

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.04.042

基于自调节缓冲装置的双机器人无内力搬运

赵志刚,王新哲,赵祥堂,车王建

(兰州交通大学 机电工程学院,甘肃 兰州 730070)

摘 要:针对目前大多数双机器人搬运系统存在控制响应慢导致内力控制不足的问题,采用装置设计的方式代替力控制算法。建立双机器人系统的约束关系,并对机器人正逆运动学进行分析。基于双机器人搬运系统运动学的分析,结合对机器人的误差建模,构建机器人误差与期望位姿间的关系。设计一种自调节缓冲装置,根据误差自动调节,使机器人的调节时间大于控制周期,以此减少误差对被搬运物所造成的影响。仿真分析机器人各关节角随时间的变化关系曲线。结果证明:该基于自调节缓冲装置的双机器人搬运系统具有有效性以及合理性。

关键词:自调节缓冲装置;双机器人搬运系统;结构设计;运动学分析;仿真分析

中图分类号:TP242 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2025)04-0231-05

Dual Robot Internal-force-free Handling Based on Self-adjusting Buffer Devices

ZHAO Zhigang, WANG Xinzhe, ZHAO Xiangtang, CHE Wangjian

(School of Mechanical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract:In response to the deficiencies in internal force control caused by slow control response in most current dual robot handling systems, this article adopts device design to replace force control algorithms. The constraint relationship of the dual robot system is established, and forward and reverse kinematic analysis on the robot is conducted. Based on the kinematic analysis and by the combination of robot error modeling, the relationship between the robot error and the expected pose is constructed. A self-adjusting buffer device that can automatically adjust according to errors is designed, making the robot's adjustment time greater than the control cycle to reduce the impact of errors on the transported object. The simulation analysis on the relationship curves of the robot joint angles along with the change of time is carried out, which proves the effectiveness and rationality of the dual robot handling system based on self-adjusting buffer devices.

Keywords:self-regulating buffer device; dual robot handling; structural design; kinematic analysis; simulation analysis

0 引言

在工业生产任务日益复杂化和生产过程要求柔性化的背景下,原有的单机器人已很难满足不断改变的生产需求^[1-3],而两台或两台以上机器人互相配合却能在完成此类作业任务时展现出了优异的性能^[4-6]。因此,多机器人协作已经成为机器人控制中的重要发展方向和国内外研究者关注的焦点问题之一^[7-9]。

传统的运动学协调方式是对于纯位置的控制,即规划被搬运物的轨迹,从而通过被搬运物与搬运机器人之间存在的约束关系,以获得各个搬运机器人末端的运动轨迹^[10-11]。但是,这种协调方式没有考虑到被搬运物受到外部干扰的情况,也没有考虑到搬运机器人轨迹误差的情况。UCHIYAMA 等^[12]采用主从协调控制的策略来完

成对被搬运物的搬运。LAURETTI 等^[13]采用基于位置/力混合控制的协调策略来对搬运机器人进行控制。颜双权等^[14]提出了对工业机器人进行 B 样条曲线轨迹控制精度补偿。其他学者提出了一种面向被搬运物的多空间阻抗的控制方式。

综上所述,在基于主从协调控制策略下要求从动臂能够极快地跟随响应,但在实际应用中很难实现,故主从协调控制策略只能应用于一些低速工况^[15];在基于位置/力的协调策略中,在位置与力控制之间切换时会使整个系统失稳并在实际使用中带来诸多困难^[16];而阻抗/导纳控制策略没有考虑到外界的动态干扰,这些误差会导致被搬运物受到未知内力的作用,从而导致搬运机器人以及被搬运物的损坏^[17-18]。

因此,本文采用装置设计的方式来代替力控制算法;设计了一种自调节缓冲装置,使双机器人

基金项目:国家自然科学基金项目(51965032);甘肃省自然科学基金重点项目(22JR5RA319)

第一作者简介:赵志刚(1975—),男,甘肃庆阳人,教授,博士生导师,研究方向为特种机器人、多机器人系统建模与控制等,1980479494@qq.com。

末端保持相对位姿不变,以达到使物体内力降低并使机器人的调节时间大于控制周期的目的;最后进行仿真分析,验证了基于自调节缓冲装置的双机器人搬运系统的有效性以及合理性。

1 双机器人系统运动学分析

1.1 被搬运物运动学分析

双搬运机器人在同一操作空间中操作同一物体时,双机器人与被搬运物之间始终存在着位置和姿态的约束关系。双机器人协调搬运物体如图1所示,其中 T_o 为被搬运物的参考坐标系; T_{bi} 为第 i 个搬运机器人基坐标系; O_6 、 O_7 分别为两搬运机器人末端执行器; T_w 为世界坐标系。

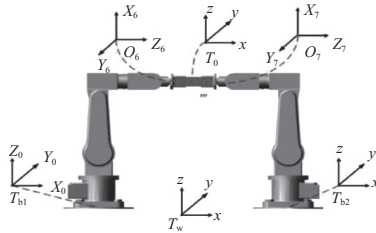


图1 双机器人协调搬运物体示意图

设被搬运物的质心 m 与被搬运物参考坐标系 T_o 相重合。被搬运物的质心 m 在 T_o 坐标系中的运动可表示为 T_o^m 。

根据搬运机器人与被搬运物的闭链约束关系,可以得出以下位姿约束关系:

$$\begin{cases} T_{bi}^w \cdot T_i^{bi} \cdot T_m^i = T_m^w \\ T_o^w \cdot T_m^o = T_m^w \end{cases} \quad (1)$$

由上述位姿约束关系可以根据逆运动学得到第 i 个搬运机器人末端执行器相对于其基坐标系的运动关系:

$$T_i^{bi} = (T_{bi}^w)^{-1} \cdot T_o^w \cdot T_m^o \cdot (T_m^i)^{-1} = T_w^{bi} \cdot T_o^w \cdot T_m^o \cdot T_m^i \quad (2)$$

由于 T_w^{bi} 、 T_o^w 和 T_m^i 为已知常数矩阵,故而通过被搬运物的运动轨迹 T_o^m 可以得到搬运机器人末端的运动轨迹。

1.2 搬运机器人运动学分析

根据各关节变量的值,利用连乘法对机器人的正运动学分析可以得到机器人末端位姿:

$${}^0T = {}^0T_1 \cdot {}^1T_2 \cdot {}^2T_3 \cdot {}^3T_4 \cdot {}^4T_5 \cdot {}^5T_6 \quad (3)$$

为使搬运机器人末端位姿达到所给位姿要求而计算出对应关节变量的过程称为逆运动学分析。逆运动学的分析可以利用 PAUL 等人提出的

反变换法,具体可以分为以下4步。

第1步,由 ${}^0T^{-1} \cdot {}^0T = {}^1T$ 可以求得 θ_1 和两组 θ_3 。

第2步,由 ${}^0T^{-1} \cdot {}^0T = {}^3T$ 可以推导出 θ_{23} 和 θ_4 。由于第1步求出两组 θ_3 ,故此可得到4组 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 。

第3步,由 ${}^0T^{-1} \cdot {}^0T = {}^4T$ 、 ${}^0T^{-1} \cdot {}^0T = {}^5T$ 可以推导出两组 θ_4 、 θ_5 、 θ_6 。

第4步,推导出4组 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 ,两组 θ_4 、 θ_5 、 θ_6 ,得到全部 $2 \times 4 = 8$ 组解。

2 双搬运机器人系统误差建模

在双机器人搬运物体完成某一段轨迹的过程中,来源于双机器人协调运动的位姿误差对物体会产生一定的内力。虽然内力在相互抵消后,并不影响被抓取物的运动轨迹,但会对物体产生挤压、拉伸、扭拧等作用。

由被搬运物的运动轨迹 T_o^m 可得主机机器人参考轨迹。由于上述的误差结合从而导致主机机器人有位置偏差 e_{k1} 、从机器人有位置偏差 e_{k2} 。由于主机机器人的参考轨迹是计算得到的,故位置偏差多源于机器人产生的定位误差;而从机器人的参考轨迹是间接得到的,其误差不仅来源于自身的定位误差,还来源于上述其他误差。所以从机器人的位置误差一般大于主机机器人,即 $e_{k1} \neq e_{k2}$ 。所以物体会由于位置误差承受巨大的内力。

针对机器人运动学的误差问题,结合刚体微分运动模型,建立机器人运动误差模型。刚体的微分运动主要包括微分平移向量以及微分旋转向量。当某坐标系与某刚体固连时,其相对于基坐标系的位姿变化矩阵为 T 。当出现微分运动时该坐标系的位姿变换矩阵变为 $T+dT$ 。该变换矩阵可以表示如下:

$$T+dT = \text{Trans}(dx, dy, dz) \cdot \text{Rot}(f, d\theta) \cdot T \quad (4)$$

变换矩阵中 $\text{Trans}(dx, dy, dz)$ 为微分平移; $\text{Rot}(f, d\theta)$ 为经过旋转变换后的坐标系相对于基坐标系绕向量 f 的微分旋转, $d\theta$ 为微分旋转角度。

绕向量 f 的微分旋转,可以将其分解为分别绕坐标系的各个坐标轴的微分旋转,令 $f_x d\theta = \delta_x$; $f_y d\theta = \delta_y$; $f_z d\theta = \delta_z$ 。

微分变换 dT 可以看作微分平移矢量 d 和微分旋转矢量 δ 所组成。其中微分平移矢量为 $d = dxi + dyj + dzk$,微分旋转矢量为 $\delta = \delta_x i + \delta_y j + \delta_z k$ 。

根据上述公式推导可以得到机器人运动轨迹中含连杆参数误差的末端位姿对于第 i 个机器人

的期望末端位姿的相对位姿:

$$T_{ie}^{bi} = (T_i^{bi})^{-1} (I + \delta T_i^{bi}) (T_{ie}^{bi}) \quad (5)$$

通过求得的误差位姿与期望位姿间的关系能够有效对机器人的定位误差进行修正,从而减小物体内力。

3 自调节缓冲装置

3.1 自调节缓冲装置的构型

由于机器人误差对被搬运物内力所产生的影响,本文设计了一种可自调节的缓冲装置,可以在双机器人对同一物体进行搬运时,自动按照主机机器人与从机器人之间的误差,通过阻尼的消耗以及对手爪关节的长度与角度的自动调整,令双机器人末端保持相对位姿不变,从而达到使物体内力降低并给予机器人控制系统足够的时间进行控制响应调节的目的。

双机器人搬运系统的运动主要可分为平衡重力而不变的竖直分量以及运动所产生的水平分量。在运动中,竖直方向固定不变,故采用控制的方式对误差进行补偿,而水平方向的,我们可以将其分解为旋转误差以及平移误差。

旋转误差及平移误差分别由图 2(a) 和图 2(b) 所示装置进行缓冲。

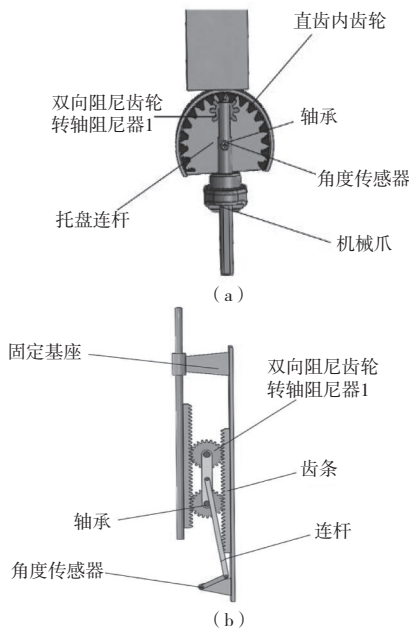


图 2 自调节缓冲装置构型图

如图 2(a) 所示装置由机械爪、托盘连杆、轴承、双向阻尼齿轮转轴阻尼器、直齿内齿轮、角度传感器等构成。图 2(b) 所示装置由固定基座、轴承、连杆、角度传感器、双向阻尼齿轮转轴阻尼器、

齿条构成。

3.2 阻尼的选择

由于本装置需要尽可能地消耗能量,并且不会产生过冲现象而导致机械臂脱离运动轨迹,致使被搬运物受损以及系统的稳定性降低,故选择能够使系统在最短时间内恢复平衡的临界阻尼。本文采用 MINGDOLL 型齿轮转轴阻尼器。由于误差方向的不确定性,故本文采用双向阻尼齿轮转轴阻尼器。双向阻尼齿轮转轴阻尼器利用黏油在旋转体部分的制动产生阻力,通过调节上方螺母来调节阻尼力,使阻尼处于临界阻尼的状态。

3.3 自调节缓冲装置的运行

本文研究目标为双机器人对物体进行搬运。在搬运过程中,主机器人不变,从机器人安装可自调节的缓冲装置。

搬运过程中物体在水平方向运动。误差产生时,由于竖直方向固定不变,能保持与重力的平衡,一般采用控制的方式对误差进行补偿;而水平方向,可以将其分解为旋转误差以及平移误差,采用自调节缓冲装置和控制相结合的补偿方式。

为了有效地防止误差过大的情况发生,对直齿内齿轮以及齿条长度进行限制,同时加入了角度传感器,在误差超过设定阈值的情况下,及时采用控制的方式进行调节。当控制不能及时反馈时,图 2 所示的装置通过双向阻尼齿轮转轴阻尼器的旋转,给予机器人控制系统有足够的时间进行控制响应调节,防止因机器人和被搬运物在控制反馈前产生巨大内力,致其发生损坏。

3.4 自调节缓冲装置的应用

在双机器人系统搬运的过程中,当误差发生时,自调节缓冲装置需要给予机器人控制系统足够的时间进行控制响应调节。故而,自调节缓冲装置的调节时间需大于控制周期,即在手爪没有运行到极限位置时控制器已发生作用。

在调节过程中,设控制周期为 t ,手爪旋转到极限角度所需时间为 t_1 ,手爪平移到极限距离所需时间为 t_2 ,手爪旋转的极限运动角度为 θ ,手爪运动平移的极限距离为 S ,通过所受误差力为 F ,误差旋转分力为 F_1 ,平移分力为 F_2 ,阻尼力为 K ,角加速度为 $\dot{\omega}$,线加速度为 a ,旋转阻尼器 1 轴线到旋转轴承距离为 r 。

$$\begin{cases} F = F_1 + F_2 \\ F_1 - K = m\dot{\omega}r \\ F_2 - K = ma \end{cases} \quad (6)$$

下式中微分旋转矢量 $\delta = \delta_x i + \delta_y j + \delta_z k$ 以及微分平移矢量 $d = dxi + dyj + dzk$ 可由式(6)求得并代入。

根据误差大小可以分为4种工况。

1) $\delta < \theta, d < S$

$$\begin{cases} \theta = \frac{1}{2} \omega t_1^2 \\ d = \frac{1}{2} a t_2^2 \end{cases} \quad (7)$$

由于微分旋转矢量以及微分平移矢量都在极限范围内,故此处对调节时间没有要求。

2) $\delta \geq \theta, d < S$

$$\begin{cases} \theta = \frac{1}{2} \omega t_1^2 \\ t_1 > t \end{cases} \quad (8)$$

由于微分旋转矢量超出了极限范围并且微分平移矢量在极限范围内,故此处需要在手爪旋转到极限角度之前完成控制周期,即手爪旋转到极限角度所需时间要大于控制周期。

3) $\delta < \theta, d \geq S$

$$\begin{cases} d = \frac{1}{2} a t_2^2 \\ t_2 > t \end{cases} \quad (9)$$

由于微分平移矢量超出极限范围并且微分旋转矢量在极限范围内,故此处需要在手爪运动到极限距离之前完成控制周期,即手爪运行到极限距离所需时间要大于控制周期。

4) $\delta \geq \theta, d \geq S$ (10)

若 $t_1 < t_2$, 则此工况同工况3)。若 $t_1 > t_2$, 则此工况同工况2)。当微分旋转矢量以及微分平移矢量都超出了极限范围时,此处需要在手爪的角度以及手爪的运行距离都未达到极限时完成控制周期,即手爪运行到极限位置所需最小时间要大于控制周期。

根据上述不同工况,求出角加速度及线加速度,代入式(6)可以求得阻尼力据此调节旋转阻尼器。

4 双搬运机器人运动轨迹仿真分析

在关节空间对机器人进行轨迹规划,令被搬运物保持水平状态,在得到双搬运机器人末端轨迹的基础上按照表1所提供的D-H参数进行逆运动学求解并利用仿真得出了两个搬运机器人关节角与时间变化的曲线,如图3所示。

表1 机器人D-H参数表

i	a_i/mm	$\alpha_i/(\circ)$	d_i/mm	$\theta_i/(\circ)$
1	0	0	0	0
2	0	$-\pi/2$	149.09	90
3	438.10	0	0	0
4	20.32	$-\pi/2$	433.07	0
5	0	$\pi/2$	0	0
6	0	$-\pi/2$	0.258	0

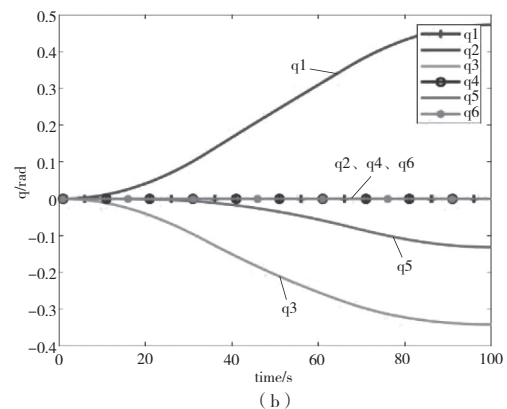
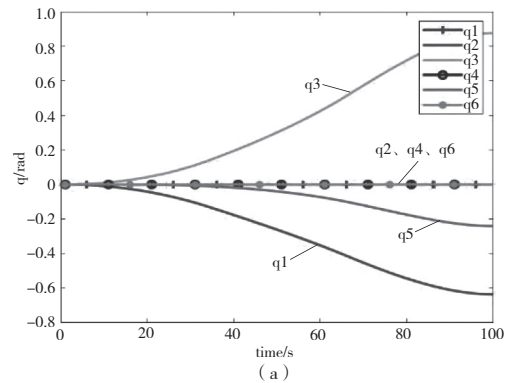


图3 机器人1、2关节角随时间变化曲线

如图3所示双搬运机器人在搬运同一物体时,机器人的关节角度变化平稳,不存在因为误差所导致的角度变化。仿真结果说明了该自调节缓冲装置设计的合理性。

5 结语

本文通过对现有双搬运机器人运动学研究现状进行整理,对其运动学及误差进行了分析,并设计了一种自调节缓冲装置,根据误差进行自调节,其研究结论如下。

1)通过双搬运机器人在同一操作空间中操作同一物体的工况,得到双搬运机器人与被搬运物之间存在的位置和姿态的约束关系,并对机器人

正逆运动学进行了分析。

2) 采用刚体微分运动模型,对双机器人系统的误差进行了建模,最后得到了误差位姿与期望位姿间的关系。

3) 设计了一种自调节缓冲装置,能够根据误差自动调节手爪结构,减小内力,给予机器人控制系统足够的时间进行控制响应调节,达到防止机器人及被搬运物受损的目的。

4) 对运动学进行了仿真分析,得到了关节角随时间的变化曲线,从而验证其装置的合理性。

参考文献:

- [1] 甘亚辉,戴先中. 多机械臂协调控制研究综述[J]. 控制与决策,2013,28(3):321-333.
- [2] 李智,骆峰,胡茵. 基于工业机器人的智能加工生产线设计[J]. 自动化技术与应用,2021,40(8):28-32.
- [3] 刘芳栋,林伟,朱建良,等. 机器人+. 正在席卷全球的机器人革命[M]. 北京:中国铁道出版社,2016.
- [4] 蔡自兴. 中国机器人学 40 年[J]. 科技导报,2015,33(21):23-31.
- [5] 任韶莹. 蚁群算法在多机器人协作中的应用[J]. 沈阳理工大学学报,2011,30(5):45-49.
- [6] 李铁军,刘力源,刘今越,等. 冗余度双臂机器人协作策略下实时避障算法[J]. 机械科学与技术:2023,42(11):1821-1828.
- [7] ZHENG H F, SMEREKA J M, MIKULSKI D, et al. Bayesian optimization based trust model for human multi-robot collaborative motion tasks in offroad environments[J]. International Journal of Social Robotics, 2023, 15(7):1181-1201.
- [8] 李磊,叶涛,谭民,等. 移动机器人技术研究现状与未来[J]. 机器人,2002,24(5):475-480.
- [9] ZHAO M, LU H, CHENG S, et al. A multi-robot cooperative exploration algorithm considering working efficiency and working load[J]. Applied Soft Computing, 2022, 128:109482.
- [10] 梁旭,苏婷婷,侯增广,等. 基于变阻抗控制的冗余驱动并联机器人多目标内力优化[J]. 自动化学报, 2023, 49(5):1099-1115.
- [11] 王亦诗. KUKA 机器人主从协调控制及其在弧焊中的应用[D]. 保定:河北大学,2019.
- [12] UCHIYAMA M, DAUCHEZ P. Symmetric kinematic formulation and non-master/slave coordinated control of two-arm robots[J]. Advanced Robotics, 1992, 7(4):361-383.
- [13] LAURETTI C, CORDELLA F, SALTARELLI I, et al. A semi-autonomous robot control based on bone layer transition detection for a safe pedicle tapping[J]. International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery, 2023, 18(10):1745-1755.
- [14] 颜双权,胥建成. 工业机器人复杂 B 样条曲线轨迹控制精度补偿[J]. 机械制造与自动化, 2023, 52(5):32-35.
- [15] 潘建龙. 多机器人协作系统运动规划及位置力协调控制研究[D]. 南京:东南大学,2018.
- [16] 董理,杨东,鹿建森. 工业机器人轨迹规划方法综述[J]. 控制工程,2022,29(12):2365-2374.
- [17] 张军,白涛,文川,等. 基于 WLAN 的螺旋式管道检测机器人远程测控系统[J]. 仪表技术与传感器, 2020(4):72-76.
- [18] 莫海军,黄平. 基于最大力螺旋多指手抓取规划[J]. 机械工程学报,2009,45(3):258-262.

收稿日期:2023-10-24

(上接第 223 页)

- [16] XIA Z Y, HAN X S, MAO J K. Assessment and validation of very-large-eddy simulation turbulence modeling for strongly swirling turbulent flow[J]. AIAA Journal, 2019, 58(1):148-163.
- [17] HAN X S, KRAJNOVIĆ S. An efficient very large eddy simulation model for simulation of turbulent flow[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2013, 71(11):1341-1360.
- [18] HAN X S, KRAJNOVIĆ S. Very-large-eddy simulation based on $k-\omega$ model[J]. AIAA Journal, 2015, 53(4):1103-1108.
- [19] SCHNEIDER C, DREIZLER A, JANICKA J. Fluid dynamical analysis of atmospheric reacting and isothermal swirling flows[J]. Flow, Turbulence and Combustion, 2005, 74(1):103-127.
- [20] SYRED N, ABDULSADA M, GRIFFITHS A, et al. The effect of hydrogen containing fuel blends upon flashback in swirl burners[J]. Applied Energy, 2012, 89(1):106-110.

收稿日期:2023-10-16