三维扫描激光雷达系统设计及实时成像技术

李小路,曾晶晶,王 皓,徐立军

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院,北京 100191)

摘 要: 三维扫描激光雷达能够主动获取目标的三维信息, 其高速数据采集与传输是三维实时成像的技术瓶颈之一。自主设计一款地基三维扫描激光雷达系统, 利用数据采集与控制系统实现点云三维成像。激光雷达系统硬件设计包括发射与接收单元、测距单元和扫描单元, 用于获取目标的三维点云数据。激光雷达系统软件设计包括上位机程序、下位机程序和 USB 固件程序设计, 实现点云数据从下位机到上位机的采集、传输和存储, 及上位机数据解析和实时成像。通过多个场景实验, 结果显示三维扫描激光雷达系统具有厘米级别的测距误差, 可以实现三维实时成像。

关键词:激光雷达; 数据采集; 实时成像

中图分类号: TN958.98 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201948.0503004

Design and real-time imaging technology of three-dimensional scanning LiDAR

Li Xiaolu, Zeng Jingjing, Wang Hao, Xu Lijun

(School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: The three-dimensional scanning LiDAR can actively acquire three-dimensional information of target. High-speed data acquisition and transmission are key technical issues for three-dimensional real-time imaging. A ground-based three-dimensional scanning LiDAR was designed using data acquisition and control system to achieve three-dimensional imaging with point cloud. The LiDAR hardware design included a transmitting and receiving unit, a ranging unit, and a scanning unit for acquiring the three-dimensional point cloud data of the target. The software design of the LiDAR included upper computer program, lower computer program and USB firmware program design for accomplishing point cloud data acquisition, data transmission, data storage, data analysis and real-time imaging which were collected in lower computer and transmitted into upper computer. Through multiple scene experiments, the results show that three-dimensional scanning LiDAR system has a centimeter-level ranging error, which can realize three-dimensional real-time imaging.

Key words: LiDAR; data collection; real-time imaging

收稿日期:2018-12-13; 修订日期:2019-01-17

基金项目: 国家自然科学基金(61671038, 61721091); 长江学者和创新团队发展计划(IRT1203)

作者简介:李小路(1981-),女,副教授,硕士生导师,主要从事激光雷达及光信号处理方面的研究。Email: xiaoluli@buaa.edu.cn

通讯作者: 曾晶晶(1992-), 女, 硕士生, 主要从事激光雷达及数据处理方面的研究。Email: zengjingjing@buaa.edu.cn

0 引言

三维扫描激光雷达 (Light Detection and Ranging, LiDAR)结合传统雷达技术和现代激光技术,是一种先进的遥感探测手段。三维扫描激光雷达由激光器发射激光脉冲信号,通过扫描机构的转动,实现对目标的垂直和水平扫描。经目标反射后的回波信号被探测器接收,经过信号处理系统转化为被测目标的距离和强度等信息,进而可得到被测目标的距离图像和强度图像等[1-2]。三维扫描激光雷达具有工作方式非接触、数据采集速率高、数据精度高^[3]、数字化采集、兼容性好等优点,是目前国际上获取三维空间数据最先进的测量方式之一;特别适用于大面积、表面复杂物体的精细测量^[4],可用于大气检测^[5]、地质测绘、文物数字化与保护修复、数字城市等领域。

按照载荷平台划分,三维扫描激光雷达系统可 以分为车载、机载、地基三种类型。地基三维扫描激 光雷达在一些国家已经发展成熟并得到广泛应用。 美欧一些发达国家的地基三维激光扫描仪已经商 业化和产业化,如奥地利的 Riegl VZ400^[6],加拿大 的 Optech ILRIS-3D^[7], 瑞士的 Leica HDSC10 和 美国的 Faro FOCUS 3D[8]。这些激光扫描仪的测距 方式为脉冲式或相位式,激光脉冲频率较高,具有 较长测距范围,扫描机构采用棱镜,测距精度可达 毫米级,内置电池可适用于野外环境[9]。国内已有 商用的地基三维扫描激光雷达,如北京北科天绘科 技有限公司的 U-Arm 地面三维激光扫描仪,中海 达的 HS1200 高精度三维激光扫描仪,广州思拓力 测绘科技有限公司的 X150Plus 三维激光扫描仪和 武汉迅能光电科技有限公司的 VS1000 三维激光 扫描仪。国内也有多家科研机构和科研院开展了三 维激光扫描系统的关键技术攻关,如中国科学院光 电研究所 2007 年研制了一套地基三维激光扫描仪 原理样机:中国科学院上海光学精密机械研究所与 杭州中科天维有限公司 2011 年联合推出了"地基 全视景三维成像激光扫描仪"[10];浙江大学信息工 程学院利用二维激光传感器 LMS511 控制步进电 机实现三维扫描。上述国内三维扫描激光雷达系统 研发,测距方式采用脉冲式或相位式,其中脉冲式测量距离长且使用广泛,相位式扫描距离相对较短;脉冲频率较高,扫描速度快;扫描机构为转镜或棱镜,其中转镜扫描角度范围较大。针对以上特点,地基三维扫描激光雷达系统在设计时多采用脉冲式测距,扫描机构为匀速转镜,由电机旋转二维扫描平面实现三维扫描,水平和垂直方向扫描范围为 360°。

文中设计的三维扫描激光雷达系统,通过激光 雷达数据采集与控制系统设计,实现实时三维点云 成像。激光雷达数据采集大多采用通用数据采集 卡,但需在工控机上实现,且软硬件无法进行修改 与升级以适应采集需求的变化,而基于现场可编程 逻辑阵列 (Field Programmable Logic Array, FPGA)的激光雷达数据采集可以克服以上问题[11]。 FPGA 由于自身特点,适用于高速采集与处理领 域,基于 FPGA 的激光雷达数据采集与控制系统设 计主要有基于 ARM +FPGA、基于 FPGA + LabVIEW 和仅基于 FPGA 的三种方式,均采用 USB 通信进行数据传输[12-14]。基于 ARM+FPGA 的 方式采用 ARM 作为主控芯片, 硬件设计复杂;基 于 FPGA+LabVIEW 方式的下位机程序开发环境 只能由 NI 提供,限制了此方式的使用[15]。因此在设 计三维扫描激光雷达系统的数据采集与控制系统 时选用仅基于 FPGA 的方式,该方式结合 FPGA 数 据采集速度快和 USB 传输数据快的优势,而且其 硬件设计简单:FPGA作为主控单元,通过USB控 制器与上位机(PC 机)进行在线数据传输。上位机 软件采用 C++语言编写,负责激光雷达外设参数 配置、点云数据的读取与在线处理以及结果的实 时显示。

1 三维扫描激光雷达系统设计

三维扫描激光雷达硬件系统由三部分组成,分别为发射与接收光学单元,测距单元及扫描单元,系统设计如图1所示。发射与接收光学单元主要完成激光发射脉冲信号与回波脉冲信号的接收;测距单元中的TDC芯片计算激光发射脉冲信号与回波脉冲信号之间的时间间隔,解算后可得到被测目标的距离信息;扫描单元用于获得角度信息。

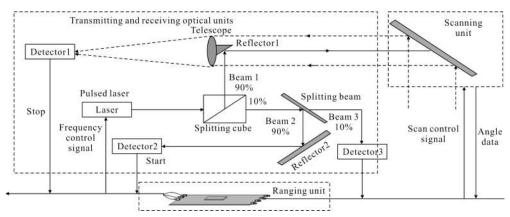


图 1 三维扫描激光雷达系统设计图

Fig.1 3D scanning LiDAR system design

1.1 发射与接收光学单元

发射与接收光学单元主要元件有激光器、望远镜、光电探测器等。激光器发射的激光脉冲(波长为1064 nm)被分束立方分成两束(反射透射比例 9:1),反射光束1经过扫描反射镜反射到目标表面,经目标反射后被望远镜系统收集,最后被光电探测器 1 采集,作为回波脉冲信号。而另一透射光束经过分束平片后又分成两束,其中光束 2 被光电探测器 2 采集作为激光发射脉冲信号;光束 3 被光电探测器 3 采集作为三维扫描成像时的同步信号之一。

1.2 测距单元

三维扫描激光雷达的测距单元主要由自动增益控制电路,时刻鉴别电路和时间测量电路三部分组成。自动增益控制和时刻鉴别是测距单元的关键技术,时间测量电路用于获得激光发射脉冲信号与回波脉冲信号之间的时间差。文中系统选用 TDC 芯片(TDC-GP22)实现高精度时间间隔测量,具有集成度高、功耗低、测量性能高等优点,使用双通道测量时单次分辨率可达 45 ps。激光发射脉冲信号进入

TDC 芯片作为开始信号(Start),回波脉冲信号经过自动增益控制电路、时刻鉴别电路之后进入 TDC 芯片作为停止信号(Stop)。TDC 芯片计算开始信号和停止信号的时间差,换算得到目标的距离信息。

1.3 扫描单元

扫描单元利用步进电机旋转二维扫描平面实现三维扫描,包括水平和垂直方向扫描。水平方向扫描通过高精度旋转台实现,旋转台定位精度为±30″。旋转台控制基于串口通信、采用 C/C++语言调用动态链接库中的函数实现。垂直方向扫描通过 45°平面反射镜和步进电机的结合来实现,反射镜是一个短边直径 50 mm 的椭圆镜;步进电机的光电编码器为增量式,用于检测电机的转动速度。

2 三维扫描激光雷达软件系统设计

为了实现被测目标的三维实时显示,设计一套 三维扫描激光雷达软件系统,主要包括上位机、下位 机和 USB 固件程序三部分,如图 2 所示。其中,上位 机接收点云数据进行存储和解算,实现三维点云成

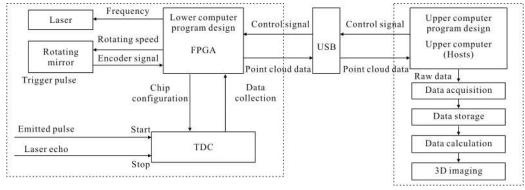


图 2 三维扫描激光雷达软件设计图

 $Fig. 2\ 3D\ scanning\ LiDAR\ system\ software\ design$

第 5 期 www.irla.cn 第 48 卷

像;下位机将采集到的点云数据传输到上位机,并接收上位机外设参数配置指令;USB 固件完成上下位机之间的数据传输。

2.1 下位机系统设计

下位机基于 FPGA 进行编程开发,主要功能是实现三维扫描激光雷达系统外设(激光器、扫描镜和TDC 芯片)的参数配置,及点云数据的采集与传输。

下位机接收到上位机的外设参数配置指令后,对其进行解析并按照指令数据设置激光器频率和扫描镜转速。TDC 芯片的初始化设置由 FPGA 完成,此外 TDC 芯片获取的激光发射脉冲信号与回波脉冲信号的时间差也由 FPGA 记录。下位机将获得的激光脚点的时间差数据与角度信息利用乒乓算法存储在 FIFO 中,通过 USB 将每一周期 (扫描镜旋转360°为一个周期)内角度信息和 TDC 时间数据上传到上位机,从而实现点云数据的采集和传输。

2.2 上位机系统设计

上位机程序采用 C++语言编写,功能主要分为两部分。一是将激光雷达外设参数配置指令传输到下位机;二是接收点云数据,数据接收后进行保存和解析成像。

上位机通过 USB 控制传输方式将外设参数配置指令下传到下位机,利用控制端点进行 USB 控制传输方式的应用程序开发,设置控制端点的传输方向、请求类型、请求代码等。为实现点云数据接收,在上位机程序中设置异步读数据的 USB 批量传输方式。点云数据接收后可进行解析与成像,上位机点云成像部分除了保持软件界面响应主线程之外,另开辟两个子线程,读取线程和成像线程。读取线程开辟一个足够大的缓存区,读取 USB 上传的数据,对数据进行解析得到点云的三维坐标;成像线程读取缓存区中的点云三维坐标之后进行实时成像。

2.3 USB 控制器 CY7C68013A 固件程序设计

USB 控制器 CY7C68013A 的固件程序是指在 芯片内部 RAM 运行的程序代码,是 USB 接口设计 的核心部分。三维扫描激光雷达系统固件程序的功 能是实现上下位机之间的数据传输。

为了实现上位机参数配置指令的控制传输,在 固件程序中添加用于控制传输的自定义函数,使用 EPOOUT 端点缓冲区,设置与上位机控制传输方式 相对应的函数索引、数据传输方向和传输数据量等。为了实现下位机点云数据上传到上位机,固件选用 Slave FIFO 异步数据传输。在 CY7C68013A 内嵌的 8051 固件中将相关寄存器配置完毕、且使 8051 固件工作在 Slave FIFO 模式下后,FPGA 即可按照 Slave FIFO 的传输时序,与主机进行高速数据传输,且 8051 固件不参与数据传输过程。

2.4 三维点云成像系统设计原理

三维扫描激光雷达系统将点云数据上传到上位 机,在上位机将数据进行解析得到点云的三维坐标, 由三维坐标可进行成像。

激光脚点的距离信息 d 可以利用 TDC 芯片得到,水平角度与垂直角度可由扫描单元获得。垂直扫描的步进电机轴中固定了光电编码器,由光电编码器得到电机转动的零位信号(Zero signal),作为垂直方向上的 0°。电机每转动一圈,产生一个零位信号。假设高精度旋转台匀速转动,旋转台的初始位置代表水平方向的 0°,其他位置的水平角度根据 0°位置计算得到。为了获取激光脚点在垂直方向和水平方向上相对于初始时刻的时间间隔,系统使用 FPGA产生一个秒脉冲(Second pulse)。结合光电编码器产生的零位信号和光电探测器采集到的激光脉冲信号(Laser pulse),利用这三种脉冲计算每个激光脚点的垂直角度和水平角度。秒脉冲、零位脉冲和激光脉冲之间的时序关系如图 3 所示。

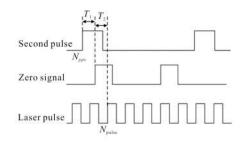


图 3 三维扫描中 FPGA 信号时序控制 Fig.3 FPGA signal timing control in 3D scanning

如图 3 所示,每一个激光脉冲相对于初始时刻的时间间隔可以分为四部分,第一部分为此激光脉冲在秒脉冲的索引号 N_{pps} ,表示第 N_{pps} 秒;第二部分为此激光脉冲所在的周期中电机零位与秒脉冲之间的时间间隔 T_1 ;第三部分为此激光脉冲所在行中第一个脉冲与最临近的电机零位之间的时间间隔 T_2 ;

www.irla.cn 第

第四部分为此激光脉冲在电机这一圈中的位置 N_{pulse} ,也就是周期内第 N_{pulse} 个发射脉冲。激光脉冲 的重复频率固定,所以发射脉冲之间的时间差可以 得到。由此可以计算得到每一个激光脉冲相对于初 始时刻(0° 位置)的时间 T,T的计算公式如下:

$$T = T_{pps} + T_1 + T_2 + N_{\text{pulse}} / f_{\text{laser}}$$
 (1)

式中: f_{laser} 为激光器重复频率。

周期(电机转动一圈)内第 N_{pulse} 个激光脉冲的水平方向角度 α 计算为:

$$\alpha = v_h \cdot (N_{pps} + T_1 + T_2 + N_{pulse} / f_{laser})$$
 (2)

式中:v,为旋转台的旋转速度。

每一圈中第 N_{pulse} 个激光脉冲的垂直角度 β 可以计算为:

$$\beta = v_{v} \cdot (T_2 + N_{\text{pulse}} / f_{\text{laser}}) \tag{3}$$

式中:v,为电机垂直方向的旋转速度。

如此,激光脚点在系统三维坐标系中的坐标可以表示为:

$$x = d\cos\beta\cos\alpha$$

$$y = d\cos\beta\sin\alpha$$

$$z = d\sin\beta$$
(4)

式中:(x, y, z) 为计算得到的激光脚点在设备三维坐标系中的坐标。

3 系统实验与结果分析

3.1 上位机和下位机传输实验

为了验证三维扫描激光雷达系统上下位机之间能正常传输数据,设计半物理实验仿真。实验细节如下:首先,利用信号发生器(型号:Tektronix AFG3252C)产生两个信号作为发射和接收信号,其频率为5kHz,幅值为3.3V,偏置为1.65V,脉宽为10ns,两个信号之间存在时间差,共进行九组实验,从第一组到第九组的两脉冲信号之间的时间间隔(时间差)设置为100~900ns,步进长度为100ns;然后,将发射与接收信号分别接入TDC芯片作为开始信号(Start)和结束信号(Stop),并使用示波器(型号:Tektronix MSO3034)观察TDC芯片接收到的波形;其次,用上位机接收TDC芯片计算的发射与接收信号之间的时间差,每组重复采集120次数据;最后,计算出接收到的每组发射与接收信号之间的时间差的平均值(Mean)、误差

(Error)和标准差(Standard Deviation, StD)。实验测量结果如表 1 所示,其中平均值为每组数据的算术平均值,计算公式如下:

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^{N} x_i}{N} \tag{5}$$

式中: μ 为测量值的平均值; x_i 为测量值;N 为每组测量值的个数。

误差为多次测量值的均值与真值之差,计算公式如下:

$$e = \mu - L \tag{6}$$

式中:e为误差;L为真值。

标准差为各测量值与其平均值之差平方的算术 平均数的平方根,计算公式如下:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (x_i - \mu)^2}$$
 (7)

式中: σ 为标准差。

从表1可以得出以下结论。第一,随着时间差的增大,时间间隔测量误差稳定在一定区间(-2.529~-2.387 ns)。第二,时间间隔测量标准差随着时间差的增大而增大,表明随着时间差的增大,时间间隔测量稳定性降低,从而可知在系统测量较远距离目标时,系统获得的测量结果的可靠性降低。

表 1 数据传输实验测量结果

Tab.1 Measurement results of data transmission experiments

True value/ns	Mean/ns	Error/ns	StD/ns
100	97.471	-2.529	0.013
200	197.513	-2.487	0.014
300	297.553	-2.447	0.010
400	397.565	-2.435	0.020
500	497.599	-2.401	0.028
600	597.558	-2.442	0.036
700	697.613	-2.387	0.031
800	797.605	-2.395	0.027
900	897.585	-2.415	0.037

3.2 扫描角度校正

在三维扫描激光雷达实时成像之前,对系统的 垂直零位和水平零位进行校正。垂直零位的校正过 程是,首先用系统扫描垂直的墙面;然后筛选出垂直 第 5 期 www.irla.cn 第 48 卷

墙面点云数据,用 MATLAB 进行平面拟合;最后计算拟合平面与 xoy 平面的夹角(小于 90°),夹角的余角即为垂直零位需要校正的角度。如图 4 所示,黑色点部分为扫描墙面得到的点云;蓝色平面为拟合平面,与 xoy 平面的夹角为 80.916°,因此垂直零位的校正角度为 9.084°。此外,水平零位需要校正的角度,可通过计算旋转台复位后在正负方向上转动的步数换算得到。

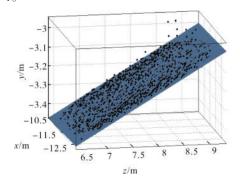


图 4 垂直方向电机零位角度校正 Fig.4 Zero-angle correction of vertical motor

3.3 三维扫描实时成像实验

为了验证三维扫描激光雷达系统可实现三维扫描实时成像,选定北京航空航天大学新主楼 D座四层大厅作为实验场景进行实验,三维扫描激光雷达系统如图 5 所示。具体的实验步骤如下:第一,利用示波器检测激光发射脉冲是否稳定;第二,在垂直零位和水平零位校正之后,利用三维扫描激光雷达系统对实验场景进行扫描,在此过程中通过上位机设置激光器频率为 5 kHz、扫描转镜的电机转速为 2 r/s、



图 5 三维扫描激光雷达系统 Fig.5 3D scanning LiDAR system

旋转台转速为 0.37 (°)/s;第三,用上位机三维点云 实时成像软件进行数据采集和实时成像。

成像结果如图 6 所示,根据三维扫描激光雷达系统的距离对彩色点云图像进行着色。图中成像结果剔除了近距离点,且对大厅四周的点云数据进行成像,三维扫描激光雷达系统旋转一周扫描的物体有不透明物质(墙面)、透明物质(玻璃)和低矮植物(盆栽)。图中红点为三维扫描激光雷达系统在实验中所在位置,定义为坐标系原点;图中正视点云为墙面、玻璃和盆栽,距离原点垂直距离为 4.74 m;侧面为墙面,距离原点垂直距离为 18.57 m;后面为墙面和走廊口,距离原点垂直距离为 5.26 m。

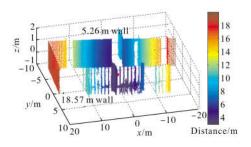


图 6 大厅三维扫描成像结果

Fig.6 3D scanning imaging results of hall

基于实验获得的点云数据,计算和统计点云数据平面拟合结果及其直方图显示,作为点云成像精度的评价指标之一。首先将距离原点垂直距离为5.26 m 和18.57 m 的墙面进行平面拟合;然后分别在两个墙面上取1500个点,计算所有统计数据的拟合误差。如图7所示,为两个距离情况下拟合误差的直方图。拟合误差可计算为:

$$\xi = \frac{Ax_i + By_i + Cz_i + D}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}$$
 (8)

式中: ξ 为拟合误差; (x_i, y_i, z_i) 为扫描点的三维坐标;Ax+By+Cz+D=0 为拟合平面的方程。

利用直方图数据分别计算拟合误差绝对值的平均值,即平面拟合精度 δ 。平面拟合精度计算公式如下:

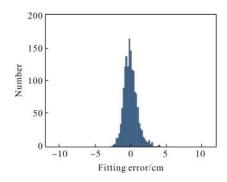
$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^{N} |\xi_i|}{N} \tag{9}$$

式中: δ 为平面拟合精度; ξ ,为各扫描点拟合误差。从图 7 可以看出:探测目标距离越远,其平面拟合精度

增大。5.26~m 和 18.57~m 墙面的平面拟合精度 δ 分 接收的时间间隔增大时,TDC 测得的时间差数据稳别是 0.68~cm 和 1.65~cm。在 5.26~m 墙面的拟合误 定性降低。由三维扫描激光雷达系统进行扫描实验, 差直方图中,拟合误差的直方统计主要集中在绝对 在成像时平面拟合效果随着扫描距离的增大而降值 3~cm 范围内。平面拟合精度(0.68~cm)可以视为 低,平面拟合精度在 20~m 扫描范围内在厘米级范

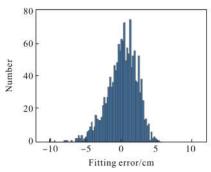
5.26 m 墙面的点云平面的平均厚度。在 18.57 m 墙面的拟合误差直方图中,拟合误差的直方统计主要集中分布在绝对值 6 cm 范围内。尽管存在部分点云测量奇异值,18.57 m 墙面的点云平面的平均厚度计算为 1.65 cm,即 18.57 m 墙面的平面拟合精度 δ。由于两个直方图近似正态型分布,随着拟合误差

的绝对值增大,拟合误差统计点数值逐渐减少,说明 三维扫描激光雷达的平面拟合精度 δ 在 20 m 扫描 范围内在厘米级范围。



(a) 5.26 m 墙面拟合误差 ξ直方图

(a) Histogram of fitting error ξ on the 5.26 m wall



(b) 18.57 m 墙面拟合误差 ξ直方图

(b) Histogram of fitting error ξ on the 18.57 m wall 图 7 5.26 m 墙面和 18.57 m 墙面的平面拟合误差 Fig.7 Fitting error of 5.26 m and 18.57 m walls

4 结束语

文中介绍一种三维扫描激光雷达系统,系统可实现三维扫描和点云数据实时成像。由上位机和下位机数据传输实验可知激光雷达测距系统 TDC 芯片存在固有的时间测量误差;激光雷达系统发射与

参考文献:

[1] Zhang Xinting, An Zhiyong, Kang Lei. Design of 3D laser radar transmitting/receiving common path optical system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(6): 0618004. (in Chinese)

围。未来可通过误差溯源,扫描机构标定等方式,进

一步提高三维扫描激光雷达系统点云成像精度。

- 张欣婷, 安志勇, 亢磊. 三维激光雷达发射/接收共光路光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(6): 0618004.
- [2] Yan Jie, Ruan Youtian, Xue Peiyao. Active and passive optical image fusion technology [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8 (3): 378–385. (in Chinese) 严洁, 阮友田, 薛珮瑶. 主被动光学图像融合技术研究[J]. 中国光学, 2015, 8(3): 378–385.
- [3] Du Yan, Wu Zhixiang, Xie Mowen, et al. Optimal layout of calibration target in terrestrial laser scanning [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(4): 757-763. (in Chinese) 杜岩, 吴志祥, 谢谟文, 等. 地面激光扫描标靶的优化布设[J]. 光学 精密工程, 2018, 26(4): 757-763.
- [4] Zhang Wenjun. 3D laser scanning technology and its application [J]. *Standardization of Surveying and Mapping*, 2016, 32(2): 42-44. (in Chinese) 张文军. 三维激光扫描技术及其应用 [J]. 测绘标准化, 2016, 32(2): 42-44.
- [5] Lu Xianyang, Li Xuebin, Qin Wubin, et al. Retrieval of horizontal distribution of aerosol mass concentration by micro pulse lidar [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25 (7): 1697–1704. (in Chinese) 鲁先洋, 李学彬, 秦武斌, 等. 微脉冲激光雷达反演气溶胶的水平分布[J]. 光学 精密工程, 2017, 25(7): 1697–1704.
- [6] Szwarkowski D, Moskal M. Assessment of deformations in mining areas using the Riegl VZ-400 terrestrial laser scanner [C]//E3S Web of Conferences. EDP Sciences, 2018, 36: 02009.
- [7] Bodin X, Thibert E, Sanchez O, et al. Multi –annual kinematics of an active rock glacier quantified from very high –resolution DEMs: an application –case in the french alps [J]. Remote Sensing, 2018, 10(4): 547.

第 5 期 www.irla.cn 第 48 卷

- [8] González-Jorge H, Rodríguez-Gonzálvez P, Shen Y, et al. Metrological intercomparison of six terrestrial laser scanning systems [J]. *IET Science, Measurement & Technology*, 2017, 12(2): 218-222.
- [9] Shan J, Toth C K. Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing [M]. Boca Raton: CRC Press, 2009: 87–128.
- [11] Wen Fei, Xia Longsheng, Liang Futian, et al. Development of lidar data acquisition system for visibility measurement [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(1): 52-56. (in Chinese) 文斐, 夏龙生, 梁福田, 等. 激光雷达能见度仪数据采集系统的研制[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(1): 52-56.
- [12] Wang Fei, Tang Wei, Wang Tingfeng, et al. Design of 3D laser imaging receiver based on 8 x 8 APD detector array
 [J]. Chinese Optics, 2015, 8(3): 422-427. (in Chinese)

- 王飞, 汤伟, 王挺峰, 等. 8×8APD 阵列激光三维成像接收机研制[J]. 中国光学, 2015, 8(3): 422-427.
- [13] Huang Jian, Hu Shunxing, Cao Kaifa, et al. Design of three dimensional scanning control system for air pollution monitoring Lidar based on LabVIEW [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2013, 8(2): 124–129. (in Chinese) 黄见,胡顺星,曹开法,等. 基于 LabVIEW 的测污激光雷达三维扫描控制系统的设计 [J]. 大气与环境光学学报,2013, 8(2): 124–129.
- [14] Cheng Guimei, Liu Tao, Rong Peng, et al. Design of multidetector data control and processing system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(4): 0420002. (in Chinese) 成桂梅, 刘涛, 荣鹏, 等. 多探测器数据控制与处理系统设计[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(4): 0420002.
- [15] Yuan Baohong, Fu Kui, Zhang Dexiang. USB data acquisition and transmission system based on FPGA and LabVIEW [J]. Instrument Technique and Sensor, 2013(9): 24–27. (in Chinese) 袁宝红,付奎,张德祥. 基于 FPGA 和 LabVIEW 的 USB 数据采集与传输系统[J]. 仪表技术与传感器, 2013(9): 24–27.