

有感而發 - 結合感測器與自動控制之 自駕車煞車系統評估

黃昱誠

學生

國立宜蘭高級中學

E-mail: stanely3636@gmail.com

黃昭銘 *

老師

宜蘭縣宜蘭市中山國民小學

E-mail: stanely503@gmail.com

摘要

自駕車的相關研發日益受到重視，尤其在複雜的交通運輸中提供更安全、更有效的防護是自駕車的發展重點之一。本次研究主要探究不同距離感測器與不同 PID 自動控制組合，針對靜物與移動障礙物進行煞車成效分析。研究結果顯示不同的距離感測器之精準度與穩定性不同，在固定障礙物狀態下雷射距離感測器因為精準度和穩定度較高，而超音波較容易受到外界干擾，所以比較不精準。由於超音波距離感測器的偵測範圍廣，所以可以事先偵測到移動障礙物，反而提供自動控制較多的反應時間，在加速度的表現上較為穩定，自動控制表現上 P 控制的情況下機器人常常卡在最後一點點的距離，不過超音波感測器因為會有點誤差，所以反而會比雷射感測器快停下來；PI 控制因為可以消除穩態誤差，所以時間消耗都是最短的；PD 控制原本的功用應該是快速修正，由於 D 控制的增益常數 (Gain) 過大，影響 D 控制作用，因此 PD 控制的效果沒有特別突出的部分。

關鍵詞：機器人、PID 自動控制、外部感測器、自駕車

* 為本文通訊作者

壹、研究背景與動機

自駕車的相關研發日益受到重視，尤其在複雜的交通運輸中提供更安全、更有效的防護是自駕車的發展重點之一。近年來全世界各家汽車公司與 Google 公司投入大量經費進行自駕車的研發，自駕車的應用主要是利用感測器偵測外部環境，透過電腦運算與人工智慧（Artificial Intelligence, 簡稱 AI）協助達成自動駕駛的目的（王傑智、黃福銘，2021）。

臺灣已經有許多縣、市都規劃自駕車的模擬場域，透過這些場域協助自駕車發展；不論是車輛結構、軟硬體系統整合，提供更多資料與樣本協助自駕車早日達成無人駕駛的目標。

本研究之研究動機主要是來自筆者先前參加的 VEX 機器人競賽，在競賽中有一項比賽稱作技能挑戰賽（Skill Challenge），這項競賽主要是利用遙控器（Driver）及透過程式編程與結合感測器應用讓機器人自動完成任務（Autonomous）的項目，為了在 Autonomous 比賽中獲得較佳的成績，筆者於 2023 年利用業界經常使用的自動控制方式 PID 進行實驗，透過實驗得到初步的認識與應用。

自駕車的發展核心主要聚焦在車上乘客、車輛與道路安全，如何降低突發狀況讓車輛迅速煞車或是避障減少事故發生（翁國樑、李玉忠、柯明寬、徐錦衍，2019），因此本研究主要是透過結合機器人零件設計自駕車底盤結構，經由距離感測器模擬自駕車目前常用的感測器，並結合 PID 自動控制軟體編程，針對車輛前方障礙物進行煞車反應評估。

貳、文獻探討

本研究主要以透過機器人零件組裝自駕車底盤，並安裝距離感測器，透過 PID 自動控制程式編程，針對靜物與移動物體進行自駕車煞車反應評估，為詳細說明本研究之目的，以下將針對此次所涉及的領域：自駕車、PID 自動控制與 VEX 機器人等三方面進行介紹：

一、自駕車簡介

（一）自駕車原理

自駕車的基本原理是藉由外部感測器偵測前方路況，將收集的訊息經由電腦運算分析，最後決定車輛的反應措施。早期因為這些資訊設備不足，因此到了 1980 年才出現第一台自駕車，之後隨著科技的發展與進步，才陸續出現我們現在所見的自駕車。

(二) 自駕車分級

目前的自駕車共分成六級 (SAE: Society of Automotive Engineers) 等級越高, 自動的項目就越多 (任苙萍, 2020; 陳敬典, 2020), 以下為不同級別的自動化水平: SAE Level 0 無自動、SAE Level 1 擁有一個別自動的項目 (例如: 車道偏離警告、前碰警告等, 為現今市面上大部分車子的自動化水平)、SAE Level 2 多項功能已自動化 (可在一些環節達到無人駕駛, 但駕駛仍須密切注意, 並做好接管駕駛的準備)、SAE Level 3 無人駕駛的前身 (已經可以獨自完成部分無人駕駛, 駕駛可以在一定程度的監控下無需自行操作)、SAE Level 4 駕駛可以在無人駕駛時不使用監控 (僅限於快速車道或車輛較少的路段上)、SAE Level 5 已擁有和人類相等的駕駛能力 (車子不需要方向盤或油門, 無論什麼情況皆可無人駕駛)。

二、PID 控制

(一) PID 控制介紹

何謂 PID 控制? PID 為自動控制系統的一種操作模式。在 Borase 等人 (2020) 回顧 PID 的文獻中指出, PID 控制在自動控制領域應用有很長的歷史, 最久可追溯至瓦特於 1769 年改良蒸汽機與調節器 (Governor) 的年代。瓦特所改良的蒸汽機與調節器是首次應用所謂回饋 (Feedback) 概念的裝置。當時這些概念尚未正式形成 PID 控制的原始架構; PID 的概念一直到 1922 年 Nicholas Minorsky 為美國海軍設計船隻自動轉向航行設計時才正式提出 (Bennett, 1996; Hågglund & Guzmán, 2024)。

將 Borase 等人 (2020) 文中所提 PID 的架構進行整理並繪製圖 1。從圖 1 可看出, 在自動控制過程中當開始執行 (Set Point) 時, 對偵測與原來設定值的差異 (Error), 然後透過比例、積分及微分的演算法, 計算出與預測量的數值然後回饋給 Control Output, 接著進行後續任務調整。

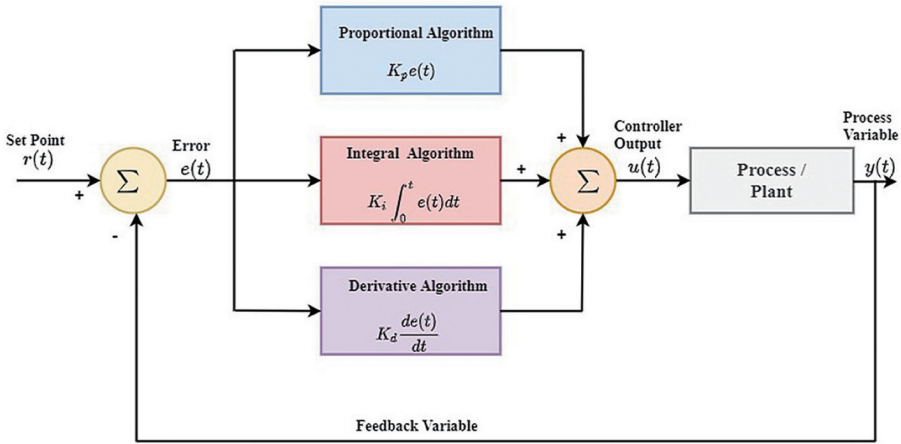


圖 1 PID 自動控制架構圖

PID 控制是將三種不同控制演算法結合在一起的統稱，他們分別為最基礎的「比例控制」（P 控制）（Proportional Control）、「積分控制」（I 控制）（Integral Control）和「微分控制」（D 控制）（Derivative Control）（黃冠淪、黃英哲，2018a）。

(二)PID 運作理論

PID 的運作理論牽涉到複雜的演算公式，本文嘗試以無人機為例針對 PID 自動控制進行簡單說明，首先以「比例控制」（Proportional Control）來說：假設有一台無人機要飛到離地 50m 的空中，一開始因為原始高度和目標高度的誤差較大，無人機就會產生較大的控制量以便無人機快速達到目標高度，當無人機和目標高度接近時，誤差變小，無人機的控制量就會變小，最終，無人機將停在接近目標高度的地方，但並非目標高度，原因是因為無人機和目標高度的誤差小，控制量也會變小，但產生的控制量並不足以使無人機上升，只得停在原位，這就是所謂的「穩態誤差」。

為了解決這個問題就得使用「積分控制」（Integral Control），積分控制會根據前面所累計的誤差值來調整控制量。以上述無人機的例子來說，因為無人機遲遲沒有達到目標高度，誤差值就會一直累積，進而增加控制量，消除穩態誤差。不過光靠 P 和 I 控制還是有一些缺陷，若在無人機達到平衡時出現一陣風，導致無人機向下飛，這時就是用「微分控制」（Derivative Control）的時機，微分控制能夠因為最近的誤差改變量立即調整控制量，使無人機儘速地回到目標高度。

經過多年的應用與改進，PID 控制在我們現代生活中應用範圍非常廣泛，包含汽車自動巡航控制（Cruise Control），冷氣機恆溫控制、無人機運用等都需要仰賴 PID 控制（Åström & Hägglund, 2001; Hägglund & Guzmán, 2024）。

綜合上述 PID 控制（Proportional, Integral, Derivative Control），可知廣泛運用在自動控制設計上，「比例控制」（Proportional Control）屬於比較簡單的設計，而「積分控制」（Integral Control）與「微分控制」（Derivative Control）則相對較為複雜與困難。

三、機器人與外部感測器

（一）VEX 機器人介紹

VEX 機器人是世界上最大的機器人比賽，原因是該項比賽對於學生的自主學習有很好的幫助，在準備過程中，學生需針對各賽季主題進行分析並撰寫程式與工程筆記，於比賽前還需要與另一隊來自不同地區的賽隊進行討論，避免在比賽過程中出現失誤，而透過此交流互動不僅可以增加學生於不同方面的技能，更能訓練學生與他人之間的溝通協調能力。除此之外，在賽程的空檔，評審會到不同賽隊進行口試，隊員必須對評審介紹自己賽隊機器人的特色，藉此確認機器人皆由賽隊成員親手組裝外，同時也訓練學生簡介說明的能力。

（二）外部感測器運作原理

於筆者先前的研究中，曾經使用的外部感測器是陀螺儀感測器（Gyro）和觸控 LED 感測器（Touch LED），以下針對這兩款感測器進行說明：1. 陀螺儀感測器：根據 VEX IQ 機器人基礎篇（周偉謨，2018）說明，陀螺儀感測器每秒可支援 500 度的測量旋轉速率，且測量速度每秒達 3,000 次，測量速度快，也很準確，這便是它可以減少編程難度的重要原因。2. 觸控 LED 感測器：為啟動和觀測程式是否完成的利器之一，不僅具有 16 位色元，可以發出數以千計的顏色，還同時具備接受並給予反饋的觸控功能，這也使得它在程式賽中佔有一席之地。

此次，本研究將嘗試使用超音波感測器與雷射感測器進行研究；這兩種感測器為目前於自駕車較廣泛被使用的感測器，透過這兩種感測器來偵測前方障礙物。

四、小結

本研究目的主要利用機器人結構與感測器，配合不同的 PID 控制方式，模擬自駕車的簡單運作原理，並探究哪種組合或方式對於自駕車遇到障礙物的緊急煞車效果最佳。

本次研究的問題可以區分兩大類：第一類為感測器的差異，本次採用超音波測距感測器與雷射感測器。兩個感測器的運作原理不同，因此探究的問題為兩個感測器分別遇到障礙物緊急煞車效果分析。第二類則是針對 PID 控制進行比較分析。主要探討獨立應用 P、I、D 控制與任兩種自動控制方式結合在遇到障礙物緊急煞車效果。綜合上述說明將本次研究設計繪製成研究架構圖 2。

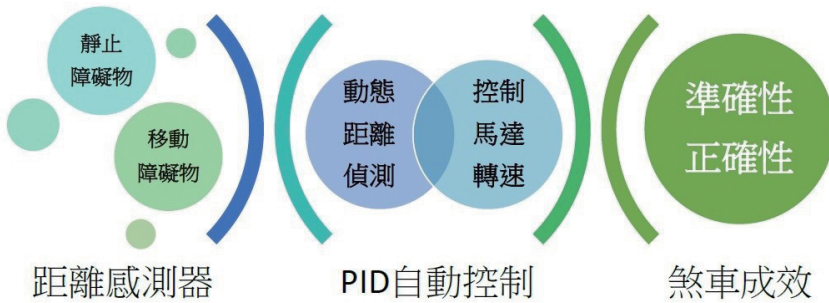


圖 2 研究架構圖

依照圖 2 所示，主要研究採用 VEX 機器人零件與兩款距離感測器組成自駕車，透過程式編程方式撰寫 PID 自動控制程式，透過感測器與 PID 程式交互應用，針對靜止與移動兩種障礙物情境，動態監控車輛馬達輸出，完成煞車任務，針對煞車距離表現進行分析評估（黃冠淪、黃英哲，2018b）。

參、研究實施與設計

本次研究的設備和器材可以分成三大類，第一類為測試場地，第二類為機器人零件，第三類為編程工具，以下進行此三大類器材介紹：

一、研究設備與器材

(一) 實驗場地

VEX IQ 的比賽場地有固定規格，必須使用符合大會規格的場地，而筆者本次研究所使用的是 2020-2021 年的賽場規格，大小為 8 英尺乘以 6 英尺的長方形場地（如圖 3 所示）。

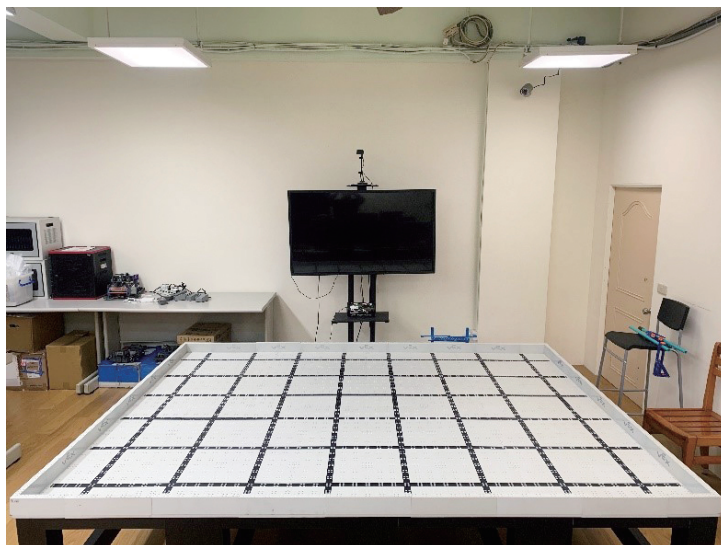


圖 3 研究場地

(二) 機器人零件

VEX IQ 規定只能使用固定規格的零件，且不可進行裁切或焊接等動作。本次實驗的零件可以分成兩類，第一類是基本零件，第二類則為控制與感測器設備，以下將進行簡單的說明：

1. 基本結構材料

基本結構包含積木、輪軸、連接器、插銷、馬達和車輪等零件如圖 4 所示。

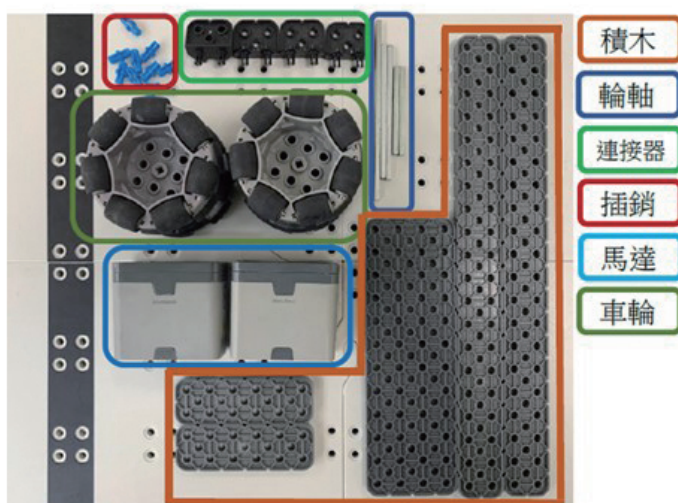


圖 4 基本結構材料

2. 控制與感測器設備

控制與感測器設備則是像觸控 LED 感測器、陀螺儀感測器或主機這類的零件（如圖 5 所示），可以藉由感測器本身去察覺外部的變化，進而將訊號傳送給主機，再進行調整。



圖 5 控制與感測器設備

本次研究主要使用的距離感測器為超音波距離感測器與雷射距離感測器（如圖 6 所示）。兩款距離感測器的運作原理不同：超音波距離感測器主要是透過超音波發送與接收方式，針對前方物體的距離進行測量；雷射距離感測器則是利用發射與接收雷射光束，針對前方物體距離進行測量。

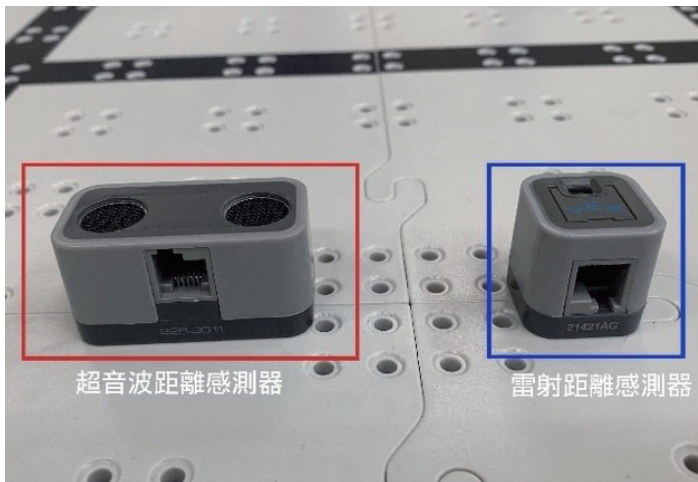


圖 6 超音波與雷射距離感測器

實際組裝之後的車輛結構如圖 7 與圖 8 所示，圖 7 為安裝超音波距離感測器的車輛外觀，圖 8 則是安裝雷射距離感測器的車輛外觀。

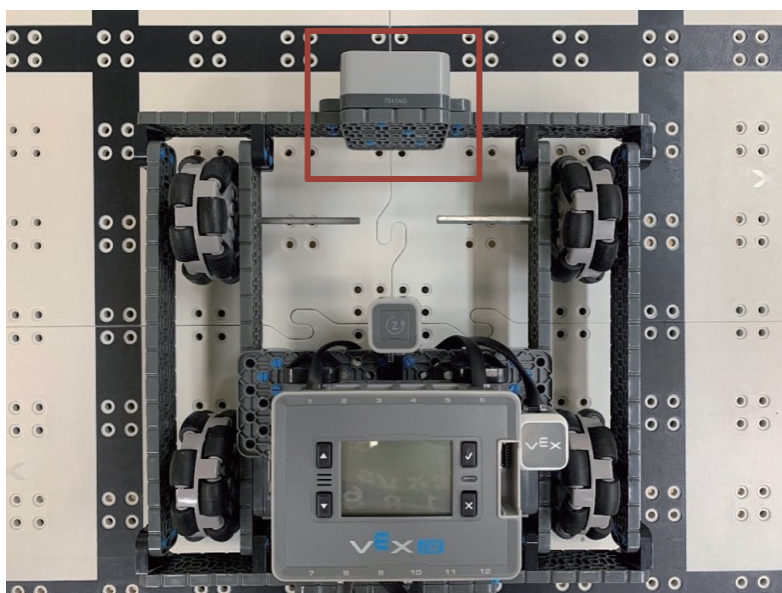


圖 7 超音波距離感測器研究車輛外觀

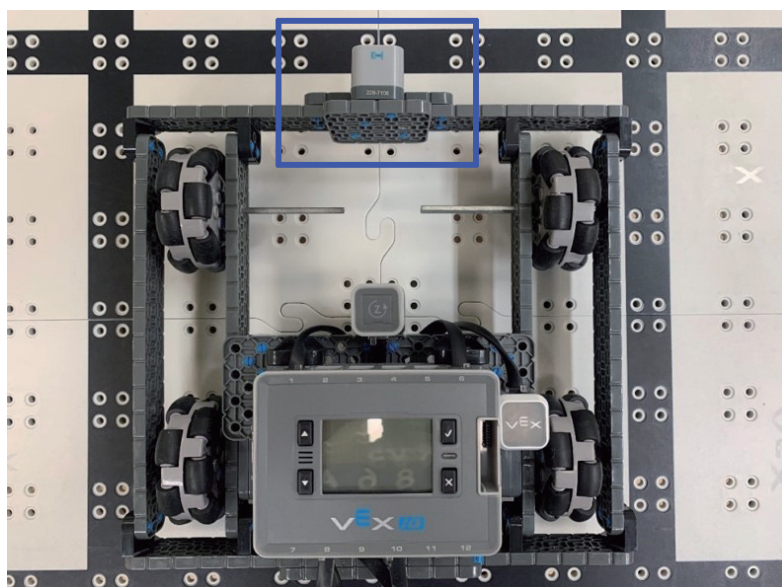


圖 8 雷射距離感測器研究車輛外觀

(三) 編程器具

本次研究主要探究「程式編程」與「使用外部感測器」對於「機器人表現」成效評估，所使用的編程軟體為 VEX 官方釋出的 VEXcode IQ V2.3.0 版本¹，進行本次研究程式編程的軟體（如圖 9 所示）。

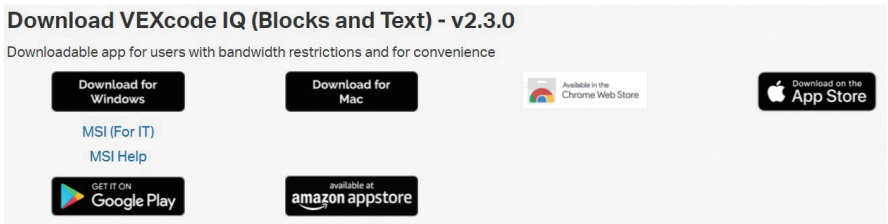


圖 9 超音波與雷射距離感測器

本次所使用的資訊設備為 ASUS 公司生產型號 C214M 的 Chromebook 擔任程式編程資訊設備，所以下載的 VEXcode IQ 版本為與 Chrome 相容作業系統版本（如圖 10 所示）²。

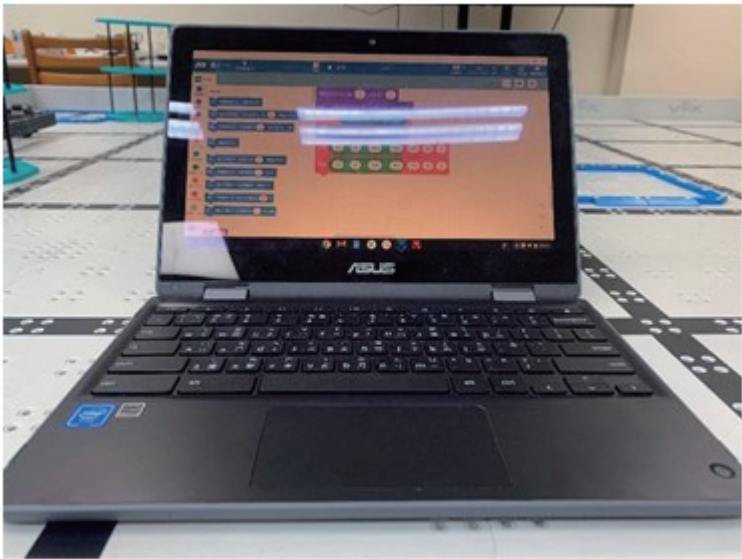


圖 10 C214M 與 VEXcode IQ 操作示意圖

¹ 參考網址：<https://www.vexrobotics.com/vexcode/install/iq>

² 相關規格請參考：<https://www.asus.com/tw/laptops/for-home/chromebook/asus-chromebook-flip-c214/>

二、研究過程與步驟

本次研究主要透過不同距離感測器與不同 PID 自動控制組合模擬自駕車在遇到靜物與移動物體時的煞車表現，為詳細介紹本次研究針對研究變因、研究處理與資料收集繪製成研究架構圖（如圖 11 所示）。

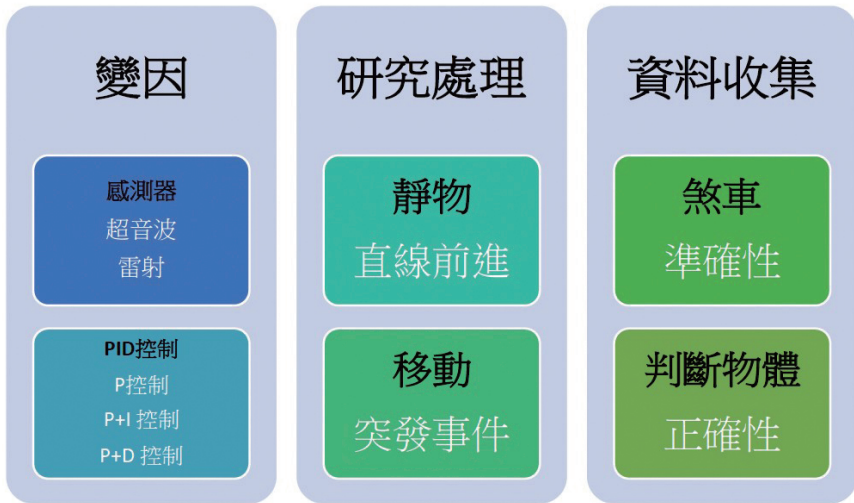


圖 11 研究架構圖

由圖 11 可知，本次研究的變因有兩大類：（一）、感測器與（二）、PID 控制。其中感測器包含超音波距離與雷射距離感測器兩款，實驗中將針對距離感測器應用提出兩種組合方式：（一）、超聲波感距離感測器與（二）、雷射距離感測器。

另外一個變因為 PID（Proportional, Integral, Derivative Control）控制，PID 控制包含：（一）、「比例控制」（Proportional Control，簡稱 P 控制）是比較簡單的設計；（二）、「積分控制」（Integral Control，簡稱 I 控制）與（三）、「微分控制」（Derivative Control，簡稱 D 控制）是比較複雜困難的，所以筆者之前主要是採用比例控制方式來進程式編程。本次研究將針對 P 控制、P+I 控制（以下簡稱 PI 控制）與 P+D 控制（以下簡稱 PD 控制）進行研究設計。

上述三種控制的程式編成採用模塊（Block）來進行編程，圖 12 為 P 控制的程式模塊示意圖，圖中圓形放大區域所設定的 K_p 值為 -0.5 。

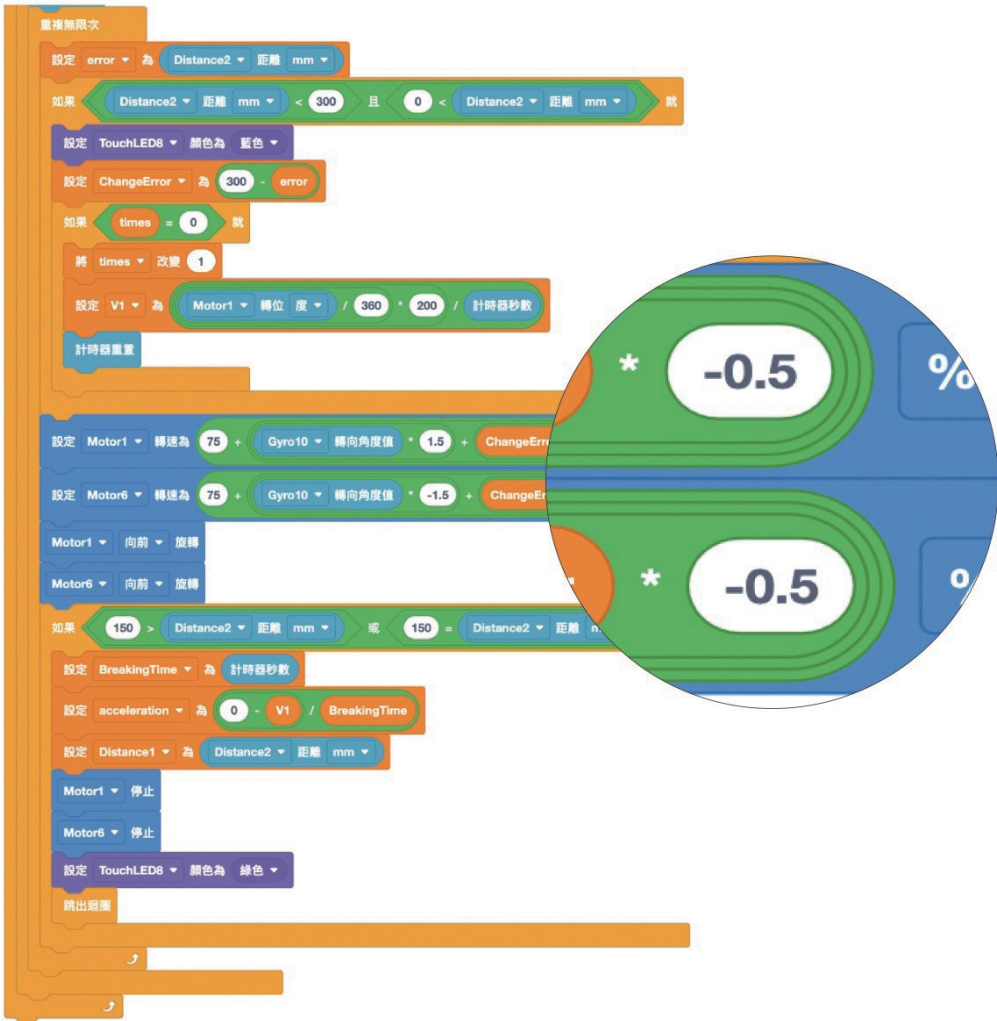


圖 12 P 控制程式模塊

圖 13 為 PI 控制的程式模塊示意圖，圖中圓形放大區域所設定的 Ki 值為 0.00045。

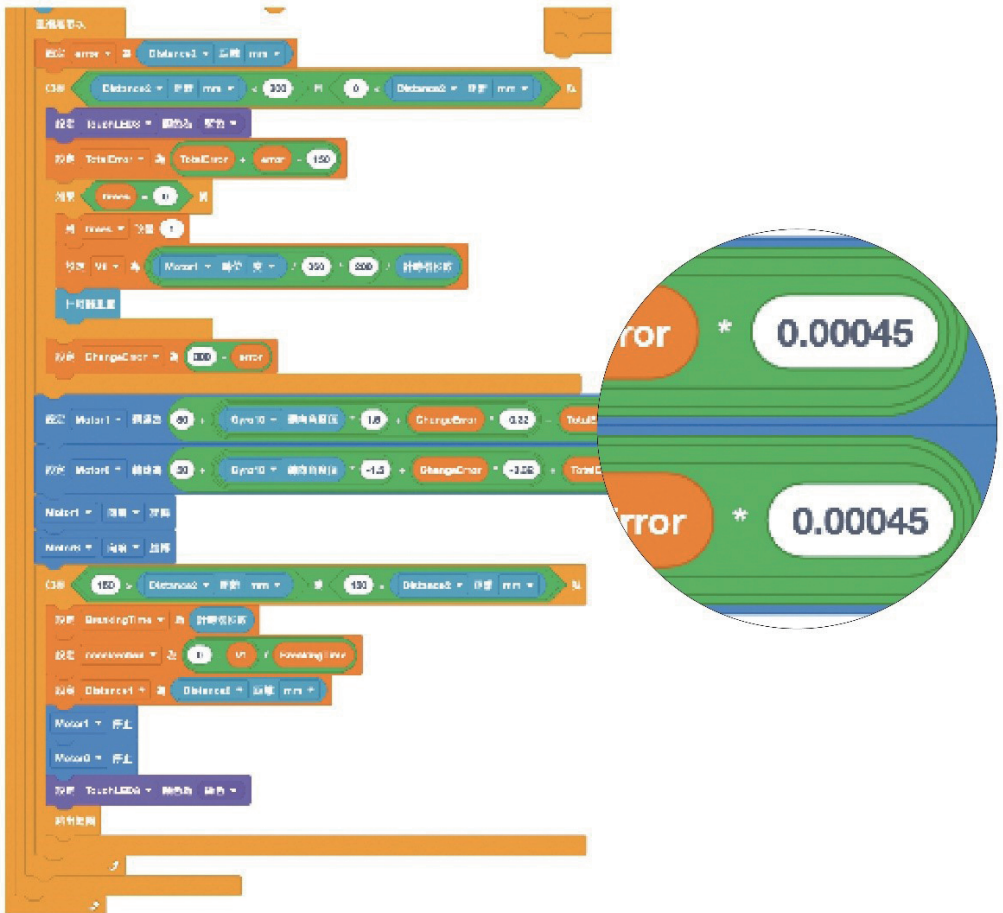


圖 13 PI 控制程式模塊

圖 14 為 PD 控制的程式模塊示意圖，圖中圓形放大區域所設定的 Kd 值為 0.2。



圖 14 PD 控制程式模塊

資料收集主要是利用場地規劃 46cm 的測試車道，在測試車到終點放置障礙物，研究設計希望自駕車能夠在偵測前方障礙物之後進行煞車，最後煞車距離最好離障礙物 15cm。為清楚介紹研究場地設計，將上述說明繪製成場地規劃圖（如圖 15 所示）。

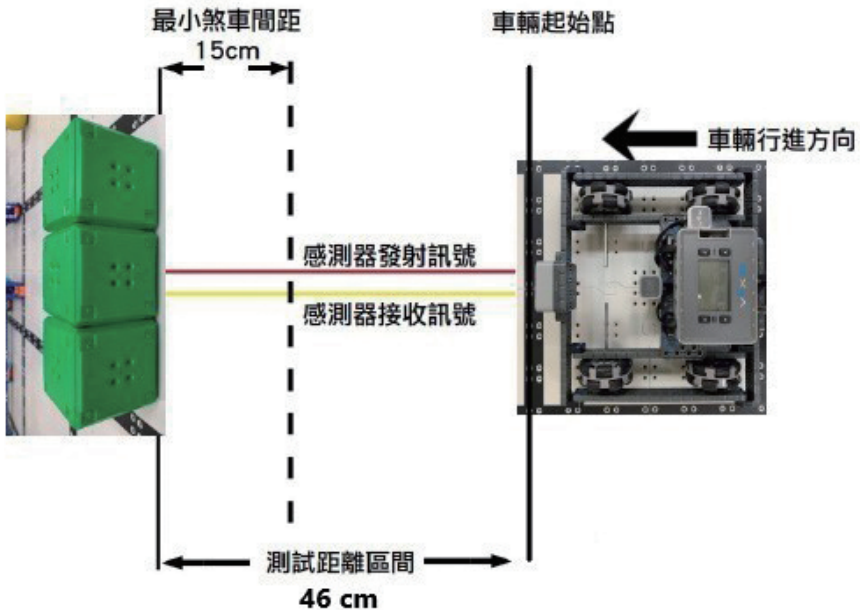


圖 15 場地規劃圖

圖 15 實驗場地，筆者主要設定自駕車距離感測器在偵測到前方障礙物時進行減速，最後需要在距離障礙物 15 公分處將車輛完全停止下來，筆者收集完全煞車後車輛前方距離障礙物的最終距離數據，透過這些數據來判斷煞車的準確性。

移動障礙物的設計主要利用感測器接收測試車經過的訊號，然後啟動馬達拉動一個綠色立方體，最後在測試車正前方停下來。針對移動障礙物實驗同樣要測量車輛完全煞車時與障礙物的距離，以及感測器能否順利偵測到突發的移動物體。不論是靜物或是移動障礙物，筆者採用長、寬、高皆為 7.62cm (3 英吋) 的綠色立方體 (如圖 16 所示)。

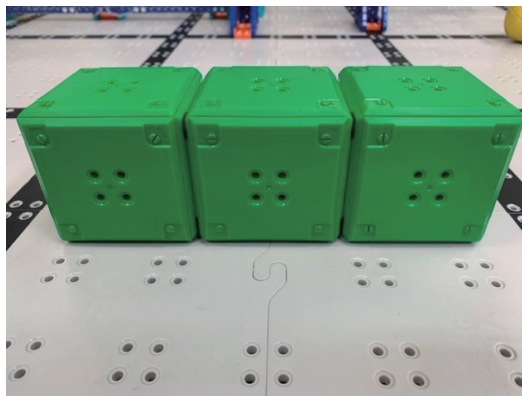


圖 16 障礙物立方體示意圖

為了精確測量不同距離感測器，針對移動障礙物場地的設置，採用另外一台機器人主機與雷達距離感測器的協助，透過拖曳的方式來拉動障礙物，詳細的場地與設備請參閱圖 17。

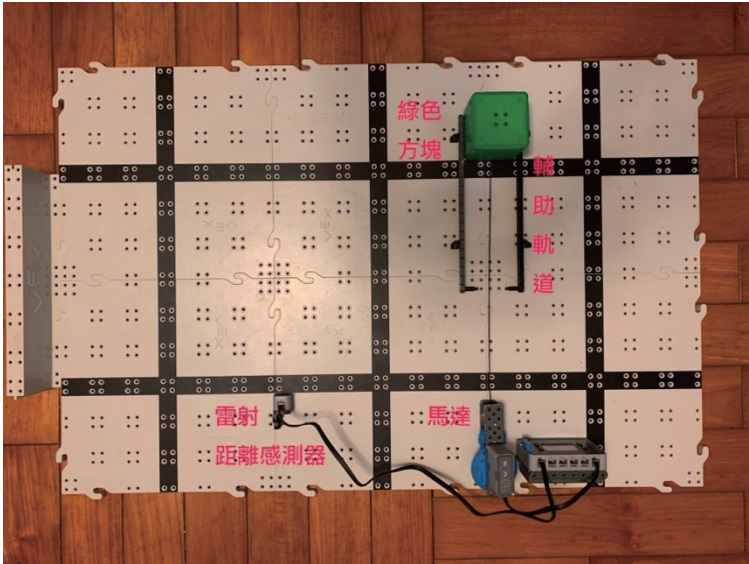


圖 17 移動障礙物實驗場地圖

圖 17 中透過雷達距離感測器偵測機器人通過的瞬間，接著再啟動主機撰寫程式旁邊的馬達，當馬達轉動時，連結的絞鍊開始轉動，透過連接在綠色方塊障礙物的繩子拉動方塊，在方塊底下安置輔助軌道讓障礙物保持直線前進，並在軌道的終點放置固定器使綠色方塊可以停下來。

肆、研究結果

本次研究主要探討安裝在測試車上，兩款不同裝置的距離感測器，並分別使用三種不同自動控制程式，在面對前方靜止障礙物與移動障礙物的煞車效果表現，經過實驗、資料收集與分析後，相關研究結果將在本章節進行說明。為了讓結果有系統性地呈現，以下分為四個部分進行說明：第一部分相關描述性資料；第二部分感測器分析比較；第三部分不同的自動控制說明及第四部份深入探討測試車的準確性與正確性。

本次研究採用兩種不同的距離感測器進行分析，資料收集包含：

1. 測試車接收前方障礙物訊息後，煞車動作時所利用的加速度值。
2. 煞車後，測試車與障礙物之間的距離。
3. 紀錄測試車煞車過程所需要的時間。

本次研究採用的距離感測器為超音波距離感測器 (Ultrasonic) 與雷射距離感測器 (Laser)，自動控制程式分為 P 控制、PI 控制與 PD 控制。為了資料能夠簡潔呈現，針對應用在研究結果中的圖片與表格中利用英文代碼表示不同的實驗處理方式，以下將每一種實驗處理利用英文代號表示，其英文代碼說明如下：

超音波距離感測器 (Ultrasonic) + P 控制 = UP

超音波距離感測器 (Ultrasonic) + PI = UPI

超音波距離感測器 (Ultrasonic) + PD = UPD

雷射距離感測器 (Laser) + P = LP

雷射距離感測器 (Laser) + PI = LPI

雷射距離感測器 (Laser) + PD = LPD

一、描述性資料

以下將針對超音波距離感測器與雷射距離感測器配合三種自動控制程式 (P 控制、PI 控制與 PD 控制) 所收集的結果進行描述性資料說明，每一種自動控制程式皆完成 20 次的測試。

(一) 固定障礙物加速度

首先將收集到的加速度資料進行繪製，圖 18 顯示本次研究中所收集到的加速度資料數值分布圖。

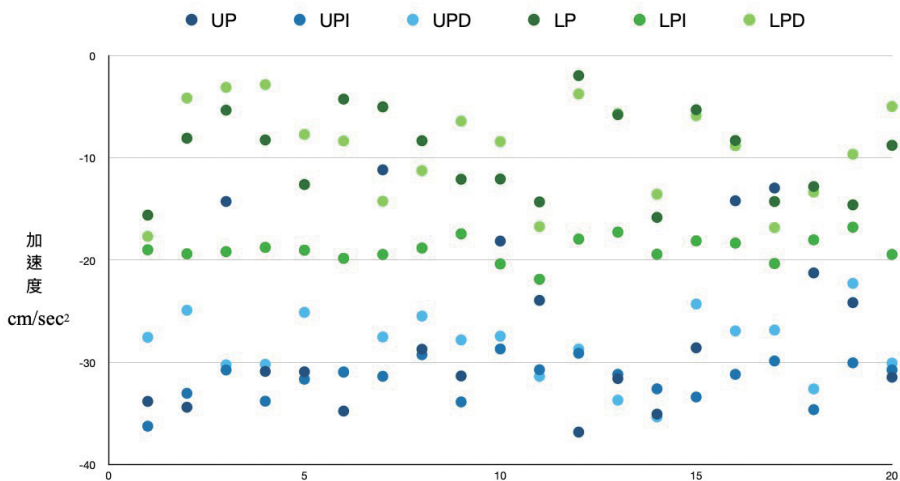


圖 18 固定障礙物加速度數值分布圖

在圖 18 中的圓點符號利用藍色系代表超音波距離感測器，綠色系代表雷射距離感測器進行不同距離感測器分類。從圖 18 來看超音波距離感測器所收集到的加速度大多分布在 $-11.15 \text{ cm/sec}^2 \sim -36.85 \text{ cm/sec}^2$ 之間，而雷射距離感測器大多分布在 $-2.79 \text{ cm/sec}^2 \sim 21. \text{ cm/sec}^2$ 之間。

進一步將所有資料經過計算所得到的加速度平均值與範圍經過整理如表 1 所示。

表 1 固定障礙物加速度分析表

	UP	UPI	UPD	LP	LPI	LPD
平均值 (cm/sec ²)	-26.43	-31.67	-28.48	-9.65	-18.93	-9.14
最大值 (cm/sec ²)	-11.15	-28.7	-22.28	-5.27	-16.77	-2.79
最小值 (cm/sec ²)	-36.85	-36.27	-35.36	-15.81	-21.87	-17.67

從表 1 來看，在超音波距離感測器中 UP 加速度平均值為 -26.43 cm/sec^2 ，數值介於 $-36.85 \text{ cm/sec}^2 \sim -11.15 \text{ cm/sec}^2$ 之間，UPI 加速度平均值為 -31.67 cm/sec^2 ，數值介於 $-36.27 \text{ cm/sec}^2 \sim -28.7 \text{ cm/sec}^2$ 之間，UPD 度平均值為 -28.48 cm/sec^2 ，數值介於 $-35.36 \text{ cm/sec}^2 \sim -22.28 \text{ cm/sec}^2$ 之間。

在雷射距離感測器表現中 LP 的加速度平均值為 -9.65 cm/sec^2 ，數值介於 $-15.81 \text{ cm/sec}^2 \sim -5.27 \text{ cm/sec}^2$ 之間，LPI 的加速度平均值為 -18.93 cm/sec^2 ，數值介於 $-21.87 \text{ cm/sec}^2 \sim -16.77 \text{ cm/sec}^2$ 之間，LPD 的加速度平均值為 -9.14 cm/sec^2 ，數值介於 $-17.67 \text{ cm/sec}^2 \sim -2.79 \text{ cm/sec}^2$ 之間。

(二) 固定障礙物之間距離

針對煞車後機器人與固定障礙物之間的距離，資料收集整理成圖 19 呈現固定障礙物之間距離數值分布圖。

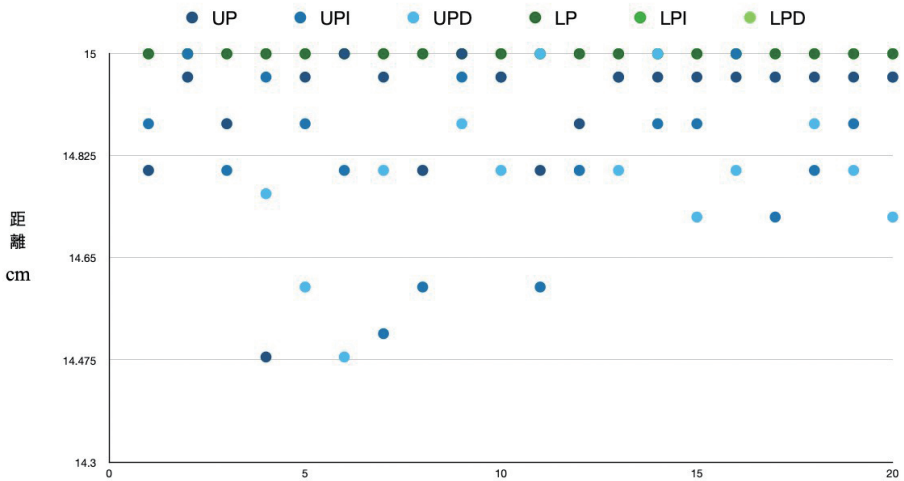


圖 19 固定障礙物之間距離數值分布圖

在圖 19 中的圓點符號利用藍色系代表超音波距離感測器，綠色系代表雷射距離感測器進行不同距離感測器分類。從圖 19 來看超音波距離感測器所收集到的距離大多分布在 14.475 cm ~ 15cm/sec² 之間，而雷射距離感測器則是與障礙物保持在 15cm 的距離。

實際每一種實驗處理方式在所收集到的 20 次資料中，經過計算所得到的距離平均值與範圍經過整理如表 2 所示。

表 2 固定障礙物之間距離分析表

	UP	UPI	UPD	LP	LPI	LPD
平均值 (cm)	14.91	14.84	14.81	15	15	15
最大值 (cm)	15	15	15	15	15	15
最小值 (cm)	14.48	14.52	14.72	15	15	15

從表 2 來看，在超音波距離感測器中 UP 距離平均值為 14.91 cm，數值介於 14.48cm ~ 15cm 之間，UPI 距離平均值為 14.84cm，數值介於 14.52cm ~ 15cm 之間，UPD 的距離平均值為 14.81cm，數值介於 14.72cm ~ 15cm 之間。

在雷射距離感測器表現中 LP、LPI 與 LPD 的距離平均值皆為 15 cm，顯示 LP、LPI 與 LPD 在每次煞車後與障礙物的距離都可以保持在 15cm 的距離。

(三) 障礙物煞車時間

針對煞車所需要花費的時間，將資料整理後製作成圖 20，在圖 20 中的圓點符號利用藍色系代表超音波距離感測器，綠色系代表雷射距離感測器進行不同距離感測器分類。圖 20 固定障礙物煞車時間數值分布圖來看，超音波距離感應器在煞車過程中所需要花費的時間介於 0.7sec~1.97sec 之間，雷射距離感測器則介於 1.17sec~13.23sec 之間。

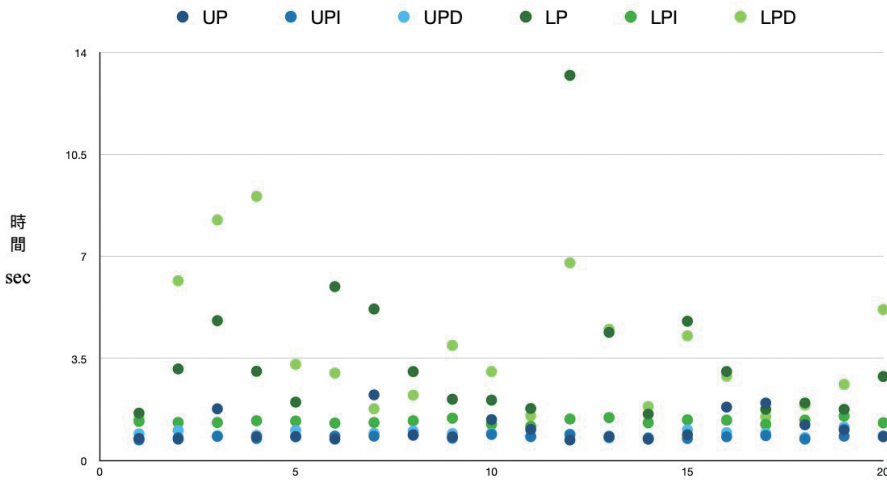


圖 20 固定障礙物煞車時間數值分布圖

進一步分析每種實驗處理全部 20 次資料，經過計算所得到的固定障礙物煞車時間平均值與範圍經過整理如表 3 所示。

表 3 固定障礙物煞車時間分析表

	UP	UPI	UPD	LP	LPI	LPD
平均值 (sec)	1.1	0.81	0.91	3.51	1.34	3.76
最大值 (sec)	1.97	0.86	1.05	13.23	1.52	9.07
最小值 (sec)	0.7	0.7	0.73	1.59	1.17	1.43

從表 3 來看，在超音波距離感測器中煞車過程所需要花費的時間中 UP 平均值為 1.1sec，數值介於 0.7sec ~1.97sec 之間，UPI 花費時間平均值為 0.81sec，數值介於 0.7sec ~0.86sec 之間，UPD 的平均值為 0.91sec，數值介於 0.73sec ~1.05sec 之間。

在雷射距離感測器表現中 LP 的煞車時間平均值為 3.51sec，數值介於 1.59sec

~13.23sec 之間，LPI 煞車時間平均值為 1.34sec，數值介於 1.17sec ~1.52sec 之間，LPD 的平均值為 3.76sec，數值介於 1.43sec ~9.07sec 之間。

(四) 移動障礙物加速度

為了區分實驗處理固定障礙物與移動障礙物的英文代碼，將原有的英文代碼前加入 M 來區分移動障礙物的實驗處理代碼，例如原來固定障礙物 UP 加上 M 則為 MUP，例如 MUP 顯示在移動障礙物中超音波距離感測器 +P 控制的實驗處理組合。

完成代碼編號後，首先將收集到的加速度資料進行繪製，圖 21 顯示本次研究中所收集到的針對移動障礙物機器人加速度資料數值分布圖。

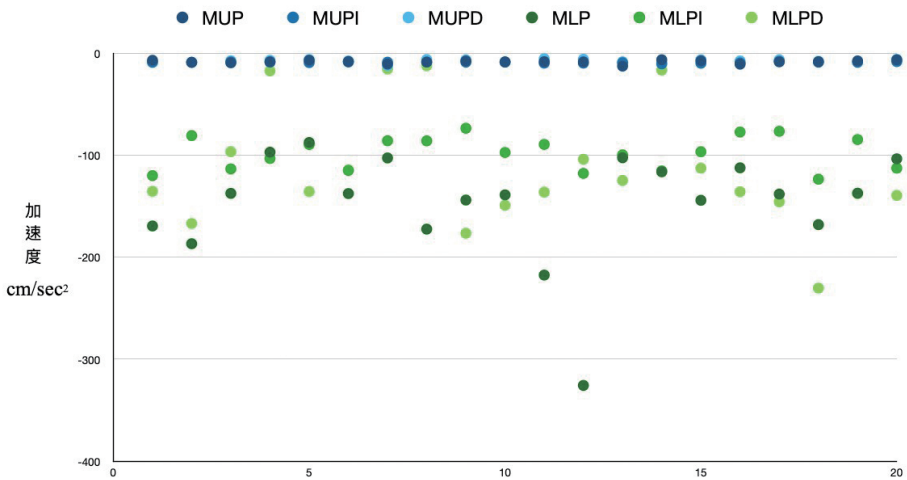


圖 21 移動障礙物加速度數值分布圖

在圖 21 中的圓點符號利用藍色系代表超音波距離感測器，綠色系代表雷射距離感測器進行不同距離感測器分類。從圖 21 來看超音波距離感測器所收集到的加速度大多分布在 $-5.99 \text{ cm/sec}^2 \sim -12.23 \text{ cm/sec}^2$ 之間，而雷射距離感測器大多分布在 $-11.86 \text{ cm/sec}^2 \sim -325.71 \text{ cm/sec}^2$ 之間。

接著將所收集到的 20 次資料中，經過計算所得到的加速度平均值與範圍經過整理如表 4 所示。

表 4 移動障礙物加速度分析表

	MUP	MUPI	MUPD	MLP	MLPI	MLPD
平均值 (cm/sec ²)	-8.02	-8.61	-7.12	-146.73	-97.6	-114.84
最大值 (cm/sec ²)	-5.99	-7.8	-5.45	-87.24	-73.24	-11.86
最小值 (cm/sec ²)	-12.23	-10.12	-11.61	-325.71	-123.27	-230.17

從表 4 來看，在超音波距離感測器中 MUP 加速度平均值為 -8.02 cm/sec²，數值介於 -12.23cm/sec² ~-5.99cm/sec² 之間，MUPI 加速度平均值為 -8.61 cm/sec²，數值介於 -10.12cm/sec² ~-7.8cm/sec² 之間，MUPD 加速度平均值為 -7.12cm/sec²，數值介於 -11.61 cm/sec² ~-5.45 cm/sec² 之間。

在雷射距離感測器表現中 MLP 的加速度平均值為 -146.73 cm/sec²，數值介於 -325.71cm/sec² ~-87.24cm/sec² 之間，MLPI 的加速度平均值為 -97.6cm/sec²，數值介於 -123.27cm/sec² ~-73.24m/sec² 之間，MLPD 的加速度平均值為 -114.84cm/sec²，數值介於 -230.17cm/sec² ~-11.86cm/sec² 之間。

(五) 移動障礙物之間距離

針對煞車後機器人與移動障礙物之間的距離，在資料收集後整理成圖 22 來呈現當機器人完全煞車後與移動障礙物之間距離數值分布圖。在圖 22 中的圓點符號利用藍色系代表超音波距離感測器，綠色系代表雷射距離感測器進行不同距離感測器分類。

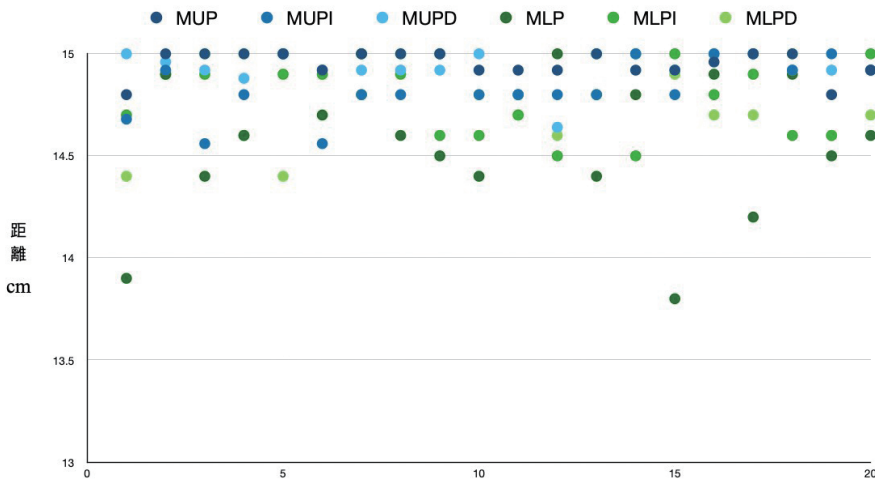


圖 22 移動障礙物之間距離數值分布圖

從圖 22 來看超音波距離感測器所收集到的距離大多分布在 14.56cm ~ 15cm/sec² 之間，而雷射距離感測器則是與障礙物保持在 13.8cm~15cm 的距離。進一步分析所收集到的 20 次資料中，經過計算所得到的距離平均值與範圍經過整理如表 5 所示。

表 5 移動障礙物之間距離分析表

	MUP	MUPI	MUPD	MLP	MLPI	MLPD
平均值 (cm)	14.95	14.85	14.93	14.6	14.76	14.82
最大值 (cm)	15	15	15	15	15	15
最小值 (cm)	14.8	14.56	14.88	13.8	14.5	14.4

從表 5 來看，在超音波距離感測器中 MUP 距離平均值為 14.95cm，數值介於 14.8cm ~15cm 之間， MUPI 距離平均值為 14.85cm，數值介於 14.56cm~15cm 之間，MUPD 的距離平均值為 14.93cm，數值介於 14.88cm~15cm 之間。

在雷射距離感測器表現中 MLP 距離平均值為 14.6 cm，數值介於 13.8cm ~15cm 之間，MLPI 距離平均值為 14.76cm，數值介於 14.5cm~15cm 之間，MLPD 的距離平均值皆為 14.82cm，數值介於 14.4cm~15cm 之間。

(六) 障礙物煞車時間

針對煞車所需要花費的時間，將資料整理後製作成圖 23，在圖 23 中的圓點符號利用藍色系代表超音波距離感測器，綠色系代表雷射距離感測器進行不同距離感測器分類。圖 23 移動障礙物煞車時間數值分布圖來看，超音波距離感測器在煞車過程中所需要花費的時間介於 1.2 sec~2.77sec 之間，雷射距離感測器則介於 0.09sec~1.45sec 之間。

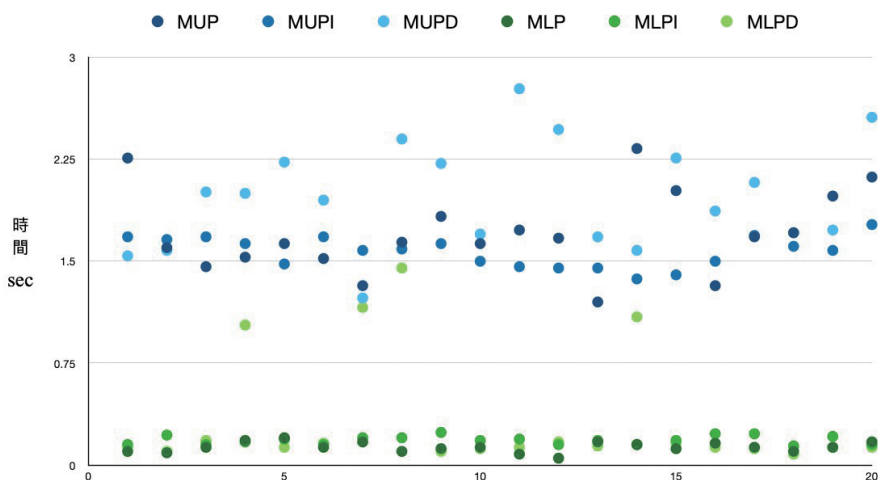


圖 23 移動障礙物煞車時間數值分布圖

進一步將煞車需要時間經過計算，將所得到的移動障礙物煞車時間平均值與範圍經過整理如表 6 所示。

表 6 移動障礙物煞車時間分析表

	MUP	MUPI	MUPD	MLP	MLPI	MLPD
平均值 (sec)	1.71	1.57	1.98	0.13	0.18	0.34
最大值 (sec)	2.33	1.77	2.77	0.18	0.24	1.45
最小值 (sec)	1.2	1.37	1.54	0.09	0.14	0.1

從表 6 來看，在超音波距離感測器中煞車過程所需要花費的時間中 MUP 平均值為 1.71sec，數值介於 1.2sec ~2.33sec 之間，MUPI 花費時間平均值為 1.57sec，數值介於 1.37sec ~1.77sec 之間，MUPD 的平均值為 1.98sec，數值介於 1.54sec ~2.77sec 之間。

在雷射距離感測器表現中 MLP 的煞車時間平均值為 0.13sec，數值介於 0.09sec ~0.18sec 之間，MLPI 煞車時間平均值為 0.18sec，數值介於 0.14sec ~0.24sec 之間，MLPD 的平均值為 0.34sec，數值介於 0.1sec ~1.45sec 之間。

二、感測器分析比較

本次研究主要探討兩種不同距離感測器（超音波距離感測器與雷射距離感測器）搭配不同三種自動控制程式（P 控制、PI 控制與 PD 控制）煞車系統，分別面對固定障礙物與移動障礙物的煞車表現。所收集的數據包含機器人在煞車時的加速度、紀錄完全煞車後與障礙物的距離以及煞車過程所需要花費的時間。

為了有系統進行比較，在分析比較部分將針對障礙物加速度、障礙物距離與煞車時間進行討論。

（一）障礙物加速度

針對機器人面對固定障礙物與移動障礙物在加速度的表現，將本次研究分別收集的加速度平均數資料整理製作成表 7。

從表 7 中可以發現在固定障礙物狀態中超音波距離感測器在三種自動控制的加速度表現高於雷射距離感測器的表現，顯示超音波距離感測器在偵測到障礙物之後，於執行煞車過程需要採用高的加速度來完成自動控制程式，而雷射距離感測器的加速度表現則採用較低的加速度來完成煞車任務。

針對移動障礙物狀態的煞車表現透過表 7 可以發現結果剛好與固定障礙

物狀態加速度表現相反，在面對移動障礙物時雷射距離感測器的加速度表現高於超音波距離感測器。

表 7 障礙物加速度表現分析表

障礙物狀態	距離感應器種類	自動控制種類	實驗處理代碼	加速度 (cm/sec ²)
固定	超音波距離感測器	P	UP	-26.43
		PI	UPI	-31.67
		PD	UPD	-28.48
		P	LP	-9.65
		PI	LPI	-18.93
		PD	LPD	-9.14
移動	雷射距離感測器	P	MUP	-8.02
		PI	MUPI	-8.61
		PD	MUPD	-7.12
		P	MLP	-146.73
		PI	MLPI	-97.6
		PD	MLPD	-114.84

針對上述現象推測可能與距離感測器的工作原理有關，由於雷射距離感測器採用雷射光的方式進行訊號偵測，超音波是利用超音波進行偵測，雷射光因為是單一直線所以較為精準，而超音波屬於球型波，較容易受到外界干擾，所以比較不精準。

為了清楚說明移動障礙物狀態下距離感測器的加速度差異之可能原因，針對感測器訊號範圍繪製示意圖（圖 24），在圖 24 中可以看到在移動障礙物狀態中由於超音波偵測的前方範圍較廣（綠線所示），雷射光只能透過直線方式進行正前方的物體（紅線所示），所以在移動障礙物開始移動時可能超音波距離感測器已經偵測到物體，而雷射距離感測器則需要物體移動到正前方時方能偵測到，這個狀況反而造成超音波距離感測器有充裕的時間執行煞車任務，反觀雷射距離感測器因為可以執行程式的時間少所以需要更大的加速度來完成煞車任務。

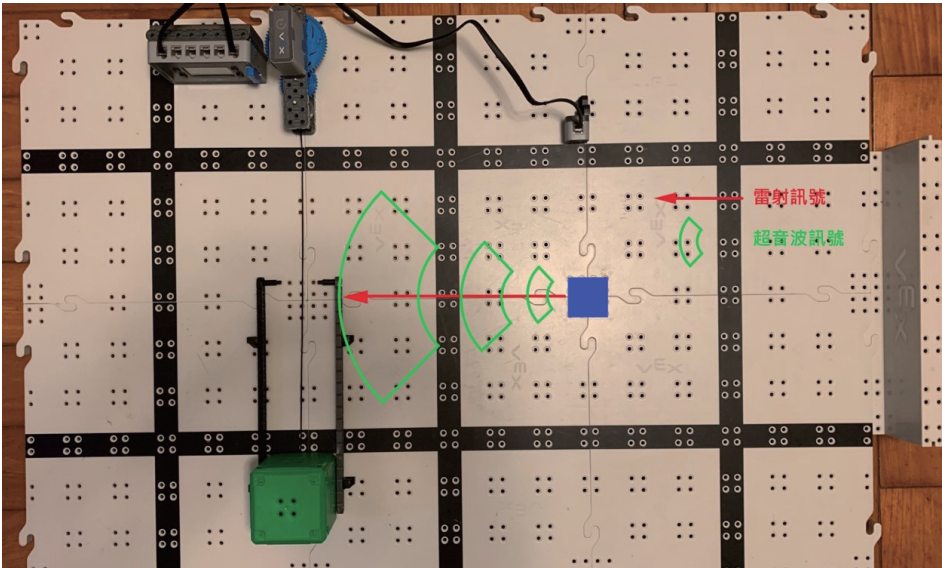


圖 24 不同距離感測器訊號偵測範圍示意圖

(二) 障礙物之間距離

針對機器人面對固定障礙物與移動障礙物在完全煞車停止後與障礙物之間的距離表現，將所有實驗處理的平均數資料整理製作成表 8。

在測量機器人與障礙物之間的距離，是透過另外一顆雷射距離感測器進行測量，藉此提高數據的準確性。從表 8 可以看到在固定障礙物狀態下雷射距離感測器搭配三種自動控制程式都可以準確保持與障礙物 15cm 的距離。

在超音波距離感測器使用上，不論是固定障礙物或是移動障礙物狀態下，當完全煞車後機器人與障礙物的距離大多保持在 14.81cm~14.95 範圍之間。

當雷射距離感測器在面對移動障礙物狀態下，最後的距離反而是離障礙物相對比較近，距離範圍介於 14.6cm~14.82cm 之間。這與固定障礙物狀態有所不同。

表 8 障礙物距離表現分析表

障礙物狀態	距離感應器種類	自動控制種類	實驗處理代碼	距離 (cm)
固定	超音波距離感測器	P	UP	14.91
		PI	UPI	14.84
		PD	UPD	14.81
	雷射距離感測器	P	LP	15
		PI	LPI	15
		PD	LPD	15
移動	超音波距離感測器	P	MUP	14.95
		PI	MUPI	14.85
		PD	MUPD	14.93
	雷射距離感測器	P	MLP	14.6
		PI	MLPI	14.76
		PD	MLPD	14.82

與障礙物距離的差異可能是在執行自動控制時，距離的精準度與穩定度不同，因此在固定障礙物狀態下雷射距離感測器因為精準度和穩定度較高，因此可以準確停留在 15cm 的地點。

超音波距離感測器則是比較不穩定，因此在完成自動控制程式執行時容易造成距離的差異。

不過雷射距離感測器在移動障礙物狀態下會面臨到另一個問題，就是執行自動控制的時間變短，而調整速度的時間也會跟著縮短，因此造成煞車距離產生明顯的差異。

(三) 障礙物煞車時間

針對機器人面對固定障礙物與移動障礙物在整個煞車過程所需的時間，將所有實驗處理的平均數資料整理製作如表 9。從表 9 可以看到在固定障礙物狀態下雷射距離感測器在煞車過程中所需要的時間較長，需要的時間介於 1.34sec~3.76sec，超音波距離感測器所需時間介於 0.81sec~1.1sec 之間。

表 9 煞車時間表現分析表

障礙物狀態	距離感應器種類	自動控制種類	實驗處理代碼	時間 (sec)
固定	超音波距離感測器	P	UP	1.1
		PI	UPI	0.81
		PD	UPD	0.91
	雷射距離感測器	P	LP	3.51
		PI	LPI	1.34
		PD	LPD	3.76
移動	超音波距離感測器	P	MUP	1.71
		PI	MUPI	1.57
		PD	MUPD	1.98
	雷射距離感測器	P	MLP	0.13
		PI	MLPI	0.18
		PD	MLPD	0.34

當面對移動障礙物狀態時，雷射距離感測器在煞車過程中所需要的時間較短，需要的時間介於 0.13sec~0.34sec，超音波距離感測器所需時間介於 1.57sec~1.98sec 之間。

對於這個現象主要是在障礙物移動狀態時，雷射距離感測器在偵測到障礙物的時間就比超音波距離感測器所需的時間短，所以可以執行煞車程式的時間也就相對縮短，而超音波距離感測器在障礙物移動的時候已經偵測到，所以爭取到較多的時間來執行煞車程式。

三、自動控制分析比較

本次研究除了探討不同距離感測器表現之外，還採用三種不同的自動控制程式來進行輔助煞車過程。接下來將針對固定障礙物狀態與移動障礙物狀態進行分析討論。

(一) 固定障礙物

首先將固定障礙物的實驗數據整理成表 10，透過表 10 針對不同自動控制方式在不同距離感測器表現進行討論。

表 10 固定障礙物與自動控制表現一覽表

	UP	UPI	UPD	LP	LPI	LPD
加速度 (cm/sec ²)	-26.43	-31.67	-28.48	-9.65	-18.93	-9.14
距離 (cm)	14.91	14.84	14.81	15	15	15
時間 (sec)	1.1	0.81	0.91	3.51	1.34	3.76

從表 10 來看，在使用超音波距離感測器時，UPI 的加速度最大，其次是 UPD 然後是 UP。在煞車停止後與障礙物的距離 UP 最大，其次為 UPI 然後是 UPD。在煞車時間方面，UP 需要花費的時間較多，然後是 UPD，花費時間最少為 UPI。

針對雷射距離感測器的表現上，LPI 的加速度值最大，其次為 LP 然後是 LPD。針對機器人與障礙物的距離則是三種方式皆為 15cm。在煞車花費的時間表現，LPD 需要的時間較多，然後是 LP，花費時間最少的是 LPI。

綜合上述固定障礙物的表現，兩種距離感應器搭配 PI 自動控制所需要的加速度高於其他兩種自動控制方式。在與障礙物的距離表現上，雷射距離感測器搭配三種自動控制組合都可以準確將機器人距離保持在 15cm 處，使用超音波距離感測器在煞車後與障礙物間的距離則是 P 控制最遠，然後是 PI 控制，最近則是 PD 控制。

針對煞車所需要的時間表現，兩種感測器搭配 PI 控制所花費的時間較少，超音波距離感測器搭配 P 控制所花費的時間較多，而雷射距離感測器搭配 PD 控制所花費的時間較多。

(二) 移動障礙物

針對移動障礙物與不同自動控制表現，將資料整理後製作如表 11，透過表 11 針對煞車的表現數據進行說明。

表 11 移動障礙物與自動控制表現一覽表

	MUP	MUPI	MUPD	MLP	MLPI	MLPD
加速度 (cm/sec ²)	-8.02	-8.61	-7.12	-146.73	-97.6	-114.84
距離 (cm)	14.95	14.85	14.93	14.6	14.76	14.82
時間 (sec)	1.71	1.57	1.98	0.13	0.18	0.34

從表 11 來看，在使用超音波距離感測器時，MUPI 的加速度最大，其次是 MUP 然後是 MUPD。在煞車停止後與障礙物的距離 MUP 最大，其次為

MUPD 然後是 MUPI。在煞車時間方面，MUPD 需要花費的時間較多，然後是 MUP，花費時間最少為 MUPI。

針對雷射距離感測器的表現上，MLP 的加速度值最大，其次為 MLPD 然後是 MLPI。針對機器人與障礙物的距離則是 MLPD 距離最遠，其次為 MLPI 然後 MLP。在煞車花費的時間表現，MLPD 需要的時間較多，然後是 MLPI，花費時間最少的是 LP。

四、準確性與正確性分析

本次研究主要探討兩種不同距離感測器（超音波距離感測器與雷射距離感測器）搭配不同三種自動控制程式（P 控制、PI 控制與 PD 控制）煞車系統，分別面對固定障礙物與移動障礙物的煞車表現。透過數據的收集來討論準確性與正確性。

（一）準確性

在準確性表現上，透過表 8 可以發現在固定障礙物狀態下，雷射距離感測器配合三種的自動控制程式都可以在障礙物 15cm 前完全靜置，顯示雷射距離感測器在準確性表現上優於超音波距離感測器。

超音波距離感測器不論在固定障礙物狀態或是移動障礙物狀態在完成煞車後與障礙物的距離都保持在 14.81cm~14.95cm 之間，顯示超音波距離感測器在配合自動控制程式於準確性表現上比較有一致性。

至於在移動障礙物狀態下雷射距離感測器在準確性表現上與面對固定障礙物狀態時有所差異，由於自動控制程式的執行需要不斷修正先前的誤差來進行調整，可能當雷射距離感測器面對移動障礙物時由於偵測到的時間短（請參閱表 9），相較超音波距離感測器煞車時間大約減少 1.5sec，所以能夠執行自動程式修正的次數減少，因此造成的距離誤差比較大。

（二）正確性

在探討正確性方面，透過研究發現兩種距離感測器都可以偵測到前方障礙物的存在，然後可以執行自動控制的煞車程式。

其值得一提的是，在資料收集過程中發現超音波距離感測器可以偵測的有效範圍距離大約為前方 46cm 左右，一旦障礙物與機器人距離超過這個範圍，超音波距離感測器就無法正確偵測到前方障礙物。

基於上述的結果和實驗過程，推論出以下結果：只有 P 控制的情況下機器人常常卡在最後一點點的距離，不過超音波感測器因為會有點誤差，

所以反而會比雷射感測器快停下來；PI 控制因為可以消除穩態誤差，所以時間消耗都是最短的；PD 控制原本的功用應該是快速修正，由於 PID 控制的增益常數（Gain）過大，影響 PD 控制作用小，因此 PD 控制的效果沒有特別突出的部分。

伍、結論與建議

本次研究的創見性主要是嘗試結合 PID 與距離感測器針對前方的障礙物進行車輛動態煞車自動控制，透過距離感測器與 PID 自動控制程式相互作用，然後針對自駕車的馬達進行調整與修正，提高車輛安全與降低交通事故發生。

經過研究資料收集以及研究結果分析與報告撰寫，以下將針對本次研究進行結論說明與提出未來後續研究建議，詳細說明如下：

一、結論

針對上述討論可以初步歸納出以下四點結論：

（一）、針對固定障礙物煞車表現雷射距離感測器的準確性與正確性表現都優於超音波距離感測器。

（二）、針對移動障礙物的表現上，由於超音波距離感測器偵測的範圍廣，當移動障礙物尚未移動到機器人正前方時已經偵測到障礙物，因此有較多的執行程式時間，故加速度比雷射距離感測器少。而且在煞車後與障礙物的距離表現也優於雷射距離感測器。

（三）、不同的自動控制程式在執行時因為有不同的參考與誤差值，所以在不同距離感測器與障礙物狀態都有不同。

（四）、不同的距離感測器的運作原理與偵測區域不同，在未來應用時候可以針對這些特性進行調整，例如現在汽車的自動跟車系統大多採用雷射系統方式，可以偵測正前方較遠的車輛。在車身四周的碰撞偵測系統，因為偵測距離短但是範圍較大所以大多則採用超音波系統。

二、建議與應用

針對上述所歸納的結論，未來後續的研究方向可以從以下四方面著手：

（一）、本次研究只有採用 20 次的實驗數據進行分析，未來可以收集資料的次數，提高研究的準確性。筆者目前由於尚未具備統計分析專業能力，建議後續研究可以針對本研究控制進行統計分析，例如針對不同距離感應器

的差異、不同 PID 程式差異等比較平均數的統計分析，獲得進一步的研究分析結果。

(二)、由於本次研究的機器人的起始位置為 46cm，無法提供誤差產生的機會，造成 PD 自動控制的效果不顯著，未來可以增加場地的面積，模擬實際道路狀態進行資料收集。

(三)、由於本次研究所使用的雷射感測器與超音波距離感測器容易受到外界光線與障礙物影響，如何模擬全天候環境亮度是未來的改進方向之一。

(四)、在煞車過程中地面與輪胎的摩擦係數也是影響因素，未來後續實驗中可以將摩擦力、車速、煞車加速度與車體重量列入考量。

由於自動駕駛系統受到重視與發展，例如現階段針對自動駕駛最關鍵的科技為先進駕駛輔助系統 (Advanced Driver-Assistance System, ADAS)，ADAS 屬於主動安全系統，目的就是主動預防車禍的發生，而車內的安全帶、安全氣囊則是屬於被動安全系統 (Kukkala, Tunnell, Pasricha, & Bradley, 2018)。先進的 ADAS 採用視覺辨識系統與人工辨識系統提高偵測的準確性與正確性，未來後續研究也可以採用視覺感測器 (Vision Sensor) 進行比較 (周偉謨、沈育如，2021)。

參考文獻

- 王傑智、黃福銘（2021年9月30日）。交通自駕車系列1：演化（革命）中的自駕車核心技術。科技大觀園。檢自：<https://scitechvista.nat.gov.tw/Article/C000003/detail?ID=11873363-004e-4cb6-abc4-c96ac23a6af3>
- 任苙萍（2020）。自駕長路漫漫但產業行程有加速之勢。電子與電腦雜誌，5，20-23。
- 林俊佑（2020）。國內自駕車道路測試概況。車安通訊季刊，109（3）。檢自：<https://www.vsc.org.tw/File/Download/8999b6d1-f58b-4756-a8ca-0751dbca5f94?FileName=353859b3-876e-4e2b-aa01-54947bb0976d.pdf&cid=3791>
- 周偉謨（2018）。VEX IQ 機器人基礎篇：進入 VEX Robotics 世界的敲門磚。新北市：中華資訊與科技教育學會。
- 周偉謨、沈育如（2021）。VEX IQ 機器人基礎篇：進入 VEX Robotics 的世界。新北市：中華資訊與科技教育學會。
- 施吉昇、黃福銘（2021年9月30日）。交通自駕車系列2：你還需要考駕照嗎？自動駕車的發展與挑戰。科技大觀園。檢自：<https://scitechvista.nat.gov.tw/Article/C000003/detail?ID=6021cb5a-bee6-4391-b435-2394edfac715>
- 翁國樑、李玉忠、柯明寬、徐錦衍（2019）。自駕車發展趨勢與關鍵技術。工程，92（4），23-41。
- 張俊毅、沈彥志（2020）。臺灣自駕車場域現況與未來發展。車輛研測專刊，2020，87-92。
- 陳柏全（2018年11月8日）。自動駕駛的演進。科技大觀園。檢自：<https://scitechvista.nat.gov.tw/Article/C000009/detail?ID=a6e47872-f4ad-4ae9-945c-4dac6c207d5a>
- 陳敬典（2018）。自動駕駛車發展現況與未來趨勢。車輛研測專刊，2018，15-26。
- 陳敬典（2020）。全球自駕車產業發展現況與未來趨勢。車輛研測專刊，2020，19-28。
- 黃冠淪、黃英哲（2018a年10月18日）。自駕車置中行駛的科技：PID 控制 - 讓自駕車各行其道（二）。科技大觀園。檢自：<https://scitechvista.nat.gov.tw/Article/C000003/detail?ID=53326f3b-f174-4eb9-bd75-89adc1c585d2>
- 黃冠淪、黃英哲（2018b年10月18日）。自駕車置中行駛的科技：PID 控制 - 讓自駕車各行其道（一）。科技大觀園。檢自：<https://scitechvista.nat.gov.tw/Article/C000003/detail?ID=47abfefa-6d4d-4fdd-8220-7156cd5790a1>

- Åström, K. J., & Hägglund, T. (2001). The future of PID control. *Control Engineering Practice*, 9, 1163-1175.
- Bennett, S. (1996). A Brief History of Automatic Control. *IEEE Control Systems Magazine*, 16, 17-25.
- Borase, R. P., Maghade, D. K., Sondkar, & Pawar, S. N. (2020). A review of PID control, tuning methods and applications. *International Journal of Dynamics and Control*, 9, 818-827. <https://doi.org/10.1007/s40435-020-00665-4>
- Hägglund, T., & Guzmán J. L. (2024). Give us PID controller and we can control the world. *IFAC-PapersOnline*, 58, 103-108.
- Kukkala, V. K., Tunnell, J., Pasricha, S., & Bradley, T. (2018). Advanced Driver-Assistance Systems: A Path Toward Autonomous Vehicles. *IEEE Consumer Electronics Magazine*, 7(5), 18-25. <https://doi:10.1109/mce.2018.2828440>

An Assessment of Self-driving Braking System with Different Sensors and Autonomous Controls

Yu-Chen Huang

Student

National Yilan Senior High School

Yilan City, Taiwan

E-mail: stanely3636@gmail.com

Chao-Ming Huang*

Teacher

Jhnog-Shan Elementary School

Yilan City, Taiwan

E-mail: stanely503@gmail.com

Abstract

The research and development of self-driving cars has received increasing attention. Providing safer and more effective protection is one of the most important concerns in the development of self-driving cars, especially in complex transportation. This study explored the performance of braking systems with two different distance sensors and three autonomous control programs (PID control) in self-driving. Besides, this study revealed that the performance of precision and stability varied with different kinds of distance sensors. Due to the different detecting ranges, the ultrasonic sensor provided more reacting time than laser sensor. Moreover, the ultrasonic sensor would be interference with other objects. The laser distance sensor has better performance than the ultrasonic distance sensor in the aspects of precision in fixed object experiments. The performance of PID control revealed that the Proportional control is less stable. Besides, P control will be influenced by the ultrasonic distance sensor and it takes less braking time than laser distance sensor. PI control (Proportional and Integral control) can stop the car faster than the other groups. PD control (Proportional and Derivative control) does not show great performance probably due to its lower gain setting on D.

Keywords: Robot; PID Autonomous Control; Sensor; Self-driving Car

* Corresponding author