



通信距离受限下无人机集群轨迹分布式滚动规划

徐广通¹, 孟子阳^{1*}, 龙腾^{2,3}, 王祝⁴, 孙景亮^{2,3}

1. 清华大学精密仪器系, 北京 100084

2. 北京理工大学宇航学院, 北京 100081

3. 飞行器动力学与控制教育部重点实验室, 北京 100081

4. 华北电力大学(保定)自动化系, 保定 071003

* 通信作者. E-mail: ziyangmeng@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2021-07-26; 修回日期: 2021-09-28; 接受日期: 2021-10-12; 网络出版日期: 2022-08-04

国家自然科学基金(批准号: 61903033, U19B2029, 61873140)和北京市自然科学基金(批准号: JQ20013)资助项目

摘要 针对通信距离受限下无人机集群轨迹规划时效性与安全性问题, 本文构建了分布式滚动规划框架, 提出了局部优先级解耦的序列凸优化方法(local-priority-decoupled sequential convex programming, LPD-SCP), 将集群轨迹规划问题分解为一系列短时域单机凸优化子问题, 在保证求解效率的基础上确保了轨迹的安全性. 本文推导了确保飞行安全的可行规划时域长度, 设计了通信距离受限的局部优先级解耦机制, 根据通信状态动态调整邻域内无人机规避优先级, 实现通信距离受限下的机间避撞. 更进一步, 定制了轨迹时间一致协调策略, 通过更新飞行时间下边界约束, 实现邻域内无人机飞行时间一致性. 理论分析了所提 LPD-SCP 能够通过多次滚动规划获得满足约束的集群轨迹. 数值仿真试验结果表明: LPD-SCP 能够在通信距离受限条件下规划出满足飞行动力学、机间避碰与时间一致约束的协同轨迹, 且 15 架无人机短时域集结轨迹生成时间不大于 4 s.

关键词 集群轨迹规划, 通信距离受限, 滚动规划架构, 局部优先级解耦, 序列凸优化

1 引言

随着机器人、网络通信、自动控制、人工智能等领域技术发展, 集群智能协同技术得到广泛关注^[1,2]. 无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)集群协同能够克服单智能体执行任务类型有限、抗损耗能力差、任务耗时长等缺陷, 具备执行监视侦察、联合干扰、协同跟踪等任务的潜能^[3,4]. 轨迹规划作为集群协同的一项关键技术, 需考虑无人机动力学、威胁规避、机间避碰等约束, 快速生成性能指标最优轨迹, 引导集群高效遂行既定任务^[5]. 针对高维强耦合的集群轨迹规划问题, Velagapudi 等^[6]提出了同步并行优先级规划方法. 同时, 文献^[7,8]提出了异步并行优先级规划方法, 将耦合问题拆分

引用格式: 徐广通, 孟子阳, 龙腾, 等. 通信距离受限下无人机集群轨迹分布式滚动规划. 中国科学: 信息科学, 2022, 52: 1527–1541, doi: 10.1360/SSI-2021-0251

Xu G T, Meng Z Y, Long T, et al. Trajectory distributed receding planning for UAV swarms subject to limited communication distance (in Chinese). Sci Sin Inform, 2022, 52: 1527–1541, doi: 10.1360/SSI-2021-0251

为支持并行求解的单机规划问题,降低规划耗时. Wang 等^[9]提出一种并行解耦的 SCP 方法,能够在 15 s 内生成 7 架无人机的飞行轨迹. 文献 [10] 提出一种动态优先级解耦的 SCP 方法 (dynamic-priority-decoupled sequential convex programming, DPD-SCP), 降低了迭代求解次数, 15 架无人机集结轨迹生成仅消耗 8.8 s. 然而, 上述方法适用于理想通信下轨迹规划问题, 未考虑任务环境中的通信距离受限问题, 难以保证集群飞行安全性.

在考虑通信约束的集群轨迹规划问题中, 网络连通性约束引入了较强的限制条件, 进一步增加了轨迹规划问题的复杂度. Murayama^[11] 通过构建通信网络拓扑图的拉普拉斯 (Laplace) 矩阵, 基于该矩阵的第二小特征值, 量化表征通信网络连通性约束. 在此基础上, 构建考虑网络连通性约束的轨迹规划最优控制模型, 使用非线性优化方法进行求解, 但计算耗时长, 难以应用于集群轨迹规划问题. Chopra 等^[12] 在路径规划中考虑了连通性保持约束, 建立了边界控制优化问题, 然而该问题同样具有高计算复杂度特征, 不适用于在线轨迹规划. 文献 [13] 针对通信距离限制下多机航路规划问题, 设计了考虑通信距离约束的航路调整策略, 通过限制无人机飞行包线使得无人机始终处于通信距离范围内. 但是, 随着无人机数量的增加, 该方法的可行性逐渐降低, 难以获得满足约束的协同航路. 文献 [14] 考虑通信距离约束, 提出基于卷地毯式搜索的组网规划算法, 给每架无人机预设规则的飞行路线, 确保无人机之间满足通信距离约束, 但是所提方法仅适用于区域搜索规划问题, 无法应用于协同飞行轨迹规划. 为确保规划效率并提升集群轨迹安全性, Morgan 等^[15] 针对通信距离限制下的旋翼机集群轨迹规划问题, 结合滚动规划框架与序列凸优化方法, 实现通信距离限制下旋翼机集群飞行轨迹快速生成. 该研究^[15] 所考虑的旋翼机动力学具有悬停特性, 提前抵达目标位置的旋翼机可以通过悬停等待的方式实现时间同步, 难以处理固定翼无人机集群轨迹规划的时间一致问题. Shin 等^[16] 针对城市环境下固定翼无人机区域搜索轨迹规划问题, 使用通信中继的方式, 实现无人机与地面站之间的通信连接. 然而, 该方法所涉及无人机规模较小, 仅处理了两架无人机的协同搜索规划问题.

针对通信距离受限下无人机集群轨迹规划面临的时效性低与安全性差的问题, 本文结合分布式滚动规划框架与 SCP 方法, 提出局部优先级解耦的集群轨迹分布式滚动规划方法, 实现集群轨迹短时域并行求解, 在实现高效规划的前提下确保集群轨迹安全性. 本文主要贡献: (1) 提出了分布式滚动规划框架下局部优先级解耦的序列凸规划方法 (local-priority-decoupled sequential convex programming, LPD-SCP), 将连续时间集群轨迹规划问题转化为一系列短时域单机凸优化子问题, 充分降低问题求解复杂度. (2) 推导了确保飞行安全的可行规划时域长度, 设计了通信距离受限的局部优先级解耦机制与轨迹时间一致调整策略, 实现邻域内无人机的避碰安全与飞行时间一致性. (3) 理论分析了所提方法能够在通信距离受限下获得满足协同约束的集群轨迹; 数值仿真结果表明, LPD-SCP 相比 DPD-SCP^[10] 具有更高的求解效率, 且短时域轨迹规划耗时均小于滚动时域长度, 验证了 LPD-SCP 能够及时生成飞行轨迹, 满足在线规划时效性需求.

2 问题描述

无人机集群轨迹分布式滚动规划是指每架无人机根据自身当前状态、终端状态、他机轨迹、威胁等信息, 在短时域内逐步规划出抵达目标点的时间一致轨迹. 本文轨迹规划研究暂未考虑集群队形保持约束. 图 1 为通信距离受限下无人机集群分布式滚动轨迹规划示意图, 每架无人机根据局部通信获取的他机轨迹信息进行滚动规划, 不断生成短时域飞行轨迹, 引导无人机集群安全一致地抵达任务区域. 在实际应用中, 由于通信能力和通信带宽的限制, 特别是针对无人机集群, 个体往往仅向其他个体发送自身轨迹规划信息, 不转发其他个体信息, 网络中不存在能够获得全局信息的中心个体. 针对无人

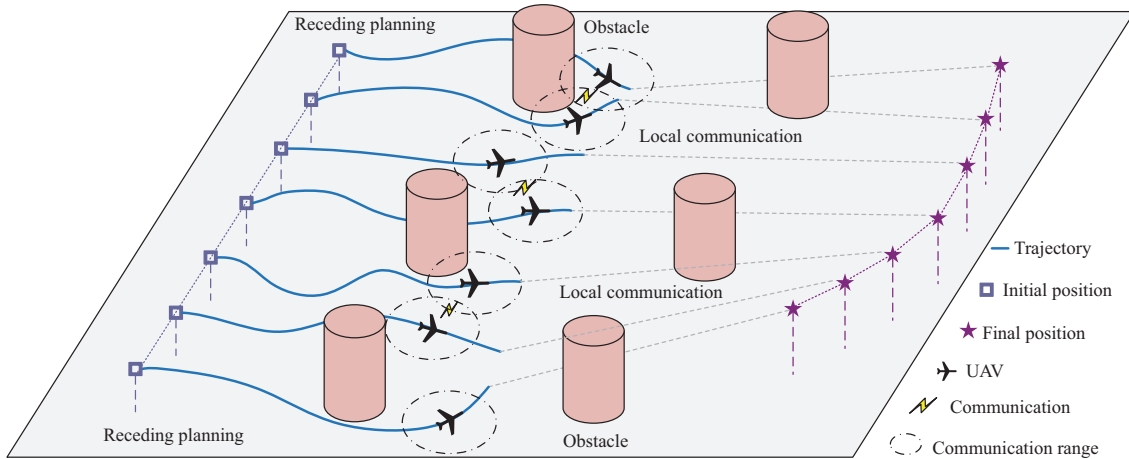


图 1 (网络版彩图) 通信距离受限下无人机集群轨迹滚动规划示意图

Figure 1 (Color online) Illustration of trajectory receding planning for UAV swarms subject to the limited communication distance

机集群分布式滚动规划问题, 本文给出如下通信假设.

假设1 (基于距离的通信假设) 集群个体间的通信状态由距离确定, 即机间距离 $d_{i,j}$ 低于通信距离 r^{cmu} 时, 无人机 i 和 j 可相互通信, 否则无法通信, 其中 i 和 j 表示无人机编号.

假设2 (安全距离假设) 机间通信距离 r^{cmu} 远大于机间避碰安全距离 r^{coll} .

2.1 无人机集群轨迹分布式滚动规划架构

滚动规划包括规划步与预测步, 其将整体轨迹规划问题分解为若干短时域轨迹规划问题, 通过多次短时域规划逐步生成完整轨迹. 在规划步中, 轨迹规划需要考虑动力学、边界、威胁规避、机间避碰与时间一致等所有约束条件, 生成安全可行的协同轨迹. 在预测步中, 仅需考虑动力学、边界、初始终端状态约束, 减少了规划约束数量. 滚动规划过程中, 每一步滚动规划的终端状态作为下一步滚动规划的起始状态, 最后一步滚动规划只包含规划步, 即规划步终点为最终的目标点. 因此, 滚动规划能够有效降低规划问题的维度, 并且随着滚动规划的进行预测步时域长度逐渐减小, 求解耗时随之降低. 图 2 为集群轨迹分布式滚动规划架构, 其中 k_0^h 表示第 h 次滚动规划的轨迹起始点, K_H^h 表示当前规划步时域长度, 上标 h 和下标 H 分别为滚动规划的编号和滚动规划的标志, 则规划步时域长度为 $T_H = K_H^h \Delta t$, Δt 为离散时间步长. 在每个规划步内, 使用分布式解耦规划机制, 将短时域规划问题建立为若干单机并行规划问题, 充分降低问题求解复杂度, 如图 2 右侧所示. 分布式解耦规划基于冻结轨迹思想^[9], 实现耦合的机间避碰与时间一致约束解耦, 具体参见文献 [10].

2.2 分布式滚动规划架构下集群轨迹凸优化模型

在前期分布式解耦轨迹规划研究^[10]基础上, 引入滚动规划思想与 SCP 方法, 将整体集群轨迹规划问题建立为一系列短时域单机凸优化子问题. 在分布式滚动规划框架下, 轨迹规划问题设计变量 \mathbf{X}_i^h 仅包含单架无人机滚动规划时域内离散时刻状态变量 $\mathbf{s}_i^h[k] \in \mathbb{R}^{n_s}$ 、控制变量 $\mathbf{u}_i^h[k] \in \mathbb{R}^{n_c}$ 及时间步长 Δt_i^h , 即 $\mathbf{X}_i^h = [\mathbf{s}_i^h[k]^T, \mathbf{u}_i^h[k]^T, \Delta t_i^h]^T$, 其中 $i = 1, \dots, N$, $h = 1, \dots, H$ 与 $k = 0, \dots, K$ 分别表示无人机、滚动规划以及示轨迹离散时刻的索引.

式 (1) 为无人机非线性动力学模型, 其状态变量 \mathbf{s}_i^h 包括无人机位置 $[x_i^h, y_i^h, z_i^h]^T$ 、飞行速度 V_i^h 、

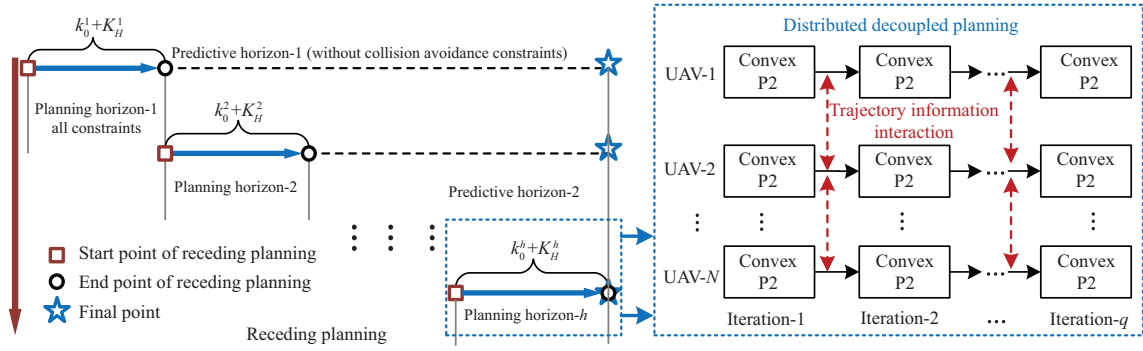


图 2 (网络版彩图) 无人机集群轨迹滚动规划框架

Figure 2 (Color online) Framework of trajectory receding planning of UAV swarms

航向角 χ_i^h 与航迹倾角 γ_i^h , 控制变量 \mathbf{u}_i^h 包括切向过载 $n_{x,i}^h$ 、法向过载 $n_{y,i}^h$ 与垂直过载 $n_{z,i}^h$.

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_i^h &= V_i^h \cos \gamma_i^h \cos \chi_i^h, \\
 \dot{y}_i^h &= V_i^h \cos \gamma_i^h \sin \chi_i^h, \\
 \dot{z}_i^h &= V_i^h \sin \gamma_i^h, \\
 \dot{V}_i^h &= g \cdot (n_{x,i}^h - \sin \gamma_i^h), \\
 \dot{\chi}_i^h &= g \cdot n_{y,i}^h / (V_i^h \cos \gamma_i^h), \\
 \dot{\gamma}_i^h &= g \cdot (n_{z,i}^h - \cos \gamma_i^h) / V_i^h.
 \end{aligned} \tag{1}$$

基于轨迹冻结思想, 使用梯形积分与凸化方法^[9], 将式 (1) 建立为式 (2) 所示的仿射等式约束, 其系数矩阵 \mathbf{A}_k , \mathbf{B}_k , \mathbf{C}_k 与 \mathbf{D}_k 具体见文献 [17].

$$\begin{aligned}
 \mathbf{A}_{k+1} \cdot \mathbf{s}_i^h[k+1] + \mathbf{A}_k \cdot \mathbf{s}_i^h[k] + \mathbf{B}_{k+1} \cdot \mathbf{u}_i^h[k+1] + \mathbf{B}_k \cdot \mathbf{u}_i^h[k] + (\mathbf{C}_{k+1} + \mathbf{C}_k) \cdot \Delta t_i^h \\
 + \mathbf{D}_{k+1} + \mathbf{D}_k = 0, \quad k = k_0^h, \dots, K-1.
 \end{aligned} \tag{2}$$

每架无人机考虑的初始与终端状态、状态与控制边界约束分别如式 (3) 与 (4) 所示, 其中 $\mathbf{s}_{i,0}^h$ 表示第 h 次滚动规划的起始状态, 即第 $h-1$ 次滚动规划的末端状态.

$$\mathbf{s}_i^h[k_0^h] = \mathbf{s}_{i,0}^h, \quad \mathbf{s}_i^h[K] = \mathbf{s}_{i,f}^h. \tag{3}$$

$$\mathbf{s}_{\min} \leq \mathbf{s}_i^h[k] \leq \mathbf{s}_{\max}, \quad \mathbf{u}_{\min} \leq \mathbf{u}_i^h[k] \leq \mathbf{u}_{\max}, \quad k = k_0^h, \dots, K. \tag{4}$$

针对威胁规避约束 $\|\mathbf{G} \cdot \mathbf{s}_i^h[k] - \mathbf{p}_m^{\text{obs}}\|_2 \geq r_m^{\text{obs}}$, 使用凸化方法^[18] 将其建立为式 (5) 所示的仿射不等式形式, 其中 $\mathbf{p}_m^{\text{obs}}$ 与 r_m^{obs} 表示威胁中心水平位置与半径, $\bar{\mathbf{s}}_i^h[k]$ 为冻结轨迹信息, 并取上一步迭代的轨迹为冻结轨迹^[17]. \mathbf{G} 为元素提取矩阵, 用于提取无人机水平位置信息. 需要注意的是, 威胁规避约束仅作用于规划步 $k = k_0^h, \dots, k_0^h + K_H^h$.

$$\begin{aligned}
 \frac{(\mathbf{G} \cdot \bar{\mathbf{s}}_i^h[k] - \mathbf{p}_m^{\text{obs}})^{\text{T}}}{\|\mathbf{G} \cdot \bar{\mathbf{s}}_i^h[k] - \mathbf{p}_m^{\text{obs}}\|_2} (\mathbf{G} \cdot \mathbf{s}_i^h[k] - \mathbf{G} \cdot \bar{\mathbf{s}}_i^h[k]) + \|\mathbf{G} \cdot \bar{\mathbf{s}}_i^h[k] - \mathbf{p}_m^{\text{obs}}\|_2 \geq r_m^{\text{obs}}, \\
 m = 1, 2, \dots, M, \quad k = k_0^h, \dots, k_0^h + K_H^h.
 \end{aligned} \tag{5}$$

针对机间避碰约束 $\|\mathbf{p}_i^h[k] - \mathbf{p}_j^h[k]\|_2 \geq r^{\text{coll}}$, 基于轨迹冻结思想, 在规划步内建立仿射的避碰约束, 如式 (6) 所示, 其中 r^{coll} 表示机间安全距离限制.

$$\frac{(\bar{\mathbf{p}}_i^h[k] - \bar{\mathbf{p}}_j^h[k])^T}{\|\bar{\mathbf{p}}_i^h[k] - \bar{\mathbf{p}}_j^h[k]\|_2} (\mathbf{p}_i^h[k] - \bar{\mathbf{p}}_j^h[k]) \geq r^{\text{coll}}, \quad j = 1, \dots, N, j \neq i, \quad k = k_0^h, \dots, k_0^h + K_H^h. \quad (6)$$

另外, 考虑无人机飞行时间一致性, 建立式 (7) 所示飞行时间下边界约束, 其中 Δt_{\min}^h 表示第 h 次滚动规划的时间步长下边界值.

$$\Delta t_i^h \geq \Delta t_{\min}^h. \quad (7)$$

在分布式滚动规划框架下, 考虑短时域约束条件, 以最小化飞行时间为性能指标, 建立式 (8) 所示的单架无人机 i 的凸优化问题模型 P1. 其中, $|\mathbf{s}_i^h[k] - \bar{\mathbf{s}}_i^h[k]| \leq \rho$ 表示信赖域约束^[9], 用于确保凸化近似精度, ρ 为信赖域半径.

$$\begin{aligned} \text{P1: } & \max_{\mathbf{s}_i^h[k], \mathbf{u}_i^h[k], \Delta t_i^h} \Delta t_i^h, \\ & \text{s.t. Eqs. (2)-(7),} \\ & |\mathbf{s}_i^h[k] - \bar{\mathbf{s}}_i^h[k]| \leq \rho, \quad k = k_0^h, \dots, K. \end{aligned} \quad (8)$$

所建立的短时域解耦凸优化子问题仅涉及短时域下单个无人机的状态及控制变量, 设计变量个数为 $(n_s + n_c)(K - k_0^h + 1) + 1$. 另外, 该问题包含 $n_s(K - k_0^h)$ 个动力学等式约束、 $2n_s$ 个初始和终端状态等式约束、 $2n_s(K - k_0^h + 1)$ 个状态边界不等式约束、 $2n_c(K - k_0^h + 1)$ 控制边界不等式约束、 $2M(K_H^h + 1)$ 个威胁规避约束、 $(N - 1)(K_H^h + 1)$ 个机间避碰约束. 相比于文献 [10] 的解耦凸优化子问题, 滚动规划架构进一步降低了变量个数与约束数量, 降低了轨迹规划问题求解复杂度.

3 分布式滚动规划框架下局部优先级解耦的序列凸优化方法

本节在分布式滚动规划框架基础上, 考虑通信距离限制, 建立通信距离受限下轨迹分布式滚动规划凸优化子问题, 提出局部优先级解耦的序列凸优化方法, 实现通信距离受限下集群轨迹快速生成.

3.1 通信距离受限下凸优化子问题建模

根据假设 1, 若无人机之间距离小于有效通信距离 r^{cmu} , 则机间能够进行信息交互; 否则机间无法获取彼此状态与轨迹信息. 在每一步滚动规划开始时刻, 首先根据无人机位置分布, 判断无人机通信连接情况, 为无人机 i 构建保持通信连接的邻域无人机集合 \mathcal{N}_i^h , 如下所示:

$$\mathcal{N}_i^h = \{j \mid \|\mathbf{p}_i[k] - \mathbf{p}_j[k]\|_2 \leq r^{\text{cmu}}, j = 1, 2, \dots, N, j \neq i\}. \quad (9)$$

针对通信距离受限下轨迹规划问题, 相应的仿射动力学约束、初始与终端状态、边界、威胁规避约束均与第 2.2 小节建立的分布式滚动规划凸优化子问题相同. 然而, 无人机仅需规避通信距离范围内的其他无人机, 因此将通信距离受限下机间避碰约束建立为

$$\frac{(\bar{\mathbf{p}}_i^h[k] - \bar{\mathbf{p}}_j^h[k])^T}{\|\bar{\mathbf{p}}_i^h[k] - \bar{\mathbf{p}}_j^h[k]\|_2} (\mathbf{p}_i^h[k] - \bar{\mathbf{p}}_j^h[k]) \geq r^{\text{coll}}, \quad j \in \mathcal{N}_i^h, \quad k = k_0^h, \dots, k_0^h + K_H^h. \quad (10)$$

考虑通信距离受限约束, 建立式 (11) 所示的分布式滚动框架下无人机 i 轨迹凸优化问题模型 P2.

$$\begin{aligned} \text{P2: } & \max_{\mathbf{s}_i^h[k], \mathbf{u}_i^h[k], \Delta t_i^h} \Delta t_i^h, \\ & \text{s.t. Eqs. (2)–(5), (7), and (10),} \\ & |\mathbf{s}_i^h[k] - \bar{\mathbf{s}}_i^h[k]| \leq \rho, \quad k = k_0^h, \dots, K. \end{aligned} \quad (11)$$

3.2 通信距离受限条件下局部优先级解耦机制

针对通信约束下集群轨迹规划问题, 本小节首先推导确保避碰安全的滚动时域长度, 然后结合动态优先级调整准则, 设计考虑通信距离的局部优先级调整准则, 最后制定时间下边界约束协调策略, 实现集群轨迹的安全性与时空一致性.

3.2.1 确保避碰安全的滚动时域长度

集群机间避碰包括两种情况: 有通信机间避碰和无通信机间避碰. 有通信无人机传递规划的轨迹信息, 基于轨迹冻结思想^[9]和优先级解耦机制^[10], 可在集群迭代收敛时满足避碰约束. 对于无通信无人机的碰撞规避, 根据假设 2, 在碰撞前必然会满足可通信条件, 基于这一前提条件, 推导保证碰撞规避的规划步离散区间数量 K_H^h 、滚动时域步长 Δt_i^h 、通信距离 r^{cmu} 、避碰安全距离 r^{coll} 以及个体运动状态之间的关系, 如式 (12) 所示, 进而避免规划步时域过大导致无人机从另一无人机的通信区域外直接进入碰撞区的现象, 以及避免规划步时域太小导致个体没有足够机动裕度完成碰撞规避.

$$\begin{cases} r^{\text{cmu}} \geq 2V_{\max} \cdot \max_{i \in \mathcal{N}_i^h}(\Delta t_i^h) \cdot K_H^h + r^{\text{coll}}, \\ r^{\text{coll}} \leq V_{\min} \cdot \min_{i \in \mathcal{N}_i^h}(\Delta t_i^h) \cdot K_H^h. \end{cases} \quad (12)$$

无人机之间的最大相对速度为 $2V_{\max}$, 在一个规划步时域长度内, 无人机之间相对距离最大改变量为 $2V_{\max} \cdot \max_{i \in \mathcal{N}_i^h}(\Delta t_i^h) \cdot K_H^h$. 因此, 只要无人机通信距离大于碰撞半径与相对距离改变量之和, 即可确保无人机在碰撞前具有足够的时间调整轨迹, 如式 (12) 第 1 项所示. 另外, 无人机在一个滚动周期内最小飞行距离需要超过无人机避碰距离, 确保规划时域具有足够长度使得无人机能够成功进行机间避碰, 如式 (12) 第 2 项所示.

图 3 为无人机通信连接与机间避碰示例. 当两架无人机距离小于通信范围时, 如图 3(a) 所示, 认为无人机之间建立了可靠的通信网络, 以一定的频率交换各自的状态信息. 考虑当前滚动规划时域内无人机最小机动距离 $V_{\min} \cdot \min_{i \in \mathcal{N}_i^h}(\Delta t_i^h) \cdot K_H^h$ 大于 r^{coll} , 能够为无人机提供足够的机动裕度, 确保通过轨迹迭代实现机间避碰. 如图 3(b) 所示, 当两无人机距离大于通信范围时, 无人机独立规划且不考虑彼此的碰撞规避. 由于两无人机当前规划时域内最大机动距离 $2V_{\max} \cdot \max_{i \in \mathcal{N}_i^h}(\Delta t_i^h) \cdot K_H^h$ 与避碰距离 r^{coll} 之和小于通信距离 r^{cmu} , 在当前时域终端无人机机间距离必然大于安全距离限制. 在下一滚动规划时刻, 两无人机建立了通信连接, 通过轨迹信息交互与迭代规划能够确保飞行安全性.

3.2.2 考虑通信距离的局部优先级调整准则

优先级解耦机制可使无人机按照规避优先级次序依次规划, 低优先级无人机需规避高优先级无人机, 进而实现耦合机间避碰约束解耦. 目前发展的优先级机制需要依赖理想的通信条件, 难以应对通信距离受限问题. 为实现通信距离受限条件下机间避碰约束解耦, 在构建的无人机局部通信集合 \mathcal{N}_i^h 基础上, 根据飞行时间确定集群的优先级关系. 基于无人机冻结轨迹对应的飞行时间信息 $K_H^h \cdot \Delta t_i^h$, 给

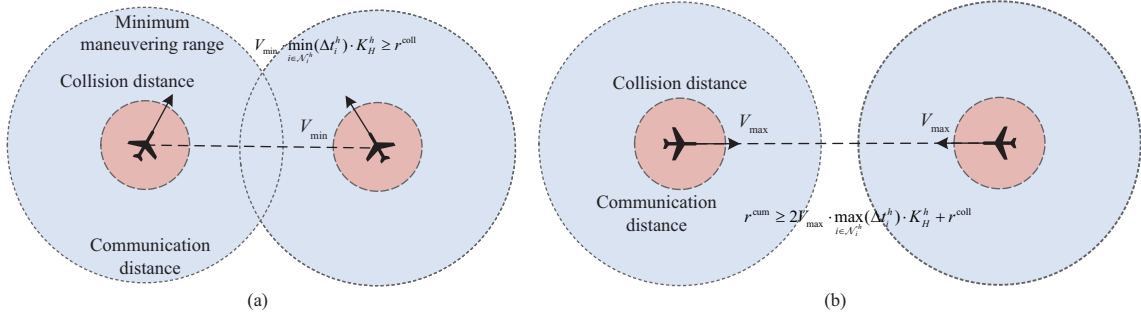


图 3 (网络版彩图) 滚动规划过程中机间通信与避碰示意图

Figure 3 (Color online) Illustration of inter-UAV communication and collision avoidance in receding planning. (a) The h th receding planning; (b) the $(h+1)$ th receding planning

飞行时间短无人机分配低的规避优先级, 无人机 i 在第 h 次滚动规划中需规避的无人机集合可表示为式 (13). 若邻域 \mathcal{N}_i^h 内两无人机飞行时间相同, 则随机确定两者优先级等级.

$$\Pi_i^h = \left\{ j \in \mathcal{N}_i^h \mid K_H^h \cdot \Delta \bar{t}_j^h > K_H^h \cdot \Delta \bar{t}_i^h \right\}. \quad (13)$$

考虑到不合理的优先级规避次序可能导致集群轨迹规划难以收敛, 在每一轮滚动规划开始时刻, 根据更新的无人机通信集合 \mathcal{N}_i^h 以及邻域内无人机轨迹信息, 局部调整无人机规避优先级, 如式 (14) 所示. 当无人机 j 进入无人机 i 的通信范围, 同时无人机 j 的飞行时间大于无人机 i 时, 将无人机 j 加入无人机 i 的规避集合中. 如果无人机 j 脱离无人机 i 的通信范围, 则直接在规避集合中去除无人机 j .

$$\Pi_i^h = \begin{cases} \Pi_i^h \setminus j, & j \notin \mathcal{N}_i^h, \\ \Pi_i^h \cup j, & j \in \mathcal{N}_i^h, \Delta \bar{t}_j^h > \Delta \bar{t}_i^h. \end{cases} \quad (14)$$

对于仍然保留在邻域内的无人机, 需要根据上一步迭代的轨迹时间信息调整优先级次序. 为避免微小飞行时间变动引发的优先级次序反复变化情况, 引入文献 [10] 所提动态优先级调整机制, 如式 (15) 所示, 即只有当邻域内两无人机飞行时间差大于阈值 $\delta_{\Delta t}$ 时才进行优先级调整, 否则优先级次序保持不变.

$$\Pi_i^h = \begin{cases} \Pi_i^h \setminus j, & j \in \mathcal{N}_i^h, \Delta \bar{t}_i^h - \Delta \bar{t}_j^h > \delta_{\Delta t}, \\ \Pi_i^h \cup j, & j \in \mathcal{N}_i^h, \Delta \bar{t}_i^h - \Delta \bar{t}_j^h < -\delta_{\Delta t}. \end{cases} \quad (15)$$

3.2.3 轨迹时间一致协调策略

针对无人机集群轨迹时间一致性问题, 利用预测步估算的目标点抵达时间, 设计分布式时间协调策略, 引导邻域内无人机在迭代收敛时实现时间协同. 根据每一次滚动规划生成的后续预测轨迹, 可计算得到每架无人机到其最终目标的预测到达时间 $\hat{t}_i^{\text{go}} = \Delta t_i^h \cdot (K - k_0^h)$, $i = 1, 2, \dots, N$, 并利用通信网络将其分发给邻域 \mathcal{N}_i^h 内无人机. 每架无人机根据自身和邻域的预测到达时间, 将局部网络内的平均轨迹时间作为规划时间下边界, 如式 (16) 所示. 在每一步滚动规划中, 轨迹迭代不断更新 \hat{t}_i^{go} 与 \hat{t}_j^{go} , $j \in \mathcal{N}_i^h$ 最终实现集群时间协同.

$$\Delta t_i^h \geq \Delta t_{i,\min}^h, \quad \Delta t_{i,\min}^h = \left(\max_{j \in \mathcal{N}_i^h} (\hat{t}_i^{\text{go}}, \hat{t}_j^{\text{go}}) + \min_{j \in \mathcal{N}_i^h} (\hat{t}_i^{\text{go}}, \hat{t}_j^{\text{go}}) \right) / 2. \quad (16)$$

3.3 局部优先级解耦的序列凸优化算法流程

在分布式滚动规划框架下, 结合局部优先级调整机制与时间一致协调策略, 设计了局部优先级解耦的序列凸优化算法, 其伪代码如算法 1 所示.

算法 1 Local-priority-decoupled sequential convex programming (LPD-SCP)

Input: $\mathbf{s}_{i,0}, \mathbf{s}_{i,f}, \mathbf{s}_{\min}, \mathbf{s}_{\max}, \mathbf{u}_{\min}, \mathbf{u}_{\max}, \mathbf{O}$;

主迭代:

```

1:  $h \leftarrow 1, k_0^h \leftarrow 0$ ;
2:  $\mathbf{X}_i^h \leftarrow (\mathbf{s}_i^h, \mathbf{u}_i^h, \Delta t_i^h) \leftarrow$  Initial Straight Line  $(\mathbf{s}_{i,0}, \mathbf{s}_{i,f}, K)$ ;
3: while  $|\mathbf{s}_i^h[k_0^h + K_H^h] - \mathbf{s}_{i,f}| > \epsilon, \exists i \in \{1, \dots, N\}$  do
4:    $q \leftarrow 0, \mathcal{N}_i^h \leftarrow \{j \mid \|\mathbf{p}_i^h[k] - \mathbf{p}_j^h[k]\|_2 \leq r^{\text{cmu}}\}$ ;
5:   Calculate  $K_H^h$  using (12), construct  $\Pi_i^{h,q}$  using (13);
6:   while  $\mathbf{X}_i^{h,q}$  dose not satisfy (2)–(5), (10), (16), and (18) do
7:      $q \leftarrow q + 1, \Delta t_{i,\min}^{h,q} \leftarrow (\max_{j \in \mathcal{N}_i^h} (t_i^{\text{go}}, t_j^{\text{go}}) + \min_{j \in \mathcal{N}_i^h} (t_i^{\text{go}}, t_j^{\text{go}}))/2$ ;
8:     for each UAV  $i \in \{1, \dots, N\}$  do
9:        $\bar{\mathbf{s}}_i^{h,q}[k] \leftarrow \mathbf{s}_i^{h,q-1}[k], \bar{\mathbf{u}}_i^{h,q}[k] \leftarrow \mathbf{u}_i^{h,q-1}[k], \Delta \bar{t}_i^{h,q} \leftarrow \Delta t_i^{h,q-1}$ ;
10:       $(\mathbf{s}_i^{h,q}, \mathbf{u}_i^{h,q}, \Delta t_i^{h,q}) \leftarrow$  Solve P2  $(\bar{\mathbf{s}}_i^{h,q}, \bar{\mathbf{u}}_i^{h,q}, \Delta \bar{t}_i^{h,q}, \mathbf{s}_{i,0}, \mathbf{s}_{i,f}, K_H^h, \mathbf{O}, \mathbf{s}_{\max}, \mathbf{u}_{\min})$ ;
11:    end for
12:    Update  $\Pi_i^{h,q}$  using (14) and (15) for each UAV,  $\mathbf{X}_i^{h,q} \leftarrow (\mathbf{s}_i^{h,q}, \mathbf{u}_i^{h,q}, \Delta t_i^{h,q})$ ;
13:  end while
14:   $h \leftarrow h + 1, K_0^h \leftarrow K_0^{h-1} + K_H^h, \mathbf{s}_i^{h,q}[k_0^h] \leftarrow \mathbf{s}_i^{h,q}[k_0^{h-1} + K_H^h], \mathbf{X}_i^{h,q} \leftarrow \mathbf{X}_i^{h-1,q}[(k_0^{h-1} + K_H^h) : K]$ ;
15: end while

```

Output: $(\mathbf{X}^{1,q}, \mathbf{X}^{2,q}, \dots, \mathbf{X}^{h,q})$.

步骤 1: 初始化参数. 初始化局部优先级解耦的序列凸优化算法参数, 包括信赖域半径 ρ 、规避优先级动态调整阈值 $\delta_{\Delta t}$ 以及轨迹规划收敛误差 ϵ . 输入无人机初始与终端状态约束 $[\mathbf{s}_{i,0}, \mathbf{s}_{i,f}]$ 、状态与控制边界约束 $[\mathbf{s}_{\min}, \mathbf{s}_{\max}]$ 和 $[\mathbf{u}_{\min}, \mathbf{u}_{\max}]$ 、威胁规避集合 \mathbf{O} 等任务信息.

步骤 2 (第 2 行): 生成满足初末状态约束的初始轨迹. 为每架无人机规划出满足初始与终端状态约束的直线轨迹, 包含无人机速度、航向角、航迹倾角以及过载控制量等信息, 为后续轨迹迭代提供初值条件.

步骤 3 (第 3~5, 14 与 15 行): 集群轨迹滚动规划. 在每次滚动规划开始时刻, 使用式 (9) 生成每架无人机的邻域无人机集合, 使用式 (12) 计算滚动时域长度 K_H^h , 使用局部优先级调整机制式 (14) 和 (15), 为每架无人机分配规避优先级集合. 判断当前滚动规划是否满足初始状态、威胁规避、机间避碰、时间一致以及式 (17) 所示的滚动规划收敛条件 (即滚动规划是否满足终端状态约束), 其中 ϵ 表示状态收敛误差. 如果满足, 则停止规划, 输出集群轨迹结果. 否则, 转入步骤 4.

$$|\mathbf{s}_i^h[k_0^h + K_H^h] - \mathbf{s}_{i,f}| \leq \epsilon, \quad \forall i \in \{1, \dots, N\}. \quad (17)$$

步骤 4 (第 6~13 行): 规划满足约束的短时域轨迹. 在迭代求解过程中, 使用式 (16) 计算时间下边界值 $\Delta t_{i,\min}^{h,q}$, 逐次建立并求解考虑无人机动力学、初始与终端状态、状态与控制边界、碰撞规避、时间一致约束的轨迹规划凸优化子问题. 更新无人机规避优先级 $\Pi_i^{h,q}$ 与时间步长下边界约束 $\Delta t_{i,\min}^{h,q}$. 该阶段不断进行迭代求解, 直到生成满足飞行约束以及收敛条件 (18) 的轨迹.

$$\left| \mathbf{s}_i^{h,q+1}[k] - \mathbf{s}_i^{h,q}[k] \right| \leq \epsilon, \quad \forall k \in \{0, 1, \dots, K\}, \quad \forall i \in \{1, \dots, N\}. \quad (18)$$

3.4 局部优先级解耦的序列凸优化收敛性分析

在前期分布式轨迹规划收敛性分析^[10]基础上,本小节分析局部通信条件下 LPD-SCP 的收敛性,首先分析引理 1 和 2 的合理性,然后结合定理 1 对定理 2 进行论证.

引理 1 ([10]) 针对包含可微目标函数、如式 (1) 所示的无人机非线性动力学等式约束、如式 (5) 和 (10) 所示的威胁规避与机间避碰凹不等式约束的非凸集群轨迹规划问题,序列凸规划能够通过迭代求解获得原非凸轨迹规划问题的局部最优解.

引理 2 理想通信条件下,优先级解耦的分布式轨迹规划 (DPD-SCP^[10]) 能够获得满足机间避碰与时间一致约束的集群轨迹.

证明 文献 [10] 利用轨迹冻结思想与信赖域方法证明了 DPD-SCP 能够生成满足机间避碰约束的集群轨迹. 另外,基于 Karush-Kuhn-Tucker (KKT) 条件与反证法,证明了 DPD-SCP 规划轨迹能够满足时间一致约束.

定理 1 基于引理 1 和 2,根据无人机通信距离限制,若邻域无人机之间满足通信连通条件,则通过分布式序列凸优化迭代求解,邻域内无人机能够获得满足机间避碰与时间一致的集群轨迹.

证明 针对机间避碰约束,式 (12) 能够推导出保证避碰安全的时域长度,因此后续主要分析集群轨迹的时间一致性. 根据假设条件 1,建立邻域无人机集合 \mathcal{N}_i ,即 $\forall i, \exists j \in \mathcal{N}_i$ 使得 $\|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j\|_2 \leq r^{\text{cmu}}$. 由于邻域无人机建立了理想的通信条件,根据引理 2,可得任意两架保持通信的无人机,能够通过不断信息交互与迭代求解获得满足时间一致约束的轨迹结果. 不失一般性,考虑邻域集合 \mathcal{N}_i 内无人机 i 与 j 建立理想通信网络,则两无人机轨迹满足如式 (19) 所示的时间一致性条件^[10].

$$\lim_{q \rightarrow \infty} |\Delta t_i^q - \Delta t_j^q| = 0. \quad (19)$$

由于邻域 \mathcal{N}_i 内的无人机至少与另外一架无人机具有通信连接,当邻域内只有 2 架无人机时,自然满足式 (19) 所示的时间一致性条件. 当邻域内包含 3 架无人机时,则至少有一架无人机能够同时与另外两架无人机建立通信连接,即 $\exists i$ 使得

$$\lim_{q \rightarrow \infty} |\Delta t_i^q - \Delta t_j^q| = 0, \quad \lim_{q \rightarrow \infty} |\Delta t_i^q - \Delta t_l^q| = 0, \quad (20)$$

其中,下标 i, j, l 表示无人机索引. 根据式 (20) 可得

$$\lim_{q \rightarrow \infty} |\Delta t_j^q - \Delta t_l^q| \leq \lim_{q \rightarrow \infty} |\Delta t_i^q - \Delta t_j^q| + \lim_{q \rightarrow \infty} |\Delta t_i^q - \Delta t_l^q| = 0. \quad (21)$$

式 (21) 表示 3 架无人机能够获得满足时间一致性约束的协同轨迹. 依次类推,当邻域内存在 N 架无人机时,通过迭代能够使得邻域内任意两架无人机均满足式 (19) 所示的时间一致性. 考虑无人机数量 N 有界,则

$$\lim_{q \rightarrow \infty} \left(\sum_{i=1}^N \sum_{j \in \mathcal{N}_i} |\Delta t_i^q - \Delta t_j^q| \right) = 0, \quad (22)$$

即得证通信距离限制下邻域无人机能够在当前规划步时域内,通过局部解耦规划获得满足时间一致约束的协同轨迹.

定理 2 若集群轨迹规划问题有解且关于通信的假设 1 与 2 成立,则集群在分布式滚动规划架构下,每步基于解耦机制进行分布式规划,能够通过多次滚动规划获得从起始点到目标点的可行协同轨迹.

证明 滚动规划框架将轨迹规划问题分解成若干短时域规划问题, 根据定理 1, 每步滚动规划中规划步能够生成满足飞行性能约束、威胁规避、机间避碰与时间一致的轨迹. 预测步考虑飞行动力学约束解算规划步终点到目标点的代价, 引导规划收敛至目标点. 随着不断的滚动规划, 集群逐渐向目标点靠拢, 更多的无人机建立通信连接.

考虑集群目标位置分布较为紧密的前提条件, 当集群接近目标点时, 集群能够建立一个共同的邻域, 使得

$$\mathcal{N}_{\text{ngb}} = \{\forall i \in \mathcal{N}_{\text{ngb}} | \exists j \in \mathcal{N}_{\text{ngb}}, \|\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j\|_2 \leq r^{\text{cmu}}\}, \quad (23)$$

即 \mathcal{N}_{ngb} 内任意一架无人机至少能够与另一架无人机建立通信连接. 在此基础上, 通过分布式解耦规划获得同时抵达目标位置的短时域轨迹, 同时满足式 (22) 所示的时间一致条件. 综上分析可得, 所提局部优先级解耦的轨迹分布式滚动规划方法能够通过多次滚动规划与分布式迭代求解得到满足飞行约束的协同轨迹.

4 仿真试验结果与分析

本节考虑通信距离受限约束, 设计典型协同飞行想定, 测试 LPD-SCP 生成轨迹安全性. 然后, 开展仿真对比试验, 验证 LPD-SCP 的时效性. 数值仿真在 MATLAB R2017a 环境进行, 计算平台选用配置 Intel Core i7-7660 2.50 GHz 处理器和 8 GB 内存的 PC 机.

4.1 仿真想定及参数设置

考虑通信距离受限条件, 设计集群无人机集结想定, 要求无人机从分散状态变换为紧密的雁形编队. 无人机初始和终端速度设置为 35 m/s, 初始和终端航向角分别为 0° 和 90° , 初始和终端航迹倾角均设置为 0. 无人机状态与控制边界约束为

$$\begin{aligned} \mathbf{s}_{i,\min} &= [-\infty, -\infty, 200 \text{ m}, 30 \text{ m/s}, -\infty, -5^\circ]^\text{T}, \quad \mathbf{u}_{i,\min} = [-0.2, -0.2, 0.8]^\text{T}, \\ \mathbf{s}_{i,\max} &= [+\infty, +\infty, 1200 \text{ m}, 40 \text{ m/s}, +\infty, 10^\circ]^\text{T}, \quad \mathbf{u}_{i,\max} = [+0.2, +0.2, 1.2]^\text{T}, \end{aligned} \quad (24)$$

设置无人机之间通信距离为 2 km, 无人机安全距离限制为 100 m. 设置信赖域半径初值 ρ 、轨迹滚动规划收敛误差 ε 、优先级调整阈值 $\delta_{\Delta t}$ 等算法参数如下:

$$\begin{aligned} \rho &= [1000 \text{ m}, 1000 \text{ m}, 100 \text{ m}, 20 \text{ m/s}, 180^\circ, 18^\circ]^\text{T}, \\ \varepsilon &= [0.1, 0.1, 0.05, 0.01, 0.05, 0.01]^\text{T}, \quad \delta_{\Delta t} = 0.1. \end{aligned} \quad (25)$$

4.2 局部优先级解耦的分布式滚动规划结果与分析

通信距离受限条件下 LPD-SCP 规划结果如图 4 所示, 图中交替出现的实线和虚线表示不同规划时域的飞行轨迹, 空心圆表示不同时域之间的连接点, 结果表明所规划轨迹能够成功规避威胁抵达目标点, 飞行时间为 195.6 s. 集群机间距离如图 4(b) 所示, 可以看出不同时刻下机间最小距离 $d_{i,j}$ 均大于安全距离限制 r^{coll} , 表明集群轨迹满足机间避碰约束. 由仿真结果可得, LPD-SCP 能够利用有限的通信交互, 通过 10 次滚动规划, 生成满足无人机动力学、初始与终端状态、状态与控制边界、碰撞规避与时间一致等约束的协同轨迹, 引导无人机集群在通信距离受限条件下完成协同飞行任务.

图 5 为通信距离受限下 LPD-SCP 分布式滚动规划过程. 如图 5(a) 所示, 第 1 次滚动规划中 ($t = 0 \text{ s}$ 时刻), 考虑无人机初始位置分布与通信距离约束, 所有无人机均未建立通信连接. 每架无人

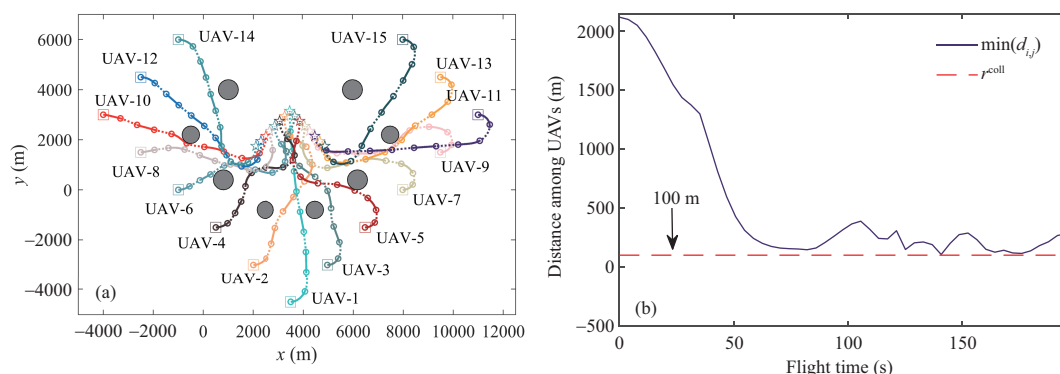


图 4 (网络版彩图) 通信距离受限条件下 LPD-SCP 轨迹规划结果

Figure 4 (Color online) Trajectory planning result by LPD-SCP subject to limited communication distance. (a) Swarm trajectory by LPD-SCP; (b) minimum distance among UAV swarms

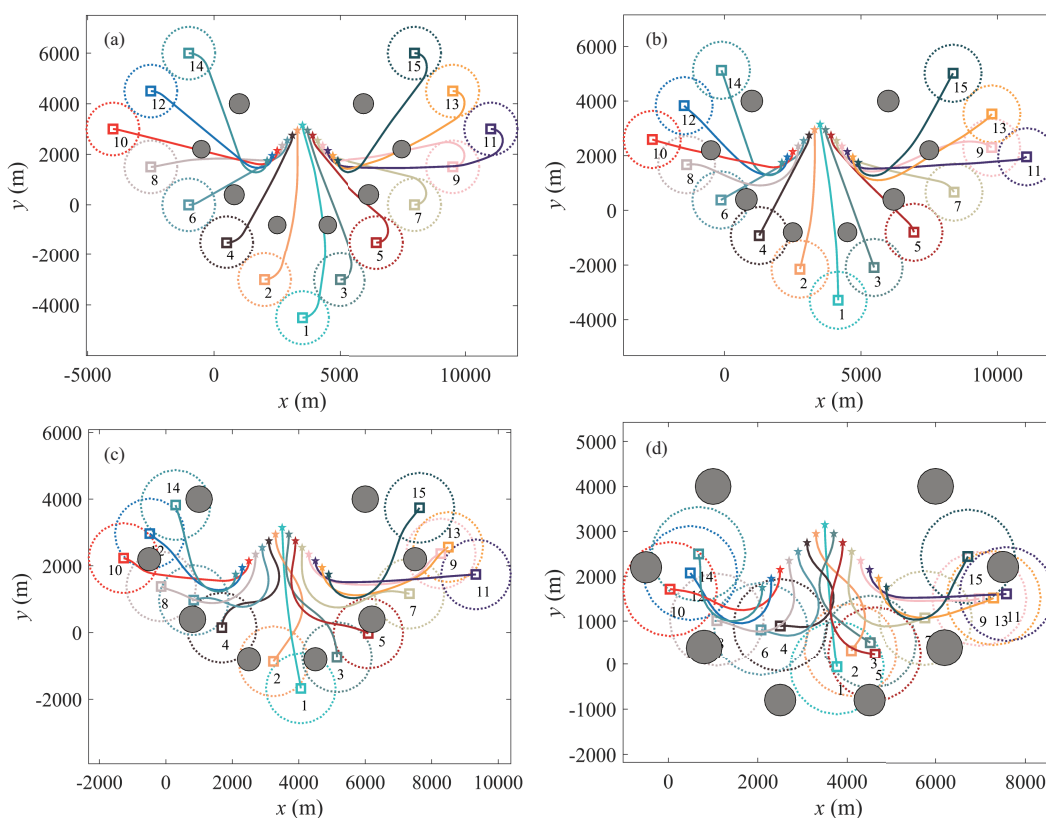


图 5 (网络版彩图) 通信距离受限下 LPD-SCP 规划过程图

Figure 5 (Color online) Trajectory planning process by LPD-SCP subject to limited communication distance. (a) The 1st receding planning, $t = 0$ s; (b) the 3rd receding planning, $t = 33.8$ s; (c) the 5th receding planning, $t = 70.5$ s; (d) the 7th receding planning, $t = 111.2$ s

机根据自身任务信息与威胁信息独立规划, 无需考虑机间避碰约束与时间一致约束. 在滚动规划框架下, 算法仅在规划步时域内考虑威胁规避与机间避碰约束, 预测步时域内的集群轨迹可能出现冲突以及与威胁发生碰撞的现象. 如图 5(b) 所示的第 3 次滚动规划, 无人机 -1 与无人机 -2、无人机 -3 建

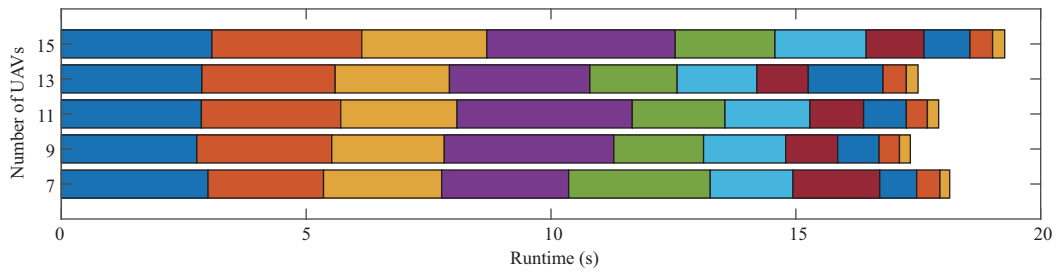


图 6 (网络版彩图) 通信距离受限下 LPD-SCP 规划耗时

Figure 6 (Color online) Runtime of LPD-SCP subject to limited communication distance

立通信连接; 无人机 -9 与无人机 -11 交互轨迹信息; 无人机 -10 与无人机 -8、无人机 -12 共享规划信息. 建立通信连接的无人机根据局部优先级解耦机制确定彼此的规避优先级, 通过轨迹信息交互更新冻结轨迹与时间步长下边界约束, 确保邻域内无人机的时间一致性. 如图 5(c) 所示的第 5 次滚动规划 ($t = 70.5$ s), 更多的无人机建立了通信连接, 无人机根据通信连接关系更新彼此的规避优先级, 同时调整时间步长下边界约束, 实现邻域内无人机的碰撞规避与时间一致. 第 7 次滚动规划中全部无人机建立了一个邻域, 即任意一架无人机均与邻域内至少一架其他无人机交互轨迹信息, 并通过时间步长下边界更新, 使得集群整体满足时间协同要求. 在后续滚动规划中, 无人机逐渐抵近相应目标点, 始终维持邻域内无人机之间的通信连接与信息交互, 引导集群形成雁形编队.

图 6 给出了通信受限条件下不同集群规模 LPD-SCP 求解耗时统计结果. 为进一步提升集群轨迹规划效率, 使用文献 [19] 所提的定制内点法求解凸优化问题. 针对 15 架无人机集结轨迹规划问题, MSD-IPM 滚动规划平均耗时大约为 1.9 s, 随着滚动规划的进行, 算法规划耗时呈下降趋势, 每步滚动求解耗时均不超过 4 s, 小于滚动时域长度 10~25 s, 表明该方法能够在无人机飞抵当前滚动规划终点前规划出后续轨迹. 在实际应用中, 小型固定翼无人机飞行速度大约在 20~40 m/s 范围内, 4 s 时间内无人机飞行距离为 80~160 m. 一般的机载探测设备的侦查范围在公里级 (1000 m), 因此无人机在发现动态威胁后具有充足的时间与空间进行动态调整, 满足在线规划时效性需求.

4.3 轨迹规划对比分析

为验证滚动规划框架下 LPD-SCP 的时效性, 将 LPD-SCP 的短时域规划耗时与 DPD-SCP^[10] 整体规划耗时进行对比, 并统一使用凸优化数值优化器 SeDuMi^[20] 求解短时域单机轨迹凸优化子问题. 考虑 DPD-SCP 难以处理通信受限问题, 在文献 [10] 所示的理想通信下集结想定基础上, 开展集群轨迹规划对比数值仿真试验. 集群初始与终端状态、状态与控制边界、威胁位置、机间避碰距离 (100 m) 等想定信息均与文献 [10] 设置相同. 信赖域半径 ρ 、优先级调整阈值 $\delta_{\Delta t}$ 、轨迹滚动规划收敛误差 ϵ 等算法参数设置如式 (25) 所示. 该想定考虑理想通信条件, 因此短时域滚动规划离散点数量 K_H^h 直接设置为 5.

由于滚动规划框架具有贪婪特性, 其结果最优性一般低于整体规划方法. 针对包含 15 架无人机的集结想定, LPD-SCP 所得目标函数值为 181.5 s, 相比于 DPD-SCP 方法 (目标函数值 174.4 s), 其结果最优性相当, 仅降低了 3.9%. 如表 1 所示为集结想定下两种方法规划耗时. 从表中可以得出 LPD-SCP 的单次滚动规划耗时均小于 DPD-SCP 规划耗时. 随着滚动规划的推进, 由于轨迹离散点个数逐渐减少, LPD-SCP 滚动规划耗时呈下降趋势, 其平均耗时为 7.1 s. 第 2 次与第 8 次滚动规划耗时为 7.4 s 与 6.2 s, 相比于第 1 次滚动规划耗时 8.7 s 分别下降了 15.0% 与 28.7%. 综上可得, LPD-SCP 有效继

表 1 算法耗时对比结果
Table 1 Runtime comparison

Algorithm	Runtime (s)							
DPD-SCP ^[10]	8.9							
LPD-SCP	8.7 ($h-1$)	7.4 ($h-2$)	7.2 ($h-3$)	6.9 ($h-4$)	6.9 ($h-5$)	7.1 ($h-6$)	6.2 ($h-7$)	6.2 ($h-8$)

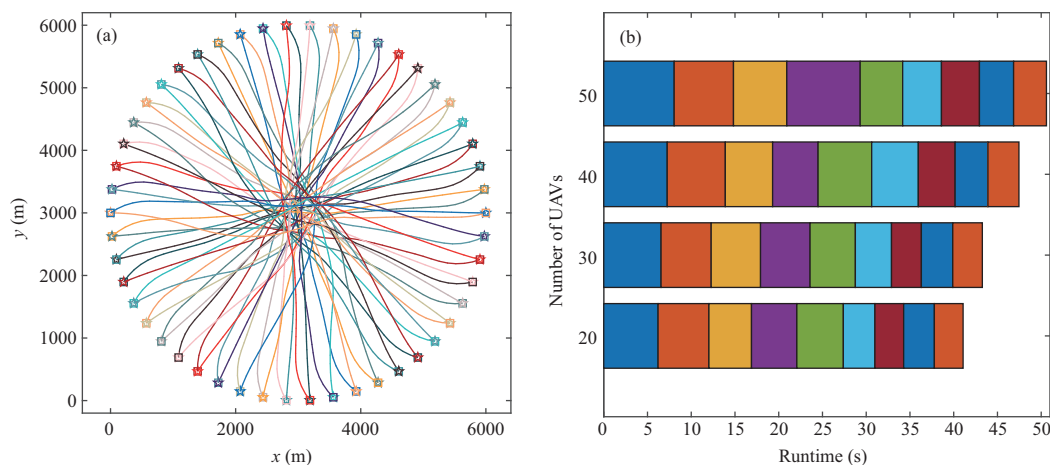


图 7 (网络版彩图) 大规模集群轨迹规划测试结果

Figure 7 (Color online) Trajectory planning test results of large-scale swarms. (a) Trajectory planning result of 50 UAVs; (b) runtime on different scale of swarms

承 DPD-SCP 的分布式解耦规划效率优势, 并通过滚动规划进一步降低了求解耗时.

4.4 大规模集群轨迹规划测试

为充分验证 LPD-SCP 的规划性能, 设计大规模集群对冲想定, 从 20 架机至 50 架机以 10 架递增依次进行仿真测试, 其中 50 架机轨迹规划结果如图 7(a) 所示. 不同集群规模下 LPD-SCP 规划的目标函数 (飞行时间) 分别为 135.2 s (20 机)、141.6 s (30 机)、142.6 s (40 机)、147.3 s (50 机). 由于无人机集群规模增大, 时间一致调节需要的迭代次数增加, 导致时间下边界约束逐渐增大, 因此总体飞行时间增长, 但增长相对缓慢. 另外, LPD-SCP 规划耗时统计如图 7(b) 所示, 由于轨迹迭代次数增加, LPD-SCP 耗时随集群规模增大而增长, 但受益于分布式滚动规划框架, 计算时间增加不明显, 其中 50 架机平均规划耗时比 20 架机增加了 18.8%, 表明了所提方法具有一定的可扩展性.

5 结论

本文针对通信距离受限下集群轨迹规划问题, 提出了局部优先级解耦序列凸优化方法 (LPD-SCP), 将整体轨迹规划问题分解为若干短时域轨迹规划问题, 在每个规划时域中进行分布式轨迹规划, 充分降低集群轨迹规划问题维度与求解复杂度. 建立了通信距离受限下短时域单机轨迹规划的凸优化子问题, 根据滚动时域长度、最大飞行速度与机间避碰距离推导安全规划时域, 保证无人机之间碰撞规避. 设计基于飞行时间的局部优先级解耦机制, 在局部邻域内确定无人机的规避优先级, 并根据通信关系与轨迹信息进行动态调整. 通过飞行时间下边界约束调整, 实现集群飞行时间的一致性. 在通信距离受限条件下, 开展集结轨迹规划数值仿真试验, 结果表明: LPD-SCP 能够在 4 s 内为 15 架无人机生成

满足碰撞避碰、时间一致与飞行性能约束的短时域集结轨迹, 引导集群在通信距离受限下完成飞行任务. 对比试验结果显示 LPD-SCP 短时域规划耗时少于 DPD-SCP, 验证了 LPD-SCP 的效率优势. 后续研究将在无人机集群轨迹规划问题中考虑复杂的队形保持约束, 并设计队形保持约束的近似凸化方法, 实现队形保持轨迹规划问题的高效求解.

参考文献

- 1 Chung S J, Paranjape A A, Dames P, et al. A survey on aerial swarm robotics. *IEEE Trans Robot*, 2018, 34: 837–855
- 2 Rubenstein M, Cornejo A, Nagpal R. Programmable self-assembly in a thousand-robot swarm. *Science*, 2014, 345: 795–799
- 3 Niu Y F, Shen L C, Li J, et al. Key scientific problems in cooperation control of unmanned-manned aircraft systems. *Sci Sin Inform*, 2019, 49: 538–554 [牛轶峰, 沈林成, 李杰, 等. 无人 - 有人机协同控制关键问题. *中国科学: 信息科学*, 2019, 49: 538–554]
- 4 Wang X K, Shen L C, Liu Z H, et al. Coordinated flight control of miniature fixed-wing UAV swarms: methods and experiments. *Sci China Inf Sci*, 2019, 62: 212204
- 5 Cai X J, Hu Z M, Zhang Z X, et al. Multi-UAV coordinated path planning based on many-objective optimization. *Sci Sin Inform*, 2021, 51: 985–996 [蔡星娟, 胡钊鸣, 张志霞, 等. 基于高维多目标优化的多无人机协同航迹规划. *中国科学: 信息科学*, 2021, 51: 985–996]
- 6 Velagapudi P, Sycara K, Scerri P. Decentralized prioritized planning in large multirobot teams. In: *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Taipei, 2010. 4603–4609
- 7 Cap M, Novak P, Kleiner A, et al. Prioritized planning algorithms for trajectory coordination of multiple mobile robots. *IEEE Trans Automat Sci Eng*, 2015, 12: 835–849
- 8 Cap M, Novak P, Selecky M, et al. Asynchronous decentralized prioritized planning for coordination in multi-robot system. In: *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Tokyo, 2013. 3822–3829
- 9 Wang Z, Liu L, Long T. Minimum-time trajectory planning for multi-unmanned-aerial-vehicle cooperation using sequential convex programming. *J Guidance Control Dyn*, 2017, 40: 2976–2982
- 10 Xu G T, Wang Z, Cao Y, et al. Dynamic-priority-decoupled UAV swarm trajectory planning using distributed sequential convex programming. *ACTA Aeronaut Astronaut Sin*, 2021, 42: 325059 [徐广通, 王祝, 曹严, 等. 动态优先级解耦的无人机集群轨迹分布式序列凸规划. *航空学报*, 2021, 42: 325059]
- 11 Murayama T. Online trajectory planning method for multi-vehicle system considering network connectivity and collision avoidance simultaneously. *SICE J Control Meas Syst Integr*, 2015, 8: 15–21
- 12 Chopra S, Egerstedt M. Spatio-temporal multi-robot routing. *Automatica*, 2015, 60: 173–181
- 13 Li J, Fu X W, Gao X G. Cooperative multi-UAV path planning with communication constraints. *Electron Optics Control*, 2013, 20: 29–33+84 [李建, 符小卫, 高晓光. 通信约束下的多无人机协同航路规划. *电光与控制*, 2013, 20: 29–33+84]
- 14 Li S J, Hu G Y, Ding Y W. A low delay networking planning method for micro UAV swarm. *Control Decis*, 2020, 35: 2696–2706 [李实吉, 胡谷雨, 丁有伟. 微型无人机集群低时延组网规划方法. *控制与决策*, 2020, 35: 2696–2706]
- 15 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. *Int J Robot Res*, 2016, 35: 1261–1285
- 16 Oh H, Shin H S, Kim S, et al. Communication-aware trajectory planning for unmanned aerial vehicles in urban environments. *J Guidance Control Dyn*, 2018, 41: 2271–2282
- 17 Wang Z. Research on key technologies of multi-UAV cooperative planning and control. Dissertation for Ph.D. Degree. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2017 [王祝. 多无人机协同规划控制的关键技术研究. 博士学位论文. 北京: 北京理工大学, 2017]
- 18 Wang Z, Xu G T, Liu L, et al. Obstacle-avoidance trajectory planning for attitude-constrained quadrotors using second-order cone programming. In: *Proceedings of Aviation Technology, Integration, and Operations Conference*, Atlanta, 2018. 3035–3043
- 19 Wang Z, Xu G T, Long T. Customized interior-point method for cooperative trajectory planning of unmanned aerial

vehicles. *Acta Automatica Sin.*, 2020, 41: 1–11 [王祝, 徐广通, 龙腾. 基于定制内点法的多无人机协同轨迹规划. *自动化学报*, 2020, 41: 1–11]

20 Sturm J F. Using SeDuMi 1.02, a Matlab toolbox for optimization over symmetric cones. *Optim Methods Softw.*, 1999, 11: 625–653

Trajectory distributed receding planning for UAV swarms subject to limited communication distance

Guangtong XU¹, Ziyang MENG^{1*}, Teng LONG^{2,3}, Zhu WANG⁴ & Jingliang SUN^{2,3}

1. *Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*

2. *School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;*

3. *Key Laboratory of Dynamics and Control of Flight Vehicle, Ministry of Education, Beijing 100081, China;*

4. *Department of Automation, North China Electric Power University (Baoding), Baoding 071003, China*

* Corresponding author. E-mail: ziyangmeng@tsinghua.edu.cn

Abstract For the security and efficiency issues of trajectory planning of unmanned aerial vehicle (UAV) swarms subject to the limited communication distance, this paper establishes the distributed receding planning framework and proposes the local-priority-decoupled sequential convex programming method (LPD-SCP). LPD-SCP divides swarm trajectory planning problems into a series of short-horizon single-UAV convex optimization subproblems, which can improve the computational efficiency and security of trajectories. This paper derives the length of feasible planning horizon to ensure the safety of trajectories. The communication-distance-limited local-priority decoupling mechanism is designed to adjust the priority of UAVs in the neighborhood according to the communication condition for achieving collision avoidance under communication distance limitation. In addition, the trajectory-time-consistency adjustment strategy is customized to realize the flight time consistency of UAVs in the neighborhood by updating the lower boundary constraint of flight time. It is theoretically guaranteed that the proposed LPD-SCP can obtain a swarm trajectory in several receding planning horizons subject to flight constraints. Simulation results demonstrate that LPD-SCP can plan the cooperative trajectories satisfying the flight performance, collision avoidance, and time consistency constraints under communication distance limitation, and the runtime of generating the short-horizon rendezvous trajectories for 15 UAVs is less than 4 s.

Keywords trajectory planning of swarms, communication distance limitation, receding planning framework, local priority decoupling, sequential convex programming