



基於單目深度估計與混合式路徑規劃之無人機自主導航

UAV Autonomous Navigation Based on Monocular Depth Estimation and Hybrid Path Planning

指導教授：張燕光 教授

專題組員：部政佑、陳亮瑋

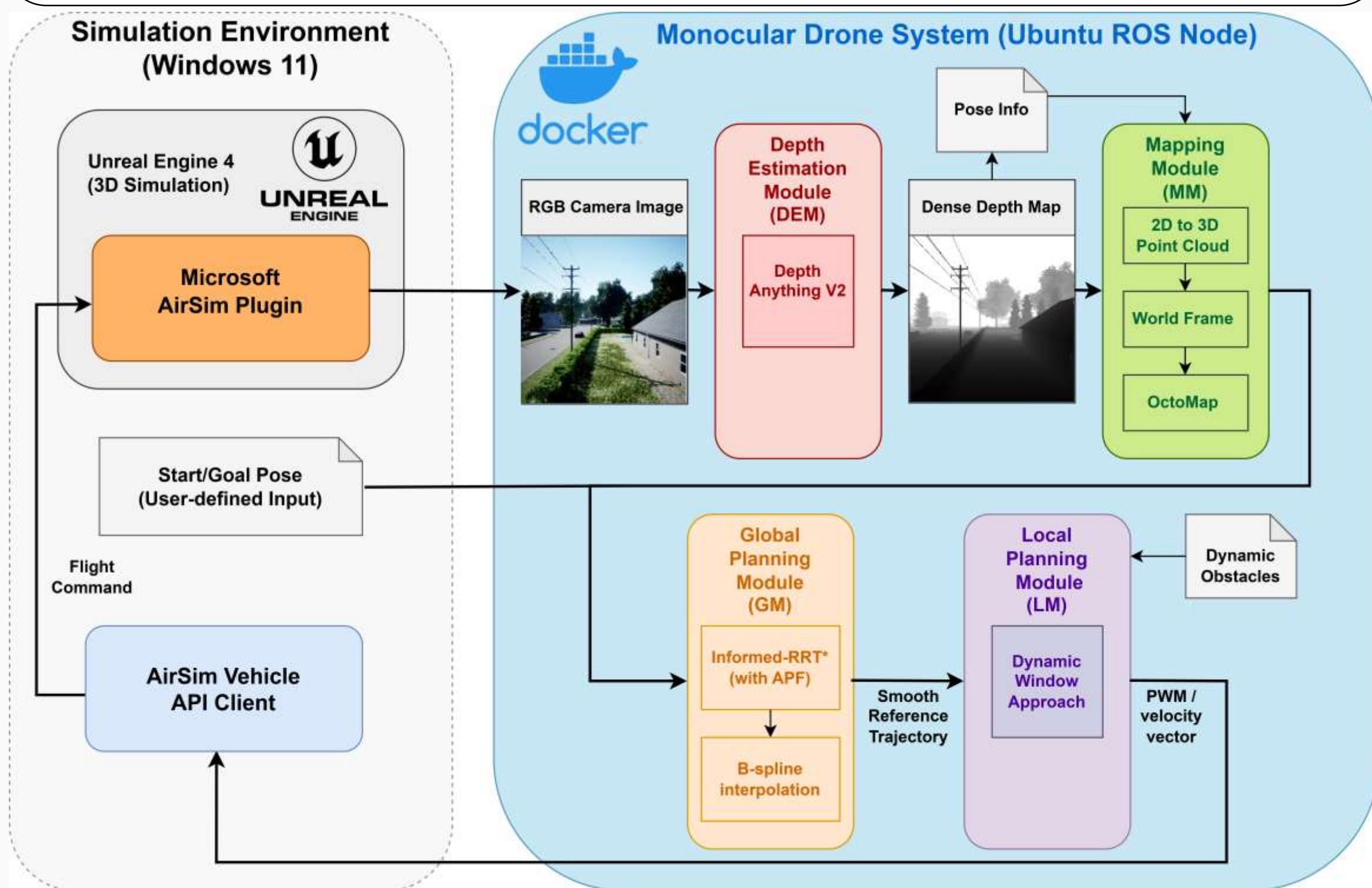


一、研究動機與目的 Research Motivation

自主無人機須在 GPS 失效、通訊中斷等極端情境下完成感知、決策與控制。然而，傳統自主導航的感測依賴 3D LiDAR，其高成本與重量使其難以部署於輕量消費級無人機。路徑規劃方面，現有開源框架多採用 A* 演算法，但在障礙密集場景中收斂緩慢且路徑曲折；局部規劃（APF、DWA）雖反應靈敏卻易陷入局部極小值而停滯震盪。本專題針對感測與規劃兩大瓶頸，以 RGB 鏡頭 + Depth Anything V2 取代 LiDAR，並以 Informed-RRT* 結合 APF、DWA 的混合架構取代純 A*，目的是在模擬環境中進行測試，最終提供有效的自主導航方案。

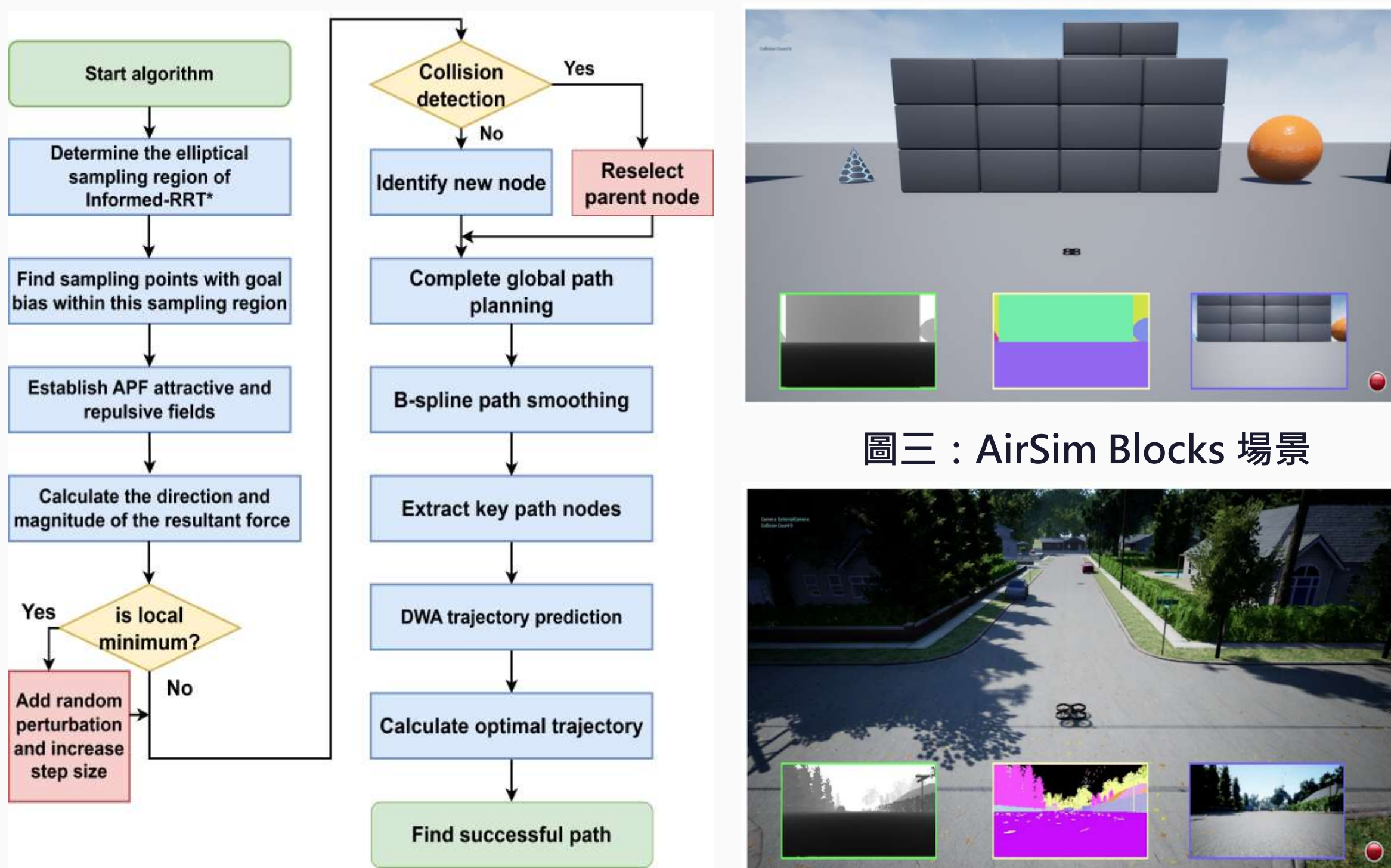
二、研究方法 Research Methods

本專題基於 ROS Noetic 開源框架 Monocular-SLAM-Drone 開發。由深度估計模組 (DEM)、地圖構建模組 (MM)、全域規劃模組 (GM) 及局部規劃模組 (LM) 四層組成，運行於 Docker 容器中並透過 AirSim API 與模擬環境通訊，如圖一所示。

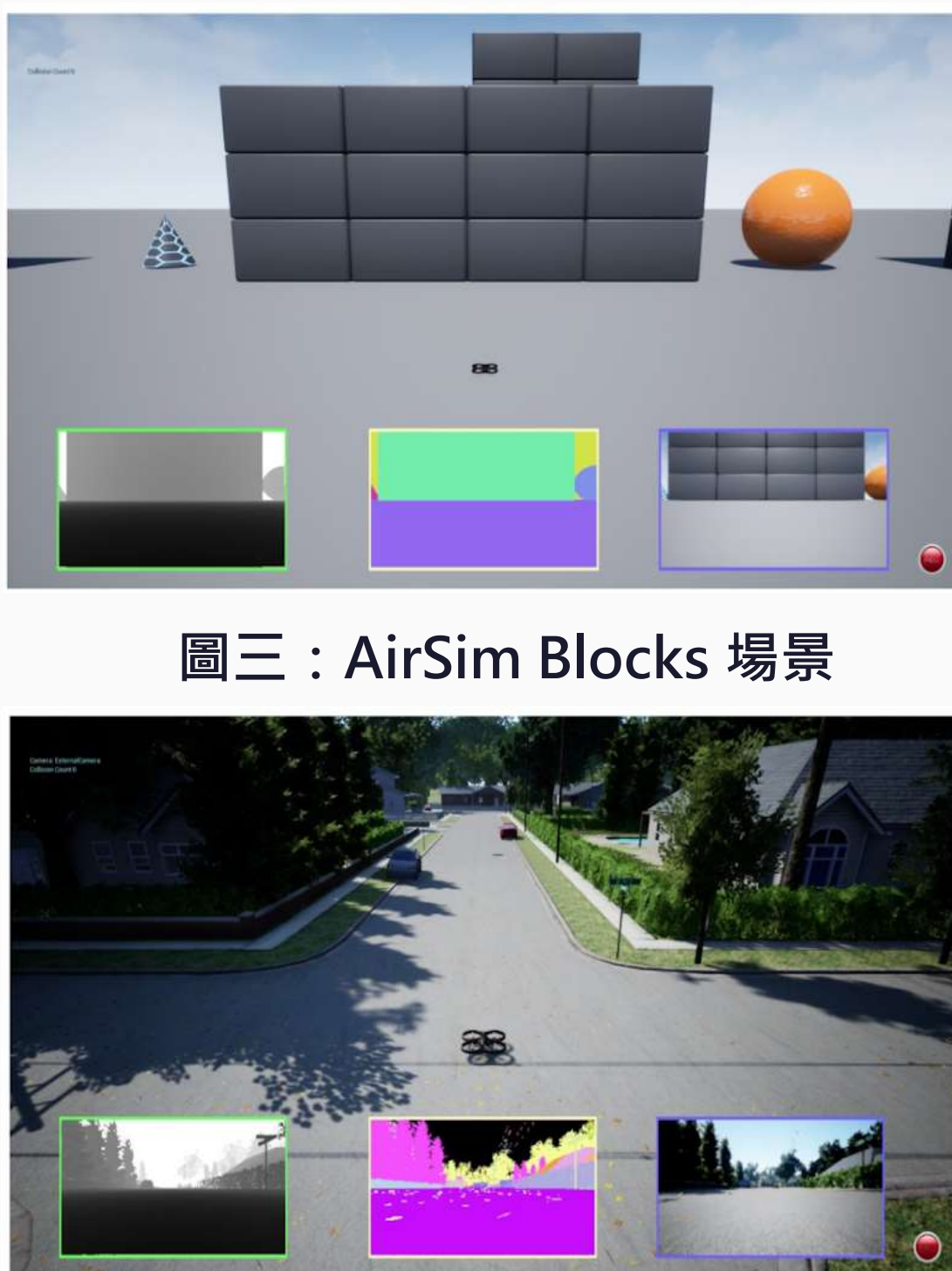


圖一：系統架構圖

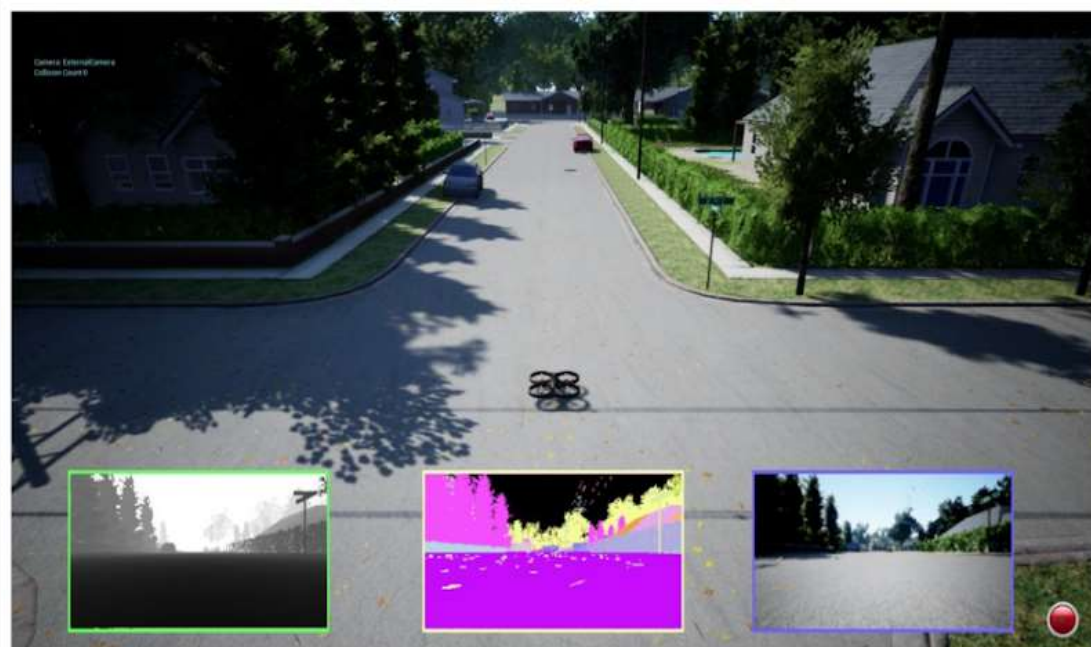
研究方法旨在驗證前述系統架構之實際效能。本專題結合 Informed-RRT*、APF 與 DWA 的混合式演算法，同時兼顧全域搜索效率與局部避障能力。實驗框架於 Microsoft AirSim 進行，涵蓋基礎空曠與複雜街道的兩種模擬場景。詳細的演算法決策邏輯（圖二）、環境設計（圖三、四）及自動化測試流程（圖五）如下所示，最終透過 JSON 飛行數據記錄導航成功率、規劃時間、FPS 與路徑長度等關鍵指標，以客觀量化本系統之導航表現。



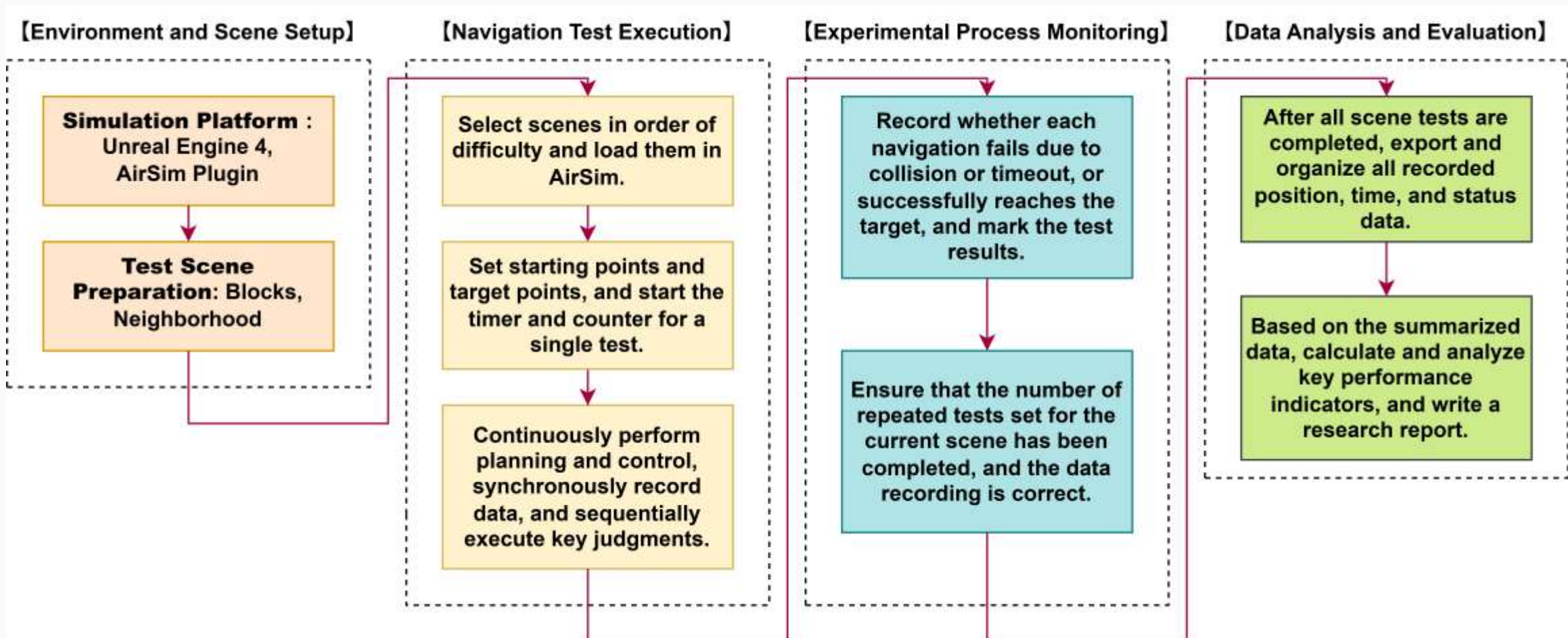
圖二：路徑規劃演算法



圖三：AirSim Blocks 場景



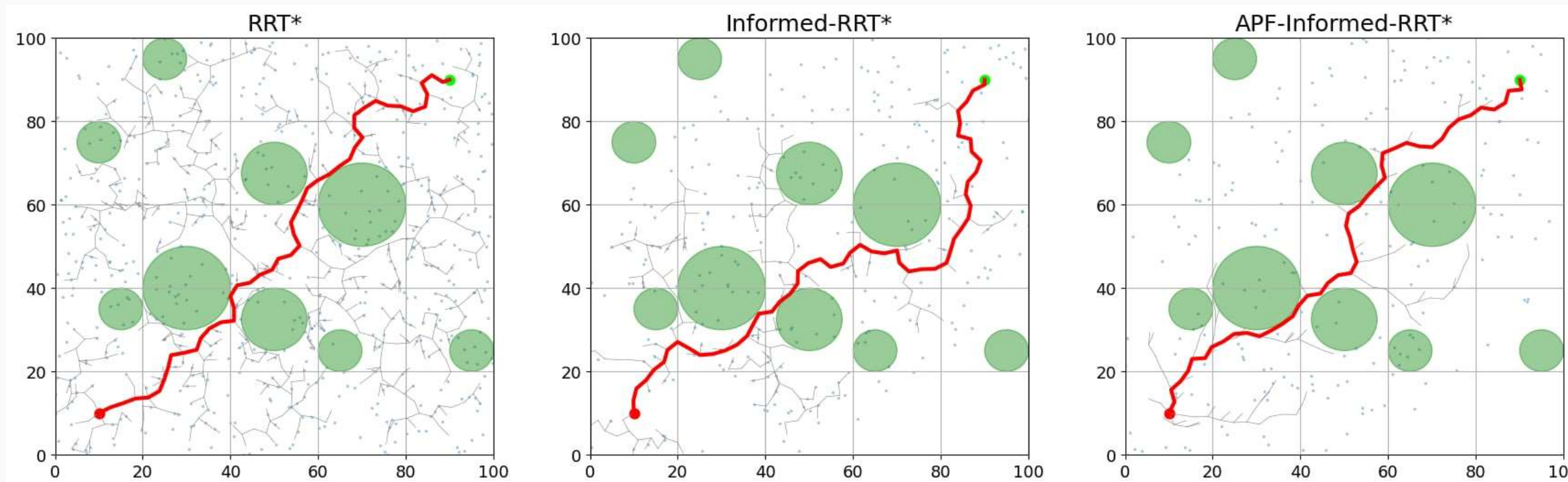
圖四：AirSim Neighborhood 場景



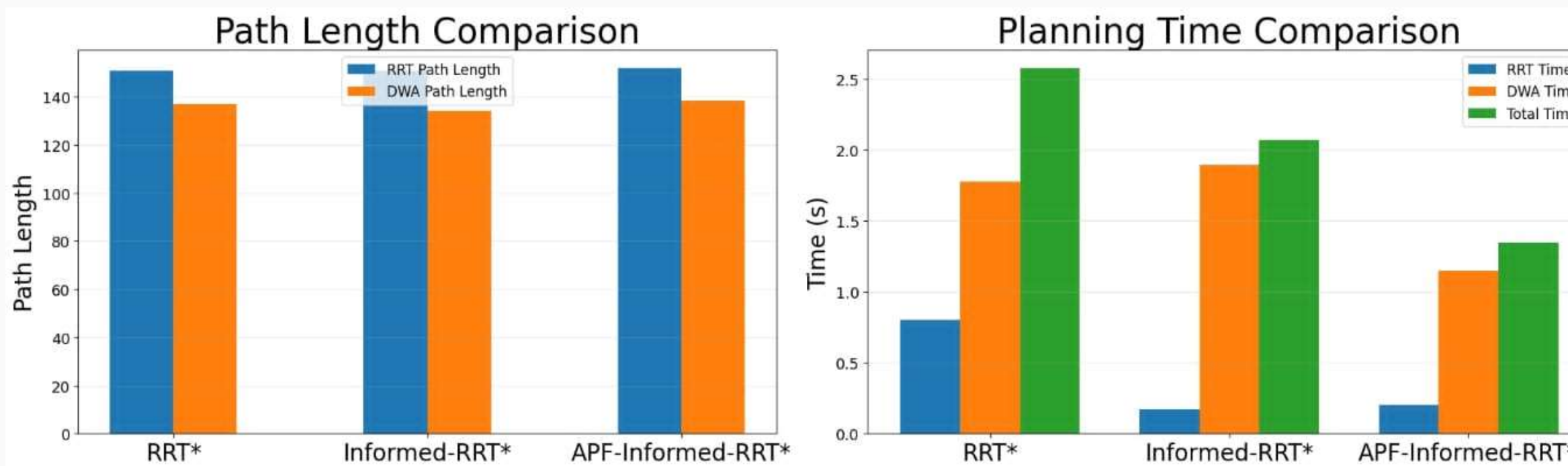
圖五：實驗步驟流程圖

三、成果展示 Results

在部署至 AirSim 前，本專題先於二維模擬環境中比較了三種 RRT* 方法的規劃表現（圖六至八）。結果顯示 APF-Informed-RRT* 在路徑長度與節點分佈上表現最佳，雖計算時間略高，但仍在可接受範圍內，因此選定作為後續的全域規劃方法。



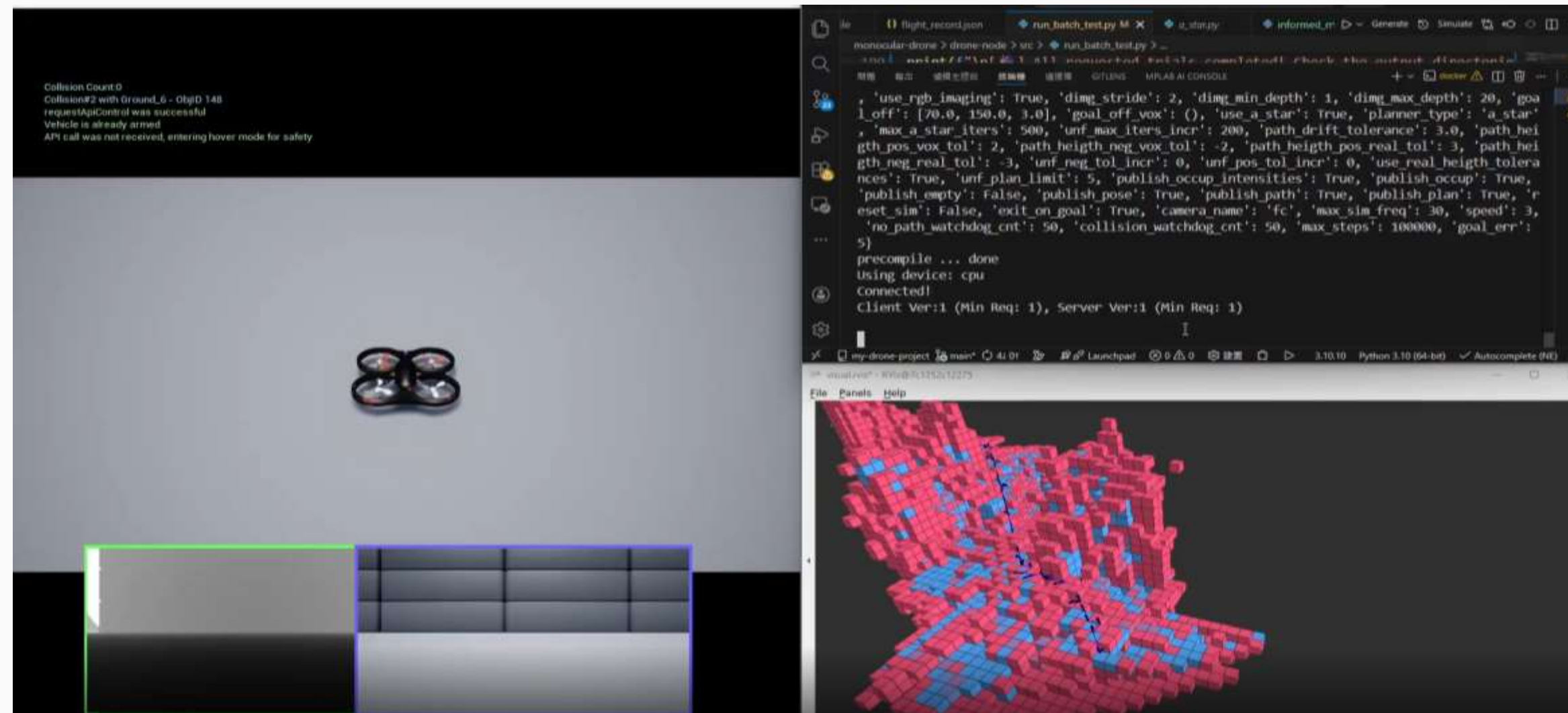
圖六：三種 RRT* 方法完整路徑比較



圖七：三種 RRT* 方法路徑長度比較

圖八：三種 RRT* 方法規劃時間比較

本專題共執行 720 次自主飛行，涵蓋 2 種場景（Blocks、AirSimNH）× 2 種深度來源（AirSim 真實深度、Depth Anything V2 估計深度）× 2 種規劃方法（A*、APF-Informed-RRT*）× 3 種路線 × 3 種 Voxel 大小（Size: 0.5 / 1.0 / 2.0 m）× 10 次重複試驗，執行過程截圖（圖九）與實驗結果（表一、表二）如下所示。



圖九：系統執行畫面

* 左半部為 AirSim 環境執行畫面，展示無人機即時飛行狀態與雙視角相機畫面（深度圖與 RGB 影像）；右上角為負責控制的 ROS Node 終端機，即時處理 API 通訊並記錄飛行數據與深度矩陣資訊；右下角為基於 RViz 的 3D Mapping Visualization，其中紅色 Voxel 代表深度不確定的空間，藍色 Voxel 標示為已知的障礙物佔用空間。

表一：已知真實深度下導航成功率比較

Planning Method	Blocks Success Rate	AirSimNH Success Rate	Blocks FPS	AirSimNH FPS	Path Ratio
A*	69/90 (76.7%)	36/90 (40.0%)	4.75	3.96	1.117
Informed-RRT*	73/90 (81.1%)	42/90 (46.7%)	4.73	3.90	1.115
gap	+4.4%	+6.7%	-0.4%	-1.5%	-0.2%

* 路徑比（Path Ratio）= 實際軌跡長度 / 起終點直線距離，綠色部分為本專題改進之處。

表二：單目深度估計對導航成功率之影響

Planning Method	Blocks Truth Depth	Blocks Estimated Depth	AirSimNH Truth Depth	AirSimNH Estimated Depth
A*	76.7%	44.4%	40.0%	0.0%
Informed-RRT*	81.1%	46.7%	46.7%	0.0%

* 切換至 Depth Anything V2 估計深度後，FPS 從 ~4.7 降至 ~1.4 (~70%)：以飛行速度 2 m/s 計算，FPS=1.4 時兩幀之間飛行距離已達 1.43 m，超過 V=0.5 m 安全間距，造成導航成功率下降。

四、結論與未來展望 Conclusion

就結果而言，本專題證實經改良過的 APF-Informed-RRT* 演算法能在不增加運算負擔下，較傳統 A* 明顯提升導航成功率（表一）；同時，也明確量化了單目深度估計應用於即時導航的效能瓶頸（表二），為無人機的視覺避障研究提供了具體的數據與參考。未來展望部分，因為目前成果仍停留於 AirSim 模擬階段，後續最直接的方向就是使用 MAVLink 通訊，嘗試將系統實際部署至真實無人機，並評估 Depth Anything V2 能否在邊緣運算設備（如 NVIDIA Jetson Orin）上完成輕量化，進一步於室內外場景中驗證系統的 Sim-to-Real 效能。

