

第二章

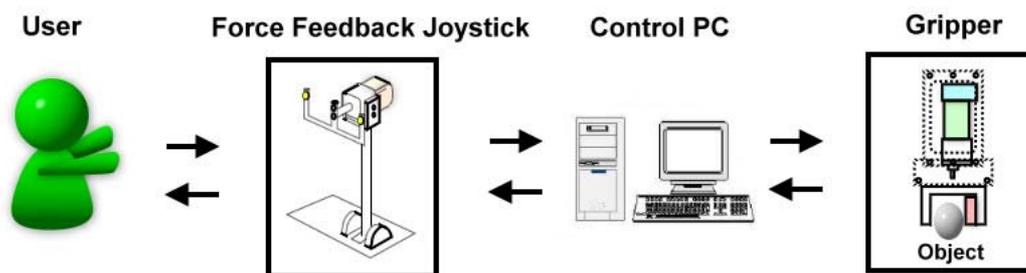
力覺回饋系統

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因而不同，本論文主要是探討如何讓操控者透過二軸力回饋搖桿輕鬆對各種材質的物體，包括雞蛋等易碎物體，進行夾取和提起的動作，包括硬體設計及軟體規劃。本章先以完整的遠端力覺回饋系統架構為基礎，介紹國內外各種類型的機械手爪，說明所設計之夾爪的優點及可行性，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。

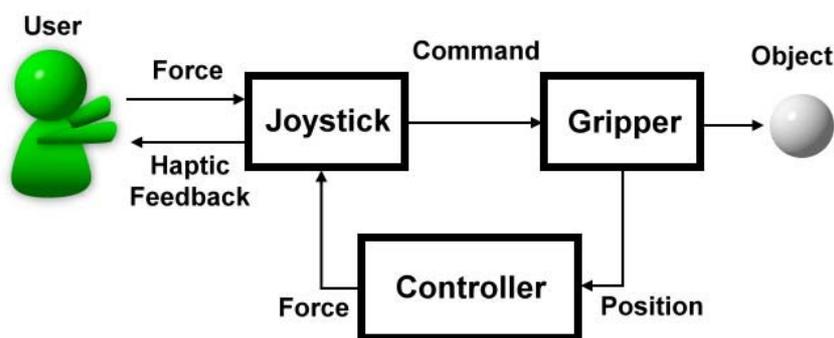
2.1 力覺回饋系統架構



我們所提出的力覺回饋系統是以二軸力回饋搖桿做為力覺回饋裝置，遠端用來執行任務的機器人主要為改良後之三菱機器人的末端效應器，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透過電腦對夾爪下夾取力量控制的指令，執行夾取雞蛋等容易破碎物體的任務，將夾爪與物體接觸時的受力狀況回授到力回饋搖桿呈現給使用者，其理想的實現架構圖如圖 2.1(a)所示，其中利用一台個人電腦做運算處理，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裡做運算，電腦下命令將遠端的夾爪系統所須做出的對應動作呈現出來，並將夾爪系統與環境接觸的資訊呈現回電腦再做運算。



(a) 系統實現架構圖



(b) 控制訊號流程

圖 2.1 力覺回饋系統：(a)實現架構圖和(b)控制訊號流程圖

若系統使用一般不具力回饋搖桿來控制遠端機械夾爪，則其系統架構與訊號處理較簡單，故資訊處理流程的方式也較為單一，但使用者無法得知夾爪所面臨的環境資訊，因此沒有回授回來的環境資訊加以進行運算，論文中使用雙向傳輸之力回饋搖桿做為操控制，其訊號流程如圖 2.1(b)所示，因為多了力回饋及其控制策略的運算，所以系統架構與訊號處理流程較為複雜，但所能呈現給使用者的效果及對物體的安全則更加完善，且使用者可任易更改操控模式以達成自己最適當的控制方式。

2.2 機械夾爪

在機器人的發展史上，命令機器人與環境中的物體接觸的任務一直是極大的挑戰，與物體接觸的工作不外乎為推、拉、壓、夾取等動作，工業界上有些機器

人已經可以成功地代替人類來完成某些工作，例如噴漆、焊接等，但諸如此類的工作並不需要做很精確的力量控制來控制機器人與環境間的接觸力。反觀，若對於一些較為細膩且又複雜的工作，使機器人具有一套如人手般靈巧的機械夾爪是不可或缺的。

人類發展機械夾爪的出發點是以創造出像人類手部一般靈巧為依據[5]，人類手部靈活到足以拿取雞蛋、豆腐等柔軟物體，又可做非常多種複雜的手部關節運動，皮膚表面尚可感覺冷、熱、痛、癢、乾、溼等多種感受[1,24]，可說是非常敏銳且複雜的器官，礙於科技發展有限，機器夾爪並無法達到像真實人手般的靈活及觸感，但學界上仍舊不斷有學者研發精密之極具人手功能之機械手爪[19]，最著名的擬人機械手爪為 Utah-MIT Hand[13]，如圖 2.2 所示，其外觀形狀像極人手，包含四隻手指頭，每隻手指均擁有像人類般的自由度，諸如此類的多手指機械其結構及所需的動態分析方法非常複雜，設計成本也較高。一般學術界或工業界上所發展出來的機械夾爪的功能有限，多以二指或三指為主[2,21]，且自由度並不像人類手部複雜，雖然功能上不比多指機械手指般地多樣，但由於結構簡單且容易設計與實現，因此二指機械手夾普遍被應用在工業自動化中，用來負責夾取、搬運的工作，以下為現今最常見的幾種機械夾爪的種類，根據夾取機構不同而分為支點型夾爪、平行型夾爪及同心型夾爪。

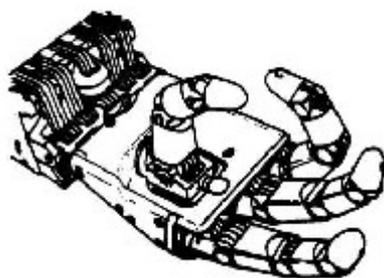
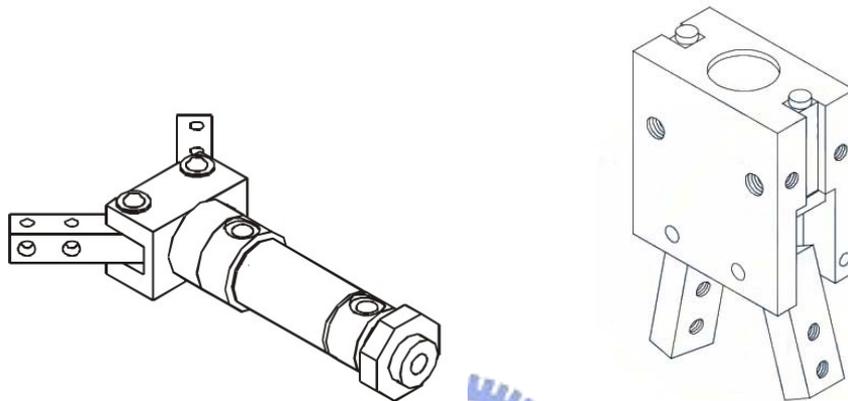


圖 2.2 Utah-MIT Hand 外觀[13]

支點型夾爪又稱 Y 型夾爪，機構設計較簡單，早期大多使用此方法設計夾爪，當夾爪關閉時其爪指的動作方式為圓弧形，其驅動方式可為氣壓[21]、油壓、彈簧或馬達[26]等，如圖 2.3 所示，圖 2.3(a)為較早期的支點型夾爪，手爪腕部可與機械手臂以同心方式鎖在一起；圖 2.3(b)為現代較常見的支點型夾爪，在夾爪的左右兩邊各安裝彈簧開關，可檢測夾爪呈現張開或是關閉的狀態。

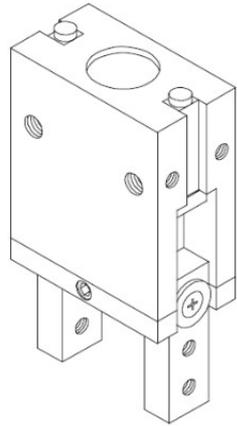


(a) 早期支點型夾爪

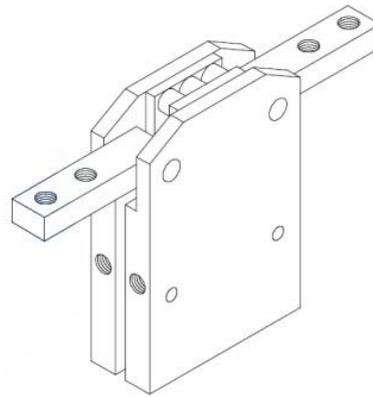
(b) 現代支點型夾爪

圖 2.3 (a)早期支點型夾爪和(b)現代支點型夾爪[4]

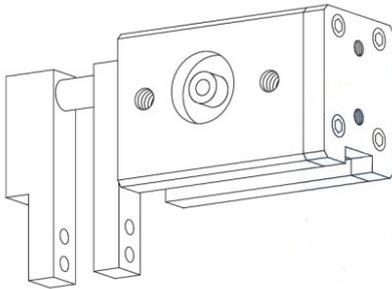
平行式夾爪指兩爪指的運動軌跡互為平行，其開度與精度因需求而有所不同，故機構組成與驅動方式亦不盡相同，圖 2.4 所示為各種不同型的平行式夾爪，圖 2.4(a)夾爪適用於夾取微小物體，通常是經過精密之機構設計再搭配精密的滑軌所組成；圖 2.4(b)夾爪平時呈現 180°分開狀態，作動時夾爪以平行狀態夾持住物體；圖 2.4(c)夾爪只能驅動其中一爪指因此夾爪活動空間僅侷限在夾爪本體之一邊；圖 2.4(d)的主要驅動源為直流馬達、交流馬達、直流伺服馬達[26]或交流伺服馬達，以馬達驅動齒輪傳動系統或活基傳動系統來帶動夾爪的開合，基於設計成本、操作容易與否及機構分析，本實驗室所開發之夾爪系統以直流馬達為驅動源，以齒輪傳動系統為傳動機構。



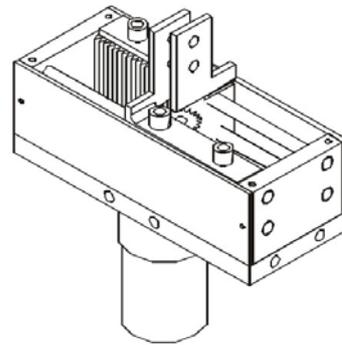
(a) 小開度平行夾爪



(b) 180°平行夾爪



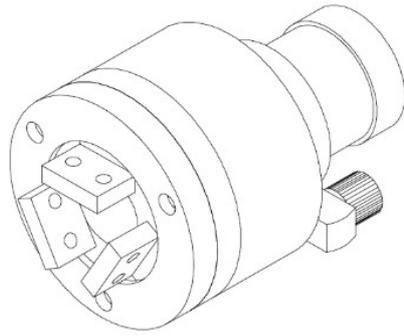
(c) 橫式平行夾爪



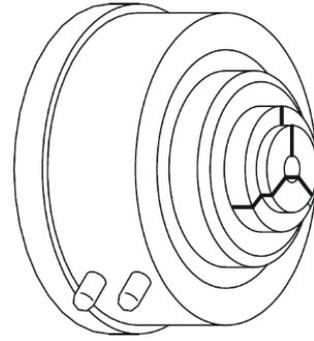
(d) 馬達驅動型平行夾爪

圖 2.4 平行型夾爪：(a)小開度，(b)180°開度，(c)橫式，和(d)馬達驅動型[4]

同心型夾爪機構大致上分為兩種，分別為三爪同心式夾爪與迴轉型同心式夾爪，如圖 2.5 所示，圖 2.5(a)為三爪同心式，當以氣壓驅動時其三爪會同時往中心夾住，其最大夾取重量通常在 10 公斤以下；圖 2.5(b)為迴轉型同心式，在夾頭中心設有一標準型筒夾，當以氣壓驅動時會驅動筒夾往內縮，達到夾持的功能，常見於車床上的夾爪工具，亦可配合油壓系統做高出力的夾持工作，這種夾爪可迴轉亦可固定於車床上面，夾持工件通常是棒形物體，夾爪可依工件直徑的不同可快速便換筒夾。



(a) 三爪同心夾持機構



(b) 迴轉型同心夾爪機構

圖 2.5 同心型夾爪：(a)三爪同心式和(b)迴轉型同心式[4]

2.3 力感測夾爪系統

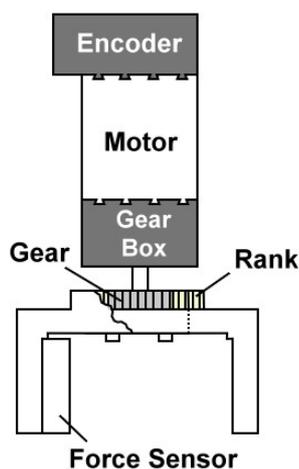
機械夾爪除了可代替操控者執行任務以外，尚需精確地得知工作時與環境或物件接觸時所產生的力量參數[15]，因此，若機械夾爪上具備一套力感測系統，則此夾爪的功能便更為強大；學界上已有學者發展出用來收割農作物[3]或幫人類搬運東西的機械夾爪，亦或是探討人類手指的特徵以發展出擬人化的機械夾爪[20]，本論文的目的，即是將發展出之機器手爪，利用在家庭廚房內，透過遠端操控自走式機器人幫人類拿取蔬菜水果，或輕薄易碎的廚具。論文中所使用為簡單之平行二指式機械手爪，其中一指裝設有石英感測器，用來測量夾取物體時的力量大小，整個夾爪的架構分成兩個部分來探討，一為夾爪馬達的驅動系統，另一為力來擷取力訊號的力感測器系統。

2.3.1 馬達驅動系統

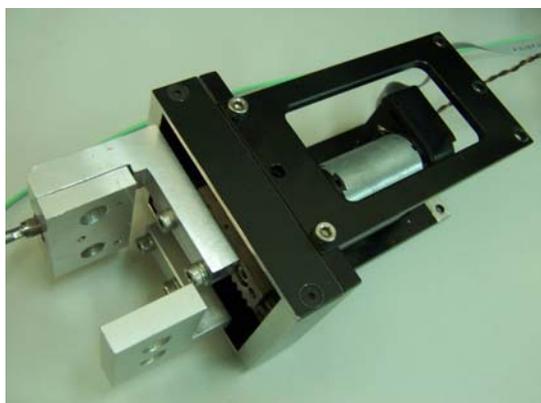
夾爪的致動方式一般分為：氣動、液壓及電動式[21]，此三種方式各有其適用的情況，選擇一個良好的致動方式將大大提升系統的效能。氣動系統具有安全、設計簡單、低成本、維護費用低的優點，是一般工業機器人主要的驅動方式，但是動力小、噪音大、控制不夠精確則是其缺點；液壓系統的優點可以產生較大

動力、驅動過程平順，但缺點是輸出與輸入存在太大的時間延遲，及液壓管線易洩漏；電動式通常以馬達作為致動器，為使夾爪達到輕巧體積小的要求，電動式是一項很好的選擇，且整個系統容易分析與建立模組，利用一些電子元件便能夠有系統地控制，並在最快的反應時間內驅動系統。

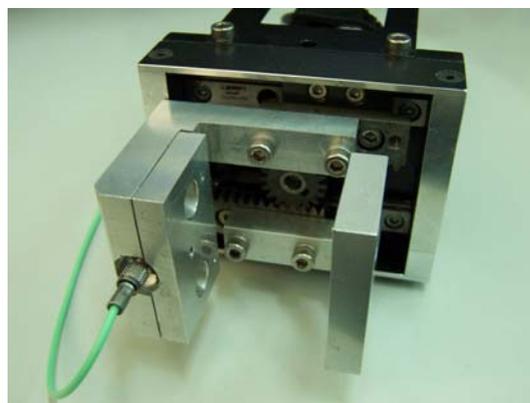
論文中選擇直流馬達為機械夾爪的主要驅動器，傳動機構由一個齒輪及兩個齒條所構成，如圖 2.6(a)所示，馬達經過減速機後帶動齒輪做旋轉，齒輪將旋轉運動經過兩齒條轉換成直線運動，兩齒條分別連接到夾爪的兩指，當齒條做直線來回運動時，夾爪即做出開跟合的動做，圖 2.6(b)-(c)為夾爪機構外觀。



(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 2.6 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

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 2.7 所示為整體夾爪系統的架構圖，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，其中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。

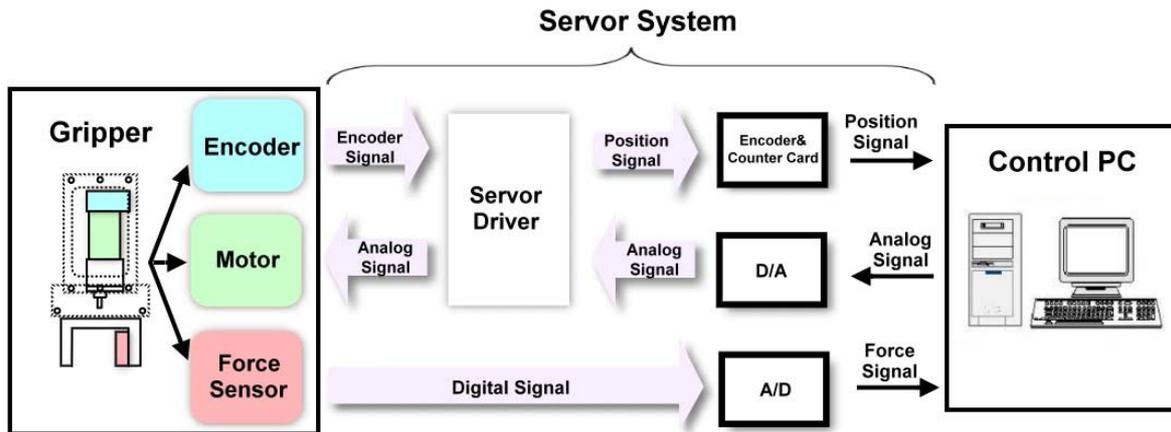


圖 2.7 夾爪之馬達驅動系統架構圖

2.3.2 力感測系統

工業上最常見的機械手爪的驅動方式有氣動式、液壓式及電動式，為了量測夾爪上面的力量值，壓力感測器對於前二項(氣動式及液壓式)驅動系統是不可或缺的，而後者電動式的驅動方式由於是透過馬達及齒輪機械來控制夾爪的運動，此方式可藉由測量馬達的轉矩大小，間接換算得到夾取力量值大小，看似電動式的夾爪系統似乎不需要壓力感測器的存在，但是由於機械夾爪的結構問題，馬達後端的驅動負載會依結構上不同而有所不同，負載會影響馬達轉矩的輸出效率，因此無法如預期般的將馬達的轉矩完整表呈現在夾爪上，所以選擇搭配壓力感測器以達到最完整的系統架構。

感測器種類眾多且各有所功能，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)，一般商業化的產品階屬此類。

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，為了可以在系統中做運算，必須將類比電壓數位化後才能讓電腦讀取並做處理，圖 2.8 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 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。

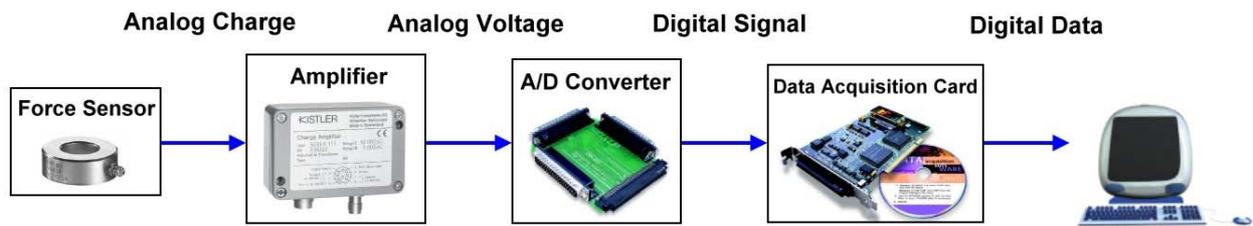
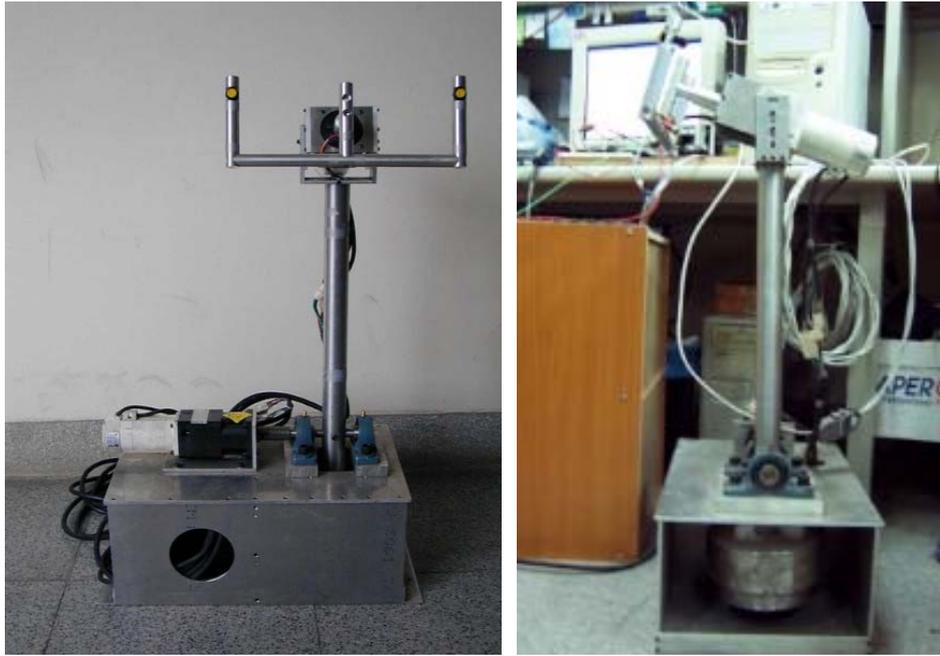


圖 2.8 力感測系統訊號流程圖

2.4 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二軸之力回饋搖桿。力回饋搖桿不同於一般力覺顯示器(Haptic Display)只提供給使用者力覺的感受，而是可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，因此其用途相當廣泛，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 2.9 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 2.10，除了透過搖桿將命令輸入到電腦做運算外，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。

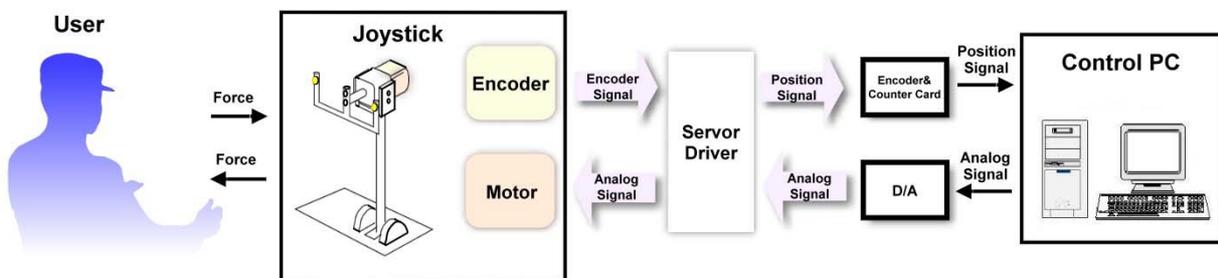


圖 2.10 力回饋搖桿系統架構

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，驅動器可接收到之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

2.5 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，在搖桿系統下可以改變搖桿的旋轉角去控制夾爪的驅動電壓，藉以驅動夾爪系統；在夾爪系統下可以得知夾爪兩指之間的移動距離，也可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	×1, ×2, ×4	
Sample Clock Frequency	8, 4, 2, or 1MHz	

2.6 作業平台

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。