第 31卷第 3期　　煤　炭　学　报　　Vol 31　No. 3
2006年　6月　　JOURNAL OF CHINA COAL SOCIETY　　June　2006

文章编号: 0253 - 9993(2006)03 - 0292 - 04

相似材料模型变形测量中的数字近景摄影测量监测技术

杨化超, 邓喀中, 郭广礼

(中国矿业大学 环境与测绘学院, 江苏 徐州　221008)

摘　要: 利用高分辨率数字相机获取模型不同时刻的数字立体影像像对, 通过模型上布设的像控点和测点, 利用直接线性变换提供的概略初值, 由理论严密的自检校光束法平差完成高精度的平差计算及相似材料模型的变形测量. 试验表明: 该方法可以克服传统模型测量方法的缺点, 具有测量精度高、信息容量大、方便易行等优点, 可以实现实时观测和以影像方式记录模型破坏形态.

关键词: 变形测量; 数字近景摄影测量; 直接线性变换; 自检校光束法平差

中图分类号: TD173.4　　**文献标识码**: A

Monitoring technique for deformation measurement of similar material model with digital close-range photogrammetry

YANG Hua-chao, DENG Ka-zhong, GUO Guang-li

(School of Environmental and Spatial Informatics, China University of Mining & Technology, Xuzhou　221008, China)

Abstract: Digital stereo image pairs of similar material model were captured with high resolution digital CCD camera. Approximate initial values were provided with direct linear transformation (DLT) method using image control points and survey points distributed on similar material model. Then completed high accuracy computing using these points through the method of self-calibration with bundle adjustment, and deformation measurement of similar material model. Tests demonstrate that this method can cope with some disadvantages of traditional model deformation method and has some unique advantages such as high accuracy, large quantities of information, feasible operating, real monitoring, recording destruction morphology with image.

Key words: deformation measurement; digital close-range photogrammetry; direct linear transformation; self-calibration with bundle adjustment

位移测量和裂缝形态变化是相似材料模型试验的主要观测内容, 是进一步研究模型力学行为的基础. 传统的模型观测方法通常是物理测量或机械测量方法, 存在观测装置或传感器安装麻烦、工作量大、采样点有限等缺点[1]. 数码相机数字化近景摄影测量是从摄影测量中逐步发展起来的一种非接触式 3维测量方法; 数码相机能直接提供内、外方位元素; 以数字方式存储影像, 可以通过计算机直接从相机上下载图像, 在计算机上进行内业数据处理. 通过非接触方式, 综合运用数字图像处理、精密测量等技术对目标进行 2维或者 3维坐标的高精度量测. 本文将数字相机和数字近景摄影测量技术相结合用于相似材料模型的

收稿日期: 2005 - 06 - 10
基金项目: 中国矿业大学青年科研基金资助项目 (2005A030)
作者简介: 杨化超 (1977 -), 男, 安徽宿州人, 硕士. E - mail: huachao - yang@163.com

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

变形测量. 该方法克服了传统模型测量方法的缺点，具有测量精度高、信息容量大、方便易行，可以实现实时观测和以影像方式记录模型破坏形态，自动化程度高.

1　试验概况

结合某大块体地质力学相似材料模型，采用数码相机数字化近景摄影测量技术量测模型变形的可行性. 铺设的相似材料模型为平面应变模型，其尺寸为宽 240 cm、高 180 cm、厚 20 cm. 岩体地应力由模型材料的自重来模拟. 模拟的主要岩类为矿体 D，围岩 $C_F—Q_2$ 及 $C_F—C_2$，断层 F_3，F_{10}，F_4，如图 1所示. 根据预测模型位移变化情况及地质模型层位结构、断层构造的分布情况，在相似材料模型体的正面及模型台两侧钢结构柱上共布置了 42个测量标志点，其中两侧模型钢结构柱上的测量标志点作为像控点和检查点使用. 测量标志点的标志为含 2个正对黑色三角形的矩形白色小纸片，并在其上对测点进行统一编号. 像控点的坐标采用精密大地测量方法精确测定. 在模型附近的稳定位置建立一相对坐标系，直接从局部坐标系的原点测定测量标志点中心的 3维坐标. 像控点和检查点的平面测定精度为 ±0.24 mm.

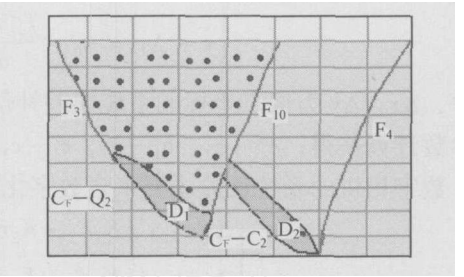


图 1　平面控制格网和监测点布设

Fig. 1　Layout of plane control grid and survey points distribution

试验使用的数字相机像素面阵为 2 592 ×1 944. 像素大小约为 3 μm ×3 μm. 摄影主距约为 3 m，针对相似材料模型模拟开采过程中的不同时刻，在数字相机定焦模式下进行多次观测，影像重叠度为 100%，对不同时刻的多组数字立体影像像对进行解析计算，以便分析模型不同时刻的位移情况和变形过程.

2　数字摄影测量处理

为了进行高精度的计算，必须采用理论严密的自检校光线束法进行 3维坐标的计算. 由于光线束采用迭代方法，需要较为精确的初始值，直接线性变换可以提供较为精确的初值. 所以，计算过程应主要包括直接线性变换和严密的自检校光束法平差计算过程.

2.1　直接线性变换

直接线性变换 (DLT) 是建立像点坐标仪坐标与物方点空间坐标之间直接的线性关系的算法，它不需要预先测定影像的内、外方位元素，而利用实际测定的像控点 3维坐标通过建立数学模型计算出内、外方位元素. 尤其适用于非量测数码相机获取的数字影像[2,3]. 直接线性变换的基本公式为

$$x = \frac{L_1X + L_2Y + L_3Z + L_4}{L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1},\quad y = \frac{L_5X + L_6Y + L_7Z + L_8}{L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1}, \tag{1}$$

式中，x, y为影像坐标；L_1～L_{11}为影像坐标与物方坐标之间的变换参数；X, Y, Z为物方坐标.

如果已知 6个物方控制点及其对应的影像坐标，即可按式 (1) 解出 L_1～L_{11}. 内、外方位元素的值由 L_1～L_{11}求得[4]. 求出 11个直接线性变换参数后，按式 (1) 求解待定点物方空间坐标.

为解出 X, Y, Z三个未知数，至少应列出 3个方程，即至少应拍摄 2张像片. 2张像片的 L系数分别为 L_1, L_2, …, L_{11}及 L'_1, L'_2, …, L'_{11}. 当略去 1个方程式时，解 X, Y, Z的方程组为

$$\begin{bmatrix} L_1 + xL_9 & L_2 + xL_{10} & L_3 + xL_{11} \\ L_5 + yL_9 & L_6 + yL_{10} & L_7 + yL_{11} \\ L'_1 + xL'_9 & L'_2 + xL'_{10} & L'_3 + xL'_{11} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_4 + x \\ L_8 + y \\ L'_4 + x \end{bmatrix} = 0. \tag{2}$$

当已知立体像对中 1对同名像点的坐标 (x, y) 和 (x', y') 时，便可以按式 (2) 计算出其对应的物空间坐标作为光线束法平差计算物空间坐标的初始值.

2.2　光线束法平差

为了获得高精度的近景摄影测量结果，平差系统应采用严密的数学模型，即

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$\begin{cases} x + \Delta x = x_0 - \dfrac{f_x [a_1 (X - X_S) + b_1 (Y - Y_S) + c_1 (Z - Z_S)]}{a_3 (X - X_S) + b_3 (Y - Y_S) + c_3 (Z - Z_S)}, \\ y + \Delta y = y_0 - \dfrac{f_y [a_2 (X - X_S) + b_2 (Y - Y_S) + c_2 (Z - Z_S)]}{a_3 (X - X_S) + b_3 (Y - Y_S) + c_3 (Z - Z_S)}, \end{cases} \tag{3}$$

式中，Δx，Δy为像点坐标的系统误差补偿；x_0，y_0，f_x，f_y为内、外方位元素的初值，由直接线性变换结果参数计算获得；a_1～a_3，b_1～b_3，c_1～c_3为相机的 9个值旋转矩阵元素；X_S，Y_S，Z_S为相机的位置.

数字相机的系统误差主要来自数字化影像变形和数字相机的镜头畸变，表达式为

$$\begin{cases} \Delta x = x'(K_1 r^2 + K_2 r^4) + P_1 (r^2 + 2x'^2) + 2P_2 x' y', \\ \Delta y = y'(K_1 r^2 + K_2 r^4) + 2P_1 x' y' + P_2 (r^2 + 2y'^2) + A_1 x' + A_2 y', \end{cases} \tag{4}$$

式中，$x' = x - x_0$；$y' = y - y_0$；K_1，K_2为径向畸变改正系数；$r^2 = x'^2 + y'^2$；P_1，P_2为切向畸变改正系数；A_1，A_2为用于补偿数字化影像变形的仿射变换参数.

用泰勒级数将式 (3) 线性化即可得到自检校光束法平差误差方程式为

$$\begin{cases} v_x = \dfrac{\partial x}{\partial X_S}\Delta X_S + \dfrac{\partial x}{\partial Y_S}\Delta Y_S + \dfrac{\partial x}{\partial Z_S}\Delta Z_S + \dfrac{\partial x}{\partial \varphi}\Delta\varphi + \dfrac{\partial x}{\partial \omega}\Delta\omega + \dfrac{\partial x}{\partial \kappa}\Delta\kappa + \dfrac{\partial x}{\partial X}\Delta X + \dfrac{\partial x}{\partial Y}\Delta Y + \dfrac{\partial x}{\partial Z}\Delta Z + \\ \qquad \dfrac{\partial x}{\partial f}\Delta f + \dfrac{\partial x}{\partial x_0}\Delta x_0 + \dfrac{\partial x}{\partial y_0}\Delta y_0 + \dfrac{\partial x}{\partial K_1}\Delta K_1 + \dfrac{\partial x}{\partial K_2}\Delta K_2 + \dfrac{\partial x}{\partial P_1}\Delta P_1 + \dfrac{\partial x}{\partial P_2}\Delta P_2 - l_x, \\ v_y = \dfrac{\partial y}{\partial X_S}\Delta X_S + \dfrac{\partial y}{\partial Y_S}\Delta Y_S + \dfrac{\partial y}{\partial Z_S}\Delta Z_S + \dfrac{\partial y}{\partial \varphi}\Delta\varphi + \dfrac{\partial y}{\partial \omega}\Delta\omega + \dfrac{\partial y}{\partial \kappa}\Delta\kappa + \dfrac{\partial y}{\partial X}\Delta X + \dfrac{\partial y}{\partial Y}\Delta Y + \dfrac{\partial y}{\partial Z}\Delta Z + \\ \qquad \dfrac{\partial y}{\partial f}\Delta f + \dfrac{\partial y}{\partial x_0}\Delta x_0 + \dfrac{\partial y}{\partial y_0}\Delta y_0 + \dfrac{\partial y}{\partial K_1}\Delta K_1 + \dfrac{\partial y}{\partial K_2}\Delta K_2 + \dfrac{\partial y}{\partial P_1}\Delta P_1 + \dfrac{\partial y}{\partial P_2}\Delta P_2 - l_y. \end{cases} \tag{5}$$

为了实现以上算法，在 Windows系统上以 VC^{++}语言开发了数字近景摄影测量像片解析处理系统，可以根据像控点数据及影像的像素坐标 (立体像对中同名像点坐标行、列号)，利用 DLT和自检校光束法平差算法计算物点的空间坐标.

3 试验结果及分析

3.1 精度估算

数字近景摄影测量中物空间坐标的计算精度，主要受摄影基线布设和摄影方式、像控点数量和布设形式及像控点点位实测精度、CCD相机几何分辨率、实际成像范围、数字影像上像控点影像坐标量测精度等影响. 对于非量测相机而言，由于采用了任意交向摄影方式，摄影机主距无法精确测定，物空间坐标测定精度难以用量测相机常用的正直摄影、等偏摄影或交向摄影估算公式来估算[5,6]. 为了评价数字近景摄影测量方法对测点坐标的测定精度，采用设计坐标与解算坐标对比的方式，即像控点和检查点的实测坐标 (当作真值) 与自检校光束平差算法解算出来的坐标 (当作观测值) 对其进行误差分析. 由于每组影像均是独立解算的，因此，可以认为每组影像的解算精度相同并将其看作是本次实验近景摄影测量的测定精度. 利用在模拟开挖过程拍摄到的一个像对计算检查点的解算中误差见表 1 (采用像控点 9个).

表 1 数字近景摄影测量的精度分析

Table 1 Precision analysis of digital close-range photogrammetry

检查点	实测坐标 / m		解算坐标 /m		解算误差 /mm	
	X	Y	X	Y	ΔX	ΔY
2	0.012	1.608	0.012 28	1.608 59	0.28	0.59
4	0.009	0.803	0.009 23	0.803 31	0.23	0.31
10	1.206	0.016	1.206 39	0.016 47	0.39	0.47
16	3.209	0.607	3.209 46	0.607 32	0.46	0.32
19	3.208	1.801	3.208 43	1.801 52	0.43	0.52

综合所有检查点，按中误差解算公式 $m = \pm\sqrt{[\Delta\Delta]/n}$ 计算得 $m_X = \pm 0.35$ mm，$m_Y = \pm 0.44$ mm，则可以得出本次试验测点坐标的平面测定精度 $m_{XY} = \pm 0.56$ mm. 这一误差反映了所有因素对物点坐标测定精度的综合影响. 试验中只考虑 X，Y二维坐标.

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

对于矿山岩层和地表移动研究的相似材料模型，其模型比例尺通常不小于 1/200，则相当于观测点的绝对测量中误差不超过 40 mm. 由表 1的分析可得，数字近景摄影测量的点位测定精度完全可以满足相似材料模型变形观测的精度要求.

3.2 变形分析

根据实际的采矿顺序及典型地质剖面情况和主要的研究目的，模拟开挖步骤共分 9步进行，每完成一次开挖，就获得模型的一组影像数据，并进行解析处理获得测点的平面坐标. 在 9步开挖过程完成后，绘出测点总的位移矢量图，如图 2所示. 从近景摄影测量所获得的平面应变相似材料模型位移场图可以看出，整个位移场的位移方向均指向采空区，垂直位移大致由上往下逐渐增大，由两侧往采空区中间也逐渐由小变大；水平位移大致由上往下逐渐增大. 位移场中反映出了周围岩体之间出现变形不连续现象的主要变形区域，与试验过程所观察到的该区域沿断层面拉开，出现一些张剪、裂纹等现象相吻合，所测位移场规律性好.

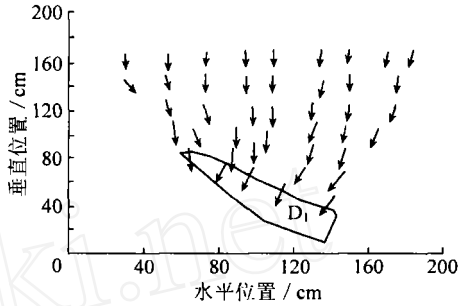


图 2　测点最终位移矢量

Fig. 2　Final displacement field map of surveying points

图 3为每一步开挖后地面测点的下沉曲线，其沉陷盆地、沉陷中心、错动范围等都与试验过程中实际观察到的较为一致. 地下采矿引起的全场位移的总体规律性较好，与某些定性及计算结果较相符. 因此，本次摄影测量所得结果是可信的，精度较高. 能基本反映本次试验条件下因地下采矿所引起的围岩及地表变形和破坏特征.

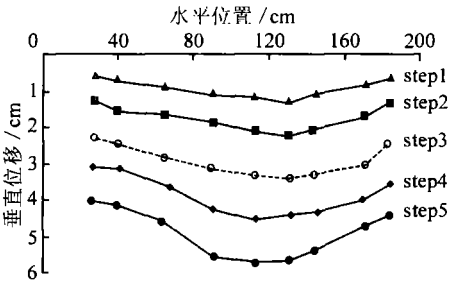


图 3　地表下沉曲线

Fig. 3　Subsidence curves of earth's surface

4 结　论

(1) 数字近景摄影测量技术用于模型试验变形测量与其它量测手段相比有着明显的优点：它是一种瞬间获取被摄物体大量物理信息和几何信息的测量手段，特别适用于量测测点众多的目标，它是一种非接触式量测手段，特别适合于变形区域、滑坡、塌陷区等的作业.

(2) 利用高分辨率数码相机进行相似材料模型变形监测，通过采用 DLT和自检校光束法平差算法测定的观测点 3维空间坐标精度完全可以满足矿山岩层和地表移动相似材料模型观测要求. 为实际的工程应用提供了理论和实践基础.

(3) 利用高分辨率非量测普通数码相机采用非固定摄影站自由直接拍摄技术，测定模型位移场的规律性符合实际情况；同时可获得不同时刻的影像数据，为全面研究变形动态过程提供了丰富的监测信息.

参考文献：

[1] 陈兴华. 脆性材料结构模型试验 [M]. 北京：水利电力出版社，1994.

[2] Bopp H, Krauss H. Extension of the 11 - parameter solution for on-the-job calibrations of non-metric cameras [J]. International Archives of Photogrammetry, 1978, 22 (5): 7～11.

[3] 张永军，张祖勋，张剑清. 利用二维 DLT及光束法平差进行数字摄像机标定 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版)，2002, 27 (6): 567～571.

[4] 冯文灏. 近景摄影测量 [M]. 武汉：武汉大学出版社，2002.

[5] 龚　涛. 近景摄影测量控制点布设方案的研究 [J]. 西南交通大学学报，1997, 32 (6): 335～337.

[6] 盛业华，阎志刚，宋金玲. 矿山地表塌陷区的数字摄影测量监测技术 [J]. 中国矿业大学学报，2003, 32 (4): 412～415.

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net