



國立臺北科技大學

電機工程系

控制系統實習

114 - 1 學期期末專題報告

**具備分立式 H-Bridge 驅動之
閉迴路追蹤車設計**

Design of Closed-Loop Tracking Vehicle
with Discrete H-Bridge Driver

超音波控制自走跟隨車實作

第一組

Department of Electrical Engineering

Annie Huang (111310452)

Advisor: Prof. Huang Cheng-Ming

2026.1

摘要

本專題旨在實作一台具備「分立式 H-Bridge 驅動 (Discrete H-Bridge Driver)」之超音波控制自走跟隨車。有別於常見的模組化方案，本系統從第一性原理 (First Principles) 出發，自行設計由 S8550 (PNP) 與 C1384 (NPN) 電晶體構成的混合式驅動電路，以實現邏輯控制與動力輸出的分離。在控制策略上，採用具備死區 (Deadband) 設計的 Bang-Bang 控制演算法，搭配中位數濾波 (Median Filter) 處理感測器訊號，成功在低成本硬體條件下實現穩健的 2D 目標追蹤與避障功能。本報告亦包含針對感測器硬體公差進行的失效分析與解決方案。

目錄

摘要	2
目錄	2
圖目錄	3
第 1 章、 專題介紹	4
1.1 設計動機	4
1.2 系統目標	4
第 2 章、 硬體架構設計	5
2.1 系統架構	5
2.2 分立式驅動電路設計	5
第 3 章、 軟體與控制策略	7
3.1 感測訊號處理	7
3.1.1 超音波感測器訊號處理架構	7
3.1.2 中位數濾波器實作	7
3.1.3 雙感測器協調機制	7
3.1.4 訊號處理參數設定	7
3.1.5 感測器驗證機制	8
3.2 控制演算法	8
第 4 章、 功能驗證與問題分析	10
4.1 功能驗證	10
4.2 異常排除案例研究	11
第 5 章、 結論與未來展望	12
5.1 專案總結	12
5.1.1 技術成就與實現目標	12
5.1.2 教育價值與學習成果	12
5.1.3 系統效能評估	12

5.2	改善策略與未來展望	13
5.2.1	硬體架構優化	13
5.2.2	電源供應系統改善	13
5.2.3	機械結構與連接可靠性	13
5.2.4	控制演算法與軟體架構	13
5.2.5	系統整合與擴展	13
第 6 章、	參考文獻與專案資源	14

圖目錄

圖 2-1	系統架構圖	5
圖 2-2	電路設計圖	6
圖 3-1	Arduino 控制程式流程圖	8
圖 4-1	攜帶式半封閉抗干擾測試場域	10
圖 5-1	超音波自走車側面實體圖	12
圖 5-2	超音波自走車俯視實體圖	12

第1章、專題介紹

1.1 設計動機

本專題的靈感來自於家中閒置國小時期的「科學魔法教學車」。這台車原本設計用於教學基本電路接線（附麵包板）、光感測感應移動以及紅外線循跡（附積體電路），並非設計成可自由控制的智慧載具。其馬達至少需要 4.5V 才能運作，這使得原始驅動方式與現代微控制器介面不完全相容；幸好手邊有兩台相似的教學車，因此也有兩個附贈繼電器，為後續驅動控制提供了彈性。

本專題的核心動機在於「舊機翻新 (Retrofitting)」：如何在不購買高階套件的情況下，將這台原本僅用於課堂演示的小型塑膠殼組裝車，透過 Arduino 套件、自製驅動電路與現代感測器，賦予其環境感知與閉迴路自動控制的能力。整個過程涉及硬體整合、電路設計以及控制演算法的實作，是一次將童年回憶與大學專業知識結合的實踐。

在此過程中，我面臨了多重挑戰：包括如何使馬達在適當電壓下穩定運作、如何整合附贈繼電器以控制車輛方向、以及如何將舊有感測器與現代控制邏輯搭配運行。這些挑戰不僅突顯了資源有限時的工程思維，也展現了從硬體到軟體完整開發流程的學習歷程。

1.2 系統目標

本計畫之目標為設計並實作一台以超音波感測為基礎之自走式跟隨車系統。該系統透過感測、判斷與致動三個層面之整合，實現對前方目標物之距離與方向追蹤，其主要設計目標如下：

(A) 主動環境感知能力

系統配置左右各一組 HC-SR04 超音波距離感測模組，用以即時量測前方目標物之距離資訊，並透過兩側感測數值之差異，推估目標物相對於車體之方位變化。

(B) 閉迴路方向控制 (Closed-loop Orientation Control)

系統根據左右超音波感測器回傳之距離差值，動態調整左右輪之轉速，以形成差速轉向行為，使車體能持續朝向目標物方向移動，構成以感測回饋為基礎之方向控制機制。

(C) 穩態距離跟隨控制

系統設定一目標追蹤距離（例如 10 cm），並依據即時量測之距離誤差調整車體前進或後退行為，以維持與目標物之相對距離。當距離過近時車體後退，距離過遠時車體前進，以達成穩定跟隨效果。

第2章、硬體架構設計

2.1 系統架構

本系統以 **Arduino Uno** 作為核心控制器，負責整體感測資料擷取、控制邏輯判斷與致動輸出。系統整合感測輸入、狀態顯示與動力輸出等模組，其架構說明如下：

在感測輸入方面，系統配置 **兩組 HC-SR04 超音波距離感測模組**，分別安裝於車體前方左右兩側，用以偵測前方障礙物距離。各感測模組之 Trig 與 Echo 腳位皆透過 **Arduino Uno** 的數位輸入/輸出腳位連接，以進行距離量測與即時資料回傳。

在狀態顯示方面，系統設置 **四顆 LED 指示燈**，分別對應車體的前(綠)、後(紅)、左、右(藍)動作狀態。LED 由 **Arduino** 直接控制，用以即時顯示系統目前的決策結果，並作為除錯與狀態監控之輔助工具。

在動力輸出方面，系統採用 **兩組直流馬達 (DC Motors)** 作為主要驅動元件，並搭配客製化設計之馬達驅動電路。**Arduino** 透過控制驅動電路之輸入訊號，實現對馬達轉向、前進後退與啟停的控制，以完成車體運動。

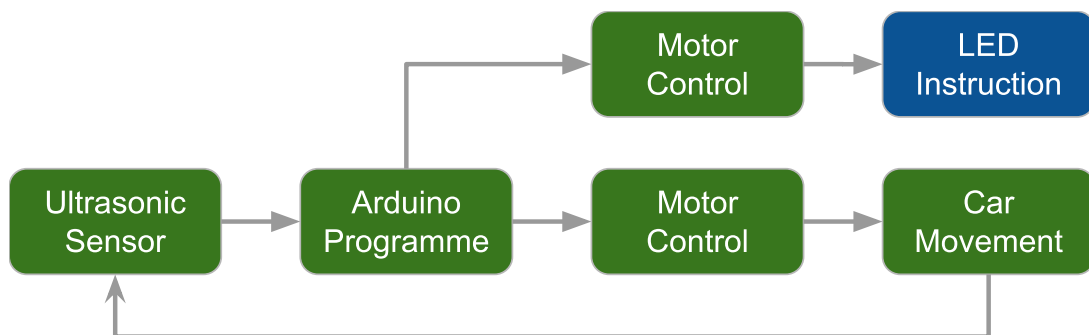


圖 2-1 系統架構圖

2.2 分立式驅動電路設計

本系統之動力驅動模組採用**分立式混合驅動架構**，由 **Arduino Uno** 負責產生控制訊號，並透過不同型態之電晶體進行**電流放大與功率隔離**，以分別驅動繼電器線圈與直流馬達負載。此設計可避免微控制器直接承受高電流負載，並提升整體系統穩定性。

在轉速控制方面，**Arduino Uno** 輸出之 **PWM** 訊號經由限流電阻後，輸入至 **C1384 NPN 功率電晶體** 之基極 (Base)。C1384 作為低側開關 (Low-side Switch)，負責放大 **PWM** 控制訊號所需之電流，控制馬達接地端之導通狀態。透過改變 **PWM** 之占空比 (Duty Cycle)，可調整馬達端的平均電壓，進而實現轉速控制。

在轉向控制方面，系統利用 **DPDT（雙刀雙擲）繼電器** 進行馬達正負極性之切換。由於 Arduino 之 GPIO 腳位輸出電流不足以直接驅動繼電器線圈，本設計使用 **S8550 PNP 電晶體** 作為繼電器之驅動元件。該電晶體負責放大 Arduino 所輸出的數位控制訊號，使繼電器線圈能夠穩定通電，進而驅動其內部磁鐵完成接點切換。

在保護機制方面，於繼電器線圈兩端並聯 **1N4001 二極體** 作為飛輪二極體（Flyback Diode），用以抑制線圈斷電瞬間所產生之反電動勢，避免高電壓突波對電晶體與控制電路造成損害。

綜合上述設計，本系統透過兩種不同型態之電晶體，分別負責**馬達轉速控制訊號**與**繼電器方向切換訊號**之電流放大，使控制邏輯電路與高功率動力電路有效分離，降低雜訊干擾並提升整體系統可靠度。雖然市面上已有整合型直流馬達驅動模組可供使用，本系統仍基於元件條件限制，採用分立元件實作等效之驅動電路。

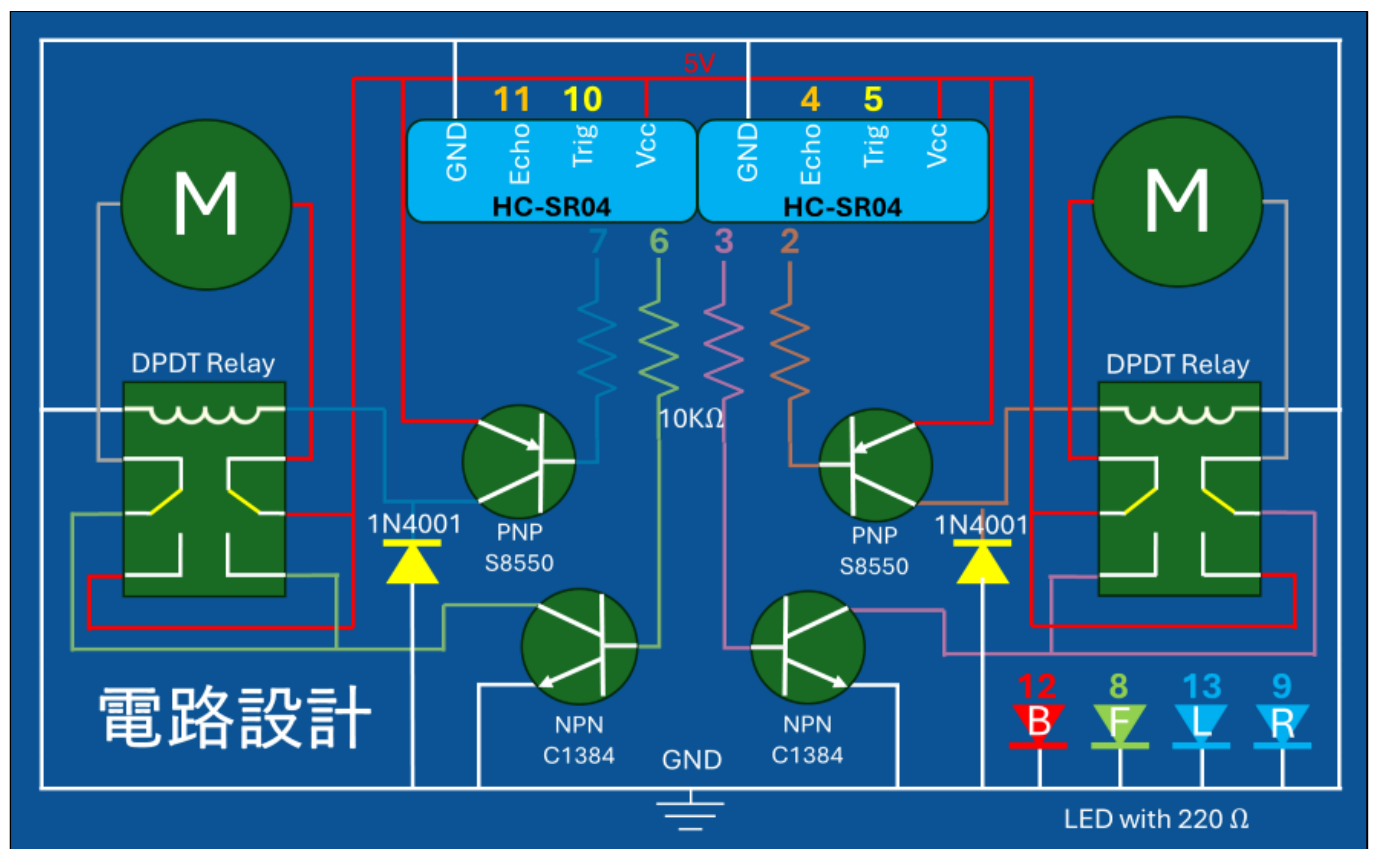


圖 2-2 電路設計圖

第3章、軟體與控制策略

3.1 感測訊號處理

3.1.1 超音波感測器訊號處理架構

本專案採用 HC-SR04 超音波感測器進行距離量測，並實作多層次訊號處理策略以確保數據可靠性。系統配置左右各一組感測器，左側感測器接至 Arduino Pin 10 (Trig) 與 Pin 11 (Echo)，右側感測器接至 Pin 5 (Trig) 與 Pin 4 (Echo)。序列通訊設定為 9600 bps，以利除錯輸出與數據監控。

3.1.2 中位數濾波器實作

為減少低成本超音波感測器所產生的雜訊影響，本系統採用五點中位數濾波法進行距離量測。與直接取平均不同，中位數濾波能有效排除單次極端雜訊對控制的影響，避免量測值偏移而導致系統運行不穩定。在每次量測中，感測器以 5 毫秒間隔連續取得五個讀值，並將讀值為零的情況視為最大距離 300 公分，以防止回波缺失造成計算異常。接著，系統對五個樣本進行排序，並以中間的第三個數值作為濾波後輸出，以保留真實訊號並排除極端值。距離計算公式如下：

$$distance(cm) = \frac{duration/2}{2}$$

其中 duration 為超音波往返時間（微秒），29.1 為聲速換算常數。

3.1.3 雙感測器協調機制

在主控制迴圈中，系統同步讀取左右感測器的濾波後距離值 (cm_L, cm_R)，並進行差分分析以判斷方向偏差。平均距離 ($cm = (cm_L + cm_R)/2$) 由左右感測器值計算而得，而方向差異 ($Diff = cm_L - cm_R$) 則取左側距離減去右側距離的結果。此差分值作為轉向控制的依據，以調整左右馬達的速度，從而實現平滑的目標追蹤。此外，系統透過序列埠即時輸出距離值與差分數據，方便除錯與性能監控，其輸出格式為：

R: [右側距離] | L: [左側距離] Diff:[差異值]

3.1.4 訊號處理參數設定

為支援距離判斷與控制決策，本系統定義了多項關鍵控制參數。目標跟隨距離 (set_dur) 設定為 8 公分，距離容忍範圍（死區, tol）為 ± 3 公分，以避免馬達因微小距離誤差頻繁調整。轉向判斷閾值 (turn_gap) 設定為 10 公分，當左右感測器距離差超過此值時，系統將啟動明顯的轉向調整。為實現平滑控制，本系統採用三段速度控制 (spd_h/m/l) 策略，高速、中速及低速分別設定為 160、140 與 100 (PWM 值)，可根據與目標的距離差動態調整馬達轉速，以兼顧追蹤精度與運動平穩性。

3.1.5 感測器驗證機制

為確保感測器運作可靠，本專案設計了獨立的測試程式 `test_ultra_sound.ino`，用以驗證超音波感測器的基本功能。測試包括觸發與回波協定的正確性、距離計算公式的準確性，以及音頻回饋機制，即依據測量距離觸發不同頻率的蜂鳴器聲音。在測試過程中，感測器會發送 10 微秒高電位的觸發訊號，接收回波並計算往返時間，進而轉換為距離值。這種驗證機制可及早發現感測器異常，並為主程式的訊號處理與控制演算法提供可靠的輸入數據。

3.2 控制演算法

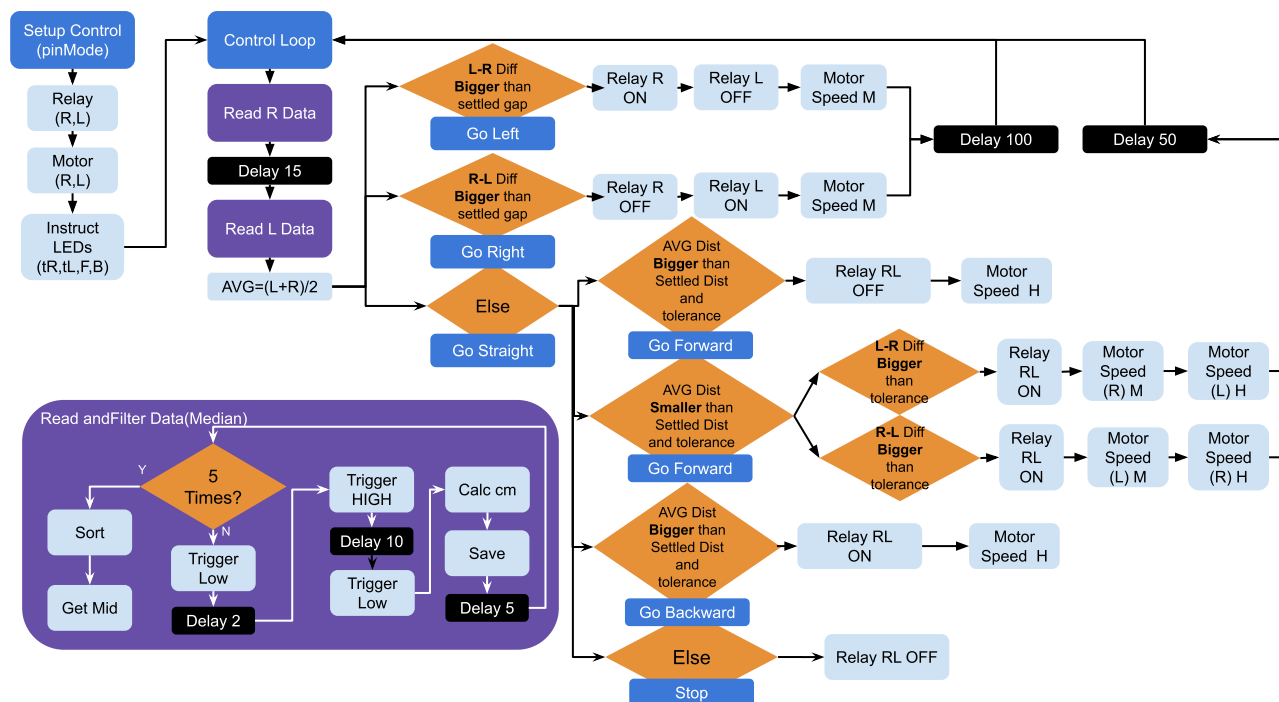


圖 3-1 Arduino 控制程式流程圖

本專案採用階層式控制架構，以優先權式狀態機作為決策核心，確保系統運行穩定且避免控制衝突。整體演算法可分為三個層次：方向校正、距離控制與死區穩定。

在方向校正層，系統首先判斷左右感測器的距離差是否超過設定閾值(`turn_gap`, 10 公分)。當差異超過此值時，系統會立即執行原地轉向操作，以迅速修正車身方向。左轉條件為右側感測器距離大於左側距離 ($cm_r - cm_l > turn_gap$)，右轉則反之($cm_l - cm_r > turn_gap$)。轉向操作透過控制繼電器切換馬達極性與 PWM 調速實現，同時啟動方向指示信號，以便除錯與狀態監控。

在距離控制層，系統在方向已修正的前提下，判斷車輛與目標之間的距離是否落在容忍範圍內 ($set_dur \pm tol$, 8 ± 3 公分)。若距離過大，車輛將前進；距離過小，則後退。為達成平滑追蹤，當左右感測器差異超過 4 公分時，系統會調整雙馬達速度實施差速控制，確保車輛在接近目標的同時保持穩定的運動方向。速度控制依據距離差異分為高速與中速，以兼顧追蹤精度與運動平順性。

在死區穩定層，當距離位於容忍範圍內時，系統停止所有馬達輸出，避免因微小誤差造成不必要的震盪。此策略可有效抑制系統的過度振盪，提升追蹤精度與整體穩定性。

所有控制參數均可透過序列埠進行即時調校，包括目標距離、距離容忍範圍、轉向閾值及三段速度控制（高速、中速、低速）。馬達控制採用分立式 H-Bridge 設計，方向透過 PNP 電晶體控制繼電器，PWM 由 NPN 電晶體執行速度調變，整合數位方向與類比速度控制，使車輛能精確地完成閉環追蹤任務。

整體而言，階層式決策架構確保方向修正優先於距離調整，結合中位數濾波的訊號輸入，使系統在面對環境雜訊或距離突變時仍能保持穩定追蹤。

第4章、功能驗證與問題分析

4.1 功能驗證

本專案在如圖 4-1 所示之半封閉式場地進行測試。該場域由模組化紙箱隔板構成，具備攜帶性與可重構性，能有效隔絕環境中的桌腳與雜物反射，為超音波感測器提供一個較低雜訊的聲學實驗環境。測試分別在空載（架高測試）與負載（車輛落地行駛）條件下進行，目的是驗證控制演算法在不同狀態下的功能與穩定性。實驗結果顯示，車輛能依據修正後的控制邏輯穩定完成二維動態追蹤、前進差速微調以及定距保持與死區控制等功能。

在二維動態追蹤方面，系統能即時偵測目標物的橫向移動，並依據左右感測器距離差判斷目標方向。當左右距離差超過設定門檻（turn_gap）時，程式會正確判定方位，並透過單邊馬達的控制實現原地或小半徑轉向，確保車輛快速回正，保持追蹤精度。

在前進差速微調部分，本車輛於直線追蹤目標時，即便出現輕微左右偏差（差異小於 turn_gap 但大於容許公差 tolerance），系統也不會直接啟動大幅轉向。相反地，透過左右馬達轉速的微調，例如左輪高速、右輪中速，車輛可柔性修正行進方向。這種策略有效減少了直線追蹤時的頻繁左右擺動，提升行駛平順度與控制穩定性。

在定距保持與死區控制方面，車輛能穩定維持與目標物的設定距離（set_dur）。當車輛接近目標距離以下時，會啟動直線後退以拉開距離；當距離落在正負容許公差範圍內，控制系統自動進入死區，停止馬達動力輸出，有效消除靠近平衡點時的微小震盪。綜合以上測試結果，階層式控制架構結合差速微調與死區控制，成功實現閉環運動控制的預期功能。

【實測影片紀錄】 觀看完整功能驗證影片：<https://youtu.be/PnYiFTAQHQA>



圖 4-1 攜帶式半封閉抗干擾測試場域

4.2 異常排除案例研究

在實際操作過程中，本專案遭遇了多項干擾因素，包括感測器訊號雜訊、硬體結構限制以及控制邏輯不完善所導致的車輛震盪等問題。我們採用「發現問題、分析變因、實作對策」的工程方法逐一克服這些困難。

首先，感測器與訊號干擾是主要挑戰之一。左右兩顆 HC-SR04 超聲波感測器若同時觸發，會互相接收到對方回波，導致距離判斷錯亂，進而引發控制誤差。為此，我們在程式中加入分時多工機制，使左右感測器讀取時間錯開，每次讀取間隔 15 毫秒，避免回波互相干擾。此外，測試場地的桌腳、雜物及其他反射面也可能造成非預期反射波，導致車輛誤觸發停止或轉向指令。我們透過物理隔離的方式，利用紙板搭建測試場地，屏蔽環境雜物，創造單純的聲學環境。

早期程式中，loop 函數執行速度過快或 Trigger 脈衝寬度不足，可能造成回波重疊，進而影響距離判斷精度。我們針對時序進行優化，確保 Trigger 脈衝高電位大於 10 微秒，並在每次取樣之間增加緩衝延遲，有效避免回波重疊。同時，副廠感測器易受外界干擾而產生極端值，因此在讀取距離時採用中位數濾波策略，透過多次讀取後取中位值來濾除突波，使距離判斷更穩定可靠。

硬體與機構層面同樣帶來挑戰。例如，轉向不完全或單邊卡頓主要是由地面摩擦係數不均及 USB 或電源線的拉扯限制車體運動造成。我們透過提高轉向 PWM 輸出以克服靜摩擦力，同時將線材架高或預留長度以減少物理阻力。馬達轉速不均的問題則來自電池瞬間電壓下降及麵包板接觸不良，我們採取電源分離與穩壓策略，並加固機構以減少震動影響。右轉頓挫問題源於右側副廠感測器波束角過廣，我們在發射端加裝遮罩限制偵測角度，成功消除特定方向的誤判。

控制邏輯層面也曾出現直線追蹤時的蛇行震盪。在早期設計中，系統只要偵測到左右誤差就會觸發轉向指令，即使偏差很小也會切換繼電器，造成車身不斷左右擺動。為解決此問題，我們在「前進」狀態中加入差速微調機制，保持繼電器極性不變，只透過 PWM 調整左右馬達轉速以微幅修正方向。這一改動大幅提升了直線追蹤的流暢度與穩定性，並減少了繼電器頻繁切換造成的磨損。

綜上所述，本專案透過感測器訊號處理、控制策略微調以及硬體與場域設計改良，有效改善了直線追蹤震盪、轉向不穩及感測器干擾等問題，使車輛在半封閉、受控的實驗環境中能穩定完成目標追蹤與距離控制。然而，由於副廠超音波感測器本身的偵測角度與精度限制，以及在複雜環境下存在的非預期反射與雜訊，系統在開放場域或特定方向仍可能出現誤判或轉向不完全的情況。整體而言，本專案成功展示了控制演算法與軟硬整合的可行性，並提供了實際操作中對工程設計與改良策略的成果。

第5章、結論與未來展望

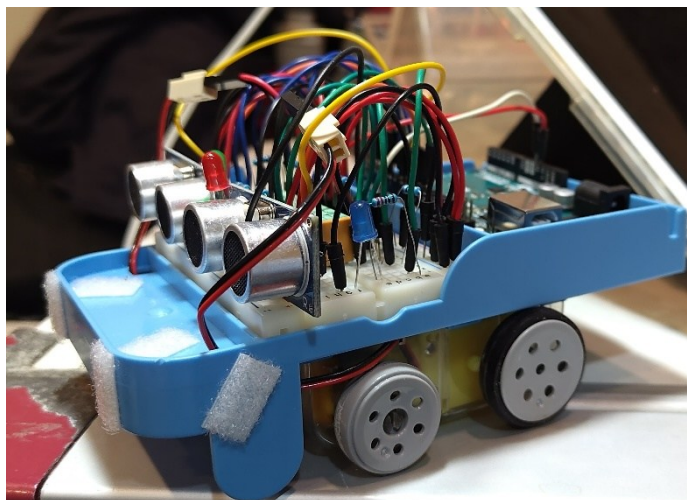


圖 5-1 超音波自走車側面實體圖

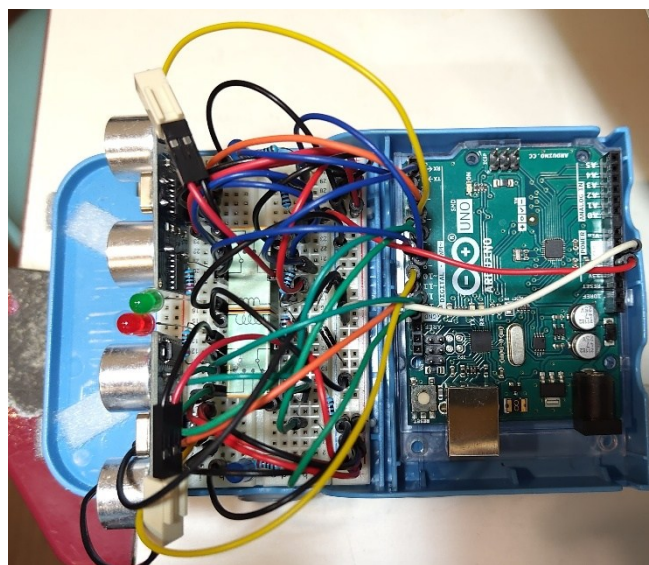


圖 5-2 超音波自走車俯視實體圖

5.1 專案總結

5.1.1 技術成就與實現目標

本專案成功建置了一個基於超音波感測器的自主車輛閉環控制系統，使車輛能在半封閉的實驗場域中完成目標追蹤與距離維持功能。專案的核心技術包括自製離散元件 H-Bridge 馬達控制電路、強健的訊號處理方法以及階層式控制架構。離散元件 H-Bridge 設計利用 PNP 與 NPN 電晶體分別控制繼電器方向及 PWM 速度調變，實現雙向馬達控制，而 5 點中位數濾波器則有效降低 HC-SR04 超音波感測器的雜訊，搭配三層決策機制（方向校正、距離控制、死區穩定）確保了系統在直線或輕度轉向時的穩定性。

5.1.2 教育價值與學習成果

專案提供了完整的硬體與軟體協同設計經驗。在硬體層面，學習了電流路徑設計、功率隔離、反電動勢保護電路實作以及元件選型與參數計算。在軟體層面，則涵蓋即時系統程式設計、數位濾波器演算法實作與狀態機控制邏輯設計。這些經驗有助於理解低成本控制系統在實務應用中的挑戰與解決方法。

5.1.3 系統效能評估

在實驗中，本系統可維持目標距離的死區範圍內，轉向反應在 10 公分差異時觸發原地轉向，取樣頻率約為 10 至 20Hz。中位數濾波器可有效抑制約 20 至 40% 的異常讀值，而死區控制機制則避免了馬達震盪現象。階層式決策架構也成功降低了控制指令之間的衝突。然而，廉價超音波感測器對環境雜訊敏感，且在複雜場域中仍可能出現誤判或轉向不完全的情況，例如副廠感測器在轉彎時的表現不穩定，限制了系統在開放場域的可靠性。

5.2 改善策略與未來展望

目前市面上已有多種整合型直流馬達驅動模組可供 Arduino 使用，能夠快速且穩定地實現雙向轉速控制功能。若在元件取得條件允許之情況下，未來可考慮採用此類模組，以降低電路複雜度並提升系統效率。本專案則基於實驗元件條件限制，選擇以分立元件實作等效之馬達驅動電路，作為控制與功率電路設計之學習與實作重點。

5.2.1 硬體架構優化

在硬體層面，整合型馬達驅動模組（如 L298N 或 DRV8833）可取代現有離散 H-Bridge 電路，降低設計複雜度並提升可靠性。同時，可增加電流監控功能以實現過載保護。感測系統方面，可透過多感測器融合或陣列設計來提高環境適應性，並改善空間解析度，進而降低單一超音波感測器所造成的限制。

5.2.2 電源供應系統改善

為提升系統穩定性與持續運作能力，本專案建議將馬達驅動與控制電路分離供電，避免 Arduino 或感測器因電流不足而產生異常。同時可在馬達電源端加入大容量電容穩定電壓，並結合簡單的電壓監控或鋰電池管理系統，以確保整體系統在運行過程中不受電源波動影響。

5.2.3 機械結構與連接可靠性

將麵包板電路改為 PCB 設計，並使用標準連接器如 JST 或 XT60，可減少震動造成的鬆脫問題。輪胎材質、輪距及底盤高度的調整，可提升車輛在不同場地的適應性，並透過簡易懸吊或防滑設計增強穩定性。

5.2.4 控制演算法與軟體架構

引入 PID 控制器與適應性參數調整，可根據車速、環境噪音與電池電壓自動調整控制參數，提升追蹤精度與轉向穩定性。軟體架構上，透過模組化程式設計、實時作業系統整合以及看門狗機制，可增加系統維護性與可靠性，方便未來進行擴充。

5.2.5 系統整合與擴展

未來系統可朝模組化設計方向發展，方便元件整合與維護。透過基本的無線通訊介面，即可實現遠端參數調整與系統監控，而簡單的顯示介面可提供即時狀態回饋。這些改善將提升專案的實用性，並為後續功能擴展提供基礎。

第6章、 參考文獻與專案資源

- [1] 專案原始碼 (GitHub Repository): https://github.com/Annie04082020/CSL_Ultrasonic_Car
- [2] 專案技術文件 (DeepWiki): https://deepwiki.com/Annie04082020/CSL_Ultrasonic_Car
- [3] HC-SR04 Ultrasonic Sensor Datasheet
- [4] S8550 PNP Transistor / C1384 NPN Transistor Datasheets