

doi: 10.3969/j.issn.1005-3026.2017.01.024

# 巷道收敛监测三维动态可视化系统开发

王运森, 李元辉, 徐 帅

(东北大学 深部金属矿山安全开采教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 结合传统巷道收敛仪与三维激光探测系统的优势,提出了一种巷道表面收敛变形的三维可视化方法,该方法利用激光扫描获取巷道点云数据,建立巷道三角形壳体模型.采用反距离加权插值算法,计算巷道表面的收敛量.利用收敛量与颜色索引对应的抛物线非线性增强算法,突出了关注范围内大的收敛变形.基于VS2010与HOOPS进行了系统的开发,实现了巷道表面监测收敛量三维云图的动态可视化显示.并在铁蛋山矿进行了实例应用,直观地展示了监测区域巷道收敛变形的危险区域与变形过程,系统满足工程人员对监测数据直观表达和可视化分析的需求.

**关键词:** 表面收敛;变形监测;数据分析;三维激光扫描;可视化

中图分类号: TD 76 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2017)01-0116-05

## Development of Three-Dimensional Dynamic Visualization System for Laneway Convergence Monitoring

WANG Yun-sen, LI Yuan-hui, XU Shuai

(Key Laboratory of Ministry of Education on Safe Mining of Deep Metal Mines, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: WANG Yun-sen, E-mail: wangyunsen@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** Combined with the advantages of traditional laneway convergence measure instrument and 3D laser scanning, a method for obtaining and presenting laneway convergence via 3D visualization was proposed. This method utilizes laser scanning point cloud data from laneway to reconstruct shell model by triangulation. The inverse distance weighted interpolation algorithm is then employed to compute the convergence of the laneway periphery. A parabolic nonlinear enhancement algorithm is further developed based on the one-to-one correspondence between the convergence and the color index, in order to highlight the more obvious convergence within the study area. The whole system was developed using VS2010 and HOOPS, which realizes the dynamic visualization of the 3D convergence contour obtained from surface monitoring. The application of the developed system in the Tiedanshan mine clearly and vividly showed the dangerous area and deformation process of laneway which satisfied the engineers' requirement for direct presentation and real-time visualization of monitoring data.

**Key words:** surface convergence; deformation monitoring; data analysis; 3D laser scanning; visualization

通过监测巷道顶板下沉、两帮移近的收敛变形,根据收敛量是否超过安全阈值,可以判断巷道变形是否影响巷道的正常使用、是否存在稳定性隐患.收敛变形监测<sup>[1-2]</sup>已被公认为是岩体工程测试的主要方法之一,测量方法从传统的接触式收敛仪到最近发展起来的非接触式激光测

量<sup>[3-5]</sup>,人们作了大量研究.提出的三维数据可视化方法<sup>[6-7]</sup>和建立的变形监测系统<sup>[8-9]</sup>,在岩土工程应用中发挥重要作用.接触式测量通过在巷道内埋设监测点,测量两点间距离的变化来监测围岩的变形量,由于仪器便宜、简单易行、数据较为可靠,一直是矿山生产监测中常用的手段,但是

收稿日期: 2015-04-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51204031,51274055); 国家科技支撑计划项目(2013BAB02B03); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(N150104007).

作者简介: 王运森(1976-),男,河南南阳人,东北大学博士后研究人员; 李元辉(1968-),男,辽宁营口市人,东北大学教授.

数据的后处理一般还是采用 excel 等半手动的处理方法. 在收敛展示上用监测点变形曲线或巷道断面变形云图来表达, 不足以直观显示真实巷道的收敛变形情况; 新型的非接触式激光测量能够全面扫描整个巷道, 形成大量的点云数据, 可以逼真再现巷道, 但是在仪器价格、测量精度、不影响井下生产等方面还有待进一步提高. 因此本文试图把两者优势结合起来, 建立一种巷道表面收敛变形方法, 在保证监测简单、数据可靠的前提下, 利用激光测量建立巷道表面模型, 空间插值技术弥补采样点数据信息的不全面, 直观动态显示收敛分布与变化趋势. 本文选用 HOOPS 三维图形引擎, 利用其面向对象的 3D 图形渲染、交互、拾取以及可视化交互编辑等功能, 以 VS2010 为开发工具、SQL server 作为系统数据库设计并开发一套巷道收敛监测三维可视化显示分析系统.

### 1 基本思路

基于激光点云及收敛监测数据, 利用 HOOPS 图形引擎壳体颜色更新 API, 在不考虑旋转、消隐、明暗处理算法和图形硬件设备的前提下, 实现三维收敛量云图的可视化动态显示, 具体实现步骤如下:

- 1) 利用 CMS 激光扫描获取被监测巷道的点云数据, 转换成大地坐标, 根据三角形生长算法, 生成用于显示收敛量三维云图的巷道几何壳体模型, 并保留三角形断面的顶点坐标, 用于后期的插值操作.
- 2) 利用全站仪获取监测点的坐标, 根据监测断面的布置形式 (见图 1, 考虑对作业生产影响, 本文选择五点式) 选择计算公式, 计算出监测点的收敛值, 形成监测收敛量原始数据.

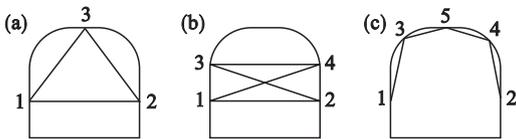


图 1 巷道收敛监测断面布置形式

Fig. 1 Section pattern of laneway convergence monitoring

(a) — 三点式; (b) — 四点式; (c) — 五点式.

3) 在时间域内, 应用线性插值算法, 对监测点的收敛值进行插值, 加密测量数据, 保证动画显示流畅; 在空间域内, 选择合适的空间插值算法, 计算巷道壳体三角形顶点的收敛量.

4) 根据三角形顶点的收敛量数值, 按照收敛

量与颜色索引对应关系, 将监测数值转换为 RGB 的色彩索引作为点云绘制的颜色值, 利用 HOOPS 的顶点颜色索引动态修改 API, 完成三维云图的绘制; 按照时间序列进行顶点颜色索引的动态修改, 并在刷新场景后形成收敛量的三维云图动态显示.

### 2 体系结构

系统由收敛仪传感器、前置服务器、数据库服务器和客户端 4 部分组成, 如图 2 所示.

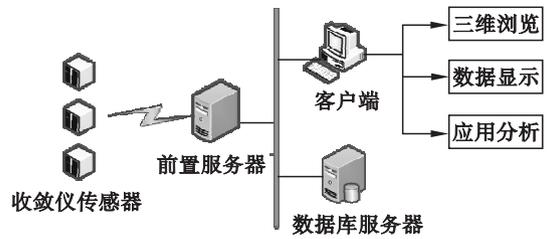


图 2 系统结构图

Fig. 2 Structure chart of system

- 1) 收敛仪传感器是系统的基础监测数据来源, 其主要部件为拉线位移传感器, 将机械位移量转换成可计量的、成线性比例的电信号.
- 2) 前置服务器位于井下, 一方面通过无线方式接收收敛仪, 采集收敛仪的监测信号并进行存储; 另一方面通过光纤局域网把数据上传到地面数据库服务器中.
- 3) 地面数据库服务器中除了存储实时监测信息外, 还存储传感器监测点的位置、点云数据等信息, 便于监测点绘制与查询、计算收敛量.
- 4) 客户端监测应用的核心是三维云图显示, 显示不同监测点的位置、巷道表面任意一点收敛值, 并实时显示收敛量云图; 同时支持监测数据的历史查询与动态云图回放.

### 3 关键算法

#### 3.1 巷道建模

将监测巷道用三维形式进行表达, 精确表示巷道的表面, 有利于增强系统的直观性和可操作性, 可以有效地分析巷道表面收敛情况. 一般利用几何实体建模的方法, 根据实测的巷道参数, 经过简化后建立长方形或者三心拱形的断面, 用拉伸的方法建立监测区域巷道的实体模型. 这种方法操作简单, 但地下巷道的构造复杂, 这种模型不能反映巷道表面细部特征, 导致由此建立的巷道收

敛数据场中的细节信息被丢失,不能真实描述巷道细部变形.三维激光扫描技术正好可以弥补这一缺点,利用 CMS 激光扫描设备,取得巷道的点云数据,转换为大地坐标后,利用三角形生长算法,建立 B-Rep 的三角形巷道壳体模型.这里没有建立实体模型的原因是本文研究巷道表面的收敛变形,壳体模型能够细致刻画巷道的表面形态,并且数据量适中,能够加速后期的数据处理与渲染速度.建立的局部巷道模型如图 3 所示.

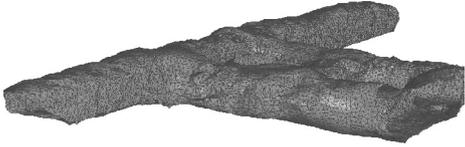


图 3 巷道表面壳体模型

Fig. 3 Shell model of the laneway surface

### 3.2 插值算法

空间插值是根据已知的空间数据估计未知空间的数据,常用于将离散点的测量数据转换为连续的数据曲面,典型算法有泰森多边形法、反距离加权法、Kriging 方法和样条插值法等,这些方法各有优缺点,没有绝对最优的空间插值方法.受地质构造等因素的影响,巷道的收敛变形在整个巷道的长度范围内一般是不相同的,监测数据采样点的分布较疏,且分布比较均匀.反距离加权法可以通过权重调整空间插值的影响程度,以圆滑的方式插值,且实现简单,因此本文选择最常用的反距离加权法作为空间内插方法.当计算一个三角形顶点收敛量时,配给的权重是一个与距离成反比的数值,所有权重的总和等于 1.根据细长结构巷道收敛测量的空间分布特点,可知监测点对数据权重的影响存在方向性,将影响区域设定为一个主轴平行于巷道轴线的椭球体,长轴为监测断面最长直径的 3 倍,短轴为巷道断面最长直径的 2 倍.收敛量的计算公式如下:

$$C(x, y, z) = \sum_{i=1}^N \left( \frac{d_i^{-p} C(x_i, y_i, z_i)}{\sum_{j=1}^N d_j^{-p}} \right). \quad (1)$$

其中: $C$  是监测点的收敛量; $x, y, z$  是待计算点的坐标; $x_i, y_i, z_i$  是椭球体内的监测点的坐标; $d_i, d_j$  是监测点与待计算点的距离; $p$  为权重减少的速度.

对于相同监测点两个监测时间间隔内的插值,采用线性插值方法计算.经过空间和时间的插值可以把巷道表面 4 维时空的收敛量全部计算出

来.本文用 C++ 编制了插值程序,实验证明,应用该方法进行插值计算的速度可满足巷道收敛变形三维可视化动态显示的要求.

### 3.3 数据存储

数据库是模型构建和收敛监测结果评定预测的基础数据源,为了便于对整个巷道监测数据进行组织和管理,建立监测点表,然后在表中建立监测点所在截面、位置描述( $x, y, z$ )、类型、序号等字段.对于收敛量,虽然巷道的收敛变形为矢量数据,但是人们最关心是最大收敛量,为了计算处理简便,本文把监测点的收敛值换算为垂直于巷道表面的最大收敛值,其物理结构如下:流水号、传感器编号、日期时间、收敛值、一级预警上限、二级预警上限;巷道的点云数据以 XYZ 文件格式存储.建立的巷道壳体模型以 HSF 文件格式存储.

### 3.4 收敛云图显示

建立一个颜色索引列表,索引取值范围为  $[0, N]$ ,设巷道收敛量最大值为  $\max$ ,最小值为  $\min$ ,则收敛数据与颜色索引的转换关系为

$$I(x, y, z) = N \left( \frac{C(x, y, z) - \min}{\max - \min} \right). \quad (2)$$

根据式(2)把监测收敛量数据进行颜色索引空间的映射,则整个收敛数据被映射到  $[0, N]$  的颜色索引区间内,颜色索引最小值对应收敛数据最小值,颜色索引最大值对应收敛数据最大值.

在矿山巷道的变形监测中,收敛变形量的受关注程度是不相同的.对于微小的收敛变形,一般不会影响正常生产;对于较大的变形,往往预示着存在某种程度的危险,应该引起人们的注意.要突出这种大的数值,最典型的是分段线性变换法,该方法通过分段线性变换公式可选择性地增大收敛变形大的颜色索引范围.但是该变换需要确定分段阈值才能达到较好的效果,且在分段连接处会引起颜色索引的不连续变化.因此本文提出一种抛物线非线性变换颜色映射算法来突出大变形,使颜色索引和变形量的平方成正比关系,计算公式见式(3).实验结果表明该算法能有效地增大收敛量的颜色索引范围,颜色变化平滑,且对小变形的影响不大.

$$I(x, y, z) = N \left( \frac{C(x, y, z) - \min}{\max - \min} \right)^2. \quad (3)$$

云图显示具体实现步骤为①统计收敛量的最大值和最小值,确定数据范围的上、下界;②建立 RGB 色彩编码索引表;③计算所有三角形顶点的收敛量数值所对应的 RGB 色彩索引编码.遍历所有巷道壳体的三角形,计算出所有的三角形顶

点的颜色索引值后,调用 HOOPS 的批量修改壳体颜色索引的 API(HC\_MSet\_Vertex\_Colors\_By\_FIndex),利用 HOOPS 封装下的 OpenGL 和 Direct3D 功能包完成三维点云的显示。

### 3.5 动画显示

尽管巷道收敛变形缓慢,但它是一个动态过程,用三维动画可以直观地表现该过程。根据监测历史数据,利用 3.2 节确定的插值算法,计算同一时刻巷道表面三角形顶点的颜色值,利用 HOOPS 壳体批量修改顶点的颜色索引,在 timer 事件中进行窗口更新,达到收敛变形的三维动画显示的目的。顶点颜色索引需要在动画过程之前计算完毕,这样不占用显示动画的 CPU 时间,能够确保动画的平滑显示。由于变形缓慢,在动画显示时把时间轴进行缩短,加速显示区间的收敛变形。

另外本文直接调用 HOOPS 的底层函数,进一步加快了动画的显示速度,实验效果如图 4 所示,示例代码如下:

```
for(int j=0;j<100;j++) {
    HC_MSet_Vertex_Colors_By_FIndex
    (pShellVertexData->GetKey(), "faces", 0,
    total_pts, findices);
    Update();
    for(int i=0;i<total_pts+data_cycles;
    i++) {
        findices[i] = findices[i] + 0.1;
        if(findices[i] > 12) findices[i] = 12;
    }
}
```

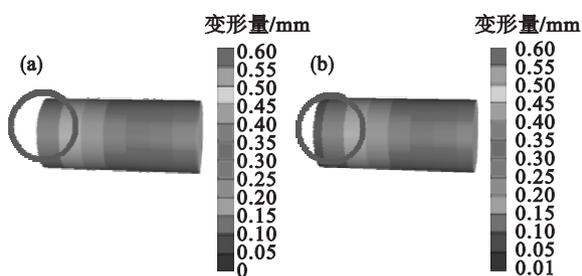


图 4 三维收敛云图动画显示

Fig. 4 Animation of 3D convergence cloud picture

(a)—时间点 1; (b)—时间点 2.

## 4 软件系统功能设计

根据巷道收敛监测的处理流程及功能需求,进行系统功能模块设计,系统总体功能由工程管理、数据输入、基本操作、数据显示分析 4 部分组

成,总体功能框架如图 5 所示。

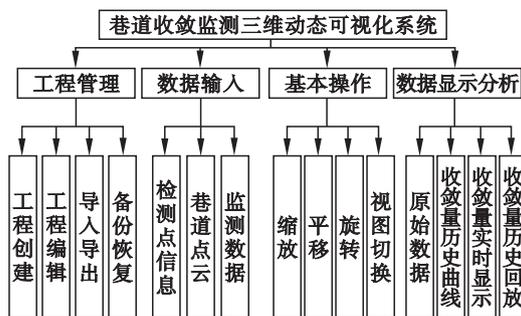


图 5 巷道收敛监测三维动态可视化系统功能

Fig. 5 Function of 3D dynamic visualization system for laneway convergence monitoring

## 5 工程应用

铁蛋山矿位于辽宁北票市城区北东方向 50 km 处,矿体赋存条件复杂、结构破碎,围岩抗压强度低、变形大、来压快、遇水极易破碎膨胀,导致其矿山沿脉运输巷道的稳定性问题十分突出,巷道施工完毕后不久即产生开裂变形,进而产生片帮、冒落和沉降变形,严重影响了矿山的开采和运输。为了弄清巷道变形区域、大小及分布规律,项目组在 +35 m 水平和 +20 m 水平位置进行巷道收敛监测,历时 3 个月时间,利用本系统获得了 8 个断面 40 个监测点共 7 万多条收敛记录。

系统的部分功能应用展示如图 6、图 7 所示,通过给定任意巷道断面点或时间范围,可显示收敛量三维云图和查询收敛数据信息,并实现收敛量随时间变化过程的实时动态显示。通过图 6 可以观测出在第 8 监测断面处巷道的收敛量由小到大的动态发展过程,突出展现了存在大变形的区域及被监测巷道的变形规律,点击巷道的任意点,图 7 可以显示出该点的收敛量历史变化曲线,进而分析巷道收敛的变化趋势,根据巷道变形的安全阈值,在第 8 监测断面附近及巷道交叉处进行支护。软件为巷道支护措施的选择提供直观定量

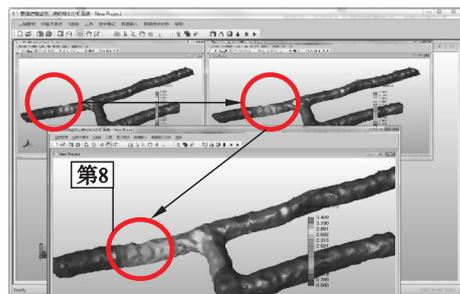


图 6 铁蛋山矿收敛量三维动态云图

Fig. 6 Dynamic 3D convergence contour of Tiedanshan mine

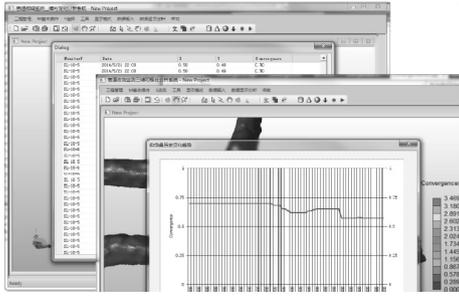


图 7 监测点收敛量查询与历史曲线

Fig. 7 Convergence query and history curves of monitoring points

化的支撑,取得了较好的工程应用。

## 6 结 论

1) 提出传统接触测量与激光三维测量相结合进行收敛数据三维动态显示的方法,可以直观地展示巷道收敛变形的过程,从宏观上把握巷道整体收敛变形的趋势。

2) 针对巷道的几何特点,改进了收敛量与颜色索引映射的线性对应算法,提出了抛物线非线性变换法来突出大变形的颜色映射算法,该方法能够平滑地处理巷道收敛量的三维云图,使各颜色层片之间过渡自然。

3) 系统在铁蛋山巷道监测项目进行了工程应用,显示了监测区域内收敛变形量较大的位置,揭示巷道变形危险区域,满足了工程人员对收敛监测数据直观表达和实时动态可视化分析的需求,为巷道支护决策提供了依据。

### 参考文献:

[1] 潘家旭. 巷道收敛观测技术的发展与展望[J]. 采矿技术, 2014, 14(3): 103 - 105, 115.  
(Pan Jia-xu. Development and forecast of tunnel convergence monitoring technology[J]. *Mining Technology*, 2014, 14(3): 103 - 105, 115.)

[2] 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): 2188 - 2191, 2196.  
(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): 2188 - 2191, 2196.)

[3] 谢雄耀,卢晓智,田海洋,等. 基于地面三维激光扫描技术的隧道全断面变形测量方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(11): 2214 - 2224.  
(Xie Xiong-yao, Lu Xiao-zhi, Tian Hai-yang, et al. Development of a modeling method for monitoring tunnel deformation based on terrestrial 3D laser scanning[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(11): 2214 - 2224.)

[4] 荆洪迪,李元辉,张忠辉,等. 基于三维激光扫描的岩体结构面信息提取[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2015, 36(2): 280 - 283.  
(Jing Hong-di, Li Yuan-hui, Zhang Zhong-hui, et al. Extraction of joint information of rock masses based on 3D laser scanning technology[J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)*, 2015, 36(2): 280 - 283.)

[5] Fardina N, Feng Q, Stephansson O. Application of a new in situ 3D laser scanner to study the scale affection the rock joint surface[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2004, 41: 329 - 335.

[6] 李占利,马巨鹏,王博辉. 一种色彩渐进的矿井监测数据三维可视化方法[J]. 计算机工程, 2012, 38(20): 212 - 214, 223.  
(Li Zhan-li, Ma Ju-peng, Wang Bo-hui. A color gradual 3D visualization method for mine monitoring data[J]. *Computer Engineering*, 2012, 38(20): 212 - 214, 223.)

[7] Lavorante L P, Ebert H D. Tensor3D: a computer graphics program to simulate 3D real-time deformation and visualization of geometric bodies[J]. *Computers & Geosciences*, 2008, 34(7): 738 - 753.

[8] Hsieh Y M, Lu Y S. Visualization system for field monitoring data and its effectiveness[J]. *Automation in Construction*, 2012, 26: 54 - 68.

[9] Akula M, Lipman R R, Franaszek M, et al. Real-time drill monitoring and control using building information models augmented with 3D imaging data[J]. *Automation in Construction*, 2013, 36: 1 - 15.