

基于无人系统的非暴露空间自主探测

杨必胜, 孙上哲, 陈驰

1. 武汉大学 测绘遥感信息工程全国重点实验室, 武汉 430079;
2. 武汉大学 时空数据智能获取技术与应用教育部工程研究中心, 武汉 430079

摘要: 非暴露空间指未完全开放环境, 比如室内空间、地下管廊、自然溶洞等。随着城市化进程的加快, 对非暴露空间进行探测的需求不断增加, 意义深远, 但非暴露空间往往具有结构复杂、外援信号拒止、特征退化的环境特点, 为探测带来了挑战。无人系统技术的发展为非暴露空间探测提供了新的解决方案。本文针对非暴露空间探测的挑战, 设计了一种自主空中无人系统, 搭载环视激光雷达具有大视场角, 具备定位与建图、规划、控制等功能模块, 支持未知空间的自主飞行。本文同时提出的一种非暴露空间自主探测方法, 可通过手动或自主方式对已建立的地图给定目标点进行非暴露空间点云建图。此外, 为了验证提出的系统与方法, 在仿真环境与实机环境分别进行检测, 分别达到了 23.94 m³/s 与 53.94 m³/s 的探测效率。综上, 本研究提出的系统与探索测图方法能够实现高效的非暴露空间自主探测, 可服务深地深空探测。

关键词: 非暴露空间, 无人自主测绘, 空中无人系统, 路径规划, 同时定位与建图

中图分类号: TP242/TP79/P2

引用格式: 杨必胜, 孙上哲, 陈驰. 2025. 基于无人系统的非暴露空间自主探测. 遥感学报, 29(6): 2005–2014

Yang B S, Sun S Z and Chen C. 2025. Autonomous non-exposed space exploration based on unmanned system. National Remote Sensing Bulletin, 29(6): 2005–2014 [DOI: 10.11834/jrs.20254330]

1 引言

非暴露空间的概念是相对于开放空间而言, 指未完全开放的环境, 泛指一切未开放或半开放的空间 (Lin 和 Kan, 2022), 如室内空间、城市地下空间、自然溶洞、地外行星非暴露空间等。对非暴露空间进行探测、采集信息意义重大。十四五规划提出要加快建设新型基础设施, 强化数字转型、智能升级、融合创新支撑, 布局建设信息基础设施、融合基础设施、创新基础设施等新型基础设施。建设高速泛在、天地一体、集成互联、安全高效的信息基础设施, 增强数据感知、传输、存储和运算能力。对非暴露空间进行探测, 获取其中的空间信息能够助力中国的新型基础设施建设、强化数字转型 (新华社, 2021)。在民用方面, 获取城市中的非暴露空间的精确数字信息能够支持我国的数字建设, 便于进行空间资产管理;

除此之外, 对非暴露空间探测也能够支持工业基础设施的维护, 支持无死角无人化巡检, 保障其正常运行。在军事领域中, 通常会面临着许多危险的非暴露空间, 在未获取其信息的情况下士兵贸然进入可能会带来不必要的伤亡, 使用无人系统技术对其进行探测实时获取战场非暴露空间信息能够为作战方案提供重要支持。在科学前沿探索中, 对地球上的自然非暴露空间如溶洞、熔岩管等和地外行星非暴露空间进行探测, 获取其空间信息, 提供数据支撑, 推动行星科学的发展。

但是非暴露空间探测技术面临着挑战。随着城市化建设的加快, 城市中的非暴露空间结构越来越复杂, 如城市管廊中存在狭小空间, 在巡检时就面临着人难到达的问题, 存在巡检死角 (<https://www.qttwz.com/newsshow.php?cid=55&id=344> [2024-07-05])。在非暴露空间中, GNSS 等外源定位信号难以获取, 难以依靠外源定位信号进

收稿日期: 2024-08-02; 预印本: 2025-03-12

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 42130105, U22A20568)

第一作者简介: 杨必胜, 研究方向为激光扫描测量与无人机摄影测量、点云智能处理与深度学习、地理空间智能与 GIS 应用。E-mail: bshyang@whu.edu.cn

通信作者简介: 陈驰, 研究方向为无人自主测绘。E-mail: chichen@whu.edu.cn

行定位,同时一些非暴露空间存在退化环境,给自定位造成了挑战。除此之外,非暴露空间内部空间结构复杂,人类贸然进入可能会遇到未知的危险。

无人系统技术的研发为非暴露空间探测提供了新的解决方案。目前中国的无人系统技术研发如火如荼,成熟稳定的无人车、无人机、四足机器人等无人平台已经进入人们的生产生活当中。在一些复杂危险的非暴露空间中,这些无人系统可以替代人类进入工作。无人系统平台通过搭载适应非暴露空间的定位、建图、感知算法在非暴露空间中实现稳定实时的定位与建图,获取非暴露空间的三维地图,同时通过实时通信技术将获得的非暴露空间信息传回控制端,实时获取非暴露空间中的情况。无人机平台作为一种空中无人系统,相比无人车四足机器人等地面无人系统具有独特的优势,可以通过在空中飞行通过一些地面无人系统无法通过的复杂非暴露空间,从而获取全面的空间信息。

目前的非暴露空间探测分为空间信息探测与地质信息探测两种类型。其中对地质信息的探测能够支持科学考察,较早发现地质问题。而对非暴露空间的探测多以智能化的无人系统进行。

早在2010年,格雷格·拜登博士曾探讨了在月球上使用无人系统进行月球上可能存在的非暴露空间探测并据此建立地下基地的可能(Baiden等,2010)。Mascarich等(2018)针对黑暗环境下的非暴露空间探测任务,研制了一款搭载双目视觉、深度相机、惯性测量单元的无人机,在相机成像时配备有闪光灯,可保证在黑暗环境下的非暴露空间探测,但是受限于视觉传感器,探测视角不够大。Li等(2020)针对地下矿道类型的非暴露空间探测,提出了一种搭载深度相机的无人机系统,在控制层面将平面控制和高度控制分开进行。Qi等(2021)设计了一款全向地形自适应的无人车用于地下空间的应急,其搭载避障传感器模块,执行城市地下非暴露空间的搜救任务,代替救援人员进行事件定位、危险物质识别、安全监测任务。布拉格捷克技术大学电气工程学院的Pavel Petráček针对非结构化的洞穴类非暴露空间探测任务,设计了一个包括导航、位姿估计、控制在内的无人机系统,支持在洞穴类环境中的

探测(Petráček等,2021),也支持复杂的室内非暴露空间探测(Krátký等,2021)。

除了使用无人系统对非暴露空间的空间信息进行探测之外,也有研究者对非暴露空间中的地质信息进行探测,中国地质调查局武汉地质调查中心的何军通过地质雷达等对武汉地区的隐伏岩溶区的地下空间的溶区边界、塌陷坑、土层扰动信息进行探测(何军等,2020)。中国地质科学院的王栩等(2021)通过微重力、高密度电法、浅层反射地震、面波勘探、探地雷达等不同地球物理方法对城市地下空间这一类型的非暴露空间进行探测。受传感器等因素的影响,进行非暴露空间探测时通常会遇到视场角受限、定位与建图特征退化等影响。针对这个难点,本研究使用搭载环视激光雷达传感器的无人系统来进行非暴露空间的信息获取。

使用无人系统对非暴露空间进行探测是目前国内外的研究热点。在地面端无人系统方面,Cao等(2021)构建了一个搭载激光雷达无人车平台来执行室内外复杂环境的探索任务。Zhang等(2021)提出了一种用于物料装在任务的自主挖掘机系统,融合激光雷达和可见光相机的数据来进行感知与规划,可适应不同环境。ETH的实验室团队构建了一个功能互补的腿式机器人多机系统(Arm等,2023),用于探索行星模拟环境。除了地面无人系统之外,空中无人系统技术也在持续发展。GRASP实验室设计了一种搭载2D激光雷达的无人机系统(Mohta等,2018),实现在GPS拒止的密集环境下的自主飞行。Kong等(2021)设计了一种搭载FPV相机与激光雷达的无人机系统,实现了对环境中动态目标的避障功能。Zhou(2021)等通过研制无人机自主规划算法,已实现视觉无人机系统在复杂环境下的激进飞行(Gao等,2020),并组建了一个微型空中无人系统集群,实现在竹林下的自主飞行(Zhou等,2022)。武汉大学也已研制出搭载低成本载荷无人机系统(Sun等,2023),可用于在弱GNSS环境下实现稳定位姿估计与建图工作。Chen等(2023)提出一种自旋无人机系统PULSAR,能够利用无人机的自旋来扩展传感器的视场,从而提高无人机的感知能力。虽然国内外对无人系统的研究很多,但是在实际应用中,特别是测绘遥感领域内投入使用的仍比较少,因此亟需开展面向测绘遥感应用的

针对非暴露空间探测的无人系统技术研究。

为了实现非暴露空间的智能化无人探测, 本研究设计了一个基于环视固态激光雷达的空中无人系统, 提出了一种基于自主空中无人系统的非暴露空间探测方法, 包括定位建图、探索规划、控制模块, 并在包含管线的地下停车场走廊这一典型的非暴露空间中测试了提出的系统与方法, 以期为非暴露空间自主探测提供解决方案, 并能够投入实际应用。

2 研究方法

2.1 自主空中无人系统

本文设计了一种面向非暴露空间的自主空中无人系统, 该无人系统包括传感器模块、控制模块、机载计算模块、动力模块、通信模块。其中控制模块可支持探索与手动两种控制模式。本文提出的基于自主空中无人系统运行流程图如图1所示, 包括传感器输入、定位与建图、规划、控制、无人系统共5大部分。其中传感器输入部分使用来

自激光雷达的点云数据和来自飞控的IMU数据, 将其输入给定位与建图部分, 在定位与建图部分使用这些数据对无人系统进行状态估计得到无人系统实时的位姿, 并依据估计的状态结合点云数据进行周围环境的实时建图。在获得无人系统状态和周围环境的地图之后, 将其输入给规划部分, 规划部分依据无人系统状态与所建立的实时地图, 建立占据格网地图, 以此为依据产生初始轨迹, 接着执行一个轨迹优化过程, 将获得的最终轨迹交给轨迹管理器生成飞控可以理解的命令, 随后进入控制部分。在控制部分, 飞控一方面可以使用规划获得的轨迹命令, 另一方面也可以直接通过遥控器直接将手动控制信号输入给飞控进行飞行, 同时在控制部分, 一个桥接结点将无人系统在定位与建图部分获取到的状态信息通过Mavros传递给飞控, 实现无人系统的位姿获取, 来保证稳定的飞行。飞控处理轨迹命令信息后交给无人系统硬件层面的电调, 电调将其转换为电信号控制电机旋转, 最终实现无人系统的自主飞行。

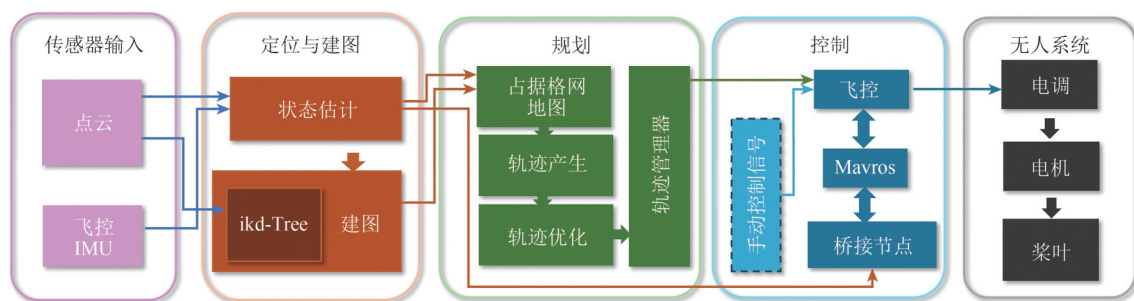


图1 自主空中无人系统运行流程图

Fig.1 Workflow of the proposed autonomous aerial unmanned system

2.2 非暴露空间自主探测方法

基于提出的自主空中无人系统, 本文提出了一种智能化的非暴露空间自主探测方法, 详见图2。非暴露空间探测方法基于提出的自主空中无人系统中的定位与建图部分、规划部分与控制部分, 通过已建立的非暴露空间地图给定目标点或在处于退化环境时基于地面控制站手动控制, 最终获取非暴露空间的点云地图。

在定位与建图方法部分, 本文基于Fast-lid2算法(Xu等, 2022)进行了改进, 以保证规划算法能够建立稳定的占据格网地图。原始Fast-lid2

算法使用迭代卡尔曼滤波器来处理来自点云和IMU数据, 能够在退化、复杂、未知的非暴露空间中实现鲁棒定位, 同时支持快速和激进的飞行状态, 这也是本研究选择基于此算法进行改进的原因。而在其特征提取模块部分, Fast-lid2处理LiDAR输入以识别平面和边缘特征。这些特性与IMU测量相结合, 随后被迭代卡尔曼滤波部分使用, 该模块以10—50 Hz的速率执行状态估计。然后, 估计的姿态将特征点注册到全局框架, 并将其与目前已构建的特征点地图合并。更新后的地图最终用于在下一步中注册更多新点。

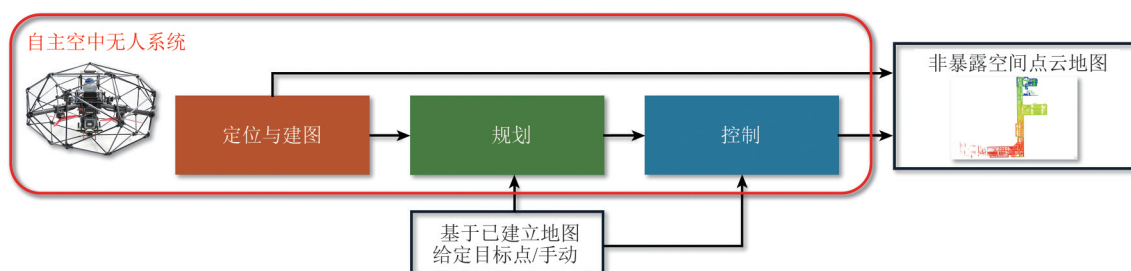


图2 非暴露空间自主探测方法

Fig. 2 The proposed method for non-exposed space exploration

卡尔曼滤波增益 K 是迭代卡尔曼滤波过程中的一个重要量, 用于平衡当前预测值与观测值之间的权重, 以便得到更精确的估计结果。其计算公式如下:

$$K = (H^T R^{-1} H + P^{-1})^{-1} H^T R^{-1} \quad (1)$$

式中, K 为卡尔曼增益, H 为与状态关联的雅可比矩阵, R 为外部参考旋转参数的对角线数组, P 为协方差矩阵。式 (1) 中的卡尔曼增益计算用于在状态估计过程中实现高效计算, 该过程基于状态维度而非测量维度, 达到与测量维度计算相同的效果, 从而避免了大量测量值的计算, 显著提高了计算效率。

数据处理阶段无需提取点云数据的特征, 而是直接利用环境中的特征点与前向传播的 IMU 数据一起进入状态估计过程, 从而降低了计算成本, 提高了精度, 从而将点直接注册到地图上。在地图构建部分, 采用增量式 k-d 树数据结构对地图进行维护, 实现了地图的增量更新和维护。

在得到当前地图前, 本研究添加了一个基于距离筛选的滤除操作, 滤除了其中过近和过远的点。因为这些点可能是由于近处无人系统的机械结构或者远处的反射得到的, 因此称之为非稳定点。通过滤除这些非稳定点, 提升当前地图的稳

定性, 以保证在规划部分能够生成稳定的占据栅格网地图, 从而实现稳定的轨迹生成。

在规划部分, 首先基于细化后的点云地图构建占据栅格导航地图, 然后根据当前状态估计和给定的目标点计算最优轨迹并输出控制指令。本研究使用的规划算法是一种基于梯度的无欧氏符号距离场 (ESDF) 局部规划算法 Ego Planner (Zhou 等, 2021)。欧氏符号距离场可以快速查询障碍物中的梯度和距离信息, 方便规划算法在重新优化部分计算代价函数, 但轨迹优化的过程只需要在范围内的有限空间内更新信息, 因此存在大量冗余计算。本研究采用无欧氏符号距离场的局部规划框架, 通过不断将发生碰撞的轨迹与无碰撞的引导路径进行比较, 在惩罚函数中生成碰撞惩罚项, 并仅当生成的轨迹遇到新障碍物时存储得到的障碍物信息来实现。在轨迹生成部分, 采用经典的 A* 算法 (Hart 等, 1968) 生成初始轨迹。在轨迹优化部分, 通过设置并计算平滑性惩罚项 $\mathcal{I}_s$ 、动力学可行性惩罚项 $\mathcal{I}_d$ 、避障惩罚项 $\mathcal{I}_o$ 来得到成本函数 $\mathcal{I}_c$, 再通过梯度下降不断更新轨迹曲线、碰撞检测而实现轨迹优化的过程, 最终经过时间重分配实现轨迹细化获得最优轨迹。算法过程如图 3。

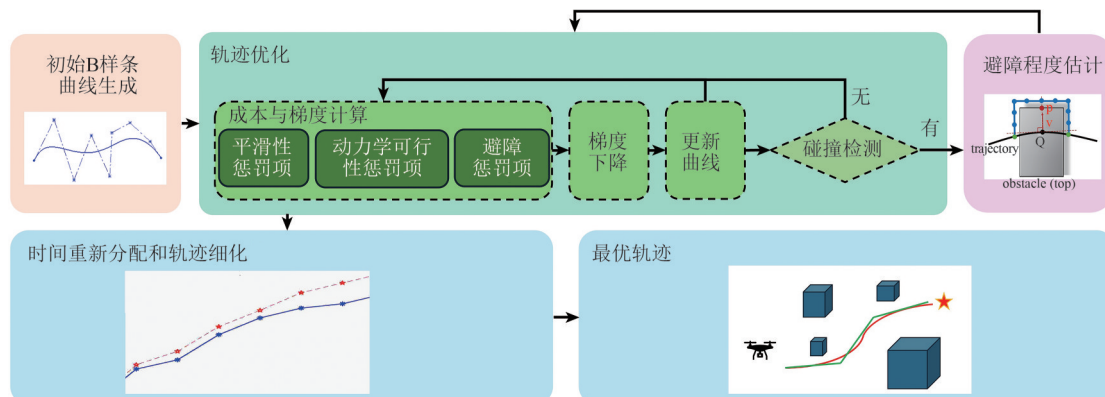


图3 规划算法部分流程图

Fig. 3 Flowchart of the planning algorithm part

成本函数计算如下:

$$\mathcal{I}_t = \mathcal{I}_s + \mathcal{I}_d + \mathcal{I}_c \quad (2)$$

在控制部分, 本研究通过里程计的桥接结点, 将定位与建图算法部分输出的状态信息通过Mavros直接发送到自主空中无人系统的飞控, 获取当前位置信息。本研究编写了一个支持两种控制模式的控制算法节点, 既可以支持手动控制模式, 也可以支持规划控制模式, 实现无人机控制模式的一键切换, 从而在非暴露空间探测过程中保证飞行的稳定性, 实现稳定的非暴露空间探测。

3 验证结果与分析

为了验证本研究提出的自主空中无人系统和非暴露空间探测方法, 本研究利用仿真场景与实

际场景分别进行了验证。

3.1 仿真非暴露空间自主探测

为了保证实机实验的安全性、验证提出算法的有效性, 本研究首先基于XTDrone无人机仿真环境(Xiao等, 2020)的实验条件选取了一个典型室内场景的仿真环境Indoor1, 设置该仿真环境处于GNSS拒止的环境条件下, 这意味着仿真实验需要在无外源定位的条件下进行, 贴近实际的非暴露空间环境, 详见图4。

仿真实验使用的无人机为PX4固件支持的无人机Iris, 其中通信方式为基于PX4的软件在环。无人机搭载Intel RealSense D455仿真模块, 能够在仿真环境中获取可见光影像、深度影像。



图4 GNSS拒止条件下的仿真环境与无人机

Fig. 4 Simulation environment and simulation UAV under GNSS denial conditions

在仿真实验中, 本研究使用仿真无人机iris的IMU与其上搭载的仿真的Intel RealSense D455相机输出的深度图像, 深度图像数据类似激光雷达的3D点云数据, 可以用于在仿真实验中验证本文提

出的非暴露空间自主探测方法。

在验证过程中, 将仿真无人机放置到仿真环境中, 通过软件在环的通信模式控制无人机起飞, 然后依次启动定位与建图、规划、控制模块, 使

仿真无人机能够获取未知空间中的全部空间信息，并将点云地图保存下来。

获得的仿真环境中的点云地图如图5所示。

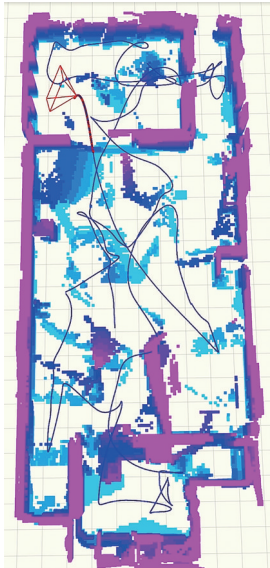


图5 仿真实验建图结果
Fig. 5 Result of simulation experiment

经过定量计算，在仿真场景中，在本文设计的非暴露空间探测方案下仿真无人机系统飞行时间为112.77 s，平均速度为1.15 m/s，飞行路径长度为130.7 m，仿真实验场地大小为45 m×20 m×3 m，探测效率为23.94 m³/s。

表1 自主空中无人系统硬件描述

Table 1 Hardware description of the proposed autonomous aerial unmanned system

硬件名称	描述	用途	硬件名称	描述	用途
激光雷达	视场角 360°×59°，近处盲区 0.1 m，点频 20 万点/s	传感器模块。获取激光点云数据	电机	1350 kv	动力模块，提供无人系统起飞的动力
机载计算机	算力 21 TOPS，内存 16 GB	机载计算模块。运行定位建图算法、规划与控制算法	桨叶	7 寸 3 叶桨	动力模块，提供升力
飞控	STM32H743 处理器，2 MB 闪存，1 MB 内存	控制模块。无人系统的 PID 控制	航模电池	5000 mAh	动力模块，提供能源
电调	四合一	控制模块。控制信号转为电信号	数传	工作频段 5.1 G—5.9 GHz，地空无遮挡传输距离 2—4 km	通信模块，为地面控制端提供通信
450 机架	轴距 450 mm，质量 272 g	组成无人系统机身	防撞网	碳纤维	在飞行过程中防撞

在仿真实验已经得到验证的条件下，本文基于图6中提出的自主空中无人系统，开展了实机实验。本研究在武汉大学星湖实验大楼选取了地下停车场的一部分空间作为实验场地，这部分试验场地包含走廊、输送管道、房间等复杂结构，实机实验场地位于负一层，处于GNSS信号拒止环境

仿真实验的结果说明本文提出的方法在保证无人机稳定飞行的条件下能够初步地实现高效的无人化非暴露空间探测，这为开展实机实验提供了技术基础与安全保障。

3.2 实机非暴露空间自主探测

实机实验中使用的自主空中无人系统的硬件组成如图6所示，其基本飞行结构由450机架、防撞网、电机、桨叶、航模电池、飞控组成，其上搭载激光雷达、机载计算机，用于对周围环境进行定位、感知规划算法计算。

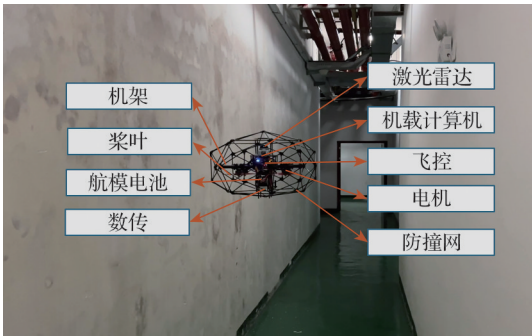


图6 实验中的自主空中无人系统及其结构组成
Fig. 6 Autonomous aerial unmanned system and its structural composition in experiments

硬件的具体模块归属、参数指标与具体应用如表1所示。

条件下，满足非暴露空间的实验条件，具体的实验环境如图7所示。

本研究在靠近电梯的位置放置自主空中无人系统，将其作为实验的起始位置。在此位置上，启动算法，通过给定目标点的方式使自主空中无人系统在实验区域内完成自主飞行建图。实验验

证过程中, 自主空中无人系统能够实现稳定的飞行。如图8所示, 本文提出的自主空中无人系统能

够稳定的通过门、狭窄的甬道、未知的房间等典型的非暴露空间场景。

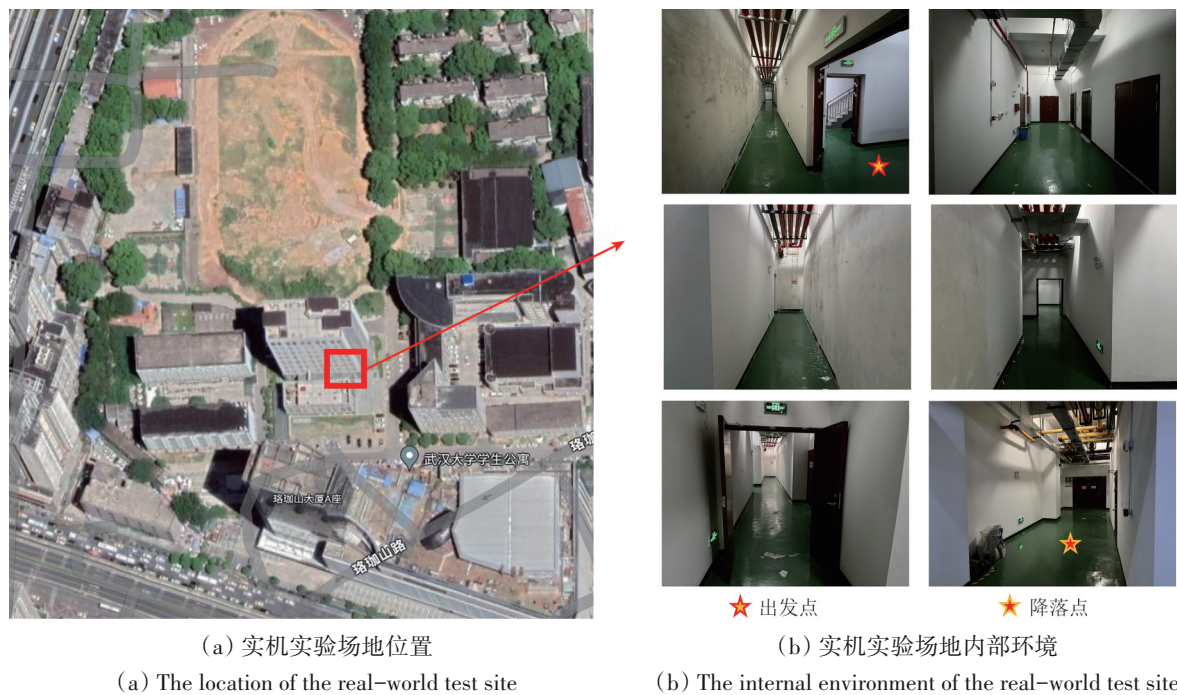


图7 地下停车场部分实验场地
Fig.7 Part of the experimental site in the underground parking lot

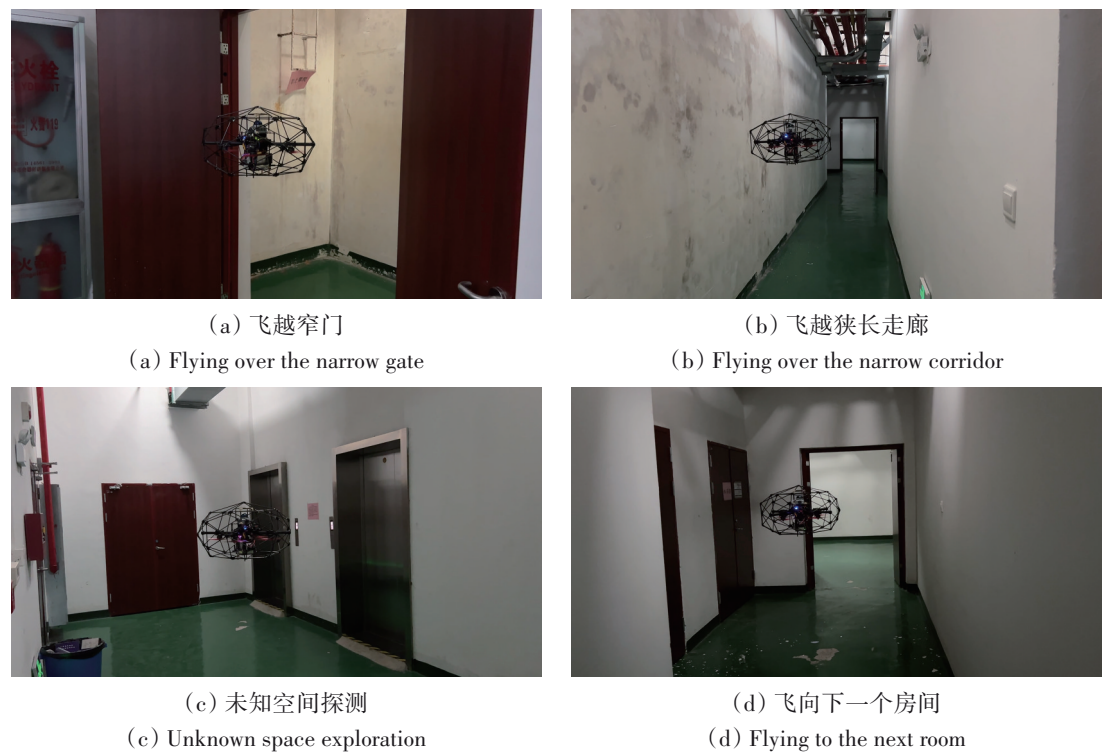
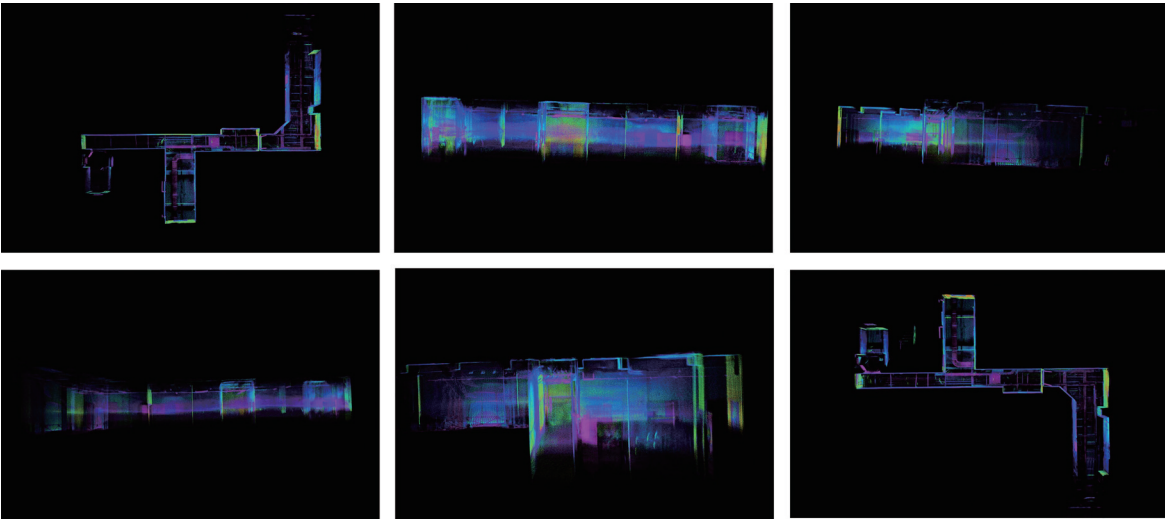


图8 自主空中无人系统在非暴露空间中稳定飞行
Fig. 8 Autonomous aerial unmanned system flies stably in non-exposed space

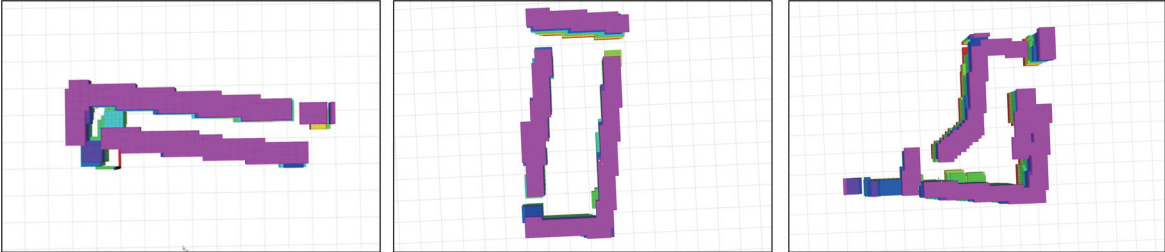
自主无人系统对非暴露空间场景探测完毕后, 即可实时得到空间的点云地图。实验最终获得实验区域的点云地图与实验过程中获取的周围障碍

物地图, 如图9所示, 其中: 图9 (a) 为建立的点云地图的不同视角; 图9 (b) 为自主过程中建立的障碍物地图。



(a) 不同视角的点云地图

(a) Point cloud maps from different perspectives



(b) 不同视角的障碍地图

(b) Obstacle maps from different perspectives

图9 实机实验建图结果

Fig. 9 Real-world experimental mapping results

经过定量分析，在整个实机实验过程中，自主空中无人系统在非暴露空间自主探测完成的有效飞行时间为16.3 s，探测得到的有效非暴露空间体积经计算为879.2 m³，实机探测效率为53.94 m³/s。

实验结果如表2。可见不论在仿真环境下的实验还是实际的非暴露空间场景的测试中，本文提出的方案均能达到20 m³/s以上的探测效率。其中实机非暴露空间探测实验的探测效率较仿真实验有显著提升，其中一个重要的原因在于仿真实验使用的是视场角有限的深度相机，而实机实验使用本文提出的自主空中无人系统，其上搭载360°×59°的视场角的环视激光雷达，能够显著提升数据获取能力，从而实现探测效率的提升。

表2 非暴露空间自主探测实验定量结果

Table 2 Quantitative results of non-exposed space exploration experiments

实验类型	非暴露空间探测体积/m ³	自主探测效率/(m ³ /s)
仿真实验	2700.0	23.94
实机实验	879.2	53.94

4 结 论

针对非暴露空间结构复杂、GNSS拒止、环境特征退化的难点，本文设计了一种自主空中无人系统，并基于此提出了一种非暴露空间探测方法。本研究使用环视激光雷达作为自主空中无人系统的主要传感器，通过扩展其获取数据的视场角从而提升数据获取效率，同时避免在非暴露空间中因数据稀疏而遇到特征退化的情况。除此之外，本研究为提出的自主空中无人系统设计了合理的算法模块，包括定位与建图、规划、控制算法模块，其中控制部分可实现自主和手动两种模式。基于自主空中无人系统的软件层逻辑，本研究提出了一种非暴露空间探测方法，用于获取非暴露空间的点云地图，实现对非暴露空间的探测。

本研究在仿真与实机场景下分别进行了验证实验。验证结果表明，本研究提出的方法在非暴露空间探测过程中是可行的，实机实验达到了53.94%的探测效率，这充分说明了本文所提出的

系统与方法能够实现对非暴露空间的高效探测, 具有广阔的应用前景。今后的研究工作将在基于目标的视点产生方面进行进一步的探索, 提升无人系统的智能化程度, 实现非暴露空间的智能化探测。

志 谢 此次实验获得了武汉大学星湖实验大楼工作人员的支持, 向他们表示感谢!

参考文献(References)

- Arm P, Waibel G, Preisig J, Tuna T, Zhou R Y, Bickel V, Ligeza G, Mi-ki T, Kehl F, Kolvenbach H and Hutter M. 2023. Scientific exploration of challenging planetary analog environments with a team of legged robots. *Science Robotics*, 8(80): eade9548 [DOI: 10.1126/scirobotics.ade9548]
- Baiden G, Grenier L and Blair B. 2010. Lunar underground mining and construction: a terrestrial vision enabling space exploration and commerce//Proceedings of the 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Orlando: AIAA [DOI: 10.2514/6.2010-1548]
- Cao C, Zhu H B, Choset H and Zhang J. 2021. Exploring large and complex environments fast and efficiently//Proceedings of 2021 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Xi'an: IEEE: 7781-7787 [DOI: 10.1109/ICRA48506.2021.9561916]
- Chen N, Kong F Z, Xu W, Cai Y X, Li H T, He D J, Qin Y M and Zhang F. 2023. A self-rotating, single-actuated UAV with extended sensor field of view for autonomous navigation. *Science Robotics*, 8(76): eade4538 [DOI: 10.1126/scirobotics.ade4538]
- Gao F, Wang L Q, Zhou B Y, Zhou X, Pan J and Shen S J. 2020. Teach-repeat-replan: a complete and robust system for aggressive flight in complex environments. *IEEE Transactions on Robotics*, 36(5): 1526-1545 [DOI: 10.1109/TRO.2020.2993215]
- Hart P, Nilsson N and Raphael B. 1968. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, 4(2): 100-107 [DOI: 10.1109/TSSC.1968.300136]
- He J, Liu L, Li Q H, Liu D H, Chen B D, Zhang A and Zhao Y B. 2020. Techniques for detecting underground space in hidden karst region: taking Wuhan as an example. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 47(6): 47-56 (何军, 刘磊, 黎清华, 刘道涵, 陈标典, 张傲, 赵永波. 2020. 隐伏岩溶区地下空间探测技术方法研究——以武汉市为例. *水文地质工程地质*, 47(6): 47-56) [DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202007066]
- Kong F Z, Xu W and Zhang F. 2021. Avoiding dynamic small obstacles with onboard sensing and computing on aerial robots *IEEE Robotics and Automation Letters*, 6(4): 7869-7876 [DOI: 10.1109/LRA.2021.3101877]
- Krátký V, Petráček P, Báča T and Saska M. 2021. An autonomous unmanned aerial vehicle system for fast exploration of large complex indoor environments. *Journal of Field Robotics*, 38(8): 1036-1058 [DOI: 10.1002/rob.22021]
- Li H, Savkin A V and Vucetic B. 2020. Autonomous area exploration and mapping in underground mine environments by unmanned aerial vehicles. *Robotica*, 38(3): 442-456 [DOI: 10.1017/S0263574719000754]
- Lin L Z and Kan Z F. 2022. Research on digital transparency technology system of non-exposed space. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4186608>
- Mascarich F, Khattak S, Papachristos C and Alexis K. 2018. A multi-modal mapping unit for autonomous exploration and mapping of underground tunnels//Proceedings of 2018 IEEE Aerospace Conference. Big Sky: IEEE: 1-7 [DOI: 10.1109/AERO.2018.8396595]
- Mohta K, Watterson M, Mulgaonkar Y, Liu S K, Qu C, Makineni A, Saulnier K, Sun K, Zhu A, Delmerico J, Karydis K, Atanasov N, Loianno G, Scaramuzza D, Daniilidis K, Taylor C J and Kumar V. 2018. Fast, autonomous flight in GPS-denied and cluttered environments. *Journal of Field Robotics*, 35(1): 101-120 [DOI: 10.1002/rob.21774]
- Petráček P, Krátký V, Petrlik M, Báča T, Kratochvíl R and Saska M. 2021. Large-scale exploration of cave environments by unmanned aerial vehicles. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 6(4): 7596-7603 [DOI: 10.1109/LRA.2021.3098304]
- Qi L F, Zhang T S, Xu K, Pan H Y, Zhang Z T and Yuan Y P. 2021. A novel terrain adaptive omni-directional unmanned ground vehicle for underground space emergency: design, modeling and tests. *Sustainable Cities and Society*, 65: 102621 [DOI: 10.1016/j.scs.2020.102621]
- Sun S, Chen C, Wang Z, Zhou J, Li L, Yang B, Cong Y and Wang H. 2023. Real-time UAV 3D image point clouds mapping. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, X-1/W1-2023: 1097-1104 [DOI: 10.5194/isprs-annals-X-1-W1-2023-1097-2023]
- Wang X, Wang Z H, Chen C X, Wang H and Yan J Y. 2021. Geophysical exploration and application for urban underground space. *Progress in Geophysics*, 36(5): 2204-2214 (王栩, 王志辉, 陈昌昕, 王昊, 严加永. 2021. 城市地下空间地球物理探测技术与应用. *地球物理学进展*, 36(5): 2204-2214) [DOI: 10.6038/pg2021EE0497]
- Xiao K, Tan S C, Wang G H, An X Y, Wang X and Wang X K. 2020. XTDrone: a customizable multi-rotor UAVs simulation platform//Proceedings of 2020 4th International Conference on Robotics and Automation Sciences (ICRAS). Wuhan: IEEE: 55-61 [DOI: 10.1109/ICRAS49812.2020.9134922]
- Xinhua News Agency. 2021. Outline of the 14th Five-Year Plan for national economic and social development and the long-range objectives through the year 2035 for People's Republic of China[EB/OL]. [2024-07-31]. https://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm (新华社. 2021. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要[EB/OL]. [2024-07-31]. https://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm)

- 5592681.htm)
- Xu W, Cai Y X, He D J, Lin J R and Zhang F. 2022. FAST-LIO2: fast direct LiDAR-inertial odometry. *IEEE Transactions on Robotics*, 38(4): 2053-2073 [DOI: 10.1109/TRO.2022.3141876]
- Zhang L J, Zhao J X, Long P X, Wang L Y, Qian L F, Lu F X, Song X B and Manocha D. 2021. An autonomous excavator system for material loading tasks. *Science Robotics*, 6(55): eabc3164 [DOI: 10.1126/scirobotics.abc3164]
- Zhou X, Wang Z P, Ye H K, Xu C and Gao F. 2021. EGO-planner: an ESDF-free gradient-based local planner for quadrotors. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 6(2): 478-485 [DOI: 10.1109/LRA.2020.3047728]
- Zhou X, Wen X Y, Wang Z P, Gao Y M, Li H J, Wang Q H, Yang T K, Lu H J, Cao Y J, Xu C and Gao F. 2022. Swarm of micro flying robots in the wild. *Science Robotics*, 7(66): eabm5954 [DOI: 10.1126/scirobotics.abm5954]

Autonomous non-exposed space exploration based on unmanned system

YANG Bisheng, SUN Shangzhe, CHEN Chi

1. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

2. Engineering Research Center for Spatio-Temporal Data Smart Acquisition and Application, Ministry of Education of China, Wuhan 430079, China

Abstract: Non-exposed spaces, such as indoor environments, underground utility tunnels, and natural caves, are partially enclosed areas that have gained increasing attention as urbanization progresses. This growing demand for exploration has significant implications. Investigating these spaces and acquiring spatial information within them can support the development of new infrastructure and facilitate digital transformation. However, exploring non-exposed spaces presents several challenges due to their complex structures, signal isolation from external sources, and degraded conditions. In such spaces, external positioning signals, such as GNSS, are often unavailable, complicating the reliance on these signals for localization. Additionally, many non-exposed spaces suffer from degraded environmental conditions, which further hinder self-localization. The intricate internal structures of these spaces also pose safety risks for human entry. The advancement of unmanned systems technology presents a promising solution to these challenges. To address these issues, we designed an autonomous aerial unmanned system equipped with panoramic LiDAR, providing a wide field of view, and integrated with modules for localization, mapping, planning, and control, enabling autonomous flight in uncharted spaces. The system consists of five main components: sensor input, localization and mapping, planning, control, and the unmanned system itself. Sensor data from LiDAR and IMU are utilized for state estimation and real-time mapping. The system generates an occupancy grid map for trajectory planning, followed by optimization. Commands are then sent to the flight controller, which integrates manual and planned inputs to maintain stable flight. The system's pose is monitored through Mavros, ensuring autonomous flight by controlling the motors via ESCs. Additionally, we propose a method for autonomous exploration of non-exposed spaces that involves point cloud mapping based on manually or autonomously assigned target points on a pre-established map. To validate the proposed autonomous aerial unmanned system and exploration method, we conducted experimental verifications in both simulated and real-world scenarios. We first selected a typical indoor scenario, "Indoor1," within the XTDrone simulation environment under GNSS-denied conditions. The simulation utilized the Iris drone, supported by PX4 firmware with PX4 software-in-the-loop communication, and an Intel RealSense D455 simulation module for capturing visible and depth images. The simulation results demonstrated a detection efficiency of 23.94 m³/s using the proposed exploration method. Subsequently, real-world experiments were conducted in a section of an underground parking lot at Wuhan University's Xinghu Experimental Building. The autonomous aerial unmanned system demonstrated stable flight, achieving a detection efficiency of 53.94 m³/s in complex environments, such as corridors, pipelines, and rooms. The experimental results confirm the feasibility of the proposed method. Real-world experiments achieved an exploration efficiency exceeding 50% m³/s, validating the system's capability to efficiently explore non-exposed spaces. This demonstrates the significant potential of the system for future applications. Further research will focus on viewpoint generation based on specific targets to enhance the system's intelligence, enabling intelligent exploration of non-exposed spaces. This will improve the system's autonomy and adaptability in complex environments.

Key words: non-exposed space, unmanned autonomous mapping, aerial unmanned system, path planning, SLAM

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 42130105, U22A20568)