

# 國立交通大學

電機與控制工程學系

碩士論文

多功能虛擬操控器之研發



Development of Multi-Functional Virtual Manipulator

研究生：馬如駿

指導教授：楊谷洋 博士

中華民國九十三年七月

# 多功能虛擬操控器之研發

Development of Multi-Functional Virtual Manipulator

研究生：馬如駿

Student : Ru-Jeang Ma

指導教授：楊谷洋

Advisor : Kuu-Young Young

國立交通大學

電機與控制工程學系



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

for the Degree of

Master

in

Electrical and Control Engineering

July 2004

Hsinchu, Taiwan, Republic of China

中華民國九十三年七月

# 多功能虛擬操控器之研發

研究生：馬如駿

指導教授：楊谷洋 博士

國立交通大學電機與控制工程學系

## 摘要



近年來科技資訊不斷進步，帶動電腦及其週邊硬體迅速蓬勃發展，使得虛擬實境 (Virtual Reality) 大量被應用於教育、訓練、娛樂、工業和醫學等方面。虛擬實境是一種讓使用者透過多種的感官途徑與虛擬環境產生即時互動的一套動態模擬系統，其中力覺感官介面更具有與虛擬環境雙向互動的性質，可在接受虛擬環境所給予力感回饋的同時對環境進行操控。因此我們提出利用力感系統與因應軟體模擬出各式的操控器，並應用在操作訓練或遠端遙控操作上，實現一個多功能虛擬操縱器系統。

本論文首先以阻抗控制理論為基礎設計出三種模擬真實世界基本阻抗元件的公式，接著透過適當的規劃將這些基本阻抗元件合成性質較為複雜的模型，如各種形狀的虛擬牆和虛擬通道，再將此模擬法則套用在一組兩軸力回饋搖桿上，完成各項模擬控制，最後進行運動限制(motion constraint)之建立，並完成一項扳手操控器的模擬實例。

# Development of Multi-Functional Virtual Manipulator

Student : Ru-Jeang Ma

Advisor : Dr. Kuu-Young Young

Department of Electrical and Control Engineering

National Chiao Tung University

## Abstract

Along with the rapid development of computers and their peripheral hardwares, Virtual Reality has been used in many areas, e.g., education, training, entertainment, industry, and medical science. Virtual Reality is a dynamic simulation system which allows the user to interact with the virtual environment through multiple sensorial channels. Among these sensorial channels, the haptic interface is capable of interacting with the virtual environment. Thus, we intend to use it along with corresponding softwares to simulate various kinds of manipulators, and then accomplish a multi-functional virtual manipulator.

In this thesis, we first design three basic impedance based on impedance control. Next, we combine these to form more complicated objects, such as various shapes of virtual wall and virtual tunnel. Finally, we utilize a group of virtual walls and virtual tunnels to form virtual motion constraints. The hardware for realizing these elements and constraints is based on a 2-DOF force reflection joystick. For demonstration, we use the proposed scheme to emulate a versatile wrench.

# 誌 謝

首先感謝學生的指導教授—楊谷洋博士，誠摯地感謝老師這兩年來的熱心指導，使學生的研究工作可以順利完成，尤其是最後的論文寫作，經由老師多次細心校閱，方得以圓滿呈現；同時，感謝口試委員們：林錫寬教授、宋開泰教授、以及蘇順豐教授撥冗參與論文口試，並給予許多寶貴的指導與建議，使本論文更臻精湛；另外感謝同於『人與機器實驗室』彼此互相勉勵的夥伴們：國鋒、彬原、高平、以及各位學弟們，因為有了你們，改善並豐富了研究期間的枯燥生活；特別感謝木政學長，陪我一起解決硬體上的問題，並啟發我研究上更多層面的思考方式；感謝室友俊廷，在我最困惑的時候適時地給予鼓勵，並且同我一起討論研究方面的課題。最後，感謝親愛的家人一直默默地給予我支持與鼓勵，因為你們的關懷與愛護，才能心無旁騖地完成學業，感謝你們！

# 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	vi
1. 導論.....	1
2. 虛擬操控器模擬系統.....	5
2.1 系統架構.....	5
2.2 阻抗控制理論.....	8
2.3 基本阻抗元件模擬法則.....	11
2.3.1 質量物體運動.....	12
2.3.2 黏滯流體運動.....	12
2.3.3 彈簧運動.....	13
2.2.4 牆面.....	14
2.2.5 通道.....	15
2.4 阻抗模擬精確度.....	16
2.4 系統穩定度分析.....	18
3. 虛擬操控器之軟體系統.....	23
3.1 控制策略.....	24

3.2 虛擬牆.....	26
3.2.1 正向虛擬牆.....	27
3.3.2 非正向虛擬牆.....	28
3.3.3 圓形虛擬牆.....	30
3.3.4 橢圓形虛擬牆.....	34
3.3 虛擬通道.....	36
3.2.1 正向通道.....	36
3.3.2 非正向通道.....	37
3.3.3 環形通道.....	37
3.4 虛擬阻抗動態特性.....	39
3.2.1 虛擬阻抗值變化.....	39
3.3.2 虛擬環境力感變化.....	39
4. 硬體機構與系統鑑別.....	41
4.1 搖桿傳動機構.....	42
4.2 搖桿動力原件.....	43
4.3 系統鑑別.....	45
4.4 力感測裝置.....	50
5. 實驗與討論.....	53
5.1 虛擬牆.....	54
5.2 虛擬通道.....	57
5.2.1 正向與非正向通道模擬.....	58
5.2.2 環形與橢圓形通道模擬.....	61
5.2.3 複合式通道.....	65

5.3 動態虛擬阻抗.....	67
5.4 扳手操作模擬應用實例.....	69
6. 結論.....	77
6.1 未來工作.....	78
參考文獻.....	80

## 表 目 錄

表 4.1 Panasonic 交流伺服馬達規格 (型號: MSMA041A1E) .....	44
表 4.2 Panasonic 控制驅動器規格 (型號: MSMA041A1E) .....	44
表 4.3 健昇馬達控制卡規格 (型號: NCC-9322 DAC) .....	44
表 4.4 力回饋搖桿裝置物理阻抗參數值.....	49
表 4.5 JR3 力感測器的最大負載量與靈敏度.....	50

## 圖 目 錄

圖 1.1 虛擬實境週邊設備.....	3
圖 2.1 模擬系統訊號流程圖.....	6
圖 2.2 模擬系統架構圖.....	6
圖 2.3 操控器模擬系統之應用.....	7
圖 2.4 系統阻抗圖.....	9

圖 2.5	合成 $M$ 、 $B$ 、與 $K$ 模擬不同的出力情形.....	10
圖 2.6	由雙牆面形成通道.....	15
圖 2.7	利用雙向彈簧阻尼組形成的通道.....	16
圖 2.8	虛擬彈簧能量變化示意圖.....	19
圖 2.9	彈簧系統模擬方塊圖.....	19
圖 2.10	加入使用者動態 $Z_o$ 之系統方塊圖.....	21
圖 3.1	虛擬牆示意圖.....	27
圖 3.2	一維正向虛擬牆示意圖.....	28
圖 3.3	非正向虛擬牆示意圖.....	29
圖 3.4	座標軸轉換.....	30
圖 3.5	圓形虛擬牆示意圖.....	31
圖 3.6	搖桿侵入內圓虛擬牆之施力方向.....	32
圖 3.7	內圓虛擬牆施力分解圖.....	33
圖 3.8	搖桿侵入外圓虛擬牆之施力方向.....	34
圖 3.9	內外橢圓虛擬牆示意圖.....	35
圖 3.10	一維正向通道示意圖.....	36
圖 3.11	非正向通道示意圖.....	37
圖 3.12	環形通道示意圖.....	38
圖 4.1	力回饋搖桿硬體系統.....	41
圖 4.2	力回饋搖桿主體機械結構和工作空間.....	42
圖 4.3	摩擦力測試曲線.....	45
圖 4.4	頻率響應法的原理.....	47

圖 4.5	輸入不同頻率弦波的頻率響應圖.....	49
圖 4.6	力感測器方位定義.....	51
圖 4.7	力感測器方向校正實驗讀值.....	51
圖 4.8	力感測器方向校正圖.....	52
圖 5.1	牆面模擬示意圖.....	54
圖 5.2	牆面感受模擬.....	55
圖 5.3	正向通道模擬示意圖.....	58
圖 5.4	垂直通道模擬.....	59
圖 5.5	斜向通道模擬.....	61
圖 5.6	環形通道模擬示意圖.....	62
圖 5.7	環形通道模擬.....	63
圖 5.8	橢圓形通道模擬示意圖.....	64
圖 5.9	橢圓形通道模擬.....	64
圖 5.10	複合式通道模擬示意圖.....	65
圖 5.11	複合式通道搖桿軌跡.....	66
圖 5.12	環形通道內部變化阻尼模擬.....	68
圖 5.13	螺絲模具組.....	70
圖 5.14	扳手工作方式示意圖.....	70
圖 5.15	左半圓弧形扳手模擬示意圖.....	72
圖 5.16	左半圓弧形扳手模擬.....	72
圖 5.17	下半圓弧形扳手模擬示意圖.....	73
圖 5.18	下半圓弧形扳手模擬.....	73
圖 5.19	不同施力角度之扳手示意.....	74



圖 5.20 動態扳手模擬示意圖.....	76
圖 5.21 動態扳手模擬.....	76



# 第一章

## 導論

將外在真實世界的變化與資訊透過模擬系統的運算，並利用各種 3D 影像、聲光特效、或是觸感力感等方法的結合具體複現，一直是許多人致力的目標。雖然要模擬真實環境所給予的刺激並能做出即時反應的計算量相當複雜，但由於近年來科技和資訊不斷地進步，帶動電腦及其週邊硬體迅速蓬勃發展，因此透過強大的電腦運算能力和適當的軟體模擬程式來完成各種系統的動態模擬，已讓這樣的一個虛擬實境系統正逐漸的被實現中。

有關虛擬實境(Virtual Reality, VR)的概念，最早在 1986 年由 Jaron Lanier (the founder of VPL Corporation)最先提到[32]，但其實在 1960 年代就已經有相關領域的研究[31]。根據 Burdea [2-4] 的定義，虛擬實境是一種尖端的人機界面，能讓使用者透過多種感官途徑(sensorial channel)與虛擬環境產生即時的互動；這些感官途徑包括視覺、聽覺、觸覺，甚至是嗅覺及味覺。因而虛擬實境具有所謂 3I 的特性分別是：互動(interaction)、沉浸(immersion)及想像(imagination)，不但可以賦予使用者親歷其境的擬真感受，甚至可以超越真實世界的極限，例如在原子世界中漫遊等[28]。

人的五種感官刺激中，一般以視覺、聽覺以及觸覺為主，所以主要的人機介面裝置也是用來處理影像、聲音、與力量方面的資訊。虛擬實境發展之初即以立體影像(stereoscopic image)為主，接著加入環場音效(surround sound)

以增加臨場效果；而觸覺回饋早期應用在遠端操作(teleoperation)上，用來複現遠端機器人在順應性工作下的力資訊情況，協助操作員控制遠端機器人完成任務[5, 14, 15, 24]。爲了讓人們能單純地從獲得刺激到更進一步發展與虛擬的環境互動，以期營造出更具真實的虛擬世界，由於力感是最直接與環境互動的介面，於是觸覺回饋裝置漸漸受到重視，在 1960 年代後被大量應用於虛擬實境的回授刺激上[18, 26, 27, 33]。

圖 1.1 顯示虛擬實境的相關週邊設備，由圖可以很容易地發現觸感、力感設備能夠提供雙向互動的途徑，一方面負責接收外在的刺激，一方面可同時對環境做出反應，此雙向互動層次賦予使用者與系統之間相互調適的工作模式，不但讓使用者擁有更大的控制權，且能更有效率地與系統溝通。將此裝置應用於學校教學上，可以讓學生產生新奇、特殊的感受，如觸摸原子表面[28]；於汽車的駕駛訓練上，可以駕駛員體驗操作時的臨場觸感[10]；於休閒娛樂，可以提高遊戲的娛樂性；於工業製造上，可以使電腦輔助設計(computer-aided design, CAD)人員在零件設計階段，不先製造實體原型就可進行有觸感的模擬組裝，降低設計成本[4, 21]；配合軟體的保護機制，可以幫助操作者遙控機器人時免於碰撞發生危險[11, 14, 24]；在醫學研究上，可以提供模擬開刀所需的觸感[31]。

力感操控器的介面種類繁多，例如搖桿、手套、滑鼠等，操作方式也不盡相同，但對於力回饋感受分析不外乎受限於真實世界的各種物理變化，如推拉彈簧、阻尼的力量感受等等，只要能夠模擬出這些基本物理元件特性，再將之組合成較爲複雜的模擬感受，如虛擬牆的阻擋、通道的導引或是碰觸時的軟硬回饋等，接著設計一套法則能將之任意結合組成所需要的結構，那麼只要利用軟體規劃把上述的模擬法則程式化並應用到適當的力回饋裝置，那麼就能實現一套可自由變化工作空間來模擬各式操作環境或感受的多功能

虛擬操控器。

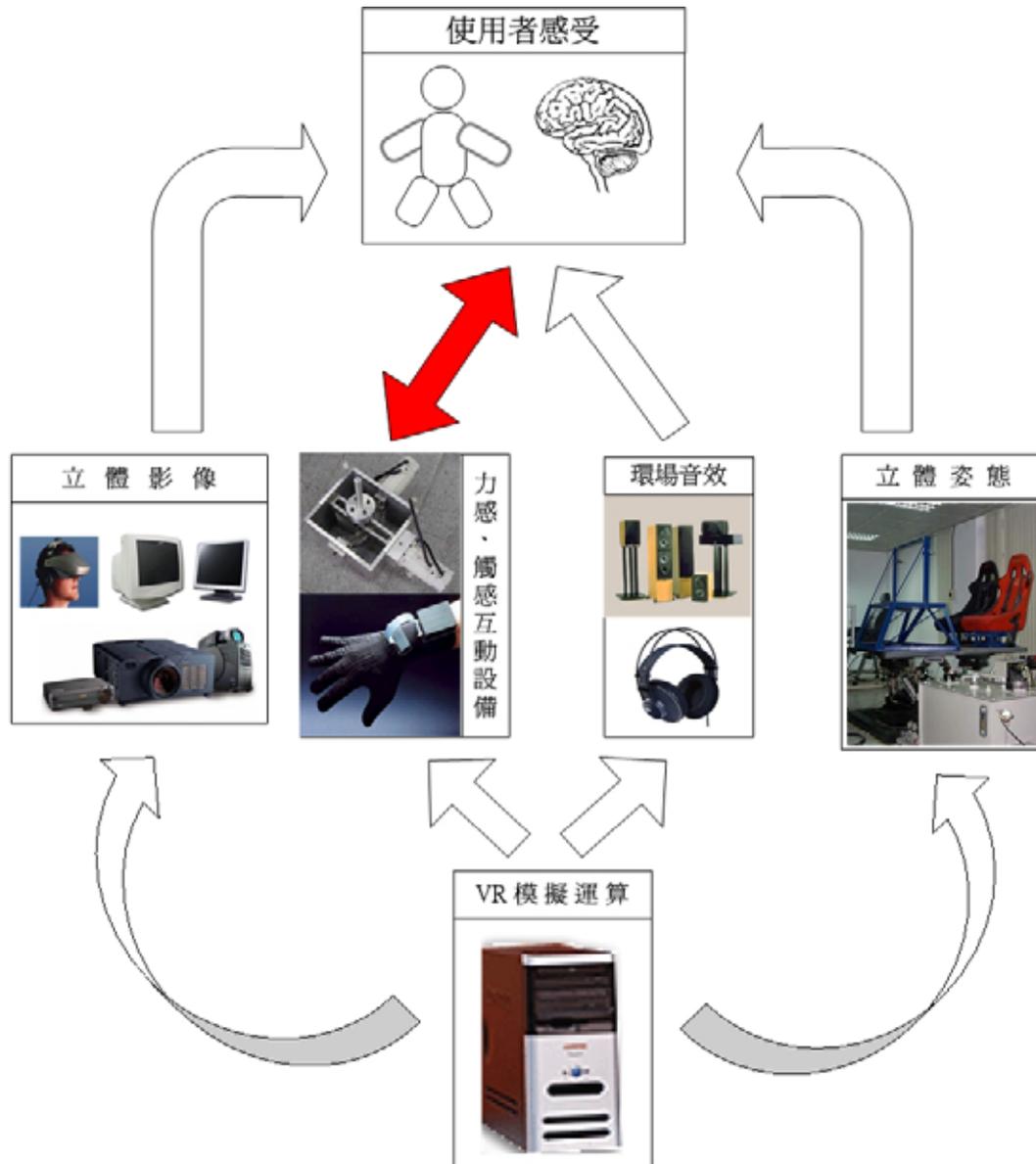


圖 1.1 虛擬實境周邊設備

本論文在第二章概述整個模擬系統架構，透過阻抗控制理論為各物理元件作基本特性分析，並探討模擬系統的精確度與穩定度；利用第二章所規劃出的基本模擬法則，第三章則是針對特殊虛擬阻抗元件作細部探討，如正向與非正向的虛擬牆、虛擬通道，並分析一些基本阻抗特性由靜態走向動態的操作感受；第四章介紹應用於此模擬系統的硬體機構，並對此硬體設備系統鑑別以獲得其系統參數，方便日後分析及模擬；第五章將進行模擬實驗，並透過這些虛擬阻抗元件的組合，加之於適當的軟體控制策略，實現一項虛擬扳手模擬和動態通道展示實驗，證實此多功能虛擬操控器的可行性和可塑性。最後，第六章會對此虛擬操控器模擬系統設計總結，並討論未來可能的發展和可改進的地方。



# 第二章

## 虛擬操控器模擬系統

本章的目的在於發展一個可模擬各式操控器的模擬系統，並利用阻抗控制理論推演出一套能讓使用者與虛擬環境雙向互動的模擬法則，將此法則應用於簡單阻抗元件模擬上，如彈簧、阻尼、質量物體；之後也會對阻抗模擬的精確度和此模擬系統的穩定度加以分析。



### 2.1 系統架構

欲設計一個可模擬各式環境的虛擬操控器，首先必須規劃適用於此虛擬操控器的動態模擬系統。圖 2.1 為此系統的控制訊號流程示意圖，在這個作為使用者與虛擬環境之間聯繫的系統中，必須能夠接受使用者操作姿態的改變（如施力大小、動作位移），並計算出這些改變在虛擬場景中相對的變化，然後再回應一個適當的感受力給予使用者。

至於整體模擬系統架構可以分成軟體與硬體兩個部分，如圖 2.2 所示。軟體層面負責建構虛擬的環境，並且由規劃好的模擬法則，處理從硬體部分得到的資訊對虛擬環境的影響，再將回饋力的結果經由裝置介面卡輸入電壓命令給硬體部分，而硬體部分直接與使用者溝通，給予使用者力的操作感受。

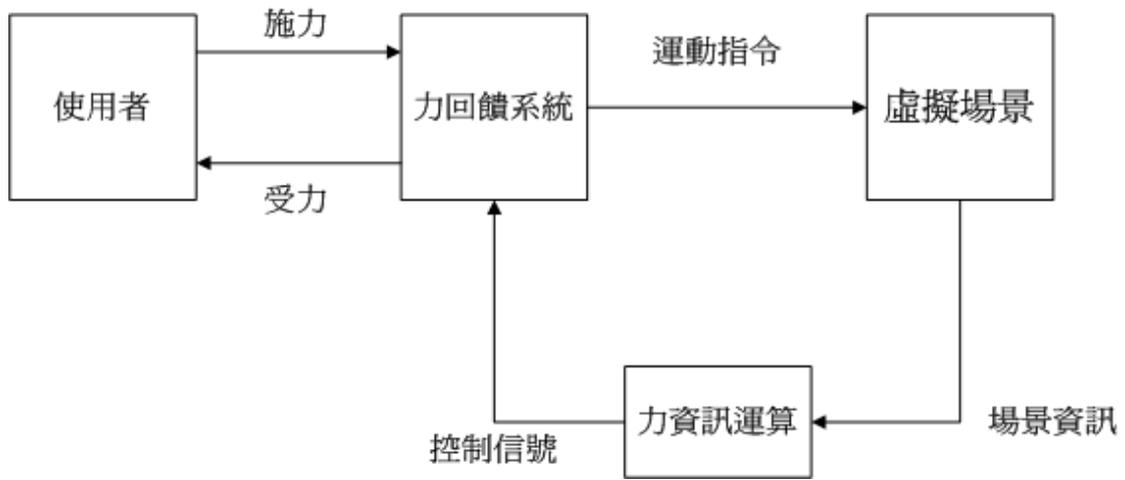


圖 2.1 模擬系統訊號流程圖

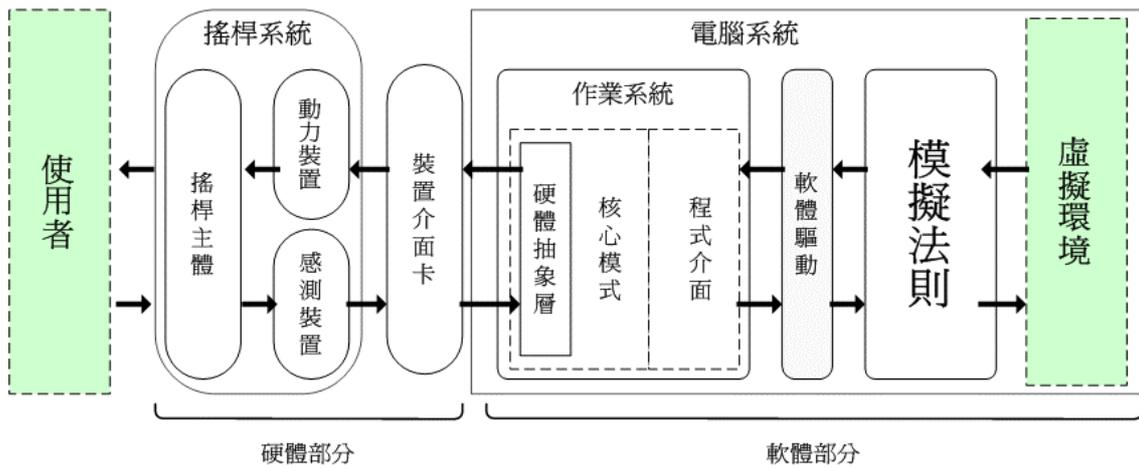


圖 2.2 模擬系統架構圖

當使用者設定好虛擬環境參數後，即可經由整個虛擬操控器系統，模擬出各式使用工具、操縱機械、或是駕駛交通工具等感覺，如圖 2.3 所示。

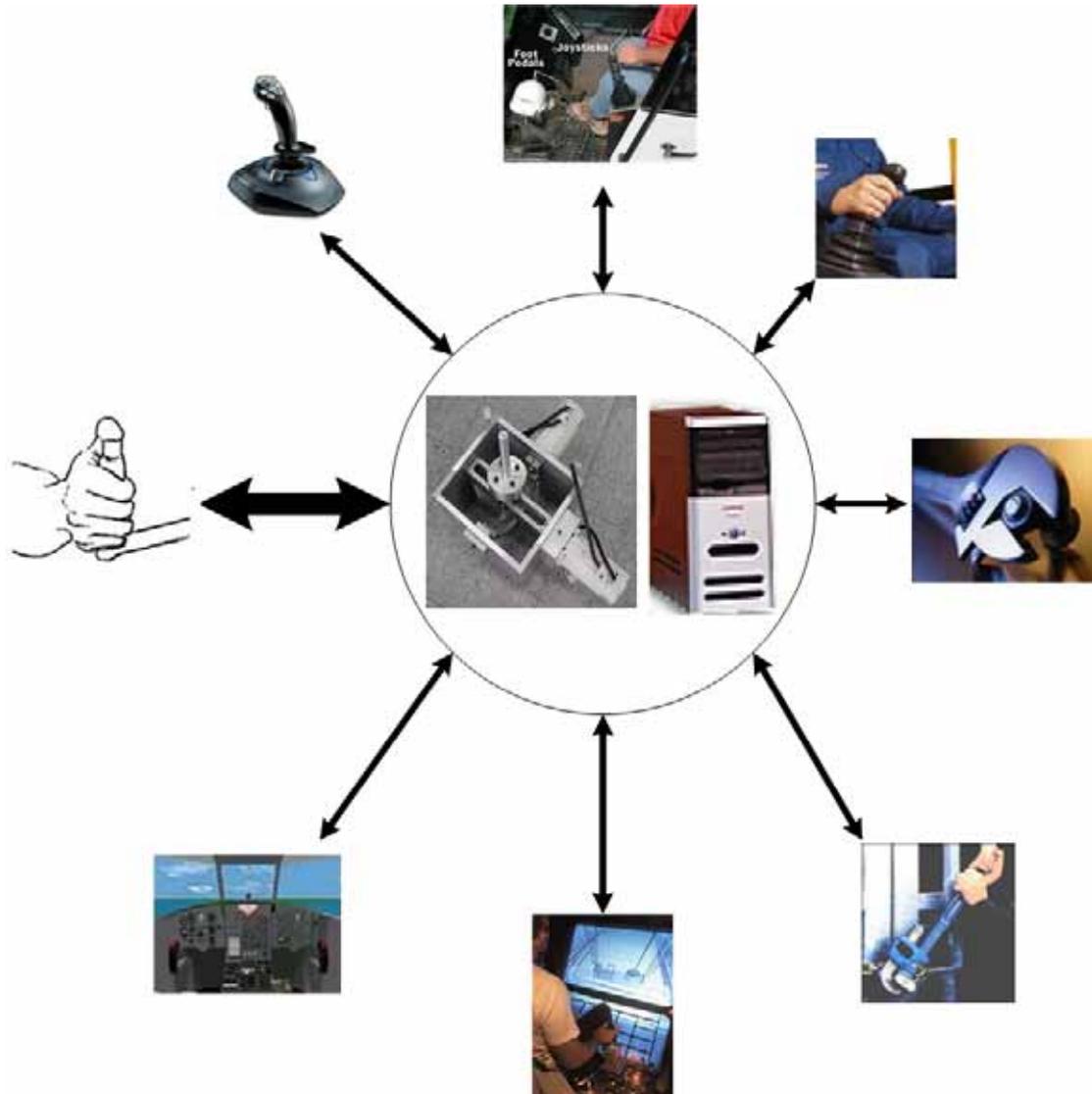


圖 2.3 操控器模擬系統之應用

## 2.2 阻抗控制理論

Hogan 於 1987 年提出阻抗控制理論 (Impedance Control Theory) [12]，用來處理機械手臂碰觸物體表面所發生的情形，並且在 1989 年應用在人機介面的互動控制上[13]，我們則應用其理論來處理使用者在虛擬環境中與物件互動，經由力回饋搖桿傳回的力量感受。只要我們利用系統鑑別以獲取系統本身的彈性係數 (stiffness)、阻尼係數(viscosity)、以及質量係數(mass)，再代入所要模擬的系統原件以上三種物理性質，就可以得到物理狀態 (位移量、速度、加速度)、馬達需要的出力、以及操作者施力 (或者是使用者感受到的力) 之間的關係式。

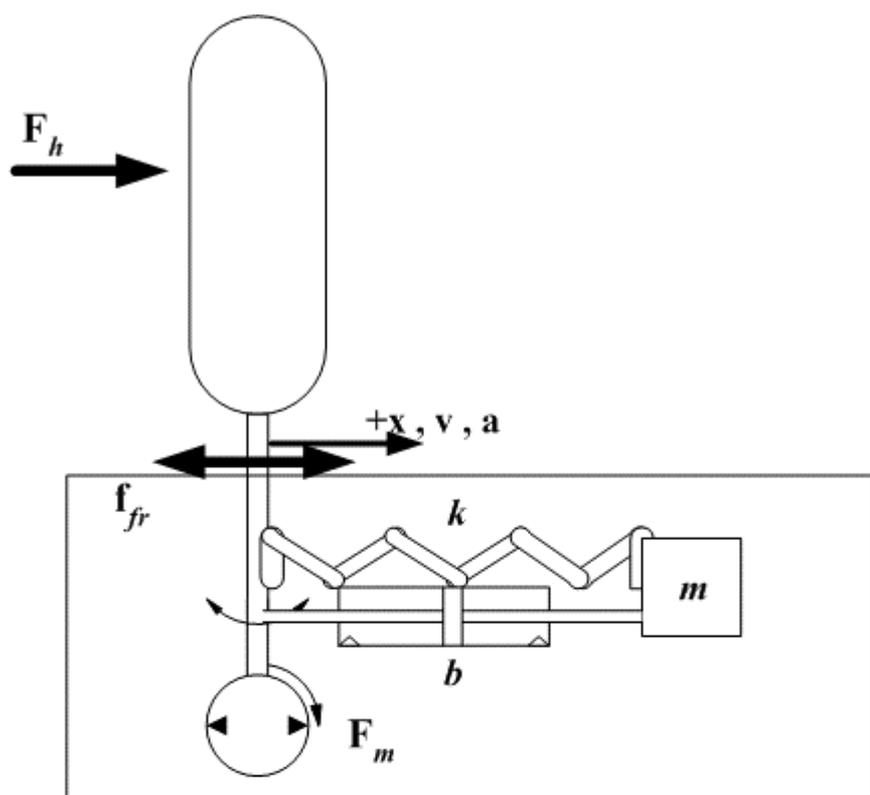
首先先定義真實世界中搖桿系統本身的物理性質，令系統本身的彈性係數為k，阻尼係數為b，質量係數為m，搖桿的位置為x，速度為v，加速度為a，系統的摩擦阻力為 $f_{fr}$ ，使用者施加的力量為 $F_h$ ，馬達出力為 $F_m$ ；相對應於真實世界，則定義所要模擬的虛擬世界物理性質，令模擬物件的彈性係數為K，阻尼係數為B，質量係數為M，搖桿的位置訊號偵測值為X，速度為V，加速度為A，虛擬的摩擦阻力為 $F_{fr}$ ，使用者感受的力量與施加的力量同為 $F_h$ ，根據參考資[22, 23, 35]，則在真實世界中以上的定義存在以下的阻抗關係式：

$$F_h + F_m = ma + bv + kx + f_{fr} \frac{v}{\|v\|} \quad (2.1)$$

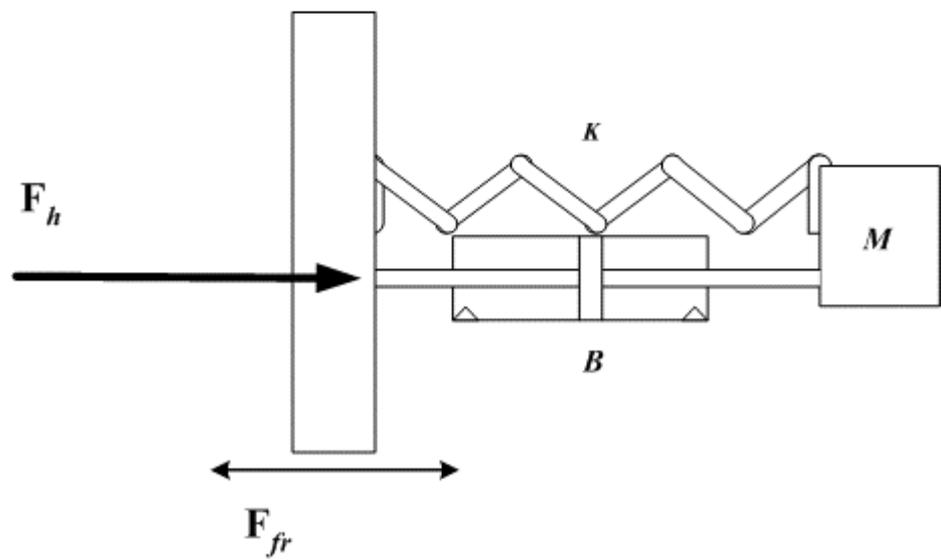
而在虛擬世界裡我們期待能達成類似(2.1)式的虛擬阻抗關係式：

$$F_h = MA + BV + KX + F_{fr} \frac{V}{\|V\|} \quad (2.2)$$

圖 2.4 顯示此兩種關係的示意圖。



(a) 真實世界



(b) 虛擬環境

圖 2.4 系統阻抗圖：(a)真實世界和 (b)虛擬環境

假設量測到的物理量與實際值相等，即： $x = X, v = V, a = A$ ，結合(2.1)和(2.2)兩式，可得到馬達輸出力的方程式：

$$F_m = (m - M)a + (b - B)v + (k - K)x + f_{fr} \frac{v}{\|v\|} - F_{fr} \frac{V}{\|V\|} \quad (2.3)$$

其中 $m$ 、 $b$ 、 $k$  和 $f_{fr}$ 為系統常數，理論上先輸入需要模擬的虛擬質量 $M$ ，虛擬阻尼係數 $B$ ，虛擬彈性係數 $K$ ，以及虛擬摩擦力 $F_{fr}$ ，只要能夠量測到位置 $x$ ，速度 $v$ ，以及加速度 $a$ ，就可藉由不同的阻抗元件及其組合，調變馬達的輸出力 $F_m$ ，模擬各種物理原件，如圖 2.5 所示。

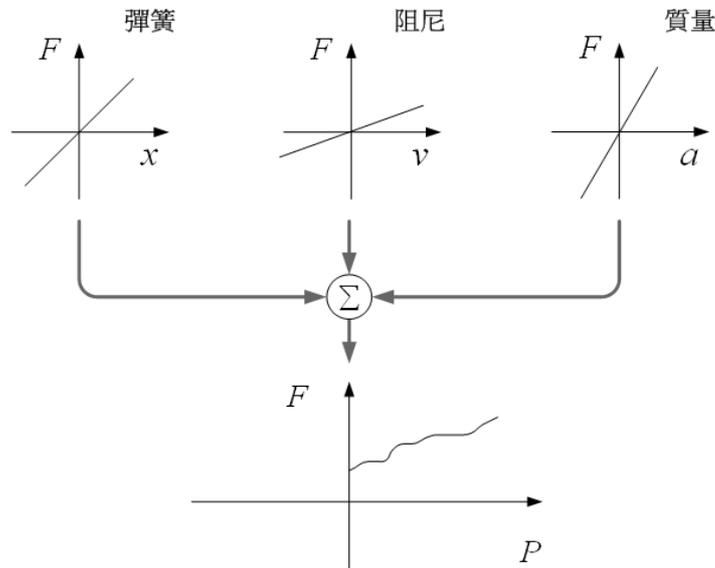


圖 2.5 合成 M、B、K 模擬不同的出力情形

另外，若加速度不易量得（需要高精度的加速規），也可利用加裝在搖桿上的力感測器，量得的搖桿與手之間的作用力  $F_s$ ，則  $F_s = F_h$  且馬達出力會有如下關係式：

$$F_m = \left\{ \left( \frac{m}{M} - 1 \right) F_s + bv + kx + f_{fr} \frac{v}{\|v\|} \right\} - \left\{ \left( \frac{m}{M} \right) \left[ Bv + Kx + F_{fr} \frac{v}{\|v\|} \right] \right\} \quad (2.4)$$

若是在模擬中，物體的質量不重要，可將模擬物件的質量直接設定成搖桿系統的自然等效質量（ $M=m$ ），代入(2.4)式

$$F_m = \left\{ bv+kx+f_{fr} \frac{v}{\|v\|} \right\} - \left\{ Bv+Kx+F_{fr} \frac{v}{\|v\|} \right\} \quad (2.5)$$

則力感測值並不會影響馬達的力量輸出，只單純的分成真實世界的物理力量與虛擬世界的虛擬力需求的差值。值得一提的是，假設把(2.5)式後半部設為零，相當於希望搖桿模擬一個在虛擬環境完全不受力的情況，使用者將感受到搖桿平順無阻力的移動，此時馬達需額外出力給使用者克服外界阻力，其出力為：

$$F_m = \left\{ bv+kx+f_{fr} \frac{v}{\|v\|} \right\} \quad (2.6)$$



## 2.3 基本阻抗元件模擬法則

運用前一節所推導出使用者透過力回饋系統與虛擬環境互動的關係式，本節將進一步探把此互動分解成三種基本阻抗元件所帶給使用者的感受，分別是推動一塊質量物體(mass)、在黏滯流體中運動(viscosity)、與推拉一個彈簧(stiffness)；此外牆面(wall)與通道(tunnel)皆是特殊的移動受限之物件感受，也將於此節介紹。

## 2.2.1 質量物體運動

牛頓第一運動定律說明，在無外力的影響下，靜者恆靜，動者恆以等速度運動前進，而物體的慣性質量就是外力想改變物體運動速度的難易度，因此要讓使用者感覺到物體的質量，必須讓搖桿有速度變化，亦即搖桿有加速度，如此使用者才能感受到正比於加速度的力量。若只針對物體的質量，我們將模擬物體的系統的黏滯係數 $B$ 與彈性係數 $K$ 以及摩擦力 $F_{fr}$ 皆設為零代入(2.3)式得到：

$$F_m = (m - M)a + \left\{ bv + kx + f_{fr} \frac{v}{\|v\|} \right\} = (m - M) \frac{\Delta v}{\Delta t} + \left\{ bv + kx + f_{fr} \frac{v}{\|v\|} \right\} \quad (2.7)$$

上式的後半部項為永遠存在且是馬達需要提供的基本力，前半部則是比較真實搖桿的等效質量與模擬物體的慣性質量，再決定馬達輸出力與加速度的關係；極端情況為  $m=M$  時，馬達並不需要額外出力，搖桿本身的慣性就可以讓使用者直接感受到慣性質量的感覺。

## 2.2.2 黏滯流體運動

黏滯力的大小取決於與環境間的黏滯係數(viscosity)，黏滯係數高會讓系統位置狀態不易改變，而有黏滯的感覺(sticky)。而黏滯力隨移動速度增加而變大，一方面會產生不易移動的力感，另一方面卻也是系統穩定的一大要素，往後將會為此作介紹。

為了方便觀察，我們設定模擬一個與搖桿系統自然等效質量相等的物體

( $M=m, K=0$ )，在一個黏滯係數為  $B$  的虛擬流體中移動，代入(2.4)式：

$$F_m = -\{Bv\} + \left\{bv + kx + f_{fr} \frac{v}{\|v\|}\right\} \quad (2.8)$$

與(2.6)式比較，(2.8)式後項就是模擬質量物體運動式，因此馬達在模擬質量物體進入黏滯流體的額外出力  $F_b$  為(2.8)及(2.6)式的差：

$$F_b = -Bv \quad (2.9)$$

因此，若我們要模擬進入黏滯流體的感覺，只需讓馬達出力加入(2.9)式的額外施力，就可以讓使用者感受到黏滯性。

### 2.2.3 彈簧運動



每個物體皆有其剛性 (stiffness)，彈簧是一個物體剛性的具體表現，根據虎克定律(Hooke's Law)，彈簧施力隨著與基準點的距離差成正比。要模擬一個端點固定的彈簧我們先給定在虛擬環境中彈簧放鬆的自然狀態基本點  $X_0=0$ ，同樣的為簡化方便，我們設定模擬與彈簧碰觸的物體質量與搖桿系統自然等效質量相等。

$$F_m = -Kx + \left\{bv + kx + f_{fr} \frac{v}{\|v\|}\right\} \quad (2.10)$$

類似 2.2.2 所討論的，馬達模擬碰觸彈簧的額外出力  $F_k$  為(2.10)及(2.6)式的差

$$F_k = -Kx \quad (2.11)$$

因此，若我們要模擬碰觸彈簧的感覺，只需讓馬達出力加入(2.11)式的額外施力，就可以讓使用者感受到彈簧的彈性。

#### 2.2.4 牆面

牆(wall)表現出的行為是依據牛頓第三運動定律，作用力等於反作用力，它有限制運動以及回饋給使用者施力相同的力量大小，要將牆面的行為表現出來可利用力訊號控制，即：

$$F_m = -F_h = -F_s \quad (2.12)$$

但若利用(2.12)式，完全依靠力訊號回饋來模擬牆面，對於力感測器的精密度、解析度、訊號取樣頻率、以及訊號傳遞的延遲都將要求極高，影響了牆面的穩定度，因此有些研究這方面的專家利用高阻抗物件來模擬牆面[8,22,23]。另外，Rosenberg 等人以心理學認知感受為基礎，解析三種阻抗參數對模擬牆的真實度的影響[25]：高黏滯係數可以讓剛碰觸牆的瞬間，感受到直接碰撞的感覺(crispness)，而高彈性係數會給予使用者在剛碰觸牆的瞬間，感受到彈回的感覺(bouncy)，但利用高彈性係數來模擬牆才能讓使用者感受到牆的硬度(hardness)，故模擬一個剛性(stiffness)高的物體最似牆面。綜合上述討論，結合高彈性與高黏滯係數阻抗元件來模擬牆面感覺較接近真實感受：

$$F_m = -K\Delta x - B \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad \text{當 } \Delta x > 0 \quad (2.13)$$

## 2.2.5 通道

通道概念與牆類似，兩者都具有運動限制，牆面的是二維平面的運動限制，而通道則限制物體在一維方向運動。所以要實現通道的運動行為，最直接而有效的方式就是利用兩面平行牆來限制搖桿在一維方向運動，如圖 2.6 所示。

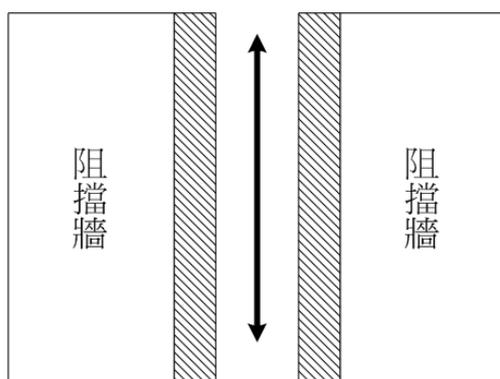


圖 2.6 由雙牆面形成通道

由 2.2.4 對牆面的設定，我們可將兩面平行牆直接等效於一個高彈性、高黏滯係數的雙向彈簧阻尼，如圖 2.7 所示。讓搖桿在平行彈簧阻尼的方向受到限制，但可以在垂直彈簧阻尼的方向自由移動，達到通道的效果，而通道寬度可由設定無阻力的位移量來決定。

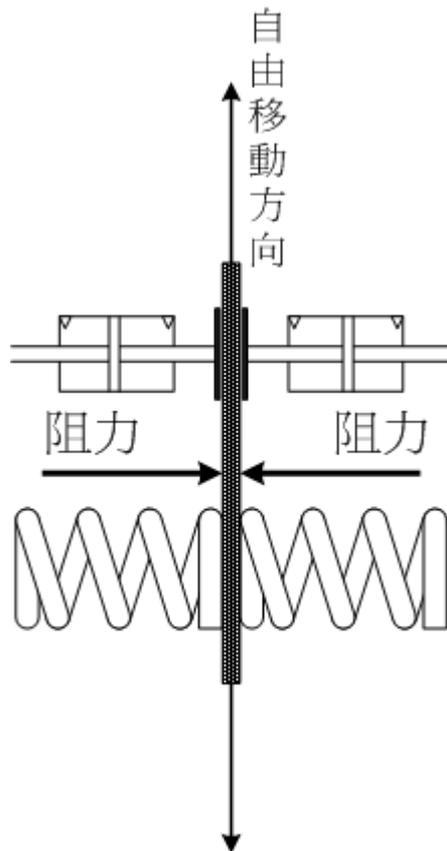


圖 2.7 利用雙向彈簧阻尼形成的通道



## 2.4 阻抗模擬精確度

對利用數位取樣的模擬系統來說，由於取樣週期、資料的量化、以及時間的延遲等使得在模擬真實世界連續系統的物體時，有其模擬的極限，而一套互動式力回饋設備的性能通常決定於其所能模擬的物體阻抗大小的範圍，而這個範圍通常被系統本身裝置的物理性質所影響。一方面模擬的阻抗物件的精確度受到如馬達的非線性輸出以及感測器的解析度等影響，而另一方面系統的取樣時間、感測器解析度還影響了系統模擬的穩定度[1, 9, 20]。

利用數位模擬系統模擬一個虛擬物體，由於數位系統取樣存在的量化誤差，將造成模擬的物體與期望的物體物理性質有一定的差距，假設模擬一個簡單的虛擬彈簧，首先定義期望的虛擬彈性係數為 $K_d$ ，真正感覺到的真實彈性係數為 $K_r$ ，彈簧模擬誤差為 $err_k$ ，則彈簧模擬誤差為 $err_k$ 可表示成：

$$err_k = \frac{K_r - K_d}{K_d} \quad (2.14)$$

由 2.3 節的模擬法則可知我們需要模擬的馬達輸出力 $F_m$  為：

$$F_m = -K_d X \quad (2.15)$$

(2.15)式中的  $X$  為量測到的位移量，若我們假設量化最小單位為  $\delta$ ，量化誤差為  $\varepsilon$ ，則搖桿實際的位移量  $x$ ：

$$x = X + \varepsilon(t) \quad -\delta/2 \leq \varepsilon(t) < \delta/2 \quad (2.16)$$



而使用者真正感覺到的彈性  $K_r$  是彈力隨實際位移量影響：

$$F_h = -K_r x = -K_r [X + \varepsilon(t)] \quad (2.17)$$

在靜止狀態，無其他外力下  $F_h = F_m$ ，所以由(2.15)式與(2.17)式可得：

$$\frac{K_r}{K_d} = \frac{X + \varepsilon(t)}{X} \quad (2.18)$$

$$err_k = \frac{K_r - K_d}{K_d} = \frac{\varepsilon(t)}{X} \quad -\delta/2 \leq \varepsilon(t) < \delta/2 \quad (2.19)$$

由(2.19)式可知彈簧的最大模擬誤差正比於量化單位的大小，且工作的位移量

越小將使得模擬的誤差變大。類似於彈性係數，黏滯係數與慣性質量在模擬上也有其資料量化所產生的誤差存在，以相同的推導公式可得：

$$err\_b = \frac{B_r - B_d}{B_d} = \frac{\varepsilon(t)}{V} \quad -\delta/2 \leq \varepsilon(t) < \delta/2 \quad (2.20)$$

$$err\_m = \frac{M_r - M_d}{M_d} = \frac{\varepsilon(t)}{A} \quad -\delta/2 \leq \varepsilon(t) < \delta/2 \quad (2.21)$$

黏滯係數與慣性質量的最大模擬誤差，分別隨操作時的操作速度與加速度增加而增大。

## 2.5 系統穩定度分析



評估一個系統是否穩定可以由這個系統的能量為收斂還是發散來判斷，在真實世界中的基本阻抗元件都是被動性元件，只會儲存或是消耗能量，不會主動提供能量，可是經由數位系統模擬的虛擬阻抗元件卻可能因為取樣時間以及零階保持器的關係(zero order hold)變成主動原件，以下用一個彈簧模擬的例子說明這個現象。

圖 2.8 為模擬使用者經由壓縮虛擬彈簧再放鬆的所得的結果示意圖，其中每一次的位移量為操作速度乘以取樣週期。由於位置編碼器取樣以及零階保持器的關係，每週期系統的輸出位移與輸出力量值都會在一整個取樣週期保持一定的值，而能量的表示為施力大小與位移的乘積，所以當使用者壓縮虛擬彈簧時，彈簧系統會儲存虛線以下面積大小的能量，但當使用者放鬆彈簧

確會釋放出實線以下面積大小的能量，兩者之間的差異顯然代表放鬆彈簧會比壓縮彈簧產生額外的能量，也是造成虛擬彈簧系統的不穩定的主素。

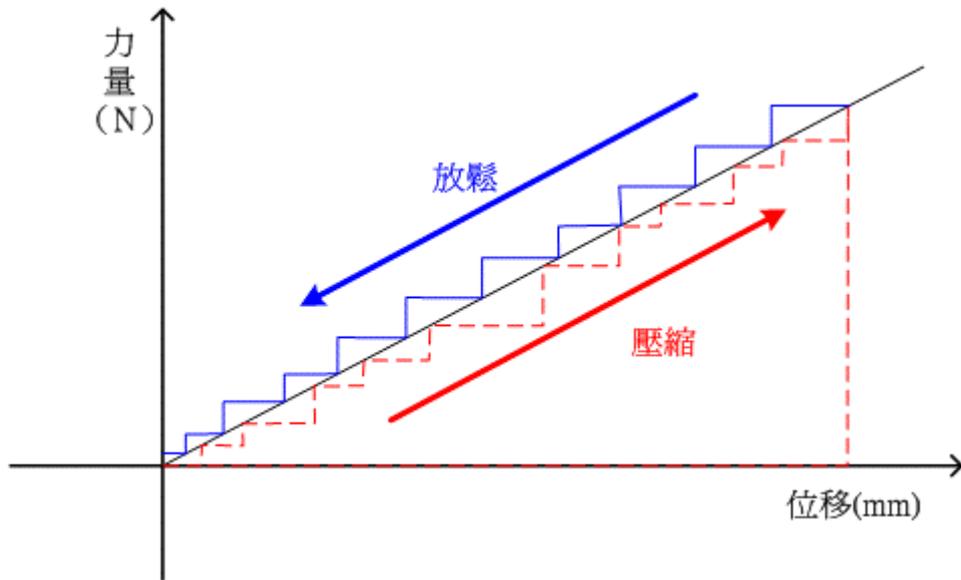


圖 2.8 虛擬彈簧能量變化示意圖



接著將上述虛擬彈簧的例子系統化，其系統方塊突如圖 2.9 所示：

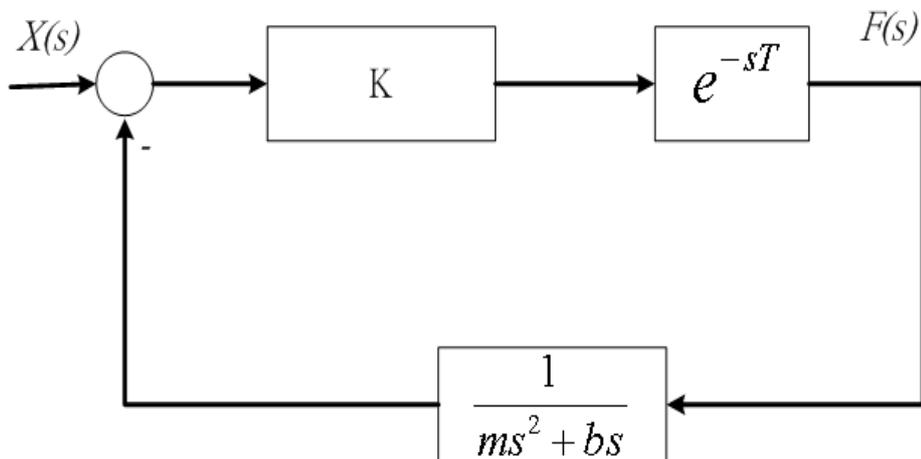


圖 2.9 彈簧系統模擬方塊圖

$X(s)$ 為系統輸入位置訊號， $F(s)$ 為輸出訊號為力量，則轉移函數為[35]：

$$G(s) = \frac{(ms^2 + bs)Ke^{-sT}}{\left[ (m + \frac{1}{2}KT^2)s^2 + (b - KT)s + K \right]} \quad (2.22)$$

根據奈式穩定準則(Nyquist stability criterion)，(2.22)式穩定條件必須所有的極點都落在左半平面上，亦即分母多項式的解其實數項必須皆小於零。(2.22)式的極點為：

$$\frac{(KT - b) \pm \sqrt{(b - KT)^2 - 4(m + \frac{1}{2}KT^2)}}{2m + KT^2}$$

故模擬的彈簧係數  $K$ 、取樣週期  $T$ 、與系統黏滯係數  $b$ ，必須滿足  $KT < b$  的關係式系統才算穩定，這個關係式還存在一個常數項  $C$ ，使穩定關係式修正為  $KT < cb$ ，Minsky 對此常數項的建議值為 2 [20]，所以關係式重新修正為：

$$b > \frac{KT}{2} \quad (2.23)$$

根據(2.23)我們可看出系統本身的黏滯係數  $b$  有助於系統穩定，且模擬的彈性係數和取樣週期越小系統會較穩定，模擬彈性係數越小代表馬達出力在一定週期出力將減小，而取樣週期變小則代表與馬達施力的乘積也跟著變小，因此將彈簧壓縮再放鬆後的主動釋放能量也減少，系統穩定度提高，此皆符合圖 2.8 所闡述的觀念。

在作上述的穩定性分析時我們並沒有考量到使用者介入，若整個動態系統加入人為因素將會使得系統穩定性難以預測，因為人的動態表現變化範圍非常大[13]，且隨當時的使用者的動態傾向使穩定系統或是故意造成系統動盪，都會使穩定度的估測結果造成極大的差異。假使將使用者的動態當成一

個未知系統 $Z_0(s)$ ，包含入搖桿的動態之中，將真實世界的系統當成 $G(s)$ ，模擬的阻抗狀態作為迴授系統 $H(z)$ ，如圖 2.10 所示，那麼我們可以利用被動性理論來分析此系統穩定度。

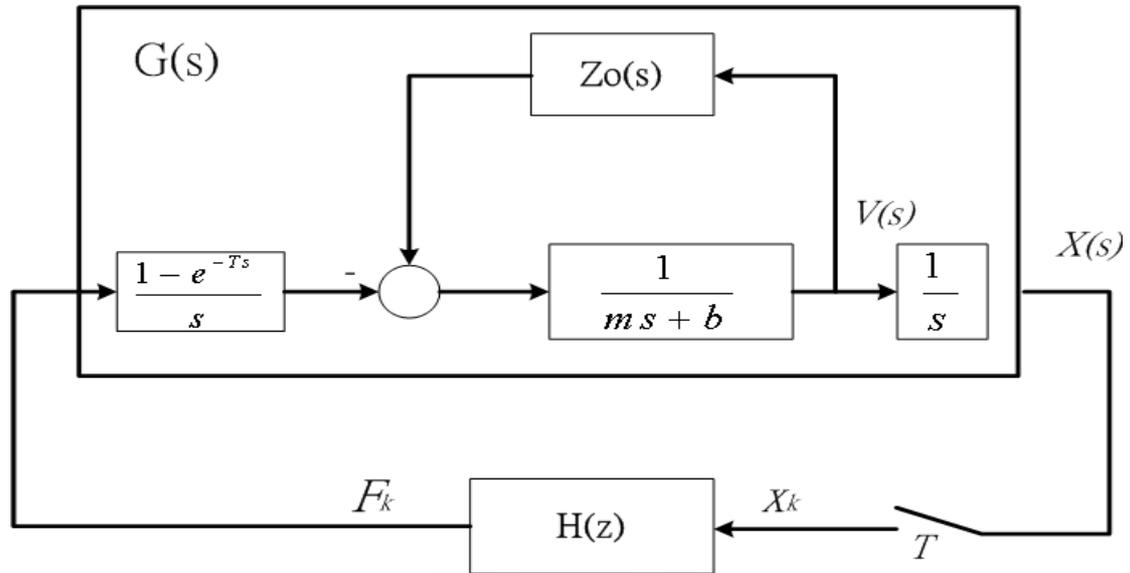


圖 2.10 加入使用者動態  $Z_0$  之系統方塊圖

根據 Colgate 所提出的被動性理論(Passivity criterion)分析[9]，數位取樣系統要能滿足被動性，必須滿足下式：

$$b > \frac{T}{2} \frac{1}{1 - \cos \omega T} \operatorname{Re}\{(1 - e^{-j\omega T})H(e^{j\omega T})\} \quad (2.24)$$

$$0 \leq \omega \leq \omega_N$$

其中  $\omega_N = \pi/T$  為奈氏頻率(Nyquist frequency)，假設模擬的虛擬阻抗是一個彈簧與阻尼系統 (spring-damper system)，虛擬的彈性係數為  $K$ ，黏滯係數為  $B$ ，則迴授系統  $H(z)$  為：

$$H(Z) = K + B \frac{z-1}{Tz} \quad (2.25)$$

將(2.25)式代入(2.24)式，則：

$$b > \frac{T}{2} \frac{1}{1 - \cos \omega T} \operatorname{Re}\left\{(1 - e^{-j\omega T})\left(K + B \frac{e^{j\omega T} - 1}{Te^{j\omega T}}\right)\right\} \quad 0 \leq \omega \leq \omega_N \quad (2.26)$$

令  $e^{j\theta} = \cos(\theta) + j \sin(\theta)$ ，上式可簡化為：

$$b > \frac{T}{2} K - B \cos \omega T \quad 0 \leq \omega \leq \omega_N \quad (2.27)$$

觀察(2.27)式發現，假使我們要增加模擬系統的阻抗值且仍然能維持系統的被動性，可以增加取樣的頻率或是加裝阻尼器提高搖桿系統的物理黏滯係數。

至於模擬的黏滯係數  $B$  對系統的影響則根據  $\omega$  當時的狀況，當  $0 \leq \omega < \frac{\omega_N}{2}$

時，模擬的黏滯係數  $B$  會幫助系統穩定，但當  $\frac{\omega_N}{2} \leq \omega < \omega_N$  時，模擬的黏

滯係數  $B$  將會破壞系統穩定性，至此我們已完成了系統的穩定性分析。



# 第三章

## 虛擬操控器之軟體系統

爲了能夠發展一套軟體系統來自由規劃一多功能的虛擬操控器，我們需要一些基本模組作爲操控器的組合工具，這類基本模組必須要有能夠讓力回饋搖桿依照欲模擬的對象在事先規劃好的工作空間上運動的能力，所以必須要有導引搖桿運動軌跡的功能，且必須要有能夠阻擋力回饋搖桿移至非正常的工作空間區域上，基於以上幾項條件，在 2.2.4 和 2.2.5 節討論的牆面和通道將是不可或缺的工具，就如同組合積木一樣，越多不同形狀的積木就可以拼出越精緻、越複雜的結構，只要我們能夠在此套系統上模擬出各種虛擬牆或虛擬通道，那麼透過其自由組合所能規劃出的操作空間就越廣泛，甚至若能考慮虛擬阻抗的變動性並找出其相對應於真實世界的操作感受，將其與各種虛擬牆和通道結合，便能使操控器能模擬出的對象更多樣、多元化。

例如實驗室在以往已利用一個水平和三個垂直的虛擬通道結合，模擬出手排汽車的排檔器，而如能再根據鍵盤或滑鼠對應的狀態關係，動態地出現包圍其六個檔位的環形或方形虛擬牆，便能模擬離合器踩合或放鬆使手排檔不能進檔退檔的操作感覺；利用環形通道配合通道內高黏滯阻尼係數，好似模擬推動一個阻力很大的磨坊；而環形和直線通道結合，再加上通道依照搖桿移動狀態內變化黏滯阻尼係數，甚至能模擬操控一個扳手扳動由鬆至緊的過程。

因此，本章的目的將以前一章規劃的模擬系統架構和基本物理元件模擬

法則為基礎，討論虛擬操控器之軟體系統實現。首先需要介紹力回饋搖桿與虛擬環境之間該如何互動的控制策略；接著我們設計能夠實現多功能虛擬操控器的各種可組合的力感工具，如正向、非正向、或圓形的虛擬牆、虛擬通道等；最後將對虛擬阻抗的動態特性分類討論之。

### 3.1 控制策略

力回饋搖桿的主要功能是利用搖桿本體輸出機械功率賦予使用者各種力覺感受，當操控搖桿與虛擬環境互動時，使用者可藉由各種不同的力覺感受，約略猜測所觸碰的虛擬物體其軟硬程度、形狀、甚至大小等。然而，對於力回饋搖桿的要求除了在力感上的模擬盡量逼近真實外，另外一項重點則是能夠讓力回饋搖桿在我們所期望的虛擬環境位置輸出一個適當的力感，如此一來才有辦法讓使用者感受到好似真的在操作一個所欲模擬的工具。

由於使用者是用手握住力回饋搖桿使其運動接近虛擬環境中的阻抗元件，我們可以把搖桿假設成虛擬環境中的一個點，而考慮點-線的碰觸方式，以下將針對一次和二次多項式的情形作說明。

若阻抗元件的形狀表面可由一次多項式構成，我們以下列直線方程式  $L$  表示：

$$L(x, y) = ax + by + c = 0 \quad (3.1)$$

其中  $(x, y)$  代表物體在 X-Y 座標平面的位置， $(a, b)$  係直線的法線向量， $c$  為其與原點的偏移量，假設  $(x_0, y_0)$  代表搖桿在虛擬環境中的座標位置，在此為了方便說明，讓  $a, b$  均為大於零的實數，那麼將  $(x_0, y_0)$  帶入(3.1)可得到以下三種情況：

$$\text{If } L(x_0, y_0) < 0 : \text{搖桿在直線 } L \text{ 左方} \quad (3.2)$$

$$\text{If } L(x_0, y_0) = 0 : \text{搖桿在直線 } L \text{ 線上} \quad (3.3)$$

$$\text{If } L(x_0, y_0) > 0 : \text{搖桿在直線 } L \text{ 右方} \quad (3.4)$$

由於座標系統 X 方向是由左向右增加，所以我們直觀地假設搖桿由左向右移動碰觸到虛擬阻抗，故碰撞情形可以由下列表示：

$$\text{If } L(x_0, y_0) < 0 : \text{搖桿處於自由狀態} \quad (3.5)$$

$$\text{If } L(x_0, y_0) = 0 : \text{搖桿碰觸阻抗表面} \quad (3.6)$$

$$\text{If } L(x_0, y_0) > 0 : \text{搖桿侵入虛擬阻抗} \quad (3.7)$$



其中，於自由狀態下，搖桿的操控移動不會有任何阻礙，當碰觸虛擬阻抗的表面時，則推進時會感受到抵抗力量，而在侵入虛擬阻抗的狀態下，則是會被其所推擠，力量的抵抗會維持到搖桿回到自由狀態為止，假使搖桿移動方向是由右向左碰觸到虛擬阻抗，則(3.5)和(3.7)式狀態將會對調。

接下來探討阻抗元件的形狀由二次封閉曲線所構成時的判斷法則，我們可以以一個簡易的二次封閉曲線方程式表示：

$$Q(x, y) = ax^2 + by^2 + cxy + d = 0 \quad (3.8)$$

同理  $(x, y)$  代表物體在 X-Y 平面的位置，且  $(x_0, y_0)$  代表搖桿在虛擬環境中的座

標位置，將  $(x_0, y_0)$  代入(3.8)式中搖桿與虛擬阻抗互動會有以下情形：

$$\text{If } Q(x_0, y_0) > 0 : \text{搖桿處於自由狀態} \quad (3.9)$$

$$\text{If } Q(x_0, y_0) = 0 : \text{搖桿碰觸阻抗表面} \quad (3.10)$$

$$\text{If } Q(x_0, y_0) < 0 : \text{搖桿侵入虛擬阻抗} \quad (3.11)$$

至於發生碰觸後力回饋搖桿的動態反應狀況則與一維的情形極為類似，有了上述兩種準則，往後對於多樣性阻抗的分析將有極大的幫助。

## 3.2 虛擬牆



在 2.2.4 曾介紹到牆面的行為符合牛頓第三運動定律的物理反應，即作用力  $F_{act}$  等於反作用力  $F_{rea}$ ，然而希望力回饋系統直接反應使用者施力作為牆面模擬對於硬體設備要求極高，故我們結合高彈性係數和阻尼係數的阻抗元件實現模擬一個牆面反彈的力感，這就是一種虛擬(virtual wall)牆的概念，如圖 3.1 所示，並希望與實際的牆面感覺差異盡量能夠最小。

由於彈性係數  $K$  值的增加可以提高剛性，所以高彈性係數將是實現虛擬牆最主要直接的方式，然而究竟需要多大的  $K$  值呢？這是一個心理物理學 (psychophysics) 上的問題，亦即身體感官雖然接受外在相同物理量的刺激，但會因為各人內在心理主觀印象的影響，而有不同的認知並產生不同的反應；根據 Colgate 的建議其值約在為 2000~8000 N/m 就能給予使用者相當不錯的

表現[8]。但虛擬牆究竟還是由彈簧組成，符合第二章所提及的彈簧穩定度分析的特性，故我們需要配合一個阻尼係數來增加系統的穩定度，接下來將介紹各種虛擬牆的呈現方式。

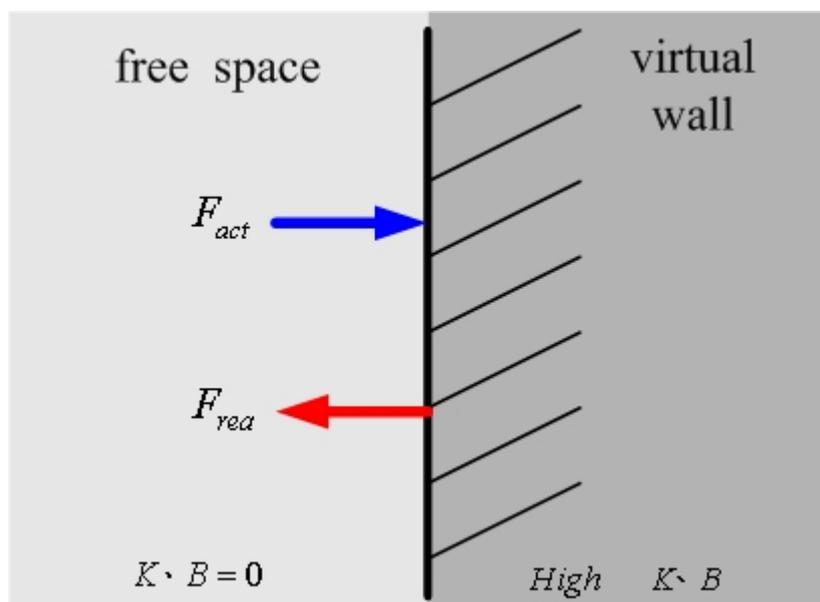


圖 3.1 虛擬牆示意圖

### 3.2.1 正向虛擬牆

顧名思義，一個正向的虛擬牆就是僅以平行於卡式座標的 X 方向或是 Y 軸方向出現，如圖 3.2 所示，所以搖桿的操控點與虛擬牆碰觸的判斷條件只需要考慮一個維度的自由度即可。

以平行 Y 軸的虛擬牆為例，假設搖桿位置為  $(x_0, y_0)$ ，虛擬牆表面邊界數學式為  $x = c$ ，使用者操控一個力回饋搖桿由左慢慢往右移動，將  $(x_0, y_0)$  帶入  $x = c$  有三種情況： $x_0 < c$  代表搖桿可任意移動不受限制； $x_0 = c$  代表接觸到虛擬牆的瞬間，再往右移推進會感受到抵抗力量； $x_0 > c$  代表搖桿侵入虛擬牆，

此時的虛擬牆會產生力回饋抵抗使用者施力直到搖桿退出牆面，而力感回饋的大小根據搖桿侵入的深淺決定：

$$F_x = -K(x_0 - x) - BV_x \quad (3.12)$$

其中  $K$  為模擬虛擬牆所設的彈性係數， $B$  為模擬虛擬牆所設的阻尼係數，同理如換成一平行  $X$  軸的虛擬牆，其數學式為  $y = c$ ，則在  $y_0 > c$  時侵入牆面並得到一回饋力：

$$F_y = -K(y_0 - y) - BV_y \quad (3.13)$$

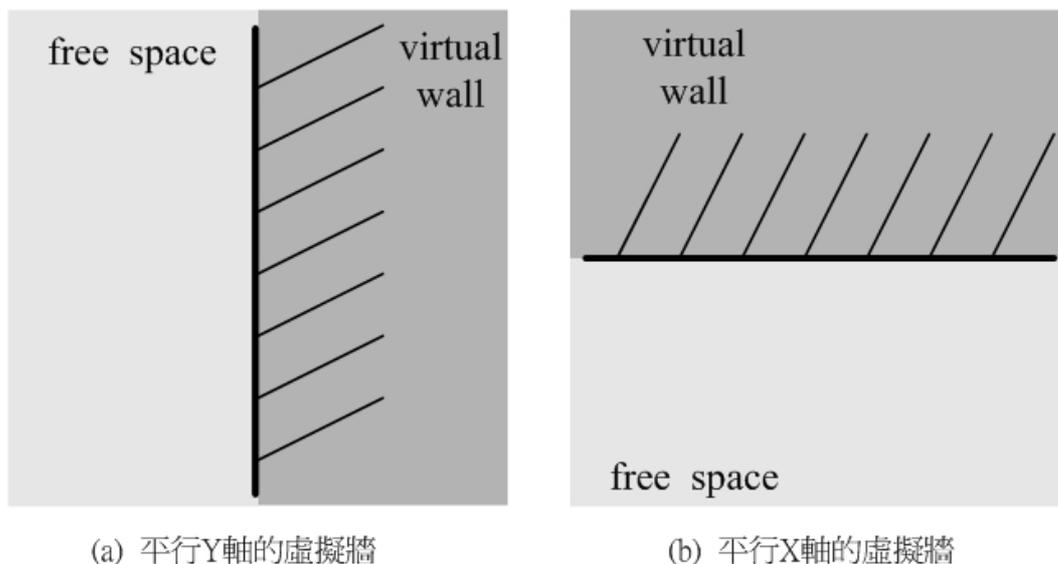


圖 3.2 一維正向虛擬牆示意圖：

(a) 平行 Y 軸的虛擬牆 (b) 平行 X 軸的虛擬牆

### 3.2.2 非正向虛擬牆

如果考慮一個與  $X$  軸、 $Y$  軸皆不平行，而是與水平方向有一個夾角  $\theta$ ，如圖 3.3 所示，那麼就不能用正向虛擬牆的法則判斷，而是必須將輸入的位

置、速度等資訊進行座標軸轉換[35]，才能計算出兩軸馬達正確的力量命令。

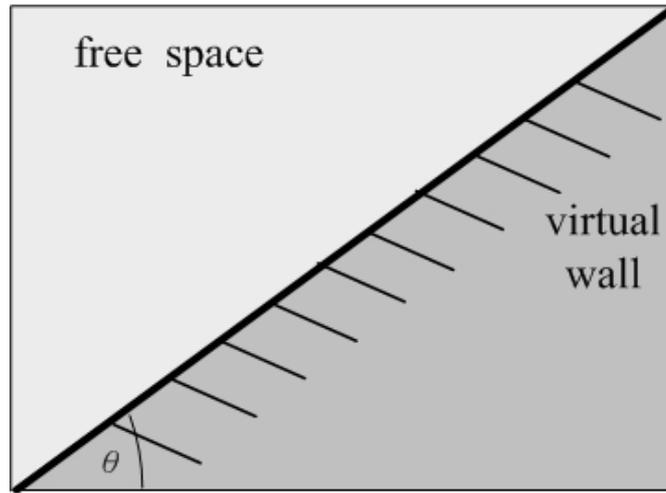


圖 3.3 非正向虛擬牆示意圖

如圖 3.4 所示，假設 X 軸為原本阻抗物件模擬面，L 軸為 X 軸旋轉了  $\theta$  度，是新的非正向虛擬牆模擬表面，而系統傳回的搖桿位置為點  $P(x_0, y_0)$ ，其與 L 軸垂直距離為向量  $\bar{d}$ ，而系統需要與施力有關的兩軸距離分別為  $\bar{l}_x$  與  $\bar{l}_y$ ，由幾何推導可得  $\bar{d}$ ：

$$\bar{d} = \cos \theta \times y_0 - \sin \theta \times x_0 \quad (3.14)$$

而  $\bar{l}_x$  與  $\bar{l}_y$  又分別為：

$$\bar{l}_x = \sin \theta \times [\cos \theta \times y_0 - \sin \theta \times x_0] \quad (3.15)$$

$$\bar{l}_y = -\cos \theta \times [\cos \theta \times y_0 - \sin \theta \times x_0] \quad (3.16)$$

由(3.15)與(3.16)兩式，我們可以用  $\bar{l}_x$  與  $\bar{l}_y$  取代原本虛擬牆中對應的位移量，

分別給予兩軸對應的施力，以實現一個非正向的虛擬牆行爲，至於速度項與加速度項，分別爲位移項的時間微分與二次微分，因此也可套用相同的公式。

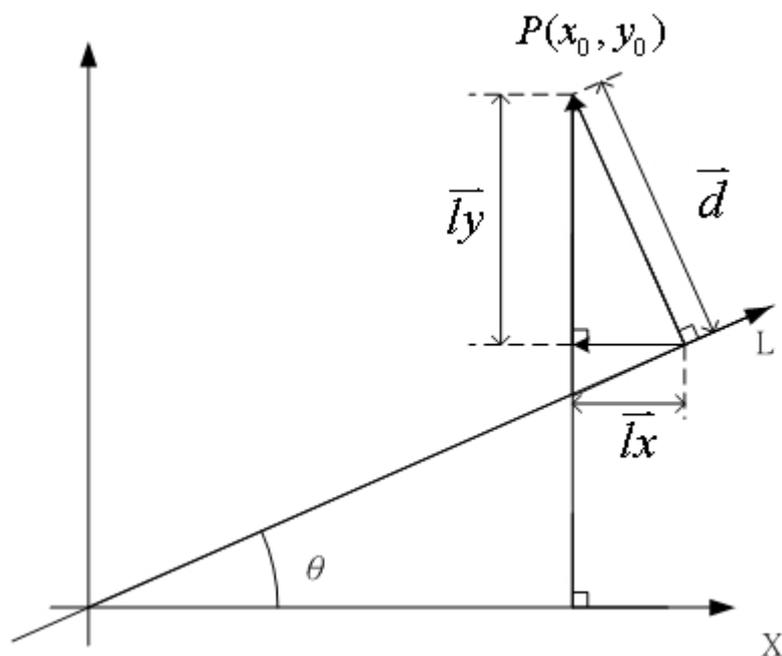


圖 3.4 座標軸轉換

### 3.2.3 圓形虛擬牆

由於圓形在二維座標空間爲一個二次封閉曲線，所以實現圓形虛擬牆基本上有兩種形式，其一爲內圓形虛擬牆，另則爲外圓形虛擬牆，如圖 3.5 所示。以內圓形虛擬牆爲例，方形區間爲搖桿可自由活動空間，但是只要經過中間牆的表面，就會感受到被推擠的反彈力，無法繼續往內移動；而外圓形虛擬牆的表現行爲剛好相反，搖桿只有在圓形區間部分能夠自由移動，無法穿越圓形表面到達外面的區間。

要推導出圓形虛擬牆的力感特性，首先必須瞭解圓的數學基本模

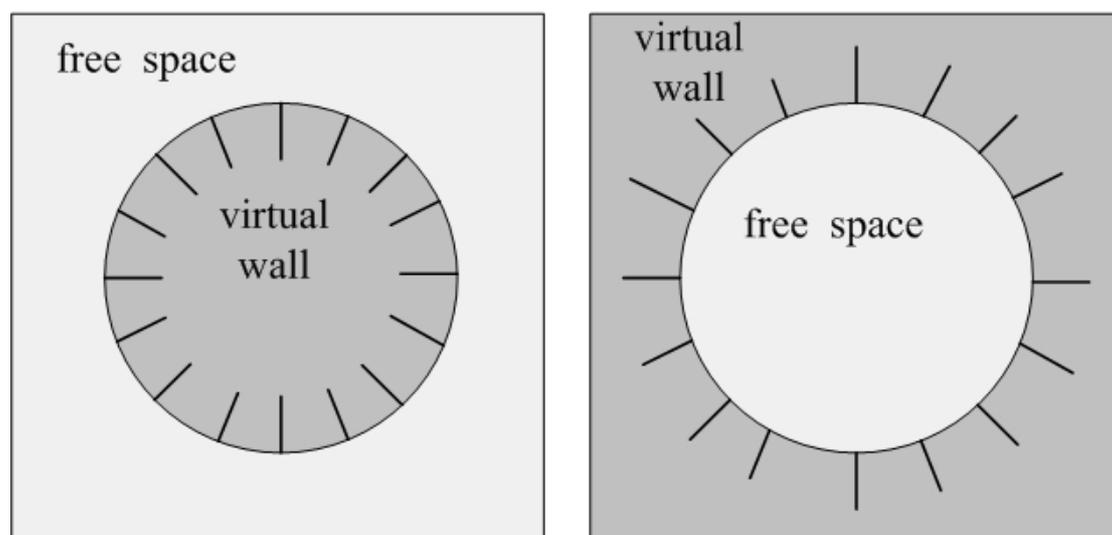
型，一個圓形虛擬牆表面的數學方程式如下：

$$x^2 + y^2 = r^2 \quad (3.18)$$

$$x = r \times \cos \theta, \quad y = r \times \sin \theta \quad (3.19)$$

$$\tan \theta = \frac{y}{x}, \quad \theta = \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) \quad (3.20)$$

其中  $(x, y)$  為圓上任一點在 X-Y 座標平面的位置， $r$  為圓形虛擬牆半徑， $\theta$  為以圓心向圓上任何一點出發的向量與 X 軸的夾角。接著我們分別介紹內外圓形虛擬牆之模擬方法。



(a) 內圓形虛擬牆

(b) 外圓形虛擬牆

圖 3.5 圓形虛擬牆示意圖：(a) 內圓形虛擬牆 (b) 外圓形虛擬牆

### A 內圓虛擬牆

假設搖桿在 X-Y 座標平面的位置為  $(x_0, y_0)$ ，向量  $\vec{P} = (x_0, y_0)$  代表由圓心出發向搖桿位置延伸的向量，搖桿侵入牆面所受到的 X 方向阻擋力為  $\vec{F}_x$ 、Y

方向阻擋力  $\overline{F}_y$ ，兩者的合力構成實際的阻擋力。由圖 3.6 我們可看出  $\overline{F}_x$  和  $\overline{F}_y$  的施力方向與搖桿目前位置向量  $\overline{P} = (x_0, y_0)$  同向，且  $\overline{F}_x$  和  $\overline{F}_y$  的比值與  $x_0$  和  $y_0$  的比值有以下關係：

$$\frac{F_x}{F_y} = \frac{x_0}{y_0} \quad (3.21)$$

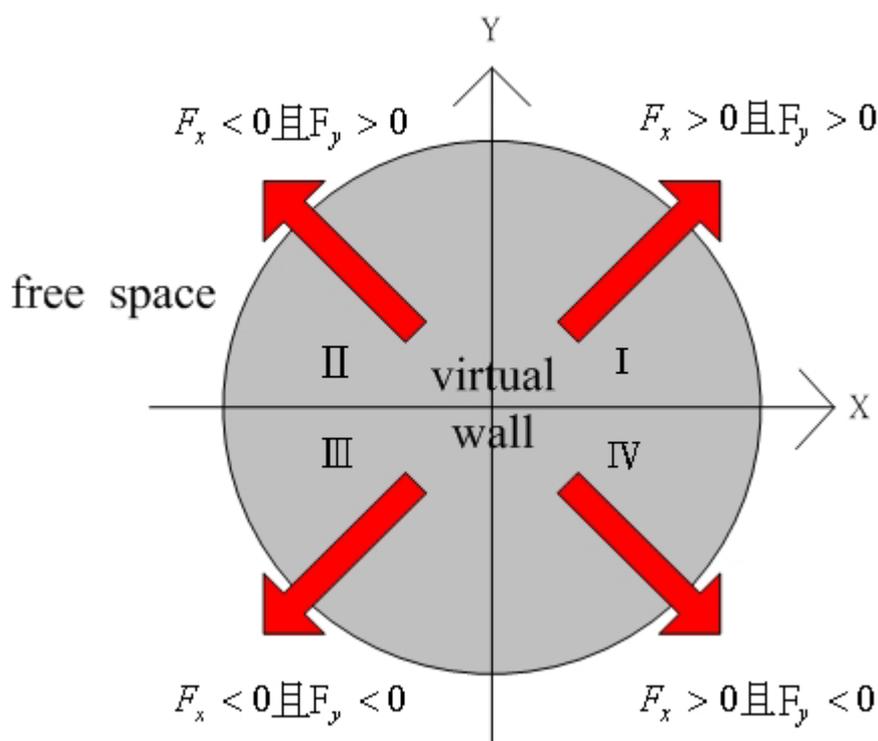


圖 3.6 搖桿侵入內圓虛擬牆之施力方向

爲了判斷力回饋搖桿會在何處侵入牆內，我們將搖桿目前位置代入(3.18)：

$$x_0^2 + y_0^2 = r_0^2 \quad (3.22)$$

上式相當於以搖桿目前位置  $(x_0, y_0)$  做出一個與虛擬牆表面相同圓心的圓形，其半徑爲  $r_0$ ，若  $r_0 > r$ ，則搖桿在牆外； $r_0 = r$ ，則搖桿剛碰觸到牆面； $r_0 < r$ ，則表示搖桿已經侵入牆內，如圖 3.7 中黃線部分，此時需產生適當的回饋力給予搖桿使其退至牆面外。藍線部分爲搖桿深入牆面之形變量，根據(3.21)式我

們可利用向量分量原理分別求出 X 軸方向和 Y 軸方向應對應的施力：

$$\begin{aligned}
 F_x &= (r - r_0) \frac{x_0}{r_0} \times K - V_x \times B \\
 F_y &= (r - r_0) \frac{y_0}{r_0} \times K - V_y \times B
 \end{aligned}
 \tag{3.23}$$

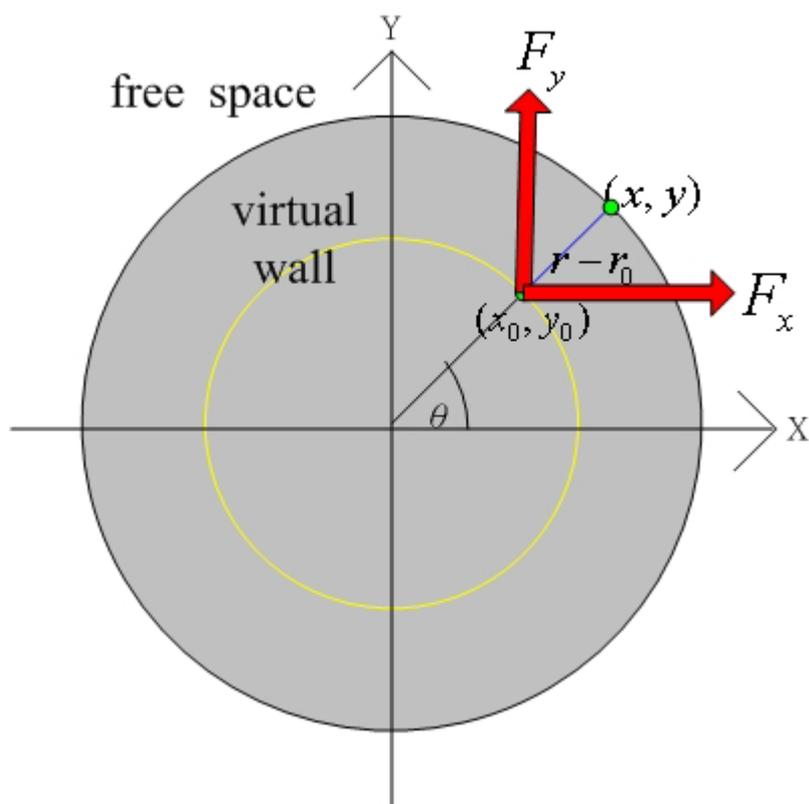


圖 3.7 內圓虛擬牆施力分解圖

## B 外圓虛擬牆

外圓虛擬牆與內圓虛擬牆概念相同，只不過搖桿的活動區間反而是能自由地活動於圓形牆內部，但當移動到圓形牆外面時會受到推擠直到搖桿狀態回復到沒侵入牆內時，如圖 3.8 所示。

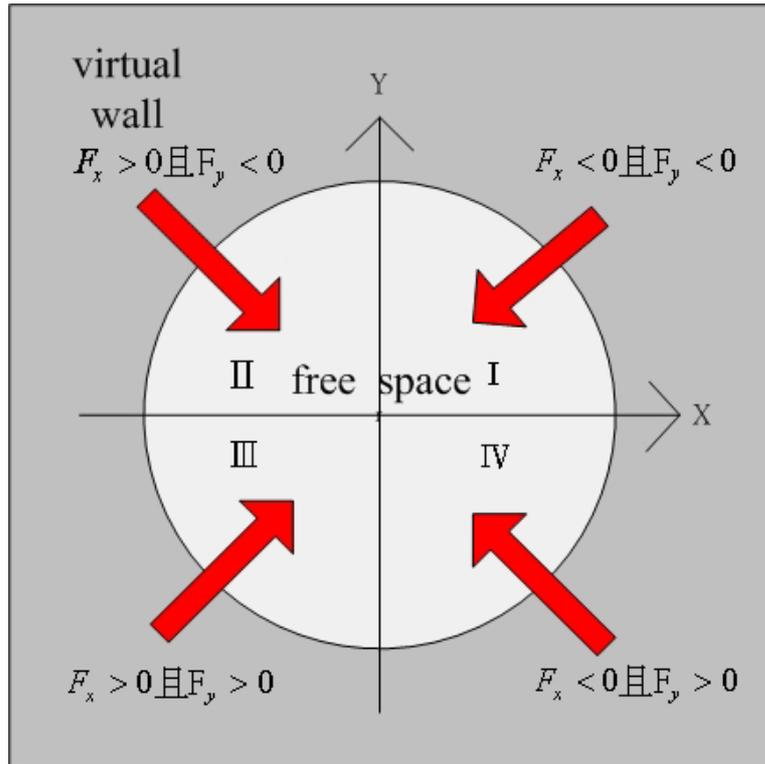


圖 3.8 搖桿侵入外圓虛擬牆施力方向

因此我們只要把內圓虛擬牆的概念重新運用一次，不過條件相反，亦即當  $r_0 > r$  時搖桿才侵入牆面，根據(3.21)和(3.23)式我們可推得外圓虛擬牆的施力為：

$$\begin{aligned}
 F_x &= -(r_0 - r) \frac{x_0}{r_0} \times K - V_x \times B \\
 F_y &= -(r_0 - r) \frac{y_0}{r_0} \times K - V_y \times B
 \end{aligned}
 \tag{3.24}$$

### 3.2.4 橢圓形虛擬牆

由於圓為橢圓的特殊例子，所以分析橢圓形虛擬牆的方法也與圓形極為類似，其概念如圖 3.9 所示，一個扁橢圓方程式為：

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (3.25)$$

其中  $a$  為橢圓之長軸、 $b$  為橢圓之短軸。判斷力回饋搖桿是否侵入橢圓形虛擬牆內部作法與圓形虛擬牆一樣，只需將(3.18)式替換成(3.25)式並把搖桿目前位置  $(x_0, y_0)$  代入，若  $\frac{x_0^2}{a^2} + \frac{y_0^2}{b^2} > 1$  則侵入外橢圓牆，反之若  $\frac{x_0^2}{a^2} + \frac{y_0^2}{b^2} < 1$  則侵入內橢圓牆，再根據向量法則給於  $X$  方向和  $Y$  方向適當的回饋力即可。至於長橢圓只需將(3.25)式中  $a$ 、 $b$  調換，便能使用相同分析。

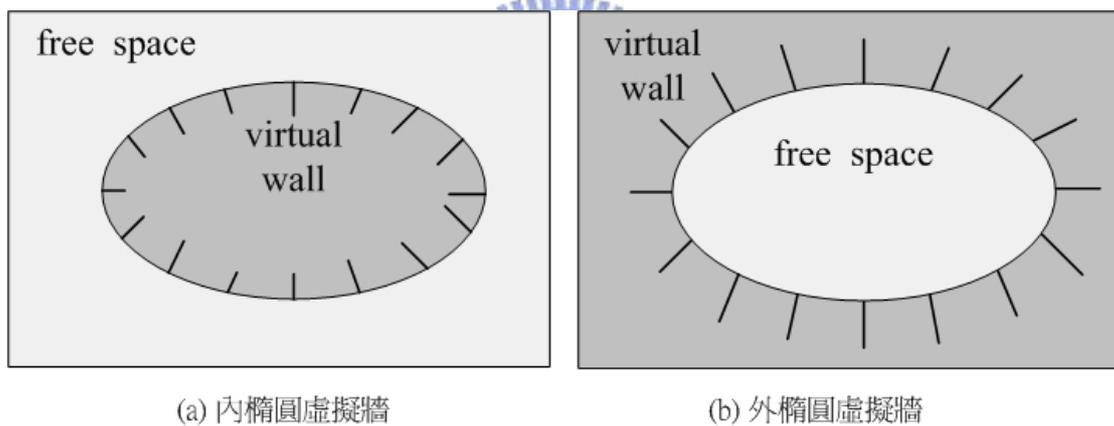


圖 3.9 內外橢圓虛擬牆示意圖

### 3.3 虛擬通道

回顧 2.2.5 節曾提過虛擬通道的概念是利用兩面硬質虛擬牆實現其功能，所以基本上其動態特性跟虛擬牆大同小異，最大的不同點，是在於虛擬通道對於搖桿的運動限制比虛擬牆更為嚴格，就直線型的虛擬通道而言，能將搖桿從二維活動空間限制成一維運動方向，而對於圓形或橢圓形虛擬通道，雖然搖桿的活動空間大體上還是擁有兩個自由度，但其工作區間已經大大的受到限制了。至於虛擬通道的寬度設定，若是一個正向或是非正向的通道，可以利用兩面平行虛擬牆設置的距離來決定；而若是環性通道則可利用內外圓半徑的差來決定其通道寬度。

#### 3.3.1 正向通道



正向通道顧名思義就是利用兩面正向且互相平行的牆來完成，藉由兩面平行牆相距的距離來設定其通道的寬度大小，可分為垂直方向和水平方向的通道，如圖 3.10 所示。

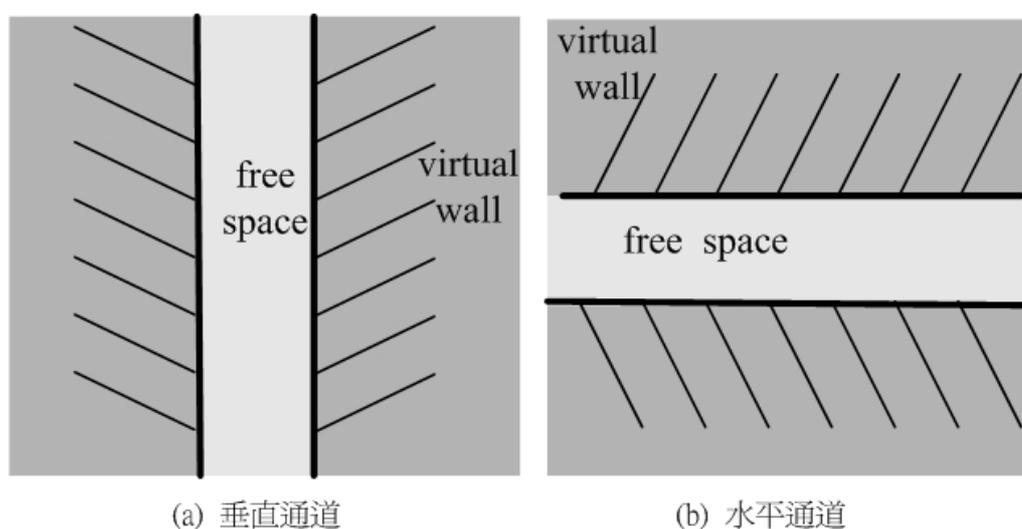


圖 3.10 一維正向通道示意圖

### 3.3.2 非正向通道

利用兩面經由座標轉換後轉了一個角度  $\theta$  的非正向虛擬牆組成，如圖 3.11 所示，其原理與正向通道一樣，而正向通道亦是非正向通道的特殊情況，亦即  $\theta = 0^\circ$  和  $\theta = 90^\circ$  時，分別代表水平和垂直兩種通道。

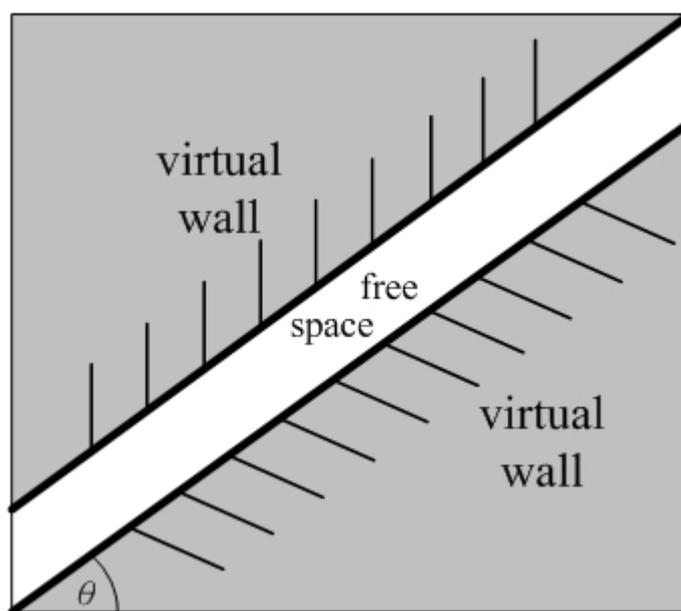


圖 3.11 非正向通道示意圖

### 3.3.3 環形通道

利用兩個不同半徑大小的圓形虛擬牆所構成的通道為環形通道，如圖 3.12 所示。假設搖桿目前位置為  $(x_0, y_0)$ ，內圓形牆半徑為  $r_1$ ，外圓形牆半徑為  $r_2$ ，則根據(3.22)式可得以下三種結果：

If  $r_1 < r_0 < r_2$ ：力回饋搖桿在環形通道內，活動不受限制

If  $r_0 < r_1$  : 力回饋搖桿侵入內圓虛擬牆，給予(3.23)式之力感

If  $r_0 > r_2$  : 力回饋搖桿侵入外圓虛擬牆，給予(3.24)式之力感

如此一來我們就完成一個環形虛擬通道，至於通道大小 $d$ 可利用外圓虛擬牆面和內圓虛擬牆面的半徑差，即 $d = r_2 - r_1$ 求得。

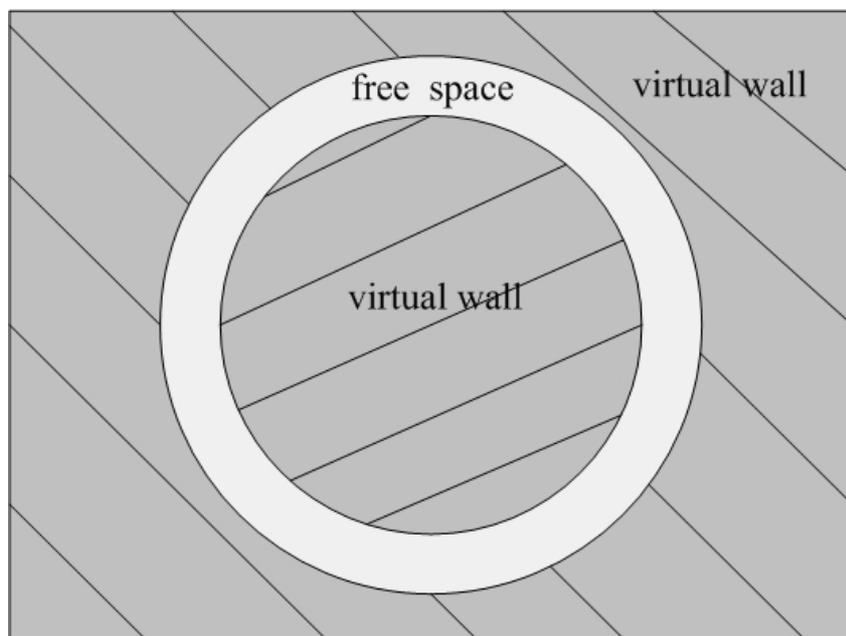


圖 3.12 環形通道示意圖

## 3.4 虛擬阻抗動態特性

雖然有了各式各樣的虛擬牆和虛擬通道，但這些阻抗只能以靜態的方式存在於某些規劃好的區間，當搖桿碰觸到這些阻抗物體，則會受到適當的反饋力；若否，則無法對搖桿產生任何影響力。為了能夠更精確的模擬各器械給使用者的操作感受，我們必須探討虛擬阻抗的動態特性。

### 3.4.1 虛擬阻抗值變化

根據不同的變因，設計一套流程使得虛擬阻抗本身會因為這些因素的改變而產生我們所期望的變化。例如以時間的變化適當地調整虛擬牆彈性係數，可以模擬觸碰一個物體由軟變硬、或是由硬變軟的感受；由於阻尼可以依照搖桿移動的速度快慢給予操縱者一個對應的反方向抵抗力，故以搖桿移動距離總和為變數增加虛擬通道內的阻尼係數，可以模擬在越來越稠密的流體中移動、或是在摩擦力越來越大的工作環境中移動。

### 3.4.2 虛擬力感環境變化

以位置對應方式產生阻抗元件的好處是使用者能以較直覺的感受操縱搖桿，但也有其缺點就是模擬的工作區間將受限於搖桿本身的活動範圍，使得虛擬操控器的應用變的狹窄，如果能根據一些外部設定的變數來改變整體力感環境，如距離、時間、外部控制器，將能擴充其實用性與可塑性。例如利用搖桿模擬走一項走迷宮的遊戲，一開始迷宮已經由許多事先規劃好的通道

所構成，使用者操縱力回饋搖桿與這樣的虛擬環境中互動，若是移動到不是事先設計好的的通道則會被虛擬牆給阻擋，而當使用者依照規劃好的通道循序漸進完成某些條件，譬如搖桿目前位置到達過關地點，又或者經過一段很長的時間，整個迷宮的通道將會被二度規劃，與遊戲之初排列完全不同。這樣的動態變化好像使用者在迷宮遊戲中由於達到過關條件到達下一關一樣，只要在程式設定時不斷地增加動態通道的個數，就可以讓整個搖桿工作空間作無限的想像擴大，甚至還可利用由簡單至繁瑣的變化來模擬遊戲不斷的增加其難度。



# 第四章

## 硬體機構與系統鑑別

本章的目的在介紹虛擬操控器的硬體部分，主要為一組擁有兩個自由度的力回饋搖桿裝置，可再細分為主體機械結構、動力元件以及力感測裝置，整體硬體架構如圖 4.1 所示。此搖桿為交通大學電控所人與機器實驗室所開發 [34]，也是整個虛擬操控器模擬系統直接與使用者互動的部分。為了能夠進一步求得此硬體系統的各项基本參數，例如搖桿最大輸出力量、取樣資料的解析度以及感測裝置靈敏度等，作為實際模擬時的依據，以發揮最佳的操作效果，我們將於後逐一分析之。

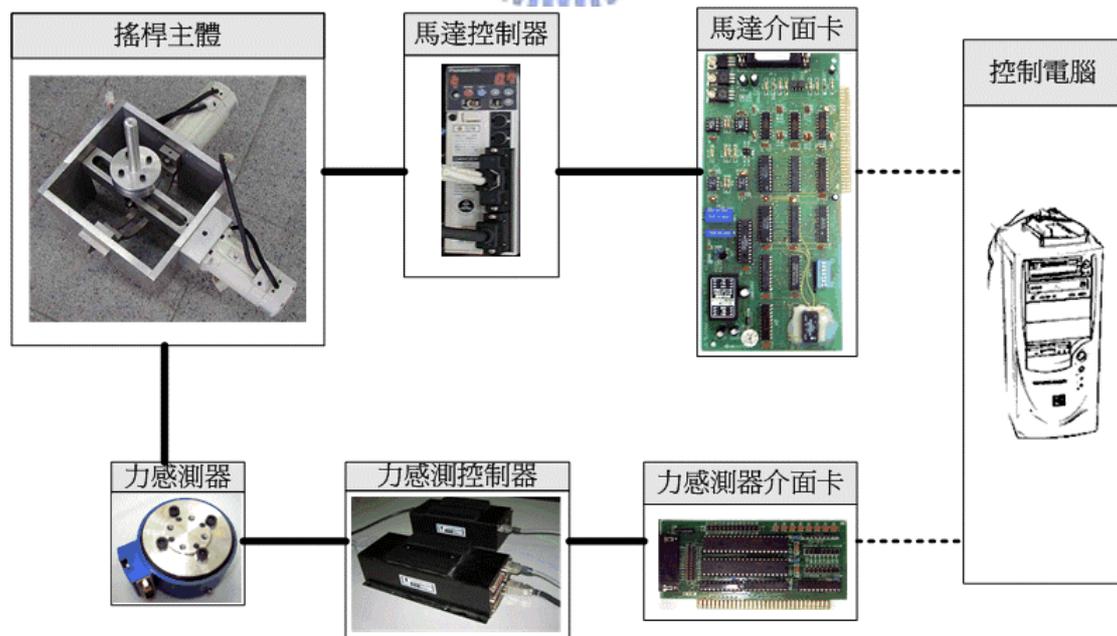


圖 4.1 力回饋搖桿硬體系統

## 4.1 搖桿傳動機構

此力回饋搖桿的機械結構如圖 4.2(a)所示，其傳動裝置一為半圓長條型鐵塊（Y 軸方向），另一為長直條型鐵塊（X 軸方向），半圓形的長條鐵塊中央有一長溝可讓搖桿下端穿過，而長條形鐵塊則將中央搖桿握把固定住，兩個鐵塊一端點連接馬達傳輸動力，另一端點則以滾珠軸承固定在機構外殼上。當 X 軸馬達轉動時，會帶動長條鐵塊旋轉，使得搖桿握把會隨之在 X 軸方向轉動（直接連動），而 Y 軸馬達轉動時，會帶動半圓長條形鐵塊，進而牽動搖桿握把下端造成在 Y 軸方向轉動。這樣的搖桿結構設計可以增加力回饋搖桿的活動範圍，並減少傳統單桅式搖桿兩傳動軸間機構干涉和摩擦等問題。圖 4.2(b)顯示力回饋搖桿的工作空間，X 軸的活動角度為  $70^\circ$ ，而 Y 軸的活動角度為  $80^\circ$ ，X 軸與 Y 軸馬達對於握把位置的施力力臂長度為 200mm，因此 X 軸與 Y 軸所能模擬的工作空間分別約為 243.3mm 與 279.3mm。

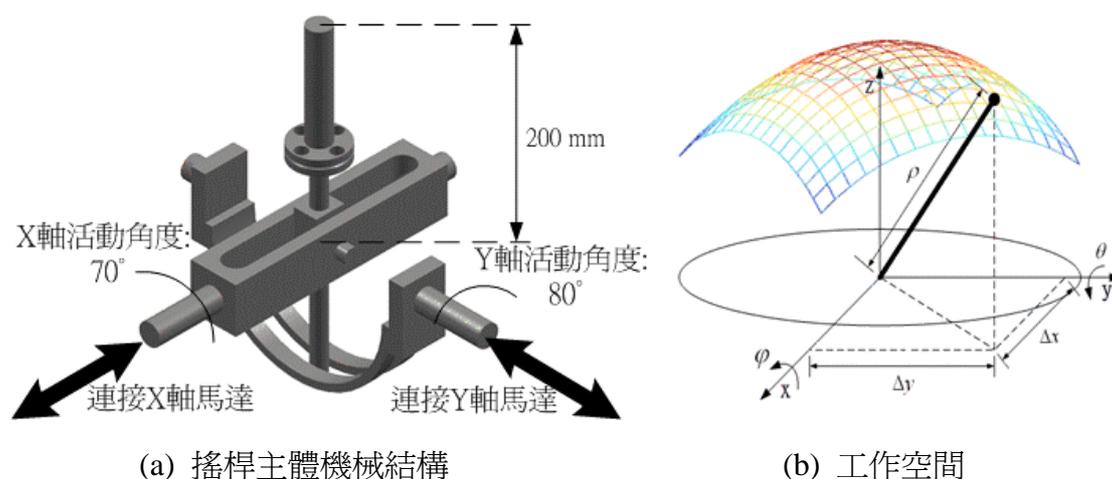
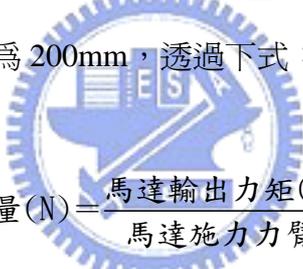


圖 4.2 力回饋搖桿(a)主體機械結構 和 (b)工作空間

## 4.2 搖桿動力元件

爲了提高力回饋搖桿動力元件的精確度與輸出轉矩，我們採用交流伺服馬達作爲搖桿的動力來源，本套系統使用日本松下公司（Panasonic）所生產的型號爲 MSMA041A1E 的交流伺服馬達和型號爲 MSDA041A1A 的控制驅動器，並且搭配建昇自動化公司所生產的型號爲 NCC-9322 DAC 的馬達控制介面卡作爲馬達訊號輸出與命令輸入之用。

表 4.1、4.2 顯示交流伺服馬達與控制驅動器的規格資料，其中顯示馬達的最大轉矩爲 3.8 N·m，而馬達位置編碼器的解析度爲 2500 Pulse/轉，我們可以大概求出搖桿機構能給予使用者最大的力量感受，以及位置訊號的解析度。已知馬達的施力力臂長爲 200mm，透過下式：


$$\text{手在握把端感受到的力量(N)} = \frac{\text{馬達輸出力矩(N·m)}}{\text{馬達施力力臂(m)}} \quad (4.1)$$

可求得使用者透過力回饋搖桿得到最大的力感爲 19N(約 1.94 kg)，而工作空間半徑等於馬達旋轉中心距握把（使用者感受位置），其長度約 200mm，透過下式：

$$\text{位置訊號解析度(P/m)} = \frac{\text{轉角解析度(P/rev)}}{2\pi \times \text{半徑(m)}} \quad (4.2)$$

得位置訊號解析度約爲 1989.4(Pulse/m)，約等於 2(Pulse/mm)，亦即每釐米約有 2 個計數輸出。至於馬達控制卡的規格可由表 4.3 得知，其最大取樣頻率爲 1MHz，比起之後電腦模擬每筆訊號處理的速度（約 1kHz）已綽綽有餘。

項目	規格
額定電壓	100-115 V 50/60 Hz
額定/最大轉速	3000/4500 rpm
額定/最大轉矩	1.3/3.8 N/m
額定功率	400 W
編碼器解析度	2500 Pulse/rev
重量	1.6 kg

表 4.1 Panasonic MSMA041A1E 交流伺服馬達規格

項目	規格
控制模式	轉矩模式
轉矩控制信號	3V / 100%額定轉距
計數器輸出	10000 count/rev
轉矩量測	3V / 100%額定轉距

表 4.2 Panasonic MSDA041A1A 控制驅動器規格

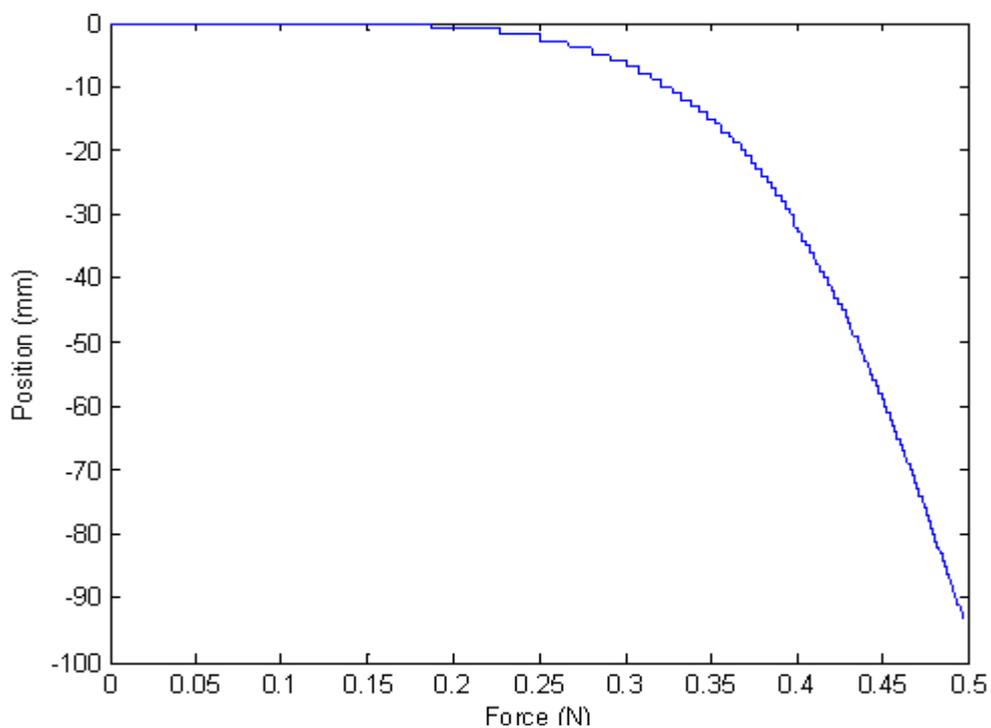
項目	規格
類比輸出電壓	-10 ~ +10 V
輸出阻抗	0.1 $\Omega$
轉換時間	1 $\mu$ s
解析位元數	13 bits
計數輸入範圍	24 bits

表 4.3 健昇自動化 NCC-9322 DAC 馬達控制卡規格

### 4.3 系統鑑別

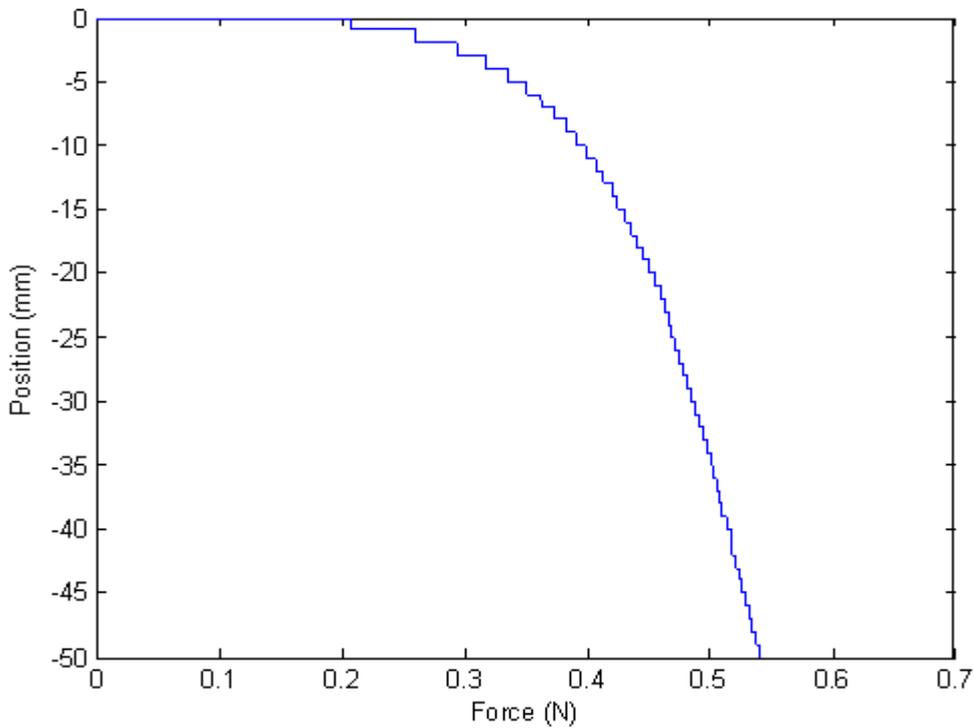
第二章曾提及虛擬操控器模擬系統的四個重要物理參數，分別為彈性係數 (stiffness)、黏滯係數(viscosity)、慣性質量(mass)、以及摩擦力(friction)，以下我們將一一推導。

關於系統摩擦力，我們分別在 X 軸方向與 Y 軸方向輸入一個穩定增加的力量訊號，以求得最小克服摩擦力而運動的力量值，由圖 4.3 可看出 X 軸最大靜摩擦力為 0.17 N，Y 軸最大靜摩擦力約為 0.20N。而動摩擦力約略小於最大靜摩擦力[35]。



(a) X 軸摩擦力測試曲線

圖 4.3 摩擦力測試曲線：(a) X 軸方向 (b) Y 軸方向



(b) Y軸摩擦力測試曲線

圖 4.3 摩擦力測試曲線(continued)：(a) X 軸方向 (b) Y 軸方向

對於搖桿系統的阻抗模型，我們以最基本的頻率響應法(frequency-response analysis)來分析[17,34]，其優點是以直觀的物理現象來闡釋模型的頻率轉移函數(transfer function)，首先我們定義搖桿單軸的轉移函數  $G(s)$  為

$$G(s) = \frac{X(s)}{F(s)} \triangleq \frac{1}{ms^2 + bs + k} \quad (4.3)$$

其中  $X(s)$  為由編碼器取得搖桿操控位置的計數輸出， $F(s)$  表示輸入的力量電壓命令。我們以圖 4.4 來說明頻率響應法的原理，即輸入系統不同頻率的弦波信號(sinusoid)，如

$$u(t) = \alpha \cos \omega t \quad (4.4)$$

(4.5)中  $\alpha$  為信號的振幅，角頻率  $\omega$  可自行選定，則此系統的輸出為

$$y(t) = \alpha |G(j\omega)| \cos(\omega t + \phi) + n(t) \quad (4.5)$$

其中  $\phi = \arg G(j\omega)$  為系統所造成的相位落後， $n(t)$  為雜訊(noise)成分。觀察(4.5)式可發現系統於角頻率  $\omega$  時的增益及相位特性，因此若輸入系統各種角頻率的正弦信號，則可得多個角頻率點的增益與相位特性，藉由其特性於 Bode 圖上的表現，可以使用圖形表示其頻率轉移函數。

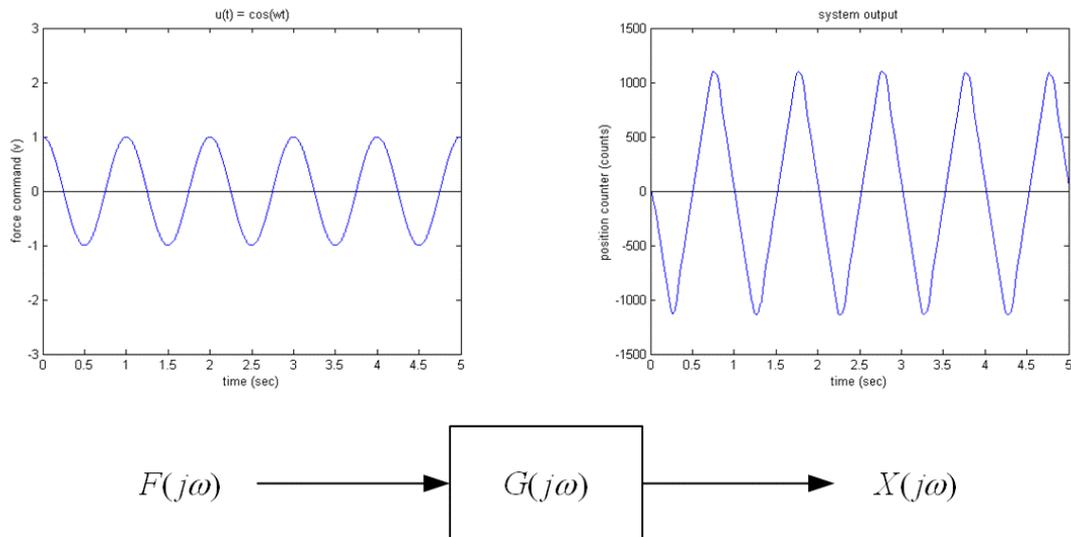


圖 4.4 頻率響應法的原理

我們輸入系統 1~65 Hz 之間各種不同頻率的正弦信號，如 (4.4)式所示，其中信號振幅  $\alpha$  為 1/3 額定力矩，對應的系統計數輸出振幅如圖 4.5 中的星狀記號 (\*)所標示。根據圖 4.5，我們可估計系統 X 軸的轉移函數為：

$$G_x(s) = \frac{1}{(1.971 \times 10^{-6})s^2 + (6.307 \times 10^{-5})s + (3.075 \times 10^{-4})} \quad (4.6)$$

系統 Y 軸的轉移函數為：

$$G_y(s) = \frac{1}{(1.8 \times 10^{-6})s^2 + (5.941 \times 10^{-5})s + (3.276 \times 10^{-4})} \quad (4.7)$$

由於系統輸入的訊號為電壓訊號(V)，我們必須轉換為一般的力量單位(N)，由表 4.1 與表 4.2 所得到的馬達與搖桿機構規格，額定電壓 3V，額定轉距 1.3 N·m，力臂 0.2 m，因此電壓訊號轉換成力量單位的比例係數  $\lambda_f$  為

$$\lambda_f = \frac{1.3(\text{額定轉矩})}{0.2(\text{力臂長}) \times 3(\text{電壓值})} = 2.17(\text{N}/\text{V}) \quad (4.8)$$

而輸出訊號為馬達計數器，也需要轉換為一般的長度單位(m)，由表 4.2 馬達計數器解析度 10000 count/rev，且力臂長為 0.2 m，故計數器訊號轉換成長度單位的比例係數  $\lambda_p$  為

$$\lambda_p = \frac{2 \times \pi \times 0.2(\text{圓週長})}{10000(\text{計數器解析度})} = 1.256 \times 10^{-4}(\text{m}/\text{count}) \quad (4.9)$$

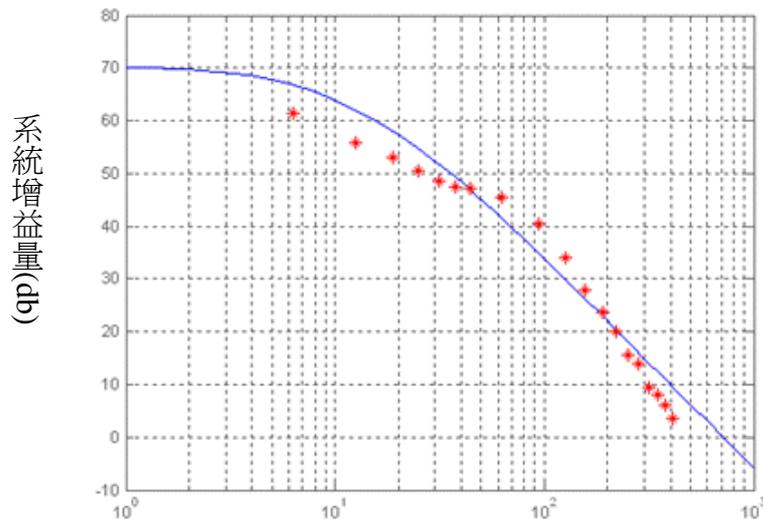
將(4.6)以及(4.7)式所得的系統彈性係數 k、阻尼係數 b、和慣性質量 m 值乘上比例係數  $\lambda$ ，其中  $\lambda$  為

$$\lambda = \frac{\lambda_f}{\lambda_p} = 1.752 \times 10^4 \quad (4.10)$$

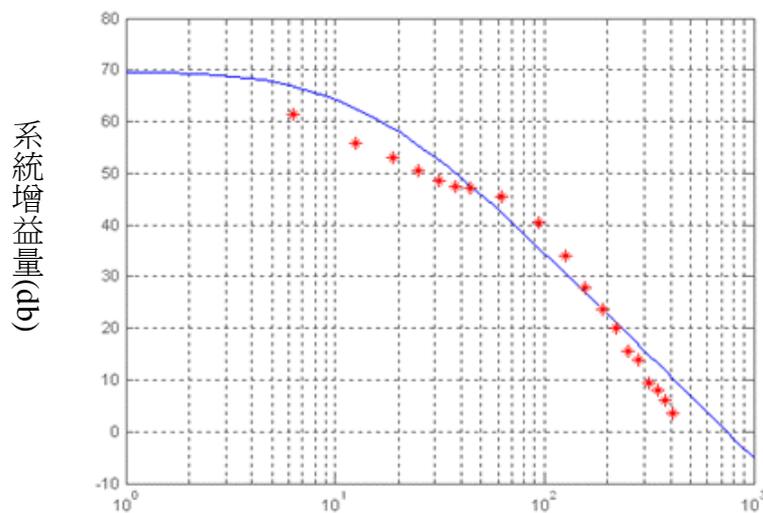
可得力回饋搖桿裝置物理阻抗參數值，如附表 4.4 所示。

	X 軸方向	Y 軸方向
慣性質量 (g)	33.5	31.5
阻尼係數 (N-sec/m)	1.105	1.041
彈性係數 (N/m)	5.38	5.732

表 4.4 力回饋搖桿裝置物理阻抗參數值



(a) X 方向頻率響應(rad/sec)



(b) Y 方向頻率響應(rad/sec)

圖 4.5 輸入不同頻率弦波的頻率響應圖：

(a)X 方向頻率響應 (b)Y 方向頻率響應

## 4.4 力感測裝置

力感測裝置是用來量測使用者操作力回饋搖桿時所感受的力量變化，並將力資訊傳回電腦控制單元之中，加上伺服馬達上的位置編碼器，兩者均為力回饋搖桿重要感測裝置。我們選購日本 NITTA 公司的 JR3 力感測器做為搖桿的力量感測裝置，並搭配美商 Intel 公司的 8255 I/O Card 作為 JR3 力感測器和系統的傳輸介面。表 4.5 顯示 JR3 力感測器各軸最大負載量與靈敏度。

方位		最大負載	靈敏度
X 軸	Force	22 kgf	0.044 kgf
	Moment	170 kgf-cm	0.34 kgf-cm
Y 軸	Force	22 kgf	0.044 kgf
	Moment	170 kgf-cm	0.34 kgf-cm
Z 軸	Force	44 kgf	0.088 kgf
	Moment	170 kgf-cm	0.34 kgf-cm

表 4.5 JR3 力感測器的最大負載量與靈敏度

圖 4.6 表示 JR3 力感測器的方位定義，我們可讀取力感測器 X 與 Y 兩個方向的讀值，但力感測器的 X、Y 方向由於設計時連接的誤差，與搖桿的運動方向不一定完全一致，故需對力感測器進行校正實驗，以獲得修正公式。我們讓搖桿 Y 軸位置固定，只在 X 方向運動，量取力感測器的 X、Y 方向的讀值繪成圖 4.7 的 X-Y 關係圖，而固定 X 軸讓搖桿在 Y 方向運動得到 X-Y 關係圖結果與圖 4.7 相差 90 度，但校正方式類似。

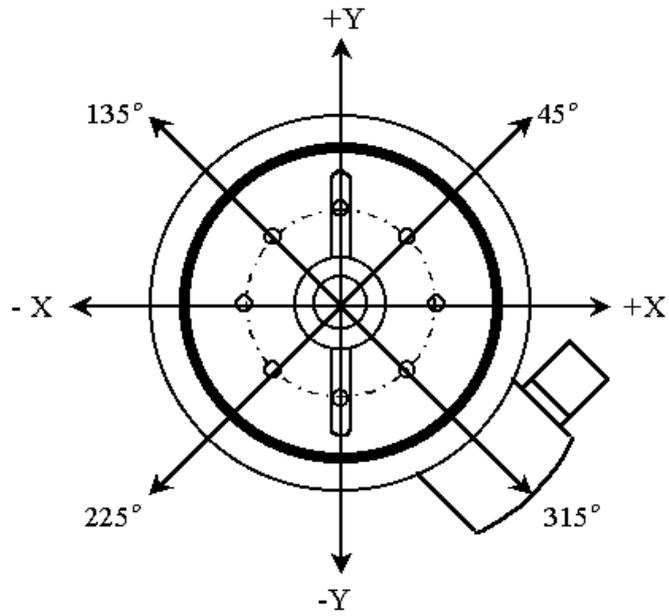


圖 4.6 力感測器方位定義

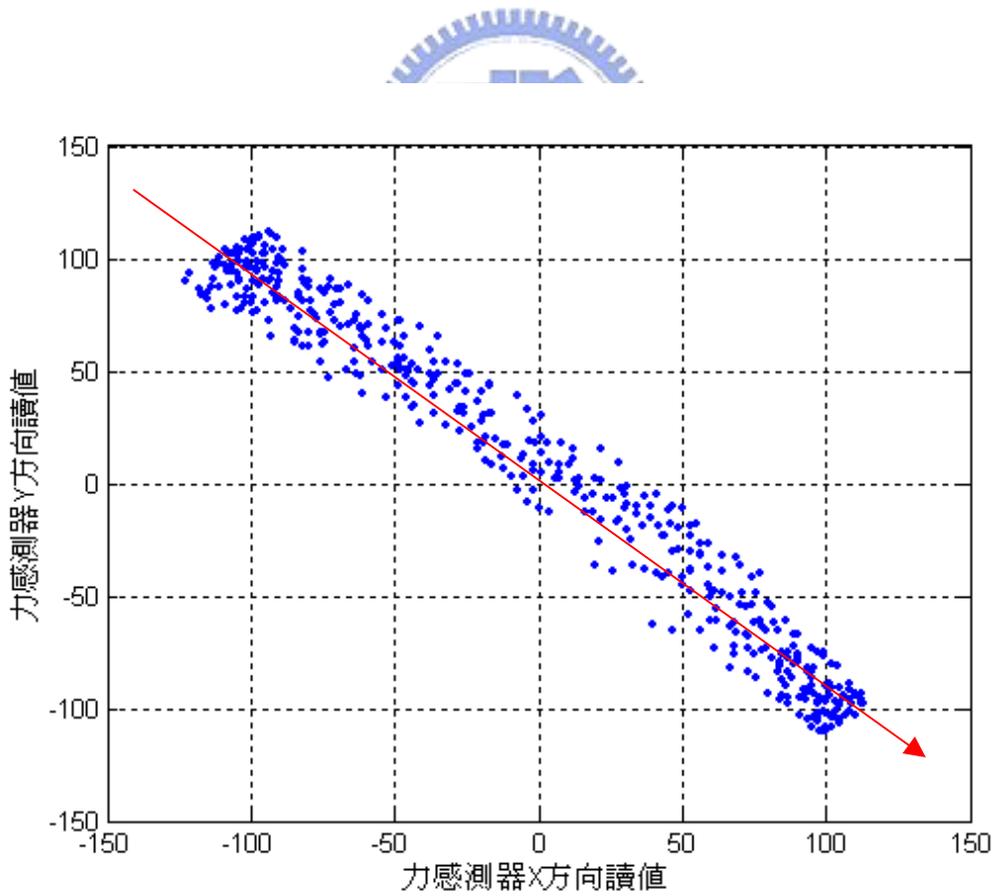


圖 4.7 力感測器方向校正實驗讀值

當我們以線性迴歸直線逼近圖 4.7 的每個點，得到的回歸直線斜率約為 -0.9453，而 $\text{Arctan}(-0.9453) = -43.39^\circ$ ，也就是說搖桿的X運動方向與力感測器的X方向約差了  $43.39^\circ$ 左右。所以實際的搖桿運動X方向量測力量 $F_x$ 與Y方向量測力量 $F_y$ 應由下式修正[35]：

$$\begin{aligned} F_x &= F_{s\_x} \cos(-43.39) + F_{s\_y} \sin(-43.39) \\ F_y &= F_{s\_x} \sin(-43.39) + F_{s\_y} \cos(-43.39) \end{aligned} \quad (4.11)$$

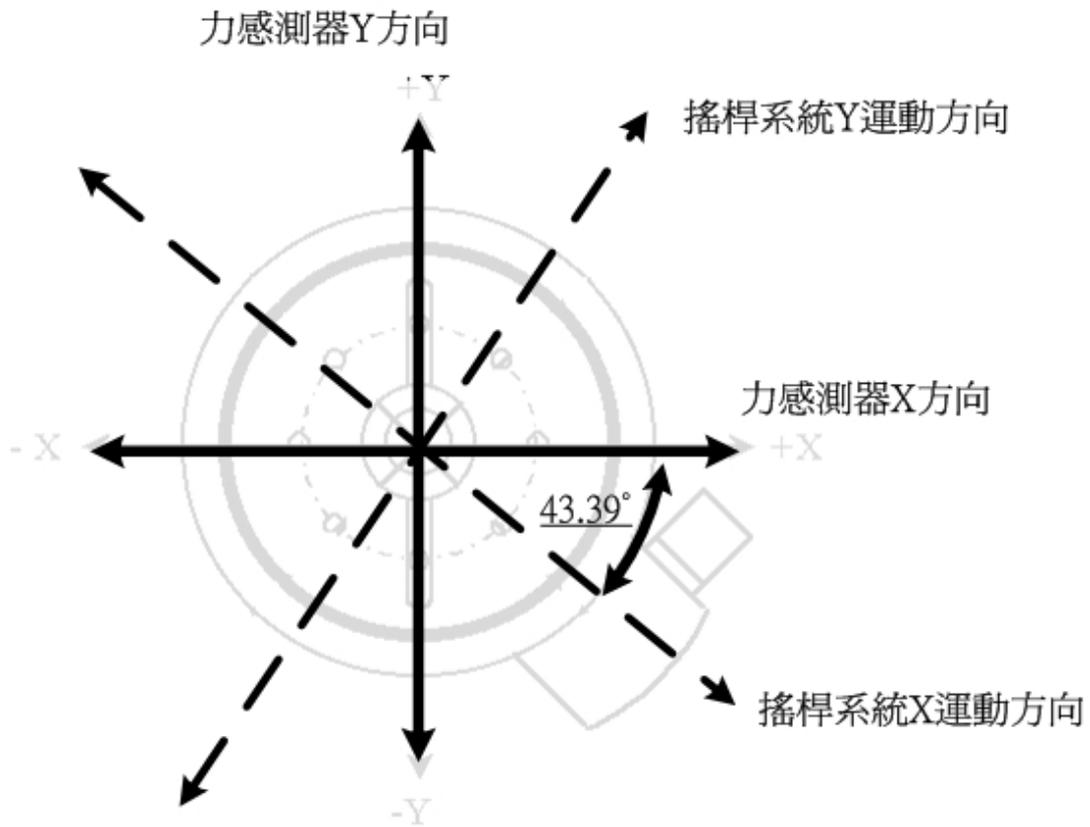


圖 4.8 力感測器方向校正圖

# 第五章

## 實驗與討論

爲了驗證前面幾章所發展的虛擬操控器軟體控制策略搭配本實驗室自行開發的硬體模擬系統架構是可行，並符合我們對多功能虛擬操控器的要求，故必須經由實際的模擬實驗，才能充分地瞭解力回饋搖桿系統所能發揮的最佳情形。我們選擇 Microsoft Windows 2000 多工的作業系統作爲模擬系統的作業平台，並且爲了使系統程式直觀、具有高性能的表現、且又能維護撰寫程式的一致性，我們使用 C++ 程序語言達成模擬法則的軟體實現，並且採用 Microsoft Visual C++ 爲程式語言發展的工具，撰寫以下各模擬實驗。

首先我們模擬一個觸碰虛擬牆面的操作感受，要實現一個多功能虛擬操，牆面所帶給使用者的力回饋感受是不可或缺的基本條件；接著利用各種虛擬牆面的組合，完成正向、斜向、以及環形等通道模擬實驗；最後，我們藉由組合以上各種虛擬通道，並結合虛擬阻抗的動態特性，完成一項虛擬扳手的操作模擬實驗。

## 5.1 虛擬牆

根據 2.2.4 節的介紹，牆面具有運動限制功能的特殊阻抗元件，簡單的說，牆面能限制物體在二維平面的位移情形並且回饋給使用者施力大小相同，方向卻相反的反作用力。而基於硬體設備的要求和軟體控制的精密度等種種要求下，牆面感覺的模擬實驗用一組單向高彈性係數為主並附加高黏滯係數來配合的效果較合宜，因此我們設定馬達的輸出力為

$$F_m = -K\Delta x - B\frac{\Delta x}{\Delta t} \quad \text{當 } \Delta x > 0 \quad (5.1)$$

其中  $\Delta x$  為搖桿侵入牆面的距離、 $\frac{\Delta x}{\Delta t}$  搖桿碰撞牆面瞬間時 X 方向的速度，我們設定四種彈性係數與黏滯係數的組合，讓使用者移動搖桿來回接觸牆面，並在平行牆面方向移動，感受接觸牆面時系統模擬的反作用力，圖 5.1 為牆面實驗時搖桿在虛擬環境中的工作示意圖，圖中右半平面代表一平行 Y 軸座標的正向虛擬牆，而搖桿對應於虛擬世界的位置以一個質點表示，至於實驗結果分別為圖 5.2(a)-(d)所示。

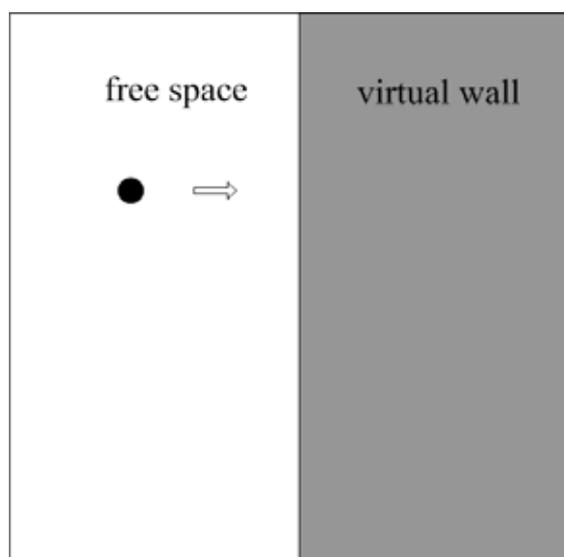
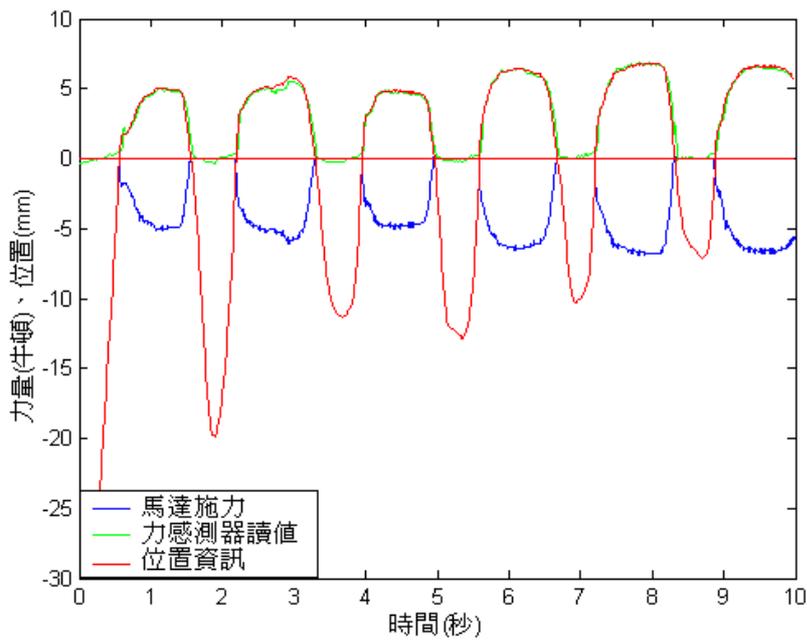
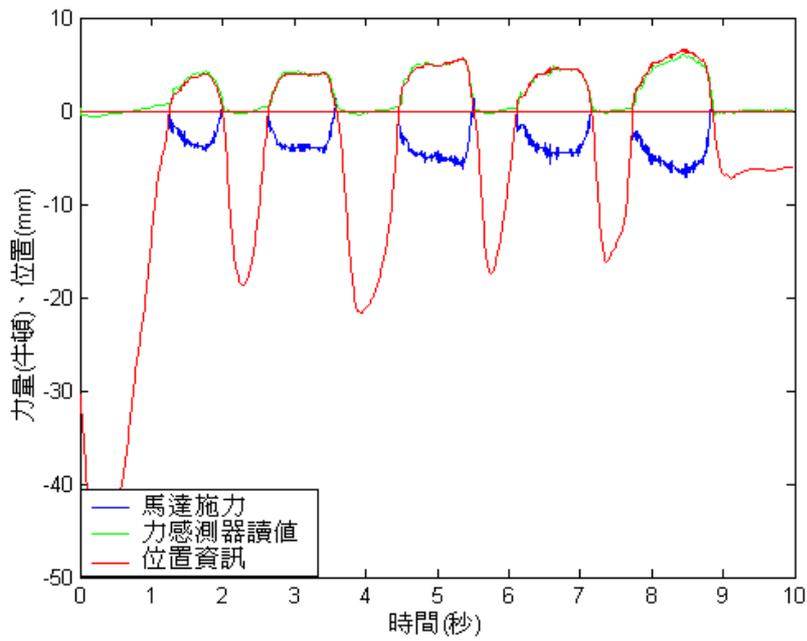


圖 5.1 牆面模擬示意圖



(a)  $K=1000 \text{ N/m}$  ,  $B=10 \text{ N}\cdot\text{sec/m}$



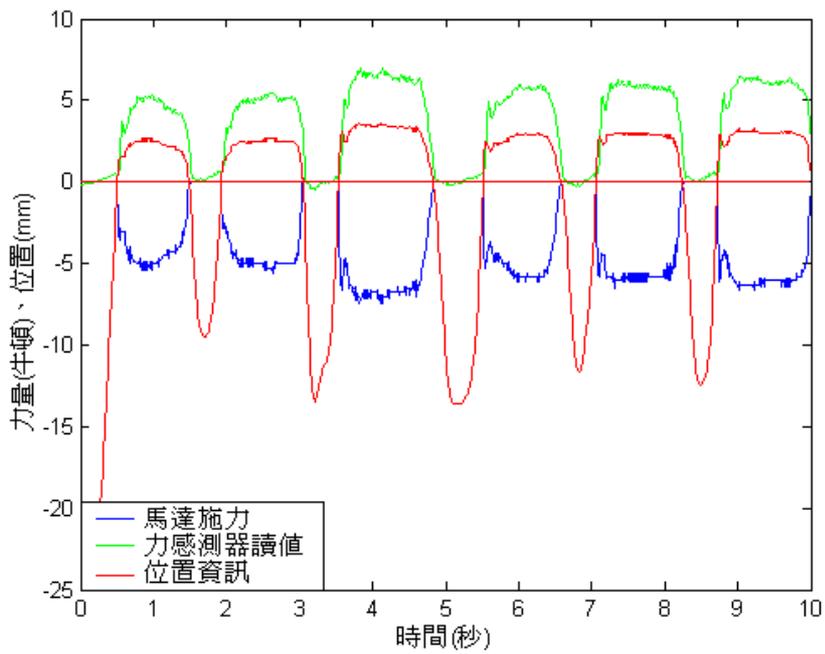
(b)  $K=1000 \text{ N/m}$  ,  $B=20 \text{ N}\cdot\text{sec/m}$

圖 5.2 牆面感受實驗：(a)  $K=1000 \text{ N/m}$  ,  $B=10 \text{ N}\cdot\text{sec/m}$

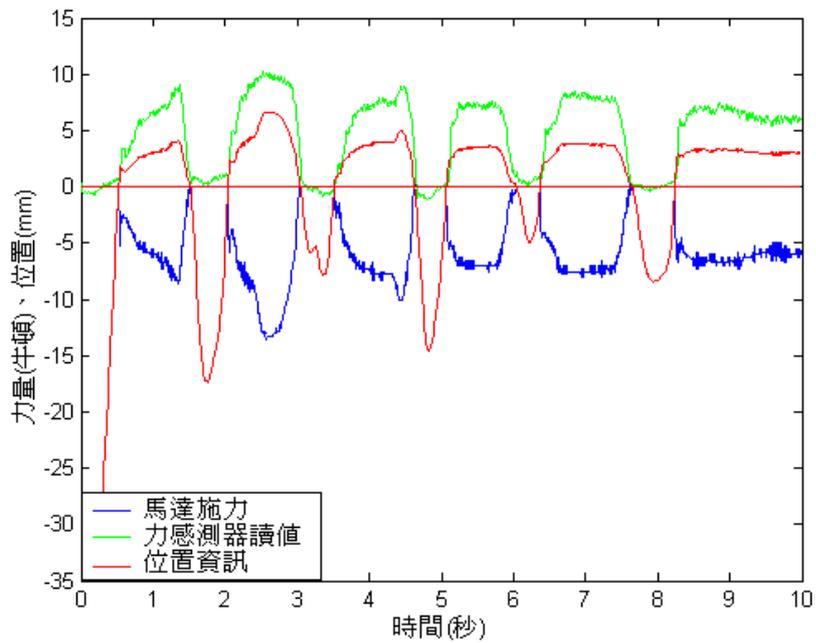
(b)  $K=1000 \text{ N/m}$  ,  $B=20 \text{ N}\cdot\text{sec/m}$

(c)  $K=2000 \text{ N/m}$  ,  $B=10 \text{ N}\cdot\text{sec/m}$

(d)  $K=2000 \text{ N/m}$  ,  $B=20 \text{ N}\cdot\text{sec/m}$



(c)  $K=2000 \text{ N/m}$  ,  $B=10 \text{ N}\cdot\text{sec/m}$



(d)  $K=2000 \text{ N/m}$  ,  $B=20 \text{ N}\cdot\text{sec/m}$

圖 5.2 牆面感受實驗(continued) : (a)  $K=1000 \text{ N/m}$  ,  $B=10 \text{ N}\cdot\text{sec/m}$

(b)  $K=1000 \text{ N/m}$  ,  $B=20 \text{ N}\cdot\text{sec/m}$

(c)  $K=2000 \text{ N/m}$  ,  $B=10 \text{ N}\cdot\text{sec/m}$

(d)  $K=2000 \text{ N/m}$  ,  $B=20 \text{ N}\cdot\text{sec/m}$

基本上，接觸虛擬牆面的瞬間可以描述為從小阻抗狀態至極大阻抗的轉變過程[8]，反之亦然。由圖 5.2 的結果中可發現搖桿有侵入虛擬牆內部的情形，這也是以阻抗元件來模擬牆面必然的現象。在圖 5.2(a)-(b)中由於搖桿移動單位為公釐(mm)，與牆面彈性係數  $K=1000 \text{ N/m}$  的乘積為牛頓(N)，此恰與馬達輸出力單位相同，所以圖中位置資訊（紅線部分）基本上會跟馬達施力呈現大小相等方向相反的情形；當彈性係數值更高時，則侵入現象較為緩和，如圖 5.2(c)-(d)所示，將更接近真實牆面，但高彈性係數卻容易造成系統不穩定現象，所以必須有一高黏滯係數來增加其穩定性，由參考資料[26]得知設定參數  $K=2000 \text{ N/m}$  ,  $B=20 \text{ N}\cdot\text{sec/m}$  可模擬較佳的牆面感覺。力感測器讀值（綠線部分）表示使用者施予力回饋搖桿的力，只要牆面模擬的夠真實，此曲線就會與馬達施力曲線（藍線部分）的大小越趨近，至於方向則為相反。



由於本系統馬達出力最大值約為 19N，而由相關文獻知道人手一般最大出力可達 66N 以上[33]，所以模擬牆面只能有警告限制的作用，並沒有完全限制運動的能力，若要做到能夠完全阻擋的虛擬牆面，必須使用能夠提供更大轉距的致動器，若人手施力持續超過馬達的最大出力，將造成馬達不正常工作而導致損壞，我們可經由軟體上的保護措施，讓馬達在將要輸出超過自己最大出力前事先給予使用者警訊，並維持出力在臨界值以內來預防此情形發生。

## 5.2 虛擬通道

通道的概念在於限制運動物體某方面的自由度，讓其在不受限制的區域內移動，在真實世界中常被應用於導引物體的移動方向上。我們利用此觀念，並配合前一節的實驗所模擬的虛擬牆操作感受，讓搖桿在虛擬環境中藉由兩面虛擬牆來模擬通過一個虛擬通道的感覺。

### 5.2.1 正向與非正向通道實驗

當我們以兩面互相平行的虛擬牆對力回饋搖桿的移動做限制，便形成一正向通道，根據(5.1)式，假設我們欲將搖桿操作在一平行 Y 軸座標的垂直通道上，可設定 X 軸馬達輸出力公式為：

$$F_m = -K\Delta x - B\frac{\Delta x}{\Delta t} \quad \text{當 } \Delta x > \frac{x_T}{2} \text{ 或 } \Delta x < -\frac{x_T}{2} \quad (5.2)$$

上式  $\Delta x$  為搖桿侵入牆面的距離， $\frac{\Delta x}{\Delta t}$  搖桿碰撞牆面瞬間時 X 方向的速度，而  $x_T$  代表模擬通道之寬度。若要模擬一個平行 X 軸座標的水平通道，則依照類似的方式可設定 Y 軸馬達輸出力公式：

$$F_m = -K\Delta y - B\frac{\Delta y}{\Delta t} \quad \text{當 } \Delta y > \frac{y_T}{2} \text{ 或 } \Delta y < -\frac{y_T}{2} \quad (5.3)$$

其中  $\Delta y$  為搖桿侵入牆面的距離， $\frac{\Delta y}{\Delta t}$  搖桿碰撞牆面瞬間時 Y 方向的速度，而  $y_T$  代表模擬通道之寬度，圖 5.3 顯示正向通道的模擬示意圖。

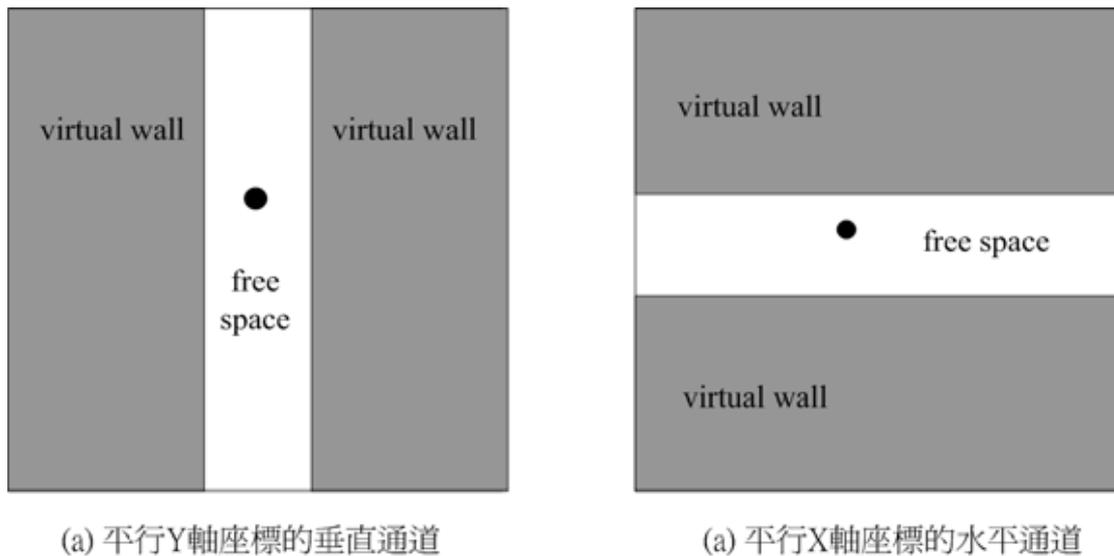
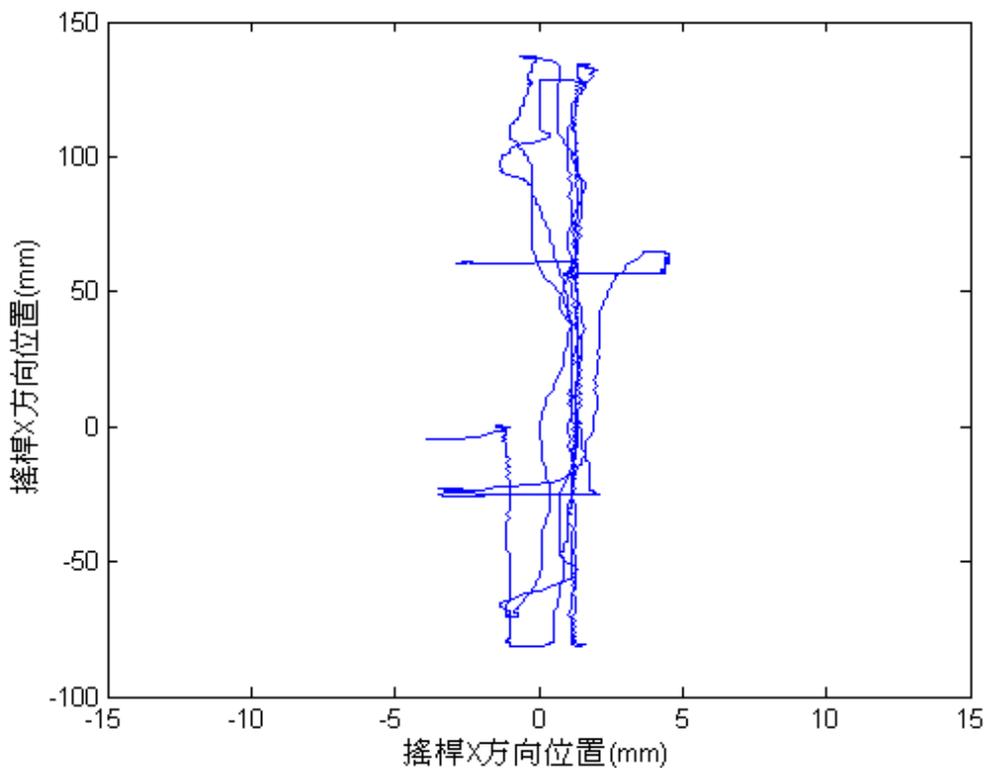


圖 5.3 正向通道模擬示意圖：(a) 平行 Y 軸座標的垂直通道

(b) 平行 X 軸座標的水平通道

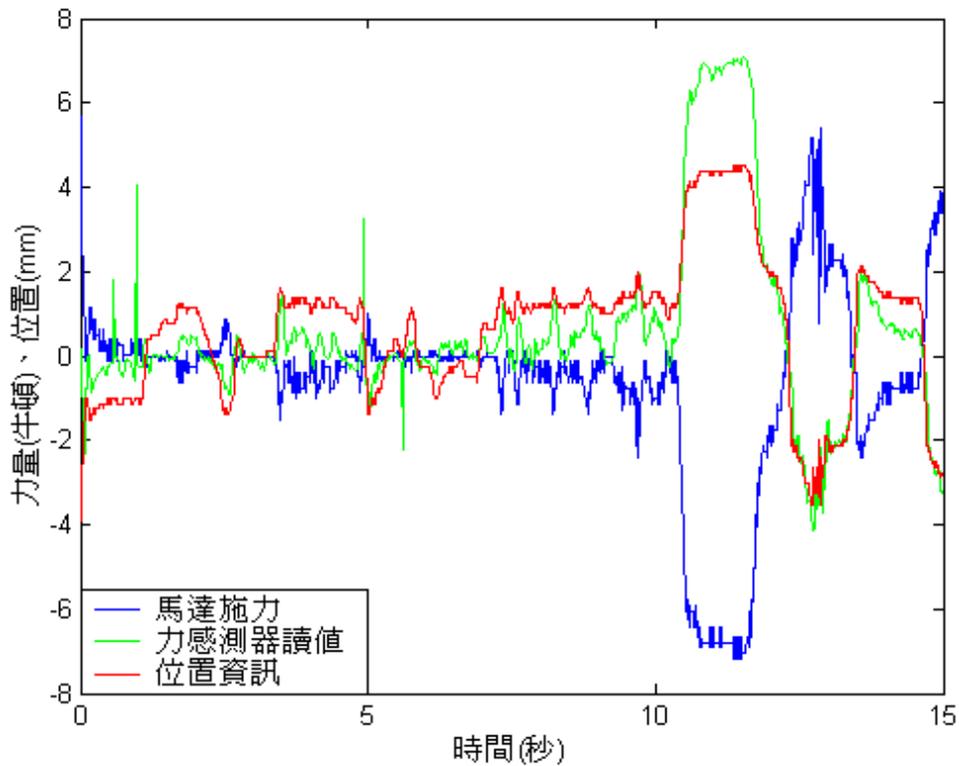
圖 5.4 記錄了使用者操作搖桿在垂直通道中的運動軌跡和力感操作，我們設定了參數  $K=2000 \text{ N/m}$  ,  $B=10 \text{ N}\cdot\text{sec/m}$  帶入模擬系統，由圖 5.4(a)可看出搖桿大致上在垂直方向運動，但由於彈簧模擬壓縮的影響，實際的通道寬度比設定的通道寬度還要大；圖 5.4(b)中時間由 0 至 10 秒時因使用者盡量將搖桿操作在垂直通道上，故馬達的施力很小，幾乎維持在 1 牛頓以下，而在 10 至 15 秒這段期間，使用者刻意將搖桿推向通道限制的方向，由圖中可發現馬達施力瞬間大幅提高以阻擋搖桿行進方向，使搖桿依然限制在 Y 軸方向運動。



(a) 搖桿移動軌跡 (通道寬度  $x_T=2\text{mm}$ )

圖 5.4 垂直通道實驗：(a) 搖桿移動軌跡

(b) 搖桿位置與受力變化情形

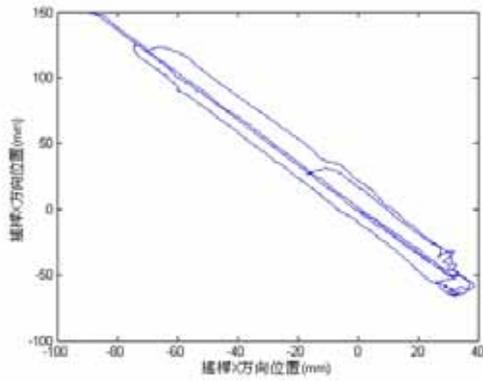


(b)  $K=2000 \text{ N/m}$ ,  $B=10 \text{ N}\cdot\text{sec/m}$

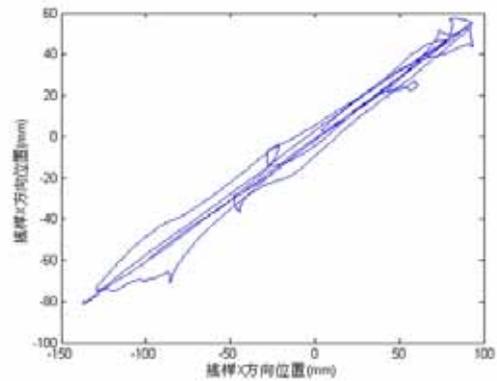
圖 5.4 垂直通道實驗(continued)：(a) 搖桿移動軌跡

(b) 搖桿位置與受力變化情形

若要模擬一個非正向的虛擬通道，只要利用 3.2.2 節所討論的非正向阻抗物件的座標轉換，就可以模擬斜向的通道運動。我們設定兩組模擬參數分別為 (a)  $\theta=120^\circ$ ,  $K=1500 \text{ N/m}$ ,  $B=10 \text{ N}\cdot\text{sec/m}$  以及 (b)  $\theta=30^\circ$ ,  $K=1500 \text{ N/m}$ ,  $B=10 \text{ N}\cdot\text{sec/m}$ ，而通道寬度均為 10mm，圖 5.5 為其實驗結果。由圖 5.5(a)和圖 5.5(b)我們可看出搖桿運動軌跡就如同在一個  $\theta=120^\circ$  和  $\theta=30^\circ$  的通道移動，其他方向則受到限制，至於通道寬度比設定的大可能是因為搖桿有侵入牆面的情形。



(a)  $\theta=120^\circ$ ,  $K=1500 \text{ N/m}$ ,  $B=10 \text{ N}\cdot\text{sec/m}$



(b)  $\theta=30^\circ$ ,  $K=1500 \text{ N/m}$ ,  $B=10 \text{ N}\cdot\text{sec/m}$

圖 5.5 斜向通道實驗：(a)  $\theta=120^\circ$ ,  $K=1500 \text{ N/m}$ ,  $B=10 \text{ N}\cdot\text{sec/m}$

(b)  $\theta=30^\circ$ ,  $K=1500 \text{ N/m}$ ,  $B=10 \text{ N}\cdot\text{sec/m}$

## 5.2.2 環形、橢圓形通道實驗



要模擬環形通道的操作感受，我們必須利用一面內圓虛擬牆和外圓虛擬牆的結合方能達到，其示意圖如圖 5.6。假設內圓牆的半徑為  $r_1$ 、外圓牆的半徑為  $r_2$ ，欲模擬的環形通道中心半徑為  $r_c$ ，通道寬度為  $r_T$ ，則  $r_1 = r_c - r_T$ ， $r_2 = r_c + r_T$ 。

為了判斷搖桿何時進入外圓牆或是內圓牆，必須將搖桿位置資訊由卡式座標轉換為極座標，即  $r_0 = \sqrt{x_0^2 + y_0^2}$ ，其中  $(x_0, y_0)$  為目前所在搖桿位置， $r_0$  為以搖桿目前位置作為假想圓的半徑，當  $r_0 < r_1$  時碰觸到內圓牆，我們可設定馬達輸出力為：

$$F_x = (r_1 - r_0) \frac{x_0}{r_0} \times K - V_x \times B \quad (5.4)$$

$$F_y = (r_1 - r_0) \frac{y_0}{r_0} \times K - V_y \times B$$

其中  $V_x, V_y$  為搖桿碰觸牆面時的 X 方向和 Y 方向速度。當  $r_0 > r_2$  時則代表接觸到外圓牆，同樣地我們可設定馬達輸出力為：

$$F_x = (r_0 - r_2) \frac{-x_0}{r_0} \times K - V_x \times B \quad (5.5)$$

$$F_y = (r_0 - r_2) \frac{-y_0}{r_0} \times K - V_y \times B$$

實驗結果如圖 5.7 所示，圖 5.7(a) 顯示一個  $r_1 = 63mm$  的內圓虛擬牆和  $r_2 = 67mm$  的外圓虛擬牆包圍著的環形通道，其通道寬度較窄，故搖桿軌跡比較能緊密地貼著牆面；而 5.7(b) 之環形通道寬由  $r_1 = 75mm$  和  $r_2 = 85mm$  之圓形虛擬牆形成，通道較前者寬，故搖桿軌跡較明顯的通道產生。

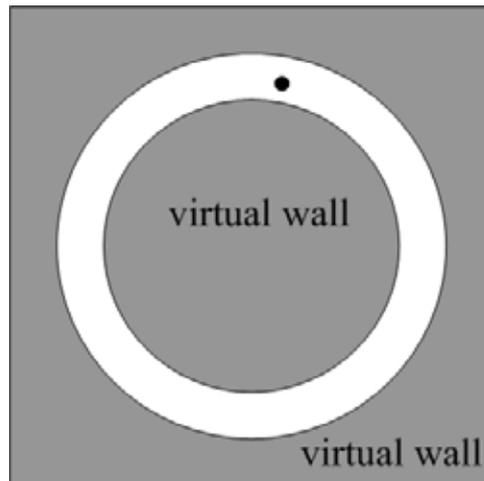
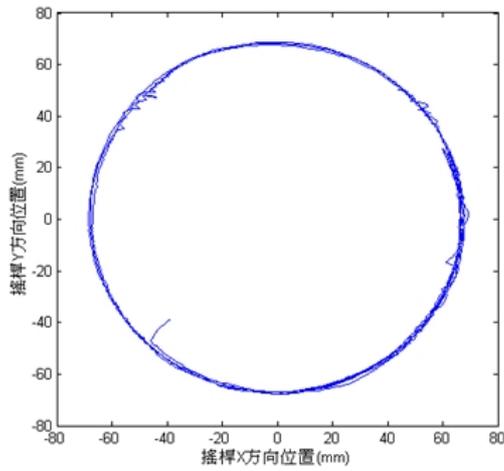
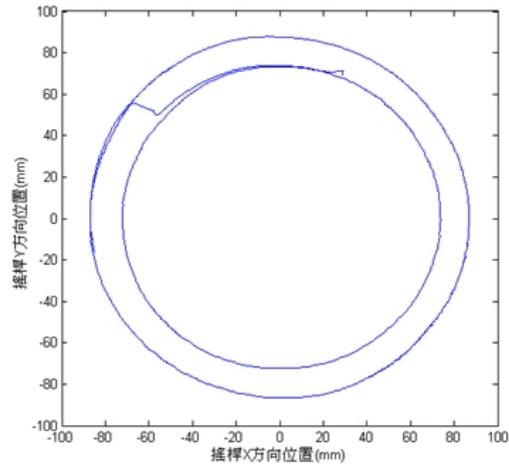


圖 5.6 環形通道模擬示意圖



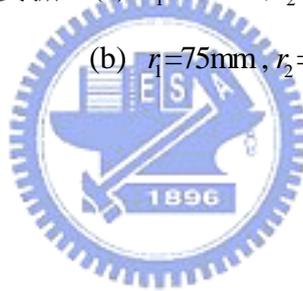
(a)  $r_1=63\text{mm}$ ,  $r_2=67\text{mm}$ ,  $r_T=4\text{mm}$   
 $K=1500\text{ N/m}$ ,  $B=10\text{ N}\cdot\text{sec/m}$



(b)  $r_1=75\text{mm}$ ,  $r_2=85\text{mm}$ ,  $r_T=10\text{mm}$   
 $K=1500\text{ N/m}$ ,  $B=10\text{ N}\cdot\text{sec/m}$

圖 5.7 環形通道實驗：(a)  $r_1=63\text{mm}$ ,  $r_2=67\text{mm}$ ,  $r_T=4\text{mm}$

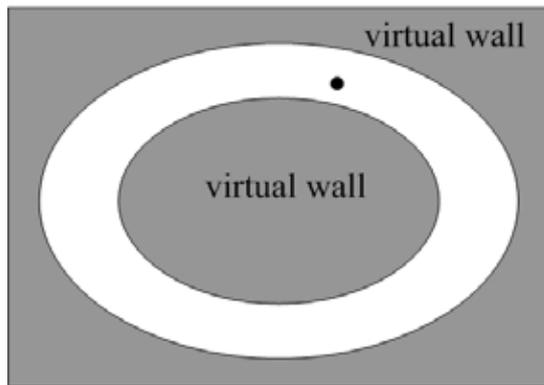
(b)  $r_1=75\text{mm}$ ,  $r_2=85\text{mm}$ ,  $r_T=10\text{mm}$



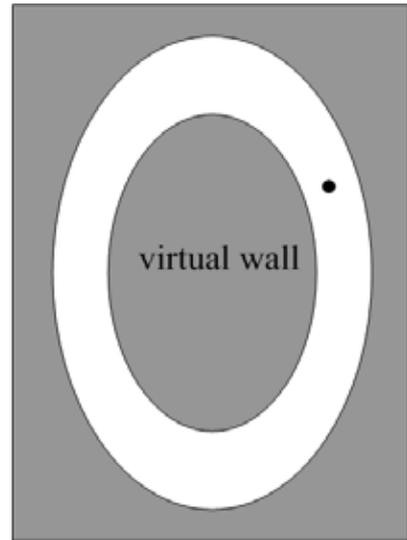
而要模擬橢圓形通道操作感受會比環形通道來的複雜一些，原因是因為一個橢圓擁有長軸和短軸兩部分，但基本觀念是一樣的，圖 5.8 顯示橢圓形通道模擬示意圖。根據橢圓公式  $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$  或  $b^2x^2 + a^2y^2 = a^2b^2$ ，假設搖桿  $(x_0, y_0)$  為目前搖桿所在位置，內橢圓牆參數為  $a_1, b_1$ ，外橢圓牆參數為  $a_2, b_2$ ，那麼我們可以分別為內外橢圓牆設計一個虛擬的半徑：

$$r_1 = b_1^2x^2 + a_1^2y^2, \quad r_2 = b_2^2x^2 + a_2^2y^2 \quad (5.6)$$

當  $r_0 = b_1^2x_0^2 + a_1^2y_0^2 < r_1$  時，代表搖桿碰觸到內橢圓牆，而當  $r_0 = b_2^2x_0^2 + a_2^2y_0^2 > r_2$  則代表碰觸到外橢圓牆，只要給予正確的力量回饋，就可以模擬橢圓形通道。

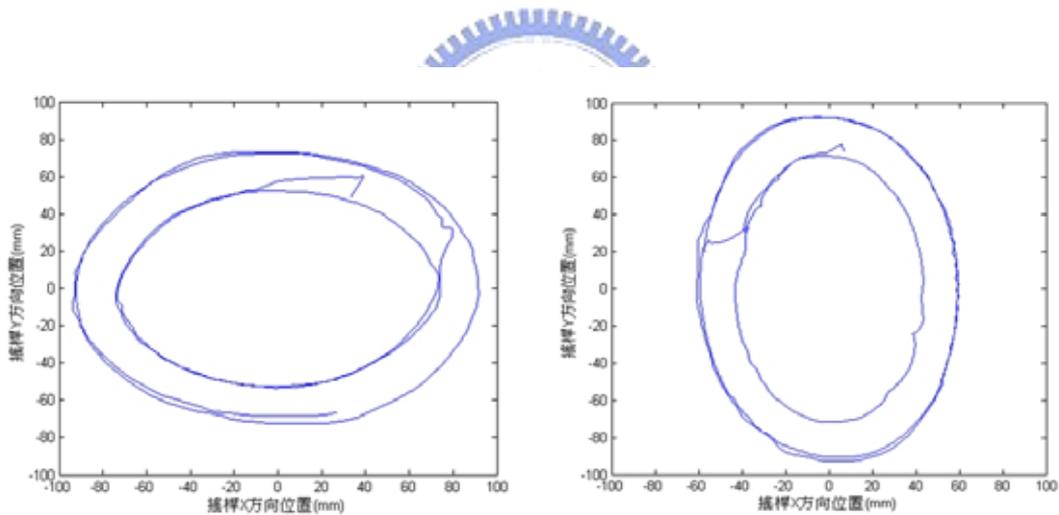


(a) 扁橢圓



(b) 長橢圓

圖 5.8 橢圓形通道模擬示意圖：(a) 扁橢圓模擬示意圖 (b) 長橢圓模擬示意圖



(a) 扁橢圓通道軌跡

(b) 長橢圓通道軌跡

圖 5.9 橢圓形通道實驗：(a)

扁橢圓通道軌跡( $r_T=10\text{mm}$ )

$$a_1=85\text{mm}, b_1=65\text{mm}$$

$$a_2=75\text{mm}, b_2=55\text{mm}$$

長橢圓通道軌跡( $r_T=10\text{mm}$ )

(b)

$$a_1=55\text{mm}, b_1=85\text{mm}$$

$$a_2=45\text{mm}, b_2=75\text{mm}$$

圖 5.9 為橢圓形通道實驗結果，圖 5.9(a)為一扁橢圓通道實驗的搖桿運動軌跡，而圖 5.9(b)則為一長橢圓搖桿運動軌跡，兩者通道寬度均為 10mm，我們讓使用者操控搖桿在內外橢圓形牆面移動，由圖中可看出搖桿正確地在橢圓形通道內移動。

### 5.2.3 複合式通道

有了以上各種型態的通道之後，我們可以嘗試利用這些基本通道，透過各種運動限制規劃，組合出一個較為複雜且變化的通道，就像是拼積木一樣，只要手邊的基本模組越多，能拼湊出來的圖樣能力也越強。圖 5.10 為我們結合水平通道、垂直通道、以及一個環形通道的模擬示意，而實際實驗結果如圖 5.11 所示。

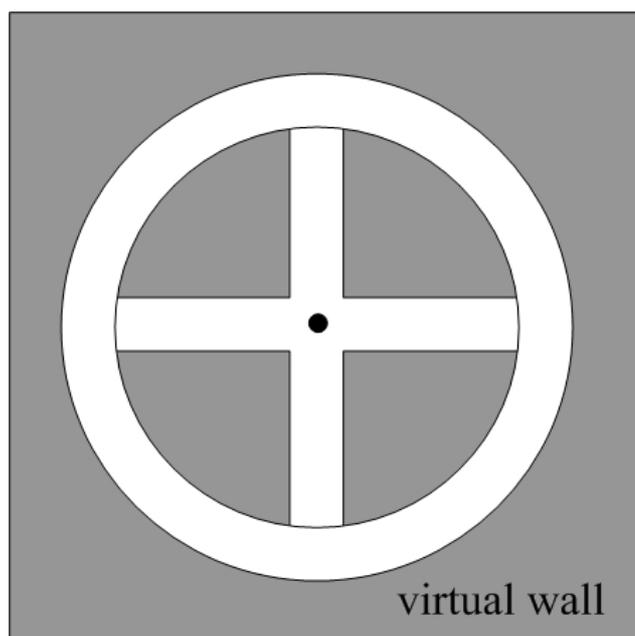


圖 5.10 複合式通道模擬示意圖

由圖 5.11 可看出搖桿軌跡在我們所設計的複合式通道內，透過區域狀態轉變的切換方式，使用者能任意地操作搖桿環形通道、垂直通道、以及水平通道中移動。

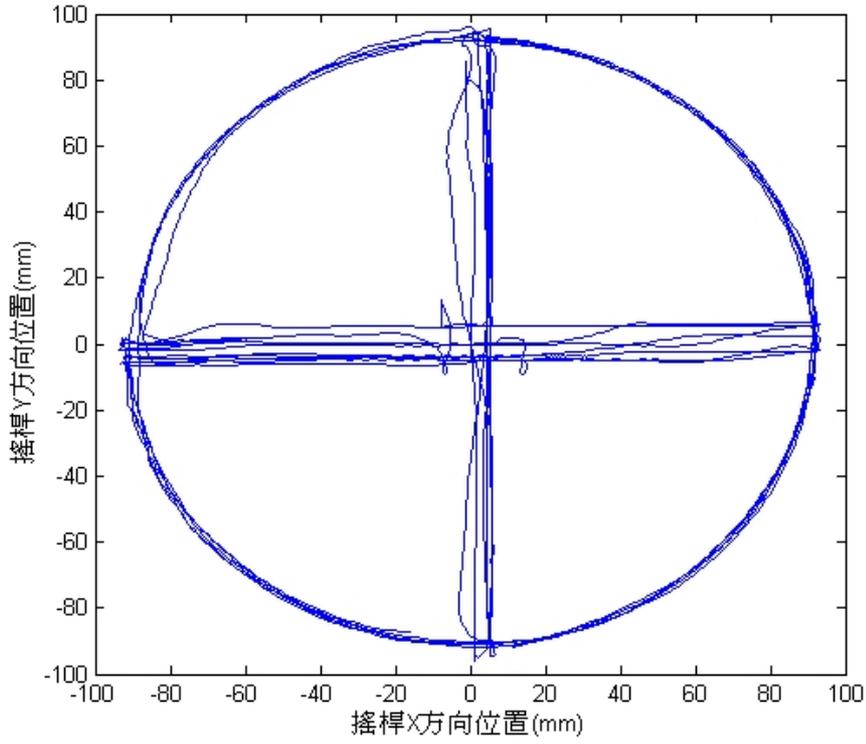


圖 5.11 複合式通道實驗搖桿軌跡( $r_1=80\text{mm}$  ,  $r_2=90\text{mm}$  ,  $r_1=10\text{mm}$ )

### 5.3 動態虛擬阻抗

前一節我們設計了各式的通道，並以其為基礎組合出更多變化的通道，雖然模擬通道時需特別注意牆面的穩定性，以防止力回饋搖桿在兩通道壁間來回震動，但是由於使用者操作搖桿在虛擬通道內移動時操作方向和速度都會受到限制，不如處於自由空間般快速移動，因此能量散失相對減少，反而會比單純地模擬虛擬牆達到更好的效能。

虛擬通道利用其特性讓搖桿遵循某固定方向移動，損失了一部份自由度，但相對卻增強虛擬牆的呈現效能，因此適合應用於虛擬機器(virtual mechanism)方面[7,16,19]，然而，爲了要使此虛擬操控器系統能夠具備更完善的模擬效果，除了虛擬通道的各種移動規劃外，還必須加上在虛擬通道內的動態阻抗特性，例如使用一個環形通道，在其通道內部加上一黏滯阻尼，然後根據搖桿的移動方向或是角度變動性的增加或減少阻尼係數的值，這樣的操作感覺就好像在攪動一個越來越黏稠的泥狀物體，如圖 5.12 即爲模擬此一情形，圖 5.12(a)顯示搖桿操作軌跡，而 5.12(b)爲搖桿運行的角度變化和阻尼相對應的變化，在時間爲 0 至 17 秒時，搖桿移動的角度不斷增加，角速度爲正，圖中角度已經被正規化爲 0 至  $2\pi$ ，此結果表示使用者操作搖桿以逆時針的方向運動，而阻尼係數亦隨著角度的增加以趨近線性方式遞增，而 17 至 30 秒時使用者操作搖桿以順時針方向運動，造成阻尼係數開始遞減，圖 5.12(c)和 5.12(d)分別顯示搖桿在環形通道內部所受到的 X 方向和 Y 方向力量，明顯地看到在 0 至 17 秒內因爲阻尼的增加，所以通道內部的黏滯阻力(紅線部分)亦不斷地增加，使用者操作搖桿時會有越來越難移動的黏滯感，而在 17 至 30 秒時因爲阻尼係數慢慢釋放，故這種黏滯力感也漸漸消失。

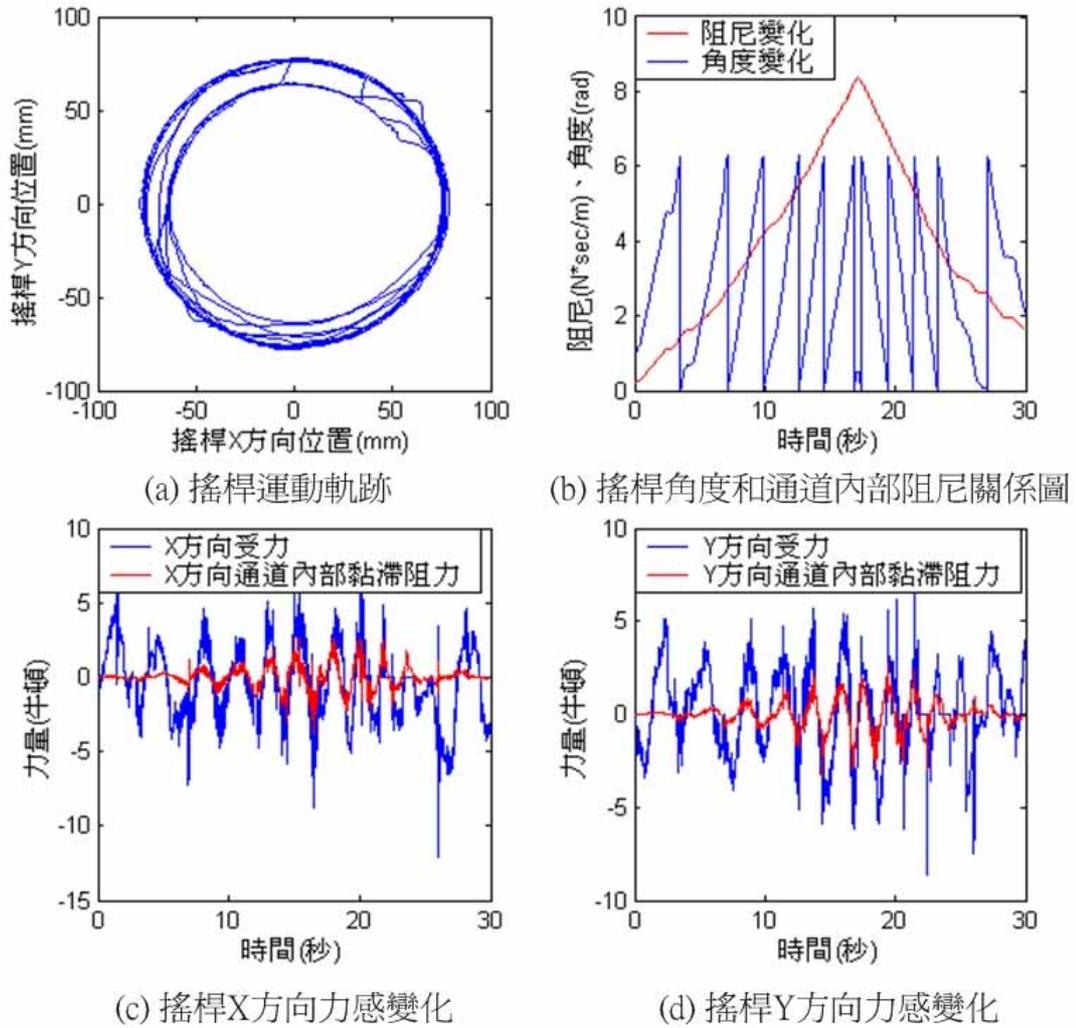


圖 5.12 環形通道內部變化阻尼實驗：(a) 搖桿運動軌跡

(b) 搖桿角度和通道內部阻尼關係圖

(c) 搖桿 X 方向力感變化

(d) 搖桿 Y 方向力感變化

## 5.4 扳手操作模擬應用實例

在本節中，我們利用之前所設計的虛擬操控器系統，實際模擬真實世界中使用扳手的操作感受以驗證此虛擬操控器之可行性，在模擬之前，我們必須先要瞭解所要模擬的工作環境和工作空間，並且針對要模擬的對象進行感覺規劃與區域安排。

當我們使用扳手進行鎖緊六角螺絲的任務時，首先要有能固定螺絲的模具，圖 5.13 所示之螺絲模具組即扮演這樣一個角色，為了規劃扳手扳動時的操作空間以及力量感受以作為模擬時的依據，我們實際操作扳手從螺絲模具上方執行鎖緊螺絲的工作，圖 5.14 顯示使用者扳動時的四種狀態，分別為，由於使用的扳手是可以根據操作環境的需要任意改變其操作方式，不同於以往常見的扳手只能在螺絲的正上方操作，故可適用於複雜的工作環境，要模擬這樣的扳手，虛擬操控器系統本身也需有相同的操作空間和適合的控制策略。根據圖 5.14(a)-(c)發現扳手其實操作在一個左半圓弧形的虛擬空間，開始扳動的起使位置一般常會是從圖 5.14(a)至圖 5.14(c)完成一個扳動週期，故我們可以利用半個環形通道與一個垂直通道的結合，模擬出此工作空間。

然而，純粹的虛擬通道完成的路徑規劃只能給使用者一個相同的操作空間，卻無法得到操作時的力感，所以還必須再加上其他的參數條件，由於黏滯阻力與摩擦力均是提供一個與物體運動速度相反的力，而模擬扳手在扳動螺絲的過程中，螺絲與螺紋密合的過程中亦包含摩擦力，且由於不斷增加的正向力會使得摩擦力越來越大，故我們可以在所構築的操作扳手的虛擬空間中加入一個正比於扳手扳動距離的黏滯阻力。



(a)



(b)

圖 5.13 螺絲模具組：(a) 正面外觀 (b) 側面外觀



(a) 起使位置



(b) 扳動90度



(c) 扳動180度



(d) 扳動270度

圖 5.14 扳手工作方式示意圖：(a) 起始位置 (b) 扳動 90 度  
(c) 扳動 180 度 (d) 扳動 270 度

根據以上規劃，我們進行相對應的模擬實驗，圖 5.15 為一個左半圓弧形工作空間的扳手模擬示意圖，灰色平面部分代表虛擬牆，其參數設定為  $K=1500 \text{ N/m}$  ,  $B=10 \text{ N}\cdot\text{sec/m}$  ，中央白色長條型方塊為一個無阻力的垂直通道，而左方半個藍色的環形通道內部設有會依據扳手扳動距離而線性增加的黏滯阻力係數；而圖 5.16 為其實驗結果，圖 5.16(a)為力回饋搖桿運動軌跡；圖 5.16(b)為依時間變化的搖桿角度和逐漸遞增的通道阻尼係數，由圖中可看出通道阻尼係數初始值為  $2 \text{ N}\cdot\text{sec/m}$  ，而當角度變化量為正，也就是搖桿逆時針方向在環形通道內移動時，通道內部黏滯阻力係數也會跟著增加，造成扳動搖桿所受到的黏滯力感增加，如同螺絲與螺紋咬合度越密的效果，此外我們也做了一個設定，就是當搖桿以順時針在環形通道中移動時，將會讓原先漸增的黏滯阻力慢慢釋放，就好像操作扳手再度讓螺絲鬆開一樣；圖 5.16(c)與圖 5.16(d)顯示搖桿整體受到的力回饋與在通道內所受到的黏滯阻力，由紅線部分我們可發現黏滯阻力隨時間增加慢慢變大，而在時間約為 27 秒時搖桿在 Y 軸方向突然有一個很大的馬達施力（藍線部分），此為模擬扳手扳動的距離已經足夠讓螺絲完全咬合，因此我們應用 3.4 節提及的動態阻抗概念，在達到此一標準的瞬間提供一個回饋力極大的虛擬牆來阻擋使用者繼續扳動。另外，根據圖 5.14(b)至 5.14(d)可以規劃出另外一種扳手工作空間，亦即以環形通道的下半部和一個水平通道的結合實現，如圖 5.17 所示，依照相同參數設定，實驗結果示於圖 5.18，除了工作空間與圖 5.16 不同外，其餘均類似。

由於我們作為模擬對象的扳手本身也具有其韌性，可以藉由彎曲其施力臂達到以不同角度和方位施力的操作方式，如圖 5.19 所示。我們提出的因應策略為設定不同的環形通道半徑來模擬此一變化的工作空間，如圖 5.19(a)表示一個較小的扳手施力角度，而 5.19 (c)相對施力角度較大，至於 5.19(d)則顯示使用扳手在模具組的側向工作情形，此模擬方式較為單純，可利用一個垂直通道配合上述通道內變化黏滯阻力來達成這樣的感受。

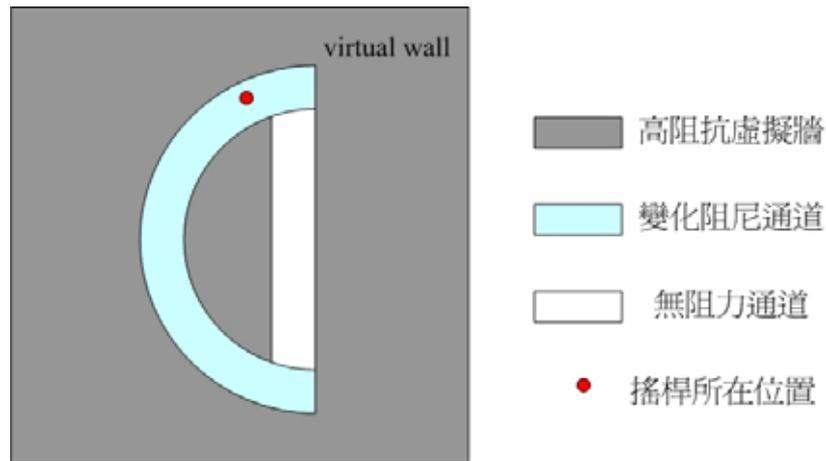


圖 5.15 左半圓弧形扳手模擬示意圖

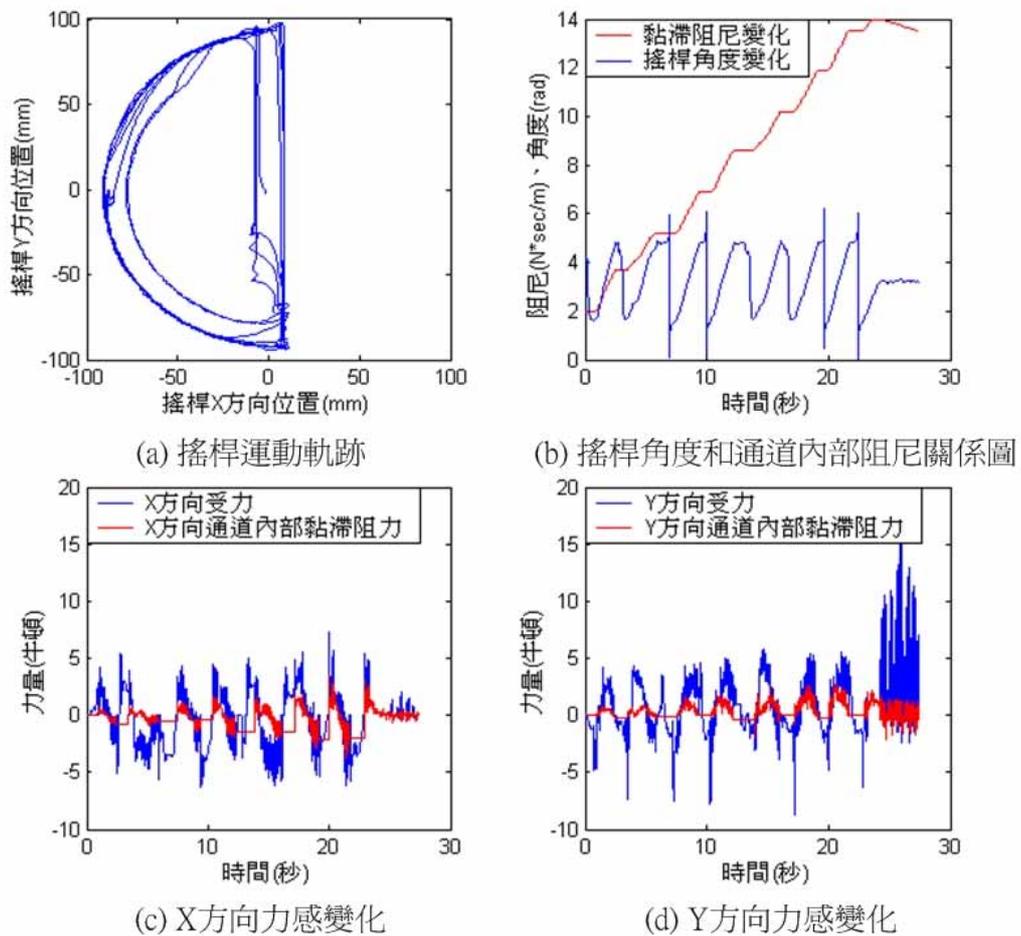


圖 5.16 左半圓弧形扳手實驗：(a) 搖桿運動軌跡

(b) 搖桿角度和通道內部阻尼關係圖

(c) 搖桿 X 方向力感變化

(d) 搖桿 Y 方向力感變化

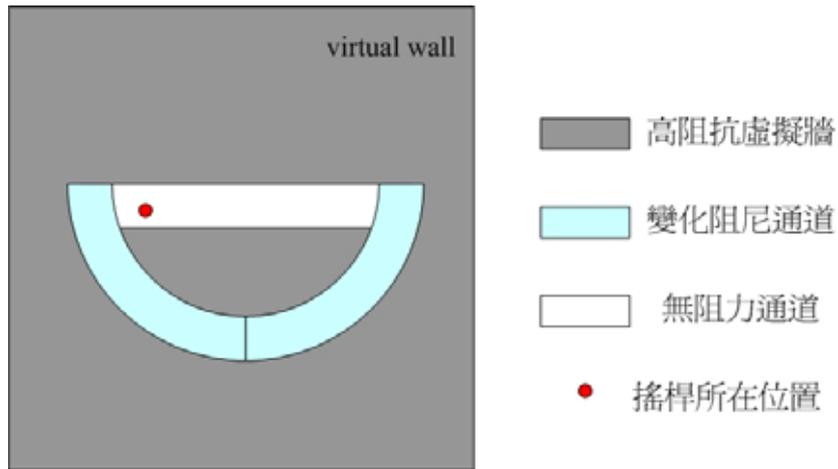


圖 5.17 下半圓弧形扳手模擬示意圖

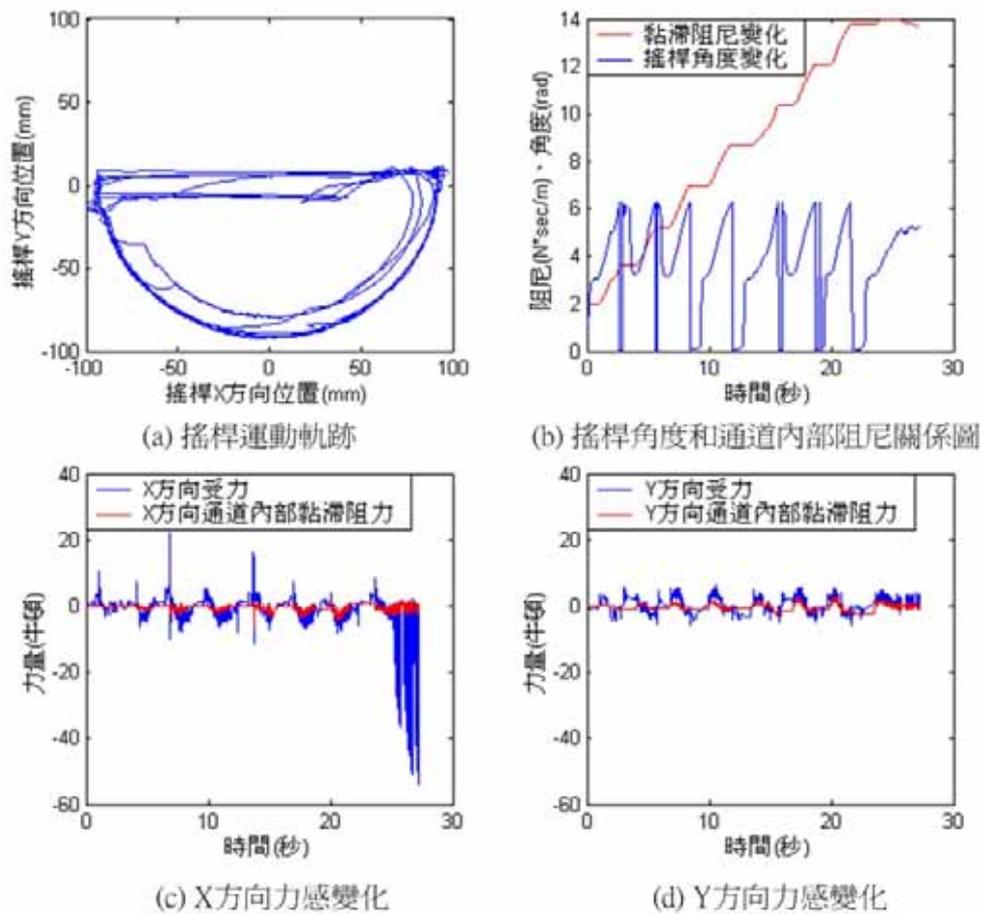


圖 5.18 下半圓弧形扳手實驗：(a) 搖桿運動軌跡

(b) 搖桿角度和通道內部阻尼關係圖

(c) 搖桿 X 方向力感變化

(d) 搖桿 Y 方向力感變化



(a) 施力角度小



(b) 施力角度中



(c) 施力角度大



(d) 扳工作於模具側面

圖 5.19 不同施力角度之扳手示意：(a) 施力角度較小  
(b) 施力角度中等  
(c) 施力角度較大  
(d) 扳工作於模具側面

最後，我們利用 3.4.2 節所提出的觀念，將圖 5.16 與圖 5.18 所模擬的工作環境以動態的方式結合，結合出來的軌跡會類似圖 5.11 顯示的複合式通道，但不同的是在圖 5.11 中複合式通道在程式執行一開始就已被規劃好，而這裡所採用的方式為兩組虛擬通道不會同時存在，假設一開始通道預設初值是以左半圓弧形的方式起始，必須達成一些內在或外部的工作，在特定的時間、位置，因運動限制的改變，通道會轉換為下半圓弧形的虛擬通道，而之前的通道將會消失不存在，利用此種方式，我們可以將許許多多不同的扳動螺絲任務結合在程式一次執行之中，而動態通道出現的情形就相當於從一項任務結束而換至另外一項新的工作的過程。

圖 5.20 為動態工作空間模擬示意圖，至於實驗結果如圖 5.21 所示，圖 5.21(a)為搖桿運動軌跡，其形狀大致上為兩種不同通道的結合；圖 5.21(b)顯示了搖桿總位移和搖桿目前 X-Y 位置狀況，由於我們設定初始狀態為左半圓弧形通道，且搖桿在通道內移動超過 1200mm 就會轉變至另外一個通道，所以由圖中可發現初期搖桿 X 方向位移（紅線部分）僅能在 0 至-90mm 方向變化，亦即我們設定通道最外側的位置，而 Y 方向位移（藍線部分）則能有-90mm 至 90mm 較寬廣的位移，表示程式執行初期搖桿確實受限在左半平面，當總位移超過 1200mm 時發現 X 與 Y 方向位移變化剛好交替轉變，由此可推斷另一個通道在此時產生；圖 5.21(c)顯示搖桿的角度與通道內部阻尼係數的變化情形，圖中發現黏滯阻尼係數每經過一段時間會被重置為 2 N•sec/m，對應於圖 5.21(b)我們得知此時搖桿總位移剛好為 1200mm 的整數倍；而 5.21(d)顯示搖桿在通道內部的力感變化，黏滯阻力較大則代表使用者操控搖桿速度較快。

由以上的實驗結果顯示我們成功的將此虛擬操控器系統應用於扳手模擬上，假若更換所要模擬的對象，只要依照同樣的步驟詳細規劃，便可以靈活運用此系統模擬各種工具。

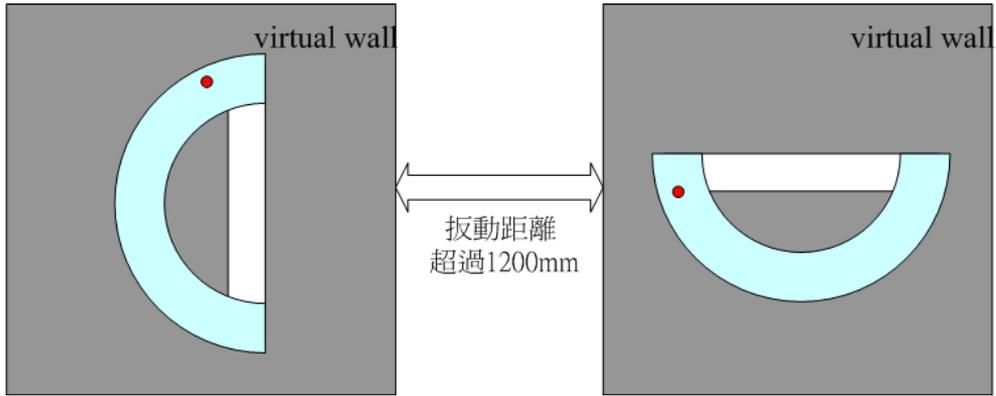


圖 5.20 動態扳手模擬示意圖

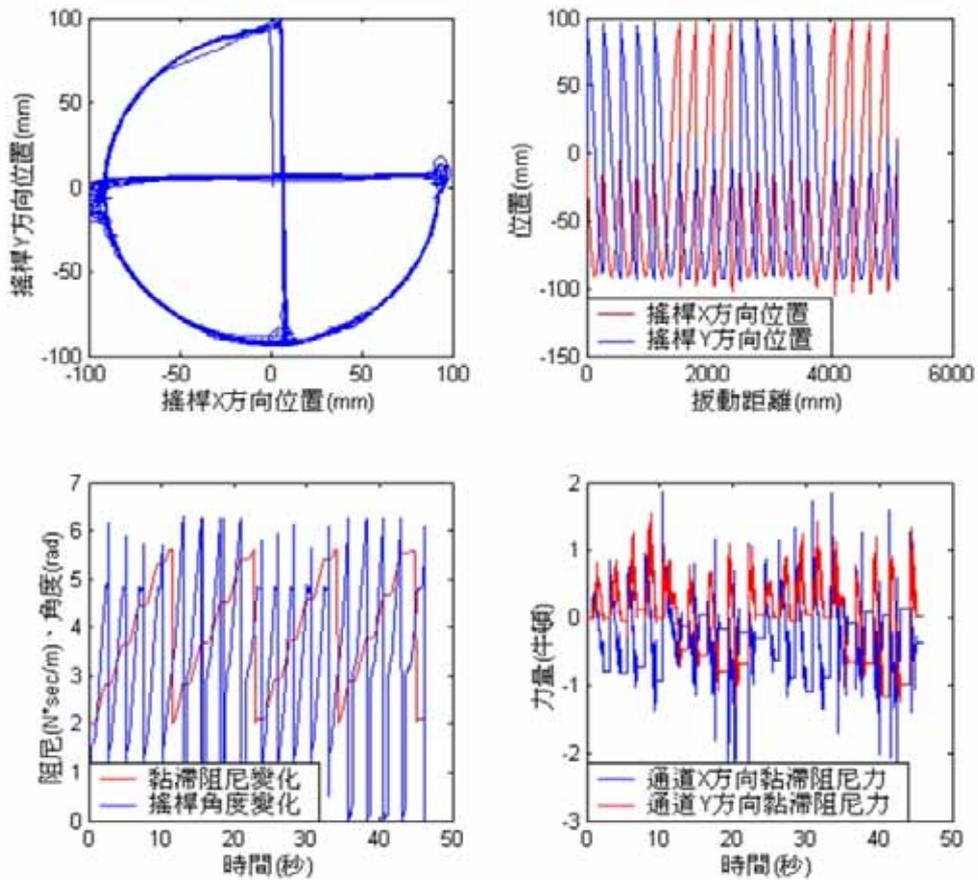


圖 5.21 動態扳手實驗：(a) 搖桿運動軌跡

(b) 搖桿總位移與 X-Y 位置關係

(c) 搖桿角度和通道內部阻尼關係圖

(d) 通道內力感變化

# 第六章

## 結論

在本論文裡，我們首先提出了一套可實現各式操作感受的多功能虛擬操控器系統，根據阻抗控制理論推導出自然界中慣性質量、黏滯係數、和彈性係數三種基本性質的模擬法則。接著將此系統分成軟體和硬體兩方面來探討，在軟體策略方面，應用基本模擬法則，實現了極端阻抗元件的表現，如虛擬牆和虛擬通道等，並且成功的將此概念延伸，推演出正向虛擬牆、非正向虛擬牆、內外圓形虛擬牆、斜向虛擬通道、以及環形虛擬通道等；在硬體系統方面，由裝置介面卡的規格推導出與模擬系統溝通的各種轉換參數，並對此硬體系統進行系統鑑別，獲得系統參數，也對裝置於力回饋搖桿上的力感測器進行校正實驗。

而由實驗模擬結果可看出此一套模擬法則在硬體系統的搭配下，對於模擬正向、非正向牆面，斜向、以及環形通道等都有不錯的力感效果。而在虛擬操控器的應用實例上，選擇模擬以扳手扳動螺絲的工作，我們藉由組合各種虛擬通道來規劃工作空間，並配合在通道內的動態虛擬阻抗特性，成功地模擬出一套虛擬扳手系統。對於模擬其他的工作任務或是機器操控，只要透過一系列的區域規劃，並將所要的模擬感受藉由此系統呈現出來，便能透過這套多功能虛擬操控器實現。

## 6.1 未來工作

在硬體方面，由於馬達的最大輸出力僅為 19 牛頓，不到人手正常施力的 1/3，所以對於實際的模擬感覺僅能提供警示效果卻無法真正完全阻擋人手的施力，例如會有穿過虛擬牆面的問題，大大的抑制此多功能虛擬操控器的應用層面，要改善此問題，可以更新能提供更大轉距的致動器；另外，由於安裝在搖桿上的力感測器會影響搖桿實際的工作空間，可以重新設計機構外殼，讓此因素的影響壓至最低。

在軟體方面，由於馬達控制卡的取樣頻率可達 1MHz，相對於此，一般個人電腦處理每筆訊號的頻率就顯得略為不足，快速且正確的取樣資料是數位系統中最重要的課題之一，不但可以增加其穩定性，也可以提高模擬感受的範圍，故將來可以藉由更新更高運算能力的電腦系統，或考慮採用類似工作站使用多部電腦連線以增強運算能力，使得虛擬操控器能模擬的範圍更廣。

在扳手模擬方面，藉由各種不同形狀的通道結合，規劃出扳手的工作空間，也透過動態變化黏滯阻尼係數讓模擬扳手扳動時卡緊螺絲的感覺，與扳手實際工作時的感受相當逼近。然而，由於馬達的最大輸出力的不足，故在最後一段模擬螺絲與螺紋完全咬合時，無法完全阻擋人手的施力，造成模擬上不逼近真實情況，關於這點可以藉由硬體的提升來改善；另外，利用增加黏滯阻力的力感來表示扳手扳動時阻力漸增的感覺雖然與真實感受相當接近，但由於不同的扳手與螺絲可能因材質的不同而使得兩者接觸的摩擦力也不同，若是能在模擬時依照不同材質的螺絲增設一個摩擦力補償的參數，將可使模擬更趨於真實。

本實驗室已經成功使用此虛擬操控器系統模擬出排檔器、扳手工作等操作感受，未來可藉由我們所開發的各項虛擬通道作為組合工具，思考更多的應用層面，例如模擬寫字教學或是建構具有力回饋感受的遊戲場景等；另外，可以為此系統增設使用者圖形介面（Graphical User Interface），讓使用者能透過圖形視覺的引導，自由選擇所要組合之虛擬牆或虛擬通道的樣式和大小，並可設定通道內部所要模擬的操作感受，當設定程序完成後，此模擬系統就能根據上述條件結合出對應於使用者設定的操作環境，也將使得這套系統的操作方式變的更方便、更具人性化；最後，若能透過虛擬場景的視覺回饋、環場音效的聽覺回饋，加上力感測器與位置編碼器互相配合來模擬需要更精密的力覺感受，將能更有效地提升虛擬實境擬真感。



## 參考文獻

- [1] C. An, and J. Hollerbach, "Dynamic stability issues in force control of manipulators", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol 4, pp. 890-896, 1987.
- [2] G. C. Burdea, *Force and Touch Feedback for Virtual Reality*, John Wiley and Sons, 1996.
- [3] G. C. Burdea, "Invited review: the synergy between virtual reality and robotics", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 15, no. 3, pp. 400-410, 1999.
- [4] G. C. Burdea and P. Coiffet, *Virtual Reality Technology*, John Wiley and Sons, 1994.
- [5] P. Buttolo, D. Kung, and B. Hanaford, "Manipulation in real, virtual and remote environments", *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, pp. 4656-4661, 1995.
- [6] C. P. Chu, T. H. Dani, and R. Gadh, "Multimodal interface for a virtual reality based computer aided designed system", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1329-1334, 1997.
- [7] C. L. Clover, G. R. Luecke, J. J. Troy, and W. A. McNeely, "Dynamic simulation of virtual mechanisms with haptic feedback using industrial robotics equipment," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 724-730, 1997.
- [8] J.E Colgate, P.E.Graing, M.C. Stanley, and G. Schenkel," Implementation of stiff virtual walls in force-reflecting interfaces", *Virtual Reality Annual International Symposium*, pp. 202-208, 1993.
- [9] J.E. Colgate, and G. Schenkel, "Passivity of a Class of Sampled-Data Systems: Application to Haptic Interfaces", *American Control Conference*, Vol 3, pp. 3236-3240, 1994.
- [10] A. Frisoli, C.A. Avizzano, and M. Bergamasco, "Simulation of a manual

- gearshift with a 2-DOF force-feedback joystick“, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol 2, pp. 1364-1369, 2001.
- [11] M. Hernando, E. Gambao, E. Pinto, and A. Barrientos, “Collision control in teleoperation by virtual force reflection: an application to the ROBTET system”, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 565-570, 1999.
- [12] N. Hogan, “Stable Execution of Contact Tasks Using Impedance Control “, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1074-1054, 1987.
- [13] N. Hogan, “Controlling impedance at the man/machine interface“, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 3, pp.1626-1631, 1989.
- [14] S. G. Hong, J. J. Lee, and S. Kim, “Generating artificial force for feedback control of teleoperated mobile robots”, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1721–1726, 1999.
- [15] L. D. Joly and C. Andriot, “Imposing motion constraints to a force reflecting telerobot through real-time simulation of a virtual mechanism”, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 357-362, 1995.
- [16] K. Kosuge, T. Itoh, T. Fukuda, and M. Otsuka, “Semi-autonomous teleoperation system using virtual tool,” *3rd IEEE International Workshop on Robot and Human Communication*, pp. 327 -332, 1994.
- [17] L. Ljung, *System Identification: Theory for the User*, second edition, Prentice Hall, 1998.
- [18] W. R. Mark, S. C. Randolph, M. Finch, J. M. V. Verth, and R. M. Taylor II, “Adding force feedback to graphics systems: issues and solutions,” *23rd Annual Conference Computer Graphics*, ACM, 1996.
- [19] A. Micaelli, C. Bidard, and C. Andriot, “Decoupling control based on virtual mechanisms for telemanipulation,” *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 1924 –1931, 1998.
- [20] M. Minsky, M. Ouh-young, O. Steele, F. P. Brooks Jr., M. Behensky, “Feeling

- and Seeing : Issues in Force Display”, *Computer Graphics*, Vol.24, No.2, pp. 235-243, 1990 .
- [21] A. Nahvi, D. D. Nelson, J. M. Hollerbach, and D. E. Johnson, “Haptic manipulation of virtual mechanisms from mechanical CAD designs”, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 375 –380, 1998
- [22] M. Ouh-young, J.-R. Wu, W.-N. Tsai, T.-J. Yang, and C.-H. Huang, “A force feedback joystick and its use in PC video games,” *IEEE International Conference on Consumer Electronics*, pp. 326-327, 1995.
- [23] M. Ouh-young, W. N. Tsai, M. C. Tsai, J.R. Wu, C. H. Huang, and T. J. Yang, “A low-cost force feedback joystick and its use in PC video games”, *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, Vol 41, pp. 787 -794, 1995.
- [24] L. B. Rosenberg, “Virtual fixtures: perceptual tools for telerobotic manipulation”, *IEEE Virtual Reality Annual International Symposium*, pp.76–82, 1993.
- [25] L. B. Rosenberg and B.D. Adelstein, “Perceptual decomposition of virtual haptic surfaces”, *IEEE Virtual Reality Annual International Symposium on Research Frontiers*, pp. 46-53, 1993.
- [26] D. C. Ruspini, K. Koralov, and O. Khatib, “Haptic interaction in virtual environments,” *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 128 –133, 1997.
- [27] M. A. Srinivasan and C. Basdogan, “Haptics in virtual environments: taxonomy, research status, and challenges,” *Computers and Graphics*, Vol. 21, No. 4, pp. 393-404, 1997.
- [28] R. Taylor, W. Robinett, V. Chi, F. Brooks Jr., W. Wright, S. Williams, and E. Synder, “The Nanomanipulator: a virtual-reality interface for a scanning tunneling microscope,” *SiGGRAPH*, pp. 127–134, 1993.
- [29] A. R. Tilley, *The Measure of Man and Woman – Human Factors in Design*, Henry Dreyfuss Associates, New York : Whitney Library of Design,c1993.
- [30] F. Vahora, B. Temkin, T. M. Krummel, and P. J. Golman, “Development of

real-time reality haptic application: real-time issues”, *12th IEEE Symposium on Computer-Based Medical Systems*, pp. 290–295, 1999.

- [31] A. Wolter, *Philosophical Writings: John Duns Scotus*, New York: Bobbs-Merrill, pp. 25-26, 1962.
- [32] M. S. Yoh, “The Reality of Virtual Reality”, *Seventh International Conference on Virtual Systems and Multimedia*, pp. 666-674, 2001.
- [33] Y. Yokokihji, R. L. Hollis, and T. Kanade, “What you can see is what you can feel – development of a visual/haptic interface to virtual environment,” *IEEE Virtual Reality Annual International Symposium*, pp. 46-54, 1996
- [34] 林瑋慶，模擬系統之兩軸力回饋搖桿設計與控制，國立交通大學電機與控制工程學系，2002。
- [35] 吳道岳，虛擬操縱器之模擬法則與分析－應用於兩軸力回饋搖桿，國立交通大學電機與控制工程學系，2003。

