

降雨条件下车载激光雷达感知局限性

邢星宇¹, 黄安¹, 姜为¹, 陈君毅¹, 李博², 余卓平¹

(1. 同济大学汽车学院, 上海 201804; 2. 武汉路特斯科技有限公司, 湖北 武汉 430090)

摘要: 针对激光雷达在降雨条件下的性能局限性问题, 基于封闭场地中的降雨模拟设施, 分别选取一款机械旋转雷达和混合固态激光雷达采集不同降雨条件下的点云数据, 通过构建包括 5 项客观指标的指标集, 对两类激光雷达受降雨条件影响的程度进行了对比分析。试验结果表明, 降雨会在一定程度上减少点云的数量, 降低点云的反射率, 增加反射率信息熵, 降低反射率信噪比; 降雨的雾化现象会大幅恶化激光雷达的表现, 在 20m~40m 内, 对机械旋转雷达造成 91.49% 的平均点云数量削减和 82.98% 的平均反射率削减; 而波长较长、非重复扫描的混合固态雷达在降雨下具有更好的穿透性, 点云数量较为稳定, 但混合固态雷达在降雨环境下的点云会包含更多反射率较低的雨滴回波, 因此需要采用更有效地噪声滤除算法。

关键词: 自动驾驶汽车; 预期功能安全; 激光雷达性能; 降雨测试; 性能局限

中图分类号: U467. 3; TP391. 9

文献标志码: A

Perception Limitation of LiDAR Sensor in Autonomous Vehicles Under Rainfall Condition

XING Xingyu¹, HUANG An¹, JIANG Wei¹, CHEN Junyi¹, LI Bo², YU Zhuoping¹

(1. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Wuhan Lotus Technology Co. Ltd., Wuhan 430090, China)

Abstract: A study was made of the performance limitations of LiDAR under rainfall conditions. Based on the artificial rainfall facility in a proving ground, we collected point cloud data from a mechanical rotating LiDAR and a hybrid solid-state LiDAR separately. By constructing a metrics set including five objective

indicators, the degree of influences of rainfall conditions on two kinds of LiDAR were compared and analyzed. The test results show that the point cloud number decreases, the reflectivity is weakened, but the information entropy of reflectivity increases. The signal-to-noise ratio reduces. The fogging phenomenon of rainfall significantly deteriorates the performance of the LiDAR. Within 20~40m, a 91.49% reduction of the average point cloud number and a 96.77% reduction of the average reflectivity of the mechanical rotating LiDAR are found. In comparison, the hybrid solid-state LiDAR with a longer wavelength and non-repetitive scanning has better penetrability under rainfall, resulting in a relatively stable number of point clouds. However, the point cloud of the hybrid solid-state LiDAR will contain more raindrop echoes with lower reflectivity, so a more effective noise filtering algorithm is necessary for application.

Key words: autonomous vehicle; safety of the intended functionality; LiDAR performance; rainfall experiment; performance limitations

自动驾驶汽车是由环境感知、决策规划、控制执行等系统组成的复杂信息物理系统。其中, 环境感知系统是自动驾驶汽车获得外部环境信息的入口, 其可靠性和鲁棒性直接关系到车辆行驶过程中的安全性。激光雷达由于其相较毫米波雷达的分辨率优势, 相较摄像头能够提供可靠的场景深度信息等优势, 并被视为自动驾驶技术的关键传感器之一。但车载激光雷达在实际运行场景中会受到外界环境因素不同程度的影响^[1], 如降雨、降雪等天气条件会对激光的发射、反射、接收过程造成干扰, 削弱激光雷

收稿日期: 2021-12-17

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB2503001); 国家自然科学基金重点项目(52232015); 重庆市技术创新与应用发展专项重大主题(cstc2019isxztz0041)

第一作者: 邢星宇(1991—), 男, 博士生, 主要研究方向为自动驾驶汽车测试技术, 车辆预期功能安全。

E-mail: xingxingyu@tongji.edu.cn

通信作者: 陈君毅(1980—), 女, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为自动驾驶汽车安全性分析与性能。

E-mail: chenjunyi@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

达的性能,造成点云缺失、点云反射强度异常等问题,造成目标识别困难。国际标准化组织于2022年发布了ISO 21448标准^[2],提出车辆应满足预期功能安全(SOTIF)要求,避免由于系统功能不足、性能局限性等引起的非合理风险。研究环境感知系统的性能局限及其特征是实现预期功能安全的重要前提,有必要对车载激光雷达在实际使用条件下受到天气影响的性能变化特征进行研究,以便明确导致SOTIF危害的机制和过程,为感知系统在不良天气条件下的性能改进提供依据,进而提升自动驾驶汽车的预期功能安全水平。

针对激光雷达在各类环境因素影响下的性能变化问题,国内外学者开展了广泛研究。Rivero J等^[3]以积聚在激光雷达表面的灰尘作为影响因素,通过测量激光雷达表面的激光穿透率和反射率对其影响进行量化;Nakajima T Y等^[4]研究了日光和噪声电流对激光雷达性能的影响;Rasshofer R H等^[5]利用雨雾模拟器对雨水和雾对激光雷达性能的影响进行了测试。进一步的,Hasirlioglu S等^[6-7]、Heinzler R等^[8]、Filgueira A等^[9]以点云数量、点云反射率、探测距离作为指标,通过场地试验对激光雷达在降雨条件下性能衰减进行了量化分析。Thomas F等^[10]进一步研究了不同直径激光束受雨滴的影响,并利用激光透过率对雨滴的影响进行了量化;Wojtanowski J等^[11]应用大气传输计算软件来计算空气中及反射面上有水滴情况下,激光的大气透过率和能见度,并通过试验得到激光雷达在不同环境下的综合表现;McKnight D等^[12]使用能见度仪来量化雾的浓度,选取激光回波能量与发射能量的比值作为衡量指标对激光雷达在水雾环境中的性能进行测试分析。面向自动驾驶车载激光雷达的具体应用需求,研究者也开展了更有针对性的研究。Montalban K^[13]等采用气候仓模拟降雨对激光雷达的目标探测性能进行了分析,认为波长较长、采用非重复式扫描的激光雷达在雨中有更好的表现;Vriesman D^[14]等同样采用实验室模拟降雨条件,发现降雨会导致目标物几何特征丢失并难以识别;Tang L^[15]等、Goberville N^[16]等则在自然降雨条件下,对激光雷达探测行人的性能进行了分析,结果显示相比于无雨天气,降雨会显著减少点云数量,降低目标检测的准确性。

相关研究大多采用较为单一的评价指标对激光雷达的性能进行评价,主要集中于点云数量和反射率的分析,且针对不同类型激光雷达的性能差异探讨较少。因此,本文主要针对激光雷达在实际使用

条件下对典型交通目标物的感知性能受降雨强度的影响情况,引入多个量化指标形成的指标集,基于封闭场地的降雨模拟设施,对不同类型的激光雷达进行了分析和比较。

1 点云客观评价指标集

激光雷达的环境感知结果以点云的形式采集和存储,每一帧点云均包含一定时间间隔内雷达接收到的全部激光回波信息,主要包含点云的坐标、距离、反射率等信息。在自动驾驶汽车应用领域,基于点云的目标识别算法主要通过点云提供的上述信息进行点云聚类 and 特征提取,进而实现目标物识别。因此,点云质量将直接影响算法识别效果,包括点云数量、点云反射率、点云位置分布、点云反射率分布、点云信息的波动等。因此,本文通过建立更加全面的点云质量评价指标,探究降雨对点云质量的影响情况,以便为激光雷达选型、识别算法性能改进提供依据。

参考其他应用领域对激光雷达的性能要求^[17],以及前述相关研究,并考虑认知算法对激光点云数量、强度、噪声、距离的要求^[18-19],本文选取了五项典型指标对点云质量进行量化分析,包括平均点云数量、平均反射率、反射率信息熵、反射率信噪比和纵向距离标准差,5项指标能够综合反映激光雷达在不同条件下的精度、反射率特性等。下面将对各个指标的计算方式进行说明。

(1) 平均点云数量

平均点云数量是指每帧点云的平均激光回波数量,该指标可以衡量点云数量的平均水平,可由式(1)计算得到。其中, n_{sum} 为特定时间段内全部帧的点云数量, m 为该段时间内的采集帧数。

$$n_{\text{average}} = \frac{n_{\text{sum}}}{m} \quad (1)$$

(2) 平均反射率

平均反射率是指一段时间内全部帧的点云反射率均值,该指标可以衡量点云反射率的平均水平,可由式(2)计算得到。其中 n_i 是第 i 帧的点云数目, r_j^i 是第 i 帧中第 j 个点的反射率。

$$R_{\text{average}} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} r_j^i}{n_{\text{sum}}} \quad (2)$$

(3) 反射率信息熵

反射率信息熵可以客观评价点云反射率的一致性,即信息熵越小,点云反射率的分布越集中。计算

方法见式(3),其中, p_i 表示反射率位于第*i*等级的点云占比。

$$\bar{E}_{\text{ref}} = - \sum_{i=1}^n p_i \log_2 p_i \quad (3)$$

(4)反射率信噪比

本文采用的反射率信噪比的计算方法如式(4)所示,该指标可以客观评价点云抵抗外界噪声的能力强弱。其中, R_{average} 为一段时间内全部帧的点云平均反射率, σ_{ref} 为一段时间内全部帧的点云反射率标准差。

$$S_{\text{ref}} = 10 \ln \frac{R_{\text{average}}}{\sigma_{\text{ref}}} \quad (4)$$

(5)纵向距离标准差

纵向距离标准差是指一段时间内全部帧的点云纵向距离标准差,该指标反映了激光雷达在一段时间内的测距精度。在本文中,选取标定后的激光雷达的点云数据*y*坐标绝对值作为纵向距离,如图1所示。

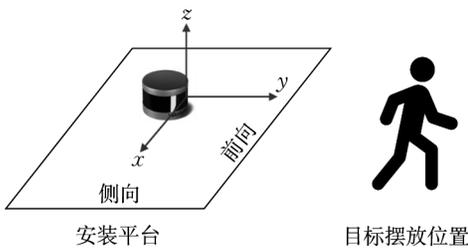


图1 激光雷达坐标系

Fig.1 Coordinate of the LiDAR

纵向距离标准差的计算方法如式(5)所示,其中 d_i^j 表示第*i*帧里第*j*个点的纵向距离,而 \bar{d} 表示全部帧点云的纵向距离均值。

$$\sigma_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} (d_i^j - \bar{d})^2}{n_{\text{sum}} - 1}} \quad (5)$$

2 降雨试验设置

围绕试验选取的被测激光雷达工作原理和性能参数,以及试验条件和试验场景的设置进行说明。

2.1 被测激光雷达

常见的车载激光雷达根据获取物体信息的方式不同,主要包含三角测距和飞行时间激光雷达两大类^[20];根据雷达内部是否具有旋转的光学部件,激光雷达又分为机械旋转式、混合固态和固态激光雷达^[21]。其中,机械旋转式和混合固态激光雷达的加

工技术已较为成熟,是采用激光雷达作为环境感知系统的自动驾驶汽车的主流方案。固态激光雷达有非常好的应用前景,但目前仍未被大规模使用。

机械旋转式和混合固态激光雷达在零部件构成和工作机制上存在一定差异,二者的工作原理见图2。机械旋转式激光雷达在工作过程中,光学系统能够在水平方向进行360°旋转,具有均匀扫描、视场角(Field of view, FOV)较大的优点,但存在重复式扫描、点云密度有限等局限,且由于旋转机构占雷达质量比重较大,容易产生振动和高温。混合固态激光雷达在工作过程中,仅有小部分棱镜在旋转,性能较为稳定,且具有非重复式扫描、点云密度大等特点,但受棱镜面积限制,水平视场角较小。两类激光雷达的上述区别,造成其受到恶劣天气影响时的性能局限也有差异,因此有必要对不同类型的激光雷达进行对比分析。

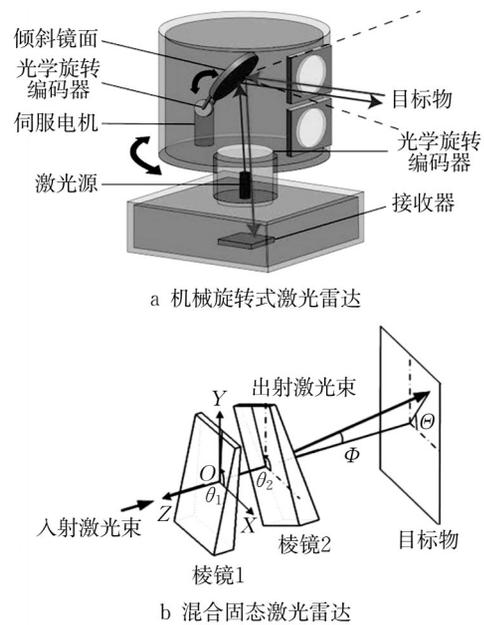


图2 不同激光雷达的工作原理

Fig.2 Working principle of different LiDARs

本文选择了机械旋转式激光雷达 OUSTER OS2-128和混合固态式激光雷达 Livox Tele-15作为被测对象,两款雷达的参数对比见表1。其中 Tele-15雷达在垂直方向上的等效线数约为135线,与 OS2-128雷达接近,角分辨率方面 OS2-128雷达要略低于 Tele-15雷达。由于二者工作原理不同,水平视场角有较大差距。

2.2 试验方法

为构建接近真实使用条件的测试环境,本文基于封闭测试场地的降雨模拟设施对被测雷达进行试

表1 OS2-128与Tele-15雷达参数对比
Tab.1 Parameter comparison of LiDAR OS2-128 and Tele-15

雷达型号	OS2-128 雷达	Tele-15 雷达
激光波长	865nm	905nm
线数	128线	135线
水平角分辨率	0.18°	0.02°
垂直角分辨率	0.18°	0.12°
垂直视场角	22.5° (±11.25°)	16.2°
水平视场角	360°	14.5°
测量精度	±1.5~±5cm	±2cm(5~220m) ±4cm(220~380m)
每秒点数	2 621 440	240 000

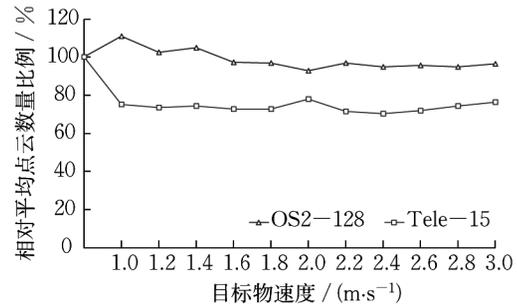
验,试验场地为位于上海临港智能网联汽车综合测试示范区内的降雨模拟路段。该降雨模拟设施共有5个降雨等级,不同降雨等级所对应的降雨强度详见表2。不同等级降雨采用独立的淋雨装置,能够保证不同降雨条件下雨滴的均匀性和较好的一致性,但降雨量无法连续调节,以降雨等级区分不同降雨水平。

表2 不同降雨等级降雨量水平
Tab.2 Levels of rainfall

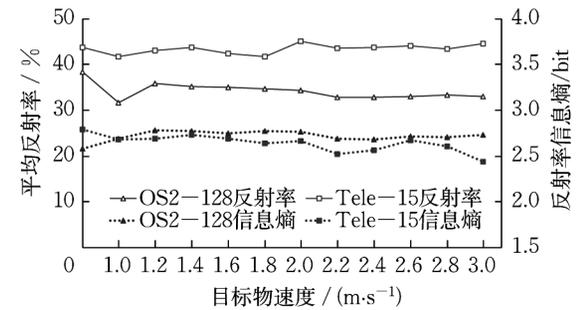
降雨等级	降雨强度/(mm·min ⁻¹)
1级	0.75
2级	2
3级	3
4级	4
5级	5.5

本文核心目的为研究不同降雨强度对激光点云质量的影响情况,即以降雨强度作为自变量,以特定测试场景下的点云质量评价指标作为因变量。为尽可能减少其他因素对试验结果的影响,试验设置为静态场景,以避免由于目标物移动位置导致与激光雷达纵向距离变化产生影响。为保证场景设置的有效性,试验前开展了相应预实验,包括无雨条件下不同速度行人横穿试验,以及不同距离静态目标物试验。结果表明行人在0~3m·s⁻¹速度范围内,两款激光雷达点云质量各项评价指标没有显著下降趋势(图3a、图3b);在10~100m纵向距离范围内,点云数量随距离增加显著减少(图3c),其他指标在20~50m范围内处于平稳状态且效果较好(图3d)。

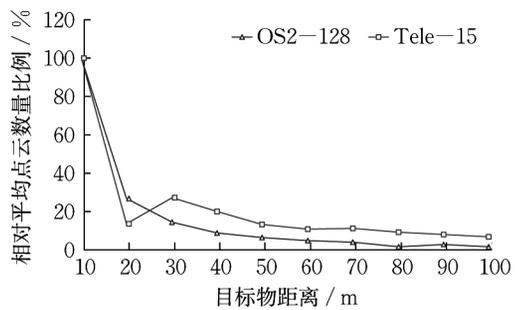
基于预实验结果,选取实际交通场景中最为常见的行人和车辆作为激光雷达感知目标,降雨条件试验场景分别设置假人、汽车目标物与雷达的纵向距离为20m和40m;横向位置布置时,考虑各目标物互不遮挡,并能完全处在激光雷达的水平视场角



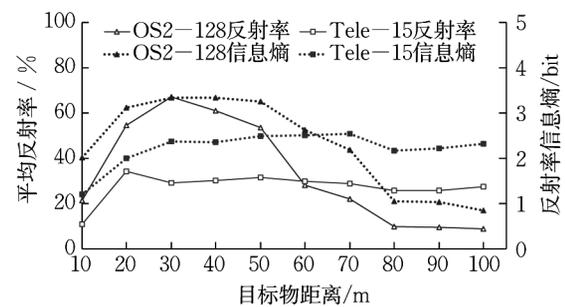
a 平均点云数量随目标物速度变化



b 点云反射率(信息熵)随目标物速度变化



c 平均点云数量随目标物距离变化



d 点云反射率(信息熵)随目标物距离变化

图3 无雨条件下点云质量变化情况

Fig.3 Change curve of point cloud quality under normal condition

范围内,如图4a所示。在测试中,利用两款雷达同步的采集无雨和不同等级降雨条件下的点云数据,采集时长均不低于1min。为保证降雨水平稳定,每次调整降雨模拟设施的降雨量后,需等待至少5min后再进行点云数据采集。

此外,为区分不同的目标物,在后续数据处理过程中,仅对目标物附近选定区域内的点云根据评价

指标进行计算和评价。选定的区域如图4b所示,其中区域1对应汽车,区域2对应假人。

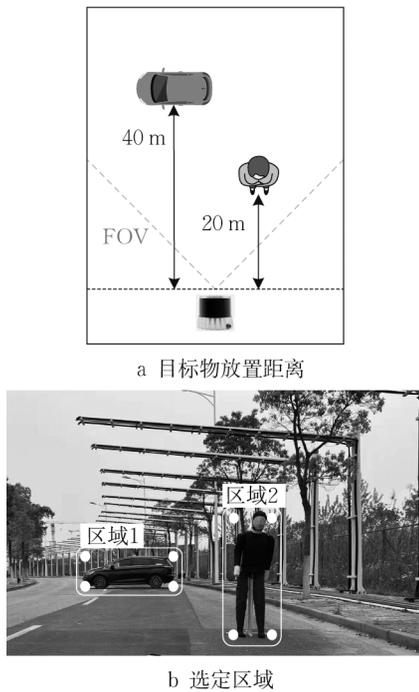


图4 降雨试验目标物设置

Fig.4 Target objects of rainfall test

3 试验结果分析

3.1 试验结果

按照试验方案,共计采集了两款激光雷达在无雨和5个降雨等级下的点云数据。图5分别展示了两款雷达在1级降雨和5级降雨条件下的原始数据效果,从图中可以看出不同降雨条件对激光雷达存在明显的影响。

(1) 平均点云数量影响情况

进一步分析第1节提出的5项指标受降雨条件的影响情况。图6展示了两款雷达在不同降雨强度下的平均点云数量的变化情况。由于两款雷达水平角分辨率存在差异,同一区域点云的绝对数量相差较大,无法直接比较,此处以无雨条件下两款激光雷达的平均点云数量作为基准,对平均点云数量进行归一化处理。对假人目标物而言,除OS2-128雷达在1级降雨情况下点云数量有22.73%的减少外,其他情况下点云数量均有不同程度的增加。对汽车目标物而言,两款雷达变化趋势相近,在1级降雨条件下受到的削弱作用最强,平均点云数量分别下降了91.49%和45.17%。整体而言,OS2-128雷达相比Tele-15雷达在平均点云数量上受到降雨的影响要

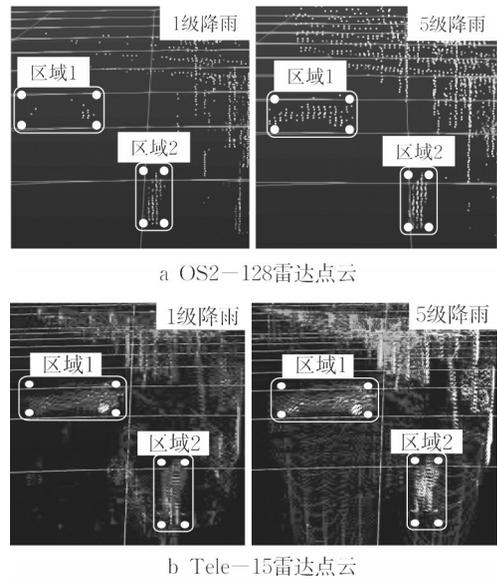


图5 试验雷达采集的点云斜视图对比

Fig.5 Comparison of oblique views of point cloud collected by LiDARs under Test

更加严重。

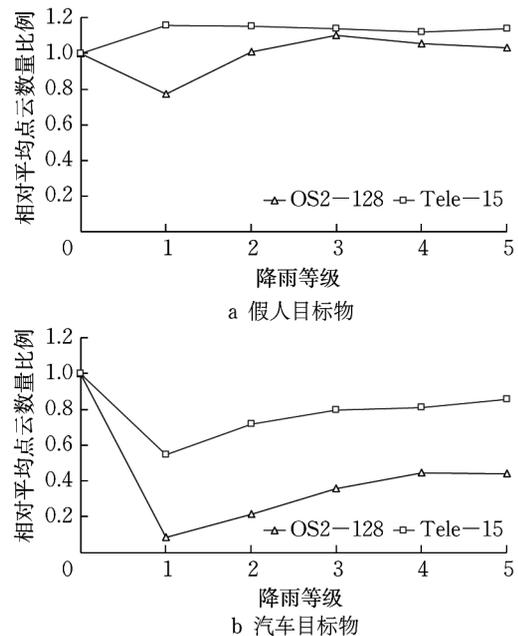


图6 相对平均点云数量比例变化曲线

Fig.6 Change curve of relative proportion of average point cloud number

(2) 平均反射率与反射率信息熵影响情况

图7是两款雷达在不同降雨强度下的平均反射率和反射率信息熵变化情况。对于假人和汽车目标物,两款雷达的平均反射率和反射率信息熵两个指标随降雨量的变化趋势均基本一致,与未降雨情况相比均有明显的下降,受到1级降雨条件的影响最

为严重,随降雨量增大有所改善。与OS2-128雷达相比,Tele-15雷达在两项指标上均相对较低,且平均反射率受1级降雨影响时的降幅更大,假人和汽车平均反射率的降幅分别达到了96.77%及83.33%。两项指标在变化趋势上有明显的一致性,假人目标物两款雷达的平均反射率和反射率信息熵相关系数为0.94和0.95,汽车目标物相关系数为0.87和0.98。分析数据发现,当点云的反射率均值较高时,其反射率分布也较分散,导致信息熵的增大,一致性变差;当平均反射率较低时,反射率则集中在低反射率区间,一致性反而提升,导致信息熵减小。

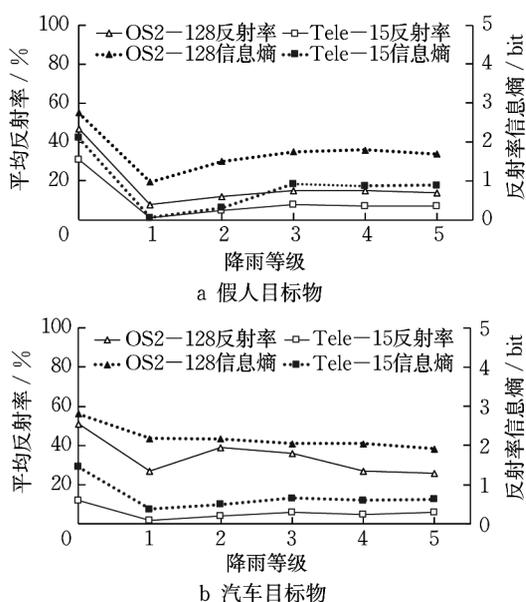


图7 平均反射率及反射率信息熵变化曲线

Fig.7 Change curve of average reflectivity and reflectivity information entropy

(3) 平均反射率与反射率信噪比影响情况

图8是两款雷达在不同降雨强度下的平均反射率和反射率信噪比变化曲线。由式(4)可知,平均反射率越强,点云的抗噪声能力越强;反射率信噪比越低,则说明反射率受干扰程度越大,失真程度越严重。由图8a可知,Tele-15雷达测得的假人点云的反射率信噪比在降雨条件时下降显著,变为负值,尤其是1级降雨对信噪比的削弱效果最严重。在图8b中,可以看到汽车的反射率信噪比始终为负值,表明来自汽车的反射点云抵抗噪声的能力较差。这可能是因为汽车的表面是不规则的曲面,以及车身不同位置构件材质的差异,导致汽车各个部分反射的激光回波强度差异较大,造成点云反射率的波动较大。对比两款雷达,总体而言Tele-15雷达信噪比值较

低,抵抗噪声的能力相对较差。

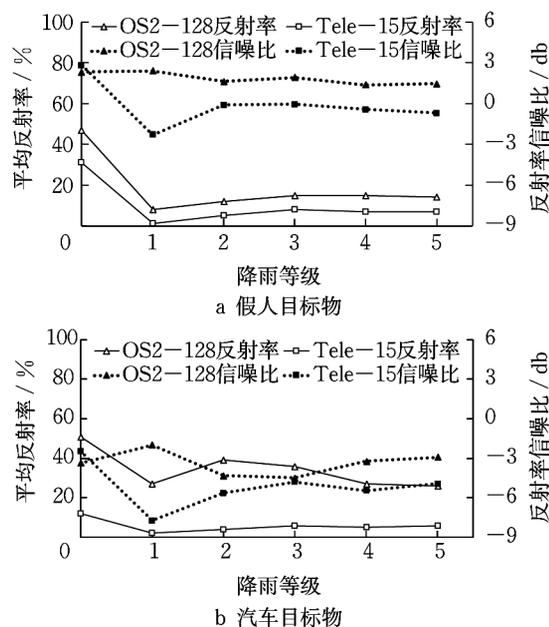


图8 反射率信噪比变化曲线

Fig.8 Change curve of reflectivity Signal-to-Noise ratio

(4) 纵向距离标准差影响情况

图9展示了两款雷达在不同降雨强度下纵向距离标准差的变化情况。从图9a中可以看到,针对假人目标物,OS2-128雷达在降雨条件下的纵向距离标准差有所下降,整体较为稳定,而Tele-15有一定波动。对于汽车目标物,两款雷达的变化趋势较为接近,纵向距离标准差在1级降雨条件下最低,随降雨强大变大有所上升。整体而言,二者在降雨条件下的测距误差基本保持稳定,且相比无雨条件均有所下降,Tele-15雷达相比OS2-128的标准差略大。

3.2 分析与讨论

考虑到被测两款激光雷达的实际表现受到生产工艺等因素的影响,测试结果具有一定的特异性,因此结合二者的性能变化趋势及一般性的工作原理和特点进行分析,对于获得激光雷达在降雨条件下的性能变化特点及其性能局限性,以及SOTIF相关研究具有一定参考价值。

(1) 雨滴雾化对激光雷达的影响显著

由试验结果可知,1级降雨对各项指标的影响最为严重。由于场地中采用的降雨模拟设施采用喷淋的形式,在1级降雨条件下,雨滴颗粒直径较小,但喷洒的雨滴密度较高,此时降雨更接近雾滴的形态。图10是1级降雨和3级降雨时拍摄的汽车图像对比,图11是不同降雨强度下的图像灰度方差,其中灰度方差越小,图

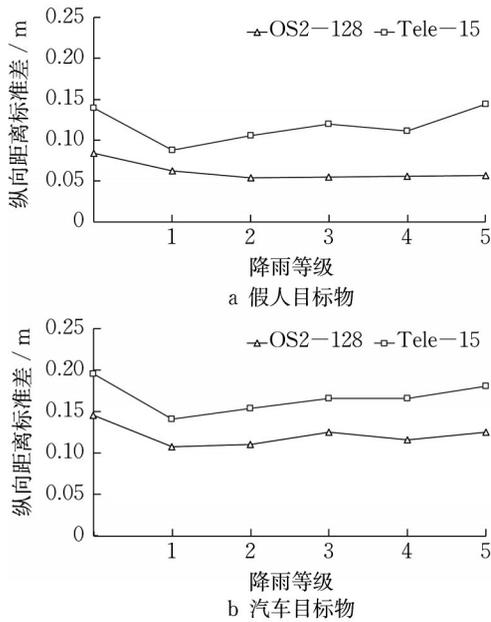


图9 纵向距离标准差变化曲线

Fig.9 Change curve of relative error of longitudinal distance

像越模糊。上述结果间接证明,1级降雨时雨滴雾化现象最严重,环境中雨滴密度更高,因此对点云数量和平均反射率等指标的影响要明显强于其他降雨等级产生的影响。

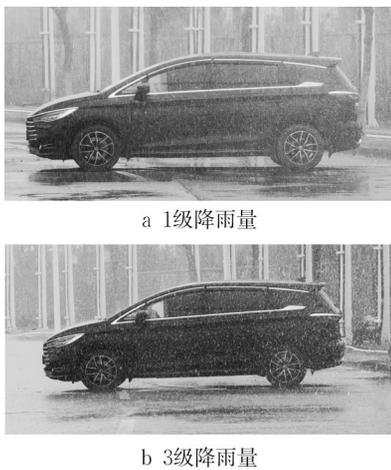


图10 1级和3级降雨下的汽车图像对比

Fig.10 Image comparison of vehicle at level 1 and level 3 rainfall

(2) 混合固态、长波长雷达点云更加稳定

由图6可知,降雨对点云数量有显著影响,但对假人目标物和汽车目标物影响趋势相反。根据激光的传播原理,造成上述问题的原因应主要来自传播距离的影响。对于假人目标物,由于其距离较近,降雨条件下由雨滴返回的低反射率点云被雷达接收,

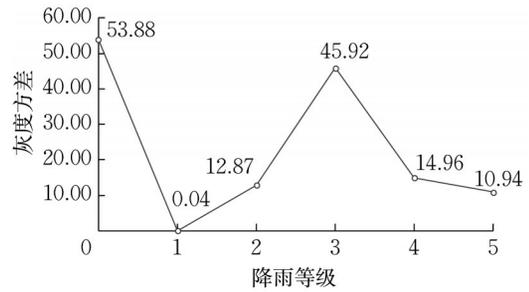


图11 不同降雨等级下的灰度方差

Fig.11 Gray-scale variance at different rainfall levels

目标物区域内点云数量较无雨条件时有所上升(如图6a所示);对于汽车目标物,其距离较远,因此大部分低反射率点云均被雨滴衰减丢失,点云数量显著下降(如图6b所示)。总体而言,降雨对点云数量的影响在近距离范围内主要表现为增加干扰点云,在远距离范围内表现为过滤低反射率点云。比较两款雷达,Tele-15点云数量受降雨影响要低于OS2-128雷达,其原因有两点:首先,由于机械旋转式雷达的重复式扫描特性,激光束受降雨的遮挡效应更强,点云丢失严重;其次,OS2-128雷达的波长要略低于Tele-15雷达,而波长较短的激光在雨雾中的穿透性能要较弱^[11,22],因此激光回波数量较少。

(3) 混合固态雷达反射率受影响更大

比较两款激光雷达的测试结果可知,Tele-15雷达的点云反射率受降雨条件的影响程度要大于OS2-128雷达,主要是因为Tele-15雷达的点云密度较大,导致点云中包含较多的雨滴回波,而雨滴的反射率极低^[23],从而降低了反射率均值。图12是在无雨和1级降雨条件下,OS2-128雷达和Tele-15雷达的低反射率点云(反射率低于5%)占比的统计结果。由图可知,对于OS2-128雷达而言,无雨和1级降雨条件下的低反射率点云占比没有很大的差异;但对Tele-15雷达而言,相比于无雨环境,1级降雨条件下的低反射率点云占比增幅为37.4%,证明了Tele-15雷达在降雨条件下的点云包含较多的低反射率雨滴回波。

(4) 降雨小幅降低了纵向距离标准差

由图9可知,降雨条件会小幅降低激光雷达纵向距离标准差,但在本研究中,针对假人目标物和汽车目标物,造成该结果的原因有一定差异性。目标物区域内的点云纵向距离标准差有所下降。对于距离较远的汽车目标物,点云数量显著下降,而反射回的点云集中于目标物反射面积较大且平整的区域内,从而造成点云纵向距离标准差的下降。但总体

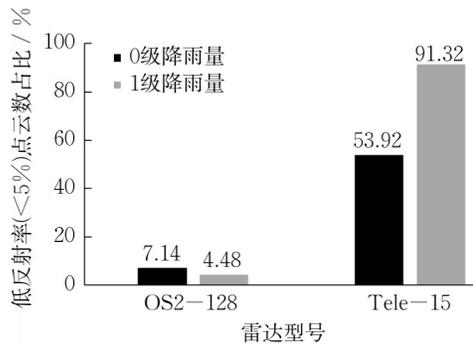


图12 两款雷达的低反射率点云占比统计

Fig.12 Proportion of low reflectivity point cloud of two LiDARs

而言,降雨对纵向距离标准差的影响极为有限。

4 结论

激光雷达是自动驾驶汽车环境感知系统的重要组成部分。本文针对激光雷达在降雨条件下的性能局限性,基于封闭场地内的降雨模拟设施,开展了测试试验,量化分析了不同类型激光雷达在典型交通目标物感知过程中受降雨强度影响的情况。可以从多个角度评价点云质量;试验以机械旋转式OS2-128雷达和混合固态式Tele-15雷达作为被测对象,设置假人和汽车作为被测目标物,采集了无雨和5个等级降雨条件下的点云数据;基于评价指标对选定区域内的点云进行分析,从降雨量、目标物类型、雷达种类三个维度,对比分析了降雨条件对雷达性能的影响情况。

实验结果表明,降雨会在一定程度上减少目标物区域内的平均点云数量,降低点云平均反射率,使反射率分布集中于低反射率区间,从而降低反射率信息熵,容易导致点云反射强度特征的丢失;降雨会降低点云的反射率信噪比,削弱其抗噪声能力。此外,在模拟降雨条件下,雾化的小雨条件对激光雷达的影响相较其他降雨条件更加严重,在20~40m距离内,机械旋转式激光雷达平均点云数量最大降幅达到91.49%,平均反射率最大降幅达82.98%。因此在自动驾驶场景中要充分考虑到雨滴雾化的影响,进而通过软硬件优化来弥补车载激光雷达的性能局限,以提升SOTIF性能。在降雨环境下,线数相近的混合固态雷达相比机械旋转雷达在局部具有更高的点云密度,从而产生更多的雨滴回波,表现为低反射率点云占比上升,因此采用混合固态激光雷达需要更加有效地噪声滤除策略。

在未来的研究工作中,将会在上述激光雷达点云质量评价指标的基础上,进一步研究基于点云的识别算法识别效果的受影响情况;并从车辆预期功能安全的触发条件分析需求出发,研究环境条件引发车辆非预期行为的过程及机制,为触发条件量化指标构建和触发条件库建立提供依据和支持。

作者贡献声明:

邢星宇:试验方案设计与实施,测试结果分析,论文撰写;

黄安:试验实施,测试结果分析,论文修订;

姜为:试验实施,测试结果分析,论文修订;

陈君毅:研究命题提出与构思,试验方案设计,论文审核;

余卓平:论文修订与审核。

参考文献:

- [1] PEYNOT T, UNDERWOOD J P, SCHEDING S. Towards reliable perception for unmanned ground vehicles in challenging conditions [C]//2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society, 2009: 1170-1176.
- [2] International Organization for Standardization. Road Vehicles-Safety of the intended functionality: ISO 21448: 2022 [S]. Geneva: ISO, 2022.
- [3] RIVERO J, TAHIRAJ I, SCHUBERT O, *et al.* Characterization and simulation of the effect of road dirt on the performance of a laser scanner [C]//2017 IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). Yokohama, Japan: IEEE, 2017: 1-6.
- [4] NAKAJIMA T Y, IMAI T, UCHINO O, *et al.* Influence of daylight and noise current on cloud and aerosol observations by spaceborne elastic scattering Lidar [J]. Applied Optics, 1999, 38(24):5218.
- [5] RASSHOFER R H, SPIES M, SPIES H. Influences of weather phenomena on automotive Laser Radar Systems [J]. Advances in Radio Science, 2011, 9: 49.
- [6] HASIRLIOGLU S, DORIC I, KAMANN A, *et al.* Reproducible fog simulation for testing automotive surround sensors [C]//2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC2017-Spring). Sydney, Australia: IEEE, 2017: 1-7.
- [7] HASIRLIOGLU S, KAMANN A, DORIC I, *et al.* Test methodology for rain influence on automotive surround sensors [C]//2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). Rio de Janeiro, Brazil: IEEE, 2016: 2242-2247.
- [8] HEINZLER R, SCHINDLER P, SEEKIRCHER J, *et al.* Weather influence and classification with automotive lidar

- sensors [C]// 2019 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). Paris, France: IEEE, 2019: 1527-1534.
- [9] FILGUEIRA A, GONZÁLEZ-JORGE H, LAGÜELA S, *et al.* Quantifying the influence of rain in LiDAR performance [J]. *Measurement*, 2017, 95:143.
- [10] FERSCH T, BUHMANN A, KOELPIN A, *et al.* The influence of rain on small aperture LiDAR sensors [C]//2016 German Microwave Conference (GeMiC). Bochum, Germany: IEEE, 2016: 84-87.
- [11] WOJTANOWSKI J, ZYGMUNT M, KASZCZUK M, *et al.* Comparison of 905 nm and 1550 nm semiconductor laser rangefinders' performance deterioration due to adverse environmental conditions [J]. *Opto-Electronics Review*, 2014, 22(3):183.
- [12] MCKNIGHT B D, MILES R, MARINE G. Impact of reduced visibility conditions on laser-based DP sensors [C]// Dynamic Positioning Conference. Houston, USA: Dynamic Position Committee, 2014: 1-9.
- [13] MONTALBAN K, REYMANN C, ATCHUTHAN D, *et al.* A quantitative analysis of point clouds from automotive lidars exposed to artificial rain and fog [J]. *Atmosphere*, 2021, 12(6):738.
- [14] VRIESMAN D, THORESZ B, STEINHAUSER D, *et al.* An experimental analysis of rain interference on detection and ranging sensors [C]// 2020 IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC). Rhodes, Greece: IEEE, 2020: 1-5.
- [15] TANG L, SHI Y, He Q, *et al.* Performance test of autonomous vehicle lidar sensors under different weather conditions [J]. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 2020, 2674(1):319.
- [16] GOBERVILLE N, EI-YABROUDI M, OMWANAS M, *et al.* Analysis of LiDAR and camera data in real-world weather conditions for autonomous vehicle operations [J]. *Advances and Current Practices in Mobility*, 2020, 2(5):2428.
- [17] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 机载激光雷达点云数据质量评价指标及计算方法: GB/T 36100[S]. 北京: 国家标准化管理委员会, 2018.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Indices and computation method of quality assessment for airborne LiDAR point cloud data: GB/T 36100 [S]. Beijing: Standardization Administration, 2018.
- [18] QIAN Q, HU Y, ZHAO N, *et al.* Summed volume region selection based three-dimensional automatic target recognition for airborne LiDAR [J]. *Defence Technology*, 2020, 16(3):535.
- [19] WANG Z, WANG X, FANG B, *et al.* Vehicle detection based on point cloud intensity and distance clustering [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 1748(4):1.
- [20] LIU J, SUN Q, FAN Z, *et al.* TOF LiDAR development in autonomous vehicle [C]//2018 IEEE 3rd Optoelectronics Global Conference (OGC). Shenzhen, China: IEEE, 2018: 185-190.
- [21] 武晓宇, 张晓, 王伟忠. 智能网联汽车激光雷达工作原理、性能比较与安全性分析 [J]. *信息安全与通信保密*, 2020(9):92.
- WU X Y, ZHANG X, WANG Z W. A comparative study on the principle, performance and safety of the intelligent connected vehicle LiDAR [J]. *Information Security and Communications Privacy*, 2020(9):92.
- [22] 郭婧, 张合, 王晓锋. 降雨对532nm和1064nm激光传输的衰减特性研究 [J]. *光学学报*, 2011(1):32.
- GUO J, ZHANG H, WANG X F. Attenuation and Transmission of Laser Radiation at 532nm and 1064nm through Rain [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011(1):32.
- [23] 刘薇, 张涛. 纯水的激光反射率的研究 [J]. *光学与光电技术*, 2010, 8(1):84.
- LIU W, ZHANG T. Research on laser reflection index of water [J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2011(1):84.