



基于生物启发的飞滚多模态球形机器人路径规划方法

周熙栋 钟杭 陈铭源 张辉 王耀南

Bio-inspired Path Planning Method for Multimodal Flying-rolling Spherical Robots

ZHOU Xi-Dong, ZHONG Hang, CHEN Ming-Yuan, ZHANG Hui, WANG Yao-Nan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16383/j.aas.c250502>

您可能感兴趣的其他文章

基于分层仿生神经网络的多机器人协同区域搜索算法

A Hierarchical Bio-inspired Neural Network Based Multi-robot Cooperative Area Search Algorithm

自动化学报. 2025, 51(4): 890-902 <https://doi.org/10.16383/j.aas.c240458>

基于改进蝙蝠算法和三次样条插值的机器人路径规划

Robot Path Planning Based on Improved Bat Algorithm and Cubic Spline Interpolation

自动化学报. 2021, 47(7): 1710-1719 <https://doi.org/10.16383/j.aas.c180855>

路网约束下异构机器人系统路径规划方法

Path Planning for Heterogeneous Robot System With Road Network Constraints

自动化学报. 2023, 49(4): 718-730 <https://doi.org/10.16383/j.aas.c200806>

基于讨价还价博弈机制的B-IHCA* 多机器人路径规划算法

B-IHCA*, a Bargaining Game Based Multi-agent Path Finding Algorithm

自动化学报. 2023, 49(7): 1483-1497 <https://doi.org/10.16383/j.aas.c220065>

基于深度学习初始位姿估计的机器人摄影测量视点规划

Viewpoint Planning for Robot Photogrammetry Based on Initial Pose Estimation via Deep Learning

自动化学报. 2023, 49(11): 2326-2337 <https://doi.org/10.16383/j.aas.c200255>

电力设施多模态精细化机器人巡检关键技术及应用

The Key Technology and Application of Multi-modal Fine Robot Inspection for Power Facilities

自动化学报. 2025, 51(1): 20-42 <https://doi.org/10.16383/j.aas.c230809>

基于生物启发的飞滚多模态球形机器人路径规划方法

周熙栋^{1,2} 钟杭^{1,2,3} 陈铭源^{1,2} 张辉^{1,2} 王耀南^{1,2}

摘要 飞滚多模态球形机器人(飞滚机器人 FRR)兼具空中飞行与地面滚动的多模态移动能力,在搜索救援和巡检侦察等任务中展现出巨大潜力,然而其在室内环境下的自主导航仍面临环境建模复杂和路径规划效率不足的挑战.自然界生物普遍通过环境简化与能效权衡以实现高效的空位移移,因此本文受到生物启发,提出一种基于分层栅格地图的飞滚多模态路径规划方法.首先,构建由建筑结构层与障碍物层组成的分层栅格地图,以实现室内环境关键要素的高效表征.其次,设计改进的 Jump A* 算法,在建筑结构层采用跳点搜索规划地面滚动路径,在障碍物层采用 A* 搜索规划空中飞行路径,并在代价函数中引入能量损耗项,通过可调权重实现移动距离与能量消耗的平衡.实验结果表明,该方法能够有效构建室内环境的分层栅格地图,并可在该地图上根据不同的距离和能耗目标进行多模态路径规划,为 FRR 在复杂室内场景下的自主导航提供了可行方案.

关键词 飞滚机器人; 分层栅格地图; 多模态路径规划; 跳点搜索; A* 搜索

引用格式 周熙栋, 钟杭, 陈铭源, 张辉, 王耀南. 基于生物启发的飞滚多模态球形机器人路径规划方法. 自动化学报, 2026, 52(5): 1-11

DOI 10.16383/j.aas.c250502

CSTR 32138.14.j.aas.c250502

Bio-inspired Path Planning Method for Multimodal Flying-rolling Spherical Robots

ZHOU Xi-Dong^{1,2} ZHONG Hang^{1,2,3} CHEN Ming-Yuan^{1,2} ZHANG Hui^{1,2} WANG Yao-Nan^{1,2}

Abstract The multimodal flying-rolling spherical robot (flying-rolling robot, FRR) combines aerial flight and ground rolling capabilities, showing strong potential in search and rescue, inspection and reconnaissance tasks. However, autonomous navigation in indoor environments remains challenging due to the complexity of environment modeling and insufficient path-planning efficiency. Inspired by biological systems that achieve efficient locomotion through environment simplification and energy trade-offs, this paper proposes a multimodal path planning method for FRRs based on a hierarchical grid map. A hierarchical grid map composed of a building-structure layer and an obstacle layer is constructed to efficiently represent key elements of indoor environments. An improved Jump A* algorithm is then designed, where jump point search is used to plan ground rolling paths on the building-structure layer, while A* search is applied to plan aerial flight paths on the obstacle layer. An energy consumption term is introduced into the cost function, enabling a trade-off between path length and energy expenditure via tunable weights. Experimental results demonstrate that the proposed method can effectively construct a hierarchical grid map for indoor environments, and enables multimodal path planning on this map according to different distance and energy consumption objectives, providing a feasible solution for the autonomous navigation of FRR in complex indoor scenarios.

Keywords flying-rolling robot; hierarchical grid map; multimodal path planning; jump point search; A* search

Citation Zhou Xi-Dong, Zhong Hang, Chen Ming-Yuan, Zhang Hui, Wang Yao-Nan. Bio-inspired path planning method for multimodal flying-rolling spherical robots. *Acta Automatica Sinica*, 2026, 52(5): 1-11

收稿日期 2025-09-29 录用日期 2025-12-24

Manuscript received September 29, 2025; accepted December 24, 2025

国家重大科研仪器研制项目(62427813), 国家自然科学基金联合基金重点项目(U22A2057), 湖南省科技创新领军人才(2023RC1049), 江西省自然科学基金(20232BAB212023), 江西省重点研发计划(20243BBG71017), 湖南省重点研发计划(2024JK2057), 装备状态感知与敏捷保障全国重点实验室基金(WDZC20255290508), 广东省基础与应用基础研究基金(2024A1515240062), 抚州市揭榜挂帅项目(2023JBA04) 资助

Supported by the National Major Scientific Research Instrument Development Project (62427813), Key Program Under the Joint Fund of the National Natural Science Foundation of China (U22A2057), the Science and Technology Innovation Program of Hunan Province (2023RC1049), National Natural Science Foundation of Jiangxi Province (20232BAB212023), Key Research and

Development Program of Jiangxi Province (20243BBG71017), Key Research and Development Program of Hunan Province (2024JK2057), National Key Laboratory for Equipment Status Perception and Agile Support Fund (WDZC20255290508), Guangdong Province Basic and Applied Basic Research Fund Project (2024A1515240062), and Fuzhou Jiebang Leading Project (2023JBA04)

本文责任编辑 刘志杰

Recommended by Associate Editor LIU Zhi-Jie

1. 湖南大学人工智能与机器人学院 长沙 410082 2. 机器人视觉感知与控制技术国家工程研究中心 长沙 410082 3. 湖南大学粤港澳大湾区创新研究院 广州 511340

1. School of Artificial Intelligence and Robotics, Hunan University, Changsha 410082 2. National Engineering Research Center of Robot Visual Perception and Control Technology, Changsha 410082 3. Greater Bay Area Institute for Innovation, Hunan University, Guangzhou 511340

在自然界中,部分昆虫能够在空中飞行与地面爬行之间切换,例如蟋蟀能够在地面行走以穿越障碍,同时也能利用飞行跨越较大障碍物,从而实现灵活移动.受到这些生物运动方式的启发,本文开发飞滚多模态球形机器人 FRR (flying-rolling robot),它同时具备空中飞行和地面滚动的多模态移动能力.这种跨域仿生的运动能力赋予 FRR 比传统单模态机器人更强的环境适应能力,使其在搜索救援、巡检侦察等复杂任务中展现出巨大潜力^[1].在废墟搜救或管线空间中,环境结构往往高度不规则,存在局部坍塌或不可通行区域, FRR 能够在可滚动的区域高效推进,并在遇到断面或障碍时灵活切换为飞行模式;在室内巡检任务中, FRR 可以在密集障碍与狭窄通道中时、稳定移动,同时保持能量消耗可控;在楼宇侦察场景中, FRR 能够实现跨房间、跨楼层的快速机动.这些任务需求体现了飞滚多模态运动方式带来的环境适应性和任务性能优势,也进一步证明 FRR 的应用价值.

然而,在室内环境中, FRR 的自主导航仍面临诸多挑战:空间复杂、障碍物密集且布局多样.如何有效表达环境、快速生成安全可行的路径以及在路径规划时考虑能量消耗,都是亟须解决的问题.值得注意的是,自然界生物在长期进化中形成一套高效的环境感知与运动决策机制,其核心特征在于通过简化环境表示来辅助路径规划,从而在短时间内选择一条运动代价最小的路径实现空间位移.

在生物进行空间位移时首先需要对周围环境进行感知,与精细化的完整环境建模不同,生物更倾向于依据运动需求对环境进行简化处理,以降低运动决策的复杂度.在室内场景中,这种处理方式可理解为生物会根据可通行性将环境要素划分为两类:一类是不可逾越的屏障,如墙体、柱子或大型固定设施,这些结构直接被视为绝对不可通过区域;另一类是可跨越的障碍,如低矮台阶、桌椅或散落物体,它们虽然可能影响运动,但在必要时可以翻越或绕行.同时,那些不直接影响运动的要素(如悬挂于高处的管道或其他障碍物)则被忽略,以减少不必要的决策负担.在此环境分类的基础上,生物在路径选择时会在体能消耗最小与运动路径最短之间进行权衡:若跨越某一障碍需要付出过高的能量代价,即便直线路径更短,也更倾向于选择绕行以降低整体位移成本.这种基于环境简化与能效权衡的感知与决策方式,为本文环境建模方法的设计和多种模态路径规划的研究提供了重要参考.

在现有研究中,环境模型主要为二维栅格地图或三维点云地图.其中二维栅格地图结构简单、运

算高效,但缺乏高度信息,难以支撑多模态规划;三维点云地图能够详细表征室内场景的空间几何特征,但数据量庞大,导致路径规划算法的计算复杂度显著提高.相比之下,自然界生物常采用层次化、选择性的方式来平衡环境表达的信息完整性与处理效率,因此基于栅格的 2.5 维高度地图^[2]成为最佳选择.2.5 维高度地图将连续的地面高度值存储在二维栅格中,从而平衡了建图效率和表示环境障碍物的能力,目前已被广泛用于崎岖地面^[3]或动态环境^[4]中的移动机器人导航.然而在障碍物更加复杂的场景中,传统 2.5 维高度地图难以有效表征环境信息,使得在该地图上进行全局路径规划的能力仍然有限.因此学者提出分层地图的概念^[5]用于解决复杂场景下的移动机器人导航问题. Liu 等^[6]将二维占用栅格地图和 2.5 维数字高程图进行结合,提出一种混合地图的表示方法,路径规划时仅在 2.5 维地图中评估机器人的安全性,因此降低了计算成本. Yang 等^[7]提出一种新的层析场景表示来理解三维环境,将高程图扩展到多层场景,同时保持其在映射效率和表示能力方面的优势,可在复杂多层结构中为移动机器人导航. Guo 等^[8]提出一种创建混合 2.5 维半语义地图的新方法,将二维几何地图与稀疏三维对象地图合并,专为广阔的室内场景而设计.

路径规划方法主要分为采样类与图搜索类.采样类方法能适应高维空间,具有一定仿生探索特征,但难以保证全局最优,例如遗传算法^[9]、蚁群算法^[10]和粒子群算法^[11]等;图搜索类方法可确保可行性与最优性,却在三维环境下效率不足,例如 A* 算法^[12]及其变体.部分改进型算法虽在二维场景中提升效率,但尚未在多模态路径规划中得到验证,例如跳点搜索 (jump point search, JPS) 算法^[13].在此基础上,针对兼具空中与地面移动能力的多模态机器人,已有学者尝试对传统算法进行扩展与改进,以适应多模态路径规划的需求. Sharif 等^[14]提出一种节能路径规划算法,该算法在 A* 算法的基础上,对潜在路径的评估加入了调整后的启发式函数或与能耗相关的额外成本因素. Wang 等^[15]提出一种基于 A* 和天牛须搜索混合算法的空地机器人路径规划方法,通过采用结合平面搜索和空间搜索的可互换搜索方法来降低计算负担,该方法能够在野外条件下规划出能耗最小的全局路径. Mustafa 等^[16]基于 A* 策略开发一种混合路径规划算法,实现了从空中到地面导航模式的无缝转换,从而提高了机器人在复杂环境中的移动能力.

为解决 FRR 在室内场景中自主导航所面临的

环境感知与运动决策难题, 本文首先提出一种分层栅格地图构建方法, 并在此地图上设计改进 Jump A* (JA*) 路径规划算法. 其中分层栅格地图与传统 2.5 维地图仅使用单一高度层表示不同, 该地图由建筑结构层和障碍物层组成, 通过将长期稳定的建筑结构视为无法跨越的障碍, 使规划算法能够无需遍历高度层判断可通行性, 从而显著提升搜索效率; 同时将半静态障碍物构建为障碍物层, 用于支持 FRR 在飞行与滚动模式之间的路径选择. 改进 JA* 算法在分层栅格地图上可实现分区域的快速多模态路径规划, 通过在代价函数中引入能量损耗代价, 并设置不同的权重系数实现 FRR 自主导航过程中移动距离与能量消耗的平衡.

本研究的贡献如下:

1) 设计一种兼具飞行与滚动能力的空地机器人结构, 其采用三轴正交万向节与球形外壳构型, 整体由内环、中环及外壳组成, 各部分均可绕其固定轴独立旋转. 通过三转轴的连续协调运动, 机器人能够在欧拉角意义下实现任意姿态调整, 保证了 FRR 地面滚动的灵活性与稳定性.

2) 提出面向 FRR 室内自主导航的分层栅格地图构建方法, 该方法受到生物在空间位移过程中对运动相关信息进行选择保留的启发, 利用攀登算法高效区分室内建筑结构与障碍物信息. 与传统建模方式相比, 本方法在准确表达关键环境要素的同时, 为 FRR 在复杂室内环境下的多模态路径规划提供了高效且简洁的环境模型.

3) 设计基于改进 JA* 算法的快速多模态路径规划方法, 在建筑结构层中, 采用 JPS 进行地面滚动路径规划; 在障碍物层中, 采用 A* 搜索进行空中飞行路径规划, 从而减少不必要的节点计算, 有效提升路径搜索效率. 同时, 在代价函数中引入能量损耗项, 并设置路径与能量的权重系数, 实现最短距离与最低能耗之间的平衡.

1 系统框架设计

本节首先介绍飞滚机器人的硬件结构设计, 包括动力系统、控制系统、传感器模块以及赋予 FRR 全向滚动能力的三轴万向节机构. 随后, 介绍飞滚机器人在室内环境下的自主导航框架, 阐述环境分层建模与多模态路径规划等核心模块的逻辑关系与整体架构.

1.1 结构设计

FRR 的结构组成包括: 三个正交布置的转动轴、旋翼机体、内环、中环与球形外框, 其中内环、中环与球形外框可绕其固定轴旋转, 结构设计如图 1 所示.

FRR 的旋翼机体采用共轴八旋翼设计, 轴距为 330 mm. 动力系统由八台 T-Motor CINE 66 KV950 无刷电机、一台 T-Motor CINE 55A 8-in-1 电调、8 个 T-Motor C7.5 × 4.6 三叶螺旋桨和一块 ACE 6S 6000 mAh 锂电池组成. 控制系统由一台运行 PX4 固件的 Pixhawk 6X Mini 飞行控制器和 NVIDIA Jetson Orin NX 机载计算机组成. 其中机载计算机上的算法均在 Ubuntu 20.04 上的机器人操作系统 Noetic 上运行. 并通过 MAVROS 与飞行控制器通信, 传输 IMU 和控制命令数据. 传感器搭载了 Livox Mid 360 激光雷达, 可不依赖外部定位系统.

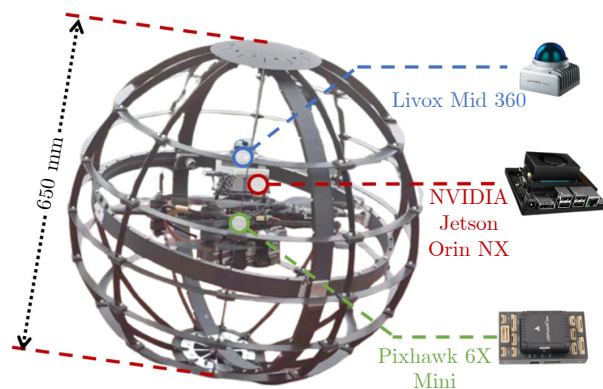


图 1 FRR 结构设计

Fig. 1 Structural design of the FRR

内环与中环直径分别为 566 mm 和 596 mm, 均由 4 块弧形腹板拼接而成. 球形外框直径为 650 mm, 由 10 块竖直安装的半圆形碳纤维板和 5 块水平安装的圆形碳纤维板构成. 半圆形碳板沿球体的方位角方向均匀分布, 其底部和顶部固定在一个中心圆形连接件上, 该连接件作为主要的结构支撑与连接节点. 水平圆形碳板则分别安装于不同的纬度位置, 有效增强整体的刚度与稳定性, 同时维持外框的球形几何形状. 内环、中环和球形外框通过 6 个轴承支撑座相互连接, 从而实现绕固定轴的旋转.

1.2 方法概述

为解决 FRR 在室内自主导航中的环境感知与运动决策问题, 本文提出基于分层栅格地图的飞滚多模态路径规划方法, 整体框架如图 2 所示. 其中分层栅格地图由建筑结构层和障碍物层组成: 建筑结构层保留长期稳定的支撑和围护结构信息, 可用于 FRR 的滚动路径规划; 障碍物层通过攀登算法和贝叶斯占用滤波器, 将局部八叉树地图中的障碍物信息转换为高度栅格, 反映环境中可绕行或可飞越的障碍物分布, 可用于 FRR 的飞行路径规划.

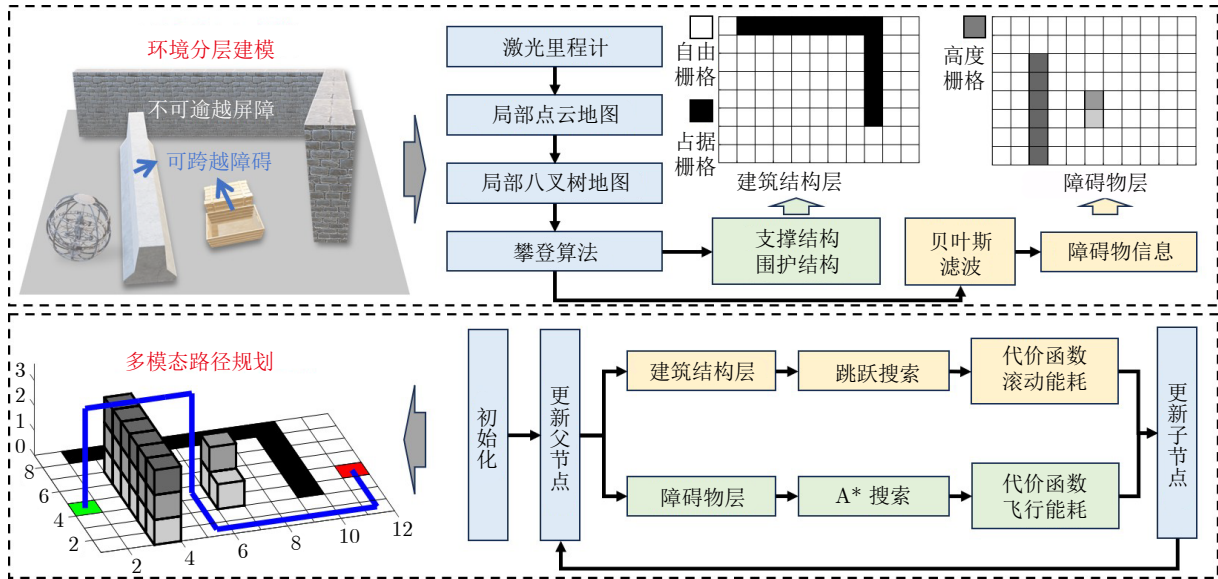


图 2 方法概述

Fig.2 Method overview

在分层栅格地图上,通过改进JA*算法实现全局多模态路径规划.在障碍物层通过邻接节点遍历保证路径可行性,在建筑结构层引入跳点搜索减少冗余计算,从而提高规划效率.代价函数中引入能量损耗,并通过距离与能耗权重系数实现路径长度与能量消耗的平衡,以兼顾任务执行效率和续航能力.

2 环境分层建模

本文提出的分层栅格地图由建筑结构层与障碍物层组成,其中建筑结构层仅保留室内环境中的支撑结构和围护结构信息,这些结构具有长期稳定性,不随环境变化而改变,可作为全局路径规划的基础环境模型.在先前研究中已对其进行了探索^[17],并提出攀登算法.然而,该工作仅关注建筑结构的表达,并未涉及对半静态障碍物的提取.在此基础上,本文进一步将室内场景中的半静态障碍物信息映射至建筑结构层上,从而构建障碍物层,使环境模型能够同时包含建筑结构与障碍物的空间分布.障碍物层的引入使路径规划算法能够在全局层面实现避障,不再依赖局部避障策略规避主要障碍,从而显著提升自主导航的整体性能与鲁棒性.

在分层栅格地图中,栅格值定义如下:0表示自由栅格(FRR可自由滚动和飞行的区域);100表示占据栅格(FRR无法绕行或飞跃的建筑结构);1~99表示高度栅格(FRR可以绕行或飞跃的障碍物),且数值越大对应的障碍物高度越高.为构建障碍物层,首先通过攀登算法提取局部八叉树地图中的障碍物信息,随后利用贝叶斯占用滤波器逐步将障碍

物信息转换为高度栅格,最终生成能够反映当前环境状态的分层栅格地图.

2.1 八叉树地图

在分层栅格地图的构建过程中,首先利用激光里程计获取机器人姿态,实现点云地图的增量式构建.由于单帧激光雷达点云可能无法完整覆盖环境信息,因此通过激光里程计生成局部点云地图,并将其转换为局部八叉树地图.相比直接处理点云数据,八叉树通过逐层分割空间,能够在不同分辨率下高效表示复杂的三维环境.随后通过遍历局部八叉树地图中的所有体素,提取出FRR可飞跃的障碍物信息,从而生成分层栅格地图中的障碍物层.

将局部八叉树地图中的所有体素用一个坐标集合 $S = \{(x_i^S, y_i^S, z_i^S)\}$ 表示,其中 x_i^S, y_i^S, z_i^S 为体素在三维空间中的坐标.根据文献[17]所提攀登算法,首先确定山脚高度 h_f 和山顶高度 h_c ,接着通过遍历 S 识别出建筑结构信息,从而分别生成分层栅格地图中的占据栅格和自由栅格.此外定义局部八叉树地图分辨率为 R_o ,分层栅格地图分辨率为 R_g .

2.2 高度栅格

由于FRR可飞跃的障碍物不同于支撑结构,其高度不会延伸至天花板,因此利用攀登算法的思想,将高于 h_f 且低于 h_c 的连续体素判断为障碍物,如图3所示.

随后将攀登路径上的体素保存为障碍物体素集合 $O = \{(x_i^o, y_i^o, z_i^o)\}$.考虑到一般情况下八叉树地

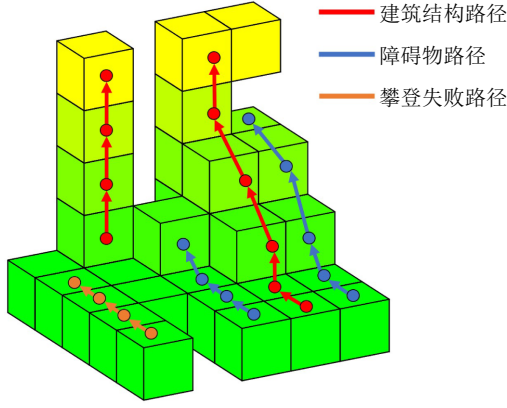


图3 攀登算法示意图

Fig.3 The schematic diagram of climbing algorithm

图分辨率 R_o 大于栅格地图分辨率 R_g , 因此一个障碍物素将覆盖多个高度栅格, 这些体素的覆盖范围 (x_o, y_o) 将作为障碍物层中可能的高度栅格:

$$x_o = \left\lfloor \frac{x_i^o}{R_g} \right\rfloor + m, m \in \left[-\frac{R_o}{R_g \cdot 2}, \frac{R_o}{R_g \cdot 2} \right] \quad (1)$$

$$y_o = \left\lfloor \frac{y_i^o}{R_g} \right\rfloor + n, n \in \left[-\frac{R_o}{R_g \cdot 2}, \frac{R_o}{R_g \cdot 2} \right] \quad (2)$$

将同一栅格上最高体素的高度 z_i^o 作为障碍物的高度. 由于高度栅格的值在 $1 \sim 99$ 之间, 因此需要将障碍物高度进行归一化为 h_o :

$$h_o = 100 \cdot \frac{z_i^o - h_f}{h_c - h_f} \quad (3)$$

因此高度栅格 $G(x_o, y_o)$ 可表示为:

$$G(x_o, y_o) = h_o \quad (4)$$

2.3 障碍物层更新

由于在地图构建过程中可能存在动态障碍物, 例如行走的人或移动的物体, 这些动态障碍物可能会被错误地构建到地图中. 因此本文使用基于贝叶斯滤波的栅格更新方法对地图中的高度栅格 $G(x_o, y_o)$ 进行更新. 对于某个高度栅格, 其在时刻 t 被占用的概率记为 $p_t(x_o, y_o)$, 则基于贝叶斯滤波的更新公式可描述为:

$$p_t(x_o, y_o) = \frac{p(o_t|G(x_o, y_o))p_{t-1}(x_o, y_o)}{p_t(o_t)} \quad (5)$$

其中 $p_{t-1}(x_o, y_o)$ 为上一次更新后的先验概率, $p(o_t|G(x_o, y_o))$ 表示在观测 o_t 下栅格被占用的可能性, $p_t(o_t)$ 为归一化因子. 为避免多次递推带来的数值饱和问题, 通常采用对数似然比形式:

$$L_t(x_o, y_o) = L_{t-1}(x_o, y_o) + \Delta L_t(x_o, y_o) \quad (6)$$

$$\Delta L_t(x_o, y_o) = \log \frac{p(G(x_o, y_o) = \text{occ} | o_t)}{1 - p(G(x_o, y_o) = \text{occ} | o_t)} \quad (7)$$

其中 $L_t(x_o, y_o) = \log(p_t(x_o, y_o)/(1 - p_t(x_o, y_o)))$; occ 为一个二值状态标签, 表示栅格是否被占用. 最终占据概率通过反变换得到:

$$p_t(x_o, y_o) = \frac{1}{1 + \exp(-L_t(x_o, y_o))} \quad (8)$$

接着根据概率值对栅格进行离散化判定, 并对障碍物层进行更新. 本文采用固定阈值对栅格状态进行分类, 其定义为:

$$G(x_o, y_o) = \begin{cases} h_o, & p_t(x_o, y_o) \geq p_{th} \\ 0, & p_t(x_o, y_o) < p_{th} \end{cases} \quad (9)$$

其中 p_{th} 为占用判定阈值. 当概率大于阈值时, 将栅格判定为高度栅格; 反之, 则判定为自由栅格. 通过这一方法, 可以将连续的占用概率转化为离散化的栅格表示. 根据经典占据栅格模型中对阈值选择的建议 (通常取 $0.5 \sim 0.7$, 以平衡噪声与可靠性^[18]), 结合室内点云环境中存在的遮挡与测量噪声特性, 本文将 p_{th} 取为 0.65 , 使占用判定在可靠性和误报率之间保持较好平衡.

3 多模态路径规划

本文采用改进 JA* 算法实现在分层栅格地图上的全局多模态路径规划, 该算法融合了 A* 算法的启发式搜索思想与 JPS 算法的节点跳跃机制. 在障碍物层中, JA* 算法通过邻接节点的逐一遍历保证路径的可行性; 在建筑结构层中, 则引入跳点搜索以减少冗余节点的遍历. 通过在不同层级间结合邻接遍历与跳跃搜索, JA* 算法能够在确保路径最优性的同时显著降低搜索过程中的无效计算, 从而有效提升多模态路径规划的效率.

先前的工作^[19] 仅研究了非结构化场景下以路径长度最优为目标的全局规划. 然而, 在 FRR 的实际应用中, 单纯考虑最短路径往往无法满足任务需求, 因为飞行与滚动模式的能耗差异显著, 若忽略能量因素, 规划结果可能导致飞行段比例过高, 从而导致续航缩短并影响任务的可执行性. 基于此, 本文在 JA* 算法的基础上进一步引入能量损耗因素, 通过对 FRR 在两种运动模式下的能耗进行定量分析, 将其加入代价函数中, 并设置距离与能耗的权重系数, 从而实现最短距离与最低能耗之间的平衡.

3.1 能量分析

为了定量分析 FRR 在不同运动模式下的能量

消耗, 本文分别建立了地面滚动与空中飞行的能耗模型. 由于研究重点在于不同运动方式之间的能量差异, 本文在建模过程中忽略空气阻力, 仅考虑滚动阻力与悬停功率, 同时假设 FRR 为匀速运动.

在地面滚动模式下, FRR 通过旋翼驱动滚动, 其能量主要用于克服滚动阻力. 设 FRR 质量为 m , 重力加速度为 g , 滚动阻力系数为 C_r , 则阻力可表示为 $F_{ground} = C_r mg$. 在恒速条件下, 当 FRR 滚动模式下距离为 d_r 时的能量消耗为:

$$E_1(d_r) = C_r mg \cdot d_r \quad (10)$$

可见地面滚动的能量消耗与行驶距离呈线性关系, 而与速度无关.

在空中模式时, 旋翼需持续提供升力以抵消重力. 根据动量理论, 悬停功率可表示为:

$$P_{\text{hover}} = \frac{(mg)^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{2\rho A_r}} \quad (11)$$

其中 ρ 为空气密度, A_r 为旋翼总盘面积.

当 FRR 飞行模式的恒定速度为 v , 移动距离为 d_f 时的能量消耗为:

$$E_2(d_f) = \frac{P_{\text{hover}}}{v} \cdot d_f \quad (12)$$

通过式 (10)、(12) 将 FRR 地面滚动模式和空中飞行模式的能量消耗均转换为关于移动距离 d 的线性函数, 同时空中飞行模式的整体能耗水平远高于地面滚动模式.

3.2 改进 JA* 算法

在原始 JA* 算法中, 路径搜索主要依赖于距离代价函数 $f(n) = g(n) + h(n)$, 其中 $g(n)$ 表示从起点到当前节点 n 的路径长度, $h(n)$ 表示当前节点到目标点的估计距离. 这种代价函数能够保证最短路径规划, 但未考虑 FRR 的额外能量消耗. 为此, 本文在代价函数中引入能量损耗代价 $e(n)$, 表示从起点到当前节点 n 的能量损耗:

$$e(n) = \sum_{i=1}^n E_i(d) \quad (13)$$

其中移动距离 d 为文献 [19] 中所提两个节点之间的欧几里得距离.

本文在 JA* 算法中引入可调节的距离与能耗权重系数, 从而可根据导航任务需求对规划算法进行调整, 以实现路径最短或能量最小的优化目标. 因此将总代价函数构建为多目标优化形式:

$$f(n) = \alpha \cdot g(n) + \beta \cdot e(n) + h(n) \quad (14)$$

其中 α 与 β 分别为距离代价和能耗代价的权重系

数, 依据实际任务需求进行参数微调获得最终权重. 当 $\alpha = 1, \beta = 0$ 时, 算法退化为最短路径搜索; 当 $\alpha = 0, \beta = 1$ 时, 算法等价于最低能耗路径搜索; 当 α, β 同时取正值时, 则实现路径长度与能量消耗的折中优化. 总体上, 增大 α 会使全局路径更短, 但飞行模式比例上升, 使得能耗更高; 增大 β 则更倾向选择低能耗的滚动模式, 路径则更迂回.

通过引入可调节的代价权重系数, 本文提出的改进 JA* 算法能够在距离最短与能耗最小之间灵活切换, 实现多目标优化的全局路径规划, 更加符合 FRR 在复杂环境中的实际应用需求.

4 实验结果

本实验分为两个部分: 环境建模实验和多模态路径规划实验. 其中环境建模实验地点位于湖南大学机器人学院 C1 栋展厅, 建筑面积约为 200 m², 实验场地中具有可移动的展台、实验器材等半静态障碍物以及行走的人等动态障碍物; 在多模态路径规划实验中, 首先进行仿真对比实验, 随后使用环境建模实验中所构建的分层栅格地图进行验证, 以检验改进 JA* 算法的有效性.

4.1 环境建模实验

分层栅格地图构建算法的参数为: $R_g = 0.05$ m, $R_o = 0.20$ m. 使用 Point-LIO^[20] 来获取机器人的实时姿态, 参数使用开发者提供的默认参数. 建图过程中 FRR 仅使用滚动模式, 同时还使用了搭载 RSLidar 的 SCOUT Mini 小车来进行对比实验. 首先使用 FRR 搭载的 3D 激光雷达来构建实验场地的分层栅格地图. 建图开始阶段首先保持机器人在起点处静止一段时间, 用于初始化 Point-LIO 算法以及获取天花板高度, 建图过程如图 4 所示. 从图中可以看出, 本文的算法首先构建局部点云地图 (图 4(a)), 接着转化为局部八叉树地图 (图 4(b)), 随后提取出建筑结构点云 (图 4(c)) 以及障碍物元素 (图 4(d)).

在 FRR 环境建模实验中, 由于其运动需由人工操控, 操作人员不可避免地出现在激光雷达观测范围内, 并一度被识别为障碍物 (如图 5 红色矩形框所示). 然而障碍物层的更新结果显示, 尽管人员在建图过程中处于运动状态, 但最终并未被保留在分层栅格地图中, 说明该方法能够有效避免动态目标对建图结果的干扰, 从而保证地图对室内静态环境的准确表征.

最终所构建的分层栅格地图如图 6(a) 所示. 可以看出本文算法可以很好地构建实验场地的环境地

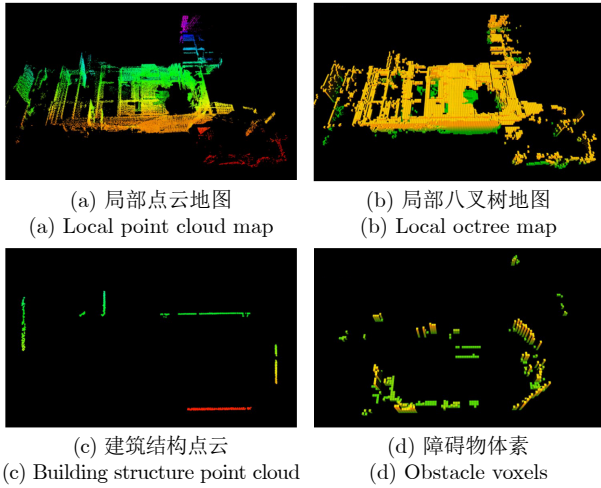


图 4 分层栅格地图建图流程

Fig.4 Mapping process of the layered grid map

图,同时栅格地图中包含了障碍物信息,灰度值越大代表障碍物高度越高.接着为了验证本文算法的性能,使用 scout mini 小车搭载的 2D 激光雷达来构建实验场地的传统栅格地图,雷达安装高度约为 0.4 m.其中建图算法使用 Gmapping 算法,所构建的传统栅格地图如图 6(b) 所示.相比而言,本文方法所构建的分层栅格地图在保留障碍物二维信息的前提下,进一步保存了障碍物的高度信息,并可用于 FRR 的多模态路径规划.

4.2 多模态路径规划实验

本节实验首先对改进 JA* 算法的性能进行验

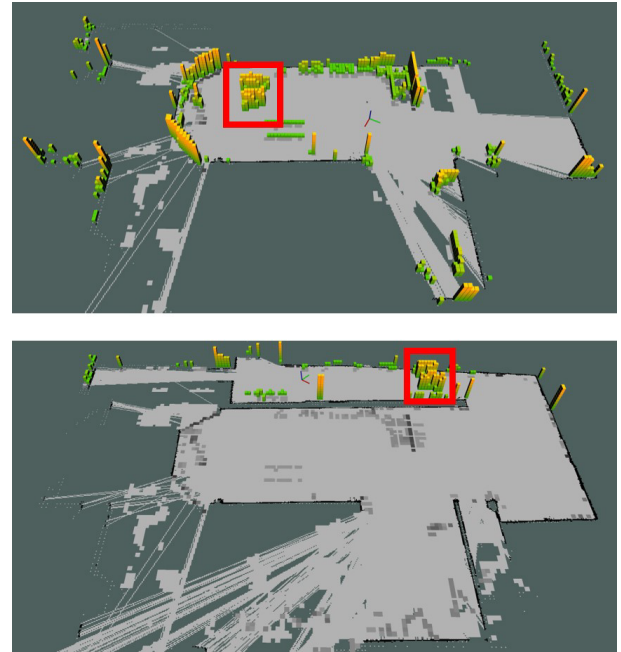


图 5 障碍物层更新流程

Fig.5 Updating process of the obstacle layer

证,与典型采样类算法 RRT* 进行对比.改进 JA* 算法的关键参数配置如表 1 所示,单位距离飞行能量消耗为 800 J. FRR 在实际控制过程中,为保证其在地面滚动模式下的稳定性,需要一部分动力用于控制机体的平衡,从而实现参考路径的稳定跟随.根据经验值设置地面滚动的能量消耗为空中飞行能量消耗的一半,因此单位距离滚动能量消耗设置为 400 J. RRT* 算法采用开源框架并保持默认

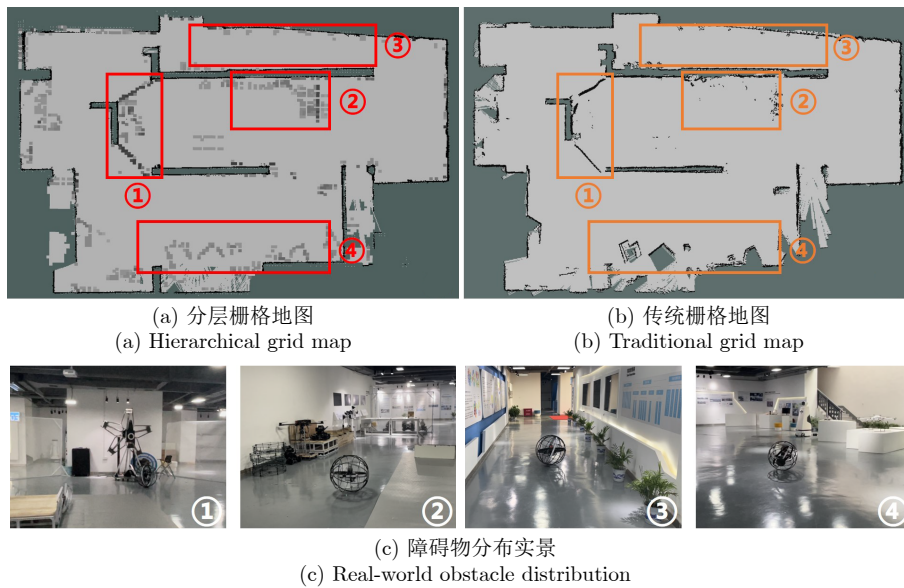


图 6 建图对比实验结果

Fig.6 Comparison of mapping experimental results

参数设置.

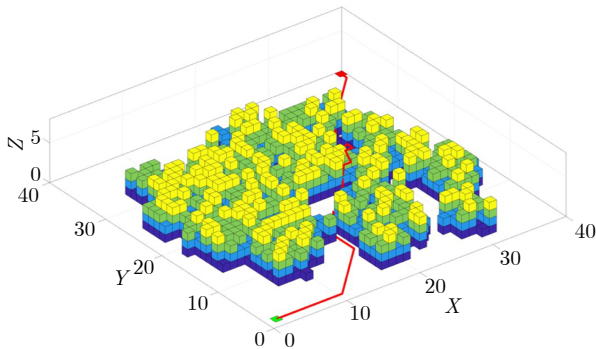
实验环境为随机生成的分层栅格地图, 地图规模为 40×40 m, 其中障碍物高度分布在 $1 \sim 4$ m 之间, 以模拟典型的室内复杂环境. 全局路径规划的可视化结果如图 7 所示, 其中绿色栅格为起点, 红色栅格为终点, 红色曲线为改进 JA* 算法或 RRT* 算法生成的全局路径, 黑色曲线则表示 RRT* 算法的探索树.

仿真实验结果表明, 改进 JA* 算法能够在分层栅格地图中生成同时兼顾路径长度与能量消耗的较优轨迹. 相比之下, RRT* 算法在复杂三维环境中虽然能够成功搜索到一条可行路径, 但其优化过程

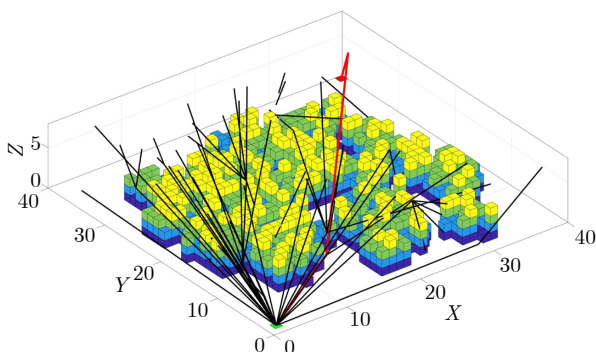
表 1 改进 JA* 算法参数

Table 1 Parameters of the improved JA* algorithm

参数	值
m	6 kg
g	9.81 m/s^2
P_{hover}	800 W
v	1 m/s
α	1.0
β	1.0



(a) 改进 JA* 算法规划结果
(a) Planning results using the improved JA* algorithm



(b) RRT* 算法规划结果
(b) Planning results using the RRT* algorithm

图 7 仿真对比实验结果

Fig. 7 Simulation results of comparison experiments

依赖大量随机采样和反复重连操作, 需要持续执行邻域查询与碰撞检测, 因此规划效率明显较低. 实验中, RRT* 与改进 JA* 的搜索时间分别为 9.97 s 和 0.02 s, 存在显著差距. 除了时间效率外, 两者在路径能耗表现上也存在明显不同. 由于 RRT* 的代价函数仅考虑几何意义上的路径最短, 而未将能量消耗纳入优化目标, 其生成路径虽较短, 但能量消耗劣于改进 JA*. 实验中, JA* 与 RRT* 的路径长度分别为 65.8 m 和 58.3 m, 而能量消耗分别为 35 069 J 和 46 640 J, 表明 RRT* 在追求最短路径时忽略了能量代价, 从而导致整体能耗更高.

总体来看, 这一差异源于两类方法在目标设计上的不同. RRT* 为保证其渐进最优性, 需要在空间中随机扩展树结构并执行大量采样与重连操作, 在障碍密集或通道狭窄环境中收敛更慢, 同时也不会主动规避能耗较高的飞行模式. 相比之下, 改进 JA* 在图搜索框架下显式引入能量消耗代价, 使搜索能够在全局范围内被引导至代价更低的候选节点, 从而在时间效率、能量消耗与路径质量之间取得更优的综合平衡. 因此, 实验结果验证了改进 JA* 算法在分层栅格地图下执行多模态路径规划的优势.

为了进一步验证改进 JA* 算法在不同优化目标下的适应性, 本研究对代价函数中的距离与能耗权重参数进行了对比实验. 通过在分层栅格地图下设定不同权重组合, 分别强调最短距离、最低能耗以及距离能耗平衡三类目标, 所生成的全局路径如图 8 所示, 实验结果如表 2 所示. 实验结果表明: 随着参数 β 与 α 比值的增加, 全局路径更倾向通过滚动方式绕行, 而不是采用代价更高的飞行跨越, 从而使得路径在几何上更加迂回, 但整体能量消耗显著降低; 当参数 β 与 α 比值减小时, 路径则更接近最短几何距离, 但会增加飞行动作的比例, 导致能耗上升. 上述现象说明实验参数对规划行为具有明确影响, 即参数 β 与 α 比值的调节能够控制 FRR 在“滚动绕行”与“飞行跨越”之间进行策略选择. 实验结果验证了改进 JA* 算法中代价函数的合理性, 即多模态路径规划任务下, FRR 可以通过调整权重在距离优先与能耗优先之间实现自适应, 从而提升自主导航的灵活性与实用性.

在完成仿真实验后, 本研究进一步在真实场景中进行了验证, 地图采用环境建模实验所构建的分层栅格地图. 为了使本文所提方法在 FRR 上应用成为可能, 将改进 JA* 算法集成至 ROS 框架中, 并可在 RVIZ (robot visualization tool) 中通过交互式按钮指定起点与目标点. 随后, 算法根据起点

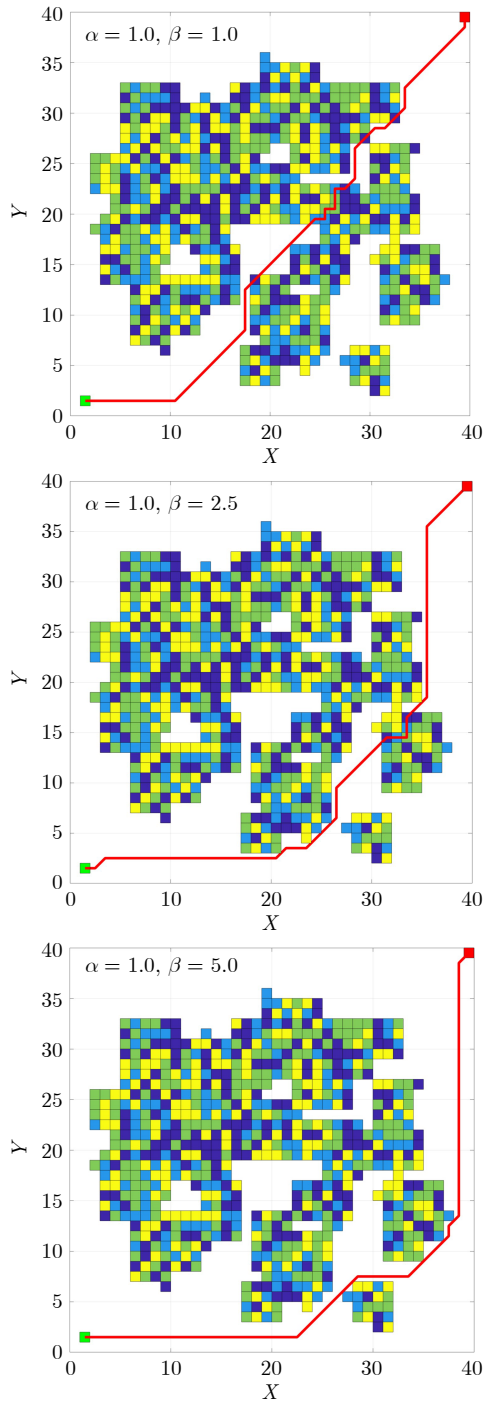


图 8 路径-能量权重对比实验

Fig.8 Path-energy weight comparison experiment

表 2 路径规划实验结果
Table 2 Path planning experimental results

序号	α	β	飞/滚距离 (m)	飞滚切换次数	能量消耗 (J)
1	1.0	1.0	21.8/44.0	8	35069
2	1.0	2.5	9.1/59.8	2	31216
3	1.0	5.0	0.0/68.9	0	27588

与终点自动生成全局路径, 并将结果以路径话题的形式发布, 以便与下游控制模块进行对接.

路径规划结果如图 9 所示, 其中黄色方块表示建筑结构, 绿色方块表示可以飞跃的障碍物. 从实验结果中可以看出, 改进 JA* 算法不仅能避开建筑结构并规划出一条最短路径, 同时能够规划出一条可以飞跃障碍物的路径, 实现多模态路径规划. 该实验不仅验证了改进 JA* 算法在真实环境的分层栅格地图上的可行性, 也为后续的自主导航与在线控制实验奠定了基础.

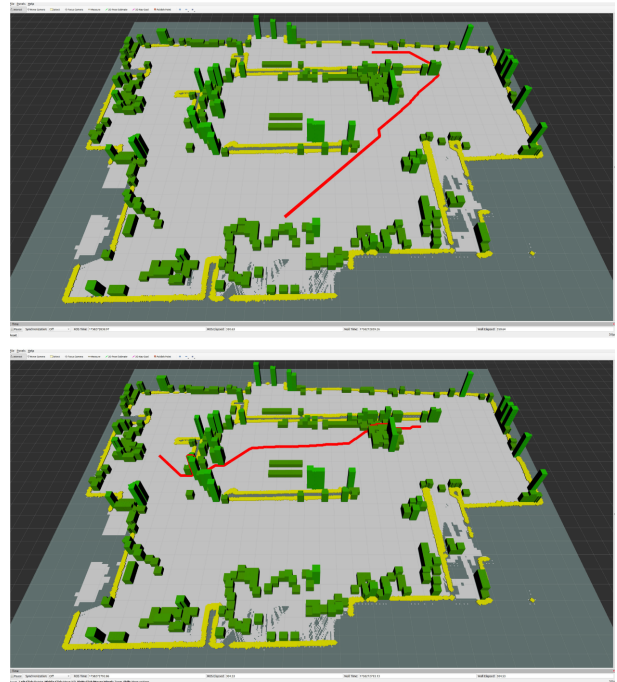


图 9 改进 JA* 算法实验结果
Fig.9 Experimental results of the improved JA* algorithm

5 结束语

本文针对 FRR 在室内环境中的自主导航问题, 提出一种受生物启发的环境建模与路径规划方法. 首先, 本文提出一种分层栅格地图构建方法, 可高效地区分建筑结构与障碍物信息, 从而实现了对室内环境的简洁表征. 其次, 在分层栅格地图的基础上, 提出适用于 FRR 多模态路径规划的改进 JA* 算法, 并在代价函数中引入能量损耗项, 通过权重参数平衡移动距离与能量消耗. 最后, 通过仿真与真实场景实验验证了所提方法的有效性. 实验结果表明, 本文所提方法可以有效地构建室内场景的分层栅格地图, 并在该地图上实现多模态路径规划, 同时通过仿真实验验证了改进 JA* 算法的性能以及权重参数对路径规划结果的影响. 综上所述, 本

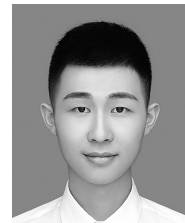
文提出的环境建模与路径规划方法为 FRR 在室内环境下的自主导航提供了基础, 未来工作将进一步探索 FRR 的局部路径规划方法, 从而实现 FRR 的自主导航功能。

参考文献

- Zhou X D, Zhong H, Zhang H, He W, Hua H A, Wang Y N. Current status, challenges, and prospects for new types of aerial robots. *Engineering*, 2024, **41**(10): 19–34
- Fankhauser P, Bloesch M, Hutter M. Probabilistic terrain mapping for mobile robots with uncertain localization. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2018, **3**(4): 3019–3026
- Pütz S, Wiemann T, Piening M K, Hertzberg J. Continuous shortest path vector field navigation on 3D triangular meshes for mobile robots. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Xi'an, China: IEEE, 2021. 2256–2263
- Gim H, Jeong M, Han S. Autonomous navigation system with obstacle avoidance using 2.5D map generated by point cloud. In: Proceedings of the 21st International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS). Jeju, Korea: IEEE, 2021. 749–752
- Chen S Y, Chen H, Chang C W, Wen C Y. Multilayer mapping kit for autonomous UAV navigation. *IEEE Access*, 2021, **9**: 31493–31503
- Liu J Y, Chen X Y L, Xiao J H, Lin S C, Zheng Z Q, Lu H M. Hybrid map-based path planning for robot navigation in unstructured environments. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Detroit, USA: IEEE, 2023. 2216–2223
- Yang B W, Cheng J, Xue B H, Jiao J H, Liu M. Efficient global navigational planning in 3D structures based on point cloud tomography. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2025, **30**(1): 321–332
- Guo S, Hu Y Z, Xu M L, Liu J G, Ju Z J. A novel hybrid 2.5D map representation method enabling 3D reconstruction of semantic objects in expansive indoor environments. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2025, **22**: 9636–9650
- Li Shao-Bo, Song Qi-Song, Li Zhi-Ang, Zhang Xing-Xing, Zhe Long-Xuan. Review of genetic algorithm in robot path planning. *Science Technology and Engineering*, 2020, **20**(2): 423–431 (李少波, 宋启松, 李志昂, 张星星, 柘龙炫. 遗传算法在机器人路径规划中的研究综述. *科学技术与工程*, 2020, **20**(2): 423–431)
- Yang Ping, Zhao Zhen, Zheng Hai-Xia. Research on mobile robot global path planning based on improved ant colony algorithm. *Machine Building and Automation*, 2017, **46**(6): 155–157 (杨萍, 赵珍, 郑海霞. 基于改进蚁群算法的机器人全局路径规划方法研究. *机械制造与自动化*, 2017, **46**(6): 155–157)
- Hu Zhang-Fang, Feng Chun-Yi, Luo Yuan. Improved particle swarm optimization algorithm for mobile robot path planning. *Application Research of Computers*, 2021, **38**(10): 3089–3092 (胡章芳, 冯淳一, 罗元. 改进粒子群优化算法的机器人路径规划. *计算机应用研究*, 2021, **38**(10): 3089–3092)
- Hart P E, Nilsson N J, Raphael B. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, 1968, **4**(2): 100–107
- Harabor D, Grastien A. The JPS pathfinding system. *Proceedings of the International Symposium on Combinatorial Search*, 2021, **3**(1): 207–208
- Sharif A, Lahiru H M, Herath S, Roth H. Energy efficient path planning of hybrid fly-drive robot (HyFDR) using A* algorithm. In: Proceedings of the 15th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, Porto, Portugal:

SCITEPRESS, 2018. 201–210

- Wang X Y, Huang K Y, Zhang X Y, Sun H L, Liu W Z, Liu H P. Path planning for air-ground robot considering modal switching point optimization. In: Proceedings of the International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). Warsaw, Poland: IEEE, 2023. 87–94
- Mustafa M A, Yaqoot Y, Martynov M, Karaf S, Tsetserukou D. MorphoMove: Bi-modal path planner with MPC-based path follower for multi-limb morphogenetic UAV. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC). Kuching, Malaysia: IEEE, 2024. 1820–1825
- Zhou X D, Zhong H, Zhang H, Chen M Y, Yu H Y, Wang W Z. A method for constructing building structure grid map based on a climbing algorithm. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Atlanta, USA: IEEE, 2025. 13753–13758
- Thrun S. Probabilistic robotics. *Communications of the ACM*, 2002, **45**(3): 52–57
- Zhou Xi-Dong, Zhang Hui, Chen Bo. Path planning of mobile robot based on improved JPS algorithm in unstructured scene. *Control and Decision*, 2024, **39**(2): 474–482 (周熙栋, 张辉, 陈波. 非结构化场景下基于改进 JPS 算法的机器人路径规划. *控制与决策*, 2024, **39**(2): 474–482)
- He D J, Xu W, Chen N, Kong F Z, Yuan C J, Zhang F. Point-LIO: Robust high-bandwidth light detection and ranging inertial odometry. *Advanced Intelligent Systems*, 2023, **5**(7): Article No. 2200459



周熙栋 湖南大学人工智能与机器人学院博士研究生. 主要研究方向为机器人控制与路径规划.

E-mail: xidong_zhou@hnu.edu.cn

(ZHOU Xi-Dong Ph.D. candidate at the School of Artificial Intelligence and Robotics, Hunan University. His research interests include robot control and path planning.)



钟杭 湖南大学人工智能与机器人学院副教授. 主要研究方向为机器人控制, 视觉伺服和路径规划. 本文通信作者.

E-mail: zhonghang@hnu.edu.cn

(ZHONG Hang Associate professor at the School of Artificial Intelligence and Robotics, Hunan University. His research interests include robot control, visual servoing, and path planning. Corresponding author of this paper.)



陈铭源 湖南大学人工智能与机器人学院硕士研究生. 主要研究方向为机器人控制与路径规划.

E-mail: chenmingyuan@hnu.edu.cn

(CHEN Ming-Yuan Master student at the School of Artificial Intelligence and Robotics, Hunan University. His research interests include robot control and

path planning.)



张 辉 湖南大学人工智能与机器人学院教授. 主要研究方向为机器视觉, 图像处理和机器人控制.

E-mail: zhanghuihy@126.com

(ZHANG Hui Professor at the School of Artificial Intelligence and Robotics, Hunan University. His re-

search interests include machine vision, image processing, and robot control.)



王耀南 中国工程院院士, 湖南大学电气与信息工程学院教授. 主要研究方向为机器人学, 智能控制和图像处理.

E-mail: yaonan@hmu.edu.cn

(WANG Yao-Nan Academician at Chinese Academy of Engineering,

professor at the College of Electrical and Information Engineering, Hunan University. His research interests include robotics, intelligent control, and image processing.)