

三维激光扫描技术在高陡边坡地质调查中的应用

董秀军, 黄润秋

(成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家专业实验室, 四川 成都 610059)

摘要: 三维激光扫描技术的产生是测绘领域继 GPS 技术之后的又一次技术革命, 可以广泛应用于工程建设与物体三维测量相关的众多领域, 具有高效率、高精度的独特优势。目前, 该项技术的应用在国外尚处于起步阶段, 国内应用还颇为鲜见, 尤其是在地质和岩土工程领域。在对该项技术的总体情况进行简单介绍的基础上, 结合工程实例, 阐述应用该项技术解决高陡边坡调查中, 关于边坡快速编录和岩体结构面参数测量的原理与方法, 由此可以看出该项技术在地质和岩土工程领域的应用前景和价值。

关键词: 工程地质; 三维激光扫描; 高陡边坡; 岩体结构; 快速编录

中图分类号: P 642

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2006)增 2 - 3629 - 07

APPLICATION OF 3D LASER SCANNING TECHNOLOGY TO GEOLOGIC SURVEY OF HIGH AND STEEP SLOPE

DONG Xiujun, HUANG Runqiu

(National Laboratory of Geological Hazard Prevention and Geological Environment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: After application of global position system—GPS technology, appearance of 3D laser scanning technology is an important technological revolution in surveying and mapping field. It can be widely used in many fields including survey of engineering constructions and interrelated 3D measurements, and has unique characteristics of the high efficiency and high degree of accuracy. At present this technique is still under the initial stage in other countries, and is also quite rarely used home, especially in geotechnical engineering and geological engineering. On the basis of simple and overall introduction of 3D laser scanning technology, the paper studies how to apply the technology to high and steep slope investigations according to a case study; and principles and methods of slope quick logging and rock mass structural plane parameters measurement are discussed and analyzed. Therefore the conclusion can be draw from the analysis that application of 3D laser scanning technology to geotechnical engineering and geology has a great prospect and value.

Key words: engineering geology; 3D laser scanning; high and steep slope; rock mass structure; quick logging

1 引言

随着西部大开发战略的实施和“西电东送”的

需求, 我国西部地区水力资源开发进入了一个迅猛发展的阶段。一系列在建或拟建的大型水利水电枢纽工程, 其工程规模越来越大, 涉及到的边坡开挖深度也越来越高。因此, 高陡边坡的稳定性问题成

收稿日期: 2006 - 01 - 04; **修回日期:** 2006 - 02 - 10

基金项目: 国家自然科学基金委员会和二滩水电开发有限责任公司雅砻江水电开发联合研究基金资助项目(50539050)

作者简介: 董秀军(1980 -), 男, 2002 年毕业于成都理工大学环境与土木工程学院勘查技术与工程专业, 现为硕士研究生、助理工程师, 主要从事地质工程方面的试验与研究。E-mail: dongzb2002@tom.com

为制约工程建设可行性和运行安全的重要工程地质和岩石力学问题。在高边坡的稳定性评价中,分析的基础是对边坡地质结构条件的掌握和描述,而西部地区的水电开发往往在高山峡谷中进行,山体雄厚,边坡陡峻,使得地质调查工作因人员难以企及而无法正常工作;另外,在工程建设期间,面对快速开挖形成的高陡边坡,必须很快完成相关的地质编录工作,而这不仅需要大量的人力投入,而且影响施工并给作业人员带来安全隐患问题。如何提高调查工作的效率和精度等,所有这些都需要在高边坡地质调查工作中引进快速、高效且对地形条件有很强适宜性的调查技术。

针对这一难题,国内外也曾开展了一些技术方法的研究工作^[1~10],如数字摄影测量、数码像片解译等,在硐室围岩、边坡开挖等工程的地质编录与隧道、坡体变形监测等方面都有应用。这些技术方法都要对获取的图像进行处理,包括影像的畸变校正、几何校正、影像增强及影像镶嵌等程序。影响测量精度的因素较多,如数码影像畸变校正残差、数码相机内方位元素稳定性误差、相机外定向误差及作业条件下的诸多因素。这些技术的应用需要配合大量的现场测量工作,同时其技术上还存在一些难以克服的问题,因此生产实践中难以推广应用。三维激光扫描技术的诞生,为上述问题的解决提供了最为有效、实用和先进的技术手段。

三维激光扫描技术又称实景复制技术,能够完整并高精度地重建扫描实物及快速获得原始测绘数据,其最大特点就是精度高、速度快、逼近原形。该设备可以真正做到直接从实物中进行快速的逆向三维数据采集及模型重构,无需进行任何实物表面处理,其激光点云中的每个三维数据都是直接采集目标的真实数据,使得后期处理的数据完全真实可靠。

三维激光扫描技术可以广泛应用于工程建设与物体三维测量相关的众多领域,包括土木工程、古建筑修复、文物保护、工厂改造、城市规划等,并具有高效率、高精度的独特优势。

三维激光扫描技术是目前国内外测绘领域的研究前沿,将这一先进的技术及时应用到高边坡地质调查中,对工程建设具有很强的现实意义。本文在对该项技术的总体情况进行简单介绍的基础上,结合工程实例,阐述了应用该项技术解决高陡边坡调查中关于边坡快速编录和岩体结构面参数测量的原理与方法。由此可以看出,该项技术在地质和岩土工程领域具有广泛的应用前景和很高的应用价值。

2 三维激光扫描系统简介

三维激光扫描系统是目前国际上最先进的获取地面空间多目标三维数据长距离影像的测量技术,它将传统测量系统的点测量扩展到面测量,可以深入到复杂的现场环境及空间中进行扫描操作,并将各种大型、复杂实体的三维数据完整地采集到计算机中,进而快速重构出目标的三维模型及点、线、面、体等各种几何数据,而且用所采集到的三维激光点云数据还可以进行多种后处理工作。

2.1 三维激光扫描系统分类

目前应用的三维激光扫描系统从操作的空间位置可以划分为3类:(1)机载型激光扫描系统;(2)地面型激光扫描系统,根据测量方式还可细分为移动式激光扫描系统和固定式激光扫描系统;(3)手持型激光扫描系统。

2.2 地面型固定式三维激光扫描系统简介

地面型固定式三维激光扫描系统是目前最为常用的三维激光扫描装置,常见型号见表1。按照激光光束的发射方式、扫描成像方式及测距原理等还可以进行分类^[3]。

本文以加拿大Optech公司生产的ILRIS 3D三维激光扫描仪为讨论对象(见图1),三维激光扫描数据处理使用的软件为Poly Works 8.0。目前市场上的三维激光扫描仪种类繁多、性能各异、数据处理软件不尽相同,但总的来说,整个扫描及数据处理过程是相似的。

2.2.1 扫描

一般来说,由于扫描仪扫描范围的限制,三维激光扫描仪很难从一个方向扫描一次便可得到扫描体的完整点云数据,反映一个扫描实体信息通常要由若干幅扫描才能完成。因此,扫描中要求相近场景的2次扫描要有一定的重叠部分,以便在处理软件中对扫描得到的点云数据进行拼接匹配。故在扫描前应对扫描场地进行初步踏勘,合理设置仪器的架设方案。科学合理地架设扫描机位,对采集高质量三维数据、提高测量精度、全面反映场景细节有着十分重要的意义。






扫描过程中可以根据工程需要与现场条件配合定位系统(GPS)一起使用,对扫描场景内的明显地物点、扫描机位点进行精确的坐标测量,以便在后期处理中进行大地坐标转换。

2.2.2 数据处理

对于激光扫描获得的点云数据都是以扫描仪位

表 1 几种常见地面型三维激光扫描仪基本参数表(中、长距离测量)

Table 1 Parameters of 3D laser scanner in different models(with middle or long distance)

生产厂家	产品型号	测距范围/m	定位精度/(mm·(100 m) ⁻¹)	扫描视场	数据采样率/(点·s ⁻¹)	激光波长/nm	激光等级	主机尺寸	主机质量/kg	电源电压/V	处理软件	RGB功能	扫描仪外观
Optech	ILRIS 3D	3~1 000	±8	40°×40°	2 000	1 500	Class 1	320×320×220	13	24	Polyworks 8.0	有	
RIEGL	LMS - Z420i	2~1 000	±10	80°×360°	12 000	Near IR	Class 3R	463×φ210	14.5	12~28	3DRiSCAN	有	
RIEGL	LPM - 2K	10~2 500	±50	360°×195°	不明	Near IR	Class 1M	232×300×320	14.6	11~18	推荐 I-SITE	不明	
Cyra	HDS 3000	300	±6	360°×270°	4 000	不明	Class 3	400×330×430	12	36	Cyclone-Scan3.0	有	
Cyra	HDS 4500	100	±3	360°×312°	500 000	不明	Class 3	不明	不明	不明	不明	有	

注：部分图片、数据来源于网站资料，仅供参考；主机尺寸单位为 mm×mm×mm，或 mm×mm。



图 1 ILRIS 3D 三维激光扫描仪

Fig.1 ILRIS 3D three-dimensional laser scanner

置为零点的局部坐标系，亦即每次经扫描而得到的点云数据的坐标系是独立和不相关联的。但实际上每幅点云阵数据都是扫描场景的一部分，那么有必要将这些点云数阵据转化到同一坐标系里。所以要

对得到的点云阵数据进行拼接匹配，其常规方法是利用选择两幅扫描图像的公共点(至少 3 个公共点)的办法来实现拼接，选择完成后软件可自动完成匹配并可查看拼接匹配误差。这样便将各个扫描文件独立的坐标转换成为以导入拼接软件的第一幅点云数据的局部坐标为整个扫描场景的坐标。然后可利用现场测得的标志点(3 个)的大地坐标对拼接好的点云数据进行坐标转换，以使扫描得到的点云数据与现实场景的方位、位置完全一致。

对获得的点云数据，根据需要可以进行长、宽、高、面积、体积等几何数据的量测；可以进行断面图、投影图、等值线图的生成；在地质调查应用中还可以获得扫描岩体的层面产状、危岩体的空间精确三维坐标等。点云数据的后处理还可将点云数据模型化生成三角面片，编辑生成的模型可以删除没

必要的三角面片, 弥补没有扫描到的漏洞, 进行模型表面光滑、局部或全部三角面片的压缩等。该软件提供了大量常用的数据转换输出接口, 可以轻松地将模型及量测数据转换成常用软件的格式, 如 AutoCAD 等。

3 三维激光扫描技术在高陡边坡地质调查中的应用

随着我国水利水电工程建设的规模越来越大, 遇到的高陡边坡等工程问题也越来越多。这类边坡多高陡险峻, 目前的水电工程边坡可达到数百米甚至近千米, 对于这类边坡的地质调查、测量工作难以开展, 传统的测绘、地质调查方法费时、费力、危险并有时很难得到令人满意的结果。三维激光扫描技术在变形监测、地形测量、工程开挖、数字地形建模、地质调查、减灾防灾等方面的应用, 让笔者的工作方法与思路得到了扩展。中、长距离三维激光扫描技术的出现与发展, 为高陡工程边坡调查提供了一种新的解决办法, 是对传统测量方法的有益补充。

3.1 工程应用中的定位问题

三维激光扫描技术可以深入到复杂的场景当中去, 快速、准确地获得扫描场景的三维数据。但三维激光扫描技术并不是无所不能, 技术上还有待进一步完善。比如在场定位问题上, 目前都是通过大地坐标转换来解决的, 这也就要求在激光扫描的同时要进行若干次精确的大地坐标测量。在一些大型水电边坡工程中, 虽然已经存在许多大地坐标控制点, 但在现场扫描工作中发现, 由于复杂的施工场地及起伏的地形限制, 根据扫描获得的点云数据要准确地发现并识别坐标控制点的水泥桩还存在很大困难, 这也是造成定位误差的一个重要原因。工程应用中的扫描数据定位的精度, 某些情况下直接影响着测量的最终结果。换言之, 如果不能进行大地坐标转换或定位不准, 那么在扫描数据中就不能进行准确的岩体产状、垂向高差等量测。

笔者通过对加拿大 Optech 公司生产的 ILRIS 3D 三维激光扫描仪的多次尝试, 发现三维激光扫描仪配合地质罗盘进行简单快速定位, 在一定空间范围内也可以取得良好的定位效果。实际应用中的使用条件在不要求获得大地坐标的情况下, 可以快速确定方位及水平面。通过使用此种方法, 扫描数据在没有进行大地坐标转换的前提下, 扫描系统在局

部坐标系内也可以进行地质上结构面产状与垂向高差的测量。同时, 可以仅利用一个已知的大地坐标控制点, 将点云数据局部坐标系转换成大地坐标系。其具体操作过程如下: 在扫描前架设三角架时, 将地质罗盘放置在三脚架的顶部平面上, 根据测平的水泡居中情况不断调整 3 个脚支架, 直至将脚架顶部调整至水平。固定好脚架后, 将激光扫描仪放到上面, 通过螺栓将扫描仪固定到三角架上, 但此时不要完全固定, 以扫描仪能够在三角架上自由转动不会感觉过紧为宜。由于 ILRIS 3D 三维激光扫描仪外形近似方形, 其扫描轴线(y 轴)与主机侧壁平行, x 轴与该侧壁垂直, z 轴与仪器底面垂直, 所以用罗盘量测扫描仪扫描轴线(y 轴)与北方向夹角 α , 记录该角度, 待扫描数据后期处理时, 绕 z 轴旋转 $-\alpha$ 便可得到与现实方位一致的扫描点云数据。在应用地质罗盘定位过程中, 由于罗盘本身精度、人为误差及其他外界因素影响, 同时整个定位过程在一点完成, 造成定位精度相对较低, 尤其在大空间范围内。通过实践发现, 水平面定位精度一般小于 1° , 方向精度一般小于 2° 。所产生的误差取决于三脚架是否水平架设和扫描仪扫描轴线(y 轴)与北方向夹角 α 量测是否准确。激光扫描测量(罗盘定位)试验成果见表 2。

表 2 激光扫描测量(罗盘定位)试验成果表

Table 2 Results of laser scanning in orientation with compass

岩层产状	激光扫描(罗盘定位)	扫描距离/m
	N18°(W/SW \angle 57°)	50
N18°W/SW \angle 56°	N17°(W/SW \angle 57°)	100
	N17°(W/SW \angle 57°)	200
N14°W/SW \angle 63°	N15°(W/SW \angle 64°)	50

3.2 地质结构面产状测量

在地质调查工作中, 结构面产状是最基本的地质参数。但现场结构面尤其是长大断层, 其产状通常具有较大的变化, 或由于某些地形因素一些重要结构面的产状难以直接近距离量测。上述情形都使获得结构面的准确产状成为难题。三维激光扫描测量为这一问题的解决提供了有效手段。

尽管三维激光扫描测量的处理软件并未直接提供产状量测工具, 但通过多次实践发现, 利用软件中生成的拟合平面工具可以模拟地质结构面, 进而计算结构面产状。这克服了地质罗盘单点测产状而存在的不足, 其效果极为理想。图 2 给出了激光扫

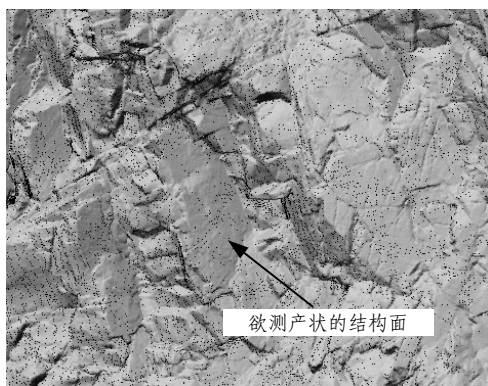


图2 激光扫描点云模型

Fig.2 Point cloud model of laser scanning

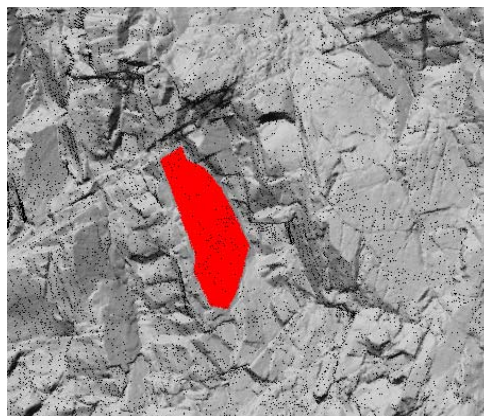


图3 选中结构面

Fig.3 Selected structural plane

描点云模型。

首先将要测产状的结构面点云数据选中(见图 3), 然后利用软件提供的按选中点云生成拟合平面功能, 生成一个平面(即模拟的结构面), 接下来显示该平面在系统中的方程参数(见图 4), 即平面一般式方程为

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (1)$$

式中: A, B, C, D 均为参数, 其中 A, B, C 组成平面法向量坐标 n , 即 $n = \{A, B, C\}$ 。

在扫描点云坐标系统中, y 轴与 N 方向对应, x

轴与 E 方向对应, z 轴为垂向方向, 由此可求出相对准确的结构面产状了。结构面产状计算成果见表 3。

3.3 高陡边坡地表节理裂隙调查和辅助地质编录

西南地区高边坡稳定性评价中, 通常会遇到由于边坡过于高陡(甚至悬崖)而人力难以企及的情形。在这种情形下, 要查明边坡的岩体结构特征, 尤其是结构面的发育情况是非常困难的。三维激光扫描技术的应用, 为这一难题的解决提供了极为有效的途径。

雅砻江上锦屏 I 级电站右岸进水口上部边坡(见图 5)呈现陡崖状, 高近 200 m, 现场不具备攀爬

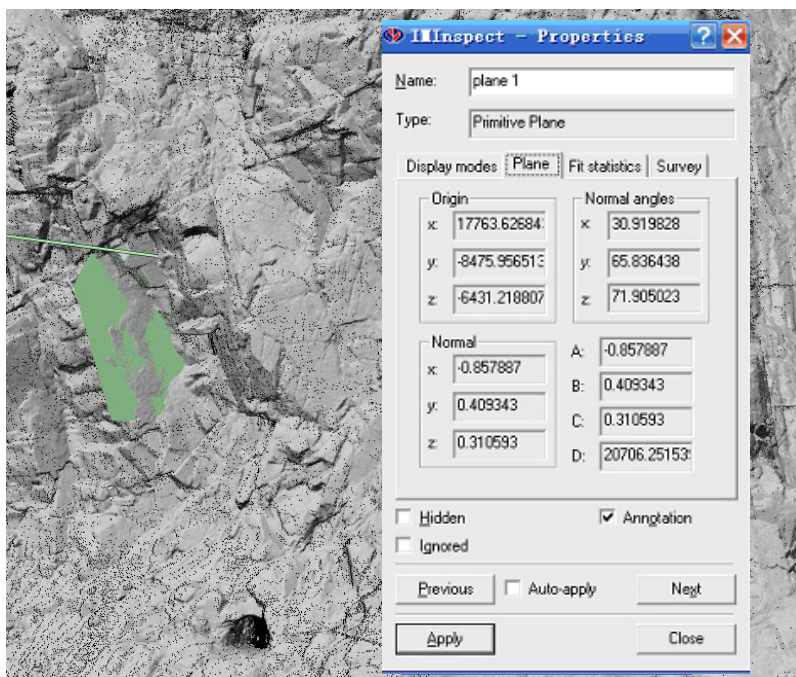


图4 结构面方程参数

Fig.4 Equation parameters of structural plane

表3 结构面产状计算成果表

Table 3 Calculated structural plane parameters

拟合平面方程参数				结构面产状参数		
A	B	C	D	走向	倾向	倾角/(°)
-0.857 887	0.409 343	0.310 593	20 706.251 535	N26°E	SE	72

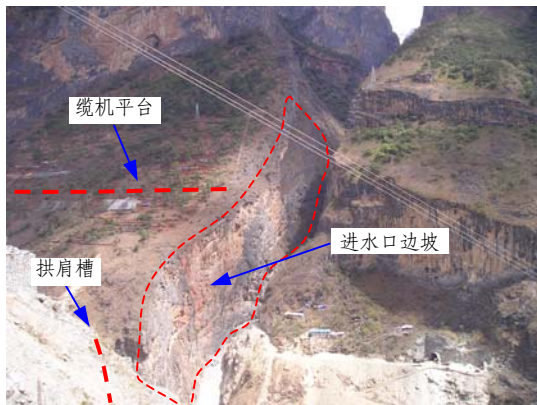


图5 雅砻江上锦屏 I 级电站进水口边坡

Fig.5 Water intake of Jinping-I Power Station on Yalongjiang River

条件，这为该部位的结构面调查带来了极大困难。采用三维激光扫描系统开展地质调查工作，野外扫描工作时间 3 h，获得边坡点云数据共由 7 173 125 个点组成。后期数据处理完成了点云数据的拼接匹配和大地坐标转换。

在所获得的扫描图像中，对陡立边坡坡表出露的长大节理裂隙进行统计，其方法是在处理软件 Poly Works 8.0 的 IMInspect 模块中用 polyline 线将结构面出露迹线描出，并量测出结构面产状参数。根据扫描数据及现场调查将节理裂隙按产状分组(见图 6)，并将调查数据导出到 AutoCAD 等软件中，其快速地质编录如图 7 所示。

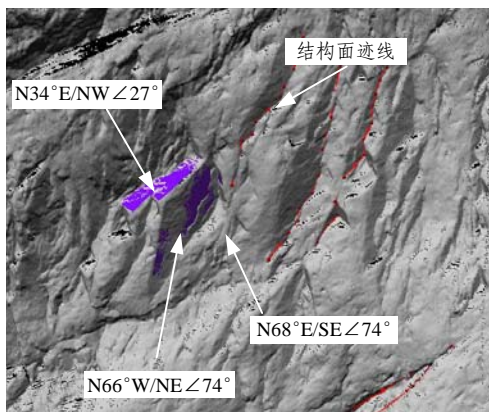


图6 点云数据中的结构面产状调查

Fig.6 Structural plane survey in point cloud

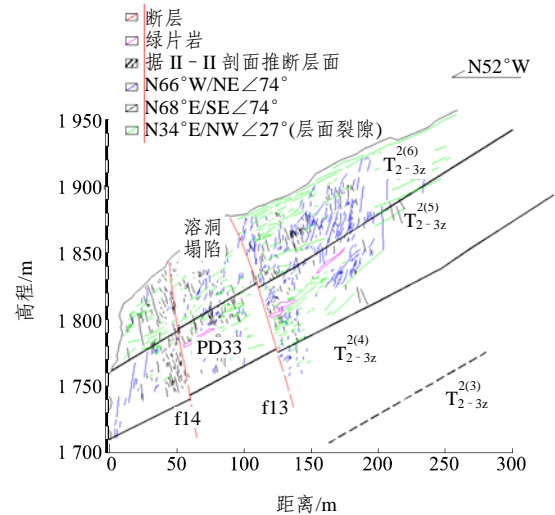


图7 快速地质编录 AutoCAD 图

Fig.7 Quick geology logging with AutoCAD

除了高陡边坡地表的地质调查外，近年来在复杂地质条件下进行高陡边坡开挖的工程实践越来越多，作业面规模越来越大，开挖速度也越来越快，这就要求对开挖工作面进行快速的地质编录，以满足工程进度的要求。应用三维激光扫描系统开展这方面的工作可以大大提高工作效率和精度。在高边坡开挖工程中，通过对整个开挖工作面的三维激光扫描，根据扫描获得的点云数据，对地质结构面进行调查统计，可以利用上述结构面产状量测和节理裂隙调查方法，由此得到开挖工作面岩体结构的分布规律和地质几何参数，并将统计结果导出到软件 AutoCAD 中，从而在工程施工过程中实现快速地质编录。

4 适用性和不足

由于三维激光扫描系统可以实现远距离非接触测量，从而对于人员难以企及和十分危险的地段进行测量具有明显优势。另外，该方法突破了传统测量方式，从点测量发展为面测量，具有测量速度快、精度高等特点。后期处理软件功能强大，能满足大部分测量工作需求，同时提供二次开发功能，扫描数据格式转换方便，输出简单、快捷，与常用软件兼容性好。

但是，目前使用的三维激光扫描技术还存在一些不足之处，主要表现在如下几个方面：

- (1) 受到安全激光功率的局限，扫描距离和范围有限；

(2) 特定材料对激光光源反射不够敏感, 造成扫描范围内出现盲区, 如潮湿的地表和绿色植被对扫描结果都有较大的影响;

(3) 坐标系统校正方法不够成熟, 坐标转换容易产生误差并难以避免;

(4) 扫描激光光斑随距离的增加而变大, 造成扫描结果中物体边缘细节难以识别。

三维激光扫描技术如同其他技术一样, 正在经历着一个产生→发展→成熟的过程, 目前三维激光扫描技术的一些不足之处, 将随着技术的不断发展和应用要求的不断提高, 必将会逐步得以解决。

5 结 语

三维激光扫描技术是测绘领域的新技术, 它突破了传统单点测量的数据处理方法, 为测绘领域提供了一条新的研究方向, 其出现与发展是“继 GPS 空间定位技术后的又一项测绘技术革新, 将使测绘数据的研究内容、方法进入新的发展阶段”^[2]。将三维激光扫描技术应用到地质和岩土工程领域, 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工作, 加深这些方面的研究工作, 势必为大型工程建设提供有效的解决问题的新手段。目前的三维激光扫描技术正处在一个发展、更新阶段, 技术上还存在一些不足, 但不难看出三维激光扫描技术的应用前景十分广阔。

参考文献(References):

- [1] 黄润秋, 许 模, 胡卸文, 等. 复杂岩体结构精细描述及其工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004.(Huang Runqiu, Xu Mo, Hu Xiewen, et al. Complicated Rock Mass Structure Elaborate Description and Its Engineering Application[M]. Beijing: Science Press, 2004.(in Chinese))
- [2] 范海英, 杨 伦, 邢志辉, 等. Cyra 三维激光扫描系统的工程应用研究[J]. 矿山测量, 2004, (3): 16 - 18.(Fan Haiying, Yang Lun, Xing Zhihui, et al. Research on engineering application of Cyra 3D laser scanning system[J]. Mine Surveying, 2004, (3): 16 - 18.(in Chinese))
- [3] 马立广. 地面三维激光扫描仪的分类与应用[J]. 地理空间信息, 2005, 3(3): 60 - 62.(Ma Liguang. Classification and application of terrestrial laser scanners[J]. Geospatial Information, 2005, 3(3): 60 - 62.(in Chinese))
- [4] 程正逢, 梁巧云. 航空三维激光扫描与成像技术在送电线路工程中的应用[J]. 电力勘测设计, 2004, (1): 31 - 35.(Cheng Zhengfeng, Liang Qiaoyun. The application of airborne laser scanning imaging technology in transmission line survey[J]. Electric Power Survey and Design, 2004, (1): 31 - 35.(in Chinese))
- [5] 翟瑞芳, 张剑清. 基于激光扫描仪的点云模型的自动拼接[J]. 地理空间信息, 2004, 2(6): 37 - 39.(Zhai Ruifang, Zhang Jianqing. Automatic registration of point clouds based on laser scanner[J]. Geospatial Information, 2004, 2(6): 37 - 39.(in Chinese))
- [6] 毛方儒, 王 磊. 三维激光扫描测量技术[J]. 宇航计测技术, 2005, 25(2): 1 - 6.(Mao Fangru, Wang Lei. Measurement technology of 3D laser scanning[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2005, 25(2): 1 - 6.(in Chinese))
- [7] 郑德华, 沈云中, 刘 春. 三维激光扫描仪及其测量误差影响因素分析[J]. 测绘工程, 2005, 14(2): 32 - 34.(Zheng Dehua, Shen Yunzhong, Liu Chun. 3D laser scanner and its effect factor analysis of surveying error[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2005, 14(2): 32 - 34.(in Chinese))
- [8] 范留明, 李 宁. 基于数码摄影技术的岩体裂隙测量方法初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(5): 792 - 797.(Fan Liuming, Li Ning. Study on rock mass joint measurement based on digital photogrammetry[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(5): 792 - 797.(in Chinese))
- [9] 李 浩, 张友静, 华锡生, 等. 洞室数字摄影地质编录及其基本算法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2004, 29(9): 805 - 808.(Li Hao, Zhang Youjing, Hua Xisheng, et al. Geologic logging of digital photos and its basic algorithm[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2004, 29(9): 805 - 808.(in Chinese))
- [10] 陈才明, 张 雷, 宋浩军, 等. 数字地质编录中的产状量测[J]. 地矿测绘, 2002, 18(1): 11 - 14.(Chen Caiming, Zhang Lei, Song Haojun, et al. The surveying of rock's attribute in digital geology logging system[J]. Surveying and Mapping of Geology and Mineral Resources, 2002, 18(1): 11 - 14.(in Chinese))