



Research on Intersection Vehicle Collision Warning Based on Roadside LiDAR

Xuan DOU^{1,2,3}, Hanping ZHAO^{1,2,3}, Xiaowen MEI^{1,2,3}

¹Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, MOE, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

²Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Ministry of Emergency Management and Ministry of Education, Beijing 100875, China

³Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

*Corresponding author. Email: 06136@bnu.edu.cn

ABSTRACT

A roadside LiDAR-based intersection vehicle collision warning method is proposed in order to reduce intersection vehicle collision accidents. Common vehicle collision scenarios at urban intersections are constructed, and corresponding 3D simulation experiments are designed. The point cloud data of the collision experiment is collected based on the realistic scenario simulated roadside LiDAR. The trajectory information of vehicles in the intersection area is extracted using the DBSCAN vehicle detection algorithm and the joint probabilistic data association tracking algorithm combined with the traceless Kalman filter. A vehicle trajectory model is constructed. The vehicle trajectory model is applied to calculate the location of the collision point where a collision may occur, and the collision warning is performed by combining the time difference between the vehicles that may collide and the collision point. The 3D simulation experiments of specific hazard scenarios are completed using Carla simulation platform. The simulation experiment results show that this method can make early warning of possible collisions. It provides a technical basis and experimental procedure for the application of roadside LiDAR-based intersection vehicle collision warning method.

Keywords: roadside LiDAR, intersection, collision warning, 3D simulation.

基于路侧激光雷达的交叉口车辆碰撞预警研究

窦轩^{1,2,3}, 赵晗萍^{1,2,3}, 梅晓雯^{1,2,3}

¹北京师范大学, 环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875, 中国;

²应急管理部-教育部减灾与应急管理研究院, 北京, 100875, 中国;

³北京师范大学地理科学学部灾害风险科学研究院, 北京, 100875, 中国

*通讯作者. 电子邮箱: 06136@bnu.edu.cn

摘要

为减少交叉口车辆碰撞事故, 提出了一种基于路侧激光雷达的交叉口车辆碰撞预警方法。构建了城市交叉口常见的车辆碰撞场景, 并设计了相应的三维仿真实验。基于现实场景模拟路侧激光雷达采集碰撞实验的三维点云数据, 使用 DBSCAN 车辆检测算法和联合概率数据关联追踪算法结合无迹卡尔曼滤波提取交叉口区域车辆的

轨迹信息；构建了车辆轨迹模型，应用车辆轨迹模型计算可能发生碰撞的碰撞点位置，结合可能发生碰撞的车辆到达碰撞点的时间差进行碰撞预警。使用 Carla 仿真平台完成特定危险场景的三维仿真实验，仿真实验结果表明，此方法能够提前对可能发生的碰撞事故做出预警，为基于路侧激光雷达的交叉口车辆碰撞预警方法的应用提供了技术基础和实验流程。

关键字：路侧激光雷达, 交叉口, 碰撞预警; 三维仿真

1. 引言

道路交叉口汇集多方向交通流，交通状况复杂，是交通冲突和交通事故的集中点。交叉口发生的交通事故约占我国城市交通事故总量的 30%^[1]。近年来，基于车路协同系统的行车安全被公认为是继安全带、安全气囊后的新一代交通安全技术^[2]。车路协同系统对相关传感器提出了更高要求。

碰撞预警是减少碰撞事故最直接有效的方法，如何判断危险状态发出预警信号则是碰撞预警技术的核心。目前许多学者基于车辆碰撞时间设计了交叉口车辆碰撞预警算法：Reihe^[3]首次提出车辆碰撞时间（Time to Collision, TTC）的概念，许多学者基于这一定义，针对不同的应用场景设计了相应的算法^[4-9]。

上述研究提出的车辆碰撞预警算法有较高的有效性和准确性，但实际场景中预警判断前提是可以获取车辆的实时位置和运动轨迹。目前主流轨迹信息获取手段是 GPS 和摄像头^[10-13]，但这两种手段无法获取高精度轨迹级别的数据。若将激光雷达作为路侧设备使用，可以很好的弥补 GPS 和摄像头的缺陷。近几年已有一些学者开展了路侧激光雷达点云数据处理研究，技术上激光雷达对道路车辆检测追踪速度和准确率都有了很大的提升^[14-19]

上述路侧激光雷达的研究建立了对道路使用者进行识别检测与轨迹追踪的理论基础，但是道路了交叉口是一类特殊且复杂的交通场景，如何将激光雷达应用于车辆碰撞预警，需要建立相应技术流程，并且由于碰撞预警难以通过现实实验验证，也需要开发可复用可控的碰撞预警仿真模型作为未来研究基础。因此本文提出了一种基于路侧激光雷达的交叉口车辆碰撞预警方法，将激光雷达作为路侧设备，获取交叉口范围车辆轨迹信息。利用提取的轨迹信息进行碰撞点估计，依据车辆到达碰撞点的时间差阈值对将要发生碰撞的车辆进行分级预警。在 Carla 仿真平台中设计并完成三维仿真实验，实现整个技术流程。

2. 研究方法

基于路侧激光雷达的交叉口车辆碰撞预警方法技术框架如图 1 所示。首先对路侧激光雷达点云数据进行处理，提取碰撞场景中车辆的轨迹信息。然后构建交叉口车辆坐标模型，利用提取的轨迹信息进行碰撞点估计，进而得到车辆到达碰撞点所需的时间（Time to Collision Point, TTCP）。最后依据 TTCP 的阈值对驾驶员进行预警，在仿真平台中验证预警的有效性。具体技术框架如图 1 所示：

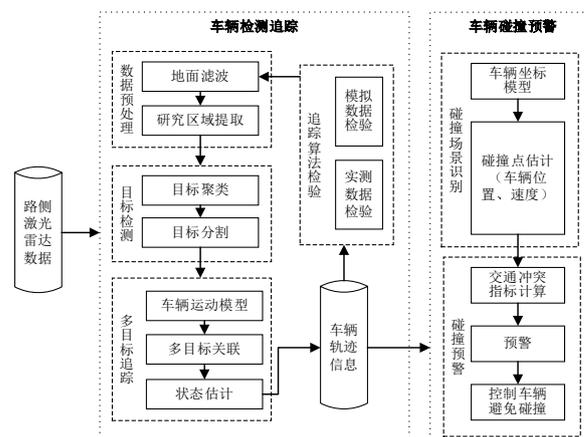


图 1 技术框架

2.1 车辆轨迹信息追踪

Carla 仿真平台中获取的路侧激光雷达原始点云数据如图 2 所示。

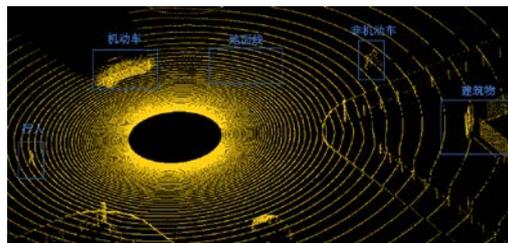
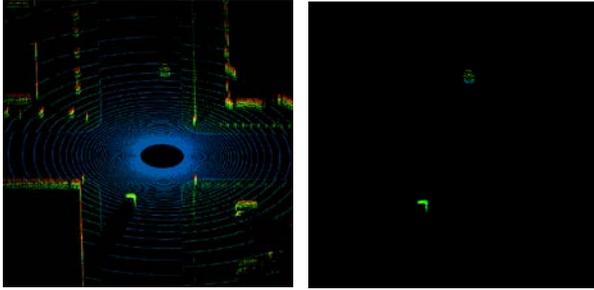


图 2 路侧激光雷达原始点云数据

2.1.1 基于 DBSCAN 聚类的车辆检测

对路侧激光雷达点云数据进行车辆检测和追踪

前需要将场景中除车辆点云数据外的其他点云数据滤除（建筑物、地面线等）。如图 3 所示，路侧激光雷达点云数据经过地面滤波和研究区域选取后，得到仅包含车辆点云的数据。



(a)原始数据 (b)预处理后的数据

图 3 数据预处理

本文采用 DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) 聚类分割算法^[14, 20]对离散点构成的目标团块进行检测识别。如图 4 所示，通过 DBSCAN 聚类算法得到车辆检测结果。

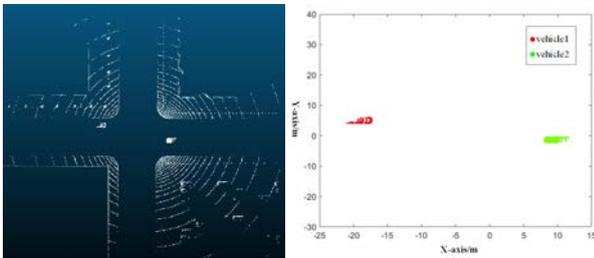


图 4 车辆检测结果

2.1.2 基于 JPDA 和无迹卡尔曼滤波的车辆追踪

在本文利用路侧激光雷达获取的三维点云数据不仅可以完成目标检测，而且可以准确地获取目标的位置，从而实现目标跟踪。联合概率数据关联算法 (Joint Probabilistic Data Association, JPDA) 可以判断两个或多个相邻帧中的检测是否为同一目标、新目标和误判目标^[21, 22]。因此选取 JPDA 方法追踪关联车辆，在关联后根据目标的运动状态对其进行追踪，在追踪过程中利用无迹卡尔曼滤波对目标的速度进行滤波，从而得到更稳定的状态估计，并据此对多个动态目标进行跟踪。

通过前面的检测和聚类处理，可以获得每一帧点云的目标检测结果，将其作为目标关联追踪器的输入，进行多帧关联及目标追踪。图 5 为点云数据经过目标检测及追踪的单帧结果示意图，其中橙色的框为目标检测结果的边界框 (Bounding box)，绿色的框为目标追踪结果的边界框。经过相应的计算，可以得到每一

帧点云中追踪到车辆在追踪算法中的关联编号及其位置和速度，据此可以得到车辆轨迹。

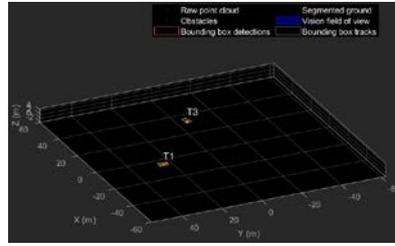


图 5 车辆追踪结果图

2.2 碰撞预警算法

车辆与目标发生碰撞的时间 (Time to Collision, TTC) 是评价驾驶过程中是否安全的重要指标。根据车辆轨迹模型，可求出若发生碰撞时碰撞点的位置，进而求出车辆到达碰撞点所需的时间 TTCP (Time to Collision Point, TTCP)。车辆距离到达碰撞点的时间 TTCP 是指根据车辆当前位置及行驶状态，到达可能碰撞点的时间。根据两车到达碰撞点的时间差来进行相应的预警判断。

车辆在交叉口处有直行、右转和左转三种行驶状态。考虑到通行效率，左转车辆在部分路口与直行车辆处于同一相位，右转车辆不受交通信号灯的限制，车辆行驶到路口即可右转。在上述交通场景中，左转车辆与右转车辆都与直行车辆有一定的碰撞风险，故本文选取左转与直行及右转与直行两个场景碰撞进行分析^[8]。

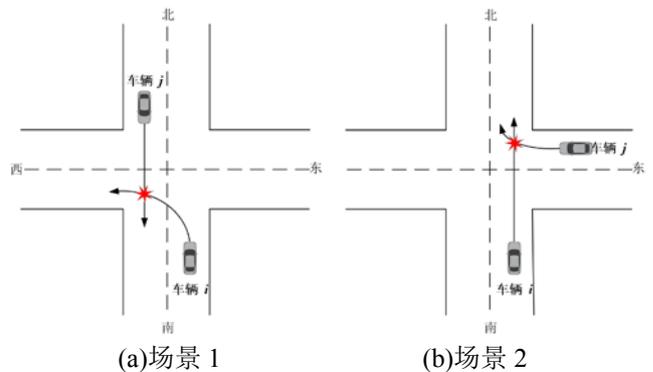


图 6 交叉口碰撞场景

场景 1 左转与直行碰撞：如图 6(a)所示，此时南北方向为绿灯，车辆 i 从南向西左转，车辆 j 从北向南直行，两辆通过交叉口的路径存在重合点，车辆在重合区域发生碰撞。

场景 2 直行与右转碰撞：如图 6(b)所示，此时南北方向为绿灯，车辆 i 由南向北直行，车辆 j 由东向

北右转, 两辆通过交叉路口的路径存在重合点, 车辆在重合区域发生碰撞。

2.2.1 左转与直行碰撞

左转与直行车辆的车辆碰撞轨迹模型如图 7 所示, 以十字路口西南角为坐标原点 O , 向东向北分别建立 x 轴与 y 轴。

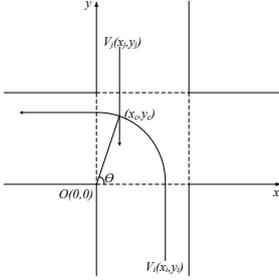


图 7 左转与直行车辆碰撞示意图

在图 7 中, 左转车辆 i 先是由南向北沿 y 轴正方向行驶, 然后在交叉口向左转弯, 其转弯半径半径 $R_l = x_i$, 直行车辆 j 由北向南沿 y 轴负方向行驶, 直行车辆 j 的行驶轨迹与左转车辆 i 的行驶轨迹相交于撞点 (x_c, y_c) , 据此可建立轨迹方程如式 (1) 所示:

$$\begin{cases} x_c^2 + y_c^2 = R_l^2 \\ x_c = x_j \end{cases} \quad (1)$$

由式 (1) 可得:

$$y_c = \sqrt{x_i^2 - x_j^2}$$

根据车辆的位置信息, 可以得到车辆到碰撞点的距离, 左转车辆 i 和直行车辆 j 到碰撞点的时间 $TTCP_i$ 和 $TTCP_j$ 可以由下式表示:

$$\begin{cases} TTCP_i = \frac{R_l \cdot \theta}{v_i(t)} \\ TTCP_j = \frac{y_j - \sqrt{x_i^2 - x_j^2}}{v_j(t)} \end{cases} \quad (2)$$

其中, $\theta = \arcsin \frac{\sqrt{x_i^2 - x_j^2}}{x_i}$ 是左转车辆 i 在转弯过程中到达碰撞点所转过的弧度值。

2.2.2 右转与直行碰撞

如图 8 所示, 路宽为 W , 直行车辆 i 直行通过路口, 右转车辆 j 在行驶过程中的右转轨迹半径 $R_r = W - y_i$, 在此基础上, 可构建车辆转弯曲线的轨迹方程, 并据此求得车辆可能发生的碰撞地点坐标。

$$\begin{cases} (x - W)^2 + (y - W)^2 = R_r^2 \\ x_c = x_i \end{cases} \quad (3)$$

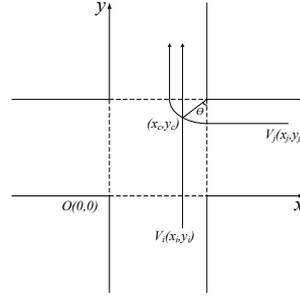


图 8 右转与直行车辆碰撞示意图

由式 (3) 可得:

$$y_c = W - \sqrt{(W - y_j)^2 - (x_i - W)^2}$$

根据车辆的位置信息, 可以得到车辆到碰撞点的距离, 直行车辆 i 和右转车辆 j 到碰撞点的时间 $TTCP_i$ 和 $TTCP_j$ 可以由下式表示:

$$\begin{cases} TTCP_i = \frac{W - \sqrt{(W - y_j)^2 - (x_i - W)^2}}{v_i(t)} \\ TTCP_j = \frac{R_r \cdot \theta}{v_j(t)} \end{cases} \quad (4)$$

其中, 车辆 j 右转经过的弧度 $\theta = \arcsin \frac{W - x_i}{W - y_j}$ 。

2.2.3 预警判定

若车辆保持当前的行驶状态继续行驶, 则 $TTCP_i$ 和 $TTCP_j$ 都会随着车辆向碰撞点行驶而逐步减小。在此基础上, 选择两车到碰撞点的时间差 $\Delta TTCP$ 作为预警判定的指标, 两车到达碰撞点的时间差越小, 则说明依照当前行驶状态, 发生碰撞的可能性越大, 应当针对情况进行相应的预警。

$$\Delta TTCP = |TTCP_i - TTCP_j| \quad (5)$$

取车辆在路口处的行驶速度为 30km/h, 查阅资料可知, 常温下车辆在柏油路面上行驶过程中可获得的刹车减速度最大为 7.4m/s²。根据公式 $v = v_0 + at$ 可算得以 30km/h 行驶的车辆在柏油路面上进行最大刹车减速, 经过 1.2s 后, 车辆能够完全刹停。要避免两车相撞, 取 $\Delta TTCP = 2s$ 为阈值来进行防碰撞预警。并根据 $\Delta TTCP$ 将防碰撞预警分为不同的等级。

表 1 预警策略分级方式

评判条件	预警方式
$\Delta TTCP < 2s$	红色预警
$2s \leq \Delta TTCP < 3s$	黄色预警

$3s \leq \Delta TTCP < 4s$	绿色预警
$4s \leq \Delta TTCP$	不发出预警

3. 仿真实例

由于车辆碰撞无法进行大量现场实验，为验证本文提出的基于路侧激光雷达的交叉口车辆碰撞预警方法的有效性，针对前文两种交叉口碰撞场景，基于Carla 驾驶仿真平台进行三维仿真实验。

3.1 车辆碰撞仿真实验

在 Carla 仿真平台中构建交叉口场景，车道为十字型无遮蔽双向 4 车道信号交叉口，场景如图 9 所示。参考实际场景中路侧激光雷达的位置，在仿真场景中的交叉口中间架设路侧激光雷达，以获取交叉口区域车辆的点云数据。

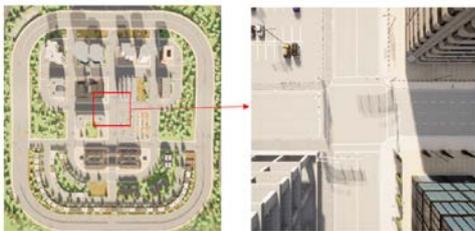


图 9 交叉口场景

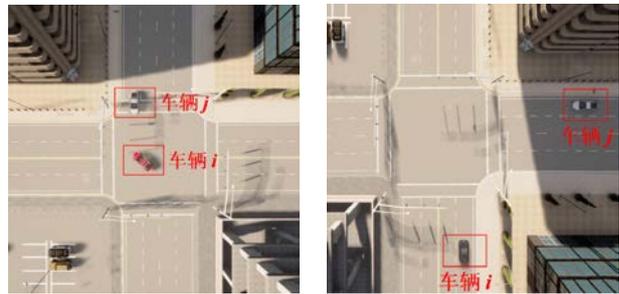
本研究参照实际场景中常用的 40 线激光雷达设置仿真场景中的激光雷达关键参数，将仿真场景中的激光雷达参数设置为如表 2 所示参数。假定交叉口内的全部车辆配备 V2X 网联通信设备和行车预警系统，车辆可以与路边基础设施通信，即可以通过激光雷达接收音频形式的预警信息。

表 2 激光雷达参数

技术指标	技术参数
放置高度	2.5m
线数	40
探测距离	200m
测量频率	720kHz
扫描频率	20Hz
垂直视场角	-30° ~0°

交叉口场景构建完成后，按照 2.2 节构建的左转与直行、右转与直行两个交叉口碰撞场景设定仿真实验中的车辆运行状态，进行仿真实验。两中碰撞场景的仿真实验如图 10 所示。图 10(a)为场景 1 左转与直行碰撞，其中红车为左转车辆 i，白色车辆为对向直行车辆 j；图 10(b)为场景 2 直行与右转碰撞，其中黑

色车辆为直行车辆 i，白色车辆为右转车辆 j。车辆碰撞仿真实验完成后，得到碰撞过程的原始路侧激光雷达点云数据。



(a)场景 1 (b)场景 2

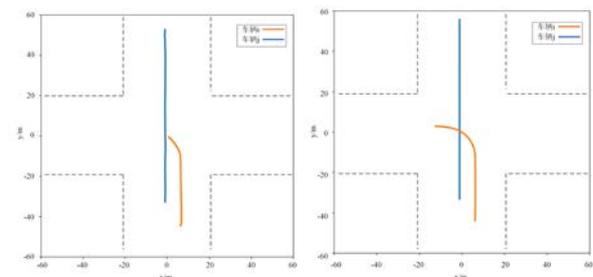
图 10 仿真实验

3.2 车辆轨迹信息追踪

依据 2.1 节车辆轨迹信息追踪方法，对 3.1 节仿真实验获取的路侧激光雷达点云数据进行车辆轨迹信息追踪。

3.2.1 追踪轨迹结果及精度分析

以场景 1 为例，场景 1 追踪轨迹与实际轨迹如图 11 所示。其中图 11(a)为追踪得到的车辆轨迹，图 11(b)为仿真实验中车辆的实际轨迹，可以看出追踪结果与实际结果基本一致。



(a) 追踪轨迹 (b) 实际轨迹

图 11 场景 1 追踪轨迹对比

为验证算法精度，计算每一帧点云中追踪到车辆位置与该帧车辆实际位置误差，以场景 1 车辆 i 为例，结果如图 13 表 3 所示。由计算得到的追踪误差结果可以看出，追踪轨迹精度较好，误差在合理范围内，能够满足碰撞预警需求。

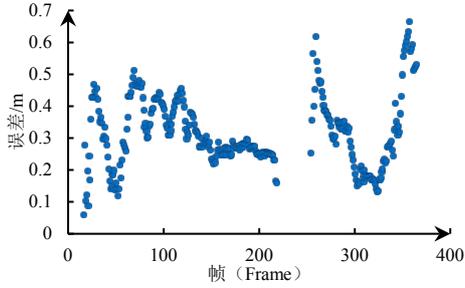


图 12 场景 1 车辆 i 轨追踪轨迹误差

表 3 场景 1 追踪轨迹误差

	最大误差/m	最小误差/m	平均误差/m
车辆 i	0.66	0.06	0.31
车辆 j	0.88	0.02	0.36

3.2.2 追踪速度结果及精度分析

以场景 1 车辆 i 为例，追踪速度与实际速度对比如图 13 所示。图中橙色的趋势线为计算得到的车辆实际行驶速度，蓝色趋势线为根据激光雷达点云追踪得到的车辆行驶速度。图中可以看出，通过检测追踪得到的车辆行驶速度大致符合系统中的车速，在车辆起步加速度阶段有一定的误差，随着车辆行驶状态的稳定，车辆平稳行驶或加速行驶阶段追踪得到的车速均趋近于系统中的车速。

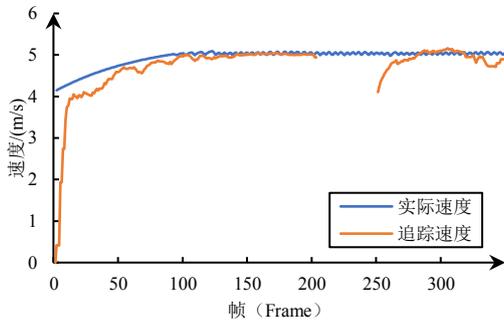


图 13 场景 1 车辆追踪速度对比

3.3 车辆碰撞预警

3.3.1 左转与直行

在 Carla 中构建左转车辆与直行车辆可能发生碰撞的行驶场景。如图 14 所示红车为左转车辆 i，白色车辆为对向直行车辆 j。



图 14 左转直行仿真场景

对仿真场景中获取的激光雷达点云数据进行车辆检测与追踪，获得红车 i 与白车 j 的位置与速度信息。结合轨迹预测模型，通过式(2)求得 $TTCP_i$ 和 $TTCP_j$ 随时间变化如图 15 所示。

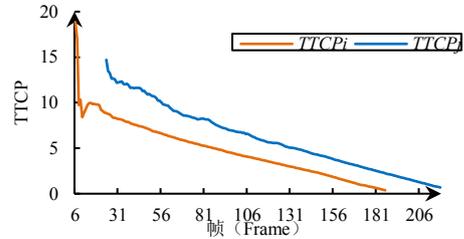


图 15 左转与直行车辆 TTCP 趋势图

在图 15 中，横坐标 Frame 为帧数，即仿真的间隔，每个间隔为 0.05 秒，1 秒有 20 帧，纵坐标为 TTCP 表明在当前 Frame 中，车辆到达轨迹碰撞点的剩余时间。从图中可以看到，在整个行驶过程中左转车辆 i 到达碰撞点的时间 $TTCP_i$ 始终小于 $TTCP_j$ ，说明左转车辆 i 会先到达轨迹碰撞点，只要两车到达轨迹碰撞点的时间差保持在一定范围，即可避免车辆碰撞的风险。

图 16 为两车到轨迹碰撞点时间差趋势图。在 frame=30,60,150 左右分别进入了绿色、黄色和红色预警范围。图 17 分别为 frame=30,60,150 时的仿真场景。直观上来看，在进入绿色和黄色预警范围内，左转车辆 i 和直行车辆 j 的行驶状态相差不大，可以看到两车都在向交叉口行驶，碰撞风险不显著。随着左转和直行车辆继续行驶，在左转车辆 i 转弯之际， $\Delta TTCP$ 降至 2 秒以下，达到了红色预警范围，可以看出两车有明显的碰撞风险。在确认行车意图及轨迹预测的基础上，分级预警的意义在于提前告知风险，给予驾驶员更多调整的时间。

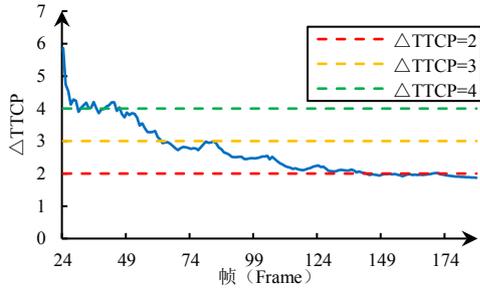


图 16 碰撞点时间差趋势图



图 17 仿真场景图 (frame=30,60,150)

3.3.2 右转与直行

在 Carla 中构建右转车辆与直行车辆可能发生碰撞的行驶场景。如图 18 所示黑色车辆为直行车辆 i，白色车辆为右转车辆 j。

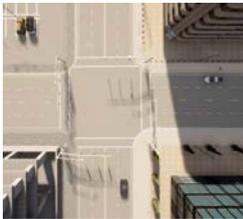


图 18 右转直行仿真场景

对仿真场景中获取的激光雷达点云数据进行车辆检测与追踪，获得黑车 i 与白车 j 的位置与速度信息，结合轨迹预测模型，通过式(3),(4)求得 $TTCP_i$ 和 $TTCP_j$ 随时间变化如图 19 所示。

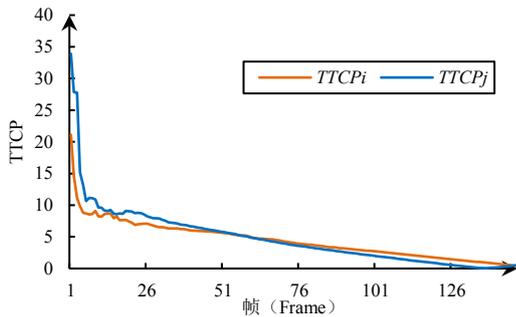


图 19 右转与直行车辆 TTCP 趋势图

从图 19 中可以看到，在整个行驶过程中直行车辆 i 到达碰撞点的时间 $TTCP_i$ 始终接近右转车辆到达碰撞点的时间 $TTCP_j$ 。在这样的情况下，若继续保持

两车的行驶状态, $TTCP_i$ 和 $TTCP_j$ 都会随着行驶进程几乎同时趋近与 0，这意味着两车很可能在同一时间点到达轨迹碰撞点，即发生碰撞。

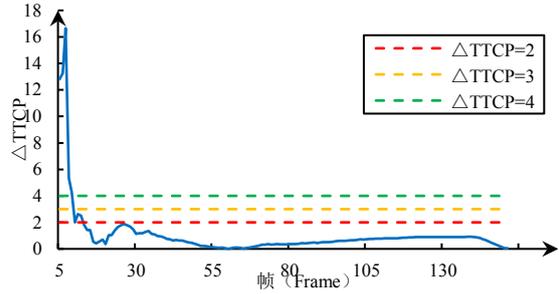


图 20 碰撞点时间差趋势图

图 20 为两车到轨迹碰撞点时间差趋势图，图 21 左图为 frame=10 时的仿真场景图，从 $\Delta TTCP$ 来看，此时大致进入红色预警范围。在仿真场景中，就车辆自身的感知范围来看，这两辆车可能尚未注意到对方的存在。而实际上，若保持这样的行驶状态，在 6.75 秒后就会发生碰撞。由此可见，在轨迹预测以及车辆检测追踪的基础上，以 $\Delta TTCP$ 作为防碰撞预警的指标有一定的前瞻性，能预估直行与转弯车辆之间的碰撞风险进行相应的防碰撞预警。



图 21 仿真场景图 (frame=10, 145)

4. 结论

本文首次提出将路侧激光雷达与碰撞预警相结合，为解决交叉口交通事故多发的问题提出全新且高效的技术基础。实现了将激光雷达作为路侧设备获取交叉口范围内车辆轨迹信息，依据车辆到达碰撞点的时间差阈值对将要发生碰撞的车辆进行分级预警。但是本文只是设计了基础场景的技术流程和仿真模型，有待深入研究：场景过于简单，在城市道路交叉口复杂的交通场景下多个车辆之间的碰撞预警检测及其优先级需要进一步的研究。

致谢

基金资助：第二次青藏高原综合科学考察研究项

目任务九：综合灾害风险评价与防御
(2019QZKK0906)

参考文献

- [1] 潘福全,陆键,项乔君,等.公路信号平面交叉口安全服务水平研究[J].东南大学学报(自然科学版),2008(02):298-303.
- [2] 张毅,姚丹亚,李力,等.智能车路协同系统关键技术与应用[J].交通运输系统工程与信息,2021,21(05):40-51.
- [3] Reihe G. Verkehrssicherheitsarbeit mit Videobildverarbeitung / Traffic safety work with video processing[J]. Gruene Reihe Fachgebiet Verkehrswesen Der Universitaet Kaiserslautern, 1996.
- [4] Miller R, Huang Q. An Adaptive Peer-to-Peer Collision Warning System: IEEE Vehicular Technology Conference, 2002[C].
- [5] Ren B, Ren J. Research on calculation model of vehicle collision avoidance based on safe collision time, 2019[C]. IEEE, 2019.
- [6] 刘庆华,邱修林,谢礼猛,等.基于行驶车速的车辆防撞时间预警算法[J].农业工程学报,2017,33(12):99-106.
- [7] Wang L, Yang Z, Xu L, et al. NCVCS: Network-coding-based video conference system for mobile devices in multicast networks[J]. Ad Hoc Networks, 2016,45(JUL.):13-21.
- [8] 张爱平,李德敏,张光林,等.基于碰撞点时间估计的车辆碰撞预警算法[J].计算机工程,2019,45(02):53-57.
- [9] 武彪,朱西产,廖茂竹,等.路口车辆冲突与碰撞的安全边界条件模型[J].天津师范大学学报(自然科学版),2019,39(02):62-66.
- [10] Qu C, Qi W, Wu P. A High Precision and Efficient Time-to-Collision Algorithm for Collision Warning Based V2X Applications[M]. 2018.
- [11] 王勤龙.基于路侧设备的车辆定位和交叉口防撞预警方法研究[D].北京交通大学,2013.
- [12] Wang J, Yan X, Nie S, et al. Research on Intelligent Vehicle Collision Warning Model Based on Intervehicle Communication[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013,2013:1-7.
- [13] 李修琪.基于车载自组织网络的车辆路口碰撞预警算法研究[D].昆明理工大学,2016.
- [14] Zhao J, Xu H, Liu H, et al. Detection and tracking of pedestrians and vehicles using roadside LiDAR sensors[J]. Transportation Research Part C Emerging Technologies, 2019,100:68-87.
- [15] Lin C, Guo Y, Li W, et al. An Automatic Lane Marking Detection Method with Low-Density Roadside LiDAR Data[J]. IEEE Sensors Journal, 2021,PP:1.
- [16] Chen J, Tian S, Xu H, et al. Architecture of Vehicle Trajectories Extraction With Roadside LiDAR Serving Connected Vehicles[J]. IEEE Access, 2019,PP:1.
- [17] Cui Y, Xu H, Wu J, et al. Automatic Vehicle Tracking With Roadside LiDAR Data for the Connected-Vehicles System[J]. IEEE intelligent systems, 2019,34(3):44-51.
- [18] Wu J, Xu H, Tian Y, et al. Vehicle Detection under Adverse Weather from Roadside LiDAR Data[J]. Sensors, 2020,20(12):3433.
- [19] Wu J, Xu H, Zheng J, et al. Automatic Vehicle Detection With Roadside LiDAR Data Under Rainy and Snowy Conditions[J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2021,13(1):197-209.
- [20] Zhang J, Xiao W, Coifman B, et al. Vehicle Tracking and Speed Estimation From Roadside Lidar[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2020,13:5597-5608.
- [21] Arya A. 3D-LIDAR Multi Object Tracking for

Autonomous Driving: Multi-target Detection and Tracking under Urban Road Uncertainties[D]. Delft University of Technology, 2017.

- [22] 宫铭钱. 基于激光雷达和相机信息融合的车辆识别与跟踪研究[D]. 西南大学, 2021.

Open Access This chapter is licensed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>), which permits any noncommercial use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons license and indicate if changes were made.

The images or other third party material in this chapter are included in the chapter's Creative Commons license, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the chapter's Creative Commons license and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder.

