

應用嵌入式 DSP 於觸控面板人機介面之研製

陳昭雄* 李昱輝 陳建中 梁世承

大葉大學機械與自動化工程學系

515006 彰化縣大村鄉學府路 168 號

*chao@mail.dyu.edu.tw

摘 要

本文發展以 DSP 微控制器為基礎的嵌入式系統應用於球拍穿線機的觸控式面板人機介面，DSP 為 Microchip 公司型號 dsPIC33EP512MU814 的微控制器，設計全數位化的軟、硬體架構，整合 TFTLCD 觸控式面板、拉線驅動馬達、拉力感測器、EEPROM 外部記憶體等裝置，達到球拍穿線機友善的人機穿線介面和拉力精密控制的目的。首先，根據球拍穿線機的功能需求設計 TFTLCD 面板所需的人機畫面，每個畫面包括背景（Background）、圖標（Icon）和按鍵位置，再以 Adobe Illustrator 繪圖軟體裁剪圖片，經由轉圖軟體轉成 BIN 檔後燒入觸控面板的記憶體。以 MPLAB IDE 開發平台和 C30 編譯器撰寫 DSP 的嵌入式程式，設計各種運算碼（Operation code, OP-code）利用 UART 通訊與 TFTLCD 觸控面板溝通。以 I²C 通訊讀取/儲存系統參數於 EEPROM 記憶體。並且透過軟體開通 DSP 內建的 A/D 和 PWM 功能模組，以擷取拉力感測器的類比訊號，發展拉力控制法則據以控制拉線馬達得到所要的拉線磅數。本文所發展的 DSP 嵌入式系統，不但在觸控式人機介面的操作能更加直覺友善，並且以 DSP 的內建功能模組取代周邊的硬體電路，簡化電子元件的數目，達到全數位化目的。最後，以所發展的觸控面板嵌入式人機介面應用於實際的穿線機，透過各種實驗驗證本文所提方法的優越性。

關鍵詞：DSP 微控制器，嵌入式系統，TFTLCD 觸控面板，人機介面

Human-Machine Interface via Touch Panel Based on DSP Microcontroller

CHAO-SHIUNG CHEN*, YU-HUEI LI, JIAN-JHONG CHEN and SHI-CHENG LIANG

Department of Mechanical and Automation Engineering, Da-Yeh University

No. 168 University Rd., Dacun, Changhua, 515006, Taiwan, R. O. C.

*chao@mail.dyu.edu.tw

ABSTRACT

An embedded system based on a digital signal processor (DSP) microcontroller was developed for the touch-panel-based human-machine interface of a racket stringing machine. The DSP microcontroller was the dsPIC33EP512MU814 from Microchip. This system has a fully digital software and hardware architecture and comprises a thin-film transistor (TFT) liquid crystal display



(LCD) touch panel, a string-pulling motor, a tension sensor, and EEPROM external memory. The goal was to provide precise tension control for the racket stringing machine in a user-friendly manner. The human-machine interface screens for the TFT LCD panel were first designed considering the functional requirements of the racket stringing machine. Each screen includes a background, icons, and buttons. Images were cropped using Adobe Illustrator and converted into binary files that were subsequently burned into the touch panel's memory. Embedded programs for the DSP are written using the MPLAB development environment with the C30 compiler. Various operation codes were designed to communicate with the TFT LCD touch panel over the universal asynchronous receiver-transmitter protocol. The system parameters were read from and stored in EEPROM memory over the I2C protocol. To capture analog signals from the tension sensor, the built-in analog-to-digital and pulse-width modulation functional modules of the DSP were enabled through software. A tension control algorithm was developed to control the string-pulling motor to achieve the desired string tension. The touch-based human-machine interface of the DSP embedded system is not only intuitive and user-friendly but also simpler than other systems due to the use of the DSP's built-in functional modules. These modules replace peripheral hardware circuits, thus reducing the required number of electronic components and allowing for a fully digital design. The developed system was applied to an actual stringing machine and its effectiveness was experimentally validated.

Key Words: DSP microcontroller, embedded system, TFT LCD touch panel, human-machine interface

一、前言

網球拍或羽球拍之拍線張力為決定球拍性能的重要因素，如反彈力、耐用度、控球性、避震性和手感。電子式球拍拉線機透過微控制器和伺服驅動系統，可以自動偵測和控制穿線拉力，消費者操作較容易，慢慢成為市場發展主流。但是，現有電子球拍拉線機的人機介面大都是以七段顯示器、LED 和實體按鍵所組成，畫面所能顯示的穿線資訊較少，操作程序繁雜，且實體按鍵容易故障，維修困難。TFT-LCD 觸控式面板顯示技術不斷提升，具備高解析度、多顏色和對比度，螢幕的顯示清晰和生動。觸控技術也不斷發展，包括電容式觸控和電阻式觸控，具備高的靈敏度和流暢的操作性能，廣泛應用於智能手機、平板電腦、筆記本電腦和各種家用電子產品。DSP 嵌入式系統具備有快速運算、實時處理、可編程性、成本低多種優點，使其在工業控制、家電產品、汽車電子、物聯網等各種應用領域廣受歡迎。DSP 嵌入式系統能夠在極短時間內完成複雜的信號處理，可以透過軟體編程實現不同的功能要求，且內建多種周邊功能模塊，如 ADC、PWM、UART、Encoder、FlashROM 等，可以簡化系統的複雜性。透過高集成度的設計減少了硬件成本和製造難度，使得開發系統更加經濟實惠。近年來，DSP 嵌入式系統更融入 AI 和機器學習技術，提升其在智能應用中的處理能力。

在 DSP 的應用方面，Wang 和 Zhao [16] 應用 DSP 控制

器和乙太網接口的 TCP/IP 設計了網絡接口控制器，以簡化 TCP/IP，並在 DSP 中實現了簡單的協議連接，通過軟件程序實現數據傳輸。Omar 等人 [14] 比較 DSP 和 FPGA 的硬體架構，以 Matlab 的 FDATOOL 設計 FIR 濾波器，轉成 C 語言程式載入 DSP 控制器，進行 DSP 和 FPGA 執行速度和耗能的比較。Chi 等人 [11] 提出基於 DSP 和 FPGA 的智能人機介面的設計方法，並以非同步串行 UART 和類比訊號界面為例，列出各種界面的智能設計方法。該方法在嵌入式系統設計領域具有高度集成性、可配置性和可擴展性。Subhankar 等人 [15] 提出 DSP 應用中，使用 Virtex-6 低功耗，現場可程式化邏輯閘陣列（FPGA）設備設計和實現低功耗濾波器。Li 等人 [13] 以 DSP 為核心，設計使用 ADI 晶片的雷達目標參數處理系統，實驗證明該系統具有高運算速度、實時性和多參數處理能力。Huang [12] 為了解決危險品運輸設備狀態的實時監控問題，提出以 TMS320F2812 DSP 為核心，通過感測器偵測酒精氣體信號，進行濾波、放大、A/D 轉換，並通過採集溫度和濕度信號對氣體濃度數據進行溫度和濕度補償，實現準確測量和校準氣體數據。

在嵌入式系統控制方面，樂曜先 [10] 是以 Cortex-M4 微處理器做為系統核心，以 EtherCAT 通訊的伺服馬達驅動器整合，來達成即時控制目的。顏瑋義 [8] 以 Microchip 公司 dsPIC33 微處理器為核心，運用 CAN 傳輸協議來建立通訊介



面，達成在機器人的機器手臂運動控制。葉正翔 [7] 設計 DSP 嵌入式的聽診器，並擴充至具有 LCD 顯示功能的 DSP 聽診器。廖崇宇 [9] 應用於監控攝影機，以 ARM 處理器建構出一個嵌入式無人即時移動檢測系統。李峰吉 [1] 開發嵌入式即時多工運動控制器，規劃系統運算與外部 I/O 介面，與即時多工作業系統，以達成工作內容模組化。吳坤德等人 [3] 以 ARM 的 DSP 嵌入式系統設計綠色電能監測系統，監測直流/交流功率、電壓、電流、頻率、總瓦特數等電力參數，並呈現在 LCD 畫面。林敬竣 [4] 以 ARM 和 DSP 雙核心之嵌入式平台，建立車道和車輛的偵測系統，整合成一套最佳化的嵌入式系統平台。

在 TFTLCD 觸控人機介面方面，李晉凱 [2] 以 C++ 語言撰寫液壓伺服控制的 TFTLCD 人機介面，針對運動控制介面卡透過 RS-232 通訊方式對液壓伺服機台加以監測，且可設定波形種類、波形振幅與波形頻率等。黃千芳 [5] 透過問卷調查以了解冰箱食材管理系統的動機，以及消費者需求，並設計出一個人性化、易操作且舒適的 TFTLCD 人機介面。黃郁雅 [6] 研究智慧型手機觸控介面操作的績效，以條列式和陣列式的操作介面比較操作的效率。

本文利用 DSP 嵌入式系統結合 TFTLCD 觸控式人機介面應用於電子式球拍穿線機，使得穿線機具備操控容易、維修簡單的友善人機介面。透過 DSP 內建之功能模組經由程式撰寫，以取代 A/D、PWM、編碼器解碼和雜訊濾波等外部電路，以減少控制系統電子元件個數，達到全數位化目的。DSP 為 Microchip 公司型號 dsPIC33EP512MU814 的 16-bit 微控制器，TFTLCD 觸控式面板為 5 吋 16 bit RGB 三色的彩色螢幕，解析度為長*寬：480*800。電子式穿線機以直流碳刷馬達（規格 60W/24V/3.2A）和蝸桿蝸輪減速機（齒輪比 1:64），配合鍊條帶動拉線頭的驅動架構。拉力感測器（Load Cell）為應變計（strain gauge）配合惠斯電橋（Wheatstone Bridge）的電路，輸出 0-3.2 DCV 相對應拉力為 0-40 kg。首先，根據球拍穿線機所要的功能需求設計 TFTLCD 面板所需的人機畫面，每個畫面包括背景、圖標和按鍵位置，再以 Adobe Illustrator 繪圖軟體裁剪圖片，經由轉圖軟體轉成 BIN 檔並儲存至 SD 卡，再把 SD 卡插入至 TFTLCD 背板卡槽，以進行燒入觸控面板的記憶體。然後使用電腦的 MPLAB IDE+C30 編譯軟體，以 C 語言編寫人機介面和穿線拉力控制的程式，開啟 DSP 內建的 A/D 轉換器、I²C、UART 和 PWM 等四種功能模組，分別應用於 Load

Cell 的 A/D 轉換、外部記憶體 EEPROM 通訊、TFTLCD 雙向通訊和碳刷馬達的驅動控制，而達成觸控式面板友善操作和簡化周邊硬體電路的全數位化目的。

二、嵌入式人機介面硬體系統架構

本文嵌入式人機介面硬體架構如圖 1 所示，電腦透過 ICD3 燒入器與 dsPIC33EP512MU814 微處理器連結，利用 MPLAB+C30 編譯軟體進行嵌入式系統程式編輯和除錯的工作，以 dsPIC33EP512MU814 微處理器為核心，控制周邊的 TFTLCD 觸控式面板、馬達驅動電路、拉力感測電路和 EEPROM 外部記憶體等裝置。以下詳細敘述各裝置的規格與功能：

1. 個人電腦：配備為 Intel (R) Core (TM) i5-10400 @ 2.90GHz 的 CPU，作業系統為 Microsoft Windows 10，安裝記憶體為 16.0GB，GPU 為 NVIDIA GeForce GTX1650，運用 Microchip 所開發的 MPLAB IDE+C30 編譯器來進行撰寫程式與偵錯的功能。
2. MPLAB ICD3 除錯器：如圖 2 所示，以 USB 2.0 連接電腦和 dsPIC33EP512MU814 微處理器，使用的軟體版本為 MPLAB X IDE V8.92，支援了全面的開發工具集，配置基本順序、開發環境、編譯、燒錄和偵錯功能，以這些功能進行 dspic 微處理器的偵錯與燒錄。
3. dsPIC33EP512MU814 微處理器：微處理器採用 Microchip 公司型號為 dsPIC33EP512MU814，該微處理器具有 144 個腳位，內建許多模組功能，包含了 2 組 I²C（SCL1, SDA1, SCL2, SDA2 等）、4 組 SPI（SCK1~SCK4, SDO1~SDO4 等）、4 組 UART（U1TX~U4TX,

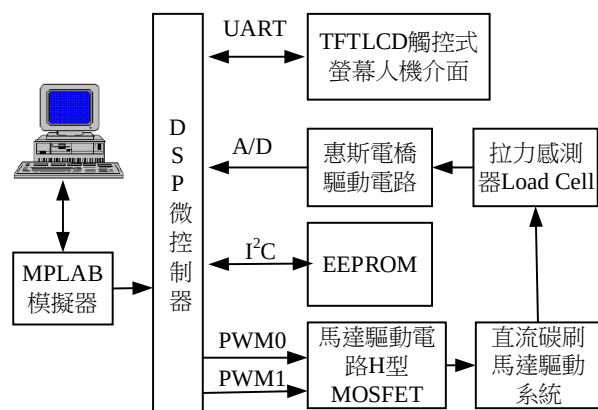


圖 1. 嵌入式人機介面硬體系統架構





圖 2. MPLAB ICD3 除錯器



圖 3. TFTLCD 觸控式面板

U1RX~U4RX 等)、14 組 PWM (PWM1H~PWM7H, PWM1L~PWM7L 等)、2 組 10/12bit 32 通道的 A/D 轉換器、5 組外部中斷器、9 組 16bit 計時/計數器等。能執行時脈管理、電源管理、先進 ADC 轉換、高速 PWM、計時器 (Timers) /輸出比較 (Output Compare) /輸入捕獲 (Input Capture)、各種通訊界面、直接記憶體存取 (Direct Memory Access, DMA) 等功能。

4. TFTLCD 觸控面板：如圖 3 所示，TFTLCD 觸控面板為 5 吋/16 bit RGB/解析度 800*480。觸控面板內建有 PIC32MX575F512L 微處理器，有 100 個針腳、512KB 程式記憶體和 64KB 資料記憶體，針腳中有 1 組 CAN、5 組計時器、6 組 UART、3 組 SPI、4 組 I²C、16 組 10bit A/D 轉換器。以 UART 通訊與 dsPIC33EP512MU814 微處理器溝通，進行 TFTLCD 面板貼圖與觸控座標傳輸。
5. 直流碳刷馬達驅動系統：圖 4 所示，以直流碳刷馬達搭配蝸桿蝸輪減速機，帶動鍊條而驅動拉線頭進行球拍線的拉力控制。DC 碳刷馬達規格為 60W/24V/3.2A，蝸桿蝸輪減速機的齒輪比為 1/64。驅動電路為 MOSFET 所組成的 H 型兩臂電路，透過 DSP 送出的 PWM0 和 PWM1 訊號控制 DC 馬達的正/反轉和拉力大小。蝸桿蝸輪減速機感測器 (Load Cell) 為應變計 (strain gauge) 配合惠斯電橋 (Wheatstone Bridge) 的電路，輸出 0-3.2 DCV 相對應拉力為 0-40 kg。
6. 拉力感測器：如圖 5 所示，拉力感測器 (Load Cell) 使

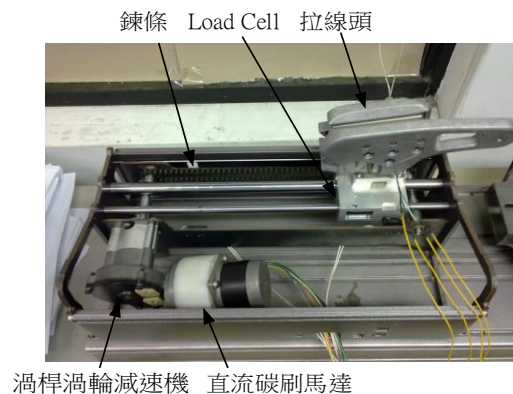


圖 4. 直流碳刷馬達驅動系統

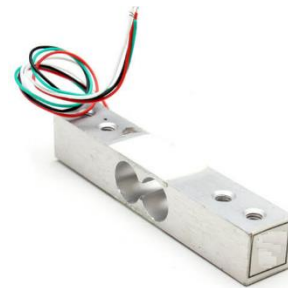


圖 5. Load Cell 拉力感測器

用應變片 (Strain Gauge) 做為感測元件。應變片的電阻銅箔黏貼在彈性體上，當彈性體受力變形時應變片也隨之變形，從而引起電阻值變化。透過惠斯登電橋 (Wheatstone Bridge) 將微小的電阻值變化轉變成電壓變化量的輸出，再透過由 OP 所組成的儀表放大器做濾除雜訊和放大訊號。該訊號隨後被 DSP 微處理器的 A/D 轉換器讀取和處理。拉力感測器輸出電壓為 0-3.2V 相對拉力磅數為 0-40kgw。

三、TFTLCD 觸控式人機介面

本章節介紹 TFTLCD 觸控式面板的構造、人機介面流程、圖形編輯和燒錄。

(一) TFTLCD 觸控式面板

本文使用 5 吋的 TFTLCD 觸控面板，解析度為長*寬：480*800，具有 16 bit 的 RGB 三色。圖 6 為 TFTLCD 觸控面板的驅動電路，包括 型號 PIC32MX575F512L 的 DSP 微控制器、型號 SSD1963QL9 的 TFTLCD 控制器和型號 W29N02GVS1AA 的 NAND Flash 記憶體。PIC32MX575F512L 微控制器負責 TFTLCD 面板與拉線機嵌入式微控制器 dsPIC33EP512MU814 間的 UART 通訊界面的



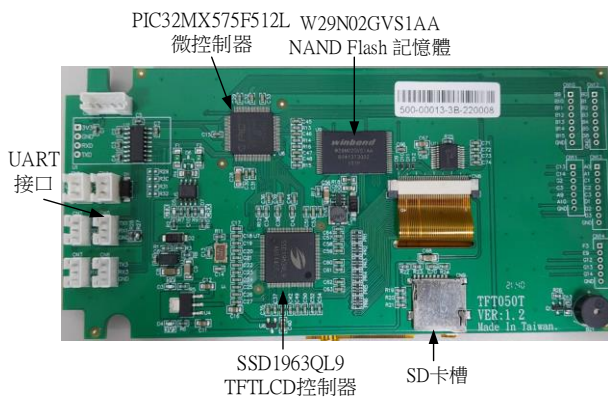


圖 6. TFTLCD 觸控面板背面的驅動電路

溝通。SSD1963QL9 晶片為 Solomon Systech 公司生產的文字與繪圖模式 TFT-LCD 控制器，透過 SPI 通訊接口與主控器 PIC32MX575F512L 連接。其可支援 BIG5/GB/UNICODE 等編碼，內建多種字型，支援多國語言顯示，內建 1215KB 的顯示緩衝區，可儲存顯示圖像數據，且支援電阻式觸控板的控制。內建 PWM 控制器，可用於控制背光亮度。W29N02GVS1AA 記憶體為華邦電子（Winbond Electronics）生產的低功耗 NAND Flash 記憶體，記憶體容量為 256Mb（32M x 8 bits），工作頻率最高可達 166 MHz，工作電壓範圍為 2.7V~3.6V。用於儲存人機介面的背景圖和各種圖標。透過並行介面與 PIC32MX575F512L 進行通訊。將要燒入的圖片與圖標先經由轉圖軟體轉成 BIN 檔，然後，儲存在 SD 卡上，將 SD 卡插入圖 6 中的 SD 卡槽，PIC32MX575F512L 的程式將自動將圖檔載入 W29N02GVS1AA 的記憶體內。

（二）人機介面流程設計

針對電子式球拍穿線機的功能需求，設計人機介面的流程頁面，每個頁面包括背景圖、圖標和觸控按鍵的位置，根據人機介面各個的流程頁面分別撰寫各種操作程式，串聯成機台友善的人機操作介面。詳細說明如下：

1. 開機流程畫面

啟動穿線機電源，TFTLCD 顯示開機和診斷畫面，如圖 7 所示。此時，拉線馬達旋轉帶動拉線頭左/右移動，同時偵測馬達電流、左極限、右極限和 Load Cell 拉力感測器電壓是否正常，如果是顯示“OK”後，進入穿線主畫面，如果有異常顯示“NOK”後，進入異常處理程序。

2. 穿線主畫面

穿線主畫面如圖 8 所示，穿線主畫面依序有如下的設定功能：



圖 7. 開機和診斷頁面



圖 8. 穿線主畫面

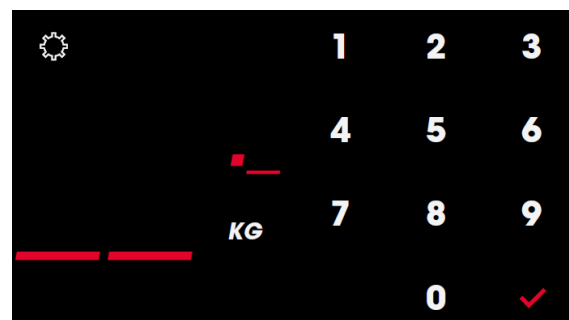


圖 9. 拉線磅數輸入畫面

- (1) 拉線磅數和單位設定：觸按拉線磅數顯示位置處，即進入拉線磅數設定畫面，如圖 9 所示。按壓輸入所要的拉線磅數到小數點位置，然後，按壓“V”圖標即回到穿線主畫面。在穿線主畫面按壓“kg”或“lb”即自動切換單位。
- (2) 設定功能：按壓設定圖標，即進入設定主畫面，進行穿線各種周邊功能設定。
- (3) 拍架剎車功能：球拍穿線完進行拉線時，為了避免拍架劇烈晃動，設計有拍架剎車的功能。
- (4) 拉線速度設定功能：按壓拉線速度圖標，立即切換三段式拉線速度分別為 1：100%、2：75%和 3：50%。
- (5) 結線功能設定：按壓結線功能圖標即可切換結線功能致



能。按壓右邊的結線調整磅數值圖標上端，即可遞增結線磅數，按壓結線調整磅數值圖標下端，即可遞減結線磅數，每按壓一次增減 0.5 單位 (kg 或是 lb)，最多到 2.5 單位。

- (6) 拉橫線功能設定：按壓拉橫線致能圖標即可切換拉橫線功能致能。按壓右邊的拉橫線調整磅數值圖標上端，即可遞增拉橫線磅數，而按壓圖標下端，可遞減拉橫線磅數，每按壓一次增減 0.5 單位，在 $\pm 2.5 \sim 2.5$ 單位調整磅數。
- (7) 預拉線線功能設定：按壓預拉線致能圖標即可切換預拉線功能致能。按壓右邊的預拉線調整磅數值圖標上端，即可遞增預拉線 % 數，而按壓圖標下端，可遞減預拉線 % 數，每按壓一次增減 1%，在 0~20% 間調整。

3. 設定主畫面

設定主畫面如圖 10 所示，在設定畫面上，提供了八個穿線機功能的設定，包含蜂鳴器 ON/OFF 切換、腳架上升、Load Cell 校正、說明書、TFTLCD 亮度調整、腳架下降、顯示拉線總次數和語言設定等功能。當按壓設定的圖標，即可進入相對的設定功能，分別敘述如下：

- (1) 腳架上升/下降功能：按壓腳架上升圖標，腳架立即上升，直至手放開。而按壓腳架下降圖標，腳架立即下降，也是直至手放開。
- (2) 蜂鳴器 ON/OFF 切換：按壓蜂鳴器圖標，即可切換蜂鳴器 ON/OFF。
- (3) TFTLCD 亮度調整：按壓 TFTLCD 亮度調整圖標，即進入 TFTLCD 亮度調整畫面，如圖 11 所示。從 10%~100% 共分成 10 段，如畫面的白色點所示，按左/右箭頭可以調整亮度，所在亮度段數會以紅色圈取代白點。
- (4) Load Cell 校正功能：按壓 Load Cell 校正圖標，即進入 Load Cell 的校正畫面，如圖 12 所示。共有 10 kgw、20 kgw、30 kgw 和 40 kgw 四點校正磅數。針對每一個校正磅數，拉線頭進行拉線，並且控制 Load Cell 輸出的電壓 A/D 值分別為 230、460、690 和 920，並且利用拉力計量測真實的磅數，然後，按壓上、下的圖標，輸入實際的對應磅數進行校正。輸入完後按壓“V”圖標確認輸入。而再自動重複下一點的校正，直到完成四點校正點的校正為止，才回到設定主畫面。
- (5) 語言設定功能：按壓語言設定圖標，即進入語言設定的畫面，如圖 13 所示。共有八國語言可以選擇，分別為法

語 (FR)、英語 (EN)、西班牙語 (ES)、德語 (DE)、義大利語 (IT)、中文 (CN)、日語 (JP) 和捷克語 (CZ)。按壓所要選擇的語言圖標，圖標即變成紅色，而選定語言。

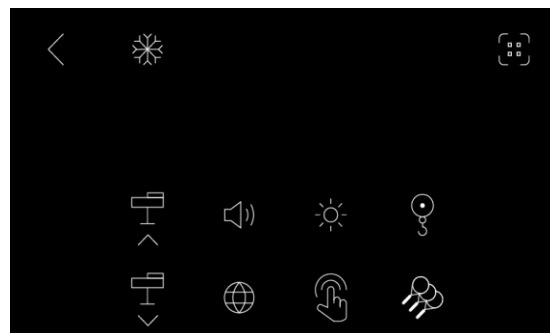


圖 10. 設定主畫面

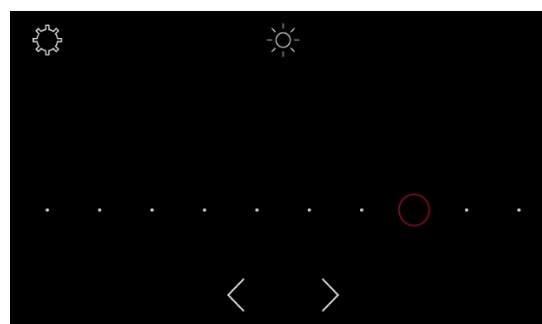


圖 11. TFTLCD 亮度調整畫面

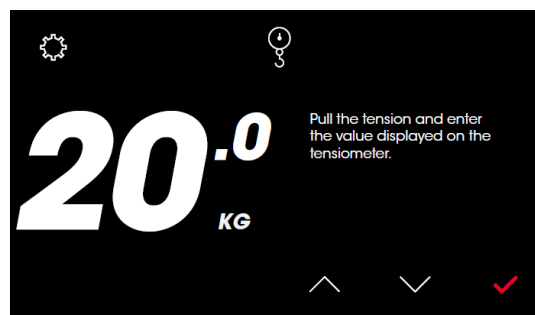


圖 12. Load Cell 的校正畫面



圖 13. Load Cell 的校正畫面



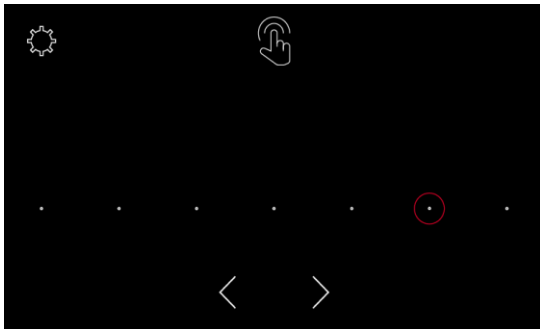


圖 14. 金屬按鍵靈敏度設定畫面

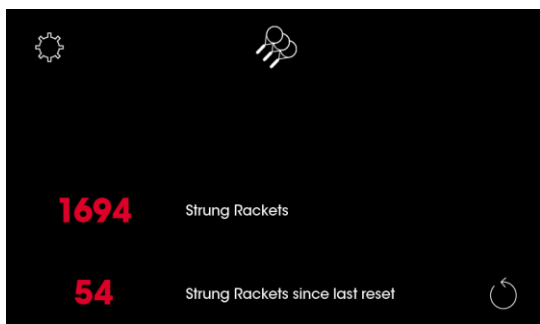


圖 15. 顯示拉線總次數畫面

- (6) 金屬按鍵靈敏度設定：穿線機上啟動拉線頭拉線的啟動按鍵，一般為機械式的按鍵，重覆按壓容易損壞，可以選擇觸摸式的金屬按鍵，且可以設定靈敏度。當按壓金屬按鍵靈敏度圖標，即進入金屬按鍵靈敏度設定的畫面，如圖 14 所示。總共分八段，按左/右的圖標，即可以選擇所要的靈敏度。
- (7) 顯示拉線總次數：按壓顯示拉線總次數圖標，即進入顯示拉線總次數的畫面，如圖 15 所示。可以顯示拉線機出廠迄今拉線的總次數，以及上次重置拉線數迄今的拉線總次數。

(三) 圖片製作、轉檔和燒錄

人機介面的畫面是由背景圖（Background）和圖標（icon）所組成，需先透過剪圖軟體裁剪所要的圖標大小，存成 BMP 檔。然後，再經轉圖軟體轉成 BIN 檔格式才能儲存於 TFTLCD 面板上的記憶體內。本文利用 Adobe Illustrator 軟體設計人機介面的畫面，並且裁剪成各種背景圖和圖標。人機介面的背景圖的底色為黑色，像素點為 800*480，在其上進行各種圖示的設計。每個圖示代表一個具體的命令或功能。圖示設計完成後，進行圖示座標的定位，在 Adobe Illustrator 軟體中，可以精確調整每個圖示像素座標位置。調

整完整個圖示畫面後，再儲存成特定檔名的 bmp 點陣圖，顏色為 16 位元的 RGB 三色。

Adobe Illustrator 軟體製作出的背景和圖示為 16 bit RGB 的 BMP 檔，必須轉成 BIN 檔才能儲存於 TFTLCD 面板的記憶體。BIN 檔案是一種二進位格式，可以直接存儲數據於記憶體。最後再把所有圖片轉換後的 BIN 檔放入到 Micro SD 卡上，然後插入到 TFTLCD 觸控面板背面的 SD 卡槽內，TFTLCD 面板送電後，面板上的 PIC32MX575F512L 微控制器就會自動偵測且將圖檔載入 W29N02GVS1AA 的記憶體內。關掉面板的電源，取出 SD 卡，就可完成圖檔燒錄的動作。

四、TFTLCD 觸控式人機介面

本章節介紹嵌入式系統的主控 dsPIC33EP512MU814 晶片和編譯軟體 MPLAB X IDE+C30，再針對電子式球拍穿線機的嵌入式程式進行設計，內容包括 Load Cell 的 A/D、EEPROM 的 I²C、DC 碳刷馬達的 PWM 模組和 TFTLCD 面板溝通的 UART。

(一) dsPIC33EP512MU814 晶片簡介

dsPIC33EP512MU814 是一款由 Microchip Technology 提供高性能數字訊號控制器（DSC），具有豐富的功能和廣泛的應用領域，設計用於需要複雜的數位和類比處理能力和精密馬達控制的應用。從工業自動化到高階的通訊系統以及控制系統的電源管理，dsPIC33EP512MU814 都能提供強大的支援。共有 144 支腳位，如圖 16 所示。該芯片能在 3.0V 到 3.6V 的電壓範圍內運行，採用的架構為 Harvard 架構，提供 70 MIPS 的處理速度。擁有一個 16 位元的 CPU，既有效率並且支援 C 語言。包括兩個 40 位元累積器、單週期乘加（MAC/MPY）和對雙數據提取的支援，以及 32 位元乘法支援，以及多達七對獨立時序的 PWM，與 2 個獨立的 ADC 模組。微處理器提供多種通訊介面選擇，其中 I²C 和 UART 是兩種常用的串行通訊協議。I²C 主要特性為支援多主機和多從機配置，且只要兩條通訊線即可以有多個主機和從機，適用於複雜的系統架構；UART 是一種非同步串行通訊協議，用於點對點的數據傳輸。此微處理器內置兩個 UART 模組，支援全雙工通訊，數據可以同時在兩條通訊線雙向傳輸，設定對應的波特率（Baud Rate），並且提供了同步/非同步傳輸模式。編譯軟體為 Microchip 公司所開發的 MPLAB IDE+C30，基於開源 NetBeans 平台開發，提供了一個圖形



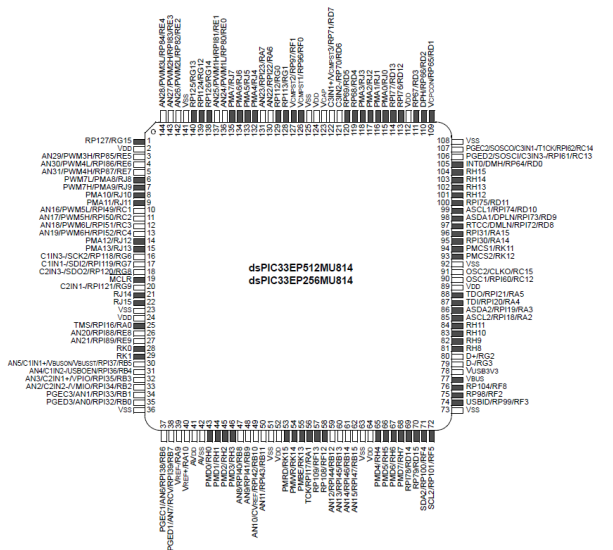


圖 16. dspic33EP512MU814 微處理器的腳位

化用戶界面，包括一個功能豐富的代碼編輯器、項目管理器和配置工具。用戶介面設計直觀，支持拖/放功能，並允許用戶自定義工作區和工具欄。MPLAB IDE 集成了多種編譯器，包括 C18 和 C30 編譯器，分別對應 C 語言的 8 和 16 位元的編譯功能。且支援提供即時追蹤功能，幫助用戶分析應用程式在實際硬體或仿真環境中的狀態。連接 ICD3 燒錄和除錯器，可以線上直接針對 dsPIC33EP512MU814 微處理器進行燒錄和軟/硬體偵錯的動作。

(二) 系統操作程序的程式設計

電子式球拍穿線機機台操作的系統操作程序，如圖 17 所示，主要分成三個步驟：開機故障診斷、穿線主畫面和設定主畫面。當開啟電源即進入開機故障診斷步驟，拉線馬達帶動拉線頭左/右來回移動一趟。期間診斷 Load Cell、左/右極限和拉線馬達是否異常。如果異常，即停機和顯示錯誤碼；反之，如果正常，即進入穿線主畫面。在穿線主畫面可以執行拉線磅數和單位調整、拍架手動和自動剎車切換、拉線速度調整、結線致能和磅數調整、橫線致能和磅數調整以及預拉線致能和預拉力%值調整等功能。設定好所有參數，按壓拉線頭啟動開關，拉線馬達即旋轉帶動拉線頭向右移動進行拉線，並且偵測 Load Cell 的輸出 A/D 值，透過所設計的拉力控制器控制拉線磅數在所設定的數值。待穿線者夾線和穿線結束後，再按壓拉線頭啟動開關結束拉線動作，拉線頭左移直至碰到左線開關為止。在穿線主畫面按壓設定的 Icon，即進入設定主畫面，在此畫面可以進行腳架高度上/下調整、蜂鳴器 ON/OFF、TFTLCD 面板背光亮度調整、Load Cell 四

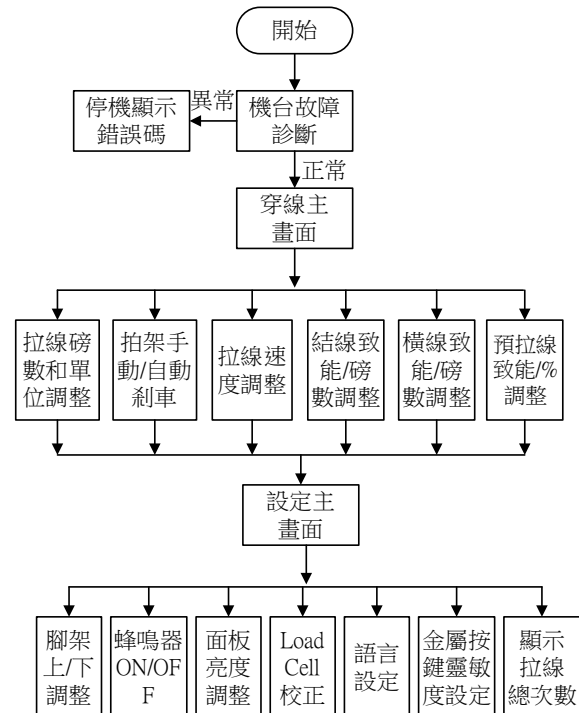


圖 17. 電子式穿線機系統操作程序

點校正、操作介面語言設定、金屬按鍵靈敏度設定已即顯示拉線總次數等功能。每一種設定功能皆有一相對應的人機操作畫面，每一人機操作畫面即是一種操作程序，必須透過撰寫程式來執行。這程式動作包括貼背景圖和 Icon 圖、掃描作動 Icon 觸摸座標位置以及相對應的動作。為了方便撰寫程式，每個人機介面畫面必須建立此畫面所用到的背景圖和 Icon 圖的記憶體儲存位置和 Icon 圖貼圖的座標位置，以及數值貼圖的記憶體位置、位數和貼圖座標，還有每個觸控 Icon 的 X/Y 座標範圍。在穿線主畫面按壓設定的 Icon，即進入設定主畫面，在此畫面可以進行腳架高度上/下調整、蜂鳴器 ON/OFF、TFTLCD 面板背光亮度調整、Load Cell 四點校正、操作介面語言設定、金屬按鍵靈敏度設定已即顯示拉線總次數等功能。每一種設定功能皆有一相對應的人機操作畫面，每一人機操作畫面即是一種操作程序，必須透過撰寫程式來執行。這程式動作包括貼背景圖和 Icon 圖、掃描作動 Icon 觸摸座標位置以及相對應的動作。為了方便撰寫程式，每個人機介面畫面必須建立此畫面所用到的背景圖和 Icon 圖的記憶體儲存位置和 Icon 圖貼圖的座標位置，以及數值貼圖的記憶體位置、位數和貼圖座標，還有每個觸控 Icon 的 X/Y 座標範圍。



(三) 控制模組功能程式設計

本章節設計嵌入式系統所需開通的通訊和馬達控制的功能模組，包括 Load Cell 資料擷取的 A/D、EEPROM 溝通的 I²C、馬達驅動的 PWM 和 TFTLCD 面板溝通的 UART 等模組，分別敘述如下。

1. Load Cell 的 A/D 轉換模組

Load Cell 感測器經由惠斯通電橋 (Wheatstone Bridge) 和儀表放大器，輸出的類比訊號電壓介於 0~3.2 V，相對的拉力磅數為 0~45 kgw。此類比訊號必須經 dspic33EP512MU814 微處理器內部的 ADC 模組轉換成數位訊號，提供拉力回授控制。本論文 ADC 模組設定 10 bit，輸入通道為 AN0。因此，Load Cell 輸入電壓 0-3.2V，相對 A/D 值為 0~1024。開通 ADC 功能模組相關的控制暫存器 (Control Registers) 分別為 ADxCON1、ADxCON2 和 ADxCON3。ADxCON1 負責控制 ADC 的基本操作，ADxCON2 提供了更多細節控制，包括選擇電壓參考源、設置掃描輸入、控制通道選擇和緩衝區管理。ADxCON3 為控制轉換時鐘源、自動取樣時間和轉換時鐘選擇，以適應不同的轉換需求和精確度。而選擇輸入通道有兩個相關的暫存器，分別為 ADxCHS0 和 ADxCHS123，ADxCHS0 用於選擇通道 0 的正負輸入，決定所需 A/D 輸入連接到 ADC 的取樣和保持 (S&H) 放大器位置。ADxCHS123 配置 ADC 的通道 1、2、3。此暫存器可以設置這些通道的正負輸入，支援多通道數據採集。

2. EEPROM 的 I²C 通訊

EEPROM 為 Microchip 公司型號 24LC16BH 16 Kbit 的 EEPROM，與 dspic33EP512MU814 微處理器的溝通方式為 I²C 達成的，它使用兩條訊號線：SDA (數據線) 和 SCL (時鐘線)。溝通的 OP-code 由 R/W (讀/寫) 控制碼和 ACK (確認訊號) 所組成，支持多主站和多從站的接收方式。SDA 為用於傳輸從主設備到從設備，以及反向傳輸；SCL 由主設備控制，提供用於同步數據傳輸的時鐘訊號。每個時鐘脈衝完成一數據字元 (Bit) 的傳輸；一個數據字節 (Byte) 被接收器 (無論是主設備還是從設備) 成功接收後，接收器會在第九個時鐘脈衝期間將 SDA 線拉低來發送 ACK 訊號。反之，如果不想接收數據或者接收過程中有錯誤時，在第九個時鐘脈衝期間保持 SDA 線高電平，發送 NACK 訊號。dspic33EP512MU814 微處理器以 I²C 與 EEPROM 溝通時，SDA 線將依序傳送通訊開始、通訊確認和暫存器寫入資料

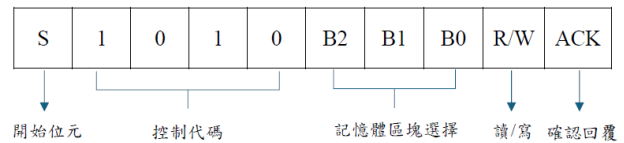


圖 18. I²C 的控制位元的分配表

的訊號，最後結束時再發送停止位元，如圖 18 所示，其中，開始位元為 0；控制代碼為 1010 四個位元；B2、B1、B0 為指示 EEPROM 的記憶方塊 (Block)，從 000~111 分別指向 0~8 個方塊；R/W 如果為 0 則是寫入，1 則是讀取。

3. 拉線馬達驅動的 PWM 模組

拉線馬達驅動的驅動電為 H 型兩臂的 MOSFET 驅動電路，如圖 19 所示，MOSFET 型號為 NMOS-IRF1010E 電器規格為最大輸入電壓 60V、最大連續輸出電流 80A、導通電阻 8mΩ。MOSFET 的驅動晶片為 IRS2101S，由 Infineon Technologies 公司生產的高壓、高速 N 通道 MOSFET 驅動器，適用於半橋、全橋和馬達控制的應用。馬達所採用的控制為脈波寬度調變 (Pulse Width Modulation, PWM) 的技術。透過調節脈衝訊號的導通的寬度，來控制功率至負載的電壓值。dspic33EP512MU814 微處理器共有 14 組 PWM 通道 PWM1H~PWM7H、PWM1L~PWM7L，供馬達控制使用，本文使用 PWM1H+PWM1L 輸送訊號於 H 型驅動電路左臂的上/下 MOSFET 的控制，而 PWM2H+PWM2L 輸送訊號於 H 型驅動電路右臂的上/下 MOSFET 的控制。當拉線馬達正轉帶動拉線頭右移時，PWM1H 輸出 PWM 訊號而 PWM2L 輸出 0 (開通 MOSFET)，PWM1L 和 PWM2H 輸出 1 (關閉 MOSFET)。反之，當拉線馬達反轉帶動拉線頭右移時，PWM2H 輸出 PWM 訊號而 PWM1L 輸出 0 (開通 MOSFET)，PWM1H 和 PWM2L 輸出 1 (關閉 MOSFET)。相關的 PWM 設定暫存器有 PTCON：PWM 時基控制暫存器、PTCON2：PWM 時鐘分頻選擇暫存器、MDC：PWM 主占空比暫存器和 IOCONx：PWM I/O 控制暫存器等，本文設定 PTCON2bits.PCLKDIV = 0b101，PWM 頻率為 FSOC (6MHz) 除以 32，因此 PWM 頻率約為 187kHz。PWM 的占/空比 (Duty) 可經由 MDC 暫存器設定。

4. TFTLCD 面板的 UART 通訊

UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter)，為通用非同步收發傳輸器，常用於微控制器與外部裝置



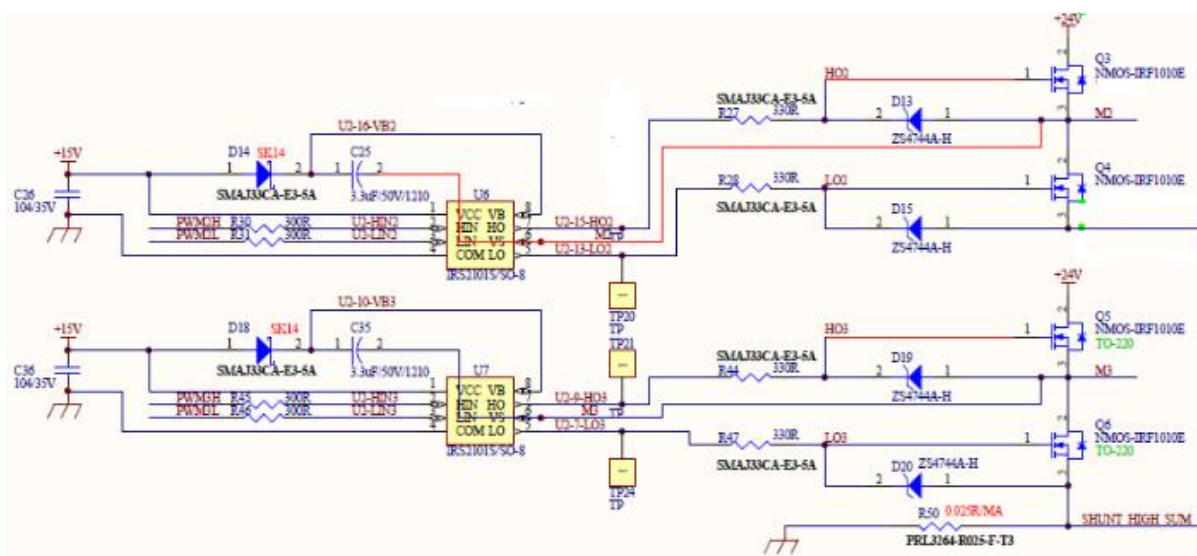


圖 19. H 型兩臂 MOSFET 驅動電路圖

之間的數據傳輸。dsPIC33EP512MU814 微處理器共有 2 組 UART 的通訊通道，本文使用 UART1 於 TFTLCD 面板的溝通。UART 通過 RX（接收）和 TX（發送）兩個引腳進行數據的接收和發送。波特率（Baud Rate）代表資料傳輸的速率，為每秒傳送多少字元數據（單位:bits/sec）。波特率的設定涉及到 BRGH（High Baud Rate Select Bit）和 UxBRG（UART Baud Rate Generator Register）這兩個元件。當 BRGH=0 時，UART 使用標準速率模式的波特率；BRGH=1 時，則使用高速模式。而 UxBRG 暫存器設定波特率的大小。波特率的計算依賴於系統時鐘（Fcy）和 UxBRG 的設定值，若 BRGH = 0，波特率的計算公式為：

$$\text{Baud Rate} = \text{Fcy} / (16 \times (\text{UxBRG} + 1)) \quad (1)$$

若 BRGH = 1，計算公式則為：

$$\text{Baud Rate} = \text{F}_{\text{cy}} / (4 \times (\text{UxBRG} + 1)) \quad (2)$$

本文設定 BRGH = 0，波特率的計算公式由(1)式計算，系統 Fcy 為 60 MHz，U1BRG 設定值為 32，則由(1)式計算出波特率為 115200 bit/sec。UxTXREG 為傳輸緩衝暫存器，用於暫存待發送的資料。當 dsPIC33EP512MU814 微處理器準備發送數據時，需先將資料寫入此暫存器。UART 硬體會自動將資料串行化並通過 TX（發送）引腳發出。TX 傳輸一筆資料必須包括起始位元、資料位元、可選的奇/偶校驗位元

和停止位元。UxRXREG 是接收緩衝暫存器，用於存儲從 RX（接收）引腳接收的串行數據。當數據從外部設備通過串行接口進入，UART 硬體會自動將接收到的串行訊號轉換為字節並存儲在 UxRXREG 中。微控制器隨後可以讀取這個暫存器來獲取數據。

五、實驗與結果

本章節介紹本論文的電子式球拍穿線機實驗平台，並且透過實際的機台實驗，驗證本論文所發展嵌入式 TFTLCD 觸控式人機介面的結果。如圖 20 所示，為電子式球拍穿線機的實驗平台，本文以 dsPIC33EP512MU814 微控制器為核心，設計軟、硬體的嵌入式系統，硬體部分包括 TFTLCD 觸控式面板、拉線驅動馬達、Load Cell 感測器、EEPROM 外部記憶體等裝置。利用 MPLAB IDE v8.43+C30 軟體平台撰寫 C 語言程式，透過 MPLAB ICD3 進行程式的燒入與除錯。TFTLCD 觸控式面板的規格為解析度 800*480/16 bit RGB 三色/記憶體容量 256 Mb（32M x 8 bits）。dsPIC33EP512MU814 微處理器透過波特率 115200 bit/sec 的 UART 通訊界面與面板上建置的 PIC32MX575F512L 微控制器溝通貼圖、傳輸觸控座標和調整背光亮度等工作。以 10 bit 的 ADC 擷取 Load Cell 拉力感測器的類比訊號，拉線磅數 0~40 kgw，相對 Load Cell 輸出電壓 0~3.2V，而 ADC 轉換值 0~1024。由型號為 NMOS-IRF1010E 的四個 MOSFET 組成 H 型的拉線馬達驅動電路，MOSFET 驅動晶片為型號 IRS2101S 的高速 N 通





圖 20. 球拍穿線機實際硬體



圖 21. 開機診斷頁面

道晶片，拉線馬達規格為 DC 碳刷馬達規格為 60W/24V/3.2A，蝸桿蝸輪減速機的齒輪比為 1/64。dspic33EP512MU814 微處理器開通 PWM1H+PWM1L 和 PWM2H+PWM2L 分別控制 H 型 MOSFET 驅動電路的左、右臂，而能控制拉線馬達正、反轉和輸入電壓。PWM 的輸出頻率為 187 kHz。透過所設計的拉力控制器依據 Load Cell 的即時拉力感測值，計算出 PWM 的占空比而能精密控制球拍拉線所欲的磅數。人機操作過程包括開機自動診斷、穿線主畫面和設定主畫面三個部分，分別實驗如下：

(一) 開機診斷頁面

啟動穿線機電源，會進入開機診斷頁面，控制拉線頭左、右移動碰觸機台的左、右極限開關，過程中會依序偵測馬達是否移動、電流是否過載等，Load Cell 偵測 ADC 初始電是否過高，左、右極限開關是否作動。待所測試的項目正常時，即貼出打勾圖標，如圖 21 所示。待機台偵測皆正常後，隨即進入穿線主頁面，進行拉線前的參數設定。



圖 22. 穿線主頁面



圖 23. 輸入拉線磅數頁面

(二) 穿線主頁面

在穿線主頁面（如圖 22）可以分別進行拉線前的參數設定動作，包括設定拉線磅數與單位、自動/手動煞車、拉線速度、結線致能/磅數調整、拉橫線致能/磅數調整、預拉線致能/磅數%值調整等。如圖 23 所示，按壓拉線磅數數值處，即進入拉線磅數設定畫面。輸入所要拉線磅數後，按確認圖標後，即返回穿線主畫面。在穿線主畫面按壓 kg 或是 lb 的單位圖標，即能切換拉線磅數的單位，數值也會跟著改變。按壓拍架剎車圖標超過 3 sec，可以切換自動剎車和手動剎車的模式。反之，如果短按拍架剎車圖標，則拍架剎車立即作動，剎車圖標變成紅色。按壓拉線速度圖標則可以切換拉線速度，總共區分成 1、2 和 3 三速，1 速為 100%全速拉線；2 速為 75%拉線；3 速為 50%拉線，所設定級速的圖標會變成紅色。按壓結線圖標則結線致能，結線圖標從白色變成紅色，拉線的磅數會增加所設定的結線增加磅數 0~5 kg。按壓結線磅數的數字圖標，則數值每按壓一次增加 0.5 kg。按壓橫線圖標則拉橫線致能，橫線圖標從白色變成紅色，拉線的磅數會增加所設定的拉橫線增加磅數±0~2.5 kg。按壓橫線磅



數的數字圖標，則數值每按壓一次增加 0.5 kg。按壓預拉線圖標則預拉線致能，預拉線圖標從白色變成紅色，啟動拉線時，會先預拉線至拉線磅數再增加所設定的%數，放開後，再從新拉線到所設定的磅數，以消除拍線內的應力。按壓預拉線%的數字圖標，則數值每按壓一次增加 1%，最多增加至 20%。圖 24 為在穿線主頁面設定的結果。

(三) 設定主頁面

在穿線主頁面按壓設定圖標，即進入設定主頁面，如圖 25 所示，在此頁面可以設定蜂鳴器 ON/OFF 切換、腳架上升、Load Cell 校正、TFTLCD 亮度調整、腳架下降、顯示拉線總次數和語言設定等功能。按壓腳架上升圖標，則腳架緩慢上升，手放開，則停止。反之，按壓腳架下降圖標，則腳架緩慢下降，手放開，則停止。按壓蜂鳴器圖標則可以切換蜂鳴器 ON/OFF，蜂鳴器顯示的圖標也會跟著改變，每按壓一次則 ON/OFF 互相變換。按壓 TFTLCD 面板背光亮度調整圖標，即進入 TFTLCD 面板亮度調整畫面，如圖 26 所示。按壓左/右箭頭圖標調整背光亮度的級數，共分 10 個級數，越右邊的級數圖標點背光亮度越亮。同時所在的亮度級數也會以色圓圈圖標替代。按壓 Load Cell 校正圖標，即進入 Load Cell 校正畫面，如圖 27 所示。分別校正 Load Cell 在 10kgw、20kgw、30kgw 和 40kgw 的磅數值。每一個校正磅數，可以按壓上、下的圖標，輸入實際的磅數進行校正。輸入完後，按壓“V”確認圖標確即進入下一校正點的校正，直到完成四點校正點的校正為止。按壓語言設定圖標，即進入語言設定畫面，如圖 28 所示。按壓選定的語言圖標，圖標即變成紅色。按壓顯示拉線總次數圖標，即進入顯示拉線總次數畫面，如圖 29 所示。顯示上次重置後的拉線次數和拉線機出廠迄今的總拉線數兩種。



圖 25. 設定主頁面



圖 26. TFTLCD 面板背光亮度調整設定



圖 27. Load Cell 校正頁面



圖 24. 穿線主頁面設定結果



圖 28. 語言設定頁面



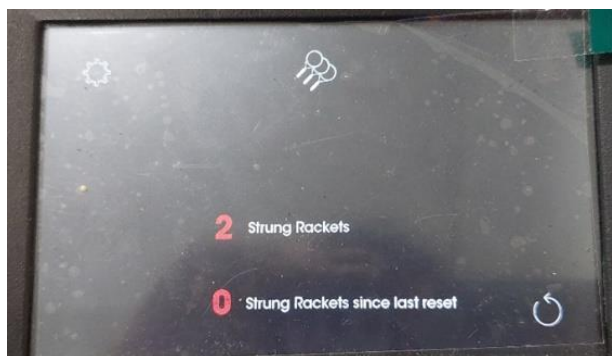


圖 29. 顯示拉線總次數畫面

六、結論

本文以 Microchip 公司型號 dsPIC33EP512MU814 的微控制器為核心結合 TFTLCD 觸控式面板，設計軟、硬體的嵌入式系統，以應用於電子式球拍穿線機的人機介面的研製。依據球拍穿線機的功能需求，以 Adobe Illustrator 繪圖軟體設計 TFTLCD 面板所需的人機操作頁面，包括開機自動診斷頁面、穿線主頁面和設定主頁面等。所有設計的背景圖和圖標經由轉圖軟體轉成 BIN 檔後燒入觸控面板的記憶體。利用 MPLAB IDE v8.43+C30 軟體平台撰寫 DSP 的嵌入式程式，包括機台操作頁面程序、TFTLCD 面板 UART 通訊、外部 EEPROM 記憶體 I2C 通訊、Load Celle 拉力感測 ADC 模組、拉線馬達 PWM 控制模組等。本論文所研製的 DSP 觸控面板嵌入式人機介面，不但讓機台的操作直覺友善，並且以軟體開通 DSP 內建的功能模組取代周邊的硬體電路，簡化電路板的設計，達到全數位化目的，讓機台的維修更加容易。最後，建立實際的電子式穿線機的實驗平台，透過各種實驗驗證本文所提方法的優越性。

參考文獻

1. 李峰吉 (民 95)，嵌入式即時運動控制核心為基礎之加速度回授控制器開發，國立台北科技大學自動化科技研究所碩士論文。
2. 李晉凱 (民 96)，液壓伺服閥系統人機介面之研發與測試，國立臺灣大學生農學院生物產業機電工程學系碩士論文。
3. 吳坤德 (民 95)，嵌入式綠色電能監測系統，工程科技與教育學刊，3(1)，1-19。
4. 林敬竣 (民 100)，整合夜間車燈與車道偵測與事件記錄

功能之嵌入式駕駛輔助系統，國立台北科技大學資訊工程研究所碩士論文。

5. 黃千芳 (民 111)，基於人機介面設計準則設計冰箱食物管理網頁，中原大學工業與系統工程學系碩士論文。
6. 黃郁雅 (民 100)，智慧型手機觸控介面操作績效之研究，國立台北科技大學創新設計研究所碩士論文。
7. 葉正翔 (民 98)，無線嵌入式 DSP 聽診器判定心雜音方法和壓力感測型聽診器設計和建構，天主教輔仁大學電子工程學系碩士論文。
8. 顏瑋義 (民 100)，以 dsPIC 為基礎的嵌入式系統之設計及其在機器手臂之應用，國立中正大學電機工程研究所碩士論文。
9. 廖崇宇 (民 103)，具備即時影像監控應用之嵌入式系統，義守大學電機工程學系碩士論文。
10. 樂曜先 (民 111)，嵌入式 EtherCAT 伺服控制系統開發與實作，國立台灣海洋大學資訊工程學系碩士論文。
11. Chi Z. Y., Q. Z. Jia, X. D. Wang, Z. G. Liu and P. Wu (2016) An intelligent interface design method based on DSP and FPGA. Proceedings of the 2016 International Conference on Electrical, Mechanical and Industrial Engineering, Phuket, Thailand
12. Huang J. S. (2017) Design of real time monitoring system for dangerous goods transportation based on DSP. *Procedia Engineering*, 174, 1323-1329.
13. Li, W. B., Q. Gao and P. C. Zhang (2012) Design target parameter estimation system based on DSP. *Physics Procedia*, 25, 1576-1581.
14. Omar D., G. G Ahmed, O. N. Hamid, S. H. Saloua, F. Q. Sanaa and O. J. Mohammed (2022) Comparison study of hardware architectures performance between FPGA and DSP processors for implementing digital signal processing algorithms: Application of FIR digital filter. *Results in Engineering*, 16, 1-12.
15. Subhankar B. C., S. Sanjib and C. B. Amlan (2013) Evaluation of power efficient FIR filter for FPGA based DSP Applications. *Procedia Technology*, 10, 856-865.
16. Wang H. Y. and S. P. Zhao (2012) The predigest project of TCP/IP protocol communication wystem based on DSP technology and ethernet. *Physics Procedia*, 25, 1253-1257.

收件：113.09.02 修正：113.09.30 接受：113.10.22

