列於”Simulation results list”中，其中的資料包含了模擬編號(Name)、進給速度(Feedrate)、控制器型式(Controller type)、X 軸追跡誤差 RMS 值(X-axis RMS Tracking)、Y 軸追跡誤差 RMS 值(Y-axis RMS Tracking)、輪廓誤差最大值(Maximum Contouring)、CCC 增益值(CCC Gain)、X 軸  $K_p$  值(X\_Kp)、X 軸  $K_i$  值(X\_Ki)、Y 軸  $K_p$  值(Y\_Kp)和 Y 軸  $K_i$  值(Y\_Ki)值等。使用者也可以把模擬的結果繪出來，按下”Plot”鍵時會繪出 4 張圖，分別為 X 軸追跡誤差、Y 軸追跡誤差、輪廓誤差 v.s.時間圖與輪廓誤差 v.s.圓的角度並放大 100 倍的圖。使用者亦可以同時選擇多個模擬結果，一起把結果繪出來，每個結果都將以不同的顏色表示出來。如圖 5-12 所示。也可同時將多個模擬結果以條狀圖顯示出來，將繪出 3 個圖，為各控制的 X 軸追跡誤差、Y 軸追跡誤差與輪廓誤差，每個圖中又分成二個部份，一個部分為最大值，另一個部份為 RMS 值，每個控制器的組合都用一種顏色表示，如圖 5-13 所示，很方便可以用於比較。整個軟體的操作流程如圖 5-14 所示。

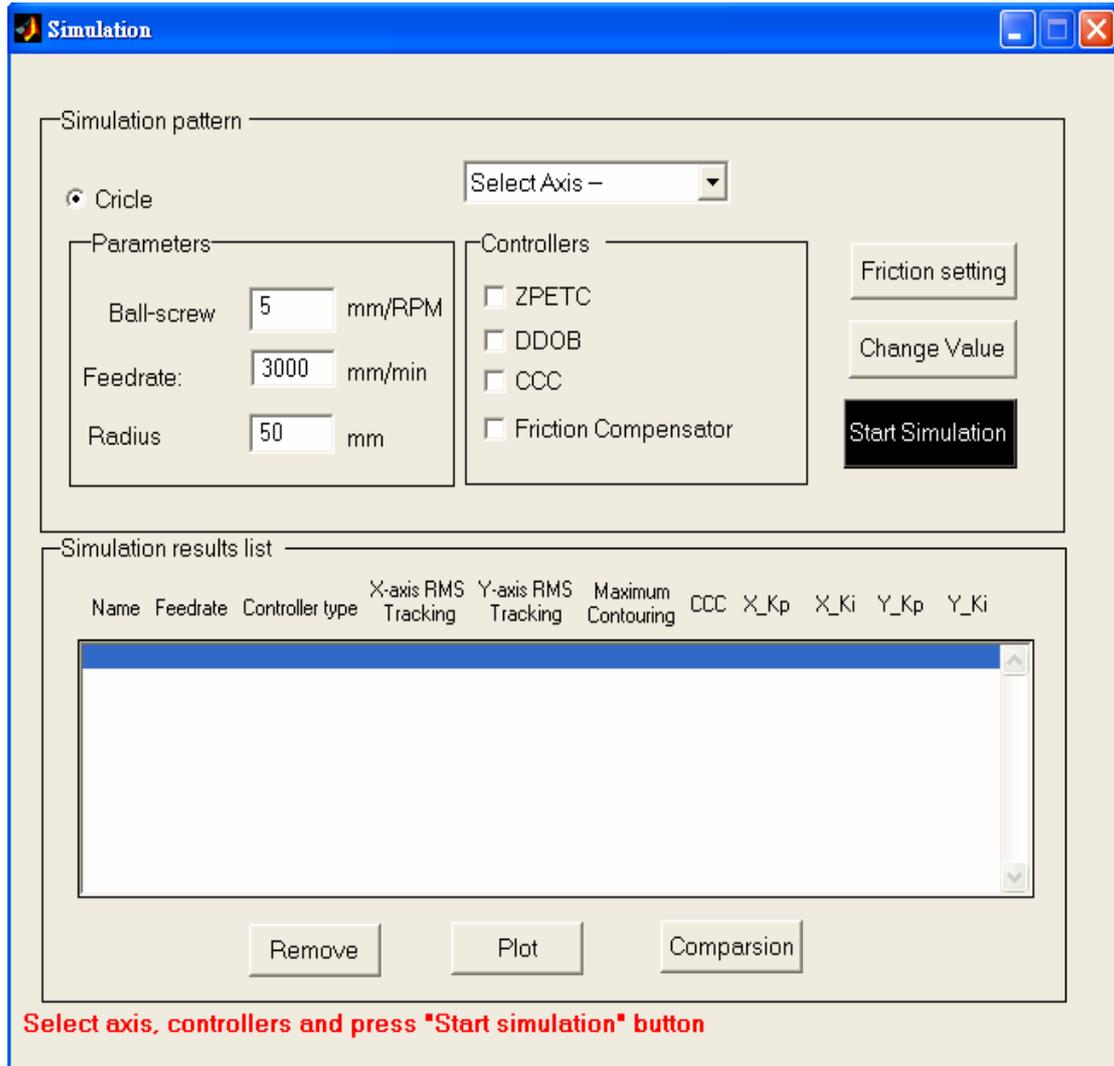


圖 5-11 模擬控制器與補償器效果之 G.U.I.

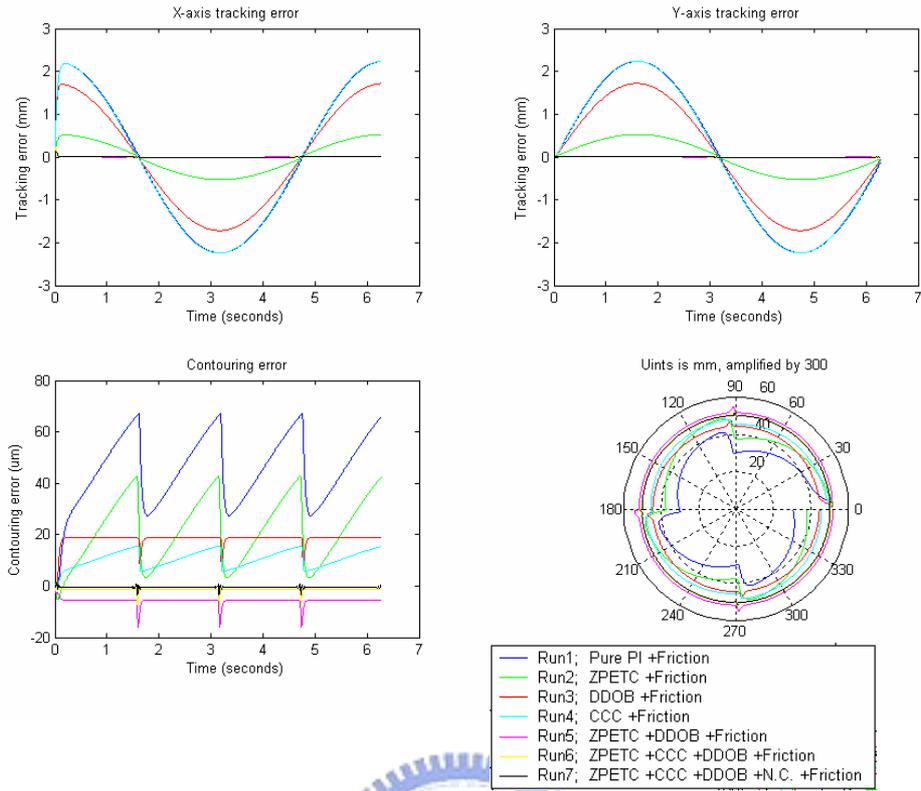


圖 5-12 不同控制器之模擬結果

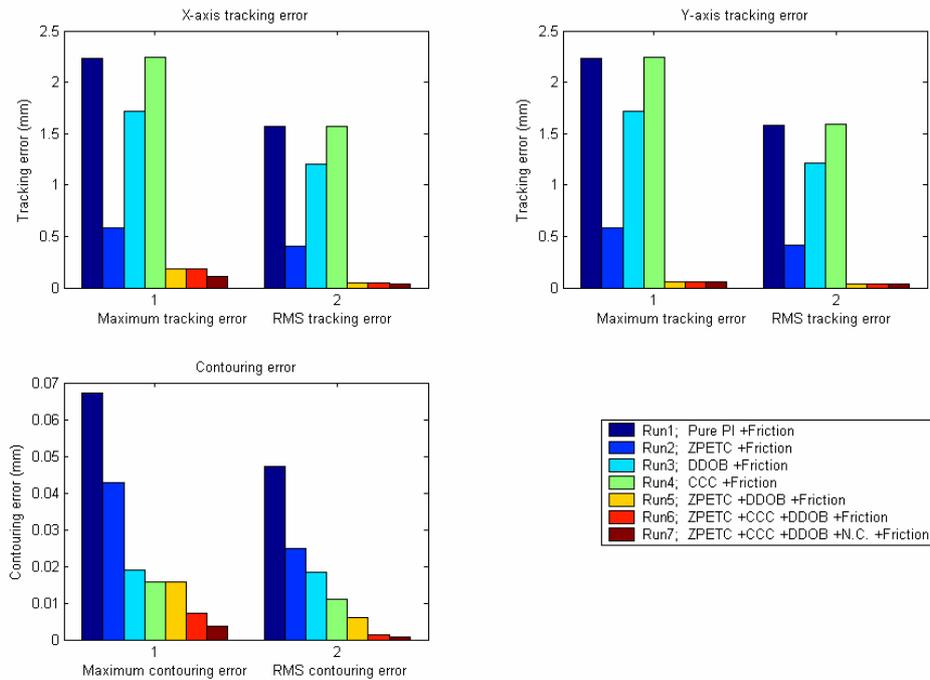


圖 5-13 不同控制器模擬結果之條狀圖

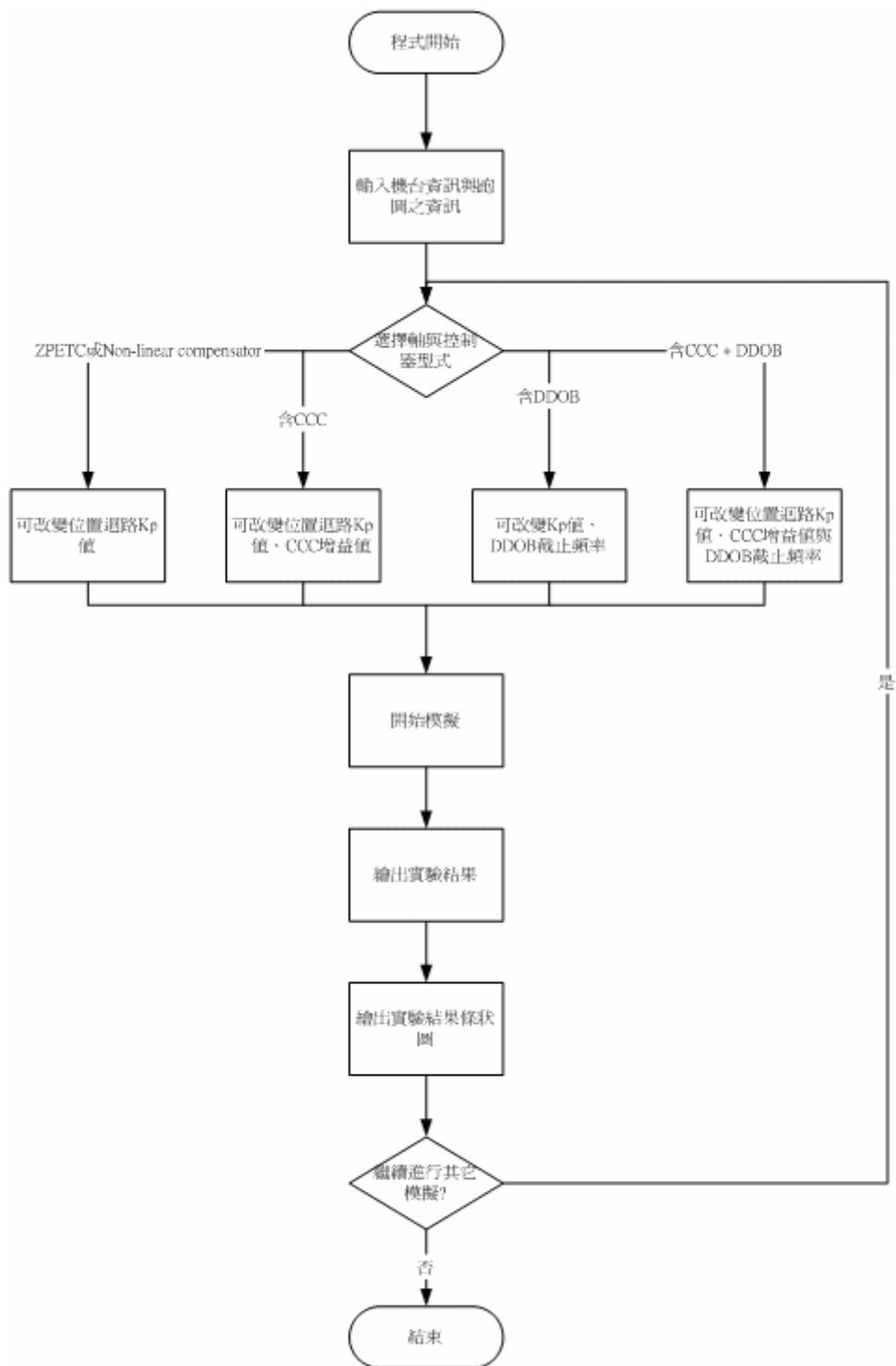


圖 5-14 模擬控制器與補償器效果之 G.U.I. 操作流程

## 5-6 設計實例

在此節中將介紹如何透過此電腦輔助控制器設計軟體，由取得機台的識別資訊到完成控制器與補償器的設計，首先開啟圖 5-1 的畫面，按下”On-line sampling data”鍵，即出現圖 5-3 的 G.U.I.。進行線性識別，如圖 5-15 所示，選擇的資訊如下所示：

Identification type : 「Linear ID」

Identification loop : 「Velocity Loop」

Select Axis : 「X-axis」

PRBS Range : 「300」 RPM

Pulses/Rev : 「8000」

mm/Rev : 「5」

在按下”Launch CCS and load program”後，程式即自動開始 Code Composer Studio，並載入程式，如圖 5-16。再按下”Start ID”鍵後程式就會開始執行，等 ID 程序完成後，軟體會自把 DSP 端的資料讀回來，繪於右上方，並且以”File Saves”框架內的檔名存成檔案，如圖 5-17 所示。在待會要進行系統識別時 G.U.I.的預設檔名就是此時的檔名。

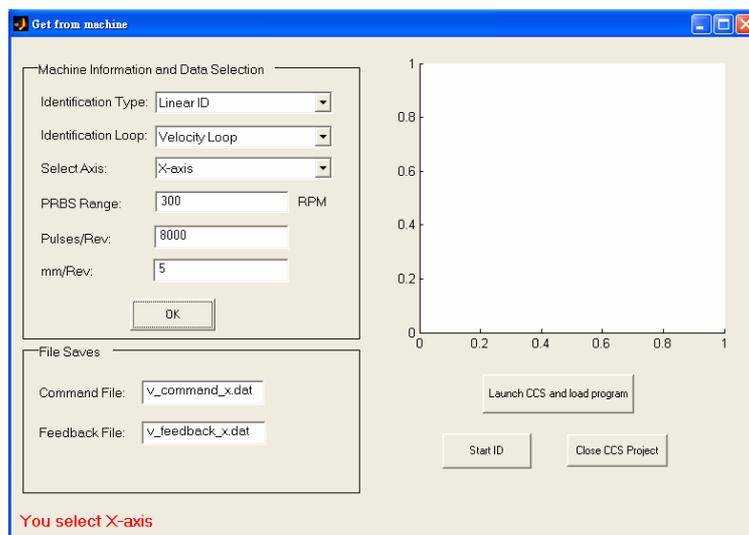


圖 5-6-1 取得機台線性識別之資訊畫面

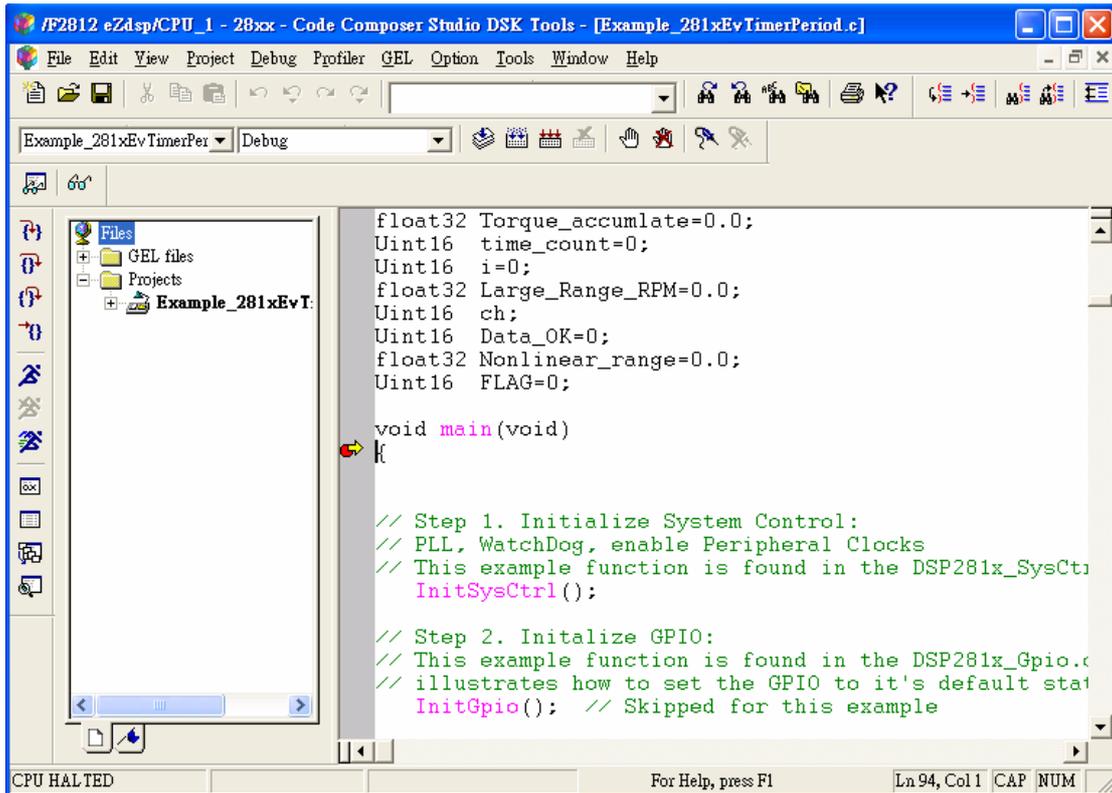


圖 5-16 按下”Launch CCS and load program”後即自動開啟 CCS

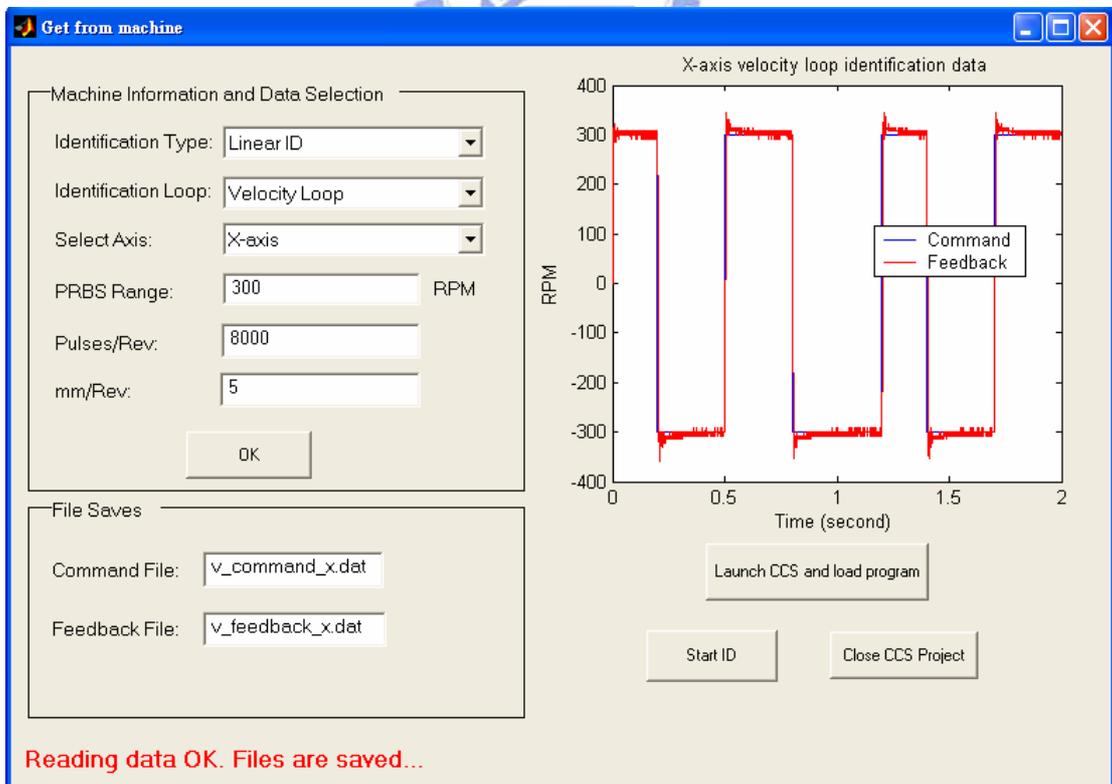


圖 5-17 完成識別工作並讀取回授資料後所出現之畫面

若要進行非線性摩擦力的識別，則在 Identification type 選「Non-linear ID」，則在軟體視窗的下方會顯示此識別所需花費的時間。當取得了速度迴路、位置迴路和非線性摩擦力的識別資訊後，在主畫面圖 5-1 中按下”Sampled data”鍵後，即出現圖 5-5 的畫面，依照圖 5-6 的流程，首先為識別速度迴路之 model，並完成 DDOB 控制器之設計，選擇的 low-pass filter 截止頻率為 30Hz，得到的識別資訊會顯示於 Message box 中，畫面如圖 5-18 所示，所得的速度迴路 model 為：

X 軸：

$$V_x(z^{-1}) = \frac{10^{-2}(30.56z^{-2} - 2.377z^{-3} + 11.10z^{-4} + 2.883z^{-5} - 1.224z^{-6} + 2.0811z^{-7} - 8.911z^{-8})}{1 - 0.70669z^{-1} + 0.1934z^{-2} - 0.15112z^{-3} - 0.02566z^{-4} + 0.028011z^{-5}}$$

Y 軸：

$$V_y(z^{-1}) = \frac{0.263z^{-2} + 0.115z^{-3} + 0.073z^{-4} + 0.076z^{-5} + 0.098z^{-6}}{1 - 0.515z^{-1} + 0.191z^{-2} - 0.12z^{-3} + 0.00922z^{-4} + 0.022z^{-5} - 0.0045z^{-6} + 0.0393z^{-7}}$$

經由 CAD 軟體計算所得之 DDOB Q-filter model 為：

X 軸：

$$Q_x(z^{-1}) = \frac{3.2729 \times LPF(z^{-1})}{1 - 0.077784z^{-1} + 0.36342z^{-2} + 0.094373z^{-3} - 0.040071z^{-4} + 0.068114z^{-5} - 0.29166z^{-6}}$$

Y 軸：

$$Q_y(z^{-1}) = \frac{3.789 \times LPF(z^{-1})}{1 + 0.4356z^{-1} + 0.27867z^{-2} + 0.29021z^{-3} + 0.3725z^{-4}}$$

其中

$$LPF(z^{-1}) = \frac{0.00069935 + 0.002098z^{-1} + 0.002098z^{-2} + 0.00069935z^{-3}}{1 - 2.6236z^{-1} + 2.3147z^{-2} - 0.68554z^{-3}}$$

再選擇位置迴路之識別與 ZPETC 之設計，其操作流程亦如圖 5-6 所示，得到的識別資訊會顯示於 Message box 中，畫面如圖 5-19 所示，所得的位置迴路 model 為：

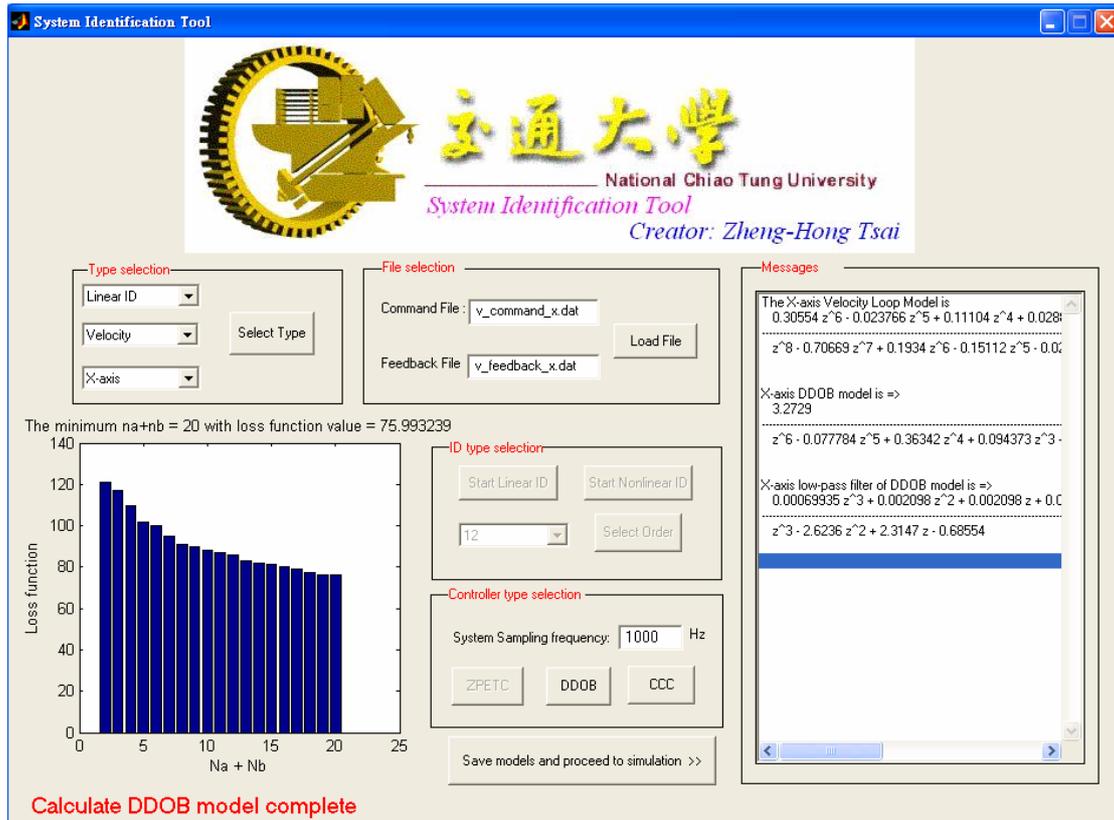


圖 5-18 速度迴路識別與 DDOB 設計後之畫面

X 軸：

$$P_x(z^{-1}) = \frac{0.0097091z^{-2} - 0.00136z^{-3} + 0.0062707z^{-4}}{1 - 1.8918z^{-1} + 1.1768z^{-2} - 0.27053z^{-3}}$$

Y 軸：

$$P_y(z^{-1}) = \frac{0.0054464z^{-2} + 0.0029018z^{-3}}{1 - 2.1365z^{-1} + 1.5579z^{-2} - 0.45906z^{-3} + 0.046028z^{-4}}$$

經由 CAD 軟體計算所得之 ZPETC 控制器為：

X 軸：

$$Z_x(z^{-1}) = \frac{103.5809z^2 - 195.9505z + 121.8969 - 28.0215z^{-1}}{1 - 0.14008z^{-1} + 0.64586z^{-2}}$$

Y 軸：

$$Z_y(z^{-1}) = \frac{182.611z^2 - 390.1409z + 284.487 - 283.8297z^{-1} + 8.4053z^{-2}}{1 + 0.53279z^{-1}}$$

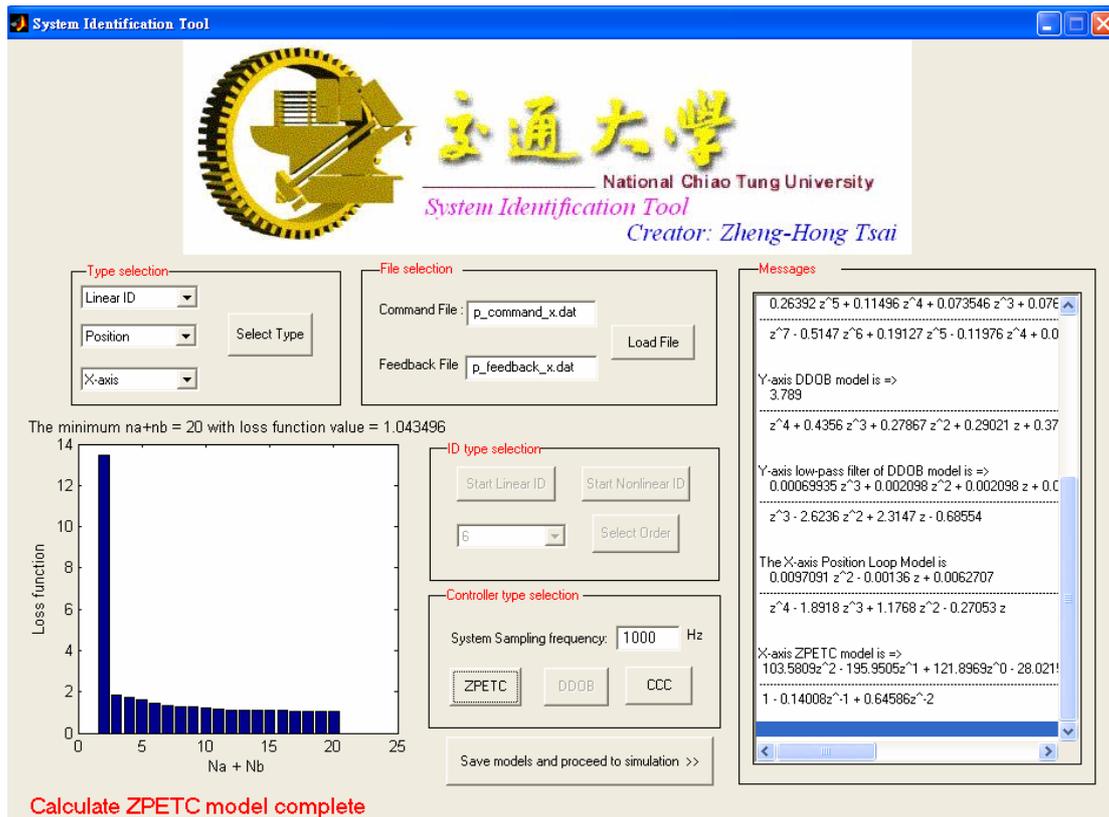


圖 5-19 位置迴路識別與 ZPETC 設計後之畫面

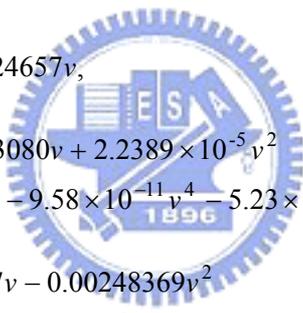
在 CCC 的增益值設定方面，按下圖 5-19 中的 CCC 鍵，即可設定 CCC 欲加之軸與其增益值。最後為非線性摩擦力補償器之設計，首先在 Identification type 選「Non-linear ID」，載入資台之識別資訊後，即出現圖 5-20 所示，會將摩擦力 v.s.速度命令繪於左下方之區域，再按下”Start Non-linear ID”鍵即開始非線性摩擦力之識別，在識別之過程中，軟體將曲線如 5-2-2 節所說的分為 5 段，每一段的 curve fitting 圖都會出現在左下方之區域，每秒鐘變換一次，如圖 5-21 所示。最後會將每一段曲線揉合的結果顯示於右方之 Message box 中，雖然在±5RPM 之 fitting 結果有些誤差，然而整體之 fitting 結果仍然不錯。在最後只要按下”Save models and proceed to simulation >>”鍵即完成控制器與補償器之設計，並前往模擬之 G.U.I.。所存的檔案有 Parameter.h、add\_in.c、Model.dat，分別為 C 語言可讀之參數檔、宣告檔及給使用者看之資料檔。另一個為使用者自行定義名稱的檔

案，是將 Message box 中的資訊存起來，所得到的非線性摩擦力模型如下：

X 軸：

$$\tau_x(v) = \begin{cases} 0.19173 + 0.00024977v, & v > 600RPM \\ 0.2153 - 0.00092919v + 8.8216 \times 10^{-6} v^2 \\ -2.796 \times 10^{-8} v^3 - 4.12 \times 10^{-11} v^4 - 2.3 \times 10^{-14} v^5, & 5 < v \leq 600RPM \\ 0.00853 + 0.0635v - 0.00041v^2 \\ -0.0016663v^3 + 5.4977 \times 10^{-7} v^4 + 2.263 \times 10^{-5} v^5, & -5 \leq v \leq 5RPM \\ -0.23092 - 0.0013893v - 1.2155 \times 10^{-5} v^2 \\ -3.872 \times 10^{-8} v^3 - 5.71 \times 10^{-11} v^4 - 3.178 \times 10^{-14} v^5, & -5 > v \geq -600RPM \\ -0.17883 + 0.00026022v, & v < -600RPM \end{cases}$$

X 軸：



$$\tau_y(v) = \begin{cases} 0.43974 + 0.00024657v, & v > 600RPM \\ 0.56788 - 0.003080v + 2.2389 \times 10^{-5} v^2 \\ -6.73 \times 10^{-8} v^3 - 9.58 \times 10^{-11} v^4 - 5.23 \times 10^{-14} v^5, & 5 < v \leq 600RPM \\ 0.069081 + 0.0527v - 0.00248369v^2 \\ + 0.0040705v^3 + 6.526 \times 10^{-5} v^4 - 0.00013618v^5, & -5 \leq v \leq 5RPM \\ -0.49176 - 0.003087v - 2.2684 \times 10^{-5} v^2 - 6.9682 \times 10^{-8} v^3 \\ -1.0149 \times 10^{-10} v^4 - 5.6727 \times 10^{-14} v^5, & -5 > v \geq -600RPM \\ -0.38 + 0.00020251v, & v < -600RPM \end{cases}$$

只要在 DSP 的運動控制程式中，include 這軟體所產生之 Parameter.h 和 add\_in.c 檔案，即可簡單的達到精密運動控制。例如以 ZPETC 為例子，DSP 控制程式有關 ZPETC 控制器轉移函式之分子與分母為與其宣告可由表 5-1 流程而將控制器引入。

表 5-1 ZPETC 控制器引入 DSP 控制程式之流程

若 ZPETC 控制器為

$$Z_p(z^{-1}) = \frac{103.5809z^2 - 195.9505z + 121.8969 - 28.0215z^{-1}}{1 - 0.14008z^{-1} + 0.64586z^{-2}}$$

在 Parameter.h 中所宣告之 ZPETC 參數為：

```

/* The X-axis ZPETC model is */
#define zbx0 103.5809
#define zbx1 -195.9505
#define zbx2 121.8969
#define zbx3 -28.0215

#define zax0 0.14008
#define zax1 -0.64586

#define X_ZPETC_NUM_LEAD_ORDER 2
#define X_ZPETC_NUM_LAG_ORDER -1
#define X_ZPETC_DEN_LAG_ORDER 2
    
```

在 add\_in.c 中則會宣告其陣列為：

```

float32 X_ZPETC_NUM[]={zbx0,zbx1,zbx2,zbx3,};
float32 X_ZPETC_DEN[]={zax0,zax1};
LIB_ZPETC x_axis_zpetc;
    
```

在 DSP 的程式中之宣告區：

```
extern LIB_ZPETC x_axis_zpetc;
```

在 DSP 的程式中之程式區：

```

position_cmdx=zpetc( &x_axis_zpetc, X_ZPETC_NUM, X_ZPETC_DEN, x_gain,
                    X_ZPETC_NUM_LEAD_ORDER,
                    X_ZPETC_NUM_LAG_ORDER,
                    X_ZPETC_DEN_LAG_ORDER, X_cmd);
    
```

其中 zpetc 為已經寫好的子程式，不須要因為 ZPETC 改變階數而已變 code 的內容。因此使用者不須要自行再將這些參數鍵入到 DSP 的程式中，即可

由軟體自動達到控制器引入的功能。

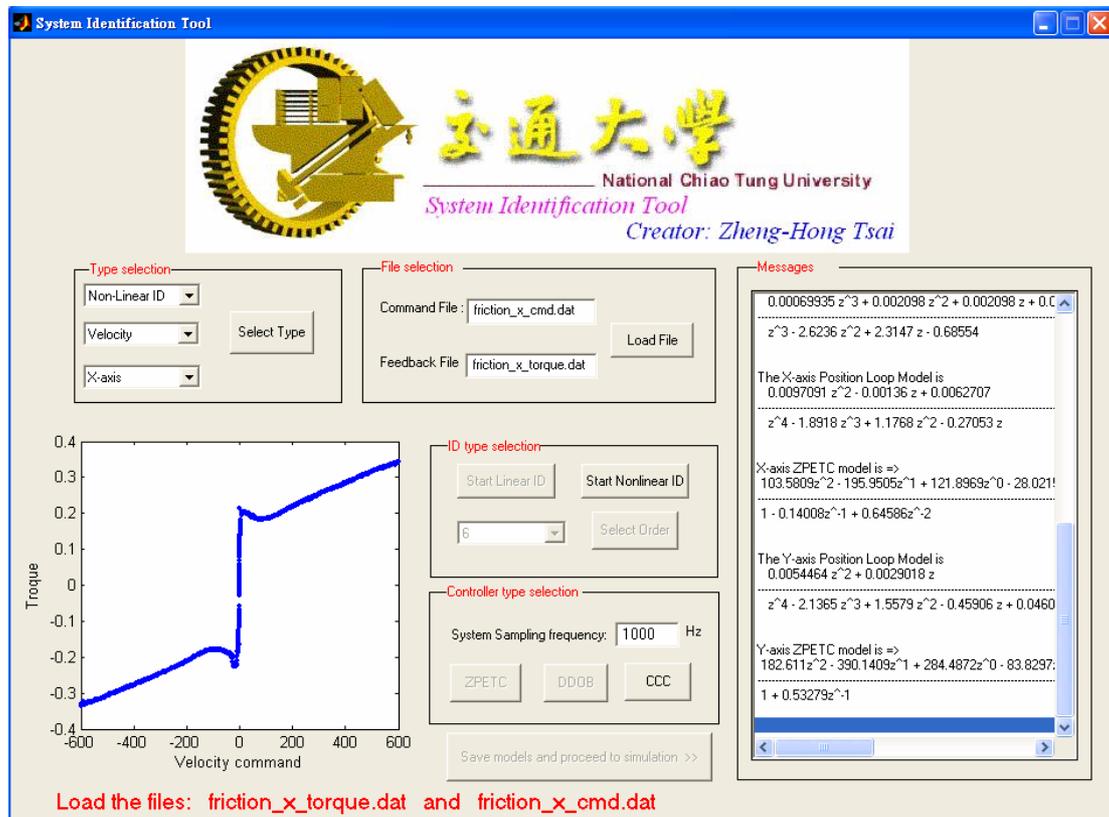


圖 5-20 載入非線性摩擦力識別資料

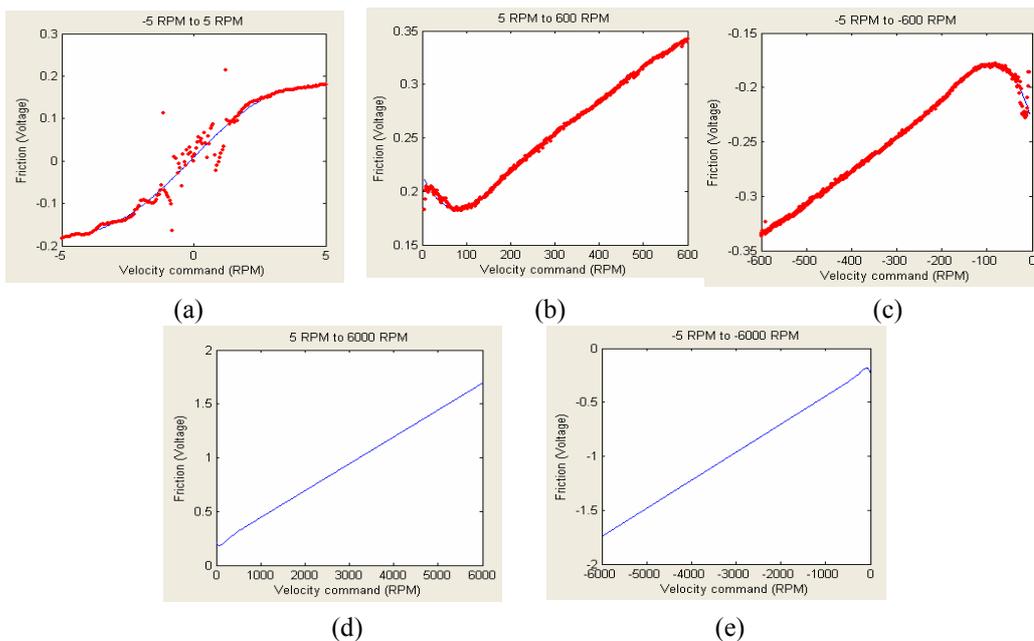


圖 5-21 各區段之資料與曲線揉合結果

## 第六章 實驗結果

在本章中將使用第五章 CAD 軟體所產生之線性控制器與非線性摩擦力補償器 model 進行實際之機台實驗，實驗之機台為 DYNA MYTE 1007 CNC machine，走圓命令為 F3000R50(即為  $\text{feedrate}=3000 \text{ mm/min}$ ,  $\text{radius}=50 \text{ mm}$ )，實驗結果圖均為取第二個圓，並將實驗結果呈現出來，以驗證各控制器的效果，最後為實驗之結論。

### 6-1 不同控制器實驗結果

#### 6-1-1 Matched DC-gain 實驗

在 Matched DC-gain 實驗中，X 軸速度迴路控制器參數為  $K_{px}=0.043$ 、 $K_{ix}=0.0005$ ，位置迴路增益值為 0.295；Y 軸速度迴路控制器參數為  $K_{py}=0.043$ 、 $K_{iy}=0.0005$ ，位置迴路增益值為 0.295。X 軸所得的追蹤誤差如圖 6-1 所示， $RMS$  值約為  $0.92\text{mm}$ ；Y 軸的追蹤誤差如圖 6-2 所示， $RMS$  值約為  $0.925\text{mm}$ ；輪廓誤差如圖 6-3 所示，最大的輪廓誤差約為  $19.236\mu\text{m}$ 。輪廓誤差放大 1000 倍與標準圓之比較如圖 6-4 所示，由圖中可以明顯地看出，在 0 度、90 度、180 度和 270 度等轉角的地方均有明顯變大的 contouring error，因為 X 軸與 Y 軸是 DC-gain matched，所以在低速的圓命令下，其誤差會大致上是圓形。

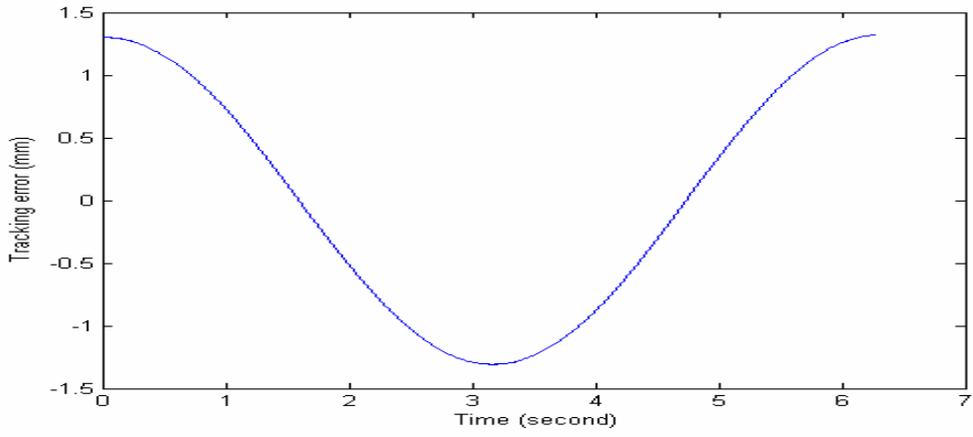


圖 6-1 X 軸的追跡誤差

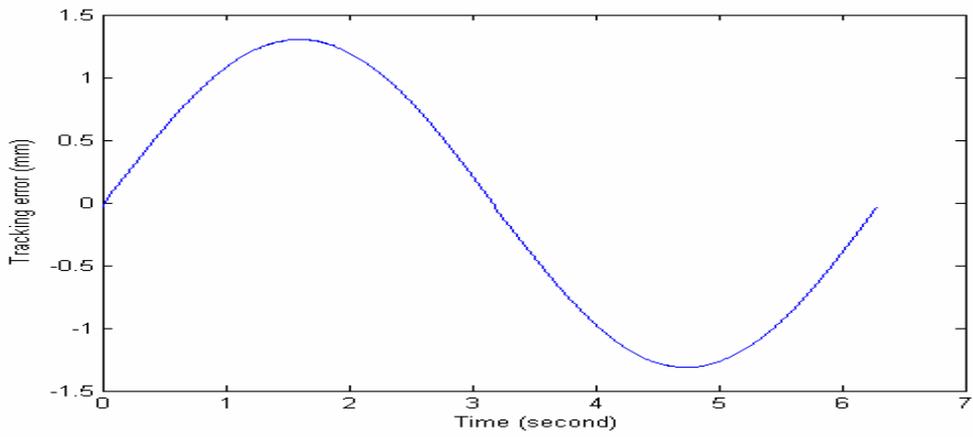


圖 6-2 Y 軸的追跡誤差

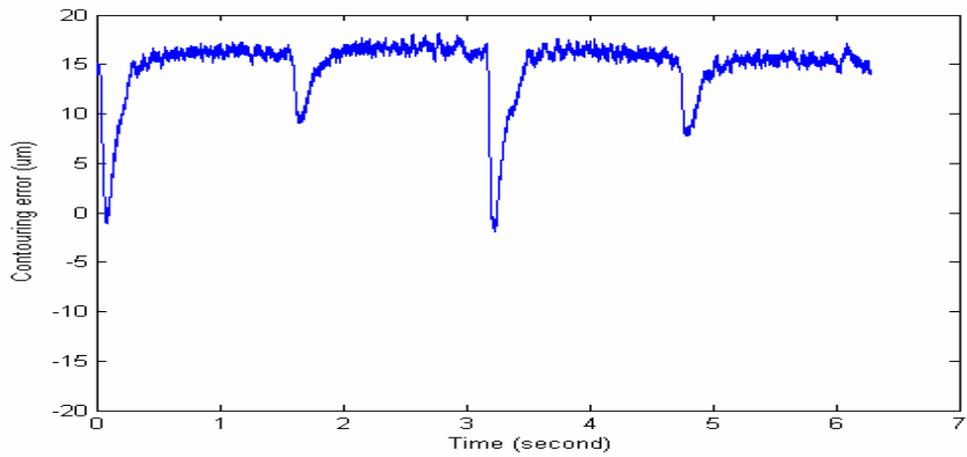


圖 6-3 Matched DC-gain control 的輪廓誤差

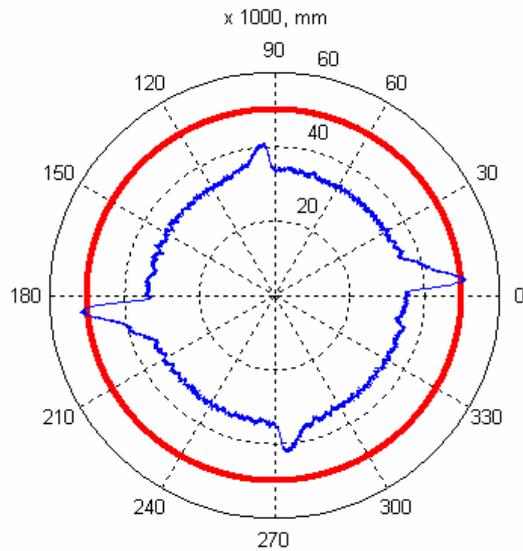


圖 6-4 Matched DC-gain control 的循圓軌跡誤差與標準圓(50mm,黑線)比較



### 6-1-2 ZPETC 實驗

在 ZPETC 實驗中，X、Y 軸速度迴路與位置迴路控制器參數均為採用 DC-gain matched 實驗的參數。X 軸所得的追跡誤差如圖 6-6 所示，*RMS* 值約為  $0.0408\text{mm}$ ；Y 軸的追跡誤差如圖 6-6 所示，*RMS* 值約為  $0.0391\text{mm}$ ；由此可知，追跡誤差大大的降低了約 23 倍。輪廓誤差如圖 6-7 所示，最大的輪廓誤差約為  $-18.22\mu\text{m}$ 。輪廓誤差放大 1000 倍如圖 6-8 所示。因為 ZPETC 無法改善最大的 contouring error，但因為追跡誤差變好了，所以 *RMS* 的輪廓誤差也會跟著變好。

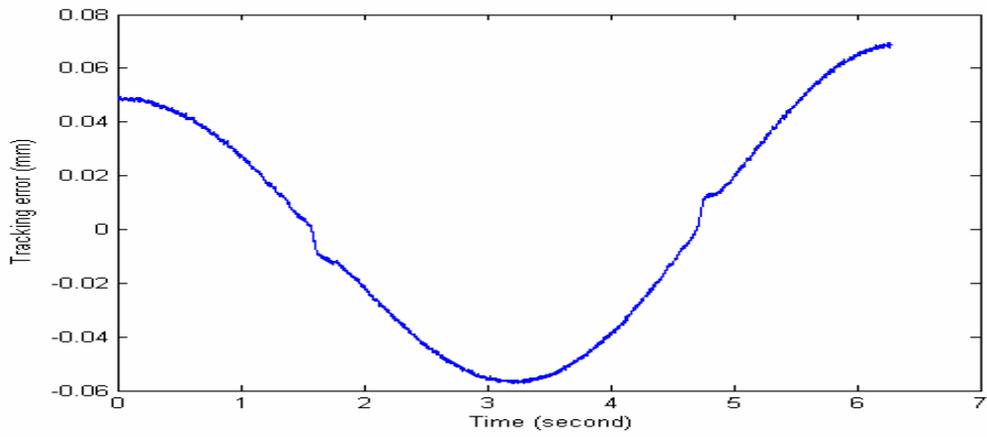


圖 6-5 系統加入 ZPETC 後 X 軸的追跡誤差

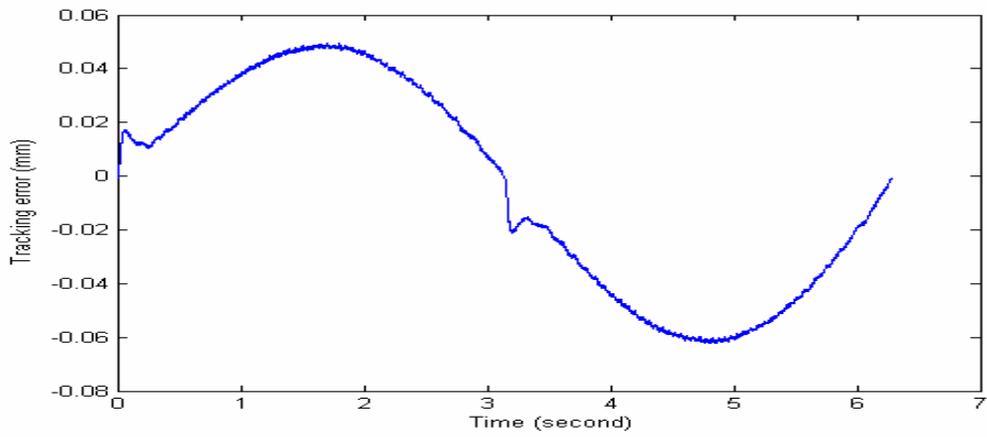


圖 6-6 系統加入 ZPETC 後 Y 軸的追跡誤差

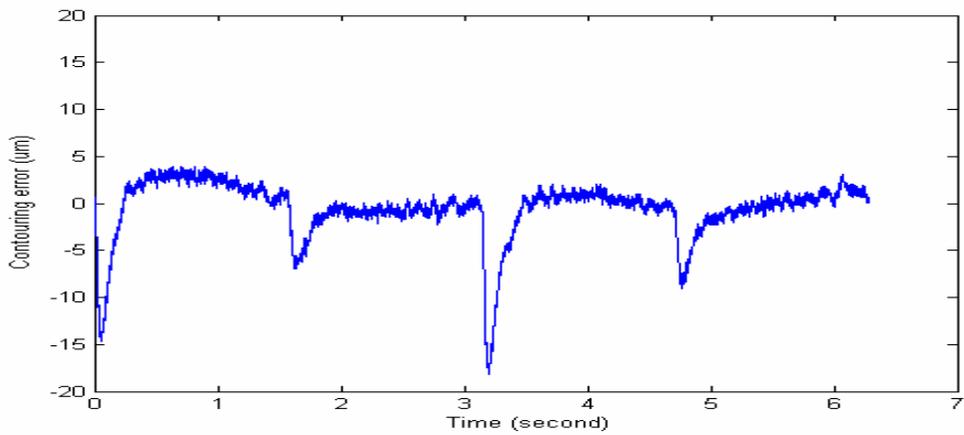


圖 6-7 系統加入 ZPETC 後的輪廓誤差

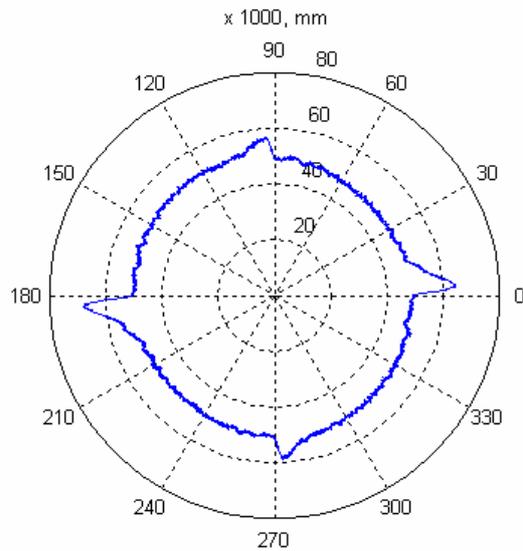


圖 6-8 系統加入 ZPETC 的循圓軌跡誤差



### 6-1-3 Digital Disturbance Observer (DDOB) 實驗

在 DDOB 實驗中，X、Y 軸速度迴路與位置迴路控制器參數均為採用 DC-gain matched 實驗的參數。X 軸所得的追跡誤差如圖 6-9 所示，*RMS* 值約為  $0.919\text{mm}$ ；Y 軸的追跡誤差如圖 6-10 所示，*RMS* 值約為  $0.919\text{mm}$ 。輪廓誤差如圖 6-11 所示，最大的輪廓誤差約為  $15.237\mu\text{m}$ ，輪廓誤差放大 1000 倍與標準圓之比較如圖 6-12 所示。由圖可以明顯看出，DDOB 對於追跡誤差無法改善，但對於 0 度、90 度、180 度與 270 度的最大輪廓誤寬度明顯的抑制。

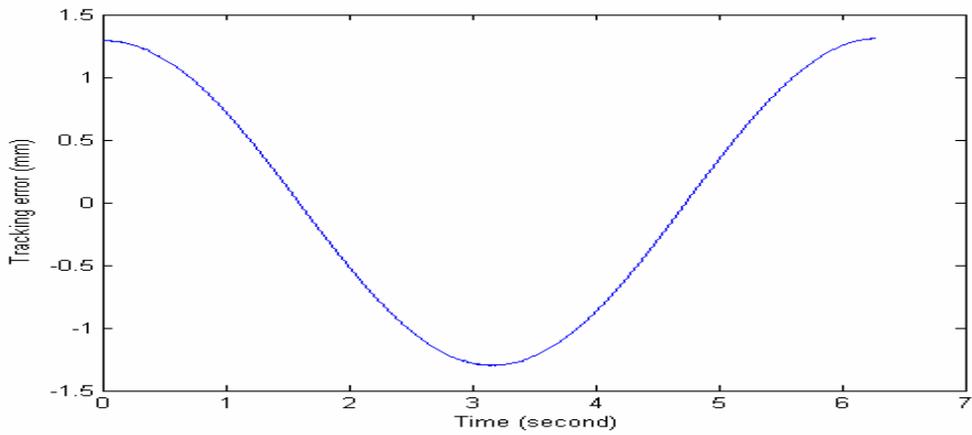


圖 6-9 系統加入 DDOB 後 X 軸的追跡誤差

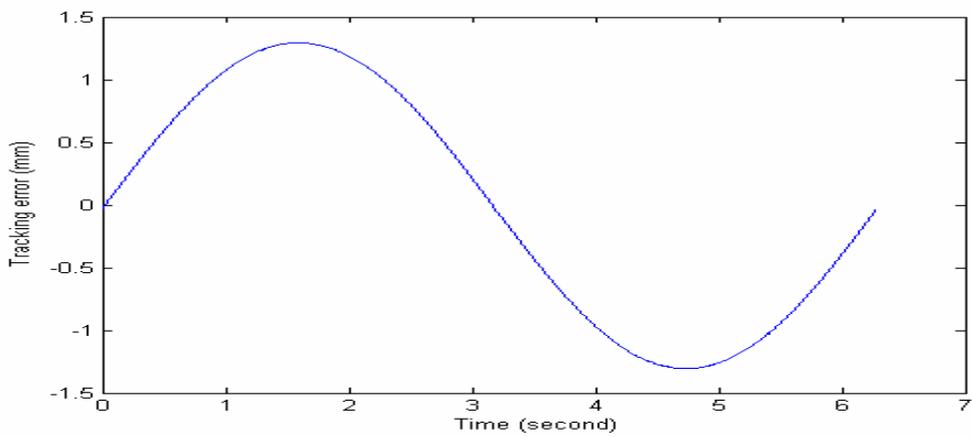


圖 6-10 系統加入 DDOB 後 Y 軸的追跡誤差

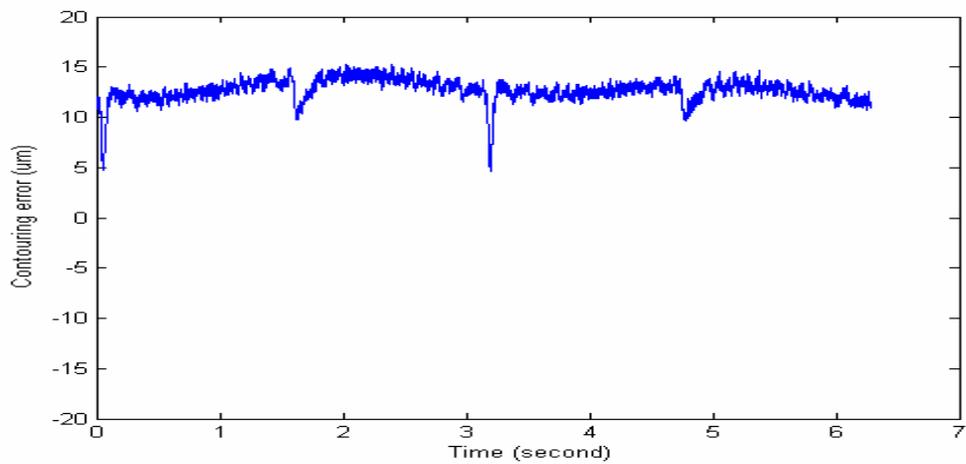


圖 6-11 系統加入 DDOB 後的輪廓誤差

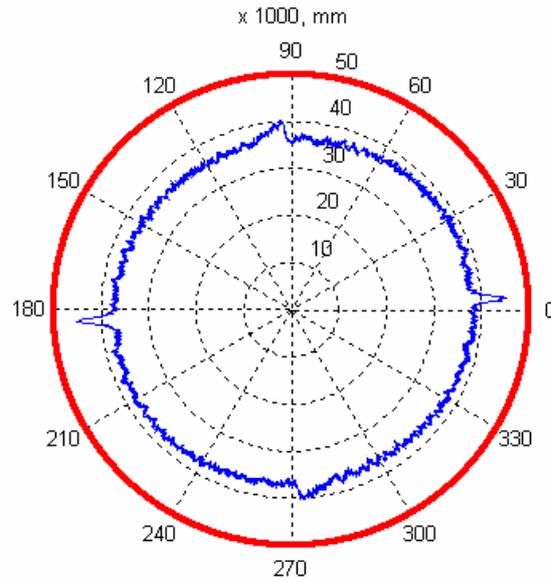


圖 6-12 系統加入 DDOB 的循圓軌跡誤差

#### 6-1-4 ZPETC+DDOB 實驗



在 ZPETC+DDOB 實驗中，X、Y 軸速度迴路與位置迴路控制器參數均為採用 DC-gain matched 實驗的參數。X 軸所得的追跡誤差如圖 6-13 所示，*RMS* 值約為  $0.0346\text{mm}$ ；Y 軸的追跡誤差如圖 6-14 所示，*RMS* 值約為  $0.0334\text{mm}$ ；因為有 ZPETC 的存在，所以可以改善追跡誤差。輪廓誤差如圖 6-15 所示，最大的輪廓誤差約為  $-11.192\mu\text{m}$ ，輪廓誤差放大 1000 倍如圖 6-16 所示。由圖中可以看出不僅追跡誤差有改善，其 0 度、90 度、180 度與 270 的最大輪廓誤差均有效抑制，由原先單獨只有 ZPETC 的  $-18\mu\text{m}$  降至  $-11\mu\text{m}$ 。

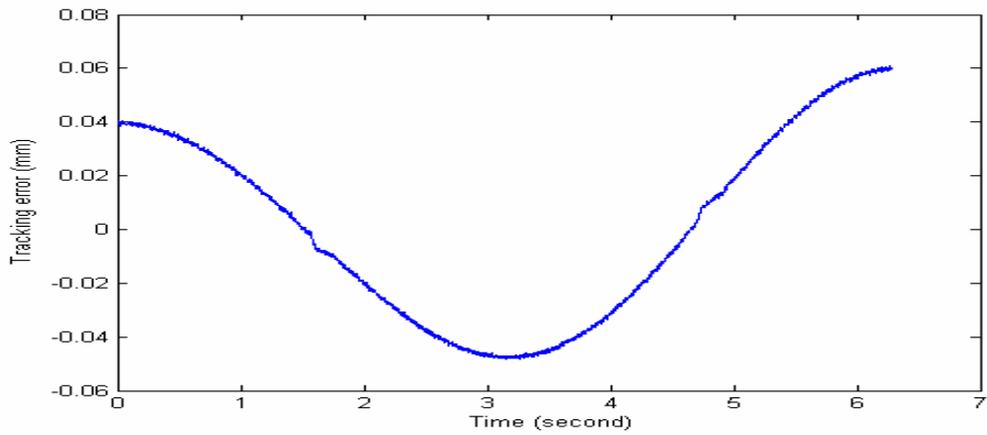


圖 6-13 系統加入 ZPETC+DDOB 後 X 軸的追蹤誤差

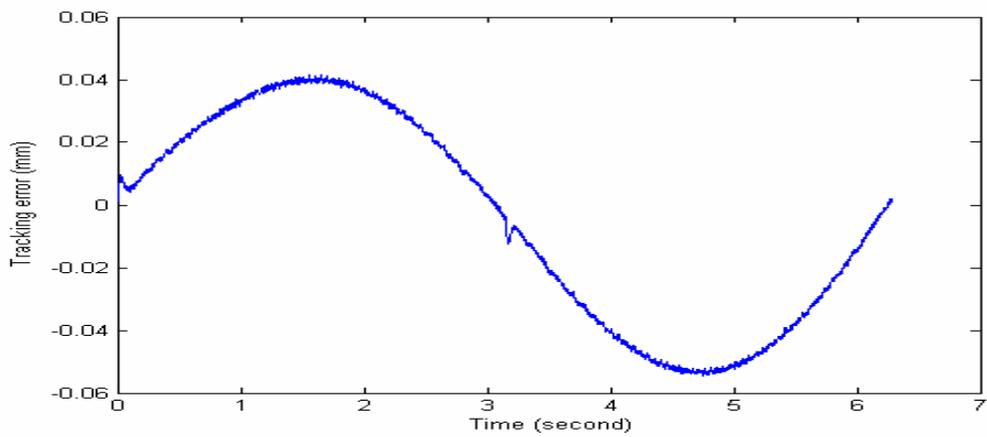


圖 6-14 系統加入 ZPETC+DDOB 後 Y 軸的追蹤誤差

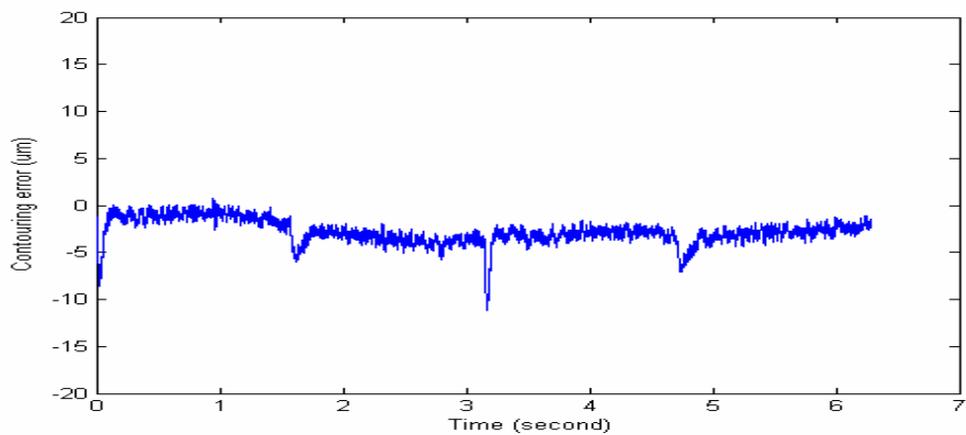


圖 6-15 系統加入 ZPETC+DDOB 的輪廓誤差

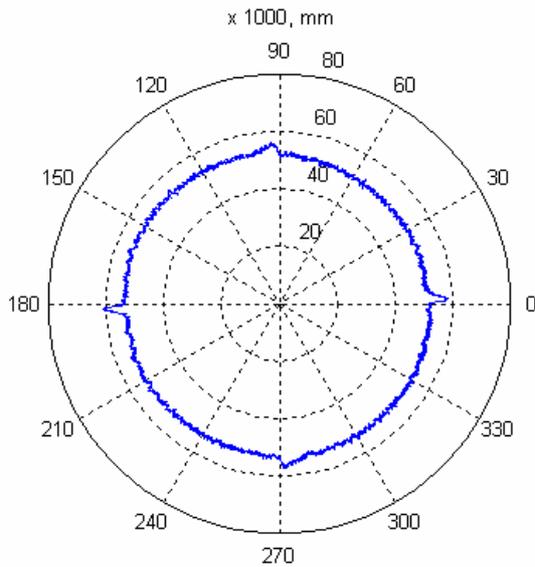


圖 6-16 系統加入 ZPETC+DDOB 的循圓軌跡誤差



#### 6-1-5 整合型控制器(ZPETC+CCC)實驗

在 ZPETC+CCC 實驗中，X、Y 軸速度迴路與位置迴路控制器參數均為採用 DC-gain matched 實驗的參數。X 軸所得的追跡誤差如圖 6-17 所示，*RMS* 值約為  $0.0406\text{mm}$ ；Y 軸的追跡誤差如圖 6-18 所示，*RMS* 值約為  $0.0393\text{mm}$ 。輪廓誤差如圖 6-19 所示，最大的輪廓誤差約為  $-5.603\mu\text{m}$ 。輪廓誤差放大 1000 倍如圖 6-20 所示。由圖可以明顯看出追跡誤差與最大的輪廓誤差均有顯著的改善，已經非常貼近標準圓，但在 0 度、90 度、180 度與 270 度轉角地方，仍然有約  $5.6\mu\text{m}$  的輪廓誤差。

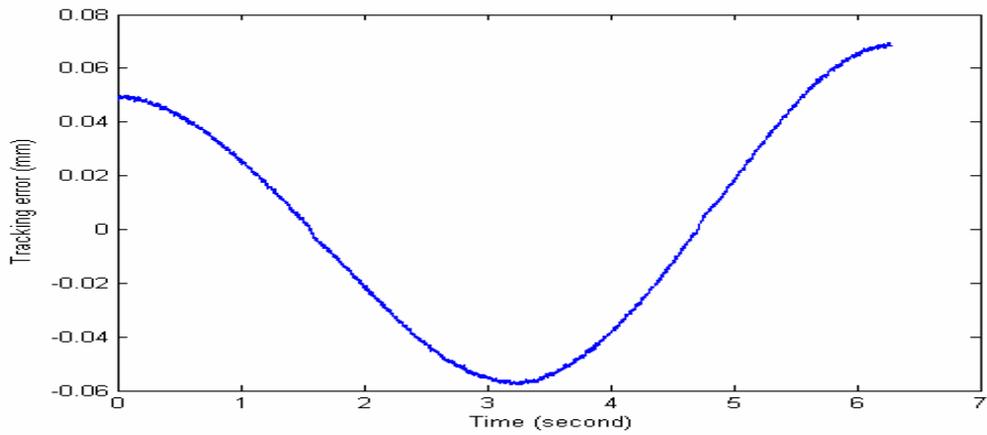


圖 6-17 系統加入 ZPETC+CCC 後 X 軸的追跡誤差

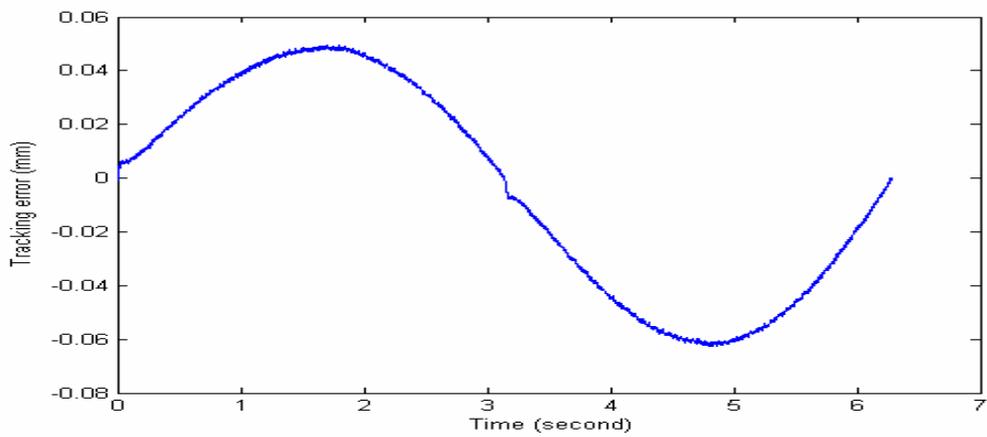


圖 6-18 系統加入 ZPETC+CCC 後 Y 軸的追跡誤差

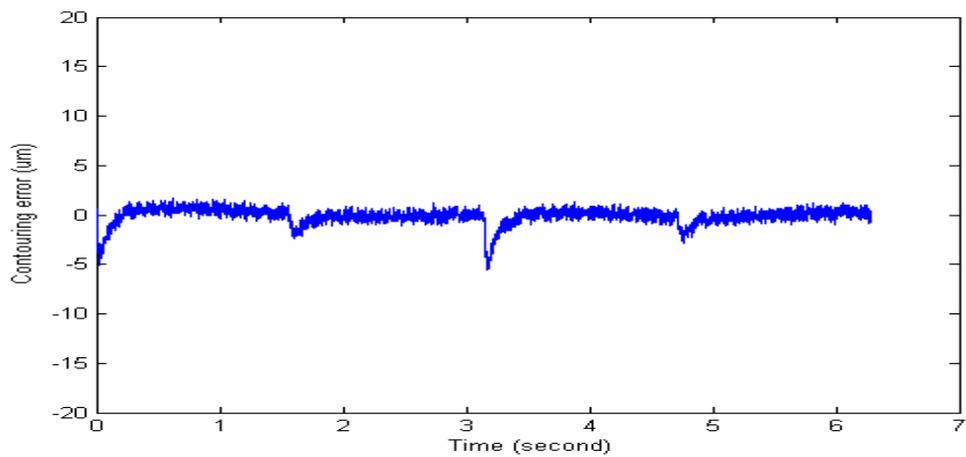


圖 6-19 系統加入 ZPETC+CCC 的輪廓誤差

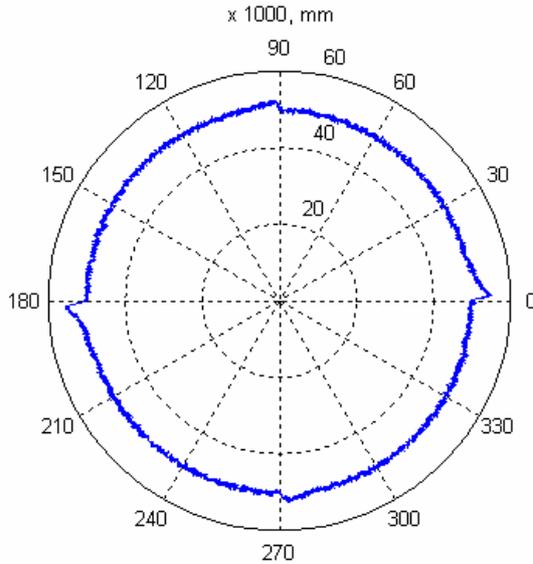


圖 6-20 系統加入 ZPETC+CCC 的循圓軌跡誤差

#### 6-1-6 ZPETC + CCC + DDOB 實驗

在 ZPETC+CCC+DDOB 實驗中，X、Y 軸速度迴路與位置迴路控制器參數均為採用 DC-gain matched 實驗的參數。X 軸所得的追跡誤差如圖 6-121 所示， $RMS$  值約為  $0.0346mm$ ；Y 軸的追跡誤差如圖 6-22 所示， $RMS$  值約為  $0.0346mm$ 。輪廓誤差如圖 6-23 所示，最大的輪廓誤差約為  $-4.488\mu m$ 。輪廓誤差放大 1000 倍如圖 6-24 所示。由圖可以明顯看出追跡誤差與最大的輪廓誤差均有顯著的改善，已經非常貼近標準圓，但在 0 度、90 度、180 度與 270 度轉角地方，仍然有約  $-4.5\mu m$  的輪廓誤差。但  $RMS$  輪廓誤差  $0.848\mu m$  比 ZPETC+CCC 時的  $0.859\mu m$  來得好。原因仍 DDOB 不僅可以消除最大輪廓誤差大小外，還可以縮小最大輪廓誤差的寬度。

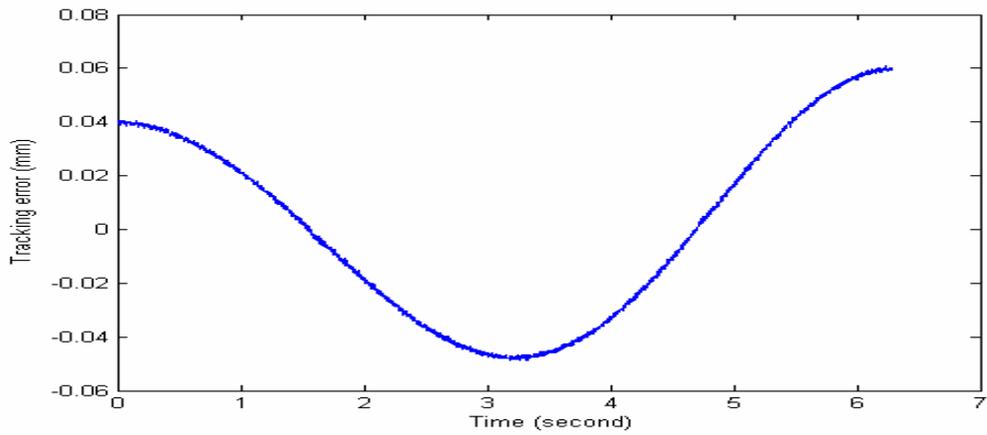


圖 6-21 系統加入 ZPETC+CCC+DDOB 後 X 軸的追蹤誤差

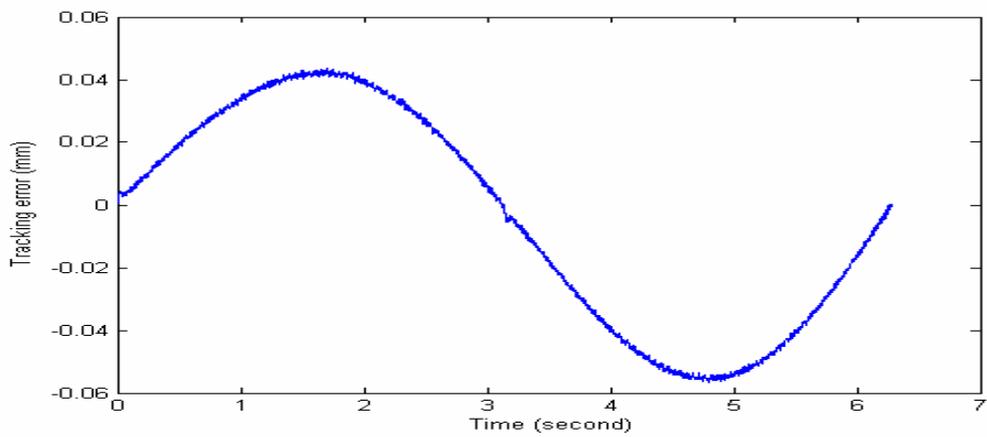


圖 6-22 系統加入 ZPETC+CCC+DDOB 後 Y 軸的追蹤誤差

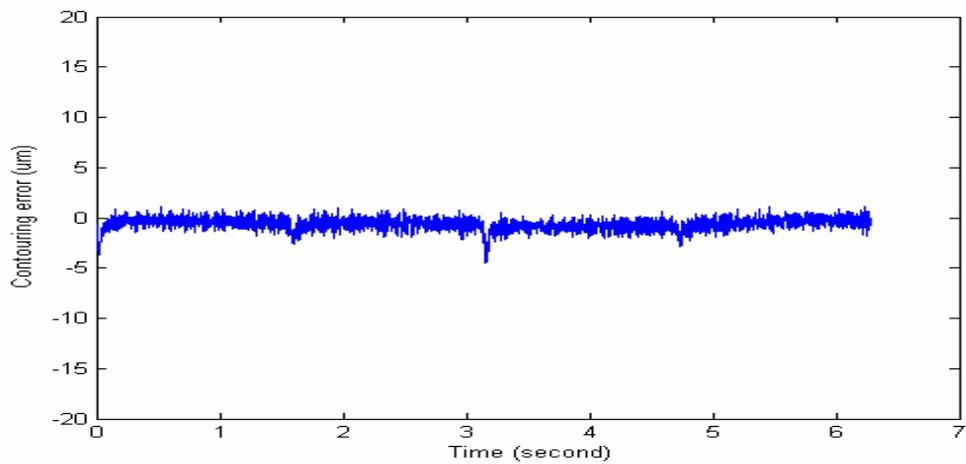


圖 6-23 系統加入 ZPETC+CCC+DDOB 的輪廓誤差

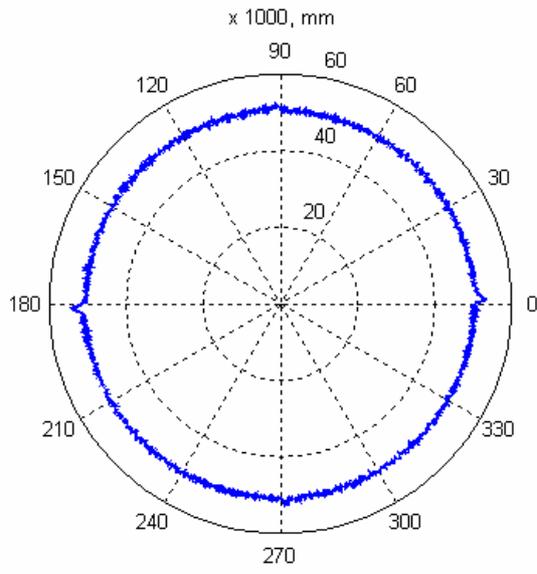


圖 6-24 系統加入 ZPETC+CCC+DDOB 的循圓軌跡誤差



## 6-2 加上非線性摩擦力補償器之實驗結果

### 6-2-1 Matched DC-gain + N.F.C. 實驗

在 Matched DC-gain + 非線性摩擦力補償器之實驗中，其控制器之參數均與 6-1-1 一樣。輪廓誤差如圖 6-25 所示，最大的輪廓誤差約為 18.436  $\mu\text{m}$ 。輪廓誤差放大 1000 倍與標準圓之比較如圖 6-26 所示，由圖中可以明顯地看出，在 0 度、90 度、180 度和 270 度等轉角的地方均較圖 6-1-1-1 未加非線性摩擦力補償器有明顯改善。

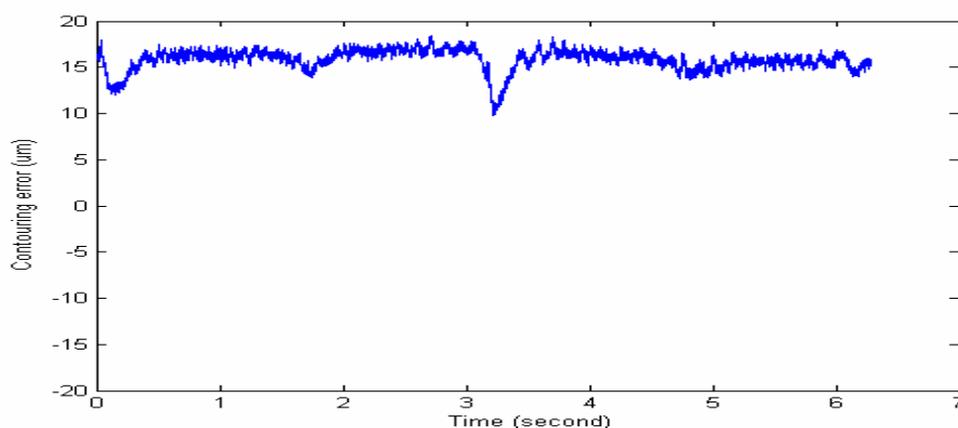


圖 6-25 Matched DC-gain + N.F.C.的輪廓誤差

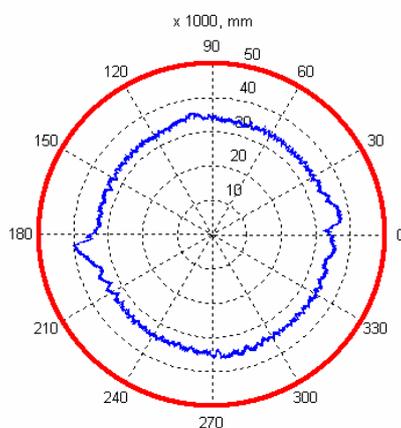


圖 6-26 Matched DC-gain + N.F.C 的循圓軌跡誤差

## 6-2-2 ZPETC + N.F.C. 實驗

在 ZPETC + 非線性摩擦力補償器之實驗中，X、Y 軸速度迴路與位置迴路控制器參數均為採用 DC-gain matched 實驗的參數。輪廓誤差如圖 6-27 所示，最大的輪廓誤差約為  $-4.747\mu m$ 。輪廓誤差放大 1000 倍如圖 6-28 所示。其最大輪廓誤差較未加非線線摩擦力補償器時縮小了  $13.473\mu m$ 。其追跡能力亦不會受到影響。

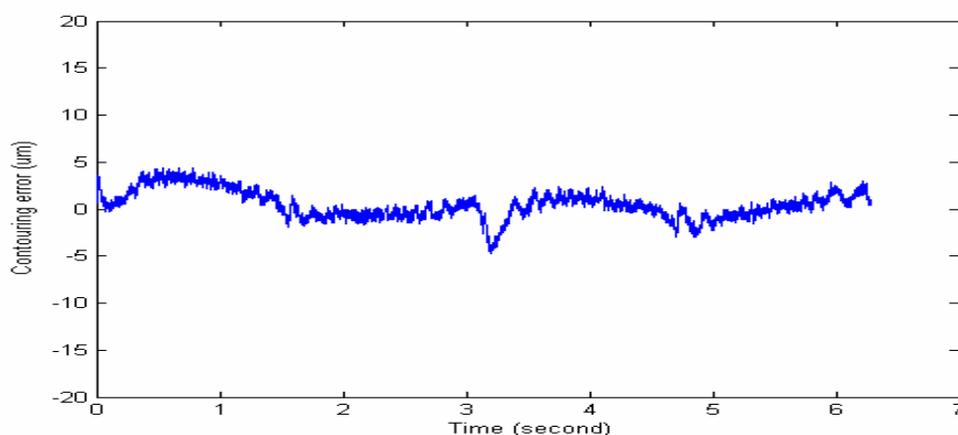


圖 6-27 系統加入 ZPETC + N.F.C. 的輪廓誤差

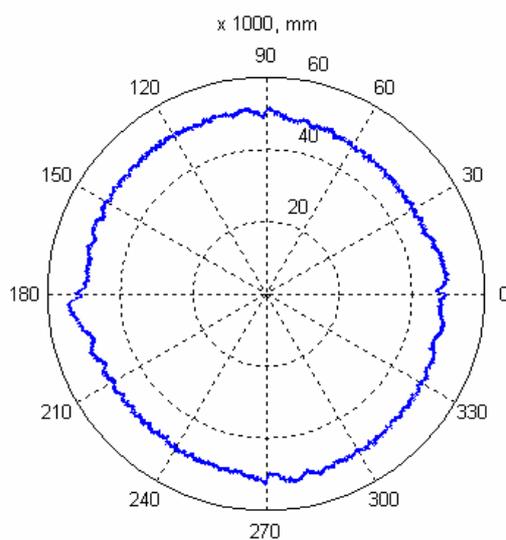


圖 6-28 系統加入 ZPETC + N.F.C 的循圓軌跡誤差

### 6-2-3 Digital Disturbance Observer (DDOB) + N.F.C.實驗

在 DDOB + 非線性摩擦力補償器實驗中，X、Y 軸速度迴路與位置迴路控制器參數均為採用 DC-gain matched 實驗的參數。輪廓誤差如圖 6-29 所示，最大的輪廓誤差約為  $15.4872\mu\text{m}$ ，輪廓誤差放大 1000 倍與標準圓之比較如圖 6-30 所示。與圖 6-11 之比較可以明顯看出，加入非線性摩擦力補償器之後，明顯地將轉角處的輪廓誤差補償掉。

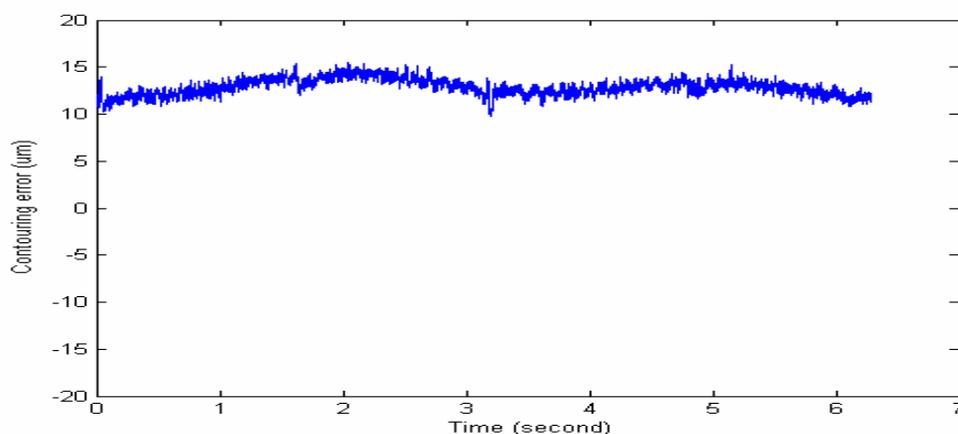


圖 6-29 系統加入 DDOB + N.F.C.的輪廓誤差

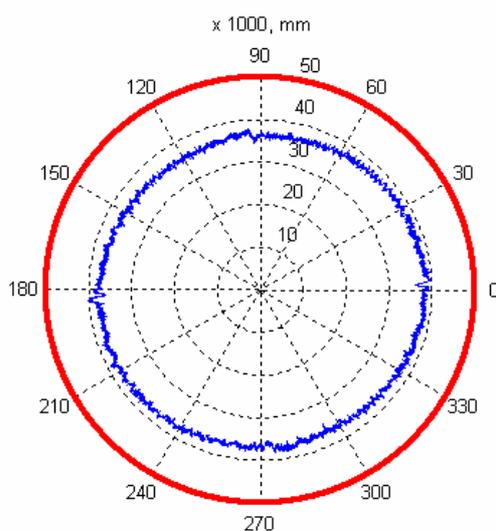


圖 6-30 系統加入 DDOB + N.F.C 的循圓軌跡誤差

### 6-2-4 ZPETC+DDOB+N.F.C.實驗

在 ZPETC+DDOB+非線性摩擦力補償器實驗中，X、Y 軸速度迴路與位置迴路控制器參數均為採用 DC-gain matched 實驗的參數。輪廓誤差如圖 6-31 所示，最大的輪廓誤差約為 $-5.981\mu\text{m}$ ，輪廓誤差放大 1000 倍如圖 6-32 所示。與未加入非線性補償器之前的圖 6-15 比較，最大輪廓誤差由 $-11.192\mu\text{m}$ 降至 $-5.981\mu\text{m}$ ，共縮小了 $5.211\mu\text{m}$ 。

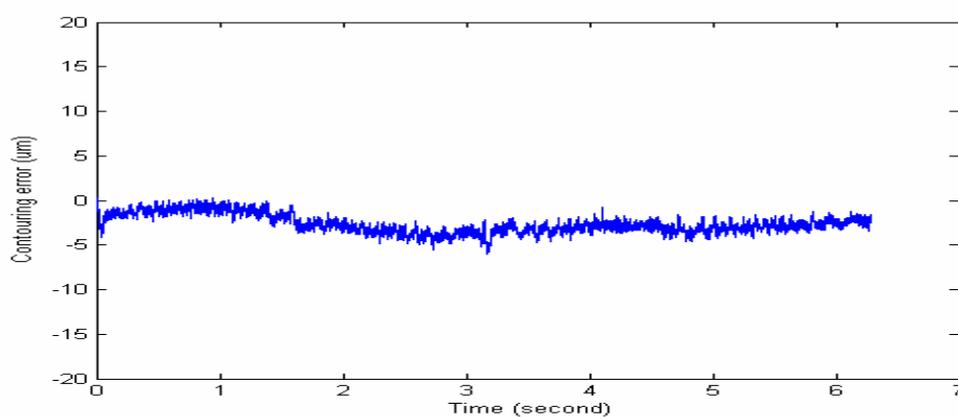


圖 6-31 系統加入 ZPETC + DDOB + N.F.C.的輪廓誤差

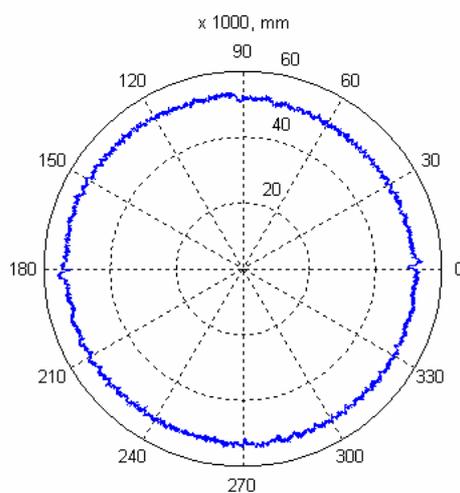


圖 6-32 系統加入 ZPETC + DDOB + N.F.C 的循圓軌跡誤差

### 6-2-5 ZPETC + CCC + N.F.C.實驗

在 ZPETC + CCC + 非線性摩擦力補償器實驗中，X、Y 軸速度迴路與位置迴路控制器參數均為採用 DC-gain matched 實驗的參數。輪廓誤差如圖 6-33 所示，最大的輪廓誤差約為 $-3.291\mu\text{m}$ ，輪廓誤差放大 1000 倍如圖 6-34 所示。與未加入非線性補償器之前的圖 6-19 比較，最大輪廓誤差由 $-5.6031\mu\text{m}$ 降至 $-3.291\mu\text{m}$ ，共縮小了 $2.31\mu\text{m}$ 。

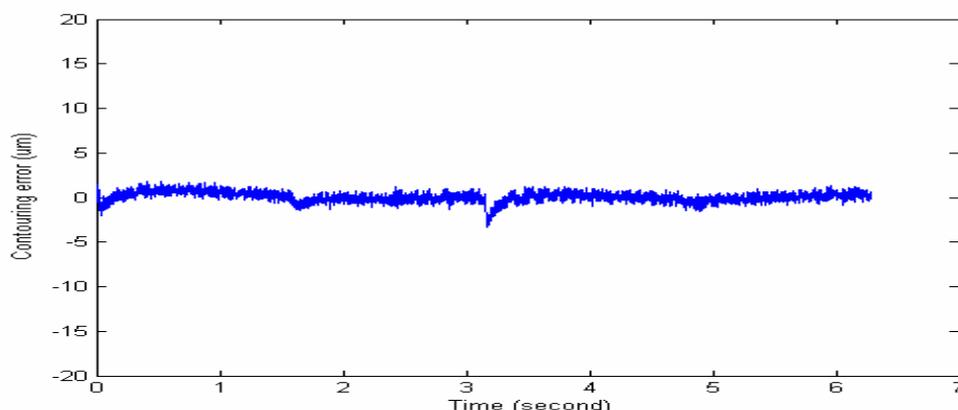


圖 6-33 系統加入 ZPETC + CCC + N.F.C.的輪廓誤差

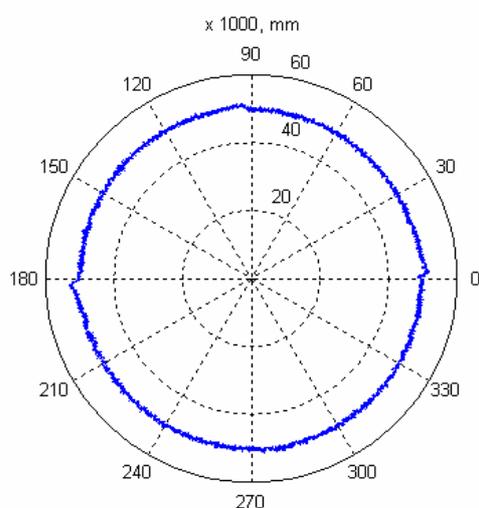


圖 6-34 系統加入 ZPETC + CCC + N.F.C 的循圓軌跡誤差

### 6-2-6 ZPETC + CCC + DDOB + N.F.C. 實驗

在此實驗中，X、Y 軸速度迴路與位置迴路控制器參數均為採用 DC-gain matched 實驗的參數。輪廓誤差如圖 6-35 所示，最大的輪廓誤差約為  $-3.272\mu\text{m}$ ，已小於  $3.5\mu\text{m}$ 。輪廓誤差放大 1000 倍如圖 6-36 所示。由圖可以明顯看出追跡誤差與最大的輪廓誤差均有顯著的改善，在 0 度、90 度、180 度與 270 度轉角地方，輪廓誤差已經明顯變得非常小了。 $RMS$  輪廓誤差  $0.78\mu\text{m}$  比 ZPETC+CCC+DDOB 時的  $0.848\mu\text{m}$  來得好。由此可以得知非線補償器的效果實在非常的好。

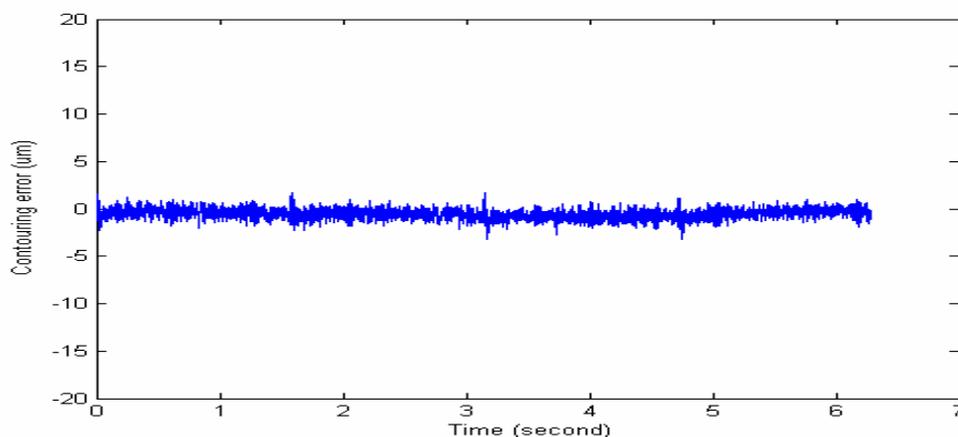


圖 6-2-6-1 系統加入 N.F.C.+ZPETC+CCC+DDOB 的輪廓誤差

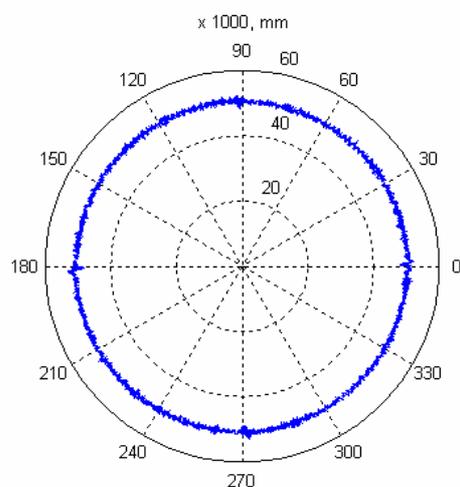


圖 6-2-6-2 系統加入 N.F.C.+ZPETC+CCC+DDOB 的循圓軌跡誤差

### 6-3 實驗結果分析

綜合前二節的實驗結果，將各種同控制器之實驗結果歸納如表 6-1 所示，圖 6-37 為最大輪廓誤差的條狀圖，圖 6-38 為各控制器輪廓誤差的 *RMS* 值，表 6-2 則是列出各不同控制器未加上非線性摩擦力補償器與加上非線性摩擦力補償時之實驗數據。圖 6-39 則為各控制器有加非線性補償與無加非線性補償之最大輪廓誤差比較圖，圖 6-40 則為其輪廓誤差之 *RMS* 值比較，由這些結果可以歸納為以下幾點：

1. CCC 對於對付輪廓誤差有非常顯著的效果。
2. ZPETC 對於對付追跡誤差的效果非常好。
3. 整合型控制器再加入 DDOB 之後其 *RMS* 值均有改善，顯示 DDOB 對於部份非線性現象有抑制功能。
4. 有加非線性摩擦力補償器之控制架構其在各轉角之表現較未加非線性摩擦力補償器來得優異，表示非線產摩擦力補償器對於摩擦力之抑制有相當好的效果。
5. 因實驗中無加入負載，所以 ZPETC+CCC+N.F.C.之 *RMS* 值較 ZPETC+CCC+DDOB+N.F.C.之 *RMS* 值小，顯示在無負載之情況下，加入 DDOB 會成為系統之負擔。

表 6-1 不同控制器之實驗結果數據

|                        | X-axis tracking error<br>(RMS mm) | Y-axis tracking error<br>(RMS mm) | Maximum Contouring Error<br>( $\mu\text{m}$ ) | Minimum Contouring Error<br>( $\mu\text{m}$ ) | Contouring Error (RMS)<br>( $\mu\text{m}$ ) |
|------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---|---|---|
| Matched DC-gain        | 0.9250                            | 0.9250                            | <b>18.236</b>                                 | -1.892  | 15.202                                      |
| DDOB                   | 0.9190                            | 0.9190                            | <b>15.237</b>                                 | 4.598   | 12.738                                      |
| ZPETC                  | 0.0409                            | 0.0392                            | 3.961   | <b>-18.220</b>                                | 3.219                                       |
| ZPETC+DDOB             | 0.0346                            | 0.0330                            | 0.726   | <b>-11.192</b>                                | 3.093                                       |
| Integrated (ZPETC+CCC) | 0.0406                            | 0.0390                            | 1.744   | <b>-5.603</b>                                 | 0.859                                       |
| ZPETC+CCC+DDOB         | 0.0346                            | 0.0347                            | 1.161   | <b>-4.487</b>                                 | 0.849                                       |

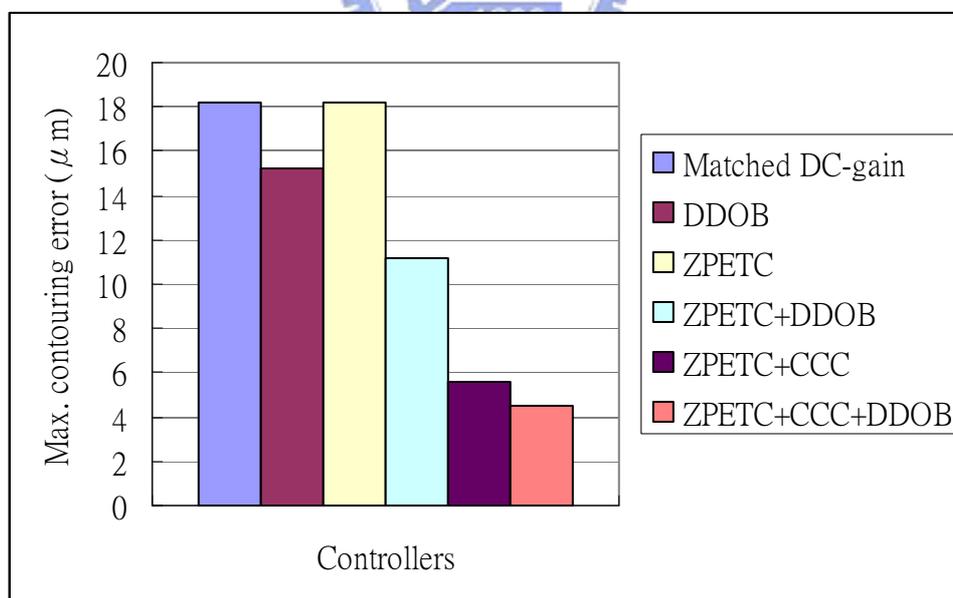


圖 6-37 各控制器之最大輪廓誤差比較圖

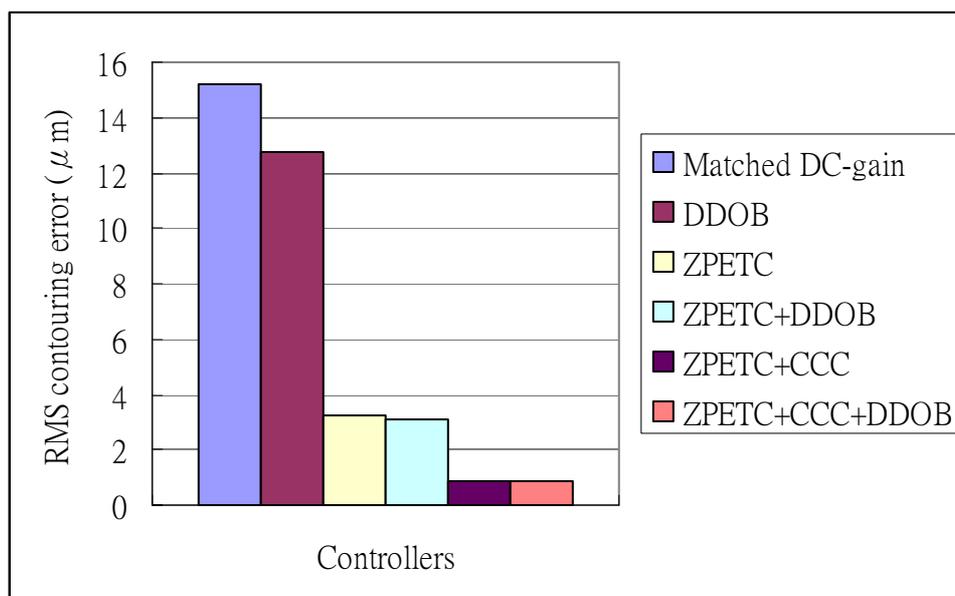


圖 6-38 各控制器之廓誤誤差  $RMS$  值比較圖

表 6-2 加上非線性摩擦力補償器後之實驗結果數據

|                                | X-axis tracking error ( $RMS\ mm$ ) | Y-axis tracking error ( $RMS\ mm$ ) | Maximum Contouring Error ( $\mu m$ ) | Minimum Contouring Error ( $\mu m$ ) | Contouring Error ( $RMS$ ) ( $\mu m$ ) |
|--------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--|
| Matched DC-gain + N.F.C.       | 0.9250                              | 0.9249                              | <b>18.436</b>                        | 9.711                                | 15.880                                 |
| DDOB + N.F.C.                  | 0.9190                              | 0.9190                              | <b>15.487</b>                        | 9.755                                | 12.883                                 |
| ZPETC + N.F.C.                 | 0.0407                              | 0.0390                              | 4.412                                | <b>-4.747</b>                        | 1.563                                  |
| ZPETC+DDOB +N.F.C.             | 0.0346                              | 0.0334                              | 0.309                                | <b>-5.980</b>                        | 2.832                                  |
| Integrated (ZPETC+CCC) +N.F.C. | 0.0405                              | 0.0393                              | 1.777                                | <b>-3.291</b>                        | 0.575                                  |
| ZPETC+CCC+ DDOB+N.F.C.         | 0.0346                              | 0.0346                              | 1.718                                | <b>-3.272</b>                        | <b>0.780</b>                           |

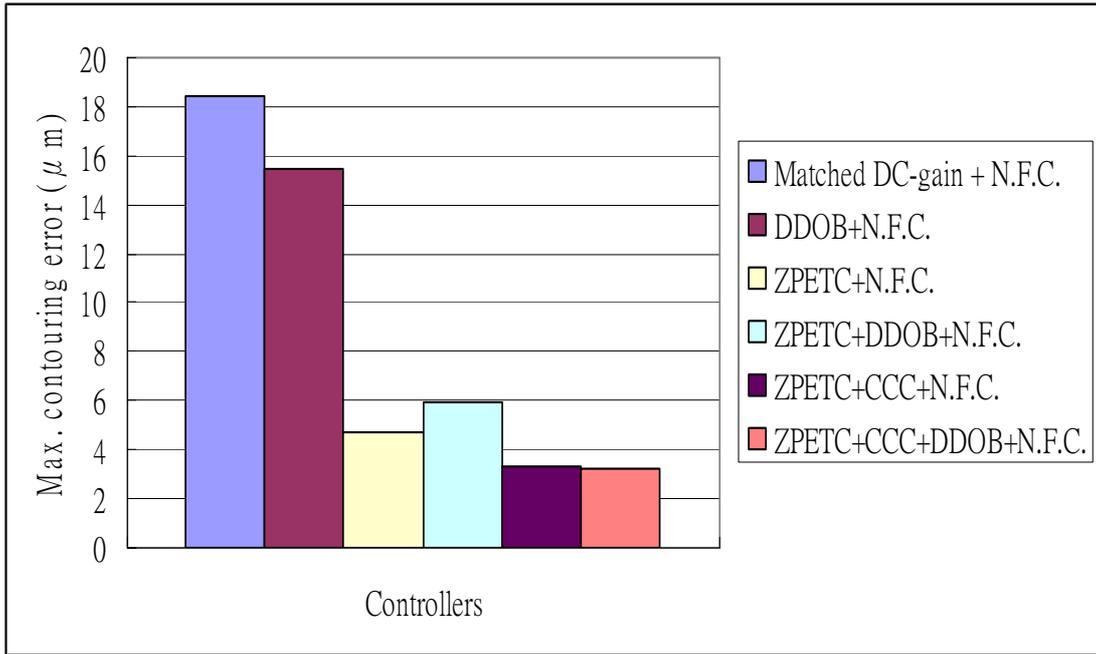


圖 6-39 加入非線性摩擦力補償器後各控制器之最大輪廓誤差比較圖

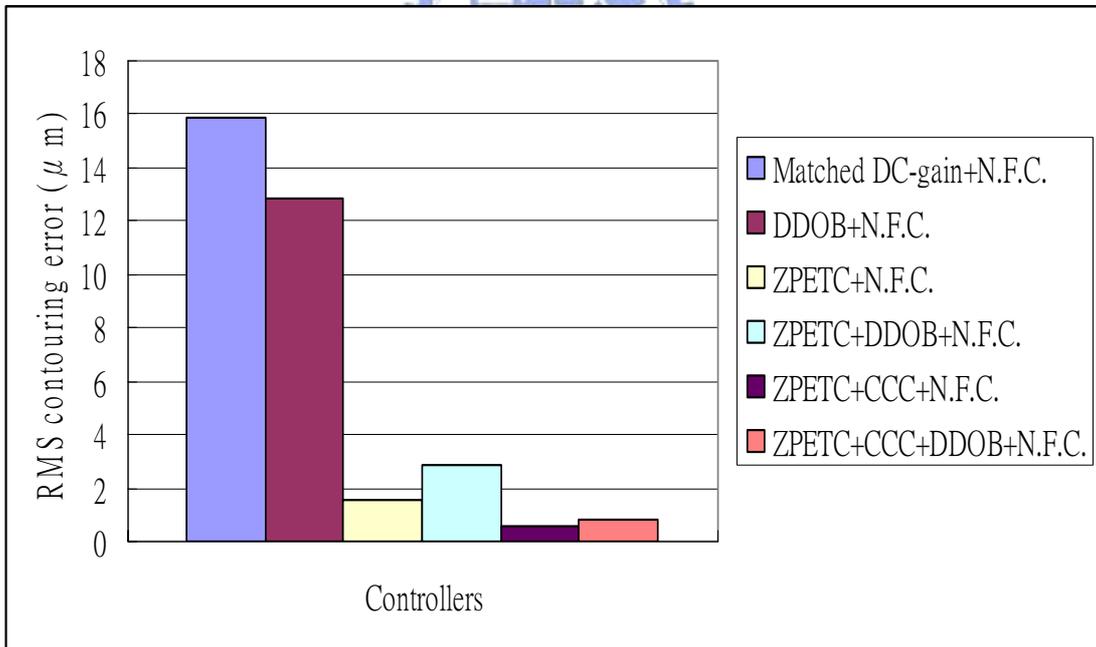


圖 6-40 加入非線性摩擦力補償器後各控制器之廓誤誤差 *RMS* 值比較圖

## 第七章 結論

在本文中，以零相位誤差追跡控制器以及整合型控制器為起點，在已經有良好的追跡誤差與輪廓誤差響應的系統中，研究發現仍有因為摩擦力的作用，使得控制精度不夠理想的情況，可利用 DDOB 來改善使得 stick slip 現象降低，再採用非線性摩擦力補償以達到消滅輪廓誤差的峰值。

整合型運動控制器搭配 DDOB 的使用對於各工作速度下的追跡誤差有著顯著的效果，可以降低摩擦力造成的 stick-slip 現象，這是因為設計良好的 DDOB 可以消除系統的模型的不確定性，使得 ZPETC 的效果達到設計時所預期的成果。而本文之非線性補償器是由 off-line 的系統識別出之非線性曲線來加以補償，在各種不同線性控制器加上非線性摩擦力補償器可以精準地消除系統摩擦力造成的 stick-slip 現象，使輪廓精密度提升。

由 CAD 軟體所設計出來之控制器為整合型控制器加上 DDOB 與非線性摩擦力補償器，在 F3000R50 的走圓命令下，其最大輪廓誤差已經可以降低達到 3.27um。此軟體可以讓使用者容易上手，並運用於各種不同的 CNC 機台，展現出高精密運動控制之水準。

## 附錄 A

### TMS320F2812 功能簡介

#### ■ TMS320F2812 中央處理器

- 32/64 位元的中央運算單元
- 32 位元的累加器
- 擁有位元結果的 32 位元 x 32 位元的乘法器
- 3 個比例縮放移位器(scaling shifter)
- 8 個擁有間接定址能力的 32 位元輔助暫存器

#### ■ 記憶體，如圖 A-1 所示

- 與 240x 系列 DSP 相容之 M0(1k), M1(1k)單存取資料/程式記憶體 (singal access RAM)。
- F281x 系列特有的 L0(4k), L1(4k), H0(8k)單存取資料/程式記憶體。
- 128k 字元的晶片內含(embedded)快閃記憶體(flash memory)，最多可分成 6 等份各別寫入。
- 64k 字元的外掛記憶體。
- 外部週邊介面模組，其中包含軟體可規劃式等待狀態產生器 (programmable wait-state generator)，22 位元位址匯流排及 32 位元資料匯流排支硬體等待狀態(hardware wait-state)。

#### ■ 程式控制

- 8 層的 pipeline 動作：
  - 提取 1(F1)：在 22 位元的程式位址匯流排取得程式記憶體位置。

提取 2(F2)：由程式讀取資料匯流排讀取程式記憶體，並將指令載入抓取指令的 F.I.F.O.。

解碼 1(D1)：因為 F2812 支援 16 及 32 位元指令，並且一個指令可以以奇數或偶數位址排列，所以此 Decode 1 的工作為識別指令在 F.I.F.O 中的邊界並且決定下一個將被執行的指令大小，也決定此指令是否是合格的。

解碼 2(D2)：由抓取指令的 F.I.F.O 載入到指令暫存器。

讀取 1(R1)：如果資料需由記憶體讀取，則將位址放在對應的位址匯流排上。

讀取 2(R2)：如果資料已被定址在 R1 的 phase，則 R2 將由對應的資料匯流排取取資料。



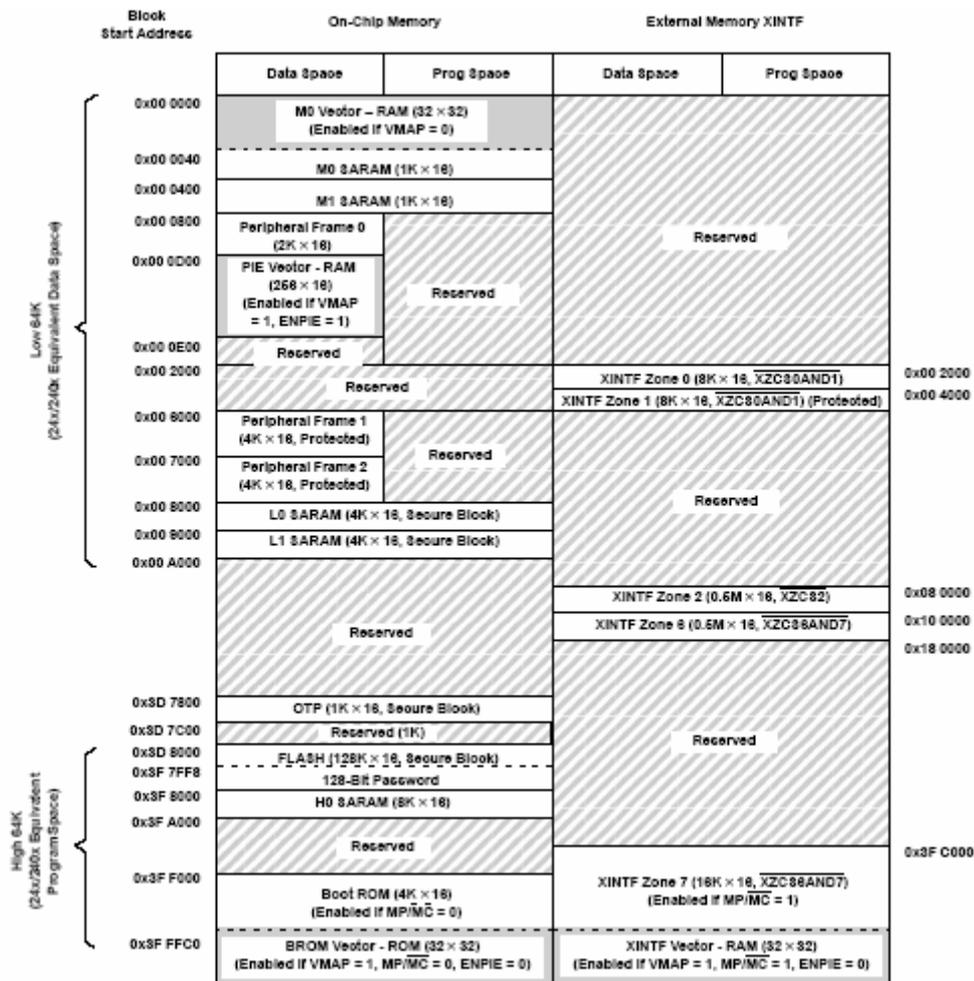


圖 A-1 TMS320F2812 記憶體規畫

執行 (Execute)：CPU 將完成所有乘法、位移和 ALU 運算，任何被乘法、位移器和 ALU 所使用到的暫存器都將在本 phase 開始時被讀取，且執行結果將被寫到 CPU 暫存器在本 phase 結束時。

寫入(Write)：如果被傳輸的值或結果需要被寫到記憶體時，則寫入的動作就會在此 phase 發生，CPU 會驅動目的地地址、適當的 strobe，以將資料寫入，實際的儲存至少要花一個時脈週期，它是由記憶體控制器或週邊介面邏輯所控制，此不被視為是 CPU pipeline 的一部份。

- 最多 1k 個堆疊(stack)在 M1 區。
- 45 個週邊中斷以及 3 個外部中斷。

#### ■ 指令集

- 單一指令重覆
- 單一指令週期的相乘／累加指令
- 記憶體區塊移動指令，有助於程式／資料的處理
- 指標定址(indexed-addressing)能力，可用於 FFT 實作。

#### ■ 功率消耗

- 全靜態 CMOS 裝置，比 C24x 動態 CMOS 技術消耗更少功率。
- 三個電源關閉模式可以減低功率消耗，分別為閒置(IDLE)、等待(STANDBY)及中斷(HALT)。



#### ■ 執行速度

- 6.67ns (150MIPS)指令週期時間。

#### ■ 事件處理(event manager)模組，其方塊圖如圖 A-2 所示

- 二組 event manager(EV)。
- 四個 16 位元的通用計時器，包含 6 種計時模式，分別為停止／維持、單一上數、連續上數、方向上／下數、單一上／下數，連續上／下數。
- 每個 EV 各有 8 個脈寬調變(PWM)通道。
- 每個 EV 各有三組空白時間(dead time)設定的全比較(full compare)單元。
- 二個簡單比較(simple compare)單元。
- 每個 EV 各有三個捕捉(capture unit)，其可以當成讀取光學編碼器

(encoder)的接腳。

- 一個 12 位元 16 通道的類比至數位轉換器。
- 56 個可程式，多工的輸出入接腳。
- 以鎖相迴路(phase-locked loop)為基礎的時脈模組。
- 具有即時中斷的看門狗計(watchdog)模組。

#### ■ 串列通訊介面(SCI)

- 每個 EV 各有二個 I/O 腳位(SCIRXD, SCITXD)。
- 可程式鮑率(baud rate, 19.07bps to 625.0kbps)。
- 可規劃資料長度(1~8 bits)。
- 可選擇 1~2 個停止位元。
- 四個錯誤偵測旗標，分別為 parity、overrun、framing 和 break。
- 半/全雙功運作。
- 可選擇奇/偶同位元。
- 自動鮑率偵測硬體邏輯。
- 接收和傳送均有雙重暫存器。
- 16 個傳送/接收 F.I.F.O.

#### ■ 串列週邊介面

- 四個 I/O 腳位(SPISIMO, SPISOMI, SPICLK, SPISTE)。
- 有 Master 和 Slave 二種操作模式。
- 具有相位和優先權控制。
- 具有狀態控制邏輯。

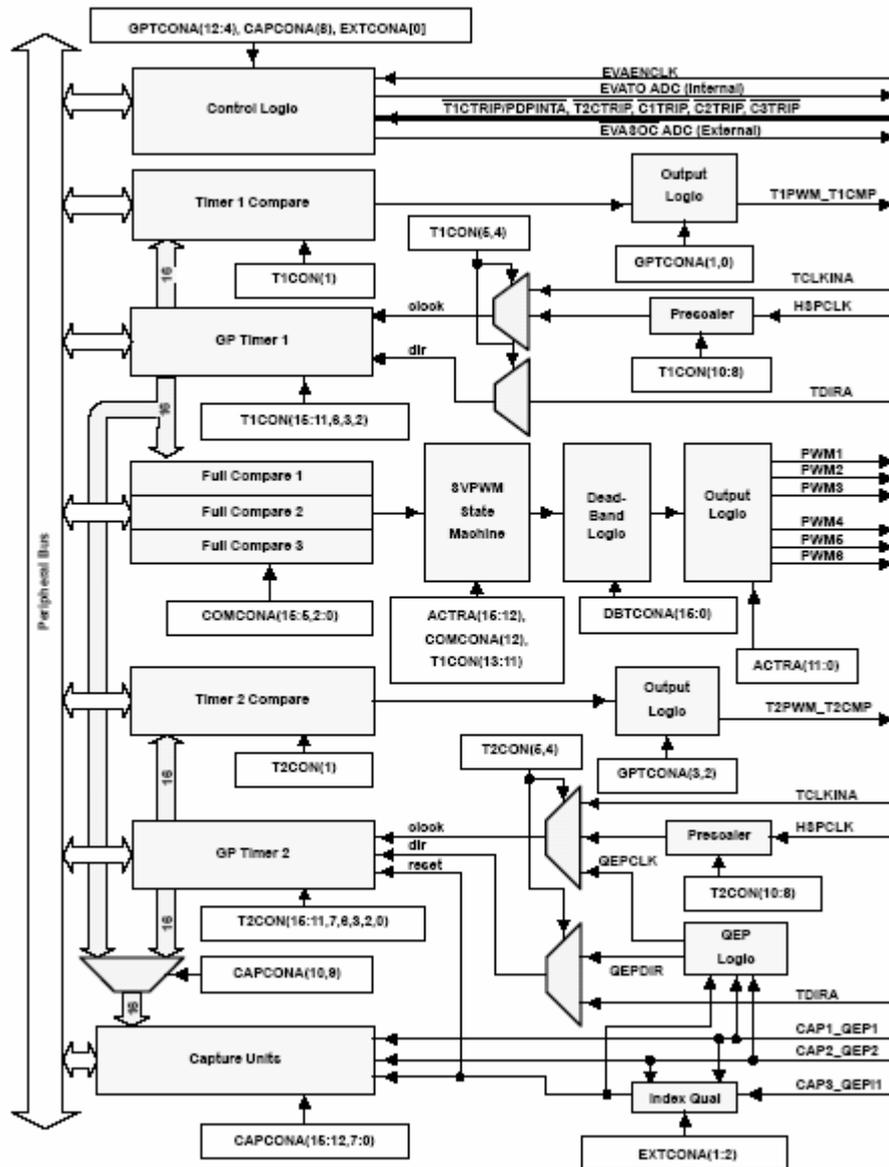


圖 A-2 事件管理模組方塊圖

■ 增強型控制區域網路(eCAN)模組，如圖 A-3 所示

- 與 CAN 2.0B 的 protocol 完全相容。
- 支援高達 1Mbps 的資料率。
- 32 個 mailboxes。
- 可程式喚醒當匯流排有動作時(activity)。
- 接收到遠端請求訊息時會自動回覆。
- 當失去仲裁(arbitration)或發生錯誤時，會自動重傳 frame。
- 具有自我測試模式。

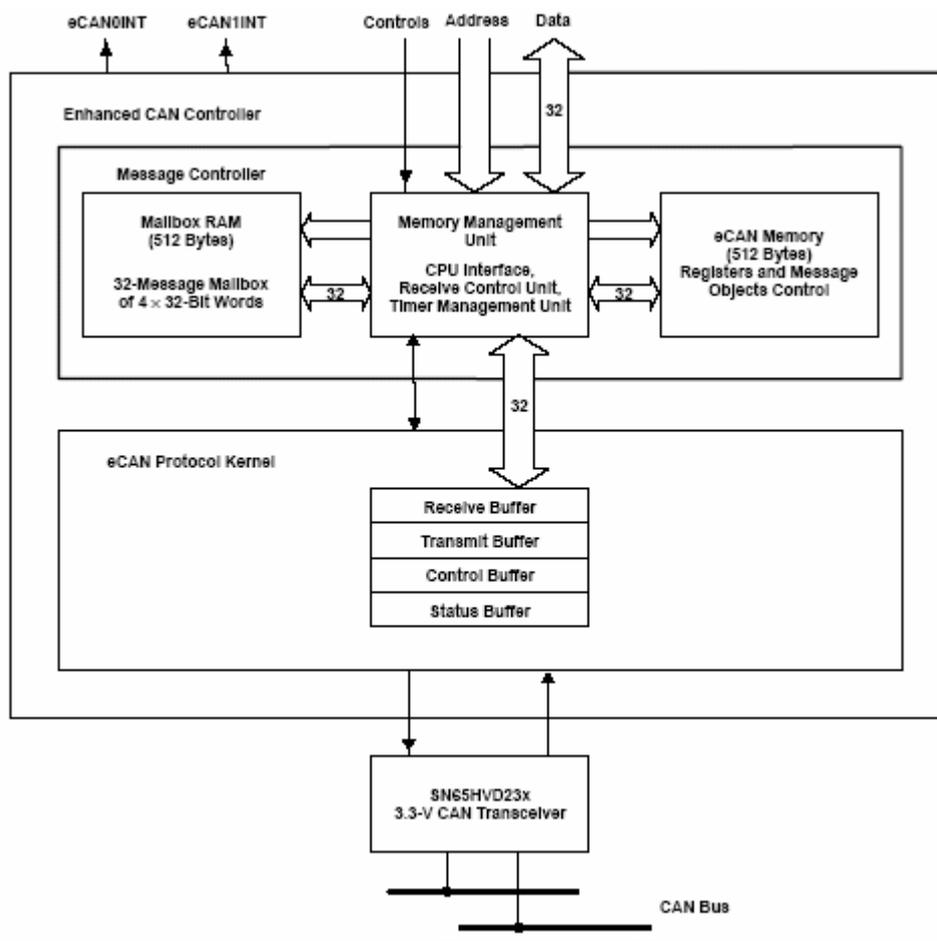


圖 A-3 eCAN 方塊圖與其介面

## 附錄 B

### TMS320F2812 DSK 板功能簡介

本文中使用的 DSP 控制器為 TI 的 TMS320F2812 DSP，其硬體是 SPECTRUM DIGITAL 公司所發行的 Ez DSK 板，如圖 B-1 所示。所撰寫的程式是在 TI 的 Code Composer Studio for C2000 軟體環境下編輯、編譯、功能測試與除錯。

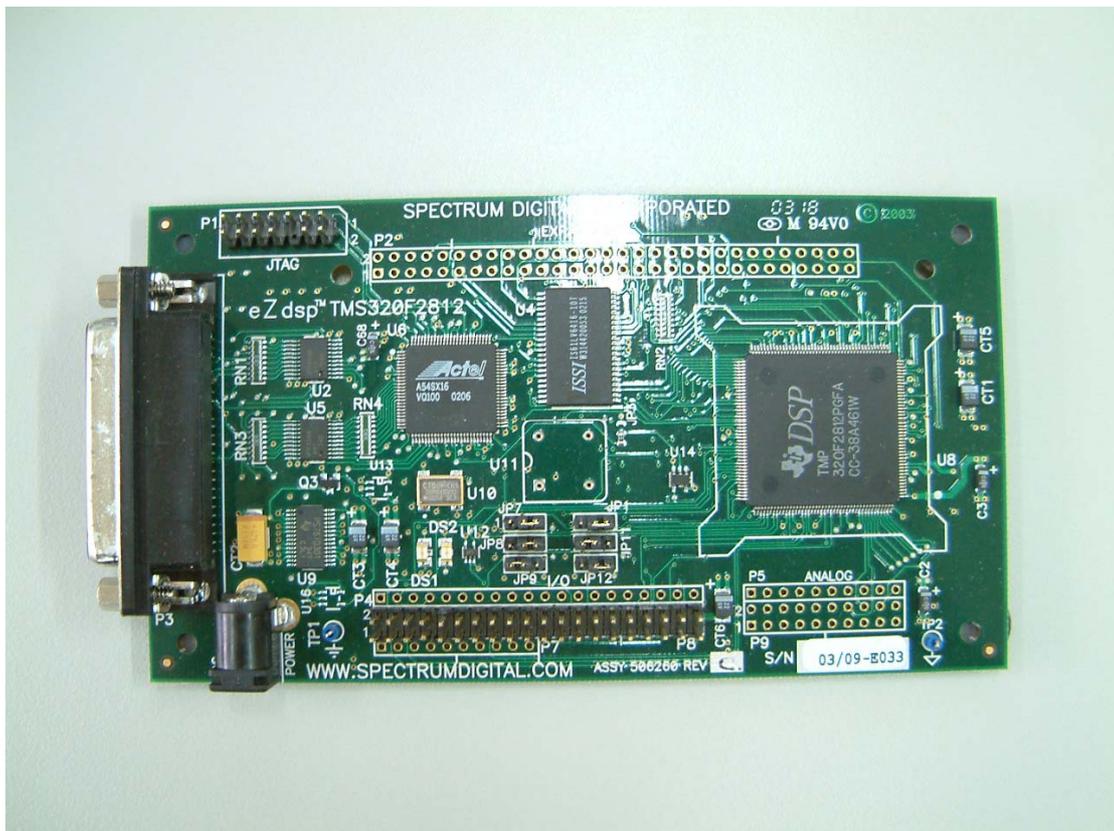


圖 B-1 F2812 Ez DSK 板

F2812 Ez DSK 特色如下：

- 25-pin printer port 與個人電腦連接，提供除錯使用。
- 板子上具有 64k words 程式／資料隨機存取記憶體。
- 150 MIPS 運作速度。
- 128k words on-chip 快閃記憶體。
- 18k words on-chip RAM。
- 板子上有 30MHz 石英震盪器。
- 二個擴充連接埠(類比及 I/O)。
- 板子上具有 IEEE 1149.1 JTAG 連接埠供操作模擬。
- 備有 5V 的 AC 轉換器。

整個板子的功能方塊圖如圖 B-2 所示。

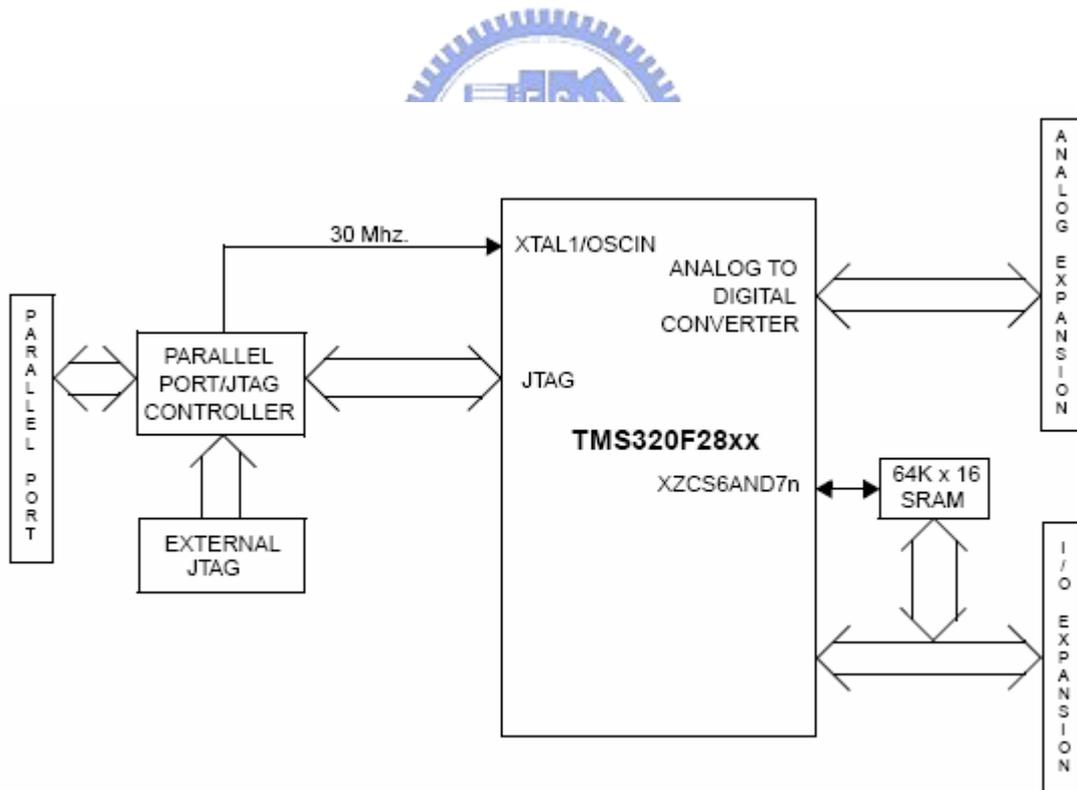


圖 B-2 F2812 Ez DSK 板功能方塊圖

F2812 Ez DSK 有九個連接埠，圖 B-3 為連接埠所在位置，而表 B-1 顯示各項連接埠功能。

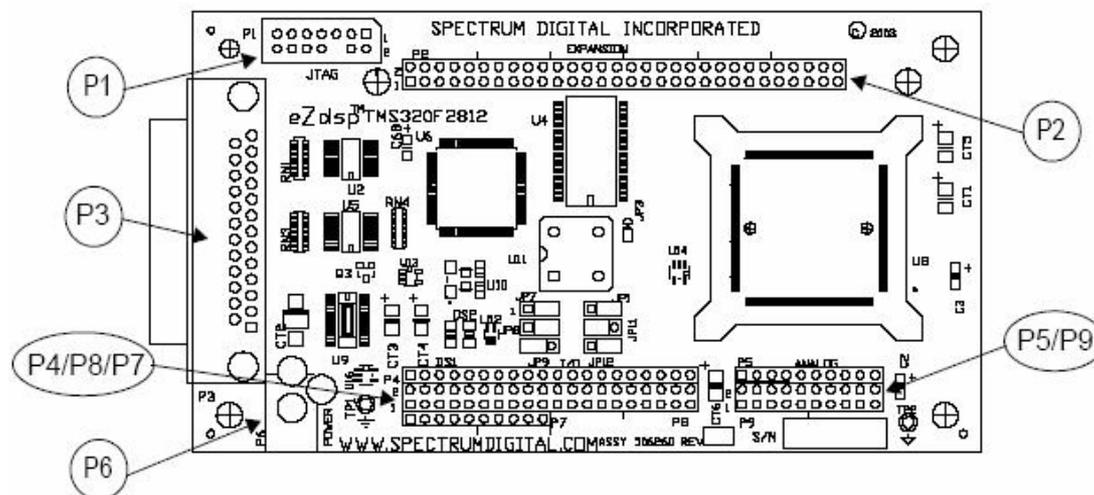


圖 B-3 F2812 Ez DSK 板各連接器位置

表 B-1 F2812 Ez DSK 板各連接器功能

| Connector | Function                                |
|-----------|---|
| P1        | JTAG Interface                          |
| P2        | Expansion                               |
| P3        | Parallel Port/JTAG Controller Interface |
| P4/P8/P7  | I/O Interface                           |
| P5/P9     | Analog Interface                        |
| P6        | Power Connector                         |

■ P1(JTAG 介面)：

P1 具有 14 隻接腳，它是 JTAG Emulator 之標準介面，用於連接個人電腦與 DSP 板之間。其接腳如圖 B-4 所示，其定義如表 B-2。

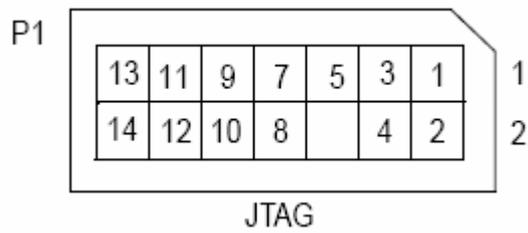


圖 B-4 JTAG 接腳位置

表 B-2 JTAG 各接腳之功能定義

| Pin # | Signal   | Pin # | Signal |
|-------|----------|-------|--------|
| 1     | TMS      | 2     | TRST-  |
| 3     | TDI      | 4     | GND    |
| 5     | PD (+5V) | 6     | no pin |
| 7     | TDO      | 8     | GND    |
| 9     | TCK-RET  | 10    | GND    |
| 11    | TCK      | 12    | GND    |
| 13    | EMU0     | 14    | EMU1   |



■ P2(擴充連接埠)：

P2 具有 60 隻接腳，其最主要用於 DSK 板之擴充使用，可外接記憶體或其它輔助裝置，其接腳如圖 B-5 所示，功能定義如表 B-3。

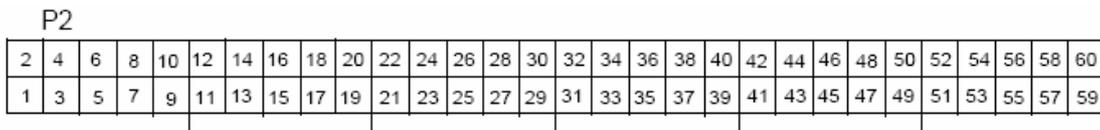


圖 B-5 擴充接腳位置

表 B-3 擴充接腳功能定義

| Pin # | Signal         | Pin # | Signal        |
|-------|----------------|-------|---------------|
| 1     | +3.3V/+5V/NC * | 2     | +3.3/+5V/NC * |
| 3     | XD0            | 4     | XD1           |
| 5     | XD2            | 6     | XD3           |
| 7     | XD4            | 8     | XD5           |
| 9     | XD6            | 10    | XD7           |
| 11    | XD8            | 12    | XD9           |
| 13    | XD10           | 14    | XD11          |
| 15    | XD12           | 16    | XD13          |
| 17    | XD14           | 18    | XD15          |
| 19    | XA0            | 20    | XA1           |
| 21    | XA2            | 22    | XA3           |
| 23    | XA4            | 24    | XA5           |
| 25    | XA6            | 26    | XA7           |
| 27    | XA8            | 28    | XA9           |
| 29    | XA10           | 30    | XA11          |
| 31    | XA12           | 32    | XA13          |
| 33    | XA14           | 34    | XA15          |
| 35    | GND            | 36    | GND           |
| 37    | XZCS0AND1n     | 38    | XZCS2n        |
| 39    | XREADY         | 40    | 10K Pull-up   |
| 41    | XRnW           | 42    | 10K Pull-up   |
| 43    | XWE            | 44    | XRDn          |
| 45    | +3.3V          | 46    | XNMI/INT13    |
| 47    | XRSn/RSn       | 48    | No connect    |
| 49    | GND            | 50    | GND           |
| 51    | GND            | 52    | GND           |
| 53    | XA16           | 54    | XA17          |
| 55    | XA18           | 56    | XHOLDn        |
| 57    | XHOLDAn        | 58    | No connect    |
| 59    | No connect     | 60    | No connect    |

■ P4/P8/P7(I/O 介面)：

P4 共有 20 隻接腳，P8 有 40 隻接腳，P7 有 10 隻接腳，均為 I/O 功能，其接腳位置如圖 B-6 所示，接腳定義如表 B-4。

|   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | P4 |
| 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 | 24 | 26 | 28 | 30 | 32 | 34 | 36 | 38 | 40 | P8 |
| 1 | 3 | 5 | 7 | 9  | 11 | 13 | 15 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 | 29 | 31 | 33 | 35 | 37 | 39 | P8 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | P7 |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |

圖 B-6 I/O 接腳位置

表 B-4 I/O 接腳功能定義

| P4 Pin # | P4 Signal               | P8 Pin # | P8 Signal                    | P8 Pin # | P8 Signal                    |
|----------|-------------------------|----------|------------------------------|----------|------------------------------|
| 1        | +3.3V/+5V/NC *          | 1        | +3.3V/+5V/NC *               | 2        | +5 Volts                     |
| 2        | XINT2/ADCSOC            | 3        | SCITXDA                      | 4        | SCIRXDA                      |
| 3        | MCLKXA                  | 5        | XINT1n/XBIO <sub>n</sub>     | 6        | CAP1/QEP1                    |
| 4        | MCLKRA                  | 7        | CAP2/QEP2                    | 8        | CAP3/QEP11                   |
| 5        | MFSXA                   | 9        | PWM1                         | 10       | PWM2                         |
| 6        | MFSRA                   | 11       | PWM3                         | 12       | PWM4                         |
| 7        | MDXA                    | 13       | PWM5                         | 14       | PWM6                         |
| 8        | MDRA                    | 15       | T1PWM/T1CMP                  | 16       | T2PWM/T2CMP                  |
| 9        | No connect              | 17       | TDIRA                        | 18       | TCLKINA                      |
| 10       | GND                     | 19       | GND                          | 20       | GND                          |
| 11       | CAP5/QEP4               | 21       | No connect                   | 22       | XINT1N/XBIO <sub>n</sub>     |
| 12       | CAP6/QEPI2              | 23       | SPISIMOA                     | 24       | SPISOMIA                     |
| 13       | T3PWM/T3CMP             | 25       | SPICLKA                      | 26       | SPISTEA                      |
| 14       | T4PWM/T4CMP             | 27       | CANTXA                       | 28       | CANRXA                       |
| 15       | TDIRB                   | 29       | XCLKOUT                      | 30       | PWM7                         |
| 16       | TCLKINB                 | 31       | PWM8                         | 32       | PWM9                         |
| 17       | XF/XPLLDIS <sub>n</sub> | 33       | PWM10                        | 34       | PWM11                        |
| 18       | SCITXDB                 | 35       | PWM12                        | 36       | CAP4/QEP3                    |
| 19       | SCIRXDB                 | 37       | T1CTRIp/PDPINTA <sub>n</sub> | 38       | T3CTRIp/PDPINTB <sub>n</sub> |
| 20       | GND                     | 39       | GND                          | 40       | GND                          |

| P7 Pin # | P7 Signal                                 |
|----------|---|
| 1        | C1TRIP <sub>n</sub>                       |
| 2        | C2TRIP <sub>n</sub>                       |
| 3        | C3TRIP <sub>n</sub>                       |
| 4        | T2CTRIp <sub>n</sub> /EVASOC <sub>n</sub> |
| 5        | C4TRIP <sub>n</sub>                       |
| 6        | C5TRIP <sub>n</sub>                       |
| 7        | C6TRIP <sub>n</sub>                       |
| 8        | T4CTRIp <sub>n</sub> /EVBSOC <sub>n</sub> |
| 9        | No connect                                |
| 10       | GND                                       |

■ P5/P9(類比介面)：

P5 共有 10 隻接腳，而 P9 共有 20 隻接腳，其主要為 A/D 轉換器

的接腳，如圖 B-7 所示，接腳的定義如表 B-5。

| P5 |   |   |   |    | ANALOG |    |    |    |    |
|----|---|---|---|----|--------|----|----|----|----|
| 1  | 2 | 3 | 4 | 5  | 6      | 7  | 8  | 9  | 10 |
| 2  | 4 | 6 | 8 | 10 | 12     | 14 | 16 | 18 | 20 |
| 1  | 3 | 5 | 7 | 9  | 11     | 13 | 15 | 17 | 19 |

P9

圖 B-7 類比介面接腳位置

表 B-5 類比介面接腳功能定義

| P5 Pin # | Signal  | P9 Pin # | Signal | P9 Pin # | Signal     |
|----------|---------|----------|--------|----------|------------|
| 1        | ADCINB0 | 1        | GND    | 2        | ADCINA0    |
| 2        | ADCINB1 | 3        | GND    | 4        | ADCINA1    |
| 3        | ADCINB2 | 5        | GND    | 6        | ADCINA2    |
| 4        | ADCINB3 | 7        | GND    | 8        | ADCINA3    |
| 5        | ADCINB4 | 9        | GND    | 10       | ADCINA4    |
| 6        | ADCINB5 | 11       | GND    | 12       | ADCINA5    |
| 7        | ADCINB6 | 13       | GND    | 14       | ADCINA6    |
| 8        | ADCINB7 | 15       | GND    | 16       | ADCINA7    |
| 9        | ADCREFM | 17       | GND    | 18       | VREFLO *   |
| 10       | ADCREFP | 19       | GND    | 20       | No connect |

■ P6(電源連接頭)：

電源 5V 是裝於 F2812 Ez DSK 的 P6 連接頭如下圖所示。

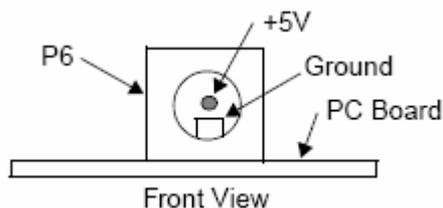


圖 B-8 電源接頭

## 參考文獻 ( Reference )

- [1] Y. Koren and C. C. Lo, "Advanced Controller for Feed Drivers," *Annals of the CIRP*, Vol. 41, pp.689-698, 1992.
- [2] K. J. Astrom, P. Hagander and Sternby, "Zeros of Sampled Systems," *Automatica*, Vol. 20, pp. 31-38, 1984.
- [3] D. W. Clarke, "Self Tuning Control of Non-minimum Phase Systems," *Automatica*, Vol. 20, pp. 501-517, 1984.
- [4] J. Golten and A. Verwer, "Control System Design and Simulation," *McGraw Hill*, 1991.
- [5] K. Ogata, "Modern Control Engineering," *Prentice Hall*, 1970.
- [6] M. Tomizuka, "Zero Phase Error Tracking Algorithm for Digital Control," *ASME Trans. Journal of Dynamic System, Measurement and Control*, Vol. 109, pp. 65-68, 1987.
- [7] Y. Koren, "Cross-Coupled Biaxial Computer for Manufacturing Systems," *ASME Trans. Journal of Dynamic System, Measurement and Control*, Vol. 102, No. 4, pp. 265-272, 1980.
- [8] Y. Koren and C. C. Lo, "Variable Gain Cross Coupling Controller for Contouring," *Annals of the CIRP*, Vol. 40, pp. 371-374, 1991.
- [9] H. S. Lee, and M. Tomizuka, "Robust Motion Controller Design for High-Accuracy Positioning System," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 43, No. 1, pp. 48-55, February 1996.

- [10] M. Tomizuka, "On the Compensation of Friction Force in Precision Motion Control," *IEEE, Motion Control Proceedings, Asia-Pacific Workshop on Advances*, pp. 69-74, 1993.
- [11] K. Ohishi, M. Nakao, K. Ohnishi, and K. Miyachi, "Microprocessor-controlled DC Motor for Load-insensitive Position Servo System," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. IE-34, pp. 44-49, February 1987.
- [12] T. Umeno and Y. Hori, "Generalized robust servosystem design based on the parameterization of two degrees of freedom controllers," *IEEE PESC '89*, pp. 945-951, 1989.
- [13] T. Umeno and Y. Hori, "Robust DC Servo system design based on the parameterization of two degrees of freedom control systems," *IEEE*, pp. 313-318, 1989.
- [14] T. Umeno and Y. Hori, "Robust Speed Control of DC Servomotors Using Modern Two Degree-of-Freedom Controller Design," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 38, No. 5, pp. 363-368, October 1991.
- [15] H. Kobayashi, S. Endo, S. Kobayashi, and C. J. Kempf, "Robust Digital Tracking Controller Design for High-Speed Positioning Systems -- A New Design Approach and Implementation Techniques," *IEEE AMC '96-MIE. Proc. Internation Workshop*, Vol. 1, pp. 65-70, 1996.
- [16] A. Tesfaye, H. S. Lee and M. Tomizuka, "A sensitivity Optimization Approach to Design of a Disturbance Observer in Digital Motion Control System," *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, Vol. 5, No. 1, pp. 32-38, March 2000.
- [17] C. J. Kempf and S. Kobayashi, "Disturbance Observer and Feedforward Design for a High-Speed Direct-Drive Positioning Table," *IEEE Trans. on Control System Technology*, Vol. 7, No. 5, pp. 513-526, September 1999.

- [18] B. Yao, M. Al-Majed, and M. Tomizuka, "High-Performance Robust Motion Control of Machine Tools: An Adaptive Robust Control Approach and Comparative Experiments," *IEEE/ASME Trans. Mechatron.*, Vol. 2, pp. 63-76, June 1997.
- [19] L. Yi and M. Tomizuka, "Two-Degree-of-Freedom Control with Robust Feedback Control for Hard Disk Servo Systems," *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, Vol. 4, No. 1, pp. 17-24, March 1999.
- [20] C. T. Johnson; R. D. Lorenz, "Experimental identification of friction and its compensation in precise, position controlled mechanisms," *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 28 Issue: 6 , pp. 1392 -1398, Nov.-Dec. 1992.
- [21] S. S. Yeh and P. L. Hsu, "Estimation of the contouring error vector for the cross-coupled control design," *IEEE/ASME Trans. on Mechatronics*, Vol. 7 Issue: 1, pp. 44 -51, March 2002.
- [22] D. C. Youla and J. J. Bongiorno Jr., "A Feedback Theory of Two-degree-of-freedom Optimal Wiener-Hopf Design," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, Vol. AC-30, pp. 652-665, July 1985.
- [23] A. H. Brain, D. PIERRE, C. D. W. CARLOS, "A survey of models, analysis tools and compensation methods for the control of machines with friction," *Automatica*, Vol. 30, No.7, pp.1083-1138, 1994.
- [24] H.T. Goh, S. Weerasooriya, T. S. Low, Y. H. Huang, "Modeling and compensation of pivot friction in a drive actuator," *Proceedings of the American Control Conference*, Vol. 6, pp.4141 - 4145, 21-23 June 1995.
- [25] J. Amin,; B. Friedland, A. Harnoy, " Implementation of a friction estimation and compensation technique," *IEEE International Conference on Control Applications*, pp. 804 -808, 15-18 Sept. 1996.
- [26] C. Canudas, K. Astrom; K. Braun, "Adaptive friction compensation in DC motor drives," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*,

Vol. 3 , pp. 1556 -1561, Apr 1986.

- [27] T. Kubo, G. Anwar, M. Tomizuka, "Application of nonlinear friction compensation to robot arm control," *IEEE International Conference on Robotics and Automation* , Vol. 3 , pp. 722 -727, Apr 1986.
- [28] J. Ishikawa, M. Tomizuka, "A Novel Add-on Compensator For Cancellation Of Pivot Nonlinearities In Hard Disk Drives," *MMM-Intermag Conference, 1998. Abstracts., The 7th Joint* , pp. 22 -23, 6-9 Jan. 1998.
- [29] M. Iwasaki, T. Shibata, N. Matsui, "Disturbance observer-based nonlinear friction compensation in table drive system," *1998 5th International Workshop on Advanced Motion Control* , pp.299 -304, 29 June-1 July 1998.
- [30] S. Jee; Y. Koren, "A self-organizing fuzzy logic control for friction compensation in feed drives," *1995. Proceedings of the American Control Conference*, Vol. 1 , pp. 205 -209 vol.1, 21-23 June 1995.
- [31] J. T. Teeter, M. Y. Chow, J. J. Jr. Brickley, "A novel fuzzy friction compensation approach to improve the performance of a DC motor control system," *IEEE Trans. on Industrial Electronics* , Vol. 43 Issue: 1 , pp. 113 -120, Feb. 1996.
- [32]洪祐崇，「應用最佳 UIO 改善 CNC 工具機軌跡精度」，國立交通大學電機與控制工程學系碩士論文，民國 83 年。
- [33]張育憲，「應用數位式干擾觀測器以改善運動控制之精密度」，國立交通大學電機與控制工程學系碩士論文，民國 89 年。
- [34]葉賜旭，「改善 CNC 工具機運動輪廓精度的控制器設計策略」，國立交通大學電機與控制工程學系碩士論文，民國 85 年。
- [35]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。

[36]翁啓信，「零振幅誤差追跡運動控制器設計」，國立交通大學碩士論文，民國 90 年。

