



多机械臂煤矸石智能分拣机器人关键共性技术研究

马宏伟 张烨 王鹏 魏小荣 周文剑

引用本文：

马宏伟, 张烨, 王鹏, 等. 多机械臂煤矸石智能分拣机器人关键共性技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 427–436.
MA Hongwei, ZHANG Ye, WANG Peng. Research on key generic technology of multi-arm intelligent coal gangue sorting robot[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 427–436.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2022-2215>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

煤矸分拣机器人设计与关键技术分析

Design and key technology analysis of coal-gangue sorting robot
煤炭科学技术. 2022, 50(3): 232–238 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/941fe867-4493-4ef1-9dbf-8462a2f31f9b>

基于多机械臂协同的煤矸分拣方法研究

Study on coal-gangue sorting method based on multi-manipulator collaboration
煤炭科学技术. 2019(4) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/ad9126cf-28fa-4d74-86a6-76a3fbe935ee>

面向煤矸分拣机器人的煤矸识别定位系统研究

Research on coal gangue identification and positioning system based on coal-gangue sorting robot
煤炭科学技术. 2022, 50(1): 237–246 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/44286d3f-7340-456c-a4fb-cb6e4fc67aea>

柔索驱动拣矸机器人分拣轨迹跟踪控制研究

Pick-and-place trajectory tracking control for cable-driven gangue sorting robots
煤炭科学技术. 2023, 51(10): 280–290 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2022-1898>

煤矸石井下原位智能分选充填技术研究进展

Research progress on in-situ intelligent sorting and filling technology of coal gangue underground
煤炭科学技术. 2024, 52(4): 12–27 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1677>

改进的ORB-FLANN煤矸石图像高效匹配方法

Improved ORB-FLANN efficient matching method for coal gangue image
煤炭科学技术. 2024, 52(1): 288–296 <https://doi.org/10.12438/j.cnki.est.2023-1550>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

机电与智能化



马宏伟, 张 烨, 王 鹏, 等. 多机械臂煤矸石智能分拣机器人关键共性技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 427-436.

MA Hongwei, ZHANG Ye, WANG Peng, et al. Research on key generic technology of multi-arm intelligent coal gangue sorting robot[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 427-436.

移动扫码阅读

多机械臂煤矸石智能分拣机器人关键共性技术研究

马宏伟^{1,2}, 张 烨^{1,2}, 王 鹏^{1,2}, 魏小荣^{1,2}, 周文剑^{1,2}

(1. 西安科技大学 机械工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 陕西省矿山机电装备智能检测与控制重点实验室, 陕西 西安 710054)

摘要: 依据我国煤矿智能绿色发展战略, 深入分析了国内外智能拣矸系统的研究现状, 指出研发适用于井下的多机械臂煤矸石智能分拣机器人是破解煤矸分拣难题的重要发展方向, 凝练了直接影响和制约我国煤矸石智能分拣高质量发展的“煤矸石准确识别、精准跟踪和可靠抓取、多目标任务多机械臂协同分拣”三大关键共性技术难题, 并给出了解决思路和方法。针对煤矿井下煤矸石被煤泥严重包裹识别难, 提出了“X射线+视觉”煤矸石识别与匹配方法、基于点云数据的煤矸石抓取特征提取方法, 实现目标矸石的快速识别和最优抓取特征提取; 针对煤矸石形态各异、动态环境抓取难, 提出了基于ORB+BEGLID特征的FLANN动态目标高效匹配方法、基于FDSST的动态目标精准跟踪方法、基于三环PID的机械臂同步跟踪轨迹规划方法, 实现机械手对高速传输的动态矸石稳定抓取; 针对煤矸石随机分布、障碍多、多机械臂任务分配难, 提出了改进匈牙利算法的多机械臂动态空间协同分拣方法, 确保系统收益的前提下实现多机械臂在动态空间中高效协同工作。现场工业性试验研究结果表明, 针对三大关键共性技术所提出的方法能够有效破解煤矸石高效识别和抓取特征提取、机械臂动态目标同步跟踪稳定抓取、多机械臂高效协同分拣等难题, 通过构建完整的多机械臂煤矸石智能分拣机器人系统, 提高了煤矸石智能分拣系统的可靠性和分拣效率。

关键词: 煤矸石智能分拣; 分拣机器人; 煤矸识别; 稳定抓取; 智能协同分拣

中图分类号: TD67 文献标志码: A 文章编号: 0253-2336(2023)01-0427-10

Research on key generic technology of multi-arm intelligent coal gangue sorting robot

MA Hongwei^{1,2}, ZHANG Ye^{1,2}, WANG Peng^{1,2}, WEI Xiaorong^{1,2}, ZHOU Wenjian^{1,2}

(1. College of Mechanical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Mine Electromechanical Equipment Intelligent Monitoring, Xi'an 710054, China)

Abstract: According to the intelligent green development strategy of coal mine in our country, the research status of intelligent coal gangue sorting system at home and abroad is deeply analyzed. It is pointed out that the development of multi-arm coal gangue intelligent sorting robot suitable for underground is an important development direction to solve the problem of coal gangue sorting. The three key common technical problems of “accurate recognition, accurate tracking and reliable grasp of coal gangue, multi-target task and multi-arm collaborative sorting” which directly affect and restrict the high quality development of intelligent sorting of coal gangue in China have been condensed, and the solutions are given. For the problem that coal gangue is badly encapsulated by coal slime in underground coal mine, the method of “X-ray and visual” recognition and matching of coal gangue, the method of extracting feature of coal gangue based on point cloud data are put forward to realize fast recognition and optimal feature extraction of target gangue. An efficient FLANN dynamic target matching method based on the fusion of ORB and BEGLID features, an accurate dynamic target tracking method based on FDSST, and a synchronous tracking trajectory planning method for manipulator based on three-loop PID are proposed to realize the stable grasping

收稿日期: 2022-12-21 责任编辑: 周子博 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-2215

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(51975468)

作者简介: 马宏伟(1957—), 男, 陕西兴平人, 教授, 博士生导师, 博士。E-mail: mahw@xust.edu.cn

通讯作者: 王 鹏(1986—), 男, 陕西澄城人, 工程师, 博士。E-mail: wpeng@xust.edu.cn

of dynamic gangstone with high-speed transmission by manipulator. For the random distribution of coal gangue and difficult task allocation of multi-manipulators with obstacles, a dynamic space cooperative sorting method of multi-manipulators based on improved Hungarian algorithm was proposed, which realized efficient cooperative work of multi-manipulators in dynamic space on the premise of ensuring system revenue. The results of field industrial experiment show that the proposed method for the three key common technologies can effectively solve the problems of efficient recognition and grasping feature extraction of coal gangue, synchronous tracking and stable grasping of dynamic targets of manipulators, efficient cooperative sorting of multi-manipulators, and construct a complete multi-manipulator intelligent sorting robot system for coal gangue. It improves the reliability and efficiency of the gangue intelligent sorting system.

Key words: intelligent sorting of coal gangue; sorting robot; identification of coal and waste; stable grab; intelligent collaborative sorting

0 引言

随着煤矿智能化的发展,煤矸石分拣已进入一个新的阶段,特别是煤矸石分拣机器人的研发,为煤矸石分拣技术的提升注入了新的活力。煤矸石分拣机器人是借助于矸石识别技术、机器视觉技术、机器人技术、人工智能技术等,实现煤矸石高效分拣,随着机器人技术与人工智能技术的深度融合,智能煤矸石分拣机器人的研发已经成为重要的发展方向。

目前已有众多高校和研究院所针对煤矸石分拣提出了几种有效的解决方案。西安科技大学煤矿机器人研发团队^[1]提出了基于机器视觉的多机械臂桁架结构煤矸石分拣机器人方案,构建了煤矸石分拣系统,并对关键技术问题开展了深入研究,已在煤炭企业得到应用。孙稚媛^[2]以煤矸石视觉识别为基础,提出了基于关节型机器人的煤矸石分拣系统,并在实验室条件下进行了机器人分拣煤矸石实验。赵明辉等^[3]设计一种并联 SCARA 型煤矸石分拣机器人,理论上能够满足粒度在 300~600 mm 砧石的分拣。董华飞^[4]提出了一种基于 Delta 机器人的煤矸石分拣系统,并对其运动学、轨迹规划等问题进行了研究,同时在实验室进行了原理性试验。分析近年来矸石分拣方案和研究热点,主要聚焦在煤矸石高效识别技术、机械臂动态目标跟踪轨迹规划技术和多机械臂智能协同技术等方面。

1)煤矸石识别与抓取特征研究现状。煤矸石高效识别是实现机器人分拣煤矸石的前提。在煤矸石识别方面,世界各国先后提出利用红外反射、天然 γ 射线、人工 γ 射线和 X 射线等 20 余种方法识别煤矸石^[5]。其中射线识别具有识别准确率高、识别速度快的优势,但对人体有害、对不同煤质的适应性较差,也需要根据煤质情况进行识别阈值计算^[6-7]。基于工业相机图像的煤矸石识别方法,能够获取矸石的更多特征,并结合深度学习方法,获取较高的识别精度。但目前所研究的仅限于选煤厂未被煤泥包裹的煤矸

石识别,对于在煤矿井下被煤泥包裹严重的煤矸石,基于视觉图像的识别方法很难发挥作用。此外,利用机器人对煤矸石进行分拣时,不仅要获取煤矸石的位置信息,还要获取其抓取特征信息,而射线识别仅能获取煤矸石平面信息。

因此,综合对比射线识别和视觉识别优缺点,提出一种基于“射线+双目视觉”煤矸石识别与抓取特征提取方法,采用射线对煤矸石快速识别,通过双目视觉对煤矸石抓取特征准确提取,实现井下煤矸石快速识别与抓取立方体提取。

2)机械臂动态目标跟踪抓取研究现状。目前,机械臂对动态目标抓取的研究主要集中在自动导引和基于视觉伺服的抓取方法研究。利用自动导引技术进行机器人抓取研究早见于文献^[8]中。在此基础上,学者们采用变比例导引法^[9]、基于金字塔寻优的导引方法^[10]、增量比例导引法^[11]完成对动态跟踪过程中机械臂的抓取轨迹规划。尽管自动导引技术可以实现目标跟踪,但实时定位精度低,易造成轨迹发散导致跟踪失败,而基于视觉伺服的目标跟踪方法具有很好的实时性和鲁棒性。基于视觉伺服的跟踪方法大多通过视觉反馈信息规划机器人运动,从而完成机器人视觉定位、跟踪或目标抓取等任务^[12]。结合煤矸石在带式输送机上高速传输的特点,若机器人在抓取时,其末端速度和目标煤矸石速度未达到同步,很容易造成冲击载荷。

因此,提出一种基于机器视觉的快速匹配和精准跟踪方法,获取目标煤矸石的实时位置信息;采用基于视觉伺服的三环 PID 自动控制算法完成机械臂对动态煤矸石的跟随轨迹规划,实现机械手对目标矸石的同步抓取,解决煤矸石精确跟踪、稳定抓取和快速搬移难题。

3)多机械臂智能协同分拣研究现状。多机器人任务分配问题是多机器人系统研究的核心,直接决定了整个系统智能化程度的高低。目前,随着智能算法和机器视觉技术在煤矸分拣机器人领域中的研

究和应用,设计基于视觉伺服的多机械臂煤矸石分拣系统,为煤矸石智能高效分拣提供了新的思路^[13]。采用现代排序理论和多目标规划方法,设计机械臂协同分拣策略,有效解矸石流的多目标分配问题^[14]。通过设计机器人多目标运动规划模型,使机器人能够在有限的时间内清理出尽可能多的矸石,提高煤矸石分选的精度和效率。分析近年来相关文献,现有方法虽然已初步实现分拣机器人的基本功能,但任务分配策略没有从系统综合收益角度进行分配求解,不能保证系统效益最大;其次,机械臂自主性差,在面对突发情况时不能及时做出相应决策,最终导致分拣失败或降低分拣率。

因此,提出一种改进匈牙利算法的多机械臂动态空间协同分拣方法,该方法通过构建机械臂收益函数实现多机械臂多任务快速分配,并通过匈牙利算法实现多机械臂协同分拣,可以有效解决煤矿井下多机械臂多任务分配难题,提高井下煤矸石分拣效率。

综上所述,为推动煤炭绿色开采和清洁利用,破解煤矸石井下分拣和利用难题,构建 X 射线图像识别

别与多机械臂协同抓取的煤矸石智能分拣系统,重点解决煤矸石准确识别、精准跟踪和可靠抓取、多目标任务多机械臂协同分拣三大关键技术问题。

1 多机械臂煤矸石智能分拣机器人系统组成

煤矸石分拣机器人关键技术逻辑关系如图1所示,智能煤矸石分拣机器人系统主要由感知模块、控制模块、机械系统模块组成,系统组成如图2所示。感知模块主要完成煤矸石图像数据以及其他传感器等数据的采集并发送到控制模块,主要包括矸石的识别信息、实时位置信息及抓取特征信息等;控制端接将信息集中处理后,根据当前分拣情况,采用多机械臂多任务分配算法完成机械臂的任务分配和协同控制,同时借助于机械臂动态目标跟踪抓取算法实现机械臂对目标矸石同步跟踪;机械系统模块根据控制端发送的指令,通过视觉伺服驱动机械臂到达指定位置,控制机械手实现自适应抓取,多机械臂系统协同完成煤矸石高效分拣。根据煤矸石分拣机器人系统组成搭建相应试验平台,如图3所示。

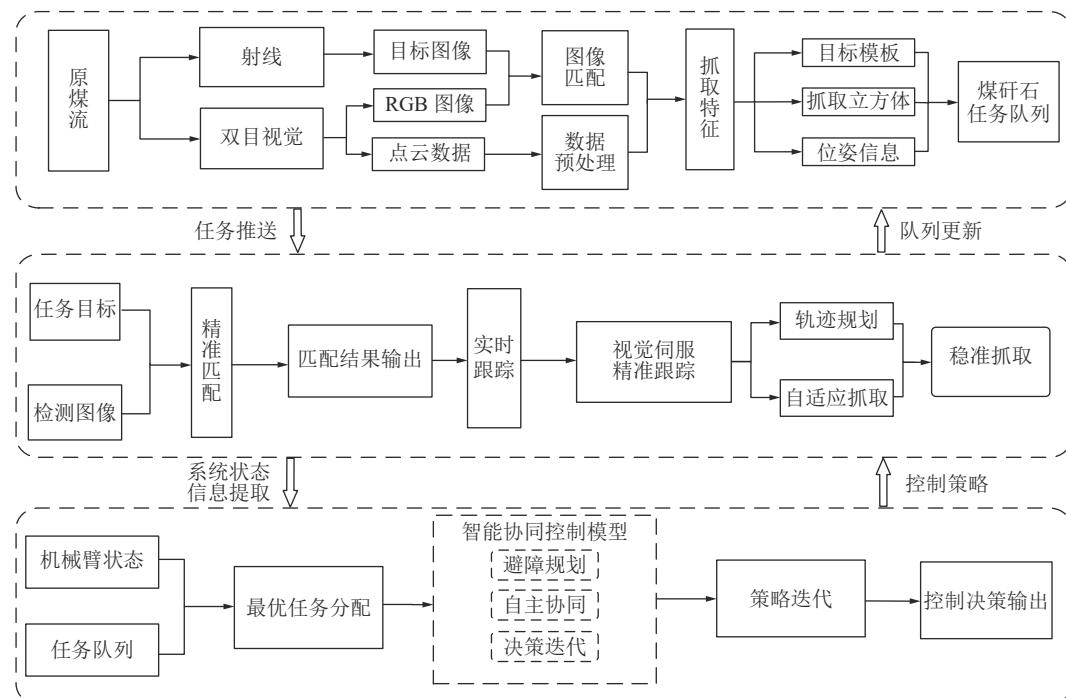


图 1 煤矸石分拣机器人关键技术逻辑关系

Fig.1 Logical relation of key technology of coal gangue sorting robot

2 煤矸石识别与抓取特征提取

煤矸石智能分拣机器人实现智能分拣的首要任务是煤矸石识别和抓取特征提取。考虑射线检测技术在煤矸石识别方面的优势,提出基于X射线图像与双目视觉信息融合的煤矸石识别和抓取特征提取

方法。通过构建煤矿井下“X射线+双目视觉”煤矸石识别和抓取特征提取系统,在获取识别结果的基础上,以煤矸石X射线图像为模板,对双目视觉RGB图像进行匹配,此外,结合点云数据提取抓取特征,获取最优抓取立方体,为煤矸石分拣机器人后续抓取提供了可靠的数据支撑。

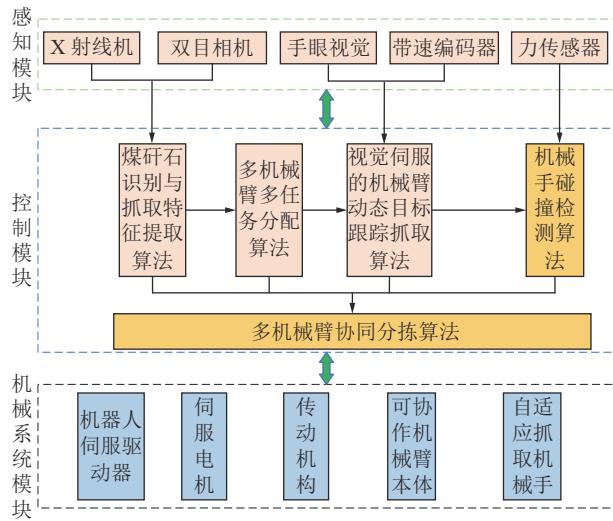


图2 智能煤研石分拣机器人系统组成

Fig.2 Intelligent gangue sorting robot system composition



图3 煤研分拣机器人试验平台

Fig.3 Gangue sorting robot experimental platform

2.1 “X射线+视觉”煤研石识别与匹配方法

通过X射线机和双目视觉对煤研石图像进行采集,分别获取煤研石X射线图像、RGB图像。

将X射线机获得的图像转化为灰度图像,依据统计数据设置阈值对图像灰度值进行判断,完成煤研石识别,并对识别的目标研石图像进行分割,保存为目标模板;将目标模板与RGB图像采用基于轮廓特征的Hu不变矩模板匹配算法进行匹配,由于X射线图像丢失了研石的细节信息,因此选取目标轮廓作为特征对图像进行匹配,最终获得目标研石在RGB图像中的位姿。“X射线+视觉”煤研石快速匹配方法如图4所示。

在煤研分拣机器人平台上进行试验,设置光照均匀,将煤研石放置到带式输送机上中,使用X射线机和双目相机分别采集2000张煤研石X射线图像和煤研石RGB图像,匹配结果如图5所示。试验结果表明,该算法能够对实现目标图像和RGB图像的精准匹配,平均匹配时间为25 ms,平均匹配精度3.27 mm,平均匹配率91.7%。

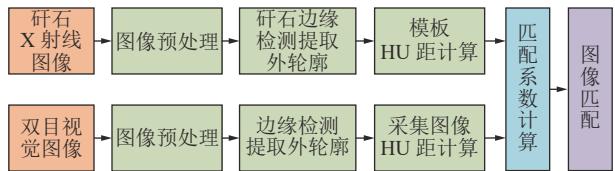
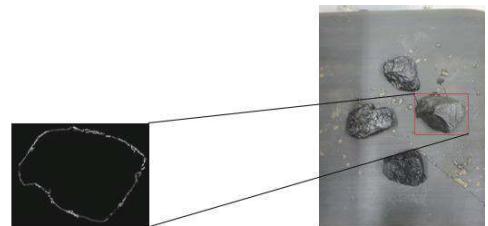
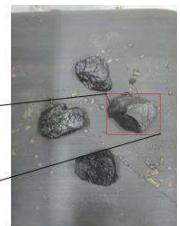


图4 “X射线+视觉”煤研石快速匹配方法原理

Fig.4 Schematic of the “X-ray + vision” coal gangue rapid matching method



(a) 处理后的研石 X 射线图像边缘 1



(b) 煤研混合视觉图像 1



(c) 处理后的研石 X 射线图像边缘 2



(d) 煤研混合视觉图像 2

图5 目标研石匹配效果

Fig.5 Target gangue matching rendering

2.2 基于点云数据的煤研石抓取特征提取方法

机械手在抓取时采用从研石顶端垂直向下的抓取方式,因此,需对机械手位姿进行控制,确保以最佳状态完成抓取。因此,定义煤研石的抓取特征为

$$G : (x, y, z, b, \theta) \quad (1)$$

其中, x, y, z 为煤研石形心坐标; θ 为煤研石抓取角度; b 为煤研石宽度。机械手在抓取时,要根据研石位姿进行合理抓取。因此,根据机械手抓取姿态定义研石抓取特征为抓取立方体,即研石抓取信息通过立方体信息表征,如图6所示。

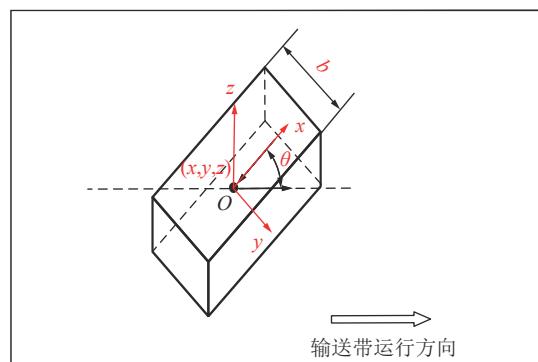


图6 煤研石抓取立方体模型

Fig.6 Coal gangue grabbing cube model

确定矸石抓取立方体后,对RGB匹配结果图像结合预处理后的矸石点云数据信息,采用DB-SCAN聚类方法进行分割^[15],通过最小方向包围盒OBB算法^[16]构造目标矸石的最优抓取立方体。基于点云数据的煤矸石抓取特征提取方法流程如图7所示。

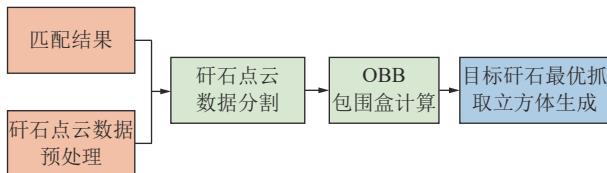


图7 基于点云数据的煤矸石抓取特征提取方法流程

Fig.7 Process of gangue capture feature extraction method based on point cloud data

选取粒度在50~200 mm的矸石样本,采用ZED2i相机采集目标矸石的点云数据,并通过该方法进行处理,生成矸石的最优抓取立方体和抓取识别特征参数,主要包括矸石最优抓取立方体的短边尺寸 a_1 ,长边尺寸 b_1 ,厚度 h ,抓取角度 θ ,如图8所示。

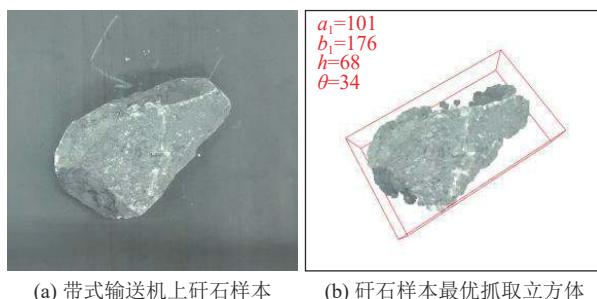


图8 真石样本点云处理效果

Fig.8 Rendering of gangue sample point cloud processing

3 视觉伺服的机械臂动态目标同步跟踪

考虑输送带的打滑和跑偏等因素,煤矸石从识别区域到达抓取区域,其位置可能发生变化。因此,提出基于视觉伺服的机械臂动态目标同步跟踪方法。首先,通过机器人手眼系统对输送带图像进行采集;然后从模板库中调取目标矸石模板,采用基于ORB(Oriented fast and Rotated Brief)+BEBLID(Boosted Effective Binary Local Image Descriptor)的快速匹配方法对目标信息。结合FDSST(Fast Discriminative Scale Space Tracking)动态目标跟踪方法对目标矸石进行跟踪,获取其实时位置信息;最后,根据当前目标矸石的位置信息,采用基于三环PID的轨迹规划方法实现对动态煤矸石同步跟踪轨迹规划。

3.1 基于ORB+BEBLID特征的FLANN动态目标高效匹配方法

煤矸石目标进入抓取区域后,首先需要完成对待抓取目标的匹配,以获取待抓取目标的初始位姿。采用ORB+BEBLID特征的FLANN(Fast Library for Approximate Nearest Neighbors)动态目标高效匹配方法。具体过程如下:通过ORB算法^[17]提取模板图像和机械臂上相机采集图像的ORB全局特征点,对ORB全局特征点提取局部BEBLID特征描述符^[18],通过FALNN单应性匹配对提取的特征点进行图像预匹配,最后采用RANSAC(Random Sample Consensus)算法设定筛选阈值^[19],去除错误匹配点,实现图像的精准匹配,从而输出目标矸石的位置信息。基于ORB+BEBLID特征的FLANN匹配算法流程如图9所示。

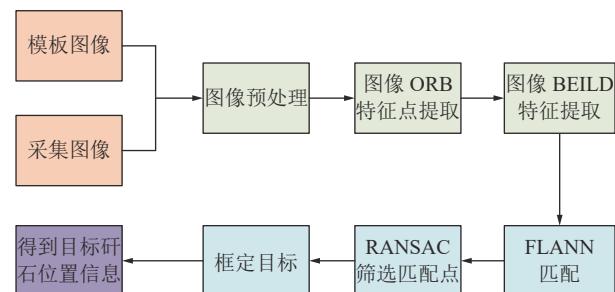


图9 基于ORB+BEBLID特征的FLANN匹配算法

Fig.9 FLANN matching algorithm based on ORB+BEBLID features

在煤矸分拣机器人平台上进行试验,模拟实际目标匹配识别环境,设置光照均匀,将煤矸石放置到带式输送机上中,使用相机对煤矸进行拍摄,获取2 000张目标矸石图像和2 000张煤矸混合图像,如图10a、图10b所示。对其采用该算法进行匹配,匹

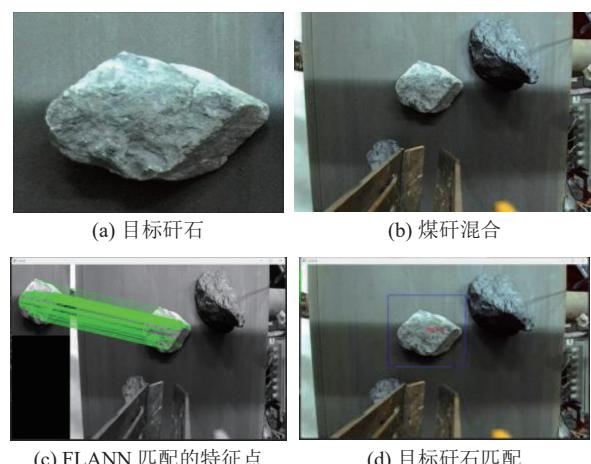


图10 算法匹配结果

Fig.10 The algorithm matches the results

配的特征点如图10c所示,匹配结果如图10d所示。试验结果表明,该算法的平均匹配时间为32 ms,平均匹配精度3.12 mm,平均匹配率98.5%。

3.2 基于快速判别尺度空间(FDSST)的动态目标

精准跟踪方法

在完成目标研石匹配后,采用基于FDSST的高速动态目标跟踪方法实现对目标研石的精准跟踪。FDSST算法设计了2个独立判别相关滤波器:平移滤波器和尺度估计滤波器,通过提取目标所在图像块的HOG多维特征作为滤波器的输入,由位置滤波器得到的高斯响应最大值,作为最终目标的位置估计;其次,以当前位置为中心,截取不同尺度的图像块特征,输入尺度滤波器得到高斯响应最大值作为精准的尺度信息,最后,更新模型继续跟踪。整体原理如图11所示。

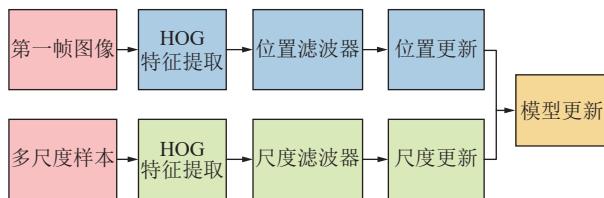


图11 FDSST位置滤波器和尺度滤波器目标位置估计示意
Fig.11 FDSST position filter and scale filter target position estimation schematic

为验证算法的有效性,在煤研分拣机器人试验平台上,对带式输送机上的目标煤研石进行跟踪验

证,带式输送机速度为0.9 m/s。其中,分为3种跟踪情况:无遮挡情况(第47帧)、部分遮挡情况(第62帧)和严重遮挡情况(第69帧),其跟踪效果如图12所示。

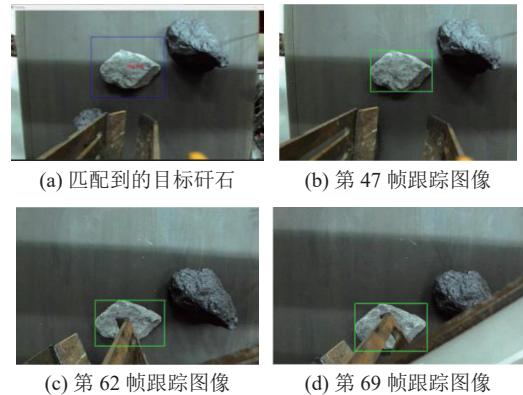


图12 基于FDSST的目标研石跟踪效果
Fig.12 Rendering of target gangue tracking based on FDSST

由图12可以看出,该算法以匹配结果作为跟踪的输入,对于无遮挡情况、部分遮挡情况和严重遮挡3种情况,均能实现对目标的精准跟踪。

3.3 机械臂同步跟踪轨迹规划方法

获取目标煤研石的实时位置后,为确保机械臂同步跟踪的准确性和稳定性,需要控制机械臂末端和目标在位置、速度和加速度上达到同步,即相对静止,这样跟踪抓取则不会出现较大冲击。提出一种基于视觉伺服的三环PID机械臂轨迹规划算法,原理如图13所示。

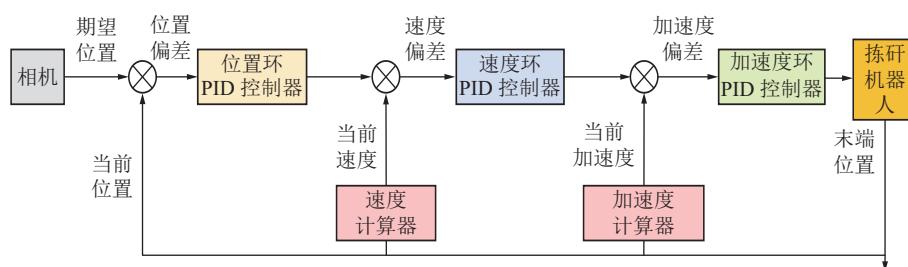


图13 基于三环PID机械臂轨迹规划原理
Fig.13 Based on the trajectory planning schematic of the three-ring PID manipulator

期望位置是机械臂上相机捕捉到目标研石的当前位置,作为位置环控制器的输入,位置环控制器的输出作为速度环控制器的输入,速度环控制器的输出作加速度环控制器的输入,将加速度环控制器的输出叠加到伺服电动机上,共同作用控制机械臂运动。整定同步跟踪保持控制的参数,使机械臂末端与目标研石达到位置速度同步运动,实现平稳快速抓取。

为验证算法的有效性,根据煤研分拣机器人试验平台实际情况:机械臂最大速度为4.2 m/s,最大加速度为10 m/s²,以带式输送机0.9 m/s的速度设置为目标研石的运动速度,验证该算法在追随式、同步式、相向式3种情况下的机械臂跟踪轨迹,结果如图14所示。

由图14可以看出,三环PID轨迹规划算法在追随式、同步式和相向式3种情况下的响应时间、跟踪

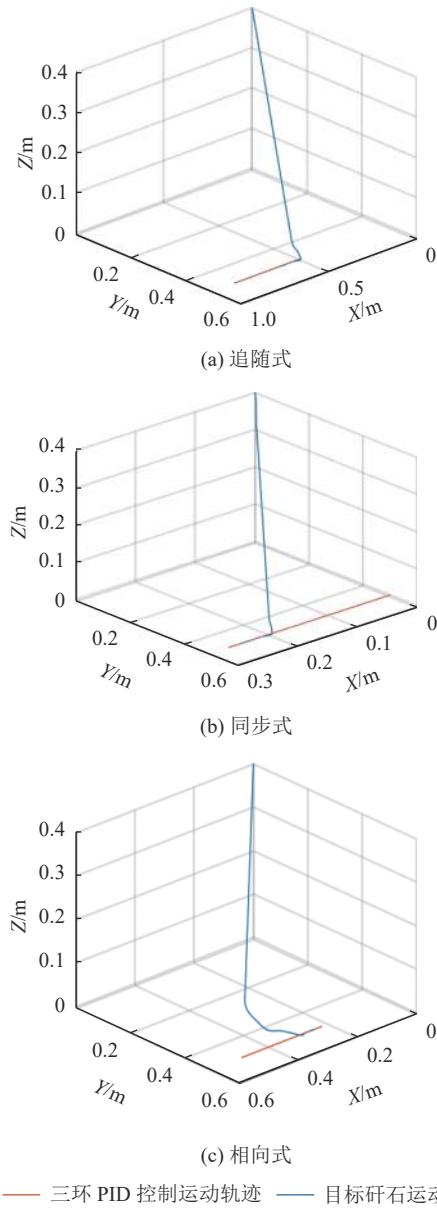


图 14 三环 PID 控制算法动态目标轨迹规划曲线
Fig.14 Dynamic target trajectory planning curve of three-ring
PID control algorithm

抓取时间均较短,且跟踪轨迹在整个过程中没有出现突变和大幅震荡,跟踪轨迹状态平稳、适应性强,实现了机械臂对动态目标的同步快速跟踪。

4 多机械臂智能协同分拣

目前,多机械臂分拣煤矸石采用分拣空间均分的协作形式,分拣效率为单机械臂分拣结果的线性叠加^[14,20]。提出基于动态工作空间多机械臂协同分拣方法,即多个机械臂共用一个分拣空间,放置位置根据抓取点就近选择。其协同分拣过程如图 15 所示。

利用机器人分拣煤矸石的最终目标是在最短的时间内分拣最多的煤矸石,即单位时间内分拣煤矸石的质量最大。因此,在实现多机械臂煤矸石分拣机器人协同作业前,需要对分拣任务进行合理分配。首先以单位时间内的分拣质量最大为目标,将机械臂 R 分拣矸石 G 的效益 C 定义为收益 m 与消耗的分拣时间 t 之比:

$$C_{ij} = \frac{m_{ij}}{t_{ij}} \quad (2)$$

式中, i 为机械臂序列; j 为矸石序列; C_{ij} 为机械臂 R_i 分拣 G_j 的效益; m_j 为矸石 j 的质量; t_{ij} 为机械臂 R_i 分拣 j 的时间代价。其中,矸石质量可通过视觉系统估算,分拣时间可通过动态目标轨迹跟踪预先计算。

用 X 表示任务分配的决策变量,将其定义 0~1 变量:

$$X_{ij} = \begin{cases} 0, & R_i \text{ 没有获得任务 } j \\ 1, & R_i \text{ 获得任务 } j \end{cases} \quad (3)$$

任务分配模型为

$$\max(Z) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m C_{ij} X_{ij} \quad (4)$$

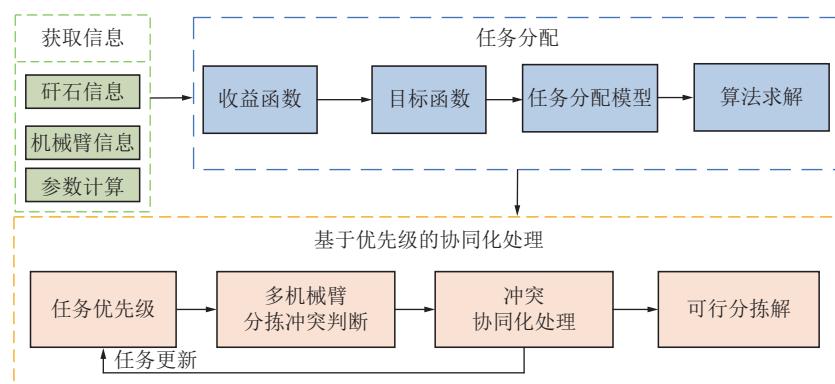


图 15 动态空间下多机械臂协同分拣过程
Fig.15 Multi-robot collaborative sorting process in dynamic space

$$\text{s.t. } \sum_{j=1}^m X_{ij} \leq 1, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^n X_{ij} \leq 1, \quad j = 1, 2, \dots, m; \quad X_{ij} = 0 \text{ 或 } 1 \quad (6)$$

任务分配的系统效益为每个机械臂的效益的代数和, n 为机械臂数量, m 为研石数量, 式(4)是任务分配的目标函数, 表示任务分配的目标是使得的系统效益最大化; 式(5)表示机械臂 i 每次最多分拣 m 个任务中的一个, 式(6)表示第 j 个研石最多只能由一个机械臂完成。

多目标对机械臂任务分配从收益角度应求最大指派, 匈牙利算法是一种以代价矩阵为基础的求最小代价的经典任务分配算法, 根据其局限性并结合多机械臂动态工作空间的工作方式, 可通过添加虚拟机械臂和修改矩阵元素构建满足标准匈牙利算法的效益矩阵, 多次求解可获得收益最大并含优先级的分配结果。

经过一次多任务分配后, 每个机械臂会按照各自任务的优先级顺序判断在不同时间节点下与其他机械臂是否存在冲突, 对于存在的冲突, 通过协同策略予以消除, 直至机械臂确定任务可行后即执行分拣工作, 系统则完成一次协同分拣。

多机械臂动态空间协同分拣时会因存在冲突导致无法正常执行分拣任务, 如图 16 所示。由机械臂分拣轨迹可以看出, 多机械臂在动态空间执行分拣任务时, 在时间节点 T_m 处会在 P 点发生碰撞, 因此可通过合理规划各机械臂 (R_1, R_2) 的轨迹来消除冲突, 即让机械臂通过点 P 的时间节点错开, 如图 17 所示, 其中 G_3, G_4 表示研石序号。当冲突无法消除时, 需根据机械臂和传送带的运动关系, 按优先级顺序对分配结果进行取舍和更换。

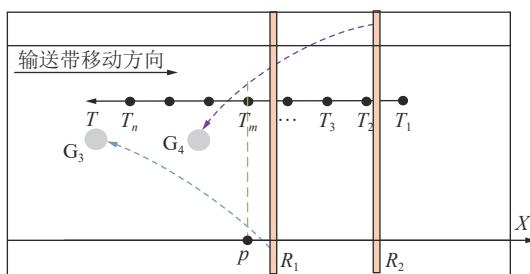


图 16 多机械臂轨迹冲突示意

Fig.16 Schematic of trajectory collision of multiple robotic arms

为验证该方法的有效性, 以铜川市某矿区搭建多机械臂煤矸石分拣机器人工业样机试验平台, 如

图 18 所示。设置最大速度为 6 m/s , 加速度为 4 m/s^2 , 机械臂末端为电动机械手。

以不同含矸率的原煤为试验样本, 并对煤矸石称重标记, 采用 3 种分拣方式分别对同一含矸率带速不同, 不同含矸率同一带速 2 种情况进行验证, 实验结果如图 19、图 20 所示。3 种分拣方式分别为: ① 动态工作空间; ② 固定工作空间 (固定空间指多个机械臂将分拣区空间等分且保持安全距离); ③ 固定放置点 (固定放置点指机械臂位置固定, 抓取后放置到指定位置)。

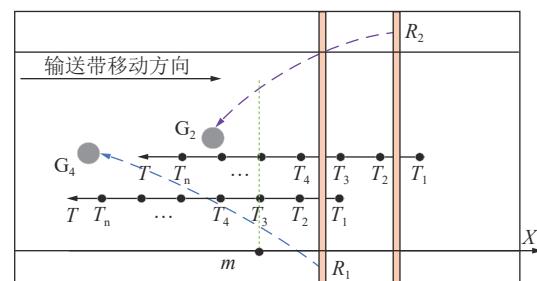


图 17 轨迹协同后机械臂分拣轨迹示意

Fig.17 Schematic of the sorting trajectory of the robotic arm after trajectory coordination



图 18 多机械臂煤矸石分拣机器人工业样机

Fig.18 Industrial prototype of multi-arm coal gangue sorting robot

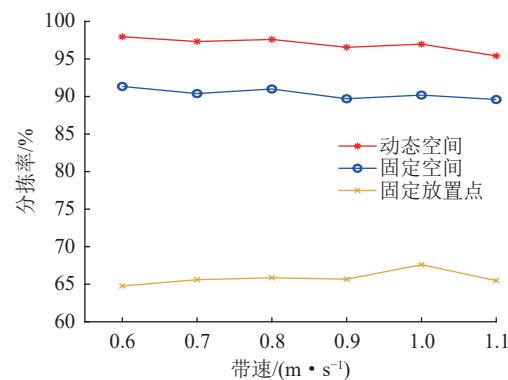


图 19 同一含矸率不同带速下不同方法的分拣效果

Fig.19 Sorting effect of different methods under different belt speeds of the same content rate

随机选择含矸率为 5.79% 的矸石样本, 带速在常用合理范围内 ($0.6\sim1.1 \text{ m/s}$), 可以看出, 在机器人

可正常运行的速度范围内,带速对分拣率的影响很小,机器人动态空间工作方式下的分拣率约为98%,固定空间和固定放置点分拣率约为91%和65%,机器人动态空间分拣策略分拣率明显高于其他2种方式。

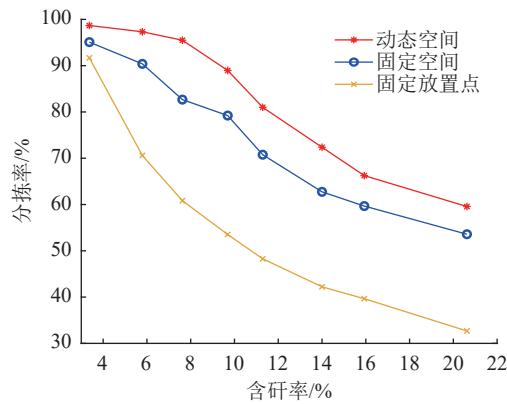


图 20 不同含矸率不同方法的分拣率

Fig.20 Sorting rates of different methods with different content rates

为验证算法对不同含矸率原煤的普适性,以不同含矸率的原煤作为试验样本,带速为0.9 m/s,其他条件相同,从试验结果可以看出,分拣率受含矸率影响,动态工作空间的工作方式的分拣率分别高于固定空间和固定放置点约10%和20%,多机械臂协同过程如图21所示。



图 21 煤矸分拣机器人多机械臂协同过程

Fig.21 Multi-arm collaborative process of coal and gangue sorting robot

5 结 论

1)针对井下煤矸石被煤泥严重包裹识别难的问题,研究煤矸石“X射线图像+机器视觉”识别和最优抓取特征提取方法,提出了融合X射线与机器视觉的煤矸石自动识别方法,实现了煤和矸石的快速识别;提出结合点云数据的煤矸石抓取特征提取方法,获取了目标矸石的最优抓取立方体。

2)针对煤矸石定位不准和直接抓取存在抓取冲击力的问题,提出基于ORB+BEBLID特征的FLANN动态目标匹配方法,匹配精度约3 mm,匹配率较传

匹配方法高出20%~30%,实现了高效精准匹配;提出基于FDSST的动态目标精准跟踪方法,确保煤矸石目标在无遮挡、部分遮挡以及严重遮挡情况下的实时精准跟踪;提出基于三环PID的机械臂同步跟踪煤矸石轨迹规划方法,验证了在追随式、同步式、相向式3种情况下的有效性,确保了机械臂的稳定抓取。

3)针对复杂环境下多机械臂协同分拣问题,分析了动态环境下带式输送机上矸石流特性及机器人工作特点,构建了效益函数并改进了传统的匈牙利算法,提出了多机械臂动态空间下协同分拣方法,其分拣率达到98%。

参考文献(References):

- [1] 王鹏,曹现刚,夏晶,等.基于机器视觉的多机械臂煤矸石分拣机器人系统研究[J].工矿自动化,2019,45(9): 47-53.
WANG Peng, CAO Xiangang, XIA Jing, et al. Research on multi-manipulator coal and gangue sorting robot system based on machine vision[J]. Industry and Mine Automation, 2019, 45(9): 47-53.
- [2] 孙稚媛.基于视觉信息的煤矸石自动分拣机器人系统研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2021.
SUN Zhiyuan. Research on automatic coal gangue sorting robot system based on visual information[D]. Beijing: China University of Mining & Technology-Beijing, 2021.
- [3] 赵明辉,宣鹏程,张少宾.并联煤矸石分拣机器人的结构设计及分析[J].机床与液压,2021,49(5): 55-59.
ZHAO Minghui, XUAN Pengcheng, ZHANG Shaobin. Structure design and analysis for parallel gangue sorting robot[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2021, 49(5): 55-59.
- [4] 董华飞.基于Delta并联机器人的煤矸石分拣方法研究[D].太原:中北大学,2022.
DONG Huafei. Research on coal gangue sorting method based on Delta parallel robot[D]. Taiyuan: North University of China, 2022.
- [5] 张烨,马宏伟,王鹏,等.煤矸石智能分拣机器人研究进展与关键技术[J].工矿自动化,2022,48(12): 42-48,56.
ZHANG Ye, MA Hongwei, WANG Peng, et al. Research progress and key technologies of intelligent coal-gangue sorting robot[J]. Journal of Mine Automation, 2022, 48(12): 42-48,56.
- [6] 王文鑫,黄杰,王秀宇,等.X射线透射煤矸石智能识别方法[J].工矿自动化,2022,48(11): 27-32,62.
WANG Wenxin, HUANG Jie, WANG Xiuyu, et al. X-ray transmission intelligent coal-gangue recognition method[J]. Industry and Mine Automation, 2022, 48(11): 27-32,62.
- [7] 司垒,谭超,朱嘉皓,等.基于X射线图像和激光点云的煤矸石识别方法[J].仪器仪表学报,2022,43(9): 193-205.
SI Lei, TAN Chao, ZHU Jiaohao, et al. A coal-gangue recognition method based on X-ray image and laser point cloud[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(9): 193-205.
- [8] PICCARDO, H R, HONDERED, G. A new approach to on-line

- path planning and generation for robots in non-static environment, [J]. *Robotics Autonom Systems*, 1991(8): 187-201.
- [9] 苏剑波, 冯纯伯. 机器人抓取运动目标的轨迹规划方法[J]. 机器人, 1994(2): 71-76.
- SU Jianbo, FENG Chunbo. Trajectory planning method of robot grasping moving object[J]. Robot, 1994, (2): 71-76.
- [10] 张朝阳. 基于视觉的机器人废金属分拣系统研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
- ZHANG Chaoyang. Research on robot scrap metal sorting robot with machine vision[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015.
- [11] 曹现刚, 李 宁, 王 鹏, 等. 基于比例导引法的机械臂拣研过程轨迹规划方法研究[J]. 煤炭工程, 2019, 51(5): 154-158.
- CAO Xiangang, LI Ning, WANG Peng, *et al*. Research and simulation on priority and path planning of manipulator gangue picking[J]. Coal Engineering, 2019, 51(5): 154-158.
- [12] 李世杰, 左治江, 李 涵. 基于深度学习的机器人抓取系统[J/OL]. 中国测试: 1-10[2022-12-17].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1714.TB.20221115.1900.005.html>
- LI Shijie, ZUO Zhijiang, LI Han. Design of robot grasping system based on deep learning [J/OL]. China Measurement & Test: 1-10[2022-12-17].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1714.TB.20221115.1900.005.html>
- [13] 王 鹏, 曹现刚, 夏 晶, 等. 基于机器视觉的多机械臂煤矸石分拣机器人系统研究[J]. *工矿自动化*, 2019, 45(9): 47-53.
- WANG Peng, CAO Xiangang, XIA Jing, *et al*. Research on multi-manipulator coal and gangue sorting robot system based on machine vision[J]. *Industry and Mine Automation*, 2019, 45(9): 47-53.
- [14] 曹现刚, 吴旭东, 王 鹏, 等. 面向煤研分拣机器人的多机械臂协同策略[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(S2): 763-774.
- CAO Xiangang, WU Xudong, WANG Peng, *et al*. Collaborative strategy of multi-manipulator for coal-gangue sorting robot[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(S2): 763-774.
- [15] 黄 贺. 基于点云的散乱堆放棒料位姿识别技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- HUANG He. Research on position and recognition technology of randomly stacked bars based on point clouds[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [16] 王培俊, 王文静, 陈 鹏, 等. 基于OBB算法和前向预防的快速碰撞检测[J]. *西南交通大学学报*, 2011, 46(6): 1003-1007.
- WANG Peijun, WANG Wenjing, CHEN Peng, *et al*. Rapid collision detection based on OBB algorithm and penetration avoidance mechanism[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2011, 46(6): 1003-1007.
- [17] 孙孟寒, 任维政. 基于动态阈值的视频场景切换检测[J]. 计算机系统应用, 2023, 32(2): 234-241.
- SUN Menghan, REN Weizheng. Video scene switching detection based on dynamic threshold[J]. Computer Systems & Applications, 2023, 32(2): 234-241.
- [18] 张 迁, 王 剑, 楚瑞博, 等. 基于BRISK-BEGLID特征的无人机图像快速配准方法[J/OL]. 激光杂志: 1-10[2022-12-18].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1085.TN.20221208.1422.009.html>
- ZHANG Qian, WANG Jian, CHU Ruibo, *et al*. A fast registration method for UAV images based on BRISK-BEGLID features[J/OL]. *Laser Journal*: 1-10[2022-12-18].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1085.TN.20221208.1422.009.html>
- [19] 程 健, 闫鹏鹏, 郁华森, 等. 基于有向线段误匹配剔除的煤矿巷道复杂场景图像拼接方法[J]. *煤炭科学技术*, 2022, 50(9): 179-191.
- CHEN Jian, YAN Pengpeng, YU Huasen, *et al*. Image stitching method for the complicated scene of coalmine tunnel based on mismatched elimination with directed line segments[J]. *Coal Science and Technology*, 2022, 50(9): 179-191.
- [20] 曹现刚, 乔欢乐, 吴旭东, 等. 考虑含研率时变性的多臂协同策略优化方法 [J/OL]. 机械科学与技术: 1-9[2022-12-11]. DOI:10.13433/j.cnki.1003-8728.20220159.
- CAO Xiangang, QIAO Huanle, WU Xudong, *et al*. Multi-arm cooperative strategy optimization method considering time variability of gangue rate[J/OL]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering* : 1-9[2022-12-11]. DOI:10.13433/j.cnki.1003-8728.20220159.