

文章编号:0494-0911(2012)02-0043-05

中图分类号:P234.5

文献标识码:B

多视点散乱点云配准及压缩改进算法研究

张鸿飞¹,程效军^{1,2},贾东峰¹,刘燕萍¹

(1. 同济大学 土木工程学院 测量与国土信息系,上海 200092;

2. 现代工程测量国家 测绘局重点试验室,上海 200092)

A Study of Improved Registration and Compression Algorithm of Multi-vision Disorder Point Clouds

ZHANG Hongfei, CHENG Xiaojun, JIA Dongfeng, LIU Yanping

摘要:针对多视点散乱点云数据,提出基于控制网的球靶标特征配准方法,并对配准后的原始数据进行基于特征保留的优化压缩,最后得到完整简洁的点云模型。利用扫描仪、全站仪获取球靶标同名点坐标,并计算出每站6个转换参数,将所有数据转换到所需的控制网坐标系下;压缩算法利用点云分块技术提高散乱点邻域的搜索效率,并计算点法矢、曲率,根据精简准则保留特征点,最后以二叉树理论为基础,细化网格直至最小网格达到要求,保留最小网格中具有代表性的一个点,删除其他点,完成数据精简。试验结果表明,配准方法中控制网的采用能够实现坐标系的转换,球靶标的运用能明显提高配准模型的精度和效率,压缩算法实现了点云数据的特征保留。

关键词:多视点云;球靶标;特征保留;点云压缩

一、引言

利用三维激光扫描仪采集目标物体完整的形状信息须采用多站多视点扫描,然后将多站点云数据配准到同一坐标系中,因此,配准技术是三维扫描技术的关键技术之一。点云的配准可分为基于特征的配准和无特征的配准。无特征的配准即直接利用原始数据进行配准,比较有代表性的是1992年计算机视觉研究者Besl和McKay提出的一种高层次的基于自由形态曲面的配准方法——迭代最近点算法(iterative closest point, ICP)^[1]。然而实际应用中,采集的多视点云数据之间并不存在完全意义上的对应点,因此本文探讨基于特征的配准方法。

配准之后的原始数据是一种点云数据,通常可达数万甚至几十万个,需进行优化压缩处理,因此点云数据的优化压缩是逆向工程中的重要研究内容之一^[2,3]。

本文针对多视点散乱点云数据提出基于控制网的特征配准方法,并对配准后的原始数据提出一种基于特征保留的点云数据压缩算法,最后得到完整简洁的点云模型。该配准算法采用基于控制网和球面靶标的方法,能够将所有数据转换到所需的控制网坐标系下,能够满足诸如数字城市建设的特定需求,而球靶标的运用也提高了配准模型的精

度和效率;提出的压缩算法则实现了点云数据的特征保留且不失效率。

二、多视点云配准

1. 数据采集

数据采集包括目标点云数据和球靶标的采集。点云采集共分3站布设控制网,建立统一坐标系。可利用扫描仪和全站仪分别采集球靶标提取公共点坐标,以此作为控制点来获取坐标系旋转和平移参数,实现点云数据配准。球靶标为一个立体模型,布设方便,可在任意方向拟合提取其球心坐标,避免了采取平面靶标时因角度问题而形成的靶标变形(如图1、图2所示),且节约了平面靶标单独扫描的时间,从而提高了整体配准模型精度和效率。

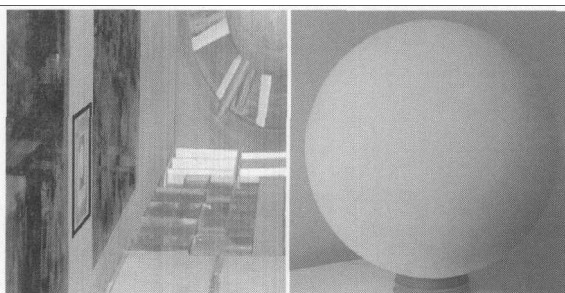


图1 平面靶标变形

图2 球靶标

球靶标扫描仪坐标系下的坐标可通过扫描

收稿日期:2011-02-18

基金项目:国家自然科学基金(40971241)

作者简介:张鸿飞(1983—),男,河南商丘人,博士生,主要研究方向为激光数据处理。

仪自身获取,控制网下球体坐标的获取可通过下述方法实现:利用全站仪在球体水平方向及垂直方向瞄准球标靶的边缘,测出水平方位角 A_1 、 A_2 和天顶距 Z_1 、 Z_2 ,其差值的一半即分别为 A 和 Z ;据此测出测站到表面中心的距离 S' ,然后根据 Z 和 S' ,求出球的半径 r 和测站至球标靶中心的斜距 S ,如图3所示。

$$r = (S' + r) \sin Z \quad (1)$$

$$S = S' + r \quad (2)$$

根据极坐标测定空间点位公式得球心坐标

$$\left. \begin{aligned} X &= X_A + S \sin Z \cos A \\ Y &= Y_A + S \sin Z \sin A \\ Z &= Z_A + S \cos Z \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

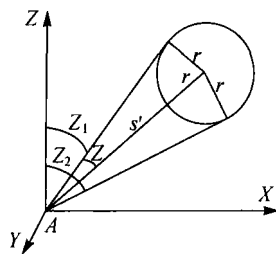


图3 全站仪测球心坐标

2. 配准模型

利用全站仪实测的球标靶坐标 (X, Y, Z) 和标靶在当前扫描仪坐标系下的坐标 (x, y, z) ,实现所有点云配准到控制网坐标系内,转换的过程如图4所示。

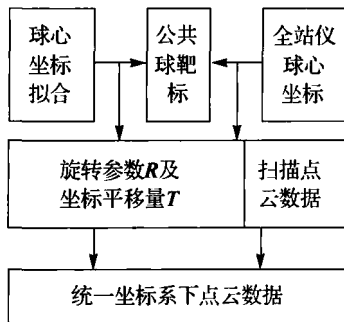


图4 点云配准

根据摄影测量原理,坐标转换不考虑模型缩放因子,共需要6个参数,即3个角度转换量 φ 、 ω 、 κ ,3个坐标平移量 ΔX 、 ΔY 、 ΔZ ,并至少需要3对同名点进行转换,一般情况下需要多余观测,因此每站至少4个靶标,按最小二乘法原理平差求解。

$$F = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, R 是由3个角度转换量构成的旋转矩阵。

将式(4)按泰勒级数展开,取一次项,并线性化,得到一般的误差方程式为

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_x}{\partial \Delta \varphi} & \frac{\partial F_x}{\partial \Delta \omega} & \frac{\partial F_x}{\partial \Delta \kappa} & \frac{\partial F_x}{\partial \Delta X} & \frac{\partial F_x}{\partial \Delta Y} & \frac{\partial F_x}{\partial \Delta Z} \\ \frac{\partial F_y}{\partial \Delta \varphi} & \frac{\partial F_y}{\partial \Delta \omega} & \frac{\partial F_y}{\partial \Delta \kappa} & \frac{\partial F_y}{\partial \Delta X} & \frac{\partial F_y}{\partial \Delta Y} & \frac{\partial F_y}{\partial \Delta Z} \\ \frac{\partial F_z}{\partial \Delta \varphi} & \frac{\partial F_z}{\partial \Delta \omega} & \frac{\partial F_z}{\partial \Delta \kappa} & \frac{\partial F_z}{\partial \Delta X} & \frac{\partial F_z}{\partial \Delta Y} & \frac{\partial F_z}{\partial \Delta Z} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d\Delta \varphi \\ d\Delta \omega \\ d\Delta \kappa \\ d\Delta X \\ d\Delta Y \\ d\Delta Z \end{bmatrix} - (F - F_0) \quad (5)$$

对每一对同名点,可列出一组误差方程,如有 n 组,可列出 n 组误差方程式,组成总误差方程式,得到法方程式,经解算后得到初始值的改正数,加上初始值得到新的近似值;再将此近似值作为新的初始值,重新建立误差方程式并法化,再次解求改正数,反复迭代,直到改正数小于规定的限差为止。初始值与每次解算的改正数相加,即得到最后的解算结果。表1给出其中一站转换参数计算结果,最终配准结果如图5所示。

表1 旋转参数

R(旋转参数)			T 坐标平移量	
0.978 2	-0.207 3	0.008 0	ΔX	40.652 9
0.207 0	0.978 0	0.027 5	ΔY	3.653 4
-0.013 5	-0.025 2	0.999 6	ΔZ	-12.577 2

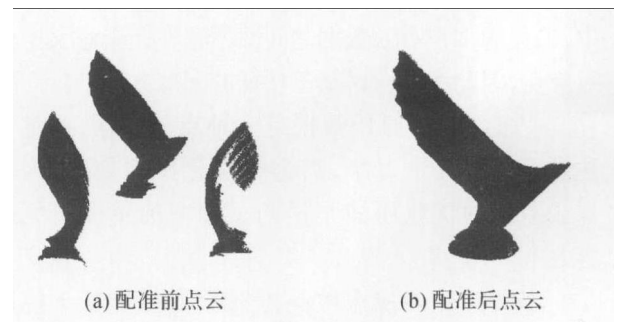


图5

3. 配准实例结果分析

本文以鸟雕塑为对象,采取球标靶特征配准方法,并与平面靶标特征配准方法对比^[4],表2给出两种配准方法的对比。精度的对比采用3个指标:单点精度、方向误差和中误差。

从两种配准方法中选取具有明显特征的若干

点,用全站仪测定三维坐标,与配准后的坐标值进行比较,分别计算单点精度、方向误差和中误差。以此来评定球标靶和平面标靶的配准精度。

Δx 、 Δy 、 Δz 分别代表单点整体误差,即为单点精度

$$\left. \begin{aligned} \Delta x &= \sum |\Delta x_i|/n \\ \Delta y &= \sum |\Delta y_i|/n \\ \Delta z &= \sum |\Delta z_i|/n \end{aligned} \right\} (i=1,2,\dots,n) \quad (6)$$

方向误差的计算公式为

$$\left. \begin{aligned} \Delta X &= \sqrt{\sum \Delta x_i^2/n} \\ \Delta Y &= \sqrt{\sum \Delta y_i^2/n} \\ \Delta Z &= \sqrt{\sum \Delta z_i^2/n} \end{aligned} \right\} (i=1,2,\dots,n) \quad (7)$$

模型整体中误差公式

$$m = \pm \sqrt{\frac{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}{n}} (i=1,2,\dots,n) \quad (8)$$

表2 两种配准方法对比

比较项	配准方式	
	球靶标配准	平面靶标配准
单站耗时	约 10 min	30 min (含 3 个靶标)
靶标可利用度	布设方便可重复利用	布设麻烦,一次性,易被破坏,影响环境
单点精度/mm	$\Delta x = \pm 3.3$	$\Delta x = \pm 13.3$
	$\Delta y = \pm 1.7$	$\Delta y = \pm 13.7$
	$\Delta z = \pm 1.6$	$\Delta z = \pm 15.2$
方向误差/mm	$\Delta X = \pm 3.5$	$\Delta X = \pm 13.7$
	$\Delta Y = \pm 2.0$	$\Delta Y = \pm 14.1$
	$\Delta Z = \pm 1.7$	$\Delta Z = \pm 16.5$
点位中误差/mm	± 4.13	± 24.5

从表2可以看出,球标靶配准方法相比平面靶标,大大缩短了数据采集时间,同时靶标布设更为方便,因此有效提高了室外作业的效率,且提高了数据在单点精度、方向误差和中误差3方面的精度。

三、基于特征保留的点云压缩算法

1. 算法概述

针对散乱点云数据,本文提出一种改进的基于特征保留的散乱点云压缩算法,以期能够达到在特征保留的同时实现算法的高效。首先利用点云分块技术提高散乱点邻域的搜索的效率,并计算点法矢、曲率等;再根据精简准则保留特征点;最后以二叉树理论为基础,不断细化网格,直至最小网格达到要求,选留最小网格中具有代表性的一个点,删

除其他点。点云数据精简过程如下:

- 1) 利用散乱点的拓扑结构并搜索点 K 近邻域。
- 2) 根据点 K 近邻域,计算点云的法矢量、曲率,并调整法矢方向,使之具有一致性。
- 3) 根据点云曲率,按照一定原则取出符合要求的特征点予以保留。
- 4) 以二叉树理论为基础,按照精简原则,在保证物体特征的前提下精简点云。

2. 近邻域的搜索

对数据点进行压缩,需知道某点的矢量特征,而这些特征的计算需要已知此点的近邻域,并通过邻近点的分布情况反映曲面在该点处的形状信息。再采用 K -Nearest Points 近邻域搜索方法,通过计算点距离确定点的邻域,而 K 近邻域方法的关键问题是如何高效地确定点的近邻域点,提高算法效率。

针对这一问题,本文采用点云分块的方法来搜索点的近邻域。首先,根据所有散乱点坐标(X 、 Y 、 Z)的最小和最大值,计算最大包围立方体包围所有点云数据;然后根据点云的数量和分布将最大立方体分割成 n^3 个子立方体,子立方体边长设为 sz 并对每个立方体按照一定的顺序编号,则对点云中的任意一点 $P(P_x, P_y, P_z)$,其所在子立方体为

$$\left. \begin{aligned} i &= \text{int}(p_x - X_{\min})/sz \\ j &= \text{int}(p_y - Y_{\min})/sz \\ k &= \text{int}(p_z - Z_{\min})/sz \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中, i 、 j 、 k 分别表示为该点在立方体的 x 、 y 、 z 轴方向立方体栅格的索引号。

分块实现效果如图6所示,完成分块后,确定 k 值,根据需搜索邻域的点的坐标,求得其对应子立方体编号以及相邻的26个子立方体编号,在这27个子立方体内部搜索,找到距离最近的 K 个近邻点,若点数不够,则将子立方体向外扩展,继续搜索,若仍达不到要求,则认为该点为噪声点,继续搜索下一点直到所有的点搜索完毕。近邻域搜索流程如图7所示。

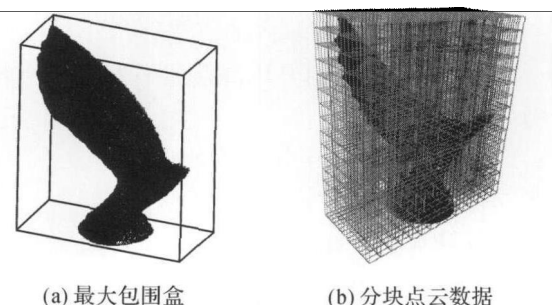


图6

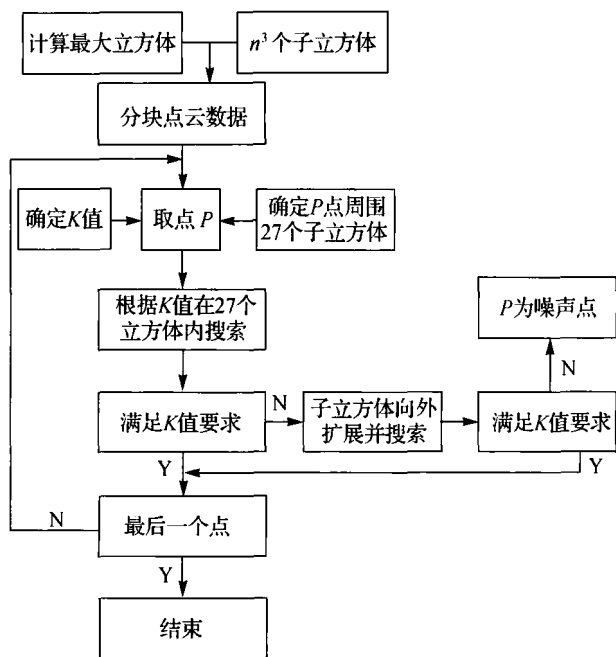


图7 近邻域搜索流程图

3. 特征点约束

数据压缩之前首先要对采样点进行特征点强制约束,本文采用系统自动提取与少量交互相结合的方法进行。特征点的强制约束针对一个单独的点进行判断,虽然约束点未形成较为规则连续的线、面等,点的提取也无精度要求,但对于点云的简化来说已经能够满足要求。本文重点研究高曲率区域的强制特征点提取,并根据点的几何属性曲率来判断其是否为特征约束点。通过曲率估算实现特征点云的保留主要包括以下3步:①点云拓扑关系的建立;②估算点云邻域内的曲率;③按照一定的原则,保留特征点。

(1) 点云拓扑关系的建立

散乱无序点云中拓扑关系的建立实际就是 K 近邻域的确定。

(2) 估算点云邻域内的曲率

本文采用稳定性较好的抛物面拟合法曲率估算,设抛物面方程为

$$z = ax^2 + bxy + cy^2 \quad (10)$$

对焦点 P 及其邻域内的点进行最小抛物面拟合,求出系数 a, b, c ,则 P 的高斯曲率 K 和平均曲率 H 分别为

$$\left. \begin{aligned} K &= 4ac - b^2 \\ H &= a + c \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

重复计算进而求出所有点的高斯曲率和平均曲率。

(3) 按照原则压缩点云

计算得到所有点云数据的平均曲率值,设定一

个阈值,进行逐点筛选,如果某点曲率与平均曲率大于给定的阈值,则认为该点为特征点,给予保留。

4. 基于八叉树的点云缩减

用八叉树来表示三维形体,既可以看成是四叉树方法在三维空间的推广,也可以认为是用三维体素阵列表示形体方法的一种改进^[5],图8为八叉树模型。

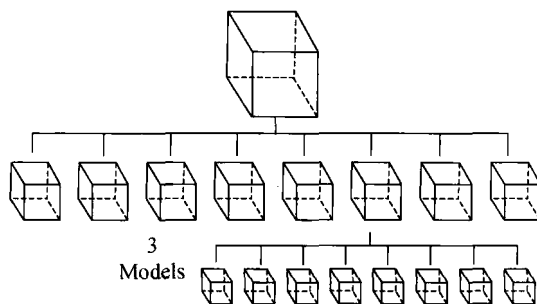


图8 八叉树模型

利用八叉树数据结构对点云数据按照一定的规则进行精简。依据对网格内点集的法向一致性的要求,利用网格内点集平均法矢与各点的法矢标准偏差大小作为网格是否再分的条件,不断细化网格,网格法矢标准偏差由式(12)可得

$$\sigma = \sum_{i=1}^n \frac{\sqrt{(N - N_i)^2}}{n} = \sum_{i=1}^n \frac{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2}}{n} \quad (12)$$

式中, $N = (x, y, z)$, x, y, z 为网格内所有点的3个坐标分量平均值; $N_i = (x_i, y_i, z_i)$ 是每个点的点法矢。首先确定八叉树根节点,计算细分后每个格网法矢标准偏差,并与设定的标准偏差阈值进行比较,若网格内法矢标准偏差大于给定阈值,则对其继续细分,直到格网内的标准偏差小于阈值或只剩下少于3个点时,细分结束;最后选出每个网格中与平均法矢相差最小的点,删除其余点,得到压缩后的点云。图9给出了整个压缩算法的流程。

5. 算例分析

以配准后鸟雕塑点云数据为对象进行试验,利用 VC++ 6.0 实现上述算法,并采用 Coin3D 库显示点云数据。压缩前后点云效果如图10、表3所示。

表3 点云简化效果对比

	特征约束	仅八叉树压缩
原始点数	331 487	331 487
简化后点数	120 440	9 945
压缩率/(%)	36	3

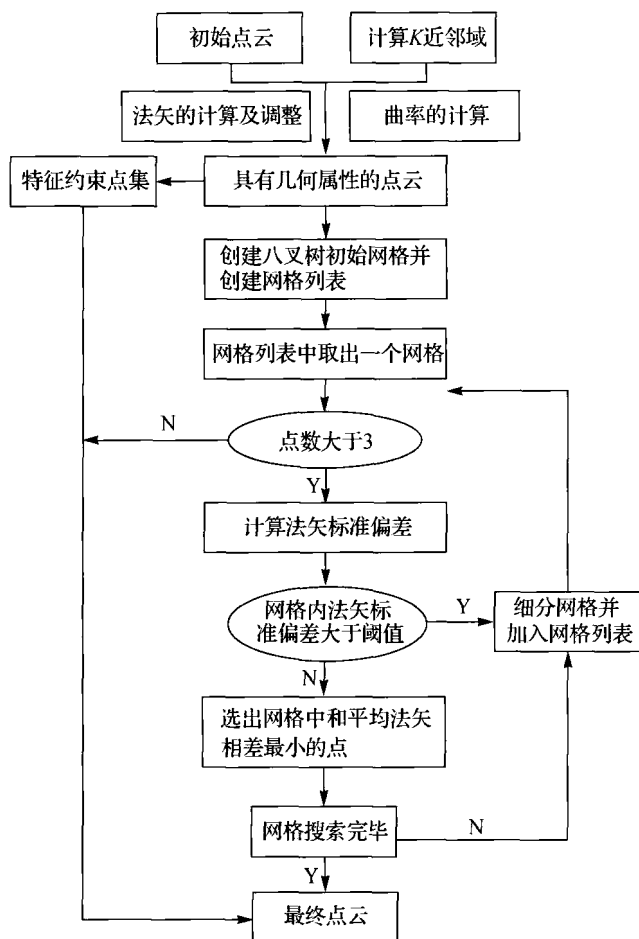


图9 基于特征保留的散乱点云压缩算法

从图10、表3压缩前后的点云效果图可以看出,仅利用八叉树压缩点云,压缩率就非常高,达到了3%,但是模型特征保留的效果不理想。而基于特征保留的八叉树压缩算法在取得较大压缩率的同时,在曲率变化较大的地方保留了较多的模型特征,验证了基于特征保留的八叉树压缩算法的可行性。

四、结束语

本文针对多视点散乱点云数据,采取基于控制网的球靶标特征配准方法,并对配准后的原始数据

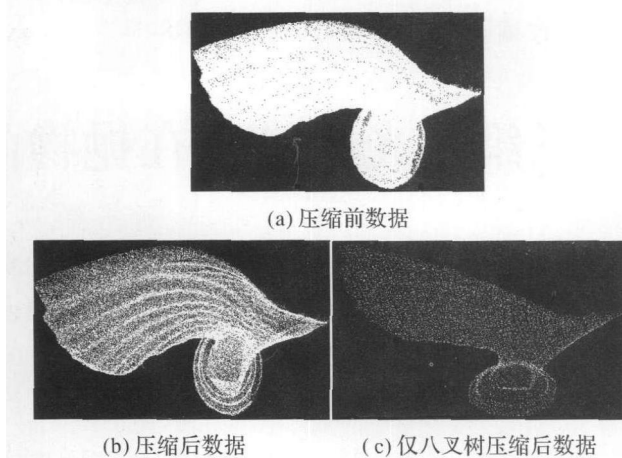


图10 点云数据压缩

提出一种基于特征保留的点云数据压缩算法,最后得到完整简洁的点云模型。试验表明,球靶标配准方法相比平面靶标方法,提高了配准模型的精度和效率,控制网的布设将所有点云数据转换到所需的坐标系下,能够满足诸如数字城市建设的特定需求;提出的压缩算法实现了点云数据的特征保留。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 吴世雄,王文,陈子辰,等. 大规模扫描测点的自适应数据压缩[J]. 浙江大学学报:工学版,2004,38(9): 1200-1204.
- [3] 师振中,王秀英,刘锡国. 逆向工程中点云数据压缩算法的研究与改进[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2006,27(B09):35-39.
- [4] ZHANG Hongfei, CHENG Xiaojun, SHI Yintao. Study on 3D Modeling for History Building and Precision Analyzing[C] //The 2nd Conference on Future Computer and Communication (FCC 2010) IEEE. [S.l.]:IEEE,2010.
- [5] 邵正伟,席平. 基于八叉树编码的点云数据精简方法[J]. 工程图学学报,2010(4):73-76.

(上接第34页)

- [4] MARIO M, ANDREA G F, CHANG J, et al. GIS and Sensitivity Analysis in Aquifer Vulnerability Representations [J]. International Geological Congress, 1996, 30(3):496.
- [5] 过静珺,李冬航,周百胜,等. 四川雅安滑坡自动化远程监测系统示范工程[J]. 测绘通报,2006(4): 54-57.
- [6] 张桂荣,殷坤龙,刘礼领,等. 基于WEB的浙江省降

雨型滑坡预警预报系统[J]. 中国地质大学学报:地球科学,2005,30(2):250-254.

- [7] 赵明阶,何光春,王多根. 边坡工程处治技术[M]. 北京:人民交通出版社,2003:22-29.
- [8] FARGHAL S A, KANDIL M S, ELMITWALLY A. Quantifying Electric Power Quality via Fuzzy Modeling and Analytic Hierarchy Processing [J]. IEEE Proceedings—Generation, Transmission and Distribution, 2002, 149(1):44-49.