

基于动态行为控制的移动机器人自主避障

徐璐¹, 陈阳舟¹, 居鹤华^{1,2}

(1. 北京工业大学电子自主导航实验室, 北京 100022; 2. 哈尔滨工业大学深空探测实验室, 哈尔滨 150001)

摘要: 针对环境信息未知或部分未知的情况, 提出动态行为控制方法使移动机器人自主避障。采用动态窗法表示结构空间, 并分析环境信息, 激发相应的行为进行避障, 经过行为融合后得到可行的路径和速度值。其中趋向目标的行为采用模糊逻辑控制的方法, 避障行为采用 VFH 方法加以实现。在计算过程中考虑了动力学与运动学约束条件, 使得动态行为控制方法更加可行。仿真结果论证了所提出的方法的实时性与有效性。

关键词: 行为控制; 避障; 运动规划; 动态窗; 移动机器人

Autonomous Obstacle Avoidance for Mobile Robot Based on Dynamic Behavior Control

XU Lu¹, CHEN Yangzhou¹, JU Hehua^{1,2}

(1. Autonomous Navigation Lab, Beijing University of Technology, Beijing 100022;

2. Deep Space Exploration Lab, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

【Abstract】 Aiming at the obstacle avoidance of mobile robot in unknown environment or partially unknown environment, this paper presents the dynamic behavior control method. The method is making a use of dynamic window to analyze the information, exciting the relevant behavior to control, and fusing the behaviors to obtain the feasible path and velocity value. The move to goal behavior adopts fuzzy control method, and the obstacle avoiding behavior uses VFH method. The paper takes into account of the dynamics and kinematics restrict conditions, making the dynamic behavior control method much practical. The simulation results show that the method is efficient and feasible.

【Key words】 behavior control; obstacle avoidance; motion planning; dynamic window; mobile robot

1 概述

近年来对移动机器人的控制已经由单一的遥操作转向了自主控制, 即让机器人具有一定的智能。在导航过程中自主避障是最能体现机器人具有智能的关键技术。移动机器人的自主避障可以描述为在给定起始点和目标点后, 通过先验环境信息和传感器实时对地图的更新, 在路径规划的基础上, 机器人利用自身的避障算法模块避开未知的障碍物, 同时朝着目标前进, 并得到姿态信息。当环境未知或部分未知时, 避障是在线控制模块。典型的方法有人工势场法^[1,2], 行为控制法^[3], 栅格法^[4]等。其中行为控制方法具有较强的实时性、计算量小、能实现多种复杂功能, 近几年得到了广泛的应用, 例如Rocky7系列火星探测车的避障就采用行为控制方法。

行为控制是一种重要的、全新的智能控制方法, 它是将机器人所感知到的所有信息和知识库一起融合到一个全局的环境地图中, 基本行为是感知和执行的基元。机器人的行为可以分为两大类: 反应型和慎思型。反应式行为是一种激励—响应行为, 不需要计算过程, 响应时间短。Rodney Brook提出的包容结构就是典型的反应范式, 行为按照能力的等级进行分层, 位于较高层次的行为可以覆盖相邻低层次的行为输出。慎思式行为是可学习的、有意识的行为。它是将规划加入到反应式中, 使得机器人具有记忆和推理能力。因此, 机器人自主避障就是反射与慎思式行为相结合的混合范式, 即感知—规划—执行。

移动机器人避障效果的评价指标包括运动的安全性和路径的优化性。针对这个标准, 本文提出了一种实时避障方法

——动态行为控制。动态行为控制是在环境未知或部分未知的情况下, 运用动态窗分析前方一定范围内结构空间的信息, 选择相应的行为达到避障的目的, 并满足局部路径最优性。

2 动态窗

机器人和障碍物存在的物理空间被定义为结构空间, 它是一种数据结构, 机器人通过这种数据结构来确定自身的位姿。表示结构空间时要尽量减少规划算法中需要处理的数据维数。本文采用动态窗结构空间表示法, 它是对四叉树法的进一步改进。动态窗是在传感器可检测到区域, 设定为边长为 m, n 的长方形上覆盖一个二维笛卡尔栅格, 路径规划时, 先用较大的栅格单元对地图区域进行划分, 以此得到路途站点; 在线避障时, 若传感器检测到前方栅格单元存在障碍物, 且只占用了栅格单元一部分, 则将此栅格单元细划, 划分的比例依赖于栅格内障碍物的分布密度。基本方法是先将栅格单元均分为 4 个小栅格, 如果小栅格中还存在被部分占用的单元格, 则按照上面的方法对该单元格进一步分割, 直到存在障碍物的栅格单元被占用的比例达到一定比例系数, 如图 1 所示。

为了便于计算, 将动态窗内每个栅格看作是一个矢量, 大小等于 $v_{i,j}$, 方向等于 $\beta_{i,j}$ 。 $v_{i,j}$ 表示此栅格障碍物存在的密

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60374067)

作者简介: 徐璐(1982-), 女, 硕士研究生, 主研方向: 移动机器人的运动规划; 陈阳舟, 教授; 居鹤华, 副教授

收稿日期: 2006-07-25 E-mail: flysand4@hotmail.com

度, $v_{i,j}$ 越大, 通行性越低:

$$v_{i,j} = c_{i,j} \cdot s \cdot (a - b \cdot d_{i,j}) \quad (1)$$

其中, $c_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{是障碍物} \\ 0, & \text{不是障碍物} \end{cases}$; s 表示栅格的面积; $d_{i,j}$ 是栅格

中心点与机器人当前位置的距离; a, b 是正常数, 且 $a - b \cdot d_{\max} = 0$ 。

$$\beta_{i,j} = \text{tg}^{-1} \frac{y_j - y_0}{x_i - x_0} \quad (2)$$

其中, (x_i, y_j) 是栅格中心点的坐标; (x_0, y_0) 是机器人当前的坐标。

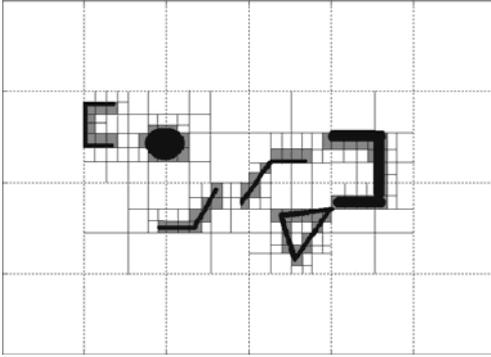


图1 动态窗的结构空间

一般的栅格法为了消除数字偏差, 即障碍物仅占用了栅格单元的一小部分, 整个栅格都被标记为被占用, 特将结构空间划分为很小的栅格单元。这就意味着需要很大的存储空间, 同时也提高了算法的计算量。动态窗法是先对结构空间进行分析, 路径规划只需要得到从起始点到目标点的路途站点, 就像公交车的站点, 所以栅格单元不用很小。而在线避障需要精确考虑每个站点之间机器人如何行走, 需要用栅格表示环境信息, 所以栅格单元被分割。如此一来, 动态栅格法既避免了结构空间的浪费, 又消除了数字偏差。

3 行为控制

移动机器人在环境未知或部分未知的情况下, 每个采样时刻要根据传感器更新的地图数据作出不同决策。针对动态行为控制方法, 作出决策即是指选择相应的行为。本文采用切换系统对各行为进行选择, 其基本模型见图2所示。状态变量 $[x_1, x_2, \dots, x_n]$ 分别为各行为的输入, 权系数集合 $w = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ 中的元素值代表相应行为执行的状态, 其值为1时, 该行为被激发。状态 X 是行为融合后系统的输出。

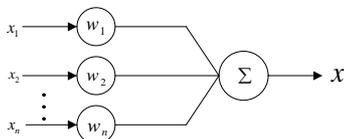


图2 行为切换模型

在3.1节、3.2节中将分别介绍2类行为: 趋向目标的行为和实时避障行为。当动态窗内所有栅格值之和 $v_{all} < TH1$ ($TH1, TH2$ 为域值, $TH1 < TH2$) 时, $w_1 = 1$, 趋向目标的行为被激发; 当 $v_{all} > TH2$ 时, $w_2 = 1$, 避障行为被激发; 当 $TH1 < v_{all} < TH2$ 时, $w_1 = w_2 = 1$, 趋向目标与避障行为同时被激发。

3.1 趋向目标的行为

当传感器检测到机器人周围没有或只有较少的障碍物

时, 趋向目标的行为被激发。它是优化路径的一种行为。本文采用模糊控制方法。模糊控制器的输入变量是当前时刻动态窗内所有栅格值之和 v_{all} 以及机器人前进方向与目标点的夹角 δ ; 输出变量是机器人的平动速度 v 与转动速度 ω 。

输入变量 v_{all} , 隶属度函数定义为 more, med, less; 变量 δ , 隶属度函数定义为 p_{left}, med, p_{right} ; 输出变量 v , 隶属度函数定义为 fast, med, slow; 变量 ω , 隶属度函数定义为 z_{left}, med, z_{right} 。模糊规则如下:

If (v_{all} is more) Then (v is slow) If (δ is p_{left}) Then (ω is z_{left})

If (v_{all} is med) Then (v is med) If (δ is med) Then (ω is med)

If (v_{all} is less) Then (v is fast) If (δ is p_{right}) Then (ω is z_{right})

这些规则表示在目标趋向行为过程中, 机器人调整运动方向趋向目标, 并且在没有障碍物的情况下以较大的速度运动。通过调整隶属函数参量, 可以进一步调整目标趋向行为的动态性能, 使之满足不同地形、不同任务需求的约束条件。

3.2 避障行为

避障行为是机器人自主运动的关键行为, 本文采用VFH算法^[5,6]加以实现。机器人动态窗内栅格的值代表了前方障碍物的信息, VFH算法就是充分利用这些信息进行实时有效的避障。将二维动态窗按照角度离散化, 转化为一维极坐标。一维极坐标是由 n 个角宽 a 的扇形面组成, $n = 180/a$ 。每个扇形面 k ($k = 1, 2, \dots, n$) 代表了一个数值 h_k , 表示沿此方向障碍物的分布密度:

$$h_k = \sum_{i,j} v_{i,j} \quad (3)$$

栅格单元从属于扇形面 k 的关系为

$$k = \text{INT}(\beta_{i,j}/a) \quad (4)$$

通过式(2)和式(4), 动态窗内的栅格就被映射到了一维极坐标图中。

选择机器人下一时刻的运动方向 k_{free} 时, 低于域值的 h_k 的方向均作为候选方向 k_w 。利用评价函数 $g(k_w)$ 比较每个候选方向, 函数最小值所对应的 k_w 即为 k_{free} :

$$g(k_w) = \mu_1 \cdot \Delta(k_w, k_t) + \mu_2 \cdot \Delta(k_w, \text{INT}(\frac{\theta}{\alpha})) + \mu_3 \cdot \Delta(k_w, k_{n-1}) \quad (5)$$

其中, k_t 为目标方向; $\text{INT}(\frac{\theta}{\alpha})$ 为机器人当前运动方向; k_{n-1} 为前一时刻速度方向; Δ 表示括号内两项之差; μ_1, μ_2, μ_3 为协调因子。

评价函数 $g(k_w)$ 中的每一项均可看作是避障行为的子行为: 第1项是趋向目标的子行为; 第2项是平滑轨迹的子行为; 第3项是满足机动性能约束的子行为。当强调哪种子行为时就尽量让其相应的协调因子大, 例如以趋向目标的子行为为主时, $\mu_1 > \mu_2 + \mu_3$ 。

确定了运动方向后, 机器人就会在采样时间段内沿此方向运动步长 d_s 。 d_s 与运动方向周围的障碍物分布密度有关, 当障碍物密度较大且距离机器人较近时, d_s 变小; 当障碍物密度较小且距离机器人较远时, d_s 变大。由于采样时间很小, 因此可以将此时间段内的平均速度等效为瞬时速度。平动速度 v 与转动速度 ω 分别为

$$v_n = d_{sn} / T_s \quad (6)$$

其中, d_{sn} 为第 n 时间段机器人行进的距离; T_s 为采样时间。

$$\omega_n = (\theta_n - \theta_{n-1}) / T_s \quad (7)$$

其中, θ_n 是第 n 时刻机器人的运动方向; θ_{n-1} 是第 $n-1$ 时刻机器人的运动方向。

3.3 行为融合

当趋向目标的行为与避障行为同时被激发时, 需要对两种行为进行融合, 本文将此问题转化为二次规划的求解。通过寻找最优的协调因子 $\{m_1, m_2\}$, 使输出的均方差最小。协调后的行为输出为 $[x_1', x_2']$:

$$x_1' = m_1 \cdot x_1 \quad x_2' = m_2 \cdot x_2 \quad (8)$$

则总均方差为

$$\sigma^2 = E[(x - \bar{x})^2] = E(x^2) - [E(x)]^2 \quad (9)$$

由于 x_1, x_2 相互独立, 因此

$$\sigma^2 = \sum_{i=1,2} (x_i \cdot m_i - \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1,2} x_i \cdot m_i)^2 \quad (10)$$

从式(10)可以看出, 总均方差 σ^2 是协调因子 $\{m_1, m_2\}$ 的二次函数, 因此 σ^2 必存在最小值, 即可得到优化后的 $\{m_1, m_2\}$ 。行为融合后的输出即为趋向目标的行为与避障行为的输出乘以相应的协调因子后的代数和。

4 仿真结果

移动机器人采用六轮摇杆吊架结构, 每个轮子可以独立驱动, 前后轮可以转向, 车体四周安装 12 个传感器, 用于检测机器人前方 180° 范围内的环境信息。仿真参数设置为动态窗 4m×2m, 最小栅格 0.1m×0.1m, 离散角间距 $\alpha = 10^\circ$, 采样时间 $T_s = 0.5s$, 车体最大平动速度 $v_{max} = 1m/s$ 。仿真结果如图 3、图 4 所示。

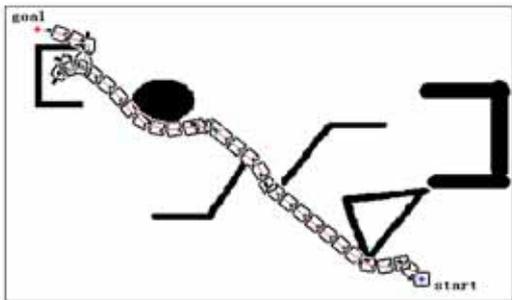


图 3 复杂地形下移动机器人的自主避障

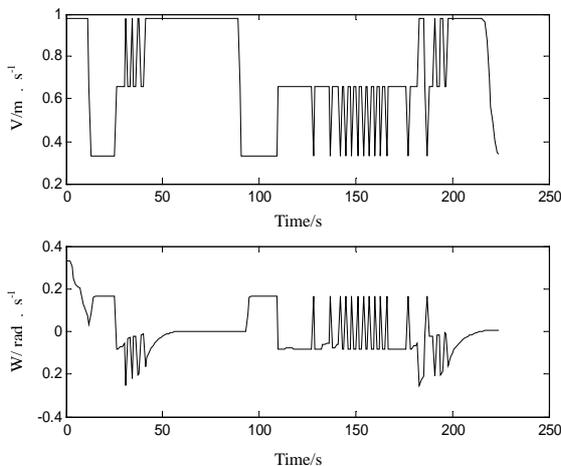
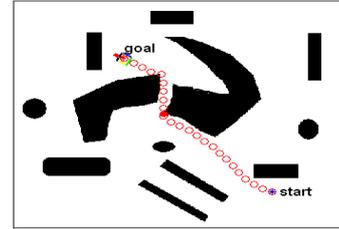
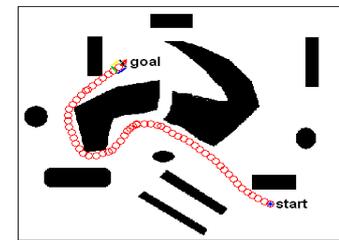


图 4 机器人的平动与转动速度

移动机器人在自主避障时, 存在着动力学与运动学的约束。例如机器人不能简单地当作质点, 要考虑实际尺寸; 速度与加速度存在峰值限制, 不能过大; 转弯时曲率要大于一定域值, 存在最小转弯半径; 坡面上行驶不可失稳等诸多条件。这些约束条件是机器人自主运动必须满足的前提条件, 见图 5, 其中, 图 5(a)是将机器人当作质点的仿真结果; 图 5 (b)是将障碍物膨化并考虑最小转弯半径后的仿真结果。



(a)未加入约束



(b)加入约束条件

图 5 移动机器人在复杂环境下的自动驾驶

从图 5 中可以看到, 同样的地形, 同样的起始点, 机器人的运动轨迹却不相同。这是因为在图中转弯处, 考虑机器人车体尺寸的约束后, 计算出右侧通道狭窄度小于可通行宽度, 不利于行走, 机器人选择继续前行。

5 结论

基于动态行为控制的移动机器人自主避障适用于任何环境下, 尤其当环境信息未知或部分未知时, 利用动态窗表示结构空间, 将地形信息数据化。避障行为与趋向目标行为共同作用使得局部避障效果非常理想, 同时优化了路径。仿真结果表明该方法运行速度快, 系统稳定, 加入运动学与动力学约束后, 结果更加实际可行。

参考文献

- 1 Masoud A A, Bayoumi M M. Robot Navigation Using the Vector Potential Approach[C]//Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. 1993.
- 2 Masoud A A, Masoud S A. Motion Planning in the Presence of Directional and Obstacle Avoidance Constraints Using Nonlinear, Anisotropic, Harmonic Potential Fields[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics & Automation, San Francisco, CA. 2000-04.
- 3 Brooks R A. A Robust Layered Control System for A Mobile Robot[J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1986, 2(1).
- 4 Elfes A. Sonar-based Real-world Mapping and Navigation[J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1987, 3(3): 249-265.
- 5 Borenstein J, Koren Y. Obstacle Avoidance with Ultrasonic Sensors[J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1988, 4(2).