



手寫筆壓力曲線校正方法

林舜斌¹ 陳文輝²

1. 國立台北科技大學自動化研究所研究生
2. 國立台北科技大學自動化研究所教授

摘要

數位手寫筆會提供 X、Y 座標及壓力信號給電腦或平板，其中壓力信號因壓力感測器及工藝製程原因，壓力曲線通常會有很大的落差，本文針對這個問題，利用類神經網路學習加比例校正法，透由收集，分析、學習、校正，使每支筆的壓力曲線都可以落在較小的範圍，經實驗結果證實壓力曲線分佈可從原本 $\pm 20\%$ 限縮到 $\pm 5\%$ 大大提高了手寫筆壓力曲線的一致性。

關鍵詞：手寫筆、壓力曲線校正、神經網路

*通訊作者 E-Mail:t105618503@ntut.org.tw



The Pressure Curve Calibration Method of Stylus

Shun-Pin Lin¹ Wen-Hui Chen²

1. Graduate Student, National Taipei University of Technology, Graduate Institute of Automation Technology
2. Professor, National Taipei University of Technology, Graduate Institute of Automation Technology

ABSTRACT

The digital handwrite stylus provides X, Y coordinates and pressure signals to the computer or tablet. The pressure curve will have a large offset error due to the deviation of force sensor and process. This paper used “Neural network learn” and “Scale calibration” to close in on pressure curve. Do a set of methods for collecting, analyzing, learning and calibration. Therefore, the offset error of each pen’s pressure curve become small and focus. The experimental results show that the pressure curve distribution from the original $\pm 20\%$ shrink to $\pm 5\%$ greatly improves the consistency of the stylus pressure curve.

Keyword: Stylus, Pressure Curve Calibration, Neural network

*Corresponding author E-mail:t105618503@ntut.org.tw

一.前言

由於平板電腦的普及化，使用者對於平板電腦操作介面簡單的手指觸控已無法滿足使用者了，大家希望再回到在一頁頁筆記簿上塗塗寫寫的記錄方式，使手寫筆成為一項熱門產品，除了鍵盤、滑鼠、語音辨識與觸控板外，手寫筆是近來獲得整個產業界關注的電腦周邊裝置，學術界也有跨足投入研究(Changbyung Park, et al. “A Pen-Pressure-Sensitive Capacitive Touch System Using Electrically Coupled Resonance Pen,”)，其中業界以電腦硬體龍頭英特爾公司(Intel)主導成立通用手寫筆聯盟(Universal Stylus Initiative；USI) 及軟體龍頭微軟公司，主導微軟手寫筆規格最具代表性。回想人類早在學習使用電腦工作之前，就已經會用筆書寫好長一段時間，因此人類使用手寫筆不需要學習也最自然。手寫筆可用來素描作畫、文件書寫及分享評論、在筆記本中做筆記、在白板上素描等。微軟更在 Word、Excel、PowerPoint 當中內建 Ink 筆跡功能，使用者可自訂最愛各式鋼珠筆、鉛筆、螢光筆等等個人化設定，筆於生產每一支手寫筆的製程因素及壓力感測器的差異性，致使壓力曲線很難一致，即使已自訂個人最愛的手寫筆樣式，如果更換不同支的手寫筆使用，寫出來的筆跡粗細濃淡就會有很大的不同，尤其在手寫簽名及繪圖應用上更為明顯。本文透由手寫筆電路設計、壓力資料收集、類神經網路學習校正，使每支筆的壓力曲線可以落在較小的範圍內。整體內容包括: 1.前言 2.硬體設計 3.韌體設計 4.壓力曲線校正 5.設計結果驗證 6.未來展望。

1-1 介紹

本文所有手寫筆通訊協議及規範標準是根據微軟手寫筆 MPP V1.51 標準(2017 年 2 月發佈)，使用微晶片公司(Microchip) 8 位元的單晶片來控制;壓力曲線校正使用單軸伺服馬達配合具 RS232 通信界面的電子秤，使用 Python 發展一套程式來控制及讀取原始資料帶入單一神經網路學習得到校正參數，移植到單晶片韌體做為校正基礎;系統驗證系使用與壓力曲線校正相同設備加微軟平板電腦(SurfacePro4)及控制卡;由測試程式讀取平板電腦上收到的手寫筆壓力值與標準壓力曲線做比對，以判斷是否落在合格範圍。

圖 1 是微軟對手寫筆壓力曲線的規範，我們可以從圖 1 看出荷重 350 克時壓力範圍為 254 ± 50 ，整體壓力曲線分佈範圍從 $\pm 20\% \sim \pm 75\%$ ，圖 2 為 100 支符合微軟對手寫筆壓力曲線標準筆的測試結果，從圖中可看出雖然合格但其分佈範圍還是超過 $\pm 20\%$ 以上，透過本文論述方法可將壓力曲線分佈控制在 $\pm 5\%$ 以大幅改善壓力曲線的漂移範圍。微軟制定的手寫筆壓力標準曲線範圍計算公式如式(1)、(2)、(3)。

$$\text{手寫筆壓力曲線上限 } Y = P \times (0.2813 \times \ln(X) - 0.4527) \quad (1)$$

$$\text{手寫筆壓力曲線理想 } Y = P \times (0.2813 \times \ln(X) - 0.6476) \quad (2)$$

$$\text{手寫筆壓力曲線下限 } Y = P \times (0.2813 \times \ln(X) - 0.8424) \quad (3)$$

Y: 計算結果，如果為負，設為零

P: 定義的最大壓力階數

X: 施力，單位為公克

$\ln(\)$: 自然對數 (Natural logarithm) 以 e 為底數的對數函數

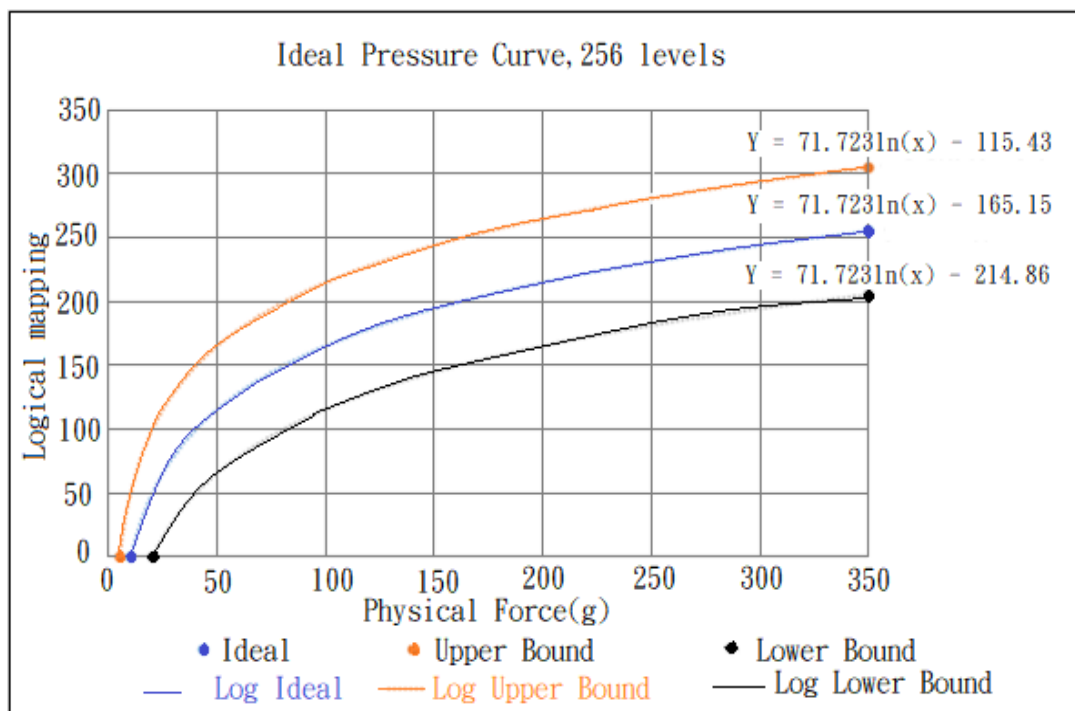


圖 1. 微軟手寫筆最大壓力 256 階的曲線範圍

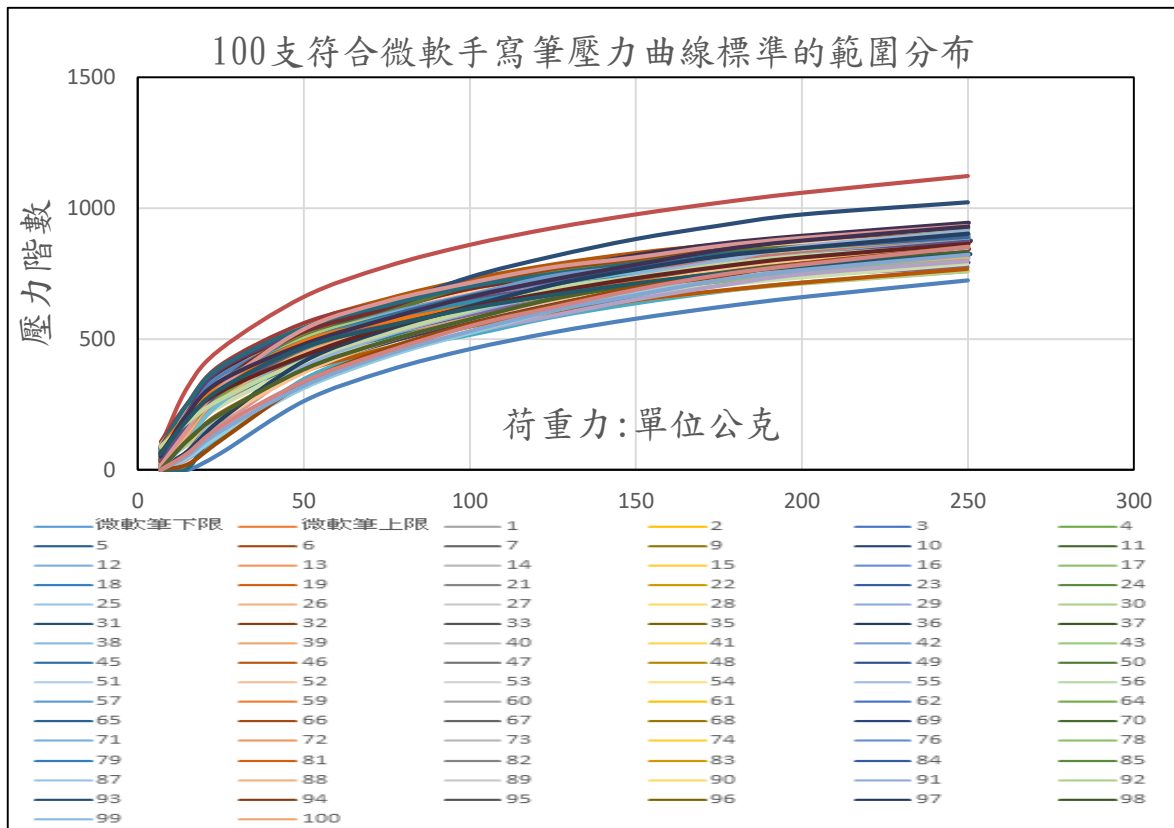


圖 2. 100 支筆測試結果

1-2 通訊協定及規範

微軟手寫筆協議(MPP V1.0)是微軟於 2015 年 2 月起草制訂，是手寫筆與觸控面板的通訊標準與規範(Microsoft, “Active Pen Device Validation Guide”)，其基礎原理是架構三個美國專利(US9690395B2, US9524045B2, US9323368B2)，本文採用 2017 年 2 月更新版本”微軟手寫筆 MPP V1.51”。主要關鍵標準有:時序允許 ± 500 ppm 的誤差、頻率允許 ± 100 ppm 的誤差、電壓大於等於 $16V_{p-p}$ ，時序如圖 3、規格如表 1。

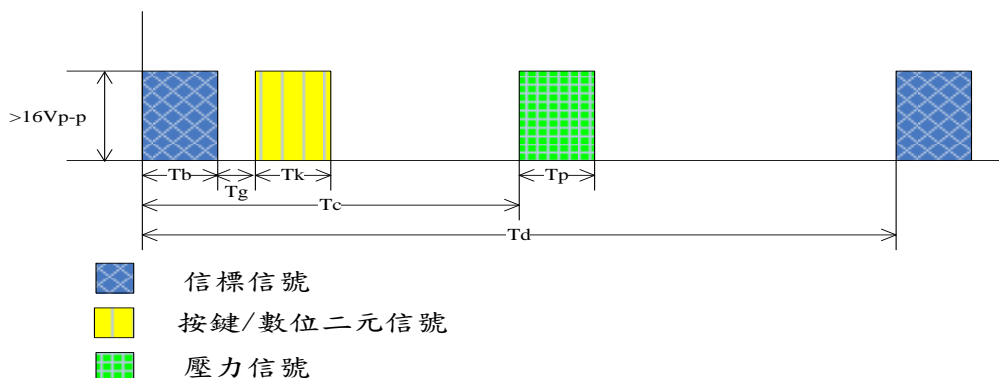


圖 3. MPP V1.5 時序圖

表 1. 微軟手寫筆 V1.51 規格

符號	內容	時間(us)	頻率(Hz)	說明
Tb	信標信號(Beacon)	1281.6	25007	±100 ppm
Tg	信號間隔	19.83	--	橡皮擦/壓力
		39.66	--	按鍵
Tk	按鍵/橡皮擦信號	1281.6	25007	± 100 ppm
	數位 0 信號	1281.6	40616	±100 ppm
	數位 1 信號	1281.6	43759	±100 ppm
Tp	壓力信號	1281.6	23338 ~ 18379	壓力小到大從 23338 ~ ~18379 Hz ± 100 ppm
	橡皮擦壓力信號	1281.6	20000	20000 Hz ± 100 ppm
Tc	壓力橡皮擦間隔	7506.7	--	± 500 ppm
Td	完整週期	15013.4	66.667	± 500 ppm

1-3 發射信號之組成

根據微軟手寫筆 MPP V1.51 協議規格，手寫筆必須能發射大於 $16V_{p-p}$ ，18379 ~ 43759 赫茲(Hz)方波，信標、數位 0、數位 1 跟壓力的每一階信號都有其規範的頻率，且誤差要小於 ±100 ppm，因此傳統的時鐘除法是無法產生符合規範的頻率，我們分別使用 5、20、50、100 百萬赫茲 (MHz)，用傳統的時鐘除法來驗證，結果如表 2，即便是用 100 MHz 還是無法產生合乎規範之頻率。因此本文採用單晶片內建的數位控制震盪模組 Numerically Controlled Oscillator Module(NCO)來達成頻率和成，其計算式如式(4)，只要給予很低的頻率便可產生誤差遠遠小於±100 ppm 的合成頻率，表 3 為使用單晶片內建振盪器的 2 MHz 頻率產生的結果，其最大的誤差結果為 10ppm 左右。

$$F_{out} = \frac{F_{osc} \times Mul}{2^{21}} \quad (4)$$

F_{out} : 合成頻率

F_{osc} : 工作頻率(2 MHz)

Mul : 頻率倍數

表 2. 使用 5 MHz ~ 100 MHz 時鐘除法的結果

壓力	頻率	5000000			20000000			50000000			100000000		
		除數	合成頻率	誤差(ppm)	除數	合成頻率	誤差(ppm)	除數	合成頻率	誤差(ppm)	除數	合成頻率	誤差(ppm)
第一階	23338	214	23364	1114.063	857	23337	-42.84857	2142	23342	171.3943	4285	23337	-42.8486
第二階	23314	214	23364	2144.634	858	23310	-171.5707	2145	23310	-171.5707	4289	23315	42.89268
次高階	18394	272	18382	-652.387	1087	18399	271.8278	2718	18395	54.36555	5437	18392	-108.731
最高階	18379	272	18382	163.2298	1088	18382	163.2298	2720	18382	163.2298	5441	18378	-54.4099

表 3. 使用 NCO 模組產生的結果 (2 MHz)

內容	單位	頻率	頻率倍數	合成頻率	誤差(ppm)
信標信號		25007	26222	25007.25	9.914216
數位 0 信號		40616	42589	40616.04	0.87309
數位 1 信號		43759	45885	43759.35	7.907135
第一階壓力		23364	24499	23364.07	2.870983
第二階壓力		23364	24499	23364.07	2.870983
次高階壓力		18382	19275	18382.07	3.941287
最高階壓力		18382	19275	18382.07	3.941287

1-4 時序之組成

為求時序準確及省電，單晶片採用雙震盪源做為時脈標準及工作時脈，其中低頻用外加的低耗電 32768 Hz 晶體振盪器做為時脈來源，於同步期間不停止振盪且每隔 7506.7us 喚醒單晶片一次，高頻使用內部震盪 2 MHz 做為頻率產生及單晶片的工作頻率，每次單晶片被喚醒完成工作不需要高頻時便進入睡眠模式並停止振盪以節省耗電，這樣搭配可大幅節省約 70% 的電力消耗如圖 4，計算方法如式(5)，為求內部震盪 2 MHz 可以符合規範要求，我們在韌體設計每次重新送電時，使用 32768 Hz 晶體振盪器來校正內部震盪器，方法如微晶片公司設計參考文件(Microchip Application Note; AN244 Internal RC Oscillator Calibration)。

整體週期 15013.4us, 發射信號工作時間 $1281.6 \times 3 + 60us + 500us$ (其他雜項) = 4404.8us

$$1 - \frac{4404.8}{15013.4} = 70.67\% \quad (5)$$

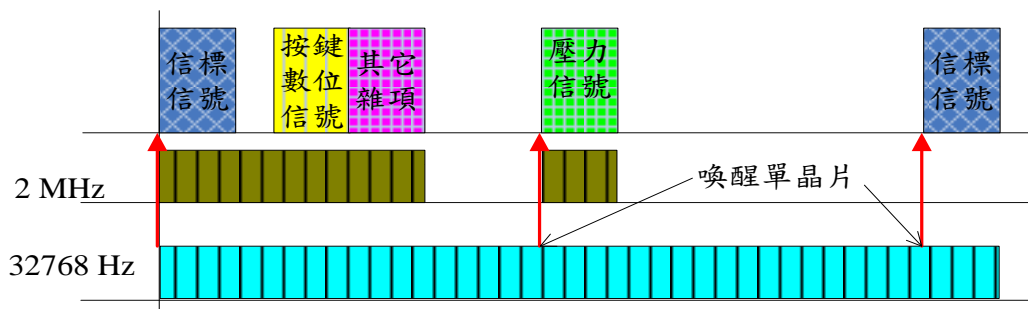


圖 4.省電方式架構圖

二.硬體設計

2-1 方塊圖

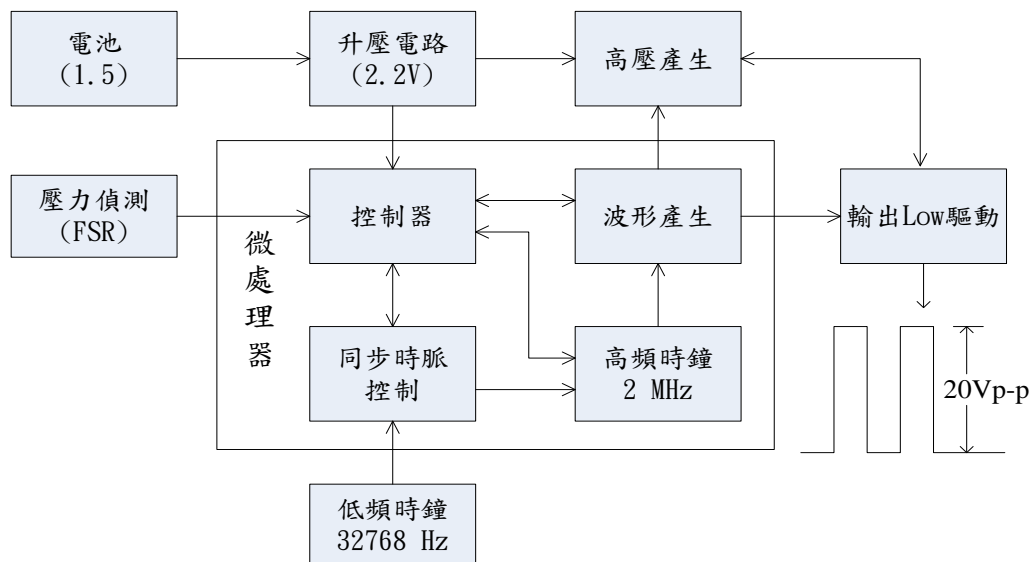


圖 5.電路方塊圖

2-2 電路說明

如圖 5 方塊所示本設計使用 1.5V 電池升壓到 2.2V 後給單晶片及系統使用，其中 2.2V 升到 20V 是採用圖 6 電路配合韌體來產生，其電壓震幅高低正比於輸入的脈波寬度，理想的轉換公式如式(6)，(周以軒“低功率儲能系統之回授式升壓型轉換器設計與實現”) 實際量測結果如表 4，由於理論值與實際值差距甚大，因此假設計算模式應屬於升壓的非連續式模式(Wikipedia; “Boost converter, Discontinuous mode”)，轉換公式如式(7)，我們利用第一個量測值，用式(7)反向求出負載電阻約 387 千歐姆，負載電流約 27 uA，代入式(7)經簡化後如式(8)，考慮產生電壓小於 MOSFET 的 V_{DS} 時，輸出電壓與公

式會接近，但如果超過 MOSFET 的 V_{DS} 時，就會被箝住在 V_{DS} 。實驗採用的 MOSFET 為日本 ROHM 編號 2SK3018，規格表上 V_{DS} 為 30V，與表 4 結果吻合。我們搭配高壓脈波之後給予另一脈波，將該高電壓拉到低電位，控制脈波與脈波的時間差，產生高壓波形如圖 6 所示。外掛的低頻時鐘 32768 Hz 屬於低功耗型，配合單晶片內建第二震盪電路於工作時只消耗約 300nA，因此可達到省電之目的。

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{T_s}{T_s - T_{on}} = \frac{1}{(1-D)} \quad (6)$$

$$V_{out} = V_{in} + \frac{V_{in}^2 * D^2 * T_s}{2 * L * I} \quad (7)$$

$$V_{out} = \frac{-1 + \sqrt{-1 + \frac{4 * V_{in}^2 * D^2 * T_s * R_L}{2 * L}}}{2} \quad (8)$$

V_{out} : 升壓輸出

V_{in} : 輸入電壓

T_s : 週期時間

T_{on} : Q1 導通時間

D : $\frac{T_{on}}{T_s}$

L : 電感

I : $\frac{V_{out}}{R_L}$ 負載電流

R_L : 負載電阻

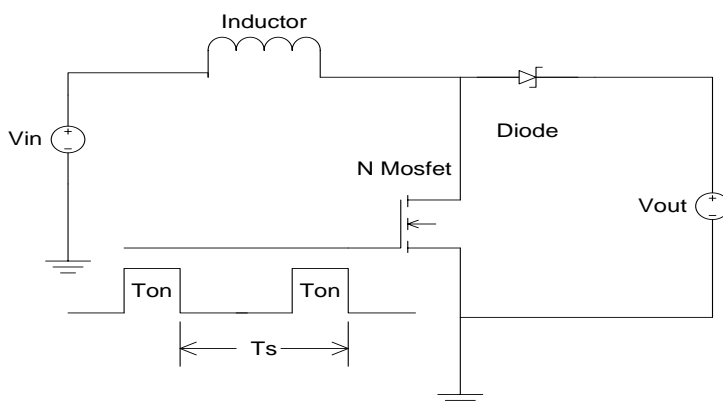


圖 6. 升壓電路

表 4. 升壓電路脈波寬度與電壓對照表

脈波寬度	理論值電壓	實際量測值	脈波寬度	理論值電壓	實際量測值
20 us	4.4V	31.5V	4 us	2.444V	29.5V
16 us	3.666V	31.5V	3 us	2.378V	24.4V
12 us	3.142V	31.5V	2us	2.315V	18.5V
8 us	2.75V	31.5V	1us	2.256V	10V

表 4 的測試條件: Inductor = 330 uH; Frequency = 25000 Hz; $T_s = 40$ us

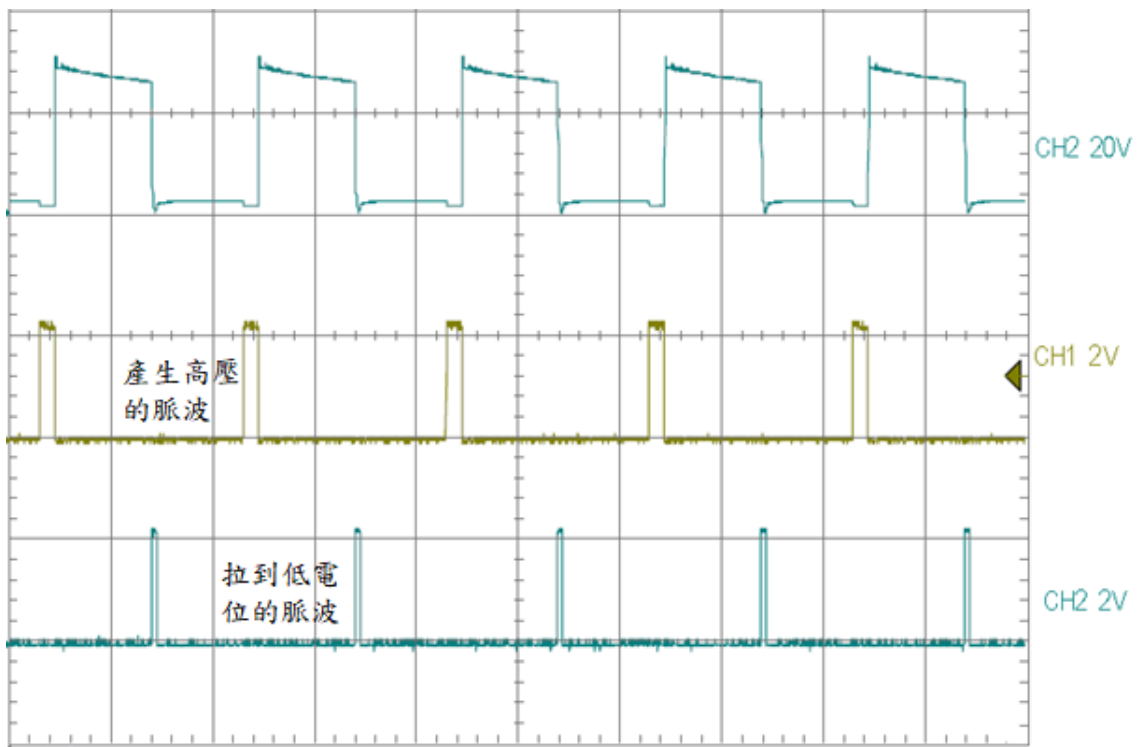


圖 6. 輸入與輸出高壓對應圖

三. 韌體開發設計

3-1 開發環境及工具說明

開發環境用 Microchip 公司的 MPLAB X IDE v4.05，組譯程式使用 Mpsasmv5.76，燒入及除錯工具使用 PICKIT 3。MPLAB X IDE 為一整合開發環境支援高階的 C 語言及低階的組合語言組譯程式，開發者可以選擇適合自己的語言來進行開發同時可外掛支援工具如程式規劃(Code Configurator)來簡化程式設計，使用者可以使用圖形化介面將想要

的功能定義好再轉成 C 程式碼(Code)讓程式設計人員不需要了解太多硬體就能完成硬體規劃，節省寫程式碼時間。

3-2 韌體架構說明

主程式主要負責讀取按鍵值及壓力感測器的壓力值轉換成它們對應的頻率值，並暫存在對應的記憶體中，其它時間則處於睡眠或閒置狀態，一旦中斷產生時將記憶體中的資料填入暫存器內以產生對應的發射信號做發射，狀態圖如圖 7 所示。總體而言韌體可簡單分為四個模式 1).全速執行模式:包括讀取按鍵、壓力、運算轉換及中斷服務期間；2).閒置模式: 在這個模式下 CPU 停止運行、周邊則持續運行，任何中斷便可恢復到全速執行模式，通常發生於發射信號期間；3).維持同步的睡眠模式:只剩 Timer1 維持運行，其它全部進入睡眠狀態，此狀態下只能由 Timer1 喚醒；4).深度睡眠模式:在這個模式下全部被功能禁能，只有 I/O 變化喚醒被致能用以喚醒回到全速執行模式。

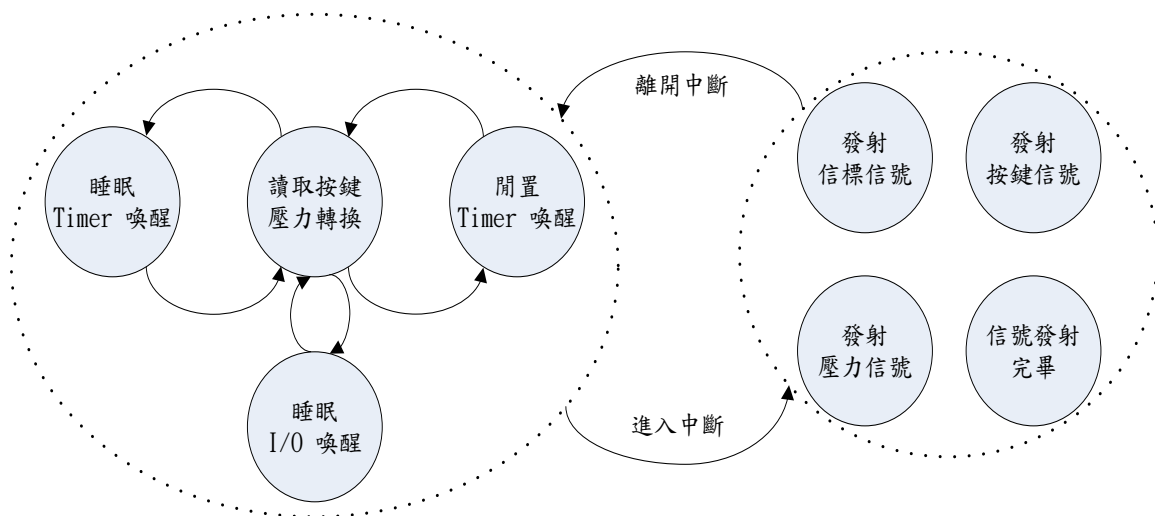


圖 7. 程式狀態圖

3-3 流程圖

中斷副程式獨立於主程式之外主要負責與主機維持同步及開始/停止發射信號如圖 8，主程式則處於閒置與睡眠狀態，被動的被喚醒通知是否要讀取按鍵、壓力做轉換，直到一段時間按鍵、壓力沒有任何改變，便轉為主動模式並禁能所有中斷及致能 I/O 變換喚醒，進入深層睡眠模式，如圖 9。

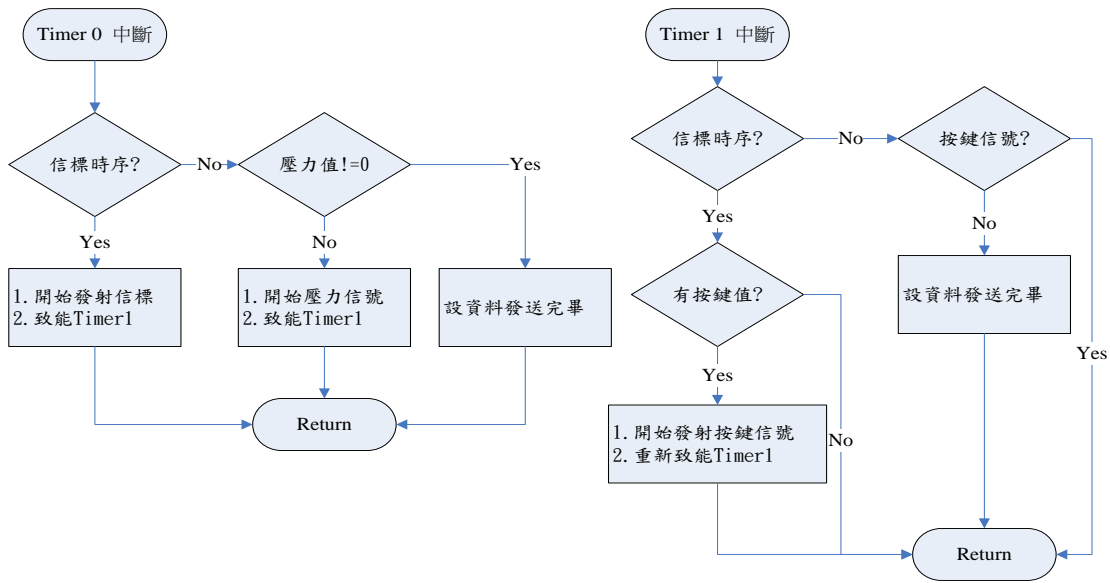


圖 8. 中斷副程式流程圖

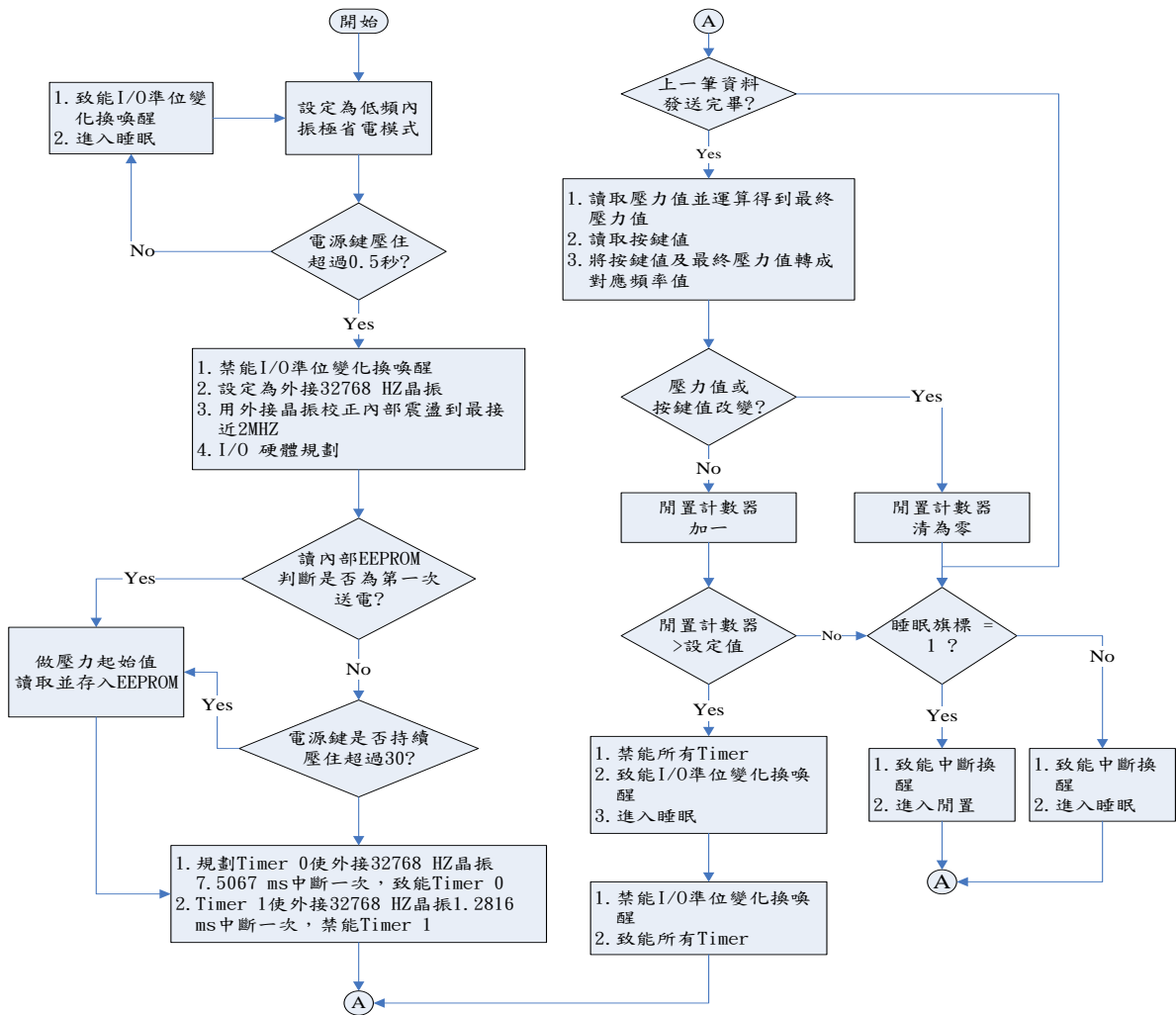


圖 9. 主程式流程圖

四.壓力曲線調校

4-1 原始資料收集工具及設備

我們使用帶有 12 bits ADC USB MCU 來讀取壓力感測器的變化資料，力量資訊是由精度 $\pm 0.1\text{g}$ 電子秤的 RS232 界面接收，力的驅動則是由 RS232 下命令去控制精度萬分之一毫釐的伺服馬達，資料每間隔 $5\pm 0.3\text{g}$ 收集一筆資料存成 txt 檔案格式，系統組成如圖 10 具體步驟如下：

- 歸零：先將電子秤扣重歸零；驅動伺服馬達逐步下降讀取電子秤數值確認已壓到感測器；逐步上升伺服馬達確認電子秤數值等於零。
- 資料收集：驅動伺服馬達；讀電子秤回報數值直到目標克重(5,10,15....g); 讀取 USB 的 ADC 值並存到檔案內。
- 繪圖：資料收集完畢將 ADC 值及克重曲線圖繪出如圖 11 左。

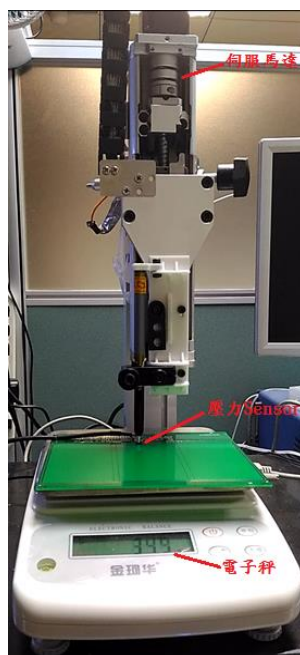


圖 10. 原始資料收集設備組成圖

4-2 壓力曲線校正

我們將收集到的資料當成輸入資料，理想壓力曲線為輸出，兩者以力量的大小為對準線，帶入單一類神經網路來自動學習得到結果，如圖 11 所示，其中乘數 $a=0.3318442$

截距 $b=0.00011049$, 使用的 Cost Function 如式(9)、式(10), 由於 b 相當小所以我們將它忽略不計並大膽假設輸入與輸出間存在線性關係即 $y = ax$ 。

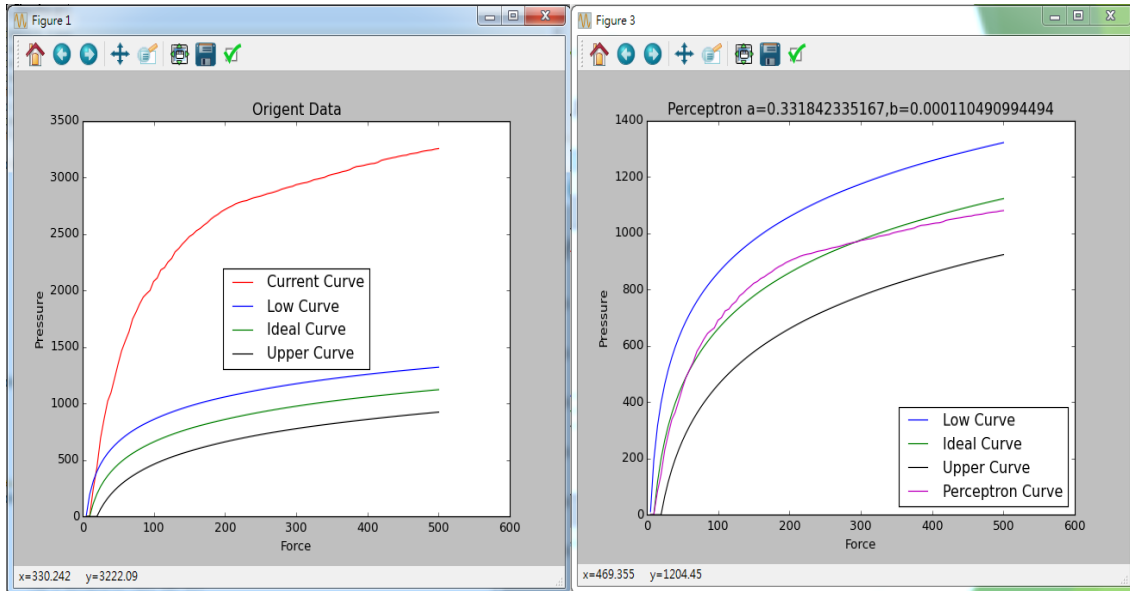


圖 11. 曲線圖(左原始資料, 右校正後)

$$m = m - \alpha \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (f(x^i) - y^i) \quad (9)$$

$$b = b - \alpha \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k ((f(x^i) - y^i) * x^i) \quad (10)$$

4-3 驗證修正

在前面實驗中雖可得到輸入與輸出關係式為 $y = ax$ 但在實際生產組裝中因存在組裝公差無法使用單一係數涵蓋全部因此我們加入了額外修正係數如式(11), 其中 B 是由機構設計所決定, 必需是介於 $1 \sim 60$, 小於 1 代表壓力感測器未受力; 大於 60 代表壓力感測器受力太大, 用來決定曲線的開始, S 參數是最大的理想值與直接在筆上施予最大理想值的力時, 獲得的壓力值比值, S 決定每支筆曲線的結束, 讓最大壓力階數時的力是一致的。

$$y = S \times (ax - B) \quad (11)$$

y : 最後修正的結果

a : 類神經網路自動學習得到乘數

x : 壓力感測器的讀值

B: 開始的受力大小，由機構設計出來的，此值必須大於零代表感測器有受力

$$S: \text{修正的比例值} = \frac{\text{最大理想值}}{\text{施予最大理想值的力時測得的壓值}}$$

五.設計結果驗證

5-1 成品

成品組成如圖 12，由 4A 電池供電可連續使用 600 小時筆尖負責發射高壓，同時連動推擠壓力感測器讓單晶片偵測。

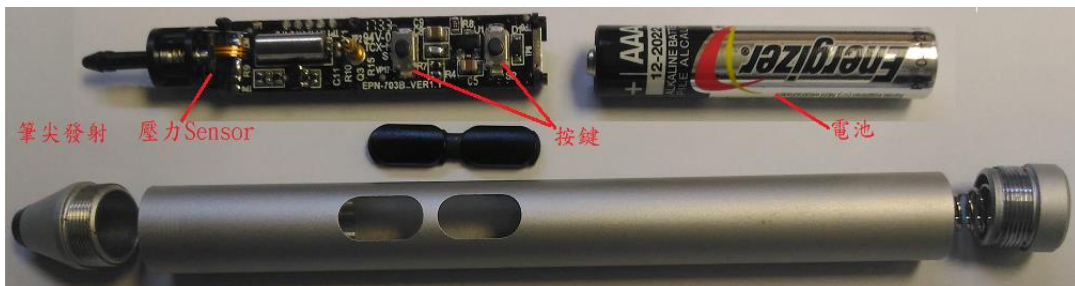


圖 12. 成品圖

5-2 驗證工具設備

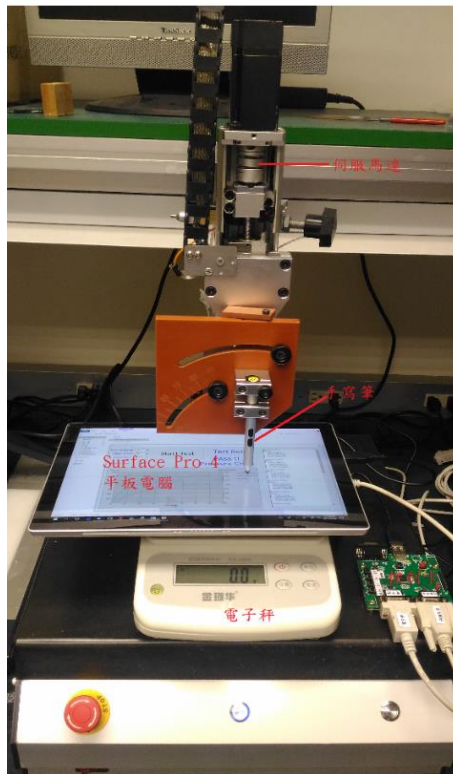


圖 13. 驗證工具設備組成圖

成品測試架構如圖 13，控制卡用台灣廠商笙泉出產的 MG84FG516 8051 1T 單晶片具有一個 Full Speed USB 及兩個 RS232 介面，其中一個 RS232 規劃成鮑率 9600 8.N.1 負責接收電子秤主動回報的克重資料，另一個則規劃成鮑率 115200 8.N.1 負責與伺服馬達介面進行雙向溝通。主程式執行在 Surface Pro4 平板電腦上，透過 USB 與控制卡溝通，主要是負責下達命令給控制卡，並同時讀取 Surface Pro4 上接收到的筆壓力資料。控制卡接收到平板電腦下達的命令後，負責控制伺服馬達前進/後退，並讀取電子秤資料，直到完成命令要求，將狀態、克重與計算出的行程資料回報給平板電腦，平板電腦收集到完整的資料後將曲線繪出，判斷是否在合格範圍後顯示 PASS 或 FAIL 如圖 14 所示。

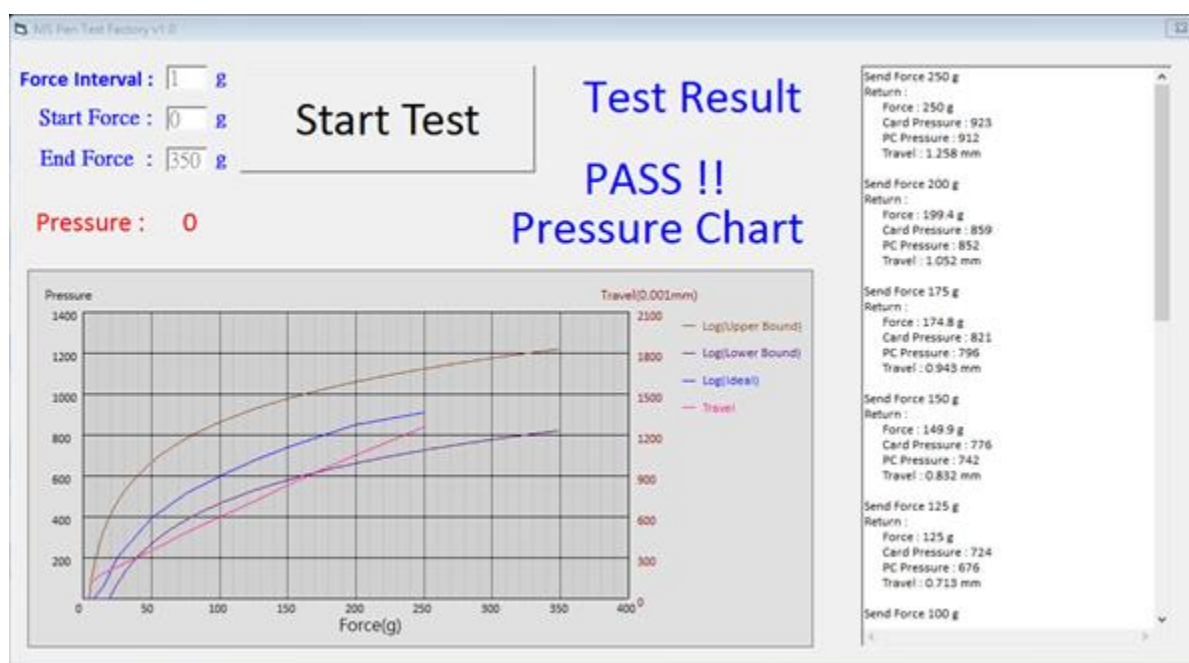


圖 14. 成品曲線圖

5-3 控制卡控制流程及智慧修正控制

由於 PC 端只負責下達命令跟讀取資料，因此整體控制完全倚賴控制卡控制，其流程如圖 15。為求能快速完成 PC 端下達命令之標的，我們採用動態修正目標行程方式。首先根據測試資料建立克重/行程的標準表，並在每次歸零時將絕對行程歸零，接收到命令為目標克重時，根據給克重查表得到 AN_{T1} 及目前的克重查表得到 AN_{T2} ，根據式(12) 運算得到控制行程 R_T ，控制卡會對伺服馬達下達前進或後退 R_T 的命令，再根據電子秤回報之克重做微修正，到達標的時再進行修正該表，行程修正式子如式(13)。

$$R_T = (AN_{T1} - AN_{T2}) * FA \quad (12)$$

$$AN_T = (AC_T + AL_T)/2 \quad (13)$$

AN_{T1} : 目標克重查表得到的行程

AN_{T2} : 目前克重查表得到的行程

R_T : 控制的行程

FA : 修正參數經驗值 0.95

AN_T : 運算後的更新值

AC_T : 這一次的行程值

AL_T : 上一次的紀錄值

$FA = 0.95$ 是由實測得來，觀察解釋為“彈跳效應”當 $FA=1$ 時控制行程 R_T 有時會過頭，必須反方向修正，因此非常容易產生反方向、反覆修正的狀況，所以我們讓 FA 略小於 1 以確保行程修正處於同一方向進行，避免上下反覆修正的狀況，提升測試速度。

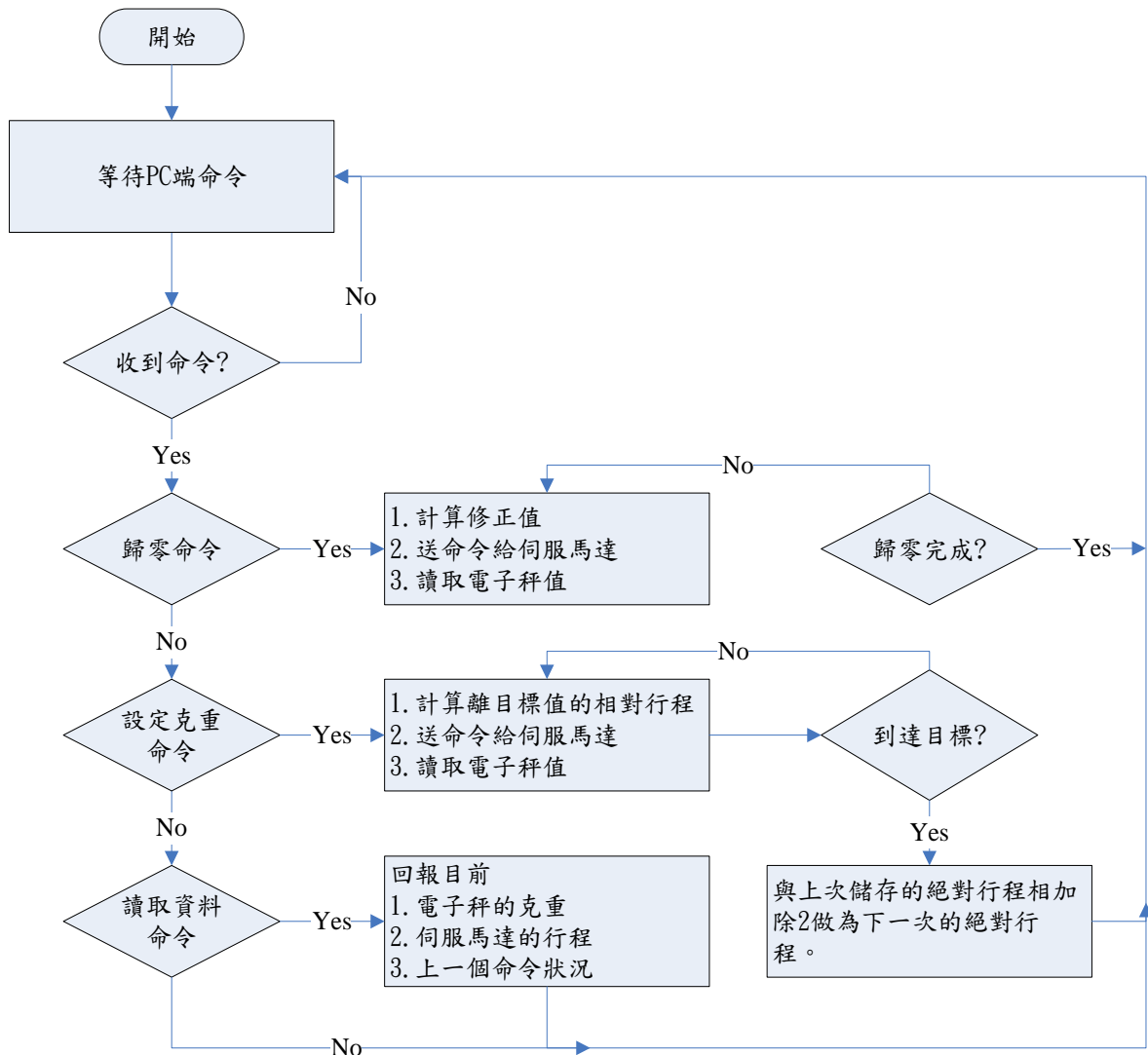


圖 15. 控制卡控制流程圖

5-4 測試結果

表 5 中左側為第一次運算出的結果(基本)，右側為二次校正後的結果(進階)，表 6 左側為基本校正的百分比誤差，右側為進階校正後的百分比誤差，結果顯示透過本文的校正方法確實可以達到降低手寫筆壓力曲線誤差範圍之目的,透過實做驗證可將原本的 $\pm 20\%$ 降到 $\pm 5\%$ 以下。

表 5. 壓力階數基本/進階量測結果

克重	25		50		100		150		200		250	
標準	264		464		663		780		863		927	
	基本	進階	基本	進階	基本	進階	基本	進階	基本	進階	基本	進階
1	260	268	460	474	644	663	745	767	824	849	900	927
2	288	272	504	477	700	662	804	761	881	833	980	927
3	253	262	428	443	660	684	776	804	868	899	895	927
4	264	263	474	471	680	676	811	807	886	881	932	927
5	252	273	437	473	616	667	736	797	804	871	856	927
6	255	276	442	478	624	675	730	790	796	861	857	927
7	280	254	492	446	736	667	882	799	976	884	1023	927
8	216	261	376	454	548	661	648	782	715	863	768	927
9	262	275	452	474	634	665	756	793	832	872	884	927
10	256	271	452	479	640	678	752	797	820	869	875	927

表 6. 壓力階數基本/進階量測結果範圍分佈百分比

克重	25		50		100		150		200		250	
標準	$\pm 75\%$		$\pm 42\%$		$\pm 30\%$		$\pm 25\%$		$\pm 23\%$		$\pm 21\%$	
	基本	進階	基本	進階	基本	進階	基本	進階	基本	進階	基本	進階
1	-2	1	-1	2	-3	0	-4	-2	-5	-2	-3	0
2	9	3	9	3	6	0	3	-2	2	-3	6	0
3	-4	-1	-8	-4	0	3	-1	3	1	4	-3	0
4	0	-1	2	2	3	2	4	3	3	2	1	0
5	-5	3	-6	2	-7	1	-6	2	-7	1	-8	0
6	-3	4	-5	3	-6	2	-6	1	-8	0	-8	0
7	6	-4	6	-4	11	1	13	2	13	2	10	0
8	-18	-1	-19	-2	-17	0	-17	0	-17	0	-17	0
9	-1	4	-3	2	-4	0	-3	2	-4	1	-5	0
10	-3	3	-3	3	-3	2	-4	2	-5	1	-6	0

六.未來展望

透由此實驗結果已驗證可行，本文實驗過程中使用電腦來做資料收集分析再帶入單晶片內來應用，如果可以將類神經網路建在單晶片內，直接做自動學習一旦測試完成也就完成校正，這樣不但可以不用做二次校正同時可以得到更完美的理想曲線，但局限於單晶片的計算能力、程式空間及記憶體空間較難以實現，因此如何減化計算、精簡電路、整合成單一 ASIC 達到電路更精省、更省電等目的都是後續要努力研究的方向。

參考文獻

周以軒, “低功率儲能系統之回授式升壓型轉換器設計與實現”, 國立交通大學電機與控制工程學系碩士論文, 2009/06.

Changbyung Park, Sungsoo Park, Ki-Duk Kim, et al. “A Pen-Pressure-Sensitive Capacitive Touch System Using Electrically Coupled Resonance Pen,” IEEE JOURNAL OF SOLID-STATE CIRCUITS, VOL. 51, NO. 1, JANUARY 2016.

Gadi Garfinkel Yahud, Eytan Mann Modiln, Arthur Gershfeld Akko, Shimon Nahear, Jerusalem, “Digitizer stylus and method of synchronization therewith,” United States Patent US9690395B2, Jun. 27, 2017.

Rafi Zachut, Rishon-LeZion, “Digitizer, Stylus and Method of Synchronization Therewith,” United States Patent US9524045B2, Dec. 20, 2016.

Rafi Zachut, Rishon-LeZion, “Digitizer, stylus and method of synchronization therewith,” United States Patent US 9323368 B2, Apr. 26, 2016.

Microsoft, “Active Pen Device Validation Guide,” <https://docs.microsoft.com/en-us/windows-hardware/design/component-guidelines/pen-validation-guide>, 2018/03/07.

Microchip Application Note AN244, “Internal RC Oscillator Calibration,” <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00244a.pdf>; 2018/03/07.

Wikipedia, “Boost converter , Discontinuous mode” https://en.wikipedia.org/wiki/Boost_converter, 2018/04/10.