

事件触发策略下多移动机器人抗干扰固定时间编队控制

王健安^{1,2}, 闫慧娴^{1,2}, 赵志诚^{1,2}

(1. 太原科技大学电子信息工程学院, 山西太原 030024; 2. 先进控制与装备智能化山西省重点实验室, 山西太原 030024)

摘 要: 为节约有限通信资源, 针对不确定多移动机器人系统的编队控制问题, 提出一种基于抗干扰观测器的事件触发固定时间编队控制方法. 首先, 设计了一类自适应固定时间滑模干扰观测器(Adaptive Fixed-time Sliding Mode Disturbance Observer, AFSMDO), 用来估计系统模型参数不确定和未知扰动. 其次, 在干扰观测器的基础上, 结合反步法和固定时间理论, 引入事件触发机制, 设计固定时间分布式编队控制器, 实现多机器人系统固定时间编队且收敛时间不依赖于系统初始状态, 并经理论推导无Zeno行为. 最后, 通过对三个移动机器人进行编队仿真研究, 验证了方法的有效性.

关键词: 移动机器人; 干扰观测器; 编队控制; 有限通信资源; 固定时间; 事件触发

基金项目: 山西省重点研发计划(国际科技合作)项目(No.201903D421045); 山西省基础研究计划面上项目(No.20210302123210, No.20210302122427, No.201901D111265); 山西省重点研发计划项目(No.202102020101002); 山西省科技重大专项(No.20191102009); 山西省研究生教育创新计划项目(No.2021Y682)

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112(2023)05-1256-10

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.12263/DZXB.20211610

Anti-Disturbance Fixed-Time Formation Control of Multi-Mobile Robots via Event-Triggered Mechanism

WANG Jian-an^{1,2}, YAN Hui-xian^{1,2}, ZHAO Zhi-cheng^{1,2}

(1. College of Electronics Information Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;
2. Shanxi Key Laboratory of Advanced Control and Equipment Intelligence, Taiyuan, Shanxi 030024, China)

Abstract: For the formation control problem of uncertain multi-mobile robot system, to save limited communication resources, an event-triggered fixed-time formation control method is proposed based on anti-disturbance observer. Firstly, an adaptive fixed-time sliding mode disturbance observer (AFSMDO) is developed to estimate model parameter uncertainty and unknown disturbance. Then, on the basis of the designed disturbance observer, combined with backstepping and fixed-time theory, as well as introducing event-triggered mechanism, a fixed-time distributed formation control method is designed to achieve formation task. The setting-time is independent on the system's initial system state. The Zeno behavior is excluded through theoretical analysis. Finally, the numerical simulations of three mobile robots are studied to verify the effectiveness of the proposed methods.

Key words: mobile robots; disturbance observer; formation control; limited communication resources; fixed-time; event-triggered

Foundation Item(s): Key Research and Development Program of Shanxi Province (No.201903D421045); Fundamental Research Program of Shanxi Province (No.20210302123210, No.20210302122427, No.201901D111265); Key Research and Development Program of Shanxi Province (No.202102020101002); Shanxi Provincial Major Science and Technology Project (No.20191102009); Shanxi Provincial Graduate Innovation Project (No.2021Y682)

1 引言

移动机器人编队广泛应用于地理勘测、巡逻侦察、

安全救援和运输大型货物等领域中,是多机器人协调控制的重要研究方向之一. 编队控制方法主要有基于

行为法^[1]、虚拟结构法^[2]和领航-跟随者法^[3,4]. 在领航-跟随者编队控制方法中,每个跟随者以一定的距离和角度跟踪领航者,控制思想简单,队形结构易实现,受到广大研究人员的关注.

然而,移动机器人会受到模型参数不确定、未知扰动和摩擦力的影响,这给其编队带来极大的困难. 为了解决模型参数不确定和未知扰动的影响,经常采用基于神经网络近似算法和基于扰动观测器算法. 文献[5]采用神经网络技术对扰动进行补偿,但神经网络技术会导致计算负担增加. 在基于扰动观测器算法中,滑模控制^[6]可以克服系统的不确定性,对干扰和未建模动态具有很强的鲁棒性. 文献[7]研究了模型参数不确定及未知海洋扰动的多 AUVs (Autonomous Underwater Vehicles) 协同编队问题,构造了一种基于固定时间积分滑模扰动观测器,实现了对复合扰动的精确估计. 文献[8]提出一种非奇异终端滑模控制器,然而收敛时间与初始观测误差有关,限制了其适用性.

在实际应用中,收敛速率是移动机器人编队的一个重要性能指标. 为了改善控制算法的收敛性能,学者们提出了有限时间稳定理论^[9-12]. 然而有限时间收敛受系统初始状态的影响,若系统初始状态无法获得,那么精确的收敛时间很难确定. Polyakov^[13]提出了固定时间稳定理论,不仅提高了系统的收敛速度,收敛时间独立于系统的初始状态. 文献[14]针对多 AUVs 系统,基于动态事件触发策略,提出了一种抗干扰的固定时间编队控制方法. 文献[15]研究了双积分器固定时间一致性跟踪问题,并将结果进一步扩展到轮移动机器人的固定编队跟踪问题.

在上述文献中,领航机器人需要连续不断将自身状态信息传送给跟随机器人,这无疑会增加网络的负荷,造成通信资源的浪费. 与传统通信策略相比,事件触发控制的采样时间取决于触发条件是否满足,可减少控制任务的执行次数,节约网络传输资源^[16]. 文献[17,18]研究了基于事件触发的 AUVs 固定时间编队控制问题,解决了通信资源浪费的问题. 然而,有限通信资源下的多移动机器人固定时间抗干扰编队控制问题还未见报道.

综上,本文同时考虑多不确定性和有限通信资源的移动机器人编队问题. 结合固定时间、滑模控制理论和事件触发机制,设计基于自适应固定时间滑模干扰观测器的事件触发编队控制器,确保编队跟踪误差在固定时间内收敛,并排除事件触发策略的 Zeno 现象. 仿真算例表明算法的合理可行.

2 问题描述

2.1 非完整移动机器人模型

非完整移动机器人的运动学和动力学方程为

$$\dot{q} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -d \sin \theta \\ \sin \theta & d \cos \theta \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$M(q)\dot{V} + C(q, \dot{q})V + F + \tau_d = B\tau \quad (2)$$

其中, $q = (x, y, \theta)^T$ 为机器人的姿态向量, (x, y) 表示前轮中点在笛卡尔坐标系中的坐标, θ 为机器人的导向角; $V = (v, \omega)^T$, v 和 ω 分别为移动机器人的线速度和角速度. $M(q) = \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & I - md^2 \end{bmatrix}$ 为系统惯性矩阵, m 和 I 分别为移动机器人平台质量及绕轮轴的转动惯量, d 是机器人后轴到前部的距离; $C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ 是向心力和哥氏力矩阵; $B = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ R & -R \end{bmatrix}$ 是仅与轮距 R 和轮半径 r 有关的非奇异矩阵. τ_d 是未知扰动, F 为表面摩擦, $\tau = [\tau_r, \tau_l]^T$, τ_r 与 τ_l 是加在右轮和左轮的力矩.

当考虑机器人系统存在不确定性时,其动力学方程可以写成:

$$\dot{V} = E\tau - \mu \quad (3)$$

其中, $E = M^{-1}B$, μ 为系统的总和扰动,取

$$\mu = M^{-1}(\Delta M\dot{V} + \Delta CV + F + \tau_d) \quad (4)$$

这里的 ΔM 和 ΔC 分别是系统矩阵 M 和 C 的模型误差,即考虑不确定因素后的误差.

2.2 领航-跟随者移动机器人编队模型

图 1 是领航-跟随者编队模型,跟随机器人根据预先设定的期望距离和期望方位角跟随领航机器人运动. 图中, L_{ij} 和 ψ_{ij} 是领航机器人和跟随机器人实际距离和方位角. 由文献[6]可知,编队系统的运动学方程为

$$\begin{cases} \dot{L}_{ij} = v_f \cos \gamma_f - v_l \cos \psi_{ij} + dw_f \sin \gamma_f \\ \dot{\psi}_{ij} = (v_l \sin \psi_{ij} - v_f \sin \gamma_f + dw_f \cos \gamma_f - L_{ij} w_l) / L_{ij} \end{cases} \quad (5)$$

其中,下标 l 和 f 分别代表领航和跟随机器人, v_l, w_l, θ_l 分别代表领航机器人的线速度,角速度和导向角, v_f, w_f, θ_f 分别代表跟随机器人的线速度,角速度和导向角,

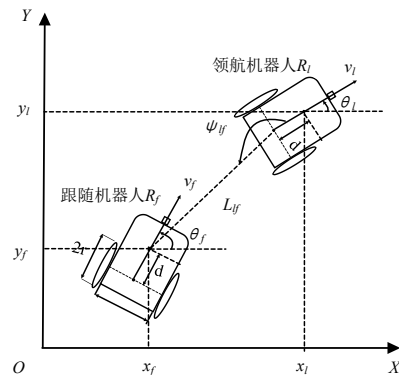


图 1 领航-跟随编队模型

$$\gamma_f = \psi_{lf} + \theta_{lf}, \theta_{lf} = \theta_l - \theta_f$$

由式(5)可以得到领航-跟随者编队模型的状态空间运动学方程如下:

$$\begin{bmatrix} \dot{L}_{lf} \\ \dot{\psi}_{lf} \end{bmatrix}^T = \mathbf{h} + \mathbf{G}\mathbf{V}_f \quad (6)$$

$$\text{其中, } \mathbf{G}(L_{lf}, \psi_{lf}, \gamma_f) = \begin{bmatrix} \cos \gamma_f & d \sin \gamma_f \\ -\frac{\sin \gamma_f}{L_{lf}} & \frac{d \cos \gamma_f}{L_{lf}} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{h}(L_{lf}, \psi_{lf}, v_l, w_l) = \begin{bmatrix} -v_l \cos \psi_{lf} & \frac{v_l \sin \psi_{lf} - L_{lf} w_l}{L_{lf}} \end{bmatrix}^T.$$

2.3 假设及相关引理

引理 1^[17] 如果存在一个连续的径向有界函数, $V: R^n \rightarrow R_+ \cup \{0\}$, 有:

$$(1) V(\mathbf{x}) = 0 \Leftrightarrow \mathbf{x} = 0;$$

(2) 对于任何 $\gamma_1, \gamma_2 > 0, 0 < \alpha < 1, \beta > 1$, 其解 $\mathbf{x}(t)$ 满足不等式:

$$\dot{V}(\mathbf{x}) \leq -\gamma_1 V^\alpha(\mathbf{x}) - \gamma_2 V^\beta(\mathbf{x}) \quad (7)$$

则系统是全局固定时间稳定的, 且收敛时间 T 满足:

$$T \leq T_{\max} = \frac{1}{\gamma_1(1-\alpha)} + \frac{1}{\gamma_2(\beta-1)} \quad (8)$$

(3) 对于任何 $\gamma_1, \gamma_2 > 0, \vartheta > 0, 0 < \alpha < 1, \beta > 1$, 其解 $\mathbf{x}(t)$ 满足不等式:

$$\dot{V}(\mathbf{x}) \leq -\gamma_1 V^\alpha(\mathbf{x}) - \gamma_2 V^\beta(\mathbf{x}) + \vartheta \quad (9)$$

则该系统是实际固定时间稳定的, 且存在正常数 $\phi, 0 < \phi < 1$, 使得收敛时间满足:

$$T \leq T_{\max} = \frac{1}{\gamma_1 \phi(1-\alpha)} + \frac{1}{\gamma_2 \phi(\beta-1)} \quad (10)$$

引理 2^[17] 若 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_M \geq 0$, 则有:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^M \varepsilon_i^k \geq \left(\sum_{i=1}^M \varepsilon_i \right)^k, 0 < k < 1 \\ \sum_{i=1}^M \varepsilon_i^k \geq M^{1-k} \left(\sum_{i=1}^M \varepsilon_i \right)^k, 1 < k < \infty \end{cases} \quad (11)$$

引理 3^[19] 对于任意的 $c > 0, a \geq 0, b > 0$, 则有如下不等式成立:

$$a^c(b-a) \leq \frac{1}{1+c} (b^{1+c} - a^{1+c}) \quad (12)$$

引理 4^[19] 对于任意的 $c > 1, a > 0, b \leq a$, 则有如下不等式成立:

$$(a-b)^c \geq b^c - a^c \quad (13)$$

引理 5^[20] (Young' 不等式) 对于任意 $\mathbf{x}, \mathbf{y} \in R^n$, 则以下不等式成立:

$$\mathbf{x}^T \mathbf{y} = \frac{1}{p} \|\mathbf{x}\|^p + \frac{1}{q} \|\mathbf{y}\|^q \quad (14)$$

其中, $l > 0, p > 1, q > 1, (p-1)(q-1) = 1$.

假设 1^[17] 假设总和扰动满足 $\|\hat{\boldsymbol{\mu}}\| \leq W, 0 < W < L$, W 未知有界, 最大上界为 L .

假设 2 每个跟随机器人配备一个传感器, 能够测量期望相对距离和期望相对方位角.

假设 3 每个机器人的角速度和线速度及其导数有界.

本文的控制目标是: 对于由运动学模型(1)和动力学模型(3)组成的多移动机器人系统, 在满足假设1~假设3的条件下, 设计基于事件触发的抗干扰固定时间编队控制器, 使跟随移动机器人在安全距离内跟踪上领航移动机器人的轨迹, 进而实现编队控制. 要求所设计的控制器在降低网络能耗的同时, 能保证所有闭环信息达到固定时间稳定, 即

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow T} (L_{lf}^d - L_{lf}) = 0 \\ \lim_{t \rightarrow T} (\psi_{lf}^d - \psi_{lf}) = 0 \end{cases} \quad (15)$$

其中, $T \in (0, +\infty]$ 为系统的收敛时间, L_{lf}^d 和 ψ_{lf}^d 分别代表所期望的相对距离和期望的相对方位角.

3 主要结果

3.1 干扰观测器设计

首先, 定义变量 $\boldsymbol{\Pi} = \mathbf{Z} - \mathbf{V}$, 其中, \mathbf{Z} 为辅助变量, 表达式选取如下:

$$\dot{\mathbf{Z}} = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{B} \boldsymbol{\tau}_f - \hat{\boldsymbol{\mu}} \quad (16)$$

选取滑模面 \mathbf{s} 为

$$\mathbf{s} = \dot{\boldsymbol{\Pi}} + a \boldsymbol{\Pi}^{\frac{m_1}{m_2}} + b \boldsymbol{\Pi}^{\frac{n_1}{n_2}} \quad (17)$$

其中, m_1, m_2, n_1, n_2 是正奇数, 且 $m_1 > m_2, n_1 < n_2 < 2n_1, a > 0, b > 0$.

为了使 $\boldsymbol{\Pi}$ 在固定时间内到达 0, 构造如下的总和扰动导数估计 $\hat{\boldsymbol{\mu}}$:

$$\begin{aligned} \hat{\boldsymbol{\mu}} = & (l_0 \text{sign}(\mathbf{s}) + l_1 \mathbf{s}^\alpha + l_2 \mathbf{s}^\beta) + \hat{L} \text{sign}(\mathbf{s}) \\ & + \left(a \frac{m_1}{m_2} \boldsymbol{\Pi}^{\frac{m_1}{m_2}-1} + b \frac{n_1}{n_2} \boldsymbol{\Pi}^{\frac{n_1}{n_2}-1} \right) \dot{\boldsymbol{\Pi}} \end{aligned} \quad (18)$$

使滑模面 \mathbf{s} 到达 0. 其中, $l_0 > 0, l_1 > 0, l_2 > 0, 0 < \alpha < 1, \beta > 1$. 根据假设 2 可知, $\|\hat{\boldsymbol{\mu}}\| \leq W \leq L$, 对 L 做自适应估计, 定义估计误差为

$$\tilde{L} = L - \hat{L} \quad (19)$$

其中, \hat{L} 是 L 的估计值, \tilde{L} 是估计误差.

对变量 $\boldsymbol{\Pi}$ 求导, 并将式(3)和式(16)代入得

$$\dot{\boldsymbol{\Pi}} = \boldsymbol{\mu} - \hat{\boldsymbol{\mu}} \quad (20)$$

对式(20)求导得

$$\dot{\boldsymbol{\Pi}} = \dot{\boldsymbol{\mu}} - \dot{\hat{\boldsymbol{\mu}}} \quad (21)$$

对式(17)求导, 并将式(18)和式(21)代入, 得

$$\dot{s} = \dot{\mu} - l_0 \text{sign}(s) - l_1 s^\alpha - l_2 s^\beta - \hat{L} \text{sign}(s) \quad (22)$$

根据引理3和引理4,有:

$$\begin{aligned} \tilde{L} \hat{L}^p &\leq \frac{1}{1+p} (L^{p+1} - \hat{L}^{p+1}) = \frac{1}{1+p} (L^{p+1} - (L - \tilde{L})^{p+1}) \\ &\leq \frac{1}{1+p} (L^{p+1} - (\tilde{L}^{p+1} - L^{p+1})) = \frac{1}{1+p} (2L^{p+1} - \tilde{L}^{p+1}) \end{aligned} \quad (23)$$

同理,可以得到:

$$\begin{aligned} \tilde{L} \hat{L}^q &\leq \frac{1}{1+q} (L^{q+1} - \hat{L}^{q+1}) = \frac{1}{1+q} (L^{q+1} - (L - \tilde{L})^{q+1}) \\ &\leq \frac{1}{1+q} (L^{q+1} - (\tilde{L}^{q+1} - L^{q+1})) = \frac{1}{1+q} (2L^{q+1} - \tilde{L}^{q+1}) \end{aligned} \quad (24)$$

其中, $0 < p < 1, q > 1$ 为设计参数.

对总和扰动 L 的自适应估计设计如下:

$$\dot{\hat{L}} = \rho (-\hat{L}^p - \hat{L}^q + \|s\|) \quad (25)$$

定理 1 针对多移动机器人系统式(1)和式(3),设计式(16)~式(18)描述的自适应固定时间滑模干扰观测器,选取式(25)描述的滑模干扰观测器自适应律,可以保证总和扰动在固定时间内被估计,即估计误差 $\tilde{\mu} = \mu - \hat{\mu}$ 在固定时间内收敛到零.

证明 选取如下的 Lyapunov 函数:

$$V_d = \frac{1}{2} s^T s + \frac{1}{2\rho} \tilde{L}^2 \quad (26)$$

对式(26)求导,结合式(22)和引理2,有:

$$\begin{aligned} \dot{V}_d &= s^T \dot{s} + \frac{1}{\rho} \tilde{L} \dot{\tilde{L}} \\ &= s^T [-l_0 \text{sign}(s) - l_1 s^\alpha - l_2 s^\beta + (\dot{\mu} - \hat{L} \text{sign}(s))] - \frac{1}{\rho} \tilde{L} \dot{\tilde{L}} \\ &\leq -l_1 (s^T s)^{\frac{\alpha+1}{2}} - 2^{\frac{\beta-1}{2}} l_2 (s^T s)^{\frac{\beta+1}{2}} - [l_0 - (L - \hat{L})] \|s\| - \frac{1}{\rho} \tilde{L} \dot{\tilde{L}} \end{aligned} \quad (27)$$

将式(23)~式(25)代入式(27),选取参数 $l_0 > \tilde{L}$,有:

$$\begin{aligned} \dot{V}_d &\leq -l_1 (s^T s)^{\frac{\alpha+1}{2}} - 2^{\frac{\beta-1}{2}} l_2 (s^T s)^{\frac{\beta+1}{2}} \\ &\quad + \frac{1}{1+p} (2L^{p+1} - \tilde{L}^{p+1}) + \frac{1}{1+q} (2L^{q+1} - \tilde{L}^{q+1}) \\ &\leq -l_1 (s^T s)^{\frac{\alpha+1}{2}} - 2^{\frac{\beta-1}{2}} l_2 (s^T s)^{\frac{\beta+1}{2}} - \frac{1}{1+p} \tilde{L}^{\frac{2p+1}{2}} \\ &\quad - \frac{1}{1+q} \tilde{L}^{\frac{2q+1}{2}} + \frac{1}{1+p} 2\tilde{L}^{p+1} + \frac{1}{1+q} 2\tilde{L}^{q+1} \\ &\leq -A_0 V_d^{\frac{p+1}{2}} - B_0 V_d^{\frac{q+1}{2}} + \vartheta_1 \end{aligned} \quad (28)$$

其中,选取参数 $0 < \alpha < p < 1, \beta = q > 1$,

$$A_0 = \min \left\{ l_1 2^{\frac{p+1}{2}}, \frac{1}{1+p} (2\rho)^{\frac{p+1}{2}} \right\},$$

$$B_0 = 2^{\frac{1-q}{2}} \gamma_2 \min \left\{ 2l_2, \frac{1}{1+q} (2\rho)^{\frac{q+1}{2}} \right\},$$

$$\vartheta_1 = \frac{1}{1+p} 2L^{p+1} + \frac{1}{1+q} 2L^{q+1}.$$

根据引理1可知,固定时间观测器收敛时间满足:

$$T_1 \leq \frac{1}{A_0 \phi_1 \left(1 - \frac{p+1}{2}\right)} + \frac{1}{B_0 \phi_1 \left(\frac{q+1}{2} - 1\right)}$$

其中, $0 < \phi_1 < 1$. 可见,系统状态能够在固定时间 T_1 内收敛.

接下来判断滑模面 s 的收敛性. 选取正定 Lyapunov 函数 $V_s = \frac{1}{2} s^T s$, 计算其导数,有:

$$\begin{aligned} \dot{V}_s &= s^T [-l_0 \text{sign}(s) - l_1 s^\alpha - l_2 s^\beta + (\dot{\mu} - \hat{L} \text{sign}(s))] \\ &\leq -l_1 (s^T s)^{\frac{\alpha+1}{2}} - 2^{\frac{\beta-1}{2}} l_2 (s^T s)^{\frac{\beta+1}{2}} - [l_0 - \tilde{L}] \|s\| \quad (29) \\ &\leq -l_1 (s^T s)^{\frac{\alpha+1}{2}} - 2^{\frac{\beta-1}{2}} l_2 (s^T s)^{\frac{\beta+1}{2}} \end{aligned}$$

当 $l_0 > \tilde{L}$ 时,可以保证式(29)固定时间收敛,即系统在固定时间内到达滑动模式 s . 式(17)可以写为

$$\dot{\Pi} = -a \Pi^{\frac{m_1}{m_2}} - b \Pi^{\frac{n_1}{n_2}} \quad (30)$$

根据引理1,可知 Π 在固定时间收敛到零,即 $\tilde{\mu}$ 在固定时间收敛到零,收敛时间为 $T_2 \leq \frac{m_2}{a(m_1 - m_2)} +$

$\frac{n_2}{b(n_2 - n_1)}$. 因此,AFSMDO的总收敛时间为滑模到达时 T_1 和滑模运动时间 T_2 ,即收敛时间 $T_d \leq T_1 + T_2$. 证毕.

注 1 目前关于固定时间干扰观测器的研究中,大都要求已知干扰的上边界值. 而本文引入自适应技术对总和扰动上界进行估计,无需对干扰进行限制,拓宽了观测器的适用范围.

3.2 事件触发机制下固定时间编队控制器设计

本小节基于所提出的干扰观测器,结合反步法、事件触发机制和固定时间理论,在领航-跟随者模型的基础上,设计运动学控制器实现对领航者的跟踪;然后将运动学速度作为动力学模型的期望输入,设计基于事件触发的固定时间编队控制器. 整个过程包括以下两个步骤.

步骤 1 移动机器人运动学控制器设计

对于编队运动学系统式(6),由于 $\det \mathbf{G} = d/L_{ij}$, 所以 \mathbf{G}^{-1} 存在. 根据文献[6],设计如下的运动学控制器:

$$V_f^d(t) = \mathbf{G}^{-1} \left(-\mathbf{h} + k_1 z_1(t)^\alpha + k_2 z_1(t)^\beta \right) \quad (31)$$

其中, $z_1(t) = [L_{ij}^d - L_{ij}, \psi_{ij}^d - \psi_{ij}]^T$ 为编队跟踪误差, $k_1 > 0, k_2 > 0, 0 < \alpha < 1, \beta > 1$.

对 $\mathbf{z}_1(t)$ 求导, 并将式(6)和式(31)代入, 得:

$$\dot{\mathbf{z}}_1(t) = -k_1 \mathbf{z}_1(t)^\alpha - k_2 \mathbf{z}_1(t)^\beta \quad (32)$$

为了验证 $\mathbf{z}_1(t)$ 的收敛性, 考虑如下 Lyapunov 函数:

$$V_1(t) = \frac{1}{2} \mathbf{z}_1^\top(t) \mathbf{z}_1(t) \quad (33)$$

对式(33)求导, 并将式(32)代入, 得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1(t) &= \mathbf{z}_1^\top(t) \dot{\mathbf{z}}_1(t) = \mathbf{z}_1^\top(t) (-k_1 \mathbf{z}_1(t)^\alpha - k_2 \mathbf{z}_1(t)^\beta) \\ &= -2^{\frac{\alpha+1}{2}} k_1 \left(\frac{1}{2} \mathbf{z}_1^\top(t) \mathbf{z}_1(t) \right)^{\frac{\alpha+1}{2}} - 2k_2 \left(\frac{1}{2} \mathbf{z}_1^\top(t) \mathbf{z}_1(t) \right)^{\frac{\beta+1}{2}} \\ &= -A_1 V_1(t)^{\frac{\alpha+1}{2}} - B_1 V_1(t)^{\frac{\beta+1}{2}} \end{aligned} \quad (34)$$

其中, $A_1 = 2^{\frac{\alpha+1}{2}} k_1$, $B_1 = 2k_2$. 根据引理 1 可知系统 $\mathbf{z}_1(t)$ 是固定时间稳定的.

步骤 2 事件触发编队控制器设计

为减少网络传输过程中通信资源的浪费, 将事件触发机制定义为如下形式:

$$\bar{\tau}_f(t) = \tau_f(t_k), t \in [t_k, t_{k+1}) \quad (35)$$

$$t_{k+1} = \inf \{ t > t_k : J_i(t) \geq 0; k \in N \}, t_0 = 0 \quad (36)$$

其中, $J_i(t)$ 为触发函数, t_k 表示跟随机器人的触发时间, 当 t_k 到达时, $J_i(t) \geq 0$, 更新事件触发控制器, 在两次触发时刻之间, 控制器保持不变.

将测量误差定义为

$$\mathbf{e}_i(t) = \bar{\tau}_f(t) - \tau_f(t), t \in [t_k, t_{k+1}) \quad (37)$$

定义速度跟踪误差:

$$\mathbf{z}_2(t) = \mathbf{V}_f(t) - \mathbf{V}_f^d(t) \quad (38)$$

其中, \mathbf{V}_f 和 \mathbf{V}_f^d 分别为系统的实际控制输入和运动学控制器的输出. 根据式(3), 对 $\mathbf{z}_2(t)$ 求导得:

$$\dot{\mathbf{z}}_2(t) = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{B} \tau_f(t) - \boldsymbol{\mu} - \dot{\mathbf{V}}_f^d(t) \quad (39)$$

设计如下的控制律:

$$\tau_f(t) = \mathbf{B}^{-1} \mathbf{M} (-k_0 \mathbf{z}_2(t) - k_3 \mathbf{z}_2(t)^\alpha - k_4 \mathbf{z}_2(t)^\beta + \dot{\mathbf{V}}_f^d + \hat{\boldsymbol{\mu}}) \quad (40)$$

式中, $k_0 > 0$, $k_3 > 0$, $k_4 > 0$, $0 < \alpha < 1$, $\beta > 1$. 将式(37)和式(39)带入式(40), 得:

$$\dot{\mathbf{z}}_2(t) = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{B} \mathbf{e}_i(t) - k_0 \mathbf{z}_2(t) - k_3 \mathbf{z}_2(t)^\alpha - k_4 \mathbf{z}_2(t)^\beta - \tilde{\boldsymbol{\mu}} \quad (41)$$

为验证 $\mathbf{z}_2(t)$ 的收敛性, 考虑如下的 Lyapunov 函数:

$$V_2(t) = \frac{1}{2} \mathbf{z}_2^\top(t) \mathbf{z}_2(t) \quad (42)$$

对式(42)求导, 利用引理 1 的 Young's 不等式可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2(t) &= \mathbf{z}_2^\top(t) (\mathbf{M}^{-1} \mathbf{B} \mathbf{e}_i(t) - k_0 \mathbf{z}_2(t) - k_3 \mathbf{z}_2(t)^\alpha - k_4 \mathbf{z}_2(t)^\beta - \tilde{\boldsymbol{\mu}}) \\ &\leq -k_3 (\mathbf{z}_2^\top(t) \mathbf{z}_2(t))^{\frac{\alpha+1}{2}} - k_4 (\mathbf{z}_2^\top(t) \mathbf{z}_2(t))^{\frac{\beta+1}{2}} - k_0 \|\mathbf{z}_2(t)\|^2 \\ &\quad - \frac{\|\mathbf{z}_2^\top(t) \mathbf{M}^{-1} \mathbf{B}\|^2}{2} + \frac{\|\mathbf{e}_i(t)\|^2}{2} - \mathbf{z}_2^\top(t) \tilde{\boldsymbol{\mu}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\leq -k_3 (\mathbf{z}_2^\top(t) \mathbf{z}_2(t))^{\frac{\alpha+1}{2}} - 2^{\frac{1-\beta}{2}} k_4 (\mathbf{z}_2^\top(t) \mathbf{z}_2(t))^{\frac{\beta+1}{2}} - \frac{1}{2} \|\tilde{\boldsymbol{\mu}}\|^2 \\ &\quad - \frac{2k_0+1}{2} \|\mathbf{z}_2(t)\|^2 + \frac{\|\mathbf{z}_2^\top(t) \mathbf{M}^{-1} \mathbf{B}\|^2}{2} + \frac{\|\mathbf{e}_i(t)\|^2}{2} \\ &\leq -k_3 2^{\frac{\alpha+1}{2}} V_2(t)^{\frac{\alpha+1}{2}} - 2k_4 V_2(t)^{\frac{\beta+1}{2}} - k_5 \|\mathbf{z}_2(t)\|^2 \\ &\quad + \frac{\|\mathbf{z}_2^\top(t) \mathbf{M}^{-1} \mathbf{B}\|^2}{2} + \frac{\|\mathbf{e}_i(t)\|^2}{2} \\ &\leq -A_2 V_2(t)^{\frac{\alpha+1}{2}} - B_2 V_2(t)^{\frac{\beta+1}{2}} + \vartheta_2 \end{aligned} \quad (43)$$

其中, $k_5 = \frac{k_0+1}{2}$, $A_2 = k_3 2^{\frac{\alpha+1}{2}}$, $B_2 = 2k_4$, $\vartheta_2 = -k_5 \|\mathbf{z}_2(t)\|^2 + \frac{\|\mathbf{z}_2^\top(t) \mathbf{M}^{-1} \mathbf{B}\|^2}{2} + \frac{\|\mathbf{e}_i(t)\|^2}{2}$.

根据定理 1, 可知存在一个正常数 ε 使得 $\|\tilde{\boldsymbol{\mu}}\| < \varepsilon$, $t \in [0, T_d]$ 和 $\|\tilde{\boldsymbol{\mu}}\| = 0, \forall t \geq T_d$. 根据引理 1 可知系统 $\mathbf{z}_2(t)$ 是固定时间稳定的.

定理 2 针对多移动机器人系统式(1)和式(3), 结合式(16)~式(18)描述的 AFSDO, 设计基于事件触发的运动学控制器式(31)和动力学控制器式(41), 选择触发函数为:

$$J_i(t) = \|\mathbf{e}_i(t)\|^2 - 2k_5 \|\mathbf{z}_2(t)\|^2 + \|\mathbf{z}_2^\top(t) \mathbf{M}^{-1} \mathbf{B}\|^2 \quad (44)$$

当 $J_i(t) \geq 0$ 时, 事件触发控制器被触发并更新控制器, 直到测量误差收敛到零. 当 $J_i(t) < 0$ 时, 移动机器人编队系统可以达到全局固定时间稳定, 且收敛时间存在最大上界.

证明 为验证整个多移动机器人编队控制系统的稳定性, 构造如下的 Lyapunov 函数:

$$V(t) = \frac{1}{2} \mathbf{z}_1^\top(t) \mathbf{z}_1(t) + \frac{1}{2} \mathbf{z}_2^\top(t) \mathbf{z}_2(t) \quad (45)$$

结合式(34)和式(43), 对式(45)求导, 得:

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &\leq -2^{\frac{\alpha+1}{2}} k_1 \left(\frac{1}{2} \mathbf{z}_1^\top(t) \mathbf{z}_1(t) \right)^{\frac{\alpha+1}{2}} - 2k_2 \left(\frac{1}{2} \mathbf{z}_1^\top(t) \mathbf{z}_1(t) \right)^{\frac{\beta+1}{2}} \\ &\quad - 2^{\frac{\alpha+1}{2}} k_3 \left(\frac{1}{2} \mathbf{z}_2^\top(t) \mathbf{z}_2(t) \right)^{\frac{\alpha+1}{2}} - 2k_4 \left(\frac{1}{2} \mathbf{z}_2^\top(t) \mathbf{z}_2(t) \right)^{\frac{\beta+1}{2}} \\ &\quad - k_5 \|\mathbf{z}_2(t)\|^2 + \frac{\|\mathbf{z}_2^\top(t) \mathbf{M}^{-1} \mathbf{B}\|^2}{2} + \frac{\|\mathbf{e}_i(t)\|^2}{2} \end{aligned} \quad (46)$$

结合定理 2, 当 $-k_5 \|\mathbf{z}_2(t)\|^2 + \frac{\|\mathbf{z}_2^\top(t) \mathbf{M}^{-1} \mathbf{B}\|^2}{2} + \frac{\|\mathbf{e}_i(t)\|^2}{2} \leq 0$ 成立时, 即 $J_i(t) < 0$. 根据引理 2, 有

$$\dot{V}(t) \leq -\tilde{A} V(t)^{\frac{\alpha+1}{2}} - \tilde{B} V(t)^{\frac{\beta+1}{2}} \quad (47)$$

其中, $\tilde{A} = 2^{\frac{\alpha+1}{2}} \min\{k_1, k_3\}$, $\tilde{B} = 2 \cdot 2^{\frac{1-\beta}{2}} \min\{k_2, k_4\}$.

根据引理 1 可知系统是全局固定时间稳定的,且收敛时间为

$$T_c \leq \frac{1}{\tilde{A}(1 - \frac{\alpha+1}{2})} + \frac{1}{\tilde{B}(\frac{\beta+1}{2} - 1)} \quad (48)$$

综上所述,基于 AFSMDO 和事件触发机制的编队控制算法总收敛时间满足 $T \leq T_d + T_c$. 证毕.

注 2 本文所提方法虽可通过参数调节实现任意时间内的编队控制,但由于移动机器人在实际应用中,会受到驱动器输出饱和限制,从而无法任意调节收敛时间. 输出饱和下的不确定多移动机器人事件触发固定时间编队控制有待进一步研究.

3.3 可行性分析

事件触发通讯机制的关键是排除 Zeno 现象. 若存在 Zeno 现象会使控制器被无限次触发,通过证明两次触发间隔 $\{t_{k+1} - t_k, k \in N\}$ 都存在一个大于 0 的下界,即事件触发过程无 Zeno 行为发生. 根据式 (35) 和引理 2 可得:

$$\frac{d}{dt} \|e_i(t)\| \leq \|\dot{e}_i(t)\| \leq \|\dot{\tau}_f(t)\| \quad (49)$$

其中, $\dot{\tau}_f(t)$ 是 $\tau_f(t)$ 的导数,因为系统中的所有信号都是有界的,所以必然存在一个常数使得 $\|\dot{\tau}_f(t)\| \leq \varpi$. 由初始条件 $e_i(t_k) = 0$, 得出 $\lim_{t \rightarrow t_{k+1}} e_i(t) = \kappa$. 则 $\|e_i(t)\| = \int_{t_k}^t \kappa ds$, 即 $\|e_i(t)\| = (t - t_k)\kappa$. 跟随机器人的下一个事件触发在 $J_i(t) = 0$ 前不会被触发. 则由事件触发的条件 $J_i(t) > 0$ 得:

$$\kappa \leq \|e_i(t)\| \quad (50)$$

且 $\kappa \leq e_i(t) \leq T_z \varpi$. 联立式 (49) 和式 (50) 得:

$$\kappa \leq e_i(t) \leq T_z \varpi \quad (51)$$

因此,事件触发时间间隔的正下界为 $T_z \geq \kappa/\varpi$, 确保无 Zeno 行为发生.

4 数值仿真

选取 3 个移动机器人进行仿真验证. 其中, leader 为领航者, follower1 和 follower2 分别为跟随机器人 1 和跟随机器人 2. 通过 Matlab 对文中所设计控制器的有效性进行验证.

4.1 仿真条件

仿真实验选取所有的移动机器人具有相同的物理参数,即负载变化、摩擦、外加扰动等不确定性是相同的,如表 1 所示.

假设 follower1 和 leader 之间的 L_{ij}^d 和 ψ_{ij}^d 分别为 3 和 $5\pi/6$, follower2 和 leader 之间的 L_{ij}^d 和 ψ_{ij}^d 分别为 3 和

表 1 移动机器人系统模型的物理参数

参数符号	取值
R	0.15 m
d	0.25 m
I	2.5 kg · m ²
τ_d	(3sin(2t), 2sin(2t)) ^T N
F	(0.25sgn(v) + 0.1v, 0.10sgn(w) + 0.1w) ^T N
r	0.03 m
m	4 kg

$-5\pi/6$. 移动机器人观测器参数选择为: $m_1 = 9, m_2 = 3, n_1 = 3, n_2 = 5, a = 3, b = 2, l_0 = 0.1, l_1 = 0.2, l_2 = 0.1, \rho = 0.1, p = 0.9, q = 1.1$. 控制器参数选择为: $k_0 = 0.5, k_1 = 2, k_2 = 0.5, k_3 = 2, k_4 = 10, \alpha = 0.9, \beta = 1.1$. 系统的初始条件如表 2 所示.

表 2 移动机器人的初始状态

状态	leader	follower1	follower2
$q(0)$	(3, 4, $\pi/6$) ^T	(0, 6, $-\pi/4$) ^T	(1, 0, $\pi/4$) ^T
$v(0)$	(2, 0) ^T	(2, 0) ^T	(2, 0) ^T

4.2 仿真结果

仿真 1 根据本文所提的算法及上述参数对表 2 中 follower1 和 follower2 初始状态进行仿真, 仿真结果如图 2~图 4. 图 2 为多移动机器人的运动轨迹, 跟随机器人 follower1 和 follower2 可以在安全距离内跟踪领航移动机器人. 图 3(a) 为距离与角度的误差, 所设计的事件触发编队控制器均能使编队距离和角度收敛到零. 图 3(b) 为速度跟踪误差, 所有的跟随移动机器人可以跟踪上领航移动机器人的速度, 系统达到了期望的收敛效果和控制精度.

图 4(a) 和图 4(b) 分别为跟随移动机器人的运动学控制输入和动力学控制输入, 可以看出跟随机器人在不同的初始状态下收敛到平衡点的时间趋于一致. 图 5

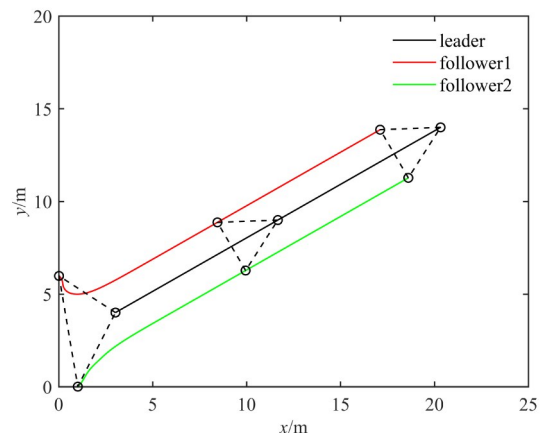


图 2 编队运动轨迹图

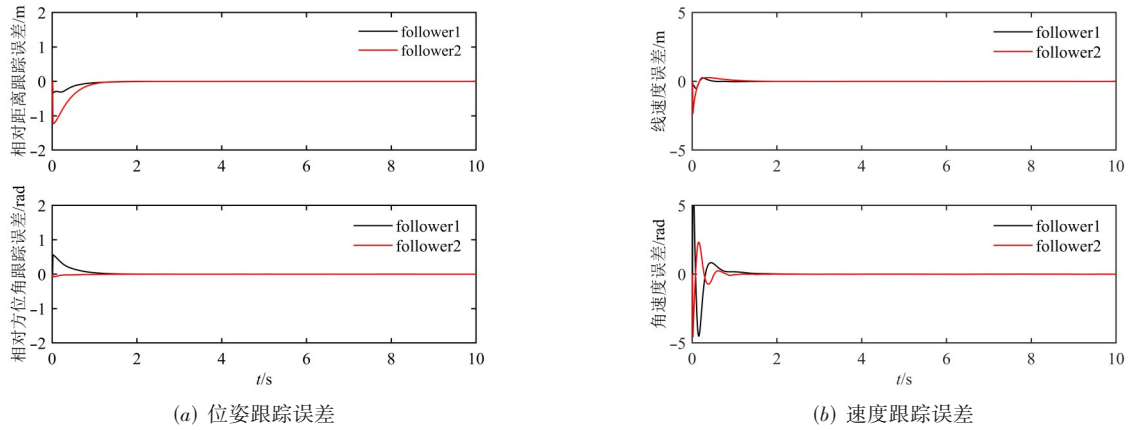


图3 跟踪误差效果图

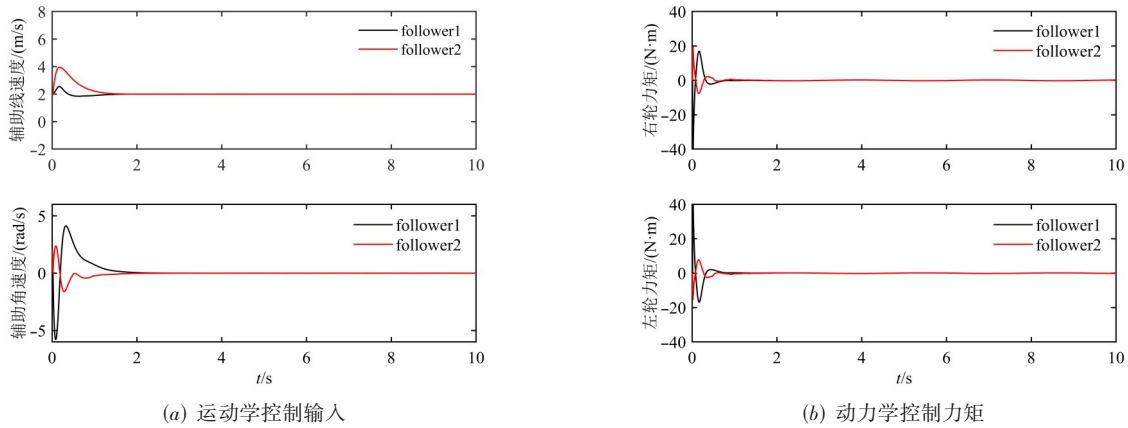


图4 控制输入效果图

给出所有跟随移动机器人的事件触发时刻仿真图,可以看出每个移动机器人的触发点的密集程度不同,即触发次数不一样,验证了本文所设计的触发机制可以减少网络通信资源的浪费。

仿真 2 为说明引入事件触发机制可节约通信资源,表3给出在分布式事件触发机制下,多移动机器人系统在 10 s 内控制器左轮和右轮的触发次数和触发比率,结合图5的触发时刻图可以看出本文将事件触发机制引入到多移动机器人编队控制中,降低了通信次数和控制器的更新频次,减少了因连续通信造成的资源浪费。

仿真 3 为验证干扰观测器的有效性,仅考虑移动机器人受到表面摩擦和未知扰动的影响。

(1) 在相同参数条件下对表2中的初始状态进行仿真验证。图6给出跟随者初始状态不同下总和扰动及其估计值的观测结果,可以看出 follower1 和 follower2 的扰动估计值均在 0.4 s 左右收敛到实际值,说明本文提出的扰动观测器收敛时间与初始系统条

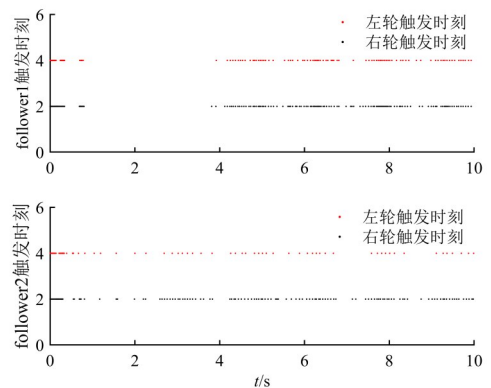


图5 事件触发时刻仿真图

表3 跟随机器人的事件触发次数和触发频率

跟随者	采样次数	触发次数		触发率	
		左轮	右轮	左轮	右轮
follower1	1 000	103	145	10.3%	14.5%
follower2	1 000	96	129	9.6%	12.9%

件无关。

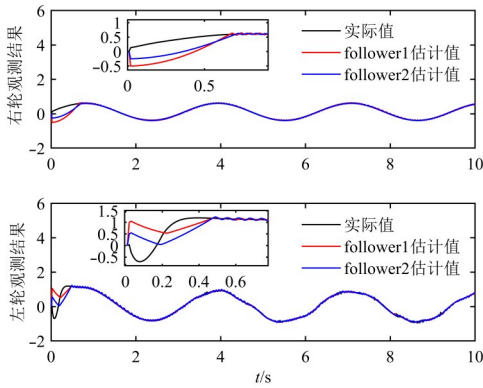
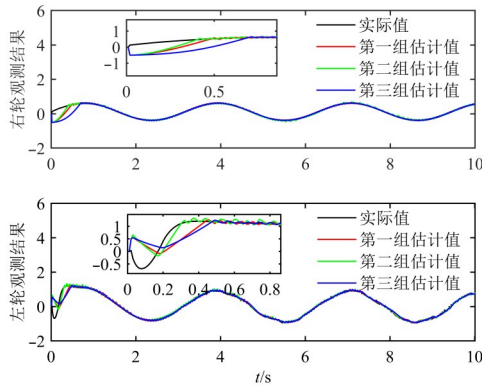
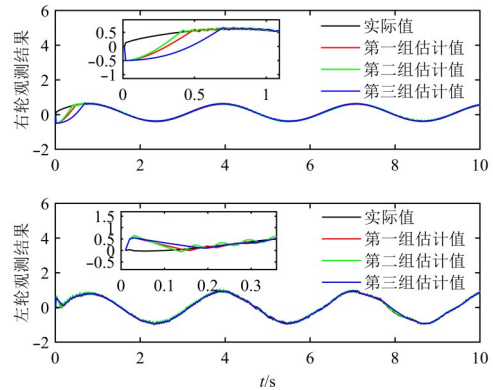


图6 follower初始位置不同的观测结果

(2) 针对表2中的初始状态,选取三组不同的观测器参数,如表4所示.图7(a)和图7(b)描述了初始状态相同,参数不同下总和扰动及其估计值的观测结果,可以看出扰动估计值收敛到实际值上的时间均不一致;



(a) follower1 观测结果



(b) follower2 观测结果

图7 follower在三组观测器参数下的观测结果

表5给出了跟随机器人在三组参数下的收敛时间对比,以follower1为例,三组左轮和右轮的扰动估计值收敛到实际值上的时间均不相同,由此验证观测器的收敛时间取决于其参数。

表4 三组扰动观测器参数

参数	第一组	第二组	第三组
m_1	11	9	11
m_2	7	3	3
n_1	5	3	7
n_2	9	5	11
a	3	4	10
b	2	1	5
l_0	0.1	0.5	1
l_1	0.1	0.3	0.5
l_2	0.1	0.1	0.1
ρ	0.1	0.2	1
p	0.9	0.6	0.2
q	1.1	1.5	1.8

表5 跟随机器人三组观测器参数收敛时间对比

跟随者	扰动估计值收敛到实际值时间 t/s					
	第一组		第二组		第三组	
	右轮	左轮	右轮	左轮	右轮	左轮
follower1	0.48	0.42	0.39	0.31	0.68	0.47
follower2	0.44	0.20	0.38	0.19	0.64	0.23

(3) 将本文所提的AFSMDO与自适应终端滑模扰动观测器^[8](Adaptive Terminal Sliding Mode Disturbance Observer, ATSMDO)进行对比,ATSMDO观测器参数取 $a=0.1, b=0.1, l_1=3, l_2=1, \rho=0.1, m=5, n=3$.图8(a)和图8(b)给出了基于AFSMDO与ATSMDO的观测误差对比,即扰动估计值与实际值的差值,明显看出AFSMDO收敛到原点的速度小于ATSMDO,且ATSMDO

表6 跟随机器人基于AFSMDO与ATSMDO的比较结果

跟随者	均方差 D	AFSMDO	ATSMDO
follower1	右轮	0.086 3	0.104 4
	左轮	0.137 0	0.199 4
follower2	右轮	0.079 8	0.110 9
	左轮	0.056 3	0.212 9
跟随者	平均值	AFSMDO	ATSMDO
follower1	右轮	0.017 4	0.025 3
	左轮	-0.008 7	0.039 8
follower2	右轮	0.018 3	-0.028 6
	左轮	-0.009 4	-0.039 7

观测误差波动幅度比 AFSMDO 大,说明本文所提干扰观测器不仅能够快速收敛到实际值,而且具有良好的瞬态性能和稳态性能,提升了编队系统的稳定性. 此

外,表 6 通过各个观测误差的均方差 D 和平均值 E 给出 AFSMDO 和 ATSMDO 的一个量化比较结果,进一步直观的说明了本文扰动观测器具有良好的观测性能.

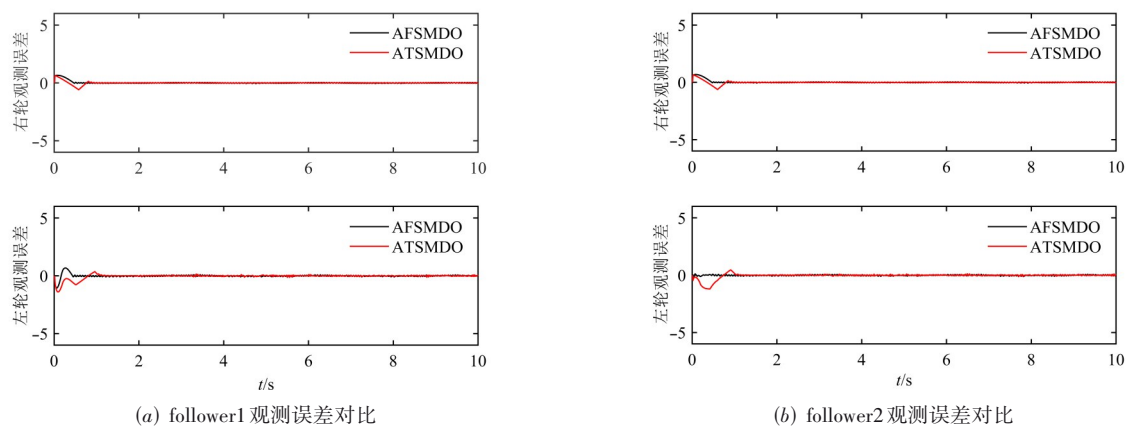


图 8 follower 基于 AFSMDO 与 ATSMDO 的观测误差对比

5 结论

本文提出了一种多移动机器人抗干扰固定时间事件触发编队控制策略. 设计的自适应固定时间滑模干扰观测器,能够实时逼近系统的总和扰动. 设计基于干扰观测器的固定时间分布式编队控制策略,有效实现移动机器人编队构型,且收敛时间仅与设计参数有关,不受系统初值影响. 引入的时间触发机制,降低了控制器的触发频次和通信次数,提高了有限通信资源利用率.

参考文献

- [1] LEE G, CHWA D. Decentralized behavior-based formation control of multiple robots considering obstacle avoidance[J]. *Intelligent Service Robotics*, 2018, 11(1): 127-138.
- [2] MEHRJERDI H, GHOMMAM J, SAAD M. Nonlinear coordination control for a group of mobile robots using a virtual structure[J]. *Mechatronics*, 2011, 21(7): 1147-1155.
- [3] CHEN Y Y, AI X, ZHU J, et al. Spherical orbit tracking and formation flying for nonholonomic aircraft-like vehicles with directed interactions and unknown disturbances[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2021, 54(8): 5362-5367.
- [4] 王保防, 张瑞雷, 郭健, 陈庆伟. 纵向打滑状态下的轮式移动机器人编队控制[J]. *电子学报*, 2017, 45(1): 206-212. WANG B F, ZHANG R L, GUO J, CHEN Q W. Formation control for car-like mobile robots under slip conditions[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2017, 45(1): 206-212. (in Chinese)
- [5] 李艳东, 朱玲, 郭媛, 于颖. 基于径向基函数神经网络的移动机器人多变量固定时间编队控制[J]. *信息与控制*, 2019, 48(6): 649-657. LI Y D, ZHU L, GUO Y, YU Y. Radial basis function neural network-based multivariable fixed-time formation control of mobile robots[J]. *Information and Control*, 2019, 48(6): 649-657. (in Chinese)
- [6] 曹政才, 赵应涛, 付宜利. 车式移动机器人轨迹跟踪控制方法[J]. *电子学报*, 2012, 40(4): 632-635. CAO Z C, ZHAO Y T, FU Y L. Trajectory tracking control approach of a car-like mobile robot[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2012, 40(4): 632-635. (in Chinese)
- [7] 苏博, 王洪斌, 王跃灵, 高静. 基于固定时间滑模干扰观测器的 AUVs 事件触发编队控制[J]. *控制与决策*, 2022, 37(5): 1116-1126. SU B, WANG H B, WANG Y L, GAO J. Event-triggered formation control for AUVs with fixed-time sliding mode disturbance observer[J]. *Control and Decision*, 2022, 37(5): 1116-1126. (in Chinese)
- [8] GURUMURTHY G, DAS D K. Terminal sliding mode disturbance observer based adaptive super twisting sliding mode controller design for a class of nonlinear systems[J]. *European Journal of Control*, 2021, 57: 232-241.
- [9] ZHANG F, CHEN Y Y. Finite-time tracking control for nonaffine nonlinear pure-feedback systems with a prescribed performance[J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2022, 32(4): 2212-2232.

- [10] YU S, YU X, SHIRINZADEH B, et al. Continuous finite-time control for robotic manipulators with terminal sliding mode[J]. *Automatica*, 2005, 41(11): 1957-1964.
- [11] YANG L, YANG J. Nonsingular fast terminal sliding-mode control for nonlinear dynamical systems[J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2011, 21(16): 1865-1879.
- [12] HU Q L, JIANG B Y, SHI Z. Novel terminal sliding mode based fault tolerant attitude control for spacecraft under actuator faults[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2014, 35(1): 249-258.
- [13] POLYAKOV A. Nonlinear feedback design for fixed-time stabilization of linear control systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2012, 57(8): 2106-2110.
- [14] SU B, WANG H, WANG Y. Dynamic event-triggered formation control for AUVs with fixed-time integral sliding mode disturbance observer[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 240: 109893.
- [15] CHU X, PENG Z, WEN G. Robust fixed-time consensus tracking with application to formation control of unicycles [J]. *IET Control Theory & Applications*. 2018, 12(1): 53-59.
- [16] 杨飞生, 汪璟, 潘泉. 基于事件触发机制的网络控制研究综述[J]. *控制与决策*, 2018, 33(6): 969-977.
Yang F S, WANG J, PAN Q. A survey of network event-triggered control[J]. *Control and Decision*, 2018, 33(6): 969-977. (in Chinese)
- [17] 王洪斌, 高静, 苏博, 王跃灵. 基于事件触发的 AUVs 固定时间编队控制[J/OL]. *自动化学报*, DOI: 10.16383/j.aas.c190816.
WANG H B, GAO J, SU B, WANG Y L. Fixed-time formation of AUVs based on event-triggered control[J/OL]. *Acta Automatica Sinica*, DOI: 10.16383/j.aas.c190816. (in Chinese)
- [18] WANG H B, SU B. Event-triggered formation control of AUVs with fixed-time RBF disturbance observer[J]. *Applied Ocean research*, 2021, 112: 102638.
- [19] YANG H, YE D. Adaptive fixed-time bipartite tracking consensus control for unknown nonlinear multi-agent systems: An information classification mechanism[J]. *Information Sciences*, 2018, 459: 238-254.
- [20] 游星星, 杨道文, 郭斌, 刘凯, 佃松宜, 朱雨琪. 基于观测器和指定性能的非线性系统事件触发跟踪控制[J/OL]. *自动化学报*, DOI: 10.16383/j.aas.c210387.
YOU X X, YANG D W, GUO B, LIU K, DIAN S Y,

ZHU Y Q. Event-triggered tracking control for a class of nonlinear systems with observer and prescribed performance[J/OL]. *Acta Automatica Sinica*, DOI: 10.16383/j.aas.c210387. (in Chinese)

作者简介



王健安 男, 1984年1月出生于江西省湖口县, 博士, 教授, 研究方向为多智能体协同控制、复杂网络控制与安全.
E-mail: jiananwang@tyust.edu.cn



闫慧娟 女, 1996年10月出生于山西省大同市. 现为太原科技大学电子信息工程学院研究生, 主要研究方向为移动机器人编队、多智能体系统协同控制.
E-mail: 1262205971@qq.com



赵志诚 男, 1970年3月出生于山西省临猗县, 教授, 研究方向为先进控制理论与应用.
E-mail: zhzhich@tyust.edu.cn