

磁吸打磨机器人定位与姿态控制技术研究

窦玉琛¹ 周佳华²

1. 中交天津港湾工程设计院有限公司, 天津 300356

2. 天津麒麟祥和服饰有限公司, 天津 300000

[摘要]磁吸打磨机器人是完成大型钢结构表面自动化打磨的重要设备, 它的定位、姿态控制精度好坏影响到作业质量和安全。文中对本领域核心技术进行系统的分析, 主要包含运动学建模、多传感器融合感知、轨迹规划和姿态协同控制等几个方面。就磁吸爬壁机器人运动控制而言, 目前的研究按照层次可以分为关节控制、轨迹跟踪、任务操作等, 其控制方法可以分为经典控制、先进控制、智能控制三类。文中又对磁吸附着稳定性、复杂曲面自适应以及动态调整等进行研究。研究表明, 采用视觉测量和力位混合控制相结合的方式可以提高系统的位姿精度以及打磨的一致性。

[关键词]磁吸打磨机器人; 定位控制; 姿态控制

DOI: 10.33142/ect.v4i9.20475

中图分类号: TH166

文献标识码: A

Research on Positioning and Attitude Control Technology of Magnetic Grinding Robot

DOU Yuchen¹, ZHOU Jiahua²

1. CCCC Tianjin Port Engineering Design Institute Co., Ltd., Tianjin, 300356, China

2. Tianjin Qilin Xianghe Clothing Co., Ltd., Tianjin, 300000, China

Abstract: Magnetic polishing robot is an important equipment for automated polishing of large steel structure surfaces. Its positioning and attitude control accuracy affect the quality and safety of the operation. The article provides a systematic analysis of the core technologies in this field, mainly including kinematic modeling, multi-sensor fusion perception, trajectory planning, and attitude collaborative control. As for the motion control of magnetic adsorption wall climbing robots, current research can be divided into joint control, trajectory tracking, task operation, etc., and their control methods can be divided into three categories: classical control, advanced control, and intelligent control. The article also conducts research on magnetic adhesion stability, adaptive complex surfaces, and dynamic adjustment. Research has shown that combining visual measurement with force position hybrid control can improve the pose accuracy and polishing consistency of the system.

Keywords: magnetic polishing robot; positioning control; attitude control

引言

大型船舶、桥梁和储罐等钢结构表面打磨作业一直采用人工方式, 存在效率低、质量不稳定、高空作业危险性大等问题。磁吸打磨机器人依靠强磁吸附在导磁壁面上, 可以携带工具自由移动并进行作业, 是实现自动化打磨的一种有效方式。但是机器人在非结构化环境中作业时, 由于受到磁吸附力的波动、壁面曲率的变化、打磨反力扰动等多种因素的影响, 所以它的定位精度和姿态稳定性会受到影响。现有的磁吸爬壁机器人, 比如为隧道二衬台车所设计的磁吸履带式系统, 已经借助建立整机力学模型的方式来探究曲面工作时的吸附可靠性和运动稳定性。但是怎样在动态打磨的过程中进行精确的位姿控制, 仍然是限

制其工程应用的主要障碍。本文从系统设计和关键技术两个方面入手, 对定位和姿态控制原理、方法及优化策略做研究。

1 磁吸打磨机器人定位与姿态控制技术原理

磁吸打磨机器人的定位和姿态控制依靠运动学、动力学特性来实现, 主要就是准确地描述出机器人本体在工件坐标系中的位置和姿态, 并根据这些信息去驱动执行机构做相应的动作。定位就是确定机器人基座或者工具中心点(TCP)在三维空间中的位置坐标, 姿态指的是它绕各个坐标轴所作的旋转角度, 一般用欧拉角或者四元数来表示。技术实现依靠闭环控制原理。通过编码器、惯性测量单元(IMU)和视觉传感器等多种传感器获取到机器人的实时

位置姿态。其次,将感知信息和期望轨迹进行比较,得到位姿偏差。对于磁粒研磨等应用,运动位姿的计算要根据工艺特点进行,例如利用弯管图像提取廓形中线,用坐标变换和离散化处理来生成研磨过程中机器人运动位姿,保证稳定的研磨间隙。最后控制算法把位姿偏差转化为驱动指令,调节各个关节电机或者磁吸附力来修正位姿。打磨力的存在导致了力-位耦合效应,需要系统在位置控制的基础上协调力控制,保证打磨深度均匀、不破坏吸附稳定性。

2 磁吸打磨机器人定位与姿态控制系统设计

2.1 磁吸打磨机器人定位系统设计

定位系统可以实时得到机器人的三维位置信息。在磁吸附场景中,单定一个位方式很难达到精度和鲁棒性的要求,因此一般会采用多源融合的方式。系统架构为:(1)内部感知模块,采用轮式或者关节编码器,用航位推算得到短时高精度的相对定位;(2)外部环境感知模块,使用激光雷达、RGB-D 相机或者双目视觉系统来识别工件表面特征或者预设标记点,给出绝对位置参考;(3)融合定位算法模块,执行扩展卡尔曼滤波或者无迹卡尔曼滤波,把多种异构数据融合起来,得出最佳的位置推测。

2.2 磁吸打磨机器人姿态控制系统设计

姿态控制系统主要用来保持打磨工具和工件表面法线方向的最佳角度,保证机器人本体在壁面上稳定的附着。设计要点为姿态感知单元主要依靠高精度 IMU,测量机器人的横滚、俯仰、偏航角,与视觉或者激光传感器得到的表面法向信息做交叉验证;姿态控制策略一般采用基于位姿误差的反演控制或者滑模控制,可以适应打磨过程中强干扰和模型不确定性的环境;执行与驱动分配把控制量映射到各个轮速或者关节运动上,动态调节磁吸附力来避免由于姿态调整造成的吸附力不足或者过载。

3 磁吸打磨机器人定位与姿态控制关键技术

3.1 机器人运动学建模与定位算法

精确的运动学模型就是位姿控制的基础。正、逆运动学建模为机器人本体和打磨执行机构。对于履带式或者轮式磁吸机器人,在不平壁面上要建立它的运动约束方程^[1]。以磁吸附爬壁机器人为例,利用拉格朗日方程对机器人整体动能、势能进行描述,从而得到倾斜面上吸附稳定性和越障能力。定位算法上除了传统的航位推算之外,用视觉特征匹配的方法来实现定位也越来越多地被采用,它主要依靠创建图像像素坐标系和机器人基坐标系之间的准确变换关系。

3.2 多传感器融合定位与姿态感知

单一传感器性能受限,多传感器融合是提高感知鲁棒性的主要方法。机器人加工中经常使用视觉测量、力传感技术,用加工运动链和误差传递模型来定量分析、补偿静态位姿误差。实际系统中把视觉得到的绝对位姿信息同 IMU 或者编码器给出的相对位姿信息结合起来,在视觉被遮挡或者惯导漂移的时候可以给出连续稳定的位姿估计。

磁吸打磨作业环境中的传感器特性差别很大。视觉传感器的精度可以达到亚毫米级,但是容易受到粉尘遮挡和光照变化的影响,输出频率只有 10~30Hz; IMU 动态响应好但是存在积分漂移,纯惯性导航几十秒内就能产生几度的累积误差;编码器局部分辨率高,但是轮地打滑会使航位推算误差随行程增加而迅速发散。根据上述互补特性可以使用基于误差状态卡尔曼滤波的紧耦合融合框架,把视觉重投影残差、IMU 预积分残差和编码器里程计残差组合成一个统一的优化目标,在滑动窗口内做非线性优化求解,同时估计位姿和传感器偏置。相比松耦合方式,紧耦合结构使得各个传感器的原始信息可以在状态估计层面进行深入的交互,在视觉因为粉尘遮挡而短暂中断的时候,系统仍然可以依靠 IMU 和编码器的运动学约束来保持连续的输出,不会出现位姿跳变或者发散的情况。在线时标校准以及外参自标定模块的加入,可以消除由于硬触发同步偏差和安装误差所造成的系统性偏移,从而提高复杂工况下感知系统的环境适应性和估计精度。

3.3 打磨轨迹规划与姿态协同控制

打磨质量不但和位置精度有关,还和工具姿态以及表面法向一致有关。轨迹规划既要考虑位置路径也要考虑姿态序列。对于复杂的曲面,采用工件三维廓形识别自动生成轨迹的方式,比手工采点更有利于减小随机误差,在保证正确的研磨位置的同时也能保持稳定的接触状态^[2]。从控制上讲,要达到位置和姿态的同步,可以采用基于位置-姿态混合雅可比矩阵的分解速度控制,使机器人沿着预定路径运动时主动调节工具姿态以适应曲率的变化。

轨迹规划的层次结构可以分成任务层、规划层和控制层。任务层根据工件三维模型来确定打磨区域覆盖路径的宏观形式,比如弓字形往复或者等距偏置等策略,根据打磨宽度来设定相邻轨迹搭接率,保证无遗漏又不会过度打磨。规划层在既定路径上用固定的弧长间隔来隔离散采样,对每个采样点计算期望位置和对应的工具姿态角,姿态规划的关键就是利用局部点云拟合二次曲面来求取表面法向量和主曲率方向。控制层完成相邻采样点间实时插值和

平滑过渡,用五次 B 样条拟合位姿序列得到位置和姿态轨迹都符合速度、加速度连续性的要求。姿态协同控制上把六自由度位姿误差分成位置误差子空间和姿态误差子空间,分别设计控制律,用混合雅可比矩阵建立关节速度和笛卡尔空间位姿速度之间的映射关系,从而达到位置环和姿态环的协调运动^[3]。同时把力控制嵌入到位置环路中,用阻抗控制框架把期望的接触力转化为位置修正量,当接触力偏离目标值时主动调节工具轴向位置来保持恒力接触,法向姿态保持不变来保证打磨角度的一致性。对于大曲率过渡段,采用局部廓形前瞻扫描补偿,用线激光传感器预先扫描机器人前方壁面廓形,预测曲率变化趋势并给出姿态超前调整指令,补偿控制系统固有的延迟造成的跟踪滞后。

3.4 定位与姿态控制精度优化

精度优化存在于感知、控制、执行各个环节中。在感知端采用标定以及误差建模补偿传感器系统的误差。在控制端加入前馈控制补偿已知干扰(重力分量),利用力和位混合控制策略,在位置控制环中嵌入力控制环来抑制打磨反力引起的位姿偏差。研究表明,用自适应轨迹规划和力传感器加权混合控制的方法来实现机器人加工时精密接触力控制以及位姿优化是行之有效的。另外,通过对机器人关节柔性、传动间隙等动态特性进行辨识,得到更精确的控制模型,也可以提高精度。

4 磁吸打磨机器人定位与姿态控制优化策略

4.1 磁吸附着稳定性与定位可靠性优化

磁吸附力稳定为定位和控制打下基础。吸附力过小容易造成滑移或者脱落,吸附力过大又会增大运动阻力并有可能对工件造成损伤。优化策略有自适应磁吸附单元,根据壁面曲率及负载的变化来调节磁力,极限吸附力模型,分析滑移、倾覆、脱离等失效模式,给磁路设计提供依据,吸附力状态加入到定位融合框架中,在吸附力不足的时候主动改变运动速度或者路径,防止打滑造成定位发散。极限吸附力模型要考虑重力分量、打磨反力和磁足摩擦力等静态和动态受力。采用库仑摩擦定律作为滑移判据,切向合力不能大于磁吸附力和摩擦系数的乘积;倾覆失效要保证重心在支撑多边形内投影的裕度满足安全阈值;脱离失效则需要法向拉力小于总磁吸附力。定义稳定裕度(实际吸附力和临界需求吸附力之比,安全值取 1.5 以上)在线评价吸附的安全性。当裕度小于阈值的时候,系统就会自动降低速度,并且减缓加减速速率来减少动态力峰值,或者重新规划路径绕开曲率突变的地方,在保证吸附安全的

基础上维持定位系统的连续运行。

4.2 复杂曲面环境下的姿态自适应控制

对于球冠、圆筒等变曲率壁面,机器人的姿态要具有自适应性。这就需要控制系统的控制对象不只是位置指令,还要实时跟踪表面法向量的变化。对台车模板等典型的曲面结构进行自适应升降打磨机构的设计,利用垂直行程的调节可以满足曲率的变化。控制算法上可以采用自适应控制或者鲁棒控制,对模型参数的不确定性以及外界干扰进行在线估计和补偿,同时用视觉或者激光传感器对前方局部曲面做前瞻性扫描,提前调节姿态,从而减小大曲率突变造成的跟踪滞后。变曲率壁面法向量变化率与机器人行进速度相乘得到姿态角速度需求,如果超出执行机构响应能力就会出现跟踪偏差。因此可以将期望的姿态角看作是曲率的函数,建立基于曲率前馈的姿态指令生成模型,在进入大曲率区域之前就预先调节机器人俯仰和横滚角,保证打磨工具轴线一直指向壁面法向。另外,用模型参考自适应控制方法,把名义平面工况下的响应当作参考模型,按照李雅普诺夫稳定性理论来设计自适应律,在线调节姿态控制器的增益参数,使得不同曲率工况下的动态跟踪性能一致。

4.3 动态打磨过程中的定位与姿态调整

打磨过程中接触力、温度、壁面状况的变化都会影响到机器人的动态位姿。优化策略是实时的、动态的。首先用力传感器检测打磨接触力,当力波动超过阈值的时候,立刻发出姿态微调指令,补偿由于工具磨损或者工件材质不均造成的力变化。其次,视觉系统要具备动态跟踪的能力,不断对已经打磨过的区域以及没有打磨过的区域进行边界特征的监测,在大型钢模板清理的应用中,集成立面定位导航和运动补偿算法,可以使得机器人具有智能感知、识别和决策作业的能力。最后建立位姿误差时间序列预测模型,用历史数据预测未来误差趋势,进行超前修正来抑制动态滞后。

4.4 定位与姿态控制性能测试与评价

创建科学的测试和评价体系,是检验并改良控制算法的重要步骤。测试内容主要是静态定位精度、重复定位精度、轨迹跟踪精度、姿态稳定度等。评价方法要联系具体的作业环境,创建出典型的测试工件(平板、单曲率板、球面板等)。工程验证时,机器人集群协同作业的总体效率以及一次打磨合格率属于评判综合性能的重要指标,有些系统可以达到一次打磨合格率达到 99% 以上的水平。另外还要建立包含最大位姿误差、均方根误差、调节时间

和超调量等在内的量化指标体系,见表1所示,对不同的控制策略进行客观评价,指导系统的优化。

表1 磁吸打磨机器人定位与姿态控制性能评价指标

评价维度	典型指标	测试方法	备注
静态定位精度	绝对定位误差/重复定位误差	激光跟踪仪对标	反映系统基础精度
动态跟踪精度	轨迹偏差/RMS误差	编码器/视觉联合测量	评估动态响应性能
姿态稳定度	横滚/俯仰角波动范围	IMU 数据统计	影响打磨一致性
综合作业性能	一次打磨合格率/表面粗糙度	工艺样件试磨	最终工艺效果表征

5 结语

磁吸打磨机器人定位、姿态控制属于感知、建模、规划、控制相结合的复杂难题。本文从技术原理、系统架构、关键环节和优化策略四个方面展开论述。目前已有运动学建模、传感器融合和轨迹生成等研究成果,例如用廓形识别来完成研磨位姿的计算,建立多层运动控制等。但是强

耦合、强干扰工况下高精度位姿控制仍然存在困难。未来的研究应该着重发展更精确的磁吸附力和位姿的耦合模型,探寻依靠深度强化学习来达成自适应控制的方法,而且要创建起针对工程实际应用的标准化性能测试体系,从而促使这类机器人在诸多复杂的环境里获得可靠的使用。

[参考文献]

- [1]杨文娟.二衬台车打磨机器人的设计与研究[J].铁道建筑技术,2026,11(2):78-80.
- [2]赵飞.履带式爬壁机器人运动学建模与磁吸附设计[J].机械科学与技术,2024,43(5):837-843.
- [3]董家候,郑甲红,何凯,等.一种基于磁力吸附的焊缝打磨爬壁机器人设计[J].机床与液压,2023,51(3):35-43.

作者简介: 窦玉琛(1992—),男,天津宝坻人,工程师,天津科技大学电子信息与自动化学院自动化专业,现就职于中交天津港湾工程设计院有限公司,从事工程机器人研发设计工作。