

基于模糊逻辑的机器人导航系统研究

宁 伟, 王耀南

NING Wei, WANG Yao-nan

湖南大学 电气与信息工程学院, 长沙 410082

Institute of Electric and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China

E-mail: ningwei20@sina.com

NING Wei, WANG Yao-nan. Fuzzy logic-based navigation system research for robot. *Computer Engineering and Applications*, 2010, 46(10): 242-244.

Abstract: Aiming at solving deadlock problem which is faced by a robot navigation under unknown and complicated environment, this paper proposes a behavior-based navigation method called "safe navigation method" which is based on a grid-based map model called "data grid". The data grid map records not only the surrounding environment information, but also the robot path data. The safe navigation method is one of the applications of the data grid technique, which addresses the deadlock problem faced by robot navigating under unknown environment. Fuzzy logic is used to implement the behavior design and coordination. Experimental results are provided to demonstrate the performance of the proposed method.

Key words: mobilerobot; fuzzy logic; grid map

摘 要: 由于未知环境下机器人导航容易出现死锁问题, 设计了一种基于栅格的地图模型叫“数据栅格”, 并在此基础上提出了一种基于行为的导航方法即“安全导航法”。数据栅格记录了周围环境中障碍物信息和机器人路径信息, 安全导航法就是应用数据栅格技术来解决未知环境下机器人导航遇到的死锁问题。模糊逻辑用来设计和协调各种导航行为。仿真和实际环境的实验结果也证实了该方法的良好性能。

关键词: 移动机器人; 模糊逻辑; 栅格图

DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2010.10.075 文章编号: 1002-8331(2010)10-0242-03 文献标识码: A 中图分类号: TP24

1 前言

目标导航是机器人一种常见的又必须完成的任务, 它要求机器人能够自主移动到目标点而不碰撞任何物体。通常的实际环境都是未知的, 为了完成导航任务, 机器人不但需要具备避障和自身定位的能力^[1], 而且同时要具有搜索安全不重复路径的能力^[2]。目前环境信息未知或部分未知的局部路径规划方法主要由人工势场法和神经模糊算法组成^[3], 可惜上述方法都很容易遇到死锁问题, 导致机器人受困在环境的某一角落无法到达目标点。针对死锁问题, 已经提出了另外两种解决方案: 沿线策略和虚拟子目标法^[4]。但上述两种方法均适用于通用的环境结构而在复杂环境下仍然会有很大的不足, 例如目标点处在不规则墙壁的一个角落时机器人可能因为沿线方向的错误而受困^[5]。

介绍了一种在未知环境下基于模糊逻辑的机器人导航系统。该系统包括一种新的栅格地图模型, 称之为数据栅格, 它不仅能记录障碍物的信息又能保存先前的路径信息^[6]。借助数据栅格又研究了一种安全导航方法, 该算法的核心部分就是设计一种路径搜索行为来解决死锁问题, 结合全局目标探索行为一起让机器人安全到达目标点。模糊逻辑的应用使机器人导航系统能更有效地处理因声纳噪声和自定位引起的误差。最后在移

动机器人仿真实验和实际环境测试中验证了该系统的性能。

2 数据栅格模型

介绍了一种新的能存储信息的栅格图模型, 利用该模型机器人的物理环境可以由一个二维数组表示, 数组的每个元素即数据点都包含两种信息, 一种是有关障碍物的, 另一种是有关路径的, 把包含这两种信息的栅格点分别称做障碍物数据点(ODD)和路径数据点(TDD)。ODD 的值 $V_{ODD}(i, j)$ 表示障碍物在该栅格点存在的可能性, 而 TDD 的值 $V_{TDD}(i, j)$ 表示机器人经过某区域的次数, 其中 $i=1, 2, \dots, M, j=1, 2, \dots, N$, 凭借 TDD 和 ODD 的信息机器人能完成安全导航任务。存储在数据栅格图的信息又分别以 $O_{M \times N}$ 矩阵和 $T_{M \times N}$ 矩阵的形式表示, 最开始它们都被设定为零矩阵, 每隔 100 ms 就会更新 $O_{M \times N}$ 和 $T_{M \times N}$ 的值。表示 ODD 信息的矩阵 $O_{M \times N}$ 每次更新都将增加存在障碍物的数据点的值, 而减小那些空区域的值。如图 1 所示声纳 S_0 的探测范围, Od 表示声纳探测到的障碍物区域的中心点, 该点位于 Od 到 S_0 的轴上, 除了点 Od 该轴上的其他点都属于空区域范围。 Od 点的值 $V_{ODD}(i, j)$ 由公式(1)决定:

基金项目: 国家自然科学基金(the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60775047)。

作者简介: 宁伟(1983-), 男, 研究生, 主要研究方向为特种机器人、机器人导航和定位; 王耀南, 博士生导师。

收稿日期: 2008-09-23

修回日期: 2008-12-23

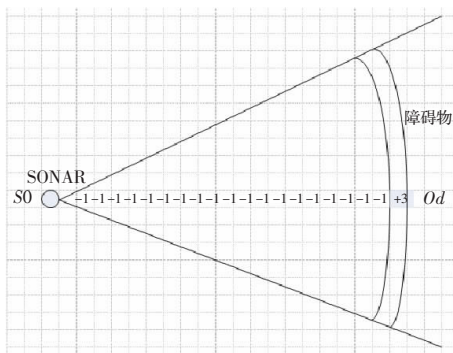


图1 矩阵 $O_{m \times n}$ 表示的栅格地图

$$V_{ODD}(i, j) = \begin{cases} V_{ODD}(i, j) + I & \text{如果 } V_{ODD}(i, j) < V_{OMAX} \\ V_{OMAX} & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

该公式中 $V_{ODD}(i, j)$ 是 ODD 在栅格点 (i, j) 的值, $i=1, 2, \dots, M$ 和 $j=1, 2, \dots, N$ 。 V_{OMAX} 是 ODD 在该栅格地图中的最大值, 导航实验的经验显示其最大值大小为 20, 而增加值 I 为 2。在 Od 到 $S0$ 的轴上, 除了 Od 外的其他点都属于空区域范围, 表示在该栅格环境内没有障碍物的存在, 其值根据公式(2)更新:

$$V_{ODD}(i, j) = \begin{cases} V_{ODD}(i, j) - d & \text{如果 } V_{ODD}(i, j) > V_{OMIN} \\ V_{OMIN} & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

公式中 V_{OMIN} 表示 ODD 在该栅格地图中的最小值, 根据经验可得最小值为 0 而减小值 d 为 1。值得注意的是只更新声纳位置前方一个半径为 1 m 的圆形弧中心轴上的栅格点 ODD 值。表示 TDD 的矩阵 $T_{m \times n}$ 的更新办法很简单, 每次运动时机器人只有当前位置点的 TDD 信息会更新。

$$V_{TDD}(i, j) = \begin{cases} V_{TDD}(i, j) + 1 & \text{如果 } V_{TDD}(i, j) < V_{TMAX} \\ V_{TMAX} & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

公式(3)中 $V_{TDD}(i, j)$ 是信息 TDD 在栅格点 (i, j) 的值。 V_{TMAX} 是 TDD 在该栅格地图中的最大值, 由机器人导航实验可得最大值为 50。TDD 信息没有减小值, 说明了机器人所经过的路径信息不会丢失。

3 基于行为导航算法

提出的机器人基于行为的安全导航法包括两种行为: 区域路径探索行为简称 RPS 和全局路径探索行为简称 GPS, RPS 是其核心部分。RPS 使机器人自主移动到一个最安全的区域而避免发生死锁现象。如图 2 所示, 所谓的最安全区域就在机器人的左、右、前 3 个区域之中, 而搜索区域内 ODD 值的大小意味着机器人与障碍物相撞的可能性。同样, 搜索区域内 TDD 值的大小也代表着机器人重复先前轨迹的可能性。如果 ODD 和 TDD 的值都非常小则说明机器人在该区域内既不会碰撞到障碍物又不会重复先前的路径, 这样就可以避免机器人陷入死锁, 也是该导航算法被称之为安全的原因。GPS 行为顾名思义就是从全局出发寻找正确的目标。移动机器人就是通过 RPS 和 GPS 在导航系统中的协调合作而安全准确地到达目标点。

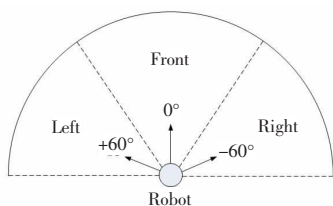


图2 机器人路径搜索的 3 个区域

只要机器人导航系统启动, RPS 和 GPS 中必有一个行为被激活, 哪种导航行为最终被激活将由它们的重要性决定。RPS 和 GPS 的重要性被设计成一个参数值, 其大小会根据机器人导航行为的重要性模糊规则进行实时更新。保证机器人在任何时刻任何环境下都能选择最适当的导航行为。

4 区域路径搜索行为

正如第 2 章所提到的, 建立了一个称之为数据栅格的地图模型。在机器人导航的每个阶段, 表示障碍物和先前机器人轨迹信息的 ODD 矩阵和 TDD 矩阵会实时更新其数据值。

4.1 实时特征值提取

为了更好地判断安全区域, 还将从 ODD 和 TDD 中提取轨迹重复性 α 、碰撞可能性 β 、轨迹强度 k 和障碍物密度 τ , 以确定测试区域是否最安全。实际上最安全是指 ODD 和 TDD 的值最小, 轨迹重复性和碰撞可能性是 RPS 行为模糊导航规则的重要参数, 而轨迹强度和障碍物强密度则与 RPS 行为的重要性因素值的模糊判定有关。

(1) 轨迹重复性 $\alpha(A) = \sum_i \in A t_i$, 其中 t_i 是区域 A 中(图 2 中弧形区域)栅格点 i 的 TDD 值。轨迹重复性 α 是区域 A 内所有栅格点 TDD 值的和。它的大小根据模糊逻辑被设定为 3 个模糊值{低, 中等, 高}。

(2) 碰撞可能性 $\beta(A) = \sum_i \in A O_i$, 其中 O_i 是区域 A 中(图 2 中弧形区域)栅格点 i 的 ODD 值。碰撞可能性 β 是区域 A 内所有栅格点 ODD 值总和。它的大小也根据模糊逻辑被设定为 3 个模糊值{低, 中等, 高}。

(3) 轨迹强度 $k(A) = \sum_i \in A t_i$, 其中 t_i 是区域 A 中(图 3 正方形区域)栅格点 i 的 TDD 值。轨迹强度 k 是正方形区域 A 内所有栅格点 TDD 值总和。它的大小根据模糊逻辑被设定为 3 个模糊值{小, 中等, 大}。

(4) 障碍物密度 $\tau(A) = \sum_i \in A O_i$, 其中 O_i 是区域 A (图 3 正方形区域)栅格点 i 的 ODD 值。障碍物密度 τ 是正方形区域 A 内所有栅格点 ODD 值总和。它的大小根据模糊逻辑被设定为 3 个模糊值{小, 中等, 大}。

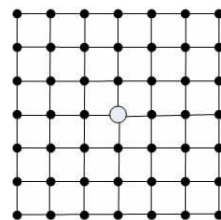


图3 正方形区域数据栅格图

区域安全系数 r 表示机器人的探测区域是否安全。该系数结合了轨迹重复性和碰撞可能性两个参数, 并根据表 1 所示的模糊规则将系数值设定为 3 个模糊值{危险, 不确定, 安全}。例如 IF α is 低 AND β is 低, THEN r is 安全。所以会将安全系数 r 最小的区域定视为最安全。

表 1 区域安全指数 r 的模糊判断规则

α	β		
	高	中等	低
高	危险	危险	危险
中等	危险	危险	不确定
低	危险	不确定	安全

4.2 转向规则

移动机器人的运动控制变量主要为速度和转向角度。机器人运动速度主要由离障碍物的距离决定,当机器人离障碍物很远时速度快近则速度变慢直至停止。机器人的转向角度则是主要受RPS行为影响,它根据成员函数图4(b)被设定为5种模糊值{NB,NS,ZE,PS,PB},其中NB表示向左角度偏大,NS向左角度偏小,ZE零角度,PS向右角度偏小,PB向右角度偏大。如图2所示,机器人的探测区域被分为3个等圆弧(假设只考虑机器人的前方),圆弧半径设定为1m。这些区域被标为left,front,right,中间区域中心角为0°,两边区域的中心角分别为+60°和-60°。3个区域的安全系数r表示为 $r_{left}, r_{front}, r_{right}$ 。RPS行为的转向规则总结如图5所示。根据图5,当机器人需要转向而左边和右边区域的安全系数值相同时,推荐机器人的转向角度为GOAL,其中GOAL表示此时推荐机器人选择的方向为接近目标点位置的方向。例如图5中的顶层元素点(3,3)的规则可以表示为:

IF r_{front} is 危险 AND r_{left} is 安全 AND r_{right} is 安全 AND ε is LEFT THEN θ_{RPS} is PS;

IF r_{front} is 危险 AND r_{left} is 安全 AND r_{right} is 安全 AND ε is RIGHT THEN θ_{RPS} is N.

这里 ε 表示目标点坐标。

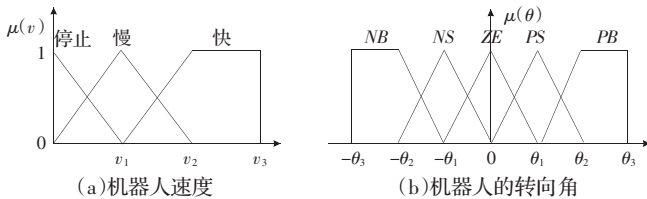


图4 模糊成员函数

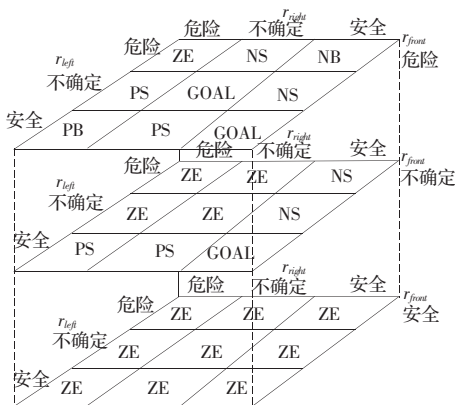


图5 路径搜索转向规则

4.3 重要规则

重要性参数值 W_{RPS} 表示移动机器人导航过程中选择RPS导航行为作为主导行为的可能性。RPS行为的重要值根据表2被设定为3种模糊值{小,一般,大},其规则判断的依据是直接来自图3中正方形区域(正方形边长为2m)的轨迹强度k和障碍物密度 τ 获得的。例如表2中元素(1,1)规则可以表示为:IF k is 大 AND τ is 大 THEN W_{RPS} is 大。另外在设计导航

表2 RPS行为重要性模糊规则

k	τ		
	大	中等	小
大	大	大	大
中等	大	大	一般
小	大	一般	小

系统中无论机器人的转向角度如何,导航行为的重要性参数值都不会改变。

5 全局目标搜索行为

这里提到的全局目标搜索行为GPS是一种不依赖于外部传感信息而又能准确搜索到全局目标点的行为。

5.1 转向规则

假设全局目标搜索行为计算出的机器人转向角度为 θ_{GPS} ,表达公式如式(4):

$$\theta_{GPS} = \Delta\theta \tag{4}$$

上式中 $\Delta\theta$ 表示当前机器人的前进方向与目标点方向的角度之差,差值的范围为 $\{-180^\circ, 180^\circ\}$ 。正负值分别说明机器人的转向角度偏左还是偏右。

5.2 重要规则

GPS行为的重要性参数 W_{GPS} 主要是根据RPS行为得来的,规则可以简单描述为:

(1)IF W_{RPS} is 大 OR W_{RPS} is 一般 THEN W_{GPS} is 小。

(2)IF W_{RPS} is 小 THEN W_{GPS} is 大。

值得注意的是在机器人导航运动中只有RPS行为的重要性参数值为小时,GPS行为才会在机器人导航中占主导地位。否则无论RPS行为的重要性参数值为大或一般时,在机器人导航中占主导地位都将是RPS行为。

6 实验结果及分析

方法在能自主移动的服务机器人上进行了测试。该服务机器人前部装配了声纳环,由8个声纳传感器组成,测量距离达到了3m。研究工作主要由两阶段构成,第一阶段是通过仿真软件MobileSim验证最大安全导航算法;第二阶段在实际未知环境中用移动服务机器人测试导航性能。

测试环境为一个大的走廊区域。图6显示了最大安全算法在软件MobileSim中的仿真结果,机器人从任意起始位置S出发到目标点G的过程中呈现出典型的“尝试-返回”现象。通过不停地尝试新的路径如果失败后又返回,机器人可以很顺利地找到最近的出口从而避免陷入死锁问题。

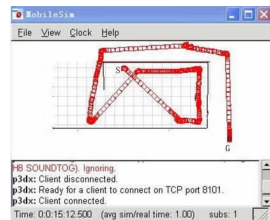


图6 MobileSim仿真结果图

在实际的环境中用移动服务机器人也做了测试。图7(a)(b)显示了机器人在导航过程中的一系列运动,图7(c)则显示



(a)机器人在导航过程中的一系列运动 (b)机器人在导航过程中的一系列运动 (c)走廊环境中数据栅格保存的TDD和ODD信息

图7 实际环境的实验结果图