arXiv:2303.05555v1 [cs.RO] 9 Mar 2023

浦项运河数据集：用于受限水域自主导航的多模态海事数据集

期刊标题 XX(X)：1–9©作者 2016 转载及许可信息：
s
a
gepub.co.uk/journalsPer
missions.nav DOI：10.1177/待定
www.sagepub.com/SAGE

Dongha Chung、Jonghwi Kim、Changyu Lee 和 Jinwhan Kim

摘要
本文介绍了一个多模态海事数据集及其数据采集流程，旨在促进受限水域环境中的自主导航。该数据集包含使用多种感知和导航传感器获取的测量数据，包括一台立体相机、一台红外相机、一台全景相机、三台激光雷达、一部船用雷达、一套全球定位系统以及一套姿态航向参考系统。数据采集路线全长 7.5 公里，途经韩国浦项的一条狭窄运河、内港和外港以及近海区域。数据采集在多种天气和视觉条件下进行。该数据集及其详细描述可通过 https://sites.google.com/view/pohang-canal-dataset 免费下载。

关键词
自主水面航行器、摄像头、激光雷达、船用雷达、全球定位系统、姿态航向参考系统、海事数据集

1 引言

自主车辆技术的最新进展，推动了人们对海事环境中自主导航的日益浓厚的兴趣。随着计算机视觉和深度学习的快速发展，先进感知传感器的开发使研究人员得以探索自主水面航行器（ASV）在海事领域的应用潜力。然而，与自动驾驶汽车等陆上应用不同，要在海事环境中获取数量充足、种类丰富的真实世界数据集颇具挑战。因此，研究人员和开发者在这一领域可用的此类数据集十分匮乏。

以往关于海事数据集的研究主要聚焦于计算机视觉应用，尤其是船舶检测和分类。虽然这些视觉数据集有助于开发海事计算机视觉算法，但要实现多传感器融合并确保运行可靠、稳健，还需要其他类型的感知数据和导航数据，并在船上同步采集。例如，在靠泊等对精度要求较高的任务中，激光雷达和相机可能发挥关键作用（Pereira等，2021年）、目标检测和避碰（Han等，2020年），以及在狭窄水道中的自主导航（Wang等，2019年）。此外，雷达能够探测远处的目标（Kim等，2021年），并可通过海岸线检测实现车辆定位（Han等，2019年）。因此，收集并分析多种感知和导航数据，对于开发适用于海事领域的高效自主导航系统至关重要。

本文介绍了一种多模态海事数据集，其中包含多种类型的感知和导航数据，旨在帮助提升受限水域环境中的自主导航能力，例如狭窄运河和港口区域。该数据集采集于韩国浦项，采集路线全长7.5公里，途经一条狭窄运河，左舷及近海区域。图1展示了用于数据采集的车辆和传感器套件，图2 则展示了本研究所用全部感知传感器采集的数据。车辆配备了两根GPS天线，分别位于前部和后部；姿态航向参考系统（AHRS）则安装在车辆后部。车辆前部安装了两台用作立体相机的可见光相机，以及一台红外相机。此外，车辆的前侧、左舷侧和右舷侧分别安装了一台激光雷达。正如图1所示，全景相机和船用雷达安装在车辆后部的垂直滑轨上。



图1。 用于数据采集的车辆

韩国科学技术院机械工程系

通讯作者： Jinwhan Kim，韩国科学技术院机械工程系 电子邮箱：jinwhan@kaist.ac.kr

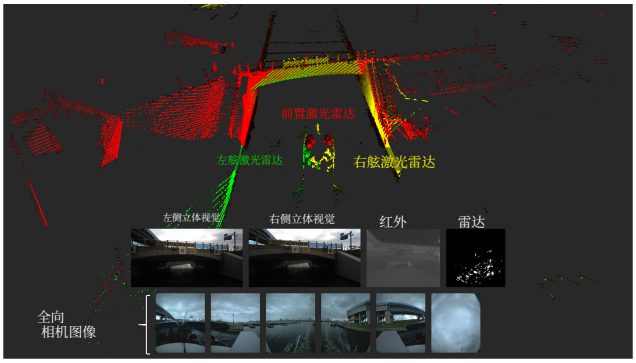


图 2。 数据集示例

本文其余部分安排如下。第2节总结了现有的海事环境相关开放数据集。第3 节介绍系统配置，包括硬件传感器系统和记录系统。第4节介绍本研究采用的传感器标定方法。第5节介绍数据集的配置与特征，包括环境条件和数据集结构。最后，第6节给出结论。

2 相关工作

真实世界数据集对于验证算法以及为基于深度学习的移动机器人应用提供学习材料至关重要。许多陆地数据集已被发布并用于评估性能，尤其是在同时定位与建图（SLAM）方面，以及用于数据密集型深度学习研究。这些数据集包含在各种环境中采集的感知数据和导航数据，例如使用无人地面车辆在公园和校园中采集的数据（Smith etal. 2009）、使用汽车在道路上采集的数据（Geigeret al.2012），以及使用无人机在室内采集的数据（Burri et al.2016）。为丰富这些数据集，研究人员探索了不同场景（Jeong et al. 2019），并采用了雷达等额外传感器（Barnes et al.2020；Kimet al. 2020；Burnettetal.2022）。

以往的海事数据集研究主要通过提供带有真实标注的图像数据，聚焦于目标检测和分类。例如，Zhang 等人（2015）提供了白天和夜间拍摄的船舶可见光与红外裁剪图像，用于分类任务。Bloisi 等人（2015）提供了从意大利威尼斯大运河沿岸建筑内的监控摄像机拍摄的图像，并配有边界框标注。此外，Prasad 等人（2017）提供了从岸上和船载位置拍摄的可见光与近红外视频，并附有地平线检测、目标检测和跟踪数据的真实标注。Ribeiro 等人（2019）提供了使用无人机拍摄的机载监控图像，并配有用于目标检测和跟踪的边界框标注。Bovcon 等人（2019）提供了带有天空、障碍物和水体语义分割标签的船载摄像机图像。Taipalmaa 等人（2019）则聚焦于利用船载摄像头拍摄的视觉图像进行水体分割。最后，Lin 等人（2022）介绍了模拟和真实场景中的三维激光雷达点云数据以及真实三维边界框，重点关注基于深度学习的目标检测。

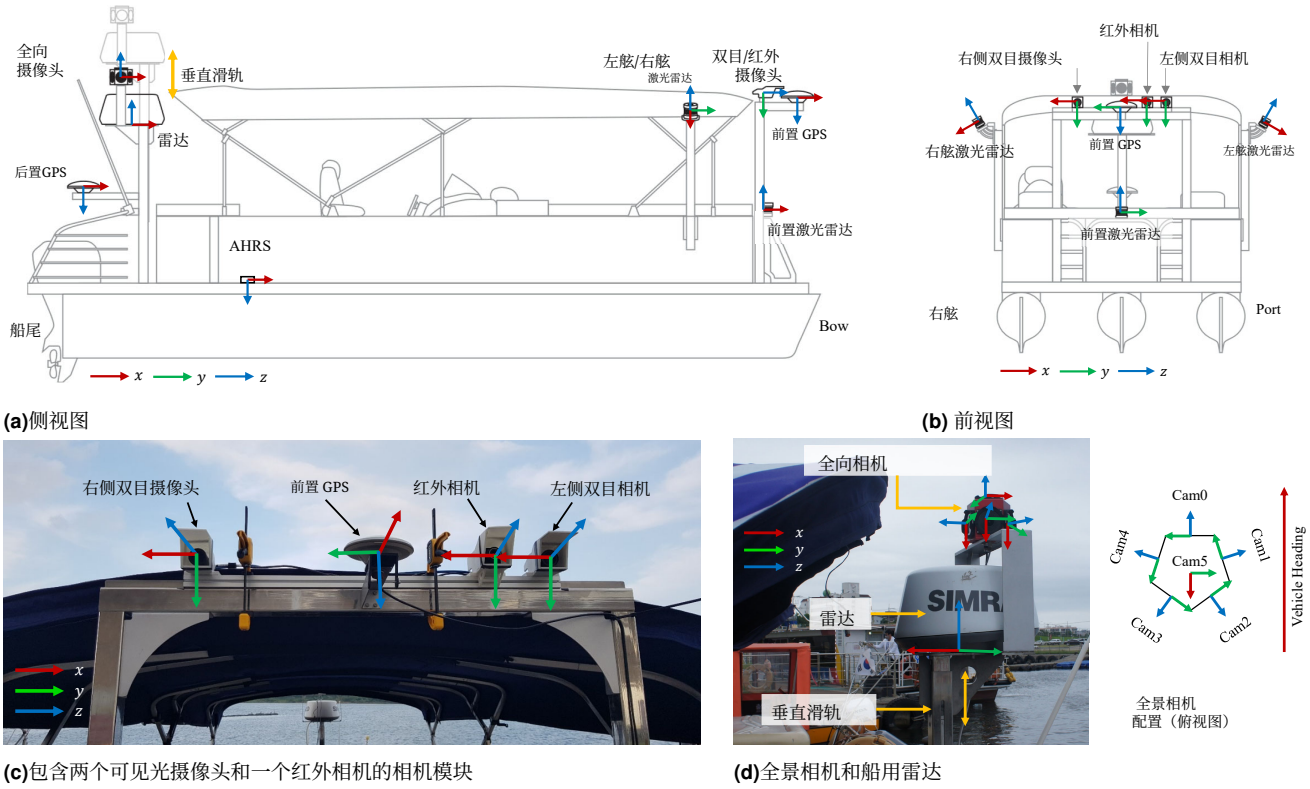
同时包含船载感知数据和导航数据的公开海事数据集十分匮乏。目前仅有少数数据集已公开，例如Bovcon et al. (2018) 和Chenget al.(2021)。前者提供立体摄像机图像、全球定位系统数据和惯性测量单元（IMU）数据，用于水道语义分割；后者则展示了使用小型无人水面艇在内陆水道不同天气条件下采集的船载感知数据和导航数据。该数据集包括一台立体相机、一台16线三维激光雷达、三部毫米波雷达、一台全球定位系统接收机以及一台船载惯性测量单元。它还提供水体分割的真实标注，以及使用全球定位系统和IMU数据获得的真实轨迹。

3 系统配置

3.1 传感器配置

车辆的传感器配置如图 3所示。研究中使用的车辆是一艘长 7.9 m、宽 2.6 m 的巡航船，重 1.7 吨，可搭载 12 人。车辆前后分别安装了两根 GPS 天线，基线长度为 6.8 m。它们连接至一套配备实时动态（RTK）接收机的全球导航卫星系统（GNSS），可提供 RTK 精度为 0.01 m 的位置数据 + 1 ppm，以及误差小于 0 的航向测量值。28°。GPS 数据的记录频率为 5 Hz。车辆后部的地板上安装了一套姿态航向参考系统（AHRS）。AHRS 提供的加速度测量分辨率为 0.02 mg，偏差为 0.04 mg；陀螺测量的分辨率为 0。003°/s，偏差为 8°/h；俯仰和横滚方向的姿态测量均方根误差为 0。5° 。AHRS 的磁力计使用配套软件进行了校准。AHRS 数据的记录频率为 100 Hz。

为增强对附近物体和安全隐患的检测能力，车辆前部和两侧安装了三台激光雷达。前部水平安装了一台64线激光雷达，用于检测路径上的障碍物或车辆。车辆左舷和右舷各安装了一台32线激光雷达，以扩大测量范围。这些侧向激光雷达相对于水平面向下倾斜 30°，用于检测水面上的小型物体，这些物体可能会威胁车辆运行。每台激光雷达的量程为120米，分辨率为0.3厘米，精度为1.0至5.0厘米。水平视场（FOV）为 360°，分辨率为2048；所有激光雷达的垂直视场均为33.2°。垂直分辨率因通道数而异（前置激光雷达为64通道，左舷和右舷激光雷达均为32通道）。每台激光雷达采集的点云数据均以每周期10 Hz的频率异步汇集。车辆尾部安装了一台波长为X波段（9.3 GHz至9.4 GHz）的调频连续波（FMCW）雷达。该雷达的量程为50至1654.8米，旋转速度为每秒1.0至1.3圈。



(a)侧视图 **(b)** 前视图

(c)包含两个可见光摄像头和一个红外相机的相机模块 **(d)**全景相机和船用雷达

图3。 硬件传感器配置：车辆右舷侧视图（a）和正视图（b）的示意图、相机模块的照片（c），以及安装在垂直滑轨上的全景相机和雷达（d）。坐标以红色（x）、绿色（y）和蓝色（z）箭头表示。

如图所示，相机模块3c安装在车辆前部，配备了两台可见光相机和一台红外相机，均装有3D打印镜头遮光罩。两台可见光相机组成一套立体相机，并通过触发线缆在硬件层面进行同步。两台相机以10 Hz的频率同时采集图像。红外相机的温度测量范围为-25至135°C，数据采集期间会在硬件层面进行自动热校准，以补偿设备温度变化。热图像以10 Hz的频率采集。车辆后部的垂直滑轨上安装了一台全景相机和一部船用雷达。车辆通过低矮桥梁下方时，滑轨保持在最低位置，并在需要获得更佳视野时手动升起。全景相机以10 Hz的频率同时采集六幅图像（五个水平视角和一个俯视图）。所有传感器的型号和详细规格均可在我们的数据集网站上查看。

3.2 数据采集系统

图4展示了数据采集过程的示意图，该过程涉及三台计算机，分别称为模块 A、模块 B 和模块 C。模块 A 记录全景相机拍摄的图像；模块 B 记录左、右立体图像、红外图像，以及前部、左舷和右舷激光雷达生成的点云；模块 C 则记录雷达图像、GPS信号和IMU数据。三台计算机的系统时间通过 Chrony（Curnow和Lichvar, 2014年）库进行了紧密同步，模块 A 和模块 B 的系统时间会定期与模块 C 同步。数据记录的启动和停止通过从模块 C 向模块 A 和模块 B 发送命令来完成。

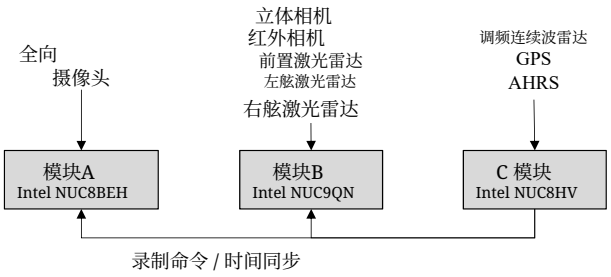


图4。 数据采集系统

为避免多个传感器同时传输数据时出现延迟和数据丢失，各模块的记录程序均经过专门设计，以提高效率。针对模块A中全景相机图像流转换为图像文件会拖慢记录进程的问题，图像流先保存为二进制文件，并在后处理中进行转换。模块B同时运行三个独立进程，分别记录立体图像对、红外图像以及来自三个激光雷达的数据。每个进程中都启用了多个线程，以防止数据丢失。另一方面，模块C只需为每项传感器测量运行一个单线程进程，因为每个传感器的数据量都相对较小。

4 传感器标定

4.1 相机内参标定

为了准确估计相机的内参数，使用了两块结构化标定板，分别用于可见光相机和红外相机。每台相机的内参标定均采用Zhang (2000所述的方法：为立体相机和全景相机中的可见光相机使用棋盘格图案标定板，并为红外相机使用一块定制的、能够反射红外光的标定板。

4.2 外参标定

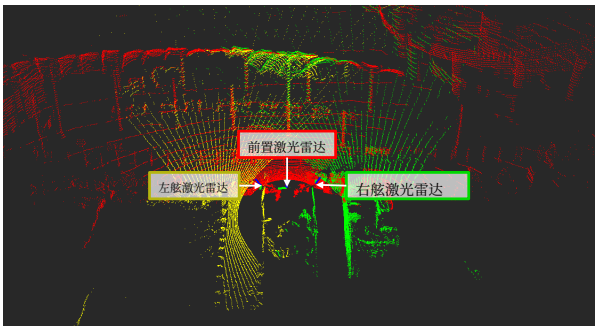
感知传感器之间的外参标定采用标定板或非结构化测量数据进行，同时考虑其测量范围的重叠情况以及实验环境的限制。对于立体相机，图像的重叠区域足够大，因此可使用标定板覆盖大部分共同可视区域。然而，由于全景相机位于车辆后部，车辆遮挡了图像中的若干部分，导致共同可视区域不足，无法进行可靠的标定。

由于车辆处于运动状态且传感器测量异步，因此采用运动中标定方法估计前置激光雷达与其他感知传感器之间的外参。该方法通过激光雷达 SLAM 构建点云地图，并根据 SLAM 结果估计激光雷达位姿。接下来，将传感器数据与点云地图进行匹配，以估计传感器在全局坐标系中的位姿（参见第4.2.2至4.2.3节）。根据测量时间戳对给定的激光雷达位姿进行插值，从而确定采集传感器数据时的激光雷达位姿。最后，利用估计出的激光雷达位姿和传感器在全局坐标系中的位姿计算外参。

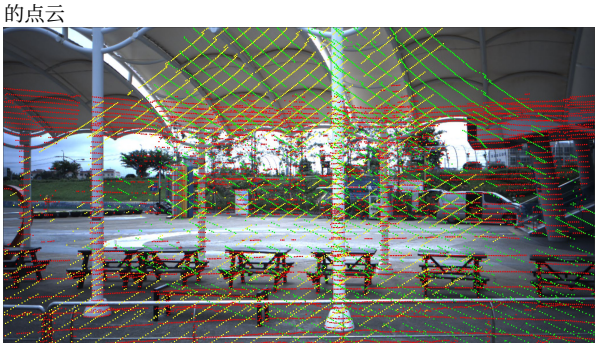
4.2.1 全景相机标定。全景相机中各摄像头的外参标定通过使用 ArUco标记（Romero-Ramirez 等，2018）实现，以改善图像之间的对应关系检测，因为图像间的重叠区域较窄。在 GTSAM（Dellaert，2012）中使用因子图框架，并将相机位姿节点和标定板的三维点节点纳入其中，从而实现精确标定。

4.2.2 激光雷达间标定。各激光雷达获取的点云如图5a所示。首先通过手动调整左舷和右舷激光雷达的旋转和平移，进行初始标定。随后，为实现前置/左舷激光雷达以及前置/右舷激光雷达之间的精细标定，采用广义迭代最近点（GICP）方法（Segal 等，2009）分别处理左舷和右舷的点云，并将其与前置激光雷达生成的点云地图对齐。

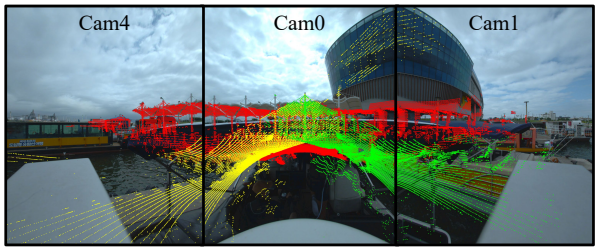
4.2.3 激光雷达到摄像头的标定。前置激光雷达与各摄像头之间的外参标定，是通过使用图像中经过仔细选取的点以及前置激光雷达生成的点云地图中对应的点，求解线性 PnP（透视 n 点）（Quan 和 Lan



(a)来自前方（红色）、左舷（黄色）和右舷（绿色）激光雷达的点云



(b) 点云投影到左侧双目相机上



(c)点云投影到全景相机上

图 5. 激光雷达数据及其在相机上的投影示例

1999）问题完成的。图5b 展示了激光雷达到左侧双目相机的标定结果，而图5c展示了全景相机的标定结果。

4.3 手眼标定

由于激光雷达与全球定位系统和姿态航向参考系统之间不存在感知相关性，我们采用了手眼标定方法（Tsai 和 Lenz，1989），对姿态航向参考系统与激光雷达之间以及全球定位系统进行外参标定。

4.3.1 姿态航向参考系统到激光雷达的标定。加速度计误差积分导致的位置漂移可能十分严重。然而，由于姿态航向参考系统根据重力和地磁力的方向提供姿态测量，因此可以精确测量姿态。鉴于这些限制，仅使用手眼标定方法求得姿态航向参考系统到激光雷达标定中的旋转分量，而相对平移则根据自主水面艇蓝图确定。该数据集包含特征丰富的码头区域附近的大幅旋转运动，因此对姿态航向参考系统的姿态测量值和激光雷达里程计进行了采样，以

通过求解手眼问题来估计相对旋转。

*4.3.2 AHRS*到*GPS*标定。AHRS与GPS之间的外参标定采用了激光雷达惯性里程计和GPS二维位姿测量。由于GNSS-RTK提供了精确的位置和航向信息，因此在相对位姿估计中同时考虑了平移和旋转。在码头附近，横滚和俯仰运动可以忽略不计，我们对数据进行采样，并利用激光雷达惯性里程计和GPS测量得到的二维位姿，计算AHRS到GPS的平移矩阵，T_G^A。该公式表示时刻 t_i 与 t_j，$T_{A_j}^{A_i}$的AHRS坐标系之间的变换矩阵，以及时刻 t_i 与 t_j，$T_{G_j}^{G_i}$的GPS坐标系之间的变换矩阵，如图6所示。图7 展示了外参标定结果，其中激光雷达点云基于GPS测量投影到卫星地图上。

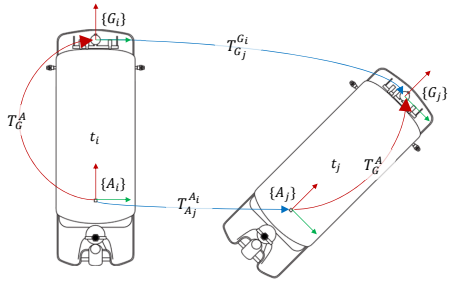


图6。时刻 t_i 和 t_j车辆的俯视图。AHRS和GPS坐标系分别表示为 {A} 和 {G}。

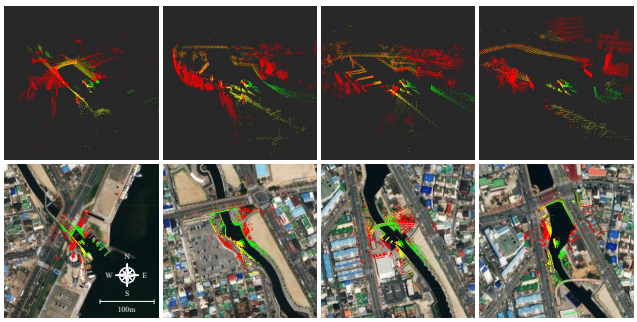


图7. 基于 GPS 数据的激光雷达点云及其在卫星地图上的投影

4.4 基准轨迹

虽然 GNSS-RTK 在大多数区域都能提供高精度的位姿信息，但在车辆经过桥梁下方的区域时会受到限制。因此，简单的全球导航卫星系统-惯性导航系统在这些区域可能不可靠。为解决这一问题，我们在 GTSAM 中实现的增量平滑与建图（iSAM）（Kaess 等，2008年）图优化同时定位与建图框架中，结合使用前置激光雷达测量值、GNSS-RTK 测量值和 AHRS 测量值。图优化同时定位与建图框架的图结构如图8所示。

本研究采用的激光雷达惯性里程计框架基于 LIO-SAM（Shan 等，2020年），并

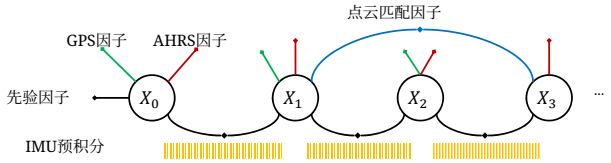
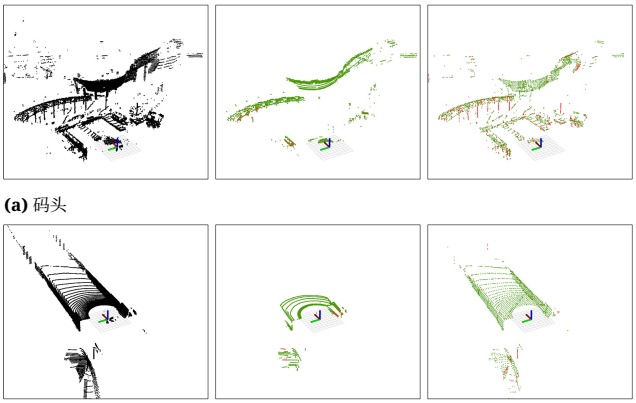


图8. 用于基准轨迹估计的因子图模型



(a) 码头

(b) 桥下

图9. 不同地点的特征提取结果对比。左侧图像展示原始点云，中间图像展示使用 LIO-SAM 的特征提取结果，右侧图像展示改进后的特征提取结果。绿色点表示面特征点，红色点表示角点。

对点云特征提取方法进行了修改。与许多物体都能以稠密点云形式检测到的城市环境不同，运河区域中的物体主要以稀疏点云形式检测到。此外，海事环境中的水面无法为激光雷达里程计提供充足的信息，因为水会吸收光线。因此，可靠的特征提取方法对于在海事环境中实现精确的激光雷达里程计至关重要。

LIO-SAM 中基于 LOAM（Zhang 和 Singh，2014年）的特征提取方法，根据一个点及其邻近点的曲率来判断该点是角点还是面特征点。然而，该方法经常会剔除邻近点较少或被遮挡的点，导致远处的点和细长杆状物体被剔除。为了提升运河区域的激光雷达里程计性能，我们改进了点剔除算法，跳过被遮挡的邻近点，并将杆状物体定义为角特征。图9 展示了 LIO-SAM 和改进算法的点云及特征提取结果。图10展示了使用 LIO-SAM 和改进方法从运河区域到内港区域的点云建图结果，并将其叠加在卫星地图上。

GPS因子通过插入从GPS获取的通用横轴墨卡托坐标和航向测量值创建，而AHRS因子则通过插入从AHRS获取的姿态测量值创建。然而，由于GPS测得的真北方向与AHRS测得的磁北方向不同，我们仅使用了根据AHRS姿态测量值估计的重力方向

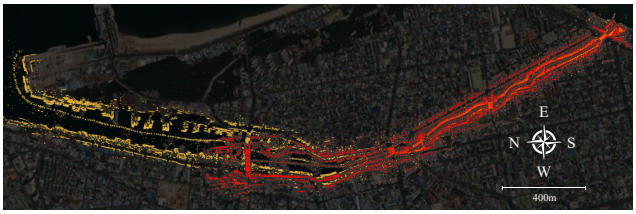


图10. 在运河区域至内港区域，使用 LIO-SAM（红色点云）和改进方法（黄色）进行激光雷达-惯性同步定位与建图的结果。

来校正车辆的横滚和俯仰。

5 运河数据集

研究所用数据采集自位于韩国的浦项运河。运河区域由多个区域组成，包括狭窄运河区、内港区、外港区和近海区域，全长 7.5 千米。图11 展示了实验地点的地图、车辆的轨迹以及采集数据示例。图中（b）、（c）和（d）列的图像分别对应位置 1、2、3 和 4，如图11所示。

5.1 实验环境

主运河区域宽约 15 至 30 米，周围环绕着公园和小型建筑。在该区域，激光雷达数据生成了密集且几何特征丰富的点云，而雷达数据大多被建筑物遮挡并含有噪声。内港区域分为两侧：西侧有鱼市场和商店，东侧则有造船厂。因此，许多渔船停靠在西侧，而东侧则停泊着各种尺寸的船只。该区域水体宽度为 50 至 100 米，激光雷达在远处采集到的点云较为稀疏。外港区域有海堤、客运码头和仓储建筑，附近还有大型邮轮、货船和海岸警卫队船只。在该区域，激光雷达数据几乎无法捕获陆上物体的点云，而雷达数据则清晰地显示了远处的海岸线。实验地点东南方有一座大型钢铁厂，从近海区域大多可以看到。由于航速约为 10 节，车辆在近海区域经历了较明显的横滚和俯仰运动；而在运河和港口区域，车辆速度为 5 至 7 节。出于安全考虑，夜间数据采集时移除了全景相机。关于各数据集的详细说明和特征，请访问我们的数据集网站。

5.2 数据集结构

每个数据序列的结构如图 12所示。所有传感器数据文件均与接收时间一同记录。每项传感器数据的时间戳要么以文本文件的形式保存，并与数据文件及其对应时间相关联；要么直接作为数据文件名。立体相机、红外相机、全景相机和雷达数据的时间戳均记录在各传感器对应的 timestamp.txt 文件中。这些时间戳文件以制表符分隔的格式记录每项数据的序列（即设为数据名称的序列）和 Unix 时间。每个激光雷达数据文件均以纳秒级时间戳命名。

5.2.1 GPS 数据从 GNSS-RTK 接收机接收的三条全球导航卫星系统消息分别为 GNGGA、GNHDT 和 GNRMC。为记录 GPS 数据，我们将这三条消息合并，并在 navigation/gps.txt 文件中为每个时间戳保存了连续的 11 个值。该文件记录的值包括 Unix 时间、GPS 时间、纬度、纬度半球（N/S）、经度、经度半球（E/W）、航向（以度为单位）、GPS 质量指示器、使用的卫星数量、水平精度因子和大地水准面高度。所有值均以制表符分隔的格式保存。

5.2.2 AHRS 数据 姿态航向参考系统记录了姿态、角速度和线性加速度数据，并以制表符分隔的格式在 navigation/ahrs.txt 文件中为每个时间戳保存了连续的 11 个值。这些值包括 Unix 时间、以四元数值（qx、qy、qz、qw）表示的姿态、x、y、z 方向上的角速度，以及 x、y、z 方向上的线性加速度。

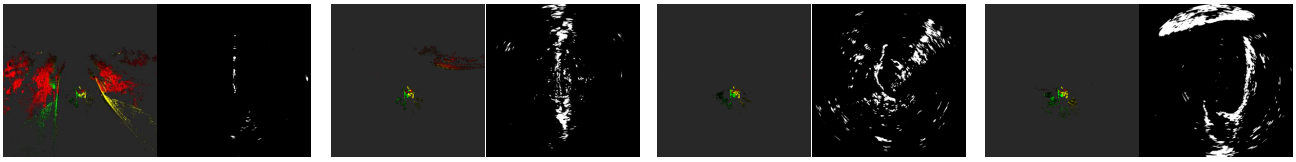
5.2.3 三维激光雷达数据 来自前置、左舷和右舷传感器的激光雷达数据分别存储在 lidar 目录下的不同文件夹中。前置激光雷达数据存储在 lidar front 文件夹中，而左舷和右舷激光雷达数据则分别存储在 lidar port 和 lidar starboard 文件夹中。在每个激光雷达文件夹中，imu.txt 文件包含来自内置惯性测量单元的惯性测量数据。imu.txt 文件为每个时间戳包含七个值，包括 Unix 时间、x、y、z 方向的角速度，以及 x、y、z 方向的线性加速度。

激光雷达点云数据以二进制文件形式提供，包含每个点的三维坐标、强度、传感器时间、反射率、环境光和距离值。每个点云中的点数等于通道数（前置激光雷达为 64，左舷和右舷激光雷达为 32）与轴向分辨率（本数据集中所有激光雷达数据均为 2048）的乘积。数据按逐环方式依序记录，每个点的环值通过点序号除以每环点数计算得出。激光雷达内部时钟记录每个点的传感器时间，可用于对点云进行去畸变。每个点云都以单独文件的形式保存在 points 目录中，文件名格式为 <time>.bin。我们在数据网站上介绍了使用 C++ 和 Matlab 读取这些二进制文件的详细方法。

5.2.4 雷达数据 雷达完成一个周期后，雷达图像会保存到 radar/images 文件夹中。由于雷达的旋转速率较低且随时间变化不规律，当平台移动时，图像很可能会发生偏斜。系统创建了两个时间戳文件，即 timestamp.txt 和 timestamp deg.txt，



(a)地图与车辆轨迹



(b) 激光雷达与雷达数据



(c)白天的可见光与红外图像



(d) 夜间的可见光与红外图像

图11。 数据采集地图、轨迹及数据示例

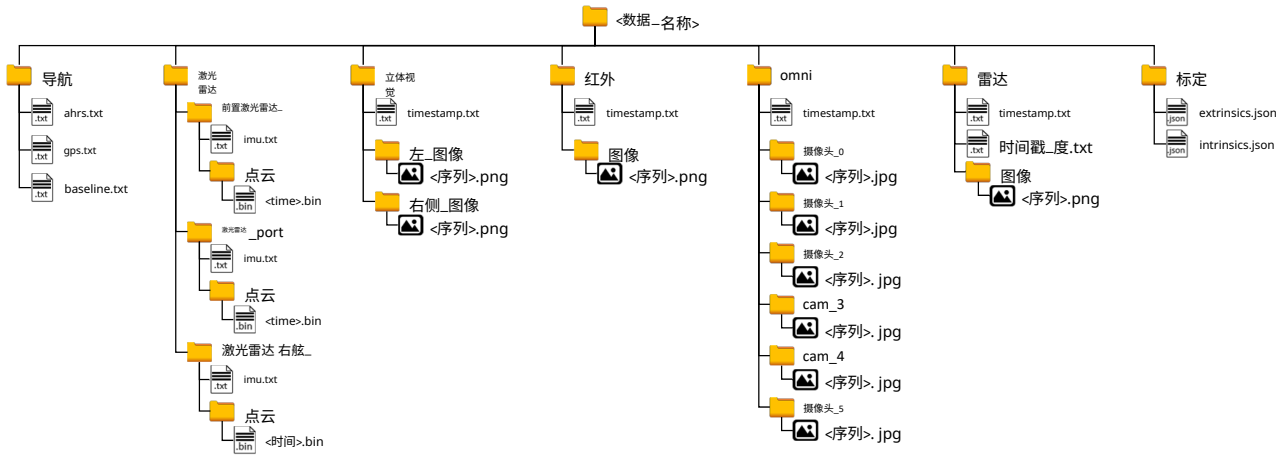


图12。 数据集结构

timestamp.txt 文件仅提供每个周期的图像序列和时间对，而 timestamp deg.txt 文件还提供每张图像中的更新角度和时间对。

5.2.5 立体相机数据立体相机拍摄的左图像和右图像分别存储在立体文件夹中的左图像文件夹和右图像文件夹内。由于每对立体图像都是同步拍摄的

表 1. 数据序列列表。传感器标记为 L（激光雷达）、R（雷达）、S（立体相机）、I（红外相机）、O（全景相机）和 N（姿态航向参考系统和全球定位系统）

数据名称	描述	路径长度	传感器套件	问题
pohang00	白天	7.43 千米	L、R、S、I、O、N	无实时动态定位的全球定位系统
pohang01	夜间	7.46 千米	L、R、S、I、N	不稳定且缺失的 GPS 数据
pohang02	白天	7.25 千米	L、R、S、I、O、N	不稳定的 GPS 数据
pohang03	白天	7.37 千米	L、R、S、I、O、N	-
pohang04	白天	7.24 千米	L、R、S、I、O、N	-
pohang05	夜间	6.86 千米	L、R、S、I、N	-

，timestamp.txt 中的序列值表示同一时间戳对应的左、右图像文件。图像以 PNG 格式保存，分辨率为 2048×1080 像素。

5.2.6 红外相机数据红外图像存储在 infrared/images文件夹中。图像以16位PNG格式记录，分辨率为 640×512像素，编码为14位热数据。每个像素的温度可通过以下公式计算：

$$t = 0.04p - 273.15 \tag{1}$$

其中，p 为像素值，t 为对应的摄氏温度。数据采集频率设置为10 Hz，但由于热标定，图像之间的部分间隔比其他间隔更长。

5.2.7 全向相机数据六个全向相机拍摄的图像存储在全向相机文件夹中的相机 0、相机 1、相机 2、相机 3、相机 4和相机5 文件夹内。与立体相机数据类似，timestamp.txt 中的序列值表示六台相机在同一时间值下同步采集的对应图像。每张图像均以 JPG 格式存储，分辨率为 2464×2048 像素。

5.2.8 标定校准文件夹包含两个文件：extrinsics.json 和 intrinsics.json，分别提供外参和内参校准参数。extrinsics.json 文件包含用于描述姿态航向参考系统传感器与其他各传感器之间关系的参数。另一方面，intrinsics.json 文件包含每台相机的内参校准参数，例如焦距、主点和畸变系数。

5.2.9 基准轨迹 基准轨迹以制表符分隔的格式保存，每个时间戳对应八个连续值。这些值包括 Unix 时间、以四元数 (qx, qy, qz, qw) 表示的方向，以及平移量 (x, y, z)。轨迹数据存储在 navigation/baseline.txt 文件中。

5.3 数据序列与已知问题

该数据集包含六个数据序列，其中四个为日间序列，两个为夜间序列，如表1所示。由于技术问题，序列 `pohang00` 和`pohang02` 的 GPS 数据采集时未进行 RTK 测量，序列`pohang01` 在运行期间则缺少 GPS 数据。

5.4 数据播放器

受Jeong 等人(2019) 的启发，我们为 ROS 环境提供了数据集播放器。源代码和描述可在 https://github.com/dhchung/rosmsg player 上找到。

6 结论

本文介绍了一个多模态海事数据集，其中包含在各种海事环境中采集的连续船载导航数据和感知数据。该数据集包括由一台配备两根GPS天线的GNSS RTK 接收机获取的 GPS 数据，以及 AHRS数据。此外，为满足海事环境中对不同特性和测量范围的各类感知传感器的需求，该数据集还包括三台激光雷达、一部船用雷达、一台立体相机、一台红外相机和一台全景相机。该数据集旨在促进全尺寸自主导航研究，并可应用于多个领域，包括传感器融合、结构重建与评估，以及其他机器人应用。

致谢

本研究得到 AVIKUS 公司和浦项市的支持。我们衷心感谢他们对本研究的支持和积极参与。

参考文献

Barnes D、Gadd M、Murcutt P、Newman P 和 Posner I（2020）牛津雷达 RobotCar 数据集：牛津 RobotCar 数据集的雷达扩展。发表于：*IEEE* 国际机器人与自动化会议（*ICRA*）论文集。巴黎。网址：https://arxiv.org/abs/1909.01300。

Bloisi DD、Iocchi L、Pennisi A 和 Tombolini L（2015）Argos-威尼斯船只分类。发表于：*2015* 年第十二届 *IEEE* 高级视频与基于信号的监控国际会议（*AVSS*）。第 1–6 页。DOI: 10.1109/AVSS.2015.7301727。

Bovcon B、Mandeljc R、Per˘s J 和 Kristan M（2018）基于惯性测量单元辅助语义分割的无人水面艇立体障碍物检测。《机器人与自主系统》104：1–13。DOI: https://doi.org/10.1016/j.robot.2018. 02.017。网址: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921889017305808。

Bovcon B、Muhovi˘c J、Per˘s J 和 Kristan M（2019）用于训练深度 USV 障碍物检测模型的 MASTR1325 数据集。载于：*2019*年*IEEE/RSJ*智能机器人与系统国际会议（*IROS*）。第 3431–3438 页。DOI:10.1109/ IROS40897.2019.8967909。

Burnett K、Yoon DJ、Wu Y、Li AZ、Zhang H、Lu S、Qian J、Tseng WK、Lambert A、Leung KYK、Schoellig AP 和 Barfoot TD（2022）Boreas：多季节自动驾驶数据集 DOI:10.48550/ARXIV.2203.10168。网址 https://arxiv.org/abs/2203.10168。Burri M、Nikolic J、Gohl P、Schneider T、Rehder J、Omari S、Achte- lik MW 和 Siegwart R（2016）EuroC微型飞行器数据集。《国际机器人研究杂志》35(10)：1157–1163。DOI:10.1177/0278364915620033。网址 https://doi.org/10.1177/0278364915620033。Cheng Y、Jiang M、Zhu J 和 Liu Y（2021）我们是否已准备好在内陆水道中使用无人水面艇？USVInland多传感器数据集与基准。《*IEEE*机器人与自动化快报》6(2)：3964–3970。DOI:10.1109/LRA.2021. 3067271。Curnow R 和 Lichvar M（2014）Chrony。网址https://chrony.tuxfamily.org。Dellaert F（2012）因子图与 GTSAM：实践入门。Geiger A、Lenz P 和 Urtasun R（2012）我们是否已准备好实现自动驾驶？KITTI视觉基准套件。载于：*2012*年*IEEE*计算机视觉与模式识别会议。第 3354–3361 页。DOI:10.1109/CVPR.2012.6248074。Han J、Cho Y 和 Kim J（2019）利用船用雷达实现无人水面艇在GPS受限环境中的海岸SLAM。《*IEEE*海洋工程学报》44(2)：300–309。DOI:10.1109/JOE. 2018.2883887。Han J、Cho Y、Kim J、Kim J、Son Ns 和 Kim SY（2020）ARAGON无人水面艇的自主碰撞检测与规避：开发与实地测试。《现场机器人学》37(6)：987–1002。DOI:https://doi.org/10.1002/rob. 21935。网址 https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/rob.21935。Jeong J、Cho Y、Shin YS、Roh H 和 Kim A（2019）涵盖高度多样化城市环境、配备多层级传感器的复杂城市数据集。《国际机器人研究杂志》38(6)：642–657。DOI:10.1177/0278364919843996。网址 https://doi.org/10.1177/0278364919843996。Kaess M、Ranganathan A 和 Dellaert F（2008）iSAM：增量平滑与建图。《*IEEE*机器人学汇刊》24(6)：1365–1378。DOI:10.1109/TRO.2008.2006706。Kim G、Park YS、Cho Y、Jeong J 和 Kim A（2020）MulRan：用于城市地点识别的多模态测距数据集。载于：*2020*年*IEEE*国际机器人与自动化会议（*ICRA*）。第 6246–6253 页。DOI:10.1109/ICRA40945.2020. 9197298。Kim K、Kim J 和 Kim J（2021）利用相机与雷达测量，在海事环境中实现多目标检测的鲁棒数据关联。《*IEEE*机器人与自动化快报》6(3)：5865–5872。DOI:10.1109/LRA.2021.3084891。Lin J、Diekmann P、Framing CE、Zweigel R 和 Abel D（2022）基于深度学习的海事环境感知。*IEEE*智能交通系统汇刊：1–11。DOI:10.1109/TITS.2022.3140933。Pereira MI、Claro RM、Leite PN 和 Pinto AM（2021）推进自主水面航行器：用于基于停靠的结构识别与评估的三维感知系统。《*IEEE*开放获取》9：53030–53045。DOI:10.1109/ACCESS.2021. 3070694。Prasad DK、Rajan D、Rachmawati L、Rajabally E 和 Quek C（2017）用于海事环境中目标检测与跟踪的光电传感器视频处理：综述。*IEEE*智能交通系统汇刊18(8)：1993–2016。DOI:10.1109/TITS.2016.2634580。Quan L 和 Lan Z（1999）线性n点相机位姿确定。*IEEE*模式分析与机器智能汇刊21(8)：774–780。DOI:10.1109/34. 784291。Ribeiro R、Cruz G、Matos J 和 Bernardino A（2019）机载海事监视环境数据集。*IEEE*视频技术电路与系统汇刊29(9)：2720–2732。DOI:10.1109/TCSVT.2017.2775524。Romero-Ramirez F、Mu˜noz-Salinas R 和 Medina-Carnicer R（2018）快速检测方形基准标记。图像与视觉计算 76。DOI:10.1016/j.imavis.2018. 05.004。Segal A、H¨ahnel D 和 Thrun S（2009）广义ICP。载于：Trinkle J、Matsuoka Y 和 Castellanos JA（编）机器人学：科学与系统。麻省理工学院出版社。ISBN 978-0-262-51463- 7。网址 https://dblp.uni-trier.de/db/conf/rss/rss2009.html#SegalHT09。Shan T、Englot B、Meyers D、Wang W、Ratti C 和 Rus D（2020）Lio-sam：通过平滑与建图实现紧耦合激光雷达惯性里程计。载于：*2020*年*IEEE/RSJ*智能机器人与系统国际会议（*IROS*）。第5135–5142页。DOI:10.1109/IROS45743.2020.9341176。Smith M、Baldwin I、Churchill W、Paul R 和 Newman P（2009）新学院视觉与激光数据集。《国际机器人研究杂志》28(5)：595–599。DOI:10. 1177/0278364909103911。网址 https://doi.org/10.1177/0278364909103911。Taipalmaa J、Passalis N、Zhang H、Gabbouj M 和 Raitoharju J（2019）面向自主无人水面艇的高分辨率水体分割：一种新型数据集及评估。载于：*2019*年第*29*届*IEEE*信号处理机器学习国际研讨会（*MLSP*）。第1–6页。DOI:10.1109/MLSP. 2019.8918694。Tsai R 和 Lenz R（1989）一种用于实现完全自主且高效的三维机器人手眼标定的新技术。*IEEE*机器人与自动化汇刊 5(3)：345–358。DOI: 10.1109/70.34770。Wang W、Gheneti B、Mateos LA、Duarte F、Ratti C 和 Rus D（2019）Roboat：用于城市水道的自主水面航行器。载于：*2019*年*IEEE/RSJ*智能机器人与系统国际会议（*IROS*）。第6340–6347页。DOI: 10.1109/IROS40897.2019.8968131。Zhang J 和 Singh S（2014）Loam：实时激光雷达里程计与建图。载于：机器人学：科学与系统。Zhang MM、Choi J、Daniilidis K、Wolf MT 和 Kanan C（2015）Vais：用于可见光与红外光谱海事图像识别的数据集。载于：*2015*年*IEEE*计算机视觉与模式识别会议研讨会（*CVPRW*）。第10–16页。DOI:10.1109/CVPRW.2015.7301291。Zhang Z（2000）一种灵活的新型相机标定技术。*IEEE*模式分析与机器智-能汇刊22(11)：1330–1334。DOI:10.1109/34.888718。