

文章编号: 1001-2486(2009)05-0086-06

# 区域目标搜索中基于改进 RRT 的 UAV 实时航迹规划\*

彭辉, 王林, 沈林成

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南长沙 410073)

**摘要:** 在线自主航迹规划是无人机(Unmanned Aerial Vehicles, UAV) 执行区域目标搜索任务的有效保证。针对 UAV 区域搜索中航迹规划的实时性要求, 提出了一种固定搜索模式和动态搜索模式相结合的 UAV 自主航迹规划框架。在快速扩展随机树(RRT)方法的基础上, 通过改进随机扩展树的节点选择和引入启发式信息, 提出了基于改进 RRT 的 UAV 实时搜索航迹规划算法, 该算法能够有效降低在线航迹规划的时间代价和扩展节点数。仿真实验结果验证了本文方法的有效性。

**关键词:** 无人机; 区域目标搜索; 快速扩展随机树; 航迹规划

**中图分类号:** TP391.9      **文献标识码:** A

## The Modified RRT based Real-time Route Planning for UAV Area Target Searching

PENG Hui, WAN Lin, SHEN Lin-cheng

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** On-line Autonomous Route Planning is the prerequisite for Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) to perform area search mission effectively. Firstly, to satisfy the real-time requirement of UAV search path planning, an autonomous route planning framework which integrates fixed search mode with dynamic search mode is presented. Then, based on basic Rapidly-exploring Random Tree (RRT), a modified RRT-based UAV route planning algorithm is proposed. The modified RRT method has introduced heuristic information, and improved the extension of RRT node, which can reduce the node number in a search tree and time cost. Simulation results demonstrate that the method is real-time and effective.

**Key words:** Unmanned Aerial Vehicles(UAV); area target search; rapidly-exploring random tree; route planning

区域侦察和目标搜索是无人机(Unmanned Aerial Vehicles, UAV)的基本任务<sup>[1]</sup>。UAV 在执行此类任务之前, 仅知道待侦察区域的地理位置信息和边界信息, 对于区域内目标的具体位置和敌方威胁情况不完全确知, 因此 UAV 需要具备一定的自主规划能力, 能够根据任务过程中的实时探测信息和外部环境信息, 进行在线的路径决策和航迹规划, 这对规划算法的计算速度提出很高要求, 很多用于预先航路规划<sup>[2]</sup>的方法, 如 A\* 算法、遗传算法、蚁群算法等耗时较多的算法很难直接应用。

针对 UAV 区域目标搜索中的航迹规划问题, 目前国内外开展了较为广泛的研究。传统的方法以搜索树<sup>[3]</sup>为基础, 从最大化目标发现概率的角度, 设计覆盖任务区域的搜索航线, 这类航线通常是固定模式, 如文献[4-5]采用扫描线模式实现对目标区域的完全搜索覆盖, 这种方法航线计算简单、快速, 能够保证一定的目标发现概率, 但飞行航线固定、搜索效率不高; 另一类重要的方法是基于搜索图(Search Map)的动态搜索方法<sup>[6-7]</sup>, 该方法以二维离散地图来存储目标和环境信息, 基于搜索图信息, UAV 可以采用不同的策略在线计算的下一时刻的搜索路径, 如随机策略、局部最优策略、全局最大策略<sup>[8]</sup>等, 这类方法能有效利用实时探测信息进行目标搜索, 难点在于如何快速计算到下一目标点的安全搜索航迹。

本文提出了一种固定搜索模式和动态搜索模式相结合的 UAV 区域搜索航迹规划方法框架。在此框架下, 根据预先情报信息对搜索区域进行划分, 对重点子区域采用固定模式实现搜索覆盖, 对其他区域则采用动态搜索模式, 采用改进的快速扩展随机树(Rapidly-exploring Random Tree, RRT)算法生成实时

\* 收稿日期: 2009-03-30

基金项目: 国防基础科研项目(A2820080247); 国防科学技术大学博士创新资助项目(B080304)

作者简介: 彭辉(1980-), 男, 博士生。

搜索航迹。该方法结合了固定模式航线计算简单的特点以及改进 RRT 算法计算快速的优势,有效提高了航迹规划的时间性能。

## 1 区域目标搜索航迹规划框架

在对任务区域进行目标搜索时,单架 UAV 的搜索过程通常可划分为两个步骤:(1)环境的实时探测和构建;(2)在线自主任务决策和航迹规划。UAV 的自主航迹规划框架如图 1 所示,主要包括环境信息模块、任务管理模块和航迹规划模块,UAV 依据当前环境信息进行实时决策路径和航路计算,产生实时航路计划给平台飞行控制模块,同时接收传感器探测信息和外部网络通信信息,不断更新自身的环境信息。

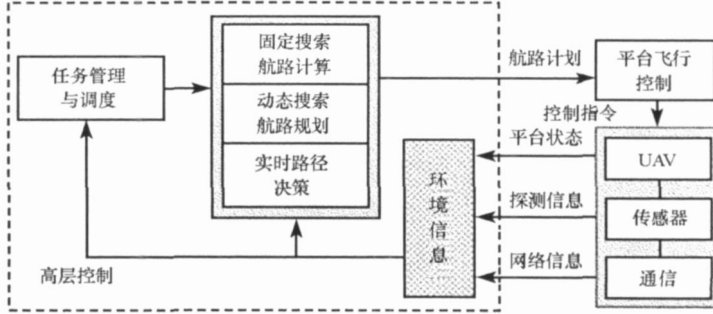


图1 UAV 自主航迹规划框架

Fig. 1 The framework of UAV autonomous route planning

### 1.1 环境信息描述

采用搜索图方法对动态不确定的环境进行建模。将任务区域划分为  $L_x \times L_y$  大小的网格,对于单元网格  $(i, j) \in E, i \in \{1, \dots, L_x\}, j \in \{1, \dots, L_y\}$ ,采用概率  $p_{ij}(t) \in [0, 1]$  来描述  $t$  时刻在网格  $(i, j)$  中目标存在的确定性程度。 $p_{ij}(t) = 1$  表示目标存在的可能性最大。搜索过程中,UAV 根据机载传感器探测信息和外部信息对搜索图进行实时更新。搜索图的更新如下:

$$p_{ij}(t+1) = \begin{cases} \tau \cdot p_{ij}(t) & \text{if no UAV visits} \\ F(p_{ij}(t), z_{ij}) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

$$F(p_{ij}(t), z_{ij}) = \begin{cases} \frac{\varphi_{ij}(t)}{1 + (\alpha - 1)p_{ij}(t)} & \text{if } z_{ij} = 1 \\ \frac{1 - p_{ij}(t)}{1 + (\alpha - 1)p_{ij}(t)} & \text{if } z_{ij} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $\tau \in [0, 1]$  为动态信息因子,如果 UAV 没有搜索到网格  $(i, j)$ ,则该处的目标确定性会降低,如果 UAV 平台搜索了  $(i, j)$ ,则  $p_{ij}(t)$  的更新与平台对目标的探测  $z_{ij} \in [0, 1]$  相关,  $z_{ij} = 1$  表示机载传感器探测到目标。探测更新方程如式(2)所示<sup>[6]</sup>,其中  $\alpha$  为传感器参数。

基于上述环境模型,结合预先情报信息和目标可能的概率分布,为搜索图赋初值。然后在搜索图信息的基础上,通过设定概率阈值,对任务区域进行处理,划分出目标存在可能性最大的子区域,将这些区域作为重点区域进行编号,然后 UAV 可以按特定顺序对重点区域进行目标搜索。

### 1.2 任务模式管理

UAV 在具体执行任务过程中存在一定的模式,称之为任务模式。任务模式采用特定的数据结构来描述 UAV 的任务状态信息,每一个任务模式对应于某阶段内 UAV 的特定控制过程和飞行状态,如执行搜索时有固定搜索模式、动态搜索模式;遇到突发危险时有威胁规避模式;正常飞行时有巡航模式、起降模式等。这些任务模式集合以堆栈的形式存储,同一时刻不存在有两个任务模式并行执行,任务管理和调度模块的主要功能是根据外部指挥控制指令和当前搜索情况,按照优先级对 UAV 的任务模式堆栈进

行管理和调度, 确定当前待执行的任务模式。

### 1.3 航迹规划模块

针对当前任务模式, 航迹规划模块为 UAV 实时规划出飞行路径, 不同的任务模式下, 航路的计算方法也不同。航迹规划模块主要由固定搜索航路计算、动态搜索航路计算和实时路径决策(用于紧急情况下的威胁规避)三部分组成。针对某些重点子区域, 采用固定模式来搜索目标是简单有效的, 如图 2 所示, 包括扫描线模式, 螺旋模式等, 这些模式下 UAV 的航路是确定的, 只要给出区域位置、形状、搜索时间、传感器扫描宽度等参数, 就可以很快计算出 UAV 的航迹。

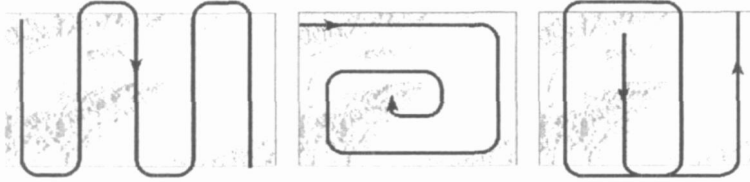


图 2 固定搜索模式下的 UAV 航迹

Fig. 2 UAV search route in fixed mode

对于动态搜索模式和威胁规避模式, 则需要根据 UAV 的最大转弯角等性能限制, 由当前位置和飞行航向, 按照一定的目标发现概率和代价函数, 实时规划出安全的可飞航路。针对实时性要求, 本文采用快速扩展随机树(RRT)方法。

## 2 基于 RRT 的实时搜索航路规划算法

### 2.1 基本 RRT 方法原理

RRT 算法由 LaVall 于 1998 年提出<sup>[9]</sup>。该算法能够根据当前环境快速有效地搜索高维空间, 通过组态空间的随机采样点, 将搜索导向空白区域, 适合于解决包含几何约束和动力学约束的航迹规划问题, 目前已应用于飞行器运动规划<sup>[10]</sup>和移动机器人路径规划<sup>[11]</sup>。

如图 3 所示, RRT 采用一种特殊的增量方式构造, 以状态空间中的初始点  $x_{init}$  作为根节点, 通过逐渐增加叶节点的方式生成随机扩展树。首先通过特定的随机采样确定目标点  $x_{target}$ , 然后从当前树节点中寻找距离  $x_{target}$  最近的叶节点  $x_{near}$ , 并以一定的步长  $\epsilon$  (通常为满足动力学约束的距离常量或时间常量) 计算新点  $x_{new}$ , 如果在向新点  $x_{new}$  行进的过程中遇到障碍, 则返回 EmptyState, 并重新选择  $x_{target}$  继续计算。在选取  $x_{target}$  时, 一部分时间以概率  $P_g$  选取终点  $x_{goal}$  作为目标点扩展, 其余时间则以概率  $1 - P_g$  从没有被探索过的区域内选取一个随机点作为目标点进行扩展, 当随机树的叶节点中包含了终点  $x_{goal}$  或者终点区域的点, 便可在随机树中找到一条以树节点组成的从初始点  $x_{init}$  到终点  $x_{goal}$  的规划路径。

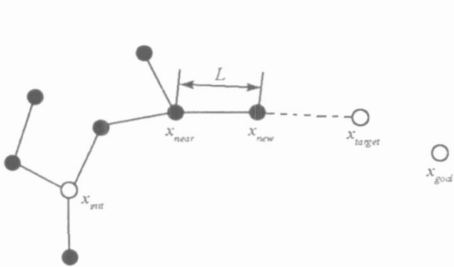


图 3 RRT 的扩展

Fig. 3 The RRT extension

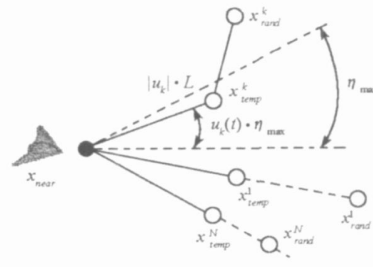


图 4 改进的 RRT 节点扩展

Fig. 4 The improvement on RRT node extension

## 2.2 基于改进 RRT 的 UAV 实时航迹规划算法

RRT 算法的随机性导致扩展树的生长形状具有随机性,并且对同一条件下的规划缺乏可重复性,这样计算出来的航路往往不是较优的航路<sup>[12]</sup>。为了将 RRT 算法用于 UAV 实时搜索航迹规划,提出以下改进策略:

(1) 改进随机点的选择。如图 4 所示,在 RRT 扩展树生长时,从未搜索的区域内产生一组随机点  $x_{rand}^k, k \in \{1, 2, \dots, N\}$ ,以  $x_{rand}^k$  为目标点,分别计算临时节点  $x_{temp}^k$ 。为了使规划出来的航迹满足 UAV 可飞性约束,需要基于当前位置  $x_{near}$  和飞行航向,根据无人机最大转弯角  $\eta_{max}$  和最小直飞距离  $L$  的限制条件来计算  $x_{temp}^k$ 。对于超出 UAV 可达范围内的目标点  $x_{rand}^k$ ,则引入随机变量  $u_k(t) \in [-1, 1]$ ,通过航向  $u_k(t) \cdot \eta_{max}$  和步长  $|u_k(t)| \cdot L$  计算  $x_{temp}^k$ 。

(2) 引入启发信息。在新增叶节点  $x_{new}$  时,引入启发式函数,通过计算每个节点到目标点的搜索增益  $J_T$  和估计距离  $J_D$  来选择新增叶节点。计算出随机节点和临时节点后,根据  $x_{rand}^k$  和  $x_{temp}^k$  所对应搜索图网格上的目标确定性值以及到目标点的距离,选择目标确定性增加最大、距离目标点最近的临时节点作为最优节点  $x_{new}$  加入扩展树。这样以搜索增益为启发信息,削弱了新增叶节点  $x_{new}$  的随机性,从而使得规划出来的航迹接近最优搜索航迹。

其中,搜索增益  $J_T$  为当前点到  $x_{temp}^k$  的航线所覆盖区域  $R_n$  内的环境确定性增加,如式(3)所示;估计距离  $J_D$  为  $x_{temp}^k$  到目标点  $x_{goal}$  的欧式距离,如式(4)所示。综合可以得到节点  $x_{temp}^k$  的目标函数为  $J = J_T / J_D$ 。

$$J_T = \sum_{(i,j) \in R_n} 0.5 \cdot (1 - p_{ij}(t)) \quad (3)$$

$$J_D = \|x_{temp}^k - x_{goal}\| \quad (4)$$

根据上述策略,基于改进 RRT 的航迹规划算法描述如下:

Step 1 以当前 UAV 位置作为起点  $x_{init}$ ,初始化搜索树结构——只包含一个节点。

Step 2 按照以下步骤扩展搜索树:

(1) 产生随机数  $P \in [0, 1]$ ,如果  $P < P_G$ ,则选择  $x_{goal}$  作为目标点,并扩展生成  $x_{new}$ ,跳至(5);否则进入(2);

(2) 按照改进策略,在未搜索区域范围内产生一组位于威胁区域外的随机点  $x_{rand}^k$ ;对于每一个  $x_{rand}^k, k \in \{1, 2, \dots, N\}$ ,从当前搜索树的叶节点中选出距离目标点最近的节点  $x_{near}$ ,并按照约束条件计算  $x_{temp}^k$ ;

(3) 根据搜索图计算从  $x_{rand}^k$  到  $x_{temp}^k$  的目标确定性增益,计算  $x_{temp}^k$  到  $x_{goal}$  的估计距离,从  $x_{temp}^k, k \in \{1, 2, \dots, N\}$  中选择增益最大、距离目标最近的节点作为  $x_{new}$ ;

(4) 如果  $x_{new}$  不在威胁范围内,则将  $x_{new}$  加入搜索树;否则返回 Step 2;

(5) 如果  $\|x_{new} - x_{goal}\| \leq \epsilon$ ,则搜索到目标点,跳到 Step 3;否则返回 Step 2;

(6) 如果搜索树的节点数超过阈值 MaxNum,则强制结束扩展,跳到 Step 3;

Step 3 返回形成的扩展搜索树,获得从  $x_{init}$  到  $x_{goal}$  的路径。如果是强制结束,则返回从  $x_{init}$  到距离  $x_{goal}$  最近的叶节点的路径。

## 3 仿真结果与分析

### 3.1 航迹规划算法的时间性能测试

为验证本文提出的算法的时间性能,采用 VC++ 6.0 编程实现本文算法,在 Intel 2.4G 主频、512 MB 内存的普通 PC 机上进行仿真实验。UAV 任务区域大小为  $40\text{km} \times 40\text{km}$ ,划分为  $400 \times 400$  的网格,仿真环境如图 5 所示。图 5 显示了采用基本 RRT 算法进

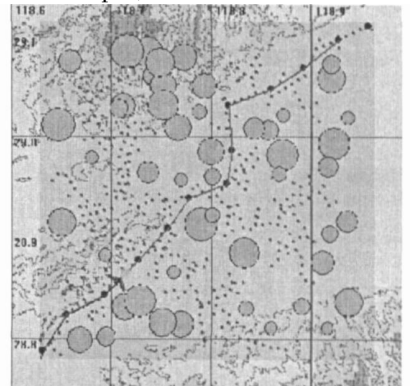


图 5 UAV 航迹规划仿真

Fig.5 UAV route planning simulation

行航迹规划的一个结果。其中起点为区域的左下角, 终点为右上角, 区域内有 50 个用不同半径的圆形表示的威胁。图中小方点为构造的扩展随机树, 大圆点和连线为在扩展随机树上搜索到的航线。此次规划时间为 34ms, 扩展节点数为 414。

由 RRT 算法可知, 影响算法时间性能的重要参数为搜索概率  $P_c$ 、搜索步长  $L$  和威胁个数, 这些参数决定了扩展随机树在空间中的节点分布和生长方向, 从而影响航迹规划时间。为验证算法的时间特性, 在不同参数条件下运行多次仿真, 对基本 RRT 算法和改进 RRT 算法的规划时间和扩展节点数进行测试和比较, 实验结果如图 6 所示。

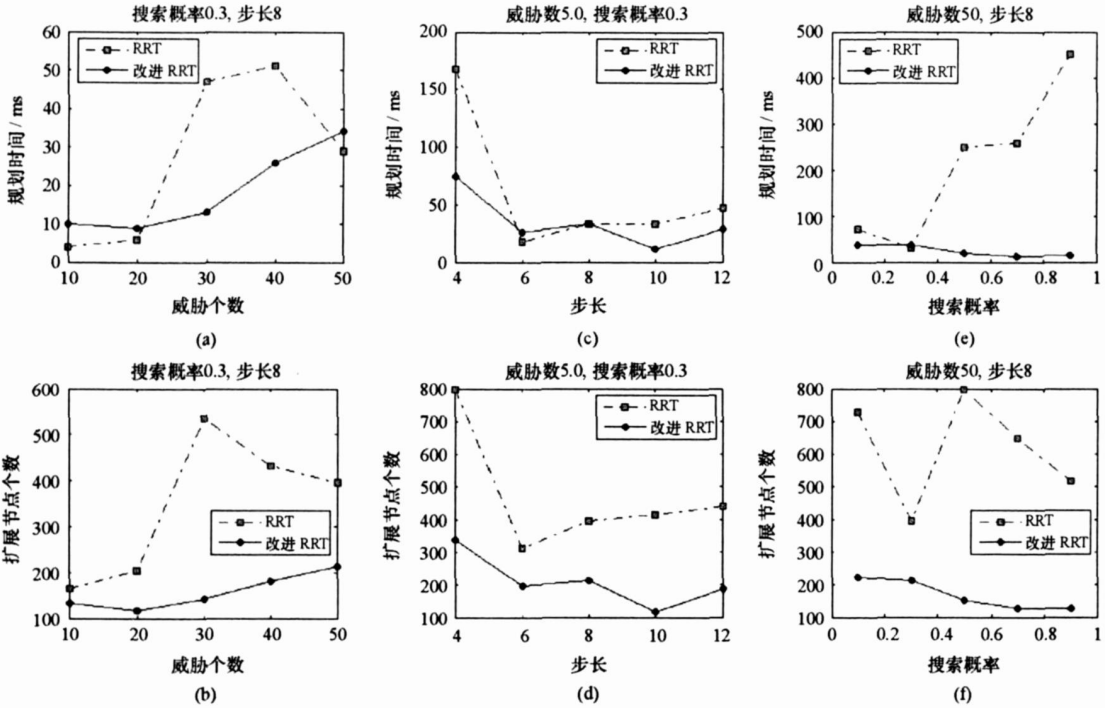


图 6 算法仿真实验结果

Fig. 6 The results of algorithm simulation

图 6(a)、(b) 显示了在搜索概率为 0.3、步长为 8 的条件下, 威胁数量对算法的规划时间和扩展节点数的影响; 图 6(c)、(d) 显示了在威胁数为 50、概率为 0.3 的条件下, 不同搜索步长对时间和节点数的影响; 图 6(e)、(f) 显示了在威胁数为 50、步长为 8 的条件下, 不同搜索概率对时间和节点数的影响。从实验结果看出: 威胁数量越多, 算法扩展的节点数也越多, 相应的计算时间也越多; 搜索步长很小的情况下, 为了达到目标点, 所需要产生的节点数也很多; 搜索概率越大, 随机树向目标扩展的机会就大, 当搜索概率为 0.5 时, 由于搜索机会均等, 因此扩展的节点数最多。通过比较, 在相同条件下, 本文提出的改进 RRT 算法由于在扩展随机树时受到启发函数的引导, 在搜索效率上有了明显提高, 完全可以满足 UAV 实时航迹规划的需求。

### 3.2 UAV 区域目标搜索仿真

在算法性能验证的基础上, 将改进的 RRT 算法用于 UAV 区域目标搜索仿真中。UAV 初始位置位于区域的左下端, 速度为 120m/s, 最大转弯角为  $70^\circ$ , 传感器参数为  $p_D = 0.8, p_F = 0.2, \alpha = 8$ , 搜索图参数为  $\tau = 0.98$ 。UAV 初始只知道区域内目标可能的概率分布, 初始目标位置随机生成, 其概率分布采用高斯函数生成, 具体概率分布如图 7(a) 所示。将任务区域划分为三个重点子区域, 对于重点区域采用扫描线模式计算飞行航迹, 完成对重点区域搜索后, 转入动态模式, 采用改进 RRT 算法计算 UAV 的航迹。仿真过程中 UAV 飞行航迹如图 7(b) 所示, 图中三角符号表示目标。仿真耗时 15min, 最终 UAV 搜索到 6 个目标, 改进 RRT 航迹规划算法的平均规划时间为 9ms, 平均扩展节点数为 72 个。

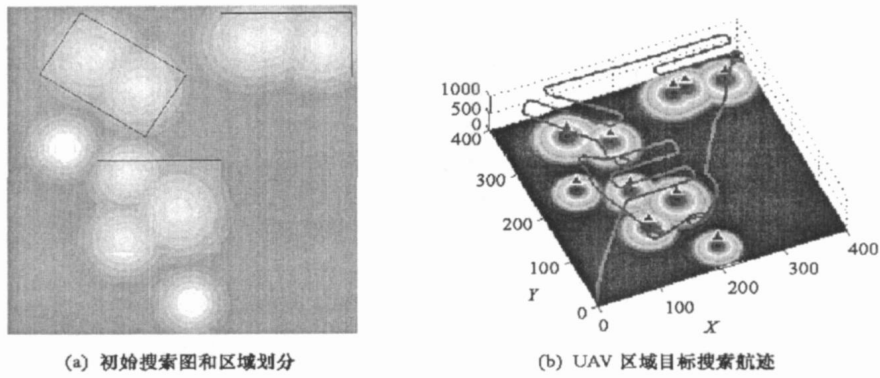


图 7 UAV 区域搜索仿真实验结果

Fig.7 The results of UAV area searching simulation

## 4 结论

本文针对区域目标搜索中的 UAV 实时航迹规划问题,提出了一种结合固定搜索模式和动态搜索模式的 UAV 自主航迹规划框架。在基本 RRT 算法基础上,改进了随机扩展树的节点选择方式,在随机树扩展过程中引入启发式信息,提出了基于改进 RRT 的 UAV 实时搜索航迹规划算法。仿真试验结果表明:两种搜索模式的有机结合,使得 UAV 能够快速有效搜索任务区域,在较短的时间内发现较多的未知目标。

## 参考文献:

- [1] Office of the Secretary of Defense. Unmanned Aircraft Systems Roadmap 2005– 2030[R]. U. S. Department of Defense, December 2005.
- [2] 龙涛, 孙汉昌, 朱华勇, 等. 战场环境中多无人机任务分配的快速航路预估算法[J]. 国防科技大学学报, 2006, 28(5): 109– 113.
- [3] Baum M L, Passino K M. A Search-theoretic Approach to Cooperative Control for Uninhabited Air Vehicles[C]// AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. 2002: 1– 8.
- [4] Maza I, Ollero A. Multiple UAV Cooperative Searching Operation Using Polygon Area Decomposition and Efficient Coverage Algorithms[C]// 7<sup>th</sup> International Symposium on Distributed Autonomous Robotics Systems, France: Springer, 2004: 211– 220.
- [5] 彭辉, 沈林成, 霍霄华. 多 UAV 协同区域覆盖搜索研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(11): 2472– 2476.
- [6] Polycapou M M, Yang Y L, Passino K M. A Cooperative Search Framework for Distributed Agents[C]// IEEE International Symposium on Intelligent Control, 2001: 1– 6.
- [7] Yang Y L, Polycapou M M, Minai A A. Multi-UAV Cooperative Search Using an Opportunistic Learning Method[J]. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. 2007, 129(5): 716– 728.
- [8] 周浦城, 洪炳, 等. 多机器人运动目标搜索策略研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(7): 879– 882.
- [9] LaValle S M. Rapidly- exploring Random Trees: A New Tool for Path Planning[R]. Computer Science Department, Iowa State University, October, 1998.
- [10] Amin J N, Bo- skovi J D, et al. A Fast and Efficient Approach to Path Planning for Unmanned Vehicles[C]// AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Keystone, Colorado: AIAA, 2006: 1– 9.
- [11] 樊晓平, 李双艳. 带滚动约束轮移式机器人动态规划的研究[J]. 控制与决策, 2005, 20(7): 786– 788.
- [12] 王滨, 金明河, 等. 基于启发式的快速扩展随机树路径规划算法[J]. 机械制造, 2007, 45(12): 1– 4.