

國立交通大學
電機與控制工程學系

碩士論文

動態環境下力搖桿於人機介面適度性之
研究



Evaluating Force-reflection Joystick in
Human-Computer Interface under Dynamic
Environments

研究生：楊鎧銜

指導教授：楊谷洋教授

中華民國九十九年六月

動態環境下力搖桿於人機介面適度性之
研究

Evaluating Force-reflection Joystick in
Human-Computer Interface under Dynamic
Environments

研 究 生：楊鎧銜

Student: Kai-Sian Young

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 and Computer Science
National Chiao Tung University
In Partial Fulfillment of the Requirements
of the Degree of
Master
in
Electrical and Control Engineering
June 2010
Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國 九十九年 六月

動態環境下力搖桿於人機介面適度性之研究

研究生：楊鎧銜

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

由於電腦功能日益強大與作業系統的快速發展，使得人機介面廣泛應用在各種領域，本論文探討在動態環境下力回饋搖桿是否適合做為人機介面之輸入裝置，我們進行了一系列的實驗，印證了運動時間與困難度間存在一線性關係，這也說明力搖桿適合作為人機介面的輸入裝置，而在搖桿的使用中，如何減少運動時間和降低錯誤率是一個重要議題，我們提出三種力輔助系統來進行改善，分別為主動力、被動力與提示力，實驗結果印證在運動時間和錯誤率方面皆有改善的成效；基於此研究，利用力回饋搖桿搭配力輔助系統，將可幫助使用者更精準完成任務。

Evaluating Force-reflection Joystick in Human-Computer Interface under Dynamic Environments

Student: Kai-Sian Young

Advisor: Dr. Kuu-Young Young

Department of Electrical and Control Engineering

National Chiao Tung University

Abstract

Due to fast development of computers and operating systems, HCI (human-computer interface) nowadays has been applied to various fields. This thesis investigates whether the force feedback joystick is suitable to serve as the input device under dynamic environments. We perform a series of experiments and find that there is a linear relationship between the movement time and index difficulty, indicating that force-reflection joystick is a suitable input device for HCI. In addition, reducing movement time and error rate is an important issue for HCI. To deal with that, we thus propose three force-assistant systems including active force, passive force and reminding force. The experimental results show that these three force-assistant systems make improvement on the movement time and error rate. With this study, the user can manipulate the force-reflection joystick with the help of force-assistant systems to accomplish the task more rapidly and accurately.

致謝

首先感謝我的指導教授---楊谷洋博士，在這兩年研究期間，由於他熱心的指導，使得我的研究工作得以順利完成。同時感謝口試委員們:莊仁輝教授、宋開泰教授及柯春旭教授撥冗參與論文口試，並給予許多寶貴的指導與建議，使我獲益良多。另外，謝謝木政、修任、豪宇、一哲、昶煒、彥安、勝雄學長以及邱添丁先生在研究上的討論與建議，還有其他在「人與機器實驗室」的夥伴們:方翔、翔斌、明勳同學以及柏穎、權哲、育傑與學弟們，在這兩年的研究室生活中，由於你們的陪伴讓我的生活多采多姿。最後要感謝的是我的家人，你們的關懷與支持使得我能心無旁騖的完成學業。非常高興自己在邁向人生另一個階段的關鍵時刻，有這麼多美好的回憶陪伴著我，我會將他好好珍藏起來，讓他成為我最美麗的回憶，謝謝大家。



目錄

| | |
|-------------------------|-----|
| 中文摘要 | I |
| 英文摘要 | II |
| 誌謝 | III |
| 目錄 | IV |
| 表目錄 | V |
| 圖目錄 | VI |
| | |
| 1. 導論 | 1 |
| 1.1 研究背景 | 1 |
| 1.2 研究動機與方法 | 7 |
| 2. 動態環境之力搖桿實驗設計 | 10 |
| 2.1 實驗場景設計 | 10 |
| 2.2 力輔助設計 | 14 |
| 2.3 實驗流程 | 16 |
| 3. 系統實現 | 20 |
| 3.1 硬體實現 | 21 |
| 3.3 軟體實現 | 24 |
| 4. 實驗分析 | 26 |
| 4.1 驗證搖桿是否適合於動態場景 | 26 |
| 4.2 力輔助實驗數據分析 | 30 |
| 4.3 錯誤率分析 | 35 |
| 4.4 受測者問卷調查結果 | 37 |
| 5. 結論與未來工作 | 38 |
| 5.1 未來工作 | 39 |
| 參考文獻 | 40 |

表目錄

| | |
|---|----|
| 表 2.1 速度與距離的困難度組合 | 12 |
| 表 2.2 受測者基本資料 | 13 |
| 表 3.1 三種搖桿規格表 | 21 |
| 表 4.1 四種力輔助線性回歸常數與關係係數表 | 30 |
| 表 4.2 速度與距離的困難度組合 | 31 |
| 表 4.3 四種力輔助模式平均完成任務時間 | 33 |
| 表 4.4 三種速度平均完成任務時間 | 34 |
| 表 4.5 九種困難度個別所對應表現最佳的輔助力和完成時間改善程度 | 35 |
| 表 4.6 九種困難度個別所對應表現最佳的輔助力和錯誤次數改善程度 | 37 |



圖目錄

| | | |
|--------|---|----|
| 圖 1.1 | 泡泡法示意圖[3]..... | 2 |
| 圖 1.2 | 視覺回饋示意圖 | 3 |
| 圖 1.3 | 力回饋滑鼠[7]..... | 3 |
| 圖 1.4 | 感受力分佈圖[7]..... | 4 |
| 圖 1.5 | 力覺回饋示意圖 | 4 |
| 圖 1.6 | 視覺回饋之缺點 | 5 |
| 圖 1.7 | 導引力輔助系統 [19]..... | 5 |
| 圖 1.8 | 限制力所展現之功能[15] | 6 |
| 圖 1.9 | 觸力提示系統[8]..... | 6 |
| 圖 2.1 | 實驗場景畫面 | 11 |
| 圖 2.2 | 實驗場景速度與距離的描述 | 12 |
| 圖 2.3 | 實際受測場景 | 13 |
| 圖 2.4 | (a)球落下在左方時之主動力和(b)球落下在右方時之主動力 | 15 |
| 圖 2.5 | (a)球落下在左方時之被動力和(b)球落下在右方時之被動力 | 15 |
| 圖 2.6 | (a)球落下在左方時之提示力和(b)球落下在右方時之提示力 | 16 |
| 圖 2.7 | 力輔助實驗場景初始畫面 | 17 |
| 圖 2.8 | 實驗中目標球落下初始位置 | 18 |
| 圖 2.9 | 受測者按下空白鍵後給予使用者的視覺回饋 | 18 |
| 圖 2.10 | (a)實驗預測落點位置失敗圖和(b)實驗預測落點位置成功圖 | 19 |
| 圖 2.11 | 實驗流程圖 | 19 |
| 圖 3.1 | 系統實現架構圖 | 20 |
| 圖 3.2 | (a)Impulse Stick Force Feedback Joystick， (b)Impulse Engine 2000，和(C)Phantom Omni Feedback Joystick..... | 21 |
| 圖 3.3 | 力回饋裝置內部示意圖..... | 23 |
| 圖 3.4 | OpenGL 成像流程 | 25 |

| | | |
|--------|-----------------------------------|----|
| 圖 4.1 | 無力輔助系統:實驗結果經線性回歸後的直線圖 | 27 |
| 圖 4.2 | 主動力輔助系統:實驗結果經線性回歸後的直線圖 | 28 |
| 圖 4.3 | 被動力輔助系統:實驗結果經線性回歸後的直線圖 | 29 |
| 圖 4.4 | 提示力輔助系統:實驗結果經線性回歸後的直線圖 | 30 |
| 圖 4.5 | 輔助力模式與困難度平均運動時間比較圖 | 32 |
| 圖 4.6 | 力輔助模式對受測者差異分析圖 | 32 |
| 圖 4.7 | 速度對受測者差異分析圖 | 33 |
| 圖 4.8 | 標準化後三種力輔助力系統與無輔助力系統平均反應分數分析圖..... | 35 |
| 圖 4.9 | 力輔助模式與困難度組合錯誤次數比較圖 | 36 |
| 圖 4.10 | 受測者問卷問回覆統計圖 | 38 |



第一章

導論

1.1 研究背景

由於作業系統日益強大以及電腦功能的快速發展，使得人們利用電腦執行工作的機會增加許多，而操控電腦的機制通常為滑鼠、力手套、力搖桿、鍵盤等輸入裝置，配合螢幕、喇叭等輸出裝置，使用上述裝置可以讓使用者更加直覺性的操控電腦完成任務，這也是人機介面(Human-Computer Interface, HCI)所期望的目標。HCI 可以是經由使用簡單的使用者介面搭配合適的輸入裝置，來達成人們所希望的任務，像是可以使用力搖桿搭配遠端操控機器手臂[1]，也有研究是在描寫使用力感呈現裝置來進行外科手術[2];在生理運動學的研究方面，Jagacinski 等[3]將 HCI 應用於目標物抓取任務，將年輕人與老年人的運動時間、反應時間、準確度等效能量化，並進行比較；而在在腦科學的研究上，David 等[4]利用控制螢幕中的游標進行指定的行為轉換，研究腦皮質層的變化；在復健科學研究上，Popesvu 等[5]進行運動復健利用的是力回饋手套，建構一含虛擬場景之遠端遙控系統，來監控並幫助進行復健，繼而運用到中風病患上也頗有成效；Colombo 等[6]在實驗中會要求受測者操控力搖桿走一正方形軌跡，進而給予適當的力輔助，有助於幫助中風的前臂復健；Lee 等[7]使用力回饋裝置進行一反覆前後左右動作的實驗，幫助受傷病患復健。

合宜的人機介面可以讓使用者感到舒適且迅速完成工作，而功能較強的人機介面常會提供輔助給使用者，其中可能包含視覺回饋和力覺回饋，在人機介面的輸入裝置中較常使用的裝置有包含滑鼠[8]、觸控型螢幕[9]、力回饋手套[10]和搖桿[2]等。對於 HCI 而言，減少完成任務時間和減少錯誤率一直以來都是熱門討

論的議題，在相關的研究報告中，對於不同的輸入裝置如何減少完成任務的時間有提出幾種方法，就滑鼠部份來說，有些方法是由視覺上著手，像是由 Grossman 等[8]所提出的泡泡法，乃就是藉由滑鼠控制的物體接近目標物時，可以適時調整控制的物體大小，當控制的物體移向目標物時，控制的物體半徑將會增大，而增大到靠近其它非目標物時，會停止增大，如果增大到欲抓取之目標物時，而小於其它非目標物時控制的物體將可以直接併掉目標物，如圖 1.1 所示。此方法使用的是關於視覺回饋，只有影響使用者選取的難易度，而不是直接給使用者物理力，對於僅需操作電腦虛擬物體是較常用之方法，視覺回饋之示意圖如圖 1.2 所示。

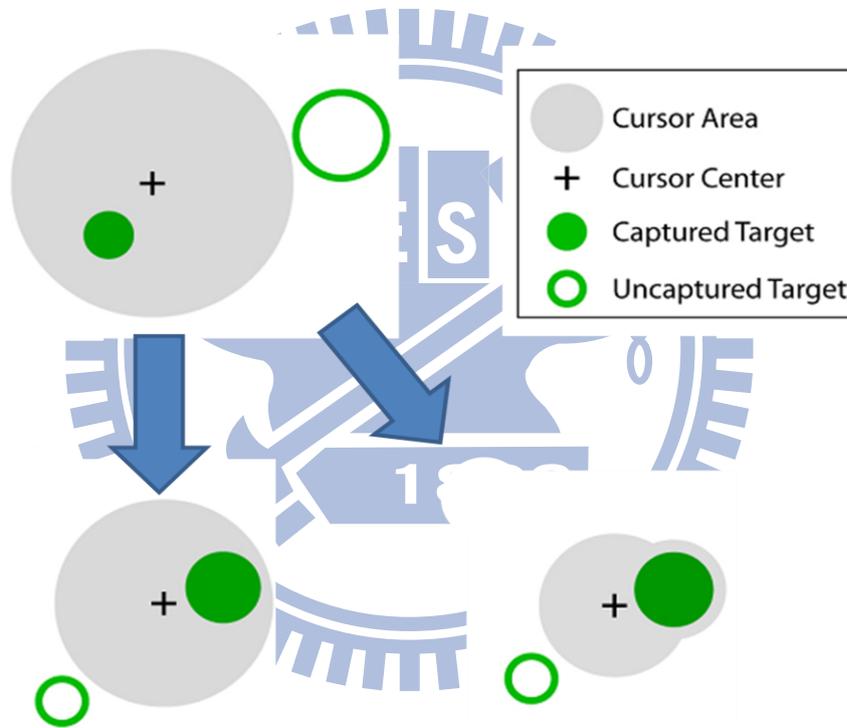


圖 1.1 泡泡法示意圖[8]

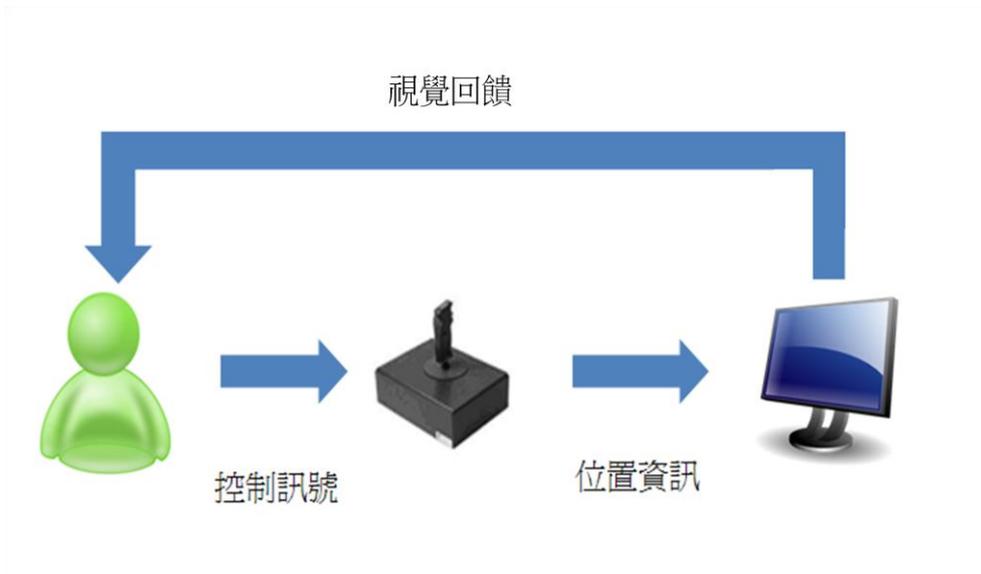


圖 1.2 視覺回饋示意圖

在觸控型螢幕方面，近年來常當成人們常用的輸入裝置，如手機、PDA、捷運站購票系統等，都是常用的輸入裝置，對於觸控型螢幕使用者來說，有時會發生誤觸的現象，當目標 A 與目標 B 靠的太近時就會發生誤觸。由 Vogel 等[9]和 Roudaut 等[11]所提出的方法中，藉由視覺的呈現上來改善此現象的發生，進而減少失誤與減少選取時間以提升效率；而 Tse 等[12]使用手套搭配口語表達，使系統更能了解使用者意圖進而改善時間問題；由 Dennerlein 等[13]所提出的方法是由輸入裝置輔助使用者，藉此改進任務的完成時間，實驗所使用的滑鼠如圖 1.3 所示，而實驗中滑鼠所感受到的力是當操控的游標離通道中心越遠，感受到的力越大，如圖 1.4 所示，此方法是屬於力回饋方面，對於透過 HCI 控制真實物體時是一實用的方法，可以直接給使用者一個物理影響力，力覺回饋示意圖如圖 1.5 所示。



圖 1.3 力回饋滑鼠[13]

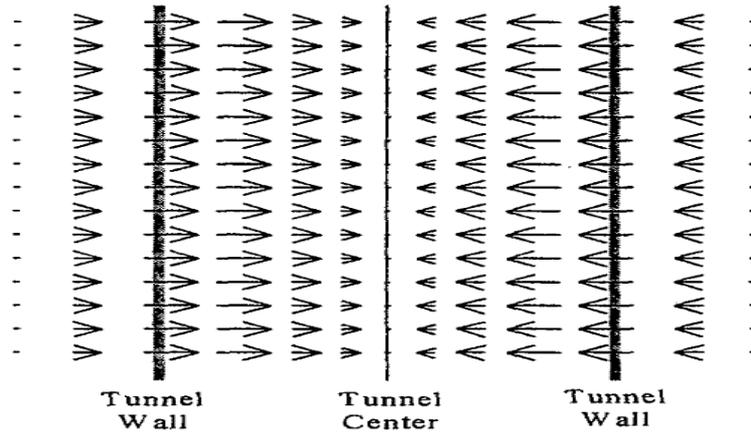


圖 1.4 感受力分佈圖[13]

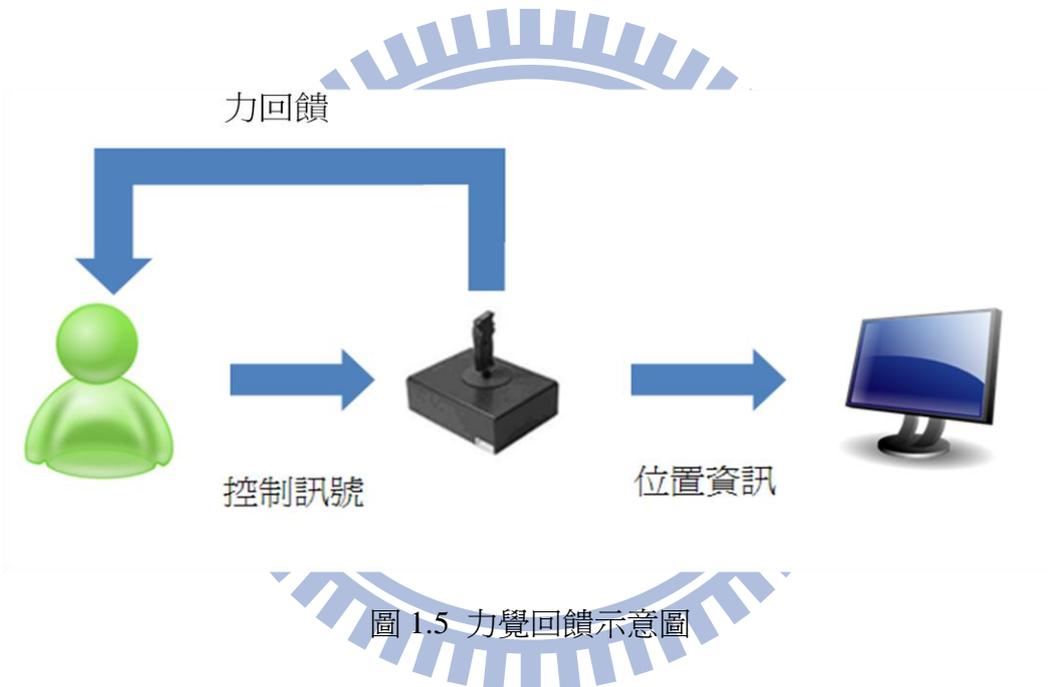


圖 1.5 力覺回饋示意圖

在視覺回饋和力覺回饋的選用上各有優缺點，而視覺回饋上對於真實硬體會產生誤差的情形發生，例如在 Grossman 等[8]所提出的泡泡法中所控制的物件半徑可以使之增加，但當在電腦中所控制的物件放大的同時，在真實場景上所控制的物件並無法變大，如圖 1.6 所示。

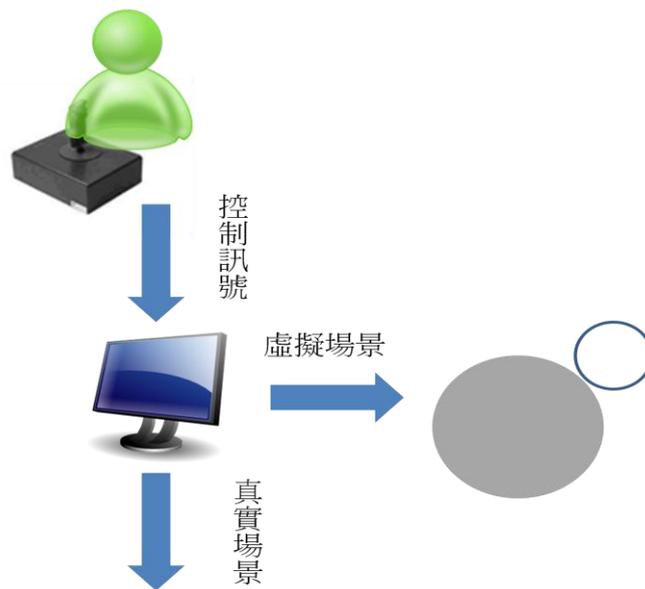


圖 1.6 視覺回饋之缺點

在力回饋方面則有好幾種輔助力，較常見的有三種，分別為導引力、限制力和觸覺力。在導引力的使用中，由 Teo 等[14]所提出的毛筆書寫系統中，在力引導方式中的方法是採用動作引導(Motion guidance)的方式(圖 1.7)，使用者可以經由力的引導進而完成控制的動作，而使用者所感受到的方向與速度都是預先規畫好的，此種方法是使用在讓使用者可以學習如何正確的軌跡，對於初學者而言不失是個好方法。



圖 1.7 導引力輔助系統 [14]

限制力在許多論文中常常出現，像是使用力搖桿使文字初學者可以學習正確寫法的應用[5][15]，也有學者針對運動感知能力進行應用[6]，此種限制力主要是

讓使用者不超出事前就規畫好的路線，為達成此一目的所採用的作法，即是在正確的路徑上的周圍產生一道力牆，如圖 1.8 所示，因為此種方法中當使用者操作在正確的路徑上時，力的功能事實上是沒太大的功用，所以也稱為被動力。

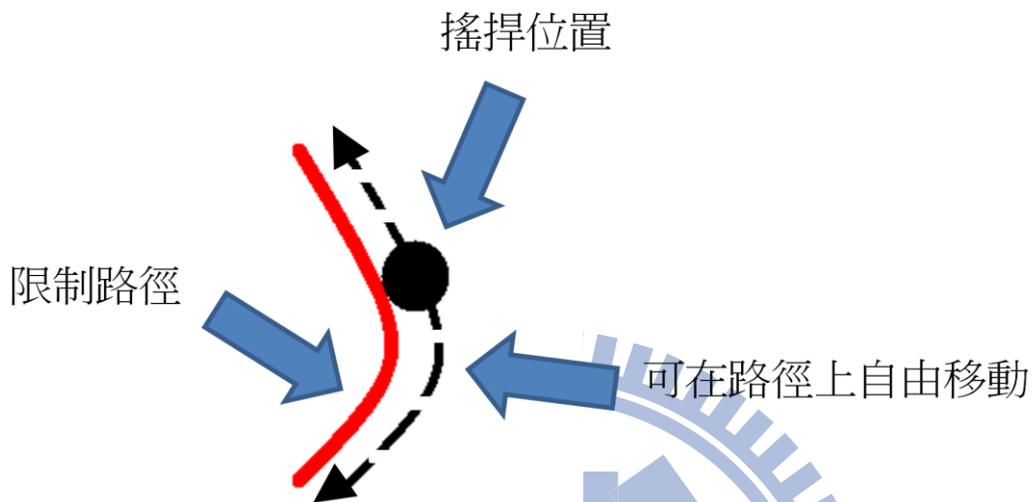


圖 1.8 限制力所展現之功能[5]

在 Forlines 等[16]論文中展現由他們自行組裝的一隻提示筆(圖 1.9)，此筆是由 20V 的螺線管(solenoid)與一隻觸控筆所組成，在他們的論文中指出，給人觸覺力的話，將有助於降低人在進行選取任務中的時間，並可以使錯誤率減少，在他們的研究中，假如觸控筆碰觸到如圖 1.9 所示中的綠色直線部份時，將會有一個小的力覺回饋，相當於某種“提示力”。

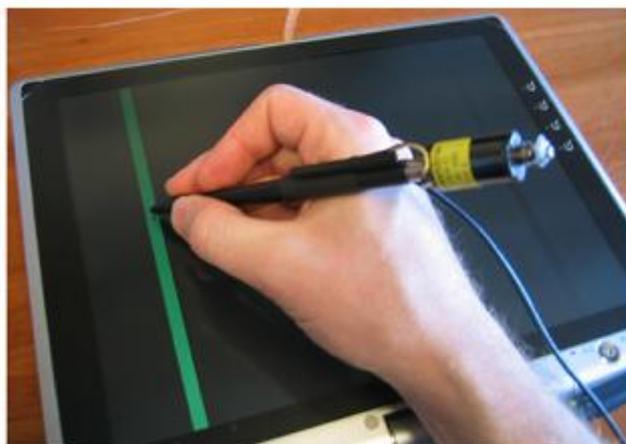


圖 1.9 觸力提示系統[16]

爲了驗證所使用的輸入裝置是否符合所建立的環境，有許多研究使用費茲定律(Fitts' law)[17][18]來檢定任務完成時間與任務困難度之間的關係。費茲定律是由 Fitts 在 1954 年中提出的關係式(式 1.1)，此關係式是在講述空間準確度與運動時間之間的關係。

$$MT = a + b \log_2 \left(\frac{2D}{W} \right) \quad (1.1)$$

MT 爲運動時間，目標物距離和物件的寬度的關係稱爲困難度(ID)，其中 ID 爲 $\log_2 \left(\frac{2D}{W} \right)$ ，D 爲與目標物之距離，W 爲寬度，式中的 a 和 b 的求法皆是經由回歸分析得到的兩個常數。而在經由多年的演進和多位學者的研究[19]，從原始的公式已被修改更符合現實情況。目前最常研究所採用的公式爲 Shannon formula(式 1.2) [20]，因爲此公式與訊息理論(Information Theory)極爲相似且也使困難度均爲正值，倍以此公式較被世人所接受，：

$$MT = a + b \log_2 \left(\frac{D}{W} + 1 \right) \quad (1.2)$$

其中 ID 爲 $\log_2 \left(\frac{D}{W} + 1 \right)$ ，D 爲與目標物之距離，W 爲寬度，式中的 a 和 b 的求法皆是經由回歸分析得到的兩個常數。

1.2 研究動機與方法

如前所提，減少完成任務時間和減少錯誤率一直以來都是 HCI 領域熱門討論之研究，而之前有許多研究提出力搖桿可以當作人們良好的輸入裝置[21]，而將力搖桿當作輸入裝置時，勢必會有時間和錯誤率上的要求，而在動態環境中我們並不確定搖桿是否合乎使用者所使用。在降低完成任務時間和減少錯誤率的改善方法中，可以利用所建立的動態環境中給予使用者輔助，並且觀察完成任務時間是否有改善的效果，在給予輔助的方法中，可行的方法有兩種，其中一種是選用視覺回饋的方法，另一種是直接從輸入裝置回饋給使用者，像是給予使用者一

個力回饋，本篇論文著重於力回饋部份，因為如前所提，視覺回饋在真實環境中可能不會滿足使用者真正的需要。為了驗證以上兩個問題，我們本篇論文提出的作法如下：

1. 驗證力回饋搖桿是否適用於動態環境

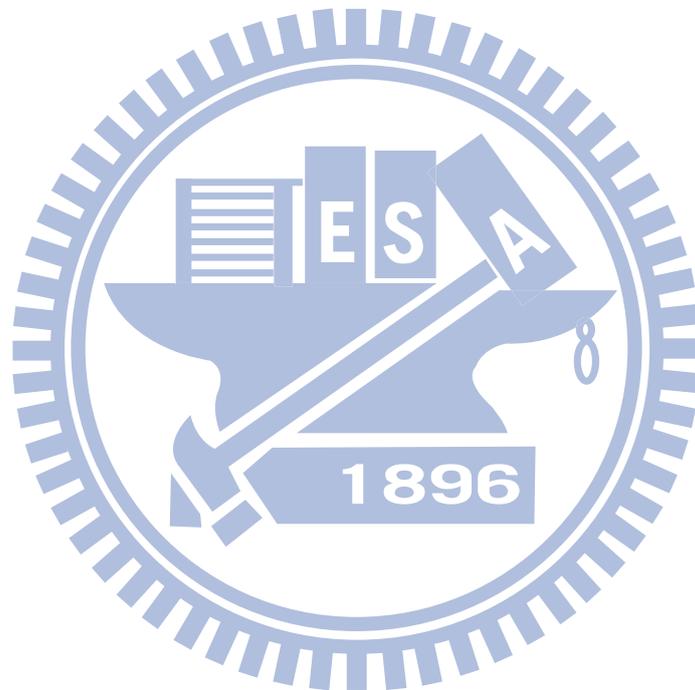
為了驗證力回饋搖桿是否適用於動態環境中，我們建立動態環境以進行實驗，本論文基於之前論文場景[21]加以變化，並且考慮到視覺回饋的影響；並使用 Shannon formula 驗證是否符合運動時間與困難度關係式，此公式是由 1954 年 Fitts[11]提出的 Fitts 定律演化而來，Fitts 提出運動時間與空間準確度的關係式，証實運動時間受到了物件寬度與距離的影響，在本論文中因為是動態場景，所以在每種困難度上外加速度此一條件進行比較分析，本篇論文中使用 Shannon formula；當我們實驗結果符合此公式，我們就可以宣稱力回饋搖桿適用於動態環境。

2. 探討力輔助是否有助於改善任務完成時間與錯誤率

為了減少完成任務時間和減少錯誤率，我們設計三種力輔助系統給予使用者輔助，分別是主動力、被動力和提示力；主動力能透過力回饋搖桿產生一朝向目標物的正向力；被動力是希望可以透過力牆的產生可以給予使用者校正，當使用者朝向錯誤方向時，力牆可以給予使用者一個阻擋力，此時使用者就不會朝錯誤的方向繼續前進；提示力是可以藉由力搖桿產生一個小小的提示力，給予使用者一個正向力的提示；提示力與主動力的差異在於一個偏向於輔助前進，另一個是提示方向。在使用分析方法部份，因為本篇論文因為使用的是動態環境，所以會涉及到速度問題，而實驗本身又包含距離與輔助力，總共有三種變數，所以分析方面將用所得到的運動時間的原始數據去除異常值($\pm 3SD$)後，利用多變量重複量數統計法分析(即三因子變異數分析，一個獨立和兩個相依混合設計的變異數分析)，從分析結果中來看對使用者而言，輔助力與無輔助力是否有差異，而此差異是否可以改進完成任務時間；而錯誤率方面，會從速度、困難度和輔助

力條件下比較，分析錯誤率是否跟輔助力有關係，以及錯誤可否有效的降低。

本論文分為五個章節，第一章為導論，說明本論文的研究背景、相關論文、動機、研究方法和研究目的;第二章是動態環境之力搖桿實驗設計，包含實驗場景畫面、實驗流程和三種輔助力設計;第三章介紹本論文中會使用到硬體與軟體設計;第四章中會先驗證動態環境是否符合 **Shannon formula**，之後再分析實驗結果，包含實驗完成時間和錯誤率，第五章為結論和未來工作。



第二章

動態環境之力搖桿實驗設計

爲了驗證力搖桿是否適合在動態環境中使用，我們實驗場景當然勢必是動態場景，本章介紹本論文所採用的實驗動態場景設計，而又爲了探討力輔助是否有助於改善任務完成時間與錯誤率，本章也會介紹我們所提出的力輔助設計和整個實驗流程。在實驗動態場景設計方面，實驗設計爲動態模型，而動態模型又必定與速度相關，所以本實驗爲速度、困難度和輔助力三種變數實驗，我們設計三種速度和困難度，總共有九種組合，爲了避免使用者經由學習而產生不正確的實驗數據，每一種組合都是隨機出現，而且每一位受測者在完成一種輔助力實驗後，至少必須間隔一星期，又爲了確保每位受測者對搖桿熟悉，在實驗開始前會給每位受測者閱讀實驗步驟，並進行實驗練習，直到了解實驗內容和輔助方式才開始進入實驗，當實驗結束後會給每位受測者一份關於本次實驗的問卷，以調查每位受測者對實驗的感受程度。

2.1 實驗場景設計

爲了設計能確保受測者不會因爲場景的複雜度而分心，所以本實驗動態場景設計較爲樸素簡單，場景設計如圖 2.1 所示，其中紫色方塊是使用者經由力回饋搖桿進而所控制的物件，爲配合實驗將採用一維空間設計(X 軸)，虛線處是控制方塊在實驗要開始進行時的等候區，當控制方塊進去後等待一秒後實驗才會正式開始，在等候區上方的提示球是可變色的，當使用者經由力回饋搖桿所控制的物件還未進過等候區時，提示球是呈現實心的紅色，在使用者經由力回饋搖桿所控

制的物件進過等候區後程式將會開始倒數，同時提示球的顏色也會轉變至黃色，進而消失，而紅色的 Deadline 是爲了製造出任務完成的緊迫性，促使使用者儘快完成實驗不然就是算失誤(error)。其中紫色方塊的寬度爲 40pixels，而 Deadline 爲最下方往上 100pixel 處，約爲 2.9cm。

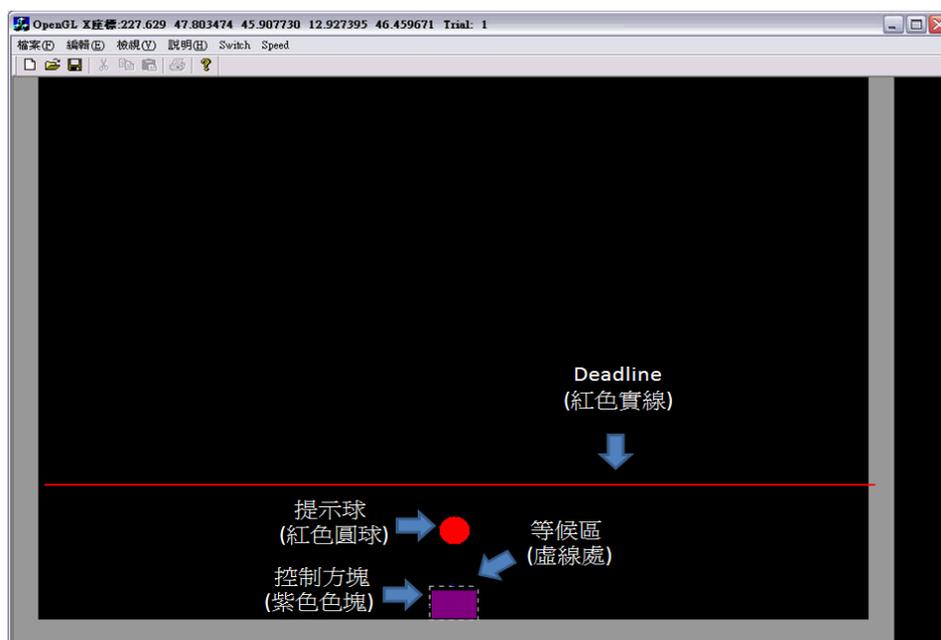


圖 2.1 實驗場景畫面

實驗中各種距離和速度，如圖 2.2 所示，圖 2.2 的中下方白色虛線方塊爲控制方塊的起始位置，起始位置寬度爲 40pixels，因爲我們實驗要設計動態場景，所以我們設計一顆會掉落目標球，讓使用者去預測掉落球的位置，圖中藍色虛線爲目標球掉落的起始點(deadline 上方 350 pixel 處)，而目標物距離控制方塊的起始位置有三種距離(D)，分別爲 62.5、125 和 250pixels，而目標球前進的速度也有三種情形分別爲 6、8 和 10pixel/0.029sec(此處的速度單位爲 pixel/0.029sec，因爲畫面更新頻率爲 35HZ，所以每更新一次爲 0.029 秒)，使用者所控制方塊寬度(W)固定爲 40pixels，交叉配對後會有九種速度距離組合，爲了左右平衡，在控制方塊的起始位置左右邊分別也是同樣的情形，所以加上左右邊的變數的話就是有十八種組合。不考慮左右邊的話，九種速度距離可以組合出九種困難度，如表 2.1 所示。

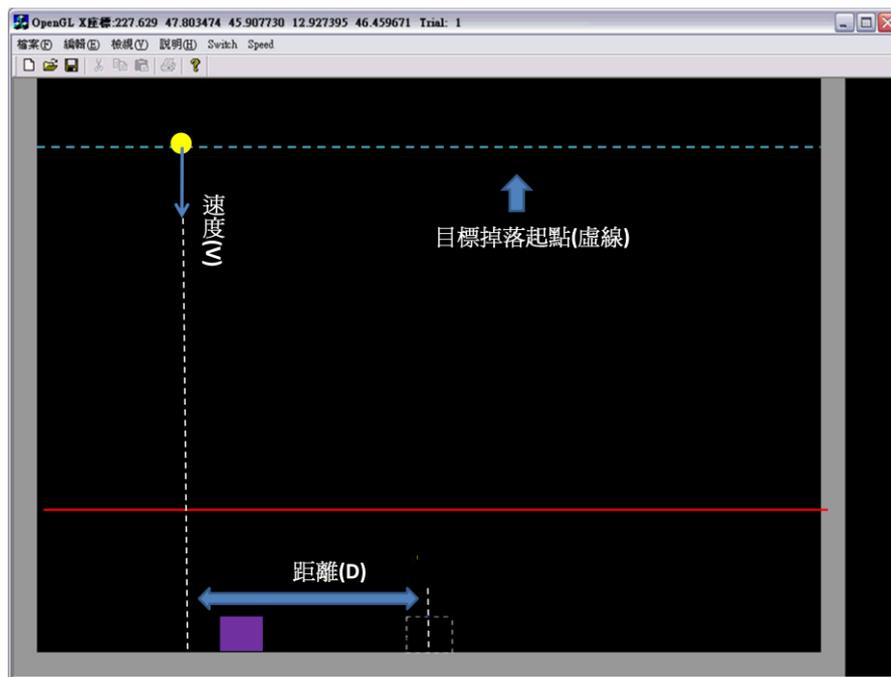


圖 2.2 實驗場景速度與距離的描述

表 2.1 速度與距離的困難度組合

| 組合 | 距離 (D, pixel) | 寬度(W, pixel) | 困難度 (ID, bits) | 速度(V, pixel/0.029sec) |
|----|-----------------|----------------|------------------|-------------------------|
| 1 | 62.5 | 40 | 1.3576 | 10 |
| 2 | 62.5 | 40 | 1.3576 | 8 |
| 3 | 62.5 | 40 | 1.3576 | 6 |
| 4 | 125 | 40 | 2.0444 | 10 |
| 5 | 125 | 40 | 2.0444 | 8 |
| 6 | 125 | 40 | 2.0444 | 6 |
| 7 | 250 | 40 | 2.8580 | 10 |
| 8 | 250 | 40 | 2.8580 | 8 |
| 9 | 250 | 40 | 2.8580 | 6 |

實驗的場景如圖 2.3 所示，其中受測者的座椅高度爲了不讓受測者感到不舒服，受測者可自行調到適合操作搖桿的高度，爲了不讓搖桿擋住受測者對顯示器的視線，所以將顯示器架高，因爲搖桿本體周圍爲四方型，會造成受測者手部不舒服，爲了解決此一問題，我們選用了一個矽膠軟墊。在本論文中總共有五位受測者，爲了增加實驗的可信度，所以實驗受測者男女均有，各人條件些微不同，受測者的資料如表 2.2 所示。

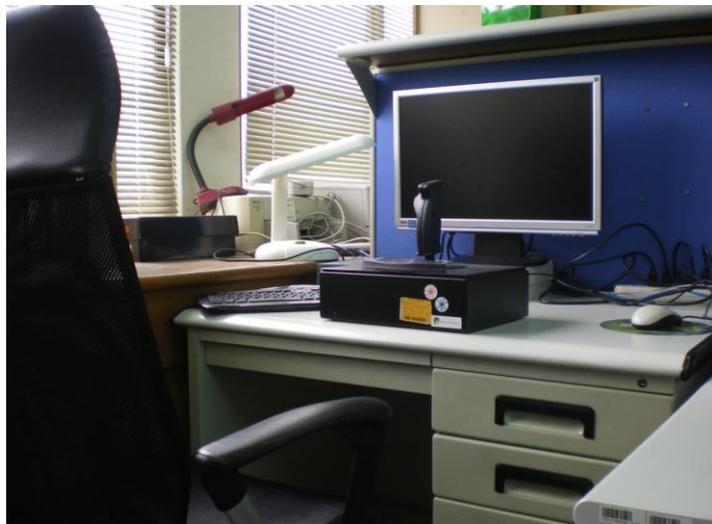


圖 2.3 實際受測場景

表 2.2 受測者基本資料

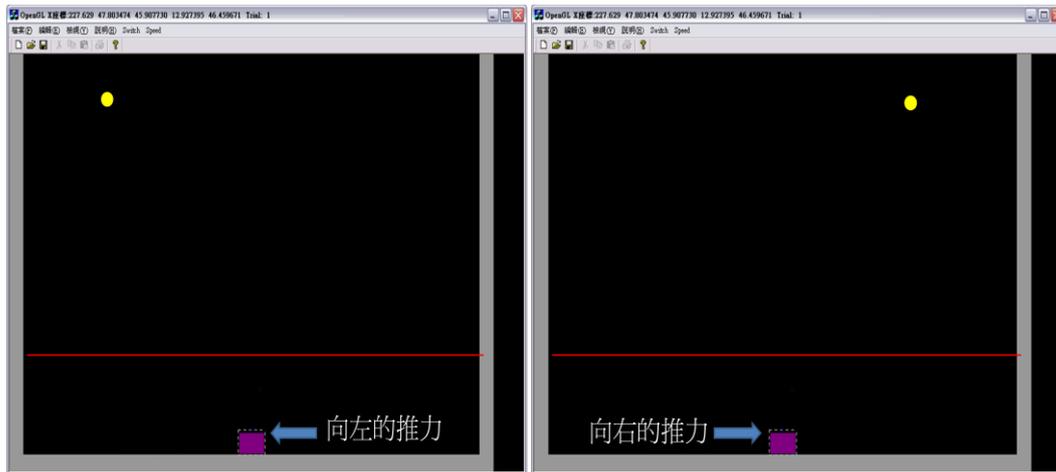
| 受測者 | 性別 | 年齡 | 慣用手 | 視力狀況 | 最大握力 |
|-----|----|----|-----|-------|-------|
| A | 男 | 23 | 右 | 矯正後正常 | 77 磅 |
| B | 男 | 23 | 右 | 矯正後正常 | 100 磅 |
| C | 男 | 22 | 右 | 矯正後正常 | 72 磅 |
| D | 女 | 23 | 右 | 正常 | 61 磅 |
| E | 男 | 24 | 右 | 矯正後正常 | 90 磅 |

平均: 23

2.2 力輔助設計

本節介紹本論文實驗所使用的三種輔助力，分別是主動力、被動力和提示力；主動力能透過力回饋搖桿產生一朝向目標物的正向力，可輔助使用者至目標球距離的二分之一處，輔助至二分之一處是因為希望可以有另外二分之一的距離給使用者進行微調，以防止輔助力將使用者推過頭，長距離的輔助雖然可以使任務完成時間減少許多，可是錯誤率相對的會提高，這並不是我們所樂見的；被動力是希望可以透過力牆的產生可以給予使用者校正，當使用者朝向錯誤方向時，力牆可以給予使用者一個阻擋力，此時使用者就不會朝錯誤的方向繼續前進；提示力是可以藉由力搖桿產生一個小的提示力，給予使用者一個正向力的提示，提示力的定義是提示使用者至目標球距離的五分之一，至於五分之一的選定是因為有實驗設計有三種距離，分別為 62.5、125 和 250pixels，距離的五分之一是為了給使用者提示，如果取小於五分之一，62.5pixels 此種距離會給使用者太小的提示，以致沒有感覺到提示力，當大於五分之一，250pixels 此種距離會給予輔助力太大，不像是提示的功能，提示力與主動力的差異在於一個偏向於輔助前進，另一個是提示方向。

主動力(長程輔助力)的用意就是使用力搖桿幫助使用者減少移動所需要花費的力量和減少所需要的時間。在主動力的模式下，當使用者所操控的控制方塊進入等待區時，提示球的顏色會由紅色轉為黃色，此時目標球就會出現，如果目標球是在於使用者操作的控制方塊的左方時，會有一股向左的力幫助使用者向左方移動，當移動至與目標球的一半距離時則停止力輔助，如圖 2.4(a)所示，而相對地當目標球是在使用者控制方塊的右方出現時，會有一股向右的力給予使用者，輸出力約為 0.688N，選此力大小原因是假如力太大，對受測而言會輔助過頭，有可能會超過目標，力太小的話會沒有輔助效果，如圖 2.4(b)所示。

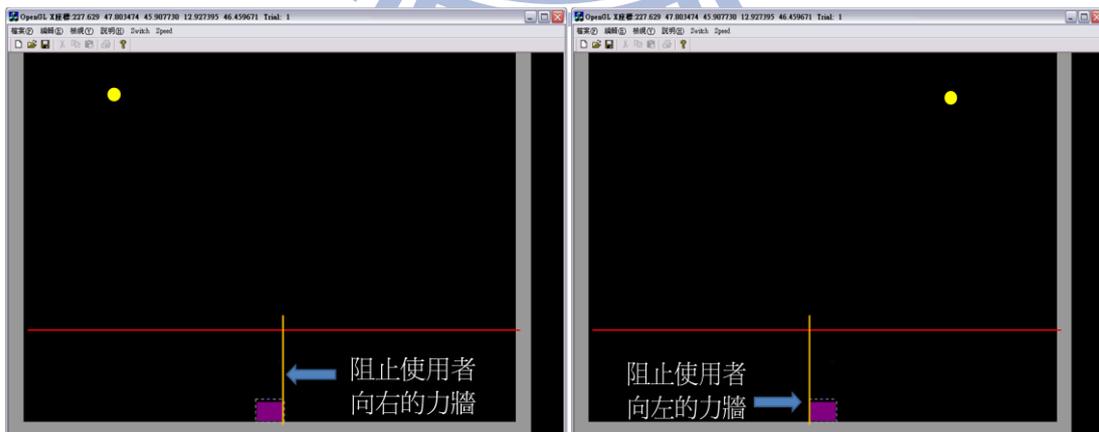


(a) 球落下在左方時之主動力

(b) 球落下在右方時之主動力

圖 2.4 (a)球落下在左方時之主動力和(b)球落下在右方時之主動力

被動力(反向力)的用意就是使用力搖桿幫助使用者減少操控錯誤而額外花費的力氣和減少額外花費的時間。在被動力的模式下，當使用者所操控的控制方塊進入等待區時，提示球的顏色會由紅色轉為黃色，此時目標球就會出現，如果目標球是位於使用者操作的控制方塊的左方時，在等待區的右方就會建立一道力牆，進而去阻止使用者向右的方向，如果使用者沒有向右的意志時，則此功能並不會對使用者造成任何的效用，如圖 2.5(a)所示，而相對地，當目標球是在使用者控制方塊的右方出現時，在等待區的左方就會建立一道力牆，進而去阻止使用者向左的方向，如果使用者沒有向左的意志時，則此功能並不會對使用者造成任何的效用，如圖 2.5(b)所示，而圖中的黃色力牆並不會顯示於實驗場景上。



(a) 球落下在左方時之被動力

(b) 球落下在右方時之被動力

圖 2.5 (a)球落下在左方時之被動力和(b)球落下在右方時之被動力

提示力(短程輔助力)的用意就是使用力搖桿提示使用者此時的球是在左方

還是右方，在提示力的模式下，當使用者所操控的控制方塊進入等待區時，提示球的顏色會由紅色轉為黃色，此時目標球就會出現，如果目標球是在於使用者操作的控制方塊的左方時，在等待區的使用者會感受到一道向左的提示力，當移動至與目標球的五分之一距離時，則停止力輔助進而提示使用者要向左的方向，如圖 2.6(a)所示，而相對地，當目標球是在使用者控制方塊的右方出現時，在等待區的使用者會感受到一道向右的提示力，進而提示使用者要往右邊的方向移動，如圖 2.6(b)所示，輸出力約為 0.688N，選此力大小原因是假如力太大，對受測而言會造成驚嚇，有可能會來不及反應，力太小的話會沒有提示效果，而圖中的黃色提示力並不會顯示於實驗場景上。

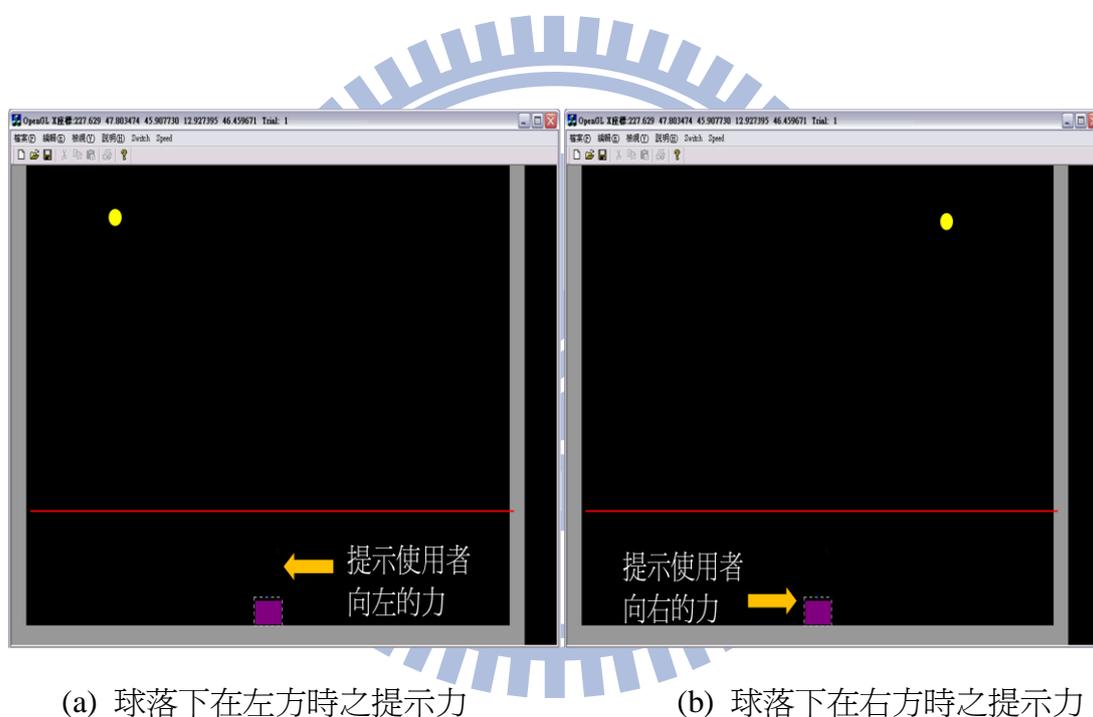


圖 2.6 (a)球落下在左方時之提示力和(b)球落下在右方時之提示力

2.3 實驗流程

本節介紹整個實驗流程，每種輔助力的流程是大同小異，只有差別在輔助力的部份，而在分析上，隨機取樣的資料能使實驗結果更具有可信度，為了讓本論文的實驗具有更高的可信度，在實驗設計上我們讓所有組合隨機出現，如此就能得到具有可信度的實驗結果，本實驗流程圖，如圖 2.11 所示，實驗步驟描述如下：

1. 在本論文實驗開始前會給每位受測者一個資料問卷與 SOP 講解，接著進行實驗練習，讓每個受測者都花數分鐘熟悉本實驗所使用的力搖桿，降低實驗的誤差。
2. 休息一分鐘後，實驗正式開始，將控制的方塊放置於等候區(虛線所包圍的區域)，本實驗受測者控制物件的寬度均為 40 pixels，等候一秒後，上方的提示球的顏色從紅色變成黃色後消失，如圖 2.7 所示，此時可以開始移動，此時依照輔助力模式的不同給予使用者不同的力回饋。而使用者必須在此時向球落下的方向前進。



圖 2.7 力輔助實驗場景初始畫面

3. 當提示球消失後，目標球會從同一高度往下掉落(白色虛線處)，如圖 2.8 所示，受測者必需預測球會掉落的位置，並控制方塊移動至預測的正下方。

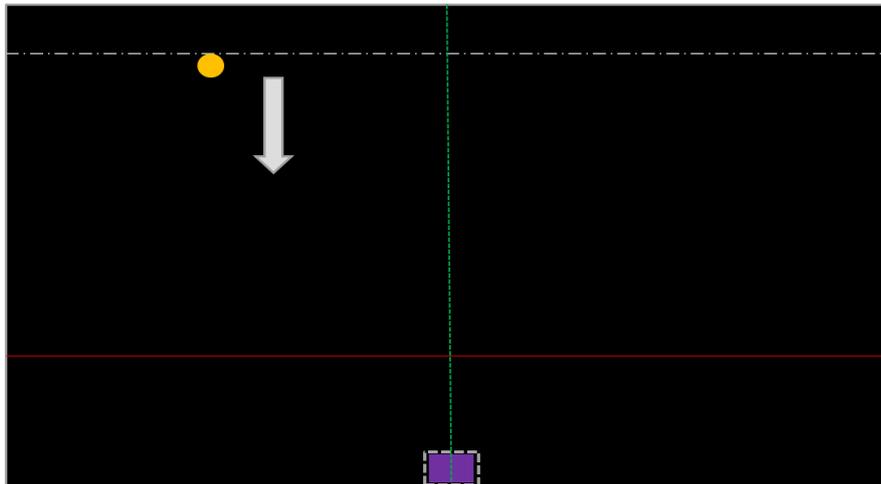


圖 2.8 實驗中目標球落下初始位置

4. 當使用者確定控制物件的位置與目標球位置後，立即按下鍵盤上之空白鍵，此時畫面會產生視覺回饋，會出現紅色射擊方塊，此方塊代表使用者所判斷之位置，如圖 2.9 所示。

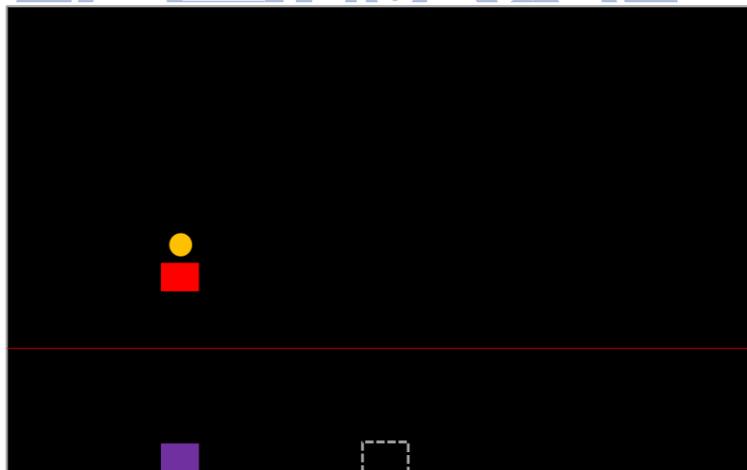
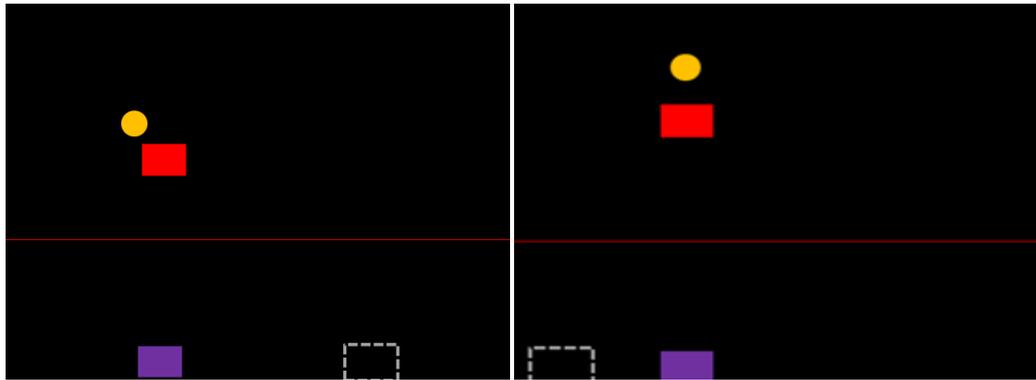


圖 2.9 受測者按下空白鍵後給予使用者的視覺回饋

5. 當目標球落下，此刻受測者預測落下位置錯誤或來不及在球到達 deadline 前到達落下的位置，使方塊無法準確接取時，這一圈就算失敗並重走一遍，如圖 2.10(a)所示，如果球完全進入實驗者的控制方塊的左邊界與右邊界之中的話，實驗就算是成功，如圖 2.10(b)。



(a) 實驗預測落點位置失敗圖

(b) 實驗預測落點位置成功圖

圖 2.10 (a)實驗預測落點位置失敗圖和(b)實驗預測落點位置成功圖

本實驗記錄任務完成時間是由提示球消失至受測者按下空白鍵的一瞬間，如果失敗則此次不列入計算，又因有三種力輔助模式和無力輔助模式，為了確保受測者不會因為長期做實驗累積習慣性動作，所以我們讓每個受測者在進行每種力輔助模式實驗後要間隔幾天，使受測者避免學習發生，本實驗每個受測者總共要接受 $360 \times 4 = 1440$ 次的實驗。

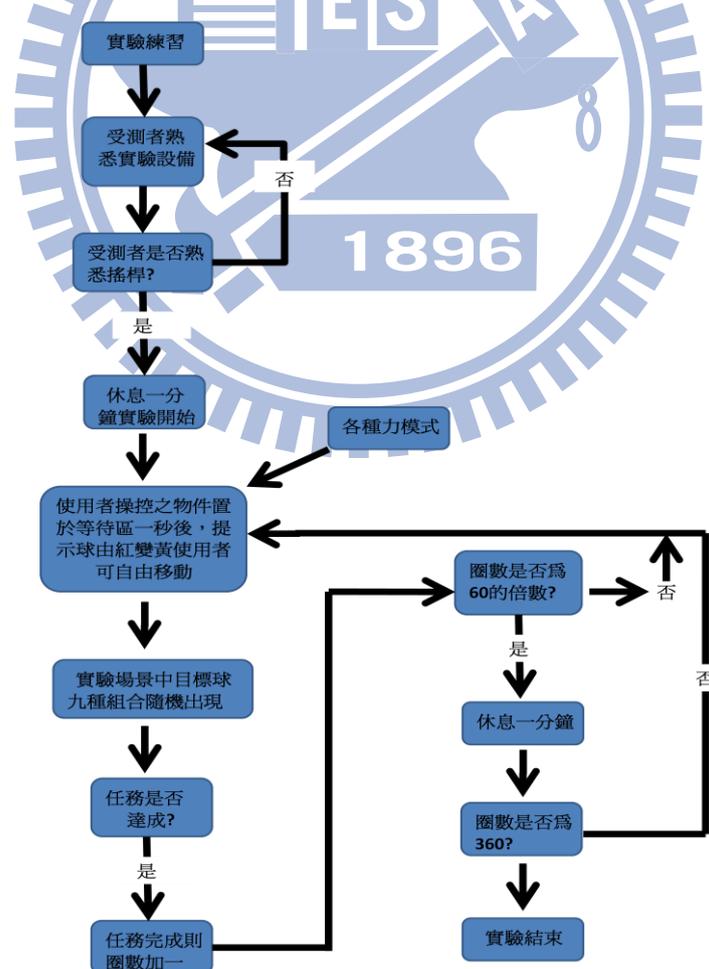


圖 2.11 實驗流程圖

第三章

系統實現

本章介紹在本論文中動態環境建立的硬體和軟體比較分析與使用理由。在本論文中使用的 HCI 系統如圖 3.1 所示，是由使用者、搖桿、個人電腦和顯示器組合成，系統流程如下所述，使用者操控實驗用的搖桿輸入使用者訊號，而由搖桿傳位置資訊給個人電腦，此時個人電腦將會記錄位置訊號並且會判斷此時該給什麼力給使用者，當電腦決定使用什麼力時就會傳馬達指令給搖桿，搖桿就會產生力回饋給使用者，在另一方面，電腦會就搖桿的資訊產生對應場景，個人電腦會將這份資訊傳給顯示器，顯示器會產生視覺回饋給使用者。

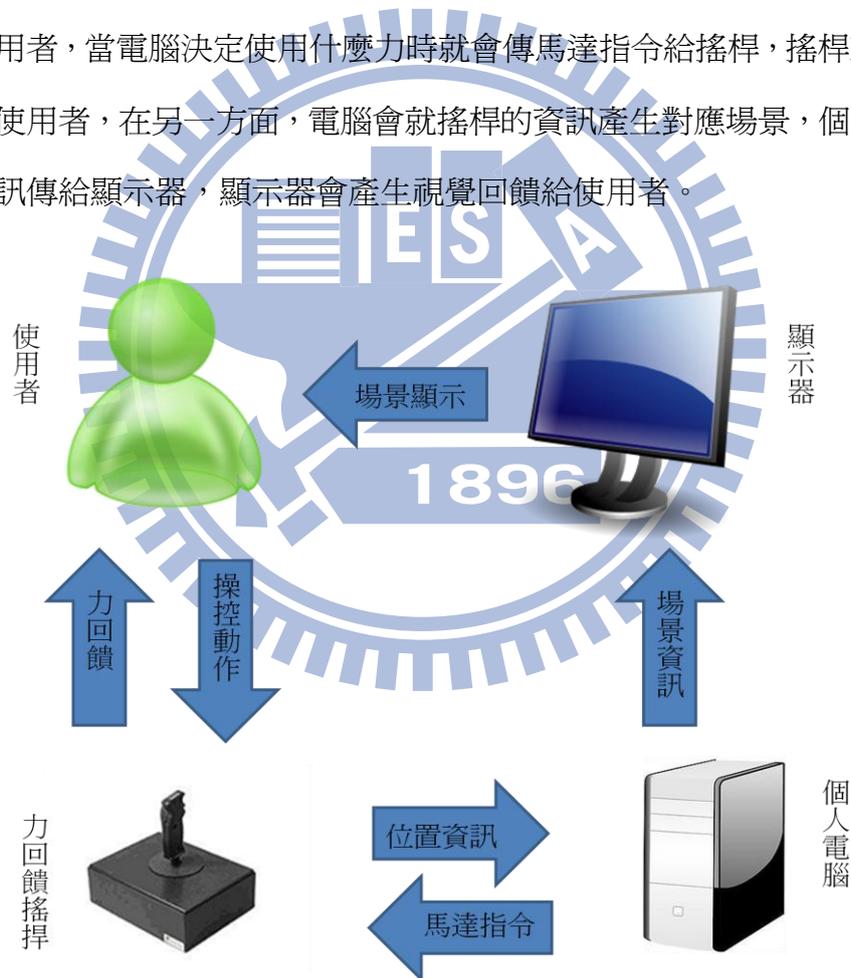


圖 3.1 系統實現架構圖

3.1 硬體實現

本論文實驗中所使用的個人電腦中主機板為 ASUS M2N-VM，電腦顯示器為 BENQ T221WA，解析度為 1680X1050。而本論文著重於搖桿輸入裝置，所以搖桿的選擇為其重要，又因為搖桿是近年來發展迅速的一種輸入裝置，所以市面上有很多選擇，目前較好的選擇有三種，分別為 Immersion 公司出產的 Impulse Stick Force Feedback Joystick (圖 3.2(a))、Immersion 公司所出產的 Impulse Engine 2000(圖 3.2(b))和 SensAble 公司出產的 Phantom Omni Feedback Joystick (圖 3.2(c))其中的規格表如表 3.1 所示:



(a) Impulse Stick Force Feedback Joystick (b) Impulse Engine 2000



(C) Phantom Omni Feedback Joystick

圖 3.2 (a)Impulse Stick Force Feedback Joystick，(b)Impulse Engine 2000，和(C)Phantom Omni Feedback Joystick

表 3.1 三種搖桿規格表

| 項 目 | | Impulse Force Feedback Joystick (CIS-56000-SYS) | Impulse Engine 2000 | Phantom Omni |
|----------------------|-----|--|---------------------|--|
| 活動範圍 (θ) | X 軸 | 40deg | 65 deg | 160 deg |
| | Y 軸 | 40 deg | 65 deg | 120 deg |
| | Z 軸 | X | X | 70 deg |
| 總高度 | | 26.67cm | 28 cm | 19.5 cm |
| 握把長度 | | 16.51cm | 18.5 cm | 18cm |
| 最大額定輸出 力矩 | | 14.5 N | 8.9 N | 3.3 N |
| 搖桿精確度 | | 2.88 mm | 0.023 mm | 0.055 mm |
| 力效果 | | Spring、Slope、 Damper、Friction、 Axis & Angle Wall、 Vector Force、 Periodic、Pulse | Spring | Spring |
| 電腦連接介面 | | USB | dedicated card | IEEE-1394 FireWire port: 6-pin to 6-pin |
| 工作頻寬 | | not available | 650 Hz | not available |
| 控制方式 | | PC | PC | PC |
| 價位 | | 200000 NT | 180000 NT | 98000NT |

Immersion 公司出產的 Impulse Stick Force Feedback Joystick 是一隻提供多種力回饋機制的多用途搖桿，它提供的力方式非常多元，擁有兩個自由度(X、Y)，可以相容於多種 Microsoft 作業系統(OS)，使用的連結為 Universal Serial Bus (USB)，內裝的力產生是使用直流馬達。而 Immersion 公司所出產的 Impulse Engine 2000 的力效果只有 spring 一種，連接的介面必須是 dedicated card，使用起來較複雜。SensAble 公司出產的 Phantom Omni 力回饋搖桿因為有一個類似筆的裝置，常常被使用來當作書寫的系統輸入裝置[22]，此裝置為 3D(X、Y、Z) 裝置。在我們論文中，因為我們應用的將是控制二維平面的物件，所以不使用 SensAble 公司出產的 Phantom Omni 力回饋搖桿，而採用 Immersion 公司出產的 Impulse Stick Force Feedback Joystick，此搖桿只要把驅動程式安裝好後就可以隨插隨用，相當便利，而且輸出的力矩較大，可以提供本論文中實驗所需要的力。搖桿操作系統部份其基本組成如圖 3.3 所示，經由感測元件可以得知使用者搖桿的位置，動力元件則可將運算後的力資訊回饋給使用者。

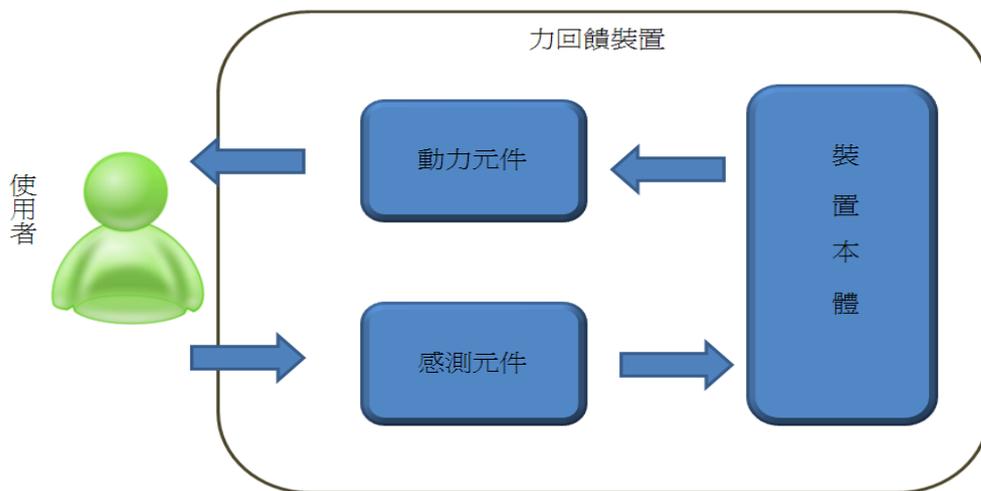


圖 3.3 力回饋裝置內部示意圖

3.2 軟體實現

本論文所使用的作業系統為 Microsoft Windows XP，編譯軟體採用 Microsoft Visual C++ 6.0 和 OpenGL，因為實驗場景是使用力回饋搖桿當作輸入裝置，所以必須使用到 Direct X 和 Immersion I-Force 2.0 這兩個軟體來驅動搖桿裝置。在實驗場景中要使用到電腦繪圖工具，本論文使用的為 OpenGL，因為 OpenGL 的架構非常的簡單明瞭，方便學者使用，而且它的彈性較佳，具有與硬體無關的開放架構，能夠在許多不同的平台所執行，為了保持畫面的流暢度，畫面更新頻率約為 35Hz。

OpenGL 已在 1992 年成為工業標準，由獨立的 OpenGL ARB (Architecture Review Board) 管理其規範，其中成員包括 SGI (Silicon Graphics)、Digital、IBM、Intel 及 Microsoft 等大廠，大部分影像顯示卡及作業系統都支援 OpenGL。OpenGL 的成像流程，如圖 3.4 所示，當應用程式發出 OpenGL API 函式呼叫時，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，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，以求得每點上的顏色亮度，完成這個程序後，就把資料提供給掃描顯影部份。掃描顯影將依照幾何位置、顏色與材質建立影像，最後影像會放到圖片緩衝區內。圖片緩衝區是圖形顯示裝置的記憶體，如顯示卡、繪圖卡等，到了這個階段，圖形顯示裝置會把影像顯示到螢幕上。

為了發展一個簡易使用的人機介面，本論文採用了 MFC(Microsoft Foundation Classes)的架構，而並不是一般人經常使用的 Win 32 架構，理由是 MFC 的建立已經擁有基本類別的架構，不需要一步步地撰寫程式進入口以及程式所需要的繼承類別，所以 MFC 對程式開發來說更為便利；另外，MFC 本身就屬於視窗化的介面，可以輕易地在視窗中加上我們所需要的對話窗(Dialog)，直接控制對話窗的命令列就可以控制場景，不需要關閉整個程式。

由於虛擬場景的建立運用了各種軟體，為了避免未來研究者設定上的困難，在此對軟體安裝的步驟做一詳細的說明；第一步，先安裝 Immersion 公司所開發的軟體 Immersion I-Force 2.0，依照說明書指示一一安裝完畢後；第二步，安裝 DirectX SDK，我們所使用的版本是 DirectX 9.0c；第三步，灌入 Visual C++，這套軟體是由 Microsoft 所研發，在 C 語言上廣泛地被使用，我們使用的版本是 Visual C++ 6.0；第四步，由於我們要使用 Immersion I-Force 2.0、DirectX、OpenGL 等軟體，所以必須將所需要的函式庫(*.lib)與 handle 檔(*.h)都加入 VC++中，不然會出現連結錯誤(link error)，而針對 OpenGL 場景的撰寫，一般建議使用 Richard[23]所著作的 OpenGL 超級手冊第二版為範本。

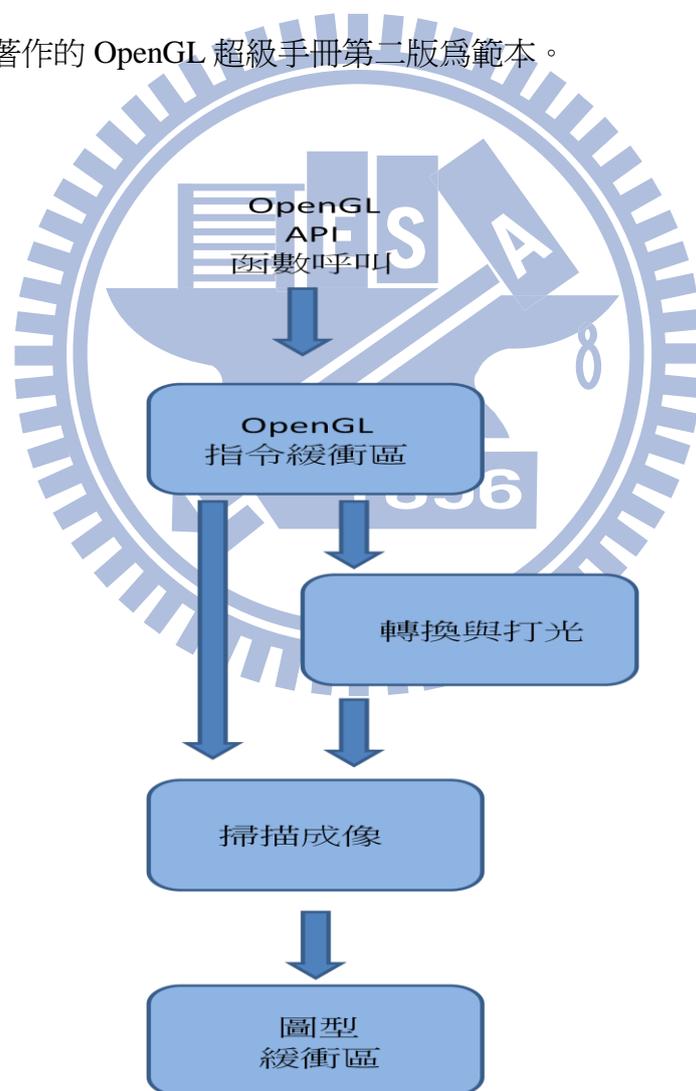


圖 3.4 OpenGL 成像流程

第四章

實驗分析

在本章，我們將驗證力回饋搖桿在動態環境中其運動時間和困難度是否符合 Shannon formula，如果符合的話，說明了在動態環境中搖桿是適合使用者進行操作，驗證過後，將進一步分析我們提出的力輔助系統對於動態場景有何種幫助，主要是透過完成工作時間進行分析，探討每一種力輔助系統彼此之間對於受測者是否有不同的影響。

4.1 驗證搖桿是否適合於動態場景

本節嘗試驗證動態環境中搖桿是適合使用者操作，本實驗使用 Shannon formula 進行驗證，Shannon formula 講述是靜態環境移動時間與困難度的關係，而本論文提出的是有關速度的關係，所以所探討的是在原本的靜態場景中加上速度此一變數的話，受測者的實驗數據是否還符合 Shannon formula。我們將每位受測者進行實驗所得到的 360 次運動時間的原始數據，去除異常值($\pm 3SD$)後，加以平均進行線性回歸分析;在無輔助力時(圖 4.1)，呈現出一線性關係直線，當困難度提高時，其移動時間也相對的增加，而當速度較慢時，因為使用者會放慢移動搖桿，所以時間也花費較多，是可以預料的，相對的在速度較快時，因為會有任務急迫性的因素，會使受測者加快移動搖桿的速度，相對地可以說明我們在動態場景中考慮的速度因素，對於受測者而言是有影響的，又因為速度加快，受測者的速度也加快，所以會帶來錯誤率上升的問題，這是在實驗前可以預期的，在判定係數方面，每種速度的判定係數都大於 0.96，判定係數越高表示運動時間與困難度兩者相依程度越高，經由線性回歸後，每個速度都可得出 Shannon formula 中代表常數的 a 和 b 值。以速度 10 為例，可得到一條 $MT = 67.067 + 6.5053 ID$

的直線，此直線代表的涵意是指，當困難度(ID)每增加 1 時，移動時間(MT)就會增加 6.5053 毫秒，而速度 8 時，可得到另一條 $MT = 71.771 + 7.765 ID$ 的直線，在速度 6 時，直線為 $MT = 74.672 + 9.9336 ID$ ，由這三條直線可看出，在速度為 6 時，困難度每增加 1 時，移動時間增加最多，增加 9.9336 毫秒，此直線也符合 Shannon formula 的假設，可以驗證出在無力輔助時，搖桿是適合在動態環境中使用。

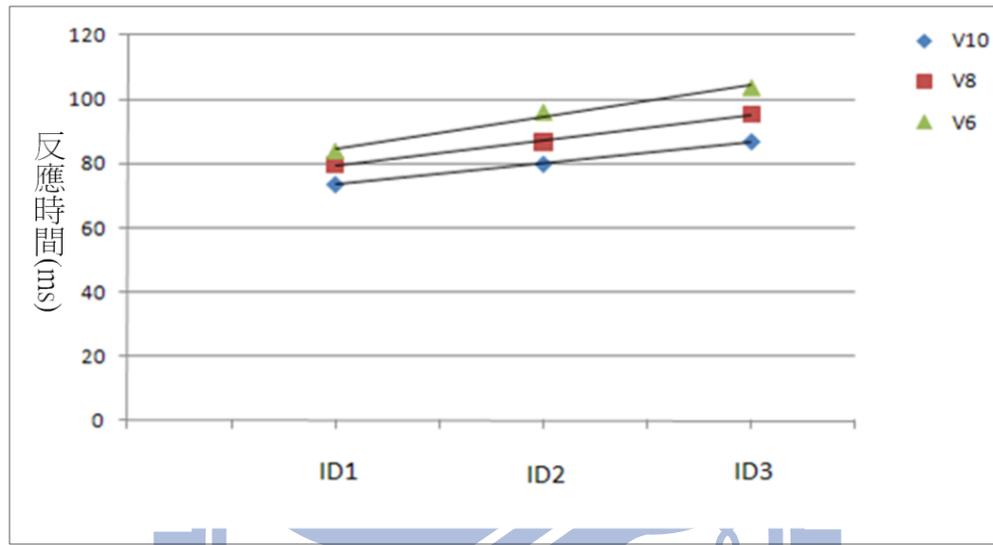


圖 4.1 無力輔助系統:實驗結果經線性回歸後的直線圖

在具主動力輔助時時(圖 4.2)，三種困難度、三種速度和運動時間之間也呈現出一線性關係，當困難度提高時，其移動時間也會相對的增加，而在速度較慢時，因為使用者會放慢移動搖桿，所以時間也花費較多，相對的在速度較快時，因為有任務急迫性的因素，會使受測者加快移動搖桿的速度，又因為速度加快，受測者的速度也加快，所以會帶來錯誤率上升的問題，在判定係數在上面，每種速度的判定係數都大於 0.98，足以代表每個速度都是趨於線性的，經由線性回歸後，每個速度都可得出 Shannon formula 中代表常數的 a 和 b 值。以速度 10 為例，可得到一條 $MT = 64.724 + 6.1783 ID$ 的直線，此直線代表的涵意是指，當困難度 (ID)每增加 1 時，移動時間(MT)就會增加 6.1783 毫秒，而速度 8 時，可得到另一條 $MT = 68.848 + 7.1823 ID$ 的直線，在速度 6 時，直線為 $MT = 74.613 + 6.8964 ID$ ，由這三條直線可看出，在速度為 8 時，困難度每增加 1 時，移動時間增加最多，增加 7.1823 毫秒，所以在當困難度很高時，有可能速度 8 會比速度 6 花費

的時間還多，在之後應用上需多加注意在主動力模式時，當困難度太高速度為 8 時，可比對其它力輔助模式相同困難度且速度為 8 的運動時間，進而挑選最好的輔助力模式，才能有較低的運動時間，而此直線也符合 Shannon formula 的假設，可以驗證出在主動力輔助模式時搖桿也是適合在動態環境中使用。

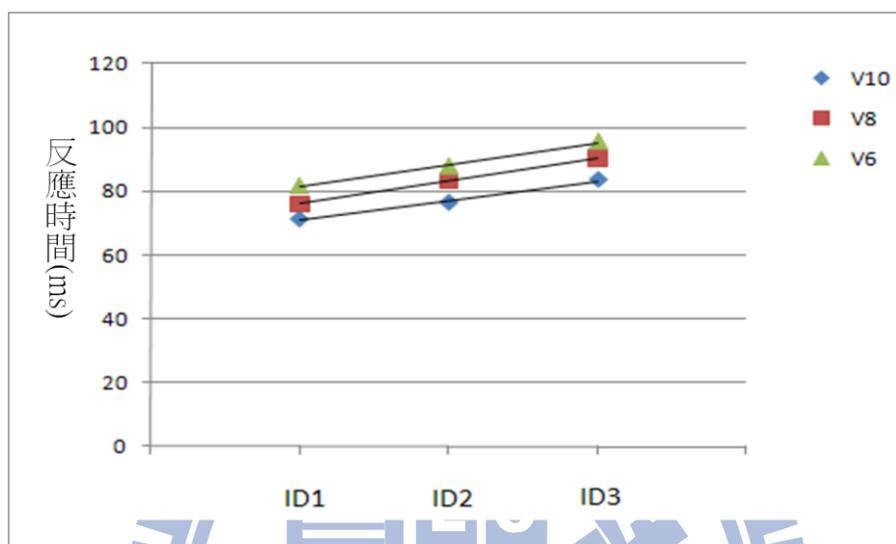


圖 4.2 主動力輔助系統:實驗結果經線性回歸後的直線圖

在具被動力輔助時(圖 4.3)，三種困難度、三種速度和運動時間之間也是呈現出一線性關係直線，當困難度提高時，其移動時間也會相對的增加，而在速度較慢時，因為使用者會放慢移動搖桿時間，所以時間也花費較多，相對地在速度較快時，因為有任務急迫性的因素，會使受測者加快移動搖桿的速度，又因為速度加快，受測者的速度也加快，所以會帶來錯誤率上升的問題，在判定係數在上面，每種速度的判定係數都大於 0.93，足以代表每個速度都是趨於線性的，經由線性回歸後，每個速度都可得出 Shannon formula 中代表常數的 a 和 b 值。以速度 10 為例，可得到一條 $MT = 65.606 + 6.3617 ID$ 的直線，此直線代表的涵意是指，當困難度(ID)每增加 1 時，移動時間(MT)就會增加 6.3617 毫秒，而速度 8 時，可得到另一條 $MT = 70.737 + 6.9049 ID$ 的直線，在速度 6 時，直線為 $MT = 71.563 + 9.4952 ID$ ，由這三條直線可看出，在速度為 6 時，困難度每增加 1 時，移動時間增加最多，增加 9.4952 毫秒，而此直線也符合 Fitts' Law 的假設，可以

驗證出在被動力輔助模式時，搖桿也是適合在動態環境中使用。

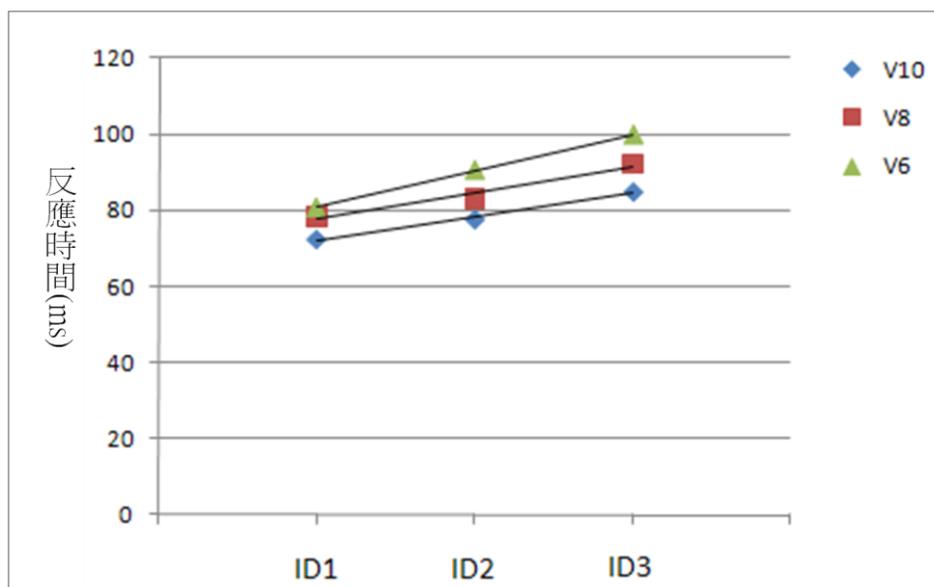


圖 4.3 被動力輔助系統:實驗結果經線性回歸後的直線圖

在具提示力輔助時(圖 4.4)，三種困難度、三種速度和運動時間之間一樣呈現出一線性關係直線，當困難度提高時，其移動時間也會相對的增加，而在速度較慢時，因為使用者會放慢移動搖桿時間，所以時間也花費較多，相對的在速度較快時，因為有任務急迫性的因素，會使受測者加快移動搖桿的速度，又因為速度加快，受測者的速度也加快，所以會帶來錯誤率上升的問題，在判定係數在上面，每種速度的判定係數都大於 0.89，足以代表每個速度都是趨於線性的，經由線性回歸後，每個速度都可得出 Shannon formula 中代表常數的 a 和 b 值。以速度 10 為例，可得到一條 $MT = 68.486 + 5.4448 ID$ 的直線，此直線代表的涵意是指，當困難度(ID)每增加 1 時，移動時間(MT)就會增加 5.4448 毫秒，而速度 8 時，可得到另一條 $MT = 73.908 + 6.0186 ID$ 的直線，在速度 6 時，直線為 $MT = 75.821 + 7.5253 ID$ ，由這三條直線可看出，在速度為 6 時，困難度每增加 1 時，移動時間增加最多，增加 7.5253 毫秒，而此直線也符合 Shannon formula 的假設，可以驗證出在提示力輔助模式時搖桿也是適合在動態環境中使用。在四種力輔助模式中，三種速度的線性回歸線整理為表 4.1，總結而言，搖桿是適合使用者在此動態環境中使用。

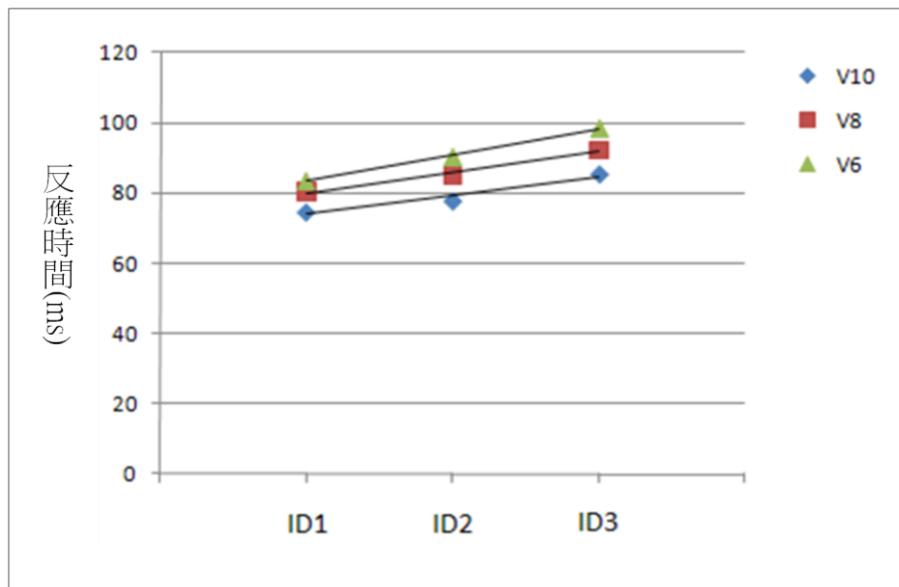


圖 4.4 提示力輔助系統:實驗結果經線性回歸後的直線圖

表 4.1 力輔助模式線性回歸常數與關係係數表

| 力輔助模式 | 速度 | 判定係數(R 平方) | 費茲定律方程式 |
|-------|----|------------|---------------------------|
| 無力 | 10 | 0.9984 | $MT = 67.067 + 6.5053 ID$ |
| | 8 | 0.9938 | $MT = 71.771 + 7.765 ID$ |
| | 6 | 0.9662 | $MT = 74.672 + 9.9336 ID$ |
| 主動力 | 10 | 0.9838 | $MT = 64.724 + 6.1783 ID$ |
| | 8 | 0.9996 | $MT = 68.848 + 7.1823 ID$ |
| | 6 | 0.9910 | $MT = 74.613 + 6.8964 ID$ |
| 被動力 | 10 | 0.9830 | $MT = 65.606 + 6.3617 ID$ |
| | 8 | 0.9374 | $MT = 70.737 + 6.9049 ID$ |
| | 6 | 0.9994 | $MT = 71.563 + 9.4952 ID$ |
| 提示力 | 10 | 0.8987 | $MT = 68.486 + 5.4448 ID$ |
| | 8 | 0.9696 | $MT = 73.908 + 6.0186 ID$ |
| | 6 | 0.9942 | $MT = 75.821 + 7.5253 ID$ |

4.2 力輔助實驗數據分析

如前所提，經由實驗分析，力搖桿是適合使用者在動態環境中使用，而在動態環境中，我們提出三種力輔助方法嘗試幫忙使用者完成任務，三種力輔助分別為主動力、被動力和提示力，我們對無力輔助和三種力輔助系統的實驗結果，進行分析。我們根據三種困難度配上速度後得到九種新的難度組合(表 4.2)，進行統計分析，將每位受測者所得到的 360 次運動時間的原始數據去除異常值

($\pm 3SD$)後，使用利用多變量重複量數統計法[24][25](即三因子變異數分析，一個獨立和兩個相依混合設計的變異數分析)進行分析，首先要分析的是我們實驗中三種力輔助、三種速度、以及九種困難組合之間有沒有對於使用者造成影響，此分析使用的檢定方法是 P 值(p-value)檢定法[26][27]，P 值(p-value)是統計學上一種假設檢定方法，檢定前我們會先假設成立與不成立兩種情況，而當 p 值大於某個數值(一般用 0.05)時，我們就可以說這個假設不成立，也就是說檢定法不具有顯著性，反之，如果 P 值小於某個數值，我們就可以說檢定具顯著性差異，假設成立表中顯著性假如小於 0.05 的話，即代表此項目對於實驗的數據有顯著性的影響，而由分析結果可得知力輔助的方式、ID(困難度)和 V(速度)在單獨作用中與混合因素都對使用者是有明確的影響的($p < 0.05$)，意思就是說。力輔助的方式、困難度組合和速度都會對受測者實驗數據產生影響，而影響的情況必須對平均數據進一步分析。

表 4.2 速度與距離的困難度組合

| 組合 | 距離 (D, pixel) | 寬度(W, pixel) | 困難度 (ID, bits) | 速度 (V, pixel) |
|----|-----------------|----------------|------------------|-----------------|
| A | 62.5 | 40 | 1.3576 | 10 |
| B | 62.5 | 40 | 1.3576 | 8 |
| C | 62.5 | 40 | 1.3576 | 6 |
| D | 125 | 40 | 2.0444 | 10 |
| E | 125 | 40 | 2.0444 | 8 |
| F | 125 | 40 | 2.0444 | 6 |
| G | 250 | 40 | 2.8580 | 10 |
| H | 250 | 40 | 2.8580 | 8 |
| I | 250 | 40 | 2.8580 | 6 |

從四種力輔助和困難度組合中圖 4.5 可看出，三種力輔助模式相較於無輔助力模式明顯有改善，此圖明顯指出在表 4.2 中困難度 F(距離 125pixel，困難度 2.0444，速度 6)主動力比無力輔助改善了許多，而在困難度 A(距離 62.5pixels，困難度 1.3576，速度 10)時，提示力模式比無力輔助花的時間更多。

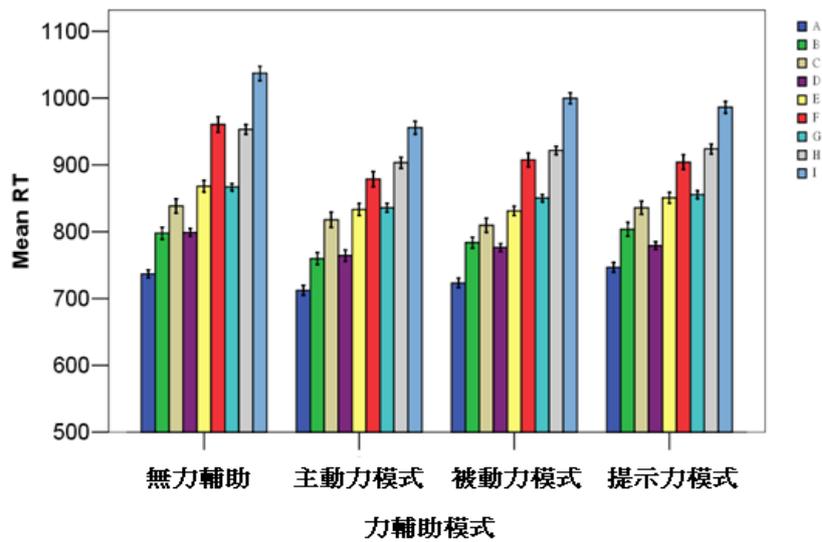


圖 4.5 輔助力模式與困難度平均運動時間比較圖

爲了比對四種輔助力之間的關係，我們透過 Pairwise Comparisons 檢定 [26][27] 進行分析，此檢定方法在本實驗中是爲了比較任兩種輔助力之間的關係，如果比較的兩種輔助力對於受測者而言是沒有分別的話，就是代表沒有差異，圖 4.6 中“*”是代表彼此間有差異，圖 4.6 和表 4.3 呈現出無力輔助分別與主動力輔助、被動力輔助和提示力輔助對於受測者的影響是不盡相同，而被動力輔助與提示力輔助並無差異性，代表的是被動力輔助與提示力輔助對於受測者而言是相同的影響，圖中也顯示出主動力輔助表現最好，在主動力輔助中總花費的時間是最少的，其次是被動力模式，提示力模式與被動力模式相差不遠，所以如果僅考慮花費時間的應用上，應將主動力輔助模式當爲首選。

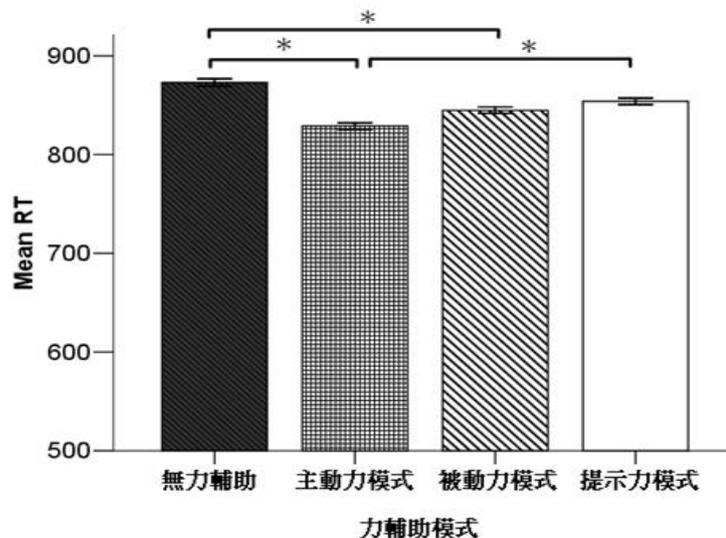


圖 4.6 力輔助模式對受測者差異分析圖

表 4.3 四種力輔助模式平均完成任務時間

| 力輔助模式 | Mean | Std. error |
|-------|--------|------------|
| 無力輔助 | 873.06 | 7.12 |
| 主動力輔助 | 828.99 | 7.12 |
| 被動力輔助 | 844.77 | 7.12 |
| 提示力輔助 | 853.98 | 7.12 |

因為本論文是動態場景，所以包含了速度變數，在不考慮困難度，僅考慮速度部份，速度有三種，分別為 10pixel/0.029sec、8pixel/0.029sec 和 6pixel/0.029sec (此處的速度單位為 pixel/0.029sec，因為畫面更新頻率為 35HZ，所以每更新一次為 0.029 秒)，這三種速度由圖 4.7 和表 4.4 可得知，三種速度對於受測者而言是有差異的，此處的差異是代表三種速度對於受測者而言帶來的影響是不相同的，而標準錯誤差也是小於 4.58，所以數值分散並不廣，而且當掉落的球速度越快時，花費的時間越少，因為當球掉落速度越快時，相對的會壓縮任務完成時間，而在速度較慢的 V6 則是因為任務完成時間可拉長，所以使用者可以調整的時間較長，花費的時間也就相對的較長。

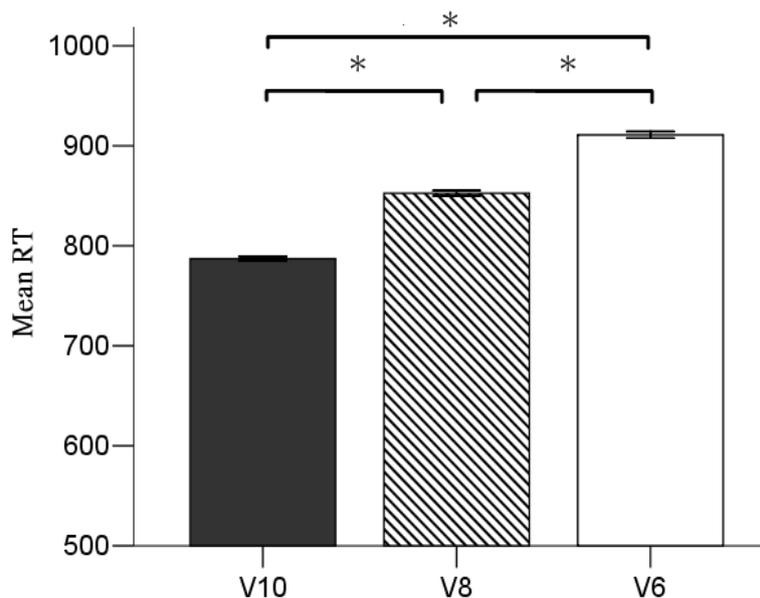


圖 4.7 速度對受測者差異分析圖

表 4.4 三種速度平均完成任務時間

| 速度(V) | Mean | Std. error |
|-------|--------|------------|
| 10 | 787.16 | 2.97 |
| 8 | 852.51 | 3.63 |
| 6 | 910.92 | 4.58 |

如果考慮到每個受測者的個體差異的話，我們就必須進行標準化，背後最主要的目的是要去除個體的差異化，如此就可以確保每位受試者的操控水準相同；標準化是當只考慮要跟單一種資料比較時會採用的，因為本實驗最主要比較對象是無輔助力系統，所以我們利用標準化將主動力輔助力系統、被動力輔助力系統和提示力輔助力系統與無輔助力系統進行比較，因為無輔助力系統為比較對象，所以無輔助力系統的九種困難度組合標準化平均反應分數均為 1，分析的結果可以看到如圖 4.8 所示，在圖 4.8 中可以發現除了提示力模式中困難度組合 A 和 B 的標準化平均反應分數是超過 1 的，其它兩種力輔助模式標準化平均反應分數都在 1 之下；因為提示力的困難度組合 A 和 B 的標準差有包含無力輔助的標準化平均反應分數 1，所以就統計上而言其實是無差異的，代表在困難度組合 A 與 B 時，無力輔助系統跟提示力輔助系統對受測者而言，感受是相同的，就從五位受測者的實驗數據去觀察此現象時，發現此現象只有出現在兩位受測者身上，其餘三位受測者在提示力輔助系統均表現的比無力輔助好；所以以大部份的困難度組合來說，提示力輔助系統在減少時間的部份，較不適合選用。

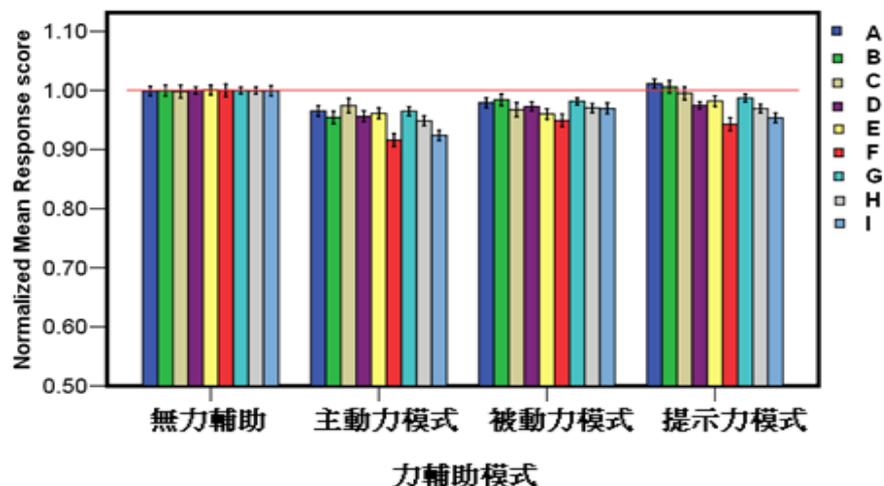


圖 4.8 標準化後三種力輔助力系統與無輔助力系統平均反應分數分析圖

基於以上的討論可以得知力輔助模式在九種困難度組合(表 4.2)中表現情況(表 4.5)，在困難度 C 與 E 時由被動力表現最好，分別可以改善 3.44% 和 4.26%，而在其它七種包含速度的困難度組合 A、B、D、F、G、H 和 I，都是由主動力表現最好，改善最少的困難度組合 H 也有 3.22% 的改善，而改善最多的是困難度組合 F，改善了 9.31%。

表 4.5 九種困難度個別所對應表現最佳的輔助力和完成時間改善程度

| 困難度組合 | 表現最佳之輔助系統 | 改善程度 |
|-------|-----------|-------|
| A | 主動力 | 3.33% |
| B | 主動力 | 4.77% |
| C | 被動力 | 3.44% |
| D | 主動力 | 4.29% |
| E | 被動力 | 4.26% |
| F | 主動力 | 9.31% |
| G | 主動力 | 3.59% |
| H | 主動力 | 3.22% |
| I | 主動力 | 7.85% |

4.3 錯誤率分析

在各種力輔助模式中，錯誤率也是我們著重的討論議題，因為本實驗是動態實驗，所以我們關注的是在速度與困難度的影響；在錯誤率的比較分析方面，困難度組合在四種力輔助模式中表現情況可以明顯看出(圖 4.9 表 4.8)，表 4.2 中困難度 F(距離 125pixels，困難度 2.0444，速度 6)在無輔助力時的錯誤次數非常的高，而在加上力輔助系統之後就有改善，改善最好的是提示力輔助系統，改善了約 63.22%，表現非常良好，而在表 4.2 中困難度 I(距離 250pixels，困難度 2.858，速度 6)也是有明顯的改善，改善了約 55.26%，由表 4.8 可以發現，在提示力方面改善的效果最明顯，總括而言，九種包含速度的困難度組合在被動力模式和提示力模式中，均能使錯誤率有效下降；由表 4.7 和表 4.8 可以進一步發現，在完成任務時間方面(表 4.5)，表現最佳的輔助力系統是主動力輔助系統，而提示力卻都是表現較一般，並無特別突出之改善，在錯誤率方面(表 4.6)，主動力卻表

現平平，並沒有改善太多，可是在完成任務時間表現一般的提示力輔助，卻表現最好，這也符合實驗前的假設，任務完成時間下降有可能會使錯誤率提高，而任務完成時間花費越多，錯誤率有可能表現較良好，這個假設在此處可得到驗證，所以在未來應用力輔助系統時可依完成任務的需要使用合適的力輔助系統，如任務要求任務完成時間必須要少、此時就可以選用主動力輔助系統，而要求錯誤率較低的任務時，就可以選用提示力輔助系統。

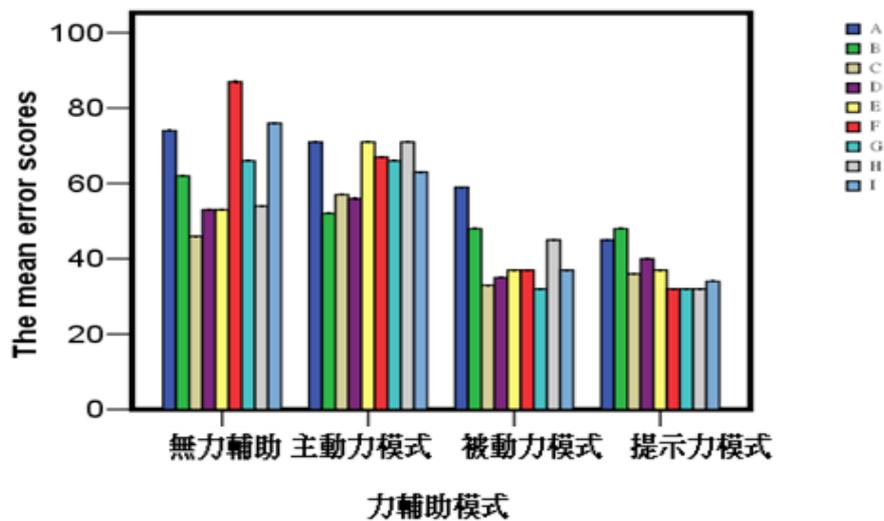


圖 4.9 力輔助模式與困難度組合錯誤次數比較圖

表 4.6 九種困難度個別所對應表現最佳的輔助力和錯誤次數改善程度

| 困難度組合 | 表現最佳之輔助系統 | 改善程度 |
|-------|-----------|--------|
| A | 提示力 | 39.19% |
| B | 被動力、提示力 | 22.58% |
| C | 被動力 | 28.26% |
| D | 被動力 | 33.96% |
| E | 被動力、提示力 | 30.19% |
| F | 提示力 | 63.22% |
| G | 被動力、提示力 | 51.52% |
| H | 提示力 | 40.74% |
| I | 提示力 | 55.26% |

4.4 受測者問卷調查結果

在實驗結束後，我們會發給每位受測者一份問卷，其中包含個人資料和一些實驗相關問題，並就使用搖桿舒適性、實驗座位舒適性和力回饋是否提供正面幫助加以詢問，問卷評分方式為最高分為 7 分，越高代表越滿意，在使用搖桿舒適性中，平均分數為 5.4 分，最高分為 6 分，最低為 5 分，以平均值而言，代表在搖桿舒適性這個題目中，搖桿的使用對於受測者而言是舒適的，並不會有帶來任何不適，顯示力搖桿適合在動態環境中操作，而且不會讓使用者感到不舒適，所以力搖桿是建議使用者選用的;實驗座位舒適性均為 6 分，對於每個受測者感受都是相同的，代表對於實驗座位均能符合每個人的需求，也就是說實驗對於受測者而言，座位環境不會影響到實驗的進行，能讓受測者更專心於實驗，更增加實驗的可信度，對於力回饋是否提供正面幫助中，平均為 5.2 分，最低為 5 分，代表力回饋系統對於使用者而言是一套可以接受並且有幫助的系統，由前幾節結果分析中指出力回饋對於使用者是有幫助的，這裡的正面幫助包含省力和舒適性，由受測者所填的問卷可得知，對於我們提出的力回饋系統是肯定的，如圖 4.10 所示，圖中黑色圓圈代表平均值，紅色線代表中位數，而紅色十字代表離群值。

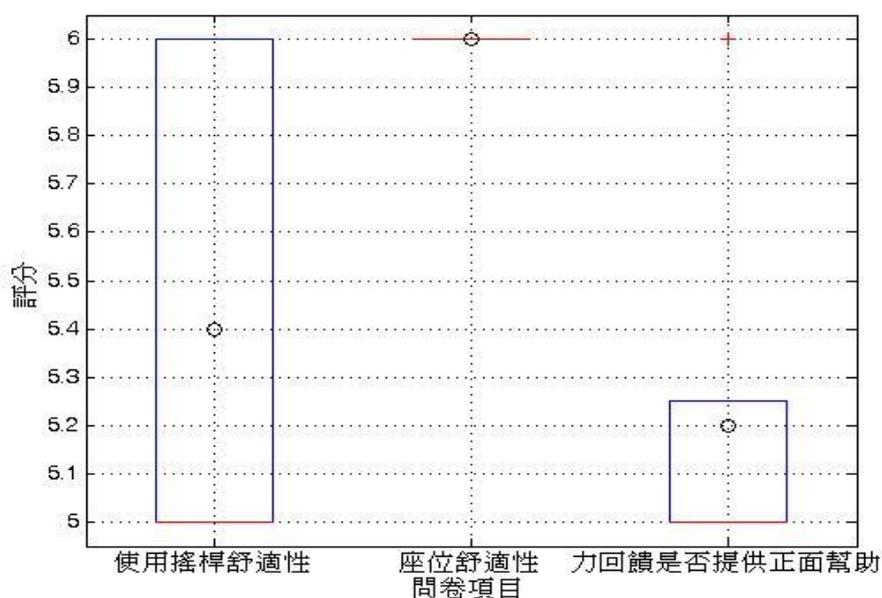


圖 4.10 受測者問卷問回覆統計圖

第五章

結論與未來工作

在人與電腦系統互動頻繁的現在，人機介面系統越顯於重要，在人機介面中輸入裝置是重要的一環，在動態環境中我們不確定力搖桿是否適合使用者採用，且減少完成任務時間和減少錯誤率一直以來都是熱門討論的議題，我們不清楚力搖桿所提供的力輔助是否可以減少完成任務時間和錯誤率。

所以我們設計一連串實驗驗證以上兩個問題，在實驗結果證實力搖桿在動態環境中符合 Fitts 定律所提出的公式，符合困難度越高花費的時間也越多，每種力輔助線性回歸，判定係數至少達到 0.94 以上，而本實驗提出的動態環境有速度此變數，在分析後也符合速度越快，花費的時間越少，可驗證力搖桿在動態環境中是適合使用者進行操作的，在每一種困難度組合中均有改善效果。在得到力搖桿在動態環境中是適合使用者進行操作的結論後，我們分析本論文所提出的三種力輔助模式是否比無力輔助具改善效果，本論文提出的三種力輔助模式對於不同的組合都有不同改善，在九種困難度組合最佳者更高達 9.31%改善率，最差者也有 3.22%改善率，錯誤率方面在力輔助情況下也獲得改善;而由每位受測者問卷中可以發現力輔助給受測者的感受是偏向於舒服，貼近需求，也驗證不只在分析上力搖桿適合使用者操作，在對使用者的舒適度也表現不錯。對於此系統是建議使用在人機介面的，像是可以使用搖桿操控自走車，可在操控自走車在行走於狹窄通道時，給予適合的力輔助，就能幫助使用者減少穿越通道的時間。

5.1 未來工作

在未來工作方面，因為在本論文所提出的動態環境實驗中為了不使受測者分心，使實驗畫面偏向於簡潔，未來要做的是將虛擬場景更符合真實世界場景，由於近年來家庭監控自走車的快速發展，又因為操控自走車是在動態環境下操控，所以未來可將此系統連接上自走車進行操控，且在操控自走車在進行穿越狹窄通道時，可以使用力輔助系統幫助使用者減少穿越通道的時間；實驗中掉落的球雖然是隨機的，可是系統是設定好給予何種輔助力，未來可加入環境偵測，可分析是處於何種環境，系統可判斷在何種環境該選取何種力輔助，系統也可加入偵測使用者意圖，可依使用者真正的需求，提供適當的力輔助減少任務完成時間和降低錯誤率。



參考文獻

- [1] 黃又勳，虛擬導引於機器人遠端操作之應用，交通大學電機與控制工程學所碩士論文，民國九十六年七月。
- [2] 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.
- [3] R. J. Jagacinski, D. W. Repperger, S. L. Ward, and M. S. Moran, "A Test of Fitts' Law with Moving Target," *Human Factors*, Vol. 22, pp. 225-233, 1980.
- [4] N. David, M. X. Cohen, A. Newen, B. H. Bewernick, N. J. Shah, G. R. Fink, and K. Vogetley, "The Extrastriate Cortex Distinguishes between the Consequence of One's Own and Others' Behavior," *NeuroImage*, Vol. 36, pp. 1004-1014, 2007.
- [5] V. G. Popescu, G. C. Burdea, and M. Bouzit, "A Virtual-Reality-Based Telerehabilitation System with Force Feedback," *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine*, Vol. 4, No. 1, pp. 45-51, 2000.
- [6] R. Colombo, F. Pisano, S. Mazzone, A. Mazzone, C. Delconte, M. C. Carrozza, P. Dario, and G. Minuco, "Robotic Techniques for Upper Limb Evaluation and Rehabilitation of Stroke Patients," *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, Vol. 13, No. 3, pp. 311-324, 2005.
- [7] T. Lee, Y. Takahashi, T. Miyoshi, T. Terada, K. Inoue, Y. Ito, K. Suzuki, and T. Komeda, "Basic Experiments of Upper Limb Rehabilitation Using Haptic Device System," *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, Vol. 13, No. 3, pp. 444-447, 2005.
- [8] T. Grossman and R. Balakrishnan, "The Bubble Cursor: Enhancing Target Acquisition by Dynamic Resizing of the Cursor's Activation Area," *Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 281-290, 2005.
- [9] D. Vogel and P. Baudisch, "Shift: A Technique for Operating Pen-Based Interfaces

- Using Touch,” *Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 657-666, 2007.
- [10] I. R. Belousov, R. Chellali, and G. J. Clapworthy, “Virtual Reality Tools for Internet Robotics,” *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1878-1883, 2001.
- [11] A. Roudaut, S. Huot, and E. Lecolinet, “TapTap and MagStick: Improving One-Handed Target Acquisition on Small Touch-screens,” *working conference on Advanced visual interfaces*, pp.146-153, 2008.
- [12] E. Tse, M. Hancock, and S. Greenberg, “Speech-Filtered Bubble Ray: Improving Target Acquisition on Display Walls,” *International Conference on Multimodal Interfaces*, pp. 307-314, 2007.
- [13] J. T. Dennerlein, D. B. Martin, and C. Hasser, “Force-Feedback Improves Performance For Steering and Combined Steering-Targeting Tasks,” *Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 423-429, 2000.
- [14] C. L. Teo, E. Burdet, and H. P. Lim, “A Robotic Teacher of Chinese Handwriting,” *Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, pp. 335–341, 2002.
- [15] K. Henmi and T. Yoshikawa, “Virtual Lesson and Its Application to Virtual Calligraphy System,” *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1275-1280, 1998.
- [16] C. Forlines and R. Balakrishnan, “Evaluating Tactile Feedback and Direct vs. Indirect Stylus Input in Pointing and Crossing Selection Tasks,” *Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1563-1572, 2008.
- [17] P. M. Fitts, “The Information Capacity of Human Motor System in Controlling the Amplitude of Movement,” *Journal of Experiment Psychology*, Vol. 47, pp. 381-391, 1954.
- [18] P. M. Fitts and J. R. Peterson, “Information Capacity of Discrete Motor Responses,” *Journal of Experiment Psychology*, Vol. 67, pp. 103-112, 1964.
- [19] A. T. Welford, A. H. Norris, and N. W. Shock, “Speed and Accuracy of Movement and Their Changes with Age,” *Acta Psychol*, Vol. 30, pp. 3-15, 1969.

- [20] I. S. Mackenzie, "A Note on the Information-theoretic Basis for Fitts' law," *Journal of Motor Behavior*, Vol. 21, pp. 323-330, 1989.
- [21] 黃宗仁, 基於搖桿之動態環境費茲定律研究, 交通大學電機與控制工程學所碩士論文, 民國九十七年七月。
- [22] 梁昶煒, 基於力回饋搖桿之虛擬毛筆書寫系統, 交通大學電機與控制工程學所碩士論文, 民國九十八年六月。
- [23] S. W. Richard and Jr. Michael Sweet 著, 大新資訊譯, OpenGL超級手冊第二版, 碁峰資訊, 民國九十三年四月。
- [24] 周宏, 統計學, 鼎茂圖書, 民國九十三年。
- [25] 吳明隆, SPSS統計應用學習實務第二版, 知城數位科技, 民國九十四年。
- [26] 楊植燁, 使用 MFC 設計 OpenGL, 文魁資訊, 民國九十五年三月。
- [27] 普悠瑪數位科技, Visual C++ 遊戲設計, 第三波資訊, 初版, 民國九十年。

