

多智能体协同路径跟踪控制方法研究*

文◆天津工业职业学院工业与信息化系 李佳佳

引言

党的二十大报告指出，要研究信息化智能化战争规律，创新军事战略，加快无人智能作战力量发展。过去十年，我国经济实力和综合国力显著增强，但仍需认识到科技创新的重要性。无人智能技术^[1-2]在军事和日常生活中的作用日益凸显，但目前的无人系统多独立运作，缺乏协同能力。

多智能体技术^[3-4]通过协同合作已在航空航天、精准农业、深海探索和军事行动等领域展现出巨大潜力。然而，当前研究存在局限性，如忽视一般轨迹问题、协同难度随智能体数量增加而剧增，同时还面临外部干扰、控制输入饱和、碰撞风险和通信拒止等挑战。因此，深入研究多智能体协同路径跟踪控制问题，具有重要的理论和实践意义。

1 系统模型

1.1 智能体运动学模型

考虑外界风扰，建立智能体运动学模型，如式(1)所示。

$$\begin{cases} \dot{x}_i = v_i \cos \varphi_i + W_x \\ \dot{y}_i = v_i \sin \varphi_i + W_y \\ \dot{\varphi}_i = \omega_i \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中， $\begin{cases} W_x = v_\omega \cos \varphi_\omega \\ W_y = v_\omega \sin \varphi_\omega \end{cases}$ ， $v_\omega = \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \leq v_{\omega \max}$ ，其中， φ_i 为智能体的前进方向角度， v_i 和 ω_i 分别为速度以及角速率。 φ_ω 和 v_ω 是风向和风的平均速度，且 v_ω 受到 $v_{\omega \max}$ 约束。

智能体的最小移动速度受限，且其前进方向的角速率受驱动功率和侧倾角度等因素的饱和约束，如式(2)所示。

$$0 < v_{\min} \leq v_i \leq v_{\max}, \quad -\omega_{\max} \leq \omega_i \leq \omega_{\max} \quad (2)$$

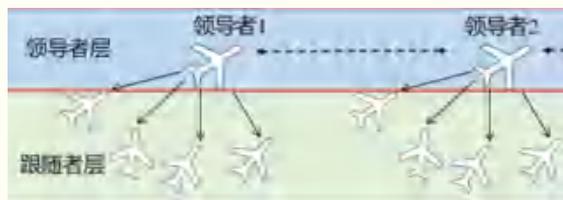


图1 多智能体系统控制架构

1.2 分层控制体系结构

多智能体系统控制架构如图1所示，在多智能体系统中，将所有智能体划分成多个独立的群组，每群组设立领导者和跟随者。

2 控制算法设计

2.1 领导者路径跟踪控制

设定每个领导者智能体追踪其规划路径上的虚拟目标点。通常二维路径跟踪问题在Frenet-Serret坐标系中定义，该坐标系随虚拟目标点移动，并且以其切线方向为x轴。在Frenet-Serret坐标系中的路径误差如图2所示。

图2 在Frenet-Serret坐标系中的路径误差

利用坐标系变换的误差动力学模型如式(3)(4)(5)所示。

$$\begin{cases} \dot{e}_s = v_i \cos \tilde{\varphi}_i - (1 - \kappa(l_i)) \dot{l}_i + W_{ex} \\ \dot{e}_d = v_i \sin \tilde{\varphi}_i - \kappa(l_i) e_d \dot{l}_i + W_{ey} \\ \dot{\tilde{\varphi}}_i = \omega_i - \kappa(l_i) \dot{l}_i \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} W_{ex} = W_x \cos \tilde{\varphi}_i + W_y \sin \tilde{\varphi}_i \\ W_{ey} = -W_x \sin \tilde{\varphi}_i + W_y \cos \tilde{\varphi}_i \end{cases} \quad (4)$$

*【基金项目】天津工业职业学院2024年科研项目“多智能体协同路径跟踪控制方法研究”(202409)

【作者简介】李佳佳(1997—)，女，河北石家庄人，硕士，助教，研究方向：控制科学与工程。

$$v_\omega = \sqrt{W_x^2 + W_y^2} = \sqrt{W_{ex}^2 + W_{ey}^2} \leq v_{\omega max} \quad (5)$$

式(3)(4)中, $\tilde{\varphi}_i$ 表示第*i*个Frenet-Serret坐标系相对于惯性系下的旋转角度。 $\tilde{\varphi}_i$ 为前进方向误差, e_{s_i} 和 e_{d_i} 是前向误差与侧偏距误差。

用 $\mathcal{O}_i = [e_{s_i}, e_{d_i}, \tilde{\varphi}_i]^T \in R \times R \times [-\pi, \pi]$ 来体现第*i*个智能体的路径跟踪误差, 用 $e_i = [e_{s_i}, e_{d_i}]^T \in R^2$ 作为第*i*个智能体的位置误差。

接着, 采用向量场^[5]的方法来调整智能体的方向。

选定向量场如式(6)所示。

$$\varphi_{di} = -\varphi^\infty \frac{e^{2ke_{d_i}} - 1}{e^{2ke_{d_i}} + 1} \quad (6)$$

式(6)中, $k > 0$, $\varphi^\infty \in (0, \pi/2]$ 。

采用滑模控制方法设计控制律, 如式(7)所示。

$$s_i = \varphi_{di} - \tilde{\varphi}_i \quad (7)$$

当 $\varphi_{di} - \tilde{\varphi}_i$ 时,

同时令 $\dot{l}_i = k_s e_{s_i} + v_i \cos \tilde{\varphi}_i$, $k_s > 0$ 。

为减小滑模控制中的抖振现象, 可用连续函数替代符号函数,

如式(8)(9)所示, δ_i 为正数。

$$\dot{s}_i = -\varepsilon_i \frac{s_i}{|s_i| + \delta_i} \quad (8)$$

$$\dot{s}_i = \dot{\varphi}_{di} - \dot{\tilde{\varphi}}_i = \dot{\varphi}_{di} - \omega_i + \kappa(l_i)\dot{l}_i = -\varepsilon_i \frac{s_i}{|s_i| + \delta_i} \quad (9)$$

则可得到式(10)。

$$\omega_i = \dot{\varphi}_{di} + \kappa(l_i)\dot{l}_i + \varepsilon_i \frac{s_i}{|s_i| + \delta_i} \quad (10)$$

最后, 对领导者控制律进行仿真验证, 本文设计的控制律可使领导者智能体有效跟踪曲线和圆形路径。在风干扰条件下, 领导者智能体在控制律作用下仍能实现精准跟踪。

2.2 跟随者路径跟踪控制

对于跟随者, 其跟踪目标是与直接领导者方向一致并与其直接领导者保持期望距离 $[d_x, d_y]^T$ 。跟随者与其领导者的相对位置如图3所示。

图3 跟随者与其领导者的相对位置

2.3 群组间领导者协调控制

领导者智能体间的协同通过调节虚拟目标点在期望路径上的更新速



率来实现。假设能够通过变量 θ_i 唯一确定路径上的点，则实现智能体间协同需达成如式 (11) 所示的控制目标。

$$\theta_i(t) - \theta_j(t) \rightarrow \theta_{ij}^d \quad (11)$$

设计控制律如式 (12) 所示。

$$\dot{\theta}_i = -\beta \tanh \left(\sum_{j \in N_i} k_{\theta} (\theta_i - \theta_j - \theta_{ij}^d) \right) + \gamma_d \quad (12)$$

所设计的协同控制律可以确保任务完成，使多组领导者智能体在运行时保持设定间距 (300m)。同时，设定最小速度为 20m/s，并约束偏向角为 $[-\pi/2, \pi/2]$ 。

3 多智能体避障策略

针对多智能体系统的碰撞问题，应用碰撞锥算法快速确定避碰方向，其原理为视线矢量法 (见图 4)。

图 4 视线矢量法

图 4 中， r_s 和 v_{ou} 分别表示智能体和“障碍物”的相对位置和速度矢量。 d_c 表示“障碍物”影响范围。避碰开始条件如式 (13) 所示。

$$r_s \cdot v_{ou} \geq 0, D(t) \sin \phi < d_c \quad (13)$$

避碰检测角的计算如式 (14) 所示。

$$\phi = \begin{cases} \cos^{-1} \left[\frac{r_s \cdot v_{ou}}{|r_s| |v_{ou}|} \right] \\ \pi / 2, r_s = 0, v_{ou} = 0 \end{cases} \quad (14)$$

具体如式 (15) 所示。

$$\sigma_L = \beta^+ - \phi, \sigma_R = \beta^- - \phi \quad (15)$$

式 (15) 中， $\beta^- < \phi < \beta^+$ 。在规避“障碍物”时，智能体会选择成本较小的方案。

根据所需转角大小评估避障成本，以此决定智能体的转向方式，表达式如式 (16) 所示。

$$\sigma = \begin{cases} |\sigma_L|, |\sigma_L| \leq |\sigma_R| \\ |\sigma_R|, |\sigma_L| > |\sigma_R| \end{cases} \quad (16)$$

避碰完成条件为 r_s 在 v_{ou} 上的投影小于 0。

最后，对该避障策略进行仿真验证。

结语

本文提出了一种复杂环境下多智能体协同控制方法，主要贡献如下。一是设计了分层控制架构，降低协同规划复杂度。二是建立了考虑约束和干扰的智能体运动学模型，构建 Frenet-Serret 坐标系误差模型。三是采用滑模控制方法设计控制律，并通过李雅普诺夫方法验证了系统稳定性，保障复杂环境下的协同。四是采用了碰撞锥算法，增强动态环境下的安全性。最后，进行仿真验证，结果表明，该方法在控制约束和外界干扰下，能有效实现路径跟踪并避免碰撞。

引用

- [1] 曾照洋, 彭文胜, 李云凯, 等. 智能无人机集群可靠性技术内涵、发展及挑战[J]. 兵工学报, 2025, 46(3): 3-20.
- [2] 张涛, 李清, 张长水, 等. 智能无人自主系统的发展趋势[J]. 无人系统技术, 2018, 1(1): 11-22.
- [3] 丁思敏, 王刚, 孙立辉. 多智能体系统编队控制技术综述[J]. 智能计算机与应用, 2024, 14(10): 50-55.
- [4] 李杨, 徐峰, 谢光强, 等. 多智能体技术发展及其综述[J]. 计算机工程与应用, 2018, 54(9): 13-21.
- [5] 王祥科, 陈浩, 赵述龙. 大规模固定翼无人机集群编队控制方法[J]. 控制与决策, 2021, 36(9): 2063-2073.

