

12-12-2019

Cooperative Control Technology of Networked Autonomous Driving Vehicle Based on Delay Compensation

Zhengze Zhu

1. Hubei University of Automotive Technology, Research Center of Active Safety and Intelligent Driving, Shiyan 442000, China; ;

Haiying Zhou

1. Hubei University of Automotive Technology, Research Center of Active Safety and Intelligent Driving, Shiyan 442000, China; ;

Yongzhi Fu

1. Hubei University of Automotive Technology, Research Center of Active Safety and Intelligent Driving, Shiyan 442000, China; ;

Zhou Kui

1. Hubei University of Automotive Technology, Research Center of Active Safety and Intelligent Driving, Shiyan 442000, China; ;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Cooperative Control Technology of Networked Autonomous Driving Vehicle Based on Delay Compensation

Abstract

Abstract: In view of the disordered and lost packets problems in intelligent transportation system, this paper studies the cooperative control technology of autonomous driving vehicle and *proposes an autonomous platoon-driving model based on Zero Order Hold (ZOH) information processing mechanism. A dedicated nonlinear state estimation algorithm is used to compensate for the delay so the platoon-driving model remains valid under the complex vehicle driving environments.* A real autonomous driving platoon is tested in a vehicle proving ground for cooperative driving. The analysis of the experimental data and simulation results based on the real networked autonomous driving system verified the stability, validity and practicability of the platoon-driving model.

Keywords

autonomous driving platoon, cooperative control technology, Zero Order Hold (ZOH), communication delay error compensation

Authors

Zhengze Zhu, Haiying Zhou, Yongzhi Fu, Zhou Kui, Sishan Wang, jiyuan Gong, Sihao Deng, and Kunming Hou

Recommended Citation

Zhu Zhengze, Zhou Haiying, Fu Yongzhi, Zhou Kui, Wang Sishan, Gong jiyuan, Deng Sihao, Hou Kunming. Cooperative Control Technology of Networked Autonomous Driving Vehicle Based on Delay Compensation[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(7): 1448-1459.

基于延迟补偿的网联式自动驾驶车辆协同控制

朱政泽¹, 周海鹰^{1*}, 付勇智¹, 周奎¹, 王思山¹, 龚家元¹, 邓思豪², 侯昆明³

(1. 湖北汽车工业学院, 汽车主动安全与智能驾驶研究所, 湖北 十堰 442000; 2. 法国贝尔福蒙贝利亚技术大学, ICB 国家实验室, 法国贝尔福 90010; 3. 法国克莱蒙奥弗涅大学, LIMOS 国家实验室, 法国克莱蒙费朗 63170)

摘要: 针对智能交通领域多车协同驾驶中存在的通信信息乱序、丢包问题, 研究网联式自动驾驶车辆协同控制技术, 建立基于零阶保持(Zero Order Hold, ZOH)信息处理机制的自动驾驶车队控制模型, 通过非线性系统状态估计算法进行延迟补偿, 使得车队控制模型在复杂汽车行驶环境下保持有效。通过构建由多辆实车组成的网联式自动驾驶车队, 在封闭道路环境下进行协同驾驶编队测试, 结合网络传输及传感器数据进行模型仿真, 验证了模型在实车编队环境下的稳定性、有效性和实用性。

关键词: 自动驾驶车队; 协同控制技术; 零阶保持; 通信延迟误差补偿

中图分类号: TP393;TB114.2 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2019) 07-1448-12

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.17-0240

Cooperative Control Technology of Networked Autonomous Driving Vehicle Based on Delay Compensation

Zhu Zhengze¹, Zhou Haiying^{1*}, Fu Yongzhi¹, Zhou Kui¹, Wang Sishan¹, Gong Jiayuan¹, Deng Sihao², Hou Kunming³

(1. Hubei University of Automotive Technology, Research Center of Active Safety and Intelligent Driving, Shiyan 442000, China; 2. ICB Laboratory, UMR 6303 CNRS, Univ. Bourgogne Franche-Comté, UTBM, F-90010 Belfort, France; 3. LIMOS Laboratory, UMR 6158 CNRS, University of Clermont Auvergne, 63170, Clermont-Ferrand, France)

Abstract: In view of the disordered and lost packets problems in intelligent transportation system, this paper studies the cooperative control technology of autonomous driving vehicle and proposes an autonomous platoon-driving model based on Zero Order Hold (ZOH) information processing mechanism. A dedicated nonlinear state estimation algorithm is used to compensate for the delay so the platoon-driving model remains valid under the complex vehicle driving environments. A real autonomous driving platoon is tested in a vehicle proving ground for cooperative driving. The analysis of the experimental data and simulation results based on the real networked autonomous driving system verified the stability, validity and practicability of the platoon-driving model.

Keywords: autonomous driving platoon; cooperative control technology; Zero Order Hold (ZOH); communication delay error compensation

引言

车辆编队行驶可以有效发挥道路承载能力, 协

同控制技术可以显著降低碰撞风险。目前车辆编队行驶协同控制在工程应用研究方面以自适应巡航控制(Adaptive Cruise Control, ACC)、协同式自适应巡航控制 (Cooperative Adaptive Cruise Control, CACC)、自主队列行驶(Autonomous Platooning, AP)3 种技术应用较为成熟。

国内外学者以协同控制中的车队控制技术^[1-7]、



收稿日期: 2017-05-19 修回日期: 2017-07-09;
基金项目: 湖北省自然科学基金(2015CFB686),
湖北省高等学校优秀中青年科技创新团队计划
(T201610), 湖北省科技支撑计划项目-对外合作类
(N°2017AHB048);
作者简介: 朱政泽(1988-), 男, 湖北, 硕士, 研究方向为智能驾驶。

<http://www.china-simulation.com>

• 1448 •

车队稳定性^[1-4]、外部通信因素对车队控制性能影响^[2,7-13]的研究居多。Huppé 等^[1]讨论了车队在正常道路及雪路上的线性二次型调节器 (Linear Quadratic Regulator, LQR) 控制问题, 并证明 LQR 控制器的收敛性, 然而研究缺少车队在急加速/减速等特殊工况下的控制策略, 特别是针对雨雪雾等传感器失效的情况, LQR 控制器缺乏有效性。Ge 等^[2]根据加速度反馈设计了 CCC 车队控制器来辅助驾驶员操作, 并验证了在社会车辆混杂情况下, 采用 CCC 控制器可有效缩短车队驾驶员的反应时间; 但研究没有对不同工况下的车辆控制方法进行比较, 且设定的短距离无线通信环境过于理想化 (200 m 内能及时收到前方四辆车加速度变化信息)。Ghasemi 等^[3]针对异构车辆组成车队的情形进行研究, 提出了双向 ACC 控制器, 通过偏微分方程近似法研究车辆稳定性判据; 然而双向 ACC 控制器超调收敛时间较长 (>60 s), 控制对象仅针对一维队列且车距必须固定, 因此在实际应用中有一定局限性。由此可见, 已有的车队控制技术面对不同工况的适用性问题, 尚值得进一步深入研究。

部分学者将无线通信的信道不稳定性的特征引入至车队控制技术研究。Ghasemi 等^[15]研究通信时延对车队稳定性的影响, 指出车队控制模型在实际设计和应用中必须考虑通信延迟影响。Peter 等^[16]在分析网络化车队控制时, 发现通信丢包事件会恶化控制效果, 导致系统不稳定。Xiao 等^[17]指出无线通信系统因为丢包、传输时间和路由选择用时等原因, 时常会存在通信延迟现象; 因此在实际应用中, 为达到车队稳定行驶的目的, 必须考虑通信延迟对车队控制模型的影响及补偿策略。

综上所述, 实车运行环境因为有更为复杂苛刻的网络场景伴随着车辆运动, 研究自动驾驶车辆协同控制技术, 必须综合考虑汽车行驶工况与通信网络特点。论文通过分析 Li 等^[18]提出的车辆通信网络化队列结构, 研究在网络不确定性下 (例如存在通信延迟、丢包、乱序等现象) 的车队控制技术及其稳定性问题, 设计零阶保持 (Zero Order Hold, ZOH)

网络通信处理器, 提出延迟补偿策略及其控制律, 结合实际网络传输及传感器实验数据进行仿真验证。最终, 在封闭道路环境下进行车辆编队行驶的实车测试, 验证车队控制模型的有效性。

1 网联式自动驾驶车队建模

在道路交通中, 车辆以编队形式行驶将使得车流量增大 2~3 倍^[19], 车队车辆间通过传感器和无线网络实现信息交互, 通过反馈控制实现车队动态连接与队形协调。目前, 主要有 2 种车队构造方式: 一种是自适应巡航控制方式 (ACC), 车辆仅靠车载传感器获取车辆自身及周围车辆的行驶信息和道路周边交通状况; 一种是协同式自适应巡航控制方式 (CACC), 此种方式允许车队车辆与其它车辆、路边的监测装置、车行道控制器进行通信交互。协同式自适应巡航控制方式 (CACC) 采用车辆间无线通信技术, 使汽车不仅能够收到相邻车辆的运动信息, 还能收到头车的运动信息, 其通信网络架构如图 1 所示。针对网络通信环境的复杂性及变化性, 论文主要研究在图 1 所示通信架构下的车队控制问题。

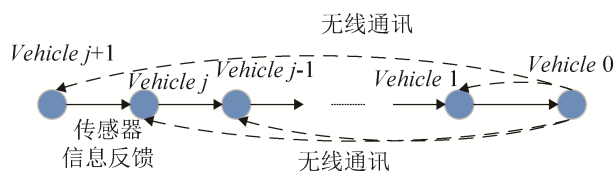


图 1 基于无线连接的车辆通信架构
Fig. 1 Vehicle communication architecture based on wireless technology

1.1 自动驾驶车队控制模型

如图 2 所示, 同一车道线内 $Vehicle 0, Vehicle 1, \dots, Vehicle r$ 组成一列车队。在 $t=0$ 时刻, 设队列中 $Vehicle r$ (尾车) 后保险杠中点垂直投影在水平横轴上 O 点, 令 O 点为整个车队起点。设 t 时刻, 第 j 辆车后保险杠中点垂直投影在水平横轴上的点与起点 O 的距离为 $p_j(t)$ 、车辆速度 $v_j(t)$ 随时间 t 变化 ($j=1, 2, \dots, r$)。另设头车

与 O 点的距离为 $p_0(t)$ 、速度为 $v_0(t)$ ，且 $v_0(t)$ 作为所有跟随车辆 t 时刻目标速度。

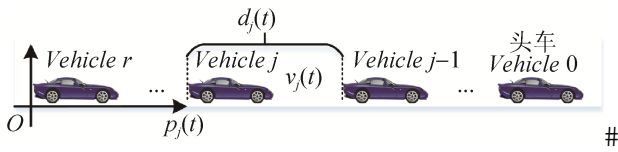


图 2 车辆编队模型
Fig. 2 Platoon model

考虑天气、道路、交通安全与车队速度等因素，设 $\beta_j, j=1,2,\dots,r$ 是车队第 j 辆车后保险杠中点与第 $j-1$ 辆车(前车)后保险杠中点设定的目标间距(包含第 j 辆车车长， β_j 为一定值)。

令： $d_j(t) = p_{j-1}(t) - p_j(t)$ ，表示在 t 时刻车队内第 j 辆车后保险杠中点与前车后保险杠中点之间的距离(包含第 j 辆车车身长度 $j=1,2,\dots,r$)。

令： $\mathbf{v}(t) = [v_1(t), v_2(t), \dots, v_r(t)]^T, \boldsymbol{\beta} = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_r]^T$ 车队所有车辆间的距离误差为 $\mathbf{e}(t)$ 、速度误差为 $\boldsymbol{\varepsilon}(t)$ ，则有：

$$\mathbf{e}(t) = \begin{bmatrix} e_1(t) \\ \vdots \\ e_r(t) \end{bmatrix} = \mathbf{d}(t) - \boldsymbol{\beta},$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}(t) = \begin{bmatrix} \varepsilon_1(t) \\ \vdots \\ \varepsilon_r(t) \end{bmatrix} = \mathbf{v}(t) - v_0(t) \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

设车队状态空间的控制目标是： $\mathbf{e}(t) \rightarrow 0$ and $\boldsymbol{\varepsilon}(t) \rightarrow 0, as t \rightarrow \infty$ 。因为速度误差 $\boldsymbol{\varepsilon}(t)$ 会随着距离误差 $\mathbf{e}(t)$ 收敛而最终收敛，故只讨论距离误差 $\mathbf{e}(t)$ 的收敛问题。

令： $x_j(t) = p_j(t) - p_j(0)$ 表示第 j 辆车在 t 时刻的行驶里程，设 $\mathbf{x}(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_r(t)]^T$ 。根据文献^[20]的发动机模型可将车队模型状态方程表示为($j=1,2,\dots,r$):

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_j(t) \\ \dot{x}_j(t) \\ \ddot{x}_j(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_j(t) \\ \dot{x}_j(t) \\ \ddot{x}_j(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} c_j(t) \quad (2)$$

式中： c_j 为外部输入量，且有

$$u_j = \frac{1}{a(\dot{x}_j)} [c_j - b(\dot{x}_j, \ddot{x}_j)],$$

式中：

$$a(\dot{x}_j) = \frac{1}{m_j \tau_j(\dot{x}_j)}$$

$$b(\dot{x}_j, \ddot{x}_j) = -2 \frac{K_{dj}}{m_j} \dot{x}_j \ddot{x}_j - \frac{1}{\tau_j(\dot{x}_j)} \left[\ddot{x}_j + \frac{K_{dj}}{m_j} \dot{x}_j^2 + \frac{d_{mj}}{m_j} \right] \quad (3)$$

式中： $\tau_j(\dot{x}_j)$ 为发动机时间常数，与车速有关； u_j 代表控制节气门开度的输入，参数 K_{dj} 、 d_{mj} 为常量。文献[20]设计了线性反馈的控制律：

$$c_j = c_p e_j(t) + c_v \dot{e}_j(t) + c_a \ddot{e}_j(t) + k_v [v_l(t) - v_j(t)] + k_a [a_l(t) - a_j(t)] \quad (4)$$

$$j = 1, 2, \dots, r$$

c_p, c_v, c_a, k_v, k_a 均为需要标定的参数。网联式自动驾驶车队的线性系统控制模型如图 3 所示。

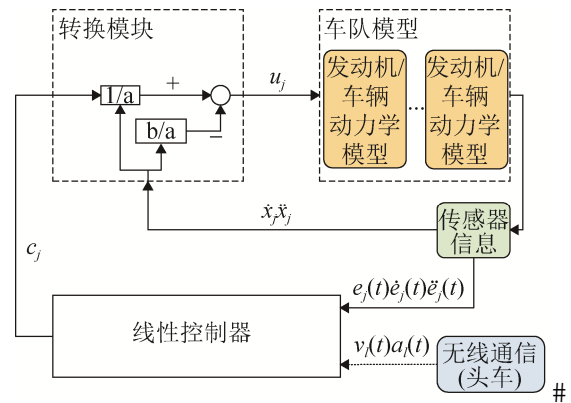


图 3 车队线性系统模型
Fig. 3 Linear system model in platoon

在图 1 所示网联式车辆通信架构下，第 j 辆车跟随第 $j-1$ 辆车做跟驰运动，Vehicle 0(头车)的车速可以作为所有跟驰车辆的目标车速，即车队速度 $v_l(t) = v_0(t)$ 。车队内部所有跟驰车辆可以依靠无线通信手段获取头车速度信息 $v_l(t)$ 、加速度信息 $a_l(t)$ ，依靠车身传感器可以获取前车和本车的位置信息 $p_{j-1}(t), p_j(t)$ 。在通信条件良好的情况下，利用该自动驾驶车队控制模型可以完成车辆编队行驶。

1.2 车队控制模型在 ZOH 信息处理下的优化与延迟误差补偿

由于通信网络信道质量的不确定性，在数据包

传输过程中信息的准确性与有效性对车队的稳定性至关重要。为了解决上述问题, 借鉴文献[14, 21]提出零阶保持(Zero Order Hold, ZOH)的数据处理方式, 提出针对图 1 通信网络架构的 ZOH 信息处理机制, 克服 Vehicle 0 (头车)无线传输丢包和乱序的问题。

在采样点 k 时刻, 头车将状态信息封装为数据包 $\sigma_l(k)$, 并以组播形式向所有车辆发送封装好的状态信息 $\sigma_l(k)^T = [v_l(k), a_l(k)]$, 车辆 j 需要接收到头车状态信息。为保证接收到的信息准确, 利用文献 [14] 设计的智能数据处理器 (Smart Data Processor, SDP)完成以下任务:

- 1) 接收 Vehicle 0 (头车)最新的数据包信息 $\sigma_l(k)^T = [v_l(k), a_l(k)]$;
- 2) 从第 $j=1, 2, \dots, r$ 辆车的缓存器中匹配与控制律 c_j 之对应的数据包。

ZOH 信息处理机制说明如下: h_j^k 为在 k 时刻, 第 j 辆车从 Vehicle 0 (头车)接收到最新数据包的发出时刻, 给定 $\sigma_l(0)$, 令 $h_j^k = k = 0$, 处理器遵循以下原则:

- ①在 k 时刻, 选择输出 $\sigma_l(k) = \sigma_l(h_j^k)$, 并让 $h_j^{k+1} = h_j^k$;
- ②若头车数据包 $\sigma_l(i)$ 在 k 到 $k+1$ 时刻内达到且 $i > h_j^{k+1}$, 则存储 $\sigma_l(i)$, 并让 $h_j^{k+1} = i$;
- ③重复步骤②到 $k+1$ 时刻, 如果没有新的数据包到达则令 $k=k+1$, 并返回步骤①。

控制器工作原理如图 4 所示。

由图 4 可知 $h_j^k \leq k$ 且 $h_j^k \leq h_j^{k+1} \leq k+1$, 数据包发生乱序时(如 $k=2, k=6$ 时), 将被直接丢弃。

在数据包发生延时的情况下, 头车与第 j 辆车的状态信息可能在不同的时刻到达车辆控制器内,

即存在数据包异步问题。为避免异步, 第 j 辆车的缓存器存储从 h_j^k 到 k 时刻的本车传感器测得的信息序列: $M = [(e_j, v_j, a_j)_{h_j^k}, (e_j, v_j, a_j)_{h_j^{k+1}}, \dots, (e_j, v_j, a_j)_k]$, 缓存器的工作机制核心即判断当前时刻数据处理器是否更新头车状态信息, 并从信息序列中找出本车对应的状态信息, 并更新序列。若没有更新, 则沿用之前状态信息。如此, 跟随车辆 j 的控制律使用 $(e_j, v_j, a_j)_{h_j^k}$ 和 $\sigma_l(h_j^k)$ 进行计算, 有效避免了异步问题。

定义 $\tau_j^k = k - h_j^k$ 为第 j 辆车接收到头车数据的时间延迟, 由图 4 所示的控制器可以看出, τ_j^k 即可以表示丢包数, 又可以表示延迟数。设延迟及连续丢包数的上界分别为 τ_{\max} 和 N_d , 在 ZOH 信息处理机制下, 对车队线性系统模型进行优化, 解决网络乱序及丢包问题, 控制律(4)考虑时间延迟进行离散化处理, 可以写为:

$$\begin{aligned} c_j(k) = & c_p e_j(k - \tau_j^k) + c_v \dot{e}_j(k - \tau_j^k) + \\ & c_a \ddot{e}_j(k - \tau_j^k) + k_v [v_l(k - \tau_j^k) - v_j(k - \tau_j^k)] + \\ & k_a [a_l(k - \tau_j^k) - a_j(k - \tau_j^k)] \end{aligned} \quad (5)$$

$j = 1, 2, \dots, r$

相应的, 优化后模型的状态方程可离散化为:

$$\begin{bmatrix} x_j(k+1) \\ v_j(k+1) \\ a_j(k+1) \end{bmatrix} = \mathbf{G}(T) \begin{bmatrix} x_j(k) \\ v_j(k) \\ a_j(k) \end{bmatrix} + \mathbf{H}(T) c_j(k)$$

$$\mathbf{G}(T) = \begin{bmatrix} 1 & T & \frac{1}{2}T^2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{H}(T) = \begin{bmatrix} \frac{1}{6}T^3 \\ \frac{1}{2}T^2 \\ T \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: T 为采样周期。

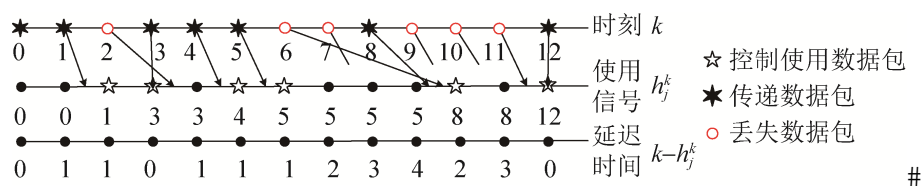


图 4 数据控制器工作示意图^[21]

Fig. 4 Schematic diagram of data processor

<http://www.china-simulation.com>

定义:

$$\mathbf{X}_j(\mathbf{k}) = [x_j(k), v_j(k), a_j(k)]^T, j = 1, 2, \dots, r.$$

令:

$$\mathbf{X}(\mathbf{k}) = [X_1(k) \dots X_r(k)]^T$$

$$\mathbf{C}(\mathbf{k}) = [c_1(k), \dots, c_r(k)]^T$$

则自动驾驶车队模型构成的离散系统可表示为:

$$\mathbf{X}(\mathbf{k}+1) = \mathbf{A}\mathbf{X}(\mathbf{k}) + \mathbf{B}\mathbf{C}(\mathbf{k})$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}(T) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \mathbf{G}(T) & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \mathbf{G}(T) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}(T) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \mathbf{H}(T) & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & \mathbf{H}(T) \end{bmatrix}$$

车队闭环控制模型加入 ZOH 信息处理器优化后, 如图 5 所示。

ZOH 信息处理器可以解决自动驾驶车辆编队行驶中通信丢包、乱序和异步问题。然而在复杂的行车环境下, 因通信延迟会导致控制精度降低。

如图所示, 控制变量 $\sigma_l(\mathbf{k}) = \sigma_l(h_j^k) (h_j^k \leq k)$,

而 k 时刻的头车状态实际信息未知。因此, 利用扩展卡尔曼滤波器(Extended Kalman Filter, EKF)的一步状态预测算法, 对 k 时刻的状态信息进行估计。

设 $h_j^k = s$, 观测变量 $\mathbf{Z}_k = \sigma_l(\mathbf{k})^T = \sigma_l(s)^T = [v_l(s), a_l(s)]$ 。即在 $t=k$ 时刻头车 $t=s$ 时刻的状态信息被跟随车辆观测器接收到, $\hat{\mathbf{X}}_k = [\hat{x}_l(k), \hat{v}_l(k), \hat{a}_l(k)]$ 为 $t=k$ 时刻实际状态信息估计。

设滤波器的计算原型为:

$$\hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} = \mathbf{f}(\hat{\mathbf{X}}_{k-1}, \mathbf{u}_{k-1}) + \mathbf{w}_{k-1}$$

$$\tilde{\mathbf{Z}}_k = \mathbf{h}(\tilde{\mathbf{X}}_{k-1}) + \mathbf{v}_{k-1} \quad (8)$$

式中: w_{k-1} 和 v_{k-1} 代表激励噪声和观测噪声, u_{k-1} 为量测方程的驱动函数, $\tilde{\mathbf{X}}_{k-1}$ 是过程相对前一时刻的后验估计, EKF 更新方程如下:

$$\mathbf{P}_{k|k-1} = \Phi_{k-1} \mathbf{P}_{k-1} \Phi_{k-1}^T + \Gamma_{k-1} \mathbf{Q}_{k-1} \Gamma_{k-1}^T$$

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}^T [\mathbf{H} \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}^T + \mathbf{R}]^{-1}$$

$$\mathbf{P}_k = [\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}] \mathbf{P}_{k|k-1}$$

$$\hat{\mathbf{X}}_k = \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k [\mathbf{Z}_k - \mathbf{H} \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1}] \quad (9)$$

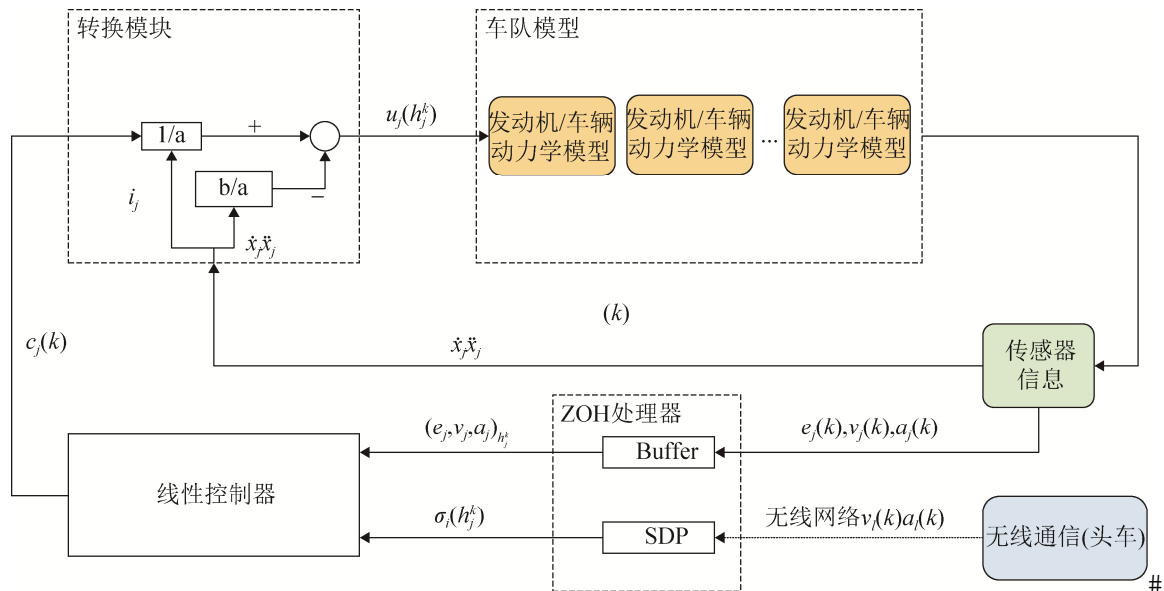


图 5 ZOH 信息处理器下车队闭环控制系统
Fig. 5 Closed-loop control system of platoon based on ZOH data processor

这里 $\mathbf{Q}, \mathbf{R}, \mathbf{P}$ 是模型定义好的激励噪声协方差矩阵、观测噪声协方差矩阵和后验估计协方差矩阵。 Φ_{k-1} 和 Γ_{k-1} 分别为 $f(\hat{\mathbf{X}}_{k-1}, \mathbf{u}_{k-1})$ 关于 $\hat{\mathbf{X}}_{k-1}$ 和 \mathbf{u}_{k-1} 的雅克比矩阵, 根据状态方程有:

$$\begin{aligned} f(\hat{\mathbf{X}}_{k-1}, \mathbf{u}_{k-1}) &= \begin{bmatrix} 1 & T & \frac{1}{2}T^2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \hat{\mathbf{X}}_{k-1} + \begin{bmatrix} \frac{1}{6}T^3 \\ \frac{1}{2}T^2 \\ T \end{bmatrix} \mathbf{c}_{k-1} \\ h(\tilde{\mathbf{X}}_{k-1}) &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tilde{\mathbf{X}}_{k-1} \end{aligned} \quad (10)$$

利用滤波计算原型, 所有跟随车辆就能够对接收到的头车信息进行一步状态预测。通过递推的方式得到 $t=s \rightarrow t=k$ 时刻实际的一步状态预测递推序列, 令 $N=k-s$ 有:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} &= \Phi_{k-1} \hat{\mathbf{X}}_{k-1} = \\ &\Phi_{k-1} [\hat{\mathbf{X}}_{k-1|k-2} + \mathbf{K}_{k-1} (\mathbf{Z}_{k-1} - \mathbf{H}_{k-1} \hat{\mathbf{X}}_{k-1|k-2})] \\ \mathbf{L} &= \left[\prod_{i=1}^{N-1} \Phi_{k-i} (\mathbf{I} - \mathbf{K}_{k-i} \mathbf{H}_{k-i}) \right] \Phi_s \\ &[\hat{\mathbf{X}}_{s|s-1} + \mathbf{K}_s (\mathbf{Z}_s - \mathbf{H}_s \hat{\mathbf{X}}_{s|s-1}) + \\ &\sum_{j=2}^{N-1} \left[\left(\prod_{i=1}^{j-1} \Phi_{k-i} (\mathbf{I} - \mathbf{K}_{k-i} \mathbf{H}_{k-i}) \right) \Phi_{k-j} \mathbf{K}_{k-j} \mathbf{Z}_{k-j} \right] + \\ &\Phi_{k-1} \mathbf{K}_{k-1} \mathbf{Z}_{k-1} \end{aligned} \quad (11)$$

参考文献[22-23]对一步状态预测误差的估计, 设 $\hat{\mathbf{X}}_{k|k-1}^*$ 为无延时的系统一步状态预测, 则一步状态预测误差为:

$$\begin{aligned} \delta \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} &= \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} - \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1}^* = \\ &\left[\prod_{i=1}^{N-1} \Phi_{k-i} (\mathbf{I} - \mathbf{K}_{k-i} \mathbf{H}_{k-i}) \right] \\ &\Phi_s \mathbf{K}_s (\mathbf{Z}_s - \mathbf{H}_s \hat{\mathbf{X}}_{s|s-1}) \end{aligned} \quad (12)$$

对 $t=s$ 时刻之前的状态进行估计, 令 $\mathbf{M} = \prod_{i=1}^{N-1} \Phi_{k-i} (\mathbf{I} - \mathbf{K}_{k-i} \mathbf{H}_{k-i})$, 则有 $\delta \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} = \mathbf{M} \Phi_s \mathbf{K}_s (\mathbf{Z}_s - \mathbf{H}_s \hat{\mathbf{X}}_{s|s-1})$ 包含了从 $t=s \rightarrow t=k$ 时刻 $N-1$ 个滤波周期的系统状态转移矩阵 Φ 和 $t=s$ 时刻系统的信息。

根据式(12), 建立基于通信信息处理的延迟状态估计补偿法: 在图 4 所示的车队闭环控制系统的基础上, 将 $t=s$ 时刻接收到的头车信息储存起来, 根据 $t=k$ 时刻接收到头车信息, 利用递推的方式得到车辆状态估计结果, 将估计误差作为对通信延迟的补偿。控制律可表示为:

$$\begin{aligned} c_j(k) &= c_p e_j(k - \tau_j^k) + c_v \dot{e}_j(k - \tau_j^k) + \\ &c_a \ddot{e}_j(k - \tau_j^k) + k_v [v_l(k - \tau_j^k) - v_j(k - \tau_j^k)] + \\ &k_a [a_l(k - \tau_j^k) - a_j(k - \tau_j^k)] + \\ &[d_v \delta \hat{v}_l(k) + d_a \delta \hat{a}_l(k)] \\ j &= 1, 2, \dots, r \end{aligned} \quad (13)$$

式中: d_v, d_a 为延迟补偿系数。

2 自动驾驶车队控制模型稳定性分析

研究自动驾驶车队跟随车辆的驾驶特性, 特别是在控制律作用下跟随车辆的跟驰效果(速度、距离、加速度变化), 其核心是通过评估车辆编队行驶中由头车引起的空间误差增益来分析车队稳定性。在离散时间域, 车队稳定性定义如下:

$$\left| ss_{\Delta_j}(e^{j\omega}) \right| = \left| \frac{\Delta_j(e^{j\omega})}{\Delta_{j-1}(e^{j\omega})} \right| \leq 1, \forall \omega, j=1, 2, \dots, n \quad (14)$$

式中: $\Delta_j(e^{j\omega}) = \Delta_j(z) = \mathbf{Z}\{e_j(z)\}$ 为车间距误差 $e_j(k)$ 的 Z 变换。

对整个车队运动做如下假设: 在 $t < 0$ 时刻, 车队处于稳定状态, 且速度 v_0 ; 下面分别对头车、及第 j 辆车稳定性进行分析。

2.1 头车稳定性分析

令 $\omega_l(t) = v_l(t) - v_0$, 由状态方程(2), 有 $\ddot{x}_j = c_j$, $\ddot{e}_l(t) = \ddot{x}_l(t) - c_l(t)$ 即:

$$\begin{aligned} \ddot{e}_l(t) &= \ddot{x}_l(t) - c_{pl} e_l(t) - c_{vl} \dot{e}_l(t) - c_{al} \ddot{e}_l(t) - \\ &k_{vl} \omega_l(t) - k_{al} a_l(t) \end{aligned} \quad (15)$$

由于头车不存在延迟, 故无补偿项。对上式进行拉普拉斯变换可得:

$$\begin{aligned} [s^3 + c_{al}s^2 + c_{vl}s + c_{pl}] \widehat{e}_l(s) &= \\ [s^2 - k_{al}s - k_{vl}] \widehat{w}_l(s) \end{aligned} \quad (16)$$

可知系统的传递函数为:

$$\hat{h}_{e_i, \omega_i}(s) = \frac{\hat{e}_i(s)}{\hat{\omega}_i(s)} = \frac{s^2 - k_{al}s - k_{vl}}{s^3 + c_{al}s^2 + c_{vl}s + c_{pl}} \quad (17)$$

通过配置 $c_{pl}, c_{vl}, c_{al}, k_{vl}, k_{al}$, 可知零极点相互独立。

2.2 第 j 辆车稳定性分析

根据车队状态方程(2), 有 $\ddot{x}_j = c_j$ 可得: $\ddot{e}_j(t) = \ddot{x}_{j-1}(t) - \ddot{x}_j(t) = c_{j-1}(t) - c_j(t)$, 结合控制律(13), 假设同一时刻相邻两辆车接收到的头车信息的延时无差别:

$$\begin{aligned} \ddot{e}_j(t) = & c_p e_{j-1}(t) + c_v \dot{e}_{j-1}(t) + c_a \ddot{e}_{j-1}(t) + \\ & k_v [v_l(t) - v_{j-1}(t)] + k_a [a_l(t) - a_{j-1}(t)] + \\ & [d_v \delta \hat{v}_l(t) + d_a \delta \hat{a}_l(t)] - \\ & c_p e_j(t) - c_v \dot{e}_j(t) - c_a \ddot{e}_j(t) - \\ & k_v [v_l(t) - v_j(t)] - k_a [a_l(t) - a_j(t)] - \\ & [d_v \delta \hat{v}_l(t) + d_a \delta \hat{a}_l(t)] \end{aligned} \quad (18)$$

对上式进行拉普拉斯变换可得:

$$\begin{aligned} [s^3 + (c_a + k_a)s^2 + (c_v + k_v)s + c_p] \hat{e}_j(s) = \\ [c_a s^2 + c_v s + c_p] \hat{e}_{j-1}(s) \end{aligned} \quad (19)$$

可知系统的传递函数为:

$$\hat{g}(s) = \hat{h}_{e_j, e_{j-1}}(s) = \frac{\hat{e}_j(s)}{\hat{e}_{j-1}(s)} = \frac{c_a s^2 + c_v s + c_p}{s^3 + (c_a + k_a)s^2 + (c_v + k_v)s + c_p} \quad (20)$$

由传递函数 $\hat{g}(s)$ 、 $\hat{h}_{e_i, \omega_i}(s)$ 、 $\hat{h}_{e_i, e_i}(s)$ 可知, 通过配置 c_p, c_v, c_a, k_v, k_a , 可知零极点相互独立。设 $\hat{g}(s)$ 的分母多项式 $\chi(s) = s^3 + (c_a + k_a)s^2 + (c_v + k_v)s + c_p$, 则车队线性系统框图如图 6 所示。

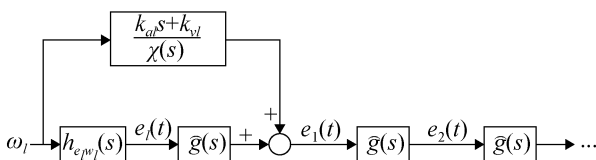


图 6 车队线性系统框图
Fig. 6 Block diagram of platoon linear system

分析图 6 由前文给出的控制律, 第 j 辆车根据 ω_l 输入传递函数为:

$$\begin{aligned} \hat{h}_{e_j, \omega_l}(s) = & [\hat{g}(s)]^{j-2} [\hat{h}_{e_i, \omega_l}(s) \hat{g}(s) + \frac{k_{vl} + k_{al}s}{\chi(s)}] \\ & j = 2, 3, \dots, r. \end{aligned} \quad (21)$$

根据(14)稳定性定义, 在 S 平面内满足式(22)时系统稳定:

$$\begin{aligned} \hat{g}(s) = \hat{h}_{e_j, e_{j-1}}(s) = \frac{\hat{e}_j(s)}{\hat{e}_{j-1}(s)} \leq 0 \\ \forall \omega, j = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (22)$$

在参数选择时通过配置 c_p, c_v, c_a, k_v, k_a 可使零极点落在 S 平面虚轴左半部分满足系统稳定性条件, 且为了避免系统震荡在队列中传递, 要求 $\hat{g}(s)$ 的拉普拉斯反变换 $g(t) > 0, \forall t$ 在时域内成立。

3 网联式自动驾驶车队控制模型仿真

为了验证车队控制模型的有效性, 利用 Matlab 环境构建了由 4 辆相同汽车组成的车队。

3.1 无延迟条件下控制模型仿真

假设车队内部所有车辆初始速度 $v_0 = 8 \text{ m/s}$, 从 $t = 0$ 时刻开始, 头车加速度发生如下变化, 最终使 $v_l = 11 \text{ m/s}$:

$$a(t) = \begin{cases} 0.5 \text{ m/s}^2 & 0 \leq t \leq 10 \\ -1 \text{ m/s}^2 & 15 \leq t \leq 25 \\ 0.8 \text{ m/s}^2 & 30 \leq t \leq 40 \\ 0 \text{ m/s}^2 & \text{else} \end{cases} \quad (23)$$

根据论文的车队控制模型对 4 辆相同车辆组成的网联式自动驾驶车队进行仿真, 按模型稳定性控制参数要求, 仿真相关参数作如下配置(目标距离 $\beta = 10 \text{ m}$)

$$\begin{aligned} c_{al} = 15, c_{vl} = 74, c_{pl} = 210 \\ k_{al} = -3.03, k_{vl} = -0.05 \\ c_a = 5, c_v = 49, c_p = 120 \\ k_a = 10, k_v = 25, \end{aligned} \quad (24)$$

图 7 显示了第 1、2、3 辆车跟随头车(vehicle0)速度 v_l 的速度—时间曲线:

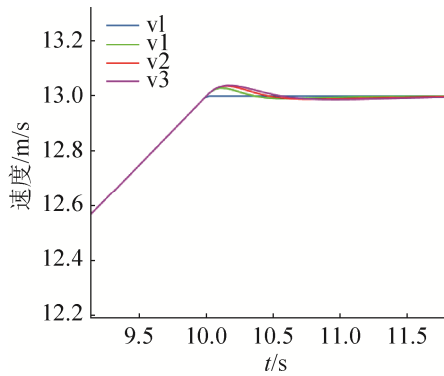
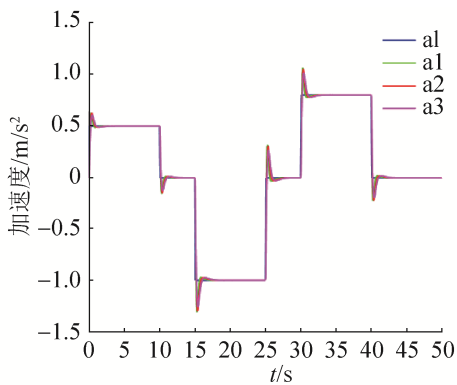
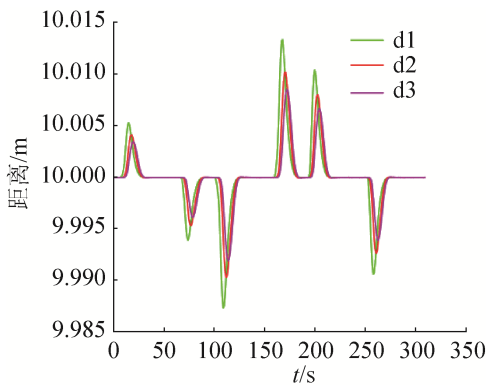


图 7 速度-时间曲线局部区间放大图
Fig. 7 Speed profile at interval

跟随车辆加速度时间曲线与距离偏差见图 8。



(a) 跟随车辆加速度-时间曲线



(b) 车辆车间距离-时间曲线

图 8 车队内车辆加速度与间距变化

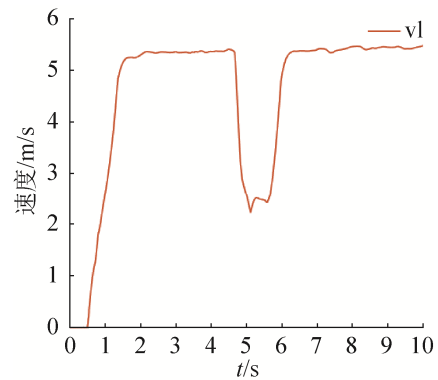
Fig. 8 Acceleration and interval changes in platoon

仿真结果表明: 在控制律(13)与仿真条件下, 所有跟随车辆与前车距离和目标距离的偏差不超过 0.015 m, 车辆速度跟驰偏差不超过 0.1 m/s。从加速度—时间曲线可以看出, 车辆加速度变化均在人体接受的舒适范围之内(-1.5~1.5 m/s², 相当

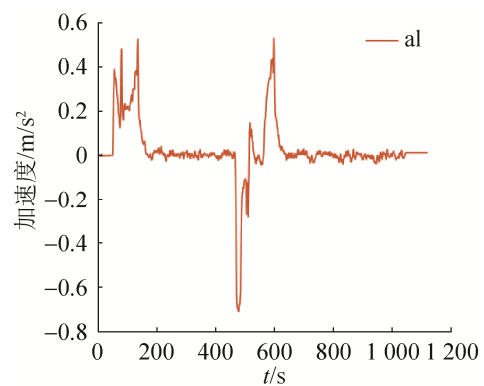
于 0.15 g), 且变化几乎与头车加速度完全相同。需要注意的是, 第 1 辆车的偏差明显高于第 2、3 辆车, 这点可以从图 5 车队线性系统框图中得到验证 ($e_1(t)$ 受到两个系统模块影响), 偏差由前车传递到后车逐渐收敛, 最终稳定到设定的距离 10 m。

3.2 传感器测量与通信延迟影响下控制模型仿真

在实际车辆行驶中, 头车速度并不能像图 7 所示的速度-时间曲线那样保持连续稳定的输出, 而是在目标值附近波动, 同时传感器还存在一定的测量误差。截取网联车辆 1 次测试所得的传感器数据, 绘制速度、加速度曲线如图 9 所示。



(a) 传感器测量的头车速度-时间曲线

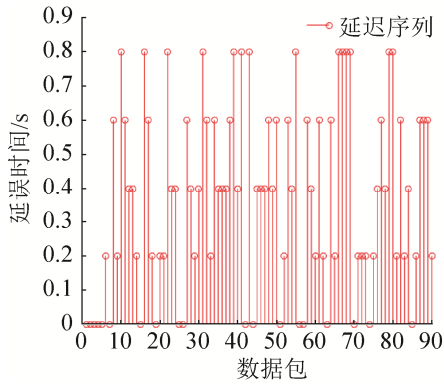


(b) 传感器测量的头车加速度-时间曲线

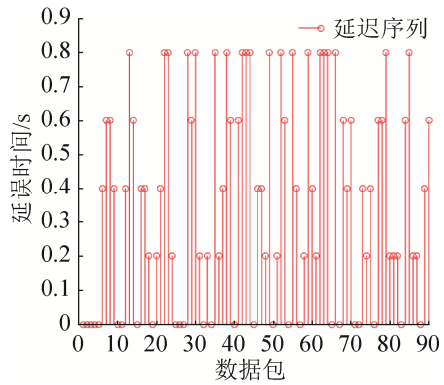
图 9 传感器实测头车速度与加速度数据曲线
Fig. 9 Sensor based leading vehicle's speed profile and acceleration profile

传感器测量的头车数据经过网络通信传输发往所有跟随车辆, 传输存在延迟, 最大延迟及连续

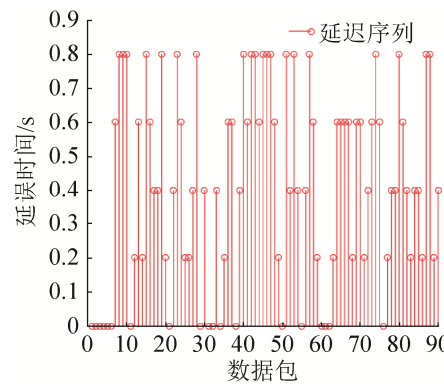
丢包数分别为 $\tau_{\max} = 800 \text{ ms}$ 和 $N_d = 3$, 延迟补偿系数 $d_v = 0.15, d_a = 0.06$ 所有跟随车辆前 100 个数据包延迟时间如图 10 所示。



(a) 跟随车辆(1 车)网络数据包延迟的时间序列



(b) 跟随车辆(2 车)网络数据包延迟的时间序列



(c) 跟随车辆(3 车)网络数据包延迟的时间序列

图 10 车队内部车辆接收网络数据包延迟的时间序列
Fig. 10 Time series of delays in receiving network packets from other vehicles in platoon

通信数据未经过处理, 存在通信延迟的情况下, 车队控制模型输出如图 11 所示。

受网络传输影响时, 利用 ZOH 处理器可解决

丢包和乱序问题。利用缓存器处理接收到的网络数据, 与本车传感器测得的数据进行同步, 避免了延迟的车辆控制异步问题, 同时进行延迟补偿, 在论文控制律(13)下进行仿真, 得到速度—时间曲线图 12。车辆加速度时间曲线与距离偏差曲线如图 13 所示。

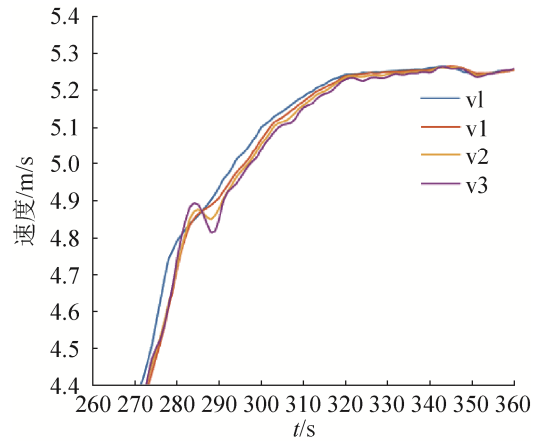


图 11 通信延迟情况下速度-时间曲线区间局部放大图
Fig. 11 Speed profile at interval with time delay

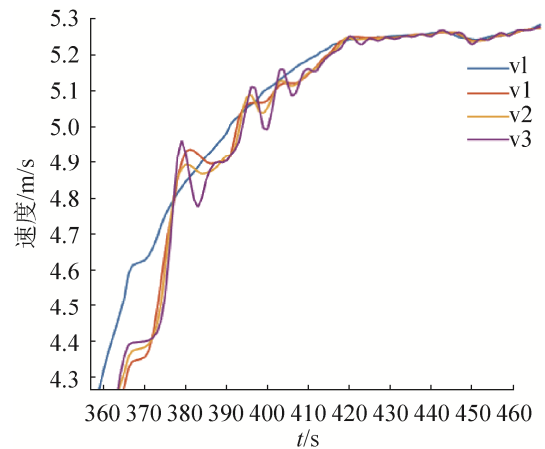
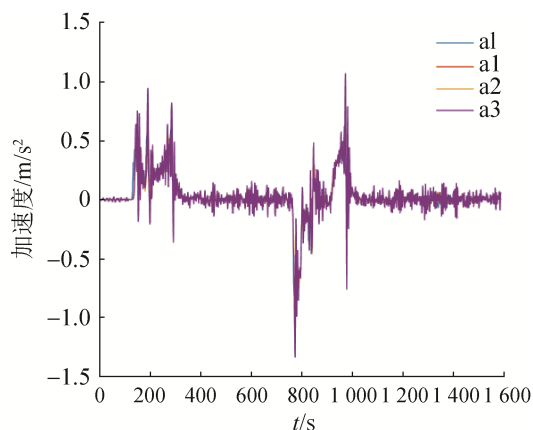


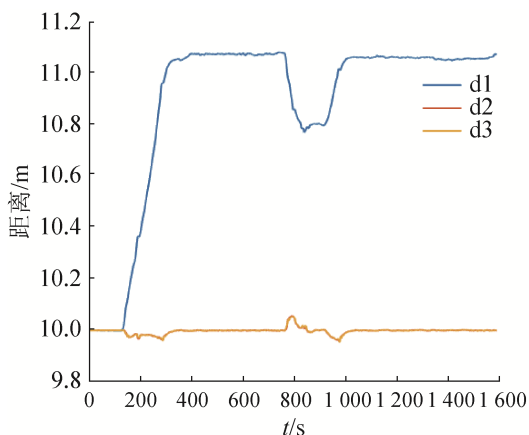
图 12 考虑延迟补偿的速度-时间曲线区间局部放大图
Fig. 12 Speed profile at interval with time delay compensation

在现有控制律作用下, 图 12 显示车队在通信延迟情况下依然可以保持较好的跟驰特性, 速度误差最大不超过 0.4 m/s 。跟随车辆与头车加速度曲线比较可以看出, 从 *vehicle1* 到 *vehicle3* 加速度除震荡加剧外, 有明显的延迟现象, 最大加速度不超过 $-1.5 \text{ m/s}^2 (0.15g)$, 在人体可接受的范围内。仿

真中, 让 *vehicle1* 完全利用网络信息进行控制, *vehicle2*、*vehicle3* 利用车身传感器和网络信息共同决策, 稳定时 *vehicle1* 与目标距离产生约 1.1m 系统误差, *vehicle2*、*vehicle3* 依旧在目标很小的范围内波动。由此可见, 在网络环境的影响下, 控制律在最大延迟 $\tau_{\max} = 800 \text{ ms}$ 条件下, 车辆间距离会产生约 10% 的系统误差。



(a) 通信网络影响下车辆加速度-时间曲线



(b) 通信网络影响下车辆间距离-时间曲线

图 13 通信网络影响下车队内车辆加速度与间距变化
Fig. 13 Acceleration and interval changes in platoon with time delay

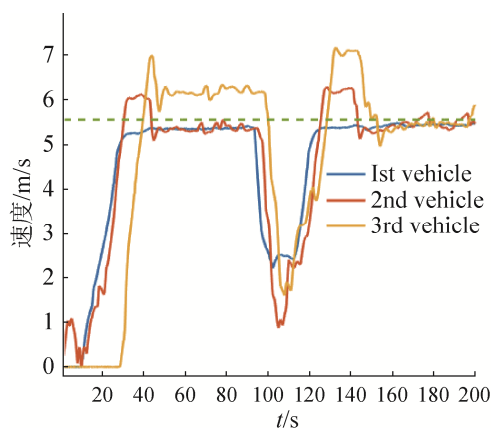
4 基于 5G 的网联驾驶车辆实车编队行驶实验

以某自主品牌自动驾驶车辆为研究平台, 在经过车辆动力学建模、实车匹配标定后, 针对车辆编队行驶的场景, 应用网络化行车自动驾驶协同控制

技术, 对论文控制模型的实用性进行封闭场地实车测试, 如图 14 所示。



(a) 车辆编队实车测试



(b) 编队行驶速度-时间曲线

图 14 车辆编队实车测试结果
Fig. 14 Platoon empirical test

实车测试中, 网联式自动驾驶车队由 3 辆汽车在规划好的车道内组成; 车车、车路通信采用无线蜂窝网络(LTE-V/5G)技术, 可进行高精定位, 一跳式通信, 所有车辆安装德尔福(Delphi) 76-77 GHz 毫米波雷达, 最远探测距离 175 m (刷新率 50 ms), 车辆搭载的车载子系统(On Board Unit, OBU)可进行网络和传感器的数据融合以及执行论文编队行驶策略程序。实验过程中, 编队行驶的目标速度为 5.56 m/s (即 20 km/h), 经过弯道时限速 2.78 m/s (即 10 km/h) 相邻车辆的期望间距为 15 m (含车身长度)。

由图 14 可以看出, 实车编队行驶车辆速度最高 6.94 m/s (即 25 km/h), 过弯时跟随车辆最低速度 1.39 m/s (即 5 km/h); 整个编队行驶过程中, 本文自动驾驶协同控制模型能够起到期望的控制作

用, 最终, 3 辆车收敛到稳定状态, 由此证明在现有技术条件下, 论文提出的算法可以支持原型车辆进行封闭场地测试。

5 结论

针对网联式自动驾驶车辆协同控制问题, 建立了车辆编队行驶控制模型, 设计了 ZOH 信息处理机制解决丢包、乱序问题, 并根据非线性系统状态估计算法补偿网络延迟, 优化控制律。通过稳定性分析, 论证了车队控制模型的稳定性。最后, 利用实车编队测试, 验证了车队控制模型的有效性与实用性。对于跨车道的柔性车队, 车辆间通信干扰情况更为复杂, 如何实现网络化编队行驶, 提高协同驾驶控制技术的可靠性将作为进一步研究内容。

参考文献:

- [1] Huppé X, de Lafontaine J, Beaugard M, et al. Guidance and control of a platoon of vehicles adapted to changing environment conditions[C]// Systems, Man and Cybernetics, 2003. IEEE International Conference on. USA: IEEE, 2003: 3091-3096.
- [2] Ge J I, Orosz G. Dynamics of connected vehicle systems with delayed acceleration feedback[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies (S0968-090X), 2014, 46(1): 46-64.
- [3] Ghasemi A, Kazemi R, Azadi S. Stable Decentralized Control of a Platoon of Vehicles With Heterogeneous Information Feedback[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology (S0018-9545), 2013, 62(9): 4299-4308.
- [4] Ploeg J, Van De Wouw N, Nijmeijer H. Lp String Stability of Cascaded Systems: Application to Vehicle Platooning[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology (S1063-6536), 2014, 22(2): 786-793.
- [5] Tae Soo no, Chong K T, Roh D H. A Lyapunov function approach to longitudinal control of vehicles in a platoon[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology (S0018-9545), 2001, 50(1): 116-124.
- [6] Lee G D, Kim S W. A longitudinal control system for a platoon of vehicles using a fuzzy-sliding mode algorithm[J]. Mechatronics (S0957-4158), 2002, 12(1): 97-118.
- [7] 王庞伟, 黄玲, 王云鹏, 等. 考虑通信延迟的车辆队列协同巡航控制算法[C]// 深圳: 中国智能运输大会, 2013.
- [8] Wang Pangwei, Huang Ling, Wang Yunpeng, et al. Vehicle platoon cooperative navigation control algorithm with communication delays[C]// Shenzhen: Intelligent Transportation System Conference China, 2013.
- [9] Emmons M R. Effects of communication delay and kinematic variation in vehicle platooning by[D]. USA: Utah State University, 2013.
- [10] Xiao Ling Yun, Gao Feng. Effect of information delay on string stability of platoon of automated vehicles under typical information frameworks[J]. Journal of Central South University (S1005-9784), 2010, 17(6): 1271-1278.
- [11] Oncu S, Van De Wouw N, Nijmeijer H. Cooperative adaptive cruise control: Tradeoffs between control and network specifications[C]// 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. USA: IEEE, 2011, 16(2259): 2051-2056.
- [12] Qin W B, Gomez M M, Orosz G. Stability analysis of connected cruise control with stochastic delays[C]// American Control Conference (ACC). USA: IEEE, 2014: 4624-4629.
- [13] Fernandes P, Nunes U. Platooning with IVC-enabled autonomous vehicles: Strategies to mitigate communication delays, improve safety and traffic flow[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems (S1524-9050), 2012, 13(1): 91-106.
- [14] Xu L, Wang L Y, Yin G, et al. Impact of package delivery rate on the safety of highway vehicle platoons[C]// Intelligent Vehicles Symposium Proceedings. USA: IEEE, 2014: 974-979.
- [15] 吴利刚, 郭戈. 基于 SDP 处理机制下的网络化车队控制研究[J]. 控制工程, 2016, 23(5): 698-705.
- [16] Wu Ligang, Guo Ge. Networked control of the platoon system based on SDP[J]. Control Engineering of China, 2016, 23(5): 698-705.
- [17] Ghasemi A, Kazemi R, Azadi S. Stability analysis of a predecessor-following platoon of vehicles with two time delays[J]. Promet-Traffic & Transportation (S0353-5320), 2015, 27(1): 35-46.
- [18] Peter S, Raja S. Analysis of communication losses in vehicle control problems[C]// Proceedings of American control Conference. USA: California, 2001: 1491-1496.
- [19] Xiao L Y, Gao F. Effect of information delay on string stability of platoon of automated vehicles under typical information frameworks[J]. Journal of Central South University (S1005-9784), 2010, 17(6): 1271-1278.
- [20] Li Yongfu, Li Kezhi, Cai Linqin, et al. Feedback-based

- platoon control for connected autonomous vehicles under different communication network topologies[C]// Proceedings of the 35th Chinese Control Conference. China: Chengdu, 2016: 8806-8811.
- [19] Shladover S E. Dynamic entrainment of automated guide way transit vehicles[J]. High Speed Ground Transport (S0018-1501), 1978, 12(3): 87-113.
- [20] J Dyn Sys, Meas. A System Level Study of Longitudinal Control of a Platoon of Vehicles[J]. Journal of dynamic systems measurement and control (S0022-0434), 1992, 114(2): 286-292.
- [21] Xiong J, Lam J. Stabilization of networked control systems with a logic ZOH[J]. IEEE Transactions on Automatic Control (S0018-9286), 2009, 54(2): 358-363.
- [22] 王文佳, 孙睿智, 高伟, 等. 基于通信延迟误差补偿的协同导航算法[J]. 火力与指挥控制, 2014, 39(12): 27-30.
- Wang Wenjia, Sun Ruizhi, Gao Wei, et al. Cooperative navigation based on error compensation of communication delays[J]. Fire Control & Command Control, 2014, 39(12): 27-30.
- [23] Gopalakrishnan A, Kaisare N S, Narasimhan S. Incorporating Delayed and Infrequent Measurements in Extended Kalman Filter Based Nonlinear State Estimation[J]. Journal of Process Control (S0959-1524), 2011, 21(1): 119-129.