

双操作臂的耦合误差同步协调控制

马 良, 闫继宏, 高永生, 赵 杰, 蔡鹤皋

(哈尔滨工业大学 机器人技术及系统国家重点实验室, 150080 哈尔滨, malianghit@yahoo.com.cn)

摘 要: 为了对具有不确定性参数的双操作臂机器人系统进行协调控制, 在同步控制基础上引入包含位置误差和同步误差的耦合误差, 提出一种能够自适应校正系统参数的同步控制策略, 并利用 Lyapunov 稳定性理论证明了系统的全局稳定性. 对 2 个二自由度操作臂机器人进行协调搬运实验研究, 结果表明, 该控制方法使双操作臂系统在协调运动过程中单操作臂的位置误差和双操作臂间的同步误差均收敛于零, 实现了在单操作臂按期望轨迹运动的同时保证双操作臂间的运动同步, 验证了所提策略对双操作臂同步协调控制的正确性和有效性.

关键词: 同步控制; 耦合误差; 操作臂; 协调控制

中图分类号: TP242.2

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2011)05-0047-05

Synchronized coordinated control of two manipulators with coupled error

MA Liang, YAN Ji-hong, GAO Yong-sheng, ZHAO Jie, CAI He-gao

(State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, 150080 Harbin, China, malianghit@yahoo.com.cn)

Abstract: To solve the problem of coordinated control for two manipulators with uncertain parameters, the coupled error containing position error and synchronization error is introduced into synchronized control; a new synchronized control strategy with adaptive correct system parameters is proposed; and Lyapunov stability theory is used to prove the global stability of system. The coordination experiment of two 2-DOF manipulators is executed, and the results show the position error of each manipulator and synchronization error of two manipulators convergence to zero simultaneously, which achieves the goal of one manipulator tracking its desired trajectory while ensuring the synchronized motion of two manipulators. The validity and effectiveness of the presented scheme is confirmed by the experiment.

Key words: synchronized control; coupled error; manipulator; coordinated control

近年来,多机器人系统已经成为机器人研究领域的一个重要分支,双操作臂机器人系统作为多机器人系统的典型代表引起了许多学者的广泛关注^[1]. 如何对双机器人系统乃至多机器人系统进行有效的协调控制,成为能否发挥其优势的关键. Yohei K 等^[2]在动力学方面对多机器人搬运任务进行了研究. Manish K 等^[3]针对多操作臂在协作过程

中产生的内力,对多操作臂系统进行力/位混合控制. Ali A M S 和 Evangelos P^[4]提出多阻抗控制,以增强被操作物体和操作臂的阻抗控制,实现了对操作臂的连续控制. 同步控制方法能够保持多机器人之间预设的运动学关系,从而在不需要掌握机器人之间的力信息的情况下实现多机器人的协调运动^[5]. 文献[6]采用反馈控制及非线性观测器实现对操作臂系统的同步控制. 在空间机器人协调控制方面,同步控制方法也逐步得到应用^[7]. 然而,上述协调控制方法均假定系统模型是精确已知的,但在实际情况下操作臂系统是一个十分复杂的多输入多输出非线性系统,具有时变、强耦合和非线性动力学特性^[8],其动力学参数如质量、质心位置等一般很难获得真实值,惯性矩特性及重力负载更是随

收稿日期: 2010-09-06.

基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2006AA04Z245); 国家科技重大专项课题(2009ZX04004-062); 国家重点实验室项目(SKLR200801A05); 中国博士后基金(200904500988); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(HIT.NSRIF.2009024).

作者简介: 马 良(1980—),男,博士研究生;

赵 杰(1968—),男,教授,博士生导师;

蔡鹤皋(1934—),男,教授,中国工程院院士.

着机械臂位置的不同而发生变化,有些学者将自适应控制与鲁棒控制、神经网络相结合,提高操作臂系统的动力学特性、鲁棒性以及轨迹跟踪能力^[9-10].

本文将包含位置误差和同步误差的耦合误差引入同步控制,采用自适应控制方法对系统模型不确定参数进行估计及修正.应用本文所提出的控制策略,在系统模型不精确的情况下,单操作臂能够按期望轨迹稳定运行,同时双操作臂进行同步运动,实现位置误差和同步误差均收敛于零,保证了双操作臂的同步协调运动.

1 系统动力学分析

在双操作臂系统中,第*i*个操作臂(*i* = 1, 2)的理想动力学模型为

$$\mathbf{H}_i(\mathbf{x}_i)\ddot{\mathbf{x}}_i(t) + \mathbf{C}_i(\mathbf{x}_i, \dot{\mathbf{x}}_i)\dot{\mathbf{x}}_i(t) + \mathbf{G}_i(\mathbf{x}_i) = \boldsymbol{\tau}_i. \quad (1)$$

式中, $\mathbf{H}_i(\mathbf{x}_i)$ 是对称正定惯性矩阵, $\mathbf{C}_i(\mathbf{x}_i, \dot{\mathbf{x}}_i)\dot{\mathbf{x}}_i(t)$ 是哥氏力和离心力向量, $\mathbf{G}_i(\mathbf{x}_i)$ 是重力向量, $\boldsymbol{\tau}_i$ 是控制力矩向量.

可以适当定义 $\mathbf{C}_i(\mathbf{x}_i, \dot{\mathbf{x}}_i)$, 使得 $0.5\dot{\mathbf{H}}_i(\mathbf{x}_i) - \mathbf{C}_i(\mathbf{x}_i, \dot{\mathbf{x}}_i)$ 成为反对称矩阵, 则有

$$\mathbf{x}^T [0.5\dot{\mathbf{H}}_i(\mathbf{x}_i) - \mathbf{C}_i(\mathbf{x}_i, \dot{\mathbf{x}}_i)]\mathbf{x} = 0. \quad (2)$$

实际上, 操作臂系统是一个十分复杂的多输入多输出非线性系统, 其动力学参数如质量、质心位置等一般很难获得真实值, 惯性矩特性及重力负载更是随着机械臂位置的不同而发生变化, 这使得 $\mathbf{H}_i(\mathbf{x}_i)$, $\mathbf{C}_i(\mathbf{x}_i, \dot{\mathbf{x}}_i)$, $\mathbf{G}_i(\mathbf{x}_i)$ 中包含未知的不确定性参数, 定义 $\boldsymbol{\theta}_i$ 为包含式(1)中所有未知模型不确定性参数的向量, 由参数线性化可将式(1)转化为

$$\mathbf{H}_i(\mathbf{x}_i)\ddot{\mathbf{x}}_i(t) + \mathbf{C}_i(\mathbf{x}_i, \dot{\mathbf{x}}_i)\dot{\mathbf{x}}_i(t) + \mathbf{G}_i(\mathbf{x}_i) = \mathbf{Y}(\mathbf{x}_i, \dot{\mathbf{x}}_i, \ddot{\mathbf{x}}_i)\boldsymbol{\theta}_i.$$

其中, $\mathbf{Y}(\mathbf{x}_i, \dot{\mathbf{x}}_i, \ddot{\mathbf{x}}_i)$ 为回归矩阵, 是操作臂运行轨迹的函数.

定义 $\hat{\boldsymbol{\theta}}_i(t)$ 为 $\boldsymbol{\theta}_i$ 的估计, 则操作臂动力学模型的估计为

$$\hat{\mathbf{H}}_i(\mathbf{x}_i)\ddot{\mathbf{x}}_i(t) + \hat{\mathbf{C}}_i(\mathbf{x}_i, \dot{\mathbf{x}}_i)\dot{\mathbf{x}}_i(t) + \hat{\mathbf{G}}_i(\mathbf{x}_i) = \mathbf{Y}(\mathbf{x}_i, \dot{\mathbf{x}}_i, \ddot{\mathbf{x}}_i)\hat{\boldsymbol{\theta}}_i.$$

式中: $\hat{\mathbf{H}}_i(\mathbf{x}_i)$, $\hat{\mathbf{C}}_i(\mathbf{x}_i, \dot{\mathbf{x}}_i)$, $\hat{\mathbf{G}}_i(\mathbf{x}_i)$ 分别代表 $\mathbf{H}_i(\mathbf{x}_i)$, $\mathbf{C}_i(\mathbf{x}_i, \dot{\mathbf{x}}_i)$, $\mathbf{G}_i(\mathbf{x}_i)$ 的估计.

2 同步控制策略

2.1 同步控制

在双操作臂机器人系统中定义第*i*个操作臂的实际轨迹为 $\mathbf{x}_i(t)$, 期望轨迹为 $\mathbf{x}_i^d(t)$, 则其位置

误差 $\mathbf{e}_i(t)$ 为

$$\mathbf{e}_i(t) = \mathbf{x}_i^d(t) - \mathbf{x}_i(t), \quad i = 1, 2.$$

对于双操作臂同步协调运动, 其控制目标可以定义为

$$f(\mathbf{x}_1(t), \mathbf{x}_2(t)) = 0, \quad (3)$$

并且,

$$f(\mathbf{x}_1^d(t), \mathbf{x}_2^d(t)) = 0.$$

将 $f(\mathbf{x}_1(t), \mathbf{x}_2(t))$ 在 $\mathbf{x}_1^d(t)$, $\mathbf{x}_2^d(t)$ 处进行泰勒级数展开, 得到

$$f(\mathbf{x}_1(t), \mathbf{x}_2(t)) = - \sum_{i=1}^2 \left[\frac{\partial f(\mathbf{x}_1(t), \mathbf{x}_2(t))}{\partial \mathbf{x}_i} \bigg|_{\mathbf{x}_i^d(t)} \cdot \mathbf{e}_i(t) \right]. \quad (4)$$

令

$$\mathbf{d}_i = \frac{\partial f(\mathbf{x}_1(t), \mathbf{x}_2(t))}{\partial \mathbf{x}_i} \bigg|_{\mathbf{x}_i^d(t)}, \quad (5)$$

综合(3)~(5)得到

$$f(\mathbf{x}_1(t), \mathbf{x}_2(t)) = \mathbf{d}_1 \mathbf{e}_1 + \mathbf{d}_2 \mathbf{e}_2 = 0.$$

定义同步误差

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{d}_1 \mathbf{e}_1 + \mathbf{d}_2 \mathbf{e}_2.$$

当 $\mathbf{e}_1(t) \rightarrow 0$, $\mathbf{e}_2(t) \rightarrow 0$ 时, 表示单操作臂能够沿期望轨迹进行运动; 若 $\boldsymbol{\varepsilon} \rightarrow 0$, 则意味着双操作臂间实现了同步运动.

2.2 耦合误差

定义耦合误差

$$\mathbf{e}_i^*(t) = \mathbf{d}_i(t) \mathbf{e}_i(t) + \boldsymbol{\beta} \int_0^t \boldsymbol{\varepsilon}(\omega) d\omega.$$

式中 $\boldsymbol{\beta}$ 是对角正定耦合参数矩阵.

令

$$\mathbf{r}_i(t) = \mathbf{e}_i^*(t) + \boldsymbol{\Lambda} \mathbf{e}_i^*(t).$$

式中 $\boldsymbol{\Lambda}$ 是对角正定矩阵, 则

$$\mathbf{r}_i(t) = \dot{\mathbf{d}}_i(t) \mathbf{e}_i(t) + \boldsymbol{\beta} \boldsymbol{\varepsilon}(t) + \mathbf{d}_i(t) \dot{\mathbf{x}}_i^d(t) + \boldsymbol{\Lambda} \mathbf{e}_i^*(t) - \mathbf{d}_i(t) \dot{\mathbf{x}}_i(t). \quad (6)$$

令

$$\mathbf{u}_i(t) = \dot{\mathbf{d}}_i(t) \mathbf{e}_i(t) + \boldsymbol{\beta} \boldsymbol{\varepsilon}(t) + \mathbf{d}_i(t) \dot{\mathbf{x}}_i^d(t) + \boldsymbol{\Lambda} \mathbf{e}_i^*(t) = \mathbf{r}_i(t) + \mathbf{d}_i(t) \dot{\mathbf{x}}_i(t).$$

若有 $\boldsymbol{\tau}_i$ 使 $\mathbf{e}_1(t) \rightarrow 0$, $\mathbf{e}_2(t) \rightarrow 0$, $\boldsymbol{\varepsilon} \rightarrow 0$, 便可实现机器人系统在协调运动过程中单操作臂的位置误差和双操作臂间的同步误差均收敛于零.

2.3 控制策略

设计如下自适应控制率:

$$\boldsymbol{\tau}_i = \mathbf{Y}_i(\mathbf{x}_i, \dot{\mathbf{x}}_i, \ddot{\mathbf{x}}_i) \hat{\boldsymbol{\theta}}_i(t) + \mathbf{k}_r \mathbf{r}_i(t) + \mathbf{k}_\varepsilon \boldsymbol{\varepsilon}(t). \quad (7)$$

模型参数估计 $\hat{\boldsymbol{\theta}}_i(t)$ 自适应率为

$$\dot{\hat{\boldsymbol{\theta}}}_i(t) = \boldsymbol{\Gamma}_i \mathbf{Y}_i^T(\mathbf{x}_i, \dot{\mathbf{x}}_i, \ddot{\mathbf{x}}_i) \mathbf{r}_i(t).$$

式中: $\mathbf{k}_r$, $\mathbf{k}_\varepsilon$, $\boldsymbol{\Gamma}_i$ 为对角正定增益矩阵.

定义 $\tilde{\theta}_i(t)$ 为模型参数估计误差

$$\tilde{\theta}_i(t) = \theta_i - \hat{\theta}_i(t).$$

则

$$\dot{\tilde{\theta}}_i(t) = -\mathbf{F}_i \mathbf{Y}_i^T(x_i, \dot{x}_i, u_i, \dot{u}_i) r_i(t). \quad (8)$$

将式(7)代入式(1),得到闭环系统动力学方程

$$\boldsymbol{\tau}_i = \hat{\mathbf{H}}_i(x_i) \dot{u}_i(t) + \hat{\mathbf{C}}_i(x_i, \dot{x}_i) u_i(t) + \hat{\mathbf{G}}_i(x_i) + \mathbf{k}_r r_i(t) + \mathbf{k}_\varepsilon \varepsilon(t).$$

简化后得

$$\Delta \mathbf{H}_i(x_i) \dot{u}_i + \Delta \mathbf{C}_i(x_i, \dot{x}_i) u_i + \Delta \mathbf{G}_i(x_i) = \mathbf{Y}_i(x_i, \dot{x}_i, u_i, \dot{u}_i) \tilde{\theta}_i(t). \quad (9)$$

式中:

$$\Delta \mathbf{H}_i(x_i) = \mathbf{H}_i(x_i) - \hat{\mathbf{H}}_i(x_i);$$

$$\Delta \mathbf{C}_i(x_i, \dot{x}_i) = \mathbf{C}_i(x_i, \dot{x}_i) - \hat{\mathbf{C}}_i(x_i, \dot{x}_i);$$

$$\Delta \mathbf{G}_i(x_i) = \mathbf{G}_i(x_i) - \hat{\mathbf{G}}_i(x_i).$$

定理 在提出的自适应控制率 $\boldsymbol{\tau}_i$ (式(7)) 及模型参数估计 $\hat{\theta}_i(t)$ 自适应率(式(8))作用下,可以实现当 $t \rightarrow \infty$ 时, $e_1(t) \rightarrow 0$, $e_2(t) \rightarrow 0$, 并且 $\varepsilon \rightarrow 0$. 即单操作臂能够按期望轨迹稳定运行,同时双操作臂进行同步运动,实现位置误差和同步误差均收敛于零.

证明 定义如下正定的 Lyapunov 函数:

$$V(t) = \sum_{i=1}^2 \left[\frac{1}{2} r_i^T(t) \mathbf{H}_i(x_i) r_i(t) + \frac{1}{2} \tilde{\theta}_i^T(t) \mathbf{F}_i^{-1} \tilde{\theta}_i(t) \right] + \frac{1}{2} \varepsilon^T(t) \mathbf{k}_\varepsilon \varepsilon(t) + \left(\int_0^t \varepsilon^T(\omega) d\omega \right) \mathbf{K}_\varepsilon \mathbf{A} \mathbf{B} \left(\int_0^t \varepsilon(\omega) d\omega \right).$$

将 $V(t)$ 对时间 t 求导,结合(2),(8)及(9)得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = & - \sum_{i=1}^2 (r_i^T(t) \mathbf{k}_r r_i(t) - (r_1(t) + r_2(t))^T \mathbf{k}_\varepsilon \varepsilon(t)) + \varepsilon^T(t) \mathbf{k}_\varepsilon \varepsilon(t) + \\ & 2 \varepsilon^T(t) \mathbf{K}_\varepsilon \mathbf{A} \mathbf{B} \left(\int_0^t \varepsilon(\omega) d\omega \right). \end{aligned} \quad (10)$$

由式(6)可得

$$r_1(t) + r_2(t) = \varepsilon(t) + (2\mathbf{B} + \mathbf{A}) \varepsilon(t) + 2\mathbf{B} \mathbf{A} \left(\int_0^t \varepsilon(\omega) d\omega \right).$$

将其代入式(10)得

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = & - \sum_{i=1}^2 r_i^T(t) \mathbf{k}_r r_i(t) - (2\mathbf{B} + \\ & \mathbf{A}) \varepsilon^T(t) \mathbf{k}_\varepsilon \varepsilon(t). \end{aligned}$$

由于 $\mathbf{k}_r, \mathbf{k}_\varepsilon, \mathbf{B}, \mathbf{A}$ 均为对角正定矩阵,因此,可得 $\dot{V}(t) \leq 0$, 即 $\dot{V}(t)$ 半负定. 当且仅当 $r_i(t) = 0$, $\varepsilon(t) = 0$ 时 $\dot{V}(t) = 0$ 成立,根据 Lyapunov 稳定性定理,该系统是一致渐进稳定的,即: $r_i(t) \rightarrow 0$,

$\varepsilon(t) \rightarrow 0$. 由拉萨尔一般不变性原理可知 $e_1(t) \rightarrow 0$, $e_2(t) \rightarrow 0$, 且 $\varepsilon \rightarrow 0$, 证毕.

3 实验与分析

为了验证所提出控制策略的正确性与有效性,本文对两个操作臂机器人进行协调搬运实验,如图1所示,操作臂具有6个自由度,在不影响协调效果的前提下,为了减小控制系统负担,本文仅运动操作臂的第3关节和第5关节来完成协调搬运作业任务.



图1 双操作臂协调搬运实验

设操作臂第3关节和第5关节期望轨迹为

$$x_{(3)}^d = 30 \cos\left(\frac{\pi}{7}t + \frac{\pi}{3}\right), \quad x_{(5)}^d = 60 \sin\left(\frac{\pi}{7}t\right).$$

双操作臂的第3关节初始位置为(0,15),第5关节初始位置为(0,3).

控制器参数选择为

$$\mathbf{A} = \text{diag}\{2\}, \mathbf{B} = \text{diag}\{2\}, \mathbf{k}_r = \text{diag}\{20, 20, 25\}, \mathbf{k}_\varepsilon = \text{diag}\{5\}, \mathbf{F} = \text{diag}\{0.3\}.$$

通过实验得到操作臂1第3关节的运动轨迹和位置误差如图2所示. 操作臂2第5关节的运动轨迹和位置误差如图3所示.

由图2可以得出,在所提出的控制率控制下,单操作臂的实际轨迹在运动的起始阶段出现较大波动,这是由于系统建模时包含不确定性参数,操作臂实际模型与理想模型存在偏差,在0.8s处出现最大误差-1.9°. 随着时间的增加,系统不断校正系统参数,使其趋近于实际模型,进而单操作臂位置误差趋近于零. 当操作臂运行3.9s及5.5s附近时,再次出现近似 $\pm 0.9^\circ$ 的误差,这是由于操作臂反向运动,驱动电机反转产生了运动滞后而产生的位置误差,经过0.3s的调整,操作臂再次很好地跟踪期望轨迹,运动误差趋近于0.

图3的结果与图2类似,在运动起始阶段和操作臂变向运动阶段出现较大的位置误差,在操

作臂平稳运行时,位置误差均趋近于零,说明操作臂能够很好地跟踪期望轨迹进行运动.

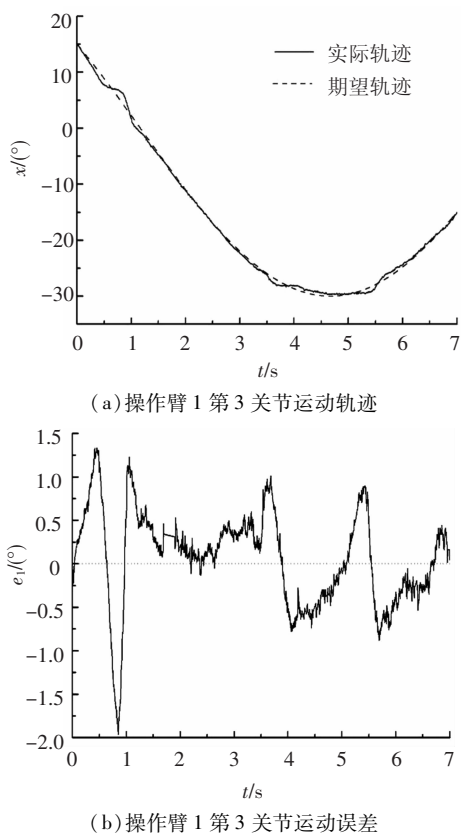


图 2 操作臂 1 第 3 关节运动轨迹和位置误差

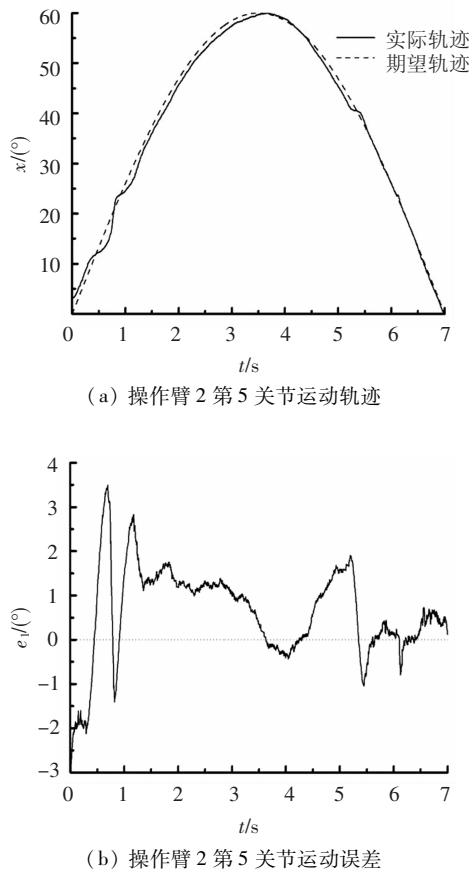


图 3 操作臂 2 第 5 关节的运动轨迹和位置误差

图 4(a) 所示为双操作臂在第 3 关节处的同步误差,图中显示,双操作臂在运动初期出现较大同步误差,但在 1.2 s 之后便逐渐趋近于零. 在单操作臂出现较大位置误差时,双操作臂的同步性能也受到影响,出现突变,但随后同步误差逐渐缩小,说明双操作臂获得了良好的同步性能. 图 4(b) 为双操作臂在第 5 关节处的同步误差,从图中也可得出与第 3 关节处类似的结论. 因此,本文所提出的控制策略能够实现在单操作臂按期望轨迹运动的同时保证双操作臂间的运动同步.

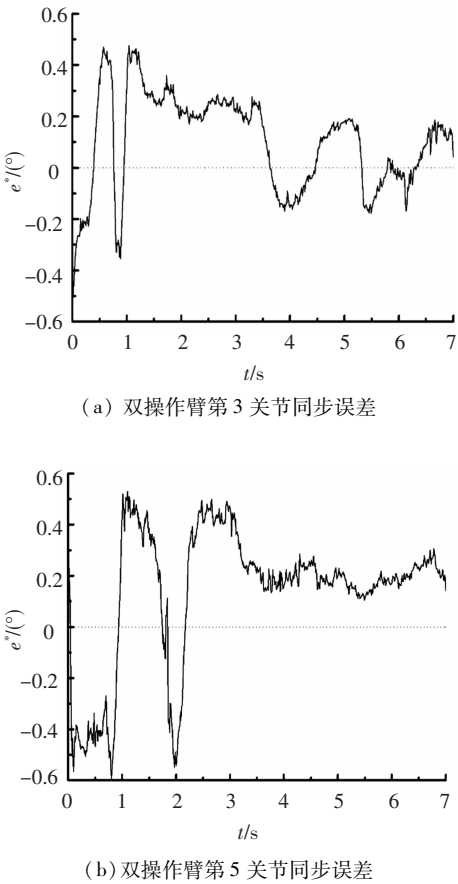
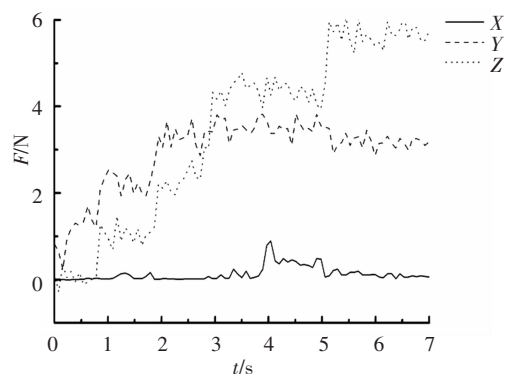


图 4 双操作臂同步误差

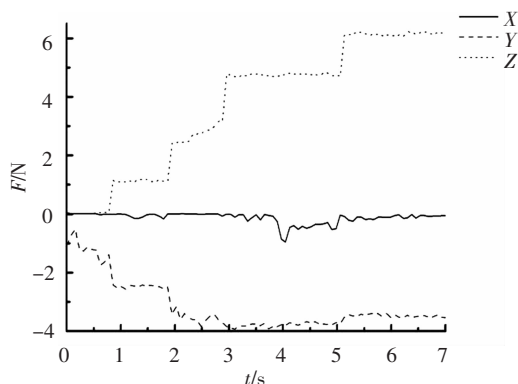
操作臂末端夹持器所受到的外力是评价多机器人协调效果的重要指标,实验中通过安装在操作臂腕部的六维力传感器,可以实时测得双操作臂在搬运作业任务过程中夹持器所受到的力,如图 5 所示为实验过程中操作臂 1 末端夹持器所受到的力曲线.

在图 5 中, X 为两夹持器连线方向,即沿杆件操作臂 1 指向操作臂 2 的方向. Z 为从刚性连接点指向夹持器的方向, Y 可由右手定则判定方向. 实验初始时设定传感器为零状态. 由图 5 可知,在整个协调运动过程中,双操作臂末端夹持器受到的力保持平稳,未出现大幅度的突变. 3 个方向中,只有 Z 方向的力出现增大趋势,这是由于在运动过程中,杆件的重力在 Z 方向的分量不断增加所

引起的.综上所述,在双操作臂协调中利用本文提出的控制方法,单操作臂在按期望轨迹运动的同时,能够实现双操作臂间的运动同步,且协调效果良好.



(a) 操作臂1末端夹持器受力情况



(b) 操作臂2末端夹持器受力情况

图5 操作臂末端夹持器受力情况

4 结 论

1) 本文将耦合误差引入到同步控制技术中,针对具有不确定性参数的双操作臂机器人系统协调控制问题,提出一种自适应同步控制策略.

2) 利用 Lyapunov 函数从理论上证明了策略的全局稳定性.

3) 对2个二自由度操作臂机器人进行的协调搬运实验验证了所提策略的正确性和有效性.

4) 针对双操作臂系统提出的控制率同样适用于多操作臂机器人系统,这对多机器人同步协调控制提供了新思路.

参考文献:

- [1] DEGHA M, REZA K A, EGHTEHAD M. Experimental study of a robust - adaptive controller design for two co-operating RLED robot manipulators carrying a rigid payload [C]//IEEE 2009 International Conference on Mechatronics. Malaga, Spain: IEEE, 2009: 1 - 6.
- [2] YOHEI K, YASUHISA H, KAZUHIRO K. Coordinated motion control of multiple mobile manipulators handling a single object without using force torque sensors [C]//IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems. San Diego, CA, United states: IEEE, 2007: 4077 - 4082.
- [3] MANISH K, DEVENDRA G P. Sensor-based estimation and control of forces and moments in multiple cooperative robots [J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 2004, 126(2): 276 - 283.
- [4] ALI A M S, EVANGELOS P. Cooperative object manipulation with contact impact using multiple impedance control [J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2010, 8(2): 314 - 327.
- [5] SUN Dong. A synchronisation approach to mutual error compensation in controlling the vehicle with an installed manipulator [J]. International Journal of Vehicle Design, 2006, 42(3 - 4): 287 - 305.
- [6] RODRIGUEZ-ANGELES A, NIJMEIJER H. Mutual synchronization of robots via estimated state feedback Acooperative approach [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2004, 12(4): 542 - 554.
- [7] 朱彦伟, 杨乐平. 空间机器人抓捕任务的六自由度同步控制逼近策略 [J]. 国防科技大学学报, 2009, 31(6): 43 - 49.
- [8] 林 雷, 王洪瑞, 任华彬. 基于模糊变结构的机械臂控制 [J]. 控制理论与应用, 2007, 24(4): 643 - 650.
- [9] LI Zhijun, GE S S, WANG Zhuping. Robust adaptive control of coordinated multiple mobile manipulators [C]//IEEE International Conference on Control Applications. Singapore: IEEE, 2007: 1085 - 1092.
- [10] CHENG Long, HOU Zengguang, TAN Min. Adaptive neural network tracking control of manipulators using quaternion feedback [C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Pasadena, CA, United states: IEEE, 2008: 3371 - 3376.

(编辑 杨 波)