

徐庆

摘要:编队控制是多智能体运动控制的一类基础且重要的技术方向,也是一致性理论的重要拓展运用,在实际场景中也有着广泛的运用。本文对主流的编队控制方法进行系统的回顾与分析,并进行相应的仿真以验证理论有效性。

一 背景

多智能体协同控制以一致性理论为基本理论框架,在自然界及工程界均有广泛的体现与运用,如美国集群协同作战战略,自然界蚁群协同觅食搬运等。而多体编队技术作为一致性理论的充分外延也逐渐成为协同控制的重要且基础的研究分支,多智能体编队技术目标在于通过智能体之间的信息交换和协同,按照预定轨迹运动,同时保持期望的空间几何构型^[1]。通过一定程度的编队构型,多智能体系统具备了传统系统无法相比的优势,可有效提升系统的灵活性及鲁棒性,赋予了智能体系统丰富的扩展功能,例如,基于编队控制技术,多机器人系统可进行协同感测建图及侦察搬运等任务,多无人机群可实现灵活高效的集群攻击。

多体编队控制技术的研究可按照不同标准进行分类。从决策规划层面,根据智能体先验信息,可分为(1)已知参考轨迹,系统的构型轨迹可离线规划生成(2)未知参考轨迹,需要基于实时感知信息进行优化决策生成系统构型轨迹^[2];根据是否具备构型参考,可分为(1)构型生成,即多智能体在没有参考编队构型的情形下自主实现某种几何模式(2)构型跟踪,即依据参考编队构型实现期望的几何构型^[3];从系统信息交互层面,编队控制结构可大体分为(1)集中式,仅与中心节点通讯以传递感测信息或获得控制信息;(2)分散式,智能体邻居间共享信息,可基于局部感测信息实现群体控制(3)混合式,结合前两者,可对全局最优性能与通信及计算负担进行权衡^[1]。

编队构型控制任务可划分为三个子任务:(1)构型获取(2)构型保持(3)构型变化^[1]。(1)中智能体群基于控制算法收敛到特定几何构型位置完成初始化;(2)指在连续运动中保持已有的编队构型,抑制扰动和噪声;(3)指当出现新的约束条件而原有编队构型无法满足时,智能体编队可通过平移旋转,扩张收缩及拓扑变换等操作使得整体几何构型满足任务需求(如多无人机在穿越管道时的队形收缩)。同时,可针对不同的编队控制方法探讨稳定性与可控性等典型性能。

二 经典模型

目前针对愈发复杂的外部环境及规划任务等约束,多智能体编队控制算法类别也日趋丰富,本节以以下较为主流的算法为主线,进行详细的理论分析回顾

2.1 Leader-follower 模型

Leader-Follower 方法基本思想在于将一或多个智能体作为领导者,其余作为跟随者,按照给定姿态偏差跟踪领导者的位姿,通过几何状态变量的一致性控制实现集群编队。跟随者与领导者的相对位姿可有两种方式描述^[4]:(1)l- ψ 方法,即跟随者保持与领航者距离及方向相对固定;(2)l-l 方法,即跟随者同时保持与多个领导者间距离相对固定。文献[5]采用全方位视觉传感器估计领导者的位置与速度并进行跟踪和避障;文献[6]结合分布式协同控制策略提出了一种基于一一致性的算法框架,允许构型中存在多个领导者。该方法优势在于可直接指定领导者期望的全局运动轨迹并指定跟随者相对领航者的位姿偏差以实现编队构型,物理意义明显,但缺陷在于缺乏跟随者的显示反馈,易造成结构的不稳定。

以两轮差速小车为例,单个领导者与跟随者的几何关系如下图:

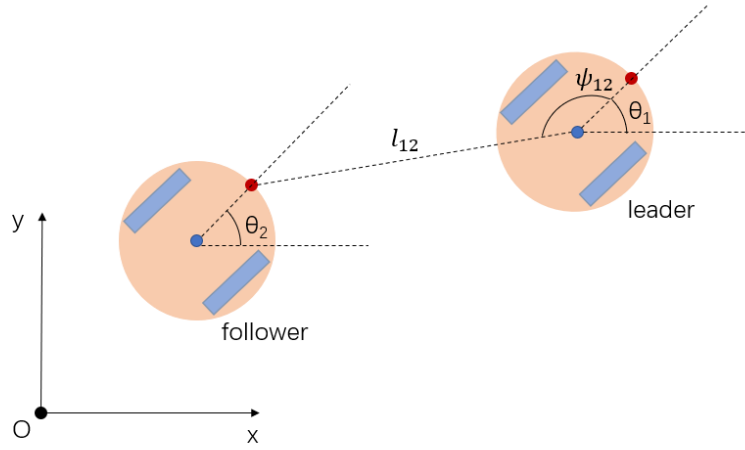


图 1 小车几何模型

如下图所示，跟随者由给定的编队位姿偏差计算出目标虚拟位姿，并基于控制器逐步跟踪期望位置，使得编队全局构型渐进收敛。

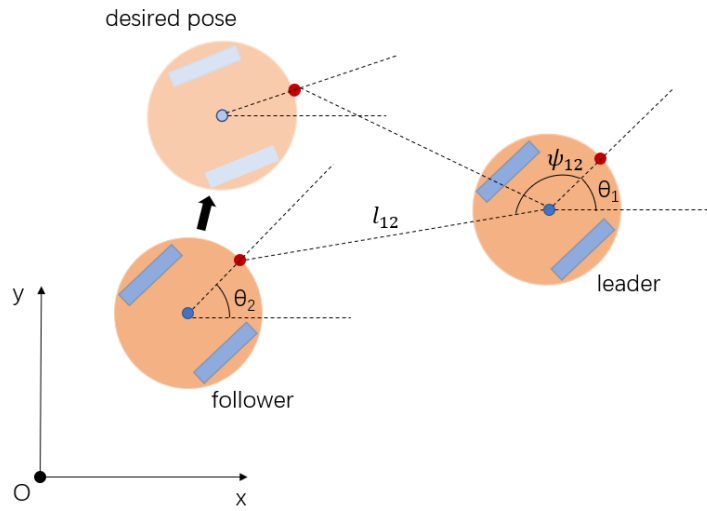


图 2 领导者-跟随者运动模型

对于上图，作为单个智能体(两轮差速小车)运动学模型

$$\begin{cases} \dot{x}_i = v_i \cos \theta_i \\ \dot{y}_i = v_i \sin \theta_i \\ \dot{\theta}_i = w_i \end{cases}$$

上式作为领航者的状态空间模型。

对于跟随者，考虑期望控制的编队几何变量，构造状态空间模型如下：

$$\begin{cases} \dot{l}_{12} = v_2 \cos \gamma_{12} - v_1 \cos \psi_{12} + dw_2 \sin \gamma_{12} \\ \dot{\psi}_{12} = \frac{1}{l_{12}} (v_1 \sin \psi_{12} - v_2 \sin \gamma_{12} + dw_2 \cos \gamma_{12} - l_{12} w_1) \\ \dot{\theta}_2 = w_2 \\ \gamma_{12} = \theta_1 + \psi_{12} - \theta_2 \end{cases}$$

可见系统构型模型本身为时域内非线性耦合模型，仅利用简单的 PID 控制难以实现编队协同控制，因此典型的 1- ψ 模型采用了反馈线性化方法，人为构造非线性控制器，使得难以控制的关键的编队几何变量转换为一阶线性可控模型。设计非线性控制率为：

$$\begin{aligned} w_2 &= \frac{\cos \gamma_{12}}{d} \cdot (\alpha_2 l_{12} (\psi_{12}^d - \psi_{12}) - v_1 \sin \psi_{12} + l_{12} w_1 + \rho_{12} \sin \gamma_{12}) \\ v_2 &= \rho_{12} - dw_2 \tan \gamma_{12} \\ \rho_{12} &= \frac{\alpha_1 (l_{12}^d - l_{12}) + v_1 \cos \psi_{12}}{\cos \gamma_{12}} \end{aligned}$$

反馈线性化后得到编队系统的线性状态方程为：

$$\begin{cases} \dot{l}_{12} = \alpha_1 (l_{12}^d - l_{12}) \\ \dot{\psi}_{12} = \alpha_2 (\psi_{12}^d - \psi_{12}) \end{cases}$$

2.2 虚拟结构法

虚拟结构法基本思想在于将整个编队构型视为具有多自由度的刚体结构，使得编队的空间构型变换等效于刚体结构的空问变换，进而通过引入的虚拟结构实现编队控制。文献[7]最早提出此方法，将虚拟结构定义为相互之间以及在某一参考系下存在刚性几何关系的对象集合。相关几何变量定义为如下。

N 个机器人的世界坐标为：

$$r_1^w, r_2^w, \dots, r_n^w$$

虚拟结构各节点在自身参考系下的坐标为：

$$p_1^r, p_2^r, \dots, p_n^r$$

虚拟结构节点的世界坐标为：

$$p_1^w, p_2^w, \dots, p_n^w$$

记虚拟结构坐标由参考系向世界系的映射为：

$$p_1^w, p_2^w, \dots, p_n^w = \Gamma_r^w(p_1^r, p_2^r, \dots, p_n^r)$$

采用如下的控制策略：

(1) 为当前构型分配虚拟结构，并在最小误差准则下拟合得出虚拟结构的局部参考系
针对当前时刻多智能体的位置分配虚拟结构形状，给定虚拟结构的局部坐标，并通过最小化如下欧氏距离求得虚拟结构局部参考系的最优位姿，

$$\min L^2(d_1, \dots, d_n) = \sqrt{\sum_{i=1}^n d_i^2}$$

$$d_i = \text{dist}(r_i^w, p_i^w) = \sqrt{[r_i^w - p_i^w]^T [r_i^w - p_i^w]}$$

$$(p_1^w, p_2^w, \dots, p_n^w) = \Gamma_r^w(p_1^r, p_2^r, \dots, p_n^r)$$

$$\Gamma_r^w = T(x)R(\theta)$$

(2) 向虚拟结构施加虚拟力使其向期望方向发生位姿偏移

$$\Gamma_r^w = T(x + x' dt)R(\theta + \theta' dt)$$

该时刻智能体期望位置为：

$$r_i^w = \Gamma_r^w p_i^r$$

(3) 对智能体进行轨迹规划

当编队朝向与虚拟结构朝向接近时，其运动控制率为：

$$v_l = \theta_{err} K + \min(d_{\max}, \text{dist}) \cdot (H_c \bullet H_d)$$

$$v_r = -\theta_{err} K + \min(d_{\max}, \text{dist}) \cdot (H_c \bullet H_d)$$

$$\theta_{err} = \arctan\left(\frac{H_c \times H_d}{H_c \bullet H_d}\right)$$

$$\text{dist} = \sum_{i=1}^n \text{dist}(r_i^w, p_i^w)$$

流程如下图所示：

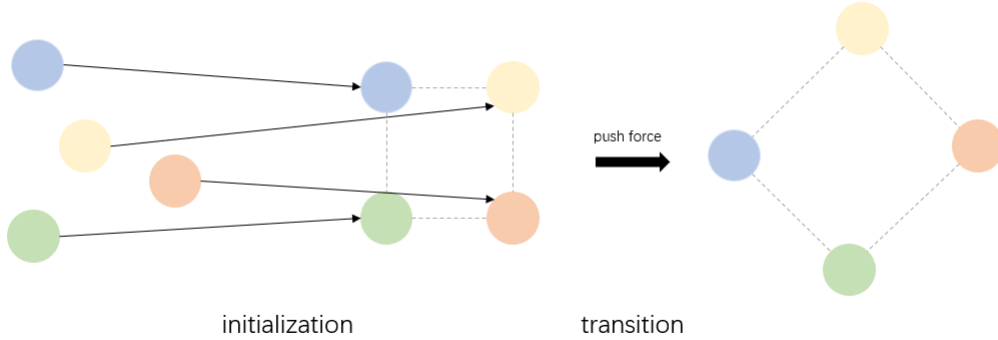


图 3 虚拟结构法

四个智能体(不区分领航者与跟随者)由初始的随机构型向指定的虚拟结构即方形过渡，并在需要编队变换时由全局规划器对虚拟结构进行适度的平移旋转及扩缩，进而智能体对各自的轨迹做出局部规划以满足虚拟结构的刚体性质。虚拟结构法提供了明确的物理意义，易于描述编队构型，但各智能体处于平级地位，需要点对点通讯维持结构，对系统通信造成较大负担，同时当群体数目较多或外部环境约束较严格时，频繁地进行构型变换会带来不稳定性和低扩展性。

三 实验分析

对 $l-\psi$ 模型进行仿真，给定如下 V 形期望队形：

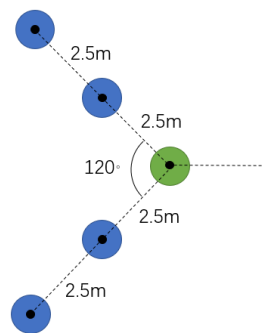


图 3 期望编队构型

L-F 算法的仿真编队路径如下：

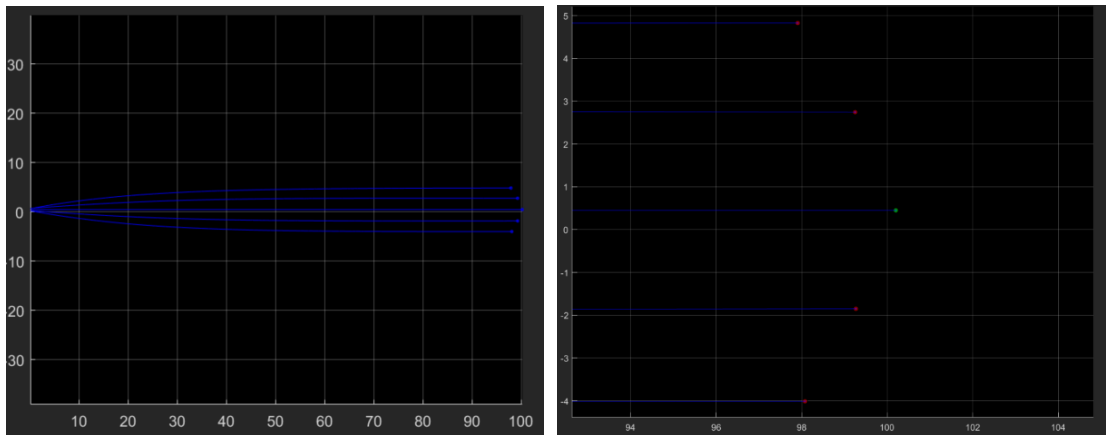


图 4 仿真路径

图中包含四个红色跟随着与一个绿色领航者，展示了由初始时刻的正方形构型向指定的 V 形过渡的过程截图。编队的几何变量变化如下：

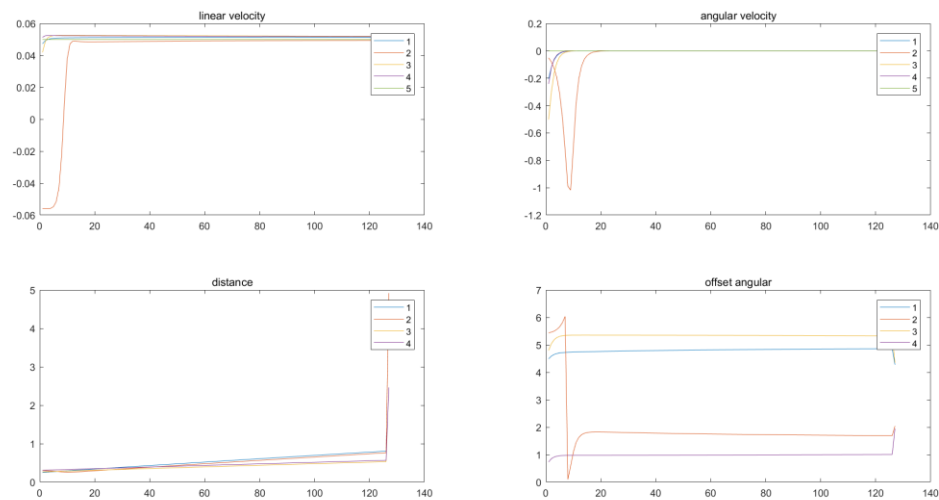


图 5 编队几何变量变化

由图 4 第一行可知，五个智能体线速度及角速度均收敛且趋向于一致，跟随者与领航者的距离及偏转角也较快地收敛于编队期望值，验证了经典 l-ψ 模型的有效性。

为详细分析跟随者位姿转角收敛原因，可进一步进行理论论证如下：

当领导者线速度为 V_1 ，角速度为 W_1 时，由前述控制率：

$$\theta_2' = \frac{W_1 l_{12} + V_1 \sin \psi_{12}^d}{d} \cos(W_1 t - \theta_2 + \theta_{10} + \psi_{12}^d) + \frac{V_1 \cos \psi_{12}^d}{d} \sin(W_1 t - \theta_2 + \theta_{10} + \psi_{12}^d)$$

即变换如下：

$$\theta_2' = \beta_1 \cos(W_1 t - \theta_2 + \theta_{10} + \psi_{12}^d - \beta_2)$$

继续代换：

$$\delta_{12} = \theta_1 - \theta_2 = W_1 t + \theta_{10} - \theta_2$$

即得如下的跟随者与领航者的位姿转角变量的非线性状态方程：

$$\delta_{12}' = W_1 - \beta_1 \cos(\delta_{12} + \psi_{12}^d - \beta_2)$$

则平衡点为：

$$\delta_{12}^e = -\psi_{12}^d + \beta_2 + \arccos(W_1 / \beta_1)$$

即跟随者的转角会局部收敛于：

$$\theta_2^e = \theta_1(t) + \psi_{12}^d - \beta_2 - \arccos(W_1 / \beta_1)$$

特别地，当领航者如上述仿真中转角恒定为 0 时，可得：

$$\delta_{12}^e = 0, \theta_2^e = \theta_{10} = \text{const}$$

即可证实仿真中出现的跟随者转角一致收敛于领航者转角的现象，且可进一步分析收敛速率及稳定性等性能。

四 总结

本课程论文立足于非线性系统控制主题，回顾分析了经典的两类非线性智能体编队控制模型：L-F 模型与虚拟结构模型，对 L-F 模型中的 l-ψ 方法进行了初步仿真，并结合理论分析，论证了该编队控制算法的稳定性。此外仍有其余的经典模型如人工势场法，基于行为的编队控制方法，同时也可将成熟的控制理论，如事件触发机制，模型预测控制，自适应控制等，融入编队控制这一场景。甚至融合前沿的启发学习类的智能控制方法，并针对多模态的感知手段及复杂动态的通讯拓扑及外部环境，构造更加高效且鲁棒的集群编队控制模型，这有待本人进一步的学习研究。

五 参考文献

- [1] Zhi-Wei H, Jia-Hong L, Ling C, et al. Survey on the formation control of multi-agent system[C]. Proceedings of the 31st Chinese Control Conference. IEEE, 2012: 6092-6098.
- [2] Do K D, Lau M W. Practical formation control of multiple unicycle-type mobile robots with limited sensing ranges[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2011, 64(2): 245-275.
- [3] Ren W, Cao Y. Distributed coordination of multi-agent networks: emergent problems, models, and issues[M]. Springer Science & Business Media, 2010.
- [4] Desai J P, Ostrowski J P, Kumar V. Modeling and control of formations of nonholonomic mobile robots[J]. 2001.
- [5] Vidal R, Shakernia O, Sastry S. Formation control of nonholonomic mobile robots with omnidirectional visual servoing and motion segmentation[C]. ICRA. 2003: 584-589.
- [6] Ren W, Sorensen N. Distributed coordination architecture for multi-robot formation control[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2008, 56(4): 324-333.
- [7] Lewis M A, Tan K H. High precision formation control of mobile robots using virtual structures[J]. Autonomous robots, 1997, 4(4): 387-403.

六 关键代码附录

```
%% 主函数
desire_pose=[5,4*pi/3;
            5,2*pi/3;
            2.5,4*pi/3;
            2.5,2*pi/3];%跟随者相对于领航者的距离及角度

k1=0.002;
k2=0.001;%控制器参数
%指定领航者速度
V_l=0.05;
W_l=0;
%存储跟随者相对位姿及各自运动量
v_agents=zeros(num,int8(total_t/delta_t));
w_agents=zeros(num,int8(total_t/delta_t));
l_agents=zeros(num-1,int8(total_t/delta_t));
phi_agents=zeros(num-1,int8(total_t/delta_t));
%离散时间迭代
for t=0:delta_t:total_t
    if t~=0
        for id=1:num
            P(id,:)=kinematics(P(id,:),w_agents(id,int8(t/delta_t)),v_agents(id,int8(t/delta_t)),delta_t);
        end
    end
    figure(1);
    for id=1:num
        %% 可视化
        THETA=linspace(0,2*pi,100);
        RHO=ones(1,100)*radius;
        [X,Y]=pol2cart(THETA,RHO);
        X=X+P(id,1);
        Y=Y+P(id,2);
        set(Q2{id},'Xdata',X,'Ydata',Y);
        set(Q2{id},'facealpha',0.5);
        set(Q1{id},'Xdata',P(id,1),'Ydata',P(id,2));
        %h=H{id};
        addpoints(H{id},P(id,1),P(id,2));
        %drawnow;
    end
    drawnow;
    %leader controller
    w_agents(5,int8(t/delta_t+1))=W_l;
    v_agents(5,int8(t/delta_t+1))=V_l;
```



```

%follower controller
for id=1:num-1
    castor=[P(id,1)+radius*cos(P(id,3)),P(id,2)+radius*sin(P(id,3))];
    %计算跟随者与领航者间的距离及偏转角
    l=norm([castor(1)-P(5,1),castor(2)-P(5,2)]);
    vec1=[castor(1)-P(5,1),castor(2)-P(5,2)];
    vec1=vec1/norm(vec1);
    vec2=[radius*cos(P(id,3)),radius*sin(P(id,3))];
    vec2=vec2/norm(vec2);
    phi=acos(sum((vec1.*vec2)));
    vec3=[radius*cos(P(id,3)+pi/2),radius*sin(P(id,3)+pi/2)];
    vec3=vec3/norm(vec3);
    if acos(sum((vec1.*vec3)))<=pi/2%由于 cos 的对称性,需要判断偏转角是否大于
pi
        phi=phi;
    else
        phi=2*pi-phi;
    end
    l_agents(id,int8(t/delta_t+1))=l;
    phi_agents(id,int8(t/delta_t+1))=phi;
    %控制率计算
    gamma=P(5,3)+phi-P(id,3);
    rho=(k1*(desire_pose(id,1)-l)+v_agents(5,int8(t/delta_t+1))*cos(phi))/cos(gamma);
    w_agents(id,int8(t/delta_t+1))=cos(gamma)*(k2*l*(desire_pose(id,2)-phi)-
v_agents(5,int8(t/delta_t+1))*sin(phi)+l*w_agents(5,int8(t/delta_t+1))+rho*sin(gam
ma))/radius;
    v_agents(id,int8(t/delta_t+1))=rho*radius*w_agents(id,int8(t/delta_t+1))*tan(gamma);
end
end
end

```