

第五章

實驗與討論

國內肌電義肢使用者多為職業災害所導致的截肢者，因此以輕以青壯年人為主，且以從事勞力性與危險性高的男性為主，因此本論文實驗的目的在於驗證 20~30 歲的男性使用本論文所提之基於肌電波之人手與義肢控制系統的正確率、人類適應性對正確率的影響以及錯誤動作之探討。此實驗共計有五位實驗者，每位實驗者皆為男性，且年齡分佈範圍為 20~30 歲，實驗規劃以練習時間區分，第一次實驗為實驗者經過五分鐘的練習後進行實驗，目的在於驗證系統於該練習時間條件下的正確率以及臨界值分佈範圍。依此類推，每次增加練習時間五分鐘，直至系統正確率已到達既定的目標 97%後停止實驗，目的在驗證訓練時間長短對系統正確率的影響。每一類的實驗皆由相同的五位實驗者接受實驗，實驗者的詳細資料如表 5.1 所示。

	性別	年齡	伸指肌臨界值	屈指淺肌臨界值
實驗者一	男	28	0.019	0.02
實驗者二	男	24	0.018	0.022
實驗者三	男	24	0.017	0.014
實驗者四	男	23	0.02	0.012
實驗者五	男	26	0.015	0.01

表 5.1 五位實驗者性別、年齡、伸指肌臨界值與屈指淺肌臨界值資料

5.1 實驗步驟

實驗共計五個步驟，第一個步驟是肌電波量測儀器擺設，包含 iworx 公司電極、生理訊號放大器、ADLINK 公司資料擷取卡與個人電腦的连接，並開啓我們自己用 LabVIEW 軟體開發的介面，如圖 5.1 所示。

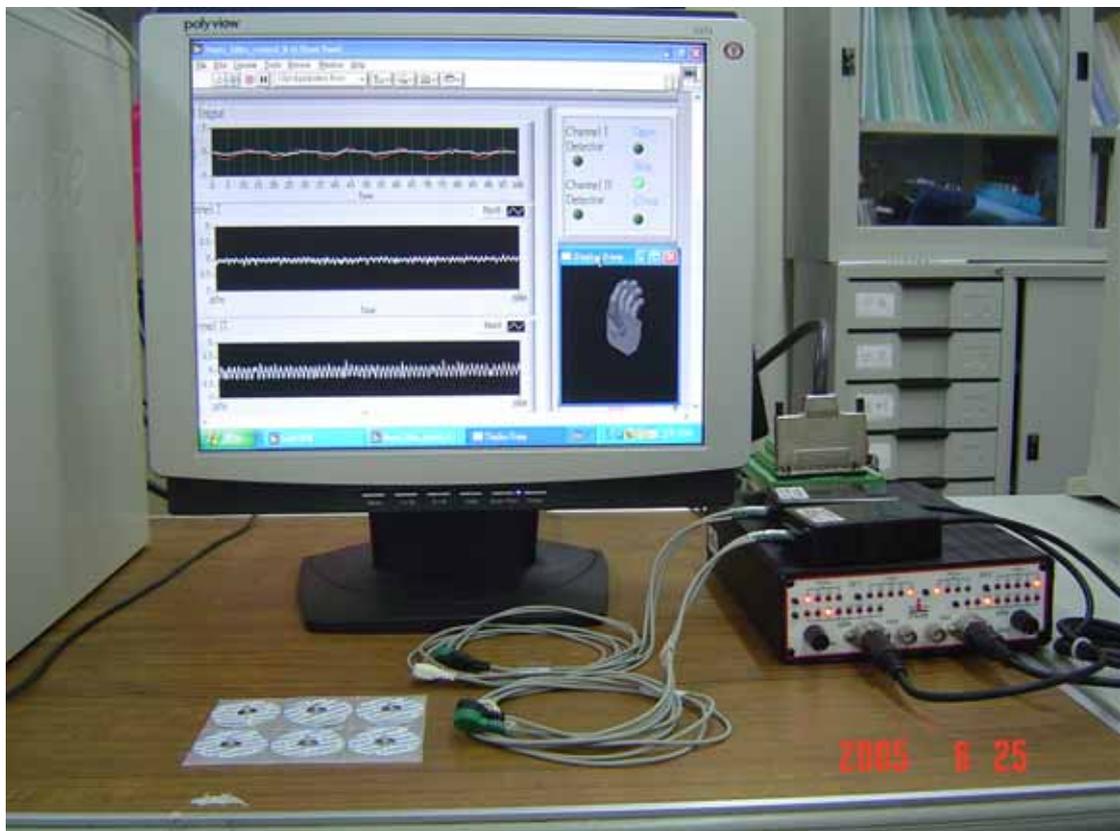


圖 5.1 量測儀器連接圖

第二個步驟是貼電極，貼電極前必須先確定肌肉的位置，以及肌肉表面的清潔，最好是用磨砂膏進行去角質的動作，這是避免雜訊的不二法門，確實地將電極貼在肌腹的位置以保有最佳的訊號輸出，每次的實驗進行也必須確保兩電極間的距離為一固定值，一般而言一至二公分皆有人採用，而基於電極型式的考量，我們使用的是兩公分左右的間距。在電極訊號線的部分也必須加以固定，根據我們的實驗得知，訊號線的晃動會造成很大的雜訊，如果沒有確實地固定，會造成系統的不穩定，但是在實際的義肢使用狀況下這個問題將不會造成使用者的困擾，因為實際的人工義肢均會將電極的訊號線固定於手臂的套統裡，故不會有晃動之虞。

第三個步驟是系統設定，包括 DAQ 資料擷取卡設定、iworx 放大器設定以及濾波器設定。在 DAQ 資料擷取卡的設定方面只需至系統介面上設定兩個參數，取樣頻率(Sampling Rate)與每次取樣數量(Number of Sample)，如無特別的需求，可使用系統的預設值 Sampling Rate = 1000 次/秒、Number of Sample = 100 筆/次。放大器設定的部分共有三個參數：放大倍率、高通濾波器的截止頻率以及低通濾波器的截止頻率，一般而言我們會將放大倍率設定為 10 倍，此放大倍率不可過大，因為過大的放大倍率有可能會導致 DAQ 卡燒毀，此點必須特別注意。濾波器的設定，因為放大器本身內建的濾波器功能不符合我們的需求，我們不採用，故將其濾波範圍調整至最大的範圍，即將高通濾波器截止頻率設定為 0Hz，低通濾波器截止頻率設定為 10KHz，兩個 channel 皆是如此。設定我們自行設計的濾波器，可至系統介面上設定所需的濾波器參數，如無特別的需求則可使用系統的預設值，帶通濾波器範圍設定為 30Hz ~ 400Hz，低通濾波器的範圍設定為 3Hz，如表 5.2，在此處是以我們設定的取樣頻率為單位，例如我們設定的取樣頻率為 1000Hz，在此情況下如果要設定帶通濾波器的帶通範圍為 30Hz 到 400Hz 則必須在此處的方塊內分別鍵入 400/1000 及 30/1000，也就是 0.4 與 0.03，低通濾波器也是如此，如果要設定截止頻率為 3Hz 的低通濾波器，則必須在此方塊內鍵入

3/1000，也就是 0.003。

	Bandpass Filter	Notch Filter	Smooth Filter
濾波器型式	Butterworth	Butterworth	Butterworth
階數	五階	五階	五階
截止頻率	30Hz~400Hz	55Hz~65Hz	3Hz

表 5.2 帶通、帶拒以及低通濾波器預設的參數值



第四個步驟是尋找偵測手臂動作之 EMG 臨界值，臨界值設定關係到整個義肢系統的穩定性與使用義肢時所需的力量大小，如果臨界值設定的太低，雖然在義肢的控制上不需要出太多的力，手臂不容易疲勞，但是卻有可能因為過低的臨界值而導致將干擾訊號誤判為控制訊號的現象，大大地降低了系統的穩定性。相反地，如果臨界值設定太高，雖然在系統的穩定性上有較好的表現，但是在控制上卻會顯得相當地費力，因此在義肢開始使用前必須找出每個使用者最適合地臨界值，只要使用者在系統開始前分別做幾次開跟合的動作，它便會顯示我們兩個 Channel 的 IEMG 特徵值，以及建議的臨界值，而我們即可依照這個建議值來找到適合地臨界值，這個部分的執行必須使用偵測手臂動作之 EMG 臨界值區塊，搭配使用者手臂動作指示燈號區塊來完成，此區塊在於顯示使用者手臂動作狀況。首先使用者必須最少執行一次手掌開跟合的動作，此時在臨界值設定區塊上

便會顯示適合使用者的臨界值建議值，然後再以這個建議值作為我們的臨界值起點，配合使用者手臂動作指示燈號區塊的輸出狀態去做調整，若覺得系統不夠穩定則可以調高臨界值，相反地，若系統在穩定性上面雖然沒有問題，但在控制性上面卻很費力的話，則可以降低系統的臨界值，如此反覆的調整，即可在短時間內找到適合不同使用者的臨界值。

第五個步驟是設定虛擬義肢的動作速度，這個項目是設定義肢的動作速度以及每次執行動作的角度，新的使用者在適應期間可以設定較為慢速的狀態，熟練的使用者則可以依照自己喜好的速度來設定，設定的方法很簡單，上面的方格是設定義肢動作的間隔，單位是毫秒 ms，下面的方格是設定義肢每次執行的角度，也就是說，如果我們想要每 50ms 執行一次角度為 2 度動作，只要在義肢參數設定這個區塊裡上面填入 50，下面填入 2 即可，剛開始的使用者建議將速度設定為 300，也就是每 0.3 秒執行一次手臂的動作，然後再依照熟練度來調整義肢的動作速度，完成上述步驟後便可進行實驗。

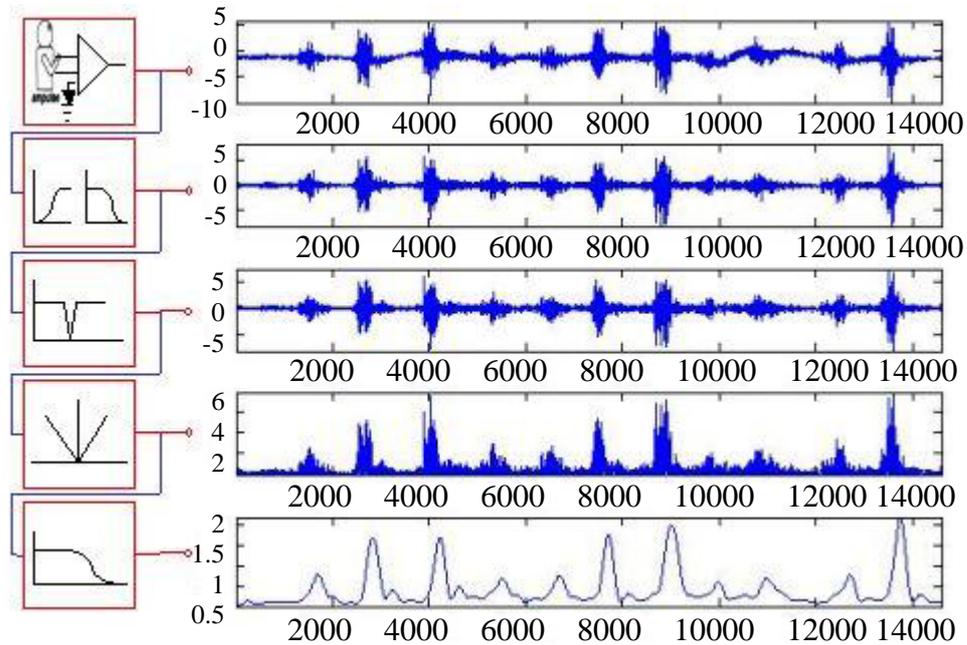


5.2 實驗結果與討論

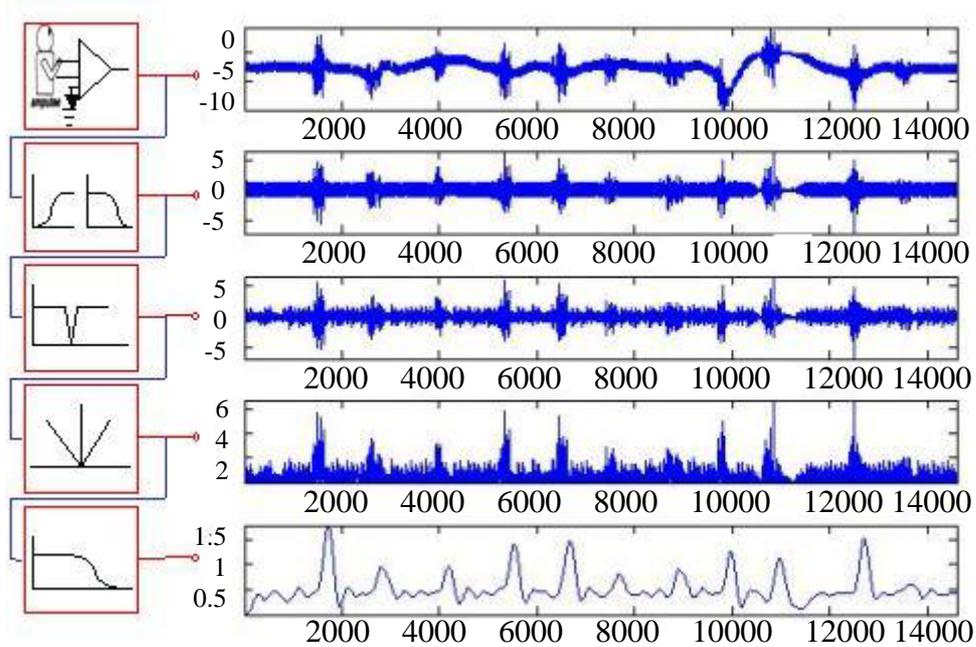
實驗規劃以練習時間分類，第一次實驗為實驗者經過五分鐘的練習後進行實驗，每次實驗增加五分鐘的訓練時間，也就是說第二次實驗為訓練十分鐘以後進行實驗，以此類推，直至系統正確率到達 97% 為止，實驗包含五位 20~30 歲的實驗對象，並按照 5.1 節實驗步驟進行實驗的設定。每位實驗者依照同樣的要求，必須讓義肢做同樣的手掌開合動作，再經由系統紀錄手掌的動作過程。

5.2.1 第一次實驗：練習五分鐘後進行實驗

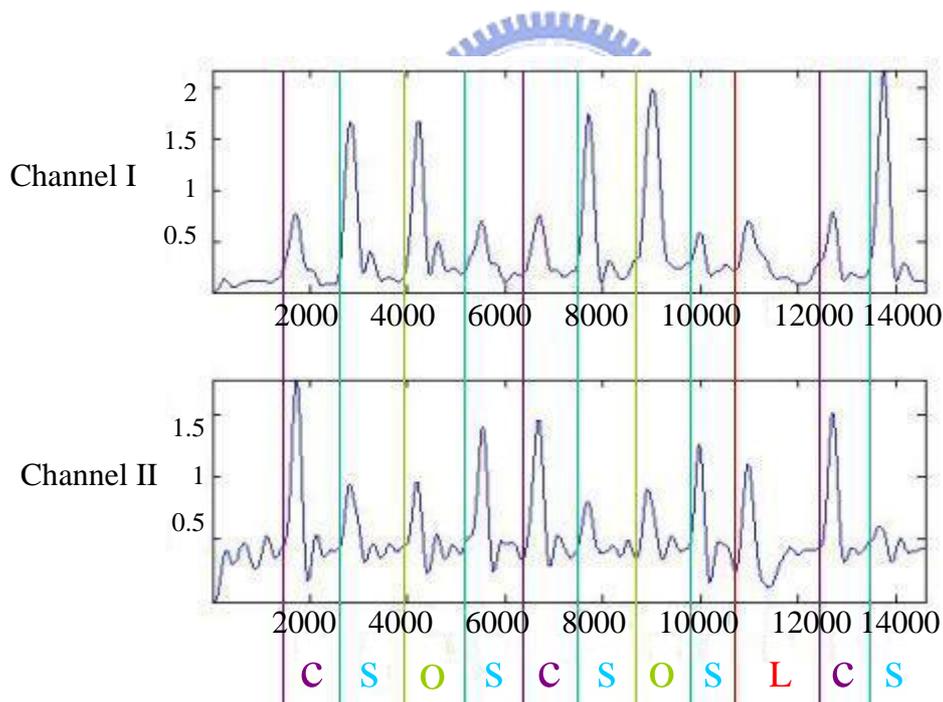
下列的實驗結果為五位實驗者訓練五分鐘後，依照同樣的要求，必須讓義肢做同樣的手掌開合動作(合~開~開~合~合~開~開~合~合~開)的實驗，並由系統紀錄實驗者伸指肌與屈指淺肌的肌電圖以及指令推衍單元輸出的指令，結果如下：



(a) 伸指肌於系統各步驟的輸出訊號



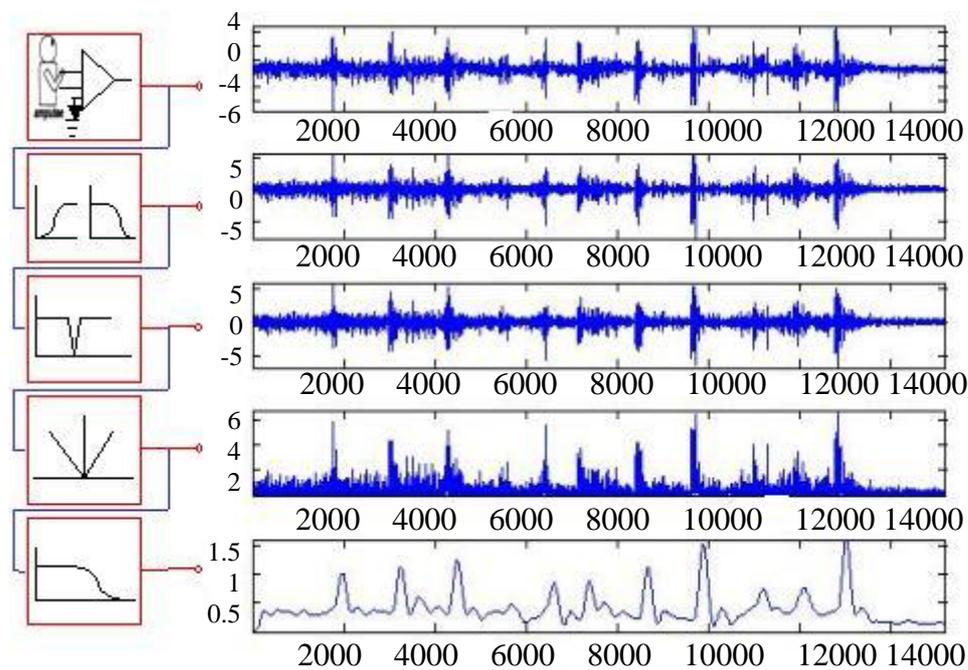
(b) 屈指淺肌於系統各步驟的輸出訊號



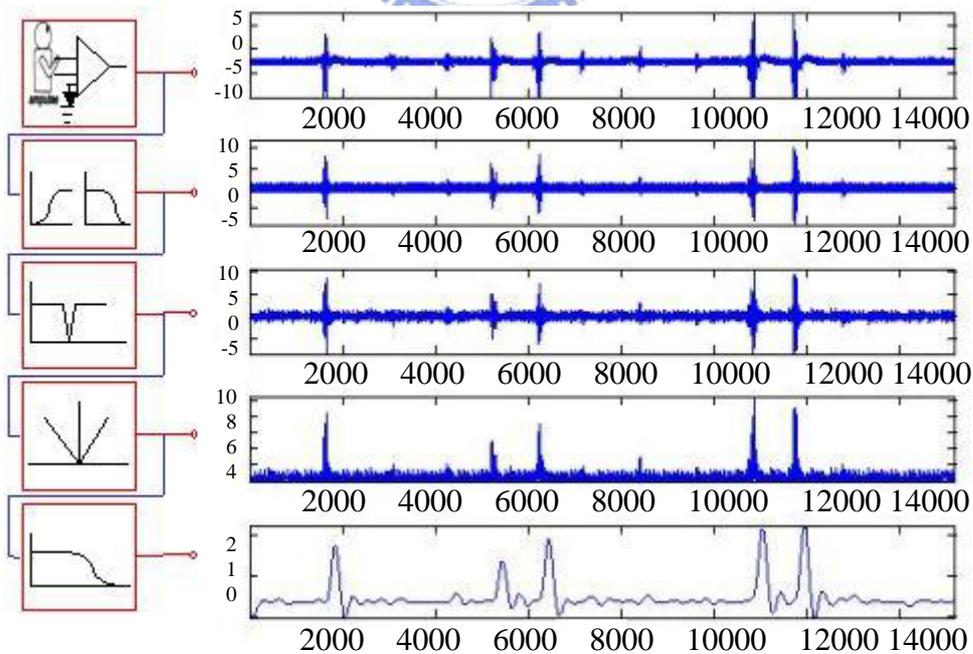
(c) 指令推衍單元輸出指令

圖 5.2 實驗者一：(a) 伸指肌於系統各步驟的輸出訊號(原始訊號、帶通濾波後的訊號、帶拒濾波後的訊號、整流後的訊號、低通濾波後的訊號), (b) 屈指淺肌於系統各步驟的輸出訊號, 和(c) 指令推衍單元輸出指令

(C:Close、S:Stop、O:Open 以及 L:Lose)



(a) 伸指肌於系統各步驟的輸出訊號



(b) 屈指淺肌於系統各步驟的輸出訊號

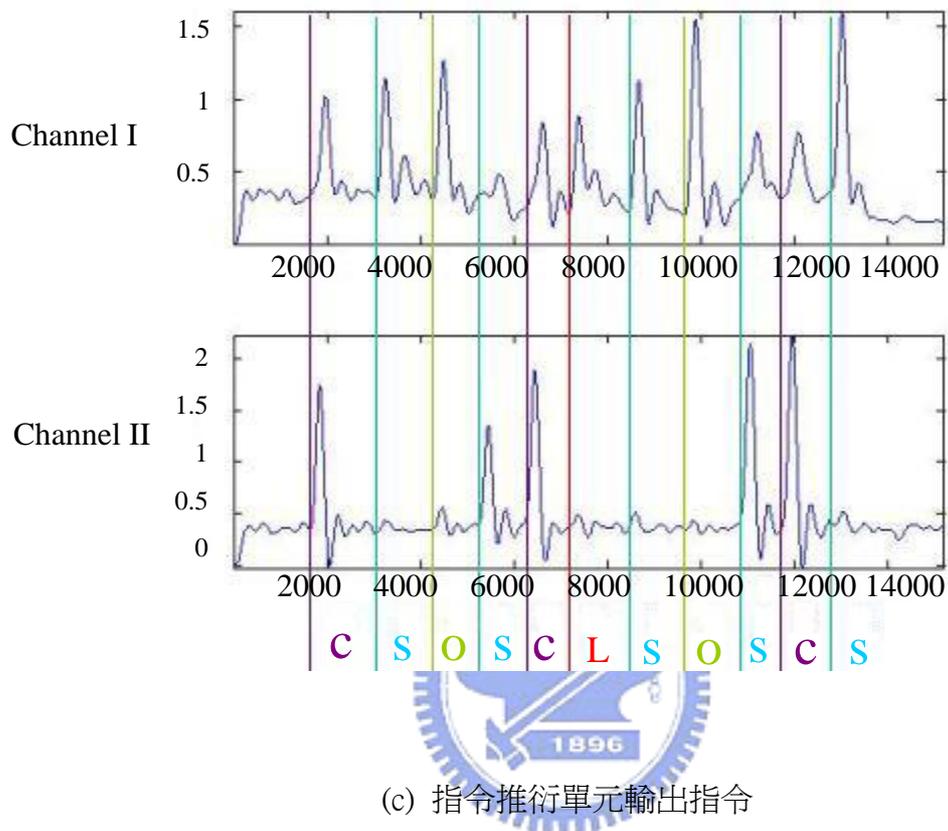
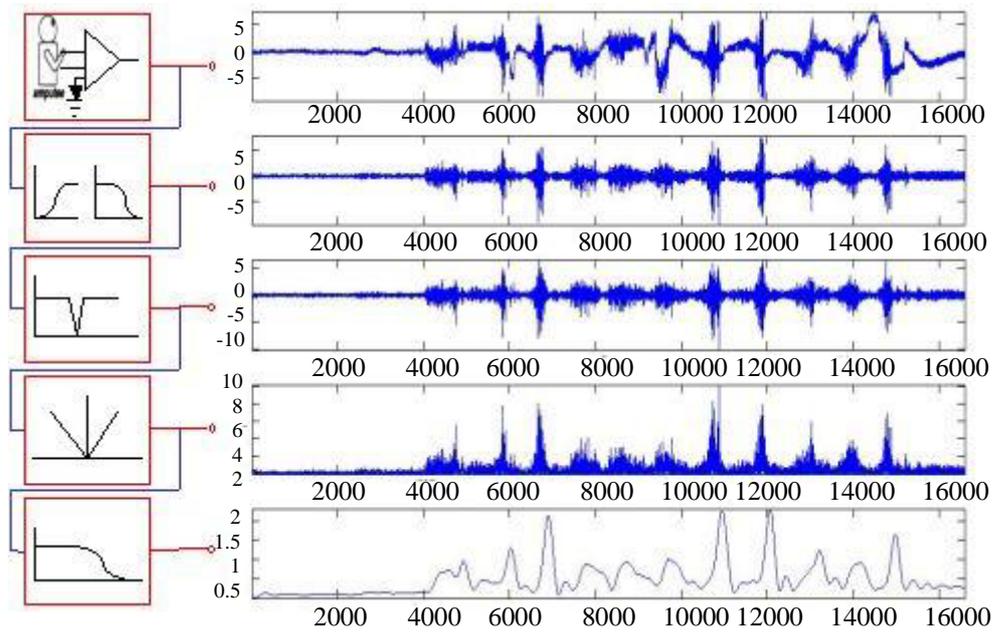
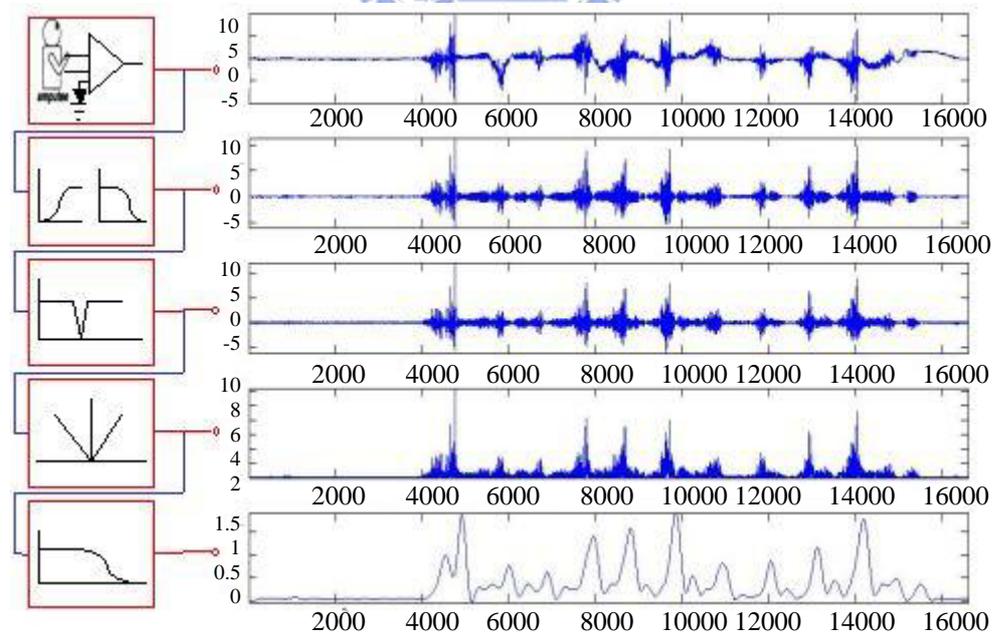


圖 5.3 實驗者二：(a) 伸指肌於系統各步驟的輸出訊號(原始訊號、帶通濾波後的訊號、帶拒濾波後的訊號、整流後的訊號、低通濾波後的訊號), (b) 屈指淺肌於系統各步驟的輸出訊號, 和(c) 指令推衍單元輸出指令 (C:Close、S:Stop、O:Open 以及 L:Lose)



(a) 伸指肌於系統各步驟的輸出訊號



(b) 屈指淺肌於系統各步驟的輸出訊號

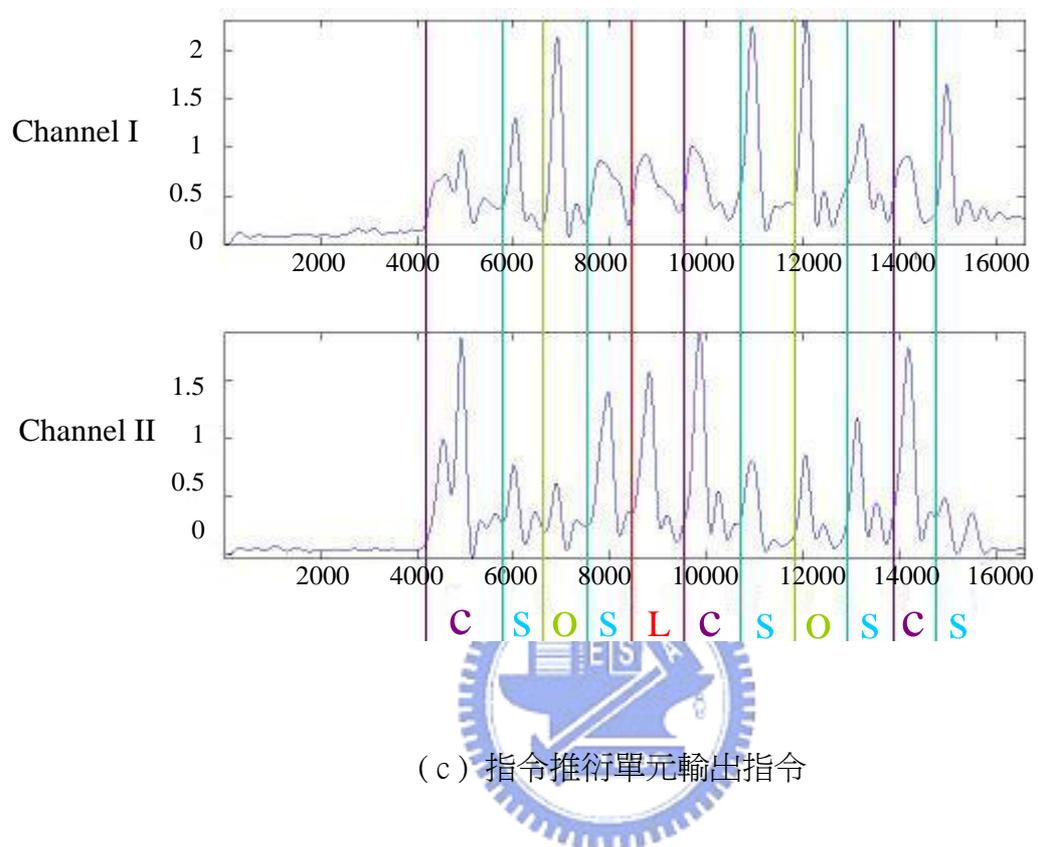
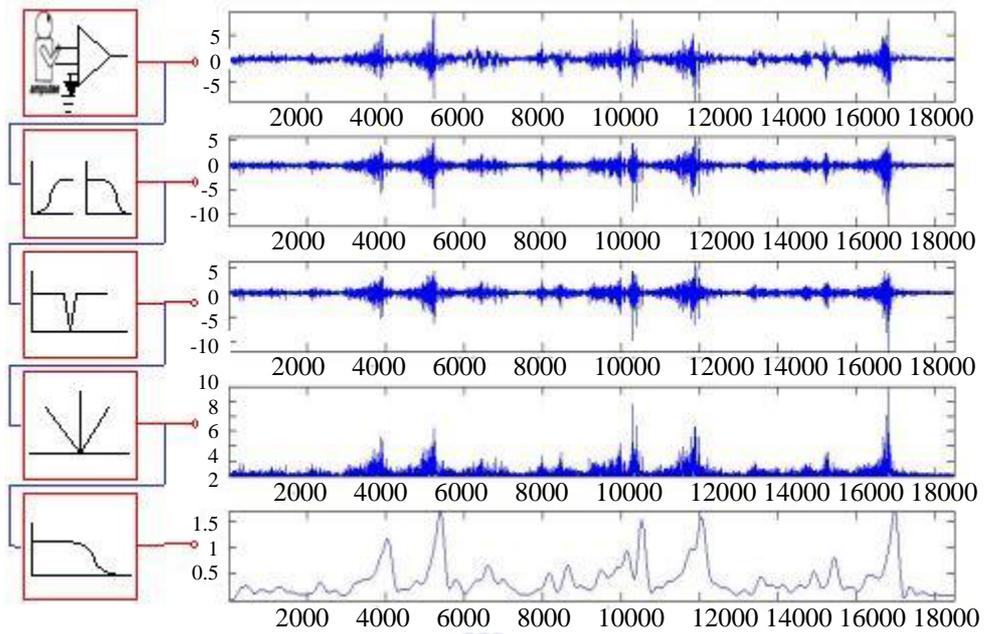
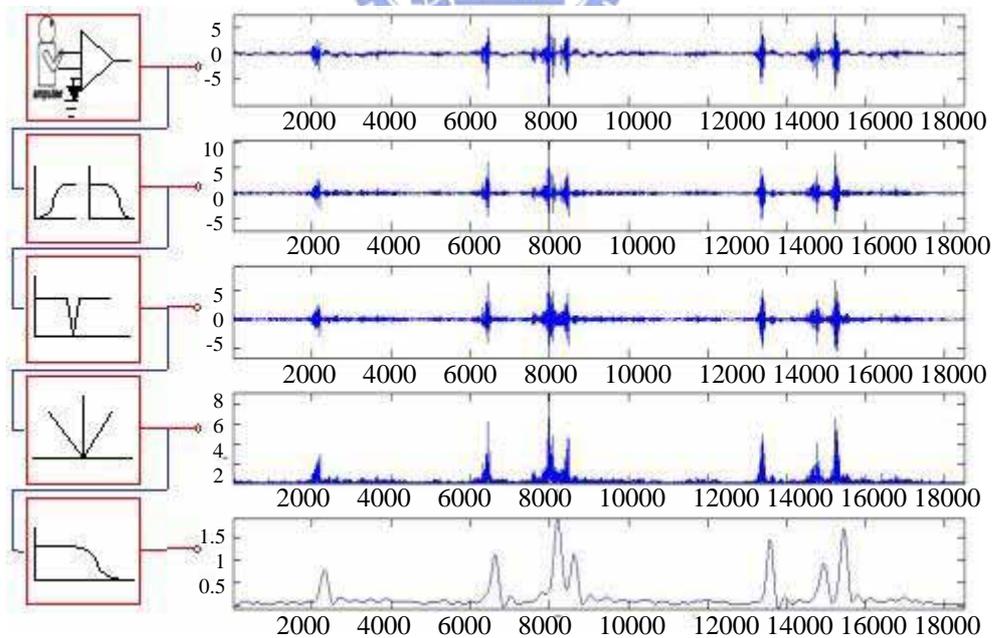


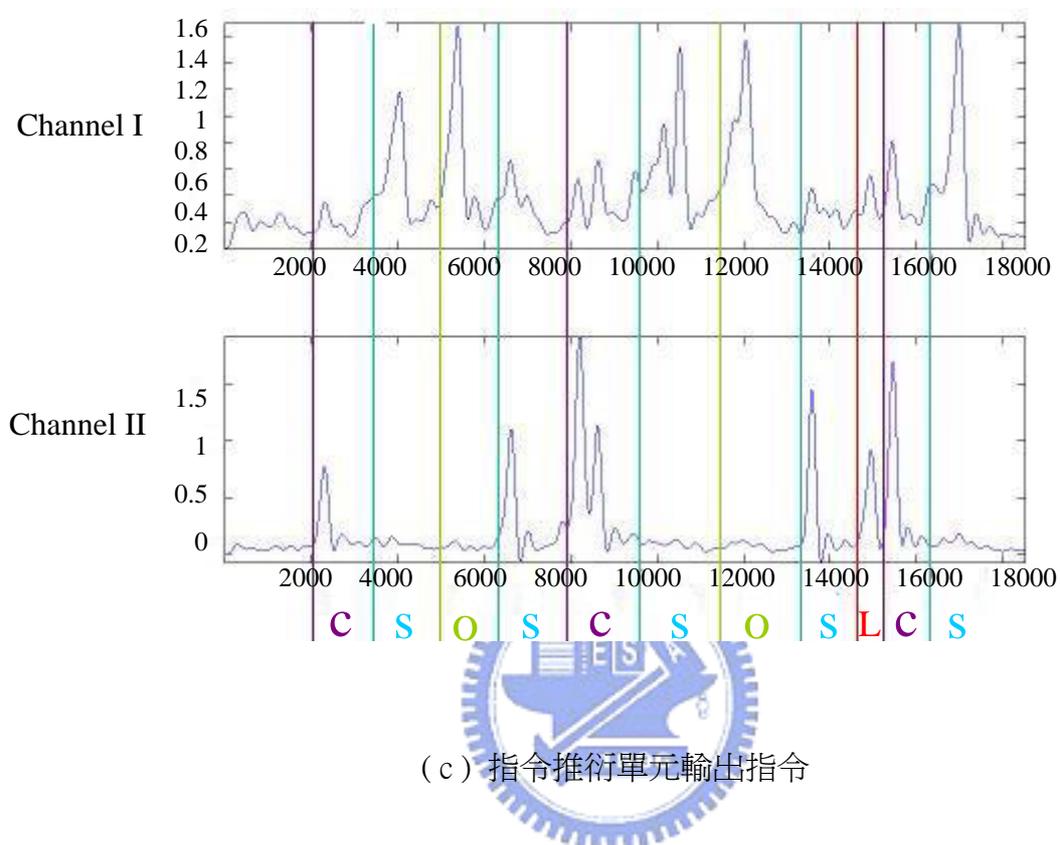
圖 5.4 實驗者三：(a) 伸指肌於系統各步驟的輸出訊號(原始訊號、帶通濾波後的訊號、帶拒濾波後的訊號、整流後的訊號、低通濾波後的訊號), (b) 屈指淺肌於系統各步驟的輸出訊號, 和(c) 指令推衍單元輸出指令 (C:Close、S:Stop、O:Open 以及 L:Lose)



(a) 伸指肌於系統各步驟的輸出訊號

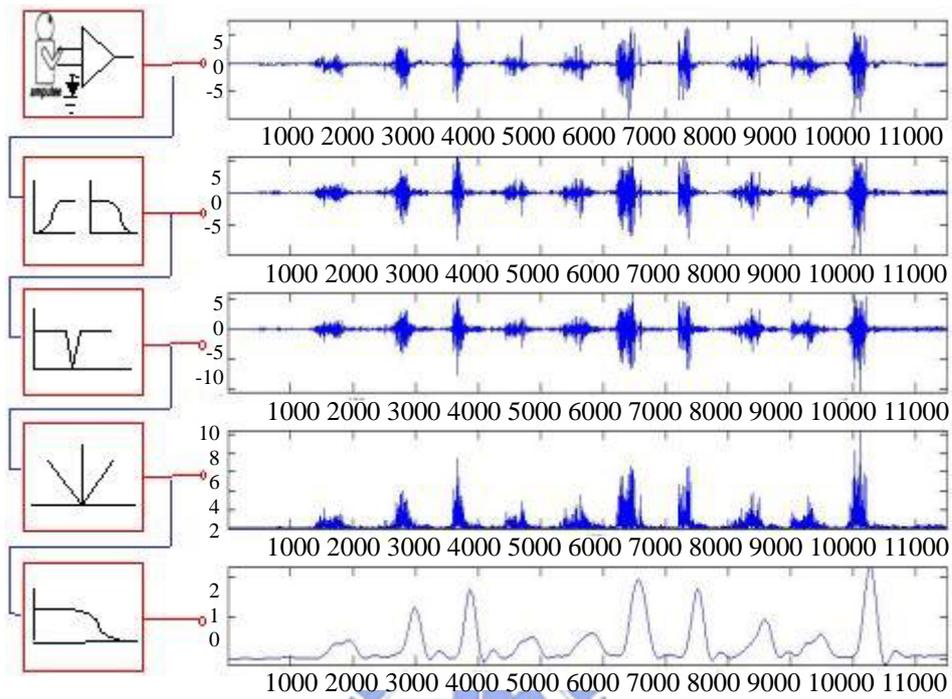


(b) 屈指淺肌於系統各步驟的輸出訊號

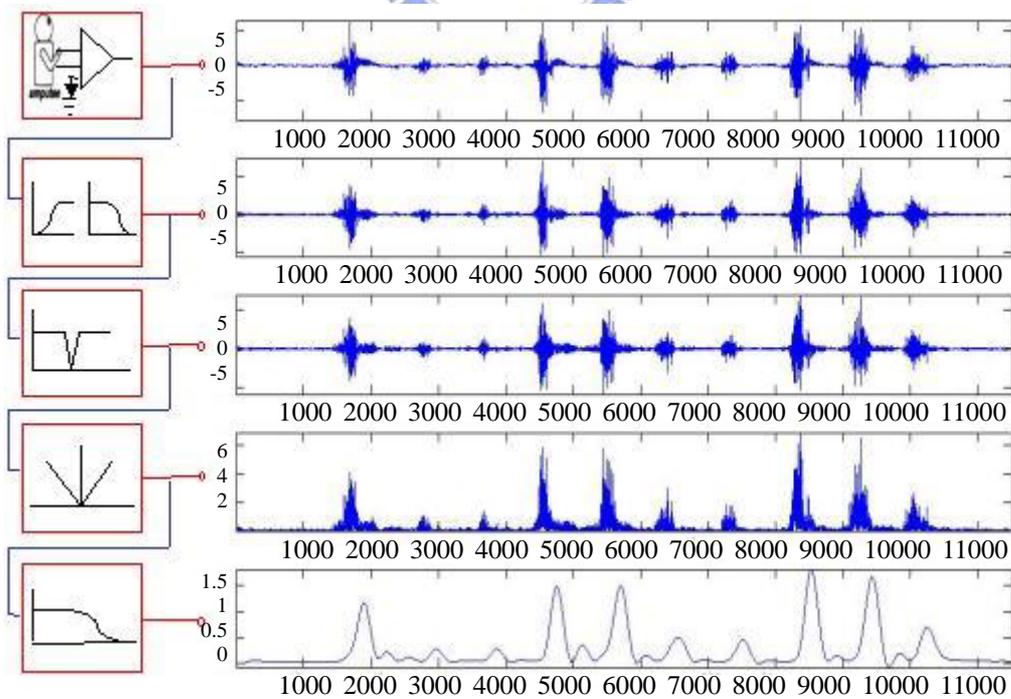


(c) 指令推衍單元輸出指令

圖 5.5 實驗者四：(a) 伸指肌於系統各步驟的輸出訊號(原始訊號、帶通濾波後的訊號、帶拒濾波後的訊號、整流後的訊號、低通濾波後的訊號), (b) 屈指淺肌於系統各步驟的輸出訊號, 和(c) 指令推衍單元輸出指令 (C:Close、S:Stop、O:Open 以及 L:Lose)



(a) 伸指肌於系統各步驟的輸出訊號



(b) 屈指淺肌於系統各步驟的輸出訊號

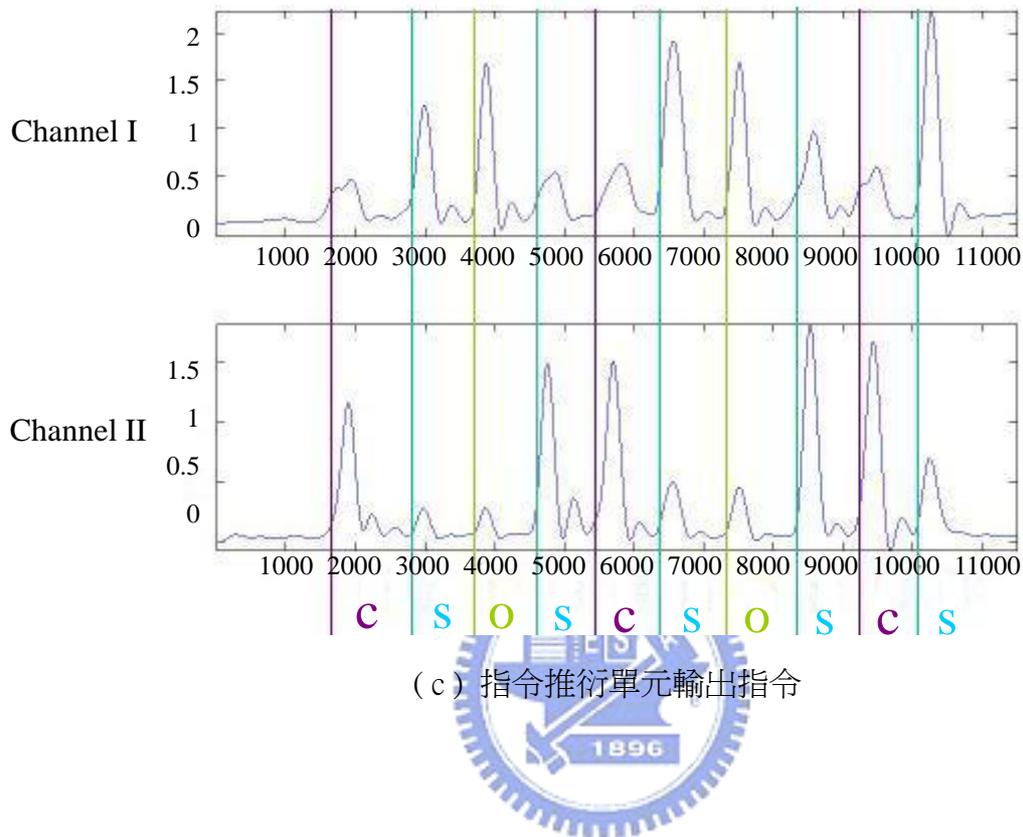


圖 5.6 實驗者五：(a) 伸指肌於系統各步驟的輸出訊號(原始訊號、帶通濾波後的訊號、帶拒濾波後的訊號、整流後的訊號、低通濾波後的訊號), (b) 屈指淺肌於系統各步驟的輸出訊號, 和(c) 指令推衍單元輸出指令 (C:Close、S:Stop、O:Open 以及 L:Lose)

依據實驗的結果，五分鐘的訓練時間，此肌電義肢的動作正確濾率大約可以到達 92%，而伸指肌的臨界值大約落在 0.015~0.02 伏特之間(放大倍率為 10 倍)；屈指淺肌的臨界值大約落在 0.01~0.022 伏特之間(放大倍率為 10 倍)，整理如表 5.3。

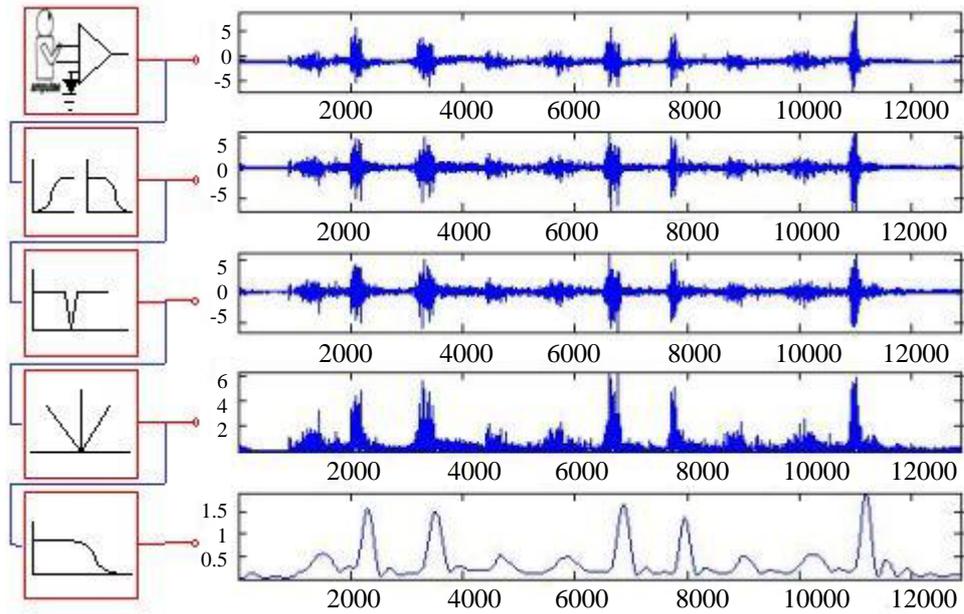
	伸指肌 臨界值	屈指淺肌 臨界值	正確率
實驗者一	0.019	0.02	90%
實驗者二	0.018	0.022	90%
實驗者三	0.017	0.014	90%
實驗者四	0.02	0.012	90%
實驗者五	0.015	0.01	100%
平均	0.0178	0.0156	92%

表 5.3 第一次實驗：練習五分鐘後進行實驗的結果

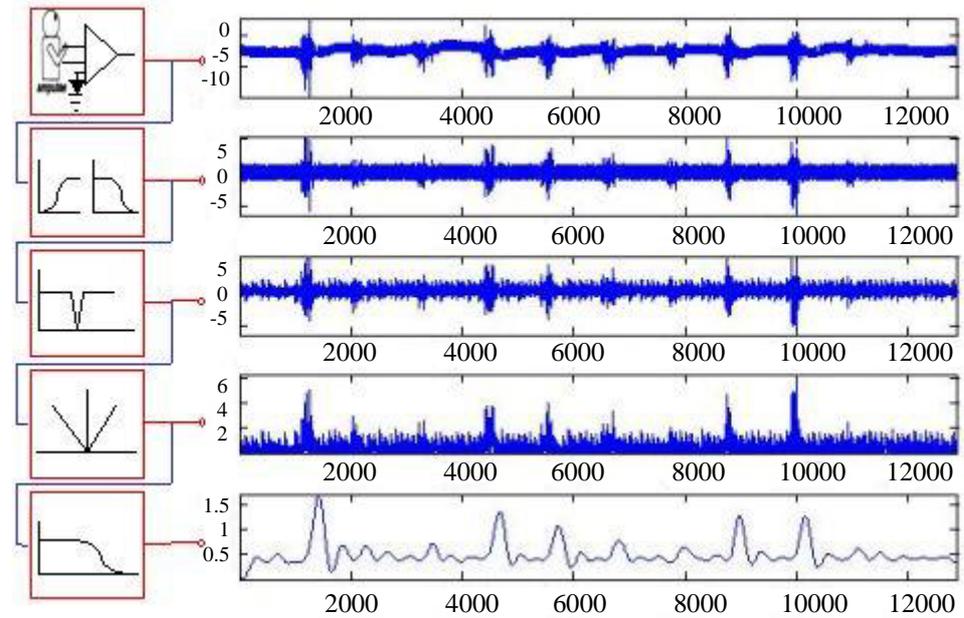


5.2.2 第二次實驗：練習十分鐘後進行實驗

下列的實驗結果為五位實驗者訓練十分鐘後，依照同樣的要求，必須讓義肢做同樣的手掌開合動作的實驗，並由系統紀錄實驗者伸指肌與屈指淺肌的肌電圖以及指令推行單元輸出的指令，結果如下。



(a) 伸指肌於系統各步驟的輸出訊號



(b) 屈指淺肌於系統各步驟的輸出訊號

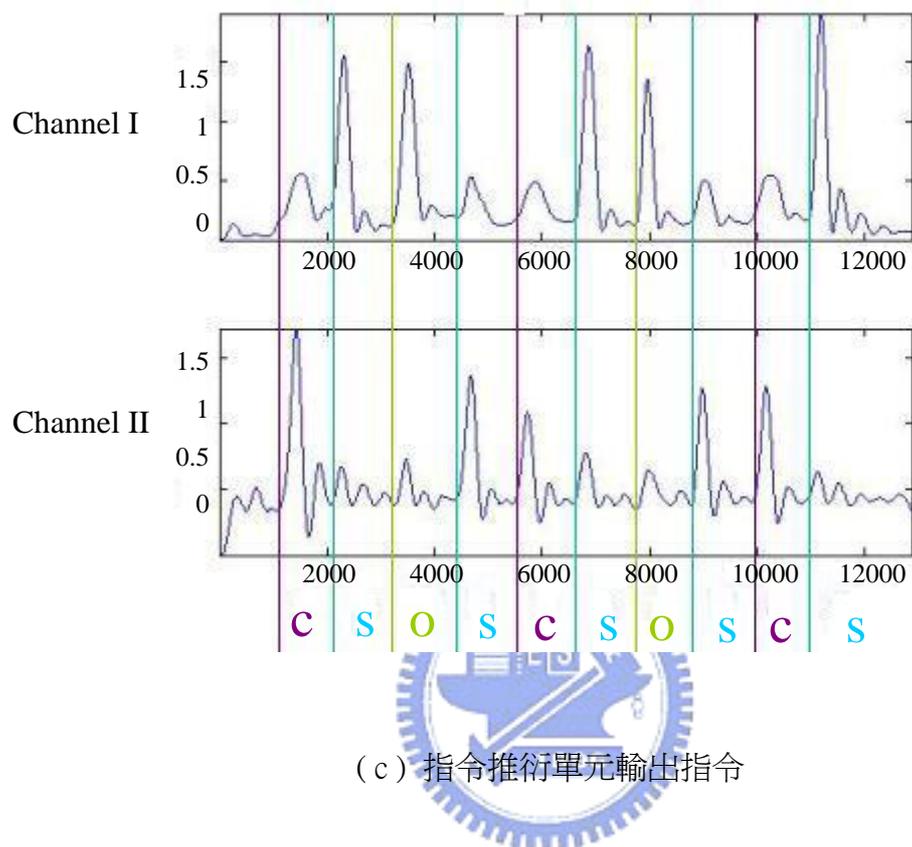
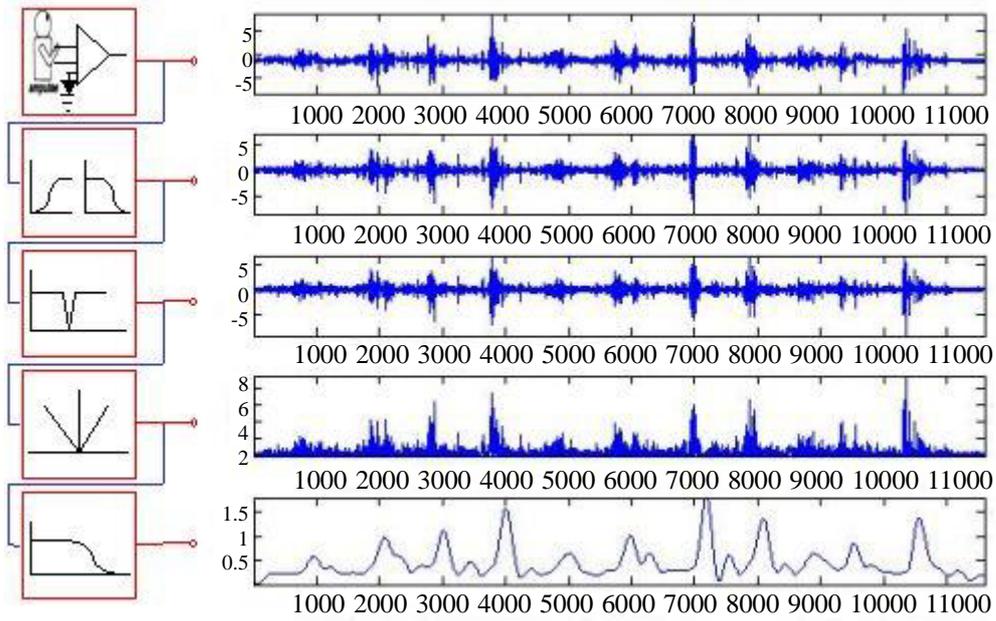
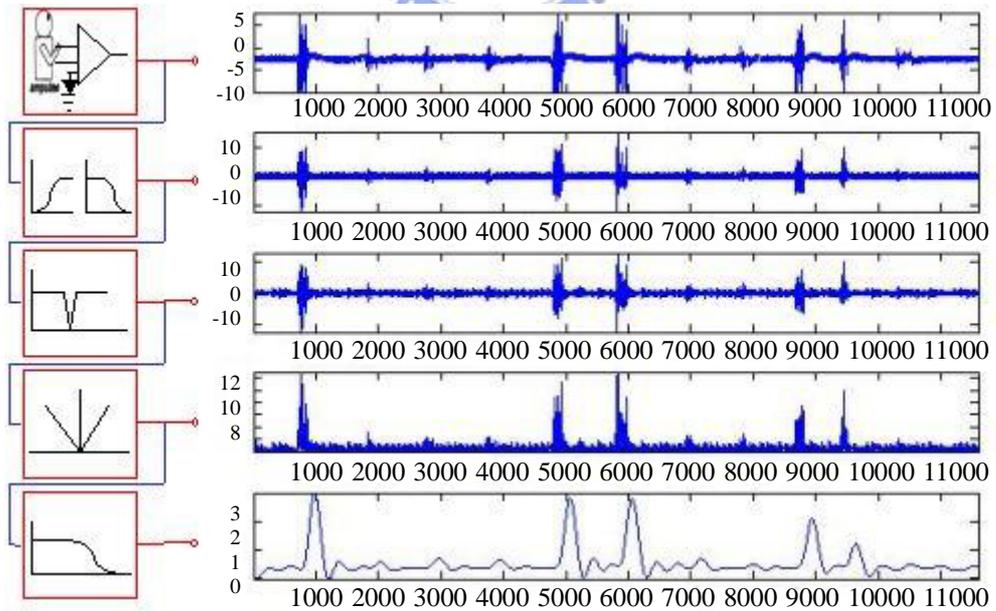


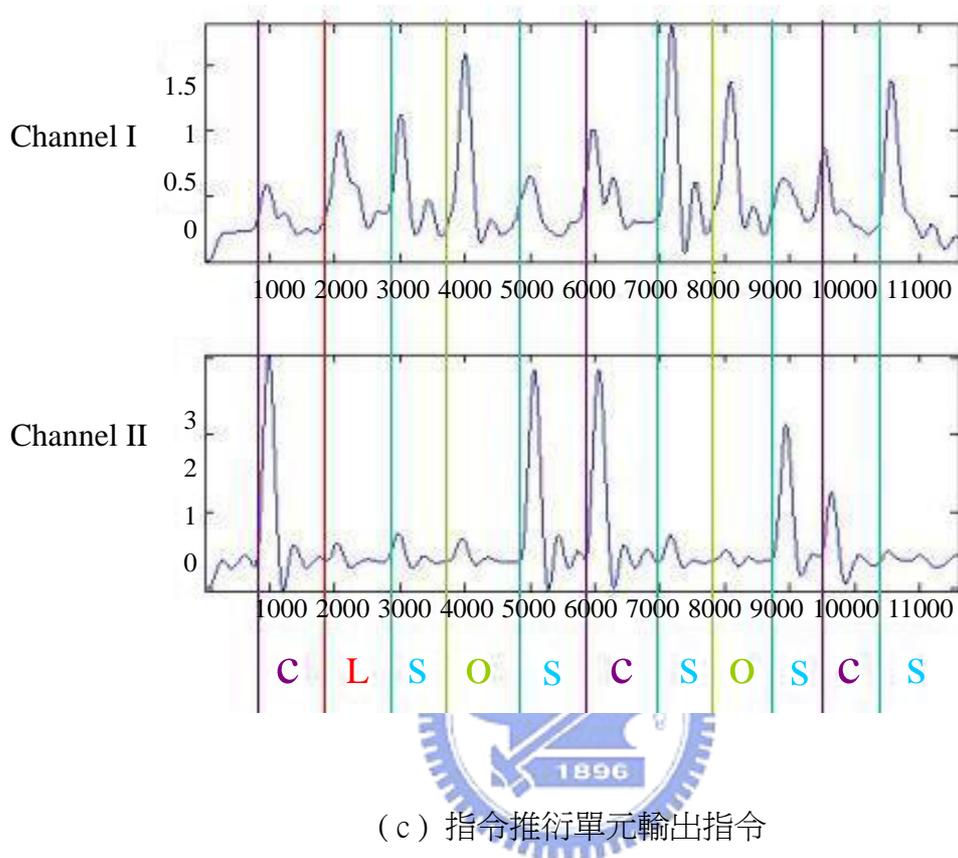
圖 5.7 實驗者一：(a) 伸指肌於系統各步驟的輸出訊號(原始訊號、帶通濾波後的訊號、帶拒濾波後的訊號、整流後的訊號、低通濾波後的訊號), (b) 屈指淺肌於系統各步驟的輸出訊號, 和 (c) 指令推衍單元輸出指令 (C:Close、S:Stop、O:Open 以及 L:Lose)



(a) 伸指肌於系統各步驟的輸出訊號

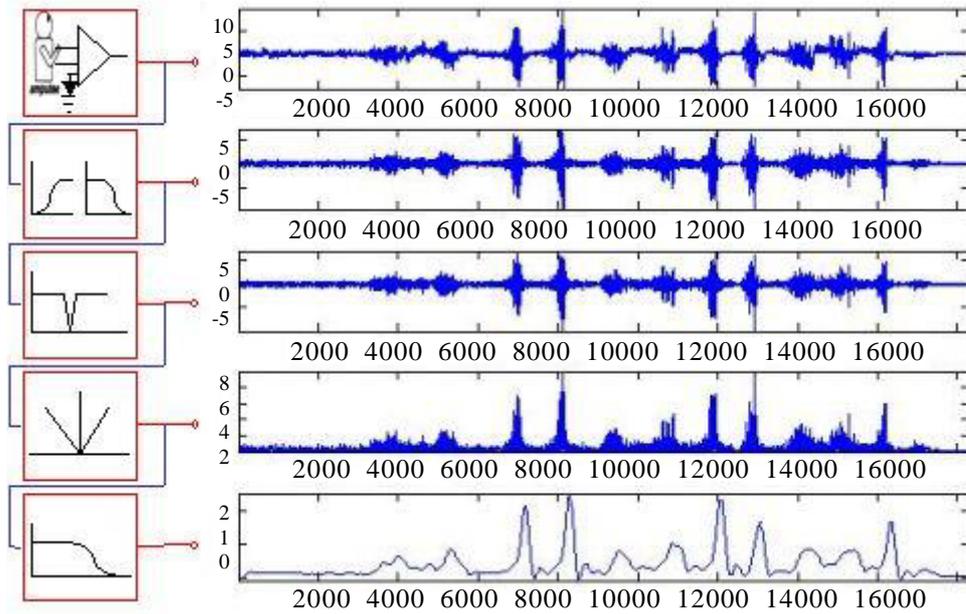


(b) 屈指淺肌於系統各步驟的輸出訊號

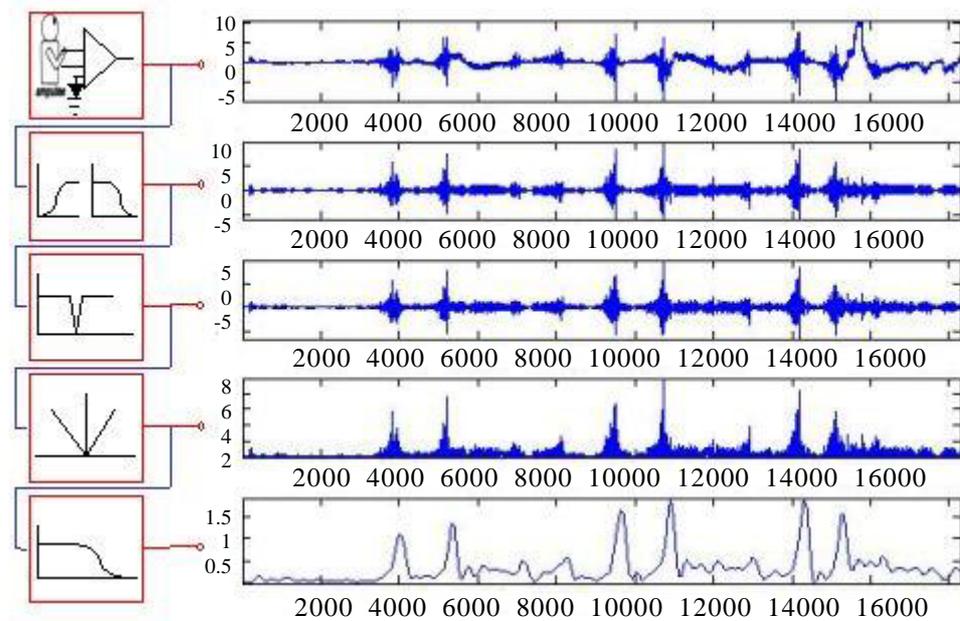


(c) 指令推衍單元輸出指令

圖 5.8 實驗者二：(a) 伸指肌於系統各步驟的輸出訊號(原始訊號、帶通濾波後的訊號、帶拒濾波後的訊號、整流後的訊號、低通濾波後的訊號), (b) 屈指淺肌於系統各步驟的輸出訊號, 和(c) 指令推衍單元輸出指令 (C:Close、S:Stop、O:Open 以及 L:Lose)



(a) 伸指肌於系統各步驟的輸出訊號



(b) 屈指淺肌於系統各步驟的輸出訊號

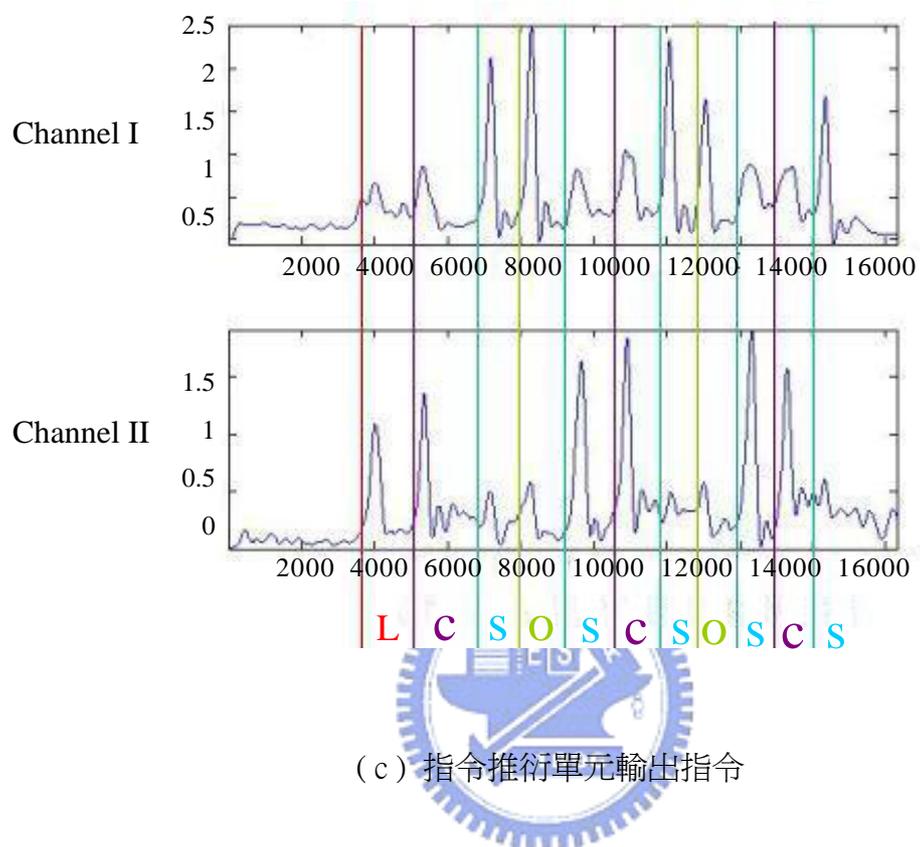
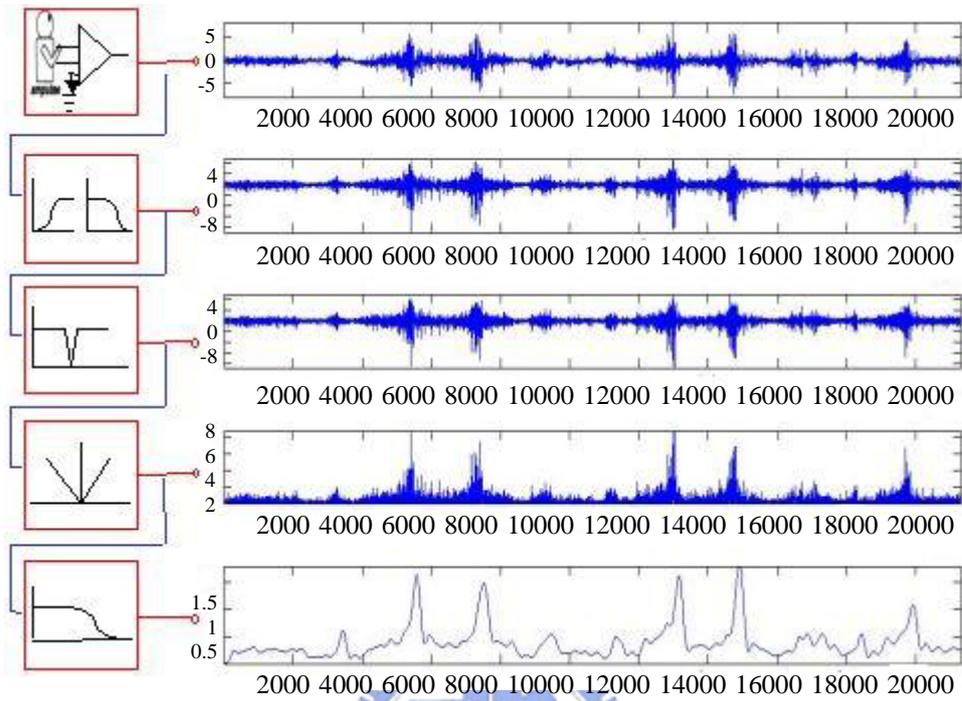
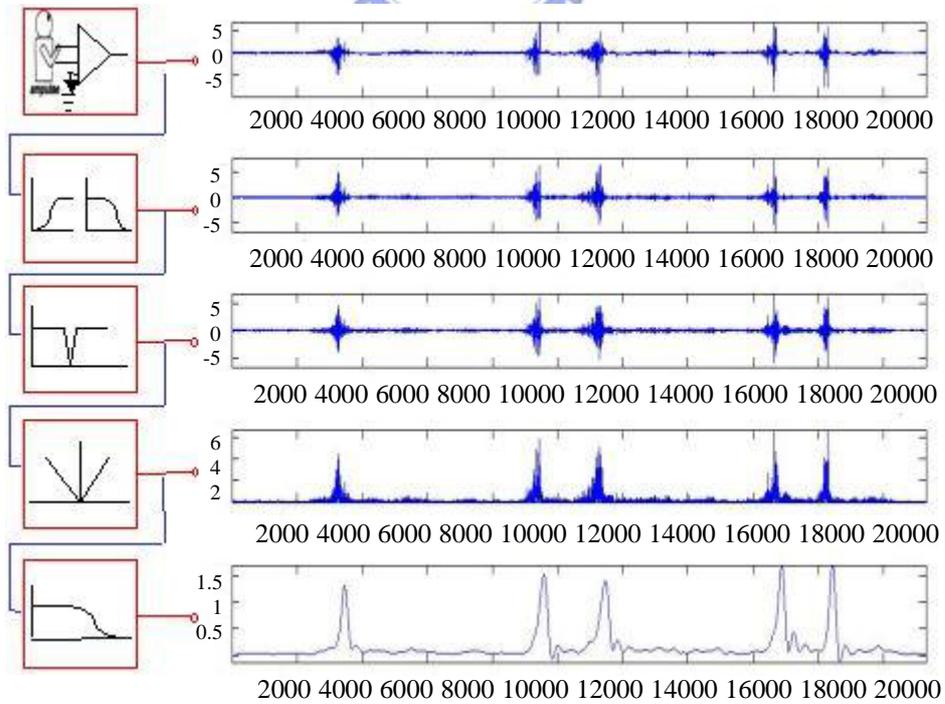


圖 5.9 實驗者三：(a) 伸指肌於系統各步驟的輸出訊號(原始訊號、帶通濾波後的訊號、帶拒濾波後的訊號、整流後的訊號、低通濾波後的訊號), (b) 屈指淺肌於系統各步驟的輸出訊號, 和(c) 指令推衍單元輸出指令 (C:Close、S:Stop、O:Open 以及 L:Lose)



(a) 伸指肌於系統各步驟的輸出訊號



(b) 屈指淺肌於系統各步驟的輸出訊號

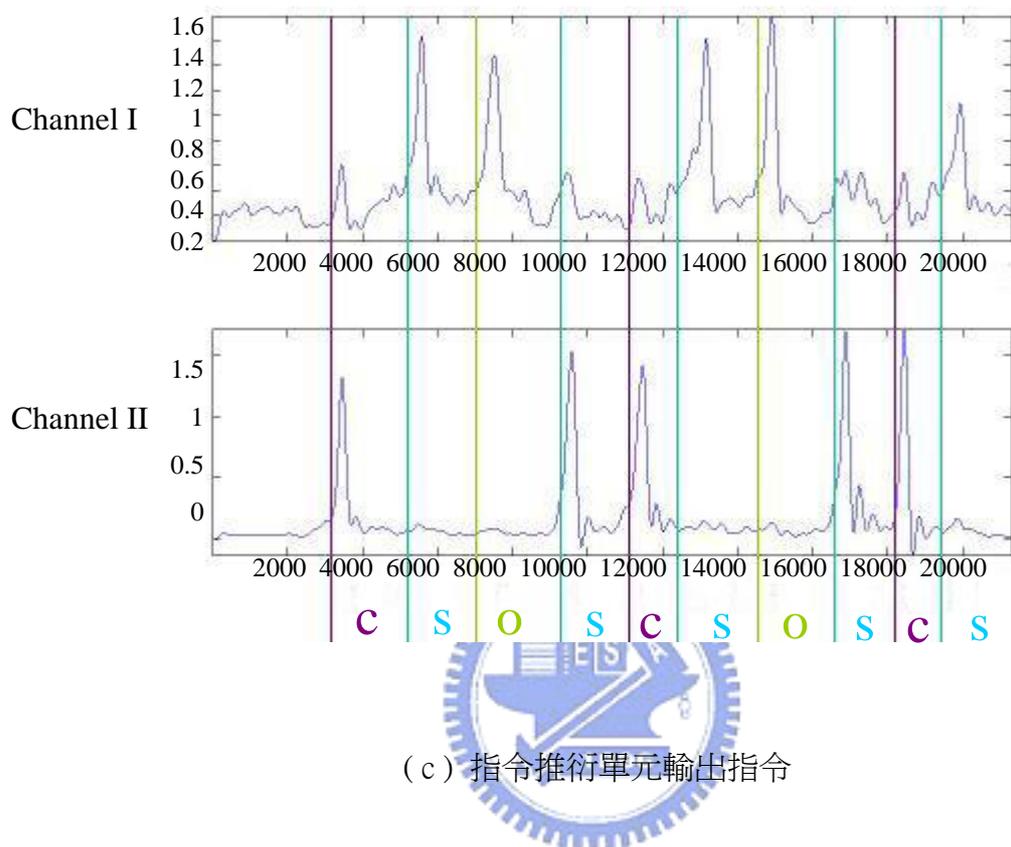
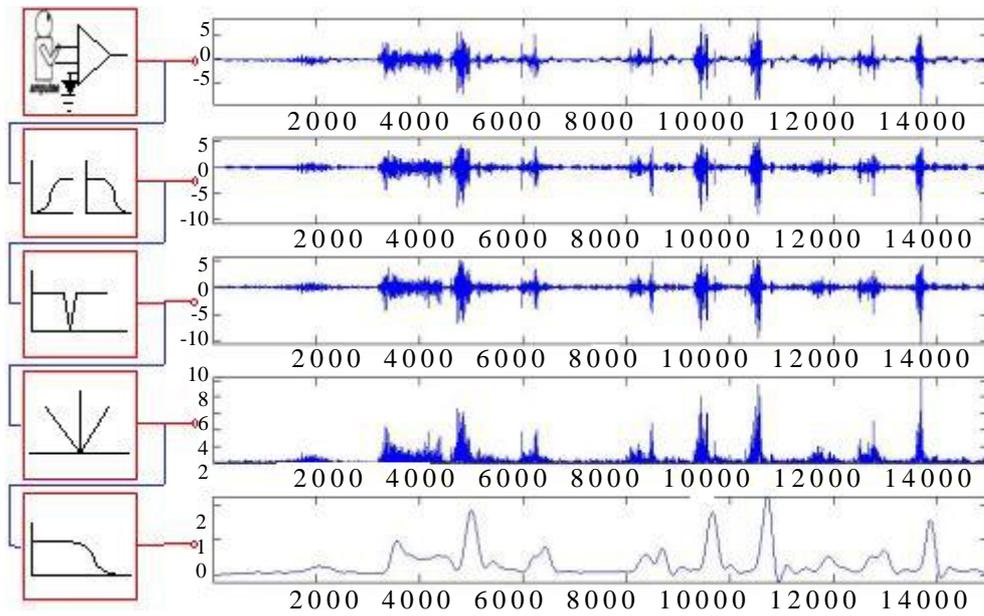
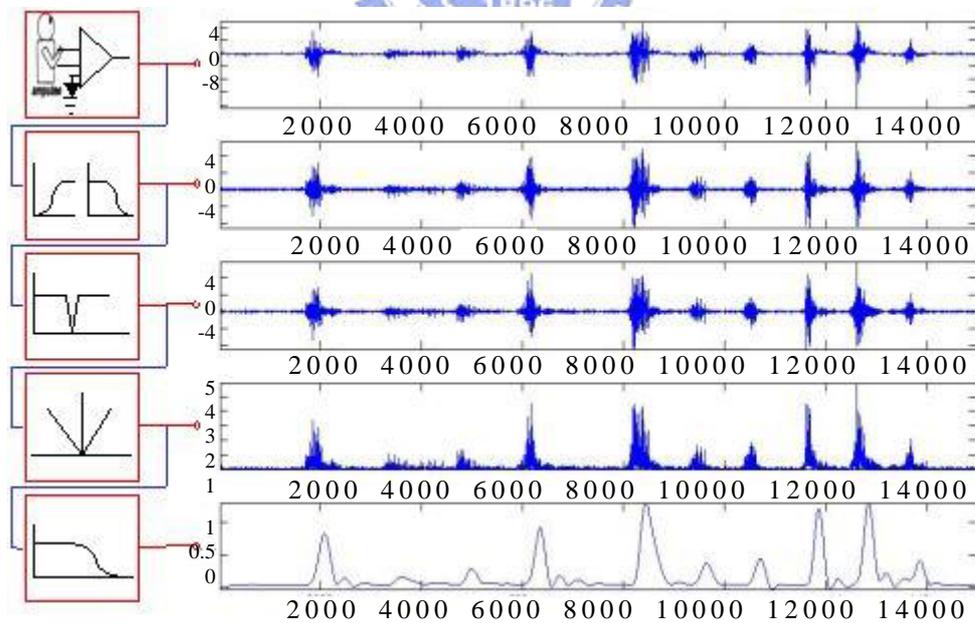


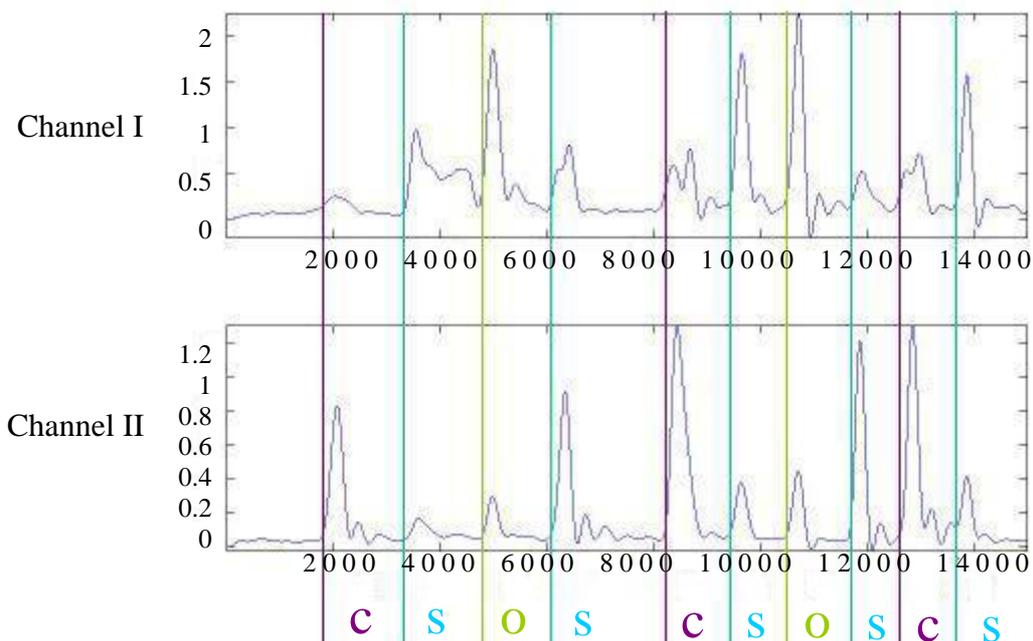
圖 5.10 實驗者四：(a) 伸指肌於系統各步驟的輸出訊號(原始訊號、帶通濾波後的訊號、帶拒濾波後的訊號、整流後的訊號、低通濾波後的訊號), (b) 屈指淺肌於系統各步驟的輸出訊號, 和(c) 指令推衍單元輸出指令 (C:Close、S:Stop、O:Open 以及 L:Lose)



(a) 伸指肌於系統各步驟的輸出訊號



(b) 屈指淺肌於系統各步驟的輸出訊號



(c) 指令推衍單元輸出指令



圖 5.11 實驗者五：(a) 伸指肌於系統各步驟的輸出訊號(原始訊號、帶通濾波後的訊號、帶拒濾波後的訊號、整流後的訊號、低通濾波後的訊號), (b) 屈指淺肌於系統各步驟的輸出訊號, 和(c) 指令推衍單元輸出指令 (C:Close、S:Stop、O:Open 以及 L:Lose)

依據實驗的結果，十分鐘的訓練時間，此肌電義肢的動作正確濾率大約可以到達 96%，而伸指肌的臨界值大約落在 0.015~0.02 伏特之間(放大倍率為 10 倍)；屈指淺肌的臨界值大約落在 0.01~0.022 伏特之間(放大倍率為 10 倍)，整理如表 5.4。

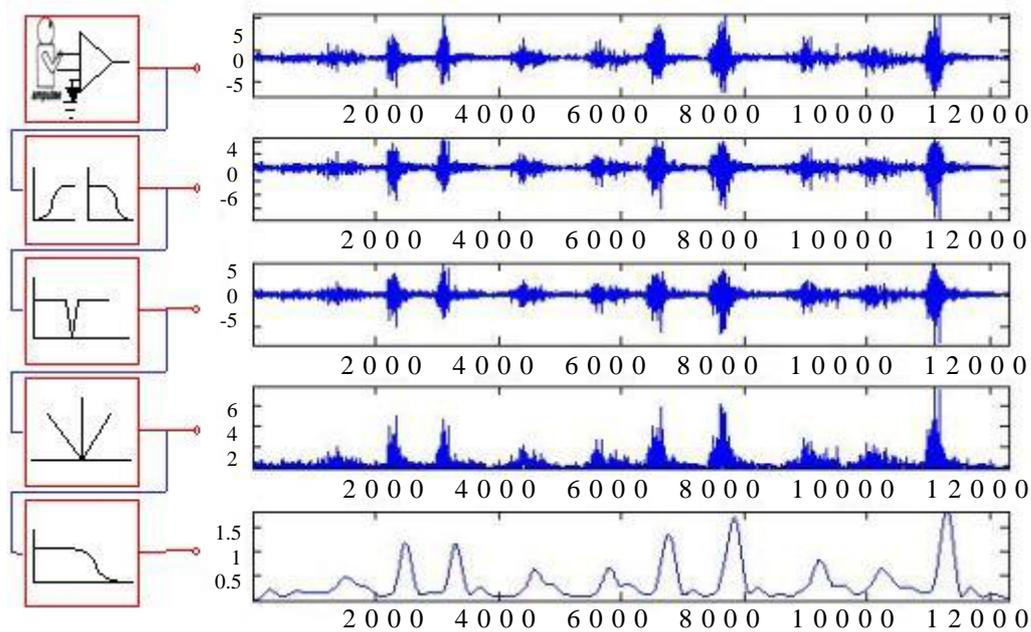
	伸指肌 臨界值	屈指淺肌 臨界值	正確率
實驗一	0.019	0.02	100%
實驗二	0.018	0.022	90%
實驗三	0.017	0.014	90%
實驗四	0.02	0.012	100%
實驗五	0.015	0.01	100%
平均	0.0178	0.0156	96%

表 5.4 第二次實驗：練習十分鐘後進行實驗的結果

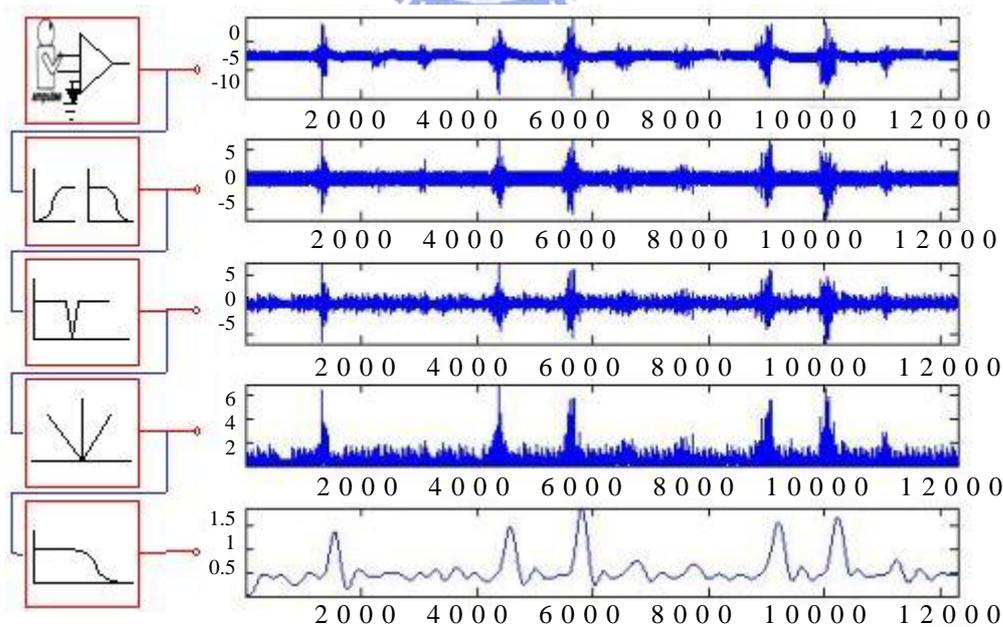


5.2.3 第三次實驗：練習十五分鐘後進行實驗

下列的實驗結果為五位實驗者訓練十五分鐘後，依照同樣的要求，必須讓義肢做同樣的手掌開合動作的實驗，並由系統紀錄實驗者伸指肌與屈指淺肌的肌電圖以及指令推衍單元輸出的指令，結果如下。



(a) 伸指肌於系統各步驟的輸出訊號



(b) 屈指淺肌於系統各步驟的輸出訊號

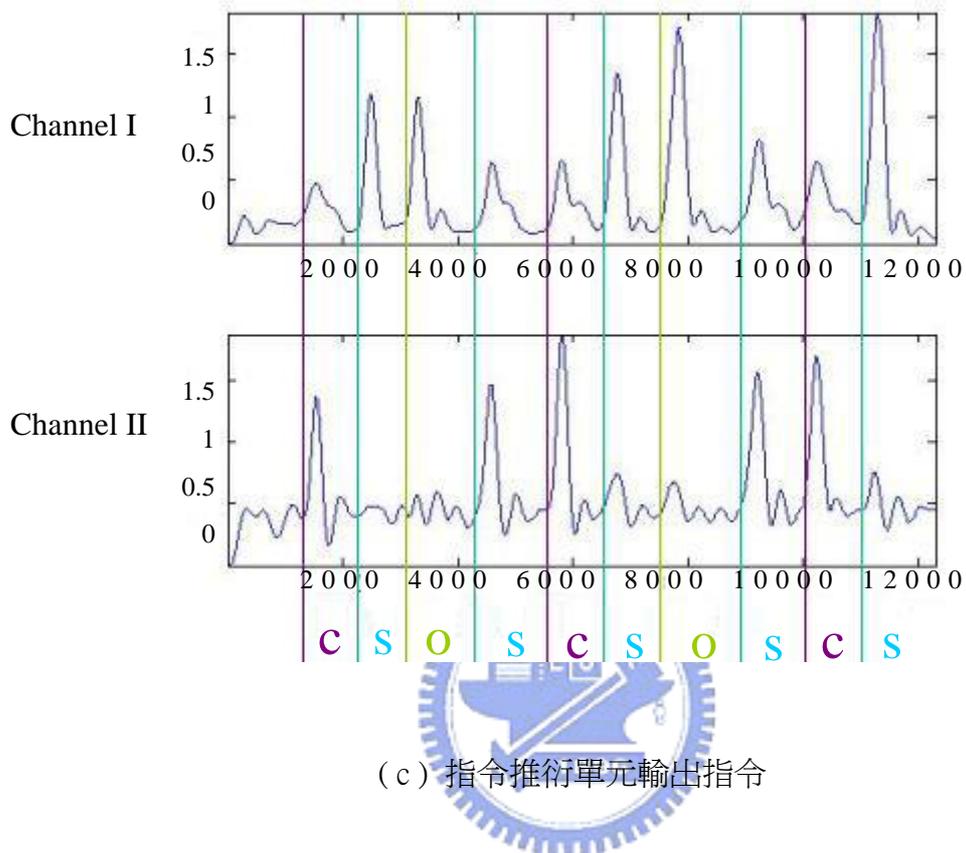
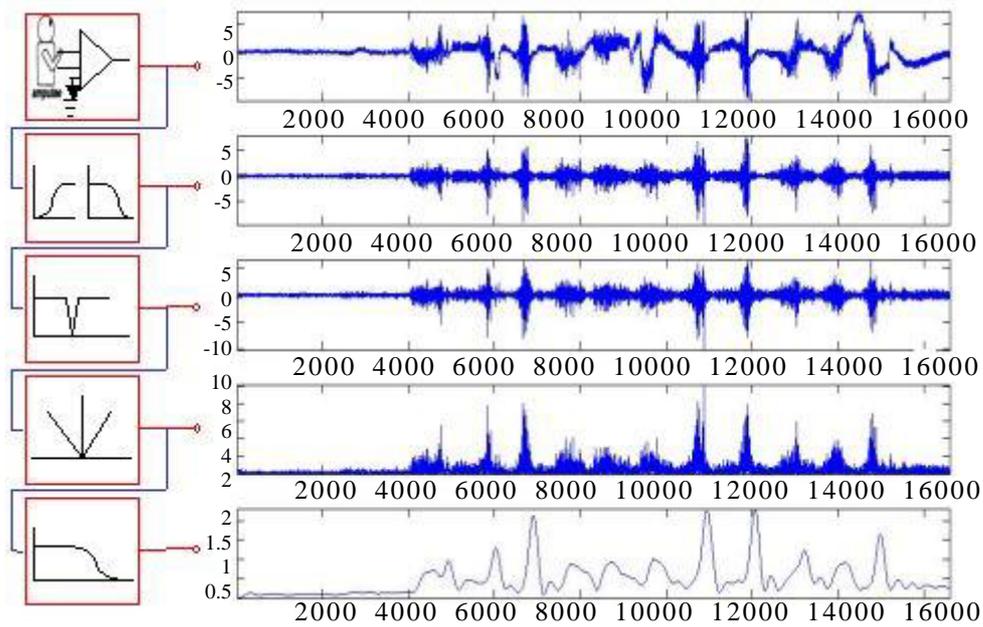
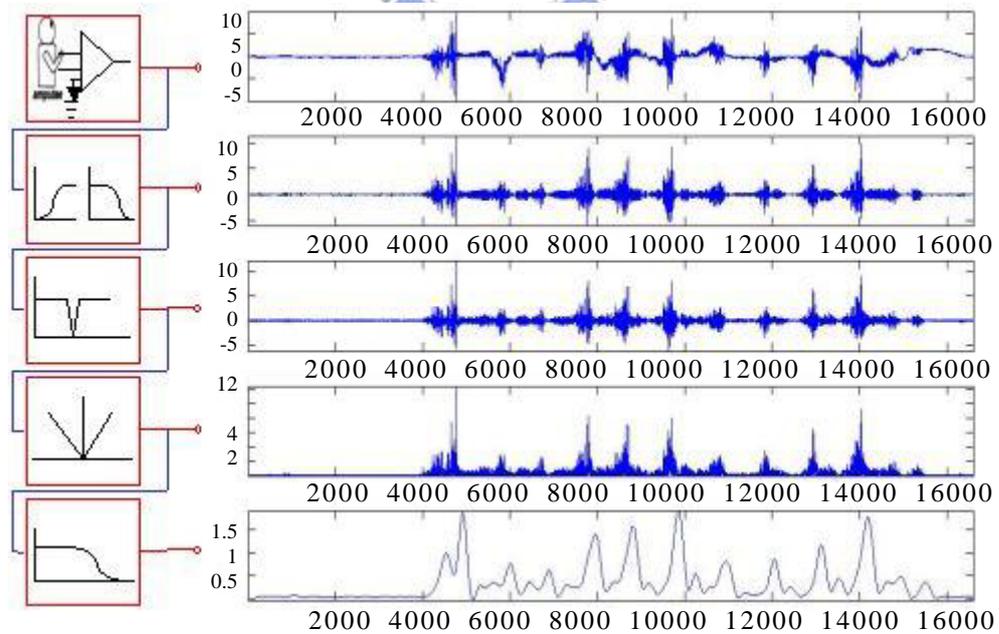


圖 5.12 實驗者一：(a) 伸指肌於系統各步驟的輸出訊號(原始訊號、帶通濾波後的訊號、帶拒濾波後的訊號、整流後的訊號、低通濾波後的訊號), (b) 屈指淺肌於系統各步驟的輸出訊號, 和(c) 指令推衍單元輸出指令 (C:Close、S:Stop、O:Open 以及 L:Lose)



(a) 伸指肌於系統各步驟的輸出訊號



(b) 屈指淺肌於系統各步驟的輸出訊號

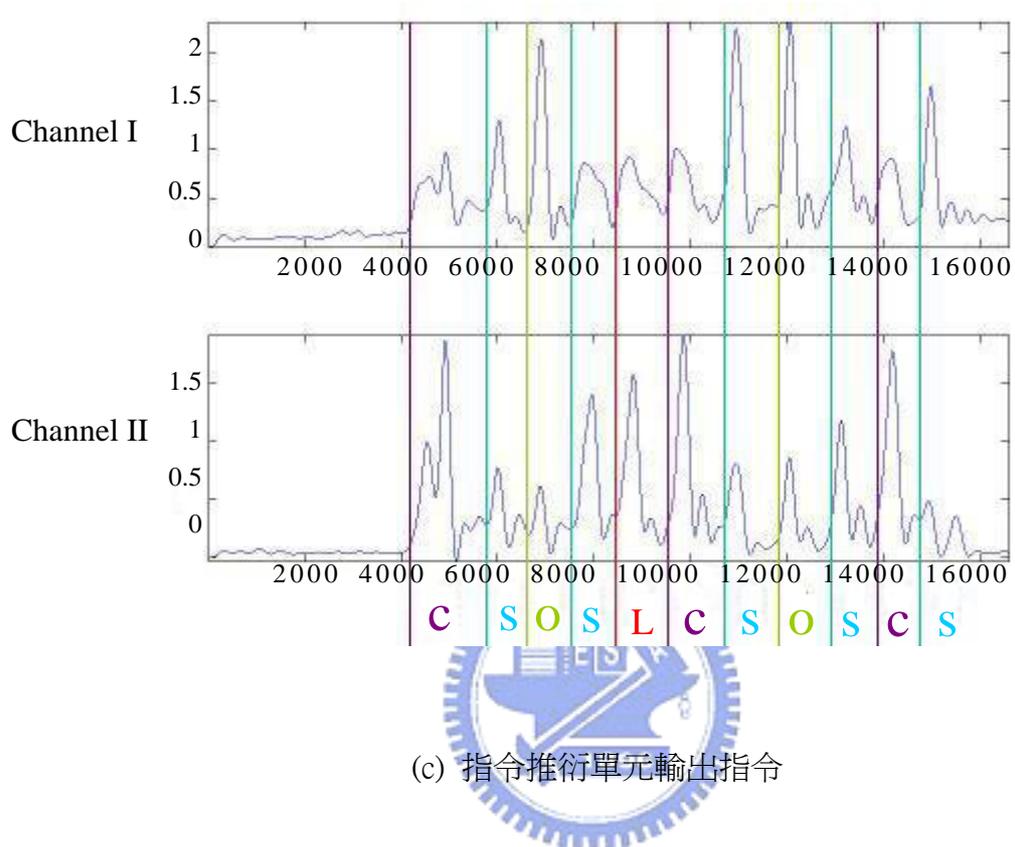
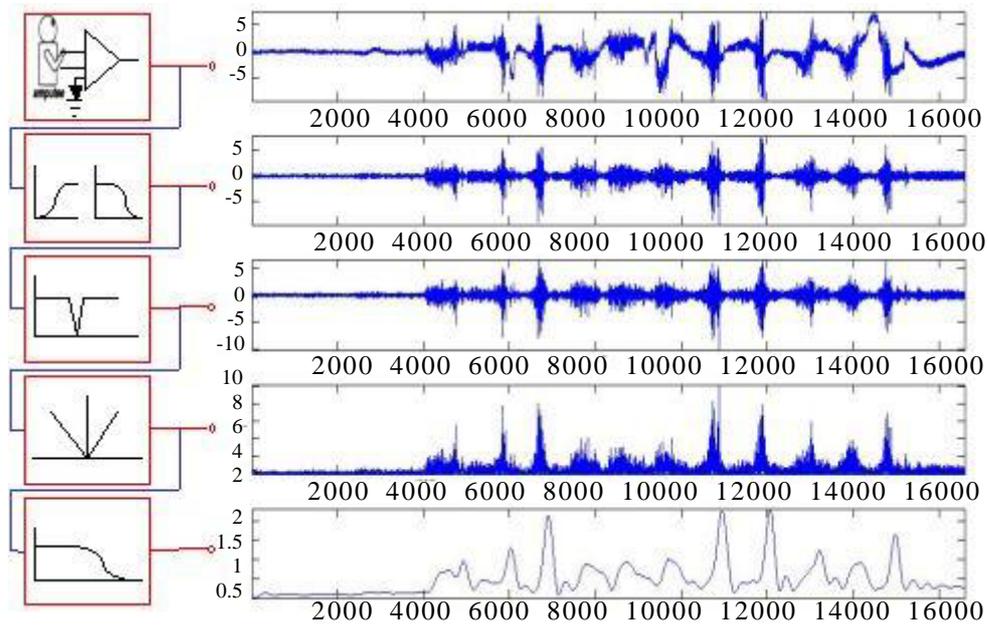
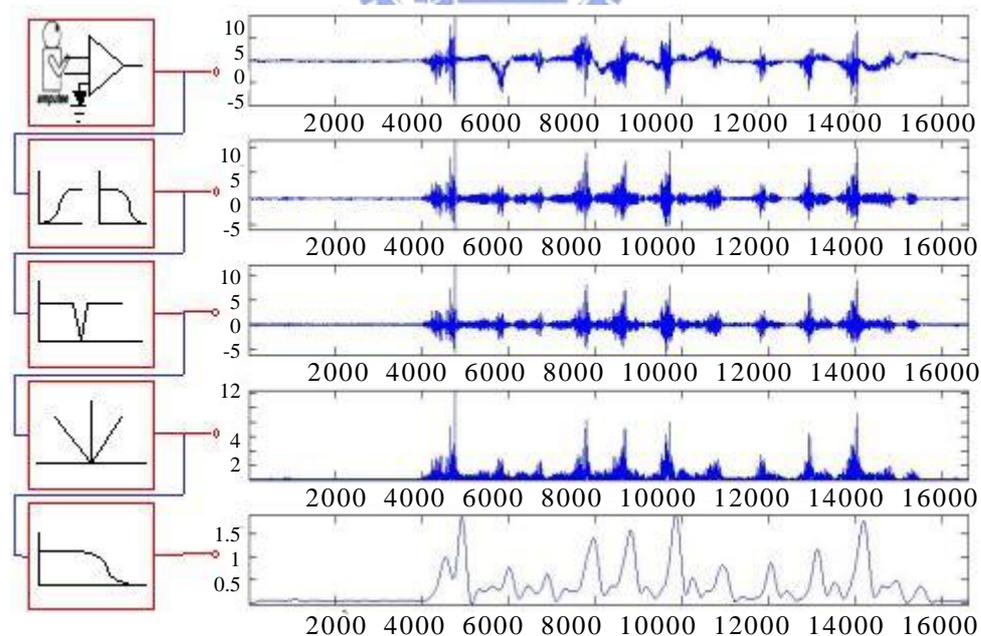


圖 5.13 實驗者二：(a) 伸指肌於系統各步驟的輸出訊號(原始訊號、帶通濾波後的訊號、帶拒濾波後的訊號、整流後的訊號、低通濾波後的訊號), (b) 屈指淺肌於系統各步驟的輸出訊號, 和(c) 指令推衍單元輸出指令 (C:Close、S:Stop、O:Open 以及 L:Lose)



(a) 伸指肌於系統各步驟的輸出訊號



(b) 屈指淺肌於系統各步驟的輸出訊號

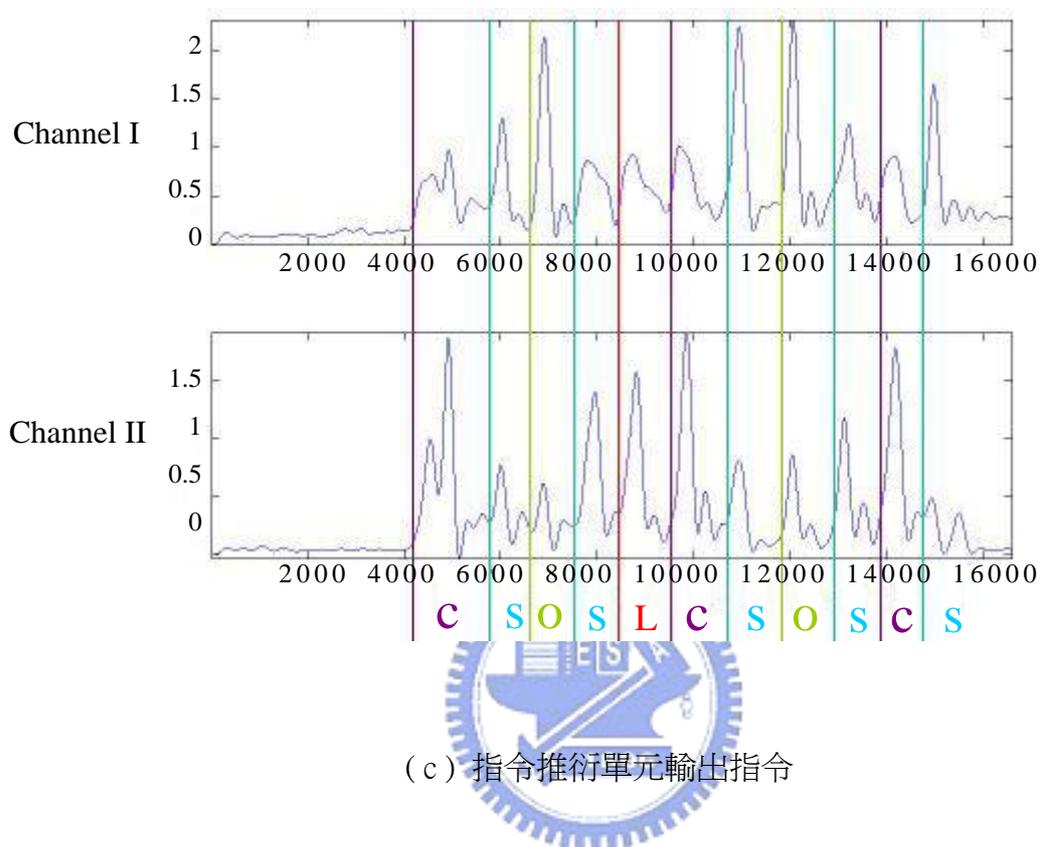
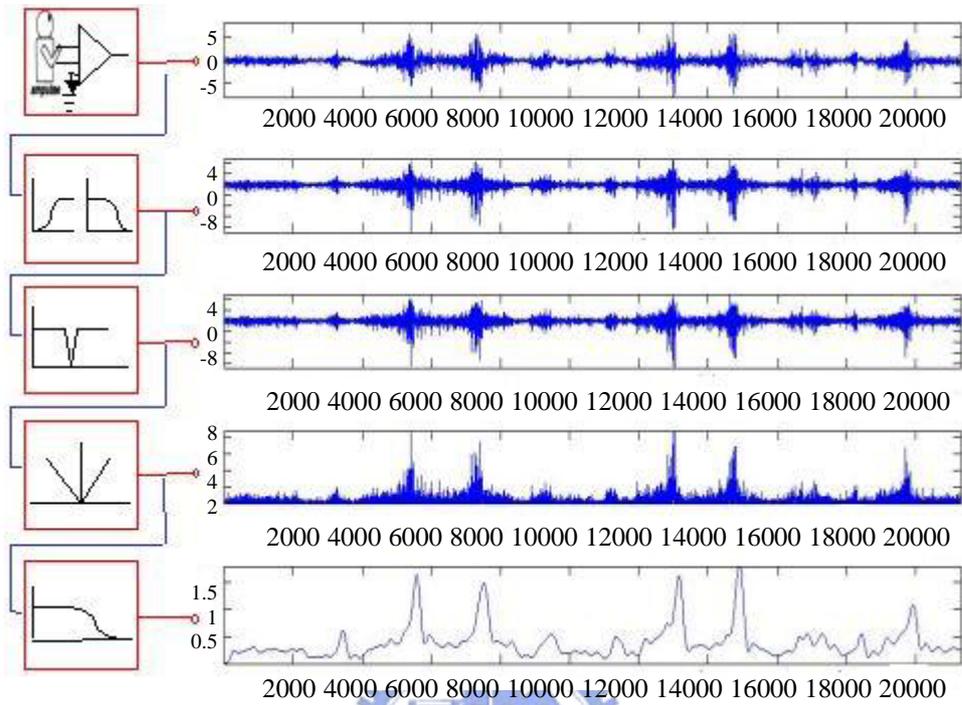
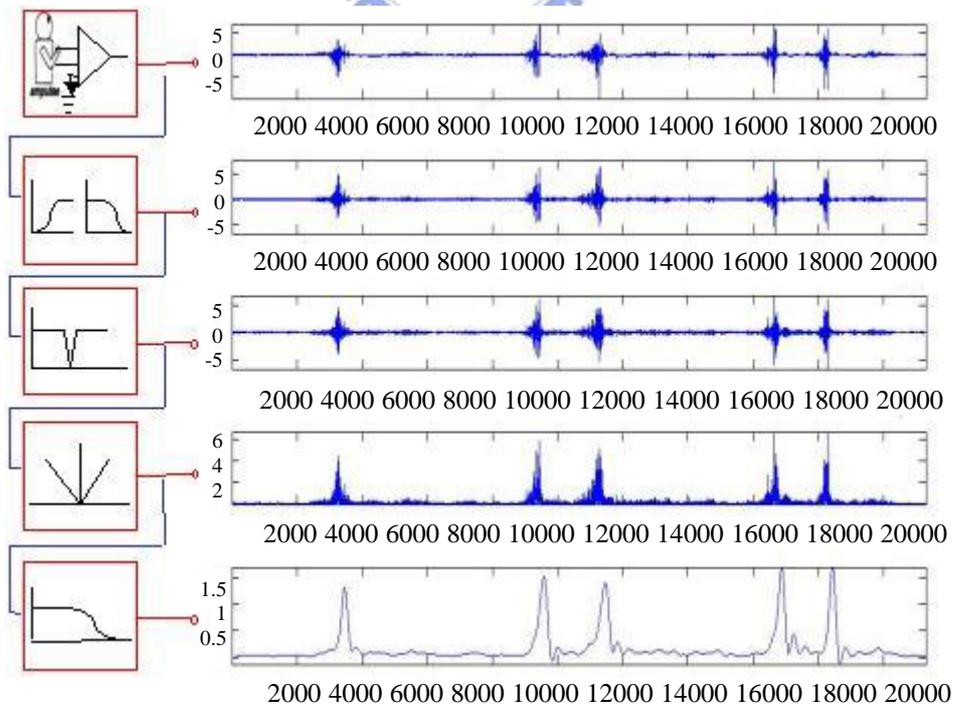


圖 5.14 實驗者三：(a) 伸指肌於系統各步驟的輸出訊號(原始訊號、帶通濾波後的訊號、帶拒濾波後的訊號、整流後的訊號、低通濾波後的訊號), (b) 屈指淺肌於系統各步驟的輸出訊號, 和(c) 指令推衍單元輸出指令 (C:Close、S:Stop、O:Open 以及 L:Lose)



(a) 伸指肌於系統各步驟的輸出訊號



(b) 屈指淺肌於系統各步驟的輸出訊號

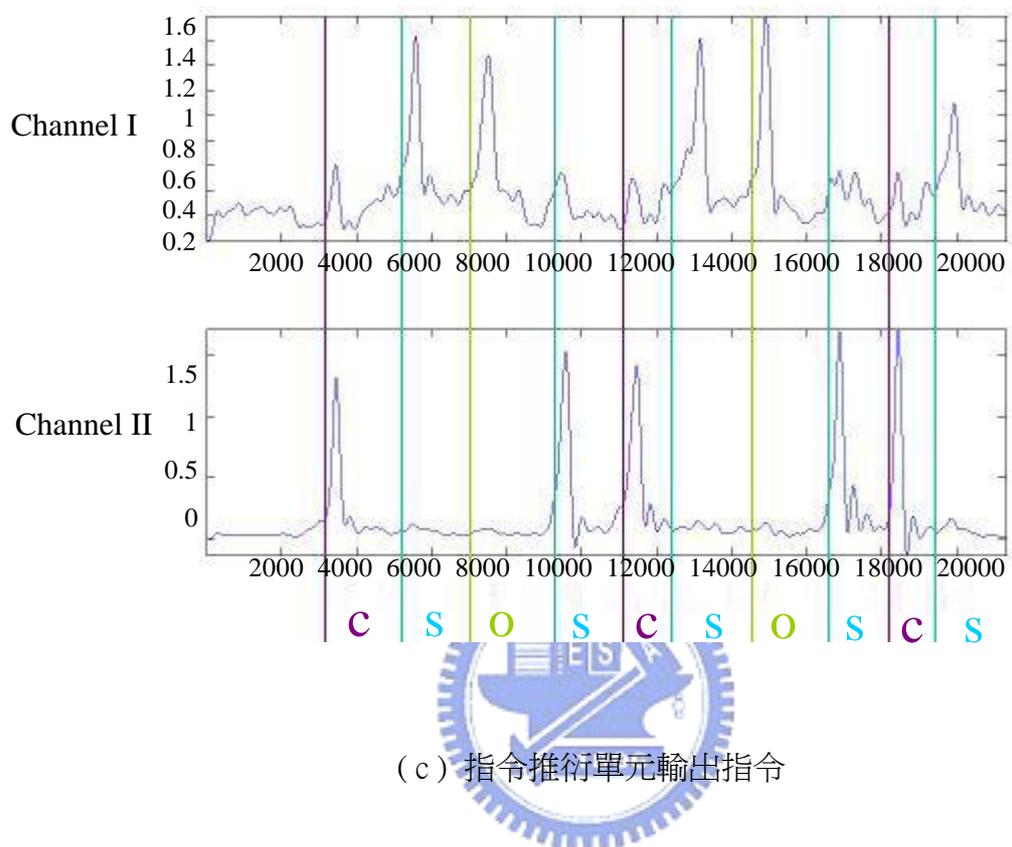
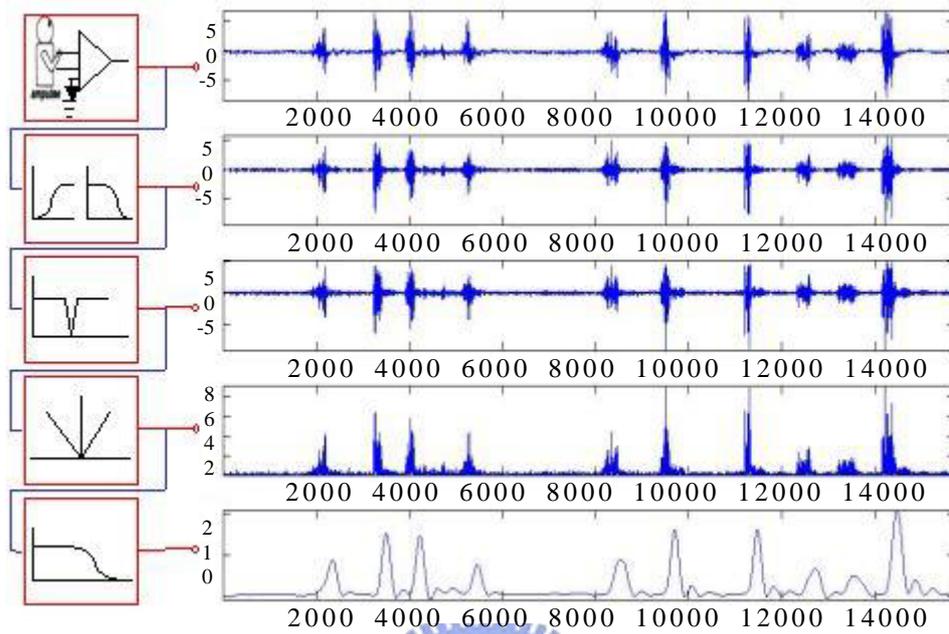
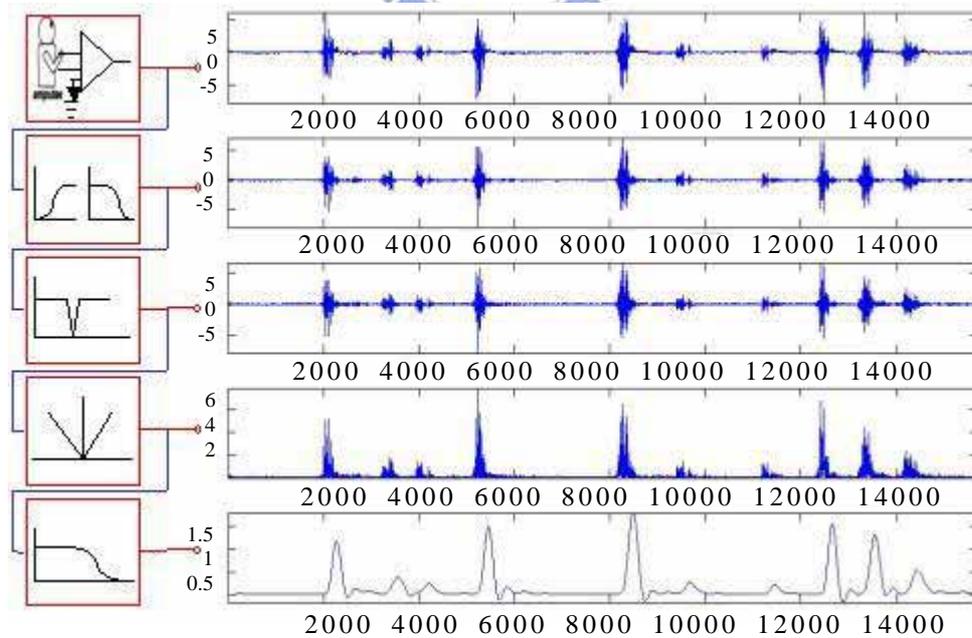


圖 5.15 實驗者四：(a) 伸指肌於系統各步驟的輸出訊號(原始訊號、帶通濾波後的訊號、帶拒濾波後的訊號、整流後的訊號、低通濾波後的訊號), (b) 屈指淺肌於系統各步驟的輸出訊號, 和(c) 指令推衍單元輸出指令 (C:Close、S:Stop、O:Open 以及 L:Lose)



(a) 伸指肌於系統各步驟的輸出訊號



(b) 屈指淺肌於系統各步驟的輸出訊號

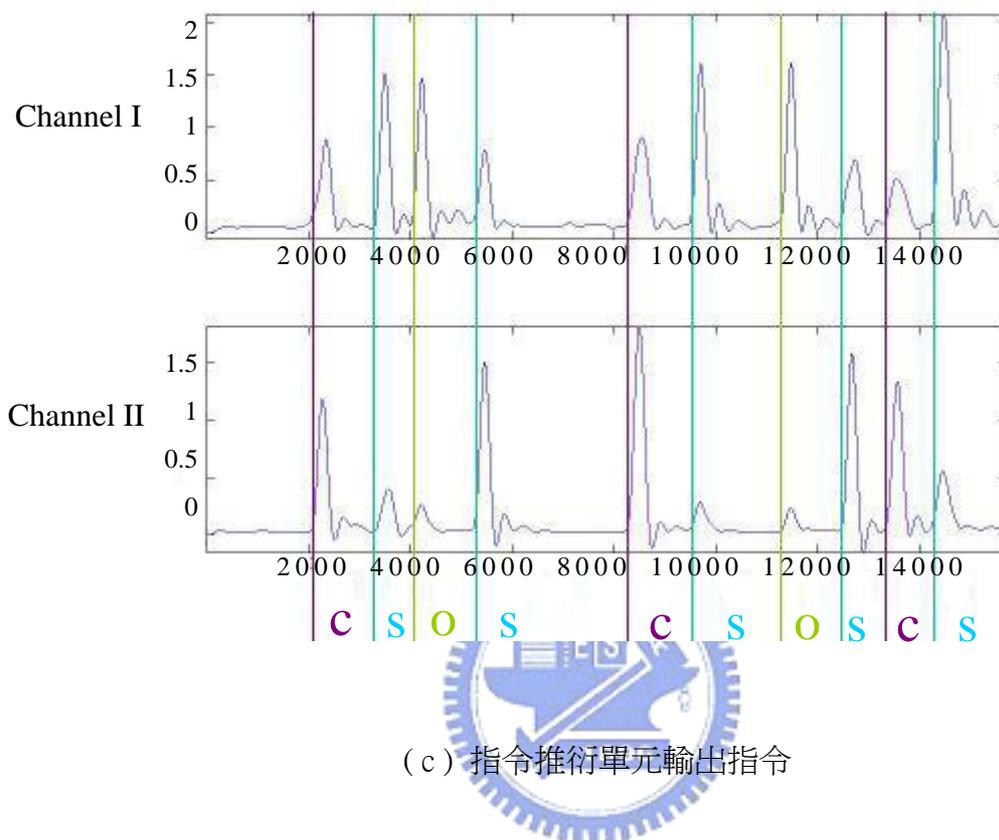


圖 5.16 實驗者五： (a) 伸指肌於系統各步驟的輸出訊號(原始訊號、帶通濾波後的訊號、帶拒濾波後的訊號、整流後的訊號、低通濾波後的訊號), (b) 屈指淺肌於系統各步驟的輸出訊號, 和(c) 指令推衍單元輸出指令 (C:Close、S:Stop、O:Open 以及 L:Lose)

依據實驗的結果，十五分鐘的訓練時間，此肌電義肢的動作正確濾率大約可以到達 98%，而伸指肌的臨界值大約落在 0.015~0.02 伏特之間（放大倍率為 10 倍）；屈指淺肌的臨界值大約落在 0.01~0.022 伏特之間(放大倍率為 10 倍)，整理如表 5.5。

	伸指肌 臨界值	屈指淺肌 臨界值	正確率
實驗一	0.019	0.02	100%
實驗二	0.018	0.022	100%
實驗三	0.017	0.014	90%
實驗四	0.02	0.012	100%
實驗五	0.015	0.01	100%
平均	0.0178	0.0156	98%

表 5.5 第三次實驗：練習十五分鐘後進行實驗的結果



依據上述三次實驗共計十五筆實驗的結果，整理如表 5.6 與 5.7 所示，由表 5.6 的結果發現，訓練時間由五分鐘增加為十分鐘，再陸續增加為十五分鐘，實驗者一、實驗者二、實驗者四及實驗者五的實驗正確率皆隨著練習時間的增加而攀升，而全部的平均正確率也從 92%、96%增加至 98%，由此可知訓練時間也會影響動作的正確率，訓練的時間較長者，義肢動作正確率也就越高，這是由於人類的適應性所造成，肌電義肢使用越久，使用者對肌電義肢的適應性越高，正確率也就越高，並且發現在經過第三次的實驗後，系統的正確率已經到達 98%，也就是說由此五位 20~30 歲的實驗者的實驗資料顯示，本論文所提之基於肌電波之人手與義肢控制系統僅僅需要十五分鐘即可讓此年齡層的女性使用者適應此肌電義肢。

	第一次實驗 正確率	第二次實驗 正確率	第三次實驗 正確率
實驗一	90%	100%	100%
實驗二	90%	90%	100%
實驗三	90%	90%	90%
實驗四	90%	100%	100%
實驗五	100%	100%	100%
平均正確率	92%	96%	98%

表 5.6 五位實驗者於三次實驗的動作正確率

於表 5.7 五位實驗者分別於三次實驗的詳細動作狀況所示，對於手掌關閉此動作的系統錯誤率共有五次，而對於手掌打開動作的系統錯誤率有兩次，明顯的，手掌關閉動作的錯誤率明顯較手掌打開動作錯誤率為高，此問題正呼應先前所述，屈指淺肌周圍分佈較多的肌肉群，且所處的位置比較靠近肌腱附著區，貼電極時若位置選擇有所偏差就會造成 EMG 訊號的不正確。另一現象是實驗者連續做兩次相同動作(如連續兩次手掌開啓或關閉)此系統錯誤次數為四次，做不同動作(如手掌的動作由開啓轉關閉或關閉轉開啓)此系統錯誤次數為兩次，手掌連續做兩次相同動作的錯誤次數明顯偏高，原因應該是起因於肌肉的疲勞現象，當肌肉持續收縮時，運動神經元需要時間恢復[23]所導致系統的動作錯誤。

手掌動作		合	開	開	合	合	開	開	合	合	開
實 驗 一	5	O	O	O	O	O	O	O	O	X	O
	10	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
	15	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
實 驗 二	5	O	O	O	O	O	X	O	O	O	O
	10	O	X	O	O	O	O	O	O	O	O
	15	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
實 驗 三	5	O	O	O	O	X	O	O	O	O	O
	10	X	O	O	O	O	O	O	O	O	O
	15	O	O	O	O	X	O	O	O	O	O
實 驗 四	5	O	O	O	O	O	O	O	O	X	O
	10	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
	15	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
實 驗 五	5	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
	10	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O
	15	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O

表 5.7 五位實驗者分別於三次實驗的詳細動作狀況