

DOI: 10.3901/JME.2012.06.076

基于遗传优化的无人车横向模糊控制*

郭景华¹ 胡平¹ 李琳辉¹ 王荣本² 张明恒¹ 郭烈¹

(1. 大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室 大连 116024;

2. 吉林大学交通学院 长春 130012)

摘要:以视觉导航式无人车 DLUIV-1 为控制对象, 对其进行横向运动控制研究。建立视觉导航式无人车横向运动控制系统模型, 对无人车的横向运动行为进行描述。在此基础上, 分析预瞄距离对横向控制系统动态性能的影响, 并建立考虑速度因素的预瞄距离计算公式。针对无人车具有非完整运动约束、高度非线性动态特性以及参数的不确定性等特点, 提出基于遗传算法的无人车横向模糊控制策略, 通过遗传算法对横向模糊控制器的隶属度函数参数和控制规则的自动优化, 从而有效地确定出横向模糊控制器的隶属度函数和控制规则。最后通过仿真和实车试验对该横向模糊控制器进行验证和评价, 仿真和试验结果表明, 该横向控制器可保证无人车稳定准确地跟踪参考路径, 且具有较强的鲁棒性。

关键词:视觉导航 无人车 模糊控制 遗传算法 横向控制

中图分类号: TP242 U461

Study on Lateral Fuzzy Control of Unmanned Vehicles Via Genetic Algorithms

GUO Jinghua¹ HU Ping¹ LI Linhui¹ WANG Rongben² ZHANG Mingheng¹ GUO Lie¹

(1. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment,

Dalian University of Technology, Dalian 116024;

2. College of Traffic, Jilin University, Changchun 130012)

Abstract: Lateral motion control of vision-based unmanned vehicle DLUIV-1 is researched. Firstly, the lateral motion control model of vision-based navigation unmanned vehicle is established, which can describe the lateral motion behavior of unmanned vehicles. On this basis, the influence of look-ahead distance on lateral control system is analyzed, and the formula of look-ahead distance with the effect of velocity considered is established. Then, in view of highly nonlinear and parametric uncertain properties of non-holonomic unmanned vehicle, an efficient fuzzy control strategy based on genetic algorithm is presented, the membership functions and rules of fuzzy controller are optimized by genetic algorithm, therefore, the membership functions and rules are effectively determined. Finally, the simulation and real vehicle experiment analysis and validation of proposed control strategy are carried out. Both simulation and experimental results show that the unmanned vehicle controlled by the proposed control strategy can stably track the reference path under various conditions with high accuracy and robustness.

Key words: Vision-based navigation Unmanned vehicles Fuzzy control Genetic algorithm Lateral control

0 前言

无人车作为先进科技的载体, 在许多领域有着潜在的应用价值^[1]。车辆的横向控制是无人车自主导航研究的核心问题之一。横向控制是指通过视觉^[2]或全球定位系统(Global position system, GPS)^[3]

等传感器获取的反馈信息, 按照一定控制策略使无人车沿着指定的路径行驶。由于无人车为非完整运动约束系统(如车辆的轮胎不能侧滑, 行驶车辆只能沿车身方向前进等), 且具有高度非线性、模型和环境的不确定性、测量的不精确性等特性, 因此实现其横向控制充满了挑战性。

目前对于无人车横向控制问题的研究受到国内外许多科研机构的重视。文献[3]设计了由路径曲率得到的前馈控制和比例—积分—微分(Proportion-integration-differentiation, PID)反馈控制组成的横向

* 国家自然科学基金(10932003, 50901011)、国家重点基础研究发展计划(973 计划, 2010CB832700)和中央高校基本科研业务费专项资金(3013893313)资助项目。20110326 收到初稿, 20110914 收到修改稿

控制器。文献[4]采用输入输出反馈线性化法设计了基于预瞄的横向控制器,并通过试验进行了验证。文献[5]应用滑动模态方法实现了无人车的横向控制器设计。文献[6]采用自适应滑模变结构控制算法设计了无人车的横向控制器,并通过仿真试验验证了该方法的有效性。为了补偿小干扰的影响,文献[7]采用二次李雅普诺夫函数,多面体不变集和线形矩阵不等式(Linear matrix inequation, LMI)相结合的控制算法对无人车的横向控制问题进行了研究。文献[8]提出了预瞄距离是速度的二次函数,从而优化了传感器获取的路径信息数据,并设计了部分状态反馈横向控制算法,实现了无人车的横向跟踪控制。文献[9]提出了一种基于系统辨识的 H_∞ 鲁棒控制方法。文献[10]对分别由 H_∞ 控制、自适应控制、PID 控制等不同控制策略获得的横向控制器进行了仿真对比分析。

为解决无人车的鲁棒横向控制问题,部分学者尝试采用模糊控制方法^[11-12]。但在模糊控制器的设计过程中,靠试探方法或不断积累的经验来调整隶属度函数参数和控制规则,难以根据系统特性进行自适应的调整,容易产生稳态误差,从而影响了模糊控制的效果。遗传算法(Genetic algorithm, GA)模拟自然界生物的进化过程,具有不依赖于问题本身,不容易陷入局部最优和不受搜索空间的限制性假设的约束等优良特性,对于模糊控制的自学习具有很大的启发性,非常适用于模糊控制器的优化设计^[13]。

本文针对视觉导航式无人车 DLUIV-1 的横向控制问题,设计了模糊控制器。利用遗传算法实现模糊控制器隶属度函数和控制规则的自动优化,从而使无人车稳定准确地跟踪参考路径。

1 横向控制模型

1.1 无人车试验平台

本文研究的视觉导航式无人车 DLUIV-1 试验样车是以一辆多用途车为平台进行改装设计的。除原有基本组成与结构外,独立设计视觉导航系统、转向伺服系统、驱动伺服系统、计算机测控系统等,其外形如图 1 所示。

1.2 横向动力学

将恒定速度行驶在半径较大的平曲线道路上的车辆简化为如图 2 所示的 2 自由度车辆模型。根据经典力学,并考虑到正常行驶时前轮转角 δ_f 较小且轮胎侧偏力与侧偏角呈线性关系,可推得车辆横向动力学模型



图 1 视觉导航式无人车 DLUIV-1

$$\begin{pmatrix} \dot{v}_y \\ \ddot{\phi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 \\ a_3 & a_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_y \\ \dot{\phi} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} \delta_f \quad (1)$$

式中

$$a_1 = -(k_r + k_f)/(mv_x)$$

$$a_2 = (l_r k_r - l_f k_f)/(mv_x) - v_x$$

$$a_3 = (l_r k_r - l_f k_f)/(I_z v_x)$$

$$a_4 = -(l_f^2 k_f + l_r^2 k_r)/(I_z v_x)$$

$$b_1 = k_f / m$$

$$b_2 = l_f k_f / I_z$$

v ——车辆速度

ϕ ——横摆角

m ——车辆质量

β ——车辆质心侧偏角

I_z ——车辆转动惯量

δ_f ——前轮转向角

v_x, v_y ——车辆纵横向速度

l_f, l_r ——质心到前后轮的距离

k_f, k_r ——前后轮胎的侧偏刚度

α_f, α_r ——前后轮侧偏角

F_f, F_r ——前后轮胎的侧向力

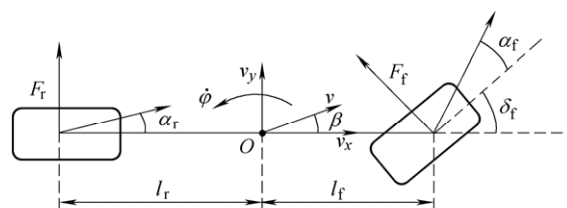


图 2 车辆简化模型

1.3 视觉模型

无人车 DLIV-1 的视觉导航系统由其上方安装的电荷耦合器件(Charge coupled device, CCD)摄像机(分辨率 656 像素×492 像素、频率为 84 帧/s)和导航计算机组成。视觉导航系统实时采集前方的环境信息,并通过图像处理获取车辆在预瞄点处的横向偏差和方位偏差,图 3 为车辆和参考路径几何关系图。

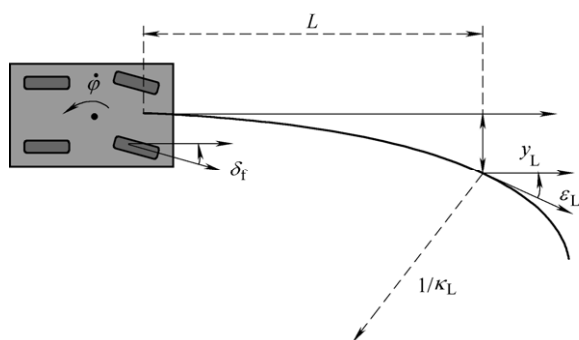


图3 车辆和参考路径几何关系图

由图3可知视觉模型

$$\begin{cases} \dot{y}_L = v_x \varepsilon_L - v_y - \dot{\phi} L \\ \dot{\varepsilon}_L = v_x \kappa_L - \dot{\phi} \end{cases} \quad (2)$$

式中 y_L ——车辆视觉预瞄点处车辆中心线与参考路径的横向偏差

ε_L ——车辆视觉预瞄点处车辆中心线与参考路径切线的夹角

L ——预瞄距离

κ_L ——路径曲率

将横向动力学模型和视觉模型结合起来可得基于视觉导航的无人车横向控制状态方程

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BU + E\omega \\ Y = CX \end{cases} \quad (3)$$

式中 $A = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & 0 & 0 \\ a_3 & a_4 & 0 & 0 \\ -1 & -L & 0 & v_x \\ 0 & -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$

$$B = (b_1 \ b_2 \ 0 \ 0)^T$$

$$E = (0 \ 0 \ 0 \ v_x)^T$$

$$C = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^T$$

状态矢量 $X = (v_y \ \dot{\psi} \ y_L \ \varepsilon_L)^T$, 输出矢量 $Y = (y_L \ \varepsilon_L)^T$, 控制输入矢量 $u = \delta_f$, 扰动矢量 $\omega = \kappa_L$ 。

由文献[14]知,当预瞄距离固定时,随着速度的增加,系统的阻尼减小、超调量增大、稳定性减小;当速度固定时,随着预瞄距离的增加,系统的阻尼增大、超调量减少;但是,预瞄距离不能超过视觉系统的可视范围。因此,选择合适的预瞄距离对于系统动态性能有主要的影响。本文选取的预瞄距离

$$L = \begin{cases} L_{\min} & v < v_{\min} \\ a_1 v + a_2 & v_{\min} \leq v \leq v_{\max} \\ L_{\max} & v > v_{\max} \end{cases} \quad (4)$$

式中, $a_1 = 1.233 \text{ s}$, $a_2 = -4.131 \text{ m}$, 最小预瞄距离

$L_{\min} = 4.5 \text{ m}$, 最大预瞄距离 $L_{\max} = 15.6 \text{ m}$, 最小车速 $v_{\min} = 25.2 \text{ km/h}$, 最大车速 $v_{\max} = 57.6 \text{ km/h}$ 。

2 模糊控制

模糊控制器结构分为模糊化、数据库、规则库、模糊推理和清晰化。首先对横向偏差和方位偏差进行归一化处理,将归一化后的横向偏差和方向偏差信号融合,选择权重函数

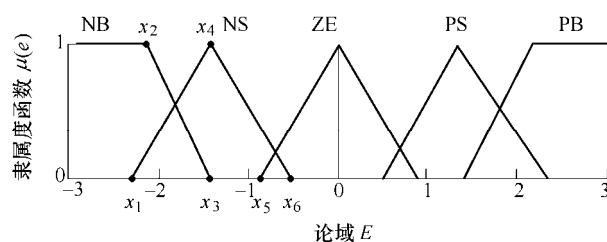
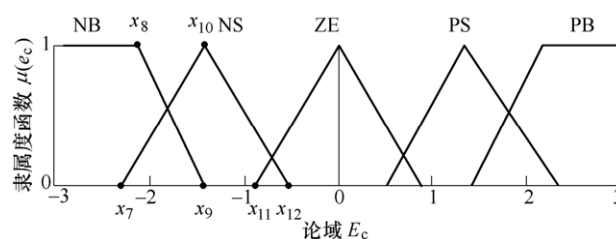
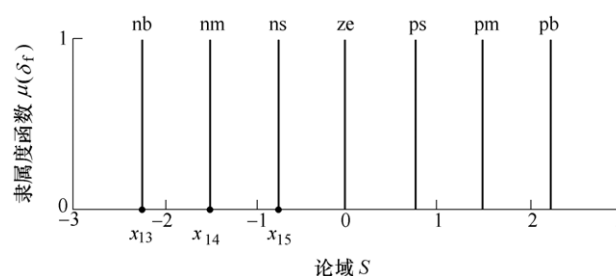
$$e = \eta y_L + (1 - \eta) \varepsilon_L \quad (5)$$

式中, η 为加权系数。

2.1 模糊化及确定隶属函数

选择由式(5)得到的偏差 e 和偏差变化率 e_c 作为模糊控制器的输入变量,前轮转角 δ_f 作为输出变量。定义偏差和偏差变化率向左为正,向右为负。

把输入变量 e 、 e_c 和输出变量 δ_f 分别转化到论域为 $[-3, 3]$ 的模糊集 E 、 E_c 和 S 。输入变量的模糊子集语言变量均为 $\{\text{NB}, \text{NS}, \text{ZE}, \text{PS}, \text{PB}\}$, 其模糊子集的隶属度函数取梯形函数和三角函数,如图4、5所示。输出变量的模糊子集语言变量为 $\{\text{nb}, \text{nm}, \text{ns}, \text{ze}, \text{ps}, \text{pm}, \text{pb}\}$, 对应的隶属度函数取单值函数,如图6所示。

图4 偏差 e 隶属度函数图5 偏差变化率 e_c 隶属度函数图6 前轮转角 δ_f 隶属度函数

2.2 建立模糊控制规则及进行解模糊

建立模糊控制规则 R_i ：如果 $e = E_j$, $e_c = E_{c_k}$,

则 $\delta_f = S_{jk}$ 。式中, $i=1, 2, \dots, 25$; $j, k=1, 2, \dots, 5$ 。

模糊逻辑推理采用 Mamdani 法, 解模糊判决利用重心法^[15]。

3 遗传优化

通常模糊控制器主要靠专家的经验或反复试探的方法来调整隶属度函数参数和控制规则, 这实际上是一个寻优的过程。GA 是一种基于自然选择和基因遗传学原理的搜索算法, 对于复杂问题的优化优于一些常规的算法, 可用于模糊控制器的参数优化^[16]。

3.1 编码

本文采用实数编码, 该方法的优点如下: 便于全局搜索, 防止陷入局部最优, 提高运算效率。由文献[15]知状态变量在模糊子集中应关于零点正、负对称, 因此采用图 4~6 所示的参数(x_1, x_2, \dots, x_{15})来表示待优化隶属度函数参数。由参数(r_1, r_2, \dots, r_{25}) [1, 7]来表示待优化的控制规则参数。其中 1 代表控制规则的后件 nb, 2 代表控制规则的后件 nm 等。将待优化的隶属度函数参数和控制规则参数的编码联合起来, 形成一维染色体的码串, 其结构如图 7 所示。

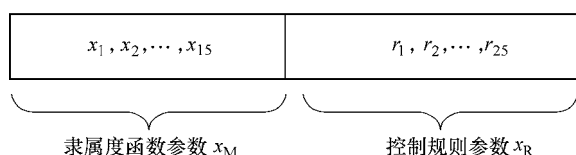


图 7 染色体结构

3.2 适应度函数

本文采用的性能指标函数如式(6)所示, 该性能指标前两项要求横向偏差和方位偏差足够小, 第三项要求控制能量消耗最小。

$$J = w_1(e)^2 + w_2(e_c)^2 + w_3(\delta_f)^2 \quad (6)$$

式中, w_1 、 w_2 、 w_3 为各项的加权系数。

加权系数 w_1 、 w_2 、 w_3 分别决定了 e 、 e_c 、 δ_f 在适应度函数种所占的比例, 其值越大表明对该项的重视程度越高, 其中 $w_2(e_c)^2$ 的引入主要是防止输出响应的超调量过大。本文研究中加权系数值为 $w_1=0.7$ 、 $w_2=0.2$ 、 $w_3=0.1$ 。

由于遗传算法要求个体适应度越大越优, 故须将性能指标函数转化适应度函数, 转换函数

$$F = \frac{1}{1+J} \quad (7)$$

因此, 模糊优化的数学模型为

$$\text{find } x = (x_M, x_R) = (x_1, x_2, \dots, x_{15}, r_1, r_2, \dots, r_{25})$$

$$\text{max } F = \frac{1}{1+J}$$

$$\text{s.t. } -3 < x_2 \leq x_3 < 0$$

$$-3 < x_1 \leq x_4 \leq x_6 < 0$$

$$-3 \leq x_5 < 0$$

$$-3 < x_8 \leq x_9 < 0$$

$$-3 < x_7 \leq x_{10} \leq x_{12} < 0$$

$$-3 \leq x_{11} < 0$$

$$-3 < x_{13} \leq x_{14} \leq x_{15} < 0$$

$$(r_1, r_2, \dots, r_{25}) \in [1, 7] \quad (8)$$

3.3 遗传算子

选择: 选择算子采用无回放余数随机选择, 该方法可以确保适应度优于均值的个体遗传到下一代, 误差较小。

交叉: 交叉是产生新个体增大搜索空间的重要手段。交叉算子采用算术交叉, 设在两个个体 x_A^t 、 x_B^t 之间进行算术交叉, 则交叉后的新个体为

$$\begin{cases} x_A^{t+1} = \alpha x_A^t + (1-\alpha)x_B^t \\ x_B^{t+1} = \alpha x_B^t + (1-\alpha)x_A^t \end{cases} \quad (9)$$

式中 t ——优化代数

α ——权参数

变异: 变异算子采用非均匀变异, 设 $x = (x_h, x_k, \dots, x_n)$ 为变异前的个体, $x' = (x_h, x'_k, \dots, x_n)$ 为变异后的个体, 变异点 x_k 处的基因值取值范围 $x_k \in [x_k^l, x_k^r]$, 则新的基因值

$$x'_k = \begin{cases} x_k + \Delta(t, x_k^r - x_k) & \text{random}(0,1) = 0 \\ x_k - \Delta(t, x_k - x_k^l) & \text{random}(0,1) = 1 \end{cases} \quad (10)$$

式中, $\Delta(t, y)$ 为 $[0, y]$ 内符合非均匀分布的一个随机数, y 表示 $x_k^r - x_k$ 或 $x_k - x_k^l$ 随着优化代数 t 的增加, $\Delta(t, y)$ 接近于 0 的概率逐渐增加。

3.4 控制参数

本文中遗传算法的参数设置如下: 种群规模 $n=60$, 迭代次数 $m=100$, 交叉概率 $P_c=0.8$, 变异概率 $P_m=0.09$, 参数 $\alpha=0.35$ 。

图 8 为通过遗传算法优化后的模糊控制输入输出关系曲面图。由图 8 可知当偏差和偏差变化率为负大时, 转向角应向左转, 期望转向角为正大; 当偏差和偏差变化率为正大时, 转向角应向右转, 期望转向角为负大。

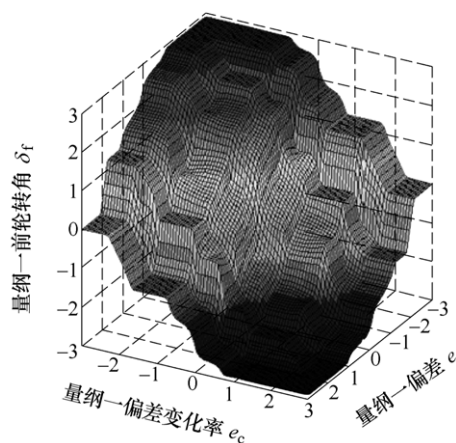


图8 优化后的模糊控制曲面图

4 仿真与试验

为验证遗传优化模糊控制器的有效性和优越性,本文首先对采用GA优化和未采用GA的模糊控制器的控制效果进行了对比分析,参考路径为直线段,初始横向偏差为 -0.4 m ,初始方向偏差为 4° ,速度为 36 km/h ,图9和图10分别为横向偏差和方向偏差的响应曲线对比图。

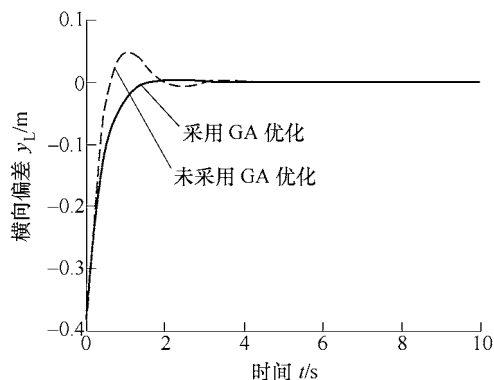


图9 横向偏差响应对比图

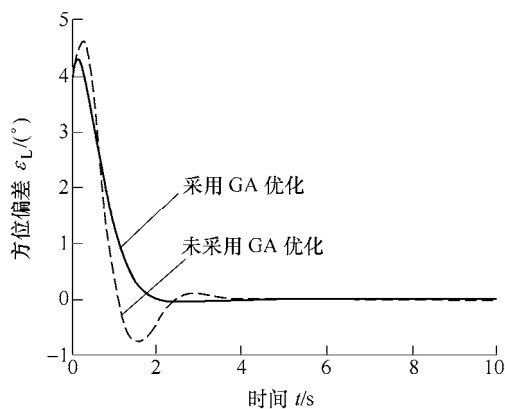


图10 方向偏差响应对比图

由图9和图10可知,采用GA优化模糊控制器的控制效果与未采用GA优化的模糊控制器相比有

了明显改善,系统几乎没有超调,且响应速度快。

路径跟踪仿真试验参考路径如图11所示,开始为直线段;然后是由曲率为 0.005 m^{-1} 和曲率为 -0.01 m^{-1} 组成的曲线段;最后为直线段。

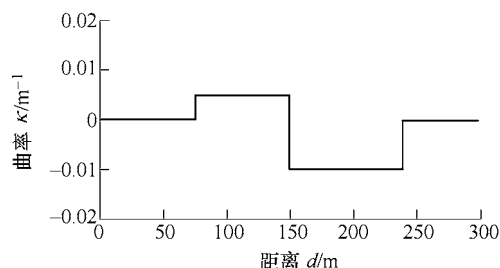


图11 参考路径

取初始横向偏差为 -0.4 m ,方位偏差为 4° ,车速为 25 km/h 。图12、13分别为横向偏差和方位偏差响应图,由图12、13可知当控制器跟踪上述参考路径时,直线段横向偏差和方位偏差均渐近为0,曲线段横向偏差在 $-0.02\sim 0.02\text{ m}$ 范围内,方位偏差在 $-1.7^\circ\sim 1.7^\circ$ 。仿真表明该控制器能够准确地跟踪参考路径。

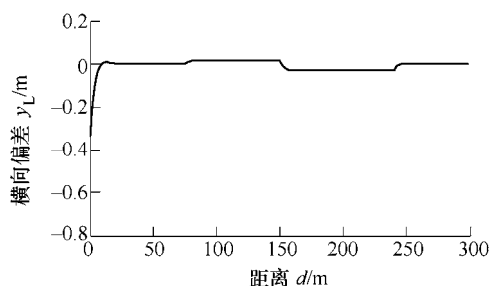


图12 横向偏差响应曲线

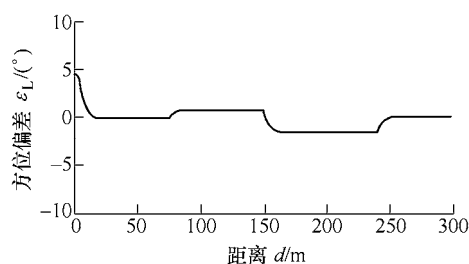


图13 方位偏差响应曲线

车辆速度是影响车辆操纵稳定性的一个重要因素,本文研究了控制器对于速度变化的适应能力。如图14所示,速度变化为4个阶段:匀减速阶段($53\sim 14\text{ km/h}$)、匀加速阶段($14\sim 47\text{ km/h}$)、减速阶段($47\sim 22\text{ km/h}$)、匀速阶段(22 km/h)。

图15和图16分别表示横向偏差和方位偏差在上述车辆速度变化时的响应曲线,由图15~16可知控制器在车辆速度变化时可使横向偏差和方位偏差

趋近于零，该控制器对车辆速度变化有较好的适应能力。

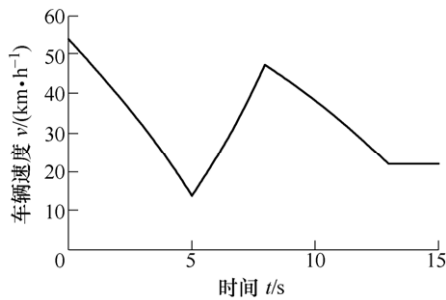


图 14 速度变化曲线

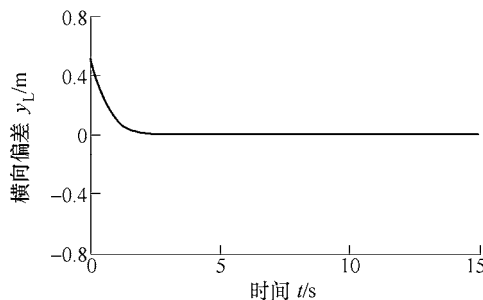


图 15 车辆速度变化时横向偏差的响应曲线

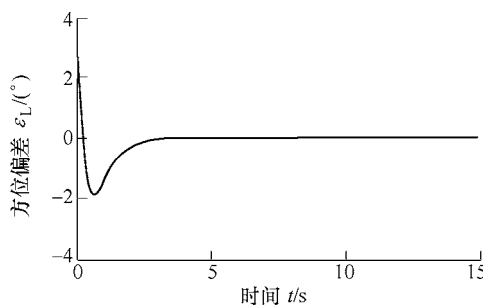


图 16 车辆速度变化时方位偏差的响应曲线

根据上述设计的控制器在试验样车上进行了多次试验，车辆速度为 15 km/h，跟踪路径如图 11 所示。图 17 和图 18 分别为横向偏差和方位偏差试验曲线图。根据曲线可知，车辆跟踪直线时横向偏差控制在 $-0.02 \sim 0.02$ m，方位偏差控制在 $-1^\circ \sim 1^\circ$ ；跟踪弧线时横向偏差控制在 $-0.18 \sim 0.18$ m，方位偏差控制在 $-3^\circ \sim 3^\circ$ 。试验结果表明，基于上述设计横向模糊控制器的跟踪性能稳定准确。

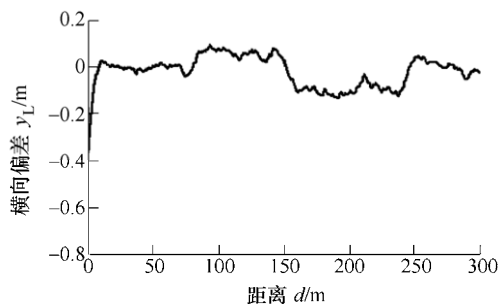


图 17 横向偏差试验曲线

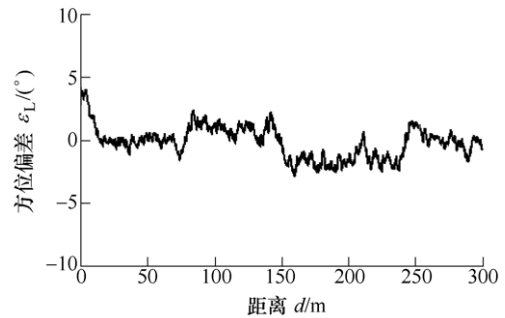


图 18 方位偏差试验曲线

5 结论

(1) 针对视觉导航式无人车的横向控制问题，设计了模糊控制器。通过遗传算法自动优化模糊控制器隶属度函数参数和控制规则。

(2) 仿真和试验结果表明，该模糊控制器不仅能保证无人车准确实现路径的位置和方位跟踪，而且能保证路径跟踪的平稳性和鲁棒性。

参 考 文 献

- [1] 徐友春, 王荣本. 世界智能车辆近况综述[J]. 汽车工程, 2001, 23(5): 290-295.
XU Youchun, WANG Rongben. A summary of worldwide intelligent vehicle[J]. Automatic Engineering, 2001, 23(5): 290-295.
- [2] WU S J, CHIANG H H, PERNG J W. The heterogeneous systems integration design and implementation for lane keeping on a vehicle[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2008, 9(2): 246-263.
- [3] CREMEAN L B, FOOTE T B, GILLUALA J H. Alice: An information-rich autonomous vehicle for high-speed desert navigation[J]. Journal of Field Robotics, 2006, 23(10): 777-810.
- [4] RAJAMANI R, ZHU C, ALEXANDER L. Lateral of a backward driven front-steering vehicle[J]. Control Engineering Practice, 2003, 11(5): 531-540.
- [5] 王荣本, 马雷. 高速智能车辆变结构转向控制器切换超平面选取方法[J]. 机械工程学报, 2004, 40(10): 83-86.
WANG Rongben, MA Lei. Method of choosing switching hyperplane of high-speed intelligent vehicle variable structure steering controller[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(10): 83-86.
- [6] ZHANG J M, REN D B. Lateral control of vehicle for lane keeping in intelligent transportation systems[C]//

- IEEE International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics, August 26-27, 2009, Hangzhou, China, 2009 : 446-450.
- [7] ENACHE N M, MAMMAR S, NETTO M. Driver steering assistance for lane-departure avoidance based on hybrid automata and composite lyapunov function[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2010, 11(1) : 28-39.
- [8] NETTO M, BLOSSVILLE J M. A new robust control system with optimized use of the lane detection data for vehicle full lateral control under strong curvatures[C]//IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, September 17-20, 2006, Toronto, Canada, 2006 : 1382-1387.
- [9] CHOI M W, RYU J H. Robust lateral controller design for an unmanned vehicle using a system identification method [C]//IEEE International Symposium on Industrial Electronics, June 30-July 2, 2008, Cambridge, UK, 2008 : 1177-1182.
- [10] CHAIB S, NETTO M S, MAMMAR S. H_∞, Adaptive, PID and fuzzy control :A comparison of controllers for vehicle lane keeping[C]// IEEE Intelligent Vehicles Symposium, June 14-17, Parma, Italy, 2004 : 139-144.
- [11] YANG J, ZHENG N N. An expert fuzzy controller for vehicle lateral control[C]//IEEE Conference on Industrial Electronics Society, November 5-8, 2007, Taipei, Taiwan, China, 2007 : 880-885.
- [12] RAIMONDI F M, MELLUSO M. Fuzzy motion control strategy for cooperation of multiple automated vehicles with passengers comfort[J]. Automatica, 2008, 44(11) : 2804-2816.
- [13] DUMITRACHE I, BUIU C. Genetic learning of fuzzy controllers[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 1999, 49(1) : 13-26.
- [14] TAYOR C J, KOSECKA J, BLASI R, et al. A comparative study of vision-based lateral control strategies for autonomous highway driving[J]. International Journal of Robotics Research, 1999, 18(5) : 442-453.
- [15] International Technical Commission (IEC), Devices, IEC 1131-programmable controller, fuzzy control programming, part7[EB/OL]. [2005-04-28]. [http ://www.fuzzytech.com/binaries/ieccd1.pdf](http://www.fuzzytech.com/binaries/ieccd1.pdf).
- [16] MENC C, FANELLI A M. Interpretability constraint for fuzzy information granulation[J]. Information Sciences, 2008, 178(24) : 4585-4618.
-
- 作者简介:郭景华,男,1982年出生,博士研究生。研究方向为智能车辆,动力学与控制。
- E-mail : guojing_0701@live.cn
- 李琳辉(通信作者),男,1981年出生,讲师。研究方向为智能车辆。
- E-mail : lilinhui81@gmail.com