

# 第一章

## 導論

遠端操控的技術在近年來有越來越多的應用，尤其在具有危險性或是人類無法親自到現場的環境，例如外太空、核電廠、深海、監控火山活動、放測性檢測等[24][25]，我們常運用機器人代替人類到這些地點收集訊息，甚至代為操控儀器設備，但機器人本身沒有足夠的智慧獨自完成一些複雜的任務，因此爲了讓機器人具有和人類一樣可以適時做出適當的決策與智慧，Goertz 與 Thompson 於 1954 年提出遠端操控 (Teleoperation) [27]。遠端操控結合人類與機器人兩者的優點；不僅讓人類的感測與操控能力能夠延伸到遠端，更讓操縱者處於安全的地方來進行遠端遙控。除此之外，爲了監控及靈活操控遠端機器人，需要將各種資訊從遠端傳回近端，通常會在遠端架設 CCD 攝影機，以獲取遠端的真實影像資料，幫助操控者完成其任務。由於現今網路與微處理器的高度發展，使得遠端操控系統系統得以廣泛的應用，例如工程師將此技術應用於電力線的維修[20]；旅居者號 (Sojourner) 上的機器人 Rover 在 1997 年成功的登陸火星，爲遠端操控太空機器人奠定下了一個重要的里程碑[25]；以及在 2004 年精神號 (Spirit) 和機會號 ( Opportunity ) 也陸續成功登陸火星上，更進一步地探測火星上重要的地理資訊。

進行遠端遙控時，需要將各種資訊回傳到主控端給操縱者，像是視覺、聽覺、力覺，甚至是嗅覺及味覺等感覺資訊，使操縱者可以感受到遠端環境的變化情形，此種將不可見的距離外景物清晰地呈現在使用者面前的技術稱爲遠端呈現

(Telepresence) [14]。遠端呈現這個名詞最早在1983年由Akin等人[14]定義，其目的是運用於太空科技上，以幫助太空人在外太空進行檢修的工作，其定義如下，「在執行任務端，操縱器 (manipulator) 具有靈活性，能讓使用者完成一般人類的動作。而在控制端，使用者接收足夠感覺資訊，並提供一種彷彿如實際身在現場的感覺」。而 Sheridan 也下了類似的定義：「遠端呈現，意為把視覺、動覺、觸覺或其他感覺資訊，由遠端的設備回傳給近端的使用者，再利用這些資訊適當地呈現給人類來感覺，就如同使用者置身在遠端一樣」。典型遠端操控系統示意圖如圖1-1所示，主要包括兩大部分：左側為主控端，由人類進行操控與監視，右側為受控端，這兩端是透過網路來進行命令與資料的傳輸連結，操控者可以利用操控裝置產生控制命令，再將這些命令傳到遠端，讓遠端的機器人可以按照這些命令來執行任務。



進行遠端遙控任務時，CCD 攝影機常被用來傳送影像，方便監控整個遠端操作的過程，但用 CCD 攝影機傳送影像實際上是有一些缺失的；因為 CCD 攝影機容易受到環境的影響，例如在一極陰暗能見度非常低的工作環境下，CCD 攝影機就沒有辦法傳回清晰的影像而造成使用者的不方便；此外 CCD 攝影機常受限於攝影機的死角，而造成視線範圍的不足。影像資訊透過網路傳輸方面，由於影像資料量龐大，使得影像的連續性易受時間延遲的影響，以致於無法即時監控。我們若能夠利用 3D 影像重建技術藉由 CCD 攝影機事前所抓取的資訊，預先建構一個與遠端近似的虛擬環境，那麼遠端只需將即時回傳影像改變的部分透過網路傳回近端，調整虛擬環境即可；此種將虛擬實境的技術應用於遠端遙控中的作法，不僅可以解決 CCD 攝影機所造成的問題，更可高度改善即時監控的效能。

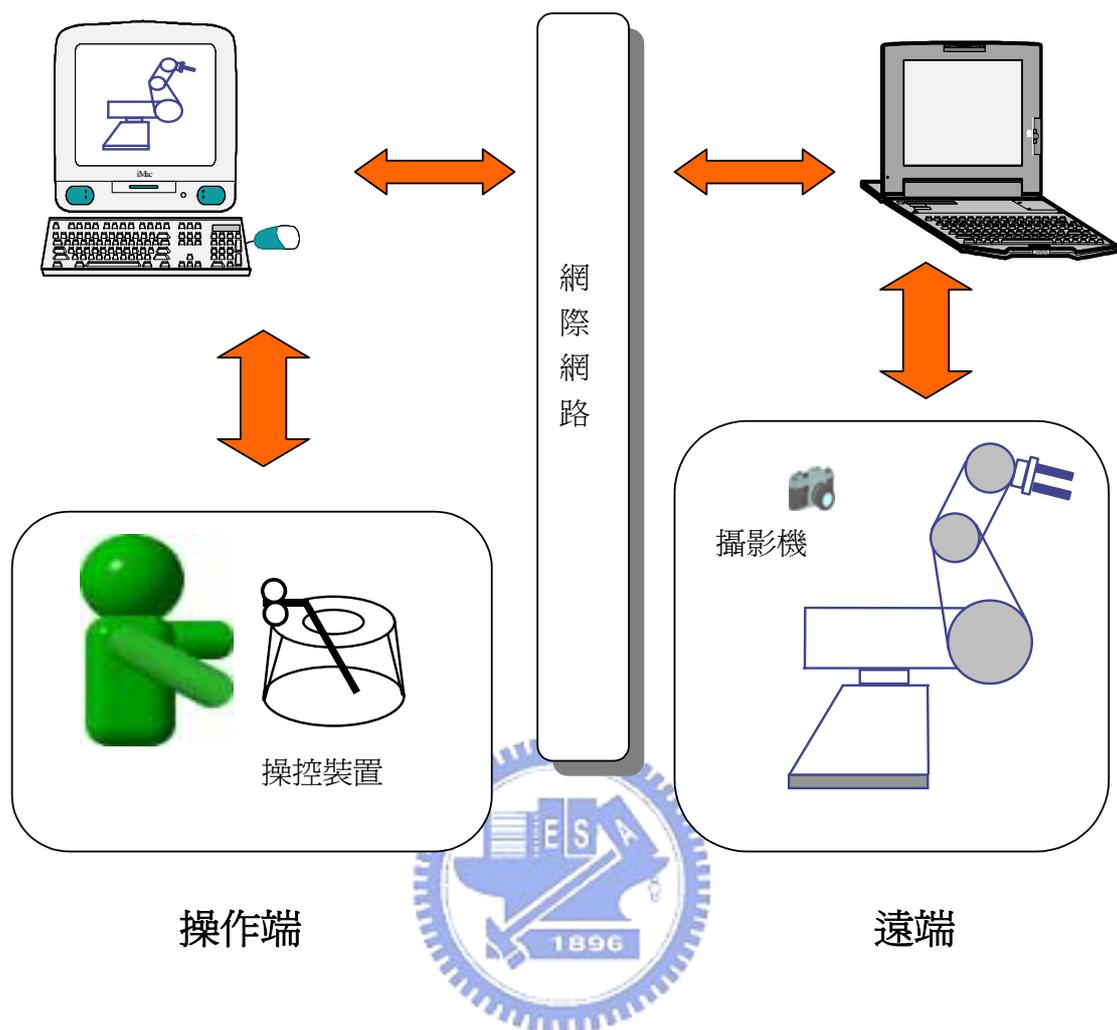


圖 1-1 遠端操控系統示意圖

虛擬實境 (Virtual Reality, 簡稱VR) 是近幾年相當熱門的技術, Lanier於1986年第一次使用此名詞[23]; 早期虛擬實境的發展多著力於產生逼真的立體視覺效果, 作為各種應用的視覺呈現, 近年來由於電腦效能急速增強與產品價格快速下跌, 使得現今的虛擬實境系統朝向多元輸入(Multimodal Input) 及感測式介面發展, 意即使用者不再以逼真的3維圖像呈現為滿足, 而更進一步地希望能夠透過感觸式的裝置與虛擬環境產生進一步的互動。簡單地說, 虛擬實境是一種幻覺, 而這種幻覺是先由電腦模擬出, 再經過我們人類的感官接收, 產生令我們難分真

偽的現象，讓使用者不自覺地沉浸於電腦所構成的環境中，形成新的人機溝通模式。若以 3D 互動式圖學研究方面說明；虛擬實境為利用電腦圖學建立 3D 物件模型，並產生和實際環境相同的三度立體空間場景，然後藉由程式的撰寫來模擬實際環境狀況，建立一個可以由人們所控制的虛擬世界，而使用者能在此空間中自由地和其它物件產生互動，如同置身於一個真實的環境[36]。

在遠端呈現技術裡，最常見的係以視覺和聽覺方面來產生擬真的環境。我們可以藉助顯像式頭盔（HMD）或立體眼鏡（3D stereo glasses）產生立體視覺景象；透過音效卡和耳機在聽覺方面製造出立體的音場和效果。此外，力覺(Force reflection)的呈現也相當的重要，它能夠讓身處虛擬環境中的使用者感受到外界給予的反應，而不是單方向的回饋，意即當使用者與虛擬環境發生互動時，可以透過力覺裝置，像是透過力回饋搖桿(Force-reflection joystick)、感應手套 (Sensing glove)、空間球 (Spaceball)、3D滑鼠 (3D mouse) 以及感測衣 (Body suit)等一些感知設備產生擬真的回饋力，傳達給使用者感應當時遠端接觸的情況。圖1-2為人類與力覺裝置之間訊息傳遞的流程圖[19]；當人類與物體接觸時，會經由感覺神經透過大腦將訊息傳遞給運動神經，讓手或手臂做出適當的反應。而在力覺裝置傳遞回饋過程中，先透過感測器的量測，再經由電腦運算傳給致動器 (Actuators)，讓它產生一回饋力到操作者手上，使操作者可以感受到力覺資訊。

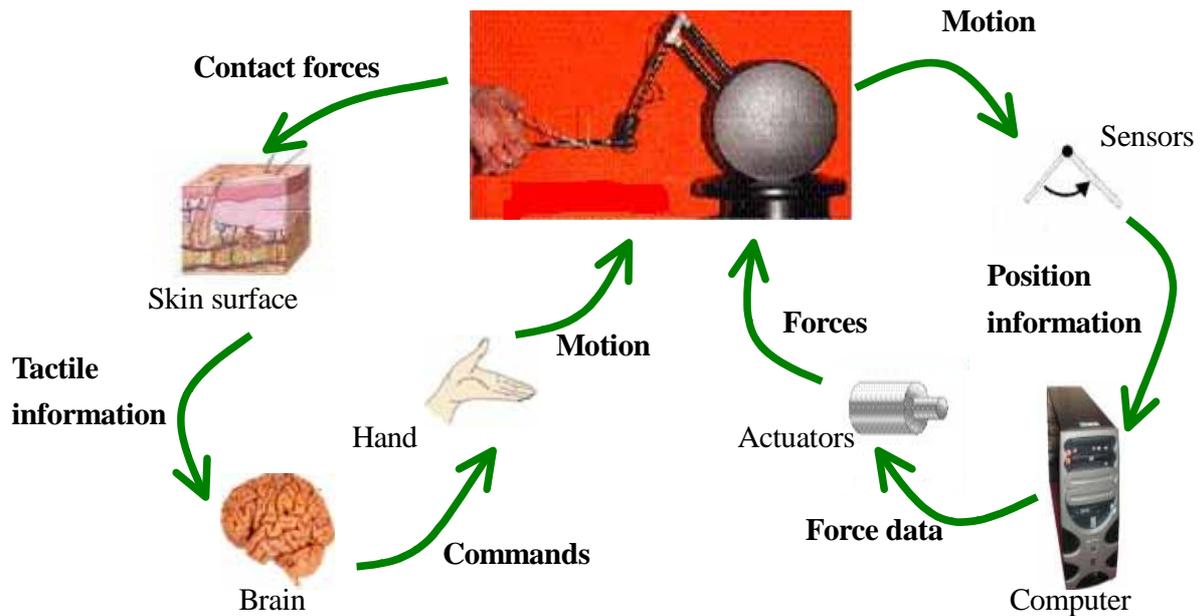


圖 1-2 人類力覺與力覺裝置之間的傳遞流程圖[20]

在遠端操控部份，爲了讓機器人能夠協助人類完成較困難、較危險的工作，它必須要能與使用者進行良好的溝通，也就是需要完善的人機介面才能順利達成我們所期望的目標。1999年 Johansson 和 Linde [5]就使用 Microsoft Sidewinder 力回饋搖桿，在2D場景中行走迷宮，並且以搖桿的力回饋效果來模擬碰撞到各種角度的牆壁時所產生的作用力，證明一般力回饋搖桿的可靠度及其應用的可行性。現今，擁有力回饋效果的操作介面在許多領域中可見到其成功的應用，例如在醫學方面，擁有力回饋操作介面的羅森三號( Luoson III ) [28]，藉著圍繞在輪椅周圍的超音波裝置，將輪椅附近的環境以力回饋搖桿將資訊傳達給操作者，即使操作者是位盲人，仍然可以知道前進路徑所將遇到的阻礙。以這個例子看來，力回饋裝置不僅使得操作介面更加簡易、並且增加了操作時的安全性及真實性。

本論文的重點在探討遠端操作的過程中，力覺和視覺相互配合的虛擬導引及其實踐；我們利用攝影機來對遠端欲操作的目標作定位，並利用力感測器來量測

目標物的軟硬度性質，再透過力回饋搖桿將相對應的力感提供給使用者，讓使用者可以藉由力覺以及視覺的感受，完成遠端操作的目標。本論文的其他章節大綱內容簡述如下：第二章針對研究中所引用的各項技術，包括虛擬導引(Virtual guidance)、單一影像定位、以及力回饋策略，說明其原理及應用情形；第三章是系統實現，介紹系統架構規畫，以及系統開發中所用到的軟體及硬體；第四章進行實驗並加以討論；最後，第五章就本論文作一總結並對未來研究方向提出建議。



## 第二章

# 遠端呈現與操控系統

在討論所提出遠端呈現與操控系統前，我們列舉幾項在實現機器人的遠端遙控系統時所面臨的諸多挑戰[8]：

- 發展逼近真實的遠端呈現，包括視覺、聽覺和力覺等；
- 設計虛擬實境之輸入與輸出裝置設備，例如：頭盔式顯示器、立體眼鏡、力回饋搖桿和資料手套；
- 改良操作裝置和遠端受控裝置之間的不相容性；
- 減少遠端遙控操作透過網路傳輸所造成的時間延遲效應；
- 提供輔助工具或輔助策略，協助使用者操控更有效率；
- 研發遠端智慧型控制器，以處理受控裝置與遠端環境互動時的問題；
- 加強人類和智慧型機器人之間的協調合作與互動。

本實驗室也針對這幾項挑戰進行改良：在對抗時間延遲的效應上，利用雙向控制策略來處理，讓執行遠端遙控系統時可以穩定地完成任務；以及在互動方面，發展出一智慧型控制器來處理力資訊，讓機器人碰觸到物體表面時可以維持一穩定的接觸力。基於之前的成果，我們希望透過視覺與力覺的相互合作，幫助使用者能更流暢的完成遠端操作的工作，而本論文選擇典型的抓取放置的組裝實驗進行討論。

視覺的回授在遠端操控中是很重要的一環，因為視覺對人類來說是最直觀的，透過視覺的回授，操作者可以輕易的操作遠端的操縱器 (manipulator)，達成欲完成的工作。對人類來說，視覺是一種伺服的控制(visual-servo control)，這樣的想法最早是在 1985 年由 Weiss 等學者所提出[16]，舉例來說，當我們要抓取桌上的保特瓶時，事實上是透過眼睛所看到的狀況不斷修正手部的位置，因此抓到保特瓶；試想，若只是看了一眼後把眼睛閉上，那麼要成功的抓到瓶子是比較不容易的。我們將這樣的觀念應用到遠端操作，則在視覺上必須要不斷的更新遠端的操作狀況，因此我們在遠端架設了 CCD 攝影機，對遠端的操作狀況進行即時監控。然而如導論所述，CCD 攝影機在網路傳輸大量資料時，時間延遲(time-delay)問題將導致影像即時性的喪失，因此本論文開發出一個與遠端近似的虛擬環境，把虛擬實境的技術應用於遠端遙控中，可改善監控的效能。



對遠端操控的使用者而言，除了視覺資訊的提供外，力覺(Force reflection)資訊的呈現也相當重要[34]，將力回饋加入操控系統中，可以有效地增加整個系統的操控能力，例如當機械手臂接近目標物件時，遠端的使用者如果只有視覺上的回饋，很容易因為視覺上的誤判，無法讓手臂到達物件的上方，甚至於和物件產生碰撞，這時候如果讓使用者在判斷物件距離遠近時，多一種力覺上的資訊，則抓取成功的機率將大很多，而使用者在操控上的效率也會提高，Pique等在1988年就說明了力回饋能有效地增加操控的穩定性及放置物體的工作效率 [21]。力回饋的展現已經用在很多地方，例如接觸力的回授，使用者透過力回饋可有接觸到障礙物的感覺；另一個應用則是使用在虛擬導引上，也是本論文的重點，藉由力覺裝置協助使用者操作遠端的操縱器(manipulator)[29]。力量大小計算方式有很多種，舉例來說，可以採用彈簧的受力方程式，建構虛擬彈簧，計算彈簧的伸長或壓縮量，而得到回饋力的大小，或是力場的模型，回饋力的大小和夾爪與目標位置間的距離成比例關係。

虛擬導引是虛擬實境技術的一種應用，目的是為了協助使用者的操作，讓整個操作的過程更加簡易，經由幫助使用者操作遠端的物體到達希望到達的位置。虛擬導引的技術在追隨路徑的實驗中，無論在操作精確度的增加，或是操作速度的增快，都展現了非常好的成果[1,2,15,26,31]。虛擬導引的方式很多樣，包括視覺、力覺、聽覺等，或是它們的合併使用[4]；目前已經有許多合併使用多種虛擬導引來協助使用者的成功案例，例如 Rosenberg 應用了虛擬力回饋的方式，幫助使用者在遠端操作的環境中完成組裝的工作，實驗的結果顯示，這樣的方式增加了超過七成的成功率[15]；Park 等人在 2001 年將虛擬牆的模型，運用在遠端操作冠狀動脈的外科手術上，並成功的縮減了 27%的操作時間[30]；而近年來 Peshkin 和 Colgate 也在所發展的 Cobot 中使用了虛擬導引的方式來完成工作[18]。

綜合以上的理由，我們採用力覺回饋與視覺回饋來進行虛擬導引；視覺回饋的優點是直觀而且精確，但缺點是容易受限於攝影機的視角，而且在操作的過程中因為無法判斷物體之間的相對關係而容易有碰撞的產生，另外使用者在操作上的臨場感也較為不足；而力覺回饋的優點則是能夠讓使用者更有安全感並且提高真實度，缺點則是使用者無法完全掌握方向，必須透過其他的感測器才能完成操作；有鑑於此，越來越多的研究合併使用不只一項的回饋系統，讓遠端的資訊回授到近端後，由電腦產生多種虛擬導引來刺激人類的感官，以協助操作遠端的操縱器(manipulator)；例如 Henigman 和 MacKenzie 在 2004 年，在事先建立好的場景中運用力覺回饋的虛擬導引，讓使用者在虛擬場景中走迷宮[3]。而在以往虛擬導引的應用上，力量回饋大都是屬於非即時性的，也就是說，在已知場景的位置中建立力場；這樣的方式對於遠端狀況的掌握度是不佳的；再加上過去的力回饋範圍和內部的作用力大都是固定的，讓使用者在操作時缺乏彈性，無法依照操作的狀況來調整回饋力的狀況；因此我們希望能夠搭配視覺的回饋來改進這個部分，讓視覺與力覺相互配合，並修正力回饋。

在實驗中，我們先對欲操作的物體作接觸力的測試以了解它的性質，再將相

對應的力感透過力回饋搖桿回饋給使用者，進行虛擬導引。由於我們將力量直接回饋給使用者，因此使用者的感受變得非常重要，然而過去的力回饋方式，大都在目標物的周圍建立力場，當使用者在操作的過程中進入力場範圍時，將提供力量回饋；然而此種方式衍生出很多問題，例如進入力回饋範圍時使用者會突然感受到很大的力量，由於此種感覺無法預期，因此使用者容易產生不安的感覺。而且都有個主要的問題在於，必須事先知道目標物的位置，事先建立好力場，而且在操作的過程中，作用力的範圍始終保持為固定，因而缺乏操作上的彈性，有時反而造成使用者的不便。

針對上述的問題，本論文針對力回饋部分加以改良，期望能完成一個可依照使用者的選擇而改變位置、並隨著操作的過程而改變其力回饋狀態(作用力範圍、作用力大小)、甚至於依照不同軟硬度的物體給予不同的力量回饋的智慧型虛擬導引輔助，讓使用者在很平順的感受下，輕鬆完成遠端操作的工作。因此，本論文主要著力於下列幾點：

1. 提出簡單的影像定位方法，透過事先校正攝影機所擷取到影像的每一個像素 (pixel)，決定出所選取物件的3-D座標，遠端的攝影機所擷取到的影像在經過這樣的運算後，只傳回需要修正的位置資訊。與直接傳回影像資訊相較之下，此法減少大量透過網路傳輸的資料數量，讓操作者更迅速的掌握遠端的控制狀況。
2. 在操作上，不同的目標物件可能會有不同的物理性質，例如軟硬度等，因而需要不同的操作方式。此部分不容易由視覺來判斷，因此我們加入力感測器來偵測目標物件和工作平面間的接觸力，藉以分辨物件的特性，進而給予使用者合宜的力回饋協助。
3. 在輔助工具與輔助策略方面，我們除了使用力感測器傳回的力資訊為基礎來進行力覺回饋，更同步利用虛擬實境作為視覺回饋。使用者操控機械手臂時，可藉由回饋的視覺資訊得知目標物的距離與方位，但由於觀察視角

上容易因限制而發生障礙物距離上的誤判，就算提供多個視角的切換，切換上的時間仍然讓資訊不夠即時，所以設計一力回饋操控系統，將模擬產生的虛擬力回傳到搖桿上，讓使用者因此感覺到力而得知目標物的距離與方位，使其能更進一步地驅使手臂逼近欲操作的物件，同時也會從虛擬實境系統獲得視覺的回授訊號。

如此視覺與力覺並行的方式增加了操作時控制的彈性以及現場的臨場感，讓使用者可以輕易控制遠端的機器手臂，完成工作，系統流程圖如圖2-1所示，首先遠端的電腦對CCD攝影機拍攝的影像作影像處理，定位出物件的位置後傳回近端，近端電腦根據此資訊建立虛擬實境場景，使用者透過此虛擬場景了解遠端的操作狀況，並透過搖桿下達位置命令操作機械手臂，為了實現一個能夠隨著操作點的位置、物件擺放位置、以及物件的種類而改變的虛擬導引，我們在操作過程中擷取機械手臂夾爪的位置傳回到近端電腦，並配合物件的位置以及量測到的物件的物理參數，經過力回饋範圍和大小的計算後得出輔助使用者的力量，並透過搖桿將力感傳回給使用者以協助操作，同時機械手臂夾爪的位置資訊也傳回近端電腦同步更新虛擬實境場景。以下將針對本論文中所應用到的視覺以及力覺回授的技術加以介紹。

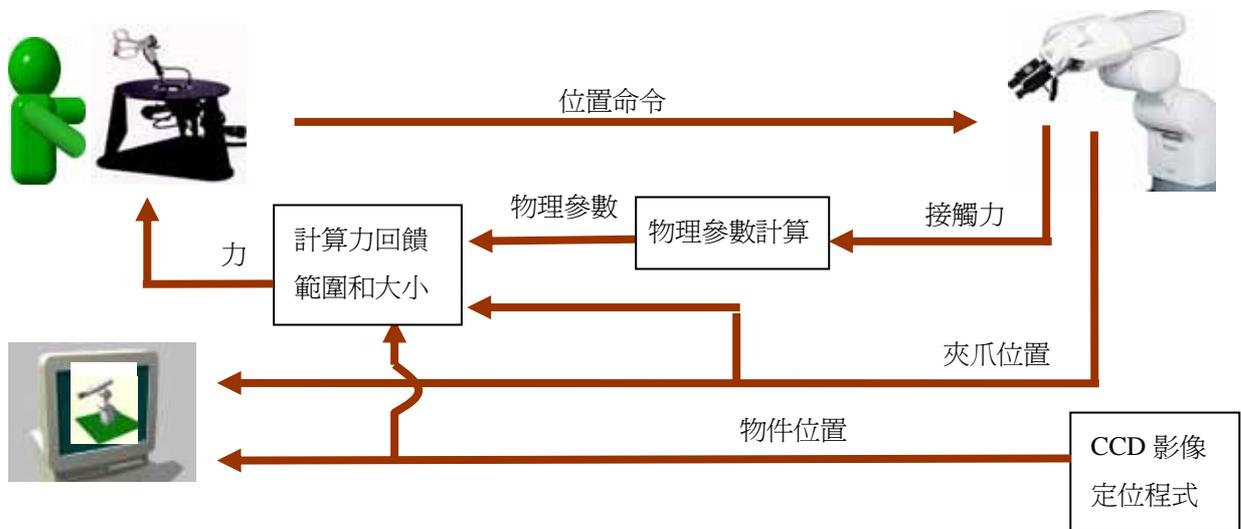


圖2-1 結合視覺與力覺之遠端操作系統流程圖

## 2.1 視覺回授

針對實際環境的虛擬實境場景的建構方法，主要可分為兩種：由已知的資訊事先建立或是由攝影機影像即時重建。前者的優點是沒有繁瑣的運算，且不須要透過網路傳輸，因此使用者在操作時可以非常流暢，缺點則為無法即時掌握遠端突發狀況的變化，而讓操作僅適用於模擬；而即時重建的優點剛好彌補了前者的缺點，透過攝影機的影像擷取，使用者可以隨時掌握遠端的突發狀況，但缺點是在重建的過程中運算量非常龐大，再加上若是要完整的重新繪製近端的場景，需要相當完整的影像資料，更增加了時間延遲的影響，因此使用者在操作時，容易發生落後( lag )的現象，而造成操作的不順暢。在實際的應用上，若是無法即時監控遠端操作的狀況，勢必讓整個系統的可靠度降低，因此我們採用折衷的方式，在遠端架設攝影機，簡化場景重建的部分，以避免網路傳遞延遲的問題，以下我們先針對遠端攝影機的單一影像定位來加以說明。

在重建的過程中，最重要的部分就是影像定位，我們可透過一張或是多張影像來決定出物件在空間中的位置；若是希望不經過事先對場景進行校正，而要達到相當的精確度，則必須使用多張從不同角度拍攝的影像來做定位。由於本實驗的重點並不在於影像定位，而在視覺即時回授和力回饋的配合，因此過程中僅使用單一固定式攝影機來對場景進行拍攝，我們採用了較為簡單的攝影機校正方式，透過事先校正好的攝影機和已知平面來對影像中的物件做定位。

在一張影像中，每一個像素(pixel)所代表的是一條射線，由攝影機的中心往外擴張，進而通過真實世界裡三度空間的點，所以一張影像中的每一個像素所對應真實世界的位置將會有無限多種可能，影像中兩個像素之間所對應真實世界的距離亦然，故同樣的物件放在近處和遠方，在影像中所看到的大小是不一樣的。

因為當物件放在近處時，兩個像素間對應真實世界的距離較短，所以在影像中會佔有較多的像素因而看起來較大；相反的，當物件放在遠處時，由於兩像素間對應的距離較大，物件在影像中佔有較少的像素而看起來較小。這和人類的視覺是類似的，圖 2-2 即說明此種情況。

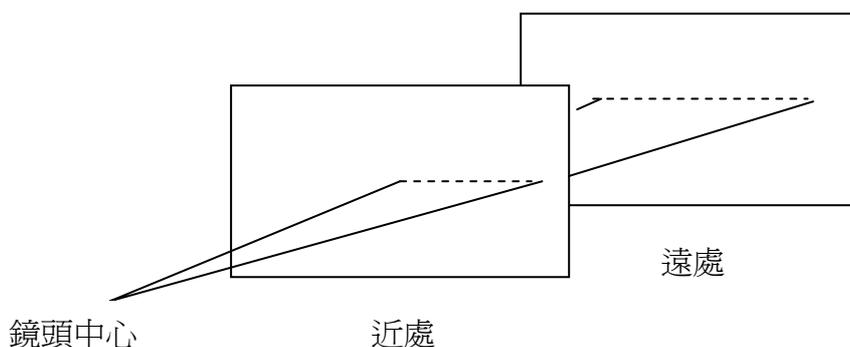
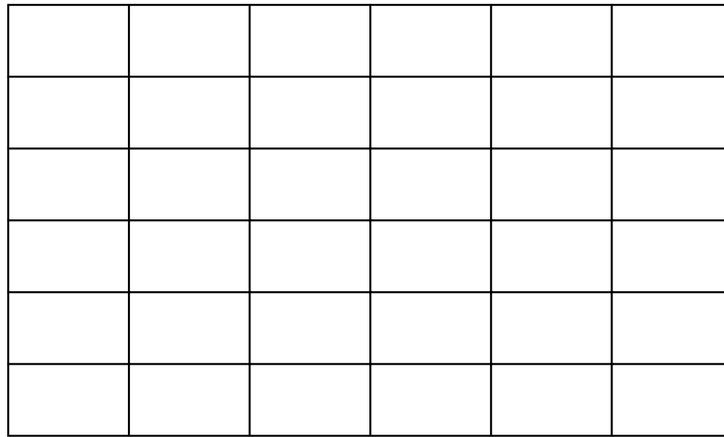


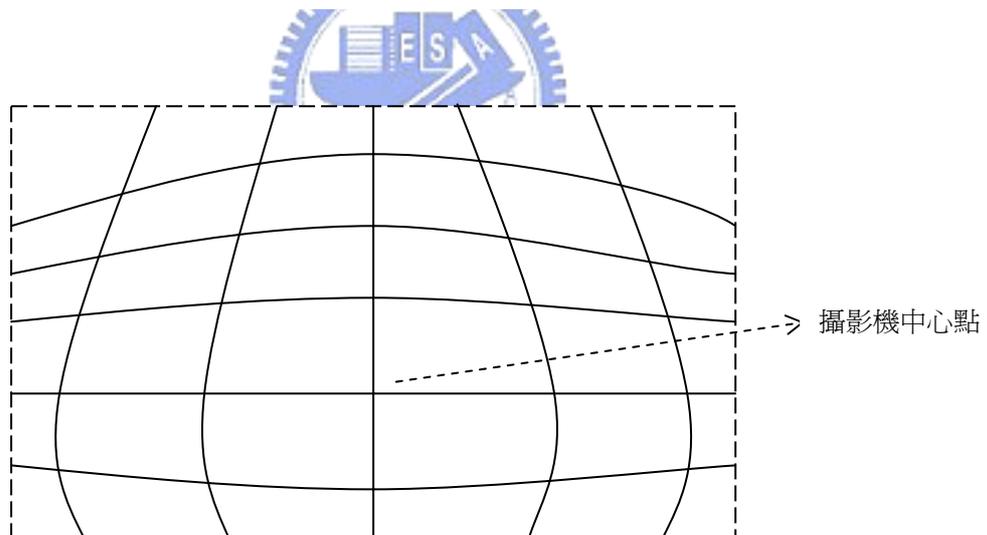
圖 2-2 影像和真實世界的對應關係

影像校正最常用的方法是標記法，也就是事先在真實世界的空間中已知點上作標記，再對影像中的每一個像素作校正。首先在牆上畫出固定大小的方塊，如圖 2-3(a)，由攝影機拍出的影像如圖 2-3(b)，除了攝影機中心的垂直和水平線外，其他的線段都會因為形變的關係，而有彎曲的現象；值得注意的是，攝影機的中心通常不是在影像的正中心，其中垂直線是在影像的中心，但水平線則在影像偏下方的地方，這是因為鏡頭和成像平面不等高所致。由圖 2-4(a)以及圖 2-4(b)中可看出，當攝影機鏡頭垂直於待測物時，相同的線段在離攝影機鏡頭中心越遠，距離攝影機中心的仰角或俯角的增加量是越來越小的。以圖 2-4(a)來說，此圖為攝影機與物件之間的俯視圖，若把每一個線段當成一個物件，由前面的說明可知，當物件擺放離攝影機的中心越遠時，所佔攝影機所拍出影像的像素是越少的；因此我們在校正時，對圖 2-3(b)中的每一個交點去記錄它距離中心點的橫向以及縱向的偏移角度，並建立一個對應表，之後在指定物件時，只需要比對影像中物件的邊緣，便可知道物件在實際空間的位置，若是在影像中物件的邊緣沒有

落在校正時交點的像素上，則使用內插的方式來得到該點的角度。

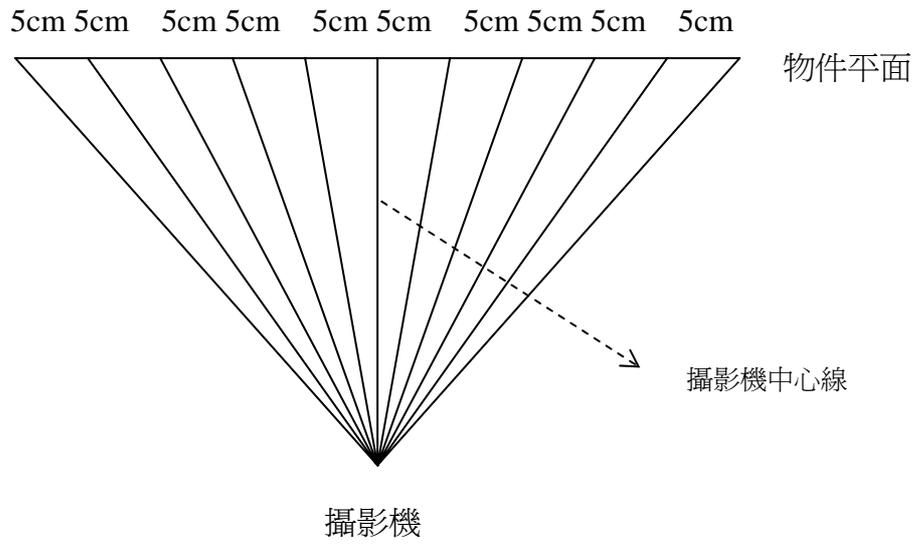


(a) 實際畫出的線條

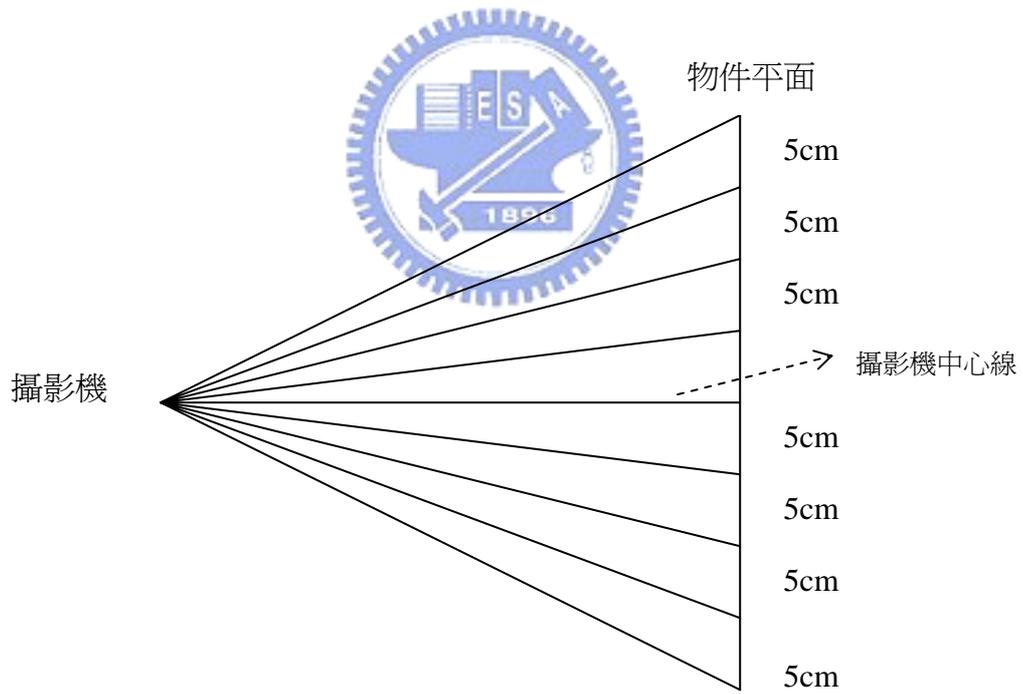


(b) 攝影機拍出的影像

圖 2-3 影像像素校正：(a) 實際的線條和(b) 拍攝後的影像



(a)俯視圖



(b)側視圖

圖 2-4 攝影機拍攝物件：(a)俯視圖和(b)側視圖

然而這樣的方式，必須保證攝影機的鏡頭和待測平面為垂直，或是為一個已知的角度，由於影像各像素的射線有無限延伸的特性，些許的誤差對遠處都會造成很大的影響，因此此角度的精確度直接影響到定位的精準度；又因本實驗使用一般市面上的網路攝影機，除了無法完全了解攝影機內部詳細的參數外，例如攝影機的焦距、鏡寬、鏡頭到成像平面的距離等，也無法很精確的知道鏡頭目前偏移的角度；所以我們使用最簡單也最直接的像素校正法來完成。

首先，我們在工作平台上畫出等距離的格子點，並事先量好每個交點上的真實世界座標，接下來固定攝影機進行拍攝，紀錄拍攝好的影像中出現交點的像素，並在程式中和之前量好的真實世界座標對應，如此一來我們就可以知道在影像中出現在該像素所代表的真實世界座標。若是該像素在有定義的像素之間，則搜尋此像素所在的格子，並以構成此格子的四個定義點作內插，以獲得該點的真實世界坐標。應用以上的方法，當物件被選取時我們藉由物件搜尋的演算法，可以找到物件底部和工作平面接觸邊界點所在的像素，進而得知物件的長度、寬度、以及其所在的位置。



## 2.2 力覺回授

在虛擬導引的應用中，力回授可分為吸引力導引和排斥力導引兩種，而作用力的範圍則可依照各式幾何圖形來給定，例如錐狀(cone)、球狀(sphere)、以及圓柱狀(cylinder)[3]，如圖 2-5 所示。不同的幾何圖形有不同的目的，比方說在走迷宮的過程中，可以將錐狀的作用力範圍用在起始點，較大的開口引導使用者在空間中接近入口；球狀用在終點，給予使用者較大的彈性到達目標；而中間避障的

過程，則是使用圓柱狀，避免使用者在操作的過程中碰撞到邊界[3]。考量操作機械手臂是由工作平台的上方往下操作，如圖 2-6 所示，我們決定採用類似圖 2-5(a)的錐狀模型，並在錐狀的作用力範圍內提供吸引的力量給使用者；在操作時，使用者將透過搖桿控制夾爪末端的中心點，之後簡稱為操作點，一旦操作點進入錐狀的範圍內，也就是進入力回饋的範圍內，則透過搖桿提供力覺感受給使用者，經由這樣的力量回饋，引導操作點到錐狀作用力範圍的頂點上。

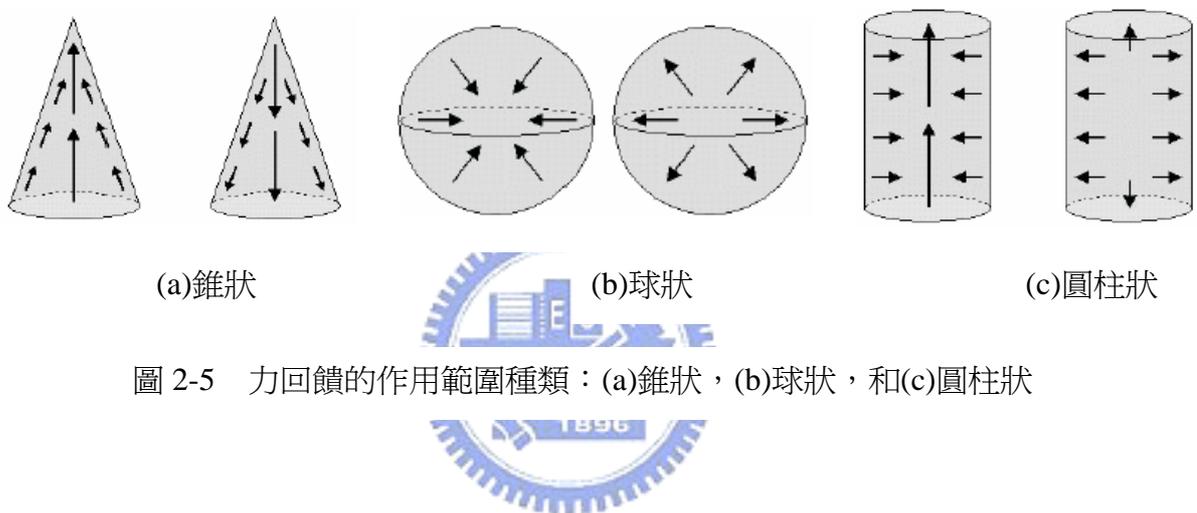


圖 2-5 力回饋的作用範圍種類：(a)錐狀，(b)球狀，和(c)圓柱狀

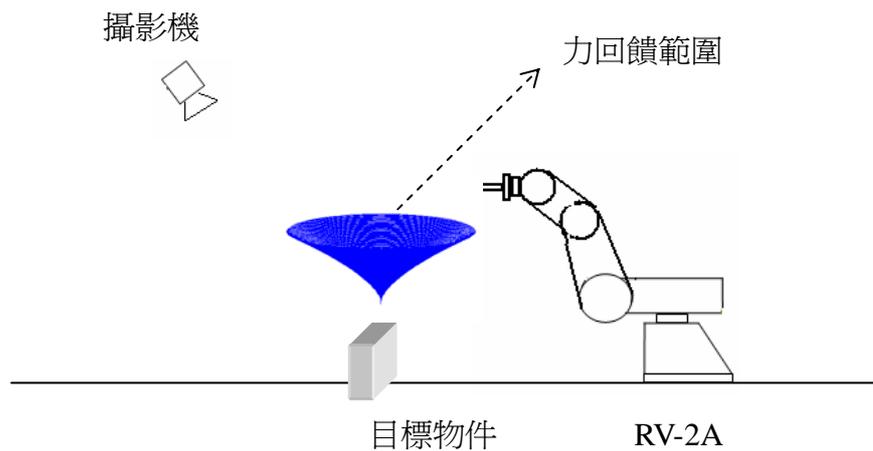


圖 2-6 引導機械手臂移動的力覺回饋示意圖

首先我們決定力回饋的範圍，我們希望作用力的範圍是可以隨著操作點位置的不同而改變的，因此在每一次更新操作點的位置時，就重新規劃一次作用力的範圍；若是操作點在力回饋的範圍中，則依照操作物件的物理性質來提供力回饋的協助。以下將針對力回饋範圍的決定，以及力回饋大小的計算來加以說明。

## 2.2.1 決定力回饋範圍

在討論虛擬力覺的演算法時，我們首先討論作用力的範圍；在過去虛擬導引類似的應用上，大都是直接採用圓錐狀(cone)模型來做為作用力的範圍，一旦操作點進入作用力範圍，則依照力回饋演算法給予使用者力覺的感受，而受力方向直接指向目標點。這是一個簡單而且直觀的方法，但在力回饋範圍的邊界上我們可以看到幾個問題，首先當操作點進入受力邊界時，會有很突然的力量感覺，再則在操作的感覺上並不是非常平順，在邊界處會有碰到牆壁的感覺。

在進入作用力範圍的邊界時，回授的力量是最大的，這樣的設定是為了解讓操作點在接近目標時，可以感受到越來越小的回授力，以避免在目標點附近過大的力覺回饋所造成的振動(此部分我們將在下節中作更詳細的說明)；因此，當操作點剛進入作用範圍時，行進的方向不一定和此時的受力方向一致，因此一個和行進不同方向的力量突然出現，往往會驚嚇到使用者而造成操作上暫時性的混亂；後期發表的論文大都已經注意到這個問題，較為普遍的解決方式是，在回授力的計算上再加入時間的控制參數[29]，也就是說，再加入一個小於 1 且隨時間遞增的權重，來緩和突然出現的力覺感受。舉 X 方向的回授力來說，

$$\vec{F}_x(t) = \vec{F}_x \times r(\tau) \quad (2.1)$$

其中  $r(\tau)$  即為新加入的權重，而  $\tau$  為時間參數，當操作點進入作用力範圍後開始累加，其大小與時間的關係如圖 2-7 中藍線所示：

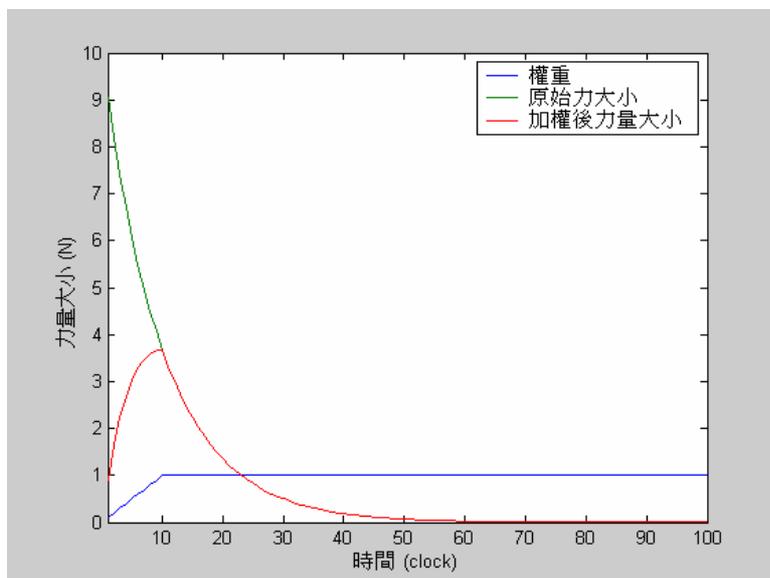


圖 2-7 力回饋大小和權重的關係圖

當操作點剛進入受力範圍的邊緣時， $\tau$  隨著時脈 (clock) 開始計數，因此，使用者所受到大的吸引力會被小的權重平均掉；而隨著操作點在受力範圍中移動，權重也慢慢增加，最終(c 個時脈後)回復到原始計算出的力量大小；若是操作的過程中離開了受力的範圍，則  $\tau$  設為零，直到下一次進入受力範圍再重新計算。我們由公式和圖形可以看出，加入權重的目的，在於拉長使用者一開始感受力量回饋的時間，也就是說，假設進入作用範圍時所須要給予的力量是 10 牛頓，那麼我們將逐步增加，分段來給使用者，讓使用者能夠逐漸習慣這樣的回授力而不會有不適的感覺，如圖 2-7 中的紅線所示，其中的綠線為原始力回饋的大小。

過去的作用力方向都是直接由此時的操作點指向目標點，這樣的演算方式會導致幾個不佳的結果，例如前面所提到的使用者感受，圓錐形的受力範圍讓使用者在操作進入力場邊緣後，感受到順著邊界，指往目標點方向的力，因此會一直留在力場的邊界而有不平順的感覺，或者是，當從側邊進入欲操作物件的上方

時，還是有可能因為使用者的不慎而碰撞到欲操作的物件，因此還是需要額外的演算法來確保避免碰撞；我們考慮到一個情況，若是我們能讓操作點提前到達目標物的上方，接下來垂直進入欲操作的位置，則可以讓操作點儘快離開作用力的邊界，也可避免碰撞的發生，因此在力回饋的演算法中，除了給予一般指向目標物的力回饋外，更額外提供了往中心方向的力量，一方面虛擬力方向和操作點原本的行進方向較為接近，可以緩和使用者的不適感受，另一方面也能讓操作點在比較安全的路徑中進入操作的位置。

基於以上的理由，我們提出一個改善的方式，在平面(x 軸、y 軸)方向增加力場，讓操作點在進入力場後，會感受到更強的力量往中心靠攏，同時往目標點移動；因此我們可以預期，操作點的受力將因為增加往中心軸的力量而不再是直線，變為一條彎曲的弧線；依照這樣的受力方式，我們將作用力的範圍修改為漏斗的形狀來配合，提醒使用者受力的方向。我們用作用力範圍的剖面來說明邊界的決定，假設操作點和目標點都在  $y = 0$  的平面上，並且令操作起始點  $P_0$  的座標為  $(0, z_i)$ ，而目標點  $P_{n-1}$  的座標為  $(x_f, 0)$ ，我們在  $P_0$  和  $P_{n-1}$  之間，依照操作點的受力方向，取  $P_1, P_2 \sim P_{n-2}$ ，則  $P_0 \sim P_{n-1}$  的連線即為作用力範圍的邊界，舉  $n = 4$  為例，我們除了操作點  $P_0$  和目標點  $P_4$  外，中間只取三個點， $P_1, P_2, P_3$ ，五個控制點的連線即為作用力的範圍的基本架構，然而該範圍由線段組成，並非一平滑的曲線，要解決這個問題，可以利用 Bezier 曲線完成平滑化的目標，因此我們對取出的  $n$  個點作平滑化，如圖 2-8 所示，最後再對目標點的 Z 軸作積分，可以得到完整的力回饋範圍，而  $n$  的值可以自行決定，越大則作用力範圍和軌跡會越接近，但計算時間越長，反之亦然。

Bezier 演算法早在 1960 年由一名汽車工程師 Pierre Bezier 所提出的，剛開始被運用在輔助設計汽車工業裡，後來此方法就被廣泛的討論[33,10]。Bezier 曲

線是由控制點所連接成的多邊形來決定的，因此只要改變控制點座標，就可以繪製出產生出一個近似所想要的曲線；現假設有  $n+1$  個控制點在 3 維空間中，其 Bezier 參數曲線方程式表示如下，下式也稱之為  $n$  階的 Bezier 曲線方程式：

$$C(u) = \sum_{i=0}^n B_{i,n}(u)P_i \quad 0 \leq u \leq 1 \quad (2-2)$$

其中  $n$  是多項式的次數， $\{P_i\}$  表示其  $n+1$  個控制點，而  $\{B_{i,n}(u)\}$  為混合函數 (blending function)，其可描述成：

$$B_{i,n}(u) = \frac{n!}{i!(n-i)!} u^i (1-u)^{n-i} \quad (2-3)$$

其中  $i$  是從 0 到  $n$ ，表示第幾個控制點。在(2-2)式中，尚需滿足  $u \in [0,1]$  這個條件，即當  $u=0$  時，則混合函數只有  $B_{0,n}(0)$  為 1，其餘都為 0，當  $u=1$  時，則混合函數只有  $B_{n,n}(1)$  為 1，其餘都為 0，因為這樣所以才會使得 Bezier 曲線只會通過第一個控制點和最後一個控制點的這特性，另外混合函數還有一個特性就是：

$$\sum_{i=0}^n B_{i,n}(u) = 1 \quad 0 \leq u \leq 1 \quad (2-4)$$

根據(2-3)式可求得表示式為：

$$\begin{aligned} B_{0,3}(u) &= (1-u)^3 \\ B_{1,3}(u) &= 3u(1-u)^2 \\ B_{2,3}(u) &= 3u^2(1-u) \\ B_{3,3}(u) &= u^3 \end{aligned} \quad (2-5)$$

由(2-5)式可知  $B_{i,3}(u)$  只和曲線參數  $u$  有關，接著利用(2-2)式來計算 Bezier 曲線，表示如下，其範例如圖2-9所示：

$$\begin{aligned} C(u) &= \sum_{i=0}^3 B_{i,3}(u)P_i \\ &= P_0 B_{0,3}(u) + P_1 B_{1,3}(u) + P_2 B_{2,3}(u) + P_3 B_{3,3}(u) \end{aligned}$$

$$= P_0(1-u)^3 + P_13u(1-u)^2 + P_23u^2(1-u) + P_3u^3 \quad (2-6)$$

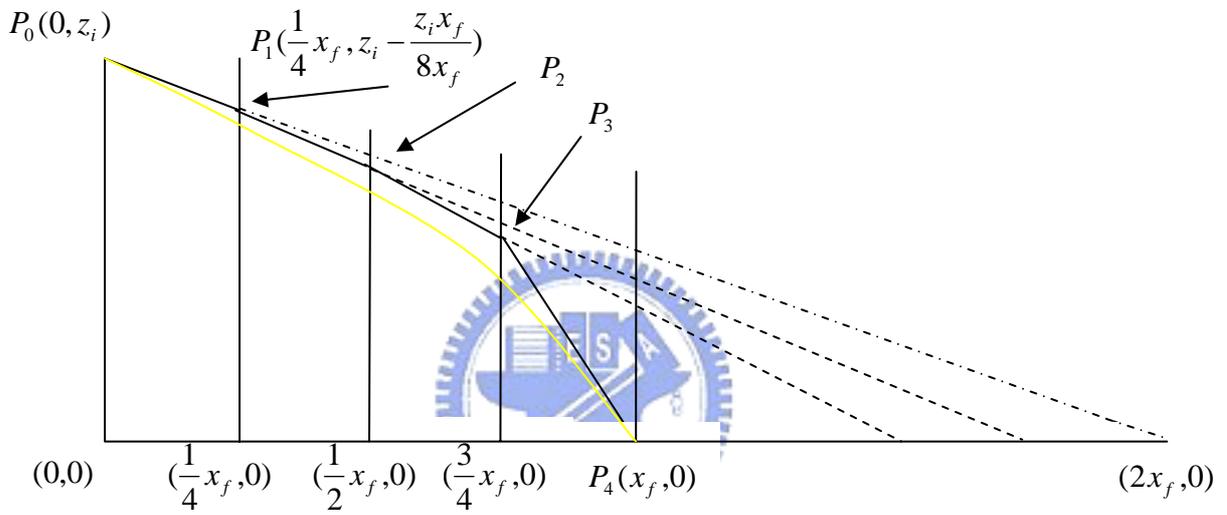


圖 2-8 作用力範圍計算示意圖

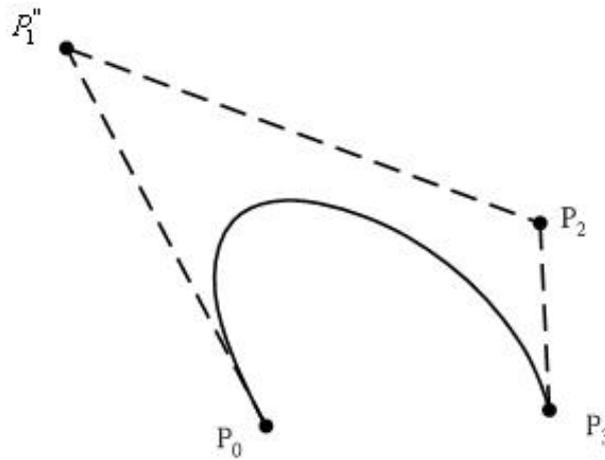


圖 2-9 Bezier 曲線範例圖

圖 2-8 中的黃線即為平滑後力回饋範圍；用這樣的方式，讓我們可以得到一個隨著使用者操作而變化的作用力範圍。因此我們可以得到作用力範圍的計算步驟如下：

步驟一、遠端回傳機械手臂操作點現在的位置  $(0, z_i)$ ，以及目標點位置  $(x_f, 0)$  到近端電腦，並存入控制點集合中；

步驟二、計算此時的合力方向  $\vec{F}$ ，將此力方向延伸為一條直線  $L_1$ ，其方程式為

$$z = z_i - \frac{z_i}{2x_f} x, \text{ 並求出 } L_1 \text{ 與 } x = \frac{1}{4}x_f \text{ 的交點 } P_1, \text{ 將 } P_1 = \left(\frac{1}{4}x_f, z_i - \frac{z_i \times x_f}{8x_f}\right)$$

存入控制點集合中；

步驟三、重覆步驟二，計算在  $P_1$  時合力方向的延伸直線  $L_2$  與  $x = \frac{1}{2}x_f$  的交點  $P_2$ ，

以及在  $P_2$  時合力方向的延伸與平面  $x = \frac{3}{4}x_f$  的交點  $P_3$ ；並將  $P_2$ 、 $P_3$  存入控制點集合中；

步驟四、將控制點集合中的五個控制點代入式 2-3 中平滑化，因此可得出

$$\begin{aligned} B_{0,4}(u) &= (1-u)^4 \\ B_{1,4}(u) &= 4u(1-u)^3 \\ B_{2,4}(u) &= 6u^2(1-u)^2 \\ B_{3,4}(u) &= 4u^3(1-u) \\ B_{4,4}(u) &= u^4 \end{aligned} \quad (2-7)$$

再將式 2-7 代入式 2-2 可以得到曲線方程式為：

$$\begin{aligned} C(u) &= \sum_{i=0}^4 B_{i,4}(u)P_i \\ &= P_0B_{0,4}(u) + P_1B_{1,4}(u) + P_2B_{2,4}(u) + P_3B_{3,4}(u) + P_4B_{4,4}(u) \\ &= P_0(1-u)^4 + P_14u(1-u)^3 + P_26u^2(1-u)^2 + P_34u^3(1-u) + P_4u^4 \end{aligned} \quad (2-8)$$

步驟五、回到空間的狀況，將  $C(u)$  對直線  $\{y = 0, x = x_f\}$  作環積分，得到此作用力範圍的完整方程式。

經由上述的步驟，我們可以得到力回饋範圍，在過去虛擬導引應用於遠端操作的範例上，力回饋的作用力範圍大都是固定的，也就是說，特定工作必須仰賴特定的虛擬導引模型，甚至於在操控的過程中，使用者想要放棄離開，都必須和虛擬力對抗，直到離開作用力範圍為止；因此針對這個部分，我們希望能建立一個智慧型的虛擬導引，隨著使用者的操作而改變作用力範圍的大小；為了要達到即時修正的目的，我們在每一次更新操作點現在的位置時，同步重新計算  $P_2 \sim P_{n-2}$  的控制點，如圖 2-10 所示，其中物件分別擺放在位置 1 和位置 2，力回饋的範圍將因為物件以及夾爪位置的不同而改變；各點的受力方向我們將在下一節作說明。

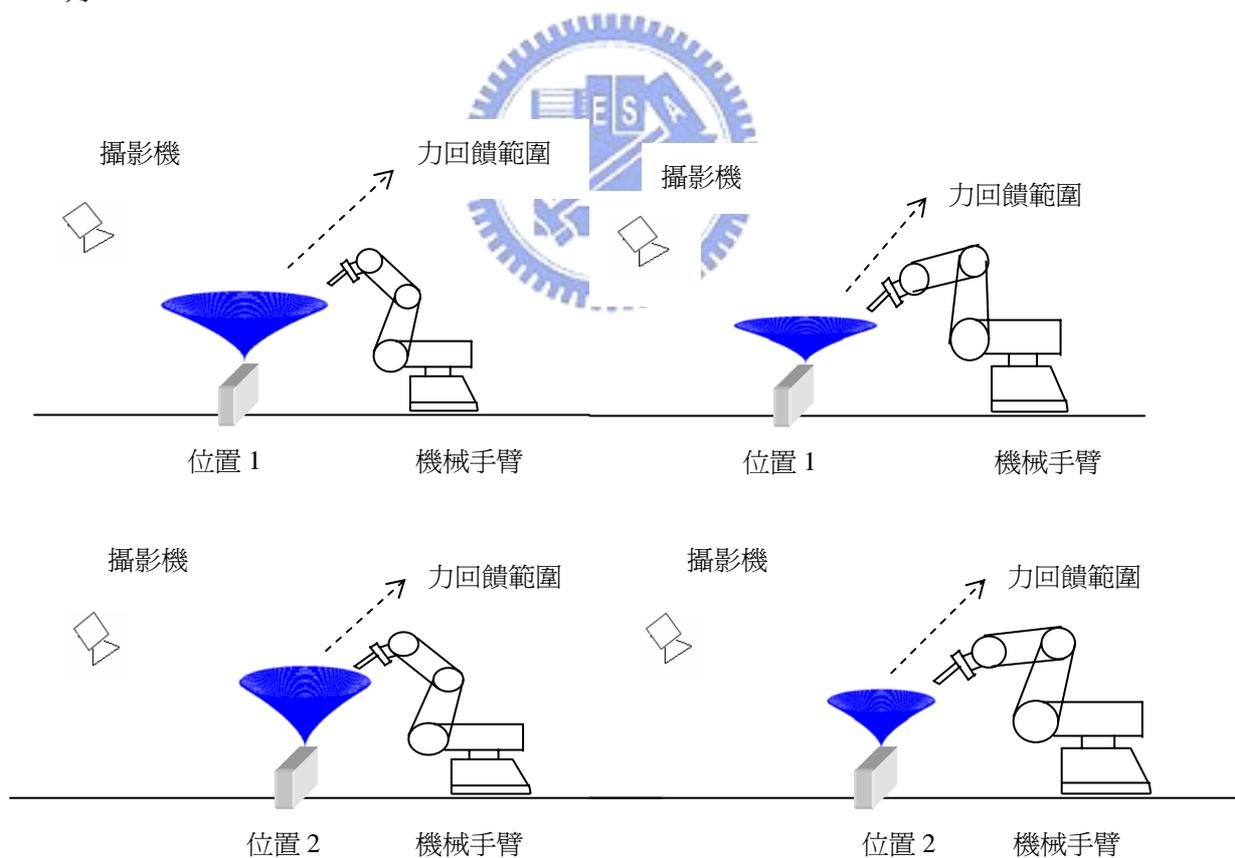


圖 2-10 夾爪位置、物件位置和力回饋範圍關係

## 2.2.2 計算回饋力

接下來討論力量回饋的計算，我們採用近似電場的力場模型，假設操作點和目標點為空間中的兩個帶電粒子，彼此間的距離會影響到兩者間作用力的變化；以下我們均以 X 方向的受力來作討論，Y 方向和 Z 方向同理可得；我們回顧(2-1)式並將之展開，得到：

$$\vec{F}_x = k_x \times g(d_x(t)) \times r(\tau) \times \vec{u}_x \quad (2-9)$$

其中， $k_x$  為給定的力常數，將由待測物的物理性質來決定，我們將在稍後說明； $\vec{u}_x$  為 x 方向的單位向量， $d_x(t)$  為夾爪現在位置和目標點間的距離，如(2-10)式，

$$d_x(t) = \sqrt{(x_i(t) - x_f)^2} \quad (2-10)$$

而  $g(d_x(t))$  為力量回授函數，由  $d_x(t)$  決定，如(2-11)式所示，

$$g(d_x(t)) = \begin{cases} d_x(t)^2, & d_x(t) \leq t_x \\ 0, & d_x(t) > t_x \end{cases} \quad (2-11)$$

其中  $x_f$  為目標點的 x 座標， $x_i(t)$  是夾爪現在的位置， $t_x$  為 x 方向距離目標點的最大受力範圍。我們設定讓  $g(d_x)$  和  $d_x^2$  成正比，如前所述，這樣的方式會造成在邊界處有最大的力覺回饋，目的是爲了要解決在操作過程中可能產生搖桿震動的問題，舉 x 軸方向來說，如圖 2-11 所示；在中心處震動的主要原因，是在很短的距離內感受到兩個相反方向的力，。而當操作搖桿接近中心點時，搖桿回授力量到手上，由牛頓運動定律可知，除非人手施以和搖桿大小相等方向相反的力量，否則搖桿將因爲力量的回饋而有位移；而在接近中心點時，若是這段位移 S 比目前位置和目標點間的距離  $\Delta x$  還要大，即  $S > \Delta x$ ，則會讓搖桿進入另一個力方向的範圍，而同樣的道理會讓搖桿再彈回來，如此復始造成震盪，再加上我們

使用搖桿直接控制機械手臂，這樣的震盪除了會讓操作者感覺不適外，也會對機械手臂的馬達造成傷害。因此我們採用遞減的力量函數，也就是前面所提到的  $g(d_x)$  來避免這樣的震盪，當初進入力場範圍時，所感受到的力量是最大的，隨著越來越接近中心點， $d_x$  越來越小，則力量的感覺會越來越小。

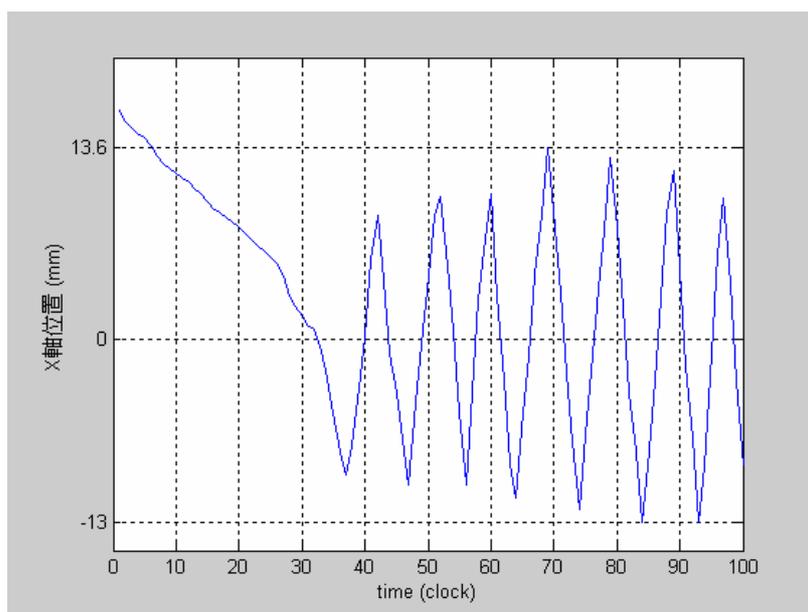


圖 2-11 回饋力所造成的振盪現象

接下來，我們討論有關待測物件的物理參數  $k_x$ 。 $k_x$  一般會給定一個常數值，因此在操作任何物體時，只要操作點的位置相同，搖桿所感受到的力量回饋就會相同；然而在現實生活中，不同軟硬度的物件在操作時的力量是不一樣的，易碎的物品可能就要小心輕放，枕頭之類的物品，或許就可以比較隨意的完成工作，以節省操作的時間；因此，對於物件物理性質的偵測，即相對重要。在實驗中，我們使用了力感測器 JR3 來量取物件和工作台的接觸力，藉以評斷物件的軟硬度，在遠端操作前，機械手臂將對待測物作以接觸工作平台並稍微擠壓的方式來作測試，並依照力感測器所量得的接觸力大小將待測物件分為三類，第一類的彈性係數較大，力感測器回授的力量也較大，為較堅硬的物體，我們應該用較小的力量來引導使用者；第三類的彈性係數較小，力感測器回授的力量也較小，為較

軟的物體，我們可以用較大的力量來引導使用者，加快操作速度；而第二類則介於兩者之間；由此，我們可得到待測物件的物理參數分別為  $k_1$ 、 $k_2$ 、和  $k_3$ ，三者的關係為  $k_1 < k_2 < k_3$ ；在這裡我們不對形變後不會恢復的物件討論。我們將量得的  $k_1$ 、 $k_2$ 、和  $k_3$  代入(2-4)式，可以得到操作點在作用力範圍中 X 方向的受力，同理可以得到 Y 方向和 Z 方向的受力  $\vec{F}_y$ 、 $\vec{F}_z$ ，所以指向目標點方向的虛擬力為

$$\vec{F} = \vec{F}_x + \vec{F}_y + \vec{F}_z \quad (2-7)$$

讓我們回顧在前一節中所提到的，為了讓操作點能夠先到達目標的上方，我們增加在平面(x 軸、y 軸)方向的力場，因此，兩者的合力即為我們在作用力範圍內所提供的虛擬力。綜合以上的觀念，整個力回饋策略的流程圖如圖 2-12 所示。

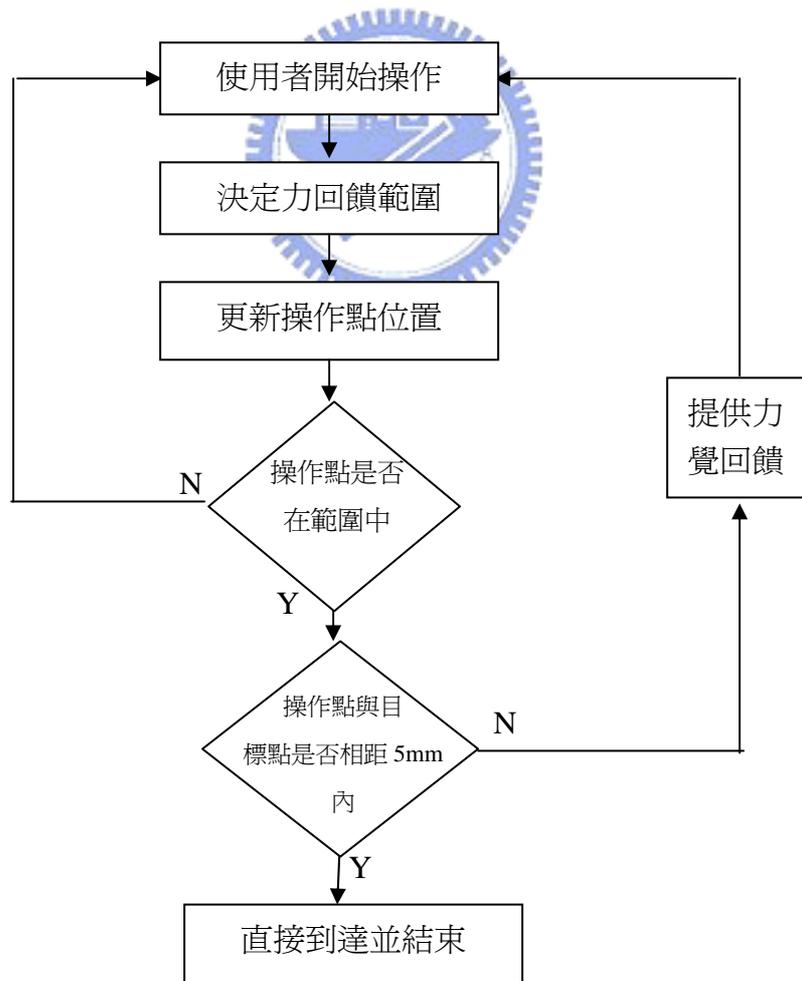


圖 2-12 力回饋策略流程圖

# 第三章

## 系統實現

在本章中，我們首先介紹本實驗室所開發出的虛擬實境網路機器人遠端操控系統( Networked VR-based Telerobotic System ) [12,32]，接著介紹本實驗所應用的軟硬體工具。圖 3-1 為一個典型的虛擬實境網路機器人遠端操控系統示意圖，這系統主要由三個部分所組成的，包括虛擬實境的輸入/輸出裝置 (VR I/O devices)，還有虛擬實境引擎( VR engine)，以及伺服端的機器人和感測器。在虛擬實境的輸入/輸出裝置 (VR I/O devices) 部分，像是立體眼鏡、立體環繞音響以及力回饋搖桿，這些提供了互動的人機介面裝置，透過這些裝置，操縱者可以輸入命令到電腦中再去控制遠端的機器人，同時操縱者也可以感受到知覺回饋的感覺；第二部分是虛擬實境引擎 (VR engine)，這部分是整個系統的的核心，它規劃虛擬環境的模型，以及繪出場景和管理物體在模擬迴圈中的行為，另外它也將從真實世界中感測器所量測的資料傳輸給使用者，以及發送命令給遠端的機器人，作為虛擬實境和真實世界兩者之間溝通的橋樑，因此實現虛擬實境引擎時最重視就是電腦效能，它的好壞影響到整個遙控機器人系統。第三部份伺服端的機器人和感測器，大致上包含了遠端機器人、驅動裝置 (Drive units) 及感測器，在這部分驅動裝置會先接收由近端所傳送過來的命令，接著控制機器人的行為，感測器再將所量測的資訊傳回近端給使用者，像是力、位置或力矩等資訊。

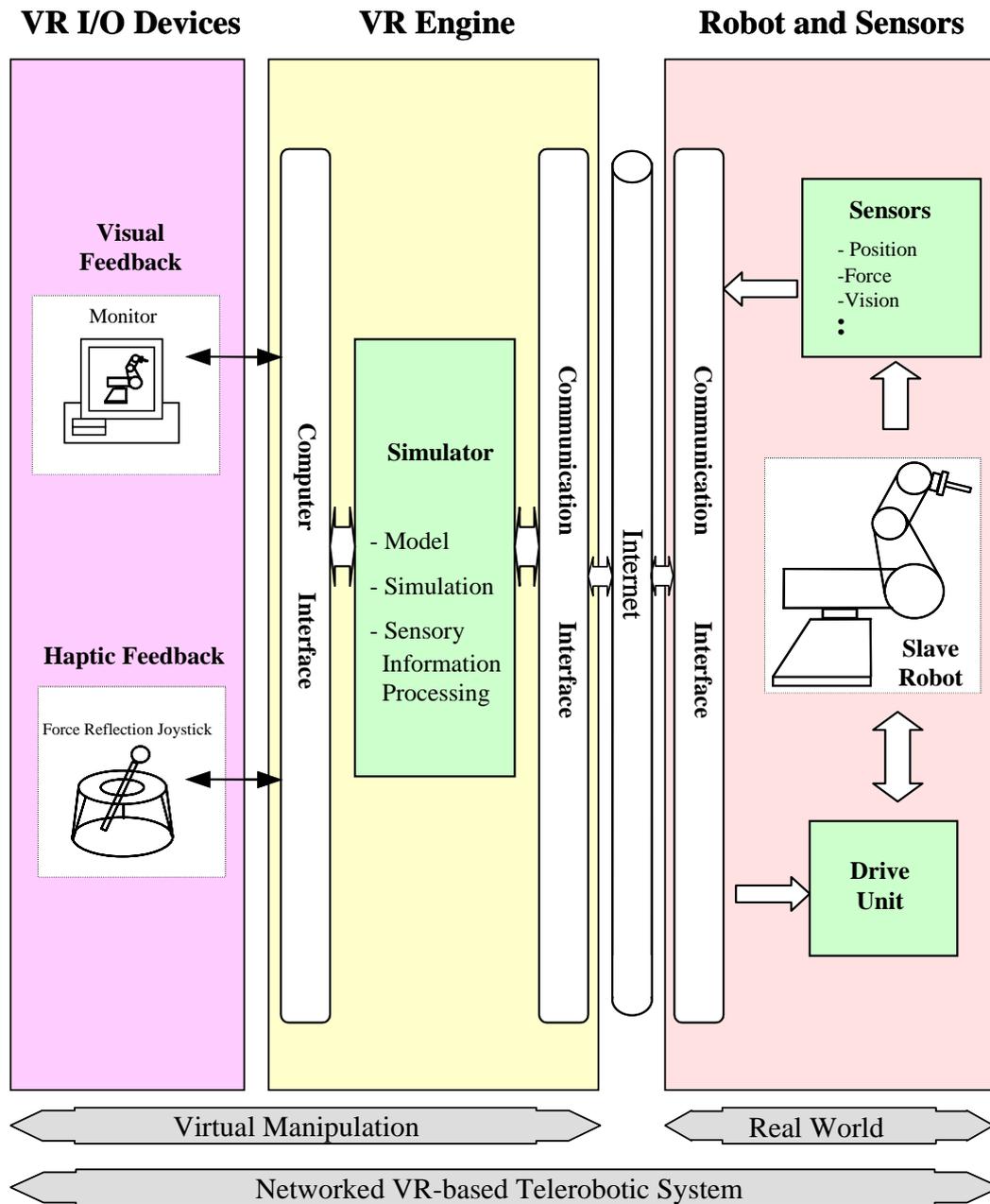


圖 3-1 典型的虛擬實境網路機器人遠端操控系統示意圖

基於圖 3-1 的架構，在我們的實驗室裡，已經發展出一遠端遙控機器人系統，如圖 3-2，此系統採用分散式的架構概念，使用了兩台電腦，一台放在主控端，負責提供視覺和溝通力回饋搖桿，另一台放在伺服端，除了傳送資訊和接收命令外，另外也負責傳送透過遠端 CCD 攝影機所獲取的影像資訊，藉由此資訊

計算出物體在影像中的位置，並找出物體和機器人之間的實際空間關係，有了物體的位置資訊，便可即時更新及校正虛擬場景，使其能自動與真實環境一致[7]；而感測器則可以量測出物體的物理參數，像是質量、黏滯係數及彈性係數等，虛擬實境就可以利用這些參數，將物體繪製出更精確的模型，並且可以提供更逼真的力覺給使用者。本實驗強調在遠端呈現中虛擬導引的部分，因此，遠端的感測器使用了機械手臂的控制器來偵測機械手臂各軸的角度，CCD 攝影機來定位目標物，以及力感測器 JR3 來測量物件的軟硬度。



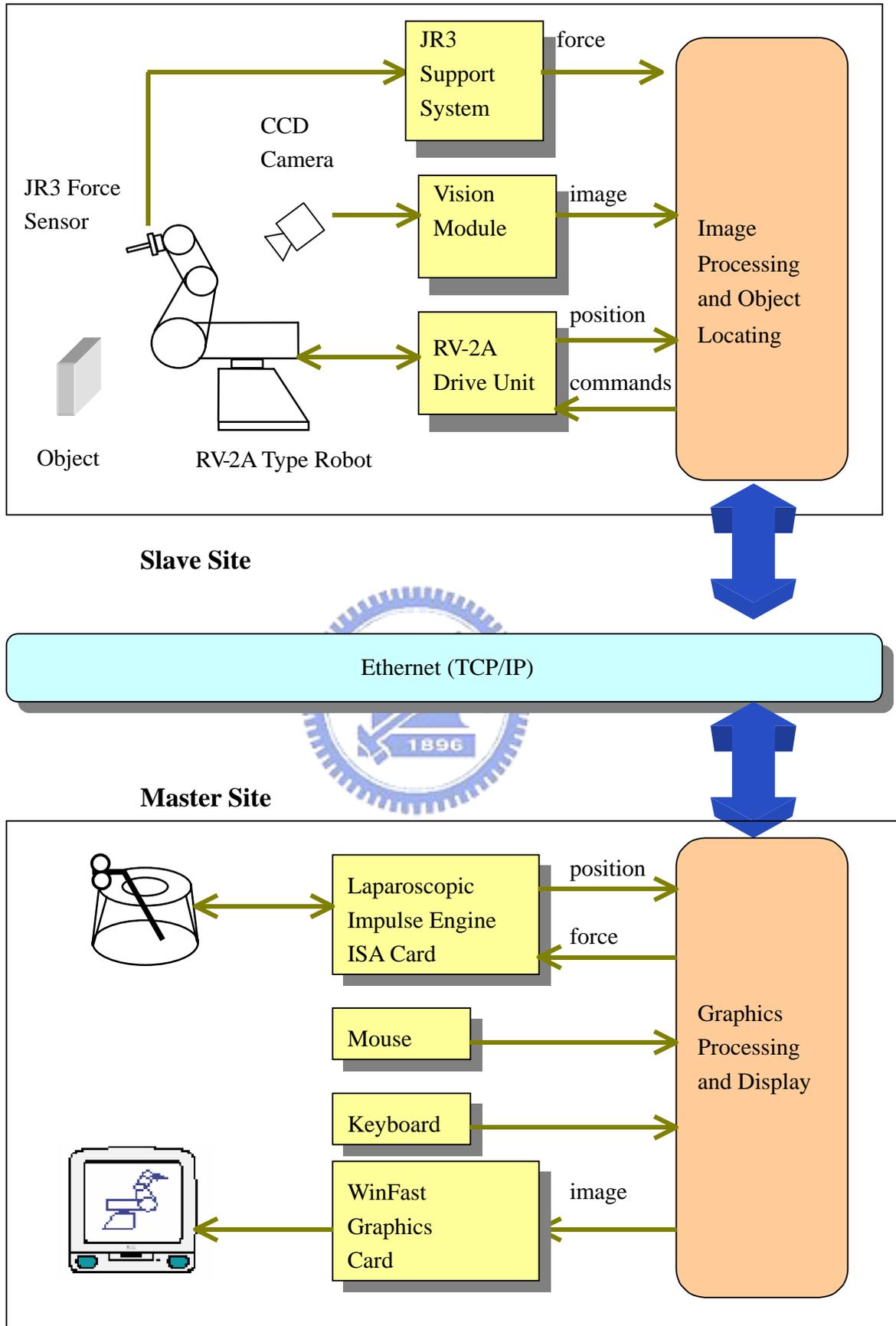


圖 3-2 遠端操作系統架構圖

## 3.1 軟體實現

本論文運用到的軟體工具主要為C語言，主要實現的部分包括搖桿的驅動、攝影機的驅動、控制機械手臂的網路溝通、虛擬實境、虛擬導引、以及目標物定位的智慧型界面，由於機械手臂的控制和虛擬實境的更新都必須即時，因此在實現時我們採用多執行緒的方式；本章中首先我們針對虛擬實境系統中可選擇採用的軟體技術進行整理與回顧，並對所選用的虛擬實境軟體作討論，接著介紹多執行緒部分。

### 3.1.1 虛擬實境建構



虛擬實境的特性是，必須是一個由電腦產生的三維立體空間，使用者可以和這個空間的物件進行互動，或是操作其中的部分物件，並可在空間中任意移動進而產生相當的融入感及參與感。藉由模擬得到的感受，使用者可以和虛擬實境中的虛擬物件作互動而有身歷其境的效果，然而人類感官刺激的呈現，有賴虛擬實境軟體的快速運算，而使用者與虛擬環境的各項互動，則需要倚靠各項特別設計的裝置或設備的配合。接下來我們將介紹 3D 繪圖與模型函式庫，並比較各種虛擬實境軟體技術。

在本論文的實驗中，需要使用到電腦繪圖[6]的工具以製作場景的影像，現今電腦繪圖的運算環境，如圖3-3所示，使用者透過 I/O 設備與視窗系統互動，常見的視窗系統如 Microsoft Windows系列的作業系統及 UNIX上的 X window 環境，應用程式及其模型則建構在圖學函式庫(Graphics library)之上，所謂圖學函式庫是一個常式(routine)的工具集，包含低階的程式碼，雖然工作與圖形的硬

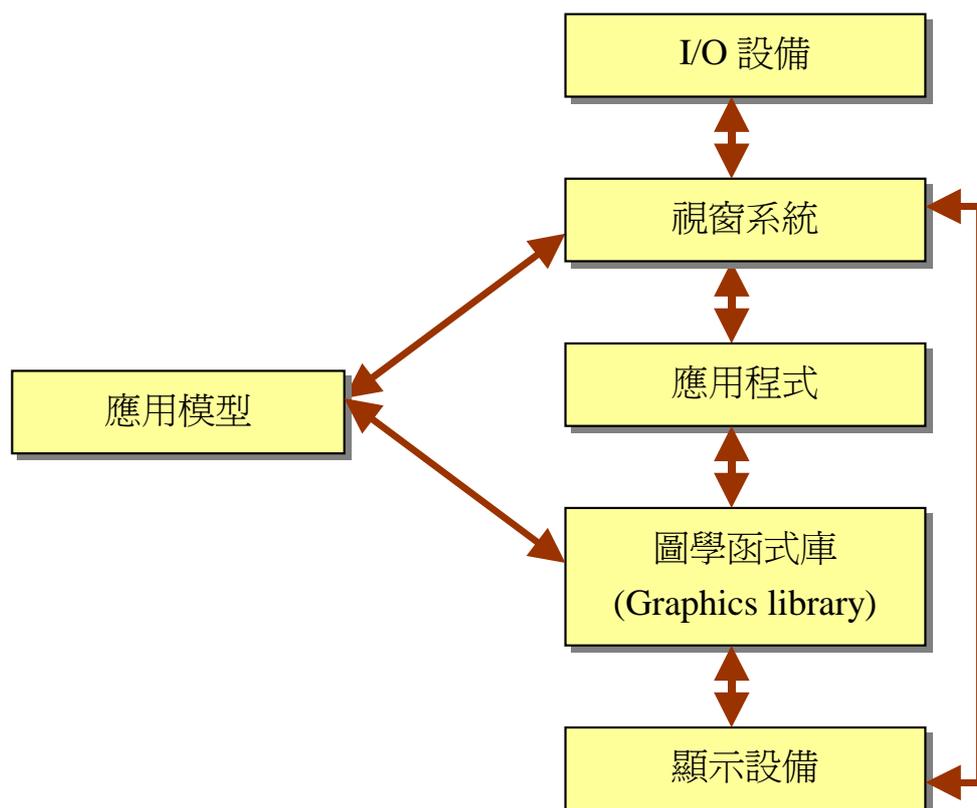


圖 3-3 電腦繪圖之運算環境



體設備很密切，但通常不會限定設備(Device-independent)，顯示設備包括顯示卡和其驅動程式以及顯示器等部分，常見的圖學函式庫有OpenGL、WTK等。以下就較知名的虛擬實境應用軟體做整理與比較 [10,11,22,35]：

### 1. WTK ( World Tool Kit )

WTK是一套開發時間較早的圖學函式庫，它所能支援的周邊軟體相當完善，亦可在多種不同的作業系統平台上運作。然而其本身並不提供視覺化的模型編修工具，必須由其他的模型建構軟體建立所需的物件，再利用WTK的程式去呼叫物件並建立虛擬場景；因此撰寫與開發WTK程式相當花費時間，為使用上較不便之處。

## 2. World Up

World Up與WTK為同一家公司所開發的虛擬實境應用軟體開發工具，其所能支援的周邊硬體數量亦相當眾多。與WTK不同之處在於其已具備簡單的模型編修功能，並提供了開放性的資料庫連接(Open DataBase Connectivity, ODBC)功能。World Up的使用者介面設計良好，即使是不熟悉程式設計者都可以輕易開發所需要的虛擬世界。然而World Up對電腦的硬體要求較高，尤其在圖形的處理能力上，除了中央處理器(CPU)和隨機記憶體(RAM)外，一般需要搭配較好的繪圖加速卡。

## 3. Division

Division原本只能在高階繪圖工作站上運作，因為個人電腦的快速發展，也開發了個人電腦的版本。與WTK一樣，Division本身不提供編修功能，需藉由其他軟體來建構虛擬場景所需的物件；但也提供了相當多的物理特性函式庫，設計者毋需特別撰寫即可使用。Division的個人電腦版本對於硬體要求相當高，一些工作站上的功能還是無法在個人電腦上使用。

## 4. VRT ( SuperScape )

VRT亦為一套開發較早的虛擬實境應用軟體，除了可以提供基本的物件編修功能外，亦可接受其他模型建構軟體所支援的檔案格式，擴充性頗佳；然而透過VRT所表現的虛擬實境場景畫面在顏色的表現上受到相當大的限制，為其主要的缺點所在。

## 5. OpenGL

OpenGL的正式定義是「繪圖硬體的軟體介面」，它是3D繪圖與模型函式庫，既迅速又可移植；OpenGL是一個文件完備的應用程式設計介面( Application Programming Interface, API )，提供許多包裝好的功能函數；除此之外，更具有穩定、可靠、可攜性高等特性，尤其是OpenGL的程式可攜性，不論在Windows或是UNIX上皆可使用，使得用OpenGL

所開發出來的程式在未來更具有發展性。

綜合以上的比較，我們決定選用穩定且可攜性高的OpenGL圖學函式庫作為我們的電腦繪圖工具；OpenGL已在1992年已成為工業標準，由獨立的OpenGL ARB( Architecture Review Board )管理其規範，其中的成員包括SGI( Silicon Graphics )、Digital、IBM、Intel、以及Microsoft等大廠，很多影像顯示卡和作業系統也都支援OpenGL。圖3-4為 OpenGL 成像流程，當應用程式發出OpenGL API 函數呼叫時，指令會放到指令緩衝區中。緩衝區最終會填滿指令、座標點資料、材質資料等等。當緩衝區清空(Flush)時，不管是經由程式指令或驅動程式本身的设计，指令與資料都會被傳到下一個階段。座標點資料會先被轉換並進行燈光運算，其中用以描述物體幾何位置的座標點會針對物體的位置與方向進行運算，同時也會進行光影計算，以得出每個點上的顏色該有多亮，完成這個程序後，就把資料提供給掃描顯像部份。掃描顯像器將依幾何位置、顏色與材質資料建立影像，然後影像會放到圖形緩衝區內。圖形緩衝區是圖形顯示裝置的記憶體如：繪圖卡、顯示卡，到了這個階段會把影像顯示到螢幕上。

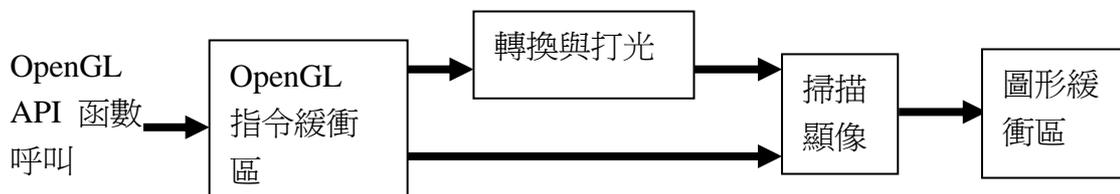


圖 3-4 OpenGL 成像流程

## 3.1.2 多執行緒技術

在人類的視覺感受中，爲了要讓人感覺畫面流暢，至少每秒需繪製20到30個畫面，也就是虛擬實境的更新頻率需要20-30Hz左右；在力覺呈現方面，其取樣頻率範圍約在300-1000Hz[13]；所以如果要同時在模擬迴圈中傳送並呈現出視覺及回饋力，讓它在相同的模擬控制迴圈中，會因爲無法提供足夠的頻寬，而可能會造成回饋的力不穩定[9]，讓操控者會因所回饋的力不連續而感覺不適，所以力覺上其更新頻率必須夠快，才可滿足人類對力覺的需求，因此利用多執行緒(Multithreading) 的技巧來解決這問題。

利用執行緒來設計程式，除了提昇效率外，還可以避免讓程式太過複雜，使用此技術，將可以在程式中進行兩個以上作業的平行處理，也就是使程式得以將其工作切開，獨立運作，不互相影響，如圖3.5所示，其中圖3.5(a)爲一般程式設計時的執行順序和時間的關係，圖3.5(b)則爲執行緒程式執行的順序和時間的關係；舉個日常生活的例來說，單緒程式就像大型量飯店中只有一個結帳出口，如果顧客採購東西只有一點點，那麼就可以快速結帳，但若採買的東西很多，則結帳時間就需很久，且其它想結帳的顧客也需等待，而多緒程式就像是有很多個結帳出口，就算一個出口停頓了很久，也不會影響到其它的出口路線。值得注意的是，CPU在同一個時間內只能處理其中某一個執行緒的資料，因此每一個執行緒的內容都是可以被中斷的，CPU將依照目前的執行狀況自動切換執行緒，以達成平行處理的目標。

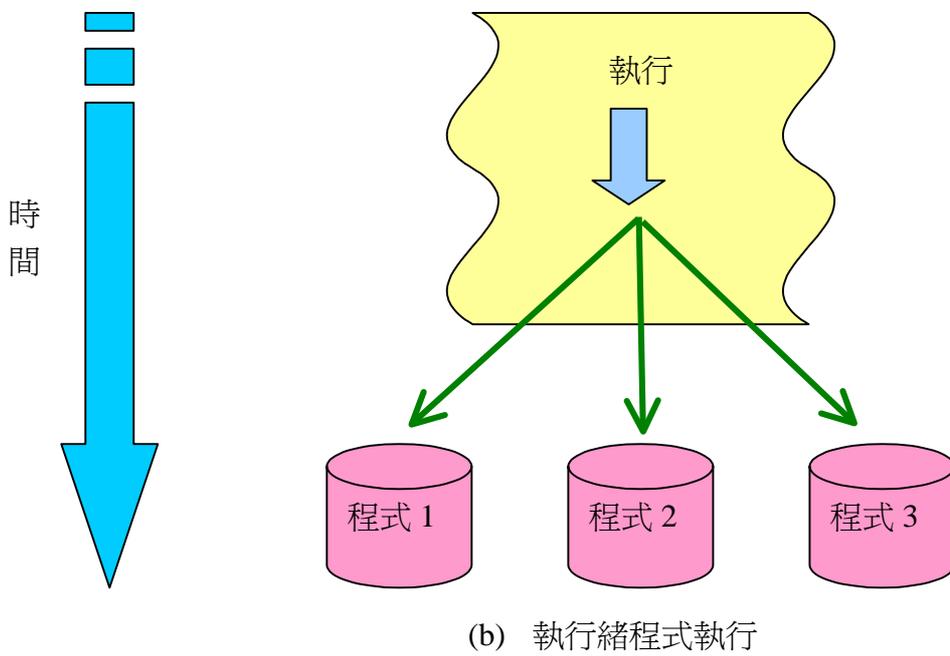
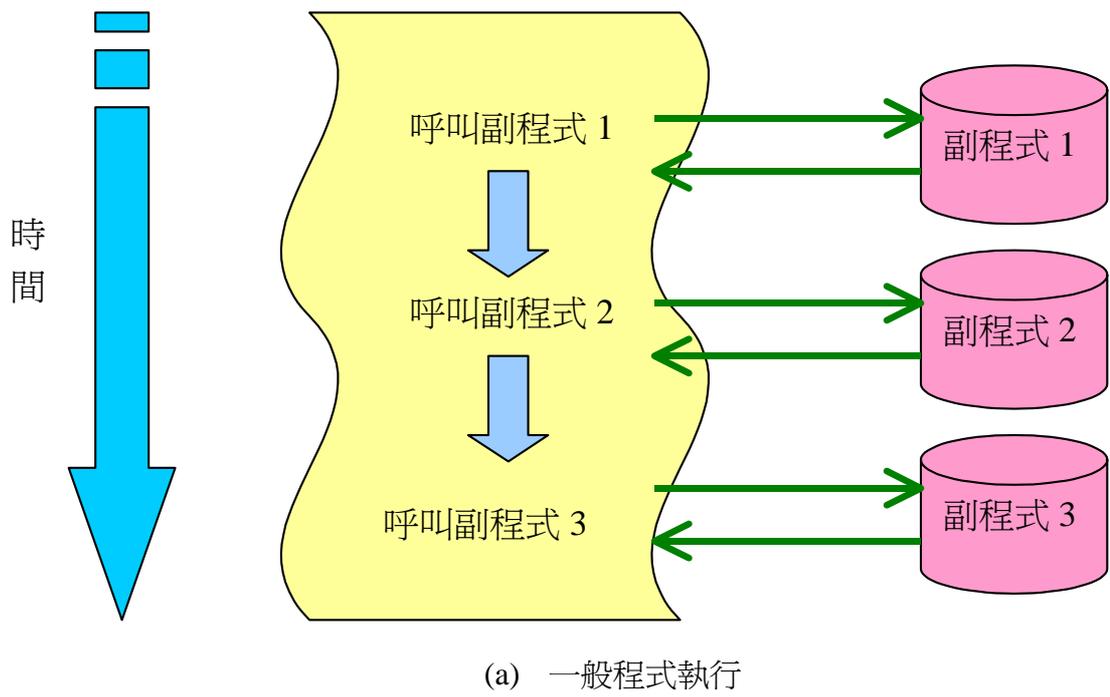


圖 3.5 執行順序和時間關係：(a)一般程式執行和(b)執行緒程式執行

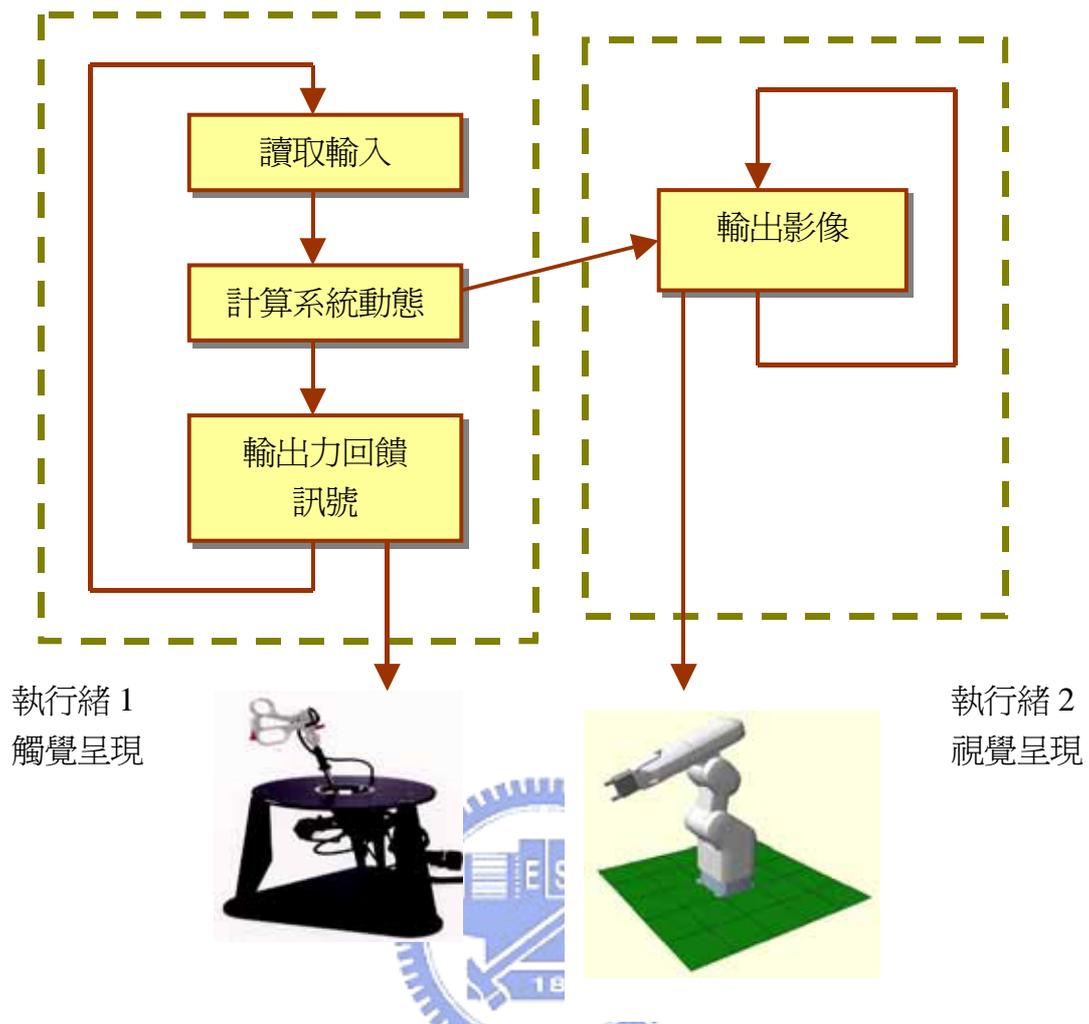


圖 3-6 機械手臂控制流程圖

在本篇論文中所採用的機械手臂控制程式流程架構，如圖3-6所示，操作者會先透過力回饋裝置下達控制命令，這些命令進而改變全區域變數的數值，接著處理器再執行這兩個執行緒，分別為處理視覺和力覺呈現的執行緒，經由處理器計算後可得場景資訊和力資訊，再經由人機介面裝置，將視覺和力覺的感受傳送給操作者。

## 3.2 硬體實現

在硬體方面，本實驗共使用電腦兩台(遠端、近端)，機械手臂一隻(含控制器)，力回饋手術搖桿一隻，力感測器一個，攝影機一具；近端電腦的配備為：Pentium(R) 4 CPU 2.00Hz，512MB的RAM；遠端電腦的配備為：Celeron(R) CPU 2.60Hz，512MB的RAM；機械手臂使用了Mitsubishi公司的RV-2A五軸機器臂，控制器為該公司的CR1-571產品；手述搖桿使用了Immersion公司的互動搖桿，Laprosopic Impulse Engine；而力感測器則是使用了JR3公司的UFS-3012A25。

### Mitsubishi RV-2A 五軸機械手臂

本實驗室所使用的機械手臂為MITSUBISHI的RV-2A五軸機械手臂，所使用的控制器為該公司的CR1-571，圖3-7為機械手臂RV-2A的外觀，圖3-8為控制器CR1-571的外觀，而表3-1及表3-2則分別為機械手臂RV-2A以及控制器CR1-571的基本規格。



圖 3-7 Mitsubishi RV-2A 五軸機械手臂外觀



圖 3-8 CR1-571 控制器外觀

Model		Units	6-axis type		5-axis type	
			RV-2A	RV-2AM	RV-3AJ	RV-3AJM
Degrees of freedom			6		5	
Driving method			AC servomotor (J1~J3 and J5 axis brake attached)			
Position sensing method			Absolute encoder			
Maximum load capacity (rating)		kg	2		3	
Maximum reach radius		mm	621		630	
Working area	J1	Deg.	320 (-160~+160)			
	J2		180 (-45~+135)			
	J3		120 (+50~+170)	135 (0~+135)		
	J4		320 (-160~+160)	—		
	J5		240 (-120~+120)			
	J6		400 (-200~+200)			
Maximum speed	J1	Deg./s	150			
	J2		150			
	J3		180			
	J4		240	—		
	J5		180			
	J6		330			
Repeat position accuracy		mm	±0.04			
Ambient temperature		°C	0~40			
Weight		kg	Approx. 37	Approx. 38	Approx. 33	Approx. 34
Tool wiring *1			6 wires for hand-check work (4-point inputs and 2 power supply lines, the hand unit); 4-point outputs for air-hand (the shoulder unit); 1-point output for motor-driven hand (the hand unit); 4 spare wires (0.3 mm <sup>2</sup> in size, arranged from the base through the end of fore-arm).			
Tool air-tubing			Primary: ø6×2 ports Secondary: ø4×4 ports	Primary: ø6×2 ports Secondary: ø4×6 ports	Primary: ø6×2 ports Secondary: ø4×4 ports	Primary: ø6×2 ports Secondary: ø4×6 ports
Protective structure			IP30	IP54	IP30	IP54

表 3-1 Mitsubishi RV-2A 五軸機械手臂基本規格

Model		Units	CR1-571
Path control method			PTP control and CP control
Number of controlled axis		Axis	Concurrent control of up to 6 axes
CPU			64bit RISC/DSP
Main functions			Indirect interpolation, direct interpolation, 3-dimensional radii interpolation, palletizing, condition branching, subroutines, multi-tasking, optimum adjustable speed control, optimum override control, optimum route connection, etc.
Programming language			MELFA-BASIC IV or MoveMaster language (MoveMaster Command)
Position teaching method			Direct and remote teaching, and MDI method
Memory capacity	Number of teaching points	Point/prg	2,500
	Number of steps	Step/prg	5,000
	Number of programs	Program	88
External input/output	General-purpose input/output	Point	16/16 (max. when using options: 240/240)
	Exclusive	Point	Allocated by general output (1 "STOP" point is fixed)
	Hand opening/closing	Point	4/0 (when using options: 4/4)
	Door-switch input	Point	1
Interface	RS232C	Port	1 (for the connection of a PC, vision sensor, etc.)
	RS422	Port	1 (for exclusive to the connection of teaching box)
	Hand-exclusive slot	Slot	1 (electric hand and pneumatic hand interface only)
	Expansion slot *2	Slot	0 (when option is used: 3 [for expansion options])
	Robot input/output	Channel	1 (for connecting parallel I/O unit)
Ambient temperature		°C	0~40
Ambient humidity		%RH	45~85
Power supply	Input voltage limit	V	180~242VAC, single phase
	Power capacity *3	kVA	0.7
Grounding		Ω	100 or less (D-type grounding)
Structure			Self-supported floor type, open structure
Outside dimension *4		mm	212 (W)×290 (D)×151 (H)
Weight *4		kg	Approx. 8
Protective structure			IP20 (IP54: when using CR1 protective box)

表 3-2 CR1-571 控制器基本規格

此機械手臂共有三種控制方式，第一種是由連接於控制器的Teach Box直接控制，第二種是將硬體描述語言寫在控制器中，直接執行其中的命令，第三種則是在控制器中下達接受網路控制的指令，讓機械手臂接受網路上某台電腦的控制；為了達到遠端操作的目標，我們使用了第三種的控制模式。控制器CR1-571接受兩種硬體驅動的語言，分別為MELFA-BASICIV，以及MOVEMASTER，這兩種語言都必須直接寫在控制器中；前者主要適用於近端電腦的控制，可透過RS-232來溝通，同時在控制器中提供了大量的函式庫，可在控制器中撰寫程式完

成較複雜的工作；但若是透過網路即時控制RV-2A時，MOVEMASTER則提供了較為便利的設計方式，讓使用者在近端電腦撰寫遠端控制程式時，可以直接對機械手臂末端的夾爪位置下達命令，因此在實驗中我們選擇了MOVEMASTER作為手臂的硬體驅動語言。在MOVEMASTER中，我們使用了MXT、GC、GO、以及ED四個指令；其中，MXT為連接遠端伺服器並接受其命令的指令，而其後所輸入的兩個參數分別為預設的連線伺服器的網路位置，在控制器CR1-571中可預存三組連線的網路IP位置，分別為MXTCOM1、MXTCOM2、以及MXTCOM3，以及命令的格式，RV-2A可以接受三種命令格式，分別為XYZ coordinate data，Joint coordinate data，以及Motor pulse coordinate data。GC是夾爪關閉的指令，而GO是夾爪張開的指令，ED則是代表程式的終止。

## Laprosopic Impulse Engine



在實現上述的遠端操控系統時，近端所使用到的設備包含了一台個人電腦和力回饋搖桿，個人電腦主要是呈現虛擬實境場景，並且配合遠端傳回的資料以計算虛擬力回饋的方向和大小，以進行資料的接收和傳送命令給力回饋搖桿，我們採用 Immersion公司的Laprosopic impulse engine [37]，如圖3-9所示，當作接收位置命令和產生力回饋給使用者，這是五軸的搖桿，我們操作握柄可以做X、Y和Z方向的移動，在握柄上方有旋轉環，可以做旋轉的方向的移動，另外在搖桿的頂端，其外觀看起來像把剪刀，可以控制開和關兩個自由度，表3.2為此搖桿規格。



圖 3-9 Laparoscopic impulse engine



Item		Specification
Degree of Freedom	Motion and Tracking	5
	Force Feedback	3
Workspace Size		$10 \times 23 \times 23 \text{ cm}^3$
Position Resolution		0.0009 in.(1100dpi)
Max Force Output		2 lbs. (8.9N)
Backdrive Friction		$\leq 0.5 \text{ oz (0.14N)}$
Bandwidth	Linear Axis	650 Hz
	Rotary Axis	120Hz

表 3-3 Laparoscopic impulse engine 規格表

## JR3 力感測器

爲了獲得目標物件的軟硬度，我們使用了JR3的力感測器，事先測量物件的物理參數，用以做爲搖桿上虛擬力量提供的依據；JR3爲六軸力感測器，除了測量X、Y、Z方向的力量大小外，還有對三個軸的旋轉力量的偵測，我們在實驗中僅使用了Z方向(垂直方向)力量的量測，其外觀如下圖3-10所示，表3-4爲其基本規格：



圖 3-10 力感測器 JR3 外觀

Nominal Diameter: 75 mm			
Height: 31.8 mm			
Weight: 310 grs			
	Electrical Load Settings	Sensor Load Ratings	Calibration Load used
Fx	11.0 kgs	11.3 kgs	11.3 kgs
Fy	11.0 kgs	11.3 kgs	11.3 kgs
Fz	22.0 kgs	22.7 kgs	22.7 kgs
Mx	85.0 cm- kgs	86.4 cm- kgs	69.1 cm- kgs
My	85.0 cm- kgs	86.4 cm- kgs	69.1 cm- kgs
Mz	85.0 cm- kgs	86.4 cm- kgs	69.1 cm- kgs

表 3-4 力感測器 JR3 基本規格

# 第四章

## 實驗

我們進行一系列實驗來展現視覺和力覺的整合成效，實驗中我們讓使用者將不同物理性質的物件擺放到希望擺放的位置上；首先，我們先對欲操作的物件作碰撞測試，以得到其物理參數，接下來，使用者透過搖桿遠端操作機械手臂抓住目標物件，依照前面所得到物件的物理參數，力回饋搖桿會提供虛擬的力量作為虛擬導引，而此虛擬導引的範圍和大小，會隨著使用者的操作而改變；抓取完成後，使用者再操作機械手臂，將此物件移動到指定的位置。以下我們首先介紹整個實驗的流程，接下來對虛擬場景的建構、虛擬導引的實現、以及機械手臂的運動進行說明。



### 4.1 實驗流程

實驗分為抓取和放置兩個部分來進行，兩者流程上的差異，在於放置時判斷搖桿是否有向下移動，若有，則開始提供力覺回饋，實驗流程圖如圖 4-1 所示。在抓取部分，為了節省 3-D 重建的時間以及縮減網路傳輸的資料量，首先我們在近端的電腦中建立遠端的虛擬場景模型，並事先對欲抓取的物件作彈性係數的量測，用以選擇虛擬力回饋所使用的物理參數，接著遠端將傳回一張照片讓使用者選擇欲抓取的物件，透過一個智慧型的界面，使用者可以藉由滑鼠左鍵來點選物

件要操作的物件，滑鼠右鍵點選欲放置的地點，避免使用鍵盤輸入上的不方便；決定好目標和地點後，近端的電腦會對此物件與目標點進行定位，在虛擬場景中建立此目標物並加以標記，接下來在操作點現在所在的位置以及所點選的目標點之間依照作用力範圍演算法建立力場；此時使用者透過搖桿來操控遠端的機械手臂，而遠端的電腦則擷取機械手臂末端操作點的位置並傳回到近端，以更新近端虛擬場景中機械手臂夾爪的位置；待操作點進入目標點 5mm 的範圍內，機械手臂將直接到達目標點上，合上夾爪抓住物件，近端電腦同時紀錄下此時機械手臂末端夾爪的高度值(Z 軸座標)，到此完成抓取的動作。而在放置的部分，完成抓取動作後，使用者繼續桿操作機械手臂，將已抓起的物件擺放到虛擬實境中已被標記的點上；在操作的初期我們將不提供力覺回饋，直到近端電腦讀取到使用者已下達往下移動的命令，即是使用者做出下壓搖桿的動作，則開始啟動前述的力回饋演算法，對此時的位置以及所點選的目標點進行作力回饋的規劃，而高度的目標值將是完成抓取時所儲存的 Z 軸座標。



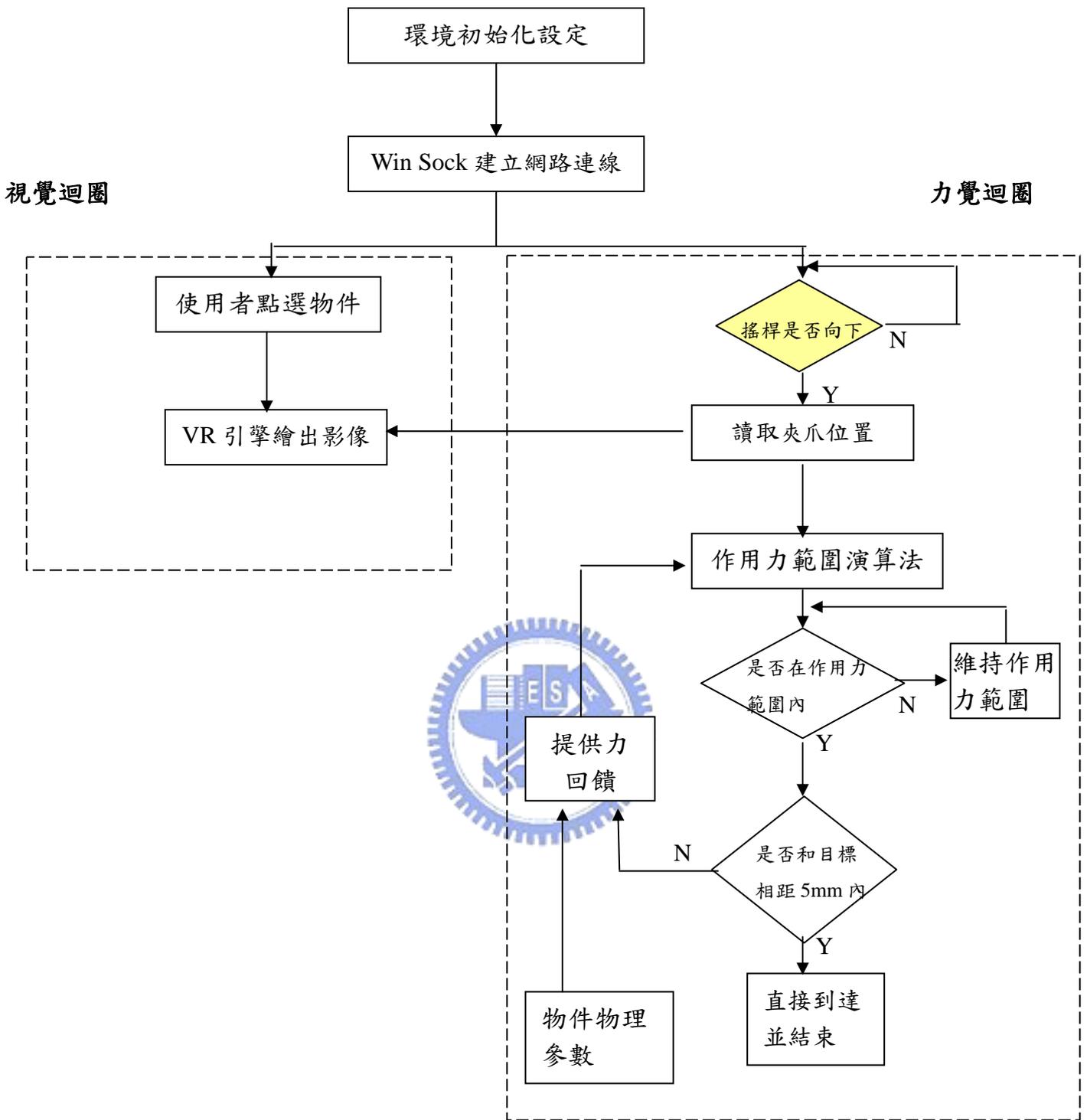


圖 4-1 實驗流程圖

## 4.2 虛擬場景實現

首先，我們介紹使用者點選物件的智慧型介面，如圖 4-2 所示，圖 4-2(a)是實驗的工作平台，這是由網路攝影機所拍攝的連續影像，擺放物件後如圖 4-2(b)所示，在開始計數後每秒鐘將更新一次照片，如圖 4-2(c)，使用者可在此視窗中點選物件；而選擇物件後，此介面將自動對物件作定位，並將其中心點位置透過網路傳回近端如圖 4-2(d)所示。

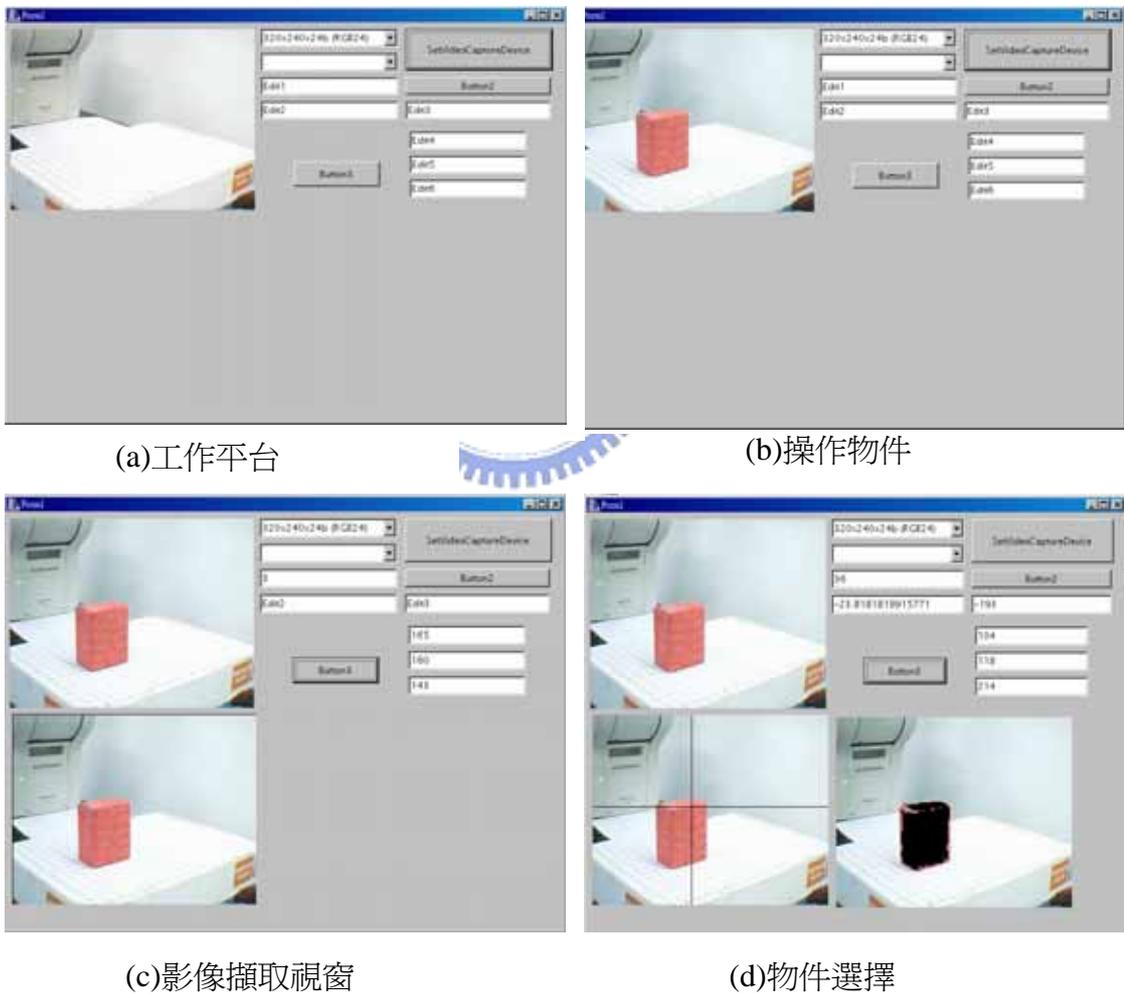


圖 4-2 物件選擇智慧型介面：(a)工作平台、(b)物件、(c) 影像擷取視窗、和(d)物件定位

近端電腦將依照所點選物件的位置資訊，在虛擬實境中建立物件，實驗過程中，遠端不斷傳回夾爪現在的位置資訊以更新近端虛擬實境場景，使用者透過此虛擬場景監看遠端的操作狀況，如圖 4-3、4-4 所示，其中圖 4-3 為操作過程中所擷取的影像，圖 4-4 為所對應的虛擬實境場景，我們可以看到力回饋範圍隨著使用者操作而改變的情形。另外，對於不同的物件擺放在不同的位置，近端電腦將依照該物件約略的顏色以及其位置來建立不同的虛擬場景，如圖 4-5 所示，其中 (a)和(b)分別為保麗龍的真實照片和虛擬場景，(c)和(d)則為布偶的真實照片和建立的虛擬場景。

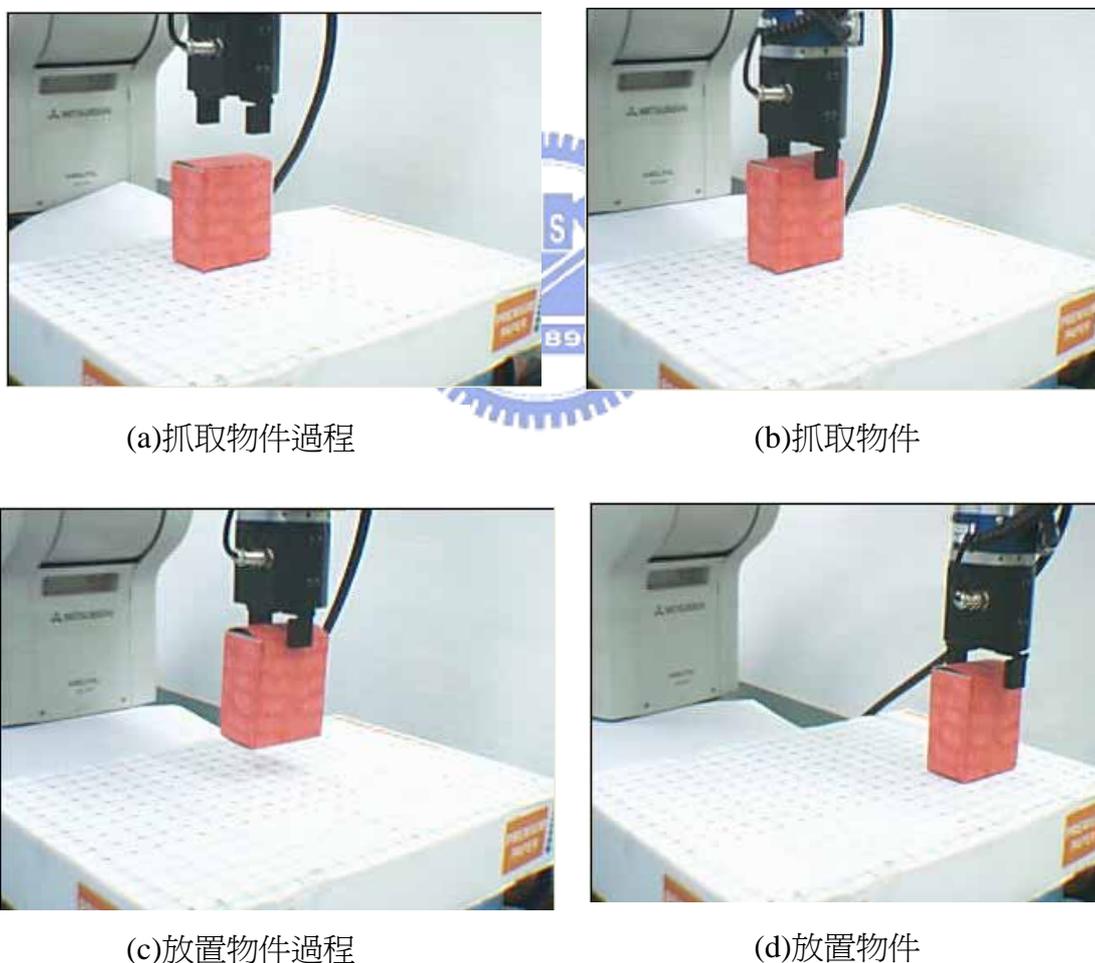
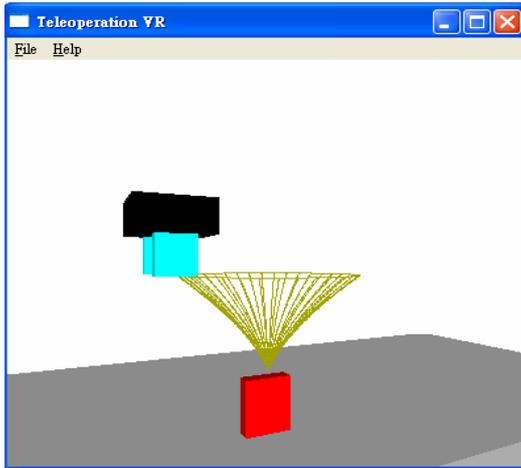
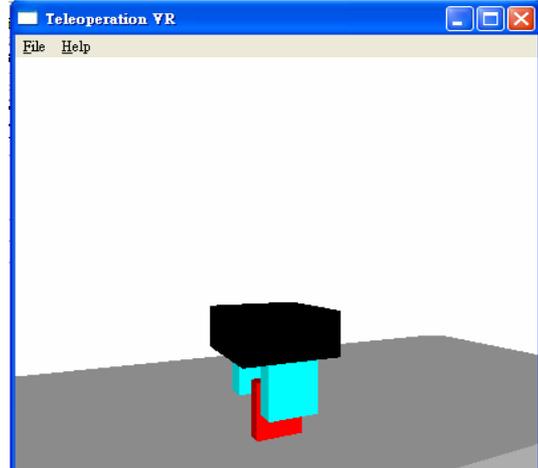


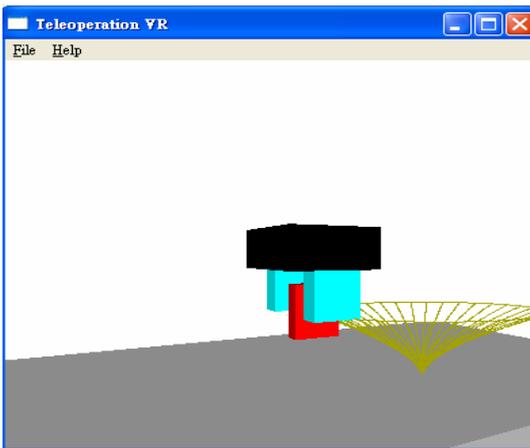
圖 4-3 機械手臂操作過程之影像：(a)抓取過程、(b)抓取、(c)放置過程、和 (d)放置



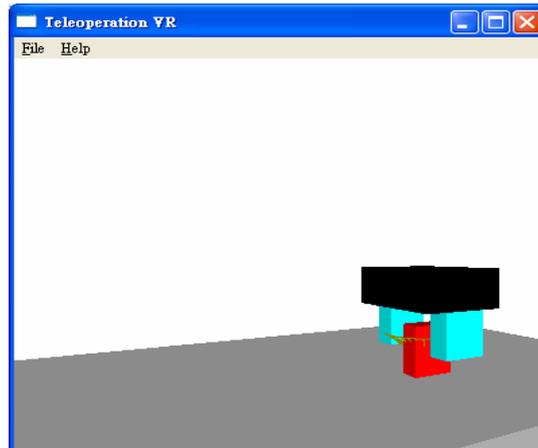
(a) 抓取物件過程



(b) 抓取物件



(c) 放置物件過程

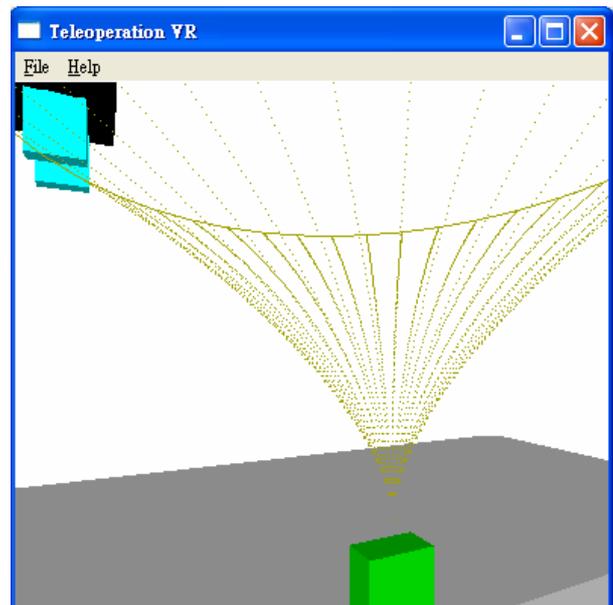


(d) 放置物件

圖 4-4 機械手臂操作過程之虛擬場景：  
(a) 抓取過程、(b) 抓取、(c) 放置過程、和 (d) 放置物件



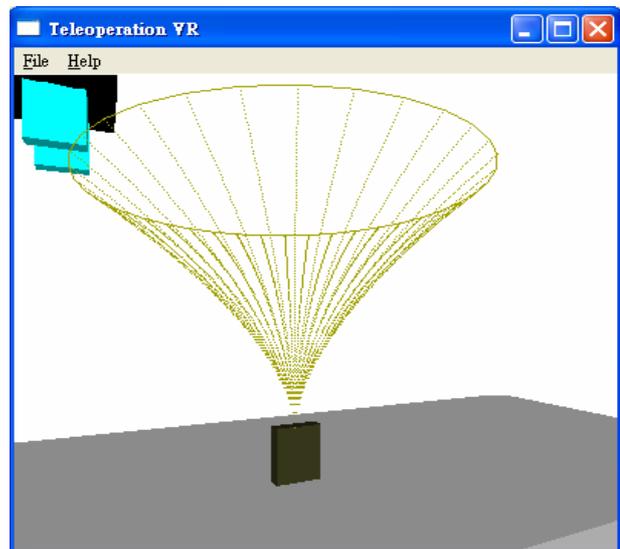
(a)保麗龍真實照片



(b)保麗龍虛擬場景



(c)布偶真實照片



(d)布偶虛擬場景

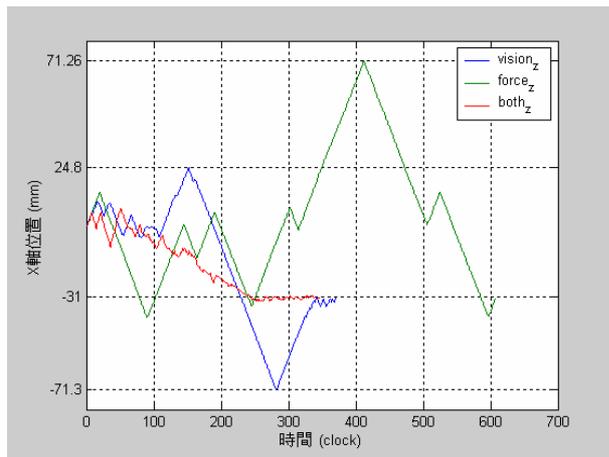
圖 4-5 不同物件的真實照片與虛擬場景比較：

(a)保麗龍真實照片、(b)保麗龍虛擬場景、(c)布偶真實照片、和(d)布偶虛擬場景

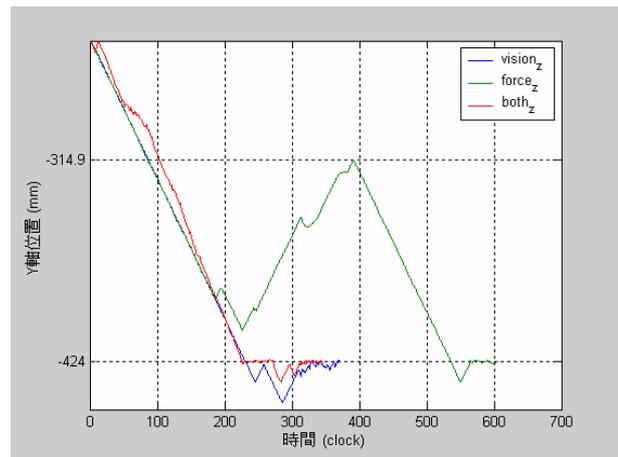
### 4.3 實驗結果與討論

首先我們分別對抓取與放置定義成功率；對抓取來說，若是使用者操作機械手臂夾爪順利抓住物件則視為成功，反之，若是將物件撞倒或是偏離位置沒有抓到，則視為失敗；對放置來說，我們比較目標位置和物件所放置的位置之間的誤差，越小表示越成功。我們針對單獨視覺回饋、單獨力覺回饋、以及兩者結合進行時間與誤差的比較，其中，單獨視覺回饋我們只提供虛擬實境的場景給使用者，單獨力覺回饋只在搖桿上提供虛擬力。

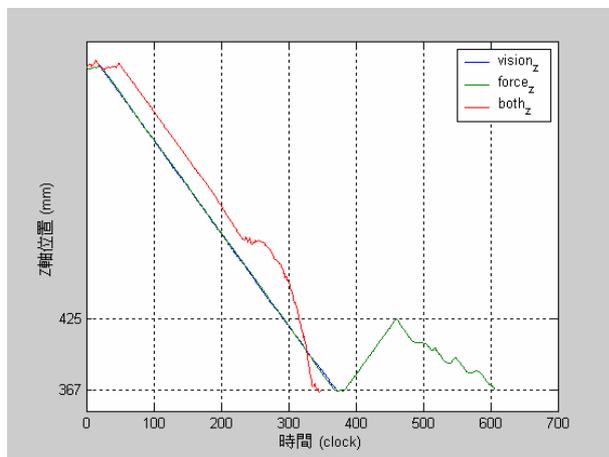
在抓取物件的部份，使用者點選工作平台上的紅色物件，經由影像定位得出其中心點的座標為 $(-32.0, -424.0, 310.0)$ ，接下來分別透過三種回饋方式，讓使用者操作機械手臂來抓取物件，操作點的軌跡如圖 4-6(a)~(c)；其中的藍色曲線代表單獨視覺回饋時，操作點的軌跡，綠色曲線代表單獨力回饋時操作點的軌跡，而紅線則是視覺和力覺同時提供給使用者時，操作點的軌跡；圖 4-6(a)為 X 方向軌跡，(b)為 Y 方向軌跡，(c)為 Z 方向軌跡。由 4-6 圖我們可以看出，單獨視覺回授容易因為使用者的誤判而造成操作點大幅度的晃動，而單獨力覺回授則因為使用者無法完全了解遠端的操作狀況，容易對搖桿所產生的回授力感到困惑，造成軌跡更加振盪；而兩者結合時，在操作軌跡上明顯較為平順，不但讓操作抓取時更容易成功，也節省了操作的時間，而三者操作點軌跡的 3-D 圖形如圖 4-6(d) 所示。我們可以從圖 4-7(a)中看出三種回授方式成功率的比較，圖 4-7(b)則顯示了個別的操作時間，樣本空間是由三位使用者分別使用三種操作方式各操作三次，因此每種操作方式共有九筆資料，取平均值得到圖 4-7，其中藍色部分為平均時間，紫色部分為標準差。



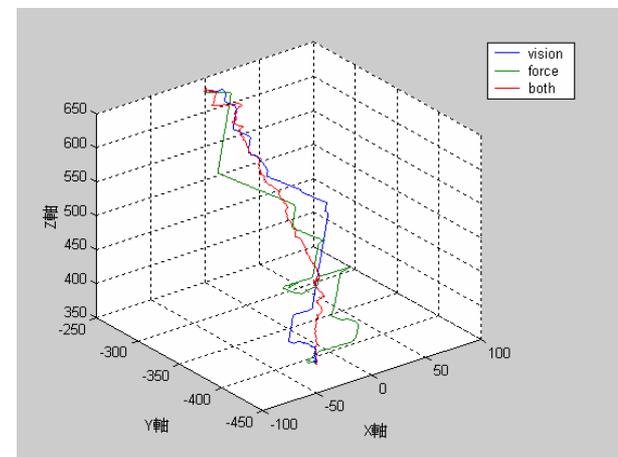
(a) X 軸軌跡



(b) Y 軸軌跡

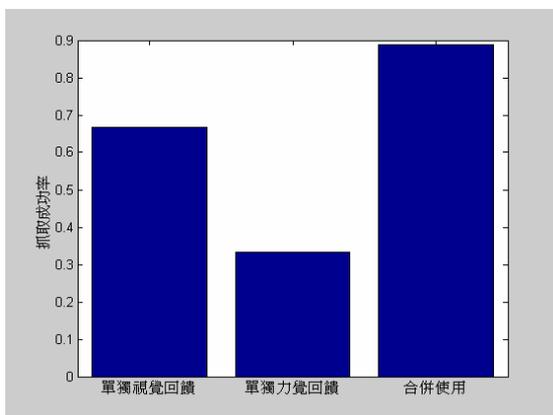


(c) Z 軸軌跡

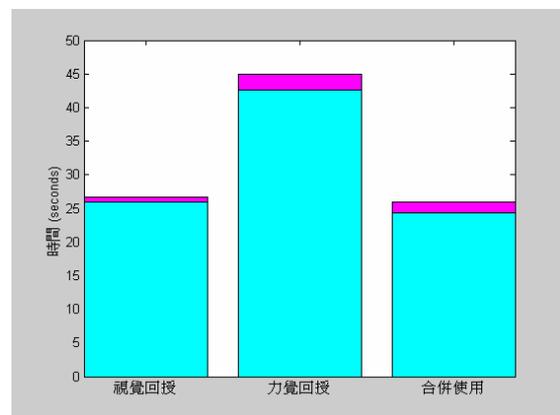


(d) 3-D 軌跡

圖 4-6 抓取過程中，三種力回饋狀態下的操作點軌跡圖 (a) X 方向軌跡、(b)Y 方向軌跡、(c)Z 方向軌跡、和(d)3-D 軌跡



(a)成功率

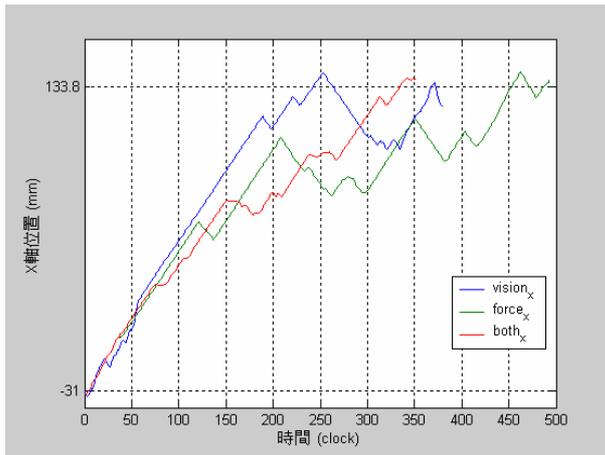


(b)操作時間

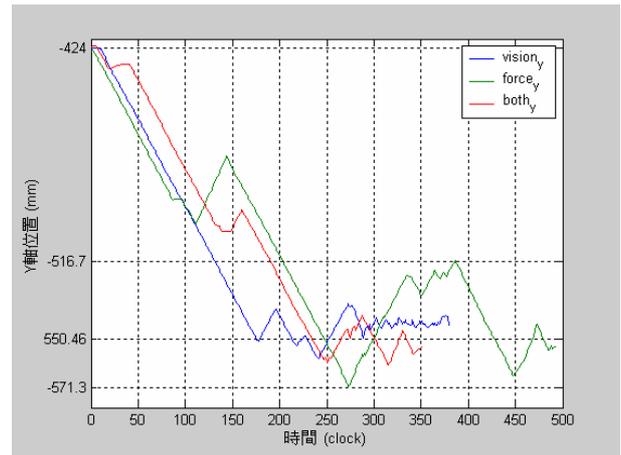
圖 4-7 三種回授方式成效比較：(a)成功率和(b)操作時間

在放置物件的部分，使用者操作已抓住的物件擺放到目標位置上，在這裡我們定義目標點的平面座標為(133.8,-550.46,310.0)；接下來透過三種回授方式來讓使用者操作，操作點的軌跡如圖 4-8 所示，其中其中的藍色曲線代表單獨視覺回饋時，操作點的軌跡，綠色曲線代表單獨力回饋時操作點的軌跡，而紅線則是視覺和力覺同時提供給使用者時操作點的軌跡；圖 4-8(a)為 X 方向軌跡，(b)為 Y 方向軌跡，(c)為 Z 方向軌跡，(d)為 3-D 的軌跡。單獨視覺回授時，使用者不容易從固定的視角觀察目標點的位置而造成誤判，再加上使用者在操作搖桿時缺乏真實感，因此容易造成操作點的晃動，在放置時也會有較大的誤差；而單獨力覺回授則因為使用者無法完全了解遠端的操作狀況，容易對搖桿所產生的回授力感到困惑，造成軌跡大幅度的振盪，因此延長了操作的時間；本論文所發展的遠端操作系統在操作軌跡上較為平順，不但讓使用者的操作更為輕鬆，也節省操作的時間。圖 4-9(a)為三種回授方式誤差值的比較，圖 4-9(b)則顯示了個別的操作時間，這裡的誤差是計算機械手臂夾爪最後的位置以及期望到達位置間的距離。樣本空間是由三位使用者分別使用三種操作方式各操作三次，因此每種操作方式共有九筆資料，取平均值得圖 4-9，其中，藍色部分為平均值，紫色部分為標準差。

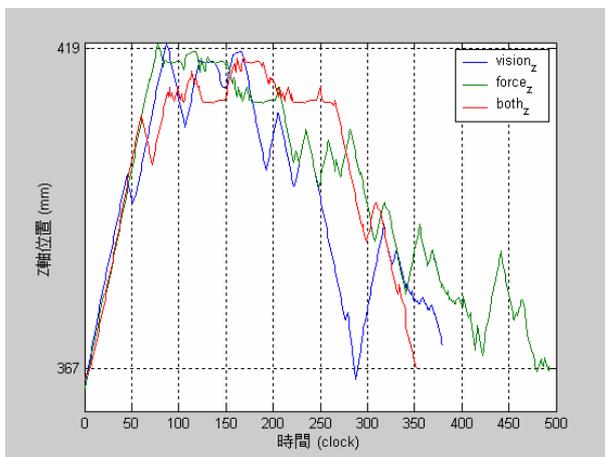
最後，我們對不同軟硬度的物件做比較，實驗所使用的物件為：紙盒、保麗龍塊、以及布偶，其中紙盒的彈性係數最大，保麗龍塊次之，布偶最小；將物件的彈性係數分類後，代入(2-9)式得到三種不同的回饋力，將之回饋給使用者輔助操作。圖 4-10 為使用者操作機械手臂抓取的軌跡圖，由於三者的大小不同，因此經由影像定位後的目標位置也都不同，其中，經過影像定位後紙盒的目標點位置為(-31,-424,365)，保麗龍的目標點位置為(-30,-360,362)，而布偶的位置為(-40,-400,350)。三者所耗費的時間如圖 4-11 所示。



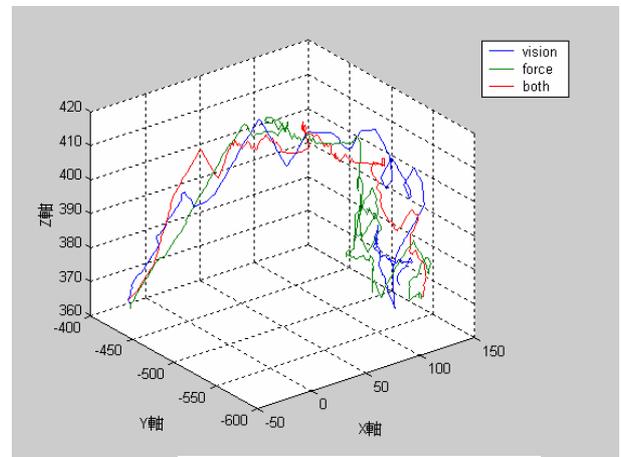
(a) X 軸軌跡



(b) Y 軸軌跡

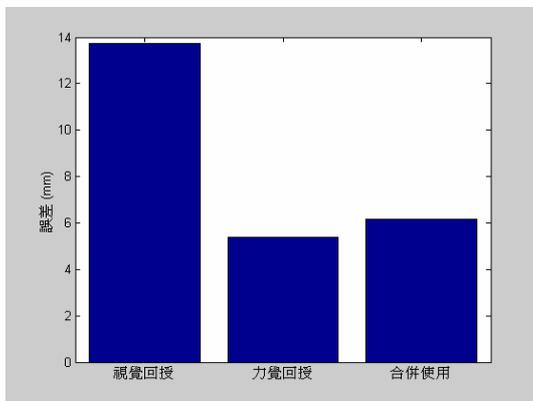


(c) Z 軸軌跡

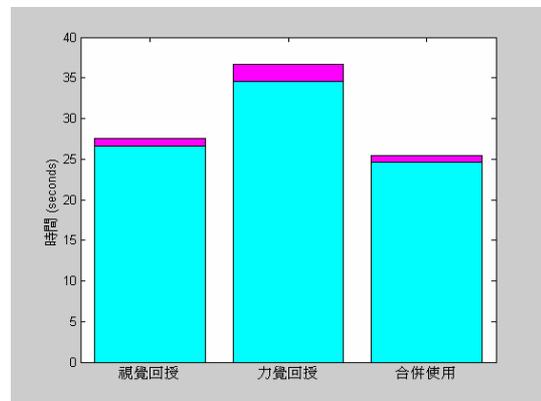


(d) 3-D 軌跡

圖 4-8 放置過程中，三種力回饋狀態下的操作點軌跡圖 (a) X 方向軌跡、(b)Y 方向軌跡、(c)Z 方向軌跡、和(d)3-D 軌跡

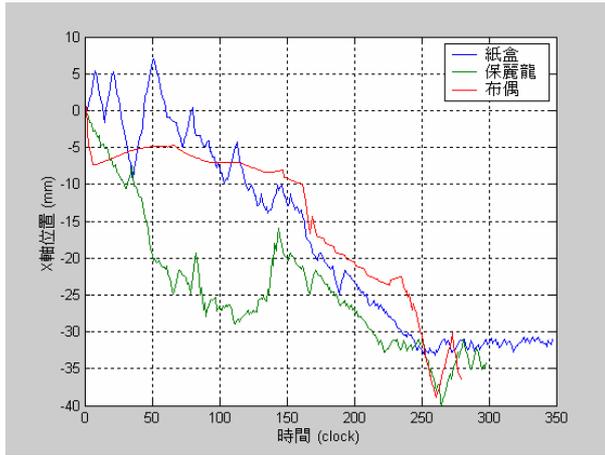


(a) 誤差

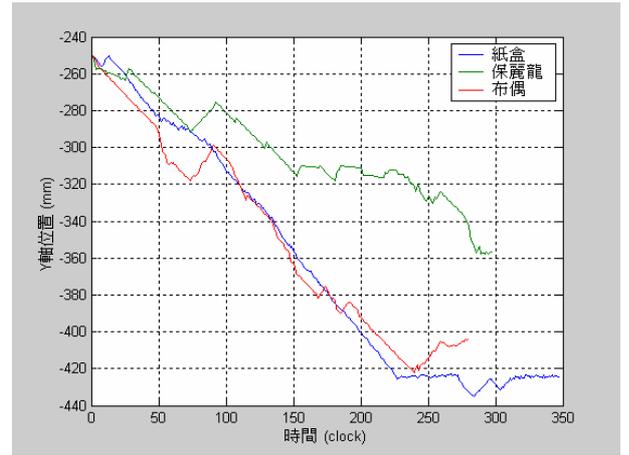


(b) 操作時間

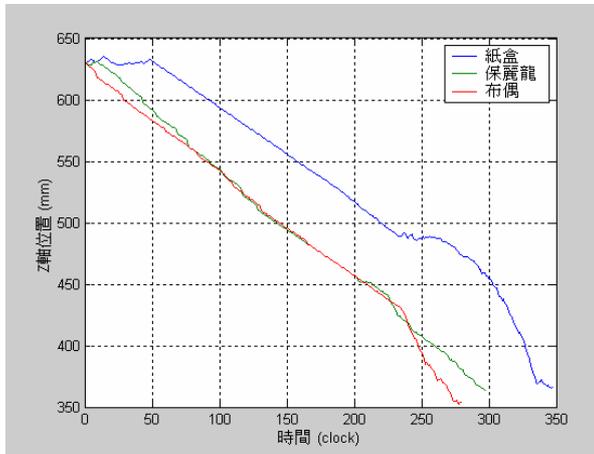
圖 4-9 三種回授方式成效比較：(a)誤差值和(b)操作時間



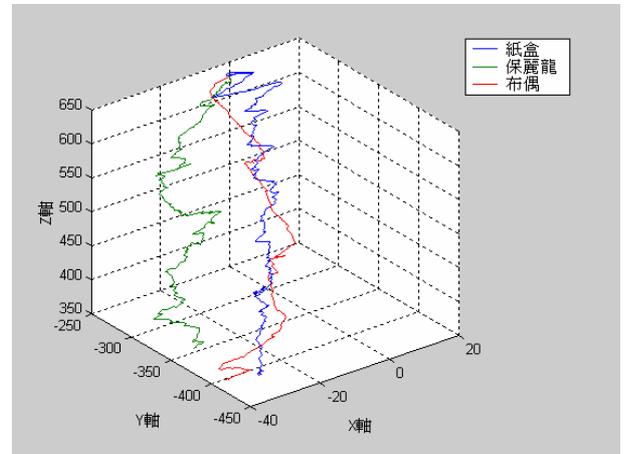
(a) X 軸軌跡



(b) Y 軸軌跡



(c) Z 軸軌跡



(d) 3-D 軌跡

圖 4-10 抓取三種物件的操作點軌跡圖

(a) X 方向軌跡、(b) Y 方向軌跡、(c) Z 方向軌跡、和(d)3-D 軌跡

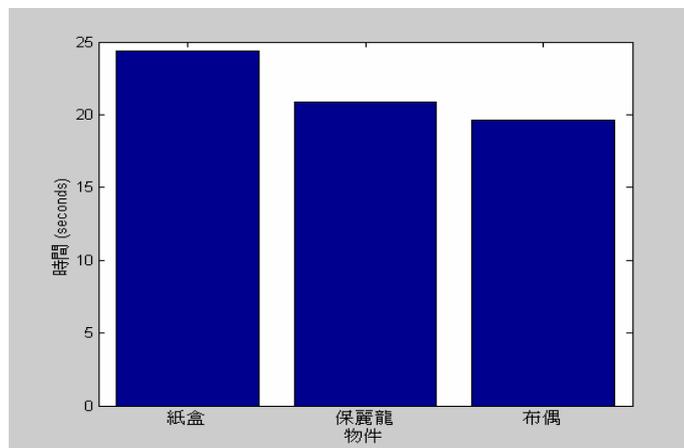


圖 4-11 三種物件操作時間比較

# 第五章

## 結論

在本論文中，我們在已發展的遠端呈現與操作系統上，建立了一個結合視覺與力覺，並隨著使用者的操作狀態、操作物件的不同而改變的虛擬導引系統；在遠端操作的過程中，最大的問題在於人類在操作時對遠端狀況的掌握；我們在遠端架設固定式攝影機以便即時了解遠端的操作狀況，但為了避免時間延遲(time delay)的影響，我們選擇減少網路資料的傳送量，因此在近端我們事先建立好部分場景，並在遠端 CCD 攝影機擷取到影像後先進行處理，分析後只傳回近端需要更新的位置資料，並在近端電腦中更新虛擬實境場景呈現給使用者，讓使用者可以即時了解遠端目前的操作狀況；我們也設計了一個多功能的虛擬導引力回饋裝置，來輔助使用者完成工作；首先，透過視覺傳回目標點的資訊以及使用者目前所操作的操作點位置，決定出力回饋的範圍，並使用 Bezier 曲線將力回饋的範圍平滑化；接著由程式自動量測物件的軟硬度；最後，當使用者透過搖桿操作機械手臂時，我們將根據不同等級的軟硬度，提供不同的回饋力給使用者作為虛擬導引，來協助使用者完成目標。

對使用者主觀上的感受來說，視覺與力覺的結合能夠有效的減少在操作上的不確定性，由於力覺的輔助，讓使用者可以準確的操作物件，而視覺的輔助除了可以讓使用者大致了解操作的方向外，也比較不會對力覺的回饋產生困惑，因此提升了操作的效率。

## 5.1 未來工作

對於所發展的遠端呈現與操作系統，在未來我們仍有以下的改善空間：

1. 在視覺回授部分主要分為物件的定位和搜尋兩個部分；物件的定位方面，目前是採用單一影像的校正定位，這樣的方式簡單方便，但容易有誤差，較不具有一般性，若是能夠配合更為精準的多張影像定位技術，則可改善這些問題；在影像的物件搜尋方面，目前是採用簡單色彩比對的方法，然而這樣的方式容易因為光源的不平均，導致物件搜尋的不完整，而其他比較常用的影像分割( image segmentation )技術有 Sobel operator, mean-shift 等，較不易受到影響而有較好的效果。
2. 在描述物體時，若真實世界中的感測系統能夠發展完整，且提供更多更精確的物理參數資訊，即可將這些參數傳送到虛擬實境中，並事先建構出更真實的物體模型，利用這些參數來描述物體的特性，讓使用者在視覺上可以有更逼真的感受。
3. 目前所發展的虛擬實境場景為固定視角，因此容易被遮蔽而造成操作上的誤差，若是能隨著操作點的位置自動切換多個視角，則可有效增加準確度並縮短操作時間。
4. 由於力感測器所量得的力資訊雜訊相當大，直接回授到搖桿上可能造成無法預期的振動，因此目前是在操作前先對物件作測試，並將待測物件的彈性係數分為三個等級，進而對搖桿產生虛擬的回授力；若是我們可以將力感測器所量得的力資訊在遠端先經過分析處理，並配合一些回授保護的措施，則可以將碰撞的力量直接回授到搖桿上，對使用者來說可以在觸覺上得到更真實的感受。
5. 在本實驗中，我們操作的物件均為簡單物件，因此只偵測 Z 方向的力量；未

來可以挑戰難度更高的物件，例如易碎的物件，再配合力感測器其他的方向，包括 X 方向、Y 方向、旋轉扭力等，讓使用者的操作能夠更全面，力覺的感受也能更真實。



## 參考文獻

- [1] A. Bettini, S. Lang, A. Okamura, and G. Hager, "Vision Assisted Control for Manipulation Using Virtual Fixtures," *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1171-1176, 2001.
- [2] A. Bettini, S. Lang, A. Okamura, and G. Hager, "Vision Assisted Control for Manipulation Using Virtual Fixtures: Experiments at Macro and Micro Scales," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3354-3361, 2002.
- [3] A. B. Kuang, S. Payandeh, B. Zheng, F. Henigman, and C. L. MacKenzie, "Assembling Virtual Fixtures for Guidance in Training Environments," *12th International Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, pp. 367-374, 2004.
- [4] A. Bettini, P. Marayong, S. Lang, A. M. Okamura, and G. D. Hager, "Vision-Assisted Control for Manipulation Using Virtual Fixtures," *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 20, No. 6, pp. 953-966, 2004.
- [5] A. J. Johansson and J. Linde, "Using Simple Force Feedback Mechanisms as Haptic Visualization Tools," *16th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, pp. 820-824, 1999.
- [6] A. Watt, *3D Computer Graphics*, 3rd Edition, Addison-Wesley, England, 2000.
- [7] B. J. Nelson and P. K. Khosla, "Integrating Force and Vision Feedback within Virtual Environments for Telerobotic System," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1588-1593, 1997.
- [8] C. P. Kuan and K. Y. Young, "Challenges in VR-Based Robot Teleoperation", *International Journal of Electrical Engineering*, Vol.11, No.1, pp. 1-9, 2004.
- [9] C. H. Ho, C. Basdogan, and M. A. Srinivasan, "Efficient Point-Based Rendering

- Techniques for Haptic Display of Virtual Objects,” *Teleoperators & Virtual Environments*, Vol. 8, No. 5, pp. 477-491, 1999.
- [10] E. Angel, *Interactive Computer Graphics: a Top-Down Approach with OpenGL*, Addison-Wesley, England, 2000.
- [11] F. Chatzinkkos, *A 3D Case Study Using OpenGL*, Version 1.0, 2000.
- [12] H. C. Chung, Modeling and Interaction of Virtual Object in a VR-Based Telerobotic System, M. S. Thesis, Dep. Electrical & Con. Eng., Chiao-Tung University, Taiwan, R.O.C., 2003.
- [13] H. Delingette, “Toward Realistic Soft-Tissue Modeling in Medical Simulation,” *Proceedings of the IEEE*, Vol. 86, No. 3, pp. 512-523, 1998.
- [14] J. G. Webster and D. G. Hanger, “Telepresence for Touch and Proprioception in Teleoperator System,” *IEEE Trans. on System, Man and Cybernetics*, Vol. 18, No. 6, pp. 1020-1023, 1989.
- [15] L. B. Rosenberg, “Virtual Fixtures: Perceptual Tools for Telerobotic Manipulation,” *IEEE Virtual Reality Annual International Symposium*, pp. 76-82, 1993.
- [16] L. E. Weiss, A. C. Sanderson, and C. P. Neuman, “Dynamic Visual Servo Control of Robots: An Adaptive Image-Based Approach,” *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 662-668, 1985.
- [17] L. Piegl and W. Tiller, *The NURBS Book*, 2nd Edition, Springer Press, 1997.
- [18] M. A. Peshkin, J. E. Colgate, W. Wannasuphprasit, C. A. Moore, R. B. Gillespie, and P. Akella, “Cobot Architecture,” *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 17, No. 4, pp. 377-390, 2001.
- [19] M. A. Srinivasan and C. Basdogan, “Haptics in Virtual Environments: Taxonomy Research Status and Challenges”, *Computers & Graphics*, Vol. 21, No. 4, pp. 393-404, 1997.

- [20] M. Hernando, E. Gambao, M. Hernando, and A. Barrientos, "Collision Control in Teleoperation by Virtual Force Reflection. An Application to the ROBTET System," *IEEE International Conference on Robotics & Automation*, Vol. 1, pp. 565-570, 1999.
- [21] M. Pique, M. Ouh-Young, J. Hughes, N. Srinivasan, and F.P. Brooks, "Using a Manipulator for Force Display in Molecular Docking," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.1824-1829, 1988.
- [22] M. Segal and K. Akeley, *The OpenGL Graphics System: A Specification*, Version 1.2.1, 1999.
- [23] M. S. Yoh, "The Reality of Virtual Reality," *7th International Conference on Virtual Systems and Multimedia*, pp. 666-674, 2001.
- [24] M. Seelinger, J.-D. Yoder, E. T. Baumgartner, and S. B. Skaar, "High-Precision visual Control of Mobile Manipulators," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 18, No. 6, pp. 957-965, 2002.
- [25] M. Utsumi, H. Sakai, and J. Akizono, "The State Representing Method for Underwater Remote Controlled Grab," *IEEE TECHNO-OCEAN*, pp. 2098-2103, 2004.
- [26] P. Marayong, A. Bettini, and A. M. Okamura, "Effect of Virtual Fixture Compliance on Human-Machine Cooperative Manipulation," *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System*, pp. 1089-1095, 2002.
- [27] R. C. Goertz and R. Thompson, "Electronically Controlled Manipulator", *Nucleonics*, pp. 46-47, 1954.
- [28] R. C. Luo, C. Y. Hu, T. M. Chen, and M. H. Lin, "Force Reflective Feedback Control for Intelligent Wheelchairs," *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 918-923, 1999.

- [29] R. Prada and S. Payandeh, "A Study on Design and Analysis of Virtual Fixtures for Cutting in Training Environments," *First Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, pp. 375-380, 2005.
- [30] S. Park, R. Howe, and D. Torchiana, "Virtual Fixtures for Robotic Cardiac Surgery," 4th International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention, pp. 14-17, 2001.
- [31] S. Payandeh and Z. Stanisic, "On Application of Virtual Fixtures as an Aid for Telemanipulation and Training," *10th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, pp. 18-23, 2002.
- [32] W. P. Hung, A Networked VR- Based Telerobotic System: Communication and System Implementation, M. S. Thesis, Dep. Electrical & Cont. Eng., Chiao-Tung University, Taiwan, R. O. C., 2001.
- [33] Y. Adachi, T. Kumano, and K. Ogino, "Intermediate Representation for Stiff Virtual Objects," *Virtual Reality Annual International Symposium*, pp. 203-210, 1995.
- [34] Y. Yokokihji, R. L. Hollis, and T. Kanade, "What You can See is What You can Feel – Development of a Visual/Haptic Interface to Virtual Environment, " *IEEE Virtual Reality Annual International Symposium*, pp. 46-54, 1996.
- [35] 辛柏陞, *虛擬實境手部功能訓練系統之設計開發與成效探討之研究*, 國立中央大學機械工程研究所博士論文, 1994。
- [36] 謝馥圭編, *PC 虛擬實境*, 儒林圖書有限公司, 1996.
- [37] Immersion Co., Laparoscopic impulse engine, impulse engine 2000, and impulse stick software development kit, release 5.0, September 2000.