

仿真全自動無人機協同系統

Simulation Autonomous Unmanned Aerial Vehicle Cooperative System

摘要

無人機的研究與發展，在近年來已經是相關產業與學術界的熱門研究及課題，已經有許多非凡的應用進入到人類生活中，儘管單獨的自主導航無人機已在工業和學術中積極發展，但群體的系統很少能實現可比擬的應用，因此在動態未知的環境中，實現自主避障和高效協同將是一個重大的挑戰。

本專題將以姿態控制策略且透過加速度進行姿態角解算，控制無人機的姿態來調整其飛行狀態，並且以追逐胡蘿蔔演算法，讓無人機通過追蹤虛擬的目標點來移動到達實際目標點，有助於引導其運動路徑。此外，將會把人工勢場法的演算應用於自主性的避障規劃中，其核心思想是將目標點設置為吸引力、障礙物設置為排斥力，從而讓這些力所產生的力場由高勢能往低勢能移動，而合力產生的矢量合，決定了無人機的最終運動方向與速度，確保無人機能在避開障礙物的同時也前往目標點。最後，則藉由領導-跟隨策略進行協同作業，透過領導者的路徑規劃與避障決策，其跟隨者會依據領導者的運動狀態及自身的相對數據進行跟隨移動。

前言

研究動機

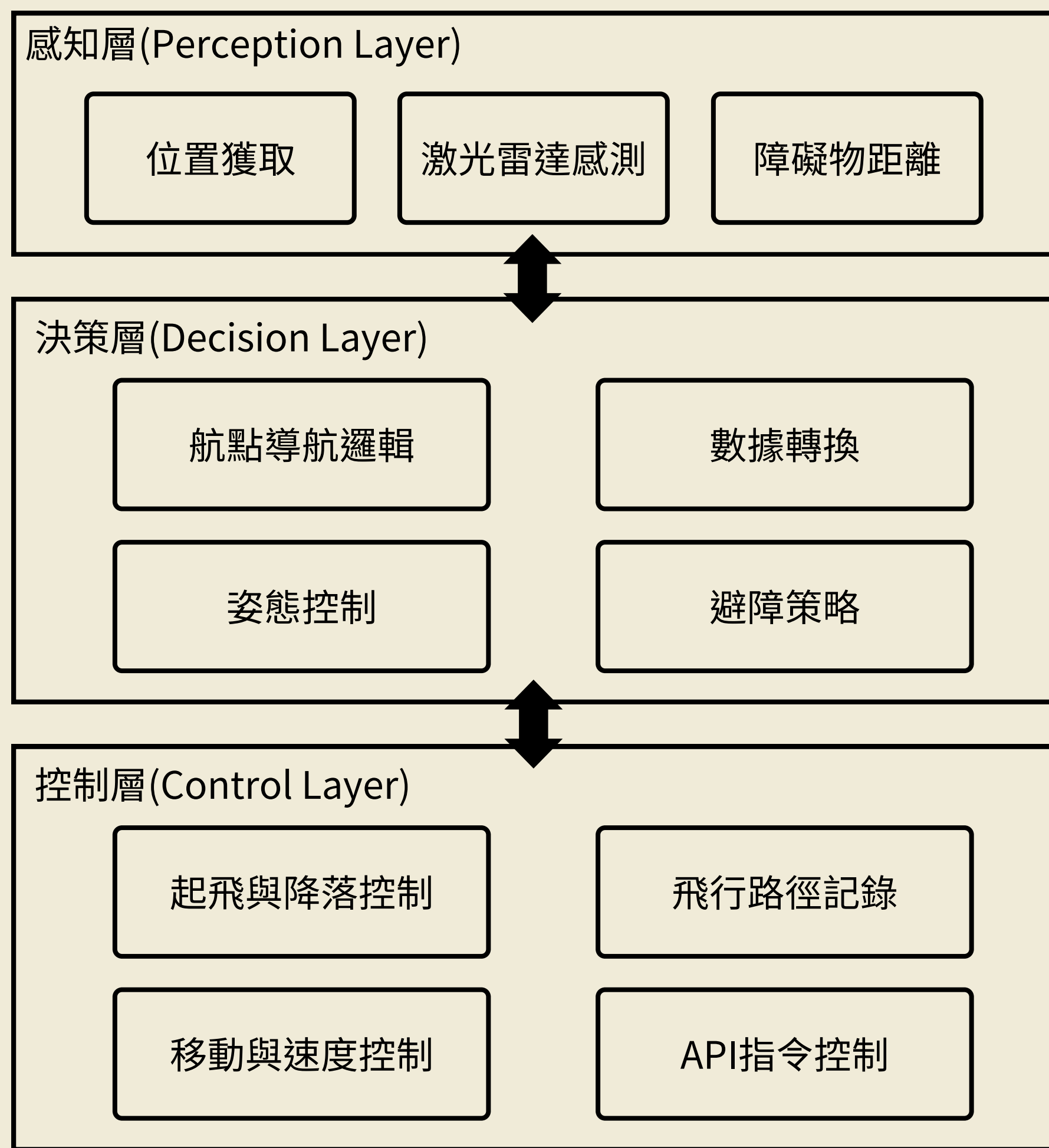
應用趨勢於無人機已逐漸從單一任務拓展至群體協作，但在動態環境中的自主避障與高效協同仍然是一個挑戰。

根據市場預測，2024至2029年間，無人機市場規模年增率預計達13.9%，2029年市場規模將突破676.4億美元。

研究目的

透過模擬與驗證，研究無人機在動態環境中的自主性與協同作業。使用Unreal Engine開發引擎與AirSim套件，進行自主路徑規劃、避障及多機協同應用測試。

系統架構



總結

與已知障礙物的結果相比，實際模擬中無人機的運行路徑，雖然路徑較彎曲且不規則，但成功避開障礙並完成任務，體現了人工勢場法在動態環境中的靈活性與適應性。

整體研究展示了追逐胡蘿蔔演算法、人工勢場法以及領導跟隨協同策略的整合，在動態的操作環境中實現了目標點的平滑移動和自主避障功能。模擬結果顯示，這些策略整合後具有較好的適應性和穩定性，能夠應對複雜的環境挑戰。

然而，研究中也發現了一些不足之處。在姿態控制方面，無人機高速時，轉角處的平滑性較差，主要源於動態響應不足，影響無人機的路徑精確性。對於追逐胡蘿蔔演算法，無人機在處理大曲率路徑時容易出現偏差，這與控制策略在轉向過程中的平滑性不足有關。在人工勢場法方面，當面對極端複雜的環境或多障礙物場景時，容易陷入局部極小值區域，導致避障效果不佳。

此外，領導跟隨策略在動態環境中亦面臨協同不良或偏差增大的問題，尤其是當領導者的運動變化較大時，跟隨者無法及時調整。為了提升系統的穩定性與靈活性，未來可對這些策略進行改進，並將結合其更高效的協同作業框架中，以進一步提高機群的適應力和自主性。

方法與技術

姿態控制法 (Attitude Contro)

姿態控制法是無人機穩定飛行的核心，通過控制俯仰角 (Pitch)、滾轉角 (Roll) 和偏航角 (Yaw) 來實現飛行穩定性與靈活性，基於動力學與運動學模型實現。

為了避免歐拉角的萬向鎖問題，將透過四元數 (Quaternion) 的方式，用於三維空間旋轉運算。

- 表達式 $q = \omega + xi + yj + zk$
- 旋轉計算 $v = (v_x, v_y, v_z) \rightarrow v' = q \cdot v \cdot q^{-1}$

將此四元數轉換為旋轉矩陣，用於將障礙物的點雲數據從無人機的局部座標系轉換為全局坐標系。

- 座標轉換 $R = \begin{bmatrix} 1 - 2(y^2 + z^2) & 2(xy - z\omega) & 2(xz + y\omega) \\ 2(xy + z\omega) & 1 - 2(x^2 + z^2) & 2(yz - x\omega) \\ 2(xz - y\omega) & 2(yz + x\omega) & 1 - 2(x^2 + y^2) \end{bmatrix}$

追逐胡蘿蔔演算法 (Carrot Chasing Algorithm)

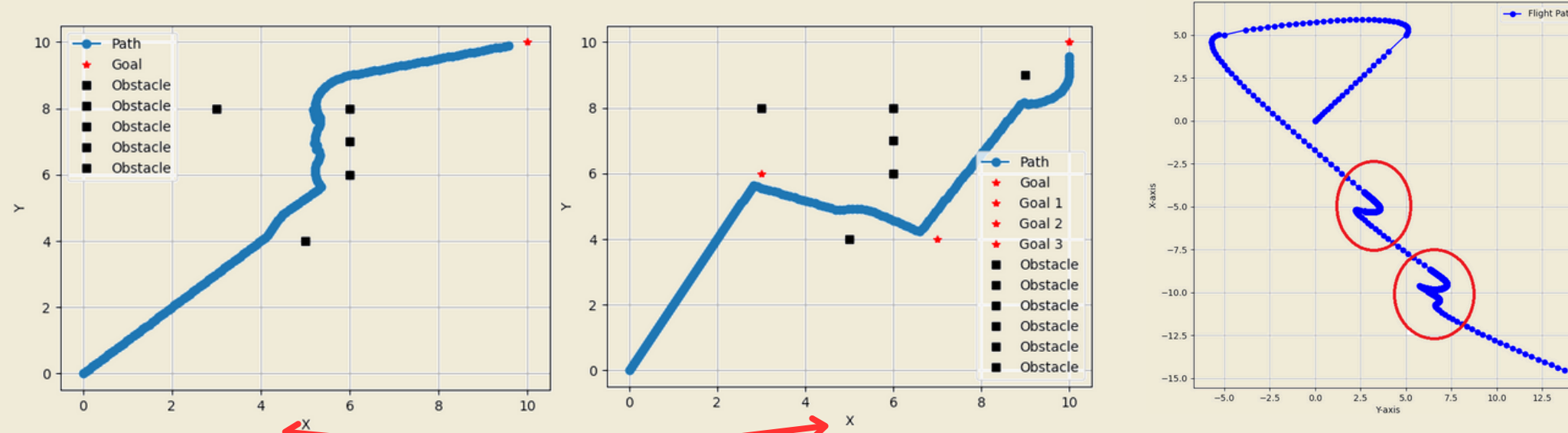
透過設置虛擬目標點 (胡蘿蔔)，實現無人機在路徑導航中的平滑運動與精準追蹤，避免直接對齊每一點造成的振盪與運算負擔。

- 偏差計算 $R = R_u \cos(\beta)$
 $e = R_u \sin(\beta)$
- 胡蘿蔔點位置 $x_t = W_a \cdot x + (R + \delta) \cos(\theta)$
 $y_t = W_a \cdot y + (R + \delta) \sin(\theta)$
- 修正控制 $u = K(\psi_d - \psi)V_a + K_2 e$
 $V_x = \sqrt{V_a^2 - V_y^2}, V_y = V_a \sin(\psi) + u dt$

人工勢場法 (Artificial Potential Field)

基於引力與斥力場模型的路徑規劃演算法。將目標點視為引力源、障礙物視為斥力源，使物件在這兩者的合力作用下，朝著目標移動並避開障礙物，從而實現高效的導航與避障功能。

- 吸引力 $F_{\text{attraction}} = k_{\text{attraction}} (P_{\text{goal}} - P_{\text{current}})$
- 排斥力 $F_{\text{repulsion}} = \begin{cases} k_{\text{repulsion}} \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{d_0} \right) \frac{1}{d^2} \frac{P_{\text{current}} - P_{\text{obstacle}}}{\|P_{\text{current}} - P_{\text{obstacle}}\|}, & \text{if } d < d_0 \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$
- 合力 $F_{\text{resultant}} = F_{\text{attraction}} + F_{\text{repulsion}}$
 $P_{\text{new}} = P_{\text{current}} + \Delta t \frac{F_{\text{resultant}}}{\|F_{\text{resultant}}\|}$



事先已知障礙物的位置，進行路徑規劃

實際模擬

領航跟隨者策略 (Leader-Follower Strategy)

該策略的基本思想是設定一個或多個領導者，負責全局路徑規劃與避障決策，其他跟隨者則根據領導者的運動狀態及其相對位置進行動態調整，從而實現協同運動與目標追蹤。



- 全局路徑規劃
- 避障決策
- 障礙物感測

- 獲取領導者的飛行數據
- 追蹤領導者飛行
- 動態調整位置和路徑