

基于车道居中控制的驾驶员切弯行为偏好 视觉影响机制

夏韬楷, 陈 慧, 杨佳鑫, 冉 巍

(同济大学 汽车学院, 上海 201804)

摘要: 驾驶模拟器的采集车道居中控制系统(LCCS)开启时,根据高速公路匝道弯道上的驾驶员注视点视角与关键路点视角信息,建立模型分析视觉特征与该工况下驾驶员对路径切弯行为偏好的关系。首先,提出基于临近路点的驾驶员注视行为分析方法;其次,分析不同弯道区段上关键路点与驾驶员注视视点之间的位置关系,以及利用其预测偏好的可行性;最后,基于视觉特征设计了72个统计指标,筛选后选择其中8个指标建立切弯行为偏好估计逻辑回归模型。结果表明:该模型能够准确估计驾驶员对两条路径在弯道中心区域切弯程度的相对偏好;模型中的参数反映了切弯行为偏好背后的视觉影响机制,这为弯道居中控制时的驾驶员偏好获取及其自适应方法提供了依据与支撑。

关键词: 车道居中控制系统;驾驶员偏好;视觉机制;切弯行为

中图分类号: U471.3

文献标志码: A

Visual Mechanism Behind Drivers' Preference on Curve-cutting Behavior of Lane Centering Control during Curve Negotiation

XIA Taokai, CHEN Hui, YANG Jiaxin, RAN Wei

(School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: The visual angles of drivers' gaze points and critical waypoints on an expressway ramp in the driving simulator when the lane centering control system (LCCS) is on were gathered. A model was built to analyze the relationship between visual characteristics and drivers' preference on the curve-cutting behavior of paths. First, methods to analyze driver gaze behavior by nearing critical waypoints were proposed. Next, the relationship between positions of critical waypoints and driver gaze

points on different curve segments was analyzed, and the reason for this relationship was used to predict driver preference was also demonstrated. Finally, 72 statistic indices were designed based on visual characteristics. A logistic regression model of drivers' preference on curve cutting behavior with selected 8 indices was built. The results show that the estimation model predicts drivers' relative preference on curve cutting behavior of two paths on the center area of the curve road with a high prediction accuracy. Coefficients in the model reveal the visual mechanism behind curve-cutting behavior preference, which provides the basis for the design of preference estimation methods and lane-centering control systems adaptive to driver preference.

Key words: lane centering control system (LCCS); drivers' preference; visual mechanism; curve-cutting behavior

由于高等级自动驾驶辅助系统在量产车型中的推广应用,车道居中控制系统(lane centering control system, LCCS)不仅能够解放驾驶员的双手,还可规避多种原因造成的重大交通事故^[1],在未来对道路交通安全发挥至关重要的作用。然而,相较于其他类型的高等级自动驾驶辅助系统,消费者对LCCS的主观接受程度普遍较低,不符合预期与被误解的LCCS控制行为是消费者不使用LCCS系统的主要因素^[2-3]。传统LCCS控制目标是为保持车辆沿着车道中心线行驶,但该控制目标不符合真实驾驶员的驾驶习惯^[4-5]。如何使得车道保持行为符合驾驶员的偏好是LCCS系统设计中的关键问题。

相关研究通常基于驾驶员自身驾驶风格来调整LCCS的行为,例如对驾驶员自身驾驶风格进行分

收稿日期: 2021-08-31

第一作者: 夏韬楷(1996—),男,博士生,主要研究方向为自动驾驶人机交互与运动规划。E-mail: xiataokai@tongji.edu.cn

通信作者: 陈 慧(1964—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为汽车底盘电子控制系统技术及智能汽车技术。

E-mail: hui-chen@tongji.edu.cn

类并为每一类驾驶员单独设计LCCS参数^[6],或者让LCCS系统直接模仿驾驶员的行为^[7]。此类研究方法假设驾驶员偏好自身的驾驶风格。与此同时,另外一些研究发现了不符合这一假设的现象:驾驶员偏好与自身驾驶风格不一致,或者驾驶员偏好比自身行为更加保守的驾驶风格^[8];在相同的高速公路匝道工况下,不同驾驶员会偏好不同的车辆行驶路径^[9]。分析这种偏好背后的基本规律是设计符合驾驶员使用需求的LCCS的基础。

为了分析引起驾驶员偏好差异的环境与车辆运动因素,研究通常采用车辆运动以及车辆与环境位置关系的物理指标进行量化表征,例如车辆运动速度的高阶导数(jerk)以及跨道时间(TLC)等^[10]。然而Lappi等^[11]提出现有的研究往往忽略了驾驶员的视觉感知特性,但它们是复杂驾驶员行为的基础。Kasper等^[12]通过模型辨识方法验证了注视与道路几何特征对转向行为的影响途径。Lehtonen等^[13]发现不同经验程度的驾驶员在不同弯道区域的注视时间存在差异。Wang等^[14]发现驾驶员的注视行为与转向操纵行为存在相关性,可作为驾驶员与自动驾驶系统交互的评价方法。因此,驾驶员视野中弯道环境的关键几何特征以及弯道上驾驶员的注视行为可能反映了驾驶员对弯道行驶路径的偏好,本文对该推测进行了实验验证。

本文采集驾驶员在高速公路匝道工况下的LCCS行为,分析驾驶员偏好与路径特征及注视行为之间存在的关系,建立模型预测驾驶员对两条路径切弯程度这一LCCS路径特征的偏好。分析结果

指出了匝道弯道工况下驾驶员注视行为与偏好存在的规律。所建立模型的参数具有可解释性,揭示了偏好的视觉影响机制。

1 数据处理与实验设计

1.1 道路关键位点的视角数据

基于眼动仪的测量数据,发现弯道驾驶过程中驾驶员的注视行为集中于视野范围内的小部分区域^[11]。该注视区域代表驾驶员对当前道路环境的判断以及对未来车辆运动状态的期望,考虑驾驶员视觉感知特性的多种驾驶员转向行为模型均可解释这一现象^[11]。

为了量化分析道路在驾驶员视野中呈现的几何特性,以及驾驶员的注视位置与当前道路环境之间的关系,计算4种反映道路几何特征的关键路点在驾驶员视野中的投影位置。

如图1所示,TP点代表驾驶员视野中弯道内侧边线方向发生改变的点,视野中该点处弯道边线的切线方向为垂直方向^[15]。TH2点为车辆以当前速度运动,在2秒以后通过弯道位置临近的车道中心线点。WP1点代表在视野中最接近TP位置的未来车辆运动路径上的点,WP2点代表在视野中处于TP位置上方的未来车辆运动路径上的点^[15]。关键位点的求解方法是基于车辆状态与环境感知信息在大地平面上计算符合要求的点,然后利用三维坐标变换将该点投影至驾驶员视野中。各个道路位点在道路环境与驾驶员视野中的位置如图1所示。

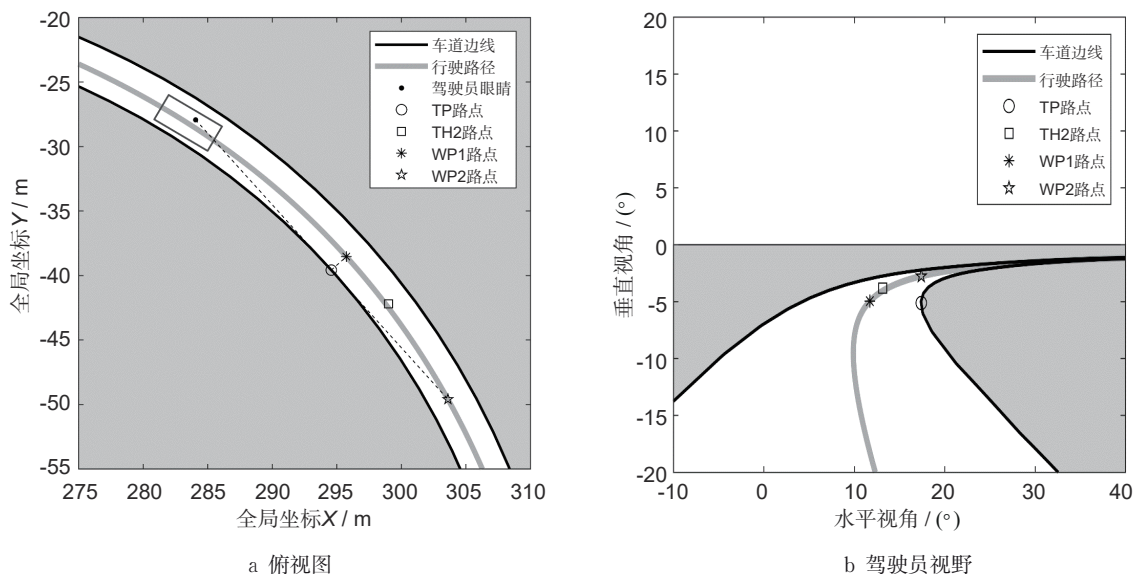


图1 道路关键位点在道路环境中的位置

Fig.1 Positions of critical waypoints in the road environment

1.2 驾驶员注视视角数据

驾驶员的注视视角通过SmartEye Pro9眼动仪采集得到。为了保证数据的可靠性,在每位驾驶员进行正式实验前,进行标定实验对可能存在的注视位置测量结果偏差进行校准。由于分析驾驶员注视时的数据,仅保留眼睑开度以及瞳孔直径指标检测未出现异常的数据点,并对参考文献[16]使用I-VT算法对有效的注视视点数据进行筛选。

1.3 实验场景设计

研究路段采用真实单车道高速公路匝道数据设计实验场景^[9]。弯道长度126.2 m,为右转弯道,弯道前后各有60.0 m的过渡段与高速公路直道相连接,用于数据分析的研究路段长为194.4 m。根据弯

道的不同阶段与曲率变化情况,进一步将有效研究路段划分为前过渡段(Seg1,45 m)、入弯段(Seg2,40.8 m)、弯道中心段(Seg3,44.9 m)、出弯段(Seg4,40.5 m)和后过渡段(Seg5,23.2 m),其中弯道段Seg2—Seg4的平均半径为68 m,弯道中心段为半径60 m的圆弧。车道宽度为3.5 m,车道两侧设置有护栏,右侧护栏与右侧车道边线之间的路肩宽度为2.5 m。考虑交通规则,车辆在弯道以及前后过渡段上以40 km/h的速度匀速行驶。驾驶模拟器场景采用PreScan软件实现,车辆动力学计算采用Simulink软件中车辆动力学工具包实现。实验采用的7条LCCS路径在Frenet坐标系下的横向偏移以及它们与车道中心线的曲率如图2所示。

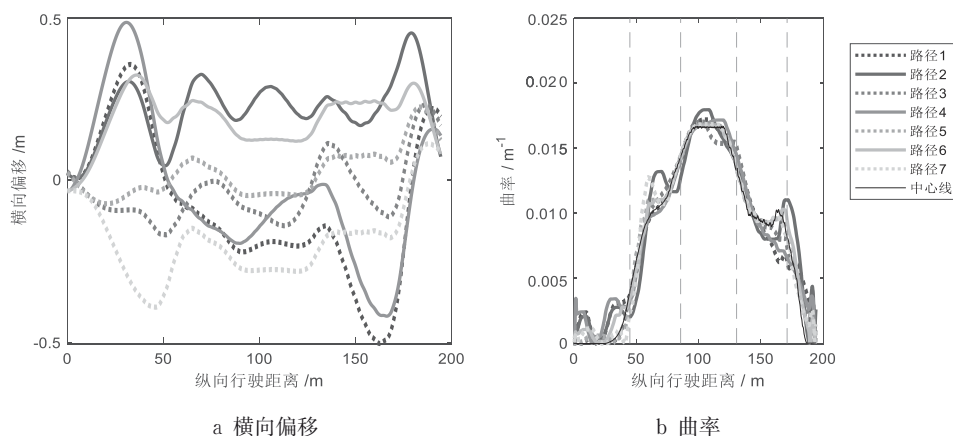


图2 LCCS路径与研究路段的横向偏移与曲率特性

Fig.2 Curvature and lateral offset of LCCS paths and road researched

1.4 主观评价实验流程

招募17位驾驶员参与实验,剔除眼动仪数据结果质量不高的驾驶员以后保留15位驾驶员的有效数据。这些驾驶员均为在校大学生,其中4位为女性驾驶员。

实验开始前,每位驾驶员自由驾驶熟悉实验场景与驾驶模拟器使用方法,并熟悉实验流程。实验开始后,车辆LCCS开启,每次通过研究路段时采用7条预设的LCCS路径中的一条,要求驾驶员感受对比不同路径的差异。每轮评价实验提供给驾驶员3条路径,要求驾驶员给出最喜欢哪一条和最不喜欢哪一条的主观评价。每组评价实验可获得驾驶员对3条路径的相对偏好程度,重复进行实验直到获取驾驶员对所有LCCS路径样本的主观偏好排序。评价实验中的主观评价方法与路径选取方法基于参考文献[9]的方法进行。

2 驾驶员路径偏好与注视行为特征

2.1 驾驶员偏好的路径特征

设计参数描述不同路径上车辆与道路环境关系的特征。加速度偏差 a_{pd} (pathologic discomfort, PD)计算方法如式(1)所示^[17];平均横向偏差 y_{lc} 计算方法如式(2)所示;切弯边距 y_{cc} 计算方法如式(3)所示。其中 y_{cc} 衡量的是车辆在弯道中心区域靠近弯道内侧边线的程度,即路径的切弯程度。

$$a_{pd}(i) = \frac{1}{L} \int_{x=0}^L \left| \frac{v^2(x)}{r_i(x)} - \frac{v^2(x)}{r_r(x)} \right| dx \quad (1)$$

$$y_{lc}(i) = \frac{1}{L} \int_{x=0}^L |y_i(x)| dx \quad (2)$$

$$y_{cc}(i) = \frac{1}{x_e - x_s} \int_{x=x_s}^{x_e} \left| \frac{d_r - d_v}{2} - d_s + y_i(x) \right| dx \quad (3)$$

式中: L 为研究路段的长度; v 为车速; r_r 为道路中心线曲率半径; r_i 为第 i 条路径的曲率半径,其值越大说明车辆运动过程中存在较多横向位置调整行为,为驾驶员带来不适感; y_i 为第 i 条路径的横向偏差且指向弯道外侧为正; d_r 为道路宽度; d_v 为车辆宽度。 d_s 为可接受最小安全边距,此处取固定值0.3 m; x_s 、 x_e 分别为进入研究路段后切弯区域的最小与最大纵向行驶距离,分别取60 m和140 m。

实验中的7条LCCS路径的参数如表1所示。偏好人数是指该路径属于某位驾驶员主观评价最高的3条路径的驾驶员数,不接受人数是指该路径属于某位驾驶员主观评价最低的3条路径的驾驶员数。由表1可知,在研究工况下,当车辆沿路某一路径行驶的加速度偏差过大或者切弯边距过大时,驾驶员对其的主观评价较差。而驾驶员偏好的主观评价较好的LCCS路径可分为两类:靠近车道中心线的路径(路径5、3)以及产生切弯行为的路径(路径7、4)。两类路径的偏好驾驶员数在本次实验中相等说明驾驶员对LCCS路径的偏好具有个性化的差异,没有一种固定的路径可以迎合所有驾驶员的偏好。分析驾驶员偏好差异的影响因素前,首先需要分析驾驶员的行为。

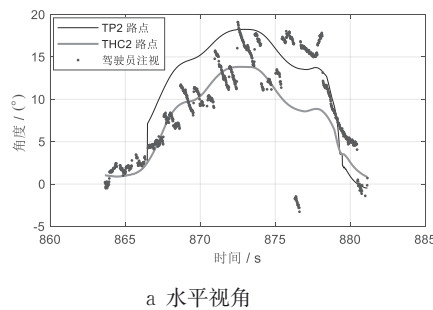


表1 路径特征与驾驶员偏好
Tab.1 Characteristic and drivers' preference of paths

路径编号	加速度偏差/(m/s^2)	平均横向偏差/m	切弯边距/m	偏好人数	不接受人数
1	0.1321	0.2059	0.2979	5	10
2	0.1728	0.2209	0.7158	3	11
3	0.0788	0.0901	0.4195	7	4
4	0.1315	0.1801	0.3648	5	5
5	0.0455	0.0622	0.4657	10	2
6	0.0611	0.1913	0.6369	3	10
7	0.0740	0.2005	0.2353	12	3

2.2 匝道工况下的驾驶员注视行为

采用驾驶员注视视点与多个道路关键位点的相对位置关系分析驾驶员注视行为在不同弯道区间的变化情况。图3以驾驶员11在体验第5条LCCS路径的第1次实验为例展示了注视视点位置从进入弯道到驶出弯道的变化情况,其中水平视角以视野右侧为正方向,垂直视角以视野上方为正方向。可以发现视点的垂直位置几乎始终高于两个路点,因为视野中处于更高位置的两侧护栏相比于地面上的车道线更容易吸引驾驶员的注意力。驾驶员注视视点的水平位置则由TH2路点附近逐渐过渡到TP路点附近。

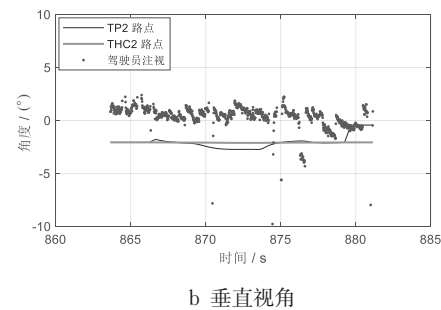


图3 驾驶员注视视点与关键路点的视角

Fig.3 Visual angle change of driver's gaze point and critical waypoints

为了进一步分析这种视点水平视角变化存在的规律,设计判断注视视点位置与路点位置的关系,如式(4)所示。式中: P_j 代表在弯道区间 j 上驾驶员注视视点临近的路点; H_{gaze} 和 V_{gaze} 代表注视视点

的水平视角与垂直视角; H_p 和 V_p 代表待判断路点 P 的水平视角与垂直视角, P 可以是TP、TH2、WP1、WP2这4种路点的其中一种; n_j 为弯道区间 j 上的有效数据点数。

$$P_j = \operatorname{argmin}_P \sum_{k=1}^{n_j} \left((H_{gaze}(k) - H_p(k))^2 + (V_{gaze}(k) - V_p(k))^2 \right) \quad (4)$$

4种路点在7条路径下与5个弯道区间段中注视视点临近的驾驶员数如图4所示。由图4可以发现,对于大部分路径来说,当车辆逐渐驶入弯道,也即从Seg1到Seg2时,驾驶员的注视位置从TH2、TP路点附近转移至WP1路点附近。当车辆逐渐驶出弯道,

也即从Seg3到Seg5时,驾驶员的注视位置从WP1路点再次转移至TH2、TP路点附近。当车辆处于接近弯道中心的Seg2与Seg3区间时,WP1路点附近的驾驶员注视频次最高。

由图1b可知,在驾驶员视野中WP1相较TH2、

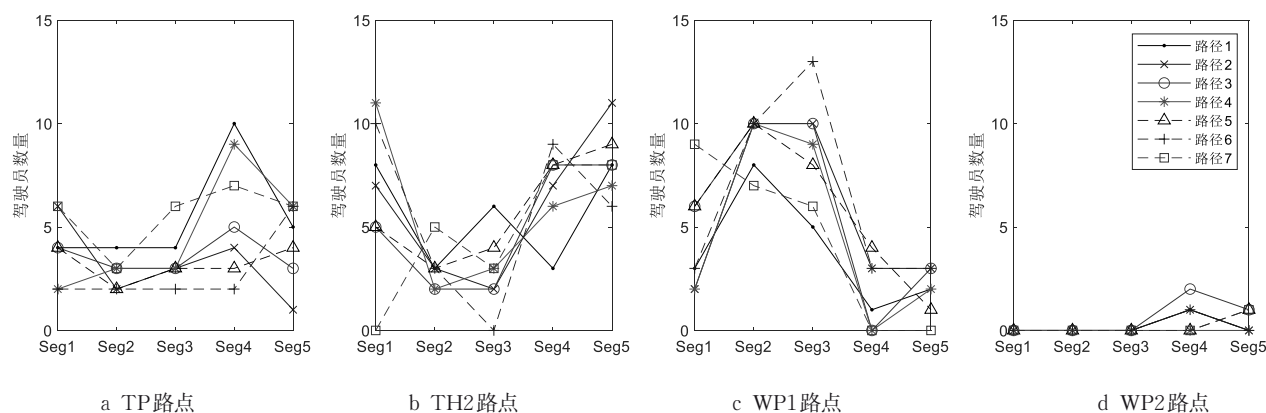


图4 不同弯道阶段不同关键路点附近注视视点临近的驾驶员数

Fig.4 Number of drivers gazing around different critical waypoints on different road segments

TP更加靠近道路外侧。考虑到驾驶员注视的是未来即将到达的道路区域,对比图4中不同路点的驾驶员数与图2b的道路与路径曲率可以发现,WP1路点的驾驶员注视频次与车辆前方道路的曲率呈相同变化趋势,TH2与TP路点的频次则呈相反趋势。另一方面,在道路与路径的曲率更大时,车辆的侧向加速度越高,转向盘转角也越大。在前方道路曲率大的时刻松开转向盘,车轮转角回正后车辆向弯道外侧偏离发生碰撞的概率更高,后果也会更严重。因此,假设注视行为信息反映了弯道过程中驾驶员的感知决策过程。驾驶员在Seg2与Seg3区间注视位置向视野中弯道外侧转移这一现象代表了驾驶员对未来交通事故风险的感知与预判。

3 估计偏好差异的视觉特征模型

3.1 估计模型的因变量

为了建立模型判断驾驶员的偏好差异,首先需要确定模型的因变量。在实际的车辆驾驶过程中,LCCS无法按照1.4节中的流程指导驾驶员进行完整的主观评价实验,而需要根据有限的驾驶员行为数据推断驾驶员的偏好。只有使得估计结果能够随着数据的累积迭代更新才能够充分利用已有数据中包含的有效信息。

由2.1节的分析可知,不同驾驶员间LCCS路径偏好的主要差异之一是路径切弯边距的大小。因此,建立模型的输出为两条路径中哪一条更接近驾驶员最偏好的切弯程度,即以驾驶员最偏好的两条路径的平均切弯边距为驾驶员期望的切弯边距,如式(5)所示。给定路径*i*和*j*上的数据,模型输出为式(6)的 $R_{cc}(i,j)$,其中 $\Pi(\cdot)$ 代表逻辑判断的真伪。

$$y_{cc,pref} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 y_{cc}(i) \quad (5)$$

$$R_{cc}(i,j) = \Pi(|y_{cc}(i) - y_{cc,pref}| > |y_{cc}(j) - y_{cc,pref}|) \quad (6)$$

3.2 估计模型的视觉特征自变量

根据2.2节的分析,驾驶员在接近弯道中心区域的过程中WP1路点附近的注视行为频次最高,因此采用WP1路点与驾驶员注视视点的视觉特征作为模型的输入信息。车辆从入弯到切弯的过程仅主要过了Seg1、Seg2、Seg3区间,而Seg4、Seg5则处于车辆尚未到达的切弯区域未来方向,因此模型输入仅考虑前3个区间段的视觉特征。视觉特征除了路点与驾驶员注视视点水平视角与垂直视角大小以外还包含驾驶员注视视点沿车道中心线方向距离车辆当前位置的时间距离估计(THW)以及注视视点在视野投影中与车道中心线上最近点之间的视角大小(VAC)^[18]。它们在驾驶员视野中的物理含义如图5所示,定义见表2。模型的自变量定义如表3所示,均为两条路径上视觉特征统计量的差值。由6种视觉特征、3个弯道区间与4种统计量计算得到72个统计指标作为候选模型自变量。

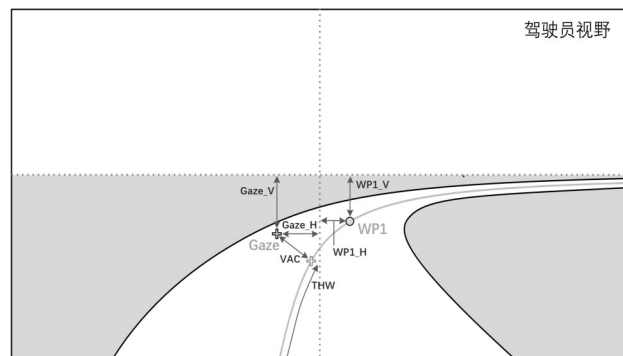


图5 视觉特征的物理含义

Fig.5 Physical meanings of visual characteristics

表2 视觉特征的定义

Tab.2 Definition of visual characteristics

参数	定义
WP1_H/(°)	WP1路点的水平视角大小
WP1_V/(°)	WP1路点的垂直视角大小
Gaze_H/(°)	注视视点的水平视角大小
Gaze_V/(°)	注视视点的垂直视角大小
VAC/(°)	注视视点相对车道中心线的偏离
THW/s	注视视点沿车道中心线的时间距离

表3 估计模型自变量的定义

Tab.3 Definition of independent variables of estimation model

自变量	定义
df_(区间)_(参数名)_.50	两条路径上视觉特征的均值之差
df_(区间)_(参数名)_.20	两条路径上视觉特征的20分位值之差
df_(区间)_(参数名)_.80	两条路径上视觉特征的80分位值之差
df_(区间)_(参数名)_.std	两条路径上视觉特征的标准差之差

3.3 估计模型的建模结果

基于15位驾驶员在7条LCCS路径上的实验数据,最终得到包含315个两两配对的样本数据集。为简化模型参数,避免可能存在的过拟合现象,采用前向逐步回归方法对统计指标进行筛选。为提升模型的可解释性,采用逻辑回归模型进行建模。最终筛选得到8个统计指标作为模型的输入量,它们在模型中的参数值如表4所示。模型在数据集上的分类表如表5所示,最终实现了84.8%的预测精度。

表4 筛选与建模后的自变量与系数

Tab.4 Selected independent variables of coefficients of estimation model

自变量	df_Seg1_Gaze_V_std	df_Seg3_Gaze_H_80	df_Seg3_TH_W_20	df_Seg3_TH_W_std
参数值	0.549	0.097	1.106	-1.605
自变量	df_Seg1_WP1_H_std	df_Seg2_WP1_H_20	df_Seg2_WP1_V_50	df_Seg3_WP1_H_20
参数值	3.337	-2.403	-17.468	1.412

表5 模型分类表

Tab.5 Classification of estimation model

观测值	预测值		准确率/%
	0	1	
0	128	26	83.1
1	22	139	86.3
总体准确率			84.8

观察表4可以发现,筛选出的统计指标主要包含WP1路点视角的20、50分位值与标准差,注视视点在Seg1上的垂直视角标准差与Seg3上的水平视角80分位值,以及Seg3上注视时间距离THW的20分位值与标准差。WP1相关的统计指标描述了前方道路在视野投影中几何特征的变化情况,在视觉

层面上间接体现了LCCS路径固有的切弯特性。注视相关的统计指标则在此基础上调节了模型对于切弯程度偏好的判断,据此定性推断模型参数的实际物理意义。df_Seg3_thw_20的系数为正代表驾驶员在Seg3上的注视距离越远时路径越接近驾驶员偏好的切弯程度。df_Seg3_thw_std的系数为负代表驾驶员在Seg3上的注视位置越集中时路径越接近驾驶员偏好的切弯程度。df_Seg3_gaze_H_80的系数较小但为正,代表驾驶员在Seg3上的注视位置越靠弯道内侧时路径越接近驾驶员偏好的切弯程度。这些现象揭示了驾驶员注视行为与切弯行为偏好之间存在的关联与影响机制,与2.2节中做出的假设较为吻合。

4 结论

基于驾驶模拟器与主观评价实验获取高速公路匝道弯道工况下驾驶员的注视行为数据以及对7条LCCS路径的主观评价排序。结果表明:不同驾驶员偏好不同的路径切弯程度;驾驶员注视视点位置在弯道中心区域主要集中于WP1路点附近;在弯道前后两端则更加接近TP或TH2路点;WP1路点附近的驾驶员注视频次与前方道路曲率存在相同变化趋势。

基于WP1路点与驾驶员注视视点的视觉特征设计统计指标建立逻辑回归模型估计驾驶员对路径切弯边距偏好,实现了84.8%的预测精度。模型参数表明,路径切弯程度接近驾驶员偏好时,驾驶员在弯道中心区域的注视距离相对较远,注视位置更集中以及注视位置更靠弯道内侧。其中:不同路点附近注视频次的变化规律体现了匝道工况下驾驶员的风险感知特性;模型中驾驶员视觉特征对路径切弯行为偏好的影响机制可用于个性化的驾驶员偏好获取。这些发现为考虑驾驶员感知特性与适应驾驶员偏好差异的LCCS决策规划算法设计提供了支撑。

参考文献:

[1] UTRIAINEN R, POLLANEN M, LIIMATAINEN H. The safety potential of lane keeping assistance and possible actions to improve the potential [J]. IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2020, 5(4): 556. DOI:10.1109/TIV.2020.2991962.

[2] VAN DER LAAN J D , HEINO A, DE WAARD D. A simple procedure for the assessment of acceptance of advanced transport telematics [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 1997, 5(1): 1. DOI:10.1016/S0968-

- 090X(96)00025-3.
- [3] BRAITMAN K A, MCCARTT A T, ZUBY D S, *et al.* Volvo and infiniti drivers' experiences with select crash avoidance technologies[J]. *Traffic Injury Prevention*, 2010, 11 (3): 270. DOI:10.1080/15389581003735600.
 - [4] SPACEK P. Track behavior in curve areas: attempt at typology [J]. *Journal of Transportation Engineering*, 2005, 131 (9): 669. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-947X(2005)131:9(669).
 - [5] BARENDSWAARD S, POOL D M, BOER E R, *et al.* A classification method for driver trajectories during curve-negotiation [C/OL]//2019 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC). Bari, Italy: IEEE, 2019. [2021 - 08 - 29]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8914301/>. DOI:10.1109/SMC.2019.8914301.
 - [6] WEI C, ROMANO R, MERAT N, *et al.* Risk-based autonomous vehicle motion control with considering human driver's behaviour [J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2019, 107: 1. DOI: 10.1016/j.trc.2019.08.003.
 - [7] YANG B, SONG X, GAO Z, *et al.* Trajectory planning for vehicle collision avoidance imitating driver behavior [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2021: 095440702110304. DOI:10.1177/09544070211030422.
 - [8] BASU C, YANG Q, HUNGERMAN D, *et al.* Do you want your autonomous car to drive like you? [C/OL]//Proceedings of the 2017 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction. Vienna Austria: ACM, 2017. [2021 - 08 - 29]. <https://dl.acm.org/doi/10.1145/2909824.3020250>. DOI: 10.1145/2909824.3020250.
 - [9] 赵斌, 陈慧, 冉巍, 等. 车道对中控制系统的驾驶员自适应需求验证[J]. *汽车技术*, 2021(3): 1.
ZHAO B, CHEN H, RAN W, *et al.* Verification of Adaptive Demand of Lane Centering Control System [J]. *Automobile Technology*, 2021(3): 1.
 - [10] LAN X, CHEN H, HE X, *et al.* Driver lane keeping characteristic indices for personalized lane keeping assistance system [C/OL]. [2021 - 08 - 29]. <https://www.sae.org/content/2017-01-1982/>. DOI:10.4271/2017-01-1982.
 - [11] LAPPI O, MOLE C. Visuomotor control, eye movements, and steering: a unified approach for incorporating feedback, feedforward, and internal models [J]. *Psychological Bulletin*, 2018, 144(10): 981. DOI:10.1037/bul0000150.
 - [12] VAN DER EL K, POOL D M, MULDER M. Measuring and modeling driver steering behavior: from compensatory tracking to curve driving [J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2019, 61: 337. DOI: 10.1016/j.trf.2017.09.011.
 - [13] LEHTONEN E, LAPPI O, KOIRIKIVI I, *et al.* Effect of driving experience on anticipatory look-ahead fixations in real curve driving [J]. *Accid Anal Prev*, 2014, 70: 195. DOI: 10.1016/j.aap.2014.04.002.
 - [14] WANG Z, ZHENG R, KAIZUKA T, *et al.* Relationship between gaze behavior and steering performance for driver - automation shared control: a driving simulator study [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2019, 4(1): 154. DOI: 10.1109/TIV.2018.2886654.
 - [15] LAPPI O. Future path and tangent point models in the visual control of locomotion in curve driving [J]. *Journal of Vision*, 2014, 14(12): 21. DOI:10.1167/14.12.21.
 - [16] SALVUCCI D D, GOLDBERG J H. Identifying fixations and saccades in eye-tracking protocols [C]//Proceedings of the symposium on Eye tracking research & applications-ETRA'00. Florida: ACM Press, 2000. [2021 - 03 - 22]. DOI:10.1145/355017.355028.
 - [17] CALVI A. A study on driving performance along horizontal curves of rural roads [J]. *Journal of Transportation Safety & Security*, 2015, 7(3): 243. DOI:10.1080/19439962.2014.952468.
 - [18] MOLE C, PEKKANEN J, SHEPPARD W E A, *et al.* Drivers use active gaze to monitor waypoints during automated driving [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11 (1): 263. DOI: 10.1038/s41598-020-80126-2.