

一种应用于自动驾驶的多传感器后融合方法

朱泽敏, 张勇, 张智腾, 彭之川, 朱田

(长沙中车智驭新能源科技有限公司, 长沙 410205)

摘要:多传感器融合已成为提高自动驾驶感知性能的关键技术。基于目标运动状态的延续特性,本文提出一种应用于自动驾驶的多传感器后融合方法,优化目标匹配策略,以提升整体感知结果的稳定性。经试验验证,该方法在多种自动驾驶环境下均表现出良好的性能。

关键词:自动驾驶; 多传感器; 后融合; 鲁棒性

中图分类号: U471.15

文献标志码: A

DOI: 10.15917/j.cnki.1006-3331.2025.01.001

A Method of Multi-sensor Post Fusion Applied to Autonomous Driving

ZHU Zemin, ZHANG Yong, ZHANG Zhiteng, PENG Zhichuan, ZHU Tian

(Changsha CRRC Zhiyu New Energy Technology Co., Ltd., Changsha 410205, China)

Abstract: Multi-sensor fusion has become a key technology to improve the perception performance of autonomous driving. Based on the continuity characteristic of target motion states, this paper proposes a multi-sensor post fusion method for autonomous driving and optimizes target matching strategies to improve the stability of overall perception results. Through experimental verification, this method has shown good performance in various autonomous driving environments.

Key words: autonomous driving; multi sensor; post fusion method; robustness

当前应用于自动驾驶的多传感器融合主要分为前融合和后融合^[1-3]。前融合是对多传感器原始数据进行融合处理,后融合是对多传感器输出的目标信息进行融合。前者算法复杂度较高、开发周期长,后者算法复杂度低、开发周期短,两者效果相差不大^[4-11]。

本文聚焦于多传感器后融合,由于传感器受到外界因素影响,导致目标信息不稳定、数据波动、漏检频发,进而引发匹配失败,损害系统整体稳定性。为解决此问题,本文提出通过融合目标的历史信息来校准当前状态数据,有效减少因数据波动或漏检带来的匹配问题,从而显著提升多传感器后融合处理的稳定性与可靠性。

1 自动驾驶感知系统架构

自动驾驶感知系统的架构如图1所示。

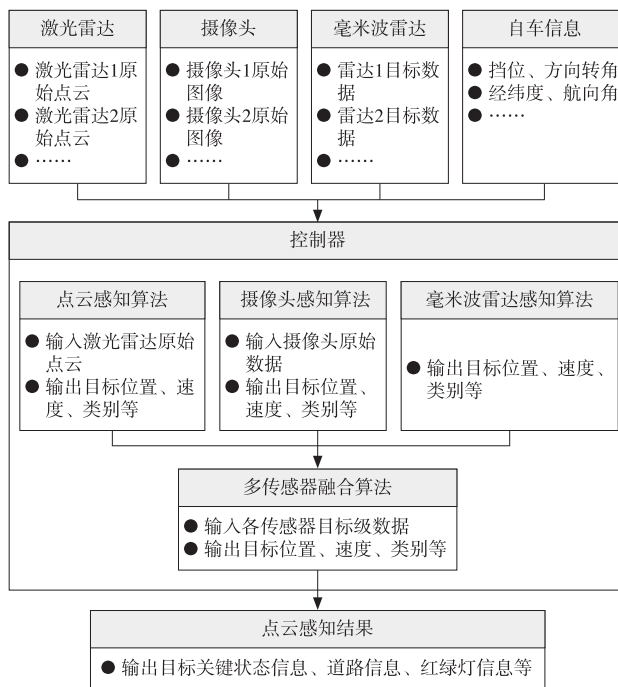


图1 自动驾驶感知系统架构图

收稿日期: 2024-08-28。

第一作者: 朱泽敏 (1991—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事智能驾驶感知、计算机视觉算法研究工作。E-mail: 752407877@qq.com。

感知系统的硬件主要由各类传感器和控制器组成。其中传感器主要包括激光雷达、摄像头、毫米波雷达等;控制器是整个感知系统的核心,负责接收并处理来自各类传感器的原始数据和自车信息。感知系统中的自车信息主要包括自车速度、经纬度、航向角等。

感知系统的核心算法包括点云感知算法、摄像头感知算法、毫米波雷达感知算法及多传感器融合算法。其中点云感知算法主要用于提取目标的位置和尺寸信息;摄像头感知算法则专注于识别行人、车辆、交通标识等;毫米波雷达感知算法主要输出目标的距离和速度信息;多传感器融合算法则整合不同传感器的数据,综合利用各传感器优势,以提升整体感知的准确性和可靠性。

感知系统最终输出的检测对象主要分为两部分:一部分是行人、骑行者、车辆等交通参与者和其它路面物体;另一部分是红绿灯、车道线、路沿等关键交通环境信息。

2 多传感器融合算法设计

2.1 算法流程

多传感器后融合算法的关键步骤有信息预处理、目标匹配和目标信息融合,算法流程如图2所示。

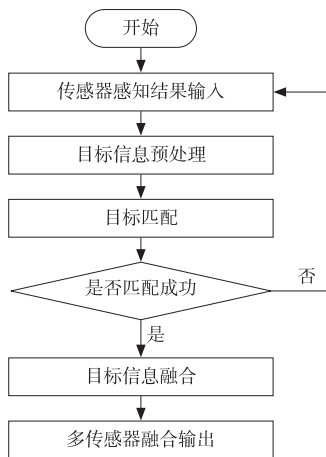


图2 多传感器后融合算法流程图

首先,接收各传感器的感知信息。通过预处理,有效滤掉原始信息中的噪声和突变,确保目标信息稳定且准确。随后,依次对目标进行匹配,准确识别并

确立不同传感器对同一目标检测信息之间的对应关系。目标匹配结束后,依据匹配得分判定是否匹配成功。如果匹配失败,则判定该目标为误报或非关注目标,继续下一个目标的匹配;如果匹配成功,则进行目标信息融合,基于各传感器特点,将不同传感器的信息进行加权融合,得到更加准确、可靠的感知结果。最后,经过传感器融合输出,为后续决策和规划提供关键依据。

2.2 目标信息预处理

目标信息预处理主要是进行空间同步和数据过滤处理。感知系统中,由于各传感器安装位置、角度不同,因此各传感器的感知坐标系不统一,这就导致各传感器输出的目标位置、速度、航向角等信息无法直接处理,需将各传感器的输出信息进行时空同步。为此,感知系统规定的统一坐标系如图3所示。

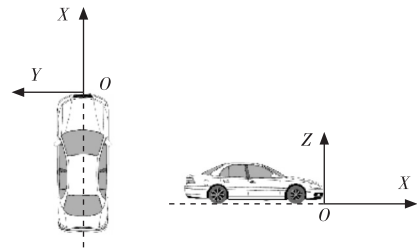


图3 感知系统统一坐标示意图

时空同步主要包括位置同步和速度同步。位置同步针对安装位置或感知原点不在统一坐标系原点的传感器。如某传感器输出的某障碍物目标原始位置(即在该传感器感知坐标系下位置)为 (X, Y) ,而该传感器在统一坐标系下的安装位置(或感知原点)为 $P_0(X_0, Y_0)$,则其在统一坐标系下对应的障碍物目标的位置 (P_x, P_y) 同步方法如下:

$$\begin{cases} P_x = X + X_0 \\ P_y = Y + Y_0 \end{cases} \quad (1)$$

由于本文实际测试车辆的前向毫米波雷达感知坐标系和统一坐标系相同,所以速度同步仅针对后向毫米波雷达的障碍物目标。将障碍物目标的速度转换后方可与感知系统的统一坐标系保持同步,具体同步方法如下:

$$\begin{cases} V_x = -V_{x0} \\ V_y = -V_{y0} \end{cases} \quad (2)$$

式中: (V_x, V_y) 为统一坐标系下对应的障碍物目标的速度; (V_{x0}, V_{y0}) 为各传感器输出的障碍物目标原始速度。

数据过滤主要是对障碍物目标的位置、速度、航向角等状态信息的异常值进行过滤。此处异常值主要是指超合理范围、异常突变的值。

1) 超合理范围的过滤。基于自车自动驾驶运行场景, 设定障碍物目标相对于自车的位置 (P_x, P_y) 、绝对速度 V 、航向角 H 的合理范围, 位置信息超出设定值时则丢弃该目标, 速度、航向角超出合理范围时则用上一时刻信息代替。本文具体过滤方法如下:

$$\begin{cases} |P_x| > 200 \text{ m 或 } |P_y| > 200 \text{ m (丢弃)} \\ |P_x| \leq 200 \text{ m 且 } |P_y| \leq 200 \text{ m (保留)} \end{cases}$$

t_i 时刻障碍物目标的绝对速度 V_{t_i} 范围为 $0 \sim 100$ m/s, 其对应的过滤方法如下:

$$\begin{cases} |V_{t_i}| > 100 \text{ m/s (} V_{t_i} = V_{t_{i-1}} \text{)} \\ |V_{t_i}| \leq 100 \text{ m/s (正常值不处理)} \end{cases}$$

t_i 时刻障碍物目标的航向角 H_{t_i} 范围为 $-\pi \sim \pi$, 其对应的过滤方法如下:

$$\begin{cases} |H_{t_i}| > \pi (H_{t_i} = H_{t_{i-1}}) \\ |H_{t_i}| \leq \pi (正常值不处理) \end{cases}$$

2) 异常突变的过滤。针对相邻两时刻 (即 t_i 时刻和 t_{i-1} 时刻) 障碍物目标的位置、速度、航向角变化情况, 大于设定阈值则判定为异常突变, 对应值用阈值代替。本文基于自车自动驾驶运行场景, 设定位置的最大变化阈值 $d_p = 3 \cdot V \cdot T$, 其中 V 是障碍物目标的绝对速度, 单位为 m/s, T 是感知更新周期, $T = t_i - t_{i-1}$, 单位为 s; 绝对速度的最大变化阈值 $d_v = 3 \text{ m/s}^2$; 航向角的最大变化阈值 $d_H = 25^\circ/\text{s}$ 。

2.3 目标匹配

目标匹配, 即基于被匹配目标的历史运动轨迹、目标速度及变化趋势、目标航向角及变化趋势等关键状态信息进行相似性匹配, 避免出现单传感器对某一状态信息的检测误差大、检测不稳定、传感器短暂漏检或误检造成目标匹配失败等问题。目标匹配具体内容包括目标历史轨迹、速度、航向角的相似度匹配, 如图 4 所示。

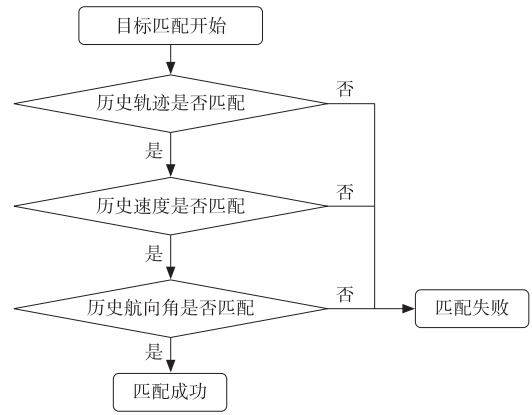


图4 目标匹配算法流程图

1) 目标历史轨迹匹配:

$$\begin{cases} P_d = W_{p1}(P_{1A} - P_{1B}) + W_{p2}(P_{2A} - P_{2B}) + \dots + \\ W_{pn}(P_{nA} - P_{nB}) \\ W_{pi} = 2i/[n(n+1)] \text{ 或 } W_{pi} = i^2/[n^2(n+1)^2] \\ W_{p1} + W_{p2} + \dots + W_{pn} = 1 \end{cases} \quad (3)$$

式中: P_d 为被匹配目标 A、B 的轨迹匹配偏差; $(P_{iA} - P_{iB})$ 为目标 A、B 在 t_i 时刻的位置偏差; W_{pi} 为 t_i 时刻位置偏差对应的权重。

如果 P_d 小于轨迹匹配阈值 P_h , 则认为轨迹匹配成功, 反之则认为匹配失败。如果传感器输出的目标位置信息波动大, 则增加目标历史时刻位置信息的权重; 如果传感器输出的目标位置信息波动小, 则增加目标最近时刻位置信息的权重。

2) 目标历史速度匹配:

$$\begin{cases} V_d = W_{v1}(V_{1A} - V_{1B}) + W_{v2}(V_{2A} - V_{2B}) + \dots + \\ W_{vn}(V_{nA} - V_{nB}) \\ W_{vi} = 2i/[n(n+1)] \text{ 或 } W_{vi} = i^2/[n^2(n+1)^2] \\ W_{v1} + W_{v2} + \dots + W_{vn} = 1 \end{cases} \quad (4)$$

式中: V_d 为被匹配目标 A、B 的历史速度匹配偏差; $(V_{iA} - V_{iB})$ 为目标 A、B 在 t_i 时刻的速度偏差; W_{vi} 为 t_i 时刻速度偏差对应的权重。

如果 V_d 小于速度匹配阈值 V_h , 则认为速度匹配成功, 反之则认为匹配失败。如果传感器输出的目标速度信息波动大, 则增加目标历史时刻速度信息的权重; 如果传感器输出的目标速度信息波动小, 则增加目标最近时刻速度信息的权重。

3) 目标历史航向角匹配:

$$\begin{cases} H_d = W_{H1}(H_{1A} - H_{1B}) + W_{H2}(H_{2A} - H_{2B}) + \dots + \\ W_{Hn}(H_{nA} - H_{nB}) \\ W_{Hi} = 2i/[n(n+1)] \text{ 或 } W_{Hi} = i^2/[n^2(n+1)^2] \\ W_{H1} + W_{H2} + \dots + W_{Hn} = 1 \end{cases} \quad (5)$$

式中: H_d 为被匹配目标 A、B 的历史航向角匹配偏差; $(H_{1A} - H_{1B})$ 为目标 A、B 在 t_i 时刻的航向角偏差; W_{Hi} 为 t_i 时刻航向角偏差对应的权重。

如果 H_d 小于航向角匹配阈值 H_h , 则认为航向角匹配成功, 反之则认为匹配失败。如果传感器输出的目标航向角信息波动大, 则增加目标历史时刻航向角信息的权重; 如果传感器输出的目标航向角信息波动小, 则增加目标最近时刻航向角信息的权重。

2.4 信息融合

目标匹配成功后, 可以得到不同传感器对同一目标的检测结果, 基于各传感器对目标各状态信息的检测偏差分配权重系数, 最终得到目标融合信息。

一般情况下, 信息融合采用加权平均的方式输出融合结果; 如果某传感器对目标某个状态信息检测准确率具有明显优势, 则融合结果对应的状态信息直接用该传感器的原始感知结果。以本次装车实测加权平均为例, 车辆配备激光雷达、智能摄像头、毫米波雷达, 基于真值系统测得各传感器对目标各状态的检测偏差分别为 e_l 、 e_v 、 e_r , 具体权重分配方式如式(6), 其中 $E = e_l + e_v + e_r$, 即对应的各权重值为:

$$\begin{cases} W_l = (E - e_l)/2E \\ W_v = (E - e_v)/2E \\ W_r = (E - e_r)/2E \end{cases} \quad (6)$$

障碍物目标信息融合包括位置融合、速度融合和航向角融合。

1) 位置融合:

$$P_f = W_{Pl} \cdot P_l + W_{Pv} \cdot P_v + W_{Pr} \cdot P_r$$

式中: P_f 为障碍物目标的位置融合信息; W_{Pl} 、 W_{Pv} 、 W_{Pr} 分别为激光雷达、智能摄像头、毫米波雷达对目标位置 P 检测误差映射得到的权重值。

2) 速度融合:

$$V_f = W_{Vl} \cdot V_l + W_{Vv} \cdot V_v + W_{Vr} \cdot V_r$$

式中: V_f 为障碍物目标的速度融合信息; W_{Vl} 、 W_{Vv} 、 W_{Vr} 分别为激光雷达、智能摄像头、毫米波雷达对目标速

度 V 检测误差映射得到的权重值。

3) 航向角融合:

$$H_f = W_{Hl} \cdot H_l + W_{Hv} \cdot H_v + W_{Hr} \cdot H_r$$

式中: H_f 为障碍物目标的航向角融合信息; W_{Hl} 、 W_{Hv} 、 W_{Hr} 分别是激光雷达、智能摄像头、毫米波雷达对目标航向角 H 检测误差映射得到的权重值。

上述融合方法中, 如果某传感器对目标某个状态信息检测准确率有明显优势, 则该传感器的权重值取为 1, 其余取为 0。

3 实车试验验证

3.1 测试数据

基于实车在开放道路上采集各传感器数据, 该测试数据包含激光点云、摄像头原始数据、毫米波雷达数据, 采集时长约为 20 min, 剔除异常数据, 最终得到 1 208 帧离线数据。基于交通复杂度、交通参与者数量, 将数据分为简单路况数据、一般路况数据和复杂路况数据三类, 每类数量见表 1。

表 1 不同复杂程度数据占比

复杂程度	数量/个
简单	356
一般	621
复杂	231

3.2 对比方法

为验证算法的有效性, 本文在目标匹配测试中采用不同时长信息下的匹配效果。采用 1、20、40、60 个周期四种方式进行匹配成功率测试, 本文单个周期时长为 0.1 s; 在信息融合步骤中采用平均加权和基于偏差的自定义加权两种方式对比融合结果的准确率。

3.3 试验结果

1) 目标匹配。不同时长信息下目标匹配测试结果如图 5 所示。试验结果表明, 考虑单个周期时长的目标状态信息时, 目标匹配成功率低, 且其受道路交通复杂度影响较大, 整体匹配效果不理想。从不同时长信息下的目标匹配测试效果看, 最佳匹配周期数为 40T。这说明在目前算法处理下, 匹配周期过大会导致误匹配相对增加, 且具体匹配效果和实际数据有关。

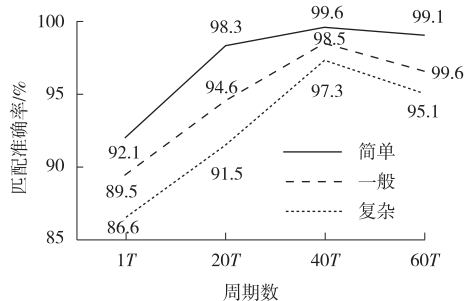


图5 目标匹配准确率与匹配周期数关系曲线

2) 信息融合。采用平均加权和自定义加权两种方式进行数据融合,最终得到的两种融合方式下目标位置、速度、航向角三个关键状态的融合结果,分别如图6、图7、图8所示。

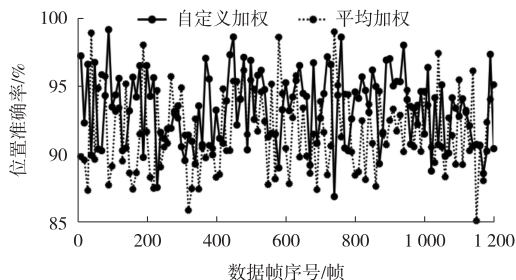


图6 融合目标位置准确率

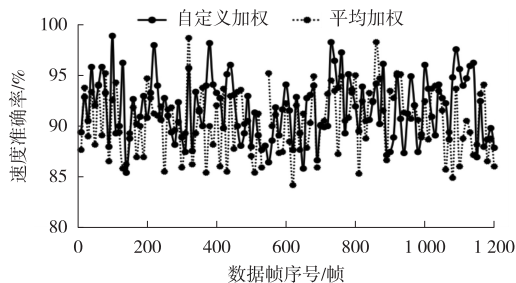


图7 融合目标速度准确率

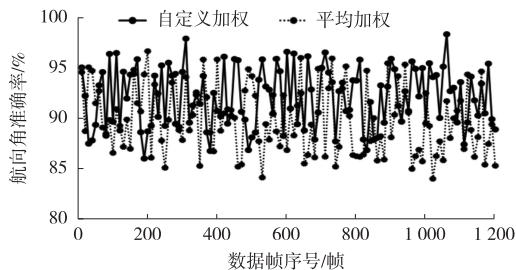


图8 融合目标航向角准确率

图6、图7、图8中平均加权和自定义加权融合下的目标位置、速度、航向角三个关键状态的准确率统计见表2。

表2 平均加权融合与自定义加权融合准确率对比 %

项目	位置准确率	速度准确率	航向角准确率
平均加权	91.9	90.3	90.4
自定义加权	93.4	91.4	91.8

4 结束语

本文探讨了多传感器后融合过程中,部分传感器短暂漏检或检测数据异常波动所带来的目标匹配不稳定问题。针对该问题,从时空维度出发,利用目标的历史状态信息,对目标当前时刻信息精确校正;同时,基于目标的历史轨迹、速度及航向角变化趋势等信息,对目标进行匹配,有效规避了短时间内传感器数据波动导致的匹配失败问题。此方法显著提高了多传感器后融合在目标检测方面的稳定性,具有一定的实用价值。

参考文献:

- [1] 卢佳佳,陈兆文. 自动驾驶场景下多传感器融合目标检测算法研究[J]. 网络安全技术与应用,2023(4):38-41.
- [2] 杨军典. 基于多传感器融合算法的自动驾驶目标追踪技术研究[D]. 上海:上海工程技术大学,2021.
- [3] 王悦. 基于传感器融合的自动驾驶汽车避障策略研究[D]. 天津:天津大学,2020.
- [4] 王海,徐岩松,蔡英凤,等. 基于多传感器融合的智能汽车多目标检测技术综述[J]. 汽车安全与节能学报,2021,12(4):440-455.
- [5] 牛国臣,田一博,熊渝. 融合毫米波与激光雷达的障碍物检测与跟踪方法[J]. 北京航空航天大学学报,2024,50(5):1481-1490.
- [6] 孙文莉. 多传感器融合技术在智能交通中的应用[J]. 集成电路应用,2024(2):300-301.
- [7] 韩丹. 自动驾驶中基于多传感器融合的目标检测分析[J]. 企业科技与发展,2024(1):95-97.
- [8] 赵浙栋,张成涛,李习刊,等. 相机与激光雷达融合的道路目标检测研究[J]. 广西科技大学学报,2024(1):84-93.
- [9] 朱波,张纪伟,谈东奎,等. 基于多源传感器与导航地图的端到端自动驾驶方法[J]. 汽车安全与节能学报,2022,13(4):738-749.
- [10] 张新钰,邹镇洪,李志伟,等. 面向自动驾驶目标检测的深度多模态融合技术[J]. 智能系统学报,2020,15(4):758-771.
- [11] 李爱娟,冯春鹏,黄欣,等. 自动驾驶汽车目标检测方法综述[J]. 山东交通学院学报,2022,30(3):20-29.