



國立臺灣大學工學院應用力學研究所

碩士論文

Institute of Applied Mechanics

College of Engineering

National Taiwan University

Master's Thesis

符合阿克曼轉向模型之汽車避障策略

The Obstacle Avoidance Strategy of Automobiles Satisfying

Ackermann Steering Model

葉乃綸

Nai-Lun Yeh

指導教授：王立昇 博士

Advisor: Li-Sheng Wang, Ph.D.

中華民國 113 年 7 月

July, 2024

國立臺灣大學碩士學位論文
口試委員會審定書

MASTER'S THESIS ACCEPTANCE CERTIFICATE
NATIONAL TAIWAN UNIVERSITY

符合阿克曼轉向模型之汽車避障策略

The Obstacle Avoidance Strategy of Automobiles Satisfying
Ackermann Steering Model

本論文係葉乃倫 (R11543063) 在國立臺灣大學應用力學研究所完成之碩士學位論文，於民國 113 年 07 月 29 日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明。

The undersigned, appointed by the Institute of Applied Mechanics on 29th July 2024 have examined a Master's Thesis entitled above presented by YEH, NAI-LUN (student ID: R11543063) candidate and hereby certify that it is worthy of acceptance.

口試委員 Oral examination committee:

王立昇 王立昇 (指導教授 Advisor)

張帆人 張帆人

王和盛 王和盛

所長 Director: 陳國慶 陳國慶

誌謝



能完成這本論文絕非憑我個人一己之力。首先感謝家人們當我最強大的後盾，讓我無後顧之憂的在台北學習、研究、生活，並給我無限的鼓勵與包容。謝謝兩年前願意給我機會加入 325 實驗室的王立昇老師，指導我完成論文的過程中鼓勵我大膽地提出想法，不要預設立場的勇於嘗試，並且以豐厚的學識涵養給予我寶貴的指導與建議，使我在完成這篇論文的過程中獲益良多。最後感謝實驗室的所有同學、學弟、學長以及器桃的每一位成員，在研究遇到瓶頸與問題時給我想法及鼓勵。能在大家的陪伴與支持下順利完成碩士學業是件幸福的事。

摘要



本研究旨在透過阿克曼轉向幾何（Ackermann steering geometry）模型找到能夠成功閃避載具航行路徑上障礙物的臨界轉彎點位置，並將其概念引入現有的避障方法中。傳統的 A*演算法雖能生成地圖中的最短路徑，但該路徑僅存在位置資訊，並未考慮載具所受之非完整約束，因此載具追蹤其生成軌跡行駛轉彎時仍存在碰撞風險。本研究的目標為調整 A*演算法與速度障區法，透過載具與障礙物的位置、姿態等訊息，找到載具在符合阿克曼轉向模型之非完整約束條件下，恰能成功閃避障礙物的轉彎點位置，並將其運用於動態調整障礙物半徑，使得載具航行生成路徑時，不因轉向限制存在碰撞風險。

關鍵字：臨界轉彎、A*路徑規劃演算法、速度障區法、阿克曼轉向幾何、模糊控制

Abstract



This study aims to identify the critical turning positions that enable a vehicle to successfully avoid obstacles in its path by using the Ackermann steering geometry model and to incorporate this concept into existing obstacle avoidance methods. While the traditional A* algorithm can generate the shortest path on a map, this path only includes positional information and does not consider the nonholonomic constraints imposed on the vehicle. Consequently, there remains a risk of collision when the vehicle follows this path through turns. The goal of this study is to adjust the A* algorithm and the Velocity Obstacle (VO) method by using the position and orientation information of both the vehicle and obstacles. This will help in identifying the turning positions that allow the vehicle to avoid obstacles while adhering to the nonholonomic constraints of the Ackermann steering model. Additionally, the approach dynamically adjusts the obstacle radius to ensure that the vehicle-generated path does not pose a collision risk due to steering limitations.

Keywords: Critical turning position, A* algorithm, Velocity Obstacle, Ackermann steering geometry, Fuzzy control

目 次



口試委員會審定書	iii
誌謝	ii
中文摘要	iii
英文摘要	iv
目次	v
圖次	vii
表次	x
第一章 緒論	1
1.1 前言與研究動機	1
1.2 文獻回顧	2
1.3 研究內容與成果	2
1.4 論文架構	3
第二章 無人載具避障演算法	4
2.1 A*路徑規劃演算法	4
2.1.1 A*路徑規劃演算法介紹	4
2.1.2 A*路徑規劃演算法流程	4
2.2 速度障區	7
第三章 符合阿克曼轉向汽車之臨界轉彎點與避障策略	10
3.1 符合阿克曼轉向汽車之臨界轉彎點	10
3.1.1 阿克曼單車模型	10
3.1.2 透過阿克曼單車模型求得安全轉彎距離	11
3.1.3 阿克曼單車運動學模型	14
3.1.4 載具鄰界轉彎點	16
3.2 符合阿克曼轉向汽車之避障策略	19



3.2.1 靜態避障策略之調整	19
3.2.2 動態避障策略之調整	21
第四章 硬體設備與系統介紹	23
4.1 實驗設備	23
4.1.1 無人載具	23
4.1.2 網路攝影機	26
4.1.3 工工作站主機與使用軟體	27
4.2 控制系統	28
4.2.1 模糊控制理論	28
4.2.2 隸屬函數	29
4.2.3 模糊規則庫	31
4.3 系統整合	31
第五章 模擬與實驗結果	32
5.1 模擬結果	32
5.1.1 靜態避障模擬結果	32
5.1.2 動態避障模擬結果	39
5.2 實驗結果	41
5.3 實驗結果討論	49
第六章 結論與未來方向	50
參考文獻	51

圖 次



圖 2-1 8 相鄰下的生成路徑	5
圖 2-2 56 相鄰下的生成路徑	5
圖 2-3 載具 A 與障礙物 B 所建構之碰撞錐範圍	7
圖 2-4 載具 A 與障礙物 B 所建構之速度障區	8
圖 2-5 速度障區法模擬時序圖	9
圖 3-1 阿克曼單車模型	10
圖 3-2 載具轉彎避障示意圖	11
圖 3-3 $\phi > \theta$ 時左轉	12
圖 3-4 $\phi > \theta$ 時右轉	12
圖 3-5 $\theta > \phi$ 時左轉	12
圖 3-6 $\theta > \phi$ 時右轉	12
圖 3-7 $ \tan \theta_0 < 1$ 臨界轉彎示意圖	17
圖 3-8 $ \tan \theta_0 > 1$ 臨界轉彎示意圖	17
圖 3-9 調整後 A*演算法流程圖	20
圖 3-10 VO_H 與調整後的速度障區 VO_{AB}'	21
圖 4-1 無人載具	23
圖 4-2 標定版	24
圖 4-3 前輪轉向控制參數對實際轉向角度之關係圖（左轉）	24
圖 4-4 前輪轉向控制參數對實際轉向角度之關係圖（右轉）	25
圖 4-5 AXIS M3006V 固定式半球網路攝影機	26
圖 4-6 工作站主機	27
圖 4-7 使用軟體	27
圖 4-8 模糊控制器架構圖	28
圖 4-9 距離誤差 d_e 之隸屬函數	29



圖 4-10 角度誤差 θ_e 之隸屬函數	29
圖 4-11 輸出參數前輪轉向角 ψ 之隸屬函數	30
圖 4-12 輸出參數後輪軸中心速度 v_r 之隸屬函數	30
圖 4-13 實驗系統架構	31
圖 5-1 情境 1 (模擬) 兩種路徑規劃演算法比較	33
圖 5-2 情境 1 載具追蹤路徑模擬時序圖 (傳統 A*演算法)	34
圖 5-3 情境 1 載具追蹤路徑模擬時序圖 (改良式 A*靜態避障策略)	34
圖 5-4 情境 2 (模擬) 兩種路徑規劃演算法比較	35
圖 5-5 情境 2 載具追蹤路徑模擬時序圖 (傳統 A*演算法)	36
圖 5-6 情境 2 載具追蹤路徑模擬時序圖 (改良式 A*靜態避障策略)	36
圖 5-7 情境 3 (模擬) 兩種路徑規劃演算法比較	37
圖 5-8 情境 3 載具追蹤路徑模擬時序圖 (傳統 A*演算法)	38
圖 5-9 情境 3 載具追蹤路徑模擬時序圖 (改良式 A*靜態避障策略)	38
圖 5-10 情境 4 動態避障模擬時序圖	39
圖 5-11 情境 5 動態避障模擬時序圖	40
圖 5-12 實驗場域	41
圖 5-13 情境 1 載具追蹤路徑實驗時序圖 (傳統 A*演算法)	42
圖 5-14 情境 1 實驗載具路徑圖 (傳統 A*演算法)	42
圖 5-15 情境 1 載具追蹤路徑實驗時序圖 (改良式 A*靜態避障策略)	43
圖 5-16 實驗載具路徑圖 (改良式 A*靜態避障策略)	43
圖 5-17 情境 2 載具追蹤路徑實驗時序圖 (傳統 A*演算法)	44
圖 5-18 實驗載具路徑圖 (傳統 A*演算法)	44
圖 5-19 載具追蹤路徑實驗時序圖 (改良式 A*靜態避障策略)	45
圖 5-20 實驗載具路徑圖 (改良式 A*靜態避障策略)	45
圖 5-21 情境 3 載具追蹤路徑實驗時序圖 (傳統 A*演算法)	46
圖 5-22 實驗載具路徑圖 (傳統 A*演算法)	46

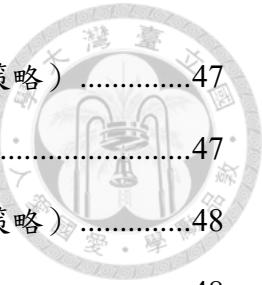


圖 5-23 情境 3 載具追蹤路徑實驗時序圖（改良式 A*靜態避障策略）.....	47
圖 5-24 情境 3 實驗載具路徑圖（改良式 A*靜態避障策略）.....	47
圖 5-25 情境 4 載具追蹤路徑實驗時序圖（改良式 A*靜態避障策略）.....	48
圖 5-26 情境 4 實驗載具路徑圖（改良式 A*靜態避障策略）.....	48

表 次



表 3-1 邊界條件選用規則	18
表 4-1 AXIS M3006V 網路攝影機規格	26
表 4-2 HP Victus 16-d0179TX 筆記型電腦規格	27
表 4-3 模糊控制器規則庫	31

第一章 緒論



1.1 前言與研究動機

隨著科技的進步和自動化時代的來臨，為節省人力，無人載具在各個領域的應用越來越廣泛，包括物流運輸、軍事偵察、農業管理以及智慧工廠等。這些載具的自主導航能力是其高效運行的核心，其中避障技術是實現自主導航的關鍵。無人載具透過傳感器感知周圍環境，利用其演算法作出決策，最後由控制系統根據傳感器數據和避障演算法的計算結果，實時調整無人載具的運動狀態，確保其安全性和穩定性。

多數載具皆受非完整約束限制而無法完成特定運動要求，使其無法滿足某些避障演算法所規劃之路徑，進而造成碰撞風險，因此對於這些限制較小的演算法仍存在優化空間。本研究以主流的阿克曼轉向汽車作為研究主體，運用其幾何特性找到能依照環境狀態解算臨界轉彎位置的方法，並將之與現有避障方法結合以實現優化。

綜上所述，無人載具避障方法的優化除了能提升操作安全性，有效地避免碰撞事故外，若將其應用於商業開發，更能減少人力成本，提高生產效率，因此本研究以無人載具之路徑規劃為主要研究方向。



1.2 文獻回顧

無人載具的避障策略涉及多種路徑規劃演算法。在地圖搜索最短路徑規劃方面，A*[5]、D*[8]和 Dijkstra Algorithm[2]是常用的方法。A*結合了Dijkstra Algorithm 的最佳路徑搜尋與啟發式搜尋的優點，將地圖網格化後，搜索最短路徑，演算法利用深度優先、廣度優先及啟發式搜索策略在網格間尋找最短路徑。隨機採樣的路徑規劃演算法如 RRT (Rapidly-exploring Random Tree) [6] 和 PRM (Probabilistic Roadmap Method) [7]。RRT 通過隨機生成點並連接這些點來構建搜索樹。PRM 則通過在自由空間中隨機生成大量節點並用邊連接這些節點來構建一個概率路徑網格。

然而以上路徑規劃演算法主要透過環境與障礙物資訊規畫路徑，缺乏動態障礙物的考慮。本研究採用 Fiorini 和 Shiller 於 1998 年提出的動態避障技術——速度障區 (Velocity Obstacles) [3]。基於運動學模型，計算無人載具與動態障礙物的相對速度，生成一個存在碰撞風險的速度區域，實現動態避障。

本研究採用阿克曼轉向模型(Ackerman Steering Model)[1]，考慮了前輪轉向角度和車輛幾何特性，為了使上述路徑生成之軌跡滿足系統受有非完整約束(Nonholonomic constraint)之限制，因此在路徑生成後採用了由 Gordon, W. J. 於 1974 年提出的 B-spline[4]平滑路徑曲線。透過控制點生成光滑、可調的路徑曲線，使其能夠滿足阿克曼無人載具之非完整約束。

1.3 研究內容與成果

本研究使用阿克曼無人載具，推導其轉向幾何條件下之臨界轉彎點，並將其用於改善靜、動態各一種避障方法。前者利用臨界轉彎點動態調整 A*演算法中障礙物之半徑以改良規劃路徑。後者則將臨界轉彎點之概念與速度障區法結合，旨找出最晚轉彎之極限避障策略，並推導路徑中載具的運動模型，結合實驗室網路攝影機進行載具及障礙物定位和影像辨識，最後以模糊控制器實現阿克曼無人載具之避障與控制。



1.4 論文架構

本論文涵蓋六個章節，本章節為緒論，論文內容將以下列順序依序介紹。

第二章為無人載具避障演算法之介紹，針對傳統熱門的靜、動態避障方法： A^* 路徑規劃演算法與速度障區法之理論與詳細流程進行說明。

第三章為符合阿克曼轉向汽車之臨界轉彎點與避障策略，本章為本研究之核心，首先透過阿克曼單車模型推導載具轉向角與轉彎半徑之關係，利用幾何特性與二元搜索法解算各狀態下之臨界轉彎位置，最後說明如何將其概念與第二章所介紹之現有避障方法結合。

第四章為硬體設備與系統介紹，介紹研究用到的各項軟、硬體設備、控制器以及實驗之系統架構。

第五章為模擬與實驗結果，此章節將呈現本研究所提出改良式避障策略之模擬與實驗結果，並將其與傳統的避障策略進行比較，最後討論各方法下所獲的結果與優劣。

第六章為結論與未來方向。



第二章 無人載具避障演算法

本章介紹兩種避障方法的基本理論，分別為 A*路徑規劃演算法（A* search algorithm）及速度障區法（Velocity Obstacle），前者為靜態避障演算法，後者為動態避障策略。以下將說明每種方法的詳細流程。

2.1 A*路徑規劃演算法

2.1.1 A*路徑規劃演算法介紹

A*演算法[5]是一種廣泛應用於圖形平面上路徑規劃的演算法，結合了 Dijkstra 演算法的最佳性和啟發式搜索的效率，常用於地圖導航、遊戲中角色的移動計算、機器人路徑規劃等領域。

A*演算法與 Dijkstra 演算法[2]最大的差別在於 Dijkstra 演算法僅使用成本函數 $g(P)$ ，即起始點到當前節點 P 的距離進行路徑搜索；A*演算法則除了使用前述成本函數 $g(P)$ 外，再加上啟發式函數 $h(P)$ 作為其評估函數 $f(P)$ 。其中， $h(P)$ 為當前節點 n 到目標節點的距離。

2.1.2 A*路徑規劃演算法流程

在平面場域上使用 A*演算法進行路徑搜索時可在地圖上建立網格，其中每個節點（Node）代表載具可能到達的位置，而兩節點間的連線為邊（Edge），代表從一個節點到另一個節點的移動路徑。

以下為 A*演算法的詳細流程：

步驟 1：將起始點 S 的成本函數 $g(S)$ 初始化為 0、即評估函數 $f(S) = h(S)$ 。將起始點 S 加入開放列表（Open List），並將閉合列表（Closed List）初始化為空。

步驟 2：若開放列表中已不存在任何節點，則搜索失敗，無法建構無碰撞路徑。若開放列表中尚存在節點，則從中選擇評估函數 f 最小的節點 P ，並判斷是否為目標節點 G ，若是，則結束路徑搜索並從目標點重構路徑；若否，則將 P 從開放列表中



移除，加入閉合列表。

步驟 3：選擇 P 節點的一個鄰點 Q ，若 Q 與 P 的連線段通過障礙物或者 Q 已在閉合列表中，則跳過該節點；若否，則計算 Q 的成本函數 g ，即

$$g(Q) = g(P) + \|\overline{PQ}\|$$

步驟 4：若 Q 已在開放列表中且新計算的成本函數 $g(Q)$ 更小，則更新 Q 的成本函數 g ，否則將 Q 加入開放列表。接著計算 Q 的評估函數為

$$f(Q) = g(Q) + h(Q)$$

步驟 5：紀錄 Q 的父節點為 P 。返回步驟 3，直至遍歷 P 的每個鄰點後，再返回步驟 2。

每個節點所能連接至的鄰點 (Neighbor node) 數目將影響演算法的靈活性甚至是結果路徑長度。鄰點數目愈多，表示載具可選擇的方向愈多，能夠靈活地繞過障礙物找到更為直接的路徑（圖 2-1、2-2）。

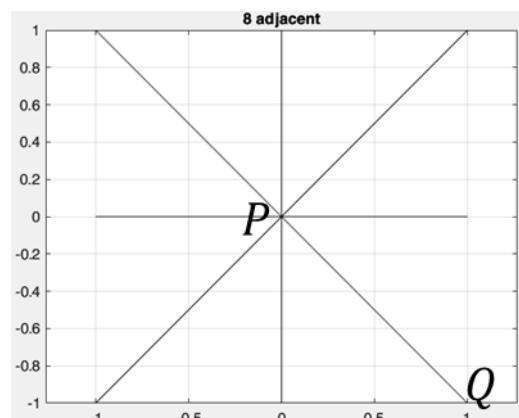
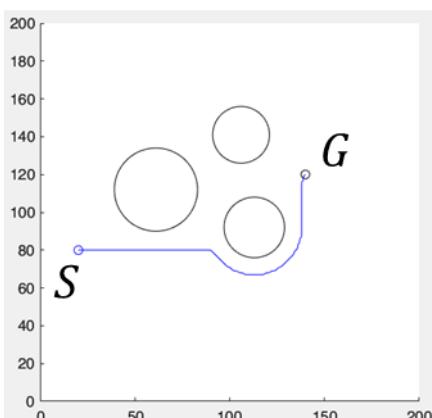


圖 2-1 8 相鄰下的生成路徑

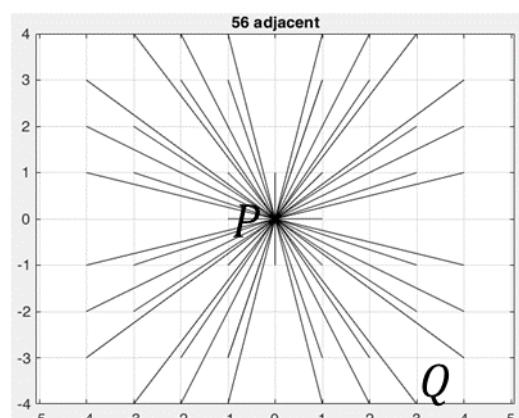
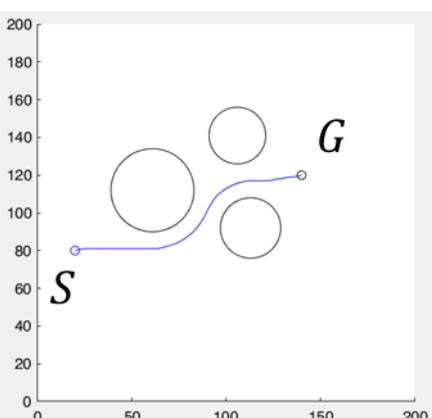


圖 2-2 56 相鄰下的生成路徑



A*演算法透過評估函數可以有效限制搜索方向，減少過多的計算量，並且能夠確保所生成的無碰撞路徑為全局最優。然而，仍存在部分缺點：

1. 搜索地圖愈大，需要花費愈大量的計算資源與時間。
2. 若路徑規劃的對象存在某些運動限制，如一般汽車在無打滑的情況下受到非完整約束而不能側向平移，只能沿著車身的前進方向移動，則無法保證其運動能夠完整貼合生成路徑，因而存在碰撞風險。



2.2 速度障區

速度障區（Velocity Obstacle，簡稱 VO）是一種用於環境中導航，同時避免載具與其他移動物體發生碰撞的速度選擇方法。速度障區法結合了幾何學和運動學，來確定在給定時間範圍內會導致碰撞的速度集合。以下是詳細介紹。

考慮平面上一圓形載具 A 與圓形障礙物 B，兩者半徑分別為 r_A 與 r_B 、速度則分別為 v_A 與 v_B 。將載具 A 由圓形縮小為一質點 \hat{A} ，並將障礙物半徑外擴一個載具半徑 r_A ，得到一半徑為 $r_A + r_B$ 的外擴圓 \hat{B} 。由質點 \hat{A} 對外擴圓 \hat{B} 作兩切線，並交 \hat{B} 於兩切點 T_1 、 T_2 如圖 2-3 所示。

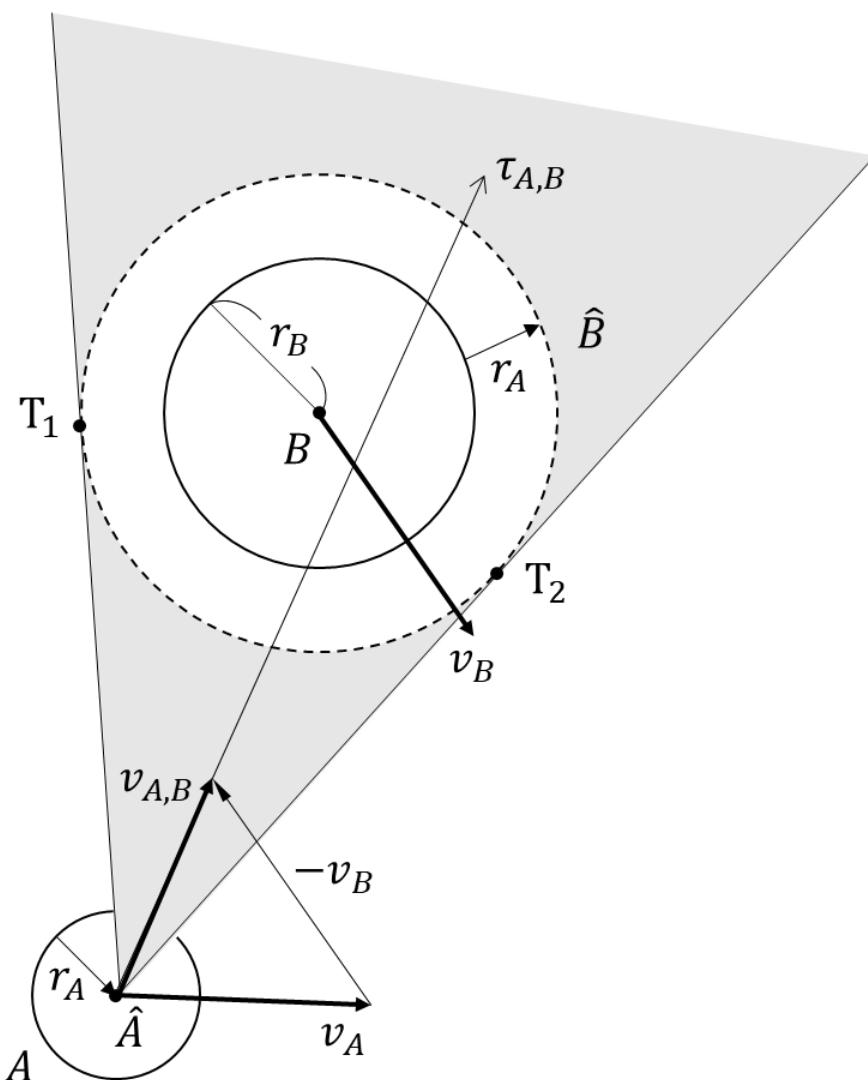


圖 2-3 載具 A 與障礙物 B 所建構之碰撞錐範圍



以 \hat{A} 為端點，朝載具相對於障礙物之相對速度 $v_{A,B}$ 方向作一射線 $\tau_{A,B}$ 。由相對運動概念可知，若射線 $\tau_{A,B}$ 與障礙物外擴圓 \hat{B} 之交集不為空集合且相對運動狀況不變，則載具將會與障礙物發生碰撞。將載具 A 與障礙物 B 之碰撞錐 (Collision Cone，簡稱 CC) CC_{AB} 定義為會產生碰撞的速度集合，即

$$CC_{AB} = \{v_{A,B} | \tau_{A,B} \cap \hat{B} \neq \emptyset\}$$

透過上述說明可知碰撞錐乃建構於相對速度空間。因此將所有相對關係轉換為絕對關係，碰撞錐 CC_{AB} 中每個速度與障礙物速度 v_B 相加即可求得載具 A 與障礙物 B 之速度障區 VO_{AB} (圖 2-4)，定義為

$$VO_{AB} = CC_{AB} \oplus v_B$$

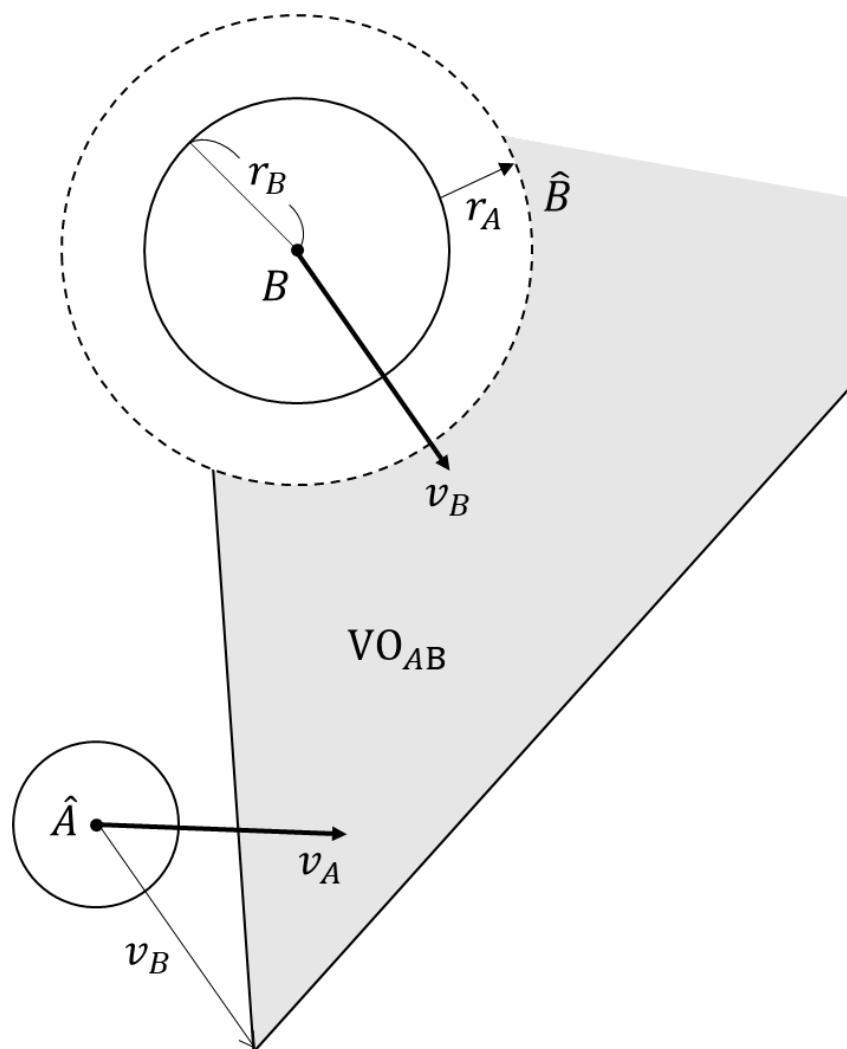


圖 2-4 載具 A 與障礙物 B 所建構之速度障區



當載具速度向量 v_A 與速度障區 VO_{AB} 產生交集，代表載具 A 與障礙物 B 將會發生碰撞。若速度向量 v_A 之頂點未落入速度障區的範圍中，則載具速度持續指向目標點；若速度向量 v_A 之頂點落入速度障區，則由速度障區外選擇一點作為載具下一時刻的速度更新方向。透過上述速度選擇方法不斷迭代便可確保載具在未發生碰撞的情況下抵達終點，如圖 2-5 所示，其中，藍色圓圈為載具近似圓，黑色圓圈為障礙物近似圓，藍色與紅色直線則為碰撞錐之兩邊界。

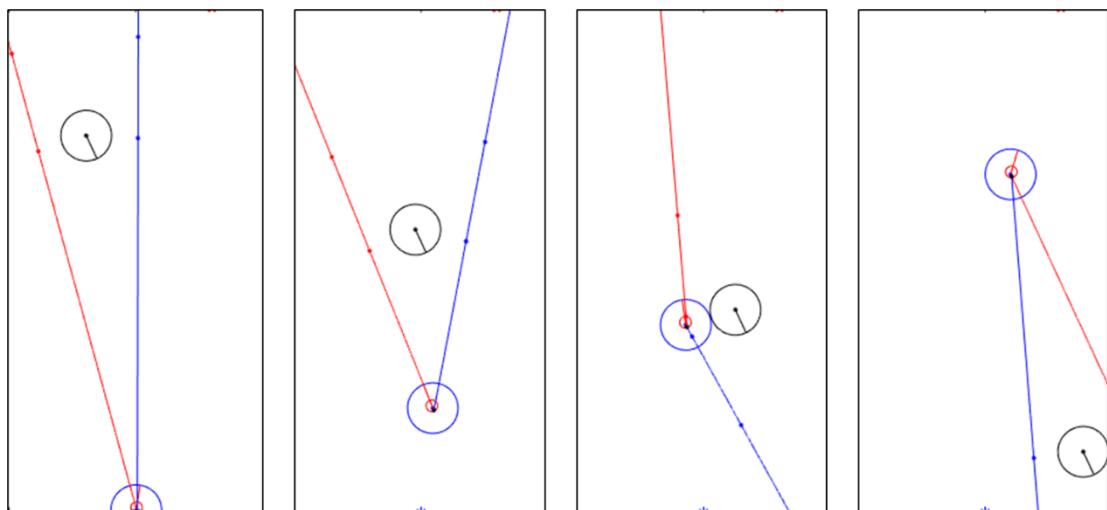


圖 2-5 速度障區法模擬時序圖



第三章 符合阿克曼轉向汽車之臨界轉彎點與避障策略

本章分為兩節，第一節介紹阿克曼單車模型，並利用其幾何條件推導載具之臨界轉彎點。第二節則將臨界轉彎點的概念與前章所述之兩避障方法結合，以調整後的避障策略改善原方法之缺點。

3.1 符合阿克曼轉向汽車之臨界轉彎點

3.1.1 阿克曼單車模型

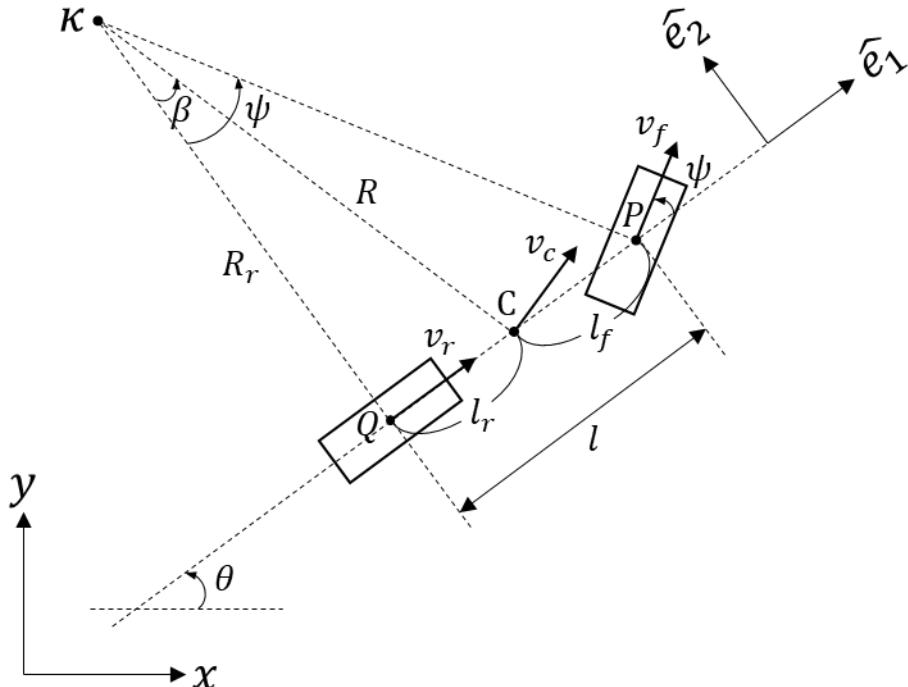


圖 3-1 阿克曼單車模型

阿克曼單車模型由一前一後的轉向輪與驅動輪組成，在車體上取前輪軸中心、後輪軸中心以及質心C，並分別描繪垂直於三點速度方向的鉛直線，三鉛直線的交點即為車體轉彎時所繞行的旋轉中心 κ （圖 3-1）。旋轉中心至後輪軸中心的距離 R_r 可表示為：

$$R_r = \frac{l_r}{\tan \beta} = \frac{l}{\tan \psi} \quad (3-1)$$

其中， l_r 為質心至後輪軸中心的距離； l 為前、後輪軸中心的間距； ψ 為前輪的轉向角； β 為質心速度方向與載具姿態角 θ 間的差角。



在車身幾何條件固定的情況下， β 角與轉向角 ψ 之間的關係可表示為：

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{l_r}{l} \tan \psi \right) \quad (3-2)$$

又旋轉中心 κ 至質心 c 的距離 R （轉彎半徑）為：

$$R = R_r \sec \beta \quad (3-3)$$

將式(3-1)、(3-2)代入式(3-3)即可求得轉彎半徑 R 與轉向角 ψ 之間的關係：

$$R = \cot \psi \sqrt{(l_r \tan \psi)^2 + l^2} \quad (3-4)$$

因此，在轉向角固定的情況下，車體質心 C 將以固定轉彎半徑繞行旋轉中心 κ 。

此時，載具的旋轉中心即為質心運動軌跡的曲率中心。

3.1.2 透過阿克曼單車模型求得安全轉彎距離

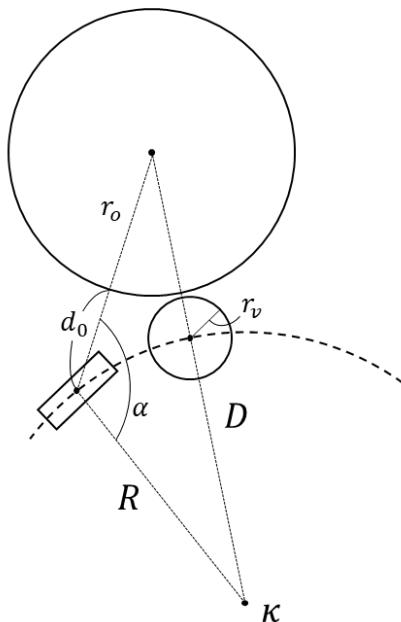


圖 3-2 載具轉彎避障示意圖

已知在轉向輪轉角固定的情況下，載具將繞行旋轉中心 κ 作圓周運動（圖 3-2）。旋轉中心與障礙物中心之距離 D 可表示為

$$D = \sqrt{(d_0 + r_o)^2 + R^2 - 2R(d_0 + r_o) \cos \alpha} \quad (3-5)$$

其中， d_0 為載具質心與障礙物近似圓的最短距離； r_o 為障礙物半徑； R 為轉彎半徑； α 為載具至旋轉中心 κ 與障礙物中心連線之間的夾角，該角度可透過幾何



關係以載具的方向角 θ (heading angle)、質心速度偏移角 β 以及障礙物和載具連線與水平之夾角 ϕ 等三角度表示之，如下所示。

當 $\phi > \theta$ 時（圖 3-3、3-4），左、右轉時的 α 角分別可表示成

$$\alpha_l = 180^\circ - (90^\circ - \beta) - (\phi - \theta)$$

$$\alpha_r = 180^\circ - (90^\circ - \beta) + (\phi - \theta)$$

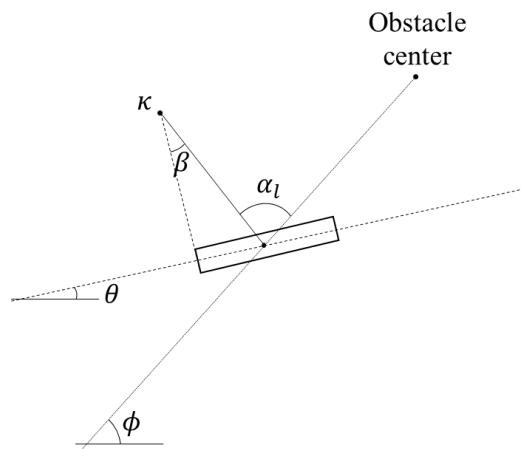


圖 3-3 $\phi > \theta$ 時左轉

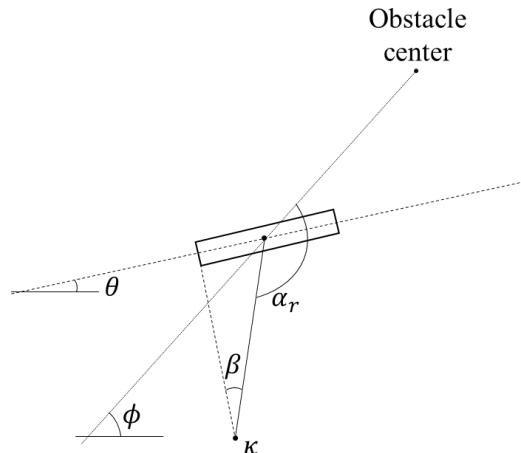


圖 3-4 $\phi > \theta$ 時右轉

當 $\theta > \phi$ 時（圖 3-5、3-6），左、右轉時的 α 角分別可表示成

$$\alpha_l = 180^\circ - (90^\circ - \beta) + (\theta - \phi)$$

$$\alpha_r = 180^\circ - (90^\circ - \beta) - (\theta - \phi)$$

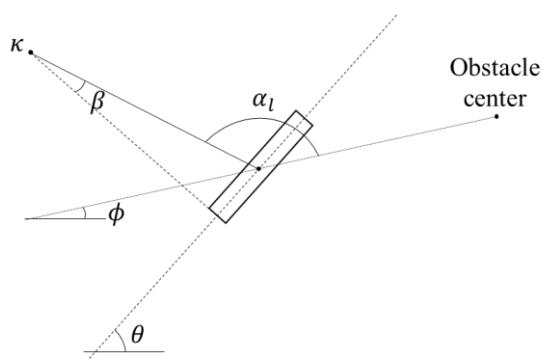


圖 3-5 $\theta > \phi$ 時左轉

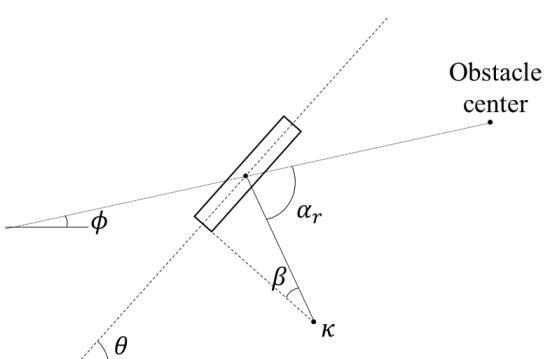


圖 3-6 $\theta > \phi$ 時右轉

因此， α 角於左、右轉時的通式為

$$\alpha_l = 90^\circ + \beta - \phi + \theta \quad (3-6)$$

$$\alpha_r = 90^\circ + \beta + \phi - \theta \quad (3-7)$$

載具轉彎的過程中，若與障礙物無發生碰撞則



(3-8)

$$D \geq R + r_o + r_v$$

可得

$$D^2 \geq R^2 + r_o^2 + r_v^2 + 2Rr_o + 2Rr_v + 2r_v r_o$$

將式(3-5)代入上式並化簡得

$$d_0^2 + (2r_o - 2R \cos \alpha)d_0 + (-2Rr_o \cos \alpha - r_v^2 - 2Rr_v - 2r_v r_o - 2Rr_o) \geq 0$$

令 $(r_o - R \cos \alpha)$ 為 A ； $(-2Rr_o \cos \alpha - r_v^2 - 2Rr_v - 2r_v r_o - 2Rr_o)$ 為 B

$$\text{則 } (d_0 + A + \sqrt{A^2 - B})(d_0 + A - \sqrt{A^2 - B}) \geq 0$$

由上式可得 d_0 的無碰撞條件式為

$$\begin{cases} d_0 \geq -A - \sqrt{A^2 - B}, & d_0 \geq -A + \sqrt{A^2 - B} \\ d_0 \leq -A - \sqrt{A^2 - B}, & \text{or} \\ d_0 \leq -A + \sqrt{A^2 - B} \end{cases}$$

即

$$\begin{cases} d_0 \geq -A + \sqrt{A^2 - B} \\ \text{or} \\ d_0 \leq -A - \sqrt{A^2 - B} \end{cases} \quad (3-9)$$

(3-10)

其中， $A^2 - B = (R \cos \alpha)^2 + 2R(r_o + r_v) + (r_o + r_v)^2 > 0$ ，故無碰撞條件式為實

數不等式。又已知不發生碰撞的情形下，安全距離 d_0 需大於載具近似圓半徑 r_v ，

故式(3-10)不合。

將 A 、 B 代入式(3-9)可得無碰撞時，安全距離 d_0 的條件式為

$$d_0 \geq R \cos \alpha - r_o + \sqrt{(R \cos \alpha)^2 + 2R(r_o + r_v) + (r_o + r_v)^2} \quad (3-11)$$



3.1.3 阿克曼單車運動學模型

參考圖 3-1，車體質心的運動方程式可表示為：

$$\begin{cases} \dot{x}_c = v_c \cos(\beta + \theta) \\ \dot{y}_c = v_c \sin(\beta + \theta) \end{cases} \quad (3-12)$$

$$\mathbf{r}^Q - \mathbf{r}^\kappa = -R_r \hat{\mathbf{e}}_2 \quad (3-13)$$

其中， \mathbf{r}^Q 為後輪軸中心的位置向量； \mathbf{r}^κ 為旋轉中心 κ 的位置向量。

因旋轉中心 κ 在瞬時為靜止，即 $\dot{\mathbf{r}}^\kappa = \mathbf{0}$ 。

且 $\dot{\hat{\mathbf{e}}}_2 = -\dot{\theta} \hat{\mathbf{e}}_1$ 。

將式(3-13)對時間微分可得

$$\dot{\mathbf{r}}^Q - \mathbf{0} = -R_r \dot{\hat{\mathbf{e}}}_2$$

即

$$v_r \hat{\mathbf{e}}_1 = R_r \dot{\theta} \hat{\mathbf{e}}_1$$

因此

$$\dot{\theta} = \frac{v_r}{R_r} = \frac{v_r}{l} \tan \psi \quad (3-14)$$

其中， v_r 為後輪軸中心之速度。

$$\text{又 } \dot{\mathbf{r}}^Q = \dot{\mathbf{r}}^C + (\dot{\theta} \hat{\mathbf{e}}_3) \times (-l_r \hat{\mathbf{e}}_1) = \dot{\mathbf{r}}^C - l_r \dot{\theta} \hat{\mathbf{e}}_2$$

將 $\dot{\mathbf{r}}^Q$ 與 $\dot{\mathbf{r}}^C$ 以載體座標系 (Body Frame) 表示可得

$$v_r \hat{\mathbf{e}}_1 = (v_c \cos \beta \hat{\mathbf{e}}_1 + v_c \sin \beta \hat{\mathbf{e}}_2) - l_r \dot{\theta} \hat{\mathbf{e}}_2$$

故 v_r 與質心速度 v_c 的關係為

$$v_r = v_c \cos \beta \quad (3-15)$$

若方向盤以一定速率轉動，則轉向角 ψ 的角速率將固定：

$$\dot{\psi} = \omega \quad (3-16)$$

將上式進行一次積分得

$$\psi = \omega t + \psi_0 \quad (3-17)$$

將式(3-17)代入式(3-14)可得

$$\dot{\theta} = \frac{v_r}{l} \tan(\omega t + \psi_0)$$

假設後輪軸中心速度 v_r 為定值，則將上式對時間進行一次積分可得



$$\theta = \frac{v_r}{\omega l} \ln |\sec(\omega t + \psi_0)| + \theta_0 = \frac{v_c}{\omega l} \cos \beta \ln |\sec(\omega t + \psi_0)| + \theta_0 \quad (3-18)$$

其中， ψ_0 與 θ_0 分別為載具初始狀態的轉向角與姿態角。

將式(3-2)、(3-18)代入運動方程式(3-12)並積分得：

$$\begin{cases} \Delta x_C = \int_0^t v_c \cos \left[\tan^{-1} \left(\frac{l_r}{l} \tan(\omega t + \psi_0) \right) + \frac{v_c}{\omega l} \cos \left(\tan^{-1} \left(\frac{l_r}{l} \tan \psi \right) \right) \ln |\sec(\omega t + \psi_0)| + \theta_0 \right] dt \\ \Delta y_C = \int_0^t v_c \sin \left[\tan^{-1} \left(\frac{l_r}{l} \tan(\omega t + \psi_0) \right) + \frac{v_c}{\omega l} \cos \left(\tan^{-1} \left(\frac{l_r}{l} \tan \psi \right) \right) \ln |\sec(\omega t + \psi_0)| + \theta_0 \right] dt \end{cases}$$

假設方向角的最大轉角為 ψ_{Max} ，將上式以離散數值法從時間 0 積分至 ψ_{Max}/ω 即

可求得載具轉向角 ψ 由 0 轉至最大轉角 ψ_{Max} 過程中，載具質心在 x 、 y 方向上的偏移量 Δx_{Max} 、 Δy_{Max} 。



3.1.4 載具鄰界轉彎點

假設原路徑為一直線則可表示為以下兩種形式：

1. $y(x) = (\tan \theta_0)x + (y_0 - (\tan \theta_0)x_0)$
2. $x(y) = (\cot \theta_0)y + (x_0 - (\cot \theta_0)y_0)$

其中， (x_0, y_0) 為載具的起始位置； θ_0 為載具的起始姿態角。

(x_{obs}, y_{obs}) 為障礙物中心之座標。

為避免載具起始姿態角接近 90° 時原路徑函數斜率過大，當 $|\tan \theta_0| < 1$ 時，令

轉彎點的 x 座標為 x_T ，則載具達最大轉向角時的座標為：

$$\begin{cases} x_{Max} = x_T + \Delta x_{Max} \\ y_{Max} = (\tan \theta_0)x_T + (y_0 - (\tan \theta_0)x_0) + \Delta y_{Max} \end{cases}$$

當 $|\tan \theta_0| > 1$ 時，令轉彎點的 y 座標為 y_T ，則載具達最大轉向角時的座標為：

$$\begin{cases} x_{Max} = (\cot \theta_0)y_T + (x_0 - (\cot \theta_0)y_0) + \Delta x_{Max} \\ y_{Max} = y_T + \Delta y_{Max} \end{cases}$$

又已知載具起始姿態角 θ_0 小於障礙物和載具連線與水平之夾角 ϕ 時，載具右轉可得臨界轉彎點，反之則臨界轉彎點發生於左轉時。透過此判斷方式將式(3-6)或式(3-7)代入式(3-11)可求得載具達最大轉向角時與障礙物的最小距離 $\overline{d_0}$ ，再利用二元搜尋法進行最佳化即可找到載具臨界轉彎點之座標。

根據載具原路徑之斜率不同，將選用不同的參數進行二元搜尋：

當 $|\tan \theta_0| < 1$ 時（圖 3-7），選用轉彎點之 x 座標 x_T 作為求解參數，使得

$$\min_{x_T \in (B_1, B_2)} \{ \| (x_{Max}, y_{Max}) - (x_{obs}, y_{obs}) \| - (\overline{d_0} + r_o) \}$$

當 $|\tan \theta_0| > 1$ 時（圖 3-8），選用轉彎點之 y 座標 y_T 作為求解參數，使得

$$\min_{y_T \in (B_1, B_2)} \{ \| (x_{Max}, y_{Max}) - (x_{obs}, y_{obs}) \| - (\overline{d_0} + r_o) \}$$

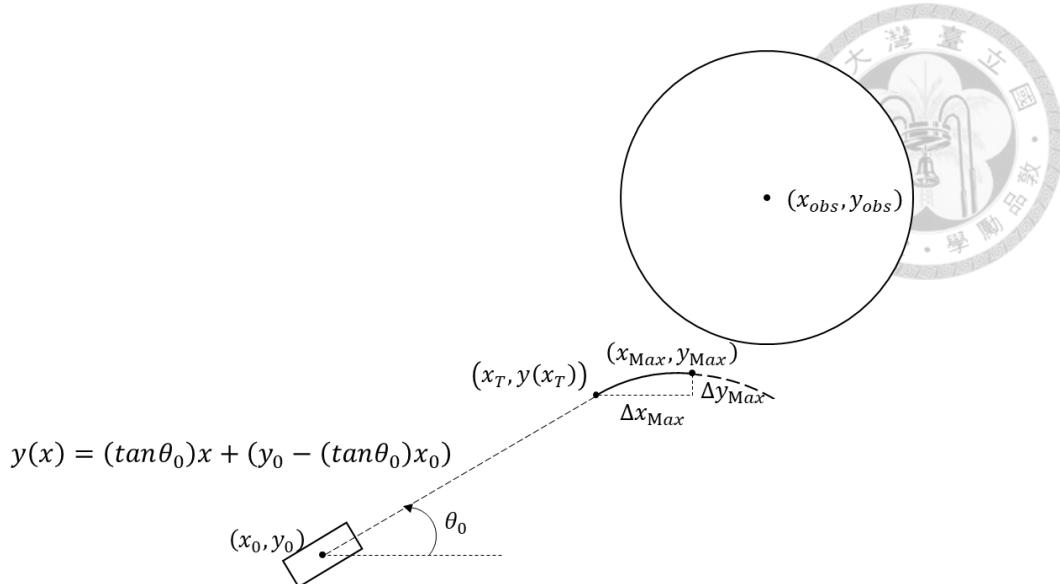


圖 3-7 $|\tan \theta_0| < 1$ 臨界轉彎示意圖

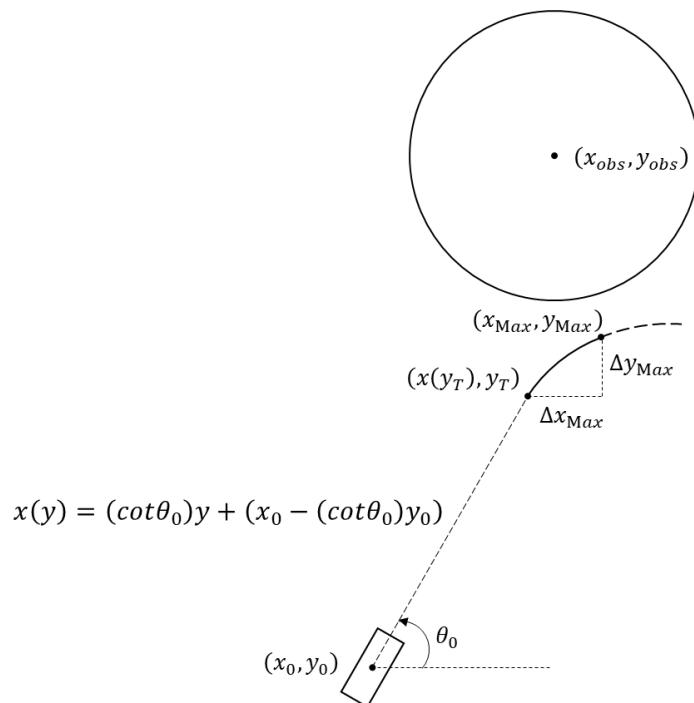
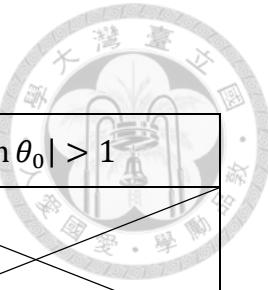


圖 3-8 $|\tan \theta_0| > 1$ 臨界轉彎示意圖

其中， B_1 、 B_2 分別為二元搜尋求解時之兩邊界值。

臨界轉彎點必位於載具初始位置與離載具初始位置最遠之障礙物邊界間，故根據載具原路徑之斜率與行駛方向，邊界值之選用規則如表 3-1 所示：

表 3-1 邊界條件選用規則



	$ \tan \theta_0 < 1$	$ \tan \theta_0 > 1$
$x_{obs} > x_0$	$B_1 = x_0$ $B_2 = x_{obs} + r_o$	
$x_{obs} < x_0$	$B_1 = x_0$ $B_2 = x_{obs} - r_o$	
$y_{obs} > y_0$		$B_1 = y_0$ $B_2 = y_{obs} + r_o$
$y_{obs} < y_0$		$B_1 = y_0$ $B_2 = y_{obs} - r_o$

當上述邊界條件使得二元搜尋無解時，可能為以下情況所致：

1. 載具原行駛路徑不會與障礙物發生碰撞。
2. 載具原行駛路徑將從邊緣擦撞障礙物。
3. 載具太接近障礙物，已無法在原行駛路徑上找到轉彎點避免與障礙物之碰撞。

其中，第三種情況存在較迫切的碰撞風險。當二元搜尋無解時，將載具的起始位置朝原行駛方向之反方向平移適當長度，再以平移後的邊界條件進行一次二元搜尋，若仍然無解，則為前兩種情況；若成功求解，則為第三種情況，藉此可將該情況與前兩種有效區隔。

透過前述方法即可求得左、右轉的臨界轉彎點。將此方法應用於 A*、VO 等避障方法之策略將於下一節討論。



3.2 符合阿克曼轉向汽車之避障策略

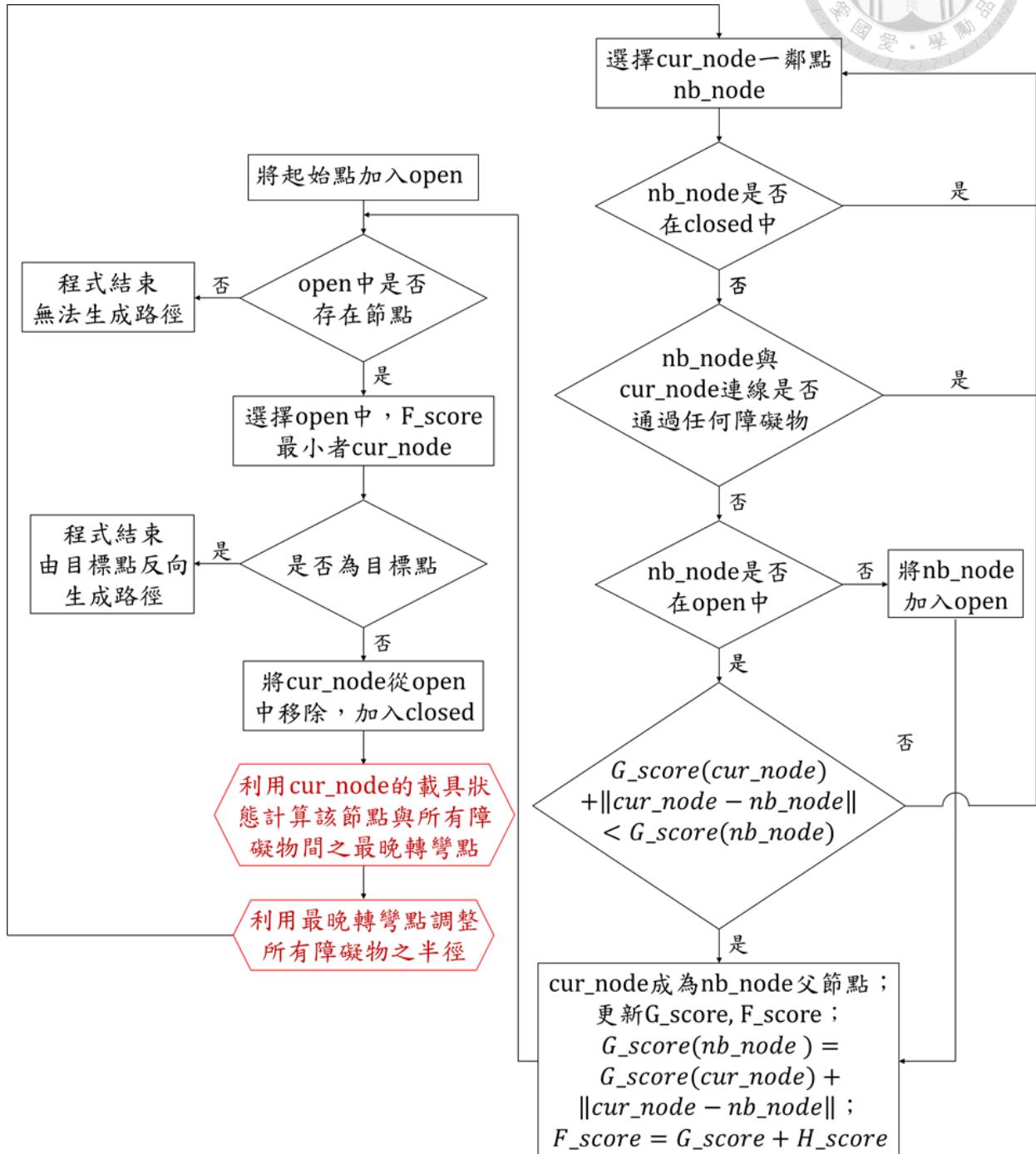
第二章中介紹了一個靜態與一個動態避障的演算法，分別為 A*路徑規劃演算法與速度障區法。本節將說明如何運用前一節所提到的載具臨界轉彎點調整兩避障演算法。

3.2.1 靜態避障策略之調整

傳統 A*演算法中，節點擴展僅基於圖上的鄰點，並未考慮汽車的運動學特性，即節點擴展的方式允許任意方向的移動，使得運動受到方向和轉向角度限制的汽車無法完整貼合規劃路徑行駛。此外，評估函數 $f(P)$ 僅基於節點位置的直線距離計算，忽略了汽車必須以某個方向移動到目標點的事實。為了避免發生碰撞，通常將演算法中的障礙物半徑外擴一固定的安全距離。然而，載具在不同的姿態下，應適用不同的安全距離，以最大化有效臨點使路徑搜索更為靈活。

給定障礙物位置、載具位置及姿態後，便可透過前節所述之方法找到臨界轉彎點位置。因此路徑規劃時，以當前探索的節點作為載具位置、以其父節點至當前節點的射線方向作為載具的姿態角，便可對每個障礙物求得相對應的臨界轉彎點，若臨界轉彎點存在，則以該臨界轉彎點至所對應的障礙物中心之距離作為當前節點下所對應的障礙物半徑；若臨界轉彎點不存在，則依照前節說明之方法判斷當前節點是否太接近障礙物，若是，則以當前節點至障礙物中心之距離作為當前節點下的障礙物半徑；若否，表示探索方向存在較小的碰撞風險或者無碰撞風險，故不改變障礙物半徑。

透過上述規則動態調整搜索過程中每個節點的障礙物大小，即可有效避免往存在碰撞風險的方向進行路徑搜索。以下為調整過後演算法的流程圖，其中六角框為調整處。





3.2.2 動態避障策略之調整

傳統速度障區係將碰撞椎中每個速度加上障礙物速度，亦可視為將碰撞椎沿障礙物速度方向平移。然而，為避免障礙物離載具過遠時即進行速度方向的判定與選擇，通常設置一適當避障距離，當載具與障礙物間的距離小於該避障距離才使用速度障區進行避障。

為考慮迫切避障（Imminent Collision Avoidance），Fiorini, P.於 1998 年定義

$$VO_H = \left\{ v_A | v_A \in VO, \|v_{A,B}\| \leq \frac{d_m}{T_h} \right\}$$

其中， d_m 為載具至障礙物之最短距離， T_h 為一合適的時間片段，與載具之動力模型、計算效能等有關。

集合 VO_H 中的速度確保載具會在時間片段 T_h 後才發生碰撞。如圖 3-10 所示，將傳統速度障區 VO_{AB} 減去 VO_H ，調整後的速度障區 VO_{AB}' 僅對時間 $t < T_h$ 內會產生碰撞的障礙物進行速度選擇與避障。

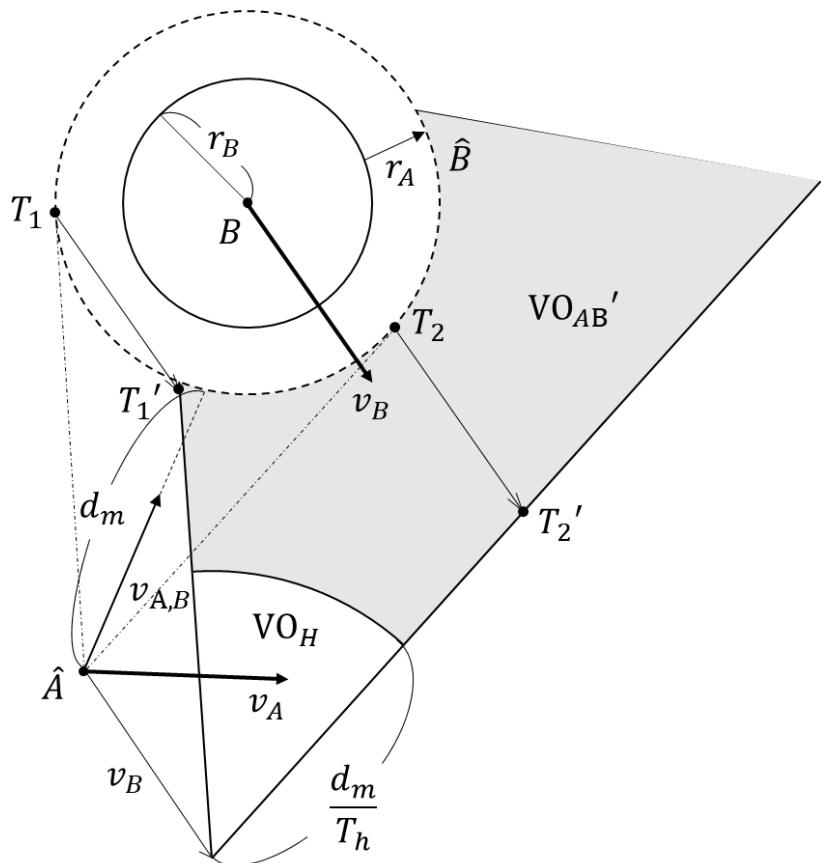


圖 3-10 VO_H 與調整後的速度障區 VO_{AB}'



由於臨界轉彎與 VO_H 皆存在迫切避障的概念，又速度障區法建構於相對運動上，將每個時刻之障礙物視為靜態，因此可利用每個時刻的載具與障礙物狀態計算臨界轉彎點，並將載具中心 \hat{A} 至臨界轉彎點 P_l 的距離設為 VO_H 的範圍，即

$$\frac{d_m}{T_h} = \|\hat{A} - P_l\|$$

若載具速度未落入 VO_{AB}' 範圍中，則速度持續指向目標點，朝目標點前進；若載具速度落入 VO_{AB}' 範圍中，則載具速度指向離障礙物中心較近的平移後切點，直至障礙物與載具相互遠離後載具才將速度方向重新指向目標點。



第四章 硬體設備與系統介紹

4.1 實驗設備

4.1.1 無人載具

本研究採用由利基科技公司客製化的阿克曼轉向無人載具（圖 4-1）。該載具為後輪驅動，並由電控馬達同步輸出控制左、右後輪轉速，前輪則通過大扭力舵機及連桿機構控制同步轉向。此外，載具還配備了無線通訊模組、9 軸 MEMS 感測器和 RespBerry PI 控制器等。

實驗時，在載具頂端放置印有特定圖案之標定板（圖 4-2），透過實驗場域之鏡頭與 OpenCV 開源函式庫進行影像擷取及特徵判讀以取得載具在各時刻之位置與姿態。標定板上之圖案可由其幾何特性區分為兩部分，同心圓區塊用以判斷位置資訊；直線條紋區塊則用以判斷載具姿態。



圖 4-1 無人載具

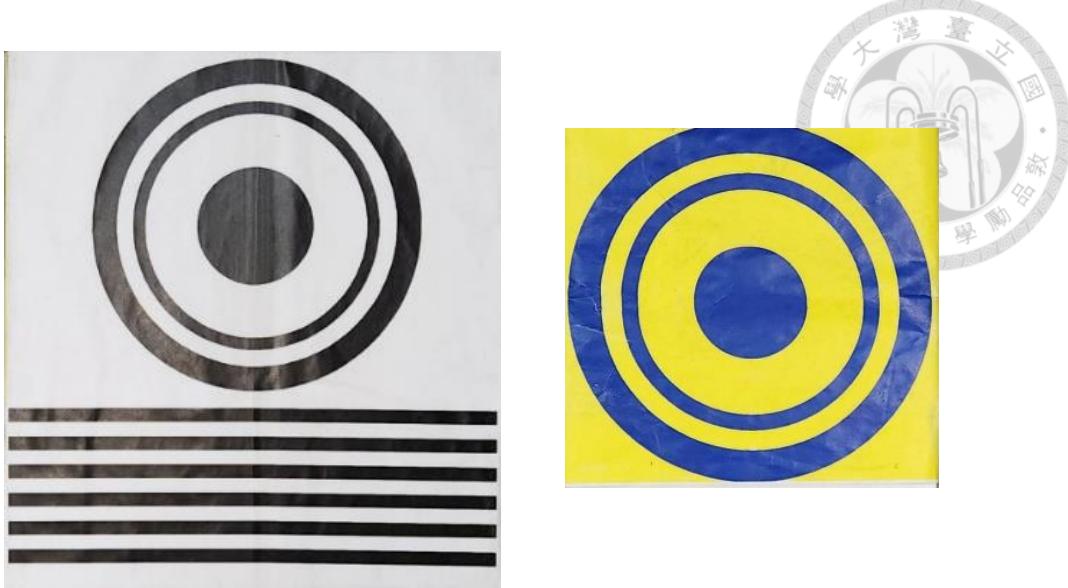


圖 4-2 標定板

阿克曼轉向無人載具以兩後輪之同步轉速與前輪轉向角作為控制項，然而其前輪轉向控制參數並非直接對應實際轉向角度，因此本研究藉由輸入多組轉向控制參數並量測各組參數下之後輪軸中心轉彎半徑，再由式(3-1)回推前輪轉向角度，最後對多組實驗數據進行迴歸分析以獲得左、右轉時前輪轉向控制參數與實際轉向角度之關係，分別如圖 4-3、4-4 所示。

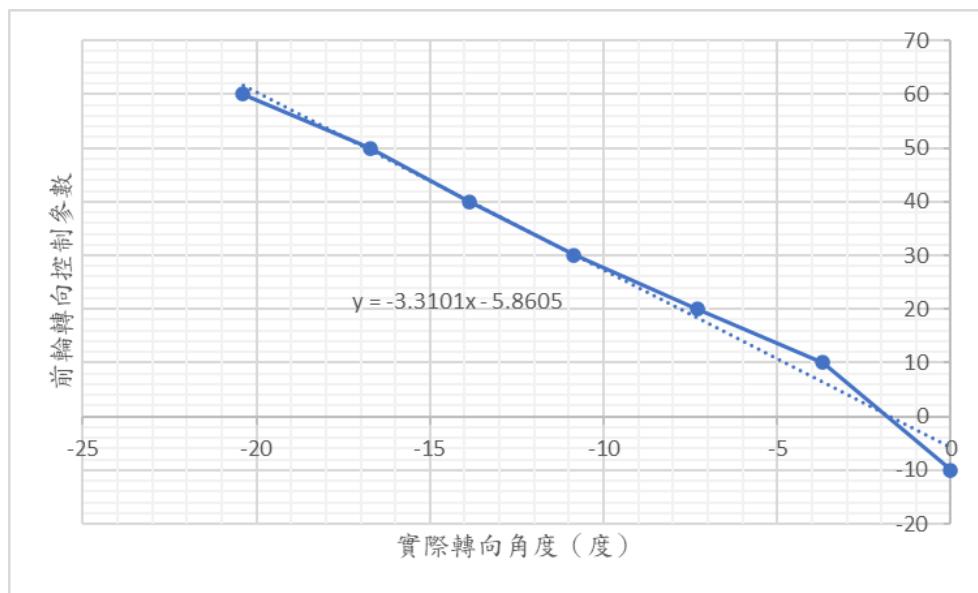


圖 4-3 前輪轉向控制參數對實際轉向角度之關係圖（左轉）

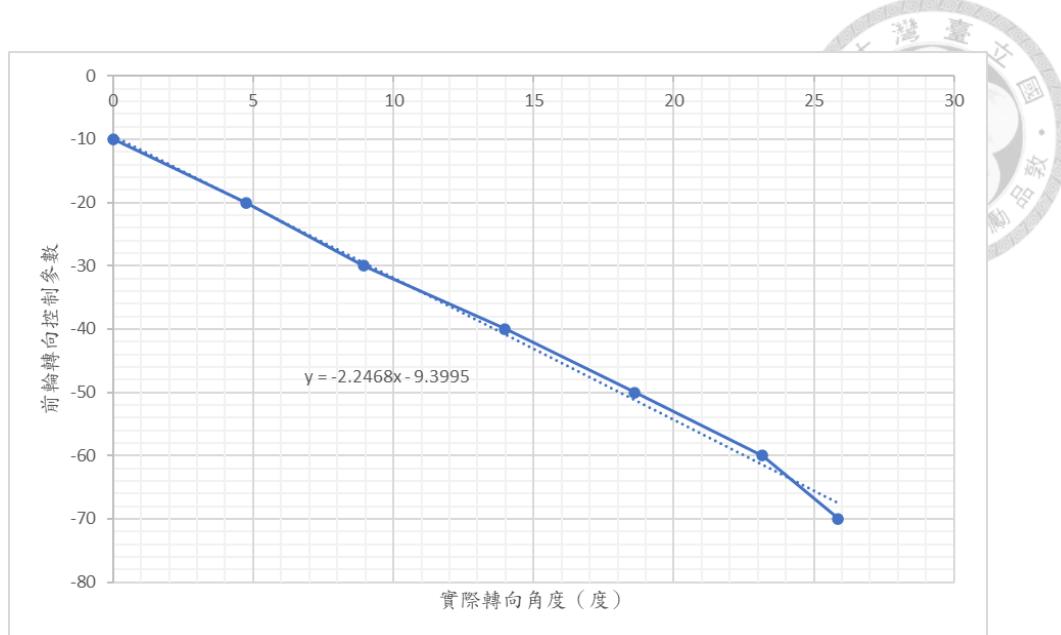


圖 4-4 前輪轉向控制參數對實際轉向角度之關係圖（右轉）

觀察實驗結果可以發現本研究所選用之阿克曼轉向無人載具前輪存在角度偏差，當前輪轉向控制參數輸入為 0 時，前輪存在一向右的微小轉向角，導致左、右轉所能達到的最大轉向角不盡相同，分別約為 20 度及 25 度。



4.1.2 網路攝影機

本研究使用偉勝科技公司所提供之 AXIS M3006V 網路攝影機（圖 4-5），安裝於實驗室天花板以取得實驗所需之影像資訊，其規格如表 4-1 所示。



圖 4-5 AXIS M3006V 固定式半球網路攝影機

表 4-1 AXIS M3006V 網路攝影機規格

Image sensor	1/3.6" (effective) progressive scan RGB CMOS
Lens	1.6mm, M12 mount, F2.8, Fixed iris
Angle of view	Horizontal: 135°, Vertical : 99°
Resolution	2048 × 1536(3MP)
FPS	30



4.1.3 工工作站主機與使用軟體

本研究以 HP Victus 16-d0179TX 筆記型電腦作為演算法運算工作站主機（圖 4-6），詳細規格如表 4-2 所示。



圖 4-6 工工作站主機

表 4-2 HP Victus 16-d0179TX 筆記型電腦規格

OS	64Bits Windows 11
CPU	11th Gen Intel(R) Core(TM) i5-11400H
GPU	NVIDIA GeForce RTX 3060 Laptop GPU
RAM	16 GB DDR4
硬碟	512GB PCIe® NVMe™ M.2 SSD

本研究以 MATLAB 作為演算法模擬程式，確認演算法之可行性。實驗階段則以 C++ 語言編程偕同 OpenCV 3.4.3 版本之函式庫進行影像處理，並選用 Visual Studio 2019 作為整合開發環境。

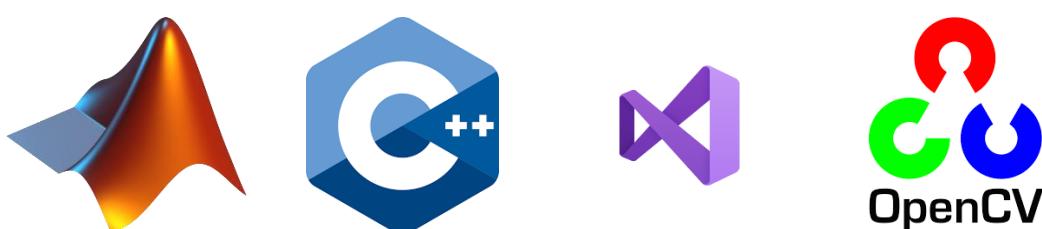


圖 4-7 使用軟體



4.2 控制系統

控制系統的主要作用為監測和調節系統之行為，使得系統受到外部擾動後能夠維持狀態穩定，並達成預期的目標。本研究使用模糊控制作為無人載具之控制系統。

4.2.1 模糊控制理論

模糊控制理論由 Lotfi A. Zadeh 於 1965 年提出，是一種模仿人類推理和決策過程的控制方法，適用於模型難以建立或系統具高度不確定性和非線性的情況。模糊控制的核心概念包括模糊集合、模糊語言變量和模糊規則。模糊集合允許元素具有部分隸屬度，而不是簡單地屬於或不屬於某個集合。模糊語言變量則使用自然語言描述，並由隸屬函數定義這些變量的取值範圍。模糊規則以“IF-THEN”之語意表示，用來規範系統的行為。

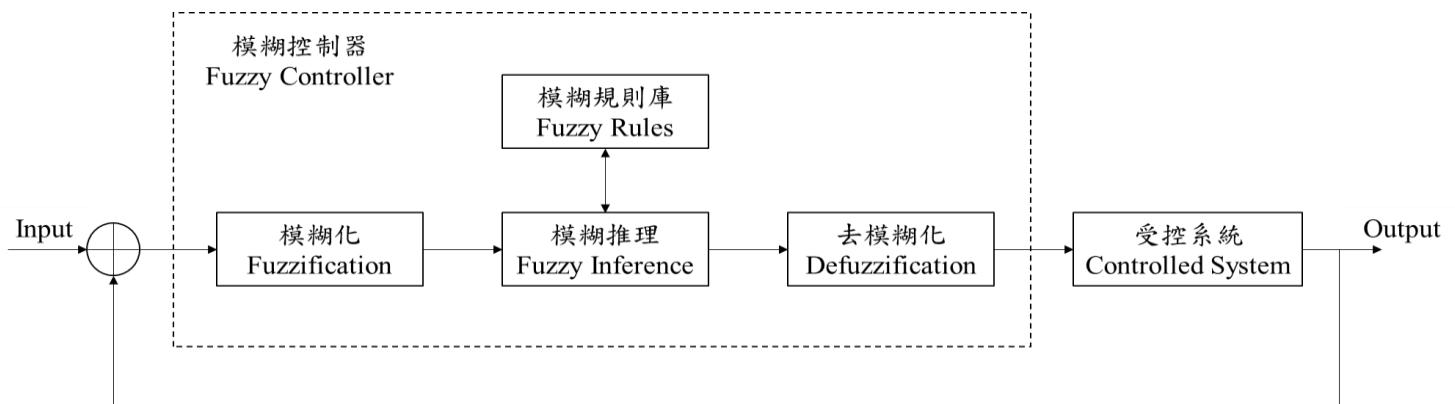


圖 4-8 模糊控制器架構圖

模糊控制的基本架構由三部分組成，分別為模糊化、模糊推理與解模糊化。模糊化將輸入的精確數值透過隸屬函數轉換為模糊集合，然後根據規則庫進行模糊推理得到模糊輸出，最後將模糊輸出解模糊化為精確數值，作為控制輸出（圖 4-8）。

模糊控制系統之優點在於其高度靈活性，可通過調整模糊規則和隸屬函數來適應不同的控制需求。



4.2.2 隸屬函數

本研究使用 Sugeno 模糊推理系統，以多段線性函數作為模糊集之隸屬函數，將輸入值轉換為模糊集中的語意。

系統的輸入參數有二，分別為載具位置與路徑追蹤點位置間的距離誤差 d_e 以及視線角之角度誤差 θ_e 。輸出參數則為轉向角 ψ 以及後輪軸中心速度 v_r 。

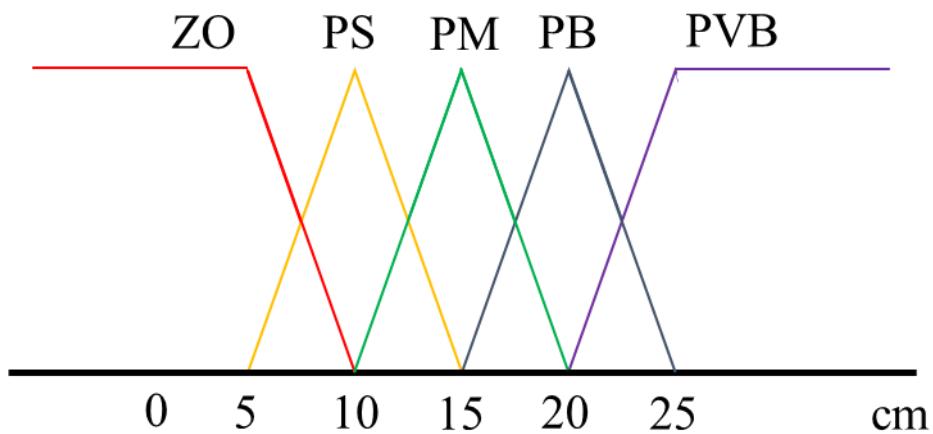


圖 4-9 距離誤差 d_e 之隸屬函數

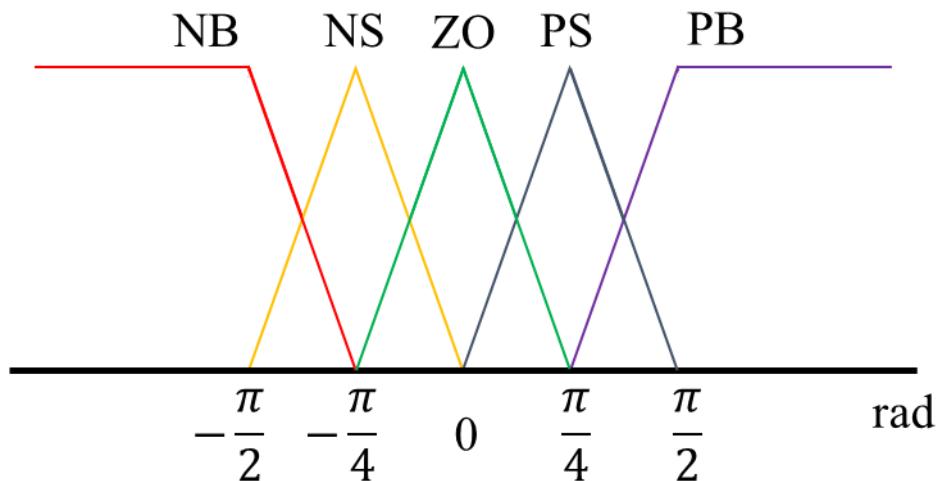


圖 4-10 角度誤差 θ_e 之隸屬函數

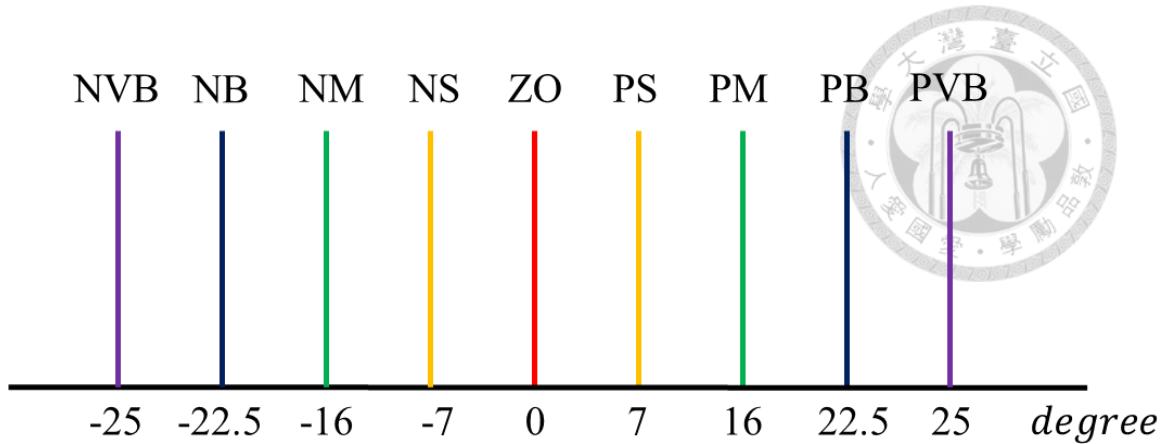


圖 4-11 輸出參數前輪轉向角 ψ 之隸屬函數

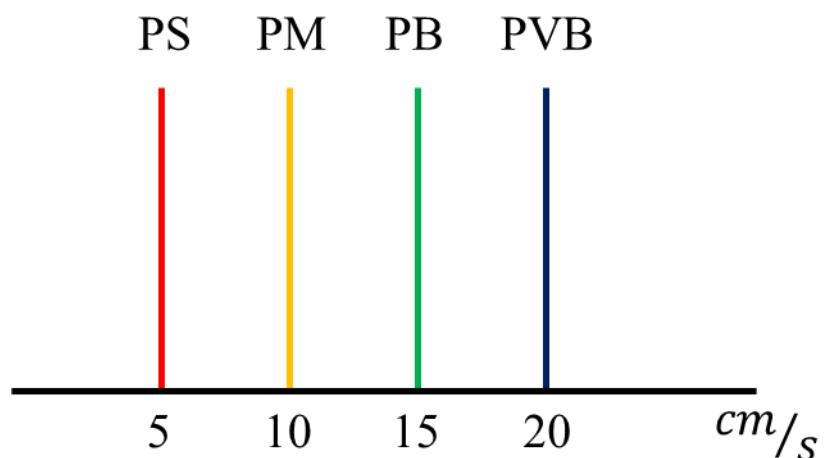


圖 4-12 輸出參數後輪軸中心速度 v_r 之隸屬函數



4.2.3 模糊規則庫

本研究所使用之模糊控制系統將輸入參數距離誤差 d_e 及角度誤差 θ_e 各劃分為五個模糊集，參考鄭[9]所建立的規則庫，定義輸出邏輯如表 4-3 所示。

表 4-3 模糊規則庫

$d_e \backslash \theta_e$	ZO		PS		PM		PB		PVB	
	ψ	v_r								
NB	PVB	PS	PVB	PS	PVB	PS	PVB	PM	PM	PB
NS	PVB	PS	PM	PS	PB	PM	PM	PB	PS	PB
ZO	ZO	PS	ZO	PM	ZO	PB	ZO	PVB	ZO	PVB
PS	NVB	PS	NM	PS	NB	PM	NM	PB	NS	PB
PB	NVB	PS	NVB	PS	NVB	PS	NVB	PM	NM	PB

4.3 系統整合

本研究之實驗使用安裝於實驗室天畫板之網路攝影機擷取實驗場域影像，藉由乙太網路逐幀傳回工作站主機，接著利用 OpenCV 開源函式庫擷取標定板特徵以獲得障礙物位置及載具位置、姿態等資訊，透過演算法計算出追蹤路徑點，最後以模糊控制推得輸出項並藉由 WIFI 傳送至無人載具主控板，進而控制載具移動及轉向，重複上述流程直至目標達成或者發生碰撞（圖 4-12）。



圖 4-13 實驗系統架構

第五章 模擬與實驗結果



5.1 模擬結果

5.1.1 靜態避障模擬結果

本研究透過不同情境驗證 3.2.1 節中描述的改良式 A*靜態避障策略能有別於傳統 A*演算法，規劃出符合載具轉向角限制下無碰撞風險之路徑。以下情境將先各別展示兩避障方法所規劃之路徑後，再分別呈現載具追蹤兩路徑之模擬時序圖以確認各路徑是否存在碰撞風險。其中，藍色圓點為載具起始點，紅色圓點為載具目標點，黑色圓圈為障礙物。路徑比較圖中（圖 5-1、5-4、5-7），藍色曲線為傳統 A*演算法所規劃之路徑，紅色曲線則為改良式 A*靜態避障策略所規劃之路徑。載具追蹤路徑之模擬時序圖中（圖 5-2、5-3、5-5、5-6，5-8、5-9）綠色曲線為載具行走軌跡。



情境 1：

第一個情境中，三障礙物在載具起始點與目標點間形成一個足夠其車身幾何條件通過的狹縫，因此傳統 A*演算法選擇較短之路徑，從狹縫穿越最終與障礙物發生碰撞（圖 5-2）。然而改良式 A*靜態避障策略判斷載具受限於其非完整約束而無法安全通過狹縫，因而選擇繞行障礙物周圍之最短路徑，最終安全抵達目標點（圖 5-3）。

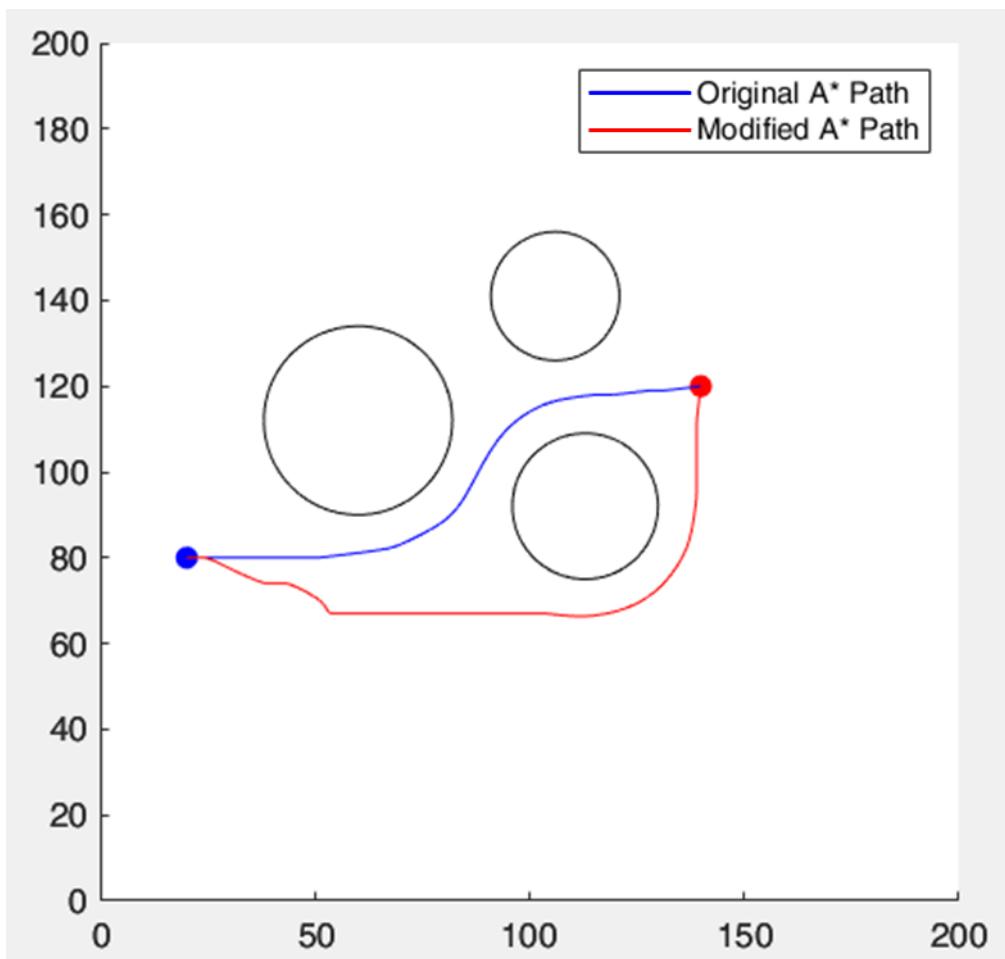


圖 5-1 情境 1（模擬）兩種路徑規劃演算法比較

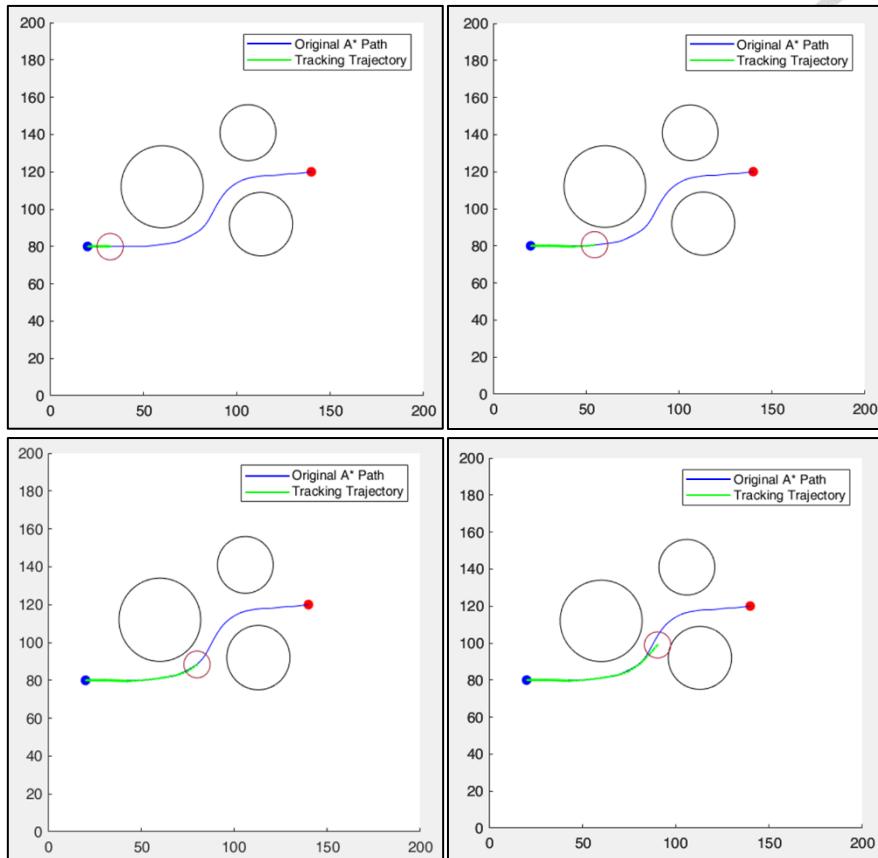


圖 5-2 情境 1 載具追蹤路徑模擬時序圖（傳統 A*演算法）

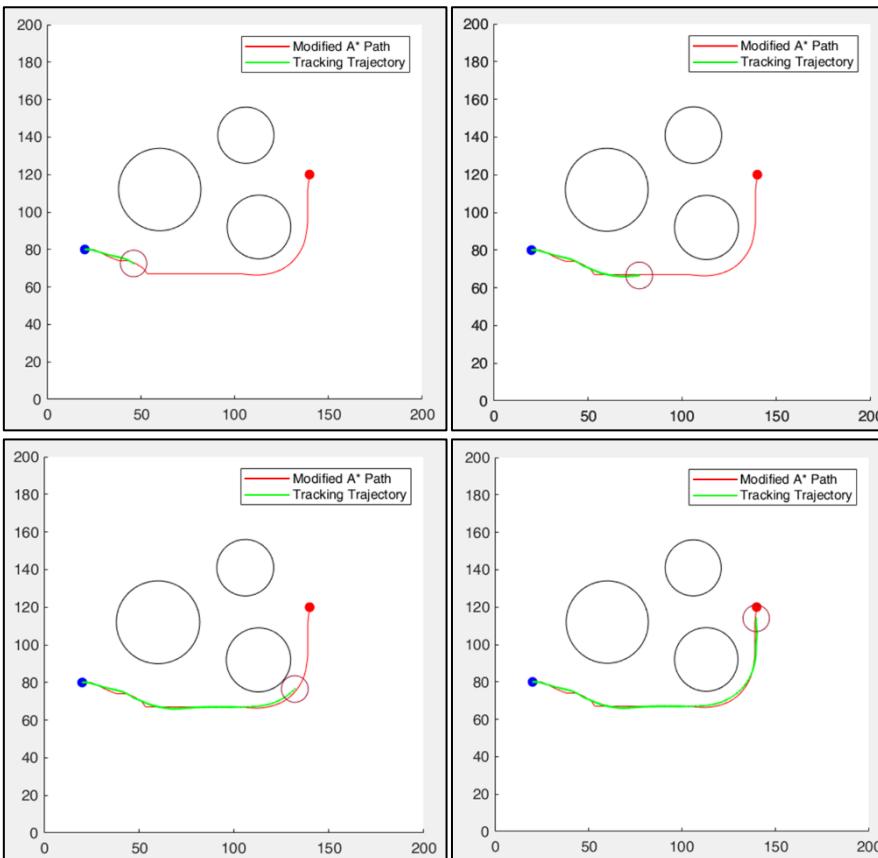


圖 5-3 情境 1 載具追蹤路徑模擬時序圖（改良式 A*靜態避障策略）



情境 2：

第二個情境中，三障礙物在起始點與目標點間形成一沿容許載具在其轉向角限制下能夠安全通過的狹縫，因此傳統 A*演算法及改良式 A*靜態避障策略皆選擇穿越狹縫前往目標點之較短路徑（圖 5-4）。載具追蹤路徑之模擬結果亦驗證了該段路徑得以順利抵達目標點（圖 5-5、5-6）。

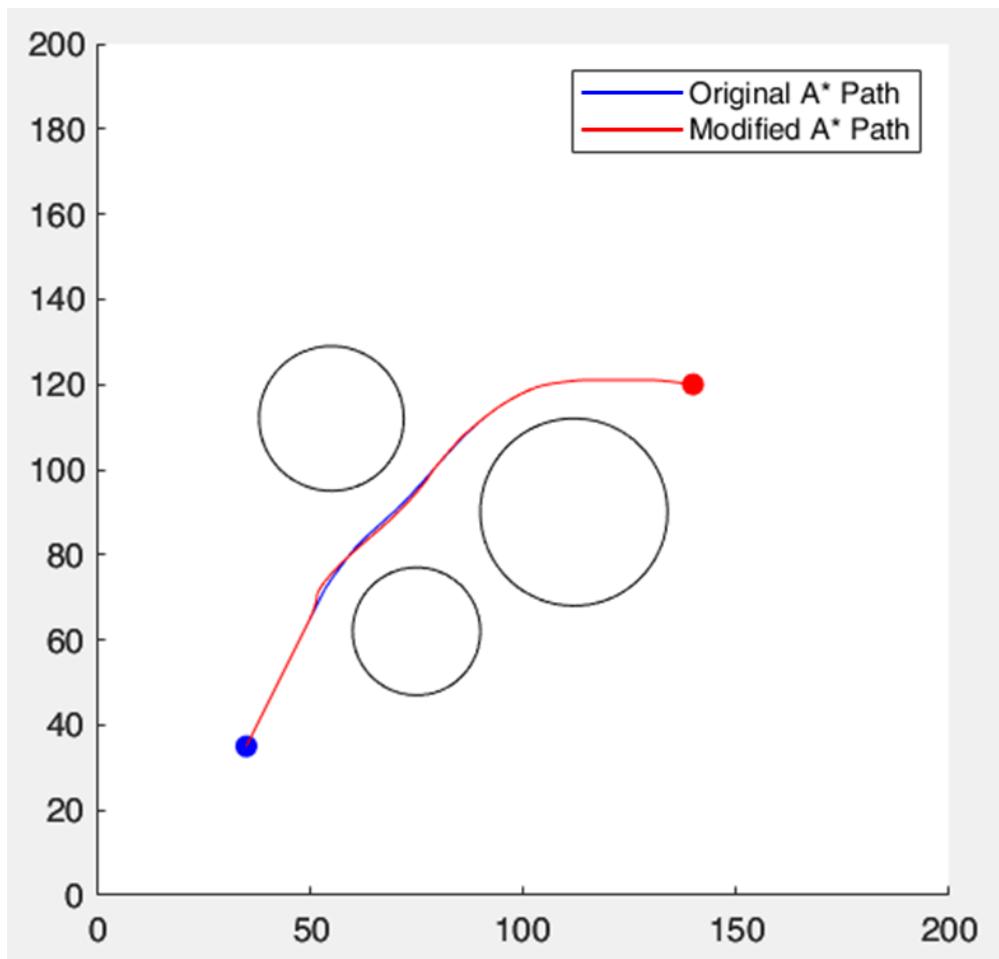


圖 5-4 情境 2（模擬）兩種路徑規劃演算法比較

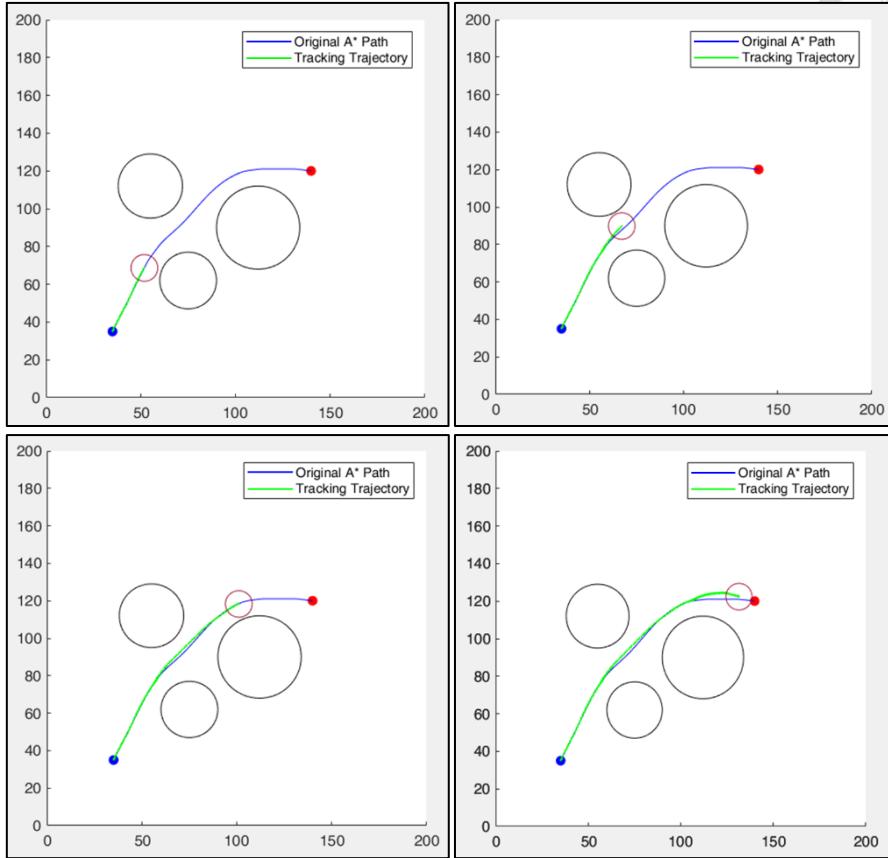


圖 5-5 情境 2 載具追蹤路徑模擬時序圖（傳統 A*演算法）

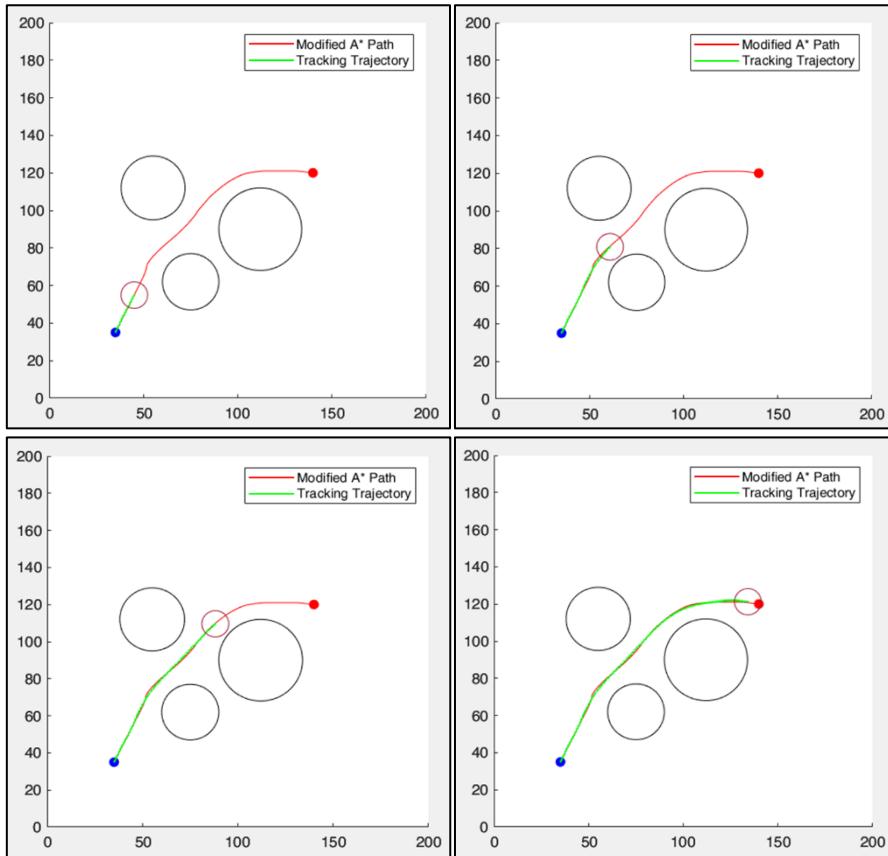


圖 5-6 情境 2 載具追蹤路徑模擬時序圖（改良式 A*靜態避障策略）



情境 3：

第三個情境與第二個情境大致相同，惟障礙物在起始點與目標點間形成之狹縫更窄小，因此改良式 A* 靜態避障策略選擇繞行障礙物周圍前往目標點，最終安全抵達（圖 5-3）。傳統 A* 演算法則礙於轉向角限制於狹縫中與障礙物發生碰撞。

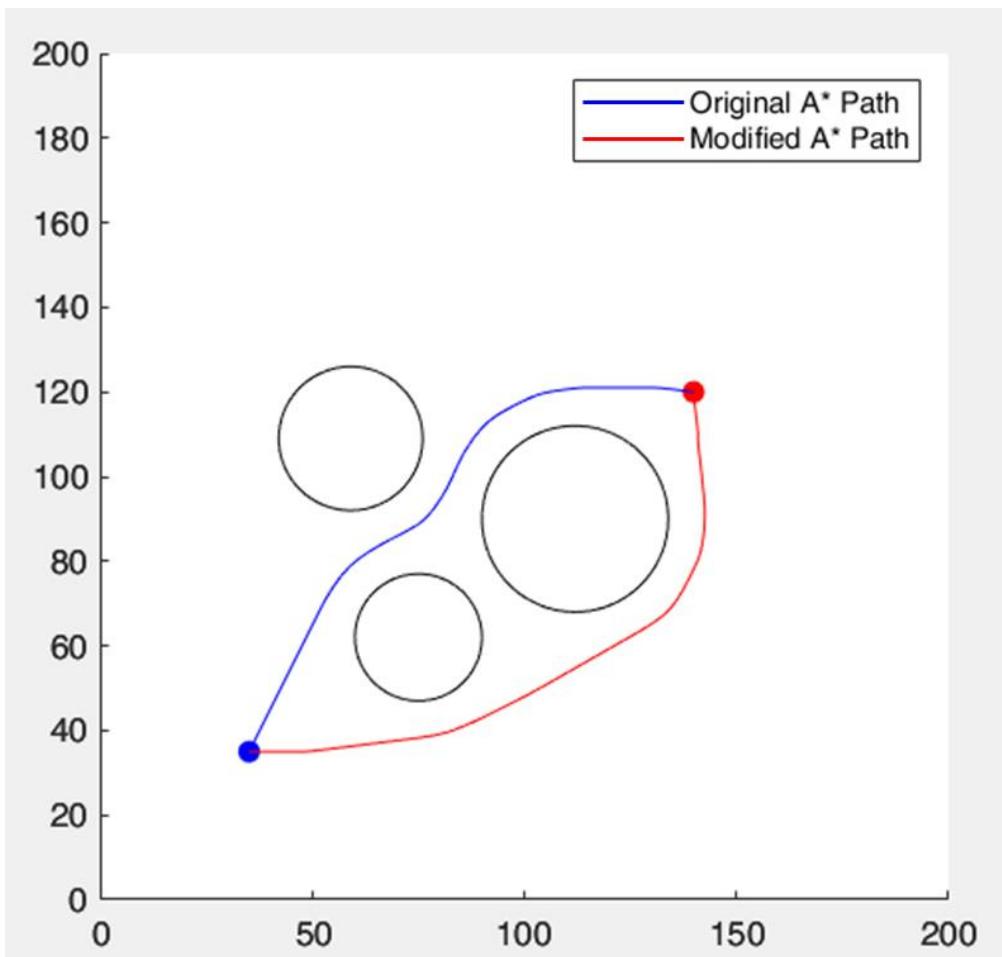


圖 5-7 情境 3（模擬）兩種路徑規劃演算法比較

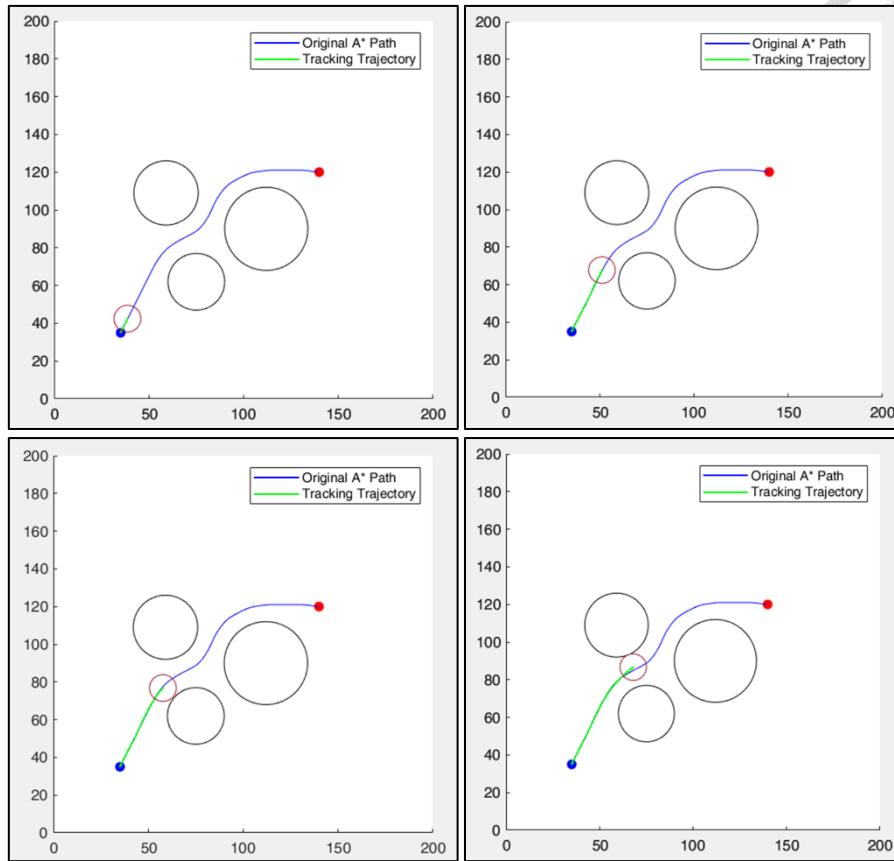


圖 5-8 情境 3 載具追蹤路徑模擬時序圖（傳統 A*演算法）

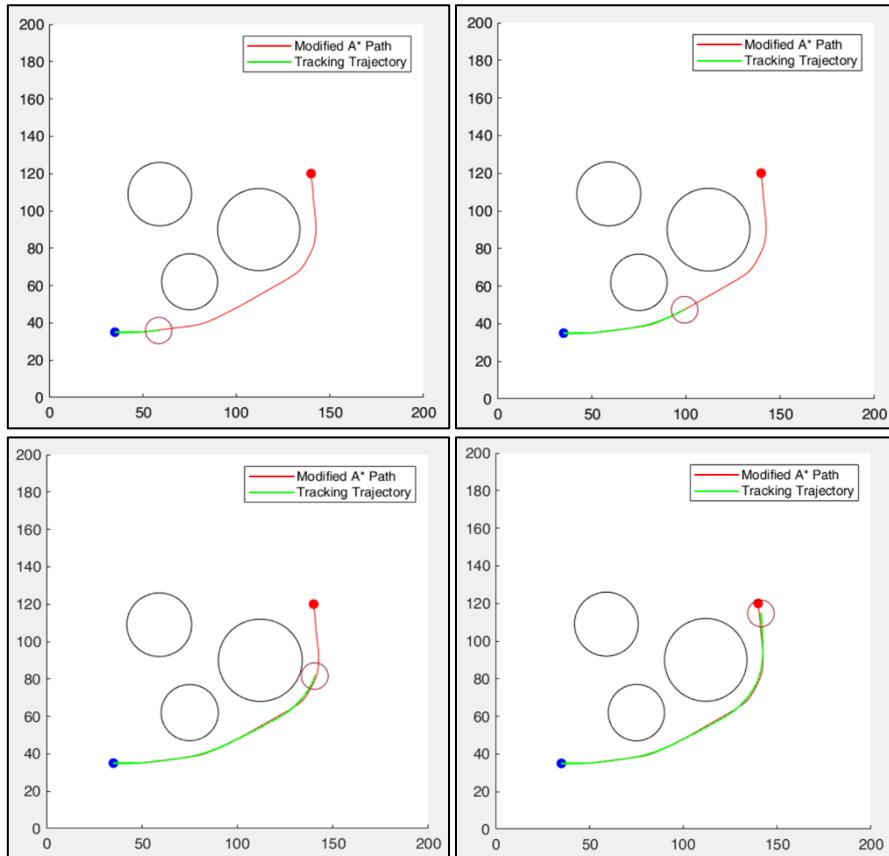


圖 5-9 情境 3 載具追蹤路徑模擬時序圖（改良式 A*靜態避障策略）



5.1.2 動態避障模擬結果

以下情境將使用動態避障模擬時序圖比較 3.2.2 節中所描述之改良式速度障區法與傳統速度障區法於單一動態障礙物環境中的避障表現。其中，藍色星號為載具起始點，紅色星號為載具目標點，紅色圓圈為載具，黑色圓圈為障礙物。

情境 4：

第四個情境中，載具朝目標點移動的路徑上出現一迎面而來的動態障礙物。此類型情境下，改良式速度障區法與傳統速度障區法有幾乎相同的避障表現，皆在差不多的位置改變速度方向，繞開障礙物抵達目標點（圖 5-10）。

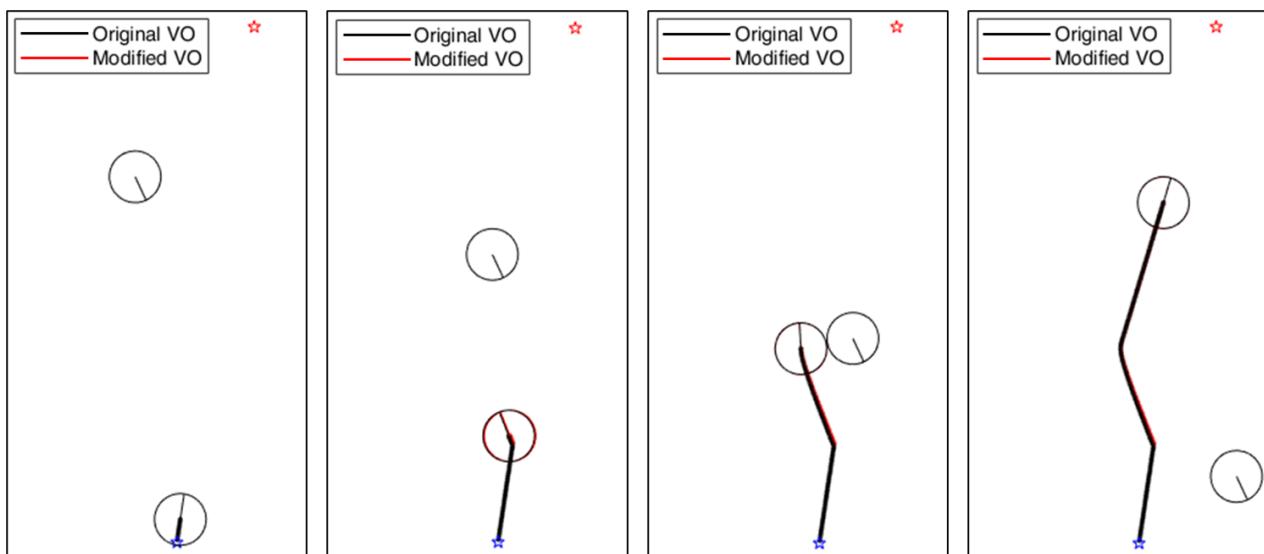


圖 5-10 情境 4 動態避障模擬時序圖



情境 5：

第五個情境中，載具起始點附近出現一與其行進方向接近垂直的動態障礙物。此類型情境下，傳統速度障區法因設定避障範圍，故出發時即改變速度方向，繞行動態障礙物，而改良式速度障區法能夠先朝目標點前進至臨界轉彎位置才改變速度方向，因此行駛路徑較短，能夠比傳統速度障區法更快到達目標點（圖 5-11）。

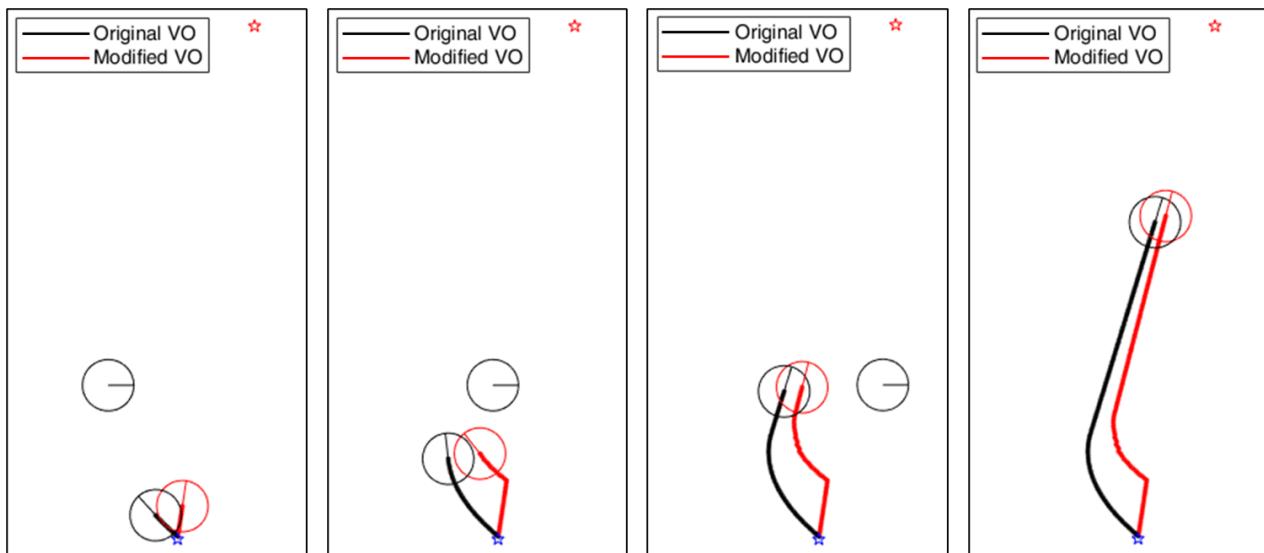


圖 5-11 情境 5 動態避障模擬時序圖



5.2 實驗結果

實驗使用第四章介紹之軟、硬體設備與系統架構，配合模糊控制系統與影像處理之理論進行。實驗場地為台灣大學應用力學所 325 實驗室，實驗場域大小約為 $3.45 \times 2.66(m^2)$ (圖 5-12)。以下實驗情境與前節模擬情境相同，透過實驗驗證模擬結果正確。

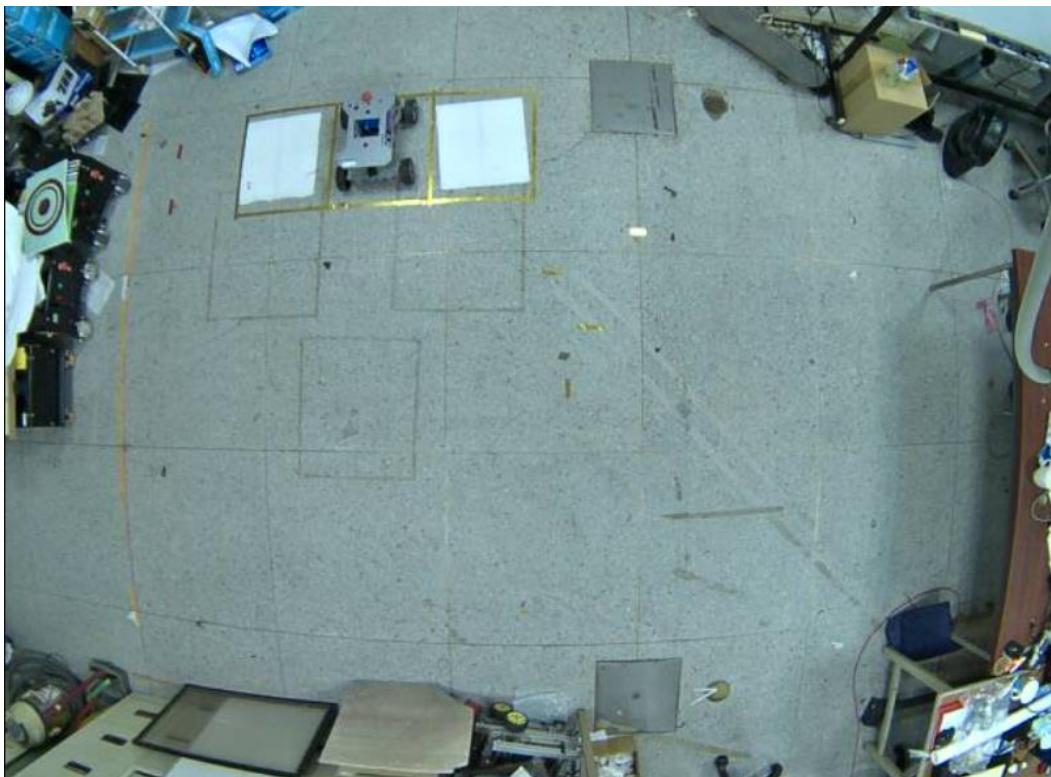


圖 5-12 實驗場域



情境 1：

傳統 A*演算法在穿越狹縫時與障礙物發生碰撞（圖 5-13、5-14），改良式 A*^{*} 靜態避障策略則繞過障礙堆順利抵達目標點（圖 5-15、5-16）。

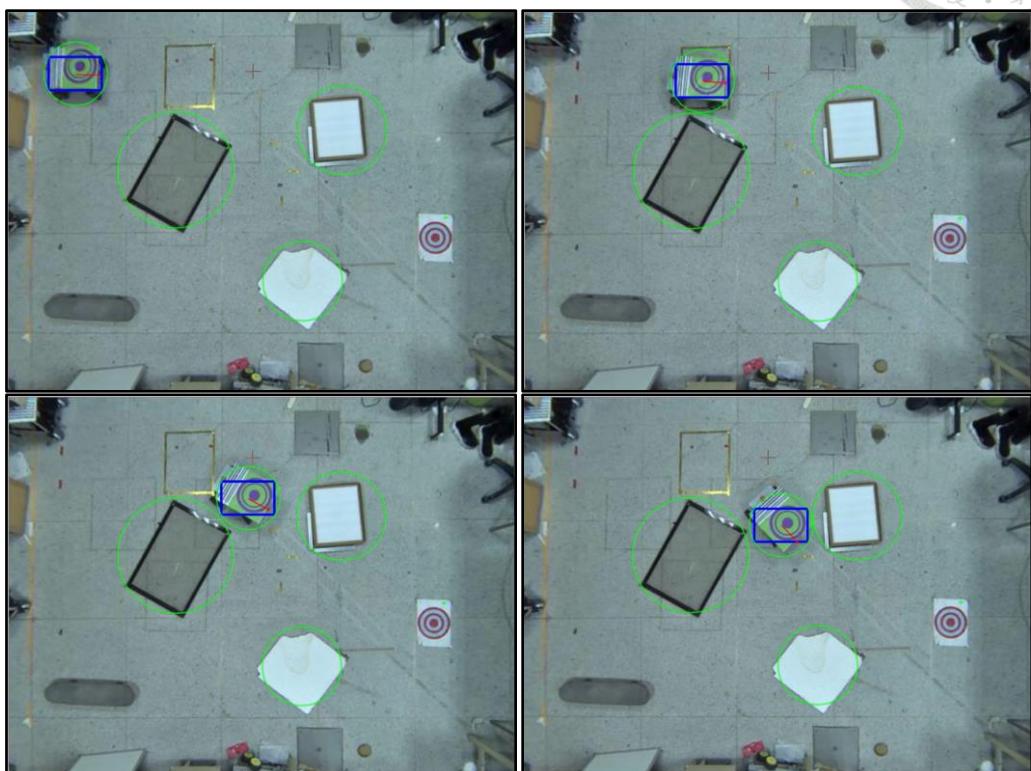


圖 5-13 情境 1 載具追蹤路徑實驗時序圖（傳統 A*演算法）

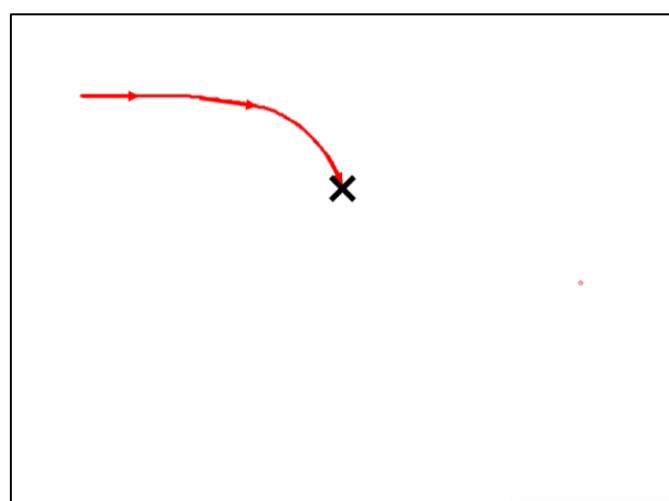


圖 5-14 情境 1 實驗載具路徑圖（傳統 A*演算法）

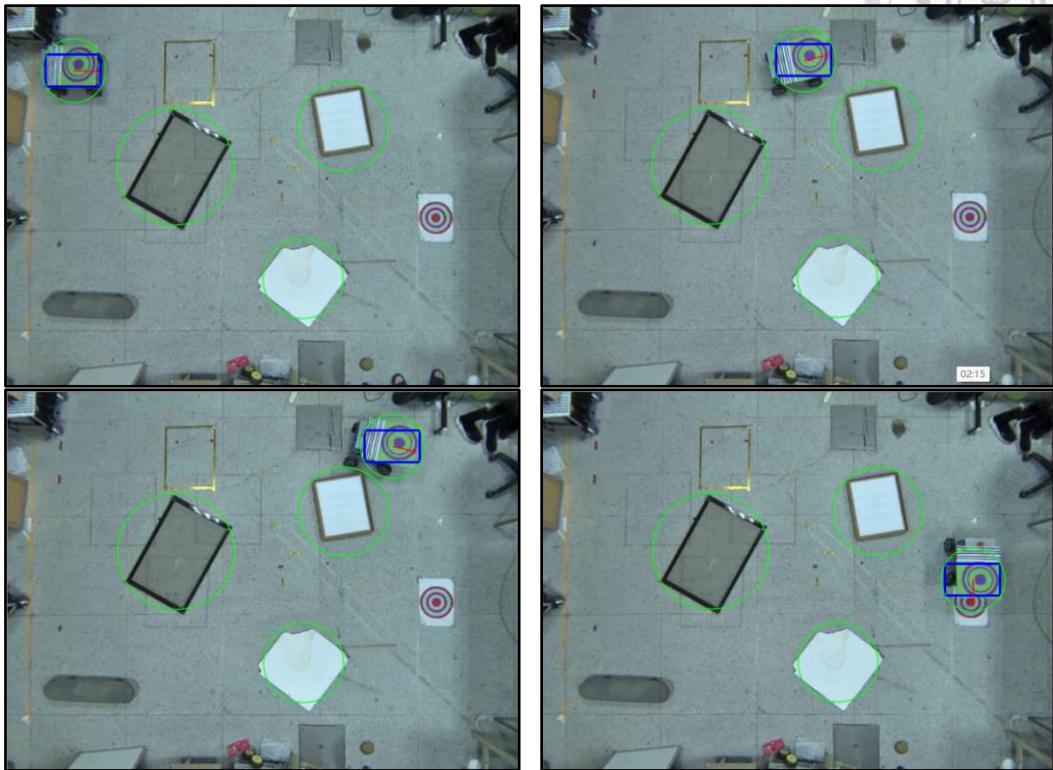


圖 5-15 情境 1 載具追蹤路徑實驗時序圖（改良式 A*靜態避障策略）

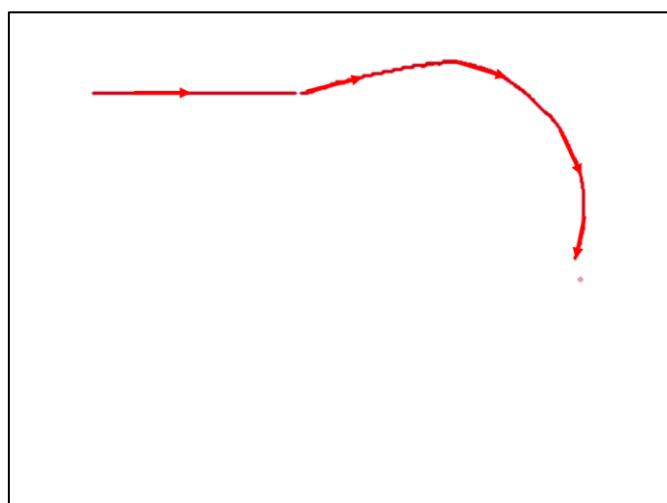


圖 5-16 情境 1 實驗載具路徑圖（改良式 A*靜態避障策略）



情境 2：

在這個情境中，傳統 A*演算法與改良式 A*靜態避障策略皆選擇從狹縫中穿越，以較短路徑前往目標點，且兩方法皆未發生碰撞。

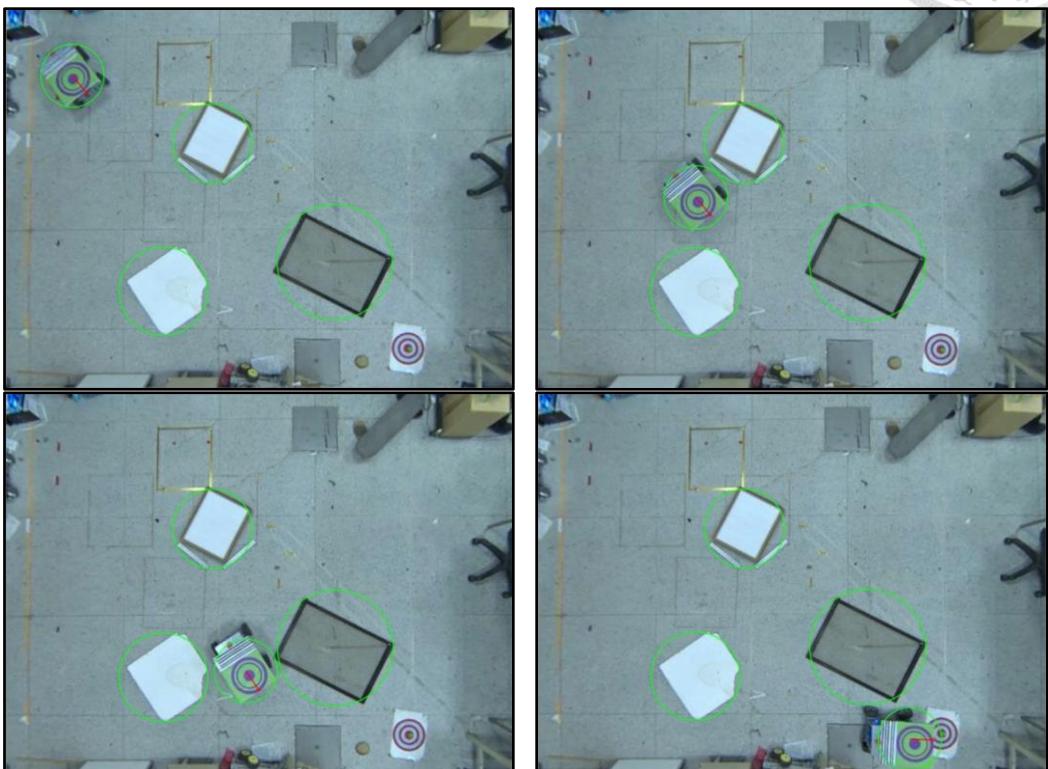


圖 5-17 情境 2 載具追蹤路徑實驗時序圖（傳統 A*演算法）

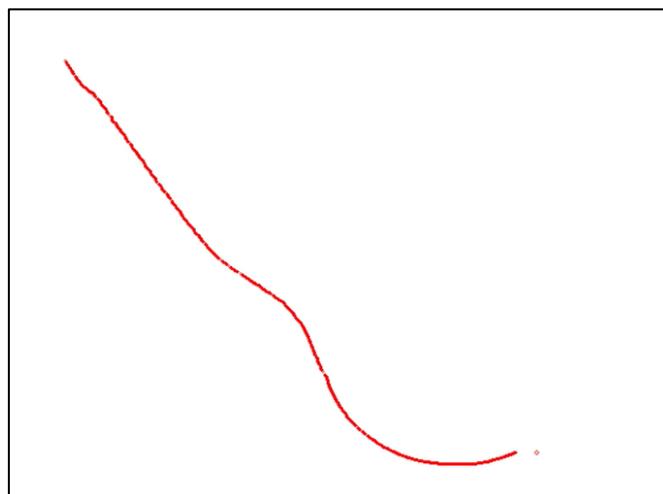


圖 5-18 情境 2 實驗載具路徑圖（傳統 A*演算法）

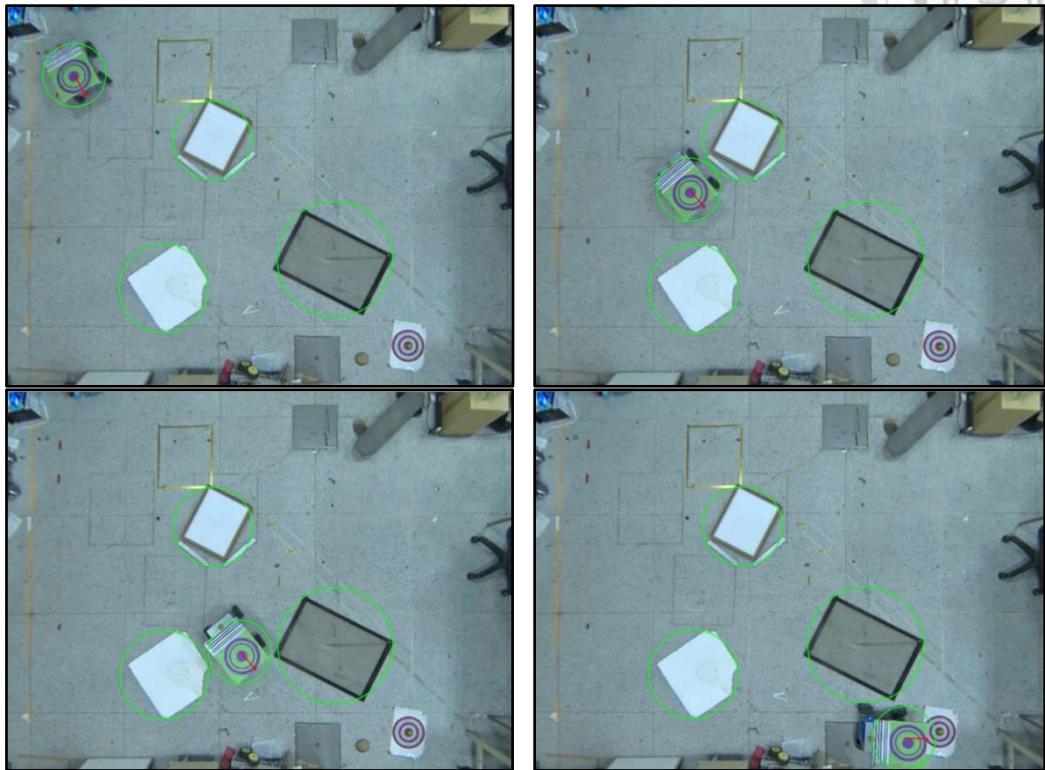


圖 5-19 情境 2 載具追蹤路徑實驗時序圖（改良式 A*靜態避障策略）

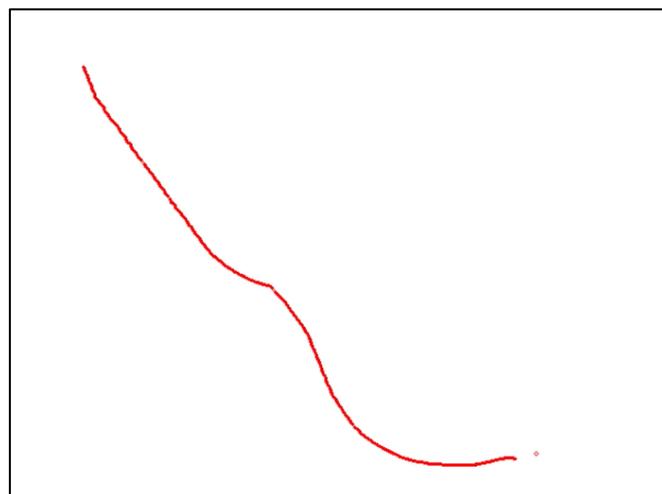


圖 5-20 情境 2 實驗載具路徑圖（改良式 A*靜態避障策略）



情境 3：

此情境中，障礙物擺放位置與情境 2 大致相同，惟彼此間距更靠近，使得狹縫空間更加狹小，因此當傳統 A*演算法選擇從狹縫穿越時，在轉角處與障礙物發生擦撞（圖 5-21、5-22）；而改良式 A*靜態避障策略因判斷狹縫空間不足，因此以繞行方式避開障礙物安全抵達目標點（圖 5-23、5-24）。

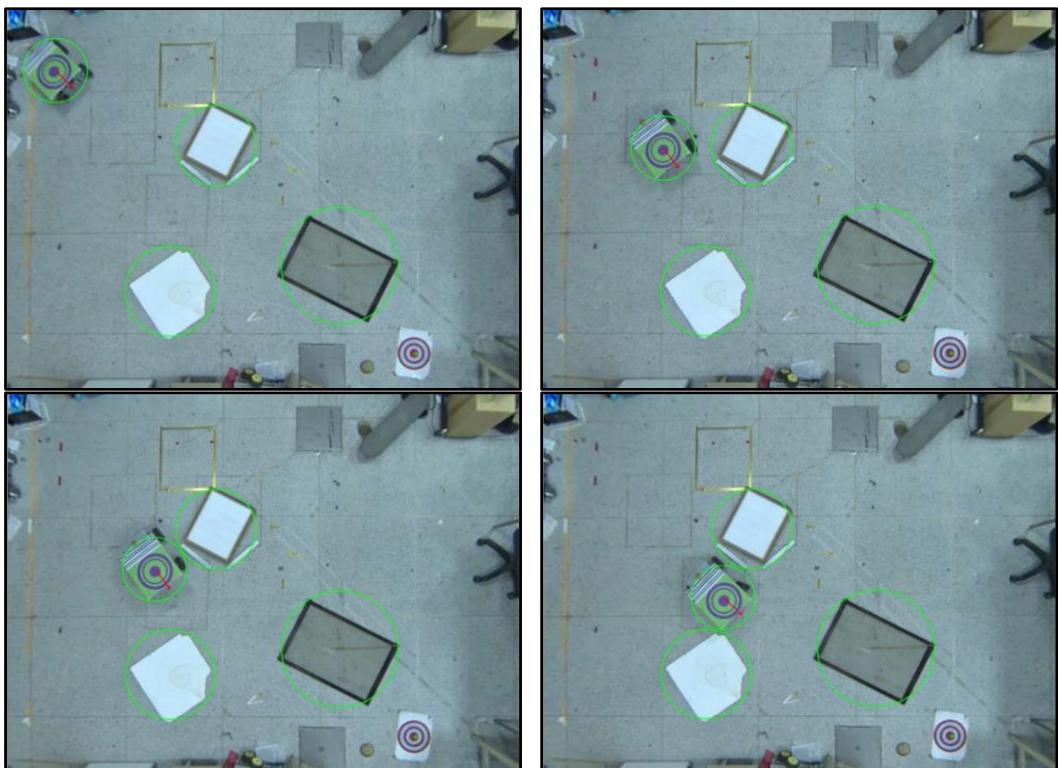


圖 5-21 情境 3 載具追蹤路徑實驗時序圖（傳統 A*演算法）

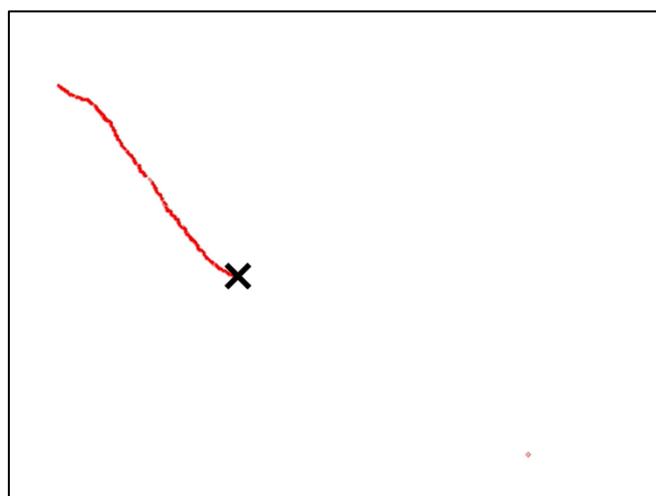


圖 5-22 情境 3 實驗載具路徑圖（傳統 A*演算法）

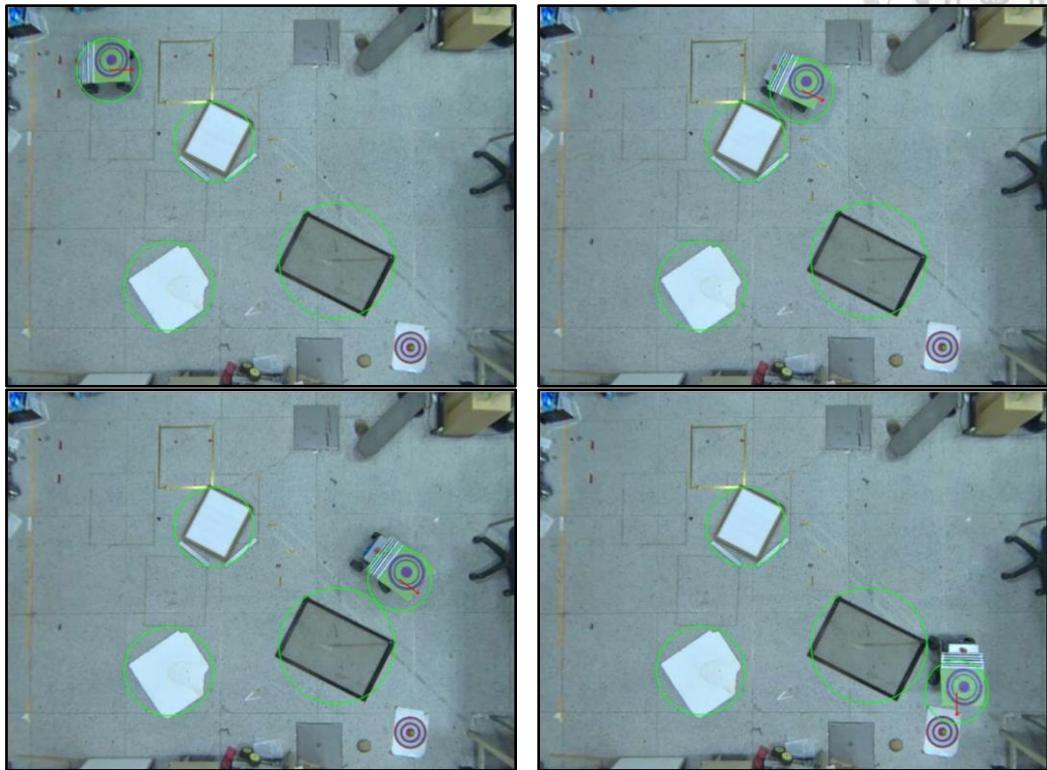


圖 5-23 情境 3 載具追蹤路徑實驗時序圖（改良式 A*靜態避障策略）

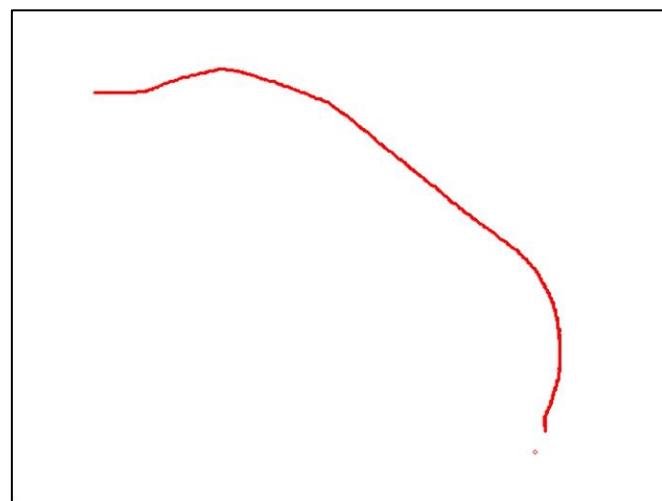


圖 5-24 情境 3 實驗載具路徑圖（改良式 A*靜態避障策略）



情境 4：

為使避障演算法更加靈活，此情境中將載具起始位置、障礙物位置與目標點位置設定為可任意擺放，並透過標定板由魚眼鏡頭讀取所有位置資訊，最後由工作站運行演算法規劃避障路徑並控制實驗載具沿路徑前往目標點。

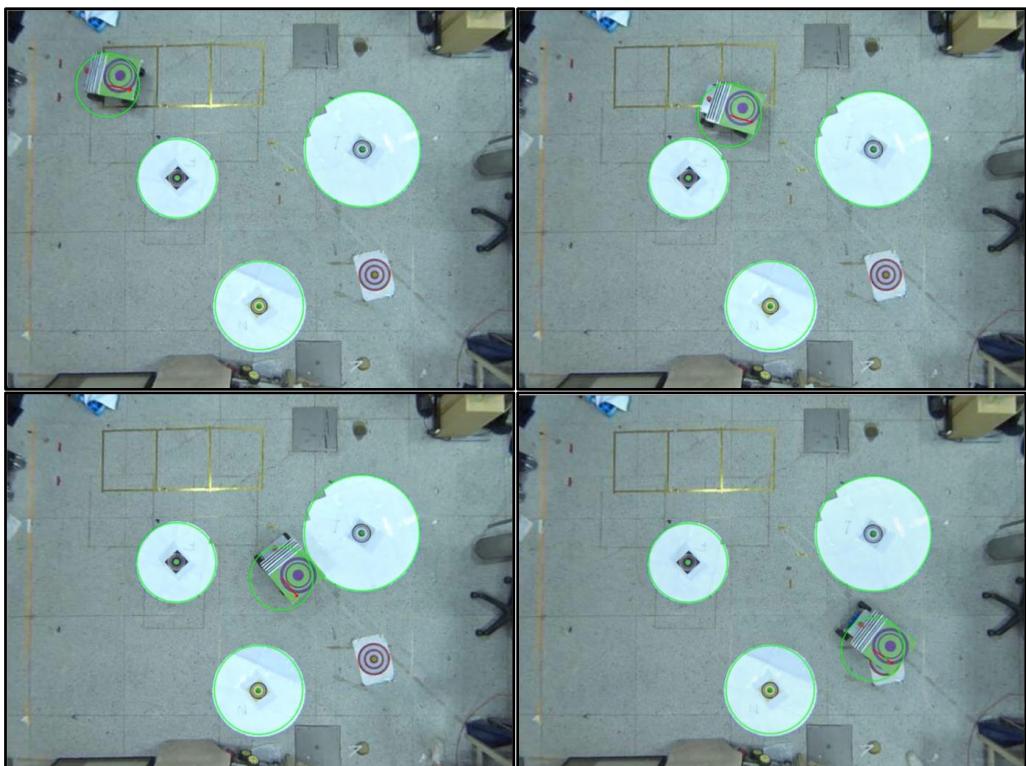


圖 5-25 情境 4 載具追蹤路徑實驗時序圖（改良式 A*靜態避障策略）

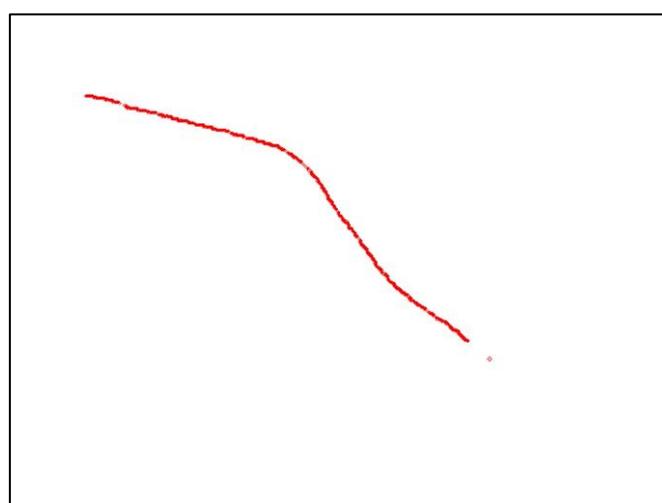


圖 5-26 情境 4 實驗載具路徑圖（改良式 A*靜態避障策略）



5.3 實驗結果討論

由實驗結果可以驗證本研究所提出之改良式 A* 靜態避障策略能夠有效避免載具落入非完整約束下存在碰撞風險的狹縫中，然而，仍有待改善之處。

由於實驗載具位置仰賴魚眼鏡頭透過網路傳送影像資訊至工作站主機進行影像辨識，過程中通訊延遲將造成載具於避障程序中的位置與實際位置有所出入。此外，當載具位於實驗場域之邊陲地帶時，魚眼鏡頭之畸變誤差亦影響載具實際位置之判讀，造成實驗誤差。

儘管如此，載具還是能夠大致貼合預先規劃之路徑，於行駛過程中避開碰撞風險抵達目標點，證明本研究所提出之改良式避障演算法能有效完成任務目標。

第六章 結論與未來方向



本研究提出一個找出符合阿克曼單車模型之臨界轉彎點演算法，該算法旨在找出載具與障礙物之碰撞距離，並考慮載具轉向角限制找出不發生碰撞的轉彎點。本研究改良路徑規劃 A*演算法及速度障區法 VO，將傳統 A*及 VO 等避障方法與臨界轉彎結合。傳統 A*路徑規劃將障礙物視為固定大小，而加入臨界轉彎算法後，每一次搜索路徑時都會根據當前探索節點狀態動態調整障礙物大小，使得生成路徑上的路徑點位於該狀態下的臨界轉彎範圍外而成功避障。模擬及實驗中顯示傳統 A*於存在轉向限制的狹縫環境下會選擇穿越，最終導致與障礙物發生擦撞，而改良式 A*算法會選擇繞過障礙物而非穿過；改良後之 VO 在速度選擇上則會較傳統 VO 靈活許多。

本研究基於阿克曼單車模型，根據其非完整運動約束，利用上述算法找出符合約束之避障路徑。該算法之概念可套用在其他載具上，如：船、飛機等。此外，臨界轉彎演算法亦可與其他路徑規劃及避障方法結合，如：RRT、PRM、Potential Field 等。

隨著科技進步，市面上已越來越多無人自駕車，提升無人自駕車之安全性能尤為重要，目前國內外發生自駕車事故新聞層出不窮，如汽車失靈及將追撞前車等，若能夠將臨界轉彎演算法應用於緊急避障，相信能夠為自動駕駛加上最後一道保護措施，提升其安全性。

參考文獻



- [1]Ackermann, J., Bartlett, A., Kaesbauer, D., Sienel, W., & Steinhauser, R. (1993). Robust Control: Systems with Uncertain Physical Parameters. Springer London.
- [2]Dijkstra, E.W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische mathematik*, 1(1), pp.269–271.
- [3]Fiorini, P., & Shiller, Z. (1998). Motion planning in dynamic environments using velocity obstacles. *The international journal of robotics research*, 17(7), 760-772.
- [4]Gordon, W. J., & Riesenfeld, R. F. (1974). B-spline curves and surfaces. In Computer aided geometric design (pp. 95-126). Academic Press.
- [5]Hart, P., Nilsson, N. & Raphael, B., (1968). A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, 4(2), pp.100–107.
- [6]Karaman, S., & Frazzoli, E. (2011). Sampling-based algorithms for optimal motion planning. *The international journal of robotics research*, 30(7), 846-894.
- [7]Kavraki, L. E., Svestka, P., Latombe, J. C., & Overmars, M. H. (1996). Probabilistic roadmaps for path planning in high-dimensional configuration spaces. *IEEE transactions on Robotics and Automation*, 12(4), 566-580.
- [8]SUN, X., YEOH, W., & KOENIG, S. (2010). Moving target D* lite. In: Proceedings of the 9th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems: volume 1-Volume 1. p. 67-74.
- [9]鄭臣凱， “無人載具之避障路徑規劃及智能控制設計” ，國立台灣大學應用力學所碩士論文，中華民國一百一十一年七月。