

# 基於搖桿之動態環境費茲定律研究

研究生：黃宗仁

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，為了發展適合電腦遊戲之人機介面，我們必須觀察在動態環境下操控者運動時間受空間(目標寬度與距離)與時間(速度)準確度的影響程度，並找出其關係式。本論文藉由靜態與動態實驗分別觀察空間與時間準確度對運動時間的影響，並探討以力搖桿為輸入裝置的人機介面之適合度，實驗結果證明運動時間與困難度間存在一線性關係，且速度會使得這個關係式斜率改變，並驗證了力搖桿適合作為人機介面的輸入裝置。

# **Study of Fitts' Law in Dynamic Environments based on a Joystick**

Student: Zong-Ren Huang

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. To develop a suitable HCI for computer video games, we investigate how the space and time factors influence the movement time of the operator when performing under dynamic environments. In this thesis, we perform both static and dynamic experiments to observe how the movement time is influenced by the accuracy of space and time, and discuss the feasibility of using a force-reflection joystick device for HCI. The experimental results show that there is a linear relationship between movement time and index of difficulty, and speed will affect the slope of that relationship. We also show that a force-reflection joystick device is suitable for use in HCI.

# 誌謝

首先感謝我的指導教授 – 楊谷洋博士，在兩年的指導、循循善誘下，使我的碩士論文得以順利完成。同時，也要感謝口試委員：楊秉祥老師、宋開泰老師及莊仁輝老師撥冗參與論文口試，並給於許多寶貴的建議與指導，使我獲益良多。特別感謝成大認知科學所的蕭富仁教授，在實驗設計上給予我許多寶貴的指導，感謝腦科學中心的夥伴君玲、睿昕在儀器設備上給予協助，感謝交大的邱添丁先生給予統計分析上的指導，也感謝實驗室的學長：修任、豪宇、木政和一元，在我困惑的時候伸出援手，幫助我解決研究上的問題並且指導我寫論文的技巧，其他還有「人與機器實驗室」的同學怡翔、佑綸，以及學弟勝雄、昶瑋、彥安，這兩年實驗室的生活中有你們的陪伴使我的生活多采多姿，讓我深感欣慰；也很感謝那些當我受測者的朋友們，因為你們的幫助讓論文得以順利寫出來。最後，我要感謝我的家人的支持，提供我穩定的經濟使我得以生活，讓我能夠心無旁騖的專心致力於研究上；也感謝我的朋友們，在我失落的時候給予我鼓勵，在我需要幫助的時候扶我一把，讓我得以完成學業。

# 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. 導論.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究動機與方法.....	3
1.3 論文架構.....	4
2. 人機介面之費茲定律應用.....	5
3. 系統實現.....	10
3.1 搖桿系統.....	11
3.2 虛擬場景系統.....	14
4. 靜態與動態環境費茲定律實驗.....	17
4.1 靜態實驗.....	17
4.1.1 實驗場景.....	18
4.1.2 實驗流程.....	20
4.1.3 實驗結果與分析方法.....	23
4.2 動態實驗.....	26
4.2.1 實驗場景.....	26

4.2.2 實驗流程.....	28
4.2.3 實驗結果與分析方法.....	31
4.3 討論.....	35
5. 結論.....	37
5.1 未來工作.....	38
參考文獻.....	39



# 表目錄

表 3.1 力回饋搖桿比較表.....	13
表 4.1 靜態實驗受測者資料.....	19
表 4.2 靜態實驗困難度組合表.....	19
表 4.3 判定係數與費茲定律方程式.....	23
表 4.4 針對所有受測者得到的(a)相關係數和(b)回歸分析係數 .....	25
表 4.5 動態實驗受測者資料.....	27
表 4.6 動態實驗中速度與困難度組合表.....	27
表 4.7 二因子變異數分析之顯著性.....	33
表 4.8 三種速度下的回歸分析.....	33
表 4.9 靜態與動態下費茲定律的差異.....	36



# 圖目錄

圖 1.1	生理研究構想圖.....	4
圖 2.1	1954 年 Fitts 實驗場景[12].....	6
圖 2.2	1964 年 Fitts 和 Peterson 設計的不連續快速掃瞄實驗[13].....	6
圖 2.3	(a)點選任務和(b)拖曳任務 .....	8
圖 3.1	系統硬體架構圖.....	10
圖 3.2	HCI 系統流程圖.....	11
圖 3.3	(a)Impulse Stick Force Feedback Joystick 和(b)Impulse Engine 2000.....	12
圖 3.4	搖桿裝置示意圖.....	12
圖 3.5	圖形函式庫 OpenGL 成像流程.....	15
圖 3.6	OpenGL 在 Windows 應用程式下的架構 .....	15
圖 4.1	靜態實驗場景.....	18
圖 4.2	等候區與提示球示意圖.....	20
圖 4.3	球出現位置示意圖.....	21
圖 4.4	靜態實驗流程圖.....	22
圖 4.5	針對所有受測者進行回歸分析的關係式.....	24
圖 4.6	動態實驗場景.....	28
圖 4.7	球出現高度位置示意圖.....	29
圖 4.8	接取失敗示意圖.....	29
圖 4.9	動態實驗流程圖.....	30
圖 4.10	二因子變異數分析流程.....	31
圖 4.11	(a)在不同困難度下運動時間隨速度的變化和(b)在不同速度下運動時間隨困難度的變化.....	34

圖 4.12 三種速度下的費茲定律方程式.....35  
圖 4.13 靜態與動態場景的費茲定律方程式.....36





# 第一章

## 導論

### 1.1 研究背景

由於電腦功能日益強大以及作業系統的快速發展，使得電腦與人之間的互動更加頻繁，藉由滑鼠、搖桿、鍵盤等輸入裝置配合螢幕、喇叭等輸出裝置使得人能更有效率地操作電腦，達成雙向的互動，這就是人機介面(Human-Computer Interface, HCI)所期望的目標。80 年代由蘋果公司所研發的麥金塔(Macintosh)使用視窗、選單及滑鼠游標建立起圖形使用者介面(Graphic User Interface, GUI)，是 HCI 成功的案例，90 年代微軟發展 Windows 系列，至今科技已進步到使用觸碰式螢幕進行各種操作，如 ATM、GPS 等，而現今熱門的虛擬實境與腦機介面(Brain Computer Interface, BCI)也都屬於 HCI 上的應用。

正由於 HCI 可以藉由使用簡單的電腦介面配合適當的輸入裝置，達成人們所期望的動作，像是我們可以利用力搖桿遠端操控一機械手臂[22]，或者使用力感呈現裝置搭配虛擬場景來進行手術[2]，HCI 有著操控方便、多機整合容易等優點，因此被廣泛地運用在各種研究。在運動生理學研究上，Jagacinski 等[15]使用 HCI 設計一目標物抓取任務，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；在腦科學研究上，David 等[11]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[20]利用力回饋手套進行運動復健，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[14]使用 HCI 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[19]使用力回饋裝置在 HCI 上進行一反覆前後左右動作的實驗，幫助受傷病患復健。上述的研究及應用都屬於一種靜態場景上的操作，螢幕中的物體並不會隨意的變動或移動，像是我們操控 ATM 提款機，提款機中的觸碰式按鍵並不會左右移動，而操作力搖桿走一正方形軌跡，圖形軌跡從頭到尾必須靜止不動，操作者才能夠跟隨軌跡行走；如果 HCI 中的物件會隨著時間而改變位置，那操控者就必須預測並且注意位置的變化，進而會影響到 HCI 操控的移動時間，像是棒球遊戲介面中，球的位置會隨著時間改變，且我們也必需預測球的落點。基於在動態環境下進行的 HCI 應用日益增加，所以在本論文中，我們針對動態的環境進行研究。

在動態的環境下，爲了完成實驗指示的動作，操控者不僅在空間上要能夠準確的抓取，在時間上也必須準確的估測，而爲了在 HCI 動態場景下觀察運動時間是否受到空間與動作準確度的影響，我們使用了費茲定律(Fitts' Law)進行分析，費茲定律是由 Fitts[12]所提出，提及人在運動上的移動時間(Movement Time)受到移動距離跟動作準確度的影響，因此場景中物件寬度與距離的設定會影響空間準確度，間接影響了運動時間。藉由觀察動態場景中困難度與速度對運動時間的影響，我們可以找到運動時間與困難度間的關係式，並且得知速度對整個關係式的影響程度，此動態場景的研究可以提供 HCI 研究者在設計動態場景下物件寬度、距離與速度的設定，進而設計出合宜的人機介面；而在未來研究中，我們期望能夠藉由費茲定律(Fitts' Law)將運動能力量化，並且提供給運動生理或者腦科學所使用，使其在分析上能有量化的數值作爲依據，像是昏迷指數可以藉由幾個檢測動作而得知人的清醒程度。

## 1.2 研究動機與方法

我們著重在遊戲環境下的動態場景，其除了要能準確的完成動作外，還要能夠精確的預估時間，像是棒球遊戲中，我們必須在球投出後預測球的落點並且預測到達的時間，針對 HCI 在動態環境下，速度的設定是否會影響到運動時間是我們所關心的議題之一；然而，除了時間準確度(速度)外，空間上的準確度(物件的寬度與距離)也同時影響了運動時間。

由於有兩個變因會影響到我們的運動時間，爲了要觀察空間準確度與時間準確度兩者對運動時間的影響，Fitts[12]提出運動時間與空間準確度的關係式，描述運動時間受到了物件寬度與距離的影響，所以在進行動態場景研究前，我們必須先證實以搖桿爲輸入裝置的 HCI 也能夠建立起運動時間與寬間準確度的關係式，再接續進行動態場景的研究，因此我們根據 Fitts[13]於 1964 年所設計的實驗先進行靜態研究。接著，我們同時針對時間(速度)與空間準確度(物件寬度與距離)進行費茲定律動態場景研究，同時觀察物件寬度、距離與速度對運動時間的影響，並觀察在不同速度下所建立的費茲定律方程式的差異。

而對於動態費茲定律研究，除了在工程上可用來設計遊戲用的人機介面，在運動生理或腦科學上，我們也希望藉由費茲定律將運動能力量化進而觀察腦皮質層上的改變，一個可能的生理研究構想圖如圖 1.1 所示，受測者經由控制指令給予 HCI，HCI 將力感與視覺回饋給受測者，並將行爲資訊記錄下來，再藉由行爲分析後得到動作誤差來矯正受測者；另一方面，受測者經由生理訊號量測系統紀錄腦電波與肌電波，再進行所紀錄的訊號之頻譜分析，經分析後得到 Brain Map 就可以進行生理訊號的研究，像是復健運動、運動學習、腦皮質層變化等。

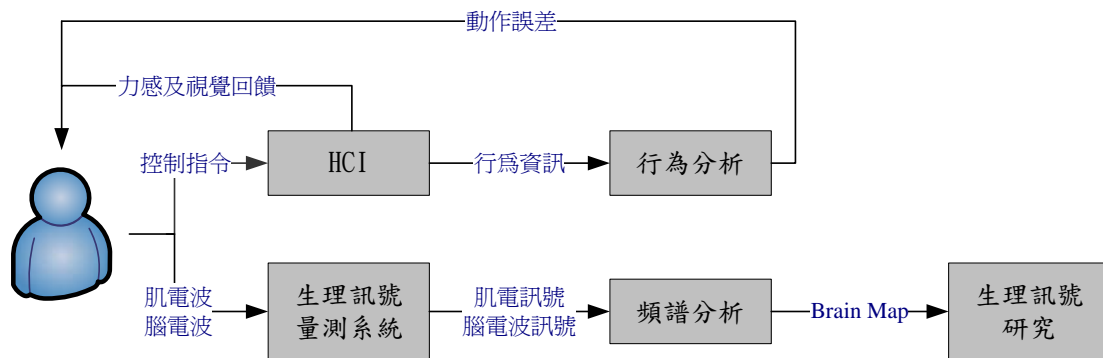


圖1.1 生理研究構想圖

### 1.3 論文架構

本論文分為五個章節，第一章為導論，說明整篇論文的研究背景、動機及研究目的；第二章為人機介面之費茲定律應用，介紹人機介面中所應用的費茲定律演進與發展歷史，及其工程應用；第三章是系統實現，介紹論文中 HCI 實現所使用的硬體與軟體上的設計；第四章介紹針對研究所設計的靜態與動態實驗，並說明實驗的設計及流程，以及根據統計分析所得到的結果並進行比較；第五章為結論及未來工作。

## 第二章

# 人機介面之費茲定律應用

1954 年 Fitts[12]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，爲了觀察運動時間在空間與時間準確度上的變化，我們使用了費茲定律來證實兩者間的關聯性，本章內容主要敘述在 HCI 場景中，針對論文所使用的費茲定律描述其公式演進及發展歷史，並選出適合的模型。1954 年由 Fitts[12]所提出費茲定律中，提及移動時間(Movement Time)受到運動距離跟動作準確度的影響，因此場景中物件的寬度、距離設定是重要的課題，而寬度的設定會影響到運動的準確度。Fitts[13]設計了一個實驗來驗證他的理論，如圖 2.1 所示，實驗中改變距離(D: 2, 4, 8, 16 in.)與目標寬度(W: 0.25, 0.5, 1, 2 in.)，控制者來回的在兩個目標物之間移動，建立起困難度(Index of Difficulty, ID)與運動時間(Movement Time, MT)的公式:

$$MT = a + b \log_2\left(\frac{2D}{W}\right) \quad (2.1)$$

其中 ID 爲式中的  $\log_2\left(\frac{2D}{W}\right)$ ，a、b 是 MT 與 ID 經由回歸分析所得到的兩個常數。接著，Fitts 爲了再次證實費茲定律的可信度，Fitts 和 Peterson[13]於 1964 年設計一個不連續的快速掃描運動實驗，如圖 2.2 所示，改變距離(D:3 ,6, 12 in.)以及目標寬度(W: 0.125, 0.25, 0.5, 1 in. )，再次驗證 1954 年所發現的關係式。1960 年，Welford[1]建議當  $\frac{D}{W} < 2$  時，MT 跟 ID 之間的直線關係會有向上 shift 的現象，因此提出一修正公式:

$$MT = a + b \log_2\left(\frac{D}{W} + 0.5\right) \quad (2.2)$$

其中 ID 為式中的  $\log_2\left(\frac{D}{W} + 0.5\right)$ ，a、b 是 MT 與 ID 經由回歸分析所得到的兩個常數。

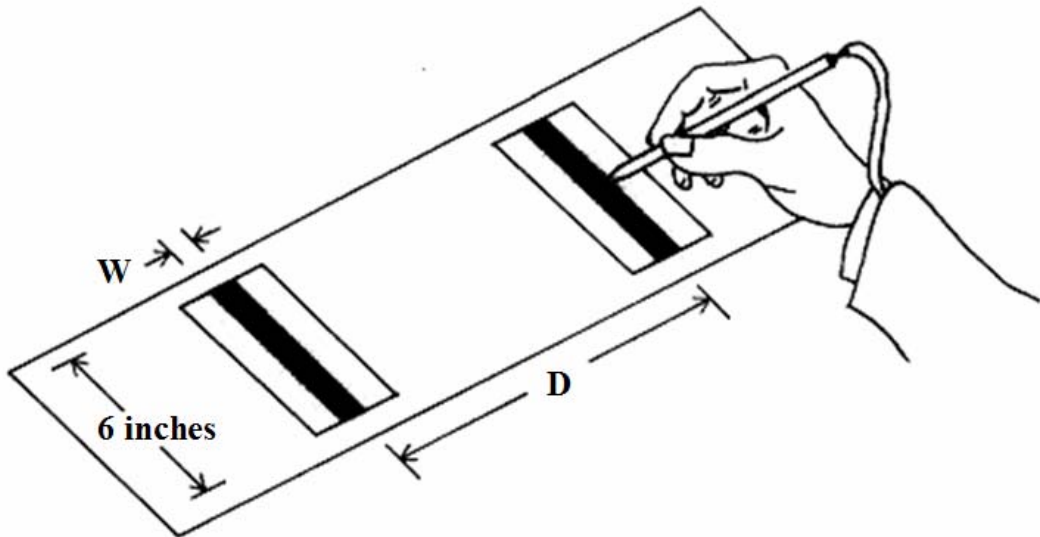


圖 2.1 1954 年 Fitts 實驗場景[12]

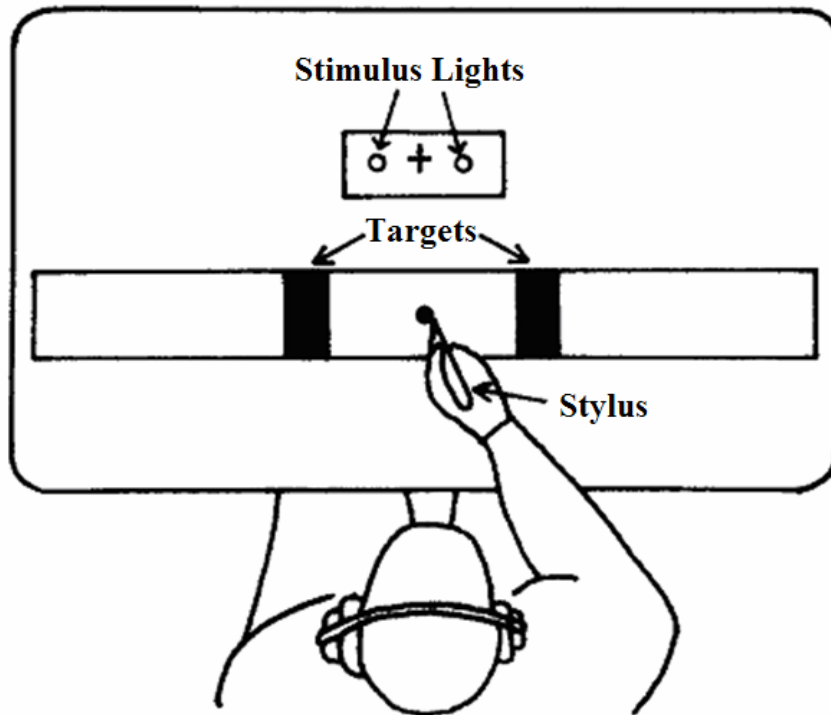


圖 2.2 1964 年 Fitts 和 Peterson 設計的不連續快速掃描實驗[13]

1989 年，Mackenzie[7]再將公式修正，原因是 1976 年 Langolf[5]發現動作時間與距離並非呈線性比例關係，修正後的公式又稱為 Shannon formulation:

$$MT = a + b \log_2 \left( \frac{D}{W} + 1 \right) \quad (2.3)$$

其中 ID 為式中的  $\log_2 \left( \frac{D}{W} + 1 \right)$ ，a、b 是 MT 與 ID 經由回歸分析所得到的兩個常數。我們從 1989 年 Mackenzie[7]進行兩種不同重量(1 盎司和 1 磅)的針筆進行三種模型間的比較，由表 2.1 中得知，不論在 1 盎司或者 1 磅重量下的針筆，Shannon formulation 模型的相關係數最高，此相關係數是經由線性回歸分析所得到的數值，數值越高表示運動時間與困難度兩者間相依程度越高；而 Shannon formulation 較被世人所接受，原因有三點：

- (1) 較符合實際觀察所得的數據；
- (2) 與訊息理論(Information Theory)極為相似；
- (3) 使困難度均為正值，

因此，本論文也採用 Shannon formulation 的模型進行分析。

表 2.1 各種 Fitts' Law 模型的比較[7]

Model	Author	1 oz	1 lb
$MT = a + b \log_2 \left( \frac{2D}{W} \right)$	Fitts & Peterson(1964)	0.9831	0.9796
$MT = a + b \log_2 \left( \frac{D}{W} + 0.5 \right)$	Welford(1968)	0.9900	0.9874
$MT = a + b \log_2 \left( \frac{D}{W} + 1 \right)$	Mackenzie(1989)	0.9936	0.9926



在探討完費茲定律的模型後，我們介紹應用費茲定律於 HCI 的相關研究，第一個將費茲定律應用在 HCI 研究上的是 1978 年的 Card 和 Burr[16]，他們使用滑鼠以及鍵盤在 CRT 上進行文件點選實驗，接著，有多位 HCI 領域的研究者都運用到費茲定律，像是 Gillan 和 Holen[4]，Boritz 和 Booth[10]，Mackenzie 和 Buxton[8,9]，他們都是屬於在螢幕上利用游標(Cursor)進行點選或拖曳任務，如圖 2.3 所示，在圖 2.3(a)中，操控箭頭移動至十字處，此時另外一邊的長條上也會出現十字，這時快速的移動箭頭到下一個十字處，此為點選任務；在圖 2.3(b)中，操控十字游標移動至長條上的十字處，按下滑鼠左鍵不放，並且移動至另外一邊的長條上，此為拖曳任務，上述兩種任務都屬於一種“靜態”的場景，因為物件會出現在某定點，我們只需要執行抓取的動作即可，而不需要去預測物件的移動，例如打地鼠這個遊戲，我們只需要把場景中的游標移到特定的定點即可，而不需要擔心這個地鼠還會跑來跑去；相對地，“動態”情形是我們除了移動到某定點外，還多了一個預測的動作，例如乒乓球的遊戲中，我們除了要準確的移動到位外，還必須預估球的移動，進行適當的調整。

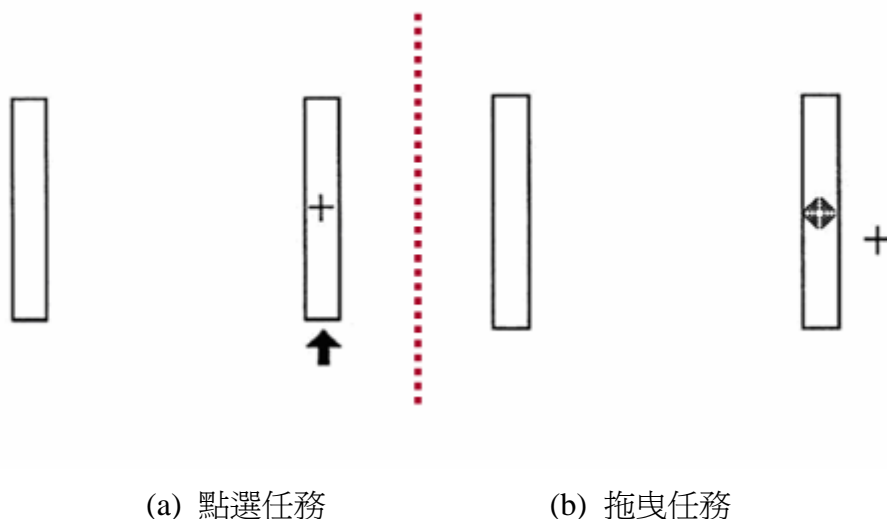


圖 2.3 (a)點選任務和(b)拖曳任務



以上的研究背後都有其研究的目的及意義，Card 和 Burr[16]使用不同的輸入裝置在 CRT 上進行文件點選的實驗，目的是為了觀察人們日常工作中，那一種輸入裝置會對於人們操作上更便利、有效率；Zhai 和 Buxton[17]在 3D 虛擬實境中設計運用虛擬手抓魚的實驗，目的是提出可在 3D 環境中抓取物件的技術；Jack 和 David[18]使用力回饋滑鼠研究力回饋可否增進人們工作的準確性與效率，及在人機介面上引入力回饋機制是否合適，而本論文為了發展用於電腦遊戲的人機介面，在動態環境下觀察空間與時間準確度對運動時間的影響，另一方面，我們也期望能夠藉由動態費茲定律將運動能力給量化並且提供給運動生理與腦科學之用。



# 第三章

## 系統實現

本章介紹一 HCI 系統中所用到的軟硬體裝置，如圖 3.1 所示，受測者透過搖桿將位置資訊傳給 PC，PC 會紀錄位置和時間的資料，且轉換位置資訊成虛擬場景，並顯示場景，最後將所紀錄的資料進行統計分析。此系統中，HCI 包括了搖桿系統以及虛擬場景系統兩個系統，受測者透過搖桿將位置資訊傳輸給力回饋系統，經由電腦運算後轉換成運動指令給虛擬場景系統，虛擬場景經由 OpenGL 成像視覺回饋給受測者；另一方面，虛擬場景也將場景中的資訊持續傳輸給力資訊計算，經由電腦判斷是否需要提供力回饋，再將力感回饋給受測者，此 HCI 系統流程如圖 3.2 所示。

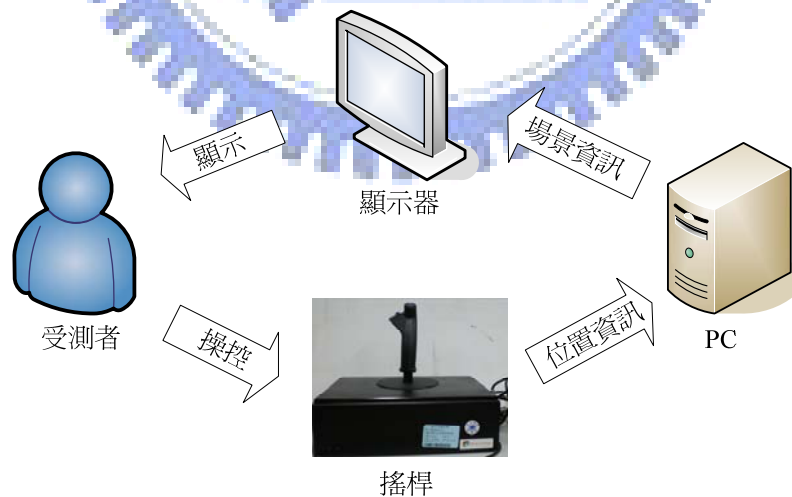


圖 3.1 系統硬體架構圖

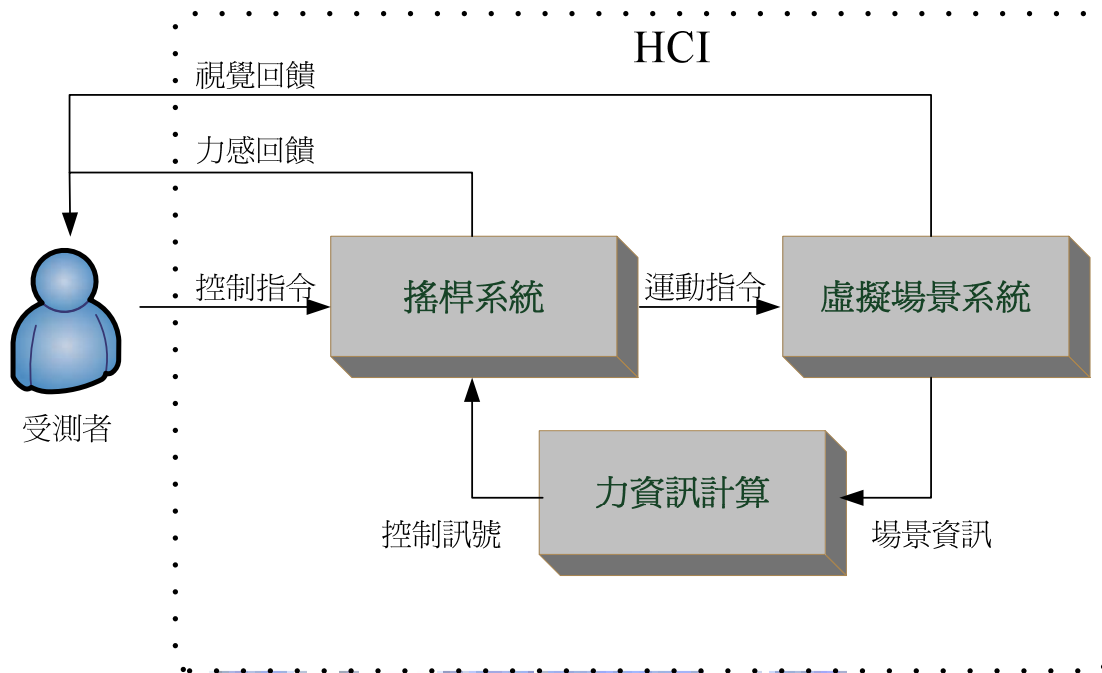


圖 3.2 HCI 系統流程圖

### 3.1 搖桿系統

本論文使用的是 Immersion 公司所出產的 Impulse Stick Force Feedback Joystick (CIS-56000-SYS)，如圖 3.3(a)所示，它是一個擁有兩個自由度的遙控器，能夠在 XP、Windows 2000 上使用，連接界面只需使用 USB，在使用上十分的便利，由於這支搖桿本來就是為了設計給遊戲廠商所使用的，所以它的力效果十分多元。而 Immersion 公司之前還有出一款力搖桿 Impulse Engine 2000，如圖 3.3(b)所示，兩種搖桿的比較如表 3.1 所示。本研究選擇這支搖桿 Impulse Stick Force Feedback Joystick 主要是因為它隨插即用的便利性，加上輸出的力矩比較大，可以使用力牆限制搖桿可移動的範圍，其缺點是精準度比較差，而本論文中力回饋部分主要是實現完全定位於 Y 軸上，利用力牆將受測者的移動限制成一個自由度，所以對力的精準度要求較低。而直接與使用者互動的力回饋裝置其基

本組成，如圖 3.4 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。



(a) Impulse Stick Force Feedback Joystick

(b) Impulse Engine 2000

圖 3.3 (a)Impulse Stick Force Feedback Joystick和(b)Impulse Engine 2000

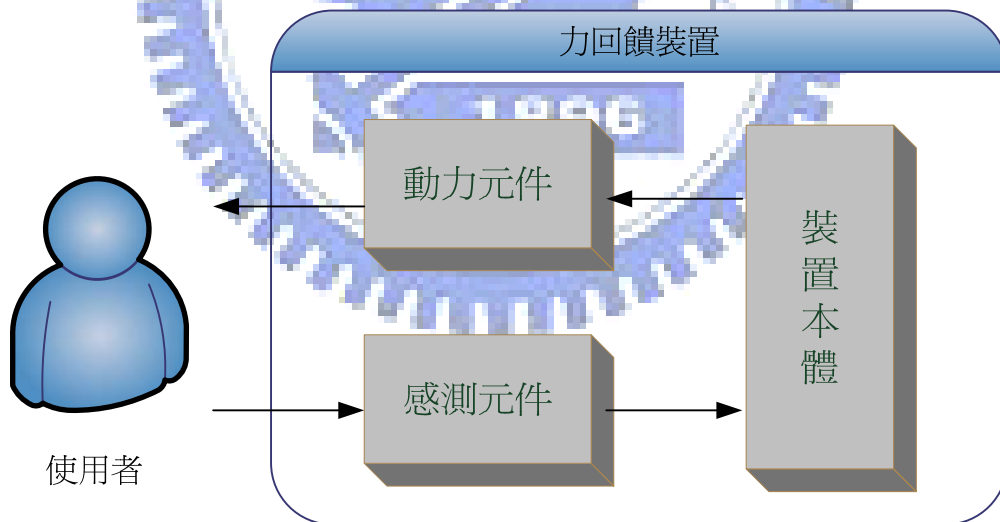


圖 3.4 搖桿裝置示意圖

表 3.1 力回饋搖桿比較表

項 目		Impulse Force Feedback Joystick (CIS-56000-SYS)	Impulse Engine 2000
活動範圍 ( $\theta$ )	X 軸	40deg	65 deg
	Y 軸	40 deg	65 deg
總高度 (L3)		26.67cm	28 cm
握把長度 (L3-L1)		16.51cm	18.5 cm
擺動距離 (R)		11.52cm	18 cm
最大額定輸出 力矩		14.5 N	8.9 N
搖桿精確度		.01 deg (2.88 mm)	0.0009" (0.023 mm)
力效果		Spring、Slope、 Damper、Friction、 Axis & Angle Wall、 Vector Force、 Periodic、Pulse	Spring
電腦連接介面		USB	dedicated card
定位方式		Free	Free
工作頻寬		not available	650 Hz
控制方式		PC	PC
價位		200000 NT	180000 NT

## 3.2 虛擬場景系統

本論文所使用的軟體工具主要為 Visual C++ 6.0 及 OpenGL，由於實驗場景中使用力回饋搖桿作為輸入裝置，所以也使用到 Direct X 和 Immersion I-Force 2.0 這兩個軟體來驅動搖桿裝置。場景的撰寫需要用到電腦繪圖工具，一般而言，最常被使用的非 DirectX、OpenGL 這兩種軟體莫屬，我們選擇採用 OpenGL，理由是 OpenGL 的架構非常簡單明瞭，方便初學者使用，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，而 DirectX 只能在 Windows 的平台所使用；我們採用的作業系統是 Windows XP。

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 3.5 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。根據 Delingette[6] 其研究中指出，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 至 30 個畫面，也就是說虛擬場景的更新頻率至少需要 20~30Hz 左右，才能夠保持畫面的流暢，而此

系統所撰寫的虛擬場景經由實驗測試，更新頻率約 35Hz。

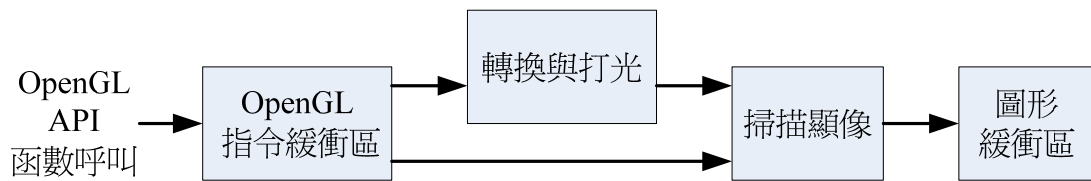


圖 3.5 圖形函式庫 OpenGL 成像流程

在 Windows 架構下，如圖 3.6 所示，GL 在應用程式裡負責 3D 繪圖的運算，GLU 是 OpenGL 工具函式庫，主要是處理特殊矩陣運算、曲面、曲線等，GLUT 是負責作業系統相關的輔助函式庫。而使用者介面、螢幕顯示或者視窗管理都必須由 Windows 作業系統所負責，爲了讓 OpenGL 與 Windows 能互相配合，Windows 提供 WGL 將 OpenGL 跟使用者介面串連起來，而 GDI 負責實際的圖形輸出入介面，一般而言，用 OpenGL 作爲繪圖介面就不需要用到 GDI。

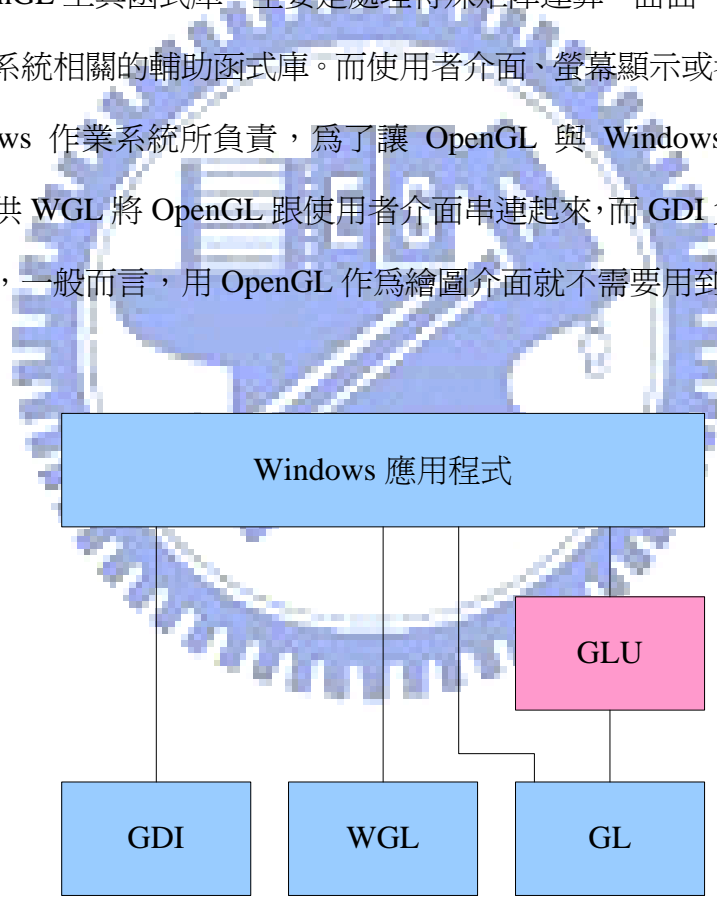


圖 3.6 OpenGL 在 Windows 應用程式下的架構

爲了發展一個簡易使用的人機介面(Human-Computer Interface, HCI)，本論文採用了 MFC(Microsoft Foundation Classes)的架構[24,25]，而非一般人常使用的 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。

接下來，由於虛擬場景的建立運用了各種軟體，爲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 這些軟體，所以必須將所需要的函式庫(\*.lib)跟 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 OpenGL 初學者使用 Richard[21]所著作的 OpenGL 超級手冊第二版爲範本。



## 第四章

### 靜態與動態環境費茲定律實驗

爲了在動態環境下觀察速度與困難度對運動時間的影響，本章節中描述兩類實驗：靜態實驗和動態實驗，靜態實驗的目的是爲了觀察 HCI 中空間準確度對運動時間的影響，我們根據 1964 年 Fiits 所設計的不連續快速掃瞄實驗[13]，設計一個相似的實驗，驗證 HCI 中運動時間與困難度間的關係及以搖桿作爲 HCI 介面輸入裝置的適合度；動態實驗的目的是觀察 HCI 在不同的速度下是否會影響運動時間與困難度間所建立的關係式，同時觀察速度與困難度對運動時間的影響，我們設計三種不同的速度搭配三種困難度，觀察不同速度下這三個關係式間的變化，並與靜態實驗找到的關係式進行比較。接下來將分別介紹這兩種實驗的場景設計、實驗流程以及實驗結果，並加以討論。

#### 4.1 靜態實驗

費茲定律的理論中，顯示場景中的運動時間(MT)與困難度(ID)成一線性關係，藉由 1964 年 Fitts[13]所設計的不連續快速掃瞄實驗進行靜態實驗，其目的是爲了觀察 HCI 中空間準確度(物件寬度與距離)對運動時間的影響，並證實搖桿適合作爲 HCI 介面的輸入裝置，實驗中找了 7 位受測者做實驗，受測者慣用手均爲右手，年齡介於 23~25 歲，靜態實驗受測者資料如表 4.1 所示。

## 4.1.1 實驗場景

靜態實驗的場景是根據 1964 年 Fitts 的不連續快速掃瞄實驗所設計，在 HCI 的設計上考慮到 HCI 中視覺回饋的影響[3]，在場景中加上提示球來提醒受測者，而搖桿本身具有兩個自由度，在分析上如果同時紀錄兩個自由度動作時，會增加分析上的難度，爲了簡化分析上的複雜度[23]，我們限制受測者的運動範圍，使用力牆來限制搖桿可移動的範圍，並將運動完全定位在 Y 軸上，利用力牆將受測者的移動限制成一個自由度，只能左右移動，上下移動是不被允許的，靜態實驗場景如圖 4.1 所示，場景中，我們改變寬度(W: 30, 40, 50 pixel)與距離(D: 62.5, 125, 250 pixel)，一共有 9 種困難度，如表 4.2 所示，根據這 9 種困難度及所記錄的移動時間，我們試圖找出困難度(ID)與移動時間(MT)的關係。

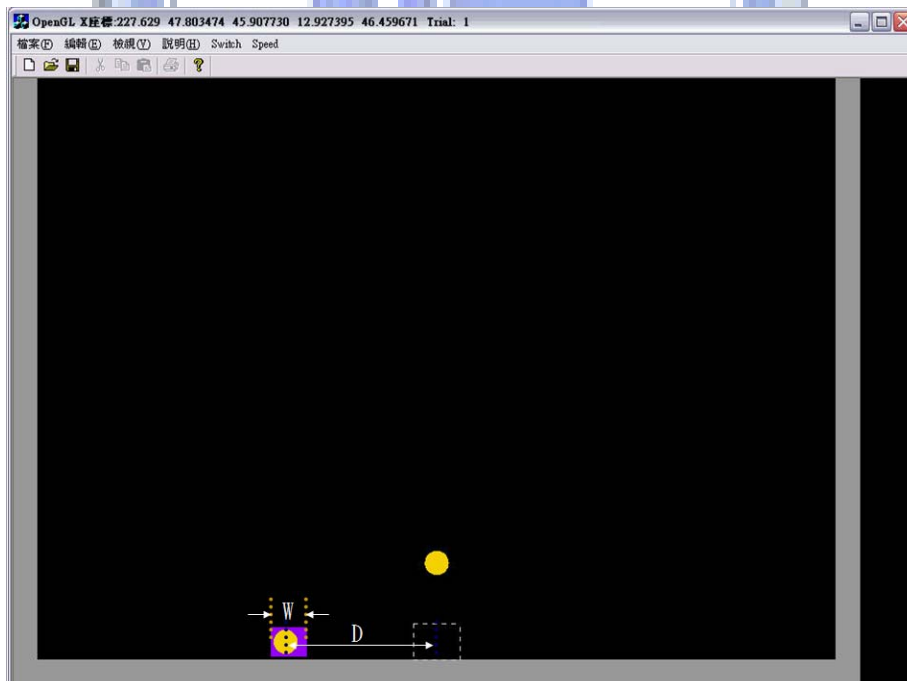


圖 4.1 靜態實驗場景

表 4.1 靜態實驗受測者資料

受測者	性別	年齡	慣用手	重走率 (%)
A	男	24	右	7.45 %
B	男	24	右	12.62 %
C	男	23	右	11.55 %
D	男	25	右	8.63 %
E	男	24	右	13.46 %
F	男	24	右	14.29 %
G	男	23	右	6.49 %
Mean				10.64 %
SD				3.09 %

表 4.2 靜態實驗困難度組合表

組合	距離 (D, pixel)	寬度 (W, pixel)	困難度 (ID, bits)
1	62.5	50	1.1699
2	62.5	40	1.3576
3	62.5	30	1.6245
4	125	50	1.8074
5	125	40	2.0444
6	125	30	2.3692
7	250	50	2.5850
8	250	40	2.8580
9	250	30	3.2224

## 4.1.2 實驗流程

在統計分析上，隨機取樣的資料能使實驗結果更具有可信度，爲了讓靜態實驗具有可靠的可信度，在實驗設計上盡可能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，實驗步驟描述如下：

1. 靜態實驗開始前先進行實驗練習，讓每個受測者的統計分析都能處於相同的基準上，降低實驗的誤差；當圈數大於 20 圈且成功率大於 80%時，練習結束。
2. 休息一分鐘後，正式實驗開始，將控制的方塊放置於等候區(虛線的區域)，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 4.2 所示，此時可以開始移動。



圖 4.2 等候區與提示球示意圖

- 當受測者每次都往同一方向移動時，會有運動學習的效果，爲了避免受測者在同一方向有學習效果，在實驗設計上採用左右隨機的方式，球的距離有 62.5、125 和 250 pixel 三種情況，搭配三種物件寬度 30、40 和 50 pixel，一共九種困難度且左右隨機出現，球出現的位置如圖 4.3 所示；必須將控制的方塊移動至球上，等候一秒且不再移動，才算成功抓取；而每次成功抓取後就會設定好下次出現的情況，運動時間是人接受刺激後反應到成功接取的時間。

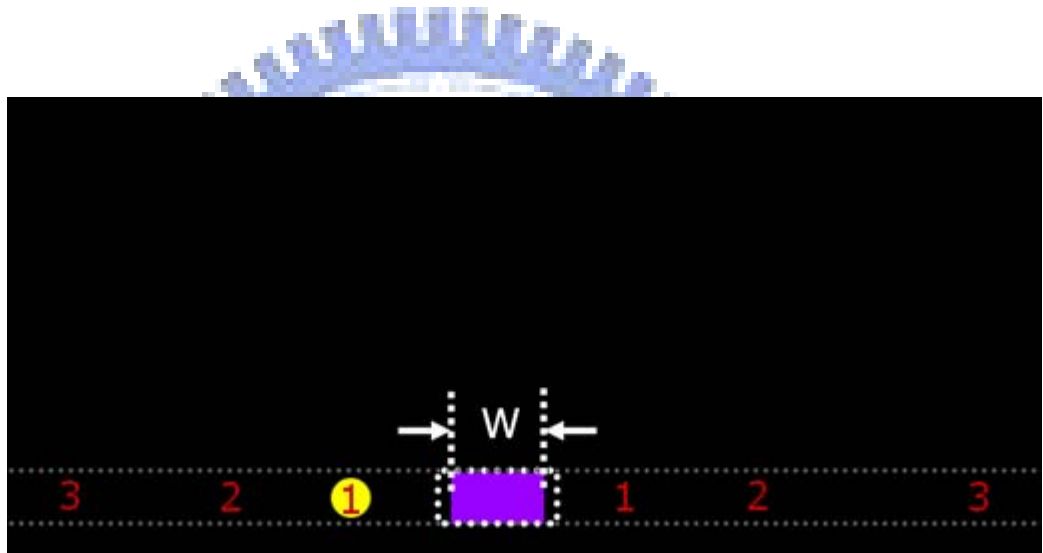


圖 4.3 球出現位置示意圖

- 爲了避免一直左右微調抓取，當抓取動作一過頭，也就是方塊一但超過球的邊界，我們視爲失敗抓取，而這個情況需要重走一次。實驗每六十圈休息一分鐘，總圈數三百六十圈，實驗一實驗流程圖，如圖 4.4 所示。

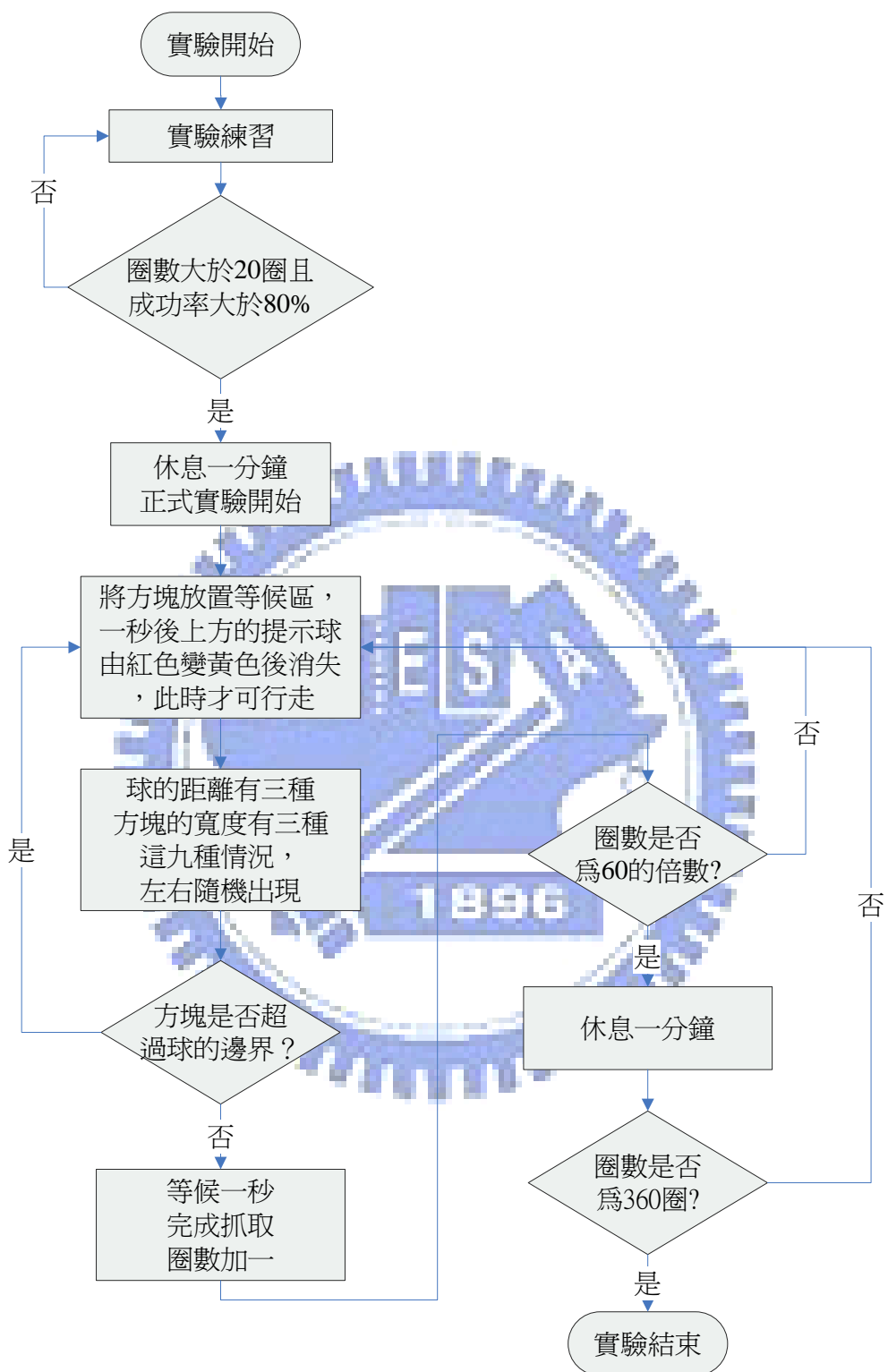


圖 4.4 靜態實驗流程圖

### 4.1.3 實驗結果與分析方法

我們根據九種不同的困難度進行統計分析，困難度的建立是採用 Shannon formulation 的模型，將實驗得到的 40 圈運動時間的原始數據經由去除異常值( $\pm 3SD$ )後進行平均，再使用線性回歸分析法得到困難度與運動時間兩者間的關係式，並藉由觀察兩者間的相關係數，可以得知困難度與運動時間兩者相關程度 [26,27]，最後爲了觀察整體的相關程度，將七位受測者的原始數據一起分析，經由去除異常值( $\pm 3SD$ )後進行平均，再使用回歸分析法得到關係式，在統計分析上常使用判定係數(coefficient of determination, R 平方)來解釋回歸分析的適合度，數值範圍從 0~1，越接近 1 表示適合度越好，反之亦然，代表著運動時間與困難度的關係可以用這個相關方程式來解釋的程度，實驗得到的判定係數與費茲定律方程式，如表 4.3 所示，每一列表示受測者經由回歸分析得到的判定係數與費茲定律方程式，最後一列描述所有受測者一起進行回歸分析所得到的結果。

表 4.3 判定係數與費茲定律方程式

受測者	判定係數(R 平方)	費茲定律方程式
A	0.960	$MT = 1139 + 257 ID$
B	0.948	$MT = 1147 + 256 ID$
C	0.948	$MT = 1124 + 243 ID$
D	0.878	$MT = 1183 + 293 ID$
E	0.895	$MT = 1032 + 298 ID$
F	0.959	$MT = 1214 + 267 ID$
G	0.954	$MT = 1262 + 249 ID$
平均	0.985	$MT = 1165 + 259 ID$

SPSS 是一套基於社會科學所發展出來的統計軟體，早期稱為 Statistical Package for the Social Science 多用於社會科學，近期因為這套軟體在統計學上廣泛使用，更名為 Statistical Products and Services Solution，它易學易用且具豐富的統計分析，因此我們使用這套軟體進行線性回歸分析。我們經由 SPSS 分析繪製出的圖表[28]中，我們可以清楚地知道運動時間與困難度間成一個正相關的關係，兩者間的判定係數為 0.985，如圖 4.5 所示，証實了我們實驗中寬度與距離的設定上的可信度非常高，另外也証實了運動時間與困難度的確有著很大的關連性，因此在 HCI 場景距離與寬度的設定會嚴重影響到實驗中的運動時間。

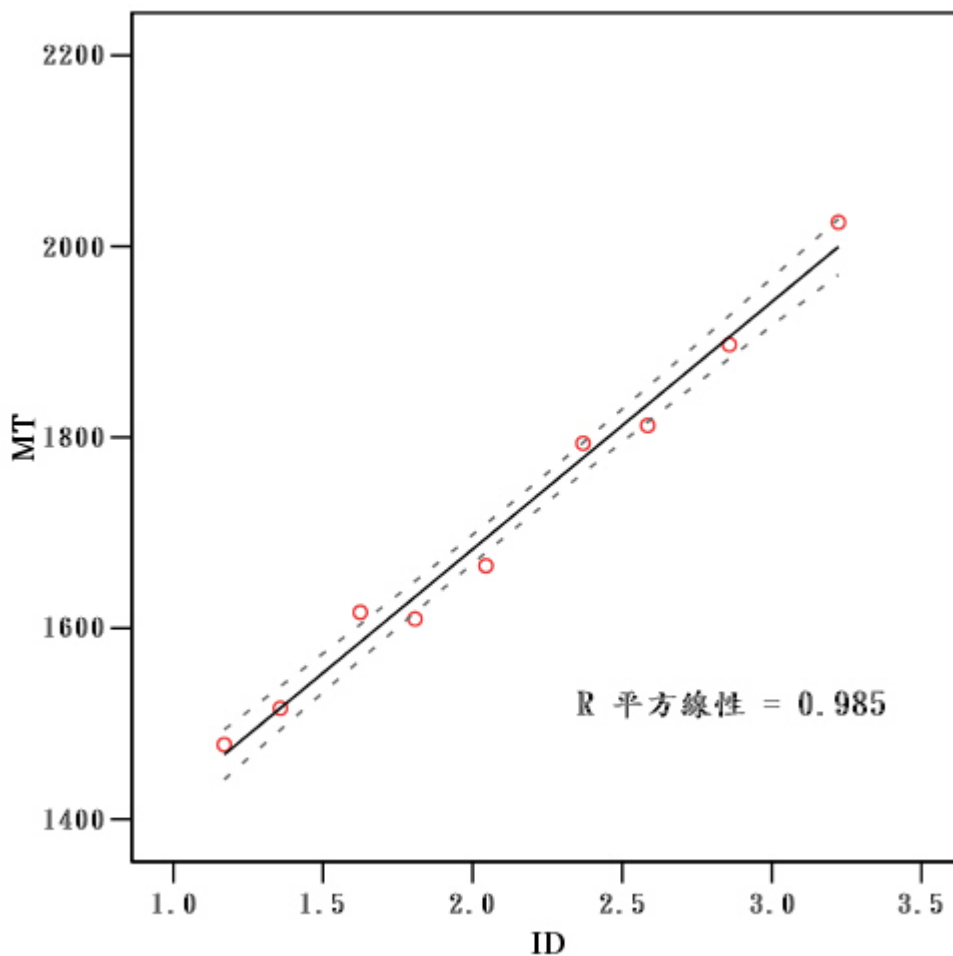


圖 4.5 針對所有受測者進行回歸分析的關係式



圖 4.6 是 SPSS 針對運動時間與困難度分析的圖表，從圖 4.6(a)中，我們可以清楚的知道運動時間與困難度間(所有受測者)的相關係數  $R$  等於 0.993，判定係數( $R$  平方)為 0.985，而修正過的判定係數為 0.983，而圖 4.6(b)顯示自變數  $ID$  對依變數  $MT$  兩者建立起的關係，從”未標準化係數”的第一行中，我們可以得知運動時間( $MT$ )與困難度( $ID$ )建立的關係式為  $MT = 1165 + 259ID$  (ms)，也說明了每增加一的困難度會增加運動時間 259 毫秒，反之減少一的困難度就減少了運動時間 259 毫秒。在實驗設計上，抓取球後一秒鐘才算抓取成功，而為了完成這個運動(困難度為 0)，受測者在運動時間上至少需要 1165 毫秒才能完成，証實實驗設計與實驗結果無抵觸。因此，在靜態的場景下我們可以得到運動時間與困難度兩者間存在一個  $MT = 1165 + 259ID$  (ms)的關係，而從判定係數  $R$  平方等於 0.985(近似於完全線性)證實在我們的場景中搖桿適合作為 HCI 的輸入裝置。

表 4.4 針對所有受測者得到的(a)相關係數和(b)回歸分析係數

R	R 平方	調整過後的 R 平方
0.993	0.985	0.983

(a) 相關係數

係數<sup>a</sup>

模式	未標準化係數		標準化係數	t	顯著性
	B 之估計值	標準誤	Beta 分配		
1 (常數)	1164.630	26.533		43.894	.000
ID	259.103	11.980	.993	21.627	.000

a. 依變數：MT

(b) 回歸分析係數

## 4.2 動態實驗

動態實驗的目的是觀察 HCI 在不同的速度下是否會影響運動時間與困難度之間的關係式，同時觀察速度與困難度對運動時間的影響，我們設計三種不同的速度搭配三種困難度，物件寬度固定為 40 pixel，球有三種距離(D: 62.5, 125, 250 pixel)，然後觀察三種速度下運動時間與困難度所建立之關係式間的差異。以往文獻中的費茲實驗都屬於靜態環境，也就是說物體是出現在固定位置，受測者主動去抓取物體，而靜態與動態實驗在場景上的差異是動態場景將場景中的物件由畫面上方掉下來，受測者除了要控制一維的運動外，還要去預測並移動至接取物體掉落的位置，藉由改變場景中物件的速度，觀察在動態場景下速度對運動時間與困難度建立起的關係式的影響，動態實驗找了 7 個受測者，受測者慣用手均為右手，年齡介於 23~25 歲，受測者資訊如表 4.5 所示。

### 4.2.1 實驗場景

在場景設計上，動態實驗同上個實驗一樣要注意視覺回饋的影響及將搖桿限制成一個自由度，除此之外，我們將靜態實驗中的物件改成由上方掉落，方塊寬度固定(W: 40 pixel)，球從同樣的高度掉落(紅色虛線處)，如圖 4.6 所示，球距離有三種情形(D: 62.5, 125, 250 pixel)，速度有三種情形(V: 6, 8, 10 pixel)，一共有 9 種組合，但是只有三種困難度，動態實驗中困難度與速度組合表，如表 4.6 所示。

表 4.5 動態實驗受測者資料

受測者	性別	年齡	慣用手	重走率 (%)
A	男	24	右	4.76 %
B	男	23	右	5.76 %
C	男	25	右	5.26 %
D	男	24	右	4.26 %
E	男	24	右	5.76 %
F	男	23	右	5.76 %
G	男	24	右	9.09 %
Mean				5.81 %
SD				1.56 %

表 4.6 動態實驗中速度與困難度組合表

組合	距離 (D, pixel)	速度 (V, pixel)	困難度 (ID, bits)
1	62.5	6	1.3576
2	62.5	8	1.3576
3	62.5	10	1.3576
4	125	6	2.0444
5	125	8	2.0444
6	125	10	2.0444
7	250	6	2.8580
8	250	8	2.8580
9	250	10	2.8580

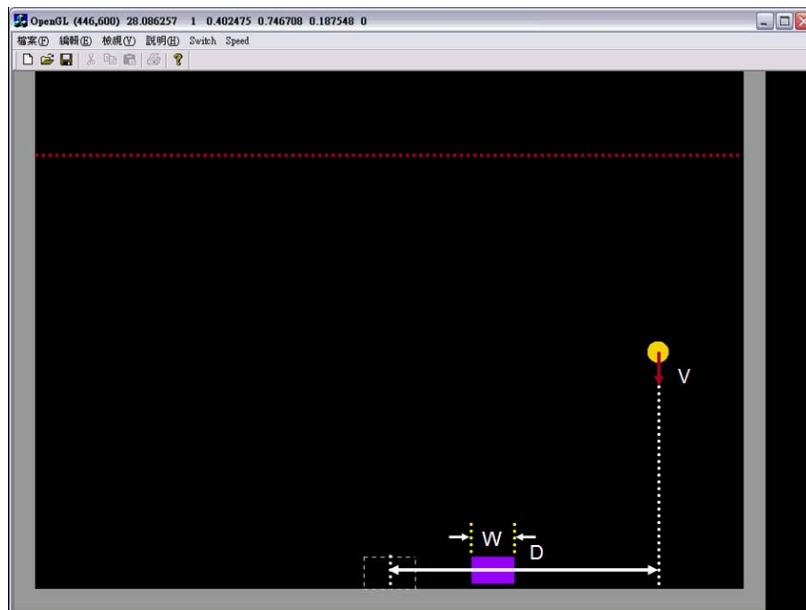


圖 4.6 動態實驗場景

## 4.2.2 實驗流程

在統計分析上，爲了讓動態實驗具有可靠的可信度，在實驗設計上盡可能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，實驗步驟說明如下：

1. 動態實驗開始前先進行實驗練習，以便每個受測者的統計分析都能處於相同的基準上，降低實驗的誤差；當圈數大於 20 圈且成功率大於 80% 時，練習結束。
2. 休息一分鐘後，正式實驗開始，動態實驗物件的寬度均爲 40 pixel，受測者將控制的方塊放置休息區內(虛線區域內)，等候一秒鐘後，上方的提示球的顏色從紅色變成黃色後消失，此時才能開始動作，馬上向球出現的方向移動。

3. 球的距離有 62.5、125 和 250 pixel 三種情況(號碼處)，另外搭配三種速度 6、8 和 10 pixel，左右隨機出現，當提示球消失後，球會從同一個高度往下掉落(紅色虛線處)，如圖 4.7 所示，受測者必需預測球會掉落的位置，並控制方塊移動至此，運動時間是人接受刺激後反應到成功接取的時間。

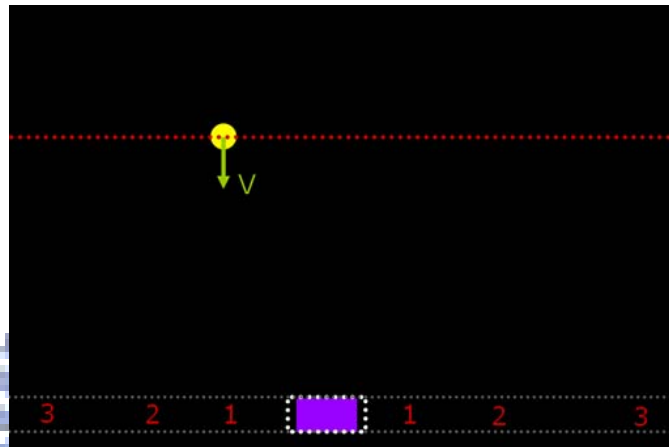


圖 4.7 球出現高度位置示意圖

4. 當球落至兩條虛線間，此刻受測者預測落下位置錯誤或來不及到達落下的位置，使方塊無法準確接取時，這一圈就算失敗並重走一遍，如圖 4.8 所示。實驗每六十圈休息一分鐘，總圈數三百六十圈。動態實驗流程圖，如圖 4.9 所示。

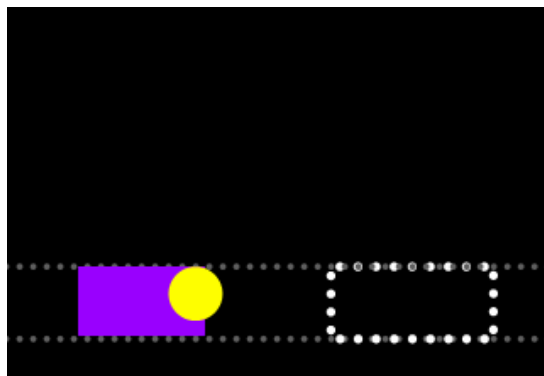


圖 4.8 接取失敗示意圖

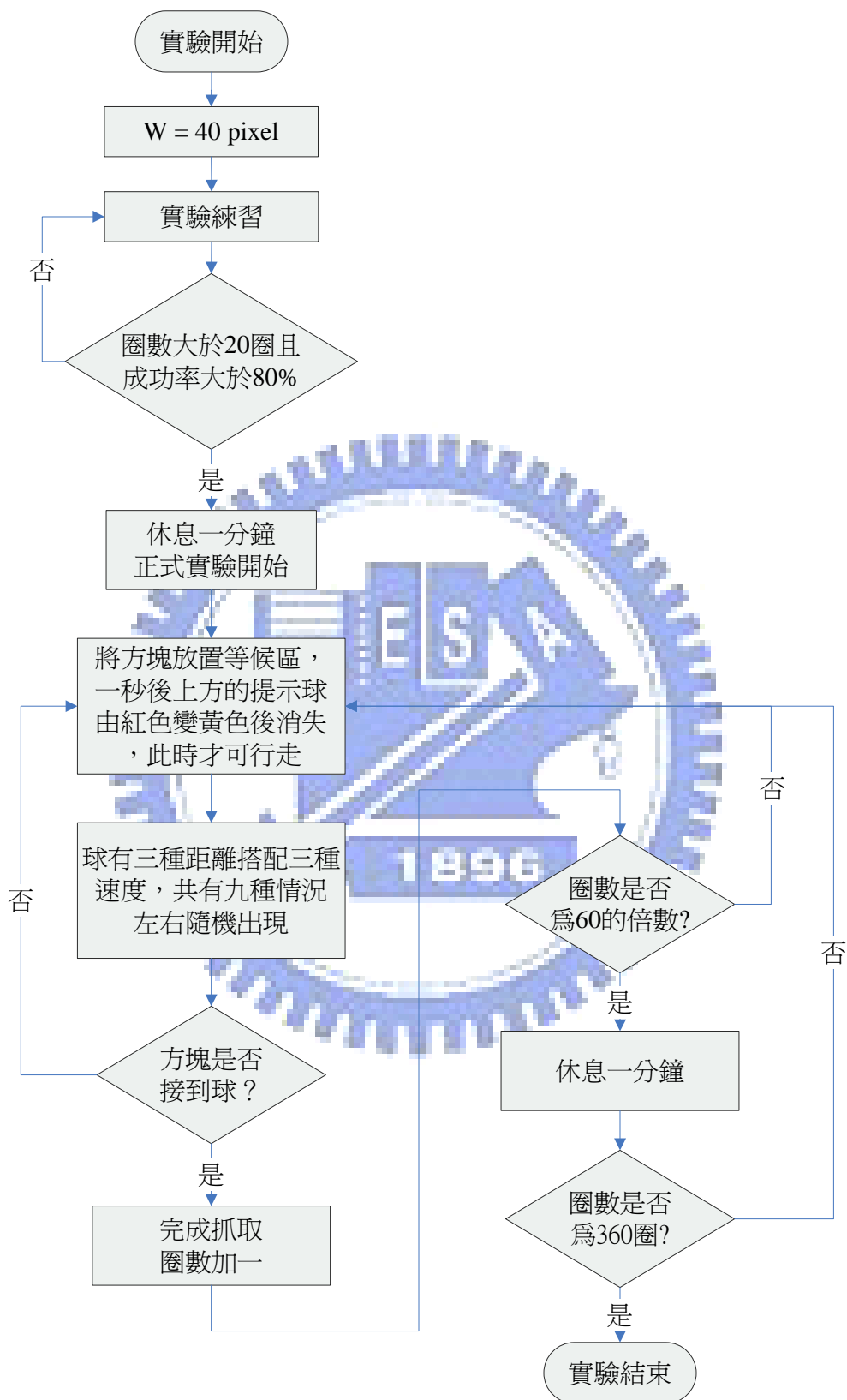


圖 4.9 動態實驗流程圖

### 4.2.3 實驗結果與分析方法

在動態實驗中，我們有兩個變數：速度(V)和困難度(ID)，我們除了觀察速度(A 因子)及困難度(B 因子)對運動時間的影響外，我們還需要考慮到這兩個變數間是否會互相干擾，也就是統計學中所謂的二因子交互作用(A×B)[26,27]，因此我們使用二因子變異數分析(two-way ANOVA)。二因子變異數分析(two-way ANOVA)屬於多因子變異數分析的其中一種，其討論重點在於同時觀察兩個自變數對一個依變數的影響，目的在考驗 A 因子及 B 因子之間是否存在 A×B 交互作用效果(interaction effect)，二因子變異數分析流程如圖 4.10 所示。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；由我們的實驗設計來看，當  $p < 0.05$  時表示二因子間交互作用的效果不明顯，反之亦然。

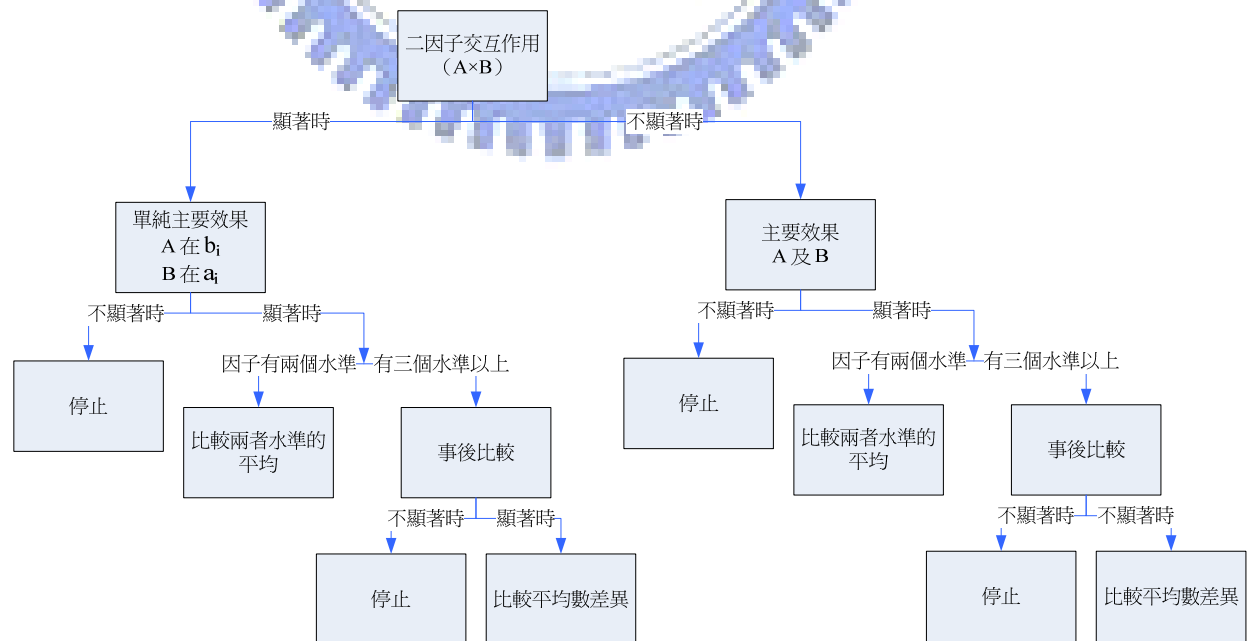


圖 4.10 二因子變異數分析流程

我們根據這九種組合(三種困難度)進行統計分析，困難度的建立是採用 Shannon formulation 的模型，將每位受測者所得到的 40 圈運動時間的原始數據去除異常值( $\pm 3SD$ )後進行二因子變異數分析[28]，從表 4.7 中得知分析結果，結果顯示受測者的現象都十分一致，在主要因子(速度和困難度)都具有顯著差異，表示說速度與困難度這兩個變數的確會影響運動時間，但是速度與困難度間交互作用並不會造成對運動時間的干擾，也就是說我們只需要個別針對速度及困難度作分析，而無須考慮到兩者交互作用會對運動時間造成的干擾；接著，因為所有受測者的二因子變異數分析結果具一致性，我們將所有原始數據一起分析，去除異常值( $\pm 3SD$ )後進行二因子變異數分析，可以發現所有受測者一起分析的結果同樣具有一致性。

進行二因子變異數分析後，我們個別觀察速度(V)與困難度(ID)對運動時間的影響，將原始數據去除異常值( $\pm 3SD$ )後，針對這九種組合平均其運動時間，使用 SPSS 分析後的平均數剖面圖如圖 4.11 所示，從圖 4.11(a)得知速度越快所花費的運動時間越少，從圖 4.11(b)中在不同速度下明顯地發現運動時間隨著困難度的增加而增長，在剖面圖中線的交叉代表著困難度與速度可能有交互作用的存在，但從圖 4.11 中可以明顯看到兩張圖都沒有線的交叉，代表著兩者間沒有交互效果，也映證了表 4.7 得到的結果。由於費茲定律所注重的是困難度與運動時間所建立的關係式，所以我們針對困難度與運動時間進行回歸分析，再將三種不同速度下所建立的費茲定律關係式進行比較，如表 4.8 所示並以圖 4.12 表示之，從表中得知在動態場景下速度越快，運動時間受到困難度影響越大，當  $V=6$  時，每增加一的困難度運動時間就增加 28.3 毫秒；當  $V=8$  時，每增加一的困難度運動時間就增加 32.4 毫秒；而當  $V=10$  時，每增加一的困難度運動時間就增加 33.3 毫秒，從三種速度下運動時間的差異，明顯地顯示速度越快會使得運動時間受困難度的影響變大，也就是說速度越快，增加相同困難度下運動時間會增加越多，



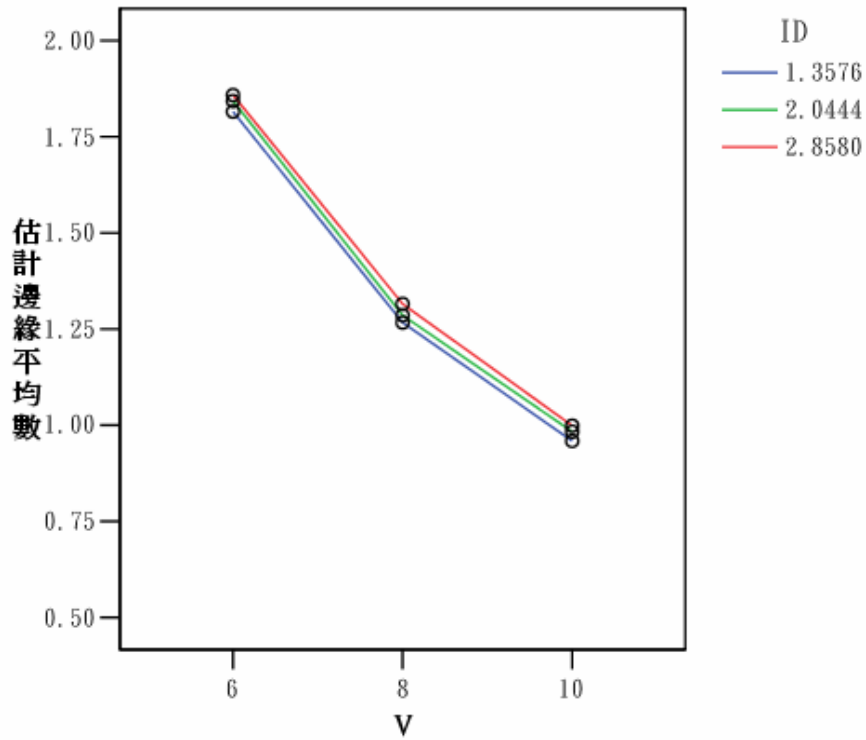
但速度越快會使得基本運動時間(當困難度為 0 時)變少。

表 4.7 二因子變異數分析之顯著性

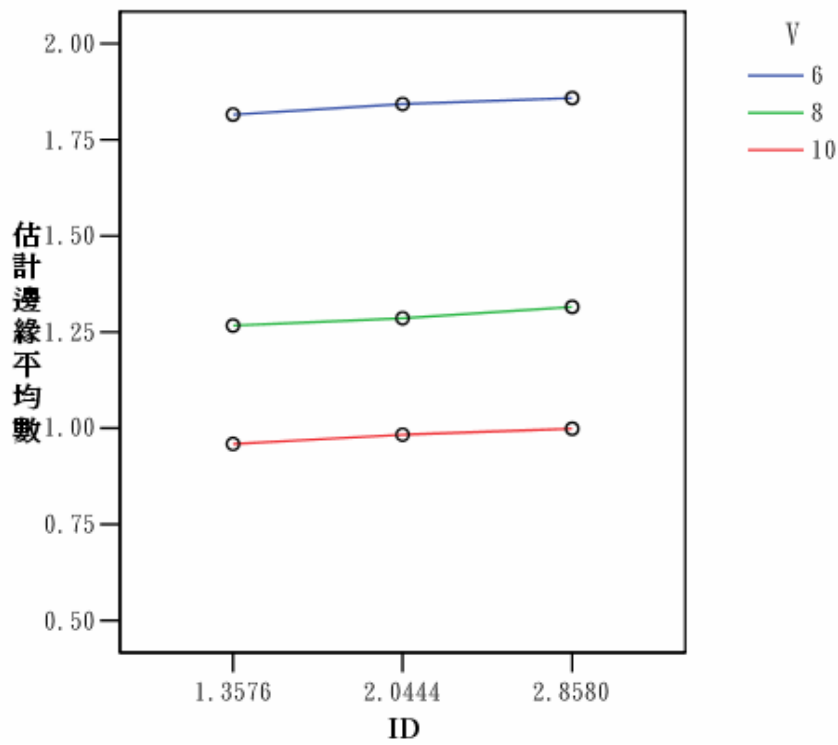
	V	ID	V×ID
A	顯著 (p<0.05)	顯著 (p<0.05)	不顯著 (p>0.05)
B	顯著 (p<0.05)	顯著 (p<0.05)	不顯著 (p>0.05)
C	顯著 (p<0.05)	顯著 (p<0.05)	不顯著 (p>0.05)
D	顯著 (p<0.05)	顯著 (p<0.05)	不顯著 (p>0.05)
E	顯著 (p<0.05)	顯著 (p<0.05)	不顯著 (p>0.05)
F	顯著 (p<0.05)	顯著 (p<0.05)	不顯著 (p>0.05)
G	顯著 (p<0.05)	顯著 (p<0.05)	不顯著 (p>0.05)
全部	顯著 (p<0.05)	顯著 (p<0.05)	不顯著 (p>0.05)

表 4.8 三種速度下的回歸分析

V	判定係數(R 平方)	費茲定律方程式
6	0.957	MT = 1780 + 28.3 ID
8	0.994	MT = 1221 + 32.4 ID
10	0.931	MT = 907 + 33.3 ID



(a) 在不同困難度下運動時間隨速度的變化



(b) 在不同速度下運動時間隨困難度的變化

圖 4.11(a)在不同困難度下運動時間隨速度的變化和(b)在不同速度下運動時間隨困難度的變化

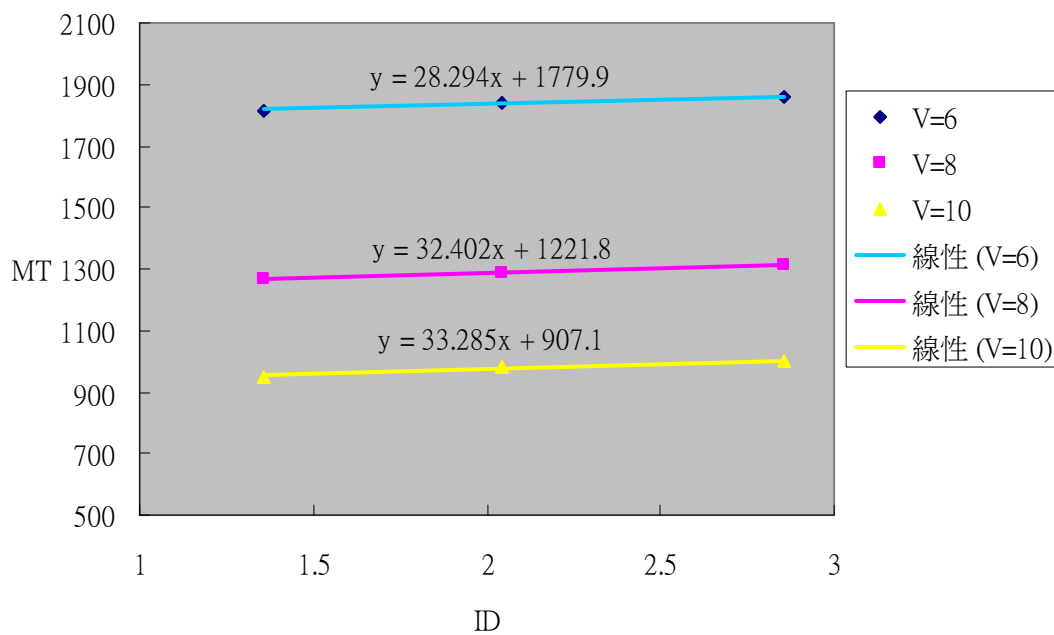


圖 4.12 三種速度下的費茲定律方程式

### 4.3 討論

從靜態實驗的結果得知 HCI 中運動時間受困難度(物件的寬度與距離)所影響，而動態實驗的結果顯示 HCI 中運動時間不僅受到困難度的影響，也同時受到物件速度變化的影響，但在靜態與動態場景下，運動時間受困難度的變化差異是不一樣的，費茲定律方程式中的斜率表示運動時間受困難度變化影響的程度，像是靜態實驗得到的  $MT = 1165 + 259 ID$ ，表示每增加一困難度會增加 259 毫秒的運動時間，但是動態實驗中  $V=6$  的情況下得知  $MT = 1780 + 28.3 ID$ ，表示每增加一困難度僅增加 28.3 毫秒的運動時間，在我們的實驗設計下可以很明顯地看出來靜態場景下運動時間受到困難度的影響比靜態場景來的大，在  $V=8$  和  $V=10$  也得到同樣的結果，如表 4.9 所示，並繪製成圖 4.13，如此也說明了動態環境下，爲了在固定時間內完成動作，運動時間受到困難度的影響會變小。從表

4.9 的判定係數可知運動時間(MT)與困難度(ID)兩變數間相依程度很高，其得到的費茲定律方程式也具有很大的可信度。

表 4.9 靜態與動態下費茲定律的差異

	V	判定係數(R 平方)	費茲定律方程式
靜態實驗	X	0.985	$MT = 1165 + 259 ID$
動態實驗	6	0.957	$MT = 1780 + 28.3 ID$
	8	0.994	$MT = 1222 + 32.4 ID$
	10	0.931	$MT = 907 + 33.3 ID$

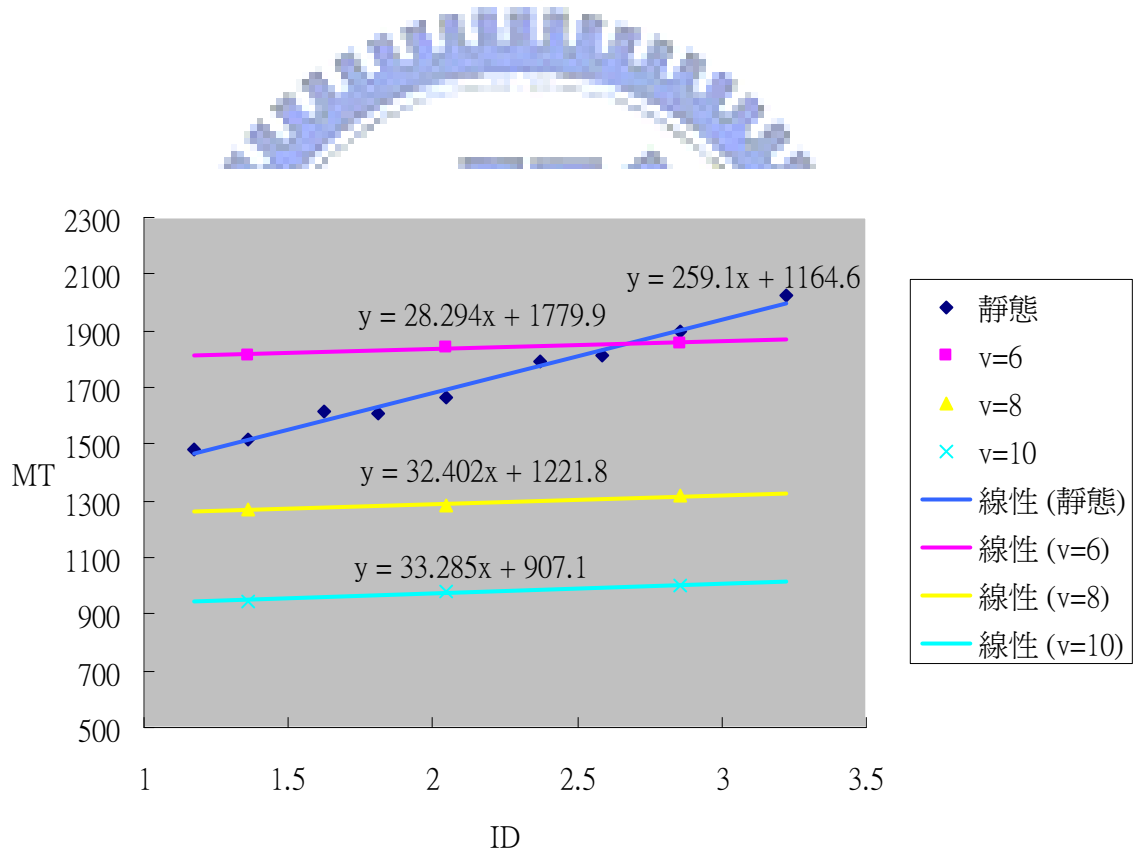


圖 4.13 靜態與動態場景的費茲定律方程式

# 第五章

## 結論

本論文爲了發展適合電腦遊戲用途的人機介面，針對遊戲中的動態場景進行費茲定律的動態研究，我們不僅從空間準確度(物件的寬度與距離)觀察對運動時間的影響，也同時從時間準確度(物件速度)一起觀察。靜態實驗中我們從困難度對運動時間的影響著手，證實了搖桿適合作爲 HCI 的輸入裝置，以及運動時間確實受到困難度所影響，運動時間隨著困難度的增加而增長，並存在一線性關係；在動態實驗中比靜態實驗多增加了速度爲變數，在動態實驗中觀察速度對運動時間與困難度間建立起的關係式所造成的差異，同時觀察速度與困難度對運動時間的影響，實驗結果顯示速度會造成運動時間減少，且運動時間也同時受到困難度的增加而增長，可是速度會使得運動時間受困難度的影響變大，也就是說速度越快，增加相同的困難度運動時間增加越多。這樣的結果顯示未來在設計遊戲用的人機介面上，速度的設定也必須加以考慮，速度設定可以控制運動時間，而在電腦遊戲中改變速度可以改變遊戲的困難度，此研究可提供人機介面設計之參考，進而對電腦遊戲的開發有所助益。

## 5.1 未來工作

本論文在研究動機提到，關於費茲定律的動態研究我們不僅希望在工程上可用來設計遊戲用的人機介面，同時也能應用到運動生理或腦科學上，藉由費茲定律將運動能力量化，進而觀察腦皮質層上的改變或者是觀察運動生理上的反應。本論文找到動態場景下的費茲定律關係式，但是為了達成上述的目標，我們依然有許多工作需要進行，茲列如下：

1. 遊戲介面:根據不同速度設定不同的困難度，設計一合宜的人機介面，進而發展電腦遊戲或者實驗用的評估遊戲。
2. 運動學習:根據不同的速度設計運動學習實驗，經長時間觀察年輕組群能否提升運動能力，進一步再訓練老人或復健組群，以增進其運動能力。
3. 腦波研究:在動態研究場景中，觀察受測者腦皮質層會產生何種反應，在頻譜分析上有什麼變化，另一方面，也可以觀察年輕人與老年人間其運動時間的差異。
4. 生理運動量化:用不同的速度觀察個體的運動能力且將之量化，同時可以針對不同年齡的組群去觀察差異性，或者可以將傷患的運動能力與一般人的運動能力進行比較，進而發展出運動能力的量化指數。

## 參考文獻

- [1] 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.
- [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] B. R. Brewer, M. Fagan, R. L. Klatzky, and Y. Matsuoka, “Perceptual limits for a robotic rehabilitation environment using visual feedback distortion”, *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, Vol. 13, No. 1, pp. 1-11, 2005.
- [4] D. J. Gillan, K. Holen, S. Adam, M. Rudisill, L. Magee, “How does fitts' law fit pointing and dragging?”, *Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 227-234, 1990.
- [5] G. D. Langolf, D. B. Chaffin, and J. A. Fouke, “An investigation of fitts' law using a wide range of movement amplitudes”, *Journal of Motor Behavior*, Vol. 8, No. 2, pp. 113-128, 1976.
- [6] H. Delingette, “Toward realistic soft-tissue modeling in medical simulation”, *Proceeding of the IEEE*, Vol. 86, No. 3, pp. 512-523, 1998.
- [7] I. S. Mackenzie, “A note on the information-theoretic basis for fitts' law”, *Journal of Motor Behavior*, Vol. 21, pp. 323-330, 1989.
- [8] I. S. Mackenzie and W. Buxton, “A comparison of input devices in element pointing and dragging tasks”, *Conference on Human Factors in Computing System*, pp. 161-166, 1991.
- [9] I. S. Mackenzie and W. Buxton, “Extending fitts' law to two-dimensional tasks”, *Conference on Human Factors in Computing System*, pp. 219-226, 1992.

- [10] J. Boritz, K. S. Booth, and W. B. Cowan, "Fitts' law studies of directional mouse movement", *Graphics Interface*, pp. 216-223, 1991.
- [11] N. David, M. X. Cohen, A. Newen, B. H. Bewernick, N. J. Shah, G. R. Fink, and K. Vokeley, "The extrastriate cortex distinguishes between the consequence of one's own and others' behavior", *NeuroImage*, Vol. 36, pp. 1004-1014, 2007.
- [12] 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.
- [13] P. M. Fitts and J. R. Peterson, "Information capacity of discrete motor responses", *Journal of Experiment Psychology*, Vol. 67, pp. 103-112, 1964.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] S. K. Card, W. K. English, and B. J. Burr, "Evaluation of mouse, rate-controlled isometric joystick, step keys, and text keys for text selection on a CRT", *Ergonomics*, Vol. 21, No. 8, pp. 601-613, 1978.
- [17] S. Zhai, W. Buxton, and P. Milgram, "The "Silk Cursor": Investigating transparency for 3D target acquisition", *Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 459-464, 1994.
- [18] T. D. Jack, B. M. David, 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.
- [19] 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.

[20] 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.

[21] 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。

[22] 林猷長，視覺與力覺整合於機器人遠端操作之應用，交通大學電機與控制學所碩士論文，民國九十五年七月。

[23] 涂博翔，力輔助對增進人類運動感知能力之研究，交通大學電機與控制學所碩士論文，民國九十六年七月。

[24] 楊植燁，使用MFC設計OpenGL，文魁資訊，民國九十五年三月。

[25] 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。

[26] 歐陽良裕，基礎商用統計學，華泰，民國八十四年。

[27] 周宏，統計學，鼎茂圖書，民國九十三年。

[28] 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。