

國立勤益科技大學
電機工程系碩士班

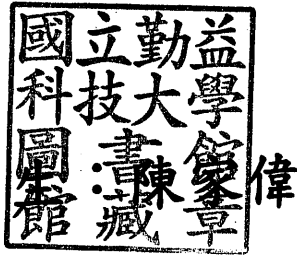
DT
448
7532
100
225156

碩士論文

關節型機器手臂設計及控制之研究

Jointed Robot Arm Design and Control

研究



指導教授：洪清寶 教授

中華民國一〇〇年七月

國立勤益科技大學圖書館



225156

國立勤益科技大學

博碩士論文全文上網授權書

(提供授權人裝訂於紙本論文書名頁之次頁用)

本授權書所授權之論文為授權人在國立勤益科技大學
電機工程系 控制 組 99 學年度第 2 學期取得碩士學位之
論文。

論文題目：關節型機器手臂設計及控制之研究
指導教授：洪清寶

■ 同意

本人具有著作權之論文全文資料，非專屬、無償授予本人畢業學校圖書館，不限地域、時間與次數，以微縮、光碟或數位化等各種方式重製與利用，提供讀者基於著作權法合理使用範圍內之線上檢索、閱覽、下載及列印。

論文全文上載網路公開之範圍及時間：

校內區域網路	<input checked="" type="checkbox"/> 立即公開
校外網際網路	<input checked="" type="checkbox"/> 立即公開

授權人：陳家偉

簽名：陳家偉

中華民國 100 年 7 月 27 日

國家圖書館

博碩士論文電子檔案上網授權書

本授權書所授權之論文為授權人在國立勤益科技大學電機工程系 99 學年度第 2 學期取得碩士學位之論文。

論文題目：關節型機器手臂設計及控制之研究
指導教授：洪清寶

茲同意將授權人擁有著作權之上列論文全文（含摘要），非專屬、無償授權國家圖書館，不限地域、時間與次數，以微縮、光碟或其他各種數位化方式將上列論文重製，並得將數位化之上列論文及論文電子檔以上載網路方式，提供讀者基於個人非營利性質之線上檢索、閱覽、下載或列印。

上列論文為授權人向經濟部智慧財產局申請專利之附件或相關文件之一（專利申請案號：_____），請於 _____ 年 _____ 月 _____ 日後再將上列論文公開或上載網路。

因上列論文尚未正式對外發表，請於 _____ 年 _____ 月 _____ 日後再將上列論文公開或上載網路。

授權人：陳家偉

親筆簽名及蓋章：陳家偉

民國 100 年 7 月 27 日

電話：0930-326926 傳真：
聯絡地址：台中市北屯區松勇里松義街312巷13號
E-Mail：qoo_wei01@yahoo.com.tw

國立勤益科技大學

研究所碩士班

論文口試委員會審定書

本校電機工程系碩士班 陳家偉 君

所提論文 關節型機器手臂設計及控制之研究

合於碩士資格水準，業經本委員會評審認可。

論文口試委員會：

召集人：

洪三山

委員：

姚賀騰

洪三山

洪清發

指導教授：

洪清發

主

任：

姚賀騰

中華民國一〇〇 年 七 月

關節型機器手臂設計及控制之研究

學生：陳家偉 指導教授：洪清寶

國立勤益科技大學 電機工程研究所碩士班

摘要

本論文主要為進行一關節型機器人設計及控制方法之研究，以開發關節型機器人機構和電控系統設計為目標。論文內容主要包括有關節型機器人之機構設計，以及關節型機器人之電控系統設計。

本文所探討之關節型機器人機構設計，包含有四個活動關節，每一個關節架構使用一直流伺服馬達連接減速機進行驅動，其減速機再透過皮帶來帶動時規齒輪做為每一關節旋轉之動力。時規齒輪連接在每一各別鋁製中空四方形管上，當其旋轉時作為各別擺臂，最前端之擺臂設計可以加載多種不同機構，如夾爪、吸盤、點焊…等，以符合各種功能之應用。

電控系統包括主控板設計、伺服控制卡設計，以及主控板及伺服卡之通信功能設計。主控板將其關節型機器人所有動作全部編成軌跡命令，依動作之要求，使用I²C通信協定，發送控制命令傳送到各別伺服控制卡，藉由分散式的控制即可輕易達成關節型機器人之操控。本論文設計的關節型機器人主要由直流馬達所驅動，考慮到後續關節

數延伸之問題，因此伺服控制卡設計為接收從主控板透過I²C介面傳送來的控制命令，再依命令各別完成閉迴路位置控制。藉此一架構之設計，伺服控制卡可依軸數之需求彈性堆疊，以應用於各種軸數之機器人控制。且控制卡之間藉由 I²C通信協定聯結，方便各種命令的傳送，且易於電控系統的維護、更換，簡化了機器人電控系統的設計，使電控系統的體積可以有效縮減。

每一伺服控制卡的控制器設計，可透過軟體彈性修改。本論文中以Ziegler-Nichols法進行PID控制器的設計，簡化了控制器設計之複雜度。如何將高度非線性的複雜系統，藉由機構配合及系統簡化，以達成符合控制需求之控制器設計，本論文除透過基本理論說明外，最終並經由實驗驗證了所提架構及理論的可行性。

關鍵字：I²C、關節型機器人、電力控制系統、PID控制、伺服控制

Jointed robot Arm Design and Control

Student : Chai-Wei Chen Advisor : Chin-Pao Hung

Department of Electrical Engineering

National Chin-Yi University of Technology

Abstract

The aim of this thesis is to study the design and control of jointed robots. It mainly includes the mechanism design and electrical control system development.

The mechanism design has four joints. Each joint is driven by DC servo motor with gear box and timing pulleys. The output shaft of timing pulleys is connected to a hollow aluminum link and is benefit to hide the motor in the base unit. At the end-effector of the robot, such as clamps, sucker, welding machine, can be install on it to suit different work operation. Note all components of the robot mechanism are purchased from domestic. It is helpful for mass-produce in future.

The electrical control system has three parts, main control board, servo control board and the communication protocol between main control board and servo control board. Main control board encodes the work trajectory as a series of position commands and transfers them to the servo control boards respectively. Servo control cards receive the control command and finish the position closed-loop control individually. The developed electrical control system is easily being extended to any axis jointed robot control. Note the I²C communication protocol is the bridge of main control board and servo control boards. It needs only two wires to connect each other. It is easily to add or to remove any board and don't need to change the original design. Lower control cost and smaller size can be obtained.

The servo control board of each axis will execute closed-loop position control after receiving control command. The controller can be modified flexible depending on the performance requirement. In this thesis, PID type controller with Ziegler-Nichols tuning scheme is built in the servo

control board. How to simplify the highly nonlinear robot system to alleviate the control complexity and to achieve the desired performance would be described in this thesis. Finally, the experimental results demonstrate the possibility and feasibility of the developed robot system.

Keywords: I²C, jointed robot, electrical control system, PID control, servo control



誌謝

在這短暫的兩年學習旅程，雖然一路上跌跌撞撞，但這裡面充滿著酸、甜、苦、辣，有許多人、事、物的多方面學習，引導著我往目標邁進。首先要感謝我最敬愛的父母與家人，感謝父母的培育之恩，給予我良好的環境，感謝你們對我的支持與包容，讓任性的我無後顧之憂，順利完成學業。

感謝這些日子裡所有老師的指導與教誨，與在研究精神上的啟發及學術上的薰陶，使我獲益匪淺，感謝百忙之中撥冗擔任口試委員的逢甲大學洪教授三山先生、勤益科技大學姚教授賀騰先生、等對於論文上的指導與文字的校對，使得本文更臻圓滿。

感謝在這段學習的過程當中，機電整合實驗室團隊內威佐、秉承、顏忠、人丰、富才、俊緯、宥丞等人，一起研究與學習的路程中，互相討論、互相幫助，一起南征北討的參與各式比賽，讓我留下許多深刻且美好的體驗與成長。

感謝好友裕仁、禹鵬、富雄、福營、旺育、培鈞、士姓、美芳學姊、翁來昌先生等，因有你們的陪伴我才有的繼續堅持下的動力，謝謝你們總能在我最孤獨無助時，從各方給我意外的幫助，在我喪失動力之時，仍不時的給予關懷與打氣，甚至提供論文內容之建議及校

對。未來，我將更努力，來感謝大家的協助與支持。

除以上所述，對所有關心與鼓勵我的長輩及朋友，僅以此表達我內心
最衷心的謝意!

家偉 中華民國 100 年 7 月

於國立勤益科技大學 電機工程研究所



目錄

摘要.....	i
Abstract.....	iii
誌謝.....	v
圖目錄.....	ix
表目錄.....	xi
符號說明.....	xii
第一章 緒論	1
1.1 研究動機與目地.....	1
1.2 文獻回顧.....	4
1.3 論文貢獻.....	6
1.4 章節概要.....	6
第二章 關節型機器人的機構設計	8
2.1 簡述.....	8
2.2 關節型機器人架構.....	10
2.2.1 前端擺臂	11
2.2.2 小擺臂	12
2.2.3 大擺臂	13
2.2.4 底座機構及底部轉動裝置	14
2.2.5 時規皮帶輪與旋轉軸	16
2.2.6 減速機與直流馬達	17

2.3	機器人組合分解圖	21
第三章	電控系統設計	22
3.1	電控系統架構	23
3.1.1	主控制卡	23
3.1.2	伺服控制卡	24
3.1.3	I ² C 通信[14]	25
3.1.4	馬達驅動電路	29
3.2	控制程式設計	29
3.2.1	主控制卡程式設計	29
3.2.2	伺服控制卡程式設計	32
第四章	數學模型與實驗驗證	34
4.1	數學模型	34
4.2	實驗驗證	42
4.2.1	開迴路測試(Open-Loop System)	43
4.2.2	閉迴路測試(Closed-Loop System)	47
第五章	總結及未來發展	52
第五章	總結及未來發展	52
5.1	總結	52
5.2	未來發展	52
	參考文獻	54
	作者簡歷	56

圖目錄

圖 1-1	工業型機械手臂	3
圖 1-2	傳統伺服控制器	3
圖 2-1	產業用機器人種類[5][7].....	10
圖 2-2	關節型機器人架構	11
圖 2-3	前端擺臂	12
圖 2-4	小擺臂	13
圖 2-5	大擺臂	14
圖 2-6	底座機構	15
圖 2-7	底部轉動裝置	15
圖 2-8	時規皮帶輪與皮帶	17
圖 2-9	旋轉軸	17
圖 3-1	關節型機器人控制架構示意圖	22
圖 3-2	主控制板示意圖	23
圖 3-3	伺服控制卡示意圖	25
圖 3-4	IPC 設備連接示意圖	27
圖 3-5	一次完整通信時序圖[13].....	28
圖 3-6	L6203	29
圖 3-7	主控制卡程式流程圖	30
圖 3-8	伺服控制卡動作流程	33
圖 4-1	直流伺服系統示意圖	35
圖 4-2	閉迴路直流伺服系統方塊圖	40
圖 4-3	簡化的閉迴路直流伺服系統方塊圖	40
圖 4-4	關節機器人實體圖(圖中標示出 M1~M4).....	44
圖 4-5	M1 至 M4 子系統步階響應曲線	46

圖 4-6 10 度位置命令各軸誤差曲線49

圖 4-7 20 度位置命令各軸誤差曲線51



表目錄

表 2-1	市售減速機減、變速方式.....	18
表 2-2	減速比、電機規格.....	19
表 4-1	M1 至 M4 PID 控制器參數.....	46



符號說明

R_a = 電樞電阻

L_a = 電樞電感

i_a = 電樞電流

i_f = 場電流

v = 電樞電壓

e_b = 反電動勢

τ_1, τ_2 = 齒輪的扭力

θ_1 = 馬達軸承的角位移

θ_2 = 齒輪的旋轉角度

J_1, J_m = 馬達承軸端的等效慣量(包括馬達與負載)

B_1, B_m = 在馬達承軸端的等效黏滯摩擦係數或阻尼係數(包括

馬達與負載)

K_b = 反電勢的電常數

n_1, n_2 = 齒輪的齒數

T = 電磁轉矩

N = 減速齒輪比

k_t = 比例常數

k_f = 比例常數

K_T = 馬達力矩常數

K_b = 反電動勢常數

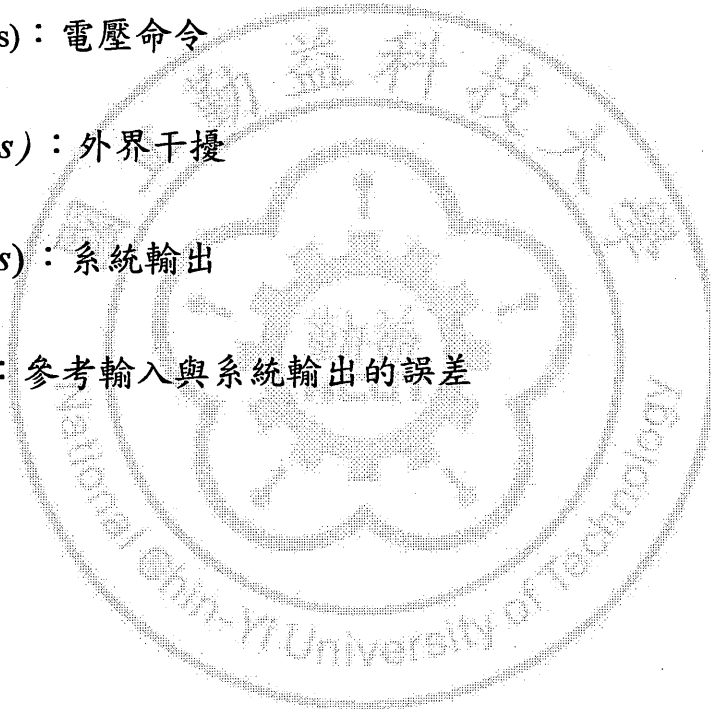
$\theta_d(s)$: 參考輸入

$u(s)$: 電壓命令

$n(s)$: 外界干擾

$\theta(s)$: 系統輸出

e : 參考輸入與系統輸出的誤差



第一章 緒論

1.1 研究動機與目地

當今對於人類來說，太髒、太粗重、太危險、太累、太精細或太反覆無聊的工作，可由機器人代勞。機器人被開發出來純粹是以模擬人的動作作為目的，而一個工業機器人可以僅包括一個感覺與動作之間的連結，且這連結不是由人所操控，是由外部或是嵌入式系統提供其命令，而所有的自動裝置總括來說都算是一種機器人。人類的關節是高自由度且精密的構造，端起一杯茶對一個普通人來說不是什麼難事。但要完全仿照人類關節之活動不是件容易的事，要做出外觀、行為、思想都非常接近真人的機器人，在目前還有不可跨越的技術難度，但在未來並不是不可能的事。

而如何利用及控制導覽機器人、迎賓機器人、仿真機器人…等高模擬機器人，它們與人類關係又將如何，早已成為一個長期話題。理想中的高模擬機器人是整合控制理論、機械電子、計算機與人工智慧、材料學和仿生學的產物，目前各界正在向此方向研究開發。目前美國在這個技術領域上處於領先地位，主要產品有太空探測用途機器人、國防用途機器人、教育用途機器人、醫療用途機器人、人工智慧軟體系統、遠距遙控機器人等。依據日本機器人協會(JARA)的機器人需求統計[1]，目前智慧型機器人以產業型機器人占絕大多數，機械

手臂是工業上最常見的自動化設備，如圖 1-1 所示。機械手臂的控制需要搭配許多感測器、周邊電路與多軸馬達控制系統。大多數機器人伺服控制系統都具有較大的規模，不適合簡單的應用，體積通常較為龐大，且成本高。例如，安川 ROBOTMAN [2]、Denso[3]和三菱系列機器人[4]可以執行高精確和複雜的工作，但他們的控制器較為龐大，成本昂貴。較大的伺服控制器或基於 PC 的軸卡，如圖 1-2 所示，通常出現在體積較大的控制箱裡。而對於簡單不需要非常精密的動作，或是從事危險的一次性工作來說(如：處理核廢料、炸彈引爆等)，設計一個便於維修、體積小、功能單一的關節型機器人系統，以減少其成本是必要的。如博奕用途之機器人，其無論在發牌或搖骰的操作上，並不需要高度的精密控制。相關的博奕機台採用精密型之機器人，將徒增設備的成本，喪失產品的競爭力。因此如何在競爭激烈的機器人產業尋求可以研發的對象，成為國內機器人開發的重要課題，也吸引著我們投入關節型機器人研製的領域。

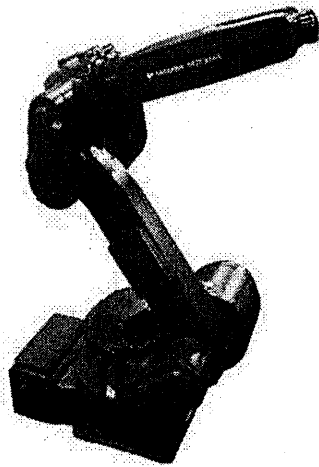
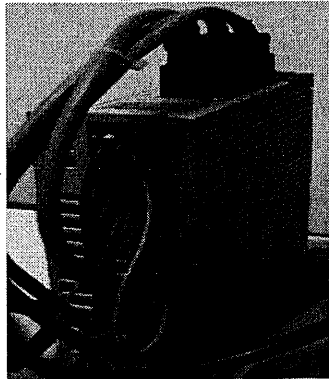
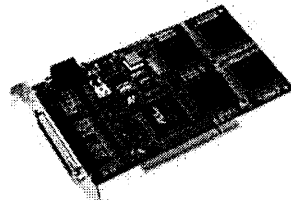


圖 1-1 工業型機械手臂



(a) 伺服控制器



(b) 伺服控制卡

圖 1-2 傳統伺服控制器

因此，本論文的主要目的在於開發關節型機器人的自主關鍵技術，主要包括：

1. 關節型機器人之機構設計：各種機器人的機構雖然可在各種場合看到，但許多的關鍵組件並不易獲得。本論文是針對低成本的關節型機器手臂開發，因此所需之組件必須全部能自市面購得，以

利於後續機器人之生產製造。

2. 開發多軸機器人所需之電控系統，包括各軸控制所需之軸卡及主控電路板。電控系統必須盡可能的精巧且維修簡易，易於模組化，且信號傳遞穩定。
3. 進行軸卡所需之控制器設計，確保各軸控制的準確度滿足設計之需求。

1.2 文獻回顧

機器人一詞，最早出現在 1920 年捷克科幻作家 Czech 的《羅索姆的萬能機器人》[5]中，原文作「Robota」是指工作(work)之意。韋氏字典定義 robot 為，後來成為西文中通行的「Robot」。再過了 40 年機器人才開始獻身現代科技工業，隨著 Intel 公司在 1971 年發展出微處理機，開始讓其發展突飛猛進，現今機器人已是電腦控制高度自動化機械操縱器。

工業機器人是目前機器人用途最多的地方，今日典型的機器人類似人類特性的地方，是其可移動手臂。機器人由程式控制其手臂作一連串運動，以執行某種用途工作。它可週而復始的運作，直到再一次更新程式執行其他工作。因此從程式的特徵，可看出機器人可用於各

種不同工業操作，並與其他許多自動化，或半自動化設備配合，這些配合操作包括機械上、下料、點焊和噴漆。

美國機器人協會(RIA, Robotics Institute of America)，對工業機器人，曾下過下列的正式定義：

一個工業機器人為可再程式(reprogrammable)，多功能(multifunctional)的操縱器，其設計用來搬運材料、工件、工具或特定儀器以執行各種不同工作。[6]

今日工業機器人它們大都僅是一手關節型手臂，且大部分固定於工廠地板。國內外各公司都競相發表各種不同功能關節型機器人，電控系統隨著軸數的增加變得益形複雜。本論文則提出了一新穎的伺服控制架構，容易彈性的依其軸數增加或減少，來符合關節型機器人的控制。擺臂(arm)及關節(joint)為關節型机器人的主要構件，每一個關節架構使用一直流伺服馬達連接減速機直接驅動。為了提供足夠的扭力及馬達位置的適度收藏，減速機及時規齒輪亦為關節型机器人設計的主要構件。机器人控制器的設計，有許多的控制理論，如 PID controller、fuzzy controller、variable structure controller...等，嘗試一穩定可靠的控制器設計，在本論文中將作進一步的探討。

1.3 論文貢獻

本論文初步完成關節型機器人之研製及控制之開發，其主要的貢獻如下：

1. 完成四個自由度關節型機器人研制，自行開發設計的關節型機器人較市面上販賣之機械手臂來的便宜，對於簡單不需要非常精密的動作，或是從事危險的一次性工作(如核廢料的夾取、爆破物的處理)來說，是非常有用的。
2. 本論文關節型機器人的驅動來源為直流馬達，而驅動馬達的控制器在本論文使用以 I²C 通信協議的伺服控制介面卡，此介面卡為自行開發，除了可以節省專用伺服驅動器的經費，更可以完全自主所需之驅動技術，以利於系統擴充之彈性。
3. 建置了分散式之電控系統架構，可應用於任何軸數的關節型機器人控制，一個伺服控制卡搭配一個關節馬達，藉此架構之設計，每一伺服控制卡與一直流伺服馬達結合後，其功能可簡化有如 RC 伺服馬達單體，可避免關節數太多造成控制器設計過於複雜。

1.4 章節概要

本論文共分為六章，其內容分述如下：

第一章 緒論：說明本論文的研究動機、文獻回顧、以及本論文的主

要貢獻。

第二章 關節型機器人的機構設計：介紹關節型機器人的主體架構、傳動機構的設計、減速機的選擇等。

第三章 電控系統設計：介紹主控制板設計、伺服控制卡架構及控制程式設計、及使用 I²C 通信協定來做為主控板與伺服控制卡的溝通。

第四章 機器臂系統的數學模型：介紹直流伺服馬達驅動的機器臂數學模型，並利用實驗法對每個關節作系統識別，實現步階控制。

第五章 實驗驗證與討論：說明實驗系統的建置，控制器參數的設計，並對實驗結果作進一步的分析及討論。

第六章 總結及未來發展：對本論文所達成的研究成果作一總結，並揭示未來欲達成商品化目標的研究方向。

第二章 關節型機器人的機構設計

工業用的關節型機器人，由於能執行各種靈巧的操作，在自動化產業裡，廣泛的被使用，有著難以取代的地位。其應用範圍普及至各層面，舉凡危險性高之作業場所、半導體製程、光電產品製造以及汽車製造業、鋼鐵業、化學業… 等等，幾乎都可見到關節型機器人的應用實例。其執行高速和高精度的搬運組裝身影，不時的可在電視媒體上出現。此種高精度和高穩定性的關節型機器人所需的技術層次高，相對的造價也不便宜，而要進入此一關節型機器人的產業門檻更是不易。

本論文開發設計關節型機器人，無意與目前產業普遍使用的關節型機器人作競爭，而是針對不需高精度應用的機器人應用找尋另外的出路。此一單元主要介紹利用國內廠商自製零件，以進行低成本之關節型機器人之機構設計。

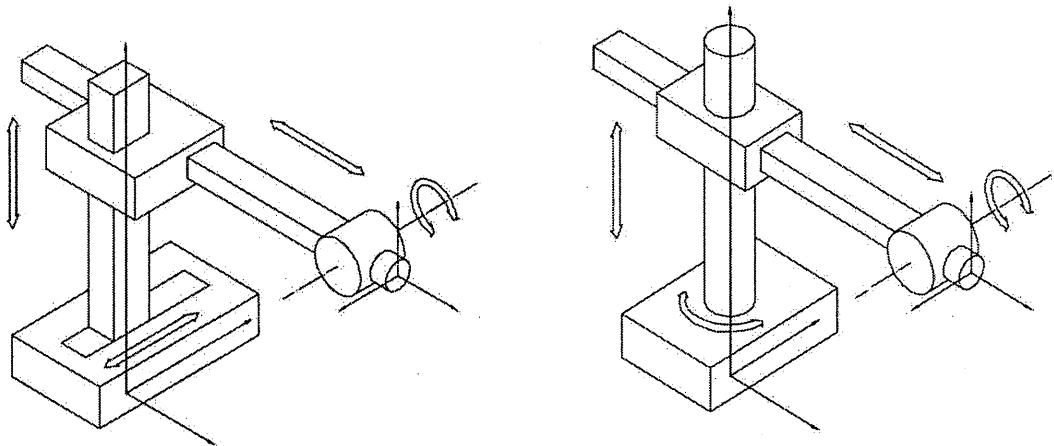
2.1 簡述

關節型機器人有各種不同的尺寸、型態及機械結構，通常是依照使用者的需求去研發製造，以目前最廣泛適用工業的關節型機器人機構，主要分為下列形式：

1. 直角座標型：由三個互相垂直的滑動軸 X、Y 和 Z 所構成，有時也

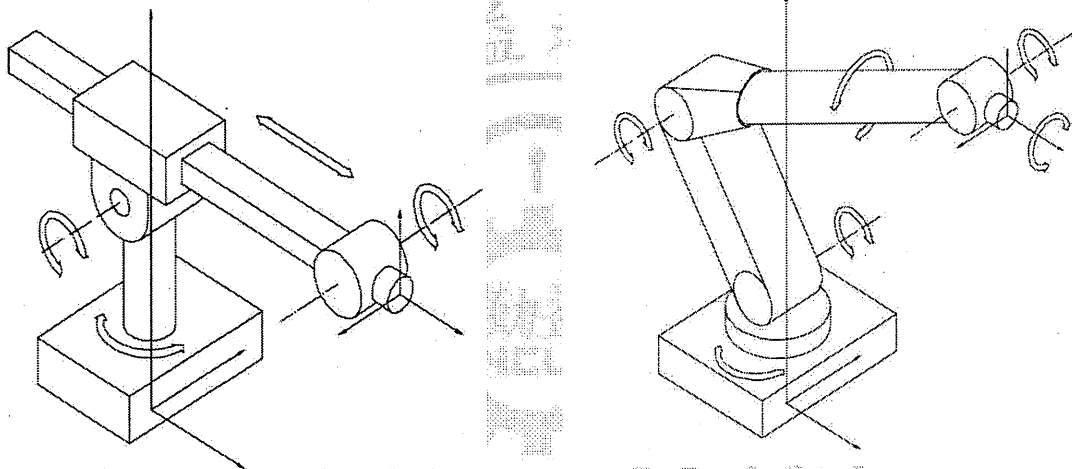
稱為 XYZ 機械手臂，具有三個移動軸線，能使手臂末端沿直角座標系的 X、Y、Z 三個座標軸作直線移動，如圖 2-1(a)所示。

2. 圓柱座標型：具有一個轉動關節和二個移動關節，構成圓柱形狀的工作空間，在相同的工作條件下，其機體所占空間體積小於直角座標型，如圖 2-1(b)所示。
3. 極座標型：具有二個轉動關節和一個移動關節，用來改變手部(直接工作部位)的空間位置，使其在一個球形空間中移動也叫做球形座標型，在相同的工作條件下，機體所占空間體積小於直角座標型和圓柱座標型，如圖 2-1(c)所示。
4. 關節座標型：一般情況下全部關節皆為轉動關節，它的結構近似人類手臂，操作時較易避開障礙物，許多市面上機械手臂都為關節結構式，其特點是結構緊湊，所占空間體積小，相對的工作空間最大，如圖 2-1(d)所示。
5. 無論是何種類型，其結構都可看成是由連桿及關節所組合而成的，而本論文在設計時採用關節型，這是目前國際上一些有名手臂所採用的類型，也是各類型中使用最多的一種形式。



(a)直角座標型

(b)圓柱座標型



(c)極座標型

(d)關節型

圖 2-1 產業用機器人種類[5][7]

2.2 關節型機器人架構

本論文在關節型機器人的機構設計上，主要分成四個自由度，而這四個自由度大概可以做到一般科技業、娛樂業、鋼鐵業、化工業…等的狀況需求。其主體機構包括了，A 前端擺臂與關節旋轉軸、B 小擺臂及其旋轉軸、C 大擺臂及其旋轉軸與 D 底座機構及其轉動裝置，其如圖 2-2 所示。

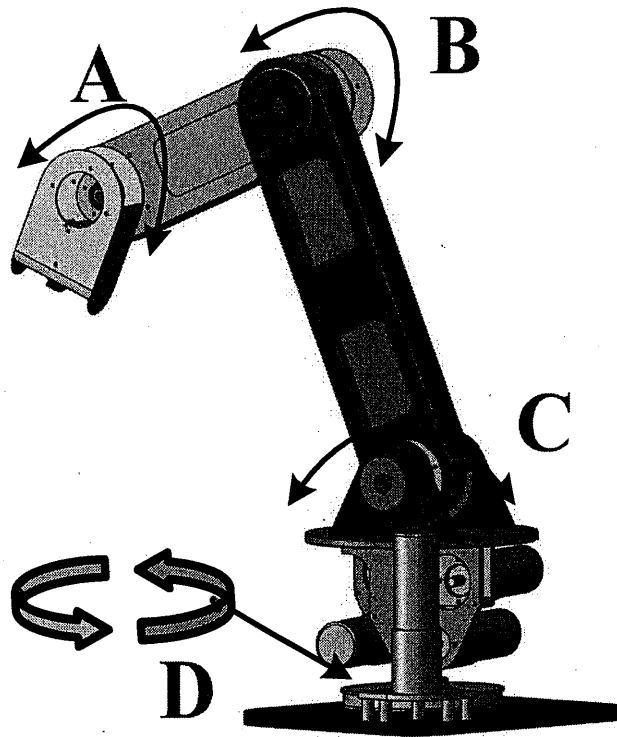


圖 2-2 關節型機器人架構

2.2.1 前端擺臂

前端擺臂是最直接參與工作的部份，依使用者狀況需求擁有各種變化，其前端可以是各種工具，例如焊接頭、夾爪、吸盤…等。操作時都要求手部(直接工作部位)能到達指定位置及相對姿態。本論文所設計之前端擺臂，其架構是以中空四方鋁管所加工而成，如圖 2-3 所示。其中 A1 為一鋁製伺服馬達座，主要功能為伺服馬達與鋁製前擺臂間的連接。A2 為一伺服馬達，其功能為前擺臂與前端工具的連接，目前連接工具為一吸嘴，日後可依工作需求更換其工具。A3 為前端擺臂總長度為 14 公分，其動作方向與伺服馬達垂直，此部位可看成

為簡易圓柱座標動作，另一端則透過轉動軸與小擺臂相互連接。

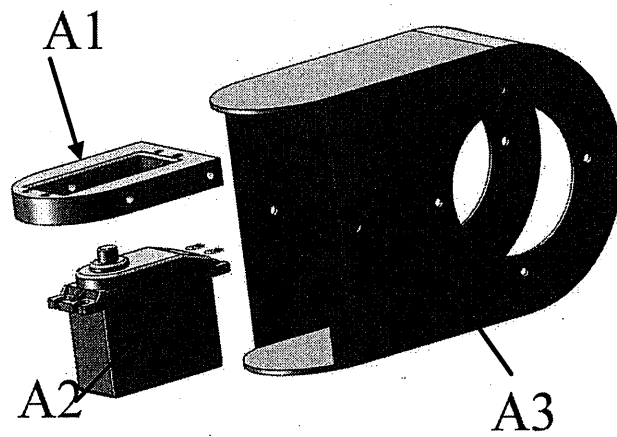


圖 2-3 前端擺臂

2.2.2 小擺臂

無論是何種形式的非關節型機器人幾乎都需要有較大的工作空間，關節型機器人主要的特點是模擬人類手臂的動作，可以容易進入較為狹窄的位置進行工作。此時需要有一個擺臂來輔助前端擺臂的不足，而小擺臂如圖 2-4 所示，能輔助前端擺臂更容易進入狹窄或有障礙物之位置工作，其為鋁製四方中空管，長度為 28.5 公分。在不影響其結構堅固性與減輕重量考量下，於中間適當位置處挖有方型空洞，一端與小擺臂相互連接外，另一端也透過轉動軸與大擺臂相互連接。

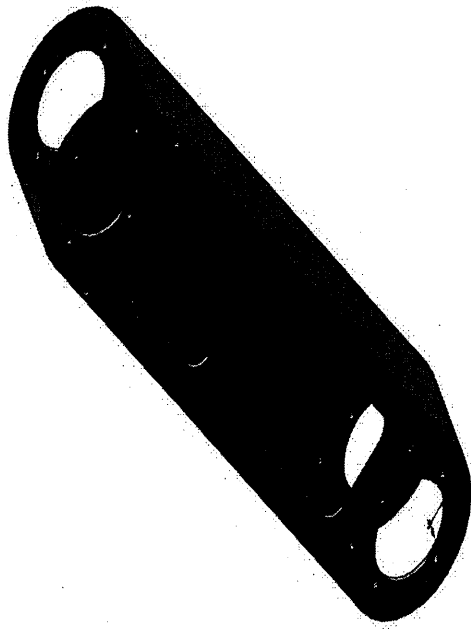


圖 2-5 大擺臂

2.2.4 底座機構及底部轉動裝置

本論文在設計時將所有驅動裝置(減速機與馬達)設計在底座機構，如圖 2-6 所示。除讓關節型機器人機構外型更加美觀外，還考慮到關節型機器人各擺臂之荷重考量。此設計可使各擺臂負載變輕，不會因為驅動裝置重量的影響而加大了控制的困難度。D1 為驅動大擺臂之直流馬達與減速機，D2 為驅動前擺臂之直流馬達與減速機，D3 為驅動小擺臂之直流馬達與減速機，D4 為時規皮帶輪。

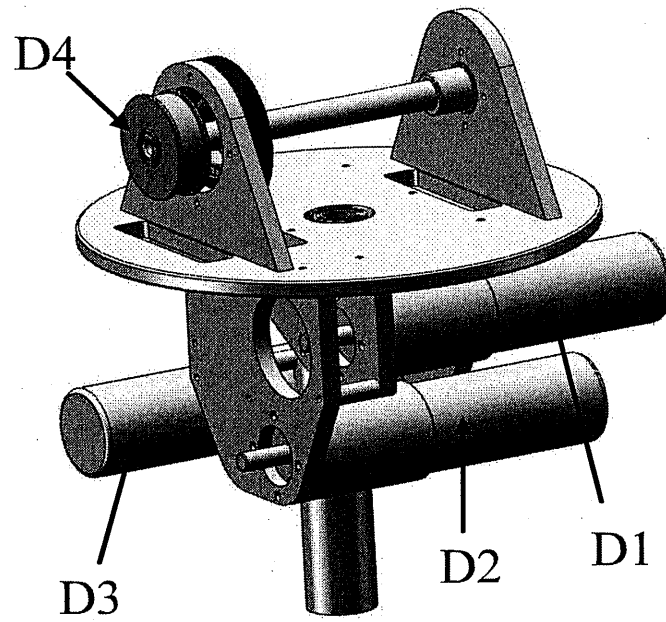


圖 2-6 底座機構

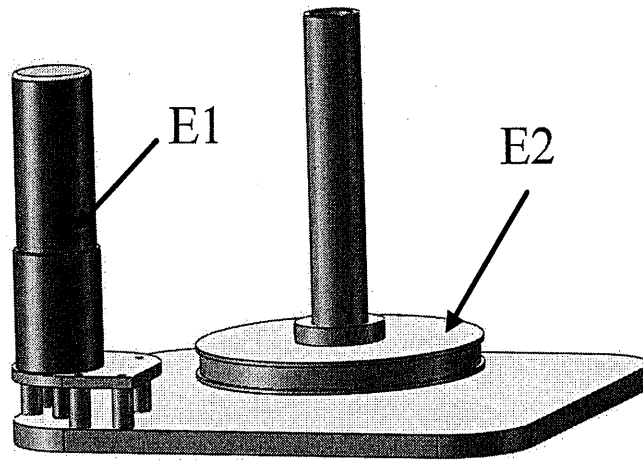


圖 2-7 底部轉動裝置

底部轉動裝置如圖 2-7 所示，負責整個關節型機器人底部旋轉。其中 E1 為驅動底部旋轉之直流馬達與減速機，此設計方法不須承受太大之荷重，在減速機的挑選上也相對容易，E2 為時規皮帶輪透過

止付螺絲與底盤軸心相互連結，經 E1 的驅動透過皮帶的帶動，能使整個關節型機器人轉動。

2.2.5 時規皮帶輪與旋轉軸

本論文中所有的關節連接部分並沒有使用驅動器直接驅動，而是透過時規皮帶輪及其皮帶的配合，如圖 2-8 所示。通常使用在較為精密的傳動場合，其優點為傳動較確實不會產生滑動且高速不滑落、高效率、低噪音、省空間、壽命長和齒輪比大...等優點。時規皮帶輪本體通常係由鋁加以表面處理所製成，皮帶本體係由塑膠製造再加入玻璃纖維或鋼線等抗張體，使其不易變形。關節型機器人各軸常用的設計有線性移動與旋轉兩種，線性的運動方式是滑動或平移。本論文設計則採用旋轉軸設計，再透過時規皮帶輪與皮帶的配合來帶動每一關節旋轉機構。每一旋轉軸設計皆相似，其架構如圖 2-9 所示，其中 F1 及 F3 為軸承座主要是與各鋁製中空擺臂相互連接，F2 為時規皮帶輪與主軸相互連結，F4 為主軸所有零件及擺臂會透過各式螺絲裝置於主軸上緊密連結，透過直流馬達直接驅動減速機，再透過時規皮帶輪與皮帶的配合來帶動每一擺臂擺動。

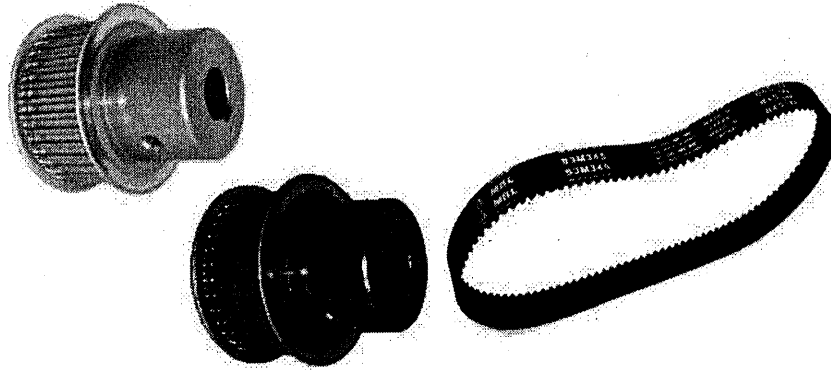


圖 2-8 時規皮帶輪與皮帶

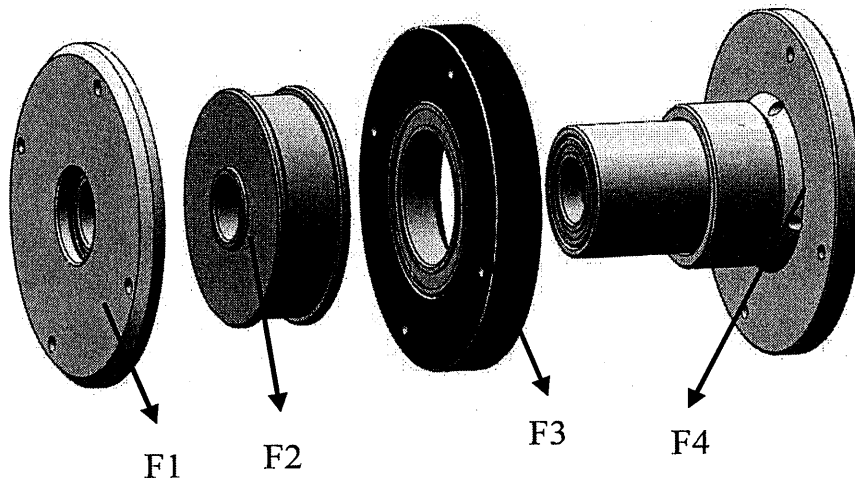


圖 2-9 旋轉軸

2.2.6 減速機與直流馬達

減速機的變速原理跟汽機車的變速箱原理相同，透過齒輪比的設計，來達到增速、減速的變化。市售的減速機一般減、變速的方法如表 2-1 所示。普通的減速機也會有幾對相同原理的齒輪來達到理想的減速效果，其中大小齒輪的齒數比，就是傳動比[8]。

減速機的作用如下：

1. 減速的同時提高輸出扭矩，最終扭矩輸出為直流馬達扭矩輸出乘減速比，但要注意不能超出減速機的額定扭矩。
2. 減速的同時降低了負載的慣量，慣量的減少為減速比的平方。

表2-1 市售減速機減、變速方式

減、變速的方法	
齒輪式	齒輪、蝸輪傳動
	行星齒輪或傘齒輪
機械式	皮帶輪、鏈條
	圓柱、滾珠
	圓錐、圓盤
壓力式	油壓、氣壓
電器式	伺服馬達、變頻器

本論文中關節型機器人最大的動力來源為驅動器，所使用的驅動器包含了馬達及減速機。在此並不使用馬達直接驅動關節型機器人，而採用馬達來驅動減速機，減速機再透過時規皮帶輪來對各關節驅動，所採用的都為相同規格直流馬達，其中最大的差異為減速比，因為各軸所需承受的荷重不盡相同，因此依照各軸需求採用的不同減速比之減速機，所採用為祥儀公司所生產之減速機[9]如表 2-2 所示。

表2-2 減速比、電機規格

	關節	減速比	馬達額定電壓
馬達 1	1	1/98	24V
馬達 2	2	1/122	24V
馬達 3	3	1/424	24V
馬達 4	4	1/147	24V

本論文中，所有關節轉動都是藉由直流馬達的運轉所帶動的。在這裡先簡略介紹直流馬達並討論其優、缺點。

直流馬達簡介[10]：

構造：直流馬達是由流通磁通鐵心、流通電流線圈、將外部所供應的直流電源，變換為旋轉速度同步交流的換向器、電刷，以及支持該設備的構造部門所組成。

特徵：雖然直流馬達的種類不同會有些許差異，但仍有下列

- 共同特徵：
1. 速度控制容易。
 2. 效率良好。
 3. 可以任意選擇起動轉矩，加減速轉矩，轉矩效率良好。
 4. 比交流機，尤其是比鼠籠型感應馬達貴。
 5. 換向器與電刷需要定期維護。
 6. 在壞環境使用時，受構造上限制。
 7. 會有從換向器和電刷發生火花雜音。
 8. 由於換向或機械強度關係，高電壓化或高速化受到了限制。

種類：由於電樞回路與激磁回路接線方法的不同，故有下列

各種馬達：1. 直流他激式馬達。2. 直流分激式馬達。

3. 直流附穩定串激，分激式馬達。4. 直流複激式馬達。

直流馬達的優、缺點如下[11]：

(1)優點：

- A. 因為有刷，所以效率良好。
- B. 由於效率良好，所以可以小型化。
- C. 啟動轉矩大。
- D. 因為使用低電壓，所以絕緣設計很容易。

(2)缺點：

- A. 因為有電刷壽命，所以和無刷馬達比較下，馬達的壽命較短。
- B. 會產生電氣雜音。
- C. 有電刷和整流子的摺動音。
- D. 定速性不佳。

在實際的使用上，特長如下：

(1)小型且啟動轉矩強。

(2) 可以使用電池。

(3) 使用簡單的回路，迴轉數控制容易。

(4) 價格便宜。

基於上述這幾項實際使用的特長，相較於其他馬達的特性，還有實驗室研究的方向，故選用直流馬達來做為關節型機器人的驅動器。

2.3 機器人組合分解圖

本論文所設計之機器人各零組件的組合分解圖如圖 2-10 所示。

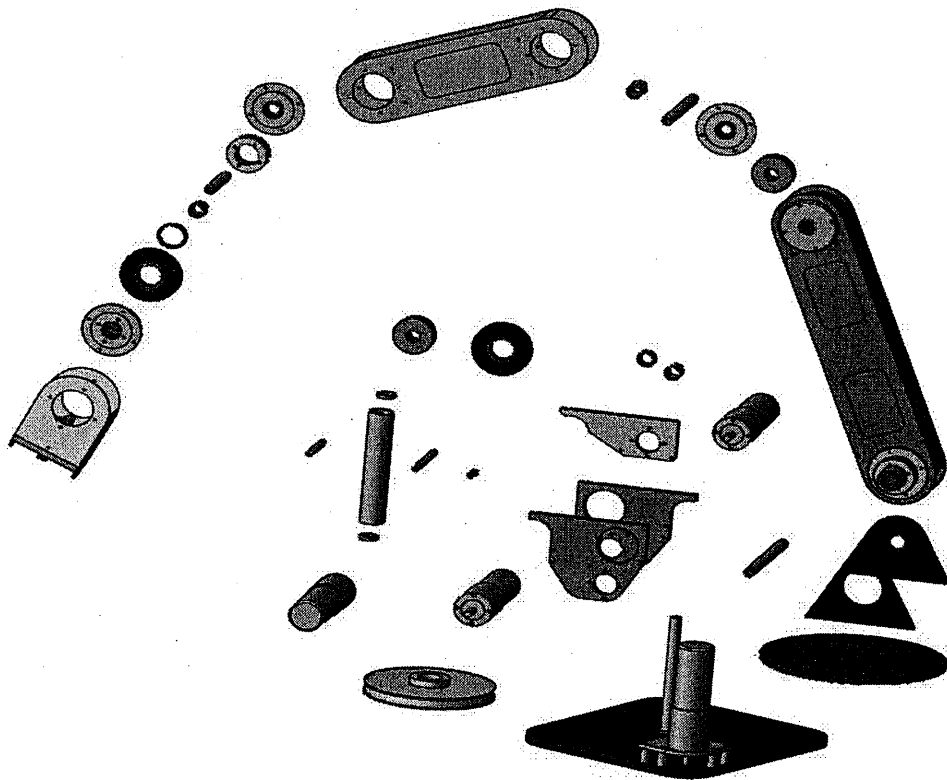


圖 2-10 機器人之組合分解圖

第三章 電控系統設計

電控系統可說是整個關節型機器人的核心，必須整合各部位的功能來執行排程工作，依序控制各關節系統達到最終的目標。在現今業界所使用的各式關節型機器人，其動力驅動系統最常用的有三種：液壓驅動、電力驅動及氣壓驅動。其中使用最普遍的系統為液壓系統和電力系統，液壓系統的優點是速度快和負載重，缺點是液壓系統較占平面空間，電力驅動系統所提供的動力與速度皆不如液壓系統，然而其精確度及重現性卻是最好的。同時使用電力系統的關節型機器人體積較小不占空間[12]，因此很適合應用在本論文所提出之關節型機器人上，其電控系統設計部分包含了主控制板、伺服介面卡設計、伺服控制器程式設計，以及主控制板與各伺服控制卡的通信程式設計。如圖 3-1 所示，顯示了 4 軸關節型機器人系統的示意，陰影區的部份是電控系統。

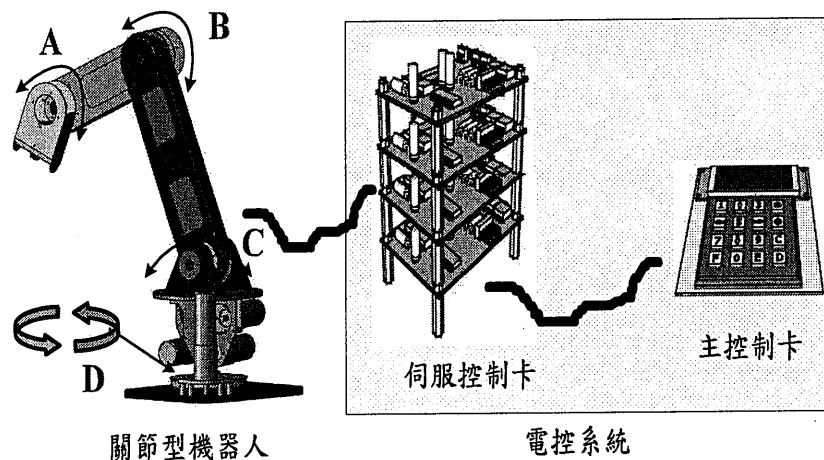


圖 3-1 關節型機器人控制架構示意圖

3.1 電控系統架構

3.1.1 主控制卡

現今，隨著晶片製作能力的提升，許多的功能模組都已整合到微控制器中，這使得電力驅動系統體積更加的縮小，控制也更加簡便。本論文中是以 Microchip 公司的 PIC18F8720 晶片做為主控板的核​​心。PIC18F8720 是一顆高性能的 8-bit CPU，可由 C 的編譯器做程式最佳化、其具三組十六位元計時/計數器、二組八位元計時器、五組 CCP(compaer, capture, PWM)…等[13]。主控制板是最重要的命令傳送系統，關節型機器人所有運行動作全部編成軌跡命令，其命令都記錄在主控板的記憶體中，依照使用者的動作需求，利用 I²C 通信協定，將不同的動作運行命令依照順序傳送到每一塊伺服控制卡。如圖 3-2 所示，顯示了主控板功能模塊，有些功能模塊是保留給可能的應用，如按鍵、LCD 顯示、LED 指示燈、蜂鳴器…等功能。

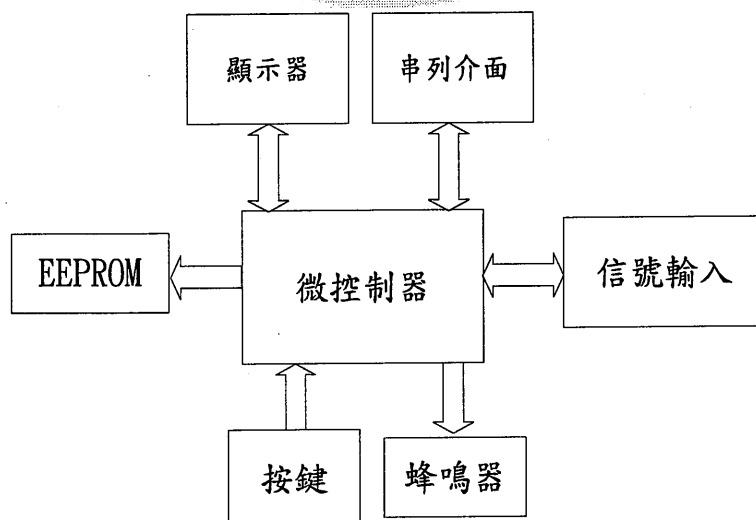


圖 3-2 主控制板示意圖

3.1.2 伺服控制卡

本論文之伺服控制介面卡以常用之直流馬達伺服控制介面卡為主，且整個晶片支援的周邊功能強大眾多，舉凡 UART、A/D、TCP/IP... 等周邊功能齊全，未來的功能擴充性強。為了在使用上維護的方便性及關節擴充或縮減之彈性，共使用了 4 片伺服控制介面卡，每片伺服控制介面卡分別控制一個主要關節，伺服控制介面卡與主控制卡間溝通方式使用 I²C 通信介面，伺服控制介面卡其功能方塊圖如圖 3-3 所示。

伺服控制介面卡上主要包括控制晶片、功率晶體、電流感測器和編碼器計數電路、記憶體儲存馬達的狀態行為、串列通信埠接收來自主控電腦/電路板的驅動命令... 等。微控制晶片為控制介面卡的核心，每個伺服控制介面卡接收到來自主控板透過 I²C 所下達的命令訊號，並對所輸入之命令做處理或演算，以送出驅動信號控制馬達運轉。位置回授信號則經光編碼器送進晶片內部的計數模組產生而得。另外在馬達運轉同時，伺服介面卡中電流感測器對驅動馬達的電流做偵測，並將電流信號轉換成一電壓信號，經類比數位轉換裝置，將類比信號轉換成數位信號，把值回傳根據回授訊號分析來更改控制命令，持續此方法直至達成目標位置。其 I²C 命令以位置命令或速度命令或兩者兼而有之，這取決於控制程序的設計。在本研究中位置命令

是首選，另外調整 PID 控制器的參數命令，以保證該系統可以接受的穩態誤差，來實現閉迴路控制。

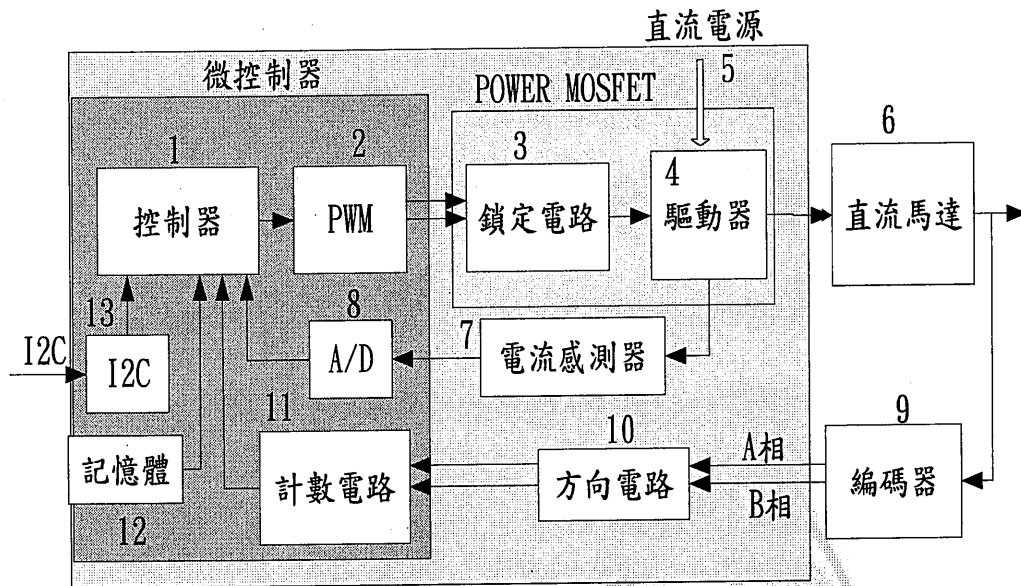


圖 3-3 伺服控制卡示意圖

3.1.3 I²C 通信 [14]

I²C (Inter-Integrated Circuit) 是內部整合電路的縮寫，由飛利浦 (PHILIPS) 公司於 1980 年所規範的一種高性能串列同步傳輸介面，顧名思義它是指集合電路之間的通信。像 I²C 這樣的匯流排之所以流行起來，是因為電腦工程師發現到對於整合電路設計而言，許多的製造成本源自於封裝尺寸及接腳數量。更小的包裝通常能夠減少重量及電源的消耗，這對於行動電話及手持式電腦的使用而言格外重要，因此開發出了此通信架構。I²C 與其它串列通信介面 SPI、UART... 等相比，無論是在硬體組成結構或程式編程上都有很大的不同，它只使用兩條

雙向開集極電路 SDA 和 SCL 的信號線，並利用提升電阻將其電位上拉，I²C 允許相當大的工作電壓範圍，而非一般典型晶片所使用的電壓準位+3.3V 或+5V，各系統工作電壓也可以不盡相同。但是使用時各系統必須是共地狀態，其工作電壓較低之系統接點也必須能承受較大之工作電壓系統方可使用。每個工作系統節點皆可以熱拔插，即可在系統帶電狀況下自由接入和拆除。由於具備匯流排同步機制，可讓使用不同工作週期的物件都能進行同步通信，且 I²C 具有可編程 7-bit 的內建地址碼(目前可擴充到 10-bit 的定址模式可容納最多 1008 個節點)，不需要額外增加位址編碼或解碼介面，這使它很容易添加到或刪除任何 I²C 的設備，也不需要更改原來的系統設計[15]，非常符合本論文所使用伺服控制卡的控制架構，圖 3-4 顯示了 I²C 設備連接示意圖。只有 2 根電線連接的 I²C 設備，使用任何版本的變化都可以很容易實現，確實減少了 I²C 架構設計的成本，也大大提高了維護性。

I²C 的工作模式分為主模式(master mode)及從模式(slave mode)，主模式代表信號的發射端，從模式代表信號的接收端。以主模式為例，圖 3-5 為 I²C 一次完整通信工作時序，其進行步驟如下：

步驟1. 主控端檢測到 I²C 匯流排為閒置狀態下，首先發送一個啟動

(S)訊號時脈。

步驟2. 發送所需控制物件 7-bit 位址碼(Address data)。

步驟3. 發送讀寫位元 R/\overline{W} 。

步驟4. 相應被控端接受到位址碼訊號後送出一個應答 \overline{ACK} 。

步驟5. 主控端收到應答後開始發送/接收數據(Data)訊號。

步驟6. 被控端發送/接收到數據訊號後，送出應答訊號 \overline{ACK} 。

步驟7. 主控端將所需訊號發送完畢後，發送出一個停止(P)訊號結束

整個通信過程。

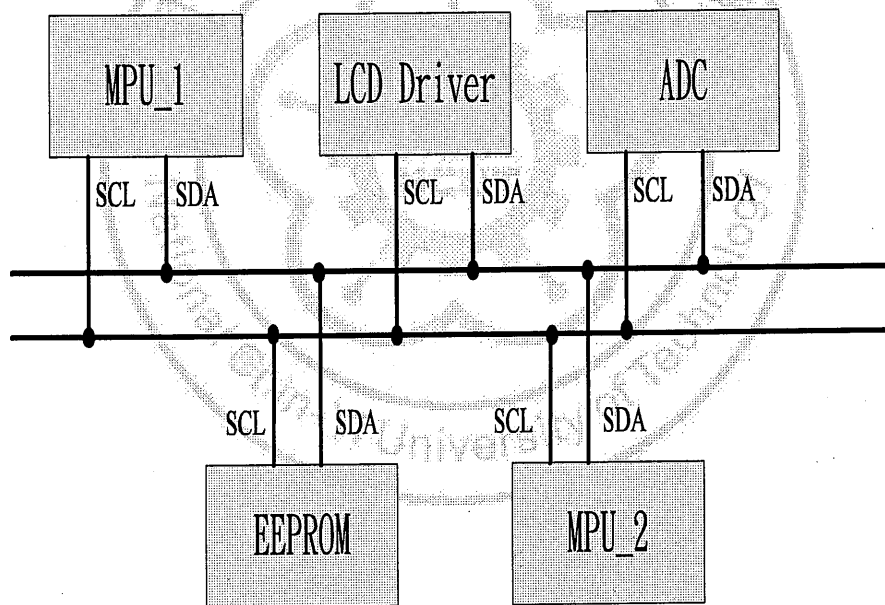


圖 3-4 I²C 設備連接示意圖

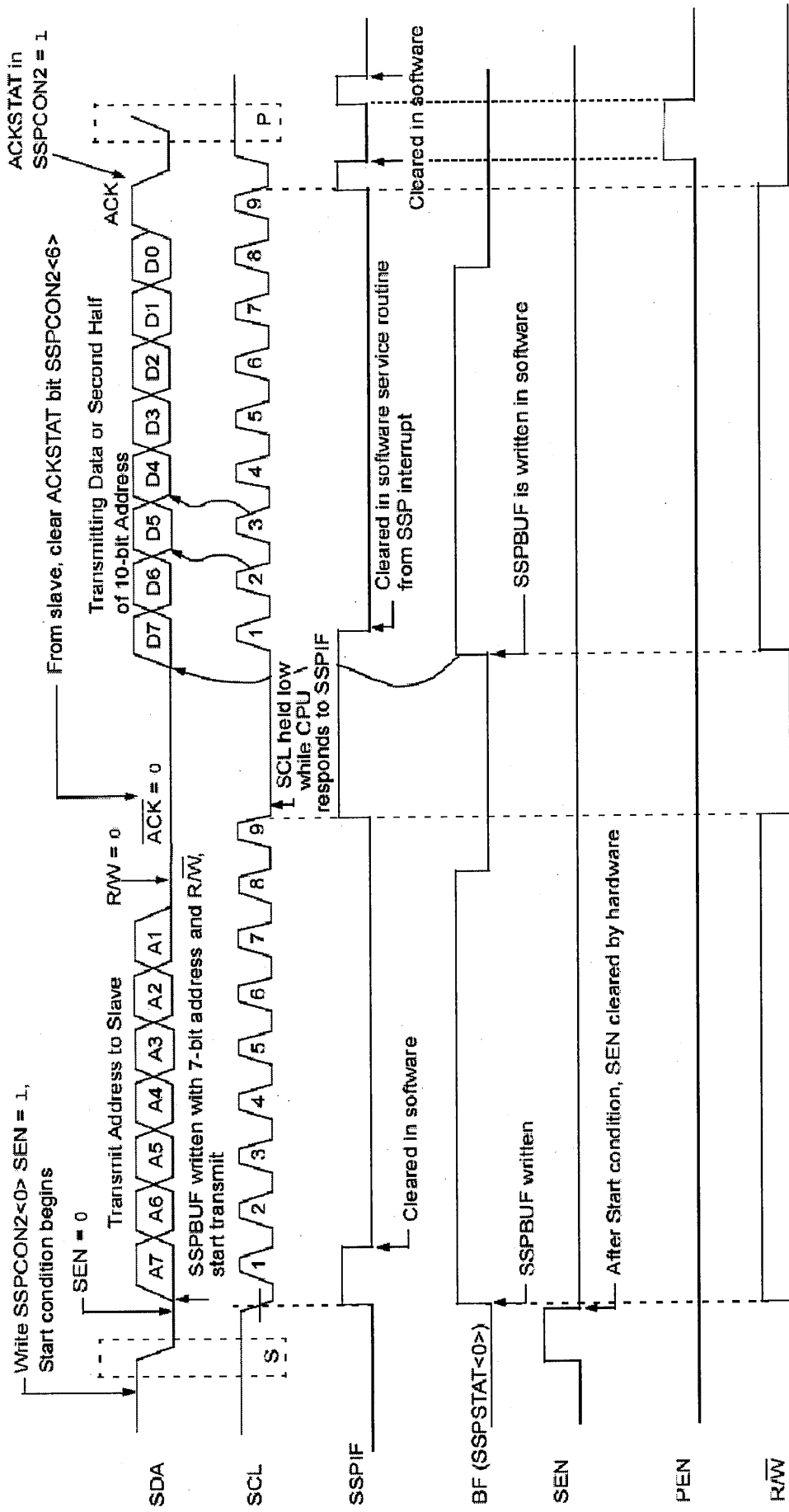


圖 3-5 一次完整通信時序圖[13]

3.1.4 馬達驅動電路

在本論文中伺服控制介面卡所使用的是 SGS-THOMSON 公司的 L6203 全橋式驅動器，為市面上專用的功率晶體模組，如圖 3-6 所示 [16]。其最高切換頻率可達 100kHz，最大額定電流達 5A，並具有過熱自我保護的功能，可以滿足小型伺服馬達驅動的需求。

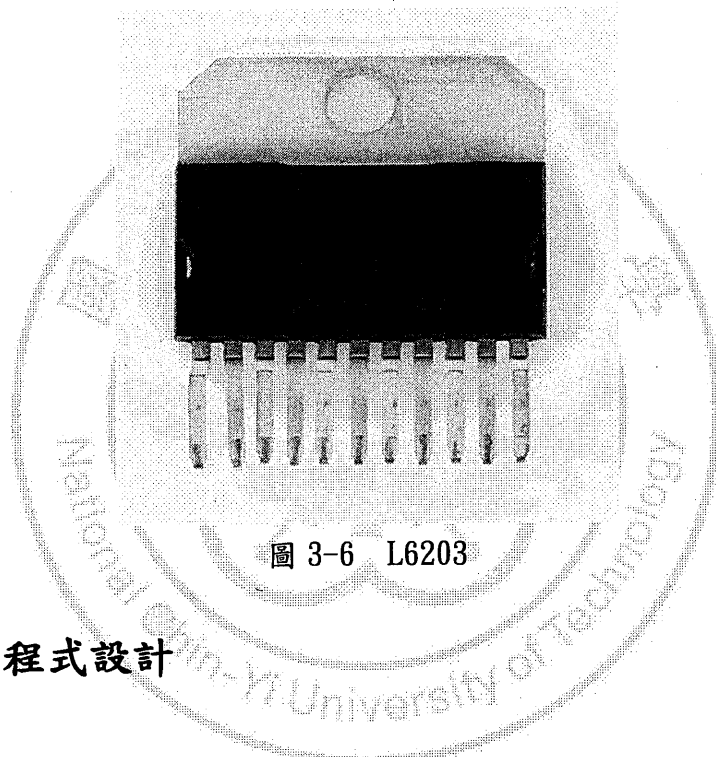


圖 3-6 L6203

3.2 控制程式設計

控制程式設計主要包括主控制卡程式設計及伺服控制卡程式設計，茲說明如下：

3.2.1 主控制卡程式設計

本論文所提出的關節型機器人控制方法，是利用主控制卡將動作運行命令透過 I²C 通信介面，依照順序傳送到每一塊伺服控制卡，其程式控制流程如圖 3-7 所示。

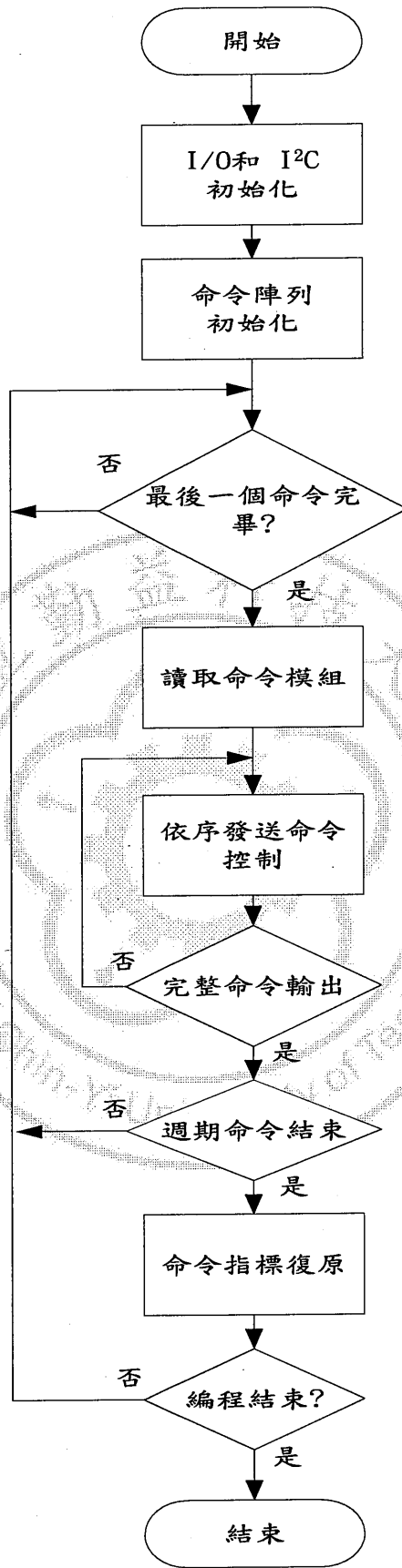


圖 3-7 主控制卡程式流程圖

首先，必須先對主控制卡所有 I/O 接腳與 I²C 通信時所會使用到的接腳做初始化的設定。接著將關節型機器人各關節的動作轉換成位置命令，把位置命令用矩陣的方式儲存起來。這樣的方式除了在設計動作或新增動作時更加方便，也讓主控制卡透過 I²C 通信模式在傳送命令時，各軸在抓取動作命令更佳的方便，不容易出錯。

等所有初始化及動作命令都設定完畢後，接著會開始偵測 I²C 忙碌旗號是否為 HIGH(表示忙碌)，如處於忙碌狀態就必須繼續等待，如為閒置狀態(I²C 忙碌旗號為 LOW)就可開始作 I²C 通信，針對各軸發送位址確認命令與動作命令。在此要特別注意的是，如 I²C 忙碌旗號一直處於忙碌狀態，主控制卡就會一直等待而無法繼續動作，這有可能是因為硬體接線的問題，或是 I²C 匯流排目前有其他資料正在傳送，因此在程式撰寫方面必須另外設計，如 I²C 匯流排等待過久沒有任何回應，就必須進入下個動作步驟，或是出現錯誤警示來告知操作者，避免程式進入無限迴圈而不自知。

當位址發送(7-bit)後會接收到一個伺服控制卡的確認訊號(\overline{ACK})，此時忙碌旗標會自動顯示狀態為(HIGH)，必須由軟體來確認清除，等確認清除後就可開始傳送/接收命令(8-bit)，當命令傳送/接收完畢後會再接收一個來自伺服控制卡的確認命令，如果還有命令訊號要傳送，就會一直重複著確認清除及傳送的狀態，如沒有動作

命令要繼續傳送，I²C 忙碌旗號就會回復成 HIGH 的狀態，繼續下一個關節軸的動作命令下達，一直循環這些步驟，直到整個命令週期完全下達完畢。

3.2.2 伺服控制卡程式設計

收到命令之伺服控制卡會依接收訊號，對直流馬達進行伺服控制。依照直流馬達所回授訊號加以分析計算，利用 PID 控制法則(於下章節會另作說明)演算輸出控制訊號，持續此動作直到完成所需動作目標，其控制程式流程如圖 3-8 所示。

伺服控制卡會先對 I/O 接腳及 I²C 通信會使用到的接腳做初使化的設定，接著開始等待 I²C 匯流排的呼叫，當 I²C 匯流排呼叫到相對應位址時，伺服控制卡會產生回應，回應之後開始接收來自主控制卡的位置控制命令。

等接收位置控制命令後，伺服控制卡發送訊號控制給相對應之直流馬達，馬達轉動之後馬達所連接之光學編碼器回送訊號給伺服控制卡，伺服控制卡會依照傳送回來的當前位置訊號與所下達的位置命令做誤差的計算，經 PID 控制器來做輸出控制訊號的調整，調整後再持續控制直流馬達，持續此動作直到直流馬達到達所要的位置。當到達位置後，伺服控制卡停止控制直流馬達，回復到等待下一次 I²C 匯流

排的呼叫與位置命令的傳送。

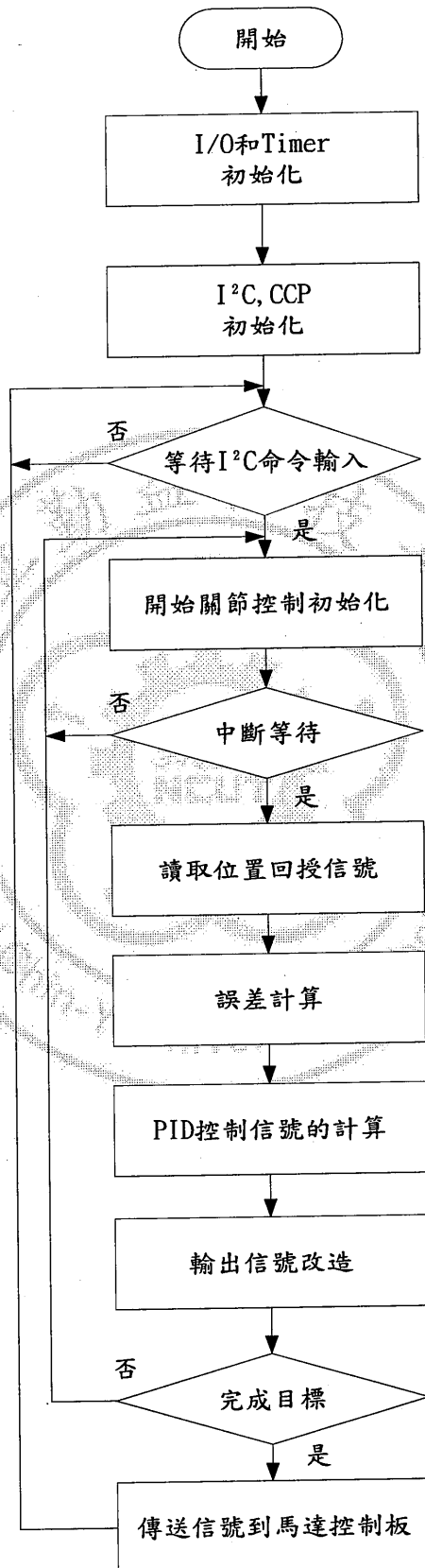


圖 3-8 伺服控制卡動作流程

第四章 數學模型與實驗驗證

建立模型為控制系統分析中最重要的工作之一，其工作除了用數學模型說明該系統外，尚需做正確的假設與近似，以便將系統的模型簡化表示之。一般建立系統的數學模型方法有二種，理論法及實驗法。理論法一般是藉由對系統的電氣及機構特性的了解，利用物理法則的推演而得。例如一個機械阻尼系統，利用了彈簧阻尼的特性，以及牛頓運動定律的學理，可以輕易的推導出阻尼系統受到外力時，物件隨時間推移相對於位置的變化關係。利用此一方法的前提是對系統特性的了解，且對諸多的物理參數要有充分的資訊。例如阻尼系統中的彈簧彈力常數，阻尼係數、摩擦力…等等。

但是常對系統的諸多物理參數不易取得時，或者假設的條件跟實際系統特性並非充分一致，此時理論法則將難以得到好的結果，藉由實驗法才是確實可行之道。以關節型機器人而言，其機構也類似一個阻尼系統，各軸所有構件的質量、摩擦係數、重心位置和慣量…等眾多參數的取得談何容易。此時藉由實驗法求得簡化之數學模型，再據以進行控制器的設計，以實現機器的控制，才是簡而易行之道。

4.1 數學模型

本論文所提出之關節型機器人共有四個自由度，各關節都是使用

直流馬達來做驅動，由於每一個關節輸出都是馬達連結一個減速機，以得到一個較高的扭力，此種足夠大的減速比降低了各軸之間的耦合效應，因此數學模型可以分離為四個相似的獨立子系統。其直流伺服系統如圖 4-1 所示，顯示了一個關節型機器人關節的連結方式，整個控制系統方塊圖可以圖 4-2 加以表示。

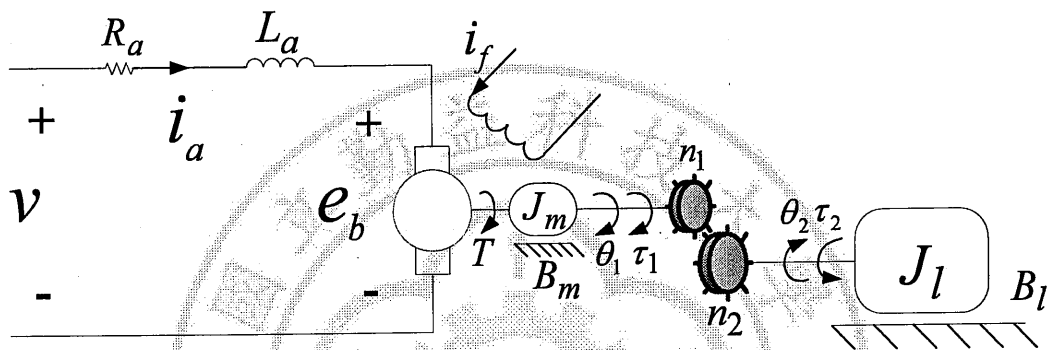


圖 4-1 直流伺服系統示意圖

其中

R_a = 電樞電阻

L_a = 電樞電感

i_a = 電樞電流

i_f = 場電流

v = 電樞電壓

e_b = 反電動勢

τ_1, τ_2 = 齒輪的扭力

θ_1 = 馬達軸承的角位移

θ_2 = 齒輪的旋轉角度

J_1, J_m = 馬達承軸端的等效慣量(包括馬達與負載)

B_1, B_m = 在馬達承軸端的等效黏滯摩擦係數或阻尼係數(包括馬達與負載)

K_b = 反電勢的電常數

n_1, n_2 = 齒輪的齒數

T = 電磁轉矩

減速齒輪比

$$\frac{1}{N} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\theta_1}{\theta_2} \quad (4.1)$$

由於能量不滅定律

$$\begin{aligned} \tau_1 \theta_1 &= \tau_2 \theta_2 \\ \Rightarrow N^{-1} \tau_1 &= \tau_2 \end{aligned} \quad (4.2)$$

由(4.2)式可得知減速齒的傳輸作用

經由(4.1)式可得

$$\dot{\theta}_1 = N^{-1} \dot{\theta}_2 \quad (4.3)$$

$$\ddot{\theta}_1 = N^{-1}\ddot{\theta}_2 \quad (4.4)$$

由於

$$\sum \text{力矩} = \sum J\ddot{\theta}$$

因此可得

$$\tau_2 = B_l\dot{\theta}_2 + J_l\ddot{\theta}_2 \quad (4.5)$$

$$T - \tau_1 - B_m\dot{\theta}_1 = J_m\ddot{\theta}_1$$

$$\Rightarrow T = \tau_1 + B_m\dot{\theta}_1 + J_m\ddot{\theta}_1 \quad (4.6)$$

將(4.3)式代入(4.6)式並乘 N^{-1} 可得

$$N^{-1}T = \tau_2 + N^{-2}[B_m\dot{\theta}_2 + J_m\ddot{\theta}_2] \quad (4.7)$$

將(4.7)代入(4.5)可得

$$N^{-1}T = B_l\dot{\theta}_2 + J_l\ddot{\theta}_2 + N^{-2}[B_m\dot{\theta}_2 + J_m\ddot{\theta}_2] \quad (4.8)$$

令

$$J_{eff} = \frac{J_l + J_m N^{-2}}{N^{-1}} \quad , \quad B_{eff} = \frac{B_l + B_m N^{-2}}{N^{-1}}$$

則(4.8)式改寫成(4.9)式

$$\Rightarrow T = J_{eff}\ddot{\theta}_2 + B_{eff}\dot{\theta}_2 \quad (4.9)$$

空氣間隙磁通 ϕ 正比於場電流 i_f :

$$\phi = k_f i_f \quad (4.10)$$

馬達力矩 T 正比於電樞電流與間隙磁通的乘積：

$$T = k_l \phi = k_l k_f i_f i_a = K_T i_a \quad (4.11)$$

其中

k_l = 比例常數

k_f = 比例常數

K_T = 馬達力矩常數

將(4.11) 式取拉式轉換

$$T(s) = K_T I_a(s) \quad (4.12)$$

馬達反電動勢正比於馬達速度：

$$\begin{aligned} e_b &= K_b \dot{\theta}_1 \\ \Rightarrow e_b &= K_b N^{-1} \dot{\theta}_2 \end{aligned} \quad (4.13)$$

K_b = 反電動勢常數

將(4.13) 式取拉式轉換

$$E_b(s) = K_b s N^{-1} \theta_2(s) \quad (4.14)$$

電樞電路的電路方程式：

$$L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + e_b = v \quad (4.15)$$

將(4.13)代入(4.16)式並取拉式轉換

$$\begin{aligned} L_a s I_a(s) + R_a I_a(s) + K_b s N^{-1} \theta_2(s) &= V(s) \\ \Rightarrow (L_a s + R_a) I_a(s) + K_b s N^{-1} \theta_2(s) &= V(s) \end{aligned} \quad (4.16)$$

由(4.9)、(4.13)、(4.16)式可整理出馬達系統的(開路)轉移函數：

$$G(s) = \frac{\theta_2(s)}{V(s)} = \frac{K_T}{(L_a s + R_a)(J_{eff} s^2 + B_{eff} s) + N^{-2} k_b k_T s} \quad (4.17)$$

(4.17)式為角位移對輸入電壓的轉移函數。以開迴路形式對位置控制而言，是難以達到良好的控制效果。因此必須將輸出信號進行回授以構成閉迴路之控制，如圖 4-2 所示之伺服馬達位置控制方塊圖。通常在電樞控制的直流馬達中，電樞電感 L_a 通常很小而被省略。將(4.17)式改為(4.18)式

$$G(s) = \frac{\theta_2(s)}{V(s)} = \frac{\frac{K_T}{R_a}}{J_{eff} s^2 + (B_{eff} + \frac{N^{-1} K_T K_b}{R_a}) s} = \frac{K_m}{s(T_m s + 1)} \quad (4.18)$$

其中：

$$K_m = \frac{K_T}{R_a (B_{eff} + \frac{N^{-1} K_T K_b}{R_a})}, \quad T_m = \frac{J_{eff}}{B_{eff} + \frac{N^{-1} K_T K_b}{R_a}}$$

因此圖 4-2 的控制方塊，陰影區塊可進一步簡化為二階系統，其

控制方塊圖可加以簡化成圖 4-3，如若圖 4-2 中的相關參數已知，自然可以得出圖 4-3 中的相關參數，而當參數未知時，圖 4-3 的參數則可以實驗法，作簡單的系統識別。

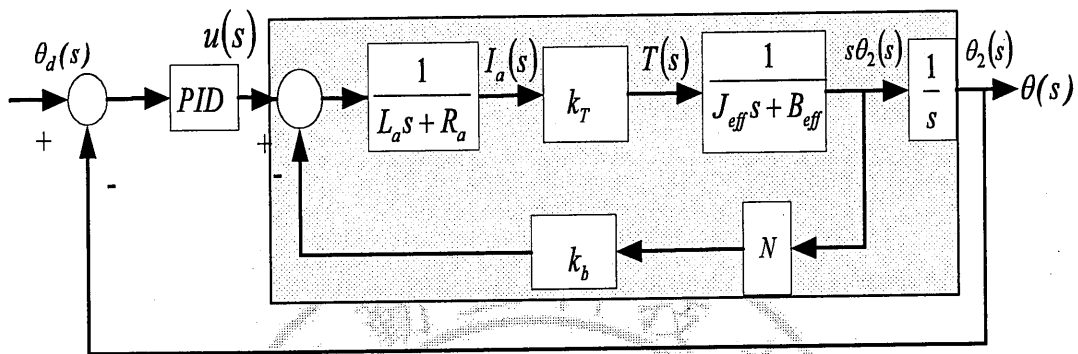


圖 4-2 閉迴路直流伺服系統方塊圖

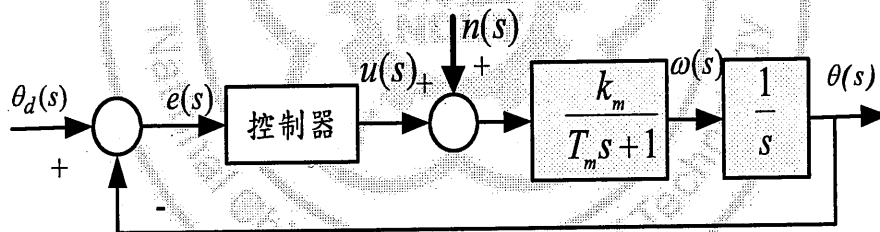


圖 4-3 簡化的閉迴路直流伺服系統方塊圖

其中：

$\theta_d(s)$ ：參考輸入

$u(s)$ ：電壓命令

$n(s)$ ：外界干擾

$\theta(s)$ ：系統輸出

e ：參考輸入與系統輸出的誤差

圖 4-3 所示系統的位置信號回授一般有兩種作法，分別為使用光學編碼器和電位計，光學編碼器隨馬達之轉動產生一定之脈波頻率，藉由計數器計數脈波數以取得馬達的位置信號。電位計則利用分壓的概念，以 A/D 讀取電壓值取得絕對位置之檢出。藉由各關節直流馬達匹配之光學編碼器取得位置資料進行分析，求出受控系統的數學模型，以利於控制器之設計，如 PID 控制器和可變結構控制器…等[17]。

如果可以確切的知道所有的參數，如圖 4-1 所示，我們可以容易得到每個直流伺服系統的數學模型。然而，這並不是一件容易的事，如圖 4-2 所示，也許直流馬達的電器參數很容易檢查出，但其他力學參數，如 J_l, J_m, B_l, B_m ，非線性因數都很難以得到。對於一個未知系統進行控制時，雖然可經由嘗試錯誤法來決定控制參數，但無法進行準確的控制，因此在進行系統控制之前先進行系統識別是件重要的事情。因此，本論文採用實驗的方式來獲得近似的相關參數。如圖 4-3 所示，由於直流伺服系統簡化為二階系統模型，我們送出不同的步階命令 u 來控制直流伺服系統，對其做開迴路測試，將馬達從啟動瞬間達到穩定的速度，所得到的輸出進行穩態值以及時間常數的尋找，便可求出系統的一階模型，透過觀察和紀錄輸出響應曲線將獲得系統的

簡化數學模型，其可以表示為式(4.19) 其中 a, b 為正規值， $\Delta a, \Delta b$ 為相對的變動量

$$\frac{\omega(s)}{u(s)} = \frac{b \pm \Delta b}{s + (a \pm \Delta a)} \quad (4.19)$$

有許多的控制方案都可以達到性能的要求，如 PID 控制[18]、模糊控制[19]和可變結構控制…等。本論文採用 PID 控制器來實現步階響應。PID 控制器轉移函數為式(4.20)

$$G_C(S) = k_p + k_i \cdot \frac{1}{s} + k_d s \quad (4.20)$$

選擇合適的 k_p ， k_i 和 k_d 值將滿足性能要求。在此我們使用 Ziegler-Nichols 法，與手動調整做比較。先將系統建構在 Simulink 軟體上模擬，逐漸調整 k_p 參數值直到輸出產生週期性的持續震盪，此時的 k_p 稱為極限增益 k_u 。此時的震盪週期為 T_u 。則根據 Ziegler-Nichols 法則，最佳的 PID 控制器參數如(4.21)式所示

$$\begin{aligned} k_p &= \frac{k_u}{1.7} \\ k_i &= \frac{T_u}{2} \\ k_d &= \frac{T_u}{8} \end{aligned} \quad (4.21)$$

4.2 實驗驗證

當系統的數學模型建立後，接著就是規格的選取，不同的系統有

不同的工作性能要求，例如飛彈控制系統的設計著重在於機動性或靈敏性。但冷氣系統的恆溫控制，穩定性的要求可能就非常重要。一旦規格確定便可設計控制器或補償器來改善系統性能，利用控制理論來測試其性能是否能達預定目標。以下將依序說明利用開迴路測試求出各子系統的數學模型，以及依據所求得數學模型進行控制器參數的設計，最後以實測結果驗證所設計架構的可行性。

4.2.1 開迴路測試(Open-Loop System)

如圖 4-3 所示，分別於控制器的輸出 u 送出步階測試命令，並記錄 ω 的輸出，即可簡易的求出系統的 k_m, T_m 。由於手臂在不同位置時馬達的負載會隨著變動。因此進行系統識別時，要盡量於各種不同姿態時進行測試，以求出參數的正規值及變動量。圖 4-6 分別針對 M1~M4 軸進行開迴路測試，並顯示出部分的步階響應曲線。送出之測試信號一併示於圖示中， u 值為 PIC18 PWM 模組的輸出信號 0~1023，512 時馬達停止，0 及 1023 分別為正反轉的最大輸出功率。

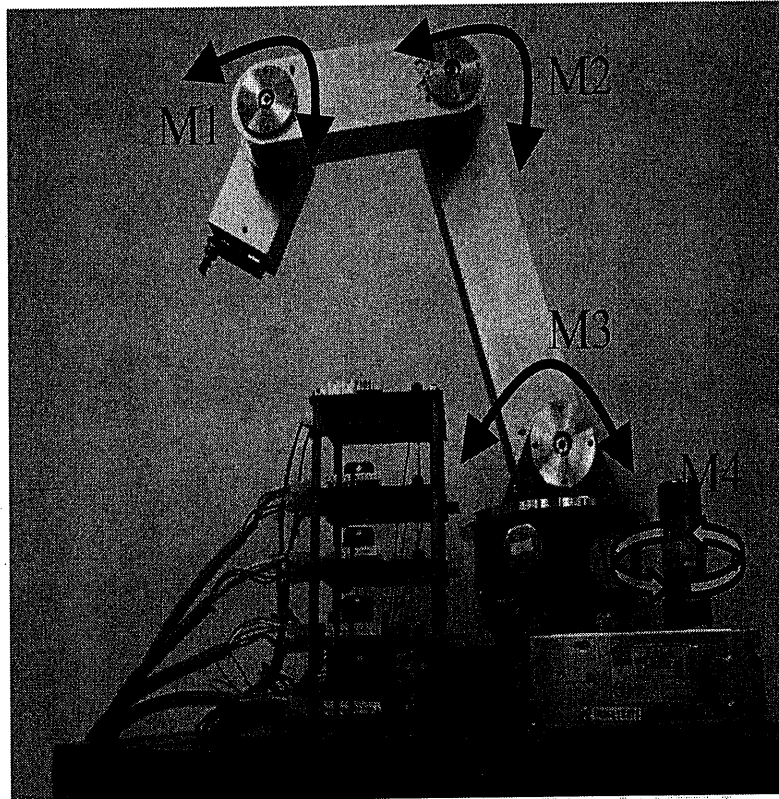


圖 4-4 關節機器人實體圖(圖中標示出 M1~M4)

實驗的關節型機器人如圖 4-4 所示。分別針對關節型機器人各軸直流馬達下達不同的步階命令 $u=23$ 、 $u=123$ 、 $u=223$ 、 \dots 、 $u=1023$ (本論文控制器採用 8-bit 微控器，所設計出來單位步階命令最大值為 $u=1023$)，然後將每一筆輸出曲線的資料儲存至 PIC 記憶體內，每 1ms 紀錄一筆回授資料，再將這些資料匯入 Excel 便可繪出在下達不同命令時的轉速曲線，依據圖 4-5 的響應曲線，將系統數學模型求出來，此時各軸的近似數學模型可以表示成公式(4.22)至(4.25)。

M1 子系統：

$$\frac{\omega(s)}{u(s)} = \frac{234.8 \pm 46.3}{s + (35.5 \pm 7.1)} \quad (4.22)$$

M2 子系統：

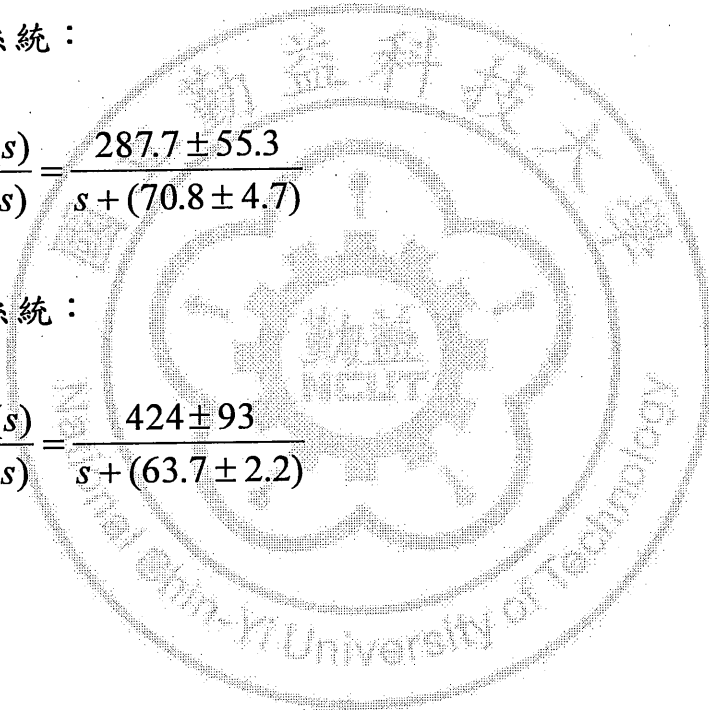
$$\frac{\omega(s)}{u(s)} = \frac{460.5 \pm 29.2}{s + (61.7 \pm 4.5)} \quad (4.23)$$

M3 子系統：

$$\frac{\omega(s)}{u(s)} = \frac{287.7 \pm 55.3}{s + (70.8 \pm 4.7)} \quad (4.24)$$

M4 子系統：

$$\frac{\omega(s)}{u(s)} = \frac{424 \pm 93}{s + (63.7 \pm 2.2)} \quad (4.25)$$



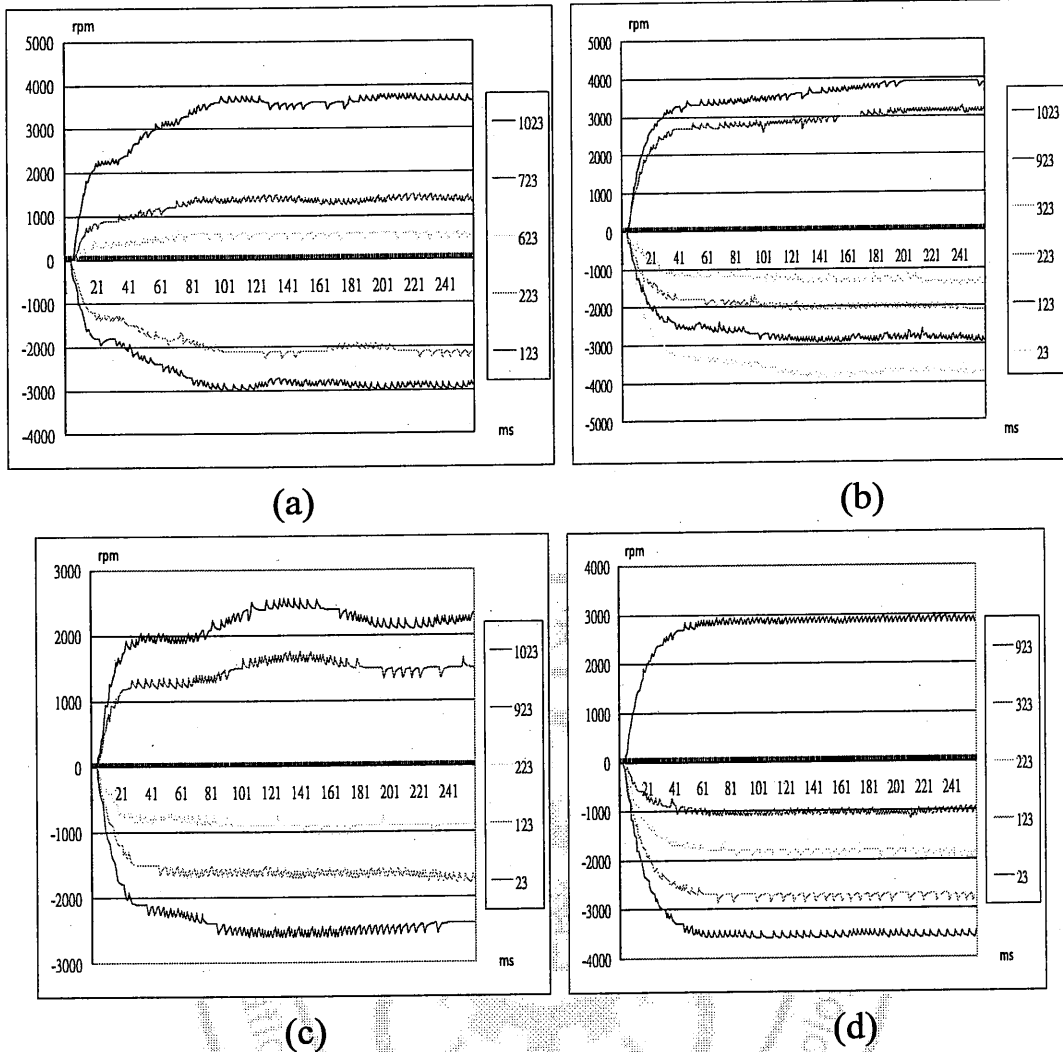


圖 4-5 M1 至 M4 子系統步階響應曲線

採用 Ziegler-Nichols 法和手動調整，所得到的 PID 控制器參數

相關列表如表 4-1 所示。

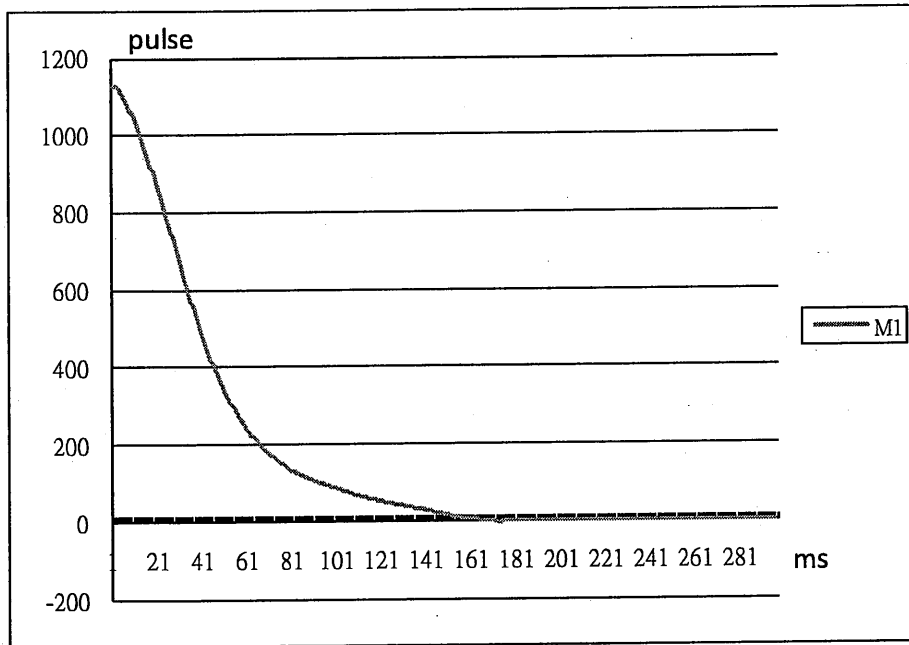
表 4-1 M1 至 M4 PID 控制器參數

	kp	ki	kd
M1	1.5	0.1	0.005
M2	1.8	0.08	0.004
M3	2	0.01	0.002
M4	3	0.05	0.01

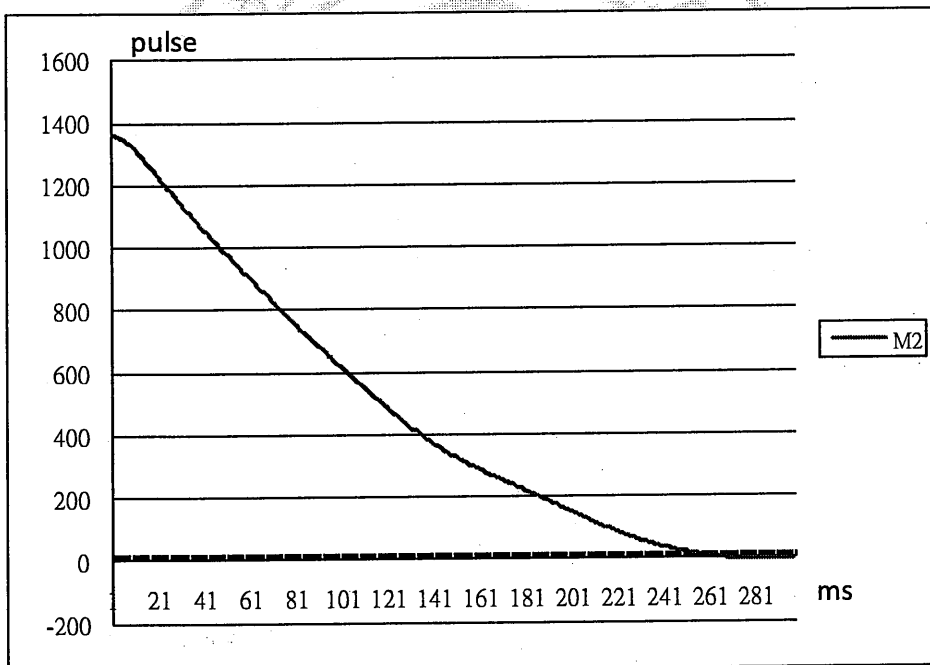
4.2.2 閉迴路測試(Closed-Loop System)

控制器計算出關節型機器人動作時所需之電壓或電流，然後送出訊號，給定一個位置命令或速度命令後，關節型機器人能自動追隨此一命令到達所指定之位置，在動作的過程中，系統的輸出訊號會有感測器的監視，感測器對關節型機器人的系統輸出做取樣調查，然後將其量測結果傳送至控制器，因為控制器知道主控制系統所下的實際動作，因此可依實際動作狀況做必要性的調整。在許多應用場合下，閉迴路的自我修正的特性佳，但是需要額外的硬體，閉迴路可以提供較可靠且重覆的運轉特性。此種系統占了控制系統中的大部分，因為能夠藉由回授訊號的修正，使關節型機器人能達到要求之目標位置，另外閉迴路控制系統還可以降低外界干擾對其輸出的影響，控制原本不穩定的系統並改善其響應效能。

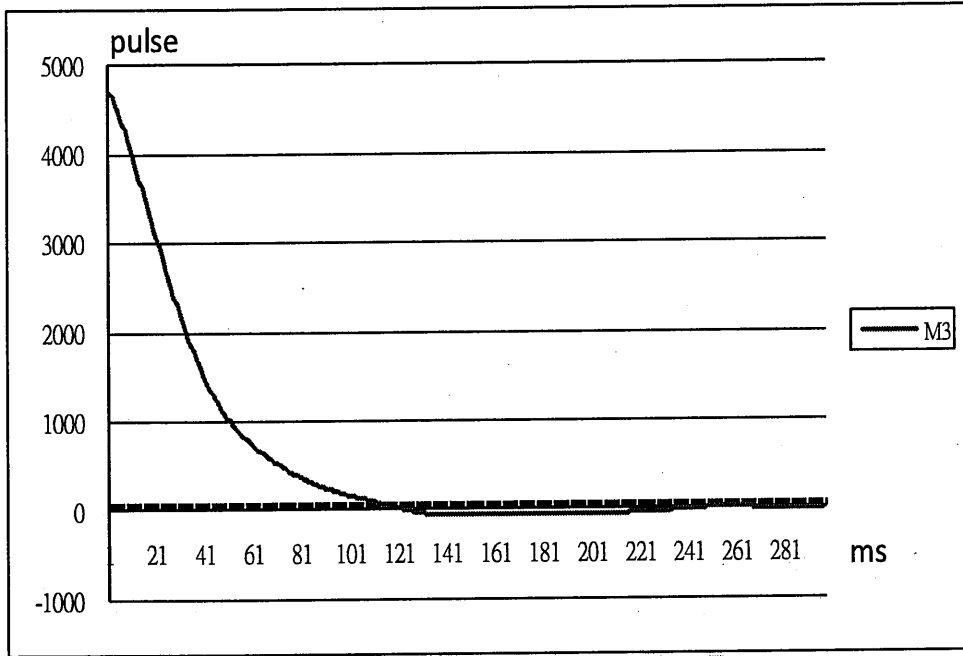
依據前述之控制器參數設計，以下針對各軸作單獨閉迴路測試，圖 4-6(a)至圖 4-6(d)中分別表示了 M1 到 M4 馬達，針對各軸下移動 10 度的位置命令，所得到的回授脈衝誤差曲線圖，圖 4-7(a)至圖 4-7(d)中分別表示了 M1 到 M4 馬達，針對各軸下移動 20 度的位置命令，所得到的回授脈衝誤差曲線圖。其中縱軸座標 pulse 為轉軸編碼器的脈衝數，本論文使用的轉軸編碼器解析度為 200 pulse/轉。



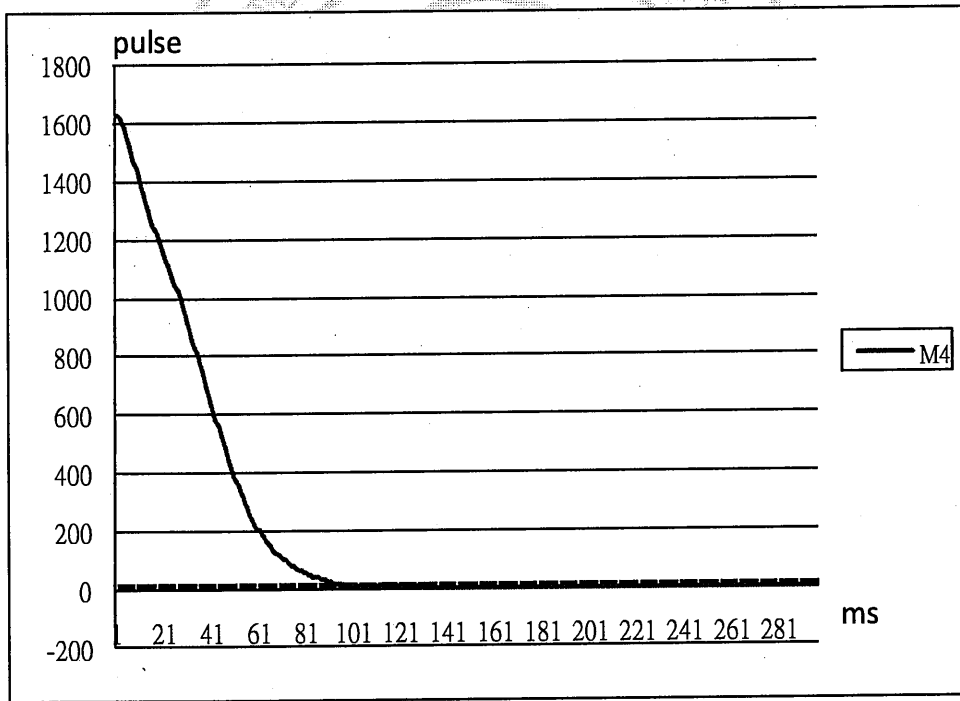
(a)



(b)

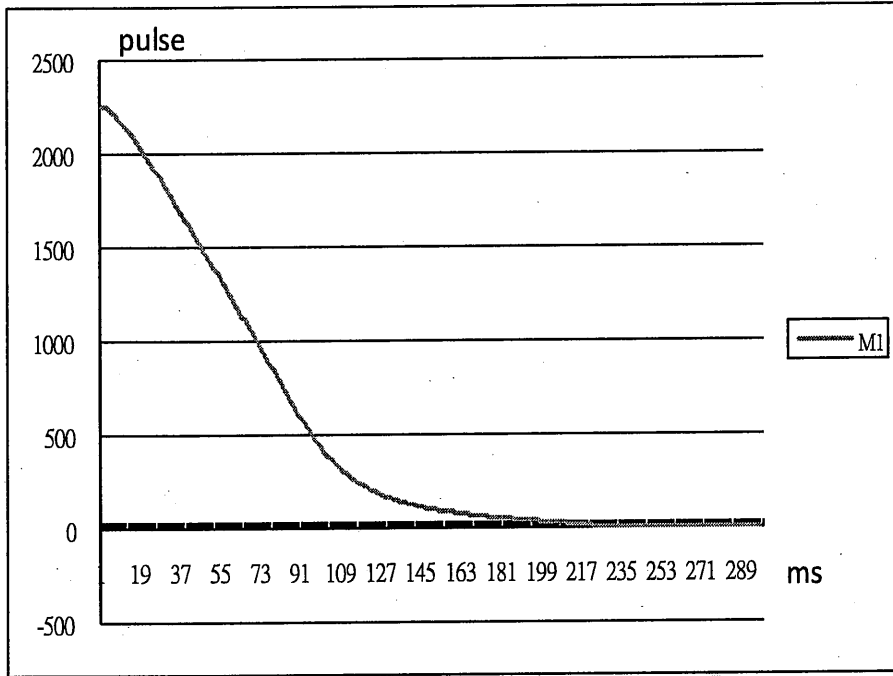


(c)

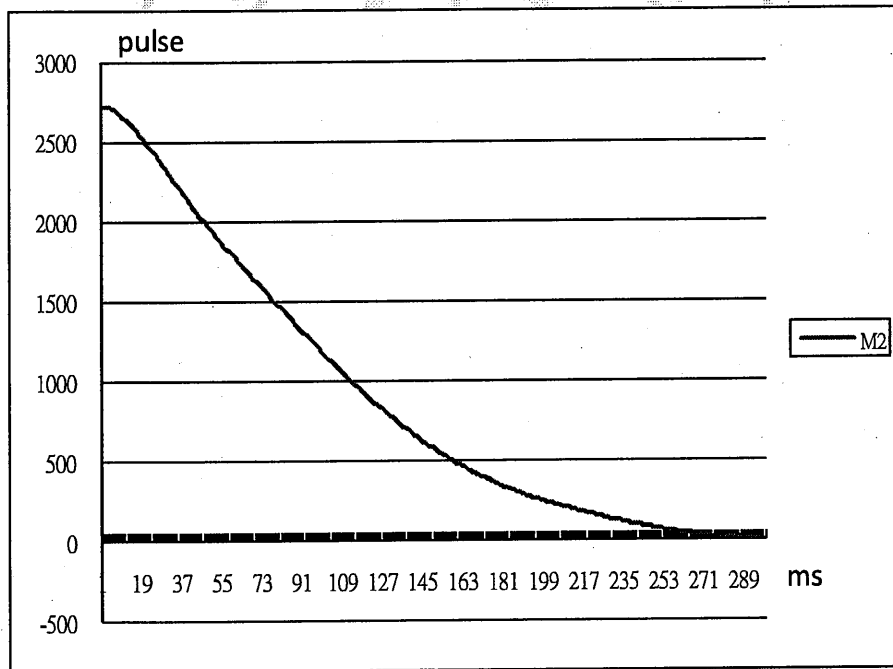


(d)

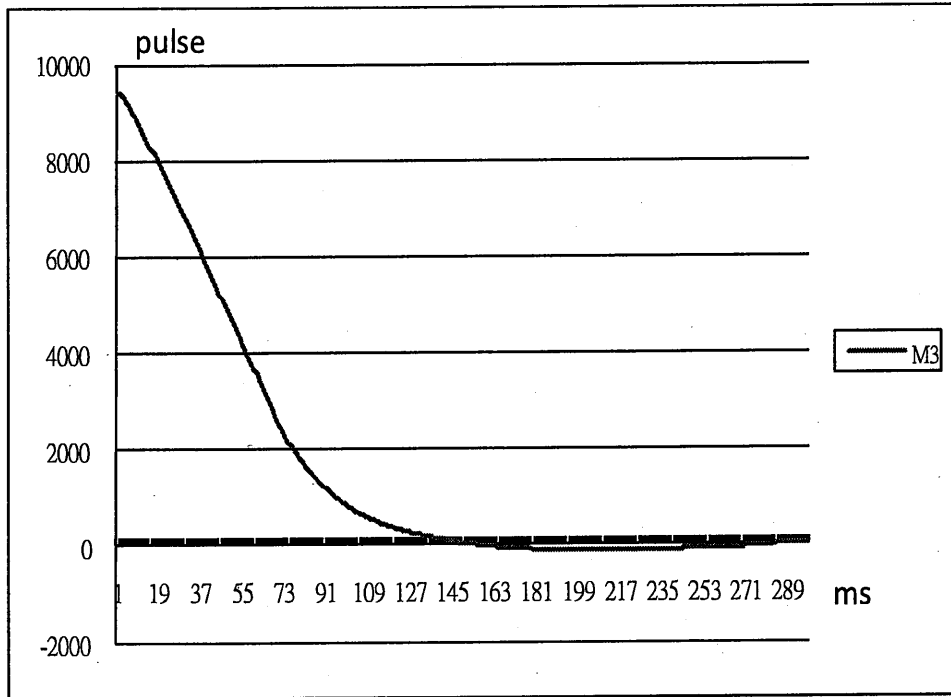
圖 4-6 10 度位置命令各軸誤差曲線



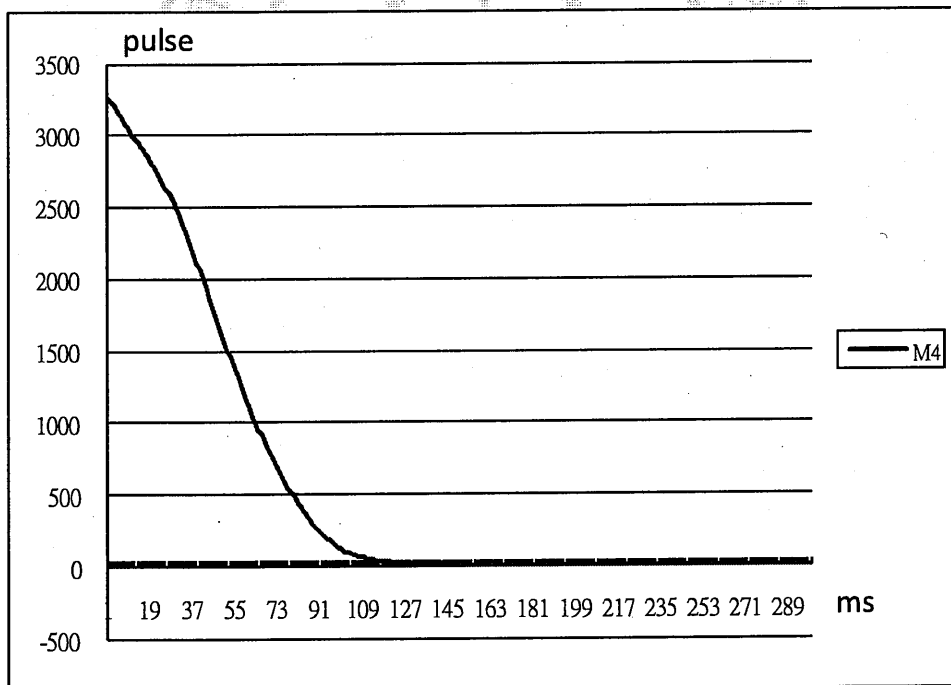
(a)



(b)



(c)



(d)

圖 4-7 20 度位置命令各軸誤差曲線

第五章 總結及未來發展

5.1 總結

本論文成功設計了一個 4 軸的關節型機器人，結合市售的減速機與直流馬達，再利用自行設計的零件組合一關節型機器人。主要目標並不是要求能達到像高科技廠所使用機械手臂，需要非常高的精確度與精準度，而是希望能使用在不需高精準度的博弈產業，或是一次性的危險行業，如從事爆破或挾取核廢料等危險物質。這些行業所需的動作都非常簡便，因此也不需要非常龐大的機構設計，自行開發設計的關節型機器人較市面上販賣之機械手臂來的便宜，實驗結果也表明了，使用 I²C 通信方式及自行開發的分散式電控系統設計，大大提高了系統的靈活性，使它的體積變的更小接線變的更加簡單，可以很容易擴展到不同的關節型機器人上。

5.2 未來發展

隨著半導體製程的技術改良，微控制晶片的封裝逐漸邁向高密度、小型化及多接腳數的設計方向發展，且內部功能日益增強，可提升更多控制相關功能需求。在本論文的研究中，關於直流伺服馬達的控制，最後利用輸入位置命令來測試，其馬達的位置隨著命令變化，且誤差修正到最小。其應用於關節型手臂的控制，仍然有許多方面需

要改善與提升功能使其更加完善。其敘述如下：

- (1)在機構裝設方面：其關節型機器人前端，目前所裝設為一個吸盤，如要能更快的更換工作端之物件，如夾爪、點焊、裁切刀具…等直接工作物件，在機構設計時應該更模組化，讓使用者能更迅速換好所需之工作物件。
- (2)在機構保護方面：對於旋轉座的轉動極限，尚未裝設轉動極限的保護裝置。若不正常干擾訊號出現，使其位置命令已超出旋轉的轉動極限，轉動超出極限而造成機構上的損壞或損毀。故未來還須加裝極限保護裝置較為妥當。
- (3)在系統操作方面：若系統加入人機介面，將人機介面透過網路的傳輸，讓遠端的使用者可輕易的監控現場的情況。不但建立一種人與機器能簡易溝通的介面，還可以增設許多的功能，例如：參數的調整、遠端操作、儲存資料和顯示即時的數值…等功能。

參考文獻

- [1] Japan Robot Association , “Summary report on technology strategy for creating a “Robot Society “in the 21ST century”, MAY 2001 .
- [2] Yaskawa, “TSE-S800-6H Data Sheet”, 1997.
- [3] Denso, ”Denson-book-rc7m Data Sheet”, 2010.
- [4] Mitsubishi, “Melfa RV-3SD/3SDJ Data Sheet”, 2011.
- [5] Karel Capek, ”Rossum’s Universal Robots”, *Czech Republic*, 1920.
- [6] 溫家俊、張義發、李廣齊，工業機器人，高立圖書有限公司，1995 年。
- [7] 江金隆，”有桿機械手設計與分析”，國立高雄第一科技大學碩士論文，92 年 7 月。
- [8] 滕步旭、謝章嘉、吳澤松、吳向宸，”馬達減速機能源效率檢測實驗室建立與測試分析”，機械工業雜誌第 331 期 2010 年 10 月號。
- [9] Shayang Ye, ”IG-42GM 01&02 TYPE Data Sheet”, 2010.
- [10] 洪芳州，電動機技術應用百科，1996。
- [11] 葉明財，小型馬達活用技術，1995。
- [12] 江耀宗、林崇賢，機器人原理與系統，全華科技圖書股份有限公司，1991 年 11 月。
- [13] Microchip, “PIC18F86520/8520/6620/8620/6720/8720 Data

Sheet”, 2004.

- [14] Paret, Dominique, Carl Fenger, ” The I²C bus”, *Chichester New York*, 1997.
- [15] Microchip, ”I²C Data Sheet”, 2011.
- [16] SGS-THOMSON, ”L6201/L6201P/L6202-L6203 Data Sheet”, 1995.
- [17] 陳順在, ”真空系統射頻電漿阻抗匹配器設計之研究”, 勤益科技大學電機工程系碩士論文, 97年7月。
- [18] Hassan B. Kazemian, ”The SOF-PID controller for the control of a MIMO robot arm”, *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 10, no.4, pp.523-532, Aug. 2002.
- [19] Hassan E. Kazemian, ”Development of an intelligent fuzzy controller”, *IEEE inter. Fuzzy Syst conf.*, pp.517-520, 2001.

作者簡歷

姓名：陳家偉(Chia-Wei Chen)

出生日期：民國 69 年 11 月 27 日

籍貫：台中市

學歷：

國立勤益科技大學 電機工程研究所 (98.9~100.8)

國立勤益科技大學 電機工程系 (95.9~97.6)

私立南開技術學院 電機工程科 (87.6~89.9)

論文著作：

- Chin-Pao Hung, Jia-Wei Chen, You-Cheng Lai, "PIC-Based Electrical Control System Design of Jointed Robot Using I²C Communication Protocol", *ILT2001*.