

滑坡变形的三维可视化研究

张 昆¹ 张松林² 刘祖强³ 杨 红³

(1 华东师范大学资源与环境科学学院地理信息科学教育部重点实验室, 上海市中山北路 3663 号, 200062)

(2 同济大学测量与国土信息工程系, 上海市四平路 1239 号, 200092)

(3 长江水利委员会三峡勘测研究院, 宜昌市沿江大道 153 号, 443003)

摘 要: 基于 3D GIS 技术, 结合一个具体的滑坡变形监测工程实例, 采用不规则三角网和等高线构建了滑坡体三维模型; 对于 mm 级的变形, 通过放大和橡皮筋动画技术, 在三维空间再现了滑坡的微观变形过程。

关键词: 滑坡; 位移矢量; 可视化; 橡皮筋动画

中图法分类号: P208; P217

滑坡变形的可视化研究是一个热点, 国内外许多学者作了积极的探索。王旭春^[1]应用 GIS 技术建立了滑坡体地质界面三维空间数据库, 结合叠置分析、缓冲区分析等技术对建筑适宜程度进行了研究。欧敏^[2]采用元胞自动机来模拟滑坡的滑动面, 能较好地表现了滑动面的动态过程。曾新平^[3]从计算机图形学的角度对地质体表面进行了三维可视化研究, 通过 Delaunay 三角形剖分和消隐、光照处理技术, 生成真实感较强的三维图形。加拿大地质勘测局(GSC)利用三维 GIS 技术来研究滑坡, 包括建立滑坡区域的数字高程模型, 覆盖遥感图像或专题图, 对三维表面进行渲染、计算体积、生成剖面、创建滑坡动画等。美国地质勘探局(USGS)用动画技术再现了发生在加利福尼亚州的一次滑坡。滑坡体在蠕变期间, 由于变形很小, 不宜在宏观上作可视化表达, 滑坡体的变形是通过对离散的监测点进行精密测量来描述的^[4]。因此, 在蠕变期间, 可采用 GIS 和三维动画技术, 将滑坡体用宏观和简化的方式来描述, 对监测点的变化采用微观和放大的方式表达, 实现滑坡变形的三维可视化。实践证明, 该方法需要地形资料少, 基本能满足设计和工程单位对滑坡变形的三维可视化要求。

1 工程背景和数据处理

某滑坡位于川、滇交界的金沙江右岸, 距上游一个大型梯级开发电站设计坝址约 900 m, 对该滑坡的监测和研究关系到坝址的选取和工程的造价等重大问题。采用测量机器人技术进行全自动化观测, 对滑坡体上的 13 个监测点已进行了 1 a 多的监测, 获取点的三维坐标, 得到 mm 级精度的位移变化量。表 1 列出了其中 27 期的部分三维坐标, 为方便处理, 所有坐标都以 mm 为单位。

本文采用 ArcGIS 的 ArcScene 模块构建三维模型, 数据导入时要设置合适的空间域, 以保证所有监测点都在显示的空间域内。ArcGIS 采用 4 字节的整型数保存坐标值, 所能表示的最大数为 2 147 483 648。因为表中的 Y 坐标超出了最大数, 因此, 需要平移 ArcGIS 的空间域以包含所有的观测点。平移后的空间域边界计算公式如下:

$$\min X = ((\text{Data min} X + \text{Data max} X) / 2) - 1\ 073\ 741\ 824 / \text{Precision} \quad (1)$$

式中, $\min X$ 为 ArcGIS 空间域的最小 X 坐标; $\text{Data min} X$ 为观测数据的最小 X 坐标; $\text{Data max} X$ 为观测数据的最大 X 坐标; Precision 为坐标精度(此处为 100, 即保留到小数点后两位);

收稿日期: 2006-06-28。

项目来源: 国家 973 计划资助项目(2003CB716705); 欧盟国际合作基金资助项目(EVGF-CT-2002-00061); 测量机器人变形监测系统研究与应用课题资助项目。

表1 滑坡变形监测点坐标/mm
Tab.1 Coordinates of Landslide's Monitoring Points

点名	坐标	日期		
		第1期(2005-05-20)	第2期(2005-05-21)	第27期(2005-11-15)
AL02	Y	2 911 358 018.01	2 911 358 017.01	2 911 357 828.36
	X	561 981 020.92	561 981 022.62	561 981 237.42
	Z	1 299 559.99	1 299 560.74	1 299 391.79
AL03	Y	2 911 222 578.01	2 911 222 578.46	2 911 222 460.71
	X	561 853 207.88	561 853 207.23	561 853 391.53
	Z	1 311 755.54	1 311 756.19	1 311 640.54
⋮				⋮
TP11	Y	2 910 902 168.53	2 910 902 167.93	2 910 901 906.33
	X	562 468 463.99	562 468 463.34	562 468 863.44
	Z	1 011 059.45	1 011 057.30	1 010 844.65

1 073 741 824 是 2 147 483 648 的一半; 计算出 $\min X$ 后, ArcGIS 会自动计算 $\max X$ 。Y 坐标和 Z 坐标采用相同的计算公式。

2 滑坡体模型及变形可视化

由于监测点含高程信息, 数据读入 ArcScene 后, 可直接以三维的方式显示, 并可借助漫游工具任意旋转, 便于从各个角度观察。在没有滑坡测区地形图资料的情况下, 本文借助 3D Analyst 工具栏中的 Create TIN From Features 命令, 用监测点建立不规则三角网(TIN)来模拟滑坡表面。采用挤压(extrude)技术模拟滑坡体(图1), 具体步骤如下: 根据 TIN 生成等高线(图上未绘出); 等高线的基准高程设为 0; 挤压的高度设为等高线的高程。挤压操作的实质是将等高线在垂直方向上延伸为面, 用这种方法得到的模型能概略和直观地了解滑坡体的坡度、体量等特征。

图1中每个点号都对应有27期监测值, 点的位移与滑坡体相比较, 显得非常微小, 在图上无法分辨。本文采用放大位移矢量法来表示监测点的细微变化, 在图1的右侧显示的是 TP_{01} 点放大后的变形过程线。放大后的该点的变形非常清晰。

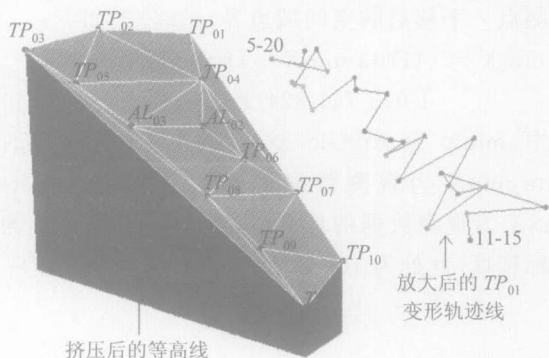


图1 滑坡体模型及放大后的监测点位移轨迹

Fig.1 Model of Landslide and Zoomed Deforming Tracks

监测点两期间(一般取相邻两期)的位移可以用矢量来表示, 矢量的方向是点的移动方向, 矢量的长度是位移的大小。笔者采用两种夸大位移长度的方法来放大位移: 将长度加上一个常数, 这种方式维持了监测点间的位移差; 将长度乘以一个常数, 夸大后的矢量不仅宏观上可见, 而且监测点之间的差异被夸大了, 视觉效果上具有可比性, 要优于第一种方法。两种方法的效果比较如图2所示。图2(a)用的是第一种方法, 图2(b)用第二种方法。从图2(b)可以清楚地看到滑坡体变形的趋势, 滑坡顶部位置的位移小, 随着高程的减小, 位移逐渐增大。位于滑坡体顶部的 TP_{03} 点只移动了 18.76 mm, 底部 TP_{11} 点的位移可达 523.87 mm。

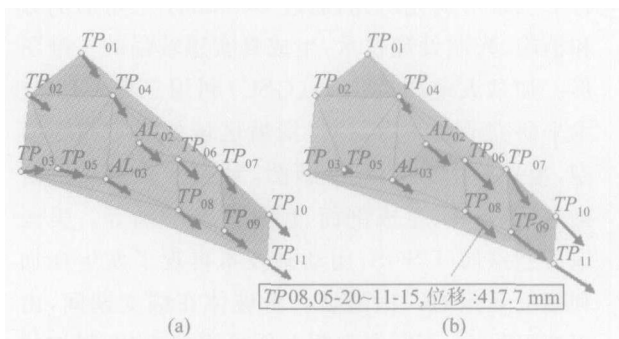


图2 位移矢量的两种夸大表示

Fig.2 Two Kinds of Representation Methods of Displacement Vector

本文编写了一段创建位移矢量的 VBA 程序来计算位移矢量, 其中用到了 ArcObject 的 Vector3D 类。具体算法是: 根据两期点(起点与终点), 调用 ConstructDifference 方法创建矢量, 保存 X、Y、Z 三个分量; 将矢量长度乘一个常数, 计算新矢量与旧矢量的三个分量差, 将终点坐标加分量差得新的目标点; 根据起点与目标点创建线要素对象。为了增强可视化, 在创建线要素时, 将

点号、起始观测日期以及位移量信息写入属性表, 只要将鼠标放在位移矢量上, 程序就可以读取对应的信息, 并加以显示(图 2(b))。

3 三维动画

尽管位移非常缓慢, 但滑坡变形是一个动态的过程, 用三维动画可以表现该过程, 即 13 个监测点的变动过程。由于 ArcScene 软件不支持节点动画, 本文采用 3D Studio MAX 软件来制作节点动画。为了方便动画制作, 采用数据中心化技术将滑坡中心移到坐标原点, 中心化后的坐标值变小了, 但其形状不变, 不影响动画效果。

动画要解决的关键问题是如何宏观地表现滑坡体的整体变形, 本文的思路是将位移轨迹线放大, 用位移矢量在轨迹线上的移动来表现其变形过程。矢量移动的方式类似于橡皮筋, 矢量的起点固定在监测点的第一期(05-20), 终点沿着变形轨迹线运动(图 3), 某个时刻矢量所指的方向是相对于起点的累积位移方向, 长度代表累积位移量。尽管 ArcScene 和 3D Studio MAX 可以通过 VRML 格式来交换数据, 但是 3D Studio MAX 用三棱柱来表示导入的线段, 不满足动画的要求。笔者在 ArcScene 中对轨迹线按比例放大, 将坐标写到临时文件, 再用脚本语言 MaxScript 将坐标读到 3D Studio MAX 中重建轨迹线。

节点动画制作的方法是: 创建一条两个节点的样条曲线表示位移矢量, 起点和变形轨迹线的起点重合, 终点在相应的时刻分别和轨迹线上的其余 26 个节点重合(即 26 期), 由 3D Studio MAX 来内插中间点。本文将这种动画方式称为橡皮筋动画, 如图 3 所示。

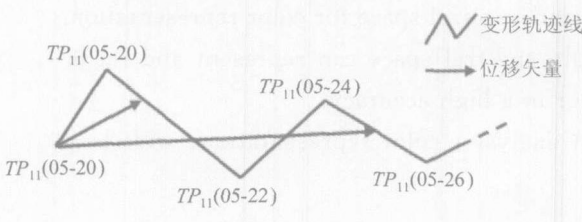


图 3 橡皮筋动画示意图

Fig. 3 Sketch Graphics of Rubber-Band Animation

一共有 13 个监测点, 因此, 需要 13 个位移矢量, 而每根矢量线要创建 27 个关键帧。手工制作动画的细节繁琐, 工作量非常大。作者编写了 MaxScript 代码来实现动画, 动画制作的代码如下:

```

animateVertex vector 2
animationRange= interval 0 537
animate on
( vec_track = "$ " + vector.name + ". spline_1_...
vertex_1.controller"
vec_pos= execute(vec_track); value= 0
at time 0 ( vec_pos.value= getKnotPoint track 1 1)
for h= 1 to 26 do
( t= value+ span[h]; value= t; tt= t* 3
at time tt
( vec_pos.value= getKnotPoint track 1 (h+ 1)
k= getKey vec_pos h
k.inTangentType= # linear; k.outTangentType= # linear)
...

```

其中 vector 变量代表位移矢量, track 变量代表轨迹线, 用 getKnotPoint 函数可以捕获其节点, 作为关键帧。从 05-20 到 11-15 号一共有 179 d, 每一天用 3 帧来表示, 因此动画长度设为 537 帧。span 数组保存的是相邻观测时点间的相差天数。3D Studio MAX 使用贝塞尔控制器来内插中间点, 每个关键帧有入切线和出切线, 缺省类型是光滑型, 光滑内插将导致位移矢量偏离轨迹线运动; 代码中将关键帧的入、出切线类型改为直线型, 这样位移矢量才会精确地沿轨迹线运动。为了将样条曲线渲染出来, 还需将其设为可渲染模式, 并适当加粗线宽, 3D Studio MAX 将用正 12 边形作为截面来渲染样条曲线。最终生成的动画如图 4(a) 所示, 图上依此显示的是第 30 帧、第 90 帧、第 150 帧、第 300 帧、第 537 帧的画面。三维动画的优势在于可以从不同的视角进行渲染, 图 4(b) 显示的是从另一个角度渲染的动画帧, 每一帧的时刻和图 4(a) 一一对应。

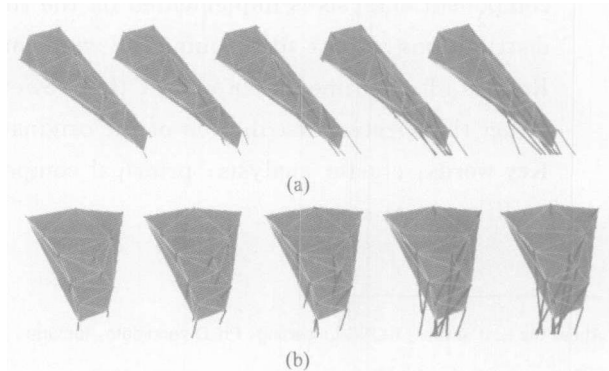


图 4 滑坡变形动画显示

Fig. 4 Animation of Landslide's Deformation

参 考 文 献

- [1] 王旭春. 滑坡 GIS 可视化研究与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(2): 2 511-2 514
- [2] 欧敏. 基于 GeoCA 和 GIS 的滑坡滑动面演化规律研究[J]. 水文地质工程地质, 2005(1): 22-25
- [3] 曾新平. 三维 GIS 环境下的地质体可视化和特征分析[J]. 地质与勘探, 2005, 41(1): 72-76
- [4] 张正禄. 工程测量学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2005
- [5] 白世彪. 基于 GIS 的长江三峡库区滑坡影响因子分析[J]. 山地学报, 2005, 23(1): 63-70

第一作者简介: 张昆, 讲师, 博士, 博士后。现主要从事地理信息系统和计算机应用方面的教学和研究工作。

E-mail: k zhang@ geo. ecnu. edu. cn

On 3D Visualization of Landslide's Deforming

ZHANG Kun¹ ZHANG Songlin² LIUZuqiang³ YANG Hong³

(1 Key Laboratory of Geographic Information Science, School of Resources and Environment Science, East China Normal University, 3663 North Zhongshan Road, Shanghai 200062, China)

(2 Department of Surveying and Geoinformatics, Tongji University, 1239 Siping Road, Shanghai 200092, China)

(3 Reconnaissance Academe of Three Gorges, 153 Yanjiang Street, Yichang 443003, China)

Abstract: The deforming of landslides usually expressed in horizontal and vertical direction separately. Based on the X , Y , Z coordinates from a real monitoring project. A method is proposed to build 3D model of landslides by constructing triangulated irregular network (TIN) and extruding contour lines. The tiny movement of monitoring points becomes visible by zooming movement vectors, and the whole landslide deforming was replayed using rubber-band animation techniques.

Key words: landslide; movement vector; visualization; rubber-band animation

About the first author: ZHANG Kun, lecturer, post-doctor, mainly engaged in GIS and application of computer.

E-mail: kzhang@geo.ecnu.edu.cn

(上接第 791 页)

component analysis is implemented on the compressed spectra set. Using the eigen spectral distributions as base to spanning the wide-band multi-spectral space for color representation. Results of experiments show that this newer multi-spectral space can represent and reconstruct the spectral distribution of the original color in a high accuracy.

Key words: cluster analysis; principal component analysis; color representation; wide-band multi-spectral space

About the first author: KONG Lingwang, Ph. D candidate, lecturer. Current research interests including color science and multimedia technology.

E-mail: K. lingwang@pps.whu.edu.cn