

固定翼無人機的群飛

Fixed-wing UAVs formation control

Virtual Leader

Slot-based Guidance

Safety Filter



UAV2



UAV1



UAV3

組員：楊濡旭、梁允翔 / 指導老師：張燕光

研究背景與問題



VS



固定翼優勢

航程長、速度快、續航力佳，適合大範圍巡檢、搜索救援與環境監測。

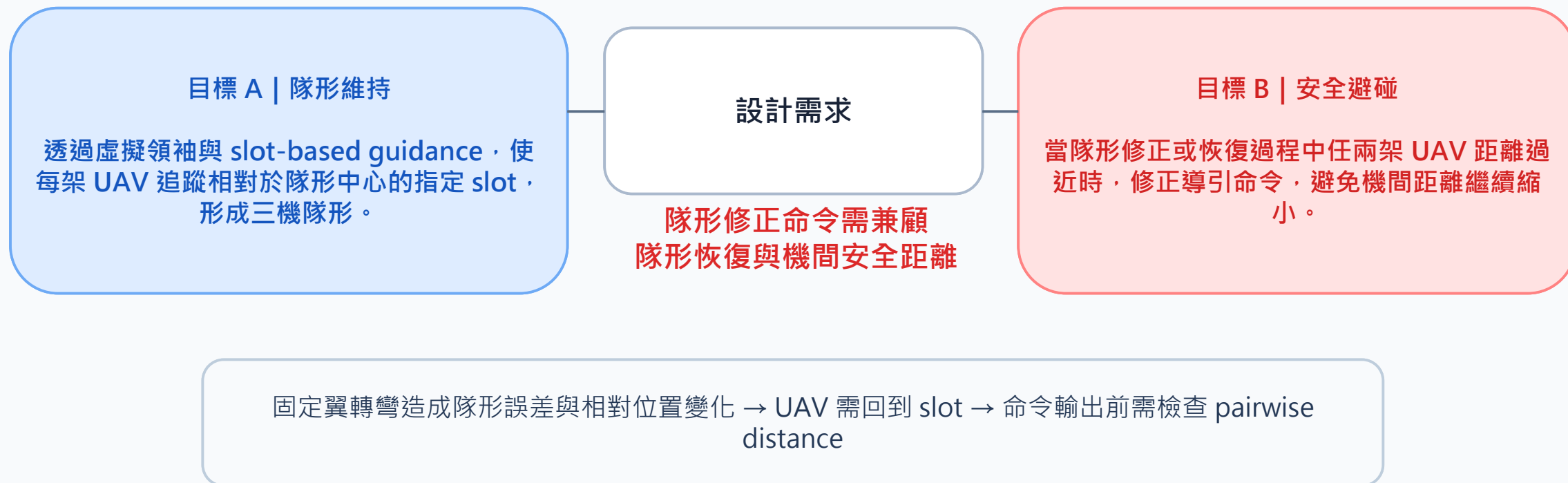
固定翼限制

不能懸停或原地轉向；需維持前進速度；轉彎半徑受速度、滾轉角與航向變化率限制。

編隊風險

若只追求隊形誤差收斂，忽略轉彎限制與機間距離，轉彎或隊形變換時可能造成機間距離不穩定與碰撞風險。

研究目標與系統設計重點

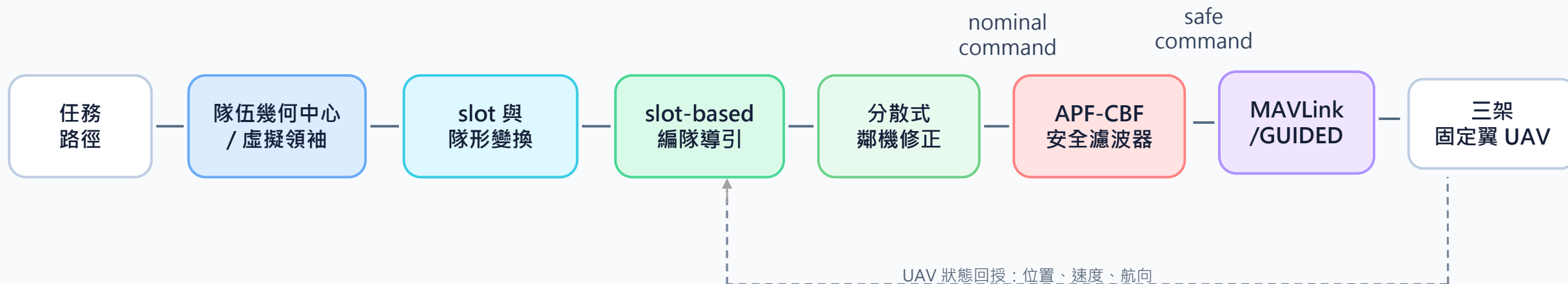


本專題目標

在固定翼飛行限制下，使三架 UAV 沿任務路徑維持隊形，並於機間距離過近時輸出安全命令。

整體系統架構

混合式控制架構：虛擬領袖、slot-based guidance、分散式鄰機修正、轉彎感知隊形變換與 APF-CBF 安全濾波器



任務規劃與編隊導引區

任務路徑與虛擬領袖提供隊伍中心航線；slot 產生、隊形變換與 slot-based guidance 產生 nominal command。

安全濾波與命令選擇區

安全狀態機與 APF-CBF 濾波器檢查機間距離，必要時將 nominal command 修正為 safe command。

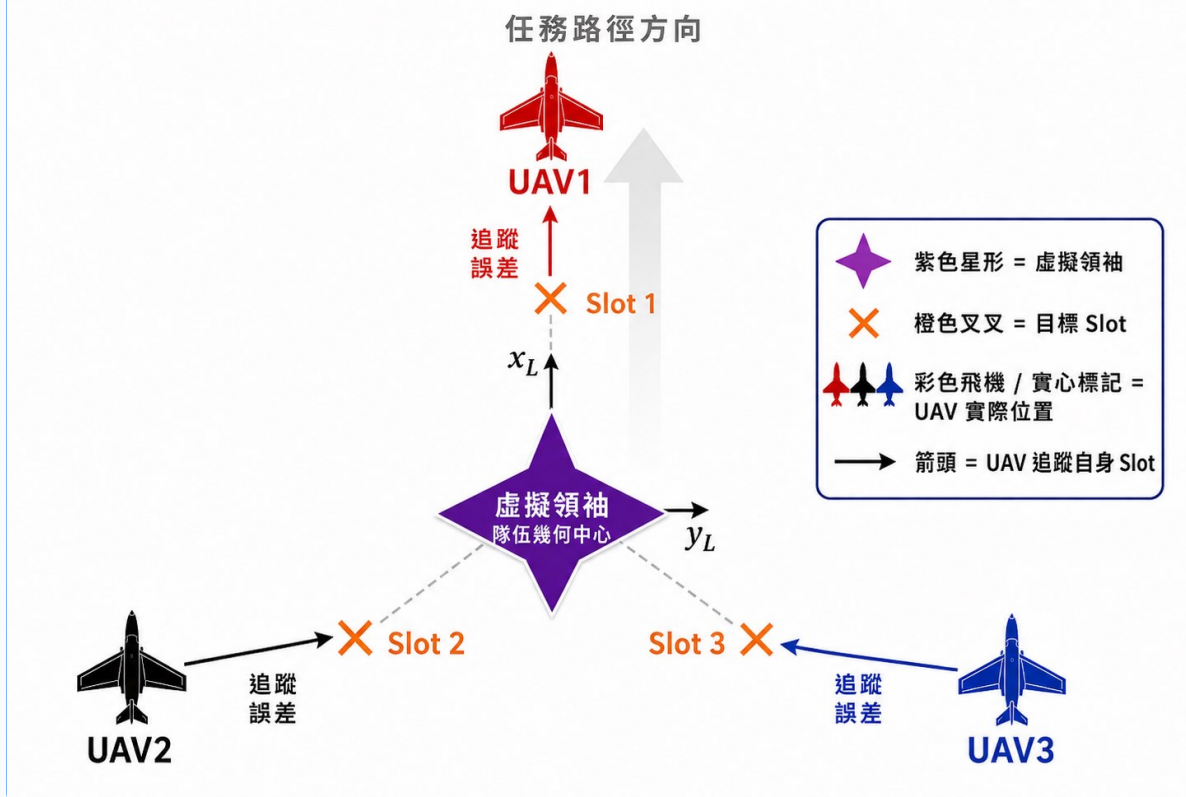
執行與回授區

MAVLink / GUIDED 將 safe command 送至 SITL UAV，並回傳位置、航向與速度等狀態。

核心方法一 | 虛擬領袖 + slot-based 編隊導引

把三機編隊問題轉換為三個 UAV 各自追蹤 slot 的問題

虛擬領袖與 Slot 示意圖



1. 虛擬領袖作為隊形中心

虛擬領袖不是實體 UAV，而是沿任務路徑前進的參考點。

2. slot 定義每架 UAV 的目標位置

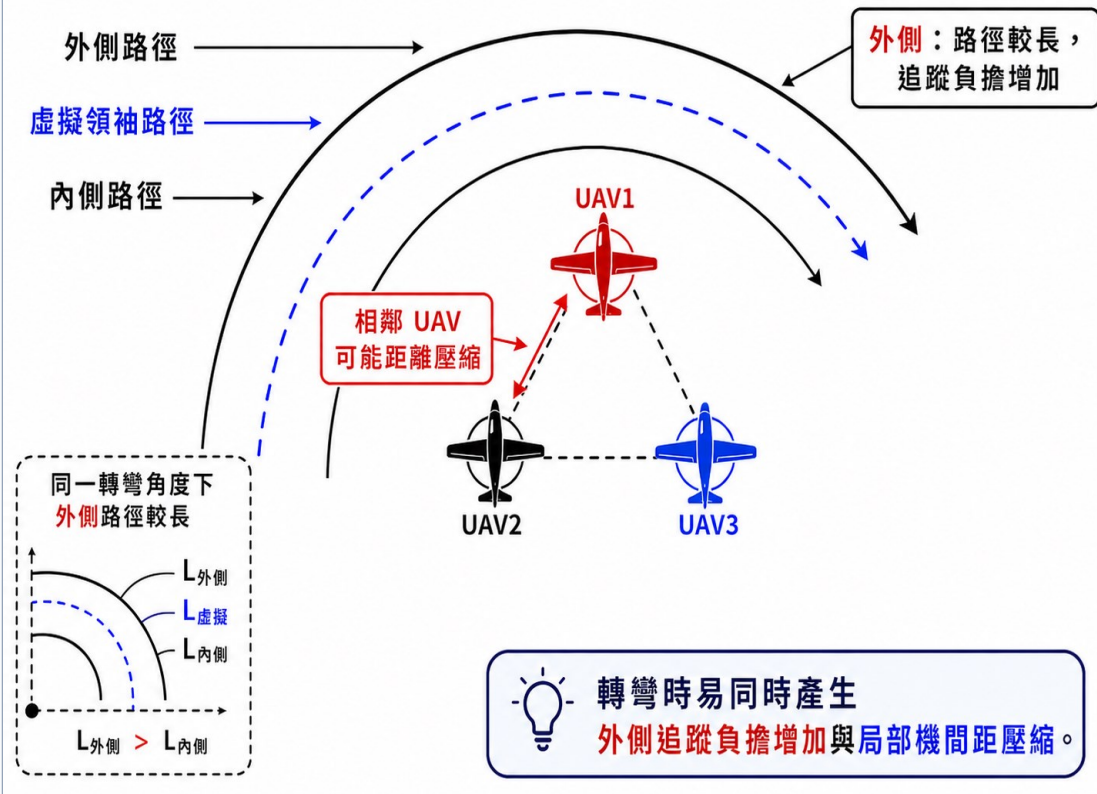
UAV1、UAV2、UAV3 依照相對於虛擬領袖的 offset 形成隊形。

3. slot-based guidance 產生導引命令

計算 UAV 目前位置與目標 slot 的誤差，並結合鄰機相對狀態進行局部修正，最後轉換為速度方向、航向與 command point

核心問題

轉彎段固定隊形之問題示意



內外側路徑差

外側路徑較長、內側路徑較短，造成各 UAV 追蹤負擔不同

固定隊形限制

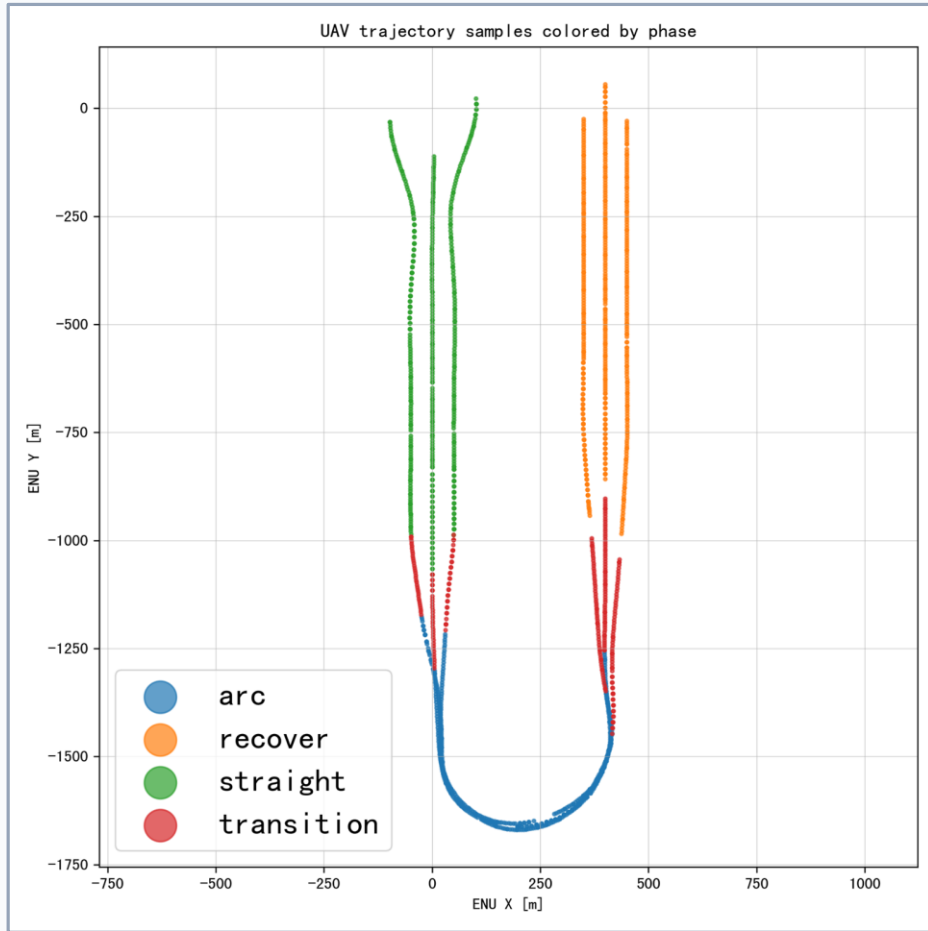
若維持剛性三角隊形，可能使 slot error 增加，隊形被拉扯或局部距離變化。

本專題對應方法

以 triangle-to-arc-to-triangle 降低轉彎段追蹤負擔，並以安全濾波器檢查機間距離。

核心方法二 | 轉彎段隊形變換

固定翼轉彎時內外側路徑長度不同，因此轉彎段需要柔性隊形

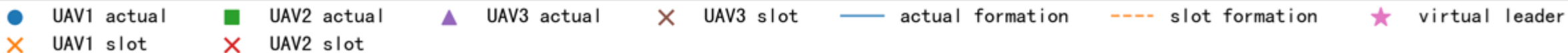
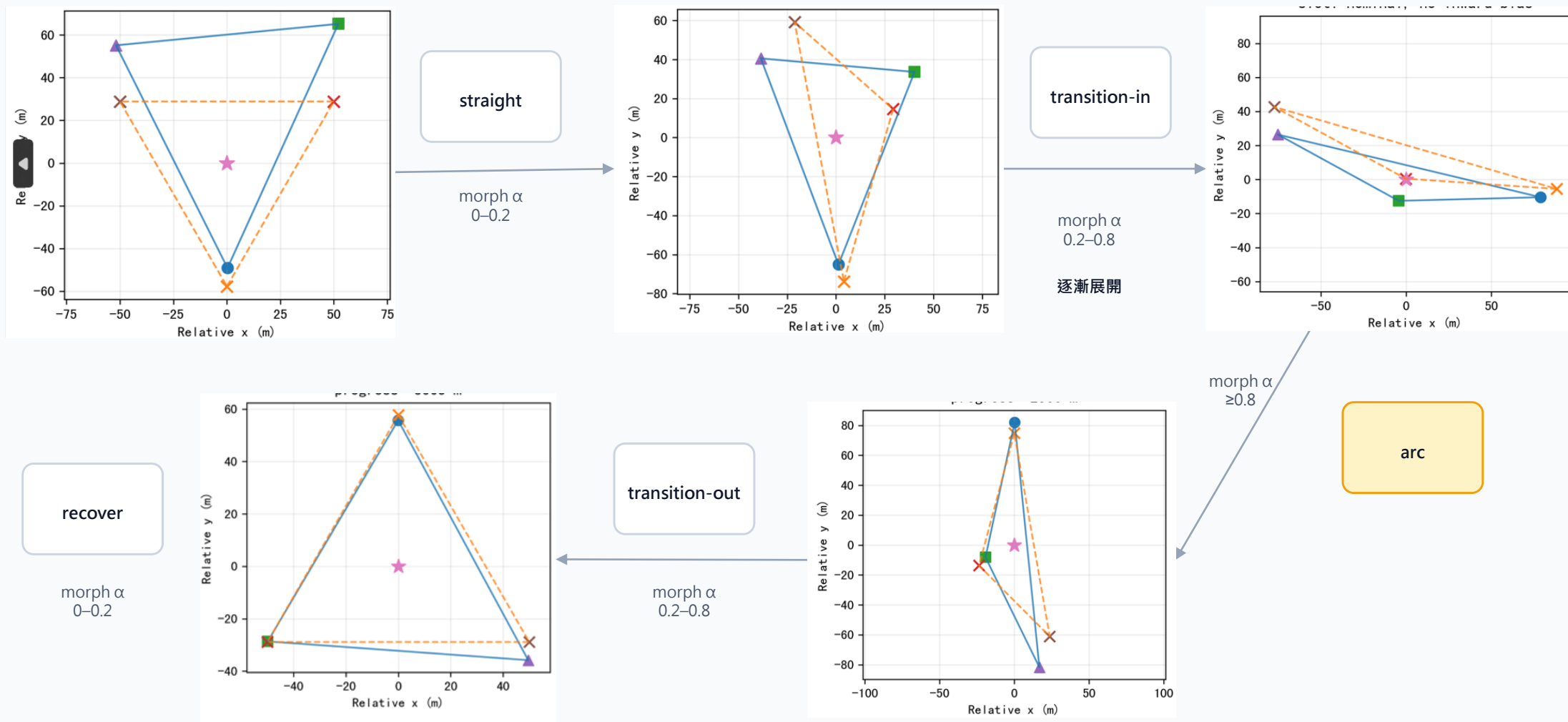


設計目的

直線段維持 triangle formation；轉彎前後透過 morph_alpha 平滑切換；轉彎主要區段採 arc-like formation，降低內外側路徑差造成的追蹤負擔。

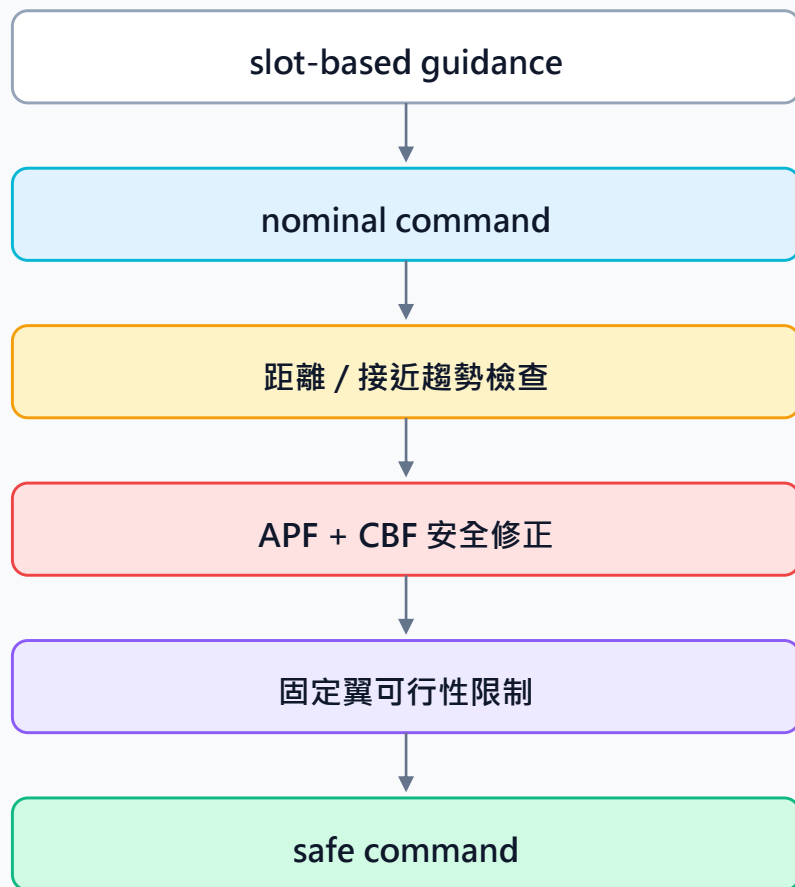
核心方法二 | 轉彎段隊形變換

固定翼轉彎時內外側路徑長度不同，因此轉彎段需要柔性隊形



核心方法三 | 編隊內避碰安全濾波器

安全濾波器將 nominal command 檢查後轉換為 safe command



判斷依據

- 機間距離
- closing speed
- 是否接近 d_{warn} / d_{safe}
- 安全模式是否需介入

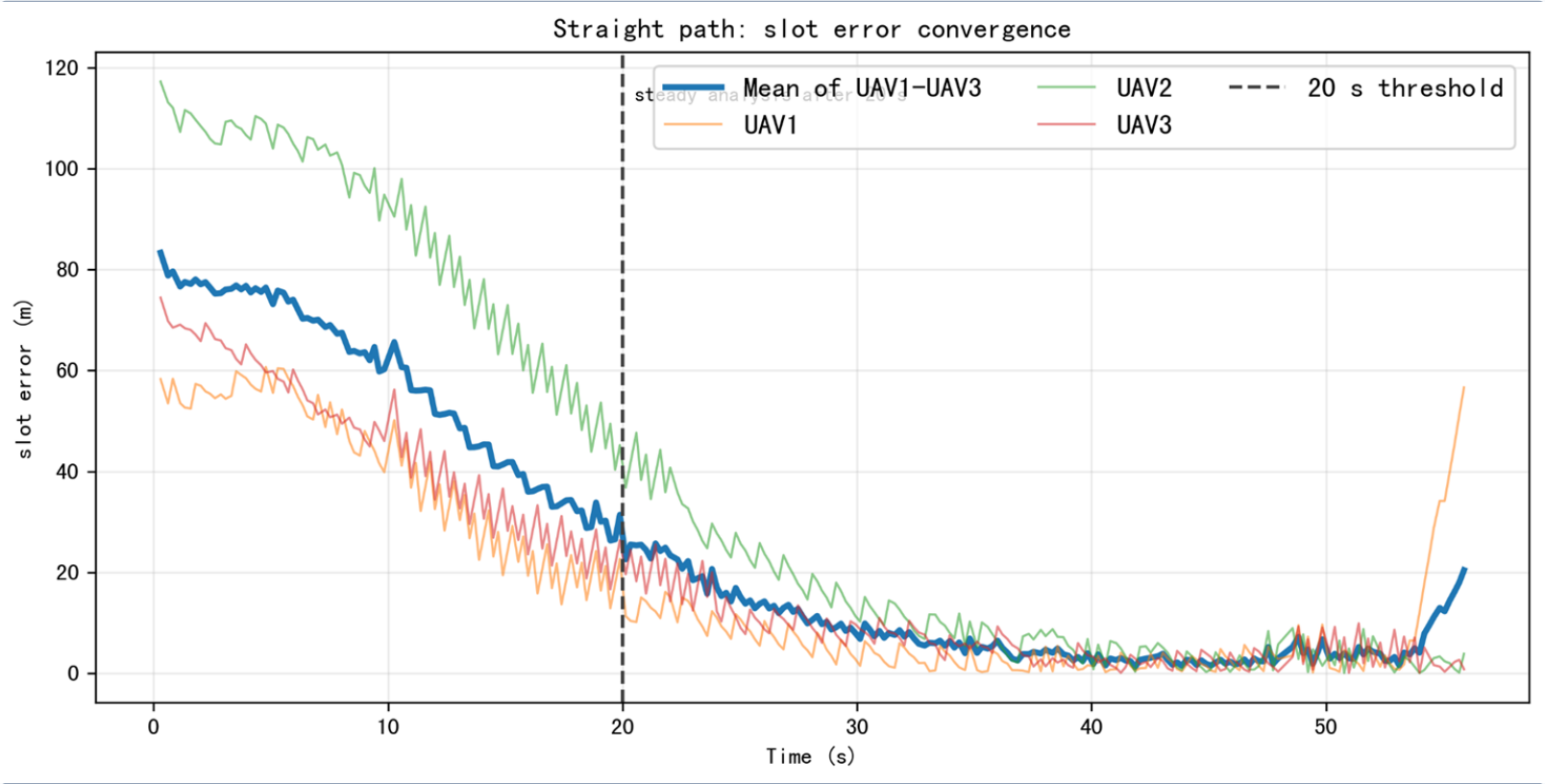
修正原則

- 安全時：nominal 直接通過
- 危險時：修正航向 / 速度
- 修正後仍需符合固定翼速度與航向限制

主要安全距離設定

d_{recover}	88 m	威脅解除
d_{warn}	80 m	預警
d_{safe}	60 m	最低安全距離

實驗一成果 | 編隊導引

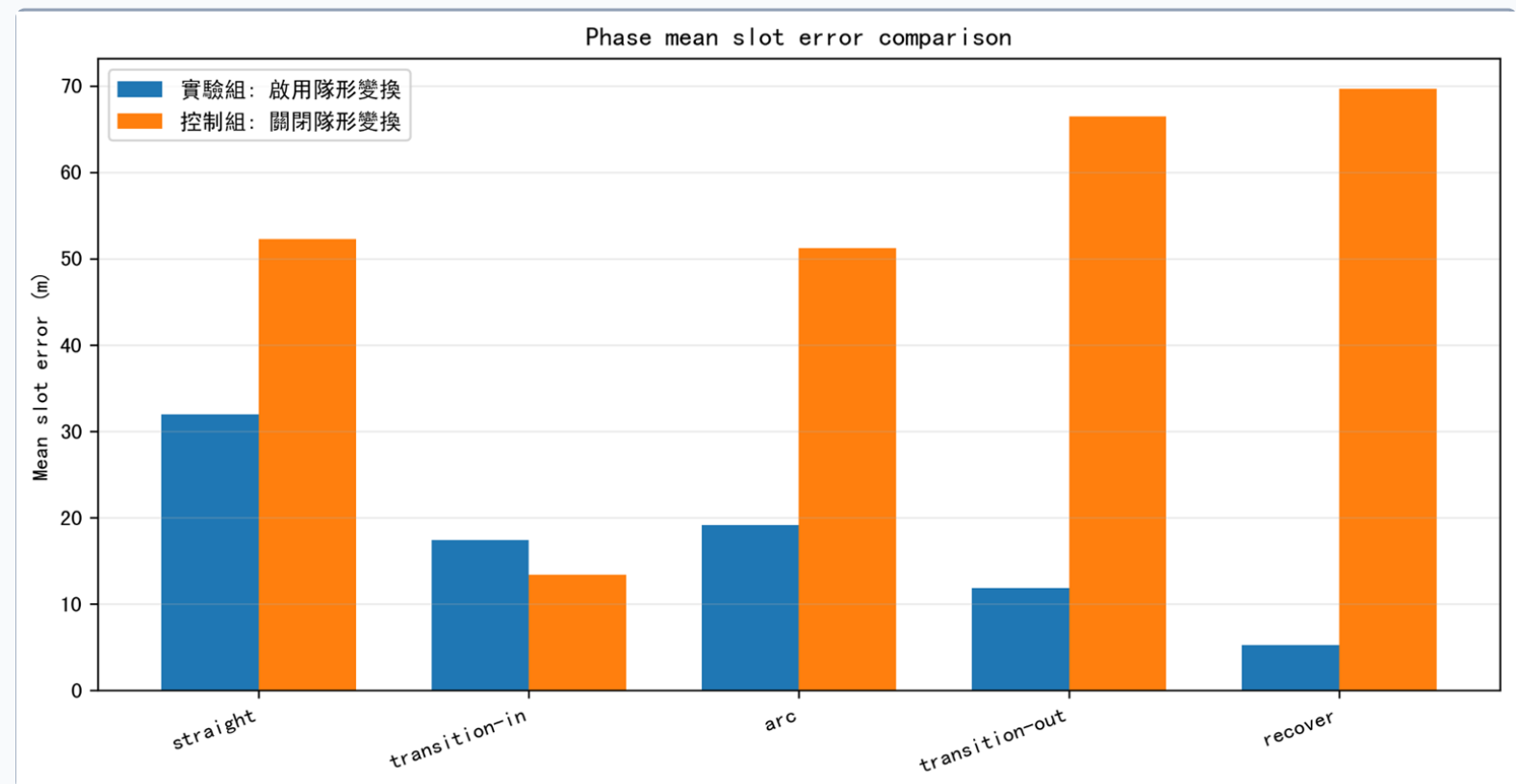


指標	無濾波器
全程平均 slot error	25.15 m
20秒後平均 slot error	8.05 m
末段平均 slot error	5.16 m

實驗一重點

實驗二成果 | 隊形變換

用 slot error 與 morph_alpha 分段驗證隊形維持與轉彎段隊形切換

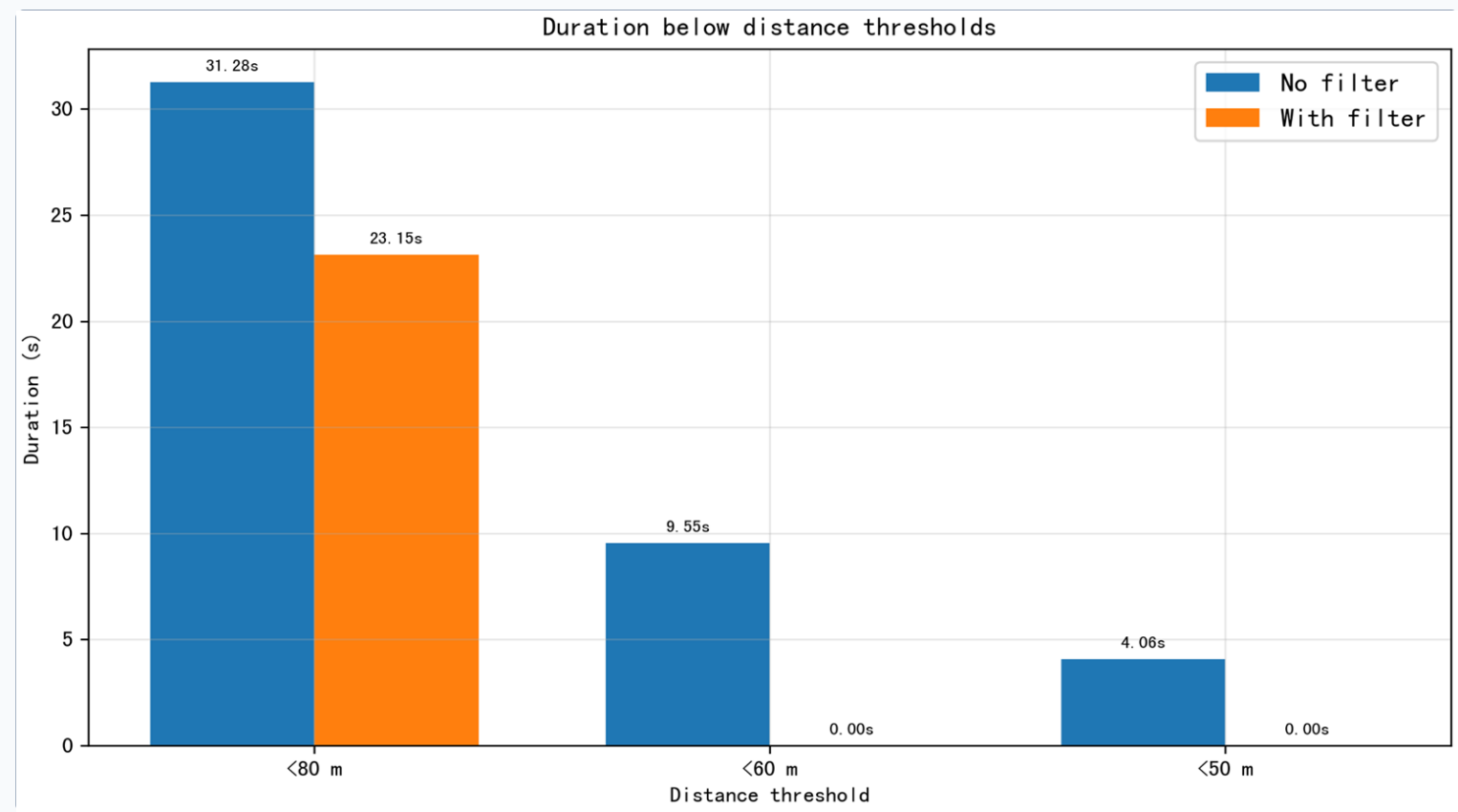


實驗二重點

	平均 slot error (m)	
phase	有隊形變換	無隊形變換
straight	31.96	52.26
transition-in	17.39	15.37
arc	19.15	51.24
transition- out	11.873	66.45
recover	5.253	69.69

實驗三成果 | 安全濾波器效果

比較無濾波器與有濾波器時的 pairwise distance



無安全濾波器 vs 有安全濾波器

指標	無濾波器	有濾波器
最小機間距	39.17 m	60.77 m
低於 60 m 時間	約 9.58 s	0 s
低於 50 m 時間	約 4.08 s	0 s
主要危險 pair	UAV2-UAV3	UAV2-UAV3

實驗三重點

結論與未來發展

結論 1 | 編隊架構

完成以虛擬領袖為隊伍幾何中心的固定翼三機編隊導引架構，將任務路徑追蹤轉換為各 UAV 的 slot tracking 問題。

結論 2 | 隊形變換

透過 triangle-to-arc-to-triangle 隊形變換，使隊形能依直線與轉彎段平滑調整，降低固定隊形在彎道中的追蹤負擔。

結論 3 | 安全濾波器

APF-CBF 安全濾波器於命令輸出前檢查安全約束，必要時將 nominal command 修正為 safe command，以維持機間安全距離。

總結：本專題建立一套結合編隊導引、轉彎隊形變換與安全濾波的固定翼三機群飛控制架構。

未來發展

擴展至五機以上編隊

加入風場、通訊延遲與感測誤差

進一步進行實機驗證

參考文獻

- [1] Y. Zhi et al., “Distributed robust adaptive formation control of fixed-wing UAVs with unknown uncertainties and disturbances,” Aerospace Science and Technology, 2022.
- [2] X. Wang et al., “A fixed-wing UAV formation algorithm based on vector field guidance,” 2021.
- [3] J. Zhang et al., “Fixed-Wing UAV Formation Control Design With Collision Avoidance Based on an Improved Artificial Potential Field,” IEEE Access, 2018.
- [4] A. D. Ames et al., “Control Barrier Function Based Quadratic Programs for Safety Critical Systems,” IEEE TAC, 2017.
- [5] T. G. Molnar et al., “Collision Avoidance and Geofencing for Fixed-wing Aircraft with Control Barrier Functions,” 2025.
- [6] A. Botea et al., “Near Optimal Hierarchical Path-Finding,” Journal of Game Development, 2004.
- [7] N. Sturtevant and M. Buro, “Partial Pathfinding Using Map Abstraction and Refinement,” AIIDE, 2005.
- [8] L. Blasi et al., “Clothoid-Based Path Planning for a Formation of Fixed-Wing UAVs,” Electronics, 2023.

感謝您的聆聽
