

# 煤矿探测机器人空间建模分析及避障路径规划

李 晓 鹏

(中国煤炭科工集团西安研究院 钻探技术研究所 陕西 西安 710077)

**摘 要:** 为了使煤矿探测机器人在路径规划过程中更好地理解环境信息,提出了一种栅格拓扑地图作为表达煤矿空间中局部环境障碍物地图模型,使其既能表达度量信息又能体现位置关系信息。在该地图模型中,利用基于主动生长元的栅格 Voronoi 图可行路径网络生成方法,机器人可以规划出一条既可以迅速到达目标,又可以保证机器人避碰的行驶路径。试验表明,该地图模型可以使煤矿探测机器人迅速建立起煤矿空间障碍物地图,并能够以较高的规划效率解决在局部路径规划中常见的规划陷阱问题。

**关键词:** 探测机器人; 路径规划; 障碍物; 地图模型; Voronoi 图

**中图分类号:** TP242 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2013)01-0102-04

## Spatial Modelling Analysis and Obstacle Avoidance Access Planning of Mine Detection Robot

LI Xiao-peng

(Research Institute of Drilling and Detection Technology, Xi'an Research Institute, China Coal Technology and Engineering Group Corporation Ltd., Xi'an 710077, China)

**Abstract:** In order to make a mine detection robot better understand the environment information in the access planning process, a grid-topologic map was provided to be a map model to express the local environment obstacle in the mine space and could express the metric information and show the location relationship information. In the map model based on active growth element, a feasible access network generation method of the grid Voronoi map applied, the robot could not only plan an access to rapidly reach the target, but also could ensure a collision avoidance driving access of the robot. The experiment showed that the map model could make the mine detection robot rapidly establish the obstacle map of mine space and the conventional planning trap problem in the local access planning which could be solved with a high planning efficiency.

**Key words:** detection robot; access planning; obstacle; map model; Voronoi drawing

## 0 引 言

在煤矿环境中,煤矿探测机器人的行驶空间具有障碍物种类和数量较多且形状不规则,缺乏有效特征供机器人进行识别,巷道空间狭窄但深远等特点。煤矿探测机器人的路径规划行为是基于分析煤矿空间中障碍物信息而做出的路径规划决策。对障碍物信息的处理与分析实质上是对环境地图模型的建立和分析的过程。机器人得到的障碍物知识越多,对当前地图模型分析得越充分,在当前势态中的路径规划越有利。但是,当机器人获取的信息过多

时,处理这些信息会给机器人带来很沉重的运算负担,导致机器人决策效率低下与行动迟缓。因此,研究一种能够在煤矿环境内使煤矿探测机器人迅速建立地图模型并依此做出路径规划的煤矿空间建模与分析方法有着积极的实用意义。在未知环境中,移动机器人常用的空间建模方法有:基于度量信息的空间分解地图<sup>[1]</sup>、几何特征地图<sup>[2]</sup>和拓扑地图<sup>[3]</sup>。栅格地图是空间分解地图种类中应用最成功、最广泛的一种空间环境模型形式,但随着环境规模的变大,地图建模计算负担也随之增加。几何特征地图则无法从复杂的煤矿环境中提取出规律特征。拓扑

收稿日期:2012-09-15;责任编辑:张 扬

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50674075)

作者简介:李晓鹏(1980—),男,黑龙江大庆人,助理研究员,博士。Tel:13468851916 E-mail:33679507@qq.com

引用格式:李晓鹏.煤矿探测机器人空间建模分析及避障路径规划[J].煤炭科学技术,2013,41(1):102-105.

模型利用节点与连接节点的边的关系拓扑图进行路径规划, 适合于大范围的空间环境使用, 但由于缺少环境的细节表达, 因而难以实现机器人的精确动作规划<sup>[4]</sup>。在煤矿巷道环境中运行的煤矿探测机器人要求对障碍物的距离信息在地图上体现, 同时还要求在地图上明确表达机器人与障碍物的拓扑关系, 采用单一的地图模型无法清晰表达煤矿探测机器人所在的煤矿环境。笔者针对煤矿环境特点, 提出了煤矿探测机器人在未知障碍环境中的栅格拓扑地图模型及基于主动生长元的栅格 Voronoi 图分析方法, 可以对大范围的煤矿环境进行滚动式建模, 并在比较复杂的环境中作出有效的路径分析, 保证机器人正常行驶。

### 1 煤矿环境信息获取

在试验平台上选用 URG-04LX 型机器人专用暗光条件激光雷达, 根据雷达最大探测距离处的机器人最小通过宽度, 可计算出角度分辨率为  $3.52^\circ$ , 激光雷达需在  $240^\circ$  范围内的 69 个方向上采集 69 个距离数据, 剔除其他无用数据。这样机器人会获得一个以自身为中心, 由不同方向上障碍物距离信息构成的扇形平面, 如图 1 所示。

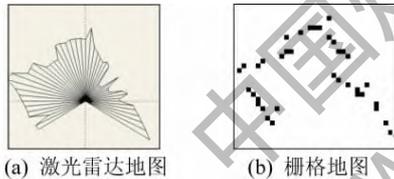


图 1 机器人栅格地图的建立

根据当前机器人的位置  $(X, Y)$  与航向角  $\gamma$ , 可将当前窗口某方向上障碍物的距离信息  $(X_o, Y_o)$  在局部环境中的转换公式:

$$\begin{cases} X_o = X + X \cos(\gamma + \varphi) \\ Y_o = Y + Y \sin(\gamma + \varphi) \end{cases}$$

式中:  $\varphi = 3.52^\circ n$ , 为第  $n$  个方向与机器人行驶方向夹角, 可通过与激光雷达  $0^\circ$  数据的夹角计算得出。

### 2 地图模型建立

对于煤矿探测机器人来说, 在煤矿井下这种大规模环境使用栅格地图时, 应控制栅格地图的规模。对于建立好的栅格地图, 煤矿探测机器人需要对障碍物与自身的相对位置进行分析, 这就需要对地图预处理、分析及提取路径。对地图的处理过程采用拓扑方法, 可以有效地利用拓扑描述对全局环境的

把握, 保证全局过程的连续性, 并且可以发挥栅格地图局部区域几何描述高精确性的特点<sup>[5]</sup>。建立栅格拓扑地图过程如下。

首先建立栅格地图的度量信息。定义栅格地图的分辨率, 即单个栅格的大小为  $g \times g (g > 0)$ ,  $g$  为栅格相对于实际空间大小的度量值。局部区域栅格地图大小为  $w \times l, w, l \in \mathbb{N}$ , 分别表示地图横纵坐标最大值。任意栅格坐标表示为  $(x, y)$ , 其中  $0 < x < w, 0 < y < l, x, y \in \mathbb{N}$ , 单个栅格的赋值  $z > 0, z \in \mathbb{N}$ 。定义任意 2 个栅格  $(p_1, p_2)$  的距离为 4-邻接栅格距离, 计算公式见式 (1)。这种栅格距离与欧几里德栅格距离在栅格图形上的距离表示不同, 该栅格距离均为非负整数, 在栅格地图的计算中更容易表达。

$$d(p_1, p_2) = |x_1 - x_2| + |y_1 - y_2| \quad (1)$$

其中:  $p_1$  坐标为  $(x_1, y_1)$ ,  $p_2$  坐标为  $(x_2, y_2)$ 。定义栅格地图上的栅格拓扑关系, 2 个栅格  $(p_1, p_2)$  之间的拓扑关系有相邻和相离 2 种。

栅格的相邻关系可从度量的角度定义为  $[(x_1 = x_2) \wedge (y_1 \neq y_2)] \vee [(x_1 \neq x_2) \wedge (y_1 = y_2)]$ 。栅格的相离关系可定义为  $(x_1 \neq x_2) \wedge (y_1 \neq y_2)$ 。

显而易见, 通过以上的定义, 栅格地图中存在点和块 2 种基本几何元素。可以进一步定义膨胀与腐蚀 2 类栅格拓扑运算。膨胀运算可定义为: 设被膨胀栅格  $p$  的值为  $z$ , 则通过膨胀运算, 使得该栅格的 4-邻接栅格值均替换为  $z$ , 即

$$\{p_{(x-1, y)}, p_{(x+1, y)}, p_{(x, y+1)}, p_{(x, y-1)}\} = z$$

腐蚀运算为膨胀运算的反过程, 通过腐蚀运算, 使得使得腐蚀核心栅格的 4-邻接栅格值均不等于  $z$ , 即  $\{p_{(x-1, y)}, p_{(x+1, y)}, p_{(x, y+1)}, p_{(x, y-1)}\} \neq z$ 。将激光雷达获取的障碍信息通过取整函数转换为障碍物栅格坐标  $(X_o^r, Y_o^r)$ , 见式 (2)。图 1a 所示障碍物距离信息即可转换为如图 1b 所示栅格图形。

$$\begin{cases} X_o^r = \text{ceil}(X_o/g) \\ Y_o^r = \text{ceil}(Y_o/g) \end{cases}$$

当机器人在工作区域内行走时, 会不断获取周围环境信息, 栅格地图也会随着机器人工作空间的深入而不断拓展, 这势必会由于地图规模过大而导致计算资源不足。为解决这一问题, 应人为控制栅格地图规模。以机器人中心, 在周边范围的矩形区域内建立栅格地图, 超出此范围的环境信息则不反映在地图模型中。随着机器人的行走, 该地图模型是动态变化的。地图范围大小应结合具体煤矿工作区域的宽窄而定。

### 3 障碍物地图的拓扑分析

对于建立好的局部环境栅格拓扑地图,煤矿探测机器人需要在这个地图上分析出当前环境中面向全局目标的机器人可行驶路径。

1) 在进行分析之前需要对栅格地图上的障碍信息值进行膨胀运算及障碍物之间的分割运算。障碍物的膨胀运算首先可以使障碍物与机器人行驶路径之间有一定的缓冲距离,这段距离可以让机器人与障碍物保持在安全的防撞区域内;另一方面,也可以使一些没有连续采集到的同一个障碍物的信息随着膨胀的过程在地图上变成连接的一体障碍,提高了离散数据在栅格地图上对障碍物的表达准确度。

2) 为对膨胀后的栅格地图的障碍物进行分割并赋值。障碍物图块的赋值按照地图上搜索到的障碍物图块的顺序进行,赋值为  $m, m \in \mathbb{N}$ 。对于每一个障碍图块内部的搜索赋值采用深度优先搜索算法 DFS (Depth First Search) 进行图块内部栅格遍历并赋值。

3) 要对分割好的地图进行基于栅格主动生长 Voronoi 图的路径分析。传统 Voronoi 图是由一组连接两邻点直线的垂直平分线组成的连续多边形组成。利用 Voronoi 图来进行机器人路径规划时,机器人沿 Voronoi 边行走,距离两边障碍物均为最远,机器人与两边障碍物发生碰撞的可能性也是最小的。将传统连续空间的 Voronoi 图推广到离散的栅格地图中,利用障碍物栅格主动生长并连接的思想得到栅格地图的 Voronoi 边。

栅格主动生长的思想原理:在煤矿探测机器人的栅格拓扑地图上的每一个障碍物信息点可以看成原始的“种子”(称为核),它不断地向其周围等速生长,占领其周围的未赋值栅格(称为胚),直到遇见非自由栅格为止,当所有的自由空间均被填满,栅格 Voronoi 图自然生成,原理如图 2 所示。

基于以上对栅格 Voronoi 图的生成原理的分析,基于主动生长的局部栅格拓扑地图的障碍物 Voronoi 图生成过程如下。步骤 1: 初始化,设置胚元

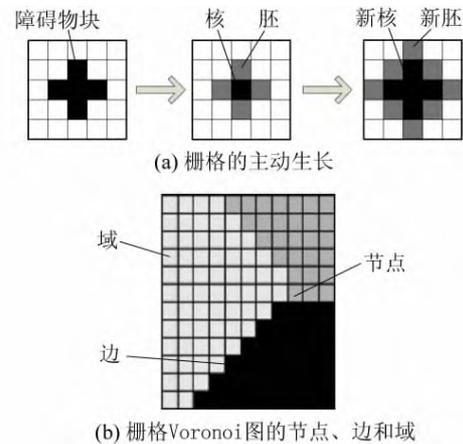


图2 栅格 Voronoi 图原理

素表  $D$  和核元素表  $S$  为空集。步骤 2: 将搜索邻接栅格值全部不为 0 的障碍物栅格,并放入  $S$ ,即为核。步骤 3: 搜索全部障碍物栅格的邻接栅格值是否有为 0 的邻接栅格,如果有,则将其放入  $D$  中,即胚。步骤 4: 胚生长,将  $D$  中的胚的邻接栅格值全部置为胚值,并将  $D$  中的胚放入  $S$ 。步骤 5: 检查新生长的邻接栅格值在生长过程中是否变化,如果变化,将其放入  $D$  中,同时剔除原胚元素,更新  $D$  中胚。步骤 6: 检查  $S$  中是否有空位栅格,如果有,转向步骤 3,如果没有,输出  $S$ 。步骤 7: 通过比较 Voronoi 图中各栅格元素的邻接栅格的元素值,可以提取出 Voronoi 边和节点。

## 4 试验

### 4.1 实验室环境中的建模与分析

实验室环境为  $5 \text{ m} \times 8 \text{ m}$  的空间,如图 3a 所示,该空间宽度大于煤矿巷道空间。试验机器人将在此空间中游历,并将利用障碍物信息进行分析,得到当前环境的可行驶路径网络。试验中利用  $50 \times 80$  栅格地图表现的栅格拓扑地图模型,分辨率为  $0.1 \text{ m}$ 。

图 3b 是经过膨胀后的实验室空间栅格地图。将其进行分割后,用不同的灰度值可以显示出分割后的障碍物图,如图 3c 所示;将其进行 Voronoi 分割,可得 Voronoi 图,如图 3d 所示。将图 3d 进行提

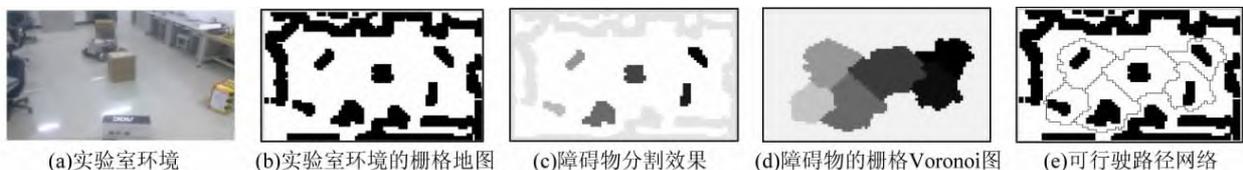


图3 实验室环境的地图建模与分析

取,可以得到在当前游历过空间的可行路径网络,如图 3e 所示。此试验中,机器人采用频率 2.4GHz 的 CPU 及 Windows2000 系统,模型地图的更新平均时间是 0.124 s, Voronoi 图分析时间为 1.299 s,可见该地图模型建立与分析的效率较高。

#### 4.2 路径规划仿真试验

基于即时信息的反应式路径规划具有实时性好、鲁棒性高和运动精确等优点,但由于缺乏全局观和全局信息这种先天不足,使其不能应用于复杂和大规模环境<sup>[6-7]</sup>,其中一个表现就是会出现“规划陷阱”现象<sup>[8]</sup>,而在反应式规划中引入基于对游历信息分析的慎思式规划是解决这个问题的方法之

一<sup>[9]</sup>。笔者所提出的空间建模与分析方法,为慎思式规划提供了有效的空间模型。在仿真试验中可以发现:人为给机器人设置复杂障碍,机器人会发生落入“规划陷阱”现象(图 4a),此时对机器人游历过的地图进行分析(图 4b),得到此时机器人的陷阱逃逸目标和最优路径(图 4c),其中  $a$  为逃逸起始点, $b$  为逃逸路径, $c$  为逃逸目标。机器人可沿最优路径向逃逸目标进行逃逸,并摆脱陷阱(图 4d)。图 4e 所示的仿真试验说明采用此种环境分析方法的规划算法使机器人在面对模仿煤矿巷道的仿真狭窄复杂环境(仿真试验空间范围 55 m × 75 m)中可以顺利抵达预定目标。



图 4 基于栅格拓扑地图的慎思式路径规划算法及仿真

## 5 结 语

提出了一种煤矿探测机器人在路径规划过程中对煤矿空间建模与分析方法。该方法利用在栅格拓扑地图上的 Voronoi 图分析,可以对类似煤矿的大空间进行建模与分析,得到机器人在游历过的局部空间的可行路径网络。此方法为机器人的慎思规划提供了地图模型基础。试验证明该方法在煤矿探测机器人面对煤矿巷道仿真环境具有良好的适应性和较高的规划效率。在下一步的研究工作中,可以将这种方法进一步推广到三维空间中。

#### 参考文献:

[1] Elfes A. Using Occupancy Grids for Mobile Robot Perception and Navigation [J]. Computer, 1989, 22(6): 46-57.  
 [2] Stephen S, David L, Jim L. Local and Global Localization for Mobile Robots Using Visual Landmarks [C]//Proceedings 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Maui, USA, 2001: 735-738.  
 [3] Kuipers B, Byun Y T. A Robot Detection and Mapping Strategy Based on a Semantic Hierarchy of Spatial Representations [J]. Robotics and Autonomous Systems, 1991, 8(1/2): 47-63.

[4] Thrun S, Gutmann J S, Fox D, et al. Integrating Topological and Metric Maps for Mobile Robot Navigation: a Statistical Approach [C]//Proceedings of the 1998 National Conference on Artificial Intelligence, Madison, USA, 1998: 21-71.  
 [5] 庄严, 徐晓东, 王伟. 移动机器人几何-拓扑混合地图的构建及自定位研究[J]. 控制与决策, 2005(7): 815-822.  
 [6] Canny J F. A Voronoi Method for the Piano-movers Problem [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, St. Louis, MO, 1985: 530-535.  
 [7] Park M G, Jeon J H, Leem C. Obstacle Avoidance for Mobile Robots Using Artificial Potential Field Approach with Simulated Annealing [J]. IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2001(3): 1530-1535.  
 [8] 王会丽, 傅卫平, 方宗德. 基于改进的势场函数的移动机器人路径规划[J]. 机床与液压, 2002(6): 67-71.  
 [9] Bornstein J, Koren Y. Real-time Obstacle Avoidance for Fast Mobile Robots [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1991, 19(5): 1179-1187.  
 [10] 张军辉, 李晓鹏. 基于多传感器的煤矿探测机器人控制系统研究[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(7): 89-92.  
 [11] 李晓鹏. 煤矿探测机器人姿态控制与局部路径规划研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2011.  
 [12] 周巍. 煤矿井下搜救探测机器人的路径规划及轨迹跟踪控制研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2011.