

基于驾驶人行为分析的道路安全检测预警系统研发

唐浩真

辽宁工程技术大学, 中国·辽宁 阜新 123000

摘要: 针对现有道路安全预警系统忽视驾驶人状态导致精度不足的问题, 研发融合行为解析的智能预警系统。通过改进 Outlook-Yolo 算法实现复杂环境精准感知, 构建引入疲劳与操纵因子的 TTC-P 碰撞预测模型。实车验证表明, 系统可提前 2.5 秒分级预警, 分心工况下预警准确率达 87.2%, 较传统模型提升 21.8 个百分点, 为个性化主动安全防控提供技术支撑。

关键词: 驾驶人行为; 目标检测; Outlook-Yolo; 碰撞预测; 安全预警

Research and Development of Road Safety Detection and Early Warning System Based on Driver Behavior Analysis

Tang Haozhen

Liaoning Technical University, China Liaoning Fuxin 123000

Abstract: Aiming at the problem of insufficient accuracy of existing road safety early warning systems due to the neglect of driver status, an intelligent early warning system integrating behavior analysis is developed. By improving the Outlook-Yolo algorithm, precise perception in complex environments is achieved, and a TTC-P collision prediction model incorporating fatigue and manipulation factors is constructed. Real vehicle verification shows that the system can provide early warnings 2.5 seconds in advance, with an early warning accuracy rate of 87.2% under distracted conditions, an increase of 21.8 percentage points compared to traditional models, providing technical support for personalized active safety control.

Keywords: Driver behavior; Target detection; Outlook-Yolo; Collision prediction; Safety early warning

0 引言

道路交通安全系统效能的好坏不单是由环境感知的准确性决定的, 更与驾驶人这个主要的决策环节的实时状况有关。利用先进的车辆传感与检测技术获取车辆驾驶行为信息及车外驾驶环境信息, 通过信息融合及模式识别方法对道路交通危险态势进行评估与决策, 是实现机动车驾驶安全预警系统功能的主要技术手段^[1-2]。基于主动安全系统对潜在碰撞的预判断, 在即将发生碰撞前调整乘员约束系统, 以降低乘员损伤的主被动融合技术, 在近年来成为汽车安全的研究热点。主动安全系统由于需要雷达等环境探测技术的支持, 造成系统繁杂且成本较高, 难于在经济型轿车中广泛应用。从事故起因的出现至碰撞的发生通常有长达数秒的时间, 且大多数碰撞发生前驾驶员进行了制动和转向的避撞操控。现有的驾驶安全预警系统对当前道路危险态势评估结论的准确度较低^[3]。本文主要研究如何设计出一个将驾驶人的动态行为特征和道路环境感知深度融合的预警系统, 通过改进视觉算法的边缘端部署方式, 建立带有行为修正因子的碰撞预测模型, 努力达到由“车看

路”向“车懂人”的转变, 为提高复杂交通环境下主动安全防护等级提供理论依据和工程实践参考。

1 系统核心架构与基于 Outlook-Yolo 的感知优化

系统总体架构分为数据采集层、行为解析层、融合预测层、分级预警层。数据采集依靠车载双目视觉单元和九轴惯性测量单元, 以 100Hz 频率同步得到驾驶人面部特征、操作时序和周边交通场景^[4]。行为解析层对驾驶人的疲劳程度和操纵意图进行量化, 用时序网络提取微观行为特征; 融合预测层把行为特征变成动态因子, 嵌入到碰撞时间模型当中, 从而达成风险阈值的自适应调节; 分级预警层按照风险等级用声光触觉多模式方式反馈^[5]。环境感知算法的准确性、实时性影响上层预测的可靠性, 是系统性能的基础性限制。

1.1 面向边缘部署的 Outlook-Yolo 算法改进

为了解决嵌入式平台算力不足、道路目标尺度变化大等问题, 提出一种轻量化改进的 Outlook-Yolo 目标检测算法。骨干网络用 Outlook Attention 机制代替传统的自注

意力, 核心思想就是用每个窗口内的特征做线性映射得到注意力权重, 避免了全局自注意力带来的二次复杂度。在 YOLOv8 的 Backbone 部分加入 Outlook 层, 把输入特征图分成规则的局部窗口, 对每个窗口内的特征做细粒度建模, 计算过程可以形式化地表示为:

$$Attention(Q, K, V) = V \cdot \text{Softmax}(\text{Linear}(Q^T \cdot K))$$

相比传统的多头自注意力, 该方法把计算复杂度从 $O(N^2)$ 降低到了 $O(N)$, 并且在窗口内用细粒度的特征交互保持了局部感知的能力。为了解决小目标检测问题, 在 Neck 部分设计多尺度特征融合金字塔, 新增 160×160 特征层上采样路径, 用双向特征金字塔网络结构加强浅层细节信息和深层语义信息的融合, 大大提高行人、交通标志等小尺寸目标的召回率。在夜间等低光照环境下, 在输入端加入基于 Retinex 理论的预处理模块, 将图像分解成反射分量和光照分量, 只对光照分量进行自适应校正后重构图像, 从而提高对比度而不放大噪声, 使算法在夜间复杂光照条件下也能保持稳定的检出精度^[6-7]。

1.2 复杂驾驶场景下的多目标跟踪与态势提取

感知模块不能只检测目标, 还要形成动态的时序态势来支持风险预测。使用 BoT-SORT 关联策略, 结合目标位置运动特征和表观特征, 用卡尔曼滤波预测目标运动状态, 用重识别网络输出的表观特征向量计算相似度矩阵, 在遮挡或者快速变向时保持身份标识号的稳定, 大大降低身份跳变率。根据稳定的跟踪轨迹, 系统得到本车和相邻车道目标修正车头时距、横向接近速率、目标切入预测轨迹、加速度波动特征^[8]。针对典型高危场景鬼探头(相邻遮挡车辆后方突然出现行人或者非机动车), 算法根据遮挡物边缘像素梯度突变和目标重现位置连续性建立遮挡-重现概率模型, 当检测到大型车辆侧前方出现连续光流异常时, 提前锁定潜在侵入区域, 使系统在目标完全显现前约 0.3 秒发出预判信号, 为碰撞预测留出关键反应时间。

1.3 基于驾驶行为解析的注意力与疲劳量化

驾驶人的行为状态用多源信息融合的方式进行细致的判定。视觉维度用深度可分离卷积网络提取眼部闭合率、视线偏离时长、打哈欠频率, 该网络结构参数量只有传统卷积的 $1/8$, 适合边缘部署^[9]; 操纵维度用方向盘转角熵值和车速标准差来量化驾驶平稳性, 转角熵值体现驾驶操作的规律性波动, 车速标准差体现速度控制的平稳程度。提出综合疲劳因子 $F_{fatigue}$:

$$F_{fatigue} = \alpha \cdot \text{PERCLOS} + \beta \cdot S_{steering} + \gamma \cdot E_{gaze}$$

其中 PERCLOS 是眼睛闭合时间占比, 是公认的疲劳

核心指标, $S_{steering}$ 是规范化后的方向盘转角熵, 体现操纵稳定性退化程度, E_{gaze} 是视线偏离道路中央区域的积分时长, 体现注意力涣散特征, α 、 β 、 γ 是通过实车试验数据基于梯度下降法标定的权重系数, 分别取 0.45、0.30、0.25。该因子以 0.1 秒为周期进行滚动更新, 实时反映驾驶人当前接管能力衰减的程度, 给后面的碰撞预测模型提供重要的行为修正依据。

2 融合驾驶人行为因子的 TTC 碰撞预测模型构建

传统的碰撞时间模型用运动学公式 $TTC = D / \Delta V$ 来计算, 只考虑相对距离 D 和相对速度 ΔV , 把驾驶人简化为一个有恒定反应时间的理想决策者, 忽略了真实驾驶场景中行为状态的动态变化和操作极限。本研究把驾驶人行为因子当作动态修正系数加入模型当中, 创建 TTC-P 预警机制, 让预警阈值随着驾驶人的实时状况而自适应浮动, 从而达成从物理风险到人因风险的映射。

2.1 TTC-P 模型定义与因子嵌入机制

定义融合驾驶人行为因子的碰撞时间 TTC-P 如下:

$$TTC - P = \frac{D}{\Delta V + \epsilon} \cdot K_{driver}$$

其中 D 是自车和目标物的纵向相对距离, ΔV 是相对速度(自车速度减目标速度, 正值表示接近), ϵ 是极小正数防止除零。 K_{driver} 为驾驶人行为修正系数, 用三部分加权融合的方式表示, 疲劳因子 $F_{fatigue}$ (反映当前警觉水平)、驾驶熟练度因子 F_{skill} (根据长期驾驶数据统计得到的制动/转向反应时间百分位数)和环境复杂度因子 F_{env} (由光照强度、雨量传感器信号、道路类型编码组成)。 K_{driver} 用带饱和特性的 Sigmoid 映射来计算。

式中 $\sigma(\cdot)$ 为 Logistic 函数, 把综合状态映射到 (0, 1) 区间, λ 控制最大修正幅度(标定取 0.8), θ 为基准偏移量。当驾驶人处于疲劳或者分心的时候, 综合状态值大于阈值, K_{driver} 增大到 1.3 到 1.8 之间, 等效于把物理 TTC 按比例“拉伸”, 系统会在更远的距离发出预警, 给状态下降的驾驶者留出更长的反应路程; 熟练驾驶人对应 K_{driver} 接近 1.0, 不会过度干预。该模型依靠边缘计算平台即时更新参数, 从而达成预警阈值同驾驶人状况的动态契合。

2.2 基于长短时记忆网络的风险趋势预测

为了克服单一阈值预警对于瞬时波动敏感的缺点, 用长短时记忆网络对 TTC-P 序列进行时序建模, 预测未来一秒内风险变化的趋势^[10]。网络结构为双层长短时记忆网

表1 不同工况下系统预警性能对比

工况类型	传统TTC模型预警准确率	本系统TTC-P模型预警准确率	平均预警提前量（秒）
白天畅通	92.30%	94.10%	0.4
夜间拥堵	78.60%	88.90%	0.9
驾驶人分心	65.40%	87.20%	1.5
目标突然切入	81.50%	90.30%	0.7

络堆叠，隐藏层维度为 128，最后接全连接层输出未来时刻的碰撞概率 $P_{collision}(t+1)$ 。输入特征维度为 7，分别是当前帧 TTC-P 值、目标纵向加速度、自车纵向加速度、横向接近速率、制动踏板开度、转向速率、方向盘角速度。训练数据来自于 50 名驾驶人在城市快速路和交叉口场景下自然驾驶采集的片段，用人工标注的紧急制动或者转向事件前 0.5 秒到 1 秒的片段作为正样本（ $P_{collision}=1$ ），随机抽取无风险片段作为负样本（ $P_{collision}=0$ ）。损失函数用二元交叉熵，优化器用 Adam，学习率初始为 0.001，经过 20 轮迭代后收敛。模型在验证集上的 AUC 为 0.92，说明它对于风险演变趋势的识别比较准确。长短时记忆网络的记忆门和遗忘门机制可以很好地提取出风险发生前的特征模式，例如 TTC-P 持续下降并且驾驶人操作滞后的联合特征，使得系统可以在驾驶人还没有做出反应的时候就预判出潜在的碰撞。

2.3 分级预警策略与实车验证分析

根据 TTC-P 和 $P_{collision}$ 建立二维决策空间，用三级递进预警策略，一级为提示级（蓝色预警），TTC-P 大于 3.5 秒且 $P_{collision}$ 小于 0.3 的场景，用仪表盘图标静默提醒；二级为干预级（黄色预警），2.2 秒到 3.5 秒之间或者 0.3 到 0.6 之间的场景，振动座椅加语音提示，引导驾驶人回到注意力上；三级为紧急级（红色预警），TTC-P 小于等于 2.2 秒或者 $P_{collision}$ 大于等于 0.6 的场景，自动预填充制动压力和安全带，必要时触发部分制动。阈值标定根据实车试验中 20 名驾驶人的主观接受度和客观避险成功率来优化得到。在封闭测试场和城市开放道路累计 300 公里的验证中，系统的性能如表 1 所示。结果表明，加入驾驶人行为因子之后，相比于传统的 TTC 模型，整体虚警率下降了大约 38%，特别是在驾驶人分心的情况下，预警时刻平均提前了 1.5 秒，提高了系统的接受度和避险能力；夜间拥堵工况下预警准确率提高 10.3 个百分点，主要是由于环境因子对感知不确定性的补偿^[11-12]，见表 1。

3 结语

本研究针对道路安全预警的人因适配性问题，提出并实现了一套包含驾驶人行为深度解析和动态风险预测的系统解决方案。设计出面向边缘计算的 Outlook-Yolo 轻

量化感知算法，提高了复杂环境下多目标检测的精度和速度；核心创新就是构建了融合驾驶人行为因子的 TTC-P 碰撞预测模型，把预警逻辑从单一的场景物理量计算升级为“人-车-路”闭环的动态博弈，很好地解决了传统系统在驾驶人状态下降时预警滞后的问题。实车测试数据表明，该系统在各种典型的危险工况下都具有更好的预警时效性和准确性，给下一代智能驾驶安全技术的人性化发展提供新的思路。后续的研究将会对各个年龄段以及驾驶风格的个性化行为因子自学习机制进行探索，还会对大规模自然驾驶队列的泛化性展开验证。

参考文献：

[1] 周顺勇, 彭梓洋, 张航领等. Helmet-YOLO: 一种更高精度的道路安全头盔检测算法[J]. 计算机工程与应用, 2025, 61(02): 135-144.

[2] 孙己龙, 刘勇, 路鑫等. 基于可变形卷积网络和 YOLOv8 的衬砌裂缝检测模型研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2024, 20(08): 181-189.

[3] 褚万里, 郭鹏, 章捷等. 机动车驾驶员疲劳驾驶检测方法研究综述[J]. 电子设计工程, 2025, 33(04): 36-41. DOI:10.14022/j.issn1674-6236.2025.04.008.

[4] 陈思港, 吕强. 基于改进 YOLOv8n 的道路安全头盔佩戴检测的研究[J]. 自动化应用, 2025, 66(06): 44-48. DOI:10.19769/j.zdhy.2025.06.014.

[5] 蒋艳冰. 智能交通系统与道路交通安全探讨[J]. 科技创新导报, 2020, 17(18): 59+61. DOI:10.16660/j.cnki.1674-098X.2020.18.059.

[6] 赵晓娟. 基于驾驶行为分析的交通安全标志设置优化研究[J]. 交通世界, 2025(10): 3-5. DOI:10.16248/j.cnki.11-3723/u.2025.10.026.

[7] 张聪聪, 王朋. 结合特征融合的道路异常检测算法在高速公路安全监测中的应用[J]. 交通世界, 2024(22): 6-9. DOI:10.16248/j.cnki.11-3723/u.2024.22.049.

[8] 马鹏飞. 加强道路试验检测提高道路建设质量探讨[J]. 大众标准化, 2024(20): 16-18.

[9] 张玉楼, 钱炜权. 以专业坚守筑牢道路运输安全防线——浅谈机动车检测机构在达标车辆核查中的核心作用

[J]. 汽车维护与修理, 2026(03): 65-67. DOI:10.16613/j.cnki.1006-6489.2026.03.037.

[10] 杨谦朋. 基于复杂网络建模与马尔可夫决策的自动驾驶行为分析[J]. 机械管理开发, 2026, 41(02): 274-275+279. DOI:10.16525/j.cnki.cn14-1134/th.2026.02.095.

[11] 张晨骁, 马永锋. 重型货车驾驶人行为分析与风

险数智化防控[J]. 道路交通管理, 2025(11): 56-59.

[12] 杨薇薇. 基于机器学习的汽车驾驶行为分析与风险评估[J]. 汽车电器, 2025(10): 35-37. DOI:10.13273/j.cnki.qcdq.2025.10.043.

作者简介: 唐浩真 (2004.10-), 男, 壮族, 广西壮族自治区河池市, 本科在读, 研究方向: 交通工程。