

第二章

遠端操作系統

爲了能夠傳達遠距離間人與人觸覺般的力感受，增進兩方間更爲真實的感受，以達到及時互動性的呈現，我們發展了互動式即時力呈現遠端操作系統，藉由網路的主從式(Master-Slave)架構，設計了 Master 系統與 Slave 系統，分別代表了近方與遠方操作系統，兩方操作者只要藉著此遠端操作系統，即可做到簡單的即時力互動，圖 2.1 顯示此遠端操作系統組成概括圖。本章首先介紹此系統的主從式架構，並且對系統架構概略性的介紹，接著說明一下操作者與觸覺/視覺裝置之間互動的情況，最後敘述其發展的相關策略。

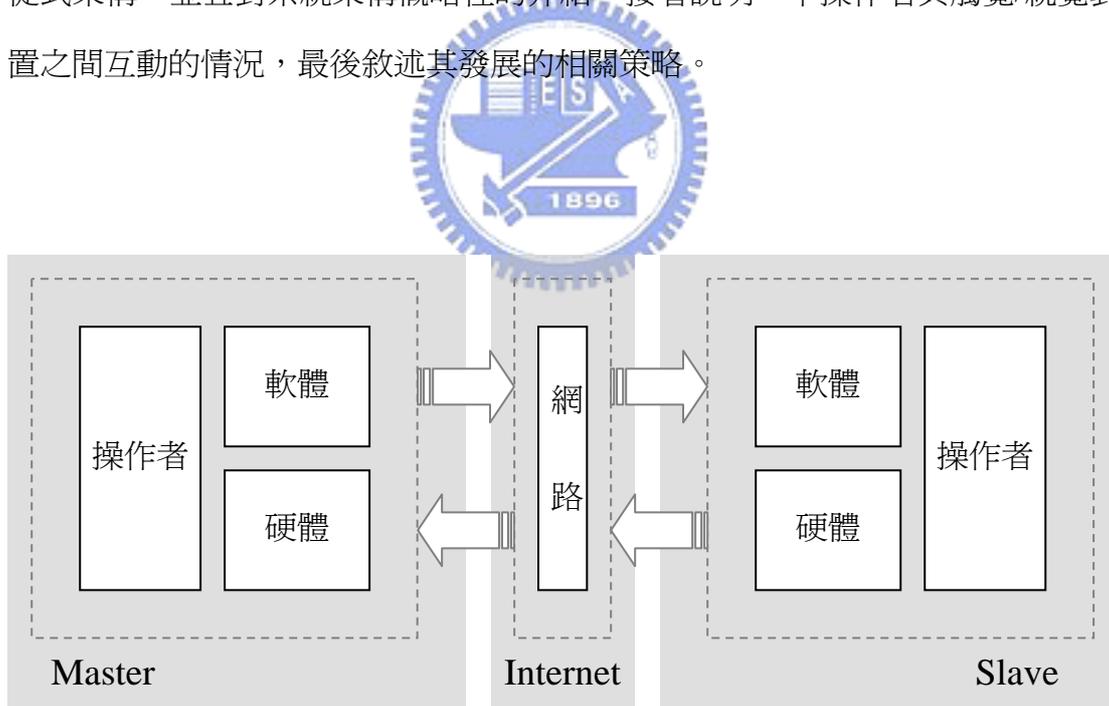


圖 2.1 遠端操作系統方塊圖

2.1 系統架構

主從架構是被廣泛運用於網路通訊間交互作用的模型，主即是Master端，從則是 Slave 端，其概念就好像是主人(Master)向伺服器(Slave)發出要求，而伺服器則針對主人所提出的要求來提供適當的服務，所以在系統中當 Master 端向 Slave 端提出請求服務，而 Slave 端接受並且處理來自 Master 端的服務請求，並將處理結果傳回給 Master 端，此流程即是主從架構的運作模式，如圖 2.2 所示。本研究則是以自製力回饋搖桿此端為 Slave 端，專業力回饋搖桿 Impulse Engine 2000 此端為 Master 端，Master 端首先會對 IE2000 力搖桿施予一力量，接著經由電腦運算後，透過網路送出一力命令給 Slave 端，Slave 端收到力命令後自製力搖桿會對 Slave 端操作者施一力量，並與 Master 端操作者的施力經由電腦作一運算，運算完之後的力量，在藉由網路將力命令傳回給 Master 端，如此反覆循環下去。實際上此雙向遠端操作系統其 Master 端亦是 Slave 端，Slave 端亦是 Master 端，為方便區別說明，我們將近端稱為 Master 端，遠端稱為 Slave 端。

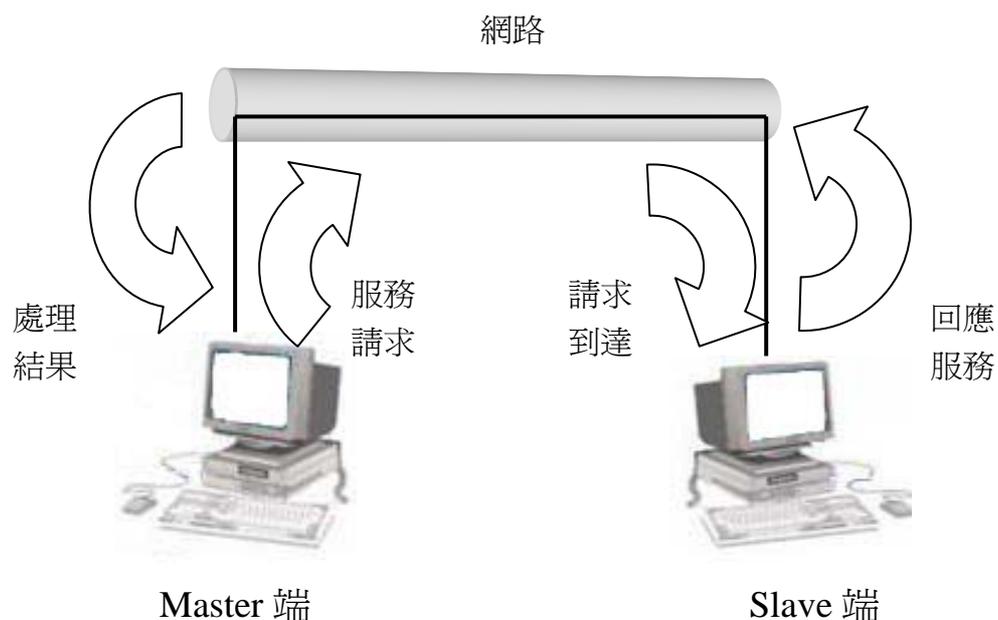


圖 2.2 主從架構運作模式

在建構遠端操作系統時，大概可分成硬體、軟體以及網路通訊三部份，如圖 2.3 所示，其中硬體部份指的是搖桿操作系統，包含搖桿本體、驅動裝置、感測裝置、裝置介面卡與控制器；而軟體部份則包含作業系統的選擇、裝置的軟體驅動、程式架構與流程的設計以及相關控制策略；至於網路通訊部份則包含網路連線建構與相關通訊協定等。硬體透過搖桿馬達力矩的輸出，提供操作者適時的力回饋呈現，為最直接與操作者互動的介面；軟體負責處理各類型訊號、資料運算以及控制策略，提供硬體正確的命令輸出；網路通訊則管理封包的大小與資料的傳送與接收。硬體詳細規格的部份，將在第三章作完整介紹；至於軟體與網路的部份，則留待第四章一併詳細討論。

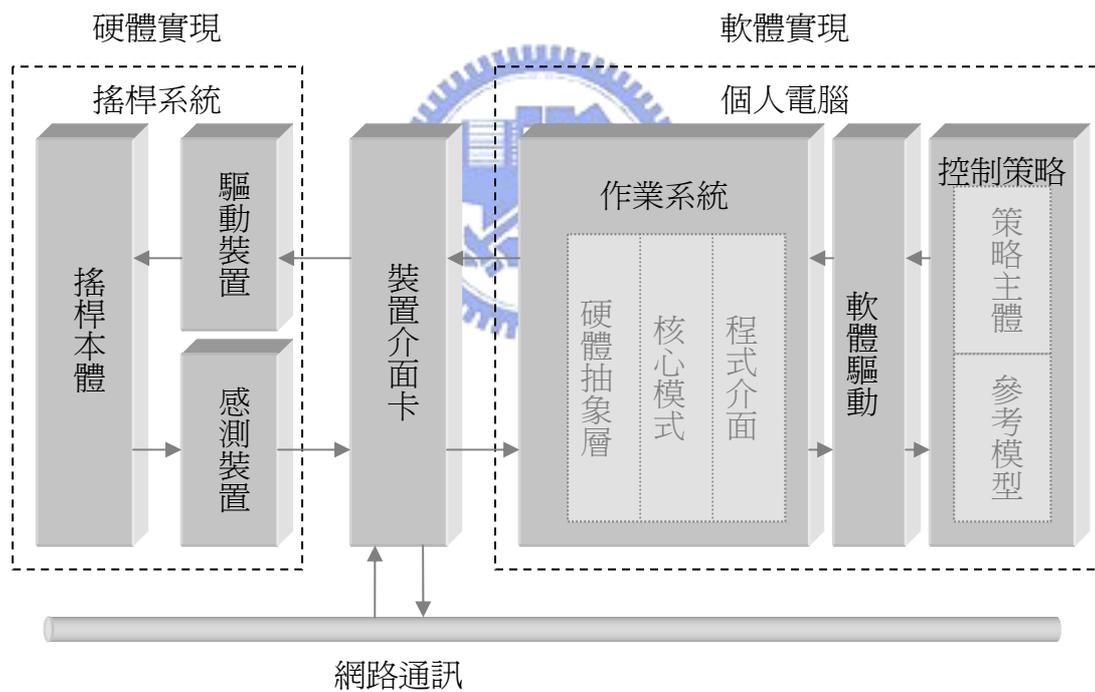


圖 2.3 遠端操作系統架構圖

2.2 觸覺與視覺頻率

雙向互動式遠端操作系統具有力回饋的功能，透過操作系統的人機介面，使用者可清楚感受彼此力互動的狀態。圖 2.4 說明人與觸覺裝置間的操作感受情形，當人類與物體發生碰觸時，首先遍及皮膚表面的感覺受體會感受到此力量，藉由神經系統將這感覺資訊傳回給大腦，讓大腦得知碰觸的實際情況，並且對肌肉下達指令以作出適當的反應。另外在觸覺裝置方面，則藉由感測器得知觸覺裝置相關物理變化量(如位置/力)，經由電腦模擬計算後，將力量命令傳給致動裝置 (Actuators)，對操作者產生一回饋力。

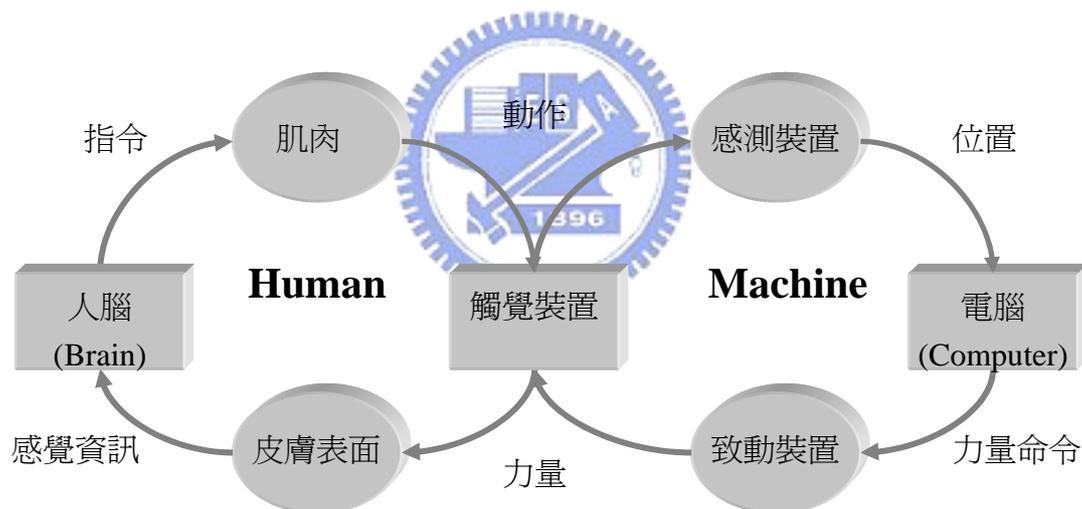


圖 2.4 人類與觸覺裝置間操作感受流程圖

一般而言，人的觸覺大概可分為力感跟觸感兩部份，力感的感受是利用肌肉組織來感受力量強度，而觸感的感受方式則是利用皮下感覺受體，因此觸感所能感受及反應的頻率較力感來的高且振幅也可較小，典型的力感頻率大約只到 30Hz，而觸感則可高達 1kHz 至 10kHz，視每個人的情況而不同。

另外，研究中指出人的手腕等效質量(M)從 0.2kg 變動至 2kg，等效黏滯性(B)左右移動時平均是 3N-s/m，而前後移動則是 15N-s/m，至於等效剛性(K)，則從 2N/m 變化至 800N/m，在操作時人的手臂剛性大概可維持 1.2 秒左右，由此可知人的手臂阻抗值是一直在變的。再者，我們來談談關於視覺呈現的部分，人的視覺更新頻率約為 20Hz 至 50Hz 之間，若超過 60Hz 則人眼很難分辨出其差異性，典型在電影播放的標準值為 24fps(frames per second)，而電腦動畫的標準值為 30fps，有時在飛行模擬駕駛的訓練中則要高達 60fps，我們將本節所提及的數據歸納如表 2.1 所示。

項目	電影播放	電腦動畫	飛行模擬
視覺更新頻率	24fps	30fps	60fps

項目	力感	觸感
觸覺更新頻率	30Hz	1kHz~10kHz

表 2.1 系統模擬時視覺/觸覺所需相關參數

2.3 時間延遲

資料在網路上傳輸會有時間延遲的現象，典型通訊延遲主要由三種部份所組成，第一部份為傳輸時間(transmission time)，第二部份為傳播延遲(propagation delay)，也就是信號從電路上一點傳播到另一點所需的時間，又稱網路延遲(network latency)，第三部份為處理延遲(processing delay)，也就是從請求信號發出到請求信號到處理設備接收到請求信號所需的時間，又稱排隊延遲(queuing delay)，如圖 2.5 所示。

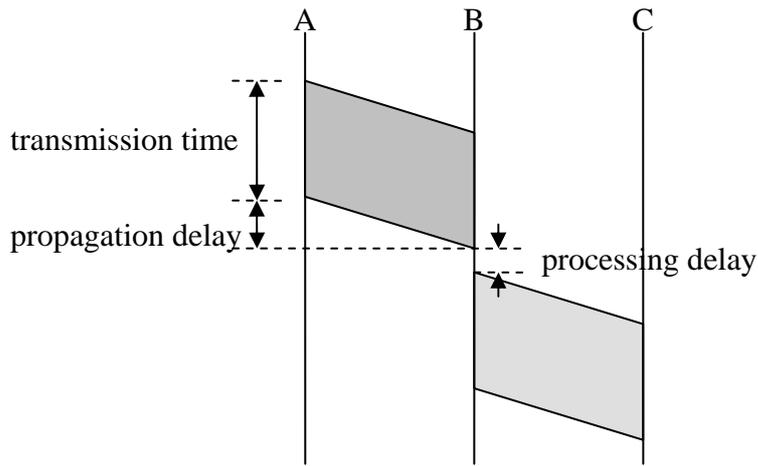


圖 2.5 通訊延遲示意圖

而遠端操作一個完整來回的操作所需花費的時間，包含了以下四個部份，分別為由遠端系統傳回給近端操作者的網路通訊延遲 t_1 ，操作者作決定所造成的時間延遲 t_2 ，將控制命令傳給遠端系統的網路通訊延遲 t_3 ，以及遠端系統執行動作所花的時間 t_4 ，將 $t_1 + t_2 + t_3 + t_4$ 就是一個迴圈所需的全部時間，如圖 2.6 所示，



圖 2.6 遠端操作往返一趟所需時間示意圖

典型遠端操控系統雙向訊號流程圖，如圖 2.7 所示，圖中下標m代表master，s代表slave，d代表delay，h代表操作者，e代表遠端環境，x為位置資訊，v為速度資訊，f為力資訊，t為時間， $T_1(t)$ 和 $T_2(t)$ 則分別代表由Master端傳到Slave端以及Slave端傳到Master端的傳輸時間延遲函式。各訊號之間的關係，如下所示：

$$x_{md}(t) = x_m(t - T_1(t)) \quad (2.1)$$

$$v_{md}(t) = v_m(t - T_1(t)) \quad (2.2)$$

$$f_{hd}(t) = f_h(t - T_1(t)) \quad (2.3)$$

$$f_{ed}(t) = f_e(t - T_2(t)) \quad (2.4)$$

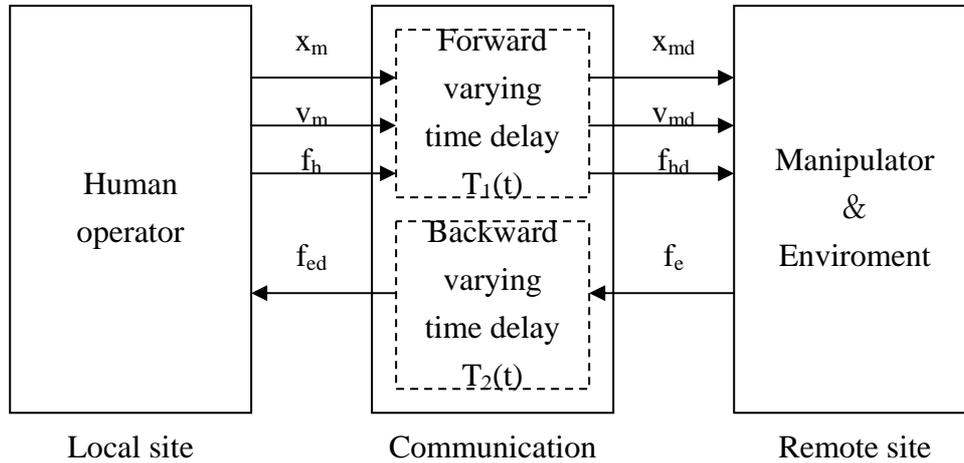


圖 2.7 雙向遠端操作系統訊號流程圖

訊號流程首先為 Master 端透過網路傳送位置、速度或加速度等命令，去操控 Server 端系統，藉由 Server 端操控器與環境間的互動，傳回接觸時的力大小給 Master 端。另外，網路上因存在著路徑選擇等問題，也有可能造成資料遺失的現象，由於網路上時間延遲的現象是時變的，且雙向延遲是不對稱的，造成系統在穩定與分析上的困難，許多文獻均有對其探討研究，不過在此我們並不作深入分析。

2.4 力感模型

操作者所感受到的力量主要是靠力回饋搖桿馬達輸出的機械功率所賦予的，藉由不同的力覺感受，可知遠方操作者的施力大小狀況，而不同的力量輸出係由力量大小、方向與頻率等因素組合而成，當使用者操縱搖桿時，施予搖桿力量的手會與搖桿產生互動，其中包含位置、速度、加速度與力量彼此間的動態關係，可以以阻抗來表示。Hogan 在 1987 年提出阻抗控制理論(Impedance Control Theory)[4,5]，用來處理機器手臂碰觸物體表面所發生的狀況，我們以此為基礎，將其概念應用在力回饋搖桿與遠端環境兩者雙向之間的互動力感關係上。

一般而言，物體可由慣性質量(mass)、黏滯性(viscosity)以及彈性(stiffness)這三個基本的阻抗特性(impedance characteristic)所組成，如圖 2.8 所示，其動態方程式(dynamics equation)可表示如下：

$$f = m \frac{d^2x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kx \quad (2.5)$$

其中 m 為物體的質量， b 為物體的黏滯係數， k 為物體的彈性係數， x 為物體的位置， $\frac{dx}{dt}$ 為物體的速度， $\frac{d^2x}{dt^2}$ 為物體的加速度， f 則為施加於物體的外力。對每個不同的物體，都有其不同的阻抗特性。

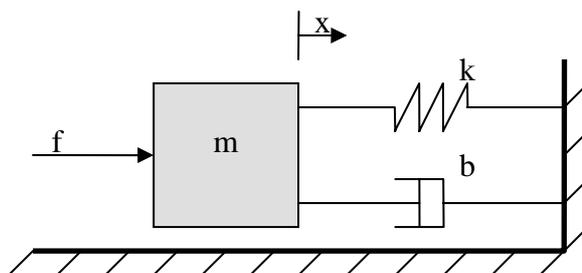


圖 2.8 質量-彈簧-阻尼系統

在遠端操作系統中，操作者藉由力回饋搖桿這人機介面(human-machine interface)與遠端環境作互動，可由圖 2.9 的模型來表示，假設力回饋搖桿的質量為 m ，黏滯係數為 b ，彈性係數為 k ，定義 x 為位置， $\frac{dx}{dt}$ 為速度， $\frac{d^2x}{dt^2}$ 為加速度， f_h 為作者施予搖桿的力量， f_m 則為馬達輸出遠端回傳的力量，其關係如下：

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kx = f_h + f_m \quad (2.6)$$

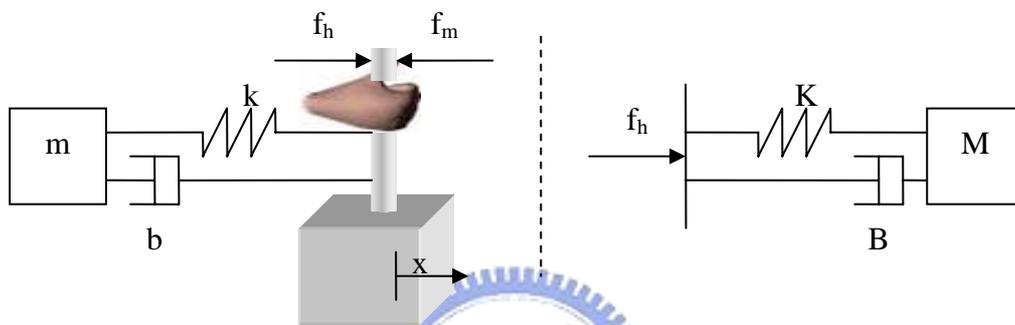


圖 2.9 Master-Slave 系統阻抗圖

假設遠端系統的質量為 M ，黏滯係數為 B ，彈性係數為 K ，操作者感受的力量與施加的的力量同為 f_h ，如此 f_h 可表示如下：

$$f_h = M \frac{d^2x}{dt^2} + B \frac{dx}{dt} + Kx \quad (2.7)$$

結合(2.6)與(2.7)式，我們可得馬達輸出力的方程式：

$$f_m = (m - M) \frac{d^2x}{dt^2} + (b - B) \frac{dx}{dt} + (k - K)x \quad (2.8)$$

理論上，只要我們能夠量測到位置 x ，速度 v 以及加速度 a ，我們就能夠藉著調變馬達的輸出力 f_m ，去模擬遠端各種物理元件了。

真實世界中，物體運動必定會伴隨摩擦力的產生，而摩擦力將導致物理系統的黏滯係數增加，並使得系統速度減緩，然而相關文獻曾經記載摩擦力對於力量-位置控制的系統，具有穩定補償的效果，考慮 Master 端含有摩擦力 f_m ，Slave 端含有摩擦力 f_{rs} ，修改(2.6)-(2.8)式如下：

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kx + f_m = f_h + f_m \quad (2.9)$$

$$f_h = M \frac{d^2 x}{dt^2} + B \frac{dx}{dt} + Kx + f_{rs} \quad (2.10)$$

$$f_m = (m - M) \frac{d^2 x}{dt^2} + (b - B) \frac{dx}{dt} + (k - K)x + f_m - f_{rs} \quad (2.11)$$

綜合以上所述，我們藉由以上相關理論與技術，建構了雙向互動式遠端系統的模型，在此系統中，雙端各有一名操作者與一組力回饋搖桿系統，透過網路進行資料傳輸交換，為了簡化問題與分析上的困難，我們假設摩擦力很小以至於可以忽略，並且只使用彈簧來建構簡化的阻抗模型，其簡化的力感模型如下所示：

$$f \approx kx \quad (2.12)$$

因為在操控力回饋搖桿時，可直接方便且精準的取得位置資訊，但對於速度以及加速度則需要經過微分計算，微分計算以及電腦所需額外的運算時間，將會導致系統的不穩定，所以我們忽略慣性質量以及黏滯性所造成的阻抗現象。

系統實際在運作時，考慮兩端操作者各自在操作力回饋搖桿，視其遠端系統為相同的彈簧模型(假設兩端力回饋搖桿系統對稱且其物理特性對等)，就好像對一樣的彈簧進行推與拉的動作，詳細情況如圖 2.10 所示。以下我們將圖 2.10 分為五個步驟說明之，假設此彈簧彈性係數 k ，Master端操作者施力 F_m ，力搖桿位置變化量 x_m ，Slave端操作者施力 F_s ，力搖桿位置變化量 x_s 。首先Master跟Slave端操作者就定位，並且此時將搖桿均維持在原點 x_0 ，如圖 2.10(a)所示，其中

$$x_m(0) = x_s(0) = 0 \quad ; \quad F_m(0) = F_s(0) = 0 \quad (2.13)$$

接著Master端操作者先對此彈簧往右推 F_m 的力，則Master端的力搖桿將往右移動 x_m 位移量，而Master端的電腦根據編碼器所得力搖桿的位移量以及彈簧模型，得知Master端往右出力 F_m ，

$$F_m = kx_m - F_s \quad (2.14)$$



並且透過網路將此 F_m 的力傳給Slave端，如圖 2.10(b)所示，待Slave端收到這 F_m 的力後，Slave端力搖桿將往右輸出此力給Slave端操作者，如圖 2.10(c)所示，此時Slave端操作者反應此力並且往左推 F_s 的力，造成Slave端的力搖桿往左移動 x_s 位移量，Slave端的電腦再根據力搖桿的位移量以及彈簧模型，得知Slave端往左出力 F_s ，

$$F_s = kx_s - F_m \quad (2.15)$$

並且透過網路將此 F_s 的力傳給Master端，如圖 2.10(d)所示，待Slave端收到這 F_s 的力後，Slave端力搖桿將往左輸出此力給Slave端操作者，如圖 2.10(e)所示，之後依照前幾個步驟這樣的模式如此循環反覆下去，直到任務結束。

Master/IE2000

Slave/自製力搖桿

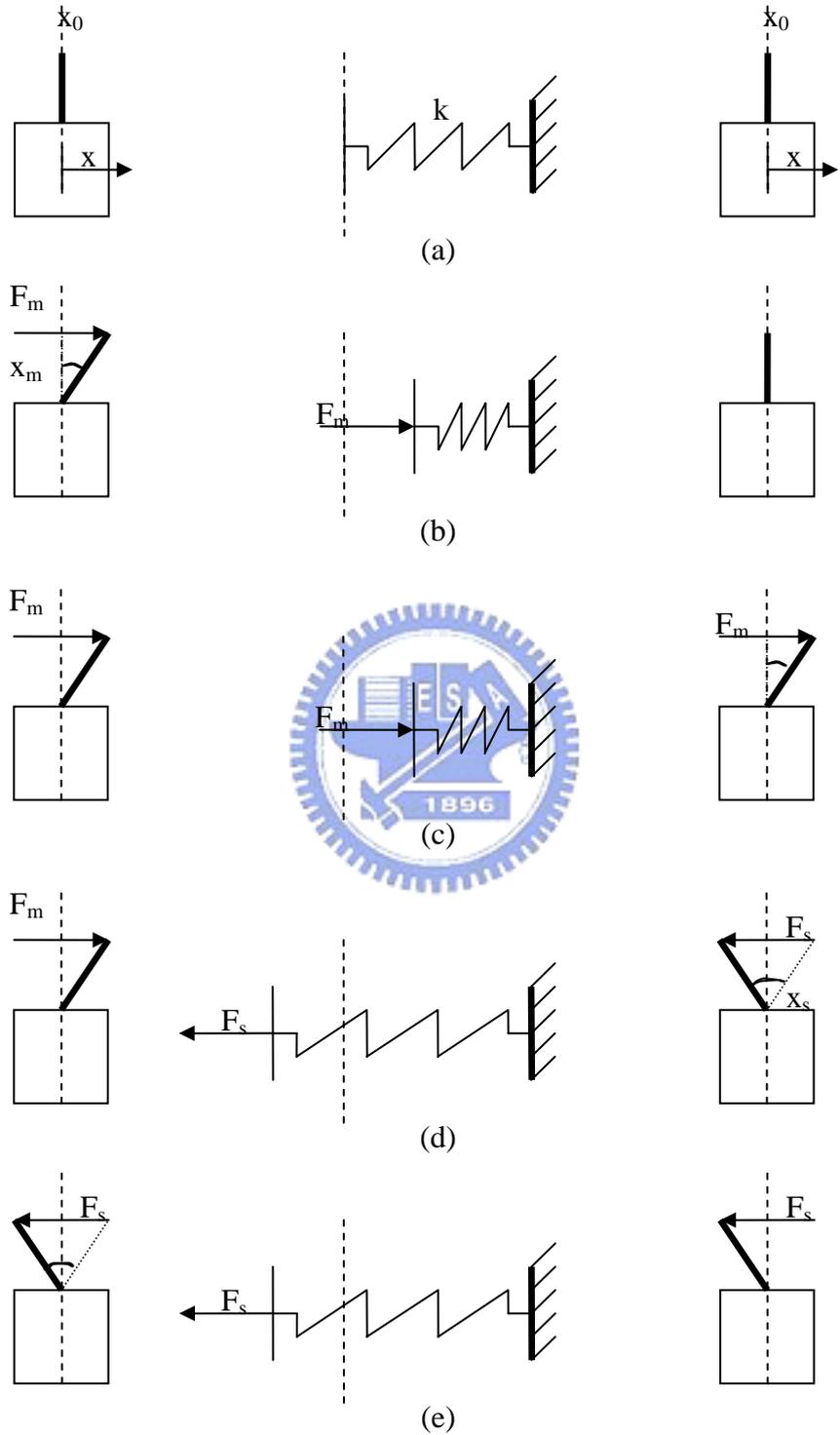


圖 2.10 系統運作力感模型示意圖