文章编号:1001-5078(2022)03-0330-06

· 激光应用技术 ·

基于 C++ 的距离选通激光成像雷达系统软件设计

曲思锦,杨 刚,崔子浩,毕宗杰,田兆硕 (哈尔滨工业大学(威海)船海光电装备研究所,山东威海 264209)

摘 要:本文基于 C++编程语言设计了距离选通激光成像雷达三维点云实时成像软件。软件以距离选通激光成像雷达成像原理为基础,实现了激光器和延时器的时序控制、点云数据的高速处理、滤波去噪以及三维图像的实时显示。基于自研硬件设备,利用本文设计的软件,对距离为 700 m 的建筑进行了三维成像实验。实验过程中,该软件能够实现多参数实时控制及目标三维图像的实时显示,三维图像距离分辨率达到 0.157 m,实验结果表明,该软件具有精度高、速度快、可操作性强等优点,在远距离探测以及实时三维成像等应用中具有广阔前景。
 关键词:距离选通;激光雷达;三维成像;点云处理
 中图分类号:TN959.3 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2022.03.004

C++ based software design of range-gated laser imaging radar system

QU Si-jin, YANG Gang, CUI Zi-hao, BI Zong-jie, TIAN Zhao-shuo

(Institute of Marine Optoelectronic Equipment, Harbin Institute of Technology at Weihai, Weihai 264209, China)

Abstract: Based on the C++ programming language, this paper designs a software of the range-gated imaging lidar to display the 3D point cloud in real-time. The software is based on the imaging principle of range-gated lidar, realizes the7 timing control of laser and time delay controller, high-speed processing of point cloud data, filtering and denoising, and display the 3D images in real-time. Based on the self-developed range-gated lidar and the software designed in this paper, an imaging experiment was carried out on a building with a distance of 700 m. During the experiment, the software can control the multi-parameter of the range-gated lidar and display the 3D image of the target in real-time. The distance resolution of the 3D image reaches 0. 157 m. The experimental results show that the software has the advantages of high accuracy, fast speed, and strong operability. It has a broad prospect in applications such as long-distance detection and real-time three-dimensional imaging.

Keywords: range-gated; lidar; three-dimensional imaging; point cloud processing

1 引 言

随着激光技术的发展,复杂环境下的成像逐渐 成为科研人员的研究热点。距离选通激光成像雷达 作为目前一种较为成熟的激光成像技术,能有效降 低后向散射的干扰,可以在相对恶劣的环境下保持 较好的成像效果^[1-2]。此外,距离选通成像技术还 广泛应用于远距离成像^[3-4]、水下目标的探测和识 别^[5-6]、以及多幅图像对观测场景的三维重建^[7-8] 等领域。距离选通激光成像雷达一般有如下三维重 构的方法:时间切片法^[9],梯形距离能量相关算 法^[10],三角形距离能量相关算法^[11]等。但目前这 三类成像方法都存在一些缺点:时间切片法有着速

作者简介:曲思锦(1997 -),女,硕士研究生,主要从事激光雷达,图像处理等方面的研究。E-mail:775607737@qq.com 通讯作者:田兆硕(1970 -),男,博士,教授,主要从事海洋激光探测技术与应用等方面的研究。E-mail:tianzhaoshuo@ 126.com

收稿日期:2021-03-22;修订日期:2021-05-04

度慢、数据量大和对快门抖动较敏感的问题;梯形能 量距离相关算法和三角形距离能量相关算法对激光 脉宽和选通门宽的关系有严格要求。对采集的雷达 数据进行三维重构后,为了去除三维点云的噪声,需 要对其进行滤波处理,使目标形态更加清晰,比较常 用的点云滤波方法有双边滤波^[12]、中值滤波^[13]和 均值滤波^[14]等。激光雷达三维图像重构及其去噪 滤波算法多采用 MATLAB 或 LabVIEW 进行开发, 这些软件虽然功能强大,但在点云数据量大的情况 下存在实时性差、处理速度慢等问题,并且受到知识 产权的限制。

本文选用 C ++ 编程语言进行了距离选通激光 成像雷达软件开发,其中获取目标点云数据采用了 一种新的距离选通激光雷达三维成像方法——相邻 帧差法^[15],该成像方法具有提取效果稳定、速度快、 算法复杂度低等优点;去除点云噪声的滤波方法采 用了离群点滤除算法,可以使目标轮廓完整地显现 出来,有效滤除被测目标周围的杂乱点。实验结果 表明该软件能够实时处理由激光成像雷达获取的点 云数据,同时准确获取目标的距离信息,多角度还原 目标物的三维图像,在三维图像重构领域具有广泛 的应用前景。

2 三维点云成像算法

在距离选通激光成像雷达工作过程中,系统获 取到的图像是一组强度图像序列,对其进行图像处 理,并结合距离信息将处理后的图像转化成距离矩 阵,最后将距离矩阵转换成三维点云并对其进行离 群点滤除实现目标点云显示。

2.1 点云数据处理

对不同距离选通门获取的原始强度图像,利用 相邻帧差法^[15]对其进行数据处理得到三维点云的 距离信息。初始化全零矩阵 Φ_{front} 、 Φ_{back} 、 Φ_d ,其 中 Φ_{front} 和 Φ_{back} 分别为 ICCD 接收到的相邻两帧强 度图像,首先判断当前延时时间是否大于设定值,若 是则结束循环,否则将当前 ICCD 采集的原始强度 图像转化成像素强度值的 Mat 矩阵,将当前矩阵与 前一帧图像转化的强度矩阵相减即 $\Phi_{\text{back}} - \Phi_{\text{front}}$,得 到差值矩阵 $\Delta \Phi$,再对差值矩阵进行阈值滤波,认为 大于阈值的像素是有效像素,并将计算出的当前距 离值赋给所有有效像素所对应的距离矩阵 $\Phi_{d(i,j)}$, 最后将距离矩阵解算成点云数据格式,生成三维点 云,经过离群点滤波生成最终目标点云。在生成点 云之后重新回到循环条件进行判定,直到延时时间 大于设定值则结束运行。



2.2 离群点滤除算法

在成像过程中,会因为 CCD 电子噪声和大气散 射等对成像效果产生影响,导致目标周围存在使目 标形态模糊的杂乱点,对于普通的阈值分割难以将 其完美滤波,有时甚至会导致目标物体的部分成像 点被删除,因此需要对点云进行离群点滤除。算法 模型如图 2 所示。



Fig. 2 Algorithm model for outlier filtering

对点云中的每一点 *P*(*x_i*,*y_i*,*z_i*) 计算其到邻域 内 *k* 个点的平均距离,得到的结果是一个近似高斯 分布的模型,其概率密度函数为: 式中, *d_i* 为点云中的第*i* 个点到*k* 邻域内的平均距 离。计算该函数对应的均值和方差, 点云集合中 每个点到邻近*k* 个点之间平均距离的均值 *µ* 计算 公式如下:

$$\mu = \frac{1}{k} \sum_{i=1, P(x_i, y_i, z_i) \in A}^{k} P(x_i, y_i, z_i)$$
(2)

式中,A为 x_i 的邻域范围。对应方差 σ^2 计算公式如下:

$$\sigma^{2} = \frac{1}{k} \sum_{i=1, P(x_{i}, y_{i}, z_{i}) \in A}^{k} |P(x_{i}, y_{i}, z_{i}) - \mu|^{2} \quad (3)$$

由计算出当前概率密度函数对应的均值和方差 生成距离阈值 *d*_{max}, 三者关系表达为:

$$d_{\max} = \mu + \lambda \times \sigma \tag{4}$$

其中, λ 为比例系数, 一般与邻域内点的数目有关。 将点云集合中的每个点到邻近的 k 个点的距离与得 出的距离阈值 d_{max} 进行比较, 把距离阈值外的点定 义为离群点将其滤除, 满足条件的点保留, 最终得到 处理后的三维点云。

$$N(x_{N}, y_{N}, z_{N}) = \begin{cases} P(x_{i}, y_{i}, z_{i}), & d_{i} < d_{\max}, (i = 1, 2, \dots, N) \\ 0, & \notin \mathbb{U} \end{cases}$$
(5)

式中,N为点云总数据点数。

3 三维成像软件设计

3.1 三维成像软件功能模块设计

本文设计的软件主要由三个模块组成:数据采 集模块,数据处理模块以及点云显示模块。如图 3 所示,其中数据采集模块主要基于距离选通激光成 像雷达实现;数据处理模块以及点云显示模块基于 电脑端实现。数据采集模块负责获取原始强度图 像、实时调节相机参数以及控制延时器延时输出选 通门信号;数据处理模块负责图像格式的转化和点 云数据的处理;点云显示模块负责点云数据转化、点 云的渲染、滤波以及可视化。



图 5 秋什侯庆仪川图 Fig. 3 Software module design diagram

3.1.1 数据采集模块

首先初始化相机驱动 COM 环境,进行相机列表 的遍历找到指定相机并连接,之后调整相机的增益 和曝光时间等相机参数。当相机开始工作之后,需 要连接延时器进行距离选通。找到延时器所在串口 设置串口名、波特率等串口信息,再根据不同距离的 目标物体设置相应的初始延时、选通门宽及延时步 长,以便于排除来自目标范围外的后向散射等干扰, 通过串口发送延时指令控制延时器实现采集过程中 的延时自动累加,每增加一次延时时间同时采集当 前图像并计算对应的距离信息保存到缓存区,由此 完成点云数据的采集。

3.1.2 数据处理模块

对采集到的强度图像做工业相机图像格式到 Mat 图像格式的转化,同时将其转换成 QImage 格式 并在 Qt 界面上显示当前采集的图像,再将转换后的 图像矩阵进行相邻帧相减,相减后得到的差值矩阵 中的像素值与设置好的阈值作对比,强度值低于阈 值的点视为无效点,高于阈值的点视为有效点。最 后将计算出的当前距离值作为 z 坐标值给差值矩阵 中所有有效点所对应的距离矩阵元,实现点云数据 的处理。这一部分主要基于 OpenCV 视觉库编程 实现。

3.1.3 点云显示模块

在 Qt 界面上显示三维点云,首先需要将用于 VTK 点云显示控件初始化,再对采集到的图像进行 数据处理后得到的距离矩阵用三维坐标的形式进行 数据格式转化,并添加点云的宽度、高度、密度及数 据点尺寸等点云数据信息,得到可以用 PCL 点云库 进行成像的数据格式,之后利用离群点滤波算法滤 除目标周围的杂乱点,再进行 z 字段渲染以及可视 化等处理,最终实现三维成像效果。

3.2 三维成像软件程序设计

三维成像软件流程图如图 4 所示。程序开始时 首先判断延时时间是否到达设定值,若未达到,则发 送字符串指令增加一个延时步长,并将计算的当前 距离值保存下来,同时将采集的当前图像与缓存中 的前一帧图像相减,对相减后的结果做阈值滤波处 理,将距离值赋值给保留下来的像素点所对应的距 离矩阵元,最后将距离矩阵转换成点云数据格式,并 进行离群点滤除、点云的可视化实现三维显示。在 生成点云之后,程序继续回到开始进行判断,若不满 足条件,将会循环上述过程直至延时时间大于设定 值来结束运行。



图 4 三维成像软件流程图 Fig. 4 Flow chart of 3D imaging software

图 5 为本文设计的软件系统 Qt 控制界面。其 中界面集成了采集图像,图像监视,停止采集,延时 器串口选择,点云处理,调整相机增益和曝光时间及 延时器的选通门宽和延时步长,延时范围设置,阈值 滤波,离群点滤除等功能。



图 5 三维成像软件界面 Fig. 5 3D imaging software interface

4 实验结果与分析

实验采用的距离选通激光成像雷达系统如图 6 所示,其中,激光器中心波长为 532 nm,激光脉冲宽 度为 5 ns,重复频率为 1 kHz,单脉冲能量为 2 mJ; CCD 采用大恒水星相机 MER-125-30,像素为1292 × 964;延时器输出的选通门宽信号可调,范围为5~1000 ns。光学接收镜头、像增强器和 CCD 组成 IC-CD 接收光学系统,激光器及扩束准直系统组成发射光学系统,信号发生器、光触发器和延时器组成同步控制系统。



图 6 距离选通激光成像雷达结构图 Fig. 6 Photo of range-gated lidar

采用基于上述雷达系统设计的距离选通激光雷 达三维成像软件对距离 700 m 处高层联排建筑进行 成像实验,成像目标为图 7 中矩形框内楼体。实验 设置选通门宽度 20 ns,延时步长 1 ns。程序运行 时,可以通过 Qt 界面实时调整曝光时间和增益等相 机参数,让它更适合激光雷达的成像需求,并根据目 标所在区域设置延时步长和选通门宽,待所有参数 设置好后便可开始采集图像实时生成目标三维 点云。



图7 距离700 m 目标建筑图 Fig.7 The target building at a distance of 700 m 在做好相机和串口的准备工作之后,开始循环

向延时器发送指令对目标进行距离选通三维成像。 三维点云成像结果如图 8(a)所示,点云的不同颜色 代表不同距离。由于背景噪声的影响,目标周围噪 点较多,但仍然可以清晰区分目标建筑顶部形状和 整个楼体的轮廓。目标点云俯视图如图 8(b)所示, 其中,部分点云对应的距离为 700 m,部分点云对应 的距离为 730 m,成像距离范围为 30 m,所对应的图 像帧数为 191,则经分析可知点云的距离分辨率约 为 0.157 m。



(a)点云正视图



(b)点云俯视图

图 8 三维点云成像图 Fig. 8 Three-dimensional point cloud image

对重建后的三维图像调整邻域 k 值和比例系数 λ 进行离群点滤除,使其对点云图像滤波的同时最 大限度地保留目标形状。三维点云做离群点滤除后 的结果如图9所示。从图中可以看出该种算法可以 有效地将目标建筑周围的杂乱点滤除,把目标建筑 轮廓清晰准确地还原出来。



(a) 点云正视图



(b) 点云俯视图
 图 9 三维点云离群点滤除后成像结果图
 Fig. 9 The 3D point cloud image after filtering out the outliers

5 结 论

本文以 C++编程语言为载体,设计了激光雷达 实时三维点云成像软件,实现了点云数据实时处理 和三维图像显示。利用设计的软件对距离 700 m 处 的建筑进行了三维成像实验,距离分辨率可达 0.157 m,通过点云颜色梯度可实现目标复杂细节的 精准呈现,实验结果证明,本文设计的三维成像软件 实现了距离选通激光雷达三维点云实时成像,在远 距离目标成像领域具有较高的分辨率和较好的成像 效果;该软件具有精度高、实时性强、操作灵活的优 势,在实际对远距离的目标进行探测和侦察等应用 中具有重要意义。

参考文献:

[1] Li Li, Gao Zhiyun, Wang Xia, et al. Effects of forwardscattering of fog on range-gated imaging system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2004, (6): 562 – 566. (in Chinese)

李丽,高稚允,王霞,等.雾的前向散射对距离选通成像 系统的影响[J].红外与激光工程,2004,(6):562-566.

- [2] He Zhiyi, Huang Yu, Zhang Yuyi, et al. Range-gated imaging LiDAR by scanning reception of space light modulator[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(12):7-13. (in Chinese)
 何志毅,黄裕,张雨益,等. 空间光调制器扫描接收的距离选通成像激光雷达[J]. 光学学报,2020,40(12):7-13.
- [3] Laurenzis Martin, Christnacher Frank, Monnin David. Long-range three-dimensional active imaging with superresolution depth mapping [J]. Optics Letters, 2007, 32 (21):3146-3148.
- [4] Xiuda Zhang, Huimin Yan. Three-dimensional active imaging with maximum depth range [J]. Applied Optics, 2011,50(12):1682-1686.
- [5] Lü Wenlei, Zhang Xu, Liu Ke. Design and experimental study on a range-gated underwater laser imaging system
 [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(8):198 202. (in Chinese)
 吕文磊,张旭,刘可.一种距离选通水下激光成像系统 设计与实验研究[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40 (8):198 202.
- [6] Wang Minmin, Wang Xinwei, Sun Liang, et al. Underwater
 3D deblurring gated range-intensity correlation imaging
 [J]. Optics Letters, 2020, 45(6):1455 1458.
- [7] Wang Baina, Gao Yuyu. Three dimensional image reconstruction based on range-gated laser imaging system[J]. Laser Journal, 2019, 40(6); 50 54. (in Chinese) 王柏娜,高煜好. 基于距离选通激光成像系统的三维 图像重构[J]. 激光杂志, 2019, 40(6): 50 54.
- [8] Chengkun Fu, Huaibin Zheng, Gao Wang, et al. Three-dimensional imaging via time-correlated single-photon

counting[J]. Applied Sciences, 2020, 10(6):930.

- [9] Wu L, Zhao Y, Zhang Y, et al. Multipulse gate-delayed range gating imaging lidar [J]. Optics Letters, 2011, 36 (8):1365-1367.
- [10] Busck J, Heiselberg H. Gated viewing and high accuracythree dimensional laser radar [J]. Applied Optics, 2004,43(24):4705-4710.
- [11] Wang Xinwei, Liu Xiaoquan, You Ruirong, et al. Three dimensional super resolution range-gated imaging and its applications[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45 (8):122 129. (in Chinese)
 王新伟,刘晓泉,游瑞蓉,等. 距离选通超分辨率三维成像及其应用[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(8): 122 129.
- [12] Zhang Siwei, Wu Rongxin, Han Ziao, et al. The application of bilateral filtering to denoise processing of ground penetrating radar data[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 45(2):496 501. (in Chinese) 张斯薇,吴荣新,韩子傲,等. 双边滤波在探地雷达数 据去噪处理中的应用[J]. 物探与化探, 2021, 45(2):496 501.
- [13] Zhao Gaochang, Zhang Lei, Wu Fengbo. Application of improved median filtering algorithm to image de-noising
 [J]. Journal of Applied Optics, 2011, 32(4):678-682.
 (in Chinese)
 赵高长,张磊,武风波.改进的中值滤波算法在图像去
 噪中的应用[J].应用光学,2011,32(4):678-682.
- [14] Maleki A, Narayan M, Baraniuk R G. Anisotropic nonlocal means denoising[J]. Applied and Computational Harmonic Analysis, 2013, 35(3):452482.
- [15] Tian Zhaoshuo, Yang Gang, Zhang Yanchao, et al. A range-gated imaging flash Lidar based on the adjacent frame difference method [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2021, 141.