

引用格式: 张佳舒,赵阁,高守礼,等. 基于 RBF 神经网络的多移动机械臂同步控制[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2019,38(3):100-109.

ZHANG Jiashu,ZHAO Ge,GAO Shouli,et al. Synchronous control of multiple mobile robotic manipulators based on RBF neural network[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science),2019,38(3):100-109.

基于 RBF 神经网络的多移动机械臂同步控制

张佳舒¹,赵 阁^{1,2},高守礼¹,赵东亚¹

(1. 中国石油大学(华东)化学工程学院,山东 青岛 266580;2. 合肥通用机械研究院有限公司,安徽 合肥 230031)

摘要:以多固定基机械臂同步控制为基础,应用 RBF 神经网络方法,并结合领导者-追随者(主从控制)通信拓扑方法,针对存在不确定性的多移动机械臂系统,设计出一种新的分布式主从同步控制器,并使得控制器的适应性得以提高。从动移动机械臂和领导移动机械臂之间的同步误差由主从式通信拓扑的网络结构来定义。本研究对从动移动机械臂的建模误差等不确定性进行了逼近和补偿,并对领导移动机械臂的控制力矩进行了估计,RBF 神经网络的权值根据自适应律在线进行更新。通过 Lyapunov 方法验证了所设计控制算法的稳定性,最后通过 Matlab 仿真验证了其可行性。

关键词:多移动机械臂系统;主从同步控制;RBF 神经网络;自适应控制

中图分类号:TP242

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2019)03-0100-10

DOI:10.16452/j.cnki.sdkjzk.2019.03.012

Synchronous control of multiple mobile robotic manipulators based on RBF neural network

ZHANG Jiashu¹,ZHAO Ge^{1,2},GAO Shouli¹,ZHAO Dongya¹

(1. College of Chemical Engineering,China University of Petroleum,Qingdao,Shandong 266580,China;

2. Hefei General Machinery Research Institute Co. Ltd,Hefei,Anhui 230031,China)

Abstract:In this paper,considering the uncertainty of multiple mobile manipulators,a new distributed leader-follower synchronous controller was designed to improve its adaptability by using RBF neural network and leader-follower communication topology based on the synchronous control of multiple fixed base manipulators. The synchronization error between the leading and follower mobile manipulator was initially established using the leader-follower communication topology network structure. Afterwards,by updating the weights of RBF neural network online with adaptive law,the systematic uncertainties of mobile manipulator such as model errors were approached and compensated,and the leading mobile manipulator control torque was estimated. By constructing Lyapunov function,the stability of the system was analyzed. Finally,the effectiveness of the designed controller was verified using Matlab simulation.

Key words: multiple mobile robotic manipulators system; leader-follower synchronous control; RBF neural network; adaptive control

在现代工业制造过程中,机械臂操作系统已经迅速被开发并得到了广泛应用,例如组装、运输、焊接、喷

收稿日期:2018-03-29

基金项目:国家自然科学基金项目(61473312)

作者简介:赵东亚(1975—),山东济宁人,教授,博士,主要研究机械系统同步控制过程建模与控制,本文通信作者。

E-mail:dyzhao@upc.edu.cn

漆以及其他各种高危高难度的复杂任务^[1-2]。这些任务需要大量的操作和很好的可操控性,其中大多数都不能通过一个单独的机械臂来实现。而固定基座机械臂系统的工作空间有一定的局限性,因此,多移动机械臂的应用得到了广泛的关注^[3-4]。多移动机械臂系统是一种复杂的强耦合时变系统,具有极强的非线性特征。多个机械臂之间如何协同配合,以及怎样解决两个子系统之间的耦合关系,对其建立统一数学模型并设计同步控制器,成为该系统同步控制问题的关键^[5-6]。对于多移动机械臂同步控制问题的研究,国内外的诸多学者近几年已经取得了很大的进展^[7]。

林冠楠^[8]针对移动机械臂的同步控制问题,将运动解耦、机械臂与移动平台分开进行控制,分别针对两者设计了基于自抗扰技术的同步控制器。Liu 等^[9]针对机械臂系统的无源化控制,研究了动力学参数不同的机械臂任务空间同步控制方法。方牧等^[10]对各移动机械臂在关节空间做了轨迹规划,并设计了基于模型参考的自适应控制器,但当较强的耦合关系存在于多个移动机械臂之间时该控制器并不能获得很好的控制性能。Desai 等^[11]对移动平台的轨迹进行了规划,为保证末端机械手能够稳定操作物体设计了相应的控制器,但移动机械臂末端机械手对被操作物体所施加作用力的鲁棒性该控制方法无法实现。Sugar 等^[12]针对多移动机械臂系统设计了基于主从式通信网络的同步控制算法,主动移动机械臂的路径方案和力规划可以依靠自身来完成,从动移动机械臂与主动移动机械臂的运动状态保持一致,对各自期望轨迹的追踪可以通过所设计的控制器来完成。

虽然关于多移动机械臂的同步控制问题到目前为止已经取得了很大进展,但系统不确定性和主动控制力矩的估计等问题并没有得到很好的解决,许多先进控制算法如 RBF(radial basis function, 径向基函数)神经网络等,未在多移动机械臂系统的同步控制中得到充分的应用。因此,本研究在对多移动机械臂系统动力学特性进行分析的基础上,基于 RBF 神经网络,设计了一种新的自适应主从同步控制器,解决多移动机械臂系统同步控制的相关问题。

1 系统描述

1.1 动力学模型

考虑如图 1 所示的多移动机械臂系统,由一个主动机械臂和 n 个从动机械臂所构成,且所有机械臂均具有同样的结构和动力学参数,系统模型如图 1 所示。

在关节空间内,其拉格朗日动力学方程可以表示为:

$$\begin{aligned} \mathbf{M}(\mathbf{q}_0)\ddot{\mathbf{q}}_0 + \mathbf{C}(\mathbf{q}_0)\dot{\mathbf{q}}_0 + \mathbf{G}(\mathbf{q}_0) &= \\ \mathbf{B}(\mathbf{q}_0)\boldsymbol{\tau}_0 + \mathbf{A}(\mathbf{q}_0)^\top\boldsymbol{\lambda}_0, \\ \mathbf{M}(\mathbf{q}_i)\ddot{\mathbf{q}}_i + \mathbf{C}(\mathbf{q}_i,\dot{\mathbf{q}}_i)\dot{\mathbf{q}}_i + \mathbf{G}(\mathbf{q}_i) &= \\ \mathbf{B}(\mathbf{q}_i)\boldsymbol{\tau}_i + \mathbf{A}(\mathbf{q}_i)^\top\boldsymbol{\lambda}_i + \mathbf{f}_i, i = 1, \dots, n. \end{aligned} \quad (1)$$

其中,下标 0 和 i 分别表示主、从动移动机械臂, $i = 1, 2, \dots, n$ 。 $\mathbf{M}(\mathbf{q}) \in \mathbf{R}^{m \times m}$ 为对称正定惯性矩阵, $\mathbf{C}(\mathbf{q}) \in \mathbf{R}^{m \times m}$ 表示哥氏力及向心力, $\mathbf{G}(\mathbf{q}) \in \mathbf{R}^m$ 为重力矩向量, $\boldsymbol{\tau}_0/\boldsymbol{\tau}_i \in \mathbf{R}^m$ 表示输入力矩, $\mathbf{B}(\mathbf{q}) \in \mathbf{R}^{m \times r}$ 表示转换输入的矩阵,矩阵 $\mathbf{A}(\mathbf{q})^\top \in \mathbf{R}^{m \times r}$ 与约束力相关, $\boldsymbol{\lambda} \in \mathbf{R}^m$ 为 Lagrange 乘子。虽然主、从移动机械臂的起始状态不相同,但其参数相同。其中,系统不确定项表示为 $\mathbf{f}_i = -\Delta\mathbf{M}(\mathbf{q}_i)\ddot{\mathbf{q}}_i - \Delta\mathbf{C}(\mathbf{q}_i,\dot{\mathbf{q}}_i)\dot{\mathbf{q}}_i - \Delta\mathbf{G}(\mathbf{q}_i)$ 。

消掉微分约束引入的约束力项,多移动机械臂系统动力学方程可化为:

$$\begin{aligned} \bar{\mathbf{M}}(\mathbf{q}_0)\ddot{\mathbf{X}}_0 + \bar{\mathbf{C}}(\mathbf{q}_0)\dot{\mathbf{X}}_0 + \bar{\mathbf{G}}(\mathbf{q}_0) &= \bar{\mathbf{B}}(\mathbf{q}_0)\boldsymbol{\tau}_0, \\ \bar{\mathbf{M}}(\mathbf{q}_i)\ddot{\mathbf{X}}_i + \bar{\mathbf{C}}(\mathbf{q}_i)\dot{\mathbf{X}}_i + \bar{\mathbf{G}}(\mathbf{q}_i) &= \bar{\mathbf{B}}(\mathbf{q}_i)\boldsymbol{\tau}_i + \bar{\mathbf{f}}_i. \end{aligned} \quad (2)$$

其中参数形式为: $\bar{\mathbf{M}}(\mathbf{q}) = \bar{\mathbf{S}}(\mathbf{q})^\top\mathbf{M}(\mathbf{q})\bar{\mathbf{S}}(\mathbf{q})$, $\bar{\mathbf{C}}(\mathbf{q}) = \bar{\mathbf{S}}(\mathbf{q})^\top\mathbf{C}(\mathbf{q},\dot{\mathbf{q}})\bar{\mathbf{S}}(\mathbf{q}) + \bar{\mathbf{S}}(\mathbf{q})^\top\mathbf{M}(\mathbf{q})\dot{\bar{\mathbf{S}}}(\mathbf{q})$, $\bar{\mathbf{G}}(\mathbf{q}) = \bar{\mathbf{S}}(\mathbf{q})^\top\mathbf{G}(\mathbf{q})$, $\bar{\mathbf{B}}(\mathbf{q}) = \bar{\mathbf{S}}(\mathbf{q})^\top\mathbf{B}(\mathbf{q})$, $\bar{\mathbf{f}}_i = \bar{\mathbf{S}}(\mathbf{q})^\top\mathbf{f}_i$ 。

定义 $\mathbf{x}_0 = [\mathbf{X}_0^\top \ \dot{\mathbf{X}}_0^\top]^\top$, $\mathbf{x}_i = [\mathbf{X}_i^\top \ \dot{\mathbf{X}}_i^\top]^\top$ 分别为主、从移动机械臂的状态向量,则多移动机械臂同步控制

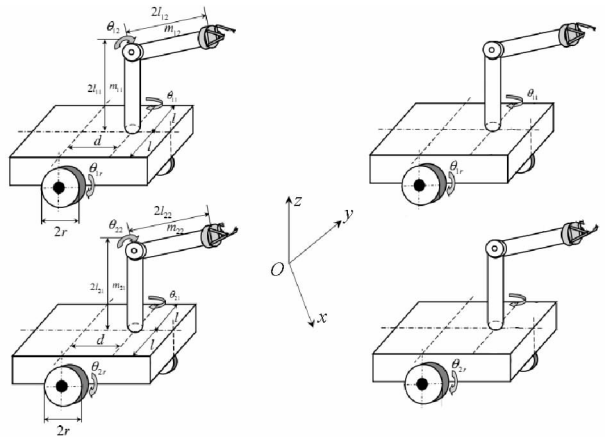


图 1 多移动机械臂主从同步控制系统

Fig. 1 Synchronous control system of multiple mobile manipulators

系统的动力学方程(2)可以转化成如下形式:

$$\begin{aligned} \dot{x}_0 &= \tilde{A}x_0 + b_0 + \tilde{B}\tilde{M}_0^{-1}(\tilde{B}_0\tau_0), \\ \dot{x}_i &= \tilde{A}x_i + b_i + \tilde{B}[\tilde{M}_i^{-1}(\tilde{B}_i\tau_i + \tilde{f}_i)]. \end{aligned} \tag{3}$$

其中, $\tilde{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}$, $\tilde{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{I} \end{bmatrix}$, $b_0 = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \tilde{M}_0^{-1}(-\tilde{C}_0\dot{q}_0 - \tilde{G}_0) \end{bmatrix}$, $b_i = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \tilde{M}_i^{-1}(-\tilde{C}_i\dot{q}_i - \tilde{G}_i) \end{bmatrix}$, 下标 0 和 i 分别表示主、从动移动机械臂,例如, \tilde{M}_0^{-1} 即代表 $\tilde{M}^{-1}(q_0)$ 。

1.2 系统同步误差

将主、从动机械臂间的同步误差定义为如下形式:

$$\varepsilon_i = x_i - x_0. \tag{4}$$

将公式(3)代入并整理可得:

$$\dot{\varepsilon}_i = \tilde{A}\varepsilon_0 + \tilde{B}[\tilde{M}_i^{-1}(\tilde{B}_i\tau_i + \tilde{f}_i)] - \tilde{B}\tilde{M}_0^{-1}(\tilde{B}_0\tau_0) + b_i - b_0.$$

令 $h_i(q_i, \dot{q}_i) = \tilde{M}_i^{-1}\tilde{f}_i$, $h_0(q_0, \dot{q}_0) = \tilde{M}_0^{-1}(\tilde{B}_0\tau_0)$, 上式可化为如下形式:

$$\dot{\varepsilon}_i = \tilde{A}\varepsilon_0 + \tilde{B}[\tilde{M}_i^{-1}(\tilde{B}_i\tau_i) + h_i(q_i, \dot{q}_i)] - \tilde{B}h_0(q_0, \dot{q}_0) + b_i - b_0. \tag{5}$$

则本研究的控制任务为:基于 RBF 神经网络,根据误差方程式(5),设计一种多移动机械臂系统的同步控制算法,对系统未知项进行估计和补偿,使同步误差最终收敛至零,从而实现多移动机械臂系统的主从同步控制。

2 RBF 神经网络主从同步控制器设计

根据已有相关文献可知,RBF 神经网络在非线性系统中已获得一定的应用,并且能够对系统非线性进行补偿^[13-14]。所以,本研究将利用 RBF 神经网络对未知状态进行估计,并针对上述机械臂系统,设计一种自适应主从同步控制算法,使得该系统在存在系统不确定性和外界干扰的情况下也可以实现同步运动,完成上节所述的同步控制任务^[15]。

2.1 径向基函数神经网络

RBF 神经网络由输入层、隐层和输出层构成^[16],具有很好的泛化能力,可以使学习速率大幅提升,符合实时控制的条件,并且能够防止局部极小值的出现。

输入向量 x 与输出 y 之间的映射关系可以用如下公式来表示:

$$\begin{aligned} \phi_i &= g\left(\frac{\|x - c_i\|^2}{\sigma_i^2}\right), i = 1, 2, \dots, n^*, \\ y &= W\phi(x). \end{aligned} \tag{6}$$

其中: $x \in \mathbf{R}^{m_r}$ 表示系统输入, $\phi = [\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_{n^*}]^T \in \mathbf{R}^{n^*}$ 表示隐函数的输出, y 为 RBF 神经网络的输出, $W = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_{n^*}] \in \mathbf{R}^{l \times n^*}$ 为神经网络权重向量, $\sigma_i > 0$ 和 $c_i \in \mathbf{R}^{m_r}$ 分别为第 i 个节点的基宽度参数及中心矢量, $\|\cdot\|$ 为欧几里得范数,函数 $g: [0, \infty) \rightarrow \mathbf{R}$ 表示神经网络激活函数。激活函数选取高斯基函数 $g(\alpha) = \exp(-\alpha)$,如图 3 所示。

应用 RBF 神经网络对主动移动机械臂的输入力矩和从动移动机械臂的动力学不确定性 $h_i(q_i, \dot{q}_i)$ 进行逼近。参考相关文献^[17],做出如下假设:

假设 1:RBF 神经网络输出 $\hat{f}(x, \theta)$ 为连续函数。

假设 2:针对一个不间断的函数 $f(x): l \rightarrow \mathbf{R}$,具有极小正数 ε_0 、权向量 θ 、和正整数 n^* ,可以使具有 n^* 个节点的 RBF 神经网络输出 $\hat{f}(x, \theta)$ 满足下式:

$$\max_{x \in l} \|\hat{f}(x, \theta) - f(x)\| \leq \varepsilon_0$$

其中, $l \in \mathbf{R}^{m_r}$ 是一个紧集, n^* 的值可以根据 $f(x)$ 、 ε_0 合理选择。

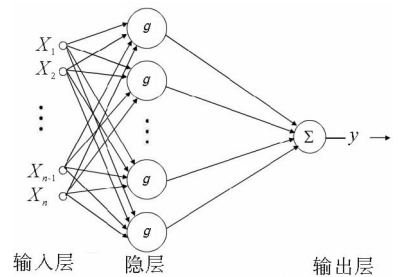


图 2 RBF 神经网络映射关系
Fig. 2 Mapping relations of RBF neural network

2.2 从动移动机械臂动力学补偿

根据误差动力学方程(5)可以看出,不确定性函数 $h_i(q_i, \dot{q}_i)$ 与同步误差 ε_i 相关。因此, $h_i(\varepsilon_i)$ 可以通过一个静态 RBF 神经网络的输出 $\hat{h}_i(\varepsilon_i, \theta_i)$ ($\theta_i \in \mathbf{R}^n$) 逼近。假设 θ_i^* 是逼近 $h_i(\varepsilon_i)$ 的最优神经网络权重系数矩阵,此时, $\varepsilon_i \in l(N_{\varepsilon_i})$, 其中, $l(N_{\varepsilon_i}) \subset \mathbf{R}^{2m}$ 是一个紧集,且定义为: $l(N_{\varepsilon_i}) \triangleq \{\varepsilon_i : \varepsilon_i \leq N_{\varepsilon_i}\}$ 。

矩阵注 1:对于矩阵 R ,其弗罗贝尼乌斯矩阵范数定义为如下形式:

$$\|R\|_F^2 \triangleq \sum_{ij} |r_{ij}|^2 = tr(R^T R) = tr(RR^T)。$$

其中, $tr(\cdot)$ 表示矩阵的迹。

假设 3:神经网络中所有权重系数矩阵均从属于一个大的紧集 $B(M_{\theta_i}) \triangleq \{\theta_i : \theta_{iF} \leq M_{\theta_i}\}$, 其中,任意 $R(M_{\theta_i}) > 0$ 是均为正数。那么:

$$\theta_i^* \triangleq \arg \min_{\theta_i \in B(M_{\theta_i})} \left\{ \sup_{\varepsilon_i \in l(N_{\varepsilon_i})} \|\hat{h}_i(\varepsilon_i, \theta_i) - h_i(\varepsilon_i)\| \right\}。 \quad (7)$$

定义由 RBF 神经网络引入的建模误差 η_i 为:

$$\eta_i \triangleq h_i(\varepsilon_i) - \hat{h}_i(\varepsilon_i, \theta_i^*)，$$

建模误差 η_i 的有限正定常数上界 η_{oi} 定义为:

$$\eta_{oi} \triangleq \sup_{\varepsilon_i \geq 0} h_0(\varepsilon_i) - \hat{h}_i(\varepsilon_i, \theta_i^*)。$$

根据公式(6), $\hat{h}_i(\varepsilon_i, \theta_i^*)$ 可以写为如下形式:

$$\hat{h}_i(\varepsilon_i, \theta_i^*) = \theta_i^* \phi_i(\varepsilon_i)。$$

其中, $\theta_i^* \in \mathbf{R}^{m \times n}$, $\theta_i^* \leq M_{\theta_i}$ 是最优权重系数矩阵, $\phi_i(\varepsilon_i) \in \mathbf{R}^n$ 为隐层输出。

2.3 主动移动机械臂控制力矩估计

由误差动力学方程(5)可以看出,主动移动机械臂的控制力矩 $h_0(q_0, \dot{q}_0)$ 也与同步误差 ε_i 具有相关性。因此, $h_0(\varepsilon_i)$ 可以通过一个静态 RBF 神经网络的输出 $\hat{h}_0(\varepsilon_i, \theta_0)$ ($\theta_0 \in \mathbf{R}^{n^*}$) 逼近。假设 θ_0^* 是逼近 $h_0(\varepsilon_i)$ 的最优神经网络权重系数矩阵,此时, $\varepsilon_i \in l(\bar{N}_{\varepsilon_i})$, 其中, $l(\bar{N}_{\varepsilon_i}) \subset \mathbf{R}^{2m}$ 是一个紧集,且定义为: $l(\bar{N}_{\varepsilon_i}) \triangleq \{\varepsilon_i : \varepsilon_i \leq \bar{N}_{\varepsilon_i}\}$ 。

假设 4:神经网络所有的权重系数都属于一个大的紧集 $B(M_{\theta_0}) \triangleq \{\theta_0 : \theta_{0F} \leq M_{\theta_0}\}$, 其中任意 $R(M_{\theta_0}) > 0$ 是均为正数。那么:

$$\theta_0^* \triangleq \arg \min_{\theta_0 \in B(M_{\theta_0})} \left\{ \sup_{\varepsilon_i \in l(\bar{N}_{\varepsilon_i})} \|\hat{h}_0(\varepsilon_i, \theta_0) - h_0(\varepsilon_i)\| \right\}。 \quad (8)$$

定义由 RBF 神经网络引入的建模误差 η_{0i} 为:

$$\eta_{0i} \triangleq h_0(\varepsilon_i) - \hat{h}_0(\varepsilon_i, \theta_0^*)，$$

建模误差 η_{0i} 的有限正定常数上界 $\bar{\eta}_{0i}$ 定义为:

$$\bar{\eta}_{0i} \triangleq \sup_{\varepsilon_i \geq 0} h_0(\varepsilon_i) - \hat{h}_0(\varepsilon_i, \theta_0^*)，$$

根据公式(6), $\hat{h}_0(\varepsilon_i, \theta_0^*)$ 可以写为如下形式:

$$\hat{h}_0(\varepsilon_i, \theta_0^*) = \theta_0^* \phi_0(\varepsilon_i)。$$

其中, $\theta_0^* \in \mathbf{R}^{m \times n^*}$, $\theta_0^* \leq M_{\theta_0}$ 是最优权重系数矩阵, $\phi_0(\varepsilon_i) \in \mathbf{R}^{n^*}$ 为隐层输出。

2.4 主从同步控制器设计

在前面两节的基础上,基于 RBF 神经网络的多移动机械臂分布式自适应同步控制器可以设计为如下形式:

$$\tau_i = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3， \quad (9)$$

$$\tau_{1i} = \bar{C}(q_i, \dot{q}_i) \dot{X}_i + \bar{G}(q_i)， \quad (10)$$

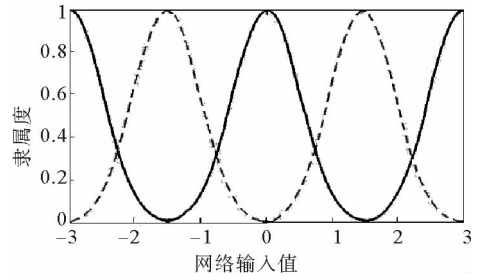


图 3 基于高斯基函数的隶属度函数

Fig. 3 Membership function based on gauss function

$$\tau_{i2} = \bar{M}(q_i) \left[\mathbf{K} \sum_{j \in N_i} (x_j - x_i) + \mathbf{K} d_i (\bar{x}_0 - x_i) - \hat{\boldsymbol{\theta}}_i^* \boldsymbol{\phi}_i(\boldsymbol{\varepsilon}_i) + \hat{\boldsymbol{\theta}}_0^* \boldsymbol{\phi}_0(\boldsymbol{\varepsilon}_i) \right], \quad (11)$$

$$\tau_{i3} = \bar{M}(q_i) \{ \bar{M}^{-1}(q_0) [\bar{C}(q_0, \dot{q}_0) \dot{X}_0 + \bar{G}(q_0)] \}, \quad (12)$$

$$\dot{\hat{\boldsymbol{\theta}}}_i^* = \gamma_i \tilde{\mathbf{B}}^T \mathbf{P} \boldsymbol{\varepsilon}_i \boldsymbol{\phi}_i^T(\boldsymbol{\varepsilon}_i) - c_i \gamma_i \frac{\boldsymbol{\phi}_i^T(\boldsymbol{\varepsilon}_i) (\hat{\boldsymbol{\theta}}_i^*)^T \tilde{\mathbf{B}}^T \mathbf{P} \boldsymbol{\varepsilon}_i \hat{\boldsymbol{\theta}}_i^*}{\mathbf{M}_{\theta_i}^T \mathbf{M}_{\theta_i}}, \quad (13)$$

$$c_i = \begin{cases} 1, & \text{if } \boldsymbol{\theta}_i^* = \mathbf{M}_{\theta_i} \text{ and } \boldsymbol{\phi}_i^T(\boldsymbol{\varepsilon}_i) (\hat{\boldsymbol{\theta}}_i^*)^T \tilde{\mathbf{B}}^T \mathbf{P} \boldsymbol{\varepsilon}_i > 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases},$$

$$\dot{\hat{\boldsymbol{\theta}}}_0^* = \gamma_0 \tilde{\mathbf{B}}^T \mathbf{P} \boldsymbol{\varepsilon}_i \boldsymbol{\phi}_0^T(\boldsymbol{\varepsilon}_i) - c_0 \gamma_0 \frac{\boldsymbol{\phi}_0^T(\boldsymbol{\varepsilon}_i) (\hat{\boldsymbol{\theta}}_0^*)^T \tilde{\mathbf{B}}^T \mathbf{P} \boldsymbol{\varepsilon}_i \hat{\boldsymbol{\theta}}_0^*}{\mathbf{M}_{\theta_0}^T \mathbf{M}_{\theta_0}}, \quad (14)$$

$$c_0 = \begin{cases} 1, & \text{if } \boldsymbol{\theta}_0^* = \mathbf{M}_{\theta_0} \text{ and } \boldsymbol{\phi}_0^T(\boldsymbol{\varepsilon}_i) (\hat{\boldsymbol{\theta}}_0^*)^T \tilde{\mathbf{B}}^T \mathbf{P} \boldsymbol{\varepsilon}_i > 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}.$$

其中, $\hat{\boldsymbol{\theta}}_i^*$ 、 $\hat{\boldsymbol{\theta}}_0^*$ 分别为 $\boldsymbol{\theta}_i^*$ 、 $\boldsymbol{\theta}_0^*$ 的估算值, 并且可以通过自适应律(13)、(14)进行在线更新, \mathbf{K} 是正定对角矩阵, 构造为 $\mathbf{K} = \tilde{\mathbf{B}}^T \mathbf{P}$ 。矩阵 \mathbf{P} 为黎卡提方程(15)的解:

$$\tilde{\mathbf{P}} \mathbf{A} + \tilde{\mathbf{A}}^T \tilde{\mathbf{P}} - 2\delta \tilde{\mathbf{P}} \tilde{\mathbf{B}} \tilde{\mathbf{B}}^T \tilde{\mathbf{P}} = -\mathbf{Q}, \mathbf{Q} \geq 0. \quad (15)$$

在控制器设计中, τ_{i1} 用来抵消哥氏力和重力; τ_{i2} 可以消除主从机械臂间的同步误差; τ_{i3} 可以抵消主动机械臂输入力矩的扰动。

2.5 Lyapunov 稳定性分析

将 2.4 节设计的控制器代入式(5), 可得:

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_i = \tilde{\mathbf{A}} \boldsymbol{\varepsilon}_i + \tilde{\mathbf{B}} \mathbf{K} \sum_{j \in N_i} (\boldsymbol{\varepsilon}_j - \boldsymbol{\varepsilon}_i) - \tilde{\mathbf{B}} \mathbf{K} d_i \boldsymbol{\varepsilon}_i - \tilde{\mathbf{B}} \hat{\boldsymbol{\theta}}_i^* \boldsymbol{\phi}_i(\boldsymbol{\varepsilon}_i) + \tilde{\mathbf{B}} \hat{\boldsymbol{\theta}}_0^* \boldsymbol{\phi}_0(\boldsymbol{\varepsilon}_i) + \tilde{\mathbf{B}} (\boldsymbol{\eta}_i - \boldsymbol{\eta}_{0i}), \quad (16)$$

其中, $\tilde{\boldsymbol{\theta}}_i^* = \hat{\boldsymbol{\theta}}_i^* - \boldsymbol{\theta}_i^*$, $\tilde{\boldsymbol{\theta}}_0^* = \hat{\boldsymbol{\theta}}_0^* - \boldsymbol{\theta}_0^*$ 。

引入拉普拉斯矩阵 \mathbf{L} , 定义 $\mathbf{H} = [(\tilde{\boldsymbol{\theta}}_1^* \boldsymbol{\phi}_1(\boldsymbol{\varepsilon}_1))^T, \dots, (\tilde{\boldsymbol{\theta}}_n^* \boldsymbol{\phi}_n(\boldsymbol{\varepsilon}_n))^T]^T$, $\boldsymbol{\varepsilon} = [\boldsymbol{\varepsilon}_1^T, \boldsymbol{\varepsilon}_2^T, \dots, \boldsymbol{\varepsilon}_n^T]^T$, $\mathbf{D} = \text{diag}(d_1, \dots, d_n)$, $\boldsymbol{\eta} = [\boldsymbol{\eta}_1^T, \dots, \boldsymbol{\eta}_n^T]^T$, 则式(11)可以写为如下克罗内克积的形式:

$$\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} &= ((\mathbf{I}_n \otimes \tilde{\mathbf{A}}) - \boldsymbol{\Gamma} \otimes \tilde{\mathbf{B}} \mathbf{K}) \boldsymbol{\varepsilon} - (\mathbf{I}_n \otimes \tilde{\mathbf{B}}) \mathbf{H} + (\mathbf{I}_n \otimes \tilde{\mathbf{B}}) \boldsymbol{\eta} \\ &\quad + (\mathbf{I}_n \otimes \tilde{\mathbf{B}}) \mathbf{I} \tilde{\boldsymbol{\theta}}_0^* \boldsymbol{\phi}_0(\boldsymbol{\varepsilon}_i) - (\mathbf{I}_n \otimes \tilde{\mathbf{B}}) \mathbf{I} \boldsymbol{\eta}_{0i}. \end{aligned} \quad (17)$$

其中, $\boldsymbol{\Gamma} = \mathbf{L} + \mathbf{D}$, $\mathbf{I} = [\mathbf{I}_m, \mathbf{I}_m, \dots, \mathbf{I}_m]^T$ 。

假设 5: 图论中 \bar{G} 为连通的。

根据文献[13]可以知道, 矩阵 $\boldsymbol{\Gamma}$ 具有非负特征值, 只有在图论中 \bar{G} 为连通时, $\boldsymbol{\Gamma}$ 正定。令 $\delta = \lambda_{\min}(\boldsymbol{\Gamma})$, 由假设 5 可知, $\boldsymbol{\Gamma}$ 正定, 那么 $\delta > 0$, 并且 $\tilde{\mathbf{A}}$ 、 $\tilde{\mathbf{B}}$ 可控, 则黎卡提方程(15)的解为对称正定矩阵, 即 $\tilde{\mathbf{P}} > 0$ 。

定理 1 在满足假设 1~5 的条件下, 针对公式(1)、(2)所示的多移动机械臂系统, 在主从同步控制律(9)~(15)的作用下, 通过适当地选取矩阵 $\mathbf{Q} \geq 0$, 可以在任意初始状态下, 使从动移动机械臂对主动机械臂移动轨迹实现跟踪, 且同步误差 $\boldsymbol{\varepsilon}_i$ 可以收敛至一个小的剩余集。

证明: 选择式(18)所示的 Lyapunov 函数

$$V = \boldsymbol{\varepsilon}^T (\mathbf{I}_n \otimes \tilde{\mathbf{P}}) \boldsymbol{\varepsilon} + \frac{1}{\gamma_i} \sum_{i=1}^n \|\tilde{\boldsymbol{\theta}}_i^*\|_F^2 + \frac{n}{\gamma_0} \|\tilde{\boldsymbol{\theta}}_0^*\|_F^2, \quad (18)$$

将公式(18)两边同时对时间求导可得:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \boldsymbol{\varepsilon}^T [(\mathbf{I}_n \otimes (\tilde{\mathbf{P}} \mathbf{A} + \tilde{\mathbf{A}}^T \tilde{\mathbf{P}}) - \boldsymbol{\Gamma} \otimes (2\delta \tilde{\mathbf{P}} \tilde{\mathbf{B}} \tilde{\mathbf{B}}^T \tilde{\mathbf{P}})] \boldsymbol{\varepsilon} - 2\mathbf{H}^T (\mathbf{I}_n \otimes \tilde{\mathbf{B}}^T \tilde{\mathbf{P}}) \boldsymbol{\varepsilon} + 2\boldsymbol{\eta}_i^T (\mathbf{I}_n \otimes \tilde{\mathbf{B}}^T \tilde{\mathbf{P}}) \boldsymbol{\varepsilon} \\ &\quad + 2\boldsymbol{\phi}_0^T(\boldsymbol{\varepsilon}_i) (\tilde{\boldsymbol{\theta}}_0^*)^T \mathbf{I} (\mathbf{I}_n \otimes \tilde{\mathbf{B}}^T \tilde{\mathbf{P}}) \boldsymbol{\varepsilon} - 2\boldsymbol{\eta}_{0i}^T \mathbf{I} (\mathbf{I}_n \otimes \tilde{\mathbf{B}}^T \tilde{\mathbf{P}}) \boldsymbol{\varepsilon} + \frac{2}{\gamma_i} \sum_{i=1}^n \text{tr}[\dot{\tilde{\boldsymbol{\theta}}}_i^* (\tilde{\boldsymbol{\theta}}_i^*)^T] + \frac{2n}{\gamma_0} \text{tr}[\dot{\tilde{\boldsymbol{\theta}}}_0^* (\tilde{\boldsymbol{\theta}}_0^*)^T], \end{aligned}$$

利用文献[18]中的方法对方程进行放缩, 可得:

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq -\lambda_{\min}(\mathbf{Q}) \sum_{i=1}^n \boldsymbol{\varepsilon}_i^T \boldsymbol{\varepsilon}_i - 2 \sum_{i=1}^n [\boldsymbol{\phi}_i^T(\boldsymbol{\varepsilon}_i) (\tilde{\boldsymbol{\theta}}_i^*)^T \tilde{\mathbf{B}}^T \mathbf{P} \boldsymbol{\varepsilon}_i] + \frac{2}{\gamma_i} \sum_{i=1}^n \text{tr}[\dot{\tilde{\boldsymbol{\theta}}}_i^* (\tilde{\boldsymbol{\theta}}_i^*)^T] \\ &\quad + 2 \sum_{i=1}^n [\boldsymbol{\phi}_0^T(\boldsymbol{\varepsilon}_i) (\tilde{\boldsymbol{\theta}}_0^*)^T \tilde{\mathbf{B}}^T \mathbf{P} \boldsymbol{\varepsilon}_i] + \frac{2n}{\gamma_0} \text{tr}[\dot{\tilde{\boldsymbol{\theta}}}_0^* (\tilde{\boldsymbol{\theta}}_0^*)^T] - 2 \sum_{i=1}^n \boldsymbol{\eta}_{0i}^T \tilde{\mathbf{B}}^T \mathbf{P} \boldsymbol{\varepsilon}_i + 2 \sum_{i=1}^n \boldsymbol{\eta}_i^T \tilde{\mathbf{B}}^T \mathbf{P} \boldsymbol{\varepsilon}_i, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -\lambda_{\min}(\mathbf{Q}) \sum_{i=1}^n \boldsymbol{\varepsilon}_i^T \boldsymbol{\varepsilon}_i - 2 \sum_{i=1}^n \text{tr} [\tilde{\mathbf{B}}^T \mathbf{P} \boldsymbol{\varepsilon}_i \boldsymbol{\phi}_i^T(\boldsymbol{\varepsilon}_i) (\tilde{\boldsymbol{\theta}}_i^*)^T] + \frac{2}{\gamma_i} \sum_{i=1}^n \text{tr} [\dot{\tilde{\boldsymbol{\theta}}}_i^* (\tilde{\boldsymbol{\theta}}_i^*)^T] \\ & + 2 \sum_{i=1}^n \text{tr} [\tilde{\mathbf{B}}^T \mathbf{P} \boldsymbol{\varepsilon}_i \boldsymbol{\phi}_0^T(\boldsymbol{\varepsilon}_i) (\tilde{\boldsymbol{\theta}}_0^*)^T] + \frac{2n}{\gamma_0} \text{tr} [\dot{\tilde{\boldsymbol{\theta}}}_0^* (\tilde{\boldsymbol{\theta}}_0^*)^T] - 2 \sum_{i=1}^n \boldsymbol{\eta}_{0l}^T \tilde{\mathbf{B}}^T \mathbf{P} \boldsymbol{\varepsilon}_i + 2 \sum_{i=1}^n \boldsymbol{\eta}_i^T \tilde{\mathbf{B}}^T \mathbf{P} \boldsymbol{\varepsilon}_i, \end{aligned}$$

将控制器中自适应律(13)、(14)带入并整理可得:

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -\lambda_{\min}(\mathbf{Q}) \sum_{i=1}^n \boldsymbol{\varepsilon}_i^T \boldsymbol{\varepsilon}_i + 2 \sum_{i=1}^n (\boldsymbol{\eta}_i^T - \boldsymbol{\eta}_{0l}^T) \tilde{\mathbf{B}}^T \mathbf{P} \boldsymbol{\varepsilon}_i - 2 \sum_{i=1}^n \text{tr} [c_i \boldsymbol{\gamma}_i \boldsymbol{\phi}_i^T(\boldsymbol{\varepsilon}_i) (\hat{\boldsymbol{\theta}}_i^*)^T \tilde{\mathbf{B}}^T \mathbf{P} \boldsymbol{\varepsilon}_i \hat{\boldsymbol{\theta}}_i^* (\tilde{\boldsymbol{\theta}}_i^*)^T / \mathbf{M}_{\theta_i}^T \mathbf{M}_{\theta_i}] \\ & - 2n \text{tr} [c_0 \boldsymbol{\gamma}_0 \boldsymbol{\phi}_0^T(\boldsymbol{\varepsilon}_i) (\hat{\boldsymbol{\theta}}_0^*)^T \tilde{\mathbf{B}}^T \mathbf{P} \boldsymbol{\varepsilon}_i \hat{\boldsymbol{\theta}}_0^* (\tilde{\boldsymbol{\theta}}_0^*)^T / \mathbf{M}_{\theta_0}^T \mathbf{M}_{\theta_0}], \end{aligned}$$

上述李雅普诺夫函数的微分不等式可整理为:

$$\dot{V} \leq -\lambda_{\min}(\mathbf{Q}) \sum_{i=1}^n \|\boldsymbol{\varepsilon}_i\|^2 + 2 \sum_{i=1}^n \|\boldsymbol{\eta}_i - \boldsymbol{\eta}_{0l}\| \|\tilde{\mathbf{B}}^T \mathbf{P}\| \|\boldsymbol{\varepsilon}_i\|,$$

其中, $\|\boldsymbol{\eta}_i\| \leq \eta_{0i}$, $\|\boldsymbol{\eta}_{0l}\| \leq \bar{\eta}_{0l}$, 因此 $\|\boldsymbol{\eta}_i - \boldsymbol{\eta}_{0l}\|$ 有界, 令 $\|\boldsymbol{\eta}_i - \boldsymbol{\eta}_{0l}\| \leq \Theta, \Theta > 0$, 则:

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & -\lambda_{\min}(\mathbf{Q}) \sum_{i=1}^n \|\boldsymbol{\varepsilon}_i\|^2 + 2 \sum_{i=1}^n \Theta \|\tilde{\mathbf{B}}^T \mathbf{P}\| \|\boldsymbol{\varepsilon}_i\| \\ \leq & \sum_{i=1}^n \|\boldsymbol{\varepsilon}_i\| (\lambda_{\min}(\mathbf{Q}) \|\boldsymbol{\varepsilon}_i\| - 2\Theta \|\tilde{\mathbf{B}}^T \mathbf{P}\|). \end{aligned} \quad (19)$$

易证, 若 $\hat{\boldsymbol{\theta}}_i^*(0) \leq \mathbf{M}_{\theta_i}$, $\hat{\boldsymbol{\theta}}_0^*(0) \leq \mathbf{M}_{\theta_0}$, 则当 $t \geq 0$, 有 $\hat{\boldsymbol{\theta}}_i^*(t) \leq \mathbf{M}_{\theta_i}$, $\hat{\boldsymbol{\theta}}_0^*(t) \leq \mathbf{M}_{\theta_0}$, 显然, 进而有 $\tilde{\boldsymbol{\theta}}_i^*(t) \leq \mathbf{M}_{\theta_i}$, $\tilde{\boldsymbol{\theta}}_0^*(t) \leq \mathbf{M}_{\theta_0}$. 那么, 由公式(19)可知, 在同步控制律(9)的控制作用下, 在任意初始状态下, 从动机械臂都可以对主动机械臂的移动轨迹实现高精度跟踪, 且误差 $\boldsymbol{\varepsilon}_i$ 最终收敛至一个小的剩余集 $\text{Re} = \{\boldsymbol{\varepsilon}_i \mid \|\boldsymbol{\varepsilon}_i\| \leq 2\Theta \|\tilde{\mathbf{B}}^T \mathbf{P}\| / \lambda_{\min}(\mathbf{Q})\}$, 从而实现了多移动机械臂的同步控制。

3 Matlab 仿真实验

选取由 5 个二连杆机械臂构成的多移动机械臂系统, 进行 Matlab 仿真, 验证本研究所提出的主从同步控制律(9)~(15)的稳定性和有效性。其中下标 1 表示主动机械臂, 其余为从动机械臂。

3.1 基本参数设定

机械臂动力学方程如下:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) = \mathbf{B}(\mathbf{q})\boldsymbol{\tau} + \mathbf{A}(\mathbf{q})^T \boldsymbol{\lambda} + \mathbf{f},$$

其中, 模型不确定性为如下形式:

$$\mathbf{f} = 0.2 \times [\bar{\mathbf{M}}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \bar{\mathbf{C}}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \bar{\mathbf{G}}(\mathbf{q})],$$

相关参数设置为:

$$m_0 = 50 \text{ kg}, m_1 = 4 \text{ kg}, m_2 = 3.5 \text{ kg}, R = 0.3 \text{ m}, d = 0.3 \text{ m}, J_0 = 1.417 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, \\ J_1 = 0.03 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, J_2 = 0.036 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, r = 0.1 \text{ m}, L_1 = 0.5 \text{ m}, L_2 = 0.35 \text{ m}.$$

主动移动机械臂期望轨迹如下:

$$\begin{aligned} x_{cd} &= 0.2t, y_{cd} = 0.2t, \\ x_{Ed} &= 0.2t, y_{Ed} = 0.1 \sin(2t) + 0.2t + 0.15. \end{aligned}$$

各移动机械臂的初始状态分别设置为:

$$\begin{aligned} \mathbf{q}_1 &= \left(0 \ 0 \ 0 \ \frac{\pi}{2} \ \frac{\pi}{6}\right), \dot{\mathbf{q}}_1 = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0); \mathbf{q}_2 = \left(0 \ 0 \ 0 \ \frac{\pi}{4} \ \frac{\pi}{3}\right), \dot{\mathbf{q}}_2 = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0); \\ \mathbf{q}_3 &= \left(0 \ 0 \ 0 \ \frac{\pi}{6} \ \frac{\pi}{6}\right), \dot{\mathbf{q}}_3 = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0); \mathbf{q}_4 = \left(0 \ 0 \ 0 \ \frac{\pi}{3} \ \frac{\pi}{3}\right), \dot{\mathbf{q}}_4 = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0); \\ \mathbf{q}_5 &= \left(0 \ 0 \ 0 \ \frac{\pi}{6} \ \frac{\pi}{6}\right), \dot{\mathbf{q}}_5 = (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0). \end{aligned}$$

反馈增益 \mathbf{K} 及自适应律相关参数 γ_0 、 γ_i 等分别设置为:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 3.2044 & 0 & 0 & 0 & 4.0837 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3.2044 & 0 & 0 & 0 & 4.0837 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3.2044 & 0 & 0 & 0 & 4.0837 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3.2044 & 0 & 0 & 0 & 4.0837 \end{bmatrix}.$$

$$\gamma_0 = 20, \gamma_i = 20。$$

拉普拉斯矩阵 L 、 D 以及所选择的正定矩阵 Q 、常数 δ 分别设置为:

$$L = \begin{bmatrix} 2 & -1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$Q = 10.2679 \times \text{diag}(1,1,1,1,1,1,1,1),$$

$$\delta = 0.3679。$$

选取如图 4 中的通讯拓扑结构。其中,信息可以由主动移动机械臂 1 传递给从动移动机械臂 2 和 4,但无法反向进行传递。

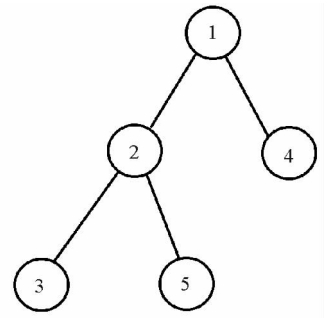


图 4 通讯拓扑结构
Fig. 4 Communication topology structure

3.2 Matlab 仿真结果及分析

在上述研究基础上对此多移动机械臂系统进行 Matlab 仿真,仿真结果见图 5~14。

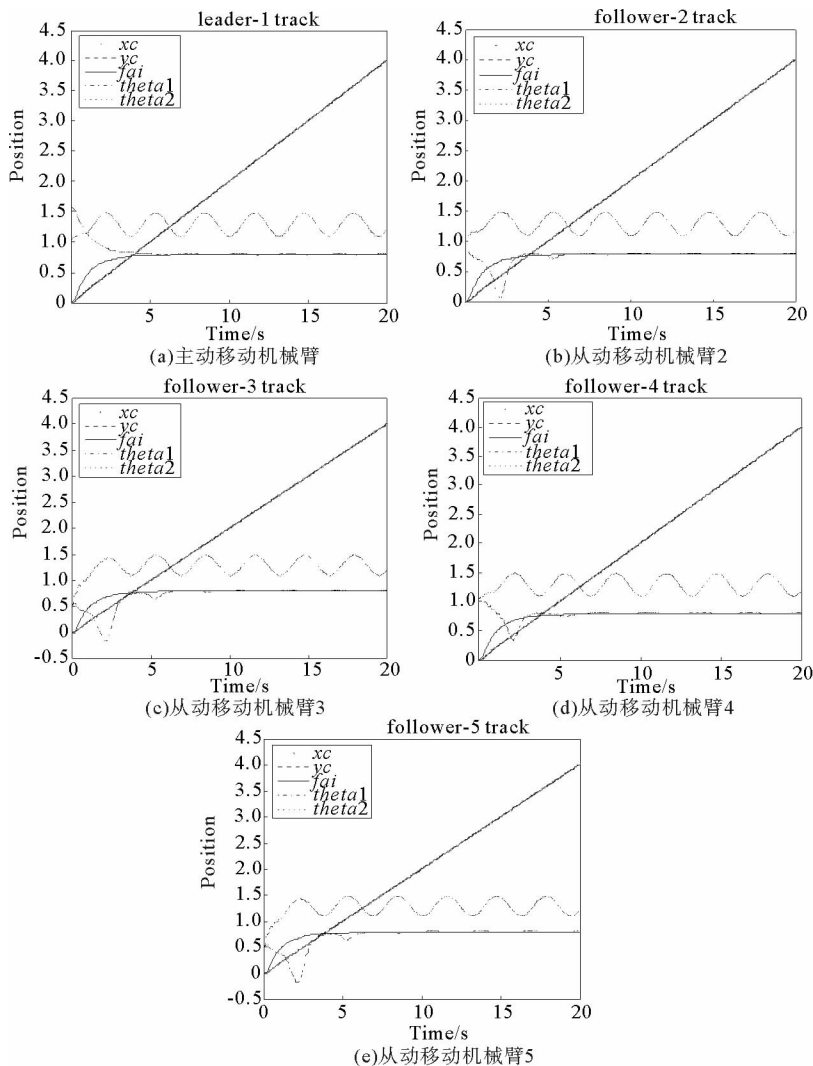


图 5 主动移动机械臂及从动移动机械臂 2~5 运动轨迹

Fig. 5 Movement trajectories of leader mobile robot and follower mobile robots 2-5

通过仿真结果图 5 可以看出,多移动机械臂系统在主从同步控制器(9)~(15)的控制作用下,主动机械臂可以对预定轨迹实现快速跟踪;从动机械臂在初始状态各不相同的情况下,也可以快速对主动机械臂移动轨迹进行跟踪,并且整个系统在达到稳定状态后未再产生较大波动。

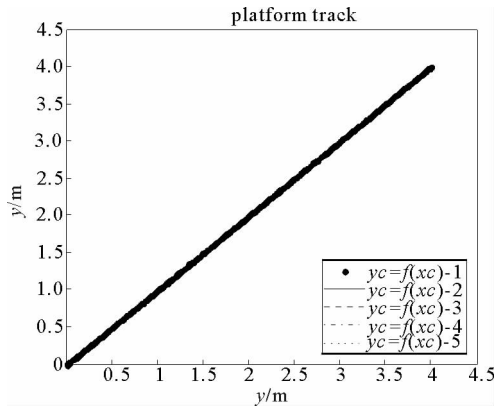


图 6 各移动平台质心位置

Fig. 6 Mass center position of each mobile platform

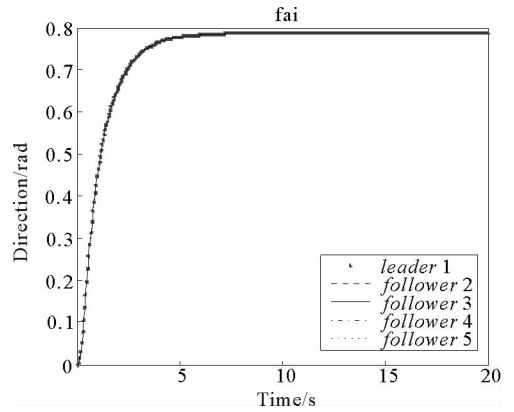


图 7 各移动平台方向角

Fig. 7 Direction angle of each mobile platform

由仿真结果图 6~7 可以看出,在同步控制器(9)~(15)的控制下,各平台移动轨迹及前进方向角均保持相同,即能够准确使平台间误差收敛到零,从而为多移动机械臂系统实现同步运动提供了保证。

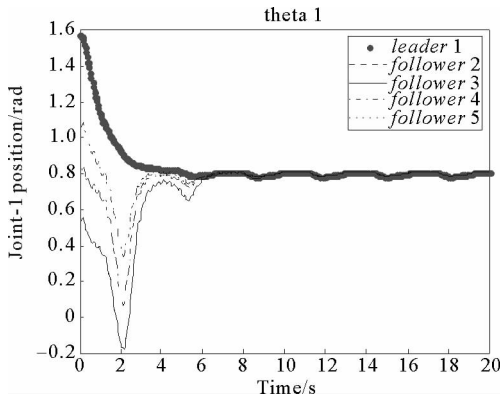


图 8 关节 1 位置变化曲线

Fig. 8 Position change curve of joint 1

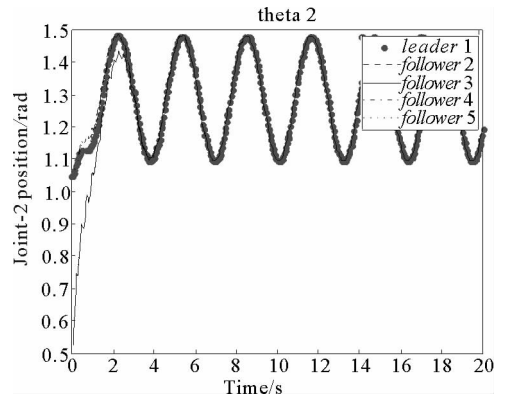


图 9 关节 2 位置变化曲线

Fig. 9 Position change curve of joint 2

通过仿真结果图 8 和图 9 可以看出,在 7 s 左右时,主动移动机械臂和从动移动机械臂中关节 1 的位置误差基本渐近收敛到零;在 4 s 左右时,主、从移动机械臂关节 2 的位置误差基本渐近收敛到零,且稳定后均不再发生较大波动。在 4~7 s 之间时,关节 1 和关节 2 同步误差共同渐近收敛到零。由仿真结果图 10 可以看出,在 4 s 左右时,各移动平台方向的角速度误差能够收敛到零。由图 11 和图 12 可知,分别在 10 s 和 8 s 左右时,各移动机械臂关节 1 和关节 2 处的速度误差均能分别渐近收敛到零。

综合分析仿真结果图 11~12 可知:通过适当地选择控制器参数,在本研究所设计的主从同步控制算法(9)~(15)的控制作用下,在初始阶段即使存在一定偏差,同理论分析一样,从动移动机械臂的平台方向角速度及二连杆机械臂两个关节的运动速度均能迅速、高精度地同步于主动机械臂,即主、从机械臂之间的速度误差能够收敛到零,且在达到稳定状态之后不再发生较大波动。

通过仿真结果图 13~14 可知,各移动机械臂的输入力矩均有界。

综合分析仿真结果 5~14,可以得到如下结论:在考虑各移动机械臂中移动平台和二连杆机械臂之间交

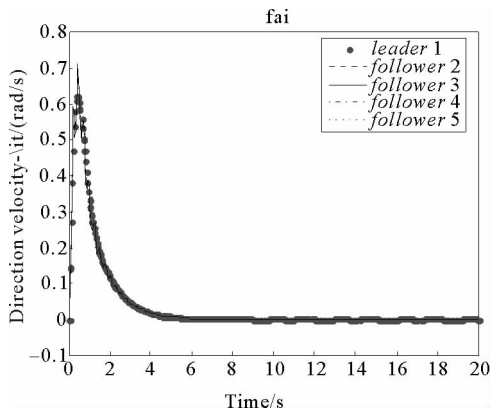


图 10 各移动平台方向角速度变化曲线

Fig. 10 Angular velocity curve of each mobile platform

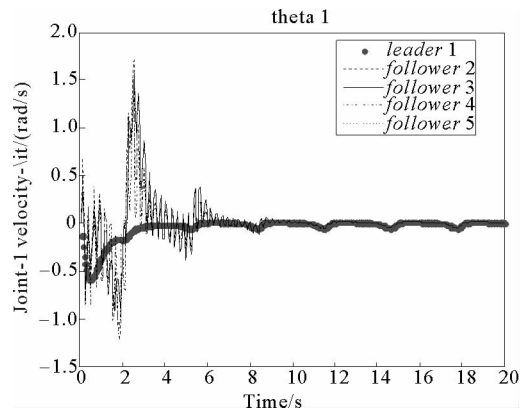


图 11 关节 1 速度变化曲线

Fig. 11 Velocity change curve of joint 1

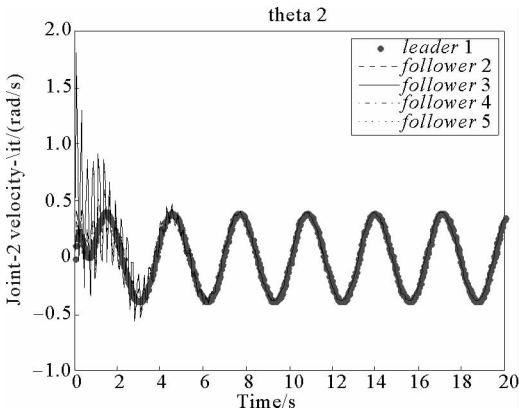


图 12 关节 2 速度变化曲线

Fig. 12 Velocity change curve of joint 2

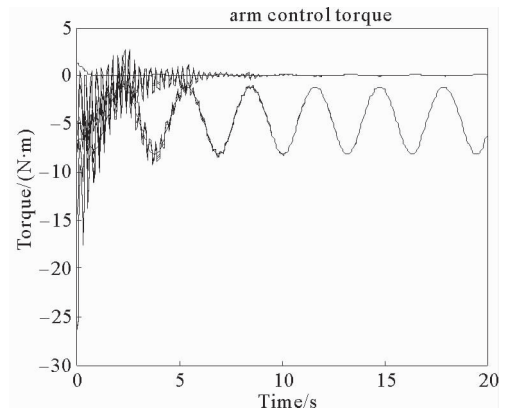


图 13 主从机械臂二连杆关节驱动力矩

Fig. 13 Joint driving torque of the two connecting rod of the leader and follower manipulators

互影响条件下,通过合理设计控制器参数,利用所提出的基于 RBF 神经网络的主从同步控制算法(9)~(15),可以抵消主动移动机械臂输入控制力矩的影响,估计从动移动机械臂的建模误差并进行补偿,使各移动机械臂之间同步误差渐近收敛到零,保证多移动机械臂实现同步运动。

4 结论

利用 RBF 神经网络和领导者-追随者通信拓扑的方法,针对多移动机械臂同步控制系统,设计了一种新的分布式自适应主从同步控制算法。主要结论有:

1) 主动移动机械臂和从动移动机械臂之间的同步误差通过领导者-追随者通信拓扑网络结构进行了定义;

2) 利用 RBF 神经网络,对从动移动机械臂的模型误差等系统不确定性进行了逼近和补偿,并对主动移

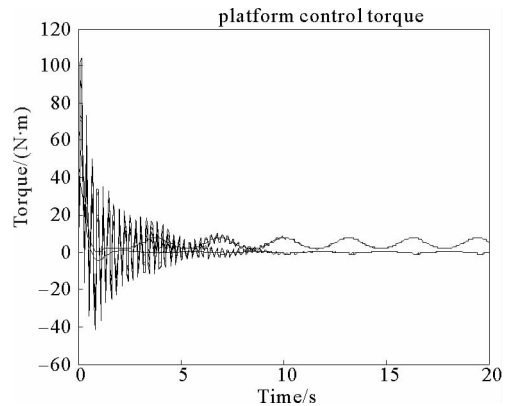


图 14 主从移动机械臂移动平台左右轮驱动力矩

Fig. 14 Left and right wheel driving torques of the platforms of the leader and follower manipulators

动机械臂的控制力矩进行了估计;

3) 所设计的同步控制器可以使同步误差渐进收敛到零,在存在较大初始误差的情况下也能够实现多移动机械臂的同步控制。

参考文献:

- [1] CUI R, YAN W. Mutual synchronization of multiple robot manipulators with unknown dynamics[J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2012, 68(2): 105-119.
- [2] NUNO E, ORTEGA R, BASANEZ L, et al. Synchronization of networks of nonidentical Euler-Lagrange systems with uncertain parameters and communication delays[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2011, 56(4): 935-941.
- [3] SHANG W, CONG S, JIANG S. Synchronization control of a parallel manipulator with redundant actuation in the task space [J]. *International Journal of Robotics and Automation*, 2011, 26(4): 432.
- [4] RINALDI F, CHIESA S, QUAGLIOTTI F. Linear quadratic control for quadrotors UAVs dynamics and formation flight [J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2013, 70(1/2/3/4): 203-220.
- [5] SERAJI H. A unified approach to motion control of mobile manipulators[J]. *International Journal of Robotics Research*, 1998, 17(2): 107-118.
- [6] HOOTSMANS N A M, DUBOWSKY S. Large motion control of mobile manipulators including vehicle suspension characteristics[C]//*IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2002: 2336-2341.
- [7] FATHALLAH M, ABDELHEDI F, DERBEL N. Synchronization of multi-robot manipulators based on high order sliding mode control[C]//*IEEE International Conference on Smart, Monitored and Controlled Cities*. 2017: 138-142.
- [8] 林冠楠. 移动机械臂跟踪控制与运动规划研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- [9] LIU Y C, CHOPRA N. Controlled synchronization of heterogeneous robotic manipulators in the task space[J]. *IEEE Transactions on Robotics*, 2012, 28(1): 268-275.
- [10] 方牧. 多移动机械臂系统的轨迹规划与跟踪控制[D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- [11] DESAI J P, KUMAR V. Nonholonomic motion planning for multiple mobile manipulators[C]//*IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1999: 3409-3414.
- [12] SUGAR, T G, KUMAR, V. Control of cooperating mobile manipulators[J]. *IEEE Transactions on Robotics & Automation*, 2002, 18(1): 94-103.
- [13] GANG F. A compensating scheme for robot tracking based on neural networks[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 1995, 15(3): 199-206.
- [14] 王敏. 非线性系统的自适应神经网络控制新方法研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2009.
- [15] ESMAILI P, HARON H. Adaptive neuro integral sliding mode control on synchronization of two robot manipulators[C]//*Conference on Computational Collective Intelligence Technologies and Applications*. Springer, Cham, 2017: 497-506.
- [16] 柴杰, 江青茵, 曹志凯. RBF 神经网络的函数逼近能力及其算法[J]. *模式识别与人工智能*, 2002, 15(3): 310-316.
CHAI Jie, JIANG Qingyin, CAO Zhikai. Function approximation ability and algorithm of RBF neural network[J]. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2002, 15(3): 310-316.
- [17] ZHAO D, ZHU Q, LI N, et al. Synchronized control with neuro-agents for leader-follower based multiple robotic manipulators[J]. *Neurocomputing*, 2014, 124(2): 149-161.
- [18] MULERO-MARTINEZ J I. Robust GRBF static neurocontroller with switch logic for control of robot manipulators[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks & Learning Systems*, 2012, 23(23): 1053-1064.

(责任编辑: 李 磊)