无人机群变航迹多任务综合规划方法研究

赵　敏，姚　敏

(南京航空航天大学自动化学院　南京　210016)

【摘要】将无人机群作为一个整体，对任务和航线进行综合规划有利于提高效率，减少油耗。为了缩短机群的任务完成时间，减少飞行航程，提出了一种启发式的任务和轨迹综合规划方法。通过将各无人机的任务执行时间趋于均衡以减小机群任务的总完成时间，同时兼顾同一无人机执行的多个任务在路径上的相邻，使得机群的总飞行航程得到缩短，从而减少了油耗。仿真试验表明，任务轨迹综合规划算法与仅考虑航线或任务执行时间的算法相比较，机群的任务完成时间减少了18%左右，提高了无人机群的工作效率，减少了油耗。

关　键　词　任务均衡;　启发式算法;　航线规划;　任务分配;　无人机

中图分类号　V279　　**文献标识码**　A　　doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2010.04.018

Study on Changeable Path Planning and Multi-Task Assignment Optimization Design for Unmanned Aerial Vehicles Cluster

ZHAO Min and YAO Min

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics　Nanjing　210016)

Abstract　In order to reduce tasks execution time and the route, a changeable path planning and multi-task assignment optimization design method is introduced in this paper. Tasks finishing time of unmanned aerial vehicles (UAVs) cluster is reduced by tasks balanced distribution to each UAV and flying route is shortened by adjacent tasks distribution to same UAV. The result proves that compared with route priority algorithm or task priority algorithms, The tasks finishing time of UAVs cluster of the proposed method is decreased 18% and fuel consumption is reduced obviously.

Key words　balancing tasks;　heuristics algorithms;　path planing;　task assignment;　unmanned aerial vehicle (UAV)

美国空军的《2025年空军》报告认为：一种可用来执行侦察、攻击和电子战任务的多用途无人战斗机，将是空军今后几十年的一项关键技术。2005年8月美国发布了《无人驾驶系统2005～2030发展道路蓝图》[1]，将无人驾驶飞机作为网络中心战的重要组成部分。目前，无人机的研究已经得到了各国的重视。但同时，无人机也存在单机能力较弱，飞行距离有限的缺点。蜜蜂和蚂蚁的群体攻击和工作能力大大超越了个体的能力，对利用智能相对较弱的无人机群实现有效和复杂的群体协同工作和作战很有启发[2-4]。

目前，国内外无人机机群协同工作(作战)的研究主要集中在区域搜索和协同侦察[5-8]，研究一定约束条件下多架无人机对多个目标侦察过程中的航线规划。由于没有考虑侦察任务本身的差异，因而没有将任务的分配和航线规划结合起来进行考虑。随着无人机技术的发展，无人机能够执行的任务种类越来越多，即使同类任务，不同的条件和要求下需要的资源也有所差异。因此，无人机群体工作的研究有必要将“侦察任务”泛化为各种任务，无人机群航线规划的同时要考虑任务本身的差异。但是，航线规划与任务分配两个因素是交织在一起的，机群中某架无人机航线的变动将导致执行任务的重新分配，同样，任务的重新分配又需要对原有的航线进行重新规划。因此，需要构造一种能够对任务分配和航迹同时完成优化的算法。

1　启发式任务航迹综合规划方法

无人机群的群体工作目标是用较短的时间共同完成一组(多项)任务，并具有较少的油耗。假设无人机群中共有n架无人机，分别为V_1、V_2、…、V_n，需要完成一组m项任务，分别为q_1、q_2、…、q_m，$m>n$，

收稿日期：2009－01－05;　修回日期：2009－03－20

基金项目：航空科学基金(2009ZC52041)

作者简介：赵　敏(1959－)，男，博士，教授，博士生导师，主要从事无人机协同任务分配、计算机测控、信号处理方面的研究.

完成相应任务需要的时间为t_{q1}、t_{q2}、…、t_{qm}。群体工作可以理解为将m项任务分配给n架无人机完成。任务完成时间为所有任务完成所需要的时间。一般可认为总油耗为完成一组(m项)任务时，机群(n架)无人机油耗的总和。由于油耗与飞行时间成正比，因此，本文以无人机的飞行时间之和衡量总油耗，其中包括执行任务时间和航线飞行时间。

为了达到减少任务完成时间和减少总油耗这一目标，将m项任务分配给n架无人机时需要考虑以下问题：(1) 不同任务的执行地点有一定的航程，为了减少油耗，同时也就是缩短任务执行时间，将相距较近的任务优先分配给同一无人机执行。(2) 任务执行的完成时间为所有任务完成所需要的时间，因此，要将执行的任务相对均衡地分配给各无人机，而不同任务分配方案会影响无人机航程的变化，即任务的分配与航程的优化是相互影响的。(3) 每架无人机的飞行距离是有限的，不能超过极限值。从以上的描述中不难看出，对于无人机群体的任务分配，既要考虑每个任务的任务执行地点，也要考虑每个任务的执行时间。若仅考虑航线，虽然能够实现总油耗的优化，有可能会将相邻的执行时间相对都较长的任务分配给同一架无人机，从而导致任务完成时间延长。同样，仅考虑任务的执行时间，而不考虑航线则可能出现航程的增加，也会延长任务完成时间。因此，无人机群体的任务分配需要综合考虑航线和任务执行时间双重因素，为此本文提出了一种启发式的任务航线综合规划方法，实现任务完成时间和总油耗同时得到优化的目的。

首先建立问题模型：假设用d_{ij}表示第i个任务执行地与第j个任务执行地之间的距离，则无人机飞行d_{ij}需要的时间为$t_{ij}=d_{ij}/v$(其中i、j=0,1,2,…,m，且i、j=0表示基地；v表示无人机的飞行速度；假设机群为同型号无人机，飞行速度相同，即为常数)。可以认为无人机在航线的飞行和任务执行都可以转换为时间的耗费。

每架无人机的任务执行过程可以描述为从基地出发，分别飞经需要执行任务的地点完成任务，最后返回基地。机群任务完成时间以第一架飞机执行任务的起飞时间为起始时间，以最后一架飞机完成任务飞回基地的时间为截止时间，每架无人机完成任务的时间=执行任务时间+航线飞行时间。将任务q_1、q_2、…、q_m分配给无人机V_1、V_2、…、V_n，定义任务分配向量为：

$$\boldsymbol{y}_{ik}=\begin{cases}1 & \text{第}i\text{号任务由}k\text{号无人机完成}\\ 0 & \text{第}i\text{号任务由非}k\text{号无人机完成}\end{cases}$$

式中　i=1,2,…,m；k=1,2,…,n。

无人机经过的航迹为：

$$x_{ijk}=\begin{cases}1 & k\text{号无人机经由路径从}i\text{到}j\\ 0 & k\text{号无人机未经由路径从}i\text{到}j\end{cases}$$

式中　i,j=0,1,2,…,m；k=1,2,…,n。

对于任意第k架无人机，完成任务时间T_k=执行任务时间+航线飞行时间，即：

$$T_k=\sum_{i=1}^{m}y_{ik}t_{qi}+\sum_{j=0,\,j\neq i}^{m}\sum_{i=0}^{m}x_{ijk}d_{ij} \tag{1}$$

机群任务完成时间即为最后完成任务的无人机的执行时间，即：

$$T_{\mathrm{M}}=\mathrm{Max}(T_1,T_2,\cdots,T_n) \tag{2}$$

无人机群总油耗以总飞行时间计算，即：

$$T_{\mathrm{S}}=\sum_{k=1}^{n}(\sum_{i=1}^{m}y_{ik}t_{qi}+\sum_{j=0,\,j\neq i}^{m}\sum_{i=0}^{m}x_{ijk}d_{ij}) \tag{3}$$

由于无人机留空时间是有限的，定义无人机极限飞行时间为$T_{\max}$。则每架无人机必须满足约束条件。$T_k<T_{\max}$，k=1,2,…,n。衡量算法结果的指标为任务完成时间T_M和飞行总时间T_S两项。从式(1)～式(3)可以看出，在算法迭代过程中需要调整y_{ik}、x_{ijk}，并且两个参数是相互影响的。通常遗传算法[9]、蚁群算法[10]等所构造出的航迹规划或任务分配算法都是设定初始个体，通过迭代逐步逼近优化解。而每个初始个体是一个完备的路径方案，在迭代过程中涉及到两个参数调整，而相互的影响也难以用数学形式描述。同时，算法衡量指标也有两个，由两个衡量指标构造的适应度函数很难保证在迭代过程中收敛。为此本文设计了一种启发式方法，可以将任务由少到多逐个进行分配，任务的分配和航迹的规划同时完成，被分配的任务由n项向m项逐步逼近，每次迭代只完成一项任务的添加，最终完成m项任务的分配与航迹规划。结合无人机群任务分配决策的问题构造模型，所设计的启发式任务航线综合规划方法(下称综合规划算法)步骤如下：

(1) 判断是否满足$\mathrm{Max}(q_i+2d_{i0})<T_{\max}$，$i$=1,2,…,$m$，如果不满足，则存在无法分配的任务，算法终止。

(2) 将n项任务按照需要的执行时间从大到小排序，形成任务列表。选出前n个任务分别分配给n架无人机(当出现多个执行时间相同的任务，则任意选择其中的任务)。

(3) 分别连接基地到步骤(2)中选取出的n项任务地点，形成n个封闭航线。即从基地出发，最终回到基地。

(4) 根据式(1)计算n架无人机的任务执行总时间T_k，k=1,2,⋯,n，并从小到大排序，形成无人机列表，选取最小完成时间的无人机V_k。

(5) 在剩余的任务中选取最大执行时间任务q_i，将该任务加入到k号无人机的任务列表中。若在步骤(4)中有多个相同最小执行时间的无人机或在任务列表中有多个最大执行时间的任务，则选择备选无人机到备选任务中具有最短航程的无人机−任务对。

(6) 重新规划新分配任务的无人机的航迹。规划算法为：计算原航路中离新节点e最近的节点，如为节点c；计算与节点c相连的两个节点(假设为a、b)到新添加节点e的距离与到c点的距离差d_1=(ae−ac)和d_2=(be−bc)；如果$d_1<d_2$，则删除节点a、c的连线，连接ae、ec，否则删除节点b、c的连线，连接be、ec。则新节点c就被添加到该无人机的航迹中，形成新的封闭航线。

(7) 根据式(1)计算任务完成总时间，判定是否满足$T_k<T_{\max}$，如果满足，此次分配成功，继续执行步骤(8)。否则，此次分配失败，重新将该任务分配给无人机列表中下一个无人机。重复执行步骤(6)。

(8) 任务列表中是否已空，如果已空则算法结束。否则转到步骤(5)。

2 实 例

以10架无人机群，25项任务为例，各任务地点分布如图1所示，用综合规划算法对任务进行了分配，其中节点中的序号为每个任务的编号，基地以序号0表示，表1为25项任务的执行时间，根据综合规划算法对任务分配与航迹规划的结果。

表1 任务执行时间表

任务编号	任务执行时间/min	任务编号	任务执行时间/min	任务编号	任务执行时间/min
1	7	10	4	19	3
2	6	11	7	20	6
3	4	12	4	21	7
4	4	13	5	22	8
5	3	14	2	23	6
6	7	15	6	24	5
7	2	16	7	25	6
8	1	17	4		
9	5	18	3		

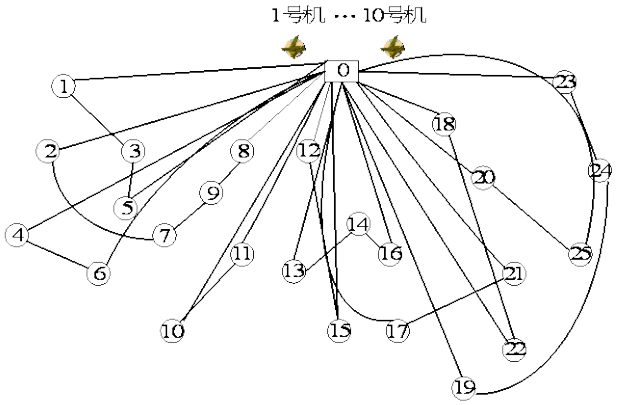

图1 无人机群任务分配与航线规划图

为了验证综合规划算法的优越性，分别用综合规划算法、航线优化算法、任务优化算法对图1中的25项任务进行分配，表2中给出了每架飞机的执行任务和飞行航线。其中航线优化算法仅考虑航线，将相邻的2～3项任务分配给同架无人机；任务优化算法仅考虑任务执行时间的平均分配，随机地将任务执行时间之和为12～13 min的任务分配给同架无人机。从分配的结果可以看出，综合规划算法在任务完成时间上是最短的，其他两种算法在完成时间上都增加了18%左右。而从任务执行总时间(总油耗)上来看，由于任务执行总时间是固定的，它最终决定于航线飞行时间，因此，航线优化算法是最优的。但该算法中各无人机的任务结束时间方差相对最大，表现为任务的执行在无人机上的分配是不平衡的，从而导致群体任务完成时间最长。而综合规划算法以牺牲少量的航线飞行时间优化任务完成时间，使得任务的执行与消耗的资源同时得到优化。

图2给出了3种算法中各无人机完成时间的分布。从图4中也可以看出综合规划算法中各无人机任务完成时间相对接近，并且平均完成时间也相对较短，即综合规划算法使得各无人机的任务分配相对平衡，从而任务的最终完成时间被缩短。

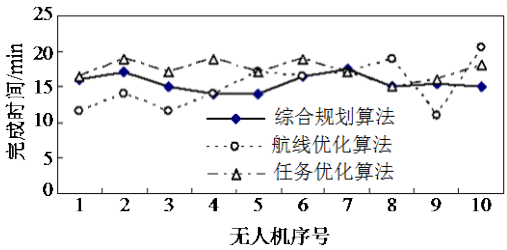

图2 无人机任务完成时间分布图

表2　任务分配算法比较

无人机序号	综合规划算法		航线优化算法		任务优化算法	
	航线	完成时间/min	航线	完成时间/min	航线	完成时间/min
1	0-1-3-5-0	16	0-1-2-0	11.5	0-1-13-0	16.5
2	0-2-7-9-8-0	17	0-4-6-0	14	0-2-25-0	19
3	0-4-6-0	15	0-3-5-7-0	11.5	0-3-12-14-0	17
4	0-10-11-0	14	0-9-8-12-0	14	0-4-22-0	19
5	0-12-15-0	14	0-11-12-0	17	0-5-15-19-0	17
6	0-13-14-16-0	16.5	0-13-14-16-0	16.5	0-6-20-0	19
7	0-19-24-23-0	17.5	0-15-17-19-0	17	0-7-21-23-0	17
8	0-17-21-0	15	0-22-21-0	19	0-8-9-11-0	15
9	0-22-18-0	15.5	0-18-20-0	11	0-16-24-0	16
10	0-25-20-0	15	0-23-25-0	20.5	0-10-17-18-0	18

机群任务执行时间综合比较如表3所示。

表3　机群任务执行时间综合比较

算法	完成时间/min	机群任务完成总时间/min	各无人机完成时间方差/min
综合规划算法	17.0	155	0.35
航线优化算法	20.5	152	1.10
任务优化算法	20.0	174	0.49

3　结　论

针对无人机群的任务分配，本文提出了一种启发式的任务航线综合规划方法。在任务的分配中，综合考虑了机群任务执行时间之和及与任务分配相关联的航迹规划，使得机群的任务执行时间和航程同时得到优化。仿真试验表明，综合规划算法与仅考虑航线或任务执行时间的算法相比较，机群的任务完成时间缩短了18%，提高了无人机群的工作效率，减少了油耗。

参　考　文　献

[1] Office of the Secretary of Defense. Unmanned Aircraft System (USA) Roadmap 2005-2030[R]. 2005.

[2] RUDOL P, WZOREK M, CONTE G. Micro unmanned aerial vehicle visual servoing for cooperative indoor exploration[C]//Aerospace Conference. [S.l.]: IEEE, 2008: 1-10.

[3] TOUSSAINT G J, DE LIMA, P, PACK D J. Localizing RF targets with cooperative unmanned aerial vehicles[C]// American Control Conference. [S.l.]: IEEE, 2007: 5928-5933.

[4] PACK D, YORK G, FIENO R. Information-based cooperative control for multiple unmanned aerial vehicles [C]//Networking, Sensing and Control, 2006. ICNSC'06. [S.l.]: IEEE , 2006: 446-450.

[5] YAN Jin, YAN Liao, MINAI A A. Balancing search and target response in cooperative unmanned aerial vehicle (UAV) teams[J]. Systems, Man, and Cybernetics, Part B, IEEE Transactions on, 2005, 36(3): 571-587.

[6] DE LIMA P, PACK D. Toward developing an optimal cooperative search algorithm for multiple unmanned aerial vehicles[J]. Collaborative Technologies and Systems, 2008, 3: 506-512.

[7] 田　菁, 沈林成. 多基地多无人机协同侦察问题研究[J]. 航空学报, 2007, 28(4): 913-921.
TIAN Jing, SHEN Lin-cheng. Rearch on multi-base multi-UAV cooperative reconnaissance problem[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2007, 28(4): 913-921.

[8] YANG Yan-li, MINAI A A, POLYCARPOU M. M. Decentralized cooperative search by networked UAVs in an uncertain environment[J]. American Control, 2004, (6): 5558-5563.

[9] WANG Z L, YANG P, LING D, et al. An improved real-coded genetic algorithm and its application[J]. Journal of Eletronic Science Technology of China, 2008, 6(1): 43-46.

[10] 苏　菲, 陈　岩, 沈林成. 基于蚁群算法的无人机协同多任务分配[J]. 航空学报, 2008, 29(S1): 184-191.
SU Fei, CHEN Yan, SHEN Lin-cheng. UAV cooperative multi-task assignment based on ant colony algorithm[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(S1): 184-191.

编　辑　漆　蓉