

DOI: 10.11779/CJGE201412026

基于三维激光扫描技术的土石坝变形监测方法研究

王 举^{1, 2}, 张成才¹

(1. 郑州大学水利与环境工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 郑州市水务局, 河南 郑州 450006)

摘要: 由于土石坝结构复杂、非刚性等特点, 受到外力作用时, 各个部分变形呈现非线性变化, 传统的单点监测存在一些局限性。提出了一种基于三维激光扫描技术的土石坝变形监测方法, 将不同时期所采集的序列点云进行绝对定向完成坐标统一, 然后获取一组不同期的点云数据在同一位置处的剖面数据进行对比分析, 监测大坝在水平与垂直方向的变形和位移。采用所提出的方法, 在郑州市尖岗水库进行了试验, 结果表明所提方法精度高, 实时性强, 能够满足水库大坝变形分析计算的要求。

关键词: 三维激光扫描; 点云数据; 剖面分析; 变形监测

中图分类号: TV641 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2014)12-2345-06

作者简介: 王 举(1975-), 男, 工程师, 博士研究生, 主要从事水利工程信息化工作。E-mail: 46624210@qq.com。

Deformation monitoring of earth-rock dams based on three-dimensional laser scanning technology

WANG Ju^{1, 2}, ZHANG Cheng-cai¹

(1. College of Water Conservancy & Environmental Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Zhengzhou Municipal Water Affairs Bureau, Zhengzhou 450006, China)

Abstract: The conventional method for deformation monitoring of earth-rock dams based on a single point cannot acquire enough information. It doesn't consider the position and the relationship between points. It cannot accurately monitor the real and three-dimensional deformations of the earth-rock dams. Owing to their complex structure and non-rigid character, the earth-rock dams exhibit irregular deformation when subjected to external force. So a new method for dam deformation monitoring based on three-dimensional laser scanning point cloud data is proposed. First, the absolute orientation is implemented for the point cloud data series collected at different time, allowing that the post-possessing can be performed in a unified coordinate system. Then, the cross-section point cloud data series at the same location collected at different time are compared and analyzed to figure out the dam deformation and displacement in horizontal and vertical directions. Jiangang Reservoir in Zhengzhou City is chosen to verify the accuracy and efficiency of the proposed dam deformation monitoring method. The experimental results show that the proposed method is highly accurate and real-time, and can meet the requirements of dam deformation analysis.

Key words: three-dimensional laser scanning; point cloud data; section at analysis; deformation monitoring

0 引言

土石坝外部变形监测能够直观准确地反映出大坝的运行状态, 是水库大坝变形监测的重要内容^[1]。外部监测又分为水平位移监测和垂直位移监测, 水平监测常用视准线、引张线、激光准直、正倒垂线及精密导线等方法监测, 垂直位移监测方法主要有几何水准和流体静力水准法。这些监测方法获取了不同时间段的水平位移和垂直位移, 降低了监测成果的实效性、同步性和科学性, 无法实时获取大坝的变形信息。为了同步和高效获取监测点的水平位移和垂直位移, 近几年研制出了基于 GPS、全站仪、测量机器人等大坝

变形监测方法, 这些监测方法在评估大坝安全性和安全监控方面发挥了巨大的作用。然而, 这些方法是基于单点或者多点监测, 较少考虑测点位置及与其它测点的关系, 难以精确完整地反映出大坝整体三维变形情况, 存在一定的局限性。与混凝土坝相比, 土石坝监测技术发展缓慢, 自动化水平较低。

土石坝一般由坝顶、防渗体、护坡和排水设施构成, 坝体无廊道, 结构较为复杂, 是非刚性结构, 导致土石

基金项目: 河南省基础研究计划项目(132300410031); 河南省高校科技创新团队支持计划项目(13IRTSTHN030)

收稿日期: 2014-03-14

坝在受到外力作用时变形值大, 并且由于各个部位受力不均匀导致了各部分的变形无规律。为了更加精确、全面地获取土石坝整体的变形信息, 需要在变形监测设计、数据采集、数据的处理采用新的方法和手段。

三维激光扫描技术能快速、精确获取监测对象表面高密度点云数据, 而且激光扫描精度也在不断提高, 单点精度达到了 0.02 mm , 超过了 1 秒全站仪获取单点精度。基于脉冲式三维激光扫描仪单点定位精度虽然只有 1 mm , 但是相对扫描精度高, 相对测距精度在 0.01 mm 。激光扫描仪精度的提高使得在较高精度变形监测领域使用激光扫描成为可能。本文尝试采用三维激光扫描仪获取土石坝整体点云数据, 通过滤波、去噪及精简处理, 采用基于点云剖面数据的变形监测分析方法对水库大坝变形进行监测分析, 即获取不同期点云数据在同一坐标位置的一组剖面数据, 利用剖面数据进行对比分析。

1 技术路线及数据采集

基于单点监测方法仅仅依靠少量监测点是不能获取充足的大坝形变信息, 对大坝安全评估容易出现误差^[9]。三维激光扫描仪可以快速准确获取大坝完整三维点云数据, 通过处理分析能够精细准确获取各部分变形信息和整体变形趋势, 实现三维空间水库大坝变形监测和分析。进行土石坝变形监测分为 3 个部分, 分别是数据采集, 数据处理和分析。数据采集包括大坝完整点云信息采集、控制点坐标采集与控制点高精度水准数据采集等。数据处理主要进行控制点数据平差运算、多站点云数据拼接、去噪、滤波及特征提取。数据处理的精度与大坝监测精度紧密相关, 点云数据去噪、滤波的精度严重影响大坝三维模型精度与截取剖面的精度。其主要监测技术路线如图 1 所示。

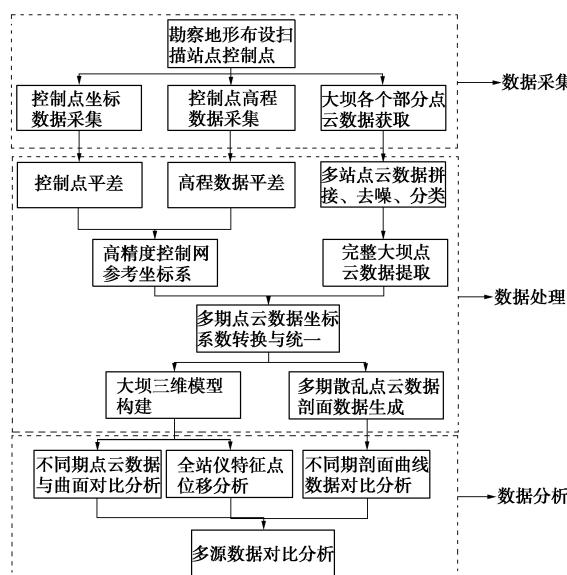


图 1 技术路线图

Fig. 1 The technical route

为了确保点云数据拼接精度和大坝监测分析的精度, 严密控制网的布设必不可少, 控制网需要至少 6 个控制点组成, 控制点需要挑选稳定、地基扎实不易变形的地方布设, 一般选择距离大坝一千米以外的地方, 在大坝两侧均匀分布, 以防止大坝变形对控制点造成影响。采用高精度全站仪(测角精度 $0.5''$, 测距精度为 0.6 mm)与高精度水准仪(每公里往返测量高差标准差小于等于 0.5 mm)进行控制点平面坐标与高程数据的采集。控制点的水平精度应保证误差小于 1.5 mm , 高程精度应小于 1 mm 。在大坝坝体上布设一些观测点, 通过控制点获取观测点坐标, 激光扫描仪不需要架设在固定的观测点上, 架设在可以获取这些观测点的位置即可。

2 基于散乱点云大坝变形分析理论基础

通过三维激光扫描仪所采集的散乱点云数据, 无法直接进行大坝变形监测, 一方面由于点云数据本身没有规律和拓扑关系, 在散乱点云数据中寻找同名点比较困难, 有的甚至是不存在同名点。再者由于激光发散性, 即使激光光束落在同一点, 激光光斑内任意一点都有可能被记录, 返回后所记录的坐标点未必相同^[10-12]。因此, 利用不同期采集的散乱点云数据进行变形监测分析时, 首先对散乱点云进行定向, 即进行坐标系的统一, 然后确定一个参考面或者基准面, 不同期散乱点云数据与基准面通过序列剖面进行对比分析。

散乱点云数据是物体对象表面形状特征的空间信息的集合, 即 $\rho = (p_1, p_2, p_3, \dots, p_n)$, $p_i = (x_i, y_i, z_i) \in R^3$ 。散乱点云剖面可以定义为沿着给定的位置序列, 并以切向为法矢构建一平面族 τ , 计算散乱点云数据 ρ 与平面族 τ 中任意一平面 E 上的轮廓线。如图 2 所示。基本原理是平面与散乱点云模型求交构建轮廓线, 以平面两侧散乱点云最近点连线近似表达模型局部轮廓。

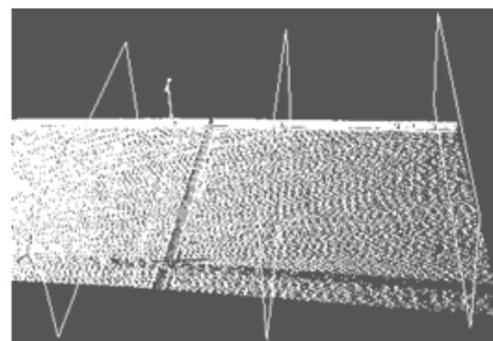


图 2 散乱点云剖面轮廓线

Fig. 2 Sectional contours of scattered clouds

散乱点云剖面获取的关键在于如何高效求取散乱

点云 ρ 中哪些点与平面族中 τ 的平面 E 相交。由于三维激光扫描仪所采集点云数据无组织无规律, 点云数据密度不均匀, 要严格获取点云 ρ 在平面 E 上的点来得到轮廓线几乎是不可能的, 因此将平面 E 沿法矢方向左右各等距生成平面 E_1 和 E_2 , 取 ρ 位 E_1 和 E_2 之间的点为可用点来近似生成轮廓曲线。

假定平面 E 为 $X-Z$ 平面取平面 E 的法矢为 Y 轴建立局部坐标系。首先对散乱点云数据进行分块建立索引, 在 X , Z 方向进行二维分块, 将散乱点云转换成二维栅格图像, 提高邻近点云数据搜索效率^[13-14]。剖面数据构建算法步骤如下:

(1) 确定剖面数量, 剖面数量越多越能够详细分析变形情况, 但是同时造成计算量大效率比较低, 剖面数量少不能很准确反映变形信息, 因此要根据实际情况确定适量的剖面数量。

(2) 根据 Y 轴为法向量建立一系列的平面族 τ , 对于其中任意一个平面 E , 通过索引找到对应的分块点云数据 ρ_i 。

(3) 计算分块点云数据 ρ_i 内的点与平面 E 的关系, $\xi = \vec{n} \cdot \vec{p}_i q$ (\vec{n} 为 E 法向量, ρ_i 为任意一点, q 为平面 E 内的点), $\xi > 0$ 表示改点在平面 E 左侧, $\xi = 0$ 在平面 E 上, $\xi < 0$ 在平面 E 右侧。

(4) 点云数据 ρ_i 任意点 p_i , 获取点 p_i 在 E 左右两侧邻域信息, 在另一侧中快速搜索对应点 p_i , 使两者平面距离相等。

(5) 设 p_i 与平面 E 交点为 $a_i(x_i, y_i, z_i)$, 那么由 $\frac{x_i - x_{p_i}}{x_{p_i} - x_{p'_i}} = \frac{y_i - y_{p_i}}{y_{p_i} - y_{p'_i}} = \frac{z_i - z_{p_i}}{z_{p_i} - z_{p'_i}}$, $z_i = 0$ 计算得到 p_i 与平面 E 交点的坐标。

(6) 对平面 E 两侧邻域中的点重复上述步骤(4)、(5), 得到 E 在该处的剖面信息。

在统一坐标系中同一剖面位置对每一期扫描点云数据获取序列的剖面信息。利用剖面信息进行对比分析, 原理就是利用两条曲线间平均距离来作为该坐标处的变形量。两个曲面在固定 x 处两条曲线分别为曲线 $F(y, z)$ 与 $G(y, z)$, 那么剖面线在 Y 方向的平均位移为

$$\text{avg}D_1 = \frac{\int_{a \rightarrow b} [F'_z(y, z) - G'_z(y, z)] dz}{b - a}, \quad (1)$$

剖面在 Z 方向的平均变化量为

$$\text{avg}D_2 = \frac{\int_{c \rightarrow d} [F'_y(y, z) - G'_y(y, z)] dz}{d - c}, \quad (2)$$

式中, a , b 为 Y 方向的距离, 且 $b > a$, c , d 为 Z 方向距离, 且 $d > c$ 。对不同期剖面数据间的 $\text{avg}D_1$, $\text{avg}D_2$

进行统计分析, 就能够获取水库大坝在 Y 方向的变形趋势和在 Z 方向的变形趋势。

3 试验与分析

3.1 试验区情况及数据采集

为了验证本文所提出方法的正确性和有效性, 选择郑州市尖岗水库大坝进行试验, 大坝距郑州市区约 6 km, 为轻粉质壤土坝。坝基自地面向下为: 灰色轻粉质壤土、含泥砂砾石、中粉质壤土、砾质土和中粉质壤土。河槽段坝长 265 m, 大坝全长 460 m, 大坝高 34.10 m, 如图 3。

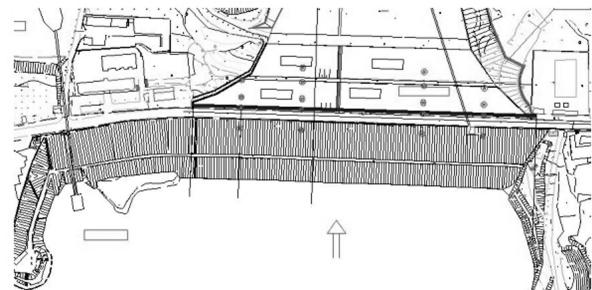


图 3 大坝平面结构图

Fig. 3 Planar structure of dam

3.2 数据采集及处理

本试验采用奥地利 Riegl 公司的三维激光扫描仪 VZ-400 进行点云数据采集, 设备的各项参数指标能够满足高精度水库大坝变形监测分析的需要。在变形监测区域以外布设由 6 个控制点组成的高精度控制网, 然后通过最小二乘对控制网进行平差, 形成一个高精度自由控制网, 建立一个高精度的参考坐标系统。利用高精度全站仪索佳 SRX1 进行控制点及标靶点的坐标数据采集。经过平差后控制点的标准差如表 1 所示 (采集时间为 2012 年 3 月 2 日), 最终参考坐标系标准差的平均值 X 方向为 0.85 mm, Y 方向为 0.86 mm, Z 方向为 0.85 mm, 控制网的精度比较高。

表 1 控制点标准差

Table 2 Standard deviations of control points (mm)

控制点	σ_x	σ_y	σ_z
C1	0.5	0.9	0.8
C2	0.8	1.0	0.9
C3	1.1	0.8	1.0
C4	0.7	0.9	0.7
C5	0.9	0.7	0.6
C6	1.1	0.9	1.1

为了验证本文所提出的理论方法, 采集三期大坝点云数据进行对比分析。针对大坝不同位置采用不同的扫描分辨率进行扫描, 大坝中间容易变形的部分扫描分辨率比较高平均 5~7 点/cm², 而在大坝两侧及周

边扫描分辨率比较低, 2~3 点/cm²。这样既可以提高扫描效率, 又能够适当压缩数据量。图 4 为经过拼接后大坝完整点云数据。

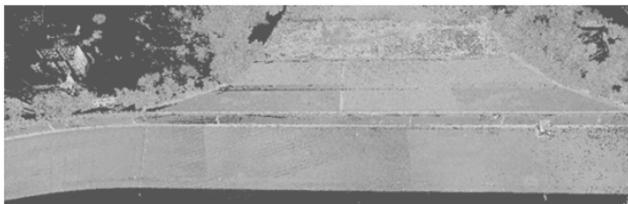


图 4 大坝完整点云数据

Fig. 4 Complete point cloud data of dam

将每期扫描点云数据通过 6 个控制点进行转换, 统一到固定的参考坐标系统中, 转换参数如表 2 所示, φ , ω , γ 为 3 个旋转角, t_x , t_y , t_z 为 3 个平移参数, RMSE 为坐标系之间的转换的均方差, 三期数据转换后的均方差都在 2 mm。

表 2 坐标系转换参数表

Table 2 Parameters of coordinate conversion

扫描日期	φ /(°)	ω /(°)	γ /(°)	t_x /m	t_y /m	t_z /m	RMSE /mm
3月12日	-0.715	-0.703	46.886	940.4243	1806.8831	90.9741	2
4月15日	0.842	1.598	-86.778	950.4470	1881.9437	90.9258	2
6月3日	-0.389	0.275	73.613	946.3267	1864.4376	90.9554	2

利用全站仪对土石坝坝体布设的 6 个监测点进行监测, 得到监测数据如表 3 所示。

表 3 不同期观测点数据对比分析

Table 3 Comparative analysis of feature point data of different sequences

点号	#1	#2	#3	#4	#5	#6
X1	943.8669	1003.9301	1065.7204	1124.5151	1165.3547	1206.5112
Y1	947.4552	948.1336	950.5531	951.9546	953.2497	958.6645
Z1	99.4775	97.6960	96.4250	97.3729	99.4726	101.5016
X2	943.8670	1003.9300	1065.7204	1124.5149	1165.3547	1206.5114
Y2	947.4738	948.1568	950.5792	951.9837	953.2773	958.6823
Z2	99.4774	97.6950	96.4262	97.3630	99.4726	101.5013
X3	943.8668	1003.9300	1065.7205	1124.5151	1165.3547	1206.5113
Y3	947.4748	948.1596	950.5845	951.9885	953.2806	958.6856
Z3	99.4779	97.6950	96.4262	97.3726	99.4736	101.5025
X2-X1	0.0001	-0.0001	0	-0.0002	0	0.0002
Y2-Y1	0.0186	0.0232	0.0261	0.0291	0.0276	0.0178
Z2-Z1	-0.0001	-0.001	0.0012	-0.0099	0	-0.0003
X3-X1	-0.0001	-0.001	0.0001	0	0	0.0001
Y3-Y1	0.0196	0.026	0.0314	0.0339	0.0309	0.0211
Z2-Z1	0.0003	-0.001	0.0012	-0.0003	0.0010	0.0011

从表 3 中可以看出大坝在 Z 方向位移量较小, 在

X 方向基本没有位移。而在 Y 方向的位移较大, 第二期监测 Y 方向位移平均值为 23.7 mm, 第三期 Y 方向位移为 27.1 mm。由于所布设观测点较少, 只能对土石坝监测点附近区域进行监测, 从而导致对大坝整体监测精度不高。

从三维激光扫描点云数据中也提取上述 6 个观测点的坐标数据, 与全站仪获取变形监测结果进行对比。分别求取 X, Y, Z 方向的差值, 根据土石坝监测规范, 其水准精度误差小于 $1.4\sqrt{n}$ mm, n 为观测点数, 表面水平位移的中误差不大于 0.2 mm, 从表 4 中可以看出, 激光扫描仪的精度能够满足土石坝变形监测的要求。

表 4 三维激光扫描点与全站仪测量数据对比

Table 4 Comparative analysis of point of 3DLS and total station (m)

点号	#1	#2	#3	#4	#5	#6
TLX1	-0.0009	0.0013	-0.0002	0.0007	-0.0006	0.0005
TLY1	0.0004	-0.0002	0.0011	0	-0.0003	-0.0002
TLZ1	-0.0001	0.0003	-0.0004	0.0007	0.0008	0.0009
TLX2	-0.0007	0.0008	-0.0011	0.0005	-0.0004	0.0006
TLY2	-0.0003	-0.0007	-0.0005	0.0003	-0.0009	-0.0007
TLZ2	0.0002	0.0004	-0.0008	0.0006	0.0006	0.0007
TLX3	0.0012	0.0008	-0.0005	0.0011	-0.0007	0.001
TLY3	-0.0005	0.0012	-0.0012	0.002	-0.001	0.0008
TLZ3	0.001	0.0007	-0.0005	0.0004	-0.0001	0.0007

3.3 基于散乱点云剖面变形分析试验

基于散乱点云剖面变形分析需要在不同期散乱点云数据中相同的位置获取一系列平行的剖面, 剖面平行于 YOZ 平面, 沿着 X 轴方向。如果垂直于坝体的中轴线, 就比较难确定采样间隔, 以及同一坐标位置, 因为坝体的中轴线不是直线, 有一定的弧度。要保证剖面的起始点在序列点云中要一致, 采样间隔也一致, 获取不同期散乱点云同一坐标处的剖面数据。

本试验采用垂直于 X 轴进行不同期散乱点云大坝剖面数据的采集。如图 5 所示, 大坝的长 265 m, 每隔 5 m 采集一个剖面, 共计采集 53 个剖面数据。得到不同期散乱点云数据剖面数据, 利用式 (2)、(3) 计算剖面曲线在 Y 方向和 Z 方向的变形。

图 6 中, 分析水库大坝在 Y 方向的位移趋势, 图中实线代表第二期散乱点云数据与第一期散乱点云数据对比分析结果, 虚线代表第三期数据与第一期数据对比结果。通过二、三期散乱点云剖面数据与第一期散乱点云数据剖面数据对比分析, 可以看出在 Y 方向水库大坝整体位移趋势向下游方向移动, 一期平均位移量达到 23 mm, 二期平均位移量达到 30 mm, 位移

的规律是大坝两头的位移量较小, 而中部位移量较大, 中部最大位移量为 36 mm。这与水库大坝受力是密不可分的, 随着水库水位的上升大坝中间所承受的静水压力也随着水位的升高而增大, 产生较大的水平位移。而大坝两边的坝基与地基结合比较紧密, 受到压力后变形较小。

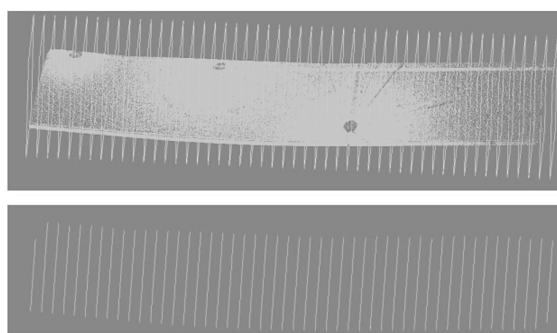


图 5 大坝剖面图

Fig. 5 Sectional view of dam

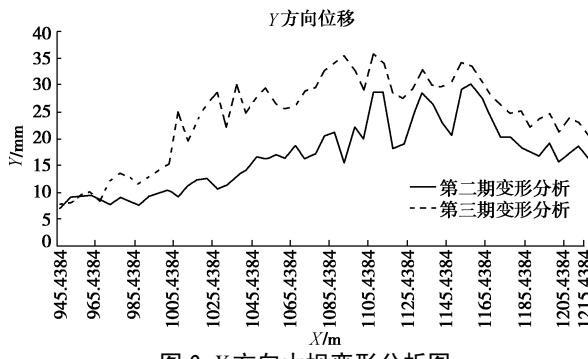


图 6 Y 方向大坝变形分析图

Fig. 6 Dam deformation analysis in Y direction

图 7 中, 分析水库大坝在 Z 方向的变化趋势, 图中实线代表第二期数据与第一期数据对比分析结果, 虚线代表第三期数据与第一期数据对比结果。水库大坝在 Z 方向变化比较小, 在 0~3 mm 之间, Z 方向的变化趋势与 Y 方向的位移有着直接关系, Y 方向的位移造成了 Z 方向的变化, 变化量比较小。Z 方向的位移量还需要考虑到由于扫描测量误差所带来的影响。

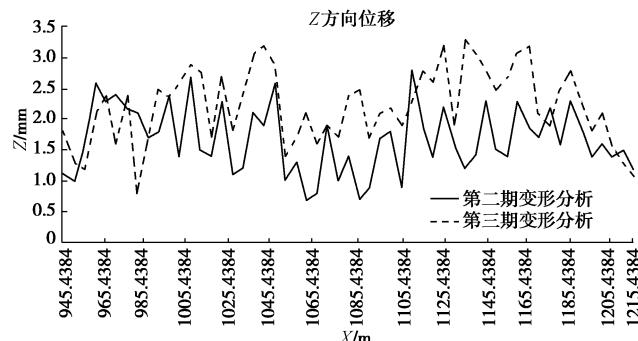


图 7 Z 方向大坝变形分析图

Fig. 7 Dam deformation analysis in Z direction

上述变形监测结果与全站仪监测结果对比可以看出, 本文所采用的方法能够更详细地反映大坝各个部分的变形情况, 从整体上反映了大坝三维整体变形位移量, 能够更准确的对大坝安全运行情况进行评估。

4 结语

本文介绍了利用三维激光扫描技术进行大坝变形监测的可能性和可行性试验分析。本文主要进行两个方面的研究: 结合全站仪控制点实现多站大坝扫描点云数据的高精度拼接, 完成不同期扫描点云数据坐标系的统一; 在国内首次利用散乱点云数据进行大坝变形分析模型研究, 提出了基于散乱点云序列剖面的变形分析模型, 改进点云剖面的快速提取方法, 提高数据处理的效率, 增加了大坝变形分析的时效性, 能够实时进行大坝变形监测和安全评估。通过试验证明了本文所提出理论方法的可行性, 并且得到了较高的监测精度。

参考文献:

- [1] 李红连, 黄丁发, 陈宪东. 大坝变形监测的研究现状与发展趋势[J]. 中国农村水利水电, 2006(2): 89~90. (LI Hong-lian, HUANG Ding-fa, CHEN Xian-dong. Research status and development trend of dam deformation monitoring[J]. China's Rural Hydropower, 2006(2): 89~90. (in Chinese))
- [2] 王小敏. 基于有限元方法的大坝变形分析与仿真研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2010. (WANG Xiao-min. Analysis and simulation of dam deformation based on finite element method[D]. Wuhan: Wuhan University, 2010. (in Chinese))
- [3] 袁 峥. EV 模型在大坝变形监测数据处理中的应用研究[D]. 南京: 河海大学, 2007. (YUAN Zheng. The study and application of EV model on deformation monitoring of dams[D]. Nanjing: Hohai University, 2007. (in Chinese))
- [4] 曾凡祥, 李勤英. 基于 LM 算法的 BP 神经网络在大坝变形监测数据处理中的应用[J]. 水电自动化与大坝监测, 2008(5): 72~75. (ZENG Fan-xiang, LI Qin-ying. Application of BP Neural Network-based LM Algorithm to dam deformation data processing[J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2008(5): 72~75. (in Chinese))
- [5] PYTHAROULI S I, STIROS S C. Ladon dam (Greece) deformation and reservoir level fluctuations: evidence for a causative relationship from the spectral analysis of a geodetic monitoring record[J]. Engineering Structures, 2005, 27(3): 361~370.
- [6] 柴世杰. 基于 CCD 技术的大坝变形智能监测仪设计与开

- 发[D]. 长沙: 湖南大学, 2011. (CAI Shi-jie. Design and development of dam deformation monitoring intelligent instrument based on CCD[D]. Changsha: Hunan University, 2011. (in Chinese))
- [7] 阴学军. GPS 在水电站大坝变形监测中的应用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2005. (YIN Xue-jun. Study on the application of dam deformation monitoring at hydropower station using GPS technique[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2005. (in Chinese))
- [8] LI W, WANG C. GPS in the Tailings Dam Deformation Monitoring[J]. Procedia Engineering, 2011, **26**: 1648 – 1657.
- [9] XU C, YUE D, DENG C. Hybrid GA/SIMPLS as alternative regression model in dam deformation analysis[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2012, **25**(3): 468 – 475.
- [10] RANKOVI C V, GRUJOVI C N, DIVAC D, et al. Modelling of dam behaviour based on neuro-fuzzy identification[J]. Engineering Structures, 2012, **35**: 107 – 113.
- [11] 张连伟. 散乱点云三维表面重建技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009. (ZHANG Lian-wei. Research on the technology of three-dimensional surface reconstruction from scattered point cloud[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2009. (in Chinese))
- [12] 武剑洁. 基于点的散乱点云处理技术的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004. (WU Jian-jie. Research of point-based techniques on unorganized point cloud[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2004. (in Chinese))
- [13] MONSERRAT O, CROSETTO M. Deformation measurement using terrestrial laser scanning data and least squares 3D surface matching[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2008, **63**(1): 142 – 154.
- [14] GONZÁLEZ-AGUILERA D, GÓMEZ-LAHOZ J, SÁNCHEZ J. A new approach for structural monitoring of large dams with a three-dimensional laser scanner[J]. Sensors, 2008, **8**(9): 5866 – 5883.

本期广告索引

- 封 2 北京筑信达工程咨询有限公司
 封 3 北京理正软件股份有限公司
 封 4 上海分元土木工程科技有限公司
 后插 1 台州建元勘察仪器有限公司
 后插 2 西安力创材料检测技术有限公司