本文已被接受发表于（ISER 2025）。

arXiv:2603.00972v1 [cs.RO] 1 Mar 2026

MiniUGV$_2$：一款具备操作能力的紧凑型可由无人机部署的履带式地面车辆

Durgakant Pushp[1], Swapnil Kalhapure[2],Shaekh Mohammad Shithil[1],和 Lantao Liu[1]

摘要。探索与巡检隐蔽空间（定义为入口仅可供空中机器人进入，但由于几何约束、有限的飞行时间和通信中断而仍未被探索的环境）仍是一项重大挑战。我们提出miniUGV$_2$，，一款紧凑型可由无人机部署的履带式地面车辆，可将无人机的能力延伸至受限环境。该系统引入了双关节机械臂、集成的激光雷达与深度感知，以及用于增强自主性的模块化电子系统。一种带有电永磁头的新型系绳模块可实现安全部署、回收和可选脱离，从而克服以往的缠绕问题。实验证明了其稳健的地形导航、自行扶正以及对重达3.5 kg物体的操作能力，验证了miniUGV$_2$作为空地混合机器人通用平台的价值。

关键词： 隐藏空间探索 · 空地机器人 · 系留部署 · 机器人巡检与操作 [1]

1 引言

对于自主机器人而言，探索和检查复杂、受限的环境仍是一项重大挑战，例如地震后倒塌的建筑物 [1–3], 岩石爆破现场 [4, 5], 以及地下涵洞 [6, 7] 。地面机器人擅长穿越崎岖地形并执行操作任务，但往往缺乏抵达待检查区域高处或受阻入口的机动能力。相反，空中机器人能够迅速抵达此类地点，但受到载荷能力和飞行续航的限制。探索或检查我们所称的隐蔽空间时，会面临一项关键挑战：其入口只有飞行机器人能够抵达，但受几何约束（如狭窄入口）、飞行时间有限、通信退化以及内部可通行性未知等因素影响，飞行机器人无法对内部进行全面探索。这些场景需要一种空地混合系统，将无人机的可达性与地面机器人的探索和操作能力结合起来。

现有的无人机-无人地面车辆协同框架通常将地面机器人视为主系统，仅把无人机当作“飞行传感器”，但这种方法未能充分应对隐藏空间带来的挑战。我们此前的工作 [8] 提出了一种反直觉的系统，颠倒了这一层级关系：由无人机充当主控主体，部署一台微型地面机器人，在受限环境中执行检查和操作任务。尽管这一系统前景可观，但仍存在若干局限：miniUGV 的尺寸和传感器能力不足，无法胜任更复杂的检查和

[1]印第安纳大学布卢明顿分校卢迪信息学、计算与工程学院，美国印第安纳州布卢明顿，邮编 47408。电子邮件： {dpushp, sshithil, lantao}@iu.edu。 [2]S. Kalhapure 在本文研究期间为独立研究人员。电子邮件：swapnil.kalhapure@outlook.com。作者感谢美国陆军工程研发中心提供资助，资助编号为 # W912HZ2320003。



图1. 无人机-微型无人地面车辆系统示意图：左图和右图展示了设计的 miniUGV_2，即 miniUGV [8] 的改进版本。中间图展示了主机器人和次级机器人，以及系绳模块。

操作任务；它始终通过系绳连接到无人机，限制了其自主性；而系绳机构采用的简单电机-滑轮系统经常出现系绳缠绕电机轴的问题，尤其是在收放系绳时遇到无人机横滚与俯仰机动的情况下。

为解决这些局限，我们推出了 *miniUGV_2*：一种紧凑型、可由无人机部署的履带式地面车辆，具备先进的传感与操作能力。这款新原型配备了两条可独立控制、完全关节化的机械臂，可进行 360 度操作；一个基于吸力的夹爪，可灵活搬运物体；可寻址 LED 前灯，提升低光照环境下的可视性；以及集成的二维激光雷达和深度传感器，以增强自主性。此外，新型系绳模块配备了电永磁头，使无人机能够按需部署和回收 miniUGV_2，支持连接模式（无人机与 miniUGV 通过系绳保持连接）和分离模式（系绳脱开，两个平台独立运行）。

本文的主要贡献包括：

1. **紧凑型 miniUGV_2:** 我们设计并制作了一款履带式地面车辆原型，在保持无人机可部署性的同时，融入了先进的操作与感知能力。我们还提供了复现所需的全部资源。2. **带主动系绳头的系绳模块：** 我们开发了一种新型系绳模块，使用单个执行器同时控制系绳转子和系绳导向器。系绳头配备电永磁体（EPM），可通过 WiFi 激活或停用，使无人机能够按需连接或分离 miniUGV_2。3. **软件集成框架：** 我们提供了一种软件架构，将无人机、系绳滑轮机构和磁性系绳头集成于 ROS 框架中，并辅以基于 MuJoCo 的无人机–系绳–模块仿真器。这一组合使研究人员能够测试核心功能、原型化控制与学习算法，并为弥合概念设计与真实空地部署之间的差距奠定基础。

通过将功能更强大的 miniUGV_2 、创新的磁性系绳头和高保真仿真平台相结合，我们提出的系统显著提升了无人机-地面机器人团队的作业能力。补充材料包括

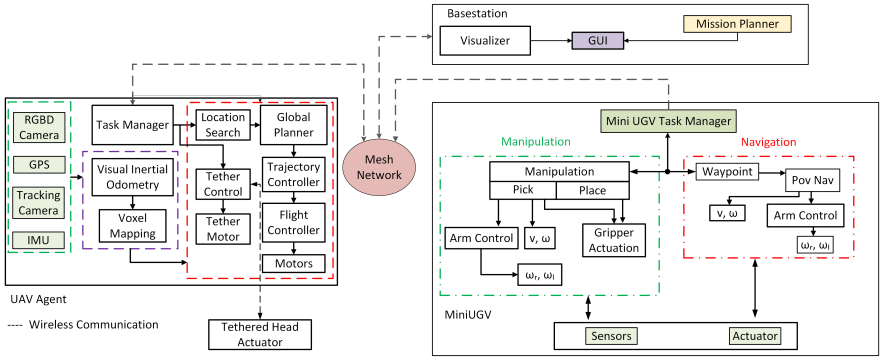


图2. 用于协同探索的无人机-miniUGV 平台系统架构。无人机配备了完整的传感器套件，用于对环境进行三维建图，并寻找适合部署 miniUGV 的潜在区域。随后，无人机使用磁性系绳头自主部署和回收机器人。miniUGV 配有用于操作和崎岖地形导航的关节臂。两台机器人通过 WiFi 网络共享轨迹信息，基站则发送高级任务指令。

软件和仿真环境，可在以下网址公开获取：https://github.com/Dpushp/drone-deployable-miniUGV2。

2 系统概述

所提出的系统由三个核心组件构成：无人机、带有主动系绳头的系绳模块，以及一辆微型地面车辆。在我们先前工作的基础上 [8]，我们利用并扩展了无人机和系绳模块现有的自主系统架构，使其适应增强型 miniUGV$_2$部署与回收带来的新要求。

如图2所示，无人机通过扫描部署区域并在隐藏空间 入口附近寻找适合 miniUGV$_2$通行的表面来启动任务。找到合适的部署地点后，无人机启动系绳模块，释放系绳，直至 miniUGV$_2$ 到达地面或接近地面至安全距离。miniUGV$_2$ 的设计确保其能够以任意朝向有效运行，并在部署过程中翻转时进行自我纠正。因此，只要 miniUGV$_2$ 足够接近地面以确保安全着陆，就可以随时决定断开系绳。为此，我们对断开系绳前 miniUGV$_2$与地平面之间的最小距离施加硬约束，以确保部署安全。无人机利用 RGB-D 相机对环境进行建图、定位部署区、监测 miniUGV$_2$ 下降和着地的过程，并估计其精确着陆位置。部署完成后，miniUGV$_2$ 转入自主运行模式，采用基于图像的规划与控制方法在隐藏空间内导航。

完成地面作业后，miniUGV$_2$ 驶出隐藏空间，并请求无人机将其回收。无人机在视觉伺服算法的引导下，对准系绳连接点上方并释放系绳。系绳头内的电永磁体可在接触时自动吸附到 miniUGV$_2$ 上。

最后，无人机收回 miniUGV$_2$ 并将其运回基地。详细 d
系统的自主与控制策略将在以下小节中详细阐述。

2.1 无人机自主系统架构

无人机作为负责部署与回收 miniUGV$_2$的主要执行体。其自主系统架构改编自我们先前的工作 [8]，现已扩展，以适应动态隐藏空间的部署场景。该自主系统架构包含 3 个核心组件：1. 基于传感器融合的定位；2. 规划与控制；3. 小型无人地面车辆的部署与回收。

无人机配备了全球定位系统、RGB-D 和跟踪相机，用于基于传感器融合的定位。我们采用视觉惯性导航系统（VINS）融合方法对无人机进行定位 [9] 。体素地图构建模块创建环境的稠密三维地图。全局规划器以高层级任务规划为输入，生成通往任务目标的可行路径。全局路径由 B样条轨迹生成模块执行，该模块为无人机生成动态可行的路径。基于 PID 的轨迹跟踪控制器跟踪 B 样条轨迹。部署位置搜索模块根据地形高程和图像分割结果寻找合适的位置。

识别出合适的部署区域后，无人机启动系绳模块，在保持飞行稳定性的同时谨慎地将 miniUGV$_2$ 缓缓放下。基于 PID 的速度控制器调节系绳释放速度，确保下降过程受控。在部署期间，无人机继续利用实时感知数据监测环境和 miniUGV$_2$ ，以实现安全、精准的着地。miniUGV$_2$完成地面作业后，无人机切换至回收模式。它通过视觉伺服重新对准系绳连接点上方的位置，并释放系绳以重新连接 miniUGV$_2$。系绳头内的电永磁体确保可靠地重新连接。连接牢固后，无人机收回系绳，将 miniUGV$_2$ 吊起，完成任务。

2.2 miniUGV$_2$自主性

miniUGV$_2$ 部署后可在隐藏空间内自主运行。它配备了机载计算平台，可执行基于图像的规划与控制算法，从而能够在复杂且受限的环境中导航。自主系统架构利用 RGB-D 和激光雷达传感器生成局部环境地图，并识别可通行区域。路径规划采用 POVNav 框架 [10, 11], 的一种变体，该变体基于表面法向估计，将环境划分为可导航区域和不可导航区域。随后，miniUGV$_2$ 选择能够最大化区域覆盖率且避开障碍物的安全轨迹。低层控制器通过视觉伺服将规划路径转换为电机指令。

为增强在不平坦地形上的机动性，机械臂控制器 模块会估算周围环境中最高峰的高度，并计算相对于 miniUGV$_2$ 车体的局部坡度。随后，它会相应地调整关节机械臂角度，以便更平稳地通过地形。若要实现完整的系统部署，则需要采用更复杂的控制方法，明确考虑地形可通行性 [12、车轮-地面相互作用及牵引力 [16]；而此原型实现采用了较简单的控制策略，以满足当前需求。

运行期间，miniUGV$_2$ 会定期评估自身相对于隐藏空间出口的位置，以确保能够返回并等待回收。探索任务完成后，或达到预设的时间或能量预算后，miniUGV$_2$ 会导航返回出口，并向无人机发出回收信号。

2.3 系绳模块控制

系绳模块负责 miniUGV$_2$ 的受控部署与收回。它由单个执行器组成，可同时管理系绳转子和系绳导向器，从而简化机械复杂度并确保可靠运行。基于 PID 的速度控制器调节执行器速度，保持稳定的部署速率，以适应动态的无人机运动。

我们提出一种位置跟踪系统，用于跟踪被系绳连接的模块，以实现精确的部署与回收操作。该系统融合深度点云与系绳转子编码器反馈，估计系绳头部相对于无人机的位置，如图 3 所示。它使用欧几里得聚类 DBSCAN 算法 [17]进行实时跟踪。它通过在感兴趣区域内选择最居中且最近的聚类，并估计质心来确定位置，从而识别 miniUGV。在发生视觉遮挡时，系绳编码器可提供准确的垂直位置反馈，使系统在非结构化环境中具有鲁棒性。

系绳头配备了一个电永磁体，可通过无人机机载计算机发送的 WiFi 指令激活或停用。回收时，无人机通过视觉伺服与 miniUGV$_2$ 的连接点对齐，并释放系绳，使磁性头部能够自主重新吸附。需要注意的是，该重新吸附

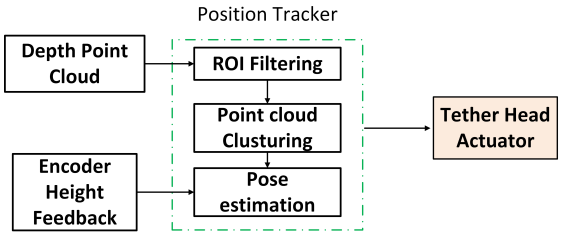
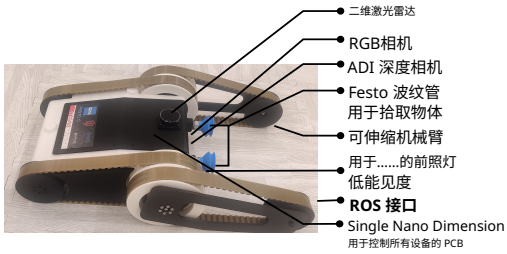


图 3. 系绳头部位置跟踪概览。

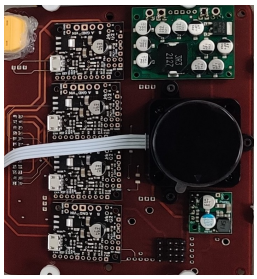
过程要求头部精确定位，因此由于其复杂性，目前尚未在真实户外环境中得到验证；因此，该问题被视为未来工作的独立课题。确认吸附后，系绳模块收回系绳，将 miniUGV$_2$ 拉回，以完成操作。

3 硬件系统实现

本节详细介绍所提系统的硬件实现，旨在确保结果可复现，并推动未来研究。主机器人选用市售无人机平台，且需满足两项关键要求：载荷能力至少为 6 kg，安装区域大于 350mm ×350mm。这些规格确保系统能够兼容 DJI Matrice 600 [18],等广泛使用的无人机型号，这些型号具备足够的载荷能力和物理空间，可将次级机器人作为有效载荷搭载。或者，任何满足这些要求的定制无人机也可用作主机器人。本节其余部分将介绍微型地面车辆和系绳模块的原型设计细节；二者均可轻松集成到任何符合要求的无人机平台，从而构成完整系统。



(a) miniUGV_2



(b) 设计电路板

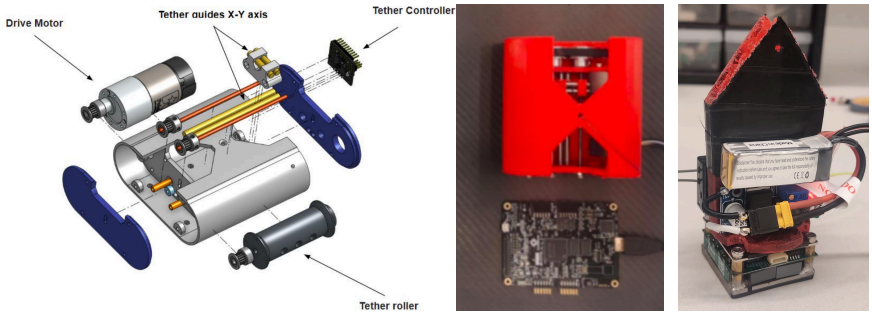
图 4. (a) 组装完成的 miniUGV_2，展示了其各项功能，突显其紧凑尺寸，以及集成的传感器和夹爪机构。(b) 展示了设计的电路板及操作 miniUGV_2 所需的所有电子元件。

3.1 次级机器人（miniUGV_2）

设计。 miniUGV_2 采用模块化方案，以满足尺寸限制并容纳自主运行所需的传感器。紧凑的底盘和模块化底盖便于集成各种载荷，例如夹爪、深度相机、RGB相机和定位相机。模块化设计使底盖能够轻松更换为搭载不同载荷的底盖，无需彻底重新设计机器人。此外，采用加长关节臂，使 miniUGV_2 能够在崎岖地面上行驶，同时仍符合规定的尺寸限制。为优化 miniUGV_2的设计，采用了前轮自由配置，以便安装用于控制关节臂的电机。将电机巧妙地布置在前轮内，为底盖腾出更多空间，从而便于集成各种载荷。这一设计提升了 miniUGV_2的整体功能性和紧凑性，使其非常适合执行预定任务。

集成电路板设计。miniUGV_2 机器人平台采用定制设计的6层印刷电路板（PCB），符合行业标准并优化了功能。电路板配备四个电机驱动器、三个稳压器以确保可靠运行，并具备二维激光雷达、LED接口、SD卡插槽、开放式5V电源、微控制器接口和I^2C通信端口等关键功能。

软件开发：从底层控制到***ROS API***。miniUGV_2 的软件开发过程涵盖底层控制以及机器人操作系统（ROS）API的开发。在底层控制方面，开发了固件以与微控制器对接，从而实现对硬件组件的直接控制，并实现电机控制算法、传感器数据采集和通信协议。该固件经过优化，以实现高效的资源利用和实时响应。随后，开发过程转向将miniUGV_2系统与ROS框架集成。开发ROS API使该平台能够兼容各种兼容ROS的工具和库，从而与其他机器人系统无缝集成，并实现更高层次的功能。miniUGV_2 平台左右两侧各配备7个可寻址LED，这些LED可通过已定义的话题进行控制。该功能可增强机器人在黑暗环境中的可见性，并为传感器、泵驱动和机械臂运动提供状态指示器。此外，



(a) 系绳模块 (b) 系绳头

图 5. (a) 左侧展示了系绳模块的设计，右侧展示了实际原型（使用红色聚乳酸材料进行 3D 打印）以及系绳控制机载计算机。(b) 展示了磁性系绳头。这是一个完全自主、支持 ROS 的模块，集成了 ESP32 微控制器、用于供电的锂聚合物电池，以及一个为 5V 和 3.3V 电源轨供电的稳压器。

miniUGV_2 平台特有的其他标准话题也被纳入ROS API的开发中。

3.2 部署系统

如图 5 所示，部署机构由一个紧凑型系绳模块和一个系绳头组成。系绳模块使用单个执行器同时控制系绳转子和系绳导向器，从而简化机械设计并减轻整体有效载荷。系绳头集成了一个电永磁体，可由无人机通过 ROS 经 WiFi 远程启用或停用。这使 miniUGV_2 能够精准、可靠地连接或脱离，从而让地面机器人在部署后能够独立运行。

回收 miniUGV_2 需要通过磁性系绳重新连接，这项任务需要更先进的控制策略，超出了本文的研究范围。为促进进一步研究，我们提供了一个逼真的 MuJoCo 仿真环境，用于应对这些挑战，可在共享的 GitHub 仓库中获取（见第 1 节）。

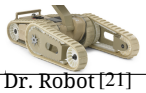
4 实验结果

本节将 miniUGV$_2$ 与现有移动机器人平台进行比较，并提供实验结果，以严格评估所提出系统的功能和性能。实验主要关注两个方面：miniUGV$_2$,的导航与操作能力，以及利用所提出的系绳模块成功部署该系统以进行隐蔽区域探索。

4.1 MiniUGV$_2$

对比研究：我们调查了多种现有轮式机器人平台，并将它们与我们提出的 miniUGV$_2$,进行了对比分析，重点评估它们作为可由无人机部署的辅助机器人的适用性。评估考量了若干关键参数，包括整体尺寸（以确保与无人机有效载荷安装区域兼容）、重量（以符合无人机的载荷能力）、运行时间（以确定其在涵洞

表1. miniUGV_2 与现有移动平台的比较

No.	机器人	尺寸 长/宽/高（mm）	重量 (kg)	运行 时间（小时）	传感器，执行器与计算机	夹爪	主动式脚蹼
1	EyeDrive [19] 	280/250/100	2.3	3.0	1. 5 个摄像头，2. 惯性测量单元，3. 麦克风 远程-控制	NA	No
2	miniUGV_1 [8] 	130/120/55	< 0.25	0.3	1. RGB 相机，2. 惯性测量单元，自主-树莓派 Zero	磁性	No
3	**miniUGV_2（提出）** 	**330/330/100 with 脚蹼 490/330/100**	**3.68**	**≈ 4.00**	1. RGB 相机，2. 飞行时间相机，3. 惯性测量单元，4. 二维激光雷达，5. 前照灯，6. 气泵，7. TinyPICO，**自主：英伟达 Jetson Orin NX**	**气动**	**Yes 2 电机**
4	510 PackBot [20] 	686/406/178 with 翻转-pers 889/521/178	10.9	≈ 4。00	All	Any	Yes 2 电机
5	Dr. Robot [21] 	640/655/176 with 翻转-pers 820/655/176	21.5	4.00	All	Any	Yes 2 电机

检查等真实场景中的实际可用性）、传感器和执行器配置，以及是否配备支持自主操作的伴随计算机。

如表1所总结，EyeDrive与miniUGV_1 平台满足可部署性准则（即有效载荷小于6 kg），但在若干关键方面存在不足，包括运行时间、传感器能力、驱动机制、机载计算、夹爪功能以及主动翻转模块。相比之下，PackBot与Dr. Robot平台在传感器和驱动方面具备更强能力，但由于重量较大、物理尺寸更大，不适合无人机部署。与之相对，miniUGV_2在便携性与能力之间实现了独特平衡，使其成为无人机支持的隐蔽空间探索的理想次级机器人。

导航测试：为了进行导航测试，我们在多种室内外环境中评估了 miniUGV_2，包括粗糙和光滑表面，以及



图6. miniUGV$_2$ 在三种不同场景中导航的示意图。从左到右：第一张图展示了其在杂乱的室内环境中的导航能力；第二张图展示了 miniUGV$_2$ 跨越尖锐边缘棱边的情形，这对于这种尺寸规格的机器人而言尤其具有挑战性；第三张图则突出展示了其在由砾石和混凝土结构组成的不平坦地形中导航的能力。

如图 6 所示，具有高耸且尖锐障碍物的不平坦地形。请注意，我们通过手动驾驶展示了原型机器人的这些能力。在导航实验中，miniUGV$_2$展现出卓越的机动性，成功越过高耸的障碍物、尖锐的边缘棱边和不平坦表面。它能够以正置和倒置构型运行，并借助双臂恢复默认朝向，这一独特能力彰显了其适应复杂地形的能力。其坚固的设计有效保护了所有机载传感器，确保机器人在整个导航任务期间持续正常运行。

操作测试： 操作测试使用了尺寸和重量各异的箱子，重量范围为 0.5 kg 至 3.5 kg。miniUGV$_2$ 展现了可靠的物体操作能力，成功抓取并放置了不同尺寸的箱子。这些结果验证了 miniUGV$_2$ 是一款用途广泛且可靠的次级机器人，适用于各种无人机支持的任务。在抓取和运输过程中，miniUGV$_2$ 需要将机械臂的活动范围限制在 0 至 90 度之间，以防止其与吸盘夹爪发生干涉，

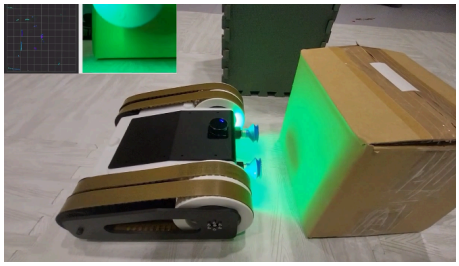


图7. 展示了启动抓取操作前的相机和激光雷达视图，以及关节臂的位置。

尤其是在处理尺寸大于机械臂间净空区域的物体时，如图 7 所示。在这种情况下，miniUGV$_2$ 会保持默认的机械臂构型，以最大限度地扩大接触面积，从而增大牵引力，提升其有效操纵和运输较重物体的能力。

4.2 miniUGV$_2$ 的自主部署

我们开展了一项部署实验：无人机自主飞越目标区域，并利用其机载传感器确定最佳部署点——即从待检查或探索的隐藏空间入口点出发，miniUGV$_2$ 能够到达的最近表面。通过将平面拟合到无人机朝下的深度相机生成的点云上，确定部署表面。在涉及不平坦地形的场景中，可以采用基于表面法线的图像分割方法来检测部署区（见图 8 深度图像中的蓝色区域）。根据深度数据生成的表面法线能够很好地反映

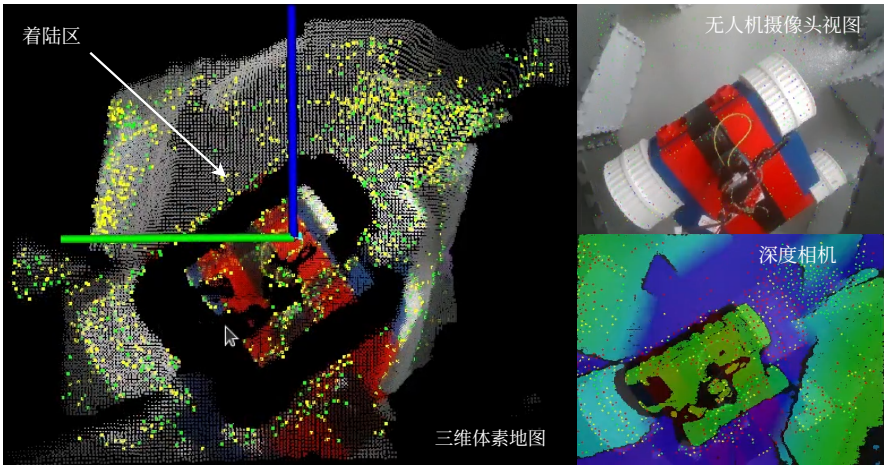


图 8. 无人机部署 miniUGV$_2$ 初始状态示意图：此图记录了部署过程开始前的瞬间。左侧面板显示由无人机朝下的 RGB-D 相机生成的点云。图像中央的坐标系表示相机坐标系。黄色点对应从 RGB 图像中提取并投影到三维空间中的视觉特征。这些相同的视觉特征也在另外两张图像中标出。右上面板显示原始 RGB 相机视图，右下面板则显示彩色深度图像，其中蓝色点表示距离相机较远的区域，绿色点表示距离相机较近的区域。

可通行性，因为具有相同法向量的表面会被标记为相同颜色，随后可利用颜色分割及其他图像处理工具获取部署区域。如图 8 所示，无人机在开始部署前执行视觉惯性定位与建图，生成环境的三维地图。点云聚类算法结合系绳控制器电机的反馈，可实现对部署载荷的实时跟踪。需要注意的是，建图仅在部署过程开始前进行，并在着地后恢复。建图会被有意暂停，以防移动中的 miniUGV$_2$ 被纳入地图，从而保留干净、静态的参考地图，便于准确进行着陆验证，同时减轻无人机机载计算机的计算负担。

着陆后的点云如图 9 所示。着陆过程可以通过多种方式进行验证。例如，当无人机启动系绳回收时，如果系绳头部位置与 miniUGV$_2$ 之间的距离超过最小阈值（该阈值考虑了位置估计误差），且在 miniUGV$_2$ 保持静止的同时，该距离持续增大，则认为部署成功。否则，如果不满足这一条件，则认为部署失败，无人机将重新尝试部署。在我们的实验中，我们主要通过 miniUGV$_2$ 与地平面之间的距离来判断是否成功着陆，如图 9 所示，其中代表 miniUGV$_2$ 位置的绿色球体表明其已接近地面。该距离是实地实验中的可调参数。此外，我们还进行了更多实验，以验证系绳模块在实验室条件下的功能，确保 miniUGV$_2$能够可靠地部署与回收。详细的实验设置和结果请见 https://github.com/Dpushp/drone-deployable-miniUGV2。

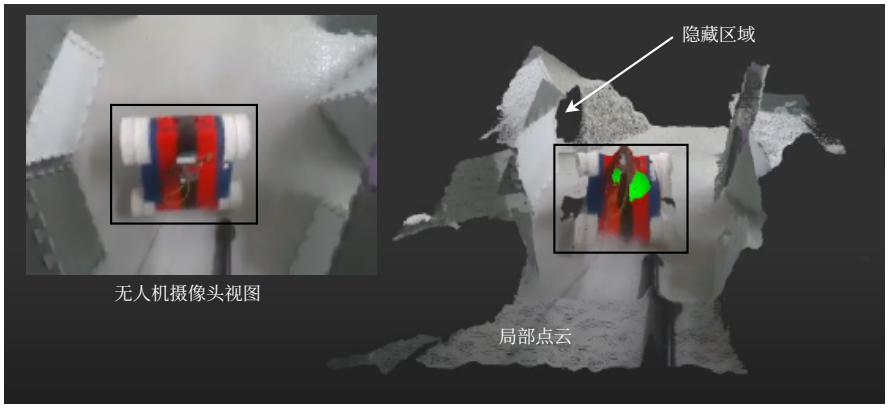


图 9. 此图展示了着陆后恢复三维建图过程时的场景。请注意，部署期间地图更新处于暂停状态。miniUGv$_2$ 的位置由点云处理确定，并以绿色球体标示。彩色点云用于验证位置估计的准确性，并显示其位于 miniUGV$_2$的点云簇内。三维地图中也清晰可见隐藏区域的入口。黑色方块在 RGB 图像和三维点云地图中均标示出 miniUGV$_2$，以供参考。

5 结论

在本研究中，我们介绍了 miniUGV$_2$, ，这是一款先进的可由无人机部署的履带式地面车辆，旨在应对探索和检查隐蔽空间所面临的独特挑战。在先前工作的基础上 [8], ，我们对地面机器人及其部署系统进行了重大改进，使其能够在复杂环境中更加稳健、自主地运行。我们的主要贡献包括设计了 miniUGV$_2$，配备双全关节机械臂、先进的感知能力和模块化电子系统，这些特性共同增强了机器人的机动性和操作能力。我们还开发了一种新型系绳模块，配有电永磁头，使无人机能够按需部署和回收 miniUGV$_2$ ，同时支持连接和分离两种运行模式。该特性消除了先前系统中的系绳缠绕问题，同时保留了永久连接模式的选项，以便在需要时利用无人机提供的额外推力。尽管在真实的户外环境中使用系绳系统回收微型机器人仍然颇具挑战，我们已开发出一个基于 MuJoCo 的高保真无人机—系绳部署系统仿真。该仿真提供了安全且可复现的测试平台，我们计划在未来的研究中利用它开发和验证先进的回收算法。实验验证展示了 miniUGV$_2$在多种场景下的能力，包括在崎岖地形中行驶、翻倒后自主复位，以及操作重达 3.5 千克的物体。实地实验期间，机械臂由人工控制，因为本文所述的简单控制逻辑不足以应对极具挑战性的环境；尽管如此，实验结果仍展示了系统的核心能力，并为未来开展完全自主运行研究奠定了坚实基础。此外，实验室测试和真实环境测试均验证了系绳系统的可靠性能，以及其与无人机集成后执行部署与回收任务的能力。

我们计划通过为 miniUGV$_2$集成先进的控制策略来扩展这项工作，明确考虑地形可通行性、牵引力和实时环境变化。此外，未来的研究将探索开发受有限理性原则 [22–24], 启发的自主决策框架，旨在增强系统在复杂任务中的适应性和安全性。

参考文献

1. D. Hu、S. Li、J. Chen 和 V. R. Kamat，《灾害废墟中空洞的检测、定位与特征描述：用于搜救》，*Advanced Engineering Informatics*，第 42 卷，2019 年。2. A. Nedjati、B. Vizvari 和 G. Izbirak，《小型无人机直升机在震后响应中的应用》，*Natural Hazards*，第 80 卷，第 1669–1688 页，2016 年。3. M. P´o lka、S. Ptak 和 L. Kuziora，《无人机在搜救行动中的应用》，*Procedia engineering*，第 192 卷，第 748–752 页，2017 年。4. P. P. Roy，《岩石爆破：影响与作业》，CRC Press，2005 年。5. T. Bajpayee、T. Rehak、G. Mowrey 和 D. Ingram，《露天采矿中的爆破伤害，重点关注爆破飞石与爆破区域安全》，*Journal of Safety Research*，第 35 卷，第 1 期，第 47–57 页，2004 年。 [在线]。网址：https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/ S0022437503000896 6. G. F. Mitchell、T. Masada、S. M. Sargand、B. Tarawneh等，《涵洞风险评估与检查规程更新》，美国联邦公路管理局，技术报告，2005 年。7. K. Asadi、A. K. Suresh、A. Ender、S. Gotad、S. Maniyar、S. Anand、M. Noghabaei、K. Han、E. Lobaton 和 T. Wu，《用于施工现场数据采集的集成式 UGV-UAV 系统》，*Automation inConstruction*，第 112 卷，2020 年。8. D. Pushp、S. Kalhapure、K. Das 和 L. Liu，《用于隐藏区域探索与操作的无人机-miniUGV混合系统》，载于*2022*年*IEEE/RSJ*智能机器人与系统国际会议（*IROS*）。IEEE，2022 年，第 1297–1304 页。9. T. Qin、J. Pan、S. Cao 和 S. Shen，《一种用于多传感器局部里程计估计的通用基于优化的框架》，2019 年。10. D. Pushp、Z. Chen、C. Luo、J. M. Gregory 和 L. Liu，《PovNav：帕累托最优无地图视觉导航器》，载于实验机器人国际研讨会。Springer，2023 年，第 250–263 页。11. D. Pushp、W. Chen、Z. Chen、C. Luo、J. M. Gregory 和 L. Liu，《探索未知环境：图像空间中的帕累托最优视觉决策》，*The International Journal of Robotics Re- search*，第 02783649251399686 页，2025 年。12. P. V. K. Borges、T. Peynot、S. Liang、B. Arain、M. Wildie、M. G. Minareci、S. Lichman、G. Samvedi、I. Sa、N. Hudson、M. Milford、P. Moghadam 和 P. Corke，《自主地面车辆地形可通行性分析综述：方法、传感器与挑战》，*Field Robotics*，第 2 卷，第 1567–1627 页，2022 年。13. Z. Chen、D. Pushp 和 L. Liu，《CALI：基于由粗到细对齐的可部署自主导航可通行性预测无监督域适应》，*arXiv* 预印本 *arXiv:2204.09617*，2022 年。14. Z. Chen、D. Pushp、J. M. Gregory 和 L. Liu，《用于域自适应可通行性预测的伪三边对抗训练》，*Autonomous Robots*，第 47 卷，第 8 期，第 1155–1174 页，2023 年。15. M. A.-M. Khan、D. Pushp 和 L. Liu，《AFRDA：用于域自适应语义分割的注意力特征细化》，*IEEE Robotics and Automation Letters*，2025 年。16. T. Zou、J. Angeles 和 F. Hassani，《无人履带车辆的动态建模与轨迹跟踪控制》，*Robotics and Autonomous Systems*，第 110 卷，第 102–111 页，2018 年。17. D. Deng，《一种基于密度的DBSCAN聚类算法》，载于*2020*年第七届电气工程与自动化国际论坛（*IFEEA*）。IEEE，2020 年，第 949–953 页。

18. DJI, 《Matrice 600 pro - 产品规格》, https://www.dji.com/matrice600-pro, 访问于 2023 年。19. EyeDrive - 履带式机器人平台。访问日期：2023 年 6 月 27 日。 [在线]。网址：http://www.army-guide.com/eng/product5553.html 20. 《PackBot》, https://www.wevolver.com/specs/packbot, 访问日期：2023 年 6 月 27 日。21. 《Dr. robot jaguar 履带式移动平台》, https://www.robotshop.com/products/dr-robot-jaguar-tracked-mobile-platform, 访问日期：2023 年 6 月 27 日。22. D. Pushp、J. Xu、Z. Chen 和 L. Liu, 《面向有限理性智能体的情境生成式默认策略》, 载于*2024*年*IEEE/RSJ*智能机器人与系统国际会议（*IROS*）。IEEE，2024 年，第 7703–7709 页。23. J. Xu、D. Pushp、K. Yin 和 L. Liu, 《有限理性智能体之间的决策》, 载于分布式自主机器人系统国际研讨会。Springer，2022 年，第 273–285 页。24. D. Pushp、J. Xu 和 L. Liu, 《通过信息引导的先验策略协调有限理性无人机》, 载于*2023*年*IEEE/RSJ*智能机器人与系统国际会议（*IROS*）。IEEE，2023 年，第 6779–6786 页。