

# 第五章

## 實驗

經由前幾章分別介紹了互動式遠端操作系統的軟硬體架構，以及所需的相關理論與方法後，我們利用這些技術開發了一套能夠進行遠端比腕力的雙向互動式操作系統，Master 端操作者和 Slave 端的操作者透過網路與力回饋搖桿裝置，彼此可以互相感受對方所傳來的力量。在建構此雙向互動式遠端操作系統方面，Master 端我們採用 Pentium 4-2.4GHz 處理器、256Mbyte 記憶體與 Impulse Engine 2000 力回饋搖桿，Slave 端則採用 Pentium 3-800MHz 處理器、256Mbyte 記憶體以及自製力回饋搖桿，另外爲了程式的可攜性與高性能的表現，選擇 Microsoft Visual C++ 作爲程式撰寫的語言，並且基於需要作業系統具有多工的性能，和符合系統硬體的相關需求，我們將此系統共同建立在 Microsoft Windows NT 的作業平台上，詳細的 Master 端與 Slave 端系統規格如表 5.1-5.2 所示。

此外，爲了加強即時互動與身歷其境的效果，我們加入虛擬實境(virtual reality)的遠端呈現，在虛擬實境中我們假設遠方爲一質量-彈簧系統，藉由彈簧的壓縮與伸張等同於操作者推與拉的施力狀態，並且搭配第二章所提到的力感模型以進行模擬。而在遠端呈現的視窗中，如圖 5.1 所示，畫面的左上方與右上方分別列出了 Master 端與 Slave 端即時的力資訊，並且爲了加強操作者的可讀性，我們利用虛線的長短表示出力道的大小，以及一橫線表達力道的方向(有一橫線處爲正方向，反之則爲負方向)。至於完整的 Master/Slave 端操作系統實體架構，如圖 5.2-5.3 所示。

Master/IE2000	
處理器	Pentium 4-2.4GHz
記憶體	256Mbyte
力搖桿	Impulse Engine 2000
作業系統	Windows NT
程式語言	Visual C++

表 5.1 Master 端系統規格

Slave/自製力搖桿	
處理器	Pentium 3-800MHz
記憶體	256Mbyte
力搖桿	人與機器實驗室自製力搖桿
作業系統	Windows NT
程式語言	Visual C++

表 5.2 Slave 端系統規格

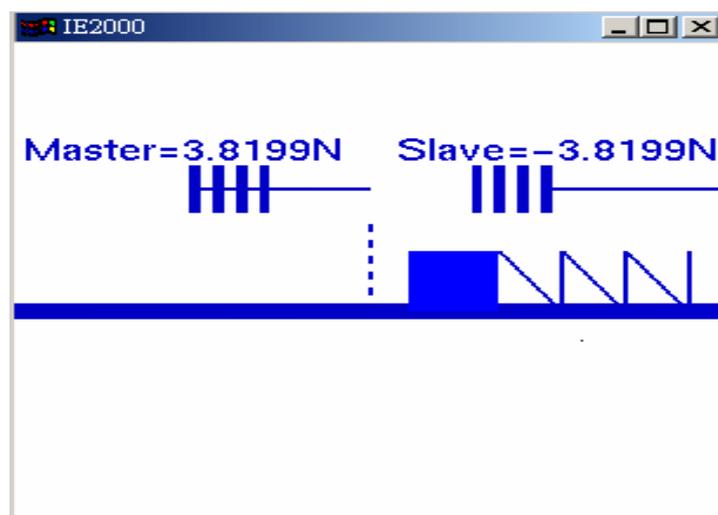


圖 5.1 Master/Slave 端操作系統動態模擬視窗



圖 5.2 Master 端操作系統實體圖

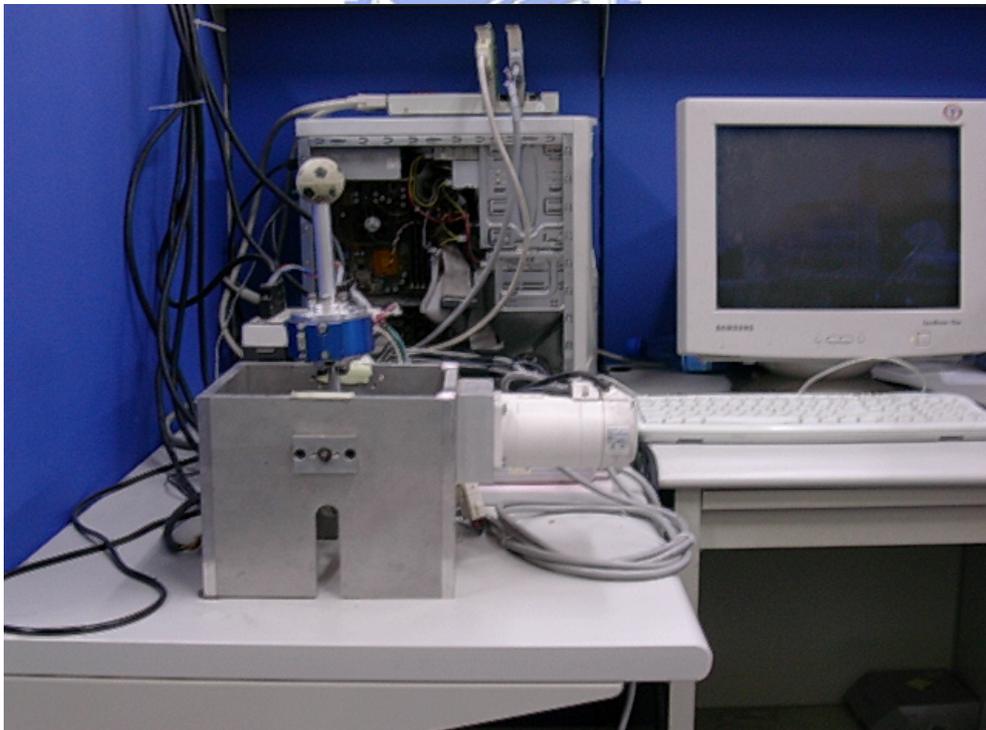


圖 5.3 Slave 端操作系統實體圖

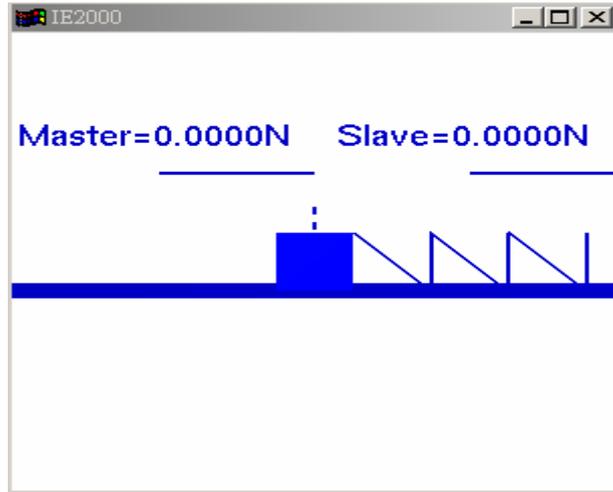
## 5.1 力感實驗

雙向互動式遠端操作系統具有兩端的操控系統，操作者藉由力回饋搖桿透過網路得知遠方力量，因此操作系統對於真實力量的呈現就變的相當重要了，雙端操作者在互動的過程中可能會有很多種的狀況，不一樣的狀況下所呈現的力覺感受也就不一樣，爲了探討這些問題，以下我們以兩種較具代表性的狀況，第一種爲假設近端操作者M施力 $F_M$ ，遠端操作者S施力 $F_S$ ，當 $F_M < F_S$ 時的力感呈現狀況，第二種爲假設近端操作者M施力 $F_M$ ，遠端操作者S施力 $F_S$ ，當 $F_M > F_S$ 時的力感呈現狀況，分別在Master端與Slave端進行實驗，以驗證本系統雙端對於力感呈現的性能。

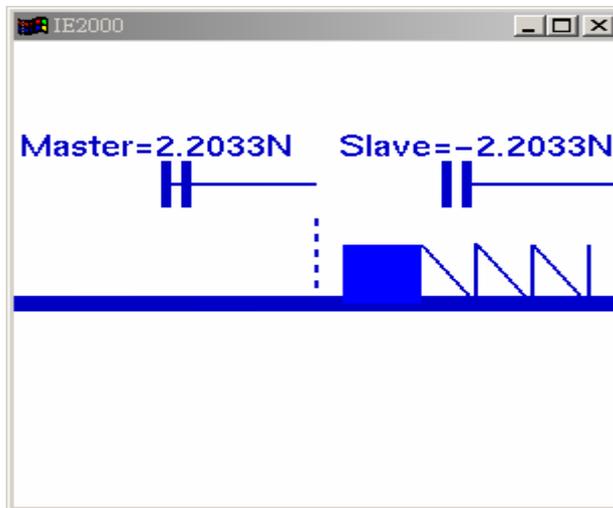
### I. 近端操作者M施力 $F_M$ ，遠端操作者S施力 $F_S$ ， $F_M < F_S$

在此實驗中，我們令近端爲 Master 端，遠端爲 Slave 端，配合場景模擬對操作者規劃了三個步驟，如圖 5.4 所示，其步驟內容如下所述：

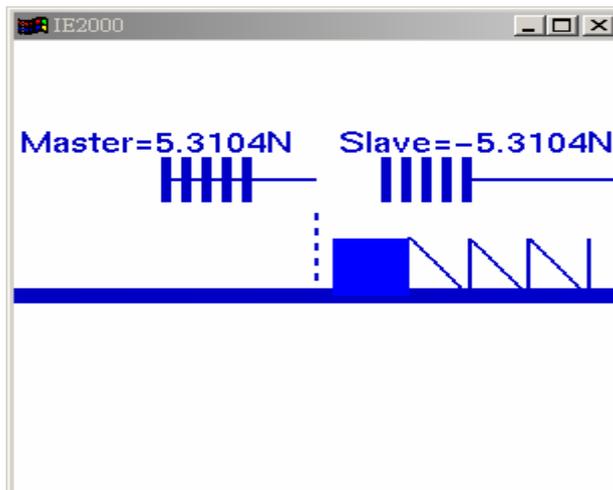
- (1) 首先將兩端力回饋搖桿置中歸零，此時兩端操作者握住搖桿但尚未施力，其場景之動態模擬與搖桿操控動作如圖 5.4(a)所示；
- (2) 接著約在 0~5 秒間，近端操作者先施予一漸漸加大的力量 $F_M$ ，透過網路將此力量傳送給遠端操作者，待遠端系統收到此力量，遠端操作者施予一力量與之抗衡，其某一瞬間之場景動態模擬與搖桿操控動作如圖 5.4(b)所示；
- (3) 最後約在 20~25 秒間，遠端操作者施予一更大的力量 $F_S$ ( $F_M < F_S$ )，透過網路將此力量傳送給近端操作者，待近端系統收到此力量，近端操作者施予一力量與之抗衡，其某一瞬間之場景之動態模擬與搖桿操控動作如圖 5.4(c)所示。



(a)步驟 1(在 0 秒處)



(b)步驟 2(約在 6 秒處)



(c)步驟 3(約在 27 秒處)

圖 5.4 遠端力量大於近端力量操控示意圖：(a)步驟 1，(b)步驟 2，和(c)步驟 3

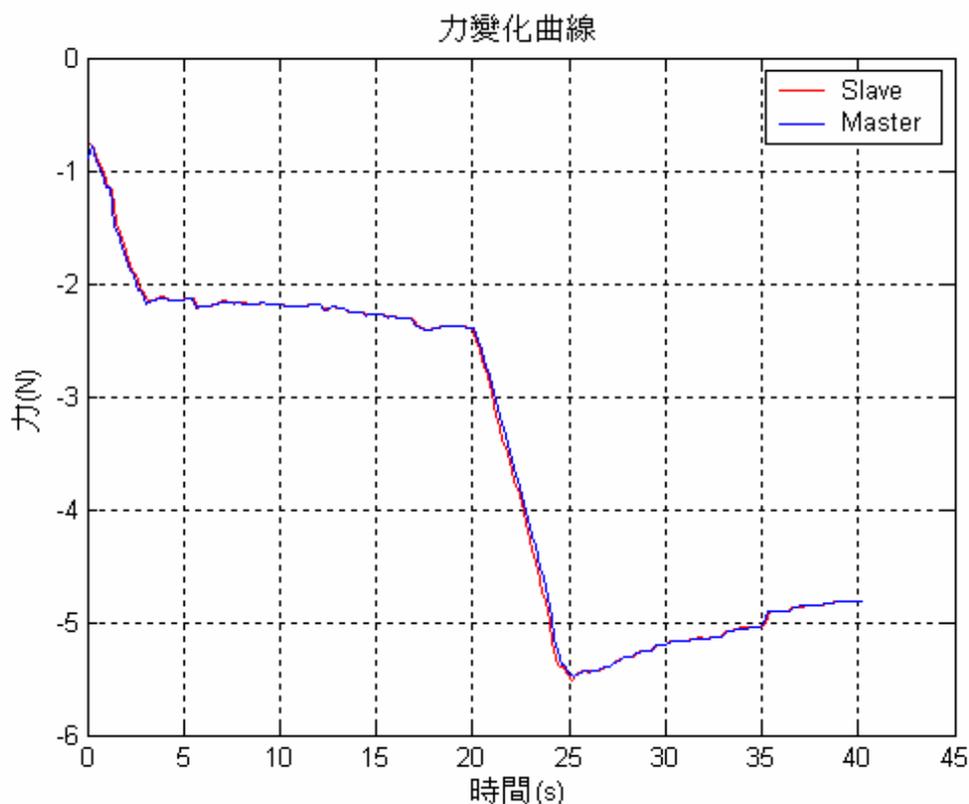
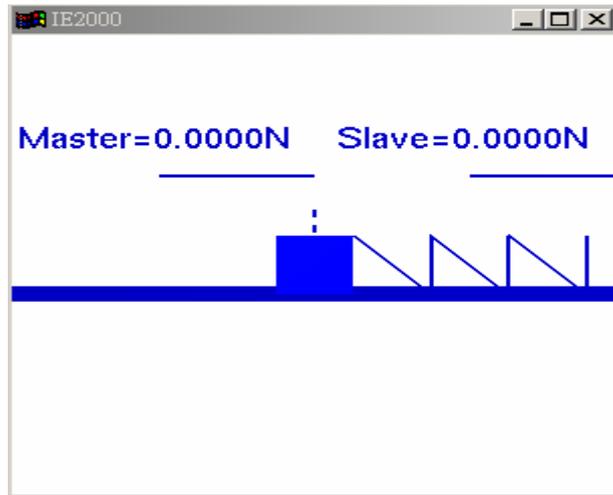


圖 5.5 Master/Slave端力變化曲線( $F_A < F_B$ )

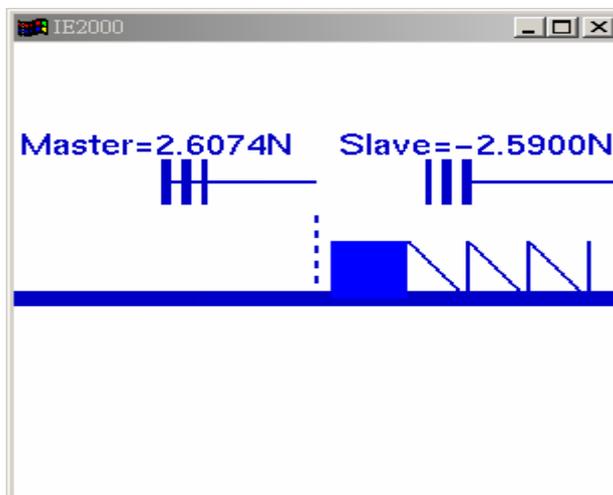
## II. 近端操作者M施力 $F_M$ ，遠端操作者S施力 $F_S$ ， $F_M > F_S$

在此實驗中，我們令近端為 Master 端，遠端為 Slave 端，配合場景模擬對操作者規劃了三個步驟，如圖 5.6 所示，其步驟內容如下所述：

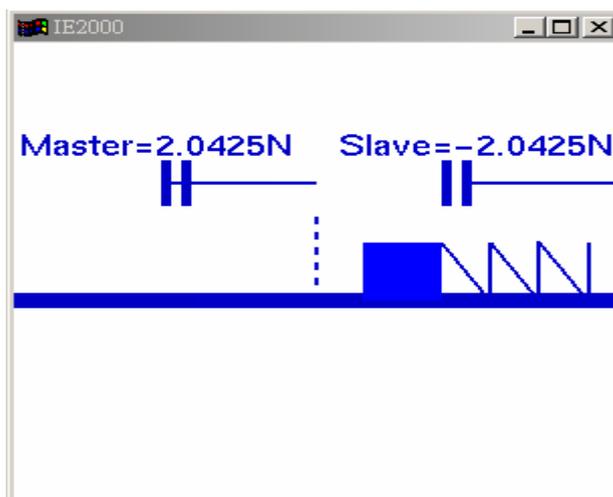
- (1) 首先將兩端力回饋搖桿置中歸零，此時兩端操作者握住搖桿但尚未施力，其場景之動態模擬與搖桿操控動作分別如圖 5.6(a)所示；
- (2) 接著約在 0~5 秒間，近端操作者先施予一漸漸加大的力量 $F_M$ ，透過網路將此力量傳送給遠端操作者，待遠端系統收到此力量，遠端操作者施予一力量與之抗衡，其某一瞬間之場景之動態模擬與搖桿操控動作如圖 5.6(b)所示；
- (3) 最後約在 15~20 秒間，遠端操作者施予一較小的力量 $F_S$ ( $F_M > F_S$ )，透過網路將此力量傳送給近端操作者，待近端系統收到此力量，近端操作者施予一力量與之抗衡，其某一瞬間之場景動態模擬與搖桿操控動作如圖 5.6(c)所示。



(a)步驟 1(在 0 秒處)



(b)步驟 2(約在 6 秒處)



(c)步驟 3(約在 18 秒處)

圖 5.6 遠端力量小於近端力量操控示意圖：(a)步驟 1，(b)步驟 2，和(c)步驟 3

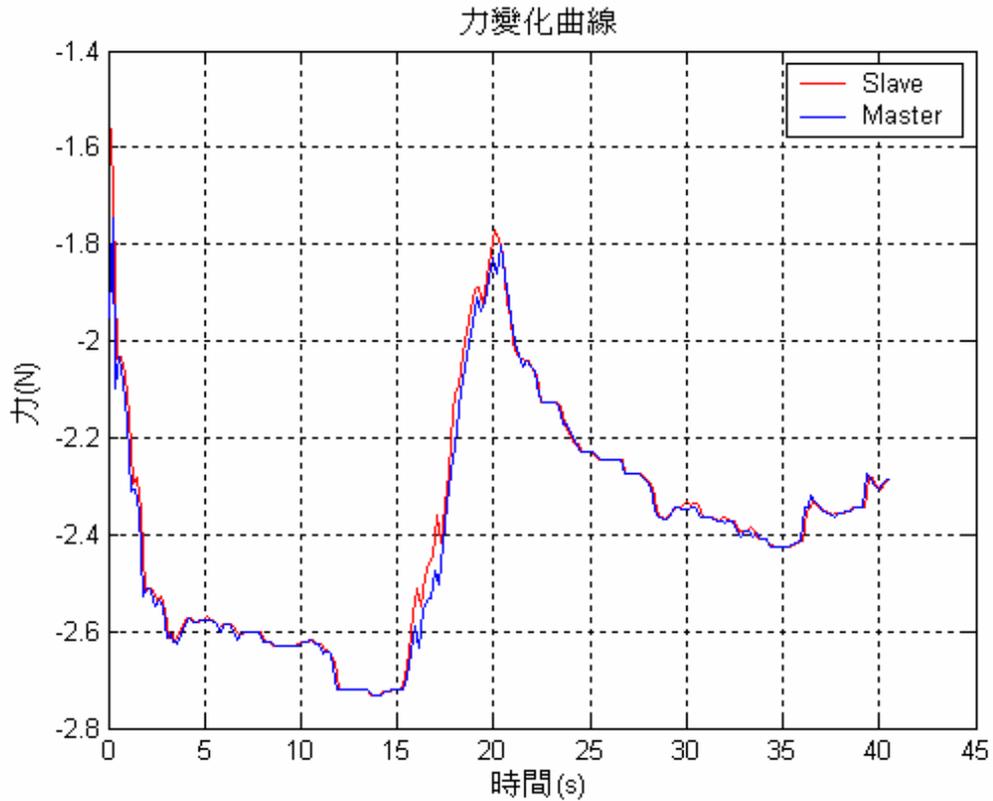
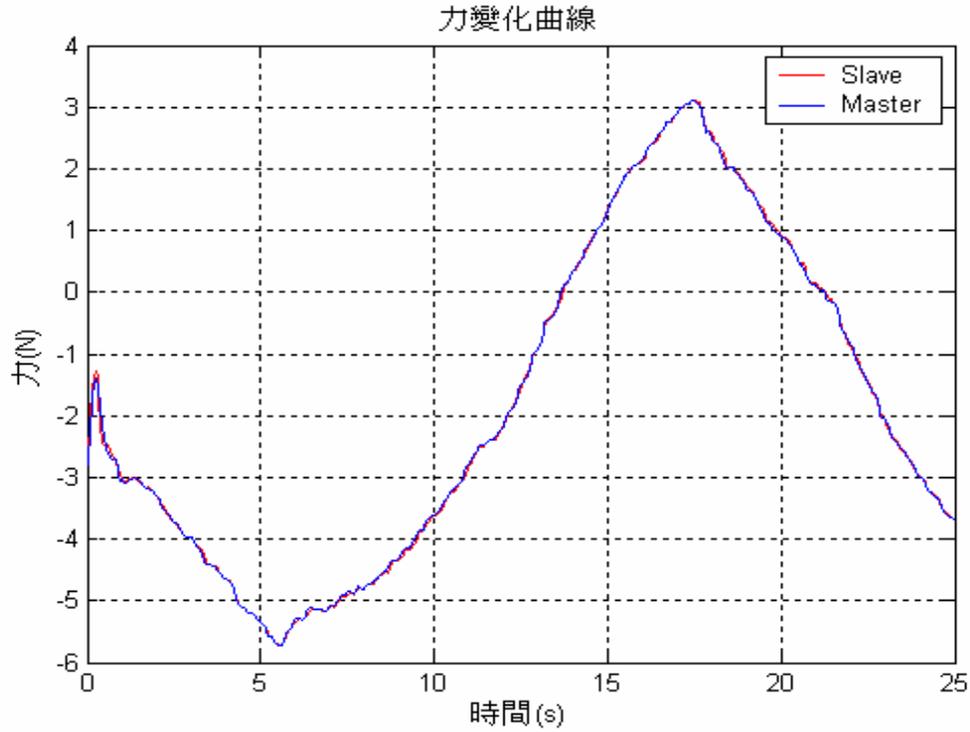


圖 5.7 Master/Slave端力變化曲線( $F_A > F_B$ )

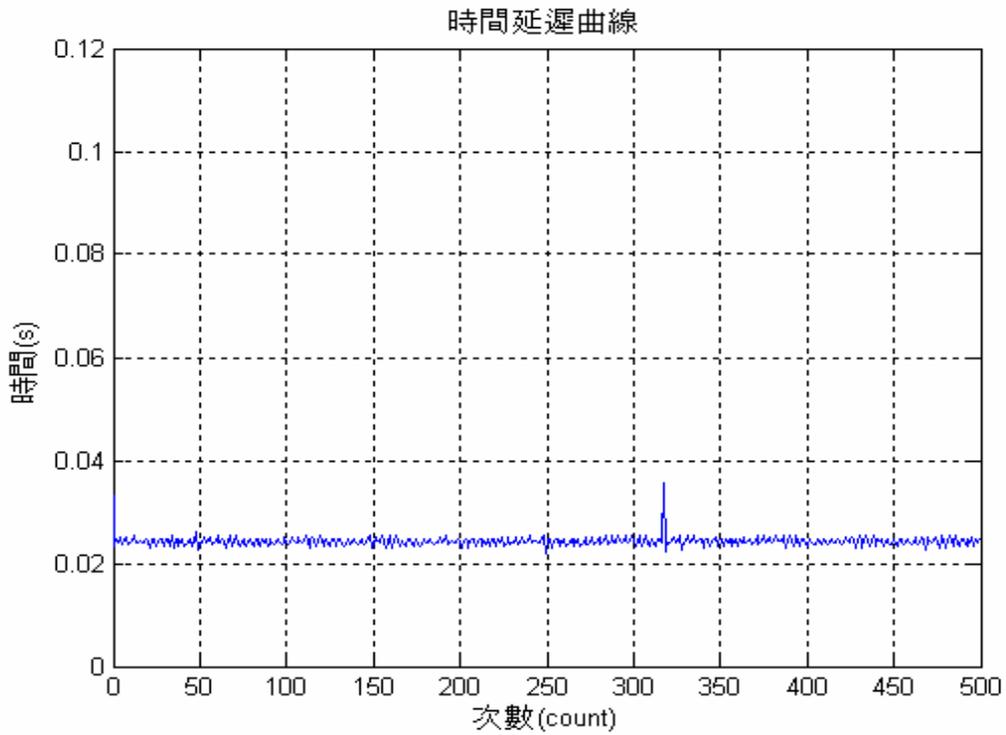
圖 5.5 與 5.7 分別顯示第一個與第二個實驗過程中 Master/Slave 端力變化曲線，其中藍線部份代表 Master 端力量變化，紅線部份代表 Slave 端力量變化。經由以上兩種實驗的結果顯示，我們可很明顯地看出此雙向互動式遠端操作系統在力感呈現與追蹤的表現上，大致穩定良好並且也能夠符合預期的狀況。另外，我們也發現當力量在某一時間內變化較為平緩時，其兩端力表現會較一致，而當力量在某一時間內變化較為陡劇時，其兩端力表現會存在些許誤差。

## 5.2 近距離與遠距離實驗

如同前面章節所提到的，資料傳輸在網路上存在著時間延遲的效應，於是在此實驗中，我們將操作系統置於近程網路與遠程網路兩種不同環境中，希望藉由不同距離的網路通訊，來探討時間延遲對本操作系統可能造成的影響。首先在近距離實驗部份，我們將此雙向互動式遠端操作系統 Master 端與 Slave 端皆置放於交通大學電控所人與機器實驗室中，透過校內區域網路的不同 IP 進行連結；在遠距離實驗部份，我們將此雙向互動式遠端操作系統 Master 端置放於清華大學實驗室中，而 Slave 端則置放於交通大學實驗室中，藉由跨校學術網路的不同 IP 進行連結。另外為了探討力更新頻率對系統可能造成的影響，我們分別在近距離與遠距離實驗時，各進行 20Hz、10Hz、與 5Hz 三種不同力更新頻率的實驗，近距離實驗相關實驗數據部份，如圖 5.8-5.10 所示，遠距離實驗相關實驗數據部份，如圖 5.11-5.13 所示，其中圖(a)部份是 Master/Slave 端力變化曲線，其中藍線部份代表 Master 端力量變化，紅線部份代表 Slave 端力量變化，圖(b)部份則是實驗中雙向時間延遲(round-trip delay)的分佈狀況。從圖 5.8-5.13 相關數據結果顯示，操作系統在兩端的力追蹤表現上情況大致良好，如同上一個實驗結果當力量在某一時間內變化較為平緩時，其兩端力表現會較一致，而當力量在某一時間內變化較為陡劇時，其兩端力表現會存在些許誤差。在時間延遲部份，我們可以發現在近距離通訊時，發生較大時間延遲現象的機率會比遠距離通訊時來的低，且力更新頻率低會比力更新頻率高來的好，圖 5.8(b)，5.9(b)與 5.10(b)的平均雙向延遲分別為 24.3146ms，48.9541ms 與 99.2622ms，圖 5.11(b)、5.12(b)與 5.13(b)的平均雙向延遲分別為 24.4412ms，49.1333ms 與 99.3168ms，遠程通訊約比近程通訊多了 100~150  $\mu s$ ，而從圖 5.8(a)、5.9(a)、5.10(a)、5.11(a)、5.12(a)以及 5.13(a)的實驗結果來看，網路時間延遲效應對本系統反應的表現大致穩定良好。

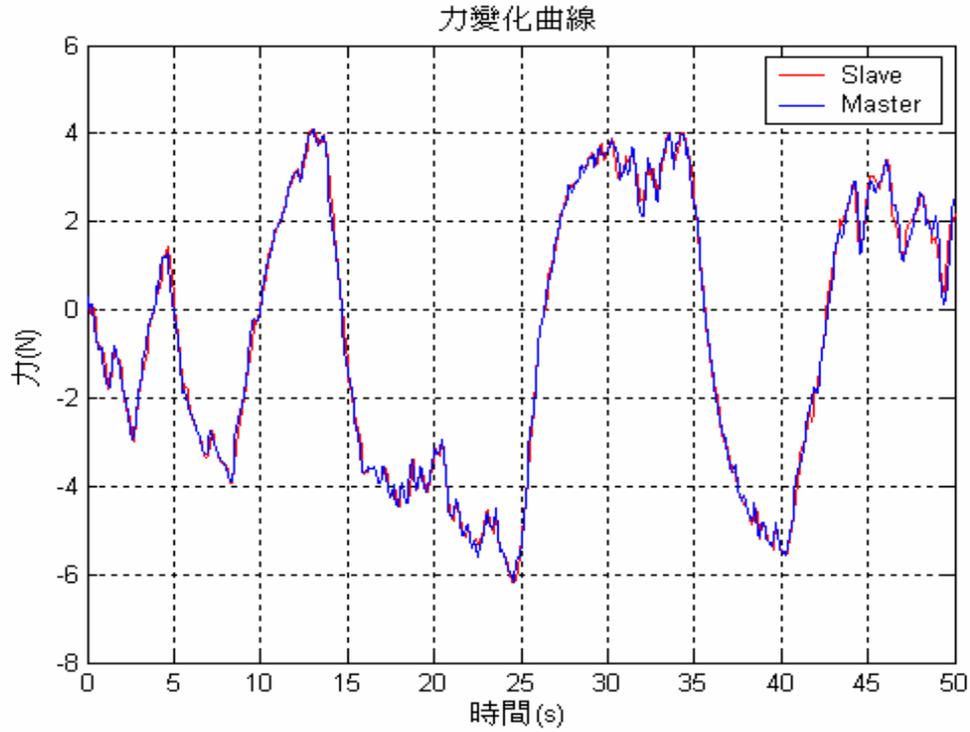


(a) Master/Slave 端力變化曲線(20Hz)

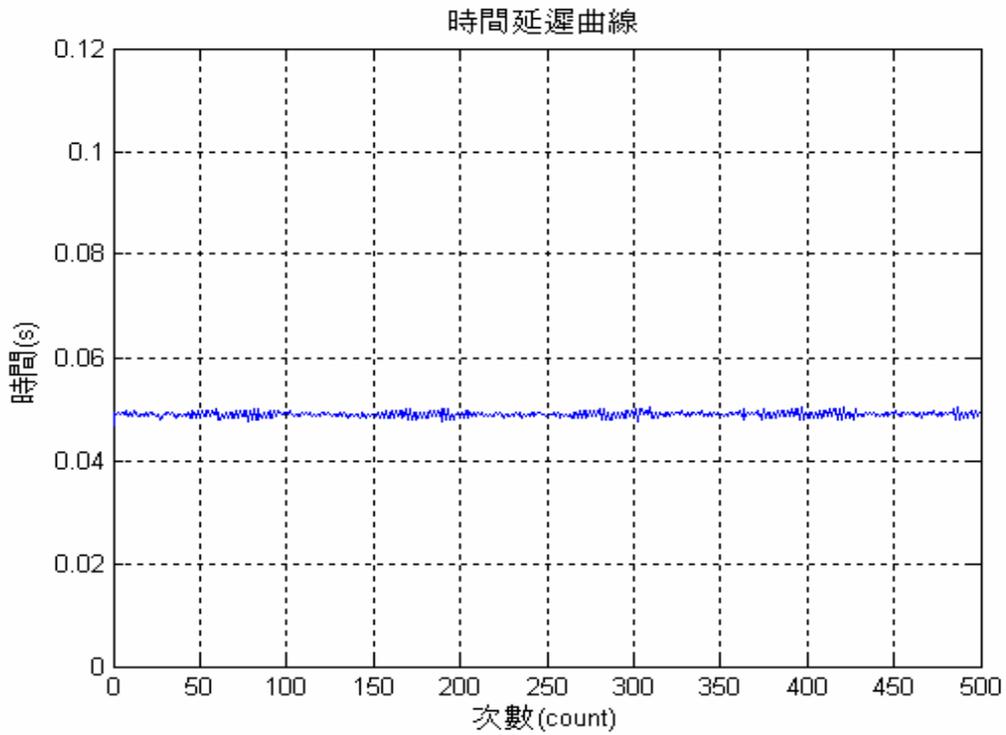


(b) 雙向時間延遲(round-trip delay)分佈狀況(20Hz)

圖 5.8 20Hz 下近距離實驗：(a)Master/Slave 端力變化曲線和(b)雙向時間延遲 (round-trip delay)分佈狀況

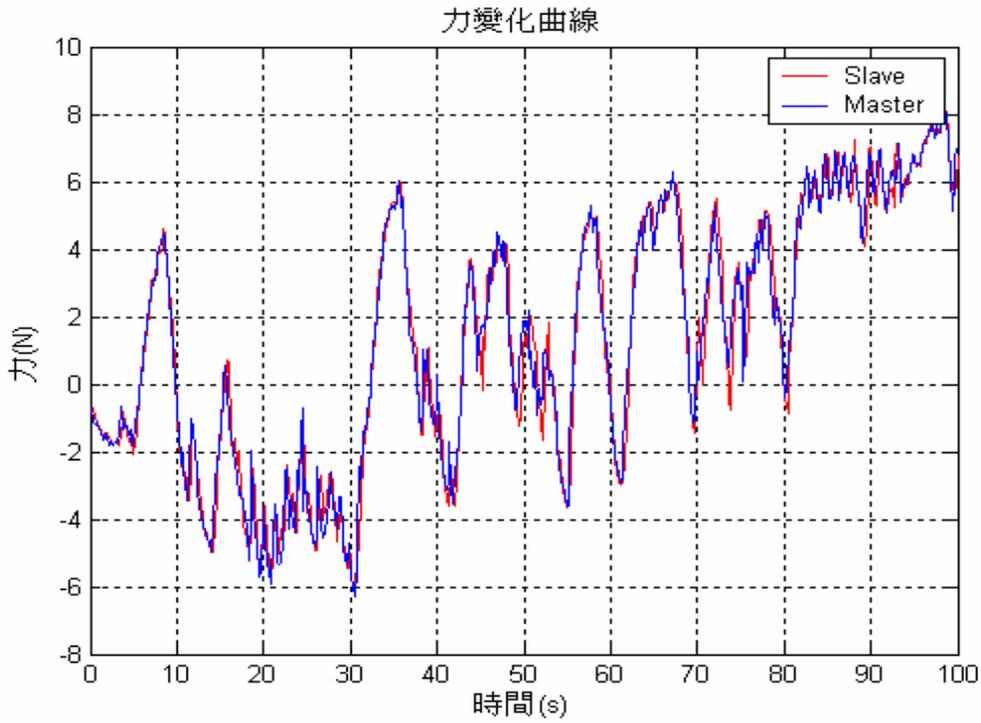


(a) Master/Slave 端力變化曲線(10Hz)

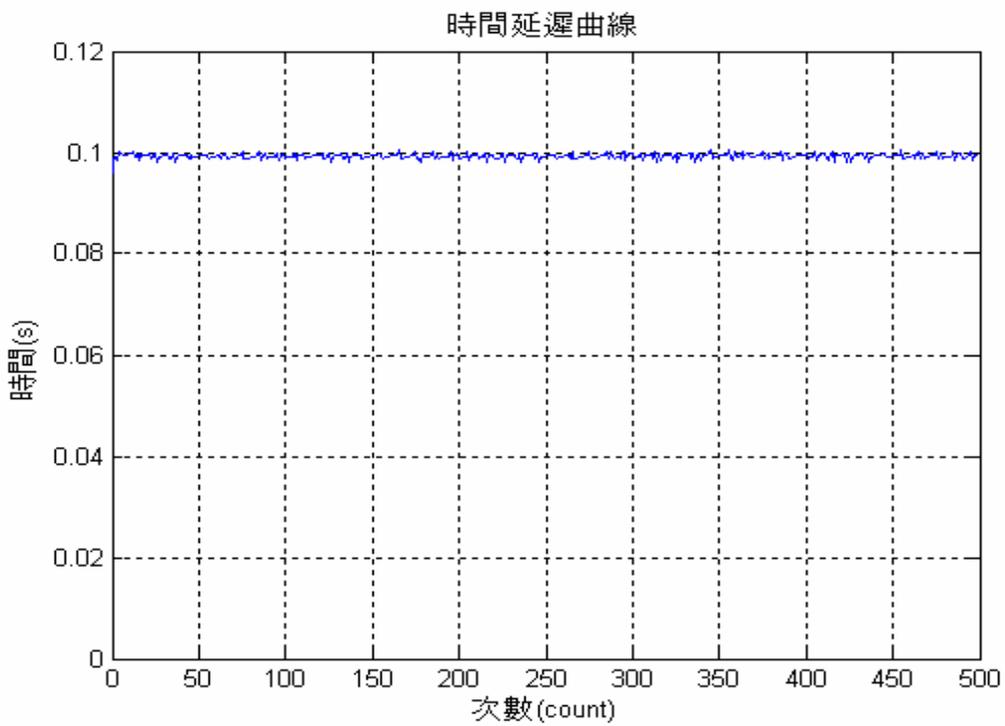


(b) 雙向時間延遲(round-trip delay)分佈狀況(10Hz)

圖 5.9 10Hz 下近距離實驗：(a)Master/Slave 端力變化曲線和(b)雙向時間延遲 (round-trip delay)分佈狀況

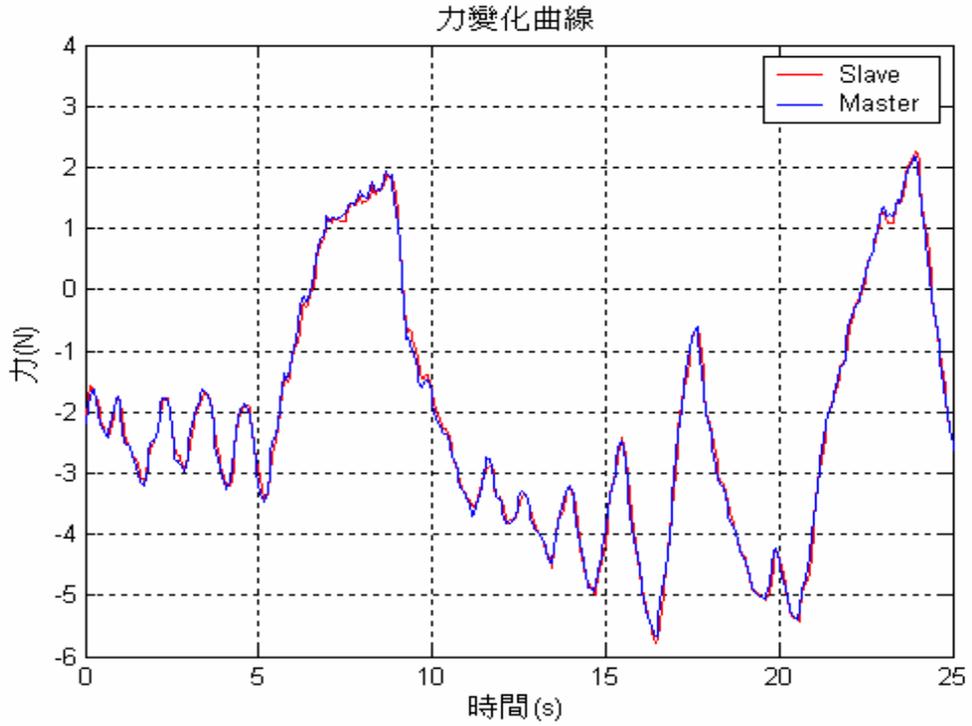


(a) Master/Slave 端力變化曲線(5Hz)

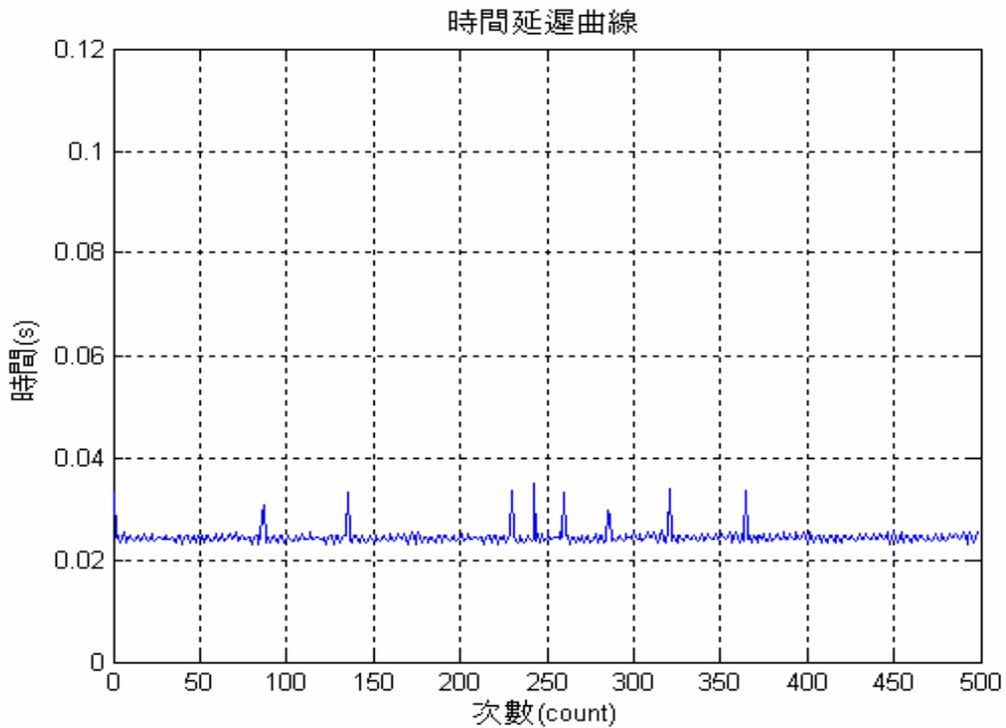


(b) 雙向時間延遲(round-trip delay)分佈狀況(5Hz)

圖 5.10 5Hz 下近距離實驗：(a)Master/Slave 端力變化曲線和(b)雙向時間延遲  
(round-trip delay)分佈狀況

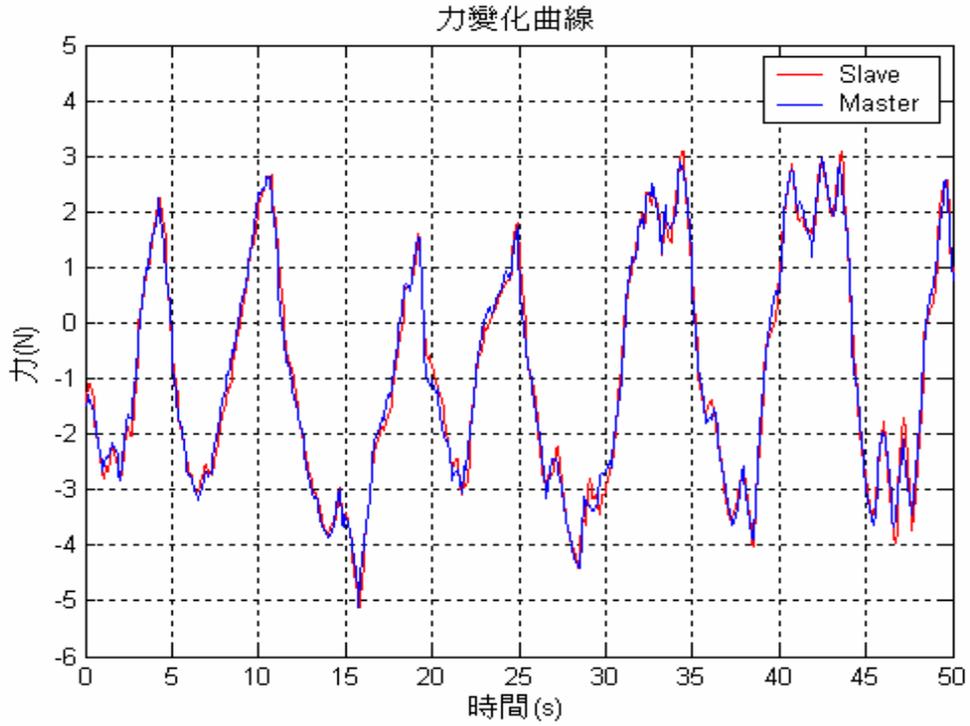


(a) Master/Slave 端力變化曲線(20Hz)

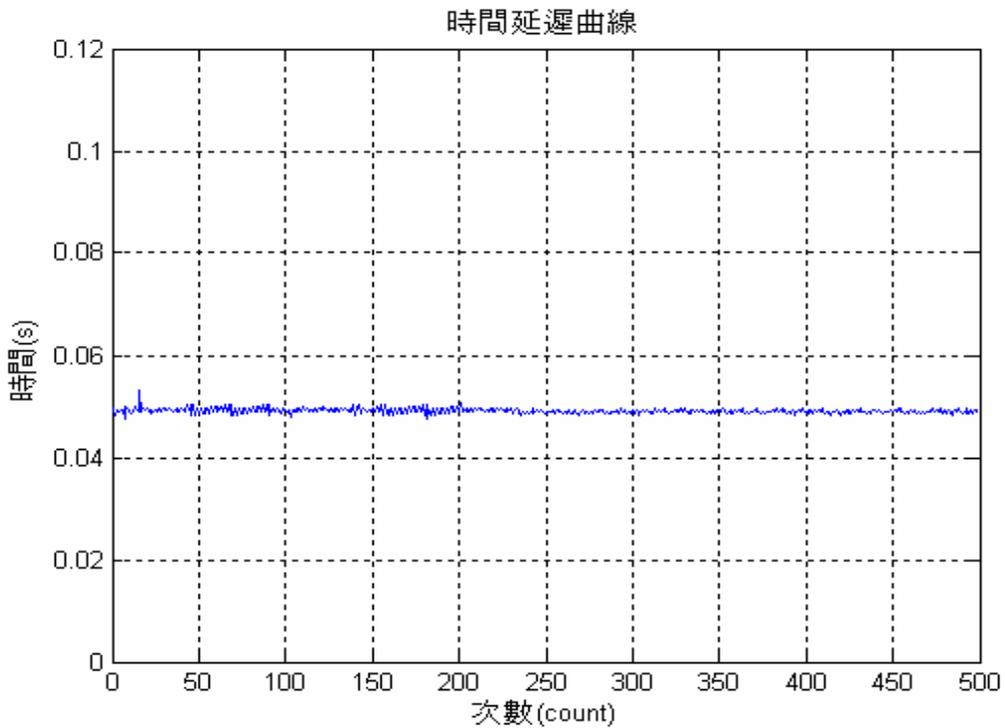


(b) 雙向時間延遲(round-trip delay)分佈狀況(20Hz)

圖 5.11 20Hz 下遠距離實驗：(a)Master/Slave 端力變化曲線和(b)雙向時間延遲 (round-trip delay)分佈狀況

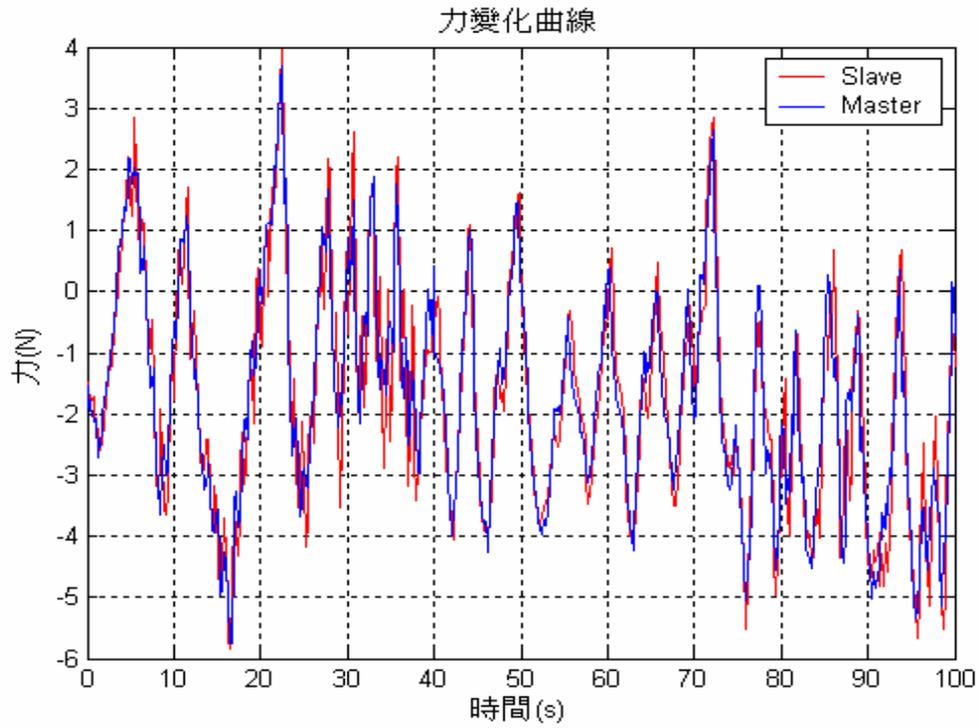


(a) Master/Slave 端力變化曲線(10Hz)

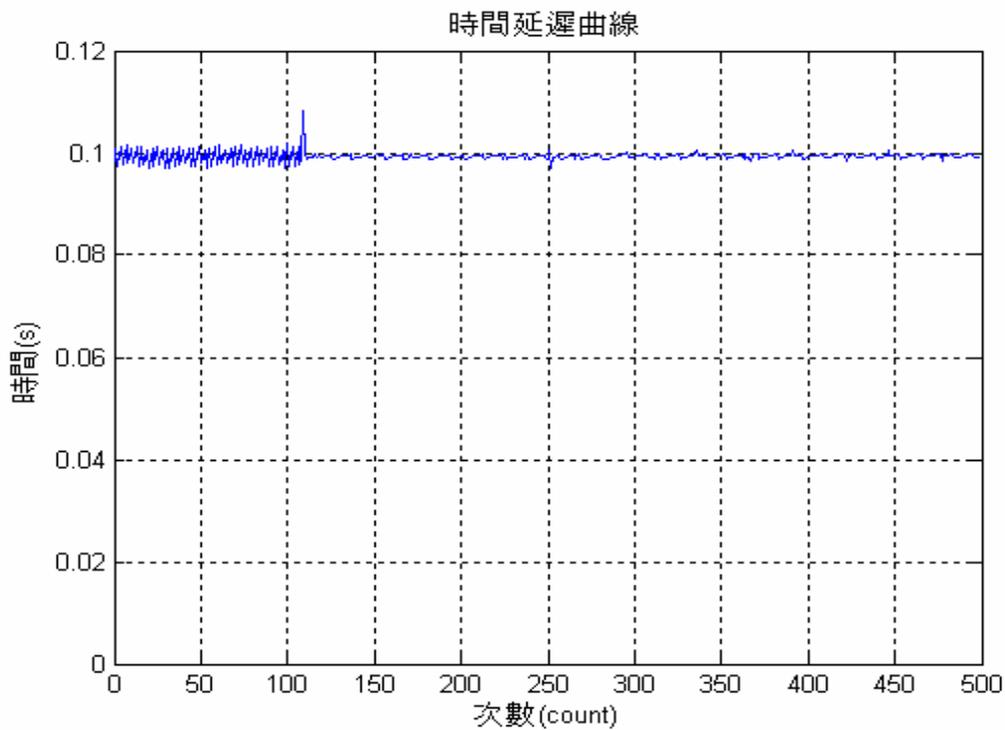


(b) 雙向時間延遲(round-trip delay)分佈狀況(10Hz)

圖 5.12 10Hz 下遠距離實驗：(a)Master/Slave 端力變化曲線和(b)雙向時間延遲 (round-trip delay)分佈狀況



(a) Master/Slave 端力變化曲線(5Hz)



(b) 雙向時間延遲(round-trip delay)分佈狀況(5Hz)

圖 5.13 5Hz 下遠距離實驗：(a)Master/Slave 端力變化曲線和(b)雙向時間延遲  
(round-trip delay)分佈狀況