

doi: 10. 6046/gtzyyg. 2014. 03. 02

引用格式: 谢谟文,胡嫚,杜岩,等. TLS 技术及其在滑坡监测中的应用进展[J]. 国土资源遥感,2014,26(3):8-15. (Xie M W, Hu M, Du Y, et al. Application of TLS technique to landslide monitoring: Summarization and prospect[J]. Remote Sensing for Land and Resources. 2014, 26(3): 8-15.)

TLS 技术及其在滑坡监测中的应用进展

谢谟文, 胡嫚, 杜岩, 许波
(北京科技大学土木工程系, 北京 100083)

摘要: 为总结地面激光扫描(terrestrial laser scanning, TLS)技术的应用特点及关键问题,强调 TLS 技术在滑坡监测应用中的重要性及优势,介绍了 TLS 技术的原理和数据处理方法,回顾了 TLS 技术在国内外滑坡监测领域的应用历史和现状,并将应用进行了分类;总结了 TLS 技术及其在滑坡监测应用中的关键问题,对该技术的未来发展进行了展望。分析认为,虽然 TLS 技术还未成为滑坡监测中的常规手段,但毋庸置疑,该技术已为滑坡调查与监测开辟了一条新的途径。

关键词: TLS; LiDAR; 滑坡监测; 总结; 回顾; 展望

中图分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-070X(2014)03-0008-08

0 引言

地面激光扫描(terrestrial laser scanning, TLS)是 20 世纪 90 年代发展起来的一种观测、监测技术,是遥感监测技术的一种。在过去的 10 a 中,遥感技术在滑坡调查与监测中的应用经历了一个飞速发展期。传感器技术、光电技术与计算机技术的发展,使得获得高精度、高空间分辨率的三维地形信息不再困难,为滑坡调查与监测开辟了一个新的途径。滑坡变形监测技术可大致分为 2 类^[1]: ①“点”式监测(如 GPS 测量、伸长仪测量、全站仪测量、激光测量、雷达测距仪测量); ②“面”式监测(如摄影测量、合成孔径雷达干涉测量技术、机载激光扫描测量和地面激光扫描测量)。在“面式”遥感调查与监测技术中,合成孔径雷达干涉测量技术^[2](interferometric synthetic aperture Radar, InSAR)和光探测与测量技术^[3](light detection and ranging, LiDAR)得到了长足的发展。InSAR 技术主要应用在探测和量化大范围区域内的微小形变; LiDAR 技术则被广泛应用在地形测绘^[4]、地面沉降监测^[5]、危岩体位移监测^[6-7]以及滑坡体的变形监测^[8-10]等领域。

根据传感器搭载的平台不同, LiDAR 技术可分为机载型(airborne laser scanning, ALS)和地面型(terrestrial laser scanning, TLS) 2 类。ALS 通常能获

取空间分辨率为 m 到 cm 级的三维点云数据,采集范围广阔; TLS 空间分辨率更高,可达 cm 或 mm 级^[11]。由于拥有更高的精度与空间分辨率, TLS 的经济消耗较 ALS 的低,正越来越多地被应用到滑坡灾害的调查与监测中,逐渐成为一种常见的滑坡监测手段。

2010 年 Derron 等对近 20 a 间公开发表的关于 LiDAR 技术应用于滑坡监测领域的论文数量进行了统计^[12],其结果反映了 LiDAR 技术在滑坡领域从缓慢起步到迅速增长的发展历程。尤其是在过去的 10 a 中,该领域公开发表的论文数量出现了大幅度增长,主要的应用领域从地形测绘、滑坡变形监测到滑坡体模型模拟等,并指出这种快速的发展趋势在未来的 5~10 a 可能还将延续。此外,一些专著也详细地介绍了 LiDAR 技术的原理、数据的质量控制、激光反射波的分析、滤波的处理方法^[11]以及 LiDAR 技术在环境科学、地形学、地质统计学、遥感与地理信息系统等学科领域的应用^[13]。

作为 LiDAR 技术应用的一个重要组成部分, TLS 技术在滑坡监测中扮演了越来越重要的角色。然而,目前的研究文献尚未有详细介绍 TLS 技术在滑坡监测中应用进展的概述性论文。为此,本文在简要介绍 TLS 技术的基本原理、数据处理方法和流程的基础上,回顾了国内外 TLS 技术在滑坡监测领域的应用进展,总结了该技术的优势及劣势,并对其技术前景进行了展望。

1 TLS 技术简介

1.1 TLS 测量原理

TLS 是 LiDAR 技术的一种,主要包括激光测距系统、扫描系统和支架系统,同时集成数字摄影和仪器内部校正等系统^[14-15],其工作原理如图 1 所示。

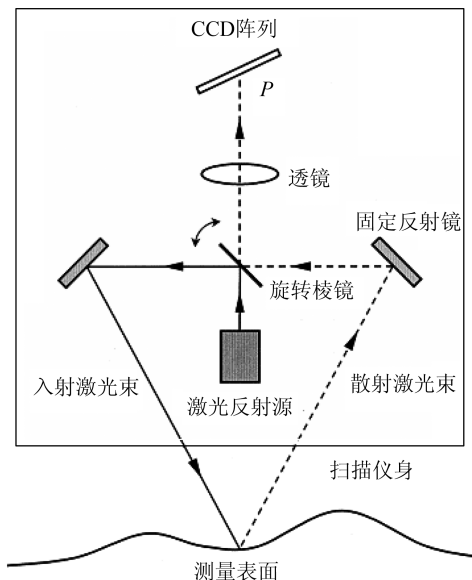


图 1 三维激光扫描仪的工作原理^[16]

Fig. 1 Working principle of the laser scanner^[16]

仪器装置内两面可用的反射棱镜使得三维激光扫描在工作中可以进行同步地投影、接收^[16]。三维激光扫描仪通常用 2 种方法(相位法和脉冲法)探测目标物表面的距离信息^[17]。其中,相位法能够获得更精确的测量结果,但测量距离较短;脉冲法能够适用于更远的测量距离,但测量精度较前者低。因此,大多数三维激光扫描仪均采用脉冲法测量原理进行设计,以便适用于精度要求较高的地表观测,如滑坡监测。

三维激光扫描仪发射的激光脉冲作用到测量表

面经反射后由仪器内脉冲接收装置接收处理,可在短时间内获得测量表面大量的三维信息。根据时间测距原理,通过激光束传播时间(Δt)可计算激光束的到达距离($2d = c \Delta t$, 其中 d 为激光束到达距离, c 为光速)。若已知激光束发射的角度,则可确定激光束到达目标距仪器的相对位置($\Delta x, \Delta y, \Delta z$)。极坐标到直角坐标的转换如图 2 所示。

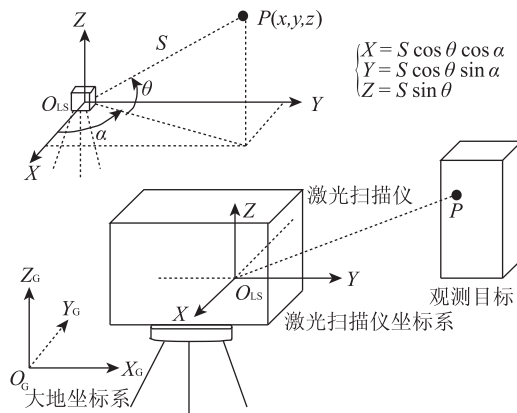


图 2 TLS 扫描仪极坐标到直角坐标的转换
Fig. 2 Conversion from polar coordinates to cartesian coordinates of TLS

如图 2 所示, $O_G (X_G, Y_G, Z_G)$ 为大地坐标系, $O_{LS} (X, Y, Z)$ 为扫描仪自身坐标系, $P(x, y, z)$ 为观测目标点, S 是扫描仪距观测点距离; θ, α 为夹角。在实际操作中,仪器在大地坐标系下的绝对位置和方向并不能自身精确地定位,通常以 GPS、精密水准等测量技术作为补充。所以 TLS 的点云数据必须经过坐标配准处理,例如安置一些地面控制点。

1.2 TLS 单点扫描精度、角分辨率与扫描距离

单点扫描精度、角分辨率与扫描距离是 TLS 的 3 个重要参数,通常由仪器性能决定,不同的生产厂家生产的扫描仪其参数有所不同。随着传感器技术的发展,扫描精度在不断提高。表 1 列举了目前使用较多的 TLS 性能参数。

表 1 几种常见的应用于滑坡监测的 TLS 性能参数^①

Tab. 1 Parameters of some TLS which are suitable for landslide monitoring

仪器型号	生产厂家	距离/m (80% 反射率)	视场范围/(°) (垂直 × 水平)	精度/mm(100 m 单点距离)	角分辨率	最高扫描速率/ (点·s ⁻¹)	处理软件	后续性能增强 系列产品
ILRIS - 3D	Optech	1 500	40° × 40°	7	0.009 74°	2 000	Polyworks	ILRIS - 36D, ILRIS - 3D_ER, ILRIS - 3D_HD
LMS z420i	Riegl	1 000	80° × 360°	10	0.15 mrad	11 000	Riscan Pro	VZ - 1000
LMS z620	Riegl	2 000	80° × 360°	10	0.15 mrad	11 000	Riscan Pro	
LPM - 321	Riegl	6 000	150° × 360°	25	0.15 mrad	1 000	Riscan Pro	
VZ - 400	Riegl	500	100° × 360°	2	0.000 5°	300 000	Riscan Pro	
GX 3D	Trimble	350	60° × 360°	7	3mm@50m	5 000	PointScape	
4 400 LR	I - Site	700	80° × 360°	50	1.4 mrad	4 400	I - site studio	

①数据由仪器生产厂家提供。

据 Manetti 等的研究^[18], 在 800 ~ 1 000 m 的扫描距离范围内, TLS 扫描精度为 ± 1.5 cm。2012 年, European project SafeLand 机构的研究表明^[19], TLS 的扫描精度是与扫描距离、材料反射率、扫描面复杂程度和激光束入射角相关的函数: 扫描距离越远, 扫描精度越低; 材料的反射率越低, 扫描精度越低^[20]; 扫描表面越复杂, 扫描精度越低^[21]; 激光入射角越大, 扫描精度越低^[22]。在实际工程应用中, 除了上述因素的控制外, 反射率过高的材料以及高光的扫描环境和恶劣的天气条件(雨、雾等)也可能对实际扫描精度造成影响。

激光扫描仪的分辨率是决定扫描精细水平的一个参数, 分为距离分辨率(range resolution)和角度分辨率(angular resolution), 角度分辨率又叫空间分辨率(spatial resolution)。距离分辨率是指测距仪的同一激光束在同一视线方向上分辨物体的能力, 受激光脉冲发射装置的激光波长控制^[23]; 而角度分辨率是指相邻的两激光束区辨物体的能力, 取决于 2 个因素: ①采样间隔, 即点间距(由用户定义); ②激光的波束宽度(由扫描距离和仪器性能决定)。激光扫描仪的上述 2 种分辨率容易被混淆, 大部分情况被单单理解为角度分辨率。通常, 采样间隔越小, 采集的点云更能反映精细的表面形状, 但并非点间距越小越好。当采样间隔小于激光的波束宽度时, 表面细节是模糊的^[24]。

点云密度是反映点云质量的另一个重要参数, 其影响因素有激光的波束宽度, 反射材料的颜色、粗糙程度、湿度以及入射角等^[20, 25-26]。TLS 的点云密度通常是 50 ~ 10 000 点/ m^2 。

在观测距离一定的情况下, 通过提高激光束发射的密度可获得密度较大的三维地形点云数据, 但如果激光束被物体遮挡就会产生数据盲区。为了克服这一缺点, 需要增加不同的扫描站点以对同一目标进行几次扫描, 同时, 每个扫描站点每次扫描中要设置几个关键点以使每个扫描站点扫描的激光点云数据方便拼接起来。TLS 原始点云数据包含很多错点、杂点或虚点, 往往不能直接使用, 必须经过滤波和删减。另外, 海量的点云数据(可能 10 GB)对数据处理和分析而言是一个大挑战, 因此采用合适、有效的滤波方法也相当重要。

1.3 高精度数字高程模型

高精度数字高程模型(high resolution digital elevation models, HRDEMs)是基于 TLS 数据进行滑坡变形监测, 以及滑坡测绘、建模、快速辨识等研究的基础。在滑坡监测中, TLS 数据通常被用来建立地形的 HRDEMs, 其过程主要包括以下 3 个步骤: ①

获取地形表面的三维坐标; ②采用不规则三角网(triangulated irregular networks, TINs)或其他插值方法进行插值; ③生成四边形网格或栅格。

1.4 点云数据的采集与处理方法

将 TLS 用于滑坡变形监测现场时, 可在比较安全、通视良好和基本稳定的地方建造几个已知坐标观测墩, 用于架设扫描仪、GPS 接收机、全站仪以及瞄准标志等仪器设备^[27]。点云数据采集过程中通常要考虑以下 4 个因素: ①点云密度, 扫描时采用的角度分辨率需提前根据现场条件和工程需要设定; ②扫描站点位置, 为了尽量减少遮挡区域, 综合考虑选择扫描仪架设位置^[28]; ③扫描站点数量, 考虑到点云数据应覆盖滑坡的全区域, 需提前根据不同地面三维扫描仪的视场参数与扫描距离, 考虑架设扫描仪的具体位置; ④重叠扫描区域, 考虑到点云数据处理时坐标配准的处理, 每次扫描间应至少保留 20% 或 30% 的重叠扫描区域。TLS 点云数据采集及初处理流程如图 3 所示。

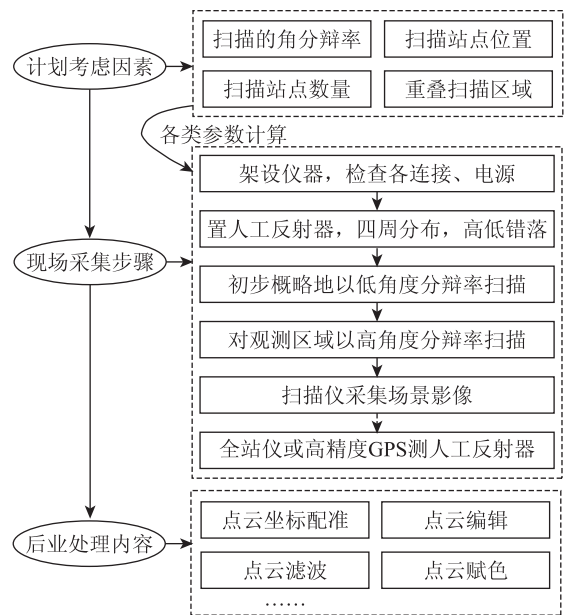


图 3 点云数据采集与初处理流程
Fig. 3 Procedure of acquisition and preprocess of point cloud

在点云初处理的操作中, 坐标配准一般包括 2 个步骤: ①用 2 次扫描中同一个视觉辨识的特征点进行初配准。通常选用的点数越多, 配准的效果越好, 一般 3 ~ 5 个共同的特征点即可得到相当好的配准效果; ②采用邻近点迭代算法(iterative closest points, ICP)进行优化配准^[29-30]。通过迭代使得 2 点间差异随着均方差函数的最小化而减少。一些点云处理软件(如 Riscan Pro)中坐标配准功能的实现也是基于 ICP 算法完成的。

点云滤波的处理方法对 TLS 滑坡监测结果影

响较大。为了得到准确的监测结果,在对点云进行后处理分析前须消除不属于地形表面的部分点(如植被、电线、设备等),滤波过程通常需结合人工手动过滤。目前的一些自动滤波算法通常从地形几何特征与点云密度 2 个方面展开,可以过滤大部分植被点云。对于高大的树木,滤波相对简单,对于矮小的灌木、草丛则较为复杂。在一些工程中,为降低小变形量滑坡监测的误差,采用了邻近平均算法^[21]。

表 2 TLS 在滑坡变形监测应用中的分类

Tab.2 Classification of different applications of TLS in landslide monitoring

分类	内容	该研究内容部分文献
第 1 类 表面变形监测	监测滑坡表面变形值,估计体积变化量	Gordon S ^[5] , Lichti D ^[15] , Oppikofer T ^[6,36] , Sturzenegger M ^[28] , A Abell'an ^[7,21,37]
第 2 类 HRDEM 提取	从三维点云数据中提取 HRDEM	Derron M ^[12]
第 3 类 运动特征与机理调查	分析 HRDEM 变化,调查滑坡体结构和运动机理	Dunning S ^[47] , Massey C ^[47]
第 4 类 误差及影响因素	分析精度影响因素,评价系统误差	Lichti D ^[22,24] , Voegtle T ^[20]
第 5 类 概述介绍	介绍 TLS 原理、方法及其应用	Slob S ^[3] , Hack R ^[3]
第 6 类 室内试验	室内试验,分析可行性与精度	Travelletti J ^[48] ,徐进军 ^[27]

第 1 类为表面变形监测。表面变形监测是 TLS 滑坡监测的基本内容,其结果最能直观表现滑坡的运动趋势,具体包括数据采集方法改善、数据处理流程研究、滤波方法研究、地形插值方法研究以及监测结果的适当表现等,是 TLS 监测滑坡变形研究的主体。

第 2 类为 HRDEM 提取。研究内容主要包括点云数据的加工、DEM 的制作以及精度的控制等。

第 3 类为滑坡运动特征与机理调查,研究如何根据 HRDEM 或 DEM 的差值分析推测滑坡的运动机理。

第 4 类为 TLS 测量系统的误差及影响因素分析,包括误差产生原因、误差大小评价以及误差影响因素等,是评价和提高系统稳定性与可靠性的重要内容。

第 5 类为概述介绍,重点介绍 TLS 原理、方法、发展历程、关键技术及主要应用等内容。

第 6 类为室内试验,通过精心设计的室内试验,验证仪器精度、监测方法的可行性以及分析监测系统的精度。

3 TLS 在滑坡监测中的应用进展

TLS 是 20 世纪 90 年代末期在 ALS 技术出现之后发展起来的一种雷达观测技术^[13],此后,在地形测绘、工程建模、变形观测以及文物保护等方面的研究便逐渐开展起来。TLS 技术发展之初较多地应用在工程建模、地形测绘与结构变形检测的研究中^[5]。21 世纪初,Lichti 等学者开始研究 TLS 技术

2 TLS 在滑坡监测中的应用分类

TLS 在滑坡监测领域的应用通常可细分为表面变形监测、体积变化估计、运动速度分析、运动机理调查和运动趋势分析 5 类。前 3 类属于滑坡变形监测的常规内容,后 2 类是前 3 类内容的扩展和后续。依据具体的研究内容还可细分为 6 类(表 2)。

的特点与性能,并开展了 TLS 系统误差水平^[31-32]试验研究。研究结果展示了 TLS 技术在建模、变形探测等方面的优势,显示了 TLS 技术在工程应用中独具的潜力。从此,TLS 作为一种非接触“面”式监测技术,与其他遥感监测手段(如 InSAR)一样飞速地发展起来。

3.1 TLS 滑坡监测方法

TLS 滑坡监测方法的研究始于 2002 年。英国地质调查局(British Geological Survey, BGS)结合 GPS 将 TLS 技术引入到海岸线侵蚀的调查中^[33],提出了海岸边坡的 TLS 监测方法,通过 HRDEM 差值对比取得了较高精度海岸侵蚀量与侵蚀速率的结果,并使得 TLS 技术在滑坡监测中的可行性与可靠性得到了验证,但数据处理较简单,且未对监测结果误差进行系统分析。随后一些学者开始注意到 TLS 技术在变形监测领域的应用优势^[34],促使 TLS 在该领域得到了较快的发展。监测方法的核心是通过采集点云数据,经处理后制作 HRDEM,借助 HRDEM 的差值比较法求解变形量等参数。同时开展与其他监测手段的对比研究和系统误差评价,使 TLS 监测方法逐渐得以完善。2007 年美国加利福尼亚州交通部针对该部门使用 TLS 技术的项目制订了具体的操作标准与细则^[35],从数据采集到数据处理给予了详细的操作向导,并在 HRDEM 差值比较法的基础上,发展了其他分析方法,如断面分析等,为 TLS 技术的推广和规范打下了基础。

此外,HRDEM 作为基于 TLS 滑坡变形监测分析的基础,除了应用差值求解形变值外,还能够直接从数据中分析出滑坡运动特征,有利于对滑坡的结

构机理进行研究^[36]。HRDEM 用于探测和分析滑坡体运动研究的局限在于,HRDEM 仅能反映滑坡体的表面变形,目前尚未出现有效的依据变形条件判断滑坡运动特征与结构机理的相关研究成果。

概括而言,目前的 TLS 滑坡监测分析方法主要是借助 HRDEM 的差值比较求解,或少部分通过点云属性统计计算直接求得。根据该原理,HRDEM 差值比较方法结果的准确性取决 HRDEM 的精度与质量。因此,提高 HRDEM 的精度与质量是改进目前基于 HRDEM 监测方法的主要途径。然而,目前出现的基于 HRDEM 的 TLS 方法并不能很好地解决 HRDEM 的精度和质量问题,如植被遮挡导致 HRDEM 精度不足,数据过滤导致 HRDEM 质量不高等,这些局限一方面阻碍了 TLS 监测精度的提高,另一方面大量数据的转换降低了工作效率。故 TLS 监测方法未来能否发展成为一种非基于 HRDEM 的监测方法,将成为 TLS 技术发展的挑战。

3.2 TLS 监测精度

随着 TLS 技术在滑坡变形监测中操作流程的逐渐发展,监测技术逐渐转向通过改进数据处理方法来提高监测精度的研究。从 TLS 技术应用于滑坡监测之初就能达到 cm 级的监测精度,目前通常三维激光扫描仪的精度已达 mm 级,但滑坡变形监测精度从 cm 级到 mm 级尚具挑战性。2006 年,Abellan 等人运用 TLS 技术监测西班牙某危岩体,其结果显示出了 mm 级精度的岩体变形及变形速率,验证了 TLS 技术应用在岩体 mm 级高精度监测研究中的可行性^[37]。此后,众多工程实例也表明 TLS 技术在危岩体、岩质边坡的变形监测中具有高精度和高效的优势。

然而,对于有植被覆盖的滑坡体,TLS 的监测精度有别于无植被覆盖的岩体边坡。Prokop 和 Panholzer 评估了应用 TLS 技术监测不同变形规模滑坡的能力,结果表明,通过 DEM 比较的方法对有植被覆盖滑坡的变形监测研究,不可能监测到每个观测区间内发生的小于 50 mm 的变形^[38]。虽然 TLS 单点监测精度可达到(2~10 mm)/100 m(不同的扫描仪精度不同),但针对危岩体、岩质边坡及岩体海岸线等,即完全不包括植被或植被很少的边坡,TLS 的监测精度可达到 mm 级;但对于有植被覆盖的滑坡体,由于点云数据经滤波后数据会有损失,DEM 数据质量不高,通过 HRDEM 对比分析滑坡变形的的方法不可能监测到较小变形。因此,对于变形量小、变形缓慢的滑坡,或变形量小于 50 mm 的滑坡(非光洁表面岩质边坡),目前的 TLS 技术还不能准确地监测到变形。

同时,对于影响 TLS 监测精度因素的研究也在展开。在 TLS 发展之初,Lichti 等人对扫描距离、扫描角分辨率及激光扫描仪系统误差等主要参数对监测精度的影响进行了分析,评价了 TLS 系统的误差水平^[31]。Voegtle 等研究了材料的差异性(包括颜色差异)对 TLS 精度的影响,结果显示了光线情况、湿度以及入射角等条件对 TLS 精度的影响关系^[20]。此类研究为 TLS 技术在监测工作中的进一步应用提供了参考,目前该方向研究已发展成熟。

3.3 滤波处理方法

对于数据处理过程中十分重要的拼接配准方法与滤波处理(杂点、植被点过滤)方法,特别是对监测结果影响巨大的滤波方法,有数学形态方法^[39]、基于最小二乘法的滤波方法^[40]以及根据滑坡地形 DEM 三角化的滤波方法和依据高程、坡度的栅格化滤波方法等^[41]。滤波方法的发展趋向于多样与复杂,每种滤波方法有各自的优势与局限性。滤波方法的选用很大程度上依据滑坡地形条件、环境条件的特点。针对不同地形、数据及精度要求,使用适用的滤波算法过滤异常点与植被点。滤波与数据过滤几乎是数据处理过程中必不可少的环节。然而,使用滤波方法就意味着牺牲部分信息。HRDEM 的数据质量也受不同滤波方法所影响,并且其影响是不可消除的。故滤波的关键问题在于如何准确地消除非观测面的三维点云。目前多数滤波方法均是基于数学方法拟合滤波面或通过形态估计滤波面,故滤波函数不能准确过滤非观测面点。滤波过程通常需结合人工手动过滤,自动滤波算法一般从地形几何特征与点云密度两方面展开,过滤大部分非观测面点云。在未来开发基于其他点云特征(如颜色、反射强度等)的滤波方法将是滤波方法发展的另一个方向。

3.4 与其他遥感监测手段的结合及应用

远距离与近距离观测技术相结合能更好地从宏观和微观的角度表现滑坡的运动轨迹,有助于更了解滑坡现象^[9]。虽然 TLS 技术观测分辨率大大高于 SAR 监测技术,但受监测距离与范围的限制,只能针对单个滑坡进行;而 SAR 监测范围广,可针对大区域进行观测。

TLS 不仅在滑坡、边坡监测中得到了广泛应用,而且在滑坡测绘、滑坡灾后评价中也给予了技术支持。2004 年日本新潟县中越地震诱发了当地接近 400 个较大型滑坡,TLS 技术在震后灾害评价中的应用,大大提高了灾害评估的效率^[42]。2008 年汶川地震后,TLS 技术的使用辅助快速抢通了两侧发生大量崩塌滑坡的都汶公路^[43]。随着 TLS 技术的

发展,将会越来越多地应用在各种监测、灾害防治工程中。

4 国内 TLS 技术及其滑坡监测应用进展

我国 TLS 技术在滑坡监测中的应用研究起步较晚,相关文献较少。虽早在 2002 年,一部分学者开始关注 TLS 技术,并做了相关的系统和特点介绍^[44],但直至 2005 年,TLS 技术在边坡监测中的应用研究才陆续展开,并有相关论文发表。董秀军、黄润秋等介绍了运用 TLS 技术开展岩体地表出露结构面的地质几何参数调查和开挖工作面的快速地质编录等的工作^[45],大大提高了工作效率,是国内应用 TLS 技术开展边坡调查的首例,但研究并未介绍到滑坡监测的相关内容。2010 年,徐进军等人将 TLS 技术应用在滑坡变形监测中,采用“重心法”对三峡库区某滑坡的局部进行了监测与分析,得到了较满意的结果^[27],验证了该方法的可行性。但该方法对于处理大型滑坡仍有不足,监测结果表达方式不完整。Xie 等通过制作 HRDEM 计算滑坡表面变形^[46],结合 GIS 技术与三维影像系统,对某水库区内大型滑坡进行变形监测,实现了大数据量的处理和监测结果的理想表现。但由于滤波方法与 HRDEM 方法的局限性,监测精度只能达到 cm 级水平。总而言之,国内 TLS 技术在滑坡监测领域的研究正在逐步发展,但相比于国外 TLS 技术的蓬勃发展之势,国内 TLS 技术发展略显滞后,研究成果较少;虽然基本监测方法流程技术已经发展起来,成熟的数据处理分析体系正在建立过程中,但 HRDEM、滤波等方法研究方向还未独立发展开来。因此,完善 TLS 监测系统,提高监测精度,与其他新技术相结合可能将成为 TLS 技术与滑坡监测的今后发展方向。

5 讨论与展望

综上所述,TLS 技术已越来越多地应用到滑坡监测领域,同 InSAR 等其他遥感监测技术一样,将成为滑坡监测、预警及滑坡风险管理的技术手段之一。尽管 TLS 技术存在扫描范围较小、点云后处理方法重要等,但其具有高分辨率、高精度和方便使用等突出优势,将在未来的滑坡监测中扮演更重要的角色。

1)随着 TLS 技术的发展与行业标准的规范,未来 TLS 技术可能成为滑坡调查与监测工作中的一种基本手段,成为工作流程中不可缺少的一个环节。

2)随着光电技术与计算机技术的发展,扫描精度更高、扫描范围更远、扫描空间分辨率更高的 TLS 仪器将会在市场上出现,使 TLS 仪器昂贵的价格得以降低。

3)在点云数据分析处理方面,目前几乎所有的的方法均是通过制作 HRDEM,对不同时间序列下的 DEM 进行比较的方法。未来能否开发出一种新的数据处理方法,或者从 HRDEM 中提取更多有用的信息将是 TLS 技术发展的挑战。

4)TLS 技术带来的高精度监测结果可以揭示滑坡的运动状态,在此基础上能否提出更理想的滑坡运动机理模型,建立基于 TLS 技术的滑坡早期预警系统也是很值得研究的课题。

参考文献 (References):

- [1] Johan K, Christophe D, Pascal A. Application of a terrestrial laser scanner (TLS) to the study of the séchilienne landslide (Isère, France) [J]. *Remote Sensing*, 2010, 2(12): 2785 - 2802.
- [2] Squarzoni C, Delacourt C, Allemand P. Nine years of spatial and temporal evolution of the La Valette landslide observed by SAR interferometry [J]. *Engineering Geology*, 2003, 68: 53 - 66.
- [3] Slob S, Hack R. 3D terrestrial laser scanning as a new field measurement and monitoring technique [C]// *Engineering Geology for Infrastructure Planning in Europe: A European Perspective, Lectures Notes in Earth Sciences*. Berlin: Springer, 2004, 104: 179 - 189.
- [4] Ardizzone F, Cardinali M, Galli M, et al. Identification and mapping of recent rainfall - induced landslides using elevation data collected by airborne LiDAR [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2007, 7: 637 - 650.
- [5] Gordon S, Lichti D, Stewart M. Application of a high - resolution, ground - based laser scanner for deformation measurements [C]// *Proceedings of the 10th International FIG Symposium on Deformation Measurements*. Orange, California, USA, 2001.
- [6] Oppikofer T, Jaboyedoff M, Blikra L, et al. Characterization and monitoring of the Aknes rockslide using terrestrial laser scanning [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2009, 9: 1003 - 1019.
- [7] Abellan A, Vilaplana J, Calvet J, et al. Detection and spatial prediction of rockfalls by means of terrestrial laser scanner monitoring [J]. *Geomorphology*, 2010, 119: 162 - 171.
- [8] Teza G, Galgaro A, Zaltron N, et al. Terrestrial laser scanner to detect landslide displacement fields: A new approach [J]. *Remote Sensing*, 2007, 28: 3425 - 3446.
- [9] Teza G, Pesci A, Genevois R, et al. Characterization of landslide ground surface kinematics from terrestrial laser scanning and strain field computation [J]. *Geomorphology*, 2008, 97: 424 - 437.
- [10] Jaboyedoff M, Oppikofer T, Abellán A, et al. Use of LiDAR in landslide investigations: A review [J]. *Natural Hazards*, 2012, 61(1): 5 - 28.
- [11] Shan J, Toth C K. *Topographic laser ranging and scanning: Principles and processing* [M]. London: CRC Press, Taylor & Francis

- Group, LLC, 2008.
- [12] Derron M, Jaboyedoff M. Preface "LiDAR and DEM techniques for landslides monitoring and characterization" [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2010, 10: 1877 – 1879.
- [13] Heritage G, Large A. *Laser scanning for the environmental sciences* [M]. London: Wiley – Blackwell, 2009.
- [14] Baltsavias E. Airborne laser scanning; Basic relations and formulas [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1999, 54: 199 – 214.
- [15] Lichti D D, Gordon S, Stewart M. Ground – based laser scanners: Operation, systems and applications [J]. *Geomatica*, 2002, 56: 21 – 33.
- [16] Feng H, Liu Y, Xi F. Analysis of digitizing errors of a laser scanning system [J]. *Precision Engineering*, 2001, 25 (3): 185 – 191.
- [17] Aloysius W, Uwe L. Airborne laser scanning – an introduction and overview [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1999, 54 (2/3): 68 – 82.
- [18] Manetti L, Steinmann G. Integration of a new measuring instrument in an existing generic remote monitoring platform [C] // 7th International Symposium on Field Measurements in Geomechanics. Boston, 2007.
- [19] SafeLand deliverable 4. 1. Review of techniques for landslide detection, fast characterization, rapid mapping and long – term monitoring [EB/OL]. SafeLand European Project, 2010. <http://www.safeland-fp7.eu>.
- [20] Voegtli T, Schwab I, Landes T. Influences of different materials on the measurement of a Terrestrial Laser Scanner (TLS) [C] // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Beijing, 2008, 37 (5): 1061 – 1066.
- [21] Abellan A, Jaboyedoff M, Oppikofer T, et al. Detection of millimetric deformation using a terrestrial laser scanner: Experiment and application to rockfall event [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2009, 9: 365 – 372.
- [22] Lichti D D. Error modelling, calibration and analysis of an AM – CW terrestrial laser scanner system [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2007, 61: 307 – 324.
- [23] Fox C. *The infrared and electro – optical systems handbook (Volume 6)* [M]. Ann Arbor, Michigan: Infrared Information Analysis Center, Environmental Research Institute of Michigan, SPIE Optical Engineering Press, 1993.
- [24] Lichti D D, Jantsho S. Angular resolution of terrestrial laser scanners [J]. *Photogrammetric Record*, 2006, 21: 141 – 160.
- [25] Ingensand H. Metrological aspects in terrestrial laser – scanning technology [C] // Proceedings of the 3rd IAG/12th FIG Symposium. Baden, Austria, 2006.
- [26] Pesci A, Teza G, Ventura G. Remote sensing of volcanic terrains by terrestrial laser scanner; Preliminary reflectance and RGB implications for studying Vesuvius crater (Italy) [J]. *Annals of Geophysics*, 2008, 51 (4): 619 – 631.
- [27] 徐进军, 王海城, 罗喻真, 等. 基于三维激光扫描的滑坡变形监测与数据处理 [J]. *岩土力学*, 2010, 31 (7): 2188 – 2196.
Xu J J, Wang H C, Luo Y Z, et al. Deformation monitoring and data processing of landslide based on 3D laser scanning [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31 (7): 2188 – 2196.
- [28] Sturzenegger M, Yan M, Stead D, et al. Application and limitations of ground – based laser scanning in rock slope characterization [C] // Eberhardt E. *Proceedings of the first Canadian US rock mechanics symposium*. London: Taylor & Francis, 2007: 29 – 36.
- [29] Besl P J, McKay N D. A method for registration of 3 – D shapes [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, 14 (2): 239 – 256.
- [30] Chen Y, Medioni G. Object modeling by registration of multiple range images [J]. *Image and Vision Computing*, 1992, 10: 145 – 155.
- [31] Lichti D D, Stewart M, Tsakiri M, et al. Calibration and testing of a terrestrial laser scanner [J]. *International archives of Photogrammetry and Remote sensing*, 2000, 33 (B5/2; PART 5): 485 – 492.
- [32] Gordon S, Lichti D D, Stewart M, et al. Metric performance of a high – Resolution laser scanner [C] // Proceedings of SPIE Electronic Imaging 2001 Conference. San Jose, California, 2001.
- [33] Hobbs P, Humphreys B, Rees J, et al. Monitoring the role of landslides in 'soft cliff' coastal recession [G] // Isle of Wight. *Instability Planning and Management: Seeking Sustainable Solutions to Ground Movement Problems*. Thomas Telford, 2002: 589 – 600.
- [34] Bitelli G, Dubbini M, Zanutta A. Terrestrial laser scanning and digital photogrammetry techniques to monitor landslide bodies [C] // Altan O. *Proceedings of the XXth congress, The International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, ISPRS2004*. Istanbul: 2004, 35 (B5): 246 – 251.
- [35] Hiremagalur J, Yen K, Akin K, et al. Creating standards and specifications for the use of laser scanning in CalTrans projects [M]. California: California Department of Transportation, US, 2007.
- [36] Oppikofer T. Detection, analysis and monitoring of slope movements by high – resolution digital elevation models [D]. Switzerland: University of Lausanne, 2009.
- [37] Abellan A, Vilaplana J, Martinez J. Application of a long – range terrestrial laser scanner to a detailed rockfall study at Vall de Núria (Eastern Pyrenees, Spain) [J]. *Engineering Geology*, 2006, 88: 136 – 148.
- [38] Prokop A, Panholzerp H. Assessing the capability of terrestrial laser scanning for monitoring slow moving landslides [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2009, 9 (6): 1921 – 1928.
- [39] Kilian J, Haala N, Eenglich M. Capture and evaluation of airborne laser scanner data [C] // Kraus K. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. Vienna, 1996 (B3): 383 – 388.
- [40] Pfiffer N, Kostli A, Kraus K. Interpolation and filtering of laser scanner data – implementation and first results [C] // Bellman C J. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. Columbus: 1998 (32): 153 – 159.
- [41] Vosselmann G. Slope – based filtering of laser altimetry data [J]. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2000, 33 (B3/2): 935 – 942.
- [42] Kayen R, Robert P, Bays J. Ground – LiDAR visualization of surface and structural deformations of the Niigata – ken Chuetsu [J]. *Earthquake Spectra*, 2005 (22): 147 – 162.
- [43] 董秀军, 黄润秋. 三维激光扫描测量在汶川地震后都汶公路快速抢通中的应用 [J]. *工程地质学报*, 2008, 16 (6): 774 – 779.
Dong X J, Huang R Q. Application of 3D laser scanner in making Duwen Road travelable in short term after Wenchuan earthquake [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2008, 16 (6): 774 – 779.
- [44] 李英成, 文沃根, 王伟. 快速获取地面三维数据的 LiDAR 技术

- 系统[J]. 测绘科学,2002,27(4):35-38.
- Li Y C, Wen W G, Wang W. A LiDAR system of collecting 3D terrain data fast [J]. Science of Surveying and Mapping, 2002, 27(4):35-38.
- [45] 董秀军,黄润秋. 三维激光扫描技术在高陡边坡地质调查中的应用[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(s2):3629-3635.
- Dong X J, Huang R Q. Application of 3D laser scanning technology to geologic survey of high and steep slope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(s2):3629-3635.
- [46] Xie M W, Hu M, Wang Z F, et al. Three dimensional laser scanner to detect large reservoir landslide displacement [C]//7th International Symposium on Digital Earth. Perth, Australia, 2011.
- [47] Dunning S, Massey C, Rosser N. Structural and geomorphological features of landslides in the Bhutan Himalaya derived from terrestrial laser scanning [J]. Geomorphology, 2009, 103(1):17-29.
- [48] Travelletti J, Oppikofer T, Delacourt C, et al. Monitoring landslide displacements during a controlled rain experiment using a long-range terrestrial laser scanning (TLS) [J]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing Spatial Information Sciences, 2008, 37(B5):485-490.

Application of TLS technique to landslide monitoring: Summarization and prospect

XIE Mowen, HU Man, DU Yan, XU Bo

(School of Civil & Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to summarize the characteristics and key points of TLS and stress the importance of TLS technology in landslide monitoring, this paper briefly describes the principles of TLS technology and basic methods for data processing, gives a review of TLS application history and present research situation both in China and abroad, and makes classification for these researches and applications. In addition, the crucial aspects and the prospective development of TLS are discussed. Although TLS has not become one of conventional technologies in landslide monitoring yet, it has opened up a new field of research in landslide monitoring. And it continues to expand and develop.

Key words: TLS; LiDAR; landslide monitoring; summarization; review; prospect

第一作者简介: 谢谟文(1965-),男,工学博士,北京科技大学教授,博士生导师。主要从事地质灾害、遥感监测、GIS与遥感应用及信息系统开发和防灾减灾等方面的工作。Email: mowenxie@126.com。

(责任编辑:刁淑娟)