

文章编号:1671-251X(2019)04-0006-07

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2018100056

面向监控的井下无人机集群系统与关键技术

杨维¹, 单春艳¹, 刘俊波²

(1. 北京交通大学 电子与信息工程学院, 北京 100044;
2. 中煤科工集团常州研究院有限公司, 江苏 常州 213015)



扫码移动阅读

摘要:井下监控系统通常是固定布设且布设范围有限,难以完全满足井下安全生产的动态监控需求,且井下单架无人机因无线通信距离有限,导致其监控能力较弱。针对上述问题,提出了一种面向监控的井下无人机集群系统,并从井下无人机集群飞行与规避协同控制、数据链组网、矿井巷道环境地图创建、井下无人机姿态与位置估计、动态障碍物检测、路径规划等方面详细介绍了系统实现的关键技术。地面调度中心通过设置在井下监控分站的网关节点向井下无人机集群发布调度命令,井下无人机编队采用“一”字形队列沿矿井巷道集群飞行,在进入指定区域后通过所搭载的视频传感器与环境监测传感器对井下指定区域进行监控,并通过多无人机协作方式将所监测的视频信息与环境参数传输到井下监控分站,实现对井下目标区域的自主动态监控。井下无人机集群系统具有覆盖范围广、监测能力强等优点,通过协同控制多架井下无人机提高了监控效率,通过无线多跳的方式解决了井下无人机单架平台无线通信距离受限的问题,有利于监测与控制信息的传递。

关键词:矿井; 井下无人机集群编队; 自组织飞行策略; 协同控制; 姿态检测; 路径规划; 引导反光标识牌

中图分类号:TD679 文献标志码:A

Underground unmanned aerial vehicles cluster system for
monitoring and its key technologies

YANG Wei¹, SHAN Chunyan¹, LIU Junbo²

(1. School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;
2. CCTEG Changzhou Research Institute, Changzhou 213015, China)

Abstract: Underground monitoring and control system is usually fixed and has limited range, so it is difficult to fully meet dynamic monitoring requirements of underground safety production. Moreover, due to limited wireless communication distance, underground single unmanned aerial vehicle has weak monitoring ability. For the above problems, an underground unmanned aerial vehicles cluster system for monitoring was proposed. The key technologies of the system implementation were introduced in detail such as cooperative control for flying and avoidance, data chain networking, creation of mine roadway environment maps, attitude and position estimation for unmanned aerial vehicles, moving obstacle detection and path planning. Ground dispatching center issues dispatching orders to the underground unmanned aerial vehicles cluster through gateway node set up in underground monitoring sub-station, and the underground unmanned aerial vehicles formation fly with "one" shaped queue along underground roadway. After entering the target area, the unmanned aerial vehicles can monitor the underground target area through the video sensors and environmental monitoring sensors on board, and transmit the

收稿日期:2018-10-25;修回日期:2018-12-29;责任编辑:张强。

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFC0801800);国家科技支撑计划资助项目(2013BAK06B03)。

作者简介:杨维(1964—),男,辽宁阜新人,教授,长期从事煤矿通信与安全监控方面的研究工作,E-mail:wyang@bjtu.edu.cn。

引用格式:杨维,单春艳,刘俊波.面向监控的井下无人机集群系统与关键技术[J].工矿自动化,2019,45(4):6-12.

YANG Wei, SHAN Chunyan, LIU Junbo. Underground unmanned aerial vehicles cluster system for monitoring and its key technologies[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(4): 6-12.

monitoring video information and environmental parameters to the underground monitoring sub-station through the cooperation of multiple unmanned aerial vehicles, so as to realize autonomous and dynamic monitoring of the underground target area. The unmanned aerial vehicles cluster system has advantages of wide coverage and strong monitoring capability, through collaborative control, which can effectively improve monitoring efficiency. In addition, it can also solve the problem of limited wireless communication distance of single platform of underground unmanned aerial vehicle by means of wireless multi-hop, which is conducive to transmission of monitoring and control information.

Key words: mine; formation of underground unmanned aerial vehicles cluster; self-organizing flight strategy; collaborative control; attitude detection; path planning; guided reflective tag

0 引言

随着科技的进步,采矿技术正不断从自动化向智能化阶段发展。依靠地面计算机远程集控系统,矿山管理人员可以在地面远程执行现场操作,这将使采矿作业实现零人身事故率成为可能。实现少人或无人采矿依靠的是高度自动化和智能化的矿山系统与设备、智能遥控系统与大型机械设备。此外,井下机器人、无人机等也将在无人采矿的测绘、探测与监测等领域发挥重要作用^[1-2]。

无人机可由飞控计算机控制,以实现自主飞行或由地面操控人员遥控飞行。微小型无人机具有体积小、质量轻、机动性好、能够在狭小空间中飞行等优点,可根据作业需求携带不同种类的设备,执行不同的任务。井下无人机预计将主要在2种情形下发挥作用:一种情形是在井下发生意外或矿难时执行侦测或搜救任务,主要利用无人机适合进入到危险区域进行作业的特点^[3];另一种情形是执行日常的监控等任务,主要是利用无人机适合进入到存在污染等恶劣环境中进行作业的特点^[3]。本文主要针对第2种情形。在少人或无人采矿中,井下监控系统通常布设的范围有限且是固定布设的,难以完全满足井下安全生产的动态监控需求,特别是在井下生产临时出现一些工作需求或问题时,更需要对井下局部区域进行快速的环境参数监测与视频巡视,并采取相应的监控措施。自主控制飞行的微小型无人机在安装了通信设备、探测和监控设备等工作负载之后,可以快速进入指定区域完成环境参数监测与视频巡视等监控任务,是完善未来无人采矿井下监控体系的重要装备。

井下巷道为狭长的带状空间,而井下无人机单架平台的无线通信距离十分有限^[4],这就在很大程度上限制了单架井下无人机的监控能力,为此,笔者提出建立一种井下无人机集群系统。井下无人机编队采用“一”字形队列沿矿井巷道集群飞行,通过协同控制的多架井下无人机编队,不仅具有覆盖范围

广、监测能力强等优点,可极大提高监控效率,而且还可以通过无线多跳的方式解决井下无人机单架平台无线通信距离受限的问题,有利于监测与控制信息的传递,是未来井下无人采矿监控、危险探测和救援中不可或缺的技术手段。

1 井下无人机集群系统

1.1 系统体系结构

井下无人机集群系统由井下监控分站进行调度。由于井下巷道为带状结构,所以,井下无人机集群系统的体系结构可采用如图1所示的带状组网体系结构。

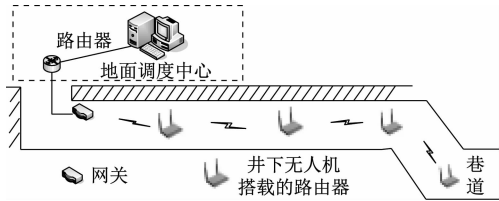


图1 井下无人机集群系统结构

Fig. 1 Structure of underground unmanned aerial vehicles cluster system

井下无人机集群系统的控制中心为井下监控系统的地面调度中心。地面调度中心通过设置在井下监控分站的网关节点向该井下监控分站控制下的无人机集群发布调度命令,即地面调度中心、井下监控分站与井下无人机数据链网络间的通信任务全部通过网关节点完成。网关节点同时还是网络的管理节点,负责网络拓扑更新、节点出入网确认等管理工作。无人机间的数据链组网要求提供大容量、稳定、可靠、强大的连通性和互操作能力,这就要求网络是一种移动高带宽网络,可利用方向快速可调的定向天线来增强通信链路的方向性增益和无线通信距离,并实现频谱复用。任何一个井下无人机节点都可以作为中继,以提升网络的连通性和超视距无线通信能力。

1.2 系统引导反光标识牌的设置与飞行控制方式

井下无人机编队需要在井下复杂环境中高效工作,这就需要井下无人机集群能够进行自主飞行与

规避控制^[5-6],而且还需要单架井下无人机在井下巷道环境下具有自主导航、避障和路径规划的能力,这样单架井下无人机才能有效完成集群飞行与监控任务。井下无人机在井下巷道复杂环境下采用自然路标进行定位和导航存在准确快速提取路标难度大、定位算法复杂、导航实时差等问题。利用矿井巷道的结构化特征,设计简单、实用的人工路标系统,不仅能够很好地解决矿井巷道中的路标特征化问题,而且能够在矿井巷道壁的环境特征与设置的路标特征之间形成稳定的关联^[7]。借鉴高速公路反光标识系统,提出在井下巷道壁两侧成对设置井下无人机引导反光标识牌。在井下无人机前照灯照射下,成对设置的井下无人机引导反光标识牌将沿矿井巷道壁左右两侧各形成一条由间隔反光标识牌构成的相互平行的反光指示标线。井下无人机通过其前向单目视觉,提取引导反光标识牌和反光标识牌周围巷道壁环境的部分特征,进而估计井下无人机相对反光标识牌的位置与位姿。这里需要提及的是,如果在井下巷道不同位置采用不同特征的引导反光标识牌,如 2 维条码或数字作为路标图案^[8],虽然可以通过不同特征的引导反光标识牌与井下巷道环境不同位置特征形成的固定关联简化对井下无人机的引导,但采用这种方式会造成对引导反光标识系统管理与维护的极大困难,在实际应用中并不易于实现。因此,如高速公路反光标识系统一样,引导反光标识牌将采用相同的形制,以更符合实际情况。基于引导反光标识牌的井下无人机集群系统如图 2 所示,井下无人机编队进入指定区域后就可以通过所搭载的视频传感器与环境监测传感器对井下指定区域进行监控,并通过多无人机协作的方式将所监测的视频信息与环境参数传输到井下监控分站。

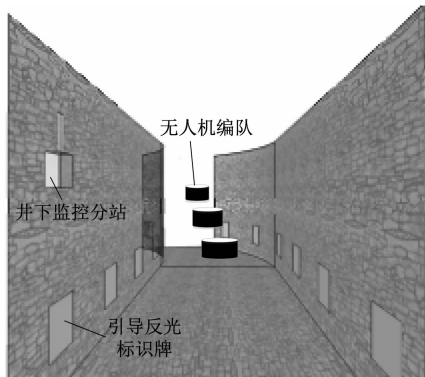


图 2 基于引导反光标识牌的井下无人机集群系统

Fig. 2 Underground unmanned aerial vehicles cluster system based on guided reflective tags

采用井下监控系统的监控分站对井下无人机集群飞行统一调度与井下无人机集群飞行自主分布控制相结合的方式对井下无人机集群的飞行进行控

制。监控分站对井下无人机集群飞行统一调度是指监控分站只向井下无人机集群发布目标信息、任务信息等调度命令,而不对井下无人机飞行进行统一控制。井下无人机集群飞行自主分布控制是指接到调度命令的井下无人机集群采用自组织分布控制的方式进行集群飞行,采用这种方式可以解决监控分站只能通过多无人机协作多跳的方式逐级向离监控分站较远的无人机传递控制信息,导致较大的传输时延,无法对无人机编队进行动态实时控制的问题。为保证井下无人机集群监控任务的有效实施和任务的协同,编队中的单架无人机都需要具备一定的自主控制和决策能力,并且井下无人机间能动态地组成通信网络,实现井下无人机之间目标信息、任务信息、协调信息和自身状态信息的有效交互。

2 系统实现的关键技术

面向监控的井下无人机集群系统所涉及的关键技术主要包括井下无人机集群飞行与规避协同控制技术、数据链组网技术、矿井巷道环境地图创建技术、引导反光标识牌与井下巷道环境特征的检测与关联技术、井下无人机姿态与位置估计技术、井下无人机动态障碍物检测技术、井下无人机集群的路径规划技术。

2.1 井下无人机集群飞行与规避协同控制技术

为使井下无人机集群可靠地飞行到井下目标区域完成监控任务,要求井下无人机集群在执行监控任务时能在井下带状受限空间中保持纵向集群运动^[9-10],相邻井下无人机间的纵向距离不能超出相邻无人机间的通信距离,同时还要有一定的随机性。这就需要研究满足井下无人机集群特点的集群控制方法,既要保证井下无人机纵向集群运动,又要保证相邻井下无人机间的有效协同,确保井下无人机集群有效完成监控任务。

井下为带状受限空间,井下无人机编队为纵向队列,把飞行在最前面的井下无人机称为领航无人机,其他无人机称为跟随无人机。无人机在井下巷道带状受限空间中飞行时,由于无人机间通信距离和视野的限制,不是相邻的跟随无人机很难实时发现领航无人机,并实时跟随。所以,必须参照通信范围内或视野范围内的其他跟随无人机。为此,可对井下无人机协同自主编队飞行采用逐一跟随的自组织飞行策略,即向着飞行方向,每一架井下无人机既是其后方跟随无人机的领航无人机,而本身又是其前方无人机的跟随无人机。这一机制不仅十分适合于井下巷道带状受限空间无人机编队的组织,而且可以保证井下无人机控制的实时性和可靠性,即使

单架无人机出现故障仍可编队重构,继续执行监控任务。

2.2 井下无人机集群数据链组网技术

为保证井下无人机集群协同工作,可靠、高效地完成井下无人机集群控制信息和无人机环境与视频等监控信息的传输,需要构建适合于井下带状结构和井下无人机编队特点与满足监控需求的井下无人机集群数据链网络^[11],提出网络的MAC协议、路由协议和信道分配策略及无线链路自适应等技术,确保井下无人机集群数据链网络对控制信息与监控信息的有效与可靠传输^[12]。

无线 Mesh 网络是基于 Ad hoc 网络的扩展,同时支持集中式和分布式拓扑结构。Mesh 节点具备自动拓拓感知和动态路由功能,Mesh 网络中节点可灵活加入或退出,加上 Mesh 节点的设置不依赖有线基础设施,网络的灵活性强,可以很好地适应包括矿井巷道在内的复杂空间结构。因此,井下无人机集群数据链组网可基于无线 Mesh 网络技术构建。

基于无线 Mesh 网络技术的井下无人机集群数据链网络不仅要传递井下无人机集群的控制信息,还要传递井下环境和视频等监控信息。井下无人机集群的控制信息、井下环境和视频等监控信息的流量特性、突发性、实时性、交互性和重要级别也都具有不同的特点^[13],且井下无人机集群的规模也不同,所构建的基于无线 Mesh 网络技术的井下无人机集群数据链网络要具有很好的可扩展性,以实现对大范围井下区域的有效覆盖。为保证井下无人机集群数据链网络具有很好的可扩展性、不同级别信息传输的可靠性以及网络工作的稳健性,Mesh 网络可采用多射频多信道技术、区分服务的 MAC 协议、路由协议和信道分配技术及无线链路自适应技术,确保井下无人机集群数据链网络对控制信息与监控信息的有效、可靠传输。

2.3 矿井巷道环境地图的创建

井下无人机飞行局部区域的地图构建是实现井下无人机导航等任务的基础^[14-15]。环境地图可以采用栅格地图、几何特征地图和拓扑地图^[16]构建。拓扑地图主要是采用节点和节点间的连线将无人机的飞行环境表示为一张拓扑意义上的图。拓扑地图中的节点对应于环境中的特征点,连线表示节点之间的通道。拓扑地图适合对可提取大量高级特征的大规模结构化环境进行描述,具有全局连贯性好、鲁棒性强的特点^[16]。几何特征地图主要是利用无人机传感器采集的环境感知信息,从中提取更为抽象的几何特征,例如几何特征点、线段或曲线,并使用

这些几何特征描述环境。由于环境地图的几何特征具有明显的位置信息,所以,便于无人机利用几何特征进行目标识别和位置估计^[16]。矿井巷道具有明显的结构化特征,因此,矿井巷道的拓扑结构基本是固定的。同样,矿井巷道中设置的井下无人机引导反光标识牌在矿井巷道中的物理位置也是固定的。所以,可结合几何和拓扑 2 种地图表示方法的特点,创建基于几何-拓扑混合的矿井巷道环境地图表示方法。在全局空间采取拓扑描述,可保证井下无人机飞行的连续性,在具体局部环境中采用几何描述来保证其一致性和精确性,实现无人机的位姿估计。

由高级环境特征所构成的巷道几何-拓扑环境模型如图 3 所示。为确保按照几何-拓扑环境模型进行混合地图构建的可操作性,首先要完成井下巷道的侧壁、引导反光标识牌、引导反光标识牌周围特征等高级环境特征的辨识和提取。图 3 中,井下巷道的侧壁、引导反光标识牌、引导反光标识牌周围高级环境特征等静态物体和环境特征可采用特征点或线段及其组合等几何元素来表示。拓扑可利用引导反光标识牌及引导反光标识牌之间的关系来选取。拓扑节点可选取每对引导反光标识牌中间的点,即每个拓扑节点都与一对引导反光标识牌相对应,而拓扑边则给出了相邻拓扑节点间的可行路径。同时,由于每个拓扑节点都与其两边的一对引导反光标识牌一一对应,所以,如果以拓扑节点作为路标就可避免出现路标混淆问题,从而完成矿井巷道几何-拓扑混合地图的构建,形成矿井巷道几何-拓扑混合地图模板。

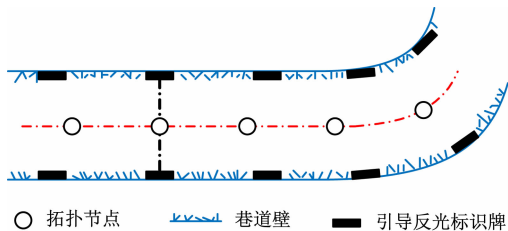


图 3 巷道几何-拓扑环境模型

Fig. 3 Geometric-topological environment model for underground tunnel

2.4 引导反光标识牌与井下巷道环境特征的检测与关联技术

在井下巷道侧壁两边成对设置井下无人机引导反光标识牌作为人工路标,引导井下无人机自主飞行。因此,需要提出井下无人机对所设置的井下无人机引导反光标识牌与井下巷道环境特征的检测与关联技术^[17-18],进而实现所提取的引导反光标识牌及其周围一定范围内的特征与预先建立的井下巷道地图模板的快速匹配。

引导反光标识牌的最显著特征就是其在无人机前照灯照射下的亮度和轮廓特征。因此,对引导反光标识牌的检测可采用基于视觉注意机制的检测方法,即将引导反光标识牌作为井下无人机的视觉显著区域,并将视觉显著区域作为既定目标来分割图像。

Canny 边缘检测算法采用泛函函数求导的方法进行边缘检测。利用视觉注意的显著区域分割图像,在分割出来的各个图像块上定义尺度不同的 Canny 算子,就可有效提取引导反光标识牌的轮廓。对引导反光标识牌的轮廓进行有效提取后,就可进一步提取引导反光标识牌及其周围一定范围内的巷道壁的角点作为稳定的特征点。将提取的引导反光标识牌及其周围一定范围内的特征点与预先建立的井下巷道几何-拓扑混合地图模板进行匹配,可实现引导反光标识牌、巷道壁及井下无人机位置的可靠关联。

2.5 井下无人机姿态与位置估计技术

姿态和位置是井下无人机的重要信息,它不仅关系到无人机的稳定飞行,也关系到无人机是否能够正常着陆,而且对井下无人机集群飞行的有效控制也有重要的作用^[19-20]。因此,需要充分利用井下巷道结构与所检测出的引导反光标识牌信息,提出相应的井下无人机位置和姿态估计方法。

井下无人机上摄像机拍摄到的场景是三维空间场景在二维空间的投影,在利用机器视觉对真实三维情况进行识别的过程中,需要一个逆求解过程,即从二维图像还原成三维场景。因此,井下无人机姿态与位置估计可采用基于投影关系的方法。井下无人机可有效提取和定位井下巷道侧壁两边成对设置的井下无人机引导反光标识牌,所以,井下无人机引导反光标识牌位置等参数是已知的。从井下无人机实时拍摄的图像中获取引导反光标识牌在像素坐标系下的像素坐标等参数,再利用引导反光标识牌及其投影的几何关系,就可求解出摄像机与引导反光标识牌的相对位置和姿态关系,然后经相应的坐标变换,将位姿关系转换到无人机坐标系中。

2.6 井下无人机动态障碍物检测技术

井下局部区域不可避免地存在一些动态障碍物,如井下生产中各种采掘和运输设备等都有可能出现在无人机正常飞行的路线中,对井下无人机的安全飞行造成威胁,影响安全生产。因此,需要研究井下无人机在飞行中对动态障碍物的检测方法,保证井下无人机的安全飞行^[21]。

井下无人机通过视觉系统采集飞行途中前方井下环境图像,可通过提取图像中障碍物的边缘信息

对障碍物进行检测。由于井下巷道环境通常较暗,即使井下无人机开着前照灯,但在低照度下视觉系统所采集到的障碍物图像与障碍物周围图像可能会出现对比度较差的问题。所以,首先要对井下无人机拍摄的图像进行增强处理,以改善图像质量。文献[22]针对井下低照度低分辨率图像中人脸检测问题,采用噪声滤波、直方图均衡化和空域高通滤波处理方法,显著增强了图像对比效果及人脸图像不同器官位置之间的像素灰度值的变化信息。文献[23]针对矿井监控图像中空列车的识别,通过边缘检测效果良好的 Canny 算法检测空列车图像的边缘,边缘图像经 Radon 变换后可突出图像边缘的直线性质,使空列车边缘具有更好的可分离性。可见,井下无人机在飞行中可采用滤波、图像增强处理、边缘检测来提取障碍物的轮廓信息,进而实现对动态障碍物的检测^[24],其流程如图 4 所示。

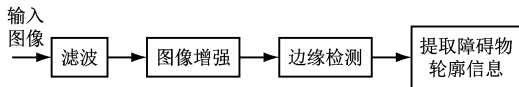


图 4 井下无人机障碍探测方法流程

Fig. 4 Flow of obstacle detection method for underground unmanned aerial vehicles

2.7 井下无人机集群的路径规划技术

井下无人机集群按照任务要求需要在井下巷道环境下寻找一条由当前位置到目标位置的飞行通道。井下巷道结构通常是已知的,这十分有利于井下无人机预先规划出飞行路径。但井下巷道中的情况也是复杂多变的,如在井下无人机预先规划出的飞行路径上可能会出现各种临时的障碍物。因此,需要提出具有动态避障能力的井下无人机路径规划方法^[25-26]。

井下无人机集群采用“一”字形队列的领航-跟随模式,其路径规划与领航井下无人机的路径规划是一致的。井下无人机路径规划的主要任务是在路径已知或部分已知的情况下,按照监控任务要求,避开环境中的障碍物,寻找一条由当前位置到目标位置的安全飞行通道。井下无人机的路径规划主要需考虑井下无人机的避障飞行及巷道受限空间和障碍物对井下无人机飞行的影响 2 个方面。为此,对于井下无人机基于单目视觉检测出的障碍物,可在垂直于巷道截面方向建立障碍物外形禁飞区域柱状空间三维地图。井下无人机路径规划如图 5 所示,其中 S 为所建立的障碍物多边形柱体。

3 结论

(1) 微小型无人机具有成本低、体积小、质量轻、机动性好与应用范围广等突出优点,适合进入到

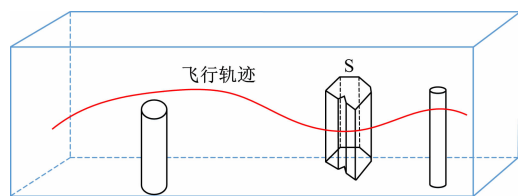


图5 井下无人机路径规划

Fig. 5 Path planning for underground unmanned aerial vehicles

危险区域或存在污染等的恶劣环境中作业,预计在未来少人或无人采矿中将发挥重要的作用。井下无人机采用的视觉导航方法在井下巷道环境下具有显著的优点。

(2) 井下无人机集群系统具有覆盖范围广、监测能力强等显著优势,通过协同控制多架井下无人机,可有效提高监控效率,而且还可以通过无线多跳的方式解决井下无人机单架平台无线通信距离受限的问题,有利于监测与控制信息的传递。

(3) 矿井巷道具有明显的结构化特征,在井下巷道侧壁两边成对设置井下无人机引导反光标识牌作为人工路标,不仅可构建矿井巷道几何-拓扑混合地图,引导井下无人机编队飞行,而且井下无人机还可通过引导反光标识牌实现位姿估计与避障飞行。

(4) 发展井下无人机系统理论与技术,对完善未来少人或无人采矿安全生产监控体系、提高井下安全生产监控能力具有一定的理论、技术参考价值和现实意义。

参考文献(References):

- [1] 孙继平. 煤矿物联网特点与关键技术研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(1): 167-171.
SUN Jiping. Research on characteristics and key technology in coal mine Internet of things[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(1): 167-171.
- [2] 毛善君. “高科技煤矿”信息化建设的战略思考及关键技术[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1572-1583.
MAO Shanjun. Strategic thinking and key technology of informatization construction of high-tech coal mine [J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1572-1583.
- [3] 徐伟杰. 基于视觉的微型无人直升机位姿估计与目标跟踪研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012: 1-5.
- [4] 杨维, 冯锡生, 程时昕, 等. 新一代全矿井无线信息系统理论与关键技术[J]. 煤炭学报, 2004, 29(4): 506-509.
YANG Wei, FENG Xisheng, CHENG Shixin, et al. The theories and key technologies for the new generation mine wireless information system [J].

Journal of China Coal Society, 2004, 29(4): 506-509.

- [5] 景晓年, 梁晓龙, 孙强, 等. 基于规则的无人机集群运动控制[J]. 计算机仿真, 2016, 33(9): 50-54.
JING Xiaonian, LIANG Xiaolong, SUN Qiang, et al. Motion control of UAVs based on rules[J]. Computer Simulation, 2016, 33(9): 50-54.
- [6] 周欢, 赵辉, 韩统, 等. 基于规则的无人机集群飞行与规避协同控制[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(6): 1374-1382.
ZHOU Huan, ZHAO Hui, HAN Tong, et al. Cooperation flight and evasion control of UAV swarm based on rule [J]. Systems Engineering and Electronics, 2016, 38(6): 1374-1382.
- [7] 刘振宇, 姜楠, 张令涛. 基于人工路标和立体视觉的移动机器人自定位[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(9): 190-192.
LIU Zhenyu, JIANG Nan, ZHANG Lingtao. Self-localization of mobile robots based on artificial landmarks and stereo vision [J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(9): 190-192.
- [8] 刘书池. 面向工业互联网的井下无人机单目视觉SLAM定位方法[D]. 北京: 北京交通大学, 2017: 53-55.
- [9] 谢媛艳, 王毅, 马忠军. 领导-跟随多智能体系统的滞后一致性[J]. 物理学报, 2014, 63(4): 17-21.
XIE Yuanyan, WANG Yi, MA Zhongjun. Delay consensus of leader-following multi-agent systems [J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(4): 17-21.
- [10] 李承志. 基于协同技术的多无人机区域监视问题研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2012: 9-18.
- [11] 吴平, 唐文照. 无人机集群数据链组网技术研究[J]. 空间电子技术, 2012, 9(3): 61-64.
WU Ping, TANG Wenzhao. The study of UAV flock network datalink [J]. Space Electronic Technology, 2012, 9(3): 61-64.
- [12] HAN Ruisong, YANG Wei, YOU Kaiming. MB-OFDM-UWB based wireless multimedia sensor networks for underground coalmine: a survey [J]. Sensors, 2016, 16(12): 1-20.
- [13] 尤凯明, 杨维, 袁小溪, 等. 煤矿井下 WMSNs 区分服务的路由协议[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(9): 1-8.
YOU Kaiming, YANG Wei, YUAN Xiaoxi, et al. Differentiated services routing protocol of WMSNs for underground coal mines [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2018, 46(9): 1-8.
- [14] 马跃龙, 赵勇, 曹雪峰. 一种基于单目 SLAM 的无人机序列图像拼接方法[J]. 系统仿真学报, 2016, 28(10): 2349-2355.
MA Yuelong, ZHAO Yong, CAO Xuefeng. Mono-

- SLAM based method for stitching images of sequence from UAV[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(10):2349-2355.
- [15] 杨祥红,王希彬. 无人机主动 SLAM 技术研究[J]. 系统仿真技术, 2015, 11(4):283-287.
- YANG Xianghong, WANG Xibin. Research on active SLAM technology for UAV[J]. System Simulation Technology, 2015, 11(4):283-287.
- [16] 庄严,徐晓东,王伟. 移动机器人几何-拓扑混合地图的构建及自定位研究[J]. 控制与决策, 2005, 20(7): 815-818.
- ZHUANG Yan, XU Xiaodong, WANG Wei. Mobile robot geometric-topological map building and self-localization[J]. Control and Decision, 2005, 20(7): 815-818.
- [17] SCHMID C, MOHR R. Local grayvalue invariants for image retrieval [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1997, 19(5): 530-535.
- [18] DUFOUMAUD Y, SCHMID C, HORAUD R. Matching images with different resolutions [C]// IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Hilton Head Island; IEEE Press, 2000: 612-618.
- [19] 刘士清,胡春华,朱纪洪. 一种基于灭影线的无人直升机位姿估计方法[J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(9):50-54.
- LIU Shiqing, HU Chunhua, ZHU Jihong. A method for estimating position and orientation of an unmanned helicopter based on vanishing line information [J]. Computer Engineering and Applications, 2004, 40(9):50-54.
- [20] SARIPALLI S, MONTGOMERY J F, SUKHATME G S. Visually guided landing of an unmanned aerial vehicle [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2003, 19(3):371-380.
- [21] YU H L, BEARD R, BYME J. Vision-based navigation frame mapping and planning for collision avoidance for miniature air vehicles [J]. Control Engineering Practice, 2010, 18(7):824-836.
- [22] 孙继平,陈伟,唐亮,等. 有限空间低照度低分辨率图像中人脸检测[J]. 中国矿业大学学报, 2008, 37(3): 373-378.
- SUN Jiping, CHEN Wei, TANG Liang, et al. Face detection in the low-luminous-density and low-resolution images within limited room[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2008, 37(3):373-378.
- [23] 孙继平,陈伟,王福增,等. 矿井监控图像中空列车的识别[J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36(5):597-602.
- SUN Jiping, CHEN Wei, WANG Fuzeng, et al. Recognizing empty trains in coalmine surveillance images[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2007, 36(5):597-602.
- [24] 于阳阳,陈妍,李伟民. 弱光环境下基于单目视觉的无人系统自主障碍探测方法[J]. 机械与电子, 2015(6):77-80.
- YU Yangyang, CHEN Yan, LI Weimin. A monocular vision obstacle detection method in low light environments for unmanned systems[J]. Machinery & Electronics, 2015(6):77-80.
- [25] 陈海,何开锋,钱炜祺. 多无人机协同覆盖路径规划[J]. 航空学报, 2016, 37(3):928-935.
- CHEN Hai, HE Kaifeng, QIAN Weiqi. Cooperative coverage path planning for multiple UAVs[J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2016, 37(3): 928-935.
- [26] 朱磊,樊继壮,赵杰,等. 基于栅格法的矿难搜索机器人全局路径规划与局部避障[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(11):3421-3428.
- ZHU Lei, FAN Jizhuang, ZHAO Jie, et al. Global path planning and local obstacle avoidance of searching robot in mine disasters based on grid method [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2011, 42(11):3421-3428.