

基于传感器的非完整移动机器人运动规划*

吴忻生, 郭丙华, 胡跃明

(华南理工大学 自动化科学与工程学院, 广州 510640)

摘要: 针对非完整移动机器人在未知室内环境中提出了一种路径规划方法, 通过利用传感器对周围环境的探测和实时处理传感器数据, 以及所设计的目标寻找函数, 可以有效地完成其运动规划. 该方法能够确保移动机器人在无障碍物区或障碍物对机器人不构成危险时加速前进, 在障碍物区能够慢速绕过, 从而使得移动机器人快速且安全地到达目标位置, 仿真的结果证明了该方法的有效性.

关键词: 非完整移动机器人; 传感器; 运动规划

中图分类号: TP242

文献标识码: A

Sensor-based motion planning for nonholonomic mobile robot

WU Xin-sheng, GUO Bing-hua, HU Yue-ming

(College of Automation Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The work presented a method of motion planning for nonholonomic robot working in unknown indoor environment. It can make the robot finish the motion planning by the scanning of the sensors to the environment, real-time coped with the information and the goal-seeking functions. The method can make the robot accelerate in motion in the field of non-obstacles or safety and turn slowly round the obstacles, so the robot can reach its goal quickly and safely. The results of simulation illustrated the effectiveness of the method.

Key words: nonholonomic robot; sensor; motion planning

1 引言(Introduction)

随着非完整移动机器人应用范围的扩大, 其运动规划已越来越引起人们的兴趣. 对于移动机器人在已知环境中工作, 其采用的规划方法有: 单元分解方法^[1]、栅格方法^[2]. 当移动机器人的工作环境为未知时, 其必须配备传感器才能够找到一条安全有效的路径, 目前采用的方法主要有基于传感器的人工势场方法^[3], 但其存在这样一个缺点, 由于吸引力和排斥力是随时都在变化, 这就给实际的控制带来了困难, 特别是对重量和惯性比较大的移动机器人来说尤其如此. 基于传感器的人工智能方法如模糊控制方法和神经网络控制方法^[4,5], 因其对硬件要求比较高, 简单的配置不易使移动机器人实现快速实时运动规划.

为了能够使移动机器人在未知的环境中快速寻找一条高效、安全的规划方法, 参考人类驾驶汽车的经验, 移动机器人在规划的过程中应考虑下列特性:

1) 当传感器未能检测到障碍物时或检测到障

碍物但其对移动机器人的运动不构成危险时, 移动机器人以较快的速度加速运动.

2) 移动机器人绕过障碍物时, 其以较低的速度减速运动.

本文的目的是在考虑上述两个特性的基础上, 利用移动机器人上配备的传感器对周围环境的探测, 通过实时处理传感器反馈的信息求得移动机器人运动的路径点, 从而快速寻求一条安全的运动轨线.

2 障碍物避开策略(Methods of obstacles avoidance)

假定移动机器人工作在室内, 且装配的传感器有 5 个, 其分布参见图 1, 左右两边的 4 个传感器用于检测机器人的旁边障碍物, 中间的传感器用于检测机器人前方的障碍物.

假设移动机器人位置(两后轮轴中点) P 为 (x, y) , 被检测到的障碍物某点位置可表示为如下形式

$$\begin{cases} x_o = x + r\cos(\gamma + \alpha) + d\cos(\beta + \alpha), \\ y_o = y + r\sin(\gamma + \alpha) + d\sin(\beta + \alpha). \end{cases} \quad (1)$$

* 基金项目: 国家自然科学基金(69974015)、广东省自然科学基金(990583)和广东省教育厅“千百十工程”资助项目.

收稿日期: 2000-07-03; 收修改稿日期: 2001-02-19.

其中 r 为传感器距 P 点的距离, γ 为传感器与机器人轴的夹角, β 为传感器与机器人轴的安装角度, α 为移动机器人的方向角度, 当传感器检测到的距离 d 满足 $d \leq d_0$ 时, 其中 d_0 为安全距离, 机器人必须设法绕过障碍物。

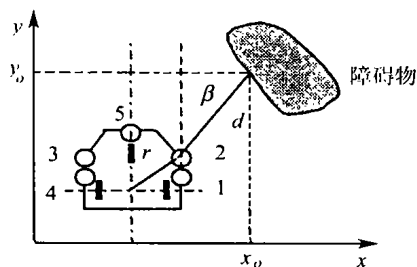


图1 轮式移动机器人
Fig. 1 Wheeled mobile robot

假定移动机器人不能后退, 在此我们不讨论其进入死区(左右前方都检测到障碍物, 且检测距离都比较近)的规划方法, 这样移动机器人在运动过程中检测到的一般障碍物及避开策略可归结为以下几种情况:

a) 拐角物. 例如左、右拐角物, 移动机器人必须朝某一固定的方向绕过(右转弯或左转弯), 见图2中的(a)、(b)图。

b) 单侧障碍物(左或右边). 移动机器人必须沿某一固定的方向转弯避开, 见图2中的(c)、(d)图。

c) 两侧障碍物. 移动机器人只能在两侧障碍物的中间运动, 见图2中的(e)图。

障碍物避开轨线见图2中的虚线所示。

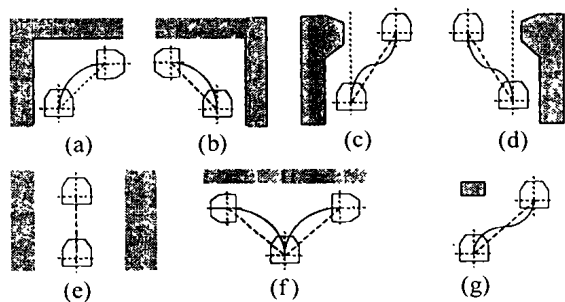


图2 障碍物避开策略
Fig. 2 Methods of obstacles avoidance

3 路径寻求与光滑化(Path searching and smoothing)

3.1 路径点寻求(Path searching)

非完整移动机器人规划的路径为连接起始点和目标点的安全路径, 其连接的路径可以由若干个线段组成. 通过对传感器实时更新的数据, 我们对于图2中所示的各种情况, 我们可作如下处理:

a) 拐角物: 当移动机器人前方传感器其检测的

距离 d 满足下式时

$$d = d_0 + r + \Delta. \quad (2)$$

其中 d_0 为安全距离, r 为移动机器人最小转弯半径, Δ 为常数, 其选取可由实验来确定. 以该点作为起始点, 连接另一点 $(x \pm r, y \pm r)$, 具体可参见图2中的(a)、(b)图。

b) 单侧障碍物: 当单侧为墙壁时, 使移动机器人与墙壁保持安全距离为 d_0 作直线运动, 当出现 $x_{o2} - x_{o4} > \delta_1$ 或 $x_{o1} - x_{o3} > \delta_2$ 时, 则连接到下一个路径点 $(x + 2B, y + 2B)$, 见图2中的(c)、(d)图。

c) 双侧障碍物: 如果双侧为墙壁, 则移动机器人在中间加速前进, 否则取下一个路径点为前方双侧障碍物之间的中点, 见图2中的(e)图。

d) 前方障碍物: 当传感器5检测到的障碍物为墙壁时, 或障碍物较大时(多个传感器能检测到), 可根据目标的位置确定其转弯的方向(具体见第4部分), 其连接的下一个路径点与a)相同, 见图2中的(f)图. 若为小障碍物(仅仅传感器5检测到, 其余传感器未能检测到)时, 则下一连接路径点为 $(x + 2B, y + d_0)$, 其中 B 为移动机器人的宽度, d_0 为安全距离, 见图2中的(g)图所示。

3.2 路径光滑化(Path smoothing)

为了便于移动机器人跟踪规划的路径, 还必须对路径进行光滑化. 在这里我们采用立方螺线^[2]对路径进行光滑化, 现在简单介绍一下立方螺线的特性, 立方螺线可用下列方程来描述

$$\theta(s) = \frac{1}{6} a_3 s^3 + \frac{l}{2} a_2 s^2 + a_1 s + a_0, \quad -\frac{l}{2} \leq s \leq \frac{l}{2}. \quad (3)$$

其曲率为

$$k(s) = \frac{1}{2} a_3 s^2 + a_2 s + a_1, \quad -\frac{l}{2} \leq s \leq \frac{l}{2}. \quad (4)$$

假定移动机器人的任意两个位姿为: $p_1 = (x_1, y_1, \theta_1)$, $p_2 = (x_2, y_2, \theta_2)$, 在过渡点处有下式成立^[2]

$$\begin{cases} k(-\frac{l}{2}) = k(\frac{l}{2}) = 0, \\ \theta(\frac{l}{2}) = -\theta(-\frac{l}{2}) = \frac{\alpha}{2}. \end{cases}$$

由此可得到方程(3)、(4)的系数为

$$\begin{cases} a_0 = 0, \\ a_1 = \frac{3\alpha}{2l}, \\ a_2 = 0, \\ a_3 = -\frac{12\alpha}{l^3}. \end{cases} \quad (5)$$

其中

$$\alpha = \theta_2 - \theta_1, d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2},$$

$$l = d \left[2 \int_0^{\frac{1}{2}} \cos(\alpha(\frac{3}{2} - 2s^2)s) ds \right]^{-1}.$$

利用上述的关系式,我们可对以上几种障碍物的避开路径光滑化,光滑化的曲线参见图 2 中实线所示.

4 目标寻找函数(Target searching functions)

非完整移动机器人在规划的过程中,为了到达目标,必须能够自动寻找目标位置,以确定运动的方向.为此我们设计了两个简单的目标探测函数 f_1 和 f_2 ,

$$\begin{cases} f_1 = x - x_d, \\ f_2 = y - y_d. \end{cases} \quad (6)$$

其中 (x, y) 为移动机器人当前时刻的位置, (x_d, y_d) 为其目标位置.

移动机器人可以根据 f_1 和 f_2 的符号来判断其运动的前后左右方向,当 f_1 和 f_2 均为 0 时,表示机器人到达目标位置,具体可见表 1,从表中可以知道,移动机器人运动的可行性有两种,我们可先采用其中的一种,当传感器检测到障碍物时,采用第二种,特殊情况,当 f_1 或 f_2 等于 0 时,只可采用第一种或第二种.

表 1 移动机器人运动方向选择

Table 1 Selection of direction for robot motion			
f_1 的符号	f_2 的符号	可行性运动(1)	可行性运动(2)
$f_1 < 0$	$f_2 < 0$	前	右
$f_1 < 0$	$f_2 > 0$	右	后
$f_1 > 0$	$f_2 < 0$	左	前
$f_1 > 0$	$f_2 > 0$	后	左

5 应用的例子与仿真(Application samples and simulation)

我们将上述结果应用于两后轮驱动的非完整移动机器人,其结构如图 1 所示,前轮为万向轮,以两后轮的中点为参考点,其运动学和动力学模型如下^[6]:

$$\begin{cases} M(q)q = B(q)T + A^T(q)\lambda^T, \\ A^T(q)q = 0. \end{cases}$$

选取 $S(q) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 \\ \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, 可将上述方程转化为

$$\begin{cases} q = S(q)v, \\ v = GT. \end{cases} \quad (7)$$

其中

$$q = (x \ y \ \theta),$$

$$M(q) = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix},$$

$$B(q) = \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\theta \\ \sin\theta & \sin\theta \\ D & -D \end{bmatrix},$$

$$G = \frac{1}{R} \begin{bmatrix} \frac{1}{m} & \frac{1}{m} \\ \frac{D}{I} & -D \end{bmatrix},$$

$$A(q) = (-\sin\theta \ \cos\theta \ 0),$$

$$v = (\mu \ w), T = (T_1 \ T_2),$$

且 (μ, w) 具有下列关系

$$\begin{cases} \mu = \frac{R}{2}(w_1 + w_2), \\ w = \frac{R}{2D}(w_1 - w_2). \end{cases} \quad (8)$$

其中 w_1 与 w_2 分别为两驱动电机的角速度.

我们将上述移动机器人置于如图 5 所示的工作环境中,初始位置为 $(0, 0, \frac{\pi}{2})$, 目标位置为 $(8, 10, 0)$, 其仿真的结果如图 3 所示,其控制力矩如图 4 和图 5 所示.

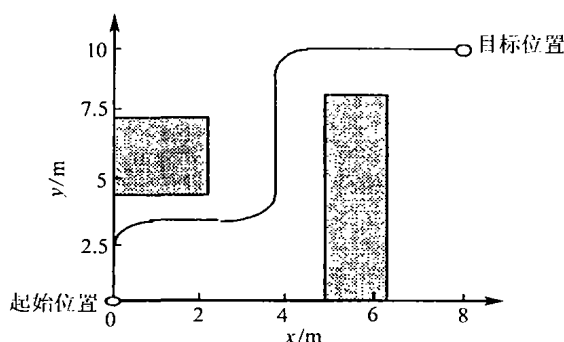


图 3 机器人运动路径
Fig. 3 Motion path of robot

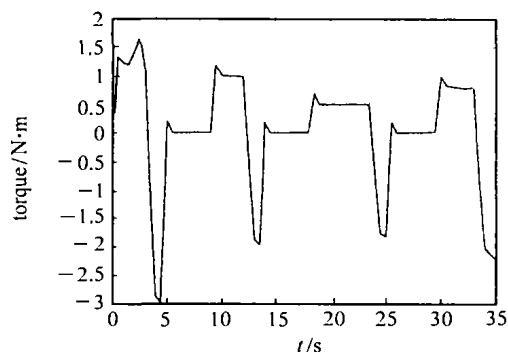


图 4 输入力矩 1
Fig. 4 Torque of input 1

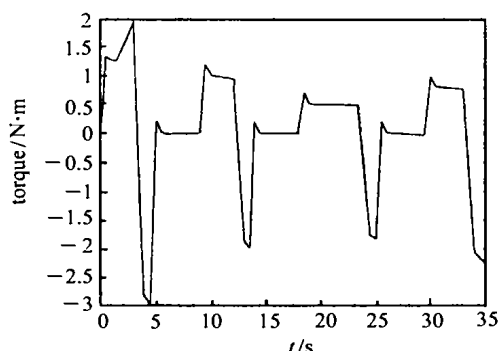


图5 输入力矩2
Fig. 5 Torque of input 2

6 结论(Conclusion)

非完整移动机器人在未知的环境中必须借助于传感器才能完成其运动规划,通过传感器对外界环境的辨识和实时处理传感器的数据,利用目标寻找函数,我们提出了一种有效的运动规划方法,该方法能够使得移动机器人在无障碍物区或障碍物对移动机器人不构成危险时以恒定的加速度加速运动,当遇到障碍物时,以较小的速度绕过障碍物,因而能够使其工作于未知的环境中,快速到达目标位置,仿真结果证明了该方法是有效的。

参考文献(References)

[1] Latombe J C. Robot Motion Planning [M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1991

- [2] Weber H. A motion planning and execution system for mobile robots driven by stepping motors [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2000, 33(4): 207 - 221
- [3] Mbede J B, Huang X H, Wang M. Fuzzy motion planning among dynamic obstacle using artificial potential field for robot manipulators [J]. Robotics and Automations Systems, 2000, 32(1): 61 - 72
- [4] Maaref H, Barret C. Sensor-based fuzzy navigation of an autonomous mobile robot in an indoor environment [J]. Control Engineering Practice, 2000, 8(7): 757 - 768
- [5] Yang X Y, Max M. Real-time motion planning of car-like robots [A]. Proceedings of International Conference on Robotics and Automation [C]. Detroit, Michigan, 1999, 1298 - 1303
- [6] Yih C C, Paul P I. Time optimal trajectory for mobile robots with independent driven wheels [A]. Proceedings of International Conference on Robots and Automation [C]. Minneapolis, Minnesota, 1996, 2943 - 2948

本文作者简介

吴忻生 1961年生,分别于1983年、1990年在华南理工大学和北京理工大学获工学学士和硕士学位,现为华南理工大学自动控制工程系讲师,长期从事自动化工程应用,机电一体化,电子产品等研究与开发工作。

郭丙华 1966年生,1995年取得硕士学位,现为华南理工大学自动化科学与工程学院博士研究生,主要研究兴趣为非完整系统,移动机器人运动规划等。

胡跃明 1960年生,曾任香港理工大学电子系副研究员和研究员等职,现为华南理工大学自动化科学与工程学院教授、博士生导师、副院长,主要研究兴趣为非线性控制与移动机器人应用技术,智能医疗器械,基于视觉技术的检测与控制系统设计等。