

# Multi-Obstacle Avoidance Based on the Method of Fuzzy-Function for Mobile Robot

Feng Zhang<sup>1</sup>, Dalong Tan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>) Faculty of Information and Control Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168  
(E-mail: fzhang@sjzu.edu.cn)

<sup>2</sup>) Robotics Laboratory, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Science, Shenyang 110016  
(E-mail: dltan@sia.cn)

**Abstract**—This paper presented a method of collision avoidance based on the fuzzy-function focus on the complex environment existing multi-obstacle for mobile robot. It constructs the curve of fuzzy-function by defining the function of degree of risk, and changes the problem of two-dimension into one-dimension for collision avoidance. It is simple. The experiment of simulation verified its validity.

**Keywords**—mobile robot, collision avoidance, fuzzy-function

## 基于模糊函数法的移动机器人多障碍物避碰方法

张凤<sup>1</sup> 谈大龙<sup>2</sup>

<sup>1</sup>) 沈阳建筑大学信息与控制工程学院 沈阳 110168

<sup>2</sup>) 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学重点实验室 沈阳 110016

**摘要** 本文针对存在多障碍物的复杂动态环境,提出了一种基于模糊函数法的移动机器人避碰方法。此方法是基于加速度空间,通过定义能反映碰撞危险程度及紧迫性的风险度函数,构造模糊函数,得到模糊函数曲线,将二维的避碰问题转换为二维问题,达到避碰目的。此方法简洁、明了。仿真试验验证了其有效性。

**关键词** 移动机器人, 避碰, 模糊函数

### 1. 引言

多障碍物避碰,尤其是动态环境下的多障碍物避碰是一个比较复杂的问题,虽然一些学者在这方面做了一些工作,但大部分学者考虑的避碰基本上是针对单个障碍物或是多机器人的情况<sup>[1-5]</sup>,或者是静态已知的环境,针对动态未知环境下多障碍物避碰的情况,目前所做的工作还较少<sup>[6]</sup>, K.Kan and S.W.Zucker<sup>[7]</sup>提出了将动态环境分解成两个子问题的方法,(1)规划静态障碍物的避碰路径;(2)沿着避开不可控的运动障碍物的路径进行速度规划。这种方法对于减小问题的复杂性具有重要意义,但也有一定的限制:首先,其路径不变,只改变速度。因而在一定条件下,即使解存在,它有可能不能给出解。另外,它没有考虑可控的物体,如机器人等。Shiller 提出了应用速度障碍物法来

进行多障碍物的一步避碰方法<sup>[8]</sup>,其优点在于可以通过一步实现躲开所有障碍物,但有时这种解是不存在的。也有学者利用模糊方法来进行动态多障碍物的避碰<sup>[9]</sup>; K.Madhava Krishna 和 Premk. Kalra<sup>[10]</sup>首先利用模糊方法进行单障碍物避碰,对多障碍物的情况,利用加权平均的方法进行避碰;在[7]提出的速度路径分解的方法的基础上, Kao-Shing Hwang, Huang-Jen Chao 和 Jy-Hsin Lin<sup>[11]</sup>提出了改进的速度路径分解的方法等。

### 2. 机器人避碰方法回顾

机器人在运动中,如何判断其有无碰撞危险?首先,建立机器人和障碍物的碰撞预测模型,图1所示为机器人和障碍物的关系模型,由此可得到动态方程为<sup>[12]</sup>:

国家 863 计划资助项目(资助号: 2001AA422140)

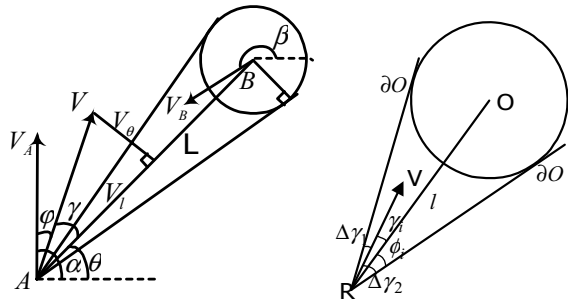


图1 机器人和障碍物关系模型

$$\begin{cases} V_i = \dot{l} = V_A \cos(\alpha - \theta) - V_B \cos(\beta - \theta) \\ V_\theta = l\dot{\theta} = V_A \sin(\alpha - \theta) - V_B \sin(\beta - \theta) \end{cases} \quad (1)$$

$\alpha$ ,  $\beta$  分别是机器人和障碍物的速度在全局坐标系中的方向角度；在测得障碍物边缘的基础上，可以得到机器人和障碍物的中心距离  $l$ 。 $\theta$  是相对距离  $l$  在全局坐标系中的角度； $V$  是机器人 A 相对于障碍物 B 的相对速度， $V = V_A - V_B$ ； $V_i$  和  $V_\theta$  分别是相对速度  $V$  沿着 LOS 和垂直于 LOS 的相对速度分量。 $\gamma_i$  是机器人与障碍物中心位置的距离直线与相对速度的夹角。 $\phi_i$  是机器人与障碍物中心位置的距离直线与边界的夹角，即碰撞角， $\gamma_i$  和  $\phi_i$  都是标量。

机器人通过调整相对速度的转角来达到与障碍物进行避碰的目的，避碰的策略为<sup>[12]</sup>：

$$V\Delta\gamma = -\Delta V_A \sin\varphi + V_A \Delta\alpha \cos\varphi \quad (2)$$

通过避碰策略公式(2)，我们可以得到避碰加速度空间坐标系如图 2 所示，两直线间的带状区域即为碰撞区，要达到避碰的目的，必须选择带状区域以外的部分。

由图 2 可知，要想使  $V$  尽快离开碰撞区，沿着  $h$  是一条最佳路径，即同时调整速度大小和方向，得到的最佳解为<sup>[12]</sup>：

$$\begin{cases} V_A \Delta\alpha = V\Delta\gamma \cos\varphi \\ \Delta V_A = -V\Delta\gamma \sin\varphi \end{cases} \quad (3)$$

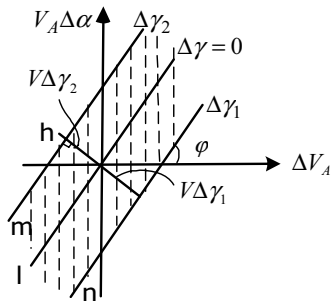


图2 避碰的加速度空间坐标系

### 3. 机器人避碰方法

#### 3.1 定义风险度

对于每个障碍物，我们利用机器人和障碍物的相对速度和相对距离信息，如图 1 所示， $t_{0i}$  为机器人与障碍物发生碰撞所需时间，定义为：

$$t_{0i} = \frac{l_i}{V_i}$$

考虑机器人与障碍物的相对速度和调整角度及最大加速度限制， $t_i$  是机器人避碰加速所需的时间，定义为：

$$t_i = \frac{V_i \Delta\gamma_{ik}}{A_m}$$

其中  $l_i$  是在相对速度方向机器人与障碍物的相对距离； $A_m$  是机器人的最大加速度； $\Delta\gamma_{ik}$  是相对速度方向与障碍物边缘间的角度，也就是机器人需要调整的避碰角度。

所以，风险度函数定义为：

$$p_i = \frac{t_i}{t_{0i}} = \frac{V_i^2 \Delta\gamma_{ik}}{l_i A_m} \quad (4)$$

$\frac{t_i}{t_{0i}}$  的物理本质是转向时间和前进碰撞时间之比，所以

要使机器人在目前状态下是安全的，要求  $\frac{t_i}{t_{0i}} < 1$ 。

由定义可知，机器人碰撞风险度是由时间关系转换成是由相对距离和相对速度及调整的角度决定的，同时表明相对距离越小，相对速度和调整的角度越大，其危险程度就越高，反映了碰撞的紧迫性。

#### 3.2 模糊函数法

利用避碰的加速度空间坐标系，定义避碰的隶属度函数，如图 3 所示， $\rho$  是  $V\Delta\gamma$  的模，即为了避碰，在调整角  $\Delta\gamma$  一定的情况下， $\rho$  表示相对速度需要达到的值大小， $\delta$  是  $\rho$  的角度。同时， $\delta$  也表示加速度方向，如果  $\delta$  在  $(-\pi/2, \pi/2)$  之间，表示机器人加速运动，而在  $(\pi/2, \pi)$  和  $(-\pi, -\pi/2)$  之间表示机器人是减速运动。如图 3，做如下定义：

$$\begin{cases} \Delta V_A = \rho \cos\delta \\ V_A \Delta\alpha = \rho \sin\delta \end{cases} \quad (5)$$

式(5)表示，通过调整相对速度来达到避碰，相应的机器人需要调整的加速度。

从式(2)和(5)，我们得到：

$$V\Delta\gamma = -\rho \cos\delta \sin\varphi + \rho \sin\delta \cos\varphi = \rho \sin(\delta - \varphi) \quad (6)$$

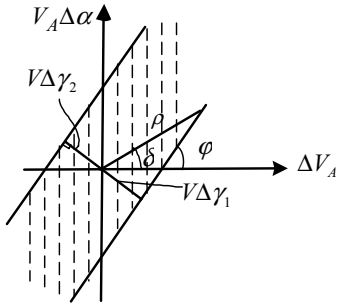


图3 避碰解模型

所以由(6)式可得:

$$\rho = \frac{V\Delta\gamma}{\sin(\delta - \varphi)} \quad (7)$$

式(7)表明, 为了避免碰撞, 基于相对速度不变的情况下, 相对速度应该达到的值, 而其大小要受到加速度方向的制约和影响。

考虑到机器人最大加速度的限制, 定义函数:

$$R_i = 1 - \frac{\rho_i}{A_m T_i} \quad (8)$$

其中,  $T_i = \frac{l_i}{V_i}$  是机器人与障碍物发生碰撞的时间。

如果  $\frac{\rho_i}{A_m T_i} > 1$ , 则风险度  $p_i$  不满足最大加速度的限制, 即避碰解不可达。从而,  $R_i$  一定是大于零的情况, 才能满足避碰目的。如果  $R_i > 0$ , 表示的是一曲线。因为机器人与障碍物碰撞的风险度函数为:

$$p_i = \frac{V_i^2 \Delta\gamma_{ik}}{l_i A_m}$$

$$\text{而 } T_i = \frac{l_i}{V_i}$$

所以将(7)式代入(8)式得:

$$R_i = 1 - \frac{\rho_i}{A_m T_i} = 1 - \frac{V_i^2 \Delta\gamma_{ik}}{A_m l_i \sin(\delta_i - \varphi_i)} = 1 - \frac{p_i}{\sin(\delta_i - \varphi_i)} \quad (9)$$

其中:  $i$  是障碍物的标号, 如果障碍物的数量是  $n$ , 则  $i = 0, 1, \dots, n-1$ 。  $k$  是避碰策略选择, 值为 1 或 2, 它表明有两种避碰策略选择。(9)式说明  $R_i$  是与风险度相关的函数, 同样反映了碰撞危险程度, 风险度  $p_i$  越大,  $R_i$  反而越小。

利用  $R_i$  函数, 定义碰撞可能性的模糊函数为:

$$u_i(r_k) = \begin{cases} 0 & R_i \leq 0 \quad i=0, 1, \dots, n \\ 1 - \frac{V_i^2 \Delta\gamma_{ik}}{A_m l_i \sin(\delta_i - \varphi_i)} & R_i > 0 \quad k=1, 2 \end{cases} \quad (10)$$

由 (10)可见, 避碰不仅仅与相对速度、相对距离和转角有关, 而且与机器人的最大加速度有关。由(9)和(10)可得到图 4, 表示  $R_i$  和  $u_i(r_k)$  的曲线。

每个障碍物的模糊函数曲线基本有两种形式, 如图 5 所示, 其中, a 图中的两个曲线表示  $\Delta\gamma$  取值的不同, 因为  $\Delta\gamma$  有两种选择,  $\Delta\gamma_1$  和  $\Delta\gamma_2$ , 机器人与障碍物有两种避碰策略。曲线越高, 表示风险度越小, 反之, 风险度越大。图中的两个曲线, 曲线高的表示选取的  $\Delta\gamma$  小, 即  $\Delta\gamma = \min(\Delta\gamma_1, \Delta\gamma_2)$ , 相对速度是向转角较小的方向转动, 这时相应的风险度也较小; 而曲线低的则表示相对速度向转角较大的方向转动, 风险度也较大。而图 b 表示机器人处于紧急危险状态。

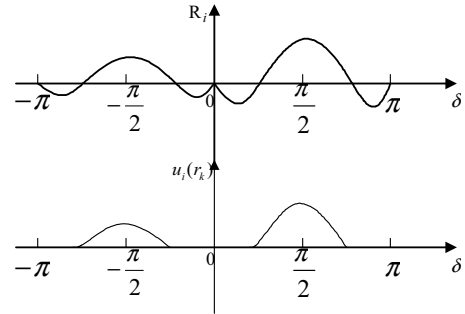


图4 上面:  $R_i$  的曲线图形。 下面:  $u_i(r_k)$  的曲线图形

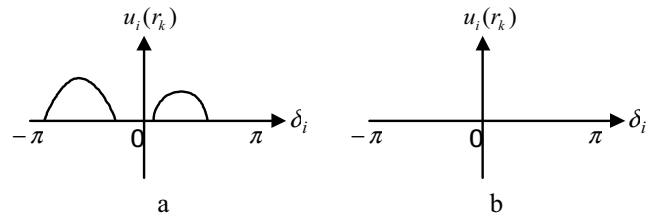


图5 模糊函数曲线

### 3.3 安全函数的确定

在考虑避碰时, 我们是假设相对速度不变, 通过不断调整角度来达到避碰目的的, 只考虑了  $V\dot{\gamma} = V \frac{\Delta\gamma}{\Delta t}$ , 但未考虑  $\dot{V}$  的变化。当  $\rho \neq V\dot{\gamma}$ ,  $\dot{V} \neq 0$  时, 这时如果出现  $\rho$  选择过大的情况, 会使  $\dot{V}$  增大很多, 从而造成碰撞发生, 安全性不能保证。所以, 要保证机器人的安全, 需要确定机器人的安全条件。

**定理 1:** 如图 6 和图 7 所示,

当  $\frac{\pi}{2} \leq \delta - \varphi < \pi$  或  $-\frac{\pi}{2} \leq \delta - \varphi < 0$  时,  $ctg(\delta - \varphi) \leq 0$ ,

系统首先不会碰撞, 可称为绝对安全区;

当  $0 < ctg(\delta - \varphi) < \frac{2(1-p)}{\Delta\gamma p}$  时, 为条件安全区;

当  $ctg(\delta - \varphi) > \frac{2(1-p)}{\Delta\gamma p}$  时, 为不安全区。

其中:

当  $\delta - \varphi = ctg^{-1} \frac{2(1-p)}{\Delta\gamma p}$  时,  $\lambda_1 = (\delta - \varphi)_1$ ,  $\lambda_2 = (\delta - \varphi)_2$

证略。

根据安全区的定义, 我们可以定义安全函数:

$$S = 1 - \frac{p\Delta\gamma ctg(\delta - \varphi)}{2(1-p)}$$

从而有::

$$S_{safe} = \begin{cases} 1 & S \geq 1 \\ \frac{p\Delta\gamma ctg(\delta - \varphi)}{2(1-p)} & 0 < S < 1 \\ 0 & S \leq 0 \end{cases} \quad (11)$$

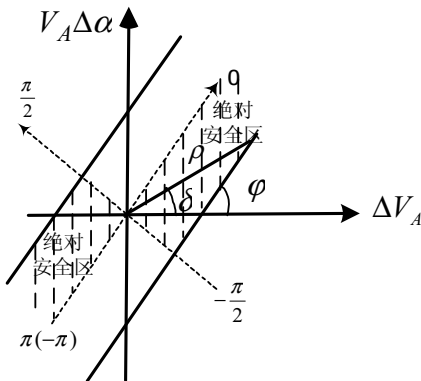


图 6 加速度空间的角度

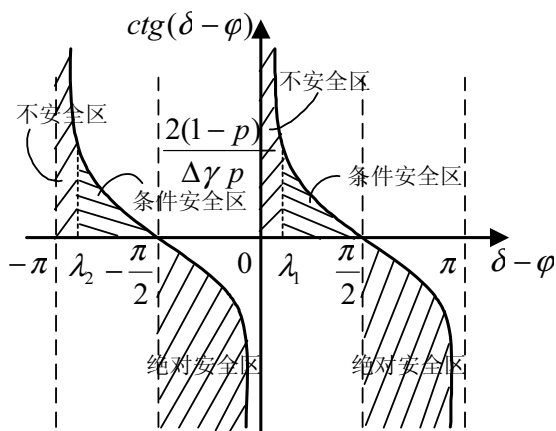


图 7 几种区域的划分

由定义可知, 它是与定理 1 是一致的, 即当  $S \geq 1$  时, 机器人处于安全区,  $S_{safe} = 1$ , 机器人是安全的; 当  $0 < S < 1$  时, 机器人处于条件安全区, 安全函数是  $0 < S_{safe} < 1$ ; 当  $S \leq 0$  时, 机器人处于不安全区, 则安全函数  $S_{safe} = 0$ 。

#### 4. 仿真研究与分析

为了验证模糊函数法的有效性, 下面给出典型的仿真试验结果。仿真环境是用 VC 开发的, 运行于 PC 机。在仿真中, 机器人为圆形全方位移动机器人, 其半径为 300mm, 感知半径为 2000mm, 对感知半径外的障碍物不予考虑, 机器人的运动速度 100m/s。距障碍物的最短安全距离为 200mm, 决策周期是 100ms, 最大加速度为 5000mm/s<sup>2</sup>。

机器人在长 5000mm, 宽 5000mm 的工作环境中工作, 对环境中存在三个移动障碍物的情况进行避碰仿真, 环境中障碍物半径为 400mm。

如图 8 所示, 机器人从初始位置(3500mm,4000 mm)向目标点 (1500 mm,1000 mm)运动, 在运动路径上会遇到三个运动障碍物, 障碍物 1 的初始位置是(1000 mm,2000 mm), 运动速度为 (60, 20) mm/s; 障碍物 2 的初始位置是(4500 mm,2000 mm), 运动速度为 (-60, 60) mm/s; 障碍物 3 的初始位置是(3500 mm, 500 mm), 运动速度为 (-20, 20) mm/s。

从图 a 可以看出, 机器人运动到 t=13.5s 时刻, 障碍物 1 和障碍物 2 同时具有碰撞危险, 考虑两个障碍物之间的

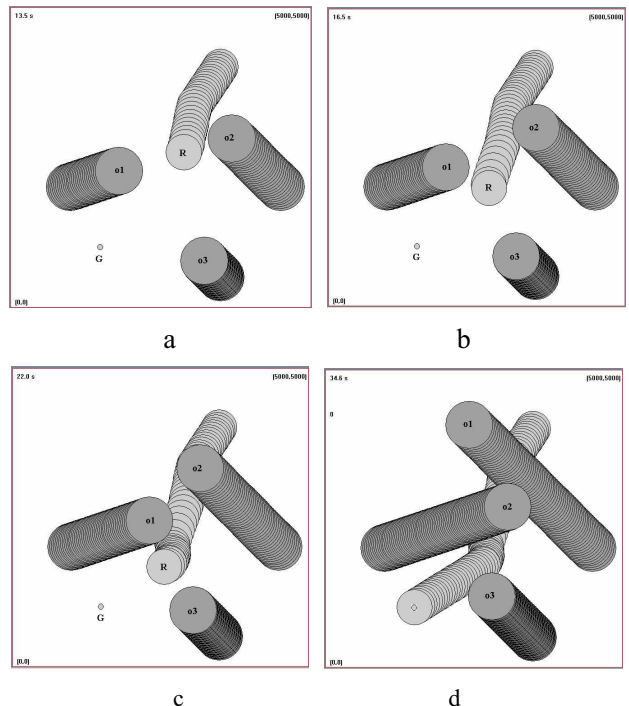


图 8 利用模糊函数法避碰

距离,采取左转并从两障碍物中间穿过的策略,进行同时避让;在 $t=16.5s$ 时刻,如图 b 所示,机器人躲过障碍物 2,并通过加速来避开障碍物 2,此时遇到障碍物 3,并有碰撞危险,进行避碰;如图 c 在 $t=22.0s$ 时刻,机器人考虑距离限制进行避让,然后开始向目标运动;在 $t=34.6$ 时刻,到达目标,如图 d。

## 5. 结论

本文提出了基于模糊函数法的多障碍物避碰方法,在考虑相对距离和相对速度的同时,考虑了转角和机器人最大加速度的限制,并应用了能反映出各个障碍物的碰撞危险程度的风险度的概念,将二维的避碰问题转换为一维问题,即将线性方程法求解的问题转换为模糊函数法求加速度方向角的问题。

通过仿真试验,验证了此避碰方法在动态环境下避碰的有效性。

### 参考文献

- [1] Dong Eui Chang, Shawn C. Shadden, Jerrold E. Marsden and Reza Olfati-Saber. "Collision Avoidance for Multiple Agent Systems". Proceedings of the 42nd IEEE Conference on Decision and Control Maui, Hawaii USA, December 2003. pp 539-543.
- [2] Douglas C. Maclembzie and Ronald C. Arkin. "Multiagent Mission Specification and Execution. Autonomous Robots " 4,29-52 (1997) © 1997 Kluwer Academic Publishers. Manufactured in the Netherlands.
- [3] 徐潼,唐振民. 多机器人系统中的动态避碰. 计算机工程, Vol. 29, No.17, October 2003. pp 79-81.
- [4] Cao Zhi-Qiang, Zhang Bin, Wang Shuo, Tan Min. "Coordinative Hunting of Multiple Mobile Robots in an Unknown Environment". ACTA AUTOMATICA SINICA, Vol. 29, No.4, July, 2003. pp 536-543.
- [5] 欧锦军,朱枫. 一种多移动机器人避碰规划算法. 机器人. Vol. 22, No.6, Nov. 2000. pp 474-481.
- [6] K.Kant, S.Zucher. "Planning Collision-free Trajectories in Time-Varying Environments: a Two Level Hierarchy." Proceedings IEEE International Conference Robotics and Automation, 1988, pp:1644-1649.
- [7] L. Yu and J. Chu, "An LMI approach to guaranteed cost control of linear uncertain time-delay systems," Automatica, vol. 35, no. 6, pp. 1155-1159, 1999.
- [8] Fiorini, Shiller "Motion Planning in Dynamic Enviroments Using Velocity Obstacles". The International Journal of Robotics Research Vol.17, July 1998, pp.760-772.

- [9] "Collision Avoidance of Multiple Dynamic Objects" <http://csce.uark.edu/~mkrishna/Chapter4.PDF>.
- [10] K.Madhava Krishna and Premk. Kalra. "Detection, Tracking and Avoidance of Multiple Dynamic Objects". Journal of Intelligent and Robotic Systems 33:371-408, 2002.
- [11] Kao-Shing Hwang, Huang-Jen Chao and Jy-Hsin Lin. "Collision-Avoidance Motion Planning Amidst Multiple Moving Objects". [http://www.iis.sinica.edu.tw/JISE/1999/199909\\_07.pdf](http://www.iis.sinica.edu.tw/JISE/1999/199909_07.pdf)
- [12] 张凤,谈大龙. "一种基于相对坐标系下移动机器人动态实时避碰的新方法". 机器人, Vol.25, No.1, Jan.2003. pp 31-34.