

二阶多智能体碰撞避免与连通性保持方法研究

周瑞敏, 王瑞尧, 周志青

(平顶山学院 信息工程学院, 河南 平顶山 467036)

摘 要:针对二阶多智能体系统,提出了一种基于人工势场的碰撞避免与连通性保持方法.首先,考虑智能体大小,通过在动作函数中引入智能体间相对速度和去抖振因子,设计了去抖振的自适应碰撞避免势场函数,其相对于其他结果,可减小势场力对编队的不利影响;然后,基于以上思想和方法,设计了去抖振的自适应连通性保持势场函数,并根据加性原理给出了带有碰撞避免和连通性保持功能的多智能体编队控制方法.最终通过数值仿真验证了所提方法可以实现零稳态编队跟踪误差,同时可以保证碰撞避免和连通性保持.

关键词:二阶多智能体系统;人工势场;碰撞避免;连通性保持

中图分类号:TP391.9

文献标识码:A

文章编号:1673-1670(2022)05-0015-05

0 引言

多智能体系统以其特有的分布性、协调性和鲁棒性,在智能物流、军事防御、灾害救援等领域得到了大量的应用,并成为近些年来分布式控制系统的主要研究热点.目前,针对多智能体系统的研究,主要从模型本身出发,根据智能体之间的拓扑连接情况,采用相应控制方法,在保证系统性能要求的同时完成一致性、编队、包围等任务^[1].

当可移动智能体在执行任务时,由于通信时滞、传感器失灵、外界未知干扰等因素,导致智能体不能及时获取自身及周围环境的状态信息,进而可能造成智能体与其他物体发生碰撞,不能完成协同任务.相对于静态障碍物的躲避,智能体之间的碰撞避免更具难度和挑战性.目前针对多智能体领域的碰撞问题,主要解决方法有基于零空间的行为控制方法、预测控制方法、人工势场方法等.基于零空间的行为控制方法通过将任务进行等级划分,然后将低级任务投影到高级任务的零空间上,以达到碰撞避免的目的^[2-5].预测控制主要是在求解控制器之前,考虑添加智能体之间距离约束,进而实现智能体之间的距离大于相应的安全距离^[6-7].相对于前述两种方法,人工势场法的原理和实现方式更为简单,主要是通过确定势场范围,当另一个智能体进入自身的势场范围内时,智能体会受到排斥力的作用,以使智能体相互脱离其势场范围^{[8],[9]}¹²⁵³.文献^[9]¹²⁵³首次提出了基于距离和速度的碰撞避免思

想,将可能发生碰撞的区域大大减小.文献^[10]在速度和不确定性动态未知的情形下,提出了基于观测器的滑模控制律,实现了系统跟踪误差的收敛性,并能保证智能体的相对距离满足指定约束.但上述文献只考虑了防碰撞问题,没有考虑智能体之间距离在势场半径附近时,势场排斥力时有时无带来的抖振现象.

对于智能体自身配备检测和通信设备的情形,其通信能力有限,智能体之间距离不能过大,否则会导致通信中断^[11-12].为了同时解决碰撞和连通性中断问题,针对二阶双积分多智能体,文献^[13]²⁴⁴⁹提出了编队控制律,并给出了势场函数参数的范围.文献^[14]⁵⁸⁹⁸针对具有严格反馈的多智能体系统,提出了实际时变编队控制律,同时保证了势场函数的连续性,避免了抖振现象.文献^[15]针对水上无人船模型,提出了基于输出反馈的协同控制律,可以同时保证碰撞避免和连通性保持.

基于以上论述和分析,针对二阶多智能体,笔者提出了具有去抖振的自适应碰撞避免和连通性保持方法,主要创新及贡献总结如下:

1) 同时解决了碰撞避免和连通性保持问题,丰富了多智能体的编队控制安全理论,并在势场函数设计过程中,引入相对速度以减小势场力对编队的不利影响.

2) 相对于文献^[14]⁵⁹⁰⁴,考虑智能体半径,提出了更为简单的去抖振方法,以消除势场力在势场边界时的抖振现象.

收稿日期:2022-07-15

作者简介:周瑞敏(1990—),女,河南省许昌市人,工程硕士,平顶山学院信息工程学院助教,主要从事多智能体协同控制、嵌入式系统应用研究.



1 图论与问题描述

1.1 图论

笔者考虑由 N 个跟随者和 1 个虚拟主智能体组成的多智能体系统, 并且至少 1 个跟随者与虚拟主智能体连接, 用无向图 $G = \{V_n, E\}$ 描述跟随者内部之间的拓扑关系. 其中, V_n 为顶点集, E 为由两个不同顶点连线组成的边集. 入度矩阵定义为 $D = \text{diag}\{d_1, d_2, \dots, d_N\}$, $d_i = \sum_{j=1}^N a_{ij}$, $i = 1, \dots, N$; 其中, a_{ij} 为邻接矩阵 $A = [a_{ij}] \in \mathbf{R}^{N \times N}$ 对应的元素, 则拉普拉斯矩阵为 $L = D - A$. $B = \text{diag}\{b_1, \dots, b_N\}$ 用于描述跟随者与虚拟主智能体的连接情况, 其中, $b_i = 1$ 表示跟随者 i 可以获取领导者的信息, 否则 $b_i = 0$.

1.2 问题描述

考虑多智能体系统在三维空间运动, 跟随者和虚拟主智能体模型描述如下:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = v_i, \\ \dot{v}_i = u_i; \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_0 = v_0, \\ \dot{v}_0 = 0. \end{cases} \quad (2)$$

其中, $x_i \in \mathbf{R}^3$ 和 $x_0 \in \mathbf{R}^3$ 分别为跟随者和虚拟主智能体的位置状态向量; $v_i \in \mathbf{R}^3$ 和 $v_0 \in \mathbf{R}^3$ 分别为跟随者与虚拟主智能体的速度状态向量; $u_i \in \mathbf{R}^3$ 为跟随者的控制输入.

为了描述期望编队队形, 引入变量 $\tau = [\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_N]$, 其中 $\tau_i \in \mathbf{R}^3$ 为智能体 i 与虚拟主智能体的期望位置偏置, 定义编队跟踪误差如下:

$$\begin{cases} e_{xi} = x_i - x_0 - \tau_i, \\ e_{vi} = v_i - v_0. \end{cases} \quad (3)$$

其中, e_{xi} 为位置跟踪误差向量, e_{vi} 为速度跟踪误差向量. 为了便于分析和描述, 定义

$$\begin{cases} \zeta_{xi} = \sum_{j=1}^N a_{ij}(e_{xi} - e_{xj}) + b_i e_{xi}, \\ \zeta_{vi} = \sum_{j=1}^N a_{ij}(e_{vi} - e_{vj}) + b_i e_{vi}. \end{cases} \quad (4)$$

笔者的目标是针对模型(1)和(2)设计控制方法, 以实现变量 τ 描述的期望编队, 同时保证智能体之间不发生碰撞, 且智能体之间距离不超过最大通信距离.

2 控制方案设计

2.1 碰撞避免设计

如图 1 所示, \bar{r} 为碰撞避免势场预警半径, r_{out}

为碰撞避免势场半径, r 为智能体的半径, θ_{ij} 为速度 v_i 和 x_{ij} 的夹角. 令 N_i^{ca} 为智能体 i 碰撞避免邻居的集合, 满足 $\|x_{ij}\| \leq \bar{r}$. 基于人工势场的基本原理, 带有去抖振作用的势场函数设计如下:

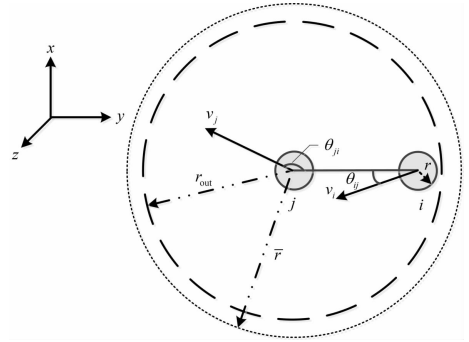


图 1 碰撞避免原理

$$\Psi_{ca} =$$

$$\begin{cases} \|x_{ij}\| \\ \int_{r_{out}}^{\|x_{ij}\|} \phi_{ca}(s) ds, \|x_{ij}\| \in (2r, r_{out}] \text{ and } \rho \geq 0; \\ \|x_{ij}\| \\ \sigma_{ca} \int_r^{\|x_{ij}\|} \phi_{ca}(s) ds, \|x_{ij}\| \in (r_{out}, \bar{r}] \text{ and } \rho \geq 0; \\ 0, \text{ otherwise.} \end{cases} \quad (5)$$

其中, $\rho = \|v_i\| \cos \theta_{ij} + \|v_j\| \cos \theta_{ji}$. 动作函数 $\phi_{ca} = -[1 - \exp(-(\|v_i\| \cos \theta_{ij} + \|v_j\| \cos \theta_{ji}))] \times \frac{\delta_{ca}(\bar{r} - \|x_{ij}\| - r)^2}{(\|x_{ij}\| - 2r + \mu)^2}$. (6)

其中, μ 为非常小的正数, 防止分母为 0 的情况出现, δ_{ca} 为正常数. 去抖振因子 σ_{ca} 设计如下:

$$\sigma_{ca} = 1 + \cos\left[\frac{\|x_{ij}\| - 2r_{out} + \bar{r}}{2(\bar{r} - r_{out})}\pi\right]. \quad (7)$$

注 1: 由图 1 及公式(5) - (7) 可知, r_{out} 与 \bar{r} 之间为过渡区域, 当 $\|x_{ij}\|$ 趋近于 r_{out} 时, σ_{ca} 趋近于 1, 当 $\|x_{ij}\|$ 趋近于 \bar{r} 时, σ_{ca} 趋近于 0, 保证了公式(5)在 r_{out} 和 \bar{r} 处的连续性. 因此, σ_{ca} 可消除抖振现象, 且由于文献[14]中所设计的过渡函数, 同时引入了指数函数和三角函数, 而笔者设计的去抖振方法仅利用了三角函数, 故更为简单.

考虑到可能同时存在多个智能体与智能体 i 发生碰撞, 则智能体 i 的碰撞避免控制律为:

$$u_i^{ca} = - \sum \nabla_{x_i} \Psi_{ca}(\|x_{ij}\|). \quad (8)$$

其中, ∇_{x_i} 为沿 x_i 的梯度.

2.2 连通性保持设计

如图 2 所示, R_{out} 为智能体最大通信半径, R_{in} 为连通性保持势场半径, \bar{R} 为连通性保持势场预警



半径,满足 $\tilde{R} < R_{in} < R_{out}$,连通性保持势场函数设计如下:

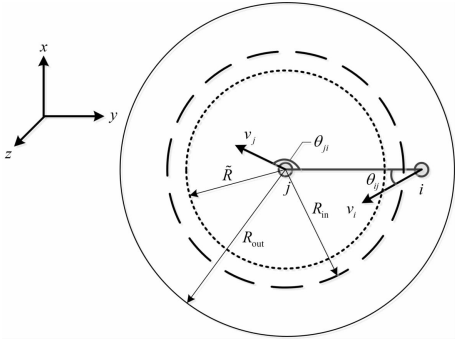


图2 连通性保持原理

$$\Psi_{conn} =$$

$$\begin{cases} \int_{R_{in}}^{\|x_{ij}\|} \phi_{conn}(s) ds, \|x_{ij}\| \in [R_{in}, R_{out}] \text{ and } \rho \leq 0; \\ \varpi_{conn} \int_R^{\|x_{ij}\|} \phi_{conn}(s) ds, \|x_{ij}\| \in [\tilde{R}, R_{in}) \text{ and } \rho \leq 0; \\ 0, \text{ otherwise.} \end{cases} \quad (9)$$

其中,自适应动作函数

$$\phi_{conn} = [1 - \exp(-(\|v_i \cos \theta_{ij} + \|v_j \cos \theta_{ji}))] \times \frac{\delta_{conn} (\|x_{ij}\| - \tilde{R} - r)^2}{(R_{out} - \|x_{ij}\| - r)^2}. \quad (10)$$

去抖振因子 ϖ_{conn} 设计如下:

$$\varpi_{conn} = 1 + \cos\left(\frac{\|x_{ij}\| - 2R_{in} + \tilde{R}}{2(\tilde{R} - R_{in})} \pi\right). \quad (11)$$

则针对智能体 i 的连通性保持控制输入为:

$$u_i^{conn} = - \sum \nabla_{x_i} \Psi_{conn}(\|x_{ij}\|). \quad (12)$$

其中, $N_i^{conn} = \{j: \tilde{R} \leq \|x_{ij}\| \leq R_{out}\}$.

2.3 连通性保持设计

根据状态反馈原理及加性原理,结合公式(8)和(12),设计带有碰撞避免和连通性保持的编队控制律为:

$$u_i = k_1 \zeta_{xi} + k_2 \zeta_{vi} + u_i^{ca} + u_i^{conn}. \quad (13)$$

其中, k_1 和 k_2 为待设计的控制器参数.

3 理论分析

定理 1 在编队控制算法(8)、(12)和(13)作用下,其中 $k_1 = -1, k_2 < 0$,则系统(1)能够实现零稳态跟踪误差,同时保证碰撞避免与连通性保持.

证明 选取半正定类李雅普诺夫函数如下:

$$\begin{aligned} V = & \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \left[\sum_{j \in N_i^{conn}} \Psi_{conn}(\|x_{ij}\|) + \right. \\ & \left. \sum_{j \in N_i^{ca}} \Psi_{ca}(\|x_{ij}\|) + b_i e_{xi}^T e_{xi} + e_{vi}^T e_{vi} \right] + \\ & \frac{1}{2} E_x^T (L \otimes I_3) E_x. \end{aligned} \quad (14)$$

式(14)对时间 t 求导可得:

$$\begin{aligned} \dot{V} = & \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j \in N_i^{ca}} \frac{d(\Psi_{ca}(\|x_{ij}\|))}{d(\|x_{ij}\|)} \left(\dot{x}_i^T \frac{\partial \|x_{ij}\|}{\partial x_i} + \dot{x}_j^T \frac{\partial \|x_{ij}\|}{\partial x_j} \right) + \\ & \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j \in N_i^{conn}} \frac{d(\Psi_{conn}(\|x_{ij}\|))}{d(\|x_{ij}\|)} \left(\dot{x}_i^T \frac{\partial \|x_{ij}\|}{\partial x_i} + \dot{x}_j^T \frac{\partial \|x_{ij}\|}{\partial x_j} \right) + \\ & \sum_{i=1}^N b_i e_{xi}^T e_{vi} + \sum_{i=1}^N e_{vi}^T u_i + E_x^T (L \otimes I_3) E_v = \\ & \sum_{i=1}^N \dot{x}_i^T \sum_{j \in N_i^{ca}} \nabla_{x_i} \Psi_{ca}(\|x_{ij}\|) + \\ & \sum_{i=1}^N \dot{x}_i^T \sum_{j \in N_i^{conn}} \nabla_{x_i} \Psi_{conn}(\|x_{ij}\|) + \\ & \sum_{i=1}^N b_i e_{xi}^T e_{vi} + E_x^T (L \otimes I_3) E_v + \sum_{i=1}^N e_{vi}^T (k_1 \zeta_{xi} + k_2 \zeta_{vi} - \\ & \sum_{j \in N_i^{ca}} \nabla_{x_i} \Psi_{ca}(\|x_{ij}\|) - \sum_{j \in N_i^{conn}} \nabla_{x_i} \Psi_{conn}(\|x_{ij}\|)) = \\ & \sum_{i=1}^N (\dot{x}_i^T - e_{vi}^T) \left(\sum_{j \in N_i^{ca}} \nabla_{x_i} \Psi_{ca}(\|x_{ij}\|) + \right. \\ & \left. \sum_{j \in N_i^{conn}} \nabla_{x_i} \Psi_{conn}(\|x_{ij}\|) \right) + \\ & \sum_{i=1}^N b_i e_{xi}^T e_{vi} + \sum_{i=1}^N k_1 e_{vi}^T \sum_{j=1}^N a_{ij} (e_{xi} - e_{xj}) + \\ & \sum_{i=1}^N k_2 b_i e_{vi}^T e_{xi} + \sum_{i=1}^N k_2 e_{vi}^T \sum_{j=1}^N a_{ij} (e_{vi} - e_{vj}) + \\ & \sum_{i=1}^N k_2 b_i e_{vi}^T e_{vi} + E_x^T (L \otimes I_3) E_v. \end{aligned} \quad (15)$$

令

$$\begin{aligned} \tilde{V} = & \sum_{i=1}^N (\dot{x}_i^T - e_{vi}^T) \left[\sum_{j \in N_i^{ca}} \nabla_{x_i} \Psi_{ca}(\|x_{ij}\|) + \right. \\ & \left. \sum_{j \in N_i^{conn}} \nabla_{x_i} \Psi_{conn}(\|x_{ij}\|) \right]. \end{aligned} \quad (16)$$

由于笔者考虑的是无向拓扑,故势场力对系统总能量无影响,即 $\dot{\tilde{V}} = 0$,则公式(15)可简化为:

$$\begin{aligned} \dot{V} = & (k_1 + 1) \sum_{i=1}^N b_i e_{xi}^T e_{vi} + (k_1 + 1) E_x^T (L \otimes I_3) E_v + \\ & k_2 E_v^T [(L + B) \otimes I_3] E_v = \\ & k_2 E_v^T [(L + B) \otimes I_3] E_v \leq 0. \end{aligned} \quad (17)$$

后续稳定性,碰撞避免和连通性保持的证明可参考[9]和[13],过程类似,此处不再列出,证毕.

4 数值仿真

选取由5个跟随者和1个虚拟领导者组成的多智能体系统,连接情况如图3所示.

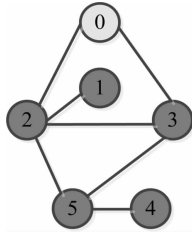


图3 通信拓扑

主智能体的初始速度为 $[0.4, 0.4, 0.4]^T$, 初始位置为原点, 跟随者的初始状态如下:

$$\begin{cases} x_1(0) = [11.5, 5.2, 0]^T, \\ x_2(0) = [7, 10, 2]^T, \\ x_3(0) = [8, 2.5, 0]^T, \\ x_4(0) = [6, 5.4, 0]^T, \\ x_5(0) = [4, 11, 0]^T; \\ v_1(0) = [0.1, 0.1, 0.1]^T, \\ v_2(0) = [1.5, 0.1, 0.36]^T, \\ v_3(0) = [0.1, 0.7, 0.7]^T, \\ v_4(0) = [4, 2.5, 2]^T, \\ v_5(0) = [1.2, 2.5, 3]^T. \end{cases}$$

与虚拟主智能体的期望偏置位置为:

$$\begin{cases} \tau_1 = [0, 7, 0]^T, \\ \tau_2 = [7 \sin 0.4\pi, 7 \cos 0.4\pi, 0]^T, \\ \tau_3 = [-7 \sin 0.4\pi, 7 \cos 0.4\pi, 0]^T, \\ \tau_4 = [7 \sin 0.2\pi, -7 \cos 0.2\pi, 0]^T, \\ \tau_5 = [-7 \sin 0.2\pi, -7 \cos 0.2\pi, 0]^T. \end{cases}$$

其他仿真实验参数为: $r = 1, r_{out} = 5, \bar{r} = 6, \bar{R} = 1.5, R_{in} = 16, R_{out} = 18, \delta_{ca} = \delta_{conn} = 200, k_1 = -1, k_2 = -1$.

从图4可以看出,5个跟随者形成了五角星编队队形. 图5中两个子图分别给出了有无碰撞避免(CA)和连通性保持(CP)时智能体之间距离的变化趋势,从图5(a)可以看出,无碰撞避免和连通性保持算法加入时,智能体发生了碰撞和连通性中断;反之,智能体间距离均大于 $2r$,且小于 R_{out} (见图5(b)),验证了所设计的碰撞避免算法和连通性保持算法的有效性. 图6给出了编队位置跟踪误差和速度跟踪误差变化趋势,表明当 $t \rightarrow \infty$ 时,系统可

以达到零稳态跟踪误差. 为了说明笔者所提去抖振方法的有效性,给出了有无去抖振时的速度变化仿真结果,其中图7(a)为有去抖振作用的智能体速度变化曲线,图7(b)为无去抖振作用加入的智能体速度变化曲线. 对比可以看出(0~10 s),在去抖振作用下,智能体速度变化相对平缓.

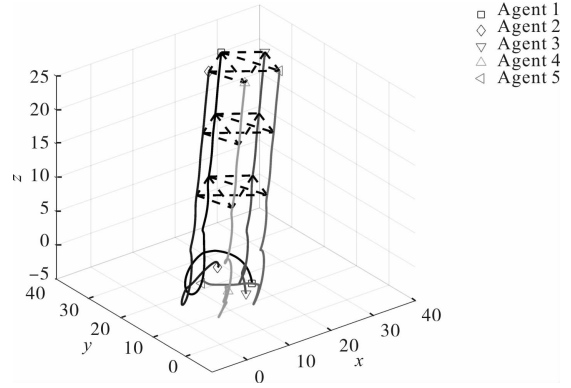


图4 智能体运动轨迹

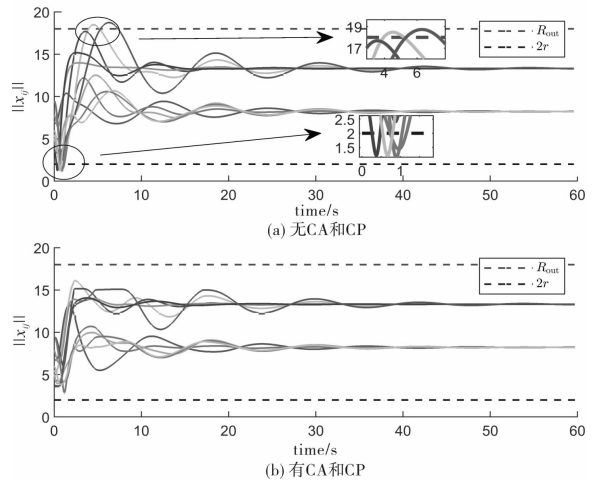


图5 有无CA和CP时智能体间距离

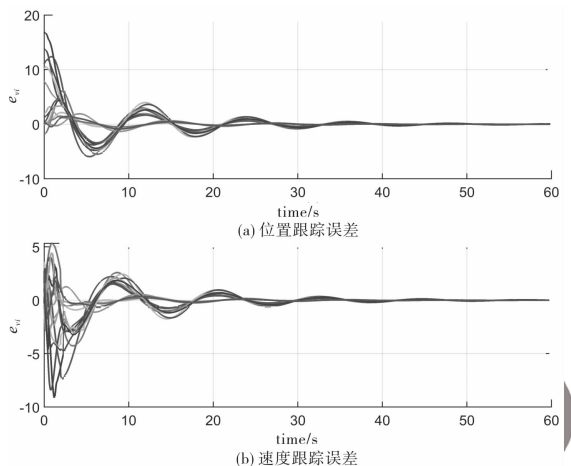


图6 位置和速度跟踪误差

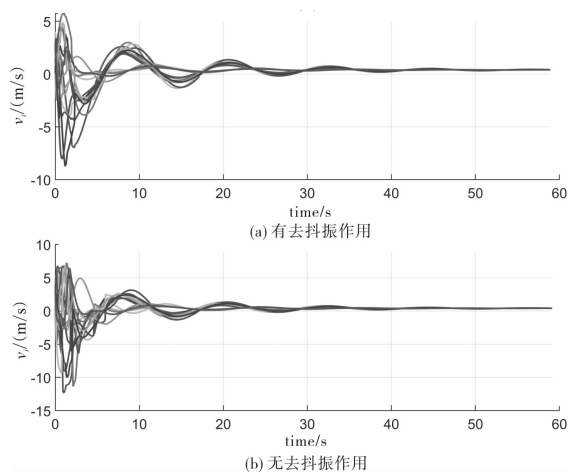


图7 有无去抖振加入时智能体速度

5 结论

笔者在人工势场基本原理的框架下,给出了碰撞避免和连通性保持算法,相比于其他结果,提出了较为简单的去抖振方法,并且所设计的势场函数可以根据相对速度的大小,自适应调节势场力,以达到碰撞避免和连通性保持的目的.为了验证所提算法的有效性,最后进行了仿真实验验证,结果表明所提的方法可以实现编队零稳态跟踪误差,并且同时保证碰撞避免和连通性保持.

参考文献:

[1] 刘娟,张皓,王祝萍.基于自触发的异构多智能体协同输出调节[J].自动化学报,2019(10):1893-1902.

[2] HUANG J, ZHOU N, CAO M. Adaptive fuzzy behavioral control of second-order autonomous agents with prioritized missions: theory and experiments [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019(12):9612-9622.

[3] WANG W J, LI C J, GUO Y N. Relative position coordinated control for spacecraft formation flying with obstacle/collision avoidance [J]. Nonlinear Dynamics, 2021(2):1329-1342.

[4] ZHOU N, CHENG X D, SUN Z Q, et al. Fixed-time cooperative behavioral control for networked autonomous agents with second-order nonlinear dynamics [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2022(9):9504-9518.

[5] DAI L, CAO Q, XIA Y Q, et al. Distributed MPC for formation of multi-agent systems with collision avoidance and obstacle avoidance [J]. Journal of the Franklin Institute,

2017(4):2068-2085.

[6] JI J, KHAJEPOUR A, MELEK W W, et al. Path planning and tracking for vehicle collision avoidance based on model predictive control with multiconstraints [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017(2):952-964.

[7] YU J W, JI J C, MIAO Z H, et al. Formation control with collision avoidance for uncertain networked Lagrangian systems via adaptive gain techniques [J]. IET Control Theory & Applications, 2018(10):1393-1401.

[8] SHI Q, LI T S, LI J Q, et al. Adaptive leader-following formation control with collision avoidance for a class of second-order nonlinear multi-agent systems [J]. Neurocomputing, 2019, 350:282-290.

[9] PANG Z H, ZHENG C B, SUN J, et al. Distance- and velocity-based collision avoidance for time-varying formation control of second-order multi-agent systems [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2021(4):1253-1257.

[10] FEI Y, SHI P, LIM C C. Robust and Collision-Free Formation Control of Multiagent Systems With Limited Information [J/OL]. (2021-09-29) [2022-06-03]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9552431>.

[11] YOO S J, PARK B S. Connectivity preservation and collision avoidance in networked nonholonomic multi-robot formation systems: unified error transformation strategy [J]. Automatica, 2019, 103:274-281.

[12] SU S Z, LIN Z L. Connectivity enhancing coordinated tracking control of multi-agent systems with a state-dependent jointly-connected dynamic interaction topology [J]. Automatica, 2019, 101:431-438.

[13] MONDAL A, BHOWMICK C, BEHERA L, et al. Trajectory tracking by multiple agents in formation with collision avoidance and connectivity assurance [J]. IEEE Systems Journal, 2018(3):2449-2460.

[14] YU J L, DONG X W, LI Q D, et al. Practical time-varying output formation tracking for high-order multi-agent systems with collision avoidance, obstacle dodging and connectivity maintenance [J]. Journal of the Franklin Institute, 2019(12):5898-5926.

[15] PENG Z H, WANG D, LI T S, et al. Output-feedback cooperative formation maneuvering of autonomous surface vehicles with connectivity preservation and collision avoidance [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2020(6):2527-2535.