

基于激光雷达测量技术的集装箱定位系统

张冒¹,程文明²,覃琴¹

(1. 成都航空职业技术学院 机电工程学院,四川 成都 610100;

2. 西南交通大学 机械工程学院,四川 成都 610031)

摘要:针对现有铁路货场起重机吊具对箱作业主要依赖人工操作而存在的时间长、效率低、劳动强度大的难题,设计实现了一套基于激光雷达测量技术的集装箱定位系统。确定了定位系统总体架构及功能模块,在此基础上,首先运用2D激光雷达实现集装箱数据点的采集;然后采用基于统计分布的方法对干扰点进行剔除,通过平行坐标系变换思路实现了集装箱位置检测;最后结合可靠测量手段,采用轨迹规划和模糊自适应PID控制速度调节算法对起重机进行精确定位控制。实际项目验证表明:该系统方案可行,实现了集装箱对箱的自动化作业,降低了操作人员劳动强度,作业效率提高了15%。

关键词:激光雷达;集装箱定位;平行坐标系;自动化

中图分类号:TP271+4 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed22761

Container Positioning System Based on Laser Radar Survey Technology

ZHANG Mao¹, CHENG Wenming², QIN Qin¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Chengdu Aeronautic Polytechnic,

Chengdu 610100, Sichuan, China; 2. School of Mechanical Engineering,

Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

Abstract: A set of container positioning system based on the laser radar measurement technology was designed and realized to solve the problems of long service time, low efficiency and high labor intensity in the railway freight yard which caused by the manual operation of crane spreader alignment. The overall architecture and functional modules of the positioning system were determined, and the 2D laser radar was applied to collect the container data points. A method based on statistical distribution was applied to remove the interference points, and the measurement of container position was realized by the conversion of parallel coordinate system. Finally, the crane was positioned accurately by integrating with the reliable measurement methods and applying the trajectory planning and speed adjustment algorithm of fuzzy adaptive PID control. It is shown in the actual project verification that the system solution is feasible, the automatic operation of crane spreader alignment can be realized, labor intensity of the operators can be reduced and the operation efficiency can be increased by 15%.

Key words: laser radar; container positioning; parallel coordinate system; automation

集装箱运输行业中,铁路集装箱运输是一种非常非常重要的运输手段,其结合了铁路运输和集装箱运输的双重优点,具有运达速度快、运输安全性好、物流成本低等突出优点,是适应国内外经济贸易发展需要的一种先进的、新型的现代化运输方式。依据2017年10月的统计数据,中国铁路集装箱办理站的数量已经达到了1 827个,集装箱货运量逐年增长,2015年我国集装箱的货运量与2014年相比,增长了20.2%,2016年我国集

装箱货运量同比增长了40%,2017年我国集装箱货运量同比增长了47.9%^[1-2]。

集装箱装卸是铁路集装箱运输中必要和极其重要的一个环节,传统的集装箱装卸多依赖于手工操作实现,自动化程度不高,需要操作人员肉眼观察结合手动控制起重机运动实现集装箱吊具与集装箱、集装箱与货运火车车厢之间的对箱工作,该过程劳动强度大,制约着集装箱装卸效率的提高。装卸作业时通常需要2~3人协同作业,

基金项目:国家自然科学基金(51675450);轨道交通运维技术与装备四川省重点实验室开放研究课题(2019YW005)

作者简介:张冒(1989—),男,硕士,助教,Email:18113153053@126.com

起重机操作人员负责操作起重机,指挥辅助人员负责现场观察对箱结果,传统作业模式很难满足装卸作业的减员增效要求。

为减少作业人员手动操作步骤,减轻其劳动强度,提高集装箱装卸效率,设计和开发出一套基于激光扫描测量的集装箱自动定位系统,以实现起重机吊具-集装箱的快速自动对箱工作,提高集装箱装卸作业效率,并适当减少相关操作人员数量。

1 系统设计

铁路货场起重机作业范围内划分了集卡作业、堆箱、火车作业3个区域,如图1所示。火车上集装箱装卸作业尤为重要,其作业速度将直接影响铁路货运的速度和车列的调度,实现火车作业区域内集装箱的快速自动定位可有效提高集装箱的装卸效率。因此,本系统重点解决火车作业区域内的集装箱装卸作业。系统要求实现集装箱在起重机参考方向下的定位、火车轨道以及火车高度相对固定。因此,Y方向通过激光传感器测量实时位置;Z方向通过绝对值编码器即可实现精确的对箱操作;X方向的定位则通过2D激光雷达实现,为不影响起重机作业,激光雷达安装在起重机侧边。

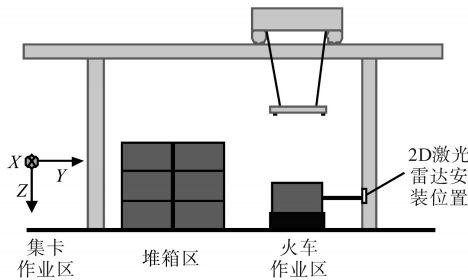


图1 起重机作业区域

Fig.1 Crane operation partition

1.1 系统硬件架构

集装箱自动定位系统主要硬件结构如图2所示,按照功能层级分为监控、控制、驱动、执行和检测5个单元。

1)监控单元:提供交互式界面供现场人员操作以控制起重机完成集装箱自动对箱动作。

2)控制单元:控制核心采用“PLC+工控机”方式,PLC完成整个起重机的逻辑、定位控制,工控机通过以太网获取2D激光雷达的数据并处理,得到集装箱在大车方向上的实时位置。

3)驱动单元:起重机采用变频驱动方式,起

重大车机构共12台动力电机,分别由2个变频器驱动;小车机构有4台动力电机,由1台变频器驱动;起升机构使用双电机驱动,配置2台变频器,运行过程中需保证2台电机同步动作。变频器与PLC之间采用西门子Profinet协议进行数据交换。

4)执行单元:包含起重机大车、小车、起升3个机构的动力电机和集装箱吊具的液压动力。

5)检测单元:增量编码器信号(HTL)接入对应变频器实现电机的速度闭环控制;起升绝对值编码器及小车激光距离传感器同样采用Profinet通讯协议与PLC连接,测量吊具在小车和起升方向的实时位置;速度传感器反馈出各机构运动的实时速度;2D激光雷达用于集装箱位置的测量。

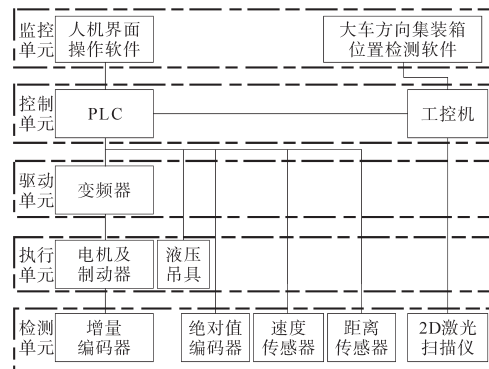


图2 系统硬件结构

Fig.2 Hardware structure diagram

1.2 系统功能设计

集装箱自动定位系统是基于激光雷达测量技术实现起重机吊具-集装箱快速精确对箱控制。系统主要包括集装箱箱型数据库、点云数据采集、集装箱自动定位、起重运动控制与流程可视化等功能模块,如图3所示。

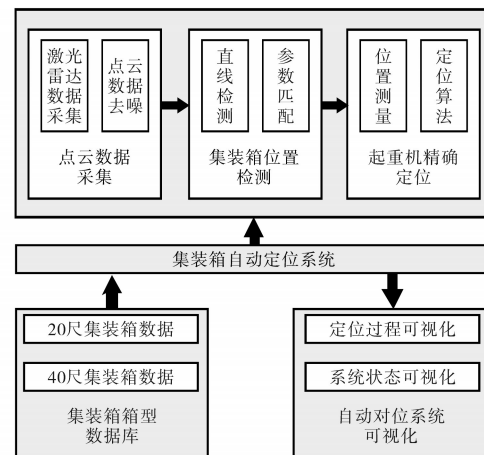


图3 系统功能设计

Fig.3 System function design

1.3 工作流程

集装箱定位系统为自动实现起重机吊具-集装箱的对箱作业而开发,需要完成集装箱位置检测与起重机的运动控制,具体作业流程如下:

1) 建立起重机的参考坐标系 $OXYZ$, 计算 2D 激光雷达坐标系的平移矩阵;

2) 定位开始后, 激光雷达开始工作, 获取得到一系列极坐标点, 数据处理模块将极坐标下的点转化成直角坐标系 $OXYZ$ 的位置点, 处理该数据点集合得到集装箱侧边的中心坐标, 该值经过坐标变换后确定为起重机大车定位目标值;

3) 根据集装箱中心点位置计算出起重机吊具与集装箱之间的位置差值;

4) 将计算得到的差值通过西门子 S7 协议写入 PLC, 控制起重机运动调整吊具位置, 运动过程中实时进行第 2)、第 3) 步, 直到起重机吊具与集装箱位置差值为 0;

5) 第 2)~4) 步执行的同时, 起重机根据固定参数值对小车、起升进行定位控制, 直到到达设定位置;

6) 起重机吊具-集装箱自动完成对箱作业后, 语音提示操作人员进行后续作业。

2 关键技术

2.1 集装箱位置检测

2D 激光雷达以极坐标方式返回测量结果, 数据报文在解码后可得到下列矩阵:

$$\begin{bmatrix} D \\ A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_0 & d_1 & d_2 & \cdots & d_i & \cdots & d_n \\ \alpha_0 & \alpha_1 & \alpha_2 & \cdots & \alpha_i & \cdots & \alpha_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: D 为扫描截面上激光路径上障碍物与发生器中心点的距离差值; A 为以扫描起始角度为起点、角分辨率为增量、扫描角终止角度为结束的角度集合。

极坐标转为直角坐标的计算如下式:

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha_i \\ \sin\alpha_i \end{bmatrix} \times d_i \quad (2)$$

转换后获得一系列直角坐标系下的点数据, 进一步进行分析处理, 可得到集装箱中心点坐标。

2.1.1 数据预处理

由于 2D 激光雷达工作在室外环境, 光照强度变化大, 集装箱表面颜色不一, 在测量数据采集过程中, 不可避免会采集到一些干扰点, 在进行集装箱位置检测之前, 需要进行滤波处理以删除这些干扰点。常用的方式包括基于统计分布

法、基于距离法、基于聚类法和基于密度法等^[3]。

集装箱定位系统选用基于统计分布的方法实现干扰点的检测和剔除, 由于 2D 激光雷达返回数据序列是以扫描起始角为起点、扫描角分辨率为增量的有序距离值, 通过坐标变换后的数据点集合同样可认定是有序数据集, 因此不用对其进行排序处理。干扰点检测与剔除算法具体处理步骤如下:

1) 加载点云集合 X_{in} ;

2) 计算每一点在半径 r 内的邻域点个数 $P = [P_0, P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_n]$;

3) 遍历 P , 删除 $P_i < k$ 对应的数据点, 得到干扰点剔除后的点云集合 X_{out} 。

2.1.2 基于平行坐标系的集装箱位置检测

平行坐标法常用于多维空间的两维表示, 使多维数据的表示更加直观, 同样可以用平行坐标中的点与平面直角坐标中的直线相对应的映射关系来求解出直线方程^[4-5]。直线方程 $y = kx + b$, 根据直线斜率不同, 需要构造不同的平行坐标系来反映直线的交点位置。图 4a 中直线 l_1 斜率 $k < 0$, 平行坐标系下交点位于由 x 轴和 y 轴构成的区间内, 如图 4b 所示, 交点坐标为 $[d/(1-k), b/(1-k)]$ 。图 4c 中直线 l_2 斜率 $k > 0$, 平行坐标系下交点位于由 $-x$ 轴和 y 轴构成的区间内, 如图 4d 所示, 交点坐标为 $[d/(1+k), b/(1+k)]$ 。图中, b 为直线 $y = kx + b$ 的截距。

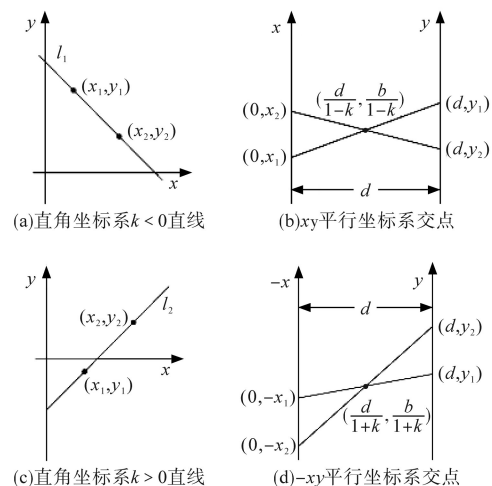


图4 平行坐标与直角坐标的对应关系

Fig.4 Correspondence between parallel and rectangular coordinates

结合上述分析, 对于数据点在直线方程未知的情况下, 可先在平行坐标系下表示, 通过交点坐标推导直线方程。令平行坐标系中的交点坐

标为 (u,v) ,对应的直线方程参数为

$$\begin{cases} (k,b) = (-1 + \frac{d}{u}, \frac{dv}{u}) & \text{交点位于 } x \text{ 轴与 } y \text{ 轴区间} \\ (k,b) = (1 - \frac{d}{u}, \frac{dv}{u}) & \text{交点位于 } -x \text{ 轴与 } y \text{ 轴区间} \end{cases} \quad (3)$$

借鉴 Hough 直线检测方法的思路^[6-7],可得到基于平行坐标系变换方式实现集装箱的位置检测算法。基于平行坐标系的集装箱位置检测具体计算步骤如下:

- 1) 加载干扰点剔除后的点云集合 X_{out} ;
- 2) 逐一取出 X_{out} 中点数据,将其映射到平行坐标系下,计算所有直线交点值 $K = [k_0, k_1, k_2, \dots]$;
- 3) 对 K 进行统计,得出交点值及相交线段数量,并对满足交点偏差 r 内的交点做均值处理,得到 $K_1 = [k_0, k_1, k_2, \dots]$;
- 4) 遍历 K_1 ,剔除相交线段小于直线包含最小点个数 m 的交点,得到 $K_2 = [k_0, k_1, k_2, \dots]$;
- 5) 根据式(3),得出 K_2 内所有数据点在直角坐标系下的直线方程;
- 6) 计算 X_{out} 中各点与直线的距离,得出小于直线距离偏差点 d 的数据点 $X_1 = [x_0, x_1, x_2, \dots]$;
- 7) 计算 X_1 相邻两点差值,找出分段点,得出分段直线;
- 8) 分段直线与集装箱信息比对,计算得出集装箱中心位置 (x,y) 。

与 Hough 变换实现坐标映射需要通过执行 $\rho = x\cos\theta + y\sin\theta$ 计算的方式不同^[6-7],采用平行坐标方法来检测直线段不需要进行计算便可实现坐标映射,计算量较 Hough 变换更小,且运算速度更快。

2.2 起重机精确定位

集装箱位置检测单元在起重机卸车作业时能够精确反馈集装箱中心点位置给起重机控制系统。需要系统识别到集装箱详细位置信息后对起重机大车、小车、起升进行精确定位控制,从而最终实现在铁道作业区内起重机吊具与集装箱的自动对箱工作。

2.2.1 运动轨迹规划

起重机定位控制方法很多,其中轨迹规划以运动速度为调整对象,通过预设轨迹的方式实现定位控制。合理的参考轨迹能够有效保证起重机的定位精度。

轨迹规划方法应用到门式起重机精确定位

需要注意两点:1)结合起重机的实际情况,加速度不能过大且需要连续;2)动力电机为变频电机,低速条件下无法输出足够转矩驱动机构运动,需要高于最小运行速度运行。

综合考虑后,本文规划的起重机速度分为加速、高速、减速和低速4段,如下式:

$$v = \begin{cases} at & t \in (0, t_1] \\ v_{max} & t \in (t_1, t_1 + t_2] \\ v_{max} - at & t \in (t_1 + t_2, t_1 + t_2 + t_3] \\ v_{min} & t \in (t_1 + t_2 + t_3, t_1 + t_2 + t_3 + t_4] \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

加速度若为正弦函数,即 $a = A\sin(Bt + \varphi) + C$ 时可保证各段规划的加速度、速度的平滑过渡,即 $t = 0$ 时, $a = 0, v = 0$; $t = t_1$ 时, $a = 0, v = v_{max}$, 以此得出加速度计算公式如下:

$$a = \begin{cases} \frac{v_{max}\pi}{2t_1} \sin(\frac{\pi}{t_1}t) & t \in (0, t_1] \\ \frac{(v_{max} - v_{min})\pi}{2t_3} \sin[\frac{\pi}{t_3}(t - t_1 + t_2)] & t \in (t_1 + t_2, t_1 + t_2 + t_3] \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

依据轨迹规划速度计算公式绘制大小车速度随时间的变化曲线如图5所示。

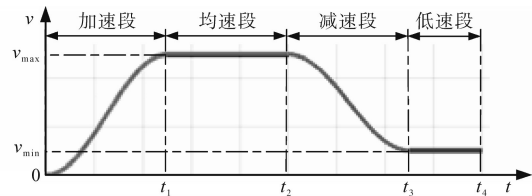


图5 轨迹规划速度曲线

Fig.5 Velocity curve of planned trajectory

2.2.2 定位实现

确保准确地执行规划轨迹的速度曲线是起重机精确定位的前提,然而起重机大车和小车机构均采用轮式传动,在运行过程中必定会出现车轮打滑的情况。车轮打滑使得目标速度和实际速度出现偏差,偏离规划的实时速度,也将影响最终的定位精度。因此,定位过程需要兼顾速度匹配与打滑累计误差的消除。

起重机定位流程如图6所示,通过模糊PID^[8]算法动态调整设定速度,从而保证正常运行状态以及存在车轮打滑情况下实际反馈速度与规划速度的匹配。结合位置传感器的实时位置检测,

能够有效消除打滑导致的累计误差,从而实现起重机的精确定位。速度匹配通过模糊PID算法实现,具体实现如下:

- 1)模糊化设计:输入量为速度偏差 e 和偏差变化率 ec ,输出量为 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$,设置基本论域为 $(-10, 10)$,确定出输入与输出变量的隶属度函数;
- 2)制定模糊规则:总结实际经验基础上,设计出 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 三个参数的模糊规则表;
- 3)PID参数初始化:设定初始值 K_p, K_i, K_d ;
- 4)PID参数调整:依据 e, ec 实时值,查询模糊规则表,找出对应的 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$,更新PID参数。

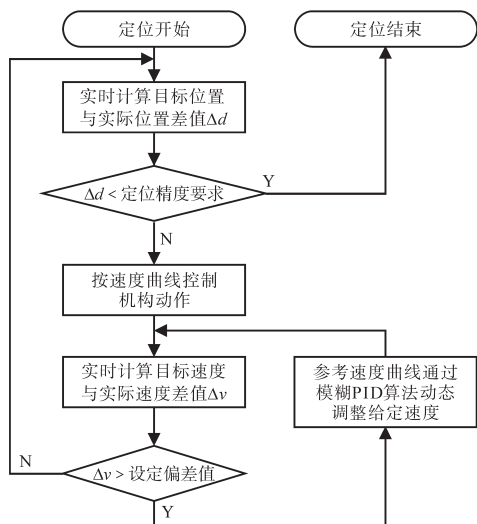


图6 定位实现过程

Fig.6 Positioning implementation process

3 系统实现与应用案例

根据系统设计方案进行集装箱定位系统开发,并在成都铁路局某集装箱货场进行测试应用。检测装置如下:选择SICK公司型号为LMS151激光雷达,角分辨率为 0.25° ,选择该公司型号为AFM60编码器,误差极限为 0.03° ;选择DIMETIX公司DAN-30-150激光测距仪,精度为3 mm。

在Visual Studio 2017环境下采用C++语言完成大车方向集装箱位置检测程序开发,程序主要包括2D激光扫描仪器数据采集、数据预处理、基于平行坐标集装箱位置检测算法实现、过程可视化、测量结果传送(PLC通讯)5大模块。检测的过程数据如图7所示,预处理算法能够对干扰点进行有效滤除,数据点在平行坐标系下交点集中在 x, y 轴构成的区域内,通过前面叙述的基于平行坐标系的集装箱位置检测算法可准确计算出集装箱中心位置。

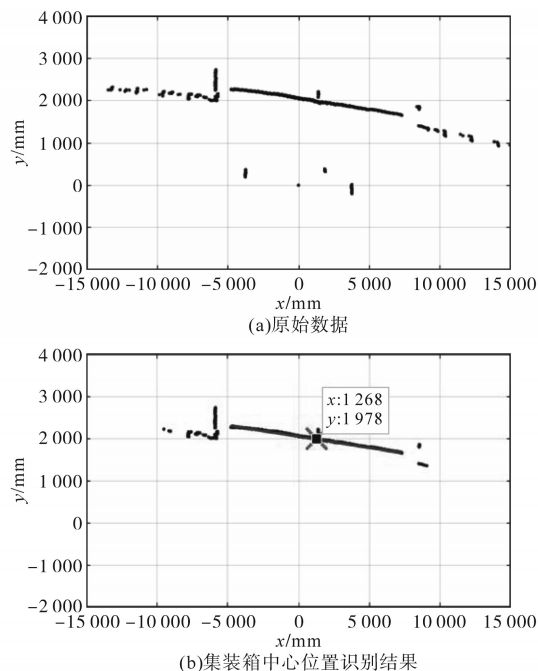


图7 集装箱位置检测各阶段数据

Fig.7 Products at all stages of the container positioning system

集装箱自动定位系统配置人机界面,如图8所示。人机界面实时显示起重机状态信息并具备下发自动对箱命令的功能。

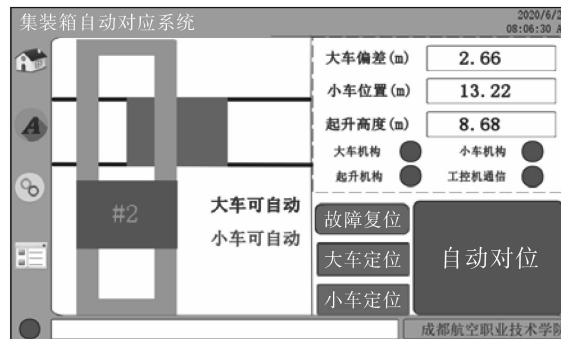


图8 触摸屏程序界面

Fig.8 HMI program interface

为了测试系统的工作效率,以人工手工作业作为比对数据,各自随机选取100次集装箱装卸作业过程进行统计,数据对比结果如表1所示。

表1 操作数据对比

Tab.1 Comparison of operation data

操作方式	一次对箱失败次数	平均作业时间/min	操作人数
本文方法	2	2.33	1
人工手动	19	2.75	3

4 结论

针对铁路货场起重机作业时集装箱对箱工作难度高、作业效率低的问题,设计了一套基于激光雷达测量技术的集装箱定位系统。运用2D

激光雷达扫描得到的数据点集合,采用基于平行坐标系数据变换方式对数据点进行分析处理以实现集装箱的位置检测。结合起重机位置检测和定位算法,让集装箱对箱工作自动化。通过实际项目验证表明:该系统方案可行,实现了集装箱对箱的自动作业,降低了操作人员劳动强度,作业效率提高了15%。

参考文献

[1] 曾鸣. 铁路集装箱中心站物流系统资源调配优化与仿真研究[D]. 成都:西南交通大学,2015.
Zeng Ming. Research on resources allocation optimization and simulation of railway container terminal logistics system[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2015.

[2] 梁晓波,程文明,郭鹏. 集装箱起重机自动装卸系统的研究与设计[J]. 计算机应用,2015,35(S1):229-231.
Liang Xiaobo, Cheng Wenming, Guo Peng. Research and design of automatic handling system for container cranes[J]. Journal of Computer Applications,2015,35(S1):229-231.

[3] 杨永涛. 三维离散点云数据处理关键技术研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2017.
Yang Yongtao. Research on the key technologies of three-dimensional scattered point cloud processing[D]. Qinhuangdao:Yanshan University,2017.

[4] 翟旭君. 基于平行坐标的可视化数据挖掘技术研究[D]. 北京:清华大学,2004.

Zhai Xujun. The research on visual data mining technology based on parallel coordinates[D]. Beijing: Tsinghua University, 2004.

[5] 王旭宸,卢欣辰,张恒胜,等. 一种基于平行坐标系的车道线检测算法[J]. 电子科技大学学报,2018,47(3):362-367.
Wang Xuchen, Lu Xincheng, Zhang Hengsheng, et al. A lane detection method based on parallel coordinate system[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2018,47(3):362-367.

[6] 郑行家,钟宝江. 图像直线段检测算法综述与测评[J]. 计算机工程与应用,2019,55(17):9-19.
Zheng Hangjia, Zhong Baojiang. Overview and evaluation of image straight line segment detection algorithms[J]. Computer Engineering and Applications,2019,55(17):9-19.

[7] 刁燕,吴晨柯,罗华,等. 基于改进的概率Hough变换的直线检测优化算法[J]. 光学学报,2018,38(8):170-178.
Diao Yan, Wu Chenke, Luo Hua, et al. Line detection optimization algorithm based on improved probabilistic hough transform [J]. Acta Optica Sinica,2018,38(8):170-178.

[8] 赵典,强宝民,刘陈. 基于模糊自适应PID控制器的起重机精确定位技术研究[J]. 机床与液压,2013,41(7):55-58.
Zhao Dian, Qiang Baomin, Liu Chen. Research on accurate orientation technology for gantry crane based on adaptive PID controller[J]. Machine Tool & Hydraulics,2013,41(7):55-58.

收稿日期:2020-12-03
修改稿日期:2021-01-24

(上接第74页)

rithm and least square support vector machine[J]. Acta Metrologica Sinica,2016,37(5):505-508.

[5] 宋勇,李博,刘超,等. 基于改进堆叠自编码器的带钢力学性能预报模型[J]. 冶金自动化,2020,44(6):2-10.
Song Yong, Li Bo, Liu Chao, et al. Prediction model of mechanical properties of strip based on improved stack autoencoder[J]. Metallurgical Automation,2020,44(6):2-10.

[6] 魏立新,翟博豪,赵志伟,等. 基于半监督深度网络的冷连轧

轧制力预报[J]. 塑性工程学报,2020,27(11):70-76.
Wei Lixin, Zhai Bohao, Zhao Zhiwei, et al. Prediction of rolling force in tandem cold rolling based on semi-supervised deep network[J]. Journal of Plasticity Engineering,2020,27(11):70-76.

收稿日期:2021-11-22
修改稿日期:2021-12-23