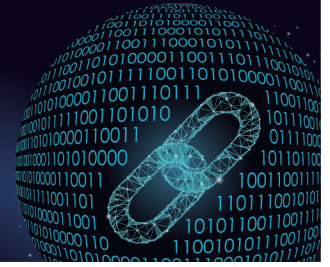




中国科技期刊卓越行动计划项目入选期刊

控制与决策

CONTROL AND DECISION



面向荒漠复杂地形的机器人在线全覆盖路径规划方法

齐立哲, 华中伟, 苏昊, 王鑫瑞, 孙云权

引用本文:

齐立哲, 华中伟, 苏昊, 王鑫瑞, 孙云权. 面向荒漠复杂地形的机器人在线全覆盖路径规划方法[J]. 控制与决策, 2024, 39(4): 1095–1103.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.1518>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于生物启发神经网络和DMPC的多机器人协同搜索算法

Multi-robot cooperative search algorithm based on bio-inspired neural network and DMPC
控制与决策. 2021, 36(11): 2699–2706 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0959>

一种基于免疫机理的确定性移动机器人路径规划算法

A path planning algorithm of deterministic mobile robot based on immune mechanism
控制与决策. 2021, 36(10): 2418–2426 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0059>

基于16方向24邻域改进蚁群算法的移动机器人路径规划

Mobile robots path planning based on 16-directions 24-neighborhoods improved ant colony algorithm
控制与决策. 2021, 36(5): 1137–1146 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0600>

基于 $\text{pm}3\sigma$ 正态概率区间分族遗传蚁群算法的移动机器人路径规划

Path planning of mobile robot based on $\text{pm}3\sigma$ normal probability interval population division using genetic ant-colony algorithm

控制与决策. 2021, 36(12): 2861–2870 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0745>

凸优化与A*算法结合的路径避障算法

Convex optimization and A-star algorithm combined path planning and obstacle avoidance algorithm
控制与决策. 2020, 35(12): 2907–2914 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0351>

面向荒漠复杂地形的机器人在线全覆盖路径规划方法

齐立哲[†], 华中伟, 苏昊, 王鑫瑞, 孙云权

(复旦大学工程与应用技术研究院, 上海 200433)

摘要: 对于地形复杂、范围广阔的荒漠环境,当前的地图模型存在占用存储空间过大的问题;同时在复杂地形下,当前的全覆盖路径规划算法能量消耗大,无法适用于在线条件. 对此,提出一种在线的全覆盖路径规划算法及相应的地图模型. 首先,介绍一种变分辨率的三维栅格地图模型. 其次,分析机器人在非平面环境下进行全覆盖任务的能量消耗问题,得出最节约能量的覆盖方式. 在对平坦地形的覆盖中,基于优先级覆盖的思想,对传统的牛耕法覆盖做出改进,拓展为8个方向. 然后,针对非平坦地形提出一种在线的面向地形的区域分解方法,在全覆盖过程中根据高度将特殊地形区域分解出来单独覆盖. 在子区域内部,对特殊地形抽象得到斜面模型,引入地形变化函数,形成新的优先级遍历方法,并设计一种针对性的避障策略以进一步减少能量消耗. 最后,对所提出的算法进行仿真验证以及机器人实验. 仿真验证和实验结果表明,相比于其他算法,所提出算法能显著减少全覆盖过程中的重复率以及机器人总能量消耗.

关键词: 路径规划; 全覆盖; 复杂地形; 区域分解; 机器人; 避障策略

中图分类号: TP242

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.1518

引用格式: 齐立哲, 华中伟, 苏昊, 等. 面向荒漠复杂地形的机器人在线全覆盖路径规划方法[J]. 控制与决策, 2024, 39(4): 1095-1103.

Robot online fully coverage path planning algorithm for desert complex terrain

QI Li-zhe[†], HUA Zhong-wei, SU Hao, WANG Xin-rui, SUN Yun-quan

(Academy for Engineering and Technology, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: For the desert environment with complex terrain and wide range, the current map model occupies too much storage space. At the same time, in complex terrain, the current full coverage path planning algorithm consumes a lot of energy and is not suitable for online conditions. Aiming at these problems, an on-line fully coverage path planning algorithm and its map model is proposed. Firstly, a variable resolution 3D grid map model is introduced. Then, the energy consumption of a robot in the full coverage task in non-planar environment is analyzed, and the most energy-saving coverage mode is obtained. In the coverage of flat terrain, based on the idea of priority coverage, the traditional boustrophedon fully coverage algorithm is improved by being expanded into 8 directions. Then, an on-line terrain oriented region decomposition method is proposed for non-flat terrain. In the process of full coverage, the special terrain region is decomposed by height and covered separately. In the sub region, the slope model is abstracted from the special terrain, the terrain change function is introduced to form a new priority traversal method, and a targeted obstacle avoidance strategy is designed to further reduce energy consumption. Simulation verification and experiment results show that compared with other algorithms, this algorithm can significantly reduce the repetition rate and total energy consumption of robots in the process of full coverage.

Keywords: path planning; fully coverage; complex terrain; region decomposition; robot; avoidance strategy

0 引言

在我国长久以来,农业开荒、工业污染等多种因素导致土地退化,荒漠化日益严重,荒漠化面积一度占国土面积达四分之一以上^[1]. 治理荒漠化最有效、最彻底的方法就是通过种植植物,固沙治沙,逐步改

变沙漠土壤环境,恢复生态. 但是,当前的荒漠造林主要依靠人工种植养护,需要消耗大量人力,而且工作条件也比较恶劣,如果能用机器代替人,用自动化、智能化的方式完成种植和养护的工作,则必定能提高治理效率,节约治理成本. 荒漠种植机器人是一种为荒

收稿日期: 2022-08-24; 录用日期: 2022-12-20.

基金项目: 上海市人工智能重大专项项目(2021SHZDZX0103).

[†]通讯作者. E-mail: qilizhe@fudan.edu.cn.

漠种植而设计的机器人,它的目标是能够在荒漠中自主导航和安全移动,并完成治沙植物的种植任务.具体而言,荒漠种植机器人需要在规定的区域内按照一定的密度对可种植的位置全部种植植物,其相应的路径规划算法属于全覆盖路径规划算法.

全覆盖路径规划是路径规划领域中一个重要的研究方向,广泛应用于清洁机器人、勘探机器人、农业机器人等领域.全覆盖路径规划中具有代表性的算法有:牛耕式覆盖法^[2-3]、区域分解法^[4-5]、神经元激励算法^[6]、内螺旋搜索法^[7]、模板法^[8-9]以及智能优化类算法^[10]等.随着需求的发展,许多机器人的作业区域不再局限于室内或平坦的地面上,而需要工作在复杂的地形条件下,这对机器人作业的安全性和效率提出了挑战.传统的二维路径规划算法由于没有考虑高度、地形等因素,难以应用到这类任务中.

一些研究人员对原本适用于二维平面的算法做出了改进以实现三维地形的覆盖^[11-12],这些算法主要关注于三维表面的几何特性.还有一些研究人员关注于能量消耗问题,但在起伏的地形上,由于重力的作用,机器人移动的能量消耗远高于在平地上的情况,能量消耗成为需要单独考虑的因素^[13].对此,研究人员提出了一系列基于能量消耗分析的全覆盖路径规划算法.文献^[14-15]将整个复杂地形视为一个完整的范围,选取能量消耗最低的一个方向对地形完全覆盖.文献^[16]基于对高度变化方向上机器人能量消耗的分析,提出一种将区域分解法与往复遍历法相结合的方法.文献^[17]主要关注于转向过程中的能量消耗,将传统往复遍历法中的直线改进为适应地形表面的曲线.文献^[18]利用遗传算法得到对于一片区域上的整体遍历最优方向,以降低重复率以及能量消耗.文献^[19]指出,由于电池容量的有限性,在覆盖过程中机器人需要多次到固定位置充电,并提出了基于深度优先搜索和回溯法的全覆盖规划方法.文献^[20]使用一种双内螺旋的轨迹来覆盖变化的地形,达到了节约爬坡能量消耗的目的.但是,目前大多数的研究成果都只适用于离线规划.对于荒漠种植机器人而言,由于其工作环境范围广阔,地形复杂,很难在路径规划前得到环境的完整地图.

针对以上问题,本文在对全覆盖过程中机器人能量消耗做出理论分析的基础上,提出一种适用于复杂地形的地图模型以及在线全覆盖路径规划算法,经仿真和实验验证,本算法能显著降低覆盖重复率以及机器人在全覆盖过程中的能量消耗.

1 变分辨率三维栅格地图模型及其构建

由于荒漠环境地形起伏,传统的二维栅格地图并不能准确地描述这种特征,必须用三维栅格地图才能描述.另一方面,荒漠环境的面积广大,如果栅格地图的分辨率很高,则会占用大量的存储空间(分辨率是指单位长度内的栅格数).因此,本文设计一种变分辨率三维栅格地图作为荒漠种植机器人的地图模型,并详细阐述在机器人实际运行的过程中,如何利用机器人上搭载的传感器获得的信息实时构建这种地图.

1.1 地图模型定义

变分辨率三维栅格地图模型由两种栅格地图组成:一种分辨率较高,称为高程图,是对局部地形的精确描述;另一种分辨率较低,称为斜面栅格地图,是对一定范围内地形的总体描述.

图1是高程图和斜面栅格地图的直观表示.高程图是将地形表面的各点的高度值以二维矩阵的形式存储起来形成的地图,因为它的分辨率较高,所以能比较精确地描述环境的地形,但同时它也会占据大量的存储空间,如图1(a)所示.本文算法主要利用它检测障碍物,然后经过一定的步骤将其转化为斜面栅格地图.

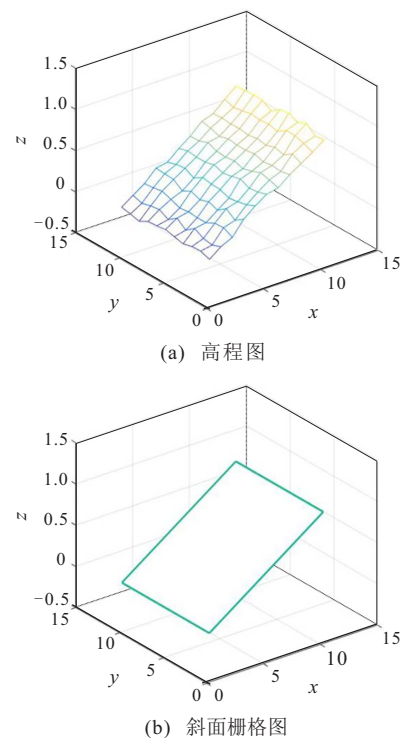


图1 高程图与斜面栅格图

斜面栅格地图是用斜面模型来描述地形的整体特征,它的分辨率较低,因此占用的存储空间较小,如图1(b)所示,每一个斜面栅格是由若干个高程图栅格的信息共同拟合而成的.斜面模型通过4个属性来描述:中心高度值 h (斜面栅格中心点到水平面的高度),

斜面倾角 θ (斜面与水平面所成的二面角),斜面方向角 α (斜面与水平面交线和 x 轴的夹角),以及是否为障碍物栅格,如图2所示。

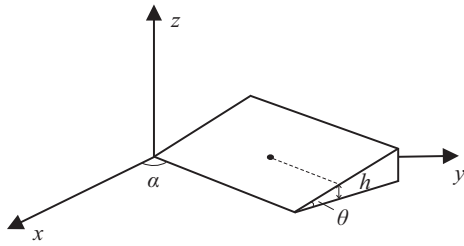


图2 斜面模型

在运行时,随着机器人的移动,保留机器人周围局部的高程图;在全局范围内,机器人仅保留斜面栅格地图。两者统一起来称为变分辨率三维栅格地图。

1.2 地图模型构建

在实际情况下,机器人往往通过其搭载的各种传感器来感知环境。将传感器得到的数据经过处理、运算,最终转化为地图的过程即为地图构建。本节将介绍在机器人移动过程中,高程图和斜面栅格地图以及全局地图的构建过程,构建流程如图3所示。

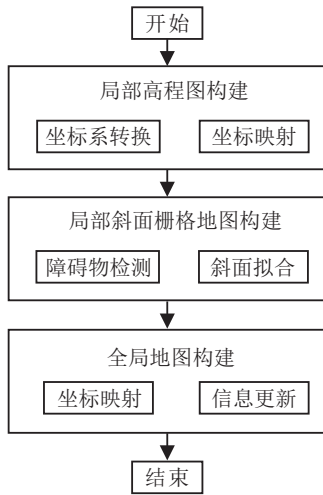


图3 地图构建流程

1.2.1 局部高程图构建

为了获得机器人周围环境信息,机器人需要搭载如深度相机这样的传感器,此外,还需要有能测得自身位姿的传感器如IMU。在此基础上,基于elevation-mapping技术^[21]构建机器人周围的高程图。

如图4所示为机器人坐标系设置,图中所有坐标系都为三维直角坐标系。 W (world)为世界坐标系,被认为固定不动; B (base)为基体坐标系,与机器人底盘固连, C (camera)为相机坐标系,与深度相机固连; M (map)为地图坐标系,中心点与 W 位于同一水平面上,由 B 垂直向下投影得到,并且 M 的三轴与 W 的

三轴平行,高程图是 M 系下的局部地图; S (sensor)为IMU传感器坐标系; PC 为深度相机测得的物理地面上的一个点在 C 系下的坐标。

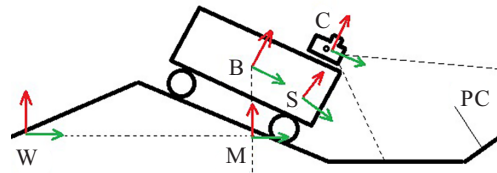


图4 坐标系设置

对深度相机测得的所有点进行坐标变换,得到 M 系下的一系列点,由于这些点是稠密点云,无法存储在一个固定大小的矩阵中,根据 x 和 y 坐标将各点映射到分辨率为 r 的栅格中,同一栅格内取各点 z 坐标的平均值作为该栅格的高度,将各栅格的高度存储在矩阵中。这样,稠密点云图便转化为高程图。

1.2.2 局部斜面栅格图构建

在高程图的基础上,分两步构建局部的斜面栅格图,分别是障碍物检测和斜面拟合。

1) 障碍物检测。

在传统的二维栅格地图中,地图信息是二分类的,即障碍物和空地。而高程图中的信息表示高度,其值不是二分类的,因此,不能采用二维栅格地图中的障碍物判定方式。为了利用高程图的信息检测三维环境中的障碍物,本文采用一种新的障碍物检测方法,称为邻域极差检测法。具体而言,对于栅格内每个点周围一定大小的邻域内的所有点,计算其极差,即其中高度最高的点与高度最低的点之差。将极差大于设定阈值的栅格视为存在障碍物的栅格。在高程图中,障碍物会以相邻点高度差的形式体现出来,当不存在障碍物时,高程图中的邻近点高度值差相对较小,当存在障碍物时,会出现高度的突变,产生较大的高度值差,利用这些高度值差来检测障碍物,这一步即为障碍物检测。

2) 斜面拟合。

经过障碍物检测后,对剩下的非障碍栅格以最小二乘法做斜面拟合。该斜面可描述为

$$z = Ax + By + C, \quad (1)$$

其中 A 、 B 、 C 为拟合平面参数。如果 B 不为零,则各斜面参数中, h 为该栅格范围内高程图中各点的平均高度,其他参数的计算方法如下:

$$\alpha = \text{atan}(-A/B), \quad (2)$$

$$\theta = \text{atan}(\sqrt{A^2 + B^2}). \quad (3)$$

1.2.3 全局地图构建

经过上述步骤后,局部地图已经构建完毕. 接下来需要将局部地图统一到全局地图中,该过程分为两步. 首先根据当前位置坐标,将局部的斜面栅格地图映射到全局坐标系中,这一步称为坐标映射. 然后,假设机器人当前所在栅格在全局坐标系中的坐标为 (x, y) ,局部地图9个栅格所对应的全局地图中的坐标为

$$(x \pm i, y \pm j), i, j \in \{-1, 0, 1\}. \quad (4)$$

全局地图在程序中的存储形式为矩阵,共有4个矩阵分别对应于地图的4个信息:是否存在障碍物以及对应的3个斜面参数. 根据式(4)中的坐标,将局部斜面栅格地图中的信息存入矩阵中的对应位置,这一步称为信息更新.

2 全覆盖能量消耗分析

机器人在地形上的运动可以抽象为在不同角度斜面上运动,其受力分析如图5所示. 虚线表示机器人运动方向, θ 表示倾斜角, ϕ 表示运动方向与斜面上的水平线的夹角, G 表示重力, F_f 表示轮子所受滚动摩擦力, F_r 表示机器人的动力系统需要提供的力.

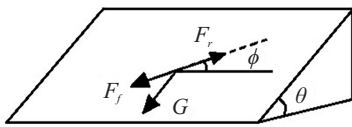


图5 受力分析

本文假设机器人平稳运行,在大部分时间机器人处于匀速运动状态,即沿着运动方向的合力为零. 设机器人质量为 m ,重力加速度为 g ,摩擦系数为 μ ,对于上坡和下坡的情况分别如下式所示:

$$F_r = mg \sin \phi \sin \theta + \mu mg \cos \theta, \quad (5)$$

$$F_r = mg \sin \phi \sin \theta - \mu mg \cos \theta. \quad (6)$$

设机器人在斜面上移动的距离为 S ,则能量消耗为

$$E_r = F_r S. \quad (7)$$

特别地,在全覆盖任务的条件下,由于机器人需要遍历斜面上的每一个点,如果总体考虑覆盖的全过程,则可以认为,上坡与下坡的总路程几乎相同. 因此,可以对上下坡的 F_r 取平均值来估算整个覆盖过程的能量消耗,即

$$F_r = mg \sin \phi \sin \theta, \quad (8)$$

从而能量消耗可以表示为

$$E_r = mgS \sin \phi \sin \theta. \quad (9)$$

根据上述分析可以得出结论:当 $\phi = 0$ 时,能量消耗最小;当 $\phi = \pi/2$ 时,能量消耗最大. 即从能量消耗的角度来看,对于一个斜面而言,最好的覆盖方式为水平覆盖,最差的覆盖方式为垂直覆盖,如图6所示.

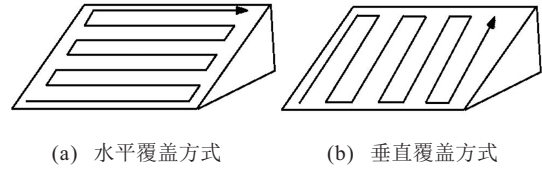


图6 水平覆盖和垂直覆盖

设 h 为机器人在垂直地面方向上的位移,有

$$h = S \sin \theta \sin \phi. \quad (10)$$

因此,从另一个角度而言,可以用机器人在垂直方向上位移距离的总和来衡量能量消耗的总量,即

$$E_r \propto \sum h_i. \quad (11)$$

由此可以得出结论,为了节约机器人对复杂地形环境全覆盖过程中耗费的能量,应尽量减少覆盖过程中在高度方向上的位移距离.

3 全覆盖路径规划算法

在上述理论分析的基础上,本文提出一种适用于复杂地形的在线全覆盖路径规划算法,因其能自适应地对不同地形采用不同的覆盖方式,并满足能量最优的约束,故称为能量约束下的自适应地形全覆盖算法.

从整体上看,复杂地形可以划分为两个部分,较为平坦的地形和高度变化比较剧烈的特殊地形(如坡、坑),特殊地形与平坦地形交错相接. 通过实时的地形检测可以区分这两种地形,然后采用不同的方法进行覆盖. 对于平坦地形,其覆盖与二维平面的覆盖接近,本节提出一种基于牛耕覆盖法改进得到的路径规划方法——八方向牛耕覆盖法;对于特殊地形,本节提出一种在线的区域分解算法——面向地形的区域分解法. 面向地形的区域分解法将特殊地形从平坦地形中分解出来,并用能量最优的方式覆盖特殊地形内部,完成特殊地形的覆盖以后利用回溯的方式,从进入特殊地形的点返回并离开特殊地形,又回到平

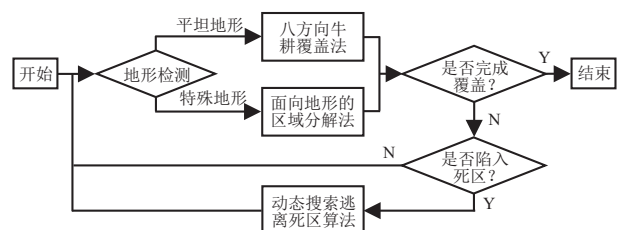


图7 全覆盖路径规划算法流程

坦地形的覆盖中.除此之外,在全覆盖的过程中,机器人可能会陷入死区,使用基于动态搜索的算法可使机器人逃离死区.算法的整体流程如图7所示.

3.1 八方向牛耕式覆盖

牛耕覆盖法是一种常用的全覆盖路径规划算法,也被称为往复覆盖法.本文对“牛耕式覆盖”做出改进,拓展为8个方向,即对当前点相邻的8个栅格赋予优先级.拓展规则为:1)保持规则:将8个相邻栅格分类为左、下、右、上(如图8所示),保持原有的4个方向的优先级相对关系不变;2)边界点优先规则:当8个相邻栅格中存在边界栅格时,优先覆盖边界栅格;3)转向最小规则:当分类为左或分类为右的栅格中存在多个可覆盖栅格时,根据机器人当前方向及目标方向,依据转向最小的原则决定要覆盖的栅格.

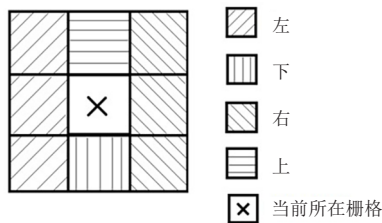


图8 栅格分类

第1条规则是为了保持牛耕式覆盖原有的逐列覆盖的特性.第2条、第3条规则是为了解决引入的4个新的方向给原有算法带来的冲突.第2条规则中,所谓边界栅格,是指与已覆盖栅格相邻或与处于地图边界的未覆盖栅格.第3条规则中,机器人当前方向定义为前一个栅格到当前栅格的连线,机器人目标方向定义为当前栅格到目标栅格连线的方向.相比于四方向牛耕式覆盖,八方向牛耕式覆盖在保持了原算法中逐列覆盖的特点的基础上,扩大了机器人的覆盖路径的搜索空间,提高了算法的性能.

3.2 面向地形的区域分解法

当机器人所在区域周围存在明显地形变化时,为了最大限度地降低能量消耗,本文提出一种在线的面向地形的区域分解方法.传统的区域分解往往是离线的,即在有全局地图的情况下先对全部子区域完成划分,再开始逐个覆盖子区域.本文提出的方法能使得机器人实时地根据周边地形变化对覆盖区域做出分解,覆盖完当前分解得到的子区域后,再回到原来的位置,继续原来的覆盖过程,同时寻找下一个需要分解的子区域.算法体现了整体覆盖规划的有序性,避免了机器人从更远处折返回来覆盖作业的高能耗、低效率现象发生的可能性.该方法的主要思想是在遇到地形起伏时,首先探索该地形的边界并记录,依

据此边界及高度划分区域,然后覆盖子区域内部,在区域内部遍历完成之后,返回进入点并进行“补充覆盖”,这步是为了防止区域覆盖不完整.完成之后离开该区域,继续寻找新的特殊地形.

3.2.1 地形边界探索

本文提出的方法依据栅格高度值(经过离散化处理)的变化来划分地形.在机器人所在栅格处,分别检查相邻的8个栅格的高度值,与当前所在栅格的高度值作对比,若发现高度值与机器人当前所在栅格的高度值不同,则视为地形变化.例如,有多个地形变化栅格,根据地形连续性,首先选取与当前栅格高度(h_c)最接近的栅格 i ,其高度为 h_i ,作为地形的边界,如下式所示,并记录该点作为回溯点:

$$i | \min\{|h_c - h_i| \neq 0\}; \quad (12)$$

然后机器人行驶到 i 点,不断地在相邻栅格中寻找与 i 点高度相同的栅格并移动到这些栅格上,直到遇到无法通过的障碍或再次回到 i 点,将得到的一系列点作为当前区域的边界.

3.2.2 区域内部覆盖

地形边界探索完成后,需要对区域内部进行覆盖.为了使能量消耗接近于理论推导的最优条件,本文阐述一种对分解区域内部做全覆盖的方法,包含覆盖策略和避障策略两部分.当没有障碍物时,根据覆盖策略选择覆盖路径;当遇到障碍物时,根据避障策略选择路径.

1) 覆盖策略.

为了使覆盖路径能够接近第2节中推导出的最佳覆盖方式,本文引入一个地形变化函数 K 来描述不同栅格之间的地形变化程度.设当前栅格为 c ,所要计算的栅格为 i ,地形变化函数计算方法如下:

$$K = A|h_c - h_i| + B \min(|\alpha_i - \alpha_c|, 2\pi - |\alpha_i - \alpha_c|), \quad (13)$$

其中 A 、 B 为系数.机器人每次规划下一个覆盖点时,需要计算当前所在栅格相邻的8个栅格的 K 值,选择 K 值最小的栅格作为下一个覆盖的栅格.

2) 避障策略.

当遇到障碍物时,传统避障策略会优先选择经过未遍历的栅格来避障,因为这样可以降低一定的重复率,但在斜面上这种方式会破坏同高度优先遍历的原则,在后续轨迹中引入多次沿垂直方向的运动(最耗费能量的方式).因此,当机器人在斜面上遇到障碍物时,本文采取优先从已遍历的栅格处避障.具体避障策略见图9.

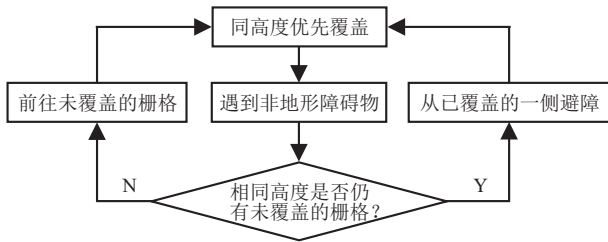


图9 避障策略

3.2.3 边界补充覆盖

当机器人按照上述步骤进入地形时,初始时刻沿着一个方向探索边界,由于无法通过的地形的作用或超出工作范围等因素,有可能遗漏另一侧的边界部分.机器人在边界探索过程中由于遇到地形障碍,有可能导致边界被遗漏.因此,在对区域内的覆盖完成以后,令机器人回到进入地形的点,再次检验周围的栅格高度,如果有高度与回溯点高度相同的未遍历栅格,则覆盖这些栅格,这样便完成了对边界部分的补充覆盖.

4 仿真和结果分析

4.1 仿真实验

为了验证本文所提出的算法的效果,在仿真环境下模拟全覆盖的过程,并与一些同类算法作对比,主要比对不同算法在全覆盖过程中的能量消耗.

仿真实验基于 Matlab 实现,建立大小为 30×30 的栅格地图,地图中包括多种不同形状的特殊地形以及平地,并随机生成一些障碍物.地图中的方格代表地图模型中的斜面栅格图,障碍物以及无法通过的地形都用黄色栅格表示,可以通过的点用蓝色栅格表示.因此,算法的目标是对地图中范围内的蓝色栅格全部访问一遍,使机器人从左下角出发,完成对整个地图的全覆盖.

本文算法与其他算法在仿真环境中路径规划的效果如图10~图12所示.仿真实验中,对式(13)中的参数 A 取值为10, B 取值为1.为了验证本文算法对全覆盖任务的有效性以及减少全覆盖过程能量消耗的特性,将本文算法与文献[5]的神经网络结合内螺旋搜索法、文献[16]的区域分解法以及文献[20]的双螺旋法作对比,如表1所示.对比指标为重复率、总路径长度、机器人沿高度方向的总位移(h)以及理论能量消耗(E).因所有算法的覆盖率均达到100%,故不在表1中列出.这里的理论能量消耗采用该研究领域广泛采用的计算方式^[22],并假设机器人底盘长度为50 cm,质量为10 kg,摩擦系数取值为0.05,栅格大小为1 m,重力加速度 g 取值 9.8 m/s^2 .

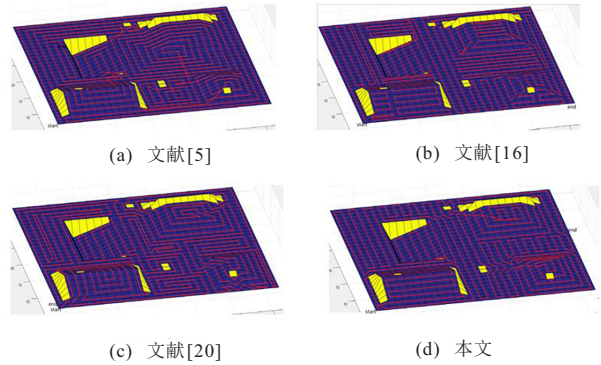


图10 复杂地形1中的路径规划结果

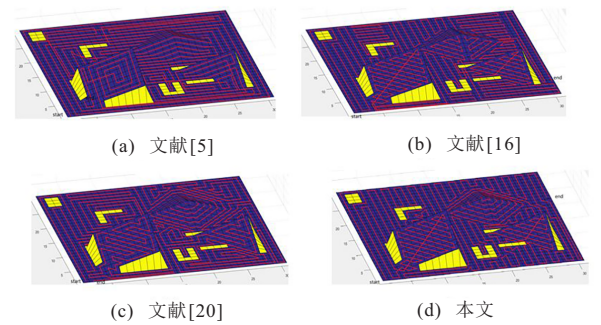


图11 复杂地形2中的路径规划结果

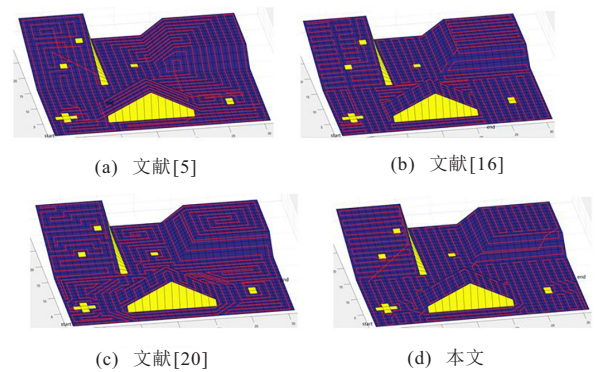


图12 复杂地形3中的路径规划结果

表1 结果对比

| 地形 | 算法 | 重复率/% | 总长度/m | h/m | E/kJ |
|----|--------|------------|--------------|-------------|-------------|
| 1 | 文献[5] | 5.3 | 880.3 | 139.7 | 60.0 |
| | 文献[16] | 6.2 | 887.8 | 72.7 | 44.0 |
| | 文献[20] | 3.0 | 861.0 | 99.0 | 50.1 |
| | 本文 | 2.2 | 854.4 | 46.0 | 35.8 |
| 2 | 文献[5] | 7.8 | 909.8 | 183.0 | 72.3 |
| | 文献[16] | 8.0 | 911.5 | 63.3 | 43.1 |
| | 文献[10] | 4.1 | 878.6 | 59.0 | 41.4 |
| | 本文 | 3.8 | 876.1 | 50.3 | 38.3 |
| 3 | 文献[5] | 6.9 | 910.8 | 262.0 | 92.0 |
| | 文献[16] | 5.2 | 896.3 | 72.3 | 44.4 |
| | 文献[20] | 4.2 | 887.8 | 78.0 | 46.0 |
| | 本文 | 4.0 | 886.1 | 64.5 | 41.9 |
| 平均 | 文献[5] | 6.7 | 900.3 | 194.9 | 74.7 |
| | 文献[16] | 6.5 | 898.5 | 69.4 | 43.8 |
| | 文献[20] | 3.7 | 875.8 | 78.7 | 45.8 |
| | 本文 | 3.3 | 872.2 | 53.6 | 38.7 |

4.2 结果分析

根据仿真结果,本文算法能够完成对复杂地形环境的全覆盖任务.从整体上看,在完成全覆盖任务的前提下,本文算法在重复率、总路径长度、能量消耗方面优于同类算法.本文算法适用于在线规划的条件,与同样适用于在线规划条件的文献[5]中的算法相比,本文的算法在重复率、总路径长度、总能量消耗方面都表现更佳,更能适应复杂的地形条件.与文献[16]和文献[20]中的离线规划算法相比,本文算法在各项指标上都接近或更佳,且能适应更苛刻的在线规划条件.本文提出的算法主要优势在于适用范围广,在多种地形下都能表现出节约能量的特性.仿真环境中,本文设置了4类特殊地形,本文算法在每种地形上的效果如图13所示.

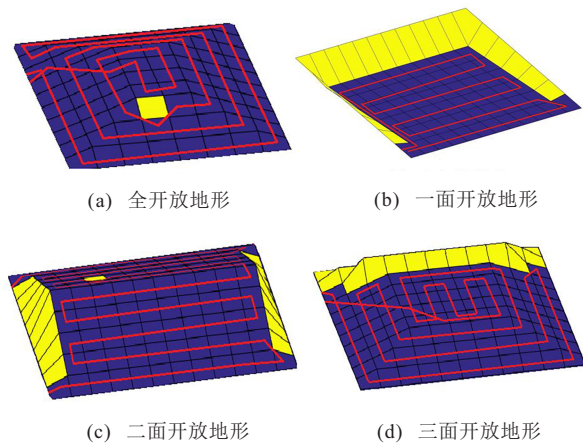


图13 4种特殊地形

1) 全开放地形.

指所有方向都能够通行的地形,在这种地形上,本文算法会表现为内螺旋式的覆盖,然后由进入点离开地形.

2) 一面开放地形.

指一侧可以通行,其他方向均不可通行的地形,在这种地形上,本文算法表现为沿水平方向的往复式覆盖,然后由进入点离开地形.

3) 两面开放地形.

指相对的两侧可以通行,另外两侧不能通行的地形.在这种地形上,本文算法表现为以往复覆盖的方式从一侧进入地形,从另一侧离开地形.

4) 三面开放地形.

指一侧不能通行,其他方向均能通行的地形.在这种地形上,本文算法表现为内螺旋法与往复覆盖相结合的方式,并由进入点离开地形.

通过分析可以发现,本文算法在以上4种地形上均表现良好,其中在三面开放地形上的路径规划能量

节省优势最为明显.作为对比,文献[16]和文献[20]的区域分解法在三面开放式地形上的表现如图14所示.图14(a)中,地形的三面被分解为3个区域分别覆盖,导致整体上无法满足能量最优的约束,在该地形上共有11个单位的垂直位移.图14(b)中,双内螺旋的约束使得轨迹在地形边界多次通过,造成不必要的垂直方向位移,在该地形上共有9个单位的垂直位移.而本文算法,如图14(c)所示,共有7个单位的垂直位移.

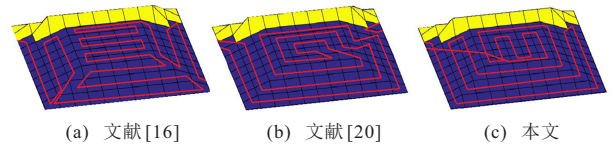


图14 三面开放地形上的表现对比

由于同高度优先覆盖法中对于非地形障碍物采取的特殊避障策略,使得局部的障碍物不会破坏到整个地形覆盖路径的能量最优约束,以复杂地形3中的部分一面开放地形为例,如图15所示.斜面上存在非地形障碍物,作为对比的两种算法规划的路径受到障碍物的影响,使得路径中引入了更多的垂直方向的位移.在此处,文献[16]的算法,共有47.8个单位的垂直方向位移;文献[20]的算法,共有40个单位的垂直方向位移;本文提出的算法,共有33.3个单位的垂直方向位移.

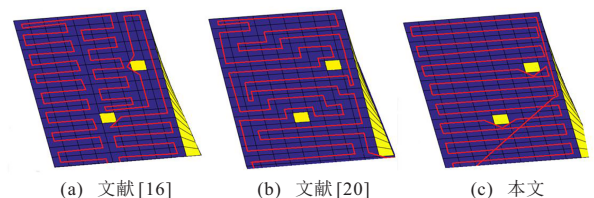


图15 避障策略对比

5 实验

为了验证本文算法的可行性,搭建由自主移动小车、深度相机、计算机等组成的实验平台,如图16所示.在户外有一定高度变化的地形上对本文算法进行实验,并对实验结果做出分析.

自主移动四轮小车的核心部件由STM32嵌入式开发板、含编码器的直流有刷电机以及12V锂电池构成.控制计算机型号为ThinkPad-T480(CPU i5-8250U、内存16GB).移动小车搭载ZED2双目深度相机以及MPU9250惯性传感单元.软件模块基于ROS环境下开发,主要由感知节点、定位节点以及本文的路径规划节点组成.不同节点间,依靠ROS环境的话题发送和订阅机制进行通信.

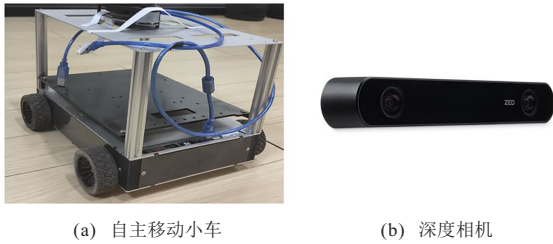


图16 自主移动小车和深度相机

5.1 实验设置

本文实验在兼具有平坦地形和斜坡地形的环境中进行. 在实验环境中划定的一个 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ 大小的矩形范围内均匀设置25个覆盖点位来模拟种植点,如图17所示. 令小车以本文的全覆盖算法对该范围内25个模拟种植点进行全覆盖作业,步长为 1 m ,小车速度为 0.2 m/s ,算法参数设置与仿真实验中相同. 小车自身定位数据由深度相机和IMU通过现有成熟SLAM方案(ORB-SLAM3)实时提供.



图17 实验环境及覆盖点位

5.2 实验过程

小车实际覆盖路径如图18所示. 小车从平坦地形处出发,沿纵向开始覆盖. 算法通过深度相机实时采集稠密点云,经过离散化处理出相邻的8个栅格的高度值,与当前所在栅格的高度值对比. 在未检测到



图18 全覆盖路径规划结果

地形变化时,采用本文的八方向牛耕式覆盖法进行行驶. 若发现高度值与机器人当前所在的栅格不同并具有一定的连续性,则视为地形变化,执行面向地形的区域分解法. 即在遇到斜坡处,不断地计算地形变化函数,在相邻栅格寻找高度相近的栅格并优先移动到这些栅格上. 优先沿高度相近的边缘覆盖,到达边界处向上爬升,而后折返,继续沿相同高度覆盖后,到达地图边界,之后返回进入斜坡的点,离开特殊地形. 完成对特殊地形的覆盖后,继续对平坦区域进行八方向牛耕式覆盖作业,直至全部范围覆盖完毕.

5.3 实验结果及分析

图19为随覆盖过程建立的全局斜面栅格地图模型以及能量约束下的自适应地形全覆盖算法在该地图的理论路径. 观察发现,图18中的实际路径与图19中的理论路径总体上基本相符,移动小车全部到达实验中设置的25个模拟种植点. 整体作业过程覆盖率为 100% ,重复率为 4.0% ,可见算法能够有效实现对复杂地形的全覆盖. 根据电机输出功率测算,整个覆盖过程消耗能量 2.61 kJ . 作为对比,令机器人以相同速度采用普通的往复覆盖法覆盖该地形,其能量消耗为 3.19 kJ . 可见针对地形的改进,使得本文的全覆盖算法具有明显的节约能量的特性.

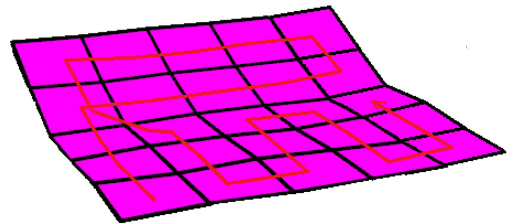


图19 斜面栅格地图及路径

6 结论

本文主要研究了移动机器人在复杂地形环境下的在线全覆盖路径规划问题,主要目的是降低机器人在全覆盖过程中的能量消耗.

本文定义了变分辨率三维栅格地图模型,包含高程图和斜面栅格地图. 基于斜面模型推导出机器人全覆盖过程的能量消耗估计模型,并得出最优的全覆盖方式. 然后,基于区域分解和优先级遍历的思想,提出了一种适用于复杂地形环境的全覆盖能量最优路径规划算法. 此外,还提出了一种针对性的避障策略以进一步降低能量消耗. 通过仿真实验的验证,本文提出的算法确实能够完成复杂地形条件下的在线全覆盖路径规划任务,并且相比于其他算法,能有效地降低覆盖过程重复率以及能量消耗.

参考文献(References)

- [1] State forestry administration. Bulletin on desertification and desertification in China[EB/OL]. (2015-12-29) [2022-08-22]. <https://www.forestry.gov.cn/main/65/20151229/835177.html>.
- [2] Peng Y K, Xu S, Chen Y D, et al. Complete traversal path planning of indoor robot based on backtracking[J]. *Industrial Control Computer*, 2021, 34(6): 33-36.
- [3] Lewis J S, Edwards W, Benson K, et al. Semi-boustrophedon coverage with a dubins vehicle[C]. 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Vancouver, 2017: 5630-5637.
- [4] Zhou L N, Wang Y, Zhang X, et al. Complete coverage path planning of mobile robot on abandoned mine land[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2020, 42(9): 1220-1228.
- [5] Sun J, Chen Z H, Wang P, et al. Multi-region coverage method based on cost map and minimal tree for mobile robot[J]. *Robot*, 2015, 37(4): 435-442.
- [6] Wang Y N, Pan Q, Chen Y J. Path planning method based on improved biologically inspired neural network[J]. *Control Engineering of China*, 2018, 25(4): 541-548.
- [7] Qian J W, Dai X Q, Gao H B, et al. Path planning algorithm for biological incentive traversal based on internal spiral search[J]. *Computer Simulation*, 2021, 38(9): 339-343.
- [8] Chen C Y, Xiong H G, Tao Y, et al. Coverage path planning method for service robot based on efficient template algorithm and dynamic window approach[J]. *Chinese High Technology Letters*, 2020, 30(9): 949-958.
- [9] Zhu D Q, Tian C, Sun B, et al. Complete coverage path planning of autonomous underwater vehicle based on GBNN algorithm[J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2019, 94(1): 237-249.
- [10] Wei L X, Zhang Y K, Sun H, et al. Robot dynamic path planning based on improved ant colony and DWA algorithm[J]. *Control and Decision*, 2022, 37(9): 2211-2216.
- [11] Atkar P N, Choset H, Rizzi A A, et al. Exact cellular decomposition of closed orientable surfaces embedded in R3[C]. *IEEE International Conference on Robotics and Automation Seoul*, 2006: 699-704.
- [12] Lin Y Y, Ni C C, Lei N, et al. Robot Coverage Path planning for general surfaces using quadratic differentials[C]. 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Singapore, 2017: 5005-5011.
- [13] Zhang H J, Su Z B, Hernandez D, et al. Energy optimal path planning for mobile robots based on improved AD* algorithm[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(9): 19-26.
- [14] Hameed I A. Intelligent coverage path planning for agricultural robots and autonomous machines on three-dimensional terrain[J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2014, 74(3): 965-983.
- [15] Hameed I A, la Cour-Harbo A, Osen O L. Side-to-side 3D coverage path planning approach for agricultural robots to minimize skip/overlap areas between swaths[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2016, 76: 36-45.
- [16] Dogru S, Marques L. Towards fully autonomous energy efficient Coverage Path Planning for autonomous mobile robots on 3D terrain[C]. 2015 European Conference on Mobile Robots. Lincoln, 2015: 1-6.
- [17] Jin J, Tang L. Coverage path planning on three-dimensional terrain for arable farming[J]. *Journal of Field Robotics*, 2011, 28(3): 424-440.
- [18] Kalaivanan S, Kalpana R. Coverage path planning for an autonomous robot specific to agricultural operations[C]. *International Conference on Intelligent Computing and Control (I2C2)*. Coimbatore, 2018: 1-5.
- [19] Wei M H, Isler V. Coverage path planning under the energy constraint[C]. 2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Brisbane, 2018: 368-373.
- [20] Wu C M, Dai C K, Gong X X, et al. Energy-efficient coverage path planning for general terrain surfaces[C]. *IEEE Robotics and Automation Letters*. Piscataway: IEEE, 2019: 2584-2591.
- [21] Fankhauser P, Bloesch M, Hutter M. Probabilistic terrain mapping for mobile robots with uncertain localization[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2018, 3(4): 3019-3026.
- [22] 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.

作者简介

齐立哲(1981—),男,研究员,博士生导师,从事机器人结构、感知、控制、规划等研究, E-mail: qilizhe@fudan.edu.cn;

华中伟(1989—),男,讲师,硕士,从事机器视觉的研究, E-mail: huorantiancai@163.com;

苏昊(1996—),男,硕士,从事机器人规划的研究, E-mail: 347449812@qq.com;

王鑫瑞(1999—),男,硕士,从事机器人控制的研究, E-mail: 20210860149@fudan.edu.cn;

孙云权(1962—),男,教授,博士生导师,从事机器人结构、感知、控制等研究, E-mail: sunyunquan@fudan.edu.cn.