

基于驾驶状态预测的人机力矩协同转向控制器设计

陈虹^{1,2}, 郭洋洋², 刘俊², 郭洪艳^{2†}, 崔茂源³

(1. 吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室, 长春 130022; 2. 吉林大学通信工程学院, 长春 130022;
3. 中国第一汽车股份有限公司智能网联开发院, 长春 130013)

摘要: 针对人机协同转向控制中对于驾驶员参与和驾驶员状态考虑较少这一问题, 提出一种基于驾驶员状态预测的人机力矩协同(human-vehicle torque collaborative based on driver state prediction, HVTC-DSP)转向控制方法. 该方法以力矩为人机交互接口, 提高了驾驶员的参与程度; 同时, 在控制器设计过程中采用模型预测控制方法, 将驾驶员状态考虑在内, 对驾驶员状态进行预测. 采用高精度车辆仿真软件 veDYNA 进行仿真验证, 结果表明, 与不考虑驾驶员状态的人机协同力矩(human-vehicle torque collaborative based on no driver state prediction, HVTC-NDSP)转向控制方法相比, 所提方法可以使辅助力矩更好地跟随驾驶员动作, 提高车辆转向性能, 减小侧向位移偏差, 同时对不同驾驶员也有较好的适应性. 进而, 以驾驶员下一步动作为参考, 使驾驶员当前力矩尽可能接近下一步期望的力矩, 在转向性能几乎不受影响的情况下, 适当减轻驾驶员操作负担.

关键词: 驾驶员状态预测; 两点预瞄驾驶员模型; 主动转向; 模型预测控制; 人机交互; 力矩接口

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Design of human-vehicle torque collaborative steering controller based on driving state prediction

CHEN Hong^{1,2}, GUO Yang-yang², LIU Jun², GUO Hong-yan^{2†}, CUI Mao-yuan³

(1. State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130022, China;
2. College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China; 3. Intelligent Connected Vehicle Development Institute, FAW Group Co. Ltd, Changchun 130013, China)

Abstract: Aiming at the problem that driver's participation and driver's state are seldom considered in human-vehicle collaborative steering control, a human-vehicle torque collaborative steering control method based on driver state prediction is proposed. This method takes torque as human-vehicle interface to improve the degree of driver's participation. At the same time, in the process of controller design, taking the driver state into account, the model predictive control method is used, to predict the state of the driver. veDYNA, a high-precision vehicle simulation software, is adopted for simulation verification. The results show that compared with the human-vehicle torque collaborative based on no driver state prediction steering control method, the proposed method can make the auxiliary torque better follow driver's actions, improve vehicle steering performance, and reduce lateral displacement deviation. At the same time, it has good adaptability to different drivers. Furthermore, with the driver's next action as the reference, the current torque can be as close as possible to the desired torque in the next step. Under the condition that the steering performance is almost unaffected, the driver's operating burden can be appropriately reduced.

Keywords: driver state prediction; two point visual driver model; active steering; model predictive control; human-vehicle interaction; torque interface

0 引言

信息与物理系统(cyber-physical systems, CPS)是一个综合计算、网络和物理环境的多维复杂系统^[1], 智能车辆作为信息与物理系统重要的组成部分, 近年来逐渐成为人们研究的热点. 人车协同转向系统

是目前智能车辆研究的重点之一. 许多方法都被应用于此: 文献[2]提出一种根据驾驶员的实时行为来计算转向辅助动作, 采用模糊控制的方法, 解决了驾驶员参数和速度时变问题, 提高了驾驶的安全性与舒适性; 文献[3-4]提出了一种以转角为控制量的人

收稿日期: 2019-04-30; 修回日期: 2019-06-25.

基金项目: 国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(61520106008); 国家自然科学基金重大项目(61790563); 汽车振动噪声与安全控制综合技术国家重点实验室开放基金项目(W65-GNZX-2018-024).

责任编辑: 俞立.

†通讯作者. E-mail: guohongyan220@163.com.

车协同转向控制方法,在跟随驾驶意图的同时,保证了车辆的安全行驶;文献[5-6]提出了一种随机博弈的共享转向控制框架,降低了人机冲突率,并提高了路径跟踪精度;文献[7]将系统感知与鲁棒控制相结合,实现了人机转向的驾驶权共享;文献[8]提出了一种风险预测的人机协同转向控制,基于潜在的风险预测,研究了驾驶员对共驾系统的接受度,并验证系统所提供听觉警报和视觉信息的有效性,同时在具有隐藏的风险场景下实现了协同转向控制;文献[9]提出一种变参数道路势场车道保持辅助方法,该方法不仅提高了车道保持性能,而且获得了较好的人机协调效果;文献[10]忽略了驾驶员神经肌肉等环节的影响,将驾驶员模型简化为比例环节,用于人机协同转向控制的研究;文献[11]考虑了具有神经肌肉模型的驾驶员,用于研究人机协同转向;文献[12]采用两点预瞄模型结合鲁棒控制方法研究人机协同转向控制方法。虽然目前对人机协同转向控制方法研究很多,但是对于协同过程中驾驶员状态的预测研究相对较少,模型预测控制方法根据预测方程可以依靠当前状态预测未来一段时间的状态,同时还可以处理多目标约束问题。为此,本文基于模型预测控制方法,提出一种基于驾驶状态预测的人机力矩协同转向控制方法。

1 人-车-路模型建立

1.1 两点预瞄驾驶员模型

1.1.1 视觉先行控制

自转向行为描述了不受驾驶员转向影响的转向特性,驾驶员可以利用车辆实际朝向与远点目光方向的夹角来感知这种转向特性^[13],这个夹角称为 θ_{far} 。由图1中的几何关系可得其表达形式如下:

$$\theta_{far} = D_{far} \times \rho + \psi_L \quad (1)$$

其中: D_{far} 为远点预瞄距离, ρ 为道路曲率, ψ_L 为航向角偏差。

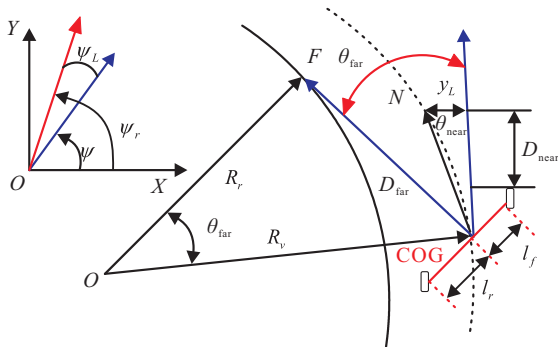


图 1 车路模型示意图

视觉补偿环节由图2中的传输 $G_a = K_a$ 表示, K_a 为远视角增益。

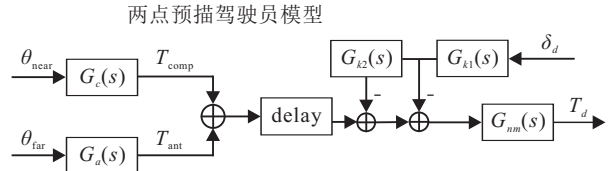


图 2 两点预瞄模型示意图

1.1.2 补偿转向控制

补偿控制即驾驶员利用视觉和动觉来补偿轨迹的瞬时变化,由图2中的 G_c 表示,即

$$G_c = K_c \frac{T_L s + 1}{T_I s + 1} \quad (2)$$

其中: K_c 为近视角增益, T_L 和 T_I 分别为驾驶员超前时间常数和滞后时间常数。

驾驶员利用近区域的信息来保持车道位置,并在车道位置内纠正车辆当前位置,近点预瞄距离与车辆实际朝向的夹角 θ_{near} 为近视角,由图1几何关系可得近视角表达式如下:

$$\theta_{near} = Y_{cl} + D_{near} \times \psi_L \quad (3)$$

其中: Y_{cl} 为车辆当前位置距道路中心线的偏差, D_{near} 为近点预瞄距离。

采用延时环节 $e^{-\tau_p}$ 来反映驾驶员感官与神经系统的延时,通过选取不同的 τ_p 数值,即可反映不同驾驶员的反应时间。为了后续状态方程的建立,取一阶pade近似可得

$$e^{\tau_p} \approx \frac{1 - \frac{\tau_p}{2} s}{1 + \frac{\tau_p}{2} s} \quad (4)$$

其中 τ_p 为驾驶员延迟时间常数。

1.1.3 运动反馈与神经肌肉系统

运动反馈主要取决于驾驶员手臂的运动,主要由图2中的 G_{k1} 和 G_{k2} 构成,其中

$$G_{k1} = K_D \frac{s}{s + \frac{1}{T_1}} \quad (5)$$

$$G_{k2} = K_G \frac{T_{k1} s + 1}{T_{k2} s + 1} \quad (6)$$

其中: K_D 、 K_G 为增益常数, T_1 、 T_{k1} 、 T_{k2} 为感知时间常数, T_N 为肌肉时间常数。驾驶员手臂模型的一阶近似传递函数由图2中的 $G_{nm} = \frac{1}{T_N s + 1}$ 表示。

从图2可以看出,两点预瞄驾驶员模型可以等效为一个三输入单输出的模型。通过对模型的适当化简,选取各输入输出的线性组合作为状态量^[14],可得状态变量 $x_d = [x_{d1}, x_{d2}, x_{d3}, x_{d4}, x_{d5}]^T$ 。系统输入为 $u_d = [\theta_{far}, \theta_{near}, \delta_d]$,系统输出为 $y_d = T_d$,可得驾驶员状态空间方程

$$\begin{cases} \dot{x}_d = A_{\text{driver}}x_d + B_{\text{driver}}u_d, \\ y_d = C_{\text{driver}}x_d. \end{cases} \quad (7)$$

其中

$$A_{\text{driver}} =$$

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{T_N} & \frac{T_{k1}K_G + T_{k2}}{T_{k2}T_N} & -\frac{1}{T_{k2}T_N} & \frac{1}{T_N} & -\frac{1}{T_1T_N} \\ 0 & -\frac{1}{T_I} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_G(T_{k2} - T_{k1})}{T_{k2}} & -\frac{1}{T_{k2}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{2}{\tau_p} & \frac{4}{\tau_p T_I} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_I} \end{bmatrix},$$

$$B_{\text{driver}} =$$

$$\begin{bmatrix} -\frac{K_a}{T_N} & -\frac{T_L K_c}{T_I T_N} & -\frac{T_{k1}K_G + T_{k2}}{T_{k2}T_N} \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_1} \\ 0 & 0 & \frac{K_G(T_{k2} - T_{k1})}{T_{k2}} \\ -\frac{4}{\tau_p T_I} & -\frac{2T_L K_c}{\tau_p T_I} & 0 \\ 0 & -\frac{(T_I - T_L)K_c}{T_I} & 0 \end{bmatrix},$$

$$C_{\text{driver}} = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0].$$

1.2 车路模型

1.2.1 车辆动力学模型

选取线性轮胎力模型

$$\begin{aligned} F_{yf} &= C_f \alpha_f, \\ F_{yr} &= C_r \alpha_r. \end{aligned} \quad (8)$$

其中: F_{yf} 、 F_{yr} 为前、后轮的轮胎侧偏力,单位为N; α_f 、 α_r 为前、后轮的轮胎侧偏角,单位为rad; C_f 、 C_r 为前、后轮的轮胎侧偏刚度,单位为N/rad. 假设纵向速度 v_x 保持不变,在小角度情况下,车辆的质心侧偏角 β 可以近似为 $\beta = \frac{v_y}{v_x}$,于是可得

$$\begin{cases} \alpha_f = \frac{v_y}{v_x} + \frac{l_f r}{v_x} - \delta_f, \\ \alpha_r = \frac{v_y}{v_x} - \frac{l_r r}{v_x}. \end{cases} \quad (9)$$

整理可得线性二自由度车辆模型如下:

$$\dot{v}_y = \frac{(C_f + C_r)}{mv_x} v_y + \left(\frac{(l_f C_f - l_r C_r)}{mv_x} - v_x \right) r - \frac{C_f}{mv_x} \delta_f,$$

$$\dot{r} = \frac{(l_f C_f - l_r C_r)}{I_z v_x} v_y + \frac{(l_f^2 C_f + l_r^2 C_r)}{I_z v_x} r - \frac{l_f C_f}{I_z} \delta_f. \quad (10)$$

其中: m 为车辆质量,单位为kg; r 为车辆横摆角速度,单位分别为rad/s; v_x 、 v_y 分别为车辆的纵向和侧向速度,单位为m/s; C_f 、 C_r 分别为前、后轮轮胎侧偏刚度,单位为N·rad; l_f 、 l_r 分别为车辆质心到前、后轴的距离,单位为m; I_z 为车辆绕Z轴的转动惯量,单位为kg·m²; δ_f 为前轮转角,单位为rad.

1.2.2 路径跟踪模型

根据图1中车辆与道路的几何关系,车辆的航向角偏差 ψ_L 为实际的航向角 ψ 与期望的航向角 ψ_r 之间的差值,即

$$\psi_L = \psi - \psi_r. \quad (11)$$

车辆的侧向预瞄位移偏差 Y_L 在小角度情况下可以表示为

$$Y_L = Y_{cl} + D_{\text{near}} \psi_L. \quad (12)$$

通过对式(11)和(12)求导,可得路径跟踪模型

$$\begin{aligned} \dot{\psi}_L &= r - v_x \rho, \\ \dot{Y}_L &= v_y + D_{\text{near}} r + v_x \psi_L - v_x D_{\text{near}} \rho. \end{aligned} \quad (13)$$

1.2.3 转向系统模型

转向系统是驾驶员与车辆之间的纽带,加入共驾系统的转向系统可以描述为

$$\begin{aligned} \dot{\delta}_d &= \omega_d, \\ J_s \dot{\omega}_d &= -b_s \omega_d - T_{\text{aln}} + T_d + T_c. \end{aligned} \quad (14)$$

其中: ω_d 为转向柱角速度,单位为rad/s; δ_d 为方向盘转角 $\delta_d = i_s \delta_f$,单位为rad; i_s 为传动比; J_s 为转向柱转动惯量,单位为kg·m²; b_s 为转向柱阻尼比,单位为N·m·s/rad; T_{aln} 、 T_d 、 T_c 分别为回正力矩、驾驶员力矩、辅助力矩,单位为N·m.

2 人车协同力矩转向控制器设计

为了提高人车系统的转向性能,补偿驾驶员操作的不足,采用预测的思想,同时考虑驾驶员的因素,设计了一种基于驾驶状态预测的力矩转向控制器.预测模型不仅包含车路模型,同时将驾驶员状态考虑其中.综合式(7)和(10)~(14),选取状态变量为 $x = [x_{d1} \ x_{d2} \ x_{d3} \ x_{d4} \ x_{d5} \ \delta_f \ \dot{\delta}_f \ v_y \ r \ \psi_L \ Y_L]^T$,控制量 $u = T_c$,可以得到人-车-路状态空间方程如下:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + D\rho, \\ y = Cx. \end{cases} \quad (15)$$

其中

$$\begin{aligned}
 B &= \left[0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ \frac{1}{J_s} \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \right]^T, \\
 C &= \left[\begin{array}{cccccccccc} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -D_{\text{near}} & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right]^T, \\
 D &= [d_{11} \ 0 \ 0 \ d_{14} \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -v_x \ -L_{\text{near}}v_x]^T, \\
 A &= \left[\begin{array}{cccccc|cccccc} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} & & & & & & \\ 0 & a_{22} & 0 & 0 & a_{26} & 0 & & & & & & \\ 0 & a_{32} & a_{33} & 0 & 0 & 0 & & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & a_{44} & a_{45} & 0 & & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{55} & 0 & & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \rightarrow & & & & & \\ a_{71} & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{76} & & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{86} & & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_{96} & & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & & & & & & \\ \leftarrow & 0 & 0 & 0 & a_{110} & a_{111} & & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & & & & & & \\ 0 & a_{38} & 0 & 0 & 0 & 0 & & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & a_{410} & a_{411} & & & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_{511} & & & & & & & \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & & & & & & \\ a_{77} & a_{78} & a_{79} & 0 & 0 & & & & & & & \\ 0 & a_{88} & a_{89} & 0 & 0 & & & & & & & \\ 0 & a_{98} & a_{99} & 0 & 0 & & & & & & & \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & & & & & & & \\ 0 & 1 & D_{\text{near}} & v_x & 0 & & & & & & & \end{array} \right].
 \end{aligned}$$

这里

$$\begin{aligned}
 a_{11} &= -\frac{1}{T_N}, \quad a_{12} = -\frac{T_{k1}K_c + T_{k2}}{T_{k2}T_N}, \\
 a_{13} &= -\frac{1}{T_{k2}T_N}, \quad a_{14} = \frac{1}{T_N}, \\
 a_{15} &= -\frac{1}{T_I T_N}, \quad a_{16} = -\frac{i_s(T_{k1}K_G + T_{k2})}{T_{k2}T_N}, \\
 a_{110} &= \frac{T_L K_C}{T_I T_N D_{\text{near}}}, \quad a_{111} = \frac{K_a}{T_N D_{\text{near}}}, \\
 a_{22} &= -\frac{1}{T_I}, \quad a_{26} = -\frac{i_s}{T_I}, \\
 a_{32} &= \frac{(T_{k2} - T_{k1})K_G}{T_{k2}}, \quad a_{33} = -\frac{1}{T_{k2}}, \\
 a_{38} &= -\frac{i_s(T_I - T_L)K_c}{T_I D_{\text{near}}}, \quad a_{44} = -\frac{2}{\tau_p}, \\
 a_{45} &= \frac{4}{\tau_p T_I}, \quad a_{410} = -\frac{4K_a D_{\text{far}}}{\tau_p},
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 a_{411} &= -\frac{2T_L K_C}{\tau_p T_I D_{\text{near}}}, \quad a_{55} = -\frac{1}{T_I}, \\
 a_{511} &= -\frac{(T_I - T_L)K_c}{T_I D_{\text{near}}}, \\
 a_{71} &= \frac{1}{J_s \dot{i}_s}, \quad a_{76} = \frac{K_{\text{aln}}}{J_s \dot{i}_s}, \\
 a_{77} &= -\frac{b_s}{J_s}, \quad a_{78} = \frac{K_{\text{aln}}}{J_s \dot{i}_s^2 v_x}, \\
 a_{79} &= \frac{K_{\text{aln}}}{J_s \dot{i}_s v_x}, \quad a_{86} = \frac{C_f}{m}, \\
 a_{88} &= -\frac{(C_f + C_r)}{m v_x}, \quad a_{89} = \frac{(C_r l_r - C_f l_f)}{m v_x}, \\
 a_{96} &= \frac{C_f l_f}{I_z}, \quad a_{98} = \frac{(C_r l_r - C_f l_f)}{I_z v_x}, \\
 a_{99} &= \frac{(C_r l_r^2 + C_f l_f)^2}{I_z v_x}, \quad d_{11} = \frac{T_L K_C}{T_I T_N D_{\text{near}}}, \\
 d_{14} &= -\frac{4K_a D_{\text{far}}}{\tau_p}.
 \end{aligned}$$

根据上面的人-车-路状态空间方程,即可实现对驾驶员状态的预测.将式(15)离散化,采样时间 $T_s = 0.01 \text{ s}$,可得如下离散预测方程:

$$\begin{cases} x(k+1) = A_d x(k) + B_d u(k) + D_d \rho(k), \\ y(k) = C x(k). \end{cases} \quad (16)$$

其中

$$\begin{aligned}
 A_d &= e^{A T_s}, \quad D_d = \int_0^{T_s} e^{A \tau} d\tau \cdot D, \\
 B_d &= \int_0^{T_s} e^{A \tau} d\tau \cdot B.
 \end{aligned}$$

假设在预测时域内道路曲率 ρ 保持不变,同时定义 k 时刻的系统输入为

$$U(k) = \begin{bmatrix} u(k) \\ u(k+1) \\ \vdots \\ u(k+N-1) \end{bmatrix}, \quad (17)$$

可以得到预测方程为

$$\begin{aligned}
 x(k+1) &= A_d x(k) + B_d u(k) + D_d \rho(k), \\
 x(k+2) &= A_d x(k+1|k) + B_d u(k+1) = \\
 &A_d^2 x(k) + A_d B_d u(k) + B_d u(k+1) + A_d B_d \rho(k), \\
 &\vdots \\
 x(k+N) &= A_d^N x(k) + A_d^{N-1} B_d u(k) + \dots + \\
 &B_d u(k+N-1) + A_d^{N-1} B_d \rho(k), \\
 &\vdots \\
 x(k+P) &=
 \end{aligned}$$

$$A_d^P x(k) + A_d^{P-1} B_d u(k) + \dots + \sum_{i=1}^{P-N+1} A_d^{i-1} B_d u(k+N-1) + A_d^{P-1} B_d \rho(k).$$

输出预测方程为

$$Y(k) = \begin{bmatrix} Y(k) \\ Y(k+1) \\ \vdots \\ Y(k+N-1) \end{bmatrix}. \quad (18)$$

为了有较好的转向性能,本文希望车辆位置与道路中心线的偏差尽可能小,即 Y_{cl} 尽可能小,同时希望控制量动作尽可能小. 由此,得到如下目标函数:

$$J = \sum_{i=0}^{N-1} Y_{cl}(k+i) + \sum_{i=0}^{N-1} \Delta u(k+i).$$

希望车辆距道路中心线的偏差不要过大,即 $Y_{clmin} \leq Y_{cl} \leq Y_{clmax}$;同时希望辅助力矩不要过大,即对控制量进行约束 $T_{cmin} \leq T_c \leq T_{cmax}$;而且还应该满足车辆稳定性约束,即 $r_{min} \leq r \leq r_{max}$. 由此,可以得到如下优化问题:

$$\begin{aligned} \min_{u(k)} J &= \sum_{i=0}^{p-1} Y_{cl}(k+i) + \sum_{i=0}^{p-1} \Delta u(k+i); \\ \text{s.t. } & Y_{clmin} \leq Y_{cl} \leq Y_{clmax}, \\ & T_{cmin} \leq T_c \leq T_{cmax}, \\ & r_{min} \leq r \leq r_{max}. \end{aligned}$$

通过求解优化问题,可以得到控制量,并将控制量的第一步作用于车辆系统.

3 仿真分析

3.1 不考虑驾驶预判的人车协同转向

为了验证人车协同转向控制器的效果,采用高精度车辆仿真模型 veDYNA 进行仿真实验,车辆参数如表1所示. 设定车速为55 km/h,双移线工况.

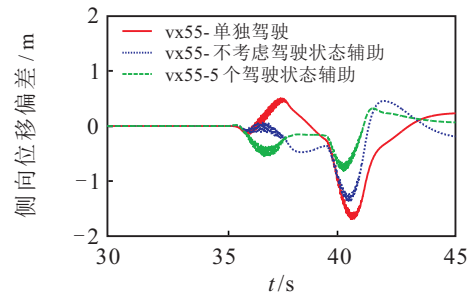
表1 车辆参数表

参数名称	数值	参数名称	数值
m	2160	C_r	87594
l_f	1.535	h_R	0.2952
l_r	1.35	J_s	0.11
I_z	3411.52	i_s	15.8
C_f	87594	b_s	0.62

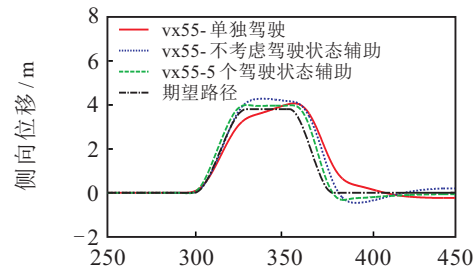
针对两点预瞄驾驶员模型,不同的模型参数代表不同类型的驾驶员,为此本文选取如表2所示的3个驾驶员参数^[15],近点预瞄距离 $D_{near} = 2.5$ m,远点预瞄距离 $D_{far} = 15$ m,并认为驾驶员的驾驶能力已经确定,在行驶过程中预瞄距离不会变化.

表2 驾驶员参数表

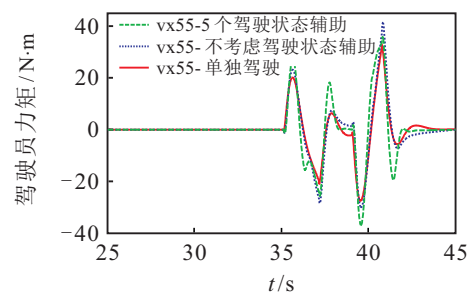
参数名称	驾驶员1	驾驶员2	驾驶员3
T_N	0.12	0.12	0.12
t_p	0.06	0.1	0.04
K_a	22	20	30
K_c	14	12	18
T_L	2.4	1.6	3.5
T_I	0.2	0.35	0.1
T_1	2.5	2.0	5.0
K_G	-0.63	-0.63	-0.63
T_{k1}	1.99	2.99	3.99
T_{k2}	0.013	0.043	0.013



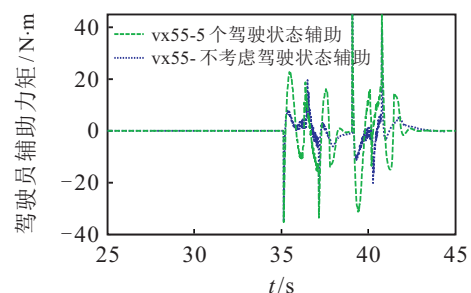
(a) 侧向位移偏差



(b) 侧向位移



(c) 驾驶员力矩



(d) 辅助力矩

图3 驾驶员1的仿真结果

从图3(a)可以看出,相比于驾驶员单独驾驶, HVTC-NDSP方法通过辅助力矩的作用,使侧向位移偏差得到减小,但是HVCT-DSP方法的侧向位移偏差明显更小. 说明在控制器设计过程中考虑驾驶员状态,可以更好地理解驾驶员的操作,人机交互信息更丰富,车辆的转向性能大大提高. 从图3(b)可以看出,实际行驶路径更好地跟踪上了期望路径.

驾驶员的目标是使车辆跟随道路中心线行驶,从图3(c)可以看出,由于驾驶员驾驶能力限制,自身输出的力矩不足以更好地完成双移线工况下的转向控制,在辅助力矩的协助下,驾驶员的操作相比于单独驾驶时都得到了修正,使车辆转向性能增强. 同时从图3(d)可以看出,由于考虑并预测了驾驶员状态, HVCT-DSP方法可以更好地理解驾驶意图,使辅助力矩更加平滑.

从图4可以看出,针对3个不同的驾驶员,转向控制器都可以通过施加辅助力矩保证车辆能够较好地跟踪上期望路径,同时侧向位移偏差保持在较小的范围内. 说明基于驾驶状态预测的人机力矩协同转向控制器对不同驾驶员的适应性,体现了所提算法具有一定的鲁棒性.

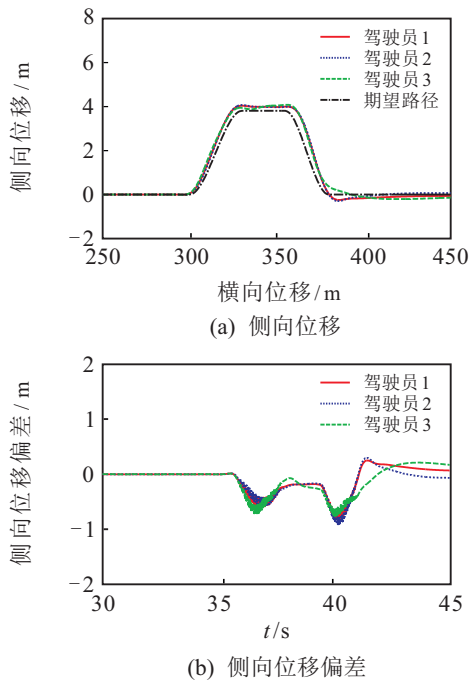


图4 不同驾驶员的对比结果

3.2 考虑驾驶预判的人车协同转向

由于将驾驶员状态考虑在控制器设计过程中,同时采用模型预测的控制方法,根据人-车-路状态空间方程可以对驾驶员下一步操作作出预测,作为驾驶员下一步的期望操作. 因此,在控制器中加入 $J_2 =$

$(T_d(k) - T_p(k + 1))^2$ 这一控制目标,其中 $T_p(k + 1)$ 为系统预测出驾驶员下一步所要进行的操作,本文希望驾驶员当前时刻操作与下一时刻期望操作偏差尽可能小,进而适当减小辅助力矩.

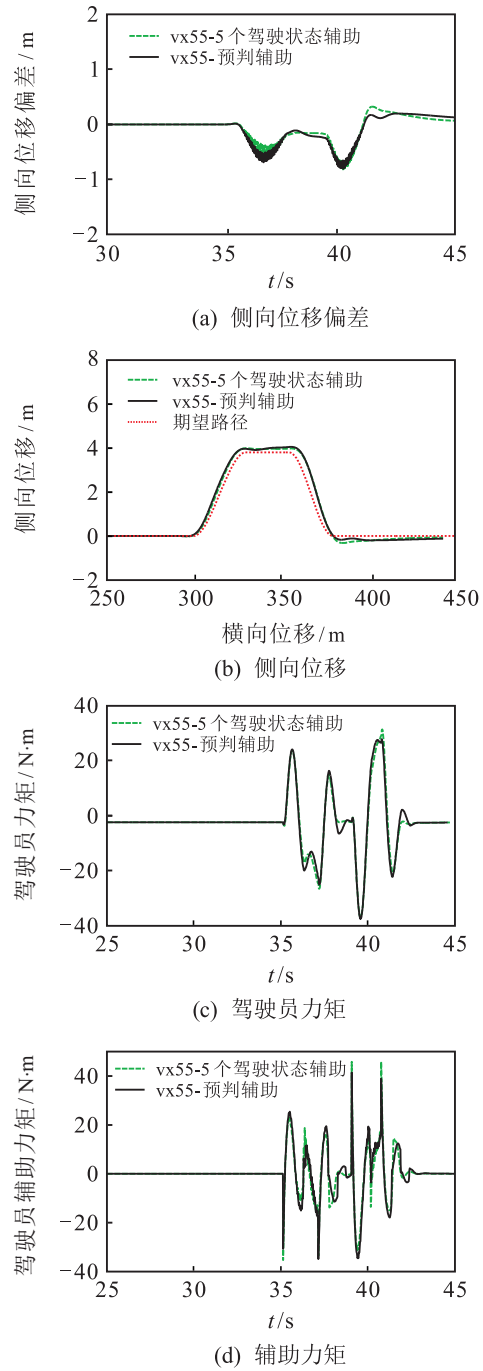


图5 带预判驾驶员1的仿真结果

从图5(a)和图5(b)可以看出,转向性能几乎没有受到影响,依然保持较高水准. 从图5(c)可以看出,驾驶员的操作较之前相比峰值有所减小,说明在一定程度上也减轻了驾驶员负担. 从图5(d)可以看出,辅助力矩较之前也有减小,这是因为考虑了下一时刻期望操作的结果,使当前时刻尽可能接近期望操作,减小每一时刻操作的差值,从而使辅助力矩减小.

4 结论

本文针对人机协同转向控制问题提出了一种基于驾驶状态预测的人机力矩协同转向控制方法,在设计控制器过程中考虑了驾驶员状态,使得人机之间的信息交互更加丰富,车辆的转向性能得到提升.同时,所提出的算法对不同驾驶员都有较好的适应性,证明了算法具有一定的鲁棒性.通过对驾驶员状态的预测,得到驾驶员下一步的期望操作.在此基础上,在目标函数中将下一步期望操作作为参考,在维持原有转向性能的基础上,减少了驾驶员操作峰值,且辅助力矩也有所减小.然而,驾驶员下一步的期望操作与驾驶员的状态和技能相关,预测参考需要的是驾驶技能熟练且状态良好的驾驶员,具体关系还需要进一步探究.

参考文献(References)

- [1] 王中杰, 谢璐璐. 信息物理融合系统研究综述[J]. 自动化学报, 2011, 37(10): 1157-1166.
(Wang Z J, Xie L L. Cyber-physical systems: A survey[J]. Acta Automatica, 2011, 37(10): 1157-1166.)
- [2] Nguyen A T, Sentouh C, Popieul J C. Driver-automation cooperative approach for shared steering control under multiple system constraints: Design and experiments[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(5): 3819-3830.
- [3] Song L, Guo H, Wang F, et al. Model predictive control oriented shared steering control for intelligent vehicles[C]. The 29th Chinese Control and Decision Conference. Yinchuan: IEEE, 2017: 7568-7573.
- [4] Guo Y, Liul J, Song L, et al. Hazard-evaluation-based driver-automation switched shared steering control for intelligent vehicles[C]. 2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Changshu: IEEE, 2018: 244-249.
- [5] Ji X, Yang K, Na X, et al. Shared steering torque control for lane change assistance: A stochastic game-theoretic approach[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(4): 3093-3105.
- [6] Ji X, Liu Y L, Liu Y H, et al. Game-theoretic modelling of shared steering control between driver and AFS considering different human-machine goal consistency[C]. IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Beijing: IEEE, 2017: 4577-4582.
- [7] Sentouh C, Nguyen A T, Benloucif M A, et al. Driver-automation cooperation oriented approach for shared control of lane keeping assist systems[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2019, 27(5): 1962-1978.
- [8] Saito Y, Mitsumoto T, Raksincharoensak P. Effectiveness of a risk predictive shared steering control based on potential risk prediction of collision with vulnerable road users[J]. IFAC-PapersOnLine, 2016, 49(19): 84-89.
- [9] 王其东, 魏振亚, 陈无畏, 等. 基于参数时变人工势场的车道保持协调控制[J]. 机械工程学报, 2018, 54(18): 105-114.
(Wang Q D, Wei Z Y, Chen W W, et al. Lane keeping coordination control based on parameter-varying artificial potential field[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(18): 105-114.)
- [10] Sentouh C, Debernard S, Popieul J C, et al. Toward a shared lateral control between driver and steering assist controller[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2010, 43(13): 404-409.
- [11] Saleh L, Chevrel P, Claveau F, et al. Shared steering control between a driver and an automation: Stability in the presence of driver behavior uncertainty[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2013, 14(2): 974-983.
- [12] 汪选要. 横向辅助驾驶及人机共驾控制策略的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学汽车与交通工程学院, 2017: 54-69.
(Wang X Y. Research on control strategy of lateral assistance driving and man-machine mutual driving[D]. Hefei: School of Automotive and Traffic Engineering, Hefei University of Technology, 2017: 54-69.)
- [13] Donges E. A two-level model of driver steering behavior[J]. Human Factors, 1978, 20(6): 691-707.
- [14] Sentouh C, Chevrel P, Mars F, et al. A sensorimotor driver model for steering control[C]. 2009 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. San Antonio: IEEE, 2009: 2462-2467.
- [15] Zafeiropoulos S, Tsiotras P. Design of a lane-tracking driver steering assist system and its interaction with a two-point visual driver model[C]. 2014 American Control Conference. Portland: IEEE, 2014: 3911-3917.

作者简介

陈虹(1963—),女,教授,博士生导师,从事预测控制、非线性控制及汽车控制等研究, E-mail: chenh@jlu.edu.cn;

郭洋洋(1994—),男,硕士生,从事智能车辆人机协同的研究, E-mail: 1729785255@qq.com;

刘俊(1991—),男,博士生,从事智能车辆人机协同的研究, E-mail: 349137443@qq.com;

郭洪艳(1980—),女,教授,博士生导师,从事智能车辆规划与控制、人机协同及交互等研究, E-mail: guohongyan220@163.com;

崔茂源(1974—),男,高级工程师,博士,从事智能网联汽车的研究, E-mail: cuimaoyuan@faw.com.cn.

(责任编辑: 齐 霖)