

# 第六章

## 實驗

經過第五章的力回饋控制器分析與電腦模擬，我們還需要實際的模擬實驗，才能確定力回饋控制系統能夠在我們設計的參數條件下，達到穩定且即時補償的要求。我們選擇 Microsoft Windows 2000 多工的作業系統作為力回饋控制系統的作業平台，並且為了使系統程式直觀、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++ 為程式語言發展的工具，撰寫接下來的各項實驗。

在實驗之前，我們首先定義搖桿與力回饋控制系統各物理量的座標系，如圖 6.1 所示。接下來在第一個實驗中，為了證明第五章所設計之力回饋控制器的可行性，所以我們規劃了兩種不同主力梯度之力感模型作為力回饋系統的輸入訊號，並實際量測力回饋之值，以觀察控制器之補償效能；在第二個實驗中，我們想了解本研究提出網路整合雙迴圈之系統效能是否良好，因此我們分別針對 X 軸、Y 軸與雙軸同時量測場景端之力命令值與力控制端之回饋力值，並分別比較兩者訊號之差異性以便判斷系統模擬環境是否正常運作。

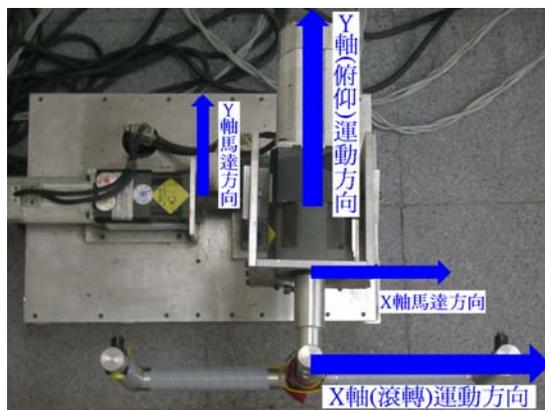


圖 6.1 實驗座標方向定義

## 6.1 力回饋控制實驗

本實驗的目的是為了印證 5.5 節所設計的力回饋控制律之可行性，並使用圖 5.10 所示之內迴路力回饋控制系統方塊圖來作為控制策略。而在力回饋控制系統輸入訊號 ( $F_r$ ) 方面即為飛機搖桿之力感模型，由於真實力感模型之曲線必須從實際飛機經力感量測儀量測而得，並經由數學參數推導出其機械系統的模型，故本研究於力感模型之設計並不詳加討論。因此本實驗所採用之模型為參考相關線傳飛控力感曲線文獻之資訊[15]而規劃主力梯度(Primary force gradient)為其一階段線性之力感模型，我們在此便定義為線性化力感模型，如圖 6.2 所示。另外在力回饋控制系統輸出訊號 ( $F_m$ ) 方面即為力搖桿之實際回饋力，輸入訊號與輸出訊號之間的差距即為誤差訊號 ( $F_e$ )，當誤差訊號經由我們於 5.5 節所設計之加速度增益 ( $K_a$ )、速度增益 ( $K_v$ ) 以及位置增益 ( $K_p$ ) 調整放大後送入致動器中所得之轉矩力即為系統輸出訊號 ( $F_m$ )。在此實驗中，我們預期系統輸出值 ( $F_m$ ) 能經由控制器即時補償且逼近於系統輸入值 ( $F_r$ )，而使得搖桿操作者能經由力回饋感受到逼真之飛行操控力感。

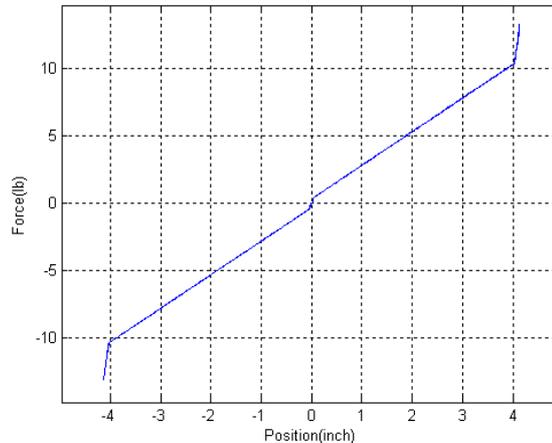


圖 6.2 線性化力感模型

決定所使用的力感模型後，首先我們先測試 X 軸力回饋控制系統，動作設定為飛行操控之滾轉動作，操作者使用搖桿先做左滾轉動作再做右滾轉動作，如圖 6.3 所示。

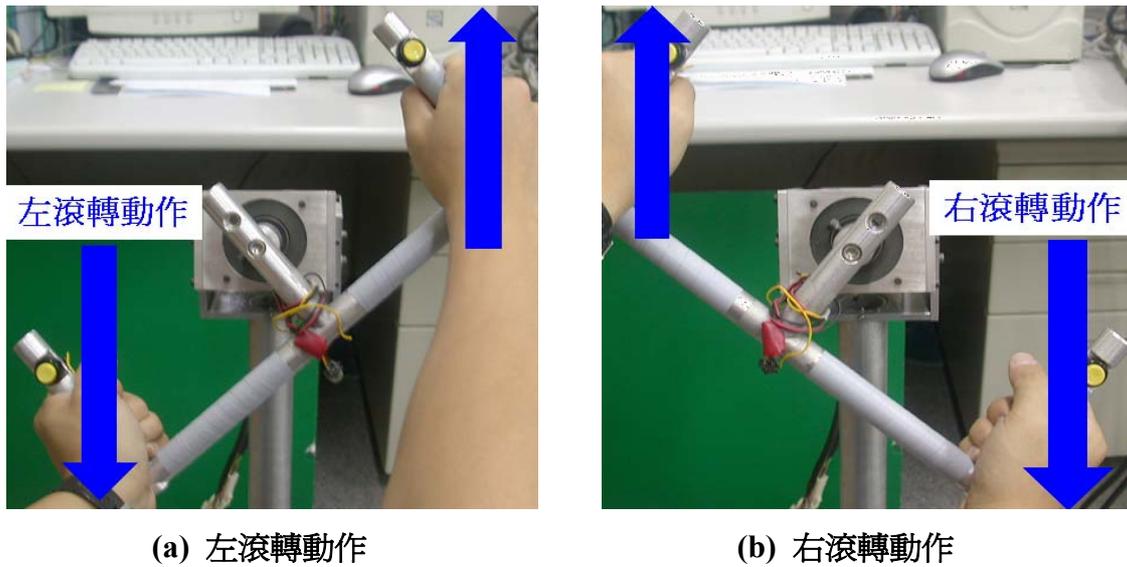
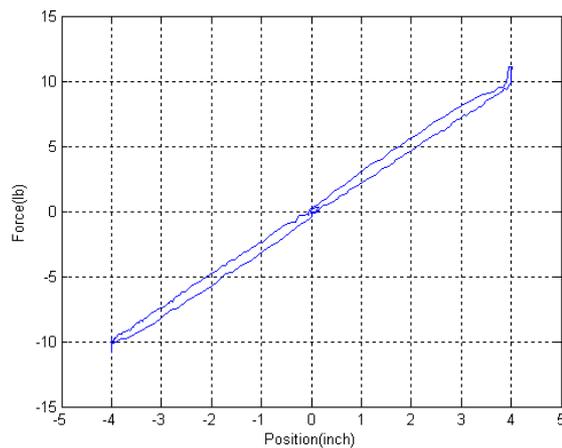
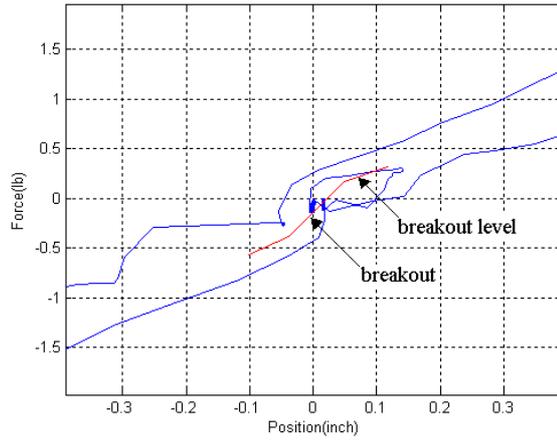


圖 6.3 滾轉操控動作：(a)左滾轉動作和 (b)右滾轉動作

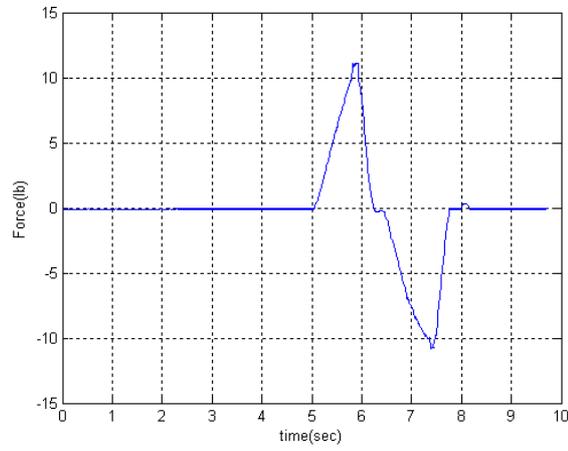
至於控制器參數設定方面，我們使用在第五章所設計的一組滾轉控制最佳參數值 ( $K_a = 0.7$ 、 $K_v = 6.8$ 、 $K_p = 1.7$ )，便將其實際經由程式的撰寫並輸入馬達伺服系統之中，最後經由 Multi I/O 卡的量測到以下的實際力回饋訊息圖，如圖 6.4(a) ~ (d) 所示。



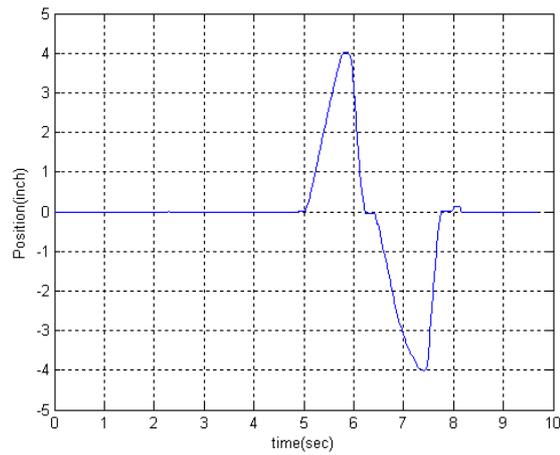
(a) X 軸力回饋力量-位移曲線圖



(b) X 軸力回饋力量-位移曲線圖局部放大圖



(c) X 軸力回饋力量-時間曲線圖



(d) X 軸力回饋位移-時間曲線圖

圖 6.4 roll 力回饋數據(使用參數  $K_a:0.7$ 、 $K_v:6.8$ 、 $K_p:1.7$ )：(a)力量-位移曲線圖，(b)曲線圖局部放大圖，(c)力量-時間曲線圖，和(d)位移-時間曲線圖

經由實際量測力回饋訊號，我們可從圖 6.4(a)中看出其力量-位移曲線的主力梯度能完全追隨力感模型之訊號值，而在圖 6.4(b)局部放大圖中清楚見到搖桿中斷區之特性，還有在圖 6.4(c)與圖 6.4(d)中我們可清楚對照其搖桿位移與回饋力之變化。另外，我們可從圖 6.5 之中見到實際曲線追隨力感模型之狀態，其力量誤差值始終維持在 0.1~0.25 lb 之間足以證明控制器補償效能良好。

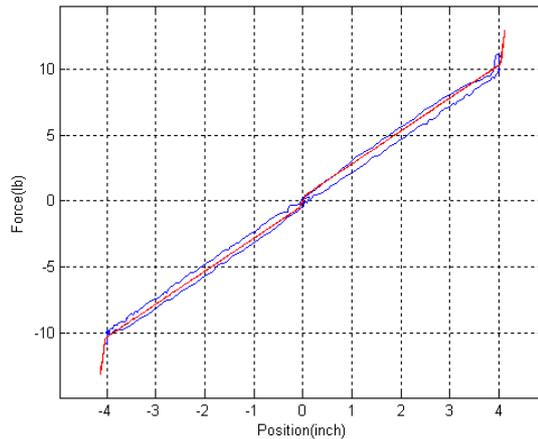


圖 6.5 X 軸力回饋力量-位移曲線與力感模型比較圖

其次我們再測試 Y 軸力回饋控制系統，同樣使用圖 6.2 之力感模型，其動作設定為飛行操控之俯仰動作，操作者使用搖桿先做上仰動作再做下俯動作，如圖 6.6 所示。



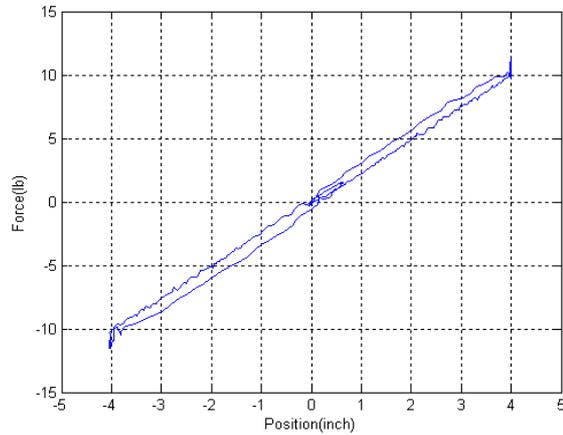
(a) 上仰動作



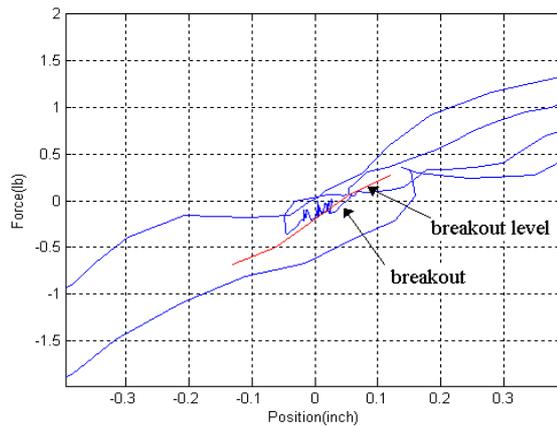
(b) 下俯動作

圖 6.6 俯仰操控動作：(a)上仰動作和 (b)下俯動作

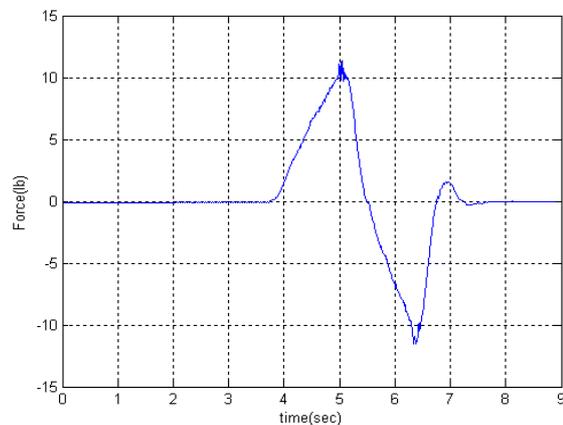
至於控制器參數設定方面，我們使用在第五章所設計的一組俯仰控制最佳參數值 ( $K_a = 1.2$ 、 $K_v = 11$ 、 $K_p = 1.1$ )，便將其實際經由程式的撰寫並輸入馬達伺服系統之中，最後經由 Multi I/O 卡的量測到以下的實際力回饋訊息圖，如圖 6.7(a) ~ (d) 所示。



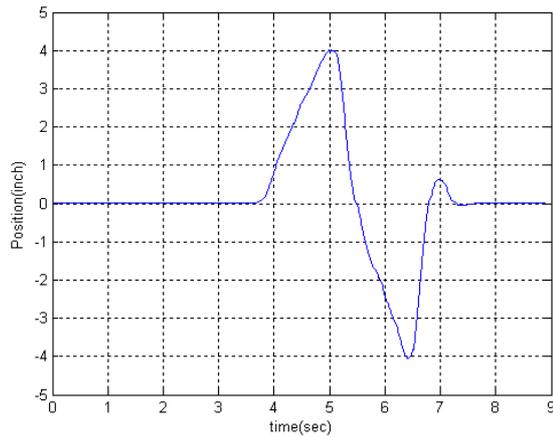
(a) Y 軸力回饋力量-位移曲線圖



(b) Y 軸力回饋力量-位移曲線圖局部放大圖



(c) Y 軸力回饋力量-時間曲線圖



(d) Y 軸力回饋位移-時間曲線圖

圖 6.7 pitch 力回饋數據(使用參數  $K_a:1.2$ 、 $K_v:11$ 、 $K_p:1.1$ )：(a)力量-位移曲線圖，(b)曲線圖局部放大圖，(c)力量-時間曲線圖，和(d)位移-時間曲線圖

經由實際量測力回饋訊號，我們可從圖 6.7(a)中看出其力量-位移曲線的主力梯度能完全追隨力感模型之訊號值，而在圖 6.7(b)曲線局部放大圖中清楚見到搖桿中斷區之特性，還有在圖 6.7(c)與圖 6.7(d)中我們可清楚對照其搖桿位移與回饋力之變化。另外，我們可從圖 6.8 之中見到實際曲線追隨力感模型之狀態，其力量誤差值始終維持在 0.05 ~ 0.2 lb 之間足以證明控制器補償效能良好。

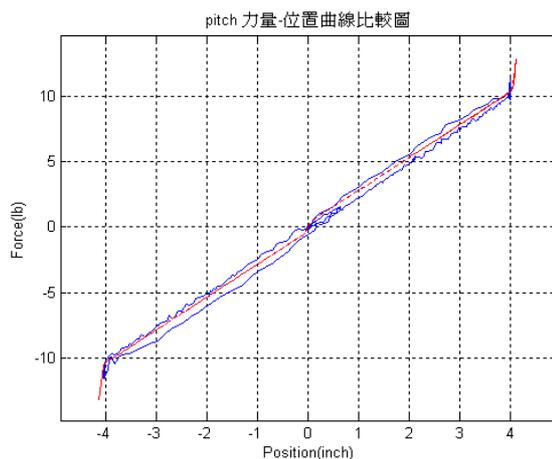


圖 6.8 Y 軸力回饋力量-位移曲線與力感模型比較圖

進一步地，爲了驗證所設計的力回饋控制迴路效能之延展性，將上述之力感模型推廣至更複雜之力感呈現，以求能更加展現實際飛機飛行之力感，故我們規劃主力梯度(Primary force gradient)爲其兩階段線性之力感模型，我們在此定義爲兩階段線性化力感模型，其所追蹤之力感曲線如圖 6.9 所示。

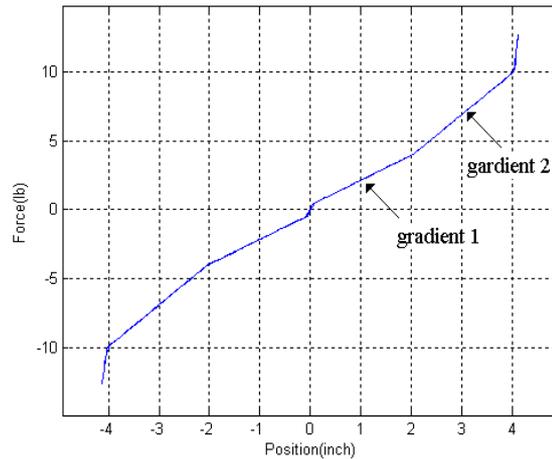
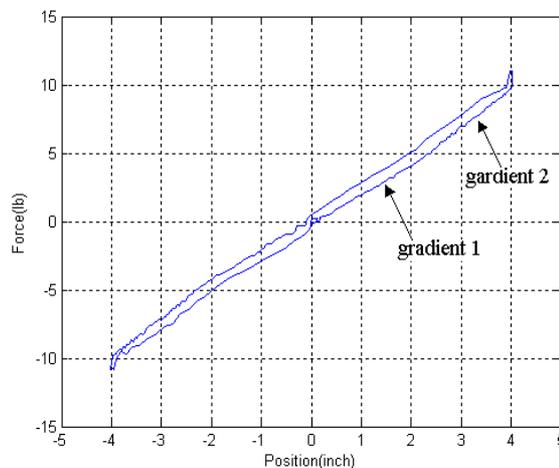
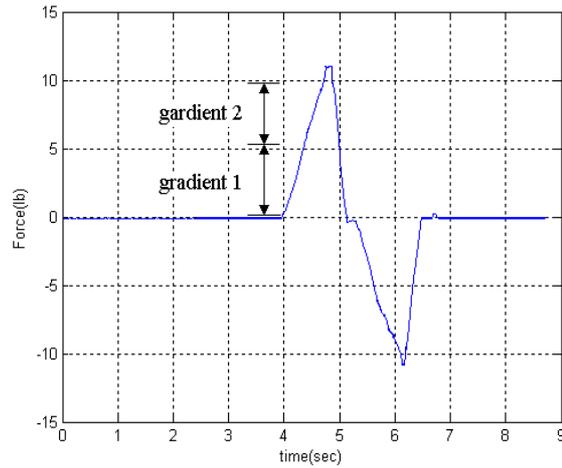


圖 6.9 兩階段線性化力感模型

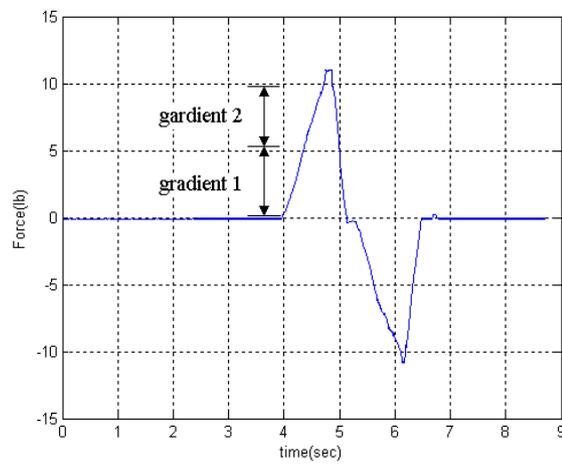
決定新的力感模型後，接著我們再次測試 X 軸力回饋控制系統，動作設定爲飛行操控之滾轉動作，與圖 6.3 之動作相同。其力回饋控制器與補償增益參數皆與圖 6.4 之實驗設定一樣，最後則經由 Multi I/O 卡的量測到以下的實際力回饋訊息圖，如圖 6.10(a) ~ (d)所示。



(a) X 軸力回饋力量-位移曲線圖



(b) X 軸力回饋力量-時間曲線圖



(c) Y 軸力回饋位移-時間曲線圖

圖 6.10 roll 力回饋數據(使用參數  $K_a:0.7$ 、 $K_v:6.8$ 、 $K_p:1.7$ )：(a)力量-位移曲線圖，(b)力量-時間曲線圖，和(c)位移-時間曲線圖

經由實際量測力回饋訊號，我們可從圖 6.10(a)中看出其力量-位移曲線的主力梯度能有效的追隨力感模型之訊號值，呈現出兩段主力梯度的特性。而在圖 6.10(b)與圖 6.10(c)中我們可清楚對照其搖桿位移與回饋力之變化，其力量與位移曲線有一明顯的彈簧梯度分界，表現出兩個彈簧梯度的特徵。另外，我們可從圖 6.11 之中見到實際曲線追隨力感模型之狀態，其力量誤差值始終維持在  $0.1 \sim 0.45$  lb 之間足以證明控制器具備一定的補償延展性。

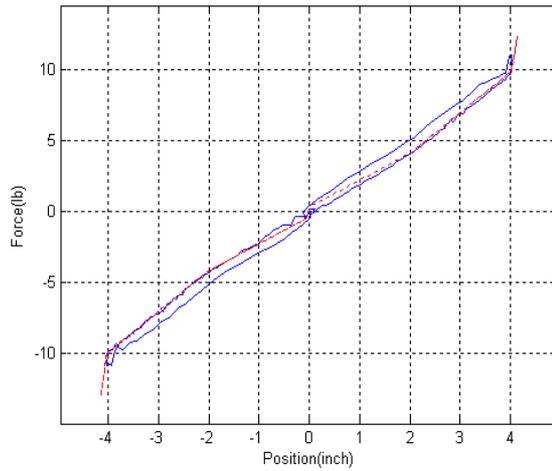
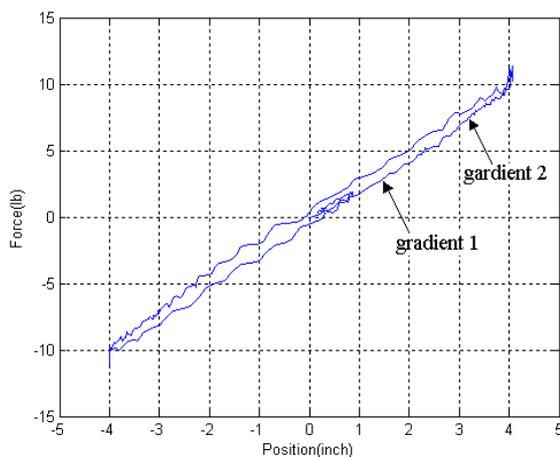
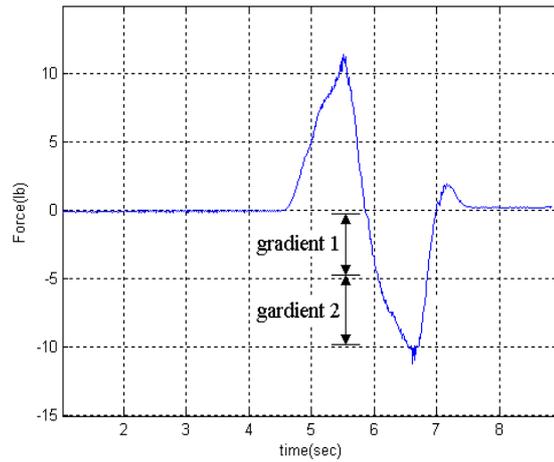


圖 6.11 X 軸力回饋力量-位移曲線與力感模型比較圖

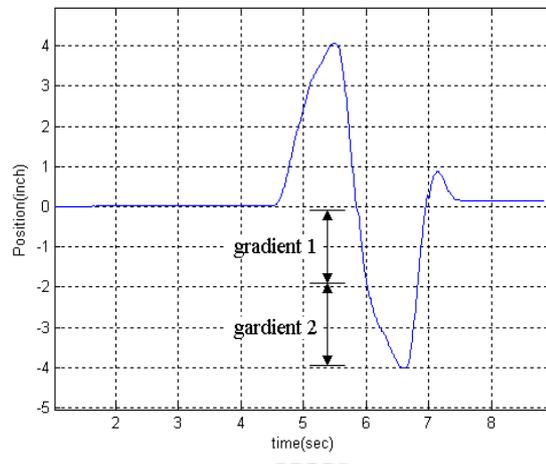
最後，接著我們再次測試 Y 軸力回饋控制系統，同樣使用圖 6.9 之力感模型，其動作設定為飛行操控之俯仰動作，操作者使用搖桿先做上仰動作再做下俯動作，其動作與圖 6.6 所示相同。其力回饋控制器與補償增益參數皆與圖 6.7 之實驗設定一樣，最後則經由 Multi I/O 卡的量測到以下的實際力回饋訊息圖，如圖 6.12(a) ~ (d) 所示。



(a) Y 軸力回饋力量-位移曲線圖



(b) Y 軸力回饋力量-時間曲線圖



(c) Y 軸力回饋位移-時間曲線圖

圖 6.12 pitch 力回饋數據(使用參數  $K_a:1.2$ 、 $K_v:11$ 、 $K_p:1.1$ )：(a)力量-位移曲線圖，(b)力量-時間曲線圖，和(c)位移-時間曲線圖

經由實際量測力回饋訊號，我們可從圖 6.12(a)中看出其力量-位移曲線的主力梯度能有效的追隨力感模型之訊號值，呈現出雙主力梯度的特性。而在圖 6.12(b)與圖 6.12(c)中我們可清楚對照其搖桿位移與回饋力之變化，其力量與位移曲線有一明顯的彈簧梯度分界，表現出兩個彈簧梯度的特徵。另外，我們可從圖 6.13 之中見到實際曲線追隨力感模型之狀態，其力量誤差值始終維持在 0.1 ~ 0.5 lb 之間足以證明控制器具備一定的補償延展性。

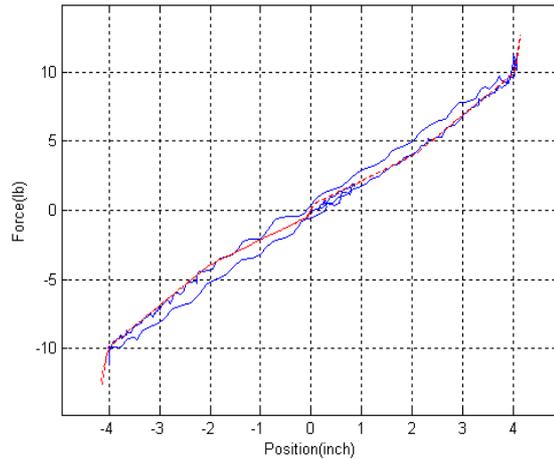


圖 6.13 Y 軸力回饋力量-位移曲線與力感模型比較圖

由以上的實驗結果我們可以發現，其力回饋控制器皆能追蹤以及補償所提供的力感模型，因為我們皆是以同一組控制參數來測試，故誤差值會因力感模型之複雜度提高而增加，而對於擁有複雜度的力感模型而言我們只需更改對其曲線追蹤性較佳之參數便可，所以此控制器除了適用於飛行力感外，也適合一般力感模型使用。

由於本論文所使用搖桿之硬體限制僅能提供約 10Hz 左右之頻寬，所以只適合於大型飛機力感之模擬，若想針對於戰鬥機或飛行自動駕駛之模擬，由於其操控性質較為大型飛機靈敏且頻寬需更高，故本論文所採用之搖桿並不適合用於戰機與飛行自動駕駛之力感模擬。

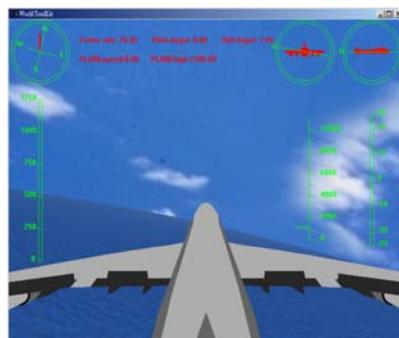
## 6.2 虛擬實境與力感控制整合實驗

爲了印證本研究於第三章所提出之整合系統對於力感表現的效能，在此我們分別對搖桿之 X 軸、Y 軸以及雙軸規劃了三個實驗以印證之。在軟體實踐方面，我們使用圖 3.5 與圖 3.6 之流程來撰寫程式，將場景端力命令(使用圖 6.2 線性化力感模型)經網路傳送後成爲力回饋控制端之輸入訊號，再經由力回饋控制器運算產生實際回饋力，此實驗之目的是爲了證明系統之回饋力能即時補償以及追隨場景端的力命令，並且能維持在一定範圍的延遲時間，使整合系統正常工作。

### A. X 軸實驗

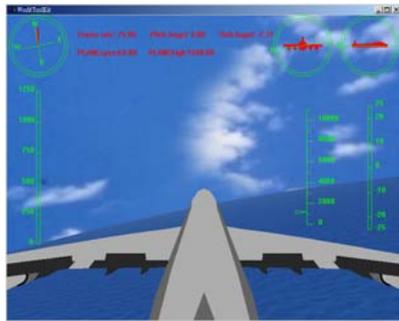
在此實驗中，我們配合場景端之動態對搖桿 X 軸規劃四種動作，其目的是爲了證明無論場景端之力命令如何變化，力回饋控制端之回饋力皆能即時補償。其四個動作(1)~(4)，如圖 6.14 至圖 6.17 所示。

- (1) 大約在 2 ~ 4 秒處做一個緩和的小型左滾轉動作，其場景端之飛機動態變化與搖桿操控動作分別如圖 6.14(a)~6.14(b)所示；
- (2) 大約在 7 ~ 9 秒處做一個緩和的小型右滾轉動作，其場景端之飛機動態變化與搖桿操控動作分別如圖 6.15(a)~6.15(b)所示；
- (3) 大約在 11 ~ 14 秒處做一個緊急的大型左滾轉動作，其場景端之飛機動態變化與搖桿操控動作分別如圖 6.16(a)~6.16(b)所示；
- (4) 大約在 16 ~ 19 秒處做一個緊急的大型右滾轉動作，其場景端之飛機動態變化與搖桿操控動作分別如圖 6.17(a)~6.17(b)所示。

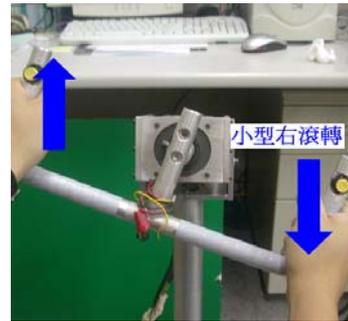


(a) 場景端小型左滾轉動態圖 (b) 搖桿小型左滾轉動作圖

圖 6.14 X 軸操控示意圖(1)：(a)場景端小型左滾轉動態和(b)搖桿小型左滾轉動作

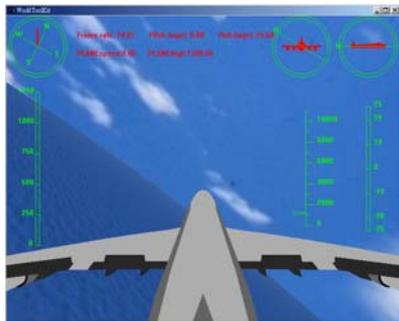


(a) 場景端小型右滾轉動態圖



(b) 搖桿小型右滾轉動作圖

圖 6.15 X 軸操控示意圖(2)：(a)場景端小型右滾轉動態和(b)搖桿小型右滾轉動作



(a) 場景端大型左滾轉動態圖

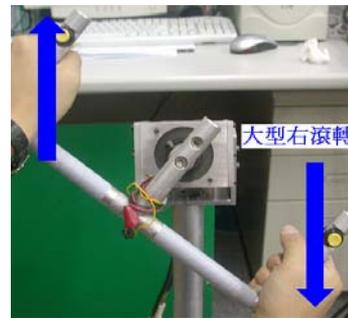


(b) 搖桿大型左滾轉動作圖

圖 6.16 X 軸操控示意圖(3)：(a)場景端大型左滾轉動態和(b)搖桿大型左滾轉動作



(a) 場景端大型右滾轉動態圖



(b) 搖桿大型右滾轉動作圖

圖 6.17 X 軸操控示意圖(4)：(a)場景端大型右滾轉動態和(b)搖桿大型右滾轉動作

X 軸實驗數據如圖 6.18 所示，其 VR 場景端之力命令為紅色虛線，而力回饋控制端之力回饋量測值為藍色實線，我們可以發現力回饋值完整的追蹤並補償場景之力感模型命令，而且維持一定範圍的延遲時間(0.1 ~ 0.3 秒)與力量誤差值(0.1 ~0.3 lb)，則我們可說，其系統整合架構皆能使其滾轉動作正常並且也能維持場景端畫面流暢。

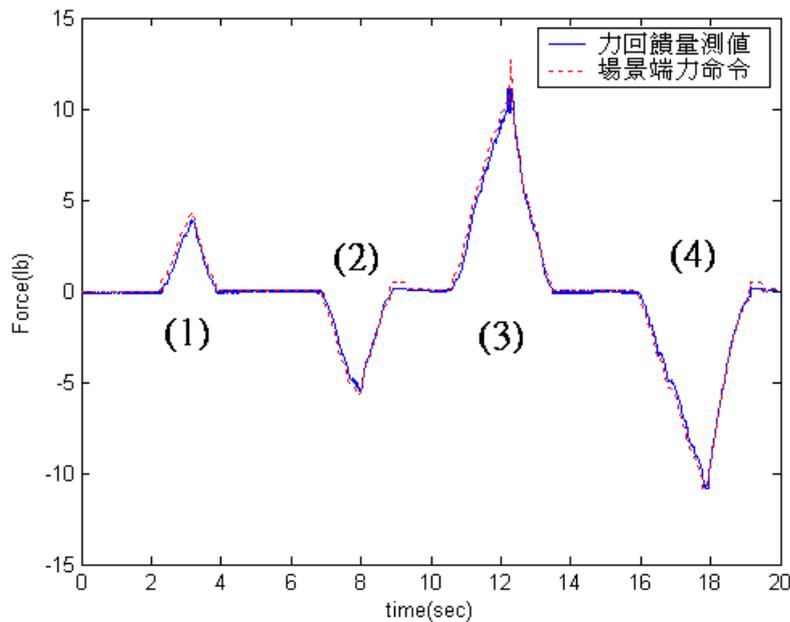
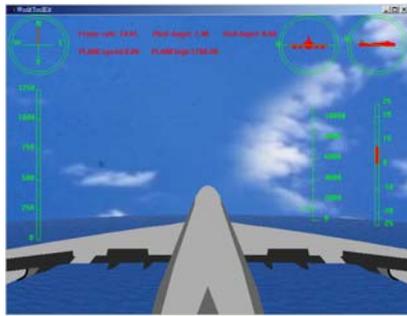


圖 6.18 整合系統之 X 軸力量-時間曲線比較圖

## B. Y 軸實驗

在此實驗中，我們配合場景端之動態對搖桿 Y 軸規劃四種動作，其目的是為了證明無論場景端之力命令如何變化，力回饋控制端之回饋力皆能即時補償，此四個動作(1)~(4)，如圖 6.19 至圖 6.22 所示。

- (1) 大約在 2 ~ 4 秒處做一個緩和的小型上仰動作，其場景端之飛機動態變化與搖桿操控動作分別如圖 6.19(a) ~ 6.19(b)所示；
- (2) 大約在 7 ~ 9 秒處做一個緩和的小型下俯動作，其場景端之飛機動態變化與搖桿操控動作分別如圖 6.20(a) ~ 6.20(b)所示；
- (3) 大約在 11 ~ 14 秒處做一個緊急的大型下俯動作，其場景端之飛機動態變化與搖桿操控動作分別如圖 6.21(a) ~ 6.21(b)所示；
- (4) 大約在 16 ~ 19 秒處做一個緊急的大型下俯動作，其場景端之飛機動態變化與搖桿操控動作分別如圖 6.22(a) ~ 6.22(b)所示。



(a) 場景端小型上仰動態圖



(b) 搖桿小型上仰動作圖

圖 6.19 Y 軸操控示意圖(1)：(a)場景端小型上仰動態和(b)搖桿小型上仰動作



(a) 場景端小型下俯動態圖



(b) 搖桿小型下俯動作圖

圖 6.20 Y 軸操控示意圖(2)：(a)場景端小型下俯動態和(b)搖桿小型下俯動作

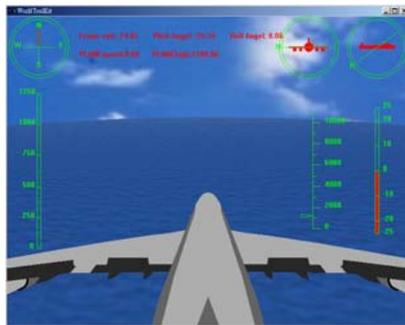


(a) 場景端大型上仰動態圖



(b) 搖桿大型上仰動作圖

圖 6.21 Y 軸操控示意圖(3)：(a)場景端大型上仰動態和(b)搖桿大型上仰動作



(a) 場景端大型下俯動態圖



(b) 搖桿大型下俯動作圖

圖 6.22 Y 軸操控示意圖(4)：(a)場景端大型下俯動態和(b)搖桿大型下俯動作

Y 軸實驗數據如圖 6.23 所示，其 VR 場景端之力命令為紅色虛線，而力回饋控制端之力回饋量測值為藍色實線，我們可以發現力回饋訊號完整的追蹤並補償場景的力感模型命令，且維持一定範圍的延遲時間(0.1 ~ 0.25 秒)與力量誤差值(0.05 ~ 0.25 lb)，則我們可說，其系統整合架構皆能使其俯仰動作正常並且也能維持場景端畫面流暢。

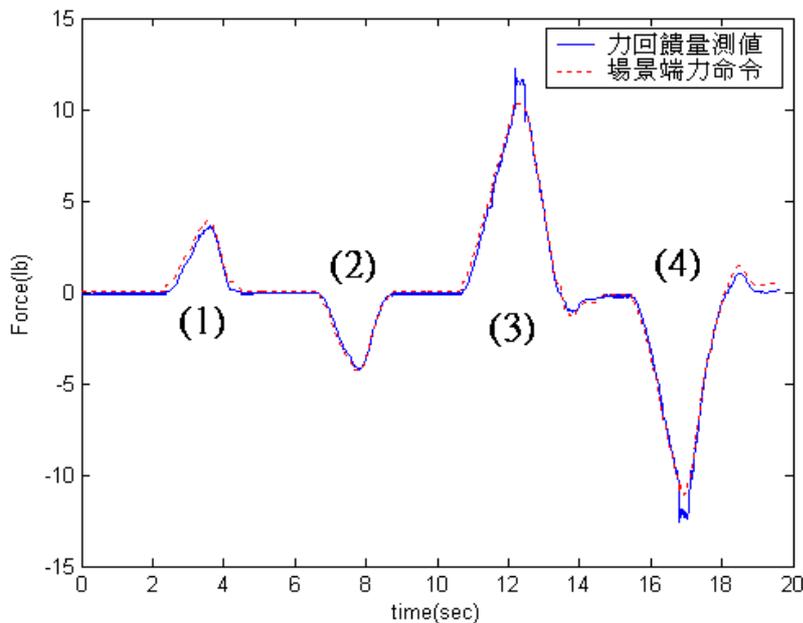
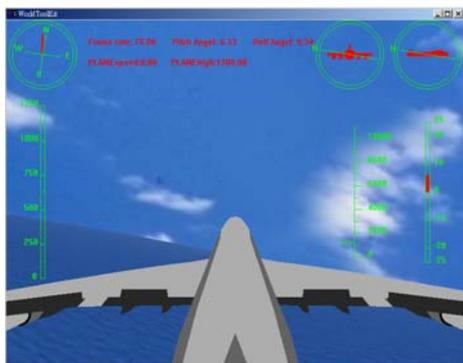


圖 6.23 整合系統之 Y 軸力量-時間曲線比較圖

### C. 雙軸實驗

在此實驗中，我們配合場景端之動態同時對搖桿 X 軸與 Y 軸規劃八種動作，其目的是為了證明無論場景端之力命令如何變化，力回饋控制端之雙軸回饋力皆能即時補償。其八個動作(1)~(4)，如圖 6.24 至圖 6.27 所示。

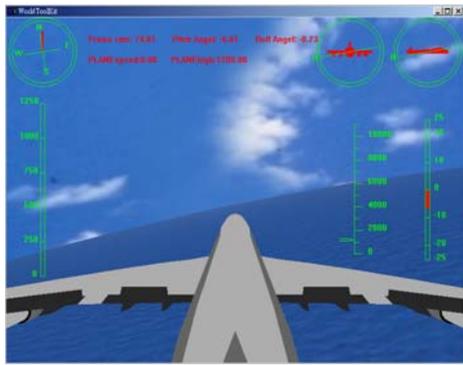
- (1) 大約在 2 ~ 9 秒處先做一個緩和的小型上仰動作，並在上仰動作其間附加一個緩和的小型左滾轉的動作 (於 4 ~ 7 秒內)，此兩者為組合式的連續動作，其場景端之飛機動態變化與搖桿操控動作分別如圖 6.24(a) ~ 6.24(b)所示；
- (2) 大約在 12 ~ 19 秒處先做一個緩和的小型下俯動作，並在其下俯動作其間附加一個緩和的小型右滾轉的動作 (於 14 ~ 17 秒內)，此兩者為組合式的連續動作，其場景端之飛機動態變化與搖桿操控動作分別如圖 6.25(a) ~ 6.25(b)所示；
- (3) 大約在 20 ~ 30 秒處先做一個緊急的大型上仰動作，並在其上仰動作其間附加一個緊急的大型左滾轉的動作 (於 23 ~ 27 秒內)，此兩者為組合式的連續動作，其場景端之飛機動態變化與搖桿操控動作分別如圖 6.26(a) ~ 6.26(b)所示；
- (4) 大約在 30 ~ 40 秒處先做一個緊急的大型下俯動作，並在其下俯動作其間附加一個緊急的大型右滾轉的動作 (於 33 ~ 37 秒內)，此兩者為組合式的連續動作，其場景端之飛機動態變化與搖桿操控動作分別如圖 6.27(a) ~ 6.27(b)所示。



(a) 場景端小型上仰左滾轉動態圖

(b) 搖桿小型上仰左滾轉動作圖

圖 6.24 雙軸操控示意圖(1): (a)場景端小型上仰左滾轉動態和(b)搖桿小型上仰左滾轉動作

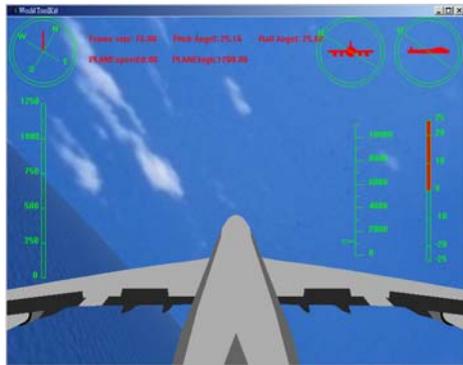


(a) 場景端小型下俯右滾轉動態圖



(b) 搖桿小型下俯右滾轉動作圖

圖 6.25 雙軸操控示意圖(2): (a)場景端小型下俯右滾轉動態和(b)搖桿小型下俯右滾轉動作

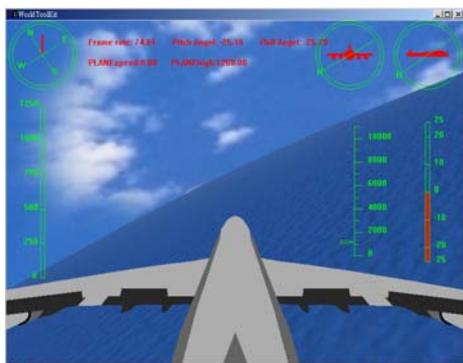


(a) 場景端大型上仰左滾轉動態圖



(b) 搖桿大型上仰左滾轉動作圖

圖 6.26 雙軸操控示意圖(3): (a)場景端大型上仰左滾轉動態和(b)搖桿大型上仰左滾轉動作



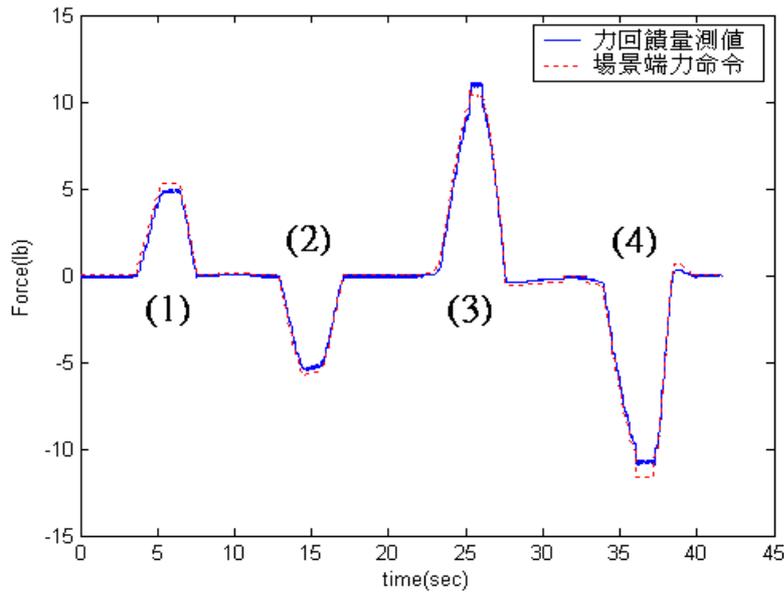
(a) 場景端大型下俯右滾轉動態圖



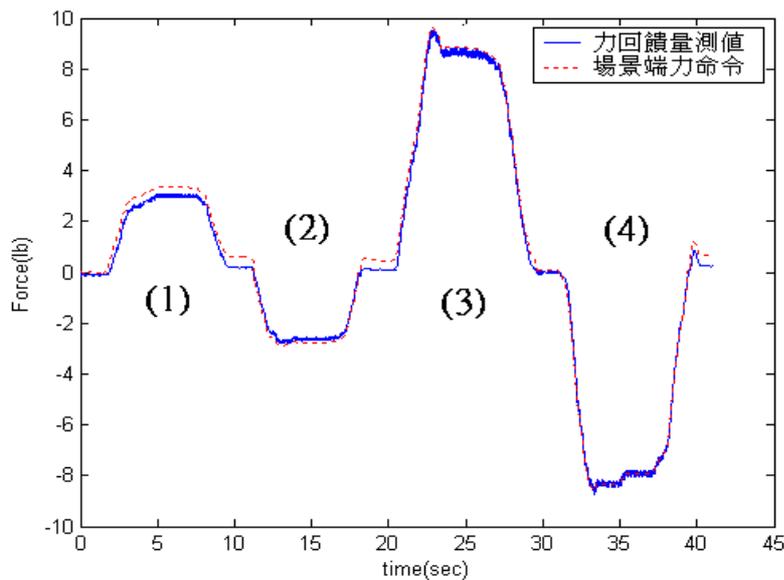
(b) 搖桿大型下俯右滾轉動作圖

圖 6.27 雙軸操控示意圖(4): (a)場景端大型下俯右滾轉動態和(b)搖桿大型下俯右滾轉動作

雙軸實驗數據如圖 6.28(a) ~ (b)所示，其中圖 6.28(a)為 X 軸力量-時間關係比較圖，圖 6.28(b)為 Y 軸力量-時間關係比較圖，且兩圖裡的紅色虛線皆代表 VR 場景端之力命令，而藍色實線皆代表力回饋控制端之力回饋量測值，我們從圖中可以發現力回饋值完整的追蹤並補償場景的力感模型命令，而且也能夠維持一定範圍的延遲時間與力量誤差值，故我們可說，其系統整合架構能同時使其兩軸之動作正常並且也能維持場場景端畫面流暢。



(a) X 軸力量-時間曲線比較圖



(b) Y 軸力量-時間曲線比較圖

圖 6.28 整合系統之雙軸力量-時間曲線比較圖：(a)X 軸和 (b)Y 軸