



南京大學

研究生畢業論文 (申請工程碩士學位)

論 文 題 目 自動駕駛雨天場景
點云數據擴增工具的設計與實現

作 者 姓 名 鄧靖琦

學 科、專 業 名 稱 工程碩士（軟件工程領域）

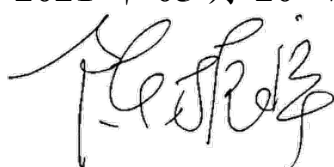
研 究 方 向 軟件工程

指 導 教 師 陳振宇 教授，馮洋 助理研究員

2021 年 5 月 20 日

学 号：MF1932031

论文答辩日期：2021 年 05 月 20 日

指 导 教 师： (签字)

The Design and Implementation of Rainy-scene Point Cloud Data Augmentation for Autonomous Driving Systems

by

Jingqi Deng

Supervised by

Professor Zhenyu Chen, Research Assistant Yang Feng

A dissertation submitted to
the graduate school of Nanjing University
in partial fulfilment of the requirements for the degree of

MASTER OF ENGINEERING

in

Software Engineering



Software Institute
Nanjing University

May 20, 2021

南京大学研究生毕业论文中文摘要首页用纸

毕业论文题目：自动驾驶雨天场景点云数据扩增工具的设计与实现
工程硕士（软件工程领域） 专业 2019 级硕士生姓名：邓靖琦
指导教师（姓名、职称）：陈振宇 教授，冯洋 助理研究员

摘 要

环境感知是确保自动驾驶安全性的重要基石，激光雷达是当前自动驾驶系统进行环境感知的主要传感器。在雨天这种恶劣的天气条件下，激光将受到水滴或空气中任意粒子的吸收、散射或折射，激光雷达探测到的点云数据会出现测量偏差。更加关键的是，自动驾驶模型的表现很大程度上取决于数据集样本质量，当样本空间不足或样本多样性不够丰富时，可能会导致模型泛化能力欠佳，并出现识别率和准确率较低的结果。

本文面向自动驾驶雨天场景进行激光雷达点云数据扩增，旨在提供采集成本极高的恶劣天气点云数据，增加自动驾驶场景数据集样本的多样性，从而提高无人车系统执行驾驶决策的准确程度，使得变异数据对于自动驾驶系统的测试具有现实意义。本文对项目背景和技术现状进行了全面分析后，基于朗伯比尔指数衰减定律、雨滴谱模型以及 Mie 散射理论推导出在不同降雨强度下激光透过率随激光传输距离的变化规律，并根据此变化函数设计相关算法提出了面向自动驾驶雨天场景的激光雷达点云数据扩增技术，接着基于 Spring Boot 框架设计实现了相应的点云数据扩增工具。工具主要分为文件上传模块、扩增参数配置模块、点云扩增模块、可视化模块以及变异数据集评估模块。通过该工具，用户可以上传待扩增原始点云数据、配置雨天场景降雨强度参数，从而执行定制化扩增任务，此外工具还提供三维点云可视化以及变异数据评估服务。

经过充分的系统测试，本工具实现了基本需求，测试结果与预期相符合。本文使用三维目标检测模型以及 KITTI 公开点云数据集进行实验评估，实验结果表明本文设计开发的自动驾驶雨天场景点云扩增工具生成的变异点云数据真实有效，且符合激光在降雨中衰减的基本特性。本文开发的点云扩增工具很大程度节省了极端天气点云的采集成本，丰富了自动驾驶场景激光雷达点云数据样本多样性，从而提高模型的鲁棒性以及泛化能力，促进自动驾驶安全性。

关键词：自动驾驶，激光雷达，点云，数据扩增

南京大学研究生毕业论文英文摘要首页用纸

THESIS: The Design and Implementation of Rainy-scene
Point Cloud Data Augmentation for Autonomous Driving Systems
SPECIALIZATION: Software Engineering
POSTGRADUATE: Jingqi Deng
MENTOR: Professor Zhenyu Chen, Research Assistant Yang Feng

Abstract

Environmental perception is the important cornerstone to ensure the safety of autonomous driving, lidar is the main sensor for autonomous driving environment perception. Under severe weather conditions such as rainy scenes, the laser is absorbed, diffracted or refracted by water droplets or any particles in the air, and the point cloud data detected by the lidar will have measurement deviations. More critically, the effect of the autonomous driving model largely depends on the sample quality of the data set, including the number of samples and diversity. When the sample space is insufficient or the sample diversity is not rich enough, the generalization ability of the model may be insufficient. And there is a result that the recognition rate and accuracy rate are not high.

In this thesis, the lidar point cloud data augmentation is carried out for the rainy scene of autonomous driving. It aims to provide point cloud data of severe weather with extremely high collection cost, increase the diversity of the data set samples of the autonomous driving scene, and improve the driving decision-making ability of the unmanned vehicle system. The degree of accuracy makes the mutation data of practical significance for the test of the automatic driving system. After a comprehensive analysis of the project background and technical status, this thesis derives the variation of laser transmittance with laser transmission distance under different rainfall intensities based on Lamberbeier's exponential attenuation law, raindrop spectrum model and Mie scattering theory, and based on this The related algorithm of the change function design proposed a lidar point cloud data amplification technology for autonomous driving rainy scenes, and then based on the Spring Boot framework design and implementation of the corresponding point cloud data amplification tool. The tools are

mainly divided into file upload module, amplification parameter configuration module, point cloud amplification module, visualization module and mutation data set evaluation module. Through this tool, users can upload original point cloud data to be amplified, configure rain intensity parameters in rainy scenes, and perform customized amplification tasks. In addition, the tool also provides 3D point cloud visualization and mutation data evaluation services.

Through rigorous system testing, this tool basically achieves requirements, and the results meet the expected standards. This thesis uses the 3D target detection model and the KITTI public point cloud data set for experimental evaluation. The experimental results show that the variable point cloud data generated by the rainy scene amplification tool designed and developed in this thesis is true and effective, and conforms to the basic characteristics of laser attenuation in rainfall. The point cloud augmentation tool developed in this thesis greatly saves the cost of collecting extreme weather point cloud data, enriches the diversity of lidar point cloud data samples in autonomous driving scenarios, thereby improving the generalization ability and robustness of the model, and hopes to play a certain role in improving the safety of autonomous driving systems.

keywords: Autonomous driving, LiDAR, point cloud, data augmentation

目 录

目 录	v
图 目 录	ix
表 目 录	xi
第一章 引言	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 自动驾驶场景数据扩增技术	2
1.2.2 雨天场景激光雷达扩增技术	3
1.3 本文主要工作	3
1.4 本文主要结构	4
第二章 相关技术综述	7
2.1 雨滴模型激光衰减理论	7
2.1.1 雨滴谱模型	7
2.1.2 朗伯比尔定律及 Mie 散射理论	8
2.2 自动驾驶与激光雷达相关技术	8
2.2.1 自动驾驶软件系统简介	8
2.2.2 激光雷达与目标检测识别技术	10
2.2.3 三维点云处理技术	11
2.3 框架技术	12
2.3.1 Spring Boot 框架	12
2.3.2 Docker 容器技术	13
2.4 本章小结	13
第三章 工具需求分析与概要设计	15
3.1 系统整体概述	15
3.2 系统需求分析	16
3.2.1 功能性需求分析	16
3.2.2 非功能性需求分析	21

3.3 系统概要设计	22
3.3.1 工具模块划分设计	22
3.3.2 架构设计	23
3.3.3 数据模型设计	26
3.4 本章小结	29
第四章 数据扩增核心算法设计	31
4.1 雨滴粒子特性及雨滴谱分布模型	31
4.2 激光衰减定律	32
4.3 Mie 散射理论	33
4.4 点云扩增核心算法设计	35
4.4.1 设计思路	35
4.4.2 算法详情	36
4.5 本章小结	40
第五章 扩增工具详细设计与实现	41
5.1 点云文件上传模块	41
5.1.1 详细设计	41
5.1.2 核心类设计	42
5.1.3 流程设计	43
5.2 扩增参数配置模块	44
5.2.1 详细设计	44
5.2.2 核心类设计	45
5.2.3 流程设计	46
5.3 点云数据扩增模块	47
5.3.1 详细设计	47
5.3.2 核心类设计	47
5.3.3 流程设计	49
5.4 点云可视化模块	50
5.4.1 详细设计	50
5.4.2 核心类设计	50
5.4.3 流程设计	51
5.5 变异数据集评估模块	52
5.5.1 详细设计	52

目 录	vii
5.5.2 核心类设计	53
5.5.3 流程设计	54
5.6 工具实例展示	55
5.7 本章小结	57
第六章 扩增工具测试与实验评估	59
6.1 系统测试	59
6.1.1 功能测试	60
6.1.2 接口测试	65
6.2 数据真实性评估	66
6.3 数据有效性评估	68
6.3.1 实验评估数据	68
6.3.2 实验评估工具	69
6.3.3 实验评估指标	71
6.3.4 实验方案设计	71
6.3.5 实验结果分析	72
6.4 本章小结	73
第七章 总结与展望	75
7.1 总结	75
7.2 展望	76
致 谢	77
参考文献	79
简历与科研成果	85
学位论文原创性声明	87
《学位论文出版授权书》	89

图 目 录

2-1 自动驾驶系统模块框图	10
3-1 系统架构图	15
3-2 系统用例图	18
3-3 逻辑视图	23
3-4 开发视图	24
3-5 过程视图	25
4-1 不同降雨强度下激光透过率随距离变化趋势图	35
4-2 算法设计思路示例图	35
4-3 点云扩增算法相关工具类图	36
5-1 点云文件上传模块核心类图	42
5-2 点云文件上传模块时序图	43
5-3 扩增参数配置模块核心类图	45
5-4 扩增参数配置模块时序图	46
5-5 点云扩增模块核心类图	48
5-6 点云扩增模块时序图	49
5-7 点云可视化模块核心类图	50
5-8 点云可视化模块时序图	52
5-9 验证模块核心类图	53
5-10 验证模块时序图	54
5-11 新增点云扩增任务截图	55
5-12 点云扩增任务列表截图	56
5-13 点云评估任务列表截图	56
5-14 点云文件下载页面截图	57
6-1 系统测试流程图	59
6-2 雨天场景不同传输距离下激光衰减趋势图	66

6-3 中小雨量情况下点云数据可视化结果示例图	67
6-4 大到暴雨情况下点云数据可视化结果示例图	67
6-5 数据有效性实验流程图	68
6-6 三维目标检测结果示例图	70

表 目 录

3-1 功能性需求列表.....	17
3-2 点云文件上传用例描述	18
3-3 新建点云扩增任务用例描述.....	19
3-4 新建变异数据集评估任务用例描述	19
3-5 查看数据集评估结果用例描述	20
3-6 点云可视化展示用例描述	20
3-7 点云文件下载用例描述	21
3-8 非功能性需求列表	22
3-9 User 类详情列表	26
3-10 PointCloud 类详情列表.....	27
3-11 AugmentTask 类详情列表	27
3-12 EvaluateTask 类详情列表	28
3-13 DataSet 类详情列表	28
3-14 PointMap 类详情列表	29
4-1 数据扩增关键步骤列表	37
6-1 点云文件上传测试用例设计表	60
6-2 新建点云扩增任务测试用例设计表	61
6-3 新建点云评估任务测试用例设计表	62
6-4 点云可视化测试用例设计表.....	63
6-5 变异数据集评估结果展示测试用例设计表	64
6-6 点云文件下载测试用例设计表	64
6-7 功能测试用例执行结果表	65
6-8 实验数据详情列表	69
6-9 实验环境配置信息列表	70
6-10 实验评估指标列表	71
6-11 实验方案设计表.....	72

6-12 数据有效性评估实验结果统计表	73
---------------------------	----

第一章 引言

1.1 研究背景与意义

近些年随着人工智能以及传感器硬件技术的高速发展，自动驾驶逐渐成为了全球范围内都在研究的技术热点，在可行性和实用化方面都取得了突破性的进展，并步入了一个全新的发展阶段 [1]。在自动驾驶体系架构中，传感模块是其他模块正常工作所依赖的关键模块，所以环境感知能力对于自动驾驶安全性至关重要。

无人车传感器主要包括车载摄像头等视觉系传感器、车载毫米波雷达、车载激光雷达等雷达系传感器 [2]，其中激光雷达被业界广泛认为是实现自动驾驶技术的必要传感器。那么通过激光雷达执行环境感知任务，将是自动驾驶领域的关键挑战，同时环境感知能力也制约了系统可用性与安全性。然而在恶劣天气条件下，激光雷达进行环境感知的能力面临着严峻的挑战 [3]。Filgueira、Mokrane Hadj-Bachir、Christopher Goodin 等人通过模拟测试后得出结论，激光雷达在类似下雨天这样的恶劣天气条件下，其发出的激光受到水滴或空气中任意粒子的吸收、衍射、后向散射或折射，会导致点云数据的错误点测量 [4]。所以在雨天这种极端天气条件下，激光雷达的感知能力将受到一定制约，这将直接对自动驾驶汽车安全性产生影响。

自动驾驶系统本质上是一个极度复杂的深度学习模型，数据集将对自动驾驶模型训练结果产生重要影响。当样本空间不足或样本多样性不够丰富时，可能会导致模型泛化能力不足，并出现识别率和准确率不高的结果。目前公开点云数据集几乎都是在良好天气条件下采集的 (比如 KITTI)，很少包含雨天场景等恶劣天气条件下的激光雷达点云数据。激光雷达在极端天气进行环境感知会出现测量偏差 [5]，而且采集该类数据效率低成本高。为了解决上述问题，本文提出了一种面向自动驾驶雨天场景的激光雷达点云数据扩增技术。

本文基于朗伯比尔指数衰减定律、雨滴谱模型以及 Mie 散射理论，提出了针对降雨环境的激光衰减算法模型，作为本文数据扩增技术的核心算法。依托核心算法，本文开发了相应的点云数据扩增工具，包括点云文件上传、扩增参

数配置、点云扩增、变异数据集评估以及点云可视化等功能模块。通过模拟雨天场景，根据降雨强度变化实现对激光雷达点云数据在不同降雨规模场景下的扩增，提供了这些在真实世界采集成本极高的极端天气点云数据。希望这些数据对于自动驾驶系统的测试具有现实意义，并为广大自动驾驶开发者提供帮助。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 自动驾驶场景数据扩增技术

数据集的准备对于自动驾驶模型的训练起关键性作用，一般来说，训练集的数量越庞大，多样性越丰富，模型进行预测时的精确度越高，泛化能力和鲁棒性越强。然而，点云数据收集难度较大，而且数据标注需要付出大量时间和精力。那么利用现有数据，通过扩增变异，可以生成大量真实有效的新数据，从而提升网络的精度、模型泛化能力和系统鲁棒性 [6]。

数据是自动驾驶技术发展的源动力。Shromona Ghosh、Tommaso Dreossi 等人提出了基于 CNN 模型的自动驾驶场景图像生成器 [7]，使用了改变图片亮度、饱和度以及调整图片中各个目标对象所在位置等方法来进行图像扩增，可以利用变异出的新样本对原有模型进行测试，并在一定程度上发现系统拥有的问题漏洞，但是其生成图像数据的真实性仍然有待提升。M Bijelic、T Gruber 等人提出了一种测试评估方法 [8]，用于在恶劣天气条件下对图像传感器进行基准测试。Cong Liu、Mengshi Zhang 等人提出了一种基于无监督学习的框架 DeepRoad 来生成真实驾驶场景的摄像头数据 [9]，测试基于神经网络的无人车系统是否存在不一致行为，并对实时图像进行验证，以提升系统的鲁棒性。Yu、Handi、Xin Li 等人提出了全新的 CycleGAN 模型，只运用少量的图像样本集以及一组对抗网络，就可以将一组标准场景用例映射到另一组极端场景用例，从而智能化生成测试数据，大大降低了收集边缘用例的成本。DeepBillboard[10] 也从车载摄像头的角度去进行图像数据扩增，通过模拟不同天气条件下的广告牌生成对抗图像来扩充数据样本，从而提升自动驾驶软件系统的鲁棒性和稳定性。上述研究都是针对车载摄像头图像数据进行扩增，并无针对激光雷达点云数据进行相关扩增工作。

1.2.2 雨天场景激光雷达扩增技术

为了解点云数据在雨天场景等恶劣天气条件下的扩增特性，本小节整理了前人所做的相关工作并进行分析。

Filgueira 等人为了定量地分析降雨对激光雷达产生的影响，使用 Velodyne VLP-16 型激光雷达在比戈大学 As Lagoas 校区附近的路段进行测试 [11]，测试路段包括带有建筑物信息的金属标牌、混凝土墙、石材立面、窗户、交通标志、反光表面、沥青路面以及垂直反光标志等物体，这些测试物体均在 100 米的范围之内。测试过程均采取了真实人工降雨措施，测试结果表明：降雨强度的变化不仅影响材料表面的回波强度，还会对激光传输路径产生干扰，各个目标的回波强度和探测点数量均随降雨规模的增大而减小。Mokrane Hadj-Bachir 等人建立了激光雷达模型 [12]，使用 Pro-SiVIC 软件模拟了激光雷达在晴天、雾天、雨天等天气条件下进行数据采集的表现，并生成可用于测试的激光雷达点云数据。Christopher Goodin 等人使用雷达功率方程和消光系数方程建立了一个模型 [13]，该模型利用激光雷达传感器的简单参数化预测降雨引起的反射强度和射程变化。然而上述相关研究花费了大量精力来探究激光雷达在极端天气下的表现情况，却没有一种特定的数据扩增工具。本文在提出了自动驾驶雨天场景点云数据扩增技术的基础上，开发了一个相应的数据扩增工具。

1.3 本文主要工作

本文提出了一种面向自动驾驶雨天场景的激光雷达点云数据扩增技术，并设计开发了相应的点云扩增工具，主要工作如下：

本文在方法上，基于朗伯比尔指数衰减定律、雨滴谱模型、以及 Mie 散射理论进行推导，考虑雨滴粒子特性，并结合点云数据的特点设计了面向自动驾驶雨天场景的激光雷达点云变异算法，能够从激光在大气中传输衰减特性角度出发，提出雨天场景点云数据扩增技术，且通过该方法扩增出的雨天点云数据符合客观规律。

本文在工具角度，基于上述核心扩增算法，开发了一个相应的点云扩增工具，用于执行雨天场景激光雷达点云数据扩增任务。扩增工具包括上传模块、配置模块、扩增模块、验证模块以及可视化模块。上传模块旨在让用户上传待扩增的原始点云数据，配置模块负责对扩增参数进行配置，主要用于设置降雨强度，之后将扩增配置信息与原始点云数据一起输入到扩增模块中。扩增模块

主要负责雨天场景变异数据的生成，该模块接收到原始点云数据和降雨参数配置信息后，利用核心算法进行数据扩增，生成目标降雨强度下的变异点云数据。之后验证模块会根据用户提交的请求对指定变异点云数据集进行评估，评估完成后用户可以查看评估结果报告。点云可视化模块作为单独的一项服务，负责将原始数据或变异数据在工具前端界面进行可视化展示。

本文在实验评估方面，选择了在自动驾驶领域最重要的测试集之一 KITTI 作为原始数据集来进行不同降雨规模的点云数据扩增 [14]，接着使用变异数据集进行数据真实性以及有效性评估。从前人的研究中我们了解到，自动驾驶激光雷达在雨天场景下探测点云数据的规律为，各个目标的回波强度和探测点数量均随降雨规模以及激光传输距离的增大而减小。本文在实验评估部分使用此结论验证提出扩增方法的正确性以及数据真实性。通过观察本工具生成的雨天场景扩增点云数据可视化结果，并结合相关数据统计图验证了本文工具生成数据基本符合上述规律，因此证明本文扩增数据具有真实性。由于无人车在路上行驶的过程中，会使用激光雷达实时探测点云数据进行环境感知，其中的关键任务就是进行无人车周身目标物体检测，并根据包括目标检测结果的数据流来做驾驶决策，那么使用三维目标检测模型来间接对扩增数据集进行有效性评估也就相对合理。本文使用基于 PointPillars 算法 [15] 的三维目标检测模型作为实验评估工具，并以目标检测框 AP 值作为实验评估指标，设计了若干组实验并分析实验结果，证明了本文工具扩增出的雨天场景点云变异数据的有效性，并且可以在一定程度上提高模型的泛化能力以及鲁棒性。

1.4 本文主要结构

本文的组织结构如下：

第一章，引言部分。对于自动驾驶系统激光雷达传感器的背景、雨天场景对激光雷达的影响以及进行点云数据扩增的意义做了简单的介绍。

第二章，相关技术综述。对于文中雨天激光衰减模型所用到的相关理论基础、三维点云处理技术、三维目标检测识别技术、自动驾驶系统架构以及前后端技术框架等进行了简单描述。

第三章，扩增工具需求分析与概要设计。首先进行系统整体概述，并分析了工具的功能性与非功能性需求，接着描述了系统服务划分与架构设计，最后从系统架构视图以及数据模型设计的角度对工具进行详细阐述。

第四章，雨天场景点云数据扩增核心算法设计。首先对雨滴粒子特性及雨滴谱分布模型进行了介绍，接着基于激光衰减定律和 Mie 散射理论阐述了激光透过率随传输距离变化函数的推导过程，最后对于本文面向自动驾驶雨天场景的点云数据扩增核心算法进行了分阶段详解。

第五章，扩增工具详细设计与实现。主要对激光雷达雨天场景点云扩增工具各模块从详细设计、核心类设计以及流程设计的角度对系统的具体设计和实现进行了重点描述。

第六章，扩增工具测试与实验评估。首先对扩增工具进行功能测试以及接口测试，其次设计实验对于生成的雨天场景点云扩增数据进行真实性以及有效性评估，最后进行实验并分析结果得出结论。

第七章，总结与展望。先对本文提出的面向自动驾驶雨天场景的激光雷达点云数据扩增技术以及相关工具进行总结，并进一步阐述点云数据扩增技术以及扩增工具的未来工作重点。

第二章 相关技术综述

本章首先介绍了雨滴模型激光衰减理论，主要包括雨滴谱模型、朗伯比尔定律及 Mie 散射理论。接着描述了自动驾驶软件系统、激光雷达与目标检测识别技术以及三维点云处理技术。最后介绍了本文使用到的框架技术，包括 Spring Boot 框架和 Docker 容器技术。

2.1 雨滴模型激光衰减理论

2.1.1 雨滴谱模型

雨滴谱模型是降水性质研究的重要工作基础，在各种各样的气候类型以及降雨规模条件下，雨滴谱呈现出的分布特征不尽相同。雨滴谱的测量方法也经历了一系列演变，最早使用滤纸法进行测量，即利用雨滴数、降雨取样面积以及雨滴降落速度等参数根据公式计算雨滴谱密度分布。到了 20 世纪中期，出现了通过雨滴传感器的受力情况计算雨滴谱分布的技术，虽然撞击型雨滴谱仪首次实现了雨滴谱测量的自动化，但是其没有考虑到大气环境对于雨滴下降过程的影响，会出现一定的测量误差 [16]。直到 20 世纪末，德国 OTT 公司产出了新型激光雨滴谱仪 [17]，综合考虑了诸如雨滴下落速度、粒子直径等关键因素，将误差降至较低，如今大多数雨滴谱测量与分析都使用此类仪器。

由于不同粒子半径的雨滴数量分布不均匀，地面雨滴数的浓度指数变化对于不同粒子半径的雨滴数浓度量级影响较大。雨滴谱分布的拟合分析方法有很多种，选择不同方法会引入不同程度的误差，因此选择合适的雨滴谱分布拟合方法有助于提升激光衰减模型的准确性与真实性。1948 年，Marshall 等人提出了指数形式的雨滴谱分布，即 M-P 分布。之后 Ulbrich 提出了 Gamma 分布，该分布使用三个参数描述雨滴谱模型，能够更加准确地描述真实降雨的雨滴谱分布 [18]。本文将采用更加通用且精确的韦伯分布模型作为雨滴谱模型参与计算。

2.1.2 朗伯比尔定律及 Mie 散射理论

朗伯比尔定律 (Lambert-Beer law) [19] 是研究光吸收的基本定律, 是吸收光谱法进行定量分析的重要依据 [20]。通俗来说, 该定律描述了激光射入某介质前后的强度变化情况, 因为激光通过介质时一部分会被吸收, 而另一部分会透过。假设入射光的强度为 I_0 , 透射光强度为 I , 那么透光度为 I/I_0 , 用 T 表示, 透过率为 $T = (I/I_0) \times 100\%$ 。本文的自动驾驶雨天场景激光衰减模型的理论推导过程使用到了朗伯比尔定律。

KITTI 点云数据集所用的激光雷达激光波长参数为 905nm, 此外市面上还有 1550nm 波长的雷达传感器, 这两种参数的激光雷达本质上是发射不同波长的光。然而光与其他物质的相互作用会引起光的吸收、散射和色散等现象。当激光透过介质时, 光线会从各个方向散开, 造成激光的透过率发生一些变化。Gustav Mie 提出的米氏散射理论 [21] 主要研究内容即对于处于均匀介质下的各向同性单个介质粒子在平行单色光照射下, 基于麦克斯韦方程边界条件下的严格数学解, 相关学术论述也称为 Mie 散射理论。本文提出的自动驾驶雨天场景激光衰减模型核心算法就是在雨滴谱模型、朗伯比尔指数衰减定律以及 Mie 散射理论等理论上提出的。

2.2 自动驾驶与激光雷达相关技术

2.2.1 自动驾驶软件系统简介

自动驾驶系统十分复杂, 不仅融合了摄像头、激光雷达等传感器进行高精度环境感知工作, 还结合了路线规划导航系统以及智能决策系统执行车辆控制任务。传感器硬件设备的探测精度越来越高, 自动驾驶软件模块也一直在不停地更新迭代, 这使得自动驾驶技术开始在更加尖端的领域得到应用, 比如军用无人机单体智能以及群体智能蜂群作战等场景。在这些场景中, 安全性无疑是最重要的因素 [22]。近年来国内外有很多企业都在进行自动驾驶相关技术的研究, 国外包括福特、奥迪、谷歌以及特斯拉等一系列传统汽车公司; 国内包括百度、滴滴、华为以及阿里等企业也在做相关研究。然而在诸多科技公司的潜心研究下, 自动驾驶系统仍存在缺陷, 事实上近几年已经发生了几起由于自动驾驶系统软件缺陷引发的事故。比如 2018 年, 中国发生了首例自动驾驶车祸致死案, 一辆特斯拉汽车在开启 AutoPilot 模式的情况下撞上一辆停泊在高

速路旁的道路清扫车；2019年3月，美国佛罗里达州，一辆特斯拉 Model3 以 110km/h 的车速径直撞向一辆正在缓慢驶过马路的白色拖挂卡车，驾驶员不幸遇难。这类事故显然令人们对于自动驾驶软件系统的安全性十分担忧，提升无人驾驶技术的安全性也是本文提出自动驾驶场景数据集扩充技术的初衷。

自动驾驶软件系统有以下特征。第一，自动驾驶系统具有集成度极高的运行环境 [23]。无人车系统拥有很多功能模块，包括感知模块、地图构建模块、预测模块、定位模块、路径规划模块以及控制模块等，这些模块需要频繁交互才能实现无人车在真实路况中的安全驾驶。第二，自动驾驶系统由数据驱动。自动驾驶软件系统对车载摄像头及车载激光雷达等传感器收集到的各种类型数据进行高速分析处理以及数据融合等操作，再使用数据分析处理的结果与汽车驾驶行为决策模块进行交互，最后做出合理的驾驶决策。无人车上有多种传感器，这使得自动驾驶软件系统实时产生的数据类型十分复杂，每一秒产生的实时数据量都极大。所以面向自动驾驶软件的质量保障技术需要考虑到数据类型的多样性、有效性以及系统功能完整性 [24]。第三，自动驾驶软件系统的系统行为具有很大的不确定性。自动驾驶系统本质上是个极度复杂的深度学习模型，用于做智能感知定位以及智能决策控制。然而，基于神经网络的深度学习算法模型本质上是不可解释的，相当于一个黑盒子，具有不透明性。

经典自动驾驶系统模块如图 2-1 所示，主要包括传感模块、地图构建模块、感知模块、预测模块、路径规划模块以及控制模块等，下面将简单介绍几个与本文工作高度相关的模块。首先是传感模块，系统的可靠性至关重要，所以无人车系统通常需要多种类型的传感器，比如相机、负责无线电探测和测距的毫米波雷达、负责光探测和测距的激光雷达以及超声波传感器。其中激光雷达可以通过物理传感器测量场景三维信息，并直接提供驾驶场景的精确三维点云数据 [25]。在自动驾驶过程中，每一时刻的点云数据都记录了从激光雷达到物体外表面的距离，可以将其转换成精确的三维坐标。这些探测到的三维点云数据对于无人车在驾驶场景中的定位以及车身周围物体的检测工作具有极大的价值和研究意义，很多公司和研究人员都认为需要依赖更先进的激光雷达才能实现更加可靠的自动驾驶车辆。接着是地图构建模块，该模块主要负责构建高精度点云地图，点云地图可理解为由精确异构地图表示的静态三维环境。高精度点云地图通常包含两个地图层，分别是表示周围环境三维几何信息的点云地图以及与交通规则相关的语义特征地图。这两个地图在三维空间中对齐，共同为路径规划模块提供详细的导航信息。点云地图是十分密集的三维点云，

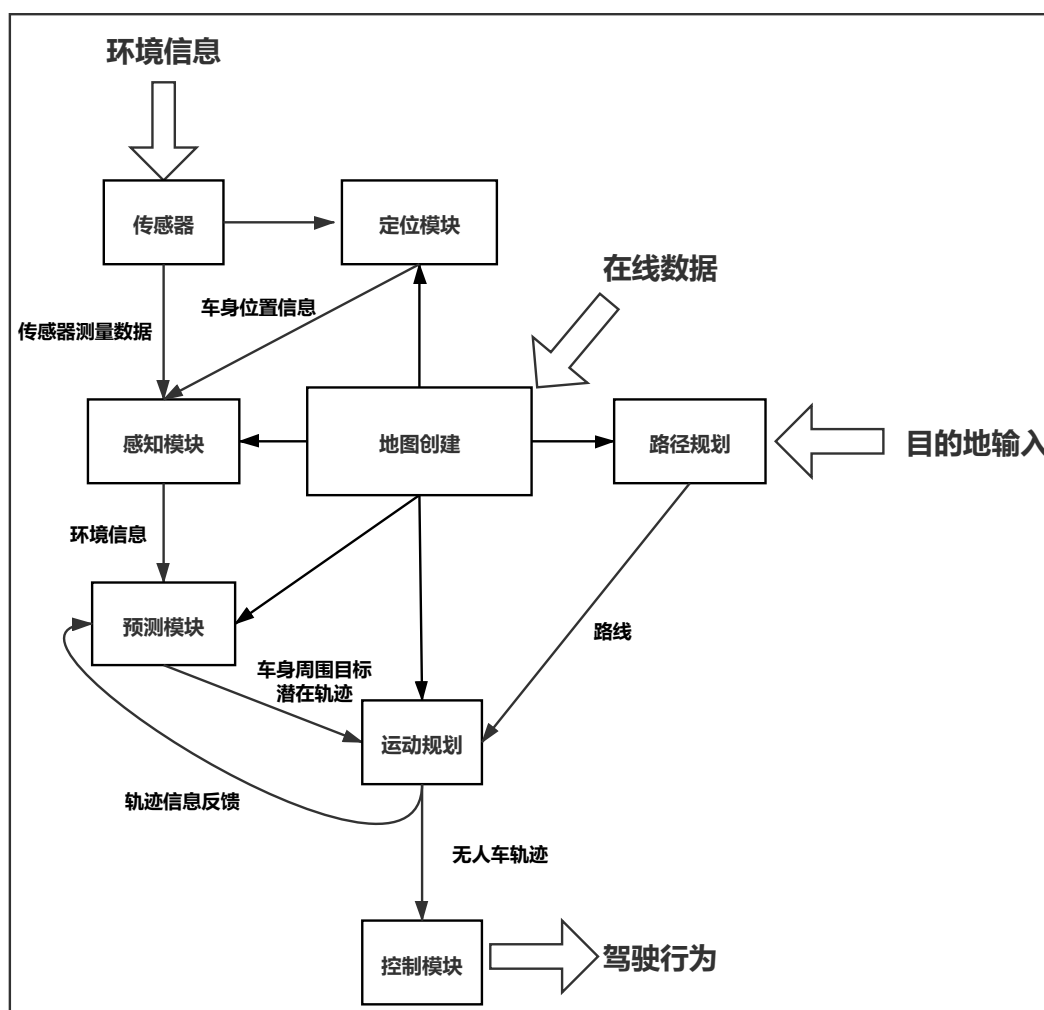


图 2-1: 自动驾驶系统模块框图

主要提供用于定位决策的先验知识，由此可知地图构建模块提供了非常有价值的环境信息，对于无人车的路径规划以及驾驶决策任务至关重要，三维点云数据相当关键。

2.2.2 激光雷达与目标检测识别技术

随着近年来车载激光雷达在智能汽车驾驶领域的广泛应用，通过车载激光雷达获取三维点云数据的技术逐渐成为了国内外研究的热点 [26]。激光雷达可以朝车身周围环境发射激光，之后雷达会利用周身物体返回的探测信号进行目标识别，判断车身周围的物体种类，还会通过计算激光束来回的时间差，以及分析信号强度来判断车身周围目标的距离和位置等信息，从而进一步预测目标的运动轨迹 [27]。

使用深度学习技术进行三维点云目标检测任务大体上可分为三类，直接处理、间接处理和融合处理。直接处理点云的方法主要是通过重新设计三维点云数据的深度神经网络从而对点云进行处理；间接处理点云的方法主要是对点云进行体素化或降维后再投入已有的深度神经网络进行处理；融合处理点云的方法则是先融合图像和点云的检测结果再进一步处理 [28]。随着摄像机硬件设备的发展，融合处理点云的方法将逐渐成为点云处理的主流技术。三维目标检测的主要目标有车辆、行人和骑行者，其中行人和骑行者的点云数据比车辆的点云数据更加稀疏，可提取的特征信息更少，检测难度更大，所以目前的检测算法都以车辆的检测为主，对于行人和骑行者的检测为辅 [29]。

本文实验评估部分所使用的基于 PointPillars 算法的三维点云目标检测模型，就属于间接处理点云的方法。间接处理点云的方法大多数是借助了二维目标检测的深度神经网络模型，先利用统计方法或者卷积网络将点云数据转化为体素网格的形式或其他二维特征，再利用深度神经网络模型进行学习训练。苹果公司曾针对无人驾驶场景下的三维目标检测提出了一个端到端的深度神经网络——VoxelNet，可以对点云数据的各个点进行遍历处理。VoxelNet 模型仅利用车载激光雷达点云数据输入进行模型训练，维持了点云的原始三维特征。重庆大学的 Yan 等人受 VoxelNet 的启发，提出了稀疏嵌入式卷积检测网络模型 [30]，采用 2 个串联的体素特征编码架构，并采用稀疏卷积神经网络进行连接，利用 RPN 网络完成目标的检测工作。SECOND 检测模型充分利用了点云的稀疏性，改善了 VoxelNet 网络的特征提取效果。该模型由体素网格特征提取器、稀疏卷积层以及 RPN 网络三部分组成。首先，体素网格特征提取器先对点云数据分组，选取特定范围内的点云数据作为特征提取器的输入，然后划分点云的体素网格，接着使用 VPE 提取器进行体素特征的提取。本文在实验评估阶段使用 SECOND 检测模型来对自动驾驶雨天场景激光雷达点云变异数据的有效性进行分析。

2.2.3 三维点云处理技术

激光雷达作为自动驾驶系统的重要传感器，其测量结果包含丰富的信息，比如激光强度信息、回波次数、RGB 色彩信息、雷达扫描方向和角度以及 GPS 时间等，将上述信息进行综合计算分析，可以得到精确的 XYZ 三维点云坐标 [31]。根据该坐标，能够比较直观地获取车身周围环境的位置信息，对此信息进一步处理可以得到详细的地理信息。激光雷达发射激光后，光波接触到目标

物体后会发生反射产生脉冲回波，传感器会根据激光传输来回过程的产生的数据参数对物体相关信息进行计算分析。在自动驾驶过程中，车身周围充斥着各种道路参与者，比如汽车、行人、路牌以及自行车等目标物，这些物体的激光反射强度不尽相同，所以激光反射强度也是判断物体所属类别的关键参数。

三维点云处理技术可以定义为使用数学工具和各种算法对点云数据进行分析 and 修改的技术，旨在优化点云在传输和储存以及计算过程的性能消耗 [32]。虽然点云处理算法的区别很大，但许多方法都汲取了一维信号和二维信号的处理经验。比如三维点云压缩算法就与图像的压缩算法类似，进行处理的目的也相同，即降低数据传输及储存的空间成本；三维点云降噪与图像降噪也大相径庭，均是为了从文件中去除可能成为影响因素的噪点；三维点云的配准是图像配准的升维度对应，目的是将同一场景的多个数据进行对齐。

自动驾驶系统中使用的三维点云通常包括两种类型，分别是激光雷达点云数据以及点云地图 [33]。首先定位模块可以通过激光雷达进行扫描，利用得到的实时数据构建点云地图，再执行点云配准任务，感知模块对激光雷达实时点云数据做预处理，接着对车身周围的三维目标物体进行检测识别。点云地图可以提供先验环境信息，从而精确获取无人车的位置信息，而且汽车感知模块会根据点云地图来分割前景以及背景点云。因此三维点云处理技术对于自动驾驶系统中的定位模块、感知模块以及地图构建都极其重要。

2.3 框架技术

2.3.1 Spring Boot 框架

Spring Boot 是一个轻量级开发框架，提供具有控制反转特性的容器，开源供用户使用。该框架为开发提供了一系列的解决方案，比如利用控制反转核心特性，并通过依赖注入实现控制反转来实现管理对象生命周期容器化，利用面向切面编程进行声明式事务管理，整合多种持久化技术管理数据访问等等。在该框架刚问世之时，很多企业和公司都开始用 Spring Boot 框架替代 EJB 模型，目前市面上大量主流的 Java 程序都选择采用此框架进行开发 [34]。Spring Boot 框架具有两大主要特性，分别为控制反转和依赖注入。控制反转即利用 Java 反射机制对系统中所有 Bean 对象进行声明周期统一管理。依赖注入即利用 JDK 或 CGLib 动态代理来实现面向切面编程。利用这些核心特性，该框架可以显著提高开发效率，缩减开发周期，加快项目迭代，方便测试维护 [35]。

2.3.2 Docker 容器技术

互联网软件架构从单体架构到微服务架构再到云原生，离不开 Docker 容器技术的支持，容器技术可以让各个服务共享指定的服务器资源，让服务部署的方式变得更加灵活。Docker 是使用 Go 语言开发的开源应用容器引擎，Docker 借助了集装箱思想，创建应用程序可移植的轻量级容器 [36]。Docker 容器有以下特点，第一，程序将不再依赖于独立的操作系统运行，而且跟虚拟机相比，它将 IO 性能提升到了极致，能够极大程度地提高资源利用率。第二，开发人员配置系统环境的难度将会更加容易，而不会局限于某一具体环境，提高了工作效率。第三，容器是一种抽象的概念，描述了应用程序层，对下层做了良好的封装，向用户展示了简洁明了的接口，并将复杂度留给自己，这是十分良好的封装方式。本文在实验评估阶段搭建了目标检测识别环境后，提供了基于 Docker 容器技术的解决方案。

2.4 本章小结

本章主要介绍了本文自动驾驶雨天场景激光雷达点云扩增技术所使用的相关理论与技术。首先描述雨滴模型激光衰减理论，包括朗伯比尔指数衰减定律、雨滴谱模型以及 Mie 散射理论等数学理论基础。其次阐述了自动驾驶与激光雷达相关技术，包括自动驾驶软件系统、激光雷达与目标检测识别技术，接下来详细描述了三维点云处理技术。最后阐述了本工具使用的服务端框架 Spring Boot 以及 Docker 容器技术。

第三章 工具需求分析与概要设计

本章首先介绍了面向扩增工具的详细需求分析，包括功能性和非功能性需求分析，接着描述了本工具的概要设计，对系统服务划分进行了阐述，并详细介绍了工具的架构设计，最后描述了本系统的数据模型设计。

3.1 系统整体概述

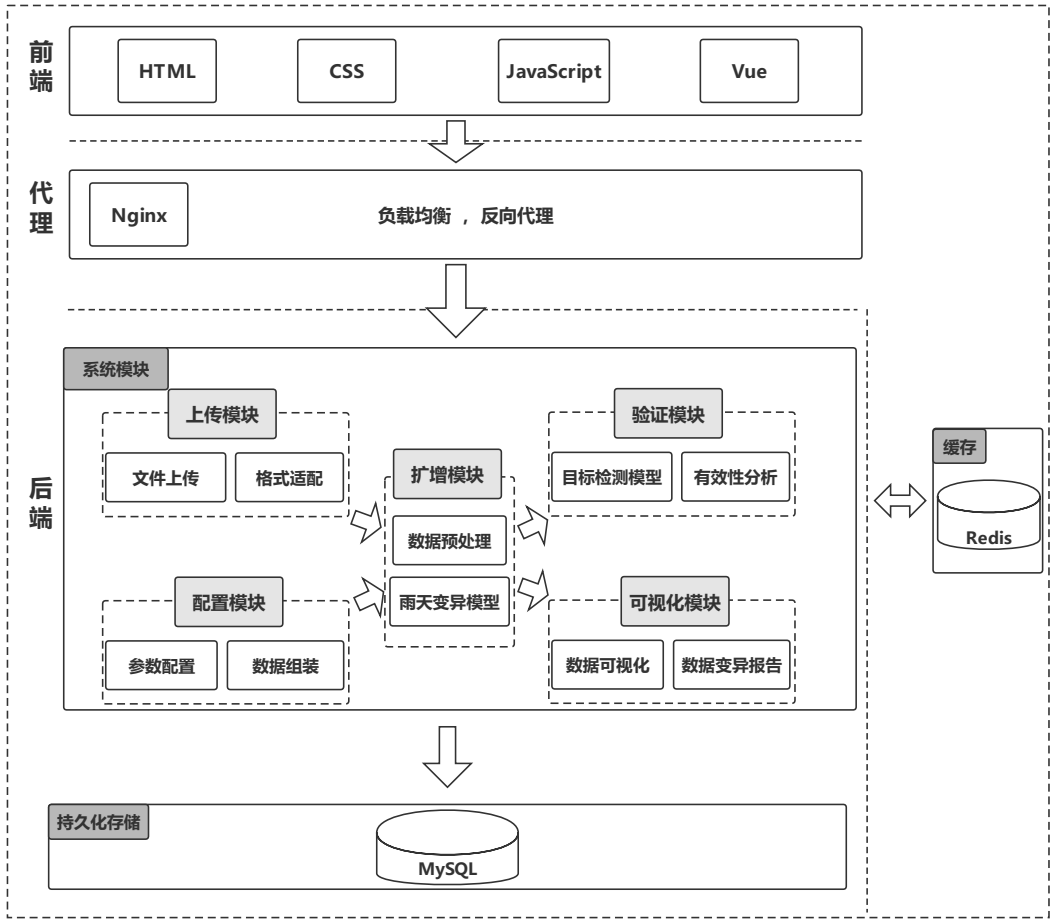


图 3-1: 系统架构图

本文面向自动驾驶雨天场景的激光雷达点云数据扩增工具主要实现了对于不同降雨规模场景的点云数据扩增。首先通过文件上传模块进行原始待点云数

据的上传，之后利用配置模块来生成扩增配置信息，主要是对于降雨强度和待扩增点云数据的选择。然后基于配置信息，通过扩增模块中集成的雨天场景激光雷达点云数据变异模型来生成不同场景的相应点云数据，得到点云变异数据集。接着基于扩增数据集，通过验证模块进行扩增点云数据的真实性和有效性验证。最后基于扩增数据集及有评估结果，通过可视化模块向用户进行点云可视化展示。

图 3-1描述了本文工具架构，工具前端服务使用基于 Vue 的前端框架，前后端分离使得开发过程是解耦的，让开发工作更加方便高效。用户在前端界面可以上传一系列请求，前端服务将用户提交的 HTTP 请求发送给后端进行处理，并在随后接收到来自后端服务的反馈信息。

工具后端服务使用 Spring Boot 框架进行开发，主要包括点云上传模块、扩增参数配置模块、数据变异模块、验证评估模块以及可视化模块。其中数据变异模块包括数据预处理器和点云生成器，数据预处理器将原始点云数据与配置信息融合成点云生成器可以识别的扩增数据，点云变异器主要是根据传入的降雨扩增参数对于激光衰减率随激光传输距离变化的函数进行计算，并代入预先设定好的变异模型来进行特定场景的点云数据扩增。验证模块主要负责使用三维目标检测模型进行有效性分析。可视化模块旨在帮助用户直观地查看三维点云数据，了解数据变异前后的异同。

3.2 系统需求分析

3.2.1 功能性需求分析

通过对用户操作流程分析并进行归纳总结，理清了本工具相关功能点，从而得出本文工具的功能性需求如表 3-1所示。

对于用户方来说，主要有以下的业务流程，首先是文件上传阶段，用户需要向服务器上传原始点云数据以待扩增，这些点云数据信息会做数据库持久化并在前端显示以供用户浏览。接着是配置阶段，用户需要在扩增配置页面中对具体降雨强度信息进行配置，在降雨强度列表选择需要扩增的目标降雨强度，或者输入自定义的降雨强度，随后在文件上传页面选择用户方的待扩增原始点云数据，本文工具将兼容不同格式的点云数据，包括 pcd、bin、txt 等格式，配置阶段之后是扩增阶段。扩增阶段，用户选择扩增所需降雨强度配置和待扩增数据集后，点击新建扩增任务，便会新增数据变异任务，本文工具后端服务进

行数据预处理并调用雨天激光衰减模型进行数据扩增，待扩增任务执行完成，会生成新的变异数据并在数据库进行持久化，扩增文件列表会返回到用户界面以供查阅，接下来将进入点云扩增结果展示阶段。在点云扩增结果展示阶段，用户可以浏览扩增数据详情，并且在工具前端页面的点云可视化模块查看点云数据在模拟指定降雨规模扩增前后的对比图，更加直观地观察到扩增前后的异同。用户还可以提交新的评估任务，对于某个扩增任务生成的变异数据集进行评估，查看扩增数据的评估结果，下载扩增数据有效性报告，用于了解扩增数据的真实性以及有效性。最后用户可以浏览点云下载页面，下载所需指定格式的变异点云数据文件，本文工具将提供多种格式选择。

表 3-1: 功能性需求列表

需求 ID	需求名称	需求描述
R1	上传原始点云数据	用户可以上传任意格式的点云数据文件，包括 pcd、bin、txt 类型，工具内部会自动进行格式转换
R2	新建点云数据扩增任务	用户可以根据需求来选择不同的降雨强度信息以及需要进行扩增的原始点云数据集，并提交扩增任务。
R3	新建变异数据集评估任务	用户浏览扩增任务已生成的变异数据集，并根据需求提交变异数据集评估任务
R4	查看数据集评估结果	用户浏览已完成的变异数据集评估任务列表，并根据需求查看评估结果
R5	点云可视化	用户可以在页面上直观地观察到原始点云和扩增后点云数据的可视化对比三维图。
R6	下载变异点云数据	工具前端服务提供点云变异数据的多种格式下载，用户可以根据需求自行选择。

基于功能性需求分析设计，图 3-2描述了本工具的系统用例。本工具系统用例分别为上传原始点云数据、提交点云数据扩增任务、提交变异数据集评估任务、查看数据集评估结果、点云可视化以及下载扩增点云数据。图中描述均为重点的用户操作，这些系统用例直接影响着系统的可用性，且优先级都比较

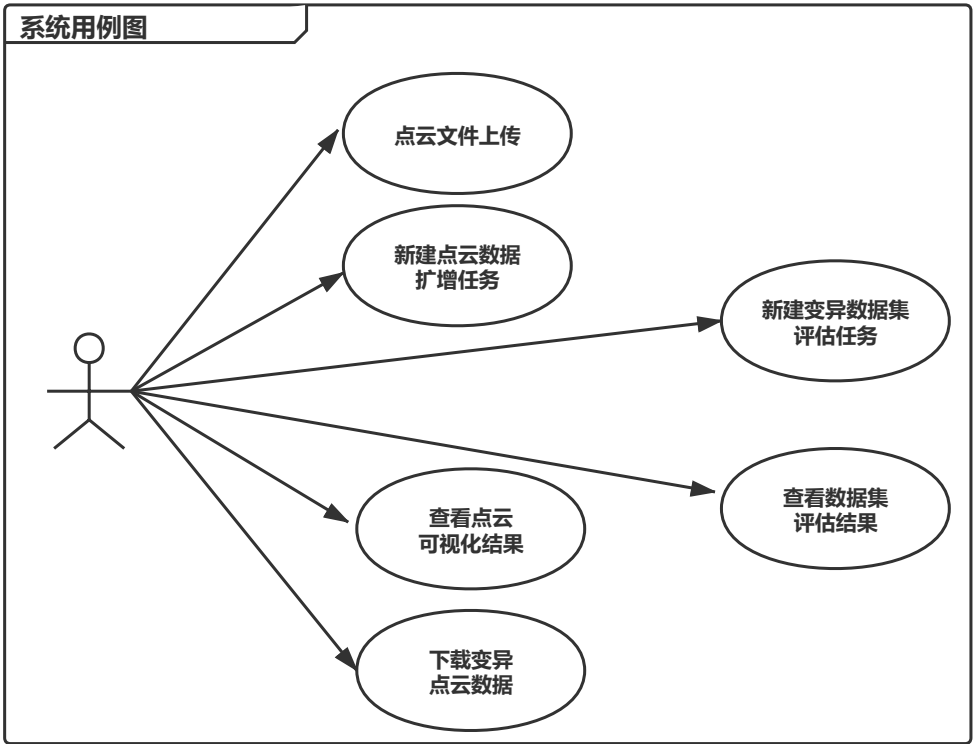


图 3-2: 系统用例图

高，全部正确完成才能将扩增流程执行完毕。

上传待扩增点云文件的用例描述如表 3-2所示，用户可以根据自身数据情况上传包括 pcd、txt、bin 等不同格式的点云数据，工具内部会自动进行格式兼容，对点云数据格式进行转换，转换成点云扩增模块可以识别的数据格式，用户可以多次上传若干个点云数据以待扩增。

表 3-2: 点云文件上传用例描述

描述项	说明
用例编号	UC ₁
用例名称	点云文件上传
用例参与者	用户
前置条件	用户成功登录系统
后置条件	用户上传的点云数据在工具所兼容的格式范围内，包括 bin、pcd、txt 等格式
基本操作流	1. 用户进入点云上传界面 2. 用户点击文件上传按钮

新建点云扩增任务的用例描述如表 3-3所示，用户可以勾选或自定义输入扩增降雨强度配置并选择要进行扩增的点云数据集，之后点击数据扩增按钮，将会新建一个扩增任务，并调用后端的扩增模块执行任务。

表 3-3: 新建点云扩增任务用例描述

描述项	说明
用例编号	UC ₂
用例名称	新建点云扩增任务
用例参与者	用户
前置条件	1. 用户成功登录系统 2. 用户拥有已上传点云数据
后置条件	用户选择的点云扩增降雨强度配置与勾选文件均不可为空
基本操作流	1. 用户勾选或自定义输入扩增降雨强度 2. 用户勾选要进行扩增的点云文件 3. 用户点击点云数据扩增按钮

新建变异数据集评估任务的用例如表 3-4所示，用户执行此动作的前提是存在已完成的扩增任务，即存在已生成的变异数据集，用户根据任务执行状态，点击评估按钮后，则会新建一个评估任务，并调用后端评估模块执行任务。

表 3-4: 新建变异数据集评估任务用例描述

描述项	说明
用例编号	UC ₃
用例名称	新建变异数据集评估任务
用例参与者	用户
前置条件	1. 用户成功登录系统 2. 用户存在已完成的扩增任务
基本操作流	1. 用户浏览任务列表 2. 用户选择要进行评估的已完成扩增任务 3. 用户点击进行评估按钮

数据评估结果展示的用例描述如表 3-5所示，查看扩增数据评估结果功能

主要面向需要评估扩增数据有效性的用户，用户浏览评估任务列表后，根据任务执行状态选择已完成评估的记录，点击其后面的查看评估结果按钮，可以向用户展示评估结果，并提供 pdf 格式的评估结果文件下载。

表 3-5: 查看数据集评估结果用例描述

描述项	说明
用例编号	UC ₄
用例名称	查看数据集评估结果
用例参与者	用户
前置条件	1. 用户成功登录系统 2. 该用户拥有数据集评估权限 3. 用户已成功上传点云数据列表 4. 用户存在已完成的评估任务
基本操作流	1. 用户进入数据集评估界面 2. 用户浏览数据集评估任务列表 3. 用户选择已完成的评估任务 4. 用户点击查看评估结果按钮

查看扩增点云可视化结果的用例描述如表 3-6所示，用户浏览点云扩增可视化结果主要是发生在成功进行基于雨天场景点云扩增之后的用户行为，可以比较直接地观察到进行雨天模拟后的三维点云有何不同之处。

表 3-6: 点云可视化展示用例描述

描述项	说明
用例编号	UC ₅
用例名称	查看点云可视化结果
用例参与者	用户
前置条件	1. 用户成功登录系统 2. 该用户拥有可视化权限 3. 用户拥有已上传点云文件或变异点云文件
基本操作流	1. 用户进入点云可视化界面 2. 用户勾选要进行可视化的点云文件 3. 用户点击可视化按钮

点云文件下载的用例描述如表 3-7所示，下载扩增点云数据一般是本文工具的用户最后一步操作，在前序一系列配置、扩增、评估、可视化等动作执行后，用户可以根据评估分析结果自行挑选符合预期的变异点云数据进行下载。

表 3-7: 点云文件下载用例描述

描述项	说明
用例编号	UC ₆
用例名称	下载变异点云数据
用例参与者	用户
前置条件	1. 用户成功登录系统 2. 该用户拥有数据下载权限 3. 用户存在已完成的点云扩增任务
后置条件	用户成功下载扩增点云数据
基本操作流	1. 用户进入点云下载界面 2. 用户浏览变异点云数据列表 3. 用户点击下载点云数据按钮 4. 工具将点云文件保存至用户本地

3.2.2 非功能性需求分析

本工具可能会被多个用户同时访问并执行多个扩增任务，那么需要该工具在进行文件上传、扩增、评估、可视化以及文件下载的时候具有良好的性能，因此提炼出本工具的非功能性需求，如表 3-8所示。

衡量一个工具的质量，首先是其可用性，对于本文开发的数据扩增工具，功能上不允许出现单点缺陷，这是在测试环节需要保证的质量标准。当使用工具的在线人数越来越多时，并发量就会随之增大，系统处理任务的压力倍增，系统扩增和评估的响应时间以及工具能够同时承受的并发量成为衡量工具稳定性的重要参数，在网络畅通条件下，工具后端服务的各个接口响应时间应该控制在一定阈值之内。同时，为了防止有恶意流量的侵入，本工具也对用户流量具有一定的过滤功能，保证系统的安全性。其次，本工具开发过程中所编写的所有接口，都严格遵守普遍的命名规范风格，这能够在一定程度上降低工具后期维护成本。当然用户交互体验也十分重要，工具前端页面会配置有人性化的提示以便用户进行浏览和操作。

表 3-8: 非功能性需求列表

需求名称	需求描述
可用性	系统不会出现任何单点缺陷；系统可用性以月为单位
性能	正常网络连接条件下，后端扩增接口的平均每个点云文件扩增耗时应该小于 56.0s
安全性	本文工具对于用户的身份及权限进行认证，建立网关筛出恶意流量
易用性	本工具全部 API 接口及函数方法均有详细注释，类名也使用易于理解的命名方法，便于测试和后期维护，人机交互友好
健壮性	本工具将具有较好的兼容性，能够识别不同格式的 point cloud 数据，成功进行扩增并提供用户下载
可拓展性	本文工具的接口设计满足可扩展性，便于迭代和维护

3.3 系统概要设计

3.3.1 工具模块划分设计

本文工具使用了微服务架构，实现了服务的组件化进行服务间的解耦，对外统一提供 RESTFUL 风格的接口，工具内各个组件通过 REST API 进行通信。前端服务采用了基于 Vue 的框架，开发过程采取了前后端分离的模式，在很大程度上提高了开发效率。用户在工具网页端提交的一系列请求，会转换成前端页面向后端服务发送的各种 POST 请求，后端逻辑模块进行响应后，前端服务得到后端服务的反馈，并将返回信息显示在用户界面，再由用户进行操作，进行下一轮前后端交互。本工具前端服务将会作为独立服务来打包部署。

本文工具依据数据变异流程的特点划分服务，首先需要用户配置扩增参数，选择已有雨天规模或者输入自定义雨天规模。用户定义好扩增配置之后，可以选择待扩增的点云数据。接着后端服务进行对雨滴规模的计算以及求解激光衰减系数随激光传输距离变化的函数，调用扩增模块的激光雷达雨天衰减模型对用户上传的点云文件进行扩增。扩增任务执行完成后用户可以检查评估报告，并进行点云数据可视化，也可在前端界面筛选需要的扩增数据下载到本地。由此，本系统主要分为配置服务、扩增服务、评估服务、可视化服务以及文件上传下载服务。本工具各个服务模块均遵循了软件设计模式，具有可拓展

性，并且每个服务都单独部署到一个容器中，各实例共享容器资源。

本文还使用了 Nginx 作为负载均衡器和流量过滤器，在大量流量打入到本工具系统时，使用 Nginx 组件进行流量合理分配，从而提升系统负载能力。用户上传的点云数据文件以及其文件名信息将被存入数据层，数据层采取了持久化存储与缓存相结合的方式。由于一般的自动驾驶场景点云数据都包含 10 万个点以上，所以本工具将点云文件存到服务器上，将点云文件信息将做数据库持久化，为了用户再次访问点云文件时可以更快命中，提高数据读取和存储速度，工具会把用户信息以及该用户相应的点云文件名写入缓存中，提升系统的运行效率。本文使用 redis 作为缓存数据库，可以利用丰富的接口进行数据操作。

3.3.2 架构设计

《No Silver》这篇软件开发领域的著作阐述了设计开发软件系统是极其复杂的观点，开发 Linux 操作系统的复杂度不比制造一家宇宙飞船低，所以说在进行软件开发之前需要精心考虑其架构设计。本文将从逻辑视图、开发视图以及过程视图等角度描述系统需求与具体架构设计方案。

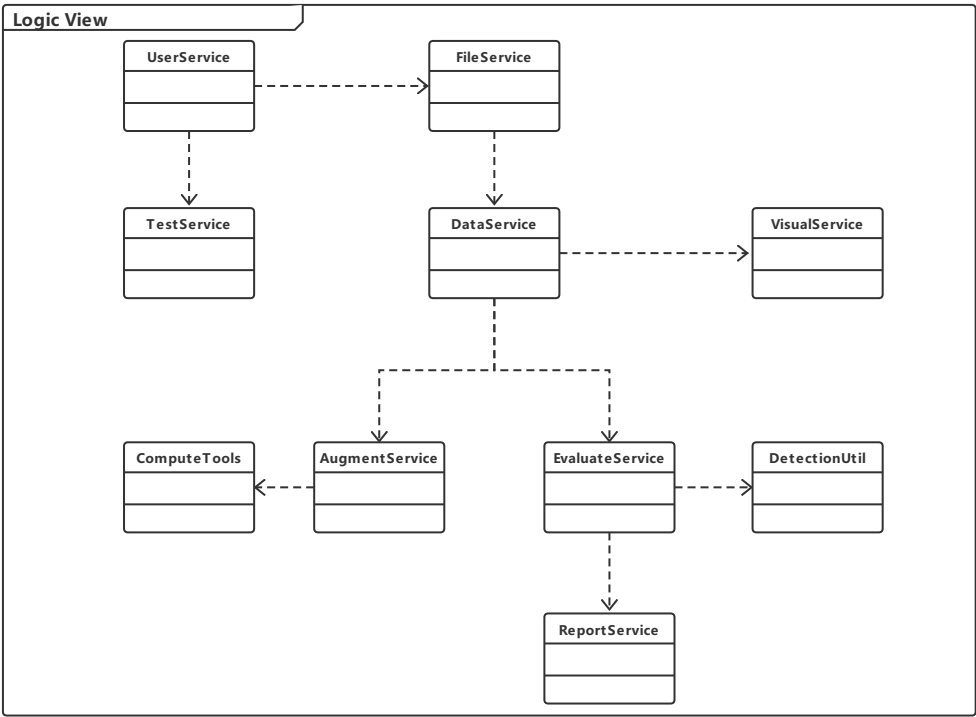


图 3-3: 逻辑视图

逻辑视图是对系统职责的逐级划分，能够比较详细地描述系统的功能和场景，而且描述了接口间的关系。设计好各个接口的边界是设计好系统架构的关键，便于提高开发效率。主流的逻辑视图一般为 UML 类图，可以将功能抽象成对象类，使用类图来描绘类间关系，如图 3-3所示，UserService 是用户服务，包括登录注册等功能；FileService 表示文件处理服务，用户可以通过该服务实现文件 IO 功能；DataService 是用于承上启下的数据处理服务；AugmentService 表示具体的数据扩增服务，ComputeTools 是扩增任务执行中的重要计算工具类；EvaluateService 表示具体的变异数据集评估服务，DetectionUtil 是用于进行目标检测识别的相关工具类；VisualService 表示数据可视化服务，用于将可视化结果展示到前端界面；ReportService 表示检测报告服务，用于提供评估结果的报告浏览及下载功能。

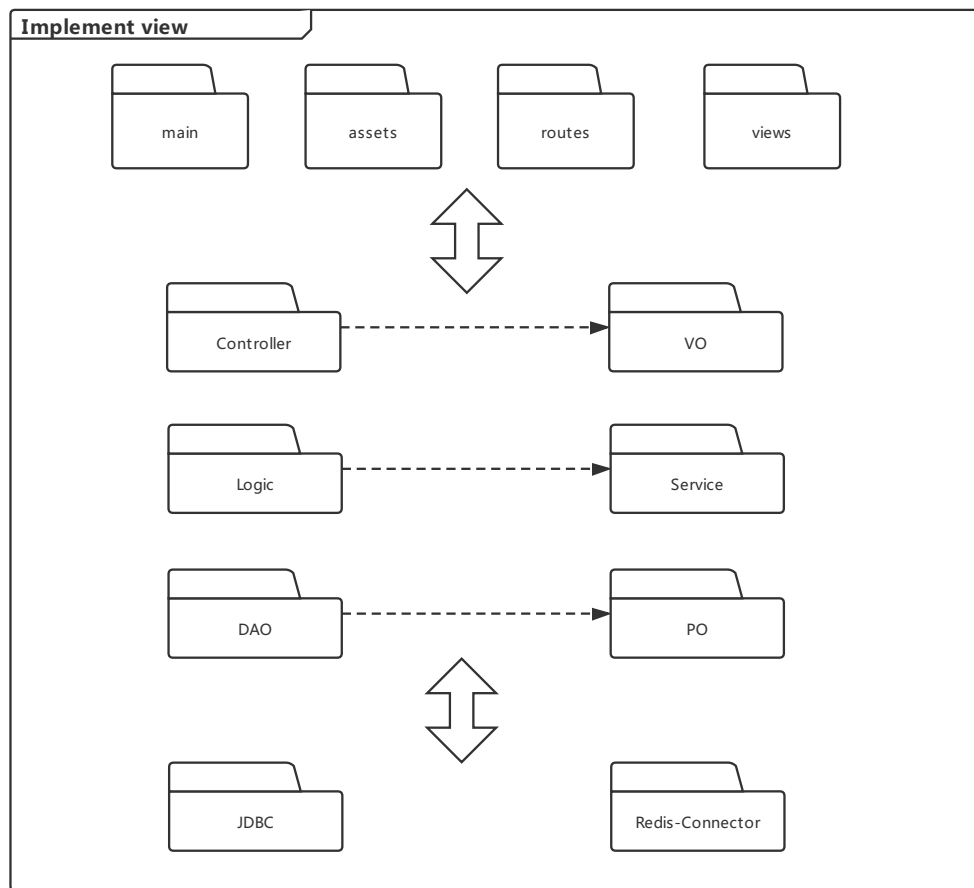


图 3-4: 开发视图

开发视图描述了逻辑架构元素与系统构建信息。本文工具开发视图如图 3-4所示，本文工具对于前端 UI 部分，主要包含 JavaScript、CSS 和 HTML

等静态资源；后端服务是根据业务逻辑划分成不同层次和功能的，包括控制器层、业务逻辑接口层、业务实现层、数据服务层等不同架构层次。其中 Controller 层负责处理前端服务的请求并进行反馈，VO 包负责与 Controller 对接，是对返回对象的一层封装。Logic 可以看作是下层业务逻辑接口的抽象，与其对接的 Service 层则实现工具核心功能。Dao 层主要涉及数据处理的功能，提供基于 Redis 和 JDBC 的接口，该层提供了数据业务封装并与数据库进行交互。

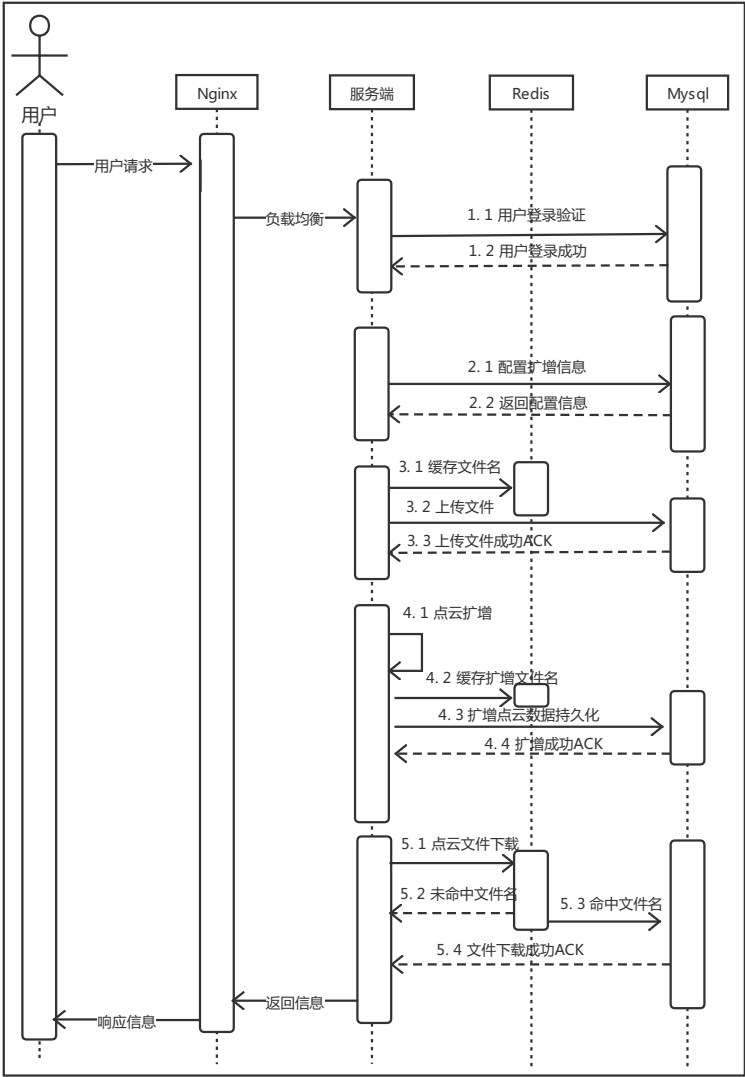


图 3-5: 过程视图

逻辑视图和开发视图描述的都是系统的静态信息，而过程视图可以体现系统的非静态过程。过程视图描述了系统中的动态信息，比较常见的形式就是 UML 时序图，如图 3-5所示。该图描述了系统中各个元素是如何交互的，这些

交互元素主要由用户、Nginx、工具服务端、Redis 和 Mysql 构成，各个元素的交互过程主要包括用户登录、配置扩增信息、点云扩增、点云文件下载等操作流程。我们再次就不逐个赘述，需要关注的是，所有进入系统的流量首先都会经过 Nginx 的筛选过滤，这是保护本系统流量安全的一个手段。

3.3.3 数据模型设计

数据模型设计主要是对系统中涉及到的类属性表进行详细描述，这些对象相互协作可以完成系统中主要的用例动作。数据模型是数据库设计中用来对现实世界进行抽象的工具，是数据库中用于提供信息表示和操作手段的形式构架。数据模型是数据库系统的核心和基础。良好的数据模型设计对于系统可维护性至关重要，设计类时需要考虑系统扩展性，让系统在迭代更新时减少对类属性修改的需求。

表 3-9是对用户信息属性在数据库中的字段描述，主要包括用户的唯一标识 id、用户名、密码以及用户权限，扩增任务 id 和评估任务 id 是为了能够在前端页面展示任务进度。

表 3-9: User 类详情列表

字段	含义	类型	备注
id	用户 ID	INT	用户唯一标识，主键且不为空
name	用户名	VARCHAR	用于描述用户信息
access	权限码	VARCHAR	用户权限：0 代表仅扩增权限，1 代表拥有下载权限
password	密码	VARCHAR	用于登录
taskId	扩增任务 ID	INT	关联的扩增任务 ID
evaluateId	评估任务 ID	INT	关联的评估任务 ID

表 3-10是对点云数据属性在数据库中的字段描述，主要记录了包括点云文件唯一标识 ID、点云文件名、点云文件类型、点云数据尺寸规格以及点云存储地址等信息。点云数据集 ID 将会通过数据集映射间接出现在具体的扩增任务以及评估任务中。

表 3-10: PointCloud 类详情列表

字段	含义	类型	备注
id	点云 ID	INT	点云数据唯一标识，主键且不为空
fileName	点云文件名	VARCHAR	用于描述点云信息
fileType	文件格式	INT	点云文件类型，0 表示原始点云数据，1 表示变异点云数据
createTime	生成时间	DATETIME	点云上传/生成时间戳
pointCloudSize	点云数据规格	INT	用于体现点云变异前后区别
address	文件路径	VARCHAR	点云文件存储地址

表 3-11: AugmentTask 类详情列表

字段	含义	类型	备注
id	扩增任务 ID	INT	点云扩增任务唯一标识，主键且不为空
userId	用户 ID	INT	数据扩增任务关联的执行用户 ID
dataId	数据集 ID	INT	扩增任务数据集 ID
rainfall	降雨强度	DOUBLE	扩增任务降雨强度配置
predictTime	预计时间	DOUBLE	根据数据及大小预估的扩增任务完成时间
beginTime	开始时间	DATETIME	扩增任务开始时间戳
endTime	结束时间	DATETIME	扩增任务结束时间戳
status	状态码	INT	用于标明扩增任务执行状态，包括“0”未完成和“1”已完成

表 3-11表示扩增任务属性在数据库中的字段描述，结合数据扩增流程考虑，主要包括数据扩增记录唯一标识 ID、任务执行用户 ID、扩增任务数据集 ID、扩增任务降雨强度配置、扩增任务预计耗费时间、开始时间、结束时间以及扩增任务执行状态。

表 3-12: EvaluateTask 类详情列表

字段	含义	类型	备注
id	评估任务 ID	INT	数据集评估任务唯一标识，主键且不为空
userId	用户 ID	INT	数据集评估任务关联的执行用户 ID
dataId	数据集 ID	INT	评估任务数据集 ID
fileNum	文件个数	INT	待评估数据集包含的文件个数
createTime	开始时间	DATETIME	评估任务开始时间戳
status	状态码	INT	用于标明评估任务执行状态

表 3-12表示评估任务属性在数据库中的字段描述，结合变异点云数据集评估流程考虑，主要包括变异数据集评估记录唯一标识 ID、任务执行用户 ID、评估任务数据集 ID、待评估数据集的文件个数、评估任务创建时间以及评估任务执行状态等类属性。

表 3-13: DataSet 类详情列表

字段	含义	类型	备注
id	数据集 ID	INT	数据集唯一标识，主键且不为空
fileNum	文件个数	INT	数据集包含文件个数
userId	用户 ID	INT	用于标明数据集所属用户
augTaskId	扩增任务 ID	INT	数据集所关联扩增任务 ID
evaTaskId	评估任务 ID	INT	数据集所关联评估任务 ID

表 3-13描述了点云数据集属性在数据库中的字段详情，包括数据集的唯一标识 ID、数据集包含文件个数、关联扩增任务 ID、关联评估任务 ID 以及数据集所属用户，此数据表关联了多个任务场景的 ID 信息，可在评估任务以及扩增任务中使用。

表 3-14: PointMap 类详情列表

字段	含义	类型	备注
id	映射 ID	INT	数据集映射的唯一标识，主键且不为空
datasetId	数据集 ID	INT	某映射中的数据集 ID
fileId	点云 ID	INT	某数据集集中的点云文件 ID

表 3-14描述了扩增任务和待扩增文件的映射关系，主要包含数据集 ID 以及点云文件信息 ID，用户在新建扩增或评估任务时，选择好待扩增或待评估点云数据集之后，就会建立相关的数据集与具体点云文件的映射，用于扩增时进行参考。

3.4 本章小结

本章节先从整体上对工具进行概述，并从功能性需求分析和非功能性需求分析的角度描述了工具需求分析，然后在系统用例图和整体架构图的基础上，对整个工具系统的概要设计进行分析，主要以逻辑视图、进程视图和开发视图等多个角度去进行系统的拆分与阐述，最后介绍了本工具数据持久化设计。

第四章 数据扩增核心算法设计

本章详细描述了雨天场景点云扩增算法的整体设计，首先对雨滴粒子特性及雨滴谱分布模型进行了介绍，接着基于激光衰减定律和 Mie 散射理论阐述了激光透过率随传输距离变化函数的推导过程，最后通过算法设计思路、算法流程图和伪代码对于本文点云扩增核心算法进行了分阶段详解。

4.1 雨滴粒子特性及雨滴谱分布模型

在气象学中，云滴可以定义为半径小于 $100\ \mu\text{m}$ 的水滴，雨滴的半径则要大于 $100\ \mu\text{m}$ 。激光在降雨中传输会受到雨滴粒子的吸收、折射和散射。对降雨场景下的激光传输过程进行分析，激光衰减的特性与雨滴谱分布高度相关。按照降雨量划分，雨天规模强度直观上可以大致分为如下几种，毛毛雨（ $2.0\ \text{mm/h}$ ）、小雨（ $5.0\ \text{mm/h}$ ）、中雨（ $12.5\ \text{mm/h}$ ）、大雨（ $25.0\ \text{mm/h}$ ）和暴雨（ $75.0\ \text{mm/h}$ ），雨滴谱谱型和相关特征值反映了降雨现象的微观物理特征。雨滴谱又称雨滴尺寸分布，描述了在单位体积内，雨滴数量随雨滴尺寸大小变化的分布规律，经研究表明，目前比较常用的几种分布包括 M-P 分布 [37]、Gamma 分布 [38]、Laws-Parsons 分布以及 Weibull 分布 [39]。其中 M-P 分布是由 Marshall 与 Palmer 在 1948 年提出的，形式如下：

$$N(D) = N_0 \exp(-\lambda D) \quad (4-1)$$

$N(D)(\text{m}^{-3} \cdot \text{mm}^{-1})$ 表示直径 D 到 $D + dD$ 内的雨滴数密度，其中参数 $\lambda = 4.1 * R^{-0.21}(\text{mm}^{-1})$ ， $N_0 = 0.08(\text{cm}^{-4})$ ，雨滴粒子的直径由 $D(\text{mm})$ 表示， $R(\text{mm} \cdot \text{h}^{-1})$ 代表雨强 (mm/h)。许多研究表明，如果该地区的降水情况相对稳定，波动性不大，那么用 M-P 分布来描述当地雨滴谱分布比较合适，但 M-P 分布形式有些过于简单，并且对降雨量起伏变化较大的天气条件来说拟合效果较差，可能会造成较大的误差。

Gamma 分布可以作为描述雨滴谱的数学分布，它引入了一个形状因子 μ ，

比 M-P 分布稍微复杂一些，其形式如下：

$$N(D) = N_0 D^\mu \exp(-\lambda D) \quad (4-2)$$

其中 μ 的正负值决定了函数曲线的弯曲形状，当 μ 的值为 0 时，Gamma 分布就会退化为 M-P 分布，但是该分布的拟合效果对于 μ 值的变化十分敏感，不适当的 μ 值造成的误差相当之大。通过阅读相关文献，在众多的雨滴谱模型中，Weibull 分布模型相比之下拥有更高的精确度，拟合程度较好，且更加通用 [40]，下式描述了 Weibull 分布模型：

$$N(D) = M_w(D)/V(D) \quad (4-3)$$

$$M_w(D) = 2.13 \frac{M_{wt}}{D_0} \left(\frac{D}{D_0}\right)^2 \exp[-0.71 \left(\frac{D}{D_0}\right)^3] \quad (4-4)$$

韦布分布模型雨滴尺寸分布函数 $N(D)$ 可由 $M_w(D)$ 以及 $V(D)$ 根据公式计算得到，其中 $D(\text{mm})$ 表示雨滴的直径， $M_{wt}(m^{-2} \cdot s^{-1})$ 表示每平方米地面上的雨滴总数， $M_w(D)(mm^{-1} \cdot m^{-2} \cdot s^{-1})$ 表示每秒钟之内每平方米地面上的雨滴总数。因为雨滴谱分布函数是计算激光在雨天天气情况下传输的重要参数，所以对于雨滴谱的选择也需非常谨慎，雨滴谱分布模型选择不合适，可能会在计算激光传输时受雨滴粒子影响的过程中引起更大误差，本文选择 Weibull 分布作为雨滴谱模型，韦伯分布计算起来非常方便，且与绝大部分地区降雨的真实雨滴谱分布匹配度较高。

4.2 激光衰减定律

上一章里有提到朗伯比尔定律，朗伯比尔定律描述了激光透过介质前后的光功率关系，其表达式如下：

$$T = \frac{P_D}{P_R} = \exp(-\delta L) \quad (4-5)$$

在上述表达式中， T 表示激光透过率，用来描述通过介质时的激光透过特性， P_D 表示车载激光雷达探测器的接受功率， P_R 表示车载激光雷达的激光发射功率； L 表示激光传输距离， δ 表示激光衰减系数，是求解激光透过率 T 的

重要参数，计算激光衰减系数 δ 的公式如下：

$$\delta = \int_0^{\infty} \sigma_e N(D) dD \quad (4-6)$$

上式中， σ_e 表示消光截面， $N(D)$ 即上面提到过的雨滴谱分布。根据以上公式可知，要求得激光透过率随着激光传输距离变化的函数，要求得衰减系数，要得到衰减系数，需要计算消光截面 σ_e 。消光截面 σ_e 描述了粒子群对于电磁波传输过程中的强度衰减能力，可以使用电磁波传输过程中的衰减值和电磁波通过的总量进行计算。

4.3 Mie 散射理论

Gustav Mie 在 1908 年提出了 Mie 散射理论 [41]，该理论能够利用麦克斯韦方程组的解向量，计算球形粒子的散射参数，这些球形粒子可以是任意尺寸材料的。雨滴粒子可以近似简化为大尺寸球状粒子，所以雨滴粒子的消光截面数值也可以通过该理论求得。首先定义几种截面，散射截面 $\sigma_s(r, \lambda, n)$ 即入射到该截面上的入射光功率等于粒子向各个方向散射功率的总和；总衰减截面 $\sigma_e(r, \lambda, n)$ 指在入射波的照射下，大气中分子和粒子衰减的总功率与入射能流密度之比；吸收截面 $\sigma_a(r, \lambda, n)$ 指吸收过程的概率量度，即入射粒子被靶核吸收的概率，数值上为总截面与散射截面之差。计算三种截面的公式如下：

$$\sigma_s(r, \lambda, n) = \pi r^2 Q_s(k, n) \quad (4-7)$$

$$\sigma_a(r, \lambda, n) = \pi r^2 Q_a(k, n) \quad (4-8)$$

$$\sigma_e(r, \lambda, n) = \pi r^2 Q_e(k, n) \quad (4-9)$$

上述表达式中， r 表示粒子半径，单位为 μm ， λ 表示激光的波长，单位为 μm ， $Q_s(k, n)$ 表示散射效率因子， $Q_a(k, n)$ 表示吸收效率因子， $Q_e(k, n)$ 表示衰减效率因子 [42]，三者关系如下：

$$Q_e(k, n) = Q_s(k, n) + Q_a(k, n) \quad (4-10)$$

其中 $k = 2\pi r / \lambda$ 是颗粒尺寸参数，这里的 λ 为光波波长，单位为 μm ， n 为

折射率 [43]。下面求解衰减因子，Mie 散射理论求衰减因子的普遍公式如下：

$$Q_s(k, n) = \frac{2}{k^2} \sum_2^{k^2} (2m+1) [|a_m|^2 + |b_m|^2] \quad (4-11)$$

$$Q_e(k, n) = \frac{2}{k^2} \sum_2^{k^2} (2m+1) [Re(a_m + b_m)] \quad (4-12)$$

上述表达式中， a_m 和 b_m 表示 Mie 理论散射系数，其计算公式如下：

$$a_m = \frac{\wp'_m(nk)\wp_m(k) - n\wp_m(nk)\wp'_m(k)}{\wp'_m(nk)\mathfrak{I}_m(k) - n\wp_m(nk)\mathfrak{I}'_m(k)} \quad (4-13)$$

$$b_m = \frac{n\wp'_m(nk)\wp_m(k) - \wp_m(nk)\wp'_m(k)}{n\wp'_m(nk)\mathfrak{I}_m(k) - \wp_m(nk)\mathfrak{I}'_m(k)} \quad (4-14)$$

$$\wp_m(z) = z \cdot J_m(z) \quad (4-15)$$

$$\mathfrak{I}_m(z) = z \cdot h_m^{(2)}(z) \quad (4-16)$$

上述表达式中， $J_m(z)$ 是第一类 m 阶贝塞尔函数， $h_m^{(2)}(z)$ 是第三类 m 阶贝塞尔函数， m 被称为贝塞尔方程的阶数。结合式 (4.3) (4.4) 求得雨滴谱 $N(D)$ ，通过 (4.13) (4.14) (4.15) (4.16) 式可以联合求解出 Mie 散射系数，通过 Mie 散射系数以及式 (4.10) (4.11) (4.12) 可以求解出衰减因子，再联合衰减因子和式 (4.7) (4.8) (4.9) 求得消光截面，最后联合式 (4.5) (4.6) 求出激光透过率随激光传输距离变化的函数 $T(L)$ 。此函数将成为本文雨天激光雷达衰减算法使用的核心公式。图 4-1 展示了不同降雨强度下激光透过率随距离的变化趋势，由图可知，对于特定的降雨强度，也就是其中任意一条曲线，激光透过率随着激光传输距离的增大而减小；若做一条垂直于横轴的切线，那么可以得出，在相同的激光传输距离处，降雨强度越大激光透过率越低，在暴雨条件下，较大的传输距离处激光透过率近似为零。

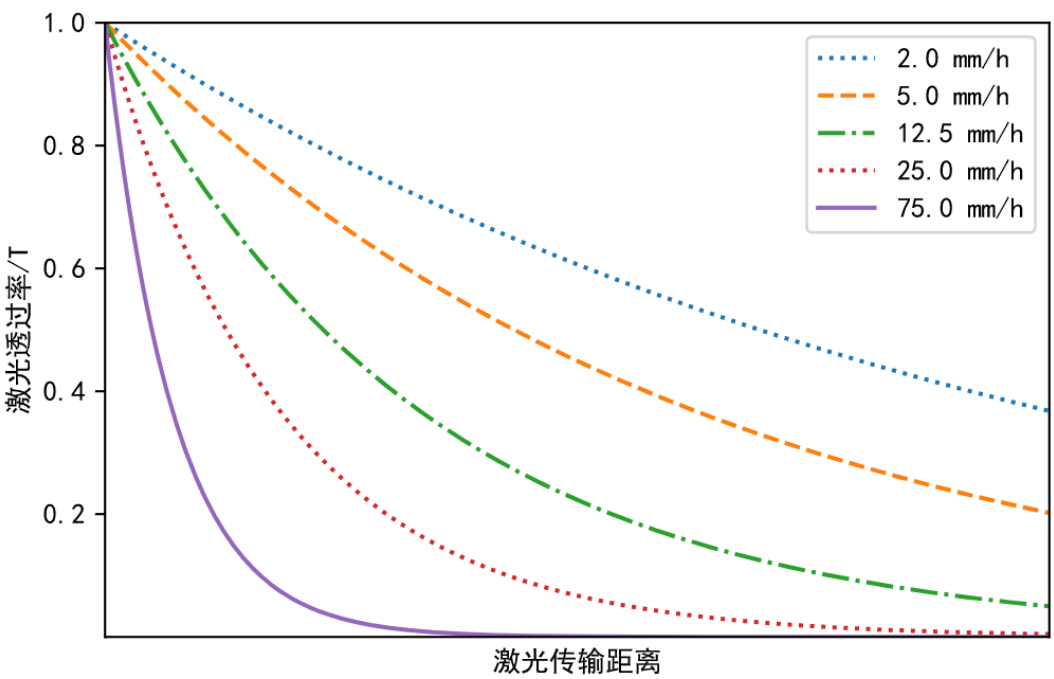


图 4-1: 不同降雨强度下激光透过率随距离变化趋势图

4.4 点云扩增核心算法设计

4.4.1 设计思路

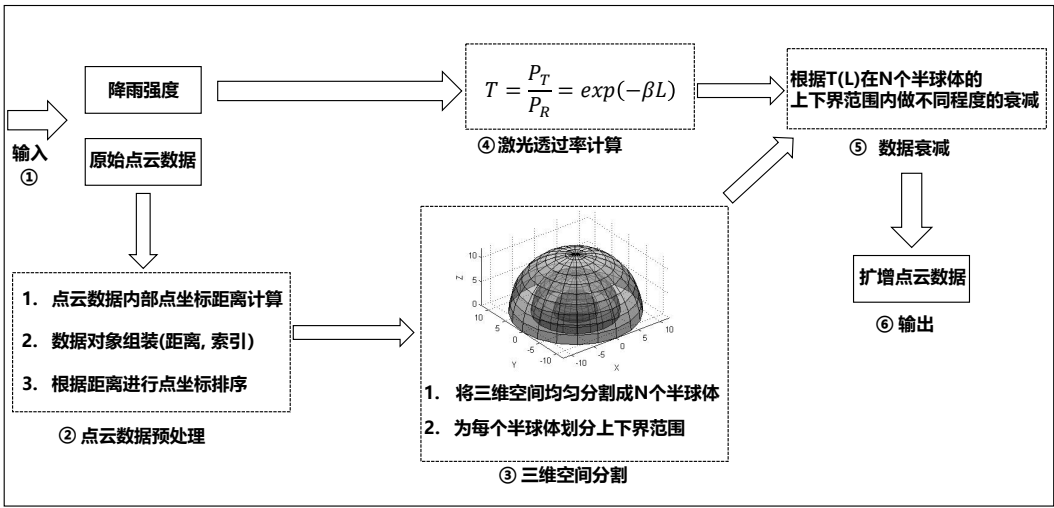


图 4-2: 算法设计思路示例图

图 4-2是本文点云扩增核心算法的设计思路，该设计思路是基于雨天场景下的激光衰减特性以及点云数据特征进行设计的。第一步，以降雨强度和原始

点云数据作为算法输入。第二步，点云数据预处理，由于涉及到在不同的传输距离处做不同程度的激光衰减，然而点云数据的各个三维空间坐标是无序的，所以点云预处理部分需要进行点云内部点坐标距离计算、数据对象组装以及对于三维坐标进行排序。第三步，三维空间分割，为了满足根据激光传输距离进行衰减的需求，本文对点云数据三维空间做了数学建模，将三维空间均匀分割成N个半球体，并为每个半球体划分上下界范围，以便在相应的范围内进行点坐标索引检索。第四步，基于前几个小节的推导过程，根据降雨强度进行激光透过率的计算，得到激光透过率随传输距离的变化函数。第五步，根据变化函数在点云数据三维空间中不同半径的半球体的上下界范围内进行不同程度的点坐标衰减。最后，即得到了目标降雨强度下的雨天场景扩增点云数据。

4.4.2 算法详情

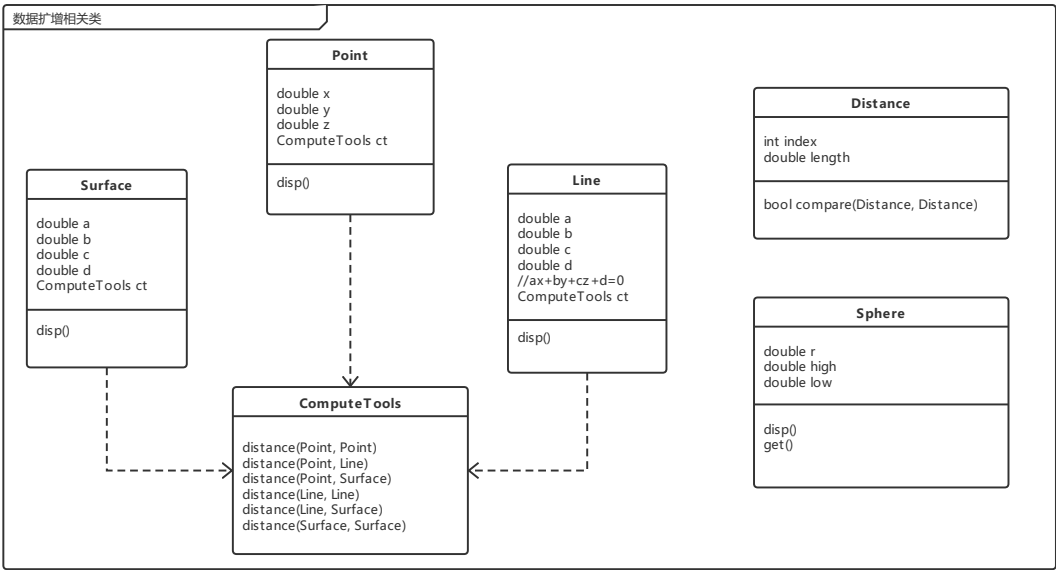


图 4-3: 点云扩增算法相关工具类图

本文核心的基于雨天场景激光雷达点云数据扩增算法主要涉及三个工具类，分别为 Point、Distance 和 Sphere 类。相关类详情如图 4-3所示，首先基于点云数据的三维空间特性，本文设计了 Point、Line、Sureface 类，分别代表点、线、面类，用于进行点云数据处理分析时的距离计算，这些距离的计算由计算工具类 ComputeTools 来协助完成。Distance 类用来描述距离，用来存储点云中的各个离群点到原点的距离，同时也存储了各个点在点云文件中的索引序号，可以利用该类实现点云中所有基于点到原点距离的排序任务，这与本文激

光衰减随激光传输距离的变化函数需求契合。**Sphere** 是球面类，该类属性包括半径、下界和上界，将球面下界到上界的区间定义为该球面的范围区间。

表 4-1: 数据扩增关键步骤列表

序号	具体步骤
1	获取到原始点云文件以及降雨强度参数作为算法输入
2	计算点云中每个点到原点的距离 length ，并将这些点的 index 以及距离 length 存入 Distance 中
3	所有 distance 根据 length 值排序，并存入 vector<Distance>
4	根据 distance 的上界下界差值计算该点云文件上界与下界的差值 gap
5	将 gap 分成 n 等份，每份为 step ，定义 n 个球体，其半径为 $(r, 2r, \dots, nr)$ ，定义某个球体的范围为 $(r - \text{step}/2, r + \text{step}/2)$
6	根据雨滴谱和 Mie 散射理论计算出激光衰减率 T 随激光传输距离而变化的函数，在 n 个球体上，根据半径，随机在每个球面范围内删除点
7	记录删除点 Distance 的 index ，存入 vector<int> ，根据索引值和原始点云复制新点云，变异完成

表 4-1描述了基于雨天场景激光雷达点云扩增的整体大概流程，首先要获取到原始点云数据以及扩增配置信息即降雨规模参数；接着就需要计算点云数据中每个点到原点的距离，并且将所有点的 **index** 索引和距离 **length** 存入 **Distance** 对象中，之后根据 **Distance** 类的 **compare** 方法依据 **length** 距离进行排序，并存入 **vector<Distance>** 中；然后根据所有点中的距离最大值减去距离最小值计算出该点云文件的上界与下界之差，再将差值分为 **n** 份，每份为 **step**，定义 **n** 个球面，这些球面的半径为 $(r, 2r, \dots, nr)$ ，并且定义某个球面的范围为 $(r - \text{step}/2, r + \text{step}/2)$ ；再根据雨滴谱和 Mie 散射理论计算出激光衰减率 **T** 随激光传输距离而变化的函数，在 **n** 个球面上，根据球面半径，即球面离原点的距离，随机在每个球面范围内删除点，本算法利用各个球面的上界下界范围来判断某个点是否再某个球面上；接着记录删除点 **Distance** 的 **index** 索引号，存入 **vector<int>**，再根据索引值和原始点云复制新点云，从而得到点云变异数据，至此扩增流程完成。接下来通过伪代码算法流程图详细分析基于雨天场景激光雷达点云扩增算法。

下述算法伪代码流程图描述的基于雨天场景的激光雷达点云数据扩增算法，主要可以分为四个阶段。

算法 4.1 雨天场景下的激光雷达点云数据扩增算法

```

1: // 第一阶段：计算点距离 length，并将索引与距离存入容器中，进行排序；
2: while point in pointCloud do
3:   length  $\leftarrow$  ComputeTools::distance(p0, point)
4:   vector<Distance>  $\leftarrow$  new distance(point.index, length)
5:   vector<Distance>.sortByLength()
6: end while
7: // 第二阶段：根据计算距离的最大最小值，进行三维空间分割
8: gap  $\leftarrow$  (distance.Length.max - distance.Length.min)
9: step  $\leftarrow$  gap/n
10: r  $\leftarrow$  step
11: half_gap_step  $\leftarrow$  step / 2;
12: while distance in vector<Distance> do
13:   vector<Sphere>.push(new Sphere(r, r - half_gap_step, r + half_gap_step))
14:   r  $\leftarrow$  r + step
15: end while
16: // 第三阶段：根据雨滴谱参数和 Mie 散射理论求得的激光透过率 T 随激光
    传输距离 length 而变化的函数，在 vector<Sphere> 球面集合上随机筛选点；
17: vector<int> res  $\leftarrow$  init()
18: while sphere in vector<Sphere> do
19:   vector<int> list  $\leftarrow$  init()
20:   while distance in vector<Distance> do
21:     if distance.length > sphere.getHigh() then
22:       break;
23:     end if
24:     if distance.length >= sphere.getLow() && distance.length <=
        sphere.getHigh() then
25:       vector<int>.push(distance.index)
26:     end if
27:   end while
28:   T  $\leftarrow$  mieTheory(beta, sphere.getR())
29:   random  $\leftarrow$  floor((1-T)*list.size())
30:   while num in list do
31:     res.push(find(num,random))
32:   end while
33: end while
34: // 第四阶段：根据结果集进行点坐标衰减；
35: newPointCloud  $\leftarrow$  pointCloud
36: while point in PointCloud do
37:   if res.contains(point.index) then
38:     newPointCloud.erase(point)
39:   end if
40: end while
41: RETURN newPointCloud

```

第一阶段。先对原始点云进行数据预处理，计算每个点到原点的距离并根据该距离进行排序，再将其存储到自定义类中。三维点云数据量庞大、散乱且无组织，包含位置信息以及反射强度信息，不过大部分公开可访问点云数据集都是无序的，没有经过拓扑结构的排列。然而在本文的研究场景下，激光雷达在雨天场景下的激光衰减，就涉及到根据衰减率函数对到自动驾驶汽车原点距离不同的点数据进行不同程度的衰减处理，于是出现了根据离原点距离排序点云数据的需求。这一阶段会使用计算工具类 `ComputeTools` 类遍历原始点云数据，计算每个点到原点距离，并将距离和遍历到每个点的 `index` 索引存储到新的 `Distance` 类集合。`Distance` 类重写 `compare` 函数，根据距离 `length` 从小到大排序，至此工具将庞大杂乱且无序的原始点云数据转换到了 `vector<Distance>` 集合中，且为有序状态，便于后续依据距离进行数据衰减的工作。

第二阶段。对算法第一阶段得到的集合进行计算分析，并将整个点云数据的三维空间分成若干个球体。首先从 `vector<Distance>` 找到点云文件中所有点中到原点距离最大的点 `distance_max` 和到原点距离值最小的点 `distance_min`，这两点到原点的距离差值记为 `gap`，将 `gap` 平均分成 `n` 份，记 `step` 为 `gap/n`，同时将距离原点最近的球面 `Sphere_0` 的半径 `r` 值记为 `step`，以此类推 ($n = 0, 1, 2, \dots, n$)，即球面 `Sphere_n` 的半径 `r` 值为 $n * step$ 。同时为了比较清楚地定义每个球面的上界跟下界，需要定义 `half_gap_step` 值为 `step/2`。定义一个球面类 `Sphere`，球面类属性包括半径、上界和下界，球面 `Sphere_n` 的上界下界范围区间为 $(n * r - half_gap_step, n * r + half_gap_step)$ ，($n = 0, 1, 2, \dots, n$)。至此工具将点云数据三维空间分解成多个球面集合 `vector<Sphere>`，后面会根据该集合进行点云衰减。

第三阶段。将以第二阶段得到的球面集合 `vector<Sphere>` 的上界下界范围作为刻度，根据激光透过率 `T` 随激光传输距离 `length` 而变化的函数，在球面集合 `vector<Sphere>` 里的各个球面上随机筛选点。首先要基于 Mie 散射理论结合雨滴粒子半径和激光波长等数据求解出衰减效率因子、散射效率因子以及吸收效率因子，接着根据几种效率因子结合散射截面、吸收截面的计算公式，计算出消光截面。然后由降雨强度规模参数结合雨滴谱分布模型和消光截面求得激光衰减系数，最后得到激光透过率 `T` 随激光传输距离 `Length` 而变化的函数。最后遍历 `vector<Sphere>` 集合中的各个球面，并在每个球面上随机选择位于该球面上界下界范围之间的若干个点的点，假设该球面上一共包含 `n` 个点，则当前球面选取点的个数为 $n * (1 - T)$ ，并且记录被筛选点集的索引序号，并将其保存

到 `vector<int>` 集合中。至此工具得到了完成雨天场景扩增需要衰减的目标点索引集。

第四阶段。这是本算法的最后一步，经过前面三个阶段的算法流程，已经得到了需要衰减的点云中具体的点索引值集合 `vector<int>`，第四阶段相对简单，将原始点云数据复制到一个新点云，遍历新点云，若该点的索引序号属于索引值集合，将其移除即可。至此，本工具就已经得到了基于雨天场景的激光雷达变异点云数据。

4.5 本章小结

本章节先从激光在大气中传输的角度介绍了雨滴粒子特性，之后通过分析 M-P 分布、Gamma 分布以及 Weibull 分布描述了雨滴谱分布模型，接着详细阐述了基于 Mie 散射理论推导出激光衰减率随激光传输距离变化规律的过程，最后对于核心扩增算法的设计进行分阶段详解。

第五章 扩增工具详细设计与实现

本章节主要介绍了面向自动驾驶雨天场景的点云扩增工具的详细设计与实现。从详细设计、核心类设计以及流程设计的角度对点云文件上传模块、扩增参数配置模块、扩增模块、点云可视化模块以及变异数据集评估模块进行描述。

5.1 点云文件上传模块

5.1.1 详细设计

点云文件上传模块主要负责进行数据扩增前期的准备工作。原始点云文件可以看作是进行数据扩增的原材料，由用户上传至服务器。工具对于用户上传的点云文件格式具有比较友好的兼容性，但是仍有兼容性限制，目前工具可以兼容 pcd、bin 以及 txt 的点云文件格式。点云文件的成功上传是进行数据扩增的前提，当用户具有的扩增参数配置信息列表以及点云文件列表均不为空时才可以进行数据扩增操作。

用户在前端页面浏览进行点云文件上传的具体操作界面，首先查看可上传文件的格式兼容性列表，其中包括 pcd、bin、txt 格式，该列表仅仅是起提醒和参考作用，并不会根据文件格式分窗口上传，上传点云文件时只有一个上传窗口，这样子会降低用户的操作复杂度，把该复杂度传递到后端服务中解决，使得用户交互尽量友好。用户上传文件后，会传入 UploadController 进行业务逻辑处理，由于工具内部对于点云文件的处理均需要 pcd 文件，后端编写了点云文件格式适配器，利用 Java 类的多态特性将传入的用户点云文件转换为工具可分析处理的 pcd 格式。之后会提取用户信息、文件名等信息并转换成相应的 DTO 数据对象，调用 PointCloudService 的点云文件信息保存方法，再调用 DBService 进行点云文件信息的数据库持久化。接着再去调用 PointCloudService 的返回用户拥有的点云文件信息列表方法，并将该列表返回 Controller 层并回传 HTTP 请求到前端界面进行显示。

5.1.2 核心类设计

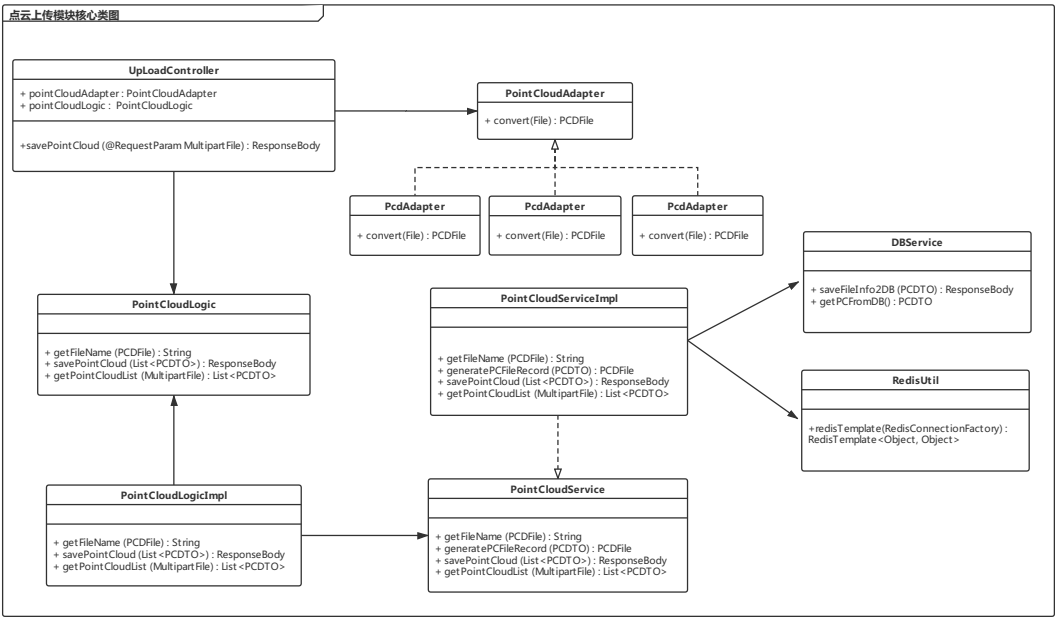


图 5-1: 点云文件上传模块核心类图

点云上传模块的核心类设计如图 5-1所示，其中 UpLoadController 是本模块对外提供服务的控制器类。该类拥有 PointCloudAdapter 接口和 PointCloudLogic 类对象的引用，savePointCloud(MultipartFile) 是用户进行点云文件上传的后端服务关键方法，参数是由用户上传成功的原始点云文件，这些原始数据会在具体实现类中进行格式适配，最终会返回点云上传结果信息。

PointCloudAdapter 是负责对用户上传的不同格式点云文件进行格式转换的适配器接口，其中的 convert 方法，由子类实现，参数是用户上传的点云文件，返回值是 PCD 类型的点云文件 PCDFile，这里的类设计主要利用了 java 类的多态特性，将格式兼容性的复杂度放在后端服务中解决，避免用户进行自行格式转换的操作，这会使得工具的易用性大大降低。UpLoadController 中的另一个成员变量是 PointCloudLogic，这点云上传模块的业务逻辑接口。其拥有的 savePointCloud 方法是关键业务逻辑，getFileName 是从用户上传的点云文件中获取文件名的方法，参数为 PCDFile，返回值为 String 类型变量。getUserId 是从用户上传文件的动作获取此用户 ID 的方法，参数为 JSON 字符串，返回值为 Int 类型变量。getPointCloudList 是从数据库查询该用户所拥有的点云文件信息的列表，入参是前端表单提交数据，返回值为点云数据列表。

PointCloudLogicImpl 是 PointCloudLogic 接口的实现类，实现了该接口的

相关方法。PointCloudService 是 Service 层的点云文件上传服务端接口，generatePCFileRecord 是生成点云文件信息记录的方法，参数为字符串，返回值为 PCDTO 点云文件信息数据对象。PointCloudServiceImpl 是 PointCloudService 接口的实现类，具体实现了 savePointCloud 方法，通过调用 DBService 进行点云文件信息的数据库持久化。

DBService 是实现了点云文件上传模块与数据库进行交互的 Dao 层服务，saveFileInfo2DB 方法实现了用户上传的点云文件信息在数据库中的持久化，点云文件存储在服务器硬盘，这里持久化相当于存储了该点云文件的索引与详情信息，包括文件所有者、文件名、文件 ID 以及文件所在地址。getPCFromDB 是从数据库获取点云数据信息的方法，参数为 PCDTO，相关的数据对象转换任务在 DTOConvertUtil 工具类中完成。RedisUtil 作为工具类，封装了相关的 redis 命令，在模块用于将点云文件信息连同当前用户 ID 存入 Redis 中，将部分信息放入内存，可以提高数据访问命中率，减少 IO 次数。

5.1.3 流程设计

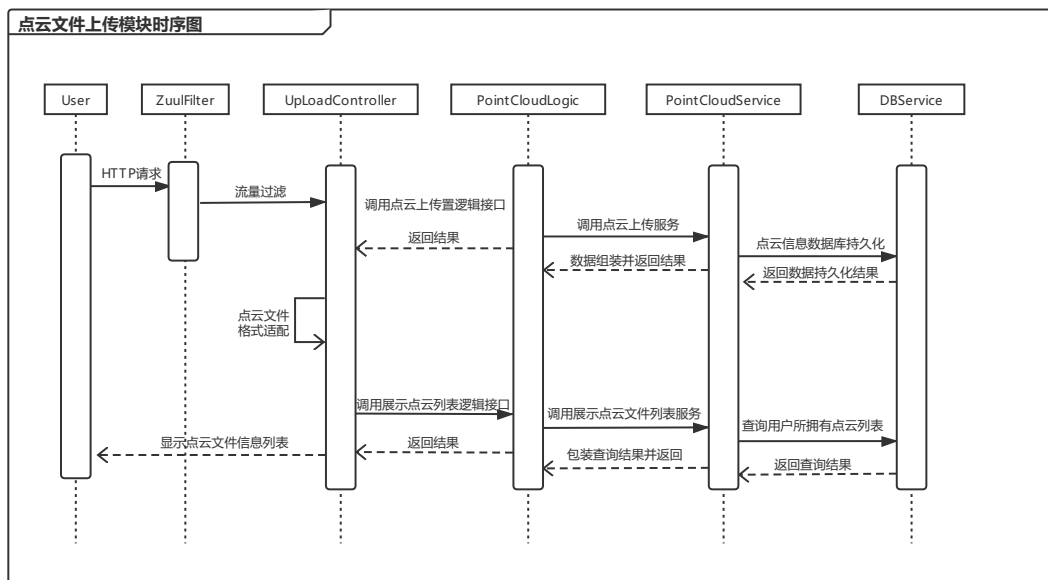


图 5-2: 点云文件上传模块时序图

点云文件上传模块时序图如图 5-2 所示，首先用户进入点云文件上传的前端界面，用户会浏览到文件格式的相关提示信息，本工具目前只适配 bin、pcd 以及 txt 格式的点云文件。接着，用户点击点云文件上传按钮，选择本机文件进

行上传，此时请求流量会打到 ZuulFilter 网关处，进行流量负载和限流过滤，这一步与上个模块类似。通过网关的流量会进入 UpLoadController，首先会将点云文件本身存入服务器硬盘中，之后调用该模块的逻辑接口 PointCloudLogic，再调用点云服务 PointCloudService 的 savePointCloud 方法，最后调用 DBService 的 saveFileInfo2DB 方法完成点云文件信息的数据库持久化。与此同时 Controller 层代码还会间接调用 PointCloudService 的 getPointCloudList 方法，进而调用 DBService 进行数据库查询操作，最后将该用户拥有的点云文件信息列表展示在前端页面上。

5.2 扩增参数配置模块

5.2.1 详细设计

扩增参数配置模块主要负责点云扩增之前的准备工作，包括对于降雨强度参数和待扩增点云数据的选择。降雨强度单位是 mm/h ，该参数决定了雨滴谱分布函数，而雨滴谱分布函数将直接影响激光衰减率随激光传输距离变化函数的计算，所以进行扩增参数配置是能够成功进行点云数据扩增的第一步。

用户将在前端页面浏览进行扩增参数配置的具体操作界面。首先需对降雨规模信息进行配置，可以在降雨强度列表选择需要扩增的目标数值，可选列表包括 2.0 mm/h 、 5.0 mm/h 、 12.5 mm/h 、 25.0 mm/h 和 75.0 mm/h 等参数，用户也可以输入自定义降雨强度。之后用户会浏览通过点云上传模块已上传的原始点云文件列表，并对待扩增原始点云数据进行勾选操作。上述操作完成后，该用户信息、降雨强度参数以及原始待扩增数据集详情均会被放在 HTTP 请求中，从前端服务传递给后端服务进行处理。该 HTTP 请求将首先经过网关，进行流量负载以及限流鉴权，中间加入一层可以减轻服务端的压力，且能够较好地保证安全性。若后端扩增参数配置服务的相关 Controller 接收到了传进来的 HTTP 请求，会首先使用 @RequestBody 将前端传递的参数转换成相应的 DTO 数据对象，随后调用 Service 的具体业务逻辑操作该 DTO 对象，接着调用 Dao 层的数据库逻辑进行扩增参数配置信息的持久化，包括数据库以及缓存的持久化，最后将后端业务逻辑的操作结果封装成 DTO 对象返回 Controller 层并回传 HTTP 响应信息到前端界面进行操作结果信息显示。

5.2.2 核心类设计

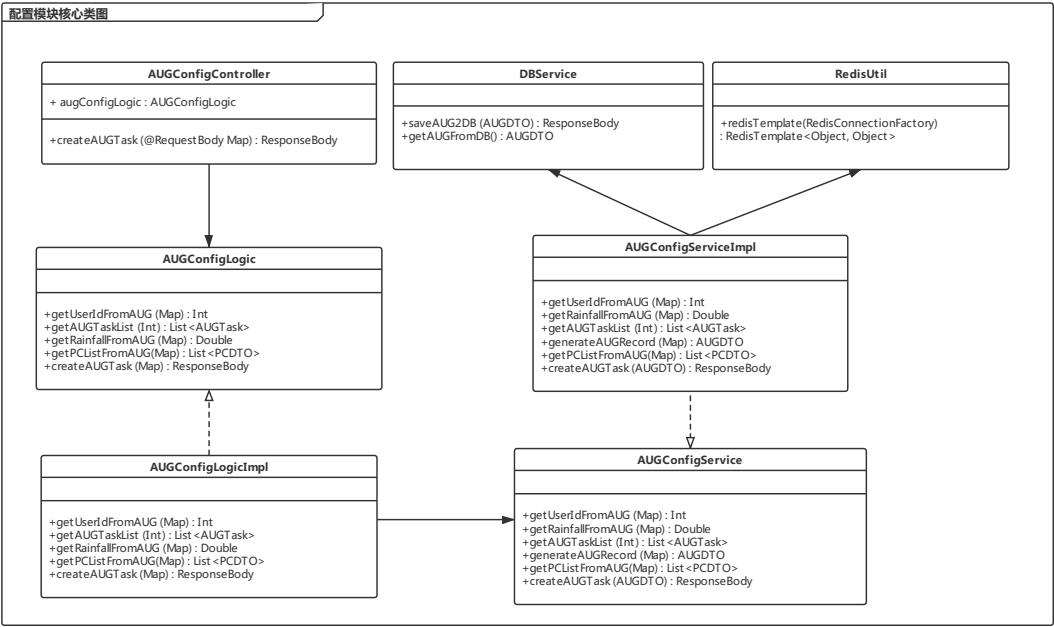


图 5-3: 扩增参数配置模块核心类图

扩增参数配置模块核心类图设计如图 5-3所示. 其中, AUGConfigController 是本模块对外提供服务的控制器类, 该类拥有 augConfigLogic 成员变量, 是对 AUGConfigLogic 的引用。createAUGTask(Map) 是工具进行扩增参数配置的关键逻辑方法, 参数是由前端传递到后端的 JSON 字符串, 最终会返回扩增参数配置结果。

AUGConfigLogic 是扩增参数配置模块的业务逻辑接口。其中 createAUG-Task 方法是 AUGConfigController 对 AUGConfigLogic 持有的引用进行的方法调用。getUserIdFromAUG 是从用户上传的配置信息中获取此用户 ID 的方法, 参数为 Map, 返回值为 Int 类型变量; getRainfallFromAUG 是从用户上传的配置信息中获取降雨强度参数的方法, 参数为 JSON 字符串, 返回值为 Double 类型变量。getPCListFromAUG 是从 Map 中获取待扩增原始点云数据列表的方法, 返回值为 List<PCDTO>。所以该方法获取用户 ID 是有必要的。

AUGConfigLogicImpl 是 AUGConfigLogic 接口的实现类, 实现了该接口中的相关方法。AUGConfigService 是 Service 层的扩增参数配置服务端接口, generateAUGRecord 是生成扩增任务记录的方法, 入参为 Map, 返回值为 AUGDTO 扩增配置数据对象, AUGConfigServiceImpl 是 AUGConfigService 接口的实现类, 实现了该接口中的相关方法。

DBService 是实现了扩增参数配置模块与数据库进行交互的 Dao 层服务，saveAUG2DB 方法实现了数据扩增配置信息在数据库中的持久化，参数为 AUG DTO，相关的数据对象转换任务在 DTOConvertUtil 工具类中完成。RedisUtil 是 redis 作为工具类，封装了相关的 redis 命令，在此模块用于将点云扩增参数信息连同当前用户 ID 存入 redis 缓存中，提高后续执行业务逻辑时的命中率，减少数据库 IO 时延。

5.2.3 流程设计

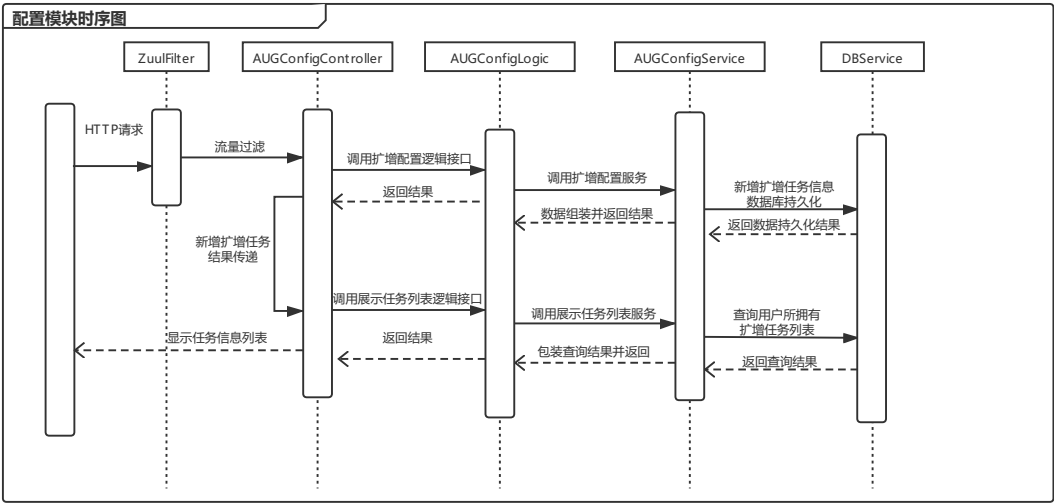


图 5-4: 扩增参数配置模块时序图

扩增参数配置模块时序图如图 5-4所示，该图展现了配置模块各类之间的逻辑交互，以及具体的业务处理过程。首先用户会进入工具的扩增参数配置前端页面，之后用户通过触发 Vue 框架 HTML 模板绑定操作事件来向基于 Spring Boot 的后端服务发送请求，用户流量会先打到 ZuulFilter 网关处，由网关处进行流量过滤以及负载操作。成功通过网关的流量请求将会由 AUGConfigController 来接收，该类会调用逻辑接口 AUGConfigLogic，再调用配置服务 AUGConfigService 的 createAUGConfig 方法从而完成扩增参数配置任务，并调用 DBService 去做配置信息的数据库持久化。与此同时 AUGConfigController 还会间接调用 AUGConfigService 服务的 getAUGTaskList，并调用 DBService 执行数据库查询操作，最后将该用户所拥有的配置信息列表展示到前端页面上。

5.3 点云数据扩增模块

5.3.1 详细设计

点云数据扩增模块是本工具的关键模块，主要负责执行面向自动驾驶雨天场景变异的激光雷达点云数据扩增任务，该模块的输入是配置模块的降雨强度信息以及待扩增点云数据列表，输出是基于原始点云和扩增参数配置进行扩增的变异点云数据。

对于用户来说，扩增模块一共包含两部分操作，首先是新增点云数据扩增任务，此时会出现一条就绪状态的数据扩增任务。接着用户点击执行此条扩增任务，那么该任务会由就绪状态转变为正在执行状态。当点云数据扩增任务执行完毕，该任务会变为已完成状态。

用户在前端页面浏览点云扩增任务列表，并选择目标任务点击开始进行数据扩增按钮，包含着降雨强度和原始数据等扩增任务详情的 HTTP 请求将会传入到 ZuulService 网关服务进行负载和过滤，透过的流量会打到 AugmentController 类进行业务逻辑处理。第一步会提取 HTTP 请求中携带的参数，Controller 层会间接调用 DBService 进行数据查询并对扩增参数和原始点云做验证，确保扩增原材料无误。若验证成功，该类会调用 PointCloudService 的 augment 核心方法进行点云扩增业务逻辑的执行。扩增任务完成后，会调用 DBService 进行变异点云数据信息以及扩增任务 ID 与相关文件 ID 映射的数据库持久化，点云数据信息表的其中一个表属性 FileType 字段就起到区分点云文件类型的作用，该字段为 0 表示是原始点云文件，该字段为 1 表示是变异点云文件。最后会通过 Controller 层向前端界面回传点云扩增任务执行状态。

5.3.2 核心类设计

点云扩增模块的核心类图如图 5-5 所示，其中，AugmentController 是本模块对外提供服务的控制器类，该类拥有 PointCloudLogic 接口的引用，augment(Map) 是用户进行点云变异的关键方法，参数是扩增任务详情 Map，包括了降雨强度以及原始点云数据列表，最终会返回点云扩增任务执行状态。

PointCloudLogic 是负责点云扩增模块的业务逻辑接口，该接口同时也负责执行点云上传模块的相关任务。其中 augment 方法是 Controller 层对与业务逻辑接口的方法引用，入参是点云文件和配置参数，返回值是扩增任务结果信息。

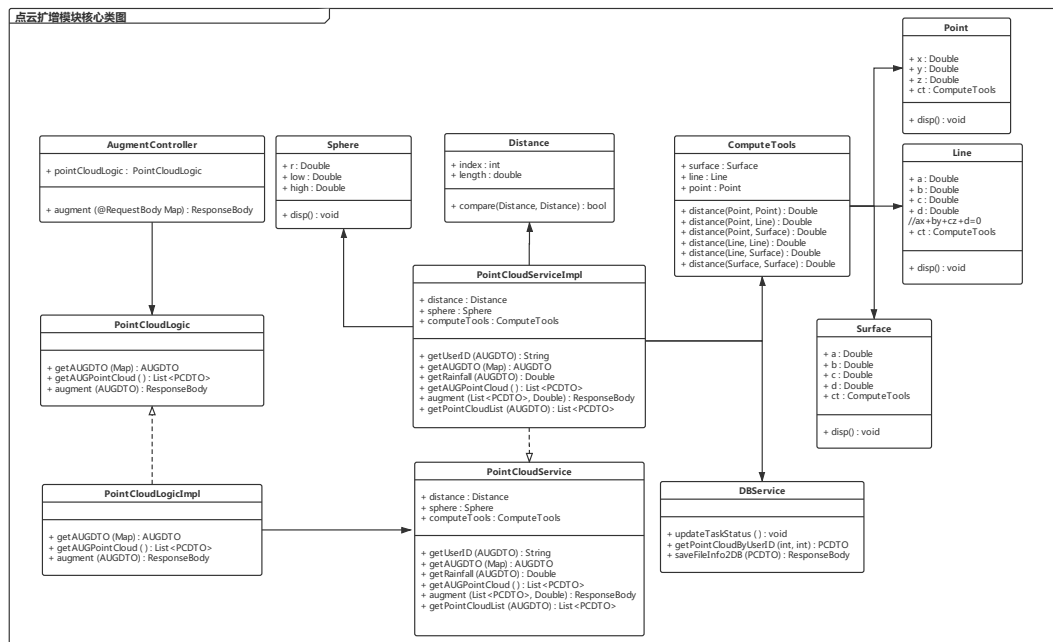


图 5-5: 点云扩增模块核心类图

其中 `getAUGDTO` 是从前端传来的 `Map` 中提取出扩增任务执行所需的关键信息；`getAUGPointCloud` 是从数据库查询该用户所拥有的全部变异点云文件信息列表。

`PointCloudLogicImpl` 是 `PointCloudLogic` 接口的实现类，为该接口中的相关方法提供了具体实现。`PointCloudService` 是 `Service` 层的点云扩增服务端接口，该接口拥有 `Distance`、`Sphere` 以及 `ComputeTools` 等类的引用，这几个类是用于实现面向自动驾驶雨天场景变异的激光雷达点云数据扩增算法的关键类。`Distance` 用于计算点云文件中各个点到原点的距离，`Sphere` 是本工具抽象出的球面类，用于将点云三维空间分为若干个球面，方便激光衰减率随激光传输距离变化函数的计算。`ComputeTools` 则是封装了点、线、面相关算法的计算工具类，具有计算点到点距离、点到线距离、点到面距离等功能。`generatePCFileRecord` 方法用于生成新的变异点云文件，返回值是 `PCDTO` 数据对象。

`DBService` 是实现了点云扩增模块与数据库进行交互的 `Dao` 层服务，其中 `getAUGConfigByUserID` 方法用于根据用户 ID 以及配置信息 ID 搜索其拥有的配置参数信息记录，入参是 `UserID` 以及 `AUGConfigID`，均为 `int` 类型值，返回值是 `AUGDTO` 数据对象；`getPointCloudByUserID` 方法用于根据用户 ID 以及文件 ID 搜索其拥有的点云文件信息记录，入参是 `UserID` 以及 `PCFileID`，均为 `int`

类型值，返回值是 PCDTO 数据对象。saveFileInfo2DB 方法实现了将用户进行扩增后的变异点云数据详情信息在数据库中做持久化。

5.3.3 流程设计

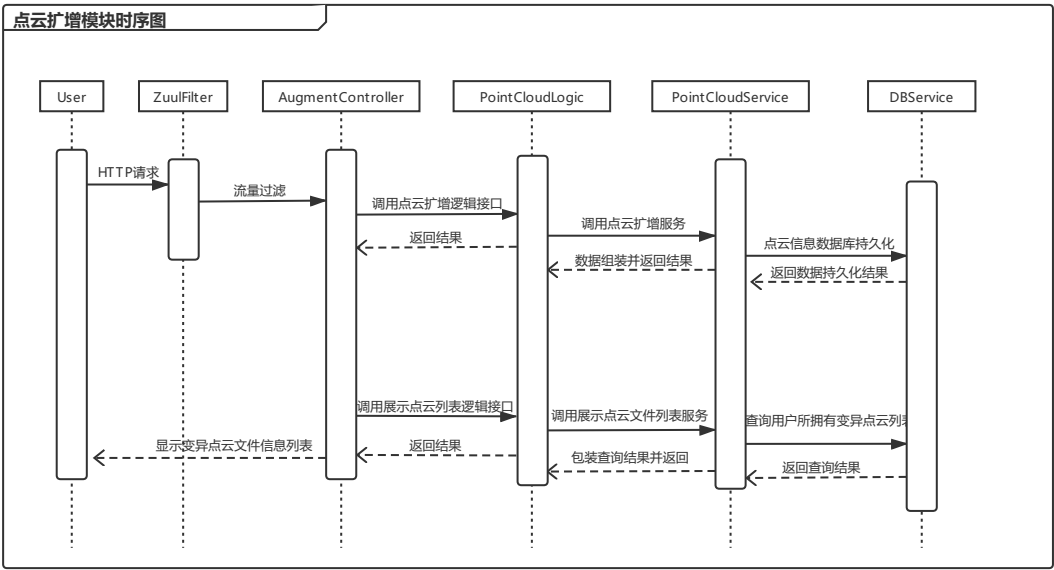


图 5-6: 点云扩增模块时序图

点云扩增模块的时序图如图 5-6所示，首先用户会进入点云扩增的前端界面浏览扩增任务列表，用户点击每条记录右边的开始扩增按钮，即可开始执行点云扩增任务，包含了点云文件信息和扩增参数信息的 HTTP 就会从前端服务打到 ZuulFilter 网关处，进行流量负载和限流过滤，该步骤与前两个模块类似。经过网关的流量会进入 AugmentController，首先会间接调用 DBService 进行数据库查询，验证用户提交的扩增请求中的原始点云数据是否存在。之后 Controller 层将会调用扩增模块的业务逻辑接口 PointCloudLogic，再调用点云服务 PointCloudService 中的 augment(List<PCDTO>, rainfall) 方法进行数据扩增，进而调用 DBService 的 updateTaskStatus 方法进行点云变异任务执行状态更新。与此同时 Controller 层还会间接调用 DBService 进行数据库查询操作，最后将该任务执行状态显示在前端任务列表中。

5.4 点云可视化模块

5.4.1 详细设计

点云可视化模块可以视作本工具的一项独立服务，旨在帮助用户直观地观察三维点云场景，用户可以选择单独可视化查看某个点云文件，也可以选择两个点云文件，执行双窗口对比可视化任务。用户进入可视化前端界面后，可以浏览到其拥有的点云文件信息列表，包括其上传过的原始点云文件以及进行扩增后的变异点云文件。用户选取要进行可视化的目标点云文件后，点击可视化按钮，该 HTTP 请求将会经由 ZuulService 网关服务过滤后传递到后端服务 VisualController，由于用户上传的点云文件类型可以有 pcd、bin、txt 三种格式，所以需要通过点云格式适配器 PointCloudAdapter 来做格式转换，之后会调用到具体的 Service 层可视化服务，并调用 python 脚本将点云数据在前端界面做可视化展示。

5.4.2 核心类设计

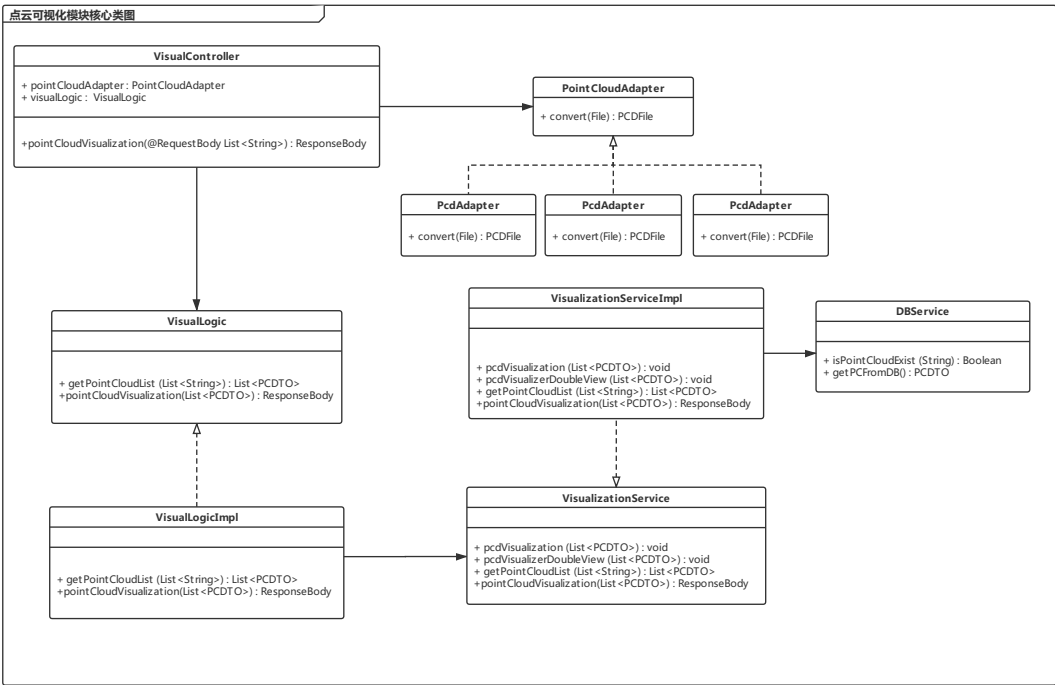


图 5-7: 点云可视化模块核心类图

点云可视化模块的核心类图如图 5-7 所示，其中 **VisualController** 是本模

块对外提供服务的控制类。该类中拥有 `PointCloudAdapter` 接口和 `VisualizationLogic` 类对象的引用。由于用户上传的原始点云可能有多种格式，而工具后端服务可视化仅能处理 `pcd` 格式的文件，前者是对于点云文件的适配器格式转换类，用于将其他格式的点云数据转换成 `pcd` 格式，前面小节中详细阐述，本小节将不再赘述。`pointCloudVisualization(List<PCDFile>)` 是进行点云可视化的关键方法，参数是用户选择的点云文件信息，最终会返回点云可视化结果。C++ 有 PCL 相关类库，用于处理点云数据。由于本工具是基于 Java 语言开发，所以此方法涉及到 Java 对 C++ 的跨语言调用。本工具使用了基于 `ProtoBuf` 的跨语言通信技术，相关的通讯信息类就没有在核心类图中赘述。

`VisualLogic` 是负责点云可视化模块的业务逻辑接口，其中 `pointCloudVisualization` 方法是 `Controller` 层对业务逻辑接口的方法引用。`getPointCloudList` 方法用于从用户提交的 HTTP 中的 `String` 类型点云文件详情中提取出点云文件信息列表，入参是 `String` 类型数据，返回值为 `List<PCDTO>`，用户可以选择单个点云可视化任务或者双点云对比可视化任务，后端的业务逻辑通过判断 `List<PCDTO>` 的 `size` 大小决定后续函数方法的具体调用。用户在执行可视化任务后，调用可视化具体逻辑前会验证点云数据存在性。

`VisualLogicImpl` 是 `VisualLogic` 接口的实现类，为该接口中的相关方法提供了具体实现。`VisualizationService` 是 `Service` 层的点云可视化服务端接口，`VisualizationServiceImpl` 是该接口的实现类，其中 `pcdVisualization(List<PCDTO>)` 是对于单点云文件可视化的实现方法，`pcdVisualizationDoubleView` 方法是对双点云多窗口可视化对比功能的实现。`DBService` 是实现了可视化模块与数据库交互的 `Dao` 层服务，在进行可视化之前需要进行数据库查询，验证提交点云文件列表中包含的点云数据是否存在数据库中，`isPointCloudExist` 是检验某个点云文件是否存在于服务器的方法，入参是 `String` 类型的文件名，返回值是 `Boolean` 类型。

5.4.3 流程设计

点云可视化模块的时序图如图 5-8 所示，首先用户会进入到点云可视化的前端界面，页面靠左侧会显示 `Controller` 层间接调用 `getPointCloudList` 方法返回的该用户拥有的点云文件信息列表，包括其上传的原始点云文件以及进行雨天场景扩增后的变异点云文件，这些点云文件供用户进行选择，进行可视化展示。用户在勾选完需要扩增进行可视化展示的点云文件之后，

点击可视化按钮，包含了待可视化点云文件信息列表的 HTTP 请求就会从前端服务打到 ZuulFilter 网关处，进行流量过滤。之后通过网关的流量会进入 VisualController，首先会间接调用 DBservice 进行数据库查询，验证是否存在这些点云文件。之后 Controller 层会调用可视化模块的业务逻辑接口 VisualLogic，再调用 VisualizationService 的 pointCloudVisualization 方法，进而调用 python 脚本，最后将点云可视化的展示图返回至前端界面上。

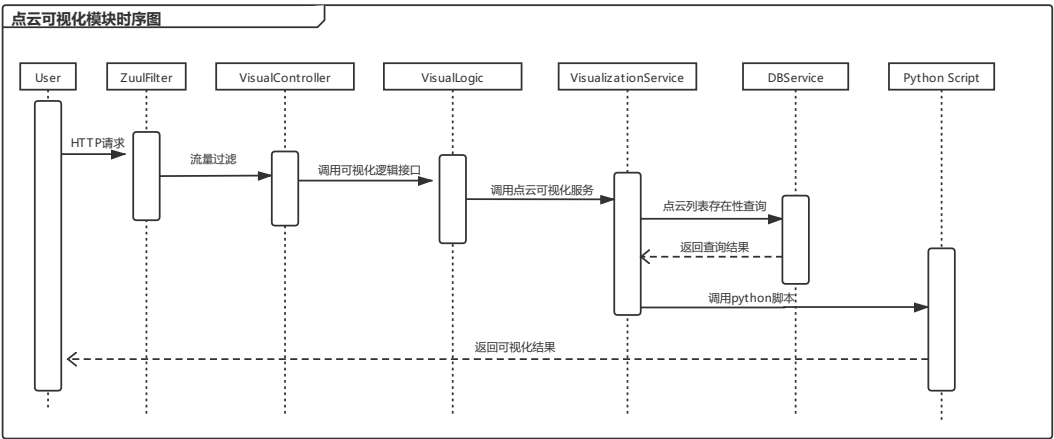


图 5-8: 点云可视化模块时序图

5.5 变异数据集评估模块

5.5.1 详细设计

变异数据集评估模块主要负责进行数据扩增的后期评估工作。本文点云扩增工具的前几个模块主要完成了扩增参数配置、点云文件上传、点云核心扩增等功能。在完成点云扩增之后，用户可能需要获知该雨天场景变异数据的有效性，这就产生了对于变异数据集进行实验评估，并将评估结果返回给用户的需求。该模块目前将采用异步的方式工作，后端服务接收到前端请求会调用生产者线程将该请求放入消息队列 [44]，并等待消费者线程进行消费，当取得消息后会通知工具管理员，由管理员执行数据评估任务，并将评估结果保存至服务器且做数据库持久化，用户可以浏览评估任务列表进行下载或者在线查看。

首先用户在前端页面浏览点云扩增任务，挑选执行状态为已完成的任务，并点击右侧的提交变异数据集评估按钮，即将包含此扩增任务生成的变异数据集详情信息放入 HTTP 请求中传递给后端验证模块服务。该 HTTP 请求会传

递至 EvaluateController 进行业务逻辑处理，之后会在将该条评估请求信息连同用户信息发送至消息队列中的同时进行数据库持久化，保存此次实验评估记录。之后管理员的消费者线程会定时对消息队列中的消息进行消费，并根据消息中的文件名列表来进行评估，扩增完毕后将会把评估结果转换成 TXT 文档并存至服务器。用户可以在评估任务列表展示界面进行评估结果下载操作。本模块的任务可以认为是异步执行的。

5.5.2 核心类设计

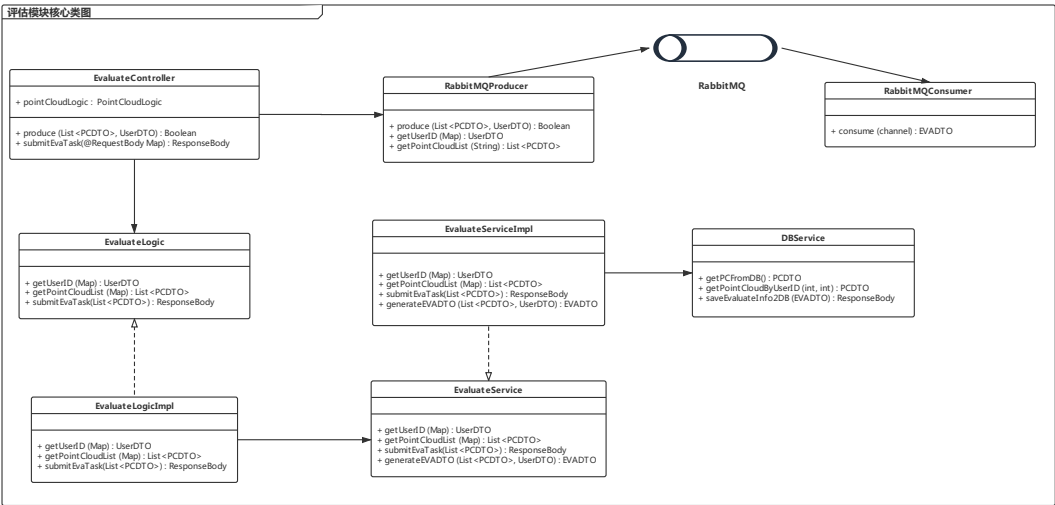


图 5-9: 验证模块核心类图

验证模块的核心类图如图 5-9所示，其中，EvaluateController 是本模块对外提供服务的控制器类，该类拥有 EvaluateLogic 接口的引用，produce 方法以及 saveEvaluateInfo 方法是用户进行实验评估结果浏览的关键方法，produce 是 RabbitMQProducer 的方法，用来生产消息，消息中包括待评估的点云文件信息列表和用户信息；submitEvaTaskList 方法用于提交变异数据集评估任务并进行评估记录数据库持久化。

Producer 可以看作是用于生产消息的生产者类，关键方法是 produce(List<PCDTO>, UserDTO)，可以向消息队列中生产消息，以供消费者进行消费。RabbitMQConsumer 是消费者类，通过从消息队列中进行 consume 来获取验证评估记录信息，再由管理员进行评估。EvaluateLogic 是负责验证模块的业务逻辑接口，其中 getUserID 方法用于提取 HTTP 请求中的用户信息并转换成 UserDTO 数据传输对象，getPointCloudList 方法用于提取 HTTP 中的变异数据集详情信

息并转换为 List<PCDTO> 点云数据传输对象列表，submitEvaTaskList 方法是 Controller 层对业务逻辑接口的方法引用，入参是 UserDTO 和 List<PCDTO>，返回值是请求进行评估操作的结果信息。

EvaluateLogicImpl 是 EvaluateLogic 接口的实现类，提供了相关方法的具体实现。EvaluateService 是 Service 层中用于对变异点云数据进行评估的服务端接口，generateEVADTO 是用来生成评估记录的方法，参数为点云文件信息数据传输对象列表 List<PCDTO> 以及用户信息数据传输对象 UserDTO，返回值为评估记录数据传输对象 EVADTO。saveEvaluateInfo 方法通过调用 DBService 的方法来进行评估记录持久化，返回值是持久化结果信息。EvaluateServiceImpl 是 EvaluateService 接口的实现类，实现了该接口中的相关方法。DBService 是实现了验证模块与数据库交互的 Dao 层服务，saveEvaluateInfo2DB 方法实现了评估记录信息在数据库中的持久化，参数为 EVADTO 评估记录信息数据传输对象，返回值是数据库操作结果信息。

5.5.3 流程设计

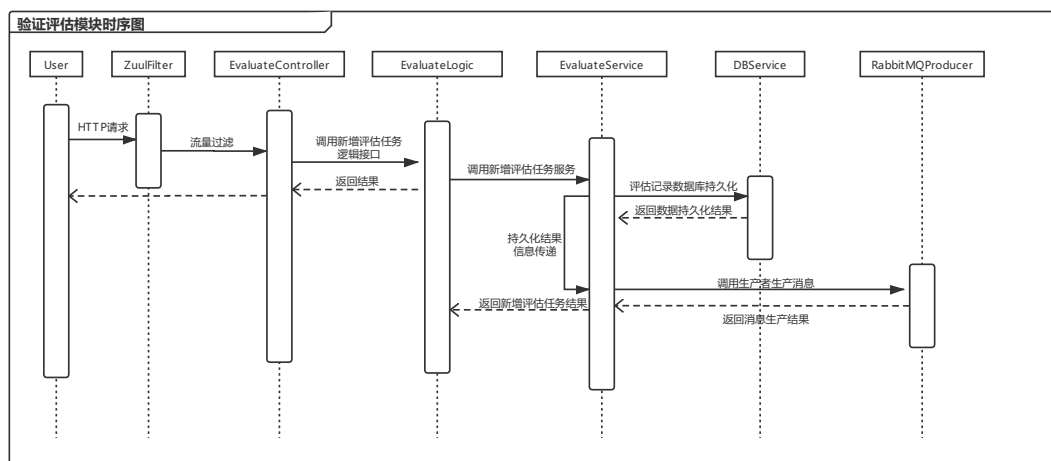


图 5-10: 验证模块时序图

验证模块的时序图如图 5-10所示，首先用户会进入点云变异任务列表前端展示界面，然后根据需求找到已完成的任务并且点击右侧的提交评估任务按钮。此时请求流量会打到 ZuulFilter 网关处，进行流量负载和限流过滤。通过了网关的流量会进入 EvaluateController，之后调用该模块的逻辑接口 EvaluateLogic，再调用验证服务 EvaluateService 的验证记录下信息保存方法，

从而间接调用 DBService 完成验证记录信息的数据库持久化。之后持久化结果会返回 Controller 层，再去调用 RabbitMQ 的生产者服务，进行消息生产，将评估请求放入消息队列中，等待消费者消费，最后将提交评估任务结果信息返回到前端界面给用户展示。评估任务结果信息主要是不同种类目标物体的 AP 值统计表，AP 值是目标框真实值与预测值的 IOU 交并比，可以看作某类目标的精确度。

5.6 工具实例展示

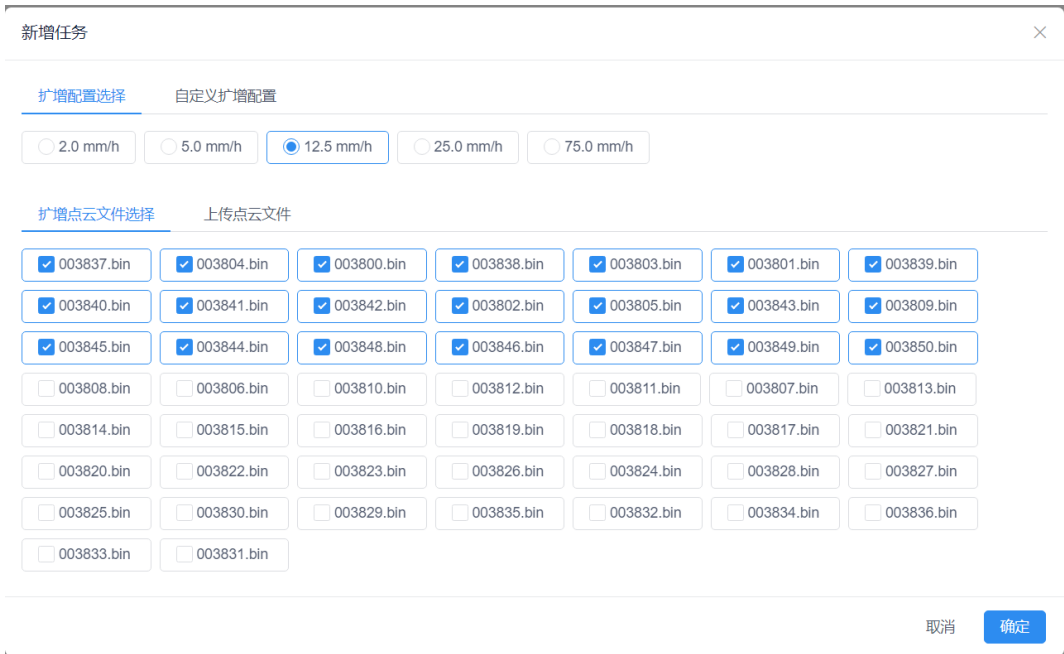


图 5-11: 新增点云扩增任务截图

图 5-11展示了新增点云扩增任务的界面，上面部分实现了扩增参数配置功能，用户可以勾选已有的降雨强度，包括 2.0 mm/h、5.0 mm/h、12.5 mm/h、25.0 mm/h、75.0 mm/h 等备选项，仅能单选。然而用户也可以点击”自定义扩增配置”选项，向文本框中输入自定义降雨强度，单位是 mm/h，这里的输入会在前端进行验证，不能超过一定范围，否则会提示重新输入。下面视图用于选择此扩增任务中的目标待扩增点云文件，可以多选，列表中展示的数据均为该用户已上传的原始点云数据，在数据库中，使用 type 字段来区分原始数据与变异数据。选择好扩增配置以及待变异点云文件后，点击确定按钮，即新增了一

条扩增任务，接着调用扩增模块服务开始进行点云变异。

激光雷达点云扩增工具									
新增评估任务成功									
新增点云扩增任务									
扩增任务ID	原始数据集ID	文件个数	降雨强度配置 (mm/h)	预计完成时间 (s)	开始时间	结束时间	任务状态	操作	操作
25	2	6	5	334.8	2021-03-29 23:31:54	2021-03-29 23:37:28	100%	开始扩增	提交评估任务
26	3	1	25	55.8	2021-03-29 23:32:24	2021-03-29 23:33:19	100%	开始扩增	提交评估任务
27	4	4	5	223.2	2021-03-29 23:32:35	2021-03-29 23:36:18	100%	开始扩增	提交评估任务
28	5	1	12.5	55.8	2021-03-30 19:48:57	2021-03-30 19:49:53	100%	开始扩增	提交评估任务
30	8	21	12.5	1171.8	2021-04-07 14:17:59	2021-04-07 14:37:30	100%	开始扩增	提交评估任务

图 5-12: 点云扩增任务列表截图

图 5-12展示了点云扩增任务列表界面，每条记录包括原始数据集点云文件个数、降雨强度配置以及预计完成时间等关键属性，新增任务状态的初始值为 0%，用户可以进行开始扩增或提交评估任务等操作。经过单元测试得知，平均每个点云扩增任务的执行需要 55.80 秒，预计完成时间就是通过该指标推算而来的，本次扩增任务包含 21 个原始点云文件、预计完成时间为 1171.80s。当点云扩增任务执行完毕后，任务进度会变成 100%。此时用户可以点击提交评估任务按钮，之后则会弹出新增评估任务成功的提示。用户后续可以浏览评估任务列表查看变异数据集评估任务详情。

激光雷达点云扩增工具						
新增评估任务成功						
评估任务ID	评估数据集ID	评估数据集点云文件个数	任务创建时间	所属用户	任务状态	操作
6	2	6	2021-03-29 23:32:42	qq	已完成	查看评估结果
7	4	4	2021-03-29 23:34:58	qq	已完成	查看评估结果
8	3	1	2021-03-29 23:35:00	qq	已完成	查看评估结果
9	2	6	2021-03-29 23:35:01	qq	已完成	查看评估结果
10	2	6	2021-04-07 14:07:31	qq	已完成	查看评估结果
15	8	21	2021-04-07 14:28:24	qq	已完成	查看评估结果
16	8	21	2021-04-07 14:28:59	qq	待开始	查看评估结果

图 5-13: 点云评估任务列表截图

图 5-13展示了点云评估任务列表界面，每条记录都包含评估任务 ID、待评估目标变异数据集 ID、数据集内点云个数以及任务创建时间等关键信息，初始任务状态是“待开始”，开始评估后，状态会变为“评估中”，评估任务执行完毕后，任务状态将变为“已完成”。之后用户可以点击查看评估结果按钮，浏览变异数据集评估结果详情，结果主要是由 AP 值准确率构成的表格数据。图 5-14是变异点云文件下载页面，用户浏览变异点云数据列表后，根据需求点击文件下载按钮即可。

激光雷达点云扩增工具						欢迎使用, 444
任务列表 点云数据评估 点云可视化 点云文件下载	点云文件ID	文件名	文件类型	数据规模(point cloud size)	所属用户	操作
	161	003837_aug.bin	变点	41851	444	文件下载
	162	003804_aug.bin	变点	31182	444	文件下载
	163	003800_aug.bin	变点	29124	444	文件下载
	164	003836_aug.bin	变点	38461	444	文件下载
	165	003803_aug.bin	变点	40954	444	文件下载
	166	003801_aug.bin	变点	37916	444	文件下载
	167	003839_aug.bin	变点	33479	444	文件下载
	168	003809_aug.bin	变点	42037	444	文件下载

图 5-14: 点云文件下载页面截图

5.7 本章小结

本章描述了点云扩增工具中关键模块的详细设计，并介绍了实现思路与细节。本章阐述的关键模块包括点云文件上传模块、扩增参数配置模块、点云数据扩增模块、点云可视化模块以及变异数据集评估模块。对于每个模块，都会首先介绍该模块的详细设计，接着使用核心类图以及时序图来描述设计思路，最后进行系统实例展示描述工具使用效果，为后一章进行系统测试做好充分准备。

第六章 扩增工具测试与实验评估

本章节首先对扩增工具做了系统测试，包括功能测试以及接口测试，以确保工具可用性。接着利用图标以及可视化对比对于数据真实性进行验证，最后设计实验对雨天场景扩增点云数据有效性进行评估，根据实验结果分析得出结论，本文工具生成雨天点云数据真实有效，且可以在一定程度上提高模型泛化能力，增强模型鲁棒性。

6.1 系统测试

工具系统的可用性和稳定性是至关重要的，所以开发工作完成后，我们需要对系统进行测试。要进行测试，我们首先要对工具系统进行部署。本文通过 Jenkins 工具来进行工具代码的持续集成部署。为了使得工具满足用户需求并检验出系统缺陷，设计了本工具系统测试的大体流程如图 6-1所示。

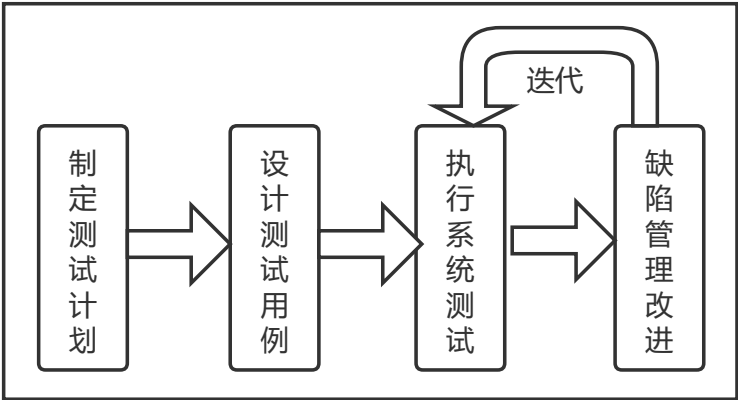


图 6-1: 系统测试流程图

系统测试的内容主要包括功能测试以及性能测试。功能测试主要用来测试软件系统的功能完成度，主要的参考文件是工具的需求文档。正确性是至关重要的因素，如果正确性都无法保证，那么系统是无法正常交付的。可用性也是一项重要的评判标准，可用性将直接影响用户的使用体验。性能测试主要用来检测工具系统的水位，在不同流量规模下观察分析工具的响应时间，从而获取

系统的各方面性能指标，保证外部流量压力下系统可以稳定运行。软件系统的健壮性主要指系统在接收到不正常不符合预期的外部输入或处于非正常的外部环境下，系统仍能够维持正常处理请求状态的程度，为了确保系统具有良好的健壮性，开发人员应该养成防御性编程的好习惯。

6.1.1 功能测试

本文工具的功能测试主要是根据不同功能模块的界限做划分的，在设计测试用例时会考虑到数据在系统中不同层次之间的流转。比如 **Model** 层是数据实体层，描述了实体类的属性，与上一章的数据逻辑设计相关，测试重点主要是类属性设计的完整性；**Dao** 层是数据持久层，主要用于对数据的访问，完成数据增删改查任务，在此层编写定制化的 **SQL** 语句以满足业务需求，测试重点主要是与数据库的连通性以及语法正确性；**Service** 层是具体的业务逻辑实现层，完成了原子性功能设计，调用 **Dao** 层接口并接收 **Dao** 层返回的数据，测试重点主要是各个功能模块之间的交互以及服务的正常运作；**Controller** 控制层主要负责执行前端服务与后端服务的交互任务，此层的测试重点主要是前端传入参数的校验以及 **Controller** 控制器中数据的流转情况。

表 6-1: 点云文件上传测试用例设计表

描述项	说明
用例 ID	UC_TCC ₁
所属模块	配置模块
测试目标	系统能够接收到用户上传的原始点云数据，并验证点云文件格式是否合理
操作步骤	1. 检测用户是否登陆成功 2. 用户查看可上传点云文件格式列表 3. 用户点击上传点云文件并浏览本机文件且上传
预期结果	1. 系统显示文件上传页面 2. 系统展示可上传点云文件格式列表 3. 系统将对用户上传的点云文件进行格式验证，若点云文件验证成功则开始文件上传。上传成功后将提示成功上传的信息，并在前端页面展示该用户已上传文件列表；若验证失败或上传文件过程中导致失败，则会提示失败信息

如表 6-1所示，在用户使用扩增工具进行基于雨天场景的激光雷达点云数

据变异之前，用户需要上传原始点云文件作为扩增对象，这一步系统会考虑到不同点云文件格式的兼容性，但仍然存在兼容性范围，系统会接收符合要求的点云文件，并将其文件名、上传用户信息在数据库中做持久化处理。该测试用例模拟了用户从用户登录、查看文件格式兼容性列表、点云文件上传的全过程。本文工具可上传的点云文件兼容列表包括 pcd、txt、bin 等三种点云文件格式，如果用户上传的点云文件符合预期，用户的上传文件操作符合规范，且在网络通畅的情况下成功上传了点云文件，那么前端页面会返回上传文件成功的提示信息，并对此点云文件的相关信息在数据库中做持久化处理，且从数据库中查询，将该用户所上传的点云文件列表展示到前端页面上。若上传文件失败，则会在前端页面提示失败信息，并建议用户重新上传点云文件，本测试用例的考察重点在于上传文件的格式兼容性以及系统的准确性。

表 6-2: 新建点云扩增任务测试用例设计表

描述项	说明
用例 ID	UC_TCC ₂
所属模块	扩增模块
测试目标	系统接收到用户的扩增请求后，验证系统是否能正确完成
操作步骤	1. 检测用户是否登陆成功 2. 检测用户是否已选择降雨强度参数配置 3. 检测用户是否已选择待扩增原始点云数据 4. 用户点击开始进行数据扩增
预期结果	1. 系统显示新增扩增任务页面 2. 系统展示降雨强度选项 3. 系统展示该用户已上传的点云数据文件列表 4. 系统将用户选择的扩增降雨强度配置以及待扩增的原始点云文件列表，从前端服务传递请求到后端服务，若新增扩增任务成功，会在用户界面上提示成功并新增一条点云扩增任务记录并展示该用户拥有的变异点云文件列表；若新增任务失败，会将相关错误信息返回到前端页面以供参考

如表 6-2所示，用户在选择扩增降雨强度参数和待扩增原始点云数据之后，点击新增点云扩增任务，就会调用工具后端业务模块开始执行点云数据扩增任务。首先用户会在页面上浏览到可选的降雨强度参数配置信息列表，也可

以选择自定义输入降雨强度，以及该用户上传过的所有原始点云文件列表，这些信息通过 Dao 层的 SQL 查询语句从数据库中获取，并回传到前端界面显示。该测试用例模拟了用户从用户登录、选择配置参数信息、选择原始点云数据、开始数据扩增的全过程。点击新增扩增任务按钮时，会做验证，若扩增配置或点云文件没有选择，会弹出提示框提请用户选择齐全。用户点击扩增按钮之后，会调用进后端业务模块，执行扩增任务，此任务耗费时间较长，所以要对此接口的响应时间做超时判断。若扩增成功，那么会提示成功信息并且向用户展示其拥有的扩增文件列表；若扩增任务失败，则会通过 Controller 层将错误信息日志打印到前端页面，以供用户以及开发维护人员浏览。

表 6-3: 新建点云评估任务测试用例设计表

描述项	说明
用例 ID	UC_TCC ₃
所属模块	变异点云数据集验证评估模块
测试目标	系统接收到用户的评估请求后，验证系统是否能正确完成
操作步骤	1. 检测用户是否登陆成功 2. 检测该数据集相关的扩增任务是否已完成 3. 用户点击进行点云变异数据集评估任务
预期结果	1. 系统显示扩增任务列表 2. 系统展示任务状态 3. 系统将用户选择执行评估任务的该条扩增任务记录关联的数据集 ID，从前端服务传递请求到后端服务，若新增评估任务成功，会在用户界面上提示成功并新增一条评估任务记录并展示到点云评估界面；若新增评估任务失败，会将相关错误信息返回到前端页面以供参考

如表 6-3所示，用户在提交点云扩增任务之后，浏览扩增任务列表，观察各个任务的执行状态，若状态为已完成，那么用户点击此条记录后面的评估按钮，则会提交变异数据集评估任务，相关变异数据集 ID 等信息会传入后端服务，之后通过 Dao 层的 SQL 查询语句从数据库中获取并执行评估任务。该测试用例模拟了用户从登录、浏览点云扩增任务列表、点击数据评估按钮的全过程。用户点击评估任务按钮后，若新增评估任务成功，那么会在点云数据评估界面新增一条记录，并展示了评估任务状态；若该条扩增任务记录没有完成，那么没有生成完整的扩增数据集，所以新建评估任务将会失败，则会提示用户

相关错误信息。

如表 6-4所示，用户在执行基于雨天场景的激光雷达点云数据扩增任务完毕之后，通常需要比较直观地浏览变异点云的三维立体图，观察扩增效果是否真实。本测试用例主要用于检测用户在前端页面进行点云数据可视化的功能。该测试用例模拟了检测用户从用户登录、检查文件列表到进行点云文件可视化的全过程。在预期的情况下，若用户拥有的变异点云文件列表不为空，且后端可视化模块成功在响应时间要求内完成了可视化任务，那么前端页面将显示可视化结果，并展示成功进行可视化的提示信息。若可视化任务失败，则会返回失败原因相关日志，用于给予用户反馈，也方便开发维护人员进行问题排查。

表 6-4: 点云可视化测试用例设计表

描述项	说明
用例 ID	UC_TCC ₄
所属模块	点云可视化模块
测试目标	系统接收到用户的可视化请求后，验证系统是否能正确完成可视化任务
操作步骤	1. 检测用户是否登陆成功 2. 检测用户是否已有可选的变异点云文件 3. 用户点击点云可视化按钮
预期结果	1. 系统可视化界面 2. 系统展示该用户的点云文件列表 3. 系统将用户选择可视化的点云文件名作为参数传递到后端业务模块，若成功可视化，则在前端显示三维点云立体图，并提示可视化成功信息，否则提示失败

如表 6-5所示，用户完成变异数据集评估任务后，通常有查看评估的需求，本测试用例主要用于检测用户查看评估结果的功能。该测试用例模拟了用户从登录、浏览评估任务列表到进行评估结果展示的全过程。工具管理员在接收到变异数据集评估请求后，会执行评估任务并将结果储存到服务器指定文件夹中并实时更新评估任务执行进度。点云评估任务每条记录的任务状态有三种，分别为未开始、评估中和已完成。预期情况下，若评估任务已成功执行完毕，评估结果将会被展示到前端组件内；若请求失败或任务未执行完成，则会返回失败信息，并提醒用户进行重试。

表 6-5: 变异数据集评估结果展示测试用例设计表

描述项	说明
用例 ID	UC_TCC ₅
所属模块	评估模块
测试目标	系统接收到用户的评估结果展示请求后，验证系统是否能正确完成
操作步骤	1. 检测用户是否登陆成功 2. 检测用户是否有已完成的变异数据集评估任务 3. 用户点击展示评估结果按钮
预期结果	1. 系统显示变异数据集评估界面 2. 系统展示该用户拥有的评估任务列表 3. 系统将用户选择需要展示的数据集 ID 作为参数传递到后端，成功则展示评估结果，否则提示失败

表 6-6: 点云文件下载测试用例设计表

描述项	说明
用例 ID	UC_TCC ₆
所属模块	点云文件下载模块
测试目标	系统接收到用户的下载请求后，验证系统是否能正确完成
操作步骤	1. 检测用户是否登陆成功 2. 检测用户是否已有可选的变异点云文件 3. 用户点击开始下载点云文件
预期结果	1. 系统显示文件下载页面 2. 系统展示该用户拥有的变异点云文件列表 3. 系统将用户选择需要下载的点云文件名作为参数传递到后端业务模块，若成功下载点云文件则前端页面展示下载成功的提示信息，否则提示失败

如表 6-6所示，用户在进行完扩增之后，通常有下载变异点云数据的需求，本测试用例主要用于检测用户下载点云文件的功能。该测试用例模拟了检测用户从用户登录、检查文件列表到进行点云文件下载的全过程。在预期的情况下，如果用户拥有的变异点云文件列表不为空，且成功从服务器完成点云文件的下载，那么本测试用例的预期结果为，首先前端页面会显示用户首页界

面，接着显示用户拥有的变异点云文件列表，最后成功下载文件的提示信息。若下载文件失败，则会返回失败信息，并提醒用户进行重试。目前点云文件下载的格式是与用户上传的数据格式相匹配的，系统的后期工作会考虑进行格式可选的点云数据下载功能。

本工具严格按照测试用例描述的步骤，完成了所有测试用例的执行，并记录结果，如表 6-7所示。由表中结果可知，所有测试用例全部执行通过，说明本系统完成了系统功能性需求，至此完成了工具的功能测试计划。

表 6-7: 功能测试用例执行结果表

测试用例 ID	功能测试执行结果
UC_TCC ₁	执行通过
UC_TCC ₂	执行通过
UC_TCC ₃	执行通过
UC_TCC ₄	执行通过
UC_TCC ₅	执行通过
UC_TCC ₆	执行通过

6.1.2 接口测试

本工具的接口测试主要是针对后端服务对前端服务开放的接口以及工具后端服务各个模块之间的通讯接口以及跨语言调用的接口进行测试，主要负责验证接口间的交互数据格式。接口测试的重点主要是关注参数在各个接口间传递的正确性、返回结果的准确性以及接口对异常情况的容错性和各别接口的时效性。本系统前后端分离，彼此通过 RESTful API 进行数据传输，本工具抽象出了一层数据传输对象（DTO），来负责前后端数据对象的传输任务，比较好的封装了接口传递的数据参数，满足迪米特法则，不必让前端传输数据的格式考虑到数据库中的类属性，在一定程度上为下层业务逻辑减少了复杂度。

本系统使用 Postman 工具模拟用户 HTTP 请求去访问后端服务接口，从而测试后端服务接口的可用性以及接口之间数据传输和处理的准确性。每个接口相当于是多个功能的集合，逻辑功能实现后，在此基础上验证接口的对外服务情况，所以在进行接口测试前，完成系统功能性测试是必要的。本工具系统在设计接口测试用例时，主要是从用户权限、参数完整性、参数兼容性几个角度考虑的。比如在对下载变异点云文件接口的测试时，需要在 HTTP 请求里模拟

不同的用户权限码；还有在测试用户扩增点云文件接口时，需要发送包含存在空参列表的 HTTP 请求，从而检测接口的容错能力以及数据格式验证准确性。此外，对于部分接口需要进行弱依赖处理，若发生超时情况，要做好容错。

6.2 数据真实性评估

对于本文雨天场景点云数据扩增技术生成的数据进行真实性评估，最重要的一个因素就是看扩增数据是否符合激光雷达在雨天场景下探测点云数据的客观规律。原始数据使用 KITII 公开点云数据，首先根据扩增数据进行数据统计，绘制出点云数据点坐标衰减个数随传输距离变化趋势图进行真实性验证。之后本文使用原始点云数据进行七种不同降雨强度下的扩增，通过可视化结果对比证明数据真实性。

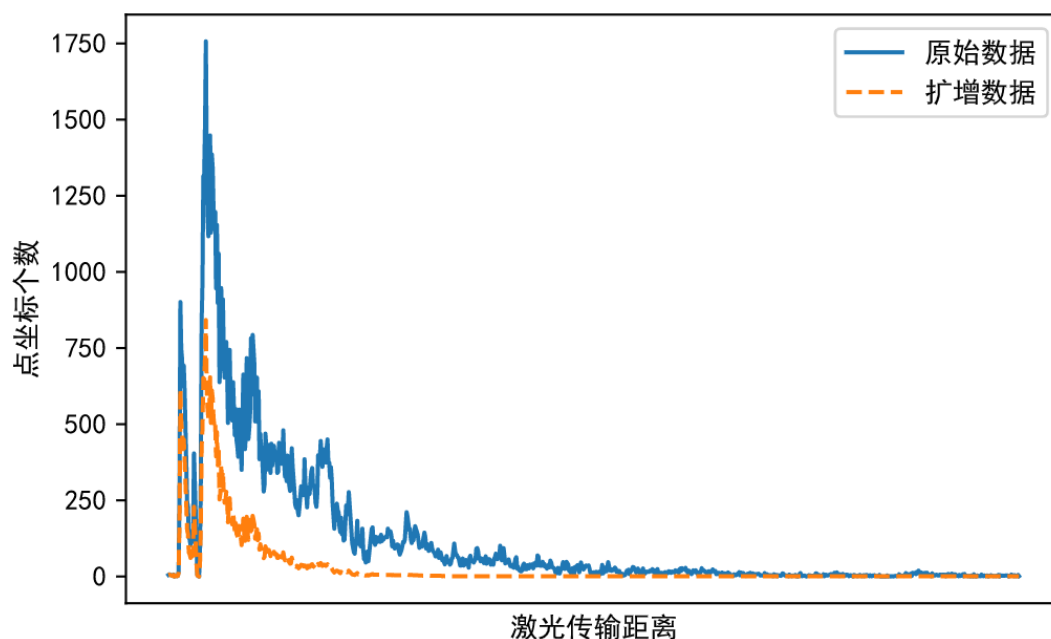


图 6-2: 雨天场景不同传输距离下激光衰减趋势图

图 6-2是在 25.0mm/h 的降雨强度下进行数据扩增，并根据数据统计绘制出在不同激光传输距离下，激光衰减程度变化图。由图可知，随着激光传输距离的增大，点坐标个数的下降速度越来越快，即点云数据衰减程度越来越大，符合已知的客观规律。至于“各个目标的回波强度和探测点数量均随降雨规模的增大而减小”的客观规律在第四章的不同降雨强度下激光透过率随传输距离变化趋势图处可以得到验证。

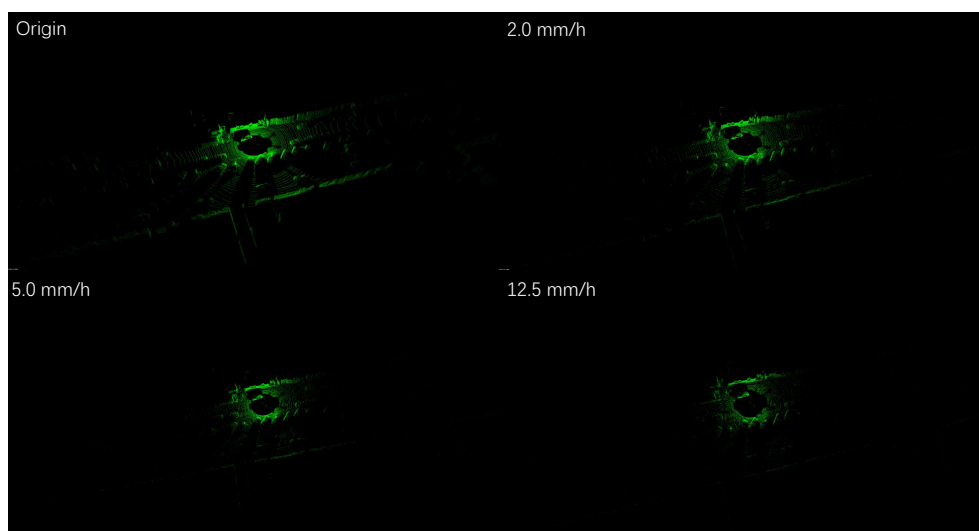


图 6-3: 中小雨量情况下点云数据可视化结果示例图

图 6-3、6-4分别展示了中小雨量和大到暴雨情况下点云可视化结果。图 6-3从左上角开始，顺时针方向分别是无雨、毛毛雨 (2.0mm/h)、小雨 (5.0mm/h) 和中雨 (12.5mm/h) 等场景可视化结果。每个小窗口的左上角均有标识降雨强度。图 6-4从左上角开始，顺时针分别是大雨 (25.0mm/h)、大到暴雨 (40.0mm/h)、大到暴雨 (50.0mm/h)、暴雨 (75.0mm/h) 等。通过了解前人相关研究成果，激光雷达在雨天场景下探测点云数据的规律为，各个目标的回波强度和探测点数量均随降雨规模以及激光传输距离的增大而减小。根据上述分析可得出结论，降雨强度越大，距离原点越远，则激光衰减程度越大，扩增数据的效果符合预期，可以证明本工具扩增出点云数据的真实性。

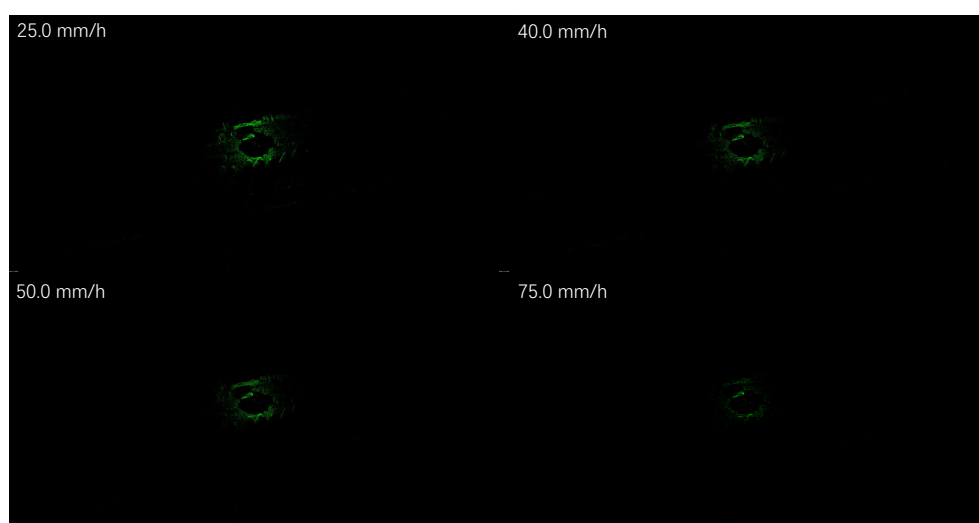


图 6-4: 大到暴雨情况下点云数据可视化结果示例图

6.3 数据有效性评估

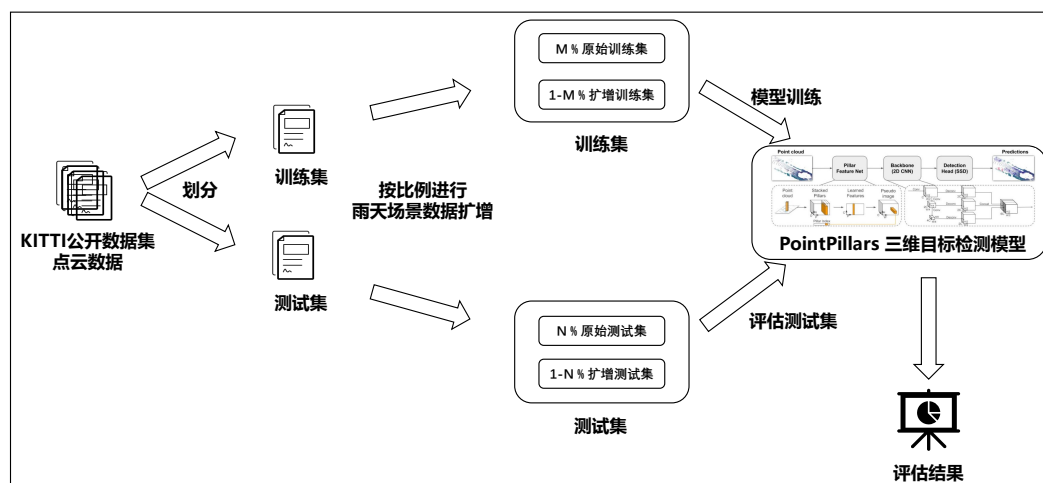


图 6-5: 数据有效性实验流程图

图 6-5描述了数据有效性评估实验流程图，我们使用 KITTI 公开数据集中的带标签数据作为原始数据集，并按 7: 3 的比例将其划分为训练集和测试集。接着根据具体的实验设计情况按比例进行雨天场景下的点云数据扩增，得到新的训练集和测试集。之后使用 PointPillars 三维目标检测模型进行训练，最后评估测试集，得到评估结果。本小节将从评估数据、评估工具、评估指标、方案设计以及结果分析的角度来介绍整个实验流程。

6.3.1 实验评估数据

本文数据有效性评估部分将使用 KITTI 数据集中的点云数据作为数据来源。KITTI[45] 是自动驾驶领域最重要的数据集之一，该数据集于 2012 年发布，此后多次更新，大多数三维目标检测算法都是在 KITTI 上进行验证的。本文进行实验评估主要是对点云数据进行检测分析，所以要对采集该数据集的激光雷达参数加以了解。Velodyne HDL-64E 有 64 个独立的激光器，每一个激光器每秒发射数千次以捕捉 360 度的视野，通过该传感器，我们可以获得一组与 64 个仰角和数千个方位角相关联的三维点，且采集到的每个三位点数据都与测量距离、强度值和高精度 GPS 时间戳相关联。

表 6-8: 实验数据详情列表

数据类型	数据详情
Velodyne point clouds	激光雷达点云文件数据，大小为 29GB
Camera calibration matrices of object data set	目标数据集的摄像机标定矩阵，大小为 16MB
Training labels of object data set	目标数据集训练标签，大小为 5MB
Left color images of object data set	摄像机图像数据，可作为点云数据的对照，大小为 12GB

本文用到的实验数据如表 6-8所示，主要包括激光雷达点云数据、摄像机标定矩阵数据、训练标签以及对应的摄像机图像数据。其中点云文件中，由 14999 个点云数据构成，其中包括 7481 个有标签数据以及 7518 个无标签数据，其他数据与点云数据一一对应。本文将 7481 个有标签数据按 7:3 的比例划分为训练集和测试集，训练集包含 5237 个点云数据，测试集包含 2244 个点云数据，相应的标签、图像数据也随之划分。本文的数据有效性评估部分将使用上述数据集训练 3D 目标检测模型并进行测试，从而评估点云扩增工具生成变异数据有效性。

6.3.2 实验评估工具

数据有效性评估工作将使用三维目标检测模型来进行，目前有三种 3D 目标检测方法，基于图像的方法、基于激光雷达的方法以及基于多传感器融合的方法。本文实验评估所用的是基于激光雷达方法的三维目标检测模型 PointPillars，相比其他三维目标检测模型，PointPillars 是一款能够平衡检测速度和检测精度的 3D 检测模型，显著提高了三维目标检测性能。该算法模型主要包含三个部分 Feature Net、Backbone 以及 Detection。首先点云文件作为输入，进入到 Feature Net 进行特征处理，将点云数据处理成类似图像的数据；之后由 Backbone 部分完成特征提取工作；最后使用 SSD 单阶段检测器来进行目标检测工作。

Second.pytorch 是 PointPillars 算法的代码实现框架，具体的实验环境配置信息如表 6-9所示，本文是在 Ubuntu16.04 系统环境下，使用 GeForce GTX850M 的 Nvidia 驱动下，并在 CUDA10.0 + CUDNN7.4.2 + PyTorch 1.1.0 + Cmake3.13.2

表 6-9: 实验环境配置信息列表

字段	环境信息
服务器	Intel(R) Core(TM) i7-4710HQ CPU @ 2.50GHZ 物理内存 250G
操作系统	Ubuntu 16.04
硬件支持	GTX 850M + Nvidia 710.45
运行环境	CUDA 10.0 + CUDNN 7.4.2 + PyTorch 1.1.0 + CMake 3.13.2
python 版本	Python 3.6.5
其他依赖	Spconv 1.2.1 + Apex 1.0

的配置下完成搭建的，本机搭建过后还搭建了相关的 Docker 环境并开源。为了环境配置的便利且不影响 Ubuntu 系统其他代码环境，该项目全程是在虚拟环境中配置运行的，并且 Second 项目还依赖于 Spconv 和 Apex 等项目的成功编译。参考上一小节的实验评估数据，本文首先使用 Velodyne point clouds 中训练集点云文件、目标数据集训练标签、目标数据集的摄像机标定矩阵以及摄像机图像数据按代码逻辑进行数据集目录编排。由于 KITTI 数据集的点云数据都是 bin 格式，但本文工具进行扩增时需要输入的点云数据仅限 pcd 格式，所以首先需要将 KITTI 数据集的 bin 格式文件批量转换成 pcd 文件，供工具进行数据变异。然而 Second.pytorch 目标检测模型能兼容的数据格式是 bin 类型，所以扩增完毕后生成的 pcd 文件，还要将其批量转换成 bin 格式点云文件。之后执行 train.py 对该目标检测模型进行训练，训练大概耗费 20 个小时。本文工具在执行评估任务后，会将评估结果打印到日志中，平均每个点云的评估工作大概需要耗时 8.54s。

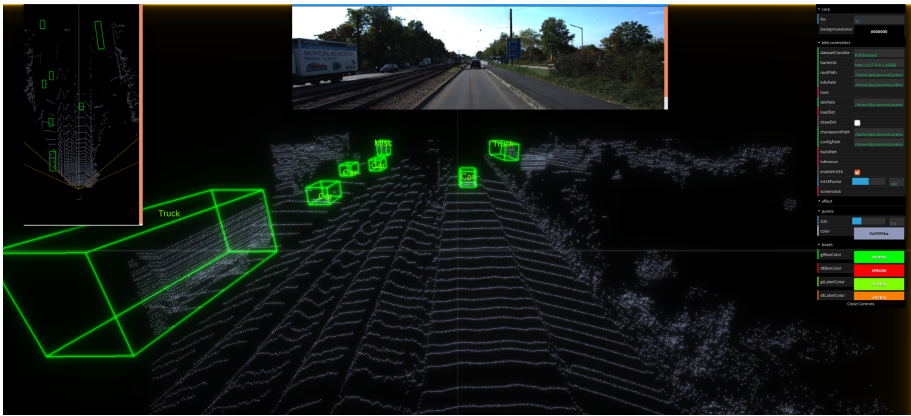


图 6-6: 三维目标检测结果示例图

最终使用测试集进行三维目标检测识别的可视化结果如图 6-6所示，图片上方是激光雷达测得的实时点云数据所对应时刻位置的摄像机图像数据；左侧是该帧点云的鸟瞰图目标检测识别可视化结果，可以看到有检测到的若干个绿色 3D 框；右侧是该可视化工具的配置界面，需要选择可视化相关的配置信息，包括数据集的加载、中间结果网络的建立以及颜色位置信息；图片中的主体即该时刻的点云数据目标检测识别可视化结果，里面包含若干个绿色 3D 框，并且有体现检测出物体的标签，比如 Truck、Car、MISC 等等。

6.3.3 实验评估指标

表 6-10: 实验评估指标列表

参数名	参数含义
bbox AP	2D 检测框的准确率
bev AP	鸟瞰图检测框的准确率
3d AP	3D 检测框的准确率
mAP	平均准确率

本文对于雨天场景变异数据的有效性评估指标主要是三维目标检测识别结果的 AP 值。模型训练完毕之后我们通过修改配置文件去选择运行参数，执行 `evaluate.py` 对模型进行评估，得到的评估结果 AP 值是重要的评估指标，可以理解为准确率。首先介绍在三维目标检测中”准确”的定义，若目标预测框与真值框之间的重叠部分占到真值框的 $x\%$ 以上，就认为该目标预测框是准确的。若 n 个预测框中有 m 个是准确的，那么该类物体的目标识别准确率是 $m/n \times 100\%$ ，该百分比则为 AP 值。至于各个具体参数的含义如表 6-10所示，分别从 2D 平面检测框（bbox AP）、3D 检测框（3D AP）、鸟瞰图检测框（bev AP）等方面进行 AP 值计算。我们在实验分析阶段主要关注这三种 AP 值的平均值（mAP）。

6.3.4 实验方案设计

对于数据有效性进行验证，主要是考虑到了雨天场景点云扩增工具生成的变异数据在目标检测模型中的表现，观察利用变异数据进行模型训练与目标检测识别的结果，并根据评估指标的变化推论数据有效性。如果使用本工具生成

雨天扩增数据对模型进行训练，能够使模型在新数据的检测表现与原模型对比有所提升，那么可以说明扩增数据可以提升模型的泛化能力以及鲁棒性。基于上述思考，本文设计了几组对照实验，如表 6-11所示。实验主要分为三个阶段。整个实验过程中，训练以及评估的参数都是一致的，比如工作线程数设为 6 个，训练的 steps 均为 99040(1238×120)，神经网络的 batch_size 大小均为 4，epochs 设置为 50 等。第一阶段，将使用原始点云训练集去训练模型，并用原始点云测试集进行目标检测识别评估任务，得到评估结果 AP1。第二阶段，将使用原始点云训练集去训练模型，并用 50% 的原始点云测试集和 50% 的雨天场景变异点云测试集进行目标检测识别评估任务，得到评估结果 AP2。对于扩增后的训练集，需要进行人工标注。第三阶段，将使用 50% 的原始点云训练集和 50% 的雨天场景变异点云训练集去训练模型，并使用 50% 的原始点云测试集和 50% 的雨天场景变异点云测试集进行目标检测识别评估任务，得到评估结果 AP3。后续实验结果分析部分我们会根据三组实验的平均准确率进行分析。

表 6-11: 实验方案设计表

实验序号	训练集	测试集	评估结果
第一组	原始点云训练集	原始点云测试集	AP1
第二组	原始点云训练集	50% 原始点云测试集 +50% 变异点云测试集	AP2
第三组	50% 原始点云训练集 +50% 变异点云训练集	50% 原始点云训练集 +50% 变异点云训练集	AP3

6.3.5 实验结果分析

接下来进行变异数据有效性验证。该部分对于点云数据进行扩增时均是在 75.0mm/h 的降雨强度下进行的。本文实验评估的三组结果如表 6-12所示。其中 mAP 是 bbox AP、bev AP 和 3d AP 的平均值，我们进行实验结果时主要关注 mAP 的值。由表可知第一组实验评估结果显示 mAP 的值为 87.36%。第二组实验结果显示，mAP 的值为 75.27%。综合前两组实验结果来分析，从整体上来看 AP2<AP1，第二组相对于第一组平均准确率有所下降，这说明该模型对于雨天场景的边缘数据泛化能力不足。因为这两组实验在进行模型训练时均使用了非雨天场景的原始点云数据，然而在第二组的测试集中加入了 50% 的雨天场景

表 6-12: 数据有效性评估实验结果统计表

实验序号	训练集	测试集	评估指标	结果
第一组	原始点云数据训练集	原始点云数据测试集	<i>bbox AP</i>	91.63
			<i>bev AP</i>	90.51
			<i>3d AP</i>	79.94
			<i>mAP</i>	87.36
第二组	原始点云数据训练集	50% 原始 +50% 变异	<i>bbox AP</i>	76.93
			<i>bev AP</i>	79.26
			<i>3d AP</i>	69.63
			<i>mAP</i>	75.27
第三组	50% 原始 +50% 变异	50% 原始 +50% 变异	<i>bbox AP</i>	84.67
			<i>bev AP</i>	83.18
			<i>3d AP</i>	77.25
			<i>mAP</i>	81.70

变异数据，模型训练时缺乏雨天场景类型的点云数据，如果模型的泛化能力又不是很很好，那么对于雨天新样本的检测框预测表现会不佳，所以 AP2 的值相比 AP1 会偏低，此结果说明本文基于雨天场景的点云变异数据有别于原始点云数据，能够与原始点云数据在测试数据集的意义上区分开来。然而在第三组实验中，我们将训练集中 50% 的数据替换为雨天场景变异点云数据，而用于测试的数据与第二组实验相同，均为 50% 的原始点云测试集和 50% 的雨天场景变异点云测试集。观察表中数据，相比于第二组实验结果，mAP 平均准确率上升了将近 6%。那么说明本文工具生成的雨天场景点云扩增数据提高了模型的泛化能力，增强了模型鲁棒性。由此说明本文工具生成的雨天场景变异数据能够补充原始数据集无法覆盖的样本空间，对模型的健壮性提升具有积极影响，进而证明了扩增数据有效性。

6.4 本章小结

本章首先根据需求设计了测试用例，对工具的基本功能进行了测试，然后利用 Postman 对工具进行了接口测试。接着对工具进行实验评估，介绍了实验数据来源、实验评估工具，对具体评估指标进行了详细解释，并设计了几组实

验方案，对若干组训练集和测试集进行划分，执行模型训练任务之后进行评估任务，最后对实验结果进行分析，验证了本工具生成的雨天场景点云变异数据的真实性与有效性。

第七章 总结与展望

7.1 总结

自动驾驶系统需要依赖激光雷达传感器进行信息探测工作，其探测结果会在雨天场景这种恶劣天气条件下由于激光在水滴或任意粒子中的吸收、衍射以及折射作用的影响下出现测量偏差。自动驾驶模型的效果很大程度上取决于数据集的样本质量，比如样本的数量和多样性，当样本空间不足或样本多样性不够丰富时，可能会导致模型训练的泛化能力不足，并出现识别率和准确率不高的结果，而且获取恶劣天气条件下的激光雷达测量数据成本高难度大。为解决上述问题，本文创新性地提出了基于朗伯比尔指数衰减定律、雨滴谱模型以及 Mie 散射理论的面向自动驾驶雨天场景变异的激光雷达点云数据扩增技术，通过利用不同规模的降雨量强度对于激光衰减率随激光传输距离的函数进行计算，从而进一步从激光在雨天传输衰减的角度对于激光雷达点云数据进行真实有效的变异，提供了在真实世界采集成本很高的不同降雨规模场景的点云数据集，丰富了自动驾驶场景点云数据集的多样性，进而在一定程度上提高系统模型的泛化能力与健壮性。

本文还设计并实现了相应的面向自动驾驶雨天场景的激光雷达点云数据扩增工具，该工具使用了基于 Vue 的前端服务框架以及基于 SpringBoot 的后端服务框架。工具主要分为配置、上传、扩增、可视化以及验证评估模块。本文开发工具可以基于配置和上传模块进行降雨强度扩增参数配置以及原始点云数据上传，并根据扩增模块的核心算法生成模拟降雨后的变异点云数据，再基于验证评估模块帮助用户了解扩增数据有效性，最后基于可视化模块进行点云前端页面的可视化展示。此外工具还会对一些耗时较多的接口方法进行优化，提供更好的交互体验。

7.2 展望

本文设计开发的点云数据扩增工具主要职责在于利用面向自动驾驶雨天场景的点云数据扩增技术来扩充自动驾驶场景数据集，增加样本多样性，目前主要是针对雨天不同降雨规模的模拟。但从长远发展的角度来看，随着自动驾驶传感器的发展以及扩增场景多样化的需求，本工具仍然需要不断进行优化完善。可以从以下方面开展后续工作。

第一，本工具在功能上还可以进一步拓展。当前面向自动驾驶场景变异仅仅局限于雨天场景，通过查阅资料可知，在雪天、雾天这种恶劣天气下，激光雷达也面临着传感结果精确度的挑战。为了更好地提供边缘天气点云样本数据集，本系统还可以根据天气特性从激光在雪雾天传输的角度来进行变异算法的设计，拓展对于雪天、雾天等其他天气场景的激光雷达点云数据变异功能。

第二，本工具在验证评估模块目前使用的是 PointPillars 三维目标检测算法，策略是根据该算法模型的 AP 值变化来评估变异数据有效性。为了更好证明数据有效性，还可用 VoteNet、MVXNet、Part-A2 等不同目标检测算法进行间接验证，最优的情况是搭建自动驾驶系统模型，比如 Apollo 自动驾驶系统，训练模型后通过观察数据集变化对于具体驾驶行为的影响对变异数据有效性进行直接验证。

第三，为了更好的性能与稳定性，底层技术可以进一步替换，比如开发框架、文件系统及缓存系统等等。对底层技术进一步探索和调研，用技术学习成本换取系统 IO 成本，提高工具整体的可用性。

致 谢

时光如梭，转眼之间研究生学习生涯即将画上句号，此刻我心中充满了感激与不舍，真心感谢每一位给过我帮助的人。

首先，我要感谢我的指导老师陈振宇老师和冯洋老师，他们为我的研究指明了方向，并在两年的学习阶段中给予我悉心的指导。在研究工作开展初期，两位老师给予了我莫大的鼓励，严谨的治学态度和对科研的热情也深深地影响着我，令我备受鼓舞。

其次，我要感谢实验室各位同学，他们是程鹏、梁越勇、徐彬桐以及张晓波等人。他们在我遇到困难的时候鼎力相助，让我少走了很多弯路。接着，我要感谢我的室友们，陈煜哲、邓翔宇和丁金亮，他们在生活中帮助了我很多，使我的研究生阶段增添了许多欢乐和温暖。

接着我要感谢我的父母家人，感谢他们对我的养育之恩，在我学习和工作的过程中遇到了很大困难时，他们是我坚实的后盾，在背后给予我支持。

最后，要对审阅论文的各位评审专家表达敬意，感谢各位老师百忙之中对我的论文提出宝贵的意见，您的每一条建议都将是我前进的动力。

参考文献

- [1] GUPTA A, ANPALAGAN A, GUAN L, et al. Deep learning for object detection and scene perception in self-driving cars: Survey, challenges, and open issues[J/OL]. Array, 2021, 10: 100057.
<http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.array.2021.100057>.
- [2] SUZUKI A J, MIZUI K. Bidirectional Vehicle-to-Vehicle Communication and Ranging Systems with Spread Spectrum Techniques Using Laser Radar and Visible Light[J/OL]. IEICE Trans. Fundam. Electron. Commun. Comput. Sci., 2017, 100-A(5): 1206–1214.
<https://doi.org/10.1587/transfun.E100.A.1206>.
- [3] ZANG S, DING M, SMITH D, et al. The impact of adverse weather conditions on autonomous vehicles: how rain, snow, fog, and hail affect the performance of a self-driving car[J]. IEEE vehicular technology magazine, 2019, 14(2): 103–111.
- [4] HEINZLER R, PIEWAK F, SCHINDLER P, et al. CNN-Based Lidar Point Cloud De-Noising in Adverse Weather[J/OL]. IEEE Robotics Autom. Lett., 2020, 5(2): 2514–2521.
<https://doi.org/10.1109/LRA.2020.2972865>.
- [5] WILSON J W, BRANDES E A. Radar measurement of rainfall—A summary[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1979, 60(9): 1048–1060.
- [6] YASUDA K, ZHANG R, YAMAMOTO H, et al. Method of Selecting Training Data to Build a Compact and Efficient Translation Model[C/OL] // Third International Joint Conference on Natural Language Processing, IJCNLP 2008, Hyderabad, India, January 7-12, 2008. [S.l.]: The Association for Computer Linguistics, 2008: 655–660.
<https://www.aclweb.org/anthology/I08-2088/>.

- [7] DREOSSI T, GHOSH S, SANGIOVANNI-VINCENTELLI A L, et al. Systematic Testing of Convolutional Neural Networks for Autonomous Driving[J/OL]. CoRR, 2017, abs/1708.03309.
<http://arxiv.org/abs/1708.03309>.
- [8] BIJELIC M, GRUBER T, RITTER W. Benchmarking Image Sensors Under Adverse Weather Conditions for Autonomous Driving[J/OL]. CoRR, 2019, abs/1912.03238.
<http://arxiv.org/abs/1912.03238>.
- [9] ZHANG M, ZHANG Y, ZHANG L, et al. DeepRoad: GAN-based Metamorphic Autonomous Driving System Testing[J/OL]. CoRR, 2018, abs/1802.02295.
<http://arxiv.org/abs/1802.02295>.
- [10] ZHOU H, LI W, KONG Z, et al. DeepBillboard: systematic physical-world testing of autonomous driving systems[C/OL] // ROTHERMEL G, BAE D. ICSE '20: 42nd International Conference on Software Engineering, Seoul, South Korea, 27 June - 19 July, 2020. [S.l.]: ACM, 2020 : 347 – 358.
<https://doi.org/10.1145/3377811.3380422>.
- [11] FILGUEIRA A, GONZÁLEZ-JORGE H, LAGÜELA S, et al. Quantifying the influence of rain in LiDAR performance[J/OL]. Measurement, 2017, 95 : 143 – 148.
<http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.10.009>.
- [12] HADJ-BACHIR M, DE SOUZA P. LIDAR sensor simulation in adverse weather condition for driving assistance development[J], 2019.
- [13] GOODIN C, CARRUTH D, DOUDE M, et al. Predicting the Influence of Rain on LIDAR in ADAS[J]. Electronics, 2019, 8(1) : 89.
- [14] ZHANG Y, ZHOU Z, DAVID P, et al. PolarNet: An Improved Grid Representation for Online LiDAR Point Clouds Semantic Segmentation[C/OL] // 2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR 2020, Seattle, WA, USA, June 13-19, 2020. [S.l.]: IEEE, 2020 : 9598 – 9607.
<https://doi.org/10.1109/CVPR42600.2020.00962>.

- [15] LANG A H, VORA S, CAESAR H, et al. PointPillars: Fast Encoders for Object Detection From Point Clouds[C/OL] //IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR 2019, Long Beach, CA, USA, June 16-20, 2019. [S.l.]: Computer Vision Foundation / IEEE, 2019: 12697–12705.
http://openaccess.thecvf.com/content_CVPR_2019/html/Lang_PointPillars_Fast_Encoders_for_Object_Detection_From_Point_Clouds_CVPR_2019_paper.html.
- [16] TOKAY A, WOLFF D, WOLFF K, et al. Rain gauge and disdrometer measurements during the Keys Area Microphysics Project (KAMP)[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2003, 20: 1460–1477.
- [17] LÖFFLER-MANG M, JOSS J. An Optical Disdrometer for Measuring Size and Velocity of Hydrometeors[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2000, 17: 130–139.
- [18] ULBRICH C W. Natural Variations in the Analytical Form of the Raindrop Size Distribution[J]. Journal of Applied Meteorology, 1983, 22: 1764–1775.
- [19] STRONG F C. Theoretical basis of Bouguer-Beer law of radiation absorption[J]. Analytical Chemistry, 1952, 24(2): 338–342.
- [20] FREHLICH R. Simulation of laser propagation in a turbulent atmosphere[J]. Applied Optics, 2000, 39(3): 393–397.
- [21] HERGERT W, WRIEDT T. The Mie theory: basics and applications[J], 2012, 169.
- [22] FUJIOKA T, OMAE M. Overview of control for automatic driving system[J]. Journal of The robotics society of Japan, 1999, 17(3): 328–333.
- [23] BEHERE S, TÖRNGREN M. A functional reference architecture for autonomous driving[J/OL]. Inf. Softw. Technol., 2016, 73: 136–150.
<https://doi.org/10.1016/j.infsof.2015.12.008>.
- [24] ZHU F, MA L, XU X, et al. Baidu Apollo Auto-Calibration System - An Industry-Level Data-Driven and Learning based Vehicle Longitude Dynamic Calibrating

- Algorithm[J/OL]. CoRR, 2018, abs/1808.10134.
<http://arxiv.org/abs/1808.10134>.
- [25] 冯洋, 夏志龙, 郭安, et al. 自动驾驶软件测试技术研究综述 [J]. 中国图象图形学报, 2021, 26(1): 13–27.
- [26] STATECZNY A, KAZIMIERSKI W, GRONSKA-SLEDZ D, et al. The Empirical Application of Automotive 3D Radar Sensor for Target Detection for an Autonomous Surface Vehicle's Navigation[J/OL]. Remote. Sens., 2019, 11(10): 1156.
<https://doi.org/10.3390/rs11101156>.
- [27] WANG H, WANG B, LIU B, et al. Pedestrian recognition and tracking using 3D LiDAR for autonomous vehicle[J/OL]. Robotics Auton. Syst., 2017, 88: 71–78.
<https://doi.org/10.1016/j.robot.2016.11.014>.
- [28] ZHANG Y, REN G, CHENG Z, et al. A Target Detection Algorithm for 3D Lidar Point Cloud[C] // 2019 2nd International Conference on Information Systems and Computer Aided Education (ICISCAE). 2019: 405–410.
- [29] MAGNIER V, GRUYER D, GODELLE J. Automotive LIDAR objects detection and classification algorithm using the belief theory[C/OL] // IEEE Intelligent Vehicles Symposium, IV 2017, Los Angeles, CA, USA, June 11-14, 2017. [S.l.]: IEEE, 2017: 746–751.
<https://doi.org/10.1109/IVS.2017.7995806>.
- [30] YAN Y, MAO Y, LI B. SECOND: Sparsely Embedded Convolutional Detection[J/OL]. Sensors, 2018, 18(10): 3337.
<https://doi.org/10.3390/s18103337>.
- [31] BISHENG Y, FUXUN L, RONGGANG H. Progress, challenges and perspectives of 3D LiDAR point cloud processing[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1509.
- [32] WEINMANN M. Preliminaries of 3D point cloud processing[G] // Reconstruction and Analysis of 3D Scenes. [S.l.]: Springer, 2016: 17–38.

- [33] WIEMANN T, NÜCHTER A, LINGEMANN K, et al. Automatic construction of polygonal maps from point cloud data[C] // 2010 IEEE Safety Security and Rescue Robotics. 2010: 1–6.
- [34] JOVANOVIĆ Ž, JAGODIĆ D, VUJIČIĆ D, et al. Java Spring Boot Rest WEB Service Integration with Java Artificial Intelligence Weka Framework[C] //. 2017: 323–327.
- [35] GUTIERREZ F. Spring Boot, Simplifying Everything[G] // Introducing Spring Framework. [S.l.]: Springer, 2014: 263–276.
- [36] ANDERSON C. Docker [software engineering][J]. Ieee Software, 2015, 32(3): 102–c3.
- [37] MARSHALL J S. The distribution of raindrops with size[J]. J. meteor., 1948, 5: 165–166.
- [38] AKSOY H. Use of gamma distribution in hydrological analysis[J]. Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences, 2000, 24(6): 419–428.
- [39] ASSOULINE S, MUALEM Y. The similarity of regional rainfall: a dimensionless model of drop size distribution[J]. Transactions of the ASAE, 1989, 32(4): 1216–1222.
- [40] RASSHOFER R H, SPIES M, SPIES H. Influences of weather phenomena on automotive laser radar systems[J]. Advances in Radio Science, 2011, 9(B. 2): 49–60.
- [41] HORVATH H. Gustav Mie and the scattering and absorption of light by particles: Historic developments and basics[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2009, 110(11): 787–799.
- [42] PARK S, MITCHELL J, BUBENZERN G. Rainfall characteristics and their relation to splash erosion[J]. Transactions of the ASAE, 1983, 29(3): 795–0804.
- [43] ULBRICH C W. Natural variations in the analytical form of the raindrop size distribution[J]. Journal of climate and applied meteorology, 1983, 22(10): 1764–1775.

-
- [44] ROSTANSKI M, GROCHLA K, SEMAN A. Evaluation of highly available and fault-tolerant middleware clustered architectures using RabbitMQ[C/OL] // GANZHA M, MACIASZEK L A, PAPRZYCKI M. Annals of Computer Science and Information Systems, Vol 2 : Proceedings of the 2014 Federated Conference on Computer Science and Information Systems, Warsaw, Poland, September 7-10, 2014. 2014 : 879 – 884.
<https://doi.org/10.15439/2014F48>.
- [45] GEIGER A, LENZ P, URTASUN R. Are we ready for autonomous driving? The KITTI vision benchmark suite[C/OL] // 2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Providence, RI, USA, June 16-21, 2012. [S.l.] : IEEE Computer Society, 2012 : 3354 – 3361.
<https://doi.org/10.1109/CVPR.2012.6248074>.

简历与科研成果

基本信息

邓靖琦，男，汉族，1997 年 12 月出生，黑龙江省牡丹江市人。

教育背景

2019 年 9 月 — 2021 年 6 月 南京大学软件学院

硕士

2015 年 9 月 — 2019 年 6 月 吉林大学软件学院

本科

学位论文原创性声明

任何收存和保管本论文的单位和个人，未经作者本人授权，不得将本论文转借他人并复印、抄录、拍照或以任何方式传播，否则，引起有碍作者著作权益的问题，将可能承担法律责任。

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人或集体已经发表或撰写的作品成果。本文所引用的重要文献，均已在文中以明确方式标明。本声明的法律结果由本人承担。

作者签名： 邓清琦
2021 年 5 月 21 日

《学位论文出版授权书》

本人完全同意《中国优秀博硕士学位论文全文数据库出版章程》（以下简称“章程”），愿意将本人的学位论文提交“中国学术期刊（光盘版）电子杂志社”在《中国博士学位论文全文数据库》、《中国优秀硕士学位论文全文数据库》中全文发表。《中国博士学位论文全文数据库》、《中国优秀硕士学位论文全文数据库》可以以电子、网络及其他数字媒体形式公开出版，并同意编入《中国知识资源总库》，在《中国博硕士学位论文评价数据库》中使用和在互联网上传播，同意按“章程”规定享受相关权益。

作者签名： 邓清琦
2021 年 5 月 21 日

论文题名	自动驾驶雨天场景点云数据扩增工具的设计与实现				
研究生学号	MF1932031	所在院系	软件学院	学位年度	2021
论文级别	☐ 硕士 ☒ 硕士专业学位 ☐ 博士 ☐ 博士专业学位 (请在方框内画勾)				
作者 Email	867256709@qq.com				
导师姓名	陈振宇 教授，冯洋 助理研究员				

论文涉密情况：

☒ 不保密

☐ 保密，保密期(_____年_____月_____日至_____年_____月_____日)

注：请将该授权书填写后装订在学位论文最后一页（南大封面）。

