

力覺回饋系統於機器人遠端操控之應用

研究生：梁少麟

指導教授：楊谷洋 博士

國立交通大學 電機學院與資訊學院 電機與控制學程（研究所）碩士班

摘要



在一些具有危險性或未知的環境中，可使用遠端操控技術來遙控機器人以達成任務。爲了要讓操作者能更真實感覺到遠端環境並且靈活的操控機器人，需要在遠端操控系統中加入遠端呈現的技術。我們實驗室已發展一套結合虛擬實境之遠端操控機器人系統，透過實驗室自行開發的力回饋搖桿以及本論文所發展的力感測機械夾爪，達成遠端操控系統中的力覺回饋功能。使用者可藉由操縱搖桿來控制遠端的夾爪，並得到遠端環境的力覺資訊，讓遠端環境的觸覺的資訊能夠在近端呈現。由於之前實驗室所開發的機械夾爪只是開迴路系統，無法達到控制的需求，本論文所提出的閉迴路系統加上控制法則，來執行夾取、提起、放下的動作，藉此達到與環境互動的效果，我們以實地夾取番茄及雞蛋等非常柔軟且易碎的物品來印證所發展系統的有效性。

Applying Force-Reflection System for Robotic Telemanipulation

Student : Sho-Lin Liang

Advisor : Dr. Kuu-Young Young

Degree Program of Electrical Engineering and Computer Science

National Chiao Tung University



For the hazardous or uncertain environment, we can use the telerobotic system for task execution. To let people have a more realistic feeling of the remote environment and manipulate the robot more efficiently, we need to enhance telepresence for the telerobotic system. Our laboratory has developed a VR-based networked telerobotic system. For its enhancement, in this thesis, we develop a force-reflection system, which consists of the joystick and gripper with force-reflection capability. The operator can use the joystick to manipulate the gripper. And also receive haptic feedback from the remote environment. A closed-loop control system with PID control is built in the system for force regulation. For demonstration, we use the developed force-reflection system to grasp fragile object.

誌 謝

誠摯地感謝指導教授楊谷洋博士，在這兩年內的指導與教誨，使學生的研究工作可以順利完成，尤其是最後的論文寫作，經由老師多次細心指正，方得以圓滿呈現。同時，也深深感謝口試委員蘇順豐教授、宋開泰教授、以及陳永平教授，於百忙中抽空參加我的畢業論文口試，並對本論文提出許多建議與指導，使我受益匪淺。

感謝父母親的鼓勵，感謝賢內助的支持，讓在我做研究時無後顧之憂；也感謝兩個寶貝兒子家綸、家瑋，你們的乖巧及偶而的刺激是我的動力來源。有了你們，過程中所遭遇的困難及挫折亦不足為懼，是你們，使一切努力顯得意義非凡。

還有同在人與機器實驗室的夥伴們，感謝洺樞的經驗傳授，一元學長在觀念上的指引，木政學長在硬體上的指導，及豪宇學長在論文研讀時的指正，感謝同學榮聰、政龍跟猷長彼此間的互相勉勵，還有修任及學弟李政、哲儒、怡康、博翔、又勳，有了大家的共勉，為實驗室添加了一股活力，感謝大家，我才能順利拿到碩士學位，謝謝你們！

目錄

中文摘要	i
英文摘要	ii
誌謝	iii
目錄	iv
表目錄	v
圖目錄	vi
1. 導論	1
2. 力覺回饋系統	4
2.1. 系統架構	4
2.2. 機械夾爪	5
2.3. 伺服驅動系統	8
2.4. 力感測系統	9
2.4.1. 觸覺感測器	9
2.4.2. 力感測系統	10
2.4.3. 力感測器校正實驗	12
2.5. 力回饋搖桿系統	14
2.6. 控制介面卡	16
3. 系統分析	19
3.1. 永磁直流馬達數學模型	19
3.2. 齒輪列數學模型	23
3.3. 負載數學模型	27
3.4. 力量接觸模型	28
3.5. 系統轉移函數	30
3.6. 系統識別	32
3.7. 穩態誤差	39
4. 操控機制	41
4.1. 夾取物體分析	41
4.2. PID 控制	43
4.3. 實作控制原則	47
5. 實驗結果	49
6. 結論	61
6.1. 未來工作	61
參考文獻	63

表目錄

表 2-1 夾爪馬達驅動系統硬體規格	7
表 2-2 力感測系統硬體規格	11
表 2-3 力回饋搖桿硬體規格	16
表 2-4 馬達控制卡 PCI-1721 規格.....	17
表 2-5 計數卡 PCI-1784 規格.....	18
表 3-1 馬達的參數	21
表 3-2 齒輪列參數	26
表 4-1 物體之性質分類	42
表 4-2 夾取各類物體所需要的力(nt)	43



圖目錄

圖 1-1 遠端呈現系統圖	2
圖 1-2 力覺回饋系統	2
圖 2-1 力覺回饋系統架構圖	5
圖 2-2 力覺回饋控制訊號圖	5
圖 2-3 Utah_MIT Hand[13]	6
圖 2-4 機械夾爪：(a)示意圖，(b)上視圖，和(c)前視圖	7
圖 2-5 力感測系統訊號流程圖	11
圖 2-6 使用砝碼進行校正實驗	13
圖 2-7 力感測校正關係圖	13
圖 2-8 兩軸力回饋搖桿：(a)前視圖和(b)側視圖	15
圖 2-9 力回饋搖桿系統架構	15
圖 3-1 Maxon 直流馬達結構圖[http://www.maxonmotor.es/]	20
圖 3-2 永磁式直流馬達模型	21
圖 3-3 紅色圈起的部分是代表(3-3)式電路系統方程式方塊圖	22
圖 3-4 紅色圈起部分是代表(3-10)式的機械系統方程式方塊圖	23
圖 3-5 齒輪列系統[http://www.maxonmotor.es/]	24
圖 3-6 齒輪耦合示意圖	24
圖 3-7 齒輪列系統示意圖	25
圖 3-8 齒輪列的模型[26]	26
圖 3-9 齒輪列模型方塊圖	27
圖 3-10 負載結構圖	27
圖 3-11 負載模型	28
圖 3-12 負載模型方塊圖	28
圖 3-13 夾爪的力量接觸模型	29
圖 3-14 力量接觸轉移函數	30
圖 3-15 簡化後之直流馬達方塊圖	31
圖 3-16 齒輪列_負載方塊圖	31
圖 3-17 簡化中的齒輪列方塊圖	31
圖 3-18 簡化後之齒輪比方塊圖	31
圖 3-19 完整系統方塊圖	32
圖 3-20 轉移函數	33
圖 3-21 輸入輸出資料(u_1 為輸入， y_1 為輸出)	33
圖 3-22 階數和損失函數的關係	34
圖 3-23 模型輸出和測量輸出的比較	36
圖 3-24 (3-33)式的波德圖	37
圖 3-25 頻率響應法的原理	38

圖 3-26 輸入不同頻率弦波的頻率響應 Bode 圖.....	38
圖 3-27 夾爪系統輸入輸出關係圖(輸入遞增，取樣時間 100ms).....	40
圖 3-28 夾爪系統閉迴路系統步階響應.....	40
圖 4-1 夾爪設計圖：(a)小開度和(b)大開度.....	42
圖 4-2 PID 控制器方塊圖.....	44
圖 4-3 調整控制器參數 k_i 得到的輸出.....	47
圖 4-4 帶有 PI 控制器的反饋控制系統.....	47
圖 5-1 夾取橡膠材質的玩具球.....	50
圖 5-2 (a)夾取橡膠球力量變化圖，(b)位置變化圖和(c)驅動電壓變化圖	51
圖 5-3 (a)夾取橡膠球力量變化圖，(b)位置變化圖和(c)力量變化圖....	52
圖 5-4 夾取金屬塊.....	53
圖 5-5 (a)夾取金屬塊力量圖，(b)位置變化圖和(c)驅動電壓變化圖	54
圖 5-6(a)夾取金屬塊力量圖，(b)位置變化圖和(c)驅動電壓變化圖.....	55
圖 5-7 夾取蕃茄場景.....	56
圖 5-8 (a)夾蕃茄力量變化圖，(b)回饋力變化圖，(c)位置變化圖和(d) 驅動電壓變化圖.....	57
圖 5-9 夾取雞蛋場景.....	58
圖 5-10 (a)夾雞蛋力量變化圖，(b)回饋力變化圖，(c)位置變化圖和(d) 驅動電壓變化圖.....	59



第一章

導論

在具有危險性或是未知的環境中，人類不適合到現場進行作業的場合裡，往往使用機器人來達成任務，受限於機器智能的的風險性及感測技術的侷限性，人類還是有必要來操控機器人。Goertz 與 Thompson 於 1954 年所提出的遠端操控(Teleoperation)[6]，是將人類操控與感測的能力延伸到遠端，而拜網路與為處理機蓬勃發展之賜，使得遠端操控的技術得以廣泛的應用。

在遠端操控過程中，遠方的機器人將視覺、聽覺及觸覺等感官資訊回傳到近端操作者的技術，稱為遠端呈現(Telepresence)技術[16]。完整的遠端呈現系統所具備的基本硬體如圖 1.1 所示，其中近端設備包括聽覺播放系統、力回饋操控器、視覺擷取系統等，遠端設備包括聽覺接收系統、力感測系統、視覺接收系統等；遠端的聽覺、觸覺及視覺接收系統分別負責擷取遠端環境的聲音、力感及外觀色彩等資訊，再將這些資訊做運算後回傳到近端的聽覺、觸覺及視覺呈現設備中，使用者可透過這些設備清楚遠端所發生的變化。

遠端呈現技術，簡單地說就是讓使用者在近端有如身在遠端環境中，可以感受到遠端的各種資訊，而虛擬實境(Virtual Reality, VR)是現今應用在遠端呈現系統最常見的技術之一[22,25]，透過電腦繪圖將遠方環境建構成一虛擬場景，在虛擬場景中加入觸覺、視覺及聽覺等因素，即時模擬遠方環境的狀況並呈現在近端的硬體設備上，此技術可應用在教育、娛樂或工業等用途上，因此虛擬實境技術在遠端呈現系統上顯得格外重要，本實驗室目前已成功開發出結合虛擬實境之遠端操控機器人系統，透過網際網路傳輸方式完成操作端與遠端的連結。

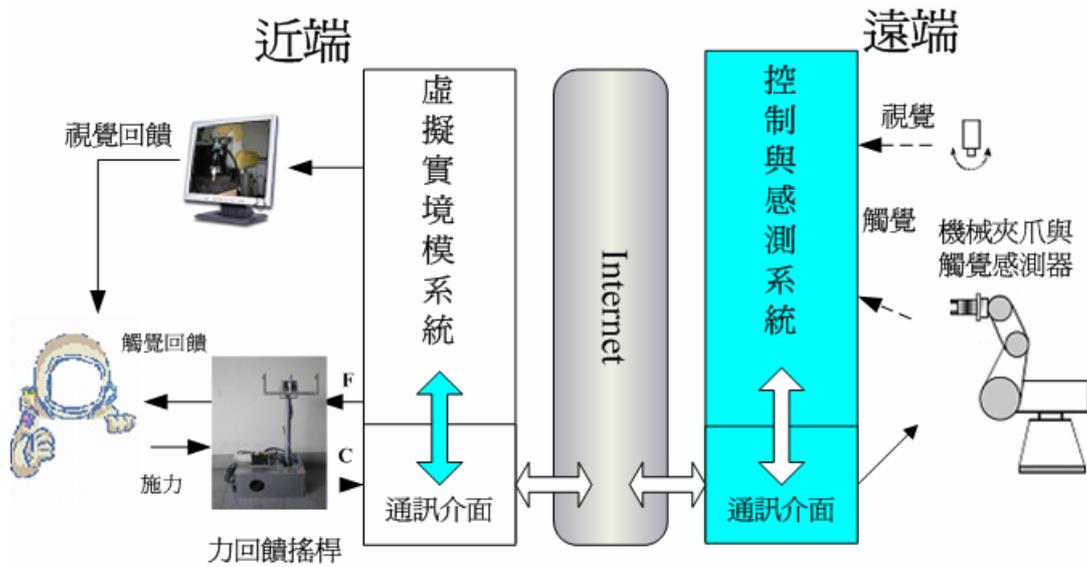


圖 1-1 遠端呈現系統圖

力覺回饋裝置早期就應用在遠端操作系統中，用來實現遠端機器人在順應性工作下的力資訊狀態，協助操作者控制遠端機器人完成任務[10,11]，如圖 1.2 所示。在遠端呈現系統中，力覺及視覺上的回饋可以幫助使用者在搖控機器人時有預警和導引作用而免於發生強烈碰撞的危險，在使用者所在位置的近端搖控遠端系統，藉由操控器及視覺接收系統來刺激人類力覺及視覺感官系統，進而感受遠端系統所獲得的資訊，其中直接與使用者接觸的操控器以力覺回饋裝置為主。

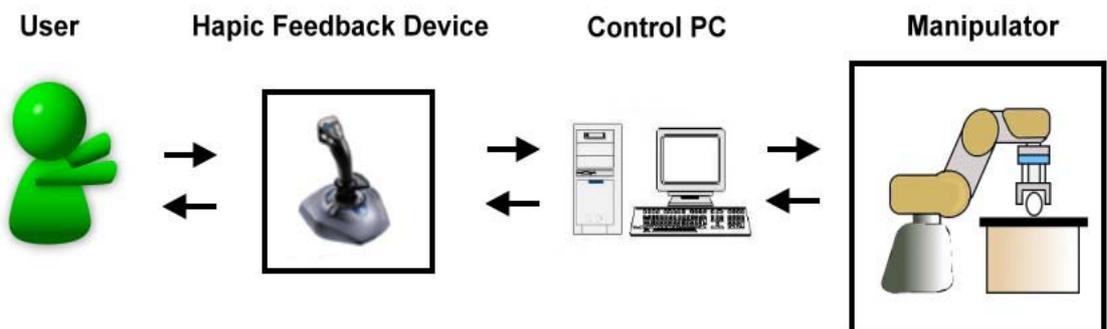


圖 1-2 力覺回饋系統

我們實驗室已開發出一機械夾爪系統，除了在爪指上設有力感測器可直接量測夾取力，尚有編碼器來計算夾爪的移動位置以得知物體形變量或供控制使用。而我們研究的方向是包含力的控制，機器人可接受指令用夾爪產生一力量，加諸於物體上，我們進而發展出一套力回饋的控制機制，讓使用者可感覺到夾取物體

時所產生的力感變化，遠端機器人含力的控制器，且是閉迴路可以出較精確的力，因此機械夾爪可以夾取多種物體，包括形狀、軟硬不同的物體，甚至工具，讓機器人可執行更複雜的工作。

接下來的章節裡，第二章將先介紹由力回饋操控器及力感測夾爪系統所完成的力覺回饋系統，近端由二軸力回饋搖桿做為力回饋操控器，遠端由擷取力量及位置訊號的力感機械夾爪為主；第三章進行系統動態方程式的建立，並執行系統辨識，在第四章，近端主要以 PID Controller 為基礎，達到搖桿力回饋與夾爪轉矩控制，進而發展出可廣泛夾取各種物體的機械夾爪；第五章則是根據整體系統與力覺系統的操控機制進行實驗，以印証其可行性；最後，第六章對整體論文進行說明及總結，並敘述未來的工作。



第二章

力覺回饋系統

力覺回饋系統最基本的硬體需求包括操控器及受控器，依照不同的工作目的所設計出的操控器及受控器也會不同，本論文主要是探討如何讓操控者透過二軸力回饋搖桿及控制器對各種材質的物體，進行夾取和提起的動作，包括硬體設計及軟體規劃。本章先介紹遠端力覺回饋系統架構，並對其中設計之夾爪的優點及可行性作說明，再依序介紹用來輔助夾取動作所需的硬體設備及系統架構。

2.1. 系統架構



我們所提出的力覺回饋系統是以兩軸力回饋搖桿做為力覺回饋裝置，在遠端用來執行任務的機器人為改良後的機器人末端效應器，為一具有力量感測系統及位置回授的機械夾爪，使用者利用力回饋搖桿對夾爪下夾取力量控制的指令，並將夾爪與物體接觸時的受力狀況回授到力回饋搖桿，進而呈現給使用者，其理想的實現架構圖如圖 2.1 所示，其中利用一台個人電腦進行運算處理，力回饋搖桿扮演使用者與機器之間的訊號傳遞媒介，使用者可透過搖桿將欲下達的命令以類比或數位方式傳送到電腦，電腦下命令讓遠端的夾爪系統執行因應動作，並將夾爪系統與環境接觸的資訊呈現回電腦。

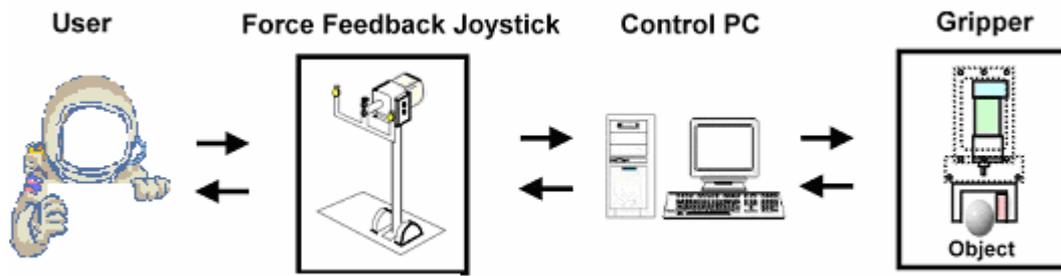


圖 2-1 力覺回饋系統架構圖

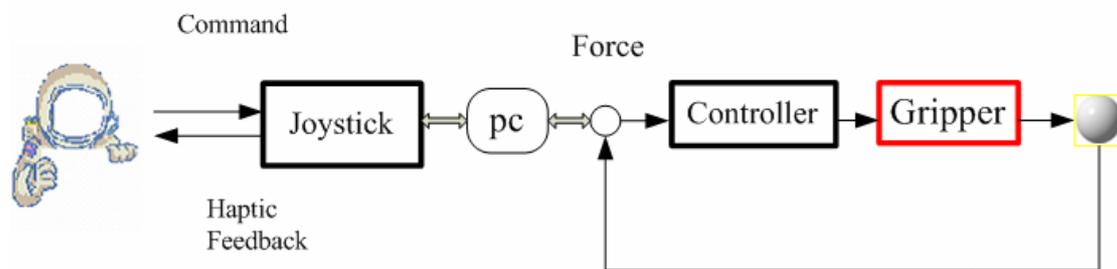


圖 2-2 力覺回饋控制訊號圖

2.2. 機械夾爪

理想的機械爪朝向能和人手一樣靈巧之機械手，而人手之不同於現有機械爪有數點：其一，人手可執行許多靈活的動作，如拿雞蛋、玩雜耍等；其二，人手的感覺非常敏銳，能夠感覺冷、熱、乾、濕、痛等[1，24]；其三，人手的結構和材料相當精巧。完成一優質的機械夾爪需要結合各領域的知識，機械工程在於機械臂的動態與靜態分析，精密輕巧的材質以及各種感測元件是材料科學研究方向，而電機方面著重於感測器與介面訊號的處理以及運動控制的方法。

Utah-MIT hand[13]是相當著名的機械手，如圖 2.3 所示，其設計的概念是模仿人類手的外形和大小，包含了四隻手指、每隻手指有四個自由度；手的關節處(joint)有位置感測器來偵測關節角度，透過肌腱處(tendon)的力感測器來量取手指的伸展和屈曲的狀況，利用這些資訊進一步控制關節、手指運動，來達成抓取物體等等的動作[19]。多手指的機械手構造複雜，能夠精巧的運用多種抓握姿勢以

及操控不同的物體或工具；相形之下，兩指的機械手爪或是平行夾(parallel jaw)，雖然功能上受到限制，不過，容易設計與實現，卻是普遍應用在工業自動化中，負責夾取、搬運的動作，因此在設計機械夾爪之前，先確定所要執行工作的複雜度，再來決定選擇是要採用哪一種類型的機械夾爪。

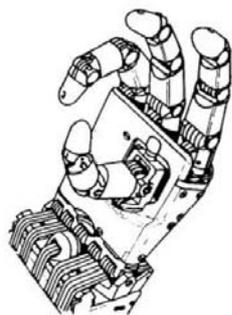
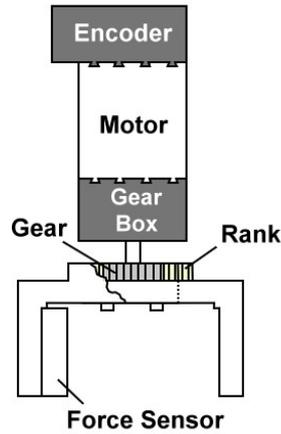


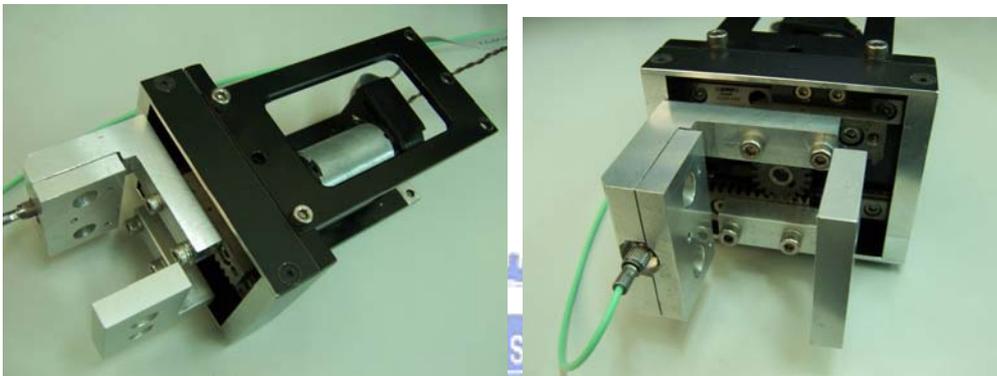
圖 2-3Utah_MIT Hand[13]

夾爪的設計可約略分爲：真空式、磁力式、通用式、與機械式。機械式的夾爪在閉合時，在物體表面施加壓力來完成夾取。機械式夾爪的用途較廣，普遍存在自動化的場合，基於設計便捷、成本合理、定位精準、應用廣泛等考量，普遍使用機械式、齒輪齒條型的設計方式。

致動器是機械手爪動力的來源，大致分爲三種致動方式：氣動、液壓以及電動式[21]。電動致動使用電動馬達作為致動器，負責將電能轉換成機械能。機械夾爪要裝置在機械手臂上，所以體積和重量要小，直流馬達是很好的選擇，而且整個致動的特性容易分析與建立模組，利用驅動電路，和控制器能夠精確的控制，並且在最快的反應時間內驅動系統，所以我們選用直流馬達作為致動器，如圖 2.4(a)所示，運作模式為馬達經過減速機後帶動齒輪做旋轉，齒輪將旋轉運動經過兩齒條轉換成直線運動，兩齒條分別連接到夾爪的兩指，當齒條做直線來回運動時，夾爪即做出開跟合的動作，圖 2.4(b)-(c)為夾爪機構外觀。



(a)機械夾爪組成示意圖



(b) 機械夾爪上視圖

(c) 機械夾爪前視圖

圖 2-4 機械夾爪：(a)示意圖，(b)上視圖，和(c)前視圖

表 2-1 夾爪馬達驅動系統硬體規格

直流伺服馬達(A-max26_110212)	
最大轉矩	42.2 mNm
最大轉速	4400 rpm
額定功率	4.5 W
重量	119 g
增量式編碼器 (Digital Encoder_110512)	
解析度	500 ppr
編碼方式	A、B 相和 Index channel
減速機(Spur Gear head GS_110448)	
減速比	100:1
最大效能	66 %
馬達驅動器(Maxon motor control 145391)	
控制模式	轉矩控制
電源	12V _{DC} ~50V _{DC}
輸入訊號	-10~10V

2.3. 伺服驅動系統

直流伺服馬達擁有良好的線性特性以及簡單易於控制的優點，因此我們選用瑞士 Maxon 公司的直流伺服馬達驅動系統做為夾爪的主要動力來源，再搭配公司提供的增量式編碼器及減速機等，表 2.1 為馬達驅動系統的硬體設備規格。圖 2.5 所示為整體夾爪系統的架構圖，圖 2.6 所示為伺服驅動系統方塊圖，前者主要由一軸直流馬達驅動系統及力感測系統所組成，與伺服驅動系統、AD/DA 卡及電腦構成整個具力感測的遠端機械夾爪，而後者為伺服系統包括馬達伺服驅動器、編碼及計數卡、類比電壓輸出卡、及感測器訊號擷取卡，電腦透過類比電壓輸出卡對伺服驅動器下達電壓命令，再由驅動器控制直流馬達的電壓輸出轉矩，透過夾爪機構帶動機械夾爪開合，夾爪上之編碼器可讀取馬達的角位移量，由計數卡間接讀出夾爪位置訊號，在夾爪本體中，其中一指手爪裝設有壓力感測器，用以讀取與物體接觸時所產生的力量訊號，感測器將壓力資訊轉換成電壓資訊送出，再由資料擷取卡來讀取電壓值，經由電腦運算系統轉換成力量資訊。

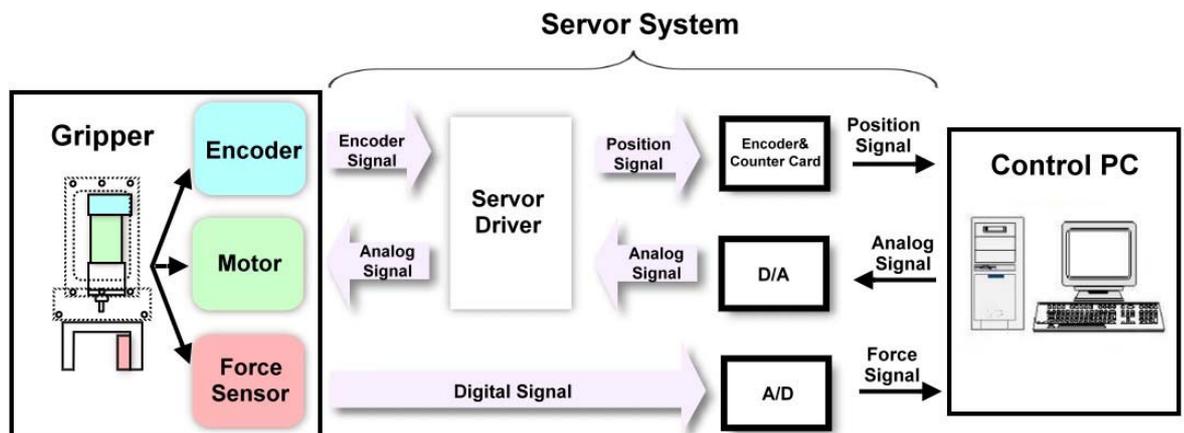


圖 2-5 夾爪之馬達驅動系統架構圖

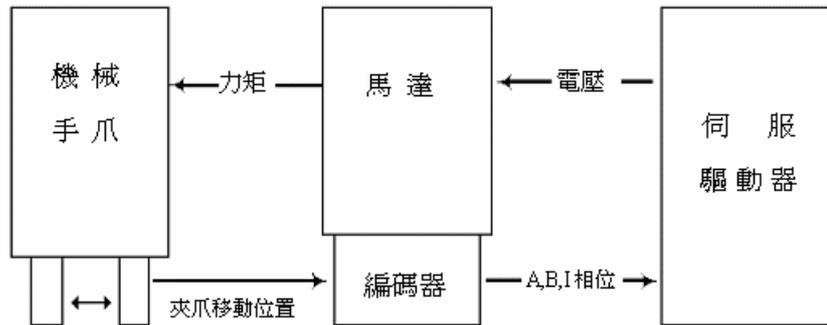


圖 2-6 伺服驅動系統方塊圖

2.4. 力感測系統

人手有觸覺感受的能力，藉由不斷的去探索、觸摸，得以鑑別出不同的物體，觸感是能夠連續感受不同接觸力，如此方能從事許多複雜的工作，而感測器的功能越強大、安裝的種類越多，就代表這隻機械夾爪擁有可觀的發展性，在後面的章節將應用這些感測的能力來執行夾取物體。本節介紹應用在觸感的感測器，並且對所選配的力感測系統進行規格以及功能上的說明，最後對力感測系統進行校正。

2.4.1. 觸覺感測器

人類藉由手不斷去探測物體來得到觸覺的資訊，鑑別出物體的物理性質。Lenderman 和 Klatzky 等人，說明人類的手以高度智能並且有系統的方式來取得物體的物理性質[15]，實驗的方式是用人類的手，依照設定的程序來判定未知物體的物理特性。舉例來說，若要感覺物體的材質是光滑或粗糙時，可將手指對物

體表面做來回側向的移動；想對物體的軟硬度做評估，可用手去擠壓物體；若是想感受物體的溫度，就將手緊貼著物體的表面；當要判斷物體的重量時，將手攤開且把物體放在手心後做上下的晃動；想要知道物體局部的外形，可以用手指沿著物體的外圍的輪廓去移動。我們可以利用這些方法，配合不同的感測器，來取得物體多方面的物理特性。

常被應用在觸覺的感測器包括，壓阻式、電感式、電容式、光電式、及壓電式，壓阻式感測器是指受到作用力時會改變其電阻質，電阻值的變化可用惠斯登電橋檢測出，故廣泛被使用，在選用不同類型的壓阻感測器時，如金屬型、半導體型的應變計，要注意如溫度、遲滯、非線性等問題。

感測器種類眾多且各有其功能，一般用於研究用途上的感測器有以下兩種：人類在拿取物體時手部的力道是分佈在所有接觸面積的範圍內，可感測整個接觸面的感測器稱為陣列感測器(Array Sensor)[14]，除了可偵測出接觸面積的受力外尚可測量出每個陣列的力道分佈區塊及大小；另一種感測器用來感測單點受力大小，也就是施加壓力那點的力量值，此類稱為離散感測器(Discrete Sensor)，一般商業化的產品皆屬此類。

2.4.2. 力感測系統

論文中所使用為 KISTLER 公司所生產的石英感測器以及電荷放大器，此種型號感測器是屬於壓電式[11]的離散感測器，無法偵測靜態電壓，產品經過訊號處理後將原本訊號做積分，即可直接觀測到力量的變化情形，可將作用在感測器表面的類比壓力值轉換成數位式的電子訊號，由於石英感測器直接由感測器量回來的電子訊號非常的小，故須透過電荷放大器將電子訊號放大，從感測器 9001A 規格可知其量測範圍可到 7500 牛頓，其靈敏度為-4 pC/N，負號表示感測器的施力方向為向內壓縮，換算後可得到感測器最大輸出 30000pC，經過電荷放大器也

就是可輸出 6 伏特的類比電壓值，再搭配由 IOtech 公司的資料擷取卡來擷取感測器所量到的電壓值，表 2.2 所示為感測器及電荷放大器之規格。

表 2-2 力感測系統硬體規格

石英感測器(Quartz Load Washer 9001A)			
重量	3	g	
量測範圍	0~7500	N	
過載額定力	9000	N	
靈敏度	-4	pC/N	
	-3.86	pC/N	
電荷放大器(Charge Amplifier 5039A122)			
量測範圍 I	± 50,000	pC	
量測範圍 II	± 12,500	pC	
輸出電壓	± 10	V	
誤差	± 1	%	

當量測到力量值經電荷放大器轉為類比的電壓值輸出後，為了可以在系統中運算，必須將類比電壓數位化後才能讓電腦讀取並做處理，圖 2.7 為感測器的訊號處理流程，當類比電壓從電荷放大器送出時，透過 IOtech 公司的轉接卡 DBK201 將類比資訊轉換成數位資訊後，再由 IOtech 研發的資料擷取卡 DaqBoard2005 來讀取其數位訊號，亦可利用其套裝軟體 Daqview 來觀測即時的電壓輸出波形，論文中使用其支援的程式語言 C/C++ 及應用程式介面 (Applications Program Interface, API) 來規劃軟體。

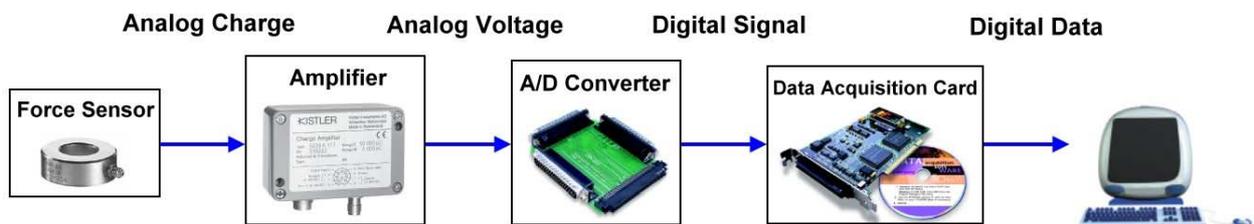


圖 2-5 力感測系統訊號流程圖

2.4.3. 力感測器校正實驗

為確保量測精度(accuracy)，在此對力感測器進行校正實驗。實驗方式係在石英感測器的垂直方向，分別懸掛不同重量的砝碼，如圖 2.8 所示，這裡使用 50、100、200、500、和 1000 公克的不銹鋼 F1 級標準砝碼，以及無負載重物的情況下，對這六種不同輸入條件下求出一條曲線，如此反覆做十次，可以得到如圖 2.9。這裡要注意的是，由於壓電感測器無法量測出靜壓力，換句話說，輸出的電壓波形無法表現出一個平穩的直流值，在此的做法是每十個輸出的電壓值做平均值後表現為一個單點的電壓值，可以得到近似直流般平穩的電壓波形。

當輸入為 x_i ，也就是砝碼的重量時，可以量到電壓值 y_i ，觀察圖 2.9，發現可以將每六個砝碼量測出的一次校正曲線，模型成有偏移量的直線 $X=aY+b$ ，反覆做 8 次實驗，可以得到八條聯立方程式求解兩個未知數，簡化為矩陣形式如下：

$$\begin{bmatrix} 1 & x_1 \\ 1 & x_2 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & x_8 \end{bmatrix} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}}_Z = \underbrace{\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_8 \end{bmatrix}}_Y \quad (2-1)$$

$$\text{最小平方解 } Z = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = (A^T A)^{-1} A^T Y \quad (2-2)$$

將八組數據利用最小平方方法得到的解為 $a=8.0049$ ， $b=0.0257$ ，其中 a 代表未以砝碼施壓時的輸出偏壓， b 代表輸入輸出關係圖的斜率，因此輸入砝碼重量 x 與輸出電壓值 y 的線性關係如下：

$$y = 0.0257x + 8.0049 \quad (2-3)$$

其中 y 代表擷取到的電壓值，單位為毫伏特， x 代表碼砝重量，單位為公克。



圖 2-6 使用砝碼進行校正實驗

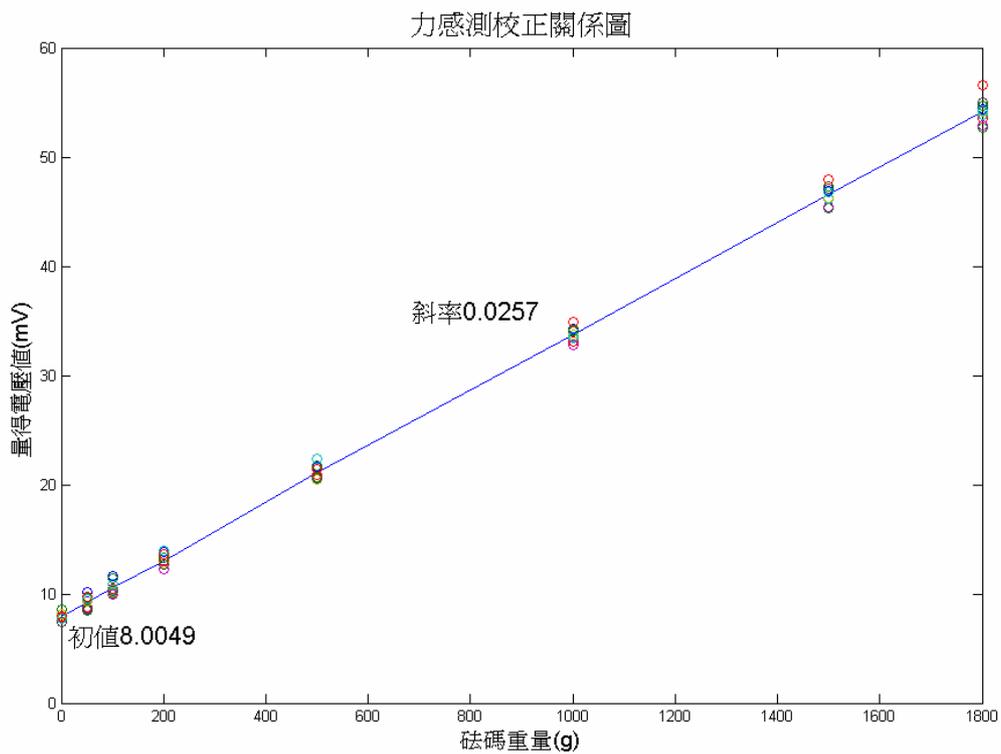


圖 2-7 力感測校正關係圖

若將以公克為單位的砝碼重量換算為以牛頓為單位的夾取力，則可得知感測器量測電壓與夾取力的關係方程式為：

$$y = 2.62244989x + 8.0049 \quad (2-4)$$

其中 y 代表擷取到的電壓值，單位為毫伏特， x 代表單邊夾取力量值，單位為牛頓，換算成牛頓與伏特為單位其關係如下：

$$x = 381.322957(y - 0.0080049) \quad (2-5)$$

其中 x 代表夾取力，單位為牛頓， y 代表感測器所量到的電壓值，單位為伏特。

2.5. 力回饋搖桿系統

使用者可對電腦下達命令來控制上述力感測機械夾爪的開合動作，下達命令的介面不外乎是一套輸入裝置，然而為了達到與環境互動的效果輸入裝置必須兼具輸出裝置來表現環境的資訊，因此在力覺回饋系統所使用之輸入輸出裝置即為兩軸之力回饋搖桿。力回饋搖桿不僅提供給使用者力覺的感受，也可以將使用者欲下達的指令透過力回饋搖桿輸入到電腦的運算系統內，再將命令輸出到遠端可執行的系統，接著將遠端環境所面臨的環境變化資訊送回並透過力回饋搖桿輸出給使用者感受到力量感受，如此便達成近端使用者與遠端環境之互動關係 [10,14]。

如圖 2.9 所示，我們所使用的力回饋操控器之外觀為常見的方向盤式操作方式，具有兩個力回饋的自由度，其用途相當廣泛，論文中將其兩個自由度分別定義成 X 軸及 Y 軸，X 軸的自由度方向為操作方向盤上圓周式的旋轉，活動範圍可以是無限制的旋轉運動；Y 軸的自由度方向為前後 40 度的近直線運動，此兩軸的活動方向近乎垂直，因此，在操作時不致會彼此造成互相干擾而混淆，本論文中只需做夾爪開閉之單軸控制，因此只需用到搖桿其中一軸來做控制即可，為了避免回饋力太大而造成危險以及活動範圍受限制，故選擇利用其 X 軸來做為主要致動器，即利用搖桿之旋轉運動來控制夾爪之直線運動，X 軸最大可輸出

力量為 43 牛頓。



(a)前視圖

(b)側視圖

圖 2-8 兩軸力回饋搖桿：(a)前視圖和(b)側視圖

力回饋搖桿系統架構如圖 2.11，除了透過搖桿將命令輸入到電腦運算外，搖桿尚可接收電腦所運算出來的力量訊號，再藉由搖桿上的馬達將轉矩大小傳送給使用者感受遠端接觸狀態。整個系統可分為兩個部分：機構部分及控制部分，機構部分為搖桿本體，包括把手、各項傳動機構、馬達、編碼器、減速機及數位按鈕，控制部分包括個人運算電腦、計數卡、類比電壓輸出卡、馬達驅動器及訊號擷取卡。

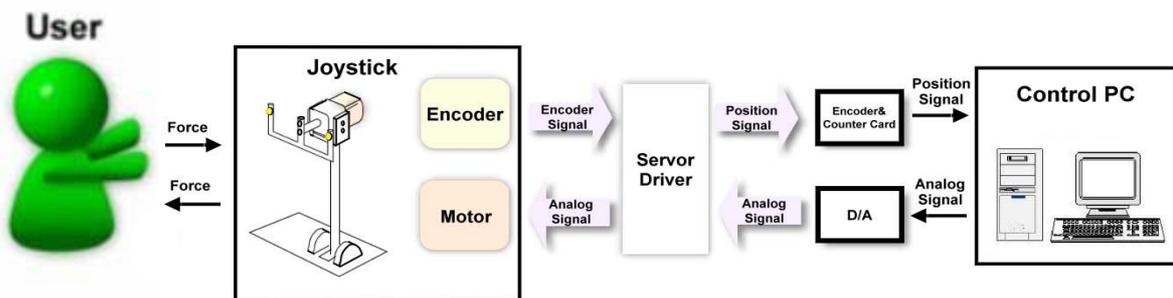


圖 2-9 力回饋搖桿系統架構

使用者轉動搖桿馬達，馬達配有編碼器可隨時讀取馬達的轉動圈數，編碼器將脈衝訊號送到馬達驅動器後得知馬達位置，驅動器最主要的功用在於提供馬達所需電壓，即做功率放大用，驅動器可將接收到的位置訊號送回電腦做運算，利用此位置訊號便可將搖桿的轉動行為模擬出夾爪的動態；此外，運算系統與搖桿

之間利用一類比電壓輸出之介面卡用以控制馬達所須的電壓大小，介面卡輸出電壓經由驅動器傳到馬達，電壓大小決定馬達的輸出轉矩大小，使用者握住搖桿把手便可感受到搖桿馬達轉矩欲呈現的力量大小；搖桿把手上配有兩個數位式按鈕，可將數位資訊輸入到電腦，不過論文中此按鈕並無任何作用，表 2.3 為搖桿本體、交流伺服馬達及馬達驅動器的規格說明，關於此力回饋搖桿的詳細資料，請參考[12]。

表 2-3 力回饋搖桿硬體規格

搖桿本體(X 軸)	
額定出力	43.33 N
軸長	0.15 m
齒輪比	1 : 5
AC 馬達(Panasonic MSMA041A1E)	
編碼器解析度	2500
額定/最大轉矩	1.3/3.8 N/m
額定功率	0.4 kW
馬達驅動器(Panasonic MSDA041A1E)	
控制模式	轉矩控制
功率	400 W
輸入訊號	3V/100%額定轉矩

2.6. 控制介面卡

搖桿之所以有力回饋即透過電腦將所要的命令送出去驅動搖桿馬達，因此馬達系統與電腦之間必須配有一套可以做為兩者之間的溝通橋梁，電腦所接收或下達的命令為數位化的資訊，驅動馬達系統的命令為類比式的電壓命令，因此論文選用台灣研華科技公司開發的 PCI 介面的類比電壓輸出卡 PCI-1721 做為控制馬達系統的介面卡，介面卡主要規格如表 2.4。

表 2-4 馬達控制卡 PCI-1721 規格

Channels	4	
Resolution	12-bit	
Operation mode	Single / Continuous / Waveform / Synchronized output	
Output Range(Internal & External Reference)	Using Internal Reference	0~+5V, 0~+10V, -5~+5V, -10~+10V, 0~20mA, 4~20mA
	Using External Reference	0~+xV@+xV (-10 ≤ x ≤ 10) -x~+xV@+xV (-10 ≤ x ≤ 10)
Accuracy	Relative	±1 LSB
	Differential Non-linearity	±1 LSB (monotonic)
Max. Update Rate	10 MHz (max. for one channel)	
Settling Time	5 μs (to ±1 LSB of FSR)	
External Clock Input	10 MHz Max.	
	Low	0.8 V max.
	High	2.0 V min.

PCI-1721 主要有四個頻道可輸出類比電壓，亦即可同時控制四套馬達驅動系統，論文利用其中的兩個頻道分別控制搖桿及夾爪的馬達驅動系統，PCI-1721 的電壓輸出範圍可藉由參數調整將其設定在 0 到 5 伏特、0 到 10 伏特、負 5 到正 5 伏特及負 10 到正 10 伏特四種範圍，夾爪馬達與搖桿馬達驅動器的驅動電壓均為正負 10 伏特之內，所以利用軟體觸發方式將 PCI-1721 的輸出範圍調整至正負 10 伏特即可。

馬達驅動系統除了電壓命令外，尚須有位置的回授，用來得知馬達目前所轉動的圈數或到達的位置。搖桿系統改變搖桿的旋轉角來控制夾爪的驅動電壓，藉以驅動夾爪系統；夾爪系統可以提供夾爪兩指之間的移動距離，也可以用來量測被夾取物體的形變量，因此為應實驗需要又另外選購一組計數卡，用來接收搖桿及夾爪編碼器回授回來的的位置訊號，計數卡 PCI-1784 規格如表 2.5。PCI-1784 用來擷取增量式編碼器的脈衝回授訊號，透過 AB 相增量方式相位相差 90 度，除了可檢測馬達的正反轉外，還可同時計數，便可算出馬達的絕對位置，利用位置對時間做微分，即可推算出馬達的轉速，將編碼器訊號連接到 PCI-1784 即可

讀到夾爪位置及搖桿位置。

表 2-5 計數卡 PCI-1784 規格

Number of Axis	4(independent)	
Resolution	32-bit	
Max. Quadrature Input Frequency	w/ Digital Filter	1.0MHz
	w/o Digital Filter	2.0MHz
Drive Type	Single-ended or differential	
Counter Mode	Quadrature, Up/Down, Count/Direction	
Max. Input Pulse Frequency	x1, x2, x4	
Sample Clock Frequency	8, 4, 2, or 1MHz	

機器人遠端操控屬於即時的操控系統，必須即時處理搖桿及馬達驅動系統的力量迴圈，且使用的類比電壓輸出卡、計數卡及資料擷取卡驅動程式的支援作業系統有限，基於以上原因，論文中選擇 Microsoft Windows 2000 做為力回饋操控系統的電腦作業平台，使用的程式語言工具為支援介面卡的 Microsoft Visual C++ 6.0 及其應用程式介面。



第三章

系統分析

在本章我們將推導機械夾爪的動態方程式，進行系統識別(system identification)，由控制對象的輸入輸出資料，以實驗方式來建立數學模型。在 3-1 節至 3-5 節是直接推導夾爪系統的轉移函數，3-6 節是以黑盒子的方式求出夾爪系統的轉移函數，會用兩種方法的原因，直覺上以公式推導出來是較容易的，亦可從中知道轉移函數的階數，當然對系統的物理特性也有一定程度的認識，只是推導出的結果，參數常常無法確定，進而使加入控制器的參數不易估計，才會用黑盒子的方式作系統識別，最後以 3-6 節所得的轉移函數，利用 matlab 軟體進行系統分析。



3.1. 永磁直流馬達數學模型

在現今工業中，直流馬達是最廣泛運用的電動機之一。之前直流馬達因為電刷與換向器比較貴，且可變磁通的直流，只適用某些型式的控制，由於稀土磁鐵的發展，已做出高轉矩體積比的永久磁鐵直流馬達，電刷與換向器技術的進步，這些容易磨損的部分，實用上已無需維護。製造技術的進步，可以做出很高的轉矩慣量比，且有低時間常數的性質，如同機具工業中一般，電腦週邊設備，如紙帶驅動器、印字機、字元處理機等有新的應用[30]。

直流馬達基本上本是一個轉矩換能器，它將電能轉換成機械能。馬達軸上的轉矩，直接正比於電樞電流，所產生的轉矩與電樞電 i_a 之的關係

$$T_m = K_t i_a \quad (3-1)$$

其中， T_m 為馬達轉矩， i_a 是電樞電流和 K_t 為比例常數。導體在磁場中移動，除了會生轉矩之外，在兩端會產生電壓。此電壓與軸速成正比，且有減少電流的趨勢。反電勢與軸速間的關係下：

$$V_c = K_b \omega_n \quad (3-2)$$

其中， V_c 表示反電勢， ω_n 表示馬達的軸速度，3-1 式及 3-2 式描述了直流馬達工作的基本原理。

圖 3-1 中是力覺回饋系統所使用的永磁式馬達的內部各元件，表 3-1 是其參數。圖 3-2 是直流馬達的模型， V_a 代表外加電壓， R_a 代表電樞電阻， L_a 代表電樞電感， V_c 代表電樞反電勢， K_t 為力矩常數， K_b 為反電勢常數，根據克希荷夫電壓及電流定律(KVL, KCL)可得電路系統方程式(Electrical System Equation)及輸入轉矩等於輸出轉矩可稱為機械系統方程式(Mechanical System Equation)分別陳述於後。

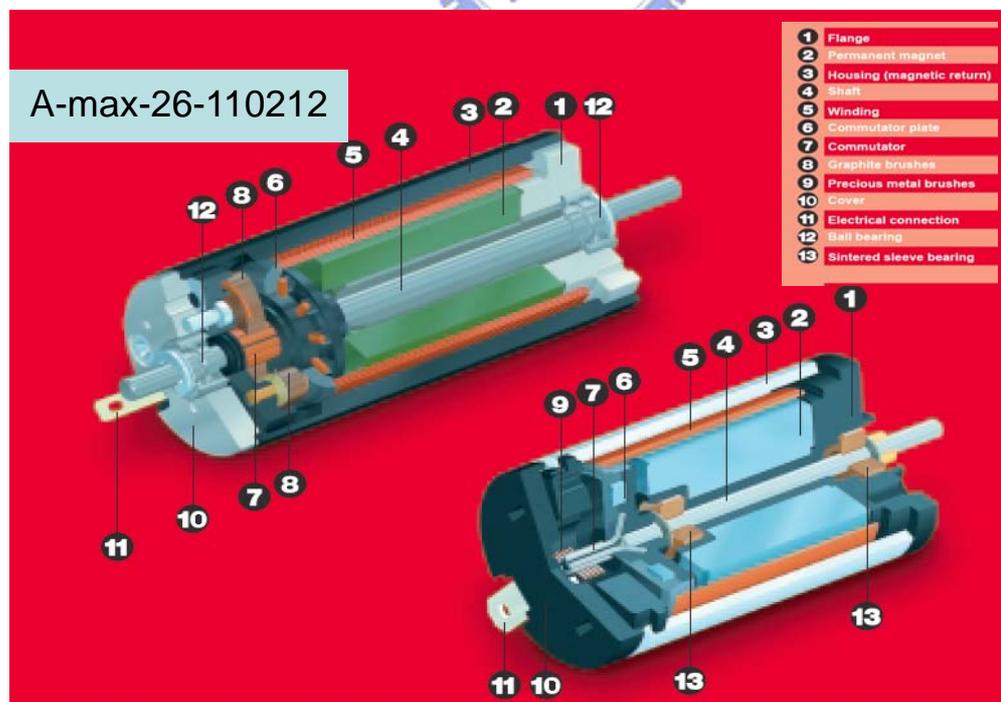


圖 3-1 Maxon 直流馬達結構圖[<http://www.maxonmotor.es/>]

表 3-1 馬達的參數

V _{in} (t)	max 24	Amplifier Input Voltage
R _a (Ω)	30.1	Motor armature coil Resistance
L _a (H)	0.00299	Motor armature coil Inductance
I _a (A)		Motor armature coil Current
V _c (v)		Motor Back Electromotive Force
K _τ (n-m/A)	0.0529	Torque constant
K _b (V-s/rad)	0.53	Back EMF Constant
J(kg-m ²)	1.20E-06	Armature Inertia
B(N-m-s/rad)	5.8e-6	Viscous Damping

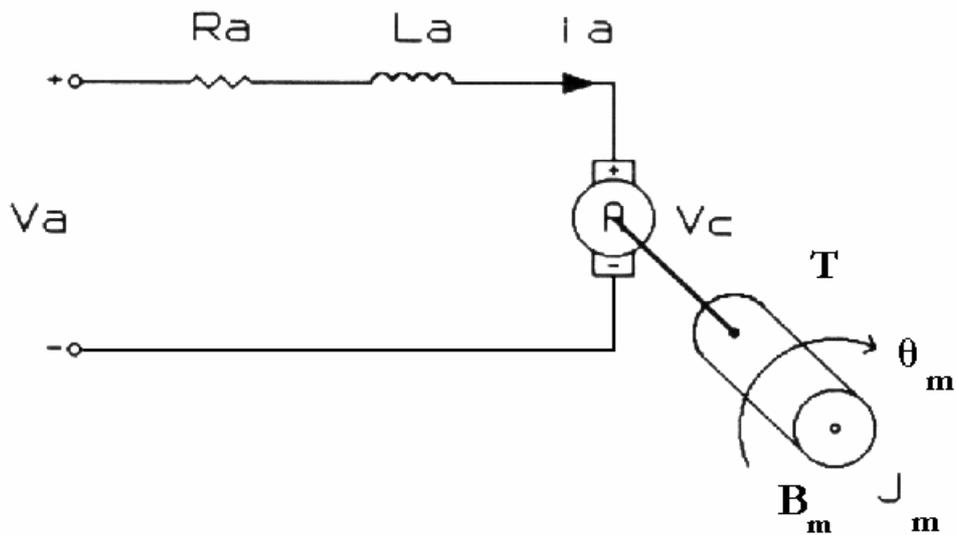


圖 3-2 永磁式直流馬達模型

(一). 電路系統方程式(Electrical System Equation)

$$V_a - i_a R_a - L_a \frac{di_a}{dt} - K_b \dot{\theta}_m = 0 \quad (3-3)$$

經拉氏轉換得下式

$$sI_a(s) - i_a(0) = -\frac{R_a}{L_a} I_a(s) - \frac{K_b}{L_a} \dot{\theta}_m(s) + \frac{1}{L_a} V_a(s) \quad (3-4)$$

左右移項後得下式

$$I_a(s) = \frac{-k_b \dot{\theta}_m(s) + V_a}{L_a s + R_a} \quad (3-5)$$

將(3-5)式轉成方塊圖，即圖 3-3 中紅色圈起部分

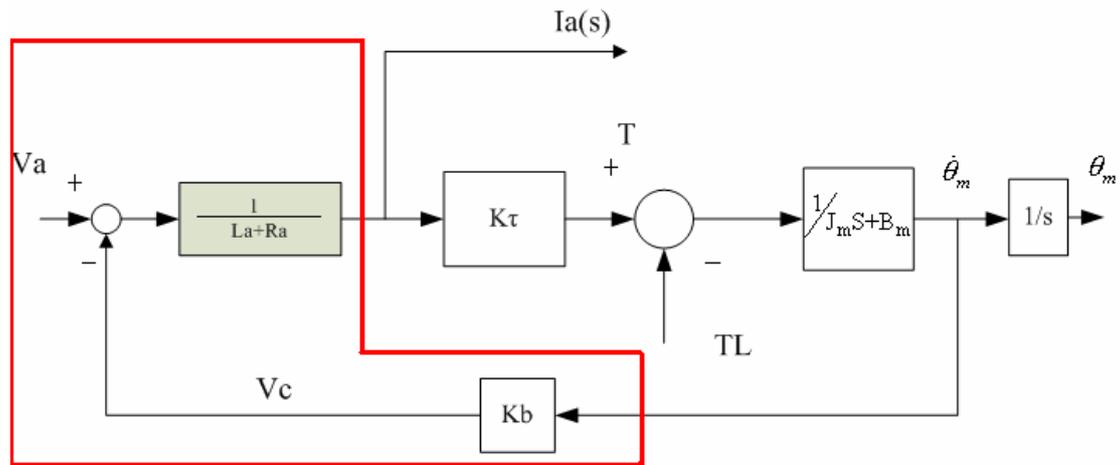


圖 3-3 紅色圈起的部分是代表(3-3)式電路系統方程式方塊圖

(二).機械系統方程式如下所示

$$T - T_{\omega'} - T_{\omega} - T_L = 0 \quad (3-6)$$

$T = K_{\tau} i_a$ 馬達產生的轉矩， $T_{\omega'} = J_m \frac{d^2 \theta_m}{dt^2}$ 慣性轉矩， $T_{\omega} = B B_m \frac{d\theta_m}{dt}$ 阻尼轉矩，

T_L 負載轉矩

$$K_{\tau} i_a - J_m \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} - B_m \frac{d\theta_m}{dt} - T_L = 0 \quad (J_m = J + J_1) \quad (3-7)$$

左右移項得下式

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{K_{\tau}}{J_m} i_a - \frac{B_m}{J_m} \omega - \frac{T_L}{J_m} \quad \left(\frac{d\theta_m}{dt} = \omega \right) \quad (3-8)$$

拉氏轉換得下式

$$s\omega(s) - \omega(0) = \frac{K_\tau}{J_m} I(s) - \frac{B_m}{J_m} \omega(s) - \frac{1}{J_m} T_l(s) \quad B_m = B + B_l \quad (3-9)$$

移項得下式

$$\dot{\theta}_m(s) = \frac{K_\tau I_a(s) - T_l(s)}{J_m s + B_m} \quad (3-10)$$

將(3-10)轉成方塊圖，即圖 3-4 中紅色圈起部分

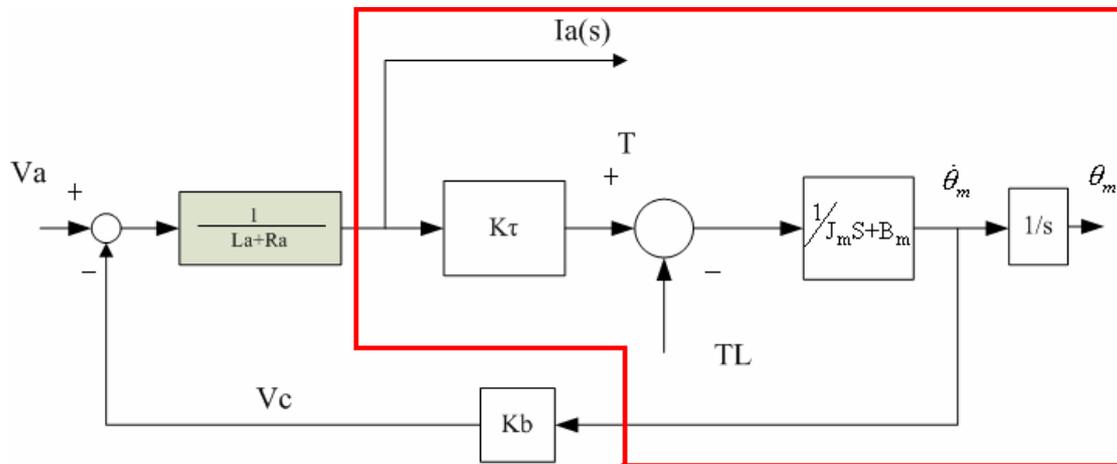


圖 3-4 紅色圈起部分是代表(3-10)式的機械系統方程式方塊圖

3.2. 齒輪列數學模型

在夾爪系統上的齒輪列如圖 3-5 所示，是將能量從系統的一端傳送到另一端的一種機械裝，是以力、轉矩、速率及位移的方式來改變。這些裝置也可以視為獲得最大功率傳輸的匹配裝置。圖 3-6 表示兩齒輪耦合在一起的情形。齒輪組的慣性及摩擦在理想情況下可考慮忽略掉。



圖 3-5 齒輪列系統[<http://www.maxonmotor.es/>]

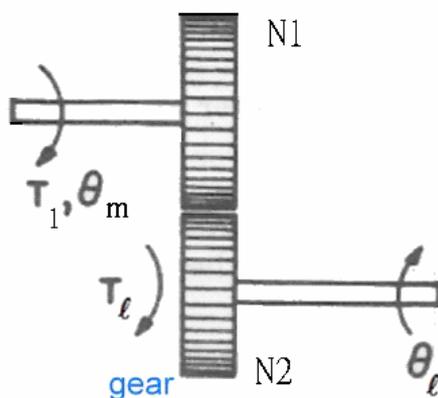


圖 3-6 齒輪耦合示意圖

齒輪列的轉矩 T_1 和 T_l 、角位移 θ_m 和 θ_l 以及齒輪數 N_1 和 N_2 之間的關係基於下列的情形推導。

(1) 每個齒輪的表面所移動的距離是相同的，因此，

$$\theta_m r_1 = \theta_l r_2 \quad (3-11)$$

(2) 因假設無損失，所以齒輪所作的功就等於另一齒輪所作的功，所以

$$T_1 \theta_m = T_l \theta_l \quad (3-12)$$

(3) 在齒輪組的表面上的齒數是與齒輪組的半 r_1 及 r_2 成正比;這也就是

$$r_1 N_2 = r_2 N_1 \quad (3-13)$$

假如兩齒輪的角速度， ω_1 及 ω_2 亦考慮在圖中，式(3-11)到式(3-13)可導出

$$\frac{T_1}{T_l} = \frac{\theta_l}{\theta_m} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{\omega_l}{\omega_1} = \frac{r_1}{r_2} = \frac{1}{n} \quad (3-13)$$

實際上用的齒組在耦合齒輪之間確有慣量和摩擦存在，這通常是不可忽略的。帶有黏性摩擦，及慣量之齒輪列的等效表示可視為集總元件，如圖 3-7 所示。庫倫摩擦不易估計在此省略。

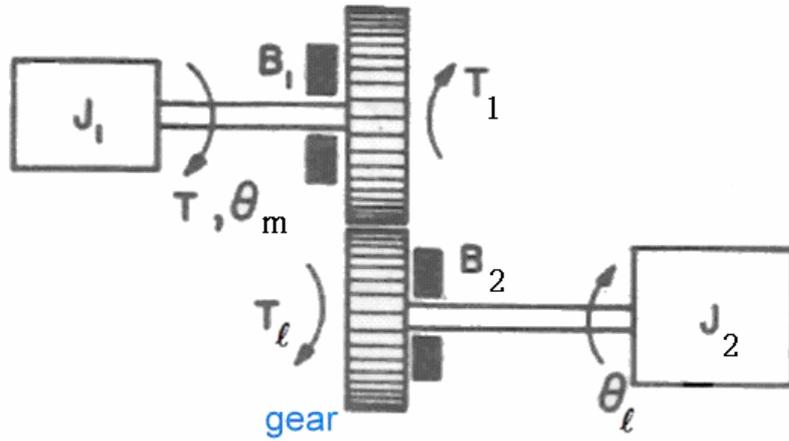


圖 3-7 齒輪列系統示意圖

齒輪 2 的轉矩方程式可寫為

$$T_l(t) = J_2 \frac{d^2 \theta_l(t)}{dt^2} + B_2 \frac{d\theta_l(t)}{dt} \quad (3-14)$$

在齒輪 1 邊的轉矩方程式為

$$T(t) = J_1 \frac{d^2 \theta_m(t)}{dt^2} + B_1 \frac{d\theta_m(t)}{dt} + T_1(t) \quad (3-15)$$

利用(3-14)式，式(3-15)式可轉換成

$$T_1(t) = \frac{N_1}{N_2} T_l(t) = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 J_1 \frac{d^2 \theta_m(t)}{dt^2} + \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 B_2 \frac{d\theta_m}{dt} \quad (3-16)$$

齒輪列的變數及參數定義如下: T =作用轉矩， θ_m ， θ_l =角位移， T_1 ， T_l =傳輸至齒輪的轉矩， J_1 ， J_2 =齒輪的慣量， N_1 ， N_2 =齒數， B_1 ， B_2 =黏性摩擦係數

圖 3-8 的齒輪列模型，是將齒輪 1 的 J_1 和 B_1 ，集總至馬達的慣量 J_m 和黏性係數 B_m ，是將齒輪 2 的 J_2 和 B_2 ，集總至負載的慣量 J_l 和黏性係數 B_l ，所以圖中只呈現了扭轉係數 K_h 及結構阻尼係數 B_d ，其相參數如表(3-2)所示，負載轉矩可以(3-17)式表示。

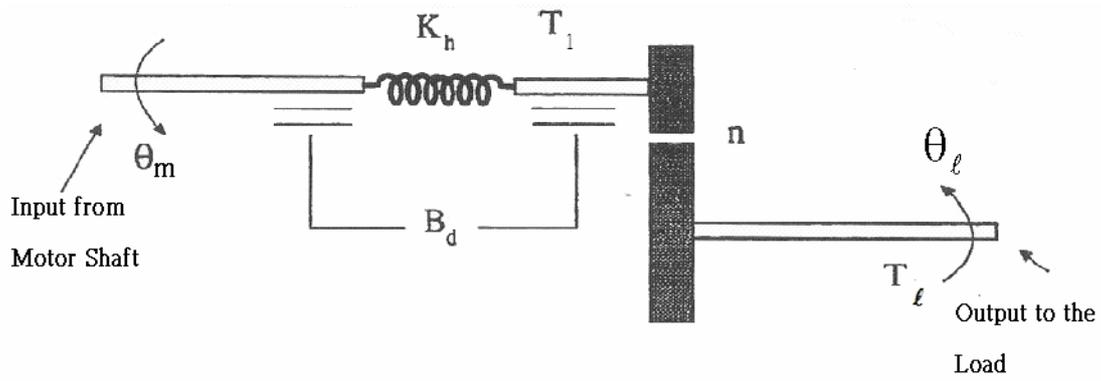


圖 3-8 齒輪列的模型[26]

表 3-2 齒輪列參數

$J_1(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$ =estimate	Gear Inertia
$B_1(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad})$ =estimate	Gear Viscous Damping
$J_2(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$ =estimate	Gear Inertia
$B_2(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad})$ =estimate	Gear Viscous Damping
$J_l(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$ =estimate	Load Inertia
$B_l(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad})$ =estimate	Load Viscous Damping
$K_h=1.20\text{E}+04$	Torsional effect
$B_h=6.8$	structural damping
$n=0.01$	Transmission ratio

$$T_l = n^{-1}T_1 = n^{-1}K_h(\theta_m - n^{-1}\theta_l) + n^{-1}B_d\left(\frac{d\theta_m}{dt} - n^{-1}\frac{d\theta_l}{dt}\right) [26] \quad (3-17)$$

經拉氏變換成

$$T_l(s) = n^{-1}K_h(\theta_m(s) - n^{-1}\theta_l(s)) + n^{-1}B_d s(\theta_m(s) - n^{-1}\theta_l(s)) [26] \quad (3-18)$$

將(3-18)式轉成如下圖

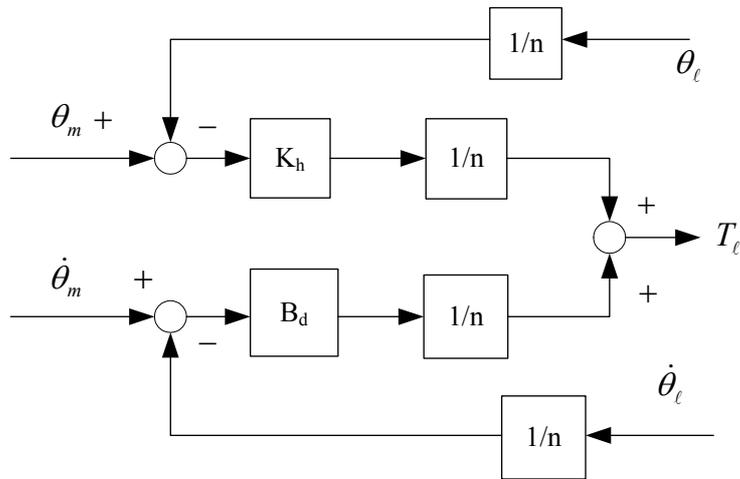


圖 3-9 齒輪列模型方塊圖

3.3. 負載數學模型

夾爪系統最後是由圓齒輪帶動平行齒輪來夾緊物體，圓齒輪是其負載轉矩為 T_l ，其結構圖如圖 3-10 所示

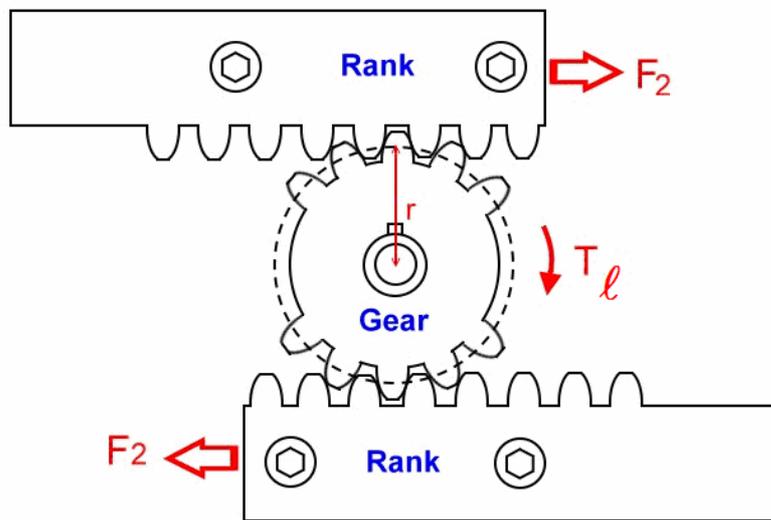


圖 3-10 負載結構圖

圖 3-11 為其負載模型，根據模型將其動態方程式列於式(3-19)

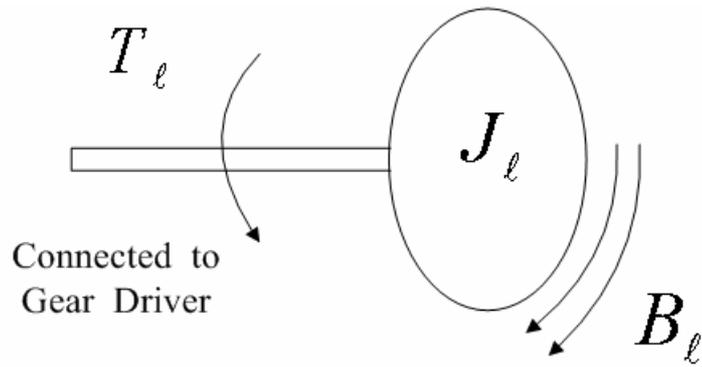


圖 3-11 負載模型

$$T_\ell = J_\ell \frac{d^2\theta_\ell}{dt^2} + B_\ell \frac{d\theta_\ell}{dt} \quad (3-19)$$

(3-19)式經拉氏轉換得下式

$$T_\ell(s) = (J_\ell s^2 + B_\ell s)\theta_\ell(s) \quad (3-20)$$

將(3-20)式轉成以下的方塊圖，此方塊圖是為後面串接系統做準備。

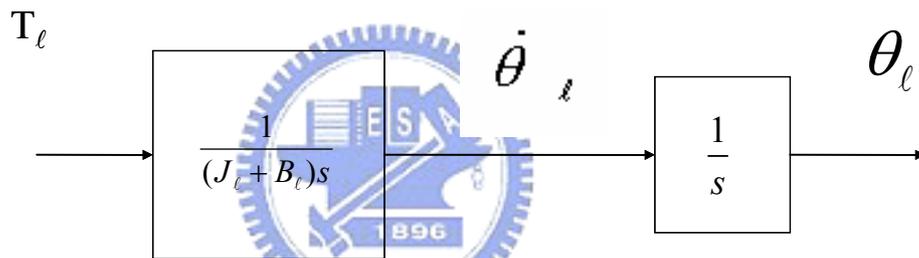


圖 3-12 負載模型方塊圖

3.4. 力量接觸模型

圖 3-13 為夾爪與物體之間垂直力量的力動態模型， f_1 表示夾爪施加的力， f_2 為力感測器量測到的力，假設夾爪及感測器均為剛體(rigid body)，則不需考慮其動態，因此其力量關係如 (3-21)式所示，由圖可推得其動態方程式如(3-22)式。

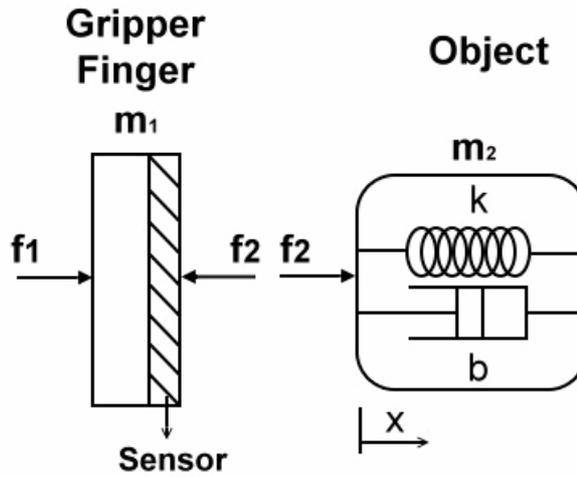


圖 3-13 夾爪的力量接觸模型

$$f_1 = f_2 + m_1 \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (3-21)$$

$$f_2 = m_2 \frac{d^2 x}{dt^2} + B \frac{dx}{dt} + Kx \quad (3-22)$$

其中 m_1 為左爪指本體加上感測器兩者的質量， m_2 、 B 、與 K 分別代表物體的物理參數質量、阻尼係數及彈性係數。

當夾爪以等速度 v 接近物體一直到與物體發生碰撞時，從接觸瞬間開始算起夾爪的位移即物體的形變量，因此碰撞瞬間速度及位置即為初始條件，所以初始條件速度= v 及位移量 $x(0)=0$ ，將(3-16)式和(3-17)式作 Laplace 轉換得到(3-23)式和(3-24)式

$$F_1(s) = F_2(s) + m_1(s^2 X(s) - v) \quad (3-23)$$

$$F_2(s) = m_2(s^2 X(s) - v) + sBX(s) + KX(s) \quad (3-24)$$

從(3-24)式左右移項可得到

$$X(s) = \frac{F_2(s) + m_2 v}{m_2 s^2 + Bs + K} \quad (3-25)$$

將(3-25)式中的 $X(s)$ 代入(3-23)式得到

$$F_1(s) = \frac{(m_1 + m_2)s^2 + Bs + K}{m_2s^2 + Bs + K} F_2(s) - \frac{m_1Bs + m_1K}{m_2s^2 + Bs + K} v \quad (3-26)$$

由(3-26)式再做轉換得到

$$F_2(s) = \frac{m_2s^2 + Bs + K}{Ms^2 + Bs + K} F_1(s) + \frac{m_1Bs + m_1K}{Ms^2 + Bs + K} v \quad (3-27)$$

其中 M 代表 m_1 及 m_2 的總和， $\frac{m_2s^2 + Bs + K}{Ms^2 + Bs + K}$ 為 $F_1(s)$ 與 $F_2(s)$ 轉換方程式， F_1 為夾爪出的力，而 F_2 為物體上感測到的力，最後力量接觸模型力量接觸模型的方塊圖的方塊圖表示如下

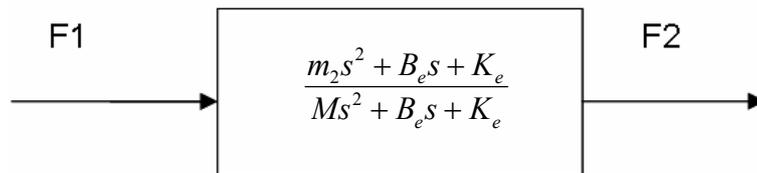


圖 3-14 力量接觸轉移函數

3.5. 系統轉移函數

在這一節我們用前面幾節得到的方塊圖，參考[26]提出的技術簡化前面的方塊圖，並將它們連接成一個完整的系統。而此完整系統是經下面三個步驟完成的，簡化直流馬達方塊圖，連接齒輪比和負載模型並簡化之，及將前述二個簡化的方塊圖連接並再簡化而產生一完整系統轉移函數，我們首先定義四個常數，馬達電的時間常數 $=\tau_e = L_a/R_a$ ；馬達機械時間常數 $=\tau_m = J_m/B_m$ ；齒輪比的時間常數 $=\tau_h = B_d/K_h$ ；負載的時間常數 $=\tau_l = J_l/B_l$ 。

參考[26]提出的方法，將圖 3-4 簡化成圖 3-15， $\dot{\theta}_m$ 此項之所以有保留，沒有簡化掉的原因在齒輪列系統中要用到。

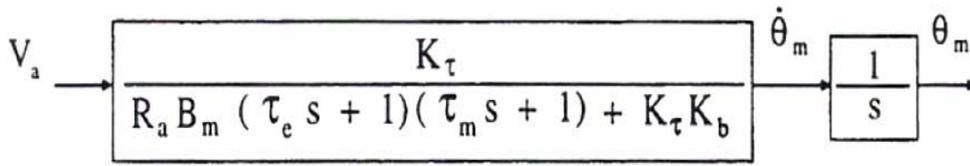


圖 3-15 簡化後之直流馬達方塊圖

齒輪系統和負載系統模型，連接在一起如圖 3-16 所示，同樣用 Van de Vegte 和 Dorf 提出的方法簡化得圖 3-17，利用馬達模型 θ_m 為 $\dot{\theta}_m$ 之積分將齒輪列模型簡化成圖 3-18。

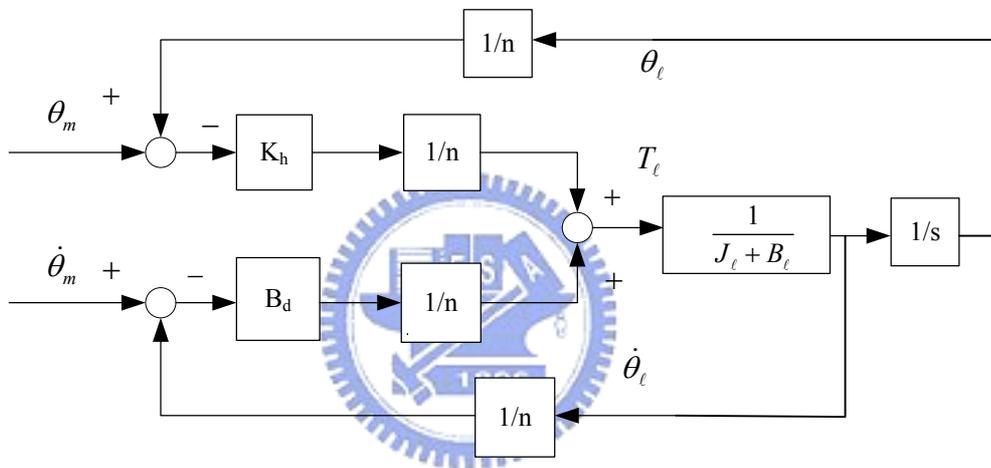


圖 3-16 齒輪列_負載方塊圖

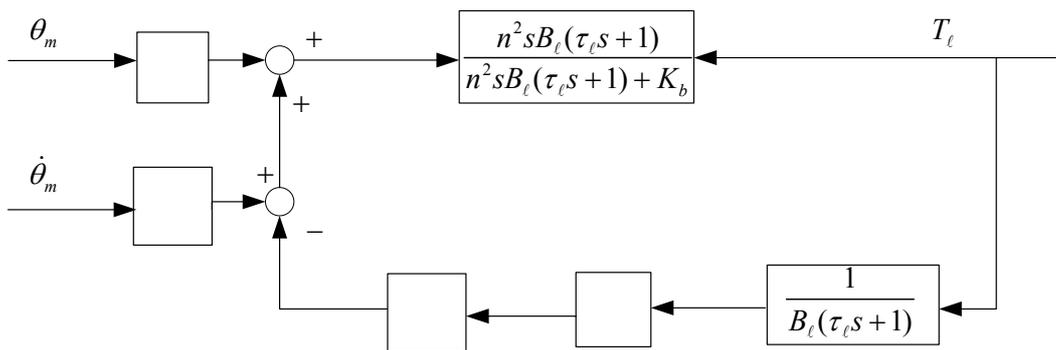


圖 3-17 簡化中的齒輪列方塊圖

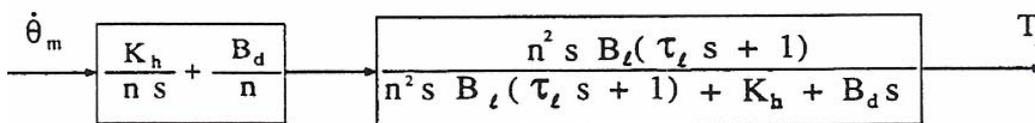


圖 3-18 簡化後之齒輪比方塊圖

將圖 3-15 和圖 3-18 及圖 3-14 結合成一個簡化的夾爪系統方塊圖，如圖 3-19 所示，輸入是電壓輸出是力。從圖 3-18 中因為 τ_l 、 B_e 、與 K_e 無法取得，因此無法求出整個系統的轉移函數但仍可知道函數分子，分母的階數，作為以後系統識別的參考。

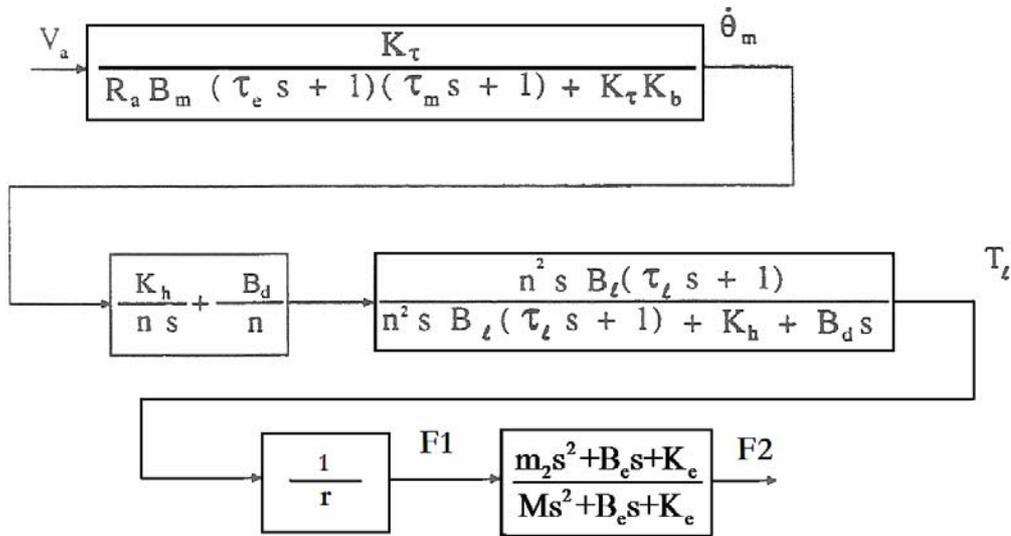


圖 3-19 完整系統方塊圖

3.6. 系統識別

上一節是直接推導出系統的轉移函數，本節是將系統當黑盒子，利用輸入/輸出資料來決定系統的數學模式，我們將對系統提供一特定的離散輸入 $u(k)$ ，量測並分析離散輸出 $y(k)$ ，而設法決定系統的轉移函數(transfer function)，如圖 3-20 所示。

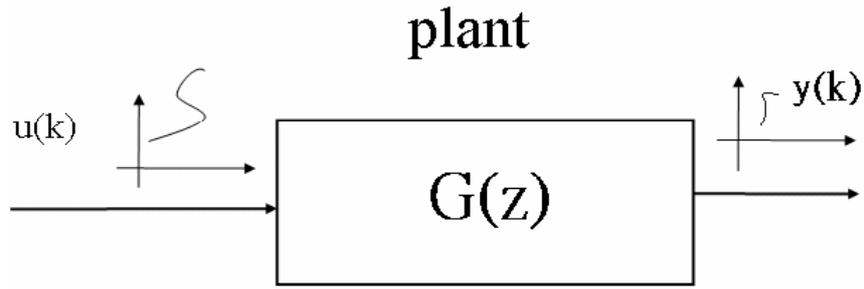


圖 3-20 轉移函數

我們把系統識別的七個步驟分別說明如何動作或決策[27]:

步驟一:硬體、識別輸入、取樣週期的決定，我們的硬體就是夾爪系統，輸入信號，是不規則的二值信號，取樣週期:100ms

步驟二:進行識別實驗，並對識別對象之輸入輸出資料做收集如圖 3-21，圖 3-21 中為收集到的 2000 個輸入輸出資料。在此用最初的 1200 個資料來做系統識別，取樣週期為 100ms，1200 筆為 12s，即橫作標之值。

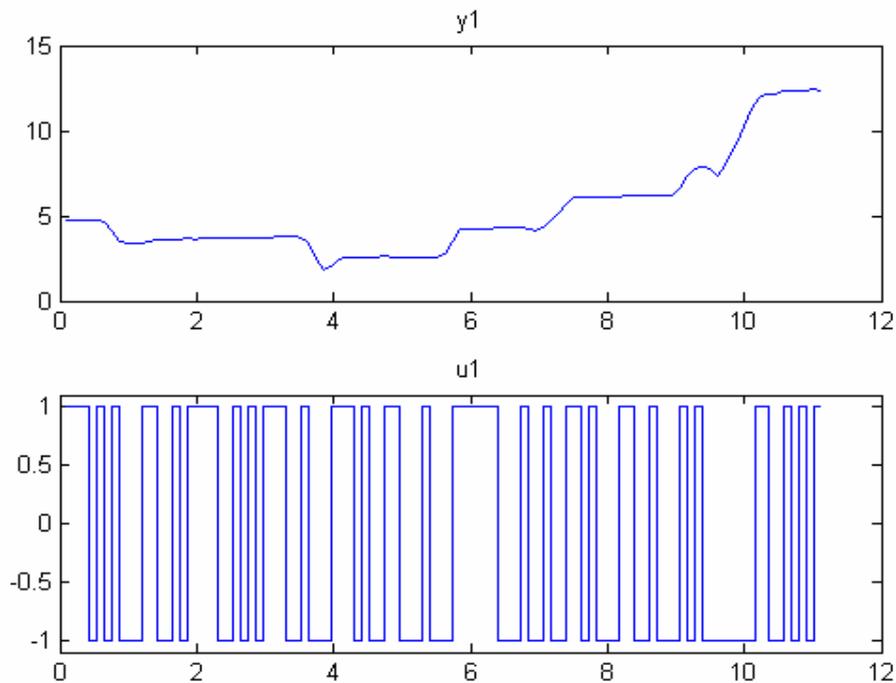


圖 3-21 輸入輸出資料(u_1 為輸入， y_1 為輸出)

步驟三:異常數據的去除，資料的擷取。

步驟四:模型階數的決定

模型階數、延遲時間的決定，是先用各種階數評估其損失函數，圖 3-22 為階數和損失函數的關係，圖 3-22 中有 9 個選項(2~10 階)，2~9 選項的損失差不多(參閱圖 3-22)，在此選[3 2 1]為第四選項，分母三階分子二階延遲時間 1 損失函數最小。

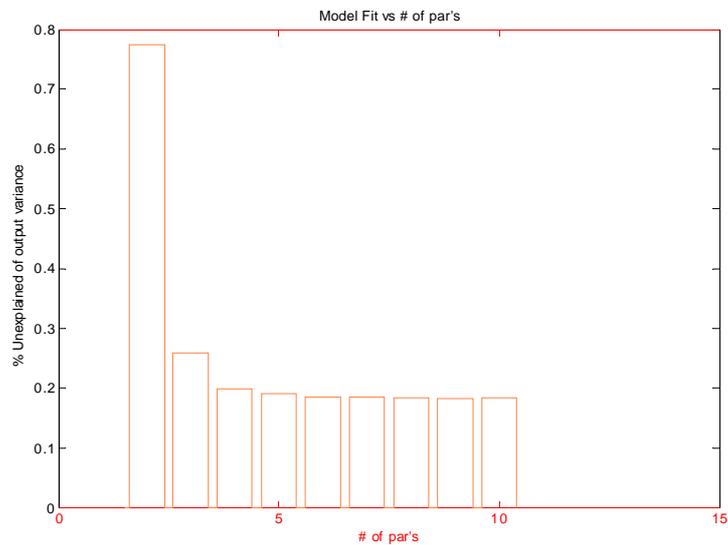


圖 3-22階數和損失函數的關係

步驟五:系統識別法

在此採用 ARX model(Auto-Regression model with eXogeneous)以下介紹其方法，圖 3-19 的輸入輸出的 z 轉換表示如下

$$\frac{Y(z)}{U(z)} = G(z) = \frac{\alpha_m z^m + \alpha_{m-1} z^{m-1} + \cdots + \alpha_1 z + \alpha_0}{z^n + \beta_{n-1} z^{n-1} + \cdots + \beta_1 z + \beta_0} \quad (3-28)$$

因此

$$\begin{aligned}
& Y(z) + \beta_{n-1}z^{-1}Y(z) + \dots + \beta_1z^{-n+1}Y(z) + \beta_0z^{-n}Y(z) = \\
& \alpha_mz^{-n+m}U(z) + \alpha_{m-1}z^{-n+m-1}U(z) + \dots + \alpha_1z^{-n+1}U(z) + \alpha_0z^{-n}U(z)
\end{aligned} \tag{3-29}$$

經過逆 z 轉換我們得到

$$\begin{aligned}
& y(k) + \beta_{n-1}y(k-1) + \dots + \beta_1y(k-n+1) + \beta_0y(k-n) = \\
& \alpha_mu(k-n+m) + \alpha_{m-1}u(k-n+m-1) + \dots + \alpha_1u(k-n+1) + \alpha_0u(k-n)
\end{aligned} \tag{3-30}$$

化簡成下式

$$y(k) = \varphi(k) \cdot \theta \tag{3-31}$$

θ 是代表轉移函數的係數， $\varphi(k)$ 過去的輸入和輸出

$$\begin{aligned}
\theta &= [-\beta_{n-1} \dots -\beta_1 \ -\beta_0 \ \alpha_m \ \alpha_{m-1} \ \dots \ \alpha_1 \ \alpha_0] \\
\varphi(k) &= [y(k-1) \ \dots \ y(k-n) \ u(k-n+m) \ \dots \ u(k-n)]
\end{aligned}$$

$\varphi(k)$ 迴歸向量，(3-28)稱為ARX model (Auto-Regression model with eXogeneous)

$\hat{\theta}$ 轉移函數的係數的估測值，可利用下式算出

$$\hat{\theta} = (\varphi' \varphi)^{-1} \varphi' Y \tag{3-32}$$

其中

$$\varphi = \begin{bmatrix} \varphi(1) \\ \varphi(2) \\ \vdots \\ \varphi(N) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y(0) \ \dots \ y(1-n)u(1-n+m) \ \dots \ u(1-n) \\ y(1) \ \dots \ y(2-n)u(2-n+m) \ \dots \ u(2-n) \\ \vdots \\ y(N-1) \ \dots \ y(N-n)u(N-n+m) \ \dots \ u(N-n) \end{bmatrix}$$

$$Y = \begin{bmatrix} y(1) \\ y(2) \\ \vdots \\ y(N) \end{bmatrix}$$

根據上面的七個步驟我們對夾爪系統輸入白噪音訊號，測得輸出，利用

matlab 軟體算出了 $\hat{\theta}$ 之值，亦即轉移函數係數值，列於 3-33 式

$$G(z) = \frac{0.02695 z^{-1} + 0.03112 z^{-2}}{1 - 2.093 z^{-1} + 1.321 z^{-2} - 0.2254 z^{-3}} \quad (3-33)$$

我們對此式送入原先的輸入得一模型輸出和測量輸出作一比對。圖 3-23 是驗證 3-33 式模型輸出和測量輸出的誤差程度，圖中黑線是測量輸出，紅線為模型輸出，兩者比較的結果吻合度 95.21%，誤差為 4.79%由圖 3-24 中的波德圖知系統之相位差在 -180° 以上區域是穩定的，其增益隨頻率增加而遞減，我們就以 -180° 為界，設定系統較佳之頻率響應是 0.35 徑/秒，其增益較佳。

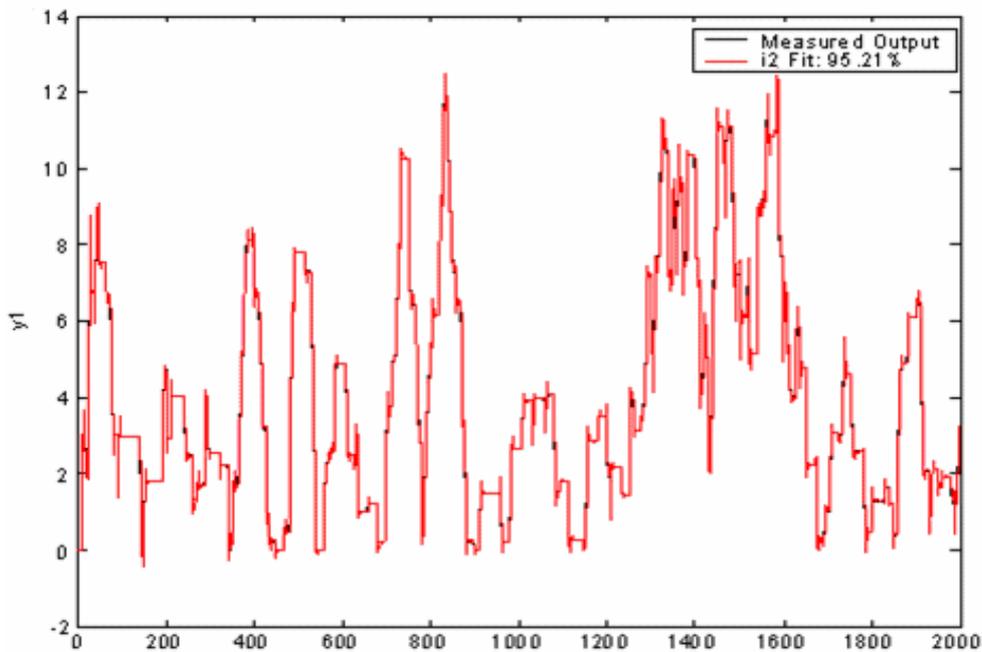


圖 3-23模型輸出和測量輸出的比較

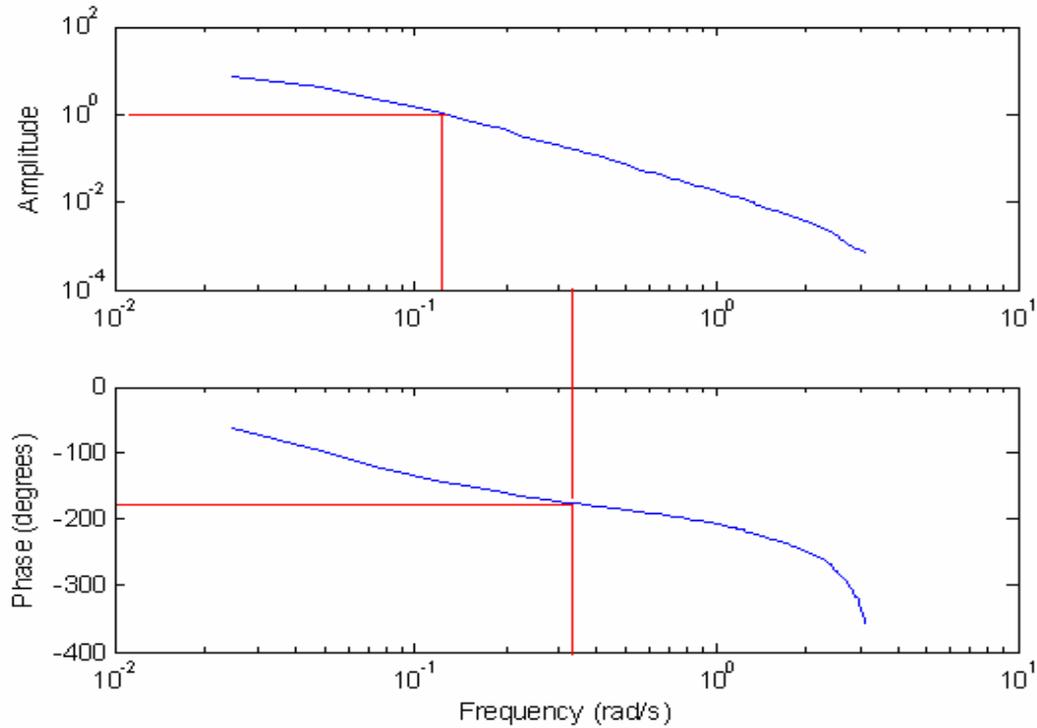


圖 3-24. (3-33)式的波德圖

我們以圖 3.25 來說明頻率響應法的原理，即輸入系統不同頻率的弦波信號 (sinusoid)，如

$$u(t) = \alpha \cos \omega t \quad (3-34)$$

其中 α 為信號的振幅，角頻率 ω 可自行選定，則此系統的輸出為

$$y(t) = \alpha |G(j\omega)| \cos(\omega t + \phi) + n(t) \quad (3-35)$$

其中 $\phi = \arg G(j\omega)$ 為系統所造成的相位落後， $n(t)$ 為雜訊(noise)成分。觀察式 (3-35)即可發現系統於角頻率 ω 時的增益及相位特性，因此若輸入系統各種角頻率的餘弦信號，則可得多個角頻率點的增益與相位特性，藉由其特性於 Bode 圖上的表現，可以使用圖形表示其頻率轉移函數。

3.7. 穩態誤差

在控制系統中所發現的穩態誤差大多數歸因於某些的非線性特性，如非線性摩擦或死區，以圖 3-25 為例，輸入在 0.45v~0.6v 以外，即為死區，本論文的夾爪系便即有遭遇此問題。當系統其輸入輸出特性如圖 3-25 所示，當輸入信號大小位於死區時[30]，系統的輸出將為零，而此控制將不能校正誤差。

其次我們研究系統穩態誤差的特性。一般說來，系統的態誤差是依系統的輸入及型式而定。今將上一節識別出的系統接成閉迴路系統，輸入為步階函數，輸出為圖 3-26，則此閉迴路系統其誤差函數為[30]

$$E(z) = \frac{R(z)}{1+GH(z)} \quad (3-34)$$

步階函數 z 轉換

$$R(z) = \frac{1}{1-z^{-1}} \quad (3-35)$$

利用終值理論得下式

$$e_{ss} = \lim_{z \rightarrow 1} (1-z^{-1}) \frac{R(z)}{1+GH(z)} = \frac{1}{1+K_p} (K_p = \lim_{z \rightarrow 1} GH(z)) \quad (3-36)$$

當 e_{ss} = 常數時為 0 型系統，而我們用 matlab 作系統測試的結果如圖 3-26，存在誤差值且為常，所以系統為 0 型系統。

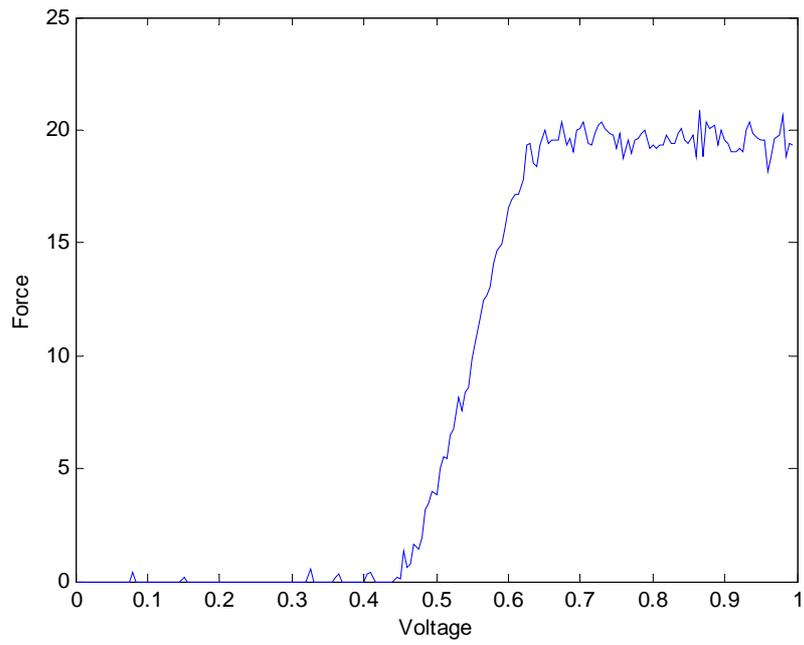


圖 3-27 夾爪系統輸入輸出關係圖(輸入遞增，取樣時間 100ms)

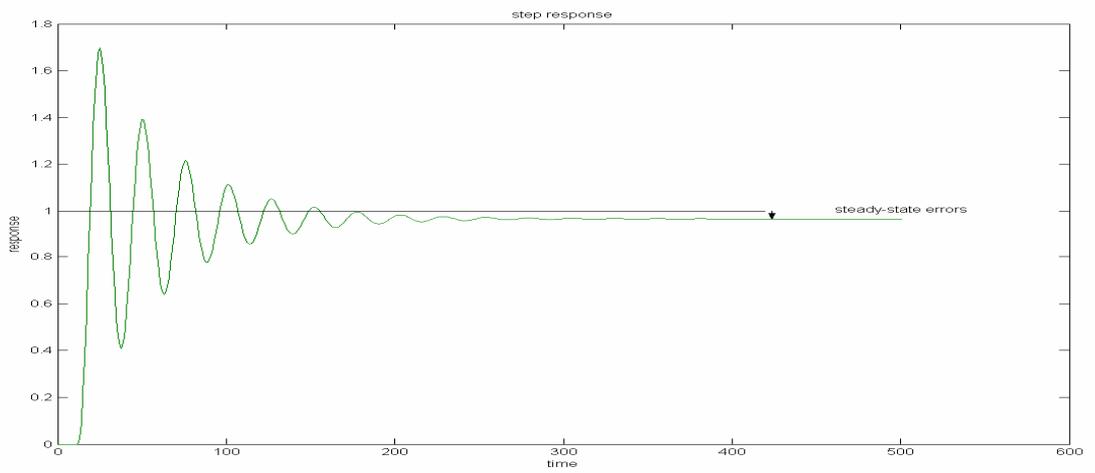


圖 3-28 夾爪系統閉迴路系統步階響應

第四章

操控機制

本論文所提出的夾爪控制系統可廣泛適用於各種不同軟硬度之物體的夾取，一般物體除了軟硬之分以外，尚有脆度、韌度等物理性質[2]，所呈現出來的物理現象不盡相同，首先必須對物理性質加以探討。論文所規劃的遠端夾爪系統可夾取任何在重量限定範圍內的物體，力覺回饋系統在遠端系統建立 PID Controller，近端主要為力回饋搖桿可感受物體的回饋力以得知物體的軟硬度，如此人與機器互動將更為密切。本章首先介紹被夾物的特性，再介紹 PID 控制理論及控制器中參數的設定。

4.1. 夾取物體分析



基於夾爪機械結構及驅動系統上的考量，所能夾取之物體的材質、大小、形狀、重量等有所限制，夾爪手指的大小決定所能夾取物的外在大小及形狀，如圖 4.1 所示，夾爪的爪指結構有兩種開度可重新做拆卸，一種可張開寬度較小，夾爪張到最大時寬度為 60 毫米，如圖 4.1(a)所示，另一種張開寬度可到 85 毫米，如圖 4.1(b)所示。

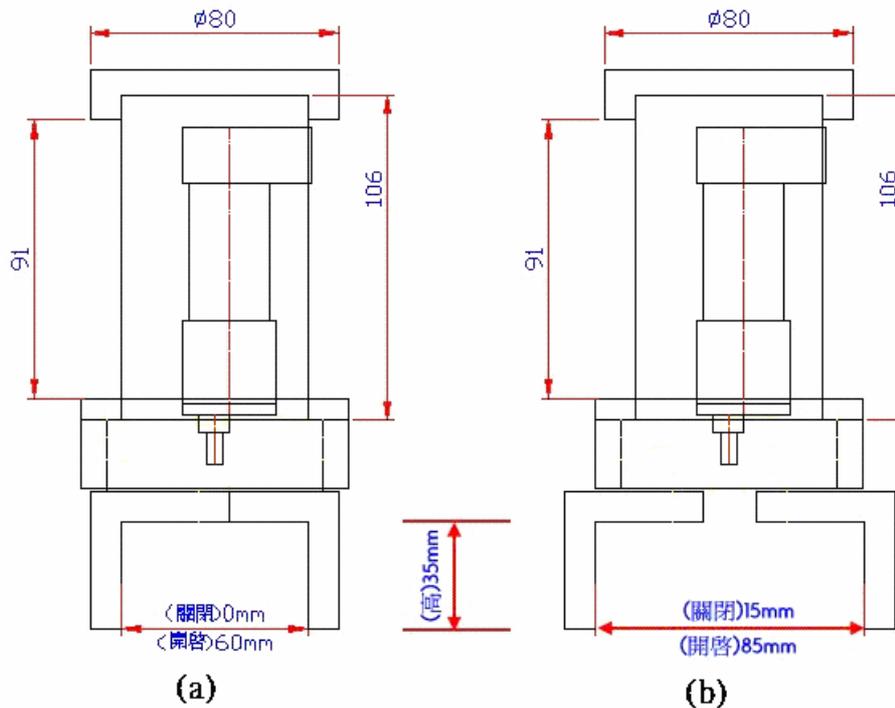


圖 4-1 夾爪設計圖：(a)小開度和(b)大開度

夾爪所必須施加的夾取力道大小與物體的材質有關，如軟硬度、韌性、彈性、脆性等，這裡我們將物體分為四類如表 4.1 所示。表 4.2 為夾爪對提起各類物體的施力大小，材質較為特殊的物體為雞蛋及番茄，雞蛋所能承受的壓力非常小，任何突如其來的衝力都可能破壞外殼，因此力量控制上必須格外注重，夾爪以最小力即可以夾持住雞蛋並不使之碎裂，且雞蛋重量不會造成夾取力道不夠的問題，因此只要以最小力即可；對於軟果皮且果肉又充滿汁液的番茄而言，通常夾取力道不能過大，否則有可能使之外表嚴重變形或表皮遭到破壞。(表 4-1 與 4-2 是實驗學長製作的)

表 4-1 物體之性質分類

	物理性質	代表物體
第一類	外表堅硬、中空、脆性、易毀損	雞蛋
第二類	外表堅硬、不易變形、不易毀損	金屬、玻璃、塑膠
第三類	外表柔軟、易變形、具韌性、不易毀損	海棉、橡膠
第四類	外表柔軟、易變形、易毀損	番茄

表 4-2 夾取各類物體所需要的力(nt)

		最小	最適
雞蛋 (50~100 克)	夾取力(N)	0~5	5~10
金屬類 玻璃類 塑膠類 海棉類 (10~500 克)	夾取力(N)	0~10	10~50
番茄 (100~200 克)	夾取力(N)	0~5	5~15

4.2. PID 控制

PID 控制器被廣泛地在工業實踐過程中已超過 60 年。且為大多數工業控制應用證明其為有效的辦法，儘管這個事實，沒有一些標準可調整控制器，但基於如果對系統有相當程度的了解，PID 控制器是可以完成控制目標的信念，本論文採用了此控制器。

PID 主要是由增益比例、積分、微分三個部分組合而成的控制器。PID 控制器在現今產業界裡算是歷史悠久、應用廣泛、實用性相當高的控制器，但是在 PID 參數的調整上，常需要則必須依賴操作人員經驗或試誤法來決定。PID 控制器結合 PI 和 PD 控制器的優點，能改善系統閉回路的相對穩定度，使暫態響應較快，減少穩態誤差。在連續時間的 PID 控制演算法如下(4.1)式

$$u(t) = K_p e(t) + \int_0^t e(t)dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (4-1)$$

其中 $u(t)$ ：控制量， $e(t)$ ：誤差訊號， K_P ：系統比例增益， K_I ：系統積分增益， K_D ：系統微分增益，其 PID 控制器 $G_C(s)$ 方塊圖如下：

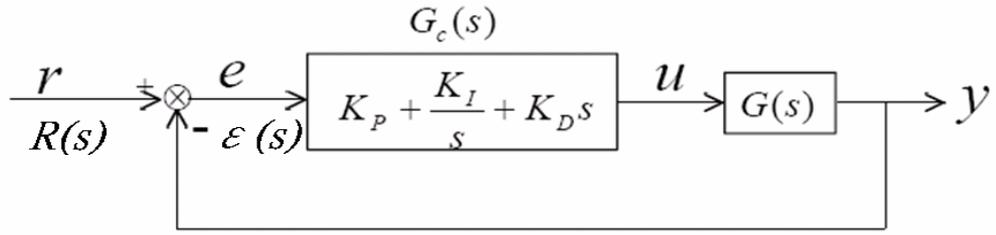


圖 4-2 PID 控制器方塊圖

由圖 4-2 中得知 $G_C(s)$ 之值如 4-2 式

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad (4-2)$$

其中 r ：輸入訊號， e ：誤差訊號， u ：控制器輸出， y ：系統輸出，與 $G(s)$ ：受控系統

若將(4-1)式離散化，用梯形面積之和來近似積分項，用前後兩點相減來近似微分項， T_s 為取樣時間(Sampling Time)，則可推導出離散時間 PID 控制演算法，其推導過程如下[27]。

$$u(k) = K_p e(k) + K_I T_s \left(\frac{e(0) + e(1)}{2} + \frac{e(1) + e(2)}{2} + \dots + \frac{e(k-1) + e(k)}{2} \right) + K_D \frac{e(k) + e(k+1)}{T_s} \quad (4-3)$$

$$= K_p e(k) + K_I T_s \sum_{h=1}^k \frac{e(h) + e(h-1)}{2} + \frac{K_D}{T_s} (e(k) + e(k-1)) \quad (4-4)$$

定義

$$z \left[\sum_{h=1}^k f(h) \right] = z \left[\sum_{h=1}^k \frac{e(h) + e(h-1)}{2} \right], f(0) = 0 \quad (4-5)$$

則

$$\sum_{h=1}^k f(h) = \sum_{h=1}^k \frac{e(h) + e(h-1)}{2} \quad (4-6)$$

將(4-6)式做 z 轉換(Z Transform)，可得

$$z \left[\sum_{h=1}^k \frac{e(h) + e(h-1)}{2} \right] = z \left[\sum_{h=1}^k f(h) \right] \quad (4-7)$$

$$= \frac{1}{1-z^{-1}} [F(z) - f(0)] = \frac{1}{1-z^{-1}} F(z) \quad (4-8)$$

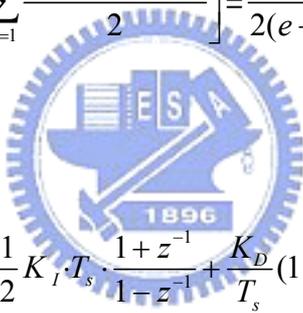
其中

$$F(z) = z[f(h)] = \frac{e + z^{-1}}{2(e - z^{-1})} E(z) \quad (4-9)$$

因此

$$z \left[\sum_{h=1}^k \frac{e(h) + e(h-1)}{2} \right] = \frac{e + z^{-1}}{2(e - z^{-1})} E(z) \quad (4-10)$$

將(4-4)式做 z 轉換可得



$$\begin{aligned} U(z) &= \left[K_p + \frac{1}{2} K_I T_s \cdot \frac{1+z^{-1}}{1-z^{-1}} + \frac{K_D}{T_s} (1-z^{-1}) \right] E(z) \\ &= \left[K_p - \frac{1}{2} K_I + T_s \cdot \frac{K_I}{1-z^{-1}} + \frac{K_D}{T_s} (1-z^{-1}) \right] E(z) \end{aligned} \quad (4-11)$$

$$\begin{aligned} \frac{U(z)}{E(z)} &= (K_p - \frac{1}{2} K_I) + T_s \cdot \frac{K_I}{1-z^{-1}} + \frac{K_D}{T_s} (1-z^{-1}) \\ &= K'_p + \frac{K'_I}{1-z^{-1}} + K'_D (1-z^{-1}) \end{aligned} \quad (4-12)$$

其中 $K'_p = K_p - \frac{1}{2} K_I$ ，為數位 PID 控制器比例增益， $K'_I = T_s \cdot K_I$ ，為數位 PID 控制器積分增益， $K'_D = \frac{K_D}{T_s}$ ，為數位 PID 控制器微分增益。

由(4-12)式可知，將連續時間之 PID 控制器離散化，其數位 PID 控制器

之參數會隨著取樣時間之改變而改變。若是應用在數位控制上，則 PID 控制器的離散時間描述式如下：

$$u(k) = u(k-1) + K_p[e(k) - e(k-1)] + K_I \cdot e(k) + K_D[e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (4-13)$$

其中 $e(k)=r(k)-y(k)$ ， $u(k)$ ：受控體 k 時刻的輸入， $e(k)$ ： k 時刻輸入訊號 $r(k)$ 和系統輸出 $y(k)$ 的回授誤差訊號， $k, k-1, k-2$ 為某時間點

爲了找出恰當的 k_p 、 k_i 、與 k_d 之值，我們將系統加入 PID controller 作軟體模擬，調整軟體中 k_p 、 k_i 、與 k_d 之值，並分析其輸出，尋找的恰當的參數，圖 4-3 爲以 $k_p=0.1$ 、 $k_d=0.5$ 、 $k_i=0.0001 \sim 1$ ，做出的結果。我們發覺 k_i 變大可消除系統穩態誤差，但不能太大，太大會引起振盪，圖 4-3 中 $k_i=1$ 時就引起振盪。有了以上的結論，我們把重心放在參數 k_i 值的調整上，即在系統中加入 PI controller，圖 4-4 顯示爲反饋控制系統方塊圖，整個系統的開路轉移數爲

$$G_r(s) = G(s) \left(\frac{sK_p + K_i}{s} \right) \quad (4-12)$$

在此情形中，PI 控制器等於是對開路轉移函數中加一零點 $s = -\frac{K_i}{K_p}$ 和一極點 $s=0$ 。積分控制的一個明顯影響是系統的階次增加了一次。更重要的是系統的型式也增加了一次，如此若已知輸出的穩態誤差爲常數，則積分控制可以將它降爲零。

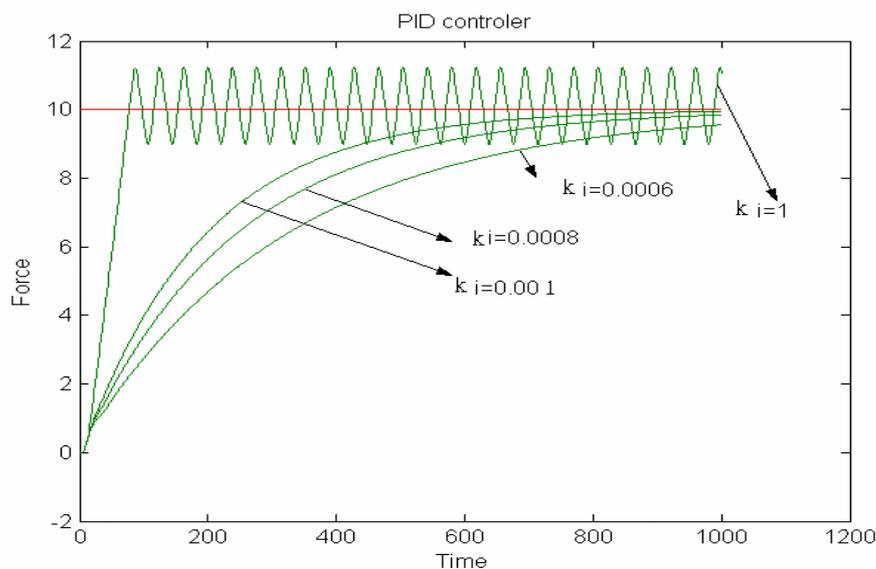


圖 4-3 調整控制器參數 k_i 得到的輸出

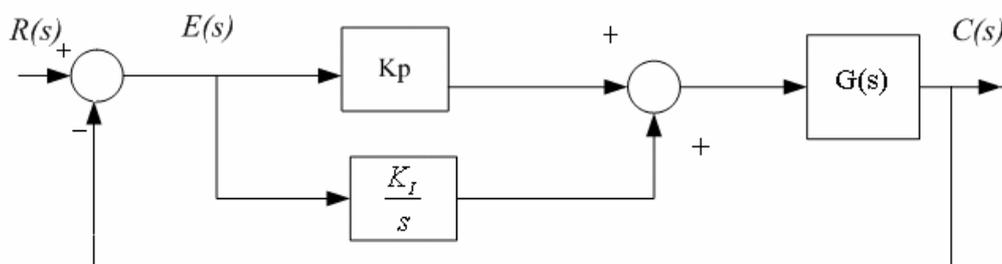


圖 4-4 帶有 PI 控制器的反饋控制系統

4.3. 實作控制原則

我們希望能達到夾爪系統的出力能收斂至設定值，且誤差值 10% 內，爲了能達到此目的，系統需實現下列各項:1.逼近的輸出曲線應如圖 4-3 所示且 $k_i < 1$
 2.PID controller k_p 、 k_i 、與 k_d 參數值之適時調整 3.夾爪系統物理特性之深入了解
 4.驅動電壓需設上、下限; 其理由陳述如後，逼近設定值的曲線其上升時間不可過快，以沒有超越量較佳，反之將振盪無法收斂，同時在上一節中有提到調整 PI 控制器的 k_i 值來消除穩態誤差，所以 k_i 值要隨時調整。

夾爪必需在非死區完成控制，因爲在死區夾爪是不反應的，所以取樣頻率要

慎選，太快夾爪系統無法反應，太慢無得到我們的設定值，在此我們的取樣頻率，是依據系統識別時，所推估的週期 100ms

隨被夾物的不同設不同的上、下限電壓，設上限依據圖 4-5 希望逼近曲線不要有超越量，設下限的原因是，0.2v 以下夾爪系統會自動開啓，而開啓的力量是物體本身的彈力，撐開夾爪。



第五章

實驗結果

本論文所發展出的遠端力覺系統能以搖桿操作機械夾爪夾取多種物件而且不產生破壞，除了夾取動作外，尚可做提起、鬆開物體的動作，實現系統的力覺回饋。本章先以沒有力回饋方式控制夾爪，再試著將物體模擬成一個虛擬彈簧，將彈簧力感回饋到搖桿上，實驗中我們利用力回饋搖桿操控機械夾爪實地夾取各種物件。由於此力覺回饋系統發展的目標為家庭內客廳或廚房的機器人幫手，因此實驗的夾取對象均為家庭內常見的物品，力量設定值為 30nt 以內，某些物品需要有較精確的力量控制，某些則不需要擔心夾爪會破壞其外表，我們以表 4-1 和表 4-2 為依據，以表內建議的力量值來夾取金屬塊、橡膠球、番茄及雞蛋等不同性質的物體。我們預期實驗的結果是夾爪出力會收斂至設定值，且不會夾壞物體。

第一組實驗中，我們是進行沒有回饋力的夾取實驗，首先進行夾取橡膠材質的玩具球如圖 5-1，因為橡膠質地柔軟且彈性佳又輕盈，不必擔心夾取力過大而破壞外觀。以下的實驗我們讓抓取力從 10nt 到 12nt，驅動電壓上、下限為 0.2~1.0v，圖 5-2 中藍色線為感測器量得的夾取力，圖 5-3 中綠色曲線代表夾爪移動的距離，圖 5-4 中紅色線為驅動電壓，實驗中發現力愈大 k_i 值愈大方可修正穩態誤差，且在圖 5-2 和圖 5-3 中發現夾爪驅動電壓有變化但力和位置都不跟著改變證明死區的存在。圖 5-2~圖 5-4 所設定的力量值及 k_p 、 k_i 、與 k_d 之值 (力量值 10nt 控制器參數 $K_p=0.01$ $K_i=0.001$ $K_d=0.01$)，圖 5-5~圖 5-7 所設定的力量值及 k_p 、 k_i 、與 k_d 之值(設定力量值 12 nt $K_p=0.01$ $K_i=0.006$ $K_d=0.01$)

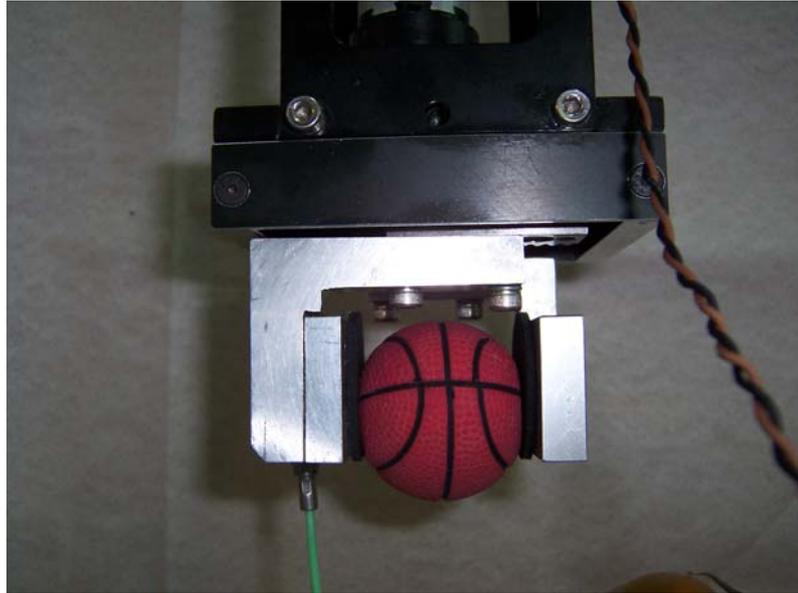
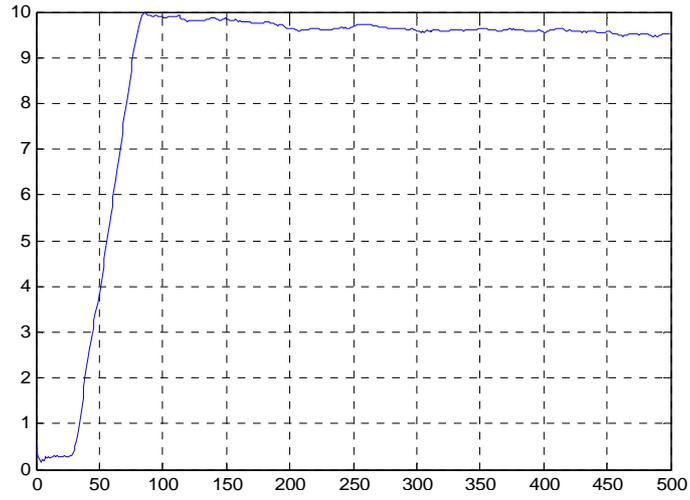
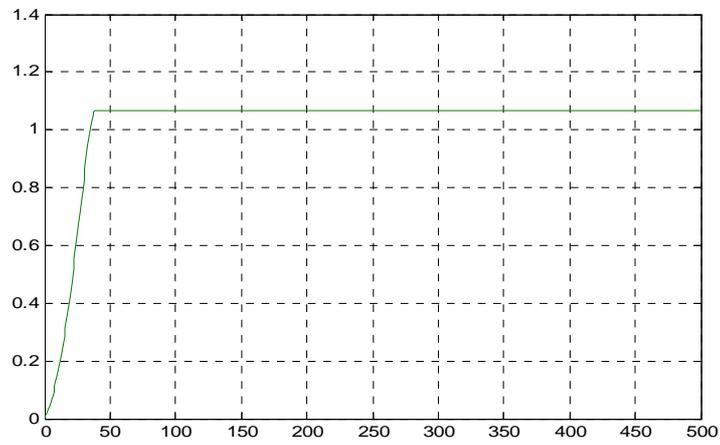


圖 5-1 夾取橡膠材質的玩具球

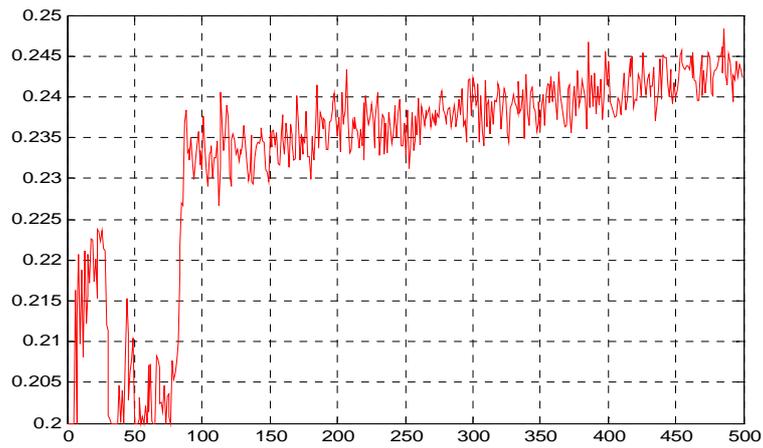




(a)力量變化圖

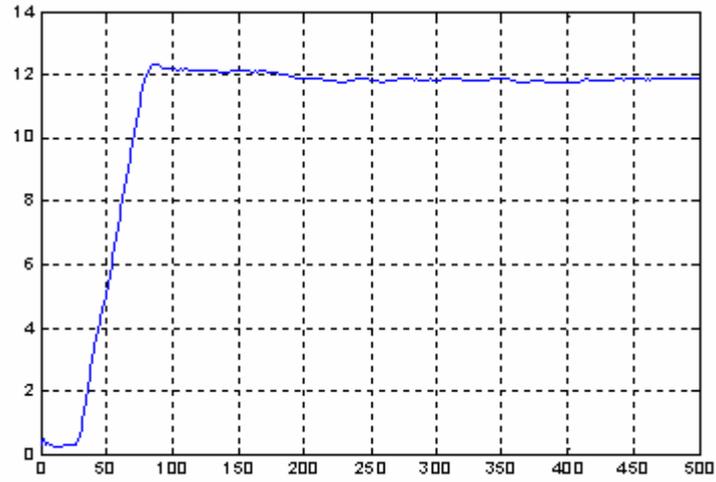


(b)位置變化圖

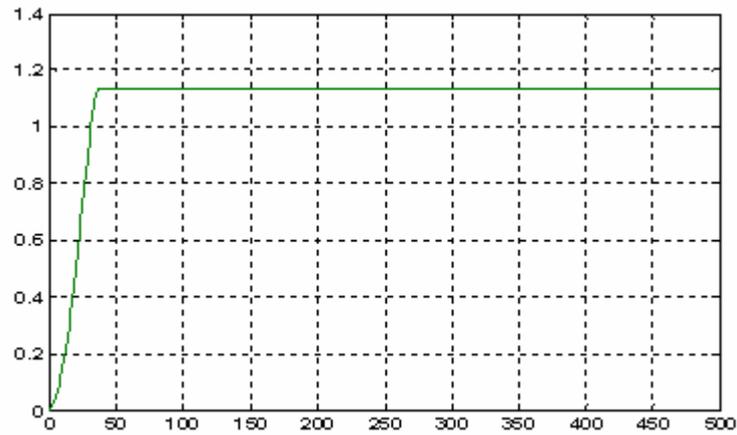


(c)驅動電壓變化圖

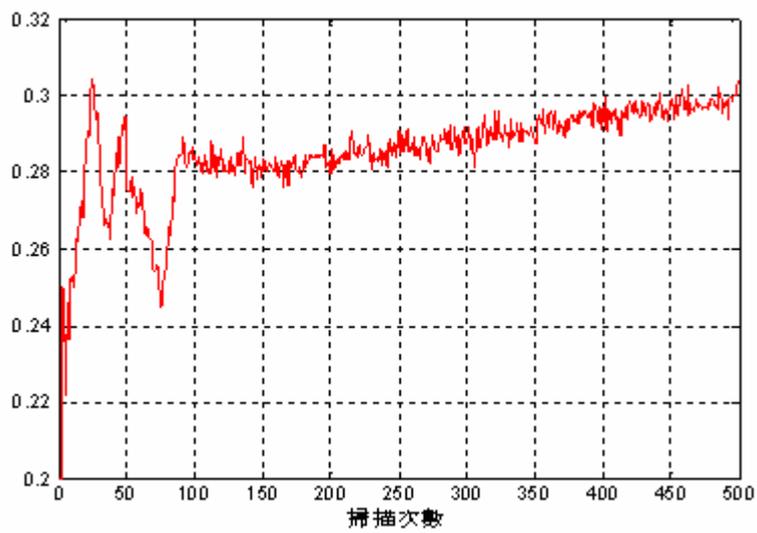
圖 5-2 (a)夾取橡膠球力量變化圖，(b)位置變化圖和(c)驅動電壓變化圖



(a) 力量變化圖



(b) 位置變化圖



(c) 驅動電壓變化圖

圖 5-3 (a)夾取橡膠球力量變化圖，(b)位置變化圖和(c)力量變化圖

接下來進行的實驗對象為金屬塊，如圖 5-8 所示，由於金屬塊為堅硬材質，故夾取時不需考慮到夾取力是否太大而造成物體損毀，以下實驗夾取力設在 14nt~16nt，驅動電壓為上、下限 0.4~1.2v，實驗中發現 k_i 值隨力愈大而愈大方可修正穩態誤差。圖 5-9~圖 5-11 所設定的力量值及 k_p 、 k_i 、與 k_d 之值(設定力量值 14nt 控制器參數 $K_p=0.01$ $K_i=0.012$ $K_d=0.01$)，圖 5-12~圖 5-14 所設定的力量值及 k_p 、 k_i 、與 k_d 之值(設定力量值 16nt $K_p=0.01$ $K_i=0.1$ $K_d=0.01$)

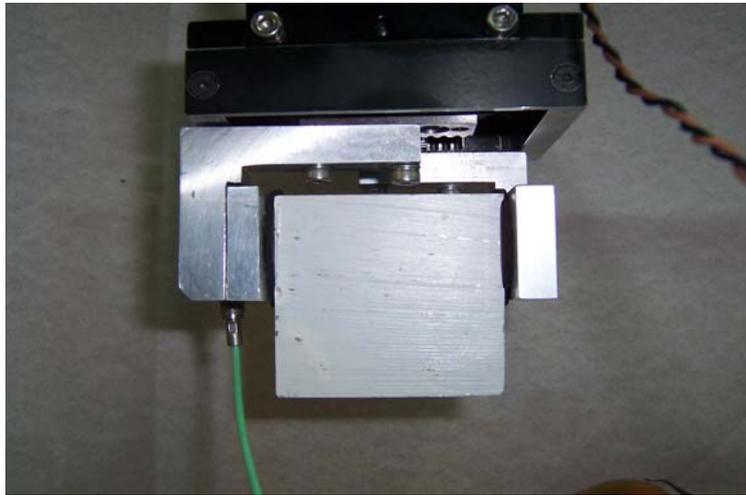
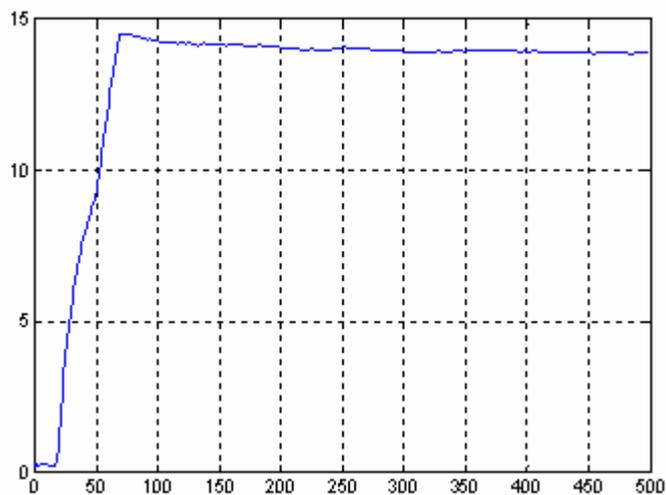
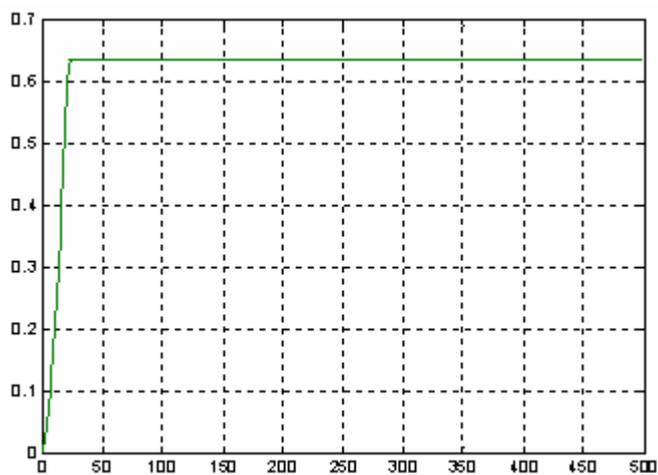


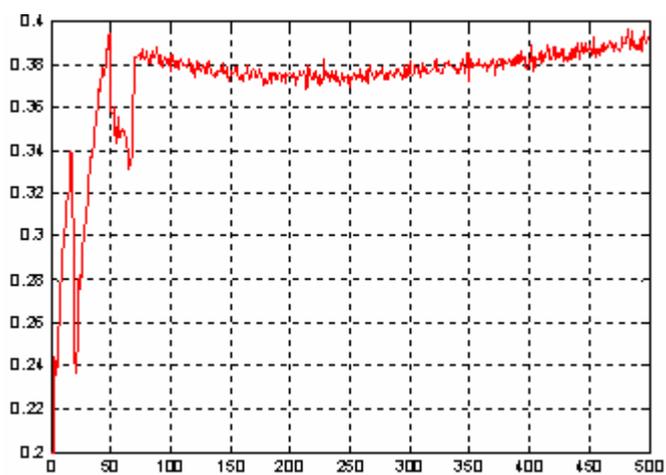
圖 5-4 夾取金屬塊



(a) 力量變化圖

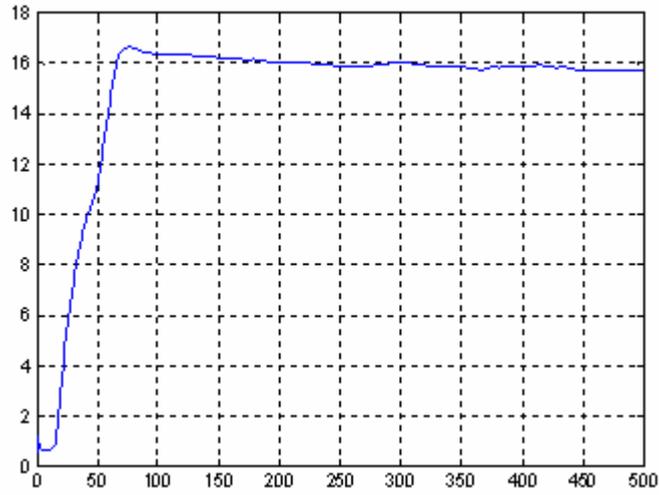


(b) 位置變化圖

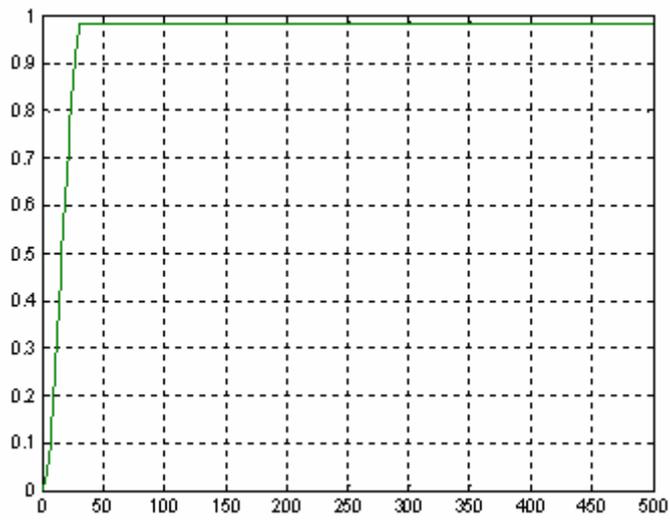


(c) 驅動電壓變化圖

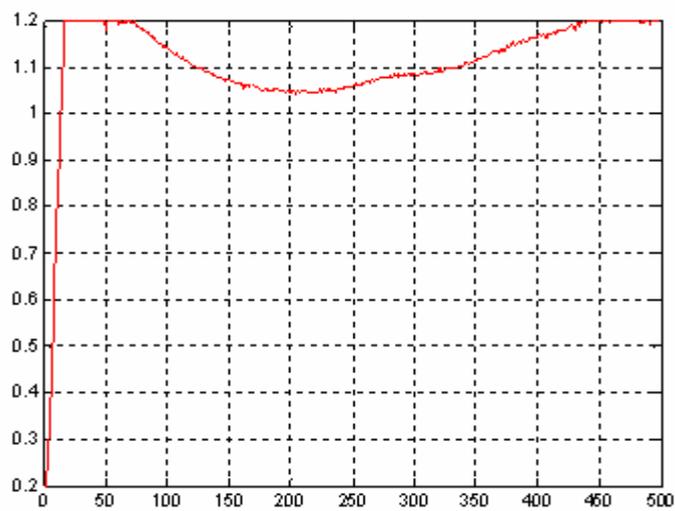
圖 5-5 (a)夾取金屬塊力量化圖，(b)位置變化圖和(c)驅動電壓變化圖



(a) 力量變化圖



(b) 位置變化圖



(c) 驅動電壓變化圖

圖 5-6(a)夾取金屬塊力量圖，(b)位置變化圖和(c)驅動電壓變化圖

在第二組實驗中，我們加入回饋力以輔助夾取，圖 5.16 為夾取番茄場景，太大的夾取力會使番茄外表受到破壞，太小的夾取力容易使番茄從夾爪滑落，因此必須先經過實驗方式找出番茄適當的夾取力量範圍，經嘗試後以 5 牛頓的力驅動夾爪。淺藍色代表力回饋搖桿，與夾爪力連動傳回搖桿之值，如圖 5-17 中所示。

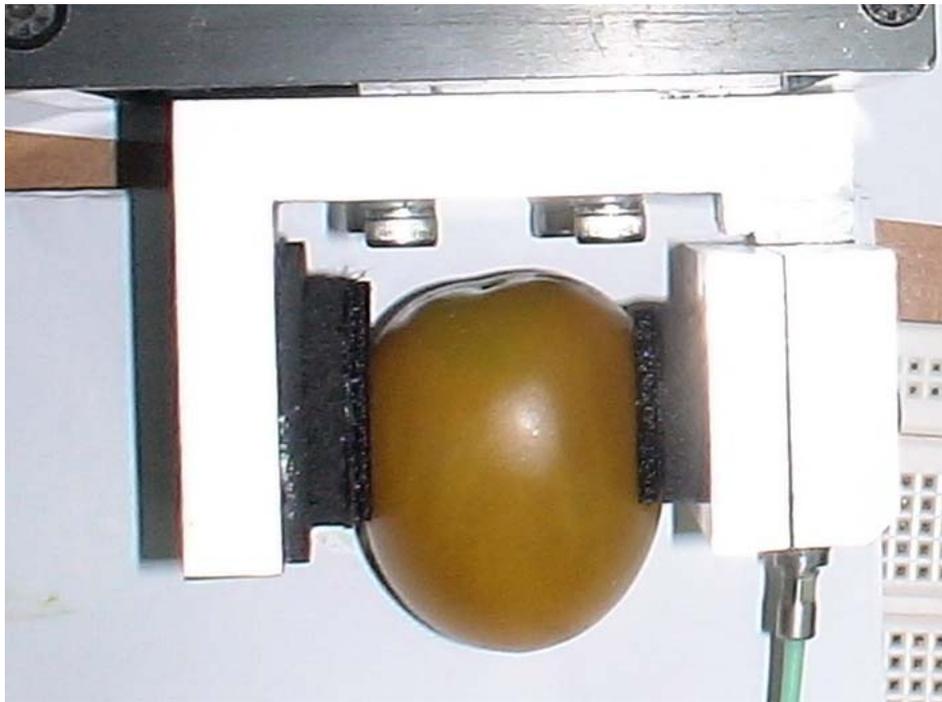
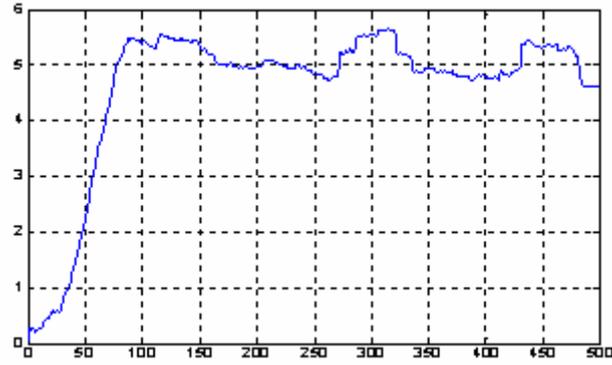
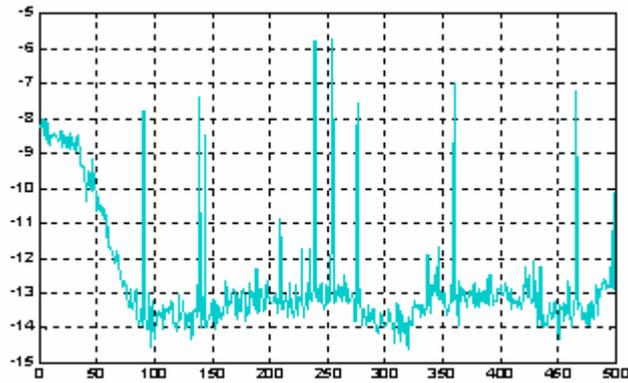


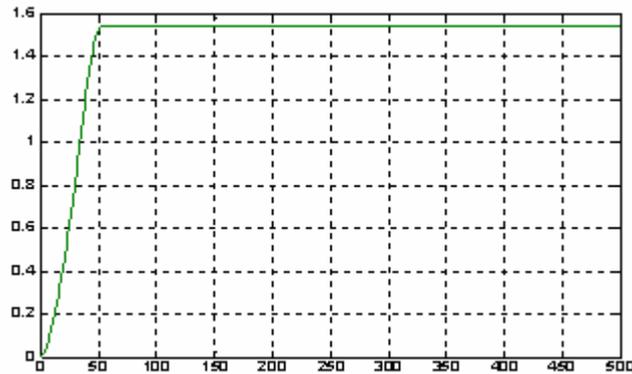
圖 5-7 夾取蕃茄場景



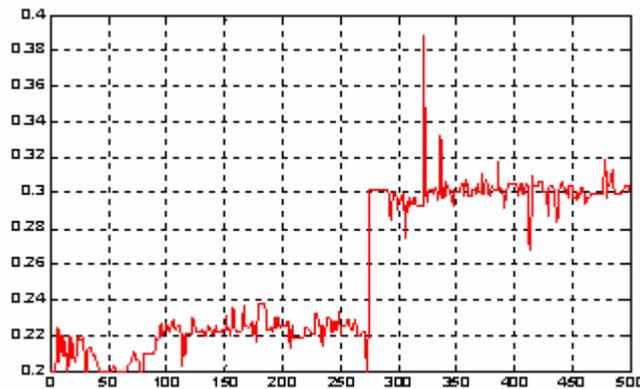
(a) 力量變化圖



(b) 回饋力變化圖



(c) 位置變化圖



(d) 驅動電壓變化圖

圖 5-8 (a)夾蕃茄力量變化圖，(b)回饋力變化圖，(c)位置變化圖和(d)驅動電壓變化圖

圖 5.20 為夾取雞蛋場景，雞蛋外殼非常脆弱，因此施力不可過大，同時雞蛋也擁有一定程度的重量，因此施力不可過小，但實驗僅以最恰當的力量值去夾取雞蛋，嘗試後以 5 牛頓的來驅動夾爪，由圖可知普通雞蛋只需約 5 牛頓的力量便可將之提起，同樣淺藍色代表力回饋搖桿，與夾爪力連動傳回搖桿之值，如圖 5-21 所示。

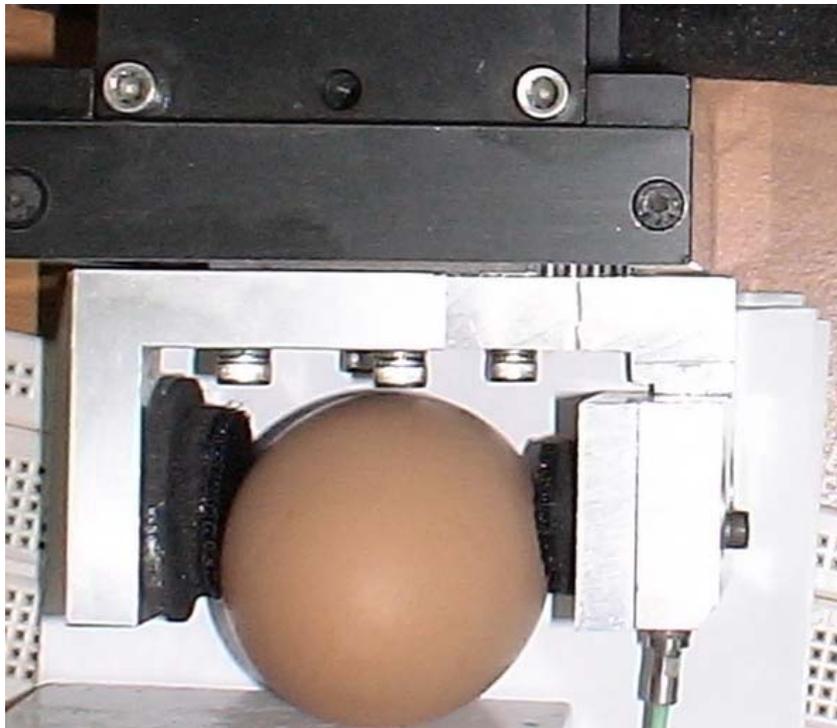
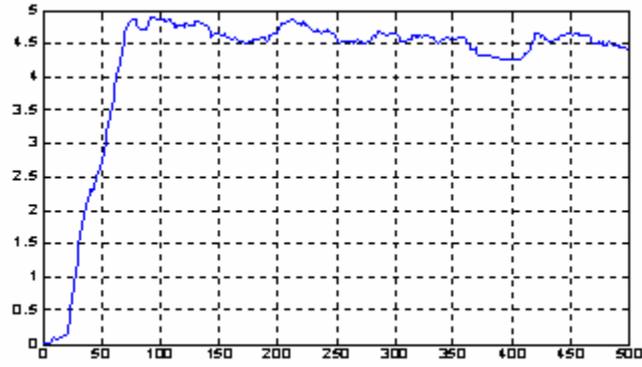
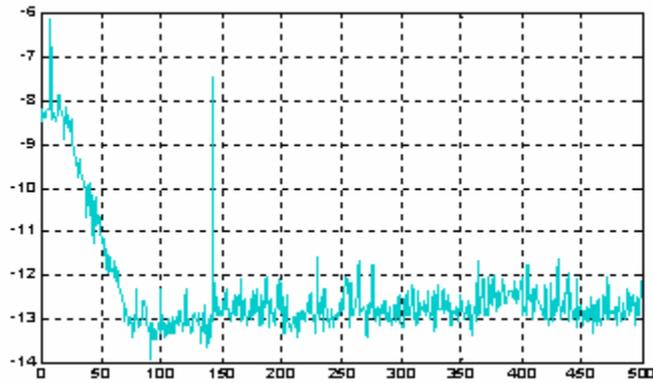


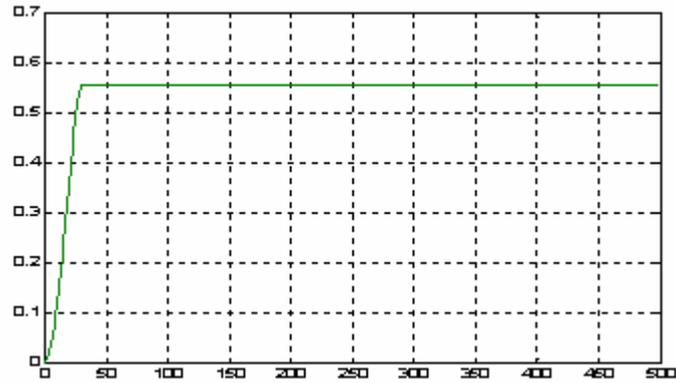
圖 5-9 夾取雞蛋場景



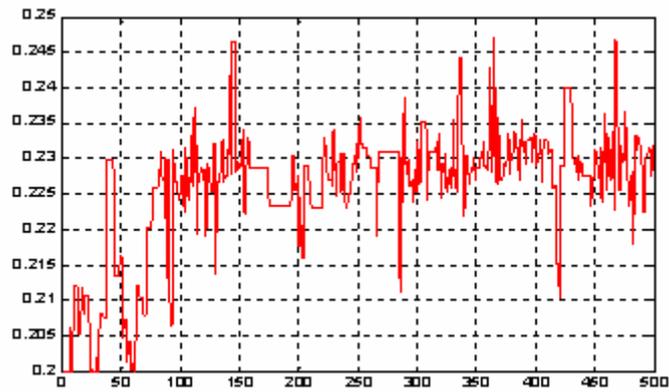
(a) 力量變化圖



(b) 回饋力變化圖



(c) 位置變化圖



(d) 驅動電壓變化圖

圖 5-10 (a)夾雞蛋力量變化圖，(b)回饋力變化圖，(c)位置變化圖和(d)驅動電壓變化圖

經由以上實驗可歸納出幾點，論文所提出的力覺回饋夾取系統在實驗前並不需要知道物體的重量、形狀、大小、軟硬等，因為我們所用來驅動夾爪的方式為力量控制，我們將欲夾取的物體大致分為四類，此四類分別有不同的物理性質，針對這些性質可給予適當的夾取力，由於我們已對各種物體的適當夾取力事先指定，當欲夾取某物體時，則只需指定到該物體的最適當夾取力量值便可，而力回饋搖桿的作用除了對夾爪下達關閉及開啓的作用外，尚可透過可程式化的力回饋方式將遠端力量呈現出來。

機械夾爪要能精確地夾住物體且不造成物體破壞，所需考量因素很多，通常包括物體本身材質、形狀、大小、重量、表面粗糙度等，而我們所提之方法是針對物體的材質而討論，因此實驗物體的形狀為方體或球體等相對稱之形狀，其大小在夾爪可夾取範圍內，重量通常不超過一兩公斤為主，對於不同材質的物體指定不同的夾取力量，以搖桿對夾爪下達命令再經由可程式化的操控機制將力量呈現給使用者，我們可將如此的力覺回饋系統應用在遠端虛擬實境操控系統中，透過虛擬實境模擬機器人及環境間的互動關係，同時讓使用者有視覺及力覺回饋的感受，使整個遠端呈現技術更加完善。

第六章

結論

遠端搖控系統在未來科技具熱門趨勢，而模擬真實環境的力覺回饋系統將會是遠端搖控技術的發展重點之一，遠端的聽覺、觸覺及視覺接收系統分別負責擷取遠端環境的聲音、力感及外觀色彩等資訊，再將這些資訊做運算後回傳到近端的聽覺、觸覺及視覺呈現設備中，使用者可透過這些設備感覺遠端所發生的變化。

本論文所提出的遠端力覺回饋系統結合機器人系統中遠端與近端的硬體設備，使用者可利用力回饋搖桿控制機械夾爪來夾取大部分物體，且系統為加入 PID controller 的閉迴路控制系統，可以設定力量值，系統的運作是，先藉由對物體的物理性質加以分析，找出該物體適當的夾取力，由力回饋搖桿逆轉發動夾取的命令遠端夾爪的控制器會自動收斂到期望的力量值，並將力傳回力回饋搖桿，完成夾取後，即可順利完成搬運物體的動作。

6.1. 未來工作

本論文的發展目標是將虛擬實境技術應用在遠端操控系統，論文重點著重在力覺回饋系統，完整的虛擬實境系統必須含各種人體感官上的呈現，因此未來希望能在下列方向加以改善。

1. 可使用適當的壓力感測器，石英感測器功能只能量測到垂直於感測器表面之單點正向力，但若具備偵測物體是否滑落等功能，例如陣列感測器 [14,18]，對控制器的設計會較有幫助。

- 2.可改善夾爪驅動系統傳動機構，由於夾爪的傳動機構包括許多機械式連結，如果進行力量控制時無法順利將欲施加的力量命令經由夾爪機構呈現給夾指末端，形成死區(有輸入但輸出無反應)，而使系統失控，我們是以齒輪帶動齒輪條，所以輕巧化、以及齒輪齒隙改小是較佳的作法。
- 3.是力回饋搖桿在感受回饋力時，雖有力感，但和手的力感經驗差異太大，所以建立更接近人類觸感的回饋力模型取代彈性模型，將改善手上的觸覺。
- 4.論文中控制器是使用 PID controller，實作中參數要一直修改，因系統是非線性，pi 控制器的參數可適用的範圍小;如果用 fuzzy controller 在建立 fuzzy rule 的過程即隱含參數的調整，可改善參數持續調整的問題，所以如果能用 fuzzy controller 其適應性會較佳，
- 5.此系統是以一部個人電腦即時處理力回饋迴圈，也就是力量或位置指令的傳遞過程不會造成時間延遲，然而完整的遠端操作系統是必須透過網際網路來做機器人的控制，因此若能以網路為傳輸媒介，並解決時間延遲對系統造成的影響，則可使整體系統更趨近完整。

參考文獻

- [1] D. G. Caldwell, A. Buvsse, and W. Zhou, "Multi-Sensor Tactile Perception for Object Manipulation/Identification," *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1904-1911, 1992.
- [2] D. Castro, L. Marques, U. Nunes, and A. T. de Almeida, "Tactile Force Control Feedback in a Parallel Jaw Gripper," *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, pp. 884-888, 1997.
- [3] M. Ceccarelli, G. Figliolini, and E. Ottaviano, "Designing a Robotic Gripper for Harvesting Horticulture Products," *International Journal of Robotica*, Vol. 18, Issue 1 , pp. 105-111, 2000.
- [4] C. L. Chiang, *Design and Analysis of A Sliding-Rod Robot*, S. M. Thesis, Department of Mechanical and Automation Engineering, National Kaohsiung First University of Science and Technology, Taiwan, R.O.C., 2003.
- [5] K. Fujita and Y. Oyama, "Control Strategies in Human Pinch Motion to Detect the Hardness of an Object," *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, pp. 682-686, 1999.
- [6] R. C. Goertz and R. Thompson, "Electronically Controlled Manipulator," *International Journal of Robotics Research*, Vol. 3, No. 4, pp. 21-50, 1954.
- [7] N. Hogan, "Compliance and Force Control for Computer Controller Manipulators," *IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics*, Vol.11, No.6 , pp. 418-432, 1981.
- [8] N. Hogan, "Impedance Control : An Approach to Manipulation : Part I -Theory, Part II -Implementation, Part III -Application," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 11, pp. 1-24, 1985.
- [9] N. Hogan, "Stable Execution of Contact Tasks using Impedance Control," *IEEE*

- International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1626-1631, 1989.
- [10] R. D. Howe, "A Force-Reflecting Teleoperated Hand System for the Study of Tactile Sensing in Precision Manipulation," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1321-1326, 1992.
- [11] R. D. Howe, N. Popp, P. Akella, I. Kao, and M. R. Cutkosky, "Grasping, Manipulation, and Control with Tactile Sensing," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1258-1263, 1990.
- [12] M. S. Hsieh, *Development and Experimental Verification of A Force Feedback Manipulator for VR Systems*, S. M. Thesis, Department of Electrical and Control Engineering, National Chiao-Tung University, Taiwan, R.O.C., 2001.
- [13] S. C. Jacobsen, "The Utah/MIT dexterous hand: Work in process," *International Journal of Robotics Research*, Vol. 3, No. 4, pp. 21-50, 1984.
- [14] D. A. Kontarinis, J. S. Son, W. Peine, and R. D. Howe, "A Tactile Shape Sensing and System for Teleoperated Manipulation," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 61-646, 1995.
- [15] S. J. Lederman and R. J. Klatzky, "Flexible Exploration by Human and Robotic Haptic Systems," *IEEE International Conference on Engineering in Medicine and Biology Society*, pp. 1915-1916, 1990.
- [16] L. Li, B. Cox, M. Diftler, S. Shelton, and B. Rogers, "Development of a Telepresence Controlled Ambidextrous Robot for Space Applications," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 58-63, 1996.
- [17] R. D. Lorenz, J. J. Zik, and D. J. Sykora, "A Direct-Drive, Robot Parts, and Tooling Gripper with High-Performance Force Feedback Control," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 27, No. 2, pp. 275-281, 1991.
- [18] R. C. Luo, K. L. Su, and S. H. H. Phang, "An Implementation of Gripper Control using the New Slipping Detector by Multisensor Fusion Method," *IEEE*

- International Conference on Robotics and Automation*, pp. 888-893, 2000.
- [19] P. Michelman, "Precision Object Manipulation with A Multifingered Robot Hand," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 14, No. 1, pp. 105-113, 1998.
- [20] N. Nakasawa, I. H. Kim , H. Inooka, and R. Ikeura, "Force Control of a Robot Hand Emulating Human's Grasping Motion," *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, pp. 774-779, 1999.
- [21] E. Ottaviano, M. Toti, and M. Ceccarelli, "Grasp Force Control in Two-Finger Grippers with Pneumatic Actuation," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1976-1981, 2000.
- [22] P. Richard and P. Coiffet, "Dextrous Haptic Interaction in Virtual Environments : Human Performance Evaluations," *IEEE International Workshop on Robot and Human Interaction*, pp. 315-320, 1999.
- [23] A. Rovetta, "Telerobotic Surgery Control and Safety," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2895-2900, 2000.
- [24] K. B. Shimoga, "A Survey of Perceptual Feedback Issues in Dexterous Telemanipulation. I. Finger Force Feedback, II. Finger Touch Feedback," *IEEE International Conference on Virtual Reality Annual International Symposium*, pp. 263-279, 1993.
- [25] J. Yoon and J. Ryu, "Control and Evaluation of a New 6-DOF Haptic Device using Parallel Mechanism," *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent and Robots and Systems*, pp. 1125-1130, 2000.
- [26] Rabadi, Adi , *DC Motor-Harmonic Drive Torque Control with Application to Robot Joints* , UMI Dissertation Services , 1994 .
- [27] Katsuhiko Ogata , *Discrete-Time Control Systems* , Prentice Hall , 1995 .
- [28] 足立修一/趙清風 *使用MATLAB 控制之系統識別* , 全華出版社 , 2001 .

[29] 仲成儀器公司，*直流伺服馬達控制*，全華出版社，1993。

[30] 潘新純/賴柏洲，*自動控制系統*，全華出版社，1990。

