

DOI:10.3969/j.issn.1673-4785.201112016

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/23.1538.TP.20120712.1018.002.html>

考虑时变时滞的多移动智能体分布式编队控制

雷明, 周超, 周绍磊, 张文广

(海军航空工程学院 控制工程系, 山东 烟台 264001)

摘要:考虑到多移动智能体编队控制中的时变时滞问题,在所设计的编队框架下,基于一致性算法设计了具有不对称时变时滞的分布式编队控制律.该控制律仅使用全局速度导引信息和邻居状态反馈信息;在固定通信拓扑条件下,推导了具有时变时滞的闭环系统状态方程,应用改进的自由权矩阵方法获得了保守性更小的系统稳定条件,并在时变通信拓扑条件下,将拓扑变化处理为系统结构的不确定性,同样获得了时变通信拓扑下的系统稳定条件;进行了6个智能体在平面内编队运动的仿真,实例证明,理论结果是正确的.

关键词:时变时滞;多智能体;编队控制;自由权矩阵;一致性

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4785(2012)06-0536-06

Decentralized formation control of multiple mobile agents considering time-varying delay

LEI Ming, ZHOU Chao, ZHOU Shaolei, ZHANG Wenguang

(Department of Automatic Control, Navy Aeronautical Engineering Institute, Yantai 264001, China)

Abstract: In consideration of the time-varying delay problem in the formation control of multiple mobile agents, we will first examine this area in the study. The defined formation framework, a decentralized formation control law with asymmetric time-varying delay is designed based on a consensus algorithm, which only uses the global velocity guidance and neighbor state feedback information systems. Secondly, under a fixed communication topology condition, the closed-loop system state equation with time-varying delay is induced and a less conservative stability condition of the system is obtained using the improved method of free-weight matrix. Further, under the time-varying communication topology condition, stability condition of the system is also obtained by processing topology's variation as a structured model uncertainty. Finally, a simulation example of six agents' formation movement in-plane proves the accuracy of the theory.

Keywords: time-varying delay; multiple mobile agents; formation control; free-weight matrix; consensus

以无人机、无人车、无人水下航行器为典型代表的移动智能体,能够通过自载的通信设备实时交互信息、相互协作,实现单一个体无法完成的复杂任务,极大地提高了执行任务的可靠性和灵活性.编队是多移动智能体面临的最基本任务,其目的是使处于任意初始状态的智能体形成期望的队形并保持队形,按照期望的速度运动并能快速变换队形.例如,为提高目标搜索效率,多无人机执行宽广区域目标搜索任务时,需要形成特定的编队队形和速度.

常见的编队控制方法包括虚拟结构法^[1-2]、行

为法^[3]、领航—跟随法^[4-6]和基于一致性的方法^[7-11].虚拟结构法属于集中式控制,控制指令解算依赖计算中心且随个体数量增多计算量迅速增大;行为法根据预置信息和触发条件形成控制指令,缺乏灵活性和适应性;领航—跟随法过于依赖领航者的状态,一旦领航者故障,编队难以保持;基于一致性的方法属于分布式控制,该方法仅仅需要邻居信息,算法简单、计算量小,不受个体数量规模限制,特别是无线自组织网络的迅猛发展,促进了该方法的工程应用研究.文献[7,10-11]基于一致性研究了多智能体编队控制问题,分别将理论成果应用到多移动机器人、多无人机和多智能小车的编队控制中,取得了较好的

效果,但是均未考虑时滞问题.时滞是造成系统不稳定的一个重要原因,由于通信带宽限制和环境干扰,智能体间的通信时滞是不容忽视的,研究具有时滞的多智能体一致性编队控制,更加符合实际需要.

时滞一致性算法主要分为2类:一种是对称性算法,即智能体检测自身信息和接收信息都有时滞;另一种是不对称性算法,即仅接收信息有时滞.在实际系统中,一般只有接收信息有时滞(或检测自身信息的时滞非常小),因此不对称性算法更加贴近实际.文献[12]研究了具有固定耦合时滞的2种二阶一致性算法,基于Lyapunov-Krasovskii方法分析了系统稳定性问题,但是2种二阶一致性算法均属于对称性算法;文献[13-14]研究了具有固定时滞的二阶平均一致性协议,分别使用频域分析法和LMI的方法获得了保证系统稳定的条件,但是实际中的时滞通常不是固定的;文献[15-16]研究了具有时变时滞的leader-following一致性协议,使用LMI的方法获得了系统稳定条件,其编队稳定性与领航者的状态密切相关,一旦领航者故障,编队难以保持.

本文研究了具有时变时滞的无领航者多智能体编队控制问题,提出了多移动智能体的编队控制框架,应用一致性算法设计了不对称时滞编队控制律,基于自由权矩阵的方法获得了保守性更小的系统稳定条件.

1 多智能体编队框架与预备知识

1.1 多智能体编队框架

在 n 维欧氏空间中,每个智能体装配相同的近程无线收发设备且具有惟一的标识号,多智能体编队框架如图1所示.

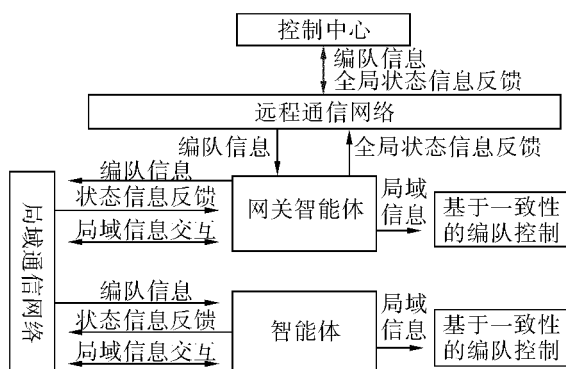


图1 编队框架示意

Fig.1 Sketch map of formation framework

智能体依赖自身通信设备形成局域通信网络,用于智能体间交互信息;除此之外,网关智能体还具备远程通信能力,用于与控制中心通信.根据任务需要,控制中心解算出最优的编队队形和编队速度,通

过远程网络将编队信息发送给网关智能体,网关智能体通过局域通信网将编队信息分发到所有智能体,同时,网关智能体通过局域通信网络汇总所有在网智能体的状态信息,定时上传给控制中心.

假定智能体具有相同的动态特性,第 i 个智能体的动态方程为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_i = \mathbf{v}_i, \\ \dot{\mathbf{v}}_i = \mathbf{u}_i. \end{cases} \quad (1)$$

式中: $i=1,2,\dots,N$ 为智能体个数; $\mathbf{x}_i \in \mathbf{R}^n$ 、 $\mathbf{v}_i \in \mathbf{R}^n$ 、 $\mathbf{u}_i \in \mathbf{R}^n$ 分别表示 n 维欧氏空间中智能体的位置向量、速度向量和控制输入向量.

编队包括编队队形和编队速度2个方面,编队队形是多智能体的空间几何位置关系,编队速度是多智能体在空间中的整体运动速度.

定义1 在 n 维欧氏空间中,智能体 i 期望的空间位置可用向量 \mathbf{h}_i 表示,任意2个智能体的相对距离向量定义为 \mathbf{h}_{ij} , $\mathbf{h}_{ij} = \mathbf{h}_i - \mathbf{h}_j$, \mathbf{h}_{ij} 在各个坐标轴上的投影记为 \mathbf{h}_{ij}^k , $k=1,2,\dots,n$,编队向量定义为

$$\mathbf{h} = [\mathbf{h}_{11}^1 \ \mathbf{h}_{12}^1 \ \cdots \ \mathbf{h}_{1N}^1 \ \mathbf{h}_{M1}^n \ \cdots \ \mathbf{h}_{NN}^n]^T.$$

易证:编队向量与编队队形一一对应,但编队在空间中的位置不惟一.

定义2 设定 \mathbf{v}_d 为期望的编队速度,当 $t \rightarrow \infty$ 时,如果对于 $\forall i,j \in N$ 均有 $\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j = \mathbf{h}_{ij}$ 且 $\mathbf{v}_i = \mathbf{v}_j = \mathbf{v}_d$ 成立,则称编队形成并保持.

1.2 预备知识

设 $G=(V,E,A)$ 表示具有 n 个节点的图,其中 $V=\{V_1, V_2, \dots, V_n\}$ 为节点集合, $E \subseteq V \times V$ 为边集合, $A=(a_{ij})$ 为邻接矩阵.如果节点 V_i 和节点 V_j 间存在信息交互,则 $a_{ij}=1$,否则, $a_{ij}=0$. G 的度矩阵 D

为对角矩阵, $d_{ii} = \sum_{i=1}^n a_{ii}$; G 的拉普拉斯矩阵 $L = D - A$,归一化拉普拉斯矩阵 $\bar{L} = D^{-1}L$.

引理1 Schur补 于给定的对称矩阵 $S = S^T = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{12}^T & S_{22} \end{bmatrix}$,其中 S_{11} 和 S_{22} 是方阵, $S < 0$ 的充要条件是 $S_{22} < 0$ 且 $S_{11} - S_{12}S_{22}^{-1}S_{12}^T < 0$.

引理2^[17] 给定具有适当维数的矩阵 $H = H^T$ 、 P 、 Q ,对于所有满足 $F^T(t)F(t) \leq I$ 的 $F(t)$,不等式 $H + PF(t)Q + Q^TF(t)P^T < 0$ 成立的充要条件是存在一正数 $\varepsilon > 0$ 使得 $H + \varepsilon^{-1}PP^T + \varepsilon Q^TQ < 0$ 成立.

假定1 智能体的通信时滞均相等,时滞和时滞变化率分别为 $d(t)$ 、 $\dot{d}(t)$ 且存在常数 d, μ ,使得 $0 \leq d(t) \leq d, \dot{d}(t) \leq \mu$ 成立.

2 编队控制律设计及稳定性分析

编队控制的目的是使处于任意初始状态的智能

体形成期望的队形和编队速度,因此,编队控制律 $u_i(t)$ 由编队速度控制项 $u_{ig}(t)$ 和编队队形控制项 $u_{ic}(t)$ 2 部分组成. 其中 $u_{ig}(t)$ 使用全局导引速度信息和邻居速度反馈信息,其作用是使每个智能体的速度均趋近于期望的编队速度; $u_{ic}(t)$ 使用邻居位置反馈信息,其作用是使智能体形成期望的编队队形.

$$\begin{aligned} u_i(t) &= u_{ig}(t) + u_{ic}(t), \\ u_{ig}(t) &= \alpha \dot{v}_d - \beta(v_i(t) - v_d) - \\ &\quad \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N a_{ij}(v_i(t) - v_j(t - d(t))). \\ u_{ic}(t) &= -\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N a_{ij}((x_i(t) - x_j(t - d(t)) - h_{ij})). \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $v_d \in \mathbf{R}^n$, $\dot{v}_d \in \mathbf{R}^n$ 是期望的编队速度和加速度, a_{ij} 是信息权重系数, α, β 是控制参数, N_i 是智能体 i 当前时刻的邻居个数.

将编队控制律写为矩阵形式,则多智能体系统的控制律为

$$\begin{aligned} u_c &= \alpha(I_n \otimes \dot{v}_d) + \beta(I_N \otimes v_d) - (\beta + 1)v(t) - \\ &\quad x(t) + E + (I_{nN} - \bar{L} \otimes I_n)v(t - d(t)) + \\ &\quad (I_{nN} - \bar{L} \otimes I_n)x(t - d(t)), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\Xi = \begin{bmatrix} \Phi_{11} & \Phi_{12} & F_{13} & dN_1 & dS_1 & dM_1 & dA^T(Z_1 + Z_2) \\ * & \Phi_{22} & \Phi_{23} & dN_2 & dS_2 & dM_2 & dB^T(Z_1 + Z_2) \\ * & * & \Phi_{33} & dN_3 & dS_3 & dM_3 & 0 \\ * & * & * & -dZ_1 & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & * & -dZ_1 & 0 & 0 \\ * & * & * & * & * & -dZ_2 & 0 \\ * & * & * & * & * & * & -d(Z_1 + Z_2) \end{bmatrix},$$

$$\Phi_{11} = PA + A^T P + Q + R + N_1 + M_1 + N_1^T + M_1^T,$$

$$\Phi_{22} = -(1 - \mu)Q - N_2 + S_2 - N_2^T + S_2^T,$$

$$\Phi_{33} = -R - M_3 - S_3 - M_3^T - S_3^T,$$

$$\Phi_{12} = \Phi_{21}^T = PB - N_1 + S_1 + N_2^T + M_2^T,$$

$$\Phi_{13} = \Phi_{31}^T = -M_1 - S_1 + N_3^T + M_3^T,$$

$$\Phi_{23} = \Phi_{32}^T = -M_2 - S_2 - N_3^T + S_3^T.$$

证明 如果网络拓扑固定强连通,则 \bar{L} 为常值矩阵,对于期望的编队向量 h 、编队速度 v_d 和给定的控制参数 $\alpha, \beta, E + \beta(I_N \otimes v_d) + \alpha(I_N \otimes \dot{v}_d)$ 能够惟一确定,因此, C 为有界常值向量,系统的收敛性与其自治系统 $\dot{\xi}(t) = A\xi(t) + B\xi(t - d(t))$ 相同.

根据牛顿莱布尼茨公式:

$$B\xi(t - d(t)) = B\xi(t) - B \int_{t-d(t)}^t \dot{\xi}(s) ds,$$

$$E = \begin{bmatrix} I_n \otimes \bar{L}_1 & & & \\ & I_n \otimes \bar{L}_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & I_n \otimes \bar{L} \end{bmatrix} h.$$

令 $\xi(t) = [x(t) \ v(t)]^T$, 则闭环系统状态方程为

$$\dot{\xi}(t) = A\xi(t) + B\xi(t - d(t)) + C.$$

式中:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & I_{nN} \\ -I_{nN} & -(\beta + 1)I_{nN} \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & I_{nN} \\ I_{nN} - \bar{L} \otimes I_n & I_{nN} - \bar{L} \otimes I_n \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 \\ E + \beta(I_N \otimes v_d) + \alpha(I_N \otimes \dot{v}_d) \end{bmatrix}.$$

定理 1 如果网络拓扑为固定强连通,对于期望的编队向量 h 、编队速度 v_d, \dot{v}_d 和给定的标量 d, μ, α, β , 若存在正定对称矩阵 P, Q, R, Z_1, Z_2 以及任意合适维数的矩阵 $N_1, N_2, N_3, S_1, S_2, S_3, M_1, M_2, M_3$, 使得 $\Xi = \Xi^T < 0$, 则编队运动能够形成并保持. 其中:

则

$$\dot{\xi}(t) - (A + B)\xi(t) - B \int_{t-d(t)}^t \dot{\xi}(s) ds = 0.$$

对于任意适合维数的矩阵 $N_1, N_2, N_3, S_1, S_2, S_3, M_1, M_2, M_3$, 令

$$\zeta_1^T(t) = [\xi^T(t) \ \xi^T(t - d(t)) \ \xi^T(t - d)]^T,$$

有

$$2\zeta_1^T(t)N[\dot{\xi}(t) - \xi(t - d(t)) - \int_{t-d(t)}^t \dot{\xi}(s) ds] = 0,$$

$$2\zeta_1^T(t)S[\dot{\xi}(t - d(t)) - \xi(t - d) - \int_{t-d}^{t-d(t)} \dot{\xi}(s) ds] = 0,$$

$$2\zeta_1^T(t)M[\dot{\xi}(t) - \xi(t - d) - \int_{t-d}^t \dot{\xi}(s) ds] = 0.$$

选取 Lyapunov-Krasovskii 函数

$$V(t) = \xi^T(t)P\xi(t) + \int_d^0 \int_{t+\theta}^t \xi^T(s)(Z_1 + Z_2)\dot{\xi}(s) ds d\theta +$$

$$\int_{t-d(t)}^t \xi^T(s) Q \xi(s) ds_2 + \int_{t-d}^t \xi^T(s) R \xi(s) ds.$$

式中: $P = P^T > 0, Q = Q^T \geq 0, R = R^T \geq 0, Z_1 = Z_1^T \geq 0, Z_2 = Z_2^T \geq 0$. 计算 $V(t)$ 沿着系统的导数

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) = & 2\xi^T(t)P\dot{\xi}(t) - \\ & (1-d(t))\xi^T(t-d(t))Q\xi(t-d(t)) + \\ & d\xi^T(t)(Z_1+Z_2)\dot{\xi}(t) + \xi^T(t)Q\xi(t) + \xi^T(t)R\xi(t) - \\ & \xi^T(t-d)R\xi(t-d) - \int_{t-d}^t \xi^T(s)(Z_1+Z_2)\dot{\xi}(s)ds \leq \\ & 2\xi^T(t)P\dot{\xi}(t) - \xi^T(t-d)R\xi(t-d) + \\ & d\xi^T(t)(Z_1+Z_2)\dot{\xi}(t) + \xi^T(t)(Q+R)\xi(t) - \\ & (1-\mu)\xi^T(t-d(t))Q\xi(t-d(t)) - \int_{t-d(t)}^t \xi^T(s)Z_1\dot{\xi}(s)ds - \\ & \int_{t-d}^{t-d(t)} \xi^T(s)Z_1\dot{\xi}(s)ds - \int_{t-d}^t \xi^T(s)Z_2\dot{\xi}(s)ds + \\ & 2\xi_1^T(t)N[\xi(t) - \xi(t-d(t)) - \int_{t-d(t)}^t \dot{\xi}(s)ds] + \\ & 2\xi_1^T(t)S[\xi(t-d(t)) - \xi(t-d) - \int_{t-d}^{t-d(t)} \dot{\xi}(s)ds] + \\ & 2\xi_1^T(t)M[\xi(t) - \xi(t-d) - \int_{t-d}^t \dot{\xi}(s)ds] \leq \xi_1^T(t)\Theta\xi_1(t) - \\ & \int_{t-d(t)}^t (\xi_1^T(t)N + \xi^T(s)Z_1)Z_1^{-1}(\xi_1^T(t)N + \xi^T(s)Z_1)^T ds - \\ & \int_{t-d}^{t-d(t)} (\xi_1^T(t)S + \xi^T(s)Z_1)Z_1^{-1}(2\xi_1^T(t)S + \xi^T(s)Z_1)^T ds - \\ & \int_{t-d}^t (\xi_1^T(t)M + \xi^T(s)Z_2)Z_2^{-1}(\xi_1^T(t)M + \xi^T(s)Z_2)^T ds. \end{aligned}$$

式中:

$$\tilde{\Xi} = \begin{bmatrix} \tilde{\Phi}_{11} & \tilde{\Phi}_{12} & \tilde{\Phi}_{13} & dN_1 & dS_1 & dM_1 & dA_c^T(Z_1+Z_2) & PD \\ * & \tilde{\Phi}_{22} & \tilde{\Phi}_{23} & dN_2 & dS_2 & dM_2 & dB_c^T(Z_1+Z_2) & 0 \\ * & * & \tilde{\Phi}_{33} & dN_3 & dS_3 & dM_3 & 0 & 0 \\ * & * & * & -dZ_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & * & -dZ_1 & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & * & * & -dZ_2 & 0 & 0 \\ * & * & * & * & * & -dZ_2 & -d(Z_1+Z_2) & d(Z_1+Z_2)D \\ * & * & * & * & * & * & * & -\lambda I \end{bmatrix}$$

$$\tilde{\Phi}_{11} = \Phi_{11}, \tilde{\Phi}_{12} = \tilde{\Phi}_{21}^T = \Phi_{12}, \tilde{\Phi}_{22} = \Phi_{22} + \lambda I,$$

$$\tilde{\Phi}_{13} = \Phi_{31}^T = \Phi_{13}, \tilde{\Phi}_{23} = \Phi_{32}^T = \Phi_{23}, \tilde{\Phi}_{33} = \Phi_{33}.$$

证明 如果网络拓扑为动态拓扑,将通信拓扑的变化看做系统的结构不确定性,则闭环系统状态方程为

$$\begin{aligned} \dot{\xi}(t) = & (A_c + \Delta A(t))\xi(t) + \\ & (B_c + \Delta B(t))\xi(t-\tau(t)) + C_c + \Delta C(t). \end{aligned}$$

式中:

$$A_c = A = \begin{bmatrix} 0 & I_{nN} \\ -I_{nN} & -(\beta+1)I_{nN} \end{bmatrix},$$

$$\Theta = \Theta^T = \begin{bmatrix} \Theta_{11} & \Theta_{12} & \Theta_{13} \\ * & \Theta_{22} & \Theta_{23} \\ * & * & \Theta_{33} \end{bmatrix},$$

$$\Theta_{11} = PA + A^T P + Q + R + N_1 + M_1 + N_1^T + M_1^T + dA^T(Z_1+Z_2)A + dN_1N_1^{-1}N_1^T + dS_1Z_1^{-1}S_1^T + dM_1Z_2^{-1}M_1^T,$$

$$\Theta_{22} = -(1-\mu)Q - N_2 + S_2 - N_2^T + dB^T(Z_1+Z_2)B + dN_2N_1^{-1}N_2^T + dS_2Z_1^{-1}S_2^T + dM_2Z_2^{-1}M_2^T,$$

$$\Theta_{33} = -R - M_3 - S_3 - M_3^T - S_3^T + dN_3N_1^{-1}N_3^T + dS_3Z_1^{-1}S_3^T + dM_3Z_2^{-1}M_3^T,$$

$$\Theta_{12} = PB - N_1 + S_2 + N_2^T + M_2^T + dA^T(Z_1-Z_2)A + dN_1N_1^{-1}N_2^T + dS_1Z_1^{-1}S_2^T + dM_2Z_2^{-1}M_2^T,$$

$$\Theta_{13} = -M_1 - S_1 + N_3^T + M_3^T + dN_1N_1^{-1}N_3^T + dS_1Z_1^{-1}S_3^T + dM_1Z_2^{-1}M_3^T,$$

$$\Theta_{23} = -M_2 - S_2 - N_3^T + S_3^T + dN_2N_1^{-1}N_3^T + dS_2Z_1^{-1}S_3^T + dM_2Z_2^{-1}M_3^T.$$

如果 $\Theta < 0$, 则必然有 $\dot{V}(t) < 0$, 因此自治系统是收敛的, 进而系统是收敛的. 根据引理 1 知, $\Theta < 0$ 与 $\Xi < 0$ 是等价的. 证毕.

定理 2 如果网络拓扑为动态拓扑且强连通, 对于期望的编队向量 h 、编队速度 v_d, \dot{v}_d 和给定的标量 d, μ, α, β , 存在正定对称矩阵 P, Q, R, Z_1, Z_2 以及任意适合维数的矩阵 $N_1, N_2, N_3, S_1, S_2, S_3, M_1, M_2, M_3$ 和标量 $\lambda > 0$, 使得 $\Xi = \tilde{\Xi}^T < 0$ 成立, 则编队运动能够形成并保持, 其中:

$$\Delta A(t) = 0, B_c = \begin{bmatrix} 0 & I_{nN} \\ I_{nN} & I_{nN} \end{bmatrix},$$

$$\Delta B(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\bar{L}(t) \otimes I_n & -\bar{L}(t) \otimes I_n \end{bmatrix}$$

$$C_c = \begin{bmatrix} 0 \\ \beta(1_n \otimes v_d) + \alpha(1_n \otimes \dot{v}_d) \end{bmatrix},$$

$$\Delta C(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ E(t) \end{bmatrix}.$$

时变结构不确定性项 $\Delta B(t)$ 用于表示拓扑结构的变化, 易知 $\|\Delta B(t)\|$ 是有界的. 令 $\Delta A(t) = DF(t)E$,

$\Delta B(t) = DF(t)E_b$, 其中 D, E_a, E_b 是具有合适维数的实常数矩阵且 $E_a = 0, F(0)$ 是有界的实矩阵函数且满足 $F^T(t)F(t) \leq I, \forall t$. 使用矩阵 A_c, B_c 替换定理 1 中的 A, B , 再利用 $A_c + DF(t)E_a, B_c + DF(t)E_b$ 分别替换 A_c, B_c , 应用引理 2 和引理 1, 定理得证.

3 平面内 6 个智能体编队仿真实例

考虑 6 个智能体在平面内运动的情况, 智能体的初始位置随机分布在 60×60 范围内, 初始速度均为 0; 期望的编队队形为 h , 编队速度 $v_d = [8 \ 10]^T, \dot{v}_d = [0.5 \ 0.5]^T$; 时变时滞 $d(t) = 0.5 + 0.5 \cos t, d = 1, \mu = 0.5$; 系统控制参数 $\alpha = 10, \beta = 6$, 权重系数 $\alpha_{ij} = 1$; 固定网络拓扑下的邻接矩阵为 L , 仿真时间 40 s, 步长为 0.01 s.

$$h = 20[h_1 \ h_2 \ h_3 \ h_4 \ h_5 \ h_6]^T.$$

式中:

$$h_1 = [0 \ 3 \ -3 \ 3 \ 0 \ -3 \ 0 \ 3 \ 3 \ 6 \ 9 \ 6]^T,$$

$$h_2 = [-3 \ 0 \ -6 \ 0 \ -3 \ -6 \ -3 \ 0 \ 0 \ 3 \ 6 \ 3]^T,$$

$$h_3 = [3 \ 6 \ 0 \ 6 \ 3 \ 0 \ -3 \ 0 \ 0 \ 3 \ 6 \ 3]^T,$$

$$h_4 = [-3 \ 0 \ -6 \ 0 \ -3 \ -6 \ -6 \ -3 \ -3 \ 0 \ 3 \ 0]^T,$$

$$h_5 = [0 \ 3 \ -3 \ 3 \ 0 \ -3 \ -9 \ -6 \ -6 \ -3 \ 0 \ -3]^T,$$

$$h_6 = [3 \ 6 \ 0 \ 6 \ 3 \ 0 \ -6 \ -3 \ -3 \ 0 \ 3 \ 0]^T,$$

$$L = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

使用 Matlab 的 LMI 工具箱, 求解线性矩阵不等式, 在给定的条件下, 可求得可行解. 智能体的运动轨迹如图 2 所示.

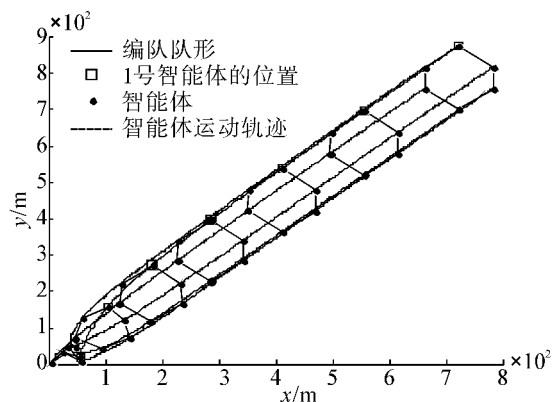


图2 智能体运动轨迹

Fig. 2 Movement trajectories of agents

在该控制律的作用下, 智能体能够形成期望的编队队形. 编队速度变化如图 3 所示, 智能体的速度渐进一致并趋近期望的编队速度; 编队队形误差变

化如图 4 所示, 编队队形误差渐进趋于零, 说明精确的编队形成.

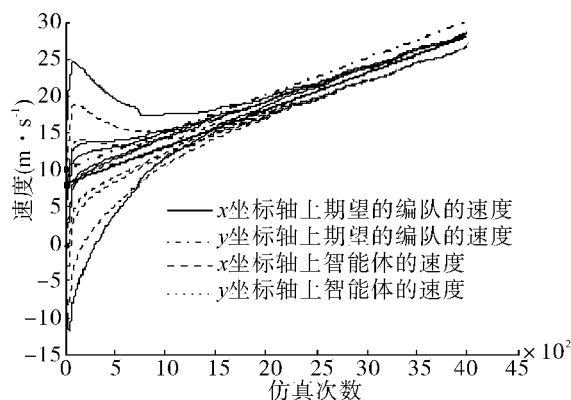


图3 智能体编队速度变化

Fig. 3 Velocity variety of agents

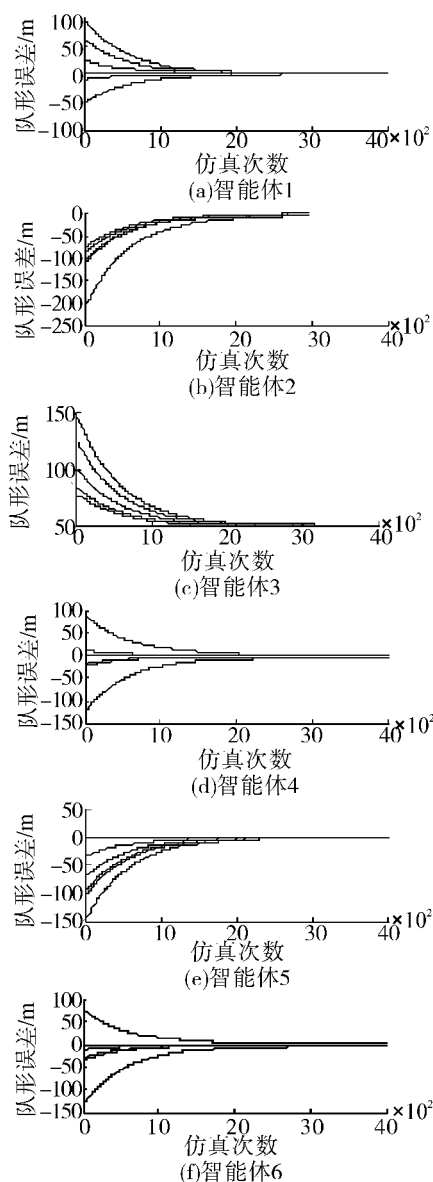


图4 智能体编队队形误差变化

Fig. 4 Formation error variety of agents

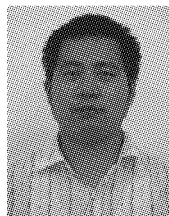
4 结束语

编队控制中,时滞是无法回避的问题.本文以二阶智能体为研究对象,考虑到时变时滞的影响,提出了一种分布式编队控制律,并对系统进行了稳定性分析.理论推导和仿真结果表明,该控制律能够使处于任意初始位置的多智能体形成期望的编队队形,在编队机动的过程中保持队形,并能快速进行队形变换.

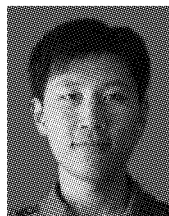
参考文献:

- [1] LEWIS M A, TAN K H. High precision formation control of mobile robots using virtual structures[J]. Autonomous Robots, 1997, 4(4): 387-403.
- [2] REN W. A decentralized scheme for spacecraft formation flying via the virtual structure approach[J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 2004, 27(1): 73-82.
- [3] R. M. Kuppan Chetty, M. Singaperumal, T. Nagarajan. Behavior based multi robot formations with active obstacle avoidance based on switching control strategy[J]. Journal Advanced Materials Research, 2012: 433-440.
- [4] SHI H, WANG L. Virtual leader approach to coordinated control of multiple mobile agents with asymmetric interactions[J]. Physica D, 2006, 213(1): 51-65.
- [5] HU Jiangping, HONG Yiguang. Leader-following coordination of multi-agent systems with coupling time delays[J]. Physica A, 2007, 374(2): 853-863.
- [6] 宗令蓓,谢凡,秦世引. 基于 MAS 的无人机编队飞行智能优化控制[J]. 航空学报, 2008, 29(5): 1326-1377.
GONG Lingbei, XIE Fan, QIN Shiyin. Intelligent optimizing control of formation flight for UAVs based on MAS[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(5): 1326-1377.
- [7] WEI Ren, ATKINS E. Distributed multi-vehicle coordinated control via local information exchange[J]. Int J Robust Nonlinear Control, 2007, 17(10): 1002-1033.
- [8] 吴正平,关治洪,吴先用. 基于一致性理论的多机器人系统队形控制[J]. 控制与决策, 2007, 22(11): 1241-1244.
WU Zhengping, GUAN Zhihong, WU Xianyong. Consensus based formation control of multi-robot system[J]. Control and Decision, 2007, 22(11): 1241-1244.
- [9] 吴俊,陆宇平. 基于网络通信的多机器人系统的稳定性分析[J]. 自动化学报, 2010, 36(12): 1706-1710.
WU Jun, LU Yuping. Stability analysis of multi-robot system based on network communication[J]. Acta Automatica Sinica, 2010, 36(12): 1706-1710.
- [10] WEI Ren. Leaderless formation control for multiple autonomous vehicles [C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Keystone, USA, 2006: 1-10.
- [11] WEI Ren. Distributed coordination architecture for multi-robot formation control[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2008 (56): 324-333.
- [12] SU Housheng, ZHANG Wei. Second-order consensus of multiple agents with coupling delay[J]. Communications in Theoretical Physics, 2009 (51): 101-109.
- [13] LIU Chenglin, LIU Fei. Consensus problem of coupled dynamic agents with communication delay[C]// Proceedings of the 29th Chinese Control Conference. Beijing, China, 2010: 4501-4505.
- [14] LIN Peng, JIA Yingmin. Consensus of a class of second-order multi-agent systems with time-delay and jointly-connected topologies[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2010, 55(3): 778-784.
- [15] LIU Chenglin, LIU Fei. Consensus of second-order multi-agent systems under communication delay[C]//2010 Chinese Control and Decision Conference. Beijing, China, 2010: 739-744.
- [16] ZHU Wei, CHENG Daizhan. Leader-following consensus of second-order agents with multiple time-varying delays[J]. Automatica, 2010 (46): 1994-1999.
- [17] PETERSEN I R, HOLLOT C V. A Riccati equation approach to the stabilization of uncertain linear system[J]. Automatica, 1986, 22 (4): 397-411.

作者简介:



雷明,男,1983年生,博士研究生,主要研究方向为无人飞行器编队、多智能体协同控制、无线自组织网络。



周超,男,1982年生,博士研究生,主要研究方向为无人飞行器编队协同控制、预测控制。



周绍磊,男,1963年生,教授,博士生导师,博士. 主要研究方向为先进飞行器设计、非线性滤波、自动测试技术、分布式控制,发表学术论文60余篇,承担省部级项目6项,出版专著2部。