

第四章

輔助操控機制

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]，故所呈現出來的物理現象不盡相同，首先必須對某些物理性質加以探討。論文所規劃之遠端夾爪系統可夾取任何在重量限定範圍內的物體，力覺回饋系統中除了須在遠端系統建立安全的控制機制外，在近端亦須建立一個可由人類來輔助遠端系統的控制方式，如此的系統才能達到人與機器互動以及避免發生危險的安全遠端呈現系統。當使用者利用搖桿對夾爪下命令使之夾取軟物體時，以夾爪上的力感測器做力量資料擷取和監視，爲了防止夾爪一味地對物體施加力量，近端必須有一個輔助操控機制，避免夾爪對物體太過用力導致物體損壞，另一方面可警告並保護使用者以避免突如其來的回饋力而造成傷害。

本章首先介紹遠端夾爪系統所設立之安全機制，再敘述近端所使用之阻抗控制理論[7-9]，接著對系統方塊圖分析夾爪與物體接觸時的力量接觸模型，並探討影響系統穩定性的因素，決定遠端與近端硬體的控制方法後，接下來則必須利用軟體將這些理論實現，主要以 Microsoft Visual C++ 6.0 爲程式撰寫平台，以理想中搖桿操控夾爪的互動行爲爲目的，找出之間互相傳遞的參數並達成互動的效果。

4.1 夾取物體分析

論文中所提出的夾取物體控制系統，以夾取大範圍的各種物體爲發展目的，但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、重量等有限，夾爪手指的大小限制所能夾取物的外觀大小及形狀，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，因應多種物體的夾取工作，論文主要以圖較大範圍做為夾爪活動空間。另一方面，爪指的長度為 35 毫米，最大可張開至 85 毫米，關閉時兩指距離為 15 毫米，所以可夾取物體的物體寬度為 15 到 85 毫米，若物體為剛性的球體則球體半徑最大不能超過 35 毫米，若為剛性方體則物體長度不得超過 85 毫米。

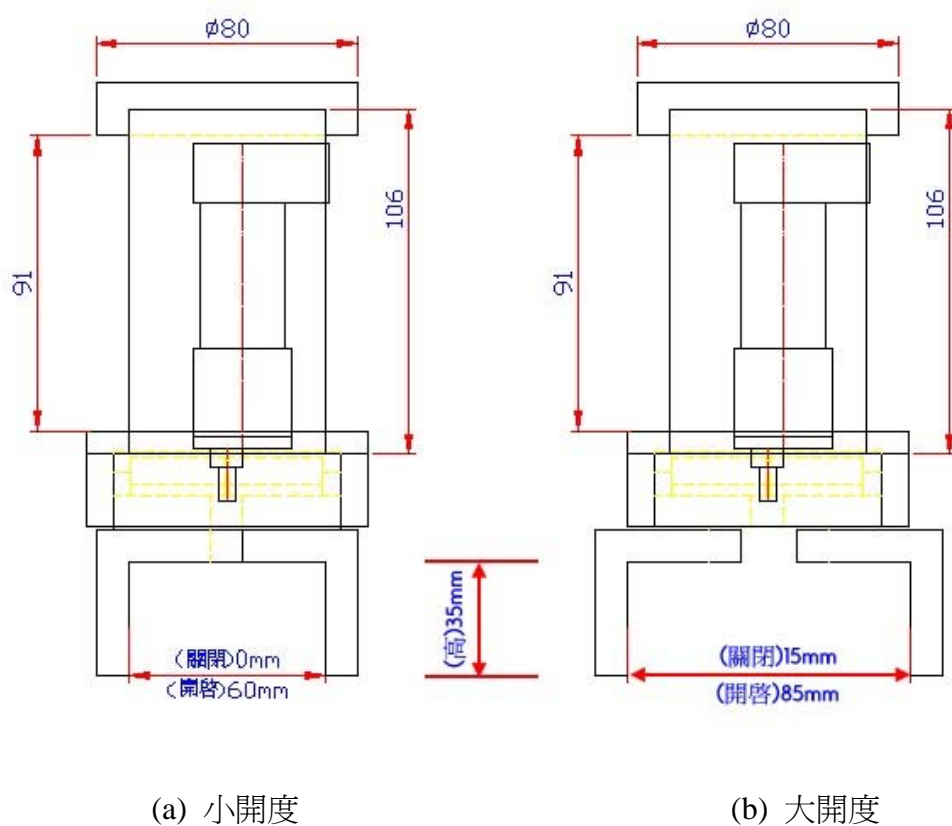


圖 4.1 夾爪設計圖：(a)小開度和(b)大開度

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如表 4.1 所示四類，對於質地堅硬且夾爪無法破壞的物體，則無需考量夾爪的上限值，例如金屬材質物體；外表雖堅硬但若施力過大仍會使之變形或損壞的對物體，則夾爪須設定最大夾取力道，例如塑膠材質物體。對於軟性材質的物體則區分為是否會遭受夾爪破壞，若物體彈性大到不會讓

夾爪損毀且在夾爪的可夾取範圍內，例如海棉；若為軟性材質但施力過大時會使之損毀，則夾取力必須要設一個上限以防物體被擠壓破裂，如番茄。對於兩個同是「堅硬」的脆性物體而言，通常是具有外殼或空心材質的物體，由於外表所能承受的力道不同，對於較脆弱的物體，當外力大到其所能承受的力量瞬間，物體便會立即遭受破壞而損毀，例如雞蛋；而可承受力道較大的脆性物體，施加外力需大到某一值才會使其瞬間破裂，例如玻璃瓶或電燈炮。

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 為馬達驅動電壓與輸出轉矩的關係，馬達本身若無加裝齒輪傳動機構及夾爪結構，則小於 10 伏特的任何電壓均可使之轉動，當以最大驅動電壓驅動馬達時則會產生最大轉矩 42.2 毫牛頓-米(mNm)。當馬達末端連接減速機、齒輪機構、夾爪機構時，優點可提升系統的輸出轉矩至 278.52 毫牛頓-米(mNm)，但是缺點是會造成其某種程度上的負載，導致若要驅動末端夾爪系統則必須先克服摩擦力才能順利活動夾爪機構，由實驗得知夾爪最小輸入電壓為 0.2 伏特，此時夾取力視物體的物理特性而定，約 0 到 5 牛頓左右。

表 4.2 夾爪系統在有無負載的驅動電壓及輸出轉矩

	無負載	有負載
最小驅動電壓(V)	0	0.2
最小夾取力(N)	0	0~5
最大轉矩(mNm)	42.2	278.52

表 4.3 為夾爪對提起各類物體的施力大小及馬達驅動電壓，從表 4.1 得知對於不易毀損的物體，夾爪可適當地施加力量於上且不必擔心施力過大而造成物體被夾壞，因此將表 4.1 中的第二類及類三類物體以同一驅動電壓去驅動夾爪，包括金屬類、玻璃類、塑膠類及橡膠類物體，若本身重量不甚重則均可令夾爪提起之，且大部分物體有其本身的硬度或韌性可防止夾爪施力不當而造成毀壞，因此對於非特殊物體均以最適當的夾取力做夾取實驗，馬達驅動電壓約為 0.5 伏特到 1.0 伏特即可。

材質較為特殊的物體為雞蛋及番茄，雞蛋所能承受的壓迫非常小，且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，夾爪以最小電壓 0.2 伏特驅動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，因此只要以最小電壓驅動夾爪即可；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，因此對於水果類物體須設下限力量及上限力量，下限驅動電壓為 0.2 伏特，上限驅動電壓不能大於 1.5 伏特，由於番茄形狀大小不相同，通常最小夾取力道視水果本身重量而定。

表 4.3 夾取各類物體所需要的驅動電壓

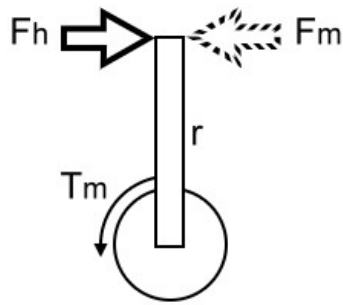
		最小	最適	最大
雞蛋 (50~100 克)	夾取力(N)	0~5	5~10	70~80
	馬達驅動電壓(V)	0.2	0.25	1
金屬類 玻璃類 塑膠類 海棉類 (10~500 克)	夾取力(N)	0~10	10~50	50~100
	馬達驅動電壓(V)	0.2~0.4	0.5~1.0	<3
番茄 (100~200 克)	夾取力(N)	0~5	5~15	10~50
	馬達驅動電壓(V)	0.2	0.3	1.5

4.2 阻抗控制理論

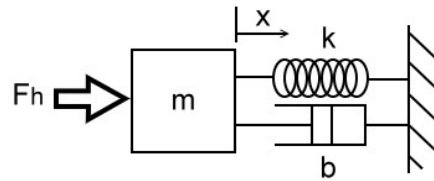
儘管學界有眾多相關研究是為了解決夾爪接觸力不穩定的問題，不論是發展出特殊控制理論，亦或是使用更精確及功能更強大的力感測器，至今這問題仍被諸多學者認為是一個難以突破的障礙。為了解決夾爪接觸力控制的問題，1987年 Hogan 提出阻抗控制理論(Impedance Control Theory)[7]，用來處理機械手臂碰觸物體表面所發生的情況，後來應用在人機介面的互動控制上[9]，論文中利用此理論處理使用者與遠端物體在互動時，經由力回饋搖桿傳回來的力量感受。為了避免物體在不經意下遭到機械夾爪破壞，須規劃出保護物體的安全措施，另一方面也讓操作者真實地體驗接觸力的變化，因此論文中使用阻抗控制來達到實驗的要求。

在虛擬實境中，所要面對的物體為真實世界的物體，真實物體在地球環境中存在各種物理性質，這些物理性質會影響物體的各種行為以及改變其本身的狀態，舉例來說，最基本的物理性質為以下三項：當一個物體在受地心引力影響的環境下便擁有重量(mass)，若在黏滯流體中運動便會有黏滯力(viscosity)，物體本身或環境均具有彈性或韌性(stiffness)；因此，當與任何物體做接觸時，這些物理性質均會影響接觸時的觸感，此三種物理性質分別稱之為質量係數、阻尼係數、彈性係數，在環境中表現出來的物理狀態分別為加速度、速度、位移量，因此若要使系統呈現遠方物體的特性，可藉由模擬此三種物理狀態來塑造真實世界的觸感。

如圖 4.2(a)所示，力回饋搖桿之力量來源為驅動搖桿動作之驅動器，驅動器以轉矩 T_m 的方式直接呈現給搖桿系統，轉矩透過搖桿機構在搖桿把手末端呈現 F_m 的力量大小，使用者經由搖桿系統施以反方向力量 F_h 去感受搖桿輸出力，所呈現出來的力量 F_m 須是跟真實世界一樣具變化性，使用者才可如身歷其境般地改變 F_h 並感受回饋力 F_m 的變化。



(a) 搖桿的實體受力圖



(b) 搖桿的虛擬受力圖

圖 4.2 搖桿受力情形：(a)搖桿的實體受力圖和(b)搖桿的虛擬受力圖

論文所使用之力回饋搖桿藉由編碼器來讀取搖桿或夾爪的位置 x ，將位置微分即可得到搖桿速度 v ，再將速度微分可得知搖桿加速度 a ，藉由此三項物理狀態即可模擬出物體的表面特性，並將其行為藉由力量表現在搖桿本體上。圖 4.2(b) 即為由各種物理性質模擬出來的虛擬力量，對於圖中的簧而言，彈簧形變量即代表位移量 x ，故施加在質量 m 的物體之反作用力為 $F_k = k \cdot x$ ，對阻尼而言，速度 v 為物體位移 x 的微分，所以因物體移動而受到阻尼所產生的作用力為 $F_b = b \cdot v$ ，由牛頓運動定律 $\Sigma F = m \cdot a$ 可得知虛擬力量 F_h 為

$$F_h - F_k - F_b = m \cdot a \quad (4-1)$$

$$\text{或 } m \cdot a + b \cdot v + k \cdot x = F_h \quad (4-2)$$

阻抗控制除了可以讓使用者感受到真實世界的物理性質外，在力量控制中亦可做為保護用的功能，因為對於遠端操作而言，使用者無法立即得知所接觸到的環境或物體為何，因此當操控機械夾爪去夾取不明物體時，系統必須做出警告以讓使用者知道何時將要與物體觸碰，或何時已經與物體觸碰，利用阻抗控制即可達到此要求，此方式對於接觸物體為雞蛋般容易脆碎的物體非常具有保護作用。

如圖 4.3(a)所示，假設被夾取物體為一顆雞蛋，使用者可透過力回饋搖桿得知接觸到物體的反作用力，但為了避免時間延遲所造成力量傳訊太慢，以至於當

使用者感知到接觸力時物體已經被夾爪破壞，故在近端系統加入阻抗控制，將雞蛋模擬成一個虛擬彈簧，也就是將空氣模擬成一個具有彈性係數的彈簧，如圖 4.3(b)。當使用者命令夾爪做關閉動作的同時，從力回饋搖桿感受到的力，如同夾爪在夾取一個彈簧般具有彈性而非真正雞蛋，當夾爪逐漸接近雞蛋的同時，根據虎克定律可知，若彈簧形變量愈大則反作用力愈大，因此使用者會感覺到力回饋愈來愈大，如此的感受可以告知使用者此時夾爪已經快和物體接觸以至於反作用力會遞增；一旦夾爪接觸到雞蛋時，使用者如同將彈簧壓至最緊，力回饋搖桿呈現的反作用力也就最大，使用者便知道夾爪已經已物體接觸了，此時夾爪便停止繼續前進，接著使用者可命令夾爪做提起雞蛋的動作。

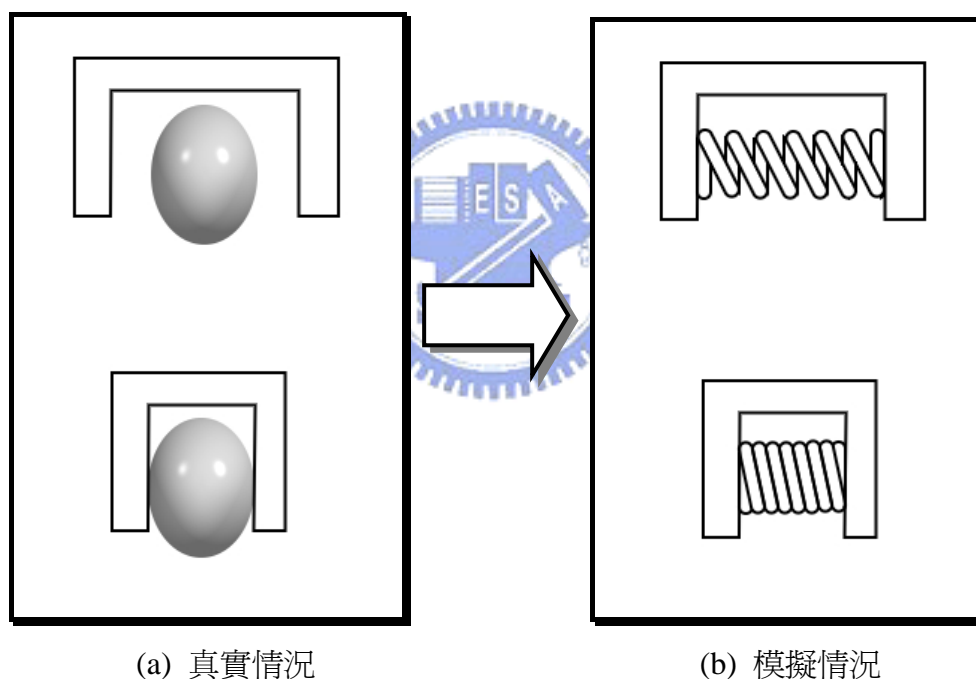


圖 4.3 夾爪力覺模擬：(a)真實情況和(b)模擬情況

4.3 力量接觸模型

在任何系統下，爲了使系統達到最佳狀態，必須使系統擁有快速、穩定、精確的功能，而在力量控制系統中，研究用之機器人系統不像工業用之機器人系統，由於沒有生產數量及生產速度的問題，因此通常不會太過要求系統的響應速

度，反倒是系統的穩定性及精確度尤其重要，而穩定性在力量的表現上比精確度還要來的明顯，系統輸入及輸出稍微的力量誤差通常都在夾取力量的容忍範圍內，故精確性在此暫不考慮其影響，但外界干擾使系統產生不穩定的力量，很有可能會超出物體的承受力量範圍，接著藉由分析力量接觸模型討論在夾爪力量控制系統中較有可能影響系統穩定性的因素，我們將舉出爪指軟韌性及夾爪移動速度兩者對系統所造成的影響，並提出解決方案。

一個性能良好的機械夾爪系統，必須是能快速且穩定達到欲施加在物體上的力量，以直流馬達為驅動方式的夾爪系統，能量是來自於輸入電壓令馬達產生轉矩後，再透過傳動機構將力量施加在物體上，能量傳遞時所經過的傳輸途徑為軸承、齒輪、齒條、指爪、物體表面等，傳遞過程中均會有摩擦力存在而使能量產生損耗，所以必須探討夾爪與物體發生碰撞瞬間的力量方程式，以便將夾爪系統性能進一步做分析與改善，圖 4.4 為夾爪與物體之間垂直力量之間的力量動態模型， f_1 表示夾爪施加的力量， f_2 為力感測器量測到的力量，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 (4-3)式所示，由圖可推得夾爪動態方程式(4-4)式。

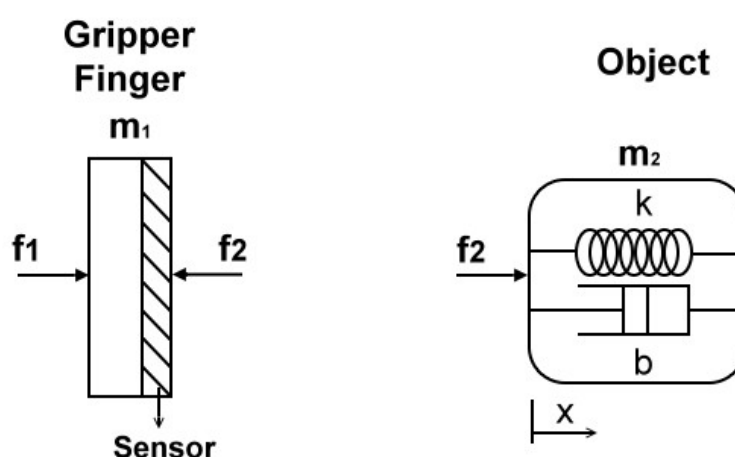


圖 4.4 夾爪的力量接觸模型

$$f_1 = f_2 + m_1 \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (4-3)$$

$$f_2 = m_2 \frac{d^2 x}{dt^2} + B \frac{dx}{dt} + Kx \quad (4-4)$$

其中 m_1 為爪指一邊加上感測器兩者的質量， m_2 、 B 、 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代表物體的形變量，在此可知道速度及位置的初始條件為 $\frac{dx(0)}{dt} = v$ 及 $x(0) = 0$ ，將(4-3)-(4-4)式做拉氏轉換得到(4-5)-(4-6)式。

$$F_1(s) = F_2(s) + m_1(s^2 X(s) - v) \quad (4-5)$$

$$F_2(s) = m_2(s^2 X(s) - v) + sBX(s) + KX(s) \quad (4-6)$$

從(4-5)式化簡可得到：

$$X(s) = \frac{F_2(s) + m_2 v}{m_2 s^2 + Bs + K} \quad (4-7)$$

將(4-7)式中的 $X(s)$ 代入(4-6)式得到：

$$F_1(s) = F_2(s) + m_1 \left(s^2 \frac{F_2(s) + m_2 v}{m_2 s^2 + Bs + K} - v \right) \quad (4-8)$$

$$F_1(s) = \frac{(m_1 + m_2)s^2 + Bs + K}{m_2 s^2 + Bs + K} F_2(s) - \frac{m_1 Bs + m_1 K}{m_1 s^2 + Bs + K} v \quad (4-9)$$

由(4-9)式再做轉換得到：

$$F_2(s) = \frac{m_2 s^2 + Bs + K}{Ms^2 + Bs + K} F_1(s) + \frac{m_1 Bs + m_1 K}{Ms^2 + Bs + K} v \quad (4-10)$$

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 與 f_2 轉換方程式。

由(4-10)式可明顯看出夾爪移動速度 v 是造成系統響干擾的主要因素，除此亦可發現物體的物理參數是決定力量控制系統的動態行為的重要參數，由於夾爪及感測器並非像一開始假設一樣是剛體，因此此處的參數 B 及 K 應為感測夾爪及物體兩者的等效參數，若以 B_o 及 K_o 代表物體的阻尼係數及彈性係數， B_s 及 K_s 代表感測器的阻尼係數及彈性係數，則兩者結合而成的等效阻尼係數 B_e 及等效彈性係數 K_e 為：

$$K_e = \frac{K_s \cdot K_o}{K_s + K_o} \quad (4-11)$$

$$B_e = B_s + B_o \quad (4-12)$$

所以若考慮所有接觸面物理參數，則力量接觸模型的動態方程式為：

$$F_2(s) = \frac{m_2s^2 + B_e s + K_e}{Ms^2 + B_e s + K_e} F_1(s) + \frac{m_1 B_e s + m_1 K_e}{Ms^2 + B_e s + K_e} v \quad (4-13)$$

4.3.1 夾爪軟韌性

由(4-13)式可看出力量接觸模型中系統的彈性、阻尼、物體重量及夾爪的行進速度等，均會對系統的穩定性有所影響，姑且先不論速度所造成的影響，首先探討等效彈性係數 K_e 對系統穩定性的影響。我們以模擬力量接觸模型的參數為依據，假設爪指的重量 $m_1 = 0.01$ kg，物體重量 $m_2 = 0.02$ kg， $B_s = 1$ Ns/cm， $B_o = 1$ Ns/cm， $K_s = 100$ N/cm， $K_o = 100$ N/cm，則可算出參數 $M = 0.03$ ， $B_e = 2$ Ns/cm， $K_e = 50$ N/cm，則系統轉移函數為 $\frac{0.02s^2 + 2s + 50}{0.03s^2 + 2s + 50}$ ，系統的步階響應圖如圖 4.5 所示。

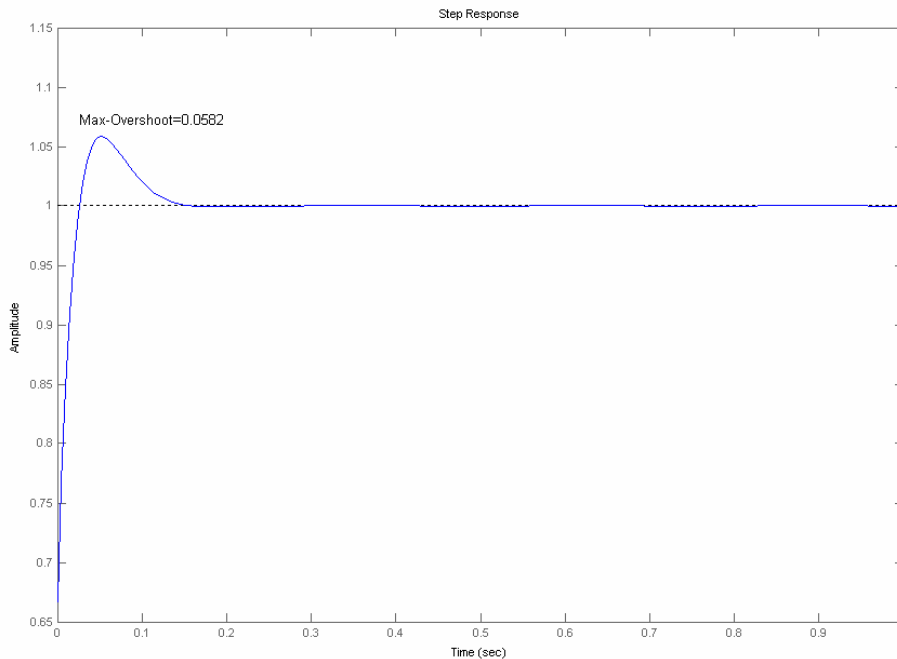


圖 4.5 堅硬夾爪夾取物體的力量響應

原系統夾爪及物體的彈性係數都很大，如同兩個堅硬的物體發生碰撞，導致碰撞瞬間會產生極大的超越量，圖 4.5 約為 0.0582 左右，若物體為易碎物時，此超越量很有可能使物體發生碎裂，必須儘量避免以兩個堅硬物體來互相接觸，因此考慮將爪指的彈性係數改變使之成為較有彈性的一方，方法係在爪指表面黏上膠橡或泡棉的保護墊，用來緩衝碰撞時發生的衝力。假設黏上泡棉後夾爪的彈性係數減小為 $K_s = 10 \text{ N/cm}$ ，則等效彈性係數變成 $K_e = \frac{100}{101} \text{ N/cm}$ ，得到新的轉移函數為 $\frac{0.02s^2 + 2s + 100/101}{0.03s^2 + 2s + 100/101}$ ，新系統的步階響應如圖 4.6 所示。由圖中可發現在有泡棉保護墊的緩衝下，系統的超越量減小至 0.0171，也就可將瞬間碰撞的力量減小，學界上亦有學者提出感測器本身的韌性會影響到觸感控制的效能[17]，說明若感測器的彈性係數遠小於物體的彈性係數，則可得到良好的控制效果。

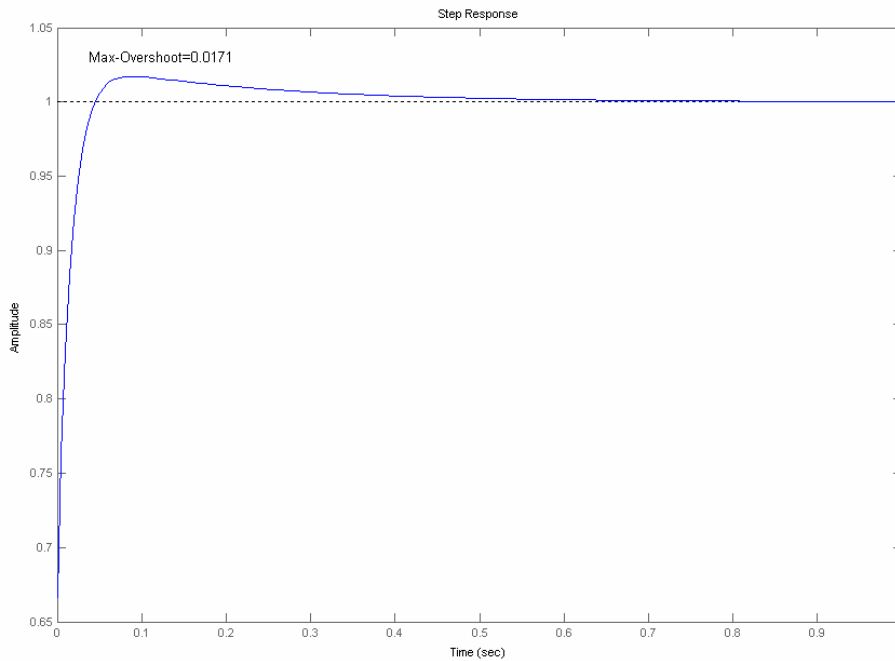


圖 4.6 柔軟夾爪夾取物體的力量響應

接下來便以實驗數據證明感測器端的爪指部分是否在不同韌性下會造成物體的損毀。圖 4.7 直接以裸露的夾爪材質去夾取雞蛋時的力量變化曲線圖，此時夾爪馬達驅動電壓為最小起動夾爪電壓 0.2 伏特去驅動之，由於夾爪的材質與雞蛋的彈性係數均很大，均有不易產生形變的物理特性，故兩者互相碰撞之下勢必會產生很大的超越量，且產生的速度及力道容易造成雞蛋外殼的破裂，由圖 4.7 明顯可看出，我們以 1600 掃描迴圈去擷取感測器訊號，個當掃描次數到達快接近 800 時感測器量測值突然上升，代表夾爪便與雞蛋接觸，由接觸瞬間夾取力量急遽上升，圖 4.7 所示感測器量到的力量到達約 7 牛頓時又急遽下降，表示雞蛋已遭受破壞，這也就代表夾爪與雞蛋接觸時的超越量大於雞蛋本身的承受力，而導致雞蛋破壞，因此證明兩堅硬物體互相碰撞所產生的力量脈衝會導致較脆弱的一方毀損。

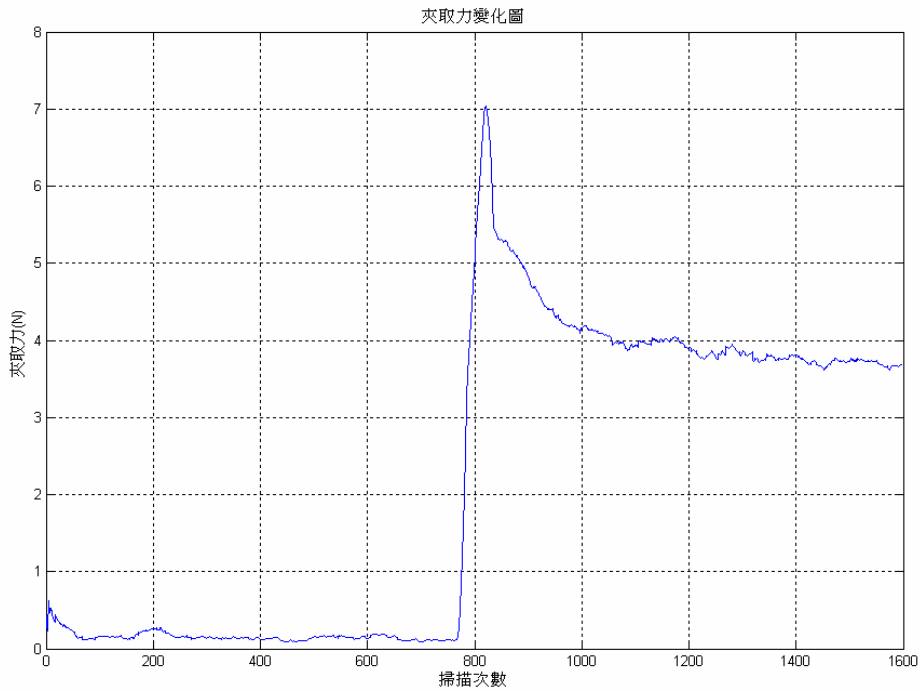


圖 4.7 未加保護墊雞蛋受力量圖

力量接觸模型證明若降低夾爪或物體任何一方的彈性係數便可使最大超越量減低，因此在夾爪兩指間加上泡棉材質的保護墊，保護墊本身材質柔軟且彈性係數小，可壓低整個爪指的彈性係數，但由於無法得知保護裝置真正使系統的彈性係數產生的變化值，因此只能預測系統將如預期中地使彈性係數變小。如圖 4.8 所示，貼上保護墊所能達到的作用，一方面可緩衝接觸瞬間所產生的衝力，另一方面可增加摩擦力防止物體滑落。

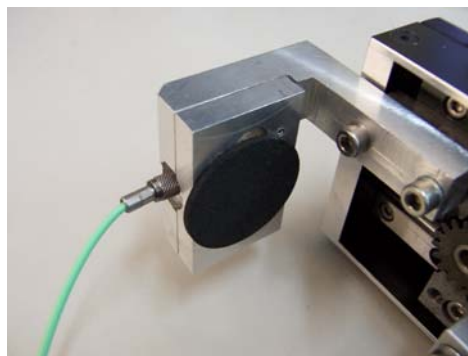


圖 4.8 感測器表面之泡棉保護墊

在夾爪加上保護墊後再次夾取雞蛋，並將馬達驅動電壓從 0.2 伏特開始調升，並觀察雞蛋在每次調升電壓後的的受力情形，並記錄當時夾爪驅動電壓及受力關係。圖 4.9 所示為經由多次重覆調高夾爪驅動電壓，當驅動電壓上升到 2 伏特時雞蛋最後遭受破壞的受力圖，在保護墊作用之下雞蛋可承受力量提升至 80 牛頓左右，結果印証了夾爪在保護墊的作用之下，除了保護、吸震及緩衝的功能外，尚可增強雞蛋外殼的承受力量，因此，當命令夾爪夾取雞蛋時，通常雞蛋重量大約相同，不須考慮滑落問題，只要馬達驅動電壓介於 0.2 伏特到 2.0 伏特之間均可夾取雞蛋，且對於任何易碎物體均能提升其最大可承受力量。

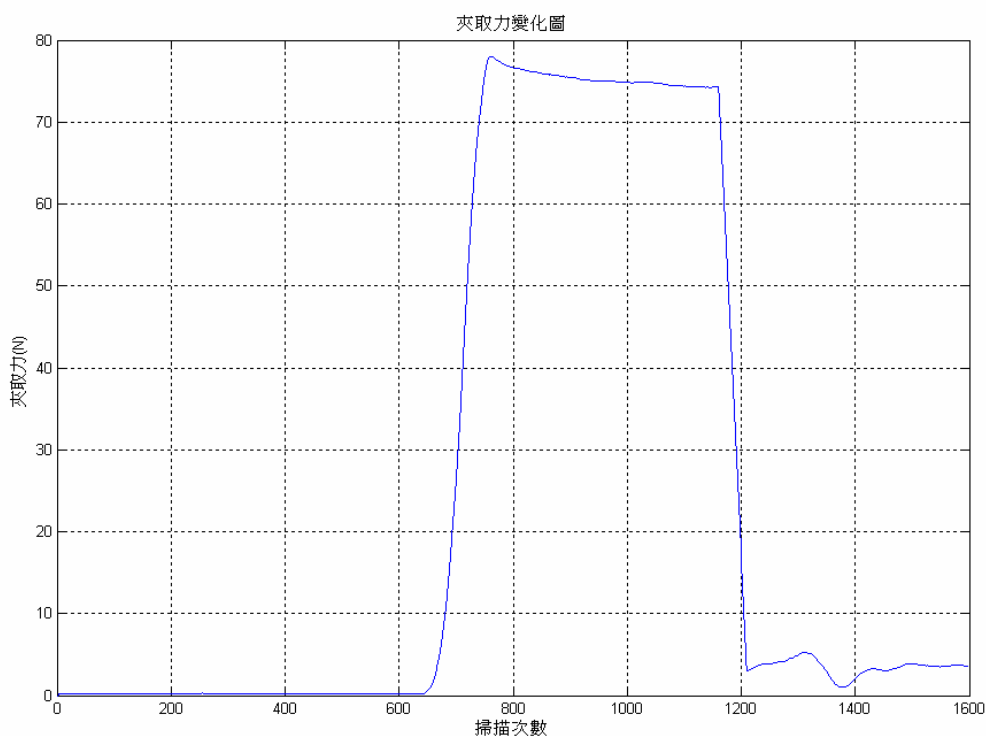


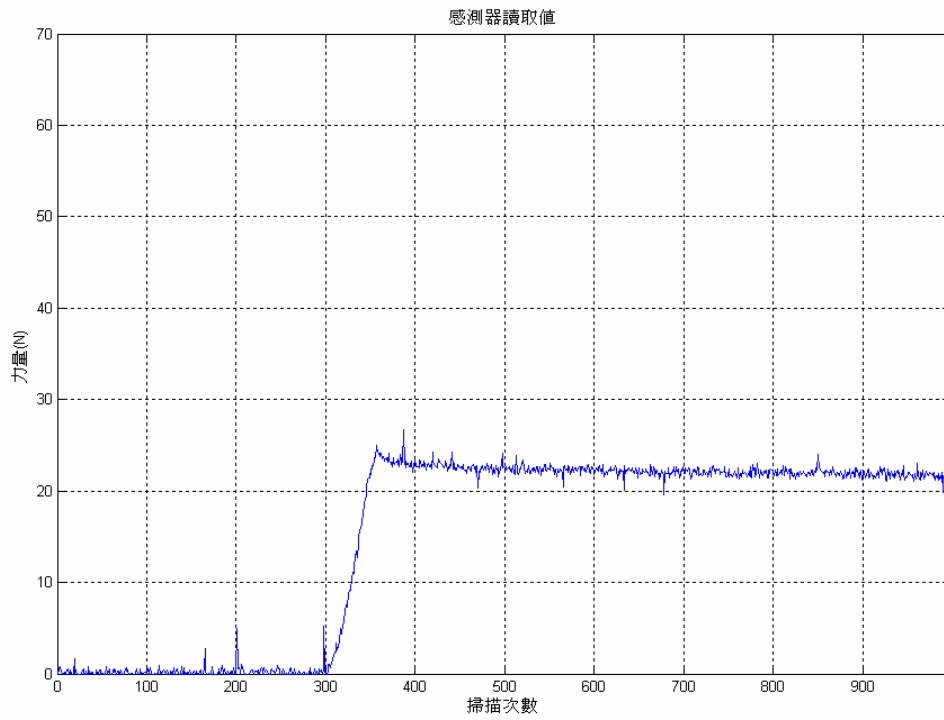
圖 4.9 加上保護墊雞蛋受力圖

4.3.2 夾取速度

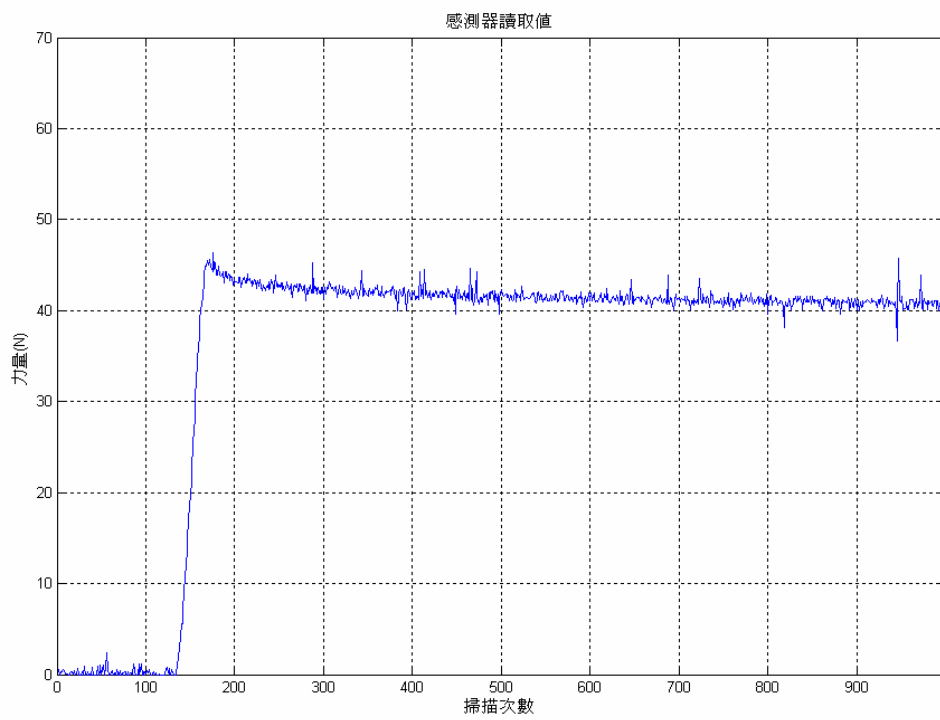
力量接觸模型亦說明了夾爪的行進速度會對夾爪系統造成干擾，速度太快會影響系統的響應，甚至造成系統不穩定，通常在高速夾取物件時，物體與爪指間會產生突極大的衝力，因此我們對速度因素的探討做了兩項實驗，實驗分別以高速及低速夾取物體，觀察接觸力的變化情形，為證明夾爪行進速度在夾取不同物體時對系統造成的影響，我們以金屬塊及橡膠球做為實驗對象，金屬塊彈性係數較大，橡膠球彈性係數較小，比較兩種不同性質的物體分別在高速及低速下的差別。

圖 4.10 及圖 4.11 馬達同樣以固定的驅動電壓去驅動夾爪，當夾爪行進速度較快時，系統會得到較大的超越量，但是安定時間(settling time)則較短，而且也使得爪指與物體間的夾取力道增加，圖 4.10 所夾物體為具有彈性之橡膠球，圖 4.10(a)為在低速下的夾取情形，最後夾取力約保持在 22 牛頓左右，圖 4.10(b)為高速下的夾取情形，在速度影響下夾取力上升至 41 牛頓，可見夾爪行進速度愈快愈有可能造成物體損毀。

圖 4.11 所夾物體為不具彈性之金屬塊，圖 4.11(a)為低速下的夾取情形，夾取力約在 33 牛頓，但是接觸瞬間其接觸力曲線的超越量到達 43 牛頓，圖 4.11(b)為高速下的夾取情形，夾取力約在 41 牛頓，高速影響下接觸瞬間力量的超越量卻高達 65 牛頓，因此可看出速度必然會影響系統穩定性及夾取力道外，對於質地較硬的物體所產生的超越量較大，因此為確保物體在夾取實驗中遭受破壞，實驗皆以低速進行。

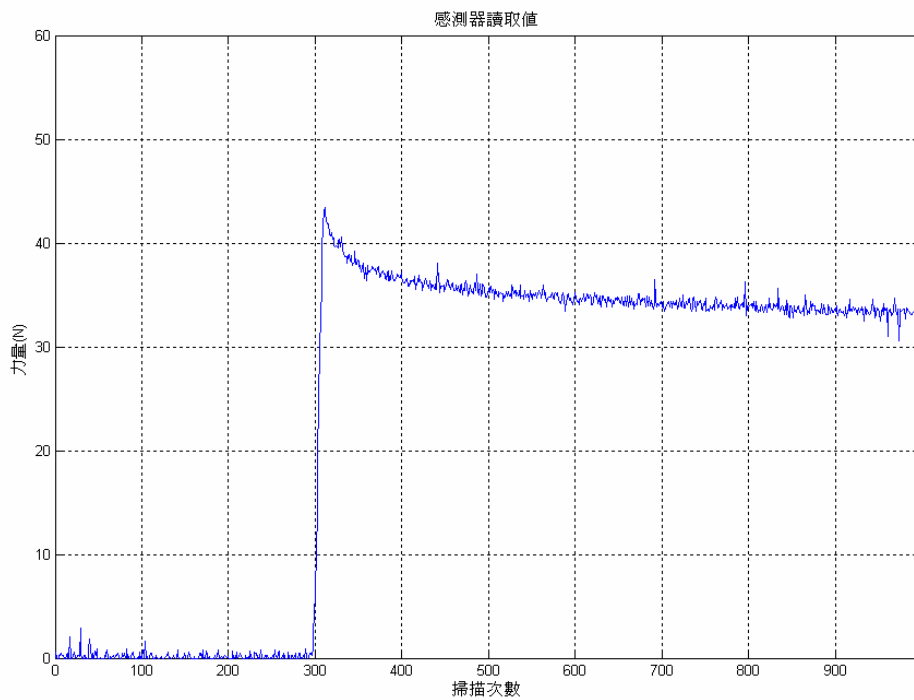


(a) 低速

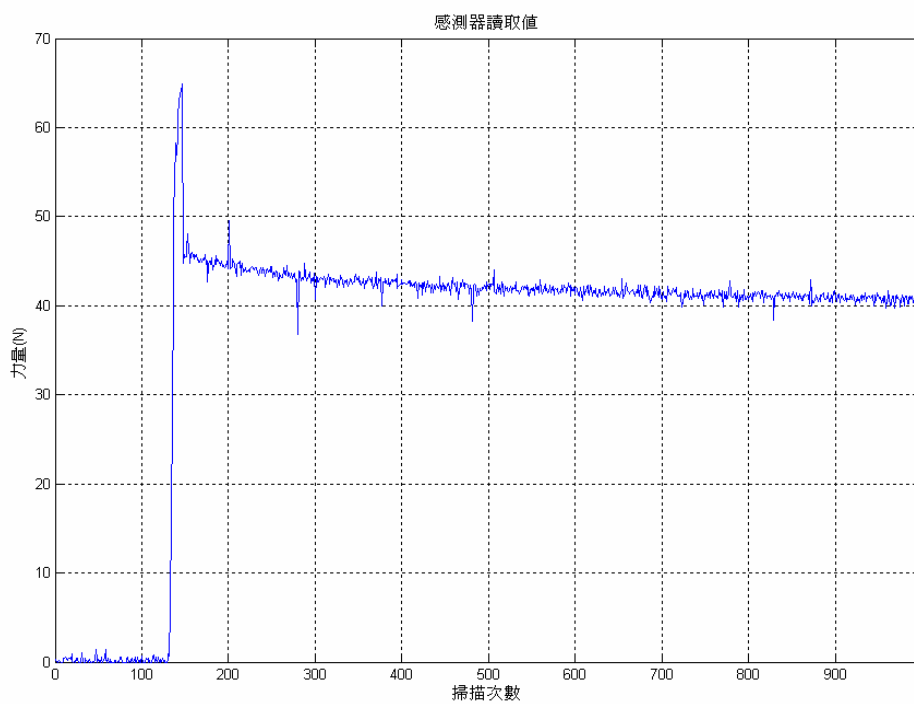


(b) 高速

圖 4.10 夾取橡膠球的力量變化圖：(a)低速和(b)高速



(a) 低速



(b) 高速

圖 4.11 夾取金屬塊的力量變化圖：(a)低速和(b)高速

4.4 軟體實現

力回饋搖桿扮演著人的力量與機械力量之間的溝通橋梁，對於使用者而言，力回饋搖桿必須適當地將轉矩傳給使用者感知，經由使用者的感知器官、運動器官及大腦系統適當地調整手部出力大小，與搖桿的轉矩做出抗衡或超越的互動；對於機械夾爪而言，力回饋搖桿必須將使用者力量欲下達的力量指令，表達成對機械夾爪下的命令，也就是接收使用者輸入的訊號，再算出應施多少電壓去驅動機械夾爪，力回饋搖桿的這些指令順序必須藉由軟體讓它實現，撰寫系統的程式流程可以圖 4.12 來表示。

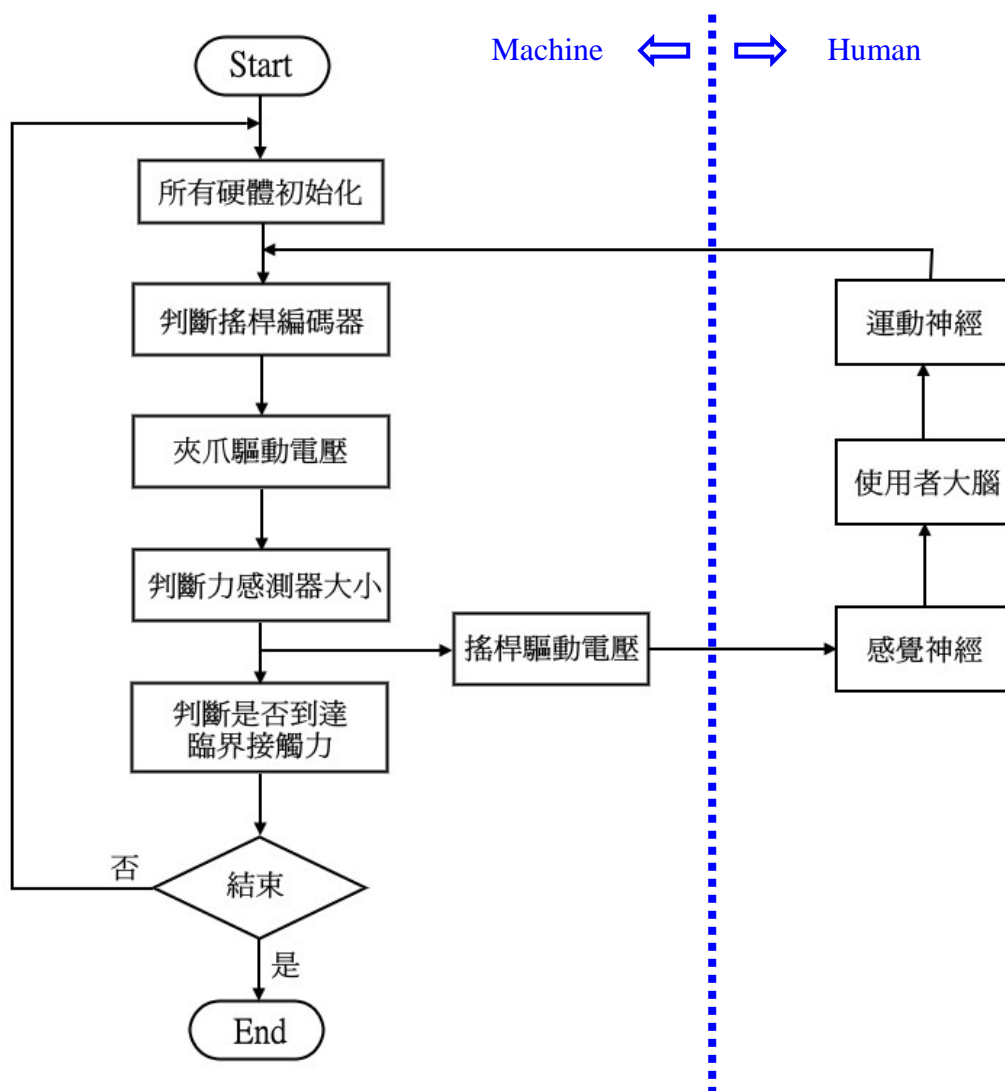
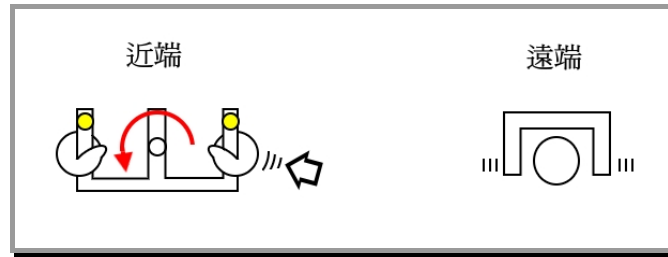


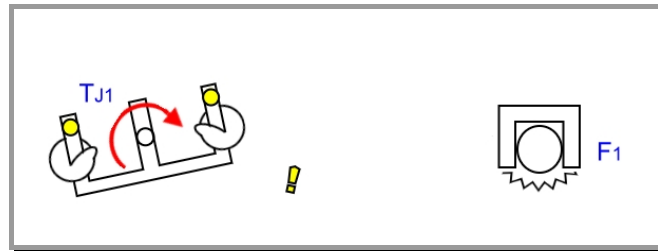
圖 4.12 人機介面和程式流程圖

程式以 Visual C++ 6.0 為撰寫平台，程式流程中必須摻雜機器與人類的互動的指令，圖 4.12 中左半部以迴圈形式讓程式持續進行，一開始必須將所有硬體初始化，包括所有介面卡的歸零動作，由使用者以手部操作力回饋搖桿來觸發程式迴圈的執行，在機械夾爪未夾取物體的情況下，當使用者轉動搖桿時可藉由讀取搖桿編碼器訊號，來得知搖桿是否開始對夾爪下閉合的命令，方法係判斷編碼器訊號增加或減少的情形，來控制是否觸發驅動夾爪的驅動電壓，再藉由夾爪的驅動電壓的正負去表現力搖桿逆時針或順時針的行為，因此，使用者只須對搖桿做出逆時針的旋轉便可驅動機械夾爪閉合，每個迴圈執行的同時隨時監控力量感測器回授訊號，判斷夾爪是否與物體發生碰撞，若感測器量得接觸力時，將數據透過運算模式轉換成搖桿的力量呈現方式，輸出適當的電壓值去驅動力回饋搖桿，使用者可藉由感知搖桿的回饋力量來改變夾爪的施力大小，以達到力量控制的目的，當力量感測器量到的接觸力到達預定的物體臨界接觸力時，程式便跳出迴圈指令並結束指令繼續執行。

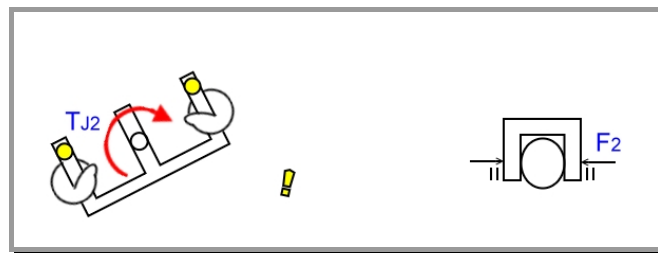
從程式所規劃方式所營造出的運動行為如圖 4.13 所示，除此之外，為了避免太快的夾取速度而造成物體的損毀，事先必要時須調整夾取速度的大小，通常以慢速夾取最為最恰當。圖 4.13(a)表使用者轉動搖桿命令夾爪開始夾取物體，當夾爪初步輕觸到物體時，爪指上的力感測器便開始量到夾取力的力量值，如圖 4.13(b)，由於感測器量到的是電壓訊號，根據第三章的感測器的校正實驗，將量得之電壓值與力量值做轉換即可得到夾取力量值。透過算運式算出欲驅動搖桿系統的電壓值，搖桿系統本身存在驅動電壓與馬達轉矩的關係，可將馬達驅動電壓以相對應的轉矩表現出來，呈現在搖桿結構上，使用者從搖桿把手上便可感受到應呈現出來的力量。



(a) 夾爪閉合



(b) 碰觸物體



(c) 控制力量遞增



(d) 到達臨界接觸力

圖 4.13 力回饋搖桿與夾爪行為關係圖：(a)夾爪閉合，(b)接觸物體，(c)增加夾取力，和(d)到達臨界接觸力

接著使用者可透過人腦感知系統去判斷力量大小，當使用者察覺到絲微的力量時，表示此時夾爪已經向物體接近，此時使用者可隨意控制夾爪的開或合，若想令夾爪持續關閉則只要繼續驅動搖桿使其編碼器不斷產生變化，藉由編碼器送

回的脈衝訊數目不斷增加，可將此訊息代表使用者對夾爪下關閉的指令。當夾爪碰觸到物體時，令搖桿的驅動電壓值呈現最大值，使用者便可感受到最大的力回饋。

如圖 4.13(c)，若使用者決定令夾爪再出更大的力，則再次驅動搖桿便可使夾爪的驅動電壓隨編碼器訊號做出調整，隨著使用者持續轉動搖桿，編碼器送出脈衝數持續增加，則驅動電壓便依使用者的命令般地遞增。若使用者不想令夾爪繼續施力則只須反方向旋轉搖桿，表示命令夾爪中斷夾取的動作，搖桿上的編碼器偵測不到馬達逆轉而停止送出夾爪驅動電壓，夾爪便漸漸張開直到完全與物體分離，感測器量不到夾取力量值時，搖桿的馬達轉矩亦愈來愈小，最後使用者便可感受到零轉矩並得知物體已脫落夾爪且夾爪張開至原始位置。

程式中加入一安全機制避免使用者過度驅動搖桿使夾爪無限施力，因此將夾爪施力設立一個施力上限，此上限因物體的最大承受力量而有所不同，也就是當使用者將搖桿轉動到某一程度時夾爪已經送出最大的轉矩而不會再隨使用者命令而增加之，此時回饋到搖桿的轉矩亦是最大的，如圖 4.13(d)，可讓使用者感受到搖桿最大的輸出扭矩來得知遠方夾爪已經到達最大承受力量。程式利用無限迴圈在每個迴圈內偵測感測器量到的力量值是否到達物體的最大承受力，當量測力量值大小即到達最大承受力時，夾爪輸出設定好的最大電壓去夾取物體，此時使用者亦經由感測器量測值感受到搖桿最大的驅動電壓；反之，當感測器量測值未達到臨界接觸力之前，夾爪驅動電壓會隨著使用者命令做改變。

物體的最大承受力量指施加在該物體的夾取力不斷地往上增加時，在該物體被摧毀瞬間的夾取力量大小，各種不同形狀不同材質的物體其最大可承受的接觸力均不相同，爲了在各種物體上加入安全機制，必須知道各種物的最大可承受的擠壓力量爲何，因此論文中以實驗方式測量各類物體的最大承受力量並將其建立成規則表以讓程式可自行辨別。

力覺回饋系統的控制訊號流動方式一開始即由使用者對力回饋搖桿下位置指令，經由位置指令來決定驅動夾爪的電壓大小，由於夾爪驅動系統為機械系統且存在許多無法辨識的摩擦力，因此夾爪驅動電與輸出力量值之間的轉移函數並不容易獲得，即使夾爪以某一電壓值驅動之使對物體施加一力量值，此力量值可能因機械結構、摩擦力或物體的性質而有所改變，是存在於系統設計上的一項無法預測參數，故在本論文中僅使用開迴路設計來控制夾爪的力量大小，使用者只能以轉動搖桿的方式來下達位置指令，逆時針代表下達夾爪關閉的命令，並藉由感測器量到的力量來做力量的改變。

在夾爪未接觸到或已接觸到物體的活動範圍內，力回饋搖桿可加入適當並且可任意變更的近端控制模式，論文中在近端建立一個虛擬彈簧及虛擬阻尼為主要控制模式，當搖桿開始命令夾爪移動的同時，搖桿便開始產生力回饋，使用者在夾爪未接觸到物體的情況下亦會感受到回饋力量愈來愈大；當夾爪觸碰到該物體瞬間時夾爪上的感測器便有力訊號產生，此時的控制模式是將此突然的夾取力遽增在操作端表現成有如撞擊到一個虛擬牆面般，而產生一個極大的力回饋訊號，告知使用者夾爪已接觸到物體；接下來使用者可繼續操作搖桿命令機械夾爪繼續增強夾取力，亦或是保持搖桿不動使夾爪力量維持固定值；任何物體其最大承受力均不同，因此需依據物體種類不同而設定其最大夾爪力量值，當程式迴圈偵測到夾取力已到達物體的最大承受力時，使用者除了感受到搖桿最大的回饋力外，亦無法再藉由搖桿來增加夾爪的夾取力量值，第五章即利用本論文所發展的搖桿操作模型對各種物體進行夾取實驗，證明系統不需經由複雜的運算即可夾取多種物體。