

元胞蚁群算法的城市楼宇间无人机航路规划

李兴超, 魏瑞轩[✉], 张启瑞, 许卓凡, 周 凯

(空军工程大学无人机运用工程系, 西安, 710038)

摘要 近年来,城市环境中小型无人机越来越多,然而传统的航路规划算法通常将威胁简化,并不能很好地解决无人机在城市环境的航路规划问题。因此引入“元胞”定义飞行区间,对“数字元胞地图”以及“航路罚函数”进行定义,并利用蚁群算法进行航路规划,使其可以对任意不规则威胁进行规避。仿真对比实验表明,所提的基于元胞蚁群的算法可以在不对障碍模型进行简化的情况下进行合理规避,为无人机在城市环境中规划出一条安全可飞的航路。

关键词 元胞蚁群算法;航路罚函数;航路规划;城市环境

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2017.05.004

中图分类号 V249 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2017)05-0019-05

A Path Planning for UAVs in Urban Building Areas Based on Cellular Ant Colony Algorithm

LI Xingchao, WEI Ruixuan[✉], ZHANG Qirui, XU Zhuofan, ZHOU Kai

(Department of UAV Application and Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: Small-sized UAVs are increasing more and more rapidly in urban circumstance in recent years. However, the traditional path planning methods always threaten simplification, and fail to solve the problem of path-planning in the circumstance efficiently. Therefore, cell is introduced to define the flying space, digital cellular map and path cost function are defined. At the same time by using ant colony algorithm this paper plans the path for UAVs, thus avoiding any kinds of irregular obstacles. The simulation results show that the proposed method can avoid obstacles logically under condition of the obstacle model without simplification. By doing so, this plans a safe flyable path in urban building areas for UAVs.

Key words: cellular ant colony algorithm; path cost function; path planning; urban building area

近年来小型无人机的应用市场迅速扩大,城市上空无人机数量与日俱增,然而城市空间中密集复杂的楼宇等其他建筑和障碍严重威胁着无人机的安全。为了保护无人机的安全,需要为无人机规划一

条安全可飞的航路。无人机自主规划任务中航路规划问题是非常重要的一个方面^[1],在飞行过程中,需要在满足其自身约束条件以及某些指定性能指标最优的情况下,规划无人机从初始点到任务点及目标

收稿日期: 2017-04-24

基金项目: 国家自然科学基金(61573373)

作者简介: 李兴超(1992—),男,湖北十堰人,硕士生,主要从事无人机任务规划与控制研究. E-mail: 1570667218@qq.com

通信作者: 魏瑞轩(1968—),男,陕西岐山人,教授,博士生导师,主要从事飞行器控制研究. E-mail: rxw123@sohu.com

引用格式: 李兴超, 魏瑞轩, 张启瑞, 等. 元胞蚁群算法的城市楼宇间无人机航路规划[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2017, 18(5): 19-23. LI Xingchao, WEI Ruixuan, ZHANG Qirui, et al. A Path Planning for UAVs in Urban Building Areas Based on Cellular Ant Colony Algorithm [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2017, 18(5): 19-23.

点的最优运动轨迹。

目前为止无人机航路规划相关算法已经有很多研究,如 Judd 等^[2-4]设计的基于 Voronoi 图和样条函数的方法;王树磊等^[5]引入的计算几何学中的 Laguerre 图的方法;Szczerba 等^[6]提出的改进 A* 算法从而使其运算效率得到提高的稀疏 A* 算法(SAS);Ye W 等^[7]改进的基本蚁群算法。另外,针对无人机航路规划的其他方法还有遗传算法^[8]、神经网络^[9-10]等。基于 Voronoi 图的算法^[11]在对上述航路规划问题进行规划时,将威胁源抽象成质点,在威胁源点阵下建立 Voronoi 图,得到初始路径集,通过对每段路径进行代价评估得到加权路径集,再寻找飞行代价最小的路径。在障碍密集的环境下,无人机可飞区域狭窄,这时仍然采用 Voronoi 图的算法则可能为无人机规划出从障碍中穿行而过的航迹,这显然会给无人机带来极大的安全威胁;基于 Laguerre 图的算法同上述算法相似,是将威胁源视作圆形区域,该方法可确保一定能找到 2 个不相交的威胁区域之间的安全间隙;A-Star 算法是一种全局最优算法^[12-13],通过构建代价函数来进行航路规划,在不规则的密集障碍环境下很容易陷入局部死区,这会大大提高无人机的事故概率。蚁群算法是一种仿生算法,通过信息素来选择、更新、协调从而进行路径规划,但是存在一些缺陷,如停滞现象、收敛速度慢、易陷入局部最优等问题。

上述方法是在二维层面对无人机进行的航路规划,共有的缺陷就是不考虑障碍物高度,遇到任何障碍物都只选择绕行,这样规划得到的航路有可能大大增加无人机的航程,对于在城市楼宇间飞行的无人机来说未必总是最优的。无人机在城市低空环境中飞行时,由于与楼宇等障碍物相对距离较近,可飞空间狭窄,所以应该根据周围障碍环境的情况建立相应的地图,综合考虑楼宇的高度和间隙。

1 城市楼宇间无人机航路规划问题建模

1.1 问题描述

目前城市现代化进程不断加快,一个显著特点就是各种高楼拔地而起,建筑物形状各异,且各种建筑之间的空隙越来越狭窄。与此同时无人机也在迅速发展,城市里执行各种任务的无人机数量逐渐增多。对于在城市间飞行的无人机来说,就要求其具有对地形跟随以及合理避障的飞行能力。且由于与威胁距离较近,可飞域狭窄,极大地增加了无人机的飞行安全风险。图 1 构建了一个常见的城市楼宇间飞行环境,其中灰色区域代表城市中的建筑物等环

境障碍,黑色大圆球代表城市里存在的复杂电磁环境区域,白色区域代表障碍威胁之间的空间,即无人机的可飞域。航路规划的要求为无人机从起点 Sta-Pos 开始,经过任务点 TarPos1,到达任务点 Tar-Pos2,最终安全到达航路终点 FinPos,图中黑色小圆点代表无人机的航路起点,任务点以及终点。

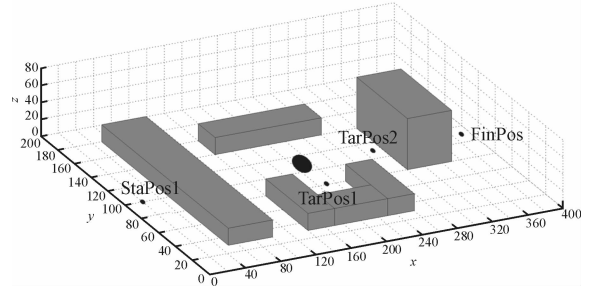


图 1 城市楼宇间无人机航路规划问题示意图

Fig. 1 Schematic diagram of path planning for UAVs in urban building areas

1.2 模型建立

数字元胞地图模型:无人机在城市环境中飞行时,要不断地躲避各种建筑物,并且某些地区还会存在一些复杂的电磁环境,也会严重影响无人机的各种性能。因此,数字地图是航路规划中十分重要的一部分。

传统的航路规划方法中地理信息的数据结构都是用二维表示,但是无人机在城市楼宇间飞行时需要根据高程与二维坐标综合规划航路,因此数字高程模型的建立很有必要。利用规划网格的方法,将任务空间划分为规则的网格单元,每个网格单元中的数值表示这个网格区域范围内障碍环境的高程,并将其转换到元胞空间中。元胞地图的离散距离称为元胞间距,其大小与元胞地图所需的精度及储存量有关。由此可将图 1 中无人机的飞行环境在元胞地图中进行表示,见图 2。图中空白网格的高度为 0,数字“18”表示复杂电磁环境的“等价高度”,“20”和“60”表示普通障碍物的高度。

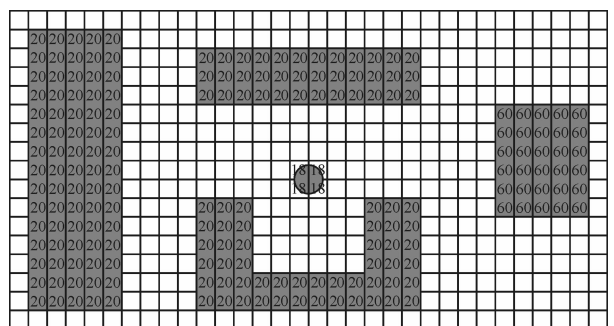


图 2 数字元胞地图示意图

Fig. 2 Schematic diagram of digital cellular map

无人机模型:由于城市飞行环境比较复杂,本文采用小型旋翼无人机进行建模,可不用过多考虑无人机的转弯半径等性能指标,将其视作质点。因此在上述的元胞地图中飞行时,可以将无人机的运动离散化为元胞状态,见图3。

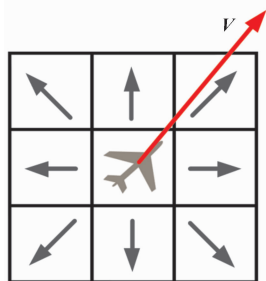


图3 元胞无人机运动模型

Fig. 3 Motion model for UAV in the cellular map

航路规划罚函数:在研究无人机航路规划问题之前,需要对优化问题的性能指标进行确定,在此采用航路规划罚函数的方法,将所有约束方程转入目标代价函数中,直接考虑目标函数优化。代价方程如下式:

$$J = \int_0^{t_f} (\omega_1 C^2 + \omega_2 h^2 + \omega_3 f_{rc}) dt \quad (1)$$

式中: ω_1 为飞行航程惩罚系数; C 代表无人机航程; ω_2 为飞行高度惩罚系数; h 代表无人机高度; ω_3 为其它环境威胁惩罚系数; f_{rc} 代表环境威胁函数。

根据此式在航路规划过程中综合考虑航程、高度、威胁3种因素的影响从而构建航路规划罚函数,通过调整3个权值系数,可以使得无人机既能保证飞行航程尽可能小,又能在遇见威胁时选择是从周围迂回以躲避障碍物还是提升飞行高度以越过障碍物,即选择“绕避”还是“跳避”。

2 元胞蚁群算法

元胞自动机是由分布在规则网格中的每个元胞取有限的离散状态,遵循确定的局部规则做出同步更新动作构成的系统^[14-16]。元胞自动机由元胞、元胞的状态空间、邻居以及局部规则组成。元胞蚁群算法是基于元胞自动机原理,利用元胞演化规则来确定区域的生与死,可使蚂蚁集中于某些区域,从而加快优化过程^[17]。解决带约束函数的优化问题可以使用常规的罚函数将所有的约束方程转入目标函数中,这样就可不必在算法的具体搜索过程中考虑约束条件是否满足,而直接考虑目标函数优化:

$$\begin{aligned} \max Z &= f(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ x_i &\in [a_i, b_i] \quad i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (2)$$

其定义域集合中的任一元素可视为元胞,所有的元素则构成元胞空间。元胞邻居这里采用扩展的 Moore 邻居类型。蚂蚁搜索的区域为元胞空间中某个元胞及其扩展的 Moore 邻居。邻域是指元胞空间中搜索区域以外的所有区域。邻域的选择概率可定义为:

$$P_{ij} = \frac{[\tau_j]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_k [\tau_k]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta} \quad (3)$$

式中: τ_j 为邻域对蚂蚁 j 的吸引强度; η_{ij} 为目标函数差值即 $Z_i - Z_j$; α 和 β 分别表示邻域吸引强度和目标函数差异的相对重要性。

蚁群根据状态转移规则通过比较邻域的选择概率来确定下一步要经过的点,重复这个过程,直至找到目标点。当所有蚂蚁完成一次迭代,即都搜索到一条可行航路后,应用全局更新规则对元胞地图各节点上的信息素进行更新。

信息素强度更新方程为:

$$\tau(j) = (1 - \rho)\tau(j) + \Delta\tau(j) \quad (4)$$

式中: ρ 是信息素挥发因子($0 < \rho < 1$); $\Delta\tau(j)$ 为全局更新因子,由下式确定:

$$\rho = \begin{cases} 1.05\rho(t-1) & , (\rho \leq \rho_{\max}) \\ \rho_{\max} & , (\rho > \rho_{\max}) \end{cases} \quad (5)$$

$$\Delta\tau(j) = \sum_{k=1}^h \Delta\tau_k(j) \quad (6)$$

当蚂蚁 k 经过节点 j 时, $\Delta\tau_k(j)$ 取值为 Q/J_k , 否则为 0。

信息素更新完毕后,对其进行阈值判断选择:

$$\tau'(j) = \begin{cases} \tau_{\min} & , \tau(j) < \tau_{\min} \\ \tau(j) & , \tau_{\min} < \tau(j) < \tau_{\max} \\ \tau_{\max} & , \tau(j) > \tau_{\max} \end{cases} \quad (7)$$

式中: Q 为常数; J_k 为蚂蚁 k 在本次循环中搜索到的可行航路目标函数值,即在 1.2 节中所述的航路处罚函数。

元胞演化规则为:选择区域 N_i 及邻域 N_j 中任意元胞 c_i 和 c_j , 计算 Z_i 和 Z_j 。当 $\eta_{ij} > 0$, 蚂蚁 i 按概率 P_{ij} 从区域 N_i 移至区域 N_j , $\Delta\tau_k(j)$ 增加 Q/J_k , 区域 N_i 死亡;当 $\eta_{ij} < 0$, 蚂蚁 i 继续在区域 N_i 搜索。

3 基于元胞蚁群算法的航路规划

应用元胞蚁群算法进行航路规划的基本思想是:蚁群算法搜索完成一次迭代得到最优解之后,应用元胞自动机原理,单独对此最优解进行元胞更新操作,让其跳出局部极值;元胞更新操作完毕后,再进行蚁群搜索。

采用基于元胞蚁群算法在建立的数字元胞地图

上进行航路规划的算法步骤见图 4。

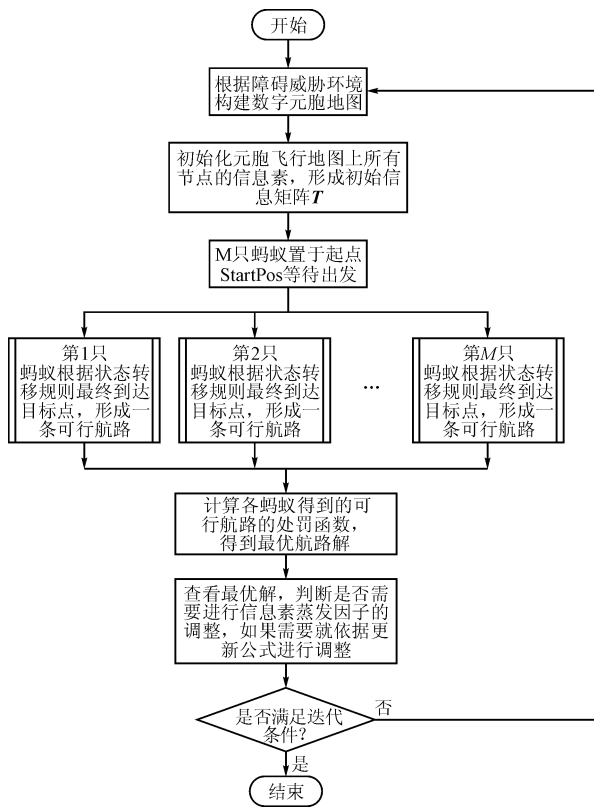


图 4 基于元胞蚁群算法航路规划流程图

Fig. 4 Flow chart of path planning based on cellular ant colony algorithm

4 仿真与分析

为了验证基于元胞蚁群的航路规划算法对于无人机在城市楼宇空间的有效性,本文分别对 A-star 算法和基于元胞蚁群算法从不同层面进行了仿真验证对比。针对图 1 的城市楼宇环境,规划范围为 400×200 的城市空间,无人机速度为 2 m/s ,升限高度为 30 m 。蚁群算法的参数经实验确定为 $\alpha=3, \beta=2, Q=100$ 。首先启用了 100 只蚂蚁来进行航路规划,图 5 中红色曲线为基于元胞蚁群算法得到的航路。由仿真结果可见,针对不同高度的障碍,无人机可以选择合理的避障方式并安全经过任务点,到达终点,验证了本方法的可行性。

图 6 中蓝色曲线为基于传统的 A-star 全局规划算法为无人机在该环境中飞行时规划得到的航路,由仿真图可以看出该算法在无人机进入凹形障碍区域时很容易陷入局部“死区”而不能为无人机规划出安全的避障航路^[18],因此不满足密集环境中的障碍规避要求。这是因为 A-star 算法使用了启发式函数,使得无人机总在寻找全局最优的航路,当遇到凹形障碍时,必须放弃全局最优而搜索当前的局

部最优航路。

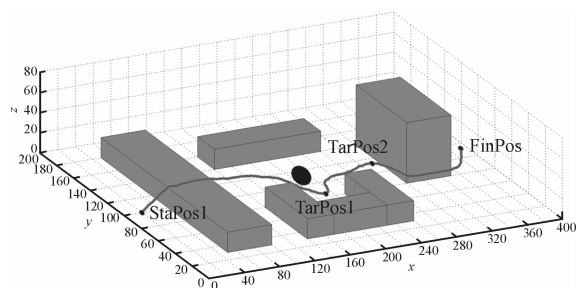


图 5 基于元胞蚁群算法的航路规划

Fig. 5 Path planning based on cellular ant colony algorithm

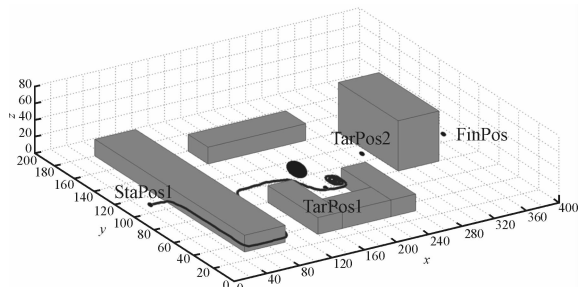


图 6 基于 A-star 算法的航路规划

Fig. 6 Path planning based on A-star algorithm

为了验证当蚁群数量不同时本文所提出的蚁群算法是否仍然有效,本文在图 1 所示的飞行环境中,分别对蚁群大小 25, 50, 75, 100 的情况进行了仿真实验。表 1 分别表示在 4 种种群规模下,无人机从起点开始,经过任务点 1、2 所需要的时间 t_1 和 t_2 及到达终点所需要的时间 t_3 。

表 1 不同蚁群规模比较

Tab. 1 Comparison between different scale of ant colony

时间	蚁群规模			
	25	50	75	100
t_1/s	474	342	317	270
t_2/s	690	613	524	480
t_3/s	869	778	683	591

由上表可见,元胞蚁群算法对于不同的种群规模,均可以为无人机规划出航路,但是随着蚁群规模增大,规划出来的航路越优,并且无人机的飞行时间随之减少。

5 结语

本文针对无人机在城市楼宇等复杂环境中的航路规划问题,建立相应的数字元胞地图,并在元胞蚁群算法的基础上引入航路罚函数的概念,为解决该问题提供了新的思路。由于数字元胞机的特性使所有元胞状态量同步进行更新,即各元胞状态量是并

行进行的,且由于元胞状态量的更新值依靠其邻居信息,使算法计算时间大大减少,因此有效地满足了飞机在复杂城市环境中航路规划的安全要求。

但由于无人机在其他应用如作战中将面对更加复杂的环境障碍、威胁,特别是对于动态威胁,本文所提方法的适应性将受限,因此今后将需要更加深入地研究如何解决这些新的问题。

参考文献(References):

- [1] MILLAR R J. An Artificial Intelligence Based Framework for Planning. Air Launched Cruise Missile Missions [R]. AD-A154466, 1986.
- [2] JUDD K B, MCLAIN T W. Spline Based Path Planning for Unmanned Air Vehicles [C]//Proceedings of Guidance, Navigation and Control Conference. AIAA, 2011: 1182-1190.
- [3] BEARD R, BEARD R W, QUIGLEY M, et al. Autonomous Vehicle Technologies for Small Fixed-Wing UAV [J]. Journal of Aerospace Computing, Information and Communications, 2005, 1(2): 92-108.
- [4] REN J, UAO X U, ZHAO H H. Path Re-Planning Decision-Making Model for UAV Based on Target State Estimate [J]. Control and Decision, 2009, 24(7): 1033-1037.
- [5] 王树磊,魏瑞轩,沈东,等.面向航路规划的Laguerre图构造算法[J].系统工程与电子技术, 2013, 35(3): 552-556.
WANG S L, WEI R X, SHEN D, et al. Laguerre Diagram Construction Algorithm for Path Planning [J]. Systems Engineering and Electronics, 2013, 35(3): 552-556. (in Chinese)
- [6] SZCZERBA R J, GALKOWSKI P, GLICKSTEIN I S, et al. Robust Algorithms for Real-Time Route Planning [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2000, 36(3), 869-878.
- [7] YE W, MA D W, FAN H D. Algorithm for Low Altitude Penetration Aircraft Path Planning with Improved Ant Colony Algorithm [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2005, 18(4): 304-309.
- [8] 刘新,周成平,丁明跃.无人机快速航迹规划算法[J].华中科技大学学报(自然科学版), 2011, 39(4): 45-48.
LIU X, ZHOU C P, DING M Y. Efficient Path Planning Algorithm for UAV [J]. J Huazhong Univ of Sci & Tech (Natural Science Edition), 2011, 39(4): 45-48. (in Chinese)
- [9] YANG S X, LUO C. A Neural Network Approach to Complete Coverage Path Planning [J]. IEEE Trans On Systems, Man and Cybernetics, 2004, 34(1): 718-725.

- [10] WU J X, WANG J. Path Planning and Tracking for Vehicle Parallel Parking based on Preview Bp Neural Network PID Controller [J]. Transactions of Tianjin University, 2015, 21(3): 199-208.
- [11] FU Z, ZHAO Y Z. Path Planning of the Robot Assembly Based on Voronoi Diagram [J]. Journal of Harbin Institute of Technology (New Series), 2008, 15(1): 39-44.
- [12] 周成平,陈前洋,秦筱械.基于稀疏A*算法的三维航迹并行规划算法[J].华中科技大学学报(自然科学版), 2005, 33(5): 42-45.
ZHOU C P, CHEN Q Y, QIN X X. Parallel Algorithm of 3D Route Planning Based on the Sparse A* Algorithm [J]. J Huazhong Univ of Sci & Tech (Natural Science Edition), 2005, 33(5): 42-45. (in Chinese)
- [13] GAO X G. UAV path planning based on bidirectional sparse A* search algorithm [J]. Intelligent Computation Technology and Automation, 2010, 3: 1106-1109.
- [14] 范洪达,叶文.基于元胞自动机的飞机低空突防航路动态优化[J].飞行力学, 2004, 22(2): 69-73.
FAN H D, YE W. Low Altitude Penetration Route Real-Time Planning of the Plane Based on Cellular Automata [J]. Flight Dynamics, 2004, 22(2): 69-73. (in Chinese)
- [15] MARCHESE F. Cellular Automata in Robot Path Planning [C]// IEEE Proceedings of EUROBOT, 1996: 116-125.
- [16] BEHRING C, BRACHO M, CASTRO M, et al. An Algorithm For robot Path Planning with Cellular Automata [C]//Proceedings of the Fourth International Conference on Cellular Automata for Research and Industry ACRE2000 in Theoretical and Practical Issues on Cellular Automata. 2000: 11-19.
- [17] 朱刚,马良,高岩.元胞蚁群算法的收敛性分析[J].系统仿真学报, 2007, 19(7): 1442-1444.
ZHU G, MA L, GAO Y. Convergence Analysis of Cellular Ant Algorithm [J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(7): 1442-1444. (in Chinese)
- [18] 张启瑞,魏瑞轩,何仁珂,等.城市密集不规则障碍空间无人机航路规划[J].控制理论与用, 2015, 32(10): 1407-1413.
ZHANG Q R, WEI R X, HE R K, et al. Path Planning for Unmanned Aerial Vehicle in Urban Space Crowded with Irregular Obstacles [J]. Control Theory & Application. 2015, 32(10): 1407-1413. (in Chinese)