

文章编号:1001-9081(2012)09-2527-03

doi:10.3724/SP.J.1087.2012.02527

基于测距特征向量匹配和模糊控制的室内清洁机器人路径规划

张志杰*

(西南民族大学 计算机科学与技术学院, 成都 610041)

(*通信作者电子邮箱 sccdzhangzhijie@163.com)

摘要:随机路径规划算法大量用于商品化的室内清洁机器人,但规划效率低下,为此提出一种低成本、高效的改进方法。由于机器人到其四周障碍物的距离随空间位置不同而变化,先使用超声测距模块获得障碍距离并组成特征向量用以区分不同的空间位置;然后,用推土机距离(EMD)进行特征向量匹配,建立并维护碰撞点集;最后,利用模糊控制理论处理碰撞后的旋转角度,完成路径规划过程。实验结果表明,所提方法一方面保留了随机规划的工作趣味性和环境适应性,另一方面大大提高了清洁效率。

关键词:清洁机器人;路径规划;测距特征向量;模糊控制;推土机距离

中图分类号:TP242.6 文献标志码:A

Indoor cleaning robot path planning based on distance feature vector matching and fuzzy control

ZHANG Zhi-jie*

(College of Computer Science and Technology, Southwest University for Nationalities, Chengdu Sichuan 610041, China)

Abstract: With regard to the inefficiency of random path planning method used by many indoor cleaning robots, a low-cost and efficient improvement method was proposed in this paper. The main idea was that the distance between the robot and its surrounding obstacles varied with the location of working robot. First, ultrasound distance measurement was used for obtaining the distances to form the feature vector which could identify different locations in work place. Then feature matching problem was solved by Earth Move's Distance (EMD), and the set of collision points was established. At last, fuzzy control theory was used for controlling rotation angle after collision to finish path planning procedure. As shown on the experiments, the proposed method can not only reserve the property of enjoyment and environment flexibility, but also promote the efficiency greatly.

Key words: cleaning robot; path planning; distance feature vector; fuzzy control; Earth Move's Distance (EMD)

0 引言

路径规划是自主式移动机器人的一项重要研究内容。室内清洁机器人常用的路径规划方法可分为全区域规划和随机规划,全区域规划是在确保全覆盖的前提下以最短时间和最有效率的方式搜索工作区域,是目前的研究热点,常用的方法有:几何法(如螺旋式、回字型、Z字型、往返前进)^[1-3]、势场法^[4-5]、栅格法^[6-7]等。栅格法采样栅格(grid)表示地图,用于机器人的空间定位,规划路径的精确程度由栅格的粒度大小确定,是目前效果较好的规划方法。此外,文献[8]中提出了一种三角栅格模型,跟传统的正方形栅格相比具有较高的灵活性。通过将栅格法和一些机器学习和人工智能算法相结合,比如蚁群算法^[9],可以使搜索过程更加高效和智能化。栅格法中栅格的建立需要利用精密传感器和较为复杂的行走控制系统,如激光测距仪、步进电机、编码盘、高速DSP芯片等^[10],虽然具有较好的规划效果,但成本难以控制,其成品不适合推广到普通家庭使用。多数全区域规划方法生成的路径比较固定,机器人通过学习后会沿着固定的路径工作,往往给人单调、机械的感觉;而且全区域规划算法需要较高的数据精度,虽然在实验室环境中取得了良好的效果,但难以适应复杂和突变的环境,比如家居环境。

已经市场化的适用于普通家庭的清洁机器人大多采用改

进的随机规划算法,即机器人在工作空间随机游走,采用一些简单手段避免路径重复。这种方法虽然效率不高,但是具有结构简单、工作稳定、环境适应能力强等优点,成为了目前最经济实用的路径规划方法;但其较强的随机性导致的无法确保全覆盖和容易陷入局部空间,是其最大缺点,并严重影响其工作效率。本文正是针对随机规划这一缺点,通过增加简单的定位装置(超声波测距探头和电子罗盘),利用它们给出的障碍距离信息和方位信息对机器人进行粗定位,实时调整机器人并避免多次经过同一位置,从而有效改善了随机规划的效率。本文方法能够继承随机规划方法的全部优点,并在统计意义上大大超过随机规划方法。

1 系统结构和基本思想

清洁机机器人的典型结构由行走结构、传感系统、控制系统和吸尘系统组成。本文在此基础上增加两个用于测量前后障碍距离的超声测距模块和一个用于方向测定的电子罗盘(见图1)。超声波测距用于区别室内不同位置而非精确定位,因此对其性能指标如发射角度、发散程度、测距精度等没有严格要求,一些能满足基本测距要求的廉价模块均可使用。

本文方法的基本思想来源于碰撞覆盖假设。图2(a)是一个理想正方形环境,如果机器人碰到障碍(墙壁)后以沿45°方向反弹,机器人会陷入死循环。而如果采用图2(b)的

策略:每次发生碰撞时,判断出该碰撞点是否已经经过,如果已经过就向前移动一定距离,这样生成的路径一定是最优的。在系统实施过程中,考虑到对环境的适应力和趣味性,机器人采样随机折线行走,反弹角度并非 45° 而是根据模糊系统输出确定。

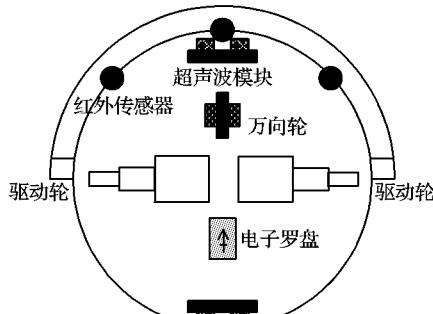


图 1 清洁机器人系统结构

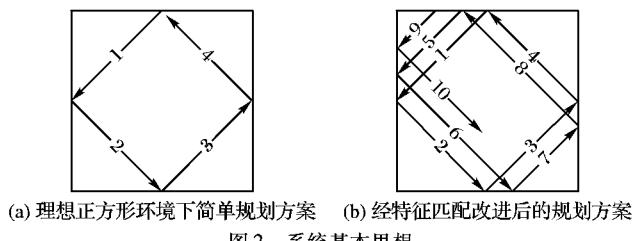


图 2 系统基本思想

系统的控制流程如图 3 所示,由于所需运算量不大,常用的 CPU 从 8 位的 51,AVR 系列到 16 位的 PIC,MSP430 系列均可以达到预期效果。系统通过为每个碰撞点建立测距特征向量,并将从未经过的碰撞点加入碰撞点集以达到维护的目的。

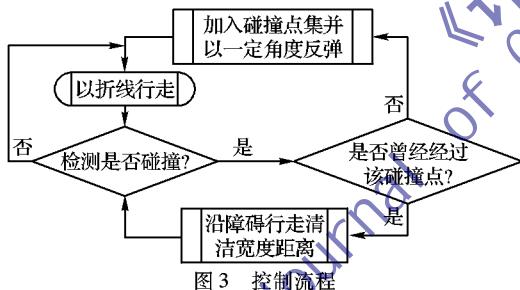


图 3 控制流程

2 测距特征向量匹配算法

2.1 特征向量的获取和定义

完整的测距特征向量是一 35 维的行向量,定义为 $\mathbf{D} = (d^1, d^2, \dots, d^{35}) \in \mathbb{R}^{35}$ 。 \mathbf{D} 中 d^i 表示 $(i-1) \times 10^\circ$ 方向的障碍距离,它由超声波测距模块以 10° 为间隔得到的周围 360° 障碍距离集组成。测距向量的获取可以利用机器人在碰到障碍物后原地旋转得到。以安装前后两个超声波模块为例,机器人需要转向 180° 以获取全部 35 个特征向量,如果安装了 4 个超声波模块,只需要旋转 90° 。在一般情况下,在室内不同位置获取的测距特征向量是具有唯一性的,因此可用于区分不同的空间位置。

2.2 特征匹配和特征点集的更新

设 $\{\mathbf{D}_1, \mathbf{D}_2, \dots, \mathbf{D}_N\}$ 为一组特征向量(点)集, N 为系统容纳的最大点数,大小取决于 CPU 的处理能力。路径规划的目的在于减少重复路径,用 $\{p_1, p_2, \dots, p_N\}$ 代表机器人穿越点集中相应碰撞点 \mathbf{D}_i 的次数,通过最小化穿越总次数 ($\min \sum p_i$) 的方法达到规划目的。对于新检测到的碰撞点

\mathbf{D}_{new} ,使用 EMD 距离进行碰撞点匹配,EMD 距离定义为:

$$EMD(\mathbf{D}_1, \mathbf{D}_2) = \sum (\mathbf{D}_1 - \mathbf{D}_2)^2 \quad (1)$$

并使用下面方法更新点集:首先利用式(1)获得 \mathbf{D}_{new} 与已有点集 $\{\mathbf{D}_1, \mathbf{D}_2, \dots, \mathbf{D}_N\}$ 的 EMD 距离,如果最小距离小于某一阈值 T 则表示向量匹配,增加相应穿越计数 p_i ;否则向量未匹配,将 \mathbf{D}_{new} 插入点集。插入更新时,如果达到系统容量 N ,使用“最少使用更新”策略,即用新碰撞点替代点集中穿越次数最少的特征点;也可以使用“最不常用更新”策略,淘汰很久没有穿越过的特征点。

2.3 特征向量的部分匹配

为了获取完整的特征向量,需要机器人原地旋转 180° ,虽然可以在碰撞旋转时部分获取,但也会浪费大量的能量,有悖于路径规划的初衷。观察发现,当机器人旋转避障时存在一个时刻:机器人的向前方向与墙壁平行(如图 2(b)所示),此时也刚好处于未检测到碰撞的状态。在这一状态下获取机器人前后超声测距值,组成 2 维部分特征向量 $\mathbf{D} = (d^{front}, d^{back})$,再加上罗盘方位信息,用以代替 35 维完整特征向量,同样可以达到较好的效果。这样一方面避免了机器人原地旋转,同时大大提高特征匹配速度并节约存储空间。

部分匹配算法的流程为:

- 1) 机器人在工作区域内按折线方式游走。如果碰到障碍,转 2)。
- 2) 机器人旋转避障。在旋转到刚好检测不到障碍时,得到已旋转角度 $\Delta\theta$ 。同时,由超声测距得到 2 维部分特征向量 \mathbf{D} ,并根据电子罗盘得到障碍物表面法线角度 φ ,转 3)。
- 3) 用 \mathbf{D} 对碰撞特征点集进行匹配和更新,并获得匹配碰撞点的穿越次数 p_{ip} 。由于两面平行墙壁可能存在相同的特征值,可以根据角度 φ 区分,然后转 4)。

- 4) 将已旋转角度 $\Delta\theta$ 和匹配点的穿越次数 p_{ip} 作为参数通过模糊控制(见第 3 章)得到继续旋转角度 $\Delta\theta'$,如果 $\Delta\theta'$ 过小(如小于 10°)则转 5) 进入沿墙模式;否则机器人在旋转 $\Delta\theta'$ 后转 1)。

- 5) 沿墙模式中,机器人沿墙行走并继续进行特征匹配,直到不匹配为止,转 2)。

根据 EMD 距离的性质,特征匹配中 EMD 的阈值 T 根据机器人清扫宽度 w 确定,其公式为:

$$T = 2 \times w^2 \quad (2)$$

式(2)能够保证:当机器人处于沿墙模式中时,一旦移动距离超过清扫宽度就会发生未匹配,从而使机器人及时转入下一条邻近工作路径以免发生死角现象。

3 旋转角度的模糊控制

机器人在遇到障碍转过 $\Delta\theta$ 直到检测不到障碍并与障碍法线垂直后,需要继续转过的角度 $\Delta\theta'$ 由以下几个因素决定:

- 1) 已经转过的角度 $\Delta\theta$ 。如果已经转过了较大角度,则应期望 $\Delta\theta'$ 较小,避免浪费能量;
- 2) 特征匹配与否。如果未匹配则期望机器人转过适当角度(如 $40^\circ \sim 60^\circ$)后反弹回去,可以保证进入新的路径工作;
- 3) 特征匹配次数 p_{ip} 。如果匹配次数很少则期望机器人进入沿墙模式;如果很大则说明该区域已经造访很多次,则期望机器人转过较小或较大的一个角度后反弹回去。

用模糊控制理论解决这个问题^[11]。该模糊系统由两个输入($\Delta\theta$ 和 p_{ip})和一个输出变量($\Delta\theta'$)组成,隶属度函数用

Matlab 梯形函数 trapmf 设计。 $\Delta\theta$ 的模糊语言描述分为两个等级:较小(SZ) 和较大(BZ),模糊语言集合为 $Z = \{SZ, BZ\}$,其隶属度函数为图 4。 p_{ip} 的模糊语言描述分为两个等级:较少(SP) 和较多(BP),模糊语言集合为 $P = \{SP, BP\}$,其隶属度函数为图 5。 $\Delta\theta'$ 的模糊语言描述分为 3 个等级:较小(SO),适中(MO) 和较大(BO),模糊语言集合为 $O = \{SO, MO, BO\}$,其隶属度函数为图 6。

模糊控制系统的规则表见表 1。这种因果关系也可以表示为从输入变量 Z, P 到输出变量 O 的模糊关系矩阵 $O = (Z \text{ and } P)$ 。 R ,根据 Mamdani 模糊推理方法利用 Matlab 可以求取模糊关系矩阵^[12]。由表 1 得到的模糊量不能直接控制被控对象,需要对其进行解模糊处理,转换为精确量,常用的解模糊方法有平均最大隶属度法、中心平均法、中位数法、质心法等。本文使用的是平均最大隶属度法 (Matlab 中的 mom),由 Matlab 模糊逻辑工具箱提供。表 2 为使用 Matlab 的 evalfis 函数进行验证性输出的结果,例如,输入已经转角 $\Delta\theta$ 为 80°,表明机器人以接近垂直的角度撞到墙面,机器人需要旋转 80° 同墙面平行,在该点的碰撞次数 p_{ip} 为 1 次,表示首次经过该碰撞点,模糊系统输出的继续转角为 8.03°,表明机器人需要继续转过 8.03° 后反弹离开。采用这种控制方式可以在一定程度上避免计算机多次经过重复路径。

表 1 模糊控制规则表

规则序号	Z	P	O
1	SZ	SP	MO or BO
2	SZ	BP	BO
3	BZ	SP	SO or MO
4	BZ	BP	SO

表 2 Matlab 的部分输出结果

$\Delta\theta/(^\circ)$	p_{ip}	$\Delta\theta'/(^\circ)$	$\Delta\theta/(^\circ)$	p_{ip}	$\Delta\theta'/(^\circ)$
5	1	45.00	70	1	12.05
10	6	80.40	80	1	8.03
40	2	60.70	80	5	4.95

4 仿真和实验结果

图 7 所示算法仿真系统是在 VC++ 和 OpenCV 视觉库平台下编写的。仿真系统的工作环境地图可以根据要求任意更换。机器人的初始位置为工作空间的正中,初始化以后机器人以随机折线方式行走,当碰到障碍后原地旋转避障,并用超声波测距模块(由图 7 中机器人前方和后方的直线代表)获取部分特征向量,并将该碰撞点记录下来(图中黑叉)。仿真中,机器人的清洁宽度为机器人半径的一半,和市场上大多数清洁机器人一致。为了验证算法,使用了 3 个代表性的地图,如图 7(a)是房间物品稀疏的情况(环境 1),图 7(b)的障碍主要分布在房间中间(环境 2),图 7(c)为多房间情况(环境

3)。实验的结果见表 3,表中数字是大致达到 95% 覆盖率(随机规划很难达到 100%^[1])时所需要的工作时间。经过大量的仿真实验,本文算法很少产生清洁死角,清洁机器人完成 95% 覆盖率时所需工作时间可以比随机规划节约 1/2 到 1/3。同时从仿真系统可看出,本文算法的路径轨迹与随机规划极为相似,对环境的变化具有很强的适应能力。

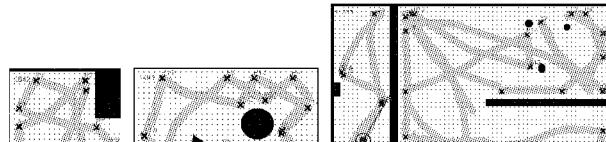


图 4 Z 的隶属度函数

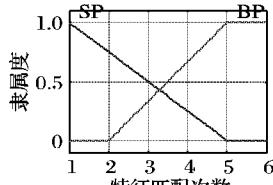


图 5 P 的隶属度函数

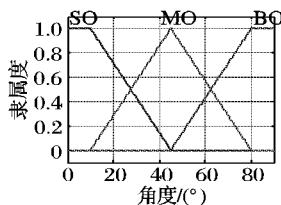


图 6 O 隶属度函数



图 7 不同仿真环境下系统表现

表 3 随机规划与本文方法效率对比

环境	随机规划	本文方法
1	992	481
2	851	622
3	7606	2110

5 结语

本文提出了一种简单、高效、低成本的路径规划算法。在确保工作效率的前提下,保留了机器人的趣味性。虽然该算法不是一种最优的路径规划算法,但是在概率统计意义上可以达到很好的效果。与其他方法不同的是,本文方法使用的特征点集沿墙壁分布,属于一维分布,不像栅格法等地图随着工作面积成平方倍增,而且其低成本优势可以进一步让清洁机器人走进千家万户。

参考文献:

- [1] 李群明,熊荣,褚健.室内自主移动机器人定位方法研究综述[J].机器人,2003,25(6): 560~573.
- [2] 石为人,周学益.室内清洁机器人壁障路径规划研究[J].计算机应用,2007,27(Z1): 378~379.
- [3] 王磊,杨杰,许曼.全自主清扫机器人的运动分析与路径规划[J].机电一体化,2007,13(2): 70~73.
- [4] 王醒策,张汝波,顾国昌.基于势场栅格法的机器人全局路径规划[J].哈尔滨工程大学学报,2003,24(2): 170~174.
- [5] YAO Z. Finding efficient robot path for the complete coverage of a known space [C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2006: 3369~3374.
- [6] 梁喜凤.室内地面清洁机器人路径规划[J].中国计量学院学报,2006,17(1): 64~68.
- [7] SIMON X, YANG, LUO C. A neural network approach to complete coverage path planning [J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B, 2004, 34(1): 718~724.
- [8] OH J S, Park J B, CHOI Y H. Complete coverage navigation of clean robot based on triangular cell map [C]// Proceedings of IEEE Conference on Industrial Electronics. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2001: 2089~2093.
- [9] 朱庆保,张玉兰.基于栅格法的机器人路径规划蚁群算法[J].机器人,2005,27(2): 132~136.
- [10] 刘海,郭小勤.吸尘机器人控制系统设计[J].现代电子技术,2009,32(12): 127~130.
- [11] 陈卫东,李宝霞,朱奇光.模糊控制在移动机器人路径规划中的应用[J].计算机工程与应用,2009,45(31): 221~223.
- [12] 黄崇福,王家鼎.模糊信息优化处理技术及其应用[M].北京:北京航空航天大学出版社,1995.