

引文格式:杨必胜,梁福逊,黄荣刚.三维激光扫描点云数据处理研究进展、挑战与趋势[J].测绘学报,2017,46(10):1509-1516. DOI:10.11947/j.AGCS.2017.20170351.
YANG Bisheng, LIANG Fuxun, HUANG Ronggang. Progress, Challenges and Perspectives of 3D LiDAR Point Cloud Processing[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1509-1516. DOI: 10.11947/j.AGCS.2017.20170351.

三维激光扫描点云数据处理研究进展、挑战与趋势

杨必胜,梁福逊,黄荣刚

武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,湖北 武汉 430079

Progress, Challenges and Perspectives of 3D LiDAR Point Cloud Processing

YANG Bisheng, LIANG Fuxun, HUANG Ronggang

State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: 3D LiDAR can perform an intensive sampling of the earth surface in a direct way, and yield the 3D point cloud that contains numerous and scattered points with the coordinates (X, Y, Z) and attributes (e.g., intensity). As the vital 3D geospatial data for description of the world in the digital era, 3D point cloud plays an important role not only in earth science researches but also in national requirements (e.g., global change analysis, global mapping, and smart city). Inspired by sensor technologies and national requirements, 3D LiDAR has got great progresses in hardware, data processing and applications, and is facing new challenges. Following the history of 3D LiDAR, this paper first reviews the status of 3D LiDAR system, and introduces the development of key technologies in data processing. Then the typical applications of 3D LiDAR in surveying and other related fields are listed, and current challenges in point cloud processing are concluded. Finally, some future perspectives are presented.

Key words: 3D LiDAR; point cloud; point cloud fusion; object extraction; 3D representation; ubiquitous point cloud

Foundation support: The Key Program of The National Natural Science Foundation of China(Nos. 41531177; 41371431); The National Natural Science Foundation of China(No. 41371431); The National Science and Technology Support Program (No. 2014BAL05B07); The National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFF0103501)

摘 要: 三维激光扫描直接对地球表面进行三维密集采样,可快速获取具有三维坐标(X, Y, Z)和一定属性(反射强度等)的海量、不规则空间分布三维点云,成为数字化时代下刻画复杂现实世界最为直接和重要的三维地理空间数据获取手段,在全球变化、智慧城市、全球制图等国家重大需求和地球系统科学研究中起到十分重要的作用。目前,在传感器技术和国家需求的双重驱动下,三维激光扫描在硬件装备、三维点云数据处理以及应用 3 个方面取得了巨大的进步,同时也面临新的挑战。本文以三维激光扫描的发展历史为线索,总结了三维激光扫描系统的现状、三维点云数据处理的关键进展以及在测绘地理信息等领域的典型应用,并分析了三维点云数据处理面临的挑战,最后展望了三维激光扫描与点云处理的发展趋势。

关键词: 三维激光扫描;点云;点云融合;目标提取;三维表达;广义点云模型

中图分类号: P237 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-1595(2017)10-1509-08

基金项目: 国家自然科学基金重点/面上项目(41531177;41371431);国家科技支撑项目(2014BAL05B07);国家重点研发计划(2016YFF0103501)

激光扫描/激光雷达(light detection and ranging, LiDAR)是一种非接触主动式快速获取物体表面三维密集点云的技术,已成为高时空分辨率三维对地观测的一种主要手段^[1]。该技术可

直接获取具有三维坐标(X, Y, Z)和一定属性(反射强度等)的海量、不规则空间分布的三维点云,而且受天气影响小,同时具有一定的穿透性,在全球变化、智慧城市、资源调查、环境监测、基础测绘等领域发挥越来越重要的作用^[2]。

经过 20 多年的发展,三维激光扫描硬件在稳定性、精度、易操作性等方面取得了长足的进步,尤其是在机载/车载/地面三维激光扫描方面进展显著,其中具有代表性的三维激光扫描硬件研制厂商包括:Riegl、Leica、Optech、Velodyne、北科天绘、海达数云等。此外还有美国 NASA 的 ICESat 和中国资源三号 02 星搭载的激光雷达。

在三维点云数据处理软件方面,商业化的软件主要有 TerraSolid 公司的 TerraSolid、Trimble 公司的 RealWorks、Leica 公司的 Cyclone、Bentley 公司的 Pointools、Orbit GT 公司的 Orbit Mobile Mapping 等,以及国内科研院所和公司开发的一些工具软件。其重点主要集中在点云数据的管理、面向 DEM 生产的滤波^[3-4]、三维建筑物提取及重建^[5-6]、森林垂直结构参数提取^[7]等方面。相对三维激光扫描硬件设备的快速发展而言,三维点云的智能化处理发展较为落后,点云处理的智能化水平、软件界面友好性、专业化应用数据接口等方面还有待提高。

在回顾三维激光扫描发展历史的基础上,本文分析总结了三维激光扫描硬件装备、三维点云数据处理以及工程化实践方面取得的成就和面临的挑战,最后展望三维激光扫描与点云处理的发展趋势。

1 三维激光扫描硬件系统的现状

近 20 多年来,国内外厂商在三维激光扫描硬件系统方面进行了各种努力和创新。表 1 列举了目前以星/机/车/地为搭载平台的几类典型激光扫描硬件系统及其参数指标。从技术发展趋势来看,三维激光扫描正在从低精度(厘米级)获取向高精度(毫米级)获取,从几何与强度的采集走向几何与多/高光谱协同采集。相比国外,国内激光扫描硬件起步晚且仍有较大差距。此外,便携式/背包式/无人机为平台的轻小型三维激光扫描装备正蓬勃发展。例如:Riegl 公司研制的集成 VUX 的低空无人旋翼机激光扫描系统,武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室研制的低空无人直升机激光扫描系统 Heli-Mapping,北京拓

维思科技有限公司研制的“巡线鹰”等。随着 SLAM(simultaneous location and mapping)等技术的发展,三维激光扫描通过与机器人等平台集成,可实现自主测量^[8]。

三维激光扫描系统的几何测量原理基本相同,通过激光发射点与目标之间的距离结合激光发射器的位置和姿态信息进行联合解算,得到目标区域的三维点云(x, y, z)。其中,距离的观测方式主要采用脉冲式测距。根据观测目标的几何结构不同,单条激光束可能有多个回波^[10],准确分离和探测每个回波是距离观测的基础。对于多回波和全波形两种回波记录方式,其回波探测方法有所不同。多回波方式在数据获取过程中利用简单的回波探测方法(constant fraction discriminator, CFD)实时检测回波^[11],但存在一些问题:算法对用户保密;算法过于简单,对复杂波形处理效果较差,容易造成部分回波漏提取。全波形方式则以一定间隔不断记录后向散射信号,并提供给用户进行后续波形处理,以得到回波的位置及形状参数,常用的处理方法有:高斯分解^[12]、去卷积方法^[13]等。

2 三维点云数据处理的重要进展

与传统的测量方式相比,三维激光扫描数据采集速度快、采样频率高等优势,导致点云数据具有高冗余、误差分布非线性、不完整等特点,给海量三维点云的智能化处理带来了极大的困难:①多视角、多平台、多源的点云数据难以有效整合,限制了数据间的优势互补,导致复杂场景描述不完整;②复杂对象模型结构和语义特征表达困难,模型可用性严重受限,极大地限制了复杂场景的准确感知与认知。近年来,国内外学者在点云处理理论以及数据质量改善、自动化融合、点云分类和目标提取、按需多层次表达等方法方面进行了深入研究,取得的主要进展如下。

2.1 广义点云模型理论方法

针对多源多平台点云数据的融合难、目标提取难和三维自适应表达难的严重缺陷,文献[14]提出了广义点云的科学概念与理论研究框架体系。广义点云是指汇集激光扫描、摄影测量、众源采集等多源多平台空间数据,通过清洗、配准与集成,实现从多角度、视相关到全方位、视无关,建立以点云为基础,基准统一,且数据、结构、功能为一体的复合模型(如图 1)。

表 1 各类平台激光扫描系统参数指标

Tab.1 Parameters of laser scanning systems of various platforms

平台	激光扫描系统	波长/nm	最大测距	最大扫描频率	视场角	重量/kg	用途
卫星平台	ICESat/GLAS ¹	532	600 km	40 Hz	—	—	532 nm: 云高、大气气溶胶测量;
		1064					1064 nm: 冰盖监测、全球森林生物量估算、陆地高程测量
	ZY3-02 ^[9]	1064	520 km	2 Hz	—	40	地表高程控制点测量,辅助卫星影像无控立体测图
机载平台	Riegl ²	VQ-1560i	1064	5800 m	1.33 MHz	58°	60
		MiniVUX-1UAV	1064	250 m	0.1 MHz	360°	1.55
	Leica ³ (ALS80-UP)		1064	5000 m	1.0 MHz	72°	—
			532				
	Optech ⁴ (Titan)		1064	2000 m	0.9 MHz	60°	71
			1550				
车载平台	北科天绘 ⁵ (AP-3500)		1064	3500 m	0.6 MHz	70°	20
	Riegl (VMX-1HA)		1064	420 m	0.6 MHz	360°	28
	Leica (Pegasus)		1064	119 m	1.0 MHz	360°	13.5
地面站平台	Optech (Lynx HS-600)		1064	130 m	0.8 MHz	360°	—
	北科天绘(RA-0600)		1064	300 m	0.3 MHz	360°	15
	海达数云 ⁶ (HiScan-C Su 2)		1064	650 m	0.1 MHz	360°	25
	Riegl (VZ-6000)		1064	6000 m	0.3 MHz	H:360° V: 60°	14.5
	Leica(P40)		1064	270 m	1 MHz	H:360° V: —	—
	Optech(TLS-250)		1550	1600 m	0.5 MHz	H:360° V:120°	—
	北科天绘(UA-1500)		1064	3600 m	0.6 MHz	H:360° V:150°	10
	海达数云(HS450)		1064	450 m	500 KHz	H:360° V:100°	11

注:“—”代表生产商未公布相应参数

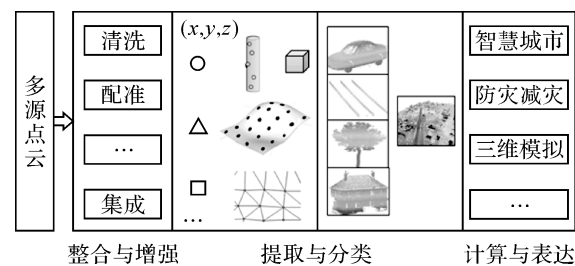


图 1 广义点云数据模型

Fig.1 Ubiquitous point cloud model

2.2 三维点云数据质量改善

点云数据质量改善包括几何改正和强度校正。一方面,由于测距系统、环境及定位定姿等因

素的影响,点云的几何位置存在误差,且其分布存在不确定性。利用标定场、已知控制点进行点云几何位置改正,能够提高扫描点云的位置精度和可用性。另一方面,激光点云的反射强度一定程度上反映了地物的物理特性,对于地物的精细分类起到关键支撑作用,然而点云的反射强度不仅与地物表面的物理特性有关,还受到扫描距离、入射角度等因素的影响。因此,需要建立点云强度校正模型进行校正,以修正激光入射角度、地物距离激光扫描仪的距离等因素对点云反射强度的影响^[10,15]。

2.3 多源、多平台三维点云融合

由于单一视角、单一平台的观测范围有限且

¹ <http://www.csr.utexas.edu/glas/>
² <http://www.riegl.com/>
³ <http://digital-imaging.leica-geosystems.com/en/index.htm>
⁴ <http://www.teledyneoptech.com/>
⁵ <http://www.isurestar.com/>
⁶ <http://www.hi-cloud.com.cn/>

空间基准不一致,为了获取目标区域全方位的空间信息,不仅需要进行站间/条带间的点云融合,还需要进行多平台(如机载、车载、地面站等)的点云融合,以弥补单一视角、单一平台带来的数据缺失,实现大范围场景完整、精细的数字现实描述^[16-18]。此外,由于激光点云及其强度信息对目标的刻画能力有限,需要将激光点云和影像数据进行融合,使得点云不仅有高精度的三维坐标信息,也具有了更加丰富的光谱信息^[19-20]。

不同数据(如不同站点/条带的激光点云、不同平台激光点云、激光点云与影像)之间的融合,需要同名特征进行关联。针对传统人工配准法效率低、成本高的缺陷,国内外学者研究基于几何或纹理特征相关性的统计分析方法^[21-22],但是由于不同平台、不同传感器数据之间的成像机理、维数、尺度、精度、视角等各有不同,其普适性和稳健性还存在问题,还需要突破以下瓶颈:鲁棒、区分性强的同名特征提取,全局优化配准模型的建立及抗差求解。

2.4 三维点云的精细分类与目标提取

三维点云的精细分类是从杂乱无序的点云中识别与提取人工与自然地物要素的过程^[4,23-26],是数字地面模型生成、复杂场景三维重建等后续应用的基础。然而,不同平台激光点云分类关注的主题有所不同。机载激光点云分类主要关注大范围地面、建筑物顶面、植被、道路等目标^[3-4,23,27-29],车载激光点云分类关注道路及两侧道路设施、植被、建筑物立面等目标^[25,30-32],而地面站激光点云分类则侧重特定目标区域的精细化解译^[33]。其中,点云场景存在目标多样、形态结构复杂、目标遮挡和重叠以及空间密度差别迥异等现象,是三维点云自动精细分类的共同难题。据此,国内外许多学者进行了深入研究并取得了一定的进展,在特征计算基础上,利用逐点分类方法^[34-35]或分割聚类分类方法^[25,30-31]对点云标识,并对目标进行提取。但是由于特征描述能力不足,分类和目标提取质量无法满足应用需求,极大地限制了三维点云的使用价值。目前,模拟人脑的深度学习方法突破了传统分类方法中过度依赖人工定义特征的困难,已在二维场景分类解译方面表现出极大潜力^[36],但是在三维点云场景的精细分类方面,还面临许多难题:海量三维数据集样本库的建立,适用于三维结构特征学习的神经网络模型的构建及其在大场景三维数据解译中的应

用。综上,顾及目标及其结构的语义理解,三维目标多尺度全局与局部特征的学习,先验知识或第三方辅助数据引导下的多目标分类与提取方法,是未来的重要研究方向。

2.5 三维场景的按需多层次表达

在大范围点云场景分类和目标提取后,目标点云依然离散无序且高度冗余,不能显式地表达目标结构以及结构之间的空间拓扑关系,难以有效满足三维场景的应用需求。因此,需要通过场景三维表达,将离散无序的点云转换成具有拓扑关系的几何基元组合模型,常用的有数据驱动和模型驱动两类方法^[5-6],其中存在的主要问题和挑战包括:三维模型的自动修复,以克服局部数据缺失对模型不完整的影响^[37];形状、结构复杂地物目标的自动化稳健重构;从可视化为主的三维重建发展到可计算分析为核心的三维重建,以提高结果的可用性和好用性。此外,不同的应用主题对场景内不同类型目标的细节层次要求不同^[38],场景三维表达需要加强各类三维目标自适应的多尺度三维重建方法^[23,39-40],建立语义与结构正确映射的场景—目标—要素多级表达模型。

2.6 典型行业和重大工程应用

三维激光扫描已在许多重大工程和典型领域里得到了广泛的应用。从深空到地球表面,从全球范围制图到小区域监测,从基础科学研究到大众服务,三维激光扫描都展现出了与众不同的优势。

2.6.1 深空探测

深空探测的目的是促进人类对月球以及更遥远天体的科学认识,而距离测量是其中的关键技术,许多国家采用激光测高仪进行星体地形表面的测量,如1971年美国阿波罗-15首次进行的月球形状测量等^[41]。

2.6.2 地球科学应用研究

数字地面模型是各种地学过程研究的基础,利用三维激光扫描系统观测地表形态及其变化,已被广泛用于各类地学应用,例如:全球冰川物质平衡^[42-43],地质灾害区域时空变化监测^[44-45],海岸线提取和海岸侵蚀监测^[46-47],海底测绘及水下目标探测^[48]等。

2.6.3 森林资源调查

及时准确了解林区的植被动态变化是林业科学研究的基础。相比光学遥感,激光雷达能够获取植被冠层的三维结构;地面激光雷达用于精细

地获取单株树木的垂直结构^[7],机载激光雷达用于大范围森林的蓄积量和生物量等生态参数的反演^[49-51],星载激光雷达还可以进行全球植被覆盖及其生态参数制图^[52-53]。

2.6.4 城市形态分析

城市形态分析对城市规划设计与管理具有重要意义,传统手段难以监测城市形态的垂直结构及其演化,激光雷达可以快速获取城市三维形态,为更精细的城市形态分析提供基础,满足基于城市形态的各种应用需求,如基础设施管理、太阳能潜力估计等^[54-55]。

2.6.5 无人驾驶高精度地图

高精度地图是实现自动化驾驶的关键因素^[25],车载三维激光扫描系统可以高效、快速的获得道路以及周边高精度、高密度的三维几何信息和纹理信息,为高精度地图的自动化生产提供高质量的数据支撑^[56]。

2.6.6 电力走廊安全巡检

我国电力资源分布和经济建设中心不一致,高压输电线路区域地理环境复杂,传统的人工巡检手段难以适应。机载三维激光扫描可以直接获取电力线及其附属设备的几何形态参数^[57],为电力巡检提供了新的手段^[58]。

2.6.7 海岛礁测绘

精确的海岛礁基础地理空间信息是海洋管理、经济开发、海防安全的重要依据,传统测绘手段作业周期长、成本高,三维激光扫描可以直接观测目标的三维空间信息,直接生产数字测绘产品,是岛礁高精度测图的重要手段。

2.6.8 文化遗产数字化保护

文化遗产数字化保护是人类共同的历史责任。三维激光扫描可以快速绘制物质文化遗产的结构图和精细的三维模型,大幅提高文化遗产保护的工作效率,并丰富文化遗产成果表现形式^[59-60]。

3 点云处理面临的挑战

近年来,星、空、地扫描以及便携式泛在传感器(如:RGB-D 深度相机)广泛运用,不但提高了点云获取的时效性、颗粒度和覆盖面,而且带来了点云的多时相、流形(streaming)和多样属性的新特性,从而产生了多维点云数据。多维点云本质上是对物理世界中地理对象/现象的三维几何、物理乃至生化特性的多维密集采样,其不但记录了

地物的三维空间结构特征,同时也记录了地物目标的物理特性(如波形、反射强度等)。深入挖掘多维点云的内在特征对提升多维点云处理的智能化程度,揭示复杂动态三维场景的变化规律至关重要。尽管点云处理方面已经取得了较好的研究成果,但是多维点云的智能化处理方面仍然面临如下的巨大挑战:

3.1 多维点云几何与属性协同的尺度转换

探索不同平台获取点云的误差分布规律,建立比例尺依赖的特征点质量评估模型;研究融合点云物理特性的特征点簇聚合与分层方法;建立基于特征分层的多维点云多尺度整合方法,实现多维点云的时空基准自动统一。

3.2 多维点云变化发现与分类

建立统一时空参考框架下多维点云的变化发现与提取方法,研究基于时间窗口的多维点云与地物三维模型的关联方法,提取地物空间要素的几何和属性变化,研究面向地物空间结构变化的可视化分析方法,为揭示空间要素的变化规律提供科学工具。

3.3 复杂三维动态场景的精准理解

基于机器学习、人工智能等先进理论方法探索多维点云结构化建模与分析的理论与方法,研究建立复杂三维动态场景中多态目标的准确定位、分类以及语义化模型的建立,建立面向多维点云的三维动态场景中各类要素的特征描述、分类与建模方法,架设多维点云与地理计算模型的桥梁。

上述关键挑战问题的突破将形成完备的广义点云全三维(覆盖全、要素全、关系全)建模的理论与方法体系,从而实现点云处理由“静态、可视、量算”到“动态、模拟、分析”的跨越。

4 三维激光扫描与点云处理发展趋势与展望

近年来,传感器、通信和定位定姿技术的发展,人工智能、深度学习、虚拟/增强现实等领域先进技术的重要进展有力推动了数字现实(digital reality)时代的来临。激光扫描与点云智能化处理将顺应数字现实时代的需求朝以下几个方面发展。

(1) 三维激光扫描装备将由现在的单波形、多波形走向单光子乃至量子雷达,在数据的采集方面由现在已几何数据为主走向几何、物理,乃至

生化特性的集成化采集。

(2) 三维激光扫描的搭载平台也将以单一平台为主转变为以多源化、众包式为主的空地柔性平台,从而对目标进行全方位数据获取,当前国家重点研发计划重点专项项目:国产空地全息三维遥感系统及产业化(编号:2016YFF0103500)已支持相关研究。

(3) 点云的特征描述、语义理解、关系表达、目标语义模型、多维可视化等关键问题将在人工智能、深度学习等先进技术的驱动下朝着自动化、智能化的方向快速发展,点云将成为测绘地理信息中继传统矢量模型、栅格模型之后的一类新型模型,将有力提升地物目标认知与提取自动化程度和知识化服务的能力。

(4) 虚拟/增强现实、互/物联网+的发展将促使三维激光扫描产品由专业化应用扩展到大众化、消费级应用,满足网络化多维动态地理信息服务的需求。

参考文献:

[1] 隋立春, 张宝印. Lidar 遥感基本原理及其发展[J]. 测绘科学技术学报, 2006, 23(2): 127-129.
SUI Lichun, ZHANG Baoyin. Principle and Trend of Airborne Laser Scanning Remote Sensing[J]. Journal of Zhengzhou Institute of Surveying and Mapping, 2006, 23(2): 127-129.

[2] VOSSelman G, MAAS H G. Airborne and Terrestrial Laser Scanning[M]. Boca Raton, FL: CRC Press, 2010.

[3] HU Han, DING Yulin, ZHU Qing, et al. An Adaptive Surface Filter for Airborne Laser Scanning Point Clouds by Means of Regularization and Bending Energy [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2014(92): 98-111.

[4] YANG Bisheng, HUANG Ronggang, DONG Zhen, et al. Two-Step Adaptive Extraction Method for Ground Points and Breaklines from Lidar Point Clouds[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2016 (119): 373-389.

[5] PERERA G S N, MAAS H G. Cycle Graph Analysis for 3D Roof Structure Modelling: Concepts and Performance[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2014 (93): 213-226.

[6] XIONG B, JANCOSEK M, ELBERINK S O, et al. Flexible Building Primitives for 3D Building Modeling[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2015 (101): 275-290.

[7] YANG Bisheng, DAI Wenxia, DONG Zhen, et al. Automatic Forest Mapping at Individual Tree Levels from Terrestrial Laser Scanning Point Clouds with A Hierarchical Minimum

Cut Method[J]. Remote Sensing, 2016, 8(5): 372.

[8] 李德仁, 王密, 沈欣, 等. 从对地观测卫星到对地观测脑[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(2): 143-149.
LI Deren, WANG Mi, SHEN Xin, et al. From Earth Observation Satellite to Earth Observation Brain [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2017, 42(2): 143-149.

[9] 唐新明, 李国元, 高小明, 等. 卫星激光测高严密几何模型构建及精度初步验证[J]. 测绘学报, 2016, 45(10): 1182-1191. DOI: 10.11947/j.AGCS.2016.20150357.
TANG Xinming, LI Guoyuan, GAO Xiaoming, et al. The Rigorous Geometric Model of Satellite Laser Altimeter and Preliminarily Accuracy Validation[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016, 45(10): 1182-1191. DOI: 10.11947/j.AGCS.2016.20150357.

[10] YAN W Y, SHAKER A, EL-ASHMAWY N. Urban Land Cover Classification Using Airborne LiDAR Data: A Review[J]. Remote Sensing of Environment, 2015(158): 295-310.

[11] BALTSAVIAS E P. Airborne Laser Scanning: Basic Relations and Formulas[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1999, 54(2-3): 199-214.

[12] CHAUVE A, VEGA C, DURRIEU S, et al. Advanced Full-Waveform Lidar Data Echo Detection: Assessing Quality of Derived Terrain and Tree Height Models in An Alpine Coniferous Forest [J]. International Journal of Remote Sensing, 2009, 30(19): 5211-5228.

[13] WANG Chisheng, LI Qingquan, LIU Yanxiong, et al. A Comparison of Waveform Processing Algorithms for Single-Wavelength LiDAR Bathymetry[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2015 (101): 22-35.

[14] YANG Bisheng, WANG Jinling. Mobile Mapping with Ubiquitous Point Clouds[J]. Geo-Spatial Information Science, 2016, 19(3): 169-170.

[15] 谭凯, 程效军, 张吉星. TLS强度数据的入射角及距离效应改正方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42 (2): 223-228.
TAN Kai, CHENG Xiaojun, ZHANG Jixing. Correction for Incidence Angle and Distance Effects on TLS Intensity Data[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2017, 42(2): 223-228.

[16] YANG Bisheng, ZANG Yufu, DONG Zhen, et al. An Automated Method to Register Airborne and Terrestrial Laser Scanning Point Clouds[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2015(109): 62-76.

[17] YANG Bisheng, DONG Zhen, DAI Wenxia, et al. Automatic Registration of Multi-View Terrestrial Laser Scanning Point Clouds in Complex Urban Environments [C] // Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Spatial Data Mining and Geographical Knowledge Services. Fuzhou, China: IEEE, 2015: 141-146.

- [18] 陈良良, 隋立春, 蒋涛, 等. 地面三维激光扫描数据配准方法[J]. 测绘通报, 2014(5): 80-82. DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2014.0163.
- CHEN Liangliang, SUI Lichun, JIANG Tao, et al. The Methods of Data Registration in Terrestrial 3D Laser Scanning[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2014(5): 80-82. DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2014.0163.
- [19] 陈驰, 杨必胜, 彭向阳. 低空 UAV 激光点云和序列影像的自动配准方法[J]. 测绘学报, 2015, 44(5): 518-525. DOI: 10.11947/j.AGCS.2015.20130558.
- CHEN Chi, YANG Bisheng, PENG Xiangyang. Automatic Registration of Low Altitude UAV Sequent Images and Laser Point Clouds[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015, 44(5): 518-525. DOI: 10.11947/j.AGCS.2015.20130558.
- [20] 张良, 马洪超, 高广, 等. 点、线相似不变性的城区航空影像与机载激光雷达点云自动配准[J]. 测绘学报, 2014, 43(4): 372-379. DOI: 10.13485/j.cnki.11-2089.2014.0056.
- ZHANG Liang, MA Hongchao, GAO Guang, et al. Automatic Registration of Urban Aerial Images with Airborne LiDAR Points Based on Line-point Similarity Invariants[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2014, 43(4): 372-379. DOI: 10.13485/j.cnki.11-2089.2014.0056.
- [21] YANG Bisheng, DONG Zhen, LIANG Fuxun, et al. Automatic Registration of Large-scale Urban Scene Point Clouds Based on Semantic Feature Points[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2016(113): 43-58.
- [22] YANG Bisheng, ZANG Yufu. Automated Registration of Dense Terrestrial Laser-scanning Point Clouds Using Curves[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2014(95): 109-121.
- [23] YANG Bisheng, HUANG Ronggang, LI Jianping, et al. Automated Reconstruction of Building LoDs from Airborne LiDAR Point Clouds Using an Improved Morphological Scale Space[J]. Remote Sensing, 2017, 9(1): 14.
- [24] FANG Lina, YANG Bisheng, CHEN Chongcheng, et al. Extraction 3D Road Boundaries from Mobile Laser Scanning Point Clouds[C]//Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Spatial Data Mining and Geographical Knowledge Services. Fuzhou, China: IEEE, 2015: 162-165.
- [25] YANG Bisheng, DONG Zhen, LIU Yuan, et al. Computing Multiple Aggregation Levels and Contextual Features for Road Facilities Recognition Using Mobile Laser Scanning Data[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2017(126): 180-194.
- [26] YANG Bisheng, XU Wenxue, YAO Wei. Extracting Buildings from Airborne Laser Scanning Point Clouds Using A Marked Point Process[J]. GIScience & Remote Sensing, 2014, 51(5): 555-574.
- [27] ZHANG Zhenxin, ZHANG Liqiang, TONG Xiaohua, et al. A Multilevel Point-cluster-based Discriminative Feature for ALS Point Cloud Classification[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016, 54(6): 3309-3321.
- [28] LIU Chun, SHI Beiqi, YANG Xuan, et al. Automatic Buildings Extraction From LiDAR Data in Urban Area by Neural Oscillator Network of Visual Cortex[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2013, 6(4): 2008-2019.
- [29] 隋立春, 张熠斌, 张硕, 等. 基于渐进三角网的机载 LiDAR 点云数据滤波[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2011, 36(10): 1159-1163.
- SUI Lichun, ZHANG Yibin, ZHANG Shuo, et al. Filtering of Airborne LiDAR Point Cloud Data Based on Progressive TIN[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2011, 36(10): 1159-1163.
- [30] YANG Bisheng, DONG Zhen, ZHAO Gang, et al. Hierarchical Extraction of Urban Objects from Mobile Laser Scanning Data[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2015(99): 45-57.
- [31] YANG Bisheng, DONG Zhen. A Shape-based Segmentation Method for Mobile Laser Scanning Point Clouds[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2013(81): 19-30.
- [32] YU Yongtao, LI J, GUAN Haiyan, et al. Automated Extraction of Urban Road Facilities Using Mobile Laser Scanning Data[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16(4): 2167-2181.
- [33] LI Zhuqiang, ZHANG Liqiang, TONG Xiaohua, et al. A Three-Step Approach for TLS Point Cloud Classification[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016, 54(9): 5412-5424.
- [34] GU Yanfeng, WANG Qingwang, XIE Bingqian. Multiple Kernel Sparse Representation for Airborne LiDAR Data Classification[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2017, 52(2): 1085-1105.
- [35] GUO Bo, HUANG Xianfeng, ZHANG Fan, et al. Classification of Airborne Laser Scanning Data Using Jointboost[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2015(100): 71-83.
- [36] LECUN Y, BENGIO Y, HINTON G. Deep Learning[J]. Nature, 2015, 521(7553): 436-444.
- [37] ELBERINK S O, VOSSelman G. Building Reconstruction by Target Based Graph Matching on Incomplete Laser Data: Analysis and Limitations[J]. Sensors, 2009, 9(8): 6101-6118.
- [38] BILJECKI F, LEDOUX H, STOTER J, et al. Formalisation of the Level of Detail in 3D City Modelling[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2014(48): 1-15.
- [39] BILJECKI F, LEDOUX H, STOTER J. An Improved LOD

- Specification for 3D Building Models[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2016(59): 25-37.
- [40] VERDIE Y, LAFARGE F, ALLIEZ P. LOD Generation for Urban Scenes[J]. ACM Transactions on Graphics, 2015, 34(3): 30.
- [41] SJOGREN W L, WOLLENHAUPT W R. Lunar Shape Via the Apollo Laser Altimeter[J]. Science, 1973, 179 (4070): 275-278.
- [42] BOLCH T, SRENSSEN L S, SIMONSEN S B, et al. Mass Loss of Greenland's Glaciers and Ice Caps 2003—2008 Revealed from ICESat Laser Altimetry Data[J]. Geophysical Research Letters, 2013, 40(5): 875-881.
- [43] RADIC V, HOCK R. Glaciers in the Earth's Hydrological Cycle: Assessments of Glacier Mass and Runoff Changes on Global and Regional Scales[J]. Surveys in Geophysics, 2014, 35(3): 813-837.
- [44] JEBUR M N, PRADHAN B, TEHRANY M S. Optimization of Landslide Conditioning Factors Using Very High-Resolution Airborne Laser Scanning (LiDAR) Data at Catchment Scale[J]. Remote Sensing of Environment, 2014(152): 150-165.
- [45] TOMÁS R, LI Zhenhong. Earth Observations for Geohazards: Present and Future Challenges [J]. Remote Sensing, 2017, 9(3): 194.
- [46] JOHNSTONE E, RAYMOND J, OLSEN M J, et al. Morphological Expressions of Coastal Cliff Erosion Processes in San Diego County[J]. Journal of Coastal Research, 2016(76): 174-184.
- [47] PAINE J G, CAUDLE T L, ANDREWS J R. Shoreline and Sand Storage Dynamics from Annual Airborne LIDAR Surveys, Texas Gulf Coast [J]. Journal of Coastal Research, 2017, 33(3): 487-506.
- [48] BROCK J C, PURKIS S J. The Emerging Role of Lidar Remote Sensing in Coastal Research and Resource Management [J]. Journal of Coastal Research, 2009 (SI53): 1-5.
- [49] FERRAZ A, BRETAR F, JACQUEMOUD S, et al. 3-D Mapping of a Multi-layered Mediterranean Forest Using ALS Data[J]. Remote Sensing of Environment, 2012 (121): 210-223.
- [50] FERRAZ A, MALLET C, CHEHATA N. Large-Scale Road Detection in Forested Mountainous Areas Using Airborne Topographic Lidar Data[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2016(112): 23-36.
- [51] NIE Sheng, WANG Cheng, DONG Pinliang, et al. Estimating Leaf Area Index of Maize Using Airborne Discrete-return LiDAR Data [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2016, 9 (7): 3259-3266.
- [52] TANG Hao, DUBAYAH R, BROLLY M, et al. Large-scale Retrieval of Leaf Area Index and Vertical Foliage Profile from the Spaceborne Waveform Lidar (GLAS/ ICESat) [J]. Remote Sensing of Environment, 2014 (154): 8-18.
- [53] WANG Yuanyuan, LI Guicai, DING Jianhua, et al. A Combined GLAS and MODIS Estimation of the Global Distribution of Mean Forest Canopy Height[J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 174: 24-43.
- [54] BILJECKI F, STOTER J, LEDOUX H, et al. Applications of 3D City Models: State of the Art Review[J]. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2015, 4 (4): 2842-2889.
- [55] YU Bailang, LIU Hongxing, WU Jianping, et al. Automated Derivation of Urban Building Density Information Using Airborne LiDAR Data and Object-Based Method [J]. Landscape and Urban Planning, 2010, 98(3-4): 210-219.
- [56] YANG Bisheng, LIU Yuan, LIANG Fuxun, et al. Using Mobile Laser Scanning Data for Features Extraction of High Accuracy Driving Maps [C] // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Prague, Czech Republic: ISPRS, 2016: 433-439.
- [57] MATIKAINEN L, LEHTOMÄKI M, AHOKAS E, et al. Remote Sensing Methods for Power Line Corridor Surveys [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2016(119): 10-31.
- [58] 陈驰, 麦晓明, 宋爽, 等. 机载激光点云数据中电力线自动提取方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40 (12): 1600-1605.
- CHEN Chi, MAI Xiaoming, SONG Shuang, et al. Automatic Power Lines Extraction Method from Airborne LiDAR Point Cloud[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2015, 40(12): 1600-1605.
- [59] RODRÍGUEZ-GONZÁLVEZ P, FERNÁNDEZ-PALACIOS B J, MUÑOZ-NIETO Á L, et al. Mobile LiDAR System: New Possibilities for the Documentation and Dissemination of Large Cultural Heritage Sites[J]. Remote Sensing, 2017, 9(3): 189.
- [60] CHENG Liang, WANG Yajun, CHEN Yanming, et al. Using LiDAR for Digital Documentation of Ancient City Walls [J]. Journal of Cultural Heritage, 2016(17): 188-193.

(责任编辑:宋启凡)

收稿日期: 2017-06-26

修回日期: 2017-09-01

第一作者简介: 杨必胜(1974—),男,教授,博士生导师,研究方向为三维地理信息获取与分析。

First author: YANG Bisheng(1974—), male, professor, PhD supervisor, majors in acquisition and analysis of 3D geospatial information.

E-mail: bshyang@whu.edu.cn