

國立臺灣大學工學院應用力學研究所

碩士論文

Graduate Institute of Applied Mechanics

College of Engineering

National Taiwan University

Master's Thesis

多載具編隊及協同控制之設計與實驗

Design and Experiment of Multi-Vehicles Formation

and Cooperative Control

彭家暉

Chia-Hui Peng

指導教授：王立昇 博士

Advisor: Li-Sheng Wang, Ph.D

中華民國 108 年 7 月

July, 2019



致謝



首先非常感謝王立昇博士兩年來悉心的指導，碩一時期老師常提點我們應該帶著如何的態度去學習，也常與我們討論關於教育方面的課題，著實獲益良多；碩二時期則常點出我們做研究時遇到的盲點，也為我們指引方向，讓這一年的研究有非常明確的努力目標。

再來感謝劉禮榮學長以及林宗佑學長在我研究遇到困難時常為我解惑，吳泓霆學長也常與我們相約聚會，關心我們的研究狀況，為原本較為苦悶的研究生生活帶來了很多樂趣。也感謝同屆同學張文耀和張晨煒常與我討論研究上的問題也給予建議，另外實驗室的學弟們包括蔡耀霆、鄭柏洋、吳為斌同學平時就算必修課繁重也常常協助我們進行實驗，在此表達感謝之意。

特別感謝我的父母和女朋友徐尉給予我生活上以及心靈上的支持，陪伴我走過這兩年的研究所生活，在遇到困境時為我加油打氣，研究順利的時候也提醒我別掉以輕心，真的非常慶幸一路走來並不是獨自一人。

最後感謝口試委員王和盛教授、卓大靖教授、張帆人教授給予的批評及指教，各位老師的見解著實讓我獲益良多。

摘要



本論文利用多代理器(Multi-agent)的概念結合協同控制理論提出一個即時的室內無人載具編隊控制演算法。利用建置虛擬參考點以及虛擬座標系使載具間能夠維持固定的相對距離，並隨著路徑變化調整隊形姿態。

另外我們利用 B-樣條曲線(B-spline curve)設計真實世界中載具的可能行走路徑，並使用 HSV 色彩分佈統計直方圖產生過濾器，使室內攝相機能夠即時偵測不同載具的位置及姿態以回傳主控站。

模擬和實驗結果顯示，此演算法能夠順利完成載具的編隊控制，並穩定的達成 B-樣條曲線的路徑追蹤任務。

關鍵詞：多代理器、協同控制、B-樣條曲線、無人載具編隊

Abstract



This thesis proposes a real-time formation and control algorithm for a team of indoor unmanned vehicles based on the concept of multi-agent and cooperative control theory. A virtual reference point and the associated virtual coordinate system are used to maintain the fixed relative positions between the vehicles, while keeping the formation as the path changes.

In addition, we use the B-spline curve to design the possible path of the vehicle in the real world, and the HSV color distribution statistical histogram to generate the filter, so that the indoor camera can instantly detect the position of different vehicles in the team and send the information to the main control station.

Simulation and experimental results show that this algorithm can successfully maintain the formation of the team and fulfill the path tracking of the B-spline curve designed from a path-planning algorithm

Key words : Multi-agent 、 Cooperative Control 、 B-spline curve 、 Unmanned vehicle formation

目錄



致謝	2
摘要	3
Abstract.....	4
目錄	5
圖目錄	7
表目錄	10
第一章 緒論	11
1.1 前言與研究動機	11
1.2 文獻回顧	11
1.2.1 室內全域視覺定位系統與載具追線控制	11
1.2.2 多代理器與協同控制[9][13].....	12
1.3 研究內容與成果	13
1.4 論文架構	14
第二章 多載具編隊演算法設計	15
2.1 協同控制 (Cooperative Control)[6][7]	15
2.1.1 雷諾法則 (Reynolds' Rule)[3]	16
2.1.2 資訊傳遞圖(Communication Graph)[7]	16
2.1.3 將雷諾法則與資訊傳遞圖應用至動力運動系統[7]	18
2.2 虛擬參考點(Virtual Reference State)及虛擬座標系(Virtual Coordinate)[6] 20	
2.2.1 虛擬參考點[6]	20
2.2.2 虛擬座標系[6]	22
2.2.3 系統流程圖	27



2.3 B-樣條(B-Spline)曲線軌跡設計[12].....	28
2.3.1 B-樣條基底函數[12]	28
2.3.3 B-樣條曲線軌跡設計[12]	35
第三章 物體辨識及定位[1]	41
3.1 數位影像觀念[1]	41
3.2 RGB 及 HSV 色彩空間[1]	42
3.3 影像之統計特性[1]	44
3.3.1 直方圖(histogram) [1].....	44
3.3.2 直方圖比較(histogram comparison) [1]	47
3.3.3 色彩分佈直方圖過濾器實驗	48
第四章 硬體配置與系統整合	53
4.1 硬體配置	53
4.1.1 M3006 型網路攝影機.....	55
4.1.2 馬達編碼器[2]	56
4.2 載具運動方程式[2]	58
4.3 載具路徑追蹤控制[14]	60
4.3.1 模糊控制簡介[14]	60
4.3.2 路徑追蹤控制[14]	61
第五章 模擬與實驗結果分析	66
5.1 模擬工具	66
5.2 模擬結果	66
5.3 實驗架構	71
5.4 協同控制編隊實驗	71
第六章 結論與未來方向	75
參考文獻	76



圖目錄

圖 2-1 鳥類成群飛行.....	15
圖 2-2(a)碰撞避免 (b)速度匹配 (c)群體聚集.....	16
圖 2-3 資訊傳遞圖[7].....	17
圖 2-4 生成樹 Spanning Tree[7].....	18
圖 2-5 虛擬參考點示意圖.....	21
圖 2-6 幾何隊形示意圖.....	22
圖 2-7 虛擬座標系示意圖.....	23
圖 2-8 藉由虛擬座標系使隊伍姿態隨路徑姿態變化.....	24
圖 2-9 成員對於虛擬參考點之認知[6].....	25
圖 2-10 虛擬參考點位置認知共識控制層面資訊傳遞圖[6].....	26
圖 2-11 載具控制層面資訊傳遞圖[6].....	27
圖 2-12 系統流程圖.....	27
圖 2-13[12] 零次基底函數($U = (0,0,0,0,1,2,3,4,5,6,6,6,6)$, $p = 0$) ,	29
圖 2-14[12] 一次 B-樣條基底函數($U = (0,0,0,0,1,2,3,4,5,6,6,6,6)$, $p = 1$) ,	30
圖 2-15[12] 二次 B-樣條基底函數($U = (0,0,0,0,1,2,3,4,5,6,6,6,6)$, $p = 2$) ,	30
圖 2-16[12] 三次 B-樣條基底函數($U = (0,0,0,0,1,2,3,4,5,6,6,6,6)$, $p = 3$).....	31
圖 2-17 B-樣條曲線($U = (0,0,0,0,1,2,3,4,5,6,6,6,6)$, $p = 3$) [12].....	33
圖 2-18 B-樣條曲線局部修正特性示意圖[12].....	34
圖 2-19 B-樣條曲線凸包性質[12].....	34
圖 2-20 重複控制點示意圖($P_2 = P_3$) [12].....	35
圖 2-21 週期性均勻 B-樣條基底函數($U = (0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11)$, $p = 3$) [12]... 37	

圖 2-22[12] 開放均勻 B-樣條基底函數($U = (0,0,0,0,1,2,3,4,5,5,5,5)$, $p = 3$)	37
圖 2-23 [12] 週期非均勻 B-樣條基底函數($U = (0,1,2,3,4,4,5,6,7,7,8,9)$, $p = 3$)	38
圖 2-24[12] B-樣條曲線軌跡設計流程圖	40
圖 3-1 RGB 色彩空間[10].....	43
圖 3-2 HSV 色彩空間[11]	43
圖 3-3 自由女神像[1].....	44
圖 3-4 自由女神像影像之直方圖[1].....	45
圖 3-5 林肯圖[1].....	45
圖 3-6 林肯圖像之直方圖[1].....	46
圖 3-7 本實驗所使用之色彩分佈.....	49
圖 3-8 透過攝相機擷取畫面(藍底紅線樣本).....	49
圖 3-9 透過攝相機擷取畫面(黃底藍線樣本).....	50
圖 3-10 將擷取畫面修剪成色彩樣本(藍底紅線樣本).....	50
圖 3-11 將擷取畫面修剪成色彩樣本(黃底藍線樣本).....	51
圖 3-12 色彩分佈直方圖過濾器實驗結果(藍底紅線樣本)	52
圖 3-13 色彩分佈直方圖過濾器實驗結果(黃底藍線樣本)	52
圖 4-1 客製化載具平台[2].....	54
圖 4-2 整體系統架構[2].....	54
圖 4-3 M3006 型網路攝影機	55
圖 4-4 載具定位示意圖	57
圖 4-5 載具模型示意圖	58
圖 4-6 模糊控制器基本架構[14].....	60
圖 4-7 參考路徑與載具姿態示意[14].....	61
圖 4-8 輸入變數 d_e 之歸屬函數[14].....	62
圖 4-9 輸入變數 θ_e 之歸屬函數[14]	62



圖 4-10 輸入變數 θ_e 之歸屬函數[14].....	63
圖 4-11 輸出變數 Δv 之歸屬函數[14]	63
圖 4-12 輸出變數 $\Delta \omega$ 之歸屬函數[14].....	63
圖 4-13 最小距離閾值 d_{\min} 及最小角度閾值 θ_{\min} [14].....	65
圖 5-1 多載具編隊控制模擬工具介面圖.....	66
圖 5-2 資訊傳遞圖(虛擬參考點認知層面).....	67
圖 5-3 資訊傳遞圖(載具控制層面).....	68
圖 5-4 載具成員與參考點的相對位置關係.....	68
圖 5-5 虛擬參考點、載具和路徑(起始位置).....	69
圖 5-6 虛擬參考點、載具和路徑(行進間 1).....	69
圖 5-7 虛擬參考點、載具和路徑(行進間 2).....	70
圖 5-8 虛擬參考點、載具和路徑(抵達終點).....	70
圖 5-9 編隊實驗(起點).....	71
圖 5-10 編隊實驗(行進間).....	72
圖 5-11 編隊實驗(行進間).....	72
圖 5-12 編隊實驗(行進間).....	73
圖 5-13 編隊實驗(行進間).....	73
圖 5-14 編隊實驗(終點).....	74

表目錄



表 3-1 相似度的比較方法.....	47
表 4-1 攝影機規格表.....	56
表 4-2 路徑追蹤模糊規則庫.....	65
表 5-1 協同控制輸入的各項參數.....	67

第一章 緒論



1.1 前言與研究動機

近年無人載具的風潮興起之後，其相關的應用領域也跟著蓬勃發展，利用多代理器(Multi-agent)的概念形成無人載具隊形以執行各種任務便是一個相當熱門的領域。多代理器的概念是指多個可自主控制並感測環境資訊的載具，透過一個決策系統一起合作執行相同目標的任務，其優點是能夠提升工作效率、增加任務成功率並降低單一個體開發的成本與困難度。我們可將一個龐大繁雜的任務分解成多個相對容易的小任務，將這些任務分派給各個群體成員後，再透過成員間的資訊交流與決策系統即時調配任務一起達成主要的任務目標。在自然界中也常能看到編隊運動的實例，例如鳥群、螞蟻以及蜜蜂等等，都是透過分工以及資訊交流結合群體的力量完成任務。如前述提到，開發多代理器的條件包括了個別成員的感測和控制能力、成員間的資訊流通以及決策系統的整合等等。本論文即提出一種利用多代理器概念結合協同控制理論的方法，以完成多載具的編隊控制任務。

1.2 文獻回顧

1.2.1 室內全域視覺定位系統與載具追線控制

Liu[1]使用影像特徵抽取並結合分類器訓練，搭配 HSV 色彩分佈直方圖使室內攝相機能夠準確並即時的偵測載具位置，再利用霍夫線轉換判定載具姿態，最後使用模糊控制理論使載具能夠順利完成追線任務。



Lin[2]結合 Liu[1]的室內無人載具定位系統，利用改良式的 A*路徑規劃演算法搭配卡爾曼濾波器預測動態障礙物軌跡，使載具能夠即時的避開靜態和動態的障礙物完成路徑規劃。

Lee[12]利用 B-樣條曲線(B-spline curve)理論，產生平滑軌跡的設計方法，並透過硬體實驗，完成無人載具之路徑平滑軌跡追蹤控制。

本論文將 Liu[1]的室內無人載具定位系統推廣至多載具系統，並使用協同控制理論提出一套多載具的編隊控制演算法，最後結合 Lee[12]的 B-樣條曲線路徑設計方法，使載具群體達成路徑追蹤任務。

1.2.2 多代理器與協同控制[9][13]

無人載具發展至今，有別於以往載具單純的動力系統，無人載具常搭載有強大的運算處理器以及感測器，能夠自主偵測環境並規劃出路徑。而若透過團隊合作、共享資訊和互相協調的方式運營無人載具團隊，將能更進一步提升工作效率與操作能力。多載具的系統的應用包括軍用戰鬥、監視與偵查系統、物料搬運等等。

為了達成載具團隊的任務目標，我們需將複雜的主任務拆解分割成多項能夠簡單執行的任務，再指派給團隊中的各成員，因此我們需要引入多代理器的概念。多代理器系統(Multi-agent System，縮寫 M.A.S.)，是由環境中多個互相影響的代理器所組成的系統。多代理器系統可以解決單個代理器或單個系統難以或不可能解決的問題。在此種系統中的代理器可分為以下幾種類型：[9]

1. 被動代理器(Passive Agent)：不具有任務目標的代理器，例如路徑規劃中的障礙物。
2. 主動代理器(Active Agent)：具有簡單任務目標的代理器。例如模擬鳥群中的鳥、追趕獵物的掠食者等等。



3. 認知代理器(Cognitive agents)：任務目標較為複雜的代理器。例如編隊控制中的載具成員。

另外在此系統中的代理器因需要單獨執行被指派的任務，因此需要具備以下特性：[9]

1. 自治(Autonomy)：代理器需至少具有部分的自我意識。
2. 區域視覺(Local View)：系統中的代理器具有自主環境周遭的感測能力，但並不具有感測整體系統周遭環境的能力(Global View)。
3. 去中心化(Decentralization)：代理器皆為能自主控制的個體，非由主要決策中心系統控制。

而協同控制理論(Cooperative Control)則是結合圖學(Graph Theory)探討一個多代理器系統中成員的資訊傳遞情形對於群體行為、工作效率的影響，以及透過不同的控制輸入達成不同的任務目標，例如集合、成群移動、隊型控制等等。

1.3 研究內容與成果

Liu[1]和 Lin[2]在室內無人載具定位系統下完成了單載具的即時路線規劃以及動態障礙物的偵測及避障。本論文將 Liu[1]的定位系統利用 HSV 色彩分佈直方圖產生過濾器，使室內攝相機能夠即時且準確的偵測多個載具的位置並回傳主控站，藉以推廣至多載具的定位系統。另外本論文利用協同控制理論，結合虛擬參考點及虛擬座標系等方法完成無人載具的隊形編排，並結合 Lee[12]設計的 B-樣條曲線模擬載具的真實路徑，最後經模擬和實驗證實此方法之可行性。



1.4 論文架構

本章為緒論，接下來本論文將以下列順序說明：

第二章將介紹協同控制理論以及虛擬參考點和虛擬座標系等概念，以及我們如何利用以上方法完成載具隊形的編織，最後介紹 B-樣條曲線理論。

第三章介紹數位影像觀念，以及我們如何利用 HSV 色彩分佈辨識不同載具的位置。

第四章介紹硬體架構與各感測器原理，包括 M3006V 網路攝影機、馬達編碼器等，並介紹實驗所使用的控制系統與路徑追蹤方法。

第五章為本研究提出編隊控制演算法的模擬與實驗結果。

第六章為結論以及未來展望。

第二章 多載具編隊演算法設計



本章介紹利用協同控制(Cooperative Control)使無人載具隊伍達成集體共識(Consensus)，並利用虛擬參考點以及虛擬座標系形成穩定的載具隊形。最後透過B-樣條曲線模擬真實世界多變的路徑，使載具隊型順利達成路線追蹤。

2.1 協同控制 (Cooperative Control)[6][7]

觀察自然界中的動物遷徙及鳥類成群飛舞的現象，可以發現多代理器的系統(Multi-agents System)在各成員的資訊傳遞上常因各成員在群體中的位階不同，而有不同的傳遞資訊量。比如羊群中的領頭羊扮演做出決策以及傳達指令至其他成員的角色，其餘的羊隻則大多扮演接收指令的角色。除了成員間資訊傳遞的關係之外，每一位成員間與鄰近的成員也保持著適當的距離，進而確保能夠以相同的運動方向前進且不互相碰撞。而將此種資訊傳達的關係應用至無人載具上，即為本章節協同控制討論的課題。



圖 2-1 鳥類成群飛行



2.1.1 雷諾法則 (Reynolds' Rule)[3]

Reynolds CW(1987)[3]將此種多成員系統以群體方式移動的行為模式歸納出下列三種基本原則，稱為雷諾法則。

雷諾法則(Reynolds' Rule) [3]:

1. 碰撞避免(Collision Avoidance)：鄰近成員應避免彼此的碰撞，如圖 2-2(a)所示。
2. 速度匹配(Velocity Matching)：鄰近成員應達到相同的移動速率及方向如圖 2-2(b)所示。
3. 群體聚集(Flock Centering)：鄰近成員應盡量靠近彼此如圖 2-2(c)所示。

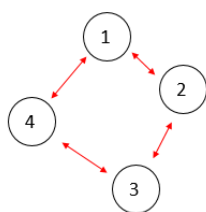
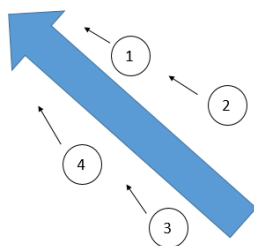
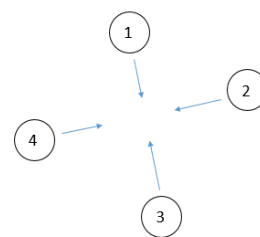


圖 2-2(a)碰撞避免



(b)速度匹配



(c)群體聚集

2.1.2 資訊傳遞圖(Communication Graph)[7]

若要滿足雷諾法則，群體中的成員就必須對於鄰近成員的位置及速度資訊有所認知，而這就關乎到群體中成員的資訊傳遞方式。協同控制理論中以資訊傳遞



圖代表成員間資訊傳遞的情形，如圖 2-3 表示一個擁有六個成員的群體其成員間資訊傳遞的關係。

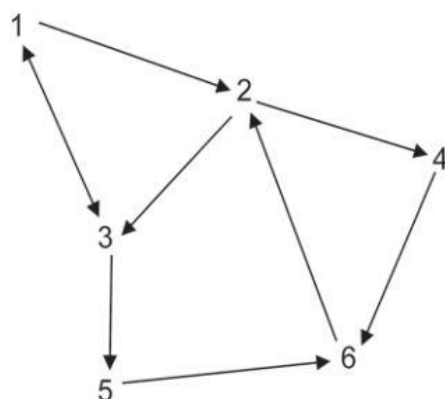


圖 2-3 資訊傳遞圖[7]

資訊傳遞圖由頂點(Vertexes)和邊(Edges)所組成，以 $G = (V, E)$ 表示。

頂點代表群體中的成員，通常以數字表示，如 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_N\}$ 代表一組擁有 N 個成員的圖形。邊則代表群體成員間資訊傳遞的關係，其關係可能為單向或是雙向，在圖形中以箭頭表示，而 $E(v_i, v_j)$ 表示從 i 成員傳向 j 成員的資訊傳遞關係。

而資訊傳遞除了方向以外，還有權重(訊息量)的意涵，比如位階較高的成員對位階較低的成員傳遞的資訊會較一般相同位階成員間的傳遞量多，而協同控制理論中以權重 $a_{ij} (> 0)$ 表示 i 成員傳向 j 成員的資訊傳遞量。隨著成員間資訊傳遞量的不同，資訊傳遞圖有以下幾種性質：[7]

1. 單/雙向的(Bidirectional)：當一群體中成員 i 和成員 j 其資訊傳遞為 i 單方面接受 j 的資訊時，也就是 $a_{ij} \neq 0$ 而 $a_{ji} = 0$ ，此時圖形為單向的資訊傳遞圖，反之則為雙向。
2. 具有方向的(Directed)：當群體中的成員 i 與成員 j 互相傳遞的資訊量不對等時，也就是 $a_{ij} \neq a_{ji}$ 時，圖形具有方向性，反之則不具有方向性。



3. 強力連結的(Connected)：當群體中成員 i 能夠以任何資訊傳遞的路徑到達成員 j ，則稱成員 i 與成員 j 之間具有連結性，而當圖形中所有的成員都為連接關係，則圖形具有強烈的連結性。
4. 生成樹(Spanning Tree)：當群體中某一成員 i 能夠透過資訊傳遞路徑到達其他任何一位成員時，我們成此圖形具有生成樹，其概念如圖 2-4 所示，成員 1 能夠透過資訊傳遞路徑到達其他所有的成員(成員 2、3、4、5、6)。

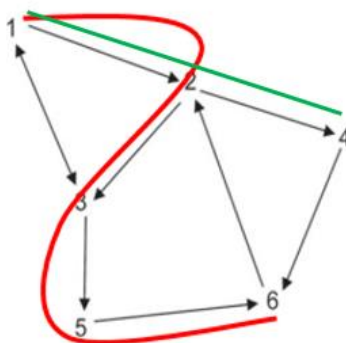


圖 2-4 生成樹 Spanning Tree[7]

2.1.3 將雷諾法則與資訊傳遞圖應用至動力運動系統[7]

考慮在二維平面上之運動，假設今有一群體其資訊傳遞圖不具有方向性 (undirected)，換言之則為 $a_{ij} = a_{ji}$ ，表示其成員之間的資訊傳遞為雙向的 (bidirectional)，以 $(x_i(t), y_i(t))$ 表示成員 i 在 x - y 平面上之位置。

若要滿足雷諾法則，群體成員需要與鄰近成員保持距離並避免碰撞，因此令一半徑為 ρ_c 的圓為成員與鄰近成員須維持的最小距離形成的區域，我們稱此距離為碰撞半徑(Collision Radius)，令與成員 i 的距離小於 ρ_c 的鄰近成員為 $N_i^c = \{j : r_{ij} \leq \rho_c\}$ ，其中 r_{ij} 為成員 i 與成員 j 之間的距離，以(2-1)式表示。

$$r_{ij} = |r_j - r_i| = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2} \quad (2-1)$$



而另一方面若要滿足群體聚集的原則，則須定一個成員與成員間能夠互相吸引靠近的最小距離 ρ ， ρ 必須要大於 ρ_c ，我們稱此距離為互動半徑(Interaction Radius)，令與成員 i 的距離小於 ρ 的鄰近成員為 $N_i = \{j : r_{ij} \leq \rho\}$ 。

我們考慮一成員 i 之二維運動與其控制輸入之關係如(2-2)式表示：

$$\dot{r}_i = u_i \quad (2-2)$$

其中 $r_i = [x_i \ y_i]^T \in R^2$ ，此為單質點運動且其控制輸入為 $u_i = [u_{xi} \ u_{yi}]^T \in R^2$ 。

以下介紹幾種符合雷諾法則的基本控制輸出：[7]

1. 符合碰撞避免最基本的控制輸入為式(2-3)。

$$u_i = -\sum_{j \in N_i^c} C_{ij}(r_j - r_i) \quad (2-3)$$

透過(2-3)式，成員 i 將會遠離所有在碰撞半徑內的鄰近成員(N_i^c)，其中 C_{ij} 為碰撞避免增益(Collision-Avoidance Gain)。

2. 符合群體聚集最基本的控制輸入為式(2-4)。

$$u_i = \sum_{j \in N_i/N_i^c} a_{ij}(r_j - r_i) \quad (2-4)$$

透過(2-4)式，成員 i 將會靠近所有互動半徑內且在碰撞半徑外的鄰近成員(N_i)，其中 a_{ij} 即為前一小節中所提到的資訊傳遞權重。

3. 若我們將單質點之二維運動系統拆解成 x 和 y 分量後可得：

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= V_i \cos \theta_i \\ \dot{y}_i &= V_i \sin \theta_i \end{aligned} \quad (2-5)$$

其中 V_i 為成員 i 速率， θ_i 為其姿態角(Heading)。而速度匹配則可透過式(2-6)和式(2-7)之控制輸入滿足。

$$\theta_i = \sum_{j \in N_i} a_{ij}(\theta_j - \theta_i) \quad (2-6)$$

$$V_i = \sum_{j \in N_i} a_{ij}(V_j - V_i) \quad (2-7)$$

根據協同控制理論，只要資訊傳遞圖中具有生成樹(Spanning Tree)，透過以上協同控制輸入，群體最終會到達所謂的共識狀態(Consensus)，意即群體成功以符合雷諾法則的方式進行群體移動。以上是較為基本的協同控制輸出，下一小節中將會以此為基礎搭配虛擬參考點以及虛擬座標系的概念形成隊形延伸為出較為複雜之協同控制輸入。

2.2 虛擬參考點(Virtual Reference State)及虛擬座標系(Virtual Coordinate)[6]

在前一小節中我們介紹了協同控制的概念使我們的載具能夠以符合雷諾法則的方式完成群體運動，但除了使隊伍成群之外我們還要在群體中加入隊形指令，使我們的載具隊形能夠形成特定的形狀，例如三角形、直排隊形、橫排隊形等等。接下來我們將在我們的控制輸入中加入虛擬參考點以及虛擬坐標系以達成我們的任務目標。

2.2.1 虛擬參考點[6]

在原本的載具群體中，加入虛擬的參考點以作為載具行進時的參考對象，這個虛擬參考點可以是一個有固定軌跡的動點，將虛擬參考點的軌跡資訊加入協同控制輸入之後，虛擬參考點可以作為群體的領導者，使原本的多載具系統的移動模式趨近於我們的虛擬參考點的移動模式，最後達到與虛擬參考點的移動共識(Consensus)，如圖 2-5 所示。

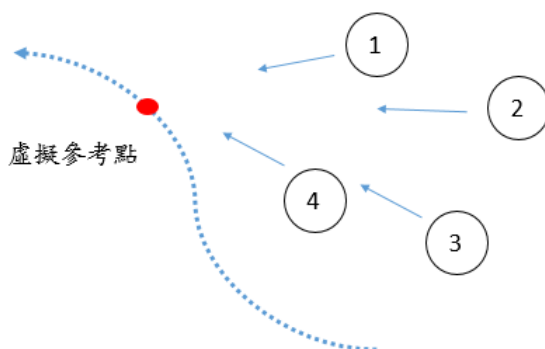


圖 2-5 虛擬參考點示意圖

假設原本的載具系統有 n 個成員，加入虛擬參考點後形成具有 $n+1$ 個成員的多載具系統，我們將虛擬參考點標記為 $n+1$ 號成員並將其位置、速度、姿態等資訊加入我們的控制輸入，以(2-10)式表示：

$$r_{n+1} \triangleq r^R \in R^m \quad (2-10)$$

另外我們將加入虛擬參考點之後的資訊傳遞圖新增為一個具有 $n+1$ 個頂點的圖形，以式(2-11)式表示：

$$G_{n+1} \triangleq (V_{n+1}, E_{n+1}) \quad (2-11)$$

假設虛擬參考點之移動軌跡為時變函數，我們在控制輸入中加入虛擬參考點之一次微分函數，如式(2-12)所示：

$$u_i = a_{i(n+1)} \dot{r}^R(t) - a_{i(n+1)} \alpha_i (r_i - r^R(t)) - \sum_{j=1}^n a_{ij} (r_i - r_j) \\ , \quad i = 1, \dots, n, \quad (2-12)$$

其中 $r_i \in R^m$ 為成員 i 之位置， $i = 1, \dots, n$ ， $j = 1, \dots, n+1$ 。 $a_{i(n+1)}$ 為加入虛擬參考點後的資訊傳遞圖中參考點傳遞至成員 i 的資訊傳遞權重，例如原具有五個成員的系統中，加入參考點後，參考點資訊傳遞至成員 2 的權重即已 a_{26} 表示。

根據協同控制理論透過(2-12)式，只要資訊傳遞圖中有生成樹(Spanning Tree)存在，我們便可以將載具的移動趨近於虛擬參考點的移動方式。



2.2.2 虛擬座標系 [6]

在多載具系統加入虛擬參考點之後，我們希望使各個載具與虛擬參考點在行進時能保持特定的距離，以達到形成幾何隊形的目的，如圖 2-6 所示。

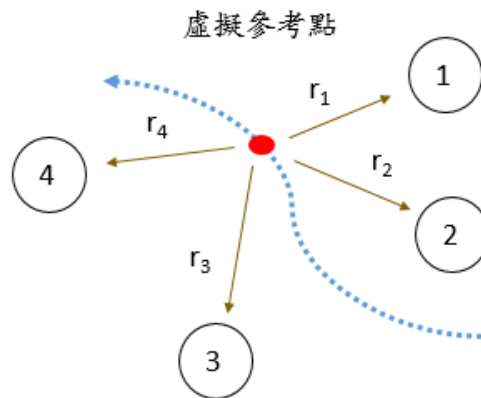


圖 2-6 幾何隊形示意圖

除了維持載具與虛擬參考點的固定距離外，我們也希望整體載具的隊形姿態能夠符合我們所給予的行進路線姿態，因此我們以虛擬參考點為原點建立一個虛擬參考座標系，以虛擬參考點的切線速度方向為 y 軸 (\bar{e}_2)，將虛擬座標系與慣性座標系的差角 (θ_c) 作為隊形的姿態角，並在虛擬座標系上建立我們想要的隊形，設定各個載具與虛擬參考點之相對位置，如此一來隨著隊伍按照路徑行走，整體隊伍的隊形姿態便會依照路徑姿態變化，如圖 2-7 和 2-8 所示，其載具位置與虛擬參考點之關係可由式(2-13)表示。

$$\begin{bmatrix} x_j^d(t) \\ y_j^d(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_c(t) \\ y_c(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \theta_c(t) & -\sin \theta_c(t) \\ \sin \theta_c(t) & \cos \theta_c(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{jF}^d(t) \\ y_{jF}^d(t) \end{bmatrix} \quad (2-13)$$



其中 $r_c(t) = [x_c(t) \ y_c(t)]^T$ 表示虛擬參考點之座標，亦為虛擬座標系之原點，
 $r_j^d(t) = [x_j^d(t) \ y_j^d(t)]^T$ ，表示為成員 j 之期望位置(desired)， $r_{jF}^d(t) =$
 $[x_{jF}^d(t) \ y_{jF}^d(t)]^T$ 表示成員與參考點之向量差， θ_c 為虛擬座標系與慣性座標系之差
 角，亦為隊型所給予之姿態角。

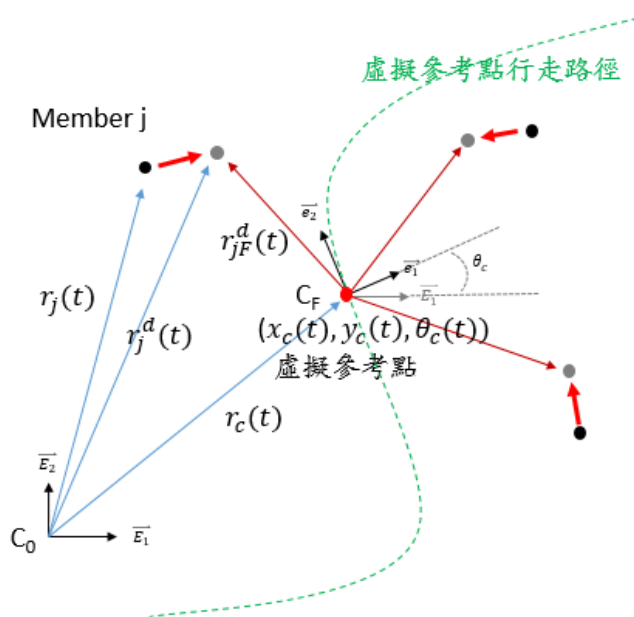


圖 2-7 虛擬座標系示意圖

(其中 C_0 為慣性座標系， C_F 為虛擬座標系)

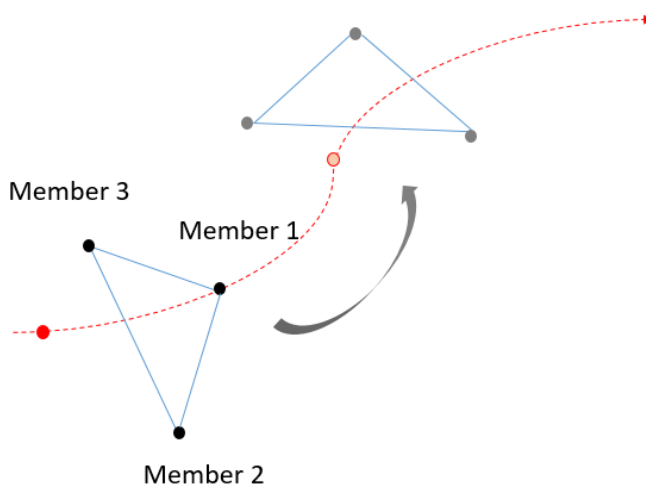


圖 2-8 藉由虛擬座標系使隊伍姿態隨路徑姿態變化



舉例說明：一個由三個成員組成的載具系統，分別為成員 1、2、3，若虛擬參考點位置為(2,2)，切線速度方向為 $(\sqrt{3}, 1)$ ，則令隊型姿態為 $\theta_c = \frac{\pi}{6}$ ，虛擬座標系原點為 $r_c(t) = [x_c(t) \ y_c(t)]^T = [2 \ 2]^T$ ，若我們希望載具隊型為縱列的直線型，則可將載具與參考點的向量差分別設為：

$$r_{1F}^d(t) = [x_{1F}^d(t) \ y_{1F}^d(t)]^T = [0 \ 1]^T$$

$$r_{2F}^d(t) = [x_{2F}^d(t) \ y_{2F}^d(t)]^T = [0 \ 3]^T$$

$$r_{3F}^d(t) = [x_{3F}^d(t) \ y_{3F}^d(t)]^T = [0 \ 5]^T$$

若我們希望載具隊型為三角形，則可將載具與參考點的向量差分別設為：

$$r_{1F}^d(t) = [x_{1F}^d(t) \ y_{1F}^d(t)]^T = [1 \ 0]^T$$

$$r_{2F}^d(t) = [x_{2F}^d(t) \ y_{2F}^d(t)]^T = [0 \ 1]^T$$

$$r_{3F}^d(t) = [x_{3F}^d(t) \ y_{3F}^d(t)]^T = [-1 \ 0]^T$$

有了虛擬參考點和虛擬座標系之後，我們需要確保每一個成員對於虛擬參考點的位置資訊認知是一致的，如圖 2-9 所示，所以我們在控制輸入中加入對於參考點位置認知共識的控制層面(Consensus Tracking Level)，如式 2-16 所示，根據協同控制理論透過式(2-14)便可以將所有成員對於虛擬參考點的認知趨近於一致。

$$u_i = \frac{1}{\eta_i} \sum_{j=1}^n a_{ij}^c [\dot{r}_j - \gamma(r_i - r_j)] + \frac{1}{\eta_i} a_{i(n+1)}^c [\dot{r}_c - \gamma(r_i - r_c)] \quad (2-14)$$

其中 $\eta_i \triangleq \sum_{j=1}^{n+1} a_{ij}^c$ ，意即在資訊傳遞圖中所有指向成員 i 之箭頭數總和，以圖 2-10 為例，觀察圖中指向成員的箭頭個數可知 $\eta_1 = 1$ ， $\eta_2 = 2$ ， $\eta_3 = 2$ ， $\eta_4 = 1$ 。 a_{ij}^c 為參考點位置認知共識控制層面的資訊傳遞圖($G_c = \{V_c, E_c\}$)中的權重， $i = 1, \dots, n$ ， $j = 1, \dots, n+1$ ， 1 ，因加入虛擬參考點，資訊傳遞圖也隨之擴增。 γ 為大於 0 之常數。式(2-14)中將鄰近成員的速度加入控制輸入意在使整體成員的移動速度與參考點趨近於一致，參數 η_i 由資訊傳遞圖決定，因此接收箭頭數較多的成員的移動速度將受到較多的鄰近成員影響，反之接收箭頭數少的成員則扮演類似團隊領導者的角色。透過參數 γ 可調整成員間相對距離以及成員相對於參考點的距離對於控制輸入之影響程度，當 γ 值愈大，此控制層面到達共識狀態的時間愈短，我們可以透過 γ 值調整系統達到共識狀態的時間。

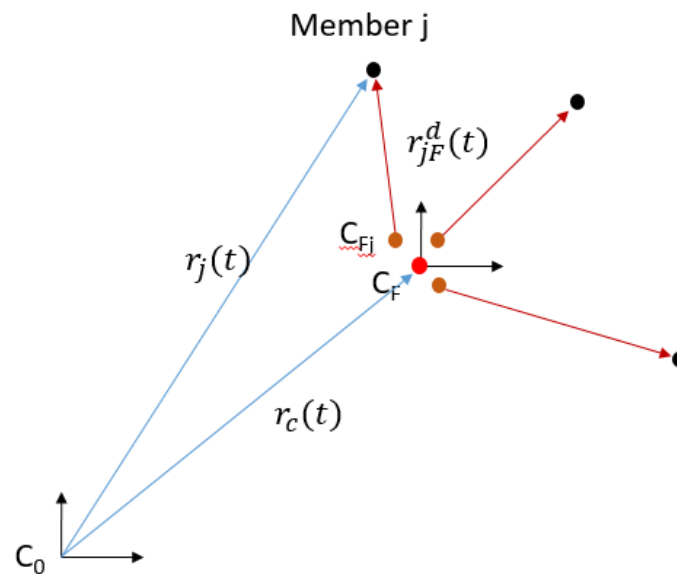


圖 2-9 成員對於虛擬參考點之認知[6]

(其中 C_{Fj} 為成員 j 對於虛擬參考點之認知)

所有成員對於虛擬參考點的認知達成一致之後，我們便可以在虛擬座標系中加入成員與虛擬參考點的相對位置關係，再將載具的位置利用控制輸入趨近於載具的期望位置(Desired Position)，以達成載具隊形的編織，我們稱其為載具控制層



面(Vehicle Control Level)，如式(2-15)表示，根據協同控制理論，透過式(2-15)，我們便可以將各個載具趨近於其期望位置。

$$u_i = \dot{r}_i^d - \alpha_i(r_i - r_i^d) - \sum_{j=1}^n a_{ij}^v [(r_i - r_i^d) - (r_j - r_j^d)] \quad (2-15)$$

其中 α_i 為大於0之常數，其值愈大則成員*i*趨近於期望位置的時間愈短。 a_{ij}^v 為載具控制層面的資訊傳遞圖($G_v = \{V_v, E_v\}$)中的權重， $i = 1, \dots, n$ ， $j = 1, \dots, n$ 。式(2-1)中 $\sum_{j=1}^n a_{ij}^v [(r_i - r_i^d) - (r_j - r_j^d)]$ 表示成員各自與期望位置的相對距離也將影響鄰近成員的控制輸入，其目的在使各成員能夠在較接近的時刻趨近於期望位置。

在式(2-14)和(2-15)中提到，不同控制層面將使用不同的資訊傳遞圖，根據協同控制理論，這些圖形都必須擁有生成樹才能確保各項任務能夠達到最後的共識狀態(Consensus State)，也就是完成各層面的任務目標。另外在虛擬參考點位置認知共識控制層面會加入參考點成為載具的虛擬領導者，我們也須確保參考點的資訊確實能確實地傳達到每一位成員，如圖 2-10 所示；而在載具控制層面則須盡量使每個成員資訊都能流通於整個資訊傳遞圖中，以維持隊形的剛性，如圖 2-11 所示。

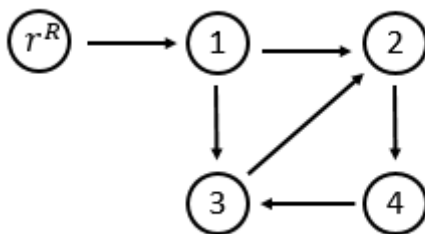


圖 2-10 虛擬參考點位置認知共識控制層面資訊傳遞圖[6]

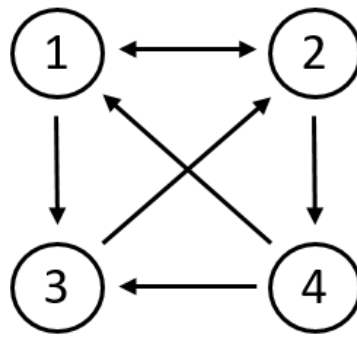


圖 2-11 載具控制層面資訊傳遞圖[6]

2.2.3 系統流程圖

本小節將介紹整個編隊任務使用的各個協同控制的系統流程，如圖 2-12 所示。

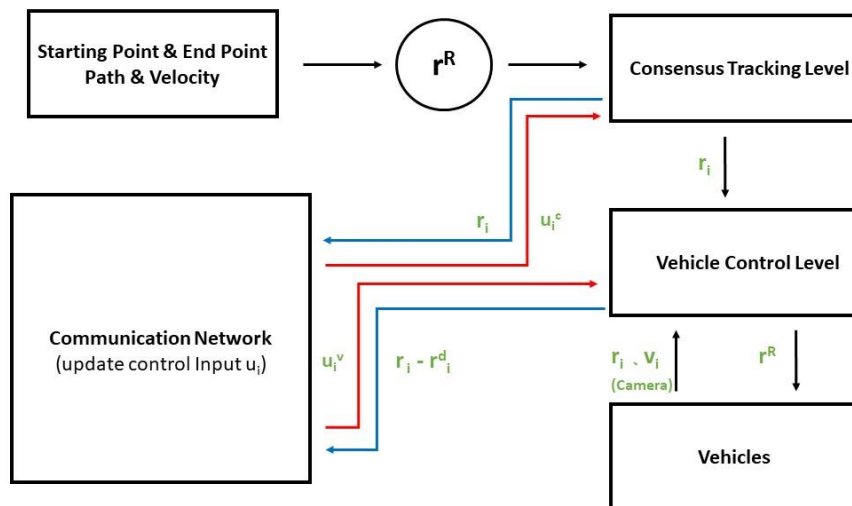


圖 2-12 系統流程圖



我們將編隊任務之路徑資訊包括起點、終點、運動姿態、速率等等寫進我們的虛擬參考點中，參考點將作為載具的領導者帶領載具進行路徑追線任務，而載具群則透過我們的協同控制指令維持與虛擬參考點的相對距離，並保持隊形姿態與路徑姿態吻合。在控制層面，確保所有載具對虛擬參考點的認知都相同後，將會進入載具控制層面以形成隊形，此期間系統將會透過攝相機回傳資訊至中控台以更新即時的控制指令，其中包括載具即時位置、姿態、速率等資訊。

2.3 B-樣條(B-Spline)曲線軌跡設計[12]

為了模擬現實中載具可能行走的路徑真實樣貌，我們使用 B-樣條曲線設計平滑曲線以作為虛擬參考點行走的路徑。

2.3.1 B-樣條基底函數[12]

B-樣條曲線以基底函數作為曲線的基礎，基底函數具有許多等價定義，我們採用 De Boor[8]等人所提出的遞迴運算表示。

令 $U = (u_0, \dots, u_m)$ 為一非遞減實數序列，意即 $u_i \leq u_{i+1}, i = 0, \dots, m - 1$

。其中 u_i 稱為節點(knot)， U 稱做節點向量(knot vector)。則第 i 個 p 次 B-樣條基底函數 $N_{i,p}(u)$ 可由下列遞迴程序所產生：

$$N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1 & \text{if } u_i \leq u < u_{i+1} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2-16)$$

$$N_{i,p}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+p} - u_i} N_{i,p-1}(u) + \frac{u_{i+p+1} - u}{u_{i+p+1} - u_{i+1}} N_{i+1,p-1} \quad (2-17)$$



設定 $\frac{x}{0} = 0$ ，上述過程中，所產生的 $N_{i,p}(u)$ 在 $[u_i, u_{i+p+1}]$ 間為一 p 次多項式，其中 (2-16) 式定義 $N_{i,0}(u)$ 為一步階函數 (step function)，僅於區間 $u \in [u_i, u_{i+1}]$ 存在值，區間外值為零。由 (2-17) 式可知：對於 $p > 0$ ， $N_{i,p}(u)$ 為兩個 $(p-1)$ 次基底函數之線性組合。以 $p=3$ 為例，選取 $U = (0,0,0,0,1,2,3,4,5,6,6,6,6)$ ，其各次基底函數分別如圖 2-13、2-14、2-15、2-16 所示。

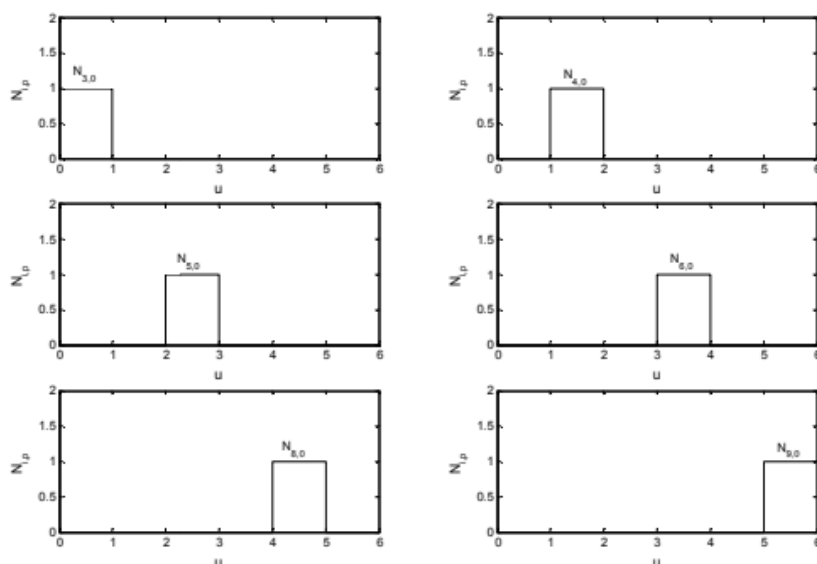


圖 2-13[12] 零次基底函數 ($U = (0,0,0,0,1,2,3,4,5,6,6,6,6)$, $p = 0$) ,

其中 $N_{0,0} = N_{1,0} = N_{2,0} = N_{7,0} = N_{10,0} = N_{11,0} = N_{12,0} = 0$

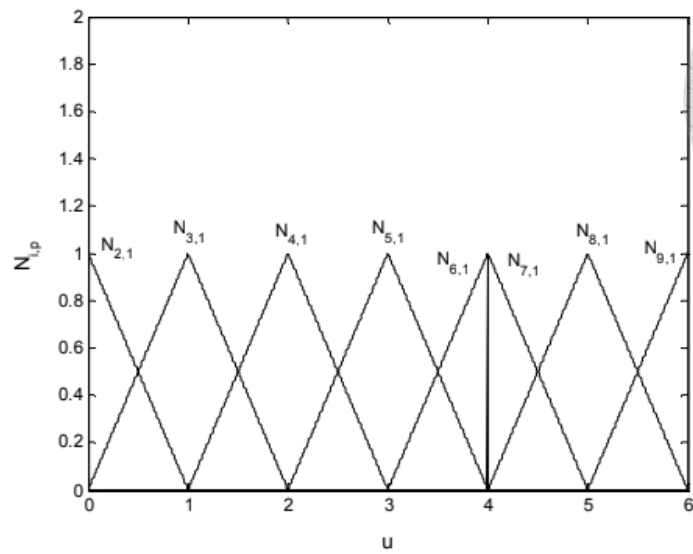
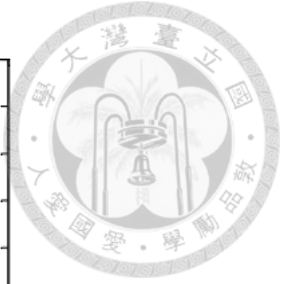


圖 2-14[12] 一次 B-樣條基底函數($U = (0,0,0,0,1,2,3,4,5,6,6,6,6)$, $p = 1$) ,

其中 $N_{0,1} = N_{1,1} = N_{10,1} = N_{11,1} = 0$

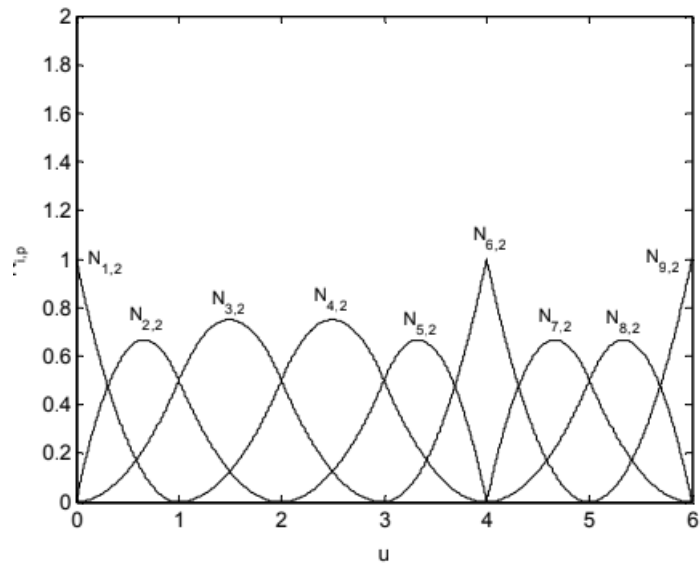


圖 2-15[12] 二次 B-樣條基底函數($U = (0,0,0,0,1,2,3,4,5,6,6,6,6)$, $p = 2$) ,

其中 $N_{0,2} = N_{10,2} = 0$

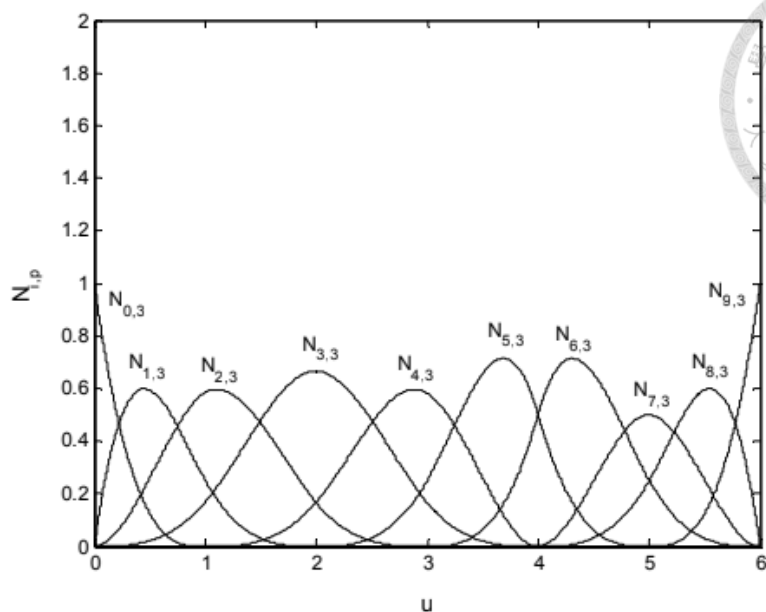
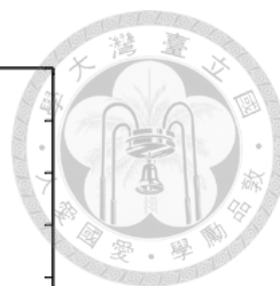


圖 2-16[12] 三次 B-樣條基底函數($U = (0,0,0,0,1,2,3,4,5,6,6,6,6)$, $p = 3$)

上述 B-樣條基底函數群有以下的特性[12]：

1. 歸一性：

$$\sum_{j=1-p}^i N_{j,p}(u) = 1, \quad \forall u \in [u_i, u_{i+1}] \quad (2-18)$$

2. 局部支承性(local support property)及非負性：

$$N_{i,p}(u) \begin{cases} \geq 0 & \text{if } u_i \leq u < u_{i+p+1} \\ = 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2-19)$$

3. 可微性：

在節點區間內， $N_{i,p}(u)$ 之所有導函數皆存在；在節點處該函數則為 $(p-k)$ 次連續可微，其中 k 為該節點之重複數(multiplicity)。

4. 當 $U = (0, \dots, 0, 1, \dots, 1)$ 時，B-樣基底函數 $N_{i,p}(u), 0 \leq i \leq p$ 即為一組 p 次的 Bernstein 多項式。



2.3.2 B-樣條曲線(B-Spline Curve) [12]

p 次 B-樣條曲線定義為：

$$C_p \sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) P_i \quad a \leq u \leq b \quad (2-20)$$

其中 $\{P_i\}$ 為控制點， $\{N_{i,p}(u)\}$ 為 B-樣條基底函數族，n 大小由非零之 $N_{i,p}$ 個數決定。給一個固定的 u，要計算在曲線上的一點，可分為以下三步驟：[12]

1. 確認 u 所存在之節點區間
2. 計算基底函數值
3. 將基底函數值乘上相對應的控制點，代入(2-20)式中。

舉例說明，利用上節中的基底函數，選取一組控制點，其所計算出的 B-樣條曲線如圖 2-17 所示。其中控制點 P_i 是經由 $N_{i,3}$ 函數影響 C_p 的位置。

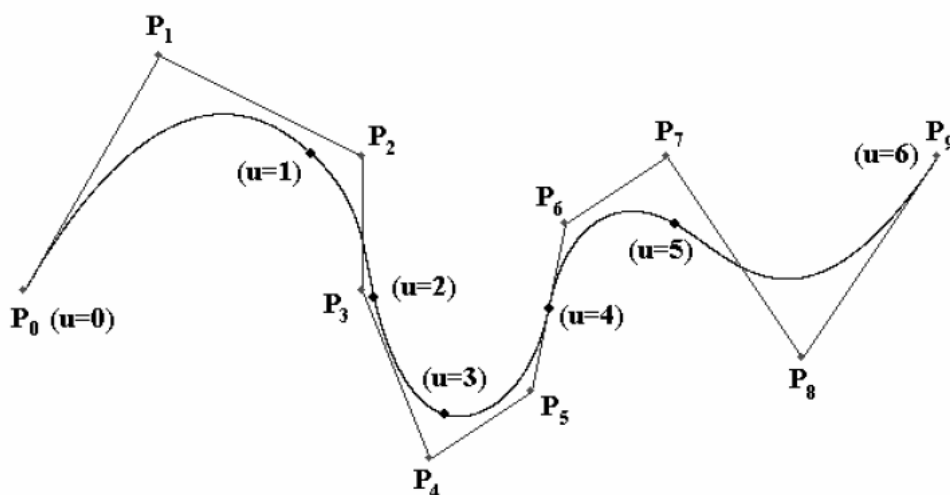


圖 2-17 B-樣條曲線($U = (0,0,0,0,1,2,3,4,5,6,6,6,6)$, $p = 3$) [12]



由於基底函數曲線的特性，因此 B-樣條曲線的性质與基底的特性相關，該曲線的性质如下：[12]

1. 如果 $n = p$ 且 $U = (0, \dots, 0, 1, \dots, 1)$ ，其中 0 與 1 之重複數皆為 $(p+1)$ ，則 $C_n(u)$ 為一 n 次貝茲曲線[4]。
2. 端點插值： $C(0) = P_0$ 和 $C(1) = P_n$ 。
3. $C_p(u)$ 為一片段的 p 次多項式曲線，控制點個數 $n+1$ 和節點數為 $m+1$ ，彼此間的關係為：

$$n = m - p - 1 \quad (2-21)$$

因此，若給定 n 個控制點，在固定 p 次後，所選定之節點數為 $n+p+1$ 個。

4. 仿射不變性：

先對控制點 $\{P_i\}$ 做仿射映射(affine map)後利用新的控制點去計算曲線與先計算曲線後再做仿射映射兩者的結果相同。

5. 局部修改方法：

移動控制點 P_i ，僅改變區間 $[u_i, u_{i+p+1}]$ 內 $C(u)$ 位置。考慮圖 2-17 的例子，將 P_4 移至 P_4' ，以實線表示新的 B-樣條曲線，虛線為原本的 B-樣條曲線，結果如圖 2-18 所示。 P_4 的改變僅影響 $u=1$ 到 $u=4$ 區間的曲線位置。

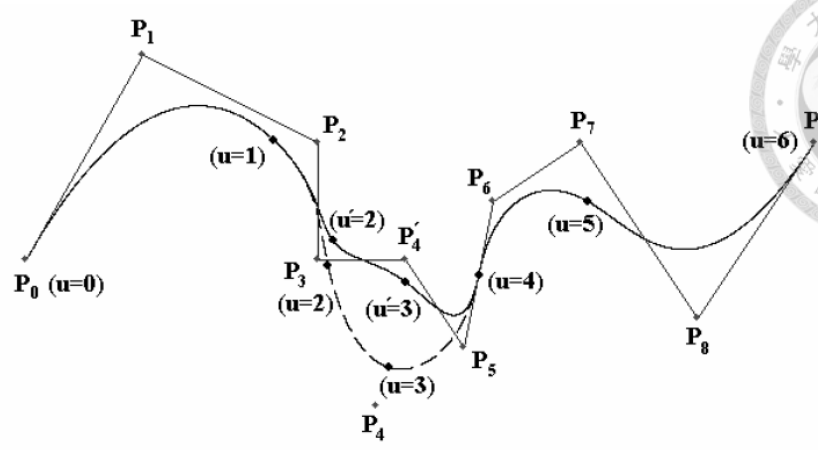
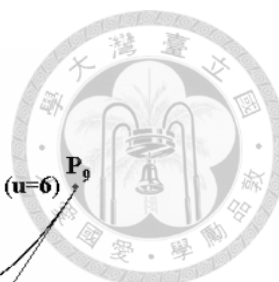


圖 2-18 B-樣條曲線局部修正特性示意圖[12]

6. 凸包性質：

如果 $u \in [u_i, u_{i+1}]$, $p \leq i \leq m - p - 1$ ，則 $C(u)$ 會落在控制點 P_{i-p}, \dots, P_i 所形成的凸包之中，故其整個曲線分段在多個凸包中，且凸包集合的範圍比貝茲曲線的凸包小，至多是相等。針對前述例子，此現象可以圖 2-19 說明。

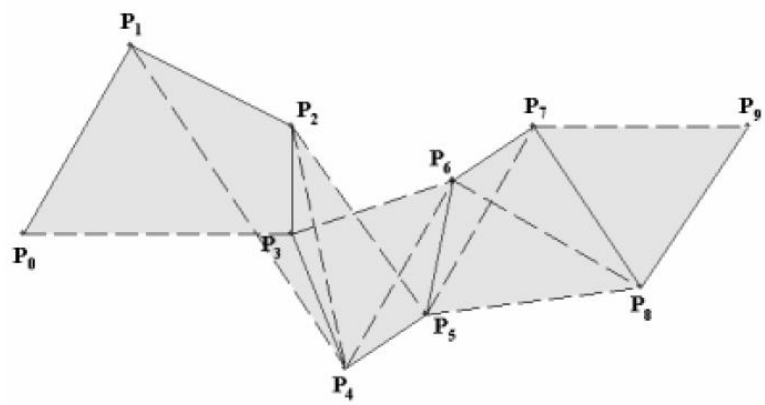


圖 2-19 B-樣條曲線凸包性質[12]

7. 連續性與可微性：

$C(u)$ 的連續型和可微性由 $N_{i,p}(u)$ 而來，因此 $C(u)$ 在節點區間內部為無限可微，再重複數為 k 的節點處，至少為 $(p-k)$ 次連續可微。



8. 除節點可重複外我們也能選用重複的控制點。以 $p=2, U=(0,0,0,1,2,3,4,4,4)$ 為例，結果如圖 2-20 所示。

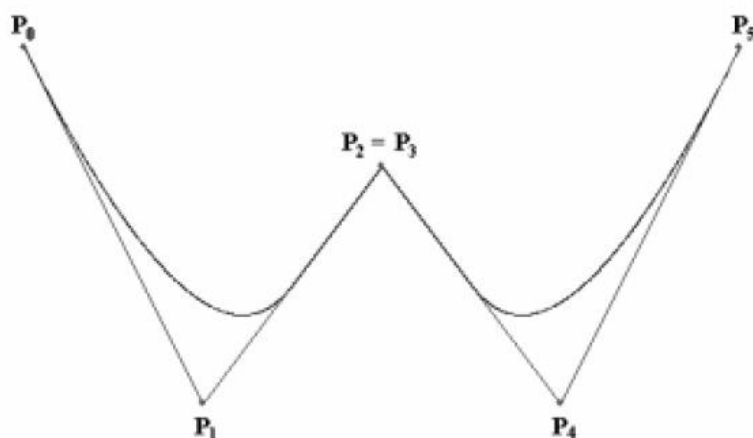


圖 2-20 重複控制點示意圖($P_2 = P_3$) [12]

如此可使 B-樣條曲線必然通過某控制點。

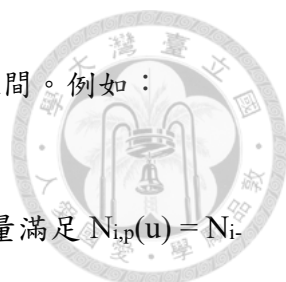
2.3.3 B-樣條曲線軌跡設計[12]

由前述討論可知 B-樣條曲線在幾何表示上有諸多的優異性質，採取遞迴的形式表示更有助於計算機的運算，因此也適合用來設計載具的路徑曲線。

2.3.3.1 節點向量(knot vector) [12]

由遞迴程序 2-18、2-19 式可知節點向量的選擇對於 B-樣條基底函數 $N_{i,p}(u)$ 有非常大的影響，並且可改變 B-樣條曲線的結果。節點向量可分為均勻(uniform)和非均勻(nonuniform)，其中又分為週期(periodic)與開放(open)，討論如下：

所謂均勻性是指節點與相鄰節點間的差值為固定量，例如： $(2,4,6,8,10)$ 或 $(5,0,5,10,15)$ 等。實際上，節點向量一般由零開始，並且節點以差值 1 逐漸增加，



直至某個最大值，或是經由正規化(normalize)使值介於 0 與 1 之間。例如：

(0,0.2,0.4,0.6,0.8,1.0)。

節點次數 p ，差值為 1 的週期均勻(periodic uniform)節點向量滿足 $N_{i,p}(u) = N_{i-1,p}(u-1) = N_{i+1,p}(u+1)$ 的關係，如圖 2-21 所示。而開放均勻(open uniform)節點向量在端點(P_0 或 P_n 點)的節點樹的重複數等於 B-樣條基底函數的次數加一(即 $p+1$)，例如：

- $P = 1, \quad U = (0,0,1,2,3,4,4)$
- $P = 2, \quad U = (0,0,0,\frac{1}{3},\frac{2}{3},1,1,1)$
- $P = 3, \quad U = (0,0,0,0,1,2,2,2,2)$

開放均勻的節點向量一般以下面的方式給定：

$$\begin{aligned}
 u_i &= 0, & 0 \leq i \leq p \\
 u_i &= i-p & p+1 \leq i \leq n \\
 u_i &= n-p+1 & n+1 \leq i \leq n+p+1
 \end{aligned}$$

其基底函數的結果，如圖 2-22 所示。此種節點的選取方式使得 B-樣條曲線必然通過端點。

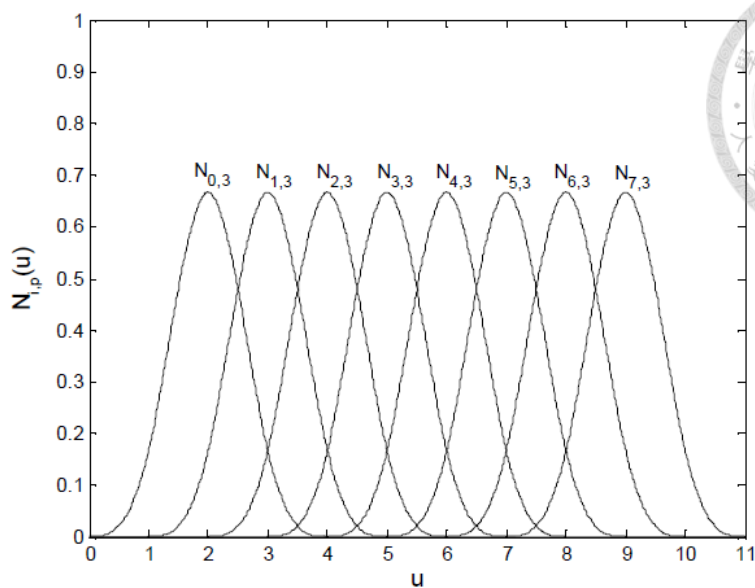
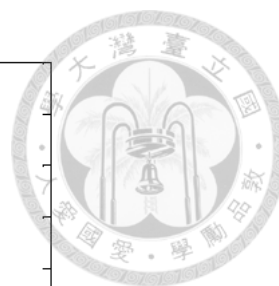


圖 2-21 週期性均勻 B-樣條基底函數($U = (0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11)$, $p = 3$) [12]

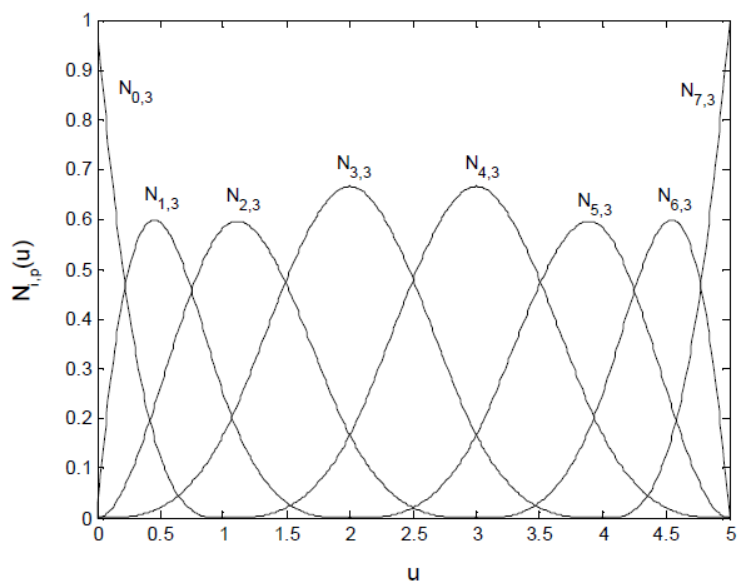


圖 2-22[12] 開放均勻 B-樣條基底函數($U = (0,0,0,0,1,2,3,4,5,5,5,5)$, $p = 3$)

非均勻節點向量其形式與均勻節點向量恰好相反，節點與相鄰節點間的差值並非為固定值。此外，節點向量的內部有重複的情況，亦歸類為非均勻、與前面討論類似，非均勻節點向量可分為開放和週期兩種，例如：



$U = (0,0,0,1,1,2,2,2)$ 開放

$U = (0,1,2,2,3,4)$ 週期

$U = (0,0.13,0.45,0.78,1)$ 週期

前述例子中，圖 2-16 即為開放非均勻基底函數。週期非均勻基底函數則如圖 2-23 所示。

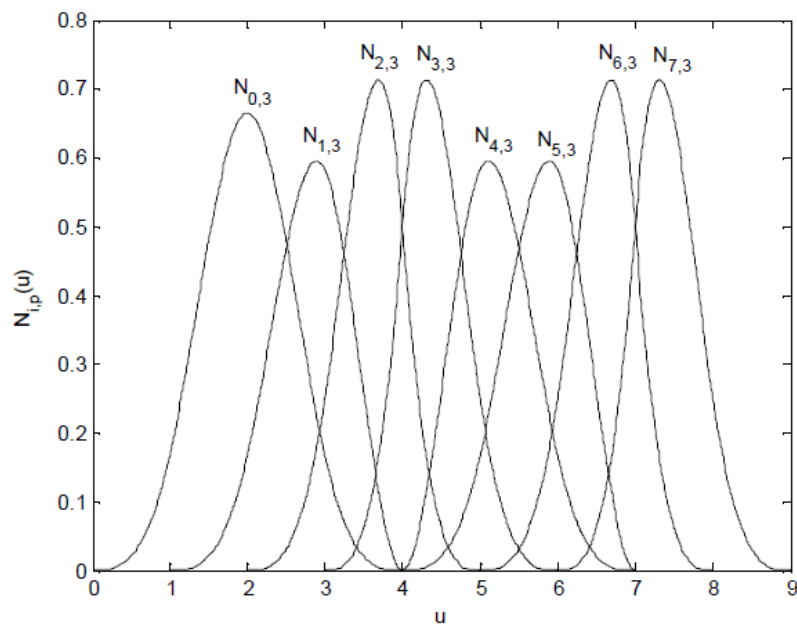


圖 2-23 [12] 週期非均勻 B-樣條基底函數($U = (0,1,2,3,4,4,5,6,7,7,8,9)$), $p = 3$)

2.3.3.2 軌跡設計[12]

我們根據任務需求設計通過特定點(包括起點、終點、中繼點)的路徑軌跡。由前述討論可知，不同曲線次數對於節點選取、基底函數及所求得的 B-樣條曲線有很大的影響。我們選定曲線的次數 p 為三次，其原因主要是基於 B-樣條曲線的連續性，在節點處至少為 C^{p-k} 連續。若重複數 k 為 1，及 C^2 連續，能保證設計的曲線在節點處兩邊的斜率變化率會相等。由於 B-樣條曲線為片段(piecewise)的線



型設計，故能確保在節點處，曲線與曲線能平滑的相接。此外，若把節點向量看做一時間序列，並且將理論應用在載具的路徑上，則載具之速度和加速度的約束條間，即可導入曲線的設計之中。

我們考慮一極端的情形：此路徑由兩控制點所構成。針對此情況節點向量若採取開放均勻的形式，則需要的節點數至少為 8 個($m = 7$)，如： $U = (0,0,0,0,1,1,1,1)$ ， $p = 3$ 。根據 2-23 式可求得 $n = 3$ ，即需要 4 個控制點，也就是說會發生控制點不足的情況。

若使用週期均勻的節點形式，由於必須滿足 B-樣條基底函數的歸一性，即 2-21 式，因此有效參數的區間為 $[u_p, u_{m-p}]$ 。以圖 2-21 為例， $\sum_{i=0}^n N_{i,3}(3) = 1$ 和 $\sum_{i=0}^n N_{i,3}(8) = 1$ ，因此有效的範圍為 $u_3 \leq u \leq u_8$ 。而由於需通過路徑的特定點，即滿足 $\sum_{i=0}^n N_{i,p}(u)P_i = P_i$ ，因此控制點在這些點的位置必須要重複設定 $p+1$ 次，其餘的點僅須設定 1 次。舉例說明：假設原始的路徑由控制點 $\{G_0, G_1, G_2, G_3, G_4, G_5\}$ 所組成，其中 G_0 為起點， G_2 為中繼點， G_5 為終點，由於必須通過 G_0 、 G_2 、 G_5 ，因此在三次的 B-樣條曲線中，控制點 $\{P_i\}$ 為：

$$\begin{aligned} P_1 &= P_2 = P_3 = P_4 = G_0 \\ P_4 &= G_1 \\ P_5 &= P_6 = P_7 = P_8 = G_2 \\ P_9 &= G_3 \\ P_{10} &= G_4 \\ P_{11} &= P_{12} = P_{13} = P_{14} = G_5 \end{aligned}$$

總共為 15 個控制點($n = 14$)。

經由上述討論後我們採取以下策略。經由控制點的設定，由非零之基底函數 $N_{i,p}$ 個數決定 n 的值，並決定使用的曲線幕次 p ，在 p 和 n 固定之後再由(2-21)式



可得所需之節點數(m+1)，找一組週期均勻之節點向量代入(2-16)、(2-17)、(2-20)式中計算可獲得一 B-樣條曲線，整個設計的流程如圖 2-24 所示。

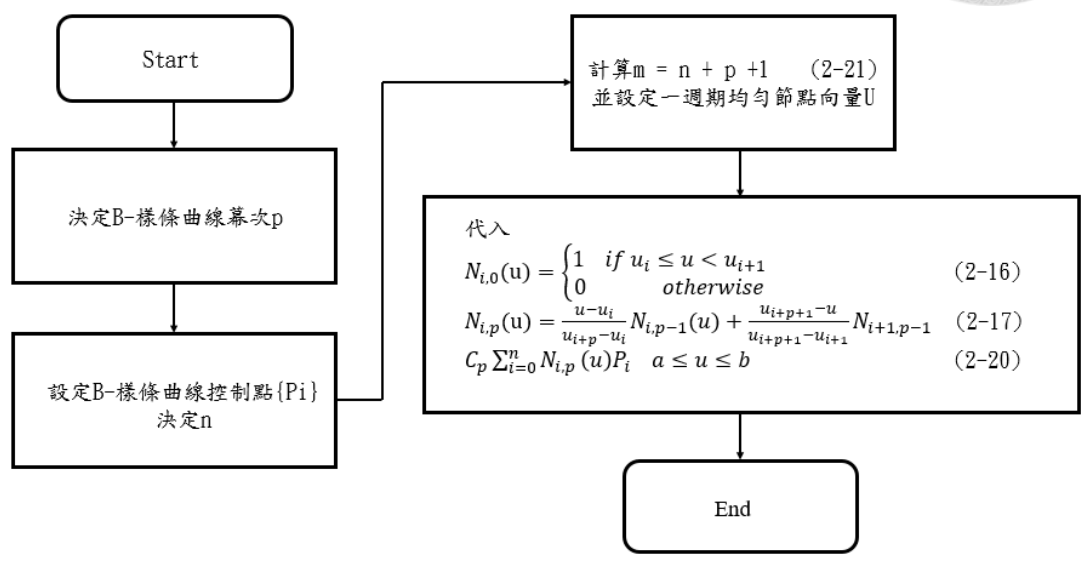


圖 2-24[12] B-樣條曲線軌跡設計流程圖



第三章 物體辨識及定位[1]

本系統之影像輸入透過 M3006V 網路攝影機傳入主控站電腦，這些原始資料 (Raw Data) 將做為我們區分不同顏色載具的依據，並透過 Liu[1] 設計之影像特徵抽取演算法來對載具進行定位及姿態之判定，本章將介紹數位影像的資料結構以及相關的演算法。

3.1 數位影像觀念[1]

令 $f(s,t): R^2 \rightarrow R^+$ (其中 $s, t \in R^+$) 代表感光元件平面在 (s, t) 位置接收到的光線強度，經過空間取樣成為大小為 $m \times n$ 數位影像 $g(x, y)$ ， $x = 0, 1, 2, \dots, m-1$ ， $y = 0, 1, 2, \dots, n-1$ ， $g(x, y)$ 的值域為 $[0, L]$ 。離散的函數 g 就是我們指稱的數位影像。

G 為一個灰階(單通道)影像，可用矩陣來表達：

$$\begin{pmatrix} g(0,0) & \cdots & g(0,n-1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g(m-1,0) & \cdots & g(m-1,n-1) \end{pmatrix}$$

(單通道灰階影像數學表示式) [1]

每個矩陣的元素又稱為**像素(Pixel)**，每個像素的最大容許值稱為**影像強度(intensity)**，通常為 2 的次方(如 2,4,8,...256 等等)。

若是一個彩色(三通道)圖像則會由三個離散函數分別代表三個通道，分別為 g_1, g_2, g_3 ，且分別代表 R(red)平面，G(green)平面，B(blue)平面。



$$G = [g_1, g_2, g_3]$$

(三通道彩色影像數學表示式) [1]

多個 g 組成一個彩色數位影像 G ， G 的行數又稱為影像深度或通道數目。

3.2 RGB 及 HSV 色彩空間[1]

RGB 色彩空間起源於光學感測元件的特性，比如人體上的視網膜或者相機上的 CMOS，在光學上較為直覺，但在感知上並不直觀，在這裡我們介紹另一個色彩空間 – HSV 色彩空間。H 代表色調(hue)、S 代表飽和度(saturation)、V 代表亮度(value)，在 1978 年由 AR Smith[5]創立，為三原色光模式的一種非線性變換。我們可以將 HSV 理解為 H 值表示在可見光譜上不同頻率(顏色)的光線，S 則是這個顏色的純粹度或分布密度，V 則代表亮度。

數學上，RGB 和 HSV 的轉換公式如下：[1]

$$V = \max(R, G, B)$$

$$S = \begin{cases} \frac{V - \min(R, G, B)}{V} & \text{if } V \neq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$H = \begin{cases} 60 \times \frac{G - B}{V - \min(R, G, B)} & \text{if } V = R \\ 120 + 60 \times \frac{B - R}{V - \min(R, G, B)} & \text{if } V = G \\ 240 + 60 \times \frac{R - G}{V - \min(R, G, B)} & \text{if } V = B \end{cases}$$



其中 $0 \leq V \leq 1, 0 \leq S \leq 1, 0 \leq H \leq 360$ ，若 H 值計算後為負值，則

$$H=H+360$$

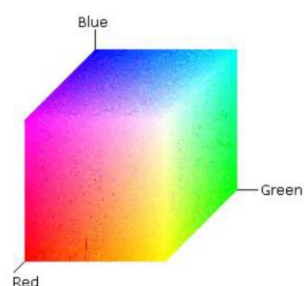


圖 3-1 RGB 色彩空間[10]

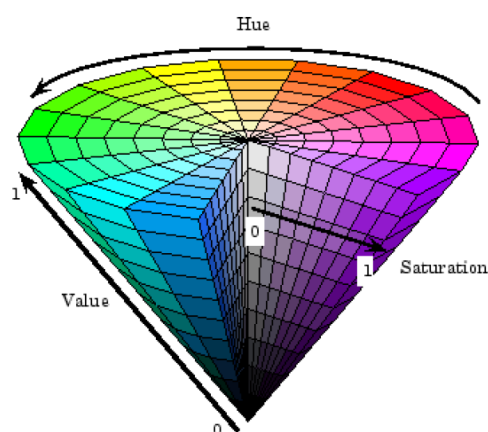


圖 3-2 HSV 色彩空間[11]

HSV 色彩空間的使用是因應著對於亮度這個特徵沒有需求的緣故。例如當我們想要在不同的照明情況下讓電腦都能夠識別現實世界中相同顏色的物體。在 RGB 色彩空間中色彩和亮度是相依的(mutually dependent)，不同光線下會得到全然不同的 RGB 向量值，而在 HSV 色彩空間中僅僅在 V 值上會有差異，根據 H、S 值的相同，我們可以判斷是否為同一物體。此特性對於影像分割(image-segmentation)，或計算影像統計特性非常有幫助。



3.3 影像之統計特性[1]

數位影像為純粹的空間上資料分佈，要分析一張影像則需要他的統計特性，即影像中不同特徵在頻率上的分佈。在文獻中，直方圖(histogram)是個簡單並實用的統計特性。要在一張影像中辨識出一個物體，正是基於現實世界中同一個物體總是會有相同的統計特性。

3.3.1 直方圖(histogram) [1]

今有一個單通道灰階影像 $g(x,y)$ ，其強度為在範圍 $[0,L]$ 之正數。 $S_k = H(r_k)$ ， r_k 是第 k 個強度準位值， S_k 為帶有 r_k 影像強度的像素在 $g(x,y)$ 中出現的次數， H 為直方圖函數。

以圖 3-3 為例，自由女神像的圖片格式為大小 64×64 ，影像強度為 $[0,31]$ (5 bits)，單通道(灰階)



圖 3-3 自由女神像[1]

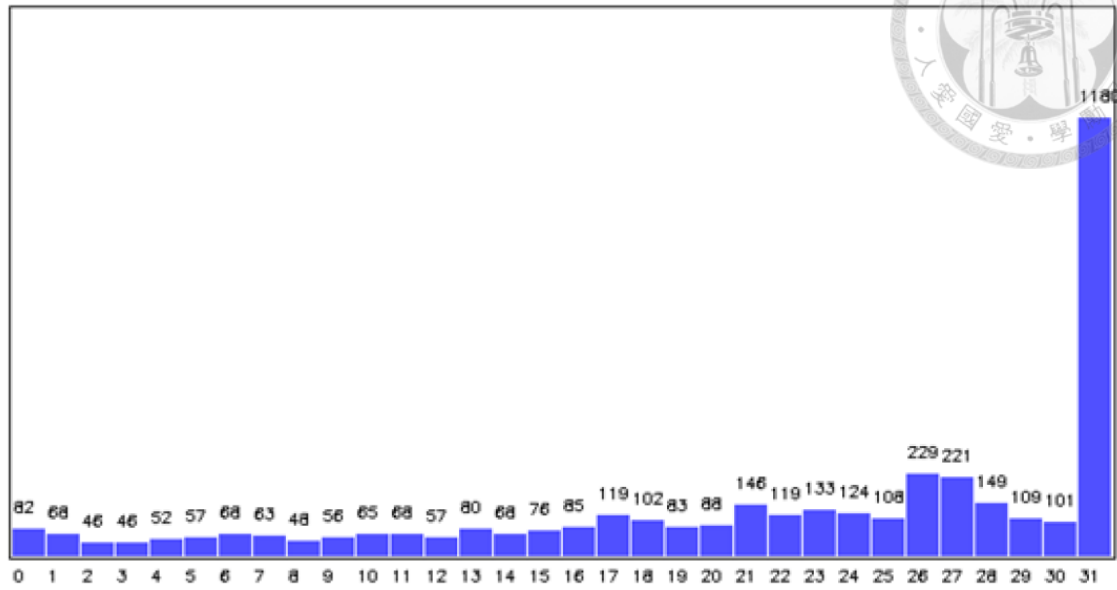
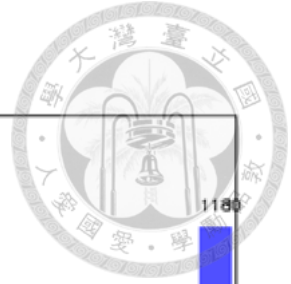


圖 3-4 自由女神像影像之直方圖[1]

如圖 3-5 林肯圖像格式亦為 64×64 ，影像強度為 $[0,31]$ ，單通道(灰階)。



圖 3-5 林肯圖[1]

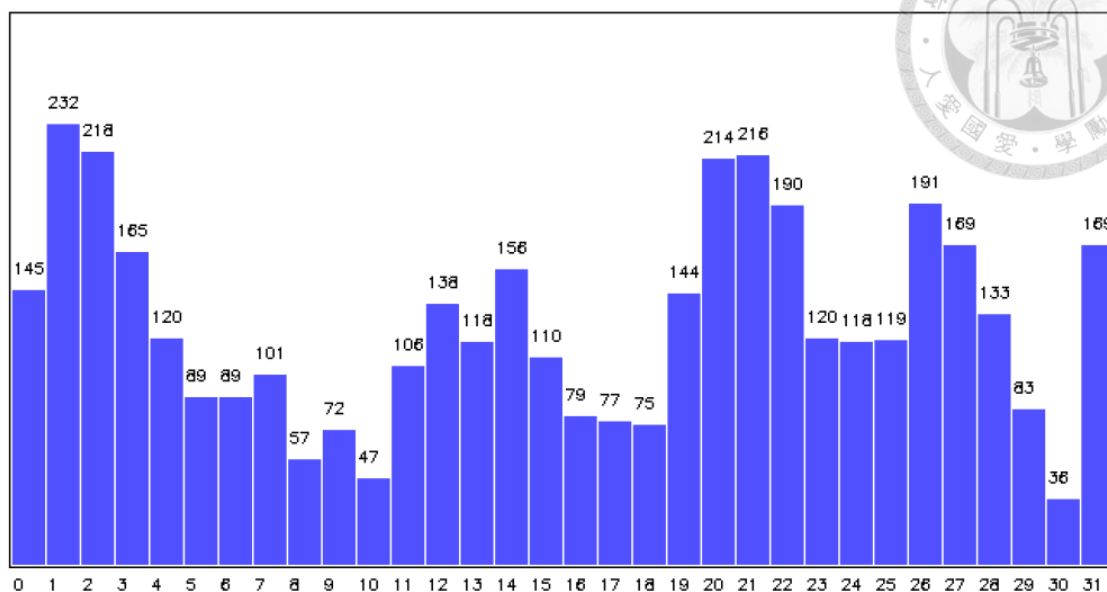


圖 3-6 林肯圖像之直方圖[1]

觀察圖 3-4 和圖 3-6 兩直方圖，我們從肉眼可以立即發現兩途的差異極大，就算不看原始圖形，也可以大略知道這兩張直方圖的原始圖形為同一張的概率極低，而我們將透過一個量化的方法使電腦能夠得知這個概率，此方法將在下節介紹。

另外，統計直方圖可以推廣到更高維度，在實作的時候一半會使用 H、S 空間(去掉 V 空間)來統計 2 維的直方圖。



3.3.2 直方圖比較(histogram comparison) [1]

上一節中， $H(r_k)$ 表示影像的直方圖。我們可以裡用統計學常用的幾種方式來得到一個介於 0.0~1.0(intersection 除外)的實數，以比較 H_1 和 H_2 的相似度。

方法	公式
Correlation	$d(H_1, H_2) = \frac{\sum_k (H_1(r_k) - \bar{H}_1)(H_2(r_k) - \bar{H}_2)}{\sqrt{\sum_k (H_1(r_k) - \bar{H}_1)^2 \sum_k (H_2(r_k) - \bar{H}_2)^2}}$ $\bar{H}_m = \frac{1}{N} \sum_j H_m(j)$ <p>其中 $N = L+1$</p>
Chi-Square	$d(H_1, H_2) = \sum_k \frac{(H_1(r_k) - H_2(r_k))^2}{H_1(r_k)}$
Intersection	$d(H_1, H_2) = \sum_k \min(H_1(r_k) - H_2(r_k))$
Bhattacharyya distance	$d(H_1, H_2) = \sqrt{1 - \frac{1}{\sqrt{\bar{H}_1 \times \bar{H}_2 \times N^2}} \times \sum_k \sqrt{H_1(r_k) \times H_2(r_k)}}$

表 3-1 相似度的比較方法[1]

若將直方圖用 Correlation 和 Intersection 方法判斷相似度，向量相似度愈高運算後得出的值越高；相反的若使用 Chi-Square 和 Bhattacharyya Distance 方法則是數值愈低，兩直方圖相似度愈高。而經過測試後發現，在我們的實驗環境中使用 Correlation 最能展現出相同體的最高相似度，另外三種方法則容易誤判環境中地板的花紋，所以本論文實驗使用 Correlation 來做直方圖比較。

本論文透過將不同顏色分佈的特徵圖樣放置於不同載具上，並配對各自的直方圖以作為辨別不同載具的依據，使電腦能夠分辨不同載具的定位以及姿態資訊。



3.3.3 色彩分佈直方圖過濾器實驗

利用上節中提到的色彩分佈直方圖之特性提出色彩分佈直方圖過濾器，將具有相同辨識特徵圖形的載具以不同的顏色區分，藉此回傳各個載具的位置至協同控制演算法中。因此我們需要利用攝相機擷取我們的色彩樣本，並進行計算統計得出直方圖，最後產生過濾器。

首先我們需要決定三種不同的顏色分佈，分別產生三個載具的過濾器。其中最好選擇在 HSV 色彩分佈中色相(HUE)差異最大的顏色，並在輪廓線上選擇其補色如此一來統計直方圖的差異也最大，能最佳化攝相機的辨識結果。因此我們選擇了黃底藍線、藍底紅線、白底黑線等色彩分佈以產生直方圖過濾器，如圖 3-7 所示。

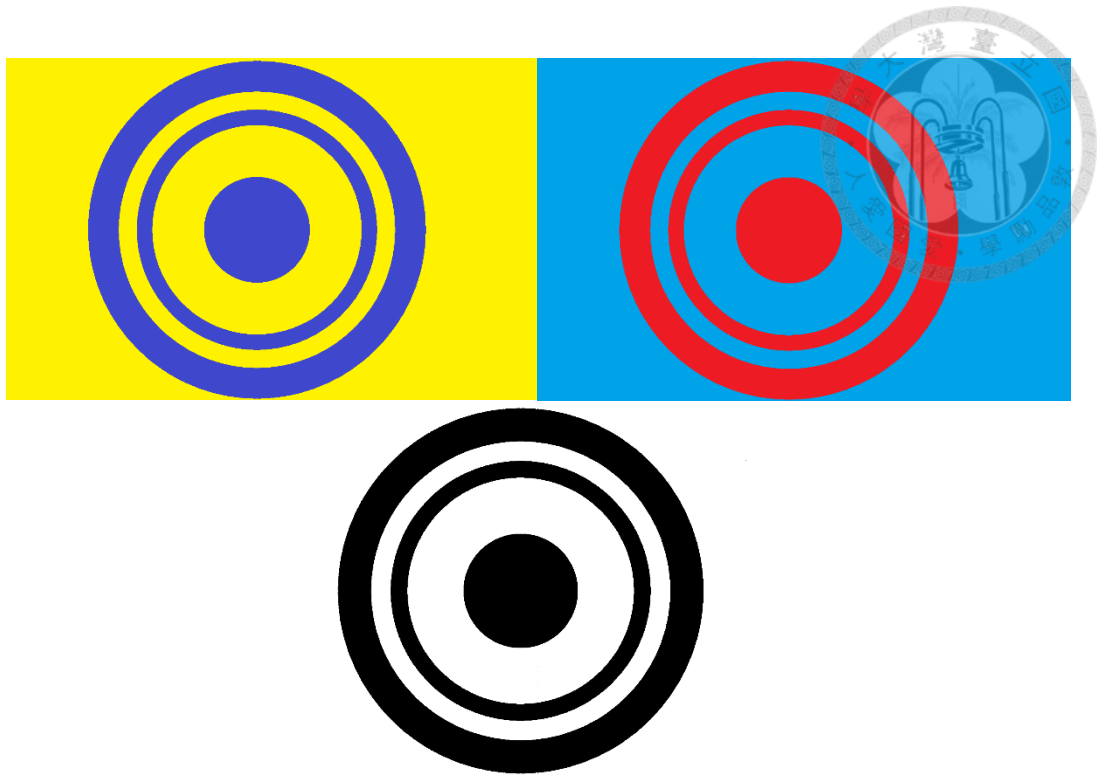


圖 3-7 本實驗所使用之色彩分佈

再來我們透過攝相機擷取畫面後將其修剪成我們所需要的色彩樣本，最後進行統計後便能產生直方圖過濾器，如圖 3-8、3-9、3-10、3-11 所示。

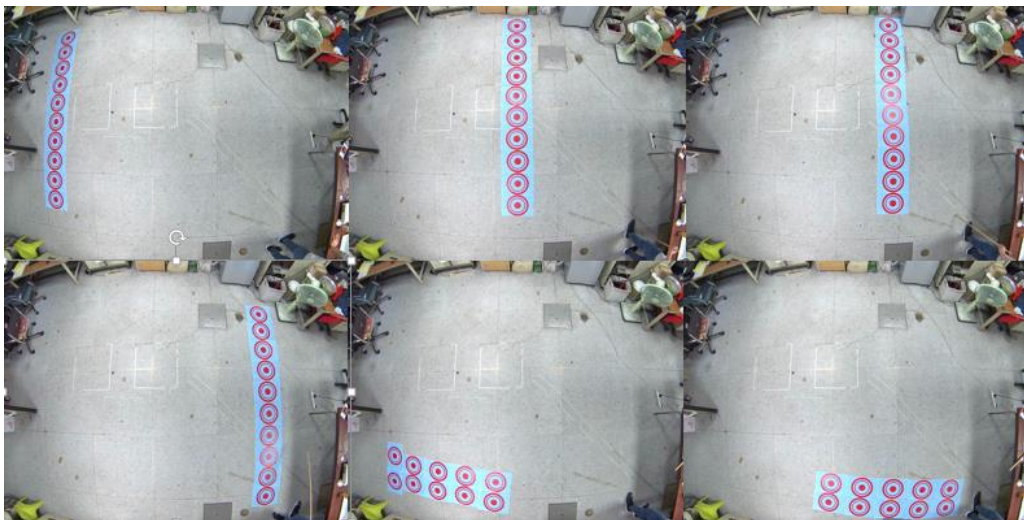


圖 3-8 透過攝相機擷取畫面(藍底紅線樣本)

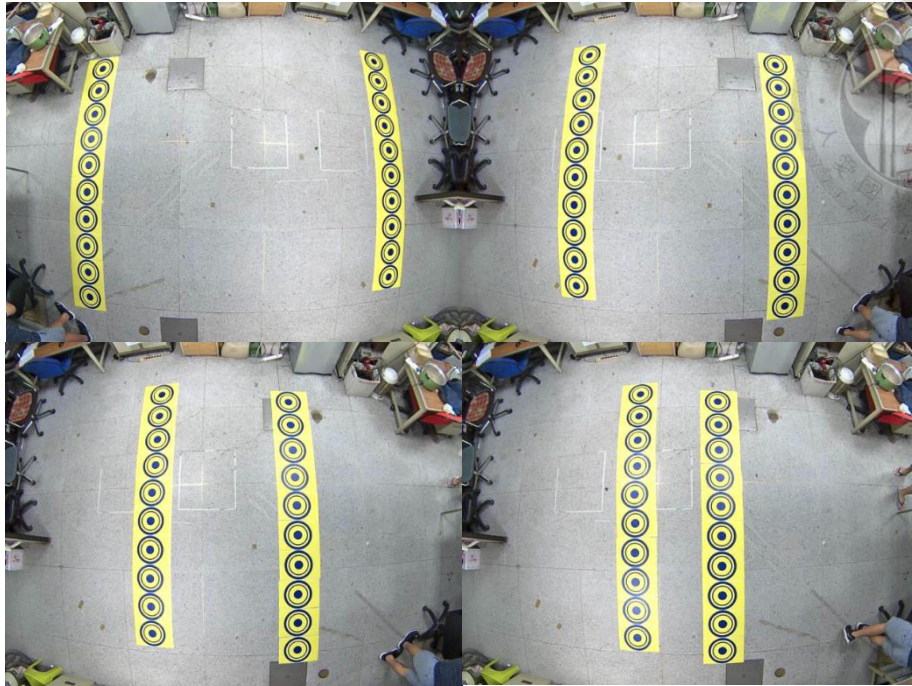


圖 3-9 透過攝相機擷取畫面(黃底藍線樣本)

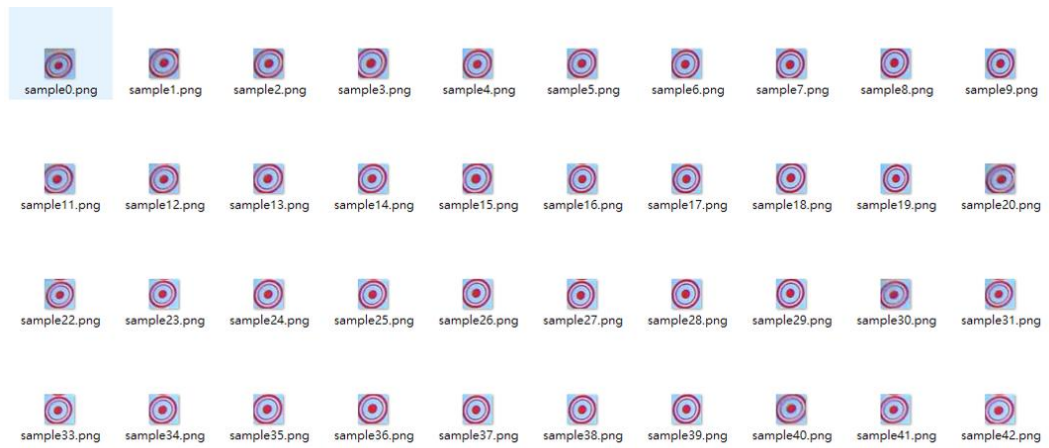


圖 3-10 將擷取畫面修剪成色彩樣本(藍底紅線樣本)



圖 3-11 將擷取畫面修剪成色彩樣本(黃底藍線樣本)



產生直方圖過濾器之後便能分別偵測三個不同的顏色分佈的圖樣，如圖 3-12、3-13 所示。

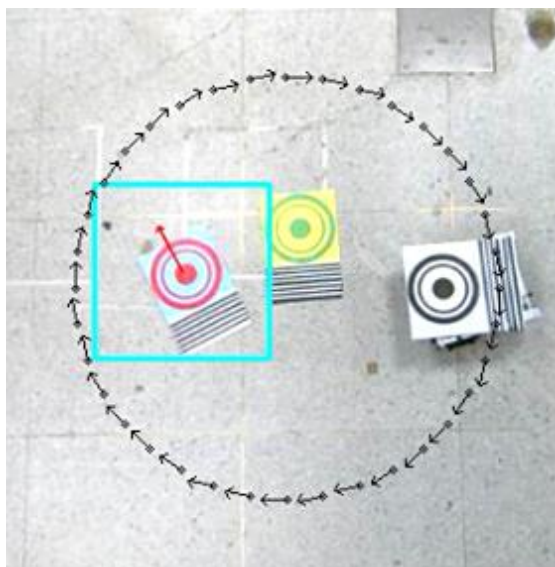


圖 3-12 色彩分佈直方圖過濾器實驗結果(藍底紅線樣本)

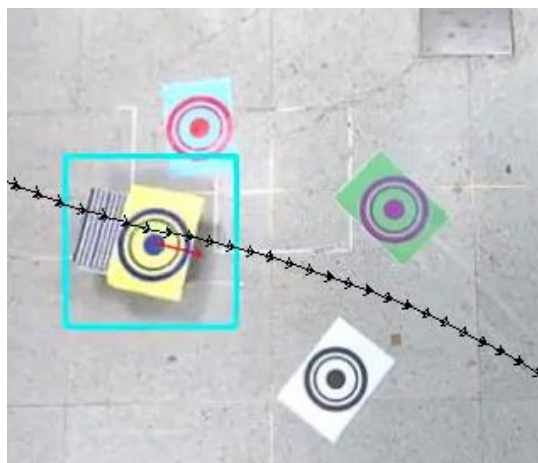


圖 3-13 色彩分佈直方圖過濾器實驗結果(黃底藍線樣本)

第四章 硬體配置與系統整合



整合系統包括演算法、致動器、馬達編碼器與視覺感測器。給予系統指定的隊形及路徑後，視覺感測器負責載具即時定位與姿態判定，伺服馬達作為載具致動器，主控站依據感測器的輸入控制伺服馬達，完成編隊任務。

4.1 硬體配置

本實驗選用「利基應用科技公司」的客制化載具平台，如圖 4-1。載具車體部分前面兩輪為驅動輪，後兩輪為從動輪，以驅動輪之轉速差改變載具姿態。ARMINNO 主控板為載具控制單元，接有馬達編碼器感測元件，透過無線通訊模組 Zigbee 與筆記型電腦連結傳輸訊號，再經筆記型電腦整合 AXIS 的 M3006 型攝影機回傳之影像資訊做出控制決策輸出致馬達驅動模組，整體系統架構示意如圖 4-2。接著將介紹各感測器之用途和作用原理。



圖 4-1 客製化載具平台[2]

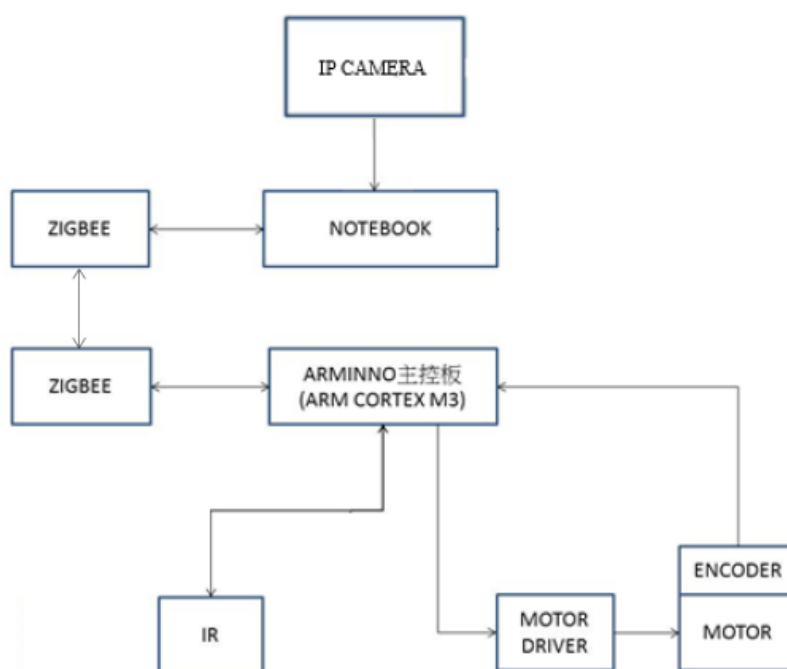


圖 4-2 整體系統架構[2]

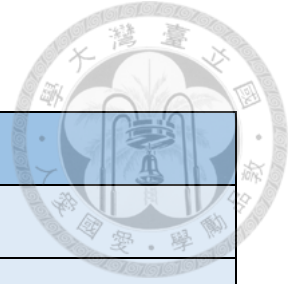


4.1.1 M3006 型網路攝影機

攝影機方面使用 AXIS 生產的 M3006V 型網路攝影機如圖 4-3，詳細規格如表 4-1。



圖 4-3 M3006 型網路攝影機



項目	規格
影像感應器	逐行掃描 RGB
鏡頭	1.6 公釐
視角	134 度
燈光敏感度	0.6-200000 lux
解析度	2048x1356 到 160x90
每秒畫格	30 FPS
同步方式	Internal

表 4-1 攝影機規格表

4.1.2 馬達編碼器[2]

載具透過前端兩側之驅動輪行走時，馬達編碼器計算輪軸轉動之角度並利用航位推算法(Dead Reckoning)計算得到載具即時的位置及姿態，其中左右兩側驅動輪行走的距離與載具位置及姿態的關係如下式：

$$\Delta\theta = \frac{\widehat{S}_R - \widehat{S}_L}{2b} \quad (4-1)$$

$$x_c(k+1) = x_c(k) + \left(\frac{\widehat{S}_R + \widehat{S}_L}{2}\right) \cdot \frac{2 \cdot \sin\frac{\Delta\theta}{2}}{\Delta\theta} \cdot \cos\left(\theta_c(k) + \frac{\Delta\theta}{2}\right)$$
$$y_c(k+1) = y_c(k) + \left(\frac{\widehat{S}_R + \widehat{S}_L}{2}\right) \cdot \frac{2 \cdot \sin\frac{\Delta\theta}{2}}{\Delta\theta} \cdot \sin\left(\theta_c(k) + \frac{\Delta\theta}{2}\right) \quad (4-2)$$

$$\theta_c(k+1) = \theta_c(k) + \Delta\theta \quad (4-3)$$



其中 $x_c(k)$ 、 $y_c(k)$ 、 $\theta_c(k)$ 為載具在 k 時刻的位置和姿態， \widehat{S}_R 為右輪前進距離， \widehat{S}_L 為左輪前進距離， $\Delta\theta$ 為載具姿態角變化量， b 為兩側驅動輪至載具對稱軸之距離。載具定位示意如圖 4-4。

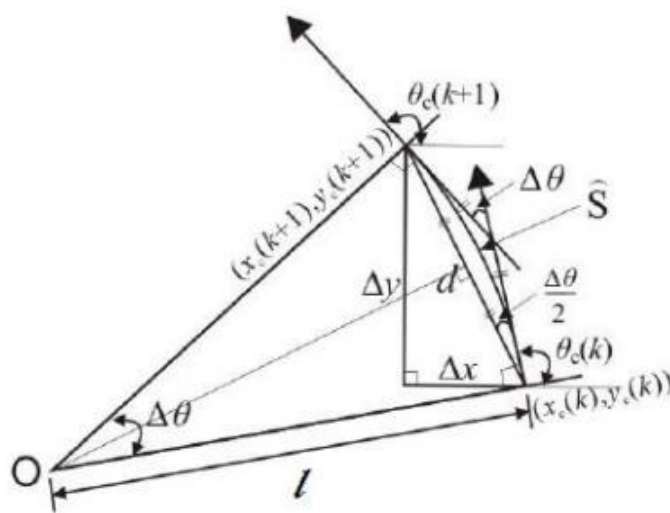


圖 4-4 載具定位示意圖



4.2 載具運動方程式[2]

本實驗使用的載具為前輪驅動，兩輪方向固定，藉由調整驅動輪之轉速差改變載具的速度與姿態，後兩輪則為輔助支撐和滾動用之情輪，如圖 4-5 所示。

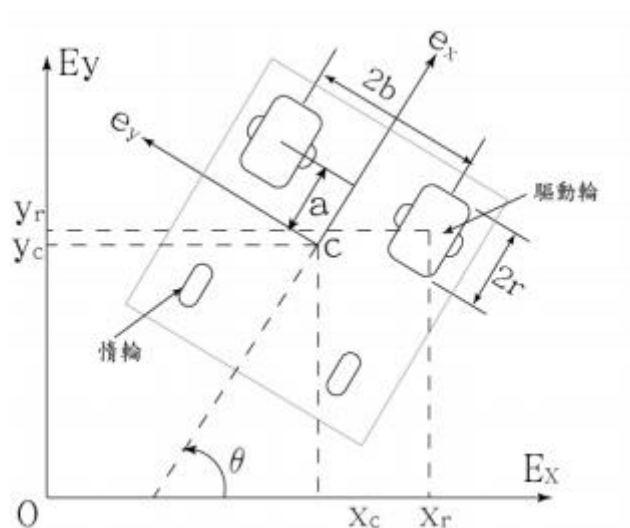


圖 4-5 載具模型示意圖

其中：

a ：驅動輪輪軸至載具中心距離 b ：驅動輪至載具對稱軸距離

r ：驅動輪半徑

θ ：載具相對於慣性參考座標的姿態角

$\dot{\phi}_l$ 、 $\dot{\phi}_r$ ：分別為驅動輪左、右輪的轉速

r_l 、 r_c 、 r_r ：分別為載具左輪、質心及右輪於慣性座標的位置向量



由載具的幾何關係可得：

$$r_r = r_c + ae_x - be_y \quad (4-4)$$

對上式微分一次並轉換到載具座標可得載具速度：

$$\begin{aligned} \dot{r}_r &= \dot{r}_c + b\dot{\theta}e_x + a\dot{\theta}e_y \\ &= (\dot{x}_c \cos\theta + \dot{y}_c \sin\theta + b\dot{\theta})e_x + (\dot{y}_c \cos\theta + \dot{x}_c \sin\theta + a\dot{\theta})e_y \end{aligned} \quad (4-5)$$

假設輪子為純滾動且無側向滑動：

$$\dot{x}_c \cos\theta + \dot{y}_c \sin\theta + b\dot{\theta} = r\dot{\phi}_r \quad (4-6)$$

$$\dot{y}_c \cos\theta + \dot{x}_c \sin\theta + a\dot{\theta} = 0 \quad (4-7)$$

定義載具之線速度 v 和角速度 ω 為：

$$v = \dot{x}_c \cos\theta + \dot{y}_c \sin\theta \quad (4-8)$$

$$\omega = \dot{\theta} \quad (4-9)$$

將 v 和 ω 代入式(4.6)後可得右輪轉速 ϕ_r 與載具線速度及角速度的關係：

$$r\dot{\phi}_r = v + b\omega \quad (4-10)$$

依據同理也可知左輪轉速與 v 和 ω 之關係：

$$r\dot{\phi}_l = v - b\omega \quad (4-11)$$

將式(4-10)和(4-11)以矩陣表式為：

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi}_r \\ \dot{\phi}_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{r} & \frac{b}{r} \\ \frac{1}{r} & -\frac{b}{r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (4-12)$$



4.3 載具路徑追蹤控制[14]

4.3.1 模糊控制簡介[14]

模糊控制為利用模糊邏輯設計控制器之工作原理，而模糊邏輯則是將人類思維中難以精確定義的形容詞加以量化，如長短、大小、遠近等等，使欲傳達的資訊更明確地呈現。模糊控制理論也被廣泛的應用在各種領域，如智能運算、類神經網絡等等。

模糊控制系統將受控系統所得到之輸入數值進行模糊化後(Fuzzification)，再根據專家經驗所訂定的規則庫進行模糊推論，最後將推論出的語言項解模糊化(Defuzzification)得到輸出數值。如圖 4-6 所示。

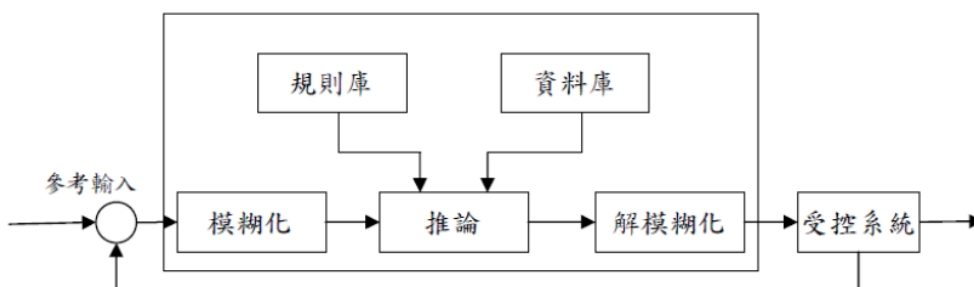


圖 4-6 模糊控制器基本架構[14]



4.3.2 路徑追蹤控制[14]

透過協同編隊演算法產生的載具路徑為座標中離散分布的有序點集合，每個點各自紀錄載具當下的位置以及姿態向量，我們將載具追線簡化成追點任務，以載具與參考點之相對距離(d_e)、視線角(ϑ_e)、姿態角差(θ_e)為輸入，經由模糊控制器的規則庫產生輸出，分別為上一節所推導的載具的線速度(v)與角速度(ω)。如圖 4-7 所示。

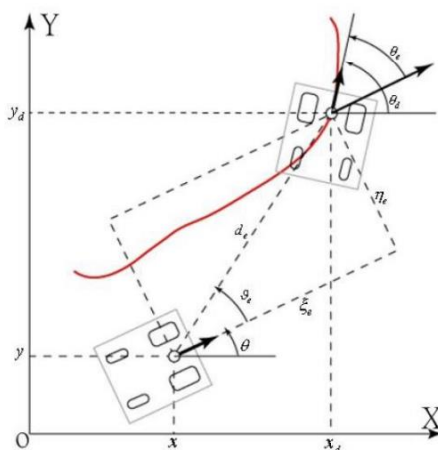


圖 4-7 參考路徑與載具姿態示意[14]

上圖中， (x, y, θ) 為載具目前的位置與姿態， (x_d, y_d, θ_d) 為參考點上的位置與姿態，而 d_e 為相對距離、 ϑ_e 為視線角、 θ_e 為姿態角，定義如下式

$$d_e = \sqrt{\xi_e^2 + \eta_e^2} \quad (4-13)$$

$$\vartheta_e = \tan^{-1}\left(\frac{\eta_e}{\xi_e}\right) \quad (4-14)$$

$$\theta_e = \theta_d - \theta \quad (4-15)$$

其中 ξ_e 、 η_e 、 θ_e 可由載具座標系與慣性參考座標系間的轉換求出



$$\begin{bmatrix} \xi_e \\ \eta_e \\ \theta_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_d - x \\ y_d - y \\ \theta_d - \theta \end{bmatrix} \quad (4-16)$$

而輸入變數及輸出變數的語言項之歸屬函數，皆選用常見並容易計算的三角型，如圖 4-8-4-12 所示。

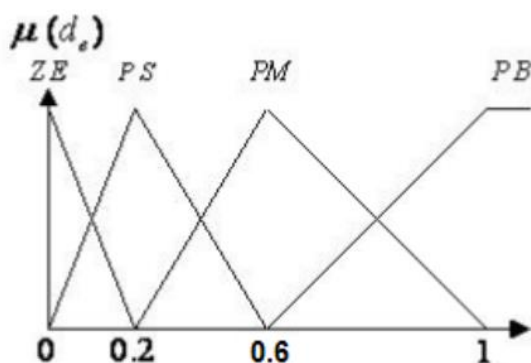


圖 4-8 輸入變數 d_e 之歸屬函數[14]

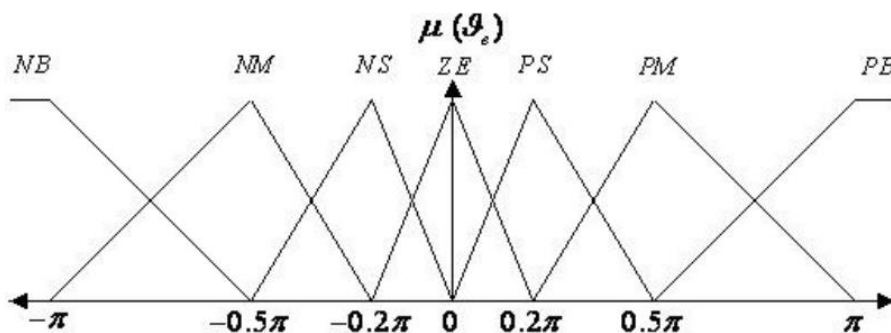


圖 4-9 輸入變數 θ_e 之歸屬函數[14]

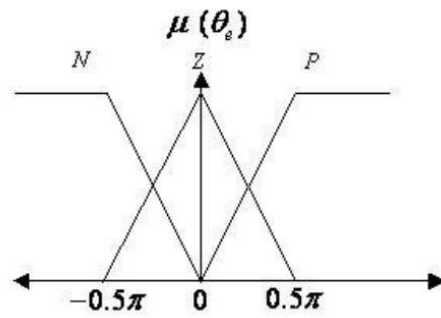


圖 4-10 輸入變數 θ_e 之歸屬函數[14]

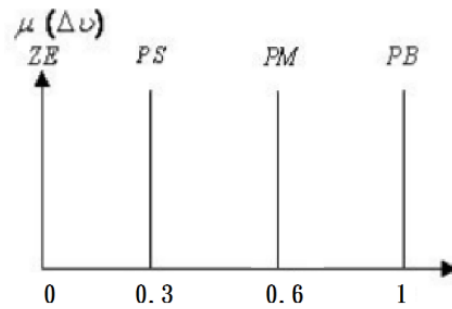


圖 4-11 輸出變數 Δv 之歸屬函數[14]

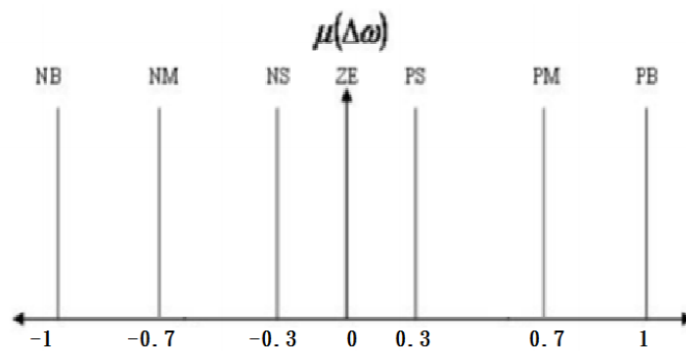


圖 4-12 輸出變數 $\Delta\omega$ 之歸屬函數[14]



由於每個歸屬函數的操作區間與實際實驗時並不一定相同，因此會依實驗需求乘上正規化係數。

定義各個輸入輸出的歸屬函數後，接著需建立模糊規則庫。原則為當相對距離和視線角過大時，代表載具遠離參考路徑，需給予較大的角速度使載具回到期望的參考路徑上；若相對距離大但視線角小，給予較大的線速度即可。並依載具之姿態角差可調整角速度的大小來達到更流暢的控制效果。

將以上的邏輯，寫成規則庫的條目如下：

$$\text{if } d_e = A, \vartheta_e = B, \theta_e = C, \text{ then } v = D, w = E \quad (4-17)$$

其中，A, B, C, D, E 為模糊規則中的語言項，分別如下所示：

A = {ZE (zero), PS (positive small), PM (positive medium), PB(positive big)}

B = {PB, PM, PS, ZE, NS (negative small), NM (negative medium), NB (negative big)}

C = {P (positive), Z (zero), N (negative)}

D = {ZE, PS, PM, PB}

E = {PB, PM, PS, ZE, NS, NM, NB}

依此定義可建立起 84 條規則庫[6]，如表 4-1 所示，再搭配模糊交集演算利用高度法解模糊化算出輸出變數。

θ_e		d_e							
		ZE		PS		PM		PB	
P	Z	Δv	$\Delta \omega$	Δv	$\Delta \omega$	Δv	$\Delta \omega$	Δv	$\Delta \omega$
	ϑ_e	PB	ZE	PS	ZE	PM	ZE	PM	ZE
ZE/ZEPS			PS/PSZE	ZE/ZEPM	PM/PSZE	ZE/ZEPB	PM/PMZE	ZE/ZEPB	PB/PB
PM		ZE	ZE	PS	PS	PS	PM	PM	PB
		ZE/ZEPS	ZE/ZE	ZE/ZEPM	PS/PSZE	ZE/ZEPM	PS/PS	PS/PSPB	PM/PM
PS		ZE	ZE	PS	PS	PM	PS	PB	PM
		ZE/ZEZE	ZE/ZEPS	PS/PSPS	ZE/ZEPS	PM/PSPM	PS/ZEPM	PM/PM	PS/PS
ZE		PS	ZE	PS	ZE	PM	ZE	PB	ZE
		PS/PSZE	ZE/ZEPS	PS/PSPS	NS/NSPM	PM/PMPS	NS/NSPB	PB/PS	ZE/ZE
NS		ZE	ZE	PS	NS	PM	NS	PB	NM
		ZE/ZEZE	ZE/ZEPS	PS/PSZE	NS/NSPS	PM/PSZE	NS/NMPM	PM/PMNS	NM/NM
NM		ZE	ZE	PS	NS	PS	NM	PM	NB
		ZE/ZEPS	NS/NSZE	ZE/ZENS	NM/NMZE	ZE/ZENS	NM/NMPS	PS/PSNM	NB/NB
NB		ZE	PS	ZE	NM	ZE	NB	ZE	NB
		ZE/ZEPS	NS/NSZE	ZE/ZENS	NM/NMZE	ZE/ZENM	NB/NBZE	ZE/ZENB	NB/NB

表 4-2 路徑追蹤模糊規則庫[14]

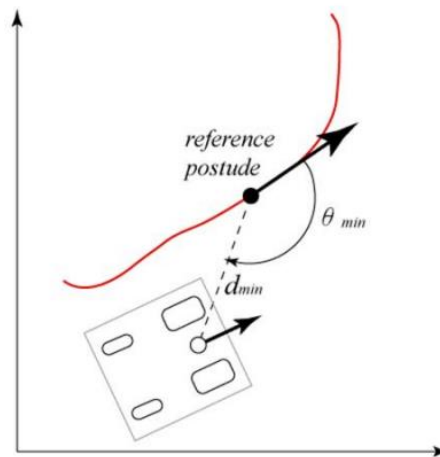


圖 4-13 最小距離閾值 d_{min} 及最小角度閾值 θ_{min} [14]



第五章 模擬與實驗結果分析

5.1 模擬工具

本論文使用 c++ 搭配 OpenGL (Open Graphics Library) 撰寫模擬程式，主要模擬在 B-樣條曲線路徑上的多載具協同控制編隊控制。以下為模擬介面圖：

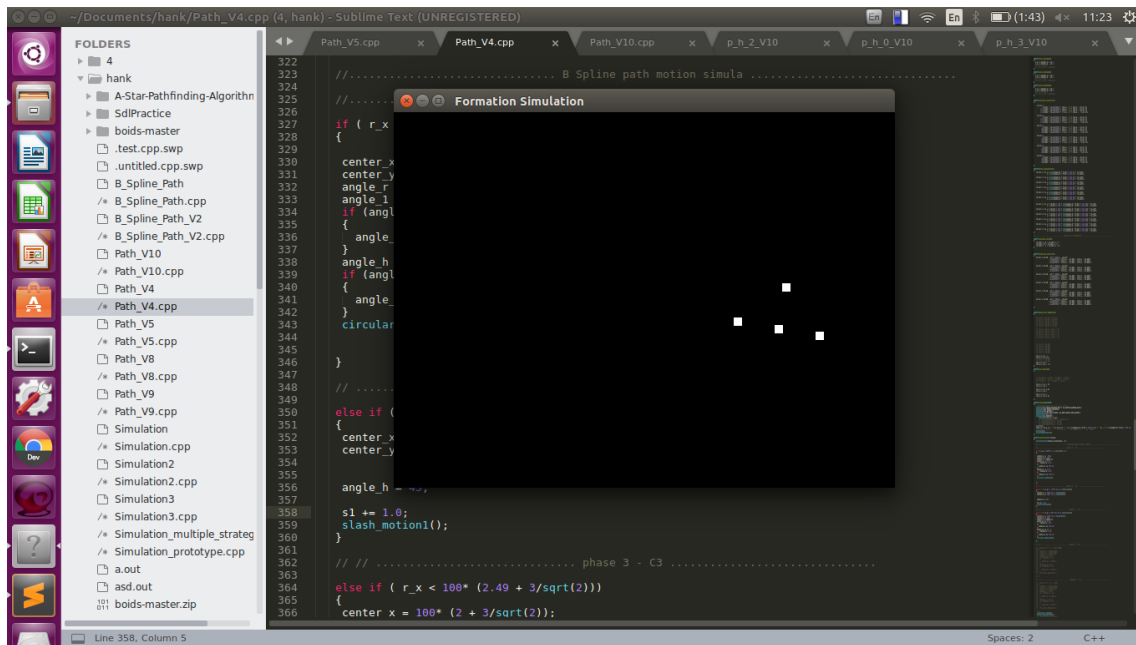


圖 5-1 多載具編隊控制模擬工具介面圖

5.2 模擬結果

如 2.2 節中提到，根據(2-14)式和(2-15)式，載具控制分成虛擬參考點認知層面以及載具控制層面，其中設計的載具隊形、資訊傳遞圖以及各個控制層面的輸入參數如圖 5-2、5-3 和表 5-1 所示。其中資訊傳遞圖中的權重以矩陣形式表示，舉例：矩陣中第一列的第二行之元素標記為 a_{12} ，表示為成員 2 傳遞至成員 1 的資訊傳遞權重，以此類推，矩陣第四列則是代表虛擬參考點傳出之資訊權重。此模



擬中所設計的載具隊形為三角形，如圖 5-4 所示。其成員與參考點位置的相量差分別為(0,1)、(1,0)和(-1,0)。

控制層面	虛擬參考點認知層面	載具控制層面
控制輸入	$u_i^c = \frac{1}{\eta_i} \sum_{j=1}^n a_{ij}^c (\dot{r}_j - \gamma(r_i - r_j)) + \frac{1}{\eta_i} a_{i(n+1)}^c [\dot{r}_c - \gamma(r_i - r_c)]$	$u_i^v = \dot{r}_i^d - \alpha_i(r_i - r_i^d) - \sum_{j=1}^n a_{ij}^v [(r_i - r_i^d) - (r_j - r_j^d)]$
資訊傳遞 權重	$a^c = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$a^v = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$
參數	$\eta_1 = 1, \eta_2 = 1, \eta_3 = 2$ $\gamma = 0.5$	$r_{1F}^d = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}^T, r_{2F}^d = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \end{bmatrix}^T, r_{3F}^d = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}^T$ $\alpha_1 = 1, \alpha_2 = 1, \alpha_3 = 1$

表 5-1 協同控制輸入的各項參數

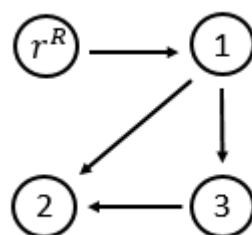


圖 5-2 資訊傳遞圖(虛擬參考點認知層面)

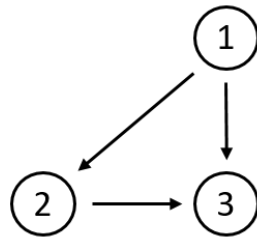


圖 5-3 資訊傳遞圖(載具控制層面)

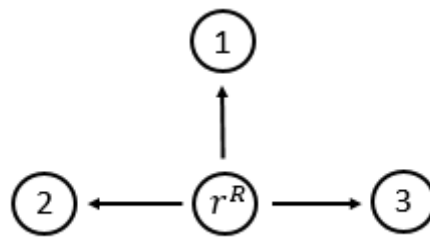


圖 5-4 載具成員與參考點的相對位置關係

圖 5-5 為模擬開始時載具和虛擬參考點的起始位置，圖中的白點分別為三個載具以及一個虛擬參考點，我們將路徑、移動速率、姿態等資訊寫入虛擬參考點後，再透過協同控制演算法使各個載具保持與虛擬參考點的相對位置並維持隊形姿態符合路徑姿態，其模擬結果如圖 5-5、5-6、5-7、5-8 所示。

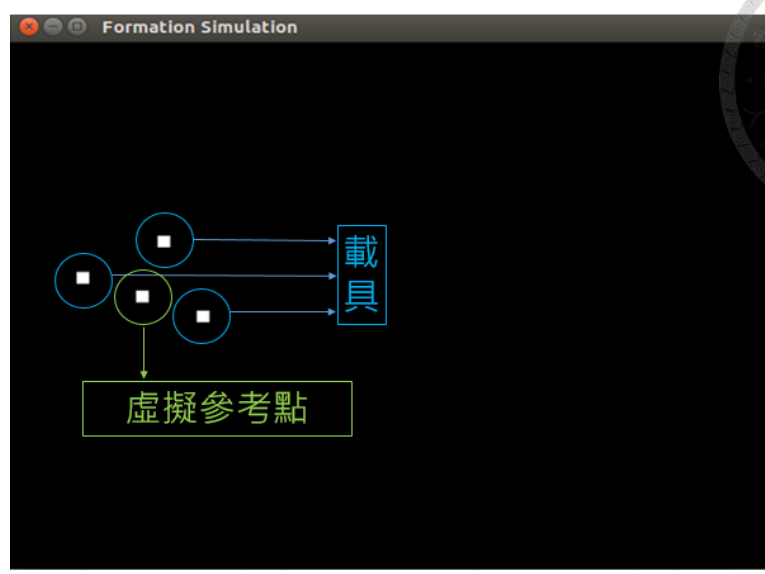


圖 5-5 虛擬參考點、載具和路徑(起始位置)

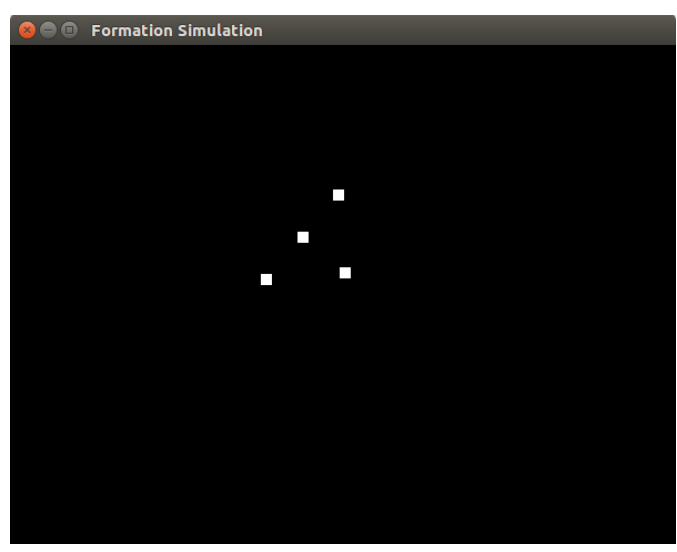


圖 5-6 虛擬參考點、載具和路徑(行進間 1)

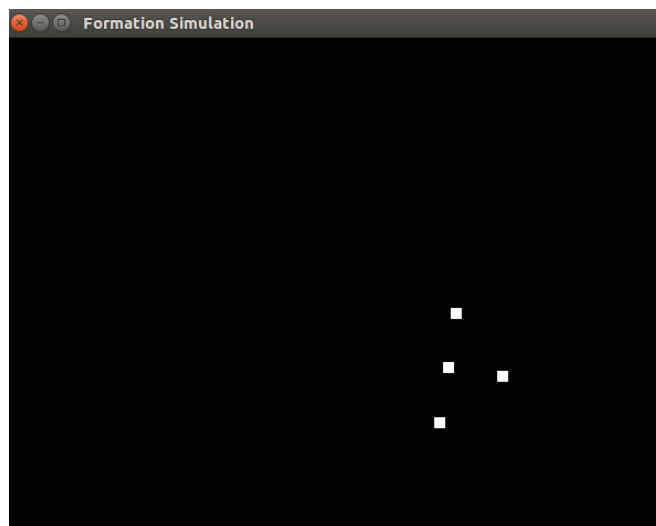


圖 5-7 虛擬參考點、載具和路徑(行進間 2)

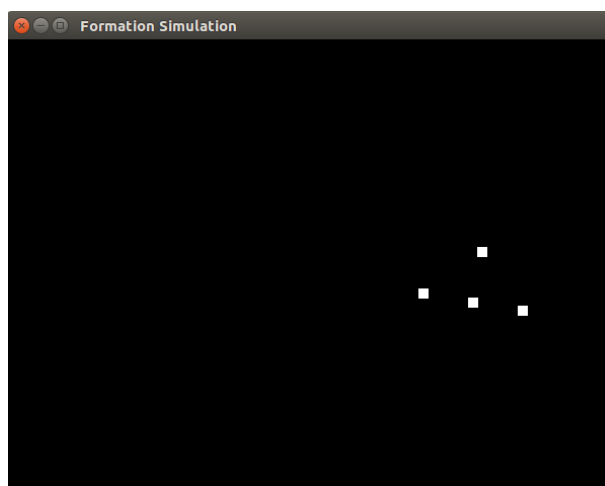


圖 5-8 虛擬參考點、載具和路徑(抵達終點)



5.3 實驗架構

本實驗透過模糊控制、影像辨識系統、協同控制編隊演算法完成。利用攝相機擷取畫面並透過色彩分佈直方圖過濾器(histogram filter)分辨各個載具並偵測其位置並傳遞給協同控制編隊演算法進行編隊控制。

5.4 協同控制編隊實驗

透過 3.3.3 節中色彩分佈過濾器實驗，確認攝相機能夠準確辨識各載具位置之後，我們便能將載具的位置回傳至主控站(電腦)，透過協同控制演算法得出載具之速率以及姿態，最後經由模糊控制器輸出為載具的左右輪轉速以完成編隊控制，其實驗結果如圖 5-9~5-14 所示，實驗中所使用的參數包括控制輸入、資訊傳遞圖以及隊形(三角形)等等都與模擬中相同，除了隊伍的行走路線因需配合室攝相機的可視範圍而有稍作改變。

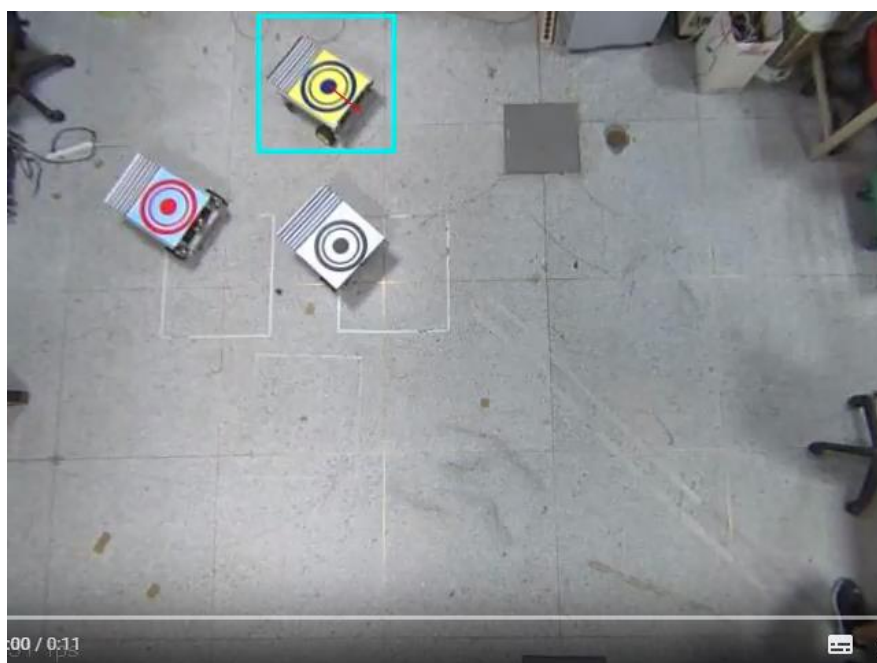


圖 5-9 編隊實驗(起點)

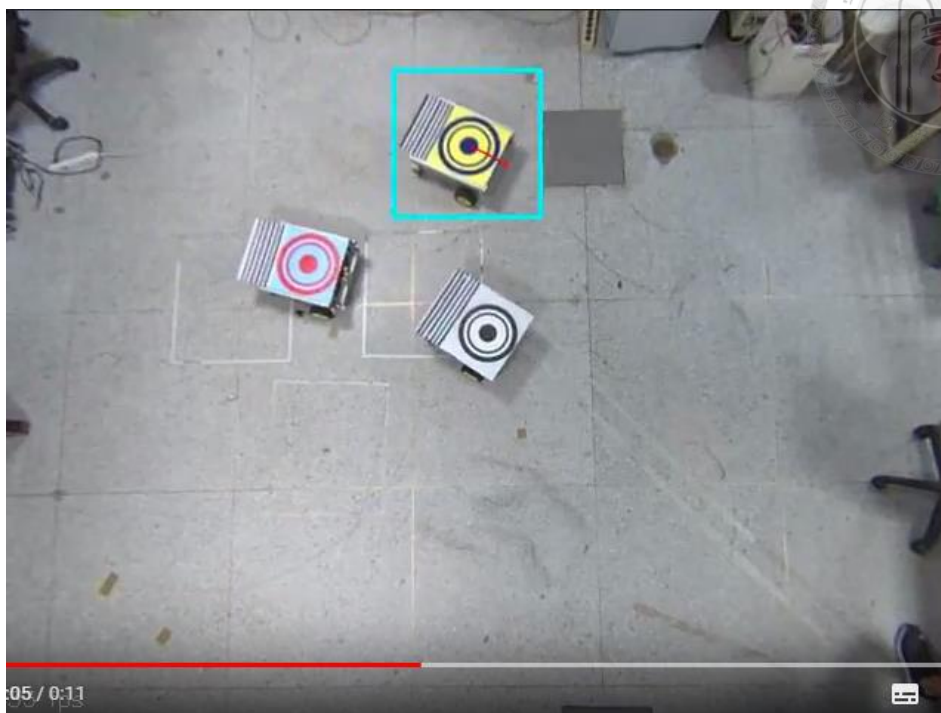


圖 5-10 編隊實驗(行進間)

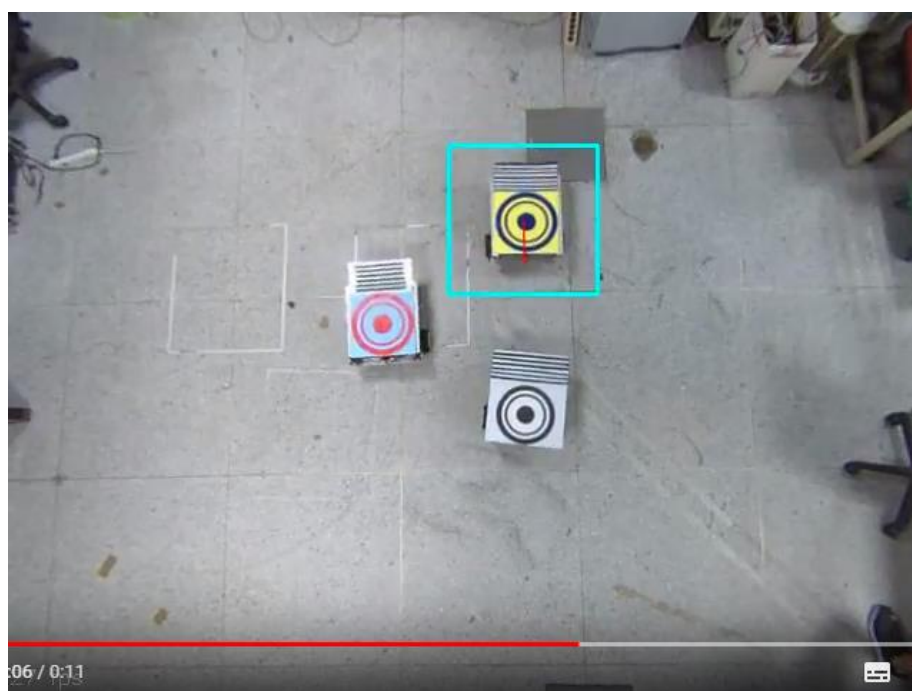


圖 5-11 編隊實驗(行進間)

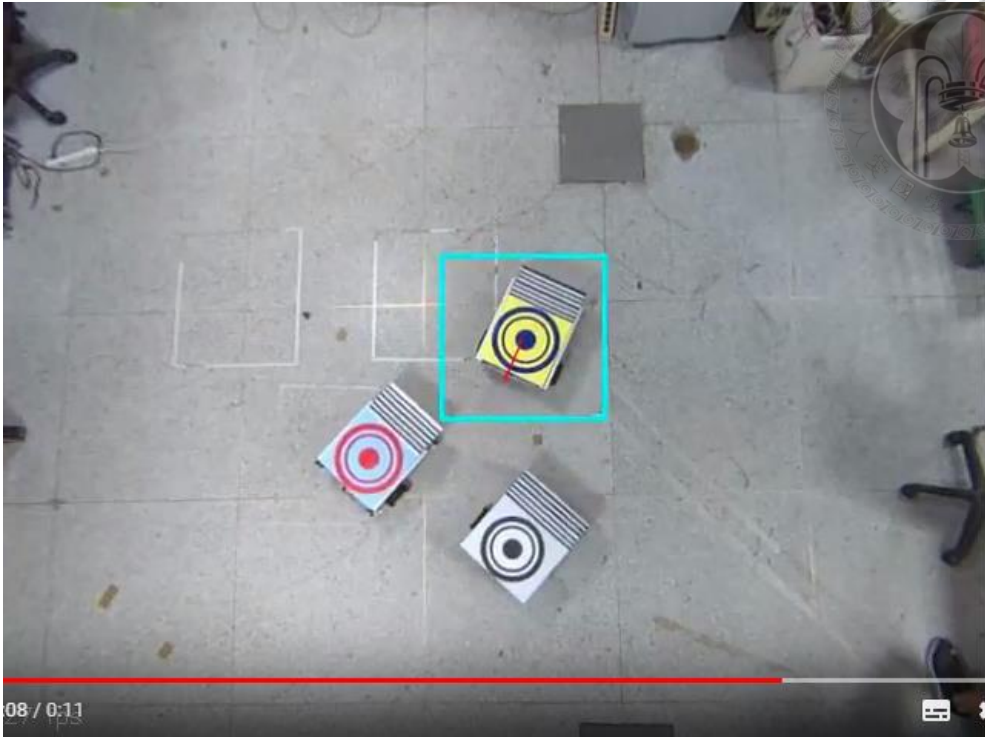


圖 5-12 編隊實驗(行進間)

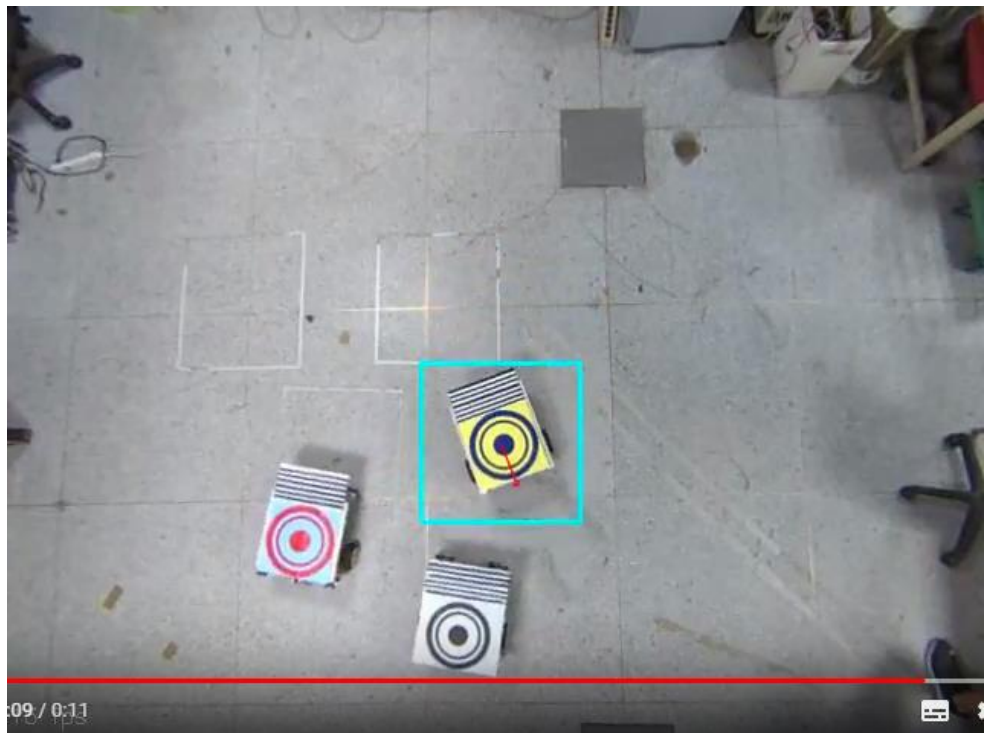


圖 5-13 編隊實驗(行進間)

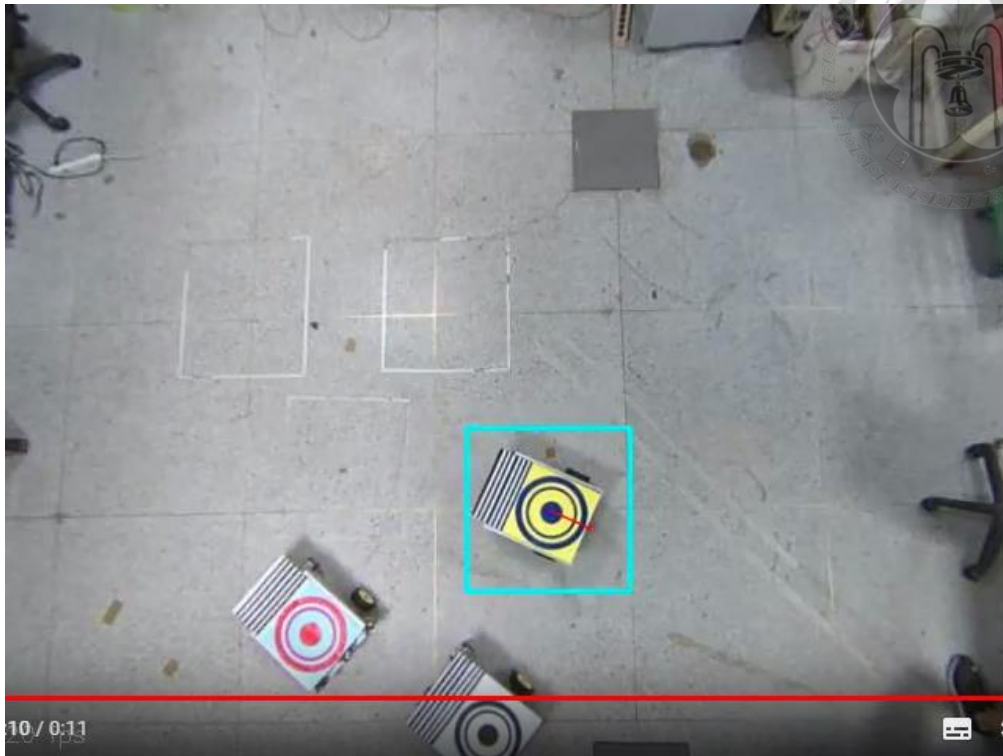


圖 5-14 編隊實驗(終點)

實驗結果發現載具群體在任務中均保持著成群的行走模式，且一定程度上維持了三角形的載具隊形，也順利的達成 B-樣條曲線的路線追蹤。但我們也觀察到載具隊型在經過幾次轉彎後產生了改變，並非我們原先所設定的三角型。其可能的原因推斷為因室內攝相機的可視範圍經校正後[1]對於具有三台載具的隊形而言較為狹小，若要在此範圍完成 B-樣條的曲線追蹤，常會面臨到需要連續轉彎或者旋轉半徑過小的情形，而在彎道靠內側的載具因旋轉半徑較小，在各載具移動速率相近的情況下會有超前整體隊形的情況發生，另外攝相機狹小的可視範圍也無法提供較長的直線路徑讓載具透過編隊控制指令將經過彎道變形後的隊型校正回預設的隊形，因此在此實驗架構下載具隊形才會產生差異。

第六章 結論與未來方向



本論文提出利用協同控制理論並結合虛擬參考點以及虛擬座標系等方法，搭配 B-樣條曲線模擬真實路徑完成室內無人載具的編隊控制任務。並使用 HSV 色彩分佈直方圖將 Liu[1]的室內無人載具定位系統從原先單一載具的定位及路線追蹤推廣至多載具系統。經模擬與實驗結果驗證，室內攝相機能夠透過不同顏色分佈的特徵圖樣成功偵測三台載具的位置及姿態，並回傳主控站。在編隊控制實驗中，載具群體在行走間也能夠穩定的維持隊形，最後達成 B 樣條路先追蹤任務。

未來發展方向可分為幾部分討論。首先在緒論中提到，本論文之系統建置於 Liu[1] 的室內無人載具定位系統之下，同樣的 Lin[2] 也使用此系統完成改良式 A*即時路徑規劃，未來若能結合本論文之編隊控制理論與即時的路徑規劃，建置出一套能夠即時避障的多載具系統，便能更進一步的探討多代理器在此系統下的可行性。

另外本論文提出的載具隊形為固定的單一隊形，未來可在此理論基礎下探討是否能衍生出一套可隨環境或者任務需求變更隊形的多載具系統，使我們的載具隊形能更廣泛的應用在各種不同的環境下。

最後由於本論文的實驗建置在以攝相機為基礎的室內定位系統下，因此載具只能在攝相機的可視範圍內進行編隊任務，而攝相機的可視範圍其實對於要容納三台載具而言略嫌狹小，因此在載具的隊形上和行走路徑上都有許多限制，與現實中可能面臨的任務需求可能還有一段距離。若要解決此問題的可能方法為：另外建置一套能夠回傳載具位置的偵測系統，比如利用現在載具上原有的紅外線感測器以及陀螺儀等等，可往建立載具全域視覺系統的方向研究，讓載具以車載視覺系統做出決策。

參考文獻



- [1] 劉禮榮，“即時全域視覺定位系統於載具控制之應用”台灣大學應用力研究所碩士論文，中華民國一百零七年七月
- [2] 林宗佑，“改良式 A*演算法用於動態路徑規劃與避障”台灣大學應用力研究所碩士論文，中華民國一百零七年七月
- [3] Reynolds, Craig W. (1987). "Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model." ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 1987
- [4] https://en.wikipedia.org/wiki/B%C3%A9zier_curve
- [5] Alvy Ray Smith : "Color and gamut transform pairs", ACM Computer Graphics, 12(3), 1978
- [6] Wei Ren · Randal W. Beard "Distributed Consensus in Multi-vehicle Cooperative Control Theory and Applications", Springer-Verlag London Limited 2008
- [7] Frank L. Lewis · Hongwei Zhang · Kristian Hengster-Movric · Abhijit Das "Cooperative Control of Multi-Agent Systems Optimal and Adaptive Design Approaches ", Springer-Verlag London 2014
- [8] https://en.wikipedia.org/wiki/De_Boor%27s_algorithm
- [9] https://en.wikipedia.org/wiki/Multi-agent_system
- [10] <https://technet.microsoft.com/zh-tw/library/dd372185.aspx>
- [11] <http://www.mathworks.com/help/images/convert-form-hsv-to-rgb-color-space.html>
- [12] 李明威，“無人車之 B-樣條曲線路徑規劃與控制”台灣大學應用力研究所碩士論文，中華民國一百零二年七月
- [13] https://en.wikipedia.org/wiki/Cooperative_distributed_problem_solving

[14]Jer-Wen Huang, “ Development of Global Vision Positioning System for Pseudo-Rigid Formation Control ” Graduate Institute of Applied Mechanics, National Taiwan University Master Thesis,2016

