

应急场景下蜂群无人机协同遥感仿真系统构建^{*}刘 健¹ 陈何伟² 曾国奇³(1. 中国航空无线电电子研究所 上海 200233; 2. 北京航空航天大学电子信息工程学院 北京 100191;
3. 北京航空航天大学无人系统研究院 北京 100191)

摘 要: 在突发应急场景下,需要快速获取现场的全局态势图像,为后续的评估决策做依据。蜂群无人机具有数量多、成本低、成像快等优点,广泛应用在军用领域。本文对蜂群无人机协同侦察应用到应急遥感领域进行了探索,并构建了蜂群无人机遥感数字仿真验证系统,对蜂群无人机的编队协同、航路规划、多路视频协同拼接进行了研究和仿真验证。针对多路视频帧间重叠率不稳定的问题,提出了自适应动态采样算法,以维持不同重叠率下拼接算法整体效率的幂等性。并针对对应场景下视频流的不稳定特点,提出一种断点重拼算法,可保证在恶劣拍摄环境下,降低拼接精度下保持算法的可用性。结果表明:蜂群无人机可以准实时构建现场的全局态势图像,本文可为蜂群无人机应用在应急遥感领域提供的技术支撑。

关键词: 无人机;协同侦察;航路规划;图像拼接;多端应用

中图分类号: TP391; TN802 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Construction of swarm unmanned aerial vehicle cooperative remote sensing simulation system under emergency scenarios

Liu Jian¹ Chen Hewei² Zeng Guoqi³(1. Chinese Aeronautical Radio Electronics Research Institute, Shanghai 200233, China;
2. School of Electronic Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;
3. Institute of Unmanned System, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: In unexpected emergency response scenarios, it is necessary to quickly obtain global situational images of the scene for subsequent assessment and decision-making. Swarm UAVs have the advantages of large number, low cost and fast imaging, and are widely used in military fields. This paper explores the application of swarm UAV cooperative reconnaissance to the field of emergency remote sensing, and constructs a swarm UAV remote sensing digital simulation and verification system, which researches and simulates and verifies the swarm UAV's formation coordination, airway planning, and cooperative splicing of multi-channel video. Aiming at the problem of unstable overlap rate between multiple video frames, an adaptive dynamic sampling algorithm is proposed to maintain the idempotence of the overall efficiency of the splicing algorithm under different overlap rates. Subsequently, for the unstable characteristics of video streams in response scenes, a breakpoint re-splicing algorithm is proposed to ensure that the availability of the algorithm can be maintained at the expense of splicing accuracy in poor shooting environments. The results show that: swarm UAVs can construct a global situational image of the scene in quasi real-time, and this paper can provide technical support for the application of swarm UAVs in the field of remote sensing in emergency response.

Keywords: UAV; coordinated reconnaissance; route planning; image stitching; multiterminal

0 引 言

我国灾难频发,对人民的生命和财产造成了严重损

失^[1]。2015年,南通火灾导致2人死亡,100多人受伤;2018年,山东爆炸事故导致1人死亡,10多人受伤;2019年,天津爆炸事故导致3人死亡,多人轻伤。2020年,西昌

大火导致 19 位消防员壮烈牺牲^[2];同年 7 月,长江淮河流域特大暴雨造成 99 人死亡,8 人失踪。2023 年 12 月 18 日甘肃积石山县发生 6.2 级地震,造成 131 人死亡。每年,我国因各类自然及人为灾害导致的直接经济损失更是早已超过千亿元。

灾情发生后,对事发现场的了解程度会直接影响应急指挥人员的决策正确性和准确性。因此,如何快速获取并及时回传灾情现场的态势信息,为现场的应急指挥决策提供技术支持,挽救和保障人民的生命和财产安全成为急需。

而无人机由于具有成本低、操作简单、机动性强的特点,在进行现场信息获取与回传方面具有显著优势。然而,由于单架无人机的信息获取范围有限,不利于对现场态势信息进行快速、完整的获取,因此,在对时效性要求较高的任务场景下,单机作业具有明显局限性,而蜂群无人机凭借数量多、成本低、多无人机协同成像快等优点,在情报收集、军事侦察等军用领域受到青睐^[3],相关技术的科研投入不断增加。美国通用原子公司投入大量科研人员进行无人机的遥控操作、实时数据传输和定位技术研究,以提高蜂群无人机的情报收集和监视侦察能力。

除了军用领域,蜂群无人机还被广泛应用于农业植保、灾害监测、环境保护等民用领域^[4]。蜂群无人机可用于农田的精准施肥、农药喷洒和种子播撒^[5],提高农作物的生长效率和产量;可用于洪涝灾害、地震、火灾等灾情的监测和救援^[6],通过快速获取灾情现场的图像和数据并将其传输到指挥中心^[7],为救援工作提供支持;华中科技大学的陆鑫炜利用无人机的回传资料,解决了清理水面污染的问题^[8]。

为了获取现场的全局态势信息,需要对无人机回传的视频进行拼接。图像拼接算法在无人机领域的应用上,Xia 等^[9]为提出了一种具有光照鲁棒性的算法,通过利用图像结构一致性的方法,解决无人机在采集图像时的亮度差异和对比度差异问题;Li 等^[10]针对无人机不同的拼接任务场景,根据地貌特征改进拼接算法,通过多视点匹配的方法解决了山地丘陵存在的拼接视差干扰问题,取得了较好的实验结果。自适应并行模式匹配算法(as-projective-as-possible, APAP)^[11]将图像进行了网格化,并且将全局单应性矩阵拆分为了多个局部单应性矩阵,为解决单应性误差积累问题打下了基础,APAP 算法将图像进行网格化,每个局部快生成响应的局部单应性矩阵,各自计算空间扭曲变换,最后映射到底图上进行图像配准。由于图像不再以单局为单位进行拼接,Chang 在 APAP 算法的基础上进行了优化改进,提出了保持形状的半投影变换模型(shape-preserving half-projective warps, SPHP)的图像拼接算法^[12]。SPHP 是一种新的参数变换,和 APAP 算法相比在拼接时加入了附加项,附加项的引入让网格化单应性矩阵具有了全局相似性,是投影变换和相似变换在空间域上的结合。目前图像拼接算法在无人机图像拼接领域的应用也越来越广泛。在很多任务场景中,需要将无人机采集到的

图像拼接在一起形成大图,以便观察整体态势,有些应急场景对拼接的时效性要求很高,需要直接对视频流图像帧进行实时拼接。本文在基于特征匹配的图像拼接算法上提出了一些改进方案,以解决现有算法的一些不足。

当前,蜂群无人机在应急场景下的应用研究和推广仍较为有限。考虑到其在军事侦察方面的研究更为成熟,若能将军事侦察相关技术移植到民用协同遥感领域,用于应急救援等场景,将大大增强相关单位在应急场景下的各项能力,为民生提供保障。本文针对蜂群无人机协同遥感的需求,通过在现实场景下构建蜂群无人机遥感仿真系统,验证无人机蜂群在遥感领域的协同算法,对遥感任务的协同规划、协同编队能力进行仿真验证。

目前,单架无人机的遥感图像处理中已有一定的应用,但基于多路遥感图像的实时拼接研究和应用较少。因此,本文将蜂群算法应用于应急场景下多路图像回传拼接研究,具有重要意义。

1 蜂群无人机协同遥感仿真系统构建

1.1 无人机协同遥感仿真系统组成与流程

本文设计的无人机协同遥感仿真系统主要由协同控制软件、载荷仿真软件、数字飞机软件、集群地面控制软件、三维显示软件、无人机视频拼接软件 6 部分组成。其主要组成如图 1 所示。

其中,协同控制软件是蜂群无人机协同遥感仿真系统的核心部分,主要用于执行目标分配、航路规划、编队控制、信息处理与融合等多种任务,可部署于机载任务计算机中,如图 2 所示。协同控制软件按层级划分,可分为决策规划层和协同控制层,其中,决策规划层主要实现任务分配、航路规划、决策控制和信息融合;协同控制层主要实现编队管理、协同控制、载荷控制、指令处理等内容。

载荷仿真软件主要模拟遥感系统中光电平台的探测过程,具体内容包括观测方位角、俯仰角、焦距值、工作模式等。

数字飞机软件主要模拟无人机的动力学和运动学特性(如图 3 所示)。以固定翼无人机为例,控制系统的输入量包括副翼舵偏角、方向舵偏角、升降舵偏角、油门杆量;无人机的状态量包括飞行速度、迎角、侧滑角、滚转角速度、俯仰角速度、偏航角速度、滚转角、俯仰角以及位置参数及高度。根据所选定的控制输入及状态量建立相应的动力学和运动学方程,再结合具体固定翼无人机的参数实现对无人机动力学的建模,采用实际无人机的飞控策略,实现在实验室环境下对无人机的飞行仿真。

集群地面控制软件主要实现对无人机的编队管理、航线装订、飞机状态参数和航迹显示、载荷控制等。

三维显示软件主要实现飞行场景的三维构建、观测区域的图像显示和视频输出等。

无人机视频拼接软件主要实现对仿真视频和无人机实

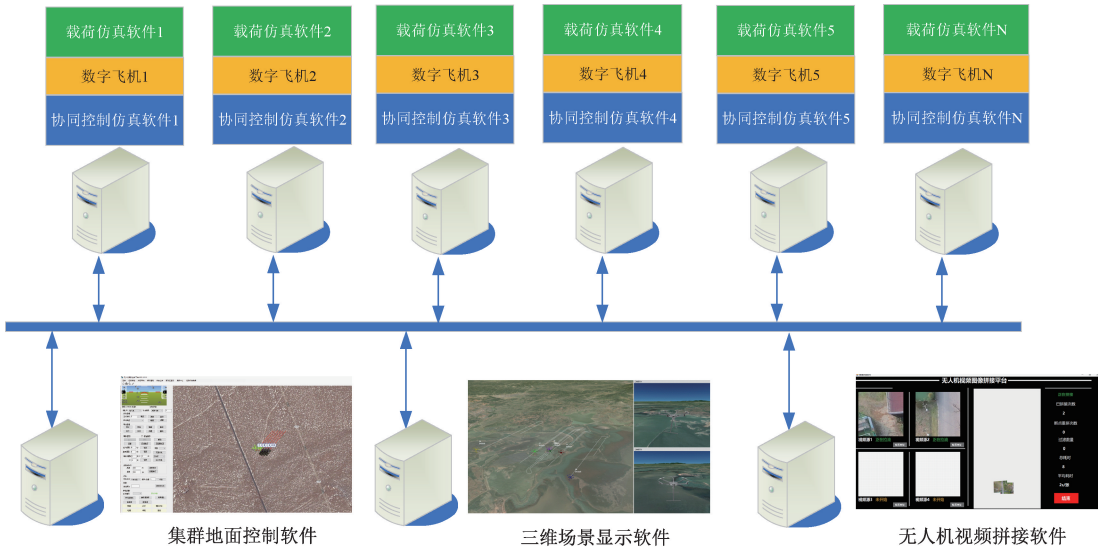


图 1 无人机协同遥感仿真系统组成

Fig. 1 Composition of UAV collaborative remote sensing simulation system



图 2 协同控制软件结构图

Fig. 2 Structure of cooperative control software

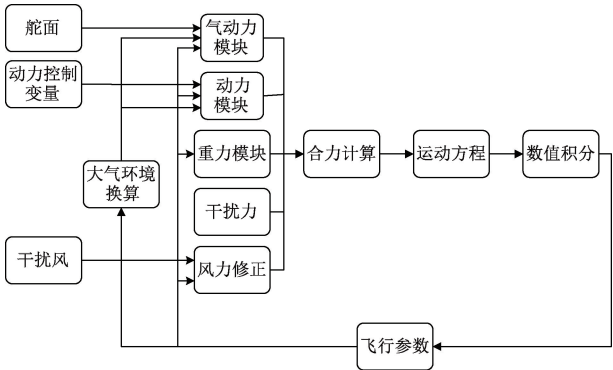


图 3 无人机动力学建模结构

Fig. 3 Drone dynamics modeling structure

飞获取的视频图像进行拼接,以获取连续、大范围的态势信息。

无人机协同遥感仿真系统信息流程如图 4 所示。
其中,协同控制软件向数字飞机发送协同控制指令,同时接收来自数字飞机的飞机状态数据;协同控制软件向载荷仿真软件发送载荷控制指令,接收来自载荷仿真软件发送的载荷状态信息。协同控制软件通过网络与其他节

点进行通信,同时接收来自地面的协同控制指令,并发送飞机和载荷的状态数据信息。集群地面控制软件接收来自网络的载荷和遥测数据进行状态显示,形成协同控制指令发送到网络上。三维场景显示软件接收到飞机和载荷的状态数据对飞机位置和状态更新,同时形成载荷图像数据发送到网络上。无人机视频拼接软件接收来自网络发送过来的飞机和载荷遥测数据以及视频数据,进行视频流的拼接形成全部态势图像。

1.2 编队协同控制算法系统设计

针对蜂群无人机协同遥感飞行的需求,采用领航-跟随法进行无人机的编队控制。领航-跟随法^[13]是指,在一个具有 m 个固定翼无人系统 A_1, A_2, \dots, A_m 的集群 S 中设定某个固定翼无人系统 A_1 作为集群的领航机,其余无人系统设定为跟随机或是相对领航机 (A_1 的跟随机之间也存在领航-跟随关系)。跟随机按照提前设定的编队控制拓扑结构,通过与领航机的相对偏航角 ψ_i 、相对俯仰角 θ_i 和相对距离 l_i 确定跟随机期望位置,使跟随机趋向,从而对领航机进行跟踪飞行,形成规定队形并保持。当需要进行队形变换时,只需要改变设定的编队控制拓扑结构,即跟随机与领航机的相对偏航角 ψ_i 、相对俯仰角 θ_i 和相对距离 l_i ,即可改变各个跟随机的期望位置,完成队形变换。

为简化模型,以三架无人系统的情况为例(如图 5 所示)进行分析,指定无人系统 A_1 作为领航机,装载有效通信设备和航迹规划系统,可以为自己和整个编队计算出安全可行的航迹,并可以将自己的即时位置信息发送给跟随的无人系统 A_2 和 A_3 。无人系统 A_1 在飞行过程中只负责按照所规划航迹进行飞行,不用接收跟随机的反馈。而无人系统 A_2 和 A_3 需要在运动控制器的控制下,飞向由领航机的状态信息和编队控制拓扑结构所确定的期望位置。当无人系统 A_2 和 A_3 都能有效跟踪自己的期望位置时,就

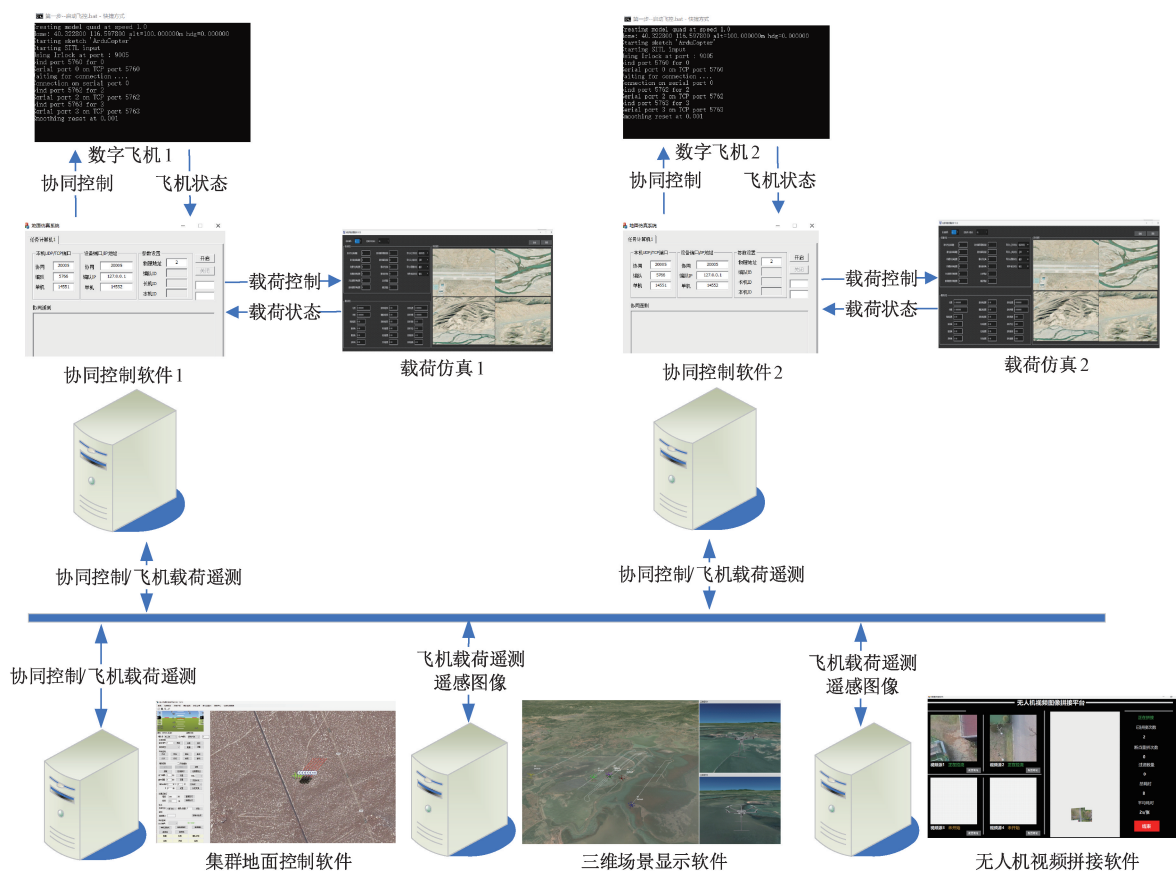


图 4 无人机协同遥感仿真系统信息流程

Fig. 4 Information flow of UAV cooperative remote sensing simulation system

可以形成图示的三角形编队,从而实现编队以一个整体状态飞行。

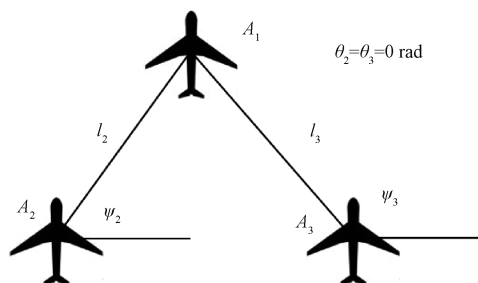


图 5 三机情况下的领航-跟随编队

Fig. 5 Pilot-follow formation in a three-aircraft situation

基于领航-跟随编队控制理论,跟随机获取领航机的即时状态信息,然后通过编队运动控制器来控制跟随机与领航机之间的偏航角、俯仰角和相对距离与编队控制拓扑结构中所规定的偏差尽可能小。因此,将领航机的状态信息和编队控制拓扑结构所计算出的跟随机期望位置与跟随机实际位置之间的误差信号 $e_i = |p_{id} - p_i|$ 作为运动控制器的输入,计算出跟随机的运动控制量,包括线速度大小 $\|V^b\|$ 、偏航角速度 q 和俯仰角速度 τ ,如图 6 所示,进而实现编队飞行的控制效果。

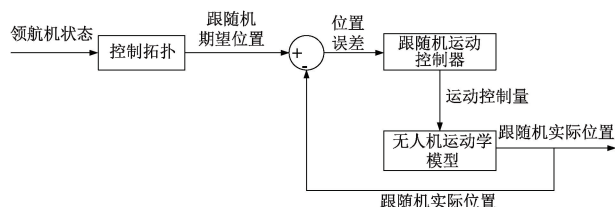


图 6 跟随机编队控制系统结构

Fig. 6 Structure of control system following randomized formation

领航-跟随编队控制理论的优点在于可以有效简化无人系统编队控制的复杂性,只需要改变设定的编队控制拓扑结构,就可以完成队形变换,增加了进行多种编队变换的可行性,且每一个跟随机只需要按照预定的规则控制自己的速度飞行方向,就可以完成整体编队控制的同步。

2 蜂群遥感无人机航路规划与视频实时拼接

2.1 蜂群遥感无人机航路规划设计

蜂群遥感无人机对特定的应急场景区域进行航路规划时,通过规划出长机的飞行航路,其他无人机采用编队跟随的方式进行编队控制,实现对整个任务区域的全部覆盖(如图 7 所示)。

根据任务区大小、无人机与载荷的参数以及飞机飞行



图 7 无人机遥感任务区域

Fig. 7 UAV remote sensing mission area

高度确定无人机对于地面的观测宽度 w 。首先需要得到单任务区域的外接矩形,遍历所有顶点,将所有边界点的经纬度进行比较,分别得到坐标的经度与纬度最大点与最小点,最大纬度与最小经度为矩形左上角点,最大纬度与最大经度为矩形右上角点,最小纬度与最小经度为矩形左下角点,最小纬度与最大经度为矩形右下角点,四点连接构成外接矩形。得到外接矩形后,以观测宽度为基准,从低纬度向高纬度依次划分条带,无人机飞行航线为每个条带中心线,则正好可以覆盖每个条带。接着,利用一次函数两点式,求单任务区域与航线的交点。

$$\frac{x - x_1}{x_1 - x_2} = \frac{y - y_1}{y_1 - y_2} \quad (1)$$

求得每条航线与任务区域每条边的交点,并去除只有一个交点及两个重合交点的点。然后根据实际任务需求和任务区域形状对于航线方向进行调整。这里利用旋转矩阵公式,如下式所示。

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -x_0 & -y_0 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, x_0 和 y_0 为旋转中心,也就是外接矩形的几何中心点, θ 为旋转角度。这样与旋转之后的任务区域进行航线求解,最后再旋转回来,就可以得到带有不同旋转角度的航线。旋转过程中,由于地球是椭球体,所以直接对经纬度旋转会造成形状畸变,所以需要利用墨卡托投影将经纬坐标与像素坐标进行转换。

$$\begin{cases} x = k \ln \left[\tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right) \times \left(\frac{1 - \text{esin}\phi}{1 + \text{esin}\phi}\right)^{\frac{e}{2}} \right] \\ y = k(\varphi - \varphi_0) \\ k = N_{\phi_0} \times \cos(\phi_0) = \frac{\frac{a^2}{b}}{\sqrt{1 + e^2 \cos^2(\phi_0)}} \cos(\phi_0) \end{cases} \quad (3)$$

其中, a 为椭球体长轴半径, b 为椭球体短轴半径, N 为卯酉圈曲率半径, (ϕ, φ) 为经纬度, (x, y) 为投影后坐标, φ_0 为标准纬度,原点纬度为 0,原点经度为 ϕ_0 。图 8 展示了无人机在整个遥感任务区域航线规划结果。

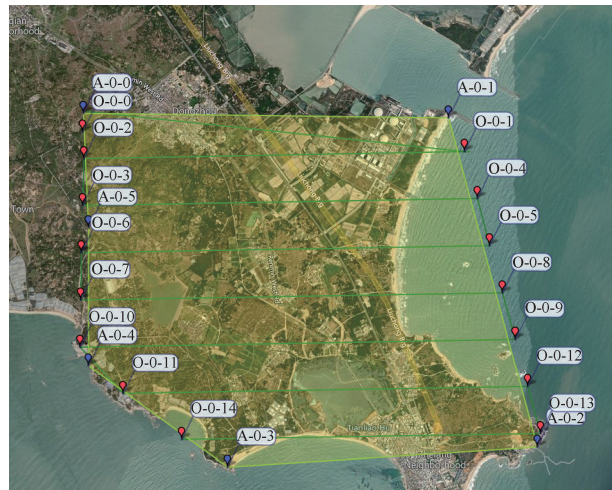


图 8 无人机遥感任务区域航线规划结果

Fig. 8 UAV remote sensing mission area route planning results

2.2 无人机视频实时拼接技术

传统的无人机图像拼接技术通常是在无人机完成飞行任务后,对无人机飞行时所拍摄的录像数据进行离线拼接,这种拼接技术目前虽然有较好的拼接效果,但通常拼接速度较慢、拼接模式本身也缺乏时效性,需要全部图像分析计算后进行拼接,不能逐帧的模式实时在线的对某一态势展开拼接观察,因此不能应用在一些时效性要求较高的场景。而随着无线通信能力的发展成熟,基于视频流的无人机图像实时拼接技术成为一个重要的发展方向,无人机的快速图像拼接算法成为研究热点。

然而基于视频流的无人机图像快速拼接技术仍然存在很多问题:例如图像配准算法难以兼顾拼接精度和拼接效率;视频流图传模式使得图像数据质量不稳定,在拼接时引入了更加复杂的误差;通信链路的稳定性影响着拼接的稳定性,甚至直接影响拼接的成败;无人机在应急场景下无法保证平稳飞行,图像间存在角度变化问题,实用的拼接算法需要对图像的角度变化具有较高的鲁棒性,因此在视频流拼接的模式下,如何同时保持拼接算法的稳定性和时效性是一个重要的问题。

本文提出的无人机实时视频拼接技术中,无人机地面站将拉取的视频流实时进行图像拼接,能够将一定区域内的态势进行实时更新展示,其技术框架如图 9 所示。

利用 Opencv-Python 库^[14]完成对图像的操作处理拉取视频流并将视频帧保存到队列中,通过网络自适应算法对视频流图像帧进行快速的关键点检测和描述子(oriented fast and rotated brief, ORB)提取特征点,并依据特征点数量进行采样,采样时将带拼接图像保存到一个新的队列

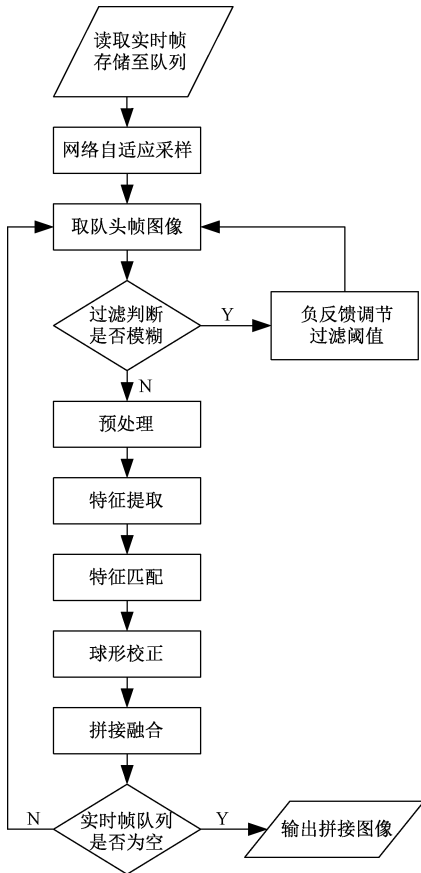


图 9 算法流程图

Fig. 9 Algorithm flowchart

中,并依据采样率选择特征提取和匹配算法。随后待拼接图像队列的头元素进行拼接,首先通过拉普拉斯算子卷积梯度判断图像的模糊程度,将模糊图像过滤,在过滤时负反馈的调节过滤阈值。过滤后的图像进行图像预处理,进行辐射校正、镜头畸变校正等图像处理,随后对图像进行特征提取、特征匹配,使用对极几何约束、单应性约束缩小匹配点范围,并使用随机样本一致算法(random sample consensus, RANSAC)对匹配点进行优化,并最终生成透射变换模型。同时利用图像间的匹配关系使用算法(perspective-n-point, PNP)粗略估算图像位姿变换参数,计算校正球参数,完成待拼接图像的球形投影,使用投影后的图像进行单应性变换完成坐标位置变换,最终在带拼接图像和参考图像处构建掩模,通过泊松融合完成一轮图像拼接。

对于多架蜂群无人机进行协同遥感,需要对多路视频进行协同拼接。对于同时拉取 4 个通道的视频流拼接,其技术实现框架如图 10 所示。

本文首先同时拉取 4 个待拼接的视频流,并且将实时帧数据缓存到硬盘内存中,不同视频流的实时帧数据分别存储,在缓存的同时对实时帧进行图像质量过滤,即使用拉普拉斯算子卷积梯度,过滤图像质量突变的图像。得到

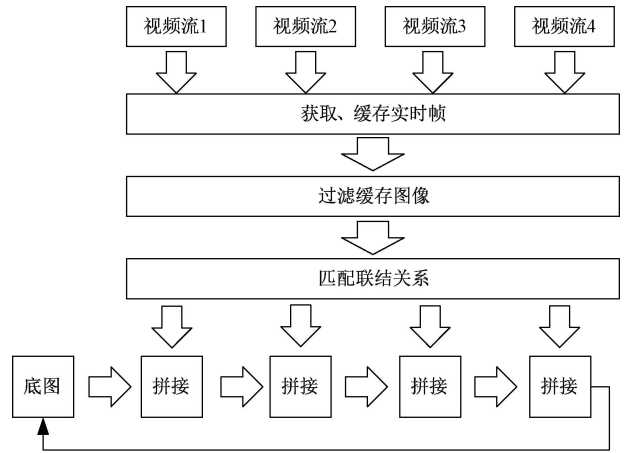


图 10 四通道视频流拼接

Fig. 10 Four-channel video stream stitching

缓存后,首先建立不同视频流间的联结关系,只有当两张图有匹配关系时,才能够确定图像间的相对位置、姿态关系,因此在拼接开始前,首先要判断视频流间的两两匹配关系,把存在匹配关系的视频流进行联结,联结关系决定着后续图像拼接的处理顺序。在拼接时,选中任意视频流的实时帧作为基准底图,然后和与它有联结关系的视频流进行拼接,拼接后的中间产物再与下一个有联结关系的视频流实时帧进行拼接,以此类推,最终将 4 个视频流实时帧拼接完的图片当作底图,进行下一轮实时帧的拼接。

当无人机以一定速度飞行时,图像的像素变化速度取决于无人机的速度和高度,当像素变化率较低时,逐帧进行拼接会浪费计算资源,可以增大采样间隔,保持在算法允许的重叠率下选取质量较高的图像进行拼接,因此本文设计使用滑动窗口与堆排序结合的算法完成自适应像素变化率的算法。

以 v 描述图像的像素变化速率,以 b 描述图像拼接所要求的最小重叠率,建立滑动窗口 $w[0, 1, 2, \dots, i]$,滑动窗口的宽度为 l ,滑动窗口内保存每个图像的特征点数量,由于此处特征点提取后,仅通过数量判断图像质量,因此使用速度较快的 ORB 算法进行特征提取,设采样间隔为 d ,则采样间隔需要满足:

$$d \leq \frac{(1-v)-b}{b} \quad (4)$$

设当前帧图像为 pic_i ,则在保持帧间的最小重叠率下,期望采样的最佳图像为 pic_F :

$$pic_F = \max_{ORB}(pic_i, pic_{i+d}, pic_{i+2d}, \dots, pic_l) \quad (5)$$

然后使用堆排序的方式完成滑动窗口内的质量排序, Floyd^[15]提出了堆排序的算法,堆排序是一种通过构建一定规则的树进行排序的,属于树形选择排序,在堆排序的过程中,是通过树节点值的比较进行的,时间复杂度较低,同时当滑动窗口的宽度固定时,树的元素容量固定,没有额外的存储开销。堆排序和滑动窗口结合的特点是,将滑

动窗口 w 当作顺序存储结构,即构建完全二叉树,使用搜索树中的节点关系,在本文中使用大顶堆,因此子节点和父节点之间的关系能够选择最大值,在无序数据放入树中时比较选择最大值进行输出。当算法进行到堆顶时,最大元素就转移到了堆顶,此时将其取出,滑动窗口向后移动,便能够将剩下子节点的元素重新构建一个堆,得到 $l-1$ 个元素和新进入滑动窗口的构建树,如此反复,能够一直将滑动窗口中的最大值提取出来:

$$pic_F = Heap_{ORB}^{\max}(pic_i, pic_{i+d}, pic_{i+2d}, \dots, pic_l) \quad (6)$$

其中,

$$1 \leq d \leq \frac{(1-v)-b}{b} \quad (7)$$

当完成一轮排序后,滑动窗口 w 正向滑动,此时 w 变为 $w[1, 2, 3, \dots, i+1]$,然后把第 pic_{i+1} 的 ORB 特征点数量元素插入大根堆里,构造一个新的大根堆,从第 $i+1$ 个位置的元素开始,依次看它的父节点的值是否小于它,如果小于就进行交换,直到它的父节点不小于它,或者到了该大根堆的最顶端的根节点,完成新一轮的大根堆构建。

由于在排序阶段已经完成了一轮特征点的提取,在多数情况下视频帧码率不会很高,图像的特征数量较少时,判断为实时帧质量较低,使用尺度不变特征变换(scale invariant feature transform, SIFT)提取特征,使用普通的模式匹配算法(brute force, BF)进行特征匹配;当用于判断采样的 ORB 特征点数量较高时,没有必要再使用 SIFT 特征点进行拼接,直接使用提取得到的 ORB 特征点进行近邻特征匹配(k-nearest neighbor, KNN),以此动态调整视频流场景中的拼接速度。

对于图像缩放参数的求解,则直接以变换前后周长之比代替,对于旋转参数的求解,使图像中心点向四个角的向量相加,得到的新向量与水平方向的夹角即为整体旋转角度:

$$\alpha = \arccos(\cos(\vec{oa} + \vec{ob} + \vec{oc} + \vec{od}), (0, 1)) \quad (8)$$

其中, α 为整体旋转角度,点 o, a, b, c, d 分别为图像的中心点和 4 个内角点。

得到基本变换参数后,以上述的平移、缩放以及旋转重新构造单应性矩阵,在断点处重新进行单应性变换,如下式:

$$H = \begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha & 0 \\ -\sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & dx \\ 0 & 1 & dy \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} W & 0 & 0 \\ 0 & W & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中, H 为重构的单应性矩阵, W 为缩放比例,由于无失真缩放在横向和纵向上的比例应当相同,因此使用同一个缩放参数,由此得到的变换虽然无法在特征上完全连续,但是消除了失真,避免了后续拼接中断的发生,具有较强的稳定性。

图 11 展示了一个由多种因素导致拼接失真的图片,

在失真一定程度后进行了重新拼接,虽然触发断点重拼后的拼接效果质量不高,但是保证了拼接的持续进行。



图 11 断点重拼效果图

Fig. 11 Effect of reassembling at the breakpoint

其中,图像的变换和参数计算部分代码涉及数学运算较多在 python 中耗时较长,一个 205 Kb 大小的图像在 Python 中经过校正的耗时需要将近 1 秒钟,如图 12 所示。

```
*****
img toal: 63
frist H21,H22: -1.67310315e-07, -1.88265549e-08
last H21,H22: 1.53468258e-04, 7.63148371e-04
time toal: 954ms
res size: 6291456
```

图 12 Python 脚本实现的算法耗时

Fig. 12 Algorithm elapsed time for Python script implementation

本文将这两块脚本编译成机器代码的方法是采用实时编译和预编译技术。实时编译技术主要针对解释性编程语言,如:Python、JavaScript、Perl、Shel 等,使高级语言编写的源代码被编译成相应的虚拟机执行的中间代码。虚拟机可以掩盖各平台差异,所以编译后的字节码文件能实现多平台使用。为了解决虚拟机下需要逐行解释字节码,导致虚拟机性能较差的问题,所以产生了提高频繁解释的字节码被编译到平台的机器码中以提高性能的实时编译技术。

在经过算法加速后,本文算法的 Python 程序耗时如图 13 所示,相比未加速前速度提升了将近十倍。

```
*****
img toal: 63
frist H21,H22: -1.67310325e-07, -1.88242356e-08
last H21,H22: 1.53467459e-04, 7.63143671e-04
time toal: 17ms
res size: 6301251
```

图 13 本文方法加速后的算法耗时

Fig. 13 Algorithm elapsed time after acceleration of the method in this paper

3 蜂群遥感数字仿真系统结果分析

3.1 数字仿真

考虑到真实飞行环境的复杂性和可靠的问题,本文对 6 架无人机编队协同控制进行了仿真模拟。本系统采用 APM 的软件在环仿真内核,可以完成无人机平台的数字仿真和控制率解算,实现在仿真环境下完成对多架无人机的仿真与控制。仿真目的旨在模拟蜂群复杂编队飞行环境和采集图像数据集。本文搭建的多架无人机协同场景如图 14 所示。

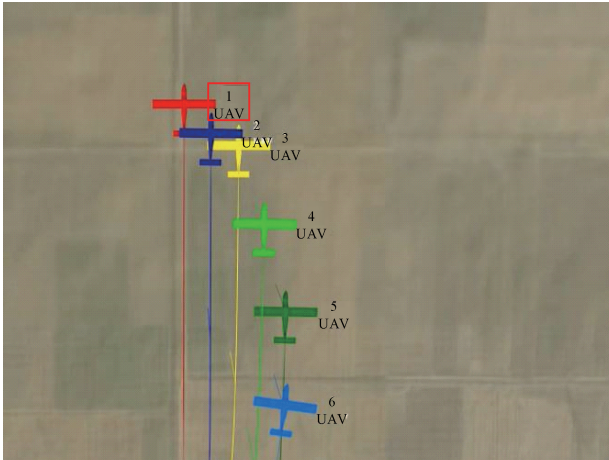


图 14 飞行仿真场景视图
Fig. 14 View of flight simulation scenario

3.2 视频拼接结果

本文基于 2.2 节所述方法,构建了无人机视频图像拼接平台实现多路图像的实时拼接,接入视频的数量为 6 路,三维场景仿真软件根据蜂群无人机的观测角度生成无人机的飞行视频数据,通过图像拼接算法进行实时视频拼接。

针对应急场景中无人机会出现大角度抖动导致不连续的问题,采用球形变换^[16]解决图像拼接不连续的问题。

为了满足这一拼接条件,本文使用椭圆对图像进行投射变换,以下从单方向的拼接进行说明,该图展示了 pic1 到 pic5 在进行拼接时发生了 α_1 到 α_4 的透射偏移,在经过不同半径的球形透射变换后,使图像拼接后的边缘像素点收束到了 Lbase 平面,而图像本身的弯曲控制在最远视角距离,使得原本的单应性视角距离改变转化为了像素的波浪形状变,如图 15 所示。

本文提出算法在图 16、17 的应急视频场景下耗时情况如表 1、2 所示,对比了主流拼接算法 SPHP^[12] ODM^[17]、与本文的算法拼接耗时,由于对现场态势视频构建和拼接方法的改进,本文算法在拼接效率方面有着较好的发挥。

实验结果可以看出本模型在在线实时的无人机图像拼接中能够增强拼接的稳定性,降低了透射变换带来的误差积累,并且这种方法无需对全部图像进行一次性的预处

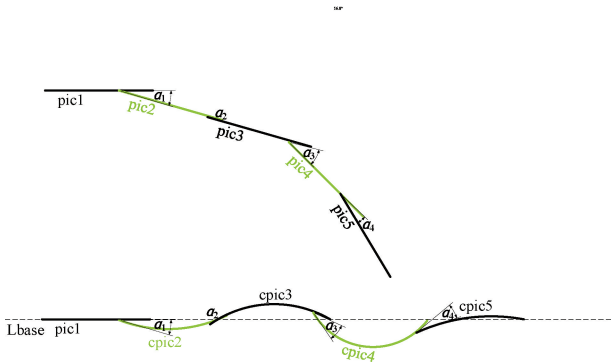


图 15 球形校正拼接示意图
Fig. 15 Schematic diagram of spherical correction splicing



图 16 无人机多路视频拼接结果
Fig. 16 Results of drone multi-channel video splicing



图 17 火灾场景下无人机多路实时视频拼接结果
Fig. 17 Multi-channel real-time video splicing results of UAV in fire scene

表 1 SPHP、ODM、本文拼接校正算法耗时对比(场景一)
Table 1 Comparison of time consuming splicing correction algorithms of SPHP, ODM, and this paper(Scene 1)

算法	耗时/ms	平均耗时/ms	输出大小/k
SPHP	451 678	3 445.38	4 825
ODM	778 804	4 828.27	5 324
本文	210 901	1 806.1	3 360

理,可以应用在连续视频帧图像的在线拼接场景。
在上述 2 个实验场景中,拼接时间对于单电脑平均每次拼接时间分别为 1.8 s、0.9 s,在实际拼接中对于实时图像存在一定的延迟,当无人机已经起飞并达到图像采集高

表 2 SPHP、ODM、本文拼接校正算法耗时对比(场景二)
Table 2 Comparison of time consuming splicing correction algorithms of SPHP, ODM, and this paper(Scene 2)

算法	耗时/ms	平均耗时/ms	输出大小/k
SPHP	54 876	1 545.25	4 523
ODM	58 846	3 428.48	4 342
本文	15 901	903.4	2 687

度平稳飞行时,只需要保证一定的图像重叠率,本文方法就可以实现实时的现场态势重建。

4 结 论

本文针对应急情况下需要快速获取现场态势的需求,构建了以多无人机组成的蜂群无人机遥感仿真验证平台。基于领航-跟随的编队控制方法,实现了蜂群无人机的编队协同控制;设计了以区域覆盖的长机航路规划,其他无人机跟随飞行的遥感自动航路规划方法。系统以滑动窗口与堆排序结合多路视频图像快速拼接方法,实现了多路图像的实时拼接,可以形成现场实时态势。通过多路图像实时拼接表明:可以利用蜂群无人机多机协同遥感,可以实时构建应急场景现场全局态势。

参考文献

[1] 孙建红. 现代信息技术在城市灾害应急管理系统中的应用[J]. 电子技术, 2022, 51(5): 116-117.
SUN J H. Application of modern information technology in urban disaster emergency management systems[J]. Electronic Technology, 2022, 51(5): 116-117.

[2] 程雪力. 四川森林消防: 全力扑救: 速战西昌山火[J]. 中国安全生产, 2023, 18(5): 46.
CHENG X L. Sichuan forest firefighters: All-out fight against the Xichang Mountain Fire in a hurry[J]. China Occupational Safety and Health, 2023, 18(5): 46.

[3] 庞强伟, 胡永江, 李文广, 等. 多无人机协同侦察任务规划方法研究综述[J]. 电讯技术, 2019, 59(6): 741-748.
PANG Q W, HU Y J, LI W G, et al. Research on multi-UAV cooperative reconnaissance mission planning methods: An overview[J]. Telecommunication Engineering, 2019, 59(6): 741-748.

[4] 闫超, 涂良辉, 王聿豪, 等. 无人机在我国民用领域应用综述[J]. 飞行力学, 2022, 40(3): 1-6.
YAN CH, TU L H, WANG Y H, et al. Application of unmanned aerial vehicle in civil field in China[J]. Flight Dynamics, 2022, 40(3): 1-6.

[5] YU H, LI G, ZHANG W, et al. The unmanned aerialvehicle benchmark: Object detection, tracking and baseline[J]. International Journal of Computer Vision, 2020(128): 1141-1159.

[6] 张广泉. 聚焦应急无人机前沿技术及应用发展新动态[J]. 中国应急管理, 2019(8): 18-28.
ZHANG G Q. Spotlight on emergency drone frontier technology and new developments in applications[J]. China Emergency Management, 2019(8): 18-28.

[7] 刘奇胜. 基于视觉的四旋翼无人机目标跟踪系统的设计与实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
LIU Q SH. Design and implementation of vision-based target tracking system for quadrotor UAVs [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.

[8] 陆鑫炜. 无人机与无人艇协同巡检的路径规划研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2022.
LU X W. Path planning for cooperative inspection of UAV and USV[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022.

[9] XIA Y H, NIE B SH, ZHANG Y N, et al. Design and implementation of tunnel image mosaic system based on open CV [J]. International Journal of System Assurance Engineering and Management, 2020, 11(4): 792.

[10] LI W N, CAO Y. A rapid road image mosaic method based on monocular camera[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1437(1): 012008.

[11] ZARAGOZA J, CHIN T J, BROWN M S, et al. As-projective-as-possible image stitching with moving DLT[C]. Portland: Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). IEEE, 2013: 1285-1298.

[12] CHANG C H, SATO Y, CHUANG Y Y. Shape-preserving half-projective warps for image stitching [C]. Columbus: Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). IEEE, 2014: 3254-3261.

[13] 段海滨, 邱华鑫. 基于群体智能的无人机集群自主控制[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
DUAN H B, QIU H X. Autonomous control of UAV cluster based on group intelligence [M]. Beijing: Science Press, 2018.

[14] ABBADI N K E, HASSANI S A, ABDULKHALEQ A H. A review over panoramic image stitching techniques[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1999(1): 012115.

[15] FLOYD R W. Algorithm 245-Treesort [J]. Communications of the ACM, 1964, 7(12): 701.

[16] 曾国奇, 牛子凡, 郑丽丽, 等. 基于球形变换的无人机视频图像实时拼接方法[J]. 航空学报, 2023, 44(24): 135-144.
ZENG G Q, NIU Z F, ZHENG L L, et al. A real time video image stitching method for UAV based on spherical transformation [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(24): 135-144.

[17] LEE K Y, SIM J Y. Warping residual based image stitching for large parallax[C]. Seattle: Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). IEEE, 2020: 8195-8203.

作者简介

刘健, 高级工程师, 主要研究方向为无人机指挥控制。
E-mail: 289347380@qq.com

陈何伟, 硕士研究生, 主要研究方向为无人机视觉感知。
E-mail: heweichen@buaa.edu.cn

曾国奇(通信作者), 研究员, 主要研究方向为无人机任务规划与飞行模拟训练。
E-mail: zengguoqi@buaa.edu.cn