

考虑时延的异质协作车队事件触发控制研究

唐传茵, 夏冀沅, 章明理, 吴龙杰

(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 针对目前研究较少考虑车辆混行造成的异质问题与时延问题, 本文提出了一种具有时延的异质协作式自动驾驶车队事件触发控制方法. 首先, 建立了考虑混行的异质车辆时延模型; 其次, 基于PID (proportional-integral-derivative) 控制与模型预测控制(MPC), 设计了不同模式下的事件触发控制器; 然后, 在城市和紧急情况下, 对所提出的控制器进行了仿真分析; 最后, 基于Jetson Nano模型车进行了实车实验. 仿真与实验结果表明, 所提出的事件触发控制方法能够在不同情况下更好地权衡控制精度与计算速度间的矛盾. 在带有通信时延的紧急情况下, 仍能够保持较低的误差.

关键词: 自动驾驶; 异质协作; 事件触发; 时延; 车队

中图分类号: U 495; TP 273 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2024)04-0540-08

Research on Event-Triggered Control of Heterogeneous Cooperative Vehicle Platoons Considering Time Delay

TANG Chuan-yin, XIA Ji-feng, ZHANG Ming-li, WU Long-jie

(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.

Corresponding author: XIA Ji-feng, E-mail: jfxial63@163.com)

Abstract: To address the problem of heterogeneity and time delay caused by mixed traffic, a heterogeneous cooperative event-triggered control method with time delay for autonomous driving platoons was proposed. Firstly, a heterogeneous vehicle delay model taking into account mixed traffic was established. Secondly, the event-triggered controller in different modes was designed based on PID (proportional-integral-derivative) control and model predictive control (MPC). Thirdly, under urban and emergency conditions, the proposed controller was simulated and analyzed. Finally, a real-car experiment was conducted based on the Jetson Nano model car. The simulation and experiment results illustrated that the proposed event-triggered control method strikes a better balance between control accuracy and calculation speed under different circumstances. In the emergency situations with communication delay, it can still maintain lower errors.

Key words: autonomous driving; heterogeneous cooperation; event-triggered; time delay; vehicle platoon

目前, 5G等通信技术与车辆行业融合形成的车联网产业得到充分发展^[1-2], 图1展示了车联网与大数据、通信、人工智能、控制等交叉领域间的关系. 评价车辆的两个重要性能是安全性和经济性, 通过V2V(车-车通信)技术形成协作式自动驾驶车队, 可提高自动驾驶车辆在控制精度和能耗等方面的性能^[3-4], 使协作车队成为更安全经济

的交通形式之一.

本文描述的智能车辆可通过车载雷达、深度相机等传感器感知环境信息; 可根据感知得到的环境信息作出动作决策; 可通过V2V技术将传感器采集到的前车状态信息传递给车队中的其他车辆. 协作车队中智能车辆遵循的基本V2V结构如图2所示. 图中, 曲线表示可以通过网络进行数

据传输,黑色线条表示可以直接相连.车队中的某一智能车辆在进行运动控制的过程中可以通过 V2V 技术共享传感器状态信息.车队具有以下

优势:控制精度更高,让车队中的车辆以更小的距离进行纵向跟车以缓解交通阻塞;减少计算量,提升运行效率,降低能耗.

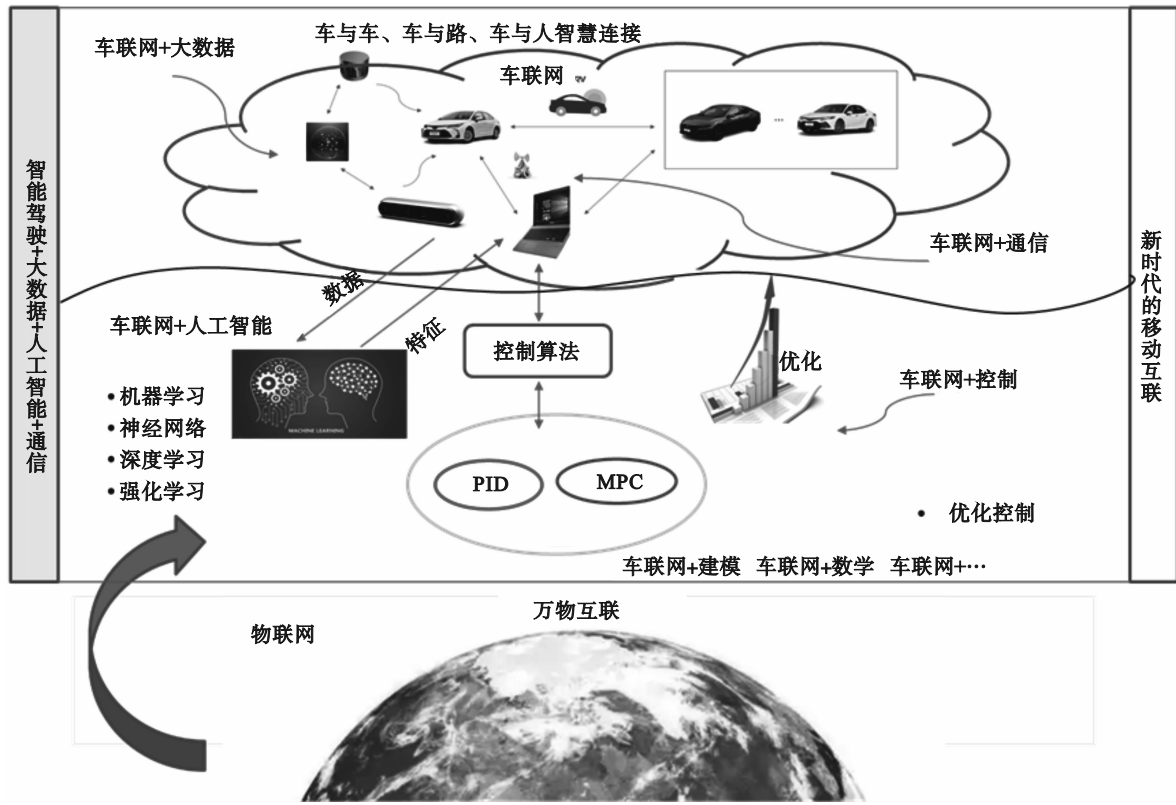


图 1 移动互联网

Fig. 1 Mobile Internet

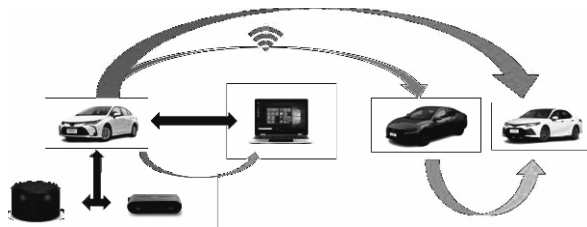


图 2 基本 V2V 结构

Fig. 2 Basic V2V structure

领航跟随法是一种编队控制方法.在领航跟随法中,协作式自动驾驶车队中的智能车辆被分为领航者和跟随者,下文称首车和从车.首车(领航者)执行期望的动作,从车(跟随者)跟随首车的运动.从车均跟随前车运动,只要掌握首车的运动信息,就可以在在一定程度上掌握跟随该首车的全部从车的运动范式.已有学者针对领航跟随法进行研究,Desai 等^[5]提出合作领航跟随者法,使跟随者不仅受领航者的引导,还与其他智能体进行信息交互并协同运动;Nägeli 等^[6]受鸟群的编队原理启发,利用感知和通信设备结合卡尔曼滤波算法估计编队状态,提出了完全分布式的领航跟随法并在室内/外进行了实验;李正磊等^[7]为

提高纵向控制器的鲁棒性,提出了考虑车辆执行器时延和 V2V 时延等因素的纵向控制方法,在算法层面考虑首车误差和前车误差,经 PID (proportional-integral-derivative) 控制得到的紧急情况仿真效果符合要求;王树凤等^[8]结合人工势场法和虚拟领航者法进行车辆控制,依据道路条件设立编队单元的纵横向迭代,可以稳定有效地控制车辆;Lan 等^[9]提出了一种由数值驱动的 MPC(model predictive control),不需要车辆动力系统参数的精确模型,基于车辆的噪声测量,在给定时域内通过模型预测混合队列的未来轨迹.

时延也是一个重要的因素,已有学者针对时延展开研究.Yu 等^[10]使用延迟范围依赖的方法处理系统异构时变延迟.Zhao 等^[11]建立了考虑时变延迟的三阶模型,推导出了决定渐进稳定性和局部队列稳定性的延迟边界.

领航跟随法中的首车具有重要作用,掌握车队信息,如某一从车加入/脱离编队的过程需要由首车对其他车辆进行调度来实现.传统的领航跟随法的鲁棒性过于依赖首车的鲁棒性,当首车处于失控/失稳状态时,将影响整个车队的控制.同

时,首车需要将复杂的数据传输给后车,通信的时延会大大影响控制的效果.现有研究采用虚拟领航者法,先建立一个虚拟的首车再应用领航跟随法,在一定程度上避免了首车失稳对车队控制产生的影响.一些文献在控制器中引入首车误差,通过设置权重调整首车和前车对从车的影响,从而提升控制精度.但大部分文献并未考虑利用分发网络的V2V技术来更好地处理通信数据,在合适的情况下选择适合的控制方法,提高首车稳定性的同时更好地平衡控制精度与计算速度之间的矛盾.

为使控制策略与常规交通情况更匹配,本文在传统的领航跟随法中引入事件触发机制,提出了一种考虑协作式自动驾驶车队情况的事件触发控制方法;建立了PID,MPC控制器,在控制器的设计过程中考虑到了可能存在的V2V通信时延对控制系统造成的影响;通过Simulink对应用该纵向控制方法的车辆队列中各个车辆的状态信息在城市/紧急情况下进行了仿真分析.仿真结果表明,城市情况下跟踪精度高,紧急情况下的效果能够满足时延要求.

1 模型建立

1.1 车队模型

车辆队列内的车辆结构具有异质的特点时,可用式(1)所示模型描述如图3所示的车队中的每辆车.

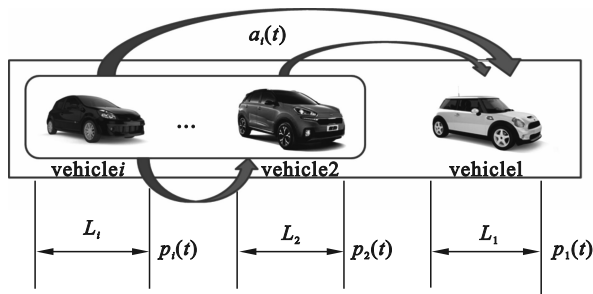


图3 车队示意图

Fig. 3 Sketch map of vehicle platoons

组成队列的异质车辆主要应用V2V技术将自身的状态信息通过网络传输给首车,在传输数据的过程中,会对控制产生一定的时延影响.用 Δt 表示通信时延,考虑通信时延后修改得到的车队模型如式(1)所示:

$$\left. \begin{aligned} \dot{p}_i(t) &= v_i(t), \\ \dot{v}(t) &= a_i(t), \\ \dot{a}_i(t) &= \frac{1}{\tau_i} (u_i(t - \Delta t) - a_i(t)). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: p 是车辆的位置; v 是车辆的速度; a 是车辆的加速度; u 是车辆的控制量; t 是时间; Δt 是车辆时延; τ 是执行器时滞.

1.2 时延模型

本文讨论的时延主要由两部分组成:一部分时延来自车辆内置处理器(在模拟实验中表现为车辆自带的电脑或芯片)处理数据所需的计算时延;另一部分时延来自向非本地化车辆共享状态信息所需要的通信时延,其中通信时延还包含处理输入信息的输入时延和处理输出信息的输出时延.在一个自动驾驶数据流中,输入数据量和输出数据量具有如式(2)所示的关系.

$$m_{out} \ll m_{in}. \quad (2)$$

式中: m_{out} 为输出数据量; m_{in} 为输入数据量.

可用比例关系代替输出数据量的大小,得到式(3):

$$m_{out} = \gamma m_{in}. \quad (3)$$

式中, γ 为小于1的参数,一般 $\gamma \approx 0.1$.

对于首车,其数据量如式(4)所示:

$$\left. \begin{aligned} m_1 &= m_{in,1} + m_{loc,1}, \\ m_{in,1} &= \sum_{i=2}^n m_{in1,i}, \\ m_1 &= \sum_{i=2}^n m_{in1,i} + m_{loc,1}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: m_1 为vehicle1需要处理的数据量, m_1 在处理的过程中将分为两部分,一部分数据需要传递给后车,由后车处理,一部分数据 m_{loc} 需要本地化处理; $m_{in1,i}$ 表示vehicle1传递给后车的数据; $m_{loc,1}$ 表示需要vehicle1本地处理的数据.对于车辆队伍中的每一辆车,其所需处理的数据量如式(5)所示:

$$\left. \begin{aligned} m_{tot,1} &= m_{loc,1}, \\ m_{tot,2} &= m_{in1,2}, \\ &\vdots \\ m_{tot,i} &= m_{in1,i}, \\ &\vdots \\ m_{tot,n} &= m_{in1,n}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: $m_{tot,i}$ 是第*i*辆车所要处理的数据量.一般情况下,数据量与其对应的处理时间成正比,可得输入时延(t_{in})和输出时延(t_{out})的关系如式(6)所示:

$$t_{out} = \gamma t_{in}. \quad (6)$$

处理时延的详细表达如式(7)所示:

$$t_i = \frac{m_{tot,i}}{w_i c_i}. \quad (7)$$

式中: c_i 表示车辆队列中不同车辆的计算能力; w_i

为权重系数,是一个可调节的超参数,用来表征不同车辆以多大的功率/效率来处理输入数据,一般 w_i 不能设置得太大,从而保留一定裕度,避免队列中某一车辆失去全部的计算能力,从而减少应对突发情况的能力. t_{tot} 为总时延,简化表达如式(8)所示:

$$t_{tot} = (1 + \gamma)t_{in} + \max \{t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_n\}. \quad (8)$$

本文中与时延相关的仿真参数如表 1 所示. 分别按平均分配、随机分配、比例分配的策略进行数据量处理,得到由计算能力随机、不同数目组成车辆的自动驾驶车队的平均时延. 通过 Python 进行 10 000 次仿真得到 3 种策略的平均时延结果,如图 4 所示.

参数	值
参与编队的车辆数 n	[2,3,4,5,6]
车辆的计算能力最大值 $c/(Mb \cdot s^{-1})$	[5,10,15,20,25]
输入数据量 $m_{in}/(Mb \cdot s^{-1})$	0.5
γ	0.1

由图 4 可知,在采用比例分配策略与平均分配策略时,随着车辆数目的增加,时延指标大体上呈现下降趋势. 这是因为随着组成车队的设备增多,车队整体的计算能力得到了提高,因此处理数据的速度更快,时延对 V2V 和车队控制的影响更小. 但是,随着车辆数目的增加,车队整体的硬件成本也会显著提高,且随着队列变长,可能出现不可控的网络通信问题. 综合考虑性能与成本,本文所提出的车队内的车辆总数量一般不超过 5 辆.

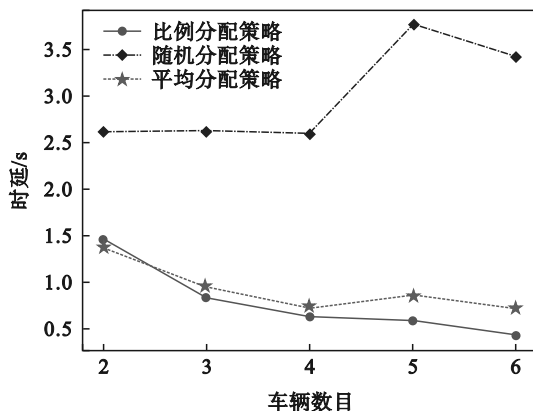


图 4 3 种策略下的时延仿真

Fig. 4 Time delay simulation under three strategies

在应用平均分配策略的过程中,时延曲线并不是严格单调递减的. 因为本文研究的车辆队列异构,可能存在新加入车队的车辆计算能力低于或远远低于其他车辆的情况. 在车辆数目等于 5

时,车队中加入了 1 辆比车队平均计算能力更低的车辆,该车辆无法在相同的时延要求下处理和原车队车辆相同的数据量,因此增加了整体的控制总时延.

在应用随机分配策略的过程中,参与车辆排队的车辆数目为 2~4 (计算能力相近),时延指标分别为 2.613, 2.624, 2.588 s. 数据整体变化趋势较平稳,这是因为在随机分配数据量的过程中,会将较多数据或较少数据分给任意车辆,而此时组成车队的车辆计算能力相近,故整体总时延相差不大. 当车辆数目为 5, 1 辆计算能力较低的新车辆加入车队时,首车仍然随机分配需要处理的数据量给任意从车,可能恰好将过多的数据量分配给计算能力较低的新加入车辆,从而增加了整体的控制总时延.

在按比例分配策略的过程中,首车会根据队伍内车辆的计算能力按比例分配需要处理的数据量,将较多的数据分配给计算能力更强的车辆处理. 数据分配机制考虑到了车辆异质的条件,相较两种传统方法更加合理,时延更低,性能更好. 本文选用比例分配策略得到的 4 车仿真结果作为控制器的时延输入.

2 协作车队事件触发控制

本文提出的事件触发控制由 PID 控制器和模型预测控制器两部分组成,其主要伪代码如图 5 所示. 伪代码描述了首车接受到命令或处于该命令的应用场景时,自适应地切换控制算法的过程.

```

while True:
    if vehicle1_command == 'PID':
        #主车向后车广播, 发送任务信息, 传感器信息
        #车队执行事件触发PID控制器
    if vehicle1_command == 'MPC':
        #主车向后车广播, 发送任务信息, 传感器信息
        #车队执行事件触发MPC控制器
    if human_command == 'PID' or 主车运行在更需要计算速度的普通交通场景, 传感器检测到主车运行在障碍物较少的地方:
        vehicle1_command == 'PID'
    if human_command == 'MPC' or 主车运行在更需要控制精度的复杂交通场景, 传感器检测到主车运行在障碍物较少的地方:
        vehicle1_command == 'MPC'
    
```

图 5 事件触发算法主要伪代码

Fig. 5 Main pseudo code of the event-triggered algorithm

根据传感器数据驱动的控制器的触发开关,在首车启动时,综合雷达和深度相机数据来确定位置状态是普通交通场景还是复杂交通场景. 如果障碍物较少,使用计算量较少、精度较低

的PID控制器;如果障碍物较多,使用计算量较大、精度较高的MPC控制器。

2.1 考虑时延的PID控制器

$$d_{2,1}(t) = p_1(t) - p_2(t) - L_1. \quad (9)$$

在图3的车队模型中,用式(9)描述首车和与首车相邻的第一辆从车之间的距离。 $d_{2,1}(t)$ 表示第1辆车和第2辆车之间的距离.不失一般性,队伍内任意相邻的两辆车、任意一辆车与首车之间的距离如式(10)所示:

$$\left. \begin{aligned} d_{i,i-1}(t) &= p_{i-1}(t) - p_i(t) - L_{i-1}, \\ d_{i,1}(t) &= p_i(t) - p_1(t) - \sum_{i=2}^i L_i. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中: $d_{i,i-1}(t)$ 表示第*i*辆与第*i-1*辆车之间的距离,即相邻两辆车之间的距离; $d_{i,1}(t)$ 表示第*i*辆车与第1辆车之间的距离; L_i 表示第*i*辆车的车长。

在控制从车纵向跟随前车的过程中,由于采用的基本控制模式为领航跟随法,首车的状态信息会对队伍中的每一辆车产生影响,所以在考虑误差时除了要考虑与前车之间的距离误差(前车误差),还应该考虑从车与首车之间的距离误差(首车误差).两种误差如式(11)所示:

$$\left. \begin{aligned} e_i(t) &= d_{i,i-1}(t) - D_{i,i-1}(t), \\ e_1(t) &= d_{i,1}(t) - D_{i,1}(t). \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中: $e_i(t)$ 表示当前车辆与前车之间的距离误差; $e_1(t)$ 表示当前车辆与首车之间的距离误差; $D(t)$ 表示两车之间的理想距离,用下标表示参与计算误差的两辆车的编号.由前车误差 e_i 和首车误差 e_1 组合成的综合误差如式(12)所示:

$$e_i = \lambda_1 e_i(t) + \lambda_2 e_1(t). \quad (12)$$

式中, λ 为可调节的超参数,用于表征前车误差和首车误差的权重。

根据建立的综合误差,进行纵向控制的传统PID控制器如式(13)所示:

$$u_i(t) = k_1 e_i'(t) + k_2 \int e_i'(t) dt + k_3 e_i''(t). \quad (13)$$

式中: e_i 表示第*i*辆车的综合误差,由前车误差和首车误差加权组成; k_1, k_2, k_3 分别表示比例、积分、微分部分的控制器参数。

时滞在通信过程中会对控制产生一定的影响,考虑上述影响得到的 $a_i'(t)$ 如式(14)所示:

$$a_i'(t) = \frac{1}{\tau_i} (u_i(t - \Delta t) - a_i(t)). \quad (14)$$

2.2 模型预测控制器

在应用领航跟随法的车辆队列中,由vehicle1作为首车,用于存储队列情况,控制事件触发器根据车队观测得到的实际情况以切换控

制方法.本节关注建立与车队模型相对应的MPC模型,修改第2.1节中针对单车建立的模型为针对相邻两车之间的模型,如式(15)所示:

$$\left. \begin{aligned} \Delta d_i(t) &= p_{i-1}(t) - p_i(t) - L_{i-1} - D_i(t), \\ \Delta v_i(t) &= v_i(t) - v_{i-1}(t). \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

式中: $\Delta d_i(t)$ 表示第*i-1*辆与第*i*辆车之间的距离与理想的安全距离之间的误差; $D_i(t)$ 表示车头时距; $\Delta v_i(t)$ 表示第*i-1*辆车的速度与第*i*辆车的速度(理想速度)之间的误差.重新建立如式(16)所示的车队动力学的线性预测模型.与原模型相比,状态量取决于车辆本身的状态与变化后的车辆状态.非线性项已通过自适应项得到了消除,预测模型更加准确。

$$\left. \begin{aligned} \Delta \dot{d}_i(t) &= v_{i-1}(t) - v_i(t), \\ \Delta \dot{v}_i(t) &= a_i(t) - a_{i-1}(t), \\ \Delta \dot{a}_i(t) &= \frac{1}{\tau_i} (u_i(t) - a_i(t)). \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

将式(16)写成紧凑形式,可以得到如式(17)所示的模型预测误差编队系统。

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_i^g(t) &= \mathbf{A}_i \mathbf{x}_i(t) + \mathbf{B}_i u_i(t) + \mathbf{E}_i \mathbf{x}_{i-1}(t), \\ \mathbf{x}_i(t) &= [\Delta d_i \quad \Delta v_i \quad a_i]^T. \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

式中:

$$\mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{\tau_i} \end{bmatrix}; \mathbf{B}_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}; \mathbf{E}_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

使用前向欧拉法进行离散化处理,结果如式(18)所示,式中的 T_s 代表采样时间,改写式(18)可以得到如式(19)所示的模型预测误差编队系统。

$$\mathbf{x}_i(k+1) = (\mathbf{T}_s \mathbf{A}_i + \mathbf{E}_i) \mathbf{x}_i(k) + \mathbf{T}_s \mathbf{B}_i u_i(k) + \mathbf{T}_s \mathbf{E}_i \mathbf{x}_{i-1}(k), \quad (18)$$

$$\mathbf{x}_i(k+1) = \mathbf{A}_{i,1} \mathbf{x}_i(k) + \mathbf{B}_{i,1} u_i(k) + \mathbf{E}_{i,1} \mathbf{x}_{i-1}(k). \quad (19)$$

$$\text{式中: } \mathbf{A}_{i,1} = \begin{bmatrix} 1 & -T_s & 0 \\ 0 & 1 & T_s \\ 0 & 0 & 1 - \frac{T_s}{\tau_i} \end{bmatrix}; \mathbf{E}_{i,1} = \begin{bmatrix} 0 & T_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{B}_{i,1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{T_s}{\tau_i} \end{bmatrix}^T.$$

根据式(17)~式(19),得到如式(20)所示的紧凑格式:

$$\mathbf{X}_i(k+1) = \mathbf{M}_x \mathbf{x}_i(k) + \mathbf{M}_u \Delta u_i(k) + \mathbf{M}_c \mathbf{x}_{i-1}(k). \quad (20)$$

考虑到计算设备的数据处理能力,为了加快计算速度,通过可调节的参数化^[11]因子,近似未来时刻的控制量,得到如下表达式^[12]:

$$M_x = \begin{bmatrix} A_{i,1} \\ A_{i,1}^2 \\ A_{i,1}^3 \\ \vdots \\ A_{i,1}^N \end{bmatrix}, M_u = \begin{bmatrix} B_{i,1} \\ A_{i,1} B_{i,1} + \gamma B_{i,1} \\ A_{i,1}^2 B_{i,1} + \gamma A_{i,1} B_{i,1} + \gamma^2 B_{i,1} \\ \vdots \\ \sum_{j=1}^N A_{i,1}^{j-1} \gamma^{N-j} B_{i,1} \end{bmatrix}$$

$$M_c = \begin{bmatrix} E_{i,1} \\ E_{i,1} + A_{i,1} E_{i,1} \\ E_{i,1} + A_{i,1} E_{i,1} + A_{i,1}^2 E_{i,1} \\ \vdots \\ \sum_{j=1}^N A_{i,1}^{j-1} E_{i,1} \end{bmatrix}$$

$$\left. \begin{aligned} X_i(k) &= M_x x_i(k) + M_c x_{i-1}(k), \\ J(k) &= X_i^T(k+1) Q X_i(k+1) + \bar{u}^T R \bar{u} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \min J(k).$$

(21)

s.t. $u_{\min} \leq \bar{u} \leq u_{\max},$
 $D_{\min} \leq d \leq D_{\max},$
 $v_{\min} \leq v \leq v_{\max},$
 $a_{\min} \leq a \leq a_{\max}.$

目标函数与约束如式(21)所示:

式中: Q 为权重矩阵; \bar{u} 是 MPC 控制量; $J(k)$ 为目标函数. 事件触发控制器算法框架如图 6 所示. 上层的事件触发控制器 vehicle1 接受环境信息, 通过计算获取参考路径并跟踪, vehicle2 获取 vehicle1 的路径后, 根据事件触发控制器的状态 State 自适应地选择匹配的控制算法, vehicle3 及其之后的从车具有类似的工作机理.

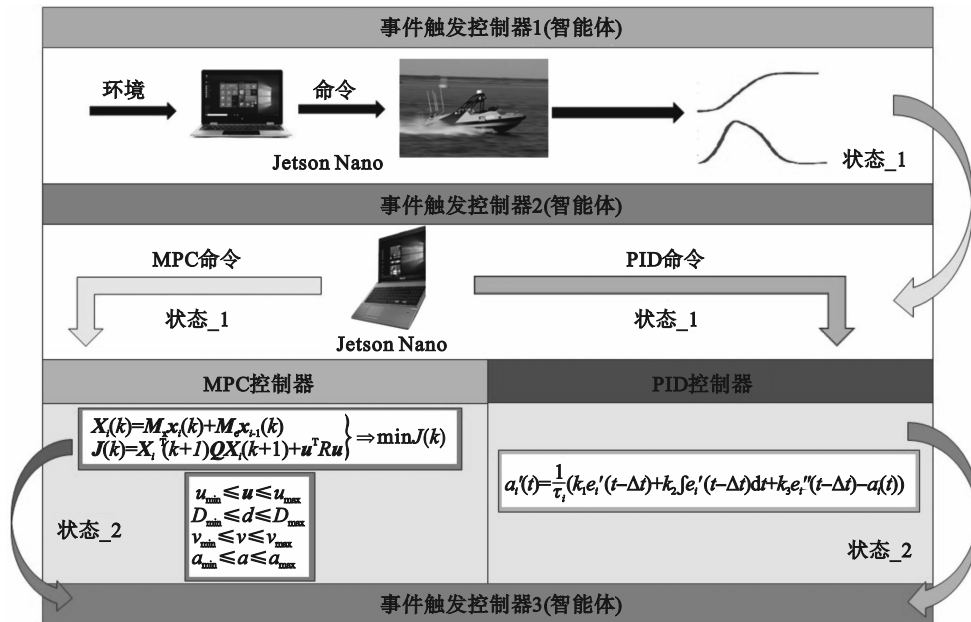


图 6 事件触发控制器算法框架

Fig. 6 Framework of the event-triggered controller algorithm

3 事件触发控制器仿真与实验

城市情况下首车运动状态参数如表 2 所示.

表 2 城市情况下首车运动参数
Table 2 Parameters of vehicle1 motion in urban condition

时间/s	速度/(m·s ⁻¹)	加速度/(m·s ⁻²)
0~5	20	
5~10		1
10~25	25	
25~30		-0.5
30~50	22.5	
50~55		-1
55~70	17.5	
70~75		0.5
75~100	20	

在前半段,首车首先以 20 m/s 的速度匀速运动 5 s, 随后以 1 m/s² 的加速度匀加速 5 s, 之后以 25 m/s 的速度匀速运动 15 s, 随后以 0.5 m/s² 的加速度匀减速 5 s, 之后以 22.5 m/s 的速度匀速运动 20 s. 在后半段, 首车以 1 m/s² 的加速度匀减速 5 s, 之后以 17.5 m/s 的速度匀速运动 15 s, 随后以 0.5 m/s² 的加速度匀加速 5 s, 最后以 20 m/s 的速度匀速运动.

图 7 表示了 PID 控制下, 由首车和 3 辆从车组成的车队的位移、速度、加速度以及相邻两辆车之间的速度误差曲线. 从图 7a 可见, 在从车跟随首车的过程中, 从车的位移曲线与首车的趋势大致相似. 通过 PID 控制, 从车能够根据与前车以及首车的误差实现高效的纵向跟随.

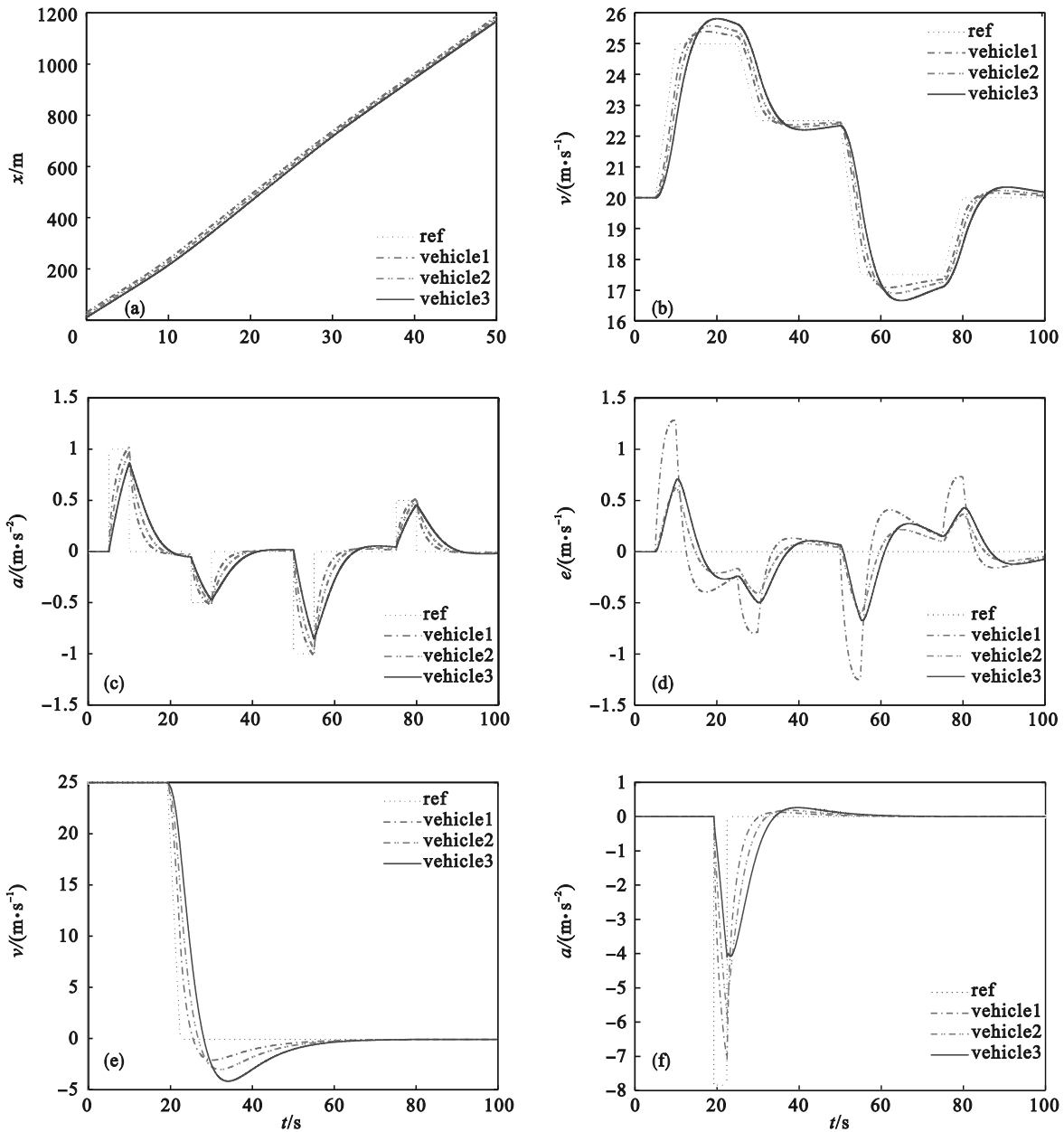


图 7 状态仿真

Fig. 7 State simulation

(a)—位移曲线 1; (b)—速度曲线 1; (c)—加速度曲线 1; (d)—误差曲线 1;
 (e)—紧急情况速度曲线 2; (f)—紧急情况加速度曲线 2.

由图 7b 可知,在加速度变化的过程中,从车对首车的运动状态进行跟随,经过一次超调后与前车的运动状态达成一致,由图 7d 可知,速度误差的最大值为 1.25 m/s,发生在首车第一次加速时,这是因为在系统进行纵向控制的过程中,加速度变化在算法层面略快于向从车广播的速度,导致后车需要经过一段时延才能接收到首车加速信号或由传感器自主得到前车加速信号.

由图 7c 可知,由于在设计 PID 控制器时,选用的综合误差合理地考虑了前车误差与首车误差,因此从整体上看,车辆队列内的从车 vehicle2, vehicle3, vehicle4 的加速度会随着从车

编号 i 的增加而减少,具有这种性质的车辆队列的误差参数也不会随着编号 i 的增大而增大,具有串稳定性.

紧急情况下,车辆队列的速度、加速度曲线分别如图 7e,图 7f 所示.在观测到障碍物后,首车以 $0.8g$ (约为 7.84 m/s^2) 的减速度进行减速,在所述的紧急情况下,传感器的检测距离约为 30 m ,在队伍内的车辆数目为 4 时,通信时延约为 0.64 s ,只要在定加速度的情况下能够满足时延要求在规定的时间内减速到 0,即可视为满足紧急情况提出的要求.由图 7e 可知,经过约 2.5 s ,从车的车辆速度达到 0.经仿真分析与数值计算,得到的结

果满足紧急情况所提出的要求,设计的控制器具有一定的处理紧急情况的能力。

MPC纵向跟踪仿真结果如图8所示.通过Simulink验证了所提的MPC控制器的有效性.应用的模型预测控制器能够在障碍物较多的情况下以更高的精度跟随参考轨迹,事件触发控制中对速度要求较低而对精度要求较高的情况下可以应用此种控制方法。

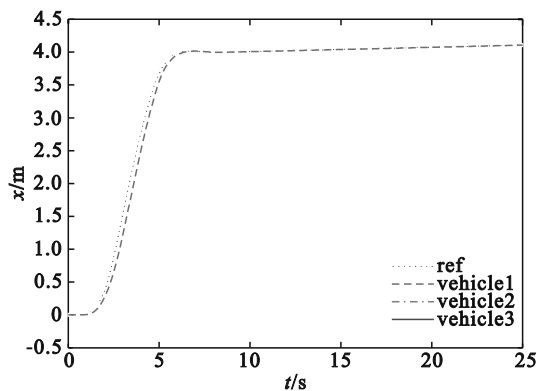


图8 MPC纵向跟踪仿真

Fig. 8 MPC longitudinal tracking simulation

将所提出的控制器搭载在Ubuntu 18.04环境中,进行室内、外现场实验.实验环境分别如图9a、图9b所示.在现场实验中,车队误差经传递后递减,验证了本文提出的具有时延的车队事件触发控制方法的有效性。

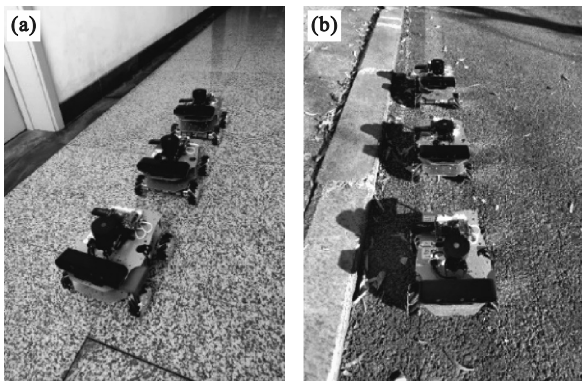


图9 现场实验

Fig. 9 Field experiment

(a)一室内工况;(b)一室外工况。

4 结 论

1) 基于PID控制和MPC建立了考虑车辆异质和通信时延的事件触发控制器,控制器合理传递了相邻两车之间的状态参数,保证了误差经传递后递减。

2) 通过Simulink对应用该纵向控制方法的异构车辆队列中各个车辆的状态信息在城市/紧

急情况下进行了仿真分析,所得结果误差较低,且在具有通信时延时仍能够在紧急情况下保留较好的性能。

参考文献:

- [1] Makino I, Terai J, Miki N. Indoor local 5G measurements employing automatic guided vehicle [C]//2021 24th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC). Okayama, 2021: 1-4.
- [2] Katsaros K V, Amditis A J, Trichias K, et al. Connected and automated mobility services in 5G cross-border environments: challenges and prospects [J]. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2023, 15(3): 145-157.
- [3] Singh A, Singh B. A study of the IEEE802.11p (WAVE) and LTE-V₂V technologies for vehicular communication [C]//2020 International Conference on Computation, Automation and Knowledge Management (ICCAKM). Dubai, 2020: 157-160.
- [4] Jurgen R K. V2V/V2I communications for improved road safety and efficiency [M]. [s.n.]: SAE International, 2012.
- [5] Desai J P, Ostrowski J, Kumar V. Controlling formations of multiple mobile robots [C]//Proceedings of 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No. 98CH36146). Leuven, 2002: 2864-2869.
- [6] Nägeli T, Conte C, Domahidi A, et al. Environment-independent formation flight for micro aerial vehicles [C]//2014 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Chicago, 2014: 1141-1146.
- [7] 李正磊, 褚端峰, 贺宜, 等. 考虑时滞的协作式自动驾驶车队的纵向控制方法 [J]. *汽车安全与节能学报*, 2020, 11(2): 182-188.
(Li Zheng-lei, Chu Duan-feng, He Yi, et al. Longitudinal control method of cooperative autopilot vehicle platooning considering time delays [J]. *Journal of Automotive Safety and Energy*, 2020, 11(2): 182-188.)
- [8] 王树凤, 张钧鑫, 张俊友. 基于人工势场和虚拟领航者的智能车辆编队控制 [J]. *上海交通大学学报*, 2020, 54(3): 305-311.
(Wang Shu-feng, Zhang Jun-xin, Zhang Jun-you. Intelligent vehicles formation control based on artificial potential field and virtual leader [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2020, 54(3): 305-311.)
- [9] Lan J L, Zhao D Z, Tian D X. Data-driven robust predictive control for mixed vehicle platoons using noisy measurement [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2023, 24(6): 6586-6596.
- [10] Yu G, Wong P K, Huang W, et al. Distributed adaptive consensus protocol for connected vehicle platoon with heterogeneous time-varying delays and switching topologies [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(10): 17620-17631.
- [11] Zhao H, Sun D H, Jin S, et al. Consensus-based control strategy for mixed platoon under delayed V2X environment [J]. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, 2023, 149(5): 04023029.
- [12] 何德峰, 顾煜佳, 罗捷. 异质车辆队列系统参数化协同预测巡航控制 [J]. *浙江工业大学学报*, 2020, 48(6): 591-597.
(He De-feng, Gu Yu-jia, Luo Jie. Parametric cooperative predictive cruise control for heterogeneous vehicle platoon systems [J]. *Journal of Zhejiang University of Technology*, 2020, 48(6): 591-597.)