

doi:10.3799/dqkx.2011.037

激光雷达测量技术在地学中的若干应用

马洪超

武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉大学遥感信息工程学院, 湖北武汉 430079

摘要: 对激光雷达测量技术在全球冰川监测、局部断裂带提取、滑坡监测和稳定性评价以及海岸线提取和海岸侵蚀等方面的应用做了较为全面的综述。作为一种新型的对地观测手段, 激光雷达(含星载、机载、车载和地面)的应用已经从传统的测绘扩大到包括文物保护在内的诸多其他应用领域。所综述的激光雷达技术在地学研究中的4个应用方面, 是传统地学研究中与全球变化和人居环境最为密切的方向。分析表明, 激光雷达技术在这些研究方向中的应用大有作为。

关键词: 激光雷达(LiDAR); 冰川; 断裂; 滑坡; 海岸侵蚀和海岸线。

中图分类号: P225

文章编号: 1000-2383(2011)02-0347-08

收稿日期: 2010-12-20

Review on Applications of LiDAR Mapping Technology to Geosciences

MA Hong-chao

State Key Lab for Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing & School of Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: This paper reviews the applications of laser mapping technology in the fields of global glacier analysis and monitoring, local and large scale faults extraction, landslide mapping and susceptibility assessment, shoreline detection and coastal erosion monitoring. As a new type of air-or-space borne remote sensing sensor, the application of laser mapping technology (including spaceborne, airborne, vehicle-based and terrestrial) has been extended from conventional surveying and precision surveying to such various fields as cultural heritage protection. The four application fields reviewed in the paper are four major research topics that are mostly related to human-environmental interaction. The review conclusion shows that the laser mapping technology should be or is becoming an indispensable tool for above mentioned issues.

Key words: light detection and ranging (LiDAR); glaciers; fault; landslides; coastal erosion and shoreline.

激光雷达(LiDAR)测量技术, 是基于以下过程的测量技术: 传感器发射激光束并经空气传播到地面或物体表面, 再经表面反射, 反射能量被传感器接收并记录为一个电信号。如果将发射时刻和接收时刻的时间精确记录, 那么激光器至地面或者物体表面的距离(R)就可以通过以下公式计算出来(Axelsson, 1999; Wehr and Lohr, 1999): $R = ct/2$, 其中: c 为光速, t 为发射时刻和接收时刻的差, 也就是激光束从激光器出发经地物反射再被接收所经历的时间。发射光束和接收光束可以是同一光路, 也可以发射器和接收器是独立的。当代激光雷达一般将发射和接收光路设计为同一光路。

如果将这样一个器件和GPS接收机、惯性导航系统(IMU)(GPS+IMU=POS, 即定姿定位系统)集成在一起, 并安装到航空平台上, 再加上一定的机电设备使得激光器以一定的角度摆动或者绕圆周旋转(此时的激光器称为激光扫描仪), 那么随着航空平台的飞行, 可以形成有一定宽度的扫描条带, 如图1所示。这样的系统称为机载激光雷达系统, 所获得的数据是表示地面点三维坐标的点云数据或波形数据。从公式(1)获得的测量距离转换到地面点的三维坐标, 需要结合GPS和IMU数据联合解算。

除航空平台外, 激光雷达的载荷平台还可以是卫星、汽车或架设于地面的固定站点, 分别称为星

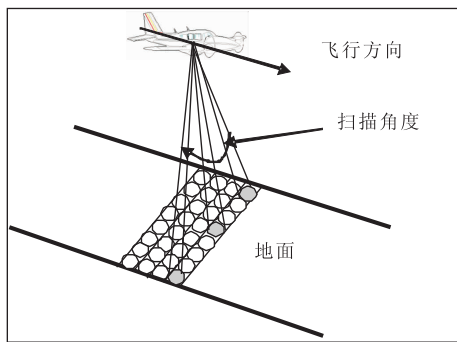


图 1 机载激光雷达数据获取示意

Fig. 1 A scheme showing how airborne LiDAR system works

载、车载和地面激光雷达。由于卫星的运行轨道一般在超过 400 km 的外太空,因此激光器的能量比较大,同时经过长距离的传输,激光束到达地面后形成的光斑直径比较大。比如 ICESat 的 GLAS 激光雷达,其光斑直径在 60~70 m 之间(和地形有关),而相对行高 1 000 m 的机载激光雷达的光斑直径约 20 cm,车载和地面激光雷达的光斑可以近似看作一个没有大小的理想的点。

这几种类型的激光雷达中,地面激光雷达最为成熟。其他几种类型的激光雷达系统,从 2002 年以后才从实验室逐步走向实际应用。因此相对整个遥感领域来说,无论是机载、车载还是星载激光雷达,都是新型传感器设备。表 1 对这几种类型的设备做了简单比较。从表中不难看出,虽然是新型传感设备,但是它们的应用领域相当广泛。除传统的测绘领域外,它们在地球科学中的应用日益广泛并深入。试图从地学应用的方方面面做一个详细的综述是比较困难的,因此本文主要从星载激光雷达在冰川研究中的应用、机载(含地面和车载)激光雷达在断裂及滑坡提取中的应用以及机载激光雷达在海岸带研究(潮位线提取和海岸侵蚀)中的应用这几个方面,对现有研究的现状做一综述,以期该技术能为更多的地学同行所熟悉并应用。

1 激光雷达数据特点及优势分析

激光雷达是一种主动式传感器,工作波长一般在 900~1 064 nm 之间的近红外波段。无论哪种类型的激光雷达,最终获取的数据是激光脚点的三维地理坐标。由于星载和机载激光雷达到达地面后会形成一定大小的光斑,该光斑会通过植被缝隙透射到地面,因此除植被冠层处有回波数据以外,地面处

也可产生回波数据,形成所谓的多次回波。一般的商业系统能生成 4 次以上的回波。当代机载激光雷达系统还提供所谓的全波形数字化技术。借助该技术,激光雷达的回波可以以非常小的时间间隔被采样,这样近似记录了完整的回波波形。利用多次回波记录的数据或全波形数据,通过一定的数据后处理算法,可有效地剔除植被高度的影响,获得真实地面的数字高程模型(digital elevation model, DEM)。

虽然激光雷达最初的目标主要是为了获得高精度的数字表面模型(digital surface model, DSM),但通过一定的数据后处理算法,能获得高精度、高分辨率的 DEM。正是这些高精度、高分辨率的 DEM 为地貌结构的精细表达提供了基础数据,同时也为激光雷达的地学应用提供了直接观测数据。

和传统的遥感手段相比,激光雷达具有以下优势(Baltsavias, 1999): (1)激光雷达是对地表三维坐标的直接测量,而传统的摄影测量或者雷达干涉测量(InSAR)都是通过间接的方法获得地表三维数据; (2)激光雷达能部分地透射植被,有效去除植被高度的影响,而传统摄影测量则只能通过估算植被高度的方法去除植被的影响,大大影响精度; (3)作为主动式传感器,不受光照影响,受天气的影响也比光学遥感要小; (4)在某些困难地区,如沙漠、海岸带、高差较大的地形复杂地区等,使用传统的遥感手段很难甚至无法获得高精度、高分辨率的 DEM 数据。

2 星载激光雷达在冰川研究中的应用

全球冰川的变化是影响全球气候变化重要因素。全球冰川的变化监测是美国 NASA 发射的 ICESat 卫星的主要目的之一,其携带的 GLAS 星载激光雷达可用于冰川的属性与参数提取,并对参数变化趋势进行定量分析。Bindschadler and Choi (2005) 利用星载激光雷达数据定量分析冰川的降雪积累程度,得到所观测地区雪量变化的定量结果。Xie and Ackley (2010) 利用 GLAS 数据对南极洲 BA 地区的海冰(sea-ice)冰层厚度分布状况进行了研究。结果显示 GLAS 得到冰层厚度平均误差为 1.38 ± 0.70 m,与实测结果的精度相符。其提出的冰面厚度分布估计方法可以用于利用 GLAS 数据计算冰层厚度分布状况。

由于 GLAS 可以获取较高精度的高程数据,因此可以用于估计冰川表面地形的高程变化率。Yamamoto *et al.* (2008) 将每一周期内记录的激光

表 1 几种类型激光雷达系统的简单比较

Table 1 Brief comparison among different types of LiDAR system

类型	平台	相对飞行高度	点云密度	精度	主要用途	主要型号
机载激光雷达	飞机(固定翼或直升机)	30~6 000 m	和多种因素有关,最大可以达到 100 点/m ² 以上	和多种因素有关,高程精度可以达到 10 cm 以下,平面精度可以达到 10 cm 左右	获取高精度数字表面模型和数字高程模型,可以应用于测绘、水利、林业、电力、城市规划等多个领域	Leica ALS 系列, Optech ALTM 系列, TopoSys Harrier 系列和 Falcon 系列, RIEGL LitterMapper 系列等
车载激光雷达	汽车		每 m ² 几百个点以上	平面和水平精度略高于机载激光雷达系统	主要是对地物的侧面进行激光扫描	英国 StreetMapper 系统, Optech lynx 系统等
地面激光雷达	地面固定站点		每平方米可以达到上千个点	平面和水平精度可以达到毫米,甚至亚毫米级	用于物体精细三维建模,广泛应用于工业测量、文物考古、建筑物建模等领域	主要由 Leica, Optech, RIEGL 等公司供应
星载激光雷达	卫星	400~600 km	光斑直径 60~70 m, 点间距 170 m	垂直精度 15 cm	全球植被、极地冰川、大气等研究领域	主要是美国 NASA 发射 ICESat 卫星上的 GLAS 激光雷达

数据内插为高分辨率的规则格网 DEM,对每一周期的 DEM 数据与前一周期进行比较,由此得出每个格网点的变化趋势.再将分辨率降低以求得较大格网单元内变化趋势的平均值,并由此来估算极地的物质运移.但由于极地地区纬度较高,扫描数据存在数据空洞,降低了数据质量,部分地影响了估计结果. Smith *et al.* (2005)利用最近邻内插方法得到轨道间的交叉点高程(crossovers),并通过轨道交叉点高程获取高程变化率,将同一地区在每年相同季节的检测结果进行线性拟合,得到变化趋势.此外, Fricker and Padman(2006)从每一个高程横断面中内插出一组纬度间隔均匀的高程值,由此计算出重复轨道数据中的平均高程值,利用高程数据与平均高程值的差异得到高程变化. Harpold *et al.* (2007)也利用重复轨道数据来说明高程的坡度以及变化趋势. Slobbe and Lindenbergh(2008)提出了一种对坡度影响的修正方法,对 GLAS 数据内插成的 DEM 模型高程进行修正,由此提高 DEM 的精度.此外, Nguyen and Herring(2005)分析了 GLAS 卫星在南极洲东部 2005 年 3 月至 11 月的数据,利用克里金/卡尔曼滤波方法来分析该地区的高程变化.

星载激光雷达数据还可以结合其他数据源,进行冰川地形测绘与变化检测. Wesche *et al.* (2009)利用 GLAS 数据,结合地面 GPS 量测数据,机载雷达测高仪以及无线电声纳等数据进行联合平差,获取了高精度的 EKsstromisen 地区 DEM,满足冰川变化状态的动态模拟以及物质平衡状态研究的需求.

Muskett and Lingle(2008)利用 GLAS 数据以及 InSAR DEM 估计阿拉斯加地区 Guyot, Yahtse 以及 Tyndall 冰川的表面沉降速率,获得一组定量的分析结果.他们将这些冰川的沉降归因于全球气候变暖以及温室效应.

Yamanokuchi and Doi(2010)利用 InSAR 数据生成 50 m 分辨率的 DEM,并利用 GLAS 测高数据作为地面控制点修正 DEM 高程,获得的结果可以支持极地地区冰川体积以及物质交换变化检测的研究.

3 利用机载激光雷达提取断裂信息

地质学家通常是通过野外地质调查、遥感影像解译等方法获得某地区的宏观断裂带.宏观断裂带的尺度在几公里甚至上千公里,而对于几 m 到几十 cm 尺度的断裂、表面破碎带、局部活动断裂带的提取,则主要通过野外实地观测来圈定.这种局部点观测不仅有观测视场的局限性,而且对观测条件艰难的地区,是无法实现的.一种比较理想的方法是利用高精度的数字高程模型(DEM),通过定量地貌学的方法,测量各种地貌参数来推断局部活动断裂的种种特征.机载激光雷达提供了有力的数据获取方式.

利用高分辨率、高精度的机载激光雷达数据研究局部断裂构造,开始于 2000 年前后.1997 年,美国科学家利用机载 LiDAR 数据研究西雅图西部 Bainbridge 岛屿的地下水渗透和地表径流过程中,

在西雅图断裂带发现了一个高达 5 m 的断裂陡坎切断了沿南北向的一个冰蚀沟。由于断裂陡坎周围森林密布,此前的地质调查和航空相片的解译均没有发现此断裂陡坎。这个发现立刻引起科学家们的注意,意识到其他的断裂陡坎也可以通过类似的方法来提取。为此在 1999 年成立了 Puget Sound(地名,在华盛顿州)激光雷达委员会,专门研究利用激光雷达数据提取断裂带并对其做地震危害评估(Harding and Berghoff, 2000; Haugerud *et al.*, 2003)。几乎与此同时,Hudnut *et al.* (2002)在 2000 年 4 月利用机载激光雷达,对美国加利福尼亚州的 Hector Mine 在 1999 年 10 月发生的地震后的断裂位移进行了详细研究,得到右旋滑移约 4.2 m、垂直滑移约 0.9 m 的精确估算值。

Arrowsmith and Zielke(2009)利用高密度的机载 LiDAR 研究美国 San Andreas 断裂带上 15 km 长度范围内的海槽、山脊、沟弧。这些断裂地貌特征是全新世以来该大断裂历次滑移综合叠加的结果。他们用每平方 3~4 个点的高密度数据,对这些断裂地貌进行了全面测量,测量参数可以指示下一次最有可能发生的断裂滑移在什么位置。这个信息对预测地震至关重要。

Begg and Mouslopoulou(2010)利用机载激光雷达对新西兰 Toupou 裂谷带进行研究时,发现了 122 个活动断裂迹(fault trace),从而为裂谷带正断层的位移、位移速率和古地震的研究提供了新的依据。他们在激光点云数据上圈定的主要线性构造是断裂陡坎。断裂迹的长度在 0.25~6 km 不等。这些断裂穿越年龄较少的地层,并形成 0.05~7 m 宽度不等的地堑。

Wechsler *et al.* (2009)用机载 LiDAR 和 SRTM(美国 NASA 的航天雷达)数据探讨了定量研究由 San Jacinto 中心断裂带引起的岩石破碎情况的可行性。该断裂是南加利福尼亚主要的活动断裂之一。他们比较了包括水系密度(Drainage density, Dd)在内的多个地貌参数,发现 Dd 值和断裂距离之间有强相关性,构造复杂区也是 Dd 的高值区,同时也是岩石破碎特别厉害的地区。

此外 Szekely *et al.* (2009)综合利用机载 LiDAR 数据、地质图、区域构造地貌图、地球物理数据、地震震源以及第四系沉积物的厚度等数据,分析了匈牙利小平原区(Little Hungarian Plain)的新构造情况,发现了若干起伏小于 2 m 的构造特征(tectonic features)。他们的研究充分肯定了 LiDAR 数

据在揭示新构造、尤其是起伏较小的构造特征中发挥的优势。

4 机载激光雷达在滑坡研究中的应用

滑坡是一种严重危害生命财产安全的重大地质灾害。对滑坡稳定性分析以及滑坡发生后规模和危害性的评估是滑坡研究中的重要课题。利用机载激光雷达数据,可以为这两方面的研究提供有力的手段。

利用 LiDAR 数据进行滑坡稳定性评价最早出现在 Dietrich *et al.* (2001)的研究中,不过他的研究主要是为他提出的滑坡稳定性评价模型 SHAL-STAB 做验证。此后,Chang *et al.* (2005)采用航空摄影测量、机载 LiDAR 和野外调查相结合的方法,对台湾 1999 年 9 月份集集地震引发的九份二山(Jiufengershan)滑坡地质和地貌学特征进行了深入的研究。他们利用地震发生两年半后采集到的该地区机载激光雷达数据计算滑坡规模(面积和土石方量),并揭示了滑坡形态结构。他们还在 LiDAR 数据上圈定出滑动面上的变形构造如断裂陡坎和褶皱,并根据地震前后的 DEM 数据画出了等厚度图。

针对西雅图地区滑坡频发的问题, Schulz (2007)利用机载 LiDAR 数据和该地区历次的滑坡记录,对滑坡稳定性进行了分析。作者认为,由于该地区森林密布,传统的利用航空影像解译得到的地质、地貌资料不能反映该地区的真实地貌。作者利用 LiDAR 数据圈定出的滑坡数量是过去用航空影像圈定的滑坡数量的四倍之多!通过对 1308 个历史滑坡数据的分析,发现它们基本上集中在由 LiDAR 数据圈定的滑坡内。同时作者发现所圈定的滑坡和地层的关系并不密切。这些结果对西雅图滑坡稳定性的评价有非常重要的意义。

Roering *et al.* (2009)利用差分干涉测量(DInSAR)、机载 LiDAR 和历史航空影像对北加利福尼亚州大型、缓慢滑动的滑坡进行研究。他们利用 ALOS 干涉数据圈定了 5 个大型(长度大于 1 km)活动滑坡,并利用 1964 年的航空影像和 2006 年的 LiDAR 原始机载数据(未经滤波),对森林位移进行变化检测,结合 DInSAR,定量计算移动速度、每年的土石方量和每年地表的剥蚀速度。

此外, Glenn *et al.* (2006)利用机载 LiDAR 数据研究南爱达荷州的两个滑坡的表面形态; Sturzenegger *et al.* (2007)同时利用地面和机载 Li-

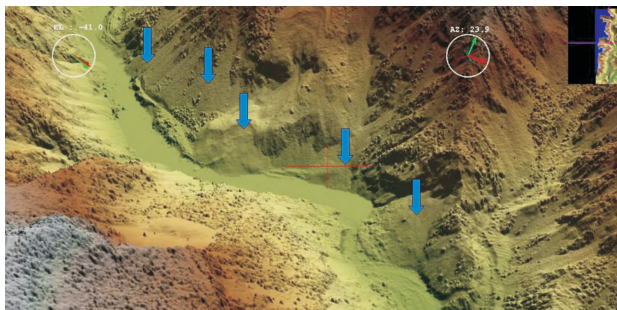


图2 都汶公路映秀镇附近数字表面模型(DSM)

Fig. 2 Digital surface model (DSM) along Du-Wen highway in the vicinity of Yingxiu Town

数据由 Leica ALS50II 机载激光雷达在 2008 年 5 月 31 日获取,点密度为 $0.8 \text{ 点}/\text{km}^2$ 。图中为原始点云数据高程配色的结果,可以判读出多个滑坡(图中箭头所示)

DAR 对加拿大 Alberta 省龟山(Turtle Mountain)上的 Frank 滑坡进行不同尺度上构造信息的提取; Inada and Takagi(2010)利用地面激光雷达对滑坡的运动行为进行研究。

还有 Booth *et al.* (2009)对从高分辨率的机载 LiDAR 数据自动提取滑坡进行了研究。他们首先对 LiDAR 数据进行二维离散傅立叶变换和二维连续小波变换,而后分别求出傅立叶变换和小波变换功率谱,并由此求出特征空间频率。该频率对应于圆丘、断裂陡坎、土石堆等滑坡特征地貌的空间分布模式,这些模式提供了历史滑坡的证据,将他们圈定出来即是历史滑坡体。他们用这个方法圈定滑坡的正确率为 82%。

马洪超等(2008)曾对 2008 年“5·12”特大地震引发的都(都江堰)—汶(汶川)公路上的滑坡监测施以机载 LiDAR 测量,在短短的 1 km^2 范围内圈定了多个滑坡体,并对滑坡体的土石方、面积和倾角等参加进行了测量和估算(图 2),表明该技术在滑坡灾后应急响应中的可行性。

5 机载激光雷达在海岸线提取及海岸侵蚀研究中的应用

5.1 机载 LiDAR 用于海岸线的提取

海岸线指陆地与海面的交接线,是区分海岸与海滨(或岸滨)的界线。由于潮汐作用和海平面的变化,海岸线的水平位置不断变化。通常将大潮平均高潮面与陆地的接触线称为高潮线,将大潮平均低潮面与陆地的交界线称为低潮线(Boak and Turner,

2005)。海岸线的位置及长度是海岛、海岸带调查中的基础数据,只有在确定出海岸线位置后,才能准确计算海岸线长度、滩涂面积等相关要素,才能进一步进行海岸侵蚀分析、潮间带生物多样性分析等研究。

传统的海岸线测量采取现场测绘的方式(申家双等,2009),目前常用的方法是摄影测量技术,此外 GPS 技术配合陆上车载技术也被用于大比例尺的岸线测绘(Ruggiero, 2000)。但是这些方法效率低,工作周期长,难以快速反映海岸线的变化(Stockdon *et al.*, 2002)。近二十年,很多学者对遥感影像自动提取海岸线进行了研究,并且取得了一定的进展。然而从遥感影像提取的实际为瞬时水涯线(水边线),并非海岸线,因此需要将水边线潮位信息纠正至大潮高潮面的水陆分界线才是真正的海岸线,潮位纠正需要有详细的潮位观测资料,而且不适合地形起伏较大的海域;同时,基于遥感影像的海岸线提取精度和海水的清澈度、海岸类型密切相关,目前为止还没有一种算法适用于全部海岸类型(Liu *et al.*, 2007)。

近年来,有学者联合 LiDAR 数据,影像数据和潮汐数据自动提取海岸线,所提取海岸线精度高、自动化程度高且不易受海岸带类型影响。

Stockdon *et al.* (2002)采用剖面分析方式结合机载 LiDAR 数据和潮汐数据自动提取海岸线,将 LiDAR 点云按一定的间隔划分剖面,然后根据剖面上的离散点拟合曲线,通过将该曲线和潮汐面相交获取临界点,最后连接这些点自动提取海岸线。Robertson *et al.* (2004)采取跟踪特定高程单条等高线的方式,从 LiDAR 点云生成的海岸带 DEM 中提取海岸线。Liu *et al.* (2007)采用分割 DEM 的方式自动提取海岸线。

上述方式提取的海岸线精度优于摄影测量方式的提取精度,同时只要 LiDAR 数据在低潮期采集,潮间带地形暴露,利用上述方式不仅可提取完整的海岸线,更能获取完整的潮间带地形信息(Liu *et al.*, 2007)。

5.2 海岸侵蚀分析

海岸侵蚀是一种灾害性的海岸地质现象,它遍及全球海岸。海岸侵蚀是指海岸带的地形地貌与海岸动力过程中不相适应所造成的泥沙搬运和转移。由于海岸带地处动态平衡的特殊地理单元,因此,海岸侵蚀问题复杂、原因众多、危害非浅(张裕华, 1996)。海岸侵蚀的监测,是 LiDAR 技术地学应用的又一方面。Woolard and Colby(2002)利用机载

LiDAR 数据和 GIS 数据,使用定向统计算法对北卡罗莱纳州的哈特拉斯角地区,进行多时相和多分辨率的海滩沙丘变化检测. Chust *et al.* (2008) 利用机载 LiDAR 数据和从点云中获取的坡度、坡向等地形信息,结合点云强度信息,融合多光谱影像,采取最大似然法对 Bidasoa 地区沿海河口栖息地的岩石区域和潮间带进行分类,并进行海岸变化监测. Chust *et al.* (2010) 利用测海 LiDAR 系统 Hawk Eye 在西班牙北部比斯开湾地区进行海岸栖息地测绘,获取了陆地、潮间带以及浅海三种区域的高精度的地形. 证明了测海 LiDAR 系统虽然受限于海水浑浊度和海浪浪高,但是提供了常规手段无法获取的高精确的高程数据,是改善海岸测绘、检测海岸变化的有效手段. Robertson *et al.* (2007) 利用机载 LiDAR 调查了佛罗里达巴拿马城由于飓风的事件引起的海岸线迁徙(海岸侵蚀). Shrestha *et al.* (2005) 使用机载 LiDAR 设备定期对佛州东北部 35 km 的海岸进行量测,采用剖面分析的方法对不同时期点云生产的 DSM 进行比较,定量监测佛罗里达的海岸线变化,由此得到海岸侵蚀速率.

6 结论和展望

激光雷达(含星载、机载、车载和地面)测量技术是本世纪以来迅速发展并走向实用化的新型遥感技术. 由于该类型传感器最初的目的就是为获取高精度、高分辨率地面或物体表面的三维空间坐标而研发的,而高精度的三维数字地面模型又是研究与地貌相关的各种地学现象和地学过程的基础数据,因此,除测绘应用以外,激光雷达技术在其他地学领域的研究中,也有非常广阔的应用前景. 本文通过综述近几年来国内外的研究文献,对激光雷达技术在全球冰川监测、大尺度断裂带提取、滑坡稳定性评价和监测、海岸线提取和海岸侵蚀等 4 个方面的研究现状进行了较为全面的总结,得出如下结论:

(1) 星载激光雷达(以 GLAS 为代表)是两极冰川变化监测研究的有效技术手段. 单独或者联合其他传感器数据,可以比较精确、定量地估算冰川沉降速率、物质运移总量等关系到全球气候变化的重要参数. 但是这种类型激光雷达的地学应用目前主要集中在全球冰川变化监测的研究中,而对于区域性宏观大断裂带的相关信息提取,却未见报道. 从 GLAS 的相关技术参数来看,是能够满足深大断裂带相关信息提取的研究需求的. 因此这方面是今后

地学工作者值得注意的方向;(2) 机载激光雷达在小规模断裂提取方面,有其独特的技术优势. 尤其是在植被覆盖严重的地区,通过一定的后处理算法去除植被高程的影响,从机载点云数据中获得真实地表的三维数字高程模型. 这种高精度(高程精度优于 30 cm,甚至优于 10 cm)、高分辨率(DEM 分辨率优于 1 m)的 DEM 为揭示微地貌结构提供了最直接的观测数据. 如何自动提取和断裂相关的微地貌结构信息,是今后研究的一个重要方向;(3) 机载激光雷达不仅能为滑坡发生后的灾害应急提供快速、定量的观测手段,而且能为滑坡的稳定行评价提供定量评价的参数. 已有的研究和我们的实际工作经验都表明,机载激光雷达可以作为包括滑坡在内的地质灾害应急响应的一种重要技术手段. 同样,如何自动、快速提取滑坡体并进行有关参数的计算,也是今后研究的一个重要方向;(4) 海岸线提取和海岸侵蚀的研究,一直以来是海洋领域研究的重要课题. 长期以来的点观测技术(包括 GPS)只能获得局部的观测数据. 激光雷达技术很大程度上解决了针对海岸带航空摄影测量的困难,为海岸线提取、海岸侵蚀提供高精度、连续面状的观测数据. 今后需要注意的一个方向是如何与高分辨率光学影像相结合进行海岸带附近精细地物分类,从而为海岸带调查、潮间带生物多样性研究等提供直接观测数据.

值得注意的是,我国在利用激光雷达测量技术对上述诸方面的研究还相当薄弱,尚处于起步阶段. 通过本文的综述,希望能将这门新技术介绍给广大的地学研究者,合理使用该技术,丰富地学研究中基础数据获取手段,深化基础数据在地学研究中的应用.

References

- Arrowsmith, J. R., Zielke, O., 2009. Tectonic geomorphology of the San Andreas fault zone from resolution topography: an example from the Cholame segment, *Geomorphology*, 113: 10—81. doi: 10.1016/j.geomorph.2009.01.002
- Axelsson, P., 1999. Processing of laser scanner data—algorithms and applications, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54: 138—147. doi: 10.1016/S0924-2716(99)00008-8
- Baltsavias, E. P., 1999. A comparison between photogrammetry and laser scanning, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 54: 83—94. doi: 10.1016/S0924-2716(99)00014-3
- Begg, J. G., Mouslopoulou, V., 2010. Analysis of Late Holocene faulting within an active rift using LiDAR, *Taupo*

- rift, New Zealand. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 190: 152—167. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2009.06.001
- Bindschadler, R., Choi, H., 2005. Detecting and measuring new snow accumulation on ice sheets by satellite remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 98: 388—402. doi: 10.1016/j.rse.2005.07.04
- Boak, E. H., Turner, I. L., 2005. Shoreline definition and detection; a review. *Journal of Coastal Research*, 21(4): 688—703. doi: 10.2112/03—0071.1
- Booth, A. M., Roering, J. J., Perron, J. T., 2009. Automated landslide mapping using spectral analysis and high-resolution topographic data: Puget Sound lowlands, Washington, and Portland Hills, Oregon. *Geomorphology*, 109: 132—147. doi: 10.1016/j.geomorph.2009.02.027
- Chang, K. J., Taboada, A., Chan, Y. C., 2005. Geological and morphological study of the Jiufengershan landslide triggered by the Chi-Chi Taiwan earthquake. *Geomorphology*, 71: 293—309. doi: 10.1016/j.geomorph.2005.02.004
- Chust, G., Galparsoro, I., Borja, A., et al., 2008. Coastal and estuarine habitat mapping, using LiDAR height and intensity and multi-spectral imagery. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 78(4): 633—643. doi: 10.1016/j.ecss.2008.02.003
- Chust, G., Grande, M., Galparsoro, I., et al., 2010. Capabilities of the bathymetric Hawk Eye LiDAR for coastal habitat mapping: a case study within a Basque estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 89(3): 200—213. doi: 10.1016/j.ecss.2010.07.002
- Dietrich, W. E., Bellugi, D., de Asua, R. R., 2001. Validation of the shallow landslide model, SHALSTAB, for forest management. In: Wigmosta, M. S., Burges, S. J., eds., Land use and watersheds: human influence on hydrology and geomorphology in urban and forest areas. American Geophysical Union Water Science and Application, 2: 195—227.
- Fricker, H. A., Padman, L., 2006. Ice shelf grounding zone structure from ICESat laser altimetry. *Geophysical Research Letters*, 33. doi: 10.1029/2006GL026907
- Glenn, N. F., Streutker, D. R., Chadwick, D. J., et al., 2006. Analysis of LiDAR-derived topographic information for characterizing and differentiating landslide morphology and activity. *Geomorphology*, 73: 131—148. doi: 10.1016/j.geomorph.2005.07.006
- Harding, D. J., Berghoff, G. S., 2000. Fault scarp detection beneath dense vegetation cover: airborne LiDAR mapping of the Seattle fault zone, Bainbridge Island, Washington State. In: Proceedings of the American Society of Photogrammetry and Remote Sensing Annual Conference, Washington, D. C. .
- Harpold, R., Urban, T., Webb, C., Schutz, B., 2007. Assessment of ICESat repeat track estimation techniques for polar elevation change detection. American Geophysical Union, Fall Meeting 2007.
- Haugerud, R. A., Harding, D. J., Johnson, S. Y., et al., 2003. High-resolution LiDAR topography of the Puget Lowland, Washington. GSA TODAY.
- Hudnut, K. W., Borsa, A., Glennie, C., et al., 2002. High-resolution topography along surface rupture of the 16 October 1999 Hector Mine, California, Earthquake (Mw 7.1) from airborne laser swath mapping. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 92(4): 1570—1576. doi: 10.1785/0120000934
- Inada, R., Takagi, M., 2010. Method of landslide measurement by ground based LiDAR. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, XXXVIII(Part 8).
- Liu, H., Sherman, D., Gu, S., 2007. Automated extraction of shorelines from airborne light detection and ranging data and accuracy assessment based on Monte Carlo simulation. *Journal of Coastal Research*, 23(6): 1359—1369. doi: 10.2112/05—0580.1
- Ma, H. C., Yao, C. J., Zhang, S. D., 2008. Some technical issues of airborne LiDAR system applied to Wenchuan Earthquake relief works. *Journal of Remote Sensing*, (6): 925—932 (in Chinese with English abstract).
- Muskett, R. R., Lingle, S. C., 2008. Acceleration of surface lowering on the tidewater glaciers of Icy Bay, Alaska, U. S. A. from InSAR DEMs and ICESat altimetry. *Earth and Planetary Science Letters*, 265: 345—359. doi: 10.1016/j.epsl.2007.10.012
- Nguyen, A. T., Herring, T. A., 2005. Analysis of ICESat Data using Kalman filter and Kriging to study surface height changes and surface characteristics in East Antarctica. *Geophysical Research Letters*, 32. doi: 10.1029/2005GL024272
- Robertson, W. V., Whitman, D., Zhang, K. Q., et al., 2004. Mapping shoreline position using airborne laser altimetry. *Journal of Coastal Research*, 26(4): 884—892. doi: 10.2112/1551—5036(2004)20[884:MSPUAL]2.0.CO;2
- Robertson, W. V., Zhang, K. Q., Whitman, D., 2007. Hurricane-induced beach change derived from airborne laser measurements near Panama City, Florida. *Marine Geology*, 237(3—4): 191—205. doi: 10.1016/j.margeo.2006.11.003
- Roering, J. J., Stimely, L. L., Mackey, B. H., et al., 2009.

- Using DInSAR, airborne LiDAR, and archival air photos to quantify landsliding and sediment transport. *Geophysical Research Letters*, 36. doi: 10. 1029/2009GL040374
- Ruggiero, P., 2000. Beach monitoring in the Columbia River littoral cell, 1997—2000. Washington State Department of Ecology, Coastal Monitoring & Analysis Program, Publication No. 00—06—26, 112.
- Schulz, W. H., 2007. Landslide susceptibility revealed by LiDAR imagery and historical records, Seattle, Washington. *Engineering Geology*, 89: 67—87. doi: 10. 1016/j. enggeo. 2006. 09. 019
- Shen, J. S., Zhai, J. S., Guo, H. T., 2009. Study on coastline extraction technology. *Hydrographic Surveying and Charting*, 29(6): 72—77 (in Chinese with English abstract).
- Shrestha, R. L., Carter, W. E., Sartori, M., et al., 2005. Airborne laser swath mapping: Quantifying changes in sandy beaches over time scales of weeks to years. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 59(4): 222—232. doi: 10. 1016/j. isprsjprs. 2005. 02. 009
- Slobbe, D. C., Lindenbergh, R. C., 2008. Estimation of volume change rates of Greenland's ice sheet from ICESat data using overlapping footprints. *Remote Sensing of Environment*, 112: 4204—4213. doi: 10. 1016/j. rse. 2008. 07. 004
- Smith, B. E., Bentley, C. R., Raymond, C. F., 2005. Recent elevation changes on the ice streams and ridges of the Ross Embayment from ICESat crossovers. *Geophysical Research Letters*, 32. doi: 10. 1029/2005GL024365
- Stockdon, H. F., Sallenger, A. H., List, J. H., et al., 2002. Estimation of shoreline position and change using airborne topographic LiDAR data. *Journal of Coastal Research*, 18(3): 502—513.
- Struzzenegger, M., Stead, D., Froese, C., et al., 2007. Ground based and airborne LiDAR for structural mapping of a large landslide: the Frank Slide. Proceedings of the 1st Canada-US rock mechanics Symposium, 27—31.
- Szekely, B., Zamolyi, A., Draganits, E., et al., 2009. Geomorphic expression of neotectonic activity in a low relief area in an airborne laser scanning DTM: a case study of the Little Hungarian Plain (Pannonian basin). *Tectonophysics*, 474: 353—366. doi: 10. 1016/j. tecto. 2008. 11. 024
- Wechsler, N., Rockwell, T. K., Yehuda Ben-Zion, 2009. Application of high resolution DEM data to detect rock damage from geomorphic signals along the central San Jancinto fault. *Geomorphology*, 113: 82—96. doi: 10. 1016/j. geomorph. 2009. 06. 007
- Wehr, A., Lohr, U., 1999. Airborne laser scanning—an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54: 68—82. doi: 10. 1016/S0924—2716(99)00011—8
- Wesche, C., Riedel, S., Steinhage, D., 2009. Precise surface topography of the grounded ice ridges at the Ekstromisen, Antarctica, based on several geophysical data sets. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(4): 381—386. doi: 10. 1016/j. isprsjprs. 2009. 01. 005
- Woolard, J. W., Colby, J. D., 2002. Spatial characterization, resolution, and volumetric change of coastal dunes using airborne LiDAR: Cape Hatteras, North Carolina. *Geomorphology*, 48(1—3): 269—287. doi: 10. 1016/S0169—555X(02)00185—X
- Xie, H., Ackley, S. F., 2010. Sea-ice thickness distribution of the Bellingshausen Sea from surface measurements and ICESat altimetry. *Deep-Sea Research*, doi: 10. 1016/j. dsr2. 2010. 10. 038
- Yamamoto, K., Fukudo, Y., Doi, K., et al., 2008. Interpretation of the GRACE-derived mass trend in Enderby Land, Antarctica. *Polar Science*, 2: 267—276. doi: 10. 1016/j. polar. 2008. 10. 001
- Yamanokuchi, T., Doi, K., 2010. Combined use of InSAR and GLAS data to produce an accurate DEM of the Antarctic ice sheet: example from the Breivikae Asuka station area. *Polar Science*, 4: 1—17. doi: 10. 1016/j. polar. 2009. 12. 002
- Zhang, Y. H., 1996. Erosion hazards and their control in coastal regions of China. *Journal of Catastrophology*, 11(3): 15—21 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 马洪超, 姚春静, 张生德, 2008. 机载激光雷达在汶川地震应急响应中的若干关键问题探讨. *遥感学报*, (6): 925—932.
- 申家双, 翟京生, 郭海涛, 2009. 海岸线提取技术研究. *海洋测绘*, 29(6): 72—77.
- 张裕华, 1996. 中国海岸侵蚀危害及其防治. *灾害学*, 11(3): 15—21.