

# 无人机多阶段航迹预测协同任务规划

齐 骥<sup>1</sup>, 王宇鹏<sup>1</sup>, 钟 志<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工程大学 自动化学院, 哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨工程大学 信息与通信工程学院, 哈尔滨 150001)

**摘要:** 针对多无人机 (Unmanned Aerial Vehicles, UAVs) 协同控制问题, 提出了一种 UAVs 多阶段航迹预测分布式任务规划方法; 定义从一次任务分配开始到其中一项任务完成为一个任务周期; 在每个规划周期, 首先, 各 UAV 使用 A\* 算法快速预测到所有任务目标的路径, 提供至任务分配; 然后, 采用聚类算法修改目标价值向量, 协商分配结果, 并实时计算探测范围内的最短路径; 最后, 采用三次 B 样条曲线平滑所分配的最短路径, 在线规划出满足飞行约束的飞行航迹; 通过仿真实验对算法的有效性进行了验证, 结果表明, 提出的算法能够实时获得近似最优的任务分配结果并规划出可飞行航迹, 并有效处理突发任务。

**关键词:** 任务规划; 多无人机; 任务分配; 航迹规划

## Multi-stage Path Prediction Mission Planning Algorithm for Multiple Unmanned Aerial Vehicles

Qi Ji<sup>1</sup>, Wang Yupeng<sup>1</sup>, Zhong Zhi<sup>2</sup>

(1. College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2. College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

**Abstract:** In this paper, a multi-stage path prediction algorithm of the decentralized mission planning for cooperative UAVs is presented. The planning horizon is defined as the period between the start of task assignment and completion of any task. In every planning horizon, each UAV utilizes the A\* algorithm to predict the paths to all tasks and provide the path distances for task assignment. Furthermore, the cluster algorithm is introduced to modify the tasks value vector. The UAVs negotiate the task assignment solution and calculate the shortest path to assigned task in the detection range in real time. Finally, the B-spline curve is addressed to convert the shortest path into flyable smoothing trajectory that subject to the flight constraints. For validation, the scenario of multiple UAVs to perform cooperative missions is considered. Numerical results show that the proposed algorithm can achieve the quasi-optimal assignment solution and generate the flyable trajectory in real time. In addition, the satisfactory performance to accomplish the pop-up tasks is demonstrated.

**Keywords:** mission planning; unmanned aerial vehicles; task assignment; path planning

## 0 引言

多无人机 (unmanned aerial vehicles, UAVs) 协同自主控制中, 航迹规划与任务分配, 一般作为任务规划的两个独立的层次开展研究。在公开文献中, 学者们先后提出了最优控制法、图论法、人工势场法和人工智能等多种航迹规划方法<sup>[1]</sup>。为满足飞行约束, 航迹规划进一步与航迹平滑的组合用于生成可飞行航迹<sup>[2]</sup>。

另一方面, 任务分配技术经历了从以最优化方法或启发式方法为核心的集中式算法, 到基于协商或市场机制等分布式算法<sup>[3]</sup>的发展。为实现全局最优分配, 这些算法在规划开始后一次性计算出所有任务的分配结果, 计算量过于集中, 同时, 在出现突发任务等应用场景变化时, 需对整个任务分配进行重新计算。此外, 任务分配的全局目标函数以任务航程为核心变量<sup>[4]</sup>, 所以联合任务规划的航迹规划和任务分配两个层次进行整体研究具有更重要的理论和现实意义。

针对上述问题, 相关学者进行了任务规划整体研究工

作<sup>[5]</sup>, 但一般只考虑了任务规划的某些方面, 完整的研究应包括: 分布式任务分配、考虑障碍规避的实时航迹规划和包含飞行约束的航迹平滑 3 个部分<sup>[6]</sup>。针对前人研究的局限性, 本文针对物理特性一致的 UAVs 协同任务分配问题, 提出了一种多阶段航迹预测 (Multi-Stage Path Prediction, MSPP) 分布式任务规划方法 (Decentralized Mission Planning System, D-MPS)。

## 1 任务规划问题描述及系统建模

### 1.1 基本定义及假设

规定每个任务只由一架 UAV 执行, 设 UAVs 应用于远程任务, 高度变化对航程影响可线性近似。考虑 N 个 UAV 完成 M 个任务的任务规划问题, 目的是: 1) 实现任务分配, 即 UAVs 与任务目标间的最优匹配; 2) 规划出可飞行航迹。为了描述问题方便, 本文中采用如下定义和假设:

定义 1 (任务规划周期, Mission Planning Period): 从一次任务分配开始到其中一项任务被完成定义为一个任务周期。

假设 1 (质心运动假设): 只考虑 UAVs 质心运动, 忽略空气运动的影响;

假设 2 (等速假设): UAVs 以相同的恒速飞行, 控制量只改变其飞行方向;

假设 3 (禁飞区假设): 采用凸多边形建模禁飞区<sup>[6]</sup>, 模型间距离足够, 即 UAV 具有足够的空间生成所需航迹。

收稿日期: 2015-12-08; 修回日期: 2015-12-29。

**作者简介:** 齐 骥 (1995-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 本科, 主要从事智能算法与控制方向的研究。

钟 志 (1976-), 男, 湖南岳阳人, 副教授, 硕士生导师, 主要从事通信、信号处理方向的研究。

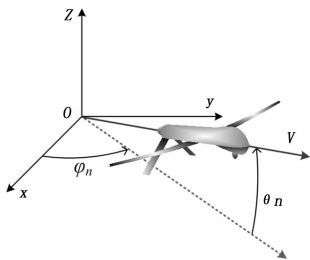


图1 UAVs 航迹倾角和航向角定义

## 1.2 UAV 运动学方程

采用 UAV<sub>n</sub>,  $n \in N$ , 表示第  $n$  架 UAV, 其中索引集合  $N = \{1, \dots, N\}$ . UAV<sub>n</sub> 相对于地面坐标系  $Oxyz$  的航迹角  $\theta_n$  和航向角  $\varphi_n$  的定义如图 1 所示, 其运动学<sup>[7]</sup> 方程为:

$$\begin{cases} \dot{x}_n = V \cos \theta_n \cos \varphi_n \\ \dot{y}_n = V \cos \theta_n \sin \varphi_n \\ \dot{z}_n = V \sin \theta_n \\ \dot{\theta}_n = u_{\theta n} \\ \dot{\varphi}_n = u_{\varphi n} \end{cases}, n \in N \quad (1)$$

式中,  $(x_n, y_n, z_n)$  为三维坐标;  $V$  为飞行速度;  $u_{\theta}$  和  $u_{\varphi}$  分别为航迹倾角和航向角对应的控制量, 如. 记  $S_n = [x_n, y_n, z_n, \theta_n, \varphi_n]^T$  为 UAV<sub>n</sub> 的状态向量,  $U_n = [u_{\theta n}, u_{\varphi n}]^T$  为对应的控制量.

## 1.3 约束条件

记第  $m$  个任务为 Task<sub>m</sub>,  $m \in M, M = \{1, \dots, M\}$  为目标索引集合. 假设 UAV<sub>n</sub> 分配到 Task<sub>m</sub>, 则在初始时刻为  $t_0$ , 对应 UAV<sub>n</sub> 的初始状态向量为:

$$S_n(t_0) = [x_{n0}, y_{n0}, z_{n0}, \theta_{n0}, \varphi_{n0}]^T, n \in N \quad (2)$$

在控制量  $U_n, n \in N$  的作用下, UAV<sub>n</sub> 终端约束为 Task<sub>m</sub> 的位置  $(X_m, Y_m, Z_m)$ .

UAV<sub>n</sub> 航迹倾角、航向角及相应的控制量应满足的机动性能约束为:

$$\begin{cases} \theta_{\min} \leq \theta_n \leq \theta_{\max} \\ \varphi_{\min} \leq \varphi_n \leq \varphi_{\max} \\ |u_{\theta n}| \leq u_{\theta \max} \\ |u_{\varphi n}| \leq u_{\varphi \max} \end{cases}, n \in N \quad (3)$$

式中,  $u_{\theta \max}$  为最大航迹倾角控制量;  $u_{\varphi \max}$  为最大航向角控制量; 对应的最小转弯半径为:

$$r_{\min} = \frac{V \cos \theta_n}{u_{\varphi \max}}, n \in N \quad (4)$$

## 1.4 任务分配模型

考虑目标价值时效性, Task<sub>m</sub> 对于 UAV<sub>n</sub> 的价值函数由奖励函数  $G_m$  和惩罚函数  $J_m$  组成:

$$\begin{aligned} R_m(t) &= \Theta_m(G_m - J_m) = \\ &\Theta_m(g_m e^{-\epsilon_m t} - \omega_n t), n \in N, m \in M \end{aligned} \quad (5)$$

式中,  $g_m$  为 Task<sub>m</sub> 静态价值;  $\epsilon_m$  为价值损耗系数;  $\omega_n$  为燃料消耗系数; 性能约束  $\Theta_m = 1$  表示 UAV<sub>n</sub> 能够执行 Task<sub>m</sub>, 否则为 0.

任务分配的全局目标为:

$$\begin{aligned} \max \sum_{n=1}^N \left( \sum_{m=1}^M R_m h_{nm} \right), n \in N, m \in M \\ s. t. \sum_{n=1}^N h_{nm} \leq 1, \forall m \in M \end{aligned}$$

$$h_{nm} \in \{0, 1\}, \forall (n, m) \in N \times M \quad (6)$$

式中, 当  $h_{nm} = 1$  表示 UAV<sub>n</sub> 获得 Task<sub>m</sub>, 否则为 0.

## 2 多阶段航迹预测任务规划算法

如图 2 所示, D-MPS 系统包括 MSPP 和任务分配两个部分. 而 MSPP 由 3 个阶段组成:

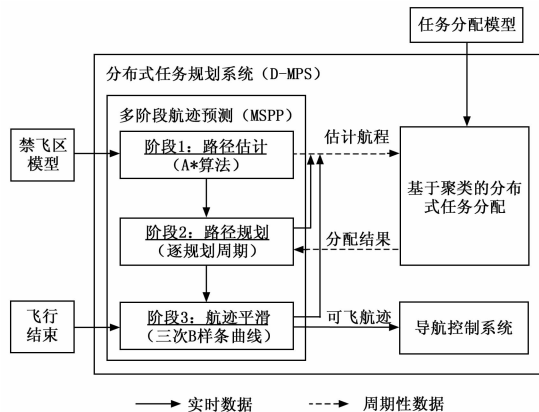


图2 任务规划系统整体架构

阶段 1: UAVs 将探测范围内的障碍多边形顶点实时添加至搜索空间, 采用 A\* 算法快速计算全部任务的估计路径, 生成价值向量.

阶段 2: 利用聚类算法修改价值向量完成任务分配; UAV 仍采用 A\* 算法, 实时更新探测范围内的最短路径; 突发任务添加至下一规划周期.

阶段 3: 采用三次 B 样条曲线同步平滑上述最短路径, 规划出满足飞行约束的平滑航迹.

### 2.1 路径估计

为快速计算至所有目标的估计航程, 采用 UAV 当前位置临近区域内 (或探测范围) 的禁飞区多边形顶点建立 A\* 算法的搜索空间. 如图 3 所示, 该时刻搜索空间为  $\{B, B_1, B_2, B_3, C, C_1\}$ . 与利用单元分解等传统建模方法相比搜索空间维度大大减小. A\* 算法的性能指标函数为:

$$\min F(d) = \min [L(d) + H(d)] \quad (7)$$

式中,  $d$  为搜索点位置,  $L(d)$  为探测范围内实际路径;  $H(d)$  为至目标的启发式路径. 图 3 所示的预测航迹结果为连接  $\{A, B, C, T\}$  的路径线段组合.

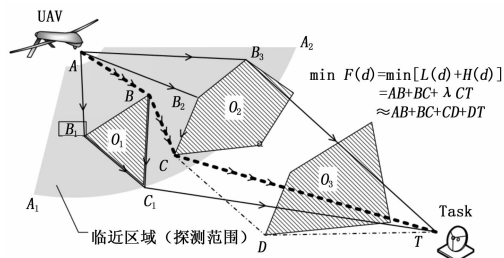


图3 A\* 算法路径估计过程

### 2.2 路径规划

路径规划需根据任务分配结果展开. UAVs 基于估计路径计算全部任务的价值向量, 采用聚类算法对价值向量进行修改. 在聚类算法中, 距离最近的两个任务归为一类, 重复该过程, 至类间距离达到给定上限. 对于 UAV<sub>n</sub>, 若 Task<sub>k</sub> 与

Task<sub>j</sub> 组成一类，则 Task<sub>i</sub> 的价值  $R_m$  修改为：

$$R'_m(t) = R_m(t) + \gamma R_{nj}(t + \frac{p_{ij}}{V}) \tag{8}$$

式中， $\gamma$  为权重系数， $p_{ij}$  为类间距离。

每架 UAV 首先选择自身任务列表中价值最高的任务，UAV<sub>*n*</sub> 选择的任务为：

$$k^* = \operatorname{argmax}_k R'_{nk}, k \in K \tag{9}$$

设竞争同一任务 Task<sub>*k*\*</sub> 的 UAVs 集合记为  $M_{k^*}$ ，价值最高的 UAV<sub>*n*\*</sub> 获得相应任务，即：

$$n^* = \operatorname{argmax}_n R'_{nk^*}, n \in M_{k^*} \tag{10}$$

重复上述过程，至消除所有分配冲突。

各 UAV 根据分配结果利用 A\* 算法计算探测范围内的最短路径，并随飞行过程实时更新。

2.3 路径平滑

*m* 次 B 样条曲线方程定义<sup>[7]</sup>为：

$$P(s) = \sum_{i=0}^b P_i B_{i,m}(s) \tag{11}$$

式中， $0 \leq s \leq 1$ ， $P_i = (X_i, Y_i, Z_i)$ ， $i = 0, \cdots, b$  为选择的控制点；*m* 阶基函数  $B_{i,m}(s)$  为：

$$B_{i,m}(s) = \frac{1}{m!} \sum_{j=0}^{m-i} (-1)^j \cdot C_{m+1}^j \cdot (s+m-i-j)^m \tag{12}$$

三次 B 样条每段曲线由相邻 4 个控制点决定，在连接点处两阶导数连续，通过添加和修正控制点使 B 样条曲线满足 UAVs 机动性能约束和避障安全距离约束。图 4（a）所示为控制点的选取。首先根据最短路径，将 UAV 位置 A、目标位置 T 及转向点 B 确定为备选控制点。避障安全距离为  $R_s$ ，威胁圆 B 以  $R_s$  为半径，其切线 AB' 与 BT 交于点 B'，则 {A, B, T} 为满足安全距离约束的控制点。为使曲线经过控制点 A，增加与其共线距离接近的辅助控制点 {A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>}，同理 {B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>}、{C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>} 分别为扩展辅助控制点。线段 A<sub>1</sub>A<sub>2</sub> 与 AB' 共线、线段 C<sub>1</sub>C<sub>2</sub> 与 BC 共线，线段 B<sub>1</sub>B<sub>2</sub> 垂直于 BB'。则满足安全距离约束的控制点序列为 {A<sub>1</sub>, A, A<sub>2</sub>, B<sub>1</sub>, B, B<sub>2</sub>, C<sub>1</sub>, C, C<sub>2</sub>}。

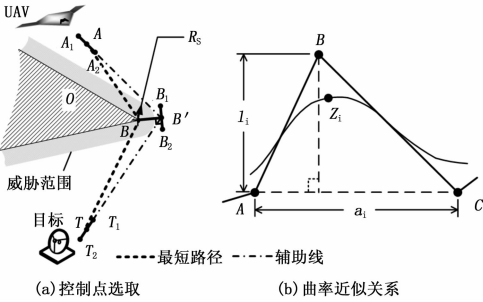


图 4 B 样条控制点选取与曲率近似

初选控制点确定后，需验证其 B 样条曲线是否满足转弯半径约束。如图 4（b）所示，连续 3 个控制点 A、B、C 所组成的三角形中， $a_i$  为边 AC 的长度， $l_i$  为该边上的高，则由该三角形确定的该段曲线的极限曲率半径  $r_i$  可近似<sup>[7]</sup>表达为：

$$r_i = \frac{a_i^2}{8 \cdot l_i} \tag{13}$$

曲线上点 Z<sub>i</sub> 为控制点 B 对应的极限曲率点。根据这种近似方式可以快速验证所选控制点是否满足转弯半径约束  $r_i \geq r_{\min}$ 。在不满足最小转弯半径约束时，采用“能量最优法”<sup>[8]</sup>调

整辅助控制点使其满足约束要求。

3 仿真结果及分析

仿真实验中给出 5 架 UAVs 及 13 个任务的仿真场景。以 Core E5800 3.2 GHz CPU，4G 内存的 Dell PC 为仿真实验环境。设飞行速度为 200 m/s，对应转弯半径为 1.91 km；探测范围为 25 km，避障安全距离为 3 km；航迹倾角和航向角取值范围分别为  $[-25^\circ, 25^\circ]$  和  $[-180^\circ, 180^\circ]$ ，对应的控制约束分别为  $3^\circ/\text{s}$  和  $6^\circ/\text{s}$ 。

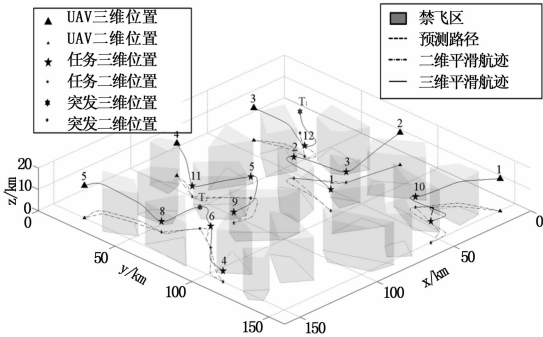


图 5 三维仿真结果

为了验证任务分配方法的有效性，随机选取 UAVs 与任务位置，重复多次仿真实验。本文采用可得到全局最优解的集中式任务分配结果作为仿真对比。以任务完成后的全局目标函数收益值作为评价标准，仿真结果如表 1 所示。其中实验 1、4、5、6、7 中，D-MPS 均得到与集中式任务分配一致的最优结果，实验 2、3、8 也得到了较好的近似最优解。

表 1 不同任务场景实验结果

试验编号	D-MPS 收益值	最优值
1	407.20	407.20
2	468.64	464.83
3	479.72	465.84
4	527.56	527.56
5	528.48	528.48
6	531.66	531.66
7	483.89	483.89
8	595.15	583.85

表 2 实验 1 任务分配结果

序号	实验 1 任务分配结果
UAV <sub>1</sub>	{Task <sub>10</sub> , Task <sub>7</sub> }
UAV <sub>2</sub>	{Task <sub>3</sub> , Task <sub>1</sub> }
UAV <sub>3</sub>	{Task <sub>12</sub> , Task <sub>2</sub> }
UAV <sub>4</sub>	{Task <sub>11</sub> , Task <sub>5</sub> , Task <sub>9</sub> }
UAV <sub>5</sub>	{Task <sub>8</sub> , Task <sub>6</sub> , Task <sub>4</sub> }

表 3 仿真初值

序号	位置/km	$\theta / (^\circ)$	$\varphi / (^\circ)$
UAV <sub>1</sub>	(10, 150, 15)	0	0
UAV <sub>2</sub>	(10, 85, 15)	0	90
UAV <sub>3</sub>	(40, 20, 15)	0	180
UAV <sub>4</sub>	(90, 20, 15)	0	180
UAV <sub>5</sub>	(150, 20, 15)	0	-90

（下转第 194 页）

