

三维激光扫描技术在采动区房屋变形监测中的应用

戴华阳, 廉旭刚, 陈炎, 蔡音飞, 刘义新

(中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083)

Study of the Deformation of Houses Induce by Mining Based on 3D Laser Scanning

DAI Huayang, LIAN Xugang, CHEN Yan, CAI Yinfei, LIU Yixin

摘要: 基于三维激光扫描技术, 提出应用房屋特征点提取采动区房屋移动变形的办法, 并通过误差分析理论, 评价三维激光扫描直接获取数据与间接计算数据的精度。结果显示其精度能满足房屋移动变形监测要求。应用三维激光扫描数据, 分析采动区房屋移动变形规律, 对村庄房屋下开采的安全开采具有指导意义。

关键词: 三维激光扫描; 特征点; 采动影响; 房屋移动变形

一、引言

随着煤炭资源的大量开采, 村庄下开采已成为煤炭企业面临的问题。地下煤层引起地表发生移动变形, 建(构)筑物等发生破坏。通过何种测量或调查手段来评估建筑物的破坏程度, 许多学者对此进行了研究^[1-5]。主要方法有: ① 采用钢尺等描述房屋裂缝状态; ② 在建筑物布设观测点, 采用全站仪与水准仪精确描述移动变形量。建筑物破坏程度的传统量测方法均为局部或者离散点的监测, 而通过三维激光扫描仪监测建筑物开采前后移动变形, 所获得的大面积、连续的点云数据, 则能整体、细致地描述建筑物的移动变形。

二、采动区地质采矿条件

采动工作面走向长为 778 m, 倾斜长为 243 m, 工作面开采深度为 450 ~ 500 m, 松散层平均厚度约为 300 m, 可采储量为 63.69 万 t, 煤层倾角为 6° ~ 14°, 平均为 10°, 平均采厚为 2.6 m。采煤方法为后退式走向长壁一次采全高综合机械化回采, 顶板全部垮落。

村庄与工作面的井上下对照关系如图 1 所示, 工作面实际走向开采长度为 325 m。村庄大部分房屋位于采空区内。三维激光扫描重点监测房屋 A、B、C 分别位于采空区外边缘、采空区中部、采空区内边缘。

三、三维激光扫描获取房屋移动变形

基于三维激光扫描的特点, 笔者采用 Trimble GX

三维激光扫描仪对研究房屋分别在工作面开采前后进行了扫描。通过三维激光扫描获取房屋的点云, 分析开采前后房屋的移动变形。房屋的移动变形包括绝对变形和相对变形, 此处绝对变形是指房屋或者道路相对同一个坐标系, 某一特征点开采前后在某一个方向上的位移; 而相对变形是指房屋基于其自身某一点开采前后墙体相对的压缩、拉伸或倾斜。

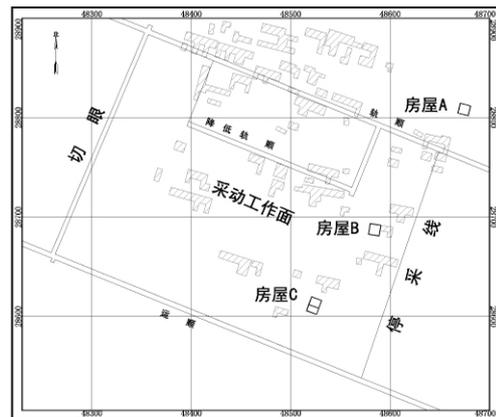


图 1 房屋与工作面井上下对照图

1. 房屋移动变形特征点移动变形的提取

国内外许多学者在三维激光扫描特征点、线等的判别方面作了大量研究^[6-9], 并取得了许多成果。这些算法及成果在同一阶段的扫描对象特征提取上具有较好的效果, 而对于不同阶段扫描对象特征的匹配还未进行深入的研究。笔者通过利用房屋角点这一显著的特征, 对开采前后的同名特征点进行研究。

收稿日期: 2010-12-01

基金项目: “十一五”国家科技支撑项目(2007BAK28B03); 国家自然科学基金项目(50974122)

作者简介: 戴华阳(1964—), 男, 湖南湘阴人, 教授, 主要研究方向为开采沉陷与“三下”采煤、大地测量学与测量工程以及土地复垦。

开采前后同名特征点的自动识别算法较为复杂,笔者采用手动量取同名特征点的绝对变形量。为减小手动量取的误差,在三维激光扫描过程中,加大了特征点区域的点云密度,同时在量取绝对变形过程中,采用多次量取平均值的方法。图2为房屋C开采前后三维激光扫描云图,以房屋角点作为特征点,量取了对应点相对移动变形与对应边绝对长度,以此方法获得了房屋A、B、C原始特征点移动数据,如表1所示。

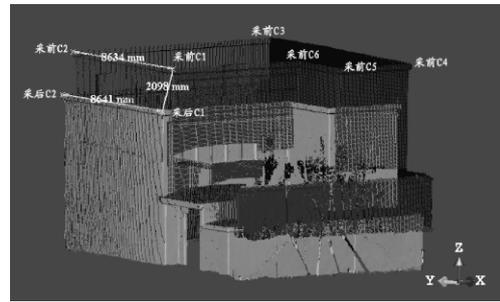


图2 开采前后房屋C扫描云图及特征点

表1 房屋A、B、C特征点移动变形量

序号	点号	X方向位移 U_x/mm	Y方向移动 U_y/mm	下沉 W/mm	采前间距 l_0/mm	采后间距 l_1/mm	水平变形 $\varepsilon/(mm/m)$	倾斜 $i/(mm/m)$
1	a_1	287	285	384	10 168	10 172	0.4	-5.3
2	a_2	288	301	330	10 823	10 832	0.8	-3.5
3	a_3	292	274	292	9 985	9 985	0.0	2.9
4	a_4	294	309	321	10 911	10 909	-0.2	5.8
5	b_1	248	520	1 750	9 821	9 831	1.0	-7.7
6	b_2	261	545	1 674	10 759	10 760	0.1	-2.2
7	b_3	248	546	1 650	9 845	9 830	-1.5	4.4
8	b_4	231	544	1 693	10 767	10 776	0.8	5.3
9	c_1	492	124	1 984	8 639	8 648	-2.0	27.6
10	c_2	593	101	2 220	10 727	10 732	0.5	-21.1
11	c_3	513	129	1 994	12 012	12 011	-0.1	-9.8
12	c_4	485	97	1 876	3 763	3 774	2.9	15.7
13	c_5	494	132	1 935	3 521	3 530	2.6	8.0
14	c_6	484	111	1 963	6 971	6 952	-2.7	3.0

说明: $U_x、U_y、W、l_0、l_1$ 为特征点量取数据,量取3次。 $\varepsilon、i$ 为间接计算数据。

2. 精度评定

在各移动量的获取过程中,各点的读取中误差为

$$m_{d_k} = \pm \sqrt{\frac{[\Delta\Delta]}{n_k - 1}} = \pm \sqrt{\frac{[\Delta\Delta]}{2}}$$

计算得各移动量各点中误差如表2所示。 $U_x、U_y、W、l_0、l_1$ 均为三维激光扫描云图量取数据,属于等精度观测,应具有相同的读取中误差 m_d

$$m_d = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n m_{d_k} = \frac{1}{14 \times 5} \sum_{k=1}^{14 \times 5} m_{d_k} = \pm 3.9 \text{ mm}$$

水平变形、倾斜均为间接计算得到,其计算及精度评定公式如下。

水平变形计算公式为

$$\varepsilon = \frac{l_1 - l_0}{l_0} = \frac{l_1}{l_0} - 1$$

水平变形误差传播计算公式为

$$d\varepsilon = \frac{\partial \varepsilon}{\partial l_1} dl_1 + \frac{\partial \varepsilon}{\partial l_0} dl_0$$

$$m_\varepsilon^2 = \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial l_1}\right)^2 dl_1^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial l_0}\right)^2 dl_0^2 = \left(\frac{l_1^2}{l_0^4} + \frac{1}{l_0^2}\right) \cdot m_d^2$$

水平变形中误差计算公式为

$$m_\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{l_1^2}{l_0^4} + \frac{1}{l_0^2}\right)} \cdot m_d$$

倾斜计算公式为

$$i = \frac{W_k - W_{k-1}}{l_0}$$

倾斜误差传播计算公式为

$$di = \frac{\partial i}{\partial W_k} dW_k + \frac{\partial i}{\partial W_{k-1}} dW_{k-1} + \frac{\partial i}{\partial l_0} dl_0$$

$$m_i^2 = \left(\frac{\partial i}{\partial W_k}\right)^2 \cdot m_{W_k}^2 + \left(\frac{\partial i}{\partial W_{k-1}}\right)^2 \cdot m_{W_{k-1}}^2 + \left(\frac{\partial i}{\partial l_0}\right)^2 \cdot m_{l_0}^2 = \left(\frac{1}{l_0}\right)^2 \cdot m_{W_k}^2 + \left(-\frac{1}{l_0}\right)^2 \cdot m_{W_{k-1}}^2 + \left(\frac{W_k - W_{k-1}}{l_0^2}\right)^2 \cdot m_{l_0}^2$$

倾斜中误差计算公式为

$$m_i = \sqrt{\frac{2}{l_0^2} + \frac{(W_k - W_{k-1})^2}{l_0^4}} \cdot m_d$$

水平变形、倾斜计算数据如表1所示,中误差如表2所示。

表2 房屋A、B、C各移动变量量中误差

序号	点号	m_{U_X}/mm	m_{U_Y}/mm	m_W/mm	m_{l_0}/mm	m_{l_1}/mm	$m_\varepsilon/(\text{mm/m})$	$m_i/(\text{mm/m})$
1	a_1	± 2.4	± 2.6	± 1.0	± 3.0	± 3.3	± 2.1	± 0.5
2	a_2	± 3.6	± 3.8	± 4.0	± 2.3	± 2.6	± 1.4	± 0.5
3	a_3	± 4.4	± 1.9	± 3.3	± 2.4	± 3.5	± 1.3	± 0.6
4	a_4	± 3.3	± 3.4	± 3.5	± 5.5	± 1.9	± 2.1	± 0.5
5	b_1	± 4.1	± 2.9	± 3.3	± 3.8	± 1.5	± 3.1	± 0.6
6	b_2	± 2.3	± 9.2	± 3.8	± 2.2	± 3.7	± 1.0	± 0.5
7	b_3	± 1.4	± 6.2	± 2.8	± 3.7	± 6.1	± 1.8	± 0.6
8	b_4	± 1.9	± 3.7	± 2.6	± 5.2	± 3.7	± 2.0	± 0.5
9	c_1	± 4.6	± 6.3	± 1.6	± 3.3	± 3.9	± 12.6	± 0.6
10	c_2	± 4.6	± 10.2	± 4.6	± 3.8	± 4.7	± 7.7	± 0.5
11	c_3	± 4.1	± 7.2	± 1.4	± 2.2	± 3.9	± 3.2	± 0.5
12	c_4	± 4.7	± 7.7	± 2.7	± 3.2	± 3.6	± 16.3	± 1.5
13	c_5	± 1.6	± 5.7	± 3.7	± 4.8	± 6.5	± 8.9	± 1.6
14	c_6	± 5.2	± 7.1	± 3.8	± 3.6	± 4.2	± 1.9	± 0.8

说明: U_X 、 U_Y 、 W 、 l_0 、 l_1 为等精度观测,量取中误差同为 m_d 。 ε 、 i 为间接计算数据,按照误差传播理论计算。

四、采动房屋移动变形规律分析

房屋A整体向西南移动并伴随下沉,总体的平均矢量位移为530 mm。房屋整体向南移动290 mm,向西移动292 mm;房屋整体下沉332 mm,房屋最大下沉384 mm;房屋整体向西南倾斜,最大倾斜7.5 mm/m;水平变形整体较小,最大0.8 mm/m。房屋B以下沉为主,水平移动较小,总体的平均矢量位移为1793 mm。整体向南移动247 mm,向西移动539 mm;房屋整体下沉1692 mm,房屋最大下沉1752 mm;最大倾斜6.9 mm/m;水平变形整体较小,最大-1.5 mm/m。房屋C以下沉为主,水平移动较小,总体的平均矢量位移为2063 mm。房屋整体向北移动510 mm,向西移动116 mm;房屋整体下沉1995 mm,房屋最大下沉2220 mm;房屋整体向西北倾斜,最大倾斜为21.5 mm/m;水平变形较小,最大压缩变形2.7 mm/m,最大拉伸变形2.9 mm/m。

结合房屋与采空区中心的位置关系进行分析可知,距离采空区中心越近,房屋整体下沉越大;房屋整体向采空区中心移动,且位于采空区中部及内部边缘的房屋移动较大;房屋整体向采空区中心倾斜,采空区边缘房屋倾斜较大。经实际房屋破坏调查,该房屋未发生明显破坏,这与三维激光扫描数据显示的房屋水平变形较小的结论是一致的。

五、结论

1) 应用三维激光扫描技术,提出了通过房屋特征点提取,计算采动区房屋移动变形的办法。实测表明,通过房屋特征点提取能够获取较高精度的房

屋移动变形值,能满足地表沉陷监测要求。

2) 三维激光扫描数据揭示了采动区房屋的变形特征,距离采空区中心越近,房屋移动变形越大,房屋整体向采空区中心移动与倾斜。三维激光扫描数据为分析房屋变形与地表沉陷的关系提供了可靠的依据。

参考文献:

- [1] 许能生,黄国斌,吴戈. 开采影响评价与开采损害鉴定[J]. 矿山压力与顶板管理,2001(1):57-58.
- [2] 黄冬梅,常西坤,聂文志,等. 唐口煤矿村庄群下开采损害评价[J]. 山东科技大学学报:自然科学版,2009(4):30-34.
- [3] 刘继岩,廉旭刚,刘吉波,等. 村庄房屋下开采损害预计及对策研究[J]. 煤矿安全,2010(2):21-24.
- [4] 谭志祥,邓喀中. 煤矿开采损害技术鉴定方法[J]. 煤矿安全,2006(5):29-31.
- [5] 王金庄,邢安仕. 判别煤矿开采损害的理论与实践[J]. 矿山测量,1998(4):7-11.
- [6] 向娟,李钢,黄承亮,等. 三维激光扫描单点定位精度评定方法研究[J]. 海洋测绘,2009(3):68-70.
- [7] 戴玉成,张爱武. 三维激光扫描数据快速配准算法研究[J]. 测绘通报,2010(6):8-11.
- [8] 丁延辉,邱冬炜,王凤利,等. 基于地面三维激光扫描数据的建筑物三维模型重建[J]. 测绘通报,2010(3):55-57.
- [9] 施贵刚,王峰,程效军,等. 地面三维激光扫描多视点云配准设站最佳次数的研究[J]. 大连海事大学学报,2008(3):64-66.