

一种多约束下无人机编队的模型预测控制算法

戴邵武^{1†}, 赵超轮¹, 李飞¹, 韩旭², 赵国荣¹

(1. 海军航空大学, 山东烟台 264001; 2. 91001 部队, 北京 100000)

摘要: 针对多无人机在编队飞行过程中须满足机间避碰、通信、避障等约束的问题, 设计了一种考虑多约束的分布式模型预测控制算法, 使无人机编队在满足上述约束的前提下, 实现轨迹跟踪、队形保持. 首先, 在不考虑通信时延、外界干扰、噪声的情况下, 以四旋翼为控制对象, 建立线性时不变的单机及编队运动模型; 然后, 在考虑状态约束、输入约束、机间避碰、机间通信、避障等多种约束的情况下, 以轨迹跟踪、队形保持为控制目标, 基于虚拟领航策略设计了一种分布式模型预测控制算法; 进而, 对优化问题的可行性以及编队系统的渐近稳定性进行了分析, 其中该算法的终端部分设计、相容性约束设计是保证系统稳定的关键; 最后, 利用 6 架无人机仿真验证了控制算法的有效性.

关键词: 无人机; 四旋翼; 编队控制; 分布式控制; 模型预测控制; 虚拟领航法

中图分类号: V249, V279

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.0382

引用格式: 戴邵武, 赵超轮, 李飞, 等. 一种多约束下无人机编队的模型预测控制算法 [J]. 控制与决策.

An Algorithm of Model Predictive Control for Multi-UAV System Considering Multiple Constraints

DAI Shao-wu^{1†}, ZHAO Chao-lun¹, LI Fei¹, HAN Xu², ZHAO Guo-rong¹

(1. Naval Aviation University, Yantai 264001, China; 2. PLA 91001 Unit, Beijing 100000, China)

Abstract: In the process of formation flight, multiple UAVs have to meet the constraints of collision avoidance between the UAVs, communication distance, and obstacle avoidance. In order to realize trajectory tracking and formation keeping of multi-UAV system on the premise of meeting the above constraints, a distributed model predictive control algorithm considering multiple constraints is designed in this paper. Firstly, the linear time-invariant motion models of single UAV and formation system are established without considering the communication time delay, external interference and noise; Then, the distributed model predictive control algorithm is designed based on virtual leader strategy, considering various constraints such as state constraints, input constraints, obstacle avoidance, collision avoidance and communication between individuals, with trajectory tracking and formation keeping as the control objectives; Furthermore, the feasibility of the optimization problem and the asymptotic stability of the formation system are analyzed, the keys to ensure the stability of the system are the designs of the terminal part and compatibility constraints of the algorithm; Finally, the effectiveness of the control algorithm is verified by the simulation of six UAVs.

Keywords: UAV; quadrotor; formation control; distributed control; model predictive control; virtual leader method

0 引言

多无人机协同编队控制问题是多无人机协同执行任务中的重要子问题^[1-4]. 协同编队控制是指根据任务要求, 在满足平台性能、战场环境等约束的情况下, 保证多无人机形成并保持一定的几何构型的原理、方法和技术. 这里涉及的约束一般包括无人机状态和输入约束、机间避碰约束、机间通信约束、避障约束等^[5-6]. 科研人员针对这一问题进行了较为深

入的研究, 提出了很多可行的方法^[7-9]. 其中分布式模型预测控制 (Distributed Model Predictive Control, DMPC) 方法^[10-12] 在众多方法中独树一帜, 这是因为其既具有模型预测控制方法显式处理约束、抑制干扰、滚动优化等优势, 又具有分布式结构计算量小、鲁棒性强、灵活性好等特点, 故而在解决协同编队控制问题上优势明显, 成果颇丰^[13-16].

利用 DMPC 方法解决多无人机协同编队控制

收稿日期: 2022-03-14; 录用日期: 2022-07-06.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61903374), 中国博士后科学基金 (2019M653928).

[†]通讯作者. E-mail: 792936421@qq.com.

问题,其难点在于要保证所设计的 DMPC 算法能够使得优化问题递归可行、系统渐近稳定.考虑到计算成本、通信成本以及无人机快速性的特点,所设计的 DMPC 算法一般都采用非迭代、并行的计算方式^[13-15],即在一个采样周期内无人机间只能交互一次信息,且所有无人机同时求解优化问题.在这种情况下,无人机间实时交互的信息通常包含假设信息,由于假设信息和真实信息之间存在不确定性偏差,这导致优化问题递归可行性和系统渐近稳定性难以得到保证.

针对上述难点,科研人员提出了在优化问题中引入相容性约束的思路.该约束要求每个子系统当前时刻的预测状态轨迹不能偏离上一时刻解算得到的最优状态轨迹太远,增加了假设信息的可靠性.如 William B. Dunbar 等^[17]设计了与更新周期相关的相容性约束,在仅考虑输入约束情况下,将多个非线性系统以协作的方式稳定到一个平衡点;Wang Peng 等^[18]通过引入位置和状态两种相容性约束,提出了一种考虑输入、状态约束及机间避碰约束的 DMPC 算法,解决了线性多智能体系统跟踪与编队问题;Dai Li 等^[19]则在考虑输入、状态、机间避碰约束及避障约束的情况下,通过设计相容性约束,将多个线性智能体稳定到一个平衡点.但上述文献并没有考虑机间通信约束.

结合上述研究成果,本文基于虚拟领航策略,为四旋翼无人机编队设计了一种考虑多约束的分布式模型预测控制算法,使得无人机编队能够在多约束下完成轨迹跟踪、队形保持任务.相较于文献[18][19],本文所设计的 DMPC 算法具有如下创新点:

1) 所考虑的约束条件更为全面.除了考虑文献[18]提到的平台状态、输入、机间避碰约束,文献[19]提到的避障约束外,还考虑了机间通信约束;

2) 所设计的代价函数更具有普适性.代价函数中各项的权重均采用对称正定矩阵来表示,相较于文献[18][19]中部分项的权重采用常数来表示,本文算法的普适性更强;

3) 结合 1) 2) 的特点,设计了一种改进的相容性约束,给出了优化问题递归可行性、系统渐近稳定性的证明.

符号说明: $N_v = \{1, 2, \dots, N_v\}$ 表示所有无人机集合, $N_v \setminus \{i\}$ 表示除 UAV_{*i*} 以外的其他所有无人机集合; $I_n \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 表示 n 维单位矩阵, $O_n \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 表示 $n \times n$ 维零矩阵, $\mathbf{0}$ 表示具有合适维数的零向量;对于矩阵 $\mathbf{P} \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $\mathbf{P} > 0$ 和 $\mathbf{P} < 0$ 分别表示

$\mathbf{P}$ 为正定矩阵和负定矩阵;对于向量 $\mathbf{x}$ 和正定矩阵 $\mathbf{P}$, $\|\mathbf{x}\|$ 和 $\|\mathbf{x}\|_{\mathbf{P}}$ 分别表示 $\mathbf{x}$ 的 2-范数和权重 $\mathbf{P}$ 下的 2-范数,即 $\|\mathbf{x}\| = \sqrt{\mathbf{x}^T \mathbf{x}}$, $\|\mathbf{x}\|_{\mathbf{P}} = \sqrt{\mathbf{x}^T \mathbf{P} \mathbf{x}}$.

1 系统模型

由于重点研究四旋翼编队的运动协调问题,且侧重其三维平移运动过程,因此在系统建模时对四旋翼模型合理简化,重点描述其平移运动的运动学特征.单机及编队的运动模型建模如下.

1.1 单机运动模型

假设无人机编队中共有 N_v 架四旋翼,无人机间动力学解耦,忽略风的阻力.目前市面上的四旋翼一般会配备自动驾驶仪,把速度指令输入给自动驾驶仪后,它能够自动控制四旋翼跟踪给定的速度指令.在此基础上,第 i 架无人机的质心运动模型可以近似描述为如下连续时间线性时不变形式^[20]:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{p}}_i = \mathbf{v}_i; \\ \dot{\mathbf{v}}_i = -l_v (\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_i^c). \end{cases} \quad (1)$$

其中,右下标 $i = 1, \dots, N_v$ 为无人机编号; $\mathbf{p}_i = [x_i, y_i, z_i]^T \in \mathbb{R}^3$ 为无人机在惯性系下的三维位置向量,单位 m; $\mathbf{v}_i = [v_{ix}, v_{iy}, v_{iz}]^T \in \mathbb{R}^3$ 为无人机在惯性系下的速度向量,单位 m/s; $\mathbf{v}_i^c = [v_{ix}^c, v_{iy}^c, v_{iz}^c]^T \in \mathbb{R}^3$ 为速度指令; $l_v > 0$ 为控制增益,用于表征四旋翼速度响应的滞后效应.

取状态量 $\mathbf{x}_i = [(\mathbf{p}_i)^T, (\mathbf{v}_i)^T]^T \in \mathbb{R}^6$, 控制输入量 $\mathbf{u}_i = \mathbf{v}_i^c \in \mathbb{R}^3$, 则式 (1) 的状态空间形式为 $\dot{\mathbf{x}}_i = \mathbf{A}\mathbf{x}_i + \mathbf{B}\mathbf{u}_i$, 即:

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{p}}_i \\ \dot{\mathbf{v}}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{O}_3 & \mathbf{I}_3 \\ \mathbf{O}_3 & -l_v \mathbf{I}_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{p}_i \\ \mathbf{v}_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{O}_3 \\ l_v \mathbf{I}_3 \end{bmatrix} \mathbf{u}_i. \quad (2)$$

式 (2) 的离散化描述为

$$\mathbf{x}_i(k+1) = \mathbf{G}\mathbf{x}_i(k) + \mathbf{H}\mathbf{u}_i(k). \quad (3)$$

其中,系数矩阵 $\mathbf{G} = e^{\mathbf{A}T} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_3 & a\mathbf{I}_3 \\ \mathbf{O}_3 & b\mathbf{I}_3 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$, $a = -(e^{-l_v T} - 1)/l_v$, $b = e^{-l_v T}$, T 为采样时间, $\mathbf{H} = \left(\int_0^T e^{\mathbf{A}t} dt\right) \mathbf{B} = \begin{bmatrix} c\mathbf{I}_3 \\ d\mathbf{I}_3 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{6 \times 3}$, $c = (e^{-l_v T} + l_v T - 1)/l_v$, $d = 1 - e^{-l_v T}$.

状态和控制输入满足如下约束:

$$\mathbf{x}_i \in \mathcal{X}_i \triangleq \{\mathbf{x}_i \in \mathbb{R}^6 \mid |\mathbf{E}_{n_x} \mathbf{x}_i| \leq \bar{x}_{i,n_x}\}, \quad (4)$$

$$\mathbf{u}_i \in \mathcal{U}_i \triangleq \{\mathbf{u}_i \in \mathbb{R}^3 \mid |\mathbf{E}_{n_u} \mathbf{u}_i| \leq \bar{u}_{i,n_u}\}. \quad (5)$$

其中 $n_x = 1, 2, \dots, 6$, $\mathbf{E}_{n_x} \in \mathbb{R}^{1 \times 6}$ 表示第 n_x 项为 1, 其余项为 0 的行向量; $n_u = 1, 2, 3$, $\mathbf{E}_{n_u} \in \mathbb{R}^{1 \times 3}$ 表示第 n_u 项为 1, 其余项为 0 的行向量; 式 (4)(5) 表示对

状态、输入向量的各个分量进行限制, $\bar{x}_{i,n_x}$ 、 $\bar{u}_{i,n_u}$ 为各个分量绝对值的上限。

在虚拟领航策略中, 虚拟领航机 UAV_r 的作用是为所有真实无人机预先提供参考状态轨迹和参考输入, 即真实无人机根据 UAV_r 的状态轨迹以及给定的期望相对状态可得到自身期望状态轨迹。UAV_r 具有与真实无人机相同的数学模型, 即

$$\mathbf{x}_r(k+1) = \mathbf{G}\mathbf{x}_r(k) + \mathbf{H}\mathbf{u}_r(k). \quad (6)$$

其中 $\mathbf{x}_r = [(\mathbf{p}_r)^T, (\mathbf{v}_r)^T]^T$, $\mathbf{x}_r, \mathbf{u}_r$ 需满足约束 (4)(5)。

1.2 编队运动模型

将 N_v 架无人机构成的集合称为编队系统, 定义编队系统的状态量 $\tilde{\mathbf{x}} = [(\mathbf{x}_1)^T, \dots, (\mathbf{x}_{N_v})^T]^T$, 控制输入量 $\tilde{\mathbf{u}} = [(\mathbf{u}_1)^T, \dots, (\mathbf{u}_{N_v})^T]^T$, 可得到线性时不变编队系统模型, 其离散形式为

$$\tilde{\mathbf{x}}(k+1) = \tilde{\mathbf{G}}\tilde{\mathbf{x}}(k) + \tilde{\mathbf{H}}\tilde{\mathbf{u}}(k). \quad (7)$$

其中, $\tilde{\mathbf{G}} = \mathbf{I}_{N_v} \otimes \mathbf{G}$, 符号 $\otimes$ 表示 Kronecker 积, $\tilde{\mathbf{H}} = \mathbf{I}_{N_v} \otimes \mathbf{H}$ 。

2 问题描述

问题的假设、控制目标如下所述。

假设 1 所有真实无人机预知虚拟领航机的状态信息, 期望相对状态信息以及障碍物信息;

假设 2 真实无人机之间采用全连通的通信拓扑结构, 在一个采样周期内, 各真实无人机能够实时、无时延地获取其他无人机发送的信息;

假设 3 不考虑外界干扰、噪声、空气阻力等对无人机动态的影响。

控制目标: 无人机编队系统在满足自身状态、输入约束以及机间避碰、机间通信距离、避障约束的前提下, 按照期望的相对位置跟踪虚拟领航机, 并保持预定的队形飞行。

数学描述如下:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} (\mathbf{p}_r(k) - \mathbf{p}_i(k)) = \mathbf{d}_{ir}; \quad (8)$$

$$\lim_{k \rightarrow \infty} (\mathbf{p}_j(k) - \mathbf{p}_i(k)) = \mathbf{d}_{ij}, \forall j \in \mathbb{N}_i; \quad (9)$$

$$\|\mathbf{p}_j(k) - \mathbf{p}_i(k)\| \geq 2R, \forall j \in \mathbb{N}_v \setminus \{i\}, k \geq 0; \quad (10)$$

$$\|\mathbf{p}_j(k) - \mathbf{p}_i(k)\| \leq C, \forall j \in \mathbb{N}_v \setminus \{i\}, k \geq 0; \quad (11)$$

$$\|\mathbf{p}_o - \mathbf{p}_i(k)\| \geq R + R_o, \forall o \in \mathbb{N}_o, k \geq 0. \quad (12)$$

其中式 (8) 表示无人机能够跟踪虚拟领航机, $\mathbf{d}_{ir}$ 为 UAV_r 与 UAV_i 间的期望相对位置; 式 (9) 表示多无人机能够保持队形飞行, $\mathbf{d}_{ij}$ 为 UAV_i 与 UAV_j 间期望的相对位置, $\mathbb{N}_i = \{j \in \mathbb{N}_v \setminus \{i\} | J_i \text{ 中包含 UAV}_j \text{ 的信息}\}$ 表示 UAV_i 的

邻居集, J_i 表示 UAV_i 的代价函数, 要求若 $j \in \mathbb{N}_i$, 则 $i \in \mathbb{N}_j$; 式 (10) 表示机间避碰约束, R 为无人机的安全半径; 式 (11) 表示机间通信距离约束, C 为无人机的最大通信半径; 式 (12) 表示无人机避免与固定障碍物碰撞的约束, 这里将障碍物简化为球体, $\mathbf{p}_o$ 为障碍物 o 的球心位置, R_o 为障碍物半径, $\mathbb{N}_o$ 为所有障碍物集合。

注 1 为避免矛盾, $\mathbf{d}_{ij}$ 和 $\mathbf{p}_r(k)$ 的设计应满足:

$$\mathbf{d}_{ij} = \mathbf{d}_{ir} - \mathbf{d}_{jr}, 2R < \|\mathbf{d}_{ij}\| < C, \forall j \in \mathbb{N}_v \setminus \{i\};$$

$$\|\mathbf{p}_o - \mathbf{p}_r(k) + \mathbf{d}_{ir}\| > R + R_o, \forall o \in \mathbb{N}_o.$$

根据控制目标, 设计单机 UAV_i 的代价函数为:

$$\begin{aligned} J_i(k, \mathbf{x}_i, \mathbf{x}_{-i}, \mathbf{x}_r, \mathbf{u}_i, \mathbf{u}_r) \\ = \sum_{l=0}^{N-1} L_i(k+l|k, \mathbf{x}_i, \mathbf{x}_{-i}, \mathbf{x}_r, \mathbf{u}_i, \mathbf{u}_r) + \\ L_{if}(k+N|k, \mathbf{x}_i, \mathbf{x}_r). \end{aligned} \quad (13)$$

其中,

$$\begin{aligned} L_i(k+l|k, \mathbf{x}_i, \mathbf{x}_{-i}, \mathbf{x}_r, \mathbf{u}_i, \mathbf{u}_r) \\ = \|\mathbf{x}_{ir}(k+l|k)\|_{\mathbf{Q}_i}^2 + \|\mathbf{u}_{ir}(k+l|k)\|_{\mathbf{S}_i}^2 + \\ \sum_{j \in \mathbb{N}_i} \|\mathbf{x}_{ij}(k+l|k)\|_{\mathbf{G}_i}^2, \end{aligned} \quad (14)$$

$$L_{if}(k+N|k, \mathbf{x}_i, \mathbf{x}_r) = \|\mathbf{x}_{ir}(k+N|k)\|_{\mathbf{P}_i}^2. \quad (15)$$

其中 $\mathbf{x}_{-i}$ 表示 UAV_i 邻居集 $\mathbb{N}_i$ 里所有 UAV 的状态, $\mathbf{u}_{ir}(k+l|k) = \mathbf{u}_i(k+l|k) - \mathbf{u}_r(k+l)$, $\mathbf{x}_{ir}(k+l|k) = \mathbf{x}_i(k+l|k) - \mathbf{x}_r(k+l) + \mathbf{d}_{ir}^x$, $\mathbf{x}_{ij}(k+l|k) = \mathbf{x}_i(k+l|k) - \mathbf{x}_j(k+l|k) + \mathbf{d}_{ij}^x$, $\mathbf{d}_{ir}^x = [(\mathbf{d}_{ir})^T, \mathbf{0}]^T \in \mathbb{R}^6$, $\mathbf{d}_{ij}^x = [(\mathbf{d}_{ij})^T, \mathbf{0}]^T \in \mathbb{R}^6$ 表示期望的相对状态, $\mathbf{x}_i(k+l|k)$ 表示 UAV_i 在 k 时刻预测的 $k+l$ 时刻的状态值。注意代价函数 (13) 中的 $j \in \mathbb{N}_i$, 权重 $\mathbf{Q}_i$ 、 $\mathbf{S}_i$ 、 $\mathbf{G}_i$ 、 $\mathbf{P}_i$ 为对称正定矩阵, N 为预测时域长度。式 (15) 为终端代价函数。

将单机代价函数 (13) 求和, 得到编队系统代价函数为

$$J_\Sigma(k) = \sum_{i \in \mathbb{N}_v} J_i(k, \mathbf{x}_i, \mathbf{x}_{-i}, \mathbf{x}_r, \mathbf{u}_i, \mathbf{u}_r). \quad (16)$$

对于 UAV_i, 其优化问题描述如下。

问题 1 在采样时刻 k , UAV_i 从 $\mathbf{x}_i(k|k)$ 出发求解预测时域长度为 N 的优化控制问题 $\mathcal{P}_i$, 可表示为:

$$\min_{U_i(k)} J_i(k, \mathbf{x}_i, \mathbf{x}_{-i}, \mathbf{x}_r, \mathbf{u}_i, \mathbf{u}_r) \quad (17)$$

对于 $l = 1, \dots, N-1$,

$$\begin{aligned}
& \text{s.t. } \mathbf{x}_i(k+l+1|k) = \mathbf{G}\mathbf{x}_i(k+l|k) + \mathbf{H}\mathbf{u}_i(k+l|k); \\
& \mathbf{x}_i(k+l|k) \in \mathcal{X}_i; \mathbf{u}_i(k+l|k) \in \mathcal{U}_i; \\
& \|\mathbf{p}_j(k+l|k) - \mathbf{p}_i(k+l|k)\| \geq 2R, \forall j \in \mathbb{N}_v \setminus \{i\}; \\
& \|\mathbf{p}_j(k+l|k) - \mathbf{p}_i(k+l|k)\| \leq C, \forall j \in \mathbb{N}_v \setminus \{i\}; \\
& \|\mathbf{p}_o - \mathbf{p}_i(k+l|k)\| \geq R + R_o, \forall o \in \mathbb{N}_o; \\
& \mathbf{x}_i(k|k) = \mathbf{x}_i(k); \mathbf{x}_i(k+N|k) \in \Omega_i.
\end{aligned} \quad (18)$$

即求解出满足约束 (18) 的控制输入序列 $\mathbf{U}_i(k) = \{\mathbf{u}_i(k|k), \mathbf{u}_i(k+1|k), \dots, \mathbf{u}_i(k+N-1|k)\}$, 使得代价函数 (13) 最小. 其中 $\mathbf{x}_i(k|k) = \mathbf{x}_i(k)$ 表示将 k 时刻当前状态作为该时刻优化问题的初始状态; Ω_i 为终端集, 其相关设计将在第 3 节介绍.

由于 UAV_{*i*} 在采样时刻 k 不能实时获取其他无人机真实的预测状态 $\mathbf{x}_j(k+l|k)$ 、 $\mathbf{p}_j(k+l|k)$, 故问题 1 无法实现多无人机优化问题的同步解算, 为解决此问题, 引入假设的预测控制输入、假设的预测状态.

3 DMPC 设计

在同步式 DMPC 中, 要求所有无人机能够在同一采样时间内同步地求解各自的优化问题, 获得当前时刻最优的预测控制输入序列. 为避免混淆, 在预测时域 $[k, k+N]$ 内, 状态、输入变量符号见表 1.

表 1 输入、状态符号表

符号	变量名称	符号	变量名称
$\mathbf{u}_i(k)$	实际控制输入	$\mathbf{x}_i(k)$	实际状态
$\mathbf{u}_i(k+l k)$	真实的预测控制输入	$\mathbf{x}_i(k+l k)$	真实的预测状态
$\hat{\mathbf{u}}_i(k+l k)$	假设的预测控制输入	$\hat{\mathbf{x}}_i(k+l k)$	假设的预测状态
$\mathbf{u}_i^*(k+l k)$	最优的预测控制输入	$\mathbf{x}_i^*(k+l k)$	最优的预测状态

一般地, 假设的预测控制输入序列由上一时刻最优的预测控制输入序列与终端控制输入构成, 即

$$\begin{aligned}
& \hat{\mathbf{u}}_i(k+l|k) \\
& = \begin{cases} \mathbf{u}_i^*(k+l|k-1), l=0, 1, \dots, N-2, \\ \mathbf{u}_i^\kappa(k-1+N|k-1), l=N-1. \end{cases} \quad (19)
\end{aligned}$$

其中终端控制输入设计为

$$\begin{aligned}
& \mathbf{u}_i^\kappa(k-1+N|k-1) \\
& = \mathbf{K}_i \mathbf{x}_{ir}^*(k-1+N|k-1) + \mathbf{u}_r(k-1+N), \quad (20)
\end{aligned}$$

其中 $\mathbf{K}_i$ 为终端反馈增益, 用上标 κ 表示进入终端集的状态和相应的控制输入. 注意 $\mathbf{x}_{ir}^*(k-1+N|k-1) = \mathbf{x}_{ir}^\kappa(k-1+N|k-1)$. 由式 (19) 得到相应的假设的预测状态, 即

$$\begin{aligned}
& \hat{\mathbf{x}}_i(k+l|k) \\
& = \begin{cases} \mathbf{x}_i^*(k+l|k-1), l=0, 1, \dots, N-1, \\ \mathbf{x}_i^\kappa(k+N|k-1), l=N. \end{cases} \quad (21)
\end{aligned}$$

其中 $\mathbf{x}_i^*(k+N|k-1) = \mathbf{G}\mathbf{x}_i^*(k-1+N|k-1) + \mathbf{H}\mathbf{u}_i^\kappa(k-1+N|k-1)$.

因为假设的预测状态 $\hat{\mathbf{x}}_j(k+l|k)$ 是 UAV_{*j*} 基于其上一时刻的量求解得到的, 所以它能够被 UAV_{*i*} 在 k 时刻实时获取, 用 $\hat{\mathbf{x}}_j(k+l|k)$ 代替问题 1 中的 $\mathbf{x}_j(k+l|k)$, 便可以实现优化问题的同步求解.

3.1 终端部分设计

终端部分包括终端代价函数、终端控制输入、终端集, 是保证系统稳定的关键. k 时刻的终端代价函数设计见式 (15), 终端控制输入可由式 (20) 得到

$$\mathbf{u}_i^\kappa(k+N|k) = \mathbf{K}_i \mathbf{x}_{ir}^*(k+N|k) + \mathbf{u}_r(k+N), \quad (22)$$

终端集设计为

$$\Omega_i = \left\{ \mathbf{x}_i(k+N|k) \mid \|\mathbf{x}_{ir}(k+N|k)\|_{\mathbf{P}_i}^2 \leq \delta_i \right\}. \quad (23)$$

为了便于设计 $\mathbf{P}_i$ 、 $\mathbf{K}_i$, 定义 $\mathbf{X}_i = \delta_i \mathbf{P}_i^{-1} \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ 、 $\mathbf{Y}_i = \mathbf{K}_i \mathbf{X}_i \in \mathbb{R}^{3 \times 6}$, 则 $\|\mathbf{x}_{ir}(k+N|k)\|_{\mathbf{P}_i}^2 \leq \delta_i$ 等价于 $\|\mathbf{x}_{ir}(k+N|k)\|_{\mathbf{X}_i^{-1}}^2 \leq 1$. 注意 $\mathbf{X}_i$ 为正定对称矩阵.

定理 1 在满足假设 1~3 的条件下, 对于无人机编队系统 (7), 若单机代价函数采用式 (13), 终端部分采用式 (15)(22)(23) 所述形式, 通过设计 $\mathbf{P}_i$ 、 $\mathbf{K}_i$ 、 δ_i , 使得对 $\forall l \geq N$, 下列条件 1)~4) 满足时,

$$\begin{aligned}
& 1) \left\| \mathbf{X}_i^{\frac{1}{2}} \mathbf{E}_{n_x}^T \right\| \leq \bar{x}_{i,n_x} - \bar{x}_{ir,n_x}, \forall n_x = 1, 2, \dots, 6, \\
& \bar{x}_{ir,n_x} = \max_l |\mathbf{E}_{n_x}(\mathbf{x}_r(k+l) - \mathbf{d}_{ir}^x)|; \\
& 2) \left\| \mathbf{X}_i^{-\frac{1}{2}} \mathbf{Y}_i^T \mathbf{E}_{n_u}^T \right\| \leq \bar{u}_{i,n_u} - \bar{u}_{ir,n_u}, \forall n_u = 1, 2, 3, \\
& \bar{u}_{ir,n_u} = \max_l |\mathbf{E}_{n_u} \mathbf{u}_r(k+l)|; \\
& 3) \frac{1}{D_i^2} \mathbf{L}^T \mathbf{L} \leq \mathbf{X}_i^{-1}, D_i = \min\{D_{i1}, D_{i2}, D_{i3}\}, \\
& D_{i1} = \min_{j \in \mathbb{N}_v \setminus \{i\}} \frac{\|\mathbf{d}_{ij}\| - 2R}{2}, D_{i2} = \min_{j \in \mathbb{N}_v \setminus \{i\}} \frac{C - \|\mathbf{d}_{ij}\|}{2}, \\
& D_{i3} = \min_{o \in \mathbb{N}_o, l} (\|\mathbf{p}_o - \mathbf{p}_r(k+l) + \mathbf{d}_{ir}\| - (R + R_o)), \\
& \mathbf{L} = [\mathbf{I}_3, \mathbf{O}_3] \in \mathbb{R}^{3 \times 6};
\end{aligned}$$

4)

$$\begin{aligned}
& \mathbf{Q}_i + \mathbf{K}_i^T \mathbf{S}_i \mathbf{K}_i + \sum_{j \in \mathbb{N}_i} 2(\mathbf{G}_i + \mathbf{G}_j) + \\
& (\mathbf{G} + \mathbf{H} \mathbf{K}_i)^T \mathbf{P}_i (\mathbf{G} + \mathbf{H} \mathbf{K}_i) - \mathbf{P}_i \leq 0. \quad (24)
\end{aligned}$$

那么, 对于 $\forall \mathbf{x}_i \in \Omega_i$ 以及相应的终端控制输入 $\mathbf{u}_i^\kappa$, 满足式 (18) 中所述的状态约束、控制输入约束, 机间避碰、机间通信、避障约束; Ω_i 为正不变集; 同

时有下述关系式 (25) 成立,

$$\tilde{L}_i \leq 0, \quad (25)$$

其中

$$\begin{aligned} \tilde{L}_i &= \sum_{i \in \mathbb{N}_v} \begin{bmatrix} L_i(k+N|k, \mathbf{x}_i^*, \mathbf{x}_{-i}^*, \mathbf{x}_r, \mathbf{u}_i^*, \mathbf{u}_r) + \\ L_{if}(k+1+N|k, \mathbf{x}_i^*, \mathbf{x}_r) - \\ L_{if}(k+N|k, \mathbf{x}_i^*, \mathbf{x}_r) \end{bmatrix} \\ &= \sum_{i \in \mathbb{N}_v} \begin{bmatrix} \|\mathbf{x}_{ir}^*(k+N|k)\|_{Q_i}^2 + \\ \|\mathbf{u}_{ir}^*(k+N|k)\|_{S_i}^2 + \\ \sum_{j \in \mathbb{N}_i} \|\mathbf{x}_{ij}^*(k+N|k)\|_{G_i}^2 + \\ \|\mathbf{x}_{ir}^*(k+N+1|k)\|_{P_i}^2 - \\ \|\mathbf{x}_{ir}^*(k+N|k)\|_{P_i}^2 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

证明 见附录 B.

条件 1) 2) 3) 可分别转化为 LMI 形式, 即

$$-(\bar{x}_{i,n_x} - \bar{x}_{ir,n_x})^2 + \mathbf{E}_{n_x} \mathbf{X}_i \mathbf{E}_{n_x}^T \leq 0. \quad (26)$$

$$\begin{bmatrix} -\mathbf{X}_i & (\mathbf{E}_{n_u} \mathbf{Y}_i)^T \\ \mathbf{E}_{n_u} \mathbf{Y}_i & -(\bar{u}_{i,n_u} - \bar{u}_{ir,n_u})^2 \end{bmatrix} \leq 0. \quad (27)$$

$$\begin{bmatrix} -\mathbf{X}_i & (\mathbf{L} \mathbf{X}_i)^T \\ \mathbf{L} \mathbf{X}_i & -D_i^2 \mathbf{I}_3 \end{bmatrix} \leq 0. \quad (28)$$

令 $\mathbf{M}_i = \sum_{j \in \mathbb{N}_i} 2(\mathbf{G}_i + \mathbf{G}_j)$, 用 $\mathbf{X}_i, \mathbf{Y}_i$ 代替 $\mathbf{P}_i, \mathbf{K}_i$, 则条件 4) 转化为 LMI 形式为

$$\begin{bmatrix} -\mathbf{X}_i & (\mathbf{G} \mathbf{X}_i + \mathbf{H} \mathbf{Y}_i)^T (\mathbf{Q}_i \mathbf{X}_i)^T (\mathbf{S}_i \mathbf{Y}_i)^T (\mathbf{M}_i \mathbf{X}_i)^T \\ \mathbf{G} \mathbf{X}_i + \mathbf{H} \mathbf{Y}_i & -\mathbf{X}_i & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{Q}_i \mathbf{X}_i & 0 & -\delta_i \mathbf{Q}_i & 0 & 0 \\ \mathbf{S}_i \mathbf{Y}_i & 0 & 0 & -\delta_i \mathbf{S}_i & 0 \\ \mathbf{M}_i \mathbf{X}_i & 0 & 0 & 0 & -\delta_i \mathbf{M}_i \end{bmatrix} \leq 0. \quad (29)$$

为了获取最大范围的终端域, 可通过求解下述 LMI 优化问题^[18] 得到 $\mathbf{X}_i, \mathbf{Y}_i, \delta_i$, 从而得到 $\mathbf{P}_i, \mathbf{K}_i$.

$$\max_{\mathbf{X}_i, \mathbf{Y}_i, \delta_i} \text{trace}(\mathbf{X}_i), \text{ s.t. } (26) \sim (29) \quad (30)$$

3.2 相容性约束设计

用 $\hat{\mathbf{x}}_i(k+l|k)$ 以代替 $\mathbf{x}_i(k+l|k)$ 能够实现多无人机优化问题的同步求解, 但这种替换会对机间通信、机间避碰约束及系统稳定性产生一定的影响. 为消除这一影响, 本节引入两个相容性约束: 一个是位置相容性约束, 其作用是保证替换后, 机间避碰、通信约束仍然能够被满足, 详见第 3.3 节; 另一个是状态相容性约束, 其作用是保证系统的稳定性, 详见第 4 节.

对于 UAV_i, 当 $l = 1, 2, \dots, N-1$ 时, 位置相容性约束为:

$$\begin{aligned} &\|\hat{\mathbf{p}}_i(k+l|k) - \mathbf{p}_i(k+l|k)\| \\ &= \|\boldsymbol{\varepsilon}_i^p(k+l|k)\| \leq \mu_i(k+l|k), \end{aligned} \quad (31)$$

其中

$$\mu_i(k+l|k) = \min_{j \in \mathbb{N}_v \setminus \{i\}} \mu_{ij}(k+l|k), \quad (32)$$

设计

$$\begin{aligned} &\mu_{ij}(k+l|k) \\ &= \min \left\{ \frac{1}{2} \|\hat{\mathbf{p}}_j(k+l|k) - \hat{\mathbf{p}}_i(k+l|k)\| - 2R, \right. \\ &\quad \left. \frac{1}{2} |C - \|\hat{\mathbf{p}}_j(k+l|k) - \hat{\mathbf{p}}_i(k+l|k)\|| \right\}. \end{aligned} \quad (33)$$

注意 $0 \leq \mu_{ij}(k+l|k) \leq C$.

状态相容性约束为:

$$\begin{aligned} &\|\hat{\mathbf{x}}_i(k+l|k) - \mathbf{x}_i(k+l|k)\| \\ &= \|\boldsymbol{\varepsilon}_i^x(k+l|k)\| \leq \nu_i(k), \end{aligned} \quad (34)$$

其中,

$$\begin{aligned} \nu_i(k) &= \frac{\sqrt{b_i^2 - 4a_i c_i} - b_i}{2a_i}, \\ a_i &= \sum_{j \in \mathbb{N}_i} (1 + 2\beta_{ji}), b_i = \sum_{j \in \mathbb{N}_i} 2\varphi_{ji}(k) \sqrt{\beta_{ji}}, \\ c_i &= -\frac{\gamma \|\mathbf{x}_{ir}(k|k)\|_{Q_i}^2}{N-1}, 0 < \gamma < 1, \mathbf{G}_j = \beta_{ji} \mathbf{G}_i, \\ \varphi_{ij}(k) &= \max_{l=1,2,\dots,N-1} \left\| \frac{\hat{\mathbf{x}}_i(k+l|k) - \hat{\mathbf{x}}_j(k+l|k) + \mathbf{d}_{ij}^x}{\mathbf{G}_i} \right\|. \end{aligned} \quad (35)$$

注 2 在位置相容性约束中, $j \in \mathbb{N}_v \setminus \{i\}$; 在状态相容性约束中, $j \in \mathbb{N}_i$, γ 为收敛速度参数. 由附录 B 中定理 2 的证明过程可知, γ 越小, 收敛速度越快, 但也使得 $\nu_i(k)$ 越小, 导致控制性能有所下降^[18].

3.3 机间避碰、通信约束设计

用 $\hat{\mathbf{x}}_j(k+l|k)$ 代替 $\mathbf{x}_j(k+l|k)$ 后, 问题 1 中描述的机间避碰、通信约束不再适用, 需要结合位置相容性约束进行修改.

对于机间避碰约束, 结合式 (31) 有

$$\begin{aligned} &\|\mathbf{p}_j(k+l|k) - \mathbf{p}_i(k+l|k)\| \\ &= \|\hat{\mathbf{p}}_j(k+l|k) - \boldsymbol{\varepsilon}_j^p(k+l|k) - \mathbf{p}_i(k+l|k)\| \\ &\geq \|\hat{\mathbf{p}}_j(k+l|k) - \mathbf{p}_i(k+l|k)\| - \|\boldsymbol{\varepsilon}_j^p(k+l|k)\| \\ &\geq \|\hat{\mathbf{p}}_j(k+l|k) - \mathbf{p}_i(k+l|k)\| - \mu_{ij}(k+l|k), \end{aligned}$$

因此, 机间避碰约束得以满足的充分条件为

$$\begin{aligned} &\|\hat{\mathbf{p}}_j(k+l|k) - \mathbf{p}_i(k+l|k)\| \geq 2R + \mu_{ij}(k+l|k), \\ &\forall j \in \mathbb{N}_v \setminus \{i\}, l = 1, 2, \dots, N-1. \end{aligned} \quad (36)$$

对于通信约束, 同理有

$$\begin{aligned} &\|\mathbf{p}_j(k+l|k) - \mathbf{p}_i(k+l|k)\| \\ &\leq \|\hat{\mathbf{p}}_j(k+l|k) - \mathbf{p}_i(k+l|k)\| + \mu_{ij}(k+l|k), \end{aligned}$$

因此, 通信约束得以满足的充分条件为

$$\|\hat{\mathbf{p}}_j(k+l|k) - \mathbf{p}_i(k+l|k)\| \leq C - \mu_{ij}(k+l|k),$$

$$\forall j \in \mathbb{N}_v \setminus \{i\}, l = 1, 2, \dots, N-1. \quad (37)$$

3.4 算法流程

根据第 3.1~3.3 节的具体设计, 最终得到可以实现所有无人机同步解算的分布式优化问题, 即问题 2.

问题 2 在采样时刻 k , UAV_{*i*} 从 $\mathbf{x}_i(k|k)$ 出发求解时域长度为 N 的优化控制问题 $\mathcal{P}_i$, 可表示为:

$$J_i^*(k, \mathbf{x}_i^*, \hat{\mathbf{x}}_{-i}, \mathbf{x}_r, \mathbf{u}_i^*, \mathbf{u}_r)$$

$$= \min_{U_i(k)} J_i(k, \mathbf{x}_i, \hat{\mathbf{x}}_{-i}, \mathbf{x}_r, \mathbf{u}_i, \mathbf{u}_r) \quad (38)$$

其中,

$$J_i(k, \mathbf{x}_i, \hat{\mathbf{x}}_{-i}, \mathbf{x}_r, \mathbf{u}_i, \mathbf{u}_r)$$

$$= \sum_{l=0}^{N-1} \left(\|\mathbf{x}_{ir}(k+l|k)\|_{\mathbf{Q}_i}^2 + \|\mathbf{u}_{ir}(k+l|k)\|_{\mathbf{S}_i}^2 + \sum_{j \in \mathbb{N}_i} \|\hat{\mathbf{x}}_{ij}(k+l|k)\|_{\mathbf{G}_i}^2 \right) + \|\mathbf{x}_{ir}(k+N|k)\|_{\mathbf{P}_i}^2,$$

对于 $l = 1, 2, \dots, N-1$,

$$\text{s.t. } \mathbf{x}_i(k+l+1|k) = \mathbf{G}\mathbf{x}_i(k+l|k) + \mathbf{H}\mathbf{u}_i(k+l|k);$$

$$\mathbf{x}_i(k+l|k) \in \mathcal{X}_i; \mathbf{u}_i(k+l|k) \in \mathcal{U}_i;$$

$$\|\hat{\mathbf{p}}_j(k+l|k) - \mathbf{p}_i(k+l|k)\| \geq 2R + \mu_{ij}(k+l|k),$$

$$\forall j \in \mathbb{N}_v \setminus \{i\};$$

$$\|\hat{\mathbf{p}}_j(k+l|k) - \mathbf{p}_i(k+l|k)\| \leq C - \mu_{ij}(k+l|k),$$

$$\forall j \in \mathbb{N}_v \setminus \{i\};$$

$$\|\mathbf{p}_o - \mathbf{p}_i(k+l|k)\| \geq R + R_o, \forall o \in \mathbb{N}_o;$$

$$\|\hat{\mathbf{p}}_i(k+l|k) - \mathbf{p}_i(k+l|k)\| \leq \mu_i(k+l|k);$$

$$\|\hat{\mathbf{x}}_i(k+l|k) - \mathbf{x}_i(k+l|k)\| \leq \nu_i(k);$$

$$\mathbf{x}_i(k|k) = \mathbf{x}_i(k); \mathbf{x}_i(k+N|k) \in \Omega_i. \quad (39)$$

其中 $\hat{\mathbf{x}}_{ij}(k+l|k) = \mathbf{x}_i(k+l|k) - \hat{\mathbf{x}}_j(k+l|k) + \mathbf{d}_{ij}^x$.

基于问题 2, 具体的 DMPC 算法如下.

算法 1 离线阶段: 对于 UAV_{*i*}, 给定邻居集 $\mathbb{N}_i$, 虚拟领航机的参考状态 $\mathbf{x}_r$ 、参考输入 $\mathbf{u}_r$, 期望相对向量 $\mathbf{d}_{ir}$ 、 $\mathbf{d}_{ij}$, 权重矩阵 $\mathbf{Q}_i$ 、 $\mathbf{S}_i$ 、 $\mathbf{G}_i$, 参数 γ , 通过求解 LMI 优化问题 (30) 确定参数 $\mathbf{P}_i$ 、 $\mathbf{K}_i$ 、 δ_i .

在线阶段: 对于 UAV_{*i*},

step 1: 在初始时刻 $k = 0$,

a) 定义预测状态初始值 $\mathbf{x}_i(0|0) = \mathbf{x}_i(0)$, 假设的预测状态 $\hat{\mathbf{x}}_i(l|0) = \mathbf{x}_i(l|0)$, 其中 $\mathbf{x}_i(l+1|0) = \mathbf{G}\mathbf{x}_i(l|0) + \mathbf{H}\mathbf{v}_i(0)$, $l = 0, 1, \dots, N-1$;

b) 发送 $\hat{X}_i(0) = \{\hat{\mathbf{x}}_i(0|0), \dots, \hat{\mathbf{x}}_i(N-1|0)\}$ 给 UAV_{*j*}, $j \in \mathbb{N}_v \setminus \{i\}$; 接收来自 UAV_{*j*}, $j \in \mathbb{N}_v \setminus \{i\}$ 的 $\hat{X}_j(0) = \{\hat{\mathbf{x}}_j(0|0), \dots, \hat{\mathbf{x}}_j(N-1|0)\}$;

c) 根据式 (33) 计算 $\mu_{ij}(l|0)$, $j \in \mathbb{N}_v \setminus \{i\}$, 根据

式 (32) 计算 $\mu_i(l|0)$, $l = 1, 2, \dots, N-1$, 根据式 (35) 计算 $v_i(k)$;

d) 在不考虑终端集约束 (23) 的情况下, 求解问题 2, 得到最优的预测控制输入序列 $U_i^*(0) = \{\mathbf{u}_i^*(0|0), \dots, \mathbf{u}_i^*(N-1|0)\}$, 并将首项应用于 UAV_{*i*} 中, 即 $\mathbf{u}_i(0) = \mathbf{u}_i^*(0|0)$.

step 2: 在 $k > 0$ 时,

a) 定义预测状态初始值 $\mathbf{x}_i(k|k) = \mathbf{x}_i(k)$, 按照式 (21) 定义假设的预测状态 $\hat{\mathbf{x}}_i(k+l|k)$;

b) 发送 $\hat{X}_i = \{\hat{\mathbf{x}}_i(k|k), \dots, \hat{\mathbf{x}}_i(k+N-1|k)\}$ 给 UAV_{*j*}, $j \in \mathbb{N}_v \setminus \{i\}$; 接收来自 UAV_{*j*}, $j \in \mathbb{N}_v \setminus \{i\}$ 的 $\hat{X}_j = \{\hat{\mathbf{x}}_j(k|k), \dots, \hat{\mathbf{x}}_j(k+N-1|k)\}$;

c) 根据式 (33) 计算 $\mu_{ij}(k+l|k)$, $j \in \mathbb{N}_v \setminus \{i\}$, 根据式 (32) 计算 $\mu_i(k+l|k)$, $l = 1, 2, \dots, N-1$, 根据式 (35) 计算 $v_i(k)$;

d) 求解问题 2, 得到最优的预测控制输入序列 $U_i^*(k) = \{\mathbf{u}_i^*(k|k), \dots, \mathbf{u}_i^*(k+N-1|k)\}$, 并将首项应用于 UAV_{*i*} 中, 即 $\mathbf{u}_i(k) = \mathbf{u}_i^*(k|k)$.

step 3: 在 $k+1$ 时刻, 基于新的状态测量值 $\mathbf{x}_i(k+1)$, 循环运行 Step2~3.

注 3 在 $k = 0$ 时刻求解问题 2 的过程中, 不考虑终端集约束 (23). 因为终端集约束要求终端时刻真实的预测状态不能离期望状态太远, 而相容性约束 (31)(34) 要求真实的预测状态不能离假设的预测状态太远. 在 $k = 0$ 时假设的预测状态值偏保守, 若考虑约束 (23) 不易得到可行解.

4 性质分析

在 DMPC 设计中, 关键要保证两个性质得到满足: 一是优化问题的迭代可行性, 二是系统的稳定性.

定理 2 在满足假设 1~3 的条件下, 对于编队系统 (7) 中的每个 UAV_{*i*}, 若在 k 时刻, 通过实施算法 1, 优化问题 (38) 具有可行解, 那么对于后续时刻, 优化问题 (38) 均是可行的; 编队系统 (7) 是渐近稳定的. 即所有的 UAV 能够在满足自身状态、输入约束, 机间避碰、通信、避障约束的前提下, 按照期望的相对位置跟踪虚拟领航机, 并以期望的队形协同飞行.

证明 见附录 B.

5 数值仿真分析

采用 6 架四旋翼进行仿真实验. 仿真参数设置及结果分析见附录 A.

6 结束语

在综合考虑多无人机的输入、状态、避障、机间避碰以及通信约束的情况下, 设计了一种多约束下的分布式模型预测控制算法, 通过设计终端部分和相容性约束, 使得优化问题的可行性和系统的渐近稳定性得以保证. 最后利用仿真验证了该算法能够

实现多约束下无人机编队的轨迹跟踪和队形保持.

参考文献 (References)

- [1] 沈林成, 牛轶峰, 朱华勇. 多无人机自主协同控制理论与方法 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2018: 1-8.
(Shen L C, Niu Y F, Zhu H Y. Theories and Methods of Autonomous Cooperative Control for Multiple UAVs[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2018: 1-8.)
- [2] 宗群, 王丹丹, 邵士凯, 等. 多无人机协同编队飞行控制研究现状及发展 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(03): 1-14.
(Zong Q, Wang D D, Shao S K, et al. Research status and development of multi UAV coordinated formation flight control[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(03): 1-14.)
- [3] 王祥科, 刘志宏, 丛一睿, 等. 小型固定翼无人机集群综述和未来发展 [J]. 航空学报, 2020, 41(04): 20-45.
(Wang X K, Liu Z H, Cong Y R, et al. Miniature fixed-wing UAV swarms: Survey and directions [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(04): 20-45.)
- [4] 段海滨, 申燕凯, 赵彦杰, 等. 2020 年无人机热点回眸 [J]. 科技导报, 2021, 39(01): 233-247.
(Duan H B, Shen Y K, Zhao Y J, et al. Review of technological hotspots of unmanned aerial vehicle in 2020[J]. Science & Technology Review, 2021, 39(01): 233-247.)
- [5] 邵壮, 祝小平, 周洲, 等. 三维动态环境下多无人机编队分布式保持控制 [J]. 控制与决策, 2016, 31(6): 1065-1072.
(Shao Z, Zhu X P, Zhou Z, et al. Distributed formation keeping control of UAVs in 3-D dynamic environment[J]. Control and Decision, 2016, 31(6): 1065-1072.)
- [6] 周绍磊, 康宇航, 史贤俊, 等. 基于 RQPSO-DMPC 的多无人机编队自主重构控制方法 [J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43(10): 1960-1971.
(Zhou S L, Kang Y H, Shi X J, et al. Autonomous reconfiguration control method for multi-UAV formation based on RQPSO-DMPC[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 43(10): 1960-1971.)
- [7] Wang X K, Shen L C, Liu Z H, et al. Coordinated flight control of miniature fixed-wing UAV swarms: methods and experiments[J]. Science China Information Sciences, 2019, 62(11): 212204.
- [8] Dong X W, Zhou Y, Ren Z, et al. Time-Varying Formation Tracking for Second-Order Multi-Agent Systems Subjected to Switching Topologies With Application to Quadrotor Formation Flying[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(6): 5014-5024.
- [9] Yuan Q, Zhan J Y, Li X. Outdoor flocking of quadcopter drones with decentralized model predictive control[J]. ISA Transactions, 2017, 71: 84-92.
- [10] 郑毅, 李少远. 网络信息模式下分布式系统协调预测控制 [J]. 自动化学报, 2013, 39(11): 1778-1786.
(Zheng Y, Li S Y. Networked Cooperative Distributed Model Predictive Control for Dynamic Coupling Systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(11): 1778-1786.)
- [11] Negenborn R R, Maestre J M. Distributed Model Predictive Control: An Overview and Roadmap of Future Research Opportunities[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2014, 34(4): 87-97.
- [12] Eren U, Prach A, Koçer B B, et al. Model Predictive Control in Aerospace Systems: Current State and Opportunities[J]. Journal of guidance, control, and dynamics, 2017, 40(7): 1541-1566.
- [13] Zhou C, Zhou S L, Lei M, et al. UAV Formation Flight Based on Nonlinear Model Predictive Control[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2012, 2012: 261367.
- [14] Hafez A T, Marasco A J, Givigi S N, et al. Solving Multi-UAV Dynamic Encirclement via Model Predictive Control[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2015, 23(6): 2251-2265.
- [15] Li H P, Shi Y, Yan W S. Distributed receding horizon control of constrained nonlinear vehicle formations with guaranteed γ -gain stability[J]. Automatica, 2016, 68: 148-154.
- [16] Morgan D, Subramanian G P, Chung S-J, et al. Swarm assignment and trajectory optimization using variable-swarm, distributed auction assignment and sequential convex programming[J]. The International Journal of Robotics Research, 2016, 35(10): 1261-1285.
- [17] Dunbar W B, Murray R M. Distributed receding horizon control for multi-vehicle formation stabilization[J]. Automatica, 2006, 42(4): 549-558.
- [18] Wang P, Ding B C. A synthesis approach of distributed model predictive control for homogeneous multi-agent system with collision avoidance[J]. International Journal of Control, 2014, 87(1): 52-63.
- [19] 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, 354(4): 2068-2085.
- [20] Quan Q, Fu R, Cai K Y. Practical control for multicopters to avoid non-cooperative moving obstacles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 6558(99): 1-19.

作者简介

戴邵武(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 从事组合导航、惯性导航技术等研究, E-mail: 792936421@qq.com;

赵超轮(1995—), 男, 博士生, 从事飞行器控制技术等研究, E-mail: chaolunzhao95@163.com;

李飞(1987—), 男, 讲师, 博士, 从事航空特设等研究, E-mail: 13355359628@163.com.

韩旭(1990—), 男, 助理研究员, 博士, 从事飞行器任务规划等研究, E-mail: 18660498713@163.com.

赵国荣(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 从事飞行器控制、导航技术等研究, E-mail: GRZhao6881@163.com.