

基于最小二乘三维表面匹配算法的滑坡变形测量

郭献涛¹, 黄 腾¹, 臧妻斌^{1,2}, 李桂华¹

(1. 河海大学 地球科学与工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 河南理工大学 测绘与国土信息工程学院, 河南 焦作 454003)

摘 要: 针对已有利用地面三维激光扫描(TLS)技术实施变形测量的局限性, 如变形提取的一维性及对小变形的不敏感性。提出了一个基于重复扫描数据实施滑坡变形监测的新方法, 该方法主要包括 3 个步骤: 原始 TLS 数据的获取、TLS 数据的总体配准以及基于子区域的变形计算。其核心是给出的一种三维表面匹配新算法(最小二乘 2 维图像匹配的泛化)。该方法可充分利用 TLS 数据的高冗余性, 实现高精度的全三维变形测量, 得到监测对象的位移量和旋转量, 同时, 在应用上具有高度的灵活性。通过模拟试验验证了该方法的性能。此外, 利用该方法分析了一个滑坡变形监测实例, 进一步证实了模拟试验的结果。该方法适用于变形监测, 尤其是人员难以到达的面灾害监测领域。对促进变形监测从点测绘向形测绘的转变具有一定的实际意义。

关 键 词: 滑坡; 变形; 点云; 地面激光扫描; 估计

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2015) 05-1421-07

An approach for monitoring landslide deformation using least-square matching algorithm

GUO Xian-tao¹, HUANG Teng¹, ZANG Qi-bin^{1,2}, LI Gui-hua¹

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

2. School of Surveying & Land information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454003, China)

Abstract: In application of the current Terrestrial Laser Scanning (TLS) technique suffers several limitations, such as its 1-D nature in monitoring the deformation and insensitivity to infinitesimal deformation. Here a new approach based on the data obtained from repeatedly scanning is proposed for monitoring the slope deformation. The new approach includes three main steps: sampling the raw TLS data, registering the obtained TLS data, and computing the deformation based on the subareas matching method. Central to the proposed procedure is a 3D matching algorithm (a generalized concept of the least-squares 2D image matching). Taking advantage of the high redundancy of TLS data, the procedure can be used to monitor the full 3-D deformations with high resolution, yielding the translational and rotational displacements of the monitored objects, while possessing high flexibility in application. The performance and advantage of the approach are illustrated through a designed simulation experiment. In addition, a case study is performed based on the proposed approach, further confirming the result of the simulation experiment. This procedure is applicable to the deformation monitoring, especially for the remote areas, helping promote the transition of the current deformation monitoring method from pointwise to morphological monitoring.

Keywords: landslides; deformation; points cloud; terrestrial laser scanning; estimation

1 引 言

目前, 滑坡变形监测应用最为广泛的手段是 GPS 和全站仪, 但这种监测手段是一种单点式监测模式^[1], 即只对滑坡体上重要部位设置的测量点进行监测。其缺点是监测点数少, 缺乏整体变形资料,

难以有效反映无监测点区域的变形情况, 监测点一旦被破坏将会严重影响数据的连续性, 同时, 该方法难以应用于人员无法到达的监测区域, 如滑坡、岩崩、雪崩、矿山塌陷等危险区域的监测。

从地面激光扫描(terrestrial laser scanning, 简称为 TLS)的测量原理与测量过程可知, TLS 可以

以格网方式、高精度、高密度、高速度及免棱镜方式进行测量, 无需接触变形体, 尤其适于危险地和人员难以到达的灾害监测领域, 具有较高的时空分辨率, 且测量精度均匀^[2-3]。应用 TLS 技术进行变形监测, 相当于布设了一个高密度的变形监测网, 大规模的采样点能用来平衡相对较差的单点质量, 有效地避免了单点监测模式下以点代面进行变形分析的片面性和局限性, 能更好地掌握滑坡体的整体及细节变化情况^[4]。因此, 将 TLS 技术引入到滑坡变形监测领域无疑是非常有意义的。

在过去的几年里, 国内外学者对 TLS 技术在变形监测领域的应用进行了一定的研究和试验。罗安德等^[1]分析了 TLS 技术应用于变形监测领域的可行性、技术优势及存在的问题。Roberts 等^[5]使用 TLS 设备和全站仪分别监测混凝土梁的变形量, 结果证实, 在 3~53 m 范围内两者得到的精度一致。Tsakiri 等^[6]对安置在变形体上的标志进行扫描, 证实利用 TLS 可检测 ± 0.5 mm 的变形量。

一些学者利用点云拟合相应的表面模型进行变形研究。主要思想是利用观测值的高冗余性克服 TLS 单点精度的局限性。其优点是能获取高质量的变形参数, 局限性是其依赖于特定的表面模型, 仅适用于具有特定几何特征的对象。此外, 该方法得到的变形场基本上是一维的, 如 Alba 等^[7]用点云数据拟合一个三维多项式曲面进行大坝结构监测, Schneider 利用该方法进行电视塔变形分析^[8]。

一些学者通过分析变形体的 DEM 模型变化实施变形研究, 如 Hesse^[9]和 Bitelli^[10]等。但这种方法有两个重要局限性, 首先, 由于 DEM 通常是在二维支持下定义的 (即 $z = f(x, y)$), 不同 DEM 间的差异主要提供在 z 方向上的一维变形量。其次, 该方法对小变形的敏感性有限, 不适用于小变形测量。

Girardeau 等^[11]描述了一个用于建筑物位置或内部设施的变化探测的方法。利用高效的八叉树结构组织点云, 并比较了不同算法的差异。其中一些算法适于快速、粗糙的变化评估, 可用于现场验证, 该方法适用于环境复杂且数据分析速度要求较高的监测对象, 但其得到的位移精度不高。

最后, 值得一提的是 Pfeifer 等^[12]提出了基于统计分析进行变形探测的方法。它把场景分割成平面片, 对每一片进行平面模型的最小二乘平差, 对每个变形的平面片进行最小二乘计算, 并对得到的变形参数进行统计分析。其优势是能以大大低于单点精度的量级探测变形; 其缺点是需要明确的模拟表面分割片, 不适用于外形复杂的变形体测量。

2 方法提出

针对上述方法存在的局限性, 本文提出了一种基于 TLS 技术进行滑坡变形测量的新方法, 该方法包括 3 个主要步骤: 点云数据的获取、点云的总体配准、利用局部匹配进行变形参数估计。其核心是本文提出的最小二乘三维表面匹配算法, 它是最小二乘图像匹配概念的一个泛化, 主要思想是利用广义高斯马尔可夫模型最小化表面元素间的欧氏距离, 从而估计搜索表面与模板表面间的变形参数。

2.1 基本估计模型

假设从不同的视点或不同的时间对同一对象的两个局部表面逐点采样。 $f(x, y, z)$ 和 $g(x, y, z)$ 分别是对象在左侧和右侧表面的共轭区域, 换句话说, $f(x, y, z)$ 和 $g(x, y, z)$ 分别是模板表面和搜索表面的三维离散化表示。问题是估计以上两表面在最小二乘表面匹配约束下搜索表面转换后的最终位置、方位和形状。假定随机误差来自传感器、外界环境和测量方法, 增加真误差矢量 $e(x, y, z)$, 函数模型为

$$f(x, y, z) - e(x, y, z) = g(x, y, z) \quad (1)$$

式 (1) 为观测方程。以目标函数实施最小二乘匹配, 使模板与搜索表面元素间距离的平方和最小:

$$\sum \|\bar{d}\|^2 = \min \quad (2)$$

式中: $\bar{d}$ 为欧氏距离, 根据 $g(x, y, z)$ 的初始位置 (共轭搜索表面 $g^0(x, y, z)$ 的近似值) 估计最终位置, 用 7 参数变换表示共轭曲面片间的几何关系:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} + m \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $[t_x \ t_y \ t_z]^T$ 为平移向量; m 为尺度因子; ω 、 φ 、 κ 分别为关于 x 、 y 、 z 轴的旋转角; $r_{ij} = R(\omega, \varphi, \kappa)$ 为正交旋转矩阵元素, x_0 、 y_0 、 z_0 为初始搜索表面上的采样点。

为实施最小二乘估计, 式 (1) 泰勒线性化展开, 并忽略二阶和高阶项, 可得

$$\begin{aligned} -e(x, y, z) = & g_x dt_x + g_y dt_y + g_z dt_z + \\ & (g_x a_{10} + g_y a_{20} + g_z a_{30}) dm + \\ & (g_x a_{11} + g_y a_{21} + g_z a_{31}) d\omega + \\ & (g_x a_{12} + g_y a_{22} + g_z a_{32}) d\varphi + \\ & (g_x a_{13} + g_y a_{23} + g_z a_{33}) d\kappa - \\ & (f(x, y, z) - g^0(x, y, z)) \end{aligned} \quad (4)$$

式中： a_{ij} 为系数项。 g_x 、 g_y 、 g_z 分别为

$$g_x = \frac{\partial g^0(x, y, z)}{\partial x}, g_y = \frac{\partial g^0(x, y, z)}{\partial y}, g_z = \frac{\partial g^0(x, y, z)}{\partial z} \quad (5)$$

式(4)的矩阵形式为

$$-e = Ax - l, P \quad (6)$$

式中： A 为设计矩阵， $l = f(x, y, z) - g^0(x, y, z)$ 为常数向量，由模板表面与对应搜索表面元素间的距离组成， $x^T = [dx \ dt_y \ dz \ dm \ dw \ d\varphi \ dk]$ 为参数向量； P 为相关权系数矩阵，在实现过程中，模板表面元素用数据点作为近似值。选择分块表面方式表示搜索表面元素，将在2.2节中进行说明。

统计期望算子 $E\{\}$ ，并假设：

$$\left. \begin{aligned} e &\sim N(0, \sigma_0^2 Q_{\parallel}) \\ \sigma_0^2 Q_{\parallel} &= \sigma_0^2 P_{\parallel}^{-1} = K_{\parallel} = E\{ee^T\} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式(6)、(7)组成一个高斯马尔科夫估计模型。 $Q_{\parallel}$ 、 $P = P_{\parallel}$ 和 $K_{\parallel}$ 分别为先验的辅因子、权重和协方差矩阵。

未知的转换参数被视为具有权重的随机变量。若未知数具有较差的初始近似值，一些未知参数，尤其是尺度因子，可能收敛并得到错误的解。

引入额外的观测方程，把系统参数作为

$$-e_b = Ix - l_b, P_b \quad (8)$$

式中： I 为单位矩阵； l_b 为(虚构的)系统参数的观测向量； P_b 为关联的权重系数矩阵。

联合式(6)、(8)的最小二乘解作为广义高斯马尔科夫链模型的参数的无偏最小方差估计，解向量为

$$\hat{x} = (A^T PA + P_b)^{-1} (A^T Pl + P_b l_b) \quad (9)$$

方差因子为

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{v^T P v + v_b^T P_b v_b}{r} \quad (10)$$

表面观测值残差向量为

$$v = A\hat{x} - l \quad (11)$$

参数观测值残差向量：

$$v_b = I\hat{x} - l_b \quad (12)$$

式中： $\hat{x}$ 表示最小二乘估计量， $r = n - u$ 为冗余度， n 为观测数量， u 为转换参数数量。当系统收敛，解向量收敛到0($x \rightarrow 0$)。表面观测值的残差 v_i 为估计的搜索表面与模板表面间的最终欧氏距离：

$$v_i = \hat{g}(x, y, z)_i - f(x, y, z)_i \quad i = \{1, \dots, n\} \quad (13)$$

对函数进行泰勒级数展开，以保证迭代的总体最小化，则参数的近似值能足够接近于其真值($P_i^0 \cong P_i \in R^u, i = 1, \dots, u$)，提供质量较好的参数初始近似值用于第一次迭代：

$$P_i^0 \in \{t_x^0, t_y^0, t_z^0, m^0, \omega^0, \varphi^0, \kappa^0\} \quad (14)$$

得到式(9)的解向量后，搜索表面变化到一个新状态，使用更新后的转换参数集，重新估计设计矩阵 A 和常数向量 l 。若解向量 $\hat{x}$ 的每个元素小于一定数值，则停止迭代。

2.2 实现问题

本文采用双线性表面片表示搜索表面元素，用每4个邻近节点 P_i 拟合一个双线性表面片：

$$\begin{aligned} \bar{g}^0(u, w) &= [x(u, w) \ y(u, w) \ z(u, w)]^T = \bar{P}_1(1-u) \cdot \\ &(1-w) + \bar{P}_2(1-u)w + \bar{P}_3u(1-w) + \bar{P}_4uw \end{aligned} \quad (15)$$

式中： $u, w \in [0, 1]^2$ ， $\bar{P}_i \in R^3$ 。向量 $\bar{g}^0(u, w)$ 是邻近4个点 P_i 拟合的双线性表面上任意点的位置向量。根据参数化的双线性表面片上的局部表面法向量 $\bar{n}$ 的分量计算 $\{g_x, g_y, g_z\}$ 。

$$\bar{n} = \begin{bmatrix} g_x \\ g_y \\ g_z \end{bmatrix} = \frac{\bar{\nabla} g^0}{\|\bar{\nabla} g^0\|} = \frac{\frac{\partial \bar{g}^0(u, w)}{\partial u} \times \frac{\partial \bar{g}^0(u, w)}{\partial w}}{\|\bar{\nabla} g^0\|} \quad (16)$$

该方法表面建模质量较好，可以获得较好的后验方差值。

$\{g_x, g_y, g_z\}$ 构成一个法向量场，在搜索表面上 $\|\bar{n}\|=1$ 。这个向量场滑过模板表面指向最终的解，使用最小二乘法最小化目标函数求解。

2.3 精度和可靠性

估计的转换参数的标准差及其相关性提供了关于系统稳定性和估计质量的信息：

$$\hat{\sigma}_p = \hat{\sigma}_0 \sqrt{q_{pp}}, \quad q_{pp} \in Q_{xx} = (A^T PA + P_b)^{-1} \quad (17)$$

式中： Q_{xx} 为估计参数的辅因子矩阵。

为了定位和消除封闭的部分和异常值，使用稳健估计方法中的简单加权方案。

$$(P)_{ii} = \begin{cases} 1 & \text{If } |(v_i)| < K\sigma_0 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (18)$$

在本文试验中选择 $K > 10$ ，以抑制较大异常值。

2.4 具体实施过程

该方法的具体实施过程包括3个主要步骤：

TLS 数据获取、点云的总体配准、使用局部表面匹配进行变形参数估计, 其中后两步基于提出的最小二乘三维匹配算法, 通过计算机编程实现。

(1) TLS 数据获取。假设一个变形监测区域, 其四周被稳定区域包围。利用 TLS 扫描仪获取该变形区及其周围稳定区的初始数据。在该阶段, 需合理设置扫描的关键参数, 如采样距离和采样密度等, 对变形分析结果有直接影响。稳定区域的分布状况对点云总体匹配的质量有较强影响, 变形区域最好完全被稳定区包围, 也可基于地面控制点或分布在场景的联系点来改善匹配的质量。在一定的时间间隔后, 对该区域进行第 2 次 TLS 数据采集。需要注意的是, 第 2 次数据采集的几何形状与第 1 次会稍有不同。事实上, 该方法也并不假定从相同的视角进行数据采集。

(2) 点云总体匹配。把第 1 次扫描的点云称作参考点云 (RPC), 第 2 次扫描的点云称为搜索点云 (SPC)。通过对两次数据采集中的稳定区域实施最小二乘三维表面匹配实施点云间的匹配。匹配前须去掉场景中的变形区域。总体匹配的性能直接影响变形参数的估计质量, 所以须适当考虑研究区的关键特征, 并评估总体匹配方法的优先性和可行性。在弱配置情况下, 可选择基于控制点或联系点进行匹配。若配置可行且已实施了总体匹配, 可通过标准最小二乘工具检查匹配质量, 如分析最小二乘的残差, 异常值的拒绝等信息。

(3) 变形参数估计。变形分析包括两个关键步骤: ①特定分析区域的选择, 通常选择运动区域的子集。②对每个选择的子集进行变形参数估计, 在 RPC 强度图像上选择感兴趣的对象实施子集的选择。若没有感兴趣的研究区域可供选择, 可把变形区域划分成包含一定数量采样点的子集, 可通过自动化程序完成区域的划分。一旦完成研究子集的选择, 对于 RPC 上的每个子集, 通过最小二乘三维表面匹配自动搜索其在 SPC 上相应的子集, 获得其局部匹配下的转换参数, 在本试验中转换参数包括 3 个平移参数和 3 个旋转参数, 以用于描述每个子集在两次数据采集间的变形。

3 验证试验

为了评估该方法的有效性及其性能, 设计了一个模拟场景进行变形测量的试验验证。图 1 是试验中获得的一幅 TLS 强度图像。在图像的底部有 10 个人造目标物, 它们的几何外形和组成材料各不相同, 其大致尺寸为 $40\text{ cm}\times 80\text{ cm}$, 在试验中移动它们以

模拟变形现象, 图像中其他建筑物和构筑物在试验中被用作稳定区域。白色圆圈标示全站仪位置。目标 1、6 和 10 为木制物, 目标 2、7、8 为泡沫和合成材料, 目标 3 和 5 是混凝土制材料, 目标 4 为铝, 目标 9 为纸板。用 Trimble GX200 进行扫描测量。

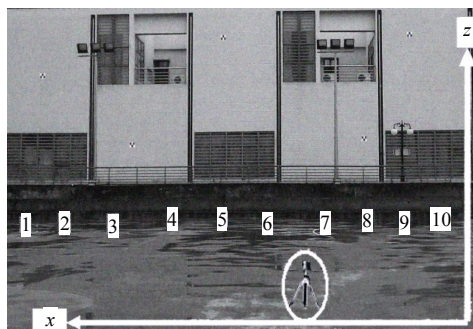


图 1 距离为 130 m 时获得的 TLS 强度图像
Fig.1 Image of TLS Intensity at the distance of 130 m

3.1 试验设计

该试验设计包括以下步骤:

(1) 安置 10 个目标物, 固定测量机器人于测站点上, 试验中保持位置不变。利用全站仪配合反射棱镜, 对每个目标物的 15~20 个标记点进行测量, 同时, 测量图 1 中建筑物上的其他目标物, 以获得 TLS 数据和全站数据间的一系列联系点。为了检查测量的质量, 对每个点都重复测量两次。用扫描仪从两个不同的设站点对场景进行扫描。第 1 个站点采样距离为 130 m, 采样密度为 $1.6\text{ 点}/\text{cm}^2$, 获取的数据称为 100 m 数据集; 第 2 个站点采样距离为 230 m, 采样密度为 $0.8\text{ 点}/\text{cm}^2$, 获取的数据称为 200 m 数据集。

(2) 以不同的距离(20~60 cm)、不同的方向移动这 10 个目标物。移动中会产生小角度的旋转, 大致在 $0\sim 11^\circ$ 之间。

(3) 用全站仪测量移动后目标物的位置, 每个目标物测量 15~20 个点。把扫描仪大致安置在与第 1 次扫描相同的位置处, 分别对新场景进行扫描。

(4) 利用获取的全站仪测量数据通过最小二乘平差估计每个目标物的三维刚体转换 6 参数。利用本文提出的变形测量方法, 对稳定区域实施总体匹配, 其匹配范围与图 1 中除去底部 10 个目标物后的区域一致。对 RPC 点云和 SPC 点云进行配准, 并对每个目标物进行局部匹配, 在该操作中目标物的选择是在 RPC 的强度图像上人工实施的, 基于每个目标物上的几个同源点进行转换来计算其初始值。最后, 通过分析匹配残差的相关性检查每个目标物

的局部匹配质量。

(5) 对每个目标物, 比较 6 个变形参数的两个独立估计集。为了方便进行比较, 把全站数据估计的参数转换到 TLS 数据坐标系中。

3.2 验证结果

通过重复测量数据可得到全站仪测量点的标准差, 其在深度 Y 方向上大致为 1 mm, X 和 Z 方向大约为 3 mm。利用 15~20 个测量点估计每个面的转换 6 参数, 位移参数的估计标准差小于 1 mm, 旋转参数估计标准差小于 0.09° 。因此, 在该试验中全站数据估计值可用作参考值, TLS 估计和全站估

计间的差值即为 TLS 法的估计误差。

TLS 扫描三维方向上的变形误差和旋转误差分别见表 1、2。由于一些遮挡, 第 2 个数据集只观测了 8 个目标物。

由表 1、2 可知, 100 m 数据集大部分目标物的 3 个轴向变形误差小于 1 cm, 旋转误差小于 0.9° , 而 200 m 数据集中的位移估计误差约为 2 cm, 明显比 100 m 数据集结果更优。由于使用的目标物特征并非最优且没有经过校准, 其估计精度还有较大的提升空间。关于这些数据的分析将在以下两节描述。

表 1 100 m 数据集验证
Table 1 Validation of the data set at 100 m distance

T_i	位移值/cm									旋转值/($^\circ$)								
	X_{TLS}	$X_{\text{Ter.}}$	$X_{\text{Err.}}$	Y_{TLS}	$Y_{\text{Ter.}}$	$Y_{\text{Err.}}$	Z_{TLS}	$Z_{\text{Ter.}}$	$Z_{\text{Err.}}$	Rot- X_{TLS}	Rot- $X_{\text{Ter.}}$	Rot- $X_{\text{Err.}}$	Rot- Y_{TLS}	Rot- $Y_{\text{Ter.}}$	Rot- $Y_{\text{Err.}}$	Rot- Z_{TLS}	Rot- $Z_{\text{Ter.}}$	Rot- $Z_{\text{Err.}}$
T1	-2.4	-3.0	0.5	19.7	19.1	0.5	-0.2	-0.6	0.2	0.45	0.63	-0.09	0.0	0.09	-0.09	0.54	0.18	0.27
T2	-19.4	-19.1	-0.3	-32.2	-32.7	0.5	-0.2	-0.6	0.4	3.87	3.96	-0.09	-0.09	-0.63	0.54	1.89	1.8	0.09
T3	-32.0	-32.2	0.7	-8.1	-8.3	0.1	-1.8	-1.1	-0.7	-0.18	-0.54	0.27	-4.32	-5.4	0.9	-1.44	-1.35	-0.09
T4	23.3	23.8	-0.4	-20.7	-20.0	-0.7	0.0	0.4	-0.4	0.99	0.54	0.36	0.09	0.27	-0.18	10.44	10.89	-0.27
T5	-6.1	6.3	0.2	21.3	20.3	1.0	1.0	2.1	-1.2	0.99	0.9	0.09	0.27	0.45	-0.09	2.07	1.8	0.27
T6	8.6	9.7	-1.0	-21.2	-22.1	0.8	-4.5	-4.2	-0.2	2.25	2.7	-0.36	2.7	1.89	0.63	-10.17	-10.17	0.0
T7	21.2	23.3	-2.1	9.0	10.1	-1.0	-0.2	-1.0	0.6	-0.99	-0.36	-0.45	1.08	1.8	-0.54	2.43	3.24	-0.72
T8	15.0	15.4	-0.4	-19.5	-18.0	-1.5	1.1	-1.1	2.3	-2.43	-1.8	-0.63	-1.53	-1.35	-0.18	6.12	6.57	-0.36
T9	-1.3	-1.4	0.0	-47.2	-47.0	-0.1	-2.7	-4.6	1.8	0.36	0.63	-0.18	0.36	0.27	0.09	7.92	7.83	0.09
T10	59.1	58.5	0.5	9.5	8.2	1.2	-0.6	-0.9	0.2	1.17	1.53	-0.27	4.05	3.69	0.27	2.25	1.98	0.27

注: 目标物表示为 $T_i(i=1\cdots 10)$, TLS 的估计值 (如 X_{TLS}), 全站仪测量估计值 (如 $X_{\text{Ter.}}$), 它们估计值之间的差值 (如 $X_{\text{Err.}}$); Rot 表示旋转。

表 2 200 m 数据集验证
Table 2 Validation of data set at 200 m distance

T_i	位移值/cm									旋转值/($^\circ$)								
	X_{TLS}	$X_{\text{Ter.}}$	$X_{\text{Err.}}$	Y_{TLS}	$Y_{\text{Ter.}}$	$Y_{\text{Err.}}$	Z_{TLS}	$Z_{\text{Ter.}}$	$Z_{\text{Err.}}$	Rot- X_{TLS}	Rot- $X_{\text{Ter.}}$	Rot- $X_{\text{Err.}}$	Rot- Y_{TLS}	Rot- $Y_{\text{Ter.}}$	Rot- $Y_{\text{Err.}}$	Rot- Z_{TLS}	Rot- $Z_{\text{Ter.}}$	Rot- $Z_{\text{Err.}}$
T1	-2.2	-3.0	0.7	21.4	19.1	2.2	-0.1	-0.5	0.3	0.18	0.54	-0.27	-0.09	0.09	-0.09	0.45	0.18	0.18
T4	21.4	23.8	-2.3	-18.6	-19.9	1.2	-0.2	0.4	-0.7	0.18	0.54	-0.45	-2.07	0.18	-2.34	10.17	10.8	-0.72
T5	-6.9	-6.5	-0.5	22.9	20.3	2.5	3.4	2.1	1.2	0.0	0.81	-0.9	0.99	0.45	0.45	1.44	1.71	-0.36
T6	4.0	9.7	-5.8	-21.3	-22.4	0.9	0.0	-4.4	4.3	2.61	2.7	-0.09	0.18	1.89	-1.8	-10.98	-10.35	-0.72
T7	20.6	23.3	-2.8	11.1	10.0	1.0	0.4	-1.1	1.4	-0.54	-0.54	-0.09	1.17	1.71	-0.63	2.7	3.24	-0.63
T8	13.2	15.4	-2.3	-16.7	-18.1	1.3	1.5	-1.3	2.7	-2.16	-1.89	-0.36	-1.17	-1.53	0.27	5.22	6.57	-1.44
T9	-2.6	-1.6	-1.1	-45.4	-47.2	1.7	-1.9	-4.8	2.8	0.63	0.63	-0.09	0.63	0.27	0.27	7.47	7.83	-0.45
T10	57.4	58.5	-1.2	10.0	8.2	1.7	1.3	-1.1	2.3	0.72	1.53	-0.9	4.41	3.69	0.63	1.8	1.98	-0.27

4 分析

4.1 总体匹配

总体匹配的质量会对变形参数估计产生系统性影响, 所以对匹配结果须进行检验, 可通过分析最小二乘 3 维表面匹配估计的残差实现。图 2 为一个沿 TLS 深度方向计算匹配残差的实例, 它是三峡库区的一个滑坡, 利用 Trimble GX200 扫描仪在距滑

坡 90~200 m 处对其进行了两次扫描, 平均采样密度为 0.46 cm^2 。图 2 左边部分为测量的变形区域, 宽约 15 m。由于大多数匹配残差值接近于 0, 可知 RPC 与 SPC 匹配良好。

为了评估总体匹配性能, 对试验数据进行不确定性分析。可通过使用相同的 RPC 和 SPC 执行一组匹配, 并对估计参数的初始值引入小变化 (约 10~20 cm) 实现。理想情况下, 这些小变化对参数

估计应该没有影响。为了证实这一点,直接研究其对点云匹配的影响。对目标物 1, 100 m 数据集中, 其标准差 $\sigma_X = \sigma_Y = 0.1$ cm, $\sigma_Z = 0.4$ cm; 而 200 m 数据集 $\sigma_X = 0.1$ cm, $\sigma_Y = 0.4$ cm, $\sigma_Z = 0.9$ cm。说明上述引入的小变化对 X 和 Y 轴向位移影响较小, 而对 Z 方向影响较大, 其原因可能是由于分析场景的特征所引起的, 它在 X 和 Y 方向上提供了比 Z 方向上更多地用于位移估计的几何信息。

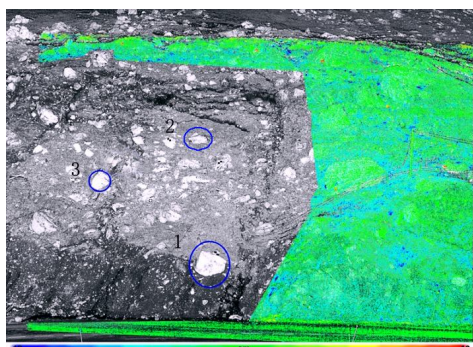


图 2 位于三峡库区的一个滑坡实例分析
Fig.2 Study of a landslide case in the
Three Gorges Reservoir Area

4.2 局部匹配

分析表 1、2 的验证结果, 须考虑两个主要误差源, 即总体匹配产生的系统误差及局部匹配产生的

相关误差。由于在表 1、2 中并没发现误差具有较强的系统性, 因此, 主要误差源是局部匹配。

通过研究估计参数的变化对局部匹配实施不确定性分析。100 m 数据集的 X 、 Y 、 Z 方向平移参数的平均标准偏差分别为 0.9、0.3、0.8 cm。而在 200 m 数据集中, 其相应值为 1.1、0.5、1.2 cm。这些值显然大于总体匹配的对值, 其原因可能是由于用于局部匹配的 TLS 点集相对较小, 相应地它也为最小二乘估计提供了一个较弱的几何外形。此外, 深度方向 Y 和其他两个轴向间的差异显著, 这显然与目标物的几何特征有关, 同时, 也说明了所用的目标物并不是最优的。

最后, 简要讨论图 2 中标记的 3 块岩石的变形试验, 在 2012 年的 1 月和 3 月对其分别进行了扫描测量和全站仪测量(每个岩石大约测量 20 个点)。表 3 显示了变形参数的估计误差, 与表 1 相比, 平移向量都低于 1 cm, 旋转角误差也远好于表 1、2 的相应值。这可能与分析的岩石的尺寸有关, 与图 1 中 0.32 m² 的目标物相比, 这 3 个岩石块最小的表面积也大于 2 m²。需注意的是, 在该实例中, 真实的变形几乎为 0, 其原因是观测期间正值旱季, 滑坡不活跃。但该实例获得的结果是有意义的, 因为其验证结果没有理由会在显著变形的情况下变差。

表 3 关于图 2 滑坡中标记的 3 块岩石变形测量的验证
Table 3 Validation of the monitored deformations at three sites shown in Fig.2

岩块	X_{TLS}	$X_{Ter.}$	$X_{Err.}$	Y_{TLS}	$Y_{Ter.}$	$Y_{Err.}$	Z_{TLS}	$Z_{Ter.}$	$Z_{Err.}$	Rot- X TLS	Rot- X Ter.	Rot- X Err.	Rot- Y TLS	Rot- Y Ter.	Rot- Y Err.	Rot- Z TLS	Rot- Z Ter.	Rot- Z Err.
岩块 1	-0.7	0.3	0.9	-1.0	0.0	0.9	-0.6	-0.6	0.0	0.0	-0.18	-0.27	-0.09	-0.18	-0.27	-0.09	-0.09	-0.09
岩块 2	-0.2	0.4	0.4	0.0	-0.2	-0.3	-1.3	-0.6	0.6	0.0	0.0	-0.18	-0.09	-0.09	-0.18	-0.09	-0.09	-0.09
岩块 3	0.0	0.5	0.4	-0.2	-0.4	-0.3	-0.3	-0.5	-0.3	-0.09	-0.18	-0.18	-0.09	-0.09	-0.09	-0.09	-0.09	-0.18

注: 表中目标物表示与表 1 相同。

5 结 论

(1) 基于 TLS 技术提出了一种滑坡变形监测新方法。该方法克服了传统利用 TLS 技术进行变形测量的一维性及对小变形的不敏感性等局限性, 具有全三维变形测量能力(包括三维位移和旋转变形信息), 且在应用上具有高度的灵活性。同时, 可通过标准最小二乘检查变形估计参数的质量。该方法的核心是本文给出的最小二乘三维表面匹配算法, 其 3 个主要步骤在文中已进行了详细说明。

(2) 若扫描对象仅仅一部分发生结构变化, 该方法将会视其为异常值, 即该方法不适用于结构变化监测。

(3) 通过模拟试验验证了该方法的性能, 在距离为 130 m 时对目标物进行扫描, 其位移误差小于 1 cm, 旋转度误差小于 0.9°; 在距离为 230 m 时上述的两项误差变大。试验的具体结果在文中已有叙述, 这里不再重复, 需要强调的是, 由于该模拟试验使用了非校准数据, 其并不代表高精度变形测量的理想场景, 试验结果还有较大的提升空间; 简要讨论了一个真实的滑坡试验分析, 也证实了模拟试验结果。

参 考 文 献

- [1] 罗德安, 朱光, 陆立. 基于三维激光影像扫描技术的整体变形监测[J]. 测绘通报, 2005, (7): 40—42.

- LUO De-an, ZHU Guang, LU Li. Whole object deformation monitoring based on 3D laser scanning technology[J]. **Bulletin of Surveying and Mapping**, 2005, (7): 40—42.
- [2] 詹庆明, 周新刚, 肖映辉, 等. 从激光点云中提取古建筑物线性和圆形特征的比较[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2011, 36(6): 74—78.
- ZHAN Qing-ming, ZHOU Xin-gang, XIAO Ying-hui, et al. Comparison of linear and circular feature extraction methods based on laser point clouds of an ancient architecture[J]. **Geomatics and Information Science of Wuhan University**, 2011, 36(6): 74—78.
- [3] 马俊伟, 唐辉明, 胡新丽, 等. 三维激光扫描技术在滑坡物理试验中的应用[J]. 岩土力学, 2014, 35(5): 1495—1505.
- MA Jun-wei, TANG Hui-ming, HU Xin-li, et al. Application of 3D laser scanning technology to landslide physical model test[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(5): 1495—1505.
- [4] 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): 21—25.
- XU Jin-jun, WANG Hai-cheng, LUO Yu-zhen, et al. Deformation monitoring and data processing of landslide based on 3D laser scanning[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(7): 21—25.
- [5] ROBERTS G, BADDLEY M. Deformation monitoring trials using a leica HDS 3 000[J]. **Strategic Integration of Surveying Services FIG Working Week**, 2007, (5): 13—17.
- [6] TSAKIRI M, LICHTI D, PFEIFER N. Terrestrial laser scanning for deformation monitoring[C]//Proc. of 3rd IAG/12th FIG Symp. Baden: [s. n.], 2006, 22—24.
- [7] ALBA M, FREGONESE L, PRANDI F, et al. Structural monitoring of a large dam by terrestrial laser scanning[J]. **Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, 2011, 36(5): 166—174.
- [8] SCHNEIDER D. Terrestrial laser scanner for area based deformation analysis of towers and water dams[C]//Proc. of 3rd IAG/12th FIG Symp. Baden: [s. n.], 2006: 8—13.
- [9] HESSE C, STRAMM H. Deformation measurements with laser scanners-possibilities and challenges[C]//Proc. International Symposium on Modern Technologies, Education and Professional Practise in Geodesy and Related Fields. Sofia: [s. n.], 2004: 4—5.
- [10] BITELLI G, DUBBINI M, ZANUTTA A. Terrestrial laser scanning and digital photogrammetry techniques to monitor landslides bodies[J]. **Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, 2010, 35(5): 246—251.
- [11] GIRARDEAU MONTAUT D, ROUX M, MARC R, et al. Change detection on points cloud data acquired with a ground laser scanner[J]. **Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, 2011, 36(3): 30—35.
- [12] PFEIFER N, LICHTI D. Terrestrial laser scanning[J]. **GIM International**, 2009, 18(12): 50—53.
- 上接第 1420 页
- ZHANG Jun-lu, DUAN Feng-hu, LIAO Wen-lai, et al. Field monitoring experimental study of sea-crossing shield tunnel segment in Zhanjiang Bay[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2014, 33(Supp.1): 2878—2884.
- [13] 李雪, 周顺华, 王培鑫, 等. 盾构隧道实测土压力分布规律及影响因素研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(增刊 2): 453—459.
- LI Xue, ZHOU Shun-hua, WANG Pei-xin, et al. Study of distribution law of earth pressure acting on shield tunnel lining based on in-situ data[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(Supp.2): 453—459.
- [14] BILOTTA E, RUSSO G. Internal forces arising in the segmental lining of an earth pressure balance-bored tunnel[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2013, 139(10): 1765—1780.
- [15] BAKKER K J, DE BOER F, ADMIRAAL J B M, et al. Monitoring pilot projects using bored tunnelling: The second heinenoord tunnel and the botlek rail tunnel[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 1999, 14(2): 121—129.
- [16] 宫全美, 刘建国, 丁春林, 等. 土的侧向压力对盾构隧道衬砌圆环内力的影响[J]. 城市轨道交通研究, 2001, 4(2): 28—32.
- GONG Quan-mei, LIU Jian-guo, DING Chun-lin, et al. Influence on internal force of shield tunnel's lining under soil's lateral pressure[J]. **Urban Mass Transit**, 2001, 4(2): 28—32.