

DOI: 10.7652/xjtuxb201310010

# 使用三维栅格地图的移动机器人路径规划

张彪<sup>1</sup>, 曹其新<sup>1,2</sup>, 王雯珊<sup>1</sup>

(1. 上海交通大学机器人研究所, 200240, 上海; 2. 上海交通大学机械系统与振动国家重点实验室, 200240, 上海)

**摘要:** 针对移动机器人使用三维地图进行路径规划的问题, 研究了使用三维栅格地图的路径规划算法。该算法将装载三维激光扫描仪的移动机器人得到的三维点云转换成为八叉树结构的三维栅格地图; 扩展了 D\* 算法使之考虑机器人的尺寸, 检测每种位姿状态下是否与环境发生碰撞, 生成多条可行路径可以在栅格地图中直接生成机器人的运动轨迹, 保证运动过程中机器人自身及物体的安全。实验结果表明: 该算法不需要对地图具有先验认识, 并且考虑了机器人的实际尺寸, 具有较强的可靠性和实用性, 已经在真实环境中进行了实验。

**关键词:** 路径规划; 三维栅格地图; 移动机器人; 三维点云

**中图分类号:** TP24 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)10-0057-05

## An Algorithm for Mobile Robot Path Planning Based on 3D Grid Map

ZHANG Biao<sup>1</sup>, CAO Qixin<sup>1,2</sup>, WANG Wenshan<sup>1</sup>

(1. Research Institute of Robotics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

2. State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** A novel planning method is proposed by using a 3D grid map to tackle the path planning problem for mobile robots with 3D grid map. The 3D grid map is obtained through transforming the point cloud collected by mobile robot equipped with 3D LRF into an octree structured data. A D\* algorithm is also developed to take mobile robot size into consideration, so that different paths can be generated and collisions of mobile robot and environment will be avoided. The 3D trajectory of the mobile robot can be generated from the algorithm directly, hence, the safety of mobile robot itself and the objects is ensured when robot moves around. Experimental results show that the proposed algorithm does not require a priori understanding to the map and takes the real size of robots into consideration. The method has been applied to practical applications in real environments, and shows strong reliability and practicality.

**Keywords:** path planning; 3D grid map; mobile robot; 3D point cloud

机器人路径规划是机器人研究领域的一个重要分支, 机器人需要利用符号性环境模型从一个位置到达目标位置, 同时避开环境中某些特定区域, 生成一个可执行的运动序列或运动轨迹。机器人地图包括几何地图、点云地图、拓扑地图和栅格地图等, 其

中栅格地图将环境分解成一系列具有二值信息的网格单元, 栅格的大小决定了环境信息存储量的大小, 适当调整栅格的大小可以既降低存储消耗, 又保留环境的空间结构, 国内外许多学者均对此进行了研究和应用<sup>[1,2-3]</sup>。A\* 算法是栅格地图中常用的路径

收稿日期: 2013-01-10。 作者简介: 张彪(1990—), 男, 硕士生; 曹其新(通信作者), 男, 教授, 博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61273331), 国家高技术研究发展计划资助项目(2012AA041403), 机械系统与振动国家重点实验室资助项目(MSV201101)。

网络出版时间: 2013-07-25

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20130725.1545.001.html>

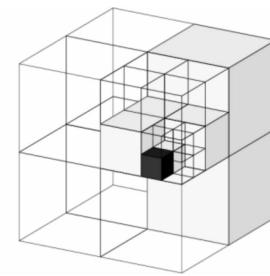
规划算法<sup>[4]</sup>, 它通过引入试探检索法来降低 Dijkstra's 算法的计算消耗<sup>[5]</sup>。但是, A\* 算法需要对地图有一些先验认识, 而 Anthony 和 Sven 所提出的 D\* 及简化 D\* 算法<sup>[6-7]</sup>则不需要对地图具有先验认识。这些方法都是通过给不同位置的栅格设置可通行性估计值来规划机器人运动轨迹, 当机器人移动到某一位置附近时, 可以通过采集新的信息得到这些位置的真实数值, 并对地图进行更新。

理论上如果环境中存在可通过的路径, A\* 或 D\* 算法总能找到这条路径, 但是这些方法不考虑机器人的实际尺寸, 而是将机器人当作一个理想点, 因此实际使用时无法判断机器人是否能真正通过某些区域。本文在这些规划算法的基础上, 提出了一种新的路径规划方法, 这种方法一方面不需要对地图具有先验认识, 另一方面考虑了机器人的实际尺寸。使用这种方法在真实环境中进行了实验。

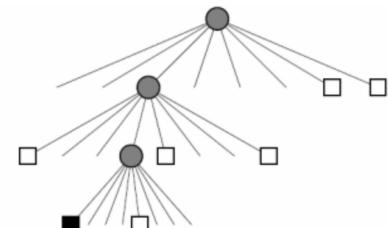
## 1 三维栅格地图创建

为构建三维栅格地图, 我们首先使用三维激光扫描仪获取环境的三维点云地图, 然后将其转换为八叉树数据结构。八叉树(Octree)是一种基于树形层次的数据结构, 其定义是: 若不为空树的话, 树中任意一个节点的子节点恰好只有 8 个或 0 个。八叉树充分利用了形体在空间上的相关性, 与按照三维体素阵列直接存储的方式相比, 它所占用的存储空间要少得多。其主要优点在于管理方便, 搜索某一个小方块的时候, 能很方便地使用二分法查找, 当深度达到一定层次以后, 基本可以拟合所有的三维模型。

图 1 所示为一个利用八叉树表示空间被占据情况的实例, 图 1a 中被完全占据的方格用黑色表示, 被部分占据的用灰色表示, 没有被占据的用白色表示, 相应的八叉树数据结构如图 1b 所示。如果每个节点用两 bit 存储, 那么空间被占据情况可以用一个 6 bit 的八叉树来存储。将点云数据转换成八叉树结构的三维栅格地图, 一方面可以大大节省内存空间, 另一方面也便于后续路径规划过程中进行碰撞检测和空间可行性分析。图 2a 为原始点云地图, 文件大小为 12 393 KB, 图 2b 是栅格大小为 5 cm 的栅格地图, 文件大小为 246 KB。转换为八叉树结构在不损失空间结构的同时节省了存储空间, 提高了计算速度, 有助于移动机器人实时感知环境并智能决策。

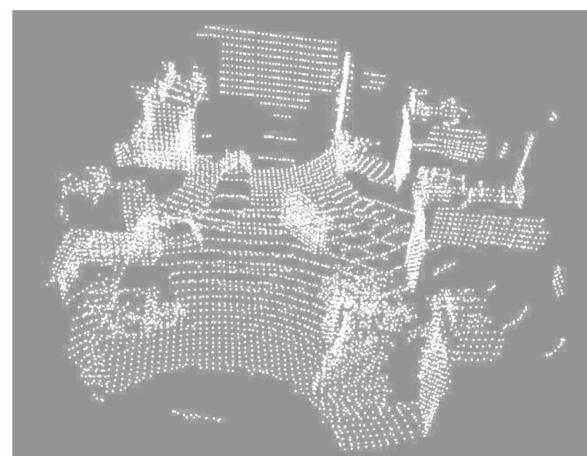


(a) 三维空间占据图

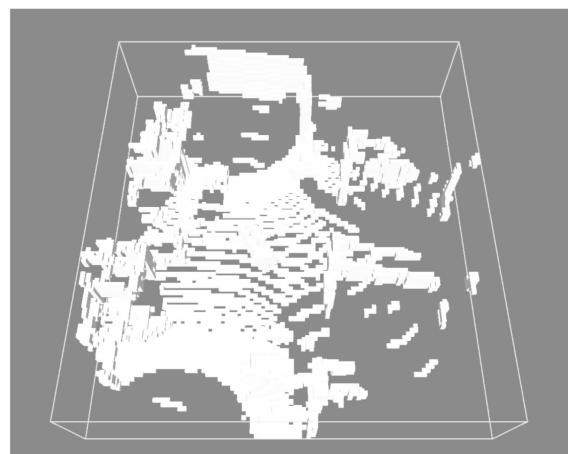


(b) 八叉树存储结构

图 1 八叉树存储<sup>[8]</sup>示例图



(a) 三维点云地图



(b) 三维栅格地图

图 2 三维点云转换为三维栅格

## 2 路径规划算法

使用上文描述的三维栅格地图来表示环境信

息,而路径规划方法来源于简化的 D\* 算法<sup>[6-7]</sup>,规划算法流程如图 3 所示。首先,假设  $G=(S,E)$  代表栅格地图,其中  $S$  表示机器人可能位置的一系列栅格, $E$  表示这些位置的边界。函数  $a_{\text{dj}}(s)$  为某一栅格  $s$  的邻域,  $S_{\text{ucc}}(s) \subseteq S$  表示栅格  $s$  的后续栅格,  $P_{\text{red}}(s) \subseteq S$  表示栅格  $s$  前面的栅格,  $v(s)$  则表示机器人是否已经到达栅格  $s$  处。当给定一个初始栅格  $s_{\text{start}} \in S$  和目标栅格  $s_{\text{goal}} \in S$  后, 路径规划算法能生成一条最短的路径, 假设估计函数  $g(s)$  记录了从初始状态到每一个其他状态  $s$  的消耗

$$g(s) = \begin{cases} 0, & \text{if } s = s_{\text{start}} \\ \min_{s' \in P_{\text{red}}(s)} (g(s') + c(s', s)), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

式中: 函数  $0 < c(s, s') \leq \infty$  用来存储从状态  $s$  变为状态  $s'$  的消耗,  $c(s, s') = \infty$  意味着从栅格  $s$  到栅格  $s'$

|   |   |   |   |
|---|---|---|---|
| 0 | 1 | 2 | 3 |
| 4 | 5 | 6 | 7 |
| 8 | 9 | A | B |
| C | D | E | F |

(a) 路径规划初始

|   |   |   |   |
|---|---|---|---|
| 0 | 1 | 2 | 3 |
| 4 | 5 | 6 | 7 |
| 8 | 9 | A | B |
| C | D | E | F |

(b) 路径规划第一步

|   |   |   |   |
|---|---|---|---|
| 0 | 1 | 2 | 3 |
| 4 | 5 | 6 | 7 |
| 8 | 9 | A | B |
| C | D | E | F |

(c) 路径规划第二步

|   |   |   |   |
|---|---|---|---|
| 0 | 1 | 2 | 3 |
| 4 | 5 | 6 | 7 |
| 8 | 9 | A | B |
| C | D | E | F |

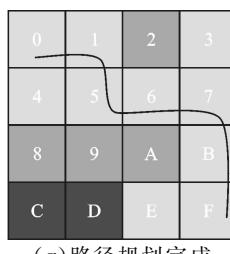
(d) 路径规划第三步

|   |   |   |   |
|---|---|---|---|
| 0 | 1 | 2 | 3 |
| 4 | 5 | 6 | 7 |
| 8 | 9 | A | B |
| C | D | E | F |

(e) 路径规划第四步

|   |   |   |   |
|---|---|---|---|
| 0 | 1 | 2 | 3 |
| 4 | 5 | 6 | 7 |
| 8 | 9 | A | B |
| C | D | E | F |

(f) 路径规划第五步



(g) 路径规划完成

图 3 路径规划算法流程示例图

是不可通行的。同时, 使用快速检索函数  $h(s, s_{\text{goal}})$  来估计到达目标位置的路径消耗, 并减少那些不需要(没有朝向目标点)的计算。显然,  $h(s, s_{\text{goal}})$  和  $c(s, s')$  满足三角不等式

$$h(s, s_{\text{goal}}) \leq h(s', s_{\text{goal}}) + c(s, s') \quad (2)$$

开始时将所有的  $s \in S$  和  $h(s)$  都设为 0, 并且将  $v(s)$  设为 false, 即所有的栅格是否可通行等信息对于机器人而言都是未知的。开始搜索时, 使  $g(s_{\text{start}}) = 0$  并且  $s$  设为 CLOSED, 即不需要再次到达该栅格。对所有的栅格  $s \in a_{\text{dj}}(s_{\text{start}})$  均计算函数  $g(s)$  和  $h(s, s_{\text{goal}})$  的数值, 如果栅格  $s$  没有设为 CLOSED, 就将其加入 OPEN 序列, OPEN 序列中存储着机器人需要达到的栅格并通过  $k(s)$  函数来排序

$$k(s) = g(s) + h(s, s_{\text{goal}}) \quad (3)$$

$k(s)$  数值最小的栅格被排在 OPEN 序列的顶端, 当栅格  $s \in a_{\text{dj}}(s_{\text{start}})$  被放入 OPEN 序列后, 序列顶部的栅格  $s$  被弹出并且状态设为 CLOSED。对 OPEN 序列排列完成后, 将  $k(s)$  数值最小的栅格弹出, 继续进行搜索。这一过程一直持续到  $s_{\text{goal}}$  被标记到为止, 如果 OPEN 序列为空, 则表明没有合适的路径, 否则表明已经找到从  $s_{\text{start}}$  到达  $s_{\text{goal}}$  的路径。

### 3 考虑机器人尺寸的路径规划

在理想算法中将机器人看作一个没有尺寸的点, 但实际实验中还要考虑机器人的大小。我们通过设置机器人的包围盒, 不考虑过细的形状信息, 这样一方面简化计算, 另一方面提高了安全系数。机器人及其三维模型如图 4 所示, 其底部尺寸为 40 cm  $\times$  40 cm, 高度为 60 cm。

移动机器人运动规划主要有尺寸、旋转和停止过程 3 个方面需要考虑。机器人尺寸可以用来判断精致情况下是否与环境发生碰撞, 机器人运动时则要判断其旋转和停止时是否具有足够的空间, 考虑这些因素的路径规划算法描述如下。

**步骤 1** 在八叉树的邻域内遍历可通行的网格。

**步骤 2** 检测步骤 1 中的网格处是否有足够的容纳机器人的空间, 若有, 转至步骤 3, 否则转至步骤 4。

**步骤 3** 检测是否具有足够的空间来进行旋转, 当前位置不能旋转的话放弃当前网格并回到步骤 1, 否则转至步骤 4。

**步骤 4** 检测是否具有足够的空间使机器人停止在当前网格, 若没有则放弃当前网格并回到步骤 1, 否则转至步骤 5。

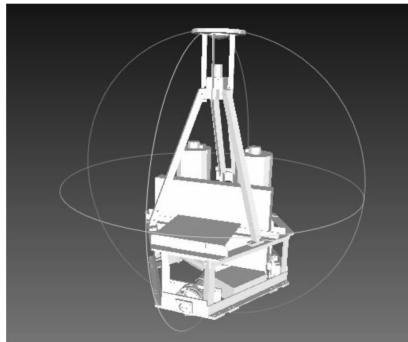
**步骤 5** 移动到之前找到的网格, 若该网格是目标

网格,则转至步骤 6,否则回到步骤 1。

**步骤 6** 生成从初始网格到达目标网格的路径。



(a) 实际移动机器人



(b) 机器人三维模型

图 4 移动机器人及其三维模型

## 4 实验结果与分析

实际环境如图 5a 所示,三维点云数据收集由三维激光扫描仪完成,激光测距系统为 SICK 公司的 LMS200 型,平面收集点数最大为 750,最小分辨角度为  $0.25^\circ$ ,旋转平台带动激光测距系统旋转以收集三维点云数据。移动机器人的中央处理器为 Intel 酷睿 2 GHz,内存为 2 GB。

真实场景如图 5a 所示,点云地图如图 2a 所示,生成的三维栅格地图如图 5b 所示。分别设置 6 个不同的障碍物,障碍物的大小、高低和形状均不相同,实际和三维地图中的障碍物分别与图 5a 和图 5b 的标号相对应。各种障碍物在地图上都有清晰的表示,包括形状和位置,这对于机器人有效地避免碰撞,绕开障碍物探测远距离的环境信息具有重要意义。

将点云地图转换成为三维栅格地图后,给机器人设定一个初始位置和终止位置,导入移动机器人模型并进行了路径规划。起点和终点在环境中的位置如图 6 所示,机器人需要绕开环境中的多个障碍物才能最终到达终点。移动机器人的运动轨迹可以清晰地从图中得到,这有利于避免机器人与环境碰撞,保证运动过程中自身及物体的安全性。



(a) 实际场景

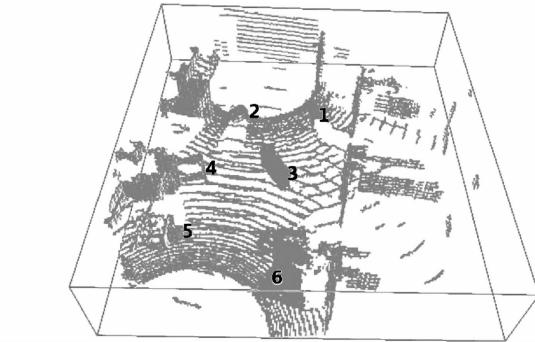


图 5 实际场景与三维栅格地图

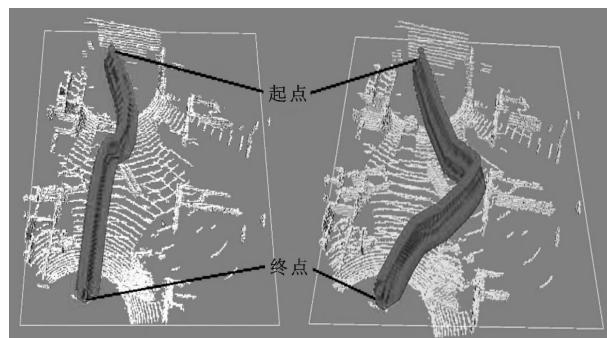


图 6 三维栅格地图中的路径

## 5 结 论

针对移动机器人路径规划问题,我们研究了使用三维栅格地图的路径规划。栅格地图一方面可以降低内存消耗,另一方面方便进行碰撞检测,有利于快速进行空间可行性分析。基于栅格地图,我们扩展了 D\* 算法,使其在不需要对地图有先验认识的基础上考虑实际机器人的尺寸,在规划路径的同时生成机器人的运动轨迹。实验时我们在环境中设置了多个障碍物,生成了相应的三维栅格地图,并在此基础上规划出两条路径,验证了这种方法的有效性和实用性。

### 参考文献:

- [1] ANTARIKSH B. A mobile robot path planning using

- genetic artificial immune network algorithm [C]// Proceedings of the World Congress on Nature and Biologically Inspired Computing. Piscataway, USA: IEEE, 2009: 1536-1539.
- [2] MAKI K. Real time mapping and dynamic navigation for mobile robots [J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2007, 4(3): 323-338.
- [3] GU Jiajun, CAO Qixin. Path planning for mobile robot in a 2.5-dimensional grid-based map [J]. Industrial Robot, 2011, 38(3): 315-321.
- [4] HART P, NILSSON N, RAPHAEL B. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths [J]. IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics, 1968, 4(2): 100-107.
- [5] Dijkstra E W. A note on two problems in connection with graphs [J]. Numerische Mathematik, 1959, 1(1): 235-237.
- [6] GU Jiajun, CAO Qixin. Path planning using hybrid grid representation on rough terrain [J]. Industrial Robot, 2009, 36(5): 497-502.
- [7] COMANICIU D, MEER P. Mean shift: a robust approach toward feature space analysis [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(5): 603-619.
- [8] WURM K M, HORNUNG A, BENNEWITZ M, et al. OctoMap: a probabilistic, flexible, and compact 3D map representation for robotic systems [C]// Proceedings of the ICRA Workshop on Best Practice in 3D Perception and Modeling for Mobile Manipulation. Piscataway, USA: IEEE, 2010: 90-95.

(编辑 武红江)

(上接第36页)

- [3] BRAUN J E, KLEIN S A, MITCHEL J A, et al. Application of optimal control to chilled water system without storage [J]. ASHRAE Transaction, 1989, 95(1): 663-675.
- [4] HOUSE J M, SMITH T F. A system approach to optimal control HVAC and buildings [J]. ASHRAE Transaction, 1995, 101(2): 647-640.
- [5] BRAUN J E, ZHONG Zhipeng. Development and evaluation of a night ventilation and precooling algorithm [J]. HVAC&R Research, 2005, 11(3): 438-458.
- [6] XU Xiaoyan, JIA Qingshan, GUAN Xiaohong, et al. Energy saving potential using natural ventilation and shading in four major cities in China [C]// The 30th Chinese Conferences on Control. Beijing, China: Chinese Academy of Sciences, 2011: 742-748.
- [7] YAO Runming, LI Baizhan, STEEMERS K, et al. Assessing the natural ventilation cooling potential of office building in different climate zones in China [J]. Renewable Energy Building and Environment, 2009, 34(1): 2697-2705.
- [8] ZHOU Junli, ZHANG Guoqiang, LIN Yaolin, et al. Coupling of thermal mass and natural ventilation in buildings [J]. Energy and Buildings, 2008, 40(6): 979-986.
- [9] HOES P, HENSEN J L M, LOOMANS M G L C, et al. User behavior in whole building simulation [J]. Energy and Buildings, 2009, 41(3): 295-302.
- [10] YANG I H, YEO M S, KIM K W. Application of artificial neural network to predict the optimal start time for heating system in building [J]. Energy Conversion and Management, 2003, 44(17): 2791-2809.
- [11] YANG I H, KIM K W. Prediction of the time of room air temperature descending for heating systems in buildings [J]. Building and Environment, 2004, 39(1): 19-29.
- [12] HUANG W Z, ZAHEER-UDDIN M, CHAO S H. Dynamic simulation of the energy management control functions for HVAC system in buildings [J]. Energy Conversion and Management, 2006, 47(6): 926-943.
- [13] CURTISS P S. Artificial neural network for use in building systems control and energy management [D]. Colorado, Canada: University of Colorado, 1992.
- [14] 徐小艳, 贾庆山, 管晓宏. 基于仿真的建筑空调和自然通风联合策略优化 [C]// 第二届中国自动控制会议. 北京: 中国自动化学会, 2011: 137-145.
- [15] 江亿, 燕达, 宋芳婷. 建筑能耗模拟方法与技术 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
- [16] 邓伟, 金丕焕. 人工神经网络及其在预防医学中的应用 [J]. 中国公共卫生, 2002, 18(10): 1265-1267.
- [17] DENG Wei, JIN Pihuan. Artificial neural network and its applications in preventive medical system [J]. Journal of Chinese Public Health, 2002, 18(10): 1265-1267.
- [18] ZHANG Beibei, GUAN Xiaohong, KHAN M J, et al. A time-varying propagation model of hot topic on BBS sites and Blog networks [J]. Information Sciences, 2012, 187(15): 15-32.

(编辑 苗凌 武红江)