

## 越野智能车转向及驱动协调控制

李琳辉, 郭景华, 张明恒, 连静<sup>†</sup>

(大连理工大学 运载工程与力学学部 工业装备结构分析国家重点实验室; 汽车工程学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 本文以实现智能车在非结构化越野环境中的自主导航为目的, 对越野路径识别及轨迹跟踪控制方法开展研究. 首先基于视觉传感器和激光传感器实现可行驶路径的分割与提取, 并建立了包含车辆转向及驱动的耦合控制系统模型; 然后, 针对控制系统模型具有非匹配不确定性的特点, 采用反演变结构控制算法设计了转向及驱动协调控制器, 并引入饱和函数以解决变结构的抖振问题; 最后, 通过仿真和越野导航试验验证了所提出控制算法的有效性和鲁棒性.

**关键词:** 智能车辆; 导航; 耦合控制系统; 非匹配不确定性; 反演变结构

**中图分类号:** TP242.6 **文献标识码:** A

## Coordinated control of steering and driving in off-road intelligent vehicle

LI Lin-hui, GUO Jing-hua, ZHANG Ming-heng, LIAN Jing<sup>†</sup>

(Faculty of Vehicle Engineering and Mechanics, State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment; School of Automotive Engineering, Dalian University of Technology, Dalian Liaoning 116024, China)

**Abstract:** Off-road path recognition and trajectory-following control are studied in the paper to realize the intelligent vehicle autonomous navigation in unstructured off-road environment. Firstly, the segmentation and extraction of traversable path are achieved by vision sensor and laser sensor, and the coupled control system model for vehicle steering and driving is established. To deal with the unmatched uncertainties of the control system model, a steering and driving coordinated controller for steering and driving is proposed via backstepping variable structure control method, and boundary layer approach is introduced to suppress the chattering phenomenon caused by variable structure. Finally, Simulations and off-road experiments are given to demonstrate the effectiveness and robustness of the proposed control method.

**Key words:** intelligent vehicle; navigation; coupled control system; unmatched uncertainty; backstepping variable structure

### 1 引言(Introduction)

越野智能车可用于执行侦察、运输、营救、探索、监视、科学数据采集等任务, 无论在军事还是民用领域均具有广泛的应用前景. 若要在越野环境中成功实现智能车的自主导航行驶, 其关键在于开发有效的可行驶路径检测算法, 并设计能够适应越野地形的轨迹跟踪控制器.

在越野环境感知领域, 针对非结构化道路的检测算法主要有基于道路特征的方法<sup>[1]</sup>, 基于道路模型的方法<sup>[2]</sup>和基于学习的方法<sup>[3]</sup>等. 受越野环境场景复杂、光照多变以及视觉投影造成信息丢失等因素的影响, 单凭视觉类传感器难以实现完全可靠的可行驶路径识别.

在智能车的轨迹跟踪控制器设计领域, 目前的多数研究是将车辆横、纵向动力学解耦, 独立设计

控制车辆横向运动的转向控制器和控制车辆纵向运动的驱动控制器. 在横向的转向控制方面, 一般考虑基于视觉感知的预瞄模型, 控制算法以最优控制<sup>[4]</sup>或模糊控制<sup>[5]</sup>最为常见, 被广泛应用于车辆在高速公路上的车道保持控制; 在纵向的驱动控制方面, 以PI(比例-积分)控制器为主, 被广泛应用于普通车辆的巡航控制中, 此外还有基于Lyapunov稳定性理论的控制器<sup>[6]</sup>考虑车辆的非线性和参数不确定性的模糊滑模变结构控制器<sup>[7]</sup>等.

然而, 车辆是一种强耦合变参数的非线性系统, 其行驶过程中所需的横向力和纵向力都产生于轮胎对地面的反作用力, 特别在越野环境下, 地形在横向和纵向上的起伏不平以及蜿蜒崎岖更是加强了车辆的横向运动和纵向运动之间的耦合关系, 传统将横向转向控制和纵向驱动控制分开考虑的轨迹跟踪控

收稿日期: 2011-11-13; 收修稿日期: 2012-08-16.

<sup>†</sup>通信作者. Tel.: +86 15524706097.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51107006, 61203171); 中国博士后科学基金资助项目(2012M510799); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(DUT12JS03).

制方法将容易导致执行器(方向盘、油门)操作频繁,降低控制效果。

基于上述考虑,本文首先基于视觉传感器,在激光传感器的辅助下,实现基于纹理特征提取的越野路径识别;然后,建立了由智能车辆横向运动及纵向运动组成,具有非匹配不确定性的耦合控制模型.针对该耦合控制系统具有非匹配不确定性的特点,提出基于反演变结构控制的转向及驱动协调控制算法,并引入饱和函数以解决变结构的抖振问题;最后,进行了仿真及越野导航试验以验证控制算法的有效性。

## 2 越野路径识别(Off-road path recognition)

实现越野智能车的导航控制,需要实时获取期望路径信息,并从中提取出车辆预瞄点处相对期望路径的方位偏差和横向偏差,作为协调控制器的反馈输入.本文通过视觉传感器,在激光传感器的辅助下实现越野路径的识别,并从中提取出期望的行驶轨迹,算法实现流程如图1所示。

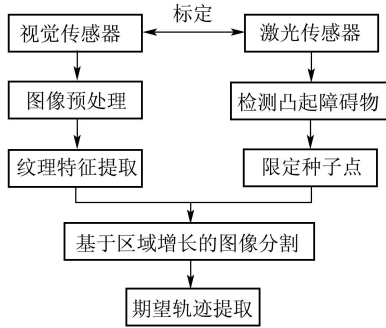


图1 越野路径识别流程图

Fig. 1 Off-road path recognition flow chart

算法具体实现步骤如下:

1) 环境信息采集:通过彩色摄像机获取智能车前方的道路图像,同时基于能够获取所扫描对象相对车体的位置信息的激光传感器检测道路中是否存在凸起障碍物,以提高可行驶区域判别的可靠性.两类传感器已通过预先标定的方式建立了激光数据点与图像像素点的对应关系。

2) 图像预处理:首先对所采集的图像进行光照补偿以减弱光照的影响,然后采用直方图均衡化方法进行图像增强以方便道路特征的提取,最后在图像中标识出凸起障碍物区域以保证后续区域增长算法的种子点能够在非障碍区域自动选取。

3) 纹理特征提取:鉴于纹理能够反映图像灰度的性质及其空间关系,而自然景物在纹理上能够体现明显的区别,本文采用构造共生矩阵的方法生成越野图像中各像素点的纹理向量.共生矩阵能够反映图像灰度分布关于方向、局部邻域和变化幅度的综合信息。

4) 基于区域增长的图像分割:首先,在激光传感器的辅助下,可以在图像中确定出车辆正前方近处

的一块可行驶区域,可被认为是道路区域,从该区域中随机选择种子点,按照纹理和灰度的相似性进行区域增长,便可检测到道路的左、右边缘,从而完成越野道路的分割。

5) 期望轨迹提取:对分割后的图像进行形态学滤波处理,填充空穴并滤除孤立点后提取Canny边缘,然后从图像中心线起向两侧搜索边缘链码,并获取链码的长度和面积信息,辅助完成左、右侧道路边界的识别.最后,采用二次曲线拟合并描述道路边界,进一步可通过在预瞄点求导的方式获取车辆在预瞄位置的偏差信息。

图2给出基于上述流程的越野路径边界识别结果,本文将右侧边界作为智能车需要跟踪的期望轨迹,通过求取车辆预瞄点相对期望轨迹的偏差信息,能够为轨迹跟踪控制的实施提供稳定可靠的道路偏差信息反馈。

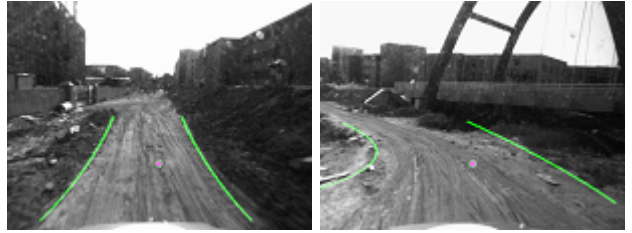


图2 越野路径识别结果

Fig. 2 Off-road path recognition results

## 3 系统模型(System model)

车辆是一种存在严重的参数不确定性的非线性系统,且该非线性系统的参数不确定性具有非匹配的特性.非匹配不确定是指不确定性不在控制矩阵所张成的空间里,不能直接通过控制量的设计来抵消其影响.由于本文研究为横向转向运动和纵向驱动运动的控制,所以暂不考虑制动输入,忽略车辆的侧倾,垂向运动及左、右轮胎侧偏特性的差异,车辆的动力学模型可表示为

$$\begin{cases} \dot{v}_x = -f_R g - \frac{c_x v_x^2}{m} + v_y \dot{\psi} + 2C_f \frac{v_y + l_f \dot{\psi}}{m v_x} \delta_f + \\ \quad \frac{1}{m} \frac{T_e i_g i_o \eta_T}{r_w} + g \sin \theta + \tau(\Delta_x), \\ \dot{v}_y = -\frac{2(C_f + C_r)}{m v_x} v_y - \left[ v_x + \frac{2(C_f l_f - C_r l_r)}{m v_x} \right] \dot{\psi} + \\ \quad \frac{2C_f}{m} \delta_f - \frac{c_y v_y^2}{m} + \tau(\Delta_y), \\ \ddot{\psi} = -\frac{2(C_f l_f^2 + C_r l_r^2)}{I_z v_x} \dot{\psi} - \frac{2(C_f l_f - C_r l_r)}{I_z v_x} v_y + \\ \quad \frac{2C_f l_f}{I_z} \delta_f + \tau(\Delta_\psi), \\ T_e = \text{MAP}(w_e, a_{\text{thr}}), \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $v_x$ 和 $v_y$ 分别为纵、横向速度(m/s),  $\psi$ 为横摆角(rad),  $m$ 为车辆质量(kg),  $l_f$ 和 $l_r$ 分别为前、后轮间轴距及质心到前、后轮的距离(m),  $C_x$ 和 $C_y$ 分别为纵、横向空气阻力系数,  $f_R$ 表示滚动阻力系数,  $I_z$ 为车辆转动惯量( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ),  $C_f$ 和 $C_r$ 分别为前、后轮胎侧偏刚度(N/rad),  $\theta$ 为道路坡度(rad),  $\delta_f$ 为前轮转角(rad),  $g$ 为重力加速度( $\text{m/s}^2$ ),  $T_e$ 表示发动机力矩(N·M),  $i_o$ 为主减速器速比,  $\eta_T$ 为传动系动力传递系数,  $r_w$ 为车轮半径(m),  $i_g$ 为自动变速器传动比, MAP为发动机速度特性函数,  $w_e$ 表示发动机转速(rad/s),  $a_{\text{thr}}$ 表示油门开度(%),  $\tau(\Delta_x)$ ,  $\tau(\Delta_y)$ 和 $\tau(\Delta_\psi)$ 分别为由未建模动态和时变参数引起的不确定性。

作变换:

$$\begin{aligned} f_0 &= -f_{RG} - \frac{c_x v_x^2}{m} + v_y \dot{\psi} + g \sin \theta, \\ f_1 &= -\frac{2(C_f + C_r)}{m v_x} v_y - \\ &\quad [v_x + \frac{2(C_f l_f - C_r l_r)}{m v_x}] \dot{\psi} - \frac{c_y v_y^2}{m}, \\ f_2 &= -\frac{2(C_f l_f^2 + C_r l_r^2)}{I_z v_x} \dot{\psi} - \frac{2(C_f l_f - C_r l_r)}{I_z v_x} v_y, \\ g_0 &= \frac{2C_f(v_y + l_f \dot{\psi})}{m v_x}, \quad g_1 = \frac{i_g i_o \eta_T}{m r_w}, \\ g_2 &= \frac{2C_f}{m}, \quad g_3 = \frac{2C_f l_f}{I_z}. \end{aligned}$$

将变换代入式(1), 整理得车辆动力学模型:

$$\begin{cases} \dot{v}_x = f_0 + g_0 \delta_f + g_1 T_e + \tau(\Delta_x), \\ \dot{v}_y = f_1 + g_2 \delta_f + \tau(\Delta_y), \\ \dot{\psi} = f_2 + g_3 \delta_f + \tau(\Delta_\psi), \\ T_e = \text{MAP}(\omega_e, \alpha_{\text{thr}}). \end{cases} \quad (2)$$

**假设 1** 动力学模型(2)中的不确定项有界, 存在已知连续函数 $a_i(v_x, v_y, \dot{\psi})$ , 使得

$$\begin{cases} \tau(\Delta_x) \leq a_1(v_x, v_y, \dot{\psi}), \\ \tau(\Delta_y) \leq a_2(v_x, v_y, \dot{\psi}), \\ \tau(\Delta_\psi) \leq a_3(v_x, v_y, \dot{\psi}). \end{cases} \quad (3)$$

智能车横向的转向控制的目标为: 通过控制前轮转角 $\delta_f$ , 使车辆相对期望路径的方位偏差 $\phi_e$ 和横向偏差 $y_e$ 趋于零. 在本文中, 基于车辆预瞄模型, 方位偏差 $\phi_e$ (rad)定义为视觉预瞄点处车辆中心线与期望路径切线的夹角, 其表达式为

$$\dot{\phi}_e = v_x K_L - \dot{\psi}, \quad (4)$$

式中:  $K_L$ 为路径曲率, 横向偏差 $y_e$ 为车辆视觉预瞄点处车辆中心线与期望路径的距离偏差(m), 其表达式为

$$\dot{y}_e = v_x \phi_e - v_y - \dot{\psi} L, \quad (5)$$

式中 $L$ 代表预瞄距离(m).

智能车纵向的驱动控制的目标为: 通过调节油门开度 $a_{\text{thr}}$ , 使其按照期望车速(加速度)行驶<sup>[8]</sup>. 在本文中, 定义速度偏差为车辆的期望速度与实际速度的差值, 其表达式为

$$v_e = v_x - v_p, \quad (6)$$

式中:  $v_e$ 为速度偏差(m/s),  $v_x$ ,  $v_p$ 分别为车辆的实际速度和期望速度.

对式(6)进行微分, 可得

$$\dot{v}_e = \dot{v}_x - \dot{v}_p, \quad (7)$$

式中:  $\dot{v}_e$ 为速度偏差变化率,  $\dot{v}_x$ ,  $\dot{v}_p$ 分别为车辆的实际加速度和期望加速度.

结合式(2)(4)-(5)和式(7)可得由横向运动及纵向运动组成, 具有耦合及不确定性特征的智能车辆控制系统模型, 该模型为由6个状态变量 $v_e$ ,  $y_e$ ,  $\phi_e$ ,  $v_x$ ,  $v_y$ ,  $\dot{\psi}$ 和两个控制向量 $\delta_f$ ,  $a_{\text{thr}}$ 组成的非线性系统, 且具有严格参数反馈形式.

#### 4 协调控制器设计(Coordinated controller design)

在目前关于智能车辆协调控制的研究中, 除了不依赖于数学模型的智能控制, 如神经网络控制外, 较常采用的是滑模变结构控制. 滑模变结构控制要求系统的参数不确定性和外部扰动满足匹配条件. 但是, 由智能车辆横向运动和纵向运动组成的控制系统模型实际是具有非匹配不确定性的非线性系统. 所以, 本文针对该系统的非匹配不确定特性, 采用反演变结构控制方法设计了转向及驱动的协调控制器, 其主要特点是在反演设计的每一步过程中, 采用非线性阻尼技术, 抵消非匹配不确定性的影响, 具体实现步骤如下:

**步骤 1** 对于转向控制, 定义控制误差:

$$s_1 = y_e, \quad (8)$$

选择Lyapunov函数 $V_{\text{lat0}} = 1/2s_1^2$ , 对其求导, 并将式(5)代入得

$$\dot{V}_{\text{lat0}} = s_1 \dot{s}_1 = s_1 \dot{y}_e = s_1(v_x \phi_e - v_y - \dot{\psi} L). \quad (9)$$

选择 $v_x \phi_e - \dot{\psi} L$ 为虚拟控制输入, 要使 $s_1$ 渐近收敛, 应使 $\dot{V}_{\text{lat0}} = -k_1 s_1^2 \leq 0$ , 其中 $k_1$ 为正实数, 可得虚拟控制的期望值 $\alpha_1$ 为

$$\alpha_1 = -k_1 s_1 + v_y. \quad (10)$$

设 $v_x \phi_e - \dot{\psi} L$ 虚拟控制与期望值 $\alpha_1$ 的偏差为 $s_2$ , 则

$$s_2 = v_x \phi_e - \dot{\psi} L - \alpha_1. \quad (11)$$

将式(11)代入 $\dot{V}_{\text{lat0}} = s_1 \dot{s}_1$ , 有

$$\dot{V}_{\text{lat0}} = s_1 s_2 - k_1 s_1^2. \quad (12)$$

显然当  $s_2 = 0$  时,  $\dot{V}_{\text{lat}0} = -k_1 s_1^2 \leq 0$ . 下一步的目标是寻找控制量  $\delta_f$ ,  $a_{\text{thr}}$ , 使得  $s_2$  收敛于0或收敛于某一较小的值, 这样可保证  $s_1$  收敛于0或一致有界收敛.

**步骤2** 选择Lyapunov函数为

$$V_{\text{lat}1} = V_{\text{lat}0} + \frac{1}{2}s_2^2, \quad (13)$$

对式(13)求导, 得

$$\dot{V}_{\text{lat}1} = \dot{V}_{\text{lat}0} + s_2 \dot{s}_2 = -k_1 s_1^2 + s_1 s_2 + s_2 \dot{s}_2. \quad (14)$$

令

$$s_1 + \dot{s}_2 = -k_2 s_2, \quad (15)$$

可使

$$\dot{V}_{\text{lat}1} = -k_1 s_1^2 - k_2 s_2^2 \leq 0, \quad (16)$$

其中  $k_2$  为正实数, 对式(11)求导代入式(15), 得

$$s_1 + \dot{v}_x \phi_e + \dot{\phi}_e v_x - \ddot{\psi} L - \dot{\alpha}_1 = -k_2 s_2. \quad (17)$$

将  $\dot{\alpha}_1 = -k_1 \dot{s}_1 + \dot{v}_y$  代入式(17), 并将式(2)的  $\dot{v}_x$ ,  $\ddot{\psi}$ ,  $\dot{v}_y$  代入该式, 可得

$$s_1 + (f_0 + g_0 \delta_f + g_1 T_e) \phi_e + \dot{\phi}_e v_x - (f_2 + g_3 \delta_f) L + k_1 \dot{s}_1 - (f_1 + g_2 \delta_f) + \eta_1 = -k_2 s_2, \quad (18)$$

其中  $\eta_1$  为  $s_2$  求导引起的不确定部分, 根据假设1, 存在连续函数  $\beta(v_x, v_y, \dot{\psi})$ , 使  $\eta_1 \leq \beta(v_x, v_y, \dot{\psi})$ .

**步骤3** 对于驱动控制, 定义控制误差:

$$p_1 = v_e, \quad (19)$$

选择Lyapunov函数为

$$V_{\text{logit}0} = \frac{1}{2} p_1^2, \quad (20)$$

则

$$\dot{V}_{\text{logit}0} = p_1 \dot{p}_1 = p_1 \dot{v}_e = p_1 (\dot{v}_x - \dot{v}_p), \quad (21)$$

要使  $p_1$  趋近于零, 必须使  $\dot{V}_{\text{logit}0} = -l_1 p_1^2 \leq 0$ , 其中  $l_1$  为一正实数. 令

$$f_0 + g_0 \delta_f + g_1 T_e + \xi_1 - \dot{v}_p = -l_1 p_1, \quad (22)$$

$\xi_1$  为对  $\dot{p}_1$  求导引起的不确定项, 根据假设1, 存在连续函数  $\gamma(v_x, v_y, \dot{\psi})$ , 使得  $\xi_1 \leq \gamma(v_x, v_y, \dot{\psi})$ . 联立式(18)和式(22), 求解  $\delta_f$  及  $T_e$ , 得等效控制:

$$\mathbf{u}_{\text{eq}} = \begin{bmatrix} T_{\text{eeq}} \\ \delta_{\text{feq}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_1 & g_0 \\ g_1 \phi_e & g_0 \phi_e - g_2 - g_3 L \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \end{bmatrix}, \quad (23)$$

式中: 标eq表示“等效”, 即  $T_{\text{eeq}}$  为等效发动机力矩控制量,  $\delta_{\text{feq}}$  为等效前轮转角控制量.

$$\sigma_1 = -f_0 + \dot{v}_p - l_1 p_1 - \frac{p_1 \gamma^2}{2\zeta_1},$$

$$\sigma_2 = -s_1 - f_0 \phi_e - \dot{\phi}_e v_x + f_2 L + f_1 - k_1 \dot{s}_1 - k_2 s_2 - \frac{s_2 \beta^2}{2\varepsilon_1},$$

$-p_1 \gamma^2 / 2\zeta_1$ ,  $-s_2 \beta^2 / 2\varepsilon_1$  为非线性阻尼项, 用来补偿不确定项  $\xi_1$ ,  $\eta_1$  的扰动,  $\zeta_1$  和  $\varepsilon_1$  均为正实数.

设计变结构控制律:

$$\mathbf{u}_s = \begin{bmatrix} T_{\text{es}} \\ \delta_{\text{fs}} \end{bmatrix} = \begin{cases} \lambda_1 \text{sat}(\frac{p_1}{\Delta_1}), \\ \lambda_2 \text{sat}(\frac{s_2}{\Delta_2}), \end{cases} \quad (24)$$

式中  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  为正实数, 其中  $\text{sat}(p_1 / \Delta_1)$ ,  $\text{sat}(s_2 / \Delta_2)$  为饱和函数,  $\Delta_1 > 0$ ,  $\Delta_2 > 0$  表示边界层厚度, 是可选择的常数.

由式(23)和式(24), 得协调控制律为

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} T_{\text{ed}} \\ \delta_{\text{fd}} \end{bmatrix} = \mathbf{u}_{\text{eq}} + \mathbf{u}_s = \begin{bmatrix} T_{\text{eeq}} + T_{\text{es}} \\ \delta_{\text{feq}} + \delta_{\text{fs}} \end{bmatrix}, \quad (25)$$

其中  $T_{\text{ed}}$  和  $\delta_{\text{fd}}$  分别为期望的发动机转矩和前轮转角, 由式(25)求出  $T_{\text{ed}}$ , 从而可以根据  $T_e = \text{MAP}(\omega_e, \alpha_{\text{thr}})$  求出期望的油门开度为

$$\alpha_{\text{thrd}} = \text{MAP}^{-1}(\omega_e, T_{\text{ed}}). \quad (26)$$

以转向控制部分为例, 进行所提出算法的稳定性证明. 由式(25)所描述的协调控制率可得

$$\delta_{\text{fd}} = \delta_{\text{feq}} + \delta_{\text{fs}} = \delta_{\text{feq}} + \lambda_2 \text{sat}(\frac{s_2}{\Delta_2}). \quad (27)$$

由式(23)可知, 等效前轮转角控制量  $\delta_{\text{feq}}$  及等效发动机力矩控制量  $T_{\text{eeq}}$  满足等式:

$$(f_0 + g_0 \delta_{\text{feq}} + g_1 T_{\text{eeq}}) \phi_e + \dot{\phi}_e v_x - (f_2 + g_3 \delta_{\text{feq}}) L + k_1 \dot{s}_1 - (f_1 + g_2 \delta_{\text{feq}}) = -s_1 - k_2 s_2 - \frac{s_2 \beta^2}{2\varepsilon_1}. \quad (28)$$

对式(11)求导, 代入式(14), 则式(14)可表示为

$$\begin{aligned} \dot{V}_{\text{lat}1} &= -k_1 s_1^2 + s_1 s_2 + s_2 \dot{s}_2 = \\ &= -k_1 s_1^2 + s_1 s_2 + s_2 (\dot{v}_x \phi_e + \dot{\phi}_e v_x - \ddot{\psi} L - \dot{\alpha}_1) = \\ &= -k_1 s_1^2 + s_1 s_2 + s_2 ((f_0 + g_0 \delta_f + g_1 T_e) \phi_e + \dot{\phi}_e v_x - \\ & \quad (f_2 + g_3 \delta_f) L + k_1 \dot{s}_1 - (f_1 + g_2 \delta_f) + \eta_1). \end{aligned} \quad (29)$$

令式(29)中  $\delta_f = \delta_{\text{fd}}$ ,  $T_e = T_{\text{eeq}}$ , 即将转向控制的协调控制量(27)及等效发动机力矩控制量代入, 然后将式(28)代入, 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_{\text{lat}1} &= \\ &= -k_1 s_1^2 + s_1 s_2 + s_2 (-s_1 - k_2 s_2 - \frac{s_2 \beta^2}{2\varepsilon_1} + \eta_1) + \\ &= s_2 \lambda_2 (g_0 \phi_e - g_2 - g_3 L) \text{sat}(\frac{s_2}{\Delta_2}) = \\ &= -k_1 s_1^2 - k_2 s_2^2 - \frac{s_2^2 \beta^2}{2\varepsilon_1} + \eta_1 s_2 + \\ &= s_2 \lambda_2 (g_0 \phi_e - g_2 - g_3 L) \text{sat}(\frac{s_2}{\Delta_2}). \end{aligned} \quad (30)$$

由 $\eta_1 \leq \beta$ , 对上式中的 $-s_2^2\beta^2/2\varepsilon_1 + \eta_1 s_2$ 采用配平方

$$\begin{aligned} & -\frac{s_2^2\beta^2}{2\varepsilon_1} + \eta_1 s_2 \leq \\ & -\left(\frac{s_2\beta}{\sqrt{2\varepsilon_1}} - \frac{\sqrt{\varepsilon_1}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \frac{\varepsilon_1}{2} \leq \frac{\varepsilon_1}{2}. \end{aligned} \quad (31)$$

设 $k_2 > k_1$ , 令

$$\kappa = \frac{\lambda_2(g_0\phi_e - g_2 - g_3L)}{\Delta_2},$$

则

$$\begin{aligned} \dot{V}_{\text{lat1}} & \leq \\ & -k_1 s_1^2 - k_1 s_2^2 - (k_2 - k_1)s_2^2 + \frac{\varepsilon_1}{2} + \kappa|s_2| = \\ & -2k_1 V_{\text{lat1}} - (k_2 - k_1)s_2^2 + \frac{\varepsilon_1}{2} + \kappa|s_2| \leq \\ & -2k_1 V_{\text{lat1}} - \left(\sqrt{k_2 - k_1}|s_2| - \frac{\kappa}{2\sqrt{k_2 - k_1}}\right)^2 + \\ & \frac{\varepsilon_1}{2} - \frac{\kappa^2}{4(k_2 - k_1)} \leq \\ & -2k_1 V_{\text{lat1}} + \frac{\varepsilon_1}{2}, \end{aligned} \quad (32)$$

所以 $\lim_{t \rightarrow \infty} V_{\text{lat1}} \leq \varepsilon_1/4k_1$ , 控制误差 $s_1$ 一致最终有界, 即

$$\lim_{t \rightarrow \infty} s_1 \leq \sqrt{\frac{\varepsilon_1}{2k_1}}. \quad (33)$$

同理, 控制误差 $p_1$ 一致最终有界(证明同上).

## 5 仿真及试验(Simulations and experiments)

为验证本文算法的有效性, 以改造的越野智能车为对象, 开展仿真和试验研究, 控制器参数选取为

$$k_1 = 1, k_2 = 1, l_1 = 1.5, \lambda_1 = 2, \lambda_2 = 2.$$

图3为试验平台及试验越野环境, 试验道路崎岖不平且具有变化的坡度和曲率, 具备越野环境的主要特征. 主要车辆参数为

$$m = 2100 \text{ kg}, I_z = 3059 \text{ kg} \cdot \text{m}^2,$$

$$l_f = 1.1 \text{ m}, l_r = 1.4 \text{ m}, i_o = 3.86,$$

$$C_f = C_r = 37500 \text{ kN/rad}, \eta_T = 0.99,$$

$$r_w = 0.33 \text{ m}, f_r = 0.02, i_g = 0.79.$$



图3 试验平台及越野环境

Fig. 3 Experimental platform and off-road environment

在算法仿真过程中, 仿真路径曲率和期望速度(加速度)如图4所示, 初始横向偏差为0.1 m, 初始方位偏差为0.02 rad, 初始速度偏差为0.5 m/s. 图5为本文反演变结构控制器的仿真结果.

图5(a)为车辆横向偏差响应曲线, 图5(b)为速度偏差响应曲线, 由图5(a)和5(b)可知在路径曲率和牵引加速度变化时, 横向偏差和速度偏差均可渐近收敛于零, 表明该控制器抗干扰能力强, 有很好的鲁棒性. 图5(c)为方位偏差响应曲线, 方位偏差在路径曲率为零时, 可渐近收敛于零; 在路径曲率不为零时, 可有界收敛于一固定值.

在试验过程中, 期望车速设定为15 km/h, 图6给出了某次路径跟踪控制的试验结果. 该段路径为崎岖的上坡路径, 不仅包含了坡度和路径曲率的变化, 还包含有一定的视觉传感器测量误差及噪声, 由图6(a)及图6(c)的横向偏差和方位偏差变化曲线可以看出, 智能车能够在越野环境中保持良好的横向纠偏效果, 从图6(b)的实际车速变化曲线可以看出, 智能车的纵向速度也能达到稳定的控制, 验证了本文转向和驱动协调控制算法的有效性.

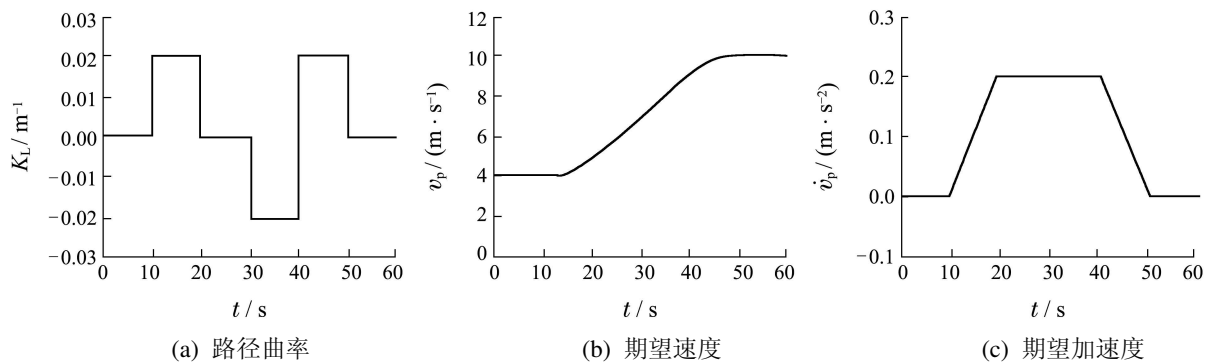


图4 路径曲率和期望速度(加速度)

Fig. 4 Road curvature and desired velocity (acceleration)

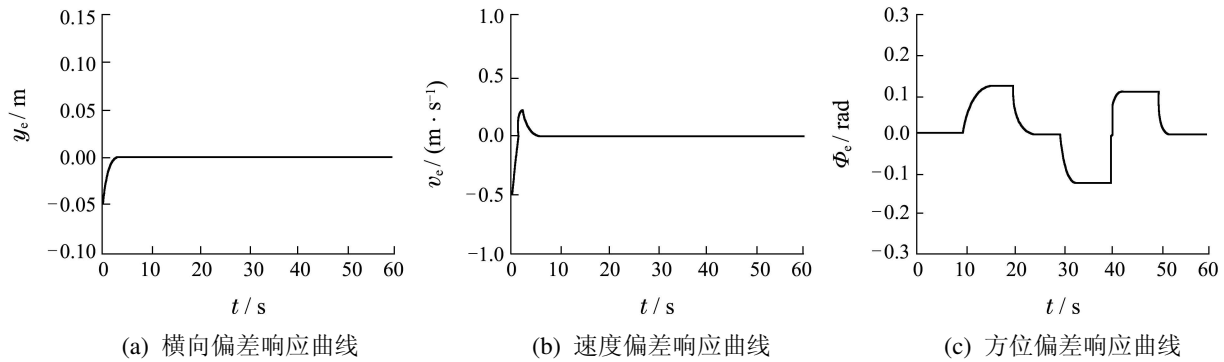


图5 反演变结构控制器仿真结果

Fig. 5 Simulation results of backstepping variable structure controller

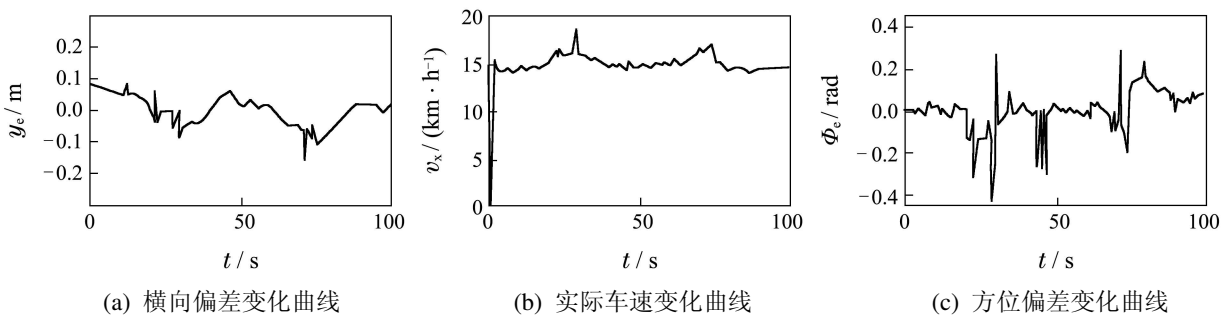


图6 实验结果

Fig. 6 Experimental results

## 6 结论(Conclusions)

本文针对越野智能车横向运动和纵向运动的互相耦合干扰问题,提出了一种协调实现转向及驱动控制的方法.考虑到控制系统模型具有非匹配不确定的特性,采用反演变结构控制方法设计了转向及驱动的协调控制器,从而实现了越野智能车转向和驱动的协调控制.仿真和试验结果表明,该控制器可以控制车辆即有良好的横向纠偏性能,又有良好的纵向速度跟踪性能,能够适应路径坡度和曲率的变化,对由未建模动态和时变参数引起的不确定性有较好的鲁棒性.

## 参考文献(References):

- [1] HUANG J G, KONG B, LI B C, et al. A new method of unstructured road detection based on HSV color space and road features [C] // *Proceedings of the 2007 International Conference on Information Acquisition*. Piscataway, NJ: IEEE, 2007, 2: 596 – 601.
- [2] DUFOURD D, DALGALERRONDO A. An assessment methodology for image processing detectors of unstructured road edges [C] // *Unmanned Ground Vehicle Technology IV*. Orlando, FL: The International Society for Optical Engineering, 2002, 4715: 189 – 200.
- [3] ZHOU S Y, IAGNEMMA K. Self-supervised learning method for unstructured road detection using fuzzy support vector machines [C] // *IEEE/RSSJ the 2010 International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Piscataway, NJ: IEEE, 2010: 1183 – 1189.
- [4] RAJAMSNI R, ZHU C, ALEXANDER L. Lateral control of a backward driven front-steering vehicle [J]. *Control Engineering Practice*, 2003, 11(5): 531 – 540.
- [5] ONIEVA E, NARANJO J E, MILANES V, et al. Automatic lateral control for unmanned vehicles via genetic algorithms [J]. *Applied Soft Computing Journal*, 2011, 11(11): 1303 – 1309.
- [6] ZHANG J, SUDA Y, IWASA T, et al. Vector Liapunov function approach to longitudinal control of vehicles in platoon [J]. *JSME International Journal: Series C*, 2004, 47(2): 653 – 658.
- [7] LEE G D, KIM S W. A longitudinal control system for a platoon of vehicles using a fuzzy-sliding mode algorithm [J]. *Mechatronics*, 2002, 12(1): 97 – 118.
- [8] 李升波, 李克强, 王建强, 等. 非奇异快速的终端滑模控制方法及其跟车控制应用 [J]. *控制理论与应用*, 2010, 27(5): 544 – 550. (LI Shengbo, LI Keqiang, WANG Jianqiang, et al. Nonsingular fast terminal-sliding-mode control method and its application on vehicular following system [J]. *Control Theory & Applications*, 2010, 27(5): 544 – 550.)

## 作者简介:

李琳辉 (1981–), 男, 讲师, 硕士生导师, 主要研究方向为智能车辆, E-mail: ali88555@sohu.com;

郭景华 (1982–), 男, 博士研究生, 主要研究方向为智能车辆, E-mail: guojing0701@live.cn;

张明恒 (1977–), 男, 讲师, 硕士生导师, 主要研究方向为智能车辆, E-mail: zhangmingheng@yahoo.com.cn;

连静 (1980–), 女, 讲师, 硕士生导师, 主要研究方向为汽车电子, E-mail: lianjing80@126.com.