



一种适用于古建筑建模的全波形高光谱激光雷达设计与实现

邵慧 撒贝宁 李伟 陈育伟 刘璐 陈杰 孙龙 胡玉霞

A design and implementation of full waveform hyperspectral LiDAR for ancient architecture modelling

Shao Hui, Sa Beining, Li Wei, Chen Yuwei, Liu Lu, Chen Jie, Sun Long, Hu Yuxia

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20210786>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于高光谱激光雷达信号强度免校准的煤岩分类

Classification of coal/rock based on Hyperspectral LiDAR calibration-free signals

红外与激光工程. 2021, 50(10): 20200518 <https://doi.org/10.3788/IRLA20200518>

GF-7星载激光测高仪全波形自适应高斯滤波

Adaptive Gaussian filtering of the full waveform of GF-7 satellite laser altimeter

红外与激光工程. 2020, 49(11): 20200251 <https://doi.org/10.3788/IRLA20200251>

基于半解析模型的激光测高回波海水海冰波形分类方法

Sea and sea-ice waveform classification for the laser altimeter based on semi-analytic model

红外与激光工程. 2018, 47(5): 506005 <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0506005>

基于深度学习的机载激光海洋测深海陆波形分类

Classification of sea and land waveforms based on deep learning for airborne laser bathymetry

红外与激光工程. 2019, 48(11): 1113004 <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.1113004>

多光谱激光雷达波形数据处理及应用

Processing and application of multispectral lidar waveform data

红外与激光工程. 2020, 49(S2): 20200368 <https://doi.org/10.3788/IRLA20200368>

高分七号激光测高中全波形回波数据的EMD降噪

Noise reduction based on empirical mode decomposition for full waveforms data of GaoFen-7 laser altimetry

红外与激光工程. 2020, 49(11): 20200261 <https://doi.org/10.3788/IRLA20200261>

一种适用于古建筑建模的全波形高光谱激光雷达设计与实现

邵 慧¹, 撒贝宁^{1*}, 李 伟², 陈育伟^{3,4}, 刘 璐^{1,5}, 陈 杰^{1,5}, 孙 龙^{1,5}, 胡玉霞^{1,5}

(1. 安徽建筑大学 电子与信息工程学院, 安徽 合肥 230601;

2. 北京航空航天大学 无人系统研究院, 北京 100191;

3. 芬兰地球空间研究所, 芬兰 马萨拉 02430;

4. 季华实验室, 广东 佛山 528200;

5. 安徽省古建筑智能感知与高维建模国际联合研究中心, 安徽 合肥 230601)

摘要: 为了获取古建筑完整的空间结构、历史演进及其健康状态等特征信息, 研制了一种全波形的高光谱激光雷达系统 (HSL)。该系统同时获得目标的空间三维信息和光谱信息, 用于古建筑空间和状态特征的建模。利用超连续谱激光器和声光可调滤波器 (AOTF) 作为发射单元, 实现 550~1 050 nm 的连续光谱波长范围内 101 个光谱通道采样, 并利用 5 GHz/s 高速采集卡完成主波和回波全波形数据采集。设计了静态单点测试和 zigzag 单点扫描相结合的双模式分步扫描方案, 保证三维空间和光谱信息的准确获取。在实验室环境下, 对 HSL 系统反射率稳定性、信噪比以及扫描精度进行了分析测试。利用三维空间和超连续的高光谱信息对古建筑构件样本建模进行验证, 并采用随机森林 (RF) 多分类方法实现不同古建筑构件木种材料的分类。结果表明, HSL 系统能够同时获得空间三维信息和连续光谱信息, 满足古建筑空间和状态特征建模的信息采集的需求。

关键词: 古建筑; 高光谱激光雷达; 全波形; 分类

中图分类号: TN958.94 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210786

A design and implementation of full waveform hyperspectral LiDAR for ancient architecture modelling

Shao Hui¹, Sa Beining^{1*}, Li Wei², Chen Yuwei^{3,4}, Liu Lu^{1,5}, Chen Jie^{1,5}, Sun Long^{1,5}, Hu Yuxia^{1,5}

(1. School of Electronic and Information Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China;

2. Institute of Unmanned System, Beihang University, Beijing 100191, China;

3. Finnish Geospatial Research Institute, Masala 02430, Finland;

4. Ji Hua Laboratory, Foshan 528200, China;

5. Anhui International Joint Research Center for Ancient Architecture Intellisencing and Multi-Dimensional Modeling, Hefei 230601, China)

Abstract: To acquire multidimensional characteristic information of ancient architectures, such as spatial structure, historical evolution and health status, this paper developed a hyperspectral LiDAR (HSL) system that implemented continuous spectrum wavelength selection from 550 nm to 1 050 nm by an acousto-optic tunable filter (AOTF). 5 GHz/s high-speed acquisition card recorded the full waveform, including the transmitted and the echo waveforms. A two-mode step scanning strategy, including static single-point testing and zigzag scanning mode, was designed to ensure the accurate acquisition of three-dimensional spatial information. The reflectivity stability, signal-to-noise ratio (SNR), and scanning accuracy tests were conducted in an experimental

收稿日期: 2021-10-26; 修订日期: 2021-12-29

作者简介: 邵慧, 女, 教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事高光谱激光雷达遥感与古建筑保护方面的研究。

通讯作者: 撒贝宁, 男, 硕士生, 主要从事高光谱激光雷达遥感与古建筑保护方面的研究。

environment, which indicated that our HSL system was stable and reliable. The 3D reconstruction distribution of ancient building components was presented with a single wavelength quantized voltage value, and the component material classification was conducted by a random forest (RF) classifier with hyperspectral reflectance. The results show that the system can obtain reliable 3D spatial and supercontinuous spectral information, providing multidimensional feature data for ancient architecture modelling.

Key words: ancient architecture; hyperspectral LiDAR; full waveform; classification

0 引言

古建筑是中国古代劳动人民智慧的结晶,其建造风格灵活多样,造型舒展,装修装饰精巧,具有很高的艺术和历史文化价值。因此,保护古建筑不仅是保护建筑本身,更重要的是将其所蕴含的时代记忆、历史价值留存和继承。由于木材质易发生火灾、虫蛀和糟朽等情况,只有少数古代木结构尚保存完好,且均存在不同程度的损伤和降质^[1]。因此,如何利用现存的建筑和已存档的信息资料,实现对古建筑修复、维护和重建等保护措施是一个重要而艰巨的任务^[2],完整的建造图纸和历史修复存档文件和资料是保护实施工作的重要依据^[3]。在我国,仅皇家和大型宗庙宗祠等建筑留存建造或修葺的档案资料,很多民用建筑建造和修葺文档缺失,制约了相关保护工作的开展。因此,如何从现存的历史建筑中提取充足且可用的信息,建立数字化的 3D 档案是必要的。精确的数据为进一步解读、分析和重建古建筑提供有力的支持,也为修复和重建方案的制定和实施提供数据依据。其中,最为关键的环节是古建筑信息数据采集、测量和测绘,其全面和准确程度直接决定后续保护工作的顺利开展。

为了获取古建筑的状态特征、构件材料和健康状况等方面的信息,人们利用多种技术和手段进行勘察、测量与精细测绘。由于非接触、效率高、精度高、细节表现力强等特点,三维激光扫描技术广泛应用于古建筑虚拟现实、数字保护和连续监测工程中^[4]。国内外专家学者利用三维激光扫描技术获取构件的几何特征,记录构件的尺寸和形状,构建古建筑完整的空间信息,建立全面的数字参考资料和 3D 档案^[5],尽可能多地保存和重建现存历史建筑细节。

用于建筑三维重建激光雷达,虽然具有较强的三维探测能力,但采用单波长激光,不能获得目标完整的光谱特征,因此对古建筑中外观和光谱特性相近且不同状态木质构件识别能力效果不佳^[6]。为了获得细

致的古建筑构件结构和状态等数据信息,人们探索出多种异构传感器或异构数据的集成方法,具体实现方法主要分成三种类型。第一类融合方法,将可见光图像数据融合到激光扫描点云中以获得具有真实效果的纹理信息^[7-8];第二类融合方法,将非可见光图像融合到激光雷达扫描点云中以获得不同光谱域图像^[9-10];第三类融合方法,将不同波段的激光扫描仪器组合获得多波段的激光光谱信息或多尺度信息^[11-12]。但 these 方法未真正实现图谱合一或多光谱激光有机融合,建模和应用的工作重点集中在数据的融合和配准算法上^[13],且数据配准融合的精度直接影响应用效果。

高光谱激光雷达(HSL)融合了激光雷达与光谱探测的优点,具有主动探测、高精度测距、快捷高效获取目标三维信息与光谱信息等优势,是一种新型的光电探测方式^[14-15],为古建筑信息获取及保护提供新的契机。高光谱激光雷达能够同时获得目标的多个波段的激光回波强度以及空间坐标,将主动高光谱成像与激光扫描功能结合到同一仪器上,解决了复杂目标探测中的数据配准难题。由于其精确测量距离和丰富光谱特性的探测能力,已在许多领域得到应用^[14-18]。

文中在前期研究的基础上^[14-16],搭建适用于古建筑建模的高光谱激光雷达系统,其信息获取的示意图如图 1 所示,同时获得目标的三维空间和光谱信息,用以满足古建筑精细测绘和建模的需求。在实验室

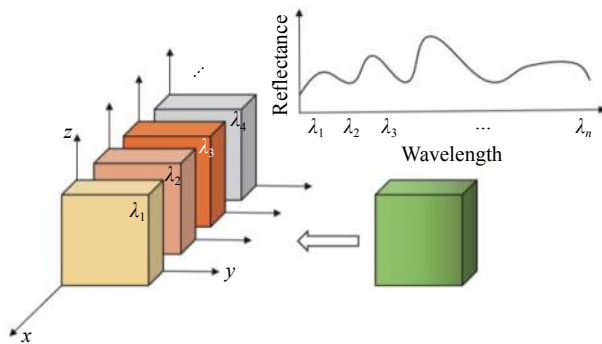


图 1 高光谱激光雷达光谱-空间域信息示意图

Fig.1 Schematic representation of spectral-spatial information of HSL

环境下,采集标准漫反射参照板和徽派古建筑木质构件样本数据,分别从空间和光谱多个维度进行了性能测试分析和实验验证。

1 高光谱激光雷达原理与设计

1.1 高光谱激光雷达系统

考虑到超连续谱激光器功率强,人眼安全系数低

的特点,直接照射会对目标产生破坏,雷达系统采用超连续谱激光器和声光可调滤波器(AOTF)组成激光发射单元,系统示意图如图 2 所示。采用超连续谱激光器作为发射光源,经光纤耦合到 AOTF 滤波器上,确保不同时刻发射不同波长激光信号,然后通过光纤耦合到反射式准直器对激光信号进行准直扩束,最后经 45°反射镜入射到目标上。

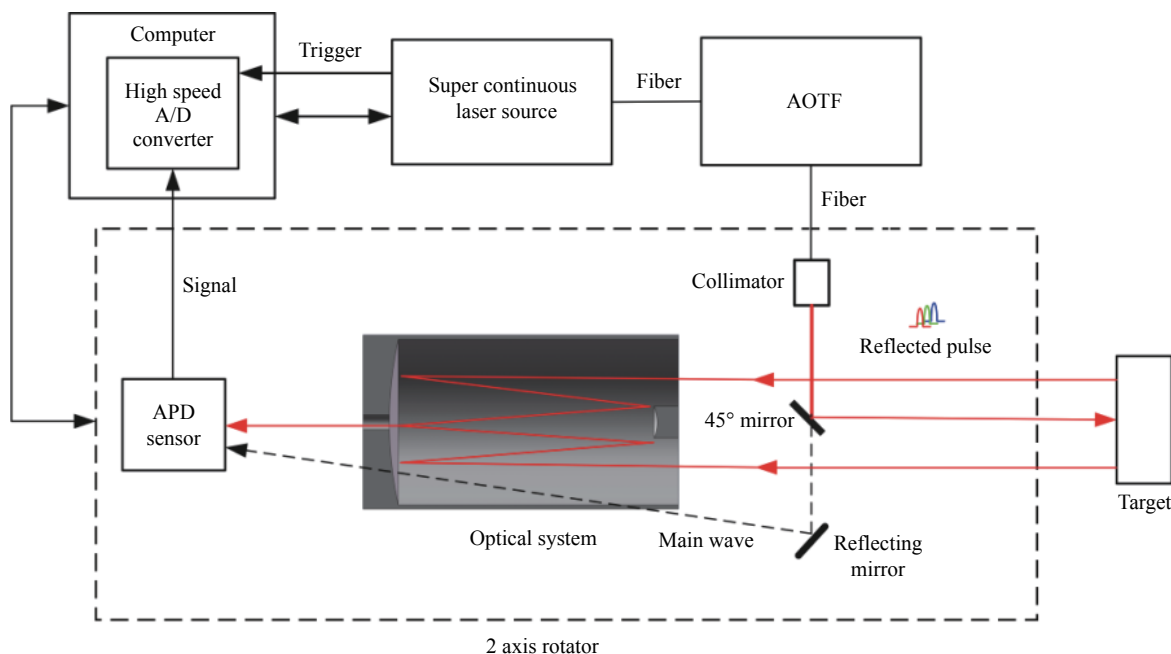


图 2 高光谱激光雷达系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of HSL

AOTF 是一种带宽在几纳米到几十纳米的可调谐窄带滤波器,波长切换速度可达纳秒级,系统利用 AOTF 装置快速、动态地从超连续谱激光光源中选择特定波长。随着 AOTF 装置中射频频率的变化,输出的波长会发生变化,快速实现波长切换。选定的波长 λ 由公式 (1) 计算得出:

$$\lambda = \frac{\Delta n V}{f} \left[\sin^2 2\theta_i + \sin^4 \theta_i \right]^{1/2} \quad (1)$$

式中: $\Delta n = n_i - n_d$ 为双折射的差异折射指数; f 是应用射频信号的频率; θ_i 表示入射角; V 表示源激光和晶体材料之间声波的速度。

超连续谱激光器光谱波段范围覆盖 450~2400 nm,脉冲频率为 1 kHz~1 MHz,单脉冲的最大功率超过 8 μ J,光束散度为 1 mrad,光束直径为 10 mm。

激光脉冲从微结构光纤(MOF)发射出来,经 AOTF 实现连续的光谱波长选择,其光谱分辨率为 2~10 nm,系统选择光谱分辨率为 5 nm,有效工作波长在 550~1050 nm 之间。滤波后的激光发射信号经光纤耦合到准直器进行光束准直,并经过 45°折反射镜实现 90°偏转,确保与系统的接收光路共轴,准直器焦距为 33 mm,通过准直后可将激光发射光斑直径压缩到 5~8.5 mm,数值孔径 0.167,反射率可达 97.5%。经准直的激光束通过放置在接收望远镜光轴上的反射镜发射到目标上,由接收大口口径卡塞格伦型望远系统(焦距 118.84 mm)确保激光回波信号的微弱信号汇聚到集成放大器的雪崩光电二极管(APD)传感器上,利用 AOTF 次级光作为主波信号,主波信号经安装在镜筒壁上的小反射镜反射到 APD 探测器上,高速采集

卡 (采样率 5 GS/s) 进行采样和存储,同时记录发射脉冲和接收回波的波形,采样记录全波形信号。系统采

用 R-C 结构,设计通光直径 56 mm,实际有效口径可达到 52 mm。系统设计指标,如表 1 所示。

表 1 HSL 系统设计指标

Tab.1 System design criterion of HSL

Item	Parameter
Output mode	Mode 1: Supercontinuum spectrum direct output Mode 2: Monochromatic light turntable output
Spectral range/nm	550-1 050
Spectral resolution/nm	5
Co-efficiency of AOTF crystal diffraction	>80%
Output efficiency	>40%
Monopulse energy	>8
Divergence angle of light spot/mrad	~0.35
Collimator focal length	33

1.2 系统搭建

图 3 为实验室搭建的基于发射端分时分光的高光谱激光雷达系统实物图;超连续谱激光光源、AOTF 模块 (含驱动器) 和工控机 (含高速采集卡) 固定置于机柜内部,激光器一侧的机柜面板采用开孔处理,便于散热。二维转台和收发光学系统固定在光学



图 3 HSL 样机实物图

Fig.3 Prototype of HSL

支架上,可与机柜一起移动,以调整与待测目标之间的距离;确定好探测距离后,固定机柜,观察转台上的水平仪,确保整个系统处在水平状态。

1.3 系统反射率标定方案

高光谱成像激光雷达回波信号是由激光束和目标相互作用所产生的,直接受到目标反射率的影响;系统采用单发单收的工作机制,发射的单脉冲激光信号经过目标散射,接收系统将回波信号以时序控制方式采集存储。

多通道高光谱激光雷达回波信号功率,可描述为:

$$P_{\lambda_i}^R = \frac{\pi P_{\lambda_i}^E \rho_{\lambda_i} \cos \alpha}{4d^2} \eta_{\lambda_i}^{stm} \eta_{\lambda_i}^{sys}, i = 1, 2, \dots, M \quad (2)$$

式中: $P_{\lambda_i}^E$ 为激光发射功率; α 为入射角度; d 为距离; ρ_{λ_i} 表示目标反射率; $\eta_{\lambda_i}^{sys}$ 、 $\eta_{\lambda_i}^{stm}$ 是系统和大气参数; M 为通道数。文中不考虑大气参数的影响,且仅分析垂直入射情况。

$$P_{\lambda_i}^R \propto \frac{P_{\lambda_i}^E \rho_{\lambda_i}}{d^2} \quad (3)$$

可见,系统传感器接收的能量数据会受到激光发射能量、目标反射光谱、测试距离等因素的影响。系统获得和记录的数据为强度信号,需将此信号标定为光谱反射率。为了获取古建筑目标的光谱数据信息,即得到其准确后向散射辐射光谱,需对系统进行反射率标定,确定各通道的标定系数。考虑激光雷达回波光谱强度数据辐射特性与关键误差因素,文中采用固定波长光谱校正法,具体策略如图 4 所示。从超连续

谱激光器中分色片出占总能量 2% 的激光作为参考激光, 利用 HSL 的光学接收和探测系统对每一个激光脉冲的光谱进行同步检测。

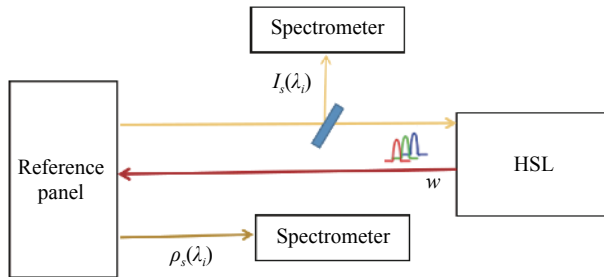


图 4 HSL 光谱校正方法

Fig.4 Calibration method of HSL spectrum

以不同反射率标准漫反射参照板为目标, 采用光谱仪对 HSL 单波长激光输出信号辐亮度值进行测试实验。发射过程调整激光器发射能量 w , 同步记录高光谱雷达数据和光谱仪获取数值。建立约束函数 J 如公式 (4), 采用最小二乘法拟合回波信号强度和光谱仪记录值的参数 $\kappa(\lambda_i)$ 。

$$J = \|I_s(\lambda_i) - \kappa(\lambda_i)I_{HSL}(\lambda_i)\| \quad (4)$$

$I_s(\lambda_i)$ 为光谱仪记录强度信号值, $I_{HSL}(\lambda_i)$ 为 HSL 记录强度信号值。光谱仪测量的标准漫反射参照板不同波长的反射率值 $\rho_s(\lambda_i)$ 为光谱仪测量的标准漫反射参照板不同波长对应的反射率值, 实现对 HSL 初步标定:

$$\rho_{HSL}(\lambda_i) = \kappa(\lambda_i)\rho_s(\lambda_i) + \delta(\lambda_i) \quad (5)$$

式中: $\rho_{ref}(\lambda_i)$ 为标准参照板在不同波长下的反射率 (出厂测试数据), 误差函数为 $\delta(\lambda_i) = \rho_s(\lambda_i) - \rho_{ref}(\lambda_i)$ 。

根据光谱仪测量标定结果, 初步标定光谱信息, 在实际应用中逐步修正高光谱激光雷达反射率。

1.4 系统扫描控制方案

为了同时获得空间和光谱数据信息, 系统采用的扫描控制如图 5 所示, 根据 AOTF 发射的触发信号, 由控制软件发送对应的控制信息给激光器与 AOTF, 在最大激光能量状态下, 提取频率并控制相应波长激光的发射, 同时将控制信号发送给转台控制扫描。

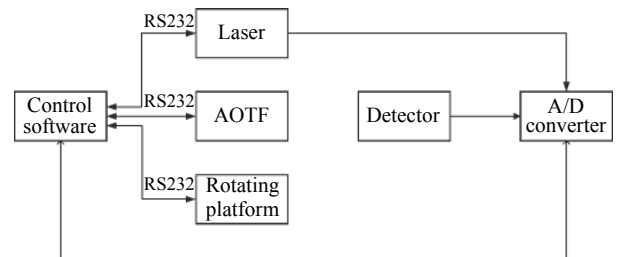


图 5 HSL 扫描控制方案

Fig.5 Scanning control scheme of HSL

扫描前应确保激光垂直入射到被测目标的正中央, 激光功率大于 0.8 mW, 并将转台的水平与俯仰角度归零。为了保证测试的准确性, 系统采用双模式分步扫描方式, 先对目标进行单点测试, 观察发射波与回波的波形是否完整。回波信号由探测器收集后, 通过高速采集卡进行 A/D 转换并收集, 实现发射波与回波全波形实时显示, 在单点测试的基础上进行连续光谱和空间域的数据采集。

系统采用 zigzag 扫描方式, 关键点扫描如图 6(a) 所示, 在确定中心点的基础上, 转台从目标左上角起始点开始从左至右逐行扫描, 系统实时计算扫描精度

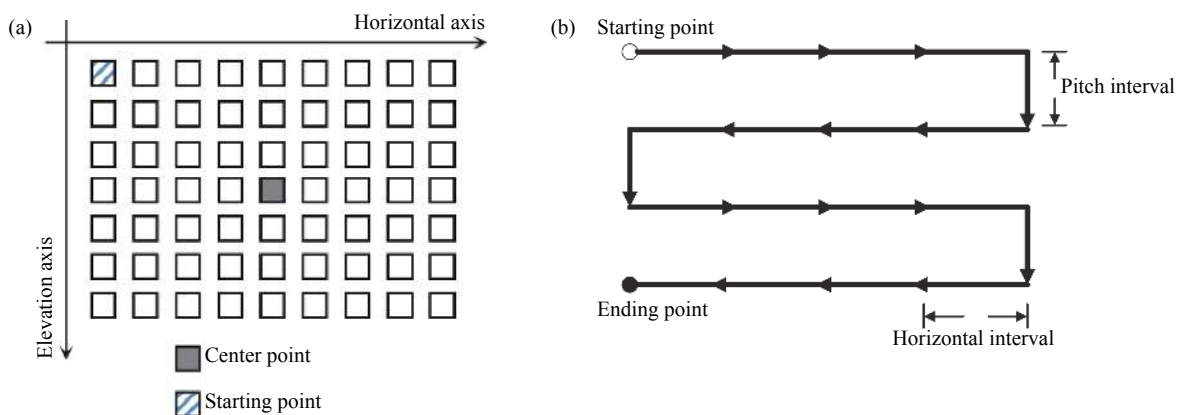


图 6 HSL 扫描策略示意图。(a) HSL 扫描关键点; (b) 扫描轨迹图

Fig.6 Schematic of scanning strategy of HSL. (a) Key scanning points of HSL; (b) Scanning trajectories

和扫描角度,扫描到最右端后换行。从下一行的最右端开始向左进行扫描。扫描轨迹如图 6(b) 所示,可以有效避免转台大范围转动,不但节省扫描时间,而且尽可能地减小转台转时的抖动,提高空间信息采集的准确性。

由计算机控制二维转台将传输的窄带激光束指向目标,获得一目标点的三维坐标信息;同时控制 AOTF 波长快速切换,采集一组以 5 nm 的光谱分辨率的 101 个通道全波形回波信号。当所有通道的回波信号采集完成,移动到下一点进行同样数据采集,直到扫描完整个目标,获得其点云数据。

2 数据采集与设备性能分析

在实验室环境下(安徽建筑大学实验综合楼 10

层走廊)测试 HSL 装置。首先验证 HSL 系统的主波波形与回波波形显示是否完整;其次验证光谱信息采集的稳定性、信噪比;在扫描精度测试基础上,对单波长下激光雷达的三维成像能力进行相关测试,并对不同材料的古建筑构件进行分类。实验中使用不同反射率(20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%和 99%)的标准漫反射参照板和多个徽派古建筑构件。构件样本由徽派建筑安徽省重点实验室提供,图 7(a)为古建筑杉木构件,使用年数约为二百年,由于突出的花纹部分经常被触碰,花纹和凹陷区域存在差异。图 7(b)为一组合构件,由 4 个样本组成,其中 1 号样本为一杉木古建筑构件,其余样本均为古建筑修复过程中替换下的构件,2 号为杉木、3 号为红豆杉、4 号为黄山松。



图 7 古建筑构件样本。(a)单一构件;(b)组合构件

Fig.7 Ancient architecture component sample. (a) Single component; (b) Combined component

2.1 全波形采集

为了测试 HSL 系统的全波形特征,选择 700 nm 作为测试波段,激光垂直入射在 99% 反射率标准参照板上,设定扫描角度为 0.1°,连续进行 10 次单点采集并对结果取平均,绘制出的全波形图如图 8 所示。回波波形的分辨率采用半高峰宽度(FWHM)来描述,其中,主波波形 FWHM 平均为 4.0 ns,回波波形 FWHM 平均为 3.9 ns,波形分辨率良好。图中横坐标代表采样时间,收到激光器 Trigger 信号后开始计时为 $t_0=0$,采样间隔为 0.2 ns; t_1 为主波信号的波峰时刻, t_2 为回波信号的波峰时刻。纵坐标为量化后的电压强度值,量化步长为 3.9 mV,通过量化电压值可以反映主波和接收回波波形强度变化情况,其中回波信号和目标的特性密切相关,每一个波段均可以绘制出

类似的波形图。

$$R = \frac{1}{2} ct \tag{6}$$

式中: R 为测距值; c 为光速;激光信号接收与发射时

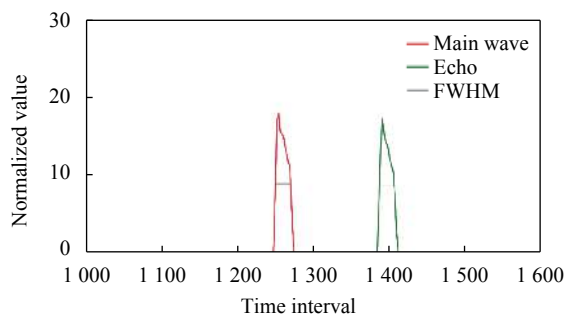


图 8 HSL 全波形显示图(700 nm)

Fig.8 Full waveform of HSL (700 nm)

刻的时间差 $\Delta t = t_2 - t_1$ 。

2.2 光谱稳定性测试

系统的稳定性指的是多次测量时结果保持相对稳定, HSL 在获得目标三维坐标的同时, 获得可见光到近红外的光谱信息。为了测试系统的稳定性, 在 600~1000 nm 范围内, 利用标准漫反射标准灰板 (20%、40%、60% 和 80%) 进行光谱稳定性测试。为了简化实验, 实验时选择入射角为 90°, 每个反射率的参照板不定时测试 5 次, 分 4 天完成, 共测试 20 次。不同测试之间得到的反射特性略有波动, 但变化趋势基本一致, 说明该激光雷达系统获得的光谱信息不受实验时

间和外界因素变化的影响。在 600~1000 nm 范围内计算标准偏差, 20% 反射率的参照板光谱标准偏差为 0.519~2.168, 40% 反射率的参照板反射率标准偏差为 0.941~3.147, 60% 反射率的参照板反射率标准偏差为 0.916~3.083, 80% 反射率的参照板反射率标准偏差为 0.724~5.442。当参照板反射率达到 80% 及以上, 采集的光谱值逐渐接近阈值, 造成了反射率标准偏差的提高。此外, 20%、40%、60% 参照板的反射率在 850 nm 后的波段偏低, 与参照板的反射率在高波段略有降低的特性一致。总体来说, 系统获得的光谱反射率稳定性较好, 如图 9 所示。

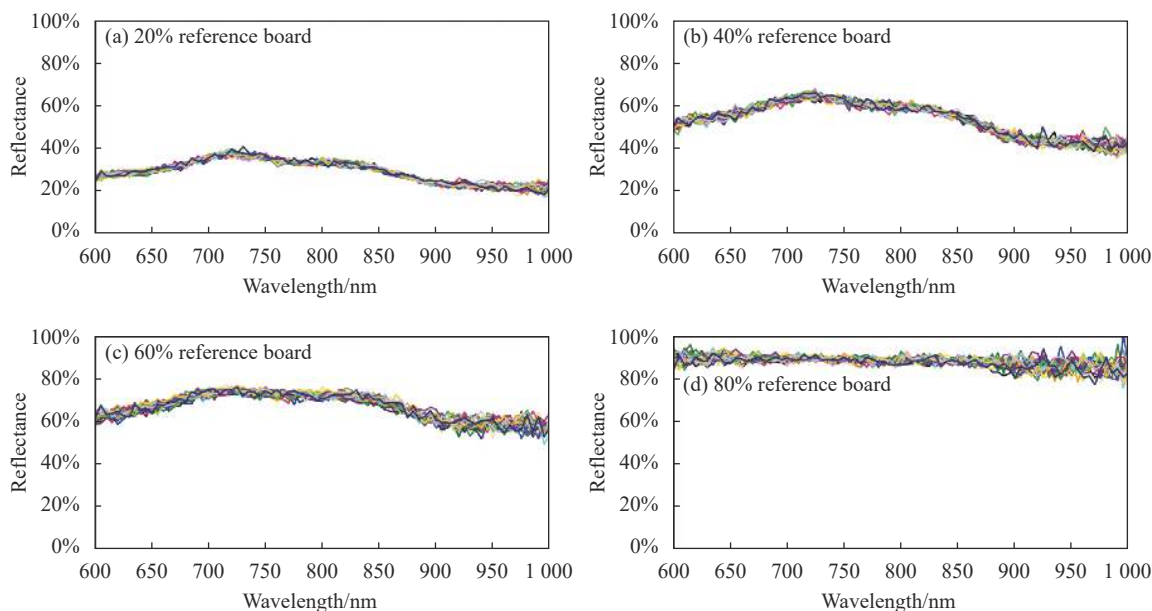


图 9 反射率稳定测试

Fig.9 Reflectance stability test

2.3 信噪比测试

信噪比测试方法与稳定性测试方法相似。采用 20 点进行测试, 即每个漫反射灰板选取 20 个测试点进行平面扫描, 角度为 0.25°, 忽略角度的影响, 采用参考文献 [19] 的方法计算高光谱激光雷达系统的信噪比。

道量化电压值; $\mu(\lambda_i), \sigma(\lambda_i)$ 为第 i 通道量化电压值均值和方差, j 取值范围为 $[0, M]$, M 为测试点的数目, 设置为 20; i 为通道数, 取值范围为 $[1, 101]$, 实际波长 λ 与 i 关系为 $\lambda_i = 550 + 5(i - 1)$, 信噪比计算结果如表 2 所示。

可见, 信噪比值稳定在 16 左右。

表 2 信噪比测试结果

Tab.2 SNR test results

SNR under different reflectance						
Reflectance	20%	30%	40%	50%	60%	70%
SNR	15.758	16.546	16.021	16.113	16.108	16.531

$$SNR_{\rho}(\lambda_i) = \frac{\mu(\lambda_i)}{\sigma(\lambda_i)}$$

$$\mu(\lambda_i) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M a_j(\lambda_i), \sigma(\lambda_i) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M [a_j(\lambda_i) - \mu(\lambda_i)]^2 \quad (7)$$

式中: ρ 为漫反射板标称反射率数值; $a_j(\lambda_i)$ 为第 i 通

2.4 扫描精度测试

水平与俯仰角度重复定位精度和绝对精度设计要求分别控制在 0.01°和 0.02°范围内。利用经纬仪对转台的水平与俯仰角度转动精度、重复定位精度进行测量,结果表 3 和表 4 所示。对于水平轴转动精度测试重复定位精度最大值为 9",绝对精度最大值为 45"。可见,偏差在-24"~45"范围内,精度满足设计需求。

表 3 水平轴转动精度测试结果

Tab.3 Test results of horizontal axis rotation accuracy

Rated value	Encoder returned value	Theodolite measured value	Bias
25	25°0'2"	359°25'52"	-24"
40	40°0'4"	359°26'06"	-10"
55	55°0'1"	359°26'04"	-12"
70	70°0'2"	359°26'03"	-13"
85	85°0'4"	359°26'16"	0"
100	100°0'1"	359°26'16"	0"
115	115°0'2"	359°26'35"	19"
130	130°0'4"	359°26'49"	33"
145	145°0'1"	359°27'01"	45"
130	129°59'54"	359°26'38"	22"
115	114°59'52"	359°26'21"	5"
100	99°59'51"	359°26'08"	-8"
85	84°59'54"	359°26'05"	-11"
70	69°59'52"	359°25'51"	25"
55	54°59'51"	359°25'51"	25"
40	39°59'59"	359°25'51"	25"
25	25°0'2"	359°25'52"	24"

表 4 俯仰轴精度测试结果

Tab.4 Test results of pitch axis rotation accuracy

Rated value	Encoder returned value	Theodolite measured value	Bias
16	15°59'50"	275°21'34"	0"
31	31°0'2"	275°21'53"	19"
46	46°0'4"	275°21'34"	0"
61	61°0'0"	275°21'05"	-29"
76	76°0'2"	275°20'58"	-36"
61	60°59'55"	275°21'39"	5"
46	45°59'56"	275°21'43"	9"
31	30°59'58"	275°21'59"	25"
16	15°59'51"	275°21'40"	6"

对于俯仰轴转动精度测试重复定位精度最大值为 10",绝对精度最大值为 36"。可见,偏差在-36"~25"范围内,满足设计精度需求。

3 三维建模与分类

将古建筑样本(图 7(a))置于距离 HSL 系统 5 m 处,二维转台以 0.05°角分辨率驱动 HSL 系统进行扫描。扫描完成后,以构件中心作为 XZ 平面的坐标原点,X 坐标左向为正,右向记为负,Z 坐标向上为正,向下为负,Y 轴为目标距离 HSL 系统的距离,均为正值。图 10 为 750 nm 波段对应的量化电压值分布图,电压值在 2~10 之间,且纹理部分相对于凹陷部分量化电压值低约 30%,可见,能够从量化电压值实现构件纹理与凹陷的区分,为后续构件特征的提取提供参考。

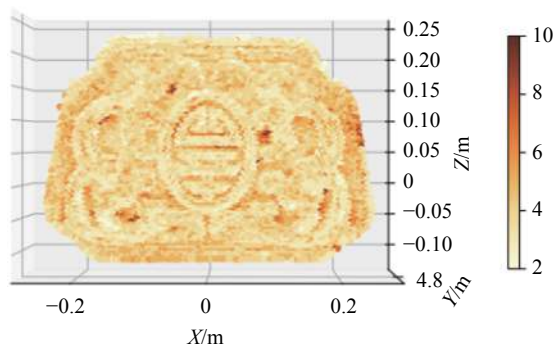


图 10 单一构件在 750 nm 电压值分布图

Fig.10 750 nm quantized voltage value distribution of single component

HSL 获取三维空间的同时可获得超连续的高光谱信息,图 11 为组合构件(图 7(b))中 4 个样本平均光谱反射率曲线,1 号与 2 号样本均为杉木,由于两个样本取自不同的古建筑,两者表面退化程度与建筑使用年数相关,光谱特征信息有较大的差异。从外观上看,1 号、3 号和 4 号样本存在很大的相似性,但它们的光谱曲线存在很大的差异,且不同波段的光谱反射率值不同。

以样本的光谱反射率作为特征,采用随机森林(RF)分类器^[20]进行组合构件不同组成部分分类,分类结果如图 12 所示,整体分类效果较好;部分边界点出现误分类情况,主要是由于采集时激光光斑一部分落在构件上,一部分落在背景上,因此收到回波信号强度低于正常构件部分,边缘处的光谱反射率和正常

构件部分存在差异。图中可以看到 1 号样本纹理起伏特征, 构件雕刻纹理、花纹以及弧度设计部分距离 HSL 系统存在差异, 根据公式 (6) 可以得到距离为 5.057~5.167 m。可见, 该激光雷达在进行空间重建同时可以实现不同古建筑构件的材料分类。

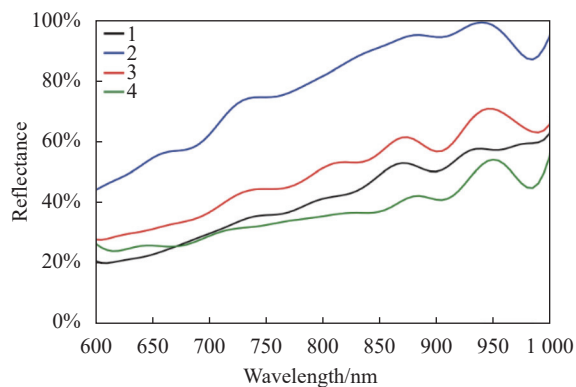


图 11 不同样本的光谱反射率分布图

Fig.11 Distribution of spectral reflectance of different samples

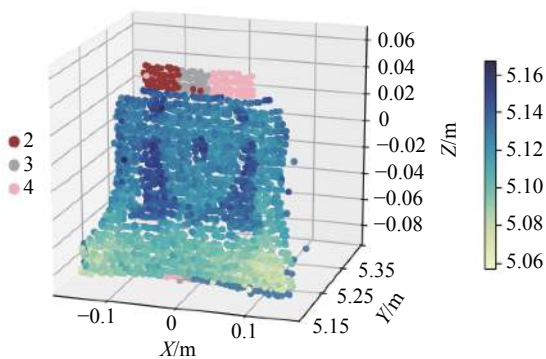


图 12 组合构件分类建模图

Fig.12 Diagram of composite component classification modelling

4 结 论

为了同时获得古建筑的空间与光谱信息, 在实验室环境搭建了适用于古建筑建模的高光谱激光雷达系统。该系统通过超连续谱激光器和 AOTF 实现了 550~1050 nm 的连续光谱波长选择, 采用双模式分步扫描方案, 确保了三维空间和光谱数据信息有序准确获取。对该系统光谱稳定性、信噪比以及扫描转动精度进行实验测试。利用 HSL 三维空间和超连续的高光谱信息对古建筑构件样本进行三维空间建模和构件材料的分类实验。实验结果表明, HSL 系统稳定,

且该系统为主动成像系统, 不受外界光照的影响, 能够满足古建筑建模多特征信息获取需求。

参考文献:

- [1] Chun Q, Van B K, Pan J W, et al. Structural performance and repair methodology of the Wenxing lounge bridge in China [J]. *International Journal of Architectural Heritage*, 2015, 9: 730-743.
- [2] Li H Q, Yu Y, Yu X. On fire protection problems and its countermeasures about Chinese ancient architecture [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 204-208: 3365-3368.
- [3] Murphy M, McGovern E, Pavia S. Historic building information modelling-Adding intelligence to laser and image based surveys of European classical architecture [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2013, 76: 89-102.
- [4] Wang M. Research on the application of three-dimensional laser scanning technology in the surveying and mapping of ancient buildings in the Forbidden City [J]. *Palace Museum Journal*, 2011, 6: 143-156. (in Chinese)
- [5] Song L, Li X, Yang Y G, et al. Structured-light based 3D reconstruction system for cultural relic packaging [J]. *Sensors*, 2018, 18(9): 2981.
- [6] Shao H, Chen Y W, Jiang C H, et al. Feasibility study on hyperspectral LiDAR for ancient Huizhou-style architecture preservation [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(1): 88.
- [7] Yang Y, Jiang X T, Kuang Y H. Arithmetic of 3-D house reconstruction based on graphics understanding [J]. *Information and Electronic Engineering*, 2011, 9(1): 105-108. (in Chinese)
- [8] Sun Z, Cao Y K, Zhang Y Y. Applications of image-based modeling in architectural heritage surveying [J]. *Research on Heritage and Preservation*, 2018(1): 30-36. (in Chinese)
- [9] Ivan A M, Luigi B, Marco S, et al. Mapping infrared data on terrestrial laser scanning 3D models of buildings [J]. *Remote Sensing*, 2011, 3(9): 1847-1870.
- [10] Costanzo A, Minasi M, Casula G, et al. Combined use of terrestrial laser scanning and IR thermography applied to a historical building [J]. *Sensors*, 2015, 15(1): 194-213.
- [11] Murtiyoso A, Grussenmeyer P, Suwardhi D, et al. Multi-scale and multi-sensor 3D documentation of heritage complexes in urban areas [J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2018, 7(12): 483.
- [12] Hu Q W, Wang S H, Fu C W, et al. Fine surveying and 3D modeling approach for wooden ancient architecture via multiple laser scanner integration [J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(4): 270.

- [13] Kaasalainen S, Lindroos T, Hyypä J. Toward hyperspectral lidar: Measurement of spectral backscatter intensity with a supercontinuum laser source [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2007, 4(2): 211-215.
- [14] Chen Y W, Räikkönen E, Kaasalainen S, et al. Two-channel hyperspectral LiDAR with a supercontinuum laser source [J]. *Sensors*, 2010, 10(7): 7057-7066.
- [15] Chen Y W, Jiang C H, Hyypä J, et al. Feasibility study of ore classification using active hyperspectral LiDAR [J]. *IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters*, 2018, 15(11): 1785-1789.
- [16] Shao H, Chen Y W, Jiang C H, et al. A 91-channel hyperspectral LiDAR for coal/rock classification [J]. *IEEE Geosci Remote Sensing Lett*, 2020, 76(6): 1052-1056.
- [17] Jiang C H, Chen Y W, Tian W X, et al. A practical method utilizing multi-spectral LiDAR to aid points cloud matching in SLAM [J]. *Satellite Navigation*, 2020, 1: 29.
- [18] He Z X, Shao H, Guo H, et al. Classification of coal/rock based on hyperspectral LiDAR calibration-free signals [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(10): 20200518. (in Chinese)
- [19] Gebhart S C, Stokes D L, Vodinh T, et al. Instrumentation considerations in spectral imaging for tissue demarcation: comparing three methods of spectral resolution[C]//Proceedings of SPIE, 2005, 5694: 41-52.
- [20] Pedregosa F, Varoquaux G, Gramfort A, et al. Scikit-learn: Machine learning in python [J]. *Journal of Machine Learning Research*, 2011, 12: 2825-2830.