文章编号:1671-4598(2016)06-0189-03 DOI:10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2016.06.052 中图分类号:V19

文献标识码:A

无人机多阶段航迹预测协同任务规划

齐 骥¹,王字鹏¹,钟 志²

(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 Ji¹, Wang Yupeng¹, Zhong Zhi²

(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^[1]。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^[2]。

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^[3]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^[4],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

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。 作^[5],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^[6]。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^[6],模型 间距离足够,即 UAV 具有足够的空间生成所需航迹。

(6)



图 1 UAVs 航迹倾角和航向角定义

1.2 UAV 运动学方程

采用 UAV_n, n(N), 表示第 n 架 UAV, 其中索引集合 N= $\{1, \dots, N\}$ 。UAV_n相对于地面坐标系 Oxyz 的航迹角 θ_n 和航向角 φ_n 的定义如图 1 所示,其运动学^[7]方程为:

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

式中, (x_n, y_n, z_n) 为三维坐标; V为飞行速度; u_{θ} 和 u_{φ} 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_n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_m, m(M, $M = \{1, \dots, M\}$ 为目标 索引集合。假设UAV_n分配到Task_m,则在初始时刻为 t_0 ,对应UAV_n的初始状态向量为:

$$S_{n}(t_{0}) = [x_{n0}, y_{n0}, z_{n0}, \theta_{n0}, \varphi_{n0}]^{T}, n \in \mathbb{N}$$

$$\text{ 在控制量 } U_{n}, n \in \mathbb{N} \text{ 的作用下, UAV}_{n} \ & \text{ & \text{$\%$d$}$ $\%$ $\text{$\%$}$ $\%$ $\text{$\%$}$ $\text{$Task}_{m}$$$

$$\text{ hod } \mathbb{T} (X_{m}, Y_{m}, Z_{m}).$$

UAV"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:

$$\begin{cases} \theta_{\min} \leqslant \theta_n \leqslant \theta_{\max} \\ \varphi_{\min} \leqslant \varphi_n \leqslant \varphi_{\max} \\ | u_{\theta_n} | \leqslant u_{\theta_{\max}} \\ | u_{u_n} | \leqslant u_{emax} \end{cases}, n \in \mathbf{N}$$
(3)

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

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

1.4 任务分配模型

考虑目标价值时效性, Task_m 对于 UAV_n 的价值函数由 奖励函数 G_m 和惩罚函数 J_m 组成:

$$R_{nm}(t) = \Theta_{nm}(G_m - J_{nm}) =$$

$$\Theta_{nm}(g_m e^{-\varepsilon_m t} - \omega_n t), n \in \mathbf{N}, m \in \mathbf{M}$$
(5)

式中, g_m 为 Task_m 静态价值; ϵ_m 为价值耗损系数; ω_n 为燃料消 耗系数;性能约束 $\Theta_{mn} = 1$ 表示 UAV_n能够执行 Task_m,否则 为 0。

任务分配的全局目标为:

$$egin{aligned} \max \sum_{n=1}^{N}ig(\sum_{m=1}^{M}\!\!R_{mn}h_{mn}ig), n\in N, m\in M \ s.\ t.\ \sum_{n=1}^{N}\!\!h_{mn}\leqslant 1, \,orall\,m\in M \end{aligned}$$

 $h_{mn} \in \{0,1\}, \forall (n,m) \in \mathbf{N} \times M$

式中,当 $h_{mn} = 1$ 表示 UAV_n获得 Task_m,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:



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:

 $\min F(d) = \min [L(d) + H(d)]$ (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_n,若 Task_i与 $Task_i$ 组成一类,则 $Task_i$ 的价值 R_{ni} 修改为:

$$R'_{ni}(t) = R_{ni}(t) + \gamma R_{nj}(t + \frac{p_{ij}}{V})$$
(8)

式中, γ 为权重系数, pij 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,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_{*}* 的 UAVs 集合记为 M_{*}* , 价值最 高的 UAV_{*}* 获得相应任务,即:

$$n^* = \operatorname{argmax}_n R'_{nk^*}, n \in M_{k^*}$$
(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^[7]为:

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

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

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

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 $\{A_1, A_2\}$,同理 $\{B_1, B_2\}$ 、 $\{C_1, C_2\}$ 分别为扩展辅助控制点。线段 A_1A_2 与 AB' 共线、线段 C_1C_2 与 BC 共线,线段 B_1B_2 垂直于 BB'。则满足安全距离约束的控制点 序列为 $\{A_1, A, A_2, B_1, B, B_2, C_1, C, C_2\}$ 。



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^[7]表达为:

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

曲线上点 Z_i 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 ≥ r min。在不满足最小转弯半径约束时,采用"能量最优法"^[8]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 $3^\circ/s$ 和 $6^\circ/s$ 。



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_1	$\{ Task_{10} , Task_7 \}$
UAV ₂	$\{Task_3, Task_1\}$
UAV ₃	$\{\operatorname{Task}_{12}, \operatorname{Task}_{2}\}$
UAV_4	$\{Task_{11}, Task_5, Task_9\}$
UAV ₅	$\{Task_8, Task_6, Task_4\}$

表 3 仿真初值

序号	位置/km	heta / (°)	$\varphi/(\degree)$
UAV_1	(10, 150, 15)	0	0
UAV_2	(10, 85, 15)	0	90
UAV_3	(40, 20, 15)	0	180
UAV_4	(90, 20, 15)	0	180
UAV_5	(150, 20, 15)	0	-90

就是在连续3个读出周期中读出数据,根据指示位将他们合 成,再以分频时钟输出;由于分频之后的时钟为83.3 MHz, 这样像素时钟不大于 80 MHz 的图像均可传输;而且对于 Camera-Full 模式的图像数据,通过数据通路时分复用之后, 需要 30 位的数据通道, GTX 串行收发器完全能够完整传输数 据,这样代表着使用 GTX 串行收发器的光纤传输系统仅需要 单根光纤即可完成图像数据的传输。

3 实验结果分析

实验首先测试 GTX 串行收发器的性能,利用 10G 带宽的 SFP 光模块连接收发器的发送端与接收端;编写计数器模块, 以 250 MHz 的系统频率产生 0x0000000-0x7FFFFFF 的 32 位递增序列码,该序列码经并串转换后发出,经过光纤后,在 接收端编写测试模块测试所接数据是否按照协议递增,并给出 序列码状态指示位;采用分析工具 ChipScope 观测 FPGA 内部 数据,得到的实验结果如图6所示。

Bus/Signal	х	0	143		10144		10145		10146		10147		10148		10149		10150		1015
∽ /TIDATA	12345888	12345888	45906	X	12245907	X	12345908)(12345909)(1234590A	X	1234590B	X	1234590C	Х	1234590D	X	123459
~ /RIDATA	12345872	12345872	458ED	X	123458EE		123458EF		123458F0		123458F1	7	123458F2	7	123458F3	X	123458F4	X	123458
-EL_check	1	1																	

图 6 自定义协议 GTX 串行收发器传输实验测试

从图 6 中可以看出, GTX 串行收发器接收端的数据与发 送端的序列码完全相同,说明功能正确,测试时间为10分钟, 一共发送 4.8×10¹² bit 数据,序列码状态指示位正常,未见误 码,可以得到 GTX 串行收发器的误码率低于 10⁻¹²。

利用本设计实现型号为 MC1362 的 MIKROTRON 可见相

机的 Cameralink 数字图像的光纤传输,实验中设置相机的帧 频为 500 Hz, 分辨率为 1 024 * 1 024, 相机工作模式为 8 * 8 bit, 数字图像的传输带宽为 4.19 Gb/s; 将相机输出的 Cameralink-Full的接口连接在图像发送端上,利用 DALSA 采集卡 采集图像接收端输出的图像,输出图像清晰稳定。

4 结束语

本文利用 GTX 串行收发器代替光纤传输系统中常用的编 解码芯片设计实现了数字图像的光纤传输,并通过数据通道的 时分复用、异步 FIFO 数据缓存技术等提高了系统的传输带 宽,适应性;实验结果表明,GTX串行收发器的传输通道误 码率低,数字图像光纤传输系统工作稳定,传输图像效果较 好, 传输带宽达到 4.19 Gb/s。

参考文献:

- [1] 肖儿良,韦荣明, 彦文超,等. 基于 Aurora 及 CameraLink 的高 速数字图像传输 [J]. 信息技术, 2015, 4 (25): 94-101.
- [2] 吴 宾,刘安良,赵 楠,等. 基于 RocketIO 的高速光收发器的 设计和实现 [J]. 光器件, 2014, 11 (4): 1-4.
- [3] Xilinx. LocalLink Interface Specification [R]. SP006 (v2. 0), 2005.
- [4] 何家维,何 昕,魏仲慧. 高速 Cameralink 图像数据光纤传输系 统设计 [J]. 信息技术, 2011, 10 (04): 9-12.
- [5] 曹伟军,袁 泉. Cameralink 图像数据光纤传输技术 [J]. 光传 输, 2014, 7 (2): 44-45.
- [6] 汝海滨,任勇峰,李辉景,等. 基于 Cameralink 的高速图像传输 模块及时序优化设计 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (7): 2546 - 2548.

(上接第191页)

表2给出实验1的分配结果,表3为对应的UAVs初始状 态。在相同的仿真场景下,任务规划开始后 50 s 在位置(20, 30,10)和(120,65,10)分别出现突发任务 T₁和 T₂,三维 仿真结果如图 5 所示。对比后可以看出,为实现全局最优, UAVs 在后续阶段分配进行了调整。UAV₃将执行的任务由 {Task₁₂, Task₂} 调整为 {Task₁₂, T₁}, Task₂ 在第二阶段的 任务规划中分配至 UAV2。T2 被分配至 UAV5,其任务执行 顺序由 {Task₈, Task₆, Task₄} 调整为 {Task₈, T₂, Task₆, $Task_4$ }.

4 结论

本文提出了一种多阶段航迹预测算法,应用于包含任务分 配和航迹规划的分布式实时任务规划中。航迹预测算法由3个 阶段组成:基于A*算法的路径估计、任务分配后的路径规划 以及基于三次 B 样条的航迹平滑算法。任务分配过程采用聚 类算法修改任务价值函数。仿真结果表明算法能够逼近最优分 配结果,并且分布式控制方式可有效处理突发任务目标,控制 量满足约束,验证了规划航迹的可行性。

参考文献:

[1] Luca D F, Giorgio G, Fulvia B Q. A novel approach for trajectory tracking of UAVs [J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2014, 86 (3): 198-206.

- [2] Sun T, Huo C, Tsai S, et al. Intelligent flight task algorithm for unmanned aerial vehicle [J] . Expert Systems with Applications. 2011, 38 (8): 10036-10048.
- [3] Ren W, Beard R W, Atkin E M. Information consensus in multivehicle cooperative control [J]. IEEE Control System Magazine, 2007, 27 (2): 71-82.
- [4] Choi H L, Brunet L, How, J P. Consensus-based decentralized auctions for robust task allocation [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2009, 25 (4): 912-926.
- [5] Sahingoz O K. Generation of Bezier curve-based flyable trajectories for multi-UAV systems with parallel genetic algorithm [J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory & Applications, 2014, 74: 499-511.
- [6] Moon S, Oh E, Shim D H. An integral framework of task assignment and path planning for multiple unmanned aerial vehicles in dynamic environments [J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2013, 70 (1-4): 303-314.
- [7] Wang Y, Wang S, Tan M, et al. Real-time dynamic Dubins-helix method for 3-D trajectory smoothing [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2015, 23 (2): 730-736.
- [8] Abbas A, Nasri A, Maekawa T. Generating B-spline curves with points, normals and curvature constraints: a constructive approach [J] . Visual Computer, 2010, 26: 823-829.