

# 基于激光雷达的移动机器人实时避障策略

蔡自兴, 郑敏捷, 邹小兵

(中南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙, 410083)

**摘要:** 以激光雷达为主要传感器, 对移动机器人设计一种实时避障算法。该算法考虑到机器人的非完整约束, 利用基于圆弧轨迹的局部路径规划和控制使之能够以平滑的路径逼近目标位置。采用增强学习的方法来优化机器人的避障行为, 利用激光雷达提供的报警信息形成刺激-反应式行为, 实现了动态环境下避障行为, 具有良好的实时反应能力。该控制算法采用分布式软件设计方法, 各功能模块异步运行, 较好地实现了局部规划与全局导航目标的结合。该策略针对移动机器人 MORCS 在未知环境下实现了实时、有效避障, 动作稳定流畅, 轨迹平滑, 具有良好的效果。

**关键词:** 移动机器人; 激光雷达; 实时避障

中图分类号: TP24

文献标识码: A

文章编号: 1672-7207(2006)02-0324-06

## Real-time obstacle avoidance for mobile robots strategy based on laser radar

CAI Zi-xing, ZHENG Min-jie, ZOU Xiao-bing

(School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** A real-time obstacle avoidance algorithm for mobile robot which took laser radar as its main sensor was put forward. This algorithm takes into account the nonholonomic restriction of robot. Robot can smoothly reach the goal through local planning based on circle locus controlling. At the same time a reinforcement method is used to optimize its obstacle avoidance algorithm. The stimulate action behavior is formed by using the alarm information of laser radar, and it can realize the obstacle avoidance in the dynamic environments. This algorithm adopts a distributed system, each module is asynchronously operated and the system can be easily combined with global planning. This algorithm is successfully implemented on mobile robot MORCS. It can be used to avoid the unknown obstacles without collision and to simultaneously steer the mobile robot toward the target in smooth, stable and continuous motion.

**Key words:** mobile robot; laser radar; real-time obstacle avoidance

实时避障能力的高低是反映移动机器人智能水平高低的关键因素之一。国内外学者对实时避障问题进行了大量的研究<sup>[1-3]</sup>, 目前比较有效的方法主要是势场法和栅格法。在势场法中, 障碍物表现为

对机器人的“斥力”, 而目标则表现为对机器人的“引力”, 最后通过求合力来控制机器人的运动。但由于势场法把所有信息压缩为单位合力, 这样就容易将有关障碍物分布的有价值信息丢失, 且非常容

收稿日期: 2005-06-28

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(60234030)

作者简介: 蔡自兴(1938-), 男, 福建莆田人, 教授, 博士生导师, 从事人工智能、智能控制研究

论文联系人: 蔡自兴, 男, 教授, 博士生导师; 电话: 0731-8877355(O)

易陷入局部最小的情况。为此, J. Borenstein 等<sup>[4]</sup>设计了一种 VFH 方法。该方法采用栅格表示环境, 由该方法控制的机器人表现出良好的性能, 但是, 它并没有考虑机器人的宽度、动力学特性, 机器人较难走完预定的轨线。

## 1 系统结构

所设计的系统是分布式软件系统<sup>[5]</sup>, 如图 1 所示。

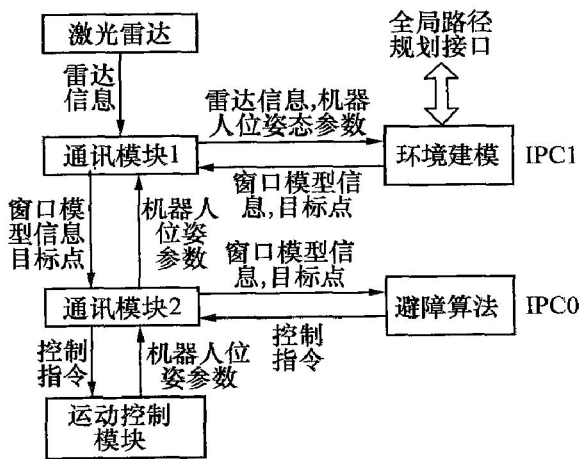


图 1 控制系统结构

Fig. 1 Architecture of control system

激光雷达的信息通过通讯模块 1 传递到环境建模模块建立环境地图, 并产生避障算法所需的活动窗口信息, 由监控端设定的目标点和从运动控制模块传递来的机器人位姿参数在环境地图中产生映射目标点。窗口信息和映射目标点通过通讯模块 1 和 2 传递到避障模块。避障算法通过通讯模块 2 发出相关的控制指令, 传递到运动控制模块并控制机器人运动, 实现实时避障。整个系统中各模块异步运行, IPC1 和 IPC0 通过 R232 串口进行通讯, 这样可以满足实时性要求。IPC1 和 IPC0 中的各模块采用进程间的通讯相连。实验证明, 该系统运行稳定、可靠, 实时性好。

## 2 控制算法

### 2.1 环境建模

SICK 公司制造的 LMS291 激光雷达在每个时间周期都会获得前方  $0^\circ \sim 180^\circ$  范围内的 361 个距离数据, 每  $0.5^\circ$  获得 1 个数据, 可以精确反映机器人

前方的环境信息<sup>[6]</sup>。这里采用二维笛卡儿矩形栅格来表示雷达探测的环境。栅格大小的选取直接关系到控制算法精度的高低, 考虑到激光雷达精度较高且速度快, 选择  $5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$  (长  $\times$  宽) 为 1 个栅格, 这样建立的机器人环境模型可以达到较高的精度和实时性<sup>[7-13]</sup>。

通过式 (1) 可以把激光雷达测得的距离信息映射到机器人的环境坐标系(世界坐标系)中:

$$\begin{cases} x' = x_r + d \cdot \cos(\alpha_1 + \alpha_2), \\ y' = y_r + d \cdot \sin(\alpha_1 + \alpha_2). \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $(x', y')$  为障碍点在世界坐标系中的坐标;  $(x_r, y_r)$  为机器人中心在世界坐标系中的坐标;  $d$  为激光雷达探测到的距离(若激光雷达不是水平放置, 则还需要把距离信息根据俯仰角转换为水平距离);  $\alpha_1$  为机器人的航向角;  $\alpha_2$  为激光束与激光雷达正前方的夹角, 如图 2 所示。

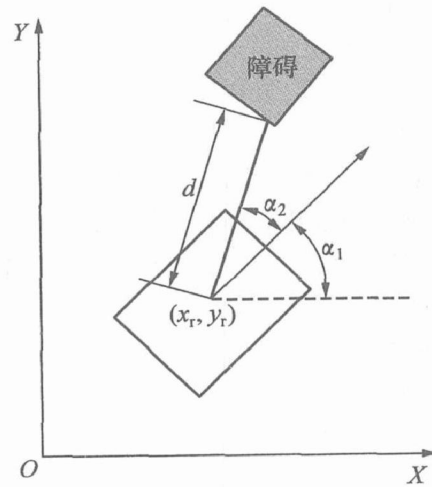


图 2 雷达信息到环境坐标的转换

Fig. 2 Transition of radar information to environment coordinate

通过式 (2) 可以将障碍点坐标映射到栅格环境地图中相应的栅格上。

$$\begin{cases} x_g = \text{int}(x'/w) \cdot w + \text{int}(w/2), \\ y_g = \text{int}(y'/w) \cdot w + \text{int}(w/2). \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $(x_g, y_g)$  为障碍点对应的栅格在世界坐标系中的坐标;  $w$  为栅格的宽度。这样, 可以把整个环境用栅格表示出来。同时, 还设计了一个活动窗口模型。在环境栅格地图中, 以机器人当前位置为圆心, 在机器人正前方开辟一个半径为  $R$  的半圆作为活动窗口, 并且建立机器人坐标系, 原点为机器人当前位置。在坐标原点模拟激光雷达发射虚拟的 181 条射线, 间隔为  $1^\circ$ 。射线在活动窗口中碰到障碍物时, 就会返回障碍物到坐标原点的距离  $d_i$ 。若

$d_i > R$ , 则取  $d_i = R$ 。同时, 在活动窗口中的 181 个方向中提取 37 个方向, 每隔  $5^\circ$  对应 1 个方向, 称为 37 个候选方向。在每个候选方向上同样存在 1 个返回值  $f_j$ , 通过式(3)确定。

$$\begin{cases} f_j = \min_{5j-5 \leq i \leq 5j+5} d_i, & 0 < j < 36; \\ f_0 = \min_{0 \leq i \leq 5} d_i, & j = 0; \\ f_{36} = \min_{175 \leq i \leq 180} d_i, & j = 36. \end{cases} \quad (3)$$

其中:  $0 \leq j \leq 36, 0 \leq i \leq 180$ 。这样, 主要根据 37 个候选方向及候选方向上的  $f_j$  进行方向评估。

把活动窗口按距离机器人中心的距离分成 7 层。最内层是保护层, 若障碍物进入内层, 则机器人会做出反射式动作如停止或后退, 以保护机器人不会碰上障碍物。机器人的保护层是矩形机器人的外切半圆。外面的 6 层称为影响层。

### 2.2 影响层的划分

图 3 中圆弧为保护层, 矩形代表矩形机器人的前半部分,  $MN$  表示机器人右侧边,  $L_{18} \sim L_{36}$  分别表示机器人候选方向。过  $L_{30} \sim L_{36}$  与保护层半圆弧的焦点  $D_1 \sim D_7$  作  $L_{19} \sim L_{25}$  的平行线, 交  $L_{29}$  于  $F_1 \sim F_7$ 。由于机器人候选方向之间的夹角为  $5^\circ$ , 故机器人右侧边  $MN$  的可选方向的分辨率也为  $5^\circ$ 。假设在  $L_{29}$  方向上有障碍点位于  $F_i$  和  $F_{i+1}$  之间, 则  $MN$  可以选择的方向为  $D_i F_i$  及  $D_i F_i$  左边的方向。因此, 可以把  $MN$  可选的角度间隔映射到  $L_{29}$  上, 从而可以把机器人活动窗口划分成相应 7 层。图 3 中,  $F_1 \sim F_7$  为各影响层与  $L_{29}$  的焦点,  $\overline{OF_1} \sim \overline{OF_7}$  为各影响层距离机器人中心的长度, 可由式(4)求出:

$$\overline{OF_i} = \frac{\overline{OD_i} \cdot \sin \angle ODE_i}{\sin \angle OF_i D_i} \quad (4)$$

式中:  $\overline{OD_i}$  为矩形机器人外切圆的半径;  $\angle OD_i F_i = 125^\circ$  (由机器人的机械结构决定);  $\angle F_i O D_i = i \cdot 5^\circ$ 。

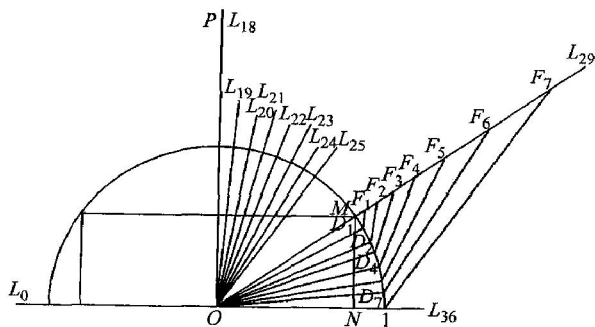


图 3 影响层层次的划分

Fig. 3 Division of infection layer

以  $OF_4$  为例, 若障碍物处于  $F_4$  与  $F_5$  之间, 则机器人的右侧边  $MN$  能避开障碍点的方向是  $DF_4$

所在的方向及其左边的方向。所以, 机器人能选择的最靠右的方向就是与  $DF_4$  平行的方向  $L_{22}$ , 在  $\triangle ODF_4$  中, 有:

$$\overline{OF_4} = \frac{\overline{OD} \cdot \sin \alpha}{\sin \beta}$$

其中:  $\alpha = \angle ODF_4 = 125^\circ$ ;  $\beta = \angle OF_4 D = 35^\circ$ 。

### 2.3 候选方向的评估

把障碍物细分为障碍点, 所有障碍点对机器人的候选方向的影响之和就是整个障碍物对机器人的总的影响。在图 3 中, 若障碍点在  $F_i \sim F_{i+1}$  之间, 则机器人的右侧边  $MN$  只能转到  $D_i F_i$  方向及  $D_i F_i$  左边的方向, 与  $D_i F_i$  平行的候选方向就是可选方向中最靠右的方向。该方向可以看作是障碍点所产生的不可通过区域的左边界; 同样地, 障碍点也会产生一个不可通过区域的右边界。如图 4 所示, 障碍物  $A$  产生的不可通过区域的左边界方向角和右边界方向角可由式(5)求出:

$$\theta_l = L_i - \eta + 5j, \theta_r = L_i + \eta - 5j \quad (5)$$

式中:  $\theta_l$  为障碍点  $A$  产生的不可通过区域的左边界角;  $\theta_r$  为障碍点  $A$  产生的不可通过区域的右边界角;  $L_i$  为障碍点所在的方向角;  $j$  为障碍物所在的影响层的层数;  $\eta = \angle POM/5$ 。

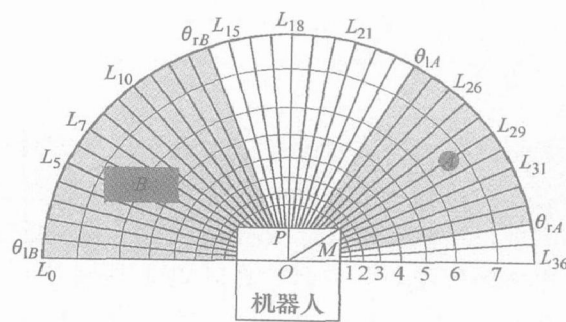


图 4 候选方向的评估

Fig. 4 Evaluation of candidate direction

由图 4 可以看出, 对于不同的矩形机器人,  $\eta$  不同。每一个障碍点  $k$  都由式(5)计算出所影响的  $\theta_l$  和  $\theta_r$ ;  $k \in \Gamma, \Gamma$  为一个障碍物中障碍点的集合。机器人的可选方向为

$$P_i = \{P_i / i < \min_{k \in \Gamma} \theta_{lk}, i > \max_{k \in \Gamma} \theta_{rk}\} \quad (6)$$

式中:  $\theta_{lk}$  和  $\theta_{rk}$  为  $k$  障碍点所产生的左边界角和右边界角。从图 4 可以看出, 障碍物  $B$  在第 4, 5 和 6 层, 影响周围较多的方向, 而障碍物  $A$  在第 6 层和第 7 层, 影响周围较少的方向。图 4 中深灰色表示障碍物, 浅灰色表示候选方向, 白色表示机器人可选方向。

### 2.4 机器人方向的选择

经过评估后, 机器人的可选方向可能有多个,

对于目标导向的机器人, 需要定义一个代价函数来评价各个可选方向, 以选择最佳方向。定义代价函数为:

$$g(c) = \mu_1 \Delta(c, k_g) + \mu_2 \Delta(c, k_r) \quad (7)$$

式中:  $\Delta(c, k_g)$  为待评价的可选方向与目标方向的夹角;  $\Delta(c, k_r)$  为待评价的可选方向与机器人航向的夹角;  $c$  为可选方向;  $k_g$  为目标方向;  $k_r$  为机器人的航向;  $\mu_1$  和  $\mu_2$  为常数。 $\mu_1$  越大, 表示机器人越以目标为导向;  $\mu_2$  越大, 表示机器人航向角的变化越平滑, 轨迹也越平滑。计算每一个可选方向的  $g(c)$ , 选取最小的值作为机器人下一个时刻的方向。为了保证机器人朝着目标前进, 式(7)中还需满足  $\mu_1 > \mu_2$ 。在本文的试验中, 选取  $\mu_1 = 8, \mu_2 = 3$ 。

### 2.5 轨迹的运动控制

采用圆弧运动转到所选的方向上。圆弧的曲率半径若选得过小, 则会使机器人动作不连续; 若选得过大, 则机器人有可能在没有转到所选的方向之前就碰到障碍物。在本文设计的算法中, 在正常情况下, 机器人以高速  $v_{max}$  运行, 当机器人活动窗口出现障碍物且要开始避障时降低速度, 使其为  $v_{low}$ 。采取圆弧避障的策略, 并采取固定圆弧弦长的方法, 即控制机器人在一段距离之内到达预定的方向。轨迹的运动控制如图 5 所示。

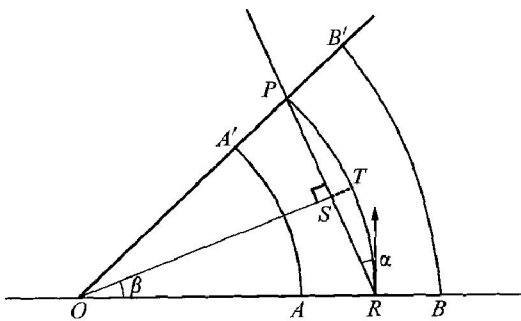


图 5 轨迹的运动控制

Fig. 5 Motion control of locus

图 5 中,  $AA'$  和  $BB'$  分别为机器人左、右轮的运动轨迹;  $R$  和  $P$  分别为机器人运动前、后机器人中心的位置。其中, 箭头方向表示机器人在  $R$  位置时的航向,  $\overrightarrow{RP}$  方向为机器人所选择的方向。由图 5 可得:

$$\begin{cases} v_r = \frac{\overline{OR} + \overline{RB}}{\overline{OR} - \overline{RA}}, \\ \overline{OR} = \frac{\overline{PR}}{2 \sin \beta} = \frac{\overline{RP}}{2 \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}, \\ v_{low} = \frac{v_r + v_l}{2}. \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $v_l$  和  $v_r$  分别为左、右轮的速度;  $\alpha$  为所选方向与机器人航向的交角;  $\overline{RB} = \overline{RA} = d/2$ ;  $d$  为矩形机器人的宽度。由式(8)可得:

$$v_r = \frac{2k}{k+1} v_{low}, \quad v_l = \frac{2}{k+1} v_{low} \quad (9)$$

$$\text{其中: } k = \frac{\frac{\overline{PR} + \frac{1}{2} \overline{AB} \sin \alpha/2}{\overline{PR} - \frac{1}{2} \overline{AB} \sin \alpha/2}}$$

故机器人左、右轮速度可以设定为  $v_r$  和  $v_l$ 。

为了保证机器人运动平滑连续, 需要保证机器人的速度在圆弧转动过程中都为正, 即  $v_r \geq 0, v_l \geq 0$ , 联立式(9)有:  $\overline{PR} \geq \frac{d}{2} \sin \alpha/2$ 。其中:  $\alpha \in$

$$\left[ -\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2} \right]$$

显然,  $\overline{PR} \geq \frac{\sqrt{2}}{4} d$ , 这里选取最短的弦长,  $\overline{PR} = \frac{\sqrt{2}}{4} d$ 。

### 2.6 路径规划中的增强学习策略

为了提高机器人的避障性能, 设计了一种加强学习的策略<sup>[9, 10]</sup>。首先把活动窗口保护层和机器人之间分为  $A, B, C$  和  $D$  4 个区域, 如图 6 所示。

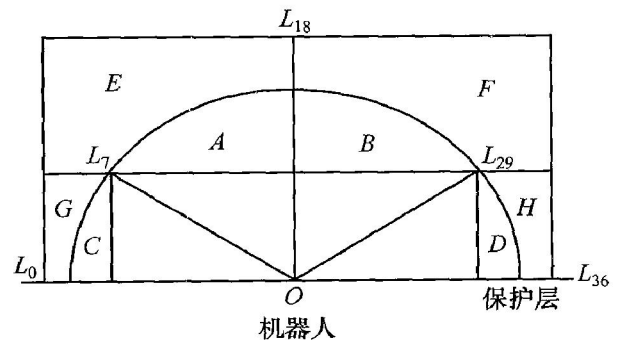


图 6 增强学习区域的划分

Fig. 6 Division of enforcement study area

通过分析得出:

$$\begin{cases} \eta = 1, & f_i < D_{min}, i \in (0, 7); \\ \lambda < 1, \eta = 1, & f_i < D_{min}, i \in (7, 18); \\ \lambda > 1, \eta = -1, & f_i < D_{min}, i \in (18, 29); \\ \eta = -1, & f_i < D_{min}, i \in (29, 36). \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $\lambda = \frac{v_l}{v_r}$ ;  $v_l < 0, v_r < 0$ ;  $\lambda > 1$  表明机器人右后退;  $\lambda < 1$  表明机器人左后退。 $\eta$  为加强学习的标志位,  $\eta = 1$  表示向右偏,  $\eta = -1$  表示向左偏;  $D_{min}$  为保护层的半径。

结合式(10)和图 6 可以看出, 当障碍物进入  $E$

区和  $G$  区时开始加强学习, 此时记住应该选择偏右的方向, 使机器人远离障碍物。在  $A$  区时, 机器人左后退, 当障碍物离开  $A$  区时, 停止后退, 使机器人在选择方向时在可选的方向中选择远离障碍物即偏右的方向。在  $C$  区时, 机器人不后退。在实验中, 当  $\eta = 1$  时, 机器人选择的方向为由式(7)的代价函数所评估的方向所在的方向角加上角度  $\alpha$ ; 当  $\eta = -1$  时, 机器人选择的方向为由式(7)的代价函数所评估的方向所在的方向角减去角度  $\alpha$ 。实验中,  $\alpha$  选取  $10^\circ$  时效果比较理想。

此外, 利用 SICK 公司的激光雷达提供的报警信号, 并形成刺激-反应式行为。该激光雷达把激光雷达前方的区域分成多个区, 当激光雷达在不同的区域探测到障碍物时, 就提示不同的报警信号。利用其中最靠近激光雷达周围的 4 个区域  $AE$ ,  $BF$ ,  $CG$ ,  $DH$  (如图 6 所示), 并对 4 个区进行编码。当  $AE$  和  $GC$  报警时进行加强学习, 使  $\eta = 1$ , 进入  $A$  区时机器人左后退。当  $BF$  和  $DH$  报警时,  $\eta = -1$ , 进入  $B$  区时机器人右后退。通过加入激光雷达报警信号可以提高机器人对于动态障碍物的反应能力。实验证明, 在障碍物运动速度不高的动态环境下, 该方法效果较好。

### 3 实验结果

#### 3.1 实验系统

控制算法在中南大学智能研究所研制的移动机器人 MORCS 上实现。MORCS 是一个矩形车, 其长  $\times$  宽  $\times$  高为  $800 \text{ mm} \times 700 \text{ mm} \times 1100 \text{ mm}$ 。前面 4 个轮子为驱动轮, 后面 1 个轮子为万向轮, 它是 1 个从动轮。MORCS 是一种基于通用工控机 (IPC) 的移动机器人, 采用 SICK 公司的 LMS291 激光雷达作为主要传感器, 以 ADT-850 控制卡来驱动步进电机来实现运动控制。

#### 3.2 实验结果分析

当机器人前面比较开阔时, 机器人以高速前进; 当需要避障转向时, 机器人会切换到低速状态。高速为  $20 \text{ cm/s}$ , 低速为  $5 \text{ cm/s}$ 。在典型环境下, 机器人实时避障实验结果如图 7 所示。其中, 浅黑色的区域表示机器人的轨迹, 黑色区域表示激光雷达探测到的障碍物, 可见实验室的墙壁, 中间的黑色区域是障碍物。可以看出, 机器人很平滑地绕过障

碍物, 到达目标点。

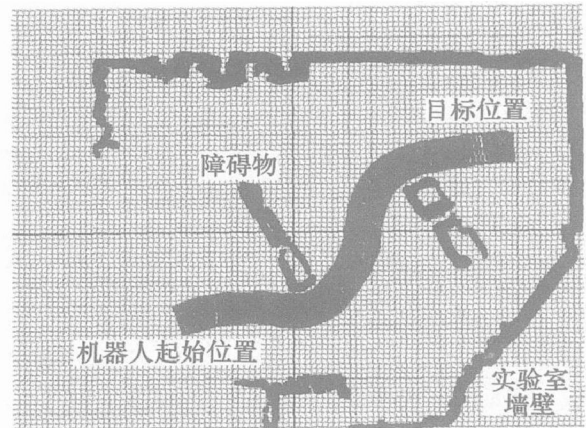


图 7 机器人实时避障实验结果

Fig. 7 Experiment result of real-time obstacle avoidance for mobile robot

## 4 结论

a. 采用 SICK 公司的 LMS291 激光雷达作为探测环境的主要传感器, 针对移动机器人设计了一种实时避障算法。该算法考虑到机器人的非完整性, 采用基于圆弧轨迹的局部路径规划和控制, 使移动机器人路径平滑, 动作流畅。该算法还采用增强学习的方法来进一步补充机器人的避障性能。同时, 利用激光雷达提供的报警信息形成刺激-反应式行为, 实现了动态环境下避障行为。控制算法设计分布式控制系统, 各功能模块异步运行, 容易实现全局规划与全局导航目标的结合。

b. 利用该算法可控制移动机器人 MORCS 在未知环境下实时检测出障碍物并有效避障, 动作流畅、平滑, 性能优良。

c. 本算法虽然是针对矩形机器人得出的, 但是对于一般类似形状的机器人可以取其外切矩形来代替, 具有一定的扩展性。

#### 参考文献:

- [1] 叶涛, 陈尔奎, 杨国胜, 等. 全局环境未知时机器人导航和避障的一种新方法[J]. 机器人, 2003, 25(6): 516-520.  
YE Tao, CHEN Er-kui, YANG Guo-sheng, et al. A novel method of navigation and obstacle avoidance for mobile robot in global unknown environment[J]. Robot, 2003, 25(6): 516-520.
- [2] Cuerrero J J. Uncalibrated vision based on lines for ro-

- bot navigation[J]. *Mechatronics*, 2000, 11(6): 759 - 777.
- [3] 朴松昊, 洪炳熔. 一种动态环境下移动机器人的路径规划方法[J]. *机器人*, 2003, 25(1): 18 - 21.  
PIAO Song-hao, HONG Bing-rong. A path planning approach to mobile robot under dynamic environment [J]. *Robot*, 2003, 25(1): 18 - 21.
- [4] Borenstein J, Koren Y. The vector field histogram fast obstacle avoidance for mobile robots[J]. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 1991, 7(3): 278 - 288.
- [5] FONG T. A survey of socially interactive robots[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2003, 42(3 - 4): 143 - 166.
- [6] CANG Ye, Borenstein J. Characterization of a 2-D laser scanner for mobile robot obstacle negotiation[C]// *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Washington DC, 2002: 2512 - 2518.
- [7] 杨明, 王宏, 何克忠, 等. 基于激光雷达的移动机器人环境建模与避障[J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2000, 40(7): 112 - 116.  
YANG Ming, WANG Hong, HE Kezhong, et al. Environmental modeling and obstacle avoidance of mobile robots based on laser radar[J]. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 2000, 40(7): 112 - 116.
- [8] Nagayuki Y, Ishii S, Doya K. Multiagent reinforcement learning: an approach based on the other agent's internal model[C]// *Proceedings of the IEEE 5th International Conference on Multi Agent Systems*. Boston: IEEE, 2000: 215 - 221.
- [9] Jaakkola S S. Convergence results for single step on policy reinforcement learning algorithms[J]. *Machine Learning*, 2000, 39(2): 287 - 308.
- [10] Arkin R C. *Behavior-based robotics*[M]. London: The MIT Press, 1998.
- [11] Gat E. *Three-layer architecture: Artificial intelligence and mobile robots* [M]. London: The MIT Press, 1998.
- [12] Podsedkowski L, Nowakowski J, Idzikowski M, et al. A new solution for path planning in partially known or unknown environment for nonholonomic mobile robots[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2001, 34: 145 - 152.
- [13] Rude M. Collision avoidance by using space-time representations of motion processes[J]. *Autonomous Robots*, 1997, 4(1): 101 - 119.