

基于导纳算法的管道机械双臂螺栓装配研究

殷云彬¹ 张悦¹ 卜春光^{2,3}

YIN Yunbin ZHANG Yue BU Chunguang

摘要

为解决煤矿井下巷道管道安装中的法兰光孔螺栓连接问题,针对双机械臂提出一种基于导纳算法的螺栓螺母紧固控制器。首先,采用ATI力传感器实时感知机械臂与环境接触时的力;其次,用UR机械臂搭建实验系统,利用双机械臂模拟螺栓螺母的装配过程;最后,在实验系统中应用导纳控制算法,实现实时监测机械臂与环境之间的接触力,并相应调整机械臂的位置以减少接触力,从而有效保护了工件和传感器,验证了柔顺控制算法在螺栓拧紧过程中的有效性。

关键词

双机械臂;力反馈;柔顺控制;导纳控制;位置控制

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.05.009

0 引言

煤矿井下作业环境存在着诸多危险,如有毒气体、高温、高湿等,同时存在工作环境脏乱、作业人员劳累等问题。为提高作业效率和保障作业人员安全,机器人化成为煤矿井下作业装备的重要发展方向^[1]。

管道作为煤矿井下的重要基础设施之一,承担着输送煤气、水、电等关键物质的任务,对煤矿生产和运维安全具有至关重要的支撑作用^[2]。而井下巷道管道通常采用金属管材,通过两端法兰通孔由螺栓连接固定。针对煤矿井下巷道管道无人化安装需要,课题组在国家重点研发计划支持下,提出了基于双机械臂的管道安装机器人方案。本文针对双机械臂,研究螺栓螺母紧固控制方法。

螺栓和螺母紧固过程中,一方面旋紧和同轴移动需要符合螺纹结构约束;另一方面,由于螺栓螺母均为金属材料构成,刚度大,紧固过程还要考虑加工和控制误差导致的螺栓和螺母间刚性接触^[3]提出的力顺应要求,以避免对螺栓螺母或机器人造成损坏。为此,本文研究了基于双机械臂协调和力控的螺栓螺母紧固方法。

目前,力控方法主要有阻抗控制、导纳控制、力/力矩控制等。针对导纳控制自适应性强、安全性高的特点^[4],本文开发了基于导纳算法螺栓螺母紧固控制算法。

当机械臂末端工具与外界环境接触并产生接触力时,

位于机械臂末端的六维力传感器会感知到不同方向的力和力矩^[5]。通过导纳控制器,这些力分量将被转换为机械臂末端工具的位置变化量,通过末端工具的位置变量改变机械臂的实时位置,使末端工具与作业环境之间的交互更加柔顺。通过实验验证,这种控制方法能够有效地减少机械臂与作业环境之间的接触力,降低由于接触力过大而引起的损坏和误差,从而提高机械臂的可靠性和稳定性。

1 系统模型

为了建立机器人与环境的接触模型,可以将机器人末端执行器等效为一个二阶弹簧-质量-阻尼系统^[6],如图1所示。这意味着将机器人末端视为一个具有弹簧、质量和阻尼的系统,类似于一个弹簧振子。当机器人与环境相互作用时,可以通过调整弹簧-质量-阻尼系统的参数来建立机器人末端作用力与位置之间的理想动态关系^[7]。

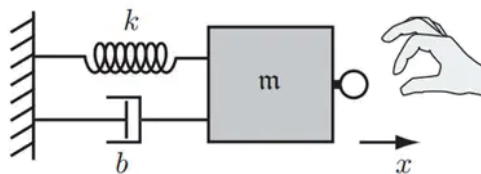


图1 弹簧-质量-阻尼系统

在这个弹簧-质量-阻尼系统中,机器人末端的位置、速度、加速度以及所受到的作用力是关键因素。结合这些因素,可以建立一个二阶微分方程,即阻抗控制模型^[8]:

$$M\ddot{x}_e + B\dot{x}_e + Kx_e = F_e \quad (1)$$

式中: F_e 为传感器采集的工具坐标系下环境力; $x_e = x - x_d$ 为工件或 ζ 基坐标下描述的实际位姿 x 与期望位姿 x_d 之差; $\dot{x}_e = \dot{x} - \dot{x}_d$ 和 $\ddot{x}_e = \ddot{x} - \ddot{x}_d$ 为 x_e 一阶导数和二阶导数; K 为刚

1. 沈阳工业大学机械工程学院 辽宁沈阳 110870
2. 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室
辽宁沈阳 110016
3. 中国科学院机器人与智能制造创新研究院 辽宁沈阳 110016
[基金项目] 煤矿井下管道安装机器人研发(2022YFB4703602)

综上所述,合理选择惯性参数 M 、刚度参数 K 和阻尼参数 B ,可以使系统在与外部环境交互时保持稳定、灵活,并且能够有效地抵抗外部干扰,提高机器人的控制性能和工作效率。

4 实验验证

为了进一步验证导纳控制方法的控制效果,本文基于 UR 构型双机械臂实验平台进行了真实拧合螺栓工况下的接触力跟踪实验,实验平台系统示意图如图 3。

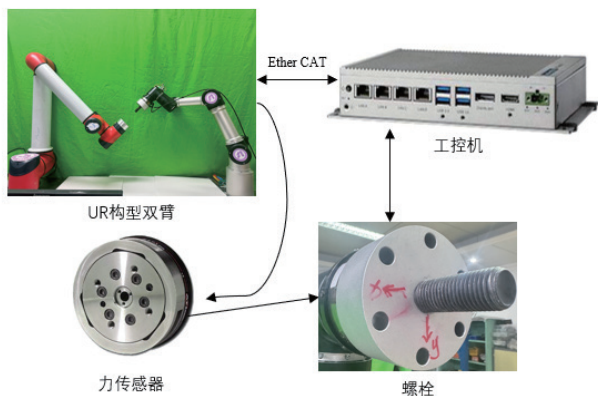


图 3 实验平台系统示意图

图 3 中机械臂均为 UR 构型,右臂末端安装有 ATI Axia80 六维力传感器和执行机构。工控机通过 EtherCat 发送机械臂控制指令,通过 UDP 获取 ATI 六维力传感器的力/力矩信息^[11]。

本实验中已设计了末端工件,将螺栓螺母固定于机械臂末端。机械臂在执行任务时,在进行作业前需要确定任务完成的操作顺序即任务分解,机械臂系统以程序的形式生成对应动作的指令,使得机械臂按照预定的步骤进行运动,机械臂任务规划流程如表 1 所示。

表 1 机械臂任务规划流程

任务分解	左臂(夹持螺母)	右臂(夹持螺栓)
1	左臂初始化	右臂初始化
2	调整	调整
3	装配姿态	装配姿态
4	暂停	接近螺母
5	暂停	螺栓拧入
6	暂停	螺栓拧出
7	完成返回	完成返回

具体装配过程为:当双臂到达指定装配姿态后,给定右臂的导纳控制器在笛卡尔空间 Z 方向 4 N 的虚拟力,其他方向不施加虚拟力,使得螺栓向螺母接近。当螺栓接触到螺母时,六维力传感器会接收到外力,此时在右臂的六轴 Z 方向

给定 $0.1\text{ N}\cdot\text{m}$ 的期望力矩使螺栓旋转。然而,螺栓螺母的姿态并不是完全吻合的。在螺栓旋拧的过程中,六维力传感器可能会感受到来自 XY 方向的力和力矩,通过导纳控制,可以调整右臂的末端姿态进行顺应,这使得螺栓可以紧贴下方螺纹进行旋转进给运动,最终右臂顺利带动螺栓旋转一圈。这种控制策略充分利用六维力传感器的反馈信息,使得机械臂能够灵活地适应外部环境的变化,并顺利完成复杂的装配任务。采用基于任务分解的机器人装配序列图如图 4 所示。

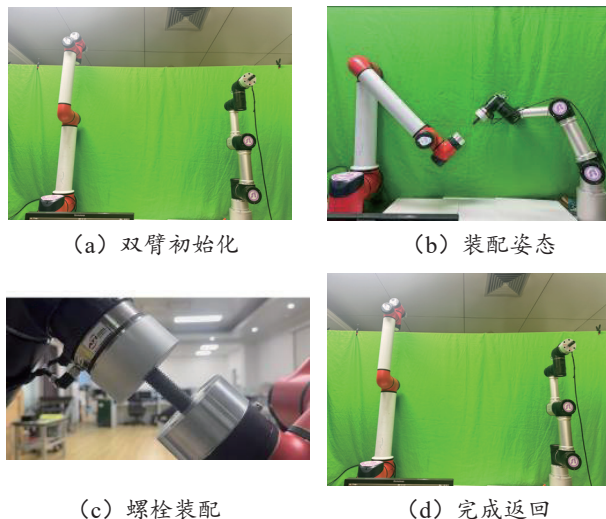
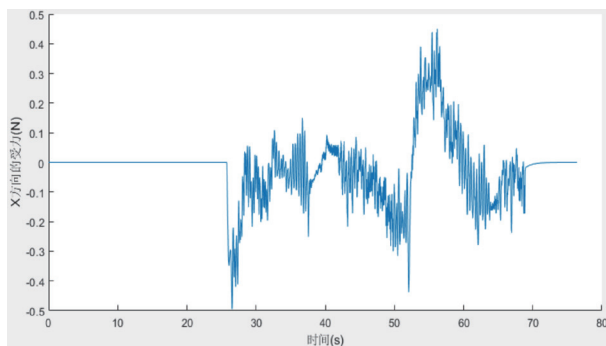
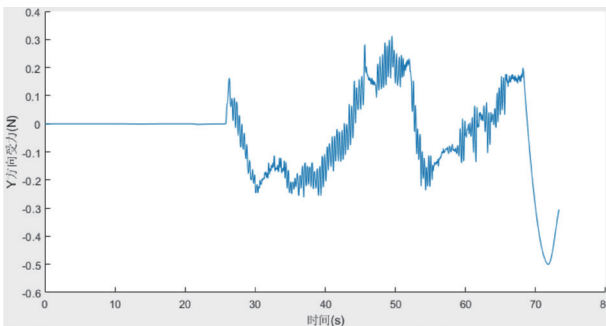


图 4 双机械臂螺栓装配

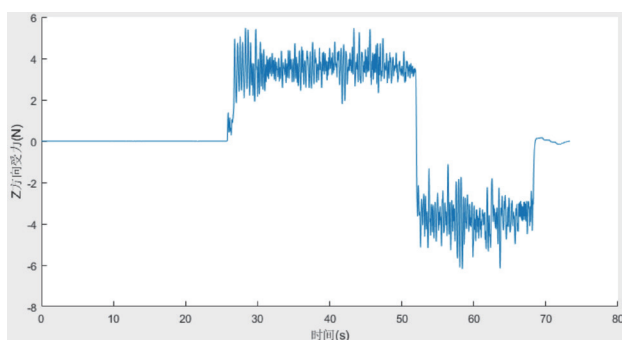
将六维力传感器的数据导出并通过 MATLAB 进行绘图分析,各轴的力和力矩实时受力如图 5 所示。



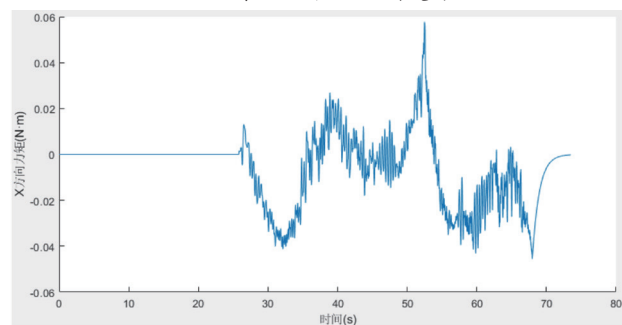
(a) 装配过程 X 方向受力



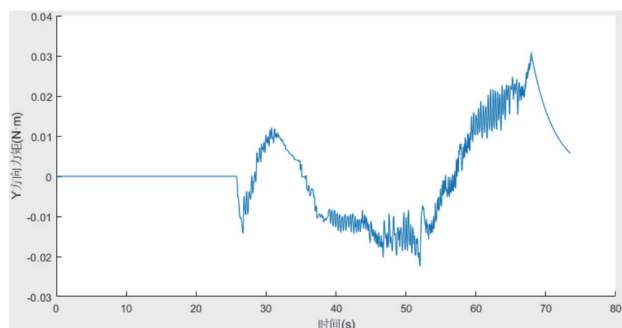
(b) 装配过程 Y 方向受力



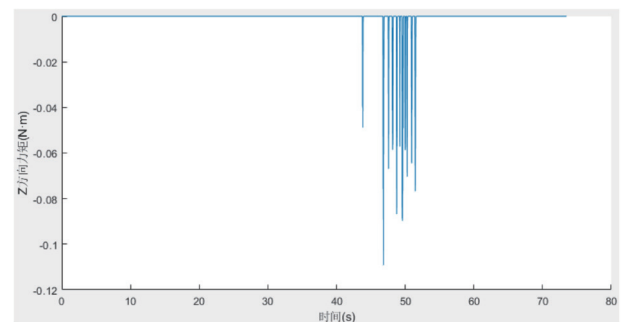
(c) 装配过程 Z 方向受力



(d) 装配过程 X 方向所受力矩



(e) 装配过程 Y 方向所受力矩



(f) 装配过程 Z 方向所受力矩

图 5 螺栓装配过程各轴受力图

通过分析机械臂在各轴所受的力和力矩,可以发现机械臂在 XY 方向受力和力矩明显,说明此时螺栓已经与螺纹接触且姿态有一定的误差,经过导纳控制进行机械臂末端位置的实时调整,力和力矩的变化有明显降低的趋势。在 25 s 时刻机械臂受力发生突变,代表螺栓已经与螺母接触,又经过 1 s 螺栓与螺纹相接触,开始保持 4 N 的接触力,此时系统接

收到对孔完成的指令,并使螺栓开始转动,在 53 s 时刻完成螺栓装配开始螺栓拧出,67 s 机械臂完成拧出并返回零位。实验结果也验证了导纳控制算法在基于机械臂的螺栓装配中的可行性。

5 结语

本文针对煤矿井下巷道管道安装中的法兰光孔螺栓连接问题,采用 ATI 力传感器实时感知机械臂与环境接触时的力,运用导纳算法将其转换为机械臂末端工具的位置变化量,从而实现机械臂实时位置调整,利用 UR 双机械臂搭建了实验系统并开展实验,验证了方法的有效性。

参考文献:

- [1] 程欢,邓立营.煤矿巷道七自由度喷浆机器人轨迹规划与跟踪控制[J].工矿自动化,2024,50(1):115-121.
- [2] 郑杰,尚祖跃,窦益华,等.模块化同步自主变径输气管道机器人的研究设计[J].石油机械,2023,51(11):154-162.
- [3] 苏启奖,黄炎,钟力强,等.输电线路螺栓紧固带电作业机器人及自提升上线装置的研究与应用[J].广东电力,2019,32(9):115-123.
- [4] 王琪,闵华松.双臂机器人的协调控制算法综述[J].计算机工程与应用,2021,57(1):1-16.
- [5] 刘会昌.基于力/视觉导引的机器人自动路径规划与恒力控制[D].南京:东南大学,2020.
- [6] 刘鹏.机器人轴孔精密装配策略与柔顺控制研究[D].襄阳:湖北文理学院,2023.
- [7] 周波,刘奕荣,刘会昌,等.基于变刚度自适应导纳机制的机械臂恒力控制[J].控制理论与应用,2023,40(10):1880-1888.
- [8] 刘凤义,岳承涛.基于恒力控制方法的医美机器人系统研究[J].机器人技术与应用,2022(6):30-32+46.
- [9] 李景春.铝锭连续铸造中打渣机器人系统设计及柔顺控制方法研究[D].兰州:兰州理工大学,2023.
- [10] 阮昭.月面作业机器人的力觉临场感与遥操作技术研究[D].武汉:华中科技大学,2022.
- [11] 金锋扬,秦菲菲,郭振武,等.机械臂接触力跟踪自适应变导纳控制方法[J].中国计量大学学报,2023,34(2):216-223.

【作者简介】

殷云彬(1996—),男,山东临沂人,硕士研究生,研究方向:机器人学、智能机器人控制。

卜春光(1971—),通信作者(email: cgbu@sia.cn),男,辽宁铁岭人,副研究员,研究方向:自主移动与操作机器人。

(收稿日期:2024-03-15)