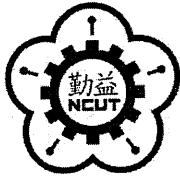


DT  
448.6  
4422.3  
100  
225318



國立勤益科技大學  
電子工程系研究所  
碩士論文

以串列封包傳輸之模組化應用於機械手臂  
之運動設計與控制

**The Module of Serial Packet Transmission  
Applied to Design and Motion Control of Robot  
Arm**

研究生：蕭順徽

指導教授：蕭順徽 博士



中華民國 一 百 年 七 月

國立勤益科技大學圖書館



225318

以串列封包傳輸之模組化應用於機械手臂  
之運動設計與控制

**The Module of Serial Packet Transmission  
Applied to Design and Motion Control of Robot  
Arm**

研究生：蕭順徽

指導教授：黃國興 博士

國立勤益科技大學

電子工程系研究所

碩士論文

Submitted in partial fulfillment of the requirements  
For the degree of  
Master of Engineering  
In  
Institute of Electronic Engineering  
from the National Chin-Yi University of Technology  
July 2011  
Taiping, Taichung, Taiwan, Republic of China

中華民國 一 百 年 七 月

# 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子工程系 99 學年度第二學期取得碩士學位之論文。

論文題目：以串列封包傳輸之模組化應用於機械手臂之運動設計與控制  
指導教授：黃國興

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 105 年 8 月 28 日後再將上列論文公開或上載網路。

授權人：蕭順徽

親筆簽名及蓋章： 蕭順徽

民國 100 年 8 月 31 日

電話：\_\_\_\_\_ 傳真：\_\_\_\_\_  
聯絡地址：桃園縣八德市富城街32號  
E-Mail：q112744@yahoo.com.tw

# 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  
電子工程系 電 組 99 學年度第 二 學期取得碩士學位之  
論文。

論文題目：以串列封包傳輸之模組化應用於機械手臂之運動設計與  
控制

指導教授：黃國興

### ■ 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	■ 立即公開
校外網際網路	■ 中華民國 105 年 8 月 28 日公開

授權人：蕭順徽

簽名：蕭順徽

中 華 民 國 100 年 8 月 31 日

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 電子工程系研究所 碩士班 蕭順徽 君

所提論文 以串列封包傳輸之模組化應用於機械手臂  
之運動設計與控制

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：許佳興

委員：黃國興

謝龍徽

許佳興

指導教授：黃國興

所

長：

電子工程系  
主任 林熊徵

中華民國 一 百 年 七 月

# 以串列封包傳輸之模組化應用於機械手臂 之運動設計與控制

學生：蕭順徽

指導教授：黃國興 博士

國立勤益科技大學電子工程系研究所

## 摘要

本論文旨在設計伺服系統架構，建立自訂封包傳輸格式，並建立模組化同時應用於機械手臂之運動設計與控制。首先完成 Robotis 公司所生產的 AI 伺服馬達 (RX-64)，探討內部的伺服系統與制式的封包傳輸格式，並設計五個自由度的機械手臂機構，求出逆向運動學的角度解。接著，第二個系統採用 Faulhaber 公司生產的有刷直流馬達，包含減速機及光學編碼器，根據 AI 伺服馬達 (RX-64) 伺服架構，去建立直流伺服馬達的伺服系統並自訂封包傳輸格式，設計成五個自由度的雙手臂機構，安裝至點餐服務型機器人。透過機器人上的雙眼視覺系統的影像擷取結果，根據機械手臂的正向運動學，求出末端效應器的座標位置，再用逆向運動學求出角度解，依序移動軸關節，將末端效應器移動至目標物的座標。最後本論文成功將自訂串列封包傳輸的格式，應用於不同規格的直流馬達，使伺服控制上獲得穩定及便利性。

# **The Module of Serial Packet Transmission Applied to Design and Motion Control of Robot Arm**

Student: Shun-Hui Hsiao    Advisor: Dr. Guo-Shing Huang

Institute of Electronic Engineering  
National Chin-Yi University of Technology

## **Abstract**

This thesis aims to design servo systems architecture, create a custom packet transmission format, had be applied to the motion design and control of module robot arm. The study is beginning from the Robotis company produced AI servo motor (RX-64), explore an internal servo system and the packet transmission format with standard, and design five-degree of freedom robot arm structure, find the angular solutions of inverse kinematics. Then, the second system uses Faulhaber company produced brush DC motors, including gears and optical encoders. According to the servo system architecture of AI servo motor (RX-64), set up the servo system and custom design the packet transmission format, design a five DOF dual arm body, install it in the service robot. Through the robot's binocular vision system and image capture results, according to the forward kinematics of robot arm, find the coordinates of End-effectors, and then find the angular solutions of inverse kinematics, in turn move the joints, End-effectors will move to the coordinates of the target. This thesis successfully achieves to design a serial packet transmission format to be applied to DC motors of different specifications, make a servo control stable and convenient.

## 誌 謝

感謝指導教授黃國興博士，這兩年多來的敦敦教誨與悉心指導，以及給予充足的研究資源，使得本論文得以順利完成，並感謝口試委員許佳興博士與謝韶徽博士給予本論文之寶貴意見與悉心指正，使本論文益臻完善。

兩年裡的日子，實驗室裡共同的生活點滴，學術上的討論、趕作業的革命情感，感謝朱銘傑、高劭銓、陳柏承同儕的共同砥礪，你/妳們的陪伴讓兩年的研究生活變得絢麗多彩，感謝學長鍾毅宏、沈育龍與林耕志在研究期間給予的指導與幫助，使我受益匪淺，以及學弟羅仁彰、周冠榮、賴昱辰、葉文揚，在朝夕相處、相互勉勵下，使學習和思考方不斷的獲得成長，研究生活能多采多姿。再次誠心感謝學弟羅仁彰，無要求任何報酬，並大力協助幫忙研究，才得以順利畢業。

最後，謹將此碩士學位及論文獻給我最摯愛的雙親，以及很照顧我的大舅，感謝你們給我不虞匱乏的生活，以及全體家族在學業上對我的支持。再次感謝所有關心我的人，願你們與我分享這份喜悅和榮耀。

順徽 謹誌於

國立勤益科技大學電子工程系研究所



## 目 錄

中文摘要 .....	I
英文摘要 .....	II
誌 謝 .....	III
目 錄 .....	IV
圖目錄 .....	VI
表目錄 .....	VIII
<b>第一章 緒論 .....</b>	<b>1</b>
1.1 研究動機與目的 .....	1
1.2 文獻回顧 .....	2
1.3 論文架構 .....	3
2.1 AI-ROBOT ARM 實驗系統架構 .....	5
2.1.1 筆記型電腦 (NB) .....	5
2.1.2 AI 伺服馬達與傳輸介面 .....	6
2.1.3 AI-Robot Arm 與平台機構設計 .....	9
2.2 DC-ROBOT ARM 研究系統架構 .....	12
2.2.1 電腦 .....	13
2.2.2 直流伺服馬達 .....	14
2.2.3 控制器 .....	16
2.2.4 DC-Robot Arm 設計與機器人平台 .....	22
<b>第三章 機械手臂運動學分析 .....</b>	<b>26</b>
3.1 座標系轉換 .....	27
3.2 連桿參數與座標 .....	28
3.3 機械手臂正向運動學分析 .....	31
3.4 機械手臂逆向運動學分析 .....	36
<b>第四章 伺服控制系統與動作決策 .....</b>	<b>45</b>
4.1 光學編碼器應用原理 .....	45
4.2 脈波寬度調變 .....	49
4.3 封包傳輸格式設計 .....	52
4.4 影像訊號擷取結果 .....	57
4.5 機械手臂動作決策 .....	60
<b>第五章 實驗結果 .....</b>	<b>66</b>
5.1 操作介面 .....	66
5.2 機械手臂動作模擬分析 .....	68

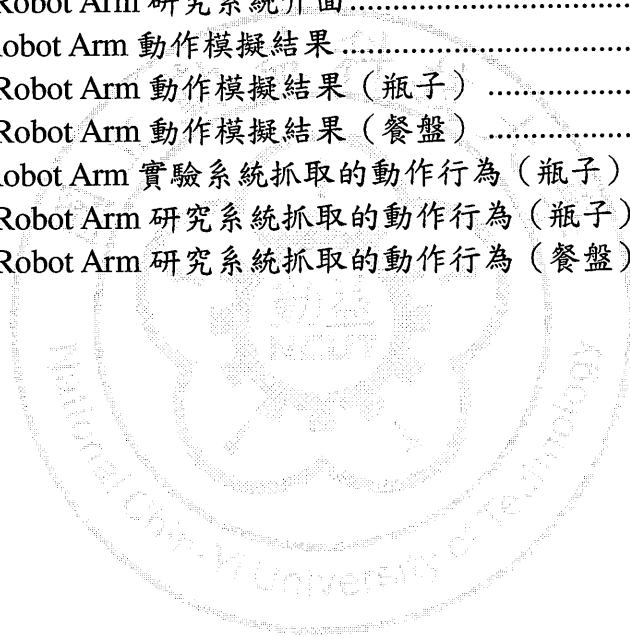
5.3 機械手臂系統實驗結果 .....	81
第六章 結論與未來展望 .....	86
6.1 結論.....	86
6.2 未來展望.....	87
參考文獻 .....	88
作者簡介 .....	91



## 圖目錄

圖 2.1	機械手臂伺服系統架構方塊圖.....	4
圖 2.2	AI-Robot Arm 實驗系統架構.....	5
圖 2.3	筆記型電腦.....	6
圖 2.4	RX-64 伺服馬達外觀.....	6
圖 2.5	USB2Dynamixel 通訊介面外觀.....	8
圖 2.6	AI-Robot Arm 外觀設計圖.....	10
圖 2.7	AI-Robot Arm 實驗系統平台外觀設計.....	11
圖 2.8	機器人系統核心架構方塊圖.....	12
圖 2.9	DC-Robot Arm 研究系統架構.....	13
圖 2.10	各部位馬達馬達外觀.....	16
圖 2.11	PIC 單晶片實體圖.....	17
圖 2.12	PIC 單晶片腳位圖.....	18
圖 2.13	Pololu 馬達驅動器.....	19
圖 2.14	單軸控制器模組.....	20
圖 2.15	單軸 H 型驅動電路.....	21
圖 2.16	單軸 H 型控制器模組.....	21
圖 2.17	DC-Robot Arm 外觀設計圖.....	23
圖 2.18	點餐服務型機器人主體架構.....	25
圖 3.1	運動學的對應關係方塊圖.....	26
圖 3.2	座標轉換圖.....	28
圖 3.3	Danevit-Hartenberg 標記法.....	29
圖 3.4	各系統的關節編號.....	32
圖 3.5	機械手臂共同座標系.....	32
圖 3.6	末端效應器映射於基底座標.....	35
圖 3.7	MATLAB 模擬正向運動學結果.....	43
圖 3.8	MATLAB 模擬逆向運動學結果.....	44
圖 4.1	光學編碼器結構.....	46
圖 4.2	光學編碼器訊號.....	46
圖 4.3	光學編碼器正反轉訊號.....	47
圖 4.4	馬達正轉訊號.....	47
圖 4.5	馬達正反轉計數時序圖.....	48
圖 4.6	脈寬調變的脈衝週期及工作週期時間.....	49
圖 4.7	PWM 模式的結構示意圖.....	50

圖 4.8	攝影機座標系統 .....	57
圖 4.9	攝影機座標軸定義 .....	58
圖 4.10	目標物 .....	58
圖 4.11	AI-Robot Arm 實驗系統動作流程圖 .....	61
圖 4.12	AI-Robot Arm 實驗系統動作分解 (瓶子) .....	62
圖 4.13	DC-Robot Arm 研究系統動作流程圖 .....	63
圖 4.14	DC-Robot Arm 研究系統動作分解 (瓶子) .....	64
圖 4.15	DC-Robot Arm 研究系統動作分解 (餐盤) .....	65
圖 5.1	AI-Robot Arm 實驗系統介面 .....	67
圖 5.2	DC-Robot Arm 研究系統介面 .....	67
圖 5.3	AI-Robot Arm 動作模擬結果 .....	72
圖 5.4	DC-Robot Arm 動作模擬結果 (瓶子) .....	77
圖 5.5	DC-Robot Arm 動作模擬結果 (餐盤) .....	80
圖 5.6	AI-Robot Arm 實驗系統抓取的動作行為 (瓶子) .....	82
圖 5.7	DC-Robot Arm 研究系統抓取的動作行為 (瓶子) .....	84
圖 5.8	DC-Robot Arm 研究系統抓取的動作行為 (餐盤) .....	85



## 表目錄

表 2.1	RX-64 伺服馬達規格 .....	7
表 2.2	USB2Dynamixel 規格 .....	8
表 2.3	各部位馬達型號與規格表 .....	14
表 2.4	Pololu 馬達驅動器規格表 .....	20
表 3.1	DH 共同連桿參數表 .....	33
表 3.2	運算步驟表 .....	41
表 4.1	RX-64 控制封包的格式 .....	52
表 4.2	DC-Robot Arm 研究系統單軸馬達控制之封包格式 .....	53
表 4.3	D_INRC 封包欄位格式 .....	54
表 4.4	DC-Robot Arm 研究系統控制運動指令之封包格式 .....	54
表 4.5	封包欄位表示式 .....	54
表 4.6	攝影機座標 .....	59
表 5.1	AI-Robot Arm 點對點運動實驗資料 .....	68
表 5.2	DC-Robot Arm 點對點運動實驗資料 (瓶子) .....	73
表 5.3	DC-Robot Arm 點對點運動實驗資料 (餐盤) .....	73

# 第一章 緒論

## 1.1 研究動機與目的

全球科技的進步，機器人的用途類型繁多，包含產業型的機器人，多娛樂型機器人，以及服務型機器人等許多類型的機器人。其中，機器人的整體機構中，機械手臂具有相當重要的地位，依機械手臂的型式、功能，運動速度以及精度需求也隨著應用的功能而各有不同，如寫字，拿起瓶子或是搬桌椅等多種以上的應用，因此，機械手臂的機構設計與運動學等相關研究至今仍持續不斷進行。在機械手臂的基本控制不外乎就是伺服控制，其控制架構為馬達，減速機，編碼器和控制晶片等所組成。近年來很多公司將此控制架構封裝成獨立的伺服系統，例如首具代表性韓國 Robotis 公司[1]在 2006 年發佈型號為 RX-64 的 AI 伺服馬達，已成為許多各學術研究單位最常用的伺服馬達，優點體積小，扭力比一般同規格的伺服馬達大，可組裝式框架，且此伺服馬達有制式的資料封包傳輸格式，資料傳遞過程中能夠避免失真、延遲或是受干擾，只要格式不對就重新接收封包，直到收到正確的封包格式，可確保資料正確與完整性。因此，本論文嘗試以設計伺服系統架構，建立自訂封包傳輸格式，並模組化應用於機械手臂之運動設計與控制。

## 1.2 文獻回顧

近年來，對於研究機械手臂的運動學及軌跡規劃的文獻非常多，如 Danevit and Hartenberg 方法於 1955 年所提出的表示法建立座標系統[2]，運動學方程[3][4][5][6]，軌跡規劃[7]，雅可比矩陣[8]等等，而運動學方程的應用最為廣泛，也是最重要的環節，不僅是建立機械手臂的連桿模型，可得知機械手臂的位置與角度分析，在機械手臂控制中是不可或缺的一項學門。

機械手臂之回饋與控制訊號來自關節旋轉角度，而其應用端為末端效應器之空間位置，是必須有逆向運動學之推導以配合控制器運作。說明機械手臂機構運動學推導方式[3]，是根據末端效應器相對於基座座標為基礎，藉由乘上反矩陣的方式來推導獲得逆向運動學方程式。原先機械手臂控制器的發展是利用系統之動力學及目標軌跡計算各軸所需的扭力，稱為力矩控制法[9][10]，雖然對動力學已知的系統使用力矩控制法有很優異的控制方法，然而機械手臂的動力學並求得不易，而且使用力矩控制法較不具彈性、不確定性也高。因此，本論文研究為運動學的控制方法[8]，解決機械手臂動力學複雜不易求得的不便。

### 1.3 論文架構

本論文分成六個章節，本章節說明本論文的研究動機與目的及其它相關研究之發展。第二章是系統架構的介紹，說明兩個機械手臂系統的硬體架構和功能，以及使用工程製圖軟體設計出機械手臂機構。第三章為機械手臂運動學的分析，說明機械手臂的數學模型和運動學相關公式，包含正向運動學和逆向運動學，以及求出各關節角度和末端效應器的座標位置。第四章為伺服控制系統與動作決策，針對機械手臂伺服系統設計方法，建立自訂封包傳輸格式，以及使用雙眼視覺系統的影像擷取資料，應用於機械手臂的動作決策的流程。第五章為兩個機械手臂的實驗結果，首先使用 MATLAB 軟體模擬機械手臂的動作行為，再根據模擬後的資料以實際操作機械手臂的結果展示。最後，第六章為結論與未來展望，對於本論文之研究結果做總結，探討未來研究方向和系統之改進。



## 第二章 系統架構

本論文有兩大機械手臂伺服系統架構來進行說明如圖 2.1 所示，分別是 AI 伺服馬達及直流馬達所各別組裝的機械手臂。首先介紹伺服系統主要架構，接在第一小節介紹 AI-Robot Arm 實驗系統主要包含筆記型電腦、AI 伺服馬達與機械手臂機構等；第二小節將一一介紹 DC-Robot Arm 研究系統，此系統主要安裝至點餐服務型機器人平台上，藉由第一小節架構概念建立以串列封包傳輸之模組化伺服系統。

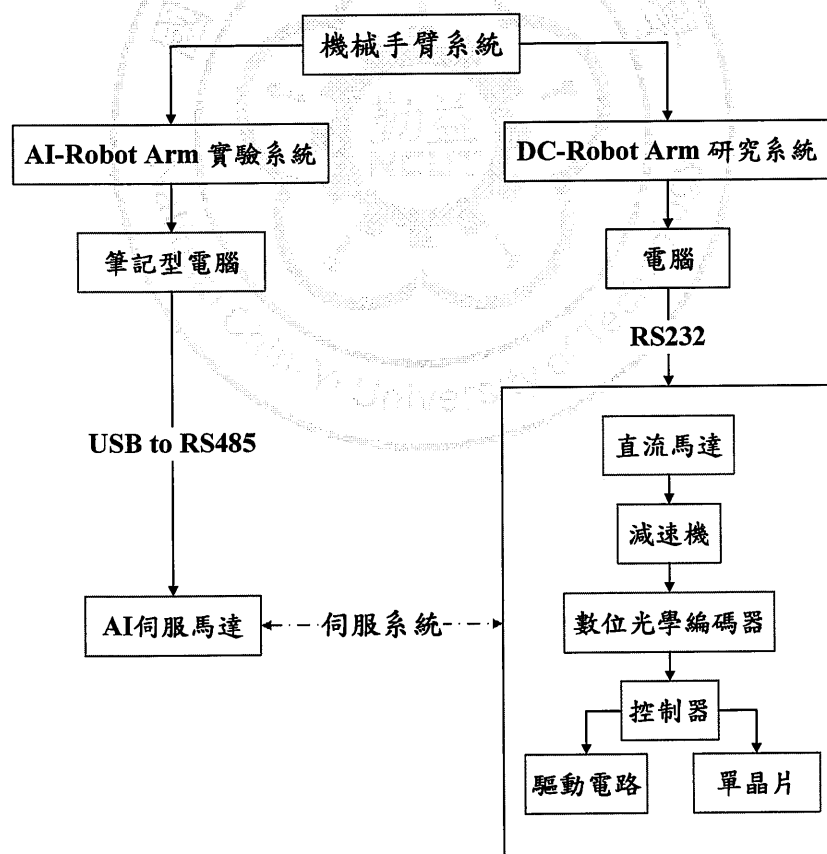


圖 2.1 機械手臂伺服系統架構方塊圖

## 2.1 AI-Robot Arm 實驗系統架構

本節系統以筆記型電腦為核心，且將數位控制訊號送至 USB2 Dynamixel 通訊介面以 RS-485 通訊方式驅動各軸 AI 伺服馬達 RX-64，並由馬達內部的控制晶片偵測各軸馬達位置訊號，以完成閉迴路控制如圖 2.2 所示。其功能包括 (1) 運動學模型設計；(2) 控制資料以封包傳輸分析；(3) 執行機械手臂操作。

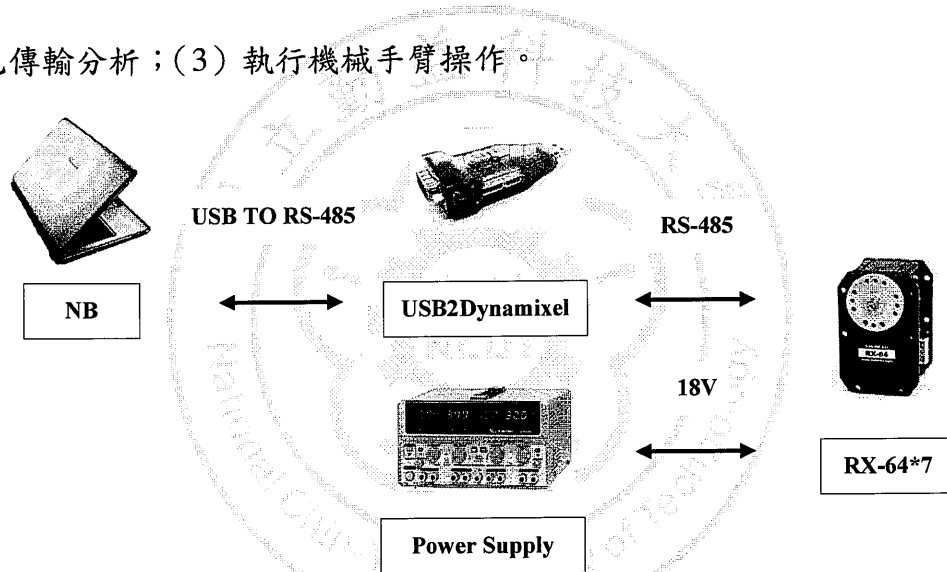


圖 2.2 AI-Robot Arm 實驗系統架構

### 2.1.1 筆記型電腦 (NB)

NB 如圖 2.3 所示型號為 ASUS F8，採用作業系為 Windows Vista，規格配置 CPU 為 Intel Core2 2.40GHz，RAM 為 2.00GB。主要負責 Borland C++ 軟體的介面開發，對 AI-Robot Arm 實驗系統以封包的方式下達控制訊號及運動學分析處理，包含正向運動學、逆向運動學及

機械手臂動作行為演算法。

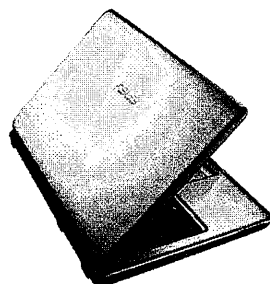


圖 2.3 筆記型電腦

### 2.1.2 AI 伺服馬達與傳輸介面

- AI 伺服馬達

此系統上的 AI 伺服馬達採用 Robotis 公司生產 RX-64 伺服馬達所組裝機械手臂，AI 伺服馬達內部含金屬齒輪、微型馬達、編碼器及控制晶片如。它不僅提供一種的控制模組如位置及速度等，也保護核心的安全如溫度及扭力檢測。此外，可執行串列傳輸 2400 至 1M 鮑率和回饋位置、速度、負荷、電壓、溫度等訊號，如圖 2.4、表 2.1 所示。

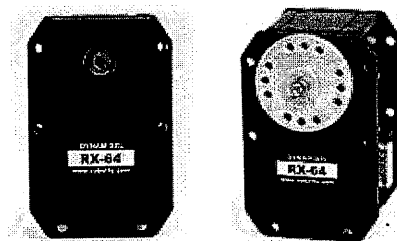


圖 2.4 RX-64 伺服馬達外觀

表 2.1 RX-64 伺服馬達規格

<b>Specification</b>	RX-64	
<b>Weight (g)</b>	125	
<b>Dimension (mm)</b>	40.2 x 61.1 x 41.0	
<b>Gear Reduction Ratio</b>	1/200	
<b>Applied Voltage (V)</b>	At 15V	At 18V
<b>Final Reduction Stopping Torque (kgf.cm)</b>	64.4	77.2
<b>Speed (Sec/60 degrees)</b>	0.188	0.157
<b>Resolution</b>	0.29°	
<b>Running Degree</b>	300°, Endless turn	
<b>Voltage</b>	12~21V (Recommended voltage:18V)	
<b>Max current</b>	1200mA	
<b>Running Temperature</b>	-5°C ~ +85°C	
<b>Command Signal</b>	Digital Packet	
<b>Protocol</b>	RS485 Asynchronous Serial Communication (8bit, 1stop, No Parity)	
<b>Link (Physical) R</b>	RS485 Multi Drop Bus	
<b>ID</b>	254 ID (0~253)	
<b>Communication Speed</b>	7343bps ~ 1 Mbps	
<b>Standby Current</b>	50 mA	

● 通訊介面

一般 NB Base 最常使用的傳輸介面為 USB2.0 介面，而 RX-64 伺服馬達內部控制晶片則是 RS485 串列傳輸介面，因此採用 Robotis 公司生產 USB2Dynamixel 通訊介面如圖 2.5 所示，操作於 RX-64 伺服

馬達與電腦之間的溝通。此介面有 USB2.0 To Serial 介面可連接到電腦，以及 3P 和 4P 接頭的安裝，使 RX-64 伺服馬達可以連接。所以 NB Base 與 AI-Robot Arm 之間資料傳輸均由 USB2Dynamixel 通訊介面負責轉換處理，其中傳輸介面規格如表 2.2 所示。

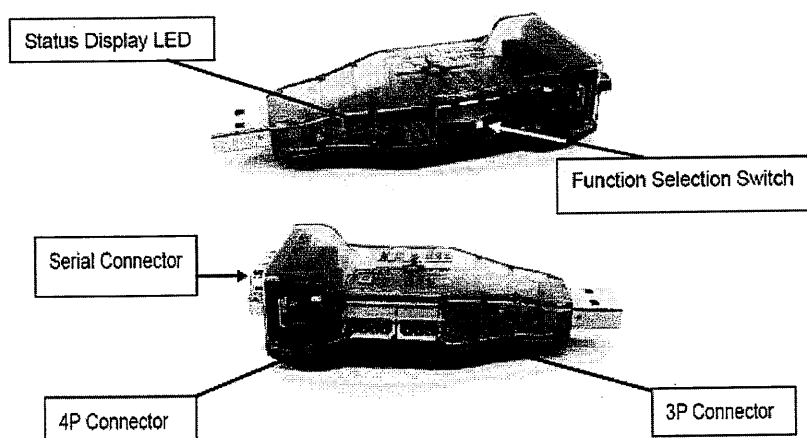


圖 2.5 USB2Dynamixel 通訊介面外觀

表 2.2 USB2Dynamixel 規格

Name	Description
Status Display LED	Display power supply, TXD (data writing), and RXD (data reading) status.
Function Selection Switch	Select the communication method of TTL, RS'485, and RS'232.
3P Connector	Connect Dynamixels of AX Series through TTL communication.
4P Connector	Connect Dynamixels of DX, RX Series through RS'485 communication.
Serial Connector	Change from USB port to Serial port through RS'232 communication.

### 2.1.3 AI-Robot Arm 與平台機構設計

- AI-Robot Arm 機構設計

本研究運用順向運動學來驅動五軸機械手臂，為了使建構的五軸機械手臂能像人類般手部移動，因此我們以人類手臂為基礎模型，也就是將五軸機械手臂的關節數目依照人類的關節數目來設立，這樣除了可以使機械手臂擬人化，另外還有個好處，就是可以簡化手部移動的條件限制。在機械手臂的結構中共有七個 AI 伺服馬達組所裝成五軸自由度，分別有基座 (Base)、肩關節 (Shoulder Joint)、上臂 (Upper Arm)、肘關節 (Elbow Joint)、下臂 (Lower Arm)、腕關節 (Wrist Joint)，以及最後控制夾爪的動作是不具自由度的末端效應器 (End-effector)。使用 SolidWorks 工程繪圖軟體來設計五軸機械手臂，機構材質採用容易加工的鋁材質，機械手臂機構尺寸為肩膀及基座長 240mm，上臂長 320mm，下臂長 410 mm，重量約為 2.5kg，可夾持 300 至 400g 的重物如圖 2.6 所示。

- 平台機構設計

該平台機構共分為系統層、工作層及操作層三層，平台機構為長 500mm×寬 500mm×高 800mm 所組裝而成，各層板間的連結則選用鋁

合金材質的鋁擠型柱來做支撐與銜接，鋁擠型柱的長度規格是40mm×40mm。層板材質為木板，大小為長500mm×寬500mm×厚15mm，使空間夠擺放筆記型電腦(NB)及體積較大的電源供應器(Power Supply)，能使平台的剛性更為穩固，如圖2.7所示以下將分別介紹機構設計及各層板的硬體擺設。

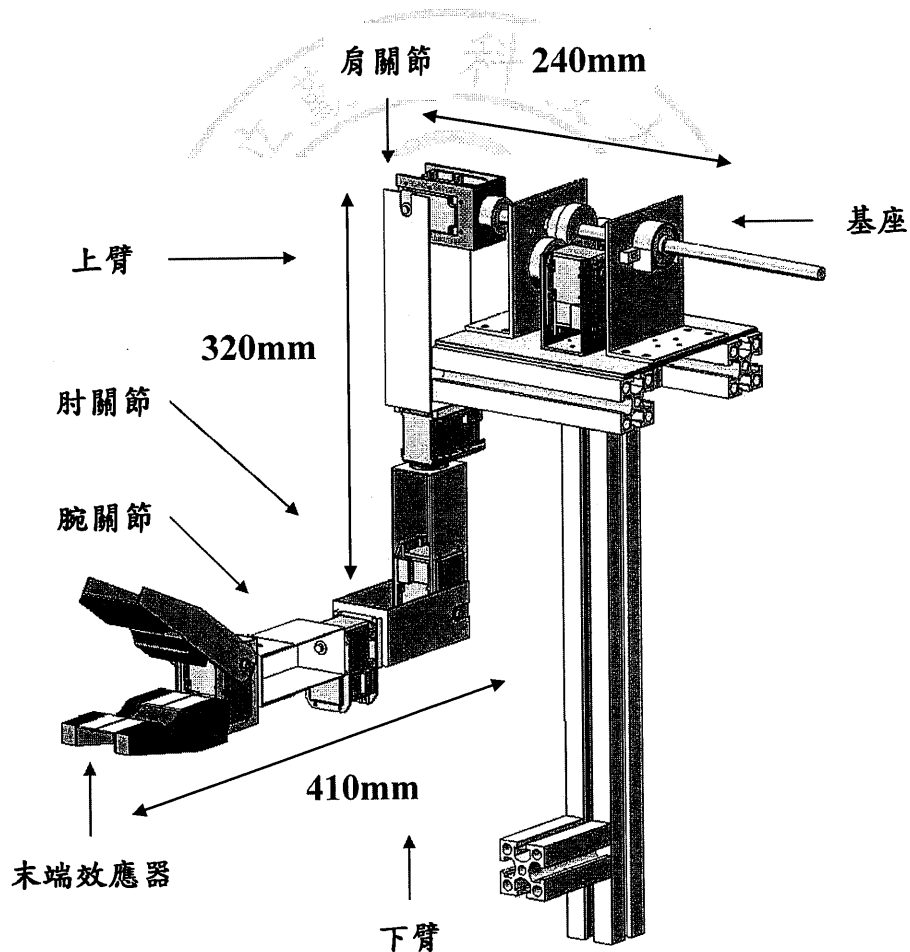


圖 2.6 AI-Robot Arm 外觀設計圖

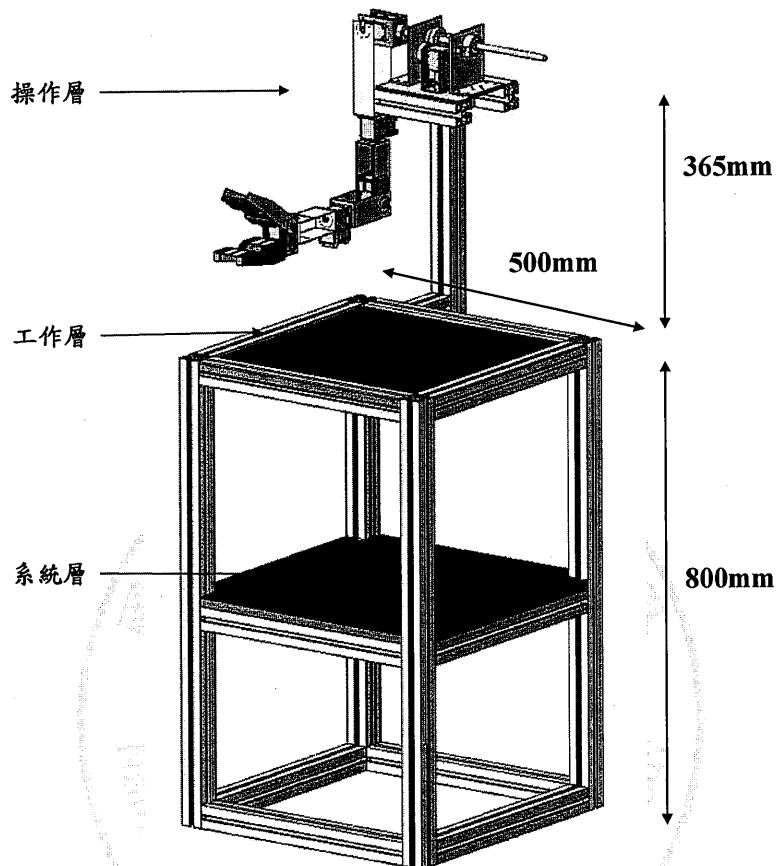


圖 2.7 AI-Robot Arm 實驗系統平台外觀設計

系統層擺放 NB 與電源供應器 (Power Supply)，在 NB Base 上使用 Borland C++ 撰寫的控制介面，專做 AI-Robot Arm 下達動作指令，而電源供應器則提供不同的電壓給各個硬體使用。工作層可擺放瓶罐或是特定的物體，使 AI-Robot Arm 執行夾取目標物，計算出物體該空間的位置。操作層則是讓 AI-Robot Arm 安置在上方，執行夾取目標物時，應有的操作空間，推導出正向運動學及逆向運動學。



## 2.2 DC-Robot Arm 研究系統架構

本節系統為安裝在點餐服務機器人平台上，以電腦作為傳送與接收資訊的控制核心，其機器人主要系統包含有 (1) DC-Robot Arm 研究系統 (2) 雷射導引系統；(3) 雷射測量系統；(4) 避障系統；(5) 行走系統；(6) 視覺辨識系統；(7) 語音辨識系統；(8) 可觸碰式使用者介面系統等如圖 2.8 所示。其中雷射導引系統與雷射測量系統作為環境定位，測量距離，避開障礙物等功能；語音系統可使用語音方式進行點餐服務；移動平台使兩輪移動到目的地，藉由雙眼視覺系統辨識目標物，使雙機械手臂抓取目標物。本論文針對點餐服務機器人平台之機械手臂系統的運動學推導演算，伺服系統及資料傳輸為研究主要目的，其 DC-Robot Arm 研究系統架構如圖 2.9 所示。

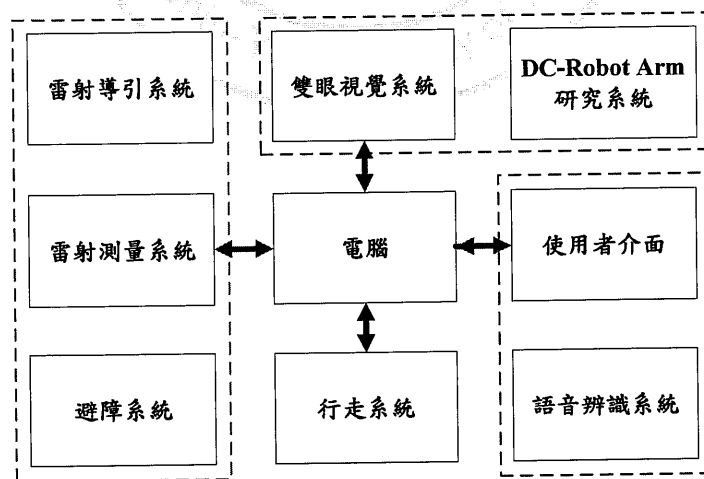


圖 2.8 機器人系統核心架構方塊圖

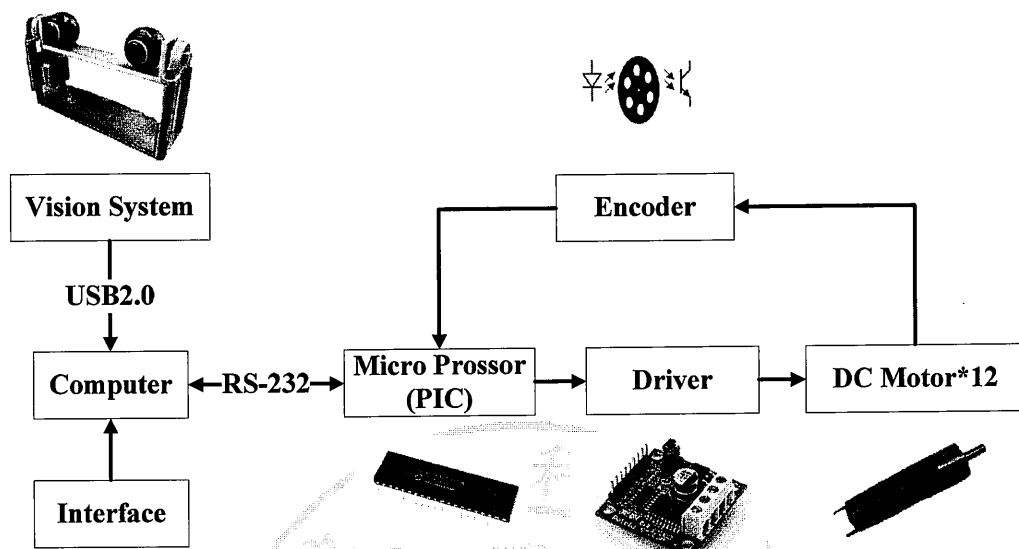


圖 2.9 DC-Robot Arm 研究系統架構

## 2.2.1 電腦

機器人身上的電腦負責處理 DC-Robot Arm 研究系統，以及所有設備的控制核心，由 Borland C++ 軟體來開發所有系統的控制介面，與各個設備之間的資料傳輸介面則以 RS-232 為主。此電腦採用作業系統為 Windows XP，其組裝規格 CPU 為 Intel Core2 1.86GHz，RAM 為 2.00GB。

此系統在電腦上所規劃的機械手臂伺服控制系統分成兩部分，第一部份是以單晶片 (PIC 系列) 內部硬體方式實現，其主要功能包含馬達光學編碼器訊號處理電路、脈波寬度調變訊號輸出和馬達驅動電路等，並把資料規劃成封包傳輸的格式。第二部份是以電腦內的軟體程式實現控制介面，其功能包含機械手臂逆向運動學計算、點對點運動

之軌跡規劃、數位影像處理和機械手臂運動之程序控制等。

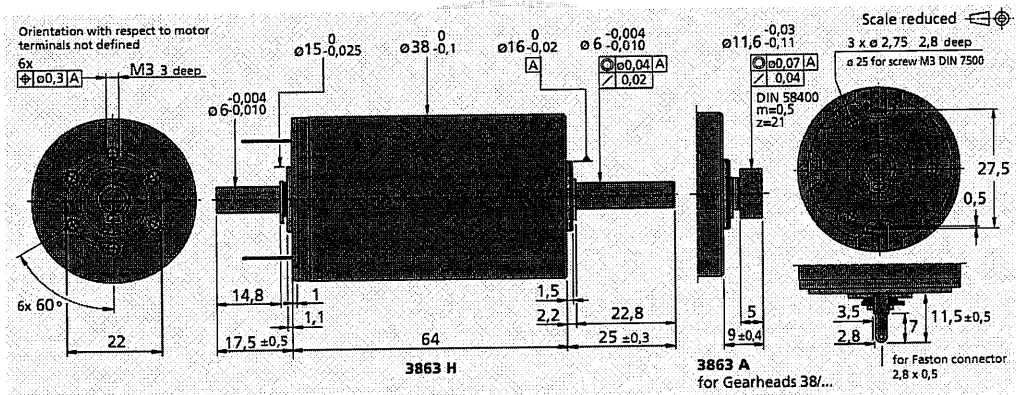
## 2.2.2 直流伺服馬達

此系統機械手臂運動時，根據各軸馬達所對應的扭力、轉速以及可控制性等，因為負載大小皆為不同。因此採用 12 個六種不同規格的直流伺服馬達組裝成五軸自由度雙手臂機構，使用的直流伺服馬達為德國 Faulhaber 公司所生產，其包含減速機與數位光學編碼器，機械手臂上各軸部位的馬達與型號如表 2.3 所示，其每個馬達工作電壓最大為 24V，而外觀與內部構造圖如圖 2.10 所示。

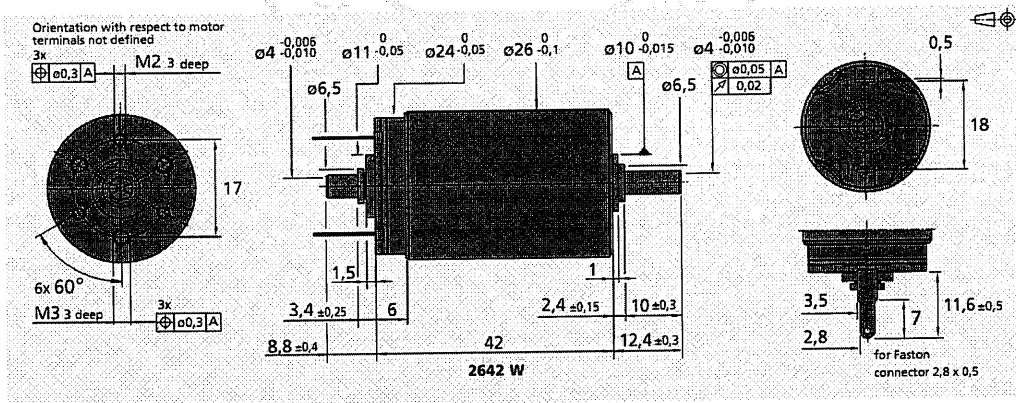
表 2.3 各部位馬達型號與規格表

	直流馬達 速度-扭力	減速機 減速比	數位光學編碼器 解析度
肩部前後馬達	3863H024C 6700rpm-110mNm	415:1 (+38/1)	HEDS5500A12 500 每轉
肩部左右馬達	3863H024C 6700rpm-110mNm	246:1 (+38/1)	HEDS5500A12 500 每轉
肩部旋轉馬達	3863A024C 6700rpm-110mNm	CSD 160:1	HEDS5500A12 500 每轉
肘部馬達	2642W024CR 6400rpm-28 mNm	CSD 160:1	HEDS5500A12

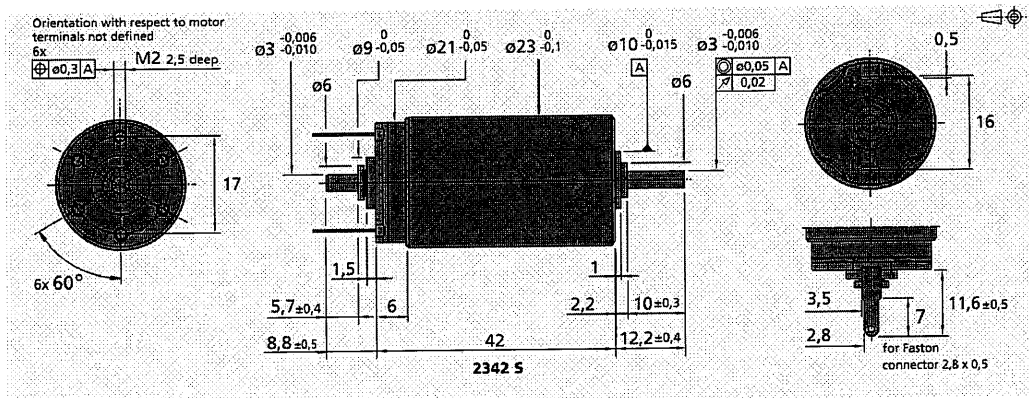
			500 每轉
腕部馬達	2342S024CR 8500rpm-16 mNm	246:1 (+23/1)	IE2-515 512 每轉
夾部馬達	2224U024SR 7800rpm-5mNm	246:1 (+23/1)	IE2-515 512 每轉



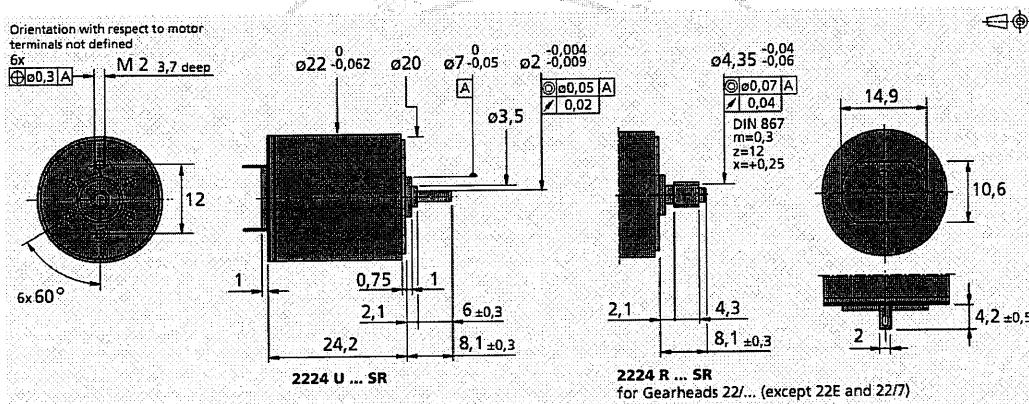
(a) 肩部前後、肩部左右、肩部旋轉馬達外觀



(b) 肘部馬達外觀



(c) 腕部馬達外觀



(d) 夾部馬達外觀

圖 2.10 各部位馬達馬達外觀

### 2.2.3 控制器

本論文主旨將 DC-Robot Arm 研究系統的伺服系統，設計成 AI-Robot Arm 實驗系統中的伺服系統且模組化，而硬體包含直流馬達、減速機、數位光學編碼器、控制器。其中控制器分為單晶片與驅動器兩個部份。

- 單晶片

單晶片使用 PIC18F4520 的型號如圖 2.11 所示，此 PIC 單晶片腳位包含五組 I/O port (port A、port B、port C、port D、port E) 如圖 2.12 所示。PIC 單晶片功能主要規劃通訊協定，設定參數值，數位光學編碼器計數與編解碼處理，及負責接收電腦封包指令，將指令轉換成馬達控制訊號，對機械手臂上的馬達下達控制指令。

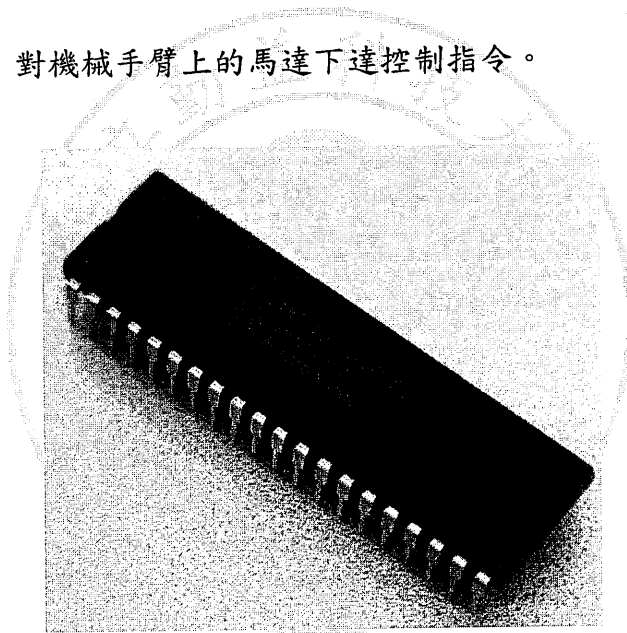


圖 2.11 PIC 單晶片實體圖

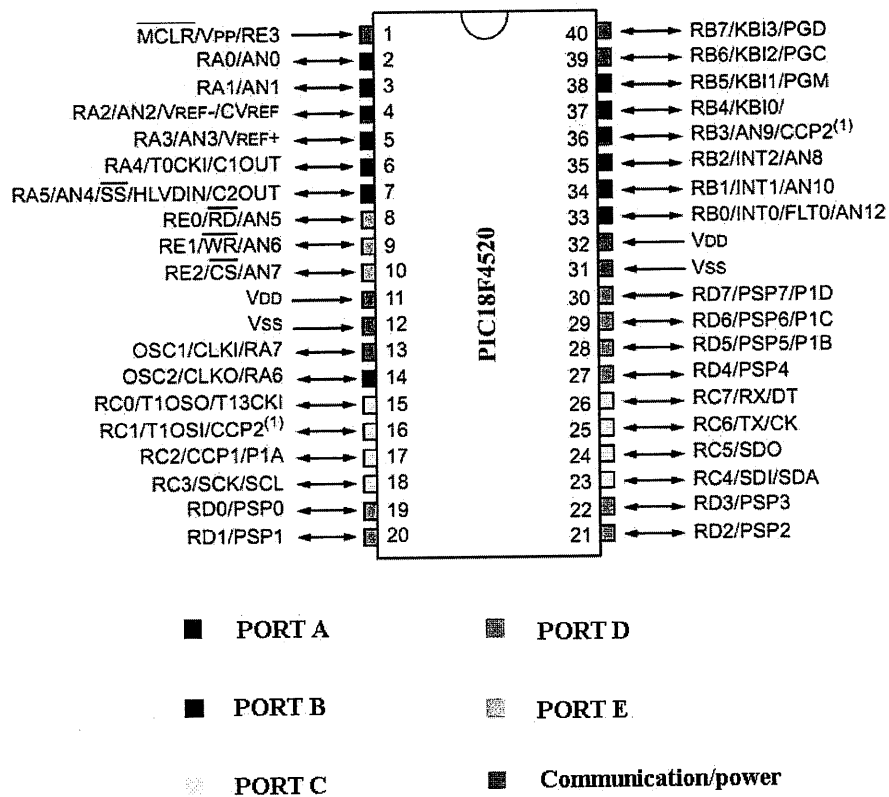


圖 2.12 PIC 單晶片腳位圖

● 馬達驅動電路

由於機械手臂各旋轉軸的直流馬達的規格不一樣，因此在驅動電路上使用了兩種驅動板，第一種是 Pololu 公司生產的驅動器如圖 2.13 所示，此驅動器具有回授控制系統，但本研究只使用馬達驅動系統，原因是肩部前後馬達，肩部左右馬達，肩部旋轉馬達，肘部馬達和腕部馬達，電流輸出約 500mA~1000mA，需要穩定的長期的電流輸出不

至於電路燒毀，因此而選用已作成產品的驅動器，表 2.4 為 Pololu 驅動器規格表，此驅動器最高額定電壓為 18V，額定為電流 3A，與單晶片模組化實體電路如圖 2.14 所示；第二種是使用低電壓驅動高電壓的 IC 2803，以及 TIP140 與 TIP145 所組成的 H 橋驅動電路如圖 2.15 所示，適用於夾部馬達，電流輸出約 50mA~100mA，因為夾部機構使用螺桿的螺旋動作較為省力，因此只需要小額電流，此驅動電路最高額定電壓為 30V，額定為電流 3A，與單晶片模組化實體電路如圖 2.16 所示。由 PIC 送出的數位控制訊號，為脈波寬度調變訊號 (PWM) 與馬達運動方向信號 (DIR) 腳位為 A, B, C 和 D。當 A=1 和 B=1, C=0 和 D=0 時，馬達即正轉 (CW)；A=0 和 B=0, C=1 和 D=1 時，馬達即反轉 (CCW)；A=0 和 B=1, C=0 和 D=1 時，馬達則為停止 (Stop)。而轉速由輸入到 PWM 腳位的平均電壓決定。

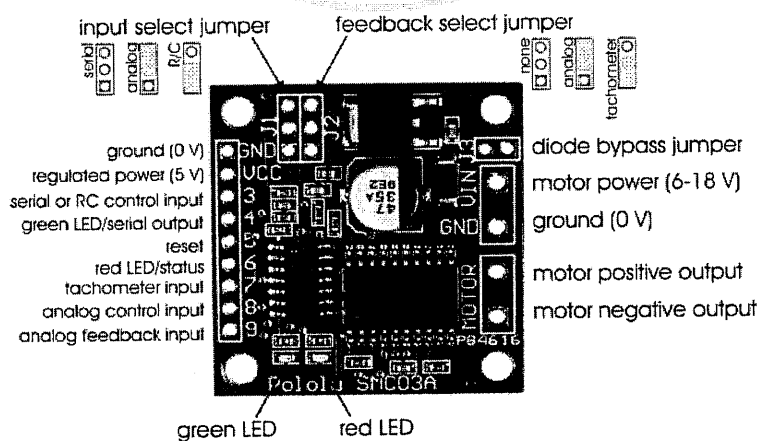


圖 2.13 Pololu 馬達驅動器



表 2.4 Pololu 馬達驅動器規格表

<b>Motor channels</b>	1
<b>Operating Voltage</b>	6~18V
<b>Peak Current</b>	3 Amp Peak (12Amp)
<b>PWM frequencies</b>	2KHz
<b>Baud rates</b>	2000 ~ 40000 bps
<b>Size</b>	3.6cm x 3.6 cm

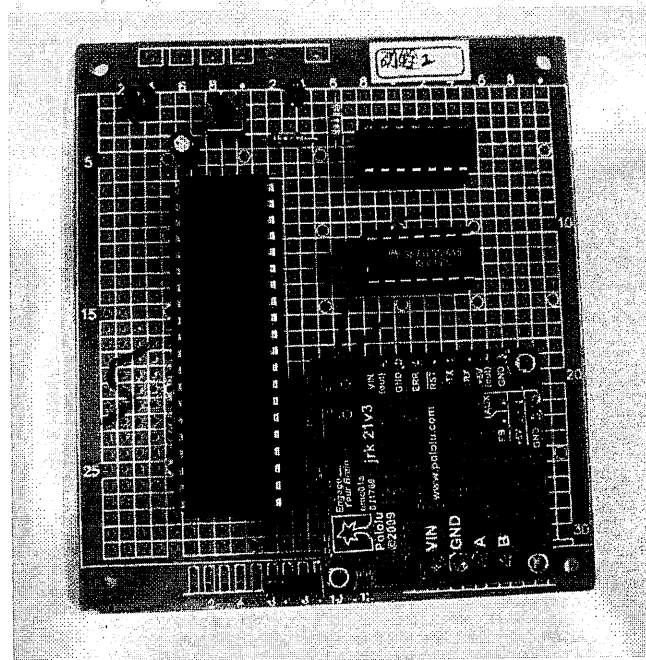


圖 2.14 單軸控制器模組

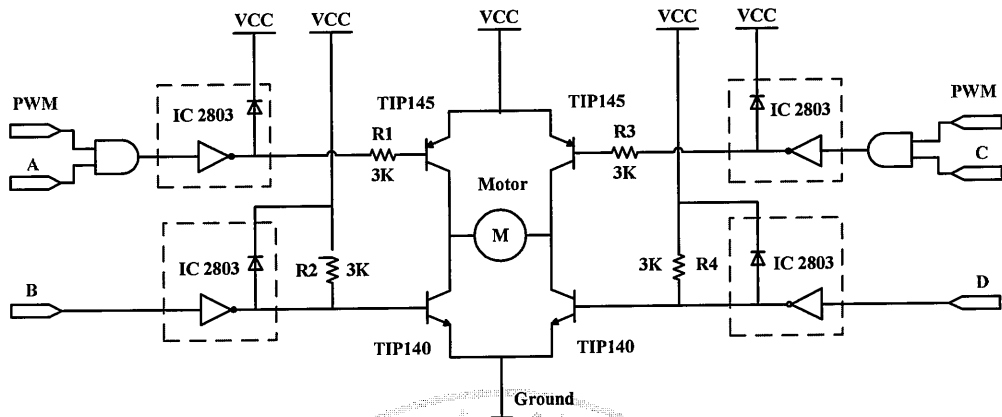


圖 2.15 單軸 H 型驅動電路

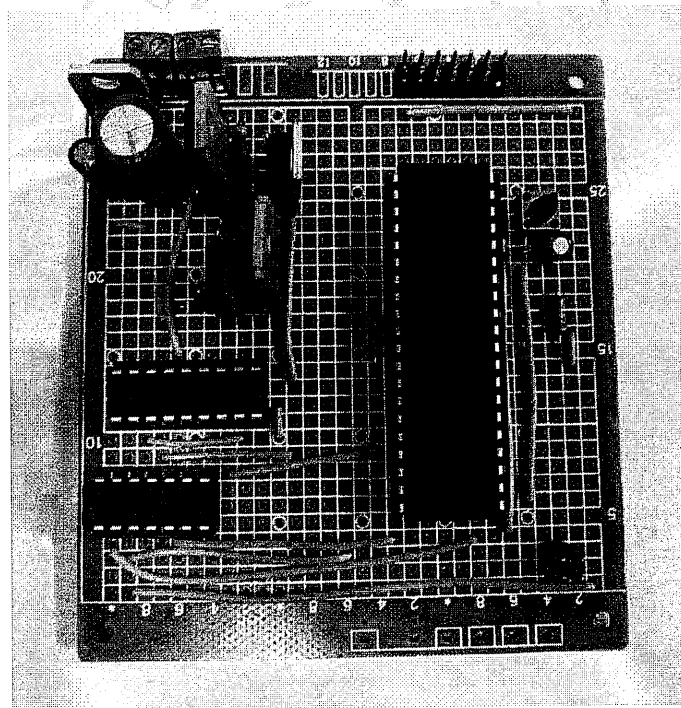


圖 2.16 單軸 H 型控制器模組

## 2.2.4 DC-Robot Arm 設計與機器人平台

- DC-Robot Arm

此機械手臂的機構設計是由 AI-Robot Arm 的機構改良後轉移，並請廠商客製化設計製作，材質是鋁合金且做過陽極處理，其陽極處理是將鋁金屬表面藉由電流的作用形成一層氧化物膜，堅硬耐磨，抗蝕性極高，色澤優美。在機械手臂的結構上使用六個直流馬達，自由度與 AI-Robot Arm 都為五軸自由度，不一樣的地方是雙手臂機構，其結構上一樣分別有基座 (Base)、肩關節 (Shoulder Joint)、上臂 (Upper Arm)、肘關節 (Elbow Joint)、下臂 (Lower Arm)、腕關節 (Wrist Joint)、以及不具有自由度的末端效應器 (end-effector)。機械手臂機構尺寸為肩膀及基座長 340mm，上臂長 400mm，下臂長 340mm，單手臂重量約為 4.2kg，可夾持 600 至 800g 的重物如圖 2.17 所示。

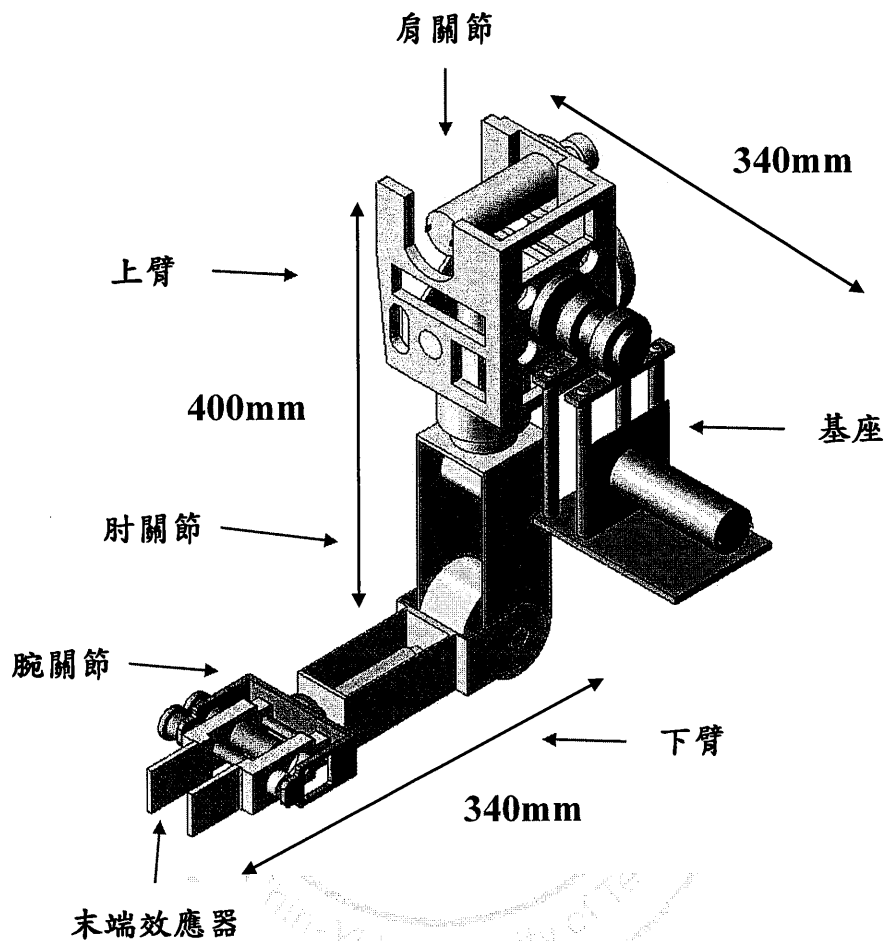
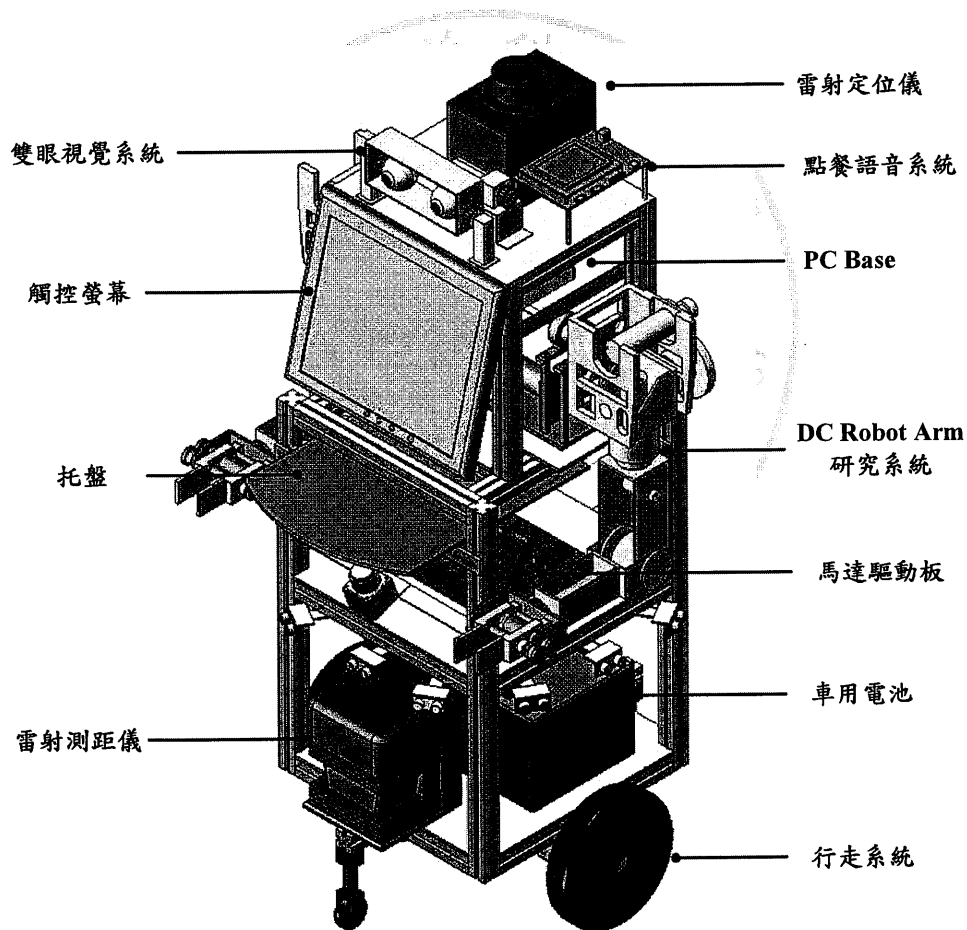


圖 2.17 DC-Robot Arm 外觀設計圖

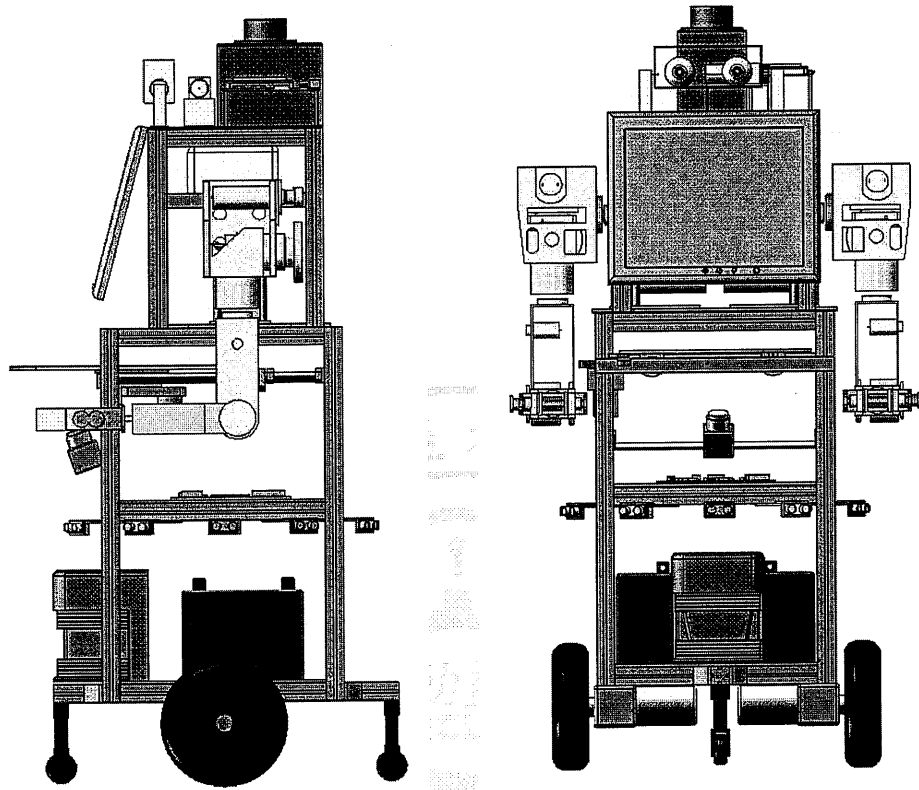
- 機器人平台

機器人平台為點餐服務型機器人，使用的運動架構是採用雙驅動輪及雙輔助輪的行走系統，將 DC-Robot Arm 研究系統安裝在機器人身上，其目的利用雙手臂端餐盤或是取物，然後機器人移動至餐桌上等

功能。機器人機體的高度約 130 公分、重量約 70 公斤，其內部元件由上到下主要可以分成四個部份如圖 2.18(a)所示。最上層為及雙眼視覺系統，雷射定位儀與點餐語音系統；第二層為觸控式螢幕，DC-Robot Arm 研究系統與電腦；第三層為托盤與馬達驅動電路；第四層為雷射測距儀、車用電池與行走系統。



(a) 等視圖



(b) 側視圖

(c) 正視圖

圖 2.18 點餐服務型機器人主體架構

### 第三章 機械手臂運動學分析

描述機械手臂的動作，必須明確定義出機械手臂與各物體之間的相對位置，使控制器能根據這些資料進行適當的計算與座標轉換，進而接近目標物執行預先設定之動作。一般機械手臂是由一連串的連桿與馬達驅動的軸關節組合而成，用運動學表示法來定義座標及連桿的關係，其中並不考慮力與力矩的問題。因此機械手臂的運動學中，包含了正向運動學與逆向運動學，其正向運動學是給予各軸關節的角度位置，使求得機械手臂的末端效應器(End-effector)的位置與方向；反之，逆向運動學是給予機械手臂的末端效應器(End-effector)的位置與方向，求得各軸關節的角度如圖 3.1 所示。

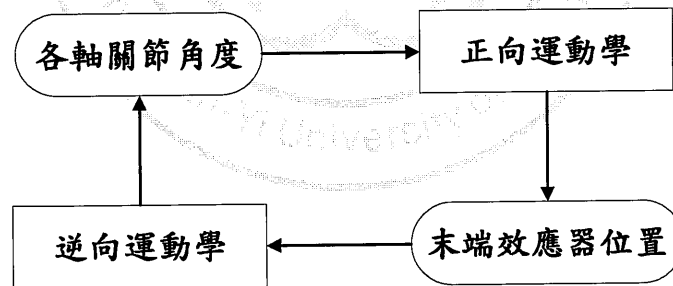


圖 3.1 運動學的對應關係方塊圖

本章節共分成幾部分說明，首先針對座標轉換，其次根據Danevit-Hartenberg (D-H)方法推導正向運動學，接著推導逆向運動學，之後使用 MATLAB 軟體加以模擬與驗證。

### 3.1 座標系轉換

一般而言，機械手臂在工作空間之軌跡任務運動是以卡式座標系描述，而實際上機械手臂運動控制卻是由機械手臂的各軸關節運動組合來達成。為求機械手臂在空間中的位置與姿態，會將座標定義在座，另外將機械手臂末端效應器（End-effector）位置定義為任務座標，因此可以獲得末端效應器位置矩陣

$${}^{i-1}P = {}^iR {}^iP + {}^{i-1}P_{BORG} \quad {}^iP \rightarrow {}^{i-1}P \quad (3.1)$$

$${}^iP = -{}^{i-1}R^T {}^{i-1}P_{BORG} + {}^{i-1}R^T {}^iP \quad {}^{i-1}P \rightarrow {}^iP \quad (3.2)$$

座標轉換關係如下式表示

$$\begin{bmatrix} {}^{i-1}P \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^iR & {}^{i-1}P_{BORG} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^iP \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$${}^{i-1}P = {}^{i-1}T_i {}^iP \quad (3.4)$$

其中  ${}^{i-1}P_{BORG}$  為平移轉換項（Translational Transformation）， $R$  為旋轉轉換項（Rotational Transformation）， ${}^{i-1}\underline{P} = \begin{bmatrix} {}^{i-1}P \\ 1 \end{bmatrix}$  為機械手臂基座座標向量，

${}^i\underline{P} = \begin{bmatrix} {}^iP \\ 1 \end{bmatrix}$  為機械手臂末端夾爪位置座標向量， ${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} {}^iR & {}^{i-1}P_{BORG} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$

為座標轉換矩陣如圖 3.2 所示。



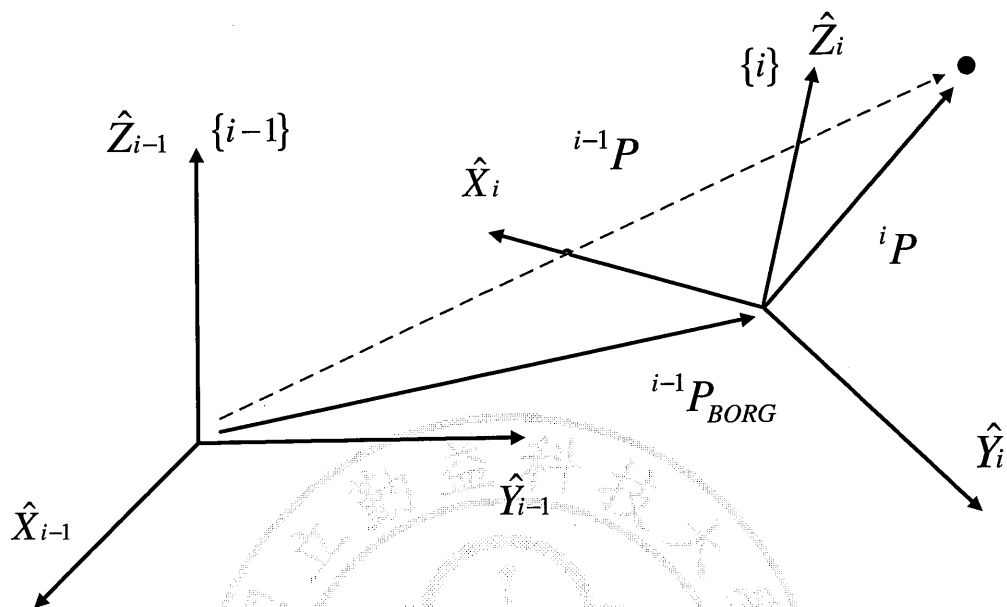


圖 3.2 座標轉換圖

### 3.2 連桿參數與座標

本文使用 Danevit-Hartenberg 標記法於 1955 年所提出的表示法建立座標系統。將每一個軸關節座標系統按照下列法則定義，得到以下四個連桿參數[2]：

桿長度 (link length) :  $a_i$

連桿扭轉 (link twist) :  $\alpha_i$

連桿分出 (link offset) :  $d_i$

關節角度 (joint angle) :  $\theta_i$

各連桿的定義及示意圖，如圖 3.3 所示：

$a_i$ ：沿著  $X_i$  計算從  $Z_{i-1}$  到  $Z_i$  的距離；

$\alpha_i$ ：沿著  $X_i$  計算從  $Z_{i-1}$  到  $Z_i$  的角度；

$d_i$ ：沿著  $Z_{i-1}$  計算從  $X_{i-1}$  到  $X_i$  的距離；

$\theta_i$ ：沿著  $Z_{i-1}$  計算從  $X_{i-1}$  到  $X_i$  的角度；

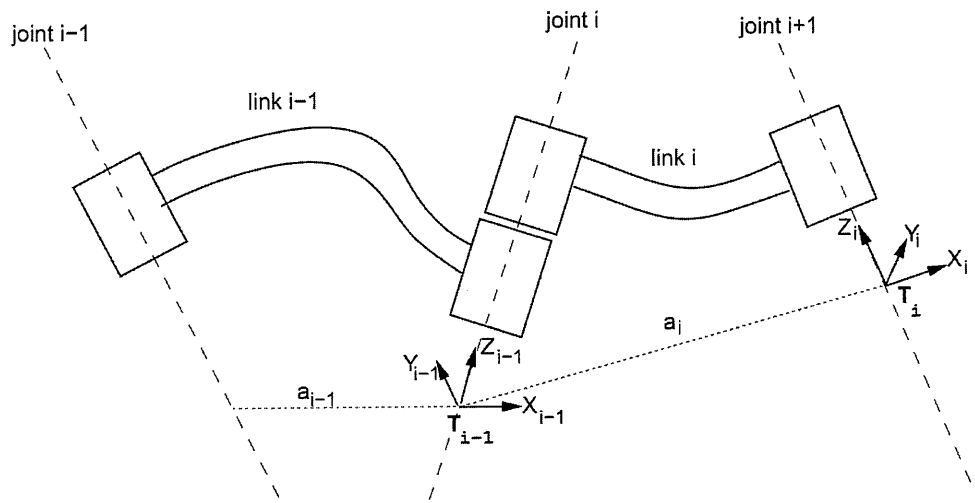


圖 3.3 Denavit-Hartenberg 標記法

因此，可以知道由第  $(i-1)$  個座標系統經過連續的位移與旋轉來轉至第  $i$  個座標系統，其轉換矩陣如下所述：矩陣的單元中含有  $\theta$  和  $\alpha$  為正餘弦函數， $c$  表示  $\cos$  函數， $s$  表示  $\sin$  函數。

$$\text{Tran}(z, d) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

第  $(i-1)$  個座標系統沿著  $Z_{i-1}$  軸旋轉角度  $\theta_i$ ，使得  $X_{i-1}$  軸與  $X_i$  軸同在一  
直線上。其轉換矩陣如下

$$\text{Rot}(z, \theta) = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & 0 \\ s\theta_i & c\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

其中

第  $(i-1)$  個座標系統沿著  $X_i$  軸位移距離  $a_i$ ，使得  $T_{i-1}$  與  $T_i$  重合在一起。

其轉換矩陣如下：

$$\text{Tran}(x, a) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

第  $(i-1)$  個座標系統沿著  $X_i$  軸旋轉角度  $\alpha_i$ ，最後使得兩個座標系統重  
合在一起。轉換矩陣如下：

$$\text{Rot}(x, \alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c\theta_i & -s\theta_i & 0 \\ 0 & s\theta_i & c\theta_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

因此，轉換矩陣  ${}^{i-1}T_i$  最後的結果可由上面四個轉換矩陣求得

$${}^{i-1}T_i = \text{Tran}(z, d) \text{Rot}(z, \theta) \text{Tran}(x, a) \text{Rot}(x, \alpha) \quad (3.9)$$

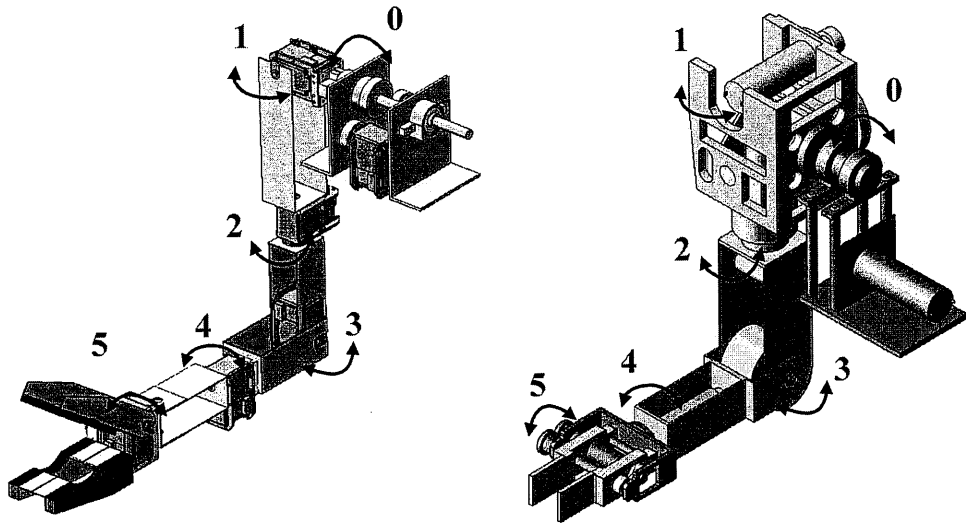
將上面 (3.5), (3.6), (3.7), (3.8) 代入 (3.9) 後，可得

$${}^{i-1}T_i = \begin{bmatrix} c\theta_i & -c\alpha_i s\theta_i & s\alpha_i s\theta_i & a_i c\theta_i \\ s\theta_i & c\alpha_i c\theta_i & -s\alpha_i c\theta_i & a_i s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

即為 Denavit-Hartenberg (D-H) 轉換矩陣。

### 3.3 機械手臂正向運動學分析

本研究有兩種系統分別為 AI-Robot Arm 實驗系統與 DC-Robot Arm 研究系統，其目的驗證兩系統的機械手臂運動學分析。首先定義各系統的關節編號如圖 3.4 所示，根據 D-H 方法定義出機械手臂各關節的座標系統，此時兩系統定義的座標與方向相同，因此把兩系統合成一個機械手臂之共同座標系統如圖 3.5 所示；依照圖 3.5 所定義的座標系統，將 D-H 表整理如表 3.1 所示。



(a) AI-Robot Arm 實驗系統      (b) DC-Robot Arm 研究系統

圖 3.4 各系統的關節編號

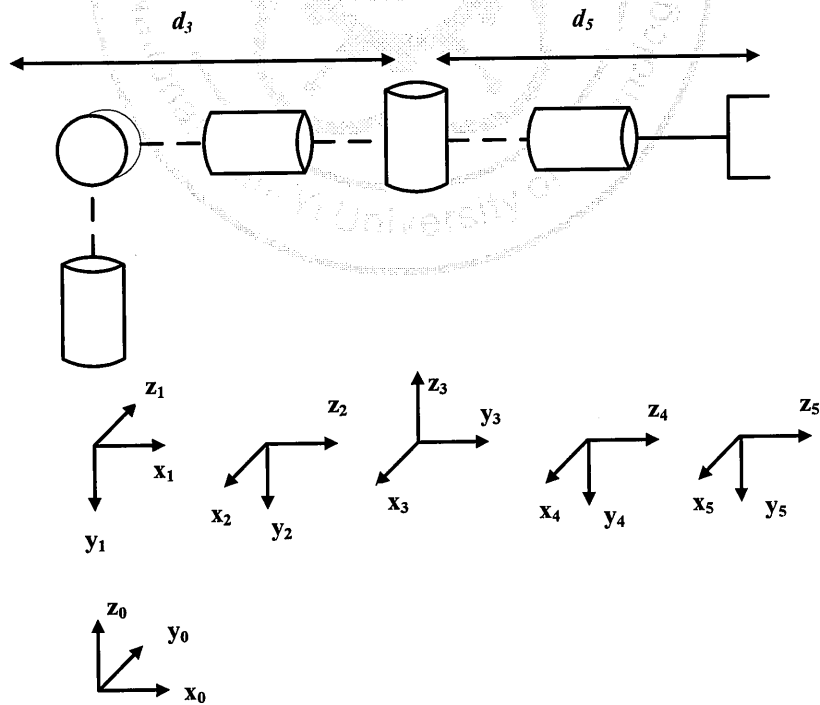


圖 3.5 機械手臂共同座標系

表 3.1 DH 共同連桿參數表

Joint	$\theta_i$	$\alpha_i$	$a_i$	$d_i$	Joint range
1	$\theta_1$	$-90^\circ$	0	0	$-90^\circ \sim 180^\circ$
2	$\theta_2$	$90^\circ$	0	0	$-180^\circ \sim -70^\circ$
3	$\theta_3$	$-90^\circ$	0	$d_3$	$-90^\circ \sim 0^\circ$
4	$\theta_4$	$90^\circ$	0	0	$-180^\circ \sim -70^\circ$
5	$\theta_5$	0	0	$d_5$	$90^\circ \sim 180^\circ$

根據表 3.1 與 (3.10) 式推導各軸之間的轉換矩陣如下：

(i) 第 0 軸座標到第 1 軸座標：

$$\begin{aligned}
 {}^0T_1 &= \text{Tran}(z, d_1) \text{Rot}(z, \theta_1) \text{Tran}(x, a_1) \text{Rot}(x, \alpha_1) \\
 &= \begin{bmatrix} c_1 & 0 & -s_1 & 0 \\ s_1 & 0 & c_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.11)
 \end{aligned}$$

(ii) 第 1 軸座標到第 2 軸座標：

$$\begin{aligned}
 {}^1T_2 &= \text{Tran}(z, d_2) \text{Rot}(z, \theta_2) \text{Tran}(x, a_2) \text{Rot}(x, \alpha_2) \\
 &= \begin{bmatrix} c_2 & 0 & s_2 & 0 \\ s_2 & 0 & -c_2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.12)
 \end{aligned}$$

(iii) 第 2 軸座標到第 3 軸座標：

$$\begin{aligned}
 {}^2T_3 &= \text{Tran}(z, d_3) \text{Rot}(z, \theta_3) \text{Tran}(x, a_3) \text{Rot}(x, \alpha_3) \\
 &= \begin{bmatrix} c_3 & 0 & -s_3 & 0 \\ s_3 & 0 & c_3 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.13)
 \end{aligned}$$

(iv) 第 3 軸座標到第 4 軸座標：

$$\begin{aligned}
 {}^3T_4 &= \text{Tran}(z, d_4) \text{Rot}(z, \theta_4) \text{Tran}(x, a_4) \text{Rot}(x, \alpha_4) \\
 &= \begin{bmatrix} c_4 & 0 & s_4 & 0 \\ s_4 & 0 & -c_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.14)
 \end{aligned}$$

(v) 第 4 軸座標到第 5 軸座標：

$$\begin{aligned}
 {}^4T_5 &= \text{Tran}(z, d_5) \text{Rot}(z, \theta_5) \text{Tran}(x, a_5) \text{Rot}(x, \alpha_5) \\
 &= \begin{bmatrix} c_5 & -s_5 & 0 & 0 \\ s_5 & c_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.15)
 \end{aligned}$$

若末端效應器 (End-effector) 相對於機座之座標如圖 3.6 所示，則機械手臂末端效應器相對於固定座標的轉換矩陣是將 (3.11) ~ (3.15) 式相乘以得到座標轉換如 (3.16) 式所示。

$${}^0T_5 = {}^0T_1(\theta_1) {}^1T_2(\theta_2) {}^2T_3(\theta_3) {}^3T_4(\theta_4) {}^4T_5(\theta_5) = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

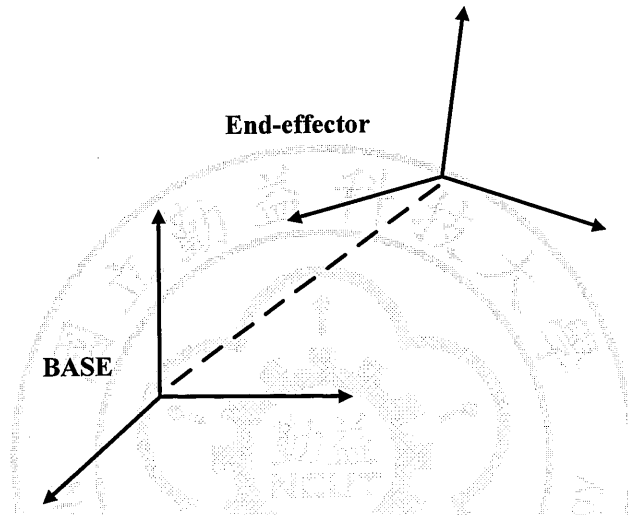


圖 3.6 末端效應器映射於基底座標

其中， $[n_x, n_y, n_z]^T$  手部的正交單位向量， $[o_x, o_y, o_z]^T$  手部的方向單位向量， $[a_x, a_y, a_z]^T$  手部的接近單位向量， $[p_x, p_y, p_z]^T$  手部的位置向量。

而 (3.16) 中的矩陣元素如下：

$$n_x = c_1 [c_2 (c_3 c_4 c_5 - s_3 s_5) + s_2 (-s_4 c_5)] - s_1 (s_3 c_4 c_5 + c_3 s_5) \quad (3.17)$$

$$n_y = s_1 [c_2 (c_3 c_4 c_5 - s_3 s_5) + s_2 (-s_4 c_5)] + c_1 (s_3 c_4 c_5 + c_3 s_5) \quad (3.18)$$

$$n_z = -[s_2 (c_3 c_4 c_5 - s_3 s_5) - c_2 (-s_4 c_5)] \quad (3.19)$$

$$o_x = c_1 [c_2 (-c_3 c_4 s_5 - s_3 c_5) + s_2 (s_4 s_5)] - s_1 (-s_3 c_4 s_5 + c_3 c_5) \quad (3.20)$$



$$o_y = s_1 [c_2 (-c_3 c_4 s_5 - s_3 c_5) + s_2 (s_4 s_5)] + c_1 (-s_3 c_4 s_5 + c_3 c_5) \quad (3.21)$$

$$o_z = -[s_2 (-c_3 c_4 s_5 - s_3 c_5) - c_2 (s_4 s_5)] \quad (3.22)$$

$$a_x = c_1 [c_2 (c_3 s_4) + s_2 (c_4)] - s_1 (s_3 s_4) \quad (3.23)$$

$$a_y = s_1 [c_2 (c_3 s_4) + s_2 (c_4)] + c_1 (s_3 s_4) \quad (3.24)$$

$$a_z = -[s_2 (c_3 s_4) - c_2 (c_4)] \quad (3.25)$$

$$p_x = c_1 [c_2 (c_3 s_4 d_5) + s_2 (c_4 d_5 + d_3)] - s_1 (s_3 s_4 d_5) \quad (3.26)$$

$$p_y = s_1 [c_2 (c_3 s_4 d_5) + s_2 (c_4 d_5 + d_3)] + c_1 (s_3 s_4 d_5) \quad (3.27)$$

$$p_z = -[s_2 (c_3 s_4 d_5) - c_2 (c_4 d_5 + d_3)] \quad (3.28)$$

由上式 (3.26), (3.27), (3.28) 可知末端效應器之座標  $(p_x, p_y, p_z)$ 。

### 3.4 機械手臂逆向運動學分析

從正向運動學求出  $(p_x, p_y, p_z)$  末端效應器之座標，即可用來反推算逆向運動學，所謂的逆向運動學是指利用已知各連桿於絕對座標系中的位置，反求各軸關節之對應轉動角度。

求解逆向運動學的技巧可使用反矩陣比較法，再根據三角函數的觀念求出各軸關節角度解。首先從 (3.16) 式子中，將任一連桿的狀態都可由先相關的矩陣相乘得知，因此藉由  ${}^0T_5 = {}^0T_1 T_2 T_3 T_4 T_5$  在等號兩旁同乘上  ${}^0T_1$  反矩陣運算得 (3.29), (3.30) 式，再比較左右兩矩陣中各

元素來推導逆向運動學。

$$\left[ {}^0_1T(\theta_1) \right]^{-1} {}^0T_5 = {}^1T_2(\theta_2) {}^2T_3(\theta_3) {}^3T_4(\theta_4) {}^4T_5(\theta_5) \quad (3.29)$$

$$\begin{bmatrix} c_1 & s_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & d_1 \\ -s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = {}^1T_5 \quad (3.30)$$

如果令 (3.30) 等號左邊的兩矩陣相乘的元素 [1,4]、[2,4] 與 [3,4] 分別相等得

$$\begin{aligned} c_1 p_x + s_1 p_y &= \bar{p}_x \\ -p_z &= \bar{p}_y \\ -s_1 p_x + c_1 p_y &= \bar{p}_z \end{aligned} \quad (3.31)$$

其中  ${}^1T_5 = \begin{bmatrix} \bar{n}_x & \bar{o}_x & \bar{a}_x & \bar{p}_x \\ \bar{n}_y & \bar{o}_y & \bar{a}_y & \bar{p}_y \\ \bar{n}_z & \bar{o}_z & \bar{a}_z & \bar{p}_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$  等式，將式 (3.31) 平方相加，整理後可得

$$c_4 = \left( \frac{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 - d_3^2 - d_5^2}{2d_3d_5} \right) \quad (3.32)$$

再根據 D-H 表角度限制範圍內，從  $\theta_4 \in (-180^\circ \sim -70^\circ)$  範圍，可得  $\theta_4$

$$\theta_4 = \text{Atan2} \left( \sqrt{1 - \cos^2 \theta_4}, \cos \theta_4 \right) \quad (3.33)$$

其中  $\text{Atan2}(\cdot)$  是四象限反正切函數。

接下來的運算根據旋轉矩陣的正交性，矩陣內的元素 (3.16) 滿足以下

等式

$$\begin{aligned} n \cdot n &= o \cdot o = a \cdot a = 1 \\ n \cdot a &= n \cdot o = o \cdot a = 0 \end{aligned} \quad (3.34)$$

重新整理 (3.16)，等號兩邊同乘上  $[{}^3T_4(\theta_4)]^{-1}$  和  $[{}^4T_5(\theta_5)]^{-1}$  如下式

$${}^0T_5[{}^4T_5(\theta_5)]^{-1}[{}^3T_4(\theta_4)]^{-1} = {}^0T_1(\theta_1)T_2(\theta_2)T_3(\theta_3) \quad (3.34)$$

即

$$\begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_4c_5 & s_4c_5 & s_5 & 0 \\ -c_4s_5 & -s_4s_5 & c_5 & 0 \\ s_4 & -c_4 & 0 & -d_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = {}^0T_3 \quad (3.35)$$

讓元素 [1,4]、[2,4] 與 [3,4] 在 (3.35) 等號分別相等

$$\begin{aligned} -a_x d_5 + p_x &= d_3 c_1 s_2 \\ -a_y d_5 + p_y &= d_3 s_1 s_2 \\ -a_z d_5 + p_z &= d_3 c_2 \end{aligned} \quad (3.36)$$

其中 (3.36) 令  $Q$ 、 $N$  和  $M$ ，如下式

$$\begin{aligned} Q &= -a_x d_5 + p_x \\ N &= -a_y d_5 + p_y \\ M &= -a_z d_5 + p_z \end{aligned} \quad (3.37)$$

依照 D-H 表角度限制範圍內，從  $\theta_2 \in (-180^\circ \sim -70^\circ]$ ，平方後整理可得  $\theta_2$

$$\theta_2 = \text{Atan2}(\sqrt{Q^2 + N^2}, M) \quad (3.38)$$

得知已知函數  $\theta_2$  可從 (3.37) 整理後可得  $\theta_1$

$$\theta_1 = \text{Atan2}[Q \cdot \text{sign}(s_2), N \cdot \text{sign}(s_2)] \quad (3.39)$$

其中  $\text{sign}(\cdot)$  是 sign 函數，定義成

$$\text{sign}(t) \begin{cases} 1, & t > 0 \\ -1, & t < 0 \end{cases} \quad (3.40)$$

再重新整理 (3.29)，使公式左邊只有已知函數

$$[{}^1T_2(\theta_2)]^{-1} [{}^0T_1(\theta_1)]^{-1} {}^0T_5 = {}^2T_3(\theta_3) {}^3T_4(\theta_4) {}^4T_5(\theta_5) \quad (3.41)$$

即為

$$\begin{bmatrix} c_1c_2 & s_1c_2 & -s_2 & 0 \\ -s_1 & c_1 & 0 & 0 \\ -c_1s_2 & s_1s_2 & c_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = {}^3T_5 \quad (3.42)$$

令 (3.42) 元素[1,3]和[2,3]，以及[3,1]和[3,2]分別使兩旁等號相等如下式

$$\begin{aligned} c_3s_4 &= c_1c_2a_x + s_1c_2a_y - s_2a_z \\ s_3s_4 &= -s_1a_x + c_1a_y \end{aligned} \quad (3.43)$$

$$\begin{aligned} -s_4c_5 &= c_1s_2n_x + s_1s_2n_y + c_2n_z \\ s_4s_5 &= c_1s_2o_x + s_1s_2o_y + c_2o_z \end{aligned} \quad (3.44)$$

其中 (3.43)、(3.44) 中分別為令  $C$  和  $D$ ，以及  $E$  和  $F$

$$\begin{aligned} C &= c_1c_2a_x + s_1c_2a_y - s_2a_z \\ D &= -s_1a_x + c_1a_y \end{aligned} \quad (3.45)$$

$$\begin{aligned} E &= c_1s_2n_x + s_1s_2n_y + c_2n_z \\ F &= c_1s_2o_x + s_1s_2o_y + c_2o_z \end{aligned} \quad (3.46)$$

從  $\theta_4 \in (-180^\circ \sim -70^\circ)$ ，整理可得  $\theta_3$  和  $\theta_5$

$$\theta_3 = A \tan 2 [D \cdot \text{sign}(s_4), C \cdot \text{sign}(s_4)] \quad (3.47)$$

和

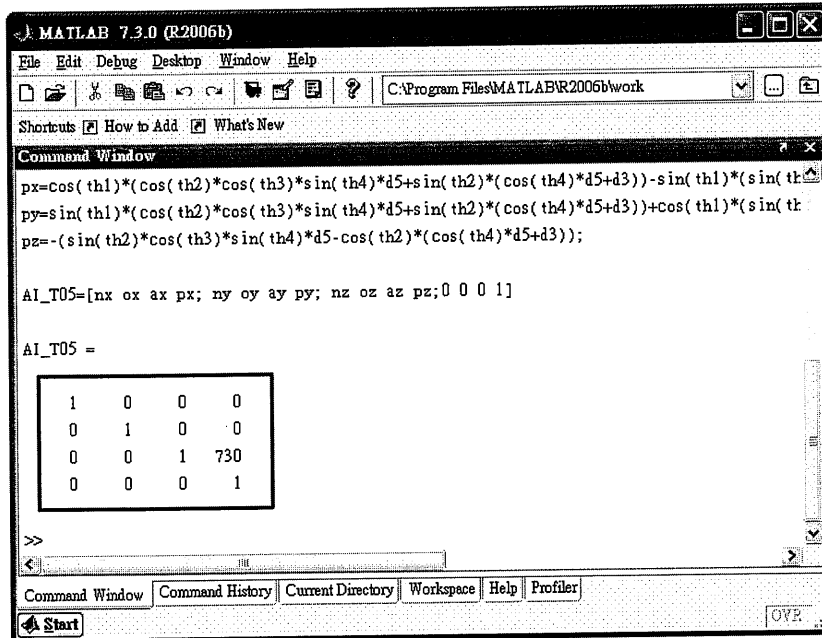
$$\theta_5 = A \tan 2 [F \cdot \text{sign}(s_4), E \cdot \text{sign}(s_4)] \quad (3.48)$$

在本章節整理上述逆向運動學方程式，使用 D-H 標記法列出機械手臂連桿參數  $d_3$  和  $d_5$ ，並解出正向運動學的末端效應器在空間位置座標  $(p_x, p_y, p_z)$ ，則五個軸關節的旋轉角度  $\theta_1 \sim \theta_5$  之計算步驟如表 3.2 所示。

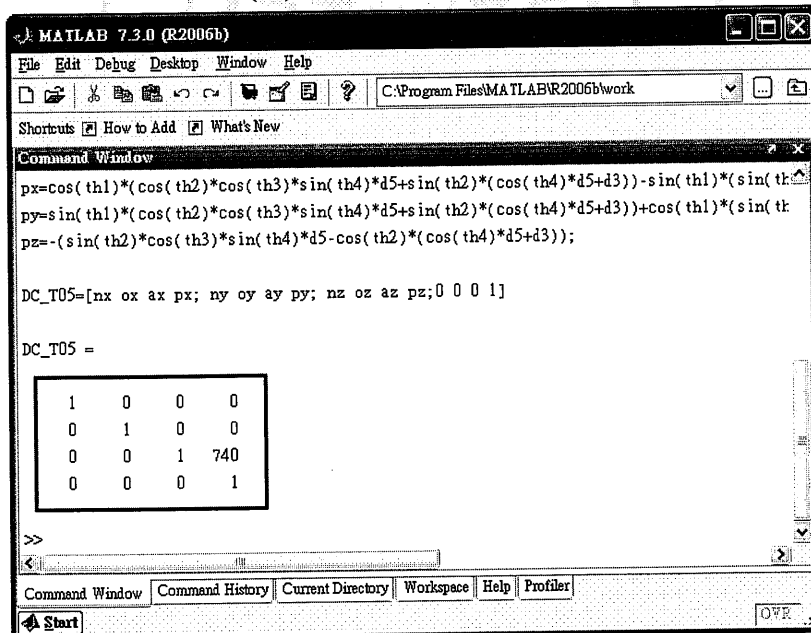
表 3.2 運算步驟表

步驟	各關節角度解
Step1.	$c_4 = \left( \frac{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 - d_3^2 - d_5^2}{2d_3d_5} \right)$
Step2.	$\theta_4 = A \tan 2 \left( \sqrt{1 - \cos^2 \theta_4}, \cos \theta_4 \right)$
Step3.	$\theta_2 = A \tan 2 \left( \sqrt{Q^2 + N^2}, M \right)$
Step4.	$\theta_1 = A \tan 2 \left[ Q \cdot \text{sign}(s_2), N \cdot \text{sign}(s_2) \right]$
Step5.	$\theta_3 = A \tan 2 \left[ D \cdot \text{sign}(s_4), C \cdot \text{sign}(s_4) \right]$
Step6.	$\theta_5 = A \tan 2 \left[ F \cdot \text{sign}(s_4), E \cdot \text{sign}(s_4) \right]$

由上式可見，首先求出機械手臂其中一個角度解，再分析已知角度函數的相關式子，求出下一個角度解。其運算相當繁瑣，驗算需使用 MATLAB 軟體加以驗證，並依照機械手臂連桿參數如表 3.1 所示，以兩個系統給定各軸角度數值 ( $\theta_1=0^\circ, \theta_2=0^\circ, \theta_3=0^\circ, \theta_4=0^\circ, \theta_5=0^\circ$ )，其中 AI Robot Arm 的連桿長度為  $d_3=320\text{mm}$  和  $d_5=410\text{mm}$ ，求得末端效應器的初始座標為  $(0,0,730)$  mm，以及 DC Robot Arm 的連桿長度為  $d_3=320\text{mm}$  和  $d_5=400\text{mm}$ ，得末端效應器的初始座標為  $(0,0,740)$  mm，由 (3.17) ~ (3.28) 式執行結果如圖 3.7。接下來驗證逆向運動學方式，反之各給定 AI Robot Arm 的末端效應器座標為  $(0,0,730)$  mm，以及 DC Robot Arm 的末端效應器的初始座標為  $(0,0,740)$  mm，求得兩系統各軸角度數值為 ( $\theta_1=0^\circ, \theta_2=0^\circ, \theta_3=0^\circ, \theta_4=0^\circ, \theta_5=0^\circ$ )，由 (3.29) ~ (3.48) 式執行結果圖 3.8 所示。一般而言，機械手臂終端器的空間解析不只一組解，以保證最小的變量，我們應該選擇一組“最短路線”。



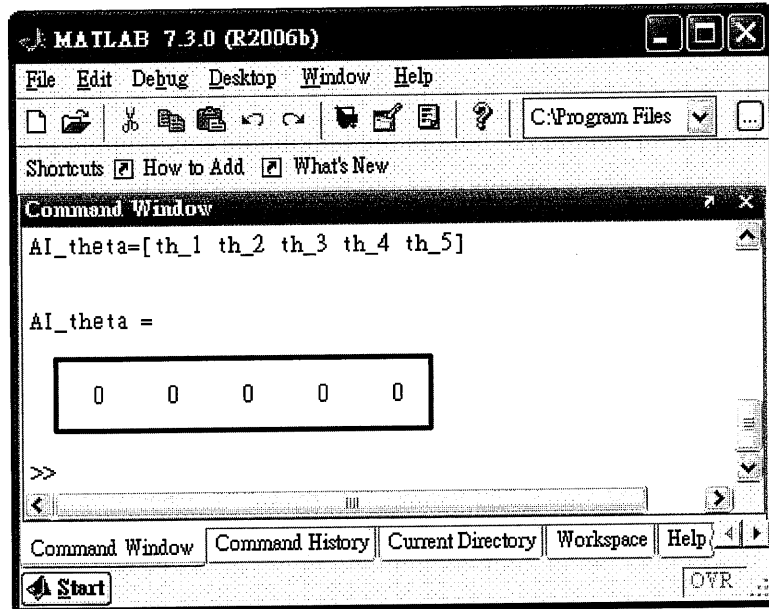
(a) AI-Robot Arm 座標



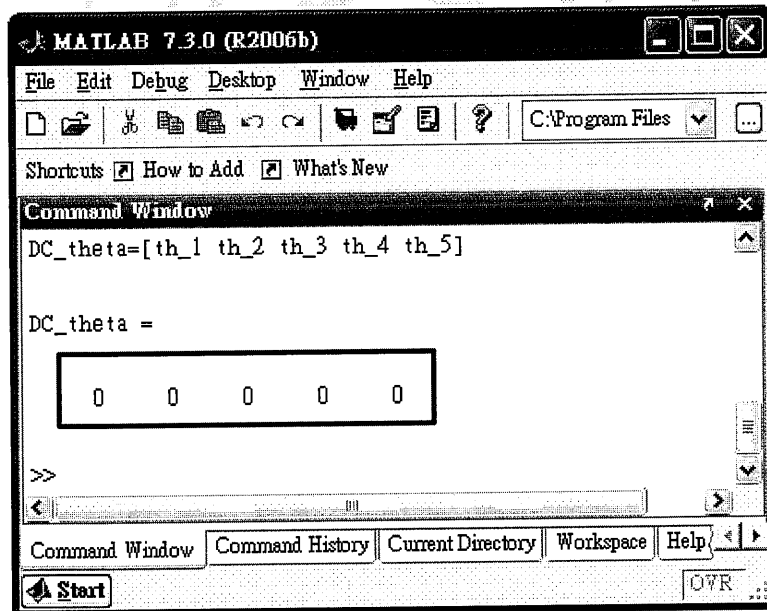
(b) DC-Robot Arm 座標

圖 3.7 MATLAB 模擬正向運動學結果





(a) AI-Robot Arm 各軸角度值



(b) DC-Robot Arm 各軸角度值

圖 3.8 MATLAB 模擬逆向運動學結果

## 第四章 伺服控制系統與動作決策

在第二章系統架構中介紹 AI 伺服馬達 (RX-64)，本身就是一種封閉式伺服系統 (金屬齒輪、微型馬達、編碼器及控制晶片)，再加上有制式的串列式封包傳輸格式，使伺服系統在資料傳遞過程中避免失真、延遲或是受干擾，只要格式不對就重新接收封包，直到收到正確的封包格式，如此才可確保資料正確與完整性。因此，本章節主要對 DC-Robot Arm 研究系統中的伺服系統，建立自訂的串列式封包傳輸格式，並說明 DC-Robot Arm 研究系統的伺服系統所需之應用原理，包含光學編碼器應用原理、脈波寬度調變、封包傳輸格式設計和影像訊號擷取結果等。而動作決策包含 AI-Robot Arm 實驗系統與 DC-Robot Arm 研究系統，其說明機械手臂的最佳路徑化，以及 PC Base 主要負責影像處理運算的結果和 DC-Robot Arm 運動學方程的運算，然後根據這些影像處理後的數據與運動學數據結果，做出動作決策並下達動作命令給 DC-Robot Arm。

### 4.1 光學編碼器應用原理

光學編碼器直接以數位格式產生角度位資料如圖 4.1 所示，使用一個有許多等間隔槽孔的單一軌道，當槽孔通過光接收器時位置值更改

一次，其各別槽孔代表一個已知角度。

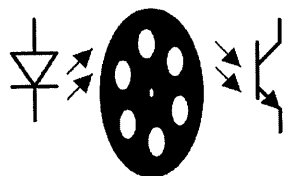


圖 4.1 光學編碼器結構

當槽孔隨著馬達主軸轉動時，光接收器將偵測到如圖 4.2 所示之訊號。若槽孔數已知，由此訊號可獲得兩樣資訊：

- 由方波頻率獲得馬達轉速。
- 由方波個數獲得馬達轉角。



圖 4.2 光學編碼器訊號

其槽孔數量越多，或是搭配減速機轉動時，角度位置的解析度越高，例如光學編碼器一圈有 30 個槽孔，解析度為 12 度，若搭配減速機的馬達 40:1，解析度則為 0.3 度。使用光學編碼器必需得知馬達正反轉的方向性，因此單一光接收器不能知道光電盤旋轉的方向；然而，使用兩組相差 90 度之光接收器，以獲得相位相差 90 度的兩個方波，判斷相位領先或落後即能得知馬達正反轉之方向如圖 4.3 所示。

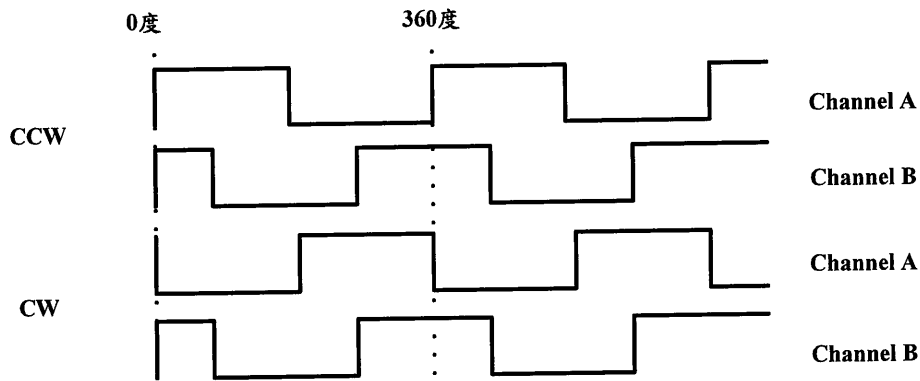


圖 4.3 光學編碼器正反轉訊號

光學編碼器的脈波訊號處理，可將訊號 channel A/channel B 相位輸入訊號在一個週期內分出四個脈波訊號 (A+, A-, B+, B-)，分別採用為 channel A/channel B 相位上下緣的訊號，來判斷馬達正反轉。當馬達正轉時 channel A 領先 channel B 相位 90 度，在一個訊號週期內得到四個脈波訊號，依序為 A+, A-, B+, B- 如圖 4.4 所示。

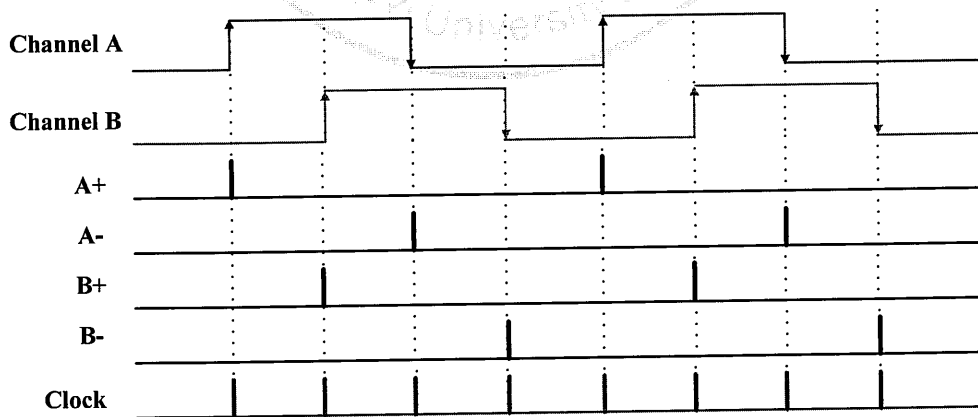


圖 4.4 馬達正轉訊號

根據 channel A/channel B 相位的分析結果，可得到 CW 與 CCW 訊號後，將訊號送往 16 位元 PIC 晶片內的計數器，作為各軸之轉角位置。因此，若產生 CW 訊號則計數器進行上數計數，反之 CCW 訊號則下數計數如圖 4.5 所示。

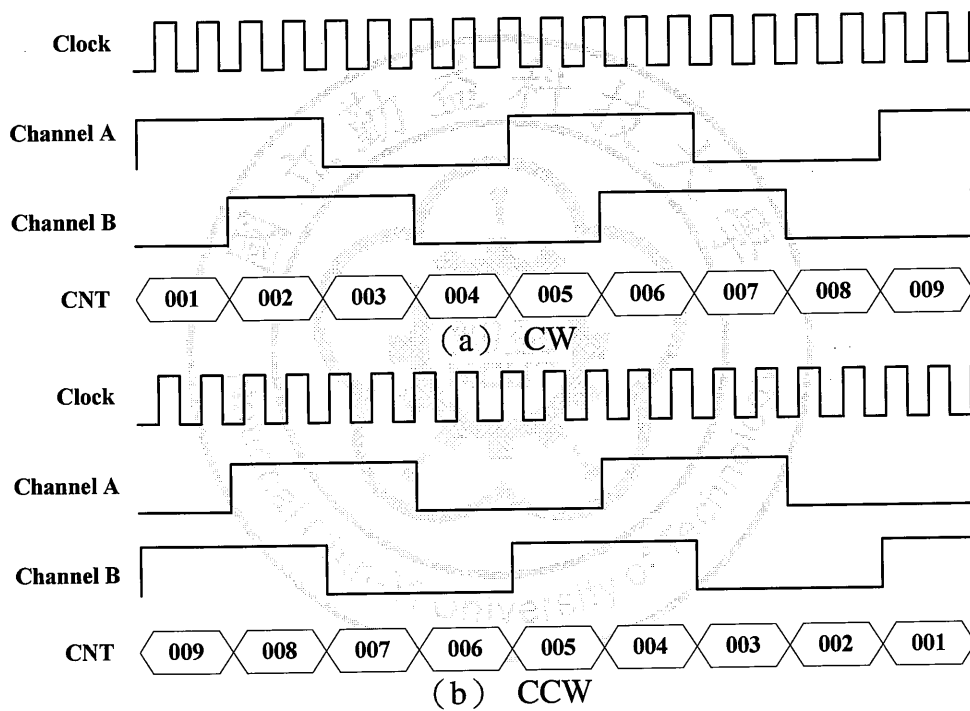


圖 4.5 馬達正反轉計數時序圖

## 4.2 脈波寬度調變

脈波寬度調變 (PWM) 訊號主要利用兩個計數器 (Timer1, Timer2) 的交替觸發，使 I/O 腳位高電位與低電位的變化。假設 PWM 信號的頻率是由 Timer1 決定；Timer2 則決定工作週期 (Duty Cycle) 的寬度如 4.6 圖所示。本研究選用 PIC18F4520，內部有脈波寬度調變電路，其使用的腳位位於 Port C 的 CCP1 (如圖 2.13)。PWM 的操作模式下如圖 4.7 所示，CCP1 腳位可以產生一個高達 10 位元的解析度的 PWM 輸出訊號。由於 CCP1 腳位與 Port C 的腳位多工共用，因此必須將 TRISC<2> 控制位元清除為 0，使 CCP1 腳位成為一個訊號輸出腳位。

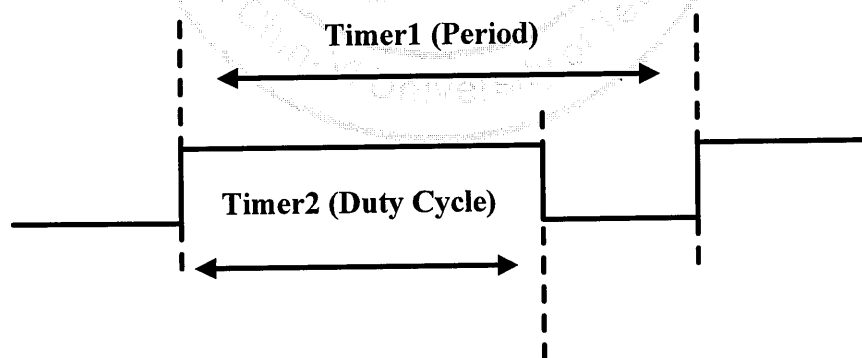


圖 4.6 脈寬調變的脈衝週期及工作週期時間

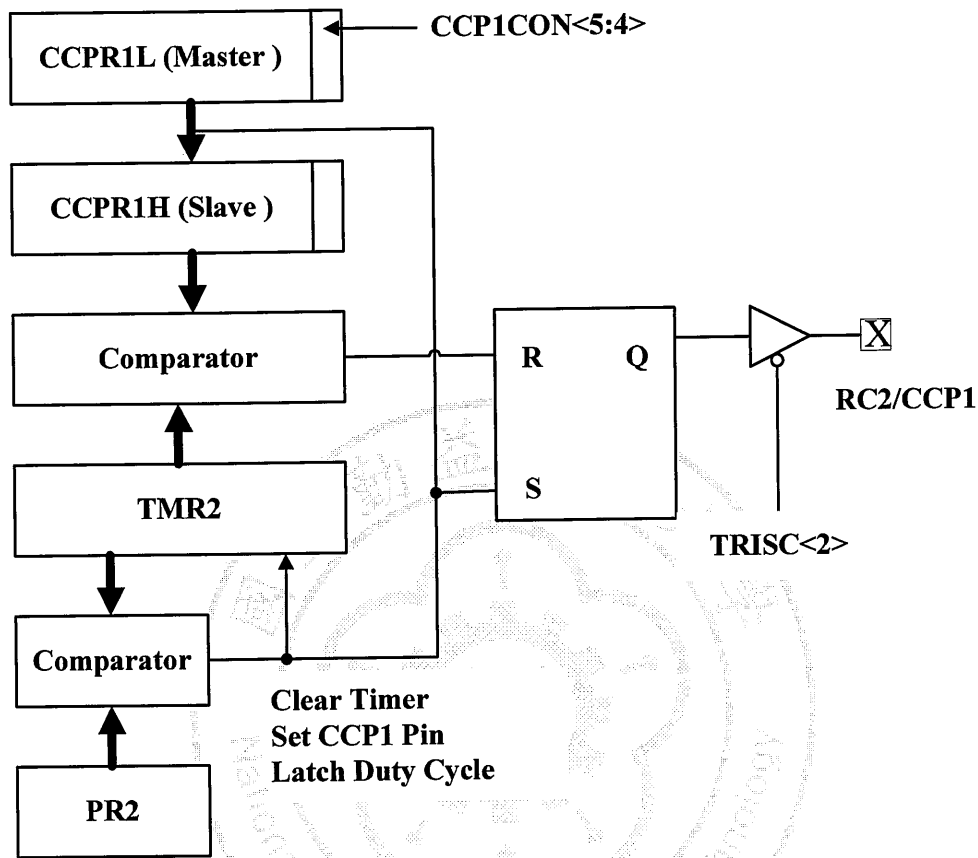


圖 4.7 PWM 模式的結構示意圖

從圖 4.7 中可以看到 TMR2 計時器的計時內容將與兩組暫存器的內容做比較。首先，TMR2 計數的內容將與 PR2 暫存器的內容做比較；當內容相符時，比較器將會對 SR 暫存器發出一個設定訊號使輸出值為 1。同時，TMR2 計數的內容將和 CCPR1H 與 CCP1COM<5:4>共組的 10 位元內容做比較；當這兩組數值內容相符時，比較器將會對 SR 暫存器發出一個清除的訊號，使腳位輸出低電壓訊號。而 SR 暫存器的輸

出訊號必須受到 TRISC<2>控制位元的管制。

其中 PWM 的 Duty Cycle 是藉由寫入 CCP1L 暫存器以及 CCPCON 暫存器<5:4>的數值所設定，因此有 10 位元的解析度。因此可以被用來計算 PWM 的 Duty Cycle 時間

$$\text{PWM Duty Cycle} = (\text{CCP1L:CCP1CON<5:4>}) \cdot T_{\text{osc}} \cdot (\text{TMR2}) \quad (4.1)$$

其中  $T_{\text{osc}}$  是主振盪器的週期。而對於一個特定的 PWM 訊號頻率能得到的最高解析度為

$$\text{PWM Resolution (max)} = \frac{\log\left(\frac{F_{\text{osc}}}{F_{\text{PWM}}}\right)}{\log 2} \text{ bit} \quad (4.2)$$

其中  $F_{\text{osc}}$  為主振盪器的頻率。若程式不慎將 PWM 的 Duty Cycle 設定得比 PWM 的週期還長時，CCP1 腳位的訊號不會被清除為 0。



### 4.3 封包傳輸格式設計

AI 伺服馬達(RX-64)的控制是透過串列封包傳輸,非傳統的 PWM 方式控制,因此有其制式的封包格式如表 4.1 所示 [28],起始兩筆資料固定為 (0XFF) 其封包傳輸的起始確認碼;第三筆資料 (ID) 為所要接收該筆封包值的馬達代號;第四筆資料 (LENGTH) 為封包內參數值的總長度;第五筆資料 (INSTRUCTION) 為下達執行的指令,有許多種模式,我們只用到寫入模式,將馬達控制值寫入到該顆馬達內的記憶體;第六筆資料 (PRAMETER) 開始為參數值的寫入位置,可先給予寫入馬達記憶體的起始位置,後面再依序給馬達轉動角度與轉動速度等相關的參數值;在寫入 N 個參數值之後必須再加上最後一筆資料 (CHECKSUM) 做為檢查碼,用來確認該筆封包內容是否正確。

表 4.1 RX-64 控制封包的格式

0XFF	0XFF	ID	LENGTH	INSTRUCTION	PRAMETER1~N	CHECKSUM
------	------	----	--------	-------------	-------------	----------

其中,檢查碼運算公式為

$$\text{CHECKSUM} = \sim (\text{ID} + \text{LENGTH} + \text{INSTRUCTION} + \text{PRAMETER 1} + \dots + \text{PRAMETER N}) \quad (4.3)$$

得知上述 AI 伺服馬達 (RX-64) 串列封包傳輸的格式架構，藉由此概念要建立 DC-Robot Arm 研究系統的封包傳輸格式就並不困難。因此，本系統封包也是由 7 筆資料所組成，每筆資料有 1 個 byte 的長度，馬達轉動角度的解析度為 0.5 度，其 360 度除於 0.5 度得到的數值換成 16 進制為 2D0H，轉動角度命令值就介於 0 至 2D0H 之間；馬達轉動速度範圍為 0 至 127，其 16 進制為 0 至 7FH。自訂的封包格式如表所示。第一筆和第二筆資料 (D\_STAR) 為封包的起始確認碼，當 DC-Robot Arm 接收到封包資料時要先確認該值是否相同，若相同則繼續接收後續資料，若不相同則刪除重新接收，第三筆資料 (D\_ID) 為各軸關節馬達代號；第四筆資料 (D\_LEN) 為封包內參數值的總長度；第五筆資料 (D\_INRC) 為下達控制指令模式；第六筆資料 (D\_PER) 為起始和目的參數值的寫入位置；第七筆封包指令確認碼，經過此確認碼核對才能執行。其該機械手臂的動作控制指令封包傳輸格式如表 4.3 所示。

表 4.2 DC-Robot Arm 研究系統單軸馬達控制之封包格式

byte 1	byte 2	byte 3	byte 4	byte 5	byte 6	byte 7
<b>D_STAR</b>		<b>D_ID</b>	<b>D_LEN</b>	<b>D_INRC</b>	<b>D_PER1~N</b>	<b>D_CKS</b>

其中，D\_INRC 封包欄位的內容說明如下：

表 4.3 D\_INRC 封包欄位格式

<b>D_INRC</b>	控制指令模式。此功能區分為 2 種基本控制指令	
	資料表示	模式
	0	寫入控制指令
	1	讀取馬達目前位置資訊

由式 (4.3) 得知檢查碼運算公式為

$$D\_CKS = \sim (D\_ID + D\_LEN + D\_INSC + D\_PER 1 + \dots D\_PER N) \quad (4.4)$$

表 4.4 DC-Robot Arm 研究系統控制運動指令之封包格式

<b>Start Code</b>	<b>Arm ID</b>	<b>Number of Motor Joint</b>	<b>Motor Joint ID</b>
<b>Instruction</b>	<b>Connection of Motor Joint</b>	<b>Speed</b>	<b>Position</b>

其中，各封包欄位的內容說明如表 4.4 所示：

表 4.5 封包欄位表示式

<b>Start Code</b>	為封包的起始確認碼。表示開始進行
-------------------	------------------

	資料傳輸行為，每一組手臂部位的控制器將進入準備接收資料之狀態，開始進行接收資訊封包的動作。	
	資料表示	0X05
<b>Arm ID</b>	手臂部分識別代號。機器人系統共有兩個手臂控制器組，每手臂控制器會自行判斷是否與自己的識別代號相同，如識別結果為相等，則繼續讀取下一筆資料封包。如識別結果不相等，則離開封包接收程序。	
	資料表示	相對應之手臂控制器
	1	右手控制器 1 至 6 號
	2	左手控制器 7 至 12 號
<b>Number of Motor Joint</b>	控制單手臂的軸關節數量。	
	資料表示	1 至 6
<b>Motor Joint ID</b>	各軸關節識別代號。	
	資料表示	1 至 12 號

<b>Instruction</b>	控制指令模式。此功能區分為 2 種基本控制指令	
	資料表示	模式
	0	寫入控制指令
	1	讀取馬達目前位置資訊
<b>Connection of Motor Joint</b>	此資訊決定手臂控制器之馬達的控制權。	
	資料表示	功能
	0	禁能馬達運動控制權
	1	致能馬達運動控制權
<b>Speed</b>	控制馬達速度。	
	資料表示	功能
	0 至 7FH	馬達運動速度數值越大 越快
<b>Position</b>	馬達的最終位置。	
	資料表示	功能
	0 至 2D0H	馬達的角度位置

#### 4.4 影像訊號擷取結果

本論文使用雙眼視覺系統來取得特徵點的座標，雙眼視覺並不代表兩張影像、兩組二維影像資訊，而是兩張有“視差”的影像，因此雙眼的組成可以代表至少有兩張不同視角的影像。在特徵點的座標為攝影機座標系統(Camera Coordinate System, CCS)，則為三維座標(x, y, z)如圖 4.8 所示。

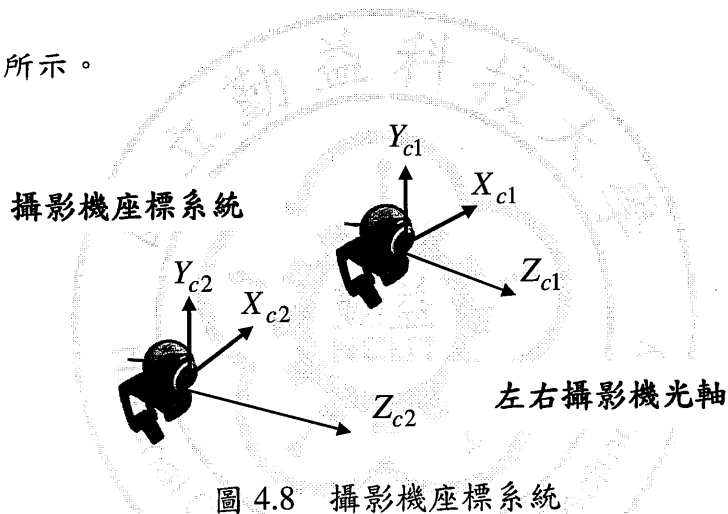
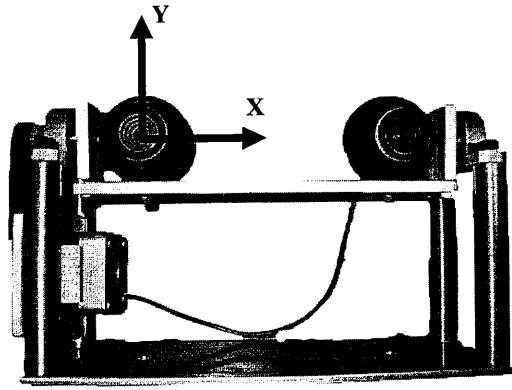
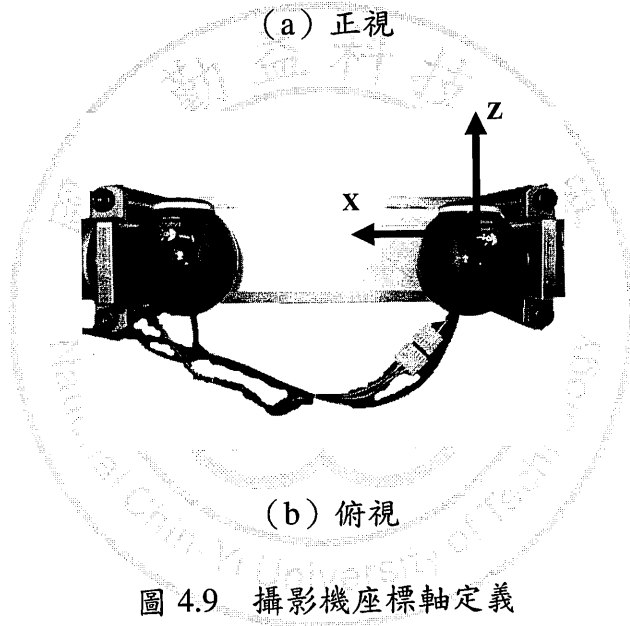


圖 4.8 攝影機座標系統

由於要跟機械手臂配合，機械手臂在工作空間之軌跡任務運動是以卡式座標系描述，而實際上機械手臂運動控制卻是由機械手臂的各軸關節運動組合來達成。因此，兩個座標系統統一使用攝影機座標為共同座標系統。圖 4.9 定義出攝影機座標系統之各軸方向，並說明是以右攝影機做為攝影機座標系統之原點。圖 4.10 為此實驗所要辨識的目標物，其分別為餐盤與瓶子。



(a) 正視



(b) 俯視

圖 4.9 攝影機座標軸定義



(a) 餐盤



(b) 瓶子

圖 4.10 目標物

表 4.5. 為目標物之特徵點的相機座標，其中負號表示為攝影機座標系統原點之右方與下方。

表 4.6 攝影機座標

單位 (mm)	餐盤		瓶子
	左邊點	右邊點	夾取點
X 軸	281.1	-145.8	76.35
Y 軸	-62.2	-62.2	1.62
Z 軸	533	533	438.5



## 4.5 機械手臂動作決策

機械手臂在移動時，會牽動連桿與軸關節之間的運動關係，或是雙眼視覺系統搭配機械手臂移動時，要能夠避免機械手臂與平台碰撞的情況下，讓末端效應器能夠準確到達目標物所在的座標執行動作，則需要有良好的動作決策，藉由流程圖與模擬比例 1:1 圖形的動作分解來介紹本章節。因此本節將介紹兩個機械手臂系統的整體決策流程，分別為 AI-Robot Arm 實驗系統與 DC-Robot Arm 研究系統。

- AI-Robot Arm 實驗系統決策流程

此系統是根據第三章的逆向運動學方法執行機械手臂的動作，其使用座標判斷演算法能使快速決定先執行哪些軸關節，並依序求出各角度解，完成整個機械手臂的動作流程。若只是給目標物的座標位置，末端效應器直接執行至座標位置，軸關節則會同步移動，可能產生機構碰撞。因此圖 4.11 用來解決 AI-Robot Arm 運動時，軸關節優先動作的判斷流程圖。

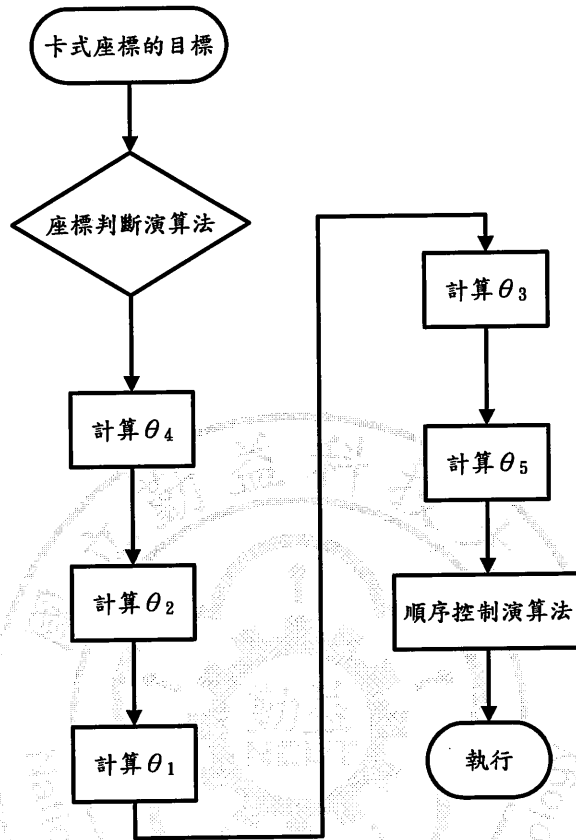


圖 4.11 AI-Robot Arm 實驗系統動作流程圖

由上述流程圖可說明圖 4.12 的動作，其圖中編號依序由左至右。當編號 0 機械手臂為初始狀態，正輸入卡式座標的目標位置時；編號 1 機械手臂經由位置判斷演算法，依序先移動肘關節 (Elbow Joint) 為  $\theta_4$ ；編號 2 移動肩關節 (Shoulder Joint) 為  $\theta_2$ ；編號 3 移動基座 (Base) 關節為  $\theta_1$ ；編號 4 移動上臂 (Upper Arm) 關節為  $\theta_3$ ；最後編號 5 移動腕關節 (Wrist Joint) 為  $\theta_5$ ，亦可達到目標位置。因此說明機械手臂移動時的角度優先順序，為機械手臂的最佳路徑。

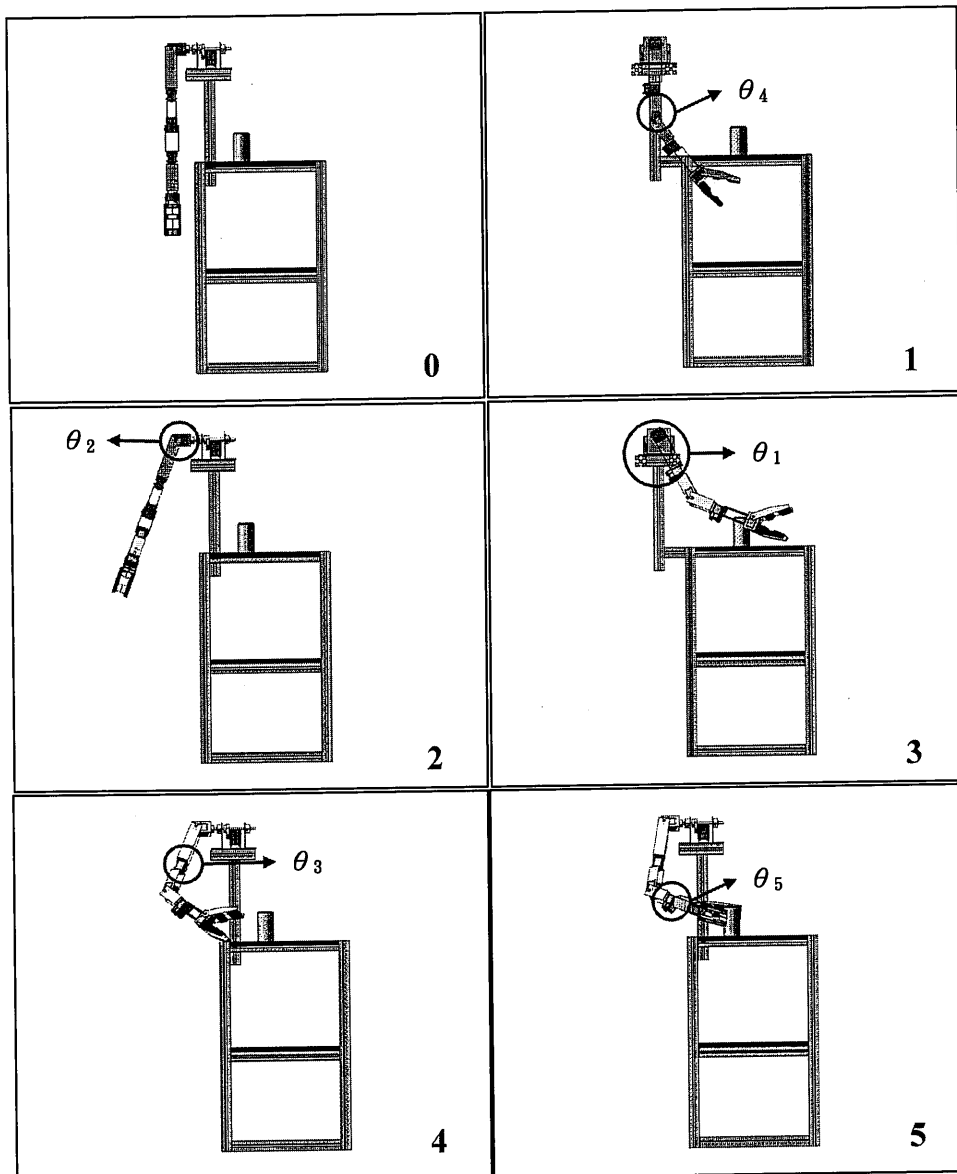


圖 4.12 AI-Robot Arm 實驗系統動作分解 (瓶子)

● DC-Robot Arm 研究系統決策流程

由於兩個機械手臂系統運動學方程一樣，可以從 AI-Robot Arm 實驗系統的動作決策，已經設定好的最佳路徑，作為 DC-Robot Arm 研究系統的主要動作決策之一。

從圖 4.13 先由辨識目標物，判斷目標物類型是否成功，否就持續進行辨識目標物，反之，輸出目標物座標，使用座標判斷演算法並依序求出各角度解，之後執行動作指令。

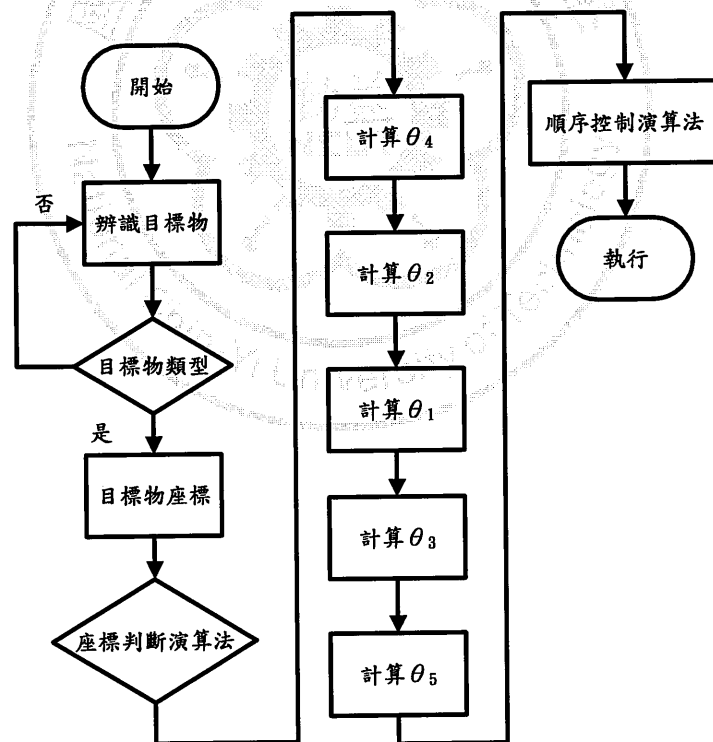


圖 4.13 DC-Robot Arm 研究系統動作流程圖

由上述流程圖可說明圖 4.14 和圖 4.15 的動作，其圖中編號依序由

左至右。當編號 0 點餐服務型機器人的雙眼視覺系統，會先辨識機器人托盤上的目標物的座標位置和類型，而目標物的類型分別是瓶子與餐盤；之後編號 1 至 5 則依序動作就如 AI-Robot Arm 實驗系統的動作決策一樣，而雙手取餐盤則是互相映射關係。

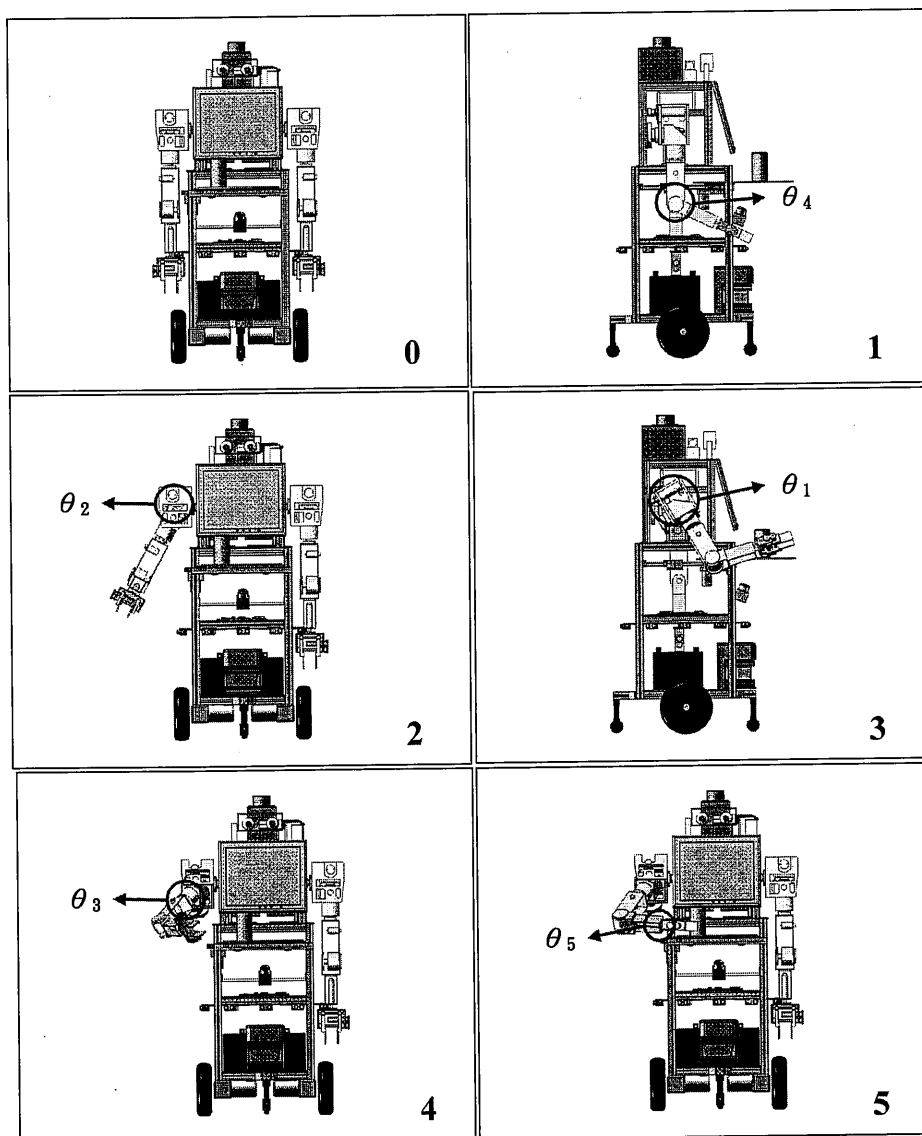


圖 4.14 DC-Robot Arm 研究系統動作分解 (瓶子)

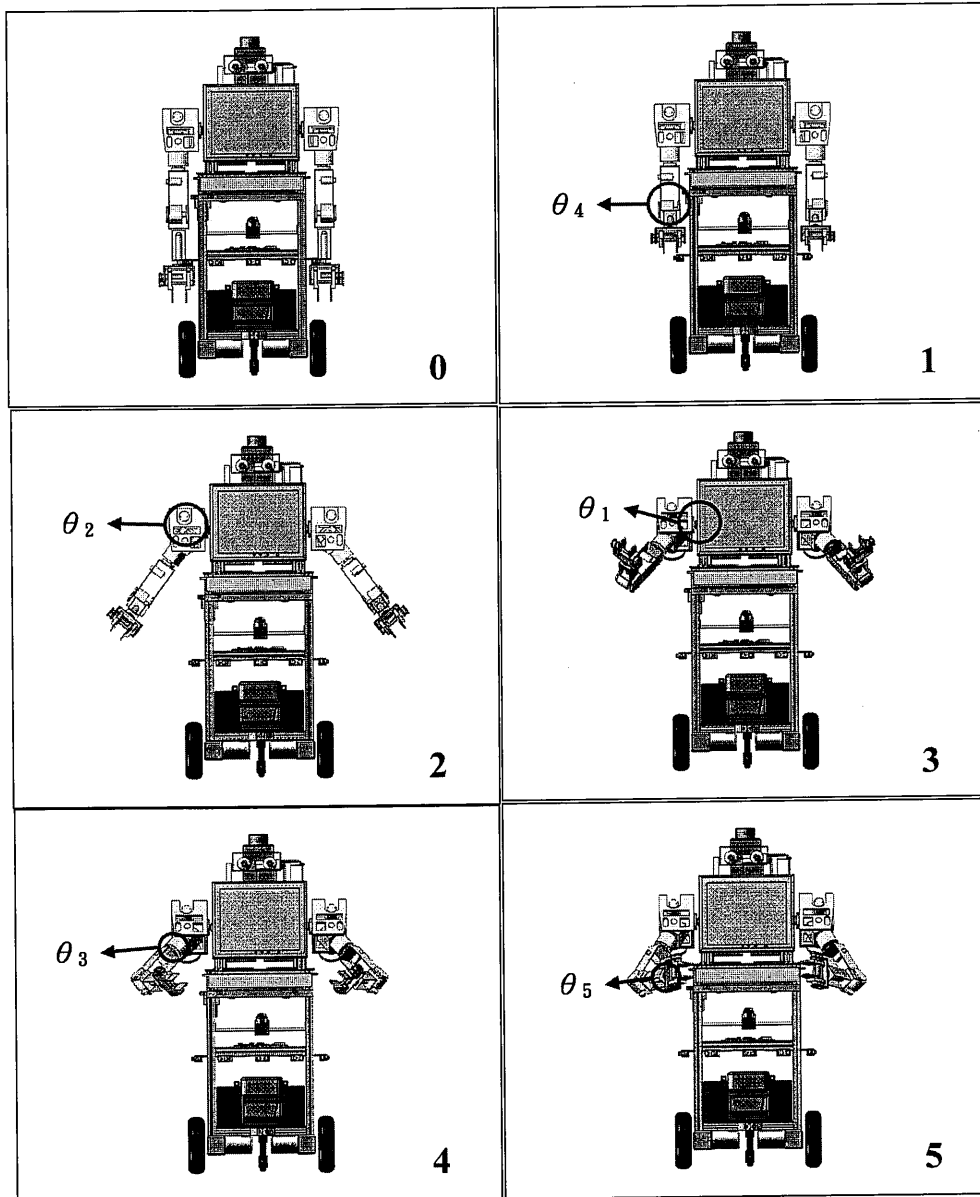


圖 4.15 DC-Robot Arm 研究系統動作分解 (餐盤)

## 第五章 實驗結果

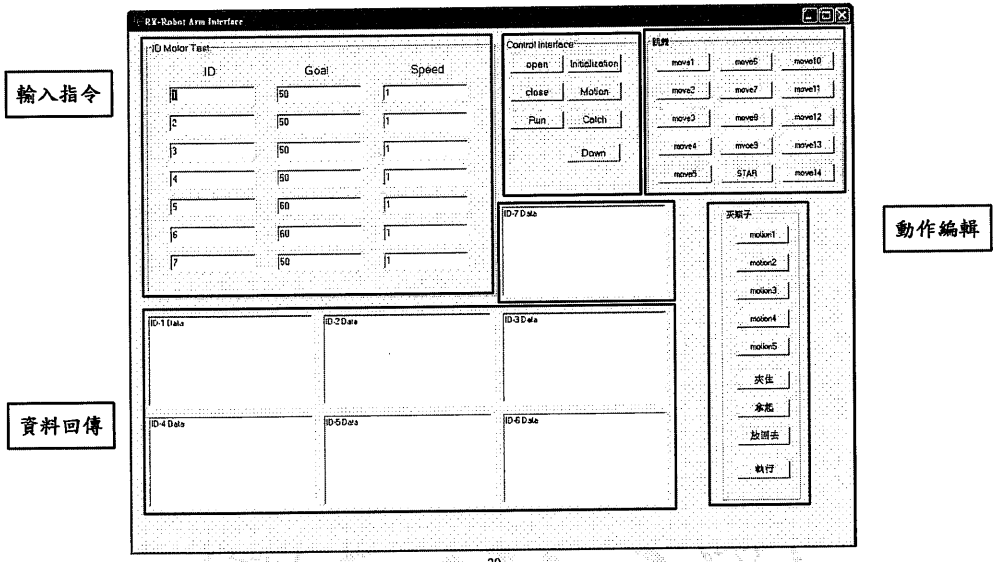
本章節將呈現兩個系統的實驗結果，分別為 AI-Robot Arm 實驗系統與 DC-Robot Arm 研究系統，此實驗的重點如下：

- 操作介面
- 機械手臂動作模擬分析
- 機械手臂系統實驗結果

### 5.1 操作介面

如圖 5.1 為使用 Borland C++ 的編輯軟體所開發的 AI-Robot Arm 實驗系統介面，其主要介面分成四個部份，輸入指令的部份可輸入軸關節的 ID 編號，角度目標以及速度等封包資料；開啟與執行的部份為開啟 RS-232 的通訊按鈕，以及執行動作；動作編輯的部份可編輯成連續動作如夾目標物；資料回傳的部份可顯示各軸關節的 AI 伺服馬達的回傳數值。圖 5.2 為 DC-Robot Arm 研究系統介面，其介面為三個部份，開啟與 ID 更改的部份為開啟 RS-232 的通訊按鈕，以及軸關節的 ID 編號；位置與速度的部份控制軸關節的位置角度與旋轉速度；動作編輯的部份可編輯雙手臂的行為動作。

開啟與執行



輸入指令

動作編輯

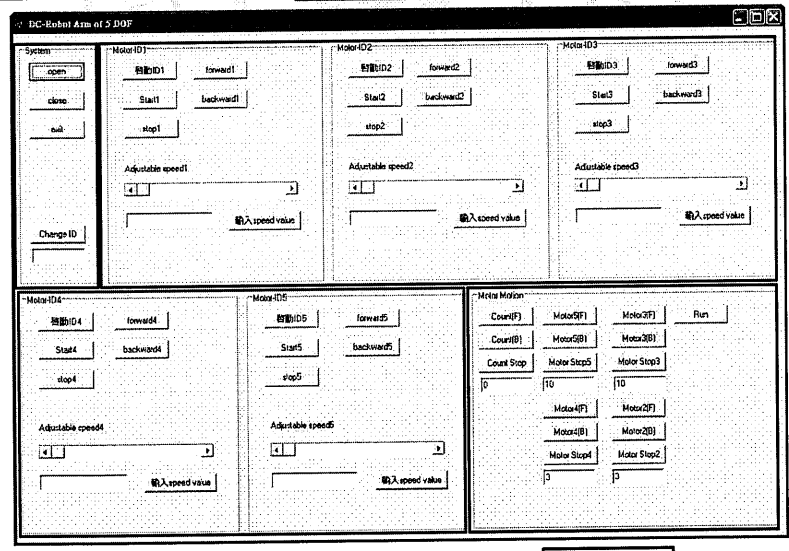
資料回傳

20

圖 5.1 AI-Robot Arm 實驗系統介面

開啟與ID更改

位置與速度



動作編輯

圖 5.2 DC-Robot Arm 研究系統介面

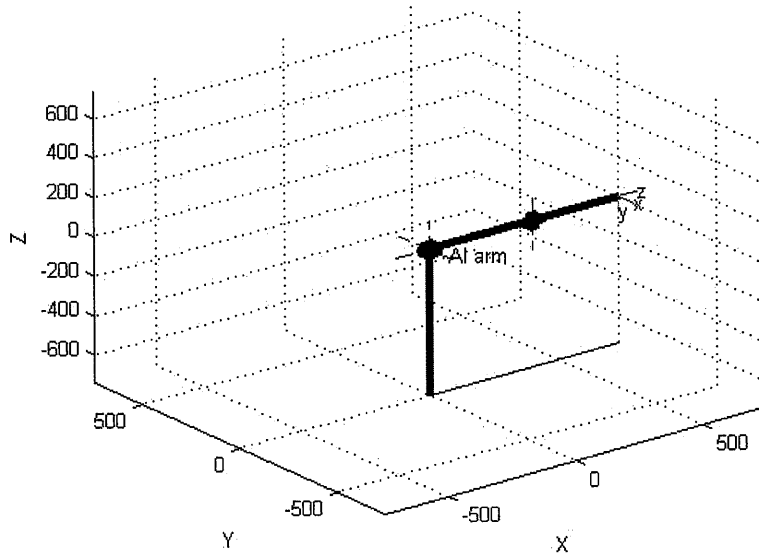


## 5.2 機械手臂動作模擬分析

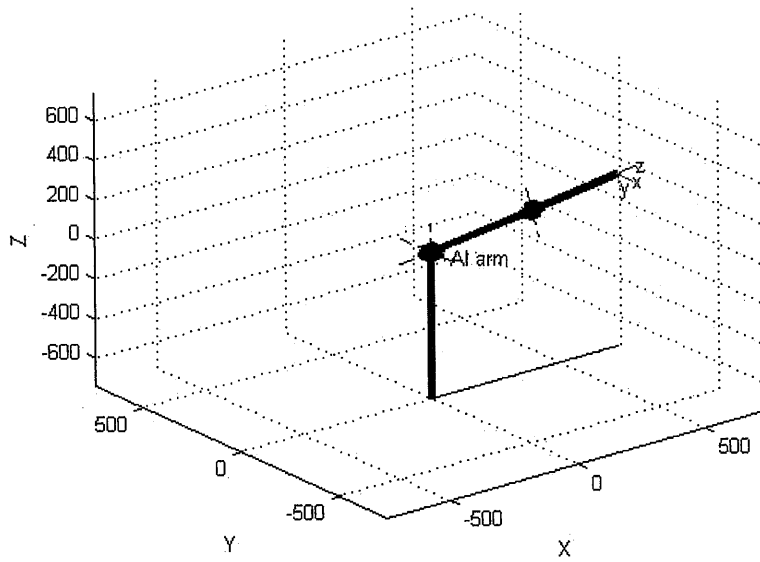
本章將 AI-Robot Arm 實驗系統及 DC-Robot Arm 研究系統的運動行為，以 MATLAB 軟體模擬機械手臂的動作，分析每關節的角度位置以及末端效應器的位置空間。在兩系統的點對點 (Point to Point) 運動實驗中，第一部分是 AI-Robot Arm 實驗系統，動作模擬為夾瓶子，由起始點從 (0, 0, 730) mm 移動到結束點 (221, 468, 90) mm，各軸運動角度如表 5.1 所示，針對點對點運動實驗資料進行手臂運動空間模擬測試如圖 5.3 所示。

表 5.1 AI-Robot Arm 點對點運動實驗資料

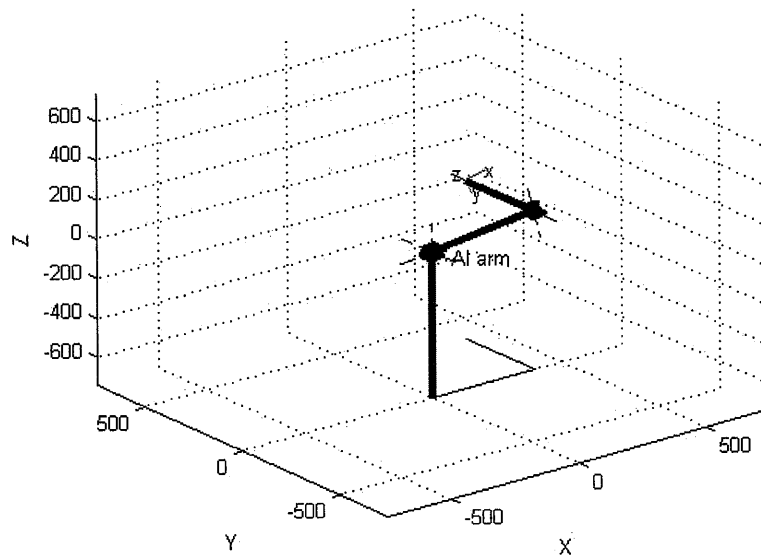
AI-Robot Arm	Joint1	Joint2	Joint3	Joint4	Joint5
Initial (0, 0, 730)	0°	0°	0°	0°	0°
Destination (221, 468, 90)	30°	55°	-120°	-90°	10°



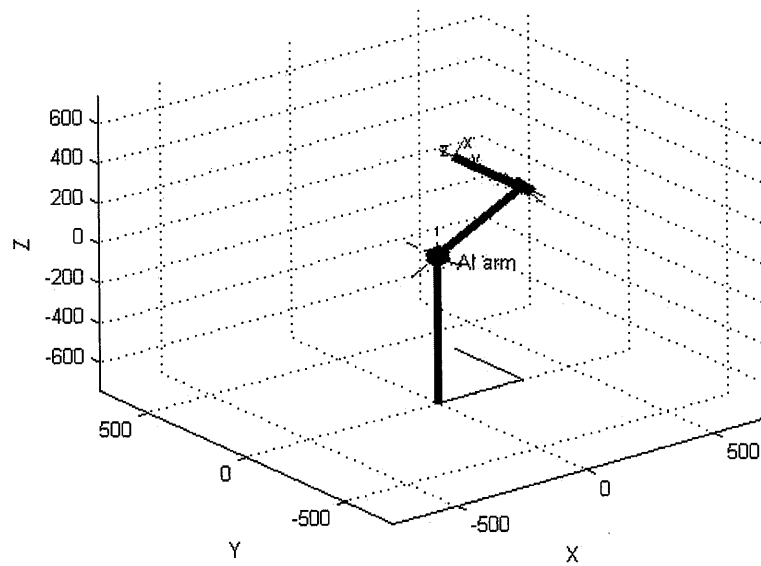
(a)



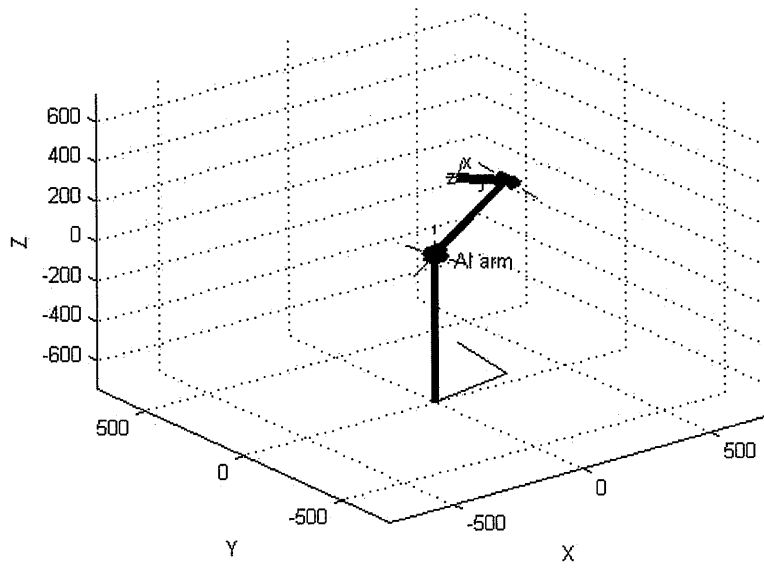
(b)



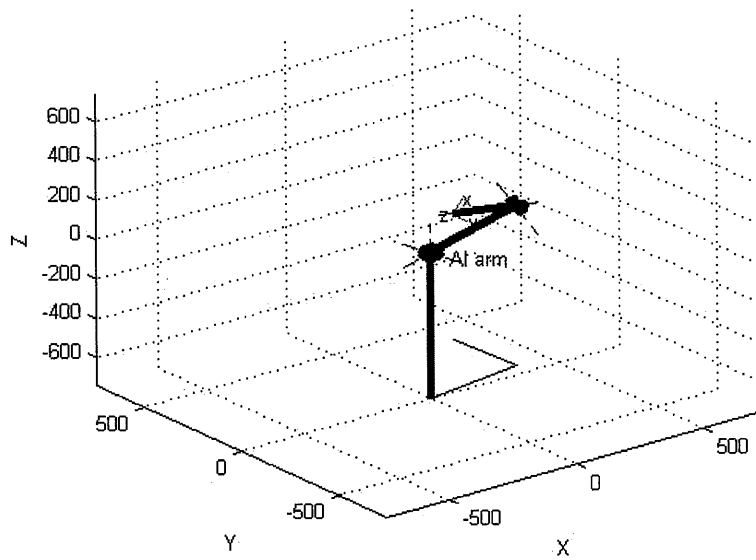
(c)



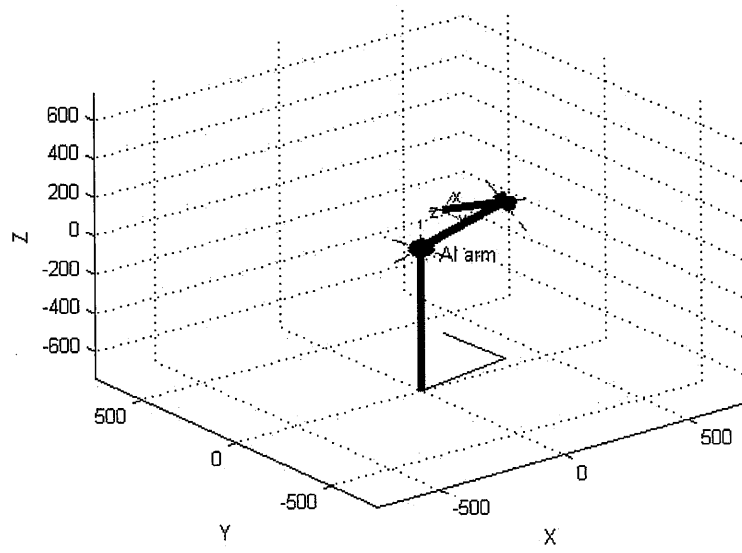
(d)



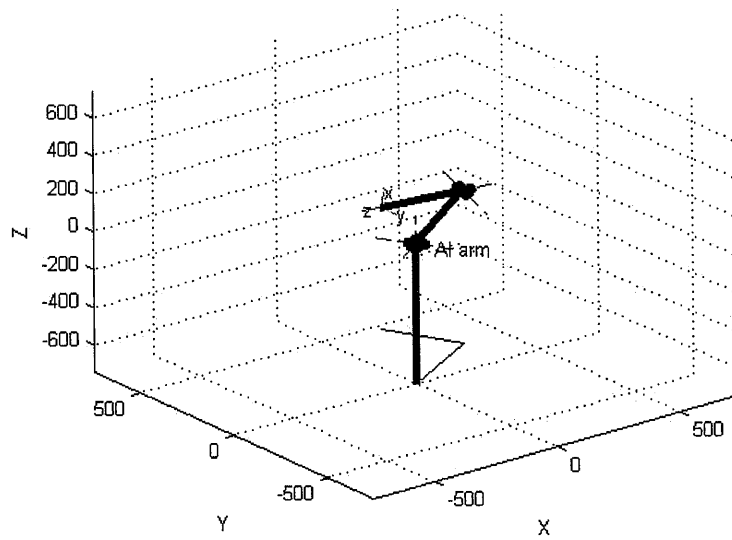
(e)



(f)



(g)



(h)

圖 5.3 AI-Robot Arm 動作模擬結果

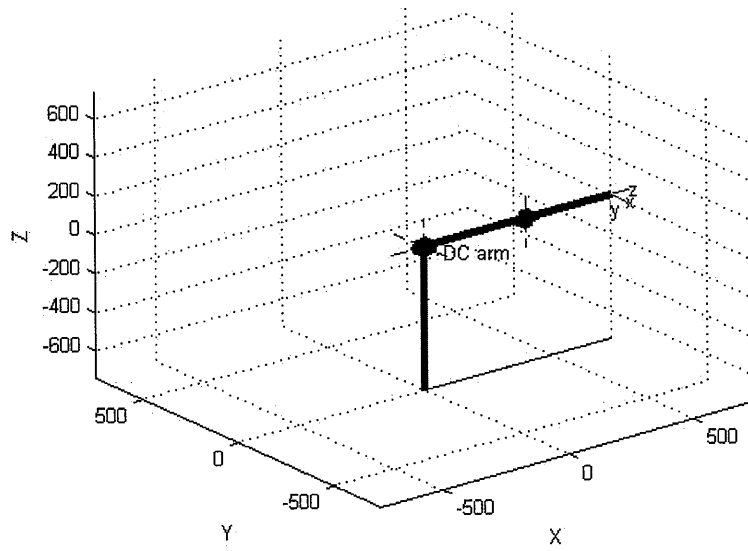
第二部份是 DC-Robot Arm 研究系統，動作模擬分別是夾瓶子與端餐盤，由起始點從 (0, 0, 740) mm 移動到結束點 (36, 422, -58) mm 和 (9, 424, -49) mm，各軸運動角度如表 5.2 和 5.3 所示，針對點對點運動實驗資料進行手臂運動空間模擬測試如圖 5.4 和 5.5 所示。

表 5.2 DC-Robot Arm 點對點運動實驗資料 (瓶子)

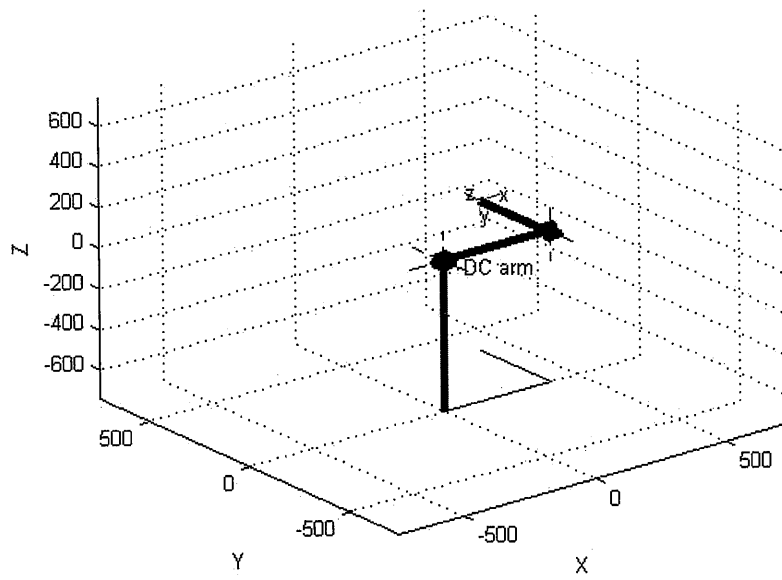
DC-Robot Arm	Joint1	Joint2	Joint3	Joint4	Joint5
Initial (0, 0, 740)	0°	0°	0°	0°	0°
Destination (36, 422, -58)	40°	80°	-110°	-110°	-30°

表 5.3 DC-Robot Arm 點對點運動實驗資料 (餐盤)

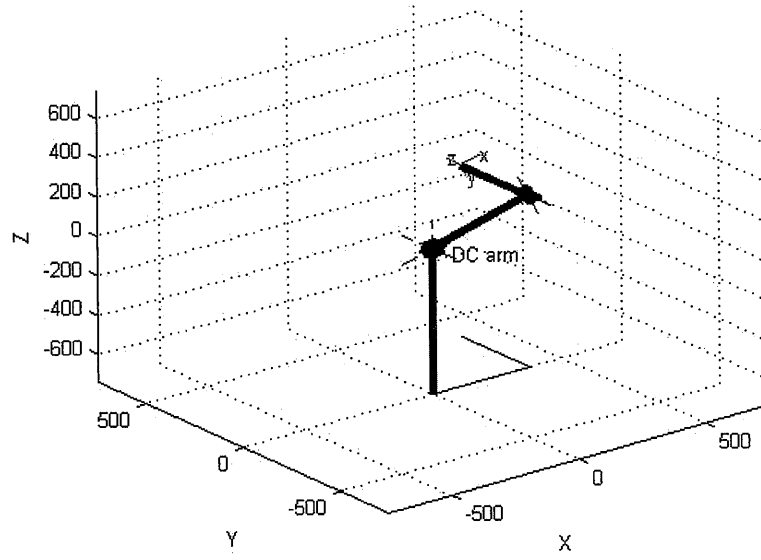
DC-Robot Arm	Joint1	Joint2	Joint3	Joint4	Joint5
Initial (0, 0, 740)	0°	0°	0°	0°	0°
Destination (9, 427, -49)	40°	110°	-110°	-110°	-60°



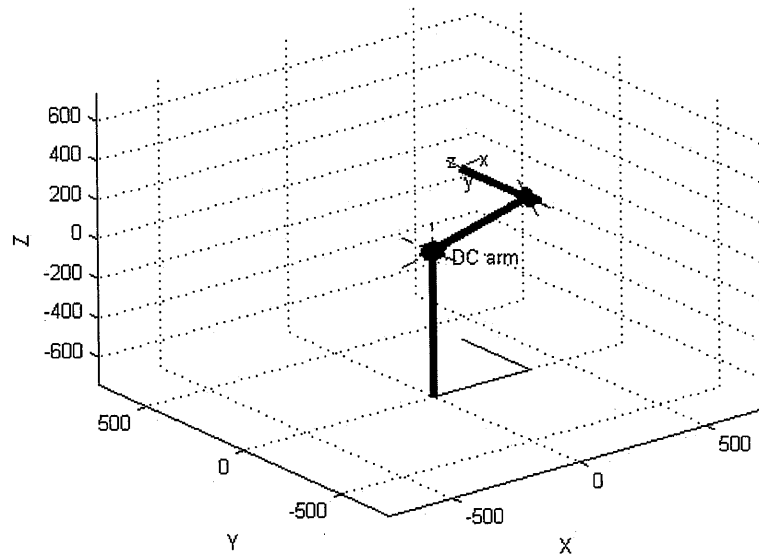
(a)



(b)

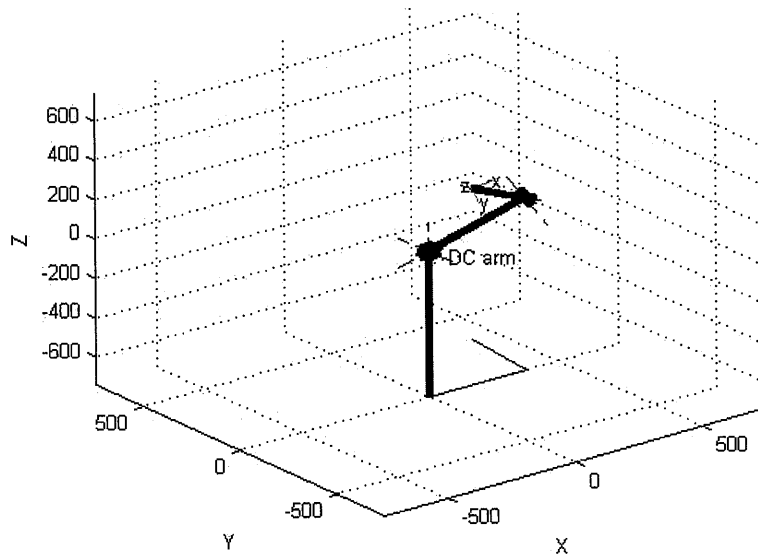


(c)

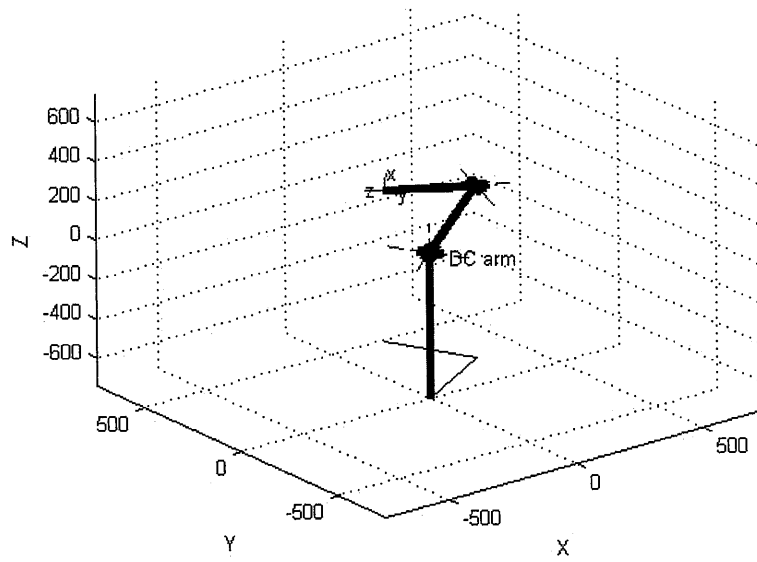


(d)

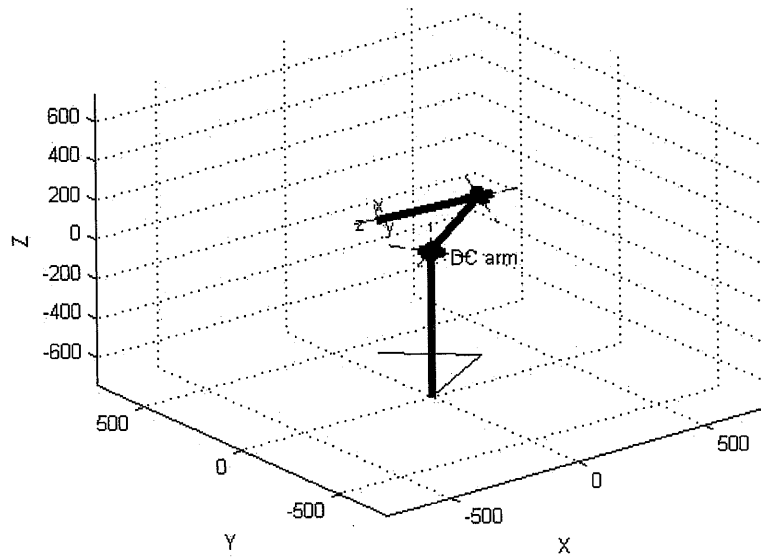




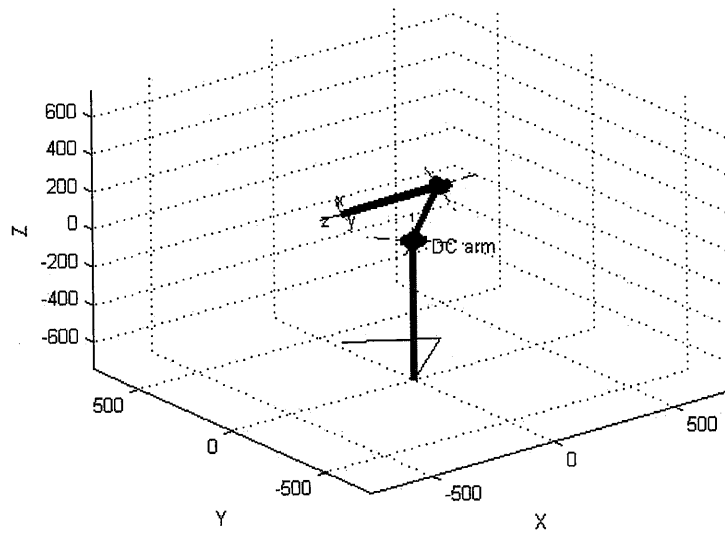
(e)



(f)

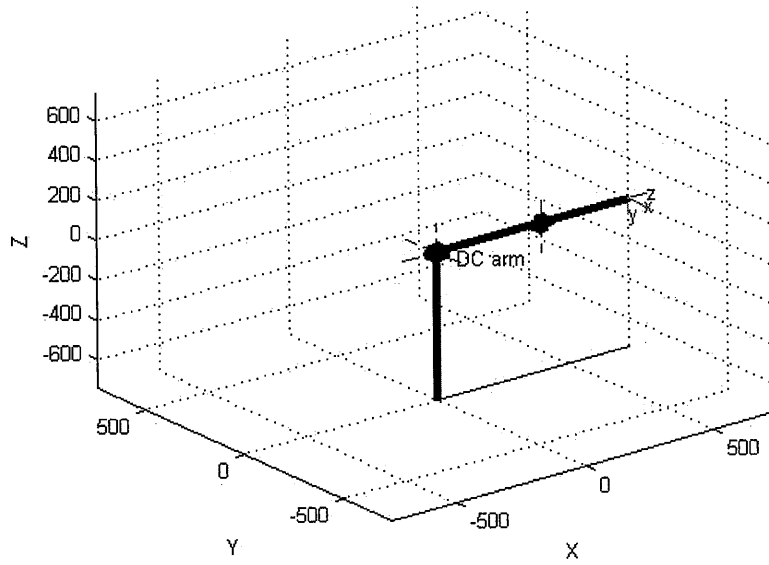


(g)

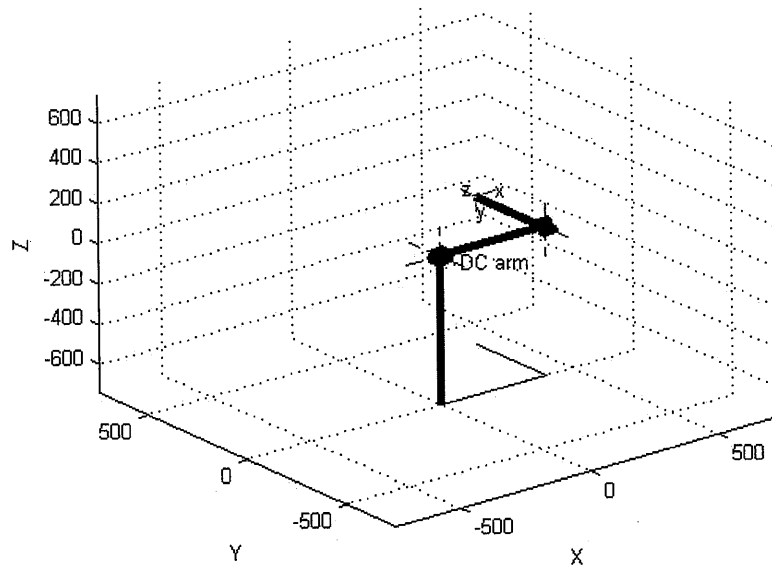


(h)

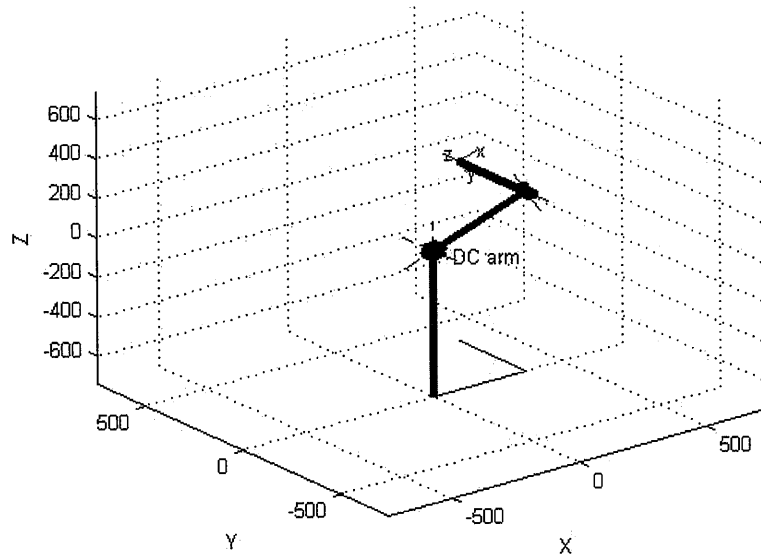
圖 5.4 DC-Robot Arm 動作模擬結果 (瓶子)



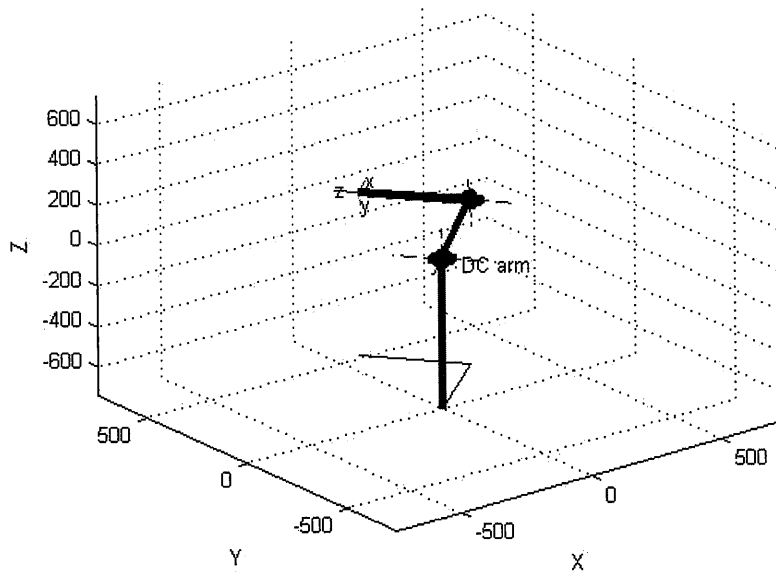
(a)



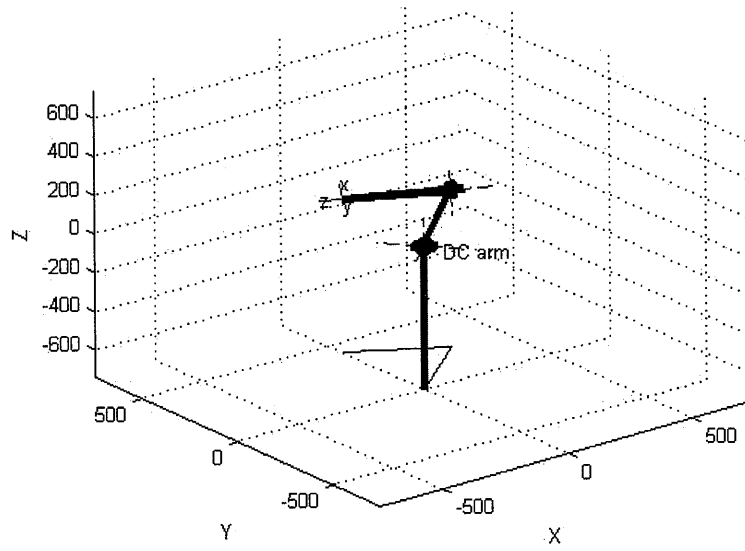
(b)



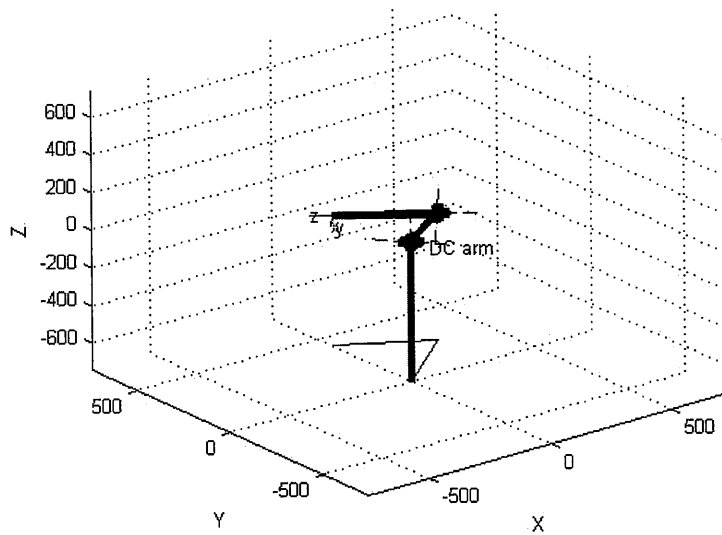
(c)



(d)



(e)

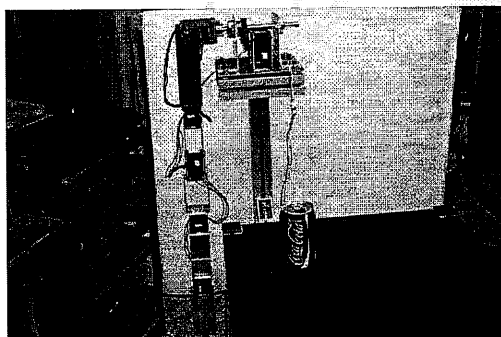


(f)

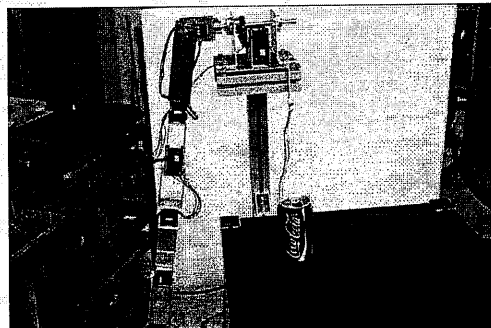
圖 5.5 DC-Robot Arm 動作模擬結果 (餐盤)

### 5.3 機械手臂系統實驗結果

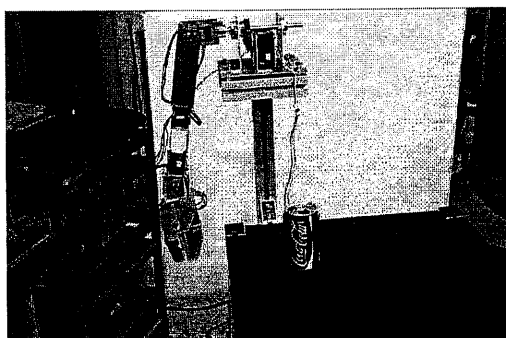
本章將 AI-Robot Arm 實驗系統及 DC-Robot Arm 研究系統的運動行為做實際測試，第一部分如圖 5.6 為展示抓取瓶子的動作行為，其動作分別由 (a) 和 (b) 是準備，(c) 和 (d) 是舉起、(e) 和 (f) 是鎖定及 (g) 和 (h) 是拿起。則系統使用座標判斷演算法，首先輸入該目標物的座標位置，用逆向運動學解出機械手臂該軸關節應旋轉的角度位置，和順序控制的方式執行末端效應器至目標物的座標位置。



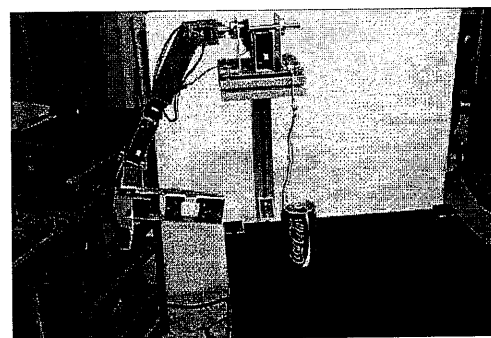
(a)



(b)



(c)



(d)

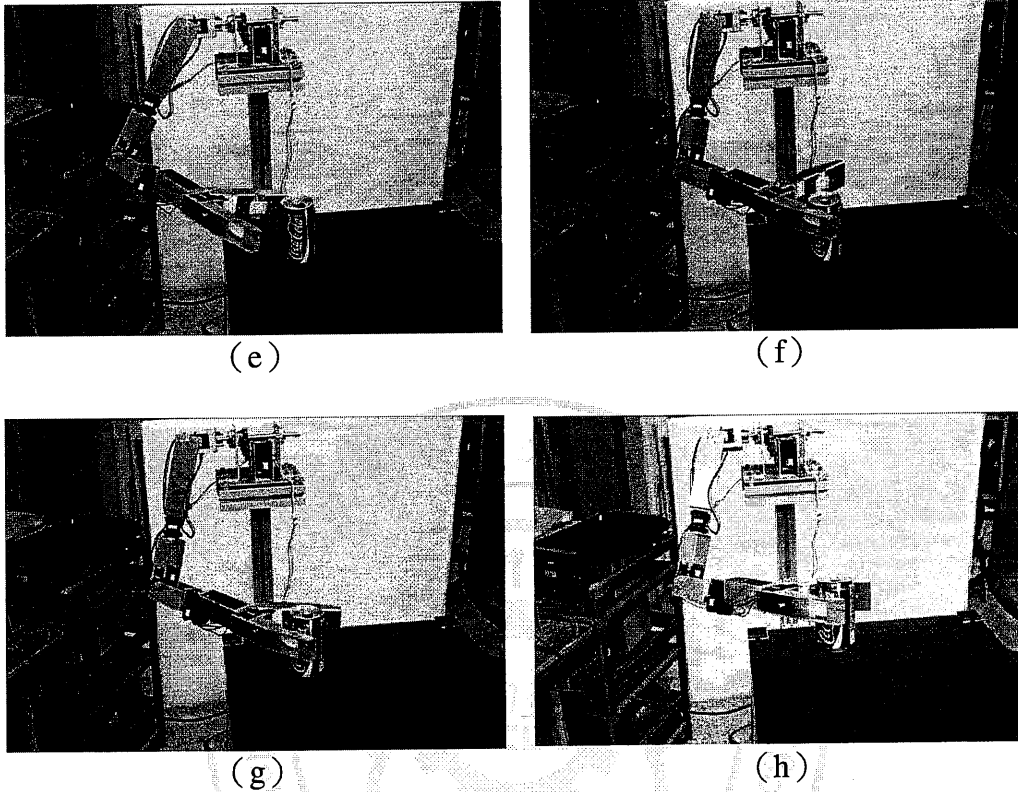
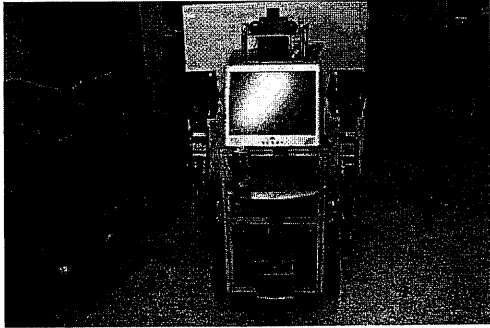
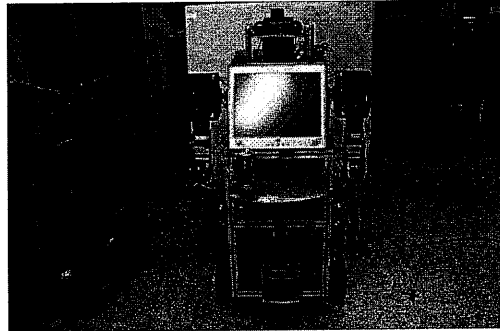


圖 5.6 AI-Robot Arm 實驗系統抓取的動作行為 (瓶子)

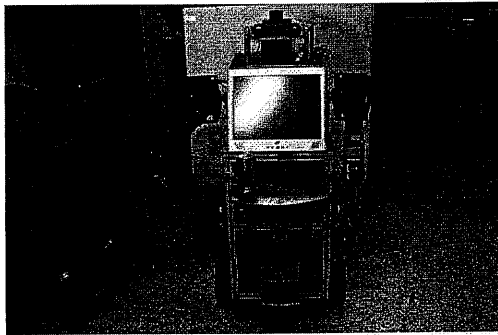
第二部分如圖 5.7 和圖 5.8 為展示單手夾瓶子和雙手端餐盤的動作行為，其兩個執行動作一樣分別由準備、舉起、鎖定及拿起。點餐服務型機器人上的雙眼視覺系統，使用視覺辨識與座標判斷演算法，根據表 4.5 的資料來辨識該目標物的類型與座標位置，其用逆向運動學解出機械手臂該軸關節應旋轉的角度位置，用順序控制的方式執行末端效應器至目標物的座標位置。



(a)



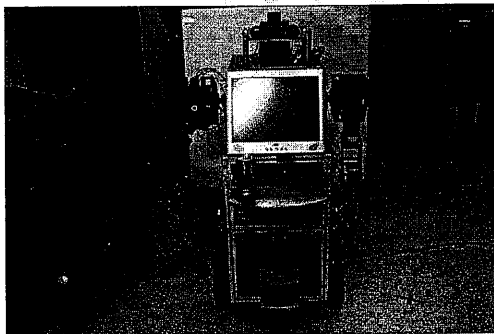
(b)



(c)



(d)

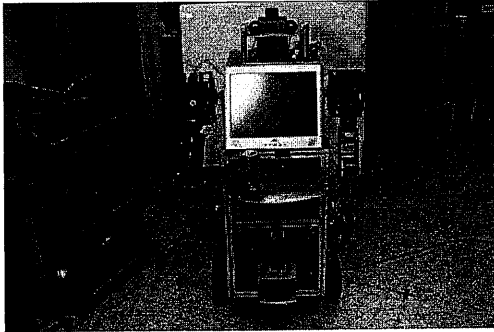


(e)

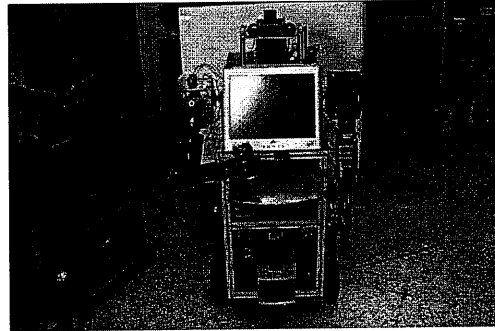


(f)



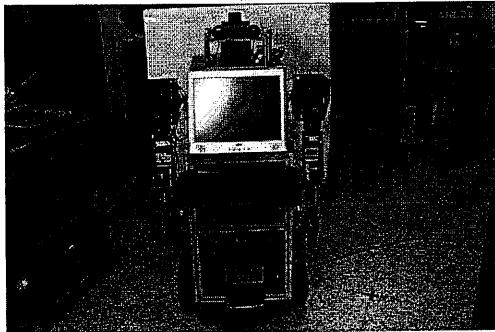


(g)

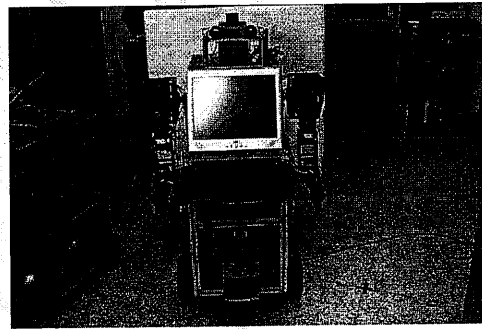


(h)

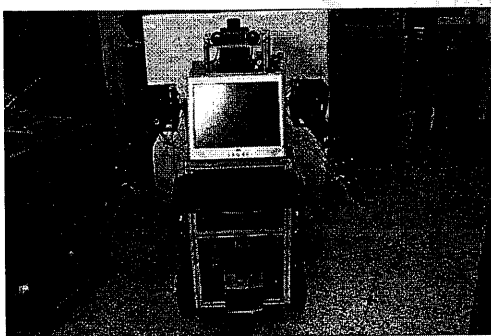
圖 5.7 DC-Robot Arm 研究系統抓取的動作行為 (瓶子)



(a)



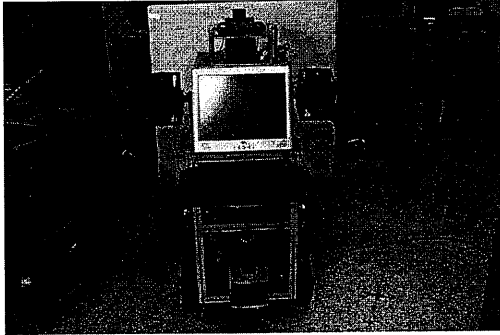
(b)



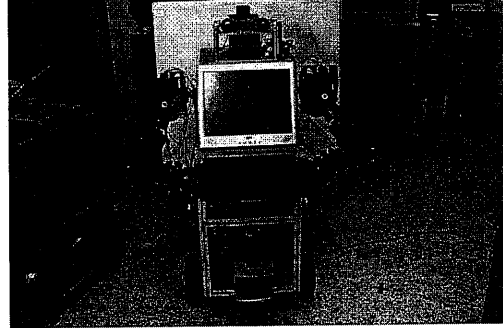
(c)



(d)

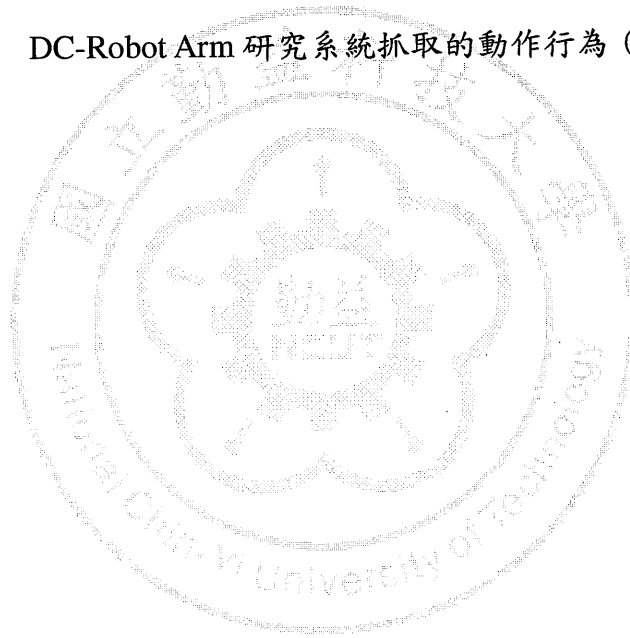


(f)



(g)

圖 5.8 DC-Robot Arm 研究系統抓取的動作行為 (餐盤)



## 第六章 結論與未來展望

### 6.1 結論

本文使用 AI 伺服馬達的伺服架構原理為基礎，用來建立一套伺服系統，並自訂封包傳輸的格式。本論文的研究中，先從 AI-Robot Arm 實驗系統開始探討，進而延伸 DC-Robot Arm 研究系統，其伺服架構的核心為 PIC18F4520，專門處理光學編碼器解碼，與 PC Base 的介面溝通的橋樑。因此，得以完成點餐服務型機器人，利用雙眼視覺系統，配合機械手臂運動控制系統，拿取瓶子或餐盤的目的。本研究所完成的項目如下：

#### (1) 硬體部分

1. 光學編碼器解碼電路：偵測馬達實際轉動角度。
2. 脈波寬度調變：為馬達的速度控制。
3. 機械手臂機構：使用 SolidWorks 繪圖軟體設計與製作。

#### (2) 軟體部分

1. 逆向運動學推導：求出末端效應器座標與角度的關係式。
2. 運動控制：使用順序控制方式控制機械手臂。
3. 動作行為：使用雙眼視覺系統的座標結果，可進行抓取目標物的行為控制。

## 6.2 未來展望

本篇論文主要為了實現建立一套伺服系統，並自訂封包傳輸的格式，應用於機械手臂的運動設計與決策。未來本系統將可進行共能性的改良，包含以下幾點：

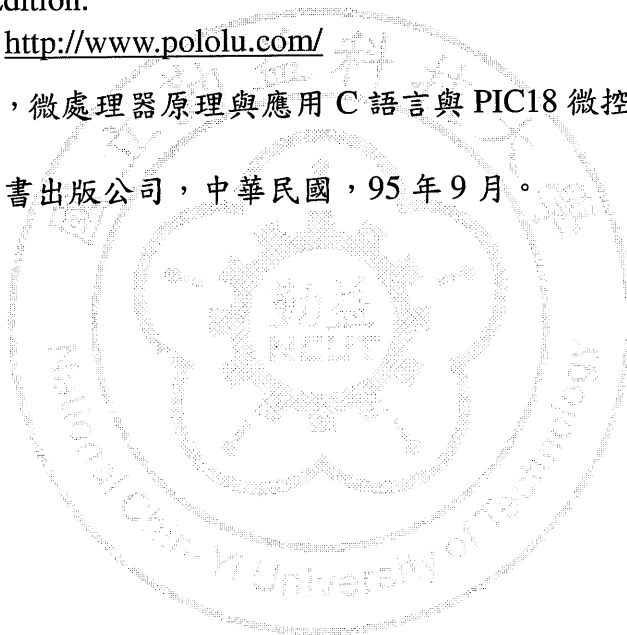
1. 因為兩個機械手臂的系統上都為 5 軸自由度之設計，都少了腕關節的左右方向，未來可以在此部位多增加 1 軸自由度，解除機械手臂的自由限制。
2. 本研究使用運動學的方式，雖然可以達到目標位置，但是實際應用中，動力學的控制方式卻是相當地重要，若有辦法使用電流檢測方式得到受力狀況，進行補償的話，在伺服系統將是一大突破。
3. 在控制的方法採用順序控制方式，未來可以加上模糊控制器，或是具有強健性的控制方法，使系統更加穩定。

## 參考文獻

- [1] Robotis. <http://www.robotis.com>.
- [2] R. S. Hartenberg and J. Denavit, "A kinematic notation for lower pair mechanisms based on matrices," *Journal of Applied Mechanics*, vol. 77, pp. 215–221, June 1955.
- [3] Yujie Cui, Pu Shi, and Jianning Hua, "Kinematics analysis and simulation of a 6-DOF humanoid robot manipulator," *IEEE Informatics in Control, Automation and Robotics (CAR), 2010 2nd International Asia Conference on*, vol. 2, pp. 246-249, 2010.
- [4] Deok Hui Song, and Seul Jung, "Geometrical Analysis of Inverse Kinematics Solutions and Fuzzy Control of Humanoid Robot Arm under Kinematics Constraints," *ICMA 2007. Int. Conf. Mechatronics and Automation*, pp.1178 - 1183, 2007.
- [5] Kai-Fei Shi, Rui-Feng Li. "Kinematics of service robot bionics arm," *Journal of Harbin Institute of Technology*, Vol. 35, No. 7, pp. 806-808, July, 2003.
- [6] Tie-jun Zhao, Jing Yuan, Ming-yang Zhao, and Da-Iong Tan, "Research on the Kinematics and Dynamics of a 7-DOF Arm of Humanoid Robot," in *proc. of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, pp. 1553-1558.2006.
- [7] E.A. Merchan-Cruz, and A.S. Morris, "Fuzzy-GA-Based Trajectory Planner for Robot Manipulators Sharing a Common Workspace," *Int. J. Robot. Res.*, vol. 5, pp. 90–98, 2006.
- [8] C.C. Cheah, C. Liu, and H.C. Liaw, "Stability of inverse Jacobian control for robot manipulator," *Control Applications, Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on*, pp.321-326, 2004.
- [9] C. H. An, C. G. Atkeson, J. D. Griffiths, and J. M. Hollerbach, "Experimental Evaluation of Feedforward and Computer Torque Control," in *proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (Raleigh, Nc, Mar.31-Apr.3. 1987)*, pp.165-168.
- [10] Sproos Tzafestas, and Leonidas Dristas, "Combined Computed Torque and Model Reference Adaptive Control of Robot System," *Journal of the Franklin Institute*. Vol.327, No.2, pp. 273-294, 1990.

- [11] M.O. Efe, "Fractional Fuzzy Adaptive Sliding-Mode Control of a 2-DOF Direct-Drive Robot Arm," Part B: Cybernetics, IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 38, pp. 1561 – 1570, 2008.
- [12] M. Tarokh, and Mikyung Kim, "Inverse Kinematics of 7-DOF Robots and Limbs by Decomposition and Approximation," IEEE Transactions on Robotics, Vol. 23, pp.1552-3098, 2007.
- [13] Jun Zhou, and Yueqing Yu, "Simulation and control of reconfigurable modular robot arm based on close-loop real-time feedback," IEEE Transactions on Computer Engineering and Technology (ICCET), Vol.3, 2010.
- [14] T.I.J. Tsay, and C.H. Lai, "Design and Control of a Humanoid Robot," IEEE Transactions on Intelligent Robots and Systems, 2006.
- [15] Yugui Yang, Guangzheng Peng, Yifeng Wang, and Hongli Zhang, "A New Solution for Inverse Kinematics of 7-DOF Manipulator Based on Neural Network," IEEE Transactions on Automation and Logistics, 2007.
- [16] 黃緒哲、巫憲欣，以系統晶片發展具機器視覺之機械手臂運動控制，國立台灣科技大學機械工程系碩士學位論文，中華民國，台北市，95年6月。
- [17] 李祖聖、邱仕榮，移動平台與手臂運動控制器之設計與實現，國立成功大學電機工程學系碩士論文，中華民國，台南市，98年7月。
- [18] 王文俊、陳漢忠，智慧型搭乘電梯機器人，國立中央大學電機工程學系碩士論文，中華民國，桃園縣，98年6月。
- [19] 鄭智湧，謝宜立，具視覺可移動式之投球機器手臂，國立台灣海洋大學電機工程學系碩士論文，中華民國，基隆市，97年6月。

- [20] 陳慶瀚、紀恩凱，仿生物六腳機器人之控制系統設計與行為建模，義守大學電機工程學系碩士班碩士論文，中華民國，高雄市，94年7月。
- [21] 晉茂林，機器人學，五南圖書出版公司，中華民國，98年2月。
- [22] John J. Craig, Introduction to Robotics Mechanics and Control, Third Edition.
- [23] Pololu. <http://www.pololu.com/>
- [24] 曾百由，微處理器原理與應用 C 語言與 PIC18 微控制器第二版，五南圖書出版公司，中華民國，95年9月。



## 作者簡介

作者簡介

姓名：蕭順徽 (*Shun-Hui Hsiao*)

出生日期：1986 年 10 月 18 日

籍貫：臺灣省雲林縣

學歷：

2002/9~2005/6 新興高中 電子科

2005/9~2009/6 國立勤益科技大學 電子工程系 四技部

2009/9~2011/7 國立勤益科技大學 電子工程系研究所 電子組

論文著作：

[1] Guo-Shing Huang, Chiou-Kou Tung, Hsiung-Cheng Lin, and Shun-Hui Hsiao "Inverse Kinematics Analysis Trajectory Planning for a Robot Arm," Proceedings of 2011 ASCC Asian Control Conference, pp.965-970Kaohsiung, Taiwan, May 15-18, 2011.

研究經歷：

1. 第二代點餐服務型機器人
2. 第三代點餐服務型機器人
3. PMC 精密機械-智慧型機器人產業發展推動計畫
4. 教學卓越計畫次子計畫 E-2-3：建構跨領域智慧型機器人學程





比賽經歷：

1. 2007 第一屆凌陽盃系統晶片創意應用設計大賽 佳作獎
2. 2008 第二屆凌陽盃系統晶片創意應用設計大賽 第二名
3. 2009 第三屆凌陽盃系統晶片創意應用設計大賽 佳作獎
4. 2010 第四屆凌陽盃系統晶片創意應用設計大賽 佳作獎
5. 2008 全國技專校院學生實務專題製作競賽 第三名
6. 2010 第三屆上銀智慧機器手 入圍
7. 2010 第三屆新光保全機器人競賽-雙足人型組 入圍
8. 2009 第二屆智慧型機器人產品創意競賽-夢想實現組 入圍
9. 2010 第三屆智慧型機器人產品創意競賽-夢想實現組 入圍
10. 第 12 屆 TDK 盃全國大專院校創思設計與製作競賽 入圍