

基於 Fast-Planner 的無人機飛行模擬

專題編號：114-2-CSIE-S011

執行期限：114 年第 1 學期至 114 年第 2 學期

指導教授：陳彥霖

專題參與人員： 112590013 陳岱佑
112590020 黃力安

一、摘要

無人機自主避障在複雜未知環境中是重要研究課題。本專題基於 Fast-Planner 規劃框架整合 Hector Quadrotor 與 Gazebo 模擬環境，結合 Kinodynamic A*路徑搜索、B-spline 軌跡優化與 ESDF 環境地圖，建構即時避障飛行系統。我們設計 14 個測試場景驗證系統在密集障礙物、長牆、迷宮等不同配置下的穩定避障能力。
關鍵詞： Fast-Planner、無人機避障、Kinodynamic A*、B-spline 軌跡優化、Gazebo 模擬

二、緣由與目的

無人機在搜救、巡檢、物流配送等領域應用日益廣泛，往往需要在未知環境中自主避障飛行[1]。

傳統 RRT、PRM 等規劃方法未考慮動力學約束，路徑不夠平滑[2]。Fast-Planner[3]結合 Kinodynamic 搜索與 B-spline 優化，能生成考慮速度、加速度約束的平滑軌跡，適合複雜環境的即時重規劃。

然而 Fast-Planner 原始設計針對自製飛行平台，缺乏通用模擬驗證環境。本專題將 Fast-Planner 整合至 Hector Quadrotor + Gazebo[4] 平台，並透過系統性場景設計評估規劃器表現。

三、研究報告內容

本專題涵蓋三個面向：（一）模擬環境整合：將 Fast-Planner 與 Hector Quadrotor 整合，透過 ROS Noetic 建立感測、規劃、控制管線。

（二）場景設計：設計 14 個包含密集森林、長牆、迷宮、斜坡的 Gazebo 世界。（三）參數調校：針對 Hector 動力學特性調整規劃參數，達到穩定避障飛行。

四、使用技術方法

（一）環境感測與地圖建構

深度相機透過光線投射更新機率式體素地圖，再計算歐幾里德符號距離場（ESDF）提供連續的障礙物距離資訊。解析度 0.1 公尺，感測範圍 6.5 公尺。

（二）路徑搜索

採用 Kinodynamic A*在六維狀態空間（位置+速度）中搜索路徑，考慮無人機動力學約束，視野範圍 7.0 公尺。

（三）軌跡優化

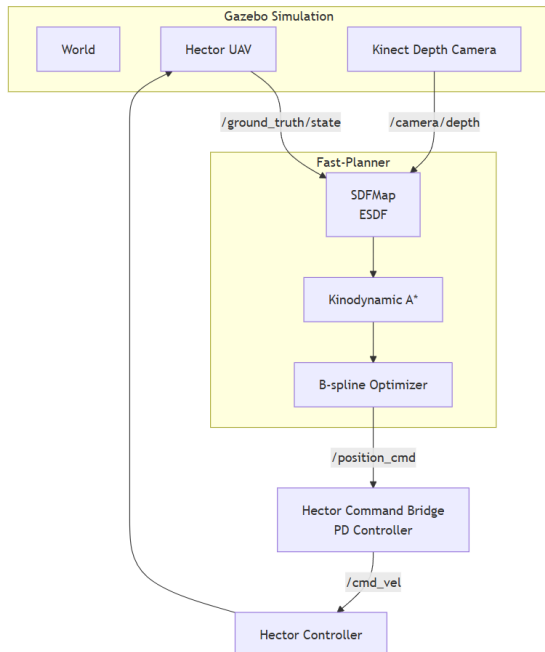
搜索路徑擬合為 B-spline 曲線，透過 NLopt 多目標優化平滑度、障礙物距離與動態可行性代價，生成安全平滑的軌跡。

（四）控制橋接

開發 hector_cmd_bridge 節點，透過 PD 控制器將位置指令轉換為 Hector 的速度指令以追蹤軌跡。

五、架構流程

系統整體架構如圖 1 所示。深度與里程計資料經 SDFMap 建構 ESDF 地圖，Kinodynamic A*搜索可行路徑，B-spline 優化器生成平滑軌跡，再經 hector_cmd_bridge 轉為速度指令。有限狀態機（FSM）在偵測碰撞風險或新目標時觸發重規劃。



(如圖 1. 為系統架構流程圖)

六、工具說明

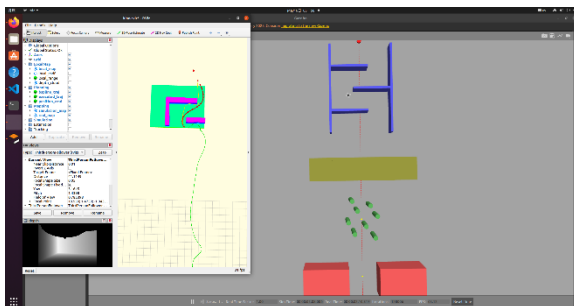
開發環境採用 Ubuntu 20.04 + ROS Noetic，模擬使用 Gazebo 11 與 Hector Quadrotor。程式以 C++14 撰寫，透過 CMake/catkin 編譯。數學運算使用 Eigen3，非線性優化使用 NLOpt v2.7.1，點雲處理使用 PCL，並透過 RViz 進行即時視覺化。

七、實驗結果

測試飛行速度設為 0.8 m/s，加速度上限 0.8 m/s²。

(一) 基礎障礙物場景

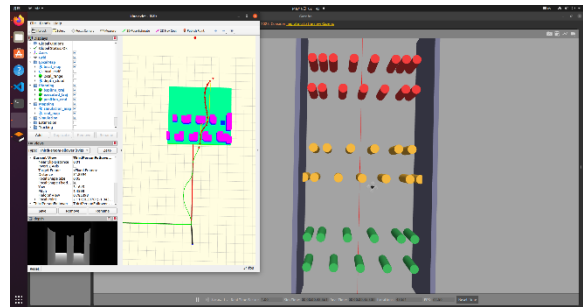
在 fast_planner_obstacles 場景中 (如圖 2)，柱狀障礙物分布於 16 公尺路徑上，無人機能穩定避開並抵達目標，平均耗時約 20 秒。



(圖 2. 為基礎障礙物場景避障飛行)

(二) 密集森林場景

在 dense_forest 場景中 (如圖 3)，最窄通道僅 0.9 公尺，系統透過 ESDF 確保軌跡與障礙物保持安全距離。



(圖 3. 為密集森林場景避障飛行)

(三) 迷宮與複雜場景

在 grid_maze 迷宮場景中，規劃器能在轉角處平滑轉向。在 long_wall_bypass 場景中，16 公尺長牆阻擋直線路徑且超出觀測範圍，系統透過增量式重規劃繞過牆端。

八、結論

本專題將 Fast-Planner 整合至 Hector Quadrotor + Gazebo 環境，實現複雜未知環境中的自主避障飛行。透過 Kinodynamic A* 與 B-spline 優化結合，系統能生成符合動力學約束的平滑軌跡，並在多種場景中展現穩定避障能力。

參考文獻

- [1] M.G. Mohanan, A. Salgoankar, "A survey of robotic motion planning in dynamic environments," Robot. Auton. Syst., 100, pp.171-185, 2018.
- [2] L. Campos-Macías et al., "A hybrid method for online trajectory planning of mobile robots in cluttered environments," IEEE RA-L, 2(2), pp.935-942, 2017.
- [3] B. Zhou, F. Gao, L. Wang, C. Liu, S. Shen, "Robust and efficient quadrotor trajectory generation for fast autonomous flight," IEEE RA-L, 2020.
- [4] J. Meyer, "The hector quadrotor ROS packages," ROSWiki,