

6-1-2020

Research for Co-simulation of 7DOF Manipulator Based on Adams and Matlab

Chen Gang

1. School of Mechanical Engineering Tongji University, Shanghai 201804, China; ;2. Zhejiang Textile & Fashion College, Ningbo 315211, China; ;

Qicai Zhou

1. School of Mechanical Engineering Tongji University, Shanghai 201804, China; ;

Wu Jing

2. Zhejiang Textile & Fashion College, Ningbo 315211, China; ;

Yan Nan

3. College of Mechanical & Electrical, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, 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.

Research for Co-simulation of 7DOF Manipulator Based on Adams and Matlab

Abstract

Abstract: In order to study the redundant robot joint coupling effect on the control of the robot, the model of 7DOF manipulator was built based on SolidWorks, *then co-simulation of ADAMS and MATLAB was researched; PD servo control scheme of single joint was designed based on the distributed control, the dynamic response curve of each joint of the manipulator was obtained in the process of synchronous movement, and the simulation of the end actual actuator was researched with the interference of the external environment.* The results show that each joint and end effector response is well, the rationality of the controller and the parameter design is verified, which further proves that this method is feasible, effective and practical, which provides theoretical and experimental basis for the research of control of redundant manipulator.

Keywords

redundant manipulator, ADAMS, MATLAB, co-simulation, coupling

Recommended Citation

Chen Gang, Zhou Qicai, Wu Jing, Yan Nan. Research for Co-simulation of 7DOF Manipulator Based on Adams and Matlab[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(1): 99-106.

七自由度机械臂的 ADAMS/MATLAB 联合仿真研究

陈罡^{1,2}, 周奇才¹, 吴菁², 严楠³

(1. 同济大学机械与能源工程学院, 上海 201804; 2. 浙江纺织服装职业技术学院, 宁波 315211; 3. 西安工程大学机电学院, 西安 710048)

摘要: 为了研究冗余机械臂多关节耦合作用对机械臂控制的影响, 采用 SolidWorks 建立了 7 自由度机械臂三维模型, 基于 ADAMS 与 MATLAB 对其进行联合仿真。采用分布式控制设计思想, 设计了单关节的 Proportional-Differential 伺服控制方案, 得到了 7 自由度机械臂各关节同步协调运动下的动态响应曲线, 对实际工作中的外部环境干扰下的末端执行器进行仿真验证。结果表明各关节及末端执行器动态响应良好, 验证了控制器及参数设计的合理性, 进一步证明该方法可行、有效、实用, 为冗余机械臂的后续控制研究提供了理论依据和试验基础。

关键词: 冗余机械臂; ADAMS; MATLAB; 联合仿真; 耦合

中图分类号: TP241

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2017) 01-0099-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201701014

Research for Co-simulation of 7DOF Manipulator Based on Adams and Matlab

Chen Gang^{1,2}, Zhou Qicai¹, Wu Jing², Yan Nan³

(1. School of Mechanical Engineering Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Zhejiang Textile & Fashion College, Ningbo 315211, China;

3. College of Mechanical & Electrical, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to study the redundant robot joint coupling effect on the control of the robot, the model of 7DOF manipulator was built based on SolidWorks, then co-simulation of ADAMS and MATLAB was researched; PD servo control scheme of single joint was designed based on the distributed control, the dynamic response curve of each joint of the manipulator was obtained in the process of synchronous movement, and the simulation of the end actual actuator was researched with the interference of the external environment. The results show that each joint and end effector response is well, the rationality of the controller and the parameter design is verified, which further proves that this method is feasible, effective and practical, which provides theoretical and experimental basis for the research of control of redundant manipulator.

Keywords: redundant manipulator; ADAMS; MATLAB; co-simulation; coupling

引言

目前工业领域中使用最多的是串联式关节型非冗余单臂机器人, 但随着工作环境和任务的复杂

化, 此类机器人难以胜任某些特殊场合的工作^[1]; 而具有冗余自由度的机器人相比六自由度机器人有了更多的姿态, 具有更好的工作空间和避障能力, 因而具有更好的灵活性、可靠性和适应性, 但也会带来驱动和控制方面的困难及精度的降低^[2]。如何实现高速运动并具有较高的跟踪精度, 一直是机器人研究和开发的一个热点问题^[3-4]。目前, 大多数研究是针对非冗余机器人的单轴或多轴协调



收稿日期: 2015-04-15

修回日期: 2015-08-12;

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2014BAF10B01), 宁波市科技创新团队(2015B11009), 产业技术创新重大专项(2016B10012、2015B11055);

作者简介: 陈罡(1974-), 男, 浙江永康, 博士生, 教授, 研究方向为机电智能控制、机器人技术。

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

运动为控制目的的系统,而对于冗余机器人的控制研究则相对较少^[5-6]。

机电控制系统联合仿真是目前机电一体化研究中的热门领域之一^[7-8]。以往多采取理论计算来研究机械臂复杂控制模型的运动学和动力学问题,其计算量非常大,而通过采用简化近似处理的方法得到的仿真结果不甚理想^[9-10]。通过联合仿真可以大大提高设计效率,缩短研发周期,同时也降低产品的研发成本,弥补了传统设计方法的不足,尤其对于复杂的机电控制系统而言,联合仿真的优势更加显著。

本文针对一款 7DOF 机械臂采用 ADAMS 与 MATLAB 联合仿真的方法对其控制进行了研究,提出了分布式的单关节 PD 控制方法,旨在研究冗余机械臂控制系统中由于冗余特性所带来的非线性程度高、耦合性干扰等运动控制输出问题。首先根据机械臂动力学模型构建了机械臂的控制率,通过联合仿真得到 7DOF 机械臂各关节同步协调运动下的跟踪相应及位移输出曲线,对处于干扰信号下的末端执行器的跟踪响应进行了研究,分析了 7 关节同步仿真惯性参数对其动力学特性的影响以及各关节之间的耦合特点,验证了控制器的合理性,为后续机械臂的实际控制提供了重要参考。该方法的具有设计效率高、成本低、有效、实用等优点,为像冗余机械臂这样的复杂控制系统的研究提供了理论依据和一种现代化方法。

1 7DOF 机械臂虚拟样机模型及参数设定

1.1 虚拟样机模型

本文基于工业生产需要所研究的 7 DOF 机械臂是由一系列连杆串联而成的“7-R”型冗余机构,具有更高的灵活性及更大的工作空间,克服了非冗余机械臂所具有的空间奇异性、关节极限角限制、避障能力差等缺陷,能够更好满足实际工业生产的需要^[11]。

虚拟样机模型的创建是后续联合仿真的基础。

本文首先根据 7DOF 机械臂结构利用 SolidWorks 造型,以 parasolid 格式导入 ADAMS 环境下进行设置,重建其相关约束,所得仿真模型如图 1 所示。

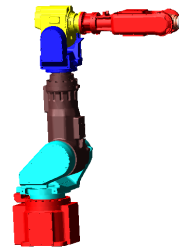


图 1 7 DOF 机械臂虚拟样机模型

Fig.1 7 DOF Manipulator Virtual Prototyping Model

1.2 虚拟样机惯性参数描述

本文提出的 7 DOF 机械臂的数学模型具有多输入、多输出、强耦合和非线性的复杂动力学系统,其机械臂惯性参数直接影响其动态响应、运动输出等重要特性,是机械臂动态设计、机械臂控制的重要基础,因而成为机械臂运动控制中不可忽视的研究内容。

本文根据 7DOF 机械臂的工作要求及自身结构特点,选择铝合金作为主体材料,根据所建模型,可知其泊松比为 0.33,杨氏模量为 $7.170 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$,得到各连杆惯性参数如表 1 所示。

表 1 7DOF 机械臂虚拟样机惯性参数描述

Tab.1 Inertial Parameter Description of 7DOF Manipulator

编号	质量 kg	Virtual Prototype		
		Ixx 转动惯量/kg·m ²	Iyy 转动惯量/kg·m ²	Izz 转动惯量/kg·m ²
连杆 1	26.324 4	0.756 0	0.697 0	0.624 3
连杆 2	33.556 2	0.729 8	0.549 3	0.397 3
连杆 3	27.563 0	1.723 5	1.701 0	0.302 1
连杆 4	16.960 4	0.342 1	0.292 3	0.182 5
连杆 5	13.712 5	0.192 8	0.151 3	0.133 4
连杆 6	17.505 1	0.780 7	0.750 6	0.117 8
连杆 7	2.997 1	0.008 3	0.007 7	0.005 2
执行器	0.353 3	0.000 5	0.000 3	0.000 3

2 机器人动力学模型

机械臂的控制要求为实现其良好的实时性、快

速性和精确性, 在冗余自由度机械臂控制系统中, 一个非常重要的工作是正确地确定被控系统的数学模型, 然后根据此模型, 构造控制律和设计控制器。根据拉格朗日法得到的 n 自由度机械臂的函数方程可表示为:

$$\begin{aligned} \tau_i = & \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \sum_{i=p}^n \sum_{k=1}^i \text{Trace} \left(\frac{\partial T_j}{\partial q_k} I_j \frac{\partial T_j^T}{\partial q_p} \right) \ddot{q}_k + \\ & I_{ap} \ddot{q}_p + \sum_{i=p}^n \sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^i \text{Trace} \left(\frac{\partial^2 T_i}{\partial q_j \partial q_k} I_i \frac{\partial T_i^T}{\partial q_p} \right) \dot{q}_j \dot{q}_k - \\ & \sum_{i=p}^n m_i g^T \frac{\partial T}{\partial q_p} i_{r_i} \end{aligned} \quad (1)$$

其中: I_i 为伪惯量矩阵; I_{ap} 为传动装置的等效惯量; T_i 为变换矩阵; m_i 为连杆 i 的质量; i_{r_i} 为连杆 i 相对于其前端关节坐标系的重心坐标; $q, \dot{q}, \ddot{q}$ 分别表示关节位置、速度和加速度。 $n=1, 2, \dots; p=1, 2, \dots, n$ 。

上述方程通过交换哑元进一步整理得到 n 自由度机械臂的动力学模型为:

$$\tau_i = \sum_{j=1}^n D_{ij} \ddot{q}_j + I_{ap} \ddot{q}_i + \sum_{j=1}^7 \sum_{k=1}^7 D_{ijk} \dot{q}_j \dot{q}_k + D_i \quad (2)$$

式中: D_{ij} 为关节空间中的惯性矩阵, 它为正定矩阵; D_{ijk} 为科氏惯性和离心惯性的系数矩阵, D_i 为重力项, τ_i 为关节驱动力矩。

根据式(2)可知, 选定关节力矩作为输入可以影响关节加速度。动力学方程的各个系数矩阵 D_{ij}, D_{ijk}, D_i 是和 $q(t)$ 和 $\dot{q}(t)$ 的高度耦合的非线性函数, 因此工业机械臂的各个关节运动之间的存在强耦合作用。当机械臂在高速运动时, 动力学系数矩阵科氏惯性和离心惯性力作用尤为明显。机械臂控制的主要问题就是有效的控制各个关节驱动力 τ_i , 使各个关节的角度 $q_i(t)$ 快速的逼近参考轨迹的关节角 $q_{ir}(t)$, 因此多自由度机械臂可以看作由多个子系统组成, 而每个子系统通过关节的耦合力作用与其它子系统连接。机械臂的耦合作用力由惯性力和科氏力、离心力、摩擦力和重力等组成。

3 控制方案设计

3.1 冗余机械臂动力学控制的控制率

冗余机械臂比非冗余机械臂有更多操作空间维数的自由度, 即关节空间坐标数 m 超过操作空间坐标数 n 。其微分运动关系如式(3)

$$\dot{x} = J(q) \dot{q} \quad (3)$$

式中: $\dot{q}$ 表示关节速度; $\dot{x}$ 表示对操作空间速度; J 是 $m \times n$ 阶矩阵。

文献[12]引入机械臂的臂平面和避障面来参数化表达冗余机械臂的零空间运动, 实现了冗余机械臂的避障控制, 机械臂在这个位形有关的子空间中可以自由运动。

对式(3)求导得到加速度的微分关系:

$$\ddot{x} = J \ddot{q} + \dot{J} \dot{q} \quad (4)$$

定义伪逆 J^+ 满足

$$\begin{cases} J J^+ J = J \\ J^+ J J^+ = J^+ \\ (J^+ J)^T = J^+ J \\ (J^+ J)^T = J J^+ \end{cases} \quad (5)$$

根据伪逆 J^+ 得到的逆关系为:

$$\ddot{q} = J^+ (\ddot{x} - \dot{J} \dot{q}) + \ddot{q}_N \quad (6)$$

当被控制对象的库伦摩擦力较小时, 采用 PD 控制可以得到较好控制性能, 其控制律可表示为:

$$u(t) = K_p [\theta_d(t) - \theta(t)] + K_d \left[\frac{d\theta_d(t)}{dt} - \frac{d\theta(t)}{dt} \right] \quad (7)$$

其中: 比例增益 K_p 又称为位置反馈增益; 微分增益 K_d 又称为速度反馈增益; θ_d 为目标值; θ 为返回值。

进一步得到的机械臂的控制律为:

$$\tau = M \{ J^+ (\ddot{x} + K_d \dot{e} + K_p e - \dot{J} \dot{q}) + \phi_N \} + N \quad (8)$$

其中: M, N 均为一致正定矩阵; ϕ_N 为 J 的零空间中任意矢量。

式(8)说明机械臂不经过奇异位形, 控制律式(8)能保证跟踪误差收敛于零。

3.2 控制器设计

本文的 7DOF 机械臂具有冗余特性, 使得机械臂动力学模型具有较高的非线性, 因而各关节之间

不可避免地存在不同程度耦合作用,直接影响机械臂的运动控制。针对上述问题,在设计控制器时,通常把机械臂的每个关节当作一个独立的伺服机构来考虑,把耦合力矩看作是外部干扰,采用 PD 控制独立地进行各关节控制器设计,并采用位置闭环和速度闭环共同对其控制器进行设计。

为了简化问题,考虑目标值 θ_d 为定值的场合,则式(7)可转化为:

$$u(t) = K_p[\theta_d(t) - \theta(t)] - K_D \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (9)$$

式(9)的反馈控制系统实际上是带速度反馈的位置闭环控制系统,速度负反馈的引入增加系统的阻尼比,改善系统的动态品质,使机械臂得到更理想的位置控制性能。因此,本文考虑 7DOF 机械臂各关节之间相互影响而对每一个关节分别设计的控制器,并将系统的机械惯性影响作为前馈项考虑,采用分布式控制设计 7DOF 机械臂的多关节控制器,带速度反馈的位置控制系统框图见图 2。

以机械臂各关节为控制对象,机械臂单元模块包含位置环和速度环。根据式(2)可知, n 自由度机械臂动力学方程可以写为一系列 n 个二阶非线性

微分方程,可将这些方程等效为一个二阶系统,其传递函数可表示为:

$$G(s) = \frac{k\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (10)$$

其中, ξ 为系统的阻尼系数; ω_n 为系统的自然频率。

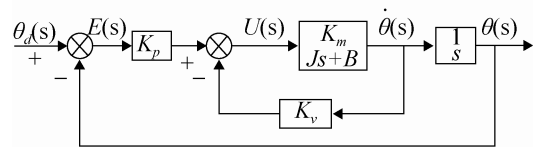


图 2 带速度反馈的位置控制系统框图

Fig.2 Block diagram of position control system with speed feedback

4 ADAMS 与 MATLAB 联合仿真

为验证 7DOF 机械臂的动力学模型及所设计控制器的合理性,本文结合 ADAMS 与 MATLAB 进行联合仿真研究。联合仿真的核心是输入变量与输出变量数据的实时交换。本文将机械臂 7 个关节的跟踪响应和质心位移作为输出,并采取各关节独立输入的方式对其运动输出特点进行研究,输入变量与输出变量之间的关系如图 3 所示。

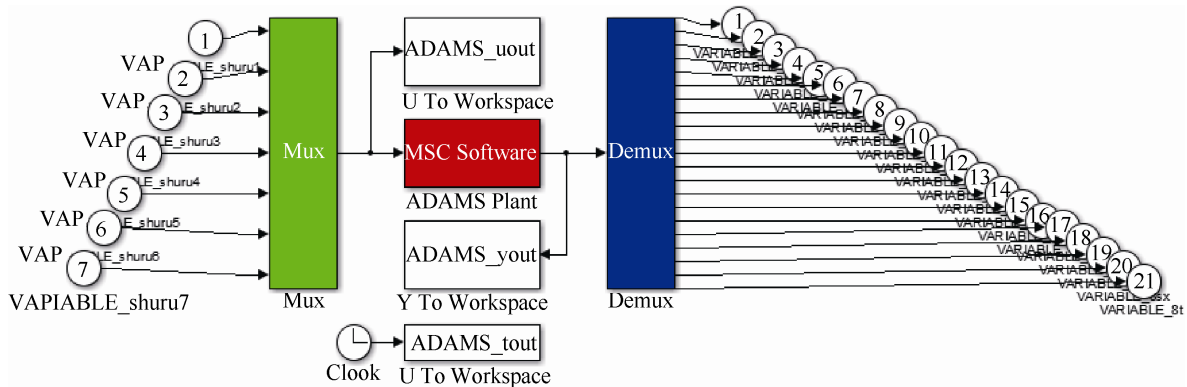


图 3 联合仿真系统中的机械子系统

Fig.3 Mechanical subsystem in co-simulation system

根据式(2)构建 7DOF 机械臂控制对象的数学模型,然后根据机械臂的控制律确定相关控制参数,采用 PD 控制独立地进行各关节控制器设计,并采用位置闭环和速度闭环共同对其控制器进行设计,联合仿真位置控制系统框图如图 4 所示。

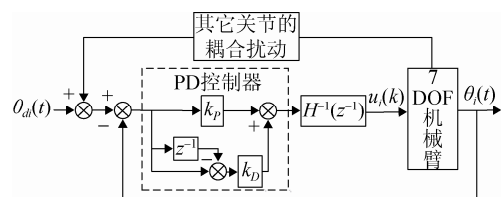


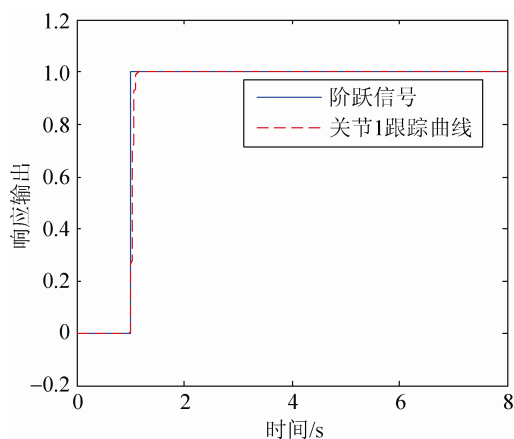
图 4 机械臂位置控制结构图

Fig.4 Manipulator Position Control Structure

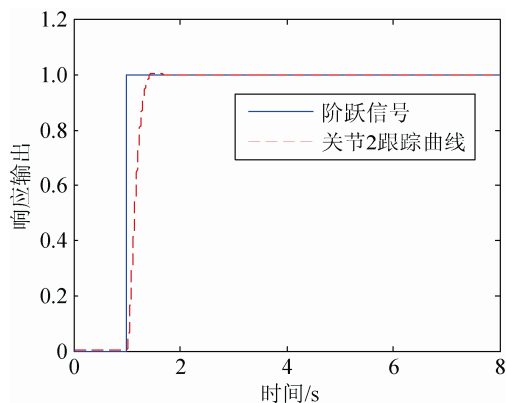
5 仿真结果讨论

5.1 联合仿真

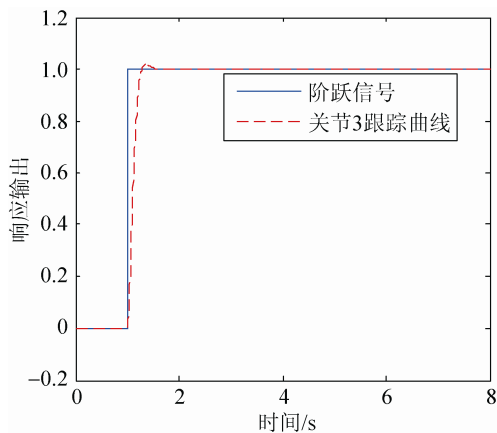
以阶跃信号作为输入研究机械臂各关节的动态响应, 7 个关节的角位移和质心位移作为输出。仿真时间 8 s, 采用批判式处理进行联合仿真, 根据图 4 控制结构得到仿真结果如图 5~6 所示。



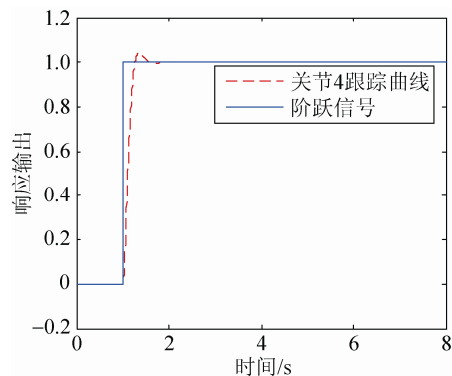
(a) 关节 1 跟踪响应曲线



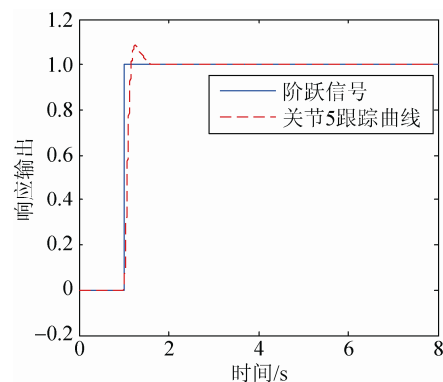
(b) 关节 2 跟踪响应曲线



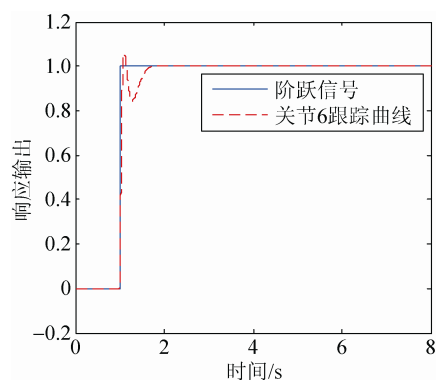
(c) 关节 3 跟踪响应曲线



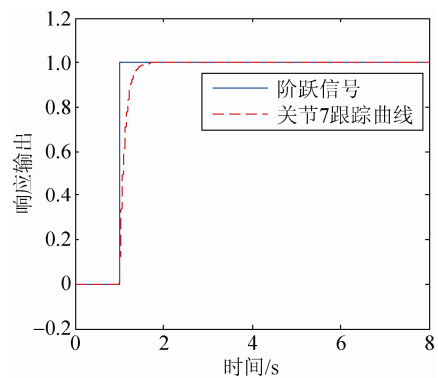
(d) 关节 4 跟踪响应曲线



(e) 关节 5 跟踪响应曲线



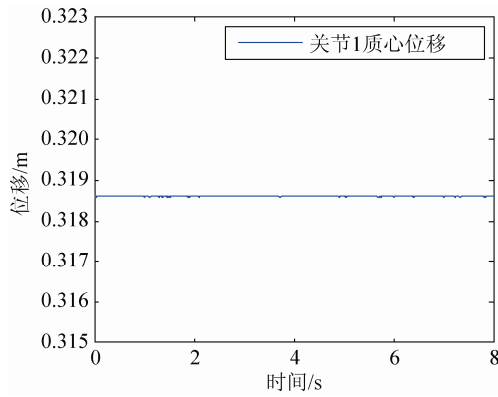
(f) 关节 6 跟踪响应曲线



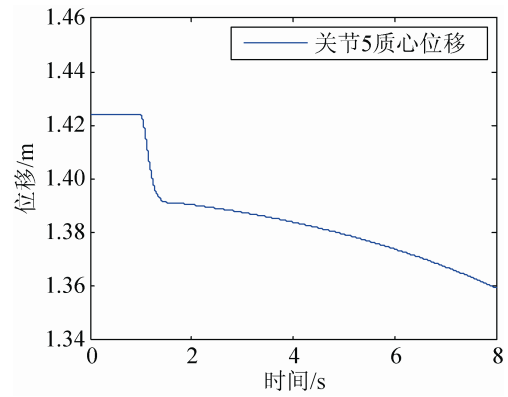
(g) 关节 7 跟踪响应曲线

图 5 各关节跟踪响应曲线

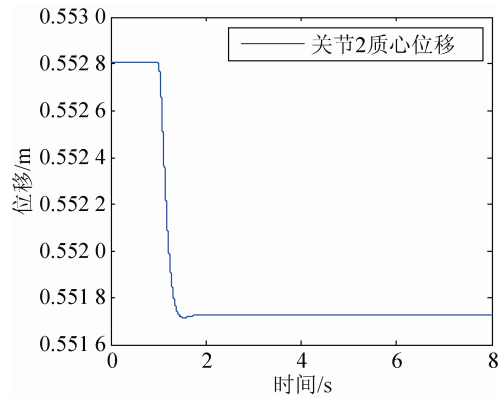
Fig.5 The response curve followed of each joint



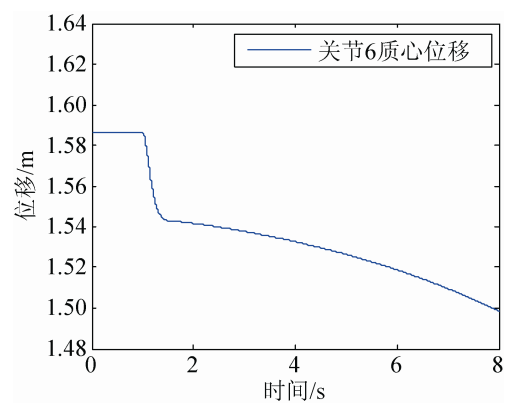
(a) 关节 1 阶跃响应位移输出曲线



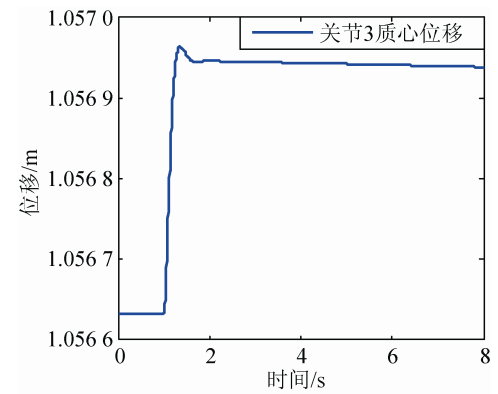
(e) 关节 5 阶跃响应位移输出曲线



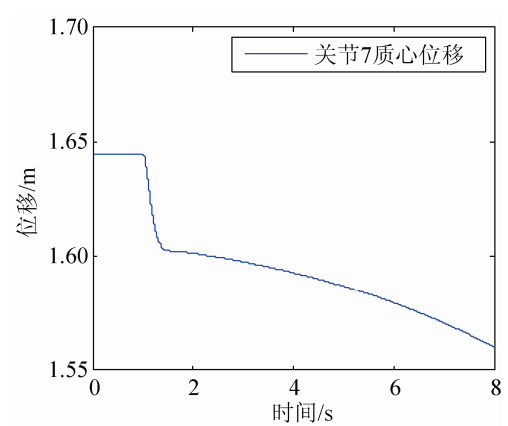
(b) 关节 2 阶跃响应位移输出曲线



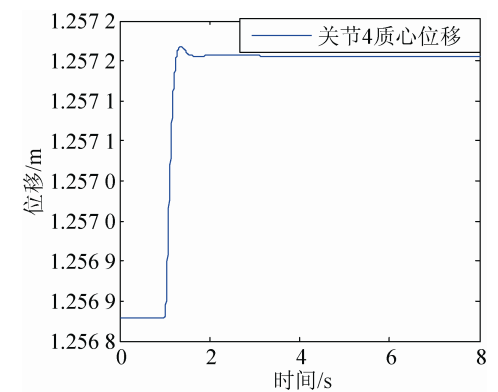
(f) 关节 6 阶跃响应位移输出曲线



(c) 关节 3 阶跃响应位移输出曲线



(g) 关节 7 阶跃响应位移输出曲线



(d) 关节 4 阶跃响应位移输出曲线

(g) 关节 7 阶跃响应位移输出曲线

图 6 各关节阶跃响应的位移输出
Fig.6 Displacement output of each joint step response

由图 5 可知, 7DOF 机械臂各关节联合仿真时各关节达到了较快的动态响应, 位置超调很小, 这样有利于避免与工件发生碰撞。设计控制器时发现, 各关节 PD 参数的数量级差别较大, 其中 6, 7 关节控制参数值较小, 1~5 控制参数相对较大, 根据表 1 可知, 关节惯性越大致使其运

动时受控性差, 直接影响机械臂整体运动控制的输出。

结果表明, 7DOF 机械臂的控制模型具有非线性程度高、各动力学状态参数变量之间存在耦合。此外, 通过增加速度前馈项, 改善了系统的动态响应性能。需要注意的是, 通过加大阻尼虽可减少超调, 但却降低了系统的快速性, 所以在实际工作中进行设计时要根据系统要求权衡。

此外, 7DOF 机械臂控制系统是一个多变量控制系统, 每个自由度包含一个伺服机构, 多个独立的伺服系统必须有机协调。机械臂末端执行器运动时所有关节运动的合成运动, 要使手部按照一定的规律运动, 就必须很好地控制各关节协调运动。在对 7 个关节共同调参时, 不同的关节之间的参数会对其它关节产生干扰, 即便某个关节单独仿真效果良好时, 在整体联合仿真时亦可能导致失败, 因此在实际过程中, 需要针对每个关节的控制器进行合理调参, 以满足 7DOF 机械臂整体的工作性能要求。

由图 6 仿真结果可知, 各关节响应均达到较为理想输出效果, 质心位移能根据输入实现阶跃响应式的输出, 验证了控制器设计合理性。其中, 关节 7 质心位移变化最大, 在 1 s 受到阶跃输入时变化 0.05 m, 这是由于该关节惯性较小且受其它各关节的叠加干扰所致。需要说明的是, 关节 1 的质心位移基本无变化, 这是由于关节 1 与基座相连, 惯性较大, 而给定激励相对较小, 致使产生的质心位移变化非常小。结果表明, 其余各关节位移输出均随其惯性参数呈现正相关关系, 其惯性越大, 动态响应越差, 根据表 1 应对机械臂 1~3 关节进一步轻量化设计, 以便获得机械臂更优的动力学性能。

5.2 末端执行器受到外部干扰的仿真研究

为研究末端执行器受到外部环境的扰动时的响应输出, 进一步验证控制器的控制效果, 试验时以阶跃信号作为末端执行器的输入, 设定随机干扰信号的权重为 0.1, 联合仿真时采用分布式的单关

节 PD 控制方案, 并采用图 4 的控制方案对末端执行器跟踪输出进行研究, 得到执行器的跟踪相应曲线如图 7 所示。

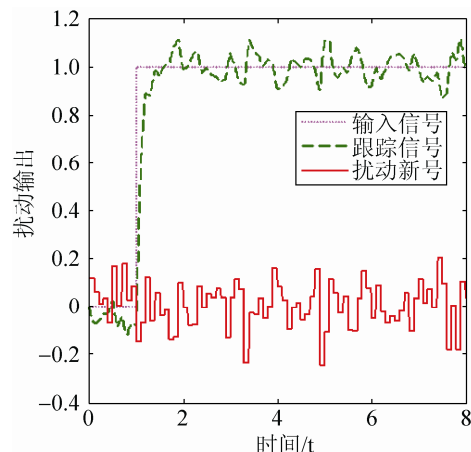


图 7 末端执行器于干扰信号下的动态响应

Fig.7 The dynamic response of the end-effector under disturbance signal

由图 7 可知, 末端执行器受到外部干扰的情况下, 跟踪曲线虽有波动, 但其跟踪响应误差的绝对值小于 0.1, 且能够较快达到响应, 能够满足常规状态下的工作要求。因此, 仿真结果表明, 本文设计的控制器能够实现补偿环境不确定、力学模型不确定对运动和精度的影响, 提高了机械臂的适应性, 进一步验证了本文设计的控制器的合理性。

6 结论

本文采用 ADAMS 与 MATLAB 联合仿真的方法对一款冗余 7DOF 机械臂进行了联合仿真研究, 得到了各关节的动态响应曲线, 分析了各关节之间控制参数的耦合相关性。结果表明各关节能够同时迅速跟踪相应, 且响应曲线超调量较小, 验证了控制器及参数设计的合理性。此外, 机械臂各部分惯性参数的大小直接影响着各关节的动态跟踪响应, 仿真验证了参数越大对其控制越不利, 因而在后续的研究中需对其进行轻量化处理。在对实际工作中的外部环境干扰下的末端执行器进行仿真结果表明, 末端执行器的动态响应能够满足实际工作要求。

研究表明,通过设计合理的控制器可极大的削弱各关节的耦合性,因此 7DOF 机械臂控制系统就变成了一个由多关节组成的各自独立的非线性系统,该结果为后续机械臂的控制研究提供了理论依据。需要说明的是,耦合程度较高时,单纯的位置闭环和速度闭环组成的 PD 控制器无法满足机械臂的控制要求,可采用带有神经网络补偿的 PD 控制策略设计非线性系统 PD 控制器参数,以补偿机械臂模型中的耦合程度较高时的非线性部分^[13];此外,为保证精度和消除振荡,可引进积分分离 PID 控制算法,既保持了积分作用,又减小了超调量、消除静差,使得控制性能有了较大的改善。

运用联合仿真的方法,大大简化了求解机械臂数学模型的计算量,提高了设计效率,研究结果为实际控制研究提供了有力的依据,而对研究模型更为复杂的冗余机械臂的运动控制而言,该方法优势更为明显。

参考文献:

- [1] Peter Kopacek. Development trends in robotics [J]. Elektrotechnik und Informationstechnik (S1613-7620), 2013, 130(2): 42-47.
- [2] Nonami K, Yuasa R, Waterman D, et al. Preliminary design and feasibility study of a 6-degree of freedom robot for excavation of unexploded landmine [J]. Autonomous Robots (S1573-7527), 2005, 18(3): 293-301.
- [3] 田强, 刘钺, 刘丽坤, 等. 柔性抓取机械臂-太阳翼耦合动力学与控制研究 [J]. 系统仿真学报, 2013, 25(7): 1609-1616. (Tian Qiang, LIU Cheng, LIU Likun, et al. Study on Coupling Dynamics and Control of Flexible Capturing Robot and Solar Panel[J]. Journal of System Simulation, 2013, 25(7): 1609-1616.)
- [4] 荣吉利, 杨永泰, 李健, 等. 空间机械臂建模方法与控制策略研究 [J]. 宇航学报, 2012, 33(11): 1564-1569. (Rong Jili, Yang Yongtai, Li Jian, et al. Research on modeling and control scheme of space manipulator [J]. Journal of Astronautics, 2012, 33(11): 1564-1569.)
- [5] Minh Hung Vu, Uhn Joo Na. A New 6-DOF Haptic Device for Tele operation of 6-DOF Serial Robots [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement (S0018-9456), 2011, 60(11): 3510-3522.
- [6] Nonami K, Yuasa R, Waterman D, et al. Preliminary design and feasibility study of a 6-degree of freedom robot for excavation of unexploded landmine [J]. Autonomous Robots (S1573-7527), 2005, 18(3): 293-301.
- [7] Luo Haitao, Liu Yuwang, Chen Zhengcang, et al. Co-Simulation Control of Robot Arm Dynamics in ADAMS and MATLAB [J]. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology (S2040-7467), 2013, 6(20): 3778-3783.
- [8] Yuan Zhixiang, Zhu Wanhui. Kinematics analysis and simulation of a 7-DOF welding robot based on ADAMS and MATLAB [D]. Anhui, China: School of Computer Science and Technology, Anhui University of Technology, 2011: 633-640.
- [9] 李斌茂, 钱志博, 程洪杰, 等. AUV 发动机的 ADAMS/MATLAB [J]. 系统仿真学报, 2010, 22(7): 1668-1673. (Li Bin-mao, QIAN Zhibo, CHENG Hongjie, et al. Co-simulation of Engine for AUV in ADAMS and MATLAB [J]. Journal of System Simulation, 2010, 22(7): 1668-1673.)
- [10] Shuai Guo, Cheng Hongjing, Chunsheng Xie. An Algebraic Inverse Method of 7-DOF Manipulator Redundant Robots [J]. Journal of Applied Sciences (S2076-3417), 2013, 13(13): 2366-2371.
- [11] Pavel K Lopatin, Artyom S Yegorov. A 7DOF Manipulator Control in an Unknown Environment based on an Exact Algorithm [J]. International Journal of Computer and Information Science and Engineering (S1307-4164), 2009, 3(2): 68-73.
- [12] 姜力, 周扬, 孙奎, 等. 七自由度冗余机械臂避障控制 [J]. 光学精密工程, 2013, 21(7): 1795-1802. (Jiang L, Zhou Y, Sun K, et al. Obstacle avoidance control for 7-DOF redundant manipulators [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(7): 1795-1802.)
- [13] 王良勇, 柴天佑. 带有神经网络补偿的机械手 PD 控制 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(12): 110-115. (WANG Liangyong, CHAI Tianyou. Neural Network Compensator Based PD Control of Robotic Manipulator [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(12): 110-115.)