基于改进 PRM 算法的路径规划研究 *

刘 洋, 章卫国, 李广文
(西北工业大学 自动化学院, 西安 710129)

摘 要: 为了解决传统 PRM 算法在处理窄通道问题时的缺陷,提出了一种改进的 PRM 算法。通过在规划环境中引入人工势场,对落在威胁体内的点施加势场力,使之移动到自由空间内,从而增加窄通道内的节点数量,在不增加采样次数的情况下完成路线图的构建。仿真结果表明,改进 PRM 算法提高了采样点的利用率,缩短了存在窄通道环境中的路径构建时间,在突发威胁时能快速完成路径生成。

关键词: 航迹规划; 概率图法; 无人机; 窄通道
中图分类号: TP391;TP301.6 **文献标志码**: A **文章编号**: 1001-3695(2012)01-0104-03
doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.01.029

Study on path planning based on improved PRM method

LIU Yang, ZHANG Wei-guo, LI Guang-wen
(*College of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi' an* 710129, *China*)

Abstract: This paper proposed an improved PRM, which focused on the problem of narrow passages in the configuration space. Considering the configuration space with narrow passages, it introduced the artificial potential field to apply force to the initial points on the obstacle. The force drove these points to the free space. Then these points could be used to construct the roadmap. The roadmap could be gotten by less sampling. The simulation results shows that the improved PRM method can increase the planning efficiency. The improved PRM method enables road maps to reliably capture the connectivity of configuration spaces with narrow passages, and it performs well when the threaten break out.

Key words: path planning; probability roadmap method(PRM); UAV; narrow passages

无人机的航迹规划问题是无人机技术中的一个关键问题。由于飞行器航迹规划中存在运动威胁、动态约束等问题,使得规划复杂性显著增加。为了解决这些问题,Kavraki 等人[1]提出了概率地图法(PRM)。概率地图法通过构造自由空间中的连通图,将连续空间的规划问题转换为拓扑空间的规划问题,使路径规划问题的复杂度与环境的复杂程度和规划空间的维数无关,而主要依赖于路径搜索复杂度[2]。

传统 PRM 算法采用均匀采样的采样策略,在规划环境中存在窄通道时,由于窄通道中的自由空间较小,当采样点数量一定时,落在通道中的采样点相对较少,可能无法连接通道两端的子图,降低了路线图的连通性。为了完成路线图的构建,需要增加采样点的数量,这样就使算法效率下降。为了解决这个问题,Boor 等人[3]提出了高斯采样策略,增加了障碍物密集区域的采样点密度,从而增加构成连通图的概率。Hsu 等人[4]提出了一种桥测试法,这种方法每次需要首先采样两个点,若这两个点位于障碍上,则检测两个点的中点,若中点位于自由空间中,则认为中点位于窄通道中。相对于高斯方法,桥测试法得到的采样点更加准确,位于窄通道中的概率更高,但是每次要检测三个点的位置。文献[5]中提出了一种收缩法,首先缩小障碍物的范围,从而使自由空间变大,完成采样再进行修正。文献[6]综合快速生成树和可视 PRM 方法提出了一种改进的方法,通过引入快速生成树解决窄通道中的采样问题。文献[7]提出了一种自适应采样方法,通过边界点的移动,使一部分采样点分布于窄通道中。

传统 PRM 算法完成路线图的构建需要较多的采样点,效率较低,其原因在于有些采样点位于威胁体中,不能得到有效利用。要在不增加采样次数的前提下提高算法效率,必须改变采样点在规划空间中的分布,将落在威胁体内的采样点移动至自由空间内,增加窄通道内的节点数量。人工势场法[8]可以使质点在势力场中运动,本文结合这一思想提出了一种改进的 PRM 算法。通过改进,提高了采样效率,优化了采样点的分布,解决了窄通道问题,并在突发威胁情况下能够使落在威胁体内的路径点移动到威胁体外,快速完成路径生成。

1 PRM 算法

在规划环境范围足够大时,可以把无人机看做质点[9]。无人机在任务中会受到各种威胁,如高山、敌方防空导弹阵地、雷达等。假设这些威胁的作用范围已知,为了简化检测策略,提高检测效率,需要对这些威胁作简化处理。用矩形和圆来表示构型简单的威胁,对于构型复杂的威胁,则用不同大小的矩形和圆组合表示。这样对威胁的碰撞检测就简化为对不同的矩形和圆的碰撞检测。

PRM 算法分为两个阶段,即路线图的构建与路径的查询。路线图的构建是一个逐步迭代的过程,需要在规划环境中采样

收稿日期: 2011-05-20; **修回日期**: 2011-07-04 **基金项目**: 航空科学基金资助项目(20090753008)

作者简介: 刘洋(1988-),男,山东济南人,硕士研究生,主要研究方向为控制理论与应用、航迹规划(Liuyang88@mail.nwpu.edu.cn);章卫国(1956-),男,安徽南陵人,教授,博导,博士,主要研究方向为先进控制算法、智能控制、智能信息融合与处理;李广文(1978-),男,河北献县人,副教授,博士,主要研究方向为飞行器控制、先进控制理论和进化算法理论.

一定数量的点来完成。首先从构型空间中选取一个点,运用碰撞检测程序检测采样得到的点的位置,若位于威胁体内,则舍弃;若位于自由空间中,则把这个点作为节点加入到路线图中。随后,尝试将新获得的节点与路线图中的节点连接在一起,如此循环直到完成路线图的构建。图 1 是由 PRM 算法得到的采样点图,图 2 是其对应的路线图。

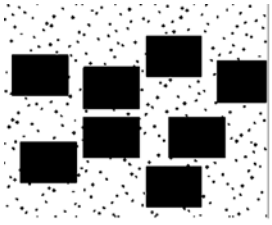

图1　采样点图

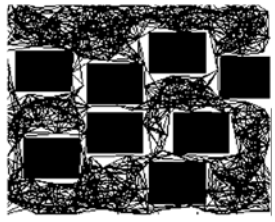

图2　路线图

节点之间的连接由局部规划器来完成。在基本 PRM 算法中,局部规划器尝试用直线段连接新采样点 c 与其一定距离内的邻近点集中的点 c'。若线段与威胁体碰撞,则不能相连。若经过碰撞检测,邻近点集中存在至少一个点能与采样点 c 相连,则局部规划器规划成功,将相应的连线作为图的边加入到对应的路线子图中。若新采样点与其邻近点集不存在直线段相连,则把该采样点作为一个新的子图存储。当采样点可以同时与多个子图连接时,被连接的子图就通过新采样点合并成一个子图。随着采样点的增多,不同的子图连接在一起;当所有子图连接成一张路线图并满足采样点密度等其他终止条件时,路线图构建完成。路线图构建完成后,就进入查询阶段。首先将初始点和终止点连入路线图,然后使用基于图的路径规划算法搜索路线图,即可得到从初始点到终止点的路径。

2　改进的 PRM 算法

2.1　基于人工势场的改进 PRM 算法

在传统 PRM 算法中,落在威胁体上的采样点直接被舍弃了,为了满足采样点密度的要求需要重新采样。若能把这些采样点通过简单处理利用起来,避免再次采样就能提高算法的效率。而要使这些采样点得到应用,必须使采样点从威胁体内移动到威胁体外。人工势场法可以使质点在人工势场中运动,借鉴这一思想,使落在威胁上的采样点在势力场中受力运动,使其移动到自由空间中,从而提高了算法效率。

把构型空间看做是一个势力场,威胁体内部为指向自由空间的斥力场,威胁体外为指向威胁体的引力场。当采样点位于威胁体内时,采样点受到斥力的作用向威胁体外移动,当移动到威胁体外时,由于受到引力的作用速度减小,逐渐停止运动。当采样点速度再次为零时,认为采样点已经移动到自由空间中,把这个新的位置作为新的节点位置连入路线图中。

图 3 所示为一个圆形威胁。若采样点初始位置为 A,由于位于威胁体内,受到斥力作用,A 沿着力场线即箭头所指方向向威胁体外运动,速度逐渐增大,当采样点移动到威胁体外即 A'时,受到指向威胁的引力作用而速度减小,逐渐停止运动。采样点在势场中的动能由式(1)给出。

$$E_p = \int_C F(r)\,d\,r, C = r(l) = x(l)\,i + y(l)\,j \tag{1}$$

其中:E_p 为采样点的动能;$F(r)$ 为质点受到的力;C 为采样点经过的轨迹;$x(t)$、$y(t)$ 为 C 在 i、j 方向的分量。

当初始点 A 已知、势力场分布已知时,式(2)可以得到两个解:一个是初始位置 A,另一个是采样点的停止位置。

$$E_p = \int_C F(r)\,d\,r = 0 \tag{2}$$

2.2　不同威胁体的势场

在处理航迹规划问题时,若将式(1)中的 $F(r)$ 看做无人机在某点处受到的威胁,则式(2)得到的解所表示的位置就一定位于自由空间中。因此,如果建立起描述某威胁大小的势场,就可以根据式(2)计算出落在威胁体内的采样点移动到自由空间中的位置。

为了减少算法运行时间,保证大部分区域的均匀覆盖,对没有落在威胁体内的采样点,由于其已经位于自由空间中,不需要移动,认为不受势场影响,不计算其在势场中的运动;对落在威胁体内的采样点,在计算运动时认为该采样点只受其所在威胁体内的势场以及威胁体周围的势场影响,而忽略其他威胁体的影响。对于构型复杂的威胁体则将威胁体分解为多个构型简单的威胁体分开考虑,避免势场中出现局部极小值。

在实际环境中,可以根据威胁在空间的分布情况,只将威胁体分为两类:a)具有明确的物理界限,无人机必须规避,如高山等;b)其边界可变,威胁大小与无人机到威胁中心的距离有关,如雷达、地空导弹等。

对于高山等障碍采用均匀的势场,即

$$F(r) = \begin{cases} k & \text{(障碍物内)} \\ -1 & \text{(障碍物外)} \end{cases}$$

其中:k 为威胁内势力场强度,1 为威胁外势力场强度。

假定雷达具有相同的反射截面,则无人机反射雷达回波的强度与其到雷达的距离的四次方成反比,因此对于雷达等威胁采用非均匀势场,即

$$F(r) = \begin{cases} \dfrac{k}{d^4(r - r_0)} & \text{(威胁体内)} \\ -1 & \text{(威胁体外)} \end{cases}$$

其中:r_0 为雷达中心的位置,$d(r - r_0)$ 为与雷达中心的距离。

地空导弹的势力场大小与导弹单发杀伤概率、齐发数量导弹飞行可靠概率等有关。为了简化计算,地空导弹的势场函数为

$$F(r) = \begin{cases} \dfrac{k}{d(r - r_0)} & \text{(威胁体内)} \\ -1 & \text{(威胁体外)} \end{cases}$$

其中:$d(r - r_0)$ 为无人机距导弹发射源的径向距离。

通过对威胁体内的势力场强度选用不同的值,就可以调节采样点移动距离的远近。当 k 值较大时,采样点的移动距离较大,在威胁周围的分布范围较大,采样较均匀;当 k 值较小时,采样点的移动距离较小,在威胁周围的分布范围较小,在规划环境中存在窄通道时,效果较好。

当出现突发威胁时,若威胁与已规划航迹相交,则需要重新生成航迹。对落在突发威胁内的路径点施加势场力,使其移动到自由空间中,若能与其他路径点相连则不需要重新规划航迹。

2.3　基于人工势场的改进 PRM 算法基本步骤

改进 PRM 算法的描述如下:

```
repeat
  c←C 空间中随机采样一点;
  if 进行碰撞检测后,c ∈ C_free
      将点 c 加入图节点集合,即 V←V∪{c};
      N←V 中 c 的邻近点集;
      for 所有的 c' ∈ N
          if 局部规划器能够连接 c 和 c'
          将无向边(c,c')加入图的边集合;
```

else 将 c 加入一个新的子图
else 计算 c 在势场中运动后的新位置 C
if 局部规划器能够连接 C 和 c'
将无向边(C,c')加入图的边集合;
else 将 C 加入一个新的子图
until 满足终止条件

3　仿真结果

为了验证改进算法的有效性,对改进算法进行了仿真。对于威胁较多、构型较复杂的区域需要较多的采样点才能保证路线图的连通性,因此把威胁周围的节点密度作为衡量连通性的标准。仿真中采用了图 1 所示的规划环境,k 值表示障碍的威胁强度,落在威胁体内的采样点的移动范围与 k 值有关。为了计算简便,k 取为 1。在采样 300 个点的条件下对 PRM 算法与改进的 PRM 算法分别进行了仿真。图 4 为采样点的仿真结果,(a)为 PRM 算法,(b)为改进 PRM 算法;图 5 为采样点构成的路线图仿真结果,(a)为 PRM 算法,(b)为改进 PRM 算法,图中只截取了威胁较密集的中间区域。由于对威胁上的采样点进行了处理,改进 PRM 算法提高了威胁体周围采样点的相对密度,使威胁体周围的采样点密度高于其他区域,威胁体之间窄通道中的节点密度也相应提高。通过采样点仿真对比,改进 PRM 算法威胁周围的采样点密度高于 PRM 算法,落在窄通道中的采样点也多于 PRM 算法。PRM 算法构造的路线图在窄通道中采样点较少,没有路线连通,连通性较差;改进 PRM 算法构造的路线图的连通性要好于 PRM 算法,可以采用较少的采样点完成路线图的构建。

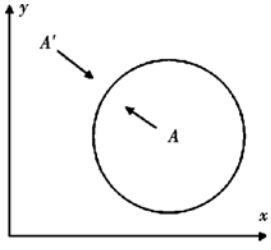

图3　质点在势场中的运动

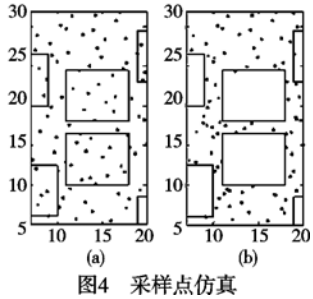

图4　采样点仿真

为了验证算法的效率,在采用相同数量点构造地图的情况下对算法运行时间进行了仿真比较。在仿真中构建了含有 300 个节点的路线图,规划环境如图 1 所示,对两种算法各进行了 50 次仿真。PRM 算法平均用时 1.7 s,改进 PRM 算法平均用时 1.2 s,可见改进算法提高了效率。

本文对不同 k 值条件下的改进 PRM 算法进行了仿真,当 k 值选取较大时,采样点移动距离较大,落在威胁体内的采样点可能由一个威胁体内移动到另一个威胁体内,导致采样点在两个威胁体之间振荡,运算时间变长。因此规划环境中存在窄通道时,选用较小的 k 值效果较好。

为了验证改进 PRM 算法在窄通道问题中的应用,对窄通道问题进行了对比仿真验证。仿真采用了带转弯的窄通道作为仿真环境。为了验证算法在窄通道中的连通性,应采用较少的采样次数。仿真中算法采样了 150 次。为了防止采样点从在势场中移动时在窄通道的两壁反复振荡,k 选取为 0.2。仿真结果如下所示:图 6 为 PRM 算法的仿真结果,图 7 为改进 PRM 算法的仿真结果,图 8 为高斯采样法的仿真结果,图 9 为桥测试法的仿真结果。由图可见,在采样 150 次的条件下,PRM 算法不能完成路线图的构建,而改进 PRM 算法由于可以使一部分原本落在威胁体内的点移至通道内的自由空间中,在窄通道里的采样点数量多于 PRM 算法,能够完成路线图的构建。高斯采样法和桥测试法也能完成路线图的构建。

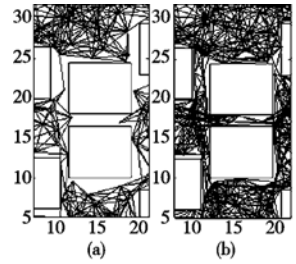

图5　路线图仿真

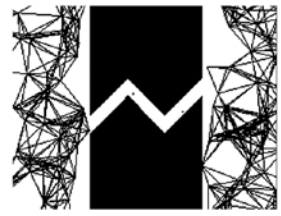

图6　PRM算法的窄通道仿真

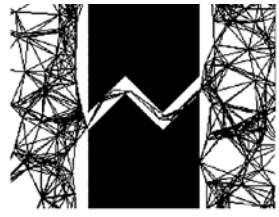

图7　改进PRM算法的窄通道仿真

图8　高斯采样法的窄通道仿真

为了验证算法在存在窄通道的规划环境中的效率,在采用相同数量点构造地图的情况下对算法运行时间进行了仿真比较。在仿真中构建了含有 150 个节点的路线图,规划环境如图 7 所示。对四种算法各进行了 50 次仿真,仿真结果如表 1 所示。

表 1　四种算法的仿真比较

算法	平均运行时间/s	通道内节点数
PRM	1.16	4
高斯采样法	0.76	7
桥测试法	0.80	10
改进 PRM	0.65	11

通过对比可见:与 PRM 算法相比,改进的 PRM 算法提高了效率,在窄通道内的节点数量多于 PRM 算法。与另外两种改进算法相比,改进 PRM 算法的运行时间最短,窄通道内的节点数量与桥测试法相差不大,多于高斯采样法。

此外,对于突发威胁的情况本文也作了仿真验证。如图 10 所示,实线路径为突发威胁前规划的路径,圆形障碍为突发导弹威胁。由图 10 可见,路径上的 A 点落在了障碍物上,需要重新构建路径。构建突发威胁的势力场使点 A 在势场中移动到 B 点,经检测 B 点位于自由空间中,这样就不需要重新进行路径规划,满足了突发威胁条件下快速生成新的可行路径的要求。

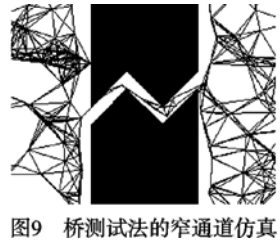

图9　桥测试法的窄通道仿真

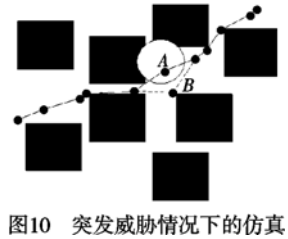

图10　突发威胁情况下的仿真

4　结束语

本文提出了一种改进的 PRM 算法,它可以提高路线图的构建效率,并能解决窄通道问题,在突发威胁条件下也有较好的表现。本文对不同的威胁选用了不同的势场(下转第 139 页)

只有一个子主题首段,则认为是一个正确的结构分析结果。

通过结构分析准确率 P 和子主题划分准确率 precision、子主题划分召回率 recall 来对两种方法以进行评价,它们的定义如下:

$$\text{结构分析准确率}(P)=\frac{\text{结构分析结果正确的文本数}}{\text{所测试的所有文本数}}$$

$$\text{子主题划分准确率}(\text{precision})=\frac{\text{正确划分出的子主题数}}{\text{划分出的所有子主题数}}$$

$$\text{子主题划分召回率}(\text{recall})=\frac{\text{正确划分出的子主题数}}{\text{答案中的所有子主题数}}$$

2.3　实验数据

将优化前后的 AP-CAPSA 文本结构分析算法在多主题文本和单主题文本两种不同的语料库上进行测试,其实验数据如表 1 所示。

表 1　优化前后的 AP-CAPSA 文本结构分析算法的实验数据
(A 为 AP-CAPSA 算法,B 为优化的 AP-CAPSA 算法)

比较项	语料类型			
	多主题文本		单主题文本	
	A 算法	B 算法	A 算法	B 算法
所测试的所有文本数	170	170	200	200
结构分析结果正确的文本数	154	162	191	197
答案中的所有子主题数	567	567	200	200
划分出的所有子主题数	539	556		
正确划分出的子主题数	521	544	188	195
结构分析准确率 P	0.906	0.952	0.955	0.985
子主题划分准确率 precision	0.967	0.978		
子主题划分召回率 recall	0.919	0.959	0.940	0.975

在多主题语料集合测试中,图 2 为两种结构分析算法的结构分析准确率、子主题划分准确率和子主题划分召回率;在单主题语料集合测试中,图 3 为两种结构分析算法的结构分析准确率、子主题划分召回率。

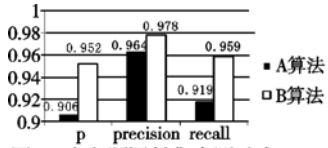

图2　多主题语料集合测试中两种算法的结构分析准确率、子主题划分准确率和召回率

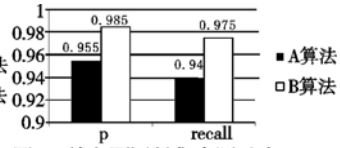

图3　单主题语料集合测试中两种算法的结构分析准确率、子主题划分召回率

2.4　实验分析

通过实验数据可以看出,优化的 AP-CAPSA 文本结构分析算法得到的结果在结构分析准确率、子主题划分准确率、子主题划分召回率均优于 AP-CAPSA 文本结构分析算法,并且该方法同时适用于单主题和多主题的文本,因此本文提出的优化的 AP-CAPSA 文本结构分析算法能够更有效地反映文本结构。

3　结束语

本文通过分析三种已有的典型的文本结构分析算法,提出了优化的 AP-CAPSA 分析算法。此算法在 AP-CAPSA 算法基础上,充分考虑了特征词在文本中分布位置对其权重的影响及特征词在段落中相对长度对其权重的影响。实验结果表明,该算法对于文本结构分析的效果令人满意,并适用于单个主题和多个主题的文章,这为中文自动摘要系统的后续工作奠定了良好的理论基础。

参考文献:

[1] CAI J S, CHI C Y, ZHAN X G. Query-biased summarization based on slide windows [J]. Computer Engineering, 2007, 33(6): 215-238.

[2] 王继成,武港山,周源远,等. 一种篇章结构指导的中文 Web 文档自动摘要方法[J]. 计算机研究与发展,2003,40(3):398-405.

[3] LUHN H P. The automatic creation of literature abstract [J]. IBM Journal of Research and Development, 1958, 2(2):159-165.

[4] 傅间莲,陈群秀. 自动文摘系统中的主题划分问题研究[J]. 中文信息学报,2005,19(6):28-35.

[5] 傅间莲,陈群秀. 基于连续段落相似度的主题划分算法[J]. 计算机应用,2005,25(9):2022-2024.

[6] 朱荷香,曲维光,卢俊之,等. 面向自动文摘的文本结构划分[J]. 南京大学学报:自然科学,2008,44(2):204-211.

[7] 中文自然语言处理开发平台[DB/OL]. http://www.nlp.org.cn.

[8] WAN Min, LUO Zheng-sheng, GUO Yu-qing. Study on semantic paragraph partition in automatic abstracting system[C]//Proc of 2001 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. 2001:892-897.

[9] WAN Min, LUO Zheng-sheng. Study on topic segmenting method in automatic abstracting system[C]//Proc of 2003 IEEE International Conference on Natural Language Processing and Knowledge Engineering. 2003:734-739.

(上接第 106 页)强度,为复杂战场环境的路线图构建提供了可能。由于提高了采样效率,进一步满足了无人机规划的实时性要求。

参考文献:

[1] KAVRAKI L, LATOMBE J. Randomized preprocessing of configuration space for fast path planning[C]//Proc of IEEE International Conference on Robotics and Automation. 1994:3020-3026.

[2] 陈岩,苏菲,沈林成. 概率地图 UAV 航线规划的改进型蚁群算法[J]. 系统仿真学报,2009,21(6):1658-1662.

[3] BOOR V, OVERMARS M, Van der STAPPEN F. The Gaussian sampling strategy for probabilistic roadmap planners[C]//Proc of IEEE International Conference on Robotics and Automation. New York: IEEE Prass, 1999:1018-1023.

[4] HSU D, JIANG T, REIF J, *et al*. The bridge test for sampling narrow passages with probabilistic roadmap planners[C]//Proc of IEEE International Conference on Robotics and Automation. New York: IEEE Press, 2003:4420-4426.

[5] HSU D, SANCHEZ-ANTE G, CHENG Ho-lun. Multi-level free-space dilation for sampling narrow passages in PRM planning[C]//Proc of IEEE International Conference on Robotics and Automation. [S.l.]: IEEE Press, 2006:1255-1260.

[6] FLAVIGNE D, TAIX M. Improving motion planning in weakly connected configuration spaces[C]//Proc of IEEE International Conference on Intelligent Robot and Systems. 2010:5900-5905.

[7] PARK B, CHUNG W K. Adaptive node sampling method for probabilistic roadmap planners[C]//Proc of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2009:4399-4405.

[8] 殷路,尹怡欣. 基于动态人工势场法的路径规划仿真研究[J]. 系统仿真学报,2009,21(11):3325-3328.

[9] 孙汉昌,朱华勇. 基于概率地图方法的无人机路径规划研究[J]. 系统仿真学报,2006,18(11):3050-3054.