

文章编号:1671-6833(2014)05-0031-05

未知环境中考虑姿态稳定性的自主机器人路径规划

王东署¹, 朱训林²

(1. 郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州大学 数学系, 河南 郑州 450001)

摘要:未知环境中自主机器人合理的路径规划是进行探索任务的前提. 传统的路径规划方法侧重于研究从起始点到目标点的无碰路径, 很少考虑机器人自身运动的平稳性. 研究了室外未知环境中考虑机器人姿态稳定性以及能量损耗的路径规划方法, 该方法分 3 步: ①梯度计算, 计算运动区域的梯度; ②节点探测, 运动区域被划分为平坦区域和非平坦区域, 辨识每个平坦区域的中心位置, 即节点; ③路径评估, 根据提出的评估函数, 规划出从当前位置经过中间节点到目标点的最优路径. 通过和传统规划方法获得的路径比较, 仿真验证了所提方法的有效性.

关键词:自主机器人; 路径规划; 能量损耗; 数字高程图; 数字梯度图; 姿态稳定

中图分类号: TP242

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2014.05.008

0 引言

随着自主移动机器人在人类生产生活中的应用越来越广泛, 其工作环境变得越来越多样化, 更多地出现在室外未知的复杂环境中. 这些未知复杂环境通常是人类难以达到的或非常危险的区域, 如星际探索、地下资源勘探以及地震、核事故或生化袭击发生后的救灾场所. 这些危险区域促使机器人研究人员将研究重心转向复杂环境中真实世界的挑战, 遥操作自主机器人在这些环境的路径规划技术就成为主要的研究热点之一.

在很多未知复杂的应用环境中, 传统的机器人路径规划方法是规划出一条从起始点到目标点的、避开高梯度区域的无碰最短路径^[1]. 然而经验丰富的遥操作人员认为这样规划出来的路径并不合理, 因为机器人在这种路径上运动时要不断调整运动方向, 降低了运动的安全性, 增加了打滑或陷入某个陷阱的几率, 甚至可能造成侧翻, 最终导致机器人损坏和整个探索任务的失败^[2].

因此, 路径规划中仅仅考虑无碰的安全最短路径是不够的, 还应考虑机器人自身运动的平稳性. 国内外诸多学者在此方面进行了一定的探索^[2-6], 如王鸿鹏等^[2]以轮式滑动转向移动机器人作为研究对象, 建立了运动打滑模型, 讨论了打滑

因素对移动机器人运动平稳性的影响.

在移动机器人路径规划的指标函数中, Rowe 等^[7]提出了复杂环境中以能量损耗为评价指标的路径规划算法, 此后 Sun 等^[8]对其进行了推广, 霍炜等^[9]对 Rowe 等提出的方法进一步推广至平面区域中机器人的路径规划. 此后, 许多学者开始在路径规划中引入能量指标, 结合其他智能优化算法, 如人工势场法^[10]、遗传算法^[11]、蚁群-遗传算法^[12]等规划出了合理的路径.

笔者在前述研究的基础上, 针对自主移动机器人在室外未知复杂环境中的路径规划问题, 提出了一种新的规划思想: ①该思想吸收了自主机器人遥操作人员的控制思想, 在进行路径规划时除考虑路径因素外, 还同时考虑了机器人侧翻和打滑对规划结果的影响; ②遇到障碍物时, 并非全部采取绕行的避障策略, 在面对坡度较小的障碍物时, 直接从障碍物上翻越过去, 面对坡度较大的障碍物时才采取绕行的策略; ③把备选路径运行时消耗的能量也作为评价路径的性能指标之一, 规划出最优的无碰路径. 通过与传统路径规划方法进行比较, 仿真验证了笔者方法的有效性.

1 路径规划方法

设自主机器人运行在室外未知的复杂环境

收稿日期: 2014-05-30; 修订日期: 2013-07-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61174085); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20114101110005)

作者简介: 王东署(1973-), 男, 河南郑州人, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事机器人智能控制研究, E-mail: wangdongshu@zzu.edu.cn.

中,利用三维激光传感器获得周围环境的信息.路径规划方法由以下 3 步组成.

(1)梯度计算. 利用 3 维激光传感器采集环境信息,作为数字高程图的信息来源. 数字高程图中的某个网格用 $G_{\text{height}}(xn, yn)$ 表示, xn 和 yn 是决定网格在 x - y 坐标平面中位置的参数, $G_{\text{height}}(xn, yn)$ 表示网格所包含区域的最大高度,具体含义如图 1 所示. 经过对采集到的数据进行插值处理后,可以得到数字高程图,用 Matlab 软件仿真后,可以得到如图 2 所示的虚拟数字高程图.

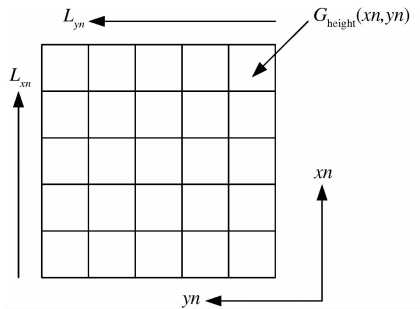


图 1 数字高程图的定义

Fig.1 Definition of digital height map

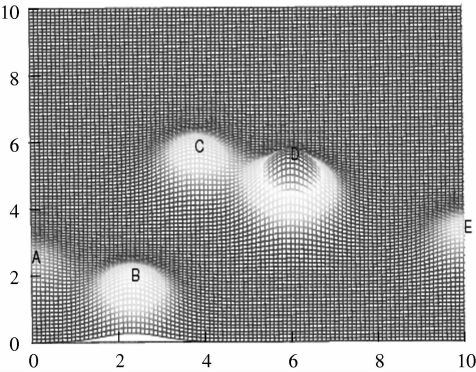


图 2 虚拟的数字高程图

Fig.2 Virtual digital height map

在得到区域环境的数据信息图后,对得到的数据组做进一步的处理,对每个网格中的所有网格的高程值进行重新赋值计算,采取的方法是:分别计算当前网格的高程值和与其相邻的其他网格的高程值之差的绝对值的最大值赋值给当前网格,如图 3 所示,对于中间的网格,如网格 B,会有 8 个相邻的网格,而对于边界上的非顶点网格(如网格 A3)有 5 个相邻网格,4 个顶点的网格(如网格 A)则只有 3 个相邻的网格. 按照这种操作对每个网格进行相应的赋值计算,把数字高程图上的每个网格的梯度全部计算一遍,这样就形成了一个新的基于网格的地图,即数字梯度图,图 2 中的数字高程图所对应的数字梯度图如图 4 所示,其

上的每个网格用 $G_{\text{grad}}(xn, yn)$ 表示.

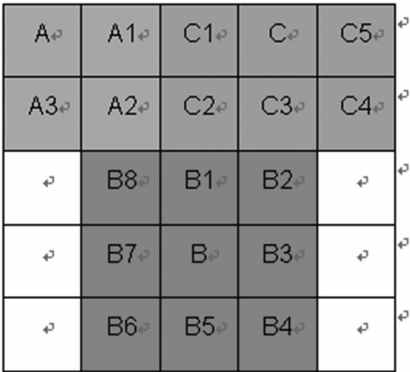


图 3 数据转换的三种情况

Fig.3 Three cases of data transform

(2)节点探测. 所谓节点是指在复杂环境中人为定义的一个特殊区域,在这个区域中机器人很容易就可以翻越过去,并可以在该区域做无侧翻的转动操作.

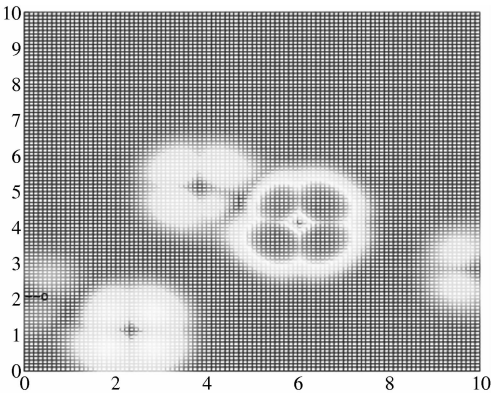


图 4 数字梯度图示意图

Fig.4 Digital gradient map

在小节(1)中已经建立了 DGM 图,按照一定的评价规则从中选出环境中的平坦区域,这里设定一个阈值 $H_{\text{threshold}}$ 用来探测机器人是否位于平坦区域. 如果 DGM 图中的某一个网格的梯度值 $G_{\text{grad}}(xn, yn) \geq H_{\text{threshold}}$ 的值,那么该网格 $G_{\text{grad}}(xn, yn)$ 就被认为位于平坦区域. 相应的把平坦区域的中心叫做节点,并用它来表征平坦区域,如图 5 所示. 按照这样的甄选规则对整个环境区域进行遴选,整个区域环境中就会有很多个节点. 在探测出环境区域里的节点后,根据机器人的攀爬能力,设定一个坡度作为机器人能否翻越障碍物的阈值,这里阈值取 30° . 每两个节点之间会定义一条边界(路径),机器人选择的路径就是由边界和节点组成的线路.

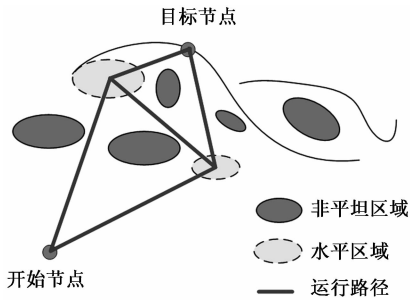


图5 机器人运动节点和路径简图

Fig.5 Nodes and edges graphics

(3) 路径评估. 路径规划时机器人沿着这些边线运动,且应使机器人尽可能多地通过这些水平区域向目标点移动. 利用状态空间的盲目搜索中的一般图搜索方法规划从起始点经其他节点到达目标点的备选路径.

定义评估函数来对这些备选路径进行评估,定义如下

$$Cost = \sum_{\text{path}} \{ (k_{\text{pos}} \cdot \Delta \text{roll} \cdot \Delta \text{yaw}) + (k_{\text{roll}} \cdot \Delta \text{roll}) + l + mg(\mu \cos \alpha + \sin \beta) l \}, \quad (1)$$

式中: $\Delta \text{roll}(\circ)$ 表示机器人与水平面间的横滚角; $\Delta \text{yaw}(\circ)$ 表示路径上每个位置处的侧摆角; $l(m)$ 表示路径上每部分的长度; k_{pos} 和 k_{roll} 是系数;评估函数中第1项 $k_{\text{pos}} \cdot \Delta \text{roll} \cdot \Delta \text{yaw}$ 表示控制机器人打滑的代价;第2项 $k_{\text{roll}} \cdot \Delta \text{roll}$ 表示控制机器人侧翻的代价;第3项 l 表示路径冗余的代价;第4项表示机器人运动中沿某条路径运动时所消耗的能量.

2 能量计算的说明

能量的计算原理如下:设移动机器人运行环境的地形图已知,且由一系列的平面三角形组成. 移动机器人的能量消耗可以定义为机器人在各三角形表面上运动时摩擦力与重力消耗能量之和,同时引入各向异性来解决当地形表面过于陡峭而导致机器人侧翻或者动力不足的问题. 如图6所示,机器人由从 P_1 点沿直线运动到 P_2 点所消耗的能量 E 可由下式给出

$$E = mg(\mu \cos \alpha + \sin \beta) l. \quad (2)$$

式中: m 为机器人的质量; μ 为该平面的摩擦系数, α 和 β 分别为机器人所在的平面以及机器人的运动方向与水平面的夹角.

假设机器人匀速运动,转弯时无能量损耗. 如图7所示,机器人运行过程中有3个禁止区域(用角度表示). 第1个是禁止通行区域(用角度 α_1 表示),表示上坡时坡度太陡机器人上不去的区域.

另外两个禁止区域是侧翻区域(用角度 α_2 表示),表示机器人重心的投影点超出了支撑点构成的凸多边形而发生侧翻的区域. 除了这3个禁止区域外,另一个特殊的区域是制动区域(用角度 α_3 表示),表示机器人下坡获得能量和加速度的区域. 图7中的常规区域是机器人可以自由通行的区域.

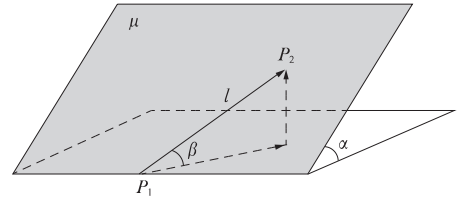


图6 能量消耗示意图

Fig.6 Energy consuming graphics

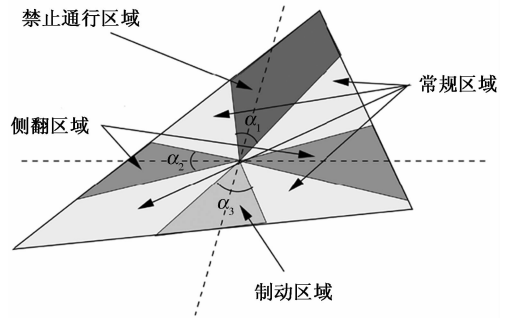


图7 四个区域示意图

Fig.7 Four districts graphics

在制动区域,当机器人沿一定的运动方向 β 下坡时,有 $\mu \cos \alpha + \sin \beta < 0$,使机器人获得能量进而加速运动. 所以,下坡时为使机器人保持匀速运动,应施加一个制动力 $-mg(\mu \cos \alpha + \sin \beta)$ 来避免机器人加速运动. 制动区域 α_3 的两个临界制动角度 β_0 可通过下式计算得到

$$\mu \cos \alpha + \sin \beta_0 = 0. \quad (3)$$

当机器人在这两个临界制动角所组成的制动区域中运动时,下坡时获得的能量被用于制动,机器人在此范围内运动时不消耗能量. 所以前述公式(2)表示的能量计算公式只在机器人运行于常规区域中才使用.

3 路径规划算法实现

3.1 本算法的实现

在梯度计算阶段,每个网格的大小设为 1 m^2 , L_{xn} 和 L_{yn} 均取 100 m ,这样数字高度图上的网格数为 $10\,000$ 个. 路径规划阶段,系数 $k_{\text{pos}} = 0.1$, $k_{\text{roll}} = 10$. 在仿真环境中,设定A、B、C、D和E5座小山坡,坡度分别为 10° , 25° , 20° , 50° 和 15° ,其俯视

图如图 2 所示,路径规划的起点设在节点 A 附近,目标点设在节点 E 附近.

节点探测阶段所产生的节点和边线(红色直线)如图 8 所示.一共规划出了 5 条路径,分别记为 A-E、A-B-E、A-B-C-E-C-E、A-C-B-E. 然后根据评估函数(1),分别计算不同路径的代价,结果如表 1 所示.运动过程中设机器人匀速运动,转弯时消耗能量为零,参照公路的摩擦力系数,室外未知环境的摩擦力系数取 0.4(大于一般公路的摩擦系数),表中所有数据都进行了取整处理.把所获得的 5 条路径的总代价进行比较,最后获得的最优路径是 A→B→E 的路径,即路径 2.在表 1 中,由于笔者所提方法采用“直线路径”(俯视图中的效果,实际运行路径为三维曲线),这里吸收了自主机器人遥控操作人员的控制思想,在实际工作环境中控制机器人沿“直线路径”运动,避免机器人运动过程中运动方向的频繁转换,可有效避免打滑因素对机器人运行平稳性的影响,所以表 1 中的前 5 条路径的打滑代价均为 0.

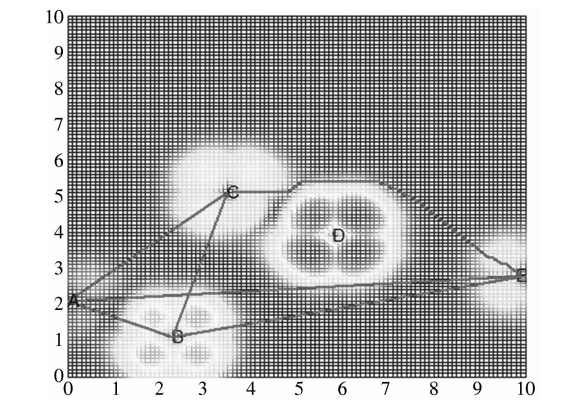


图 8 笔者算法获得的路径(俯视图)
Fig. 8 Path Obtained by Proposed Method (Planform)

表 1 不同路径的代价比较

Tab. 1 Cost Comparison among Different Paths

序号	所经节点	打滑	侧翻 代价	距离	消耗 能量	总 代价
1	A→C→E	0	963	118	3 440	4 521
2	A→B→E	0	335	102	3 148	3 585
3	A→C→B→E	0	640	165	6 542	7 347
4	A→B→C→E	0	1023	139	5 579	6 741
5	A→E	0	35	98	3 859	3 992
6	图 9 所示路径	407	1002	101	3 984	5 494

3.2 传统方法实现

传统方法包含 3 个阶段. ①梯度计算,障碍物探测和路径规划.第 1 步的梯度计算和该方法完全相同. ②障碍物探测,引入一个坡度阈值

$H_{threshold}$,把数字梯度图上的网格划分为自由空间的网格和有障碍物空间的网格.坡度值大于 $H_{threshold}$ 的网格被认为是含有障碍物的网格. ③路径规划,在自由空间中采用最短路径搜索方法来规划一条从起点 A 到终点 E 的最短路径.利用该方法获得的最短路径如图 9 所示(俯视图).

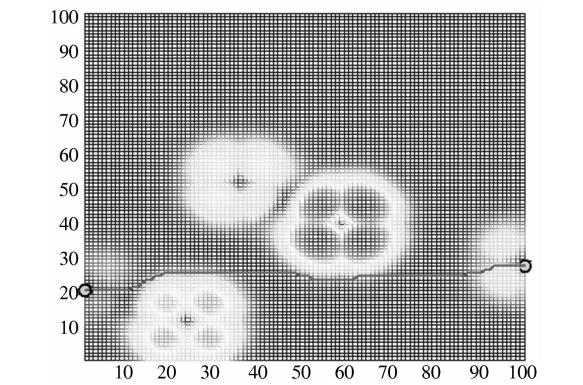


图 9 传统方法获得的路径(俯视图)
Fig. 9 Path Obtained by Traditional Method (Planform)

3.3 讨论

采用笔者所提方法获得的最优路径是表 1 中的路径 2,虽然最短路径是路径 5,但由于路径 2 的能量消耗小于路径 5 的对应项,使得路径 2 的总代价小于路径 5 的总代价,故路径 2 为规划的最优路径.

利用传统方法获得的最优路径的打滑和侧翻代价都较大,虽然路径 6 和路径 2 相比,距离代价相差不大,但路径 6 的打滑以及侧翻代价之和远大于路径 2 的侧翻代价,消耗能量也大于路径 2 的对应项,这是由于在机器人运动过程中,传统方法总是迫使机器人不断调整运动方向,增加了打滑和侧翻的风险,同时也增加了能量消耗,而这正是机器人实际运动控制中应尽量避免的.

4 结论

设计了针对非平坦复杂区域中自主机器人的路径规划,该方法与传统方法的区别主要有两点: ①除考虑路径因素外,还考虑了打滑和侧翻因素对规划结果的影响,并考虑了路径的能量损耗,使规划的最优路径更安全、更合理; ②在机器人遇到障碍物时,并非全部采用躲避绕行的策略,而是根据障碍物的坡度,确定机器人采用绕行或者直接从障碍物上面越过的原则,减少了运行中频繁更换运动方向导致的打滑或侧翻的风险. 把该方法规划的最优路径与传统方法规划的路径进行了对比分析,仿真结果验证了笔者所提方法的有效性.

参考文献:

- [1] LIU Hui, NORBERT S, STEFFEN J, et al. A Floyd-Dijkstra Hybrid Application for Mobile Robot Path Planning in Life Science Automation[C]. 8th IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, Seoul, Korea, 2012; 279 – 284.
- [2] 王鸿鹏. 复杂环境下轮式自主移动机器人定位与运动控制研究[D]. 天津: 南开大学信息技术科学学院, 2009.
- [3] MICHAEL B, BERND B, DIRK S. Towards autonomously traversing complex obstacles with mobile robots with adjustable chassis[C]. 2012 13th International Carpathian Control Conference (ICCC), 61 – 64.
- [4] SHEN C C, KE J H, CHENG H L. Trajectory planning for stair climbing in the leg-wheel hybrid mobile robot Quattroped[C]. 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Shanghai, China, 1229 – 1234.
- [5] AHMED E, ACHIM W. Lyapunov stability study for a special actuated holonomic wheeled mobile robot[C]. 2011 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC), 1962 – 1967.
- [6] OHKI T, NAGATANI K, YOSHIDA K. Safety path planning for mobile robot on rough terrain considering instability of attitude maneuver[C]. 2010 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, 55 – 60.
- [7] ROWE N C, ROSS R S. Optimal grid-free path planning across arbitrarily contoured terrain with anisotropic friction and gravity effects[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1990, 6(5): 540 – 553.
- [8] ZHENG Sun, JOHN H R. Finding energy minimizing paths on terrains[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2005, 21(1): 102 – 114.
- [9] 霍伟, 刘大维, 王江涛. 基于局部最小能量的移动机器人路径规划[J]. 青岛理工大学学报, 2008, 29(4): 99 – 104.
- [10] LI Guang-hui, ATSUSHI Y, HAJIME A. An efficient improved artificial potential field based regression search method for robot path planning[C]. Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 1227 – 1232.
- [11] NAFISEH S. Mobile robot path planning by new structured multi-objective genetic algorithm[C]. 2011 International Conference of Soft Computing and Pattern Recognition (SoCPaR), 79 – 83.
- [12] IMEN C, ANIS K. smartPATH: A Hybrid ACO-GA Algorithm for Robot Path Planning[C]. WCCI 2012 IEEE World Congress on Computational intelligence, 1 – 8.

Path Planning of Autonomous Robot Considering Attitude Stability in Unknown Environment

WANG Dong-shu¹, ZHU Xun-lin²

(1. School of Electric Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Department of Mathematics, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Suitable path planning is precondition of autonomous robot exploration in unknown complex environments. Traditional path planning methods focus particularly on planning an un-colliding path from the start position to the goal and robot attitude stability is seldom considered. A new path planning approach considering robot's attitude stability and energy consumed in outdoor complex environment is proposed, which consists of three steps: (1) gradient calculation, gradients of the rough terrain are calculated; (2) node detection, terrain is divided into flat regions and rough regions according to height threshold; central position of each flat region is recognized as the node; (3) path evaluation, the optimal path from current position to destination through intermediate nodes is planned based on the cost evaluation function. Compared with the conventional approach, the effectiveness of the proposed method is demonstrated through simulations.

Key words: autonomous robot; path planning; energy consumed; digital height map; digital gradient map; attitude stability