

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.11.029

基于自适应模糊控制的拖拉机自动导航系统*

刘兆祥¹ 刘刚¹ 籍颖^{1,2} 张漫¹ 孟志军³ 付卫强³

(1. 中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083;
2. 河北农业大学信息科学与技术学院, 保定 071000; 3. 国家农业信息化工程技术研究中心, 北京 100097)

【摘要】 阐述了一种基于自适应模糊控制的拖拉机自动导航系统。由 PLC、电控开关液压阀和比例方向液压阀组成自动转向控制系统,设计了 PD 转向控制算法;为提高拖拉机自动导航的精度和稳定性,提出了一种基于遗传算法的自适应模糊控制方法,采用遗传算法在线优化模糊控制规则以及输出比例因子,既保留了传统模糊控制的优点,又有效改善了系统的控制品质;仿真和田间试验结果表明,该方法可以迅速消除跟踪误差,响应速度快,超调小,系统工作稳定,稳态跟踪误差不超过 10 cm。

关键词: 拖拉机 模糊控制 遗传算法 自动导航 自适应控制
中图分类号: TP24 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2010)11-0148-05

Autonomous Navigation System for Agricultural Tractor
Based on Self-adapted Fuzzy Control

Liu Zhaoxiang¹ Liu Gang¹ Ji Ying^{1, 2} Zhang Man¹ Meng Zhijun³ Fu Weiqiang³

(1. Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China
2. College of Information and Science & Technology, Agricultural University of Hebei, Baoding 071000, China
3. National Engineering Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China)

Abstract

An autonomous navigation system based on self-adapted fuzzy control for agricultural tractor was proposed. PLC, electro-hydraulic switch valve and proportional directional control valves were used to construct the automatic steering control system based on PD control algorithm. A self-adapted fuzzy control algorithm was proposed, GA was adopted to optimize the fuzzy rules and proportion factor of fuzzy output online. It retained the advantages of conventional fuzzy control, and meanwhile, it improved the performance of autonomous navigation control system. Simulation and field experiment indicated that the proposed navigation control algorithm could eliminate the tracking error effectively with rapid response and small overshoot, the navigation system worked stably, the maximum tracking error was less than 10 cm.

Key words Tractor, Fuzzy control, Genetic algorithm, Autonomous navigation, Self-adapted control

引言

为提高农用车辆自动导航的精度和稳定性,许多学者对其导航控制方法进行了研究。文献[1~11]

分别对线性模型控制方法、模糊控制方法、最优控制方法、神经网络控制方法以及纯追踪算法进行了研究。总体来说,目前对于自适应导航控制方法研究较少。

收稿日期: 2010-01-05 修回日期: 2010-02-26
* 国家自然科学基金资助项目(30900869)和国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2006AA10A304)
作者简介: 刘兆祥,博士生,主要从事智能化检测与控制技术研究,E-mail: lzxaihaojia@yahoo. cn
通讯作者: 刘刚,教授,博士生导师,主要从事电子信息技术在农业中的应用研究,E-mail: pac@cau. edu. cn

模糊控制具有不依赖精确的数学模型、鲁棒性好等特点。对于一个确定的模糊控制器,当被控对象受到参数摄动和外部干扰等不确定因素影响时,仍可以保证系统最终趋于稳定,但是会降低系统的控制品质,出现诸如振荡加剧、过渡时间过长等缺点。因此有必要研究自适应模糊控制方法,在控制过程中的不同阶段,对模糊控制器进行自动调整。拖拉机本身是一个具有大延迟、高度非线性以及及时变性和不确定性的复杂系统,而且农田地况较差,轮胎与地面作用过程复杂,难以建立精确的数学模型,

因此应避免运用车辆模型进行控制,但是也应该充分挖掘车辆模型所蕴含的车辆状态信息,以改善导航系统性能。

本文提出一种基于遗传算法的自适应模糊控制算法,以 RTK-DGPS 为导航传感器,构建拖拉机自动导航系统,并进行拖拉机田间自动导航试验。

1 拖拉机自动导航控制系统

研究平台为福田雷沃 FT704 拖拉机,前轮转向,后轮驱动。自动导航控制系统如图 1 所示。

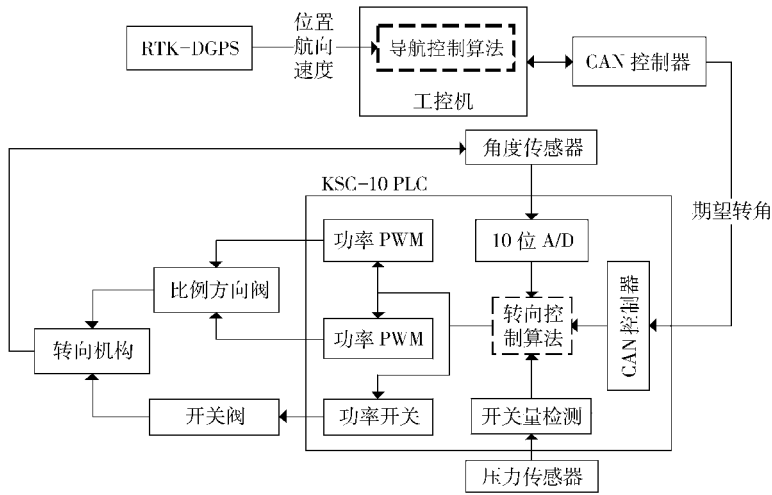


图 1 导航控制系统
Fig. 1 Navigation control system

系统采用分层控制策略,两层之间通过 CAN 总线(ISO11783 协议标准)通信。PPC-3710GS 型工控机作为上层控制器,通过串口接收 RTK-DGPS 输出的 GGA 和 VTG 两种数据格式(输出频率 5 Hz),获取车辆的位置、航向和速度信息,经过导航控制算法输出期望前轮转角。KSC-10 PLC 作为下层控制器,实时采集角度传感器数据,获取当前前轮转角,与期望转角相比较,通过转向控制算法,输出功率 PWM 信号和功率开关信号,驱动开关阀和比例方向阀,实现前轮转向动作,并实时检测压力传感器的输出信号,实现自动驾驶模式和人工驾驶模式的自动切换。

2 基于遗传算法的自适应模糊导航控制器

采用拖拉机的横向偏差 E 和航向偏差 ψ 作为模糊控制器的输入,输出量为期望前轮转角 U 。横向偏差 E 基本论域选择为 $[-30\text{ cm}, 30\text{ cm}]$,量化因子为 $K_e = 0.5$,航向偏差 ψ 基本论域选择为 $[-15^\circ, 15^\circ]$,量化因子为 $K_\psi = 1$,即两输入变量的模糊论域均为 $[-15, 15]$,同时令输出变量的模糊论域与输入相等。模糊控制器可以用解析式概括为^[12]

$$U = -[\alpha E + (1 - \alpha)\psi] \quad (\alpha \in (0, 1)) \quad (1)$$

其中, α 为规则修正因子,又称为加权因子。通过调整 α 值,可以调整控制规则。这种基于解析式的模糊控制器可以将变量的基本论域划分得很细,不仅有利于提高控制精度,而且易于计算机实现,避免了常规模糊控制器规则繁琐的缺点。

采用模拟生物进化过程的遗传算法对模糊控制的修正因子以及输出比例因子进行在线整定,以达到自适应控制。控制算法原理如图 2 所示。

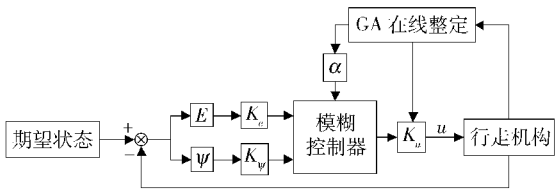


图 2 基于 GA 的导航控制原理图
Fig. 2 Principle of navigation control algorithm based on GA

遗传算法具有鲁棒性强、并行搜索和群体寻优等优点,是一种有效的参数优化手段。其基本操作主要包括编码、解码、选择、交叉和变异,设计如下:

(1) 编码和解码

考虑到拖拉机前轮转向范围为 $[-25^\circ, 30^\circ]$,模糊控制器输出比例因子大小范围选择为 $K_u \in$

[0.2,1.67]。编码方式采用搜索能力较强的二进制编码,染色体是长度为10位的二进制串, α 占6位, K_u 占4位。相应的解码方式为

$$\begin{cases} \alpha = \frac{\text{binrep}(\alpha)}{2^6 - 1} \\ K_u = 0.2 + \frac{1.47\text{binrep}(K_u)}{15} \end{cases} \quad (2)$$

式中 $\text{binrep}(\alpha)$ ——6 位字符串表示的二进制整数
 $\text{binrep}(K_u)$ ——4 位字符串表示的二进制整数
(2) 适应度函数的构造

适应度函数的选取直接影响 GA 的收敛速度以及能否找到最优解。由于根据 ITAE 指标设计的系统超调量小,阻尼适中,具有良好的动态特性,而且在农用车辆自动驾驶中,横向跟踪偏差是衡量控制效果的首要指标,故选择横向跟踪偏的 ITAE 指标的倒数为适应度函数,即为

$$f = \frac{1}{\int_0^\infty t | y(t) | dt} \quad (3)$$

式中 $y(t)$ —— t 时刻的横向跟踪偏差,m
在实际寻优中,为提高算法运算速度,保证控制的实时性,改进为

$$f = \frac{1}{\Delta t \sum_{k=1}^N t_k | y(k) |} \quad N = \text{round}(20v) \quad (4)$$

式中 Δt ——分段积分区间长度,为 0.1 s
 $y(k)$ —— $k\Delta t$ 时刻的横向跟踪偏差,m
 v ——拖拉机前进速度,m/s
 round ——对结果取整

为计算适应度函数,采用简化的两轮车运动学模型推算 $y(k)$,由于不考虑车辆离心力和侧滑的两轮车模型,虽然在实际过程中不能完全精确地描述车辆的运动状态,但是在很大程度上还是能够反映车辆真实运动变化趋势的。同时将液压转向系统简化为一阶惯性环节^[13],以预定直线路径为横轴建立跟踪坐标系,前进方向为横轴正方向,跟踪起点横坐标为零,则可得如图 3 所示的非线性运动学模型为

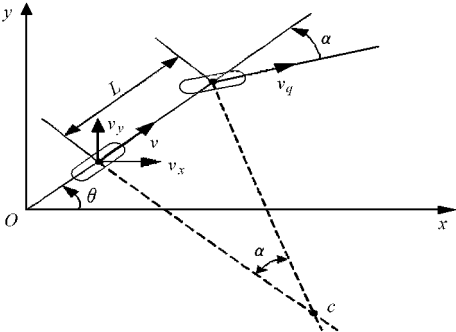


图 3 两轮车运动学模型
Fig. 3 Kinematics model of two-wheel vehicle

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos \theta \\ \dot{y} = v \sin \theta \\ \dot{\theta} = v \tan \alpha / L \\ \dot{\alpha} = -\alpha / \tau + \alpha_d / \tau \end{cases} \quad (5)$$

式中 x ——跟踪距离,m v ——速度,m/s
 y ——横向跟踪偏差,m L ——轴距,m
 θ ——航向跟踪偏差,rad
 α ——前轮转向角,rad
 τ ——惯性时间常数,s
 α_d ——期望前轮转角,rad

(3) 选择策略

采用按适应度比例分配的轮盘赌选择法,即利用个体适应度比例的概率决定其后代留存的可能。若个体 i 的适应度为 f_i ,则其被选中的概率为

$$P_i = \frac{f_i}{\sum f_i} \quad (6)$$

(4) 遗传算子

主要包括交叉和变异两个遗传算子。交叉算子采用单点交叉方式;变异算子,以变异概率对染色体的每个二进制位进行逻辑取反。遗传算法的流程如图 4 所示。

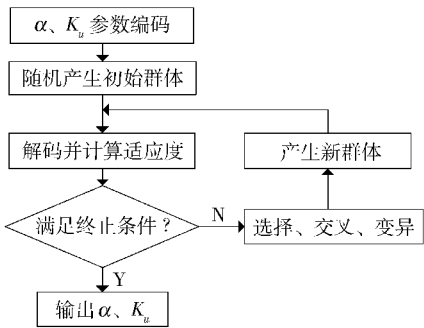


图 4 基于 GA 的 α, K_u 参数优化流程
Fig. 4 Float chart of optimization of α, K_u

3 前轮转向控制器

由于 KSC-10 型 PLC 支持多任务运行模式,所以将下层控制器的任务划分为:任务 1 按照 ISO11783 规定的时间周期向导航控制器报告前轮转角;任务 2 负责前轮转向控制以及驾驶模式的切换和上报。任务 1 的优先级高于任务 2。

前轮自动转向控制是通过转向控制算法输出一定的功率信号,控制比例阀门的开度,通过调节流量来调节前轮的转向速度,从而实现转角的控制。本文采用位置式数字 PD 控制器实现前轮转角控制,期望转角与当前转角之差作为控制器输入。转向控制原理如图 5 所示。

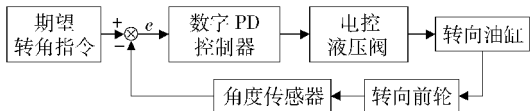


Fig. 5 Principle of turning control

考虑到比例方向阀有两路 PWM 输入, 而且有 700 mA 的电流死区, 控制算法改进为

$$\begin{cases} I_{PD} = K_P e_k + K_D (e_k - e_{k-1}) \\ I_{out} = \begin{cases} I_{PD} + \frac{700 I_{PD}}{|I_{PD}|} & (I_{PD} \neq 0) \\ 700 & (I_{PD} = 0) \end{cases} \end{cases} \quad (7)$$

式中 I_{PD} ——PD 算法输出值 K_P ——比例系数
 e_k ——当前角度误差 K_D ——微分系数
 e_{k-1} ——前一次角度误差
 I_{out} ——控制器最终输出值

I_{out} 的正负极性分别代表左路和右路 PWM 输入, 相应代表前轮的两个转动方向。在转向过程中的某一时刻, 必然有一路 PWM 输入需要置为零。

4 算法仿真与系统试验

4.1 前轮转向控制试验

为尽可能考虑农田地面状况对前轮转向控制的影响, 在北京小汤山国家精准农业示范基地秋收后的玉米地进行转向控制试验。选择频率为 0.2 Hz, 幅值为 15°方波指令曲线和正弦指令曲线对转向控制器进行测试。经过多次调试, 当 $K_P = 250, K_D = 20$ 时, 转向控制效果较佳。测试结果如图 6 所示。

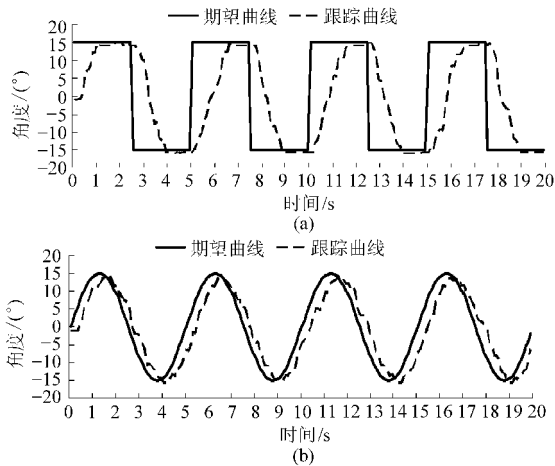


图 6 指令曲线跟踪

Fig. 6 Tracking of signal curve

(a) 方波曲线跟踪 (b) 正弦曲线跟踪

可见, 转向控制系统可以较好地完成任务。对于方波信号, 跟踪一个 30° 的阶跃信号 (从 -15° 到 15° 或反之) 大约需要 1.2 ~ 1.4 s, 对于正弦波, 跟踪延迟约为 0.2 ~ 0.4 s, 可满足实际自动导航

需求。另外, 在正负峰值处, 跟踪曲线并不完全对称, 这是由于左右转向时执行机构参数不同造成的。

4.2 导航控制算法仿真

首先在 Matlab 环境下, 采用式 (5) 所描述的两轮车模型, 对设计的自适应导航控制算法进行仿真验证, 仿真程序采用 M 语言编写。运动学参数为: $v = 2 \text{ m/s}, L = 2.3 \text{ m}, \tau = 0.1 \text{ s}$ 。遗传算法的种群大小为 40, 进化代数 40 代, 交叉概率为 0.6, 变异概率为 0.02。拖拉机初始状态为 $[3.5 \text{ m}, 0.4 \text{ rad}, 0.2 \text{ rad}]$, 分别代表横向偏差、航向偏差和前轮转角, 导航控制周期为 200 ms。与之对比, 常规模糊控制的规则因子选择为 0.6, 输出比例因子为 1。仿真结果如图 7 所示。

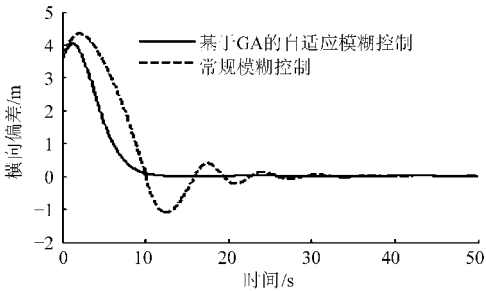


图 7 直线跟踪仿真

Fig. 7 Line tracking of simulation

由图可见, 基于 GA 的自适应模糊控制与常规模糊控制相比, 消除误差的速度更快, 几乎没有超调和振荡, 具有良好的动态性能, 在理论上是可行的。

通过大量仿真发现, 在 GA 每步优化中, 基本不超过 10 代即可寻找到最优解, 其中一步的进化过程如图 8 所示。

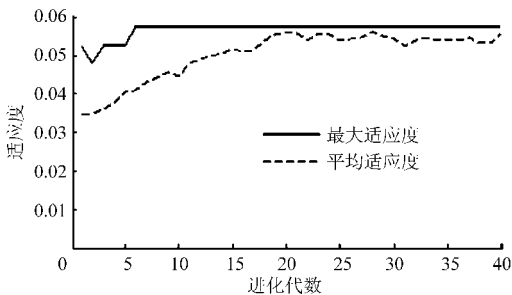


图 8 适应度曲线

Fig. 8 Fitness curve

另外, 在拖拉机自动导航过程中, 导航控制算法的实时性问题是必须考虑的问题。将上述自适应控制方法在工控机的 Visual C++ 6.0 环境下进行验证, 进化代数设置为 10 代, 经统计发现, 每步优化平均耗时 10 ms 左右, 与 200 ms 的导航控制周期相比, 其算法延时造成的影响可以忽略不计。

4.3 田间自动导航试验

试验地点选择在北京小汤山国家精准农业示范

基地秋收后的玉米地,地面颠簸不平。转向控制器采用上述设计的数字 PD 控制器,拖拉机速度 2 m/s 左右,分别对常规模糊控制方法和基于 GA 的自适应模糊控制方法进行试验,试验结果如图 9 所示。

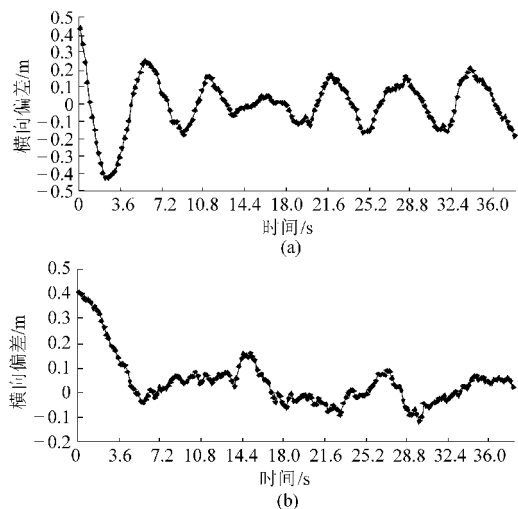


图9 自动驾驶直线跟踪

Fig.9 Line tracking of autonomous navigation

(a) 常规模糊控制 (b) 基于 GA 的自适应模糊控制

由图可见,基于常规模糊控制的直线跟踪,存在一定的超调和振荡,稳态时最大偏差为 20 cm 左右,而基于自适应模糊控制的直线跟踪可以迅速消除横向偏差,超调较小,振荡也较小,稳态时最大横向偏差为 10 cm 左右,跟踪曲线变化相对平缓,具有良好的动态特性。考虑到地面颠簸不平对 GPS 天线造成一定定位误差情况下,这个跟踪精度是可以接受的。

5 结论

(1)对电控液压转向机构进行了研究,设计的位置式数字 PD 转向控制器,具有良好的动态性能,可以满足农业机械自动导航的需求。

(2)对拖拉机自动导航控制算法进行了研究,设计的基于遗传算法的自适应模糊控制器,可以显著提高拖拉机自动导航时的跟踪精度,改善系统的控制品质。

参 考 文 献

- 1 Noguchi N, Will J, Reid J, et al. Development of a master-slave robot system for farm operations[J]. Computer and Electronics in Agriculture, 2004,44(1): 1~19.
- 2 Kaizu Y, Yokoyama S, Imou K, et al. Vision-based navigation of a rice transplanter[C]// 2004 CIGR International Conference, Vol. 2, Beijing, 2004: III 147.
- 3 周建军, 张漫, 汪懋华, 等. 基于模糊控制的农用车辆路线跟踪[J]. 农业机械学报, 2009, 40(4): 151~156.
Zhou Jianjun, Zhang Man, Wang Maohua, et al. Path tracking for agricultural vehicle based on fuzzy control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(4): 151~156. (in Chinese)
- 4 周俊, 姬长英. 视觉导航轮式移动机器人横向预测模糊控制[J]. 农业机械学报, 2002, 33(6): 76~79.
Zhou Jun, Ji Changying. Lateral predictive fuzzy logic control for wheeled mobile robot navigated by machine vision[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(6): 76~79. (in Chinese)
- 5 吕安涛, 毛恩荣, 宋正河, 等. 一种拖拉机自动驾驶复合模糊控制方法[J]. 农业机械学报, 2006, 37(4): 17~20.
Lü Antao, Mao Enrong, Song Zhenghe, et al. A complex fuzzy control technique of tractor automatic steering[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(4): 17~20. (in Chinese)
- 6 吕安涛, 宋正河, 毛恩荣. 拖拉机自动转向最优控制方法的研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(8): 116~119.
Lü Antao, Song Zhenghe, Mao Enrong. Optimized control method for tractor automatic steering[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(8): 116~119. (in Chinese)
- 7 朱忠祥, 宋正河, 谢斌, 等. 拖拉机队列自动控制系统[J]. 农业机械学报, 2009, 40(8): 149~154.
Zhu Zhongxiang, Song Zhenghe, Xie Bin, et al. Automatic control system of tractors platooning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(8): 149~154. (in Chinese)
- 8 陈军, 朱忠祥, 鸟巢凉, 等. 拖拉机沿曲线路径的跟踪控制[J]. 农业工程学报, 2006, 22(11): 108~111.
Chen Jun, Zhu Zhongxiang, Torisu Ryo, et al. On-tracking control of tractor running along curved paths[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(11): 108~111. (in Chinese)
- 9 周俊, 姬长英, 刘成良. 农用轮式移动机器人视觉导航系统[J]. 农业机械学报, 2005, 36(3): 90~94.
Zhou Jun, Ji Changying, Liu Chengliang. Visual navigation system of agricultural wheeled-mobile robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(3): 90~94. (in Chinese)