

8-17-2020

Cooperative Controller Design for Redundant Dual Arm Robot

Meiling Wang

1. Department of Automation, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;;2. Institute of Advanced Manufacturing Technology Hefei Institute of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Changzhou 213164, China;

Minzhou Luo

1. Department of Automation, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;;2. Institute of Advanced Manufacturing Technology Hefei Institute of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Changzhou 213164, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Cooperative Controller Design for Redundant Dual Arm Robot

Abstract

Abstract: Cooperative operation for a redundant dual arm robot can be divided into three modes, namely, independent mode, full constrained cooperative working mode and partly constrained cooperative working mode. The dynamic equations of both dual arms and the interactions between dual arms and the operating objects were established and derived based on the three modes, and a unified formulation was obtained. With focus on motion and force of the desired task being operated, a unified controller was designed which could be carried out based on two dynamic model based controllers, namely feedforward controller and computer torque controller. Simulations of dual arms cooperative operation were carried out on a redundant dual arm robot, results of simulations were reported and discussed to validate the theoretical results of the proposed controller. Comparing with feedforward controller, the computer torque controller has better trajectory tracking precision.

Keywords

dual arm robot, redundant degree of freedom, dynamics, cooperative operation, controller design

Recommended Citation

Wang Meiling, Luo Minzhou. Cooperative Controller Design for Redundant Dual Arm Robot[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(8): 1783-1789.

一种冗余自由度双臂机器人协调控制器设计

王美玲^{1,2}, 骆敏舟^{1,2}

(1. 中国科学技术大学自动化系, 合肥 230026; 2. 中国科学院合肥物质科学研究院先进制造技术研究所, 常州 213164)

摘要: 将冗余自由度双臂协作机器人协调操作分为三种工作模式: 双臂独立操作模式、双臂全约束协调操作模式和双臂部分约束协调操作模式。针对以上三种工作模式, 分别建立推导双臂及与被操作物体之间相互作用的动力学模型。以被操作任务的运动和力为控制目标, 对以上三种模式设计了统一的双臂协调控制器, 该控制器可以通过两种基于动力学模型的前馈控制器和计算力矩控制器实施。通过冗余自由度双臂机器人双臂协调操作仿真验证了该控制器的有效性, 且仿真结果显示相比于前馈控制器, 计算力矩控制器具有较好的轨迹跟踪精度。

关键词: 双臂机器人; 冗余自由度; 动力学; 协调操作; 控制器设计

中图分类号: TP242

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2016) 08-1783-07

Cooperative Controller Design for Redundant Dual Arm Robot

Wang Meiling^{1,2}, Luo Minzhou^{1,2}

(1. Department of Automation, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

2. Institute of Advanced Manufacturing Technology Hefei Institute of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Changzhou 213164, China)

Abstract: Cooperative operation for a redundant dual arm robot can be divided into three modes, namely, independent mode, full constrained cooperative working mode and partly constrained cooperative working mode. The dynamic equations of both dual arms and the interactions between dual arms and the operating objects were established and derived based on the three modes, and a unified formulation was obtained. With focus on motion and force of the desired task being operated, a unified controller was designed which could be carried out based on two dynamic model based controllers, namely feedforward controller and computer torque controller. Simulations of dual arms cooperative operation were carried out on a redundant dual arm robot, results of simulations were reported and discussed to validate the theoretical results of the proposed controller. Comparing with feedforward controller, the computer torque controller has better trajectory tracking precision.

Keywords: dual arm robot; redundant degree of freedom; dynamics; cooperative operation; controller design

引言

随着操作环境和任务要求的复杂化与精细

化, 对于许多操作任务而言, 如复杂的精密装配作业、搬运较重的物体、配合安装零部件等, 单臂工业机器人在信息获取、协调操作等方面尤显不足, 甚至无法完成任务, 这样往往需要双臂工业机器人相互协调配合去完成。具有冗余自由度的双臂工业机器人就是适应这一要求而开发出一款新型工业机器人。双臂之间的协调控制也越来越受到关注。不同于对单臂机器人的控制, 双



收稿日期: 2015-02-05 修回日期: 2015-05-30;

基金项目: 江苏省科技支撑计划(BE2013003);

作者简介: 王美玲(1986-), 女, 安徽, 博士生, 研究方向为机器人; 骆敏舟(1973-), 男, 安徽, 博导, 研究员, 研究方向为机器人。

<http://www.china-simulation.com>

• 1783 •

臂机器人由同一控制器控制,在双臂协调操作过程中,双臂之间以及双臂与被操作物体之间均存在一定的运动和力约束关系,运动和力约束的维数耦合程度高,且存在内力耦合现象。为此,对双臂协调操控制方法进行研究极其重要。

早期对双臂协调操控制方法的研究对象主要是两个工业操作臂或两个工业机器人间的协调与控制。双臂间的协调控制主要采用主从控制方法。在主从控制方法中,定义一个操作臂为主臂,另一个操作臂为从臂,主臂采用位置控制,通过运动约束关系导出从臂的位姿信息或从臂通过力传感器来感应主臂的运动规律,这就要求从臂具有快速的响应速度,实验证明,主从控制方式存在力延迟现象^[1]。丁希伦^[2]提出了一种基于递推算法的主从式双臂力/位混合控制方法。通过对主臂的位姿进行预估计一个值和从臂进行力反馈修正来补偿从臂的滞后性。Zhang^[3]等对冗余双臂工业机器人进行螺栓螺母装配进行了动态仿真,推导了双臂间的运动约束关系。主从控制方法是基于运动学模型的控制方法,没有考虑机器人质量、惯性参量等对机器人运动的影响,此外,对于双臂协调操作需要双臂同时出力,比如,双臂共同拿起同一物体进行打磨操作,双臂除了需要平衡物体重力、摩擦力之外,还需要承担打磨的阻力,所以主臂仅有位置控制难以完成操作任务。

为了改善主从控制方法的不足,同时考虑位置和力控制的双重特性,研究者提出了位置与力的混合控制方法。其控制思想为,双臂均采用位置/力控制,该控制方法将任务空间分为位置控制子空间和力控制子空间,两个子空间独立控制。Kruse^[4]采用混合位置/力控制方法对冗余双臂工业机器人 Motoman SDA10 协调抓取物体进行了研究。华磊^[5]针对双臂冗余机器人提出了一种位置/力紧协调控制方法,对双臂机器人轨迹跟踪控制进行了研究。混合位置/力控制方法可以较好的对协调操作任务的位置和力同时进行控制,但位置和力控制不能同时作用在同一个方向,转换到关节空

间中控制,位置控制法则和力控制法则需要进行叠加以达到混合位置/力控制,并且根据不同的任务要求,需要在位置控制和力控制之间进行切换,这就导致计算量很大且较难对位置空间和零空间进行严格正交划分。

结合环境约束对双臂机器人协调操作带来的影响,阻抗控制方法被应用到双臂机器人协调控制中。Luo^[6]采用笛卡尔空间阻抗方法对双臂机器人实时追踪、模拟人手臂运动进行了研究。Heck^[7]采用内外力的阻抗控制方法对两个操作臂抓取圆形物体进行了研究。Lee^[8]针对双臂机器人执行不对称双手协调操作任务,提出了相对阻抗控制方法。阻抗控制方法是通过调解阻抗参数以维持机器人末端的位置与环境接触力的理想动态关系。其末端接触力的大小取决于末端的参考轨迹,环境刚度等参数,而这些参数随着环境改变而改变且较难获得。

在双臂协调完成任务过程中,除了需要对位置进行控制,力控制同样是协调任务不可缺少的,特别是搬运重物,打磨操作等需要抵抗外力的情况下,则需要对双臂间的内力进行动态控制。以位置、力为控制目标,综合考虑机器人动力学和被操作物体动力学、以及双臂间的内力动态分配问题,论文设计了一种基于动力学模型的双臂协调控制器。

1 双臂协调动力学模型

动力学模型是机器人力控制的基础。在实际任务操作中,双臂之间的协调操作可分为 3 种工作模式:双臂独立操作模式、双臂全约束协调操作模式和双臂部分约束协调操作模式。分别在各种操作模式下建立双臂的动力学模型以及被操作物体的动力学模型。

1.1 双臂独立操作模式

双臂独立操作模式的示意图如图 1 所示。双臂独立操作模式定义为双臂在同一操作空间中,各自完成不同的操作任务,不考虑双臂之间的运动和力约束,仅考虑双臂之间的避障。

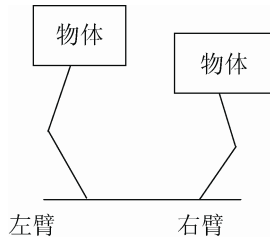


图 1 双臂独立操作模式

双臂独立操作模式下, 主要考虑各个机械臂单独操作物体时, 机械臂与被操作物体的动力学建模方法。为了表达方便, 定义 $i(L, R)$ 为双臂机器人的左右臂, 则对于 i 机械臂, 其动力学方程可以表示为

$$\tau_i = M_i \ddot{q}_i + C_i(q_i, \dot{q}_i) - J_{wi}^T F_i \quad (1)$$

式中: τ_i 为机械臂关节电机的驱动力矩向量; M_i 为机械臂的惯性矩阵; $C_i(q_i, \dot{q}_i)$ 为科氏力, 离心力和重力的和矩阵; F_i 为物体作用在机械臂末端上的广义力向量; J_{wi} 为机械臂在世界坐标系下的雅克比矩阵; $q_i, \dot{q}_i, \ddot{q}_i$ 分别为机械臂关节位置、速度及加速度向量。

被操作物体的动力学方程可定义为

$$M_o \ddot{X}_o + C_o \dot{X}_o = -J_{oi}^T F_i + \tau_e \quad (2)$$

式中: $M_o = \begin{bmatrix} m_o & 0_3 \\ 0_3 & I_3 \end{bmatrix}$, $\dot{X}_o = \begin{bmatrix} \dot{x}_o \\ \omega_o \end{bmatrix}$, $C_o = \begin{bmatrix} -G_o \\ \omega_o \times (I_3 \omega_o) \end{bmatrix}$, $J_{oi}^T = \begin{bmatrix} I_3 & 0_3 \\ r_i \times & I_3 \end{bmatrix}$; m_o 为物体质量; x_o 为物体质心位置向量; ω_o 为物体质心角速度向量; G_o 为物体重力向量; τ_e 为环境作用在物体上的广义力向量; r_i 为物体质心与机械臂末端操作器的距离; \times 代表叉乘。

式(1)~(2)为单机械臂独立操作物体时的动力学方程, 由于存在未知参数 F_i , 实际并不常用该方程组作为控制法则, 通常希望通过联合式(1~2), 消除未知量, 为此, 从式(2)中求出 F_i 并带入式(1), 可得动力学联合方程为

$$\tau_i = M_i \ddot{q}_i + C_i(q_i, \dot{q}_i) + J_{wi}^T (J_{oi}^T)^{-1} (M_o \ddot{X}_o + C_o \dot{X}_o - \tau_e) \quad (3)$$

1.2 双臂全约束协调操作模式

如图 2 所示, 是双臂全约束协调操作模式的示意图。双臂全约束协调操作模式定义为双臂共同完成同一操作任务, 双臂与物体之间形成闭链的运动和力约束关系。例如, 机器人双臂同时拿起同一物体, 双臂末端操作器之间不存在相对运动, 双臂与物体之间形成闭链结构。双臂的运动相互影响, 需要考虑双臂对物体施加力的协调, 即双臂作用在物体上内力的分配。

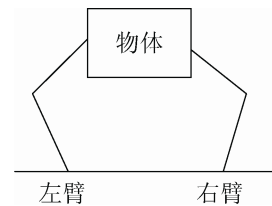


图 2 双臂全约束协调操作模式

对于 i 机械臂, 其动力学方程可以表示为

$$\tau_i = M_i \ddot{q}_i + C_i(q_i, \dot{q}_i) - J_{wi}^T F_i \quad (4)$$

被操作物体的动力学则可写为

$$M_o \ddot{X}_o + C_o \dot{X}_o = -\sum J_{oi}^T F_i + \tau_e \quad (5)$$

从式(5)中求出 F_i 并带入到式(4)中, 可得双臂全约束协调操作模式下双臂的动力学模型为

$$\tau_L = M_L \ddot{q}_L + C_L(q_L, \dot{q}_L) + J_{wL}^T (J_{oL}^T)^{-1} (M_o \ddot{X}_o + C_o \dot{X}_o + J_{oR}^T F_R - \tau_e) \quad (6)$$

$$\tau_R = M_R \ddot{q}_R + C_R(q_R, \dot{q}_R) + J_{wR}^T (J_{oR}^T)^{-1} (M_o \ddot{X}_o + C_o \dot{X}_o + J_{oL}^T F_L - \tau_e) \quad (7)$$

从式(6)~(7)可知, 作用在双臂的驱动力矩影响整个链的运动, 因此各个机械臂的驱动力矩不能单独计算, 双臂驱动力矩存在约束关系, 其中主要的约束关系为双臂作用在物体上内力的分配。根据被操作物体所受净内力确定双臂与操作物体末端接触点的受力问题被称为内力分配, 可采用能量最小法^[9]分配双臂作用在物体上内力的大小。

1.3 双臂部分约束协调操作模式

如图 3 所示, 是双臂部分约束协调操作模式的

示意图。双臂部分约束协调操作模式定义为双臂完成同一操作任务，双臂之间形成不封闭的运动和力约束。例如，双臂完成焊接、插装作业等。

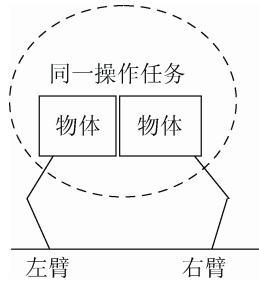


图 3 双臂部分约束协调操作模式

该模式分 2 种情况进行讨论：(1)双臂末端操作器不接触，仅存在运动约束，例如一个手臂拿起水杯，另一手臂拿起水瓶完成倒水任务等；(2)双臂末端操作器相互接触，双臂末端操作器之间存在相对运动，例如双臂完成轴孔装配任务等。

定义作用在双臂末端操作器接触力为 f_i ，则双臂动力学方程可写为

$$\tau_i = M_i \ddot{q}_i + C_i(q_i, \dot{q}_i) + J_{wi}^T (J_{oi}^T)^{-1} (M_o \ddot{X}_o + C_o \dot{X}_o - \tau_e) + J_{wi}^T f_i \quad (8)$$

当双臂末端操作器不接触时，式(8)中 $f_i = 0$ ；当双臂末端操作器相互接触， f_i 随着双臂末端操作器的相对运动的变化而变化。

1.4 动力学模型统一表达式

综合考虑以上 3 种工作模式，可对双臂协调动力学写成统一形式的表达式

$$\tau = \tau_A + \tau_E \quad (9)$$

式中： $\tau_A = M_i \ddot{q}_i + C_i(q_i, \dot{q}_i)$ 为机械臂动力学方程的线性求解部分。 τ_E 为环境作用在机械臂末端操作器上的广义力，其值随着不同的操作模式而不同。

为了计算机械臂关节驱动力，需要给定关节位置、速度及加速度参数。假定双臂末端操作器与物体之间不存在相对运动，则可得

$$\dot{X}_i = J_{oi} \dot{X}_o \quad (10)$$

$$\ddot{X}_i = J_{oi} \ddot{X}_o + \dot{J}_{oi} \dot{X}_o \quad (11)$$

式中， X_i 为机械臂末端操作器的位姿向量。

机械臂关节空间与操作空间的微分方程可写成如下表达式

$$\dot{X}_i = J_i \dot{q}_i \quad (12)$$

$$\ddot{X}_i = J_i \ddot{q}_i + \dot{J}_i \dot{q}_i \quad (13)$$

由式(10)~(13)，可得

$$J_i \dot{q}_i = J_{oi} \dot{X}_o \quad (14)$$

$$J_i \ddot{q}_i + \dot{J}_i \dot{q}_i = J_{oi} \ddot{X}_o + \dot{J}_{oi} \dot{X}_o \quad (15)$$

由此可得，当给定被操作物体速度、加速度情况下，机械臂关节速度、关节加速度根据式(14)~(15)可求得。

式(9)可实现对双臂的目标力 τ_e 、 f_i 、目标轨迹 \dot{X}_o 、 \ddot{X}_o 进行同步控制。

对于具体的双臂机器人及被操作物体，当给定物体目标轨迹和力，即可根据不同模式下 τ_E 的表达式，计算 τ_E 。此外， τ_A 可采用迭代牛顿-欧拉算法计算，为此，以上 3 种工作模式下的动力学均可求解。

2 双臂协调统一控制器设计

式(9)给出了一种理想状态下的控制器模型，即需精确获取机器人各连杆、质量、转动惯量等参数。在实际机器人控制中，由于存在关节摩擦、难以精确获取机器人动力学参数等，故采用反馈量对式(9)进行反馈设计。以下基于动力学模型的两种控制器：基于前馈控制和基于计算力矩控制对理想控制器进行修正。

2.1 前馈控制器设计

为了补偿由于动力学模型参数的不确定性、以及外界环境的干扰所引起的轨迹偏差，对理想控制器增加 PD 反馈，如图 4 所示，给出了机械臂前馈控制器模型原理图。该控制器主要分为前反馈和后反馈两部分。前者用于补偿各关节之间的相互作用力矩，后者用来平衡动力学模型中的非线性项。

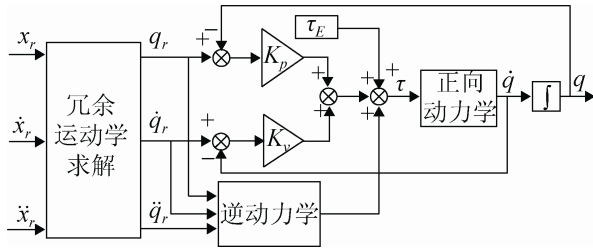


图 4 前馈控制器系统原理图

在关节空间中, 前馈控制器的控制法则可描述为

$$\tau = M_i \ddot{q}_{ri} + C_i(q_{ri}, \dot{q}_{ri}) + \tau_E + K_v(\dot{q}_{ri} - \dot{q}_i) + K_p(q_{ri} - q_i) \quad (16)$$

式中: $q_r, \dot{q}_r, \ddot{q}_r$ 为机器人目标关节位移、速度和加速度向量; K_p 为机器人位置增益矩阵; K_v 为机器人速度增益矩阵。

由理想控制器方程与补偿控制法则方程, 可以推导出动态误差方程为

$$M_i \ddot{e} + K_p e + K_v \dot{e} = 0 \quad (17)$$

式中: $e = q_{ri} - q_i$, 当 $e = 0$, 该控制器具有全局渐进稳定性。

在操作空间中对双臂机器人进行控制, 则需要进行冗余求解, 将操作空间的控制变量转换为关节空间变量。该控制器可以采用基于速度级的冗余求解进行控制, 即给定操作空间速度变量为

$$\dot{X}_{ri} = \dot{X}_i^d + K_p(X_i^d - X_i) \quad (18)$$

式中, \dot{X}_i^d 可根据式(10)从目标物体运动轨迹 \dot{X}_0^d 求出。

通过采用零空间法对微分运动学进行求解, 可得关节速度向量为

$$\dot{q}_{ri} = J_i^+ \dot{X}_{ri} + (I - J_i^+ J_i) \eta_1 \quad (19)$$

式中: I 为单位向量; 雅克比矩阵 J_i 的伪逆为 $J_i^+ = J_i^T (J_i J_i^T)^{-1}$; η_1 是任意向量, 可根据不同的优化目标选取, 如避关节极限、避障等。

2.2 计算力矩控制器

将 PD 反馈量作为反馈量加入到动力学模型中, 给出计算力矩控制器, 其原理图如图 5 所示。

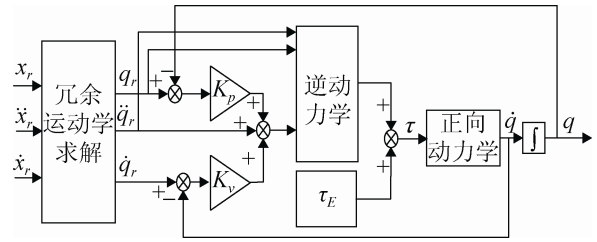


图 5 计算力矩控制器系统原理图

在关节空间中对计算力矩控制器的控制法则可描述为

$$\tau = M_i \ddot{q}_{ri} + C_i(q_{ri}, \dot{q}_{ri}) + \tau_E \quad (20)$$

由理想控制器方程与补偿控制法则方程, 可以推导出动态误差方程为

$$\ddot{e} + K_v \dot{e} + K_p e = 0 \quad (21)$$

则可推导出 $e = 0, \dot{e} = 0$ 是该控制器全局渐进稳定平衡点。

在操作空间中对双臂机器人进行控制, 该控制器可以采用基于加速度级的冗余求解进行控制, 即给定操作空间加速度变量为

$$\ddot{X}_{ri} = \ddot{X}_i^d + K_v(\dot{X}_i^d - \dot{X}_i) + K_p(X_i^d - X_i) \quad (22)$$

其中: \ddot{X}_i^d 可根据式(11)从目标物体运动轨迹 \ddot{X}_0^d 求出。

通过采用零空间法对微分运动学进行求解, 可得关节加速度向量为

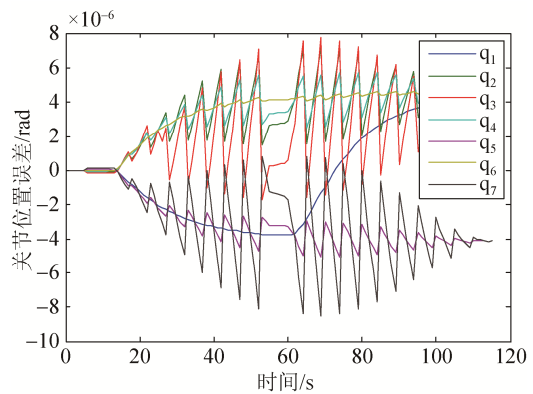
$$\ddot{q}_{ri} = J_i^+ \ddot{X}_{ri} + (I - J_i^+ J_i) \eta_2 \quad (23)$$

其中: η_2 是任意向量, 可根据不同的优化目标选取, 如避关节极限、避障等。

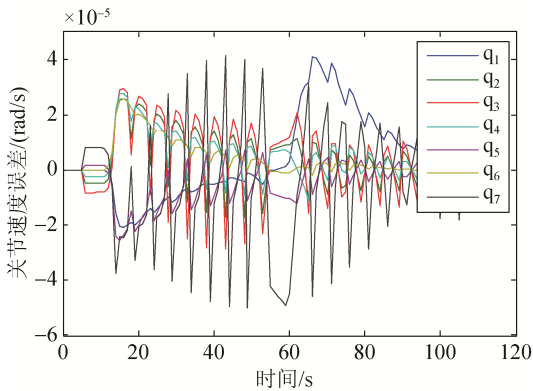
3 仿真

仿真的双臂机器人包含 2 个 7 自由度的冗余机械臂。以双臂共同拿起同一物体从空间一点运动到另外一点为任务目标。定义左右臂起始点关节位置向量分别为, $q_{L0} = [0.0766 \ -1.2625 \ -1.8449 \ -1.4785 \ -0.3183 \ 1.4914 \ 1.8605]^T$, $q_{Lf} = [0.0766 \ -1.9850 \ -3.0590 \ -1.8725 \ -0.0435 \ 1.4539 \ 3.0710]^T$, $q_{R0} = [0.0766 \ -1.6910 \ 0.6312 \ 1.2115 \ 1.2431 \ 1.0273 \ -0.9744]^T$, $q_{Rf} = [0.0766 \ -1.7727 \ -0.3572 \ 1.2115 \ 1.6326 \ 1.9457 \ -1.0115]^T$ 分别采用前馈

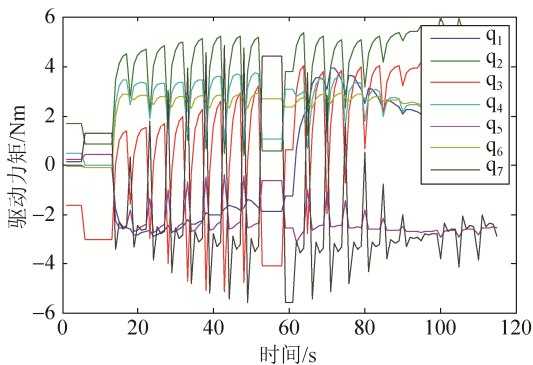
控制器和计算力矩控制器进行仿真实验。在前馈控制器中增益系数设为 $K_p = 500I$, $K_v = 80I$, 给定物体目标运动速度向量 $\dot{X}_0 = [0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1]^T$ 。如图 6 所示, 给出了左、右臂运动位置跟踪误差、速度跟踪误差及关节驱动力矩。在计算力矩控制器中增益系数设为 $K_p = 10I$, $K_v = 2I$, 给定物体目标运动加速度向量 $\ddot{X}_0 = [0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ 。如图 7 所示, 给出了左、右臂运动位置跟踪误差、速度跟踪误差及关节驱动力矩。



(a) 关节位置误差

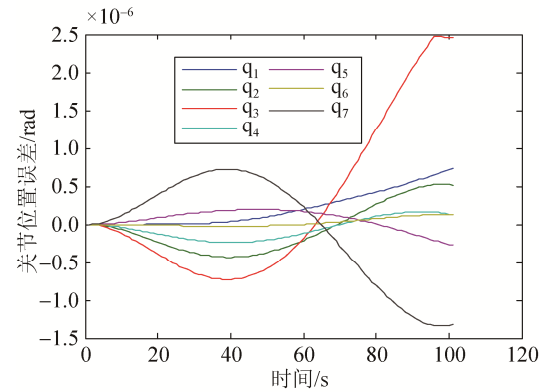


(b) 关节速度误差

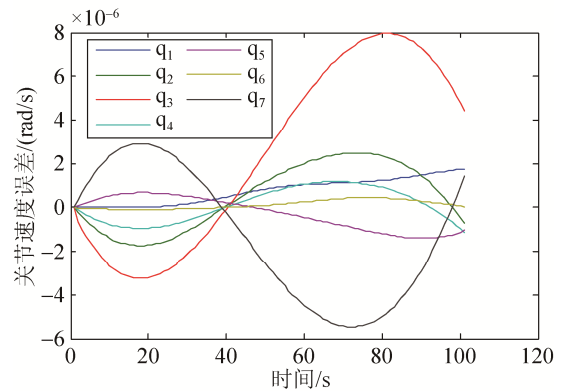


(c) 关节驱动力矩

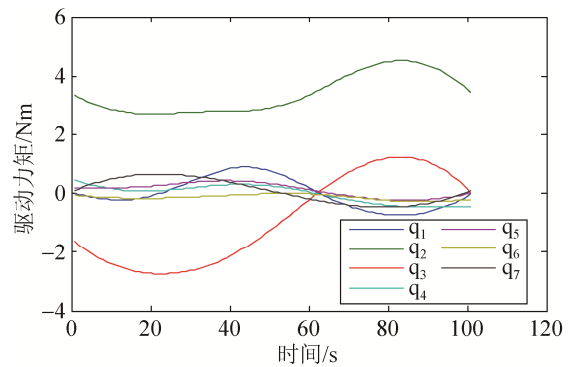
图 6 前馈控制器仿真结果



(a) 关节位置误差



(b) 关节速度误差



(c) 关节驱动力矩

图 7 计算力矩控制器仿真结果

由图 6(a)~(b)可知, 关节位置误差、关节速度误差沿轴线对称分布(关节 1 除外), 由图 6(c)可知关节 2-3 和关节 7 提供较大的驱动力矩。由图 7(a)~(b)可知, 关节 3 和关节 7 的位置误差、速度误差较大, 由图 7(c)可知, 关节 2 和关节 3 提供较大的驱动力矩。

由图 6、图 7 对比分析可知, 相比前馈控制器, 计算力矩控制器具有良好的控制精度, 在较小的增

益参数下可获得较高的位置跟踪精度和速度跟踪精度。

通过反馈修正的协调控制器可以满足对双臂位置和力进行同步控制。该控制器可以弥补主从控制中从臂获取信息的滞后性以及增加了对主臂力的控制,且综合考虑了机器人实际动力学参数的影响。其次,与混合位置/力控制不同之处,是避免了混合位置/力控制中对位置空间和力空间的划分及实时转换,可以在同一方向上对位置和力进行控制,降低了程序计算量。再者,在不影响机械臂与环境作用力控制前提下,避免了阻抗控制中随环境改变需要实时获取环境参数。

4 结论

针对具有协调操作的冗余自由度双臂机器人,对其协调工作模式划分了 3 种情况:独立操作模式、全约束协调操作模式和部分约束协调操作模式。针对 3 种不同的操作模式,分别推导了双臂和操作物体的动力学方程,并提出了统一的力学模型。设计了统一的双臂协调控制器,该控制器可基于两种动力学模型的控制实现,通过仿真结果,在较小的增益参数下,相比前馈控制器,计算力矩控制器具有良好的控制精度,可获得较高的位置跟踪精度和速度跟踪精度。

参考文献:

[1] Kopf C D, Yabuta T. Experimental comparison of master/slave and hybrid two arm position/force control

- [C]// Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. USA: IEEE, 1988: 1633-1637.
- [2] 丁希仑. 拟人双臂机器人技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [3] Zhang F H, Hua L, Fu Y L, et al. Dynamic Simulation and Analysis for Bolt and Nut Mating of Dual Arm Robot [C]// Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Guangzhou, China, USA: IEEE, 2012: 660-665.
- [4] Kruse D, Wen J T, Radke R J. A Sensor-Based Dual-Arm Tele-Robotic System [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering (S1545-5955), 2015, 12(1): 4-18.
- [5] 华磊. 冗余双臂机器人协调操作方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [6] Luo R C, Shih B H, Lin T W. Real time human motion imitation of anthropomorphic dual arm robot based on Cartesian impedance control [C]// Proceedings of IEEE International Symposium on Robotic and Sensors Environments. USA: IEEE, 2013: 25-30.
- [7] Dennis Heck, Dragan Kostić, Alper Denasi, et al. Internal and External Force-Based Impedance Control for Cooperative Manipulation [C]// Proceedings of European Control Conference, Zürich, Deutschland. USA: IEEE, 2013: 2299-2304.
- [8] Jinh Lee, Pyung Hun Chang, Rodrigo S Jamisola Jr. Relative Impedance Control for Dual-Arm Robots Performing Asymmetric Bimanual Tasks [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics (S0278-0046), 2014, 61(7): 3786-3796.
- [9] J M Tao, J Y S. Luh. Coordination of two redundant robots [C]// Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. USA: IEEE, 1989: 425-430.