

# 多移动机器人鲁棒容错编队控制算法研究\*

李修云<sup>1</sup>, 石慧霞<sup>2</sup>, 岳元龙<sup>3</sup>

(1. 重庆工程职业技术学院 信息工程学院, 重庆 402260; 2. 重庆工商职业学院 学生处, 重庆 401520;  
3. 海信(山东)空调有限公司, 山东 266000)

**摘要:**针对基于领航者-跟随者编队架构的多移动机器人系统,考虑存在执行器故障且拓扑结构为非平衡拓扑的情况,给出了多移动机器人实现编队运行的鲁棒容错控制算法。利用反馈线性化、降价等方法处理机器人模型的非线性及非完整约束等问题;考虑非平衡拓扑结构下的执行器故障问题,设计基于领航者-跟随者法的鲁棒容错控制方法;最后在 Matlab/Simulink 环境下对算法进行了软件仿真,仿真结果验证了所提控制策略的有效性。

**关键词:**编队控制;执行器故障;鲁棒容错控制;非平衡拓扑

**中图分类号:**TP301.5

**文献标志码:**A

**文章编号:**1672-6693(2016)05-0121-07

随着工业化的进程和高新技术的发展,多机器人系统的研究和运用受到了广泛关注。相对于单一的工业机器人,多个机器人采用相互协作的方式可以完成更加复杂的任务<sup>[1]</sup>。编队控制是一个具有典型性和通用性的多机器人协调控制问题。多机器人的协调编队控制技术在工农业生产、柔性制造、无人探险以及国防工业中具有巨大的应用前景<sup>[2]</sup>。常用的队形控制方法包括领航者-跟随者方法<sup>[3-6]</sup>、基于行为的方法<sup>[7-9]</sup>、以及虚拟结构法<sup>[10-13]</sup>等。

文献[13]把全局编队问题转化为局部跟随问题,将队形控制问题转化为跟随机器人离轴点对虚拟机器人离轴点的跟踪。文献[14]运用主从式编队方法,采用反馈控制策略使主从机器人保持期望的角度和距离,并将单一主从式编队控制扩展到多机器人编队控制。无论是局部跟随,还是主从编队,都离不开邻节点信息的交流。文献[15-16]在理论上证明了在缺少邻节点速度信息的情况下编队控制的可行性,但尚缺乏实物验证。文献[17-18]研究了针对具有执行器故障的多机器人编队控制方法,通过求解 Riccati 方程,分别得到传感器失效和执行器失效下的鲁棒容错线性调节器的设计方法。以上文献对机器人编队过程中可能出现的故障问题做了较深入的研究,但都仅限于通信拓扑结构为平衡拓扑的情形。文献[19-20]研究了非平衡拓扑结构下多智能体一致性协议问题,但对于多智能体出现执行器故障时的情况并未考虑。

考虑存在执行器故障且通信拓扑结构为非平衡拓扑的条件,本文从多机器人的二阶运动学模型着手,运用反馈线性化等方法处理机器人的非线性及非完整约束等问题,设计出基于领航者-跟随者法的鲁棒容错编队控制方法。为验证所设计控制算法的有效性,本文搭建了基于 Matlab/Simulink 的多移动机器人仿真平台,最终通过仿真结果验证了所提编队容错控制方法的有效性。

## 1 问题描述

本文考虑  $i(i=0, \dots, n+1)$  个机器人的多移动机器人系统,其中第 0 个机器人代表领航机器人,其余的  $n$  个机器人表示跟随机器人,跟随机器人与领航机器人保持一定的距离  $l$  和角度  $\varphi$  信息。领航机器人和跟随机器人的运动学模型分别为:

$$\dot{\mathbf{x}}_0 = f(\mathbf{x}_0, \dot{\mathbf{x}}_0) \quad (1)$$

\* 收稿日期:2016-03-17 修回日期:2016-07-05 网络出版时间:2016-07-13 14:03

资助项目:重庆市教委科技项目(No. KJ1403209)

作者简介:李修云,男,副教授,高级工程师,研究方向为电子信息、智能机器人、智能算法,E-mail:973736111@qq.com

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20160713.1403.028.html>

$$\begin{cases} \dot{x}_i = v_i \cos \varphi_i \\ \dot{y}_i = v_i \sin \varphi_i \\ \dot{\varphi}_i = \omega_i \\ \dot{v}_i = \frac{f_i}{m_i} \\ \dot{\omega}_i = \frac{\tau_i}{J_i} \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $(x_i, y_i)$  为机器人中心的笛卡尔位置坐标,  $\varphi_i$  为转向角度,  $v_i$  为运行速度,  $\omega_i$  为角速度,  $m_i$  为机器人质量,  $J_i$  为转动惯量,  $f_i$  为输入的力,  $\tau_i$  为输入力矩。为避免方程产生的非完整约束, 定义

$$\begin{bmatrix} x_{i1} \\ y_{i1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i + d_i \cos \varphi_i \\ y_i + d_i \sin \varphi_i \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中  $(x_{i1}, y_{i1})$  为轮轴长为  $d$  的第  $i$  个机器人轴心的位置坐标。于是, 系统模型(2)可反馈线性化为:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{i1} \\ \dot{y}_{i1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{i1} \\ v_{i2} \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} \dot{v}_{i1} \\ \dot{v}_{i2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{i1} \\ u_{i2} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

其中

$$\begin{bmatrix} f_i \\ \tau_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{m_i} \cos \varphi_i & -\frac{d_i}{J_i} \sin \varphi_i \\ \frac{1}{m_i} \sin \varphi_i & \frac{d_i}{J_i} \cos \varphi_i \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} u_{i1} + v_i \omega_i \sin \varphi_i + d_i \omega_i^2 \cos \varphi_i \\ u_{i2} - v_i \omega_i \cos \varphi_i + d_i \omega_i^2 \sin \varphi_i \end{bmatrix}. \quad (5)$$

考虑执行器出现故障的情况, 其模型如下

$$\begin{cases} \dot{x}_i = v_i \\ \dot{v}_i = p_i(t)u_i + \theta_i(t) \end{cases}, i=1, 2, \dots, n, \quad (6)$$

其中,  $\mathbf{x}_i = (x_{i1}, y_{i1})^T$  和  $\mathbf{v}_i = (v_{i1}, v_{i2})^T$  分别为第  $i$  个机器人的位置与速度,  $\mathbf{u}_i = (u_{i1}, u_{i2})^T$  为控制输入,  $p_i(t)$  和  $\theta_i(t)$  为执行器故障因子, 且满足  $p_{i0} I \leq p_i(t) \leq I_2$ ,  $\|\theta_i(t)\| \leq \theta_{i0}$ ,  $p_{i0} > 0, \theta_{i0} > 0$ 。

系统(6)可以写成全局形式

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{v} \\ \dot{\mathbf{v}} = \mathbf{p}(t)\mathbf{u} + \boldsymbol{\theta}(t) \end{cases}. \quad (7)$$

其中,  $\mathbf{X}_N = (x_1^T, x_2^T, \dots, x_n^T)^T$ ,  $\mathbf{v} = (v_1^T, v_2^T, \dots, v_n^T)^T$ ,  $\mathbf{u} = (u_1^T, u_2^T, \dots, u_n^T)^T$ ,  $\mathbf{p}(t) = \text{diag}\{p_1(t), p_2(t), \dots, p_n(t)\}$ ,  $\boldsymbol{\theta}(t) = (\theta_1(t), \theta_2(t), \dots, \theta_n(t))^T$ 。

**假设 1** 领航机器人的速度是有界的, 且其界为  $V_m$ , 即  $\sup_t \|\dot{x}_0(t)\| \leq V_m < \infty$ 。

若由  $n+1$  个机器人的通信拓扑为有向图结构  $G=(V, E)$ ,  $V=\{v_0, v_1, \dots, v_n\}$ 。则由跟随机器人形成的子图  $\bar{G}=(\bar{V}, \bar{E})$  的邻接矩阵为

$$\bar{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} 0 & a_{12} & \cdots & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & 0 & \cdots & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ a_{(n-1)1} & \cdots & \cdots & 0 & a_{(n-1)n} \\ a_{n1} & \cdots & \cdots & a_{n(n-1)} & 0 \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{n \times n}. \quad (8)$$

令  $\bar{\mathbf{D}} = \text{diag}\{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ ,  $d_i = \sum_{j=1}^n a_{ij}$ 。于是, 子图  $\bar{G}$  的拉普拉斯矩阵为  $\bar{\mathbf{L}} = \bar{\mathbf{D}} - \bar{\mathbf{A}}$ 。若  $\mathbf{B} = \text{diag}\{b_1, b_2, \dots, b_n\}$ ,  $\mathbf{b} = (b_1, b_2, \dots, b_n)^T$ , 则当  $0 \in N_i$  时,  $b_i > 0 (i=1, 2, \dots, n)$ ; 否则  $b_i = 0$ 。于是对有向图  $G=(V, E)$ , 其拉普拉斯矩阵为

$$L = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0}_{1 \times n} \\ -\mathbf{b} & \bar{\mathbf{L}} + \mathbf{B} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

如果  $G$  有生成树,那么  $\text{rank}(L) = n$ 。根据(9)式,可得  $\text{rank}[-\mathbf{b} \quad \bar{\mathbf{L}} + \mathbf{B}] = n$  和  $(\bar{\mathbf{L}} + \mathbf{B})\mathbf{1} = \mathbf{b}$ ,  $\mathbf{1}$  为  $n$  维的全  $\mathbf{1}$  矩阵。于是,可知  $\text{rank}(\bar{\mathbf{L}} + \mathbf{B}) = n$ 。当  $\bar{G}$  为强连通时,  $\bar{\mathbf{L}}$  是不可约的。并且只要  $b_i \neq 0$  且为非奇异的,那么  $\bar{\mathbf{L}} + \mathbf{B}$  即是不可约对角占优的。

因此本文的目标是设计控制协议  $u_i$ ,使之对具有一般通信拓扑结构的多机器人系统都能实现  $t \rightarrow \infty$  时  $x_i \rightarrow x_0$ 。

## 2 基于领航者-跟随者的鲁棒容错编队控制器

**定义 1** 定义机器人  $i$  的局部位置误差和全局位置误差分别为:

$$s_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} (x_j - x_i - l_{ij}) + b_i (x_0 - x_i - l_i), \quad (10)$$

$$\zeta_i = x_0 - x_i - l_i. \quad (11)$$

其中,  $l_{ij}$  为机器人  $i$  与机器人  $j$  之间的期望距离。

由(10),(11)式可知,多机器人系统中所有的局部位置误差向量可表示为

$$\mathbf{S} = ((\bar{\mathbf{L}} + \mathbf{B}) \otimes \mathbf{I}_m) (\mathbf{1} \otimes x_0 - \mathbf{X}_N) = ((\bar{\mathbf{L}} + \mathbf{B}) \otimes \mathbf{I}_m) \boldsymbol{\zeta}, \quad (12)$$

其中  $\mathbf{S} = (s_1^T, s_2^T, \dots, s_n^T)^T$ ,  $\boldsymbol{\zeta} = (\zeta_1^T, \zeta_2^T, \dots, \zeta_n^T)^T$ 。

**引理 1**<sup>[21]</sup> 若  $G$  具有生成树,且其根节点可用(1)式表示,那么:

$$\| \mathbf{X}_N - \mathbf{1} \otimes x_0 \| \leq \frac{\| \mathbf{S} \|}{\underline{\sigma}(\bar{\mathbf{L}} + \mathbf{B})}, \quad \| \dot{\mathbf{X}}_N - \mathbf{1} \otimes \dot{x}_0 \| \leq \frac{\| \dot{\mathbf{S}} \|}{\underline{\sigma}(\bar{\mathbf{L}} + \mathbf{B})}. \quad (13)$$

其中,  $\underline{\sigma}(\bar{\mathbf{L}} + \mathbf{B})$  为矩阵  $\bar{\mathbf{L}} + \mathbf{B}$  的最小奇异值。此外,当且仅当所有节点同步,即  $\mathbf{X}_N = \mathbf{1} \otimes x_0$ ,  $\dot{\mathbf{X}}_N = \mathbf{1} \otimes \dot{x}_0$  时,  $\mathbf{S} = \mathbf{0}$ ,  $\dot{\mathbf{S}} = \mathbf{0}$ 。

为书写方便,下文中省略了函数中的参数。考虑一种控制律如下

$$u_i = \bar{u}_{i1} + \bar{u}_{i2}, \quad \bar{u}_{i1} = -k_2 z_i + k_1 \dot{s}_i - \theta_{i0} \text{sign } z_i, \quad \bar{u}_{i2} = -\frac{1 - p_{i0}}{p_{i0}} \text{sign } z_i \| \bar{u}_{i1} \|. \quad (14)$$

其中,  $z_i = \dot{x}_i - k_1 s_i$ ,  $k_1 > 0$ ,  $k_2 > 0$ 。则可得以下结果。

**定理 1** 考虑网络化多机器人系统(6),假设  $G$  有生成树,则根据控制器(14)可得,局部位置误差和速度跟踪误差一致最终有界,同时全局跟踪误差也是一致最终有界的。

**引理 2**<sup>[21]</sup> 若  $G$  具有生成树,且其根节点可用(1)式表示。定义  $\mathbf{q} = [q_1, q_2, \dots, q_n] = (\bar{\mathbf{L}} + \mathbf{B})^{-1} \cdot \mathbf{1}$ ,  $\mathbf{P} = \text{diag}\left\{\frac{1}{q_i}\right\}$ , 以及  $\mathbf{Q} = \mathbf{P}(\bar{\mathbf{L}} + \mathbf{B}) + (\bar{\mathbf{L}} + \mathbf{B})^T \mathbf{P}$ , 则有  $\mathbf{P} > \mathbf{0}$ ,  $\mathbf{Q} > \mathbf{0}$ 。

**证明** 选取李雅普诺夫函数为

$$V = \frac{1}{2} \mathbf{S}^T \mathbf{P} \mathbf{S} + \frac{1}{2} \mathbf{Z}^T \mathbf{Z}, \quad (15)$$

其中  $\mathbf{Z} = (z_1^T, z_2^T, \dots, z_n^T)^T$ 。对函数  $V$  求导得

$$\dot{V} = \mathbf{S}^T \mathbf{P} \dot{\mathbf{S}} + \mathbf{Z}^T \dot{\mathbf{Z}}, \quad (16)$$

又由于:

$$\dot{\mathbf{S}} = -((\bar{\mathbf{L}} + \mathbf{B}) \otimes \mathbf{I}_2) \dot{\mathbf{X}}_N + \mathbf{b} \otimes \dot{x}_0, \quad (17)$$

$$\dot{\mathbf{Z}} = \mathbf{p}(t) \mathbf{u} + \boldsymbol{\theta}(t) - k_1 \dot{\mathbf{S}}. \quad (18)$$

将(17),(18)式带入(16)式得

$$\dot{V} = -\mathbf{S} \mathbf{a}^T \mathbf{P} ((\bar{\mathbf{L}} + \mathbf{B}) \otimes \mathbf{I}_2) \dot{\mathbf{X}}_N + \mathbf{S}^T \mathbf{P} (\mathbf{b} \otimes \dot{x}_0) + \sum_{i=1}^n z_i^T [p_i(t) u_i + \theta_i(t) - k_1 \dot{s}_i]. \quad (19)$$

又因为

$$\dot{\mathbf{X}}_N = \mathbf{Z} + k_1 \mathbf{S}, \tag{20}$$

代入(19)式可得

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{V}} = & -k_1 \mathbf{S}^T \mathbf{P}(\bar{\mathbf{L}} + \mathbf{B}) \otimes \mathbf{I}_2 \mathbf{S} - \mathbf{S}^T \mathbf{P}(\bar{\mathbf{L}} + \mathbf{B}) \otimes \mathbf{I}_2 \mathbf{Z} + \mathbf{S}^T \mathbf{P}(\mathbf{b} \otimes \dot{\mathbf{x}}_0) + \\ & \sum_{i=1}^n z_i^T [\bar{u}_{i1} - (1 - p_i(t)) \bar{u}_{i1} + p_i(t) \bar{u}_{i2} + \theta_i(t) - k_1 \dot{s}_i]. \end{aligned} \tag{21}$$

将(14)式代入(21)式得

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{V}} = & -k_1 \mathbf{S}^T \mathbf{P}(\bar{\mathbf{L}} + \mathbf{B}) \otimes \mathbf{I}_2 \mathbf{S} - \mathbf{S}^T \mathbf{P}(\bar{\mathbf{L}} + \mathbf{B}) \otimes \mathbf{I}_2 \mathbf{Z} + \mathbf{S}^T \mathbf{P}(\mathbf{b} \otimes \dot{\mathbf{x}}_0) + \\ & \sum_{i=1}^n z_i^T [-k_2 z_i - \theta_{i0} \text{sign } z_i - (1 - p_i(t)) \bar{u}_{i1} - \frac{1 - p_{i0}}{p_{i0}} p_i(t) \text{sign } z_i \| \bar{u}_{i1} \| + \theta_i(t)]. \end{aligned} \tag{22}$$

进一步处理可得

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{V}} \leq & -k_1 \mathbf{S}^T \mathbf{P}(\bar{\mathbf{L}} + \mathbf{B}) \otimes \mathbf{I}_2 \mathbf{S} + \bar{\sigma}(\mathbf{P}) \bar{\sigma}(\bar{\mathbf{L}} + \mathbf{B}) \| \mathbf{S} \| \cdot \| \mathbf{Z} \| + \sqrt{n} V_m \bar{\sigma}(\mathbf{P}) \| \mathbf{S} \| - k_2 \| \mathbf{Z} \|^2 + \\ & \sum_{i=1}^n [(1 - p_{i0}) \| z_i \| \cdot \| \bar{u}_{i1} \| - \theta_{i0} \| z_i \| - \frac{1 - p_{i0}}{p_{i0}} p_i(t) \| z_i \| \cdot \| \bar{u}_{i1} \| + \theta_i(t) \| z_i \|]. \end{aligned} \tag{23}$$

其中,  $\bar{\sigma}(\bar{\mathbf{L}} + \mathbf{B})$  为  $\bar{\mathbf{L}} + \mathbf{B}$  的最大奇异值。

于是有

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{V}} \leq & -k_1 \mathbf{S}^T \mathbf{P}(\bar{\mathbf{L}} + \mathbf{B}) \otimes \mathbf{I}_2 \mathbf{S} + \bar{\sigma}(\mathbf{P}) \bar{\sigma}(\bar{\mathbf{L}} + \mathbf{B}) \| \mathbf{S} \| \cdot \| \mathbf{Z} \| + \sqrt{n} V_m \bar{\sigma}(\mathbf{P}) \| \mathbf{S} \| - k_2 \| \mathbf{Z} \|^2 \leq \\ & -\frac{1}{2} k_1 \mathbf{S}^T \mathbf{Q} \mathbf{S} - k_2 \| \mathbf{Z} \|^2 + \frac{\bar{\sigma}^2(\mathbf{P}) \bar{\sigma}^2(\bar{\mathbf{L}} + \mathbf{B})}{2\varepsilon_1} \| \mathbf{S} \|^2 + \frac{\varepsilon_1}{2} \| \mathbf{Z} \|^2 + \frac{V_m^2 \bar{\sigma}^2(\mathbf{P})}{2\varepsilon_2} \| \mathbf{S} \|^2 + \frac{n\varepsilon_2}{2} \\ & - \left( \frac{1}{2} k_1 \lambda_{\min}(\mathbf{Q}) - \frac{\bar{\sigma}^2(\mathbf{P}) \bar{\sigma}^2(\bar{\mathbf{L}} + \mathbf{B})}{2\varepsilon_1} - \frac{V_m^2 \bar{\sigma}^2(\mathbf{P})}{2\varepsilon_2} \right) \| \mathbf{S} \|^2 - \left( k_2 - \frac{\varepsilon_1}{2} \right) \| \mathbf{Z} \|^2 + \frac{n\varepsilon_2}{2} \end{aligned} \tag{24}$$

成立。(24)式中参数  $k_1, k_2$  为满足条件  $k_1 > \frac{\bar{\sigma}^2(\mathbf{P}) \bar{\sigma}^2(\bar{\mathbf{L}} + \mathbf{B})}{\varepsilon_1 \lambda_{\min}(\mathbf{Q})} + \frac{V_m^2 \bar{\sigma}^2(\mathbf{P})}{\varepsilon_2 \lambda_{\min}(\mathbf{Q})}, k_2 > \frac{\varepsilon_1}{2}$  的常数。

令  $c_0 = \min \left\{ k_1 \lambda_{\min}(\mathbf{Q}) - \frac{\bar{\sigma}^2(\mathbf{P}) \bar{\sigma}^2(\bar{\mathbf{L}} + \mathbf{B})}{\varepsilon_1} - \frac{V_m^2 \bar{\sigma}^2(\mathbf{P})}{\varepsilon_2}, (2k_2 - \varepsilon_1) \right\}, \xi = \frac{n\varepsilon_2}{2}$ 。由(24)式可得  $\dot{\mathbf{V}} \leq -c_0 V + \xi$ , 即

$V(t) \leq V(0)e^{-c_0 t} + \frac{\xi}{c_0} (1 - e^{-c_0 t})$ 。于是,  $\| \mathbf{S} \| \leq \sqrt{2V(0)e^{-c_0 t} + \frac{2\xi}{c_0} (1 - e^{-c_0 t})}$ , 说明局部跟踪误差是一致最终有界的。类似可以得出速度跟踪误差也是一致最终有界的。根据引理 1 可知, 全局跟踪误差一致最终有界。证毕

**注** 此部分在原有理论的基础上有所拓展。本文的结果适用于目标系统的跟随子系统拓扑结构为有向拓扑结构的情景。

### 3 仿真研究

假设多移动机器人编队的通信拓扑结构如图 1 所示, 运用基于领航者-跟随者法的鲁棒容错编队控制器进行仿真实验。设定三个移动机器人的期望队形如图 2 所示, 其距离分别为: 1 和 2 之间  $2\sqrt{2}$ 、1 和 3 之间  $2\sqrt{2}$ 、2 和 3 之间 4。假设给定的参考运动轨迹为

$$\begin{cases} x_0(t) = 3t + 3 \\ y_0(t) = \sin t \end{cases}, \begin{cases} x_0(0) = 3 \\ y_0(0) = 0 \end{cases} \tag{25}$$

其余各机器人的初始状态分别为  $(3, 0), (1, -1), (0, 2)$ 。各个机器人的协调控制输入由(14)式给出: 在  $t \leq 8$  秒时, 取  $k_i = 10, p_i(t) = 1, \theta_i(t) = 0, \theta_{i0} = 0, p_{i0} = 1, i = 1, 2, 3$ , 即  $u_i = k_i r_i + \sum_{j \in N_i} a_{ij} (r_i - r_j) + f_i(x_i)$ ; 在  $t = 8$  秒时, 对图 2 中的 2 号移动机器人加入故障项, 其中  $p_2(t) = |0.2 \cos(0.1t)| + 0.5, \theta_2(t) = 10$ ; 当检测到执行器故障时, 则切换控制器为(14)式, 并改变参数为

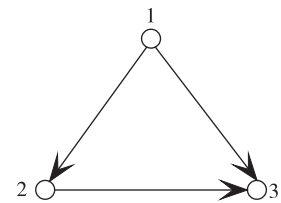


图 1 通信拓扑结构图  
Fig. 1 Topology of communication

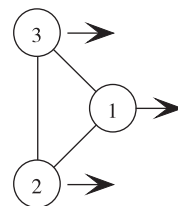


图 2 三角形队形  
Fig. 2 Triangle formation

$k_1 = 60, k_2 = 1, \theta_{10} = 10, p_{10} = 0.5$ 。仿真效果如图 4 所示。若加入故障后,仍采用  $t \leq 8$  时的控制器,得到的效果图如图 3 所示。

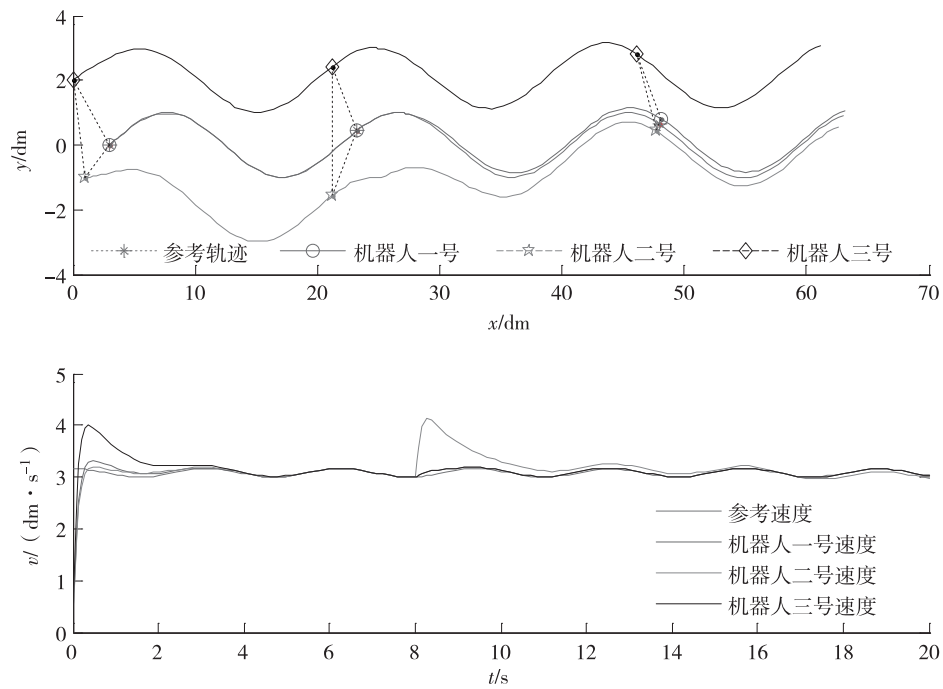


图 3 运用常规控制器时位置与速度跟踪情况

Fig. 3 Situations of tracking position and speed with conventional controller

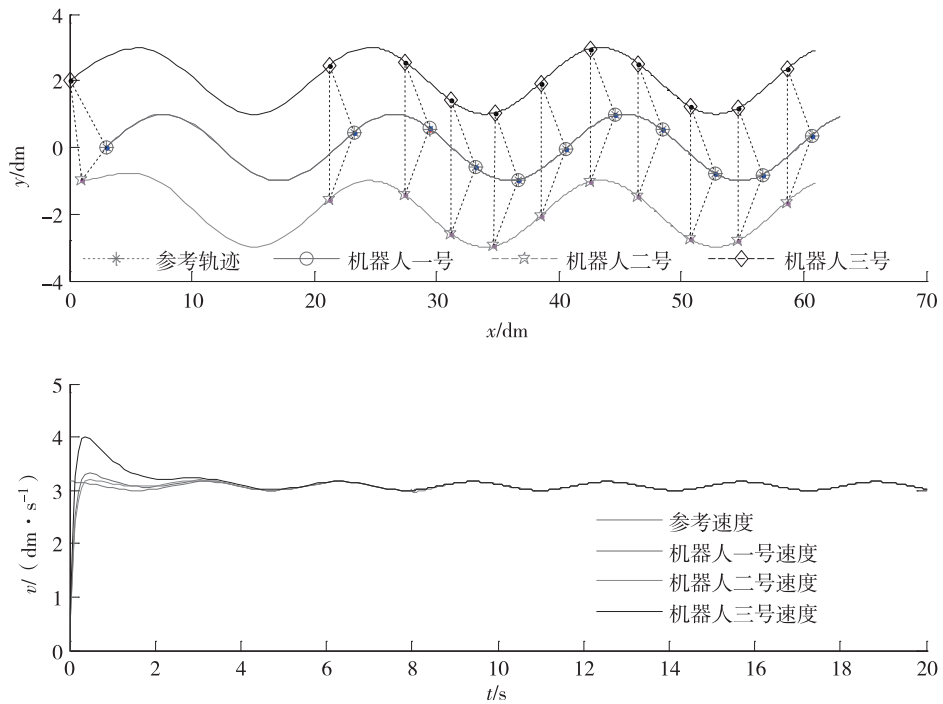


图 4 运用容错控制器时位置与速度跟踪情况

Fig. 4 Situations of tracking position and speed with fault-tolerant feedback controller

对比图 3 和图 4 可知,未加入故障项之前,系统能够根据设定的编队控制算法很快的达到期望队形和期望速度,并趋于稳定,但收敛速度较慢;当加入故障项之后,若仍然运用原来的控制器,则机器人将发生碰撞或逐渐分离,导致期望队形逐渐被破坏;若此时能够检测到故障的存在,并切换为容错控制器,则对队形及故障机器人的速度没有明显影响,且系统又能很快恢复到期望水平,达到稳定,且收敛速度较快。同时由图 5 可知,切换为

容错控制器后,控制输入将发生跳变,但能够很快的稳定下来,与未加入故障的机器人的控制输入变化规律一致。这就说明所述的容错控制器对于多移动机器人系统通信拓扑结构为非平衡的情况下是合理的、有效的。

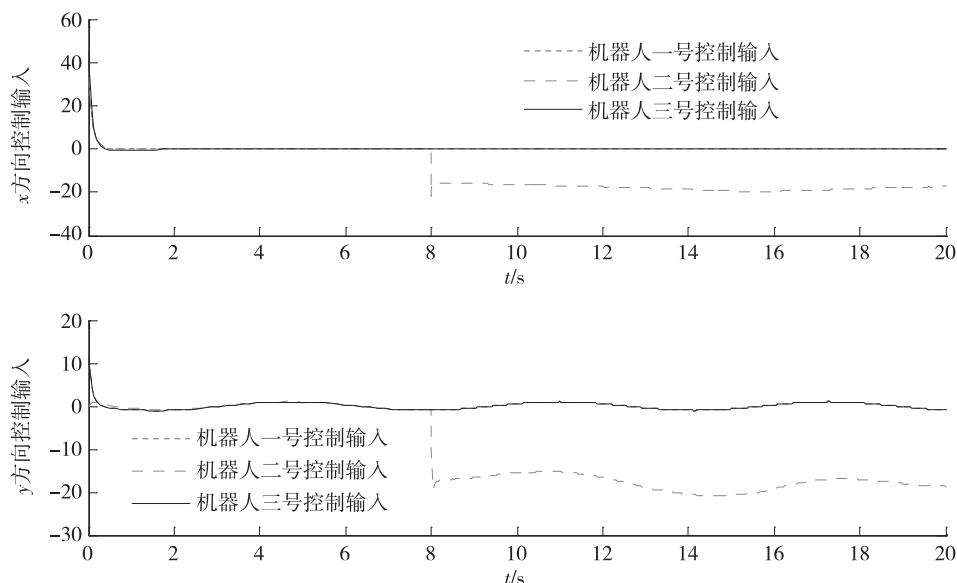


图 5 控制输入

Fig. 5 Control inputs

## 4 总结

本文提出了一种多机器人系统鲁棒容错编队控制方案。相对已有成果,本文方法适用于更广泛的一类分布式系统,即系统通讯拓扑结构为非平衡的情况。基于李雅普诺夫方法,验证了基于此方法的网络化系统的全局跟踪误差是一致最终有界的。最后,本文设计了基于 Matlab/Simulink 的多移动机器人仿真平台,仿真结果证明了控制方法的合理性和有效性。

### 参考文献:

- [1] 原魁,李园,房立新. 多移动机器人系统研究发展近况[J]. 自动化学报,2007,33(8):785-794.  
Yuan K, Li Y, Fang L X. Multiple mobile robot systems: a survey of recent work[J]. Acta Automatica Sinica, 2007, 33(8):785-794.
- [2] 董胜龙,陈卫东,席裕庚. 多移动机器人编队的分布式控制系统[J]. 机器人,2000,11(6):433-438.  
Dong S L, Chen W D, Xi Y G. An Distributed Control system for Multi-Mobile Robots Formation[J]. Robot, 2000, 11(6):433-438.
- [3] 吴垠,刘忠信,陈增强,等. 一种基于模糊方法的领导-跟随型多机器人编队控制[J]. 智能系统学报,2015,10(4):533-540.  
Wu Y, Liu Z X, Chen Z Q, et al. A based on fuzzy method of leader follower formation control of multi robot system [J]. the intelligent system of, 2015, 10(4):533-540.
- [4] 周峰,吴炎焯. 基于有向网络的一致性跟踪算法[J]. 自动化学报,2015,41(1):180-185.  
Zhou F, Wu Y X. A consensus tracking algorithm based on directed networks[J]. 2015, 41(1):180-185.
- [5] Li X H, Xiao J Z. Robot formation control in leader-follower motion using direct lyapunov method[J]. International Journal of Intelligent Control and Systems, 2005, 10(3): 244-250.
- [6] Brandao A S, Sarcinelli-Filho M, Carelli R, et al. Decentralized control of leader-follower formations of mobile robots with obstacle avoidance[C]//Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Mechatronics, 2009:1-6.
- [7] Lawton J R, Beard R W, Young B J. A decentralized approach to formation maneuvers[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2003, 19(6):933-941.
- [8] 崔荣鑫,徐德民,沈猛. 基于行为的机器人编队控制研究[J]. 计算机仿真,2006,23(2):137-139.  
Cui R X, Xu D M, Shen M. Formation control of robots based on behavior[J]. Computer Simulation, 2006, 23(2): 137-139.
- [9] 左国玉,张洪亮,韩光胜,等. 基于动态目标点的行为分解编队算法[J]. 控制工程,2010,17(5):679-681.  
Zuo G Y, Zhang H L, Han G S, et al. Behavior decomposition formation algorithm based on dynamic target point

- [J]. Control Engineering of China, 2010, 17(5):679-681.
- [10] Dang B N, Khac D D. Formation control of mobile robots [J]. International Journal of Computers, Communications & Control, 2006, 1(3):41-59.
- [11] 秦梓荷, 林壮, 李平, 等. 存在饱和输入量的欠驱动船舶编队控制[J]. 华中科技大学学报, 2015, 43(8):75-78.  
Qin Z H, Lin Z, Li P, et al. There is a saturated input underactuated ship formation control volume[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2015, 43(8):75-78.
- [12] Shao J Y, Wang L, Xie G M. Flexible formation control for obstacle avoidance based on numerical flow field [C]// Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision & Control, 2006:5986-5991.
- [13] 杨丽, 曹志强, 谭民. 不确定环境下多机器人的动态编队控制[J]. 机器人, 2010, 32(2):283-288.  
Yang L, Cao Z Q, Tan M. Dynamic formation control for multiple robots in uncertain environments [J]. Robot, 2010, 32(2):283-288.
- [14] 张明, 严卫生, 高剑. 实时位置反馈的多机器人主从式编队控制[J]. 火力与指挥系统, 2012, 32(2):12-15.  
Zhang M, Yan W S, Gao J. Study on leader-following formation control of multi-robots based on real-time location feedback[J]. Fire Control and Command Control, 2012, 32(2):12-15.
- [15] Choi K, Yoo S J, Park J B, et al. Adaptive formation control in absence of leader's velocity information[J]. IEEE Trans on Control Theory and Applications, 2009, 4(4):521-528.
- [16] Chen G, Yue Y L. Coordinated motion control of networked mechanical systems [J]. IEEE Trans on Control and Decision Conference, 2012, 23(1):2478-2483.
- [17] 孙金生, 李军, 王执铨. 离散系统鲁棒容错线性调节器设计[J]. 控制与决策, 1996, 11(1):68-72.  
Sun J S, Li J, Wang Z Q. Design of robust fault-tolerant linear regulator for discrete systems [J]. Control and Design, 1996, 11(1):68-72.
- [18] 王巍, 王丹, 彭周华. 不确定非线性多智能体系统的分布式容错协同控制[J]. 控制与决策, 2015, 30(7):1303-1308.  
Wang W, Wang D, Peng Z H. Distributed fault tolerant cooperative control for uncertain nonlinear multi-agent systems [J]. 2015, 30(7):1303-1308.
- [19] 谭拂晓, 关新平, 刘德荣. 非平衡拓扑结构的多智能体网络系统一致性协议[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(10):1087-1092.  
Tan F X, Guan X P, Liu D R. Consensus protocol in networked multi-agent systems with non-balanced topology [J]. Control Theory and Applications, 2009, 26(10):1087-1092.
- [20] Lu J, Chen F, Chen G R. Nonsmooth leader-following formation Control of nonidentical multi-agent systems with directed communication topologies [J]. Automatica, 2016 (64):112-120.

## Robust Fault-tolerant Formation Control for Multiple Mobile Robots

LI Xiuyun<sup>1</sup>, SHI Huixia<sup>2</sup>, YUE Yuanlong<sup>3</sup>

(1. Department of Information Engineering, Chongqing Vocational Institute of Engineering, Chongqing 402260;

2. Student Office, Chongqing Technology and Business Institute, Chongqing 401520;

3. Hisense(Shandong) Air Conditioning Co., LTD, Qingdao Shandong 266000, China)

**Abstract:** This paper proposes a robust fault-tolerant formation control algorithm for multiple mobile robots that are organized by leader-follower schema, where the actuator faults and the non-balanced topological structure are considered. The feedback linearization and degree reduction methods are utilized to solve the nonlinearity and nonholonomic constraints problems that exist in the robot model. Then, a leader-follower based robust fault-tolerant formation control method is developed to deal with the actuator faults. Finally, the simulations are conducted in Matlab/Simulink and the results verified the effectiveness of the proposed control algorithm.

**Key words:** formation control; actuator fault; robust fault-tolerant control; non-balanced topology

(责任编辑 黄 颖)