

# 基于栅格方法的移动机器人实时导航和避障

马兆青 袁曾任

(清华大学计算机科学与技术系 北京 100084)

**摘 要** 本文对移动机器人的实时导航和避障设计了基于栅格 (Grids) 的控制算法, 用该算法控制清华大学计算机系研制的 THMRH 移动机器人能在未知的环境中, 实时检测出障碍物, 并实时规划出合理路径, 稳定、平滑连续地向着目标行驶, 最后给出了 THMRH 在几种典型环境中行驶的实验结果。

**关键词** 移动机器人, 实时导航, 避障

## 1 引言

实时避障和导航是反映智能移动机器人自动能力的关键问题之一, 比较困难的问题是一方面要求有充分的环境信息, 另一方面又要求处理速度比较快, 满足实时性的要求。国内外学者曾做过大量的研究工作, 比较有效的方法主要有势场法和栅格 (Grids) 法。势场法由于它的简单性和优美性被广泛采用。J. Borenstein<sup>[3]</sup>曾采用 Grids 表示环境, 用势场法决策出 VFF 算法。通过 VFF 的实验研究, 发现了势场法存在的缺陷主要有 4 方面: (1) 存在陷阱区域; (2) 在相近障碍物间不能发现路径; (3) 在障碍物前震荡; (4) 在狭窄通道中摆动<sup>[2]</sup>。针对势场法的缺陷, J. Borenstein 完全放弃了势场法而设计了一种称为 VFH 的方法<sup>[1]</sup>, 仍然采用 Grids 表示环境, 由 VFH 控制的移动机器人表现出了良好的性能。由于 J. Borenstein 的工作, 栅格方法越来越得到人们的重视并表现出很好的发展前景。但 J. Borenstein 没有解决栅格方法存在着的环境分辨率与环境信息存储量大的矛盾, 因此, 在实用上受到一定的限制。本文在文献 [1] 的基础上, 设计了一种基于栅格 (Grids) 方法的移动机器人实时避障和导航的控制算法, 并在清华大学计算机系研制的 THMRH 移动机器人上实现。在栅格方法基础上, 我们主要进行了以下几方面的工作: (1) 栅格大小的选取; (2) 对于一般的矩形移动机器人如何选取活动窗口; (3) 决定参数; (4) 环境信息的优化。用该算法控制的移动机器人能在未知环境下, 实时检测出障碍物并规划出合理路径, 在几种典型的环境中能稳定、平滑、连续地驶向目标。它不仅使机器人表现出良好的性能, 而且克服了栅格方法存在着的环境分辨率与环境存储量大的矛盾, 并且对栅格法具体实现问题做了进一步的讨论。

## 2 控制算法

### 2.1 环境表示

环境表示在很大程度上依赖于提供原始信息的传感器的特性, 超声传感器由于信息处理简单、快速和低的价格, 被各种移动机器人广泛采用。我们在 THMRH 移动机器人周围安装着 15 个超声头传感器, 以车体中心为中心等角度均匀分布在车体正前方  $[-90^\circ, +90^\circ]$  的水平边缘上, 车体中心选在两后轮轴的中心点处。

环境信息表示不仅要考虑如何将环境信息存储在计算机中,更重要的是使用方便,使得问题的求解有较高的效率.我们采用二维笛卡尔矩形栅格表示环境,每个矩形栅格有一个累积值 CV,表示在此方位中存在障碍物的可信度,高的 CV 值表示存在障碍物的可能性高.传感器不断快速采样环境,存在障碍物的栅格将会不断地被检测到,导致高的 CV 值.如果是环境的干扰信息被传感器读入,很少能导致高的 CV 值. CV 值的引入在一定程度上排除了干扰信息的影响.

栅格大小的选取直接影响着控制算法的性能.栅格选得小,环境分辨率高,但抗干扰能力弱,环境信息存储量大,决策速度慢;栅格选得大,抗干扰能力强,环境信息存储量小,决策速度快,但分辨率下降.在密集障碍物环境中发现路径的能力减弱.栅格大小的选取也与传感器的性能有关,如果传感器精度高而且速度快,栅格可以选得小些.在我们的实现中,栅格大小选为  $0.3 \times 0.3\text{m}$ . 建立一个环境坐标系来描述机器人的环境,在这个坐标系中,二维笛卡尔栅格不断被车载传感器采样环境所更新,环境坐标系是绝对地表示环境,主要用于建立机器人的环境地图.

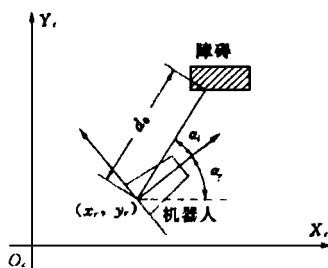


图 1 车载传感器信息到环境坐标系的映象

通过公式 (1),由传感器测得的障碍信息可以被映象到环境坐标系中 (如图 1 所示):

$$\begin{cases} x'_e = x_r + d_0 \cos(T_r + T_i) \\ y'_e = y_r + d_0 \sin(T_r + T_i) \end{cases} \quad (1)$$

这里  $(x'_e, y'_e)$  为被测点在环境坐标系中的坐标,  $(x_r, y_r, T_r)$  为机器人在环境坐标系的位姿;  $d_0$  为被测点离机器人中心的距离.  $T$  为被测点矢量在车体坐标系中的矢量角,车体坐标系的选取如图 1 所示,坐标系原点即车体中心.

通过公式 (2),坐标  $(x'_e, y'_e)$  可以映象到环境坐标系中相应的栅格  $\text{cell}(i, j)$  上.

$$\begin{cases} x_e = \text{INT}(x'_e / w)w + \text{INT}(w / 2) \\ y_e = \text{INT}(y'_e / h)h + \text{INT}(h / 2) \end{cases} \quad (2)$$

这里  $(x_e, y_e)$  为栅格  $\text{cell}(i, j)$  在环境坐标系中的坐标;  $w$  为栅格  $\text{cell}(i, j)$  的宽度.

## 2.2 方向决策

在机器人前面开出一个以长度  $R$  为半径的半圆形假想窗口,称为活动窗口,环境坐标系中暂时属于活动窗口的栅格称为窗口栅格.在我们的实现中,  $R$  为  $3.6\text{m}$ .窗口栅格是方向决策的主要依据.对于具有对称形状的机器人,窗口中心简单地选在机器人的几何中心.对于一般的矩形车体机器人,窗口中心定义在距车前  $1/2$  车体宽度的车体上,即窗口中心距车的两边和距车前距离应该相等 (如图 2 所示).在活动窗口中建立一个窗口坐标系,坐标系原点为窗口中心点,  $X$  轴正向为车的正前方,通过公式 (3),栅格  $\text{cell}(i, j)$  从环境坐标系中映象到窗口坐标系中.

$$\begin{cases} x_w = (x_e - x_r) \cos(T_r) + (y_e - y_r) \sin(T_r) - D_w \\ y_w = (y_e - y_r) \cos(T_r) - (x_e - x_r) \sin(T_r) \end{cases} \quad (3)$$

这里  $(x_w, y_w)$ : 栅格  $\text{cell}(i, j)$  在窗口坐标系中的坐标;  $D_w$ : 窗口中心到机器人中心的距离.

在活动窗口中, 分出  $(180/\theta)$  个角度为  $\theta$  的扇面, 分别代表行驶方面, 如图 2 所示. 公式 (4) 把窗口栅格中的栅格映象到所在扇面中.

$$K = \text{INT} \left( \frac{\arctan(y_w/x_w)}{\theta} \right) \quad (4)$$

窗口栅格贡献的障碍权值

$$M_{i,j} = CV_{i,j}^2 [a - b D_{i,j}] \quad (5)$$

这里  $K$  为扇面的序号;  $M_{i,j}$  为窗口栅格  $\text{cell}(i, j)$  的障碍权值;  $CV_{i,j}$  窗口栅格  $\text{cell}(i, j)$  的  $CV$  值, 表示此栅格存在障碍物的可信度, 我们取值是  $0 \sim 5$ ;  $D_{i,j}$  为窗口栅格  $\text{cell}(i, j)$  到窗口中心的距离;  $a, b$  为正的常数, 应满足  $a - b \times R = 0$ ,  $R$  为窗口的半径,  $a, b$  选得大, 远的障碍的栅格与近的障碍的栅格贡献的障碍权值差别大, 有利于方向的决策, 但  $a, b$  过大, 不利于下面的平滑函数的平滑及计算处理.

对于每一个扇面  $K$ , 由公式 (6) 求出障碍密度

$$H'_K = \sum_{i,j} M_{i,j} \quad (6)$$

$H'_K$  在一定程度上反映出在扇面  $K$  中的障碍物密集程度和远近程度.

由于扇面的不连续性, 用公式 (7) 的平滑函数平滑障碍密度

$$H_K = \frac{H'_{K-L+1} + 2H'_{K-L+2} + \cdots + LH'_K + \cdots + 2H'_{K+L-2} + H'_{K+L-1}}{2L-1} \quad (7)$$

在我们的实现中取  $L = 3$ .

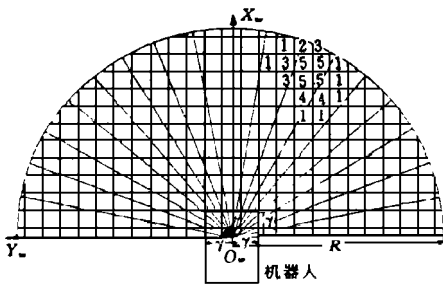


图 2 环境的栅格表示及活动的窗口

我们把有一定数量的几个连续的扇面而且每个扇面的障碍密度  $H_K$  低于一个阈值的区域称为候选扇区. 候选扇区为移动机器人行驶的安全区域, 通常存在有几个候选扇区, 在这种情况下, 选取最利于到达目标的候选扇区作为行驶方向.

### 2.3 环境信息的优化策略

随着机器人的移动, 传感器不断采样环境, 环境信息会越来越大, 这不仅会溢出存储器容量, 而且对环境信息的处理时间会越来越长, 这将不能满足实时性的要求, 因此, 必须对环境信息进行优化.

我们发现, 随着机器人的移动, 在移动机器人后面一定距离的信息利用率是很低的, 这部分信息如果被删除, 不会对决策产生大的影响. 通过以下策略, 删除此类环境信息: ① 从环境坐标系取出一栅格; ② 由公式 (2) 映象窗口坐标系中; ③ 如果此栅格落后于车体, 且与窗口中心的距离大于一定值, 则从环境坐标系中删除此栅格.

通过这样的处理, 使得所存储的环境信息不至于随着移动机器人的移动而无限增大, 减少了处理时间, 使得工作空间不再受到限制.

### 3 实验结果

#### 3.1 实验系统

控制算法在清华大学计算机系研制的移动机器人 THMR-II 上实现. THMR-II 是一矩形车 ( $1.5\text{m} \times 0.8\text{m}$ ), 有三个轮, 后面两轮是分别驱动的主动轮, 前面的轮为从动轮. 机器人总是尽可能以开始设置的最大速度行驶, 当机器人遇到障碍物需要改变方向时减速, 这样才能使转弯不至于太突然. 公式 (8) 为速度减小函数

$$\text{speed}' = \text{speed}_m (1 - C_1 \times |K - K_0| - C_2 \times |K - K_0|) \quad (8)$$

这里  $\text{speed}_m$  为开始设置的最大行驶速度;  $K$  为当前选择的行驶方向;  $K_0$  为机器人行驶的正方向;  $C_1, C_2$  为正的常数.

用公式 (9) 进一步求出左、右轮速度.

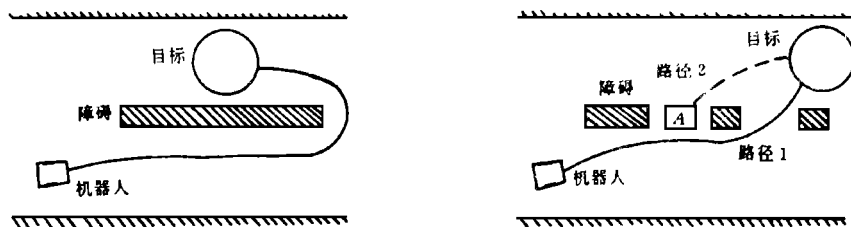
$$\text{speed}_L = \text{speed}' (1 - C_3 |K - K_0|); \text{speed}_R = \text{speed}' (1 + C_3 |K - K_0|) \quad (9)$$

这里  $\text{speed}_L$  为机器人左轮速度;  $\text{speed}_R$  为机器人右轮速度;  $C_3$  为正的常数. 在 THMR-II 型机器人周围安装着 15 个超声头传感器, 超声传感器的测距范围是  $0.7\text{m} \sim 7\text{m}$ . THMR-II 为二层控制系统, 两个车载 8031 单片机分别控制超声测距子系统和车体定位子系统, 一个具有主频为  $16\text{M Hz}$  并配有协处理器 8087 的 IBM PC386 上位机运行此控制算法.

#### 3.2 实验讨论

在大量的实验中, 由该控制算法控制的 THMR-II 移动机器人在各种障碍物分布的环境中行驶, 障碍物都是事先未知的, 在大部分的情况下, 皆能以接近于开始设置的最大速度—— $0.28\text{m/s}$  行驶, 只有进入密集障碍物环境中, 速度才慢一些. 在行驶的过程中, 行驶轨迹平滑, 运动稳定连续. 图 3 是沿着障碍物行驶, 并自动寻找目标最后到达目标的实验, 它表明 THMR-II 有一定的导航能力.

图 4 的实验中, 在放置障碍物 A 的情况下, THMR-II 到达目标的轨迹是路径 1; 去掉障碍物 A, 重复上面的实验, THMR-II 到达目标的行驶轨迹是路径 2, 可以看出, THMR-II 上具有一定的实时规划能力, 它总是选择一个最接近于到达目标的路径, 体现了 THMR-II 一定程度上的智能.



3 机器人沿着障碍物行驶并自动寻找目标 图 4 机器人实时路径规划自动寻找目标

THMR-II 具有通过一宽度为  $1.6\text{m}$  窄门的能力, 在某一特殊位置时, 有些传感器已经失灵. 在这种情况下有效地利用了环境坐标系的信息找出了正确的行驶方向. 在行驶过程中, 大部分情况接近于开始设置的最大速度行驶, 只是在通过窄门位置时, 速度才显著减小一些.

THMR-II 还能够完成从宽通道到窄通道的过渡, 过渡过程是稳定的, 表现了 THMR-II

的应变能力.(因篇幅所限,这里不介绍了.)

## 4 结论

本文设计的控制算法在清华大学计算机系研制的 THM R-II 型移动机器人上实现,本控制算法运行速度快,能够部分忽略错误的传感器信息的干扰.用比较充分的累积环境信息决策机器人的行驶方向,当传感器失灵时,还能找出合理的行驶方向.用优化策略合理优化环境信息,在一定程度上解决了栅格方法存在的环境分辨率与环境信息存储量大的矛盾.

一定数量的实验结果表明本控制算法控制的 THM R-II 智能移动机器人在导航、避障、实时路径规划方面表现了良好的性质,体现出一定的智能水平,行驶的过程是连续、稳定的.

本控制算法的思想有着广泛的应用前景.它容易接收全局规划的指导信息,容易实现全局规划与实时局部规划的有效结合.这对实现高级的智能行为有一定的意义,在实时建立地图方面也有一定的前景.

由于引入环境坐标系表示环境,使得本控制算法有着一定的感知外部环境变化的能力,这对于在有运动障碍物的复杂动态环境中实现导航和避障有着一定的研究前景.

## 参 考 文 献

- 1 Borenstein J, Koren Y. Real-time Obstacle Avoidance for Fast Mobile Robots in Cluttered Environments. In: The 1990 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Cincinnati Ohio, 1990: 572~ 577
- 2 Koren Y, Borenstein J. Potential Field Methods and Their Inherent Limitations for Mobile Robot Navigation. In: Proceedings of the 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Sacramento, California, 1991: 1398~ 1404
- 3 Borenstein J, Koren Y. Real-time Obstacle Avoidance for Fast Mobile Robots. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1989, 19(5): 1179~ 1187
- 4 Moravec H P. Sensor Fusion in Certainty Grids for Mobile Robots. AI Magazine, 1988: 61~ 74
- 5 Arkin R C. Motor Schema-based Mobile Robot Navigation. The International Journal of Robotics Research, 1989, (8): 92~ 112
- 6 马兆青.关于移动机器人实时导航与动态避碰的研究.硕士学位论文,清华大学计算机系,1991

# REAL-TIME NAVIGATION AND OBSTACLE AVOIDANCE BASED ON GRIDS METHOD FOR FAST MOBILE ROBOT

M A Zhaoging      YU AN Zengren

(Dept of Computer Science and Technology, Tsinghua Univ, Beijing 100084)

**Abstract** A real-time navigation and obstacle avoidance method based on grids for fast mobile robot has been developed and implemented on our mobile robot ( THM R-II ). This method allows the detection of unknown obstacles and avoids collisions while simultaneously steering the mobile robot toward the target in smooth, stabled and continuous motion. Experiment results from mobile robot THM R-II traversing obstacle courses demonstrate the effectiveness of the method in typical environment.

**Key words** Mobile robot, real-time navigation, obstace avoidance

## 作者简介

马兆青: 男, 27岁, 博士生. 研究领域: 智能控制、移动式机器人.

袁曾任: 男, 60岁, 教授. 研究领域: 智能控制、移动式机器人、人工神经网络及其应用.