基于信号重构的可重构机械臂主动分散容错控制

赵 博 [1,2] 李元春 [1]

摘 要 针对可重构机械臂系统传感器故障, 提出一种基于信号重构的主动分散容错控制方法. 基于可重构机械臂系统模块化属性, 采用自适应模糊分散控制系统实现正常工作模式时模块关节的轨迹跟踪控制. 当在线检测出位置或速度传感器故障时, 分别采用数值积分器或微分跟踪器重构相应信号, 并以之代替故障信号进行反馈实现系统的主动容错控制. 此方法充分利用了冗余信息, 避免了故障关节控制性能的下降对其他关节的影响. 数值仿真结果验证了所提出容错控制方法的有效性.

关键词 可重构机械臂, 传感器故障, 信号重构技术, 模糊控制, 主动分散容错控制

引用格式 赵博, 李元春. 基于信号重构的可重构机械臂主动分散容错控制. 自动化学报, 2014, **40**(9): 1942−1950

DOI 10.3724/SP.J.1004.2014.01942

Signal Reconstruction Based Active Decentralized Fault Tolerant Control for Reconfigurable Manipulators

ZHAO Bo[1,2] LI Yuan-Chun[1]

Abstract An active decentralized fault tolerant control scheme is proposed based on signal reconstruction for reconfigurable manipulator systems with sensor fault. According to the modularity property of reconfigurable manipulators, an adaptive fuzzy decentralized controller is adopted to realize tracking control of each module joint trajectory at normal state. When a position or velocity sensor fault is detected, the reconstructed signals obtained by numerical integrator or differential tracker are utilized as the feedback signals to substitute for the relevant fault signals to realize active fault tolerant control. This scheme takes the advantage of redundant information sufficiently and avoids the affection to other joints brought by performance degradation of the faulted joint module. The numerical simulation results verify the effectiveness of the proposed fault tolerant control.

Key words Reconfigurable manipulators, sensor fault, signal reconstruction technique, fuzzy control, active decentralized fault tolerant control

Citation Zhao Bo, Li Yuan-Chun. Signal reconstruction based active decentralized fault tolerant control for reconfigurable manipulators. *Acta Automatica Sinica*, 2014, **40**(9): 1942−1950

可重构机械臂[1] 由一系列标准连杆和关节模块组成, 易于拆卸、装配和变换构形来适应不同的任务需要. 由于其模块化特点, 越来越多的应用到环境多变、高精度及高稳定度任务中, 对其安全性和可靠性提出了更高的要求, 而在很大程度上, 系统的执行器、传感器和其他部件能否正常运行决定了系统的可靠性. 可重构机械臂长时间工作在未知的、恶劣的环境中, 系统部件不可避免会发生故障, 此时系统的稳定性将会被破坏, 控制性能下降, 若不能对故障及时进行处理, 可能导致灾难性的后果. 因此进行故障诊断与容错控制已成为亟待解决的任务.

目前, 国内外学者针对故障诊断[2] 与容错控制[3] 的研究已涉及多个领域, 如航空航天[4−5]、机器人[6] 及工业生产过程[7] 等, 但主要针对执行器故障进行处理, 对传感器故障进行诊断与容错问题的研究成果还相对较少, 其方法主要可分为三种: 1) 基于冗余信息的方法[8−9], 一般适合于存在冗余元件或冗余信息时进行容错控制; 2) 基于控制律重构的方法[7, 10−12], 此方法通过在线重组或重构控制律达到容错控制目的; 3) 基于鲁棒容错控制的方法[13−14], 对于模型不确定性与外界干扰具有很强的鲁棒性, 但对于高维系统设计效率还有待提高.

针对可重构机械臂的故障诊断与容错控制, 一些学者给出了基于力矩传感器[15]、能效估计[16] 的分布式故障诊断方法, 此方法各关节模块只与相邻关节模块进行通信, 但仍存在控制时延的问题. 分散容错控制方法由于只需要模块局部信息可解决上述

收稿日期 2013-06-19 录用日期 2013-12-11
Manuscript received June 19, 2013; accepted December 11, 2013
国家自然科学基金 (61374051, 60974010), 吉林省科技发展计划项目 (20110705) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (61374051, 60974010), Scientific and Technological Development Plan Project of Jilin Province (20110705)
本文责任编委 刘德荣
Recommended by Associate Editor LIU De-Rong
1. 长春工业大学控制工程系 长春 130012 2. 吉林大学控制科学与工程系 长春 130022
1. Department of Control Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012 2. Department of Control Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022

不足, 但研究大多针对执行器故障的情况[17−21]. 而针对可重构机械臂传感器故障, 文献 [22] 采用分散滑模观测器对传感器故障进行检测与辨识, 并利用其输出信号取代相应的故障信号进行容错, 但其容错性能受故障辨识精确性的限制.

本文针对可重构机械臂系统传感器故障的容错控制方法进行研究. 基于可重构机械臂特有的模块化属性及 Lyapunov 稳定性理论, 设计正常工作模式下的自适应模糊分散控制律, 保证各关节模块跟踪期望轨迹. 当子系统位置传感器发生故障时, 利用速度传感器的积分信号代替故障信号, 而当子系统速度传感器发生故障时, 采用位置传感器的微分信号代替故障信号来实现主动分散容错控制. 此方法利用位置传感器和速度传感器在功能上的冗余关系, 保证传感器故障后控制系统性能.

1 问题描述

由 Newton-Euler 方程得到的 n 自由度可重构机械臂的动力学模型为[20]

$$M(q)\ddot{q}+C(q,\dot{q})\dot{q}+G(q)=u \tag{1}$$

其中, $q\in\mathbf{R}^n$ 为关节位置向量, $M(q)\in\mathbf{R}^{n\times n}$ 为惯性矩阵, $C(q,\dot{q})\in\mathbf{R}^n$ 为哥氏力和离心力项, $G(q)\in\mathbf{R}^n$ 为重力项, $u\in\mathbf{R}^n$ 为关节力矩向量. 将式 (1) 分解为

$$\sum_{j=1}^{n}M_{ij}(q)\ddot{q}_j+\sum_{j=1}^{n}C_{ij}(q,\dot{q})\dot{q}_j+\bar{G}_i(q)=u_i \tag{2}$$

其中, q_i, $\dot{q}_i$, $\ddot{q}_i$, $\bar{G}_i(q)$ 和 u_i 分别为向量 q, $\dot{q}$, $\ddot{q}$, $G(q)$ 和 u 的第 i 个分量, $M_{ij}(q)$ 和 $C_{ij}(q,\dot{q})$ 分别为矩阵 $M(q)$ 和 $C(q,\dot{q})$ 的第 ij 个分量.

将可重构机械臂的每个关节考虑为一个子系统, 从式 (2) 分离出局部变量 $(q_i,\dot{q}_i,\ddot{q}_i)$, 则子系统的动力学模型可以描述为

$$M_i(q_i)\ddot{q}_i+C_i(q_i,\dot{q}_i)\dot{q}_i+G_i(q_i)+Z_i(q,\dot{q},\ddot{q})=u_i \tag{3}$$

$$\begin{aligned}&Z_i(q,\dot{q},\ddot{q})=\\&\quad\left\{\sum_{j=1,j\neq i}^{n}M_{ij}(q)\ddot{q}_j+[M_{ii}(q)-M_i(q_i)]\ddot{q}_i\right\}+\\&\quad\left\{\sum_{j=1,j\neq i}^{n}C_{ij}(q,\dot{q})\dot{q}_j+[C_{ii}(q,\dot{q})-C_i(q_i,\dot{q}_i)]\dot{q}_i\right\}+\\&\quad[\bar{G}_i(q)-G_i(q_i)]\end{aligned} \tag{4}$$

其中, $M_i(q_i)\in\mathbf{R}$ 为子系统惯性矩阵, $C_i(q_i,\dot{q}_i)\in\mathbf{R}$ 为子系统哥氏力和离心力项, $G_i(q_i)\in\mathbf{R}$ 为子系统重力项, $Z_i(q,\dot{q},\ddot{q})\in\mathbf{R}$ 为子系统耦合关联项.

考虑系统未建模动态及外部干扰, 将各子系统的实际参数 $M_i(q_i),C_i(q_i,\dot{q}_i),G_i(q_i)$ 定义为名义值和建模不确定性两部分, 即

$$\begin{aligned}M_i(q_i)&=M_{i0}(q_i)-\Delta M_i(q_i)\\C_i(q_i,\dot{q}_i)&=C_{i0}(q_i,\dot{q}_i)-\Delta C_i(q_i,\dot{q}_i)\\G_i(q_i)&=G_{i0}(q_i)-\Delta G_i(q_i)\end{aligned} \tag{5}$$

将 $M_{i0}(q_i)$, $C_{i0}(q_i,\dot{q}_i)$, $G_{i0}(q_i)$, $Z_i(q,\dot{q},\ddot{q})$ 分别简写为 M_{i0}, C_{i0}, G_{i0}, Z_i, 则子系统动力学模型改写为

$$\ddot{q}_i=M_{i0}^{-1}(u_i-C_{i0}\dot{q}_i-G_{i0})+\rho_i+h_i \tag{6}$$

其中

$$\rho_i=-M_{i0}^{-1}(-\Delta M_i\ddot{q}_i-\Delta C_i\dot{q}_i-\Delta G_i) \tag{7}$$

$$h_i(q,\dot{q},\ddot{q})=-M_{i0}^{-1}Z_i \tag{8}$$

设 $X_i=[q_i\ \ \dot{q}_i]^{\mathrm{T}}$ $(i=1,2,\cdots,n)$, 当子系统位置传感器或速度传感器发生故障时

$$X_{if}=X_i+D_if_{si} \tag{9}$$

其中, $D_i=\mathrm{diag}\{1,1\}$ 为第 i 个关节模块传感器故障分布矩阵. $f_{si}=[f_{si1}\ f_{si2}]^{\mathrm{T}}$ 为第 i 个关节模块的传感器故障函数矩阵, 其未知且满足 $\|f_{si}(t)\|\le\xi_i(t)$, 其中 $\xi_i(t)$ 为已知连续函数.

2 主动分散容错控制律设计

2.1 分散控制器设计

2.1.1 自适应模糊分散控制器设计

针对可重构机械臂子系统动力学模型 (3), 基于计算力矩法设计分散自适应模糊控制律如下:

$$u_i=u_{i0}+u_{ic} \tag{10}$$

$$\begin{aligned}u_{i0}=\ &M_{i0}(q_i)(\ddot{q}_{id}-k_{iv}\dot{e}_i-k_{ip}e_i-\hat{\rho}_i)+\\&C_{i0}(q_i,\dot{q}_i)\dot{q}_i+G_{i0}(q_i)\end{aligned} \tag{11}$$

$$u_{ic}=-M_{i0}\mathrm{sgn}(x_i^{\mathrm{T}}P_iB_i)(\hat{p}_i+\hat{\eta}_i) \tag{12}$$

其中, u_{i0} 是计算力矩控制律, u_{ic} 是鲁棒自适应模糊控制律, 用来补偿系统不确定性. k_{iv}, k_{ip} 是微分和比例常数, $x_i=[e_i\ \ \dot{e}_i]^{\mathrm{T}}$ 定义为跟踪误差向量, $B_i=[0\ \ 1]^{\mathrm{T}}$. $\hat{\eta}_i$ 是可调参数, 并可利用下式的自适应更新律更新:

$$\dot{\hat{\eta}}_i=\Gamma_{i\eta}\left|x_i^{\mathrm{T}}P_iB_i\right| \tag{13}$$

其中, $\Gamma_{i\eta}$ 为正常数, P_i 是如下 Riccati 方程的解:

$$A_i^{\mathrm{T}}P_i+P_iA_i=-Q_i \tag{14}$$

其中, $Q_i\in\mathbf{R}^{2\times2}$ 是对称正定矩阵.

利用自适应模糊逻辑系统补偿未建模动态和子系统间耦合关联项的影响, 其表示如下:

$$\rho_i\left(\left|x_i^{\mathrm{T}}P_iB_i\right|,W_{i\rho}^{\mathrm{T}}\right)=W_{i\rho}^{\mathrm{T}}Z_{i\rho}\left(\left|x_i^{\mathrm{T}}P_iB_i\right|\right)+\varepsilon_{i\rho} \tag{15}$$

$$p_i\left(\left|x_i^{\mathrm{T}}P_iB_i\right|,W_{ip}^{\mathrm{T}}\right)=W_{ip}^{\mathrm{T}}Z_{ip}\left(\left|x_i^{\mathrm{T}}P_iB_i\right|\right)+\varepsilon_{ip} \tag{16}$$

其中, $\varepsilon_{i\rho}$ 和 ε_{ip} 为模糊逻辑系统的逼近误差, $W_{i\rho}^{\mathrm{T}}$ 和 W_{ip}^{T} 为可调参数向量, $Z_{i\rho}(|x_i^{\mathrm{T}}P_iB_i|)$ 和 $Z_{ip}(|x_i^{\mathrm{T}}P_iB_i|)$ 为模糊基函数向量, $\rho_i(|x_i^{\mathrm{T}}P_iB_i|, W_{i\rho}^{\mathrm{T}})$ 和 $p_i(|x_i^{\mathrm{T}}P_iB_i|,W_{ip}^{\mathrm{T}})$ 的估计值分别为 $\hat{\rho}_i(|x_i^{\mathrm{T}}P_iB_i|, \hat{W}_{i\rho}^{\mathrm{T}})$ 和 $\hat{p}_i(|x_i^{\mathrm{T}}P_iB_i|,\hat{W}_{ip})$, 表示如下:

$$\hat{\rho}_i\left(\left|x_i^{\mathrm{T}}P_iB_i\right|,\hat{W}_{i\rho}^{\mathrm{T}}\right)=\hat{W}_{i\rho}^{\mathrm{T}}\hat{Z}_{i\rho}\left(\left|x_i^{\mathrm{T}}P_iB_i\right|\right) \tag{17}$$

$$\hat{p}_i\left(\left|x_i^{\mathrm{T}}P_iB_i\right|,\hat{W}_{ip}\right)=\hat{W}_{ip}^{\mathrm{T}}\hat{Z}_{ip}\left(\left|x_i^{\mathrm{T}}P_iB_i\right|\right) \tag{18}$$

其中, $\hat{W}_{i\rho}^{\mathrm{T}}$ 和 $\hat{W}_{ip}^{\mathrm{T}}$ 分别是 $W_{i\rho}^{\mathrm{T}}$ 和 W_{ip}^{T} 的估计, 可由式 (19) 与式 (20) 所示的自适应更新律更新

$$\dot{\hat{W}}_{i\rho}=\eta_{i\rho}x_i^{\mathrm{T}}P_iB_i\hat{Z}_{i\rho}\left(\left|x_i^{\mathrm{T}}P_iB_i\right|\right) \tag{19}$$

$$\dot{\hat{W}}_{ip}=\eta_{ip}\left|x_i^{\mathrm{T}}P_iB_i\right|\hat{Z}_{ip}\left(\left|x_i^{\mathrm{T}}P_iB_i\right|\right) \tag{20}$$

其中, $\eta_{i\rho}$ 和 η_{ip} 为正常数.

比较式 (6) 和式 (10), 可知

$$\ddot{e}_i=-k_{iv}\dot{e}_i-k_{ip}e_i+\tilde{\rho}_i+M_{i0}^{-1}(u_{ic}-Z_i) \tag{21}$$

其中, $\tilde{\rho}_i=\rho_i-\hat{\rho}_i$, 注意到 $x_i=[e_i \quad \dot{e}_i]^{\mathrm{T}}$, 并定义 $h_i = -M_{i0}^{-1}Z_i$ 为耦合关联项, 则上式为

$$\dot{x}_i=A_ix_i+B_i(\tilde{h}_i+\tilde{\rho}_i) \tag{22}$$

其中, $A_i=\begin{bmatrix}0 & 1\\ -k_{ip} & -k_{iv}\end{bmatrix}$, $B_i=\begin{bmatrix}0\\ 1\end{bmatrix}$, $h_i = M_{i0}^{-1}(u_{ic}-Z_i)$.

假设 1. 期望轨迹 $q_{ir}, \dot{q}_{ir}$ 和 $\ddot{q}_{ir}$ 有界.

假设 2. 交联项 $h_i(q,\dot{q},\ddot{q})$ 有界且满足[21]

$$|h_i(q,\dot{q},\ddot{q})|\le\sum_{j=1}^{n}d_{ij}E_j \tag{23}$$

其中, $d_{ij}\ge 0$, $E_j=1+\left|x_j^{\mathrm{T}}P_jB_j\right|+\left|x_j^{\mathrm{T}}P_jB_j\right|^2$, 并定义 $p_i(|x_i^{\mathrm{T}}P_iB_i|)=n\max_{ij}\{d_{ij}\}E_i$.

定义估计误差

$$w_{i1}=W_{i\rho}^{\mathrm{T}}\tilde{Z}_{i\rho}\left(\left|x_i^{\mathrm{T}}P_iB_i\right|\right)+\varepsilon_{i\rho} \tag{24}$$

$$w_{i2}=p_i\left(\left|x_i^{\mathrm{T}}P_iB_i\right|\right)-W_{ip}^{\mathrm{T}}\hat{Z}_{ip}\left(\left|x_i^{\mathrm{T}}P_iB_i\right|\right) \tag{25}$$

$$w_i=w_{i1}+w_{i2} \tag{26}$$

假设 3. 模糊逻辑估计误差有界, 且满足 $\|w_i\| \le \eta_i$.

定理 1. 考虑可重构机械臂子系统动力学模型 (3) 和假设 1～3, 设计基于计算力矩法的分散自适应模糊控制律 (10)～(12), 及自适应更新律 (13), (19) 及 (20), 则可保证闭环系统渐近稳定, 且轨迹跟踪误差最终一致有界.

证明. 选取 Lyapunov 函数如下:

$$\begin{aligned}V_i=\;&\frac{1}{2}x_i^{\mathrm{T}}P_ix_i+\frac{1}{2}\tilde{W}_{i\rho}^{\mathrm{T}}\Gamma_{i\rho}^{-1}\tilde{W}_{i\rho}+\\&\frac{1}{2}\tilde{W}_{ip}^{\mathrm{T}}\Gamma_{ip}^{-1}\tilde{W}_{ip}+\frac{1}{2}\tilde{\eta}_i^{\mathrm{T}}\Gamma_{i\eta}^{-1}\tilde{\eta}_i\end{aligned} \tag{27}$$

对上式求导, 并考虑式 (22), 可得:

$$\begin{aligned}\dot{V}_i=\;&\frac{1}{2}\dot{x}_i^{\mathrm{T}}P_ix_i+\frac{1}{2}x_i^{\mathrm{T}}P_i\dot{x}_i-\tilde{W}_{i\rho}^{\mathrm{T}}\Gamma_{i\rho}^{-1}\dot{\hat{W}}_{i\rho}-\\&\tilde{W}_{ip}^{\mathrm{T}}\Gamma_{ip}^{-1}\dot{\hat{W}}_{ip}-\tilde{\eta}_i^{\mathrm{T}}\Gamma_{i\eta}^{-1}\dot{\hat{\eta}}_i=\\&\frac{1}{2}x_i^{\mathrm{T}}(P_iA_i^{\mathrm{T}}+A_iP_i)x_i+x_i^{\mathrm{T}}P_iB_i(\tilde{h}_i+\tilde{\rho}_i)-\\&\tilde{W}_{i\rho}^{\mathrm{T}}\Gamma_{i\rho}^{-1}\dot{\hat{W}}_{i\rho}-\tilde{W}_{ip}^{\mathrm{T}}\Gamma_{ip}^{-1}\dot{\hat{W}}_{ip}-\tilde{\eta}_i^{\mathrm{T}}\Gamma_{i\eta}^{-1}\dot{\hat{\eta}}_i\le\\&\frac{1}{2}x_i^{\mathrm{T}}(P_iA_i^{\mathrm{T}}+A_iP_i)x_i+\left|x_i^{\mathrm{T}}P_iB_i\right||h_i|-\\&\left|x_i^{\mathrm{T}}P_iB_i\right|\hat{p}_i(\left|x_i^{\mathrm{T}}P_iB_i\right|,\hat{Z}_{ip})+x_i^{\mathrm{T}}P_iB_i\tilde{\rho}_i-\\&\left|x_i^{\mathrm{T}}P_iB_i\right|\hat{\eta}_i-\tilde{W}_{i\rho}^{\mathrm{T}}\Gamma_{i\rho}^{-1}\dot{\hat{W}}_{i\rho}-\\&\tilde{W}_{ip}^{\mathrm{T}}\Gamma_{ip}^{-1}\dot{\hat{W}}_{ip}-\tilde{\eta}_i^{\mathrm{T}}\Gamma_{i\eta}^{-1}\dot{\hat{\eta}}_i\end{aligned} \tag{28}$$

考虑式 (23), 上式可得:

$$\begin{aligned}\dot{V}=\;&\sum_{i=1}^{n}\dot{V}_i\le\sum_{i=1}^{n}\Bigg(\frac{1}{2}x_i^{\mathrm{T}}(P_iA_i^{\mathrm{T}}+A_iP_i)x_i-\\&\left|x_i^{\mathrm{T}}P_iB_i\right|\hat{W}_{ip}^{\mathrm{T}}\hat{Z}_{ip}-\left|x_i^{\mathrm{T}}P_iB_i\right|\hat{\eta}_i+\\&\max_{ij}\{d_{ij}\}\sum_{j=1}^{n}\left|x_i^{\mathrm{T}}P_iB_i\right|\sum_{j=1}^{n}E_j+\\&x_i^{\mathrm{T}}P_iB_i\tilde{\rho}_i-\tilde{W}_{i\rho}^{\mathrm{T}}\Gamma_{i\rho}^{-1}\dot{\hat{W}}_{i\rho}-\\&\tilde{W}_{ip}^{\mathrm{T}}\Gamma_{ip}^{-1}\dot{\hat{W}}_{ip}-\tilde{\eta}_i^{\mathrm{T}}\Gamma_{i\eta}^{-1}\dot{\hat{\eta}}_i\Bigg)\end{aligned} \tag{29}$$

注意到 $|x_i^{\mathrm{T}}P_iB_i|\le\left|x_j^{\mathrm{T}}P_jB_j\right|\Leftrightarrow E_i\le E_j$, 并利用 Chebyshev 不等式, 可得:

$$\sum_{i=1}^{n}\left|x_i^{\mathrm{T}}P_iB_i\right|\sum_{j=1}^{n}E_j\le n\sum_{i=1}^{n}\left|x_i^{\mathrm{T}}P_iB_i\right|E_i \tag{30}$$

联立式 (13)、式 (29) 与式 (30), 可得:

$$\begin{aligned}\dot{V} \le & \sum_{i=1}^{n}\Bigg(\frac{1}{2}x_i^{\rm T}\left(P_iA_i^{\rm T}+A_iP_i\right)x_i+\left|x_i^{\rm T}P_iB_i\right|\tilde{\eta}_i- \\ & \tilde{\eta}_i^{\rm T}\Gamma_{i\eta}^{-1}\dot{\hat{\eta}}_i+\tilde{W}_{ip}^{\rm T}\left(\left|x_i^{\rm T}P_iB_i\right|\hat{Z}_{ip}-\Gamma_{ip}^{-1}\dot{\hat{W}}_{ip}\right)+ \\ & x_i^{\rm T}P_iB_i\tilde{W}_{i\rho}\hat{Z}_{i\rho}-\tilde{W}_{i\rho}^{\rm T}\Gamma_{i\rho}^{-1}\dot{\hat{W}}_{i\rho}\Bigg)= \\ & \sum_{i=1}^{n}\Bigg(\frac{1}{2}x_i^{\rm T}\left(P_iA_i^{\rm T}+A_iP_i\right)x_i+\tilde{\eta}_i^{\rm T}\big(\left|x_i^{\rm T}P_iB_i\right|- \\ & \Gamma_{i\eta}^{-1}\dot{\hat{\eta}}_i\big)+\tilde{W}_{ip}^{\rm T}\left(\left|x_i^{\rm T}P_iB_i\right|\hat{Z}_{ip}-\Gamma_{ip}^{-1}\dot{\hat{W}}_{ip}\right)+ \\ & \tilde{W}_{i\rho}\left(x_i^{\rm T}P_iB_i\hat{Z}_{i\rho}-\Gamma_{i\rho}^{-1}\dot{\hat{W}}_{i\rho}\right)\Bigg) \end{aligned} \tag{31}$$

联立式 (14), 式 (19), 式 (20) 和式 (31), 可得:

$$\begin{aligned}\dot{V} \le & \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{1}{2}x_i^{\rm T}\left(P_iA_i^{\rm T}+A_iP_i\right)x_i\right) \le \\ & -\frac{1}{2}n\lambda_{\min}(Q_i)x_i^2 \le 0\end{aligned} \tag{32}$$

即 $\dot{V}(x_i,\tilde{W}_{i\rho},\tilde{W}_{ip},\tilde{\eta}_i)\le 0$, $x_i(t)$ 和 $\tilde{\eta}_i(t)$ 大范围渐近稳定.

$$\begin{aligned}&\lim_{t\to\infty}x_i(t)\to 0\\&\lim_{t\to\infty}\tilde{\eta}_i(t)\to 0\end{aligned} \tag{33}$$

□

2.1.2　输出噪声处理

在实际工程中, 可重构机械臂系统会不可避免地受到输出噪声的干扰, 严重影响输出精度, 因此需要对其进行滤波处理.

设 $\chi_i=[x_{i1}\ \ x_{i2}]^{\rm T}=[q_i\ \ \dot{q}_i]^{\rm T}$ $(i=1,2,\cdots,n)$, 考虑输出噪声, 将可重构机械臂子系统动力学模型 (3) 改写为状态空间表达式为

$$S_i:\begin{cases}\dot{\chi}_i=A_i\chi_i+B_i[f_i(q_i,\dot{q}_i)+g_i(q_i)u_i+\\ \qquad h_i(q,\dot{q},\ddot{q})]\\ y_i=C_i\chi_i+\omega_i\end{cases} \tag{34}$$

其中, χ_i 是子系统 S_i 的状态向量, y_i 是子系统 S_i 的输出, ω_i 为零均值、方差为 W_i 的输出噪声, 且 ω_i 与初始状态 $\chi_i(0)$ 相互独立, 且

$$A_i=\begin{bmatrix}0&1\\0&0\end{bmatrix},\quad B_i=\begin{bmatrix}0\\1\end{bmatrix},\quad C_i=\begin{bmatrix}1&0\\0&1\end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}&f_i(q_i,\dot{q}_i)=M_i^{-1}(q_i)\left[-C_i(q_i,\dot{q}_i)\dot{q}_i-G_i(q_i)\right]\\&g_i(q_i)=M_i^{-1}(q_i)\\&h_i(q,\dot{q},\ddot{q})=-M_i^{-1}(q_i)Z_i(q,\dot{q},\ddot{q})\end{aligned} \tag{35}$$

设计如下稳定滤波器:

$$\begin{aligned}\dot{\hat{\chi}}_i=\ & A_i\hat{\chi}_i+B_i\Big[f_i(\hat{q}_i,\hat{\dot{q}}_i)+g_i(\hat{q}_i)u_i+\\ & h_i(\hat{q},\hat{\dot{q}},\hat{\ddot{q}})\Big]+K_i[y_i-C_i\hat{\chi}_i]\end{aligned} \tag{36}$$

其中, K_i 为待求的滤波增益矩阵. 滤波误差 $\tilde{\chi}_i=\chi_i-\hat{\chi}_i$ 满足如下方程:

$$\dot{\tilde{\chi}}_i=(A_i-K_iC_i)\tilde{\chi}_i+B_i\delta_i-K_i\omega_i \tag{37}$$

其中

$$\begin{aligned}\delta_i=\ & f_i(q_i,\dot{q}_i)+g_i(q_i)u_i+h_i(q,\dot{q},\ddot{q})-\\ & f_i(\hat{q}_i,\hat{\dot{q}}_i)-g_i(\hat{q}_i)u_i-h_i(\hat{q},\hat{\dot{q}},\hat{\ddot{q}})\end{aligned} \tag{38}$$

而 $\hat{\chi}_i(0)=\chi_i(0)$, $\tilde{\chi}_i(0)=0$.

假设 4. 滤波误差项 δ_i 有界, 且满足 $\|\delta_i\|\le\Delta_i$.

如果 K_i 为一稳定滤波器增益, 则稳态误差方差 P_i 必然存在, 且 P_i 为以下连续型 Riccati 方程唯一正定解[23]:

$$\dot{P}_i=P_iA_i^{\rm T}+A_iP_i-P_iC_i^{\rm T}W_i^{-1}C_iP_i+B_i\Delta_iB_i^{\rm T} \tag{39}$$

对于时变系统, 均方误差 P_i 是时变的, 每次采样对其进行更新计算量大, 甚至成为滤波计算的主要工作. 对于完全能控完全能观测系统, 随着迭代次数的增加, 滤波增益会最终趋于一个常值矩阵[24], 即

$$K_i=P_iC_i^{\rm T}W_i^{-1} \tag{40}$$

且当 $t\to\infty$ 时, $\dot{P}_i\to 0$.

由于此滤波器使用常值矩阵参与滤波器的计算, 为对系统状态的次优估计, 此方法计算量小, 更适合于在线的状态估计[25].

2.2　基于信号重构的主动分散容错控制

2.2.1　位置传感器故障信号重构

变步长的 Runge-Kutta 法是一种常用的常微分方程解法, 其可根据实际问题的具体情况合理选择每一步的步长, 平衡了局部截断误差和误差累积过大之间的矛盾, 精确性高. 本文选择基于四阶变步长 Runge-Kutta 算法的积分器进行数值积分运算[26].

标准的四阶 Runge-Kutta 公式如下:

$$\begin{cases} y_{n+1} = x_n + \frac{1}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \\ k_1 = f(x_n, y_n) \\ k_2 = f(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2}k_1) \\ k_3 = f(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2}k_2) \\ k_4 = f(x_n + h, y_n + hk_3) \end{cases} \tag{41}$$

变步长的 Runge-Kutta 方法的计算步骤如下:

设误差上限为 ε, 下限为 ε/M, $M>1$, 步长最大值为 h_0. 从 x_h 出发进行计算, 步长为 h.

步骤 1. 用步长 h 和 Runge-Kutta 公式计算 $y_{n+1}^{(h)}$, 用步长 $h/2$ 计算两步得 $y_{n+1}^{(\frac{h}{2})}$, 并计算 Δ;

步骤 2. 若 $\Delta > \varepsilon$, 说明步长过大, 应将 h 折半, 返回步骤 1 重新计算;

步骤 3. 若 $\Delta < \varepsilon/M$, 说明步长过小, 在下一步将 h 放大, 但不超过 h_0.

此方法中步长 h 与误差上限 ε 的选取对积分器的精度有很大影响. 一般情况下, 步长 h 与误差上限 ε 越小, 精度越高, 但同时也增加了计算负担, 导致实时性差, 因此二者的选取应以平衡积分精度和计算实时性为原则.

2.2.2 速度传感器故障信号重构

数值微分器可直接由位置传感器信号重构得到速度传感器信号, 本文选用如式 (42)[27] 的微分跟踪器代替故障速度传感器信号实现主动容错控制.

$$\begin{cases} \dot{\omega}_{i1}(t) = \omega_{i2}(t) - \lambda_{i1}\sqrt{|\omega_{i1}(t) - x_{i1}(t)|} \times \\ \qquad \mathrm{sgn}(\omega_{i1}(t) - x_{i1}(t)) \\ \dot{\omega}_{i2}(t) = -\lambda_{i2}\mathrm{sgn}(\omega_{i1}(t) - x_{i1}(t)) \\ \hat{x}_{i2}(t) = \hat{\dot{x}}_{i1}(t) = \omega_{i2}(t) \end{cases} \tag{42}$$

其中, $\hat{x}_{i2}(t)$ 为由位置传感器信号重构得到的速度信号, λ_{i1}, λ_{i2} 为用于调节跟踪速度的设计参数, 其取值越大, 跟踪速度越快, 但计算速度越慢, 因此需要综合考虑二者取值, 在满足实时性的同时尽量减小计算负担.

2.2.3 主动分散容错控制方案

主动分散容错控制系统分为故障检测、信号重构、取代控制以及反馈控制四个部分. 其主动分散容错控制策略为: 当实时检测出位置传感器发生故障, 立即采用式 (41) 中的重构信号取代位置传感器信号进行反馈控制, 同理, 当子系统速度传感器发生故障时, 立即采用如式 (42) 所重构的速度信号进行反馈控制, 以达到主动容错控制的目的.

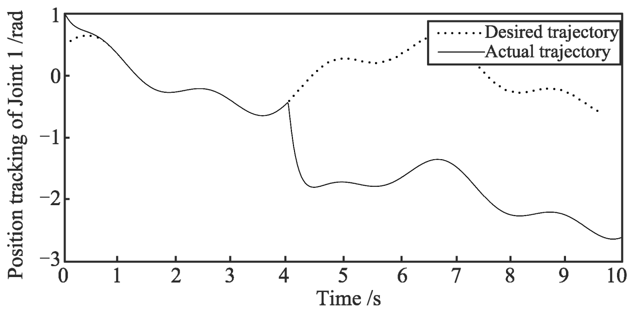
3 数值仿真

为了验证所设计的主动分散容错控制方法的有效性, 本文沿用文献 [21] 中图 1 所示的两种不同的二自由度可重构机械臂构形以及动力学模型进行仿真研究, 且期望轨迹和初值选取不变. 仿真采用式 (10) 所示的自适应模糊分散控制律, 其中控制参数设置为: $k_{ip} = 400$, $k_{iv} = 80$, $\eta_{i\rho} = 1$, $\eta_{ip} = 1$, $\eta_i = 1$, $Q_i = \mathrm{diag}\{10, 10\}$; 稳定滤波器参数设置为: $W_i = 1$, $\Delta_i = 1$; 变步长 Runge-Kutta 数值积分器的参数设置为: $h = 1/128$, $\varepsilon = 0.001$, $M = 2$; 微分跟踪器设计参数设置为: $\lambda_{i1} = 8$, $\lambda_{i2} = 8$.

在数值仿真过程中, 针对关节 1 加入如式 (43) 所示的位置传感器故障.

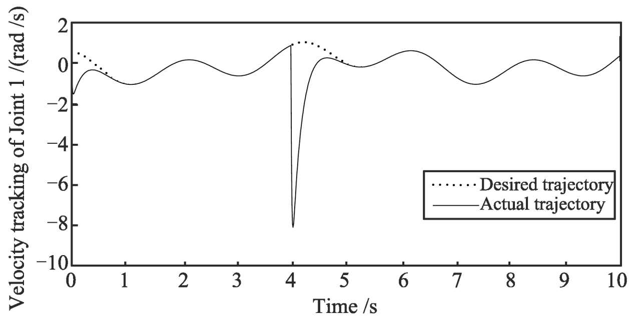
$$f_{si} = \begin{cases} 0, & t < 4\,\mathrm{s} \\ 2, & t \geq 4\,\mathrm{s} \end{cases} \tag{43}$$

从图 1 中可看出关节 1 在 $t = 4\,\mathrm{s}$ 时跟踪曲线出现了很大偏差. 此时采用变步长的 Runge-Kutta 算法对位置信号进行重构, 并取代位置信号进行反馈控制, 各关节轨迹跟踪曲线如图 2 所示, 控制系统性能几乎没有受到影响.



(a) 关节 1 位置跟踪曲线

(a) Position tracking curves of Joint 1

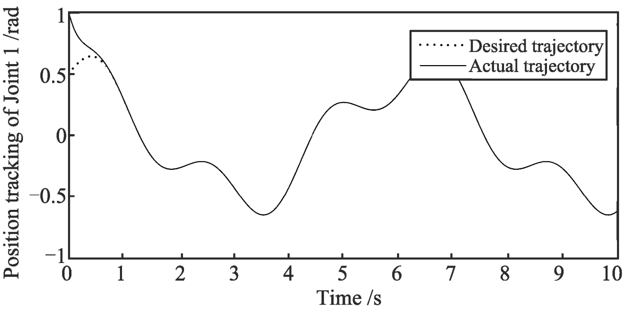


(b) 关节 1 速度跟踪曲线

(b) Velocity tracking curves of Joint 1

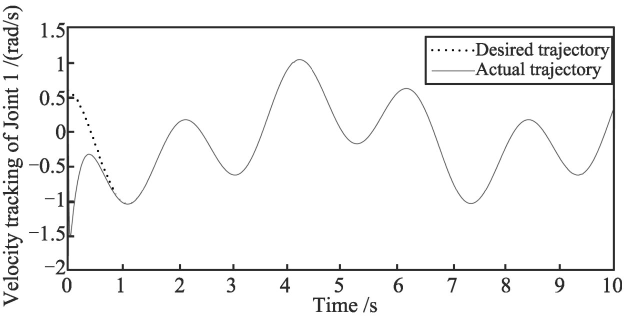
图 1 构形 A 位置传感器故障跟踪曲线

Fig. 1 Tracking curves of Configuration A with position sensor fault



(a) 关节 1 位置跟踪曲线

(a) Position tracking curves of Joint 1



(b) 关节 1 速度跟踪曲线

(b) Velocity tracking curves of Joint 1

图 2　构形 A 采用位置信号重构的容错控制跟踪曲线

Fig. 2　Tracking curves of Configuration A with position signal reconstruction fault tolerant control

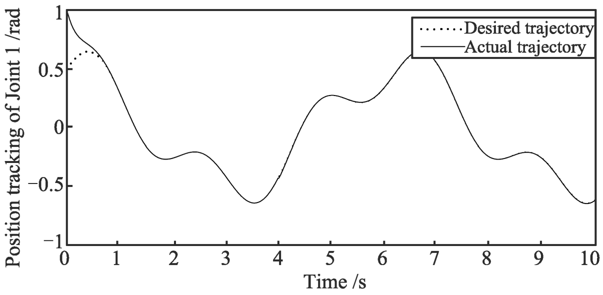
下面考虑速度传感器发生故障的情况, 亦针对关节 1 加入如式 (44) 所示的速度传感器故障.

$$f_{si} = \begin{cases} 0, & t < 4\,\mathrm{s} \\ 2\sin(t), & t \geq 4\,\mathrm{s} \end{cases} \tag{44}$$

从图 3 中可以看出, 由于故障的存在, 导致了关节 1 位置轨迹跟踪出现一定偏差, 速度轨迹跟踪曲线偏差非常明显. 此时, 采用微分跟踪器得到的速度重构信号取代故障信号, 轨迹跟踪曲线如图 4 所示, 从图中可以看出, 只有故障发生之初出现了一定偏差, 之后又可以使跟踪精度保持在误差允许范围内, 说明此方法有效地对故障进行了容错.

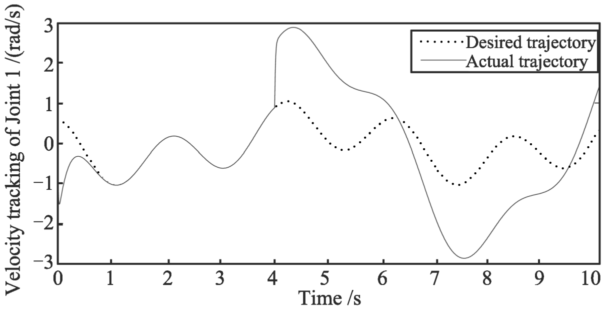
为了验证所设计的方法不需要修改控制参数对不同构形的机械臂仍然适用, 应用构形 B 进行相同的仿真实验. 针对关节 1 加入如式 (45) 所示的位置传感器故障, 轨迹跟踪曲线如图 5 和图 6 所示.

$$f_{si} = \begin{cases} 0, & t < 4\,\mathrm{s} \\ 2\sin(3t) + 0.5\cos(2t), & t \geq 4\,\mathrm{s} \end{cases} \tag{45}$$



(a) 关节 1 位置跟踪曲线

(a) Position tracking curves of Joint 1

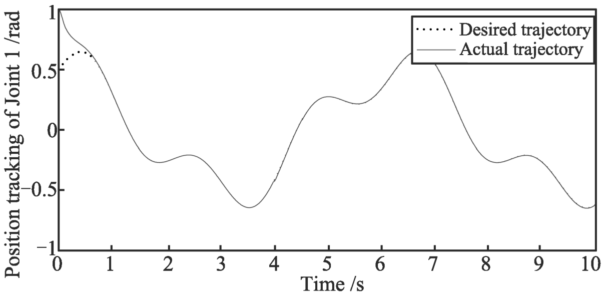


(b) 关节 1 速度跟踪曲线

(b) Velocity tracking curves of Joint 1

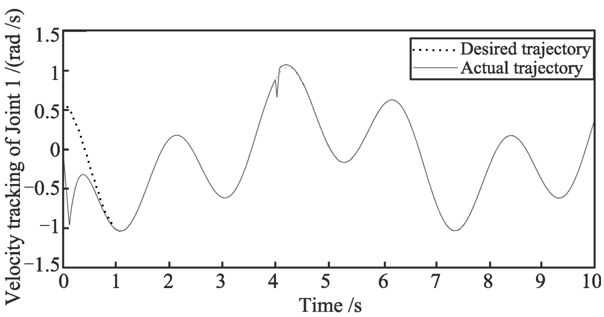
图 3　构形 A 速度传感器故障跟踪曲线

Fig. 3　Tracking curves of Configuration A with position sensor fault



(a) 关节 1 位置跟踪曲线

(a) Position tracking curves of Joint 1

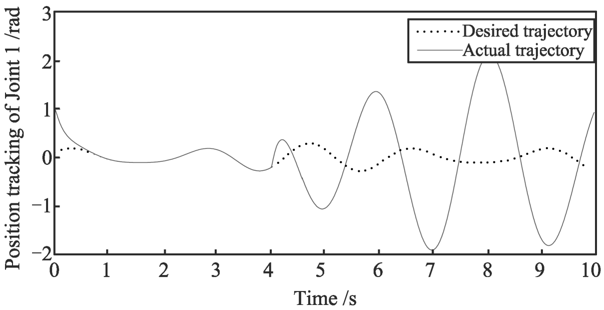


(b) 关节 1 速度跟踪曲线

(b) Velocity tracking curves of Joint 1

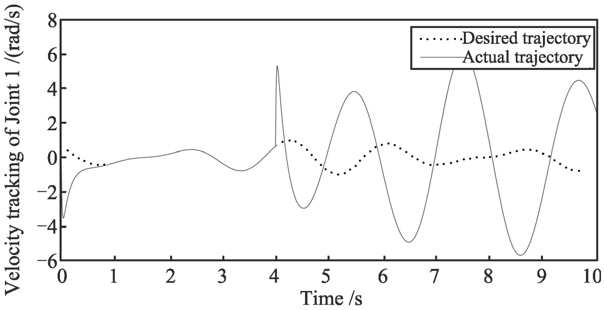
图 4　构形 A 采用速度信号重构的容错控制跟踪曲线

Fig. 4　Tracking curves of Configuration A with velocity signal reconstruction fault tolerant control



(a) 关节 1 位置跟踪曲线

(a) Position tracking curves of Joint 1

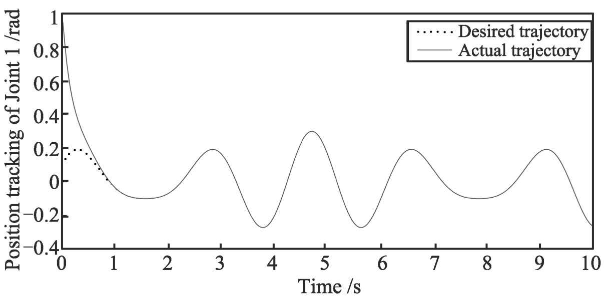


(b) 关节 1 速度跟踪曲线

(b) Velocity tracking curves of Joint 1

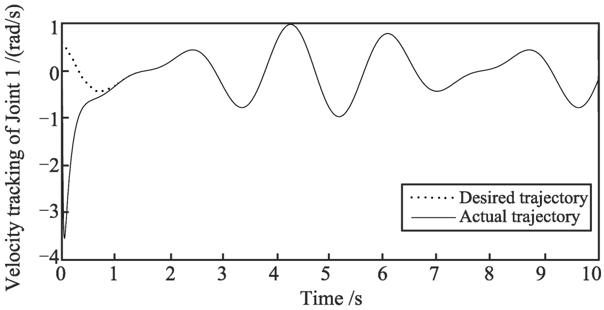
图 5　构形 B 位置传感器故障跟踪曲线

Fig. 5　Tracking curves of Configuration B with position sensor fault



(a) 关节 1 位置跟踪曲线

(a) Position tracking curves of Joint 1



(b) 关节 1 速度跟踪曲线

(b) Velocity tracking curves of Joint 1

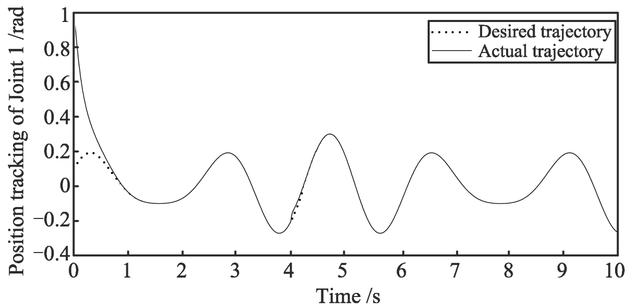
图 6　构形 B 采用位置信号重构的容错控制跟踪曲线

Fig. 6　Tracking curves of Configuration B with position signal reconstruction fault tolerant control

然后亦针对关节 1 加入如式 (46) 所示的速度传感器故障, 轨迹跟踪曲线如图 7 和图 8 所示.

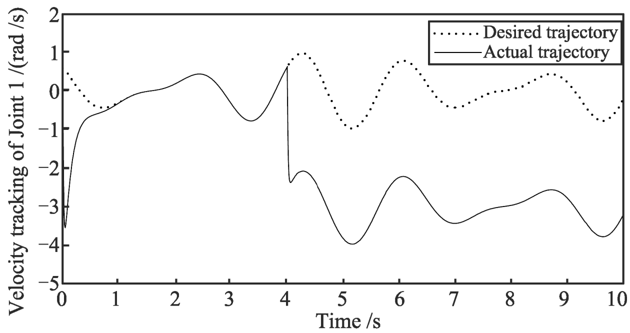
$$f_{si} = \begin{cases} 0, & t < 4\,\mathrm{s} \\ 3, & t \geq 4\,\mathrm{s} \end{cases} \tag{46}$$

从仿真结果可以得到与构形 A 相同的结论, 因此从两组仿真实验可知: 无论传感器发生时不变还是时变故障, 在不修改任何控制参数的情况下, 本文所设计主动分散容错控制方法对不同构形的可重构机械臂均有效.



(a) 关节 1 位置跟踪曲线

(a) Position tracking curves of Joint 1

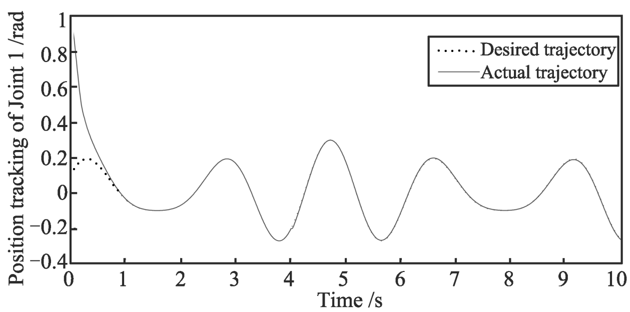


(b) 关节 1 速度跟踪曲线

(b) Velocity tracking curves of Joint 1

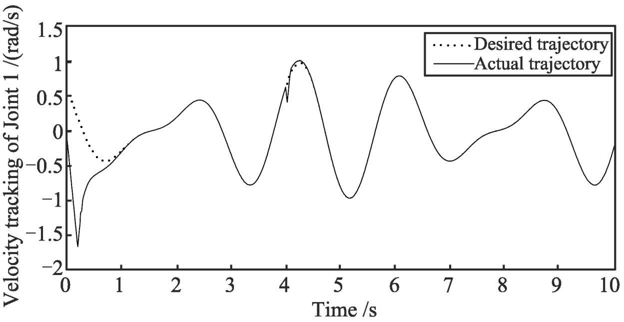
图 7　构形 B 速度传感器故障跟踪曲线

Fig. 7　Tracking curves of Configuration B with velocity sensor fault



(a) 关节 1 位置跟踪曲线

(a) Position tracking curves of Joint 1



(b) 关节 1 速度跟踪曲线
(b) Velocity tracking curves of Joint 1

图 8 构形 B 采用速度信号重构的容错控制跟踪曲线
Fig. 8 Tracking curves of Configuration B with velocity signal reconstruction fault tolerant control

4 结论

针对可重构机械臂系统传感器故障, 提出一种基于信号重构技术的主动分散容错控制方法. 当系统正常工作时, 采用基于 Lyapunov 稳定性理论的分散自适应模糊控制方法进行关节轨迹跟踪控制. 当系统传感器发生故障时, 利用位置传感器和速度传感器功能上的冗余关系, 采用重构信号代替故障信号实现主动分散容错控制. 仿真研究表明, 在不改变任何控制参数的条件下, 无论系统发生位置传感器故障还是速度传感器故障, 无论发生时不变还是时变故障, 所提出的主动分散容错控制方法均能保证可重构机械臂系统达到满意的控制性能.

References

1 Paredis C J J, Brown H B, Khosla P K. Rapidly deployable manipulator system. *Robotics and Autonomous Systems*, 1997, **21**(3): 289−304

2 Zhou Dong-Hua, Liu Yang, He Xiao. Review on fault diagnosis techniques for closed-loop systems. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(11): 1933−1943
(周东华, 刘洋, 何潇. 闭环系统故障诊断技术综述. 自动化学报, 2013, **39**(11): 1933−1943)

3 Chen Zong-Ji, Zhang Ru-Lin, Zhang Ping, Zhou Rui. Flight control: challenges and opportunities. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(6): 703−710
(陈宗基, 张汝麟, 张平, 周锐. 飞行器控制面临的机遇与挑战. 自动化学报, 2013, **39**(6): 703−710)

4 Edwards C, Alwi H, Tan C P. Sliding mode methods for fault detection and fault tolerant control with application to aerospace systems. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, 2012, **22**(1): 109−124

5 Liu Chun-Sheng, Jiang Bin. H_2 fault tolerant controller design for a class of nonlinear systems with a spacecraft control application. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(2): 188−196
(刘春生, 姜斌. 一类非线性系统的 H_2 容错控制器的设计及其在空间飞行器的应用. 自动化学报, 2013, **39**(2): 188−196)

6 Siqueira A A G, Terra M H, Buosi C. Fault-tolerant robot manipulators based on output-feedback H_∞ controllers. *Robotics and Autonomous Systems*, 2007, **55**(10): 785−794

7 Mirzaee A, Salahshoor K. Fault diagnosis and accommodation of nonlinear systems based on multiple-model adaptive unscented Kalman filter and switched MPC and H-infinity loop-shaping controller. *Journal of Process Control*, 2012, **22**(3): 626−634

8 Tan C P, Habib M K. The development of a fault-tolerant control approach and its implementation on a flexible arm robot. *Advanced Robotics*, 2007, **21**(8): 887−904

9 de Silva C W, Wong K. Online fault identification and fault-tolerant control of a multi-module manipulator. *International Journal of Robotics and Automation*, 2010, **25**(3): 217−228

10 Edwards C, Tan C P. Sensor fault tolerant control using sliding mode observers. *Control Engineering Practice*, 2006, **14**(8): 897−908

11 Izumikawa Y, Yubai K, Hirai J. Fault-tolerant control system of flexible arm for sensor fault by using reaction force observer. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2005, **10**(4): 391−396

12 Wu G Q, Lin B J, Zhang S C. Fault-tolerant backstepping attitude control for autonomous airship with sensor failure. *Procedia Engineering*, 2012, **29**: 2022−2027

13 Talebi H A, Khorasani K, Tafazoli S. A recurrent neural-network-based sensor and actuator fault detection and isolation for nonlinear systems with application to the satellite′s attitude control subsystem. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2009, **20**(1): 45−60

14 Dhahri S, Sellami A, Hmida F B. Robust sensor fault detection and isolation for a steer-by-wire system based on sliding mode observer. In: Proceedings of the 2012 IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference-MELECON. Hammamet, Tunisia: IEEE, 2012. 450−454

15 Ahmad S, Zhang H W, Liu G J. Distributed fault detection for modular and reconfigurable robots with joint torque sensing: a prediction error based approach. *Mechatronics*, 2013, **23**(6): 607−616

16 Yuan J, Liu G J, Wu B. Power efficiency estimation based health monitoring and fault detection of modular and reconfigurable robot. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, **58**(10): 4880−4887

17 Abdul S, Liu G J. Decentralised fault tolerance and fault detection of modular and reconfigurable robots with joint torque sensing. In: Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Pasadena, CA: IEEE, 2008. 3520−3526

18 Zhu Ming-Chao, Li Yuan-Chun, Jiang Ri-Hua. Decentralized fault tolerant control for reconfigurable modular robots. *Control and Decision*, 2009, **24**(8): 1247−1251, 1256
(朱明超, 李元春, 姜日花. 可重构模块机器人分散容错控制. 控制与决策, 2009, **24**(8): 1247−1251, 1256)

19 Ogita T, Yubai K, Hirai J. Construction of fault-tolerant control system for fixed fault in a reconfigurable robot. *Advanced Science Letters*, 2012, **15**(1): 315−320

20 Zhao Bo, Li Yuan-Chun, Liu Ke-Ping. Effectiveness factor integrated decentralized fault tolerant control scheme for reconfigurable manipulators. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2012, **52**(9): 1218−1222, 1229
(赵博, 李元春, 刘克平. 有效因子融合的可重构机械臂分散容错控制方法. 清华大学学报 (自然科学版), 2012, **52**(9): 1218−1222, 1229)

21 Li Yuan-Chun, Lu Peng, Zhao Bo. Backstepping time delay decentralized fault-tolerant control for reconfigurable manipulators. *Control and Decision*, 2012, **27**(3): 446−450
(李元春, 陆鹏, 赵博. 可重构机械臂反演时延分散容错控制. 控制与决策, 2012, **27**(3): 446−450)

22 Zhao B, Li Y C. Multisensor fault identification scheme based on decentralized sliding mode observers applied to reconfigurable manipulators. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, Article ID 327916, DOI: 10.1155/2013/327916

23 Hu Zhi-Kun, Sun Yan, Jiang Bin, He Jing, Zhang Chang-Fan. An optimal unknown input observer based fault diagnosis method. *Acta Automatica Sinica*, 2013, **39**(8): 1225−1230
(胡志坤, 孙岩, 姜斌, 何静, 张昌凡. 一种基于最优未知输入观测器的故障诊断方法. 自动化学报, 2013, **39**(8): 1225−1230)

24 Frogerais P, Bellanger J J, Senhadji L. Various ways to compute the continuous-discrete extended kalman filter. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2012, **57**(4): 1000−1004

25 Qi Guo-Qing, Chen Li, Li Yin-Ya, Sheng An-Dong. A bias-allowable estimator for continuous-time system. *Control Theory and Applications*, 2010, **27**(2): 193−198
(戚国庆, 陈黎, 李银伢, 盛安冬. 连续系统下的一种容偏估计策略. 控制理论与应用, 2010, **27**(2): 193−198)

26 Xu Tao. *Numerical Calculation Method*. Changchun: Jilin Science and Technology Press, 1998.
(徐涛. 数值计算方法. 长春: 吉林科学技术出版社, 1998.)

27 Pu Ming, Wu Qing-Xian, Jiang Chang-Sheng, Dian Song-Yi, Wang Yu-Fei. Recursive terminal sliding mode control for higher-order nonlinear system with mismatched uncertainties. *Acta Automatica Sinica*, 2012, **38**(11): 1777−1793
(蒲明, 吴庆宪, 姜长生, 佃松宜, 王宇飞. 非匹配不确定高阶非线性系统递阶 Terminal 滑模控制. 自动化学报, 2012, **38**(11): 1777−1793)

赵 博 吉林大学控制科学与工程系博士研究生. 2009 年获得吉林大学自动化专业学士学位. 主要研究方向为故障诊断与容错控制, 智能机械与机器人控制.
E-mail: zhaob09@mails.jlu.edu.cn
(**ZHAO Bo** Ph. D. candidate in the Department of Control Science and Engineering, Jilin University. He received his bachelor degree in automation from Jilin University in 2009. His research interest covers fault diagnosis and fault tolerant control, and intelligent mechanical and robot control.)

李元春 长春工业大学控制工程系教授. 主要研究方向为复杂系统建模, 智能机械与机器人控制. 本文通信作者.
E-mail: liyc@mail.ccut.edu.cn
(**LI Yuan-Chun** Professor in the Department of Control Engineering, Changchun University of Technology. His research interest covers complex system modeling, intelligent mechanical, and robot control. Corresponding author of this paper.)