

文章编号 1004-924X(2025)17-2734-10

沙氏激光雷达植物叶绿素荧光探测与验证

阚若冉¹, 郑可欣^{1,2}, 杨淑清², 梅亮^{1,2*}

(1. 大连理工大学 大连理工大学白俄罗斯国立大学联合学院, 辽宁 大连 116000;

2. 大连理工大学 光电工程与仪器科学学院, 辽宁 大连 116000)

摘要: 植物叶绿素含量的精准监测对农业生产和生理研究至关重要, 但传统方法存在需要近距离接触测量, 效率较低等局限, 且难以同时获取植物的三维结构特征。为解决这一问题, 基于 Scheimpflug 原理开发了一种新型激光雷达系统 (SLiDAR), 旨在实现植物叶绿素荧光信号的非接触、高精度遥感测量和三维结构信息的同步获取。该系统采用连续波激光 (450 nm) 和倾斜 CMOS 传感器架构, 通过红光通道荧光信号与蓝光通道弹性散射信号的归一化处理, 以消除环境干扰并提升信噪比。实验通过对比 SLiDAR 系统与手持叶绿素仪 (SPAD-502PLUS) 对多种叶片的测量数据, 结果显示两者具有极强的线性相关性 ($R^2 > 0.98$), 验证了系统在 5~10 m 内毫米级空间分辨率和叶绿素反演中的可靠性。研究表明, SLiDAR 系统兼具高光谱灵敏度与空间分辨率, 通过获取叶绿素荧光信号间接实现叶绿素含量的高效、无损监测, 为植物生理状态监测提供了创新技术手段, 未来可通过多波长激发和算法优化进一步提升其在农业遥感中的应用潜力。

关键词: 沙氏激光雷达; 荧光成像; 三维点云; 叶绿素荧光

中图分类号: TN958.98; S127 **文献标识码:** A

doi: 10.37188/OPE.20253317.2734 **CSTR:** 32169.14.OPE.20253317.2734

Detection and validation of plant chlorophyll fluorescence employing Scheimpflug lidar

KAN Ruoran¹, ZHENG Kexin^{1,2}, YANG Shuqing², MEI Liang^{1,2*}

(1. Dalian University of Technology and Belarusian State University Joint Institute,

Dalian University of Technology, Dalian 116000, China;

2. School of Optoelectronic Engineering and Instrumentation Science,

Dalian University of Technology, Dalian 116000, China)

* Corresponding author, E-mail: meiliang@dlut.edu.cn

Abstract: Accurate monitoring of plant chlorophyll content is essential for agricultural management and physiological research. Traditional methods typically require contact measurements, are time-consuming, and cannot readily capture three-dimensional structural information. To address these limitations, a fluorescence LiDAR system (SLiDAR) based on the Scheimpflug principle was developed for non-contact, high-precision measurement of chlorophyll fluorescence, enabling simultaneous acquisition of fluorescence spectra and three-dimensional (3D) structure. The SLiDAR employs a continuous-wave 450 nm laser and

收稿日期: 2025-07-24; 修订日期: 2025-08-17.

基金项目: 中央高校基本科研业务费资助项目 (No. DUT25RC(3)039); 辽宁省“兴辽英才”计划资助项目 (No. XLYC2203185)

a tilted CMOS sensor architecture. Normalization of the red-channel fluorescence signal by the blue-channel elastic scattering signal was implemented to suppress environmental interference and enhance signal-to-noise ratio (SNR). Validation against a handheld chlorophyll meter (SPAD-502PLUS) for various leaf samples demonstrated a strong linear correlation ($R^2 > 0.98$), confirming reliable chlorophyll fluorescence retrieval and millimeter-level spatial resolution at ranges of 5-10 m. The results indicate that the fluorescence SLiDAR offers high spectral sensitivity and spatial resolution, enabling efficient, non-destructive indirect monitoring of chlorophyll content via fluorescence measurements. This approach provides an innovative technical solution for assessing plant physiological status, with potential for enhanced applicability in agricultural remote sensing through multi-wavelength excitation and algorithmic optimization.

Key words: Scheimpflug LiDAR; fluorescence imaging; 3D point cloud; chlorophyll fluorescence

1 引言

在现代农业领域,实时、精准地监测植物生长状态是实现资源高效利用、提高作物产量和保障农业可持续发展的基础^[1-5]。植物叶绿素含量不仅反映植物的光合能力、发育阶段、生长状况、生理代谢水平及营养条件,还可作为环境生理研究的重要参考指标^[6-8]。传统的叶绿素测量方法主要依赖实验室化学分析,虽然精度较高,但操作繁琐、成本高、耗时较长,且属于破坏性测量,无法满足实时、原位监测的需求^[9-10]。近年来,随着传感技术的发展,多种先进的无损监测技术应运而生。叶绿素仪通过获取叶片对测量光源的吸收率,从而实现叶绿素含量的实时测定^[11],但测量方式需要接触植物叶片、反复测量且工作量大;三维成像技术通过结构光扫描重建叶片形态参数^[12-13],但对环境光的依赖不可忽视;高光谱技术则通过采集叶片连续光谱反射特征来估算叶绿素含量,能够同时获取生化成分与空间分布信息,但依赖复杂的数据处理和建模算法^[14-15]。

尽管上述技术在植物监测中各有应用,但在同时实现高精度三维结构重建与植物叶绿素相关特征的无损获取方面仍存在局限。激光诱导荧光雷达(Laser-Induced Fluorescence LiDAR, LIF-LiDAR)是近年来飞速发展的一种光谱分析技术^[16],因能够同时获取目标的空间信息和荧光光谱特征,在植被遥感领域展现出独特的优势^[17-18]。该技术通过激光激发植物体内叶绿素、类黄酮等荧光物质产生特征光谱,可

无损监测光合作用效率等生理指标以及水分胁迫程度、氮素含量等关键参数^[19-20]。传统的LIF-LiDAR系统基于飞行时间原理,常采用脉冲激光激发植物荧光,其荧光信号接收多依赖光电倍增管(Photomultiplier Tube, PMTs)或光谱仪^[21]。相较于多光谱和高光谱成像技术,LIF-LiDAR受环境光照干扰小,特别适合昼夜连续观测。此外,LIF-LiDAR系统主动激光照明的特性使其在冠层穿透性和三维荧光分布重建方面具有独特优势,已成功应用于森林监测^[22]、作物胁迫早期诊断^[23-24]、水生环境遥感^[25-26]等方面。然而,这类系统往往存在空间分辨率有限、操作复杂、成本较高等问题,且大孔径接收望远镜易引入近场盲区,限制了其在近距离、高精度植物监测中的应用。

基于Scheimpflug原理的LiDAR技术^[27-32]的出现为解决上述问题提供了新的思路,该技术采用连续波激光和CMOS或CCD图像传感器,能够实现近距离高分辨率测量,有利于系统的低成本化和小型化。早期研究中,基于Scheimpflug原理的高光谱LiDAR虽能实现较高的光谱分辨率,但一次只能测量单个点的荧光,导致荧光点云稀疏,数据采集时间长。随后发展的二维荧光Scheimpflug LiDAR(SLiDAR)通过采用线激光作为激发源,提升了空间分辨率和检测效率,但大多聚焦于定性测量和研究^[33-34]。本研究聚焦于SLiDAR硬件系统及其定量化测量,验证了该技术在植物叶绿素荧光定量化测量方面的精度和可靠性,为该系统在植物生理状态监测中的实际应用提供实验依据。

2 系统结构与原理

2.1 三维荧光成像系统

Scheimpflug 原理是激光雷达系统实现高精度测量的核心基础,如图 1 所示。当图像平面、透镜平面和物体平面相交于一条公共直线时,满足 Scheimpflug 条件。其中, L 为透镜到物平面的距离, L_{II} 为图像平面的中心与透镜的中心之间的距离, θ 为像平面相对于透镜平面的倾斜角(或物平面与透镜轴的角度), Φ 为透镜摆角。这种几何配置使得在使用大孔径接收望远镜或成像系统时能够获得无限景深,对于检测十分微弱的荧光信号至关重要。Scheimpflug 成像系统的优势在于:从近距离到远距离的不同目标都能同时在图像传感器上清晰成像,可为后续的距离计算和信号分析提供高质量的原始图像。

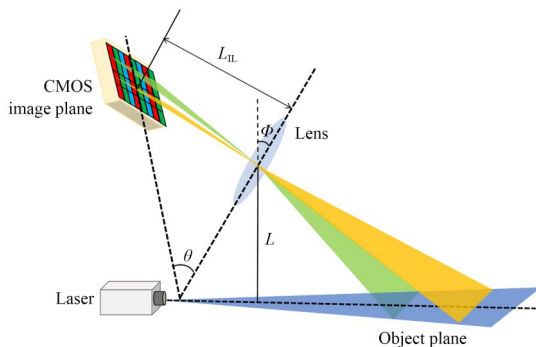


图 1 Scheimpflug 成像原理

Fig. 1 Principle for Scheimpflug imaging

本文搭建的 SLiDAR 系统满足 Scheimpflug 条件,以实现对植物相关信号的高精度检测。该系统主要由激光模块、接收模块和控制模块组成,结构见图 2。其中,激光模块采用连续波激光

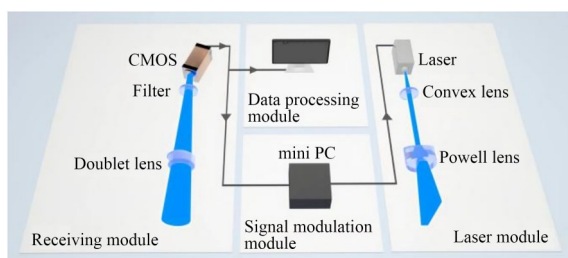


图 2 荧光 SLiDAR 系统结构

Fig. 2 Composition of fluorescence SLiDAR system

二极管作为光源,其发出的激光经过准直透镜准直后,形成具有特定波长和功率的激光束,用于激发植物叶片中的叶绿素产生荧光。接收模块主要包含透镜、滤光片及图像传感器三大核心组件。透镜负责收集植物反射的光信号(含激光弹性散射信号与叶绿素荧光信号);滤光片通过抑制环境光等噪声,仅允许特定波段的荧光信号与弹性散射信号通过,并一定程度地削减弹性散射信号值;图像传感器(如 CMOS 传感器)则将过滤后的光信号转换为电信号,可通过增加曝光时间提升荧光信号的信噪比(Signal-to-Noise Ratio, SNR)。为满足 Scheimpflug 条件,图像传感器需按特定角度倾斜放置,确保不同距离目标均能清晰成像。

2.2 三维荧光点云重构

借助 SLiDAR 系统实现植物目标的三维荧光点云的高精度重构,在植物表型领域具有重要应用价值。然而,植物目标的形状尺寸差异大、叶绿素荧光强度弱等特点,使三维荧光点云强度与距离的测量准确性面临较高的挑战。一方面,植物目标的复杂形态结构导致激光信号在植物表面发生多次反射、散射或遮挡,容易使距离测量值出现偏差;另一方面,微弱的荧光信号易受环境光干扰,难以精准获取反映植物生理状态的信息。本研究基于 Scheimpflug 原理搭建的荧光 SLiDAR 系统,通过信号预处理,空间位置回溯,强度归一化等多流程,完成三维荧光点云重构,进而实现植物叶绿素荧光的定量分析。

首先是对荧光 SLiDAR 系统获得信号的预处理,相应流程如图 3(a)~3(c)所示。本系统基于成像原理对目标进行三维重构,在理想状况下,每一个合适尺寸的空间物点被激光照亮后,应在面阵传感器的一个具体像素上清晰成像。如图 3(a)所示,当利用与传感器行像素平行的线激光照射目标时,应有与传感器列数相同的空间物点成像在传感器上。根据系统原理,面阵传感器成像时,图像信号仍按列处理。在实际应用中,由于激光发散,目标表面散射以及成像像差等因素,空间物点无法准确成像在一个像素上,而是成像为有一定宽度的“波峰”,如图 3(b)即彩色 CMOS 传感器的某列像素接收到的三通道强

度分布情况。根据系统与数据特征,提取信号最大值附近的 100 个像素作为有效信号,而其余部分则作为背景噪声,通过设定 SNR 阈值保留有效信号。这里 SNR 定义为每通道信号中的最大值与背景的标准差的比值。由于植物并非每个器官都有叶绿素荧光,为保证信号完整性,若彩色 CMOS 传感器 3 个通道中的任一通道 SNR 大于阈值,本列信号就会作为有效信号保留,当前 SNR 阈值设定为 10。在下一步运算之前,有效信号的所有背景与无效信号都被剔除,该方案可有效降低最终点云中的杂散点,并提升算法运行效率。被保留的信号仍需确定一个具体的像素作为目标物点的成像位置。本研究采用“重心法”,即通过强度与所在像素序号的加权平均,获得相对准确的像素定位。激光整形与最终成像也导致由物点反射或发射的光能无法被单一像素接收,经实验比较,选取保留信号值之和代表目标光强是更为准确的方案。

完成信号预处理后,需进行相应的像素距离转换,实现目标空间位置的确定。根据几何光学,系统通过校准的像素-距离算法从图像传感器获取的信号中提取距离信息。在激光雷达系统的 x - y - z 坐标中,被测目标的 (x, y) 空间位置描述为:

$$x = \frac{L [r_1 (\sin \theta - \cos \theta \tan \Phi) + L_{II}]}{r_1 (\cos \theta + \sin \theta \tan \Phi) + L_{II} \tan \Phi}, \quad (1)$$

$$y = \frac{c_1 (x - f)}{f}, \quad (2)$$

式中: L 为透镜到物平面的距离; r_1 为行位置,由行数(n)和像素大小(s_p)决定,即 $r_1 = (N/2 - n)s_p$,其中 N 是总行数,即传感器的中心与透镜的光轴重合; θ 为像平面相对于透镜平面的倾斜角(或物平面与透镜轴的角度); Φ 为透镜摆角; L_{II} 为图像平面的中心与透镜的中心之间的距离; c_1 为列位置,由列数(m)、像素大小(s_p)和总列数(M)定义,即 $c_1 = (M/2 - m)s_p$; f 是成像透镜的焦距。由式(1)可知,系统角度分辨机制实现了沿激光轴线方向(x)的深度分辨,系统内图像传感器像素的行位置与空间深度存在耦合,并呈非线性关系。而式(2)展示的水平方向(y)的空间宽度与传感器像素的列位置则呈线性关系。如图 3(d) 所示,

每幅图像经信号预处理与像素距离转换后,可获得一条目标物体的二维轮廓线。结合所搭载具的运动,连续多条轮廓线即可拼接出目标的高精度三维点云。

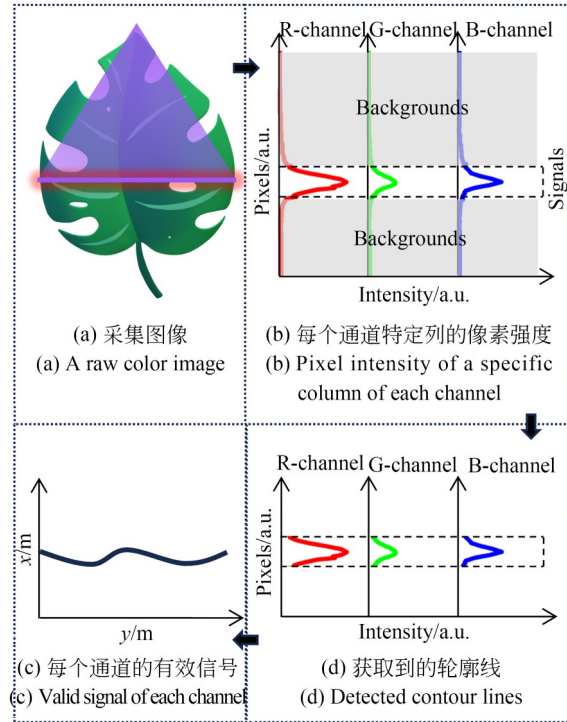


图 3 荧光 SLiDAR 点云提取流程

Fig. 3 Extraction process of fluorescence SLiDAR point cloud

本实验选用的搭载平台为可控制云台,需进行空间坐标转换,SLiDAR 系统的三维坐标 x - y - z 与测量空间 X - Y - Z 坐标之间的坐标变换由下式给出:

$$X = x \cos \varphi, \quad (3)$$

$$Y = y, \quad (4)$$

$$Z = h + x \sin \varphi, \quad (5)$$

式中: h 为激光出射窗位于地面上方的高度, φ 为雷达系统的俯仰角,即激光束和水平面之间的角度。若雷达系统所发激光束位于雷达系统所在平面下方,则定义 $\varphi < 0$ 。

针对荧光信号的处理,系统利用彩色 CMOS 传感器的多通道特性实现光谱分辨。其中,红光通道(R通道)主要接收红-近红外荧光信号,绿光通道(G通道)接收可见光范围荧光信号,蓝光通

道(B通道)接收激光弹性散射信号。通过将红光或绿光通道的荧光信号与蓝光通道的弹性散射信号进行归一化处理(如计算R通道和B通道的比值),可有效降低环境波动、光束不均匀性及目标距离变化带来的测量误差,提升叶绿素含量反演的准确性。荧光SLiDAR采集的单一通道信号所包含的信息为:

$$L_{ch} = K \cdot \int I_{Fluo.}(\lambda) \cdot T_{Filter}(\lambda) \cdot \eta_{ch}(\lambda) d\lambda, \quad (6)$$

式中: K 代表系统常数, $I_{Fluo.}$ 表示目标的荧光光谱, T_{Filter} 表示接收器中滤光片的透射率, η 表示CMOS传感器的灵敏度,ch表示不同的光谱通道(R,G,B), λ 表示波长。

归一化处理能够消除环境因素与测量距离变化导致的信号差异,提升不同通道数据的可比性,减小通道间尺度差异,为后续分类或分割任务提供一致性数据基础,提高分析准确性;通过信号放大突出目标特定信息,增强微弱荧光特征的识别性。

3 实验与结果

为验证荧光SLiDAR系统对植物荧光信号探测的准确性及其成像性能,本文设计并开展了不同距离植物的荧光测量实验。沙氏激光雷达系统参数如表1所示。实验场景选取夜间室外环境,将正常生长的盆栽植物及不同生长阶段的叶片样本置于不同距离的观测位置。在5 m观测点,将盆栽固定于视场中心;在10 m观测点,以低反射率泡沫板为承载基底,其上固定6片不同种类叶片(绿萝、万年青、琴叶榕各2片)。实验过程中通过统一叶片朝向、规避背景光源等操作控制变量,实验环境布局详见图4与图5(a)。

实验参数设置如下:激光雷达系统的曝光时间设定为150 ms,累计采集1 030幅原始图像。为保证在曝光过程中的图像稳定,搭载系统所用云台的俯仰速度被设定为 $0.01 (^{\circ})/150 \text{ ms}$,即 $6.7 (^{\circ})/s$ 。经图像预处理后生成目标对象的荧光点云数据,分别绘制R通道、G通道与B通道等原始光谱三维点云,并采用红光通道荧光强度与蓝光通道弹性信号强度的比值(L_R/L_B)

表1 沙氏激光雷达系统参数

Tab.1 System specifications of Scheimpflug SLiDAR system

Components	Specifications
Laser diode	$\lambda=450 \text{ nm}$, $P \approx 2 \text{ W}$
Collimation lens	$f=8 \text{ mm}$, $\Phi 7 \text{ mm}$
Powell lens	$\theta=45^{\circ}$
CMOS sensor	MV-CH089, $4\ 096 \times 2\ 160 \text{ pixel}$, $3.45 \mu\text{m}$
Optical filter	455 nm, Longpass
Receiver (Doublet lens)	$f=150 \text{ mm}$, $\Phi 50 \text{ mm}$

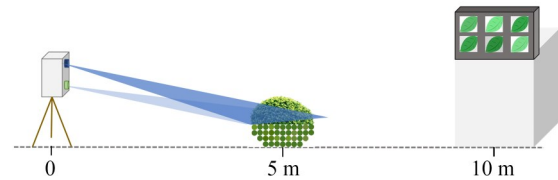


图4 荧光SLiDAR系统测量示意图

Fig. 4 Measurement of fluorescence SLiDAR system

作为归一化荧光信号指标,以消除系统固有噪声及环境光干扰。

在传统激光雷达中,基于飞行时间原理的激光雷达受原理限制,空间分辨率难以实现量级的提升,在植物表型等细小目标扫描应用中受限。基于成像原理的遥感方案虽可实现像素级的高分辨率,但其往往受景深限制,只能对较小范围内目标清晰成像,仅可应用在植物冠层或低矮植物探测中。图5(b)产生的大深度场景点云突出显示了本研究应用的沙氏激光雷达的关键优势,即超景深成像。在当前硬件配置下,系统存在4.87 m的探测盲区。针对相距5 m以上,且最远距离超10 m的目标,沙氏激光雷达可在单次扫描,无系统调整的前提下,实现视场内物体的全清晰成像。针对不同目标,如含叶绿素的盆栽、叶片与不含叶绿素的地面、墙壁均可成像,既实现了多种目标三维结构的完整重构,避免了传统荧光方案中除叶片外其他结构无法探测,又可结合荧光特征,简化目标分类研究。

图 5(c)~5(f)利用距系统约 5 m 处的盆栽,对比展示了 450 nm 的激发光在不同光谱通道的信号特点。需要注意的是,本组盆栽点云的提取无需借助复杂算法,仅通过三维信息与荧光强度信息进行点云阈值分割即可实现,极大地简化了传统点云分割流程。图 5(c)展示 R 通道荧光点云,其强度主要与叶绿素发射的红光波段与近红外波段荧光相关,主要体现了植物光合器官中的叶绿素浓度与光合作用活性。图 5(d)展示 G 通道荧光点云,其强度主要和类胡萝卜素与黄酮类物质发射的绿光波段荧光相

关。植物在健康状态下发射的绿光荧光较弱,易被红光与近红外荧光掩盖,但其会在受胁迫时显著升高。但是,本系统采用的三通道彩色 CMOS 相机,其 RGB 通道的滤光片(通常以拜耳阵列形式集成在传感器像素表面)具有宽光谱通带特性,且各通道滤光片的光谱透过率曲线存在一定重叠(即光谱串扰)。因此,在一般条件下,G 通道的实际信号强度主要受红光与近红外荧光的主导。图 5(e)展示了 B 通道反射光点云,可以看到,受系统接收装置中插入的 455 nm 高通滤光片的限制,反射光的强度约为 R 通道接收荧光的三分之一,避免了长曝光条件下 B 通道的过曝。除此之外,B 通道实时记录了发射激光的强度分布、植物目标朝向对激光信号的反射角度和散射程度的影响,以及环境背景光等关键信息。借助 B 通道对荧光通道进行归一化,提升了荧光强度的稳定性,同时减少了测量环境的干扰。

空间分辨率决定了激光雷达系统最终的探测精度。在当前系统配置下,荧光 SLiDAR 系统水平方向(三维坐标中 Y 轴)的分辨率在距系统 10 m 处优于 0.3 mm,距系统 5 m 处优于 0.15 mm;深度方向(三维坐标中 X 轴)的分辨率在距系统 10 m 处优于 5.4 mm,距系统 5 m 处优于 1.4 mm。除 X-Y 坐标轴外,系统在竖直方向(三维坐标中 Z 轴)的分辨率主要受限于当前搭载云台的扫描精度与线激光宽度。本系统中,转动云台的扫描精度约为 0.01° ,经计算后该方向分辨率在 10 m 处优于 2 mm,5 m 处优于 1 mm。系统发射的线激光在 5~10 m 处厚度约为 2 mm,因此系统在 Z 轴的实际分辨率约为 2 mm。综上所述,荧光 SLiDAR 系统分辨率满足多数植物在遥感条件下实现三维成像的分辨率需求。若需要更高的空间分辨率需求,在满足 Scheimpflug 成像原理的条件下,可进一步优化、调整系统结构参数,如焦距、发射-接收端间隔、像素等,从而进一步提高空间分辨率,实现更为精细的荧光三维成像。

为验证荧光 SLiDAR 定量分析叶绿素含量的能力,利用 10 m 处泡沫板上的 6 片不同生长

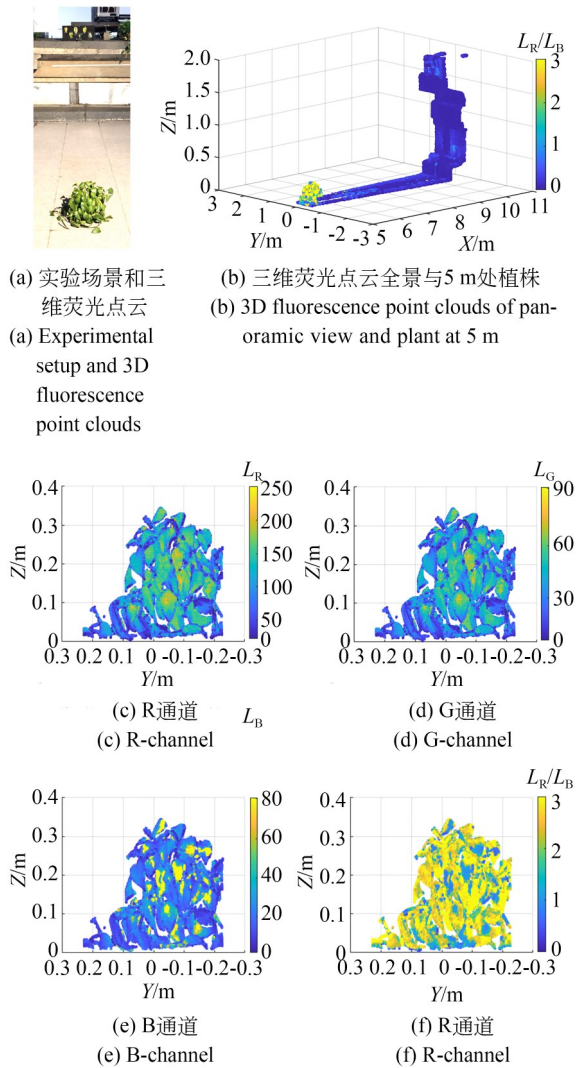


图 5 实验场景和归一化的三维荧光点云

Fig. 5 Experimental scene and normalized 3D fluorescence

状态的叶片开展对比实验。在激光雷达扫描完成后,使用手持式叶绿素检测仪 SPAD-502PLUS 对每片叶片进行 10 次夹持式测量,取平均值作为参考土壤、作物分析开发值 (Soil Plant Analysis Development, SPAD)。如图 6(b) 所示,荧光 SLiDAR 凭借其较高的分辨率,使实验目标的每片叶子获得了 1 000 个点以上的三维立体点云,且每个点均包含目标的荧光/反射光强度信息。每片叶子的点云通过阈值分割技术与其他叶片和背景分离,其 R 通道值结合 B 通道值进行归一化后再取平均值,作为该片叶子的归一化荧光信号。将激光雷达探测的归一化荧光信号与参考 SPAD 值进行线性拟合 (拟合结果见图 6),相关系数 (R^2) 大于 0.98,表明两者具有极强的线性相关性,检测数据可靠性显著。

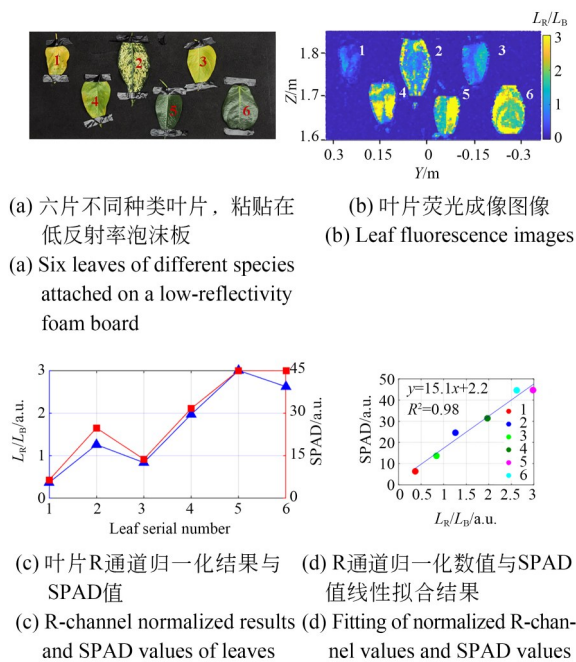


图 6 叶片荧光成像及数值拟合

Fig. 6 Leaf fluorescence imaging and numeric fitting

本实验通过在夜间对不同距离植物的荧光进行测量,验证了荧光 SLiDAR 系统不仅具有高清晰度成像的能力,并且通过荧光信号归一化处理有效抑制了因目标距离差异、朝向不

同和激光强度分布不均导致的测量误差,使系统测量值与手持式叶绿素检测仪测量值的线性拟合相关系数达 $R^2 > 0.98$,探测信息具有极高可信度。该系统为植物生理状态的精准监测提供了兼具空间分辨率与光谱灵敏度的技术支撑。

4 结 论

本文基于 SLiDAR 开展植物叶绿素含量测量研究,该系统利用 Scheimpflug 原理实现了大景深成像,能够同时获取目标的空间信息和荧光信号,通过对荧光信号的归一化处理有效降低了环境光、光束不均匀性和距离变化等因素的影响。该系统具有毫米级空间分辨率,在 10 m 处,深度方向分辨率优于 5.4 mm,水平方向分辨率优于 0.3 mm,垂直方向分辨率优于 2 mm,能够捕捉植物叶片的细微荧光分布特征,为植物生理状态的精准监测提供丰富的数据支持。实验结果表明,系统获取的归一化红光通道荧光信号与手持式叶绿素仪测量值具有极高的线性相关性 ($R^2 > 0.98$),充分证明了激光雷达系统在植物叶绿素含量非接触式、高精度测量中的可行性。

尽管本研究取得了较好的结果,但激光雷达系统在实际应用中仍存在一定的局限性。由于视场范围相对固定,在监测大面积植物时,需要进行扫描操作,可能会增加数据采集时间和系统复杂性。未来的研究可以从以下几个方面展开:首先,优化系统的扫描方式和数据处理算法,提高大面积监测的效率;其次,探索多波长激发方案,扩展系统的光谱分辨能力,以获取更多的植物生理信息,如不同色素的含量变化等;最后,结合机器学习等先进算法,实现植物叶绿素含量的实时反演和植物生长状态的智能诊断,进一步提升系统在现代农业和植物科学研究中的应用价值。此外,还可以对系统的稳定性和长期工作性能进行深入研究,为其在实际田间环境中的推广应用提供更全面的技术支撑。

作者贡献声明:

阚若冉:实验测量,数据分析,论文构思和撰写;

郑可欣:实验设计及数据分析;

杨淑清:论文审核与编辑;

梅亮:研究指导,论文审核与编辑。

参考文献:

- [1] ATAEI KACHOU EI M, KAUSHIK A, ALI M A. Internet of Things-enabled food and plant sensors to empower sustainability[J]. *Advanced Intelligent Systems*, 2023, 5(12): 2300321.
- [2] WU B F, ZHANG M, ZENG H W, *et al.* Challenges and opportunities in remote sensing-based crop monitoring: a reviewOpen Access[J]. *National Science Review*, 2023, 10(4): nwac290.
- [3] JIN S C, SUN X L, WU F F, *et al.* Lidar sheds new light on plant phenomics for plant breeding and management: Recent advances and future prospects [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2021, 171: 202-223.
- [4] WEI X, ZHAO Y, LU X J, *et al.* A high-throughput method for monitoring growth of lettuce seedlings in greenhouses based on enhanced Mask2Former[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2024, 227: 109681.
- [5] XING Y Y, CHEN M R, WANG X K. Enhancing water use efficiency and fruit quality in jujube cultivation: a review of advanced irrigation techniques and precision management strategies [J]. *Agricultural Water Management*, 2025, 307: 109243.
- [6] HÖRTENSTEINER S, KRÄUTLER B. Chlorophyll breakdown in higher plants[J]. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics*, 2011, 1807(8): 977-988.
- [7] BERGER K, MACHWITZ M, KYCKO M, *et al.* Multi-sensor spectral synergies for crop stress detection and monitoring in the optical domain: a review [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2022, 280: 113198.
- [8] YANG C, DU S M, ZHANG D Q, *et al.* Method for estimating relative chlorophyll content in wheat leaves based on chlorophyll fluorescence parameters [J]. *The Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(1): 175-181.
- [9] YANG W N, DUAN L F, CHEN G X, *et al.* Plant phenomics and high-throughput phenotyping: accelerating rice functional genomics using multidisciplinary technologies[J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2013, 16(2): 180-187.
- [10] 罗祖友, 袁萍, 莫开菊. 姜叶叶绿素的提取及叶绿素铜钠的制备[J]. *食品科学*, 2008, 29(10): 361-364.
- LUO Z Y, YUAN P, MO K J. Extraction of chlorophyll from zingiber officinale leaves and preparation of sodium copper chlorophyllin[J]. *Food Science*, 2008, 29(10): 361-364. (in Chinese)
- [11] 何明霞, 王璞, 李进才, 等. 基于RGB颜色传感器叶绿素仪的设计[J]. *贵州农业科学*, 2008, 36(4): 184-186.
- HE M X, WANG P, LI J C, *et al.* The design of chlorophyll meter based on RGB color sensor[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2008, 36(4): 184-186. (in Chinese)
- [12] ZHANG Y, TENG P, AONO M, *et al.* 3D monitoring for plant growth parameters in field with a single camera by multi-view approach[J]. *Journal of Agricultural Meteorology*, 2018, 74(4): 129-139.
- [13] WANG Y H, HU S T, REN H, *et al.* 3DPhenoMVS: a low-cost 3D tomato phenotyping pipeline using 3D reconstruction point cloud based on multiview images[J]. *Agronomy*, 2022, 12(8): 1865.
- [14] MALENOVSKÝ Z, HOMOLOVÁ L, ZURITAMILLA R, *et al.* Retrieval of spruce leaf chlorophyll content from airborne image data using continuum removal and radiative transfer [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 131: 85-102.
- [15] GIRMA A, SKIDMORE A K, DE BIE C A J M, *et al.* Photosynthetic bark: Use of chlorophyll absorption continuum index to estimate *Boswellia papyrifera* bark chlorophyll content[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2013, 23: 71-80.
- [16] 莫凯峰, 唐云, 杨泽恩, 等. 激光诱导荧光辅助激光诱导击穿光谱对合金结构钢中Mo的定量分析

- [J]. 光学精密工程, 2024, 32(20): 2999-3005.
- MO K F, TANG Y, YANG Z E, *et al.* Quantitative analysis of Mo in alloy structural steel using laser-induced fluorescence assisted laser-induced breakdown spectroscopy [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(20): 2999-3005. (in Chinese)
- [17] EL-NAGGAR A G, JOLLY B, HEDLEY C B, *et al.* The use of terrestrial LiDAR to monitor crop growth and account for within-field variability of crop coefficients and water use[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2021, 190: 106416.
- [18] WAN W B, SU J H. Study of laser-induced plant fluorescence lifetime imaging technology for plant remote sensing monitor[J]. *Measurement*, 2018, 125: 564-571.
- [19] ANDERSON D M, FREDRICKSON E L, NACHMAN P, *et al.* Laser-induced fluorescence (LIF) spectra of herbaceous and woody pre- and post-digested plant material[J]. *Animal Feed Science and Technology*, 1998, 70(4): 315-337.
- [20] LANG M, LICHTENTHALER H K, SOWINSKA M, *et al.* Fluorescence imaging of water and temperature stress in plant leaves [J]. *Journal of Plant Physiology*, 1996, 148(5): 613-621.
- [21] APOSTOL S, VIAU A A, TREMBLAY N, *et al.* Laser-induced fluorescence signatures as a tool for remote monitoring of water and nitrogen stresses in plants[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2003, 29(1): 57-65.
- [22] SAITO Y, SAITO R, KAWAHARA T D, *et al.* Development and performance characteristics of laser-induced fluorescence imaging lidar for forestry applications[J]. *Forest Ecology and Management*, 2000, 128(1/2): 129-137.
- [23] LEDNEV V N, GRISHIN M Y, SDVIZHENSKII P A, *et al.* Fluorescence mapping of agricultural fields utilizing drone-based LIDAR[J]. *Photonics*, 2022, 9(12): 963.
- [24] SCHUERGER A C, CAPELLE G A, DI BENEDETTO J A, *et al.* Comparison of two hyperspectral imaging and two laser-induced fluorescence instruments for the detection of zinc stress and chlorophyll concentration in Bahia grass (*Paspalum notatum* Flugge.) [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 84(4): 572-588.
- [25] LI Y F, FU Y H, YI W N, *et al.* Development of high sensitivity shore-based laser induced fluorescence radar and its application in high-precision on-line monitoring of chlorophyll concentration [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2025, 187: 108883.
- [26] 陈恒, 何荣, 吴晓玲, 等. 基于星载激光雷达光子分布特征的湖面近岸水体浊度反演[J]. 光学精密工程, 2025, 33(12): 1971-1983.
- CHEN H, HE R, WU X L, *et al.* Inversion of nearshore lake water turbidity based on photon distribution characteristics from spaceborne lidar [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2025, 33(12): 1971-1983. (in Chinese)
- [27] CHEN K, GAO F, CHEN X, *et al.* Overwater light-sheet Scheimpflug lidar system for an underwater three-dimensional profile bathymetry [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(27): 7643-7648.
- [28] MEI L, BRYDEGAARD M. Atmospheric aerosol monitoring by an elastic Scheimpflug lidar system [J]. *Optics Express*, 2015, 23(24): A1613-A1628.
- [29] CHANG Y P, KONG Z, WANG X H, *et al.* High spectral resolution scheimpflug lidar for atmospheric aerosol sensing [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2025, 19(18): e00897.
- [30] KONG Z, FEI R N, CHENG Y, *et al.* Imaging-based lidar for atmospheric remote sensing: a review [J]. *Optics & Laser Technology*, 2025, 191: 113354.
- [31] 梅亮, 孔政, 林宏泽, 等. 基于沙氏成像原理的激光雷达技术研究进展(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(3): 19-35.
- MEI L, KONG ZH, LIN H Z, *et al.* Recent advancements of the lidar technique based on the Scheimpflug imaging principle (Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(3): 19-35. (in Chinese)
- [32] MEI L, BRYDEGAARD M. Continuous-wave differential absorption lidar [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2015, 9(6): 629-636.
- [33] GAO F, LIN H Z, CHEN K, *et al.* Light-sheet based two-dimensional Scheimpflug lidar system for profile measurements [J]. *Optics Express*, 2018, 26(21): 27179-27188.

[34] LIN H Z, ZHANG Y, MEI L. Fluorescence Schempflug LiDAR developed for the three-dimen-

sion profiling of plants[J]. *Optics Express*, 2020, 28(7): 9269-9279.

作者简介:



阚若冉(2004—),女,安徽合肥人,大连理工大学应用物理学专业,主要从事激光探测方法的研究。E-mail: kanruoran@163.com

通讯作者:



梅亮(1985—),男,湖北黄梅人,教授,博士生导师,2013年于浙江大学获得博士学位,2014年于瑞典隆德大学获得博士学位,主要从事激光光谱、激光雷达、光电传感技术及其应用的研究。E-mail: meiliang@dlut.edu.cn