

第三章

系統分析與鑑別

在遠端操控系統中所面臨的人機介面，系統直接與外部接觸的都是類比資訊，因此必須透過類比/數位轉換器將代表物理性質的類比資訊，例如電壓，轉換成數位式的資訊以供電腦讀取，然而電腦處理的資料是數位化資訊，因此爲了使硬體的量測數據正確地表示接收到的外界資訊，包括力量資訊、位置資訊等，因此進行實驗之前必須先校正硬體的參數以求最精準的控制，本章包括夾爪馬達之轉矩判定、及夾爪齒輪傳動系統之位移判定、力感測器的校正、力感測器的雜訊處理。

3.1 夾爪馬達系統轉矩判定



機械夾爪的致動器若爲電動式的驅動方式，則可藉由量測馬達上面的轉矩大小間接得知夾取力道的值，進而做爲力回饋算運用，實驗選擇用馬達來驅動時，是否需使用到壓力感測器即是一個值得探討的問題。在此我們做了馬達轉矩與壓力感測器之間關係的分析，用以說明壓力感測器所能達到的精確性，效果比直接量測馬達轉矩的方法還要來得好，以及壓力感測器存在的某些重要性。

夾爪的驅動機構是利用齒輪去帶動齒條，將齒條的直線移動轉換成在夾爪上的開閉動作，如圖 3.1 所示，若直接以驅動夾爪的直流馬達去驅動夾爪系統，由於馬達本身輸出轉矩不夠，因此在抓取較重物體的時候會發生夾取力道不夠，導致物體滑落的情形，故在馬達末端裝設有減速機，另一方面由於馬達本身轉速極快，不能直接帶動夾爪機構的開閉動作，因此，馬達若裝設合適的減速機可降低齒輪的轉速，一方面增加齒輪轉矩來獲得較大的夾取力。接著我們分析完整夾爪系統的轉矩傳遞過程，以及馬達轉矩與夾取力量的關係，並說明爲何需使用精密

感測元件來量測夾取力。

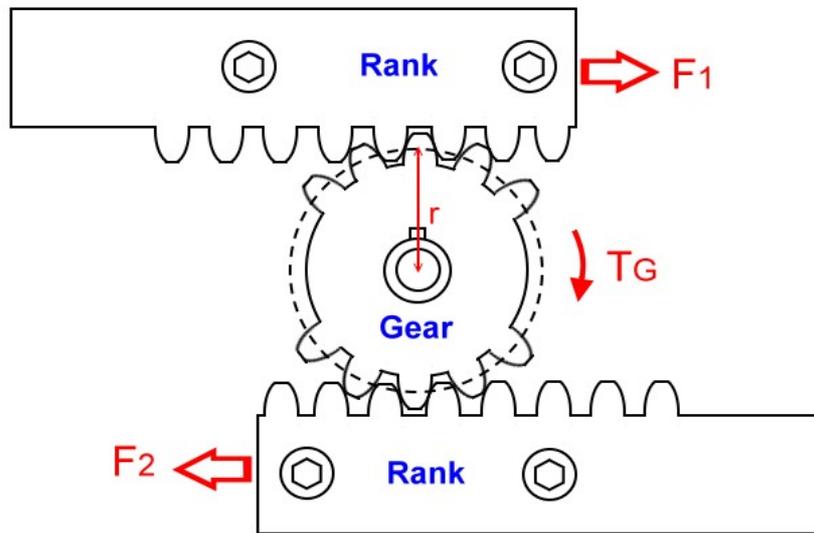


圖 3.1 夾爪機構傳動系統

設假馬達直接輸出轉矩為 T_M ，經過減速機後的轉矩為 T_G ，減速機的減速比為 R ，傳動效能為 η ，夾爪的左右邊夾取力道為分別為 F_1 及 F_2 ，齒輪半徑為 r ，從第二章中的規格可知，夾爪機構中減速機的減速比 R 為 100，傳動效能 η 為 66%，馬達額定轉矩 T_M 為 42.2 毫牛頓-米(mNm)，齒輪半徑 r 為 0.009 米，因此可得到馬達經過減速機構後所能提升的轉矩方程式(3-1)式。

$$T_G = T_M \times R \times \eta \quad (3-1)$$

由(3-1)式可算出齒輪轉矩 T_G 為 2.7852 Nm，藉由馬達輸出轉矩，將能量透過齒輪及齒條再傳遞給夾爪的爪指形成夾取力，假設夾取姿態保持在不傾斜的情況下，及不考慮傳動機構的能量損耗下，左右兩指的力道可視為相等，即 $F_1 = F_2 = F$ ，其之間的關係如(3-2)式：

$$F_1 \times r + F_2 \times r = T_G \quad (3-2)$$

由(3-2)式可算出夾取力 F 為 154.7 牛頓，即當馬達施加最大轉矩時，表現在

夾爪上最大的施力，此力量足以夾取十餘公斤的重物，對一般使用者欲拿取之物體所需力量可說是綽綽有餘。爲了避免馬達燒毀及傳動系統磨損，在不必要情況下儘量不要以 10 伏特電壓驅動馬達使之以最大轉矩運作，以確保馬達的安全壽命。

接著考慮利用馬達轉矩推算夾取力量，如圖 3.2 所示，以週期爲 12.5 秒的電壓命令去驅動夾爪的馬達，夾取對象爲一具有彈性之橡膠球，從馬達驅動器上直接讀取馬達轉矩監控電壓端的電壓變化，再與命令電壓值做比較。藍色線即爲馬達的電壓命令，負值表示使馬達關閉，其值愈大表示馬達輸出轉矩愈大，夾爪出力就愈大，綠色曲線部分表示馬達轉矩的觀測電壓值。

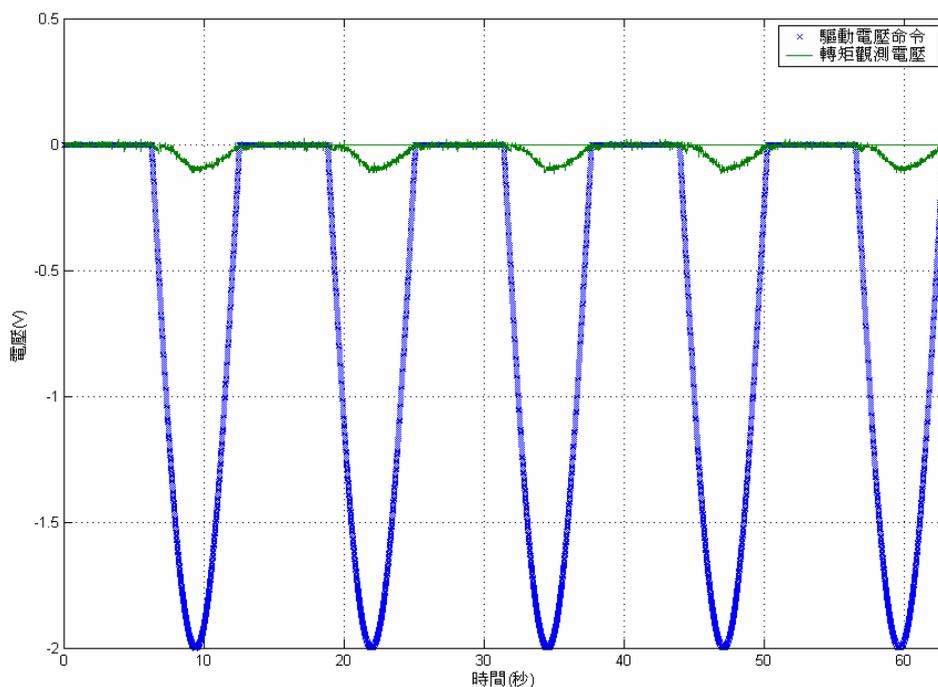


圖 3.2 夾爪馬達轉矩與電壓命令關係

由圖 3.2 可看出馬達轉矩監控電壓與驅動電壓命令大約成正比關係，理論上可由馬達轉矩監控電壓去間接推算出馬達實際轉矩，再由馬達轉矩經由傳動機構的參數算出夾爪的出力，電動式夾爪系統可直接由馬達轉矩得知夾取力，因此夾

爪末端似乎不需要感測器的存在，然而，實際上由於馬達傳動機構是機械式的齒輪機構，整個夾爪系統對馬達來講亦是個相當大的負載，故馬達出力必須先克服所有可能在傳動中造成的摩擦力，在如此複雜的傳動系統中的摩擦力難以去計算，另一方面，因為馬達轉矩監控電壓的值相對於驅動電壓命令非常小，如圖綠色曲線的幅度變化約為藍色曲線幅度變化的 10%，因此若直接從馬達上的轉矩觀測電壓去推算夾取力便會產生不準確的誤差值，故為了達到精確控制的要求，在夾爪末端裝設一個壓力感測器，以感測器來量測夾爪與物體之間的實際接觸力是必要的。

3.2 夾爪齒輪傳動位移實驗

力感測夾爪系統除了需量測夾取物體的夾取力量外，系統必須知道物體被擠壓時力量與形變量的關係，也就是物體的彈性係數，內嵌在爪指裡的壓力感測器可量測夾取力的變化，而驅動夾爪的直流馬達上的編碼器則可計算形物體形變量，編碼器可接收馬達轉動時送出的脈衝訊號，用來得知馬達轉動角度或圈數，故亦可間接計算出夾爪平行移動的距離，當夾爪最初與物體接觸到夾持住之間夾爪所走的距離便是物體的形變量。編碼器所計算出來的值，與馬達的轉動圈數相關，論文中用來驅動夾爪的機構由齒輪及齒條所組成，如圖 3.3 所示，將馬達的旋轉運動轉換成夾爪二指的直線來回運動，被夾取物體的位移量可從夾爪的位移量得知，位移量可間接藉由馬達的編碼器送出的脈衝數得知，因此，接著我們分析去找出馬達轉動圈數與夾爪位移的關係，進而比較實際數據與理論推算值之間的誤差，並探討兩者的差異與精確度。

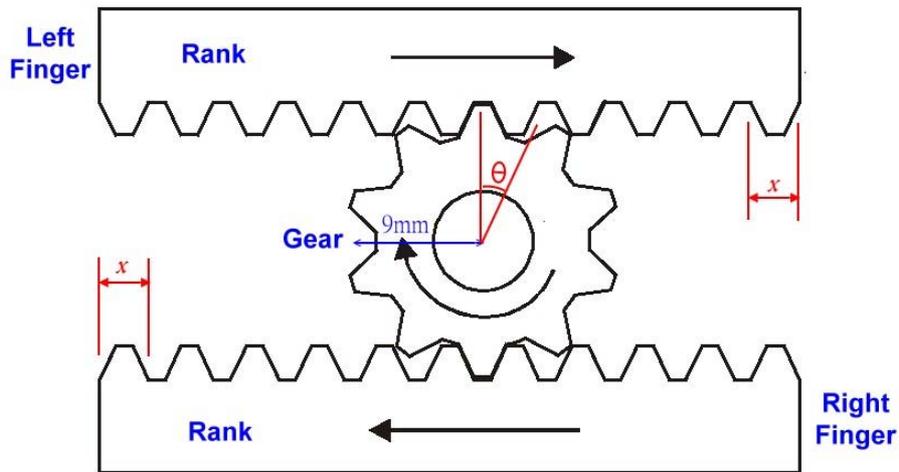


圖 3.3 夾爪機構傳動位移關係

從硬體規格換算出理論關係，假設 $m=2500$ 代表馬達轉動一圈時編碼器送出的脈衝數， $R=100$ 為減速機的減速比，意思即當馬達轉動 R 圈經過減速機便會帶動齒輪走轉動一圈，所以說若齒輪走一圈則會產生 $R \times m$ 個脈衝訊號。假設齒輪轉動一圈時帶動齒條移動 x 的距離， $x=2\pi r$ 代表一邊爪指走移動距離，夾爪有二指故整體夾爪移動了 $2x=4\pi r$ 的距離。

理論上當齒輪轉動一圈時，轉動角度與接收到的脈衝數目關係為：

$$\frac{\text{齒輪轉動角度}(\text{°})}{\text{脈衝數目}} = \frac{360}{R \times m} = \frac{360}{100 \times 2500} \quad (3-3)$$

當齒輪轉動一圈時，夾爪便走了 $4\pi r$ 的距離，故夾爪移動量與接收到的脈衝數目關係為：

$$\frac{\text{夾爪移動距離}(m)}{\text{脈衝數目}} = \frac{4 \times \pi \times r}{R \times m} = \frac{4 \times \pi \times 0.009}{100 \times 2500} \quad (3-4)$$

由於編碼器訊號是用來測量物體形變量，形變量是屬相對關係，所以若以理論值為基礎則會與實際值有所誤差，以下實驗找出脈衝數目與實際夾爪移動量的關係。實驗方式係從電腦向馬達下命令使夾爪從全開到全閉，再利用游標尺量測

夾爪兩指在完成動作前後的距離差值，即為夾爪移動距離，並觀察此時電腦上讀取到的脈衝數目。

經由多次實驗得知齒輪轉動一圈所送出的脈衝數目實為 287500 左右，也是馬達轉動一圈送出脈衝訊號數 $m=2875$ ，與規格 2500 稍微不同。所以實際上當齒輪轉動一圈時，轉動角度與接收到的脈衝數目關係為：

$$\frac{\text{齒輪轉動角度}(\text{°})}{\text{脈衝數目}} = \frac{360}{R \times m} = \frac{360}{100 \times 2875} \quad (3-5)$$

夾爪移動量與接收到的脈衝數目關係為：

$$\frac{\text{夾爪移動距離}(m)}{\text{脈衝數目}} = \frac{4 \times \pi \times r}{R \times m} = \frac{4 \times \pi \times 0.009}{100 \times 2875} \quad (3-6)$$

理論值與實驗值之所以會有些許誤差，是因為機械結構上的齒隙、訊號接收頻率與電腦 CPU 頻率、計數介面卡的解析度等種種因素造成，為達到真實性與實驗的可靠性，在往後論文中的實驗皆採用實驗值為準。

3.3 力感測器校正實驗

為確保量測精度，本論文中對力感測器進行校正實驗。從石英感測器的規格上可知，最大測量範圍可到 7500 牛頓，相當於 765 公斤左右，但是人類平常的握力或招力不過幾十牛頓，因此夾爪在夾取物體時，其力量大小經轉換成電壓後可說是非常小，經過類比/數位轉換器後，由電腦處理 16 位元的數位輸入訊號，即解析度為 0.3 毫伏特，經校正實驗換算後即 10 公克為最小解析度。此外由於感測器是壓電材質，當沒有施力的狀況下，感測器測量到的值是接近於零的非零值，因此為了達到精確地量測到力量值的要求，論文中必須先對感測器做校正實驗。

實驗方式如圖 3.4 所示，係在感測器垂直平面的方向上，分別以不同重量的不銹鋼 F1 級標準砝碼在上面施壓，實驗砝碼的重量包括 50、100、200、500、1000、1500 及 1800 公克，以及無負載重物的情況下，對這八種不同負載的輸入，求出施加力量值與量得電壓值的線性關係。由於壓電感測器無法量測出靜壓力，也就是說電壓波形無法表現出一個平穩的數值，故實驗過程係利用 C 高階語言去讀取一個頻道所擷取到的電壓值，設定擷取頻率為 100 赫茲，每次擷取 100 個樣本，再將此 100 個樣本做平均，即為一個取樣值，如此每種負載各反覆做十次，再將此十個輸出電壓值做平均表現為一個單點的電壓值，可得到近似直流般平穩的電壓波形。



圖 3.4 砝碼校正實況照片

令輸入砝碼重量為 x_i ，感測器量到的電壓值為 y_i ， i 代表八次不同的負載，實驗結果可得到八組資料，即圖 3.5 所標示，其之間的關係可用 (3-7) 式之矩陣形式來表示之，我們希望可以得到一個線性方程式 $X=aY+b$ 來描述所有數據點，在此我們利用最小平方法，使等號兩邊的差異最小，得到的方程式 $X=aY+b$ 即為

最小平方線。

$$\underbrace{\begin{bmatrix} 1 & x_1 \\ 1 & x_2 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & x_8 \end{bmatrix}}_A \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}}_Z = \underbrace{\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_8 \end{bmatrix}}_Y \quad (3-7)$$

$$\text{最小平方解 } Z = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = (A^T A)^{-1} A^T Y \quad (3-8)$$

將八組數據利用最小平方方法得到的解為 $a=8.0049$ ， $b=0.0257$ ，其中 a 代表未以砝碼施壓時的輸出偏壓， b 代表輸入輸出關係圖的斜率，因此輸入砝碼重量 x 與輸出電壓值 y 的線性關係如下：

$$y = 0.0257x + 8.0049 \quad (3-9)$$

其中 y 代表擷取到的電荷值，單位為毫伏特， x 代表碼砝重量，單位為公克。

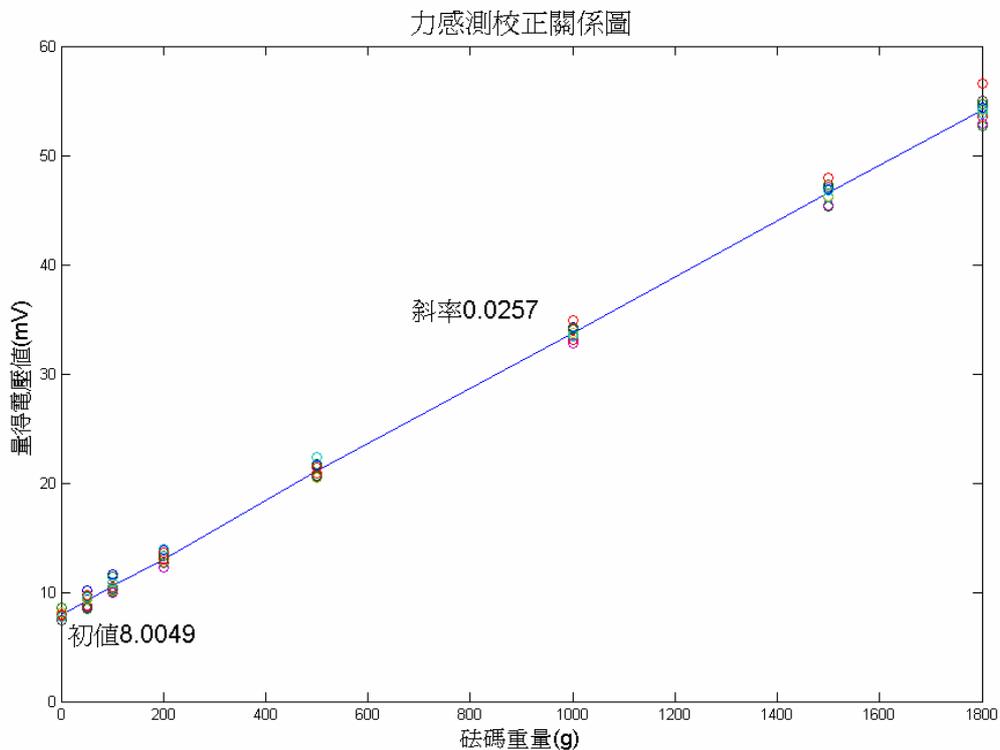


圖 3.5 感測器電壓與力量關係

由於砝碼施壓方向為單邊方向，故砝碼的重量相當於夾爪手指一邊的力量，因此必須將砝碼重量轉換成夾爪的單邊夾取力，若將以公克為單位的砝碼重量換算為以牛頓為單位的夾取力，則可得知感測器量測電壓與夾取力的關係方程式為：

$$y = 2.62244989x + 8.0049 \quad (3-10)$$

其中 y 代表擷取到的電荷值，單位為毫伏特， x 代表單邊夾取力量值，單位為牛頓，換算成牛頓與伏特為單位其關係如下：

$$x = 381.322957(y - 0.0080049) \quad (3-11)$$

其中 x 代表夾取力，單位為牛頓， y 代表感測器所量到的電荷量，單位為伏特。

接著考慮感測器的靈敏度及雜訊影響，根據實驗數據得知，當夾爪所去夾取的實驗對象感測器所量到的電壓值通常介於 0.5 伏特以下，換算成牛頓單位最多達到一百多牛頓，但生活中由人類用手去拿持物體的力量顯少大於一百牛頓，論文所使用之感測器的靈敏度及可量測範圍非常大，最小靈敏度為 0.3 毫伏特，相當於 10 克的壓力，且所使用感測器為石英材質，所以實驗中的任何微小震動或電磁波等，均會造成雜訊的問題發生。此石英感測器最大測量範圍可到 7500 牛頓，但實驗中所要量測的力量範圍並非此廣大，因此當系統要求要做更精準的控制時，如此雜訊相對就顯得非常大，對控制精確與否的影響也就更大，接下來內容便介紹如何降低力感測器的量測雜訊。

3.4 力感測器之雜訊處理

實驗中所用的力量感測器由於是硬體電路關係，故免不了有雜訊存在，例如前述，理論上當夾爪在沒有夾取物體的情況下感測器量到的電壓訊號應保持為零，但實際並非如此，必須先找出感測器未受力狀態的電壓值，但儘管如此測量

過程中仍舊會有瞬間的脈衝產生，此脈衝的變化即為雜訊，雜訊誤差大到足以使系統產生錯誤判斷，因此必須在系統中予以消除。

壓力感測器的雜訊產生因素很多，有時候是因為感測器本身的靈敏度，或是電荷放大器放大功率準確度影響，或是因為機械結構問題，例如所夾取物體與感測器表面的接觸狀態、放大器的雜訊比、夾爪機械結本身的防震與否，甚至配線周圍的電磁波或訊號線接觸不良，均有可能造成不必要的雜訊，實驗中所使用的感測器因為其本身靈敏度較高，以及電荷放大器外接電源的訊號干擾，是造成雜訊最主要原因，因此必須設法降低這些雜訊的干擾，解決方法為硬體上的調整及利用軟體將訊號做最佳化。

3.4.1 硬體方面

硬體方面即上面所描述般，實驗中能解決的部分就是盡量減少訊號線之間彼此的干擾，但硬體本身規格所限定之精確度及頻率等存在無法改善的雜訊誤差訊號，因此主要以軟體的方式來消除雜訊，再比較感測器經軟體濾波前與濾波後雜訊的解除程度。但首先必須先從硬體角度切入探討，討論訊號線與電源線的干擾問題，圖 3.6 為電荷放大器的供應電壓對感測器擷取訊號時所造成的干擾狀態，脈衝振幅最高到達 0.007 伏特至 0.010 伏特，換算成力量大小則為 2.2 牛頓到 3.3 牛頓的雜訊，若以此感測器訊號直接加在系統中做判斷，必然會發生誤判情形，當夾爪未與物體接觸所擷取到的感測器訊號有可能已超過系統的判斷值，因此系統會認定夾與物體接觸，使整個系統發錯誤，因此首先必須先消除各硬體設備對壓電感測器的干擾。

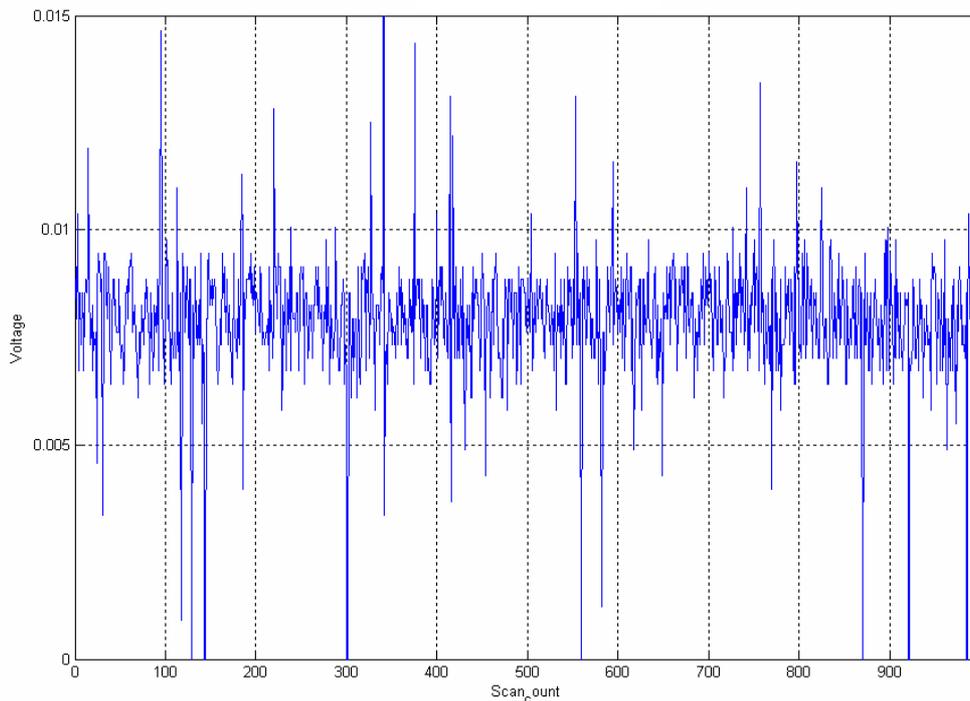


圖 3.6 感測器原始訊號

由於搖桿機構的驅動馬達其功率為 400 瓦，以致於當搖桿通電時會產生非常大的電磁波，嚴重影響到壓電感測器的量測訊號，故搖桿驅動馬達的運轉為雜訊產生的主要原因。經實驗證實，搖桿馬達的供給電壓與感測系統電荷放大器的供給電壓源彼此間會造成干擾，因此若將放大器電壓源與搖桿馬達的電壓源獨立開來，便可使雜訊降低到某一程度，如圖 3.7 為使感測器遠離電磁波干擾的結果，原本存在某一頻率上跳動的脈衝訊號即為電磁波干擾所造成，最大脈衝振幅約為 0.002 伏特，相當於 0.6 牛頓的力量雜訊，如圖 3.8 所示為以力量單位的感測訊號，與原始訊號比較若將電磁波干擾消除後可將雜訊降低至 20%。

圖 3.7 及圖 3.8 的感測器訊號為不施加任何壓力時所量到的訊號，由於是壓電感測器容易受微小振動干擾，因此才會呈現如圖中般的高頻率跳動，為了避免高頻雜訊對控制策略造成影響，我們希望感測器訊號能趨近低頻且振幅小的平穩訊號，我們利用軟體方式先做濾波處理，將感測器訊號轉換成理想的靜態壓力。

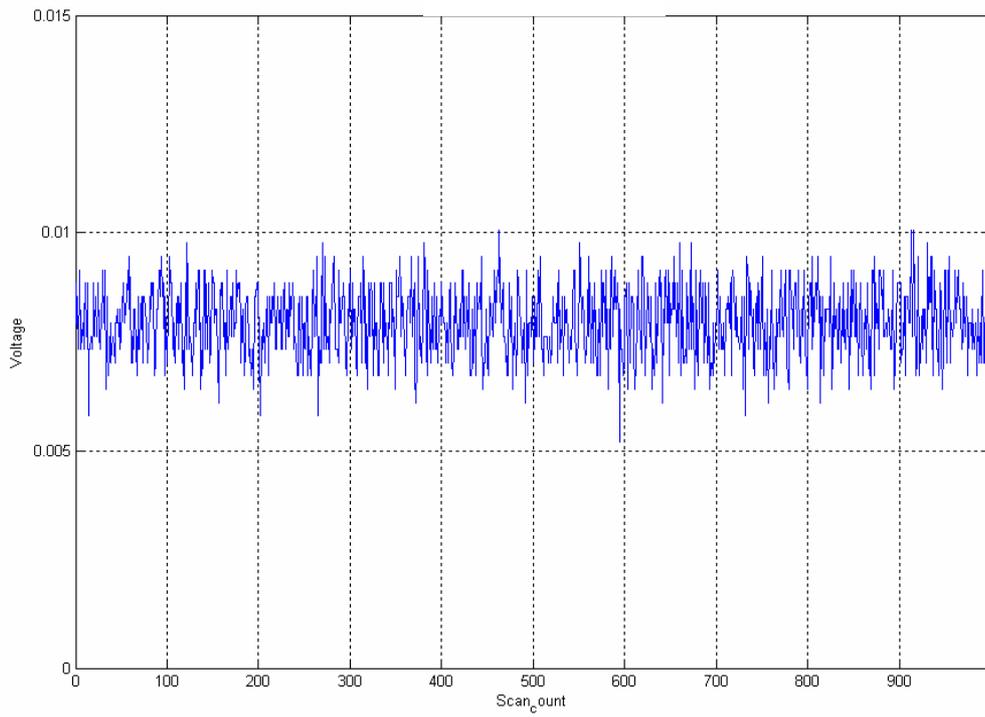


圖 3.7 排除電磁波干擾之電壓訊號

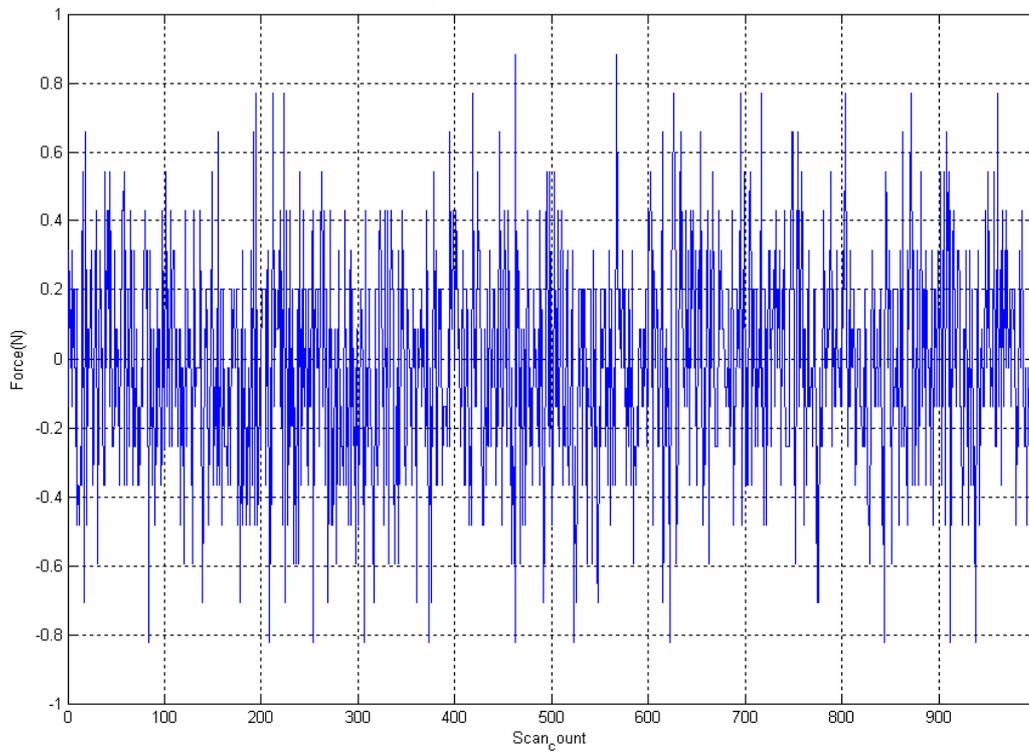


圖 3.8 排除電磁波干擾之力量訊號

3.4.2 軟體方面

經由上述硬體上的修正後，雜訊仍然在上下 0.002 伏特跳動之間，相當於力量雜訊約為正負 0.6 牛頓左右的誤差，如圖 3.6 所示，儘管已去除電磁波的雜訊干擾，但從圖 3.7 及圖 3.8 所表現的感測器擷取訊號波形仍是以高頻的方式上下振動，因此為了使測量更精準，接下來則利用軟體的方式，將所擷取到的高頻且振幅大的電壓訊號波形，表現為低頻且振幅小的波形圖，方法係採用平均值的運算，將某一段時間內所量到的電壓訊號先算出平均值再輸出，以達到較穩定的值，軟體設計如下圖 3.9 所示，首先以 off-line 的方式測試其濾波效果，接下來再應用在 on-line 的系統上，使濾波系統能直接在 C 語言內同時抓取訊號並執行訊號處理。

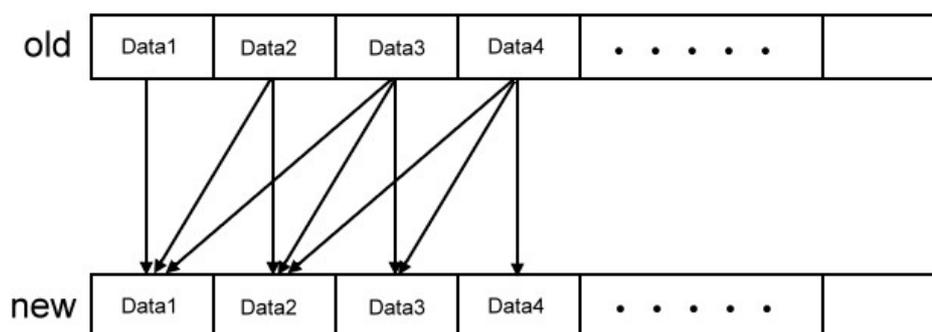


圖 3.9 off-line 資料傳輸模式

我們利用迴圈方式擷取訊號，每跑一個迴圈即擷取一筆資料，假設擷取到的資料從 Data1、Data2、Data3、…依序開始傳入，石英感測器的訊號擷取卡所得到的連續輸入電壓訊號，圖 3.9 所示上排為原始且帶有雜訊的資料數據，為了避免訊號跳動過大，必須將每筆輸入的訊號經過處理，將感測器擷取到一長串資料中，每 n 筆資料做一次平均再以平均值做為資料的輸出，例如圖例設定為 n=3，即每 3 筆資料做一次平均，圖 3.9 所示下排的資料即為經過運算處理過的新數據，即 $Data1=1/3(Data1+Data2+Data3)$ ， $Data2=1/3(Data2+Data3+Data4)$ ，

$Data3=1/3(Data3+Data4+Data5)$ ，依此類推，調整 n 值大小可將訊號的變化程度做不同程度的調整。

為証實此方法的可行性，先利用此方法將感測器擷取到的一組資料做 off-line 的處理，方法係利用感測器擷取 1000 筆電壓訊號後，將此資料存成一個矩陣型式的檔案，再利用 Matlab 軟體做處理，係將每 100 筆訊號做一次平均再做輸出，圖 3.10 及圖 3.11 分別為處理後的電壓訊號與力量訊號，由圖 3.10 中觀察到方法很明顯地有效改善原有雜訊干擾，原本存在的高頻雜訊已改變成低頻的平穩訊號，訊號波形的振幅降低到約 0.0002 伏特以下，相當於正負 0.06 牛頓的力量誤差雜訊，即將誤差值降低至 2%，如此便達到感測器的最小準確度並且符合控制系統的要求。

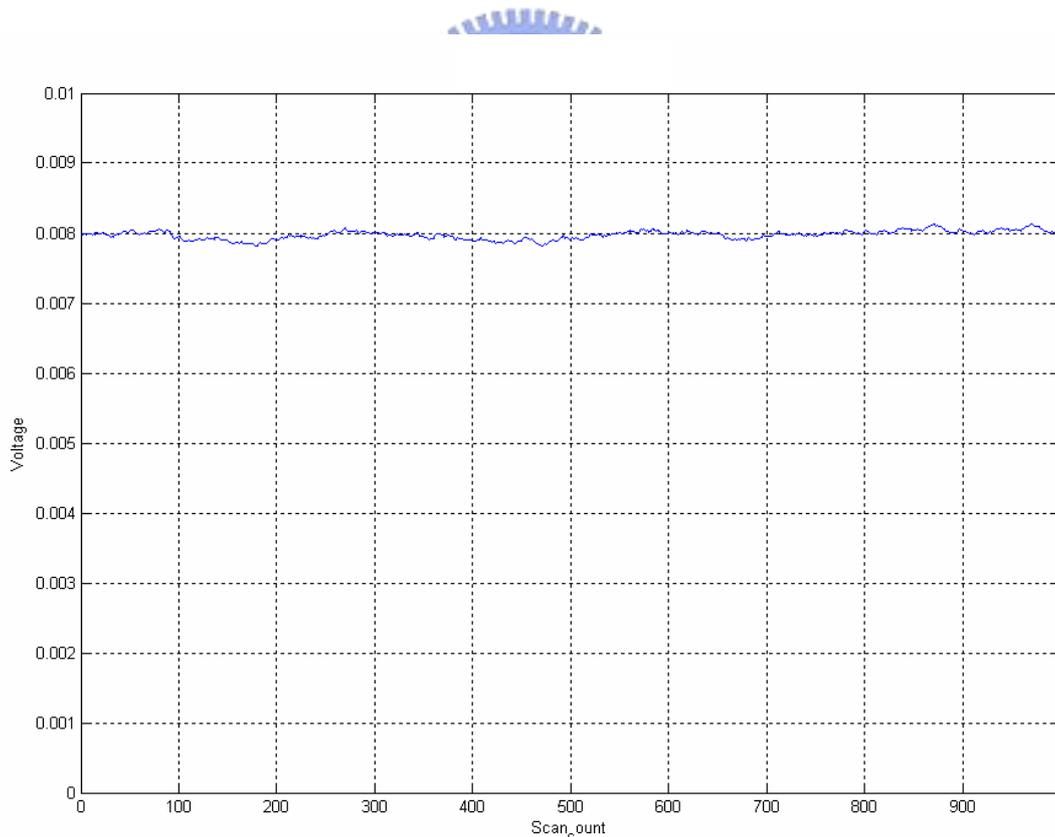


圖 3.10 經過軟體處理後之電壓訊號

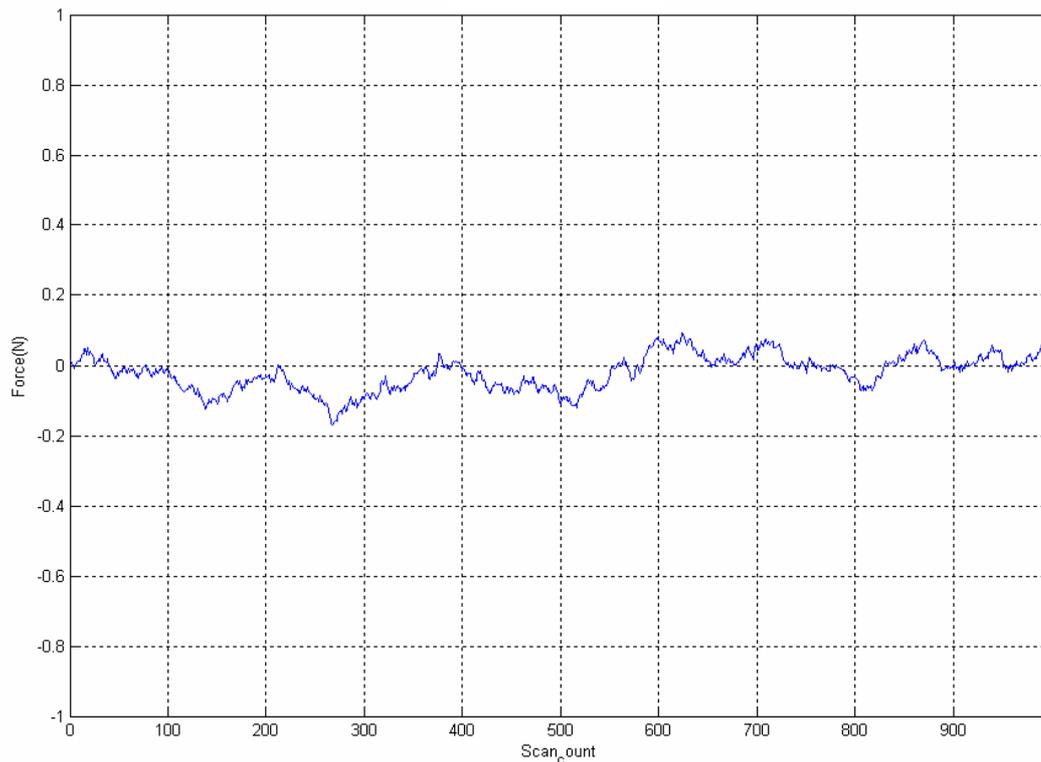


圖 3.11 經過軟體處理後之力量訊號

以上均為 off-line 的解決方案，以就是將擷取到的資料存檔後再做消除雜訊的處理，但是當實驗進行 on-line 遠端操控時，感測器擷取電壓訊號為即時的 (real-time)，也就是擷取方式為每掃描到一個訊號便將它輸出，因此必須在擷取資料的同時，邊做資料擷取邊做消除雜訊處理。實驗所使用的軟體為 Visual C++，方法是在程式寫法上利用環狀佇列(circular queue)方式設定長度為 n 的佇列，當資料不斷被輸入時依序將資料一個個送到佇列上做儲存，當佇列被 n 筆資料填滿後做平均值再一個個回傳出去。如圖 3.12 所示，先以迴圈方式讀取感測器電壓訊號，從第一筆資料被讀到開始，依序將資料從佇列的第一個位置開始填滿，當有新的元素加入時則將佇列空間內的每一個值做平均後再回傳，例如第二迴圈回傳值為 $1/2(\text{Data1}+\text{Data2})$ ，第三迴圈的回傳值為 $1/3(\text{Data1}+\text{Data}+\text{Data3})$ ，依此類推，當佇列開始被填滿後，也就是在第五迴圈之後，將新加入的資料蓋過佇列最前端的值，如此可避免佇列空間的浪費，因此在第五迴圈之後都是最新的五筆資料做平均再將之回傳，如此的程式寫法效果達到前面方法所述。

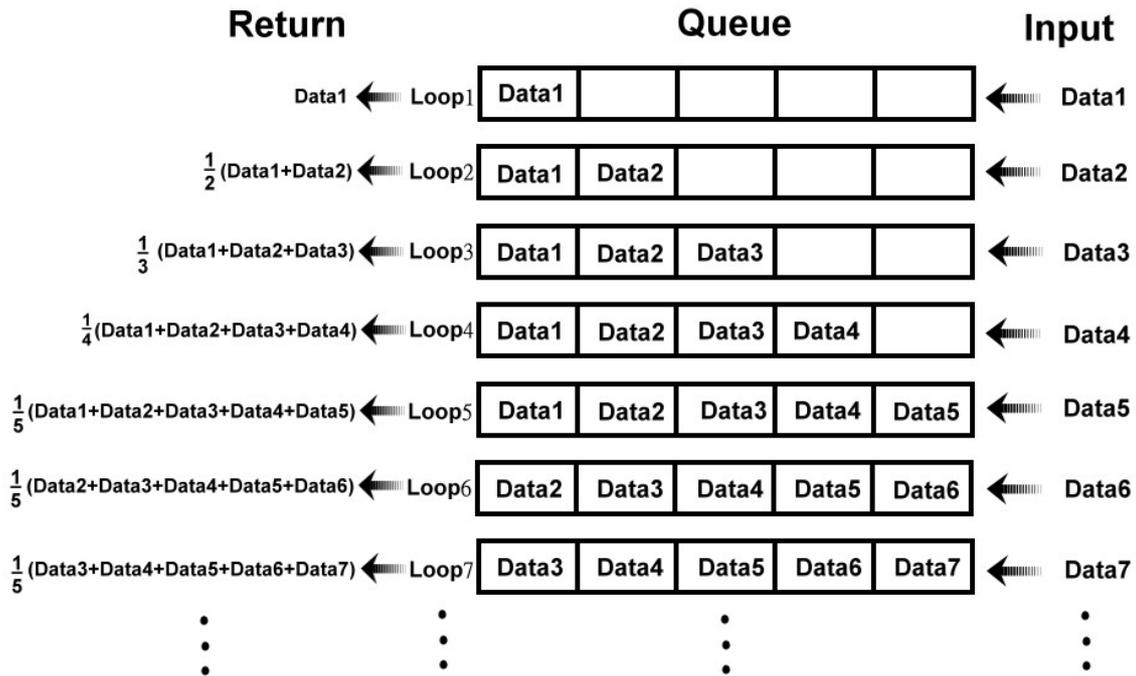
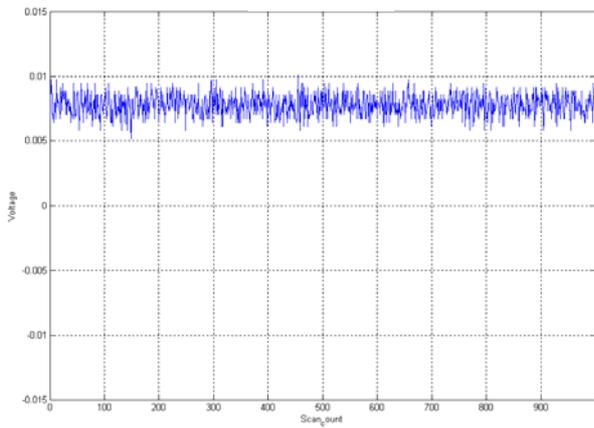
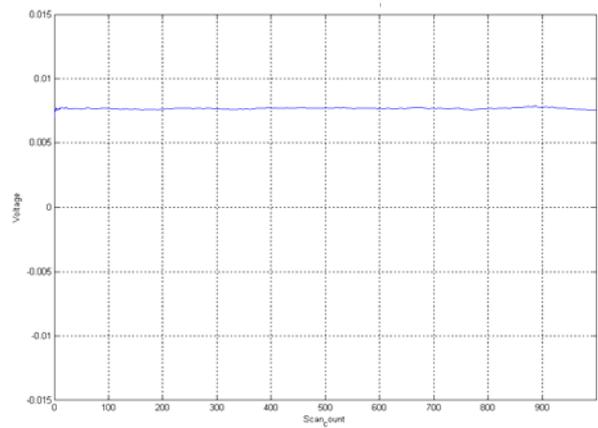


圖 3.12 on-line 資料傳輸模式

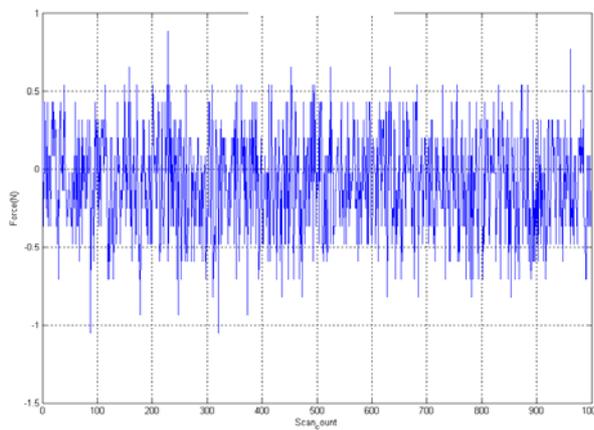
利用上述佇列方式撰寫程式做訊號處理，接下來我們直接以高階 c 語言進行 on-line 的擷取訊號實驗，以迴圈方式令感測器的訊號擷取卡每跑一迴圈即進行一次資料擷取動作，首先讓程式跑 1000 個迴圈，擷取 1000 筆感測器電壓訊號，每跑一次迴圈輸入的訊號均須做一次平均值運算，方法是建立一個運算函式，當迴圈執行到此運算函式時便呼叫該函式執行運算迴圈，函式內將佇列長度設為 100 並加入迴圈內，函式將佇列內的一 100 筆資料先做平均再輸出到原系統迴圈，圖 3.13 為即時擷取到的訊號波形，圖 3.13(a)為原始未經處理且帶有雜訊的電壓訊號，圖 3.13(b) 為經過平均值運算後的結果，電壓訊號呈現平穩的值，將電壓訊號換算成力量訊號後，圖 3.13(c)即為原始帶有雜訊的力量訊號，圖 3.13(d)為經過平均值運算後的訊號波形圖，因此從圖 3.13(c)及圖 3.13(d)均可看出經過處理後的訊號，能有效地去除雜訊並達到與 off-line 相同的效果。



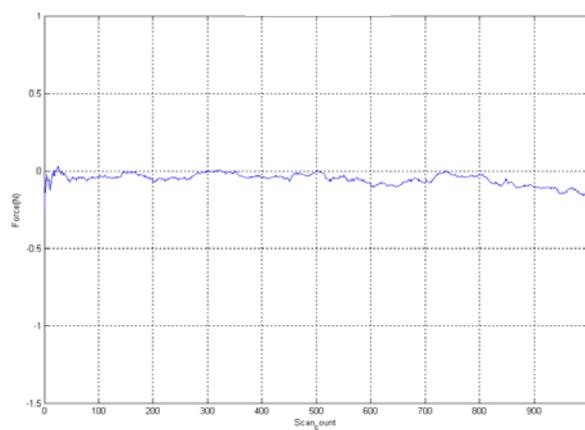
(a) 原始電壓訊號



(b) 處理後之電壓雜訊



(c) 原始力量訊號



(d) 處理後之力量雜訊

圖 3.13 訊號經過 on-line 處理後結果：(a)原始電壓訊號，(b)處理後之電壓雜訊，(c)原始力量訊號，和(d)處理後之力量雜訊