# 数字近景摄影测量技术在矿山地表沉陷监测中的应用研究

杨化超 邓喀中 张书毕 刘 超 于瑞鹏
(中国矿业大学环境与测绘学院,徐州 221008)

**摘 要** 为了解决传统的矿山地表沉陷监测方法存在的劳动强度大、不能实时观测、难以获得瞬时3维移动变形信息等缺陷,提出了一种利用基于非量测数相机的数字近景摄影测量技术进行塌陷区沉陷监测的方法。该方法首先利用标定过的高分辨率数字相机获取塌陷区的数字立体影像像对;然后采用相对定向、影像匹配等摄影测量解析处理技术提取塌陷区地表的数字高程模型;最后通过与该区域开采前数字高程模型对比分析来完成塌陷区沉陷范围、深度、体积等沉陷参数计算。应用研究结果表明,数字近景摄影测量的测定精度基本可以满足这次应用条件下沉陷监测的精度要求。该方法为矿山地表塌陷区的沉陷监测提供了一条可行的途径。

**关键词** 塌陷区 相机标定 数字近景摄影测量 小波变换 直接线性变换 影像匹配 数字高程模型
**中图法分类号**:P234.1 **文献标识码**:A **文章编号**:1006-8961(2008)03-0519-06

# Research on Subsidence Monitoring of Mine Surface Using Digital Close-range Photogrammetric Technique

万方数据

YANG Hua-chao, DENG Ka-zhong, ZHANG Shu-bi, LIU Chao, YU Rui-peng
(*School of Environmental and Spatial Informatics in China University of Mining & Technology, Xuzhou*, 221008)

**Abstract** Conventional geodetic monitoring methods have some disadvantages such as intense workload, difficulties of realizing real-time monitoring and acquiring instant 3D moving deformation information in subsidence areas of mine surface. In order to cope with the practical problem, we proposed a method using digital close-range photogrammetric technique to monitor subsidence areas. First, digital stereo pairs of mine surface were captured using high resolution digital camera. And then digital elevation model (DEM) was extracted by a series of photogrammetric reduction processes such as relative orientation, image matching etc. By comparing the constructed DEM with the original, the subsidence parameters such as subsidence range, depth and volume etc can be calculated. Practical research results indicated that the precision acquired by digital close-range photogrammetric technique can meet the accuracy requirement under this test condition. A feasible approach is provided for subsidence monitoring of mine surface.

**Keywords** subsidence areas, camera calibration, digital close-range photogrammetry, wavelet transformation, direct linear transformation, image matching, DEM

## 1 引 言

传统的地表沉陷监测方法一方面存在劳动强度大、不能实时观测、不能获得瞬时3维移动变形信息等缺陷;另一方面,某些塌陷区域可能存在着潜在的危险而无法使用传统的大地测量方法直接观测。数字化近景摄影测量是一种非接触量测方

基金项目:中国矿业大学青年科研基金资助项目(2005A030)
收稿日期:2006-05-22;改回日期:2006-09-12
第一作者简介:杨化超(1977~ ),男。讲师,在职博士研究生。主要研究方向为摄影测量与遥感。已发表论文20余篇。E-mail:hua-chao-yang@163.com

式,具有可以实时获取地表信息和以数字方式存储和实时观测等优点,其在变形滑坡、结构变形领域得到了广泛的应用。石必明、任伟中等人将非量测数字相机数字化近景摄影测量技术用于沉陷模型的试验观测,取得了不错的效果[1,2]。但仅仅通过对模型的变形测量无法给出地表的整体变形信息;Thomas 等人采用专业量测相机将数字近景摄影测量技术用于大坝的变形监测[3];盛业华等采用未经标定的非量测相机,利用数字近景摄影测量技术进行矿山地表塌陷区的沉陷监测[4],得出了地表的沉陷参数。

专业的光学量测相机提供内方位元素,虽然其获取的影像质量好,但由于其价格昂贵、摄影技术要求过高,因此,本文尝试将非量测普通数字相机用于小范围塌陷区的数字近景摄影测量,并提出了一种适用于数字近景影像的相对定向、影像匹配的算法,其可用于实现矿山地表目标点的 3 维量测与重建,应用结果表明,其测定精度可以满足本次应用条件下沉陷监测的精度要求。构建的数字高程模型(digital elevation model, DEM)可以用于矿山地表沉陷分析,这就为矿山地表塌陷区的沉陷监测提供了一条可行的途径。

万方数据

## 2 应用概述

某矿由于多年持续开采,其主体矿区塌陷严重,存在严重的安全隐患,由于采用传统的方法进行监测费时费力,为此如今多采用数字近景摄影测量技术进行塌陷区沉陷监测。为降低成本,本文采用非量测数字相机作为传感器进行监测。在进行塌陷区监测时,其整体工作流程如图 1 所示。

利用数字近学摄影测量技术进行塌陷压监测时,首先对数字相机进行标定,同时利用标定过的数字相机获取已布好控制的塌陷区数字立体像对,并采用金字塔分层影像匹配方案匹配出同名点;然后采用直接线性变换(direct linear transformation, DLT)算法并根据匹配出的同名点计算塌陷区地表的离散点坐标;继而利用分块内插方法构建塌陷区数字高程模型;最后,通过与开采前根据地形图数字化等高线获得的 DEM 进行对比分析来完成塌陷区沉陷范围、深度、体积等沉陷参数计算。

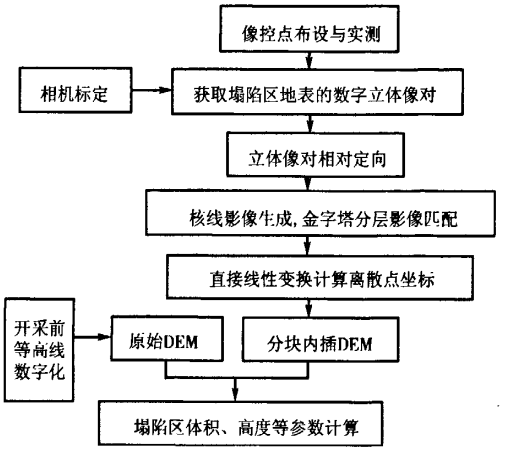



图 1 监测技术流程图

Fig. 1 Flow chart of monitoring technique

## 3 相机标定

2 维 DLT 可表达为[5]:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 & L_2 & L_3 \\ L_4 & L_5 & L_6 \\ L_7 & L_8 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中,$L_i(i=1,2,\cdots,8)$为 2 维 DLT 的 8 个变换参数;$X,Y$ 为平面控制(格网)点坐标($Z$ 坐标为 0);$x,y$ 为相应的像坐标(如图 2 所示)。当像点数多于 4 个时,可利用式(1)来平差计算 2 维 DLT 的 8 个变换参数。

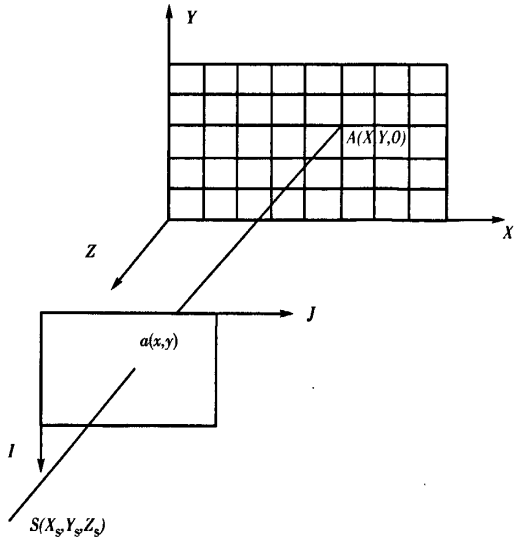



图 2 标定平面格网示意图

Fig. 2 Sketch map of planar grids

对于平面格网而言,由于 $X,Y$ 轴一般在平面(格网)内,且所有物(格网)点的 $Z$ 坐标为0,因此可将共线方程表达为如下矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \lambda \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{x_0}{f} \\ 0 & 1 & \frac{y_0}{f} \\ 0 & 0 & -\frac{1}{f} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & -(a_1X_S + b_1Y_S + c_1Z_S) \\ a_2 & b_2 & -(a_2X_S + b_2Y_S + c_2Z_S) \\ a_3 & b_3 & -(a_3X_S + b_3Y_S + c_3Z_S) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中,$x_0,y_0,f$ 为像机的内方位元素;$X_S,Y_S,Z_S$ 为摄站点坐标;$X,Y,Z$ 为物方空间坐标;$x,y$ 为相应的像点坐标。$\boldsymbol{R} = \{a_i,b_i,c_i,i = 1,2,3\}$ 为摄影测量中常用的由旋转角 $\varphi,\omega,\kappa$ ($Y$ 为主轴)构成的旋转矩阵。

若采用理想相机模型,即主点在图像中心,焦距取标称值,则式(2)中的内方位元素值为已知,由式(1)式(2)矩阵元素之间的对应关系,根据旋转矩阵的正交性特点即可以求出比例因子 $\lambda$,继而可确定旋转矩阵元素 $a_1,a_2,a_3,b_1,b_2$。而 $c_1,c_2,c_3$ 则由旋转矩阵的正交性确定。若 $\tan\varphi = -a_3/c_3$,$\sin\omega = -b_3,\tan\kappa = b_1/b_2$,则可以分别求出外方位角元素 $\varphi$、$\omega$、$\kappa$ 的初始值。旋转矩阵确定以后,可再利用线性化的共线方程和至少3个控制点解算相机外方位元素的初值。

内、外方位元素初始值确定以后,即可利用自检校光束法平差算法进行精确相机标定来获得相机的内方位元素和畸变系数的值。

## 4　立体像对相对定向

自动相对定向是利用立体像对中摄影时存在的同名光线对的相交几何关系来自动提取足够的分布合理的同名点,并计算该立体像对的相对方位元素的过程[6]。由于普通数码相机畸变差较大,破坏了共线构像条件,从而使相对定向精度较低,甚至不收敛。另外,由于受塌陷区立体摄影条件的限制,摄影基线往往较长,从而造成立体像对中像片之间外方位角元素差别很大,这些因素也会影响相对定向元素的解算。为此,本文利用相对定向直接解法[6]进行相对定向,直接解法相对定向是通过线性变换直接求解相对定向元素,其优点是不需要知道定向元素初始值,且计算结果具有确定性。由于篇幅所限,具体算法详见文献[6]。

为提取相对定向需要的足够且分布合理的同名点,首先应将左影像划分为若干个子影像块,然后在每一个子影像块内利用点特征提取算子提取每一个子影像块的局部特征点。本文采用算法简单、精度较高的 Förstner 点特征提取算子来提取分块特征点。其基本思想是,先以像元的4个主要方向上的最小灰度方差来表示该像元与邻近像元的灰度变化情况,即像元的兴趣值;然后在图像的局部选择具有最大的兴趣值的点(灰度变化明显的点)作为特征点[6];最后在右影像中利用金字塔影像分层匹配方案匹配出这些特征点,以作为相对定向之用。本文利用以下快速小波变换进行金字塔影像分层[7,8]:

$$A_2^{d_j}f(m,n) = \sum_{l\in Z}\bar{h}(2n-1)\left(\sum_{k=-\infty}^{+\infty}\bar{h}(2m-k)A_2^{d_j}f(k,l)\right) \times D_2^1 f(m,n)$$

$$= \sum_{l\in Z}\tilde{g}(2n-1)\left(\sum_{k=-\infty}^{+\infty}\bar{h}(2m-k)A_2^{d_{j+1}}f(k,l)\right) \times D_2^2 f(m,n)$$

$$= \sum_{l\in Z}\bar{h}(2n-1)\left(\sum_{k=-\infty}^{+\infty}\tilde{g}(2m-k)A_2^{d_{j+1}}f(k,l)\right) \times D_2^3 f(m,n)$$

$$= \sum_{l\in Z}\tilde{g}(2n-1)\left(\sum_{k=-\infty}^{+\infty}\tilde{g}(2m-k)A_2^{d_{j+1}}f(k,l)\right)$$

金字塔影像分层后,可首先在金字塔顶层进行匹配,全部特征点匹配完成后,再按照广度优先的原则扩展到下一层,直到最底层时,则进行最小二乘影像匹配,以便得到亚像素级匹配精度。最高层的影像匹配要保证100%正确,为此,在最高层影像匹配时采用双向匹配,即先从左至右匹配一次,匹配成功时,再利用该匹配结果,从右至左匹配一次,若反向匹配也成功,则认为该匹配结果可靠,否则匹配为失败。利用这种方法可降低误匹配率。

## 5　影像匹配

当相对定向完成后,则可以制作核线影像对,在中心投影的像对上,沿核线搜索即可实现1维匹配,本文使用的是以"水平"像片为基础的核线影像,倾斜像片与水平像片之间的坐标关系式为[6]

万方数据

$$\begin{cases} u = -f\dfrac{a_1x + a_2y - a_3f}{c_1x + c_2y - c_3f} \\ v = -f\dfrac{b_1x + b_2y - b_3f}{c_1x + c_2y - c_3f} \end{cases} \tag{3}$$

其中，$(u,v)$ 和 $(x,y)$ 分别为倾斜像片和“水平”像片的像片坐标；$a_i,b_i,c_i(i=1,2,3)$ 为相对方位元素的函数。如果分别对左右像片进行核线处理，则可得到核线影像对。

采用小波变换进行金字塔分层匹配。匹配时，原始图像与各层分解后的低频子图像形成金字塔，先在低频子图像上提取特征，然后进行特征匹配。这种基于特征点的匹配有利于提高匹配成功率。核线影像的制作是在 $v$ 方向（或者说 $y$ 方向）减少了搜索范围，变为1维搜索，即消除了上下视差。而金字塔的生成，又为匹配减少了 $u$ 方向的搜索，即按比例缩小了左右视差，使得左右搜索范围得到控制。实践表明，核线生成和金字塔生成可以提高匹配的速度和成功率。

由于阴影、遮掩及噪声等的影响，因此与相关系数的最大值对应的点，可能并不是真正的相应像点，而相应像点对应的相关系数可能是次大，这样也会引起误匹配。在金字塔层和核线1维搜索的控制下，产生的误匹配大多数是由于上述情况产生的。为了降低这种误匹配的发生，本文仍然使用双向匹配策略。对成功匹配好的点，再反向匹配一次，以确认匹配结果是否真的无误。对匹配不成功的点，则再在右片上重选一个点，然后以该点作为基准点，在左片上寻找同名点，如果匹配成功则再反向匹配一次，如果不成功就丢弃。反向匹配成功的点就标志为匹配成功点，反向匹配不成功的点则标志为可疑点。

## 6 物点坐标计算

利用3维DLT算法计算塌陷区地表离散点坐标时，首先利用3维DLT基本关系式解算11个L变换系数和物点坐标初始值。

当有多余观测值，像点坐标改正数为 $(v_x,v_y)$，像点坐标的非线性改正数为 $(\Delta x,\Delta y)$ 时，则3维DLT可表达为

$$\begin{cases} (x + v_x) + \Delta x = \dfrac{L_1X + L_2Y + L_3Z + L_4}{L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1} \\ (y + v_y) + \Delta y = \dfrac{L_5X + L_6Y + L_7Z + L_8}{L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1} \end{cases} \tag{4}$$

式中，$L_i(i=1,2,\cdots,8)$ 为3维DLT的11个变换参数。像点坐标的非线性改正 $\Delta x = (x - x_0)k_1r^2$，$\Delta y = (y - y_0)k_1r^2$；像点向径 $r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}$，$k_1$ 为径向畸变改正系数。$x_0,y_0,k_1$ 的值可通过相机标定获得。误差方程式的具体形式及物点坐标的计算步骤详见文献[5]。

## 7 应用结果与分析

实地拍摄前，首先进行相机标定，即先在一立面墙体上布设一平面控制格网，格网大小为 400 × 400cm²，格网间隔为40cm；然后从4个摄站上，每个摄站相机主光轴旋转约90°摄像两次，共拍摄标定格网的8张像片[9]；接着利用Hough变换检测标定图像中的格网直线，并利用最小二乘法拟合出最佳直线，格网点的像坐标可通过求直线的交点得到。标定时，需固定调焦距，并采用不同的摄影深度，再利用本文提出的相机标定算法进行多次标定，以获得稳定的主点坐标。主点坐标的标定结果如下：$x_0 = 1285.449$，$y_0 = 958.749$，单位均为pixel，径向畸变参数 $k_1 = 1.98 \times 10^{-8}$，标定精度约为 ±2.6 pixels。

用标定过的普通数字相机获得塌陷区地表9个数字近景立体影像像对，拍摄前，在塌陷区周围稳定区域均匀布设18个控制点，其中8个作为像片控制点，其余10个作为检查点。控制点标志如图3所示，打印后贴于标志杆上。

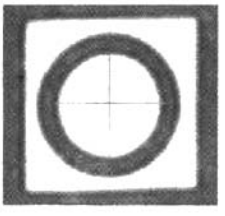


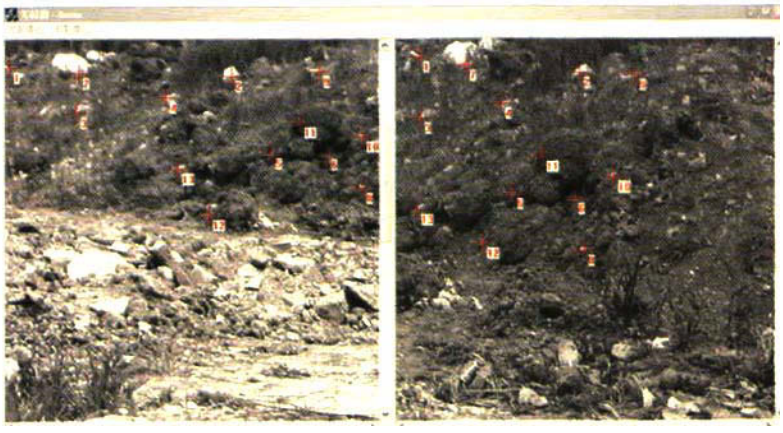
图3 控制点标志

Fig. 3 Sign of control points

根据该区域的已有控制点资料，利用T2经纬仪和测距仪按前方交会方法测定标志点中心的3维坐标。对于控制点影像坐标以半自动方式量测，即首先利用区域生长算法获得标志点边缘轮廓；然后用椭圆拟合法算法精确量测标志点中心影像的像素坐标[9]；最后根据控制点地面坐标和影像坐标按直接线性变换算法计算各像片的11个L变换系数。

为提取足够数量且分布均匀的用于相对定向的

同名点,并考虑到影像的纹理特征,可先将左影像划分为512个子影像块,若利用 Förstner 算子共提取出512个特征点,则在右影像中有109个点得到了正确的匹配(图4所示的为12个正确匹配的特征点);然后利用匹配得到的109个同名像点进行直接解法相对定向,相对定向后即可生成核线影像(如图5所示),其中红线为同名核线,核线影像匹配共获得了1 333个正确的匹配点,双向匹配成功率为77.3%。

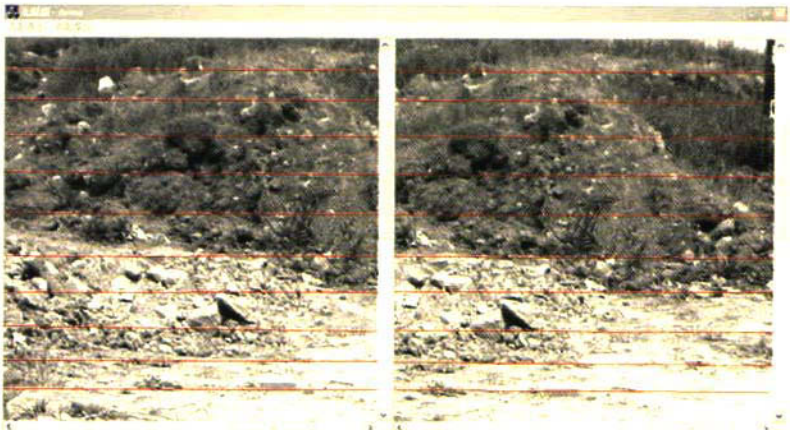


(a) 左图　　(b) 右图

图4　特征点匹配结果(部分)

Fig. 4　Matching results of feature points ( parts)

万方数据



(a) 左图　　(b) 右图

图5　核线影像对(部分)

Fig. 5　Image pairs of epipolar lines ( parts)

核线影像匹配完成后,可先根据立体像对中各片的11个L变换系数按直接线性变换算法计算与各同名点对应的物空间坐标,然后根据地表的离散点坐标利用分块内插方法获得塌陷区规则格网DEM[10],其结果如图6所示。通过与利用开采前原始等高线建立的DEM进行[10]比较分析可知,该区域最大下沉高度为19.7m,最低下沉高度为2.3m,下沉量约为1 203.8$m^3$。

在Windows平台上用VC++6.0可视化编程工具开发了上述相应的数字近景摄影测量解析处理程序,主要包括像控点影像坐标的半自动量测、立体像对的相对定向、核线影像生成、影像匹配与编辑、基于直接线性变换算法的立体像对空间前方交会、DEM的生成与编辑等模块,其界面友好,自动化程度较高。

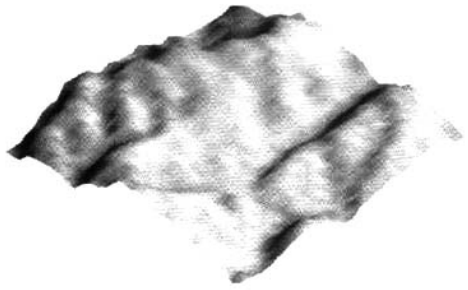


图6 摄影测量地表3维重建结果

Fig. 6 Surface results of photogrammetric reconstruction

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的控制。对于非量测相机而言,由于采用了任意交向摄影方式,其不仅摄影机主距无法精确测定,而且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[4],因此,为了评价数字近景摄影测量方法对测点坐标的测定精度,本文采用设计坐标与解算坐标对比的方式,即采用检查点的实测坐标(当作真值)与用摄影测量方法解算出来的坐标(当作观测值)对其进行误差分析。

万方数据

综合10个检查点,如果按中误差解算公式 $m = \pm\sqrt{[\Delta\Delta]/n}$,计算得到 $m_X = \pm 15.1\text{cm}$, $m_Y = \pm 13.4\text{cm}$,则可以得出本次试验测点坐标的平面测定精度为 $m_{XY} = \pm 20.2\text{cm}$, $m_Z = \pm 17.6\text{cm}$。其测定精度可以满足本次应用条件下沉陷监测的基本要求。

## 8 结 论

综上所述,可得以下结论:

(1) 数字近景摄影测量技术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,非常便于3维可视化且测定精度可以满足本次应用条件下矿山地表沉陷监测的精度要求。

(2) 塌陷区地表3维重建的结果符合实际情况,并可同时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。

(3) 由于影像遮蔽现象严重。同时由于塌陷区影像色调较为单一,纹理贫乏,而本文提出的影像匹配算法虽然能够保证一定的匹配成功率,但无法有效地处理影像遮蔽问题,因此,需要对影像匹配算法进行进一步地改进,以提高匹配结果的准确率和可靠性。

## 参考文献(References)


1 Shi Bi-ming, Yu Qi-xiang. Test and research on coal and rock movement deformation characteristics in coal mining with long distance protection layer[J]. Coal Science and Technology, 2005, 33(2): 39~41. [石必明, 俞启香. 远距离保护层开采煤岩移动变形特性的试验研究[J]. 煤炭科学与技术,2005, 33(2): 39~41. ]

2 Ren Wei-zhong, Bai Shi-wei, Ge Xi-run. Modeling test study on deformation and subsidence of ground surface induced by underground mining with thick overburden[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(10): 1715~1719. [任伟中, 白世伟, 葛修润. 厚覆盖层条件下底下采矿引起的地表变形陷落特征模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(10): 1715~1719. ]

3 Thomas Kersten, Hans-Gerd Maas. Photogrammetric 3-D point determination for dam monitoring[J]. Optical 3-D Measurement Techniques, 1995, 14(10): 161~168.

4 Sheng Ye-hua, Yan Zhi-gang, Song Jin-lin. Monitoring technique for mining subsidence with digital terrestrial photogrammetry[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2003, 32(4): 412~415. [盛业华, 闫志刚, 宋金铃. 矿山地表塌陷区的数字近景摄影测量监测技术[J]. 中国矿业大学学报, 2003, 32(4): 412~415. ]

5 Feng Wen-hao. Close-rang Photogrammetry[M]. Wuhan: Wuhan University Publishing Press, 2002. [冯文灏. 近景摄影测量[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002. ]

6 Zhang Jian-qing, Pan Li, Wang Shu-gen. Photogrammetry[M]. Wuhan: Wuhan University Publishing Press, 2002. [张剑清, 潘励, 王树根. 摄影测量学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003. ]

7 Huang Yu-qi, Mu Xiao-hui, Qiang Zeng-bo. Total-automatically image matching of stereoscopic pair of aerial photography[J], Journal of Institute of surveying and Mapping, 2002, 17(4): 277~299. [黄玉琪, 牟晓辉, 钱曾波. 航空摄影立体像对的全自动影像匹配[J]. 测绘学院学报, 2000, 17(4): 277~279. ]

8 Lin Yi, Chen Ying. Auto-generating DEM with stereo image matching and mathematical morphologic transformation[J]. Journal of Image and Graphics, 2003, 8(4): 447~452. [林怡, 陈鹰. 用立体影像匹配和数学形态变换自动生成DEM[J]. 中国图象图形学报, 2003, 8(4): 447~452. ]

9 Feng Wen-hao, Li Jian-song, Yan Li, *et al*. Postioning of screw holes group by video photogrammetry and digital drilling holes[J]. ACTA Geodetica et Cartographic Sinica, 2003, 32(3): 229~233. [冯文灏, 李建松, 阎利等. 基于数码相机的孔群定位与数控钻孔[J]. 测绘学报, 2003, 32(3): 229~233. ]

10 Chai Hua-bin, Zou You-feng, Lin Jing-gan. Application of DTM in visualization prediction of mining subsidence [J]. Journal of Liaoning Technical University (Nature Science Edition), 2004, 23(2): 171~174 [柴华彬, 邹友峰, 刘景艳. DTM在开采沉陷可视化预计中的应用[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2004, 23(2): 171~174. ]