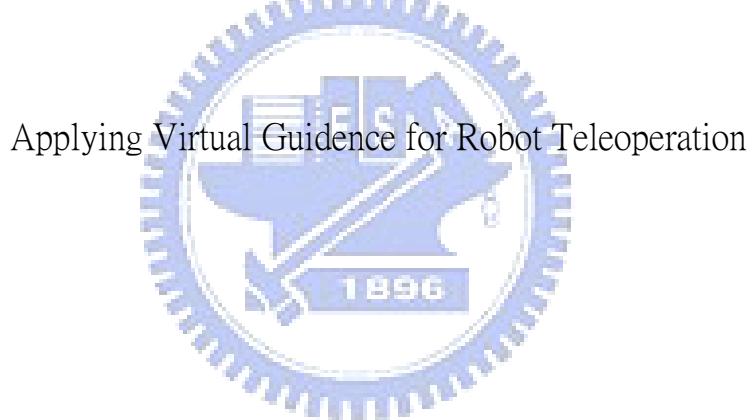


國立交通大學
電機與控制工程學系
碩士論文

虛擬導引於機器人遠端操作之應用



研究生：黃又勳

指導教授：楊谷洋 博士

中華民國九十六年七月

虛擬導引於機器人遠端操作之應用

Applying Virtual Guidance for Robot Teleoperation

研究 生：黃又勳

Student: Yu-Hsun Huang

指 導 教 授：楊 谷 洋 博 士

Advisor: Dr. Kuu-Young Young



A Thesis

Submitted to Department of Electrical and Control Engineering

College of Electrical Engineering and Computer Science

National Chiao Tung University

in Partial Fulfillment of the Requirements

of the Degree of Master

in

Electrical and Control Engineering

July 2007

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國 九十六 年 七 月

虛擬導引於機器人遠端操作之應用

研究生：黃又勳 指導教授：楊谷洋教授

國立交通大學電機與控制工程學系

摘要

由於現今網路技術的發達，人類已經可以藉由操作機器人在各種嚴酷的環境下進行未知領域的探索，但是遠端操控系統也存在許多缺點，像是由於網路的延遲使得操作者無法即時得到遠方機器人的資訊，另外攝影機回傳的影像限制，造成操作者難以判斷物體的遠近關係，這些問題使得遠端操控在實際應用上產生困難，因而有學者提出利用虛擬場景(Virtual environment)配合虛擬導引(Virtual guidance)來輔助操作者進行遠端操控，虛擬導引乃透過虛擬場景中提供的視覺、力覺等對操作者提供輔助，在操作上的穩定性以及效率都有相當大的幫助。對於虛擬導引的建構方法，已有相當多的研究及著作，本文提出一鎖定形式虛擬導引方法，該方法利用攝影機提供的平面影像，配合力輔助的導引，使操作者在操作過程可矯正夾爪位置，彌補定位上的不精確，進而完成工作。利用所提出方法，我們建構了一網路連結遠端操控機器人系統進行實地操作，並獲得不錯的實驗結果，證明鎖定式虛擬導引在提昇效率以及穩定性方面，都可以發揮很好的效果。

Applying Virtual Guidance for Robot Teleoperation

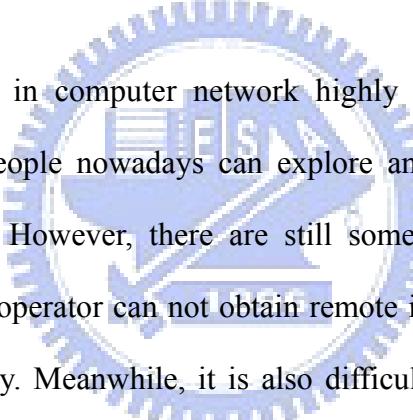
Student : Yu-Hsun Huang

Advisor : Dr. Kuu-Young Young

Department of Electrical and Control Engineering

National Chiao Tung University

Abstract



Rapid development in computer network highly enhances the capability of teleoperation systems, people nowadays can explore an unknown area by using a remote-controlled robot. However, there are still some drawbacks in a telerobotic system. For instance, the operator can not obtain remote information fast enough due to the network time delay. Meanwhile, it is also difficult to distinguish the relative distance between objects from the planar image. Some researchers proposed using virtual environment and virtual guidance to tackles the problems. Virtual guidance acts as a guidance that aids the user in manipulating the robot via providing haptic and visual clues. In this thesis, we propose a novel virtual guidance which is more effective than those proposed previously in object grasping. The proposed virtual guidance integrates the planar image and force reflection to provide the guidance. With it, the operator can easily control the robot gripper for object grasping in the presence of imprecision in positioning. In implementation, we developed a networked VR-based telerobotic system for the proposed virtual guidance. Experiments are performed to demonstrate the effectiveness of the proposed approach.

誌 謝

首先要感謝我的指導教授----楊谷洋博士，由於他熱心的指導，使我的研究工作得以順利完成。同時，感謝各位口試委員：楊秉祥老師、蕭得聖老師及曲在雯博士撥冗參與論文口試，並給予許多寶貴的指導與建議，使我獲益良多。感謝木政、一元以及豪宇學長對我研究上許多的指導以及協助，讓我能順利完成機器人系統的建構，感謝兩年來陪我一起歡樂的同學以及學長們：酋長，感謝你的小頭、政龍，感謝你的希望、爽聰，感謝你的無敵南台灣輻射線、小鐵，感謝你的薩克 2.0、爽康，感謝你的嘴砲，博翔，感謝你跟我一起九月畢業，章魚，掰啦！還有感謝宗仁、怡翔、佑綸學弟，在這兩年的實驗室研究生活中，由於你們的陪伴讓我的生活更多采多姿。

最後要感謝的是我的爸媽，謝謝你們的耐心與信心，讓我能完成學業，謝謝，在 605 實驗室的兩年是很美好的回憶，我永遠也不會忘記，期待下次再相逢的時候啦！

目 錄

中文摘要	I
英文摘要	II
誌 謝	III
目 錄	IV
表 目 錄	VI
圖 目 錄	VII
1. 緒論.....	1
2. 鎖定形式虛擬導引.....	8
2.1 虛擬導引路徑建立.....	10
2.1.1 Bezier 演算法.....	12
2.2 虛擬導引回饋範圍.....	15
2.3 虛擬導引力回饋演算法.....	16
3. 遠端操控系統實現.....	21
3.1 系統架構.....	23
3.2 系統流程.....	25

3.3 軟體實現.....	29
3.4 硬體實現.....	34
4. 實驗.....	40
4.1 流程.....	41
4.2 操作實景.....	43
4.3 結果與討論.....	46
5. 結論.....	50
5.1 未來工作.....	51
參考文獻.....	52

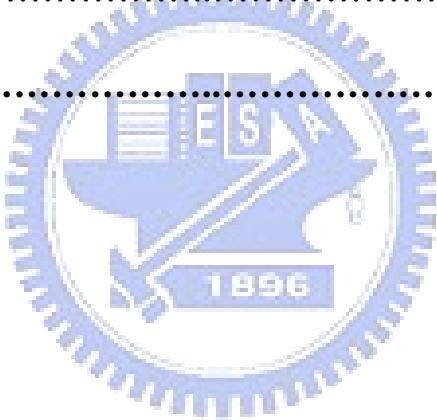


表 目 錄

表 3-1 Mitsubishi RV-2A 五軸機械手臂基本規格.....	35
表 3-2 CR1-571 控制器基本規格.....	36
表 3-3 Laparoscopic impulse engine 規格表.....	38
表 3-4 力感測器 JR3 基本規格.....	39
表 4-1 操作時間的平均值以及標準差.....	47
表 4-2 三種輔助的操作成功率.....	48

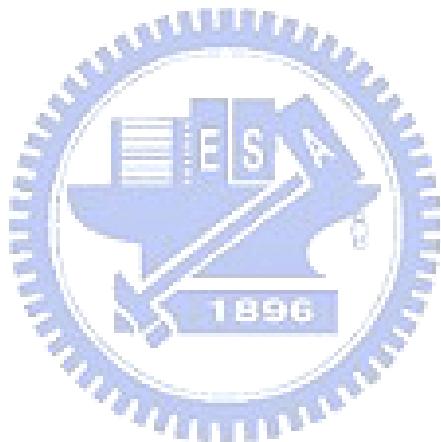


圖 目 錄

圖 1-1	微創機器手術系統「Zeus」	2
圖 1-2	遠端呈現資訊傳遞示意圖	3
圖1-3	遠端操縱系統示意圖	7
圖2-1	鎖定式虛擬導引示意圖	9
圖2-2	虛擬導引建構流程	9
圖2-3	攝影機與夾爪相對位置圖	10
圖2-4	利用攝影機焦點與目標物連線決定導引路徑	11
圖2-5	目標物超出攝影機視角關係圖	12
圖 2-6	(a)三點控制點之 Bezier 曲線與(b)分段式控制點的 Bezier 曲線	14
圖 2-7	不同形狀的力輔助虛擬導引：(a)圓錐、(b)圓柱體和(c)球形	15
圖 2-8	力回饋虛擬導引示意圖	16
圖2-9	(a)圓錐形的虛擬導引和(b)回饋力圖解	17
圖2-10	虛擬力演算法示意圖	19
圖2-11	虛擬導引回饋力剖面圖	19
圖2-12	虛擬導引對使用者進行力輔助之流程圖	20
圖 3-1	利用虛擬實境與攝影機組合取得物體位置： (a)攝影機畫面和(b)虛擬場景	22
圖 3-2	遠端操控系統架構圖	24
圖3-3	位置命令處理流程圖	25
圖 3-4	力訊號處理流程圖	26
圖 3-5	使用 Kaiser window 的 FIR lowpass filter	27
圖 3-6	低通濾波前後比較圖：(a)力訊號和(b)使用者輸入訊號	28

圖 3-7	OpenGL 成像流程	30
圖 3-8	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	31
圖 3-9	多執行序執行示意圖	32
圖 3-10	遠端操控系統之使用者介面：(a) Client 端和(b) Server 端	33
圖 3-11	Mitsubishi RV-2A 五軸機械手臂外觀	34
圖 3-12	CR1-571 控制器外觀	35
圖 3-13	Laparoscopic impulse engine	38
圖 3-14	力感測器 JR3 外觀	39
圖 4-1	夾取物體流程圖	42
圖 4-2	操作者在近端進行遠端操控的情形	43
圖 4-3	機器夾爪與操作平台	43
圖 4-4	使用者操作情形：攝影機畫面	44
圖 4-5	使用者操作情形：虛擬場景	44
圖 4-6	實驗開始時之操作實景：(a)機器人實景和(b)虛擬場景	45
圖 4-7	進行夾取動作時之操作實景：(a)機器人實景和(b)虛擬場景	45
圖 4-8	夾取物體時之操作實景：(a)機器人實景和(b)虛擬場景	46
圖 4-9	三種力導引下的抓取軌跡圖	47
圖 4-10	圓錐型導引弓起的震盪軌跡圖	49
圖 4-11	利用鎖定式導引夾取不同軟硬度物體之軌跡圖	49

第一章

緒論

自古以來人類對廣大的未知世界一直充滿著強烈的好奇心與求知慾望，而人類探索的領域也隨著科技日新月異的進步而逐漸地擴大。從前的科學家們想對危險的未知環境進行探索時，往往都必須親身歷險，各種突發狀況以及嚴苛的環境阻礙了科學家們探索研究的腳步。後來科學家提出了由機器人代替人類，進入危險環境進行各種任務的想法，機器人固然比人類更能抵抗高熱、低溫以及輻射，然而面對突發狀況，機器人往往缺乏應變的智慧，不能即時的應變及處理。Goertz 與 Thompson 在 1954 年提出遠端操控 (Teleoperation) [17]的概念，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，使得科學家得以透過遙控機器人探索遠方的環境來收集各種資訊，如旅居者號 (Sojourner) 在 1997 年成功的登陸火星[15]，就是一個成功的案例，近年來遠端操控有越來越多的應用，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、深海、放測性檢測等[13,14]。

遠端操控系統在醫學等領域亦多所應用，利用遠端操控系統進行手術的構想已經在十多年前便已付諸實現，在 1996 年，Computer Motion Company 便開發出微創機器手術系統，名為「Zeus」[6,23]；利用遠端操控系統進行手術的優點是可以突破尺寸的限制，例如透過將使用者公分等級輸入指令映射至遠端機器手臂公厘等級的輸出，可以讓醫師進行更加精密的操作，在一些需要高精度的手術中提高效率，同時系統透過力輔助對醫師本身的輔助，可以減少進行高疲勞度手術對醫師造成的負擔。透過遠端操控系統的幫助，醫師亦可以對遠在他處的病患進行診療，醫師由網路影像的傳遞觀察到遠方患者的病情並操控遠端的機器手臂

為患者進行遠端手術(Telesurgery)；在 2001 年，美國紐約一名醫師利用該項特點以 Zeus 系統，透過高速光纖網路，首次成功完成遠端手術，替一名位於法國高齡 68 歲的女性病患進行膽囊切除手術。

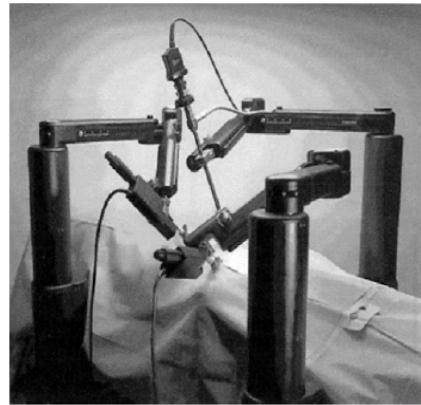


圖 1-1 微創機器手術系統「Zeus」[6]

遠端操控系統的核心主要由遠端呈現以及遠端操控所組成，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(Human mounted device, 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，而不僅是單方向的回饋，意即當使用者與虛擬環境互動時，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，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，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。

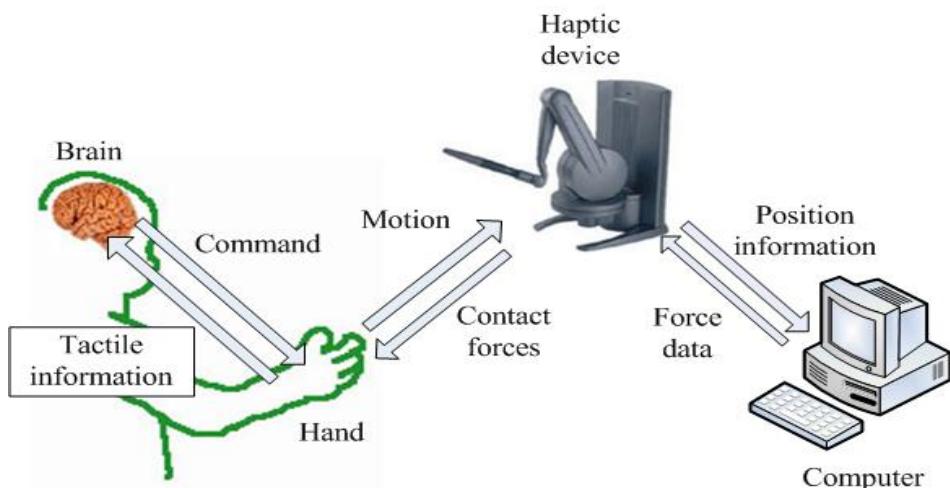


圖1-2 遠端呈現資訊傳遞示意圖

在遠端操控部份，為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。在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)[18]，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。

先前已有許多學者[2,3,9]利用虛擬場景(Virtual environment)配合虛擬導引(Virtual fixture)來實現遠端呈現以及輔助操作者進行遠端操控，虛擬場景的優點在於由近端電腦模擬出遠端機器人附近的環境，因此不受網路資訊傳遞延遲的影響，可以帶給操作者即時的影像回饋；虛擬實境還有可以任意變更視點的好處，

可以避免遠端攝影機被障礙物阻擋造成使用者視覺上的死角；而虛擬導引即利用在虛擬場景中給予使用者視覺上的指示、力牆的輔助，或直接修正使用者下達之控制指令等來輔助使用者進行操作，近年來，虛擬導引在訓練初學者操作設備及輔助使用者更快速的進行操作，都發揮相當良好的效果[1,9,16]。

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。虛擬導引的技術，在追隨路徑的實驗中，無論在增加操作精確度或增快操作速度上，都展現了非常好的成果[2,3]。虛擬導引的方式，包括視覺、力覺、聽覺或是它們的組合使用[4]，目前已經有許多複合式虛擬導引來協助使用者的成功案例，例如 Rosenberg 應用虛擬力回饋，幫助使用者在遠端操作的環境中完成組裝的工作，實驗結果顯示，這樣的方式增加七成以上的成功率[11]；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[21]；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[12]。



虛擬導引對使用者進行輔助的方法主要是在虛擬場景中建構一回饋範圍，當使用者進入該範圍時，由電腦給予力覺及視覺等回饋，以虛擬牆為例，虛擬導引在回饋範圍的邊緣建立起一道牆，當使用者碰觸到牆時，會受到一股反抗力，藉此將使用者限制在範圍內，此即為力覺形式的輔助。虛擬導引的回饋範圍，依照外觀可以分成圓錐型、圓柱型等不同的幾何形狀，S.Payandeh 與 Z.Stanisic[20]指出，根據使用者欲進行的工作改變，所需要的回饋範圍也不盡相同，如圓錐型的導引適合用於導引使用者前往特定地點，圓柱型適合讓使用者在一定範圍內移動，可說是虛擬導引應依任務改變而調整，如果選取的回饋範圍不適合指定的工作，反而會造成對使用者的妨礙[15]。

在建立虛擬導引時，除了回饋的形狀外，尚需要考慮到回饋力的範圍，回饋

力的大小等問題，回饋範圍大小與操作者要進行的工作有關，若操作者要夾取一個螺絲釘，則回饋範圍就不宜太大，若是要讓機器人巡視房間，則範圍就不宜太小，其他的因素，如夾取物體的軟硬度等，亦會影響範圍大小的設定；另外回饋力的大小則直接影響了使用者的感受，太小的回饋力對使用者沒有太大幫助，太大的回饋力則會造成系統的不穩定，這些參數都要配合使用者的目的進行設定，建立合宜的虛擬導引以達到快速、直覺的遠端操作，而如何設計出適合的虛擬導引對遠端系統操控是相當重要的。

本文的重點即在討論根據虛擬導引形式的不同，對於使用者操作效率上的影響，進而設計一種鎖定式虛擬導引，並配合該虛擬導引發展出一個因應的遠端操控系統；該虛擬導引主要是用於附有機器夾爪的機器人遠端操控系統，目的是協助使用者更快速的操作夾爪夾取及移動遠端的物體。接下來，我們將介紹一個附夾爪的遠端操控系統在操作上的困難處，並說明鎖定形式的虛擬導引如何改善這些缺點。

在一個附有夾爪的遠端操控系統中，使用者由視覺回饋了解到遠處的情況，並利用力回饋搖桿控制遠端的機器人進行探索或搬運物體的動作；但是，在操作過程中使用者通常無法很順利的夾取物體，原因在於視覺回饋上的誤差以及操作介面的非直覺式的控制，其中視覺回饋上的問題，在於繪製虛擬場景時所產生的誤差，在繪製場景時，通常需要用到 3D 定位來取得物體的位置、大小，以及其他資訊；在使用 3D 影像定位建構虛擬場景上，本實驗室已有若干研究成果發表 [24,25]，受限於影像處理運算的速度，虛擬場景無法即時的繪出物體在外力碰撞產生的移動或者翻轉的情形，因此經常有虛擬場景與實際情況不一致的情形，造成操作者對物體位置的誤判。再者，操作介面的非直覺式的控制也會影響到使用者的操作，用搖桿來控制機器夾爪抓取物體，使用者往往很難體會搖桿與夾爪間互動的關聯性，不能精準的控制夾爪，同時也很難維持夾爪穩定的移動，造成夾

取物體時，要花費很大的力氣，甚至會弄壞目標物。

針對以上問題，在本論文之中我們使用攝影機的 2D 影像配合 3D 虛擬實境，讓操作者來自行矯正誤差；Curtis 與 Michael[8]在遠端操控汽車行走迷宮的實驗中，談到影像回饋搭配虛擬場景的效果要比單獨使用虛擬場景要來的好，當我們無法準確知道物體在遠端環境中的位置時，近端電腦只要藉由力覺導引，輔助操作者到達目標物的附近，讓操作者透過攝影機的平面影像以及力感測器的回饋，使操作者自行進行位置的微調。為了達到上述的目的，我們將攝影機裝置在夾爪上，回傳給使用者第一人稱視角的影像，並利用力覺導引輔助使用者操作機械夾爪，使得夾爪在移動時，目標物能落在使用者的視線內，有如將目標物鎖定在攝影機畫面上，因此，我們將該導引稱為鎖定式虛擬導引。使用者透過第一人稱的畫面，對於掌握物體的遠近感以及相對位置亦較有幫助，最後，透過力牆的輔助，使用者沿著力牆即可很輕易操控搖桿，控制機器人遠離或接近物體，讓使用者可以克服對輸入裝置的不直覺控制。

我們配合鎖定式虛擬導引建構出一個因應的網路遠端遙控機器人系統供實地進行遠端操控，該系統的特色如下：

- 利用虛擬場景提供操作者不同的視角，使操作者能掌握物體的遠近距離；
- 藉由力輔助虛擬導引(Virtual fixture)協助使用者快速並穩定的到達目標附近；
- 攝影機(CMOS camera)的視覺回饋配合力感測器(Force sensor)量測的力資訊，使操作者得以進行細微的調整，藉此可以補足影像定位的誤差。

圖 1-3 為本文所建構遠端操縱系統示意圖，使用者由力回饋輸入裝置輸入指令給近端電腦，近端電腦透過網路向遠端電腦傳送位置命令並取得機械手臂及感測器(攝影機、力感測器)的資訊，經過處理後將視覺資訊(2D 影像、3D 虛擬場景)

及力資訊回傳給使用者。

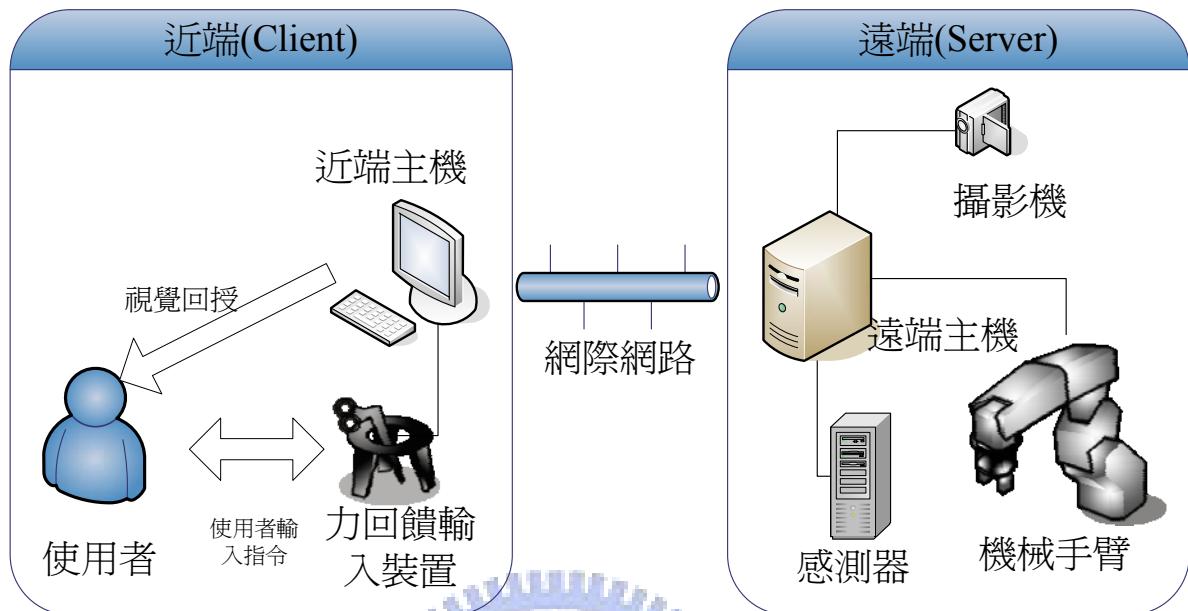


圖 1-3 遠端操縱系統示意圖

接下來簡述各章的內容，第二章將會說明鎖定式虛擬導引的建立，及如何輔助操作者進行操作，第三章則是介紹我們所建構的機械夾爪結合網路之遠端物體抓取系統，在第三章中我們會說明整個系統操作流程，並與先前實驗室已發展的成果比較，在第四章的實驗中，將呈現如何輔助操作者透過該系統進行遠端抓取的任務，最後第五章為本文下總結以及針對實驗結果提出討論和未來須改善的部分。

第二章

鎖定形式虛擬導引

本章的內容主要在敘述遠端操控系統如何利用鎖定式虛擬導引對使用者進行輔助，在遠端操控系統中，使用者乃是透過近端的虛擬環境與機器人進行互動，其中虛擬引擎(VR engine)負責建立虛擬場景給予使用者視覺上的回饋，同時在虛擬場景中建立虛擬導引並計算回饋力，藉此給予使用者力覺上的輔助。透過虛擬導引，我們得以改善操作者操作上的效率。



我們針對附有夾爪的遠端操控系統，設計出一鎖定式虛擬導引，用以因應使用者對遠方物體夾取、放置及搬運的需求，該導引利用夾爪與攝影機的組合，來達到輔助的目的，圖2-1為遠端抓取系統示意圖，該圖為機器手臂側面(x-z平面)，圖中有一個機械夾爪，使用者可以經由遙控該夾爪來夾取桌上的目標物，我們在夾爪上安置一攝影機，藉此回傳第一人稱視角的畫面給使用者；在使用者下達開始輔助的指令後，電腦將會根據夾爪尖端的位置(以下簡稱操作點)，以及目標物的位置計算出一條軸線，並沿著軸線建立力覺虛擬導引，軸線即導引路徑，也就是我們希望使用者沿其移動的路線。

Payandeh與Stanisic在 [20]中指出，虛擬導引隨指定工作而改變，舉例來說，我們將”把物體從A點移動到B點”這個搬運過程分割成三個工作：”將夾爪移動到A點，抓取物體”對應的是定位用導引，”由A點移動到B點上空”對應的是移動用導引，”由B點上空移動到B點，放置物體”對應的是定位用導引，因為由A點移動到B點上空時，不限制使用者移動的方向，故移動導引不給使用者過多的限制，對操作上的影響也就不大；對於操作上的效率，主要的影響將決定在定位導

引的優劣，在這方面，鎖定式虛擬導引在作為一個定位導引上有相當好的表現。

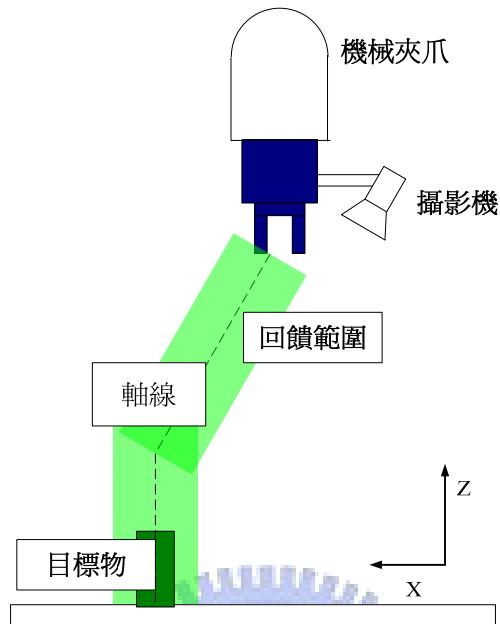


圖 2-1 鎖定式虛擬導引示意圖

圖 2-2 為力導引建構流程，首先依使用者工作的要求決定導引路徑、回饋範圍的形狀，接著參考工作中目標物的大小、軟硬度決定回饋範圍的大小以及調整適當的回饋力強弱，在最後，電腦將根據回饋力演算法計算出回饋力，並回饋給使用者，以下各節將對這些流程分別介紹，2.1 節說明如何建立導引路徑，2.2 節為決定回饋範圍，2.3 節則敘述虛擬導引的力演算法及各參數的設定，用以計算出輔助使用者的回饋力，並列出整個利用虛擬導引進行力輔助的流程。



圖 2-2 虛擬導引建構流程

2.1 虛擬導引路徑建立

本節內容為如何規劃出導引路徑，由於攝影機在夾爪上的位置及角度都會影響到導引路徑的設計，因此我們將先說明攝影機的擺設方法，再繼續說明如何建構導引路徑。圖2-3為攝影機與夾爪相對位置圖， C 點為攝影機位置， P 點為操作點，攝影機掛在夾爪的側邊，並且以 θ 角向夾爪傾斜，目的是要取得操作點附近的影像；自 P 點延長一線交攝影機視線於 Q 點，令線段 PQ 長為 h ，經由調整 θ 將可以改變 h 的大小，由圖2-3可看出，當 θ 越大時 h 越小，兩者呈現反比關係。隨後我們會在建立路徑的過程中提到，路徑與 h 的關係，並說明我們如何決定 h 及 θ 的值。

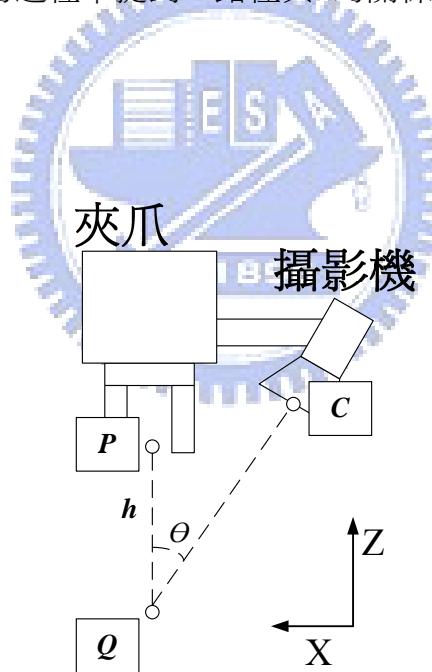


圖 2-3 攝影機與夾爪相對位置圖

導引路徑的建立過程如下：首先將攝影機視線與目標物連成一直線 L，則可以知道當攝影機在 L 上移動時，操作者都可以在畫面上觀察到目標物。接著通過操作點作一直線 M1 與 L 平行，再來過目標點作一垂直桌面，長度為 h 的直線 M2，如圖 2-4 所示，M1 及 M2 即為虛擬導引的軸線，也就是導引路徑。

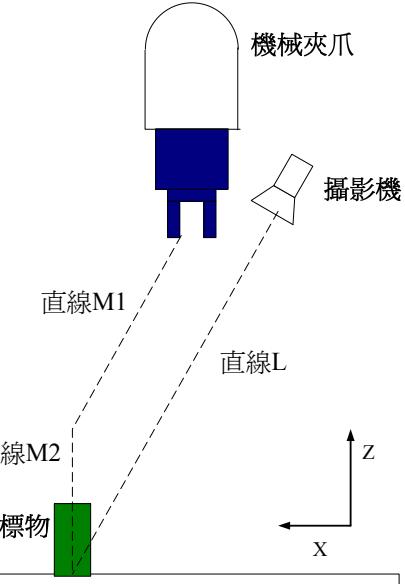


圖 2-4 利用攝影機焦點與目標物連線決定導引路徑

由於攝影機的位置為固定在夾爪上，故操作點與攝影機之間的相對位置是不變的，當操作點沿著直線 M1 前進時，攝影機也會沿著直線 L 前進，換句話說，在操作點沿著直線 M1 移動到目標正上方的位置之前，目標物都會將會保持在操作者的視線之內，當操作點移動到目標正上方，也就是 M1 與 M2 之交點時，此時夾爪與目標物的距離為 h ，夾爪、攝影機與目標物的關係圖將如圖 2-3 所表示，夾爪位置為 P ，攝影機位置為 C ，而目標物位置為 Q ，當夾爪繼續往向下抓取時，目標物的位置會落在 \overline{PQ} 上，由 Q 往 P 移動，當目標物到達 P 點時，也是夾爪可以抓取到物體的時候，因此我們可以知道，攝影機必須可以觀察到整個 \overline{PQ} 線段，否則在夾取時，目標將會超出攝影機的視角，如圖 2-5 所示，藉由調整 Θ 的大小，可以改變攝影機的角度，因此， Θ 與目標物的大小及攝影機視角寬窄有關，我們所使用的攝影機視角約為 26.56° ，經過計算， Θ 在 26° 以上都可以讓攝影機觀察到整個 \overline{PQ} 線段，然而 Θ 太大時，視角被夾爪遮蓋的比例也會增大，我們設 Θ 為 30° ，對應的 h 值為 15cm 。最後我們利用 Bezier 演算法來求得這個軸線的近似曲線，藉由平滑的導引路徑讓使用者在行進中有更好的表現，介紹如下。

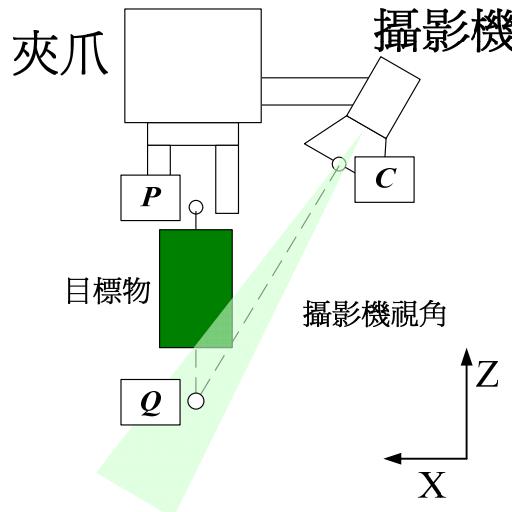


圖2-5 目標物超出攝影機視角關係圖

2.1.1 Bezier演算法

Bezier 曲線[19,22]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：

$$C(u) = \sum_{i=0}^n B_{i,n}(u) P_i \quad 0 \leq u \leq 1 \quad (2.1)$$

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)，可描述成

$$B_{i,n}(u) = \frac{n!}{i!(n-i)!} u^i (1-u)^{n-i} \quad (2.2)$$

其中 i 是從 0 到 n ，表示第幾個控制點；在(2.1)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 曲線有著只會通過第一個控制點和最後一個控制點的特性，另外混合函數還有一個特性就是：

$$\sum_{i=0}^n B_{i,n}(u) = 1 \quad 0 \leq u \leq 1 \quad (2.3)$$

根據(2.2)式可求得表示式為：

$$\begin{aligned} B_{0,3}(u) &= (1-u)^3 \\ B_{1,3}(u) &= 3u(1-u)^2 \\ B_{2,3}(u) &= 3u^2(1-u) \\ B_{3,3}(u) &= u^3 \end{aligned} \quad (2.4)$$

由(2.4)式可知 $B_{i,3}(u)$ 只和曲線參數 u 有關，接著利用(2.3)式來計算 Bezier 曲線，表示如下：

$$\begin{aligned} C(u) &= \sum_{i=0}^3 B_{i,3}(u)P_i \\ &= P_0 B_{0,3}(u) + P_1 B_{1,3}(u) + P_2 B_{2,3}(u) + P_3 B_{3,3}(u) \\ &= P_0(1-u)^3 + P_1 3u(1-u)^2 + P_2 3u^2(1-u) + P_3 u^3 \end{aligned} \quad (2.5)$$

由(2.5)式可以知道我們只要在空間中任意取出四點($P_0 \sim P_3$)，都可以藉由 Bezier 演算法計算出近似線，為了節省運算時間，我們使用三點控制點來產生曲線。圖 2-6(a)為一個由三個控制點 P_1 、 P_2 以及 P_3 所建構的二次 Bezier 曲線，可以發現在軸線的轉折處，近似線與原本的軸線有一段誤差。為此，我們使用分段控制點的 Bezier 演算法，藉此減小誤差，該方法為在轉折處增加控制點，以新的控制點繪出更為接近的曲線，圖 2-6(b)則為使用分段式控制點後的結果，我們在靠近 P_2 的位置，增加了兩個控制點 P_1' 及 P_3' ，以 P_1' 、 P_2 、 P_3' 為控制點生成新的 Bezier 曲線後，與線段 $\overline{P1P1'}$ 、線段 $\overline{P3P3'}$ 組成一個近似曲線，由圖 2-6(b)可看出雖然使用的控制點增加，計算量變大，但是在轉折處的誤差則變小了，我們控制 P_1' 以

及 P_3' 與 P_2 的相對距離來改變誤差的大小，在實驗中使用的 P_1' 以及 P_3' 與 P_2 相對距離關係為

$$\begin{cases} \overline{P_1 P_1'} = 1/D \overline{P_1 P_2} \\ \overline{P_3 P_3'} = 1/D \overline{P_3 P_2} \end{cases} \quad (2.6)$$

D 值將會決定 P_1' 以及 P_3' 的位置，同時也會決定 Bezier 曲線在轉折處的誤差值，我們一方面不希望 P_1' 以及 P_3' 離 P_2 太遠，這樣會使得誤差太大，同時也不希望 P_1' 及 P_3' 離 P_2 太近，這樣會使得近似曲線不夠圓滑，失去了原本使用 Bezier 演算法的意義，經過測試後，我們選擇 $D=8$ 為一個較理想的值。

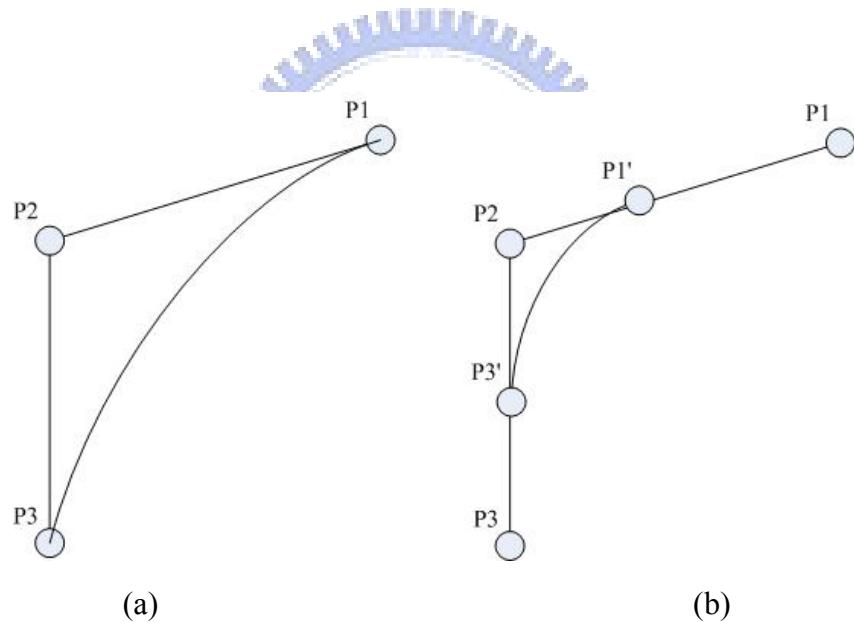
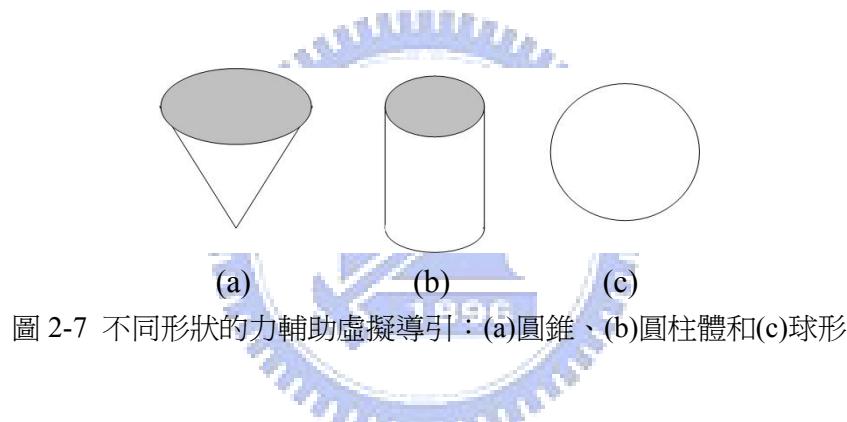


圖 2-6 (a)三點控制點之 Bezier 曲線與(b)分段式控制點的 Bezier 曲線

2.2 虛擬導引回饋範圍

在設定好導引路徑後，我們接著設定虛擬導引力回饋範圍的形狀，如圖 2-7 所示，虛擬導引的範圍有許多不同的幾何形狀：球形(Sphere)、圓柱體(Cylinder)、以及圓錐(Cone)等。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[9]。



由於我們主要的目的是讓使用者快速的在導引路徑上移動，因此我們選擇了一個圓柱型的結構作為鎖定式導引的回饋範圍，沿著導引路徑建構出一個外觀為彎曲圓柱的形狀。我們也另外選擇了圓錐型的虛擬導引作為對照，圓錐型的導引一般應用在讓使用者移動到定點的工作，在第四章的實驗將會用這兩種不同的導引來輔助使用者進行夾取物體的工作，觀察在指定工作下兩者的差異性。在下一節將介紹虛擬導引中相當重要的回饋力演算法，透過該演算法，虛擬導引將可以計算出回饋力的大小。

2.3 虛擬導引回饋演算法

當使用者進入虛擬導引的回饋範圍時，虛擬導引會設置一個導引向量，並且根據使用者的位置與導引向量計算出回饋的大小，以位置命令為輸入而力為輸出，利用搖桿上的回饋力推移或拉扯使用者，達到導引使用者的效果，其演算法如下，當使用者對系統輸入一向量 \vec{V}_u ，該訊號將分成兩個向量，一個為垂直於導引向量 \vec{V}_g 的向量 \vec{V}_{pp} ，另一個為 \vec{V}_u 在 \vec{V}_g 上之投影 \vec{V}_{pj} ，如圖 2-8 所示，輸出力 \vec{V}_o 可寫成如(2.7)式：


$$\vec{V}_o = -K \times (\vec{V}_{pp} + \vec{V}_{pj}) \quad K \geq 0 \quad (2.7)$$

\vec{V}_o 與 \vec{V}_{pp} 、 \vec{V}_{pj} 反向，目的是將操作者吸引至 \vec{V}_g 的起點，(2.7)式中的 K 為導引係數(Guiding factor)，當 K 越大時，逼迫操作者向 \vec{V}_g 靠攏的作用力越大，反之則作用力越小，操作者越可自由移動，較不受虛擬導引影響。

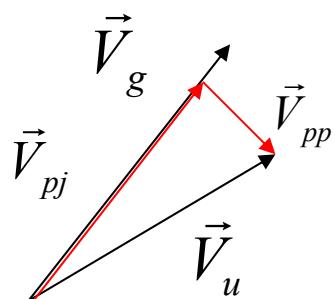


圖 2-8 力回饋虛擬導引示意圖

K 的大小與虛擬場景的解析度、力回饋搖桿的輸出力範圍以及力回饋範圍的大小

有關。當我們決定一個導引向量 \vec{V}_g 後，以 \vec{V}_g 為軸心劃定力回饋的範圍即可做出不同形狀的虛擬導引，倘若我們以導引向量 \vec{V}_g 為軸心畫出一個圓錐 C ，如圖 2-9(a) 所示，並令圓錐 C 為力回饋的範圍，當 \vec{V}_u 落在 C 上時操作者會開始受到力回饋，如圖 2-9(b) 所示，它的功能是將使用者吸引至圓錐 C 的頂點。

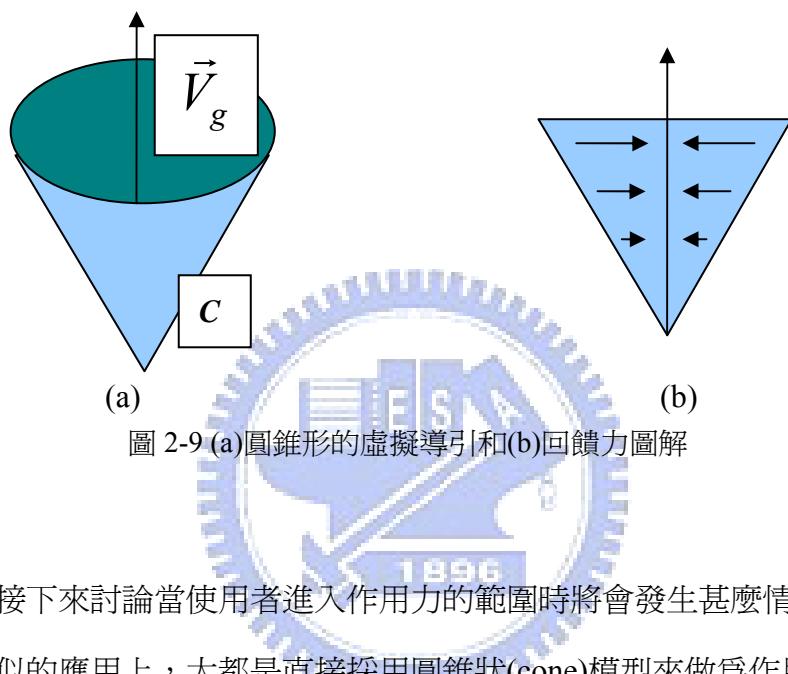


圖 2-9 (a) 圓錐形的虛擬導引和(b)回饋力圖解

我們接下來討論當使用者進入作用力的範圍時將會發生甚麼情形，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發現一個問題，當操作點進入受力邊界時，回授的力量是最大的，這樣的設定是為了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；而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，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 [16]，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，輸出至搖桿的回授力 \vec{F}_o 可以寫成

$$\vec{F}_o = \vec{V}_o \times g(t) \quad (2.8)$$

其中 $g(t)$ 為一時間函數：

$$g(t) = \begin{cases} t/\tau & \text{for } t < \tau \\ 1 & \text{for } t \geq \tau \end{cases} \quad (2.9)$$

當操作點剛進入受力範圍的邊緣時， t 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(τ 個時脈後)回復到原始計算出的力量大小，如此一來，可以避免使用者進入力導引範圍時，突然受到一個很大的回饋力而造成操作上的不穩定。

接下來，我們將(2.7)式的力演算法與(2.8)式結合，我們知道力演算法將根據所使用的虛擬導引形式而各自有所不同；鎖定式導引與圓錐型導引不同的地方在於，導引向量在圓錐型導引中方向恆固定，而在鎖定式導引中導引向量則會隨著軸線而改變方向，故演算法也有所不同，令圓柱型力回饋範圍的軸線為 L ，其中 L 由 $P_0 \sim P_n$ 所組成，操作點為 U ，已知操作點在力回饋範圍中時可以找到一與操作點距離最近之點 P_i 以及該點的前一點 P_{i-1} ，設向量 $\overrightarrow{P_i U}$ 為輸入向量 \vec{V}_u ，

向量 $\overrightarrow{P_{i-1} P_i}$ 為導引向量 \vec{V}_g ，此時(2.8)式將改寫如下：

$$\begin{aligned} \vec{F}_o &= \vec{V}_o \times g(t) \\ &= -K \times (\vec{V}_{pp} + \vec{V}_{pj} \times h) \times g(t) \end{aligned} \quad (2.10)$$

\vec{V}_{pp} 為操作向量對導引向量 \vec{V}_g 之垂直向量， \vec{V}_{pj} 為操作向量在導引向量上的投影， K 為導引係數， h 為一個高度係數，正比於控制點與圓柱底部的相對距離，加入 h 的原因是想增加將使用者吸引到目標物的縱向力量，圖解如圖 2-10。

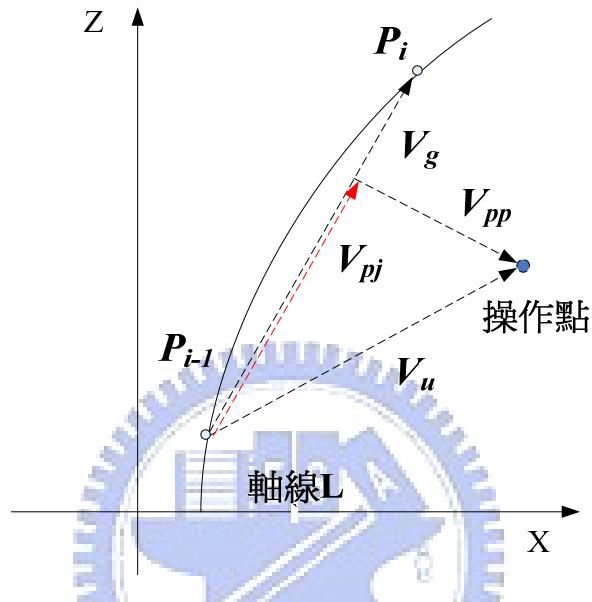


圖 2-10 虛擬力演算法示意圖

圖 2-11 為回饋力的縱切面剖面圖(x-z 軸)，顏色代表回饋力的強度，紅色表示最強而藍色表示最弱，可以看見越接近目標點(0,0)處，回饋力就越小。

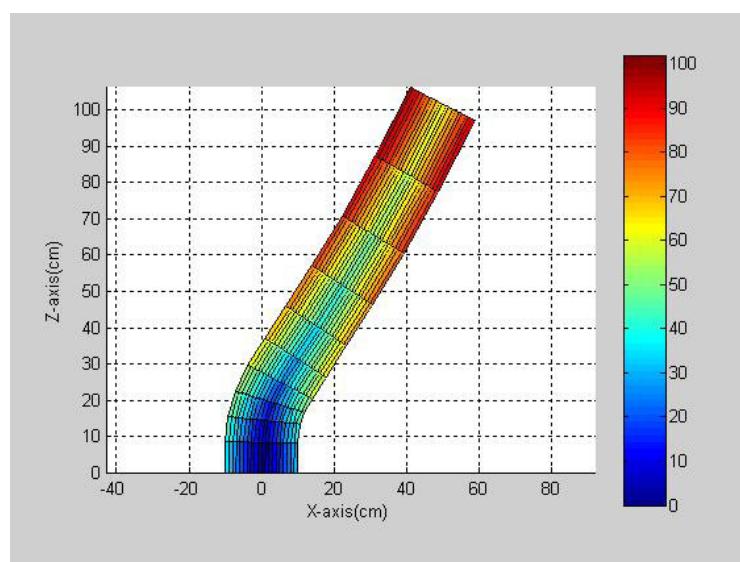


圖 2-11 虛擬導引回饋力剖面圖

有了力演算法後，我們即可以根據操作點在力回饋範圍中的位置算出虛擬力的大小，進而來對使用者進行力輔助，整個力輔助的流程如圖 2-12，當使用者對系統輸入起始命令後，系統便開始對使用者進行力輔助，系統先根據操作點的位置以及虛擬導引的種類設置導引向量以及力回饋範圍，接著判斷使用者是否離開力回饋範圍，若使用者已離開力回饋範圍，表示已完成夾取的動作或者使用者決定取消夾取，系統將取消力牆並停止力輔助；反之則依操作點在力回饋範圍中的位置計算出回饋力並回傳給近端的電腦。

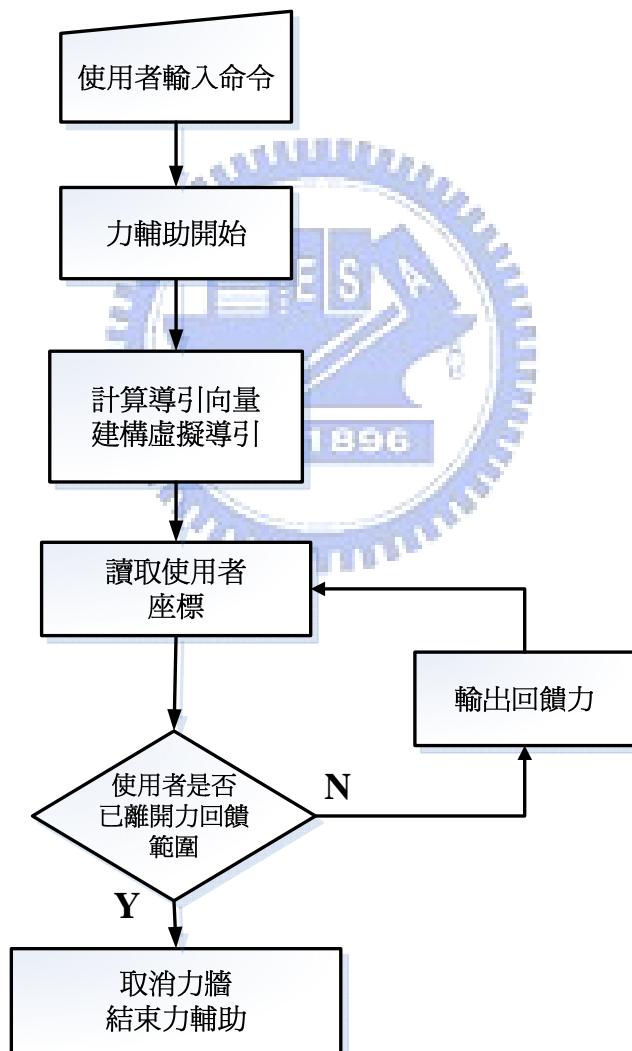


圖 2-12 虛擬導引對使用者進行力輔助之流程圖

第三章

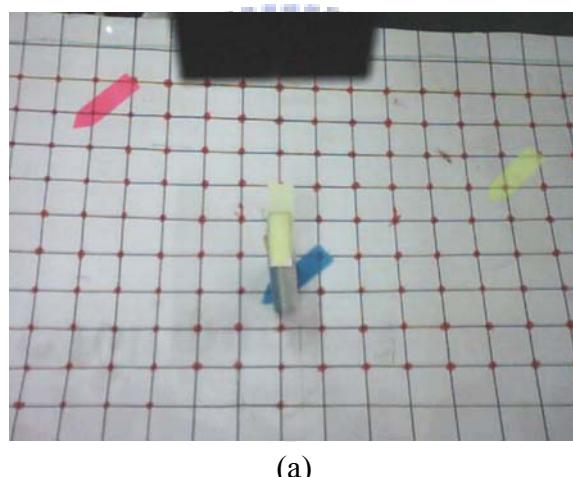
遠端操控系統實現

在本章，我們介紹所開發的結合機器夾爪之網路遠端操控系統，其系統的架構、軟體實現以及所使用到的硬體設備。該系統可配合鎖定形式虛擬導引，使用了一台攝影機以及力感測器，藉由 2D、3D 影像與力資訊的結合，讓操作者充分掌握遠方機器人的情形，操作者將可利用所得資訊，透過網路來操作機器人。

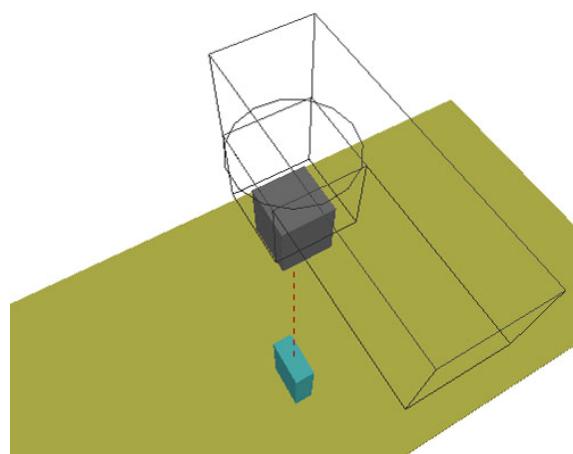
在進行遠端操控時，使用者是藉由近端電腦來探索遠端的環境，因此，需要使用感測器來收集資訊，讓使用者更進一步了解機器人的週遭環境。選用感測器數量的多寡，對系統的影響相當大，更多感測器固然可以取得更多的資訊，但也需要更大的網路頻寬才能即時呈現給使用者，因此，選擇適當感測器的種類及數量，才能建構一個良好的遠端操控系統。在眾多型態的感測器，攝影機、力感測器、紅外線及聲納等，我們尤其注重攝影機的部份，除了視覺回饋對人類而言是最直覺的回饋方式以外，攝影機牽涉到的影像定位也一直是學界研究的重要課題。在影像定位中，最直覺的方法即利用兩部攝影機，對空間中方形的物體作定位[25]，將攝影機取得的 2D 影像，先用影像處理進行分析，再透過幾何運算求出物體在 3D 空間的位置。經過實驗，我們知道虛擬物體與實際物體的平均誤差約 3mm，屬於可以接受的範圍，但是該方法需要對攝影機做很精準的調整，而且進行影像處理需要運算時間，無法即時的回傳物體位置。

因此在遠端定位不精確的情況下，我們採用由操作者本身矯正誤差來完成操作的動作，此時操作者將會遇到以下的問題，由於定位的不精準，操作者不能完

全仰賴虛擬場景，必須配合遠端的即時影像來控制，於是在進行實驗時，我們採用最小的影像解析度以減低在頻寬上的要求，另外與目標物也可能會有不可預期的碰撞，此時可經由力感測器回饋給操作者力感，使操作者得知碰撞的發生，並進行修正的動作。我們使用一台攝影機搭配力感測器來獲得遠端環境的資訊，攝影機安置在夾爪上以提供第一人稱的視角，如此一來，雖然增加了影像定位的困難，但是可以避免在第三人稱視角時物體被其他障礙物阻擋的情況。圖 3-1(a) 為攝影機畫面，畫面中有一淡綠色方塊放置在一白色平台上，該平台並劃有格線以便於定位，圖 3-1(b)為虛擬場景，黑色方塊代表夾爪，褐色長方體為虛擬平台，平台上有藍色的虛擬方塊，該物體位置對應實際的淡綠色方塊，使用者可以藉由攝影機與虛擬場景的輔助來獲得平台上方塊的位置。



(a)



(b)

圖 3-1 利用虛擬實境與攝影機組合取得物體位置：(a)攝影機畫面和(b)虛擬場景

接下來將介紹本實驗遠端操控系統工作，使用者透過網路，操作在實驗室另一個角落附有夾爪的機械手臂(RV-2A Mitsubishi Industrial Robot)拾取在遠處桌面上的物體，將物體堆疊或放置，藉此來模擬遠端遙控機器人在遠端的環境中進行檢拾以及搬運物品的動作，在使用者操作機械手臂的同時，系統將會以虛擬力導引來輔助使用者。

3.1 系統架構

我們所採用的遠端系統採用分散式的架構概念，共使用了兩台電腦，如圖3-2 所示，一台是近端電腦(Client)，負責提供操作者視覺回饋、建立虛擬實境、建構虛擬導引以及與力回饋搖桿進行溝通，近端電腦透過介面卡讀取搖桿資訊，並化為位置指令，同時也經由螢幕提供使用者視覺回饋，工作執行中將使用者對搖桿輸入的命令傳送到遠端，接收到遠端電腦回送的力資訊及視覺資訊時，將該力資訊與虛擬導引所計算之回饋力相加，成為操作者實際所感受到的回饋力；而視覺資訊則與虛擬實境以雙視窗的方式傳達給操作者，讓使用者能同時觀察到兩邊的變化。

另一台遠端電腦則放在伺服端，主要的目的在於處理近端電腦的命令以及力感測器所測得之力資訊，遠端電腦將位置指令轉換為機器手臂的角度控制命令後，傳達給手臂的控制器，改變手臂各軸的角度，藉以移動夾爪的位置，遠端電腦同時也對機器手臂的工作範圍以及姿態進行限制，以防止因為操作者不當的操作或近端電腦程式的錯誤造成手臂的損傷，攝影機以及力感測器的資訊，則透過USB介面以及JR3的資料擷取卡來取得，資料在處理後將傳回近端電腦進行整合，回饋給使用者。

目前的遠端操控系統為一對一之關係，藉由分散架構的設計，將來也可以擴充為一對多的遠端操作系統，讓多位操作者同時使用該系統；另外，該系統也可以透過變更輸出入裝置或感測器來改良，這說明了系統未來更多發展的可能性。

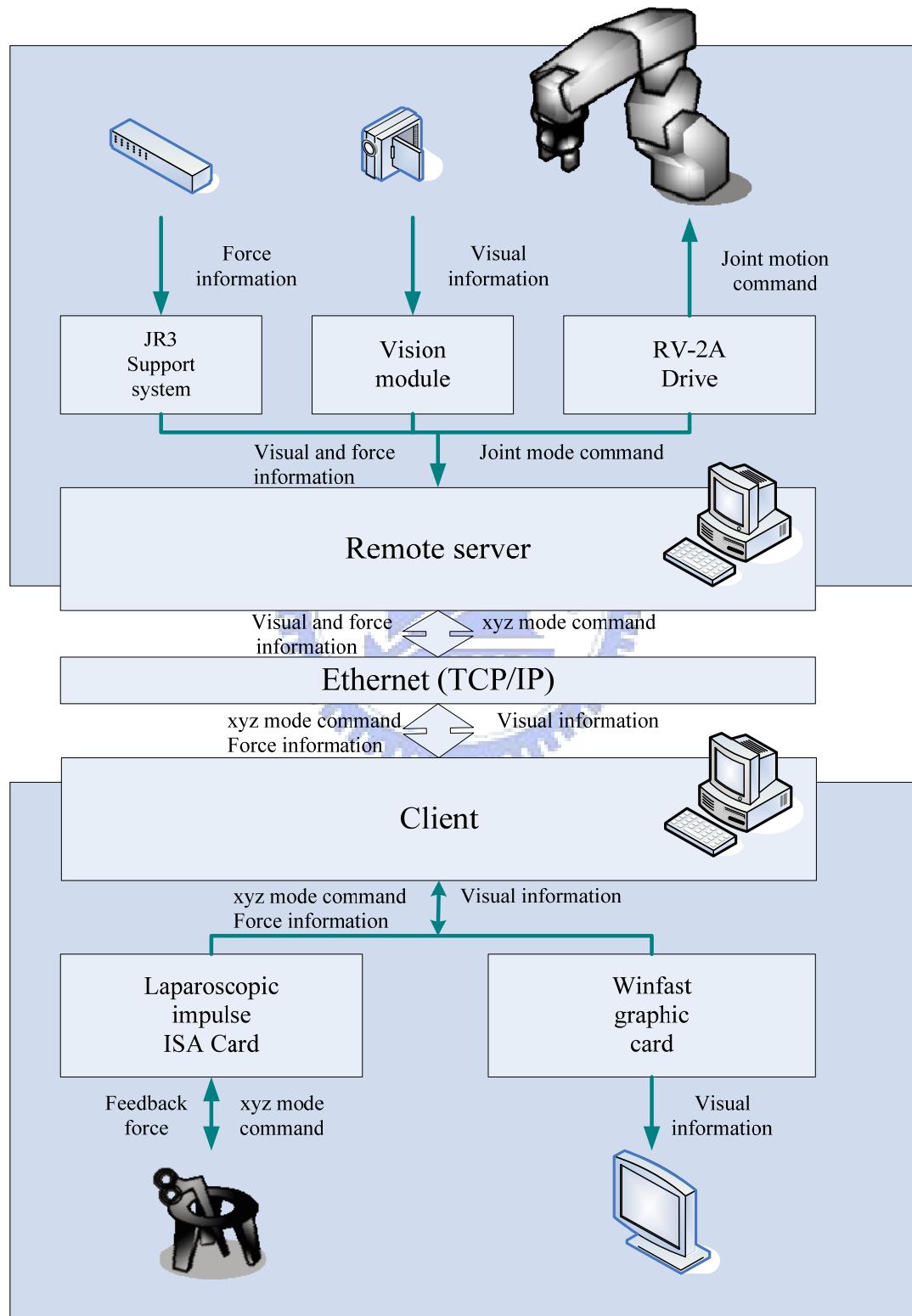


圖 3-2 遠端操控系統架構圖

3.2 系統流程

我們將整個遠端操作系統的流程分成處理位置命令、力覺訊號以及視覺訊號三個部份，分別由個別的執行緒控制，首先是位置命令處理的流程，圖 3-3 為系統處理流程，使用者藉由搖桿對近端電腦輸入位置命令，透過網路傳輸以後輸入遠端電腦，遠端電腦接受到以後先利用低通濾波器過濾雜訊，接著將使用者的位置控制命令轉換成機器手臂用的角度控制命令，透過角度控制操作夾爪到達使用者想要到達的位置。

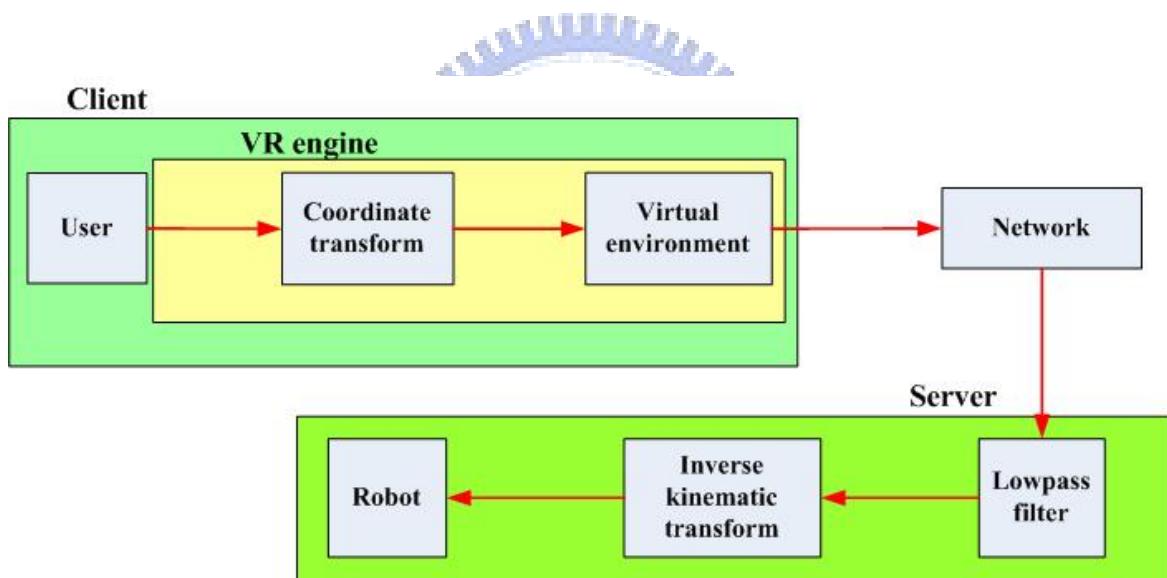


圖 3-3 位置命令處理流程圖

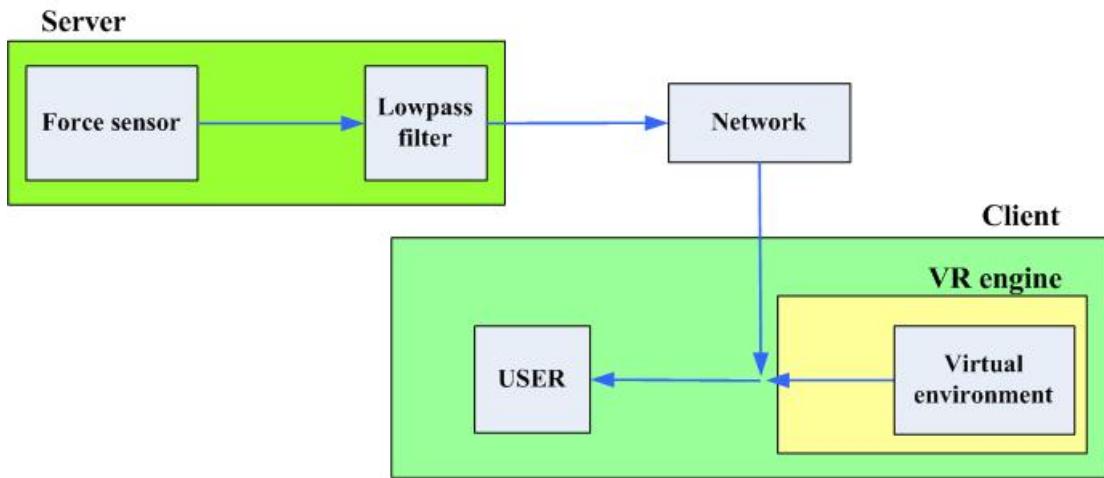


圖 3-4 力訊號處理流程圖

圖 3-4 說明了力訊號在系統中傳遞的流程，當力感測器(JR3 UFS-3012A25)感測到外力時，會將該訊號傳送給遠端電腦，遠端電腦以低通濾波去除雜訊後，再傳到近端，近端電腦會將力訊號與虛擬導引產生的虛擬力結合，成為使用者實際感受的回饋力。在量取力訊號的時候，由於力感測器極容易受到高頻雜訊的干擾，故需要對該訊號作低通濾波處理，JR3 的取樣頻率約在 1k Hz，而雜訊頻率則約為 150Hz。經過設計後，我們設置了一個使用 Kaiser window 的 FIR 低通濾波器，其 pass band 為 100Hz、stop band 為 250Hz，該濾波器的參數及頻率響應圖如圖 3-5 所示，window 長度為 16，頻率響應圖之橫軸以 π 為單位， 2π 代表的是 1kHz，故 bass band 在 0.2π 的位置，stop band 則在 0.5π ，濾波後的效果如圖 3-6(a)所示。另外當操作者在進行操作時，由於手部的疲勞或者不經意的抖動，造成位置命令也會參雜著若干雜訊，為了能更平順的控制機器人，遠端電腦在接受使用者輸入的訊號後，同樣的安置了一個濾波器去除雜訊；一般人手部抖動的頻率約在 50Hz 左右，server 接收位置命令的取樣頻率約在 150Hz 上下，設置的濾波器 pass band 為 15Hz，stop band 為 35.5Hz，濾波後的圖形如圖 3-6(b)所示。

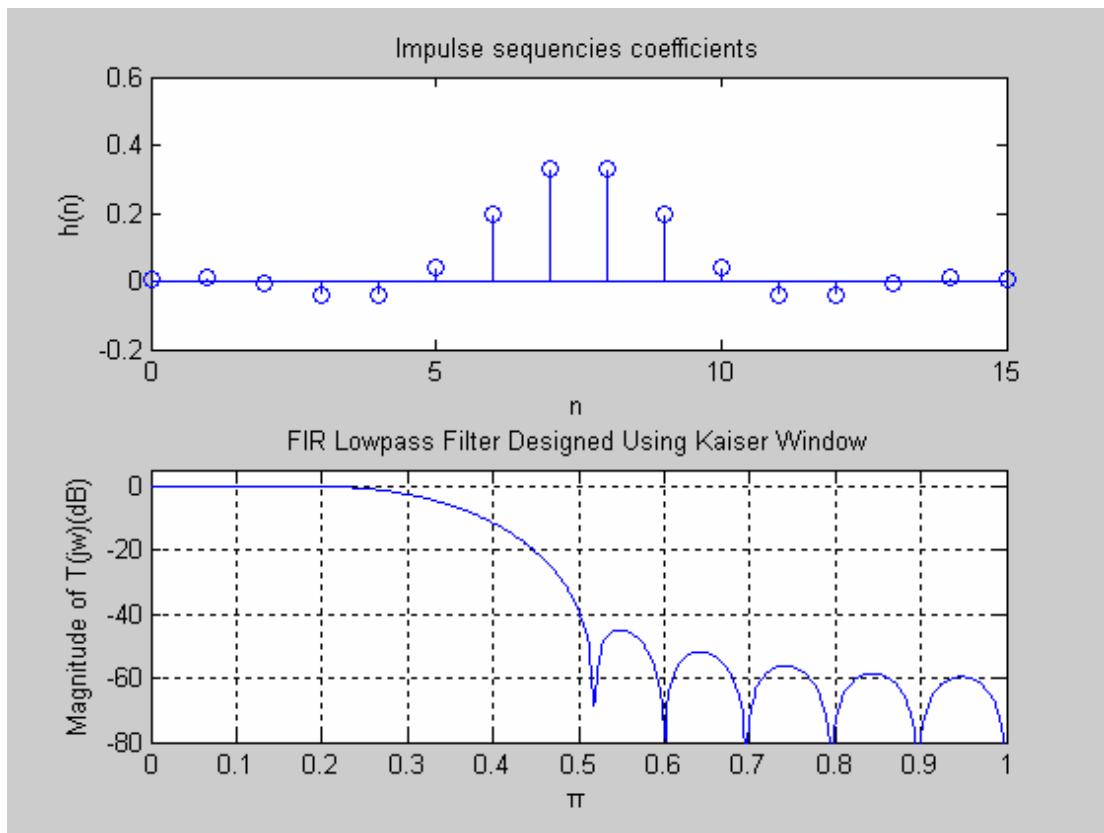


圖 3-5 使用 Kaiser window 的 FIR lowpass filter, 上圖為 window 的 weighting 值, 下圖為頻率響應圖。

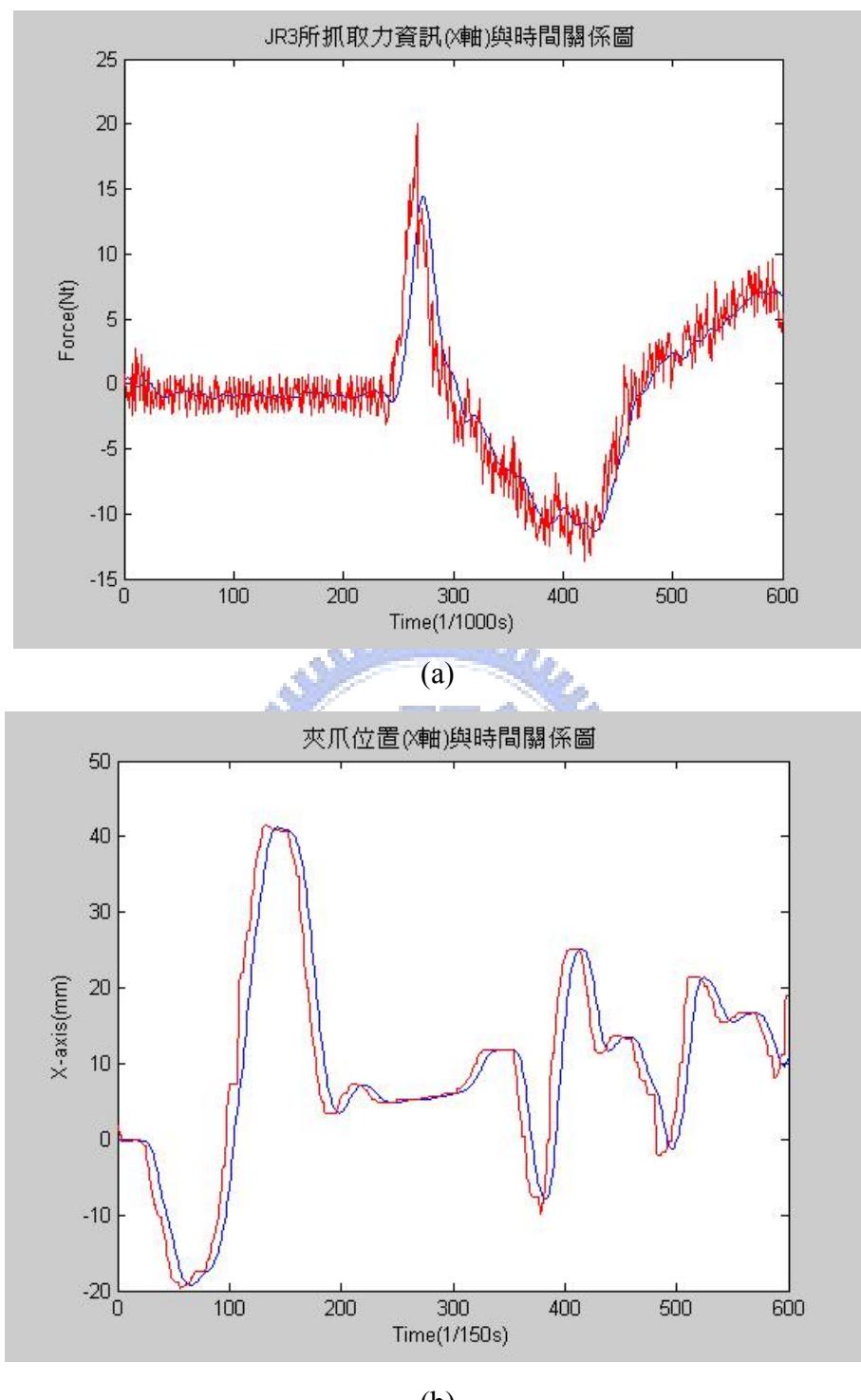


圖 3-6 低通濾波前後比較圖：(a)力訊號和(b)使用者輸入訊號，紅色線為濾波前，藍色線為濾波後。

3.3 軟體實現

本論文運用到的軟體工具主要為Visual C++ 6.0以及Borland C++ builder 5.0，Client端主要實現的部分包括搖桿的驅動、與Server端的網路溝通、建構虛擬實境以及虛擬導引的智慧型界面，Server端則負責與Client端的溝通、攝影機的驅動、操縱機械手臂以及處理力感測器的資訊等。由於機械手臂的控制、網路封包的傳遞和虛擬實境的更新都必須即時處理，因此在Client端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，最後分別介紹Client端與Server端操作程式的介面。



首先是虛擬環境的部份，在本實驗室的遠端操作系統中我們採用OpenGL繪圖函式庫來建構虛擬場景，雖然還有許多其他的工具，例如World Tool Kit、World up等，但因為OpenGL具有穩定且可攜性高的特性，所以我們選擇作為繪製3D虛擬場景的工具。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3-7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設計，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，到了這個階段圖形顯示裝置會把影像顯示到螢幕上。

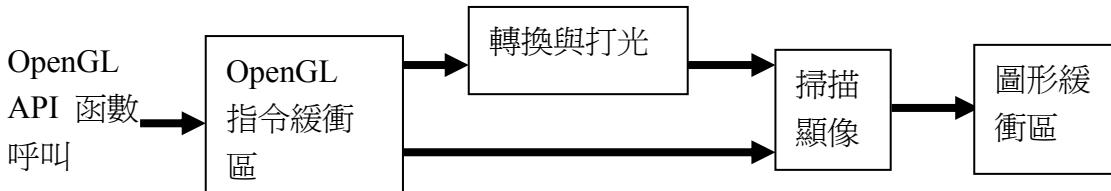


圖 3-7 OpenGL 成像流程

根據Delingette在研究[10]中指出，在人類的視覺感受中，為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，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，會因為無法提供足夠的頻寬，而可能會造成回饋的力不穩定[7]，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3-8所示，其中圖3-8(a)為一般程式設計時的執行順序和時間的關係，圖3-8(b)則為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。

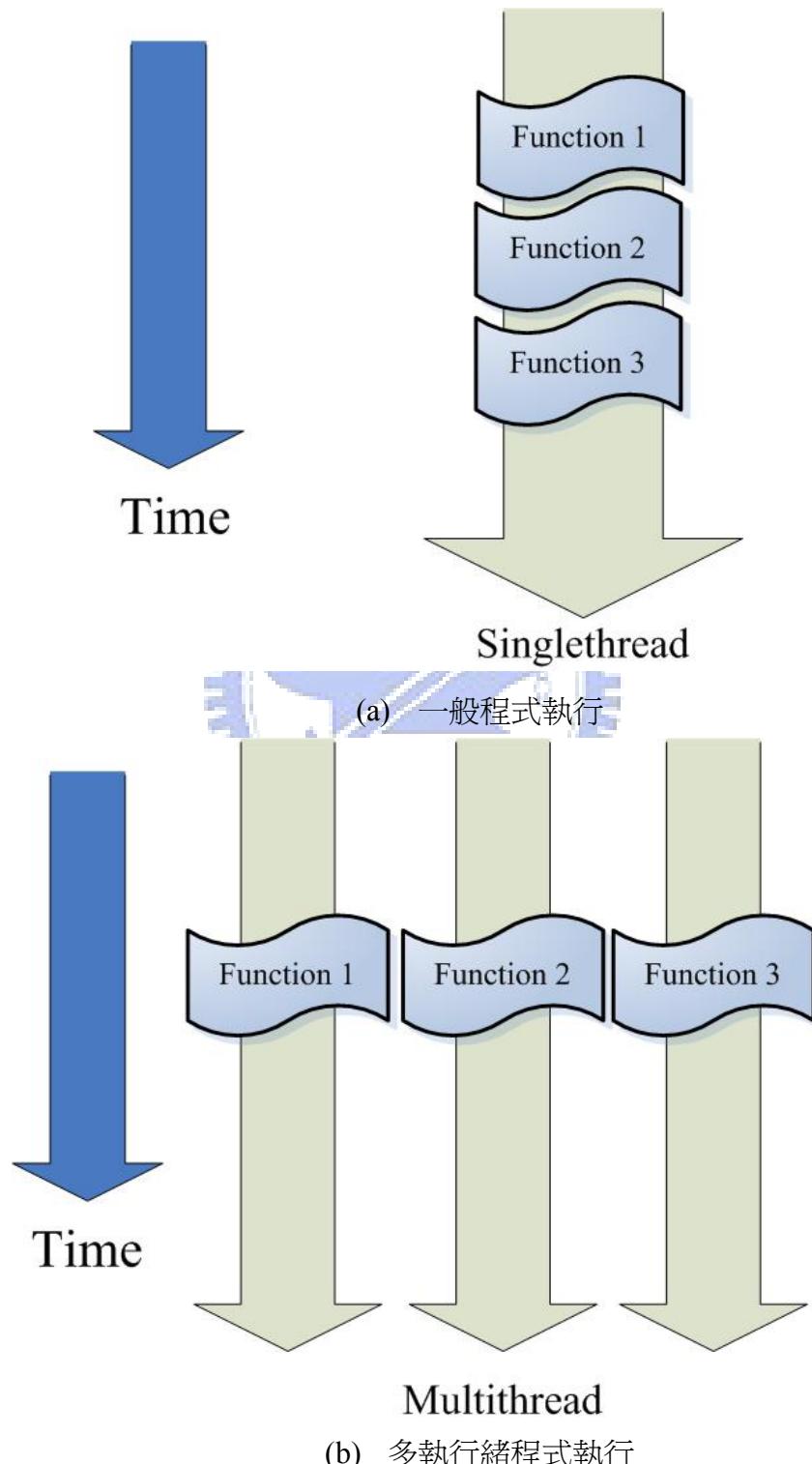


圖 3-8 執行順序和時間關係：(a)一般程式執行和(b)執行緒程式執行

Client 端電腦因為需要同時進行網路傳輸資料、搖桿力覺的更新以及虛擬實境畫面的更新，我們將同時開啓三個多執行序來完成這三項工作。三個多執行序中以負責搖桿力覺更新的執行序 A，其更新頻率最快為 1KHz，這個執行序同時也負責更新搖桿的位置並將其儲存起來，其餘兩個執行序 B 和 C 則分別在 150Hz 及 33Hz 的頻率下工作，執行序 B 由執行序 A 處存取目前搖桿位置並傳送至遠端，同時將由遠端接收到的力覺資訊傳送給執行序 A，執行序 C 則同樣存取搖桿位置後將其輸入虛擬實境並更新畫面，執行序 C 會將由虛擬導引計算出的虛擬的回饋力回傳給執行序 A，執行序 A 將會把由執行序 B 及 C 收集來的力資訊結合，成為真正要回饋給使用者的回饋力，圖 3-9 為執行緒 ABC 之間互通訊的示意圖。

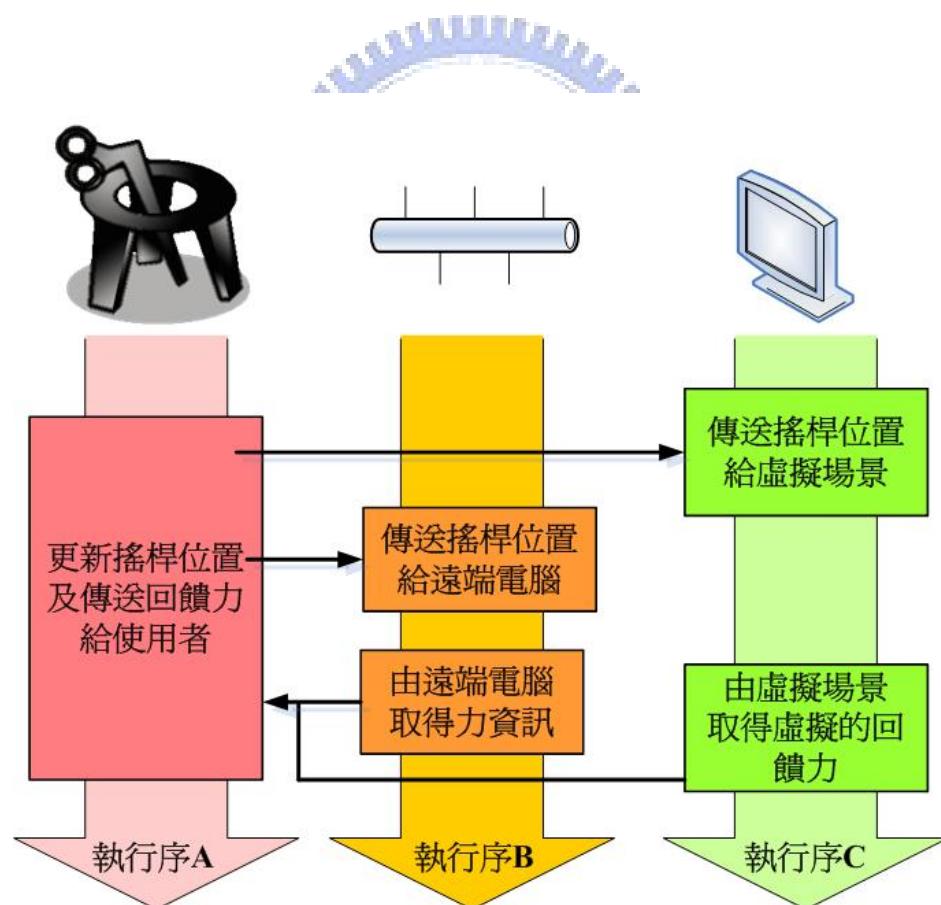


圖 3-9 多執行序執行示意圖

最後介紹遠端操控系統的使用者介面，圖 3-10(a)和(b)分別是 Client 端以及 Server 端程式的使用者介面，圖 3-10(a)為 Client 端介面，虛擬場景不僅可以供使用者進行實際遠端操作，也可以在 Client 端獨立進行模擬的實驗：圖中桌上的三個虛擬方塊可供操作者夾取、碰撞或丟擲，在夾取途中搖桿也會給予使用者回饋力，使模擬實驗更加貼近真實情形，圖 3-10(b)為 Server 端介面，除了接受 Client 端所傳來指令外，亦可以直接經由該介面來對機械手臂下達命令，調整夾爪的位置、開合等狀態。

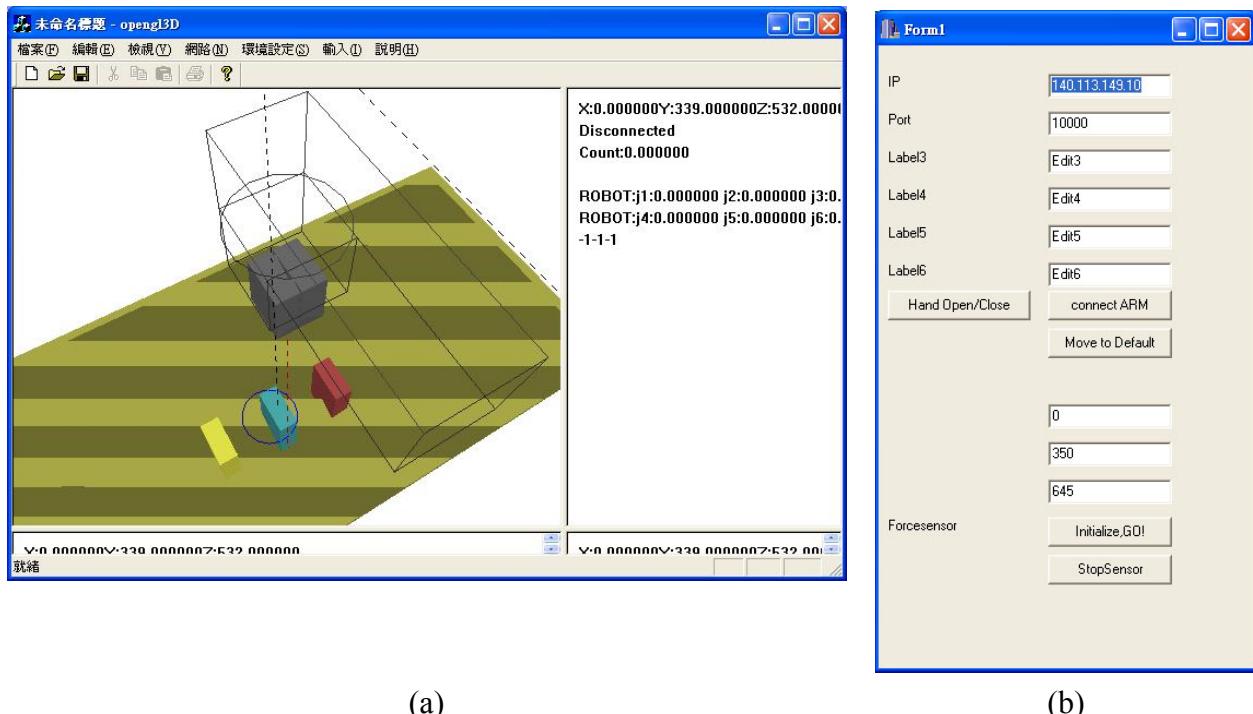


圖 3-10 遠端操控系統之使用者介面：(a) Client 端和(b) Server 端

3.4 硬體實現

在硬體方面，本實驗共使用兩台電腦（遠端、近端），一具機械手臂（含控制器），一台力回饋手術搖桿，一具力感測器，以及一具攝影機；近端電腦的配備為Pentium(R) 4 CPU 1.70Hz，512MB的RAM，遠端電腦的配備為Celeron(R) CPU 2.60Hz，512MB的RAM，其餘的設備說明如下。

(a) 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3-11為機械手臂RV-2A的外觀，圖3-12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 3-11 Mitsubishi RV-2A 五軸機械手臂外觀



圖 3-12 CR1-571 控制器外觀

表 3-1 Mitsubishi RV-2A 五軸機械手臂基本規格

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 ² in size, arranged from the base through the end of fore-arm).								
Tool air-tubing		Primary: ø6×2 ports	Primary: ø6×2 ports	Primary: ø6×2 ports	Primary: ø6×2 ports					
		Secondary: ø4×4 ports	Secondary: ø4×6 ports	Secondary: ø4×4 ports	Secondary: ø4×6 ports					
Protective structure		IP30	IP54	IP30	IP54					

表 3-2 CR1-571 控制器基本規格

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)	

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，但若是要透過網路即時控制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，GO是夾爪張開的指令，ED則是代表程式的終止。

(b) Laparoscopic 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Laparoscopic impulse engine [26]，如圖3-13所示，當作接收位置命令和產生力回饋給使用者，由於是五軸的搖桿，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 3-13 Laparoscopic impulse engine



表 3-3 Laparoscopic impulse engine 規格表

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		$\leq 0.5 \text{ oz } (0.14\text{N})$
Bandwidth	Linear Axis	650 Hz
	Rotary Axis	120Hz

(c) JR3 力感測器

為了獲得夾爪與外界物體碰撞時的力資訊，我們使用了JR3的力感測器，量測得到的力資訊混合虛擬場景產生的虛擬力，即為搖桿提供給使用者的回饋力；JR3為六軸力感測器，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，我們在實驗中使用了X、Y、Z方向力量的量測，其外觀如下圖3-14所示，表3-4為其基本規格。



圖 3-14 力感測器 JR3 外觀

表 3-4 力感測器 JR3 基本規格

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

第四章

實驗

本實驗目的為檢測操作者使用鎖定式導引進行操作時的效率與穩定性，我們採用在遠端的桌面隨機的位置上放置一個方塊並要求操作者來夾取，當操作者輸入夾取命令後，電腦便開始建立虛擬導引並且紀錄位置及力資訊，受測者為五名年齡分佈在 22~29 歲的男性學生，在實驗開始前都已經有多次使用本系統的經驗，因此不考慮在實驗的過程中經過測試逐漸進步的可能性，我們在這裡先對操作的成功與否下定義，當夾爪夾取到物體，並且可以維持一秒不讓物體落下，我們設定這次夾取成功，反之為失敗，失敗的原因，經過測試後分類為二類：操作者本身的失誤以及虛擬導引的不穩定，前者為在夾取過程中，碰撞太多次導致物體與虛擬實境中的位置誤差太大，後者為由於虛擬導引的力輔助失當，造成使用無法順利完成夾取。

本次實驗中的虛擬場景工作區域大小為 $500 \times 225 \times 340 \text{ mm}^3$ ，虛擬場景中力回饋範圍的大小則參考物體的大小以及軟硬度來設定，由於我們將在實驗中的物體體積範圍限制在 $50 \times 10 \times 30 \text{ mm}^3$ 之內，因此將鎖定式導引中的圓柱半徑設定為 50mm，力回饋搖桿的工作區域為 $230 \times 125 \times 100 \text{ mm}^3$ ，力回饋搖桿輸出範圍為 -8.9N~8.9N，輸出力大小 $|\vec{F}_o|$ 公式如下

$$\begin{aligned} |\vec{F}_o| &= \left| -K \times (\vec{V}_{pp} + \vec{V}_{pj} \times h) \times g(t) \right| \\ &= K \times \left| (\vec{V}_{pp} + \vec{V}_{pj} \times h) \right| \\ &= K \times \left| \vec{V}_o \right| \quad (\text{N}) \end{aligned} \tag{4.1}$$

在此假設使用者已進入虛擬導引一段時間，故權重函數 $g(t) = 1$ ，由於圓柱半徑設定為 50mm，故 $|\vec{V}_o|$ 最大值為 50， K 值定為 $8.9/50 = 0.178$ (N/mm)，使在力回饋範圍的邊緣可以受到最大的力。圓錐型導引的力回饋範圍最窄處同樣為 50mm，最寬處則根據開始導引時的操作點位置決定，通常會比窄處大 10~50mm，當使用者在寬處時，由於回饋力與距離成線性關係，因此感受到的力量會比在窄處時微弱，為了讓使用者更快速的到達物體的正上方，我們將 K 值調大，經過實驗後， K 值設為 0.2 為一個較理想的值。

4.1 實驗流程

整個遠端操作的流程如下，我們先依照欲夾取物體的大小、軟硬度來調整虛擬導引中的導引係數以及回饋範圍，接著在桌面上設定 A、B 與 C 三點放置物體，隨機挑選 A，B，C 其中一點上的物體，並要求使用者進行夾取。遠端操控系統將透過三種輔助方式，圓錐型，鎖定式以及無虛擬導引，來輔助使用者操作機械手臂，當操作者夾取到目標物時便完成實驗。

操作者進行夾取的流程如下，操作者先透過搖桿移動夾爪及攝影機，在遠端的桌面上尋找物體，當使用者下達開始夾取的指令後，電腦將認定出現在攝影機畫面中央的物體為目標物，此時電腦會建構出對應的虛擬導引，接著操作者隨著虛擬導引的指示操作夾爪接近目標物並進行夾取，圖 4-1 為系統輔助使用者進行夾取的流程圖，該流程分成兩個迴圈執行，力覺迴圈主要執行力輔助，而視覺迴圈則負責繪製虛擬場景及攝影機畫面。

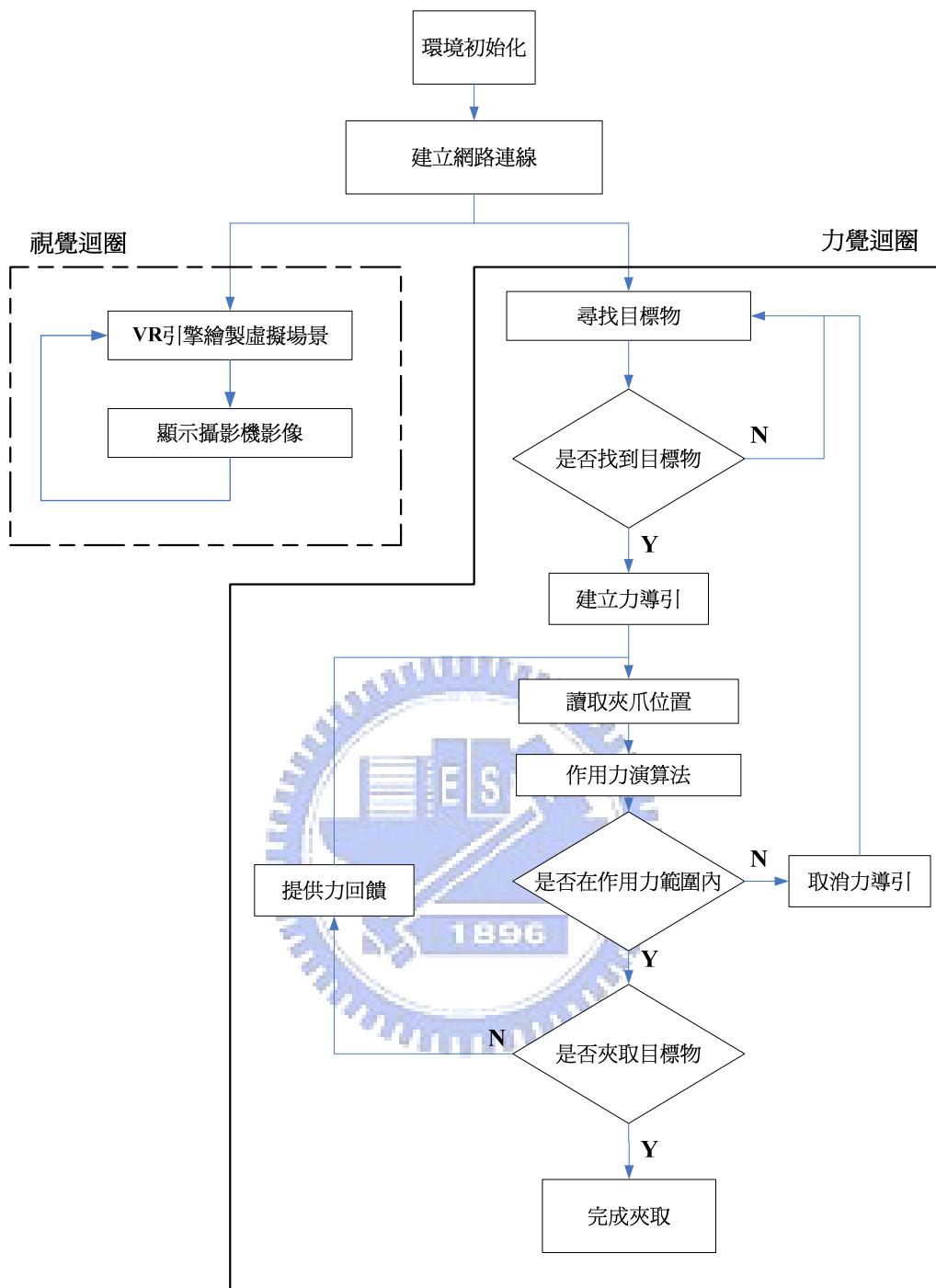


圖 4-1 夾取物體流程圖

4.2 操作實景

本節將介紹遠端操控系統實際運作的情形，圖 4-2 為操作者在近端進行操作的實景，操作者透過螢幕回傳的畫面得知夾爪的狀態，並以力回饋搖桿下達命令。



圖 4-2 操作者在近端進行遠端操控的情形

圖 4-3 為機器夾爪與實驗平台，機器夾爪上裝置有力感測器以及攝影機，提供操作者遠處機器夾爪的資訊，機器夾爪與遠端電腦之間透過網路傳遞訊息，我們經由遠端電腦也可以觀察操作者下達的命令以及力感測器的資訊，當操作者進行不當的操作時，可由遠端的觀察者停止實驗。



圖 4-3 機器夾爪與操作平台

圖 4-4—4-5 為使用者操作的情形，圖 4-4 為攝影機觀察到的畫面，圖 4-5 為繪製的虛擬場景，深灰色的方塊代表夾爪，圖中夾爪為閉合狀態，褐色長方體以及紅色方塊為平台以及目標物，虛擬導引的外觀類似一個彈簧，為數十個淺藍色的圓圈所組成的一個通道，每個圓圈代表在該高度時，力回饋的範圍大小，由圖可以看出，該通道為一個略略傾斜的圓柱體，表示使用的是鎖定式虛擬導引，準線為夾爪在桌面上的投影，使用者可以藉準線來估測夾爪與目標物的距離。

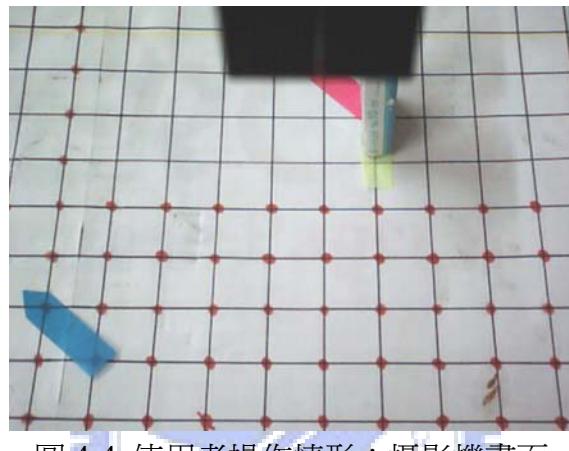


圖 4-4 使用者操作情形：攝影機畫面

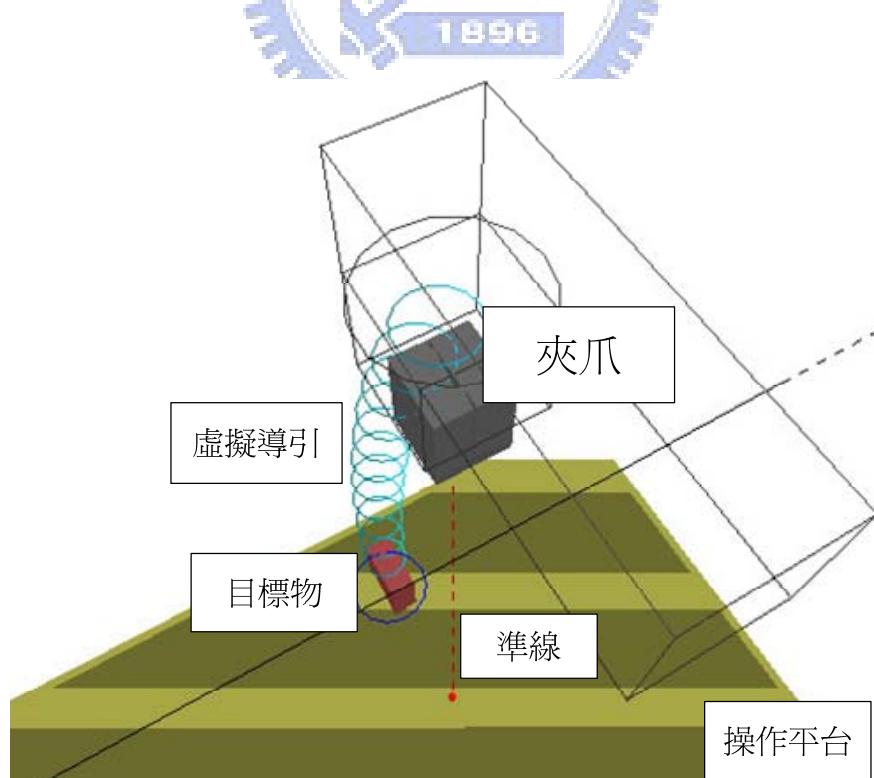
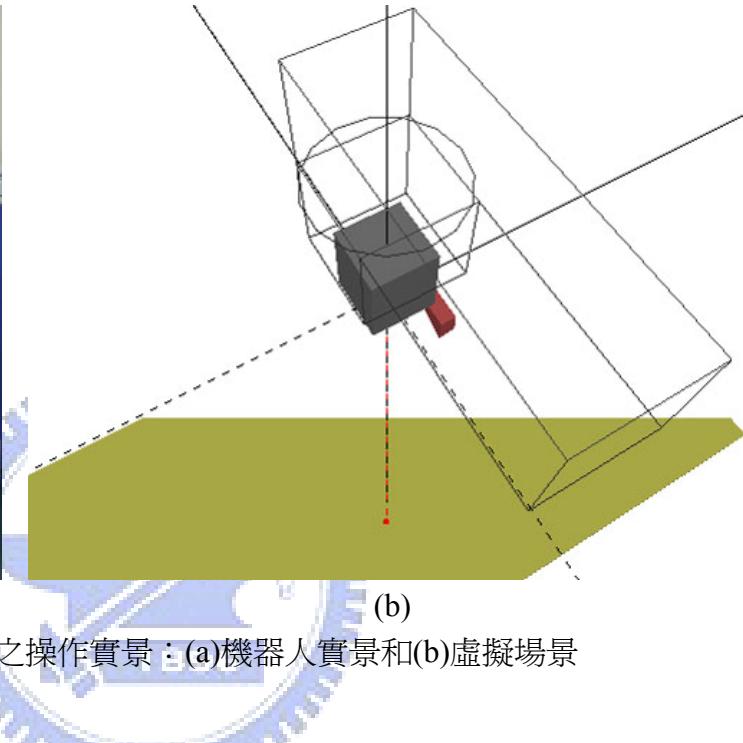


圖 4-5 使用者操作情形：虛擬場景

圖 4-6、4-7 和 4-8 為在操作過程中所擷取的機器人影像及相對應的虛擬場景。圖 4-6(a)~(b)為實驗開始的情形，此時夾爪在預設的起始點，圖 4-7(a)及(b)為開始夾取的情形，此時使用者已搜尋到目標物，開始夾取的動作，由圖 4-7(b)可以看到場景中已經建立虛擬導引，最後圖 4-8(a)~(b)為夾取到物體的情形。



(a)

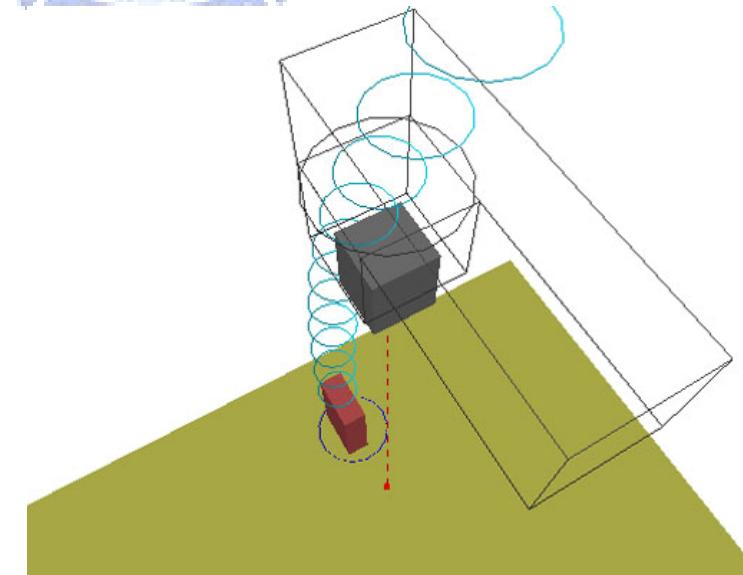


(b)

圖 4-6 實驗開始時之操作實景：(a)機器人實景和(b)虛擬場景

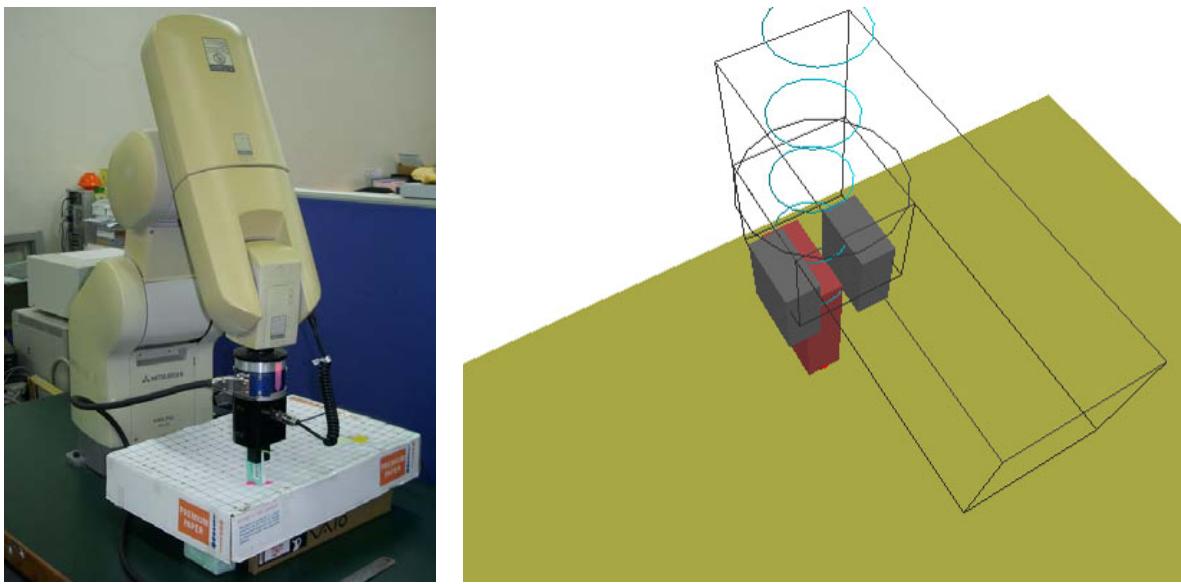


(a)



(b)

圖 4-7 進行夾取動作時之操作實景：(a)機器人實景和(b)虛擬場景



(a)

(b)

圖 4-8 夾取物體時之操作實景：(a)機器人實景和(b)虛擬場景

4.3 結果與討論

每位操作者使用三種輔助方式各進行三次的抓取，共有九組實驗數據，我們以 B 點的抓取軌跡圖為例，如圖 4-9 所示，目標物的位置為(-120,80,-300)，藍色線為圓錐型，紅色線為鎖定式，綠色線則為無導引的情形，由圖 4-9 我們可以發現有虛擬導引的確比較沒有導引的情況下要來的快速，鎖定式虛擬導引的軌跡曲線與圓錐型的曲線平滑程度類似，但是可以更快到達目標點的位置，我們認為會有這種效果的原因有二：一個是當操作者瞄準目標物時，圓柱狀的導引將操作點的移動範圍限制的更小，此點由在 x 軸上的軌跡可以看出，當夾爪往下移動時，鎖定式的軌跡較為平滑；另外當操作者在往下移動時，物體保持在攝影機的畫面中，讓使用者更為放心的移動，這點由 z 軸上鎖定式比圓錐型更快到達底部可以看出。

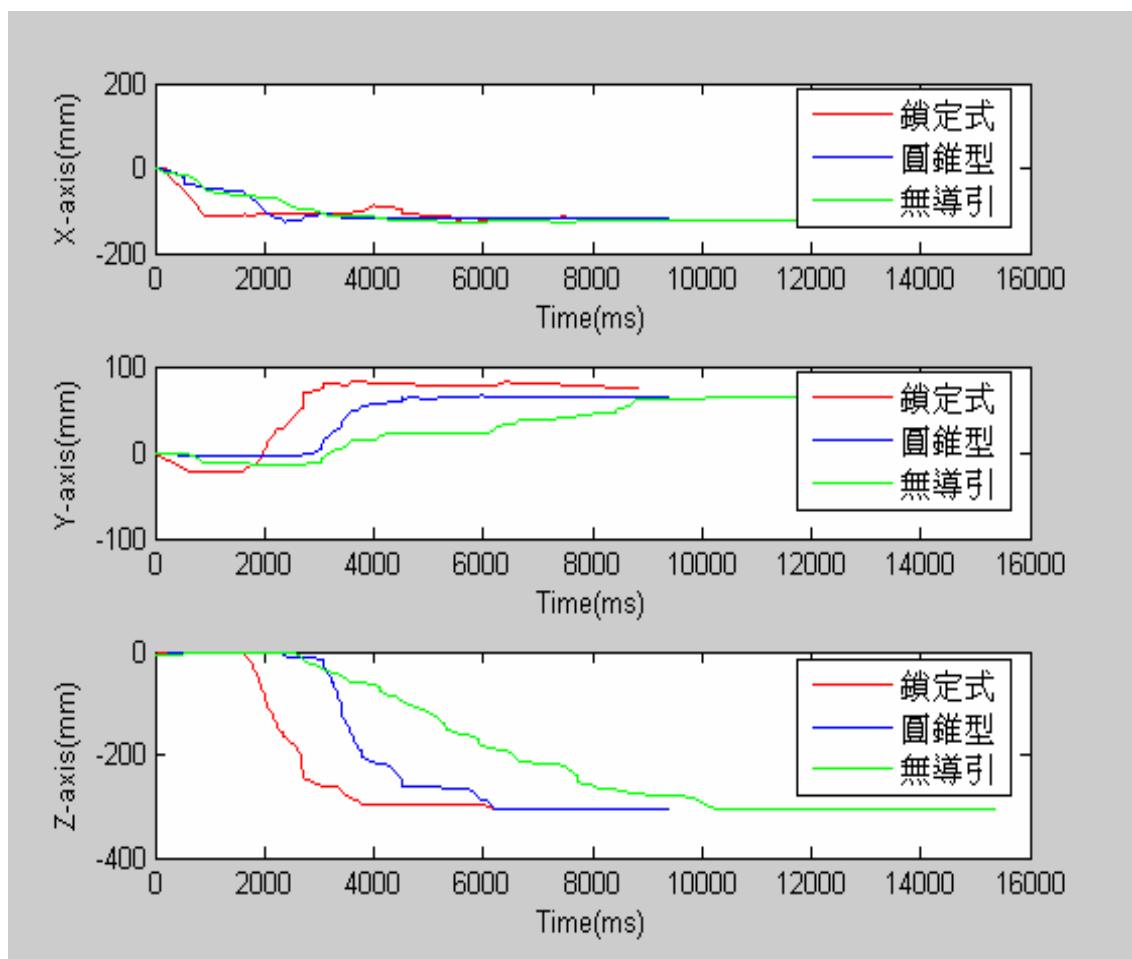


圖 4-9 三種力導引下的抓取軌跡圖

表 4-1 操作時間的平均值以及標準差(sec)

	無導引	圓錐型	鎖定式
受測者 A	9.35 ± 0.35 (69.33%)	6.49 ± 1.6 (56.03%)	5.24 ± 0.3
受測者 B	9.23 ± 0.6 (71.38%)	6.59 ± 1.5 (59.14%)	5.46 ± 0.3
受測者 C	15.28 ± 2 (106.85%)	16.33 ± 2.2 (66.12%)	10.10 ± 0.6
受測者 D	8.73 ± 1.7 (54.77%)	4.78 ± 0.3 (57.48%)	5.02 ± 0.8
受測者 E	7.98 ± 0.2 (67.44%)	5.39 ± 0.9	5.11 ± 0.8 (63.99%)

表 4-1 為操作時間的平均值以及標準差，由表 4-1 可以看出，以無導引時所

花費時間為基準(100%)，圓錐型的導引花費的時間約為 73.4%，鎖定式導引花費的時間為 60%，證明鎖定式導引在效率上的表現較圓錐型的要好。

表 4-2 三種輔助的操作成功率

	操作成功率(%)
鎖定式導引	95
圓錐型導引	75
無導引	60

表 4-2 為三種導引模式的成功率，可以發現到圓錐型導引的成功率比起鎖定式的導引要來的低，我們在觀察操作失敗的軌跡圖後發現，由於在接近物體時圓錐型導引的力回饋範圍過於狹小，當操作者施力撞上力牆時，很容易因為回饋力的關係反向再撞上另一邊的牆，造成在來回的震盪使得實驗失敗，圖 4-10 為一個操作失敗的軌跡圖，使用者在進行圓錐型力輔助實驗時，因為用力過猛造成震盪的情形產生，由於圓錐型導引最寬處與最窄處半徑通常相差 10~50mm，因此若 K 值過小時，使用者在寬處不容易感覺受到輔助， K 值太大時就容易產生震盪，此種震盪的現象造成使用圓錐型導引時成功率的降低。

我們在最後再針對不同軟硬的物體作抓取的測試，我們將受外力後較易形變的物體定義為軟物體，如紙盒、海綿一類，另外受外力後不易產生形變的物體定義為硬物體，如塑膠盒、鐵盒一類，我們要求使用者對不同軟硬度的物體作抓取的動作，圖 4-11 為使用鎖定式導引之結果，目標物座標為(100,100,-300)。所有的物體的體積都在 $50 \times 10 \times 30\text{mm}^3$ 左右，由圖可知大小接近的物體，在接近物體所花費的時間差別不大，然而當夾爪與物體產生些微的碰撞時，軟物體僅產生形變，而硬物體則會產生位移，因此硬物體比軟物體容易產生實際與虛擬物體位置

的誤差，另外當使用者在夾取物體，夾爪太往下時，軟物體可以由形變來緩衝，而硬物體則會直接擠壓到操作平台，因此，在使用鐵盒等較硬的物體時，失敗率較為其他物體來的高。

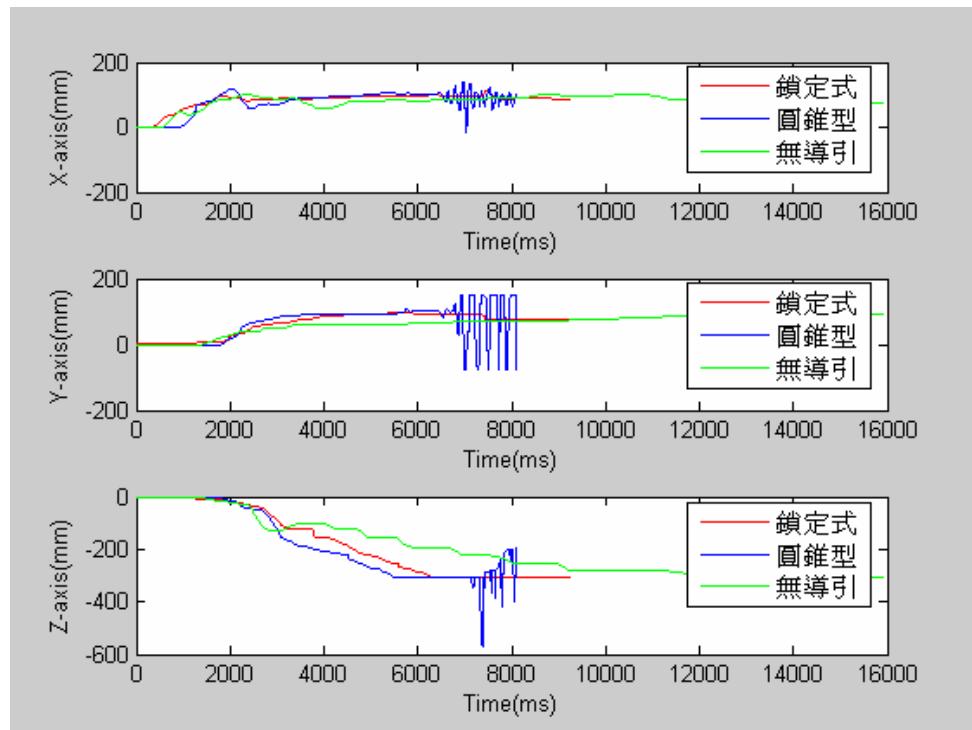


圖 4-10 圓錐型導引引起的震盪軌跡圖

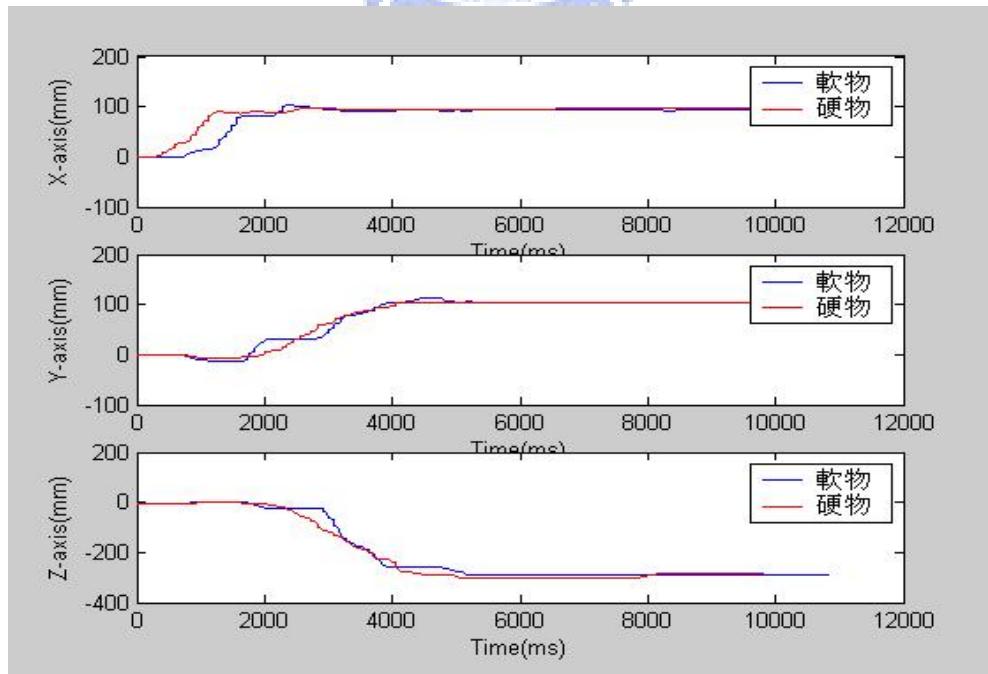


圖 4-11 利用鎖定式導引夾取不同軟硬度物體之軌跡圖

第五章 結論

在遠端操控系統中，由於遠端呈現以及遠端操控的問題，使得操作者無法快速的完成操作，為了增加操作者對遠端環境的了解以及增進操作上的效率，我們使用了虛擬導引來輔助操作者。在本論文中，我們利用攝影機與夾爪的組合建構新的鎖定式虛擬導引，系統讓使用者在操作過程中，能一直觀察到物體，掌握到物體的動態以及夾爪與物體的相對關係。



我們發現在進行搬運物體的操作時，雖然系統提供了 2D 影像以及 3D 場景的視覺回饋，但使用者對於物體與夾爪相對位置的認知仍然有限，需要多次的矯正才能到達物品或者是目標點附近，以至於在夾取以及放置物品的階段花費大量時間。因此，在夾取或放置物品時，虛擬導引的設計對使用者操作效率的影響相當顯著，基於上述的理由我們設定遠端操控的工作為遠端夾取物體來判別虛擬導引的優劣，實驗分別使用鎖定式虛擬導引以及圓錐型導引對使用者進行輔助，最後經由實驗後的數據來討論兩種不同形式導引的差異性。

經過實地操作後證明在操作的過程中，鎖定形式的虛擬導引的確在效率有著相當好的表現，當使用者在進行夾取的動作時，借助攝影機的輔助，使用者能夠一直觀察到物體的動態，可以更精準的調整夾爪的位置，在移動上也更有把握，操作的效率也就因此而提昇，另外，鎖定式虛擬導引也避免在力回饋範圍過小時產生的震盪，改善了使用圓錐型導引的缺點，鎖定式虛擬導引確實在搬運、堆疊物體的遠端操作上，有很好的效果，是相當有效的輔助方法。

5.1 未來工作

對於我們所設計出的鎖定形式導引，仍然有許多需要改進以及調整的空間，首先的問題是力回饋範圍的大小以及導引參數的調整，較小的力回饋範圍固然可以限制住使用者的移動進而讓使用者更精準的往目標物前進，但是過於狹窄的範圍將造成震盪的情形發生，我們希望在未來回饋力的計算部份，加入速度方面的控制，將可以減少震盪的產生，減少虛擬導引本身的誤差。

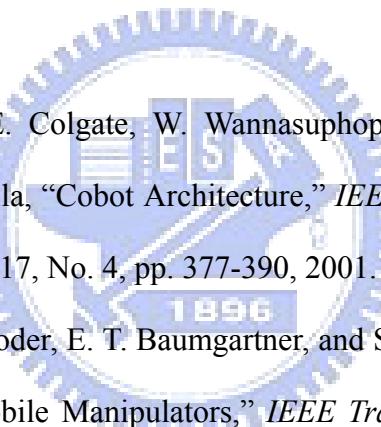
在本實驗中由於目標物的體積限定在一定的範圍內，針對相似大小的物體我們設計了對應的力回饋範圍以及導引參數，將來若要對不同大小的物體進行夾取，勢必將進行範圍以及參數的調整，我們期望屆時能找出描寫物體體積、力回饋範圍與參數間的關係式，以達到對使用者最大的輔助效果。

其次是 Bezier 演算法控制點的選定問題，Bezier 演算法固然可以由控制點得到想要的近似曲線，但是我們發現隨控制點的移動，近似曲線與原來的路徑誤差也會改變，此時我們就必須跟著調整控制點以達到最小的誤差，如何找出更適合的控制點數量以及如何設定更佳的位置，也是日後必須解決的問題。

由於夾取的動作在進行搬運的過程中是最講求精確的部份，因此我們在這次的實驗中僅對夾取的部份進行實驗，將來我們將對更複雜的動作以及物體進行實驗，並探討鎖定式導引在其他的動作中對於操作效率的影響，未來也將對力感測器作進一步的應用，在更複雜的動作中使用力感測器，提供使用者對遠端環境更擬真的感受。

參考文獻

- [1] A. B. Kuang, S. Payandeh, B. Zheng, F. Henigman, and C. 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [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. P. Kypson, and W. R. Chitwood, "Robotic Applications in Cardiac Surgery ", *International Journal of Advanced Robotic Systems*, Vol. 1, No. 2, pp. 87-92, 2004.
- [7] 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.

- 
- [8] C. W. Nielsen, M. A. Goodrich, “Comparing the usefulness of video and map information in navigation task,” *Proceedings of the 2006 ACM Conference on Human-Robot Interaction*, pp. 95-101, 2006.
 - [9] D. Aarno, S. Ekvall, and D. Kragic, “Adaptive virtual fixtures for machine-assisted teleoperation tasks”, *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1139-1144, 2005.
 - [10] H. Delingette, “Toward Realistic Soft-Tissue Modeling in Medical Simulation,” *Proceedings of the IEEE*, Vol. 86, No. 3, pp. 512-523, 1998.
 - [11] L. B. Rosenberg, “Virtual Fixtures: Perceptual Tools for Telerobotic Manipulation,” *IEEE Virtual Reality Annual International Symposium*, pp. 76-82, 1993.
 - [12] M. A. Peshkin, J. E. Colgate, W. Wannasuphoprasit, 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.
 - [13] 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.
 - [14] M. Utsumi, H. Sakai, and J. Akizono, “The State Representing Method for Underwater Remote Controlled Grab,” *IEEE TECHNO-OCEAN*, pp. 2098-2103, 2004.
 - [15] P. Marayong, A. Bettini, A. Okamura, “Effect of virtual fixture compliance on human-machine cooperative manipulation” *Intelligent Robots and System, 2002. IEEE/RSJ International Conference*, pp. 1089- 1095
 - [16] R. Prada, S. Payandeh, ”A study on design and analysis of virtual fixtures for cutting in training environments,” *Eurohaptics Conference, 2005 and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator*

Systems. World Haptics 2005. First Joint, pp.375-380,2005.

- [17] R. C. Goertz and R. Thompson, “Electronically Controlled Manipulator”, *Nucleonics*, pp. 46-47, 1954.
- [18] 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.
- [19] S. Otmane, M. Mallem, A. Kheddar, F. Chavand, “Active Virtual Guides as an Apparatus for Augmented Reality Based Telemanipulation System on the Internet” ,*33rd Annual Simulation Symposium*, pp.185,2000.
- [20] S. Payandeh, Z. Stanisic, “On application of virtual fixture as an aid for telemanipulation and training,” *Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, pp.18,2002.
- [21] 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.
- [22] Y. Adachi, T. Kumano, and K. Ogino, “Intermediate Representation for Stiff Virtual Objects,” *Virtual Reality Annual International Symposium*, pp. 203–210, 1995.
- [23] D. U. Zhijiang, and S. Lining, “ Review of Surgical Robotics and Key Techniques Analysis ”, *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics, Intelligent Systems and Signal Processing*, pp. 1041-1046, 2003.
- [24] 陳正翰,虛擬實境網路機器人遠端操控系統:視覺與攝影機校正,國立交通大學電機與控制工程學系碩士論文,2001.
- [25] 林猷長,視覺與力覺整合於機器人遠端操作之應用, 國立交通大學電機與控制工程學系碩士論文,2006.

[26] Immersion Co., Laparoscopic impulse engine, impulse engine 2000, and impulse stick software development kit, release 5.0, September 2000.

