

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2024.01.046

基于自控测距的液压启闭机油缸清洁机器人位姿跟踪研究

刘晓东,卜晓珊,吴增众

(南水北调中线信息科技有限公司,北京 100070)

摘要:针对当前机器人开展清洁工作时只考虑方向信息而未考虑异常情况,导致位姿末端跟踪结果不精准的问题,研究基于自控测距的液压启闭机油缸清洁机器人位姿跟踪技术。充分考虑到清洁机器人清洁过程中位姿不断变化,使用激光跟踪仪进行跟踪布局。提取机器人动态特征,计算俯仰轴姿态角、机器人前进位移,以此为依据构建清洁机器人位姿跟踪数学模型。使用自控测距法进行位姿跟踪,解决无相应幅值标志物条件下的非系统误差问题。通过对机器人各个角度的补偿,实现了机器人末端位姿误差的最小化。由仿真结果可知:该方法运动轨迹与实际轨迹基本一致,所跟踪的末端位姿坐标与实际坐标位姿一致。

关键词:自控测距;清洁机器人;位姿跟踪;补偿

中图分类号:TP242 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2024)01-0228-04

Research on Pose Tracking of Hydraulic Hoist Oil Cylinder Cleaning Robot Based on Automatic Distance Measurement

LIU Xiaodong, BU Xiaoshan, WU Zengzhong

(South-to-North Water Transfer Middle Route Information Technology Co., Ltd., Beijing 100070, China)

Abstract: Aimed at the inaccurate tracking results at the end of the pose due to sole consideration of direction information and no regard to abnormalities when current robot is carrying out cleaning work, the pose tracking technology of hydraulic hoist cylinder cleaning robot based on automatic ranging is studied. With full consideration of the changing posture of the cleaning robot during cleaning, the laser tracker is used to track the layout. The dynamic characteristics of the robot are extracted, and the attitude angle of the pitch axis and the forward displacement of the robot are calculated. Based on this, the mathematical model of the cleaning robot posture tracking is constructed. The automatic ranging method is used for position and attitude tracking to solve the problem of non systematic error without corresponding amplitude markers. By compensating each angle of the robot, the end pose error of the robot is minimized. The simulation results show that the motion trajectory of this method is basically consistent with the actual one and the tracked end pose coordinates confirm to the actual coordinate pose.

Keywords: automatic ranging; cleaning robot; pose tracking; compensation

0 引言

目前的油缸清洗方法没有相应的辅助标志,难以达到高效的清洗效果,因此,提出了液压启闭机油缸清洁机器人。机器人的定位是当前导航领域的一个主要研究领域,其需要在移动中准确地感知自身的位置和姿态^[1]。相关学者研究了机器人位姿跟踪,文献[2]提出了基于滚动时域优化的位姿跟踪方法,该方法结合机器人运动学模型,采用PD控制方式实现了机器人跟踪参考位姿,并构建了闭环误差模型。采用滚动时域跟踪方法实时跟踪机器人位姿误差,并在一个固定时域窗口内利用误差参数迭代处理位姿误差,结合参考位姿实现对机器人位姿的实时跟踪;文献[3]提

出了卡尔曼滤波框架下的机器人位姿跟踪方法,该方法利用MC处理非高斯噪声,构造基于MC的代价函数,并使用麦夸尔特法优化代价函数,推导协方差迭代更新过程,实现机器人位姿跟踪。然而,上述这两种方法过分依赖机器人工作环境,在无相应辅助标志物条件下,难以实现自主作业。为此,提出了基于自控测距的液压启闭机油缸清洁机器人位姿跟踪技术。

1 清洁机器人位姿跟踪装置布局

要充分考虑机器人在工作过程中位姿不断变化^[4-6],需要使用激光跟踪仪跟踪定位位姿。激光跟踪仪的基本原理是采用球面坐标法,在实际跟踪过程中,激光跟踪仪的位置直接影响到跟踪

第一作者简介:刘晓东(1993—),男,内蒙古兴安盟人,助理工程师,硕士,研究方向为机械及自动化,1783146750@qq.com。

器与各测量点之间的相互关系,从而影响其最终跟踪准确性。不合理的布置会导致测量误差增大,甚至导致高精度的激光跟踪系统失去参考价值。在机器人测量范围已被确定的情况下,调节激光跟踪仪布置位置,减小其布置位置的不合理所带来的影响,以达到更好定位精度,提高机器人跟踪精度。基于该原理,激光跟踪坐标系下跟踪点的坐标可表示为:

$$\begin{cases} x=r\cos\alpha\sin\theta \\ y=r\cos\alpha\cos\theta \\ z=r\sin\alpha \end{cases} \quad (1)$$

式中: α 为俯仰角; θ 为水平角; r 为激光测量半径。该坐标系下跟踪误差可表示为:

$$\begin{cases} \varphi_x = \frac{\partial x}{\partial r} \times \varphi_r + \frac{\partial x}{\partial \theta} \times \varphi_\theta + \frac{\partial x}{\partial \alpha} \times \varphi_\alpha \\ \varphi_y = \frac{\partial y}{\partial r} \times \varphi_r + \frac{\partial y}{\partial \theta} \times \varphi_\theta + \frac{\partial y}{\partial \alpha} \times \varphi_\alpha \\ \varphi_z = \frac{\partial z}{\partial r} \times \varphi_r + \frac{\partial z}{\partial \theta} \times \varphi_\theta + \frac{\partial z}{\partial \alpha} \times \varphi_\alpha \end{cases} \quad (2)$$

式中 φ 表示误差参量。

激光跟踪器是一种利用激光干涉仪测量长度的方法,它可以直接追溯到激光的波长。因此,激光跟踪器的长度测量比角度测量的精度要高得多。由于激光跟踪器测点的真实位置坐标与其本身的坐标系统相关,而采用该方法选取的采集点坐标系为机器人基座坐标系,因此,在激光跟踪器和机器人基座坐标系之间建立对应关系。由此得到的清洁机器人位姿跟踪装置布局,如图 1 所示。

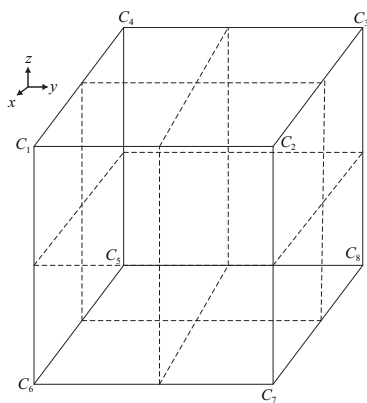


图 1 位姿跟踪装置布局

从图 1 可以看出,为了最大限度地减少跟踪误差,激光跟踪仪应尽可能地设置在最优配置和最靠近基座的位置,减少激光跟踪仪的分布位置对测量精度的影响。

2 清洁机器人位姿跟踪方法研究

2.1 基于自控测距法的机器人位姿跟踪

在机器人位姿跟踪方法中^[7-8],为了解决无相应幅值标志物条件下的非系统误差问题,使用自控测距法跟踪位姿。根据机器人在清洗过程中各个传感器的误差特征,采用一种融合加速度计的自控测距方法^[9]。该方法根据测量的实际位置和加速度计测量的位置对比结果跟踪与调整位姿,可表示为

$$|x_{oa} - x_{ob}| > x_0 \quad (3)$$

式中: x_{oa} 表示测量的位置; x_{ob} 表示加速度计测量的位置; x_0 表示阈值。为克服运动目标对姿态估计的影响,采用激光测距仪测量清洁机器人位置,机器人在动态障碍物中的运行示意图如图 2 所示。

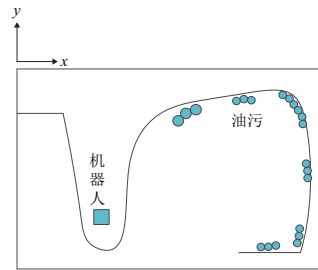


图 2 机器人在动态障碍物中的运行示意图

根据运行示意图可以获取机器人大概运行的轨迹,设待运动特征点的坐标为 (a_i, b_i) ,则对每一个特征点可做出如下判断:

$$\begin{cases} a_{\min} - L/2 < a_i < a_{\max} + L/2 \\ b_{\min} - L/2 < b_i < b_{\max} + L/2 \end{cases} \quad (4)$$

式中 L 表示误差感知范围边长。由于机器人的姿态跟踪存在着一定的感知范围,为了避免在距离较近的背景点发生误跟踪,应适当地增大其消除范围,尽量减少运动目标,以免影响其误差^[10]。

由于液压启闭机油缸清洁机器人在清洗过程中,位姿变化非常复杂,需要结合机器人瞬时姿态值,才能获取机器人位姿信息^[7]。当清洁机器人的收集处理器采用吸附再生法降解净化处理油时,俯仰轴姿态角计算公式为

$$\alpha(t) = \arctan \frac{S_1(t) - S_2(t)}{L_{12}} \quad (5)$$

式中: $S_1(t)$ 、 $S_2(t)$ 分别表示机器人在初始清理位置和当前清理位置; L_{12} 表示两次清理位置之间的距离; t 表示机器人移动时间。

清洁机器人在清洁时,机器人前进位移由超

声传感器的测量值确定,其计算公式为

$$x(t) = [S_3(t) + L_3] \cos\theta(t) - L_4 \sin\theta(t) \quad (6)$$

式中: $S_3(t)$ 表示传感器测量的位置; L_3 、 L_4 分别表示传感器与机器人中心、底盘距离^[11]。

在确定俯仰轴姿态角和机器人前进位移的前提下,构建机器人状态位移矩阵:

$$F(t) = \begin{bmatrix} 1 & t & (\eta t - 1 + e^{-\eta})/\eta^2 \\ 0 & 1 & (1 - e^{-\eta})/\eta \\ 0 & 0 & e^{-\eta} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中 η 表示机器人在前进位移下的移动频率。在该频率下,计算机器人输入控制矩阵:

$$H(t) = \begin{bmatrix} [-t + \eta t^2/2 + (1 - e^{-\eta})/\eta]/\eta \\ T - (1 - e^{-\eta})/\eta \\ 1 - e^{-\eta} \end{bmatrix} \quad (8)$$

基于此,构建的清洁机器人位姿跟踪数学模型为

$$X(t) = F(t) + H(t) \quad (9)$$

由于机器人的清洁速度较快,因此在清洁期间, z 方向的位移对于机器人正常工作状态下的方向偏差较小,但是 x 方向上的位移变化较大。因此,可忽略 z 向的定位问题,仅探讨 x 方向的定位问题。

2.2 机器人末端位姿误差补偿

在机器人直线移动时,左轮越过一个清洁物,使其保持直线移动,左轮向前移动一段距离。当无清洁物存在时,机器人的两个轮子将尽量保持同样的速度,而左边轮子转速要小于右边轮子转速,这样机器人就会朝有清洁物的方向移动。同时,机器人的运动路线也会从直线变为曲线,在经过清洁物后,机器人的末端位姿发生变化,即产生误差。为了补偿机器人的末端位姿误差,采用神经网络的真实输出和预期输出的平均误差作为模型的适应性函数,可表示为

$$f = \frac{1}{N} (y_i^1 - y_i^p)^2 \quad (10)$$

式中: y_i^1 表示第 i 组理想值; y_i^p 表示第 i 组实际输出值; N 表示样本总数,其计算公式为

$$N = (m+1) \times j + (j+1) \times n \quad (11)$$

式中: m 表示输入节点数; n 表示输出节点数; j 表示隐藏层节点数。

为了最小化位姿误差,设定阈值 ε 需满足如下公式:

$$f \leq \varepsilon \quad (12)$$

仅考虑上述误差无法达到精准跟踪机器人位姿,因此在上述研究的基础上,分析误差参数对机

器人位姿跟踪的影响,从而调整机器人状态转移矩阵,实现清洁机器人位姿跟踪数学模型修正,则调整后的机器人状态位移矩阵为

$$F'(t) = \Delta\varphi \begin{bmatrix} 1 & t & (\eta t - 1 + e^{-\eta})/\eta^2 \\ 0 & 1 & (1 - e^{-\eta})/\eta \\ 0 & 0 & e^{-\eta} \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中 $\Delta\varphi$ 表示误差参量包含的误差值。

联立上述公式,得到机器人末端位姿误差补充公式:

$$V(t) = \frac{f}{F'(t)} \quad (14)$$

将补偿误差后的机器人末端位姿带入式(9),替换原来的机器人状态位移矩阵,得到更加准确的清洁机器人位姿跟踪数学模型:

$$X(t) = V(t) + H(t) \quad (15)$$

至此完成机器人末端位姿误差补偿,并且得到了精度更高的机器人位姿跟踪模型。通过误差补偿,提高了机器人位姿跟踪效果。

3 仿真分析

为了验证基于自控测距的液压启闭机油缸清洁机器人位姿跟踪研究的合理性,在水电工程液压启闭机油缸仿真平台上进行仿真分析。

3.1 实验装置及内容

液压启闭机油缸清洁机器人整体结构,如图3所示。

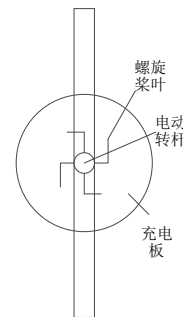


图3 液压启闭机油缸清洁机器人整体结构

清洁机器人工作原理:当清洁机器人启动时,两组固定块的电动连接轴开始工作,收集板在电动连接轴滚动的情况下自动闭合,同时采用平衡模块收集机器人的运行数据,实时调整机器人运动平衡。当清洁机器人停止工作时,两组收集板在电动连接轴下自动打开,通过电动连接轴实时调整收集面积。通过进油管中的收集处理器降解净化处理油污,并通过排油管排出。

3.2 机器人实际运动轨迹及相关数据分析

使用 RAM 计算机作为仿真平台,利用 Matlab 工具箱得到机器人实际运动轨迹,如图 4 所示。

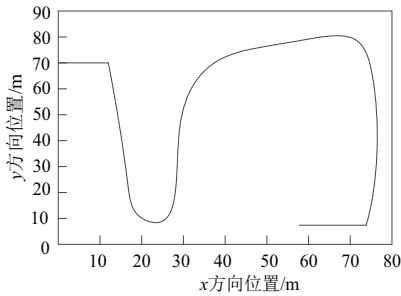


图 4 机器人实际运动轨迹

由图 4 可知,该机器人正在执行清洁工作时的精准位姿数据如图 5 所示。

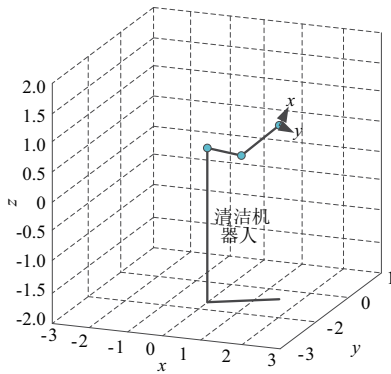


图 5 机器人精准位姿数据

图 5 所示的机器人末端位姿坐标为(0.5,0.7,0.25)。为了定量分析机器人位姿跟踪性能,使用方根误差作为实验结果好坏的评价指标,公式为

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=0}^M (x_i - \hat{x}_i)^2} \quad (16)$$

式中: M 表示状态向量维数; x_i 表示实际位置; \hat{x}_i 表示跟踪位置。该计算结果越小,则说明跟踪结果越精准。

3.3 实验结果与分析

分别使用文献[2]、文献[3]和所研究方法对比分析机器人跟踪轨迹,对比结果如图 6 所示。

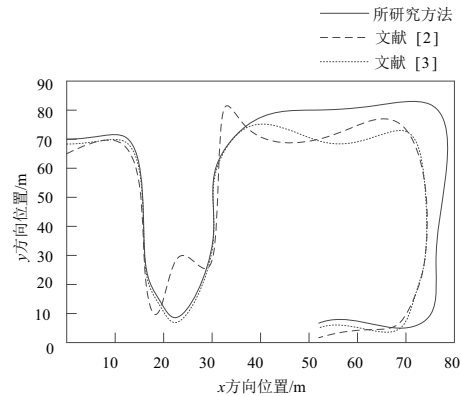


图 6 3 种方法机器人跟踪轨迹对比分析

由图 6 可知,使用文献[2]、文献[3]的机器人运动轨迹与实际轨迹不一致,其中文献[2]方法下的机器人运动轨迹与实际轨迹差别最大;使用所研究方法机器人运动轨迹与实际轨迹基本一致,该轨迹仅在 x 方向 0~10 m 和 50~70 m 位置处出现较小的误差,使用所研究方法的 y 方向位置不固定。

对于机器人清洁工作下的机器人位姿数据跟踪结果,如图 7 所示。

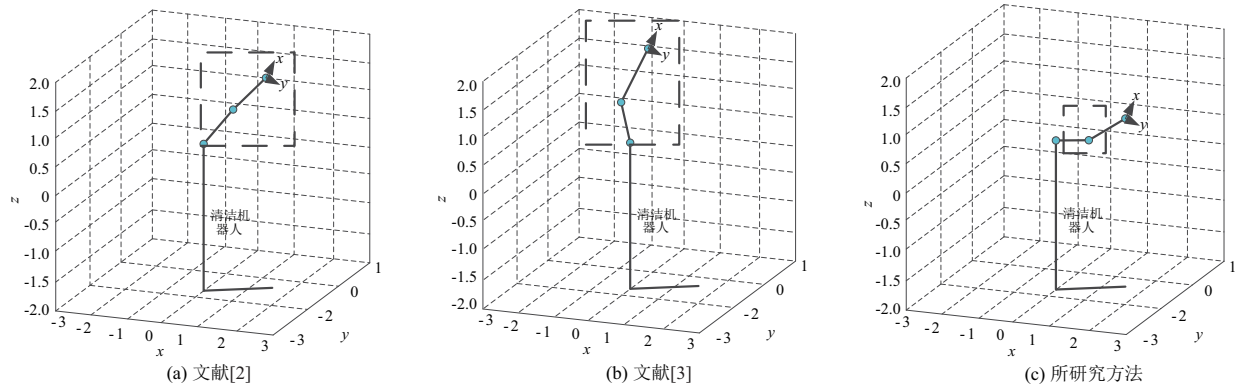


图 7 3 种方法机器人位姿数据跟踪结果对比分析

由图 7 可知,使用文献[2]机器人末端位姿与实际位姿不一致,末端位姿坐标为(0.2,0.8,1.0);使用文献[3]机器人末端位姿与实际位姿不一致,末端位姿坐标为(-1.1,0.9,1.6);使用所研究方法虽然在前一关节发生了与实际运动趋势不

相符的状态,但是不影响清洁机器人末端位姿,其得到的末端位姿坐标为(0.5,0.7,0.25),与实际坐标位姿一致。由此说明,所研究方法有效补充了机器人末端位姿误差。

(下转第 265 页)

对轴承的识别定位精度要求;可应用于轴承的生产线上;对提高对轴承各项参数的质量检测精度,具有实际意义。

参考文献:

- [1] 张明辉,王建武,张文,等. 机器视觉在轴承检测中的研究现状及发展趋势[J]. 机床与液压, 2019, 47(23):183-189.
- [2] 罗辉,崔亚飞. 基于机器视觉的工件识别与定位系统设计及实现[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021(1): 101-105, 109.
- [3] 白芳,乔荣福. 基于视觉定位的轴承在线快速检测系统[J]. 机床与液压, 2017, 45(10):162-164, 169.
- [4] 林海波,杨建西. 基于机器视觉的微小轴承几何量精度检测研究[J]. 机电工程, 2023, 40(2):245-251.
- [5] 温学军,葛动元,姚锡凡,等. 基于机器视觉的轴承滚动体缺失检测[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2020(12):116-120, 124.
- [6] 黄超,茅健,徐斌,等. 基于最小外接矩形和 Hough 变换的定位算法[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021(8):66-71.
- [7] JI J, LYU X J, YAO Y F. A SAR image segment method using gray level reduction based on graph in ICA

space[J]. Chinese Journal of Electronics, 2017, 26(4): 883-888.

- [8] SINGHD, KUMAR V. Single image defogging by gain gradient image filter [J]. Science China Information Sciences, 2019, 62(7):1-3.
- [9] 王宏文,梁彦彦,王志华. 基于新遗传算法的 Otsu 图像阈值分割方法[J]. 激光技术, 2014, 38(3): 364-367.
- [10] 赵鹏宇,王宗彦,丁培燎,等. 基于机器视觉的并联机器人工件识别定位[J]. 制造技术与机床, 2021(12): 15-20.
- [11] 周勇亮,金燕,何萍,等. 随机 Hough 变换圆检测累计加速算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2014, 26(4):574-580.
- [12] 陈跃飞,王恒迪,邓四二. 机器视觉检测技术中轴承的定位算法[J]. 轴承, 2010(4):54-56.
- [13] 骆腾斌,陈硕,赵紫阳,等. 基于机器视觉算法的轴承套端面缺陷检测研究[J]. 机电工程, 2018, 35(2): 148-152.

收稿日期:2023-01-13

(上接第 231 页)

4 结语

本文所提出的自控测距方法,使用激光仪布置了清洁机器人位姿跟踪装置,结合自控测距方法和误差补偿,精准跟踪液压启闭机油缸清洁机器人位姿,解决传统方法位姿跟踪精度低的问题。仿真结果表明:该方法在保证跟踪实时性前提下,精准跟踪了机器人运动轨迹,末端跟踪误差为 0,实现了机器人位姿的精准跟踪。

参考文献:

- [1] 王昊,张得礼,王宏涛. 基于遗传算法的机器人加工位姿优化研究[J]. 机械制造与自动化, 2021, 50(6): 174-177.
- [2] 何德峰,徐晨辉,朱威,等. 基于滚动时域优化的移动舞台机器人位姿估计[J]. 浙江工业大学学报, 2021, 49(6):608-613, 622.
- [3] 李志鹏,程兰,王志飞,等. 卡尔曼滤波框架下基于最大相关熵的移动机器人位姿估计[J]. 太原理工大学学报, 2021, 52(6):936-944.
- [4] 刘志,陈恳,徐静. 基于模型和数据驱动的机器人 6D 位姿估计方法[J]. 清华大学学报(自然科学版),

2022, 62(3):391-399.

- [5] 张磊,徐孝彬,曹晨飞,等. 基于动态特征剔除的图像与点云融合的机器人位姿估计方法[J]. 中国激光, 2022, 49(6):58-69.
- [6] 王琳玮,邵星灵,杨卫. 基于惯性传感器的球形机器人位姿控制系统及实验研究[J]. 中国测试, 2020, 46(3):123-127.
- [7] 周云成,许童羽,邓寒冰,等. 基于自监督学习的温室移动机器人位姿跟踪[J]. 农业工程学报, 2021, 37(9):263-274.
- [8] 马芳武,倪利伟,魏路路,等. 具有悬架系统的全地形机器人位姿控制[J]. 吉林大学学报(工学版), 2020, 50(4):1503-1516.
- [9] 杨学军,王然风,王怀法,等. 基于运动过程还原法的液压支架巡检机器人位姿检测[J]. 太原理工大学学报, 2020, 51(2):162-170.
- [10] 祝润泽,黄昕,高燕. 基于六维鼠标的机器人位姿控制研究[J]. 机床与液压, 2022, 50(9):61-65.
- [11] 卢红煜,秦明旺,王浩坤,等. 自动翻越式玻璃幕墙清洁机器人设计[J]. 机械制造与自动化, 2021, 50(6):181-185.

收稿日期:2022-08-31