

智能车辆自动超车系统的数据驱动路径跟踪约束控制

许德智[†], 邓 竞, 颜文旭, 纪志成

(江南大学 物联网工程学院, 江苏 无锡 214122)

摘要: 针对智能车辆自动超车系统, 提出了一种新的数据驱动超车路径跟踪约束控制方案, 系统控制方案的设计仅利用自动超车系统的输入/输出数据, 并不包括车辆的模型信息, 所以针对不同的车型均能够实现自动超车的数
据驱动路径跟踪约束控制. 在控制器的设计过程中, 针对控制输入受变化范围和变化速率的限制, 提出了一种新的
动态抗饱和和补偿器来解决饱和问题. 最后给出了数据驱动约束控制与原型无模型自适应控制(model free adaptive
control, MFAC)以及PID控制的仿真结果对比, 结果表明, 本文所提控制方案能够很好的完成自动超车过程的路径跟
踪, 且相比原型MFAC以及PID控制方案, 本文方案具有更小的跟踪误差和更快的响应速度.

关键词: 智能车辆; 数据驱动约束控制; 超车路径; 动态抗饱和和补偿

引用格式: 许德智, 邓竞, 颜文旭, 等. 智能车辆自动超车系统的数据驱动路径跟踪约束控制. 控制理论与应用, 2018, 35(3): 283–290

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Novel data-driven path tracking constrained control for intelligent vehicle autonomous overtaking system

XU De-zhi[†], DENG Jing, YAN Wen-xu, JI Zhi-cheng

(School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi Jiangsu 214122, China)

Abstract: In this paper, a novel data-driven path tracking constrained control scheme is proposed for intelligent vehicle autonomous overtaking system. The design of the proposed control scheme only depends on the input data and output data of the controlled system, and it does not involve any model information of the car. Therefore, the proposed scheme based autonomous overtaking system is applicable to different kinds of cars. In the design procedure of the controller, a novel dynamic anti-windup compensator is used to deal with the change magnitude and rate saturations of autonomous overtaking control input. Finally, a simulation comparison among the proposed scheme, model free adaptive control (MFAC) and proportion integration differentiation (PID) control algorithm is given. It is shown that the proposed scheme can perfectly achieve the path tracking in the autonomous overtaking process. And the proposed scheme has smaller tracking errors and more rapid responses than model free adaptive control and PID control scheme.

Key words: intelligent vehicle; data-driven constrained control; overtaking path; dynamic anti-windup

Citation: XU Dezhi, DENG Jing, YAN Wenxu, et al. Novel data-driven path tracking constrained control for intelligent vehicle autonomous overtaking system. *Control Theory & Applications*, 2018, 35(3): 283–290

1 引言(Introduction)

智能车辆(intelligent vehicle, IV)是现代智能交通系统(intelligent transport system, ITS)的核心, 它集现代传感技术、计算机技术、现代通讯技术、人工智能技术及自动控制技术于一体, 实现对环境感知、路径规划决策和自动驾驶等多种功能. 智能车辆作为典

型的先进技术的结合体, 旨在减少道路交通事故、提高汽车的安全性能, 是现代车辆未来发展的方向.

目前, 汽车工程师们运用发展迅速的信息交互、电子技术、结构优化等高新技术手段来提高汽车质量, 为汽车提供逐步健全的辅助驾驶技术, 推进了汽车智能化的发展进程. 在荷兰举办的2011年度Grand Co-

收稿日期: 2016-07-25; 录用日期: 2017-10-09.

[†]通信作者. E-mail: xudezhi@jiangnan.edu.cn; Tel.: +86 15006176505.

本文责任编辑: 贾英民.

国家自然科学基金项目(61503156), 中央高校科研计划项目(JUSRP11562, JUSRP51406A), 江苏省普通高校研究生实践创新计划项目(SJLX15.0570), 江苏省科技研究项目(BY2015019-24)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (61503156), the Fundamental Research Funds for the Central Universities (JUSRP1-1562, JUSRP51406A), the Practice Innovation Project of Jiangsu Province (SJLX15.0570) and the Science and Technology Funds for Jiangsu China (BY2015019-24).

perative Driving Challenge (GCDC 2011)上出现了智能客运车辆和智能卡车,并通过实验证明了在现有道路上实施自动驾驶技术的可行性和可靠性^[1-2]。此外,欧盟出台了一系列关于智能车辆的资助项目,例如区域智能交通系统(Cybercars)的开发^[3]。这些项目着重于解决智能车辆自动驾驶的控制问题,例如自适应巡航控制,按目标轨迹行驶和自动换道控制等。通过这些项目的实施,推进了道路智能化,解决了城市交通中存在的诸多问题。

对车辆控制的研究一直是智能车辆发展的一个关键点,智能车辆控制策略的制定取决于车载控制器所获得的信息。并且通过车辆间的通信,特别是对于车辆的相对位置、方向、速度信息的获取,可以充分简化车辆自动控制的方案。在过去的几十年里,对于还没有车辆间通信功能的智能汽车,其自动控制就已经引起了人们的关注^[4]。智能车辆的车载传感器,如激光扫描雷达装置^[5],用来测量车辆相对位置和方向等参数,再根据测量得到的参数估计相对速度和加/减速度。在上述情况下,智能车辆可以利用高增益观测器和自适应控制来取代直接测量和车辆间参数的通信,完成自动控制器的设计^[6]。

智能车辆的自动超车系统是其最复杂的自动驾驶系统之一。与车道保持和车道变换不同,自动超车是由3个连续步骤组成的过程,首先是自动换道,然后控制车辆行驶在一个与被超车辆所在车道平行相邻的指定车道内(车道保持),当车辆与被超车之间满足换道的安全距离时^[7],再次通过自动换道操作,回到原先所在车道,这3个步骤必须有计划的协调完成。车道保持系统通过对转向运动的控制,来保证智能车辆可以沿规定的路径行驶。通常,对车辆纵向和横向运动的自动控制是独立进行的,将纵向和横向运动解耦后就可以分别进行控制器的设计^[8]。文献[9]针对车辆不同的横向运动情形,提出了不同的横向控制器,例如线性时不变车道保持控制器。文献[10]提出了一种自适应车道保持控制器,来解决车辆行驶过程中的动态不确定性和参数变化的问题。文献[11]提出了智能车辆纵向和横向的联合控制器,该控制器可以使智能车辆行驶轨迹渐近稳定的趋向目标轨迹,且该过程的实现不需要测量车辆的横向速度和精确的车辆参数。在车道变换的过程中,智能车辆车载控制器产生目标轨迹并控制车辆自动完成对目标轨迹的跟踪^[12]。基于曲线生成的类型,将现有的车辆换道运动轨迹分类成基于圆弧的换道轨迹,基于样条曲线的换道轨迹,基于多项式的换道轨迹^[13],这些轨迹在一般情况下,都是关于时间的函数。在自动换道控制器的设计过程中,已经采用了非线性控制技术中的滑模控制和鲁棒切换控制^[14-15]。

在自动超车过程中,通过车载传感器来判断车辆

之间的相对位置和方向,来设定控制车辆的转向命令,进而完成超车动作。文献[16]中,通过提出一个非线性约束优化问题,并采用多项式函数来得到优化问题的解决方案,设计了自动超车过程的最优轨迹,确定了车道变换的最佳时间和距离。文献[17]中提出了一种基于Rendezvous-Guidance原则的在线时间最优轨迹规划算法,并应用于赶超车速较慢的车辆。文献[18]中提出了一种具有两层结构的自动超车控制器,第1层由两个模糊转向控制器构成,来控制路径跟踪和车道变化,第2层用来评估超车的必要性和可能性,并控制切换第一层的两个控制器。文献[19]运用了模型预测控制,提出了一种解决跟踪问题的自动超车控制方法。文献[20]提出了一种基于模糊逻辑控制器的自动超车系统,该系统通过视觉系统,差分全球定位系统(differential global position system, DGPS)和惯性测量单元来获得参数信息,并且在不同的智能车辆上获得了成功的运用。然而,当前市场上存在多种车型,车辆参数与尺寸各不相同,其性能当然也各有特点。于是针对各种不同的车型,上述各超车控制器的参数则需要重新选取,模糊控制逻辑规则表需要重新制定,模型预测控制需要重新计算。所以,以上控制方法所建立的自动超车系统的可移植性较差,难以实现“即插即用”。

数据驱动控制方法在故障诊断、规划决策、调度分配等领域获得了成功应用^[21-24],本文针对自动超车系统提出了一种新的数据驱动约束控制方案,该控制方案由约束控制算法、伪偏导数(pseudo partial derivative, PPD)参数估计算法和参数重置算法构成。系统控制方案的设计仅利用自动超车系统的输入/输出数据,并不包括车辆的模型信息,所以针对不同的车型均能够实现自动超车的数据驱动约束控制。针对控制输入受变化范围和变化速率的限制,提出一种新的动态抗饱和补偿器来解决饱和问题。仿真结果验证了所提控制方案的有效性和优越性。

2 自动超车过程问题描述(Problem formulation for autonomous overtaking process)

2.1 超车必要性和可能性(Necessity and possibility of overtaking)

为了确保超车动作能够安全的完成,定义如下的一组条件:

- 1) 受控超车车辆正沿直线行驶;
- 2) 被超车辆与受控车辆在同一车道行驶;
- 3) 受控超车车辆的速度能够高于被超车辆的速度;
- 4) 左车道无障碍车辆;
- 5) 车道足够长,可以在当前速度下完成超车动作。当车辆环境符合以上条件时,则超车的必要性和

可能性得到保证。

2.2 自动超车过程(Autonomous overtaking process)

超车过程主要包括以下几个方面, 受控车首先探测周围环境存在的车辆(车辆探测), 然后采用合适的动态轨迹规划算法(路径规划), 并使受控车从原车道沿着规划的轨迹到达相邻车道, 加速超越被超车, 最后通过并道操作返回原先车道(跟踪控制)。在这样复杂的超车过程中, 需要考虑受控车的横向控制和纵向控制以及换道与超车过程的安全性, 平稳性和快速性。

假设超车动作仅发生在两车之间, 则具体可以划分为3个阶段: 阶段1, 车辆切换到相邻的车道; 阶段2, 到达相邻车道后, 以大于被超车的车速行驶, 直到超越被超车; 阶段3, 从相邻车道再次进行换道操作返回到原先车道。以上3个阶段简称为换道、超越和并道。超车各阶段如图1所示, 其中 d 是车辆换道的最小安全距离。

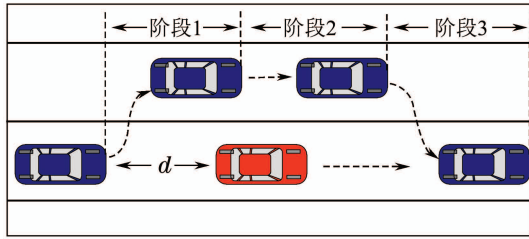


图1 超车过程示意图

Fig. 1 Diagram of overtaking process

2.3 路径跟踪控制问题(Control problem of path tracking)

四轮车运动学模型^[25,28]如下:

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos \theta, \\ \dot{y} = v \sin \theta, \\ \dot{\theta} = \frac{v \tan \beta}{L}, \end{cases} \quad (1)$$

其中: θ 是车身角, β 是前轮转角, v 是车速, L 是前后轴距, (x, y) 为后车轴中点的坐标。模型示意图如图2所示。

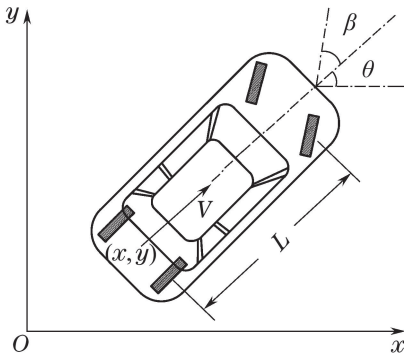


图2 运动学模型

Fig. 2 Kinematic model

在车辆超车过程中, 运动轨迹与车身角相关, 车载方向盘的转动可以产生前轮转角, 通过控制前轮转角来控制车身角, 进而可以控制车辆的运动轨迹。

在实际应用中, 运动学模型(1)通常被转换成如下离散化模型:

$$\begin{cases} x(k+1) = x(k) + Tv \cos(\theta(k)), \\ y(k+1) = y(k) + Tv \sin(\theta(k)), \\ \theta(k+1) = \theta(k) + \frac{Tv \tan(\beta(k))}{L}, \end{cases} \quad (2)$$

其中 T 为采样时间。

除此之外, 车辆前轮转角的变化不能超出一定的范围, 其变换速率也有一定的限制, 所以就有如下约束:

$$\beta_{\min} \leq \beta(k) \leq \beta_{\max}, \quad \dot{\beta}_{\min} \leq \dot{\beta}(k) \leq \dot{\beta}_{\max}. \quad (3)$$

本文采用多项式运动轨迹规划方法, 该方法只需得知受控车的初始状态和最终状态即可, 正是因为选用多项式作为换道轨迹的函数基, 函数本身以及函数的一阶导数和二阶导数都是连续的, 所以能够很好地拟合动态超车路径。

为了减少超车动态路线产生的工作量, 并验证本文所提控制算法的有效性, 超车过程的路线可以由如下的三次多项式定义:

$$y = Ax^3 + Bx^2, \quad (4)$$

其中:

$$\begin{aligned} A &= \frac{x_t \tan \theta^* - 2y_t}{x_t^3}, \\ B &= \frac{3y_t - x_t \tan \theta^*}{x_t^2}. \end{aligned} \quad (5)$$

可知超车路线由车辆当前位置 (x, y) 、动态目标位置 (x_t, y_t) 以及两个位置的车身角 θ 和 θ^* 动态的决定。

3 数据驱动约束控制方案(Data-driven constrained control scheme)

在这一章节, 针对自动超车系统提出了一种新的数据驱动约束控制方案。该方案包括: 1) PPD参数估计算法; 2) 参数重置算法; 3) 抗饱和数据驱动约束控制算法。

3.1 PPD参数估计算法(PPD parameter estimation algorithm)

首先, 将自动超车非线性系统转换成如下的动态线性化数据模型:

$$\Delta\theta(k+1) = \varphi_1(k)\Delta\theta(k) + \varphi_2(k)\Delta\beta(k), \quad (6)$$

其中: θ 和 β 分别表示车身角和前轮转角, φ_1 和 φ_2 是系统的两个伪偏导数, $\Delta\theta(k+1) = \theta(k+1) - \theta(k)$, $\Delta\beta(k) = \beta(k) - \beta(k-1)$ 。模型(6)可以转换为如下形式:

$$\theta(k+1) = \theta(k) + \phi^T(k)\eta(k), \quad (7)$$

其中:

$$\phi(k) = [\Delta\theta(k) \ \Delta\beta(k)]^T, \ \eta(k) = [\varphi_1(k) \ \varphi_2(k)]^T.$$

本文所提出的参数识别观测器具有如下结构:

$$\hat{\theta}(k+1) = \hat{\theta}(k) + \phi^T(k)\hat{\eta}(k) + Ke_o(k), \quad (8)$$

其中: $e_o(k) = \theta(k) - \hat{\theta}(k)$ 是输出的估计误差, $\hat{\eta}(k) = [\hat{\varphi}_1(k) \ \hat{\varphi}_2(k)]^T$, 这里要求系数 K 满足关系式 $F = 1 - K$, 且位于单位圆中.

将式(7)与式(8)联立, 得到输出的动态估计误差

$$e_o(k+1) = \phi^T(k)\tilde{\eta}(k) + Fe_o(k), \quad (9)$$

其中 $\tilde{\eta}(k) = \eta(k) - \hat{\eta}(k)$ 表示参数估计误差. 自适应参数估计算法如下:

$$\hat{\eta}(k+1) = \hat{\eta}(k) + \phi(k)\Gamma(k)(e_o(k+1) - Fe_o(k)), \quad (10)$$

其中: $\hat{\eta}(k)$ 表示伪偏导数的估计值, 系数 $\Gamma(k)$ 满足如下等式:

$$\Gamma(k) = 2(\|\phi(k)\|^2 + \mu)^{-1}, \quad (11)$$

其中 μ 是一个正常数, 因此, $\Gamma(k)$ 对于任意的 k 都是正定的. 注意到, 在假设 $\|\phi(k)\| \leq \gamma$ 的前提下, 系数 $\Gamma(k)$ 是有下界的, 即

$$\|\Gamma(k)\| \geq \frac{2}{\gamma^2 + \mu} = \tau > 0.$$

由式(9)–(10)和条件 $\eta(k+1) \approx \eta(k)$, 可以得到动态估计误差如下:

$$\begin{aligned} e_o(k+1) &= \phi^T(k)\tilde{\eta}(k) + Fe_o(k), \\ \tilde{\eta}(k+1) &= H\tilde{\eta}(k), \end{aligned} \quad (12)$$

其中参数 H 定义如下式:

$$H = I_2 - \phi(k)\Gamma(k)\phi^T(k),$$

I_2 表示 (2×2) 的单位矩阵.

定理 1 系统(12)的平衡方程 $[e_o \ \tilde{\eta}^T]^T = [0 \ 0_{2 \times 1}^T]^T$ 具有全局一致稳定性, 而且, 参数估计误差 $e_o(k)$ 渐近收敛于 0. 证明过程参考文献[26].

为了使参数估计算法(10)具有良好的跟踪时变参数的能力, 考虑如下参数重置算法:

$$\begin{aligned} [\hat{\varphi}_1(k) \ \hat{\varphi}_2(k)]^T &= [\hat{\varphi}_1(1) \ \hat{\varphi}_2(1)]^T, \\ [\hat{\varphi}_1(k) \ \hat{\varphi}_2(k)] \begin{bmatrix} \hat{\varphi}_1(k) \\ \hat{\varphi}_2(k) \end{bmatrix} &\leq \varsigma, \end{aligned} \quad (13)$$

$$\text{sgn}(\hat{\varphi}_2(k)) \neq \text{sgn}(\hat{\varphi}_2(1)),$$

其中: ς 是一个很小的正常数, $\hat{\varphi}_1(1)$, $\hat{\varphi}_2(1)$ 分别是 $\hat{\varphi}_1(k)$ 和 $\hat{\varphi}_2(k)$ 的初始值.

3.2 约束控制算法(Constrained control algorithm)

在参数识别观测器(8)的基础上, 数据驱动未约束

控制算法如下:

$$\begin{aligned} \beta_0(k) &= \\ \beta(k-1) &+ \\ \hat{\varphi}_2(k)(\theta^*(k+1) - \hat{\theta}(k) - Ke_o(k) - \hat{\varphi}_1(k)\Delta\theta(k)) &, \\ \hat{\varphi}_2^2(k) + \sigma & \end{aligned} \quad (14)$$

其中: $\theta^*(k)$ 表示目标车身角, σ 是一个给定的小正数.

考虑前轮转角的约束条件(3), 将自适应约束控制器描述如下:

$$\begin{aligned} \beta(t) &= \text{sat}\{(\beta(k-1) + \text{sat}\{(\beta_0(k) - \beta(k-1)), \\ T\dot{\beta}_{\min}, T\dot{\beta}_{\max}\}), \beta_{\min}, \beta_{\max}\}, \end{aligned} \quad (15)$$

其中: T 表示采样时间, 函数 $\text{sat}(\cdot)$ 定义如下:

$$\text{sat}(a, b, c) = \begin{cases} b, & a \leq b, \\ a, & b < a < c, \\ c, & a \geq c. \end{cases}$$

由于动态约束存在于闭环控制系统中, 所以设计了一个抗饱和补偿器来适应目标车身角 $\theta^*(k)$. 补偿信号 $\rho(k)$ 如下:

$$\rho(k+1) = \kappa\rho(k) + \hat{\varphi}_2(k)(\beta_0(k) - \beta(k)), \quad (16)$$

其中 κ 位于单位圆中. 于是, 考虑补偿信号后, 控制器(14)重新描述如下:

$$\begin{aligned} \beta_0(k) &= \beta(k-1) + \frac{\hat{\varphi}_2(k)}{\hat{\varphi}_2^2(k) + \sigma}(\theta^*(k+1) - \\ \hat{\theta}(k) - \kappa\rho(k) - Ke_o(k) - & \\ \hat{\varphi}_1(k)\Delta\theta(k)). & \end{aligned} \quad (17)$$

观测器的跟踪误差定义为 $e(k) = \theta^*(k) - \hat{\theta}(k) - \rho(k)$, 考虑动态约束条件(3)和补偿信号(16), 可得

$$\begin{aligned} e(k+1) &= \\ \theta^*(k+1) - \hat{\theta}(k+1) - \rho(k+1) &= \\ \theta^*(k+1) - \hat{\theta}(k) - \hat{\varphi}_1(k)\Delta\theta(k) - \hat{\varphi}_2(k)\Delta\beta(k) - & \\ Ke_o(k) - \kappa\rho(k) - \hat{\varphi}_2(k)(\beta_0(k) - \beta(k)) = & \\ \theta^*(k+1) - \hat{\theta}(k) - \kappa\rho(k) - \hat{\varphi}_1(k)\Delta\theta(k) - & \\ Ke_o(k)\hat{\varphi}_2(k)(\beta_0(k) - \beta(k-1)). & \end{aligned} \quad (18)$$

将式(17)代入式(18), 可得

$$\begin{aligned} e(k+1) &= \frac{\sigma}{\hat{\varphi}_2^2(k) + \sigma} \times (\theta^*(k+1) - \hat{\theta}(k) - \\ \kappa\rho(k) - \hat{\varphi}_1(k)\Delta\theta(k) - Ke_o(k)). & \end{aligned} \quad (19)$$

定理 2 给定 $|\theta^*(k) - \theta^*(k-1)| \leq \Delta\theta^*$, 结合数据驱动约束控制算法(15)和(17), 可得对于任意的 k , 闭环观测器的误差(19)是一致最终有界的(uniform-

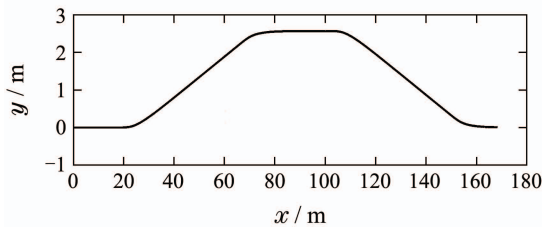


图 5 超车路径图

Fig. 5 The diagram of overtaking path

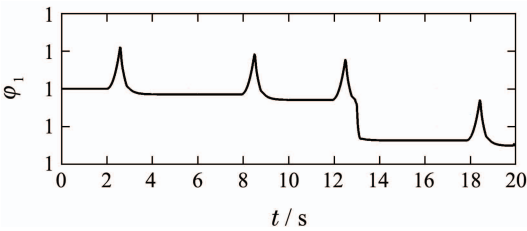


图 10 PPD1伪偏导数 φ_1

Fig. 10 Pseudo partial derivative φ_1 of PPD1

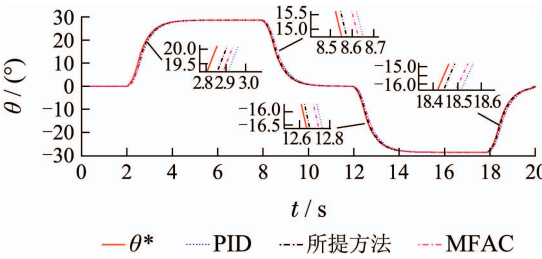


图 6 超车过程车身角

Fig. 6 The orientation angle of the car of overtaking process

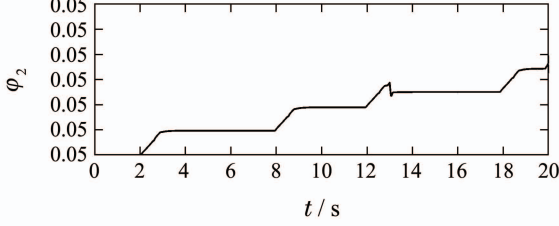


图 11 PPD2伪偏导数 φ_2

Fig. 11 Pseudo partial derivative φ_2 of PPD2

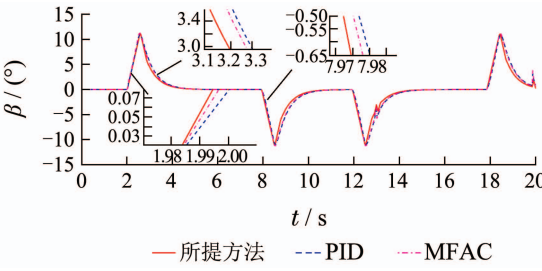


图 7 超车过程前轮转角

Fig. 7 The steering angle of overtaking process

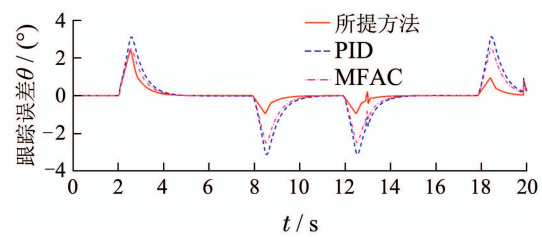


图 8 车身角跟踪误差

Fig. 8 Tracking error of the orientation angle of the car

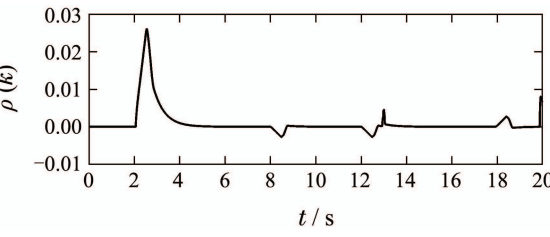


图 9 补偿信号

Fig. 9 Compensating signal

图5是奥迪A6L的整个超车过程路径图. 由图6, 可以观察到在自动超车过程中, 3种控制方案均可以实现对目标车身角的跟踪. 从局部放大图和车身角跟踪误差图8中可以看到, 数据驱动约束控制方案对车身角的跟踪误差比MFAC方案和PID控制方案均小, 说明本文所提算法具有很好的跟踪效果. 由图7, 可以看出3种控制方案的前轮转角与超车过程中的车身角相关联一致, 且前轮转角均无强烈的来回摆动, 保证了超车过程的平稳性和安全性. 由图7局部放大图, 可以看出MFAC方案和PID控制方案的前轮转角均滞后于数据驱动约束控制方案, 说明本文所提算法具有更快的响应速度. 抗饱和补偿信号如图9所示, 在整个跟踪过程中, 自整定PPD参数如图10–11所示.

4.2 现代伊兰特的自动超车仿真(Simulation results of Hyundai Elantra)

现代伊兰特的基本参数信息见表2. 仿真结果如图12–18所示. 由仿真结果得出本文所提数据驱动约束控制方案明显优于MFAC方案和PID控制方案, 具有更小的跟踪误差和更快的响应速度.

表 2 现代伊兰特基本参数

Table 2 Basic parameters of Hyundai Elantra

参数 / m	数值
车长 / m	4.545
车宽 / m	1.725
前后轮轴距 / m	2.610
最大前轮转角 / (°)	42.00

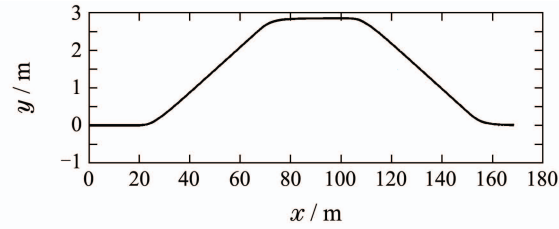


图 12 超车路径图

Fig. 12 The diagram of overtaking path

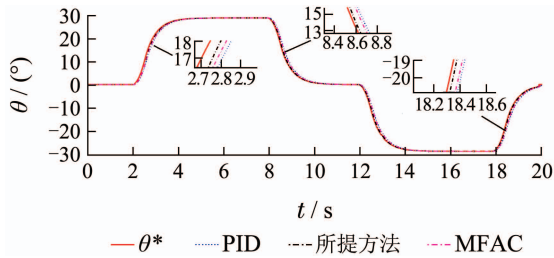


图 13 超车过程车身角

Fig. 13 The orientation angle of the car of overtaking process

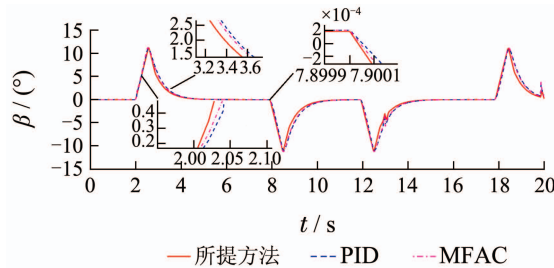


图 14 超车过程前轮转角

Fig. 14 The steering angle of overtaking process

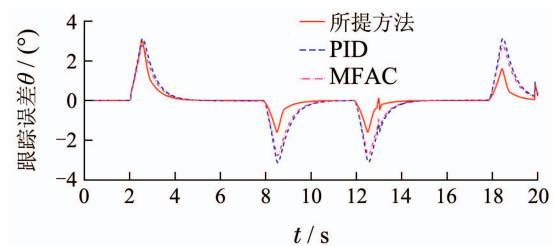


图 15 车身角跟踪误差

Fig. 15 Tracking error of the orientation angle of the car

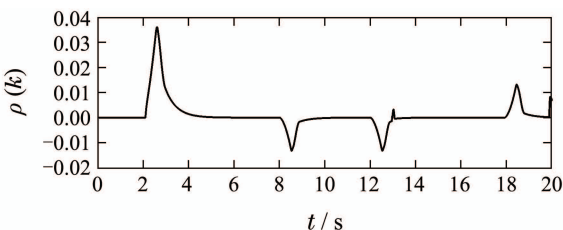
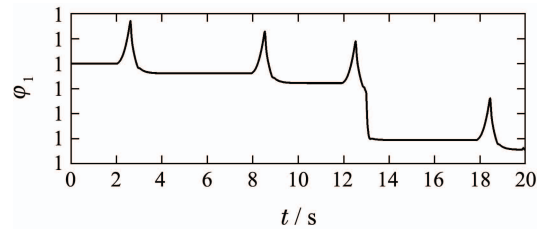
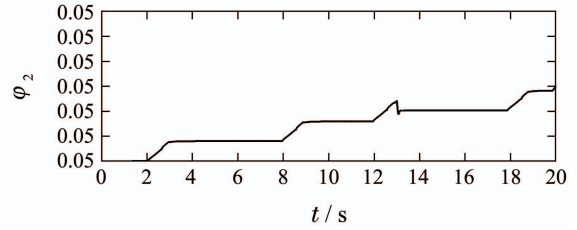


图 16 补偿信号

Fig. 16 Compensating signal

图 17 PPD1伪偏导数 φ_1 Fig. 17 Pseudo partial derivative φ_1 of PPD1图 18 PPD2伪偏导数 φ_2 Fig. 18 Pseudo partial derivative φ_2 of PPD2

5 结论(Conclusions)

本文针对智能车辆自动超车系统,设计了一种新的数据驱动约束控制方案,该方案仅利用自动超车系统的输入/输出数据,并不包括车辆的模型信息.提出了一种基于抗饱和补偿器的动态约束单元,能够更好的适应目标车身角的变化.所提出的约束控制算法具有实时实现的优点,且不需要任何迭代计算,可以运用在非线性系统的显式分析模型很难建立的情况下.两种不同车型的仿真结果表明基于本文控制方案的自动超车系统具有良好的可移植性,同时验证了本文控制方案的有效性和优越性.

参考文献(References):

- [1] NUMEN E, KWAKKERNAT M, PLOEG J, et al. Cooperative competition for future mobility [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2012, 13(3): 1018 – 1025.
- [2] LINDSROM K, SJOBERG K, HOLMBERG U, et al. A modular CACC system integration and design [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2012, 13(3): 1050 – 1061.
- [3] FRAICHARD T. CyberCar: L'alternative à la voiture particulière [J]. *Navigation*, 2009, 53(209): 53 – 75.
- [4] SHEIKHOESLAM S, DESOER A. Longitudinal control of a platoon of vehicles with no communication of lead vehicle information: a system level study [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 1993, 42(4): 546 – 554.
- [5] WHILE R, TOMIZUKA M. Autonomous following lateral control of heavy vehicles using laser scanning radar [C] // *Proceedings of the 2001 American Control Conference*. Arlington: IEEE, 2001: 2333 – 2337.
- [6] SESHAGIRI S, KHALIL H. Longitudinal adaptive control of a platoon of vehicles [C] // *Proceedings of the 1999 American Control Conference*. San Diego: IEEE, 1999: 3681 – 3685.
- [7] CHEN Xiufeng, YANG Wansan, QU Dayi. Research on lane - changing safety of vehicle based on minimum safety spacing [J].

- Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2013, 38(3): 42 – 46.
(陈秀锋, 杨万三, 曲大义. 基于最小安全距离的车辆换道安全研究 [J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2013, 38(3): 42 – 46.)
- [8] LIM H M, HEDRICK J K. Lateral and longitudinal vehicle control coupling for automated vehicle operation [C] // *Proceedings of the 1999 American Control Conference*. San Diego: IEEE, 1999: 3676 – 3680.
- [9] WU S, CHIANG H, PERNG J, et al. The automated lane keeping design for an intelligent vehicle [C] // *Proceedings. Intelligent Vehicles Symposium*. Las Vegas: IEEE, 2005: 508 – 513.
- [10] OYA M, WANG Q. Adaptive lane keeping controller for four-wheel-steering vehicles [C] // *Control and Automation Conference*. Guangzhou: IEEE, 2007: 1942 – 1947.
- [11] LEE H, LOVE D W, TOMIZUKA M. Longitudinal maneuvering control for automated highway systems based on a magnetic reference/sensing system [C] // *American Control Conference*. Seattle: IEEE, 1995: 150 – 154.
- [12] YOU Feng. *Study on autonomous lane changing and autonomous overtaking control method of intelligent vehicle* [D]. Jilin: Jilin University, 2005.
(游峰. 智能车辆自动换道与自动超车控制方法的研究 [D]. 吉林: 吉林大学, 2005.)
- [13] PAPADIMITRIOU I, TOMIZUKA M. Fast lane changing computations using polynomials [C] // *American Control Conference*. Denver: IEEE, 2003: 48 – 53.
- [14] BRIEN R T, IGLESIAS P A, URBAN T J. Vehicle lateral control for automated highway systems [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 1996, 4(3): 266 – 273.
- [15] HATIPOGLU C, OZGUNER U, REDMILL K. Automated lane change controller design [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2003, 4(1): 13 – 22.
- [16] SHAMIR T. How should an autonomous vehicle overtake a slower moving vehicle: design and analysis of an optimal trajectory [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2004, 49(4): 607 – 610.
- [17] GHUMMAN U, KUNWAR F, BENHABIB B. Guidance-based online motion planning for autonomous highway overtaking [J]. *International Journal on Smart Sensing & Intelligent Systems*, 2008, 1(2): 549 – 571.
- [18] NARANJO J, GONZALES C, GARCIA R, et al. Lane-change fuzzy control in autonomous vehicles for the overtaking maneuver [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2008, 9(3): 438 – 450.
- [19] WANG F, YANG M, YANG R. Conflict-probability-estimation-based overtaking for intelligent vehicles [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2009, 10(2): 366 – 370.
- [20] MILANES V, FLORCA D, VILLAGRA J, et al. Intelligent automatic overtaking system using vision for vehicle detection [J]. *Expert Systems with Applications*, 2012, 39(3): 3362 – 3373.
- [21] CAO Rongmin, ZHOU Huixing, HOU Zhongsheng. Data-driven model-free adaptive precision control for linear servo system [J]. *Control Theory & Applications*, 2012, 29(3): 310 – 316.
(曹荣敏, 周惠兴, 侯忠生. 数据驱动的无模型自适应直线伺服系统精密控制和实现 [J]. 控制理论与应用, 2012, 29(3): 310 – 316.)
- [22] HOU Zhongsheng. On model-free adaptive control: the state of the art and perspective [J]. *Control Theory & Applications*, 2006, 23(4): 586 – 592.
(侯忠生. 无模型自适应控制的现状与展望 [J]. 控制理论与应用, 2006, 23(4): 586 – 592.)
- [23] XU D, JIANG B, SHI P. Adaptive observer based data-driven control for nonlinear discrete-time processes [J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2014, 11(4): 1037 – 1045.
- [24] XU D, JIANG B, SHI P. A novel model-free adaptive control design for multivariable industrial processes [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, 61(11): 6391 – 6398.
- [25] KONG J, PFEIFFER M, SCHILDBACH G. Kinematic and dynamic vehicle models for autonomous driving control design [C] // *Intelligent Vehicles Symposium*. Seoul: IEEE, 2015: 1094 – 1099.
- [26] XU D, JIANG B, LIU F. An improved data driven model free adaptive constrained control for a solid oxide fuel cell [J]. *IET Control Theory & Applications*, 2016, 10(12): 1412 – 1419.
- [27] HOU Z, JIN S. Data driven model-free adaptive control for a class of MIMO nonlinear discrete-time systems [J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2011, 22(12): 2173 – 2188.
- [28] YU Shaowei. Research on intelligent vehicle autonomous overtaking control and simulation [J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(8): 2365 – 2368.
(于少伟. 智能车辆自动超车控制仿真研究 [J]. 系统仿真学报, 2009, 21(8): 2365 – 2368.)

作者简介:

许德智 (1985–), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为数据驱动控制及其应用、故障诊断与容错控制等, E-mail: xudezhi@jiangnan.edu.cn;

邓 竞 (1992–), 男, 硕士研究生, 研究方向为数据驱动控制, E-mail: dengjing1217@126.com;

颜文旭 (1971–), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电力电子与电力传动、新能源电动汽车等, E-mail: ywx03@163.com;

纪志成 (1959–), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力电子与电力传动等, E-mail: zcji@jiangnan.edu.cn.