

第三章

硬體實踐

操控器的硬體部分主要為一組力回饋搖桿裝置，也是系統與使用者互動的部分，大致上可分為搖桿本體、動力元件以及感測裝置三部分，如圖 3.1 所示。搖桿本體由一些傳動機構與支架所組合，動力元件則為動力產生來源，而感測裝置則是用來量測搖桿狀態的變化。本章首先將對一些典型的搖桿傳動機構作簡單介紹，接著再依系統主從(Master-Slave)架構，分別討論其力回饋搖桿裝置、規格以及效能，例如搖桿的最大輸出力量，取樣資料的解析度等等，最後並將實驗室自製力搖桿與專業力搖桿及市售力搖桿作分析比較。

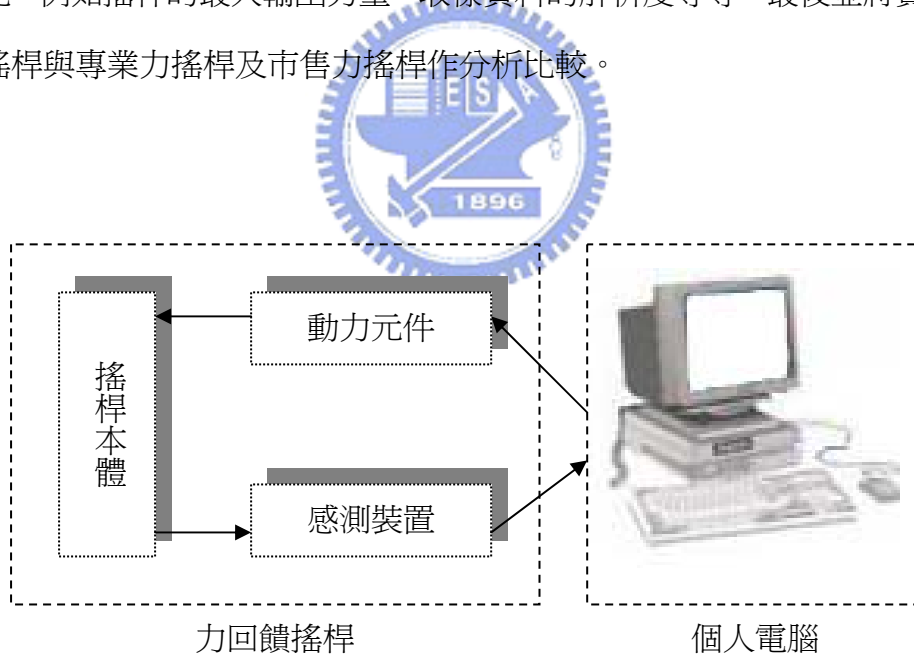


圖 3.1 操作系統裝置示意圖

3.1 典型搖桿傳動機構

搖桿的動力來源為馬達，而能量的傳遞則需要透過適當的傳動機構，如此方能使搖桿正常運作。由於目前較常見的搖桿皆為兩個自由度(degree-of-freedom, DOF)的設計，所以以下我們將討論著重於兩個自由度的機構設計。基於空間的直覺考量，設計傳動機構的方式可分為耦合式(coupled mode)，如圖 3.2-3.3 所示，與解耦式(decoupled mode)，如圖 3.4 所示。耦合式必須採用中間媒介傳遞主要動力，解耦式則是直接將多自由度分解成多個少數自由度的設計。而耦合式又可分成直接傳動與間接傳動，其中直接傳動根據傳動心軸(mandrel)的不同又可分為平行式(prismatic type)，如圖 3.2(a)所示，與旋轉式(revolute type)，如圖 3.2(b)所示，或者兩種混和使用，如圖 3.2(c)所示；而間接傳動則根據中間媒介的不同可分為剛性連接器(rigid connector)，與撓性連接器(flexible connector)；其中剛性連接器又可分為單桅式，如圖 3.3(a)所示，與多桅式，如圖 3.3(b)所示；撓性連接器，如圖 3.3(c)所示，則有皮帶(belt)、繩索(rope)、和鏈(chain)等[8]。

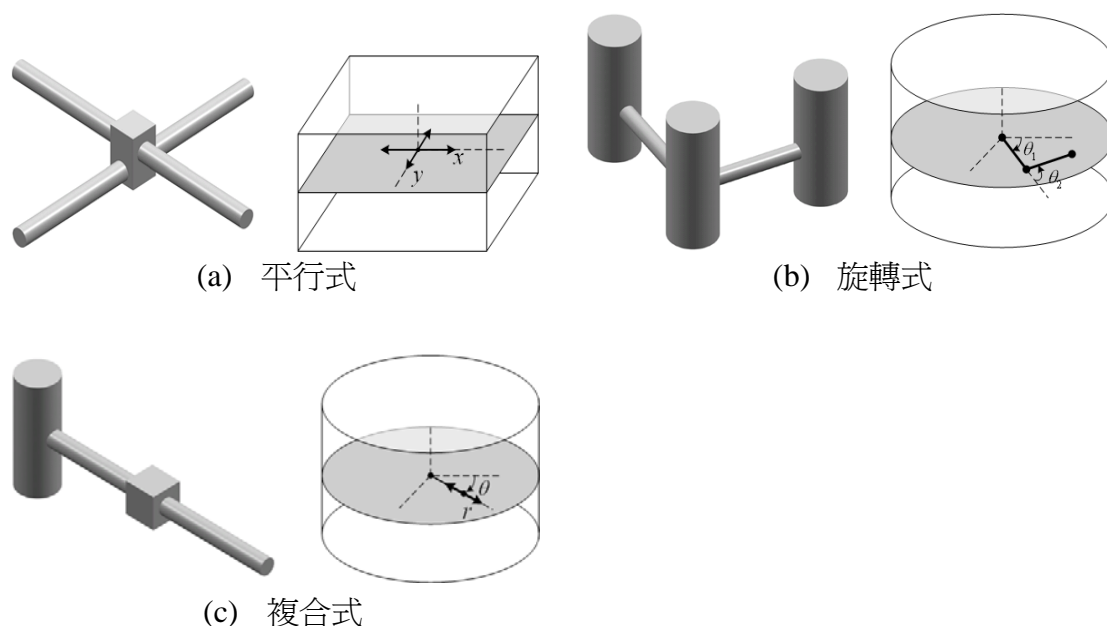


圖 3.2 耦合式直接傳動機構：(a)平行式，(b)旋轉式，和(c)複合式

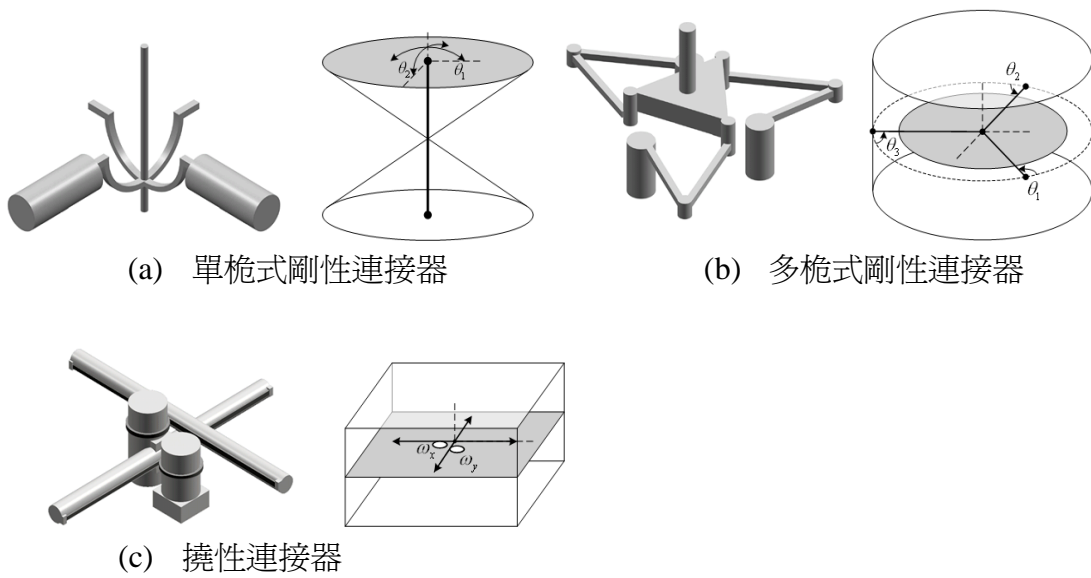


圖 3.3 耦合式間接傳動機構：(a)單桅式剛性連接器，(b)多桅式剛性連接器，和(c)撓性連接器

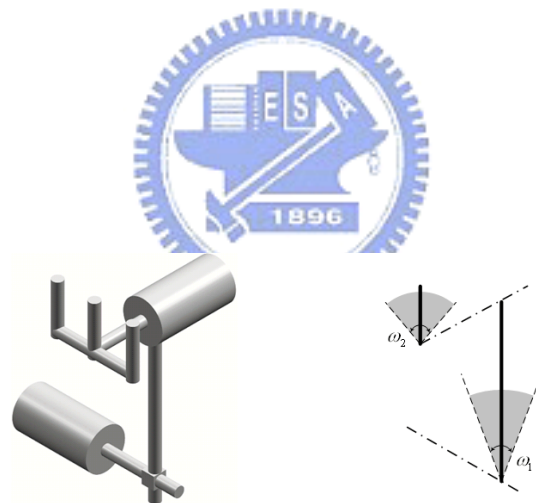


圖 3.4 解耦式間接傳動機構

3.2 雙向互動式操作系統

在實際建構此雙向互動式系統時，我們將其分為 Master 端操作系統與 Slave 端操作系統兩大部份，兩端操作系統各自擁有自己的處理器、Multi-I/O 卡、控制器、編碼器、馬達以及力回饋搖桿，如圖 3.5 所示，資料透過網路連結進行交換，兩端使用者則透過此操作系統進行互動，彼此感受遠方所傳來的力量。

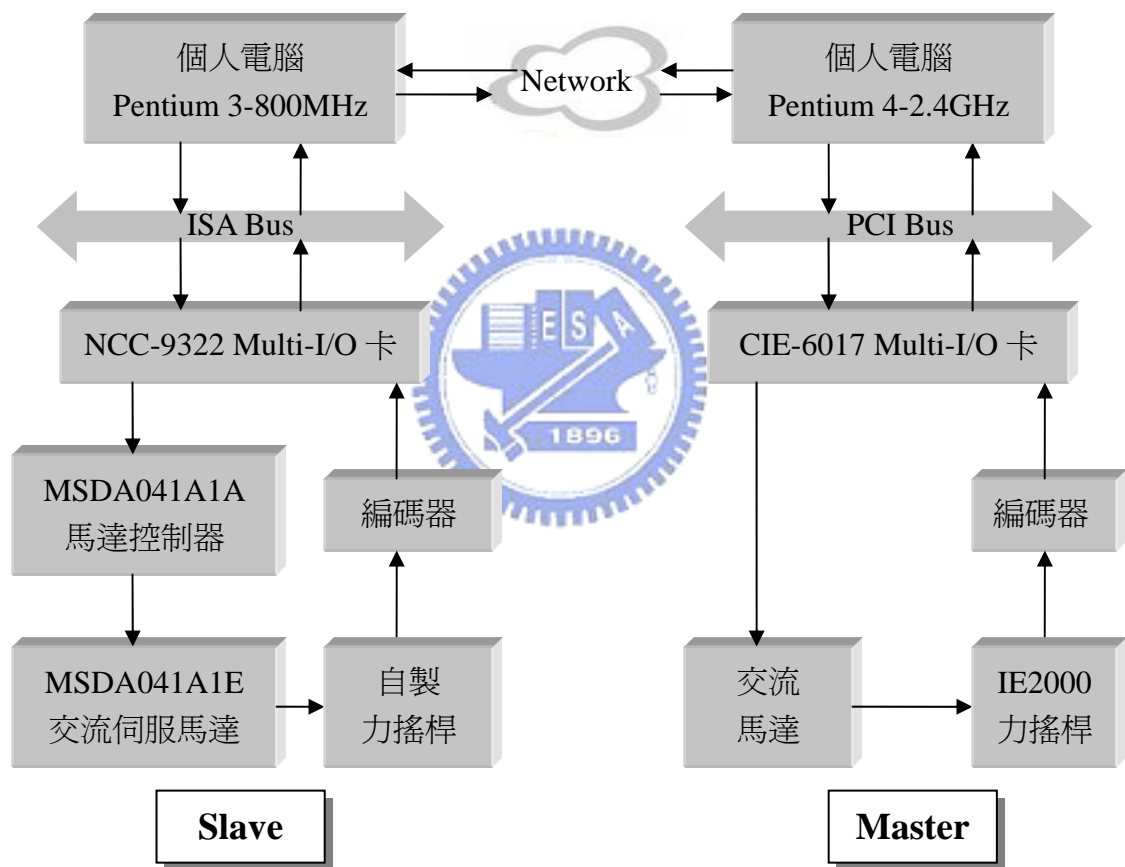


圖 3.5 雙向互動式操作系統硬體架構圖

3.2.1 Master 端操作系統

在 Master 端我們採用美國 Immersion 公司所發展的 Impulse Engine 2000 力回饋搖桿，如圖 3.6(a)所示，其傳動方式採用撓性連接器傳動機構之鋼纜線傳動技術，如圖 3.6(b)所示。此設計方式利用媒介物傳動中央兩個旋轉式致動器的動力，機構的運動則是利用各致動器的旋轉力改變其旋轉角度。其連接方式為利用 x 軸的鋼纜線連接 x 軸的馬達心軸與 x 軸的扇型連接器，y 軸的鋼纜線連接 y 軸的馬達心軸與 y 軸的扇型連接器，其運作的方式為當 x 軸的馬達心軸轉動時，藉由 x 軸的鋼纜線特殊的安排設計，帶動 x 軸的扇型連接器的轉動，而造成搖桿 x 軸的轉動，當 y 軸的馬達心軸轉動時，藉由 y 軸的鋼纜線特殊的安排設計，帶動 y 軸的扇型連接器的轉動，而造成搖桿 y 軸的轉動，這樣的技術，其優點是可增強主動元件出力，且具有齒輪比的效果，但沒有齒輪所帶來的不必要感覺；缺點則是鋼纜線很容易脫離軌道，加上需要與機構保持高密合度，因此維護不易。

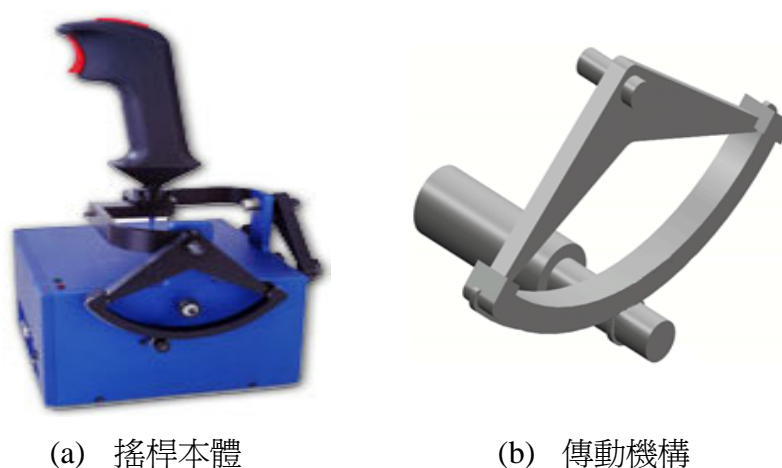


圖 3.6 Immersion Impulse Engine 2000 力回饋搖桿：(a)搖桿本體和(b)傳動機構

Impulse Engine 2000 為一具有兩個自由度(X 軸/Y 軸)的力回饋搖桿，其工作空間為 $6 \times 6 \times 4$ in.的立方體，其中 X 軸可左右移動各 30 度，Y 軸可前後移動 30 度，另外搖桿上附有兩個數位輸入的按鈕，不過在本研究中我們並不會去用到。Impulse Engine 2000 配有一張 PCI multi-I/O 卡，型號為 CIE-6017，如圖 3.7 所示，具有 3 組數位輸入、1 組數位輸出、2 組編碼器輸入以及 2 組類比輸出，其可透過馬達上的編碼器計數輸入得知位置資訊，位置的解析度為 0.0009in，此外也可對馬達輸出控制命令，使搖桿產生適當的力回饋，輸出的最大力為 8.9N，而其工作頻寬則為 120Hz，表 3.1 顯示 Impulse Engine 2000 力搖桿詳細的規格。

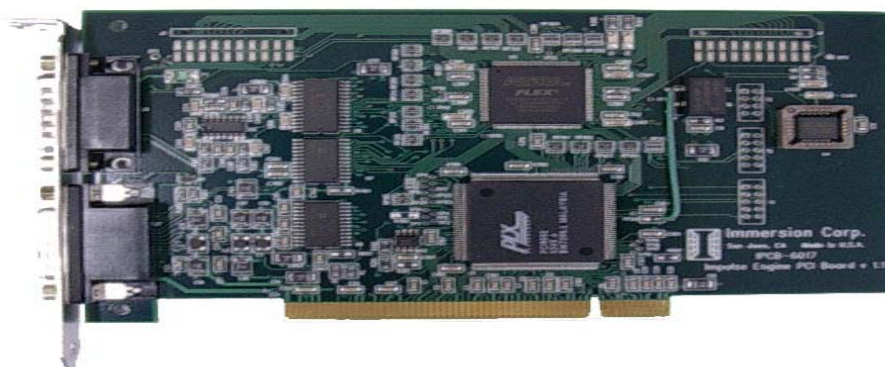


圖 3.7 CIE-6017 PCI multi-I/O 卡

Item	Specification
Degrees of Freedom	2
Workspace Size	$6 \times 6 \times 4$ in.
Position Resolution	0.0009 in.(1100dpi)
Max Force Output	2 lbs.(8.9N)
Backdrive Friction	< 0.5 oz.(0.14N)
Bandwidth	120 Hz

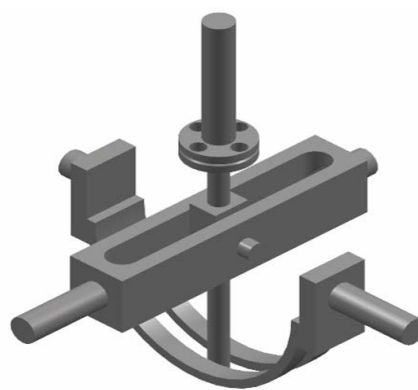
表 3.1 Impulse Engine 2000 力回饋搖桿規格表

3.2.2 Slave 端操作系統

在 Slave 端則採用我們實驗室所自行研發的力回饋搖桿，如圖 3.8(a)所示，其傳動方式採用改良型單桅式傳動機構，如圖 3.8(b)所示。其中傳動機構一為傳統半圓型連接器，另一個則改良成長直條型連接器。兩連接器中間皆有長溝可以穿越並帶動中央桅桿，且直接連動馬達心軸，兩端皆裝設滾珠軸承固定於搖桿外殼。此一半圓型連接器的傳動方式係利用馬達的運轉直接帶動連接器，進而牽動中央桅桿底端造成轉動；另一方面，因為長直條型連接器係改良成直接穿越中心點的設計，不但是力回饋搖桿的傳動軸，而且也是中央桅桿的固定軸，當馬達轉動時，會直接帶動連接器旋轉，因此中央桅桿也跟著轉動。改良的動機在於傳統單桅式的傳動方式會造成中央桅桿移動摩擦兩半圓型連接器的中央長溝，導致軸間干涉、傳動間隙、與機構摩擦等問題，而我們將其中一半圓型連接器改良成長直條型，使中央桅桿直接固定於機構中心點與長直條型連接器，則可減輕這些現象。



(a) 搖桿本體



(b) 傳動機構

圖 3.8 實驗室自製力回饋搖桿：(a)搖桿本體和(b)傳動機構

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，以及型號爲 MSDA041A1A 的控制驅動器，如圖 3.9 所示，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，如圖 3.10 所示，作爲馬達訊號輸出與命令輸入之用。

表 3.2 與 3.3 分別顯示交流伺服馬達規格資料以及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，根據這些數據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約爲 19N(約 1.94 kg)，以及位置訊號的解析度約爲 1989.4(Pulse/m)，約等於 2(Pulse/mm)，亦即每釐米約有 2 個計數輸出。而馬達控制卡的規格可由表 3.4 得知，其中最大取樣頻率爲 1MHz，比起之後電腦模擬每筆訊號處理的速度（約 1kHz）已相當足夠。此外我們以最基本的頻率響應法(frequency-response analysis)來分析搖桿系統的阻抗模型，其優點是可以用直觀的物理現象來闡釋模型的頻率轉移函數(transfer function)，首先定義搖桿單軸的轉移函數 $G(s)$ 爲

$$G(s) = \frac{X(s)}{F(s)} \triangleq \frac{1}{ms^2 + bs + k} \quad (3.1)$$

其中 $X(s)$ 爲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。接著對系統輸入不同頻率的弦波信號(sinusoid)，可得多個角頻率點的增益與相位特性，藉由其特性在 Bode 圖上的表現，得知頻率轉移函數。其中此力回饋搖桿裝置物理阻抗參數值 m 、 b 、 k 分別代表系統慣性質量、阻尼係數以及彈性係數，而在系統摩擦力部份，則分別在 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，我們此這些數據整理列於表 3.5 中，至於以上詳細的分析內容請參考文獻[16]。



圖 3.9 MSDA041A1A 控制驅動器/MSMA041A1E 交流伺服馬達

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 3.2 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 3.3 Panasonic MSDA041A1A 控制驅動器規格



圖 3.10 健昇自動化 NCC-9322 DAC 馬達控制卡

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

表 3.4 健昇自動化 NCC-9322 DAC 馬達控制卡規格

項目	X 軸方向	Y 軸方向
慣性質量 (g)	34.5	31.5
阻尼係數 (N-sec/m)	1.105	1.041
彈性係數 (N/m)	5.38	5.732
靜摩擦力 (N)	0.17	0.20

表 3.5 自製力回饋搖桿裝置物理參數值

3.3 力回饋搖桿比較與分析

對於力回饋搖桿，市面上發行了許多產品，不過大都是娛樂性用途，在本章節最後的部份，我們蒐集了幾樣較具代表性的力回饋搖桿，如 Immersion 公司的 Impulse Engine 2000、Microsoft 的 SideWinder Force Feedback Pro 與 Logitech 的 WinMan Force 3D，與我們自製的力回饋搖桿，針對活動範圍、輸出力矩、精確度、連接介面、工作頻寬以及價位這些重要的性質作分析比較，如表 3.6 所示。

項 目		自 製 Developed	專 業 Immersion Engine 2000	市 售 Microsoft & Logitech
活動範圍 (θ)	X 軸	70 ~ 80 deg	65 deg	45 ~ 55 deg
	Y 軸	80 ~ 90 deg	65 deg	35 ~ 50 deg
總高度(L3)		29 cm	28 cm	18 ~ 30 cm
握把長度(L3-L1)		16 cm	18.5 cm	13 ~ 20 cm
擺動距離(R)		22 cm	18 cm	10 ~ 16 cm
額定輸出力矩		10.83 N	8.9 N	not available
搖桿精確度		2250/80 counts/deg	1100/65 counts/deg	not available
電腦連接介面		dedicated card	dedicated card	USB、game port
定位方式		free	free	fixed
工作頻寬		100 Hz	120 Hz	not available
控制方式		PC	PC	μ -processor
價位		70000 NT	180000 NT	1000 ~ 5000 NT

表 3.6 自製/專業/市售力回饋搖桿對照資料

基本上，好的力回饋搖桿要具有以下四種特性：

1. 足夠大的力量回饋；
2. 高精確度(高解析度)；
3. 較廣的搖桿操控空間；
4. 較高的工作頻寬；

從表 3.6 中各項性質比較結果可知，在活動範圍、輸出力矩與精確度等方面，自製力回饋搖桿確實較專業力回饋搖桿來的好，至於像 Microsoft 與 Logitech 這類的市售力回饋搖桿，則屬於較低價位的力回饋搖桿，不論在解析度或者輸出力矩皆遠遠不及自製力回饋搖桿與專業回饋搖桿，此類型搖桿的設計方式大都於內部嵌入一微處理器，用來控制搖桿馬達轉動的方式，控制方式是對電腦輸入動作進行編號並且儲存於內部微處理器韌體內，經由電腦傳送動作編號，其內部微處理器即以對應此編號的動作控制搖桿的輸出，所能提供的力感大都是固定的，所以只適合娛樂遊戲使用。

