

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2015.03.21

大型崩滑灾害变形三维激光扫描监测技术研究

褚宏亮¹ 殷跃平¹ 曹峰¹ 隋立春² 李滨³

(1. 中国地质环境监测院, 北京 100081; 2. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710061;
3. 北京大学遥感与地理信息系统研究所, 北京 100871)

摘要: 三维激光扫描技术突破了传统单点测量方法采样点有限、覆盖范围小的不足, 实现了对观测对象面的测量。受制于扫描速率和扫描距离的限制, 该技术目前在地质灾害领域应用有限, 因此也成为热点研究课题。本文针对高陡危岩、大型滑坡等复杂地质环境下地质灾害的三维激光扫描技术, 系统探讨了地形构建、DEM 建模和几何量测等快速调查方法, 并提出了点、线、面相结合的危害地质体形变监测方法; 结合应用案例系统比较和分析了三维激光扫描技术在滑坡、崩塌调查监测中的技术优势和局限性, 展望了该项技术在地质灾害领域的应用与发展趋势。

关键词: 三维激光扫描; 地质灾害; 调查; 监测

中图分类号: P642.22; P642.21

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2015)03-0128-07

Research on deformation monitoring of large collapses and landslides based on 3D laser scanning technology

CHU Hongliang¹, YIN Yueping¹, CAO Feng¹, SUI Lichun², LI Bin³

(1. China Institute of Geo-Environment Monitoring, Beijing 100081, China;
2. School of Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an Shaaxi 710061, China;
3. Institute of Remote Sensing and GIS, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: As an area surveying, 3D laser scanning technology breaks the limitation of the traditional method of single point measurement, which has insufficient sample points and small coverage. Due to the limitation of scanning speed and range, this technology has only a few application in geological disaster and is a hot topic in this research field. This article discusses the fast surveying method of territorial modeling, DEM creating and geodesy based on the 3D laser scanning technology in complex geological disasters such as high steep rocks and large land slides. A new monitoring method on geological change detection is introduced by combining points, lines and planes. This article compares and analyzes the advantage and disadvantage of 3D laser scanning in land slides and collapses by using case study. The application and future development of this technology is discussed for further researches.

Keywords: 3D laser scanning; geological disaster; survey; monitoring

三维激光扫描技术是近年来出现的全新的测绘技术, 它突破了传统单点测量方法的不足, 实现了对面的测量, 具有获取数据速度快、成果精度高、非接触测量等

诸多优势。三维激光扫描技术已经被应用到各个行业领域工作中, 如建筑修复、森林和农业资源调查、交通事故现场模拟、岩体结构面统计等^[1-2]。近年来, 学者们

收稿日期: 2014-06-17; 修订日期: 2014-08-15

基金项目: 十二五国家科技支撑课题(2012BAK10B01); 中国地质调查局项目(1212011220140, 121201140079101); 国土资源部公益性行业科研专项(201211055)

第一作者: 褚宏亮(1981-), 男, 学士, 主要从事工程地质、地质灾害等领域的科研工作。E-mail: chuhl@mail.cigem.gov.cn

开始探索三维激光扫描技术在地质灾害领域工作中的适用性^[3~6]。如赵国梁等^[3]应用三维激光扫描技术较好地分析了四川达竹矿务局柏林煤矿滑坡区地表移动的特殊规律和适用性;董秀军等^[4]将三维激光扫描技术应用于高陡边坡地质调查中,完成了地质结构面产状的测量、高陡边坡地表节理裂隙调查、辅助地质编录等工作;徐进军等^[5]通过对实验室滑坡模型和三峡库区某现场滑坡的变形监测,将三维激光扫描技术引入到滑坡变形监测与分析中。已有研究表明:受扫描速率、扫描距离、地质工程需求等具体条件的影响,该技术在解决复杂地质环境条件下地质灾害的监测有一定能力但也有所限制。

1 三维激光扫描技术原理与仪器现状

1.1 扫描原理与原始数据

三维激光扫描技术工作原理,以脉冲式为例,是基于激光测距原理来确定目标体的空间位置。仪器测量每个激光脉冲从发出到被测物体表面再返回仪器所经过的时间来计算距离,同时编码器测量每个脉冲的角度,可得到被测物体三维真实坐标。经过软件处理,实现实体建模输出^[6]。

三维激光扫描仪通过脉冲测距法获得测距观测值 S ,精密时钟控制编码器同步测量每个激光脉冲横向扫描角度观测值 α 和纵向扫描角度观测值 θ 。三维激光扫描测量使用仪器内部坐标系 P_i , X 轴在水平向, Y 轴在水平向与 X 轴垂直, Z 轴与 X 、 Y 轴平面垂直^[6]。由此可得三维激光脚点 P 坐标 (X, Y, Z) 的计算公式如图 1。

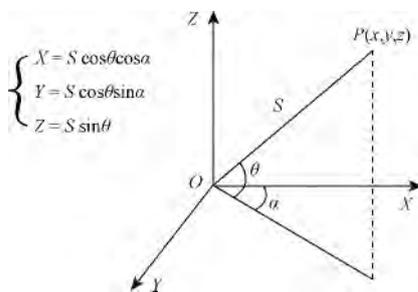


图1 三维激光扫描仪空间坐标示意图

Fig.1 Coordination system of 3D scanner

1.2 仪器分类

(1) 按照扫描获取的精度和作用距离来划分,可分为近距离扫描仪、中远距离工程型扫描仪和长距离机载扫描仪。

(2) 按照扫描仪承载介质的不同,可分为手持型

扫描仪、地面型扫描仪、车载型扫描仪和机载型扫描仪。

(3) 按照扫描仪的工作原理来分,又可分为基于飞行时间的脉冲式扫描仪和基于相位波测距的相位式扫描仪。

2 地质灾害三维激光扫描调查

当前滑坡崩塌灾害野外调查测量多以全站仪、静态 GPS、RTK 等方法来开展工作,其测量理论基础是具有共性的。但是,由于地形条件的限制,尤其是高陡岩体崩塌,传统的人工实地接触式调查方法很难达到预期的效果。三维激光扫描技术作为传统调查方法的有益补充,可快速有效解决高陡灾害体的精细化测量需求。本文以甑子岩大型危岩体为例,研究和总结三维激光扫描技术在地质灾害调查测量中的技术流程。

2.1 数据采集与 DEM 建模

重庆南川甑子岩危岩体位于南川区金佛山南坡,危岩高约 400 m。2004 年 8 月 12 日 W12 危岩体发生大规模崩塌;2008 年 5 月 12 日受汶川地震影响,发生小规模崩塌^[8]。由于接触式测量困难,因此采用 Leica HDS8800^[9] 三维激光扫描仪对危岩体扫描,获取其表面的点云数据(图 2)。在数据处理中,首先要进行滤波,以删除由于被测物体表面的粗糙度、波纹以及其他一些表面缺陷或者是扫描仪器本身性能等因素导致的噪声点^[10]。去除噪声分为手动删除和自动滤波两种方法,手动删除主要用于较为明显的特征地物。自动滤波可通过聚类算法提取噪声点然后删除,或用数学形态学算法提取体外悬浮点。

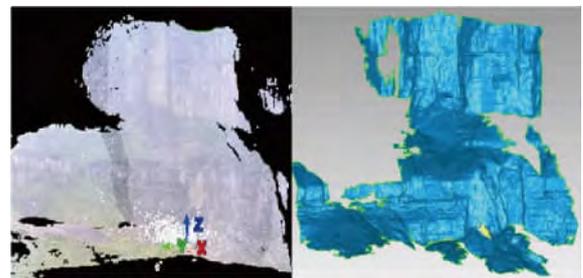


图2 甑子岩危岩体点云和建模结果

Fig.2 Point cloud and the Zengziyan model

滤波完成后,进行建模工作。DEM 模型是后续开展野外调查工作的基础。可根据点云数据特征把数据分割成不同的区域分别建模后再进行合并(图 2)。

2.2 等高线的提取

在特殊灾害点或重点地段的大比例尺测绘中,传

统测量方法很难实现陡崖地形测绘。首先,人们很难到达陡崖之上实地测量;其次,在成果表达上,陡崖地形的等高线会出现重叠现象。无论是从精度上还是成果表现上,陡崖地形的传统测量方法都略显粗糙,而用三维激光扫描技术则能很好地解决上述问题。

在成果表达上基于三维本身的立体特性,以DEM模型为基础生成等高线,可以很好地表现出地形变化(图3),克服传统等高线测绘技术对陡崖地形绘制的重叠问题,更加具有表现力。在精度上,以Leica HDS 8800扫描仪为例,其100 m处采样点间距的标定值为2 cm,以此推算,1000 m处采样点间距约为20 cm。即便考虑到剔除噪音数据或针对原始数据进行数据压缩以及数据滤波等采样点的后处理工作^[11],20 cm的选点采样精度对于大比例尺地形形成图来说,是可以满足精度要求的。

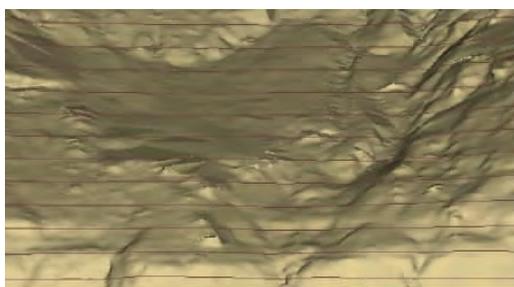


图3 甌子岩危岩体局部等高线图

Fig.3 Contour map of the Zengziyan unstable rock

2.3 体积参数的推算

以DEM建模和等高线提取为基础,可对灾害体规模、形态和结构进一步标定,并解算相关体积参数,提供量化数据基础。

以甌子岩2004年崩塌区域为例,在已生成的甌子岩DEM模型基础上,模拟2004年崩塌区域发生崩塌前的外表面,与现阶段DEM模型形成闭合区域并测算其体积约为 $17.9 \times 10^4 \text{ m}^3$ (图4),即可以推测2004年崩塌体体积约为 $17.9 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

从2004年崩塌危岩裸露部分可以看出,甌子岩危岩体顶部平台卸荷裂隙已经全面贯通(图5),受风化作用、大气降水、地下水等因素作用,陡崖下部页岩、泥质胶结的石灰岩风化、软化、崩解,形成空腔,在上覆岩体自重作用下向临空方向产生进一步变形,陡倾角裂隙带进一步拉裂扩张,有大规模崩塌隐患。在已生成DEM模型基础上,沿卸荷裂隙方向创建平面,与危岩体临空面形成闭合区域,即崩塌隐患区域,可计算出闭合空间体积约为 $124 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

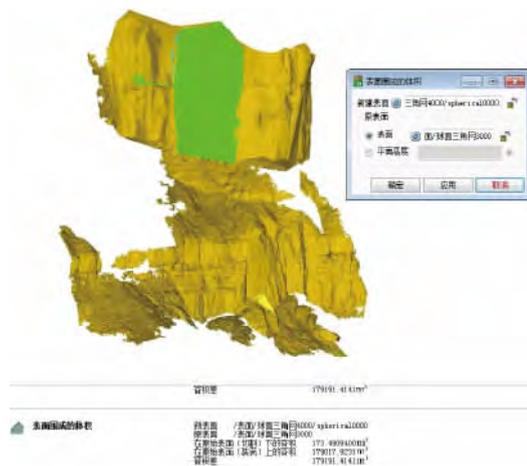


图4 闭合区域体积计算

Fig.4 Volume calculation of closed area



图5 已贯通的卸荷裂隙

Fig.5 Stress-release on cracked coalescence

三维激光扫描技术的应用,使得灾害体体积参数的推算尤其是复杂地质环境下无法开展野外实地测量的灾害体的体积参数的推算更加精确,为开展预警预报工作以及有针对性地制定防治预案提供了详实的基础数据。

3 地质灾害三维激光扫描形变监测

传统边坡监测方法多是基于对形变部位的判断而开展局部形变监测工作,属于逆向监测思维,主观性强,人为预判因素多。应用三维激光扫描开展形变监测则实现了由单点到面的监测,可大范围获取高分辨率的海量数据,进而判断出形变区域、形变趋势和形变量。由于具有合理的空间采样间隔,大幅度提高了数据采集速率和监测效率,提高了野外工作安全系数。下面分别以滑坡和高陡危岩体为例,分析总结三维激光扫描监测中点、线、面相结合形变监测方法。

3.1 滑坡监测

辽宁某大型滑坡,南北向纵长约 1200 ~ 1500 m,东西向横宽约 3100 m,滑面埋深大于 50 m,为深层滑坡,估算总体积约 $1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。滑坡北侧为露天矿坑南帮,坑下有露天开采活动。滑坡后缘沿东西方向发育有两条近平行的拉张裂缝(图 6),两条裂缝均持续垂直错落和水平张裂,且呈现加速趋势,日形变量达到 10 cm 以上。

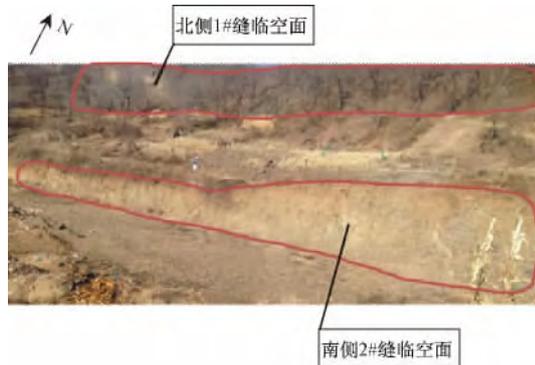


图 6 1、2 号缝临空面重点监测区域
Fig. 6 Key monitoring area of fracture 1# and 2#

为掌握后缘坡体破裂沉陷变形的整体性规律,分别于 2013 年 11 月 17 日和 12 月 17 日,在滑坡体后缘 1、2 号缝南侧,运用 Riegl VZ1000 扫描仪针对临空面进行三维激光扫描,获得两期扫描数据,通过面上对比和点上对比 2 种方法解译 2 处裂缝 1 个月内变形规律和形变值。

(1) 面上对比

运用三维激光扫描仪获得原始点云数据后,剔除噪音,将第一期 1、2 号缝区域点云单独提取后,进行封装建模。将第二期 1、2 号缝处点云数据提取,与第一期封装模型进行对比分析,比较该区域变形趋势及变形量,并用色谱图直观表现出来(图 7、8)。从对比分析检测图上可以看出,滑坡后缘 1、2 号缝临空面同时向北侧整体移动,从色谱图上看均属冷色调,即负值。1 号缝移动速率较 2 号缝快(深蓝色),1 个月内向北移动约 3.30 ~ 3.90 m;2 号缝区域(浅蓝色)移动速率相较于 1 号缝慢,1 个月内向北移动 1.40 ~ 1.95 m。

(2) 点上对比

三维激光扫描技术针对同一物体扫描 2 次,2 次的扫描数据中不会出现同名点。所谓的点上对比,是指被扫描物体上突出的、具有代表性的、通过对大量扫描点进行统计分析和拟合出来的特征点的比较。在面上对比分析的基础上,提取 1、2 号缝临空面上具有代

表性区域的特征点进行两期数据对比,结果见图 9,特征点信息见表 1。可以看出,点上对比分析可以很好地反映滑坡体的移动趋势和 $x、y、z$ 三轴方向的分项位移量,垂直错落和水平张裂得以量化分析,1、2 号缝的不同步移动规律得以体现,相对于 2 号缝,1 号缝的垂直错落和水平张裂速度明显更快。

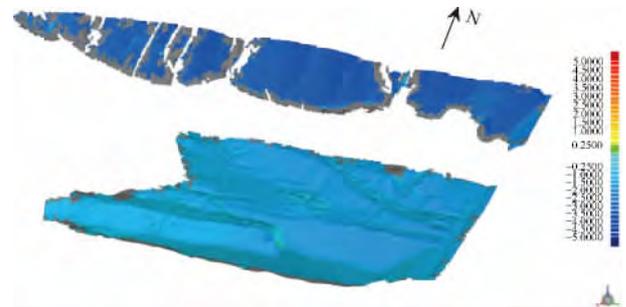


图 7 1、2 号缝代表性区域两期数据对比分析监测图
Fig. 7 Analysis of two different phases in the area of fracture 1# and 2#

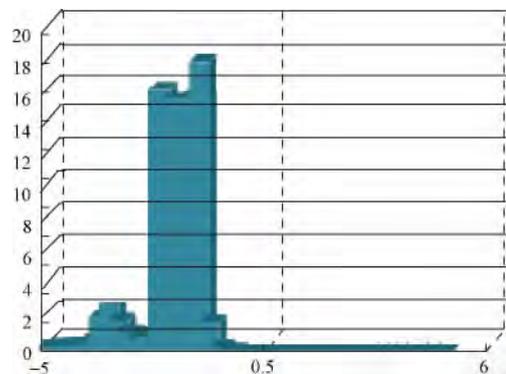


图 8 1、2 号缝监测区域形变偏差分布图(横向坐标为变形量、纵向坐标为百分比)
Fig. 8 Distribution chart of deformation on the area of fracture 1# and 2#(Horizontal is the changed value; vertical is the percentage)

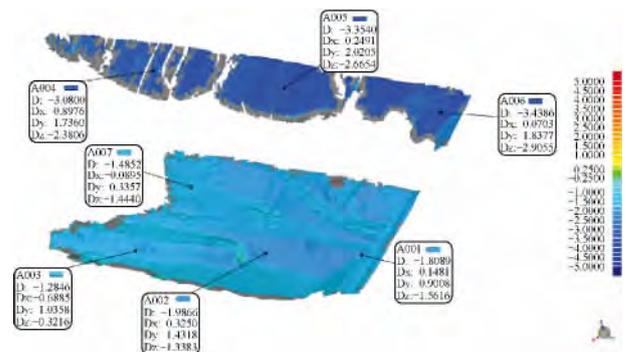


图 9 1、2 号缝代表性特征点形变对比监测图
Fig. 9 Deformation monitoring on the feature point in the area of fracture 1# and 2#

表 1 1、2 号缝代表性特征点监测信息表

Table 1 Monitoring information on the feature points of the fracture 1# and 2#

名称	偏差/m	偏差 X/m	偏差 Y/m	偏差 Z/m	偏差半径/m	参考/X	参考/Y	参考/Z
A001	-1.8089	0.1481	0.9008	-1.5616	0.1000	8.5942	42.0038	156.4265
A002	-1.9866	0.3250	1.4318	-1.3383	0.1000	-27.2313	43.4490	151.6063
A003	-1.2846	-0.6885	1.0358	-0.3216	0.1000	-73.1026	38.1987	150.9399
A004	-3.0800	0.8976	1.7360	-2.3806	0.1000	-84.9581	111.9365	172.3393
A005	-3.3540	0.2491	2.0205	-2.6654	0.1000	-35.9901	107.1019	174.5561
A006	-3.4386	0.0703	1.8377	-2.9055	0.1000	22.2200	102.3357	174.6369
A007	-1.4852	-0.0895	0.3357	-1.4440	0.1000	-59.4988	64.8778	160.2533

运用面上对比的方法,针对灾害体提取形变区间、形变趋势、形变量等相关参数;运用点上对比的方法,可以很好地反映灾害体上具有代表性的特征点的分项位移量。两种对比方法相结合,对于灾害体形变趋势及运动规律的总结分析有着至关重要的数据支撑作用。

3.2 高陡危岩体监测

鸡冠岭危岩体位于重庆武隆兴顺乡,乌江在此段切割强烈,形成峡谷地形。鸡冠岭危岩地处桐麻湾背斜核部地层中,地形陡峭,节理裂隙十分发育,由灰岩和页岩夹煤层组成,具有上硬下软的地质结构特征。乌江两岸形成比较对称的高陡岩质边坡,为发生大型崩塌提供了地形条件。

在 2012 年和 2013 年期间,运用徕卡 HDS8800 三维激光扫描仪多次针对鸡冠岭危岩体开展三维激光扫描形变监测工作。下面以 2012 年 10 月和 2013 年 10 月 2 期数据为例进行高陡危岩体的形变对比分析。高陡危岩体同滑坡不同,短时间内不易受到风化或雨水侵蚀的影响,结构面相对稳定,所以在面上对比和点上对比基础上,加入结构面剖面线对比,多角度反映危岩体刚性形变。

(1) 面上对比和点上对比

面上对比、点上对比的监测方法同滑坡监测方法相同,首先,提取鸡冠岭点云数据(图 10),并对原始点云数据进行处理,剔除噪音数据后进行封装建模。然后,选取鸡冠岭危岩体上无植被覆盖区域(临空面左上角红线方框区域)进行 2 期数据的面上对比和点上对比(图 11)。

危岩体表面的变化表现出整体的、刚性的三维变化。从图 11 可以看出,最外侧临空面形变以红色黄色为主,逐步过渡到中间部位的以黄绿色段为主,靠近最内侧区域则以蓝色段为主,由外到内,形变量由正值逐步过渡为负值,由此可以判断出,该危岩体在 Z 轴方向上存在着一个顺时针方向幅度微小的扭曲变形,这也很好地体现了危岩体刚性形变的特点。



图 10 鸡冠岭危岩体点云数据

Fig. 10 Point cloud of the Jiguanling unstable rock

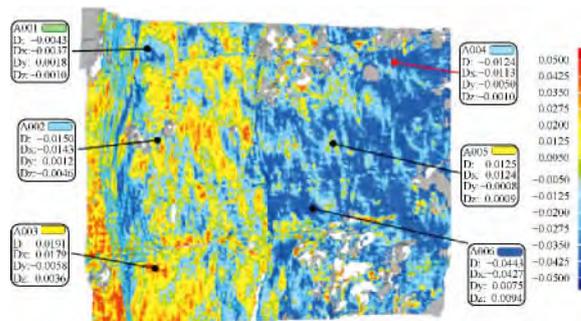


图 11 2 期危岩体形变和特征点对比分析监测图

Fig. 11 Deformation monitoring of the unstable rock and the feature points in different times

(2) 结构剖面线对比

首先在 2 期数据的模型上设置横向剖面。剖面的位置可以选取在结构面特征较明显的位置,也可以选取在面上对比和点上对比的监测图中形变量较为明显的区域。剖面与 2 期数据模型相切得到剖面线(图 12),其中红色线条为 2012 年 10 月危岩体结构面剖面线,蓝色线条为 2013 年 10 月危岩体结构剖面线。由于线性对比在形变量很小时,不宜用色谱对比分析的方法表示,所以将其中一条剖面线还原成点云数据格式,通过点云与剖面线对比的方法表示结构面的变化(图 12)。从剖面线对比分析监测图可以看出,由于危岩体表面

块体结构的特点,各个位置的位移和变化在各个方向上都有所体现。

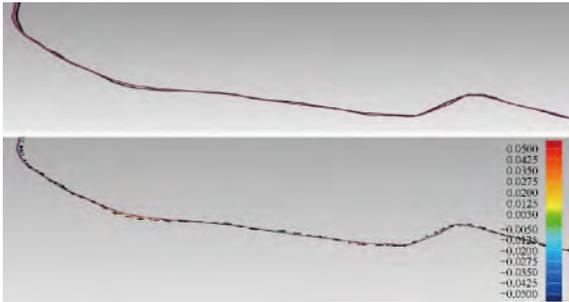


图12 两期危岩体剖面线(上)和相对位移监测结果(下)
Fig. 12 Profiles of the rock body (above) and the monitoring on rock surface displacement (below) in two phases

三维激光扫描技术形变监测不同于以往的单点监测测量,是通过针对形变监测区域内大量空间点云数据的相对位移的监测来实现面上的监测。通过实际应用可知,运用三维激光扫描技术针对滑坡、危岩体进行形变监测,通过点、线、面相结合的方法,不仅可以推断其形变趋势和形变量,还可通过数据分析,认识相关运动规律,这是险情预判和重点部位处置的关键依据。

4 三维激光扫描技术优势及局限性

4.1 技术优势

(1) 获取数据速度快

在地形测量与形变监测中,三维激光扫描技术可以快速获取被测目标体表面的整体信息,实现面监测,更加客观、直接地反映出目标体上的变化区域和变化量,可以更加准确地反映出目标体形变趋势,为预警预报工作提供数据支持。

(2) 测绘结果精度高

点云数据精度主要受单点精度、角度精度等因素控制。三维激光扫描仪的单点和角度精度均低于全站仪,但三维激光扫描技术的特点与优势并不在于单点测量,而是通过对目标体表面的测量来进行拟合建模,生成表面模型。如图13所示,三维激光扫描仪对目标体表面(图中实线部分)进行扫描并获取点云数据,通过软件可对这些数据点云进行统计并拟合出一个表面(图中虚线部分),点云密度越大,拟合表面越接近真实表面,相对误差也就越小,精度大幅度提高^[12]。

(3) 非接触测量更安全

三维激光扫描技术采用远距离非接触扫描目标的方式进行测量。对于在我国西南峡谷地区、黄土高原地区等传统测量方法无法或难以开展野外调查测量工



图13 扫描仪获取点云示意图
Fig. 13 Point cloud from 3D laser scanner

作的地区,该技术起到了有益的补充作用。在突发地质灾害情况或对险情认知不充足,是否伴随次生灾害等情况不明时,远距离非接触的测量和监测方法使得调查人员的安全得以保障。

4.2 复杂环境下的局限性

(1) 测量距离有限。实际的操作当中,扫描仪的实际有效距离约为1.5~2 km。针对大型的滑坡或危岩体等灾害体的扫描,有效测量距离的限制使得测站点增加,进而降低监测效率。这对于特大型的地质灾害调查与监测工作是明显制约。

(2) 受植被影响较大。由于三维激光扫描仪只能获得物体表面的三维坐标,当滑坡、危岩体表面有大量的植被覆盖时,三维激光扫描仪无法测量到地形表面,虽经后期数据处理,仍会对最终成果精度产生影响。

(3) 变形监测工作流程有待优化。不同于以往的单点监测,对灾害体表面形变的分析和监测较为复杂。灾害体表面变化是复合的、三维的,不完全局限于水平方向或垂直方向。三维激光扫描技术对灾害体进行变化分析和形变监测是一个新的课题,需要在形变监测的工作流程、观测方案优化以及数据处理方法上进行研究和优化,以满足工程监测精准性、全面性和完整性的要求。

5 结论与展望

本文针对地质灾害的野外调查与监测工作中的三维激光扫描技术的案例研究,系统探讨了地形构建、DEM建模和几何量测等快速调查方法,提出了点、线、面相结合的灾害地质体形变监测技术;系统比较和分析了三维激光扫描技术在滑坡、崩塌调查监测中技术优势和局限性,提出了其在地质灾害快速调查识别与监测中的技术方法、操作流程和成果表达形式,并对该技术在现阶段应用的限制做了一些探讨。展望未来,该项技术提升的空间还很大,适用范围也会越来越广。随着三维激光扫描技术的逐步成熟,该项技术将会更好地服务于地质灾害的调查、排查以及监测预警工作。

参考文献:

- [1] 李滨,王汉顺,段奇三等. 点云检测技术在高速公路

- 路边坡监测中的应用[J]. 城市勘测, 2014(4):20-22. [LI B, WANG H S, DUAN Q S, *et al.* Slope monitoring for highway based on point cloud technology [J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2014(4):20-22. (in Chinese)]
- [2] 刘昌军,高立东,丁留谦,等.应用激光扫描技术进行岩体结构面的半自动统计研究[J].水文地质工程地质,2011,38(2):52-57. [LIU C J, GAO L D, DING L Q, *et al.* Research of semi-automatic statistics of rock mass discontinuity applying laser scanning technology [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011, 37(2):52-57. (in Chinese)]
- [3] 赵国梁,岳建利,余学义,等.三维激光扫描仪在西部矿区采动滑坡监测中的应用研究[J].矿山测量,2009(3):29-31. [ZHAO G L, YUE J L, YU X Y, *et al.* Research on laser scanner applied for landslide monitoring in west mining areas [J]. Mine Surveying, 2009(3):29-31. (in Chinese)]
- [4] 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(增刊2):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(Sup2):3629-3635. (in Chinese)]
- [5] 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):2188-2191. [XU J J, WANG H, 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):2188-2191. (in Chinese)]
- [6] 赵俊兰,吴依琴,尹文广,等.三维激光扫描技术在汶川什邡地震遗址虚拟重建中的应用研究[J].测绘通报,2012(7):53-56. [ZHAO J L, WU Y Q, YIN W G, *et al.* The Applications of 3D laser scanning technology in virtual reconstruction of the quake relics in Shifang of Wenchuan [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2012(7):53-56. (in Chinese)]
- [7] 罗旭,冯仲科,邓向瑞,等.三维激光扫描成像系统在森林计测中的应用[J].北京林业大学学报,2007,29(增刊2):82-87. [LUO X, FENG Z K, DENG X R, *et al.* Application of 3D laser scanning imaging system in forest measuring [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2007, 29(Sup2)82-87. (in Chinese)]
- [8] 重庆市地质矿产勘查开发局107地质队.重庆市南川区金佛山甄子岩—观音洞危岩带调查评价报告[R].2009. [Geology No. 107 of Chongqing. The Survey Report on Zengzi Rock in Jinpo Mountain and Guanyindong Rock Belt in Nanchuan District of Chongqing City [R]. 2009. (in Chinese)]
- [9] 段奇三.徕卡HDS8800三维激光扫描仪在露天矿中的应用[J].测绘通报,2011(12):79-80. [DUAN Q S. The application of the leica HDS 8800 laser scanner in open-pit mine [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2011(12):79-80. (in Chinese)]
- [10] T Varady, R R Martin, J Cox. Reverse Engineering of Geometric Models—An Introduction [J]. Computer Aided Design, 1997, 29(4):255-268.
- [11] 刘春,陆春.三维激光扫描数据的压缩与地形采样[J].理论研究,2005(2):6-9. [LIU C, LU C. Compress of the three dimension laser ranger scanning data and topography sampling [J]. Theoretical Research, 2005(2):6-9. (in Chinese)]
- [12] 李滨,李跃明,宋济宇.地面三维激光扫描系统中的“五度”研究[J].测绘通报,2012(3):43-45. [LI B, LI Y M, SONG J Y. On Five Parameters in Terrestrial 3D Laser Scanning [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2012(3):43-45. (in Chinese)]

责任编辑:汪美华