

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.02.053

煤矿电力设备拖缆机器人自主控制方法设计

刘杰¹, 李文瑞², 张雪亮², 方伟², 郭新才², 郭星廷²

(1. 神东煤炭集团补连塔煤矿, 内蒙古 鄂尔多斯 017209;

2. 山西戴德测控技术有限公司, 山西 太原 030032)

摘要: 为了提高煤矿电力设备拖缆机器人自主控制的精度和效率, 设计一种煤矿电力设备拖缆机器人自主控制方法。计算机器人运动状态, 运用 Hertz 定理分析机器人在井下电力设备拖缆过程中的受力情况, 建立拖缆机器人运动学模型; 采用里程计与超声波传感器组建多传感器信号采集模型; 利用基础矩阵和单应矩阵校正采集的机器人位姿信息, 采用状态转移函数得到雅可比矩阵估计运动状态协方差; 使用卡尔曼滤波融合多传感信息, 实现拖缆机器人自主控制。实验分析结果证明: 所提方法能有效降低传感器数据误差, 信息融合提高了煤矿电力设备拖缆机器人自主控制精度与效率, 令其在复杂矿井操作环境下完成高效率煤矿电力设备拖拽任务。

关键词: 多传感信息采集; 拖缆机器人; 自主控制; 卡尔曼滤波; 动力学模型; 煤矿电力设备

中图分类号: TP242 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2025)02-0271-05

Design of Autonomous Control Method for Cable Hauling Robot of Coal Mine Electric Equipment

LIU Jie¹, LI Wenrui², ZHANG Xueliang², FANG Wei², GUO Xincan², GUO Xingting²

(1. Bulianta Coal Mine of Shendong Coal Group, Ordos 017209, China;

2. Dedicated Measurement Control Co., Ltd., Taiyuan 030032, China)

Abstract: In order to improve the accuracy and efficiency of the autonomous positioning of the coal mine electric equipment towing robot, an autonomous positioning method of the coal mine electric equipment towing robot is designed. Calculate the motion state of the robot, use the theorem of Hertz to analyze the force of the robot in the underground power equipment, and establish the kinematic model of the robot. Multi-sensor observation model is built with odometer and ultrasonic sensor. The basic matrix and homography matrix are used to correct the robot position and posture information, and the Jacobian matrix is obtained by using the state transfer function and the motion state covariance is estimated. Kalman filter is used to fuse multi-sensor information to realize the autonomous positioning of the streamer robot. The experimental analysis results show that the proposed method can effectively reduce the sensor data error, and the information fusion improves the robot's autonomous positioning accuracy and efficiency, enabling it to complete the efficient coal mine electrical equipment inspection task under the complex mine operating environment.

Keywords: multi-sensor information acquisition; towing robot; autonomous control; Kalman filter; dynamic model; coal mine electric equipment

0 引言

随着我国经济的高速发展, 煤炭消耗呈逐年上涨趋势。开采煤矿时, 需要用到许多电力设备来支持煤矿生产^[1]。电力设备在煤矿中的应用可提高煤矿开采效率, 但一旦触发潜在的安全隐患, 将会导致重大安全事故。因此, 煤矿对电力系统安全性能要求极高, 必须对其设备进行定期巡视^[2]。

在煤矿中, 拖缆式机器人是使用频率最高的机器人之一。拖缆机器人具备坚固耐用的机械结

构, 通过电子控制系统可实现运动和操作控制, 并由电源系统提供电力支持。拖拉绳或电缆用于机器人与操控物体或设备的连接^[3]。传感系统配备各种传感器, 用于感知周围环境和监测机器人状态。自主充电系统使机器人能够自动返回充电站进行充电, 保持充足的电力。自主控制系统基于先进的定位和导航技术, 实现在煤矿环境中的自主导航和任务执行。

面对机器人自主控制问题, 不同研究领域的学者给出如下解决方案。胡钊政等^[4]利用概率描述机器人在地图所处的方位, 通过核密度估计法

第一作者简介: 刘杰(1984—), 男, 内蒙古鄂尔多斯人, 工程师, 本科, 研究方向为煤矿智能化, 1125632021@163.com。

生成全部路径数据点;采用规划路径约束下机器人控制方法增强机器人控制整体性能。但此方法应用于机器人高速运动的场景下,很容易因误差增大而降低控制精度,无法实现预期控制效果。廖志涵等^[5]使用激光得到机器人位姿结果,分析路标点在全局坐标系中的位置,采用预积分信息自主控制机器人。但该方法不能得到精准的偏航角测量数据,控制能力偏弱。

针对上述方法中的不足之处,充分考虑煤矿工作实际环境,本文提出一种煤矿电力设备拖缆机器人自主控制方法。测试结果证明:所提方法拥有更强的实用性,能够提高自主控制精度,为煤矿电力设备的安全运行提供帮助。

1 煤矿电力设备拖缆机器人运动参数计算

拖缆机器人能很好地应用于复杂地形^[6],依靠4个移动单元板块和3个十字轴俯仰偏航关节板块来活动,需要建立运动学模型计算前进速率,便于后续控制。

倘若拖缆机器人在十字轴水平面进行旋转运动,坐标系 xOy 是原点固定于机器人质心的随机坐标系。将拖缆机器人的运动状态参数定义为

$$\mathbf{a} = [x, y, \theta]^T \quad (1)$$

式中: (x, y) 为机器人质心处于地面参照坐标系下的运动坐标; θ 为机器人的航向角,用来展现机器人运动变化趋势。但以上走姿没有考虑环境对其运动的阻力,估计的走姿不够精准,因此使用Hertz定理^[7]计算机器人运动时受阻力参数的情况。

$$E = D\zeta^c \theta + G(\mathbf{a}) \quad (2)$$

式中: E 为接触力; D 为接触力刚度; ζ 为法向穿透距离; G 为阻尼系数。

假设机器人主动轮转速依次是 σ_L, σ_R ,半径是 r ,履带和中心点的间距是 C ,则进一步将机器人前进线速率与转动角速率参数定义为

$$\begin{cases} \vartheta = \frac{r}{2}(\sigma_L + \sigma_R) \\ \sigma = \frac{(\sigma_R - \sigma_L)}{C} \end{cases} \quad (3)$$

利用上述计算即可构成简便的拖缆机器人运动参数计算方法。

2 多传感信息融合下拖缆机器人自主控制

2.1 多传感器采集模型构建

多传感器信息采集与融合技术是一种模仿人

类大脑综合处理功能的信息梳理方法,在多种传感器采集数据基础上,根据最优评估准则,对不同传感器收集得到的数据进行空间、时间的补充^[8],去除冗余信息,形成一个统一观测环境。

利用多传感器采集机器人运动信息,突破了单一传感器数据采集的局限性,能更精准地提供机器人控制信息。拖缆机器人使用的传感器主要包括里程计和超声波传感器。基于上节的运动学参数,通过对这两种传感器观测建模采集机器人运动信息。

里程计是一种安置在2个驱动轮电机内的光电编码检测器,计算车轮旋转弧度,结合机器人转动角速率和线速率,明确机器人位姿改变趋势。假设车轮半径是 d ,光电码盘是 o 线/ r , t 时段内光电码盘输出的脉冲量是 M ,那么当前车轮移动的距离为

$$\Delta u = \frac{2M}{o\sigma\vartheta} \cdot d \quad (4)$$

计算出前轮转动距离,推算采样时间内的机器人方位横纵坐标与方向矢量^[9],即可获得拖缆机器人位置坐标与方向角,输出自控制数据。

超声波传感器可以传输超声压力波包,若波包遇见物体就会被反射,检测波包反射与返回接收器所耗时长^[10],从而计算出机器人距离目标反射的距离 h 为

$$h = \frac{jt}{2} \quad (5)$$

式中: j 为声音传播速率; t 为声波飞跃时间。

假设第 i 个超声波传感器在 $O_R x_R y_R$ 坐标系内的坐标是 (x_{Ri}, y_{Ri}) ,和 x_R 轴的夹角是 λ_{Ri} ,如果在第 k 个采样时段,拖缆机器人的位姿是 $\mathbf{X}(k) = [x(k), y(k), \lambda(k)]^T$,转换旋转平移坐标后,把第 i 个超声波传感器在 $O_R x_R y_R$ 坐标系内的坐标转移至上节机器人运动学模型所用的 O_{xy} 坐标系中,且当前坐标是 $(x_i(k), y_i(k))$ 。将此过程拟作齐次坐标形式,记作

$$\mathbf{X}(k) = \begin{bmatrix} x_i(k) \\ y_i(k) \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\lambda(k) & \cos\lambda(k) & x(k) \\ -\cos\lambda(k) & \sin\lambda(k) & y(k) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} h_{Ri} \\ m_{Ri} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中 h_{Ri} 为 h 在 $O_R x_R y_R$ 坐标系转换中转变为第 i 个超声波传感器在坐标系下检测到目标物体的距

离。由此,将多传感器系统的随机采集模型记作

$$U(k) = vX(k) + w(k) \quad (7)$$

式中: $w(k)$ 为观测偏差; v 为高斯白噪声; $U(k)$ 为里程计输出值和超声波传感器读数的总和。

由此获得机器人运动距离的多传感器观测数据,基于该数据进行自主控制。

2.2 卡尔曼融合算法下拖缆机器人自主控制

获得机器人观测数据后,对机器人自身配备的摄像机进行初始化^[11],利用卡尔曼滤波反馈校正对多传感器观测数据进行增益补偿,实现自主控制。

综合分析并处理两种传感器的局部数据,构成局部信息互补,输出更加准确的控制结果。当前常用的信息融合处理方法涵盖卡尔曼滤波、模糊逻辑推理、人工神经网络等。依照操作环境的差异,采用卡尔曼滤波完成多传感数据融合^[12],达到煤矿电力设备拖缆机器人自主控制目标。

卡尔曼滤波器运用反馈机制消除误差,并将拖缆机器人状态测量的数据滤噪,其结果和初始帧特征点进行校正结果表示为:

$$\kappa_r = f(\kappa_{r-1}) + F_{cr} \cdot H_{cr} \quad (8)$$

$$z'_r = \eta(\kappa_r) + \zeta_r \quad (9)$$

式中: $f(\kappa_{r-1})$ 为过程噪声; ζ_r 为观测噪声; η 为观测测量总和; F_{cr} 为基础矩阵; H_{cr} 为单位矩阵。

将观测噪声 ζ_r 分为拖缆机器人方位、速率和偏航测量相应的控制量,三者的协方差分别为:

$$S_p = \text{diag}\{1 \times 10^{-2}, 1 \times 10^{-2}\} \quad (10)$$

$$S_v = \text{diag}\{1 \times 10^{-3}, 1 \times 10^{-3}\} \quad (11)$$

$$S_q = \text{diag}\{1 \times 10^{-3}, 1 \times 10^{-4}\} \quad (12)$$

若拖缆机器人系统接收到首个观测值,初始化运算系统状态量与状态协方差^[13-14]。通过状态转移雅可比矩阵 F 和过程噪声协方差估算目前系统状态协方差 $\hat{Q}_r$:

$$\hat{Q}_r = Fz'_r f(\kappa_{r-1}) + V \quad (13)$$

式中 V 为过程噪声协方差。

在系统状态更新过程中利用测量方程协方差反馈加权校正系统状态,获得自主控制信息的增益矩阵 L 的解析式为

$$L = z_c \hat{Q}_r (U(k) + S_p + S_v + S_q) \quad (14)$$

由此完成拖缆机器人自主控制。

3 算例分析

为验证所提方法在机器人自主控制方面的成

效,在 Matlab 软件中对拖缆机器人进行自主控制分析。拖缆机器人某煤矿企业所用,由某科技公司生产。该机器人使用矿鸿操作系统,摄像机使用海康威视 DS-2CD3,分辨率为 $1\,920 \times 1\,080$,视野角度为 90° ,用于获取环境图像信息;里程计型号为 SD-547C,分辨率为 0.1 mm ,最大速度为 2 m/s ,用于测量机器人的位移和速度信息;超声波传感器为宝盾 M18U300,测量范围为 $20\text{ cm} \sim 300\text{ cm}$,探测角度为 30° ,用于检测机器人与障碍物之间的距离。该机器人的最大速度为 2 m/s ,最大加速度为 1 m/s^2 ,轮距为 1 m ,轴距为 1.5 m 。通过收集传感器测量数据并上传至上位机,利用传感器后置的微软 SDK 开发包启动 OpenNI 数据生成器,将深度信息解码为与 OpenNI 运行库匹配的数据语言,进行控制仿真。以控制输出结果的方均根误差为标准,研究本文方法在不同实验环境下的自主控制性能。方均根误差计算过程如式(15)所示。实验参数如表 1 所示,表中 χ 代表拥有恰当维度的单位矩阵。

$$R_{\text{MSE}} = \sqrt{\partial_x^2 + \partial_y^2} \quad (15)$$

式中: ∂_x 为 x 方向上对应于真实值的方均根误差; ∂_y 为 y 方向上对应于真实值的方均根误差。

表 1 实验参数

参数	数值
系统初始状态	随机
时域窗口长度	6
采样周期/s	0.15
参考角速率/($^\circ/\text{s}$)	0.2
参考线速率/(m/s)	0.4
测量噪声协方差	$10^{-4}\chi$
过程噪声协方差	$10^{-4}\chi$
实验时长/s	60

以椭圆形轨迹为例,轨迹中心点坐标位于 $(1.0, 3.7)$ 附近,设定机器人原始方位坐标是 $(2.0, 0.5)$,本文方法下拖缆机器人自主控制轨迹跟踪结果如图 1 所示。

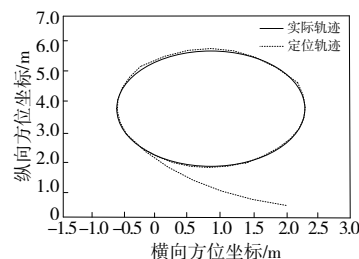


图 1 拖缆机器人自主控制轨迹实验结果

由图1看出,所提方法在机器人偏离初始参照轨迹的状态下,能迅速追踪至预定参照轨迹范围,控制感知能力强。因噪声影响,控制结果与参照轨迹相比会产生轻微波动,但波动较小,不影响控制精度,实用性强。

为了更好地展现本文方法的适用性,把文献[4]规划路径约束法与文献[5]人工路标法作为对照组,从横向、纵向、旋转角和偏航角误差4个部分评估拖缆机器人自主控制能力的优劣,结果如图2所示。

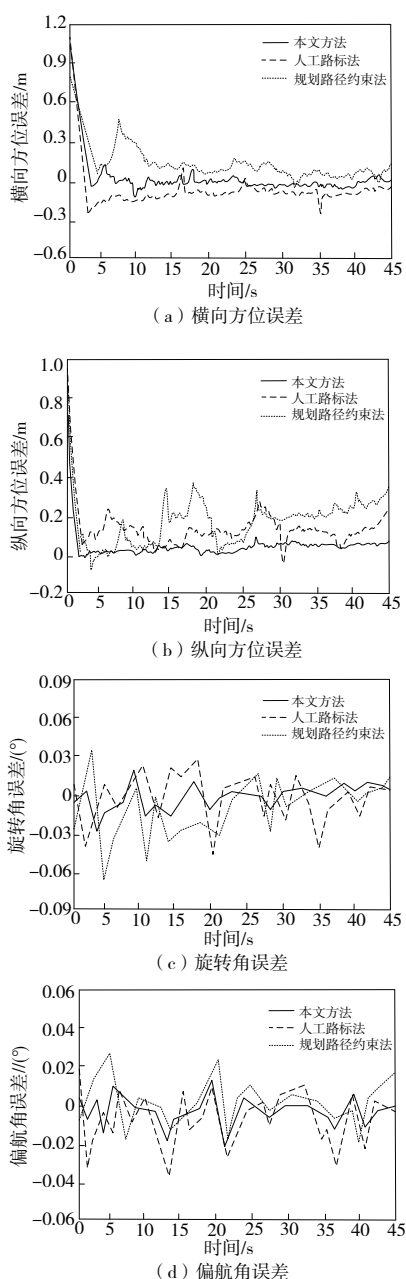


图2 不同位置拖缆机器人自主控制误差评估

从图2(a)—图2(d)可以看出,和本文方法相比,规划路径约束法、人工路标法在机器人自主

控制过程中,控制误差不断累积,无法满足实际需求;本文方法在卡尔曼滤波基础上所得的控制结果误差较小,控制精度得到显著提高,极大地缓解了机器人转弯过程中旋转角和偏航角控制易失效的问题。

为了展现拖缆机器人自主控制的时效性,设置待控制的煤矿电力设备巡检路径长度为300 m,依次使用3种方法进行自主控制计算,实验结果如图3所示。

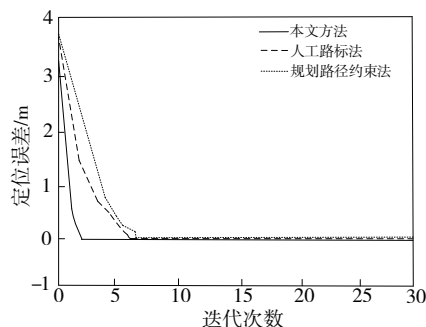


图3 拖缆机器人自主控制收敛性分析

从图3中看到,在位置控制过程中,本文方法使用的迭代次数最少,没有产生明显波动,计算稳定性强,能够在极短时间内完成拖缆机器人高精度控制;两个文献方法均耗费较多迭代次数才实现机器人控制任务。

为了验证本文方法的真实性,将选择的拖缆机器人放置在模拟煤矿环境中,并确保传感器和控制系统正常工作。设置障碍物以模拟实际避障场景。启动数据采集系统,获取环境图像信息、机器人的位移和速度信息以及机器人与障碍物之间的距离信息。基于传感器数据,通过本文方法对拖缆机器人进行控制,设计合适的避障控制策略,验证机器人在模拟煤矿环境中自主完成电力设备拖缆任务的精度。记录期望轨迹与实际控制后的机器人轨迹结果如图4所示。

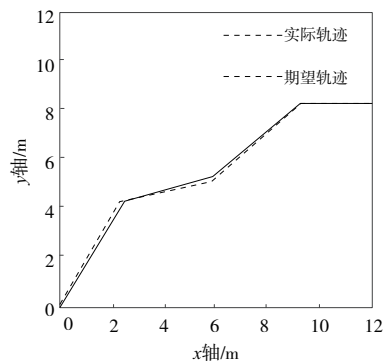


图4 轨迹控制结果

从图4中看到,在运行轨迹控制过程中,拖缆机器人的实际轨迹与期望轨迹几乎重合,说明本文方法能够成功地将拖缆机器人引导到预定的路径上,实现了目标控制效果,且具有较高的精度。

4 结语

为了有效地完成煤矿电力设备拖缆机器人的自主控制,提出基于多传感信息融合的煤矿电力设备拖缆机器人自主控制方法。利用多传感信息融合策略辅助完成巡检工作。通过多传感信息融合,计算出机器人当前方位与偏航角信息,利用卡尔曼滤波进行位置校正,使本文方法具备更优的机器人自主控制能力。测试结果表明本文方法获得较为精准的控制结果。在接下来的研究中,伴随设备更新换代,引入深度学习等算法,在更复杂的煤矿环境下也能避免出现控制失败的情况,为煤矿企业的稳定发展发挥更大作用。

参考文献:

- [1] 黎荣华,汪双,张华.空地协同机器人目标定位方法[J].计算机工程与应用,2022,58(20):305-310.
- [2] 金书奎,寇子明,吴娟.煤矿水泵房巡检机器人路径规划与跟踪算法的研究[J].煤炭科学技术,2022,50(5):253-262.
- [3] 胡琴,赵一亭,夏方平,等.基于Soft-Actor-Critic算法的机器人局部路径规划算法[J].武汉理工大学学报,2021,43(9):79-84.
- [4] 胡钊政,许聪,周哲,等.基于规划路径约束的机器人定位方法[J].电子与信息学报,2022,44(11):3941-3950.
- [5] 廖志涵,吴锋.基于人工路标的易部署室内机器人全局定位系统[J].计算机应用研究,2021,38(9):2741-2745.
- [6] 刘目坤,张飞斌,王天杨,等.多质心有限质点法及其在工业机器人动力学建模的应用[J].振动与冲击,2022,41(18):1-8.
- [7] 王保民,齐湛江,闫瑞翔,等.基于随机权重粒子群算法的SCARA机器人动力学参数辨识[J].西安交通大学学报,2021,55(9):20-27.
- [8] 王立玲,李森,马东.基于单目稀疏法多传感器融合移动机器人定位[J].机床与液压,2021,49(24):17-22.
- [9] 华洪涛,马宏伟,毛清华,等.基于捷联惯导和推移油缸信息融合的智能掘进机器人位姿测量方法[J].煤炭工程,2021,53(11):140-145.
- [10] 崔海华,漏华钺,田威,等.轨道式爬行机器人制孔基准的视觉高精度定位[J].光学学报,2021,41(9):179-188.
- [11] 班朝,任国营,王斌锐,等.融合加权SVD算法的工业机器人运动学标定[J].计量学报,2021,42(9):1128-1135.
- [12] 孟媛,秦云川,蔡宇辉,等.一种用于RPA系统的DOM对象快速搜索与定位算法[J].计算机科学,2022,49(10):252-257.
- [13] 黄山,黄洪钟,曾奇,等.一种室内高动态环境的机器人定位方法[J].电子科技大学学报,2021,50(3):382-390.
- [14] 王红梅,陈冬.多传感器数据融合下机器人路径分段规划仿真[J].计算机仿真,2021,38(10):349-352,418.

收稿日期:2023-06-20

(上接第270页)

- [3] 曹燕,尚万峰,张潇云.柔性双臂医疗机器人无传感器零力控制算法研究[J].机械设计与制造,2021(4):293-295,300.
- [4] 张智豪,于潇雁.存在关节死区的空间机器人无扰快速终端滑模控制[J].力学学报,2022,54(3):777-785.
- [5] PAVLICHENKO D,BEHNKE S.Flexible-joint manipulator trajectory tracking with two-stage learned model utilizing a hardware forward dynamics prediction[J].International Journal of Semantic Computing,2022,16(3):403-423.
- [6] 谭加林,肖正明,伍星,等.柔性关节机械臂轨迹规划及振动抑制研究[J].机械科学与技术,2023,42(4):504-511.
- [7] 欧劲松,李蓉,尹辉,等.基于奇异摄动的柔性关节机械臂约束跟随控制研究[J].应用数学和力学,2023,44(5):513-524.
- [8] 潘昌忠,罗晶,李智靖,等.平面欠驱动柔性机械臂的PSO轨迹优化与自抗扰振动抑制[J].振动与冲击,2022,41(14):181-189.
- [9] 岳胜杰,王红旗,刘群坡,等.结合扩展卡尔曼滤波与基于点线的最近点迭代扫描匹配算法的机器人位姿自适应估计[J].测绘通报,2022(7):49-53.
- [10] 张彦泽,于斌超,马大智,等.自适应扩展卡尔曼滤波机械臂末端定位[J].组合机床与自动化加工技术,2022(10):150-153,158.

收稿日期:2023-11-02