

doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2020.06.007

车载移动三维激光扫描系统的设计与实现

沈蔚^{1,2,3}, 惠笑^{1,2,3}, 崔晓冬^{1,2,3*}, 栾奎峰^{1,2,3}, 朱卫东^{1,2,3}, 张进^{1,2,3}

(1. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306; 2. 上海河口海洋测绘工程技术研究中心, 上海 201306;

3. 上海海洋大学 海洋科学与技术实验教学示范中心, 上海 201306)

摘要: 车载移动激光雷达扫描系统由脉冲激光源、测距探测接收器、系统控制处理器和光机扫描器组成, 并集成定位定姿系统 (Position and Orientation System, POS)。本文以自主研发的车载激光扫描仪为研究对象, 阐述了扫描系统的软硬件组成与工作流程, 并对实验结果进行了精度评定。实验表明, 本文设计的车载移动三维激光扫描系统能有效准确地获取目标物的三维点云数据, 未来可在海岸带海岛礁测绘、港口码头测量、近岸工程变形监测中发挥重大作用。

关键词: 车载移动三维激光扫描系统; 点云数据; POS 系统; 激光扫描仪

中图分类号: P225.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-2029 (2020) 06-0048-05

激光雷达扫描系统可以高效、快速地获取目标物的外部信息, 目前已广泛应用于测绘行业。依据扫描系统载体, 该系统可分为机载、车载和船载 3 类^[1-2]。由于激光雷达扫描系统的独特优势, 车载激光雷达扫描系统在海岸带海岛礁测绘、港口码头测量、近岸工程变形监测中发挥了重要作用。汪连贺^[3]使用了奥地利 RIEGL 公司的 VZ1000 激光扫描仪与中海达 iStreet 影像采集子系统进行了海岛礁测量, 并将获取数据与 RTK 数据比对, 进行了精度分析。李杰等^[4]使用 Optech ILRIS-LR 激光扫描仪对海岛海岸带进行了动态的远距离测量, 并获取了三维信息和回波强度信息, 实现了车载扫描系统对海岸带信息的高精度采集。本文阐述了车载激光扫描系统的硬件和软件设计, 点云三维坐标的解算流程, 并对解算点云进行 RTK 比对, 验证了车载移动三维激光扫描系统的较高精度。

1 系统设计

1.1 工作原理与硬件组成

对于车载激光扫描系统而言, 通过 GPS 和 IMU 获得航迹上激光发射中心的空间坐标和设备的空间姿态, 内插后可以获得任何时刻激光光束的姿态和发射中心的空间坐标, 结合激光扫描仪获取的发射中心到地面物体的距离和扫描角度, 可以求得每一个激光脚印点的空间三维坐标, 实现对目标物的三维建模。

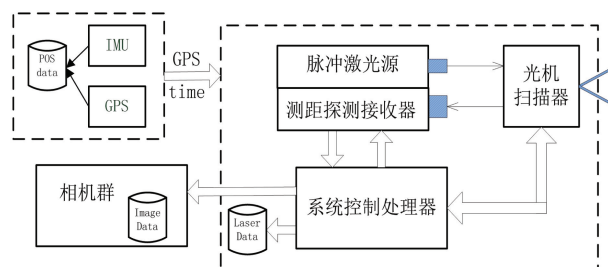


图1 车载三维激光扫描系统组成

收稿日期: 2020-06-30

基金项目: 上海市科委重点研发资助项目 (17DZ1204902)

作者简介: 沈蔚 (1977-), 男, 博士, 教授, 主要从事海洋测绘与遥感的科研与教学。E-mail: wshen@shou.edu.cn

通讯作者: 崔晓冬 (1996-), 男, 硕士, 主要从事三维点云处理研究。E-mail: xiaodongcui1996@163.com

船载移激光雷达扫描系统由脉冲激光源、测距探测接收器、系统控制处理器和光机扫描器组成, 外联 IMU、GPS 定位系统 (如图 1 所示)。

(1) 本系统的激光扫描仪采用中科院技术物理研究所研制的船载激光雷达主机系统, 回波信息包含距离信息、回波次数、回波脉宽、POS 授时数据等。激光扫描仪主要参数如表 1 所示, 扫

描距离最远可达 2 000 m, 精度可达 4 cm @1 000 m, 且可提供 100°开角的扫描视场, 能够满足海上复杂作业情况的需要。

(2) IMU 传感器采用 Octans III 光纤罗经, 能够提供 0.01°精度的横摆角、纵摇角改正参数和 0.1°精度的航向信息, 其主要参数如表 2 所示。

表 1 激光扫描系统主要参数

激光波长	测距方式	测距精度	量程范围	激光发射频率	激光发散度	视场角	扫描方式
1 064 nm	脉冲式、多次回波	4 cm @1 000 m	5 ~ 2 000 m	50 ~ 300 kHz	0.3 mrad	100°	旋转四面镜扫描

表 2 Octans III 光纤罗经主要参数

航向精度			升沉 / 横摆 / 纵摆		纵摇 / 横摆	
精度	分辨率	稳定时间	动态精度	精度	量程	分辨率
0.1° × Secant 纬度	0.01°	< 5 min	0.01°	5 cm 或 5%	无限制	0.001°

1.2 硬件系统安装

(1) 船载测量系统各传感器安置在稳定的船载平台。激光扫描仪开角水平向上最大为 52°, 向下为 48° (如图 2 所示)。为避免扫描视场受到干扰, 安装时需对仪器进行架高。

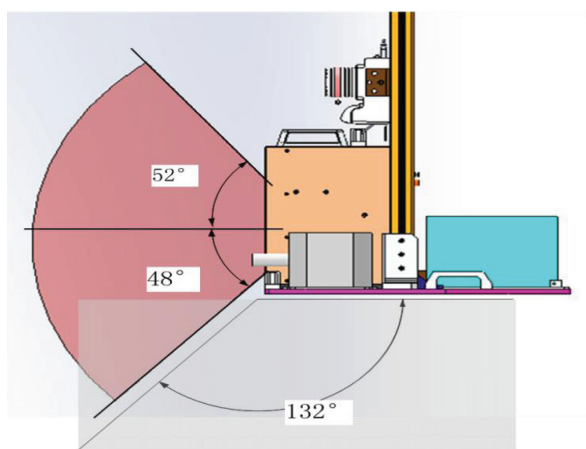


图 2 激光出射角度示意图

(2) 使用全站仪测量 GPS 天线中心和激光扫描仪中心相对于 IMU 中心的偏移量, 量取 IMU 直

角坐标系与激光扫描仪直角坐标系三轴的旋转角度。为保证坐标解算的准确性, 需对安置角进行检校^[5]。

1.3 软件系统

软件系统由激光扫描仪配套的数据采集软件和自主开发的点云解算软件组成。采集软件可获取距离信息、回波次数、回波脉宽、授时数据和扫描角度等。点云解算软件由 IMU 处理模块、GPS 处理模块和点云解算模块组成。

1.4 工作流程

激光扫描系统各传感器安装在稳定的船载平台^[6], 完成测线布设、GPS 基准站架设和偏移参数测量后, 进行船载测量。GPS 基准站的开机时间应早于 POS 设备的开机时间、晚于 POS 设备关机时间。获取 IMU 与 GPS 数据内插后, 结合激光雷达扫描数据, 可进行三维坐标的解算工作。完整的船载测量系统工作流程如图 3 所示。

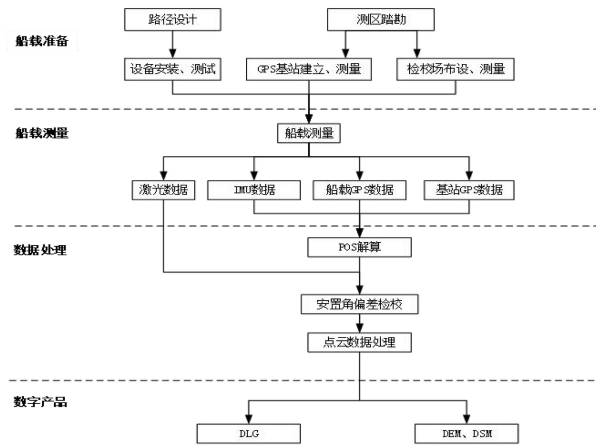


图 3 车载测量系统工作流程

2 点云解算

从激光雷达的原始测距信息到三维点云数据，主要分为两个阶段：第一阶段为时间匹配，第二阶段为坐标计算^[7]。

2.1 时间匹配

由于车载激光雷达的采集频率远高于 GPS 和 IMU 传感器，需要对 POS 数据进行内插后得到任意时刻激光波束的姿态信息和空间位置信息。结合回波的距离信息和扫描角度，可准确求得激光脚点的三维坐标。严格的时间匹配是坐标解算的前提^[8-9]。

2.2 坐标解算

坐标解算涉及多个坐标系，激光雷达坐标系、IMU 坐标系、当地坐标系和 WGS84 坐标系^[10]。解算前需量取 GPS 和激光扫描仪相对于 IMU 的坐标中心偏移量，以及激光扫描仪与姿态传感器之间的坐标旋转角。坐标解算表达式为：

$$\begin{bmatrix} X_{84} \\ Y_{84} \\ Z_{84} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{GPS} \\ Y_{GPS} \\ Z_{GPS} \end{bmatrix} + R \left[R_{IN} \left[R_{LI} \cdot R_L \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ D \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X_{LI} \\ \Delta Y_{LI} \\ \Delta Z_{LI} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta X_{GI} \\ \Delta Y_{GI} \\ \Delta Z_{GI} \end{bmatrix} \right] \right] \quad (1)$$

式中： X_{84}, Y_{84}, Z_{84} 为 POS 系统的 GPS 天线中心的 WGS-84 坐标， R_L 为激光的旋转矩阵。设激

光波扫描仪到目标物的距离为 D ，激光扫描仪瞬时坐标系到激光扫描仪直角坐标系束在瞬时坐标系下的出射角为 θ ，则 R_L 的表达式为：

$$R_L = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2)$$

在 IMU 直角坐标系中，船舶航行方向为 X 轴， Y 轴为激光扫描方向， Z 轴与 XOY 构成右手系，垂直于 XOY 面向上。 $\Delta X_{GI}, \Delta Y_{GI}, \Delta Z_{GI}$ 为 GPS 天线中心到 IMU 传感器中心的偏移量； $\Delta X_{LI}, \Delta Y_{LI}, \Delta Z_{LI}$ 为激光扫描仪中心到 IMU 中心的三个轴的偏移量。 R_{LI} 为激光扫描仪直角坐标系到 IMU 直角坐标系的旋转矩阵，为确保点云数据的精准度，需进行检校，获取精确的安置角， R_{LI} 为：

$$R_{LI} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & -\sin \beta \\ 0 & \sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

R_{IN} 为 IMU 直角坐标系到当地坐标系的旋转矩阵，由 IMU 提供的 *roll*, *pitch*, *heading* 三个参数构成，形式与 R_{LI} 一致，*roll*, *pitch*, *heading* 分别对应式中的 α, β, γ 。

R 为当地坐标系到 WGS-84 坐标系的旋转矩阵，公式为：

$$R = \begin{bmatrix} -\cos L \sin B & -\sin L & -\cos L \cos B \\ -\sin L \sin B & \cos L & -\sin L \cos B \\ \cos B & 0 & -\sin B \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中： B, L, H 分别是纬度、经度和海拔高。

3 精度分析

为检验车载激光扫描系统精度，本文开展了某河道车载移动激光扫描实验，经过完整的采集和处理流程后得到的三维点云如图 4 所示。对车载激光扫描仪获取的特征点坐标与 RTK 实测值进行比对（如图 5 所示），其平面误差， X 方向上最大误差为 0.07 m，中误差为 0.020 5； Y 方向最

大误差为 0.06 m, 中误差为 0.023 2。高程误差, Z 方向上最大误差为 0.09 m, 中误差为 0.024 3。高程误差略高于平面误差。



图 4 点云数据解算结果

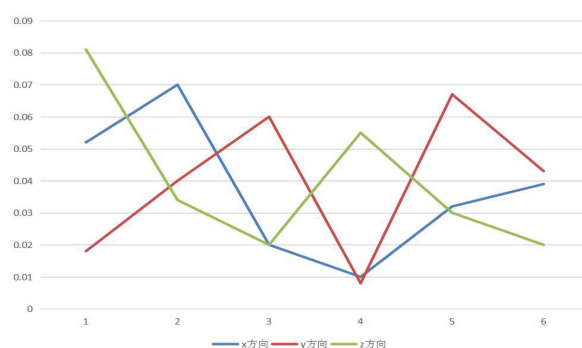


图 5 精度评定检验结果

4 结 论

本文首先阐述了船载激光扫描系统的硬件和软件设计, 系统的工作流程; 并对解算的点云坐标与 RTK 实测值进行比对, 其平面和高程最大误差不超过 9cm, 验证了船载移动三维激光扫描系统的较高精度。通过实验研究证明, 本文设计的船载激光扫描系统, 软硬件性能可靠, 数据精度满足行业标准要求, 可广泛应用于海岸带、海岛礁、港口码头、航道、桥梁测绘等领域。

参考文献:

- [1] 沈严, 李磊, 阮友田. 车载激光测绘技术 [J]. 红外与激光工程, 2009, 38(3): 438-440.
- [2] 胡耀锋, 张志媛, 林鸿. 利用机载 LiDAR 测绘大比例尺数字地形图的可行性研究 [J]. 测绘通报, 2015(5): 87-90.
- [3] 汪连贺. 三维激光移动测量系统在海岛礁测量中的应用 [J]. 海洋测绘, 2015, 35(5): 79-82.
- [4] 李杰, 唐秋华, 丁继胜, 等. 船载激光扫描系统在海岛测绘中的应用 [J]. 海洋湖沼通报, 2015(3): 108-112.
- [5] 沈蔚, 帅晨甫, 惠笑, 等. 船载移动激光三维测量系统安置角偏差检校 [J]. 测绘通报, 2020(2): 126-130.
- [6] Scouarnec R L, Touzé, Thomas, Lacambre J B, et al. A new reliable boresight calibration method for mobile laser scanning applications [J]. ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2014, XL-3/W1(3): 67-72.
- [7] 徐文学, 田梓文, 杨建昌, 等. 船载激光扫描点云数据坐标解算方法研究 [J]. 海洋科学进展, 2018, 36(4): 578-585.
- [8] 王胜平, 周丰年, 刘大伟, 等. 船载三维激光扫描数据时空配准方法研究 [J]. 现代测绘, 2015, 38(3): 7-10.
- [9] 田祥瑞, 徐立军, 徐腾, 等. 车载 LiDAR 扫描系统安置误差角检校 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(10): 3292-3297.
- [10] LE SCOUARNEC R, TOUZÉ T, LACAMBRE J B, et al. A new reliable boresight calibration method for mobile laser scanning applications [C]//ISPRS International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2014: 67-72.

Design and Implementation of a Ship-borne Moving 3D Laser Scanning System

SHEN Wei^{1,2,3}, HUI Xiao^{1,2,3}, CUI Xiao-dong^{1,2,3}, LUAN Kui-feng^{1,2,3}, ZHU Wei-dong^{1,2,3}, ZHANG Jin^{1,2,3}

1. *College of Marine Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;*

2. *Shanghai Engineering Research Center of Estuarine and Oceanographic Mapping, Shanghai 201306, China;*

3. *Experimental Teaching Demonstration Center for Marine Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China*

Abstract: The ship-borne shift Lidar scanning system is composed of pulse laser source, ranging detection receiver, system control processor and optical machine scanner, and integrated position and Orientation system (POS). In this paper, the hardware and software components and working flow of the scanning system are introduced in detail, and the accuracy of the experimental results is evaluated. Experiment results show that the 3D laser scanning system designed in this paper can effectively and accurately obtain the 3D point cloud data of the target object, and will play an important role in the mapping of coastal islands and reefs, measurement of ports and wharfs, and monitoring of the deformation of near-shore projects in the future.

Key words: ship-borne mobile 3D laser scanning system, point cloud data, POS system, laser scanner