

文章编号: 1671-7848(2010)03-0397-04

## 动态环境下移动机器人路径跟踪与避障

王仲民<sup>1</sup>, 刘开绪<sup>2</sup>

(1 天津工程师范学院 机械工程学院, 天津 300222; 2 大庆师范学院 物理与电气信息工程学院, 黑龙江 大庆 163712)



**摘 要:** 采用模糊神经网络并结合模糊逻辑控制的方法, 研究在动态环境下移动机器人的在线路径跟踪与实时避障问题。针对移动机器人的运动学模型, 依据点与直线间的距离关系设计了移动机器人的路径跟踪算法, 提出了一种基于模糊神经网络的移动机器人在线路径跟踪方案, 采用改进的 BP 算法对网络进行学习训练, 利用梯度下降法调整网络的权值与阈值, 使其实际输出与期望输出的误差总均方差最小。同时, 运用模糊逻辑控制, 实现了移动机器人的实时避障。仿真实例证实了控制方案的有效性, 表明了所提出的跟踪算法与控制方案具有良好的动态路径跟踪与实时避障能力。

**关 键 词:** 移动机器人; 路径跟踪; 模糊神经网络; 避障

**中图分类号:** TP 27

**文献标识码:** A

## Path Tracking and Avoiding Obstacles of Mobile Robot in Dynamic Environment

WANG Zhongmin<sup>1</sup>, LIU Kai-xu<sup>2</sup>

(1 School of Mechanical Engineering Tianjin University of Technology and Education Tianjin 300222, China;

2 School of Electrical Engineering Daqing Normal University Daqing 163712, China)

**Abstract:** The problems of mobile robot on-line path tracking and real-time avoiding obstacles in a dynamic environment are studied. A method of fuzzy neural networks(FNN) combined with fuzzy logic control(FLC) is presented. A scheme of mobile robot on-line path tracking is designed based on FNN according as kinematics models of mobile robot and the interval relation between point and line. A reformative BP algorithm is used to complete the network learning and training. The gradient descending method is utilized to adjust the weight and threshold value of this network, which makes the error mean square deviation between reality output and expected output be minimum. The FLC is utilized to fulfill the real-time avoiding obstacles. Simulation results show that the method is efficient and possesses better abilities of dynamic path tracking and real-time avoiding obstacles with regard to an unknown dynamic environment.

**Key words:** mobile robot; path tracking; fuzzy neural networks; avoid obstacles

## 1 引言

路径跟踪是移动机器人最基本和最重要的问题之一, 是其完成工作任务所必须具备的自主行为之一<sup>[1]</sup>。尤其是在动态环境下, 移动机器人的路径跟踪更是一个较难解决的问题, 它要求移动机器人在行进过程中尽量不要偏离所指定的路径, 除非遇到运动的障碍物时不得不绕开行走, 但在躲过障碍物后, 移动机器人必须回到原路径, 直至到达目的地。

目前, 关于移动机器人路径跟踪的研究成果很多, 多数方法是采用线性反馈控制或非线性反馈控制, 不仅需要系统准确的运动学或动力学模型, 而且设计复杂、鲁棒性与实时控制效果也不好<sup>[2]</sup>。基

于模糊推理的移动机器人路径跟踪方法, 虽然不需要建立系统精确的数学模型, 但模糊规则难以面面俱到, 且缺乏泛化能力<sup>[3]</sup>。模糊神经网络是神经网络与模糊理论结合的产物, 不但具有广泛的逼近特性, 还可实现从输入到输出的任意非线性映射<sup>[4]</sup>。因此, 本文采用模糊神经网络实现了移动机器人的在线路径跟踪, 应用模糊逻辑控制实现了移动机器人的实时避障, 并通过仿真实验验证了本文所提出的路径跟踪算法与控制策略的正确性与有效性。

## 2 移动机器人路径跟踪系统建模

本文针对两轮独立驱动的轮式移动机器人(Wheeled Mobile Robot WMR)进行研究, 随动轮仅在运动过程中起支撑作用, 其在运动学模型中的影

收稿日期: 2008-10-30; 收修定稿日期: 2009-02-19

基金项目: 哈尔滨工业大学机器人技术与系统国家重点实验室开放基金资助项目(SKJRS200708); 天津工程师范学院科研发展基金资助项目(KJ2008028)

作者简介: 王仲民(1974-), 男, 天津人, 副教授, 博士, 主要从事智能机器人系统等方面的教学与科研工作; 刘开绪(1967-), 男, 教授。

响忽略不记,  $\mathbf{v}$ 、 $\omega$  分别为移动机器人的平移速度与旋转速度。移动机器人的运动学模型为

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & 0 \\ \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} v \\ \omega \end{pmatrix} \quad (1)$$

因此, 只要控制  $\mathbf{U} = [\mathbf{v} \ \omega]^T$ , 就可以得到当前移动机器人的实时位姿。将移动机器人所跟踪的路径分割成若干路径点, 各个路径点间依次连线就构成该路径, 利用两点间连线设计移动机器人的路径跟踪算法, 如图 1 所示。

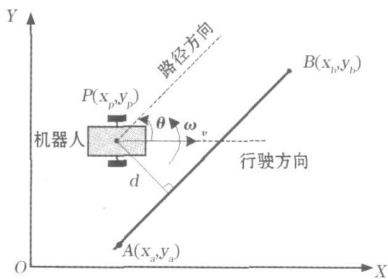


图 1 WMR 路径跟踪模型

Fig.1 WMR path tracking model

假设移动机器人沿着 A 点到 B 点间的直线运动, 机器人与路径方向的夹角为  $\theta$ ,  $\theta \in [-\pi, \pi]$ ,

A 点的坐标为  $A(x_a, y_a)$ , B 点的坐标为  $B(x_b, y_b)$ , 移动机器人的当前坐标为  $P(x_p, y_p)$ , 则 A 点与 B 点间的直线方程<sup>[4]</sup>为

$$\begin{aligned} (y_a - y_b)x - (x_a - x_b)y + (x_a - x_b)y_a - \\ (y_a - y_b)x_a = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

定义移动机器人偏离路径的距离为  $d$ , 则根据点到直线的距离公式, 得:

$$d = \frac{|(y_a - y_b)x_p - (x_a - x_b)y_p + (x_a - x_b)y_a - (y_a - y_b)x_a|}{[(y_a - y_b)^2 + (x_a - x_b)^2]^{1/2}} \quad (3)$$

为研究问题需要, 若机器人在所跟踪路径的上方时, 定义  $d$  为正; 若机器人在其下方, 则  $d$  定义为负。定义机器人逆时针转动时,  $\theta$  为正; 顺时针转动时,  $\theta$  为负, 若机器人运动方向与路径方向一致时, 定义为 0。

### 3 基于模糊神经网络的路径跟踪实现

1) 模糊神经网络结构 根据对移动机器人路径跟踪模型的分析, 本文采用了一个标准的 5 层模糊神经网络 (FNN) 来实现, 结构如图 2 所示。

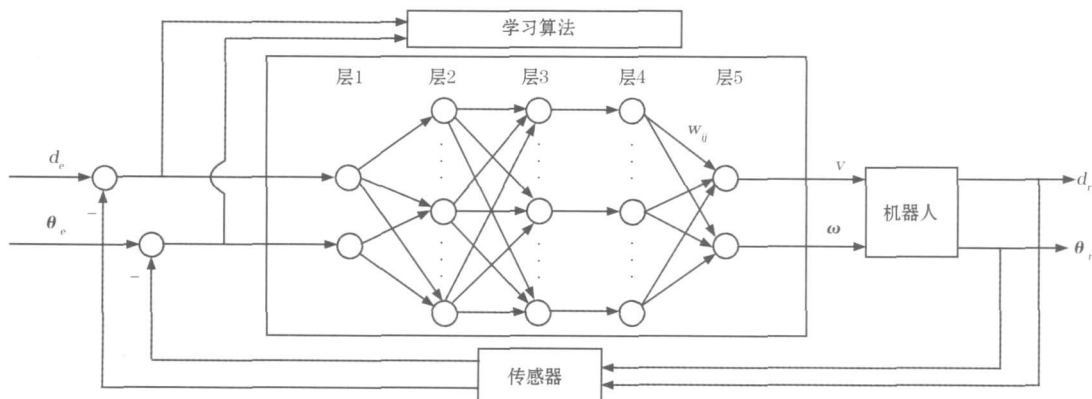


图 2 移动机器人路径跟踪的模糊神经网络框图

Fig.2 FNN block diagram of WMR path tracking

$d_e$  和  $\theta_e$  为移动机器人的期望位置, 而  $d_r$  和  $\theta_r$  为其实际位置。第一层为输入层, 其作用是将输入值传送到下一层。第二层表示输入语言变量的词集, 每个神经元代表一种语言变量, 表达为一个隶属度函数。第三层和第四层在一起表示模糊控制的规则, 其中, 第三层用于实现模糊逻辑规则的前件匹配, 规则节点完成模糊 “与” 运算; 第四层表示规则的后件, 执行模糊 “或” 运算。第五层表示模糊控制的输出, 即输出控制信号<sup>[5]</sup>。 $w_{ij}$  代表第四层到第五层间的联接权, 其初始值设为 1。

用  $D$  表示  $d$  的模糊变量, 用  $\Theta$  代表  $\theta$  的模糊变量, 将  $D$  和  $\Theta$  分别划分为 5 个模糊子集  $\{NB, NS, ZO, PS, PB\}$  (负大, 负小, 零, 正小, 正大),  $v$  具有 3 个模糊等级:

$\{STOP, SLOW, FAST\} = \{\text{停止, 慢速, 快速}\}$

$\omega$  具有 5 个模糊等级:

$\{NB, NS, ZO, PS, PB\} = \{\text{负快, 负慢, 零, 正慢, 正快}\}$

隶属度函数本文采用高斯型隶属度函数:

$$\mu(x_i) = \exp\left[-\frac{(x_i - c_{ij})^2}{\delta_{ij}^2}\right] \quad (4)$$

式中,  $x_i$  为输入变量;  $c_{ij}$  为隶属度函数的中心;  $\delta_{ij}$  为隶属度函数的宽度。

根据图 2 所示的模糊神经网络结构, 通过网络训练与自学习不断调整  $c_{ij}$ ,  $\delta_{ij}$  及最后一层的连接权  $w_{ij}$  (其初始值任意), 使得网络的实际输出值与期望值

望输出值误差最小。

2) 网络学习算法 该模糊神经网络中需要确定的参数主要为  $c_{ij}$ 、 $\delta_{ij}$  及  $w_{ij}$ 。本文采用附加动量项改进的 BP 算法对网络进行训练<sup>[4]</sup>。根据规则学习, 利用梯度下降法, 通过调整权值和阈值使网络实际输出与期望输出的误差总均方差最小<sup>[6]</sup>。附加动量项改进 BP 算法的权值修正迭代过程可以表示为

$$\Delta X^{k+1} = M \cdot \Delta X^k + (1-M) \cdot \epsilon \cdot \frac{\partial f(X^k)}{\partial X^k} \quad (5)$$

式中,  $K$  为训练次数;  $M$  为动量项, 一般取 0.95 左右;  $\frac{\partial f(X^k)}{\partial X^k}$  为目标函数的梯度,  $\epsilon$  为学习步长。

由于 BP 算法使误差函数朝负梯度方向下降, 因此第  $k$  层的网络权值修正公式可表示为

$$\Delta w_i^k = -\epsilon \cdot \frac{\partial E}{\partial w_i^k} \quad (6)$$

令误差函数为  $E = (V - P)^2 / 2$  其中,  $V$  为期望信号,  $P$  为实际输出信号, 则加入动量项后, 得:

$$\Delta w_{ij}^k(t+1) = M \cdot \Delta w_{ij}^k(t) + (1-M) \cdot \epsilon \cdot \frac{\partial E}{\partial w_{ij}^k} \quad (7)$$

因此得到  $w_{ij}(t+1) = \Delta w_{ij} + w_{ij}(t)$ , 同理可以推导出  $\Delta c_{ij}$  及  $\Delta \delta_{ij}$ 。

### 4 移动机器人避障行为设计

避障是移动机器人必须具备的行为之一。当动态环境信息表明移动机器人接近到障碍物时, 其采取的首要的行为就是避障。为了及时获取动态环境中的环境信息, 假设装在移动机器人上的传感器被分为三组, 分别用来感知机器人左方、前方和右方的障碍物, 移动机器人避障行为的示意图, 如图 3 所示。

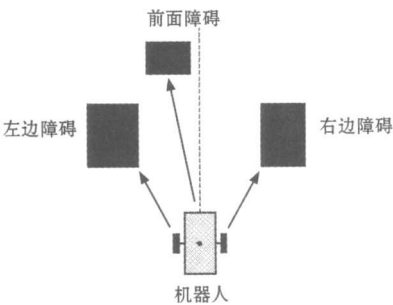


图 3 避障行为示意图

Fig.3 Schematic map of avoiding obstacles

用简单的 IF-THEN 规则很容易实现避障, 在这里不再具体介绍, 可见文献 [7]。同时, 为了使移动机器人很好地在动态环境中完成路径跟踪任务, 必须使移动机器人避障行为的优先级高于路径跟踪的优先级。需指出的是, 倘若移动机器人仅有这两种行为, 则不能判断是否到达目标位置。如果移动机器人要执行经过若干个指定路径点的路径跟踪, 那么其必须要知道何时到达一个路径点, 可通

过再给移动机器人增加一个目标检查行为, 来检查是否已经到达所指定路径的终点, 即可解决。

### 5 仿真实验及分析

在仿真实验中, 学习步长  $\epsilon$  取为 0.05, 移动机器人起始位置可以任意设定, 静态障碍物的数量与位置及动态障碍物的位置由仿真程序随机设定, 动态障碍物的运动方向与运动速度是随机的。在计算机仿真过程中, 令动态障碍物的运动速度不能大于移动机器人的移动速度, 这是因为如果障碍物运动太快, 则可能导致移动机器人不能及时躲开障碍物而使二者发生相互碰撞, 同时对动态障碍物运动方向的变化也要加以限制, 防止其剧烈变化。

在动态环境中的仿真实验结果, 如图 4 所示。

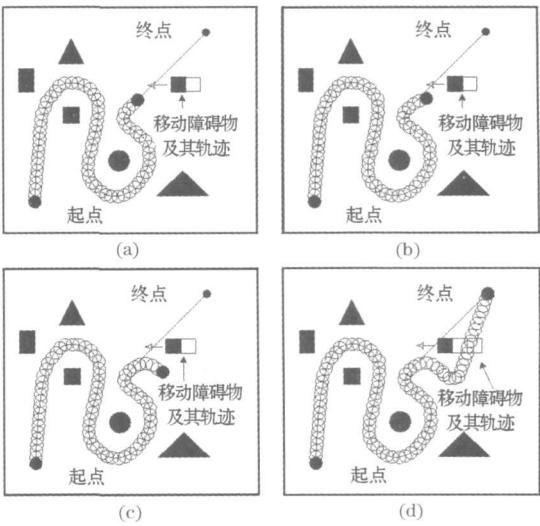


图 4 移动机器人与一个运动障碍物的避碰过程

Fig.4 Procession of mobile robot avoids collision with a moving obstacle

预定的路径为起点到终点间的曲线, 移动机器人用一个黑色实心圆表示, 空心圆表示移动机器人的运动轨迹。运动障碍物正向移动机器人的预定路径运动, 并将封锁机器人的路径, 见图 (a); 当机器人探测到这个障碍物时, 急剧右转弯, 见图 (b)、(c); 当移动机器人躲过障碍物后, 又迅速回到了预定的路径直至终点, 见图 (d)。

移动机器人跟踪误差曲线, 如图 5 所示。

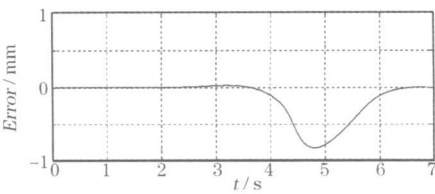


图 5 路径跟踪误差曲线

Fig.5 Errors curves of path tracking

### 6 结 语

本文针对移动机器人所处的动态环境, 利用神

经网络来实现模糊推理而构成模糊神经网络控制器,对移动机器人的路径跟踪进行了有效控制,同时采用模糊逻辑控制实现了移动机器人的实时避障。仿真实例结果表明,该方法可以提高移动机器人在动态环境下的路径跟踪能力,成功完成了路径跟踪任务,不仅具有较强的环境适应能力,实时避开静态障碍物和动态障碍物,而且具有模块化的特点,便于系统功能的扩展及智能水平的提高。下一步,将在移动机器人平台上进行实验研究,进一步验证本文所阐述的控制策略与方法的有效性。

## 参考文献 (References):

- [1] Yang X Y, Moallem M, Patel R V. A layered goal-oriented fuzzy motion planning strategy for mobile robot navigation [J]. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics 2005, 35 (6): 1214-1224.
- [2] Kolmanovsky I, McClamroch N H. Developments in nonholonomic control problems [J]. IEEE Control Systems Magazine 1996, 15 (6): 20-36.
- [3] Maaref H, Barret C. Sensor-based fuzzy navigation of an autonomous mobile robot in an indoor environment [J]. Control Engineering Practice 2000, 8(1): 757-768.
- [4] Du Z J, Wang Z M. Mobile robot path tracking in unknown dynamic environment [C]. Chengdu, China: IEEE International Conference on Robotics Automation and Mechatronics 2008.
- [5] Chen L H, Chang C H. New approach to intelligent control system with self-exploring press [J]. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics - part B: Cybernetics 2003, 33(1): 56-66.
- [6] Masters T, Land W. A new training algorithm for the general regression neural network [C]. Orlando, USA: IEEE International Conference on Systems Man and Cybernetics - Computational Cybernetics and Simulation 1997.
- [7] Hagmas H A. A hierarchical type-2 fuzzy logic control architecture for autonomous mobile robots [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems 2004, 12(4): 524-539.
- [8] 皮旷怡, 马孜, 徐慧朴. 未知环境下的移动机器人定位及实时避障 [J]. 控制工程, 2007, 14(S1): 162-165. (Pi Kuangyi Ma Zi Xu Huipu. Localization and real-time obstacle avoidance of mobile robots in an unknown environment [J]. Control Engineering of China 2007, 14(S1): 162-165.)
- (上接第 379 页)
- Automation of Electric Power Systems 2004, 28(21): 43-48.)
- [6] 杨刚, 杨仁刚, 郭喜庆. 嵌入式以太网在变电站自动化系统智能化电气设备上的实现 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(3): 74-76. (Yang Gang Yang Rengang Guo Xiqing. Implementation of embedded ethernet in intelligent electric device (IED) in the substation automation system [J]. Automation of Electric Power Systems 2004, 28(3): 74-76.)
- [7] 衡晓鹏, 牛英俊. 变电站自动化系统中以太网通信模块设计 [J]. 电子科技, 2006, 20(1): 36-39. (Heng Xiaopeng Niu Yingjun. Design of the Ethernet interface in the substation automation system [J]. Electronic Technology 2006, 20(1): 36-39.)
- [8] IEC61850-7-4. Communication networks and systems in substations part 7-4: Basic communication structure for substations and feeder equipment-compatible logical node classes and data classes FD IS 2003.
- [9] IEC61850-7-3. Communication networks and systems in substations part 7-3: Basic communication structure for substations and feeder equipment-common data classes FD IS 2003.
- [10] IEC61850-7-1. Communication networks and systems in substations part 7-1: Basic communication structure for substations and feeder equipment-principles and models FD IS 2003.
- [11] 吴在军, 胡敏强. 基于 IEC61850 标准的变电站自动化系统研究与实现 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(21): 43-48. (Wu Zaijun Hu Mingqiang. Research on a substation automation system based on IEC61850 [J]. Power System Technology 2003, 27(10): 61-65.)
- (上接第 387 页)

## 7 结 语

受非完整约束的移动机器人是一个具有多自由度关节的非固定基多刚体系统,不能直接利用运动旋量理论建立其运动模型。本文通过构造移动机器人的虚拟连杆首先将其转换成一般的固定基单自由度关节的开链机器人,再应用运动旋量理论建立其运动模型,为移动机器人等多刚体系统建模提供了一种新途径。

## 参考文献 (References):

- [1] Brigitte D N, Bastin G, Campion G. Modeling and control of nonholonomic wheeled mobile robots [C]. Sacramento, California: The 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation 1991.
- [2] Campion G, Bastin G, D'Andrea novel B. Structural properties and classification of kinematic and dynamic models of wheeled mobile robots [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation 1996, 12(1): 47-62.
- [3] Abo-shanab R F A. Dynamic modeling and stability analysis of mobile manipulators with application to heavy duty hydraulic machines [D]. Canada: The University of Manitoba 2003.
- [4] 理查德·摩雷, 李泽湘, 夏恩卡萨斯特里, 等. 机器人操作的数学导论 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1998. (Richard M, Li Zexiang, Sastry S S. A mathematical introduction to robotic manipulation [M]. Beijing, China: Machine Press 1998.)
- [5] Campion G D A N, Bastin G. Modeling and state feedback control of nonholonomic mechanical systems [C]. Brighton, England: The 30th IEEE Conference on Decision and Control 1991.
- [6] 董文杰, 霍伟. 受非完整约束移动机器人的跟踪控制 [J]. 自动化学报, 2000, 26(1): 1-6. (Dong Wenjie Huo Wei. Tracking control of mobile robots with nonholonomic constraint [J]. Acta Automatica Sinica 2000, 26(1): 1-6.)
- [7] 徐俊艳, 张培仁. 非完整轮式移动机器人轨迹跟踪控制研究 [J]. 中国科学技术大学学报, 2004, 34(3): 376-380. (Xu Junyan Zhang Peiren. Research on trajectory tracking control of nonholonomic wheeled mobile robots [J]. Journal of University of Science and Technology of China 2004, 34(3): 376-380.)
- [8] Andrea N D, Bastin G, Campion G. Dynamic feedback linearization of nonholonomic wheeled mobile robots [C]. Nice, France: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation 1992.