

doi: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.005

# 基于改进粒子群优化模糊控制的农业车辆导航系统\*

孟庆宽<sup>1</sup> 仇瑞承<sup>1</sup> 张漫<sup>1</sup> 刘刚<sup>1</sup> 张志刚<sup>2</sup> 项明<sup>3</sup>

(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. 华南农业大学南方农业机械与装备关键技术教育部重点实验室, 广州 510642;

3. 农业部农业信息获取技术重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 以采用机器视觉导航的农业车辆为研究对象, 提出了一种基于改进粒子群优化自适应模糊控制的农机导航控制方法。建立了车辆 2 自由度转向模型和视觉预瞄模型, 对车辆横向控制进行状态描述。对粒子群算法进行了改进, 提高了粒子群算法的收敛速度, 降低了算法计算时间。构建了自适应模糊控制器, 在模糊控制器中引入加权因子, 以横向偏差和航向偏差时间误差绝对值积分 (ITAE) 之和作为系统目标函数, 通过粒子群算法计算得到最优加权因子, 进而调整控制规则实现导航车辆的自适应控制。仿真和导航试验结果表明, 提出的控制方法可以迅速消除横向误差, 具有超调量小、响应速度快等特点, 既保留了模糊控制算法的优点, 又提高了系统控制品质。在相同参数条件下, 与常规模糊控制相比, 改进模糊控制算法导航精度显著提高。当车速为 0.8/s 时, 直线路径跟踪最大横向偏差不超过 4.2 cm, 曲线路径跟踪最大横向偏差不超过 5.9 cm, 能够较好地满足农业车辆导航作业要求。

**关键词:** 农业车辆 导航 路径跟踪 自适应模糊控制 粒子群算法

**中图分类号:** TP242.6<sup>+</sup>2; TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)03-0029-08

## Navigation System of Agricultural Vehicle Based on Fuzzy Logic Controller with Improved Particle Swarm Optimization Algorithm

Meng Qingkuan<sup>1</sup> Qiu Ruicheng<sup>1</sup> Zhang Man<sup>1</sup> Liu Gang<sup>1</sup> Zhang Zhigang<sup>2</sup> Xiang Ming<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Key Laboratory of Key Technology on Agricultural Machine and Equipment, Ministry of Education, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

3. Key Laboratory of Agricultural Information Acquisition Technology, Ministry of Agriculture, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Taking agricultural vehicle with machine vision navigation as study object, a self-adaptive fuzzy control method with improved particle swarm optimization algorithm was designed. Firstly, by establishing 2-DOF steering model and visual preview model, lateral control equations of vehicle were described. Secondly, in order to improve the convergent speed of particle swarm optimization (PSO) algorithm, an improved PSO algorithm was designed. Finally, agricultural vehicle guidance system was a complex system with high nonlinearity, time-varying and large delay; therefore, an adaptive fuzzy controller was used for path tracking control. Correction factors were introduced into the fuzzy controller and particle swarm algorithm was used to optimize the correction factors. Taking the integral time absolute error (ITAE) sum of lateral offset and heading offset as the objective function, optimal correction factors were calculated by using PSO algorithm. Simulation and experimental results showed that the designed

收稿日期: 2014-08-01 修回日期: 2014-10-12

\* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2012AA101901)和引进国际先进农业科学技术计划(948计划)资助项目(2011-G32)

作者简介: 孟庆宽, 博士生, 主要从事农业自动化图像信息处理研究, E-mail: 373414672@qq.com

通讯作者: 张漫, 副教授, 博士, 主要从事农业电气化与自动化研究, E-mail: cauzm@cau.edu.cn

control algorithm could eliminate the lateral offset rapidly with less overshoot and rapid response. It retained the advantages of fuzzy control method and improved the control quality of guidance system. Compared with standard fuzzy control method, the improved fuzzy control method has a significant improvement on navigation accuracy under the same parameters condition. When the velocity of vehicle was 0.8 m/s, the maximum lateral offset of straight path and curve path were less than 4.2 cm and 5.9 cm respectively, which could meet the requirement of agricultural vehicle navigation.

**Key words:** Agricultural vehicle Navigation Path tracking Self-adaptive fuzzy control Particle swarm algorithm

## 引言

随着智能化农业装备的迅速发展,农业车辆自动导航技术在农业生产领域得到了广泛应用,已经成为现代农业工程技术的一个重要组成部分<sup>[1-2]</sup>。农业车辆自动导航技术主要包括定位技术和控制技术。定位技术是利用传感器准确获取当前车辆绝对位置或者相对于目标路径的位置;控制技术是通过控制决策输出控制信号到执行机构,使农机沿着目标路径进行行走作业。

国内外很多学者对车辆导航技术做了大量研究,文献[3-5]采用PID控制方法设计了车辆导航控制器,PID控制是基于误差来生成消除误差的控制策略,具有控制方案简单、应用广泛等特点,但也存在控制参数整定困难、对农田复杂路径的适应性差、难以实现精确控制的不足。文献[6-8]设计了基于线性二次型的最优控制器,该控制器能够获得在某一性能指标下的最优控制策略,它一般都把被控对象简化为线性时不变系统,在控制模型精确和无干扰情况下具备较高的精度,但在有外部扰动时鲁棒性差,对车辆横向控制稳定性不高。文献[9-10]采用具有预见性的纯追踪方法进行导航控制,该方法具有控制参数少、可预见性等特点,但前视距离与速度大小有关,难以实现自适应调整。文献[11]采用常规模糊控制器控制车辆对目标路径进行追踪,模糊控制算法可模拟人的行为操纵,无需精确的数学模型,但需要专家经验制定模糊控制规则,具有较强的主观性容易产生静态误差。文献[12]采用遗传算法优化模糊控制器参数实现拖拉机导航控制,但程序设计比较复杂,算法实时性不高。文献[13]采用粒子群优化模糊控制器的比例因子和隶属度函数,以跟踪目标函数为最优进行车辆导航控制。该文献用常规粒子群算法进行模糊控制器优化,但对于实际物理平台上如何进行大量迭代没有进行说明。此外,对粒子群算法找到最优解的平均迭代次数,耗费时间没有进行定量的计算分析,导致控制算法的实时性无法保证。

农业车辆沿目标路径导航过程中,轮胎不能侧滑,只能沿车身方向前进,是典型的非完整运动约束系统,具有高度的非线性和不确定性,难以建立精确的数学模型。模糊控制算法具有不依赖精确数学模型、鲁棒性高等特点,可以有效地应用于车辆导航控制。但常规模糊控制器的控制规则需要根据经验制定,主观性强,控制参数无法自适应调整,造成算法自适应能力不高。采用遗传算法和粒子群算法优化模糊控制器参数,能有效提高控制器性能,但控制算法的实时性有待提高。本文针对常规模糊控制器控制规则无法自适应调整和改进模糊控制器实时性不高的问题,提出一种基于改进粒子群算法优化模糊控制器的农业车辆导航控制方法。

## 1 导航车辆横向控制模型

### 1.1 车辆运动模型

假设车辆行驶过程中,轮胎与地面不存在侧向滑动且左右轮胎动力学对称,则每个车轴上的2个车轮可以用1个车轮来代替,这样车辆就简化为二轮车辆模型,图1为2自由度车辆转向模型。

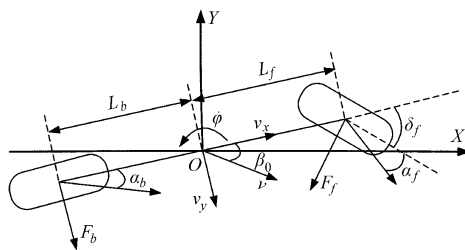


图1 2自由度车辆转向模型

Fig. 1 2-DOF vehicle steering model

图中,  $O$  为车辆质心位置,  $v$  为车辆行驶速度,  $v_x$ 、 $v_y$  为车辆横向和纵向速度,  $\varphi$  为横摆角,  $L_f$ 、 $L_b$  为前后轮与质心间距离,  $\delta_f$  为转向角,  $\beta_0$  为车辆质心侧偏角,  $\alpha_f$ 、 $\alpha_b$  为前后轮胎侧偏角,  $F_f$ 、 $F_b$  为前后轮胎侧向力。

选取车辆质心所在点为世界坐标系原点,根据牛顿第二定律获取2自由度车辆横向运动学方程。

$$\dot{v}_y m = \frac{-C_f - C_b}{v_x} v_y + \frac{C_b L_b - C_f L_f}{v_x} \dot{\varphi} - v_x \dot{\varphi} + C_f \delta_f \quad (1)$$

$$\ddot{\phi}I = \frac{C_b L_b - C_f L_f}{v_x} v_y - \frac{C_b L_b^2 + C_f L_f^2}{v_x} \dot{\phi} + C_f L_f \delta_f \quad (2)$$

式中  $m$ ——车辆质量

$C_f, C_b$ ——前、后轮胎侧偏刚度

$I$ ——车辆转动惯量

## 1.2 车辆视觉预瞄模型

驾驶员驾驶车辆行驶过程中,需要提前对前方道路进行观察,并对道路方向进行估计判断,进而调整方向盘实现对目标路径的跟踪。基于机器视觉的农业导航车辆,通过视觉传感器采集前方道路信息,利用图像处理算法获取导航路径并计算车辆相对于预瞄点处横向偏差和航向偏差,然后结合一定的控制策略,实现车辆对目标路径的跟踪。

本研究图像处理部分主要包括:图像预处理、导航路径提取和位姿求解。图像预处理采用2G-R-B特征因子对图像进行灰度处理,使用Ostu法进行图像分割。导航路径采用最小二乘法获取,然后求解车辆位姿获取预瞄点处横向偏差和航向偏差。车辆预瞄运动学模型如图2所示。

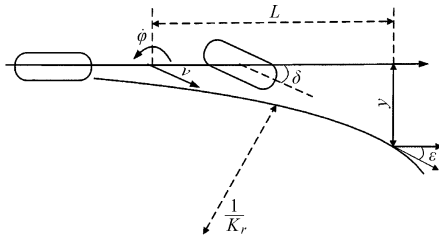


图2 车辆和目标路径几何关系

Fig.2 Geometry relationship between vehicle and target path

由图2可以得到视觉导航车辆运动学模型。

$$\dot{y} = v_x \varepsilon - v_y - \dot{\phi} L \quad (3)$$

$$\dot{\varepsilon} = v_x K_r - \dot{\phi} \quad (4)$$

式中  $y$ ——车辆横向偏差,即视觉预瞄点处路径与车辆中心线横向偏差

$\varepsilon$ ——航向偏差,即视觉预瞄点处切线与车辆中心线夹角

$L$ ——预瞄距离  $K_r$ ——路径曲率

联立公式(1)~(4)得到基于机器视觉的导航车辆横向控制状态方程

$$\dot{X} = AX + Bu + Ew_0 \quad (5)$$

$$Y = CX \quad (6)$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} \frac{-C_f - C_b}{mv_x} & \frac{C_b L_b - C_f L_f}{mv_x} - v_x & 0 & 0 \\ \frac{C_b L_b - C_f L_f}{Iv_x} & \frac{-C_b L_b^2 - C_f L_f^2}{Iv_x} & 0 & 0 \\ -1 & -L & 0 & v_x \\ 0 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$X = \begin{bmatrix} v_y \\ \dot{\phi} \\ y_L \\ \varepsilon_L \end{bmatrix} \quad Y = \begin{bmatrix} y_L \\ \varepsilon_L \end{bmatrix} \quad u = \delta_f \quad w_0 = \frac{1}{K_r}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{C_f}{m} \\ \frac{C_f L_f}{I} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad E = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ v_x \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}^T$$

式中  $X$ ——状态变量  $Y$ ——输出变量

$u$ ——输入控制变量

$w_0$ ——曲率倒数,即输入扰动信号

## 2 改进粒子群算法优化模糊控制器设计

### 2.1 粒子群优化算法基本原理

粒子群优化算法(Particle swarm optimization, PSO)是一种有效的全局寻优算法,通过个体间的协作与竞争,实现复杂空间最优解搜索,PSO算法最早由美国Kenedy教授提出<sup>[14]</sup>。

设粒子群在一个 $n$ 维空间中搜索,粒子在空间中的位置可以表示为 $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$ ,表示问题的一个解 $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in})$ 表示粒子速度,则PSO算法公式为

$$v_{id}(k+1) = wv_{id}(k) + c_1 N_{rand1}(P_{idbest}(k) - x_{id}(k)) + c_2 N_{rand2}(P_{gdbest}(k) - x_{id}(k)) \quad (7)$$

$$x_{id}(k+1) = x_{id}(k) + v_{id}(k+1) \quad (8)$$

式中  $x_{id}(k)$ ——粒子 $i$ 在第 $k$ 次迭代中第 $d$ 维上的位置

$v_{id}(k)$ ——粒子 $i$ 在第 $k$ 次迭代中第 $d$ 维上的速度

$P_{idbest}(k)$ ——粒子 $i$ 个体最优位置

$P_{gdbest}(k)$ ——整个粒子群全局最优位置

$c_1, c_2$ ——学习因子

$w, k$ ——惯性因子和迭代次数

$N_{rand1}, N_{rand2}$ ——0~1之间随机数

### 2.2 改进粒子群优化算法

在实际工程应用中,由于硬件平台配置限制,粒子群算法在硬件平台上进行大量迭代运算将增加算法计算时间,影响控制系统实时性。除提高硬件平台配置外,还有必要对粒子群算法进行改进,提高粒子群收敛速度,降低算法耗费时间。本文采用“最优保存策略”对粒子群算法进行改进,具体算法设计如下:

(1) 初始化粒子群,粒子个数为 $N$ ,随机设定每

个粒子的初始位置  $x_i$  和初始速度  $v_i$ 。

(2) 根据初始速度和初始位置产生各个粒子的新位置。

(3) 计算每个粒子适应度,在  $k+1$  次迭代中将每个粒子经历过的最好位置适应度与当前位置适应度进行比较,并更新粒子最好位置  $P_{idbest}(k+1)$ 。

(4) 对每个粒子比较它的适应度和群体所经历的最好位置  $P_{gdbest}$  适应度,选择当前全局最佳适应度粒子位置作为  $k+1$  次全局最佳位置  $P_{gdbest}(k+1)$ 。

(5) 统计当前粒子个数  $N_{k+1}$ ,如果粒子个数  $N_{k+1} \geq N/2$  则进行步骤(6),否则进行步骤(7)。

(6) 根据适应度对群中粒子进行降序排序,选择排在前面的粒子(比例  $r$ ) 组成新一代粒子群  $M(k+1)$ 。

(7) 根据式(8)和式(9)对  $k+1$  代粒子群  $M(k+1)$  中粒子速度和粒子位置进行更新。

(8) 如果达到条件则结束,否则返回步骤(3)继续迭代。

其中,步骤(5)是防止粒子数量过小造成局部收敛,迭代过程中粒子个数小于初始种群数量的一半时,则不再进行比较选择。

为进一步提高粒子群算法计算速度,本文还对惯性因子进行了优化。惯性因子较大时,具有较强的全局寻优能力,有利于找到全局最优解;惯性因子较小时,具有较强的局部寻优能力,有利于算法的收敛。本文令  $w = WN_k/N$ ,其中  $W$  为惯性因子初始值,  $N_k$  为第  $k$  代粒子群中粒子个数,  $w$  随着粒子群迭代次数的增加线性递减,在算法前期  $w$  较大,具有较强的全局搜索能力;算法后期  $w$  较小,具有较快的收敛速度。

粒子群优化算法实现的基本步骤为:选择待优化参数,初始化粒子群及参数设置,建立适应度函数,粒子群更新。

### 2.3 自适应模糊控制器设计

为了克服常规模糊控制算法存在的不足,本文设计了一种基于粒子群优化自适应模糊控制器的控制方法,通过粒子群优化控制器的加权因子,调整模糊推理规则和输出量,从而实现导航车辆的自适应控制。本研究将视觉系统采集到的预瞄点处横向偏差和航向偏差作为模糊控制器的输入,车辆前轮输出转角作为模糊控制器输出,模糊控制器原理框图如图3所示<sup>[15]</sup>。

图3中  $e$  和  $i$  为实际输入横向偏差和航向偏差,  $E$  和  $I$  为量化后横向偏差和航向偏差,  $U$  和  $u_0$  分别为前轮输出转角模糊值和精确值,  $\alpha \in (0,1)$ ,  $\beta \in$

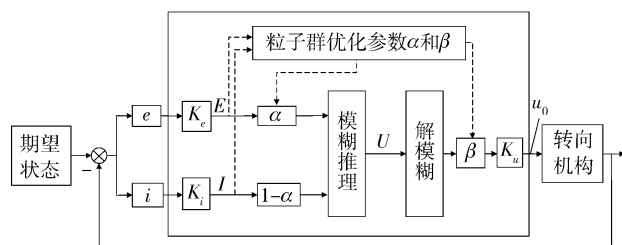


图3 粒子群算法优化模糊控制器原理框图

Fig.3 Schematic diagram of fuzzy control method with PSO algorithm

(0,1)为调节加权因子。对于二维模糊控制器,当输入变量  $E$  与  $I$  和输出控制量  $U$  的论域等级划分相同时,模糊控制查询表可采用解析式<sup>[16]</sup>

$$U = -\langle \alpha E + (1 - \alpha) I \rangle \quad (9)$$

式中  $\langle \rangle$  表示取整操作,调整  $\alpha$  值可以调整模糊控制规则。

本研究规定横向偏差、航向偏差和车辆前轮转角正负号如下:导航车位于导航线右侧时横向偏差为正,左侧为负;航向偏差顺时针为正,逆时针为负,前轮右转为正,左转为负。横向偏差的基本论域为  $[-20\text{ cm}, 20\text{ cm}]$ ,量化等级为  $\{-12, -11, -10, -9, -8, -7, -6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12\}$ ,量化因子  $K_e = 0.6$ ,航向偏差基本论域  $[-15^\circ, 15^\circ]$ ,量化等级与横向偏差相同,量化因子  $K_i = 0.8$ ,输出变量基本论域为  $[-12^\circ, 12^\circ]$ ,量化等级与横向偏差相同,比例因子  $K_u = 1$ 。

为简化运算,将航向偏差、横向偏差和前轮期望转角划分为7个模糊子集,即NB(负大)、NM(负中)、NS(负小)、O(零)、PS(正小)、PM(正中)、PB(正大)。输入、输出隶属度函数相同,均采用三角形隶属度函数,隶属函数为6个。图4为横向偏差隶属度函数。

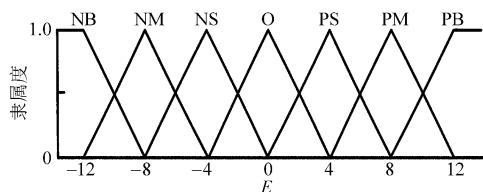


图4 横向偏差隶属度函数

Fig.4 Member-ship function of lateral error

### 2.4 模糊控制器待优化参数确定

由图3可知,在控制过程中自动改变  $\alpha$  和  $\beta$  能够改变模糊控制器不同阶段上的控制特性。调整  $\alpha$  可以改变横向偏差和航向偏差的权重,进而调整控制规则;调整  $\beta$  可以改变输出控制量的大小,提高输出特性。当横向偏差  $E$  较大时,控制系统的任务是消除偏差,增加  $\alpha$  提高偏差  $E$  的加权,尽快消除横

向偏差, 同时应采用较大的控制输出, 即放大输出加权因子 $\beta$ 。当横向偏差较小, 系统趋向稳定阶段, 控制系统主要任务是减小超调量, 通过减小 $\alpha$ 降低横向偏差控制作用, 同时缩小 $\beta$ , 采用微小的控制输出, 使系统尽快稳定。根据上面分析, 本研究选择模糊控制器的 $\alpha$ 和 $\beta$ 因子作为待优化参数。

## 2.5 建立适应度函数

适应度函数的选取直接影响 PSO 收敛速度以及是否可以找到最优解。在控制领域常采用时间乘以误差绝对值积分 (Integral time absolute error, ITAE) 作为评价控制系统性能优劣的指标, 利用 ITAE 指标设计的系统具有超调量小、阻尼适中、动态性能良好等优点。本文采用横向偏差和航向偏差的 ITAE 之和作为粒子群优化模糊控制器的性能指标函数

$$f = w_1 \int_0^{\infty} t |y(t)| dt + w_2 \int_0^{\infty} t |i(t)| dt \quad (10)$$

式中  $y(t)$  ——  $t$  时刻横向偏差

$i(t)$  ——  $t$  时刻航向偏差

$w_1, w_2$  —— 加权系数

$w_1, w_2$  分别决定了横向偏差和航向偏差的 ITAE 指标在性能函数中所占比例。

在实际运算中, 为了提高算法运算速度和实时性, 对式 (10) 做了改进

$$f = w_1 \Delta t \sum_{j=1}^N t_j |y(j)| + w_2 \Delta t \sum_{j=1}^N t_j |i(j)| \quad (11)$$

其中  $N = \text{round}(20V)$

式中  $\Delta t$  —— 分段积分区间长度, 为 0.1 s

$y(j)$  —— 在  $j\Delta t$  时刻的横向偏差

$i(j)$  —— 在  $j\Delta t$  时刻的航向偏差

$\text{round}$  —— 取整函数  $V$  —— 车辆速度

粒子群算法中个体适应度函数越大表示个体越优, 所以将性能指标函数的倒数作为适应度函数

$$F = \frac{1}{f} \quad (12)$$

根据适应度函数逐渐增大的原则, 不断调整输入输出加权因子的取值, 最终求解一组最佳加权因子。PSO 优化模糊控制在硬件平台上迭代流程如图 5 所示, 相关参数设置可参考 3.1 节中内容。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 农业车辆试验平台

农业车辆导航系统主要由拖拉机、视觉传感器、工业控制计算机、PLC 控制器、转向驱动机构、前轮偏角传感器和速度采集传感器组成。系统原理框图和试验平台分别如图 6、7 所示。

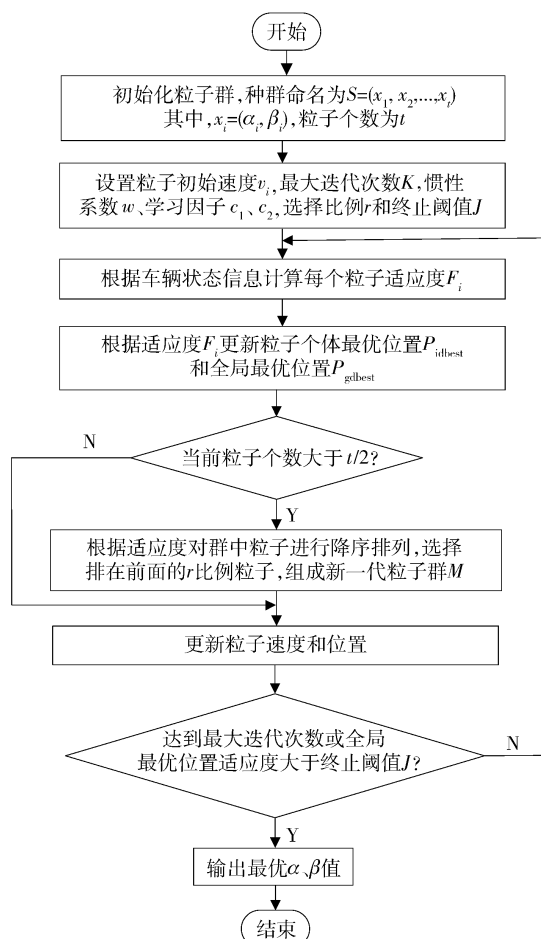


图 5 粒子群优化算法流程图

Fig. 5 Flow chart of PSO algorithm

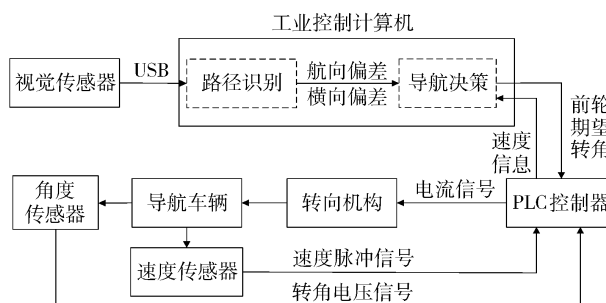


图 6 农业车辆导航系统结构框图

Fig. 6 Structure block of agricultural vehicle navigation system



图 7 农业车辆导航系统试验平台

Fig. 7 Experiment platform of agricultural vehicle navigation system

本文视觉传感器选用 OKAC1310 型摄像头,摄像头距离地面高度 1.2 m,与地面夹角呈  $25^\circ$ ,预瞄距离 2.4 m; PLC 型号为 KSC-40; 角度传感器型号为 WYH-4; 为提高控制算法运算速度,工控机采用 Intel(R) HM65 @ 3.0 GHz 处理器,2 GB 内存, Windows 7 操作系统; 导航程序运行环境为 VS2010; 导航控制周期 150 ms; 导航车辆为雷沃-M8 型拖拉机。

粒子群优化模糊控制器算法中,粒子群最大迭代次数  $K=200$ ,初始化粒子个数为 30,惯性系数初始值  $W=0.8$ ,学习因子  $c_1=c_2=1$ ,选择比例  $r=0.9$ ; 适应度函数的加权系数  $w_1=0.7$ ,  $w_2=0.3$ 。终止算法阈值选择  $J \geq 0.8$ ,此指标有利于抑制大误差的出现,同时也防止系统输出超调造成剧烈波动。在导航跟踪过程中,车辆状态信息(横向偏差和航向偏差)不断变化,粒子群算法需要根据车辆状态信息不断优化迭代,对  $\alpha$  和  $\beta$  进行调整,直到粒子群适应度函数最大(横向偏差和航向偏差 ITAE 之和最小)或者满足算法终止条件( $J \geq 0.8$ )。

本研究采用 Trimble 570 型 GPS 对视觉导航效果进行评价,将 GPS 放置在拖拉机顶部,通过串口与工业控制计算机相连,导航过程中 GPS 向工控机发送数据,工控机对数据进行保存,用于后期试验分析。

### 3.2 改进粒子群算法实时性测试

在拖拉机导航过程中,导航控制算法的实时性是需要考虑的,本文分别采用改进 PSO 算法和常规 PSO 算法对模糊控制器的  $\alpha$  和  $\beta$  因子进行寻优求解,并将 2 种方法的迭代次数和迭代时间进行对比。改进 PSO 算法中  $r=0.9$ ,其他参数与常规 PSO 算法相同,按照 3.1 节进行设置,算法运行环境为 VS2010,每种算法进行 100 次试验。表 1 为 2 种方法耗时对比。改进 PSO 算法平均 26 代即可找到最优解,平均每代耗时 2.85 ms,导航控制周期为 150 ms,优化 PSO 算法的延时不会对控制造成影响; 常规 PSO 平均 38 代可以找到最优解,平均每代耗时间 4.74 ms。试验表明,改进 PSO 算法的平均迭代次数和平均迭代时间均小于常规 PSO 算法。改进粒子群算法每代平均耗时小于常规粒子群算法

表 1 改进粒子群算法与常规粒子群算法耗时对比

Tab. 1 Real-time comparison between improved and standard PSO algorithm

算法	最大迭代次数	最小迭代次数	平均迭代次数	每代平均耗时/ms
常规 PSO 算法	55	24	38	4.74
改进 PSO 算法	33	17	26	2.85

是因为随着迭代次数的增加,每代粒子数不断减小,用于粒子更新的时间变短。

### 3.3 PSO 优化模糊控制算法仿真

为验证本文设计算法的有效性和优越性,将 PSO 优化模糊控制器和常规模糊控制器的控制效果进行仿真分析,2 个算法参数设置相同(模糊子集、模糊论域、量化因子和隶属度函数),运行环境为 Matlab 2010。导航车辆初始状态为  $[5 \text{ cm}, 1^\circ]$ ,分别代表初始横向偏差和航向偏差。图 8、9 分别为 2 种控制算法的横向偏差和航向偏差响应曲线对比。

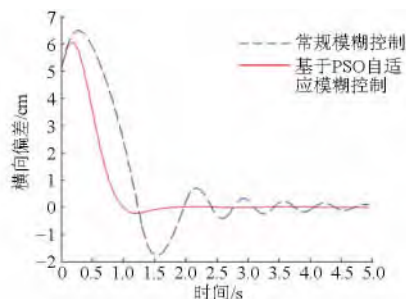


图 8 横向偏差响应曲线

Fig. 8 Response curves of lateral offset

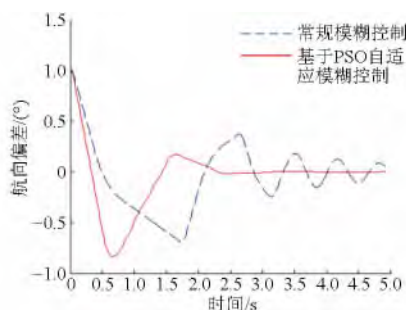


图 9 航向偏差响应曲线

Fig. 9 Response curves of heading offset

由图 8、图 9 可知,PSO 优化模糊控制方法横向偏差响应曲线与常规模糊控制方法相比具有超调量小、响应速度快等优点,能够快速地消除横向偏差;航向偏差响应曲线可以很快达到稳定且不会出现上下波动,具有较好的稳定特性。

### 3.4 路径跟踪试验

#### 3.4.1 直线路径跟踪试验

农机视觉导航试验地点为华南农业大学操场,导航直线路径由 GPS 确定,利用 Trimble 5700 在地面上选择 2 个点,分别记为 A 点、B 点,两点距离 36 m。将 A、B 点确定的直线作为导航路径,从 A 端开始,导航车辆以 0.8 m/s 的速度开始跟踪,车辆初始状态为  $[-0.1 \text{ m}, -5^\circ]$ 。路径跟踪效果如图 10 所示,车辆行驶 2 m 就可以跟踪到目标路径,具有较好的跟踪响应速度,跟踪到目标路径后最大横向偏差 4.2 cm,平均横向偏差为 1.34 cm。航向偏差跟



踪结果如图 11 所示,最大航向偏差  $4.8^\circ$ ,平均航向偏差  $1.76^\circ$ ,以  $0^\circ$  为基准进行上下波动,说明拖拉机不断调整前轮转角对目标路径进行跟踪,具有较快的响应速度。

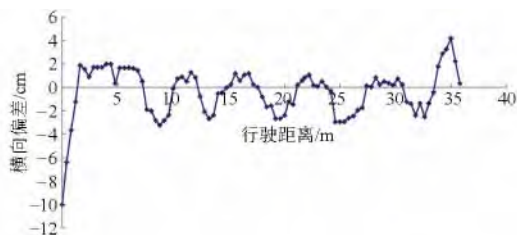


图 10 横向偏差跟踪结果

Fig. 10 Experimental results of lateral offset

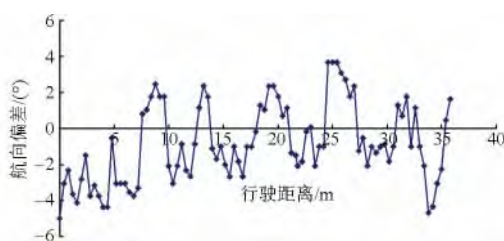


图 11 航向偏差跟踪结果

Fig. 11 Tracking results of heading offset

### 3.4.2 曲线路径跟踪试验

农机视觉导航所用曲线路径由 GPS 确定,在平坦地面上选择 3 个点,分别记为 A 点、B 点、C 点,要求 C 点不在 A、B 两点所确定的直线上, A、B 段为直线, B、C 段为曲线。试验前,由试验人员携带 GPS 移动站沿曲线路径行走,获取目标路径数据。导航车辆速度为  $0.8 \text{ m/s}$ ,路径跟踪效果如图 12 所示,试验最大横向偏差  $5.9 \text{ cm}$ ,平均横向偏差  $2.08 \text{ cm}$ 。

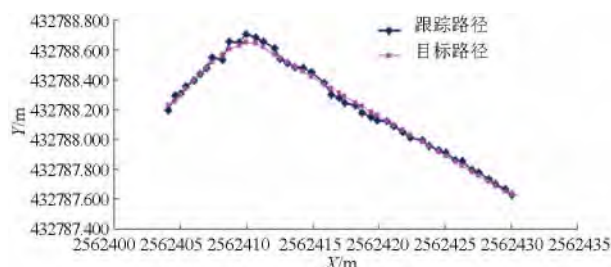


图 12 曲线路径跟踪结果

Fig. 12 Tracking results of curve path

由试验结果可知,PSO 优化模糊控制方法在曲线跟踪精度略低于直线跟踪,原因是拖拉机转向过程中车轮角度变化率较大,转向执行机构由于存在一定的滞后性,反应速度无法跟上这种变化所致。

### 3.4.3 与常规模糊控制算法比较试验

为验证本文算法与常规模糊控制算法在实际路径跟踪效果方面的差异,本文分别在  $0.6$ 、 $1.0$ 、 $1.2 \text{ m/s}$  条件下对 2 种方法的控制效果进行测试,利用放置在车顶的 GPS 记录车辆位置信息, GPS 工作频率为  $2 \text{ Hz}$ ,跟踪路径为直线。为增强 2 种方法的可比性,改进方法与常规模糊控制的基本参数相同(模糊子集、模糊论域、量化因子、比例因子和隶属度函数),在相同物理硬件平台上进行测试。图 13、14 为改进模糊控制和常规模糊控制的跟踪效果图,表 2、3 分别为 2 种算法在 3 种速度条件下的路径跟踪数据,可以看出常规模糊控制跟踪最大横向偏差和平均横向偏差均高于改进算法,改进算法在不同速度条件下均有较好的输出结果。

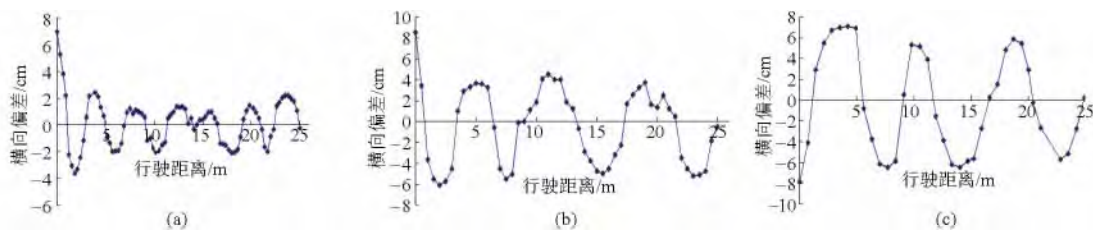


图 13 3 种不同速度条件下粒子群优化模糊控制试验结果

Fig. 13 Results of PSO fuzzy control algorithm with three different speeds

(a)  $0.6 \text{ m/s}$  (b)  $1.0 \text{ m/s}$  (c)  $1.2 \text{ m/s}$

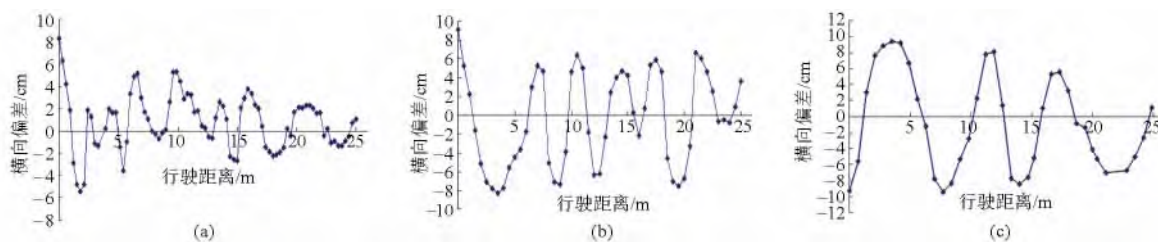


图 14 3 种不同速度条件下常规模糊控制试验结果

Fig. 14 Results of standard fuzzy control algorithm with three different speeds

(a)  $0.6 \text{ m/s}$  (b)  $1.0 \text{ m/s}$  (c)  $1.2 \text{ m/s}$

表2 改进模糊控制算法试验数据  
Tab.2 Experimental data of improved  
fuzzy control algorithm

行驶速度 /(m·s <sup>-1</sup> )	最大横向 偏差/cm	平均横向 偏差/cm	标准 差/cm
0.6	3.58	1.45	1.08
1.0	6.05	3.22	1.81
1.2	7.08	4.32	2.26

表3 常规模糊控制算法试验数据  
Tab.3 Experimental data of standard  
fuzzy control algorithm

行驶速度 /(m·s <sup>-1</sup> )	最大横向 偏差/cm	平均横向 偏差/cm	标准 差/cm
0.6	5.43	2.11	1.61
1.0	8.21	4.48	2.29
1.2	9.47	5.40	2.86

本文以平均横向偏差作为衡量导航精度的指标。

$$A = \frac{S_{avg} - I_{avg}}{S_{avg}} \times 100\% \quad (13)$$

式中  $A$ ——导航精度提高百分比(符号为正表示精度提高,符号为负表示导航精度降低)

$S_{avg}$ ——常规模糊控制算法平均横向偏差

$I_{avg}$ ——改进模糊控制算法平均横向偏差

由公式(13)得出,在3种速度条件下改进算法

相对于常规模糊控制导航精度分别提高了31.2%、28.2%和20%。试验表明,在相同参数配置条件下改进算法相对于常规算法性能有所提升,常规模糊控制方法根据专家经验制定,主观性较强,不能在线调整,不能很好地适应情况的变化。

## 4 结论

(1) 构建了基于机器视觉的农业车辆导航控制系统,对车辆横向控制状态方程进行了描述。

(2) 针对常规模糊控制方法的不足,提出了一种基于改进粒子群优化自适应模糊控制的方法。对粒子群方法进行改进,提高算法实时性;在模糊控制器中引入加权因子,利用改进粒子群算法对加权因子进行在线优化,实现自适应控制。

(3) 仿真试验表明,与常规模糊控制方法相比,本文的算法具有超调量小、响应速度快、动态性能好等优点;采用GPS对导航效果进行验证,导航速度为0.8 m/s时,直线路径跟踪横向偏差不超过4.2 cm;曲线路径跟踪误差不超过5.9 cm,具有较高的控制精度,可以满足农业导航作业要求。

(4) 分别在0.6、1.0、1.2 m/s条件下对常规模糊控制算法和改进模糊控制算法的控制效果进行测试。试验数据表明,3种速度条件下改进模糊控制算法相对于常规模糊控制算法导航精度分别提高了31.2%、28.2%和20%。

## 参 考 文 献

- 高峰,李艳,黄玉美,等. 基于遗传算法的农业移动机器人视觉导航方法[J]. 农业机械学报, 2008, 39(6): 127-131.  
Gao Feng, Li Yan, Huang Yumei, et al. Visual navigation method based on genetic algorithm for agricultural mobile robots[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(6): 127-131. (in Chinese)
- 罗锡文,周志艳,李庆,等. 基于地图匹配的导航定位数据模糊校正算法[J]. 江苏大学学报, 自然科学版, 2006, 27(5): 397-398.  
Luo Xiwen, Zhou Zhiyan, Li Qing, et al. Map-matching-based algorithm of fuzzy correction for positioning data[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2006, 27(5): 397-398. (in Chinese)
- 罗锡文,张智刚,赵祚喜,等. 东方红X-804拖拉机的DGPS自动导航控制系统[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 139-145.  
Luo Xiwen, Zhang Zhigang, Zhao Zuoxi, et al. Design of DGPS navigation control system for Dongfanghong X-804 tractor[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(11): 139-145. (in Chinese)
- 李进,陈无畏. 基于自适应导航参数的智能车辆视觉导航[J]. 农业机械学报, 2012, 43(6): 19-24.  
Li Jin, Chen Wuwei. Navigation of vision guided intelligent vehicle based on adaptive navigation parameters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(6): 19-24. (in Chinese)
- Nagasaka Y, Saito H, Tamaki K, et al. An autonomous rice transplanted guided by global positioning system and inertial measurement unit[J]. Journal of Field Robotics, 2009, 26(6-7): 537-548.
- 陈军,鸟巢凉,朱忠祥. 拖拉机在牧草地上自动引导行走的控制[J]. 农业机械学报, 2005, 36(7): 104-107.  
Chen Jun, Torisu R, Zhu Zhongxiang. Study on automatic guidance for tractor on grassland[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(7): 104-107. (in Chinese)
- O'Connor M L. Carrier-phase differential GPS for automatic control of land vehicles[D]. Stanford: Stanford University, 1997.
- 马莹,李国强,高峰,等. 改进的有限时间最优预瞄横向控制器设计[J]. 汽车工程, 2006, 28(5): 433-438.  
Ma Ying, Li Keqiang, Gao Feng, et al. Design of an improved optimal preview lateral controller[J]. Automotive Engineering, 2006, 28(5): 433-438. (in Chinese)

(下转第58页)



- Applied Sciences, 2006, 3(5): 1831 – 1835.
- 7 Leow Y P, Low K H, Loh W K. Kinematic modeling and analysis of mobile robots with omni-directional wheels [C] // 7th IEEE International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision., Marine Mandarin, 2002, 2: 820 – 825.
  - 8 Han K L, Choi O K, Kim J, et al. Design and control of mobile robot with mecanum wheel [C] // ICROS-SICE International Joint Conference, Fukuoka, 2009: 2932 – 2937.
  - 9 Wang Rongrong, Zhang Hui, Wang Junmin. Linear parameter-varying controller design for four-wheel independently actuated electric ground vehicles with active steering systems [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2014, 22(4): 1281 – 1296.
  - 10 陈平,倪振,马伟. 四轮差动全方位移动机器人路径跟随控制分析 [J]. 重庆大学学报, 2013, 36(3): 20 – 24.  
Chen Ping, Ni Zhen, Ma Wei. The path following control analysis for 4-wheel differential omnidirectional mobile robot [J]. Journal of Chongqing University, 2013, 36(3): 20 – 24. (in Chinese)
  - 11 Borenstein J. Control and kinematic design of multi-degree-of-freedom mobile robots with compliant linkage [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1995, 11(1): 21 – 35.
  - 12 周岗,姚琼荟,陈永冰,等. 基于输入输出线性化的船舶全局直线航迹控制 [J]. 控制理论与应用, 2007, 24(1): 117 – 121.  
Zhou Gang, Yao Qionghui, Chen Yongbing, et al. Global straight-line tracking control of ships based on input-output linearization [J]. Control Theory & Applications, 2007, 24(1): 117 – 121. (in Chinese)
  - 13 李湘平,吴汉松,吴瑶. 基于输入输出线性化的神经滑模航迹控制 [J]. 舰船电子工程, 2013, 33(7): 42 – 44.  
Li Xiangping, Wu Hansong, Wu Yao. Neural sliding mode controller and simulation for ship's track-keeping systems based on input-output linearization [J]. Ship Electronic Engineering, 2013, 33(7): 42 – 44. (in Chinese)
  - 14 de Luca A, Lucibello P. General algorithm for dynamic feedback linearization of robots with elastic joints [C] // IEEE International Conference on Robotics and Automation, Leuven, 1998, 1: 504 – 510.
  - 15 Mariottini G L, Oriolo G, Prattichizzo D. Image-based visual servoing for nonholonomic mobile robots using epipolar geometry [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2007, 23(1): 87 – 100.
  - 16 郭磊,廖启征,魏世民. 自行车机器人动力学建模与MIMO反馈线性化 [J]. 北京邮电大学学报, 2007, 30(1): 80 – 84.  
Guo Lei, Liao Qizheng, Wei Shimin. Dynamic modeling of bicycle robot and nonlinear control based on feedback linearization of MIMO systems [J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2007, 30(1): 80 – 84. (in Chinese)
  - 17 Kim D H, Oh J H. Tracking control of a two-wheeled mobile robot using input-output linearization [J]. Control Engineering Practice, 1999, 7(3): 369 – 373.

(上接第36页)

- 9 吕文杰,马戎,李岁芳,等. 基于纯追踪模型的路径跟踪改进算法 [J]. 测控技术, 2011, 30(7): 93 – 96.  
Lü Wenjie, Ma Rong, Li Suilao, et al. An improved algorithm based on pure pursuit model for path tracking [J]. Measurement & Control Technology, 2011, 30(7): 93 – 96. (in Chinese)
- 10 张志刚,罗锡文,赵祚喜,等. 基于Kalman滤波和纯追踪模型的农业机械导航控制 [J]. 农业机械学报, 2009, 40(增刊): 6 – 12.  
Zhang Zhigang, Luo Xiwen, Zhao Zuoxi, et al. Trajectory tracking control method based on Kalman filter and pure pursuit model for agricultural vehicle [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(Suppl.): 6 – 12. (in Chinese)
- 11 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)
- 12 刘兆祥,刘刚,籍颖,等. 基于自适应模糊控制的拖拉机自动导航系统 [J]. 农业机械学报, 2010, 41(11): 148 – 152.  
Liu Zhaoxiang, Liu Gang, Ji Ying, et al. Autonomous navigation system for agricultural tractor based on self-adapted fuzzy control [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(11): 148 – 152. (in Chinese)
- 13 高振海,吴涛,尤洋. 基于粒子群算法的汽车自适应巡航控制器设计 [J]. 农业机械学报, 2013, 42(12): 11 – 16.  
Gao Zhenhai, Wu Tao, You Yang. Design of vehicle adaptive cruise controller based on PSO algorithm [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 42(12): 11 – 16. (in Chinese)
- 14 Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization [C] // Processing of 1995 IEEE International Conference on Neural Networks. New York: IEEE Press, 1995, 4: 1942 – 1948.
- 15 杜尚丰,孙明,董乔雪. 智能控制理论与应用 [M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2005.
- 16 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.
- 17 姬长英,周俊. 农业机械导航技术发展分析 [J]. 农业机械学报, 2014, 45(9): 44 – 54.  
Ji Changying, Zhou Jun. Current situation of navigation technologies for agricultural machinery [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(9): 44 – 54. (in Chinese)