

# 基于改进 Voronoi 图的移动机器人在线路径规划

吴海彬, 林 宜

(福州大学 机械工程及自动化学院, 福建 福州 350002)

**摘要:** 针对移动机器人在部分环境信息已知下的路径规划问题, 运用 Voronoi 图理论及动态路径最优算法( $D^*$  算法)理论, 研究了一种基于传感器信息的移动机器人在线路径规划的方法. 该方法利用现有的已知环境信息离线生成路图, 并根据起点与终点的位置规划出一条无碰撞的全局最优路径, 然后移动机器人沿着最优路径前进, 安装在机器人上的传感器不断地探测环境新信息以在线完成路图的重构及路径的重规划, 实时搜索一条全局最优路径. 最后, 通过在自制的小车平台上的实验证明方法的可行性.

**关键词:** 移动机器人; Voronoi 图论; 路图重构;  $D^*$  算法

中图分类号: TP 24

文献标识码: A

文章编号: 1672-5581(2007)01-0117-05

## Online path planning of mobile robots based on improved Voronoi diagram

WU Hai-bin, LIN Yi

(College of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

**Abstract:** Pertaining to partially-sensored environment information, an on-line path planning is proposed for mobile robots using the Voronoi diagram and dynamic  $D^*$  algorithm. Accordingly, the road map is configured based on the acquired environment information. In this manner, a globally-optimal non-collision path is obtained between the origin and terminal. Afterwards, the road map, together with the path, is reconfigured in terms of the real-time environment information updated. Eventually, this approach is proven feasible by the means of a robot car testing platform.

**Key words:** mobile robot; Voronoi diagram; road map reconfiguration;  $D^*$  algorithm

目前, 在环境信息完全已知的情况下进行路径规划已经很难满足实际应用的需要了, 如何在环境信息部分已知或者环境信息未知的情况下进行导航控制就成为了研究热点<sup>[1, 2]</sup>, 但沿未形成统一和完善的体系<sup>[3]</sup>. 基于部分环境已知的在线路径规划通常可以采用两种策略, 第一种是不更新路图直接利用传感器信息绕过障碍物<sup>[4]</sup>, 第二种是利用传感器信息更新路图并重规划路径<sup>[5]</sup>. 第一种策略应用在障碍物不密集的环境中规划效率比较快, 但如果环境中的障碍物比较密集, 采用第一种策略绕过障碍物较第二种耗时长而且缺少学习能力, 显得智能水平不够.

本文研究的路径规划方法采用第二种策略. 这种策略有两个重要的组成部分: 路图重构和路径重规划, 而完成这两个部分任务的效率直接影响到在线路径规划的好坏. 如果路图重构效率太慢或者路径重规划效率太慢, 移动机器人无法及时地采取下一正确步骤, 使找到的最优路径失去其“最优”的意义. 研究过程发现, 基于 Voronoi 图的增量构图方法可以与动态搜索算法  $D^*$  算法很好结合并运用在在线路径规划

收稿日期: 2006-12-20

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2006J0025); 福州大学科技发展基金资助项目(XJJ-0501)

作者简介: 吴海彬(1973-), 男, 副教授, 工学博士, E-mail: skuiphon@sohu.com

上,并能有效地解决在线路径问题.本文基于这个发现,研究了一种基于传感器信息的移动机器人在线路径规划的方法.

# 1 环境路图的构建

基于 Voronoi 的环境路图最大的优点是路图中的路径是 Voronoi 边,而 Voronoi 边是障碍物离散中心的中垂线,这样能保证机器人在运行过程中最大程度地远离障碍物.在运用 Voronoi 图理论进行环境路图的创建时,通常先根据移动机器人的大小对障碍物进行“膨化”处理后把机器人退化成一个质点,再提取障碍物的离散中心作为 Voronoi 建模的生成元,以离散中心为圆心作“膨化”的障碍物的外接圆作为障碍物区域.生成的路图如图 1 示.显然,这样的处理忽略了障碍物的大小及形状,所构建的环境地图不能很好地表达出障碍物信息,浪费许多可行区域,造成了路图构建的低效性.该处理方法在大环境下还可用,但在障碍物比较密的环境中,就显得不适用了.因此,为了能在环境地图中较好地表达出障碍物的信息,本文采取的处理不是简单地提取障碍物的离散中心作为生成元,而是根据障碍物形状大小在障碍物的内部提取若干个点作为建模的生成元,再以这些生成元作圆心作若干个圆包络障碍物区域.生成的路图如图 2 所示.对比图 1 与图 2,可知本文所构建的路图包含了更准确的障碍物信息及可行路径.

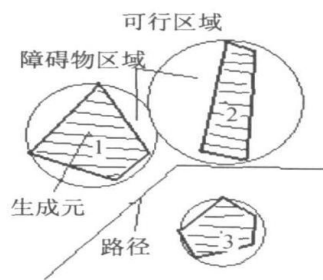


图 1 改进前路图  
Fig. 1 Roadmap before improved

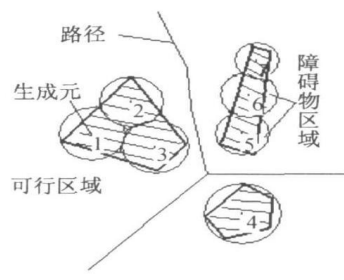


图 2 改进后路图  
Fig. 2 Roadmap after improved

# 2 环境路图的重构

由于初始的环境路图是利用有限的环境信息构建起来的,显然是无法预测路图的路径是否被未知的障碍物所阻挡,所以移动机器人在运行的过程中必须依靠自身的传感器系统实时对路径信息进行探测以实时更新环境路图.一方面,传感器系统能否准确地获得障碍物的信息直接影响到环境路图更新的准确性.另一方面,找到一种高效的环境路图重构的方法也是非常关键.如果移动机器人每探测到一个障碍物都要重新生成路图,势必加大控制器的数据处理器,降低机器人的反应能力.利用 Voronoi 图的增量构造法可以很好地解决这个问题,这也是本文采用 Voronoi 图来为环境建模的重要原因.因此,本文利用文献 [6] 给出的 Voronoi 图的构造原理提出一种路图重构方法.

- 步骤 1 利用传感器所获得的障碍物信息,提取障碍物上的若干点作为新增添的 Voronoi 生成元.
  - 步骤 2 由于每个路径节点距其相邻的三个生成元的距离  $D_{\min}$  最短.因此,引入新生成元后,如果某个路径节点距新生成元的距离  $D < D_{\min}$ ,那么该路径节点就不再是新环境路图中的节点.在新环境路图中要全部删除这种路径节点.
  - 步骤 3 由步骤 2 得到的要删除掉的路径节点确定出受影响的生成元.
  - 步骤 4 把受影响的生成元与新加入的生成元局部重新生成 Voronoi 图路.
  - 步骤 5 把局部 Voronoi 图路联入全局 Voronoi 图路完成路图重构,即完成路图的更新.
- 重构前后对比如图 3 所示,可以看出,利用路图重构机制,只要在受影响的几个 Voronoi 区域内进行局部的区域的重划分就可以完成图路的更新.

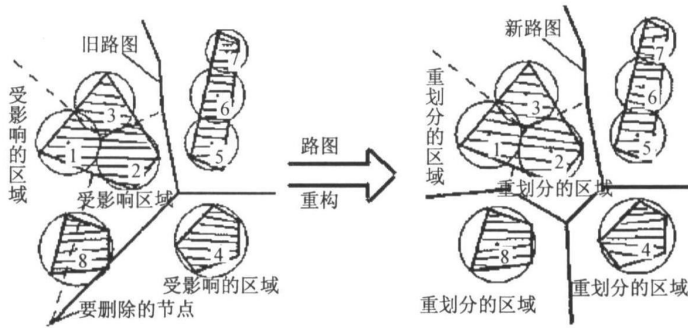


图 3 路图重构  
Fig.3 Roadmap rebuild

在设计路图重构机制的算法程序时, 还要注意内存空间的合理使用. 由于在编写程序时需要开辟内存空间来存储节点的信息, 如节点位置、节点关系等, 而在路图重构的过程中涉及到许多节点增添、删除问题, 相应地就涉及到了许多内存的开辟、释放及整合问题, 因此, 如果没有很好地考虑内存的分配与再利用问题, 会造成内存的浪费, 加大控制器的运算工作量, 导致系统反应的迟钝.

3  $D^*$  路径搜索算法

Anthony Stentz 针对部分环境信息已知的路径规划问题, 在文献[ 7] 中提出了  $D^*$  算法, 解决了基于栅格环境地图的两个状态位置之间的最优路径动态搜索的问题. 所谓的  $D^*$  算法就是动态最优路径搜索算法, 它主要由弧代价的传播 PROCESS-STATE() 与弧代价的修改 MODIFY-COST() 两部分组成. PROCESS-STATE() 完成弧代价的传播及最优路径搜索两部分工作. MODIFY-COST() 完成弧代价的修改工作. 移动机器人沿着 PROCESS-STATE() 最初确定的最优路径行走, 当在某状态位置( 移动机器人当前状态位置) 发现其与一个邻居之间存在障碍物时, 就修改它与该邻居之间的弧代价为无穷大( 表示之间存在障碍物), 此时再用 PROCESS-STATE() 调整当前状态位置的弧代价值及传播关系, 并修改与当前状态位置有传播关系的所有邻居及其所有子邻居的弧代价及其传播关系, 最后得到一条从目标状态位置到当前状态位置的最优传播关系.

本文运用  $D^*$  算法的思想构建路径重规划机制来解决基于 Voronoi 环境路图最优路径的动态搜索问题. 下面详细论述路径重规划的步骤.

人们知道, 基于 Voronoi 的环境路图是由一系列的节点与直线路径构成的, 本重规划机制把“节点”当作栅格环境地图中的“状态位置”, 但基于 Voronoi 的环境路图中的“当前节点”并不是移动机器人在路图中的实际位置而是沿用“当前状态位置”的含义. 本机制把直线路径的长度作为弧代价, 同时, 把起点与终点也分别连入环境路图<sup>[ 8]</sup>.

- 步骤 1 在初始的环境路图中, 设置所有节点路径代价及传播关系为空.
- 步骤 2 设置终点路径代价为 0, 利用 PROCESS-STATE() 从终点开始向其邻居节点传播路径代价并确定传播关系, 再邻居节点向其子邻居节点传播路径代价并确定传播关系. 其中, 各节点存储其最小路径代价及其传播关系.
- 步骤 3 当得到起点最小路径代价值传播停止. 此时找到一条从起点到终点的最优路径.
- 步骤 4 机器人由起点沿着最优路径向终点运行, 直到传感器探测到路径上的未知障碍物.
- 步骤 5 传感器系统对障碍物进行识别, 并提取障碍物上的若干点作为新生成元.
- 步骤 6 应用环境路图重构方法, 更新路图, 并设新节点路径代价为空.
- 步骤 7 为了有效地传播路径代价, 多次实验证明应取原最优路径节点中移动机器经过的未受影响的节点作为“当前节点”. 利用 PROCESS-STATE() 调整当前节点的路径代价及传播关系, 并修改与当前节点有传播关系的所有邻居节点及其所有子邻居节点的路径代价, 直到得到一条从终点到当前节点的新

最优路径.

步骤 8 与起点连入环境路图方式相似, 把移动机器人的当前状态位置连入环境路图.

步骤 9 找到新最优路径节点中与移动机器人当前状态位置最近的节点, 然后移动机器人运行到该最近节点, 接着再沿新最优路径向终点运行.

步骤 10 如果移动机器人在运行的过程中, 由传感器再一次探测到未知障碍物, 那么重复步骤 5 到步骤 9.

步骤 11 依次类推, 直到移动机器人到达终点.

4 仿真及实验

为了验证规划方法的正确性与可行性, 规划算法的程序用 VC++ 编写并仿真实现. 假定移动机器人半径等于 5 像素的圆, 移动机器人运行的环境为 500 像素×500 像素的方形区域, 在该区域上分布着若干个不同形状大小的已知及未知的障碍物, 如图 4. 仿真目标是: 在该运行环境下, 移动机器人能在给定的两点之间找到一条路程最短路径. 仿真过程: 规划算法首先根据已知的环境信息生成初始环境地图, 如图 5, 然后在给定的起点及终点之间生成一条初始最短路径, 接着移动机器人从起点沿着最短路径向终点运动, 如图 6, 当机器人碰到未知障碍物, 完成路图的重构及路径重规划并生成一条新最短路径, 如图 7, 机器人沿着新最短路径向终点靠近, 如图 8. 仿真结果: 经过多次不同运行环境下及不同起点终点的实验, 证明利用该规划算法确实能找到一条最短路径.

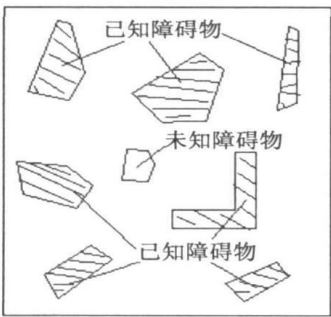


图 4 运行环境

Fig. 4 Running environment

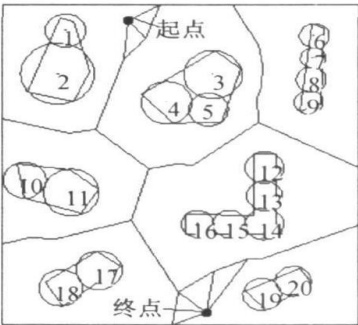


图 5 初始环境路图

Fig. 5 Initial roadmap

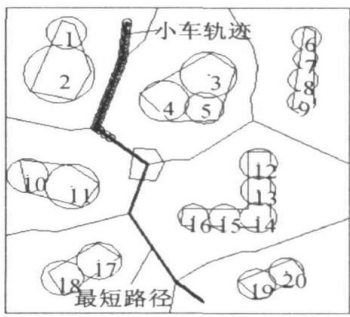


图 6 初始最短路径

Fig. 6 Initial shortest path

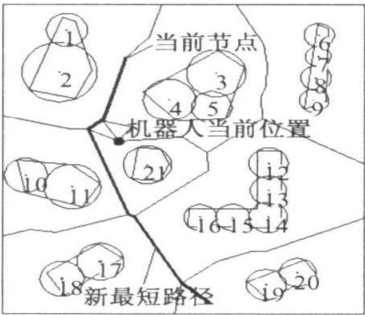


图 7 新环境路图及新最短路径

Fig. 7 New roadmap and new shortest path

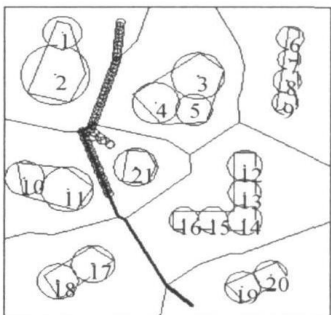


图 8 小车运行仿真轨迹

Fig. 8 Simulation trail of the car

为了更好地证明本规划方法的有效性及一定的实用性, 该算法在自制的移动机器人小车平台进行了实验. 小车的平台如图 9, 为典型的三轮式机器人, 两后轮单独驱动, 前轮为万向轮, 主要由主控制器 (TMS320LF2407DSP (Digital Signal Processing) 芯片) 模块、人机接口模块 (液晶屏及按键)、驱动电机及光电编码器、超声波传感器模块及无线通信 (CDMA) 模块组成. 由于实验条件的限制, 超声波模块无法获得障碍物具体的信息, 本文在实验时采取如下的处理: 当超声波检测到障碍物, 通过无线通信模块通知“工作

人员”,“工作人员”再把障碍物信息发送给小车.控制芯片的编程软件支持 C 语言编程,所以只要对数据类型及数学运算稍加改动,就可以把 VC++编写的程序移植到 DSP 程序中.

实验的环境为 10 m×10 m 的光滑地板,障碍物的设定参照仿真运行环境.实验发现小车确实都能够实时搜索出最短路径并向终点运动,且最短路径吻合仿真结果,如图 10.

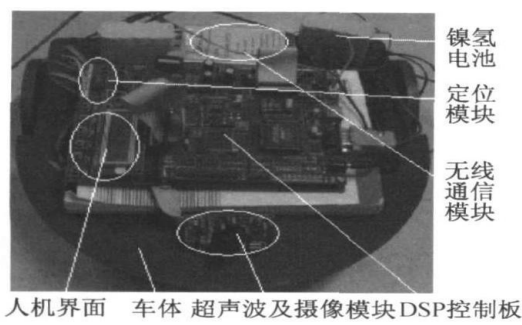


图 9 小车平台  
Fig. 9 Robust system

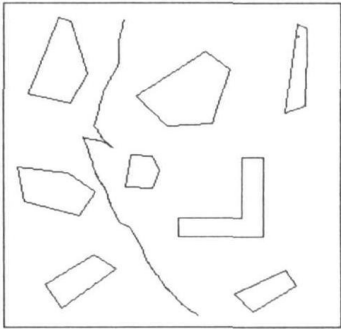


图 10 小车实际运行轨迹  
Fig. 10 Real trail of the car

5 结语

通过仿真及平台实验证明本文研究的规划方法能有效地解决在环境信息部分已知的情况下在线路径规划的问题.受限于实验条件,小车在实验过程中并不是通过自己的传感器来获取障碍物,但该规划还是有实际应用意义,例如在移动机器人高位安装一个摄像机,对其拍摄的障碍物图像进行处理,就可以获得障碍物的具体信息.因此,后续工作将在根据图像提取障碍物信息并重构障碍物方面作深入的研究.

参考文献:

[ 1 ] ZHANG C G, XI Y G. Robot rolling path planning based on locally detected information[ J ]. ACTA Automatica Sinica, 2003, 29( 1 ): 37—44.

[ 2 ] LAVALLE S M, KUFFNER J J. Randomized kinodynamic planning[ J ]. The International Journal of Robotics Research, 2001, 20( 5 ): 378—400.

[ 3 ] 蔡自兴, 贺汉根, 陈虹. 未知环境中移动机器人导航控制研究的若干问题[ J ]. 控制与决策, 2002, 17( 4 ): 285—390.

CAI Zixing, HE Hangen, CHEN Hong. Some issues for mobile robots navigation under unknown environments[ J ]. Control and Decision, 2002, 17( 4 ): 285—390.

[ 4 ] 李保国, 宗光华. 未知环境中移动机器人实时导航与避障的分层模糊控制[ J ]. 机器人, 2005, 27( 6 ): 481—485.

LI Baoguo, ZONG Guanghua. A hierarchical fuzzy controller for realtime mobile robot navigation in unknown environments[ J ]. ROBOT, 2005, 27( 6 ): 481—485.

[ 5 ] ERSSON T, HU X M. Path planning and navigation of mobile robots in unknown environments[ C ] // The IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems Maui, Hawaii USA, Oct. 29—Nov. 03, 2001; Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems. [ 2006—10—18 ]. <http://www.math.kth.se/~hu/paper/iros36.pdf>.

[ 6 ] 周培德. 计算几何——算法分析与设计[ M ]. 北京: 清华大学出版社, 2000.

ZHOU Peide. Computational geometry: algorithm analysis and design[ M ]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.

[ 7 ] STENTZ A. Optimal and efficient path planning for partially-known environments[ C ] // IEEE. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation 1994. Washington D C: IEEE Computer Society Press, 1994: 3310—3317.

[ 8 ] LIN Yi, WU Haibin. The research on optimization of path planning and searching strategy based on Voronoi graph[ C ] // YAN Shirong. The 3rd China-Japan Conference on Mechatronics 2006. Fuzhou: Fujian Science & Technology Publishing House, 2006: 76—80.