DOI:10. 20033/j. 1003-7241. (2026)08-0013-08

复杂环境下空地无人系统协同运行控制方法

王荣浩, 李井卓, 赵 煜, 晏开杨

(陆军工程大学 国防工程学院,南京 210007)

摘 要:为解决复杂环境中单一种类无人装备因工作方式、工作空间及载荷性能限制而难以独立完成多样化任务的问题,本文研究了一种基于多源信息融合的空地无人系统协同运行控制方法。该方法首先融合 IMU 与 GPS 对空中无人机与地面无人车进行高精度自主定位,并结合视觉跟踪技术实现对动态目标的实时识别与锁定。同时,针对运行过程中的障碍干扰,引入避障策略以确保系统安全运行。利用 Wi-Fi 无线通信构建空地协同网络,实现无人机与无人车之间的位置、速度、姿态及障碍信息等数据交互,并据此对两者的航迹行为进行协同控制。在系统软硬件实现与测试环节,搭建无人机-无人车实验平台对所提算法开展实际场景验证。实验结果表明,所提出的多源信息融合与跟踪控制方法能够有效实现无人车与无人机的协同运行,显著提升空地异构无人系统在复杂任务中的适应性。

关键词:空地无人系统;IMU-GPS 融合定位;视觉跟踪;多源信息融合;协同控制

中图分类号: TP273;TP242. 2;V279^{+}. 2 **文献标志码**: A **文章编号**: 1003-7241(2026)08-0013-08

Collaborative operation control method for unmanned air-ground systems in complex environments

Wang Ronghao, Li Jingzhuo, Zhao Yu, Yan Kaiyang

(National Defense Engineering College, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China)

Abstract: To address the problem that a single type of unmanned equipment, limited by its working mode, workspace, and payload capacity, struggles to independently complete diverse tasks in complex environments, this paper investigates a collaborative operation control method for air-ground unmanned systems based on multi-source information fusion. The proposed method first integrates IMU and GPS to achieve high-precision autonomous positioning of both aerial drones and ground unmanned vehicles, and combines visual tracking technology to enable real-time detection and locking of dynamic targets. Meanwhile, considering obstacle interference during operation, a collision avoidance strategy is introduced to ensure safe system operation. A Wi-Fi wireless communication network is established to construct an air-ground collaborative communication network, enabling the exchange of position, velocity, attitude, and obstacle information between drones and unmanned vehicles, based on which the trajectory behaviors of both are coordinatively controlled. In the system hardware and software implementation and testing stage, a drone-unmanned vehicle experimental platform is built to validate the proposed algorithm in real-world scenarios. Experimental results demonstrate that the proposed multi-source information fusion and tracking control method can effectively achieve collaborative operation between unmanned vehicles and drones, significantly enhancing the adaptability of heterogeneous air-ground unmanned systems in complex tasks.

Keywords: air-ground unmanned systems; IMU-GPS fusion positioning; visual tracking; multi-source information fusion; cooperative control

近年来,无人系统作为改变未来战争模式的颠覆性技术装备,在世界范围内得到飞速发展,已经成为国家间军事博弈的重要力量。无人机与无人车是无人系统中最具有代表性的两类对象,空地无人系统是无人机与无人车组成的异构无人系统[1]。无人车载荷重、续航时间长,能够对近距离目标精确定位,但视野范围小,容易被障碍物阻碍行动;无人机视野开阔、灵活性好,但续航时间短、载荷轻,通过无人机与无人车的合理配合,可以弥补单一类型对象的不足,有效提升协同作业效能。面向未来作战应用需求,聚焦复杂区域反恐及城市巷战等典型任务场景,由无人机与无人车组成的异构无人系统具有重要的研究价值。通过无人机与地面车辆的交互协同和信息融合,可提供抵近侦察及跨域感知能力,拓展地面侦察车辆信息获取的精度和维度,提升系统的侦察效能。例如,在复杂地形条件的侦察中,作战侦察车辆往往会因为周边环境中障碍物的遮挡而无法有效探测,利用无人机实现伴飞协同侦察,可以为地面车辆整体侦察决策提供大范围环境信息,并可作为地面通信障碍时的通信中继,实现异构无人系统

收稿日期:2025-09-22;**录用日期**:2025-10-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(62173341); 江苏省自然科学基金资助项目(BK20231487)

作者简介:王荣浩(1985—),男,博士,教授,研究方向为无人系统、多智能体系统。

通信作者:李井卓(2003—),男,硕士研究生,研究方向为图像处理、智能控制。

引用本文:王荣浩,李井卓,赵煜,等. 复杂环境下空地无人系统协同运行控制方法[J]. 自动化技术与应用,2026,45(8):13-20. (Wang Ronghao, Li Jingzhuo, Zhao Yu, et al. Collaborative operation control method for unmanned air-ground systems in complex environments[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026, 45(8): 13-20.)

的优势互补与协同配合[2]。

目前空地无人系统自主协同运行主要侧重于室内场景,利用室内动作捕捉系统实现精确测量和反馈控制。然而室外场景下的自主协同运行研究与设计鲜有报道。主要原因在于相较于动捕系统,室外 GPS 定位精度较低,不利于实施精确反馈控制,且室外环境复杂,对空地无人系统运行带来了一定程度的挑战。无人机和无人车在运动过程中使用单一的 GPS 定位手段会存在误差,如电离层折射误差、对流层折射误差、多路径效应误差等。基于此,本文考虑结合 IMU(惯性测量单元)进行融合定位,IMU 可以弥补 GPS 更新频率较慢的不足,从而提高定位的准确性;GPS 可以有效地抵消 IMU 的运动偏差,从而提高定位精度[3]。IMU 通过测量物体的运动路线,获得相对的定位信息,在室外 GPS 信号较弱的情况下,IMU 与 GPS 的有机融合可以为无人机和无人车实施有效反馈控制提供更加精确的位置数据。此外相对于室内较为理想的环境,室外场景更为复杂,在遇到遮挡物时 GPS 失效,地面障碍物的阻挡对无人车跟踪运行造成不利影响,这些复杂因素为空地无人系统协同控制的实现带来了困难与挑战。

本文基于 IMU-GPS 融合定位和视频跟踪技术,在 ROS 架构下利用向量场直方图(vector field histogram, VFH)局部规划算法实现了具有障碍干扰下的无人车与无人机的协同跟踪控制。在具有遮挡物的条件下,通过图像定位技术,弥补了 GPS 定位跟踪失效的缺陷,达到持续跟踪运行的效果。实验表明所设计的算法在空地无人系统协同运行控制中具有较强的实时性和适用性。

1 协同运行算法设计

1.1 基于 IMU-GPS 融合定位跟踪控制

IMU 通过加速度传感器测量无人机的加速度,再通过一次积分可以得到无人机的速度,通过二次积分可以得到无人机的位置。IMU 的更新频率满足无人机的反应速度,但存在累积误差,使无人机偏航,再利用 GPS 定位,将无人机及时拉回提前设定的飞行路径,使无人机按照规划的路线飞行。IMU 测量相对定位,GPS 测量绝对定位,将两者结合,可取得较为理想的定位与导航控制效果。在实际应用中将 IMU 和 GPS 融合要考虑大气、地表摩擦、引力等环境因素,这时需要用到卡尔曼滤波器进行矫正[4]。

在空地无人系统协同运行中,无人车需要实时跟踪获取无人机姿态信息,通过 IMU 传感器获取无人机的加速度、角速度等数据,计算出其姿态角度信息。为便于计算和提高位置精度,将 GPS 模块获取的无人机与无人车当前经纬度位置数据转化为 UTM(通用横墨卡托格网系统)坐标系下的坐标点。基于 IMU-GPS 融合定位跟踪控制设计流程为:计算距离和偏差、设计跟踪控制策略、控制算法代码实现、IMU-GPS 数据通信、测试与优化 5 个步骤,如图 1 所示。

1) 计算距离和偏差。根据当前无人车位置和无人机位置,计算出二者之间的距离和偏差。

2) 设计跟踪控制策略。根据距离和偏差信息,设计控制策略实现跟随。可以将无人机的位置和姿态作为目标,采用基于 PID 的嵌入式控制器控制无人车的运动方向和速度,达到跟随无人机的目的。

3) 控制算法代码实现。根据所设计的控制策略,编写相应的控制算法代码,包括无人车速度控制、方向控制等。

4) IMU-GPS 数据通信。设置无人机与无人车之间的通讯协议,确保无人机可靠获取 IMU 和 GPS 信息,并将其传输给无人车。

5) 测试和优化。在实际操作中,进行测试和优化以验证无人车跟随无人机的效果,考虑应对特殊情况的控制策略等。

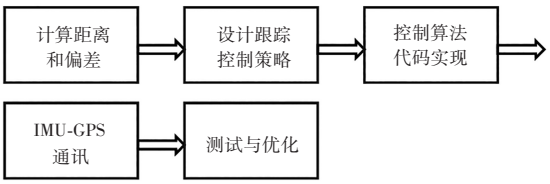


图 1 融合定位跟踪控制设计流程

Fig. 1 Design process of fusion localization and tracking control

在算法代码实现时,需要考虑通信协议、传感器数据处理等,以保证系统的可靠性、安全性和实时性。

无人机与无人车之间通过 Wi-Fi 无线通信获取彼此坐标位置,并根据两者之间距离大小进行调整。但是通过 IMU-GPS 获得的坐标投影到地面后两者间是一段弧线,难以算出直线距离。可考虑将无人机和无人车的经纬度坐标转换为 UTM,在同一个坐标平面内计算两者间距离,无人机和无人车再适时做出调整[5]。坐标具体转换过程:首先通过 GPS/RTK 分别获得无人机和无人车的经纬度坐标,以及高程、偏航角、横滚角参数,将经纬度坐标转换为 UTM 坐标,关键源码如下。

UTM 坐标转换:

```
double lat, lon; //经纬度信息
utm_ = utm.from_latlon(lat, lon);
utm_x = utm_[0];
utm_y = utm_[1];
```

此时经度、纬度和高程可作为 GPS 在世界坐标系下的实时位置,如图 2 所示。

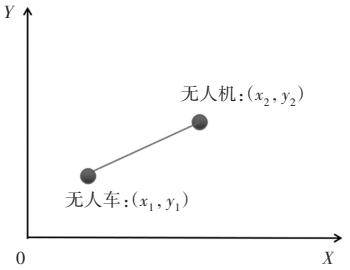


图 2 UTM 坐标

Fig. 2 UTM coordinates

根据实际通信距离为无人机与无人车在 UTM 坐标下的投影距离 D 设置可容许的最大阈值 a 和最小阈值 b，根据 D 的大小来协调无人机与无人车运行状态。

$$D = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$$

If ($D \geqslant a$)

{无人机悬停，无人车}

If ($D < b$)

{无人车停止}

Else

{无人车与无人机协同运行}

将无人机的横滚角、俯仰角、偏航角转化为旋转矩阵，并将参数整合就可以最终得到 GPS 在世界坐标系下的位姿。无人车通过标定可以得到 GPS 到车身坐标系的变换，得出当前车身在世界坐标系下的位姿，再由标定得到激光雷达到车身坐标系的变换，可将激光雷达坐标系下的点云变换到世界坐标系下，也就是高精度地图中点云的坐标。

无人机与无人车协同自主通信过程为：无人机发送指令报文 ack_UAV = 1 给无人车，无人车接收到无人机坐标位置，跟踪运行；无人车发送指令报文 ack_UGV = 1 给无人机，无人机接收到无人车坐标位置，保持当前运行状态；如果无人车遇到障碍、受到外力干扰，则向无人机发送指令报文 ack_UGV = 0，此时无人机悬停、飞行速度放缓，无人机与无人车通信报文交互流程如图 3 所示。

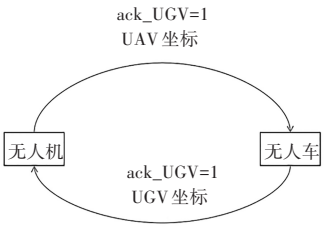


图 3　无人机与无人车报文交互

Fig. 3　Message exchange between UAV and UGV

1.2　视觉跟踪技术

在无人系统协同运行控制中，无人车通过 IMU-GPS 融合定位技术跟踪无人机，但定位信号会受到天气因素影响，无线电、强磁场也会产生不同程度上的干扰，茂密的树木、高耸的楼房同样会导致 GPS 信号减弱，在这些情况下显然不能再通过定位技术实现协同运行，此时可以通过无人车摄像辅助跟踪，以此继续实现协同运行控制[6-7]。

本文研究的视觉跟踪主要方法为无人车利用 YOLOv5 识别无人机图像，计算无人机与无人车的相对方向位置，调节无人车运行状态，从而实现协同运行的任务。该方法需要通过图像训练从混有无人机和背景物的图像中识别出无人机及其周围物体，启用视觉反馈控制调整无人车朝无人机行驶方向运行，达到协同跟踪效果。

当遇到信号干扰，无人机与无人车无法正常通信传送各自位置时，无人车启动摄像跟踪，继续执行协同运行任务。无人车使用 YOLOv5 图像检测来进行摄像跟踪，利用 YOLOv5 首先训练无人机模型以及周围物体的模型，从所摄图像中识别出无人机[8]，YOLOv5s 进行图像识别步骤如图 4 所示。识别效果如图 5 所示。

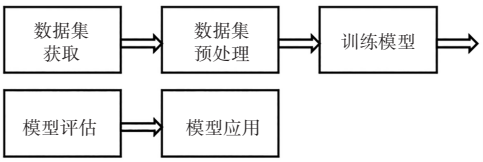


图 4　图像识别步骤

Fig. 4　Image recognition steps

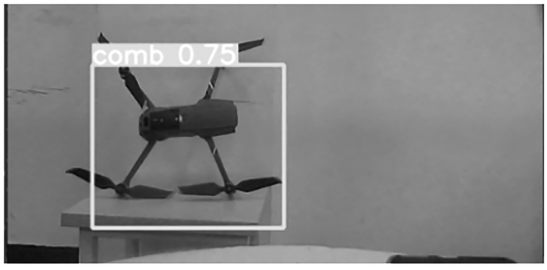
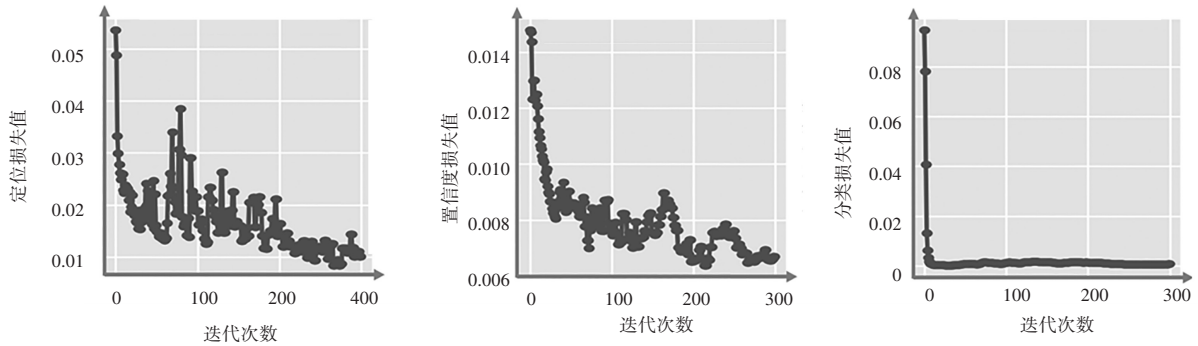


图 5　无人机训练识别效果

Fig. 5　UAV training recognition performance

在训练完成后需要对模型进行评估，评估结果损失曲线如图 6 所示。



(a) 定位损失　　(b) 置信度损失　　(c) 分类损失

图 6　损失曲线

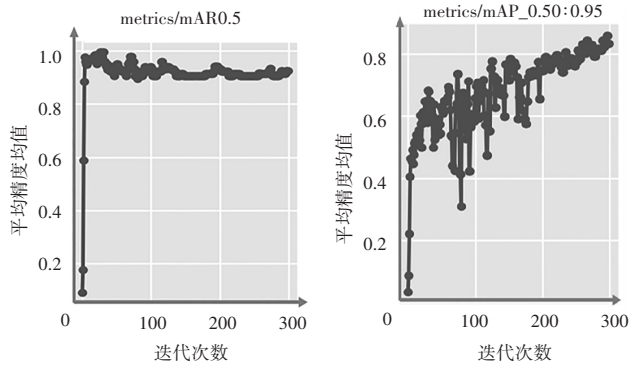
Fig. 6　Loss curve

由损失曲线的结果可以看出，损失曲线随着训练次数的增加不断下降，最终收敛于 0，则说明训练的模型有效可用，评估结果平均精度均值曲线如图 7 所示。

图 7(a) 中 mAP_0.5 表示计算所有图片的平均精度

(Average Precision),然后求阈值大于 0.5 的平均精度均值,可以看出阈值大于 0.5 的平均精度均值都接近 1,效果比较好,训练的模型可用。图 7(b)中 mAP_0.50:0.95 表示在不同阈值(从 0.50 到 0.95,步长 0.05)(0.50、0.55、0.60、0.65、0.70、0.75、0.80、0.85、0.90、0.95)下的平均精度均值,可以看出随着训练次数的增加,平均精度均值趋近于 1,效果比较好,训练的模型可用。

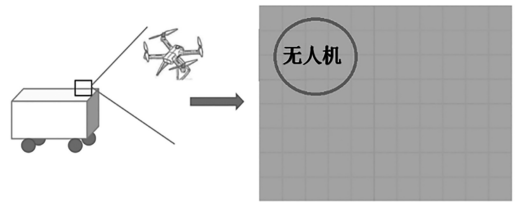
当无人机位于摄像视野左侧时,如图 8(a)所示,无人车向左旋转并使得无人机图像位于视野中心线上,继续跟踪协同运行;相反,如果无人机位于摄像视野右侧时,如图 8(b)所示,无人车向右旋转并使得无人机图像位于视野中心线上,如图 8(c)所示,然后继续跟踪协同运行。



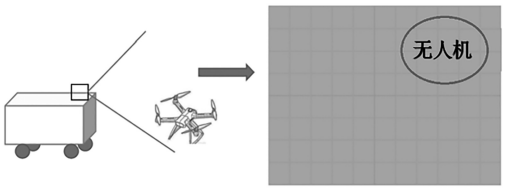
(a) 阈值大于 0.5 的平均精度均值曲线　(b) 不同阈值下的平均精度均值曲线

图 7　平均精度均值曲线

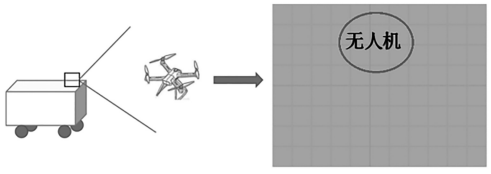
Fig. 7　Mean average precision curve



(a) 无人机偏左



(b) 无人机偏右



(c) 无人机在中心线处

图 8　无人机相对无人车的视野位置

Fig. 8　Relative position of UAV in UGV's field of view

启动摄像跟踪时,无人车先判断无人机是否在无人车摄像视野范围之内,如果处在视野范围内,通过 YOLOv5 将无人机以像素形式呈现在屏幕中,无人机特征像素位于(x_1, y_1)处,中心线横坐标为x_0,误差为Δx。若$x_1 < x_0 - \Delta x$,无人车向车身左侧旋转,直到满足$x_0 - \Delta x \leqslant x_1 \leqslant x_0 + \Delta x$,无人车停止旋转,保持前行跟踪;若$x_1 > x_0 - \Delta x$,则无人车向车身右侧旋转,直到满足$x_0 - \Delta x \leqslant x_1 \leqslant x_0 + \Delta x$,无人车停止旋转,保持前行跟踪;若$x_0 - \Delta x \leqslant x_1 \leqslant x_0 + \Delta x$,无人车保持当前前行跟踪状态如图 9 所示,摄像跟踪流程图如图 10 所示。



图 9　无人机位于摄像中心

Fig. 9　UAV is at the camera center

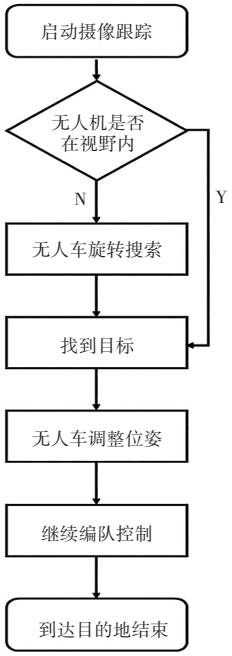


图 10　摄像跟踪流程

Fig. 10　Camera tracking flowchart

1.3　无人车避障

无人车跟随无人机期间,无人车行驶途中会出现障碍物,此时无人车需要自行规避障碍物并继续实施跟踪。无人车避障使用的传感器主要有超声波传感器、视觉传感器、红外传感器、激光传感器等。激光传感器在测量距离方面具有显著优势,它的测量速度快,测量范围广,角度分辨率高,镜面反射小,而且不受光照的影响[9]。基于此,本文采用激光传感器实现无人车避障。在遇到障碍时,可将无人车的起始点设定为直角坐标系的原点,根据当前位置,规划出最优避障路径,从而实现最佳行驶效果。在每一步规划开始时,通过无人车身装有的激光传感器探测出前方障碍物,再由激光扫描并进行数据分析,得到障碍物

所在的具体位置和分布[10-12]。

UTM 坐标中若无人车跟随无人机的原始路径上(图 11 中的虚线 c) 没有出现障碍物,那么无人车继续沿着路径 c 跟踪无人机行驶;而当原始路径上有障碍物出现,则可通过激光扫描得出障碍物左右两侧 a、b 分别距无人车原始路径 c 的夹角 α、β,当 $\alpha \leqslant \beta$ 时,无人车沿左切线 a 运动;当 $\alpha > \beta$ 时,无人车沿右切线 b 运动。并且当无人车绕过当前障碍物后,继续与无人机协同运行[13-14]。

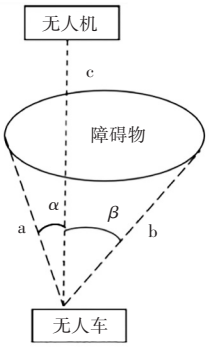


图 11　无人车选择绕行方向

Fig. 11　UGV selects the detour direction

当无人车运行前方有多个障碍物,如图 12 所示,无人车运行的目标点位于障碍物 A 和障碍物 B 之间的前方位置,此时无人车可根据图 13 所示的前方感知的障碍物分布实时调整行驶状态和方向。图 13 中横轴是以无人车为中心感知到的障碍物角度,纵轴表示在该方向存在障碍物的概率大小。实际应用的过程中会根据这个直方图首先辨识出允许无人车通过的足够大的所有空隙,然后对所有这些空隙计算其代价函数,最终选择具有最低代价函数的路径通过,代价函数具体形式如下[15]。

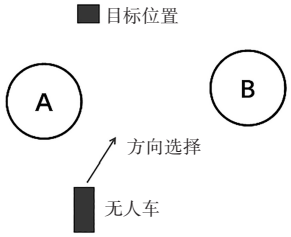


图 12　多个障碍物情形

Fig. 12　Multiple obstacles scenario

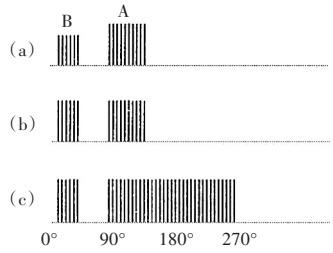


图 13　无人车前方感知的障碍物分布极坐标直方图

Fig. 13　Polar histogram of obstacle distribution perceived in front of the UGV

$$g(c) = \mu_1 \Delta(c,k_t) + \mu_2 \Delta(c,\theta_n/\alpha) + \mu_3 \Delta(c,k_{d,n-1}) \quad (1)$$

式中,$\Delta(c,k_t)$ 为目标方向,系数是 μ_1;$\Delta(c,\theta_n/\alpha)$ 为车轮转动角度,系数是 μ_2;$\Delta(c,k_{d,n-1})$ 前一刻运动方向,系数是 μ_3,通过配置 3 个系数的大小可以得到不同特性的 VFH 算法。

可以看出 3 个主要因素决定了代价函数:目标方向、无人车当前方向、前一时刻运动方向。对这三个因素进行加权求和,可以得出一个确定的代价值,实现对无人车的状态和方向的调整。

2　实验测试与仿真

实验装置如图 14 所示,其中无人机搭载了 GPS/北斗天线、电池仓、机载计算机和飞控器、通行模块;无人车车体采用差速四驱轮式驱动,前后搭载了双 GPS/北斗天线,安装了接收 RTK 信号的电台天线,车身前部安装避障激光雷达,用以感知前方障碍物,车身中部安装机载计算机和通信模块。

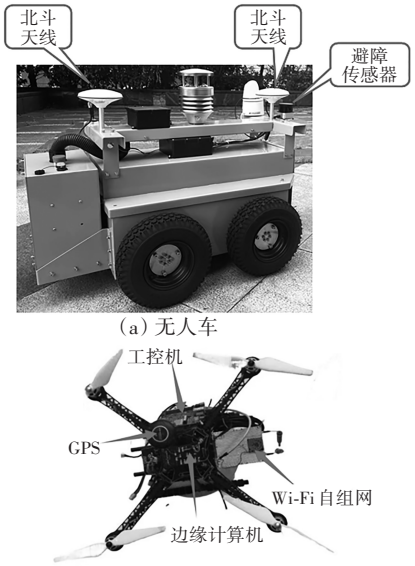


图 14　无人机与无人车硬件平台

Fig. 14　Hardware platforms of UAV and UGV

2.1　避障模型测试

当无人车遇到障碍物时,激光扫描出障碍物两边距中心线的角度 β、γ,得到 $\beta < \gamma$,此时无人车选择从 a 侧绕行,如图 15(a)所示。通过激光扫描测出距 a 侧障碍物的实际距离,再根据无人车长度和宽度计算出旋转的角度 α,向无人车前进方向左侧偏转角度 α 完成后,无人车继续行驶,如图 15(b)所示。

通过计算得出障碍物离无人车适当远时,无人车向反方向及车身右侧偏转两倍 α,然后直线行驶,如图 15(c)所示。当行驶到原前进方向时,无人车再次向车身左侧偏转角度 α,从而使车身回正,然后继续前行跟踪无人机,如图 15(d)所示。

空地无人系统协同运行时,地面无人车避障模拟情况如图 16 所示,实际避障运行测试场景如图 17 所示。

2.2　视觉跟踪测试

当遇到信号干扰,无人机与无人车无法正常通信传送各自位置时,无人机放缓飞行速度,无人车采用摄像跟踪,通过基于特征匹配的跟踪算法继续跟踪无人机。



(a) 选择绕行方向 (b) 计算偏转角度

(c) 返回原始路径 (d) 绕障结束

图 15 无人车避障过程

Fig. 15 UGV obstacle avoidance process

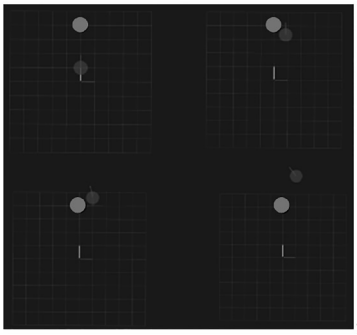


图 16 地面无人车避障模拟

Fig. 16 UGV obstacle avoidance simulation



图 17 地面无人车避障运行实测场景

Fig. 17 UGV obstacle avoidance field test scenario

当无人机位于摄像网格左侧时,如图 18(a)所示,无人车向左旋转并使得无人机图像位于网格中心线上;相反,如果无人机位于摄像网格右侧时,如图 18(b)所示,无人车向右旋转并使得无人机图像位于网格中心线上,待旋转完毕,无人车继续通过摄像跟踪无人机达到协同运行效果,如图 18(c)所示。



(a) 视野左侧 (b) 视野右侧 (c) 视野中心

图 18 无人车摄像跟踪

Fig. 18 UGV camera tracking

2.3 基于 IMU-GPS 的跟踪测试

无人机接收地面站发送的轨迹运行指令,依据轨迹飞行,通过无线 Wi-Fi 与地面无人车实时交互自身的经纬度数据信息,空地系统运行架构如图 19 所示。

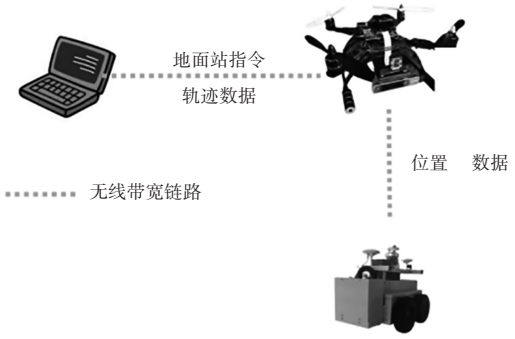
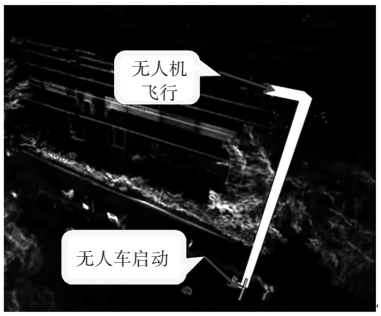


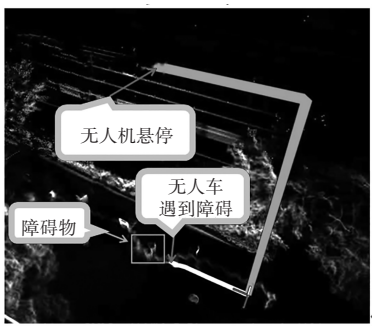
图 19 无人机与无人车运行架构

Fig. 19 UAV and UGV operation architecture

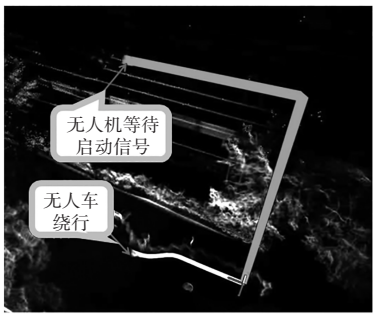
实验测试流程为:启动无人机,飞行 2 s 之后,启动无人车,如图 20(a),此时无人车开始使用 IMU-GPS 跟踪算法进行跟踪。当无人车遇到障碍时,发送报文,无人机悬停,无人车调用避障算法,如图 20(b)。无人车开始避障运行,无人机仍等待恢复飞行信号,如图 20(c)。直到无人车避障结束,发送报文,无人机继续向前飞行,无人车继续跟踪无人机,保持协同运行,如图 20(d)。当无人机到达目的时,向无人车发送信号,完成空地协同运行过程,无人车等待无人机下达后续指令任务,如图 20(e)。



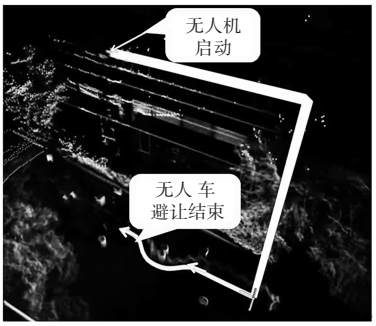
(a)无人机-无人车启动运行



(b) 无人车遇到障碍



(c) 无人车绕行障碍



(d) 无人车完成避障



(e) 无人机与无人车协同运行结束

图 20 无人机与无人车运行轨迹

Fig. 20 UAV and UGV operation trajectories

空地无人系统协同运行实测场景如图 21 所示。

2.4 实验结果分析

实测场景中利用 IMU-GPS 融合定位跟踪控制技术,无人机和无人车通过 UTM 坐标转换计算得出无人机与无人车距离和方位,调整无人车与无人机的运行速度和方向,最终实现空中无人机与地面无人车协同运行。然而在

一些特殊地区,GPS信号会受到干扰,无人车启用摄像跟踪。但通过摄像跟踪实现空地协同运行,需要YOLOv5提前将无人机以及周围物体的模型训练出来,针对目标模型置信度不高的问题,需要反复训练使无人车能够快速识别无人机。此外,当无人车启用摄像跟踪时,若在视野中丢失无人机,需要原地旋转寻找,无人机则需悬停等待无人车,使得自主协同的机动性受到限制。因此在实际应用中,通常利用GPS通讯进行导航跟踪控制,以无人车摄像跟踪为辅,最终可实现空地无人系统的灵活自主协同运行。



图21 无人机与无人车协同运行实测场景

Fig. 21 UAV-UGV cooperative operation field test scenario

3 结论

本文研究了无人机与无人车协同运行控制问题,基于单台无人车与单架无人机,融合了IMU-GPS技术、VFH避障算法以及图像识别与视觉跟踪技术实现了在室外实际复杂场景中无人机与无人车的协同运行效果。然而,在实际应用中往往需要多台无人机与多辆无人车协同执行任务,此时需要进行多机器人系统协同控制技术的研究。多台无人车和多架无人机协同运行时需要指定领导者,其余无人车和无人机听从各自领导者分发的指令。在遇到障碍物的情况下,无人车集群不仅需要躲避障碍物,还需要考虑车与车之间的距离问题;无人机需要实时接收领导者指令,选择悬停或减缓飞行速度。总之,将本文所研究的协同运行技术推广到多机器人系统中,还需要考虑控制框架、通信方式、多样任务、动力学异构等多种因素。

参考文献

[1]胡子峰,陈洋,郑秀娟,等. 空地异构机器人系统协作巡逻路径规划方法[J]. 控制理论与应用,2022,39(1):48-58.

[2]周思全,化永朝,董希旺,等. 面向空地协同作战的无人机-无人车异构时变编队跟踪控制[J]. 航空兵器,2019,26(4):54-59.

[3]问靖,王建华,郑翔,等. 基于GPS和IMU的欠驱动无人水面艇动力定位方法[J]. 传感器与微系统,2022,41(1):54-57.

[4]Cahyadi N M,Asfihani T,Mardiyanto R,et al. Performance of GPS and IMU sensor fusion using unscented Kalman filter for precise i-Boat navigation in infinite wide waters[J]. Geodesy and Geodynamics,2023,14(3):265-274.

[5]Centrone L,Da Silva T F. Y-proper graded cocharacters of the algebra UTm(F) of $m \times m$ upper triangular matrices over F[J]. Journal of Algebra,2023(618):96-119.

[6]邱天衡,王玲,王鹏,等. 基于改进YOLOv5的目标检测算法研究[J]. 计算机工程与应用,2022,58(13):63-73.

[7]周鹏,陈通,汪祝年,等. 基于计算机视觉的绝缘升降车位置跟踪方法[J]. 自动化技术与应用,2024,43(10):56-59, 115.

[8]陈世权,王从庆,周勇军. 一种基于YOLOv5s和图像融合的行人检测方法[J]. 电光与控制,2022,29(7):96-101,131.

[9]江楠,徐健. 基于扩展卡尔曼滤波的无人车避障算法研究[J]. 电脑知识与技术,2023,19(8):16-18,25.

[10]祁继祥. 基于激光雷达的无人车SLAM算法设计与实现[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2021.

[11]曾庆杨,王荣浩. 基于目标搜索的无人车路径规划研究[J]. 自动化技术与应用,2025,44(1):5-10,15.

[12]施琳琳,巫凯旋,周浩波,等. 车载式无人机簇状水果采摘系统设计与试验[J]. 农机化研究,2026,48(5):1-8.

[13]张梓峭,冯卫君,马志凯,等. 差速无人喷药车的自主导航及路径规划的仿真研究[J]. 农机化研究,2025,47(8):279-285.

[14]Lin T J,Wang T C. Unmanned vehicle obstacle avoidance using single sensor scan method and danger zone estimation[J]. Applied Mechanics and Materials,2013,22(40):284-28.

[15]Daniel D,Marín L. VFH+D:an improvement on the VFH+ algorithm for dynamic obstacle avoidance and local planning[J]. IFAC-PapersOnLine,2020,53(2):9590-9595.