

引用格式: Sana Ullah, 晏磊, 冯朝晖, 等. 无人机组网遥感实时任务观测的冗余容错控制方案[J]. 地球信息科学学报, 2019, 21(4): 552-559. [ Sana Ullah, Yan L, Feng Z H, et al. Redundancy-based fault-tolerance control schemes in UAV networking for real-time remote sensing monitoring missions[J]. Journal of Geo-information Science, 2019, 21(4): 552-559. ] DOI:10.12082/dqxxkx.2019.180389

# 无人机组网遥感实时任务观测的冗余容错控制方案

Sana Ullah, 晏磊, 冯朝晖, 赵海盟, 孙逸渊, 赵红颖\*

北京大学地球与空间科学学院遥感与地理信息系统研究所, 北京 100871

## Redundancy-Based Fault-Tolerance Control Schemes in UAV Networking for Real-Time Remote Sensing Monitoring Missions

Sana Ullah, YAN Lei, FENG Zhaohui, ZHAO Haimeng, SUN Yiyuan, ZHAO Hongying\*

Peking University, School of Earth and Space Science, Institute of Remote Sensing and GIS, Beijing 100871, China

**Abstract:** Small to medium-sized unmanned aerial vehicles (UAVs) are increasingly been used in various real time static and dynamic missions, which make them very useful tool to assist men. There are several factors which make these UAVs suitable for monitoring and survey in a wide range of conditions. Despite of all these capabilities, certain factors remain the biggest challenge for extensive use of UAVs at individual level in different real-time missions. Moreover, once prompt response to any of these constraints during the mission execution is missed, can affect the mission's overall results, leading to partial or complete failure of the whole mission. For such purpose introduction of redundant fault-tolerance into the system is very important in order to minimize the probability of failures and increase its robustness because it is practically impossible to build a perfect system. The fundamental problem is that, as the complexity of a system increases, its reliability drastically decreases unless compensatory measures are taken. The aim of redundant fault tolerance is to introduce redundancy by adding one or more modules as back-up usually in parallel configuration. To improve the robustness and success rate of UAV network systems for aerial remote sensing missions under extreme conditions, this paper introduced the redundancy-based fault-tolerance control technology into UAVs networking designs, and determined the best networking solutions with different restrictions. The devised networking design includes multi-UAV network with active cooperation through simultaneous monitoring during remote sensing missions such as "large-scale ecological monitoring," "medium-scale flood disaster monitoring," and "fine-scale security surveillance" under different observation conditions. The multi-UAV network serve as redundant fault-tolerant architecture where system could be fault tolerant through adding more than one UAVs as back-up. Scenarios set for the redundant fault-tolerance are UAVs position and viewing angle during different extreme conditions. The UAV(s) in network scheme is considered faulty when its position and viewing angle exceeds the set threshold and would be separated and not considered for further analysis. Only in this way, we can get

收稿日期: 2018-08-24; 修回日期: 2019-01-29.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0503003). [ **Foundation item:** National Key Research and Development Program of China, No.2017YFB0503003. ]

作者简介: Sana Ullah (1984-), 男, 博士生, 巴基斯坦基达市, 主要从事基于多无人机的实时任务冗余容错的研究。

E-mail: sana\_ullah@pku.edu.cn

\*通讯作者: 赵红颖 (1971-), 女, 博士, 吉林长春人, 主要从事遥感成像处理与应用、无人机航空遥感技术。

E-mail: zhaohy@pku.edu.cn

effective output of the networking control solutions under extreme conditions to ensure that missions can be carried out smoothly.

**Key words:** UAV networking; ecological monitoring; disaster monitoring; security surveillance; redundancy-based fault-tolerance

**\*Corresponding author:** ZHAO Hongying, E-mail: zhaohy@pku.edu.cn

**摘要:**中小型无人机(UAV)越来越多地应用于各种实时静态和动态任务中,已成为对人类非常有用的辅助工具。适合无人机在各种条件下进行监视和测量的因素有很多,但无人机在执行不同的实时任务时仍会受到各种挑战,且一旦在任务执行过程中任何一个约束的及时响应缺失,将会影响任务的总体结果,导致整个任务部分或完全失败,在实际中很难建立完美系统。因此,在系统中引入冗余容错来最小化故障概率并增强其鲁棒性非常重要。其中,根本问题是随着系统复杂性的增加,除非对其采取补偿措施,否则其可靠性会急剧下降。冗余容错是通过添加一个或多个模块(通常采用并行配置)作为备份来引入冗余。为了提高极端条件下航空遥感任务无人机网络系统的鲁棒性和成功率,本文将基于冗余的容错控制技术引入无人机网络设计中,确定了不同限制条件下的最佳网络解决方案。组网设计是在不同观测条件下的遥感任务如“大尺度生态监测”、“中尺度洪灾监测”、“小尺度安全监测”中,通过同步监控进行主动合作的包括多个无人机的网络。多无人机网络作为冗余容错体系结构时可以通过添加多个无人机作为备份使得系统可以容错,而无人机在不同极端条件下的位置和视角则可以作为冗余容错的场景设置。当组网方案中的无人机位置和视角超过设定的阈值时可以被认为是故障的,其将被分离并不考虑进一步分析。通过以上方式,无人机网络可以在极端条件下得到组网控制方案的有效输出,进而保证遥感观测任务的顺利进行。

**关键词:**无人机组网;生态监测;灾害监测;安全监控;冗余容错

## 1 引言

无人机被定义为不带人类操作员的动力飞行器。它利用空气动力来提供无人机升力,可以自主飞行或远程驾驶,并且可以携带有效载荷<sup>[1]</sup>。尽管在摄影测量与遥感领域,迄今为止的数据来源主要是飞机和卫星传感器<sup>[2-5]</sup>,但无人机正迅速成为一种可替代的数据获取方法<sup>[2,6]</sup>。尤其因为无人机作为一种可用的低成本系统,其应用数量在过去十年中一直在增长<sup>[1,7-9]</sup>。除了成本低外,无人机还有一些其他因素使其真正适合在各种条件下进行监视和测量,如便携性好、尺寸小、重量轻、可飞越难以到达的区域、可在确保非常近距离观察时快速获取一个相对较大区域的大量信息。

无人机作为一种动态工具,可帮助人类在不同的应用领域执行不同的任务。例如,Themistocleous<sup>[6]</sup>使用各种无人机平台在不同区域使用可见光、多光谱和超光谱摄像机进行环境和考古应用;Yang等<sup>[10]</sup>以无人机作为遥感平台(UAV-RSPS),配备不同的农业传感器,用于监测植物高度、叶色、叶面积指数(LAI)、叶绿素含量、生物量、大面积产量等表型参数,并尽可能少地进行田间试验,从而取得了高度可靠的结果;Silvagni等<sup>[11]</sup>成功地将基于多旋翼无人机的可见光和热红外探测应用在雪山救援行动中;

Tomotani<sup>[12]</sup>和Karaca等<sup>[13]</sup>利用无人机平台,使用不同的搜索算法进行了搜索和救援操作;Seo等<sup>[14]</sup>还提出了一种在物联网(Internet of Technology)安全平台上利用信标和无人机在建筑物里进行救援和疏散的监测和应急响应方法,称为UAV-EMOR(UAV-assisted Emergency Monitoring and Response)系统;Giordan等<sup>[15]</sup>通过收集大量案例进行研究,提供了一系列通过使用无人机平台评估的自然灾害监测和管理应用。此外,通过无人机平台可监测比固定监测系统更广泛的区域,比在直升机或卫星上实施的常规系统更具成本效益<sup>[16-17]</sup>。

无人机甚至可以在不危及人身安全的情况下到达人类不可到达的地点,使用连续近似模型(CA)<sup>[18]</sup>来设计无人机作为在受灾地区提供应急物资的运输方式。在道路和废墟覆盖区、基础设施遭到破坏会阻碍医疗队到达偏远灾区,不适合卡车或直升机供应物资的情形下,无人机,特别是小型无人机成为灾区提供卫生设施的最佳选择。Rabta等<sup>[19]</sup>将无人机应用在人道主义后勤物资分配中,还提出了通过无人机将多包轻型救灾物品(如疫苗、纯净水、药片等)运送到灾区内一定数量的远程地点的优化模型。Griffin<sup>[20]</sup>讨论了无人机灾害管理平台的发展前景,并根据目前的研究现状和研究多样性得出结论,有相当的证据支持对无人机技术进行战略

投资用来开发新的和提高现有的无人机的能力。在发展这些能力时,研究人员必须了解一系列影响特定类型灾害发展的变量。

在上述领域中无人机的使用越来越多,为用户提供了具有成本效益的实时高空间和高时间分辨率信息。尽管无人机具有上述功能,某些因素(如储能有限、物理和机械损坏、Wi-Fi 信号故障、大气条件恶劣(有风、光线过暗、降雨)等)仍然是中小型无人机在灾害监测、森林火灾探测、搜救、执法、空中监视和边界管理等不同的实时高风险任务中广泛使用的主要障碍。组网飞行过程中任何阶段遇到上述因素都会对任务造成危害甚至导致其最终失败。

鉴于此,用多个无人机积极合作的多无人机网络在实时高风险任务中用以避免任务执行过程中任何关键阶段的失败具有重要优势。可靠性是飞行器中的关键问题,其中故障检测和识别(FDI)技术在提高系统可靠性中起到重要作用。考虑到这一概念,使用具有冗余容错系统的多无人机是成功完成任何特定任务的迫切需要,尽管在多无人机网络的任何子系统的任何阶段都可能会发生故障。已有对无人机的FDI应用研究都使用基于模型的方法,这些方法试图使用系统动力学中一些数学描述的冗余来诊断故障,主要应用于固定翼无人机<sup>[21-22]</sup>或直升机无人机<sup>[21,23-25]</sup>。而本文提出的多无人机冗余容错控制方案的概念用于实时任务,即大尺度生态监测、中尺度洪水监测和小尺度国土安全预警监测。本文首先讨论容错的概念和相关理论,然后介绍了无人机冗余容错方案在不同尺度的实时任务中的应用,最后讨论了无人机容错网络方案的构建。

## 2 冗余容错的理论

容错性是指系统尽管有故障但仍能继续执行其功能的能力,或者说一个成功的操作系统是可靠且没有故障的<sup>[26-27]</sup>。容错系统能处理单个硬件或软件组件中的故障、电源故障或其他类型的意外故障,并且仍然满足其规范。因为实际上不可能建立一个完善的系统,所以需要容错。根本问题是随着系统复杂度的增加,除非采取补偿措施,否则其可靠性会大幅降低<sup>[27]</sup>。如果系统不能执行其期望的功能,任务则会失败。故障既可以是系统的完全停

止,也可以是子系统中某些功能的故障或不稳定。容错设计的目的是使故障的概率最小化,不管这些故障是简单地惹恼客户还是导致财富损失、人员伤亡或环境灾难。

### 2.1 容错和冗余

为了使系统更加稳定可靠,采用不同的方法实现容错。所有这些方法的目的是实现一定数量的冗余。通过引入冗余来提高系统可靠性的想法最初来自Heimerdinger等<sup>[28]</sup>在1950年代早期的作品《概率逻辑和从不可靠部件合成可靠有机体》。

冗余实际上是在无故障环境中提供不必要的功能的能力。在实际中,冗余意味着除了所考虑的模块之外,还添加一个或多个模块作为通常并行配置的备份模块<sup>[29]</sup>。具有冗余功能的容错系统基本方案如图1所示。

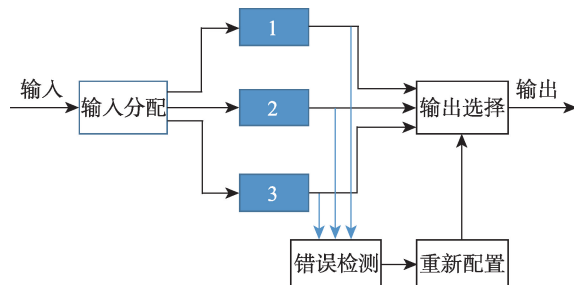


图1 冗余并联功能模块的并联系统故障分析

Fig. 1 Fault analysis of the parallel system with redundant functional units

该功能模块可以是硬件组件或软件组件,可以相同或不同。容错系统的不同配置存在静态或动态冗余、冷备份或热备份。一般来说,用故障检测功能对功能模块进行监控,然后使用重新配置机制来关闭故障模块并打开备用模块(动态冗余)。这些模块是执行器、传感器、计算机、马达或泵。对于电子硬件,存在以 $n \geq 3$ 个模块和多数投票者构建的简单方案,如3分之2系统(静态冗余)<sup>[29]</sup>。

### 2.2 基于容错理论的无人机系统

如上所述,无人机在物理机身、通信、传感器和成像系统方面可能存在故障。物理系统故障可以在UAV的机身部位,如机翼(固定翼无人机)、转子(旋转无人机)、飞行控制器、电机、螺旋桨、速度控制器、电池、框架等。尽管无人机使用不同类型的传感器,如带有加速度计和3个陀螺仪的惯性测量单元(IMU)、用于姿态确定的三轴磁强计、用于起



飞和着陆的GPS和超声波或气压高度传感器,这些传感器中一个传感器的故障如果未检测到,则可能引起位置和姿态估计误差。在这些情况下,重新配置通常包括隔离故障传感器和使用其他传感器来获得最佳的位置和姿态估计<sup>[21,30]</sup>。另外,通信系统基于由地面控制站通过上行链路和下行链路信号形式的Wi-Fi单独共享的UAV生成的传感器信息。单个上行链路用于远程导频的飞行控制或用于自动导频,但下行链路信号被指定用于从无人机到地面控制站的信息共享。在关键任务中,数据下行任务中有效载荷(摄像机)的损失必须中止。在部分或联合数据链损失的其他情况下,任务可以继续,并且任务可以实现部分预期目标<sup>[31]</sup>。成像系统由摄像头组成,用于通信信道的图像和视频与地面控制站共享。因此,在相机或通信系统出现故障的情况下,成像系统将出现故障,或者说它更依赖于通信系统并且更经常地集体表达。表1中给出了轻小型无人机会发生的一些故障的识别。

### 3 用于实时研究的冗余容错方案

#### 3.1 大尺度生态组网

无人机提供了一种快速、经济、灵活的方式来收集生态数据,以便为保护土地和土地管理决策提供信息。在大尺度生态组网<sup>[27]</sup>冗余容错控制方案中,提出的目标是无障碍从地面控制站的编队无人机接收输出信息(即目标站点的图像),并且通过识别故障然后将其隔离以确保系统平稳工作而没有任何故障。生态监测组网方案包括利用控制车辆控制现场的多个轻小型无人机,在示范区(预计是在观测站)形成观测网络,综合观察时间为4~5 d,使用的记录传感器是全景传感器和高光谱传感器,并且在示范区域的观察期间最好有良好的天气条

件。基于该方案的冗余容错解决方案会导致传感器、天气和UAV平台的资源约束的增加。

#### (1) 无人机平台的要求

由于轻小型无人机用于区域观测,一次只能携带一个传感器,传感器之间没有其他选择。如上所述,生态监测是通过多个传感器的组合完成的。在这种情况下,任务被分配给全景和高光谱传感器的可用有效载荷。假设工作的全景和高光谱传感器的数量分别由 $N_{\text{pan}}$ 和 $N_{\text{hyper}}$ 表示,而 $S_{\text{pan}}$ 和 $S_{\text{hyper}}$ 分别表示每日全景和高光谱传感器需要工作的飞行区域。对于 $S_{\text{pan}}$ 和 $S_{\text{hyper}}$ ,实际的日常工作区域将重新计算为:

$$\text{New}S_{\text{pan}} = \frac{M \cdot S_{\text{pan}}}{N_{\text{pan}}} \quad (1)$$

$$\text{New}S_{\text{hyper}} = \frac{M \cdot S_{\text{hyper}}}{N_{\text{hyper}}} \quad (2)$$

式中: $M$ 是无人机平台的架次。根据重新计算出来的单飞行面积进行任务分配,并输出组网方案。因为全景影像和高光谱影像是同步成像,在进行全景传感器与高光谱传感器数量选择时应满足 $\min|N_{\text{pan}} - N_{\text{hyper}}|$ 。

#### (2) 观测期间天气变化较大

由于基于无人机的遥感成像系统受天气条件的影响很大,因此在极端天气条件下(如阴天、下雨、沙地、大风等)应当停止遥感观测,因为这些极端天气条件极大地影响了无人机从机身到成像系统的可靠性,反过来影响整体观测输出的准确性。在陡风期间,应避免使用无人机特别是轻小型无人机观测,因为这些轻小型无人机难以稳定地悬停,这可能导致图像捕获不良并且还增加了项目成本。在涉及农作物和树木的地方,这些在多风条件下的运动会使图像更加模糊。然而,在风速高于

表1 轻小型无人机故障识别<sup>[32]</sup>

Tab. 1 Fault recognition of light and small-size UAVs

故障类型	故障组件	可能原因
硬件故障	无刷电机和电子速度控制器(ESC)	过热、振动、断开、冲击
	姿态传感器(IMU:陀螺仪+加速度计+磁强计)	振动、漂移和磁场产生的噪音
	高度传感器(超声波装置)	障碍物回声
	全球定位系统	信号丢失、信号跳跃、低精度、漂移
软件故障	电池组	短路、意外放电
	操作系统	系统停止、内存问题、CPU空间不足、软件错误
	控制器	不稳定、上风、饱和

15 km/h 的风中飞行可能会对无人机图像的整体质量产生负面影响。另外,滚动云层也是有问题的,因为在示范区域中来自无人机网络的一致观测很重要,而滚动的云倾向于产生阴影和不一致的光。即使在完全晴朗的晴天,用于遥感目的的无人机飞行的最佳时机是在上午 10 时至下午 14 时,其中成像对象可以接收最佳光线以将其图像捕获到传感器上。考虑到这些限制,在这些天气条件下的时间被排除在遥感观测有效时间之外,有必要使用其他时间进行补偿。因此每个传感器的正常观察工作量是:

$$NewS_{pan} = \frac{T_{normal} \times S_{pan}}{T_{available}} \quad (3)$$

$$NewS_{hyper} = \frac{T_{normal} \times S_{hyper}}{T_{available}} \quad (4)$$

式中:  $T_{normal}$ 、 $T_{available}$  分别为正常观测的周期和无人机可工作的观测天数。

### (3) 日观测面积超出观测极限

在(1)和(2)两种观测条件下,单个台站的日观测面积会超出观测极限  $S_{max}$ ,而其中观测极限来自于无人机平台的飞行速度、油耗以及太阳处于合适天顶角的时间,因此在组网方案中首先将降低观测采样频率,对观测地点进行权重赋值,以权重高低进行排序,观测满足的条件为:

$$S_{ob} = \sum S(w_i) < S_{max} \quad (5)$$

式中:  $i$  是观测对象的权重信息,排列为(0, 1, 2, ...),观测面积的增加以日观测上限为标准。

## 3.2 中尺度洪水监测

自然灾害始终是人类历史上面临的最大问题,但在过去的几十年里,由于当地地形和全球环境的变化,其频率和严重程度急剧增加,对人民的生计和安全影响很大<sup>[33]</sup>,因此需要认真考虑这个问题以减少人力和财产损失,并采取一些措施进行灾害(洪水,台风等)预报、灾害管理和灾后(洪水、地震、火山)救援等情况。受灾地区通常位于硬地形区域,在发生任何灾难时人员难以进入。在紧急情况下,遥感技术可用作灾害影响的信息来源,因此过去几年主要用航空照片或卫星图像获取土地覆盖变化和灾害检测的所需信息,但卫星图像由于灾害发生时间和卫星重访时间的不同而无法提供那个特定灾区的实时信息。而在危险的和人员无法立即到达的地区这个问题可以通过无人机来解决。由于无人机体积小、装载方便、移动性更好,它们可

随时随地在相对恶劣的气候条件下使用。对于灾害监测,本文将注意力集中在基于无人机的中尺度洪水灾害监测<sup>[34-36]</sup>的冗余容错架构设计,使用无人机代替卫星数据的目的是获得实时航拍图像。这些图像可以记录和分析洪水造成的整体环境变化。该任务将通过使用多 UAV 监测洪水区域来完成。受影响的区域将通过使用不同的传感器来监测,即可见光、红外、SAR 和激光雷达传感器,并且轻小型无人机一次仅携带一个传感器。在这种情况下,传感器按照要求和目的进行分布。同时,在实时任务中进行观察时,即在示范区域内发生洪水灾害时,无人机在机身、通信系统,传感器或成像系统中发生任何故障的可能性都很大。为了克服观察期间的这种故障,引入冗余容错方案来识别丢失或冗余的信息,隔离它们并使系统顺利工作以用于后续工作中。

### (1) 长航时无人机缺失

长航时无人机的主要目的在于灾情巡航,在这种情况下,长航时无人机的工作任务将直接转化给轻小型无人机平台。而考虑到轻小型无人机的航程较短,一般在受灾地区边缘采用固定翼飞机,在受灾核心地区采用多旋翼无人机,因此在单重访周期内所采用的无人机数量要能够覆盖整个灾区的面积,即满足:

$$S_{Total} = \sum S(UAV_i) \quad (6)$$

式中:  $S(UAV_i)$  是单个无人机在重访周期内所观测到的以洪水灾害为例的面积。无人机组网满足多架次无人机在受灾区域同时进行观测,并同步将观测的灾情数据返回给综合指挥车。

### (2) 基于传感器的任务分配

本文所提出的用于洪水灾害监测的任务是用无人机安装的传感器完成的,即可见光、红外、SAR 和激光雷达。鉴于载荷类型中可见光与红外载荷为二位成像载荷,在仅仅获取地面场景的问题上面可以进行互换。而 Lidar 与 SAR 影像均是可以获取三维场景的,而且这两种观测手段均以主动方式观测,有着全天时的效果,因此以地形 DEM 数据等可以进行互相替代,基于上述分析可以完成以观测区域规划的冗余容错控制。

$$NewS_{IR-Ob} = \frac{N_{V/IR} S_{V-Ob} + N_{IR} S_{IR-Ob}}{N_{IR} + N_{V/IR}} \quad (7)$$

$$NewS_{Lidar-Ob} = \frac{N_{SAR/Lidar} S_{SAR-Ob} + N_{Lidar} S_{Lidar-Ob}}{N_{Lidar} + N_{SAR/Lidar}} \quad (8)$$

式中:  $N_{V/IR}$  是用红外传感器代替可见光传感器的

数量;  $S_{V-Ob}$  是单个可见光传感器在单个周期内观测的面积;  $N_{IR}$  是原定计划中使用的红外传感器数量;  $S_{IR-Ob}$  是单个红外传感器观测的面积;  $NewS_{IR-Ob}$  是在新的任务分配下传感器需要观测的面积;  $N_{SAR/Lidar}$  是用 Lidar 传感器代替 SAR 传感器的数量,  $S_{SAR-Ob}$  是单个 SAR 传感器在单个周期内观测的面积;  $N_{Lidar}$  是原定计划中使用的 Lidar 传感器数量,  $S_{Lidar-Ob}$  是单个 Lidar 传感器观测的面积;  $NewS_{Lidar-Ob}$  是在新的任务分配下 Lidar 传感器需要观测的面积。

### (3) 载荷和平台均缺失

在这种条件下,将使用历史遥感影像数据对观测区域进行影像的分割,对中心区域进行标记,如将居民居住的区域、重点交通道路标志为权重最高的区域,将工业区与农业区域标志为权重次之的地方,将核心区域进行重点观测,观测总面积为:

$$S_{ob} = \sum S(w_i) < S_{max} \quad (9)$$

式中:  $S_{max}$  是平台和传感器在单位重访周期内完成的观测面积总数,其中  $w_i$  是观测对象的权重信息,排列为  $(0, 1, 2, \dots)$ ,观测面积的增加受到  $S_{max}$  的限制。

### 3.3 小尺度国土安全预警观测

无人机受到重大关注的另一个领域是执法界。它是执法机构非常有效的技术工具,主要有2个原因:①传统空中支援的规模、技术能力和成本效益;②在操作过程中降低人员的安全风险,包括国土监视,反恐等<sup>[37]</sup>。本文从安全角度<sup>[38-40]</sup>讨论冗余容错控制框架。在进行精细化组网冗余容错控制中,拟获取可见光、红外、SAR 影像,所采用的无人机为长航时、轻小型平台以及飞艇,通过长航时影像对恐怖分子可能逃窜的区域进行长航时可见光影像二维拼接,同时采用轻小型无人机平台进行重点区域侦查。在整个打击恐怖分子的过程中,应以充足的准备开展任务,因此精细化反恐冗余容错控制不受平台缺失、载荷缺失以及天气条件所制约。基于此,在开展精细化反恐组网冗余容错当中,应该以无人机的位置是否受敌人干扰、被击毁甚至失误造成组网异常为冗余容错的重点。

## 4 无人机容错组网方案的构建

利用冗余容错技术实现状态监测和故障重规划,

针对无人机飞行的位置状态进行调整。首先对编组的无人遥感器进行命令权重划分,通过地面站对无人机的飞行位置、姿态进行分析,如有无人机状态异常,在可调控的范围内进行状态调控使组网系统恢复正常,如不能进行状态的及时恢复,则按照优先权重进行编队重组。

对于建立失踪无人机位置检测的方案,以3个无人机为例来完成这种情况。在可见情况下,通过其车载导航传感器无法检测到单个无人机可能存在的定位故障。因此,通过在观测网络中使用一个以上的无人机可以克服这个限制因素,可利用无人机团队提供的功能来增强每个单独的故障检测系统。以这种方式,来自其他无人机的传感器可以获取数据,这些数据可用于无人机故障检测系统以检测其自身传感器中的故障。如果无人机配备了可视摄像头,不同的无人机可以使用他们的摄像头识别场景中的常见物体<sup>[21]</sup>。例如,使用能够识别场景的自然界标的鲁棒特征提取技术<sup>[41]</sup>,以及由3个无人机获得的相同界标之间的对应关系提供它们之间的相对姿态位移。因此,倘若任何一个无人机的GPS有故障,则可以通过使用其他2个无人机的GPS和根据它们拍摄的图像的相对位置来计算并检测该故障。它将有助于使用其他无人机的已知位置估计失踪的无人机位置。如图2所示,系统重构需要提供的实时位置反馈通道  $P_1, P_2, P_3$  需满足:

$$\overrightarrow{\Delta P_1} = \overrightarrow{OP_1} - \overrightarrow{OP_2} \quad (10)$$

$$\overrightarrow{\Delta P_2} = \overrightarrow{OP_2} - \overrightarrow{OP_3} \quad (11)$$

$$\overrightarrow{\Delta P_3} = \overrightarrow{OP_3} - \overrightarrow{OP_1} \quad (12)$$

当  $\overrightarrow{\Delta P_i} - \overrightarrow{\Delta P_m} (i=1, 2, 3)$  中各参量(角度  $\theta$ , 距离  $l$ )绝对值小于设定阈值时,3条通道均正常;当  $|\Delta P_{1\theta}| < k_\theta, |\Delta P_{1l}| < k_l; |\Delta P_{2\theta}| > k_\theta \text{ or } |\Delta P_{2l}| < k_l; |\Delta P_{3\theta}| >$

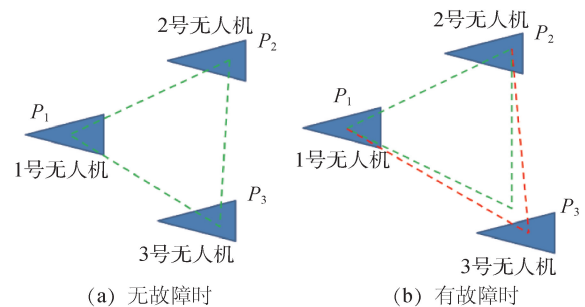


图2 冗余容错

Fig. 2 Redundancy-based fault-tolerance



$k_{\theta} \text{ or } |\Delta P_{3l}| > k_l$  时,  $P_3$  有故障; 当  $|\Delta P_{1\theta}| > k_{\theta} \text{ or } |\Delta P_{1l}| > k_l$ ;  $|\Delta P_{2\theta}| > k_{\theta} \text{ or } |\Delta P_{2l}| > k_l$ ;  $|\Delta P_{3\theta}| < k_{\theta} \text{ or } |\Delta P_{3l}| < k_l$  时,  $P_2$  有故障; 当  $|\Delta P_{1\theta}| > k_{\theta} \text{ or } |\Delta P_{1l}| > k_l$ ;  $|\Delta P_{2\theta}| < k_{\theta} \text{ or } |\Delta P_{2l}| < k_l$ ;  $|\Delta P_{3\theta}| > k_{\theta} \text{ or } |\Delta P_{3l}| > k_l$  时,  $P_1$  有故障。

判定出故障的通道必须切除, 而其余通道应保证系统能继续正常工作。例如,  $P_3$  有故障并切除后,  $P_1$  和  $P_2$  保证组网系统继续工作; 但若切除后, 系统参量  $|\Delta P_{1\theta}| > k_{\theta} \text{ or } |\Delta P_{1l}| > k_l$ , 则又有故障出现, 但无法判定哪一个通道故障, 即只能发现故障而无法进一步切除。这样, 具有3个位置反馈通道的容错系统具有两次发现故障的能力, 一次分离故障并进行系统重构的能力。

## 5 结论

本文通过讨论容错的概念和相关理论、无人机冗余容错方案在不同尺度的实时任务中的应用, 以及无人机容错网络方案的构建, 得出以下结论:

(1) 为了达到预期的效果, 在高风险的实时遥感任务中采用多无人机组网并积极合作比使用单架无人机具有更大的优势, 因为它减少了在任何不确定情况下遥感观测任务部分或全部失败的几率。

(2) 在多无人机组网体系架构中引入冗余容错, 通过增加一个或多个无人机作为后备使无人机系统可以容错, 既提高了系统鲁棒性, 又使故障概率降到最低。

(3) 以无人机组网时的位置和视角作为无人机组网冗余容错的场景, 当无人机的位置和视角超过设定的阈值时, 网络中的无人机被认为是故障的, 其将被分离并不考虑进一步分析, 这种方法可以在极端条件下最终得到组网控制方案的有效输出, 大大提升遥感观测的质量和效率。

因此, 在遥感区域观测任务的解决方案设置中增加冗余容错控制功能可以使网络控制方案更加可靠, 在各种监测、紧急情况和监视场景中更容易做出响应。在今后的工作中, 将通过在上述领域进行实验来证明所提出的方法的适用性。

### 参考文献(References):

[1] Masiero A, Francesca F, Antonio V. A Low cost UWB based solution for direct georeferencing UAV Photogrammetry[J]. Remote Sensing, 2017,9(5):414-445.  
[2] Colomina I, Molina P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review[J]. ISPRS

Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2014,92(6):79-97.  
[3] Eisenbeib H. UAV Photogrammetry (Doctoral dissertation), 2009. (Online Accessed) [http://www.igp-data.ethz.ch/berichte/Blaue\\_Berichte\\_PDF/105.pdf](http://www.igp-data.ethz.ch/berichte/Blaue_Berichte_PDF/105.pdf)  
[4] Eiris R, Zhou S, Gheisari M. Integrating the use of UAVs and photogrammetry into a construction management course: lessons learned. 35<sup>th</sup> International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2018), 2018:1-8.  
[5] Woodget A S, Austrums R, Maddock I P, et al. Drones and digital photogrammetry: From classifications to continuums for monitoring river habitat and hydromorphology[J]. Wiley Interdisciplinary Reviews Water, 2017,4(4):1-20.  
[6] Themistocleous K. The use of UAV platforms for remote sensing applications: case studies in Cyprus[C]. Second International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2014), 2014,9229.  
[7] Remondino F, Barazzetti L, Nex F, et al. UAV photogrammetry for mapping and 3D modeling-Current status and future perspectives[C]// UAV-g 2011. 2011.  
[8] Nex F, Remondino F. UAV for 3D mapping applications: A review[J]. Applied Geomatics, 2013,6(1):1-15.  
[9] Bendea H, Boccardo P, Dequal S, et al. Low cost UAV for post-disaster assessment[C]. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences-ISPRS Archives, 2008,37:1373-1379.  
[10] Yang G, Liu J, Zhao C, et al. Unmanned aerial vehicle remote sensing for field-based crop phenotyping: current status and perspectives[J]. Frontiers in plant science, 2017,8:1111.  
[11] Silvagni M, Tonoli A, Zenerino E, et al. Multipurpose UAV for search and rescue operations in mountain avalanche events[J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2016,8(1):18-33.  
[12] Tomotani J. Using unmanned aerial vehicles in search & rescue operations[J]. Journal of Geek Studies, 2015,2(2):41-53.  
[13] Karaca Y, Cicek M, Tatli O, et al. The potential use of unmanned aircraft systems (drones) in mountain search and rescue operations[J]. The American Journal of Emergency Medicine, 2018,36(4):583-588.  
[14] Seo S H, Choi J I, Song J. Secure utilization of beacons and UAVs in emergency response systems for building fire hazard [J]. Sensors, 2017,17(10):2200.  
[15] Giordan D, Manconi A, Remondino F, et al. Use of unmanned aerial vehicles in monitoring application and management of natural hazards [J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2017,8(1):1-4.  
[16] Martínez de Dios R J. Fleets of small unmanned aerial systems for forest fire applications[J]. Forest Research, 2015,4(1):1-2.

- [17] Cruz H, Eckert M, Meneses J, et al. Efficient forest fire detection index for application in unmanned aerial systems (UASs)[J]. *Sensors*, 2016,16(6):893.
- [18] Chowdhury S, Emelogu A, Marufuzzaman M, et al. Drones for disaster response and relief operations: A continuous approximation model[J]. *International Journal of Production Economics*, 2017,188:167-184.
- [19] Rabta B, Wankmüller C, Reiner G. A drone fleet model for last-mile distribution in disaster relief operations[J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2018,28:107-112.
- [20] Griffin G F. The use of unmanned aerial vehicles for disaster management[J]. *Geomatica*, 2014,68(4):265-281.
- [21] Heredia G, Caballero F, Maza I, et al. Multi-unmanned aerial vehicle (UAV) cooperative fault detection employing differential global positioning (DGPS), inertial and vision sensors[J]. *Sensors*, 2009,9(9):7566-7579.
- [22] Napolitano M, Windon D, Casanova J, et al. Kalman filters and neural-network schemes for sensor validation in flight control systems[J]. *IEEE Trans. Contrpl System Technology*, 1998,6:596-611.
- [23] Drozeski G R, Saha B, Vachtsevanos G J. A fault detection and reconfigurable control architecture for unmanned aerial vehicles[C]// *Aerospace Conference*, 2005 IEEE. IEEE, 2005.
- [24] Heredia G, Ollero A, Bejar M, et al. Sensor and actuator fault detection in small autonomous helicopters[J]. *Mechatronics*, 2008,18:90-99.
- [25] Heredia G, Ollero A. Sensor fault detection in small autonomous helicopters using observer/kalman filter identification [C]. *Proceeding of the 5<sup>th</sup> IEEE International Conference on Mechatronics 2009*, Málaga, Spain, April, 2009.
- [26] Johry A, Kapoor M. Unmanned aerial vehicle (UAV): fault tolerant design[J]. *International Journal of Engineering Technology Science and Research IJETSR*, 2016,3(6). [Online] Ijetsr.com. Available at: [http://www.ijetsr.com/images/short\\_pdf/1465569895\\_ifuna1518\\_ijetsr.pdf](http://www.ijetsr.com/images/short_pdf/1465569895_ifuna1518_ijetsr.pdf) [Accessed 23 Dec. 2018].
- [27] Dubrova E. Fault tolerant design: an introduction. Boston/Dordrecht/London. Kluwer academic publishers, 1-134. [Online] <https://pld.ttu.ee/iaf0530/draft.pdf> [accessed 23 dec. 2018].
- [28] Heimerdinger W L, Weinstock C B. A conceptual framework for system fault tolerance. Pittsburgh. Software Engineering Institute, Carnegie Mellon University 1992, pp. 1-33. [Online] [https://resources.sei.cmu.edu/asset\\_files/Technical-Report/1992\\_005\\_001\\_16112.pdf](https://resources.sei.cmu.edu/asset_files/Technical-Report/1992_005_001_16112.pdf) [accessed 23 dec. 2018].
- [29] Isermann R. Fault- diagnosis systems[M]. Heidelberg. Springer-Verlag Berlin. 2006:1-469.
- [30] Dai X, Lin Z, Zhen S. Fault tolerant control in redundant inertial navigation system[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, 2013:1-11. (Online: <http://dx.doi.org/10.1155/2013/782617>).
- [31] Dimc F, Tone M M. UAV communication link systems [C]. *Proceedings of International Conference on Traffic Science 2006*, Portoroz, Slovenija, December 6-7.
- [32] Suarez A, Heredia G, Ollero A. Cooperative virtual sensor for fault detection and identification in multi-UAV applications[J]. *Journal of Sensors* 2018:1-19.
- [33] Chou T, Yeh M, Chen Y, Chen Y. Disaster monitoring and management by the unmanned aerial vehicle technology [C]. In: *ISPRS Technical Commission VII Symposium 100 Years ISPRS Advancing Remote Sensing Science*. [online] Vienna: Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, Vienna University of Technology 2010:1-6. (Online Available) [http://www.isprs.org/proceedings/xxxviii/part7/b/pdf/137\\_XXXVIII-part7B.pdf](http://www.isprs.org/proceedings/xxxviii/part7/b/pdf/137_XXXVIII-part7B.pdf) [Accessed 8 Nov. 2018].
- [34] Li Y, Wei X, Wei W. Application and research of disaster monitoring UAV technology [J]. *Journal of Catastrophology*, 2011,26(1):138-143.
- [35] Lei T, Adu G, Changchun L. Application of UAV remote sensing system in low temperature rain and snow freezing disaster monitoring[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011,39(4):2417-2419.
- [36] 杨静学,陈亮雄,李昼阳,等.无人机遥感技术在河源紫金县洋头镇洪灾区监测中的应用[J]. *广东水利水电*, 2015(1):56-61. [ Yang J X, Chen L X, Li Z Y, et al. Application of UAV remote sensing technology in flood-stricken area monitoring of Yangtuo Town, Zijin County, Heyuan[J]. *Guangdong Water Resources and Hydropower*, 2015(1):56-61. ]
- [37] Friedenzohn D, Mirot A. The fear of drones: Privacy and unmanned aircraft[J]. *The Journal of Law Enforcement*, 2013,3(5):1-14 (Online Accessed) <https://jghcs.info/index.php/l/article/view/491/599>
- [38] Zheng Y, Yi W. Design of emergency communication system for micro-miniature drones[J]. *Journal of Electronic World*, 2015,20:80-81.
- [39] Xiao J, Yingcheng L, Jiangjiang Y. Construction of emergency mapping system for vehicle drones[C]// *12<sup>th</sup> meeting of China Association for Science and Technology Annual Conference - Symposium on Disaster and Emergency Management of Surveying and Mapping Services*, 2011.
- [40] Wang F, Yun W, Yi S. Design of emergency environment monitoring system based on UAV and self-organizing network technology[J]. *Journal of Electronic World*, 2017, 12:166-166.
- [41] Merino L, Wiklund J, Caballero F, et al. Vision-based multi-UAV position estimation [J]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2006,13(3):53-62.