

# 基于模糊神经网络的智能履带车路径跟踪系统

赵登峰, 王国强, 许纯新, 陈向东

(吉林大学机械科学与工程学院)

**摘要:** 履带车适合于松软地面作业, 其在结构化环境中能够自动驾驶功能具有重要的意义。介绍了基于模糊神经网络的智能履带车路径跟踪系统。该系统是模糊控制和神经网络控制的有机结合体, 除了保留常规模糊控制器的自然语言信息处理功能以外, 同时具有神经网络控制系统的监督学习及知识获取功能, 这使得控制系统对变化的工作环境具有更好的适应性。试验表明: 该控制系统对变化路径的跟踪响应迅速、反应敏感, 能够满足路径实时跟踪的要求, 效果较好。

**关键词:** 智能履带车; 路径跟踪; 模糊神经网络

中图分类号: U 120

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2003)01-0149-04

## 1 引言

智能履带车用于松软地面自动作业或行驶, 路径跟踪是智能履带车辆最基本的功能, 其技术要求是根据道路跟踪摄像机采集到的车体前方场景图像, 确定合适的转弯指令, 以保证车辆始终行驶在给定的路径上(尽可能在路径中央)<sup>[1,8]</sup>。常用的路径跟踪控制算法有 PD 控制、模糊控制、神经网络控制以及模糊神经网络<sup>[9,10]</sup>等等。其中模糊神经网络<sup>[3]</sup>(fuzzy neural networks, FNN)是模糊系统(fuzzy system)和人工神经网络(artificial neural networks)的有机结合, 它不但保留了模糊系统以自然语言方式表达的经验信息的处理能力, 更重要的是它具有人工神经系统的自动知识获取及并行信息处理能力。基于模糊神经网络的模糊神经控制(fuzzy neural control)是一种较少依赖被控对象模型的现代控制方法<sup>[4]</sup>。作者曾采用模糊控制算法对智能履带车的路径跟踪进行过研究, 发现随着跟踪路径的急剧变化, 控制效果变差, 系统自适应能力明显下降。分析其原因主要是控制策略是根据人工操作经验离线归纳总结的, 是若干个常规路况跟踪知识的浓缩, 控制策略知识无法覆盖所有路况下的操作, 另外, 人为选定的隶属函数的宽度和形状也对控制效果有很大的影响<sup>[5]</sup>。

本文利用模糊神经网络技术对智能履带车路径跟踪进行控制, 使控制系统从运行中不断获取和完善控制策略, 从而达到较优的实时路径跟踪效果。

## 2 控制原理

本文采用的路径标志为宽约 1 cm 的白色纸带, 如图 1 所示。智能履带车在对路径的跟踪过程中, 通过车载摄像机采集车体前下方的地面场景图像(由于采集的视频图像中的路标图像只是被跟踪图像的一微小段, 因此该微小段路标可以采用直线拟合出其方位), 通过图像预处理和直线拟合, 可以提取出路径标志的中心

线<sup>[7]</sup>。系统控制的目标就是通过调整智能履带车左右履带的行驶速度<sup>[2]</sup>, 使该中心线与车体纵向轴线的误差相平面属性轨迹逼近原点, 即中心线与车体纵向轴线重合。

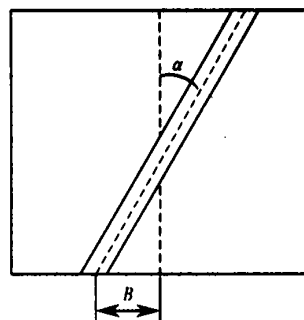


图 1 路径标志

Fig 1 Path mark

## 3 模糊神经网络控制器设计

选择路径标志中心线与车体纵向轴线的夹角  $\alpha$  (规定车体纵向轴线右侧为正值, 左侧为负值) 和路径标志中心线与视野底边的交点到车体纵向轴线的距离  $B$  (规定交点在纵向轴线右侧为正值, 左侧为负值) 作为控制系统的输入信号, 智能履带车左右履带行驶速度差值为系统的输出量。为便于叙述, 夹角  $\alpha$  表示为:  $x_1$ ; 距离  $B$  表示为:  $x_2$ ; 组成输入向量:  $x = [x_1, x_2]$ , 输出信号为左右履带速度差:  $y$ 。

夹角  $x_1$  采用 9 个模糊集合描述, 对应 9 个隶属函数。距离  $x_2$  用 7 个模糊集合表示, 对应 7 个隶属函数, 各个模糊集合隶属函数都采用高斯函数, 即

$$\text{夹角为: } A^j(x_1) = \exp[-(x_1 - c_{1j})^2 / \sigma_{1j}^2],$$
$$j = 1, 2, \dots, 9$$

$$\text{距离为: } A^i(x_2) = \exp[-(x_2 - c_{2i})^2 / \sigma_{2i}^2],$$
$$i = 1, 2, \dots, 7$$

式中  $c_{1j}, c_{2i}$ ——隶属函数的均值;  $\sigma_{1j}, \sigma_{2i}$ ——隶属函数的标准差。

模糊推理共有  $9 \times 7 = 63$  条规, 采用代数积 - 加法 (sum product) 方法, 即第  $l$  条规则为  $R_l$ : 如果  $x_1 = A^j_1, x_2 = A^i_2$ , 那么  $y = \dot{y}_l$ 。如果解模糊采用加权平均法, 则系统的输出为:

收稿日期: 2002-01-23

作者简介: 赵登峰(1976-), 男, 河南上蔡人, 博士生, 长春市人民大街 142 号 吉林大学南岭校区机械科学与工程学院, 130025. Email: wizzard.zhao@163.com

$$y = \sum_{l=1}^{63} y_l a_l$$

式中  $a_l$ ——第  $l$  条模糊规则的激活度, 由模糊推理方法得

$$a_l = A_1^l(x_1)A_2^l(x_2)$$

构造的模糊神经网络的结构<sup>[6]</sup>如图 2 所示。第 1 层为输入层, 提取智能履带车实际运动轨迹相对于被跟踪路径的偏差, 用夹角和距离来衡量; 第 2 层为模糊化层, 输入节点  $x_1, x_2$  分别对应 9 个和 7 个模糊节点, 第 3 层和第 4 层分别为规则层和解模糊化输出层。如果用  $x_i^k$  表示第  $k$  层的第  $i$  个输入,  $net_j^k$  表示第  $k$  层的第  $j$  个节点的净输入,  $y_j^k$  表示第  $k$  层的第  $j$  个输出, 即  $y_j^k$ , 则 FNN 各层的处理过程可表示为:

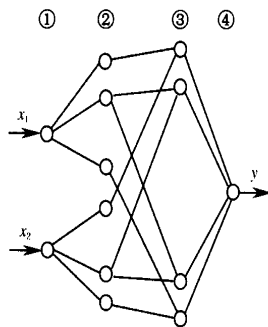


图 2 模糊神经网络结构

Fig 2 Structure of Fuzzy Neural Network (FNN)

输入层

$$net_j^1 = x_i^1, j = i, y_j^1 = net_j^1$$

式中  $x_i^1$ ——网络的第  $i$  个输入,  $i = 1, 2$ 。此层只有 2 个结点。

模糊化层

$$net_j^2 = - \frac{(x_i - c_{ij})^2}{\sigma_{ij}^2}, y_j^2 = \exp(net_j^2)$$

式中  $c_{ij}, \sigma_{ij}$ ——分别是第  $i$  个输入变量的第  $j$  个模糊集合的高斯型隶属函数的均值和标准差。此层共有 13 个结点。

规则层

$$net_j^3 = x_1^3 \cdot x_2^3, y_j^3 = net_j^3$$

式中  $y_j^3$ ——第  $j$  条规则的激活度  $\alpha$ 。此层共有 63 个结点。

解模糊化输出层

$$net_1^4 = \sum_{i=1}^{63} y_i^3 a_i, y_1^4 = net_1^4$$

式中  $y_1^4$ ——网络输出;  $y$ ——第 3 层和第 4 层间的可调权系数。此层共有 1 个结点。

可见, 此模糊神经网络中只有参数值  $c_{ij}, \sigma_{ij}$  和  $y_k$  需要训练调整, 各个模糊集合隶属函数的形状和位置可以根据各个采样信号进行调整, 实现系统对跟踪路径的自适应。调整方法如下:

定义学习误差

$$E = \frac{1}{2} (d - y_1^4)^2 = \frac{1}{2} e^2$$

式中  $d$ ——速度差教师信号。

各层的局部梯度为:

1) 输出层

$$\delta_1^4 = - \frac{\partial E}{\partial net_1^4} = d - y_1^4 = e$$

$$\Delta y_i^3 = - \frac{\partial E}{\partial y_i^3} = - \frac{\partial E}{\partial net_1^4} \frac{\partial net_1^4}{\partial y_i^3} = \delta_1^4 y_i^3$$

其中,  $i = 1, 2, \dots, 63$ 。

2) 规则层

$$\delta_j^3 = - \frac{\partial E}{\partial net_j^3} = \frac{\partial E}{\partial net_1^4} \frac{\partial net_1^4}{\partial net_j^3}$$

其中,  $j = 1, 2, \dots, 63$ 。

3) 模糊化层

$$\delta_j^2 = - \frac{\partial E}{\partial net_j^2} = \frac{\partial E}{\partial y_j^2} \frac{\partial y_j^2}{\partial net_j^2} = \left[ \sum_k \frac{-\partial E}{\partial net_k^3} \frac{\partial net_k^3}{\partial y_j^2} \right] \frac{\partial y_j^2}{\partial net_j^2} = \left[ \sum_k \delta_k^3 y_j^2 \right] y_j^2$$

其中,  $k$  代表与  $j$  结点相连的第 3 层中的节点,  $i$  代表与第 3 层中  $k$  结点相连的第 2 层中的另个节点 ( $i = j$ ),  $j = 1, 2, \dots, 13$ 。

输入隶属函数的参数修正值为

$$\Delta c_{ij} = - \frac{\partial E}{\partial c_{ij}} = - \frac{\partial E}{\partial net_j^2} \frac{\partial net_j^2}{\partial c_{ij}} = \delta_j^2 \frac{2(y_i^1 - c_{ij})}{\sigma_{ij}^2}$$

$$\Delta \sigma_{ij} = - \frac{\partial E}{\partial \sigma_{ij}} = - \frac{\partial E}{\partial net_j^2} \frac{\partial net_j^2}{\partial \sigma_{ij}} = \delta_j^2 \frac{2(y_i^1 - c_{ij})}{\sigma_{ij}^3}$$

综上所述, 各个可调参数的学习算法可归纳为

$$c_{ij}(t+1) = c_{ij}(t) + \eta_c + \Delta c_{ij}$$

$$\sigma_{ij}(t+1) = \sigma_{ij}(t) + \eta_\sigma + \Delta \sigma_{ij}$$

$$y_i(t+1) = y_i(t) + \eta_y + \Delta y_i$$

其中,  $\eta_c, \eta_\sigma, \eta_y$  分别为可调参数  $c_{ij}, \sigma_{ij}$  和  $y_i$  的学习率,  $t$  是离散时间变量。

4 控制系统硬件和软件设计

为了提高程序运算速度和控制系统的可靠性, 系统主机选择 CPU 主频为 P733 的工业控制用计算机, 负责视频图像的预处理和模糊神经网络的训练迭代计算, 数据采集采用插卡式扩展板设计, 扩展板 PCLD 825 和光电编码器完成履带行驶速度的采集, 图像采集卡完成视频信号的输入, 扩展板 PCL 731 负责输出模拟控制信号, 然后通过变频器控制驱动电机。

考虑到控制系统的实时性和程序的简洁通用性, 控制程序采用 Visual C++ 语言编写, 主程序流程如图 3 所示, 网络训练程序流程如图 4 所示。

5 试验验证

试验装置如图 5。摄像机用来获取地面路径视频图像信号, 通过图像采集卡进入计算机; 光电编码器分别检测智能履带车左右履带的行驶速度, 通过 I/O 板 PCLD 825 采集到计算机; 驱动系统由 I/O 板 PCL 731 输出两路电压模拟信号, 通过变频器控制驱动电机, 电机通过减速器驱动履带行走。

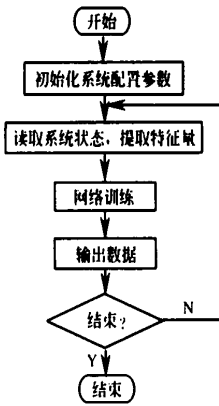


图 3 主程序流程图

Fig 3 Flow chart of the main program

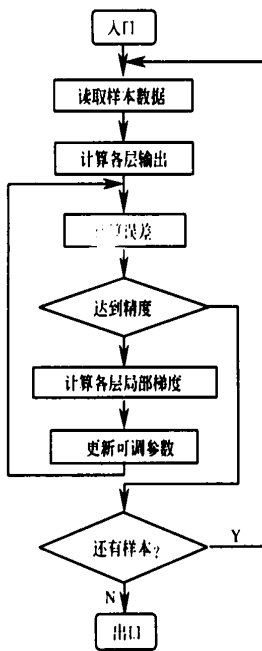


图 4 网络训练流程图

Fig 4 Flow chart of training networks

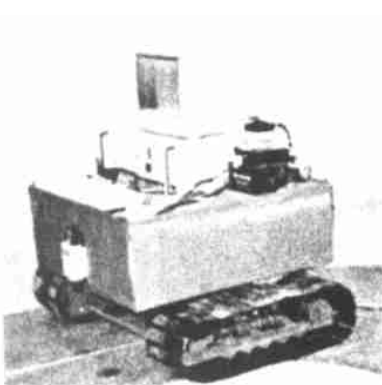


图 5 试验装置

Fig 5 Test equipment

自学习试验: 该试验测试控制系统获得人为控制路径跟踪规律性知识的能力, 即获得模糊神经网络的可调参数  $c_{ij}$ ,  $\sigma_{ij}$  和  $y_k$ 。网络训练采用批数据处理的方法, 每次训练保证 10 组训练样本, 样本更替形式为前向移动。智能履带车行驶速度由键盘输入设定, 控制系统自学习命令也由键盘控制。

验证试验: 为了验证控制系统的稳定性和可靠性, 本文采用模糊控制系统和模糊神经控制系统分别对如图 6 所示的两种典型路径进行了跟踪试验, 跟踪轨迹曲线如图 7 所示, 图例 1 和图例 2 分别表示利用模糊控制和模糊神经网络控制对两种典型路径的跟踪轨迹标志。从两种典型路径的跟踪轨迹可以发现, 利用模糊神经控制系统能够更好地实现路径标志的跟踪。

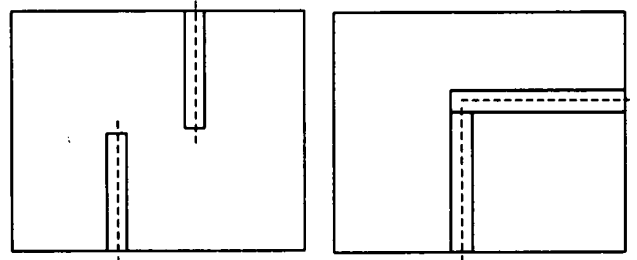


图 6 两种典型路径

Fig 6 Two typical paths

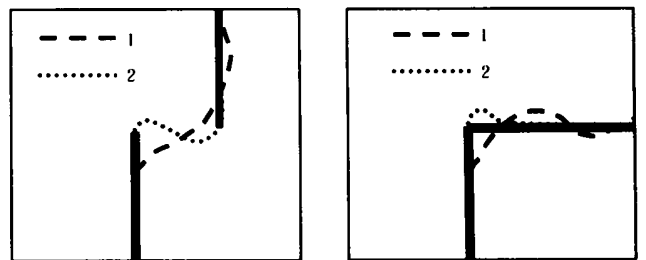


图 7 跟踪轨迹

Fig 7 Track of path following

### 6 结论

1) 将常规的不具备知识获取能力的模糊控制系统进行神经网络化改造, 弥补了常规模糊控制器在自身知识之外的控制缺陷。

2) 所提出的智能履带车路径跟踪系统模糊神经网络控制, 既能定性或模糊地表达经验知识, 又具有很强的学习能力。

3) 通过神经网络算法在线修正网络参数, 使其具有更强的自适应能力, 能够保证智能履带车在结构化环境中的实时路径识别跟踪。

4) 通过试验比较模糊控制和模糊神经网络控制对典型路径的跟踪结果, 说明模糊神经网络控制具有更好的跟踪效果。

## [参 考 文 献]

- [1] 孙怀江, 杨静宇. 一种改进的神经网络道路跟踪方法[J]. 机器人, 2001, 23(5): 197~ 200
- [2] 刘榴娣, 刘明奇, 党长民. 实用数字图像处理[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1998, 4: 87~ 196
- [3] 李士勇. 模糊控制·神经控制和智能控制论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1998, 6: 254~ 448
- [4] 张乃尧, 阎平凡. 神经网络与模糊控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998, 6: 250~ 256
- [5] 蒙以正, 柳成茂. Matlab 5.x 应用与技巧[M]. 北京: 科学出版社, 1999, 7: 1~ 210
- [6] 楼顺天, 施 阳. 基于MATLAB 的系统分析与设计——神经网络[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1999, 6: 9~ 14
- [7] 张友坤, 周云山, 许建斌等. 图像识别自动引导车辆制动系统的研究[J]. 农业工程学报, 1998, 14(2): 40~ 43
- [8] 沈明霞, 姬长英. 农业机器人视觉导航技术与展望[J]. 农业机械学报, 32(1): 109~ 111
- [9] 王志中, 王荣本, 张友坤等. 自动引导车辆转向系统的辨识建模[J]. 农业工程学报, 1999, 15(2): 27~ 31
- [10] Eric Colon, Yvan Baudoïn. Development and evaluation of distributed control algorithms for the mobile robot Nomad200[J]. SPIE, 2903: 86~ 97.

## Path following system based on fuzzy neural networks for intelligently tracked vehicle

Zhao Dengfeng, Wang Guoqiang, Xu Chunxin, Chen Xiangdong

(College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

**Abstract:** The intelligently tracked vehicle is fit for working on soft ground, and its auto drive function is of great significance. This paper introduces the path following system of an intelligently tracked vehicle using fuzzy neural networks. The system, which is an integral combination of the fuzzy system and artificial neural system, can not only deal with information expressed linguistically, but also possess the same function of supervised learning and knowledge acquisition as the artificial neural networks. Therefore, the system is more adaptable to its working environment. The test shows that the system follows the changing path at a rapid speed, and can efficiently satisfy the demands of real time path following.

**Key words:** intelligently tracked vehicle; path following; fuzzy neural networks