

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2013.11.031

清洁机器人路径规划算法研究综述*

赵晓东, 鲍方

(杭州电子科技大学 信息与控制研究所, 浙江 杭州 310018)

摘要:针对目前清洁机器人的清洁效率低,同时路径规划技术在实际应用中方法简单、适应性弱,特别是在障碍物环境下存在明显的不足等问题,提出了路径规划的基本方法及关键过程,保证机器人完成清洁任务,达到自主路径规划和全区域覆盖的要求。着重分析了环境建模的不同技术,同时讨论了在环境地图中不同的路径搜索算法,通过对算法的覆盖率、重复率等重要性能指标进行了比较,分析了不同算法的优、缺点及适用范围,为算法的合理应用提供了技术参考,最后提出了清洁机器人进一步研究的方向。研究表明,根据环境的复杂程度,需要采取不同的路径规划算法来制定控制方案,而对多种算法进行融合技术处理则能有效地提高对不同环境的适用度以及控制系统的鲁棒性。

关键词:清洁机器人;路径规划;环境建模;覆盖率;鲁棒性

中图分类号:TP242.6

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2013)11-1440-05

Survey on cleaning robot path planning algorithm

ZHAO Xiao-dong, BAO Fang

(Institute of Information and Control, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aiming at the current problems of cleaning robots' inefficient cleaning, and the robots' key technology that path planning used in the practical occasions is simple and weak, especially apparent deficiencies exist under the obstacle circumstances, the basic approaches and key process were proposed to ensure that cleaning tasks were completed, and the requirements of autonomous path planning and full regional coverage were achieved. Various technologies on environment modeling were emphatically analyzed, and path search algorithm applied in the environmental map was also discussed, then the advantages and disadvantages and application scope of different algorithms were analyzed by comparing through algorithm performance of coverage and repetition rate, in result, technical reference was provided for reasonable application, eventually, research direction of future cleaning robot was put forward. The results indicate that, according to the complexity of environment, it takes a different path planning algorithm to develop control scheme, but the integration of various algorithms can effectively improve the degree of environmental application and control system robustness.

Key words: cleaning robot; path planning; environment modeling; coverage rate; robustness

0 引言

智能清洁机器人是家用服务机器人的一种,具有扫地省时、省力,功能多样化,轻便小巧等特点,可大大减轻人的劳动负担,正成为机器人研究的热点,它具有较多的科研价值和广阔的市场前景^[1]。智能清洁机器人是一个庞大的系统,包括移动系统、清扫洗尘系

统、避障系统和垃圾压缩系统^[2]。它拥有强大的多重感应装置和处理芯片,能够自动辨别目标环境是否干净,自动躲避障碍物,并根据实际情况采用不同的清洁策略,以保证完成清洁任务。据有关资料显示,2011~2012年世界智能清洁机器人取得了很多新进展,例如美国研制出受伤后可自行调整的机器人、英国设计出吃苍蝇老鼠的机器人家具、法国研发出“儿童机器

收稿日期:2013-06-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60974138);浙江省人才计划资助项目(R10080)

作者简介:赵晓东(1971-),男,山西太原人,博士,教授,硕士生导师,主要从事控制理论与控制工程方面的研究. E-mail:xdzhao@hdu.edu.cn

人”、欧洲研发出的超级机器人能预知人类意图、韩国推出手机遥控清洁机器人等,可以说,世界智能清洁机器人行业发展迅速。

机器人技术是现代科学与技术的交叉和综合的表现,虽然机器人功能多种多样,但是核心技术是互通的,即移动系统中的路径规划算法。如何快速寻找到一条覆盖率高、重复率低等特点的路径,提高清洁机器人工作效率,成为了路径规划的研究热点。

本研究首先介绍路径规划方法的基本概念,然后分析各种算法的基本特点并阐释了它们的优、缺点,最后对该领域未来研究方向进行展望,为研究清洁机器人路径规划算法提供一个系统的参考。

1 路径规划方法介绍

清洁机器人的路径规划是机器人学的一个基本而又复杂的问题,是指机器人根据所感知的环境信息,按照某种优化指标在起始点和目标点之间规划出一条与环境障碍无碰撞并实现全区域覆盖的路径^[3]。从定义中可得,清洁机器人路径规划需要解决 3 个问题:①需完成全区域覆盖的清扫任务;②机器人能根据一定的算法避障;③在众多路径中寻找最优。

由于清洁机器人的路径规划属于全覆盖寻优,基于这个特殊要求,从而提出路径规划的目标是在封闭区域内实现机器人的移动路径对工作区域(该文所讨论的是指室内环境)的最大覆盖率和最小重复率。覆盖率和重复率是清洁机器人路径规划最主要的两个评估标准,除了这两个参数当然还有机器人的能量消耗、未覆盖率、清洁剂消耗量等参数。清洁机器人的全区域覆盖路径规划可以分为无环境模型全区域覆盖、基于环境模型全区域覆盖以及混合方法。

2 无环境模型的路径规划

无环境模型的路径规划分为随机全区域覆盖和规划式全区域覆盖路径规划,规划式全区域覆盖路径规划方法无需建立环境模型,实际应用很多而且技术成熟,一般包括往返式“梳”字型路径规划和内螺旋式“回”字型路径规划^[4]。往返式路径规划如图 1 所示,往返式路径规划的清扫规则为:首先,将清洁机器人放置在室内的某一角落;然后,沿某一方向行进;遇到障碍物后采取避障策略,碰到墙壁则移一个车身转弯掉头继续行进,如此来回运动以达到遍历整个环境。

文献[5]实现了在避障策略下基于往返式的全区域覆盖路径规划,并用先绕行环境一周,接着以环境的

最小跨度为行走方向的改进方法,这样可以降低能量消耗。

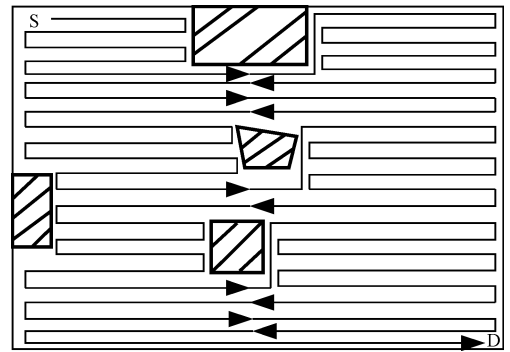


图 1 往返式路径规划

内螺旋路径规划即让机器人沿着墙壁的边界移动,遇到障碍物则沿边移动或采取避障策略,进行“回”字型移动,最后到达环境的中心点,但是相比于“梳”字型路径,“回”字型路径存在一个难题,由于没有明显的转折点,必须给机器人一个标志,让它知道何时进入下个内圈行进。无环境模型的路径规划由于在实际应用中设计简单、控制方便,在简单的清扫环境下,采取该方法能取得高效的回报。

3 基于环境模型的路径规划

要让清洁机器人达到高质量的遍历环境效果,必须建立环境模型,而创建环境地图是建立环境模型最常用且有效的方法。目前所用到的地图模型大致可以分为栅格地图、可视图、拓扑地图等,然后在地图的基础上运用图的遍历技术或者启发式搜索算法获得最优路径^[6]。

3.1 栅格地图

栅格法是运用最多的构建环境地图方法,即把整个待覆盖区域平面划分成很多小方格,然后定义几种标记,分别为未覆盖区域、已覆盖区域、障碍物区域等,并给每个小方格标上一种标记,通过这种对环境的离散化处理,可以将抽象的环境信息转为具体的数值。这种建立环境模型的方法简单,易于实现,但是如果达到精确的环境地图或者遇到复杂的环境必须消耗大量的存储空间,而且也会降低搜索效率。基于栅格地图的路径规划方法被广泛地研究,包括通过改进栅格的研究和优化搜索算法的研究。

3.1.1 四叉树分解法

四叉树分解法是对栅格地图的一种改进,研究者利用四叉树对环境信息建模,可以高效地对环境信息进行压缩,使遍历区域更加清晰,降低路径规划问题的

规模,提高了搜索效率。建立四叉树环境模型,一般有以下步骤:①将整个环境区域看作是一个根节点;②树中每个节点拥有以下状态之一:障碍节点、自由节点、混合节点,其中混合节点包含障碍空间和自由空间;③将混合节点进行横竖分解,直到每个子节点状态变成障碍节点或者自由节点,环境分割及其编码如图 2 所示,环境空间被有效地分割,图中的灰色区域为障碍空间,白色区域为自由空间;④将这些节点进行编码以方便处理,四叉树环境模型如图 3 所示,利用四叉树来表示区域划分后的结果。

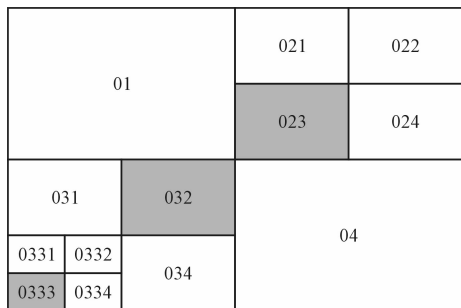


图 2 环境分割及其编码

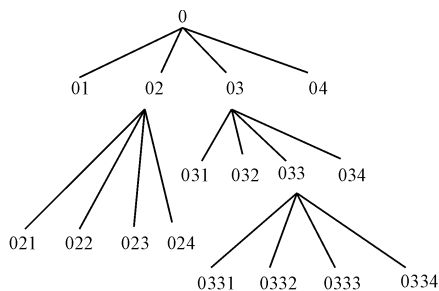


图 3 四叉树环境模型

众所周知,树这种数据结构具有快速查找、删除、添加节点等优点,所以如果环境中的某区域有所变化时,环境模型也极易被修改和更新快。建立了四叉树环境模型后,只要运用树的遍历算法对自由空间进行搜索,就能进行全区域覆盖了,文献[7]利用改进的蚁群算法在四叉树环境地图中进行路径规划。虽然四叉树环境模型对栅格地图进行了优化,大大简化了数据的存储量,但是也存在着缺陷,如在要求精确的环境信息时,栅格必须一直划分下去,造成树的深度加大。

3.1.2 区域分解法

区域分解法也是对栅格地图的一种改进,即对已经构建好的栅格地图再次区域分割,把整个待覆盖区域分割成若干个无障碍物区域的集合,接着以这些无障碍物区域的中心建立连通图,然后确定小区域的遍历顺序,最后清洁机器人依据顺序完成清洁任务。用这种方法构建的环境地图清晰明确,环境模型中只有

障碍物区域和自由区域,清洁机器人只需要进行小区域的覆盖,而无需盲目地探索环境。

此外,该方法还需解决区域遍历顺序问题,区域分解法所建立的连通图有点类似著名的旅行商问题,而目前遗传算法、蚁群算法等都可以很好地解决旅行商问题,所以衔接顺序也就能解了。文献[8]就是采用区域分解法建立环境模型,图的搜索方法确定遍历顺序,然后运用内螺旋式行走方法在小区域中遍历。但是,当遇到多障碍物环境时,以障碍物为中心划分环境的方法,会使环境模型中的区域增多,这会消耗大量 CPU 时间去处理遍历顺序问题。

3.1.3 全局规划法

神经网络、遗传算法、A* 算法等算法由于能够很好地用于求得问题空间的全局最优解,很多研究人员在这类算法的基础上进行全区域覆盖算法的研究。文献[9]提出的算法在未知环境中能规划出被机器人执行的路径,并且根据障碍物的信息重新规划路径,在动态中引导机器人移动。文献[10]是在构建的栅格地图下,运用遗传算法搜索策略在起点与目标点之间寻求最优路径,机器人只需在这两点之间的不同路线上进行来回清扫就能达到全区域覆盖的要求。全局路径规划法如图 4 所示,栅格地图下的全局规划法能完成全区域覆盖任务。

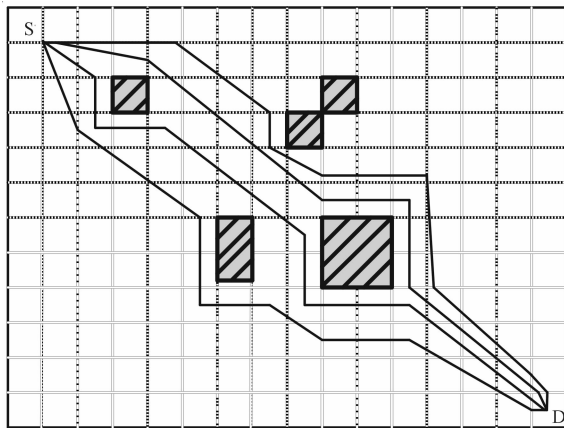


图 4 全局路径规划法

在这个算法中,栅格主要有两个作用:①标记环境清扫的状态;②方便遗传算法的编码。缺点在于只进行一次遗传算法计算无法遍历整个环境,往往需要进行多次运算,这样造成计算量大。

3.2 可视图

可视图法就是在构建地图时,首先,将清洁机器人视为一点,而环境中的障碍物用多边形表示;然后,将多边形的顶点与起点、目标点相连接,形成全区域连通图如图 5 所示;最后,依据启发式搜索算法,寻找到一

条最优的全区域覆盖路径。

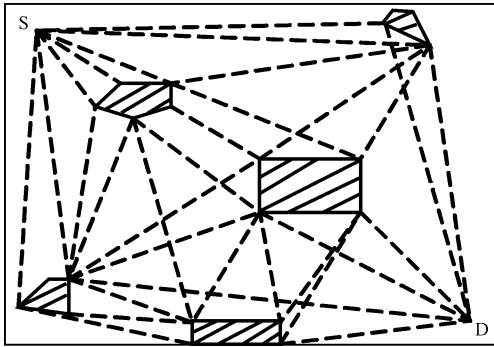


图 5 可视图环境模型

该方法的缺点是:在确定性已知的清扫环境中实现容易,但是在未知环境里,必须通过传感器采集到的信息对障碍物进行分析处理,对传感器系统和图像处理要求较高,这实现起来困难;其次,是在复杂的障碍物环境中,构成的连通图也相当繁琐,导致搜索算法实现起来不易;最后,如果在清扫区域内环境一旦有所变化,那么地图必须重新构建,更新过程复杂且慢。

切线图法是对可视图法的一种改进,障碍物并不是以它们的形状多边形进行表示,而是用障碍物的切线表示弧。该方法的缺点是:虽然相对于可视图法机器人沿边移动与障碍物碰撞的几率降低,但是可能性还是很高。

3.3 拓扑地图

拓扑法是根据环境和机器人的特点,将空间分割为若干个拓扑特征相似的子区域,拓扑图中的节点对应于环境中的一个特征状态或由感知决定的地点,将这些节点依据彼此的连通性构建一个拓扑网,只需要运用搜索算法就能找到一条拓扑路径,进而反映到环境中的几何路径。在环境较为简单时,拓扑地图是一种有效的环境建模方法,存储量少,可以快速实现路径规划,把环境表示成一种较为抽象和自然的信息。在拓扑地图中,机器人通常不需要准确的位置信息,因此机器人的位置误差也就有了更好的鲁棒性。

该方法的不足是:拓扑地图一般难以直接获取,对传感器系统的要求颇高,且对相似环境的识别较为困难,一般用于特定的环境^[11]。

4 混合型方法

混合型方法结合了各种路径规划方法的优点,在全区域覆盖方法上取长补短、从“粗”到“细”。目前,将模糊逻辑、遗传算法、蚁群算法以及神经网络^[12]等方法相结合,组成了一些新的机器人路径规划方法,提

高了规划的效率和清扫的效果。周明等提出利用遗传算法和模拟退火算法相结合的方法来解决遗传算法的早熟现象,克服了其局部寻优能力较差的缺点。文献[13]提出了一种改进的蚁群算法,通过在遗传算法中加入变异因子,解决蚁群算法在规划中容易陷入局部最优的问题。文献[14]将改进的粒子群算法和蚁群算法进行融合,形成 PAAA 算法,这种算法在路径求解性能上优于粒子群算法,在时间效率上优于蚁群算法。文献[15]将内螺旋法、野火法以及 A* 算法结合,提出了一种高效的全覆盖路径规划算法。首先以内螺旋法进行全区域覆盖,再用野火法寻找未覆盖的区域,接着用 A* 算法寻找到达未覆盖区域的最优路径,最后完成清扫任务。这个算法的优点在于能达到比较高的清扫覆盖率,但是同时也增加了清扫重复率。

5 结束语

本研究分析了近几年来清洁机器人的全区域覆盖路径规划算法,讨论了算法的两个主要方面:①环境建模方法;②路径搜索算法。两者互为作用,相辅相成。但是,许多学者研究了大量的先进理论,却未能应用于实践,智能机器人也正处于“低智能阶段”。而且综合上述方法的优、缺点得知,每种方法都有其应用条件限制,所以在实际应用中,应结合具体的环境信息,选择最为有效的路径规划方法。然而,随着近几年来传感器技术和多信息融合技术的快速发展,大大地提升了机器人的定位技术和环境建模技术,一旦环境模型具备快速建立、快速改变等鲁棒性特点,相信未来路径搜索算法在环境地图中的应用更加得心应手。

对此,路径规划技术有以下几个问题需要进一步研究:①在如今强大的硬件平台下,发展技术建立精确的环境模型信息,包括有些场合需要建立 3D 环境模型;②通过融合 2 种或多种方法的策略,设计出新的路径规划算法,弥补自身算法的缺点,使算法具有收敛快、应用简单等特点。

参考文献 (References):

- [1] 李航,宋春华,罗胜彬,等. 机器人的研究现状及其发展趋势[J]. 微特电机, 2013, 41(4): 49-51.
- [2] 闫中奎,何常玉,曹晓明,等. 全方位智能清扫垃圾机器人[J]. 中国科技投资, 2013, 4(11): 111-112.
- [3] 王继超. 基于 ARM 的家用清洁机器人软件设计于研究[D]. 杭州:浙江工业大学信息工程学院, 2011.
- [4] PALLEJA T, TRESANCHZ M, TEIXIDO M, et al. Modeling floor cleaning coverage performances of some domestic

mobile robots in a reduced scenario[J]. **Robotics and Autonomous System**, 2010, 58(1):37-45.

[5] 周学益. 清洁机器人全区域覆盖路径算法与避障控制研究[D]. 重庆:重庆大学自动化学院, 2007.

[6] JONES M T. 人工智能[M]. 黄厚宽, 尹传环, 董兴业, 等, 译. 北京:电子工业出版社, 2010.

[7] 赵百铁, 张利军, 贾鹤鸣. 基于四叉树和改进蚁群算法的全局路径规划[J]. 应用科技, 2011, 38(10):23-28.

[8] 马正华, 李敏, 章明, 等. 智能吸尘器全覆盖遍历路径规划及仿真实现[J]. 测控技术, 2012, 31(2):99-102.

[9] 张紫辉, 熊岳山. 未知环境下基于 A* 的机器人路径规划算法[J]. 计算机工程与科学, 2012, 34(11):141-147.

[10] 蒋玉杰, 曾岑. 清洁机器人基于遗传算法的全区域路径规划[J]. 机械制造, 2009, 47(5):18-20.

[11] 曾碧. 移动机器人的动态环境建模与路径规划研究[D]. 广州:广东工业大学自动化学院, 2010.

[12] LUO C, YANG S X. A bioinspired neural network for real-time concurrent map building and complete coverage robot navigation in unknown environments[J]. **IEEE Transactions on Neural Networks**, 2008, 22(12):1279-1298.

[13] 李学洋, 李悦, 张亚伟. 基于遗传变异蚁群算法的机器人路径规划的改进[J]. 电子设计工程, 2012, 20(15):38-40.

[14] 杨惠, 李峰. 粒子群和蚁群融合算法的自主清洁机器人路径[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(32):200-203.

[15] 刘淑华, 夏菁, 孙学敏, 等. 已知环境下一种高效全覆盖路径规划算法[J]. 东北师范大学学报, 2011, 43(4):39-43.

[编辑:李辉]

(上接第 1439 页)

能家居系统的软、硬件设计方案以及系统的具体实现。MQX 实时操作系统满足应用对嵌入式系统的实时性、可靠性, 缩短开发周期和减小后期维护的难度的要求, 基于 LabVIEW 开发的上位机软件实现了对外界环境的采集和实时监控。经实验验证, 该系统具有运行稳定、测量准确、报警及时、操作简单等优点。该设计方案的实现使 MQX 实时操作系统应用在智能家居上成为一种可能。

参考文献 (References):

[1] 谭涛, 徐晓辉, 黄晓亮, 等. 基于 Arm-Linux 的嵌入式智能家居控制系统的设计[J]. 电子设计工程, 2011, 19(3):160-162.

[2] 程玉娟. 基于嵌入式实时操作系统 MQX 的内核分析与应用研究[D]. 苏州:苏州大学计算机科学与技术学院, 2011.

[3] 薛席, 刘贯营. 基于 Cortex-M4 内核的智能瓦斯监测仪的设计[J]. 中国科技新产品, 2012(18):9.

[4] Freescale Semiconductor Inc.. K60 Sub-Family Reference Manual [EB/OL]. [2011-11-06]. <http://www.freescale.com>.

[5] 张伟, 王晓涛, 王世伟. 基于 ARM 的智能家居远程控制系统的的设计[J]. 信息科学, 2010(8):72-73.

[6] Freescale Semiconductor Inc.. Freescale MQX RTOS Reference Manual [EB/OL]. [2011-04-06]. <http://www.freescale.com/mqx>.

[7] 刘刚. 基于 S3C44B0X 和 μ C/OS-II 智能家居嵌入式系统设计[J]. 现代电子技术, 2008(14):43-45.

[8] Freescale Semiconductor. Inc.. Motor Control Under the Freescale MQX Operating System [M]. Freescale Semiconductor. Inc., 2011.

[9] 贾少才, 兰西柱, 李叶. 基于 MQX 实时操作系统的微机保护装置研究[J/OL]. [2012-03-29]. <http://www.paper.edu.cn>.

[10] 吴瑾, 程玉娟, 王宜怀. MQX 实时操作系统在 MCF52259 上移植的研究与实现[J]. 微计算机信息, 2011, 27(3):95-97.

[11] 傅杰. 嵌入式操作系统的任务调度策略研究[D]. 长沙:湖南大学软件学院, 2005.

[12] 陈敏, 汤晓安. 虚拟仪器软件 LabVIEW 与数据采集[J]. 小型微型计算机系统, 2001, 22(4):501-503.

[13] 蒋威, 吴建华. 基于 Matlab 和 LabVIEW 的电机控制系统集成开发[J]. 机电工程, 2006, 23(7):8-9.

[14] 徐之健, 史伟民, 彭来湖, 等. 基于 GSM 短消息的滚动式广告机远程通信控制系统[J]. 机电工程, 2011, 28(3):357-359.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

赵晓东, 鲍方. 清洁机器人路径规划算法研究综述[J]. 机电工程, 2013, 30(11):1440-1444.

ZHAO Xiao-dong, BAO Fang. Survey on cleaning robot path planning algorithm[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2013, 30(11):1440-1444. 《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>