

一种未知环境下的局部动态概率路线图法

杨盛毅^{1,*}, 柳阳阳², 杨伟力¹

1. 贵州民族大学 贵州省模式识别与智能系统重点实验室, 贵州 贵阳 550025

2. 北京理工大学宇航学院 飞行器动力学与控制教育部重点实验室, 北京 100081

摘要: 针对未知环境中空中机器人路径规划问题, 提出了一种适用于静态未知环境的路径规划方法。该方法在概率路线图法基础上, 重新设计了在线重规划阶段, 使得空中机器人不需更新整个规划空间, 而是借助传感器感知环境信息, 重构局部路线图, 从而达到避障的目的。该方法可在规划空间中搜索出一条光滑的且能有效避开障碍物的可行路径。仿真结果表明, 该方法复杂度低、实时性好, 能快速规划出静态未知环境下空中机器人的可行路径。

关键词: 未知环境; 概率路线图; 空中机器人; 路径规划

中图分类号: TP24

文献标识码: A

文章编号: 1007-5453 (2016) 04-0069-05

空中机器人实现在未知环境中飞行是其完成高层复杂任务的基础。由于飞行环境未知且实时变化, 其未知元素常常导致任务失败。因此, 空中机器人需具备环境感知能力, 并使用感知信息, 进行路径规划, 得到满足任务要求的新路径^[1-4]。

概率路线图法(Probabilistic Roadmap Method, PRM)是一种常用的路径规划方法, 其采用随机性的规划空间采样方式, 使用较少的采样点和路径数目完成了规划空间的描述, 通过路径点搜索和查询两个阶段完成路径规划^[5-6]。目前, PRM有许多改进版本, 如文献[7]在障碍物的表面产生采样点, 文献[8]使用了高斯采样策略, 文献[9]提出了“桥测试”方法, 文献[10]设计了星形试验法, 这些方法通过在狭窄通道及障碍密集区进行节点增强, 增加构成连通图的概率, 提高可行路径生成概率。但是, 上述方法需要已知规划空间, 这无疑限制了PRM的应用及发展。

为此, 本文基于障碍探测系统信息, 使用绕障碍物的基本避障策略, 结合PRM的路径规划框架, 提出一种适用于静态未知环境的路径规划方法。该方法利用障碍探测系统感知空中机器人本体与周围环境的距离信息, 并利用该信息对局部路线图进行重构, 按照基本避障策略新增路径点, 构成新的路线图。在此路线图上进行可行路径搜索, 在得到可行路径后对其进行优化, 使得路径满足节能要求。最终得到满足任务要求的可行飞行路径。

1 障碍探测系统

为避免与障碍物发生碰撞, 需要测量机器人本体与障碍物之间的相对距离。常用的测距方法有接触式和非接触式两种。接触式显然无法在空中机器人上实现。而非接触式不需要与障碍物接触, 就可获得距离信息, 适用于空中机器人系统。常见的非接触式测距有激光、红外、声纳和图像方式, 其中, 图像探测方法由于其前瞻性好, 且能包含优于距离类传感器的大量环境信息。但是单纯依靠图像方式测距, 其测距精度、计算量、功耗是空中机器人系统设计中需要权衡的问题。

为此, 在不大量依靠数字图像处理的前提下, 结合激光和图像方式设计了一种障碍探测系统。该系统可以提供空中机器人飞行平面上, 机器人本体轴向上到障碍的距离, 以及机器人所面对障碍物的宽度和高度信息等。这使得空中机器人系统具备了局部环境感知能力。

2 基于传感器的局部动态PRM

传统PRM根据已知规划空间规划的最小代价路径, 可作为空中机器人在未知环境中的参考路径。但是, 由于PRM的随机性, 有时规划出的最小代价路径并不那么平滑, 不太符合空中机器人的飞行特性。特别是在路径点数比较少的时候, 这种情况更明显。如图1中所规划的最小代价路径。从图

收稿日期: 2016-03-20; 录用日期: 2016-04-03

基金项目: 贵州民族大学引进人才科研基金资助项目(15XRY007)

*通讯作者。Tel.: 18685168512 E-mail: yangyshi@163.com

引用格式: YANG Shengyi, LIU Yangyang, YANG Weili. A local dynamic probabilistic roadmap method for unknown environment [J]. Aeronautical Science & Technology, 2016, 27(04): 69-73. 杨盛毅, 柳阳阳, 杨伟力. 一种未知环境下的局部动态概率路线图法[J]. 航空科学技术, 2016, 27(04): 69-73.

中可以很明显的看出,传统PRM规划的最小代价路径不仅不是最佳路径,而且路径上还存在很多尖点。这些都是不太符合机器人的飞行特性。在飞行中,不希望机器人多走无用的路程,而且也不希望在未知环境的探索飞行过程中,进行过大角度的转弯机动。探索飞行过程中,如果能有效地节约能量,将有助于机器人探索更大的范围。

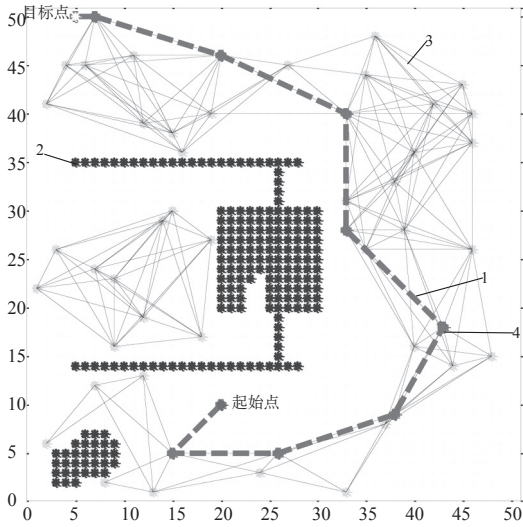


图1 传统PRM规划的路径
Fig.1 The path of traditional PRM planning

进一步分析,当规划空间中存在未知元素时,引起路径规划失败的原因是由于传统PRM中没有环境感知和路径重规划机制。因此,只需在传统PRM基础上,增加上述两种机制,即可使得PRM适用于静态未知环境的路径规划问题。

综上,利用障碍探测系统作为空中机器人感知环境的“眼睛”,使得机器人可以看到飞行环境中未知的障碍。然后,利用障碍探测系统获得局部环境的信息,在控制机器人飞行阶段在线地对飞行路径进行重规划。这种在PRM基础上改进的算法,称为基于传感器的局部动态概率路线图方法(Sensor Based - Local Dynamic Probabilistic RoadMap Method, SEB-LDPRM),其算法伪代码如图2所示。

2.1 尖点优化

SEB-LDPRM中,在第{11}步对PRM所计算的最小代价路径进行优化,主要是为了消除飞行路径中的两类尖点。第一类尖点是引起空中机器人无效折返运动的点;第二类尖点是引起空中机器人过大角度的转弯机动的点。

对于第一类尖点,主要是为了减少机器人在飞行环境中无用的折返运动。若以 S_i 代表最小代价路径上的任一路径点,以 S_{i+1} 代表最小代价路径上 S_i 的下一路径点,观察规划形成的路径可得,引起机器人不必要折返运动的路径点 S_{i+1} , S_i 与 S_{goal} 有如下关系:

```
{01} 设定最大搜索路径点数,对图 $G=(V,E)$ ,令  $V=\emptyset$ ,  $E=\emptyset$ ;
{02} 循环开始
{03}  $c$ =从规划空间按一定的采用规则随机地选取一个空闲路径点;
{04} 将 $c$ 加入到路径点集 $V$ 中;
{05} 由 $c$ 按照一定的约束条件在 $V$ 中选取相邻点集 $V_c$ ;
{06} 对于 $V_c$ 中的所有路径点 $v$ ,计算 $(c,v)$ 之间的距离 $d(c,v)$ ;
{07} 按照 $d(c,v)$ 的升序,测试 $v$ ,如果 $(c,v)$ 之前未连通,且采用一定的局部规划器能够将它们连通,则将路径 $(c,v)$ 加入到路径集 $E$ 中;
{08} 循环结束
{09} 将起始点 $S_{start}$ 到目标点 $S_{goal}$ 连接到 $G$ ;
{10} 搜索从 $S_{start}$ 到 $S_{goal}$ 的最小代价路径 $path(S_{start}, S_{goal})$ ;
{11} 对 $path(S_{start}, S_{goal})$ 进行路径优化;
{12} 一直循环,直到任务结束;
{13} 根据障碍探测系统探测障碍信息 $S_{obstacle}$ ;
{14} 如果有新障碍
{15} 根据障碍探测系统计算的避障距离进行机动;
{16} 否则
{17} 按原 $path(S_{start}, S_{goal})$ 机动;
{18} 循环结束
```

图2 SEB-LDPRM算法
Fig.2 SEB-LDPRM algorithm

$$\angle S_{goal}S_iS_{i+1} > 90^\circ \quad (1)$$

式(1)表明机器人在最小代价路径点存在的前提下,将向背离目标点的方向运动。因此,需要避免这种情况出现,并将类似这样的路径点从最小代价路径中剔除。所以,根据 S_{i+1} 这样的路径点特性,以及兼顾飞行路径的存在性,设计如图3所示的第一类尖点优化策略。

```
{01}  $S_0 = S_{start}$ ,  $S_i \in path(S_{start}, S_{goal})$ , 新路径初始点;
{02} 循环开始,直到新路径到达目标点 $S_{goal}$ ;
{03} 取 $path(S_{start}, S_{goal})$ 中 $S_i$ 的所有后续路径点组成点集 $S'$ ;
{04} 对 $S'$ 中能与 $S_i$ 连通的路径点 $S'_k$ 计算 $\angle S_{goal}S_iS'_k$ ;
{05} 取 $\angle S_{goal}S_iS'_k$ 值最小的 $S'_k$ 为新路径点 $S_{i+1}$ ;
{06}  $i=S'_k$ 在原 $path(S_{start}, S_{goal})$ 中的序号;
{07} 循环结束
```

图3 第一类尖点优化策略
Fig.3 The first kind cusp optimization strategy

对于第二类尖点,主要是为了减小机器人的机动转弯角及减少迂回行进。第二类尖点常在第一类尖点优化后出现,这是由于减少了构成路线图的路径点数,造成某些路径点在采样时会远离障碍物。当形成的最小代价路径经第一类尖点优化后,即会形成所谓的第二类尖点。若以 S_{i-1} 代表最小代价路径上 S_i 的上一路径点,定义若 S_{i-1} , S_i 和 S_{i+1} 有如下关系:

$$\angle S_{i-1}S_iS_{i+1} < 100^\circ \quad (2)$$

则称 S_i 为第二类尖点。在消除第二类尖点时,需要在路径中增加路径点。所增加的路径点分别位于原路径 $S_{i-1}S_i$ 和

$S_i S_{i+1}$ 上。若用 $S_i^{'}$ 和 $S_i^{''}$ 分别表示在 $S_{i-1} S_i$ 和 $S_i S_{i+1}$ 上新增的路径点。根据最佳优先策略,综合考虑新加入的路径 $S_i^{'}$ $S_i^{''}$ 与 S_{i-1} 和 S_{i+1} 之间的关系,避免产生新的第二类尖点的同时,使得新加入的路径最佳。因此,第二类尖点优化策略如图4所示。

-
- ```

{01} 如果 S_i 是第二类尖点;
{02} 分别计算 $S_{i-1} S_{i+1}$ 与 $S_{i-1} S_i$ 和 $S_i S_{i+1}$ 之间的关系;
{03} 当路径间关系不产生第二类尖点条件时
{04} 选择 $S_{i-1} S_{i+1}$ 作为参考路径;
{05} 否则
{06} 修正路径,避免出现第二类尖点;
{07} 在 $S_{i-1} S_i$ 和 $S_i S_{i+1}$ 上计算 $S_i^{'}$ 和 $S_i^{''}$,使得 $S_i^{'}$ $S_i^{''}$ 与参考路径平行;
{08} 循环校验 $S_i^{'}$ $S_i^{''}$ 是否可行,直到可行;
{09} 将 $S_i^{'}$ $S_i^{''}$ 一端沿 $S_{i-1} S_i$ 向 S_i 点移动一个给定距离,得到 $S_i^{'}$ 和 $S_i^{''}$;
{10} 循环结束
{11} 将 $S_i^{'}$ $S_i^{''}$ 加入 $\text{path}(S_{\text{start}}, S_{\text{goal}})$;

```
- 

图4 第二类尖点优化策略

Fig.4 The second kind cusp optimization strategy

## 2.2 路径重规划

SEB-LDPRM从第{12}步开始,加入环境感知和路径重规划机制。其中,通过障碍探测系统感知是否有新的障碍物出现。当遇到新的障碍物时,SEB-LDPRM将启动路径重规划。一般而言,在线路径规划方法大致分为全局式和局部式两类。这两类方法各有优势,需要根据对环境的认知程度来灵活使用。全局规划在对环境的认知程度较高时,能更有效地规划出代价最小的路径,而局部规划的优势则体现在运算量小,且在对环境的认知程度较低时,能更快速地适应环境。由于希望SEB-LDPRM能适应的静态未知环境的未知程度越高越好,因此采用局部式规划更符合设计需求。不需要复杂全局规划,只需要局部地图信息,就可以快速地规划局部路径,绕开被障碍物阻断的不可行路径,回到原参考路径上。

SEB-LDPRM中第{13}和{14}步中的局部环境信息是由障碍探测系统提供,该信息主要包括前方是否有障碍物及绕开障碍物的参考距离。由于障碍探测系统处理的图像信息不包含距离信息,换句话说,认为检测出的边缘信息是在同一平面内,因此,会出现如图5所示情况。

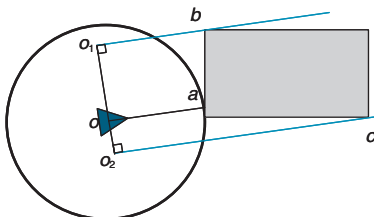


图5 单目视觉系统测距分析

Fig.5 The analysis of monocular vision range

图中三角表示机器人所在位置,其中心为 $o$ ,以 $o$ 为圆心, $oa$ 为半径的圆表示机器人上搭载的激光扫描测距仪的扫

描域。 $o_1 b$ 和 $o_2 c$ 表示单目视觉的视场范围。则障碍探测系统可以探测到的距离信息为机器人到障碍物的距离 $oa$ 和机器人到系统所认为的障碍物边缘的距离 $oo_1$ 和 $oo_2$ 。由于系统探测的距离 $oo_1$ 和 $oo_2$ 存在误差,所以实际中,应增加一个预设的安全距离,确保飞行安全。同时,当探测到未知障碍物时,下一路径点与未知障碍物存在3种关系,即下一路径点位于障碍物前、中和后。当下一路径点位于障碍物前时,该点不受障碍物影响,不启动重规划机制。而对于下一路径点位于障碍物中和后的情况,到达该点的路径被障碍物阻断,则该路径点无效,应将机器人引导向下一路径点。基于上述考虑,若以 $S_i^{'}$ ( $i=1, 2, 3, \dots$ )表示在重规划过程中新加入的路径点。设计重规划策略如图6所示。

- 
- ```

{01} 如果遇到新障碍
{02} 计算 $d_1$ =左向避障距离+安全距离;
{03} 计算 $d_2$ =右向避障距离+安全距离;
{04}  $l$ =机器人到障碍的距离;
{05} 在机器人所在点基础上,向前移动 $l$ 后,分别向左和向右移动 $d_1$ 和 $d_2$ ,构造 $S_1^{'}$  $S_2^{'}$ ;
{06} 比较 $\angle S_1^{'}$  $S_2^{'}$  $S_{i+2}$ 和 $\angle S_2^{'}$  $S_1^{'}$  $S_{i+2}$ ,取角度值最小的路径点作为下一路径点进行机动;
{07} 否则
{08} 按原 $\text{path}(S_{\text{start}}, S_{\text{goal}})$ 机动;

```
-

图6 重规划策略

Fig.6 The replanning strategy

3 仿真实例与分析

为验证所提出的SEB-LDPRM的正确性和有效性,在Matlab中搭建路径规划仿真工具箱,设计仿真实验进行实验分析。实验中以 50×50 的栅格域划分飞行环境,使用顶点移动式网格表达,作为规划空间。使用1表示最小代价路径,2表示障碍物,3线段表示路线图,4表示搜索到的路径点。SEB-LDPRM中路径点搜索部分采用随机获取50个采样点进行搜索构造路线图,选取0.3倍的地图边长作为近邻点的判断阈值;查询路线图部分采用A*算法。首先进行路径优化策略的验证实验,采用传统PRM规划路径,选取起始点为(20,10),目标点为(5,50),所规划路径如图7所示。

在同样的环境、起始点和目标点的情况下,采用SEB-LDPRM进行路径规划。首先分析对第一类尖点的处理情况,对第一类尖点的优化结果如图8所示。

由实验结果可以得出,通过优化,消除了引导机器人背离目标运动的路径点,同时也消除了右上段迂回向目标移动的路径点。删减这些路径点,有效地缩短了航程,减少了能量损耗。但是优化后,在路径的最右侧形成了典型的第二类尖点,所以采用第二类尖点优化策略进行处理,如图9所示。

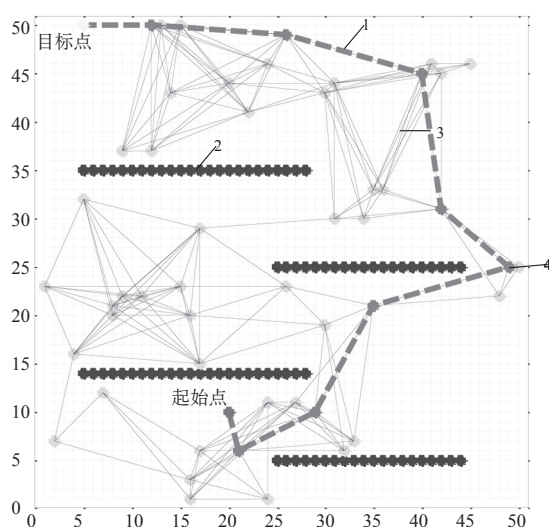


图7 传统PRM规划的路径
Fig.7 The path of traditional PRM planning

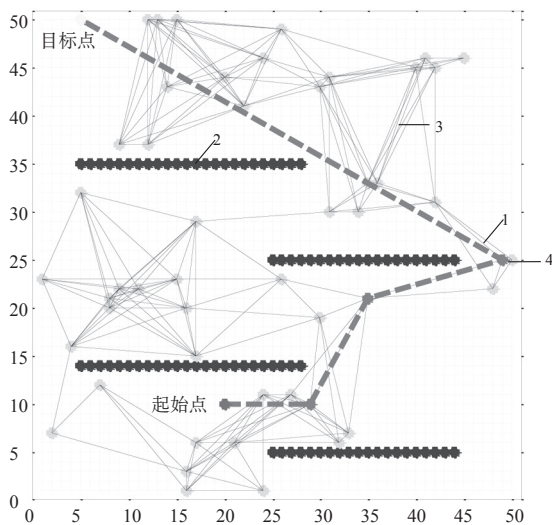


图8 第一类尖点优化结果
Fig.8 The result of first kind cusp optimization

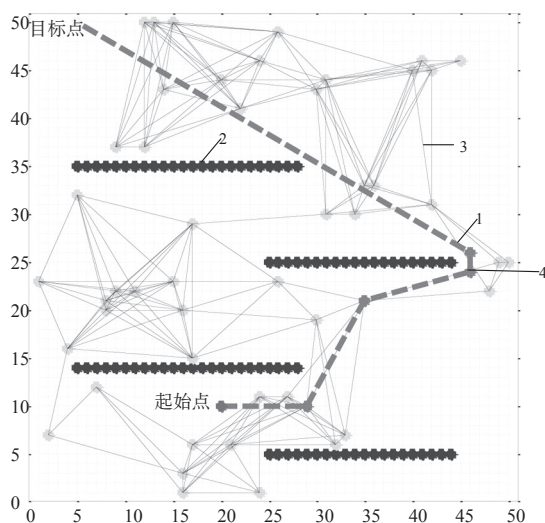


图9 第二类尖点优化结果
Fig.9 The result of second kind cusp optimization

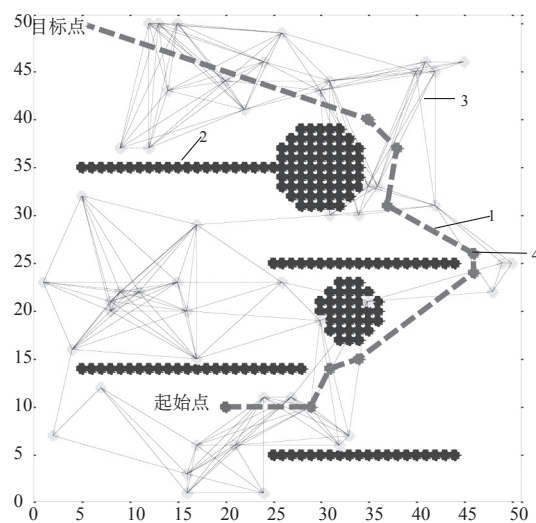


图10 含未知障碍时路径重规划结果
Fig.10 The result of path replanning in unknown environment

由实验结果可以得出,路径右侧的第二类尖点将使机器人进行大于 120° 的急转弯,而经过优化后,有效地降低了转弯角度,同时也一定程度上缩短了航程。经过对两类尖点进行路径优化,优化后的路径更符合机器人的飞行特性,减小了转弯角度,降低了对机动性的要求,减少了航程,降低了能量损耗。

最后,验证路径重规划策略。假设在原来规划空间中存在两处未知的圆形障碍物。机器人依靠机载传感器感知环境中的未知障碍信息,由于机载传感器的探测范围有限,所以假设探测范围为5个栅格。采用路径重规划策略结果如图10所示。

由实验结果可以得出,机器人在飞行过程中,通过传感器感知环境,当感知到飞行路径上有障碍物存在时,立即启动重规划,利用所探测到信息进行机动,并在绕开障碍物后直接飞向下一路径点。算法在仿真中整体耗时约为0.4s。由此可知,SEB-LDPRM可以适用于静态未知环境,并且能实时地借助障碍探测系统感知局部环境信息,利用该信息在线地进行路径重规划。

4 结论

本文所设计的SEB-LDPRM可以有效地优化路径和实现实时在线路径重规划,实现在静态未知环境中的路径规划。在传统PRM基础上对飞行路径进行优化,降低了能耗和航程,同时,当飞行过程中遇到未知障碍时,借助障碍探测系统对周围环境进行感知,并结合基本避障策略进行局部路径重规划。该方法复杂度低,实时性好,能较好地适应静态未知环境,对空中机器人的路径规划有一定的现实意义。 **AST**

参考文献

- [1] Chowdhary G, Sobers D M Jr., Pravitra C. Self-contained autonomous indoor flight with ranging sensor navigation[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2012, 35(6):1843-1854.
- [2] Bachrach A, Prentice S, He R, et al. RANGE—robust autonomous navigation in GPS-denied environments[J]. Journal of Field Robotics, 2011, 28(5):644-666.
- [3] Bachrach A, He R, Roy N. Autonomous flight in unknown indoor environments[J]. International Journal of Micro Air Vehicles, 2009, 1(4):217-228.
- [4] Shen S, Michael N, Kumar V. Autonomous indoor 3D exploration with a micro-aerial vehicle[C] //Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation (ICRA), [s.l.]: IEEE, 2012:9-15.
- [5] 刘贤敏, 王琪, 许书诚. 改进型概率地图航迹规划方法[J]. 火力与指挥控制, 2012, 37(04): 121-124.
LIU Xianmin, WANG Qi, XU Shucheng. Path planning based on improved probabilistic roadmap method[J]. Fire Control & Command Control, 2012, 37(04): 121-124.(in Chinese)
- [6] Svestka P, M H Overmars. Motion planning for carlike robots using a probabilistic learning approach[J]. International Journal of Robotics Research, 1997, 16(2): 119-143.
- [7] Amato N M, O B Bayazit, L K Dale, et al. OB PRM: an obstacle-based PRM for 3D workspaces[J]. Found of Robotics, 1998.
- [8] Boor V, M H Overmars, A F van der Stappen. The gaussian sampling strategy for probabilistic roadmap planners[J]. Utrecht University Thenetherlands, 2001, 2:1018-1023.
- [9] Hsu D, JIANG Tingting, John Reif, et al. The bridge test for sampling narrow passages with probabilistic roadmap planners[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2003.
- [10] 钟建冬, 苏剑波. 基于概率路标的机器人狭窄通道路径规划[J]. 控制与决策, 2010, 25(12): 1831-1836.
ZHONG Jiandong, SU Jianbo. Robot path planning in narrow passage based on probabilistic roadmap method[J]. Control and Decision, 2010, 25(12): 1831-1836.(in Chinese)

作者简介

杨盛毅(1986—) 男, 博士, 副教授。主要研究方向: 飞行器系统动力学与控制、计算机测控技术。

Tel:18685168512 E-mail:yangyshy@163.com

A Local Dynamic Probabilistic Roadmap Method for Unknown Environment

YANG Shengyi^{1,*}, LIU Yangyang², YANG Weili¹

1. Key Laboratory of Pattern Recognition and Intelligent Systems of Guizhou Province, Guizhou Minzu University, Guiyang 550025, China

2. Key Laboratory of Dynamics and Control of Flight Vehicle, Ministry of Education, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract: In view of the aerial robots path planning problem in unknown environment, this paper proposed a path planning method for the static unknown environment. Based on the probabilistic roadmap method, the method redesigned the online replanning stage, and perceived its environment through sensors, and used sensors' information to reconstruct the local roadmap. Thus it can make the aerial robots avoid the obstacle effectively and search out a smooth feasible path in configuration space without update the whole planning space. The simulation results show that this method has low complexity, good real-time performance and it can plan out a feasible path rapidly for aerial robots in static unknown environments.

Key Words: unknown environment; probabilistic roadmap; aerial robots; path planning

Received: 2016-03-20; **Accepted:** 2016-04-03

Foundation item: Introduced Talents Research Foundation of Guizhou Minzu University (15XRY007)

***Corresponding author. Tel.:** 18685168512 **E-mail:** yangyshy@163.com