

doi:10.13436/j.mkjx.202205059

煤矿掘进机器人视觉位姿感知与控制关键技术*

徐伟锋¹, 金向阳^{2,4}, 张丽平³

(1. 绍兴职业技术学院, 浙江 绍兴 312000; 2. 中国矿业大学(北京), 北京 100083; 3. 国网网信科技(北京)有限公司, 北京 100011; 4. 中煤科工集团 国际工程有限公司, 北京 100013)

摘 要: 针对煤矿井下掘进机器人位姿感知精度低、远程监控效果差及智能控制难度大等问题,通过分析机器视觉在煤矿掘进机器人中的应用情况,从掘进机器人位姿视觉检测、远程视频监控、数字孪生驱动控制和智能协同控制等方面进行深入探究,提出煤矿掘进机器人位姿视觉测量原理和方法,结合远程视频监控技术,实现对掘进机器人地面远程控制,并对其应用效果加以分析与总结。同时,为进一步提升掘进机器人智能化程度和远程控制可靠性,利用数字孪生驱动的虚实远程控制技术,构建煤矿掘进机器人三维可视化模型,通过煤矿掘、支、锚、运多种机器人的多位一体并行智能化协同控制,实现煤矿掘进绿色、安全、高效的智能化生产。

关键词: 机器视觉; 掘进机器人; 位姿感知; 智能化

中图分类号: TP391 文献标志码: A 文章编号: 1003-0794(2022)05-0181-04

Key Technology of Vision Pose Perception and Control of Coal Mine Tunneling Robot

Xu Weifeng¹, Jin Xiangyang^{2,4}, Zhang Liping³

(1. Shaoxing Vocational and Technical College, Shaoxing 312000, China; 2. China University of mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 3. CHN Energy Network Technology (Beijing) Co., Ltd., Beijing 100011, China; 4. International Engineering Co., Ltd., China Coal Technology and Engineering Group, Beijing 100013, China)

Abstract: Aiming at the problems of low pose sensing accuracy, poor remote monitoring effect and difficult intelligent control of underground coal mine tunneling robot, by analyzing the application of machine vision in coal mine tunneling robot, made an in-depth exploration from the aspects of tunneling robot pose visual detection, remote video monitoring, digital twin drive control and intelligent collaborative control. Put forward the principle and method of visual measurement of pose of coal mine tunneling robot, realized the ground remote control of tunneling robot combined with remote video monitoring technology, analyzed and summarized its application effect. At the same time, in order to further improve the intelligent degree and remote control reliability of the tunneling robot, the virtual and real remote control technology driven by digital twin was used to construct the three-dimensional visual model of the coal mine tunneling robot. The green, safe and efficient intelligent production of coal mine excavation was realized through the multi position integrated parallel intelligent collaborative control of multiple robots for excavation, support, anchor and transportation in coal mine.

Key words: machine vision; tunneling robot; pose perception; intellectualization

0 引言

国家《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》中明确指出,煤矿智能化发展的任务和目标是在煤矿生产全方位多维度信息融合感知,促进数字化“人机环管”高效协同,重点突破我国煤矿综掘的智能化快速掘进技术及装备,提高煤矿生产效率,推进绿色发展,实现煤矿智能化生产。而随着物联网、机器视觉、人工智能、5G 和大数据等新兴信息技术的高速发展,煤矿生产与新兴信息技术深度融合将快速推动煤矿掘进智能、绿色发展。其中,机器视觉技术在煤

矿智能化装备中应用较为广泛,尤其是在煤矿掘进生产中的应用更为突出。文献[3]针对煤矿井下掘进机位姿检测难题,通过防爆工业相机对目标图像的采集,结合图像处理算法和位姿解算方法,提出了基于激光成像特征的掘进机位姿视觉检测系统。文献[4]基于机器视觉技术,阐述在煤矿掘进机位姿检测与定位导航的研究现状,通过工业相机采集巷道目标特征,融合多种传感器,解决掘进机空间位姿的检测。文献[5]根据煤矿巷道特点,按照“感知为基础,信息融合为中心,智能掘进为目标”原则,利用大数据和云计算平台,提出掘进机器人智能掘进技术体

* 浙江省教育厅科研项目资助(Y202148052)

系,推动掘进技术和装备的发展。本文结合国内外的研究进展情况,从煤矿掘进机器人视觉位姿检测与控制、远程视频监控、数字孪生驱动控制和智能协同控制方面深入研究与分析,探究机器视觉在煤矿智能掘进机器人上的应用与发展趋势,为煤矿掘进智能化、无人化提供参考。

1 煤矿掘进机器人位姿视觉检测技术

煤矿掘进机器人位姿检测主要涉及对掘进机本体位姿和掘进截割头位姿两部分的检测,其位姿检测方式主要有全站仪测量、捷联惯导、电子罗盘和视觉检测等,而视觉检测具有非接触、抗干扰强、测量稳定等优点,已越来越多应用到煤矿掘进机器人位姿检测中。

(1) 掘进机器人本体位姿视觉检测

在煤矿巷道的复杂环境中,掘进机器人通过构建其位姿视觉测量模型,通过安装在掘进机器人上的矿用工业相机实时采集激光指向仪在标靶上成像的目标图像并经图像预处理后,提取与识别目标特征图像,再通过坐标系变换以及对掘进机器人位姿解算,获取巷道基准位姿信息,从而推算出掘进机本体实时位姿信息。掘进机器人本体视觉位姿检测原理如图1所示,其在实际研究与应用中已较为广泛。例如文献[6]利用单目视觉成像测量技术,通过防爆工业相机采集十字激光指向仪在激光标靶上目标特征图像,经图像处理及特征提取,采用位姿视觉测量模型解算掘进机器人本体位姿信息,实现对其本体位姿的检测。

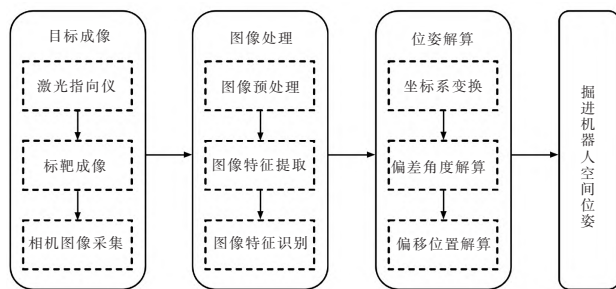


图1 掘进机器人本体位姿视觉检测原理

为了提升视觉位姿检测精度和系统可靠性能,文献[7]采用激光捷联惯导测量与单目视觉检测相结合的组合检测方法,通过捷联惯导获得掘进机姿态信息,通过防爆单目工业相机检测获取掘进机位置信息,可实现对掘进机5个自由度的实时位姿测量,但巷道路面不平、单目相机测量精度等因素会影响掘进机测量精度。为此,文献[8]针对煤矿不同巷道的复杂环境,提高掘进机器人巷道空间环境特征识别能力和定位定向精度,采用双目视觉感知技术,

通过矿用双目工业相机获取煤矿巷道内的空间环境特征,建立掘进机器人视觉特征识别模型,经巷道空间坐标系与掘进机器人坐标系转换,解算获得较为精准的掘进机器人位姿信息,对掘进机器人进行精准定位定向,如图2所示。

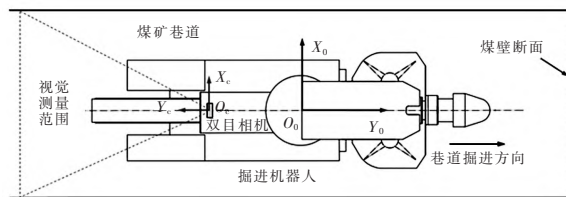


图2 掘进机器人双目视觉测量示意图

(2) 掘进机器人截割头位姿视觉检测

煤矿掘进机器人掘进截割过程中,为确保巷道截割质量、掌握掘进机器人截割头位姿情况,需对其截割头进行位姿测量。目前主要有角度传感器摆角测量、摆动油缸位移传感器测量和视觉位姿测量等几种方式,而视觉位姿测量具有环境适应性强、稳定性好、安装维护方便等优点,在掘进机器人截割头位姿检测中优势较为明显。如文献[9]针对掘进机截割头测量稳定性差、测量改造安装复杂等问题,利用单目视觉检测技术,通过防爆工业相机实时对掘进机上的红外标靶图像进行采集,提取目标图像特征,并通过构建的截割头位姿测量模型计算获得掘进机当前截割头的位姿信息,其视觉位姿检测系统如图3所示。而文献[10]利用双目视觉测量技术,以测量截割头转向角和俯仰角为姿态参数,构建掘进机截割视觉检测模型,提出了基于机器视觉的掘进机截割位姿检测系统,能有效获取截割头的位姿检测数据。

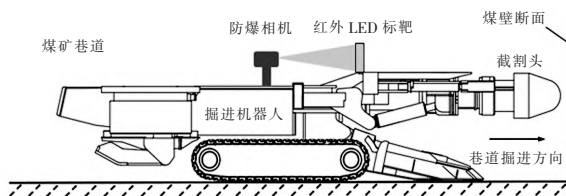


图3 掘进机器人截割头位姿视觉检测示意图

2 煤矿掘进机器人远程视频监控技术

由于煤矿掘进危险程度高、井下工况复杂,为确保煤矿作业人员的人身安全和提升作业效率,推进煤矿掘进智能化和无人化生产,势必需要加快煤矿掘进远程智能化控制的发展。而远程视频监控技术作为煤矿掘进智能化、无人化的视觉感知保障,可起到较为重要的作用,利用视觉监控提升掘进机的感知能力,通过安装在掘进机器人各个关键部位实时获取掘进运行情况图像信息,使远程监控系统实时掌握煤矿井下现场安全生产情况,而且也能及时发

现危险隐患并加以排除,已广泛应用到煤矿掘进生产中。如文献[11]针对煤矿掘进复杂工况和危险程度高等情况,设计基于视频监控的煤矿智能化远程控制系统,通过安装在掘进机本体的防爆高清摄像头实时采集掘进机本体及巷道内的环境信息,并将采集数据信息及时传送给煤矿控制中心,同时通过云平台与地面控制中心进行互联控制,实现煤矿掘进机的远程监控。文献[12]通过多套矿用高清摄像头、中继站、远程操控中心和远程监控系统等构建煤矿掘进机远程控制系统,对煤矿掘进过程中的工况和运动状态进行远程智能化控制。

但在实际煤矿掘进过程中,因煤矿巷道内粉尘较多、环境较为复杂,视频监控画面不清晰,容易造成掘进机器人的实际位姿和工况信息失真。

3 煤矿掘进机器人数字孪生驱动控制技术

针对煤矿掘进机器人位姿视觉测量稳定性和远程视频监控可靠性问题,可结合人工智能、物联网、大数据以及虚拟增强现实等技术,创建与实际煤矿掘进机器人多种传感器的物理数据相匹配的三维虚拟模型,将物理数据实时反馈给虚拟模型,构建数字孪生驱动的远程监控系统,再现掘进工作状态,实时采集掘进过程中运行状态信息数据,通过数字孪生驱动实时调整虚拟模型参数,并对实际掘进机器人进行调整控制,实现数字孪生驱动控制的虚实同步,从而提升掘进机器人位姿视觉测量和远程视频监控的性能。如文献[13]利用虚拟增强现实技术,通过对掘进机器人的优化改进,构建虚拟仿真远程监控平台和掘进机器人控制模型,建立煤矿掘进机器人的虚拟仿真与远程监控系统,能有效提升远程视频监控和遥测遥控的控制性能。

同时,通过采用数据驱动算法模型,增强数据的可视化、人机交互能力,实现数字孪生三维可视化监控;将煤矿掘进控制信息数据融合,从数据感知、数据传输、远程自动掘进截割控制等方面采用数据驱动,并将虚拟远程控制、远程视频监控、掘进机器人本体和截割头视觉位姿检测以及智能控制技术相结合,构建煤矿掘进机器人数字孪生驱动控制系统如图4所示。通过远程操控平台对掘进机器人进行远程智能操控,提升煤矿掘进运营效率,确保煤矿综掘安全,从而有效提高掘进截割的智能化程度。

4 煤矿掘进机器人智能协同控制技术

要实现煤矿综掘高效、快速、安全的智能化连续生产,还需对煤矿自动掘进截割、自动锚护以及输送设备自动控制及监测等并行连续作业进行智能化协同控制。所以将掘进机器人视觉位姿检测、远程视

频监控、数字孪生驱动的远程虚拟控制、智能化掘进机器人协同控制以及环境检测等技术相融合,完成多任务之间的最优规划,通过截割机器人、临时支护机器人、钻锚机器人等多种煤矿机器人的协同合作控制,构建掘进、支护、运输三维一体化的煤矿快速掘进智能机器人,实现煤矿巷道综掘的智能化、无人化生产。文献[16]结合煤矿巷道与掘进机器人的系统耦合关系,分析掘进截割机器人和钻锚机器人等多任务的影响机理,构建多任务并行协同控制模型,选取钻锚机器人最佳时空匹配策略,并对钻锚机器人与截割机器人的工作时间进行匹配,实现对煤矿掘进多机器人系统的并行协同智能控制。

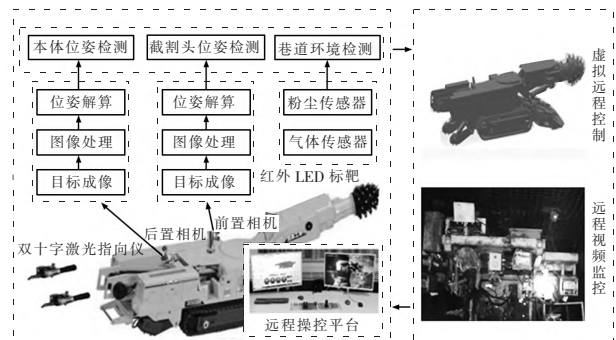


图4 掘进机器人数字孪生驱动控制系统框架

目前,由西安科技大学与西安煤矿机械有限公司共同研制的掘、支、运三位一体的煤矿智能快速掘进机器人在小保当煤矿已投入运行。该煤矿智能快速掘进机器人系统整体分为巷道掘进控制层、集控网络层和地面远程测控层,如图5所示。其中巷道掘进控制层主要由截割机器人、临时支护机器人、钻锚机器人、锚网运输机器人和电液控平台以及通风除尘和运输系统等组成;地面远程测控层涉及远程视频监控系统、数字孪生虚拟模型以及远程测控系统等,实现本地和遥控及远程一键式启停、关键部件远程视频监控、数字孪生虚拟远程监测、精准位姿感知与定位定向、截割机器人与钻锚机器人以及锚网运输机器人的并行协同控制,实现煤矿安全、绿色、高效的智能化掘进。

5 结语

随着机器视觉在煤矿掘进机器人中的应用与推广,煤矿掘进的智能化程度、掘进工作效率和巷道安全均有所提升,但因煤矿巷道环境复杂、干扰因素多等,视觉位姿检测精度和远程视频监控智能化还有待提高,数字孪生驱动的融合程度以及多机器人并行协同控制还需进一步加强。

(1)优化视觉位姿检测方案,开发研制抗干扰强的高清防爆工业相机等高性能视觉感知设备,利用

人工智能和深度学习等算法提高图像特征的提取与识别,完善感知设备的布设,确保煤矿掘进智能感知;

(2)大力发展煤矿巷道 5G 和无线网络的应用,确保视频监控、控制信号等数据的高速传输,加速数字孪生驱动控制技术与煤矿巷道掘进过程的深度融合,促进煤矿掘进机器人的高效、低延时的可靠互联;

(3)提高煤矿掘进多机器人系统的并行协同智能控制,利用大数据云计算技术、多位一体智能控制,促使高适应、高智能、高集群的煤矿掘进机器人高速发展。

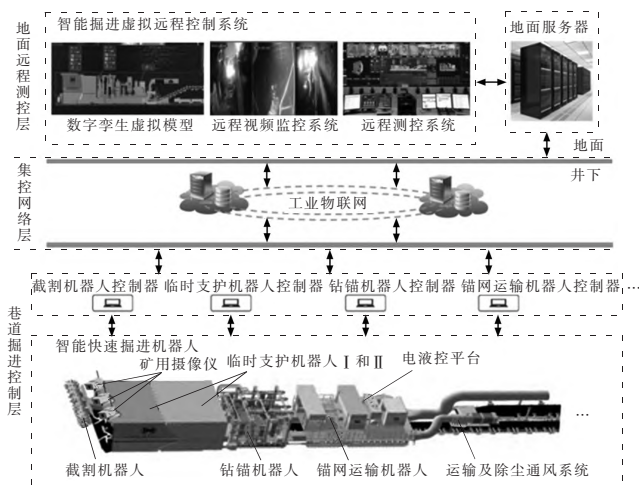


图 5 智能快速掘进机器人系统总体架构

参考文献:

- [1]杨健健,张强,王超,等. 煤矿掘进机的机器人化研究现状与发展[J]. 煤炭学报,2020,45(8):2995-3005.
- [2]王国法,任怀伟,赵国瑞,等. 煤矿智能化十大“痛点”解析及对策[J]. 工矿自动化,2021,47(6):1-11.
- [3]杨文娟,张旭辉,马宏伟,等. 悬臂式掘进机机身及截割头位姿视觉测量系统研究[J]. 煤炭科学技术,2019,47(6):50-57.
- [4]张凯,田原,贾曲. 机器视觉在煤机装备中的应用现状与趋势[J]. 煤矿机械,2020,41(12):123-125.
- [5]胡兴涛,朱涛,苏继敏,等. 煤矿巷道智能化掘进感知关键技术[J]. 煤炭学报,2021,46(7):2123-2135.
- [6]杜雨馨,刘停,童敏明,等. 基于机器视觉的悬臂式掘进机机身位姿检测系统[J]. 煤炭学报,2016,41(11):2897-2906.
- [7]黄东,杨凌辉,罗文,等. 基于视觉/惯导的掘进机实时位姿测量方法研究[J]. 激光技术, 2017,41(1):19-23.
- [8]薛旭升,张旭辉,毛清华,等. 基于双目视觉的掘进机器人定位定向方法研究[J]. 西安科技大学学报,2020,40(5):781-789.
- [9]张旭辉,刘永伟,杨文娟,等. 矿用悬臂式掘进机截割头姿态视觉测量系统[J]. 工矿自动化,2018,44(8):63-67.
- [10]刘勇. 基于机器视觉的掘进机截割头姿态检测系统[J]. 煤矿机械,2020,41(3):187-189.
- [11]张敏骏,臧富雨,吉晓冬,等. 掘进机远程监控系统设计与位姿检测精度验证[J]. 煤炭科学技术,2018,46(12):48-53.
- [12]李合菊,魏燕,魏珑. 煤矿掘进机远程智能控制技术研究[J]. 煤矿机械,2021,42(9):49-51.
- [13]张旭辉,陈利,马宏伟,等. 煤矿掘进机器人虚拟仿真与远程控制系统[J]. 工矿自动化,2016,42(12):78-83.
- [14]迟焕磊,袁智,曹琰,等. 基于数字孪生的智能化工作面三维监测技术研究[J]. 煤炭科学技术,2021,49(10):153-161.
- [15]张超,张旭辉,张楷鑫,等. 数字孪生驱动掘进机远程自动截割控制技术[J]. 工矿自动化,2020,46(9):15-20+32.
- [16]马宏伟,王鹏,王世斌,等. 煤矿掘进机器人系统智能并行协同控制方法[J]. 煤炭学报,2021,46(7):2057-2067.

作者简介: 徐伟锋(1979-), 浙江绍兴人, 副教授, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向: 智能控制及视觉检测, 电子信箱: xuwf@sxvtc.com.

责任编辑: 刘宝胜 收稿日期: 2022-02-05