

# 数字网格摄影测量法及其在滑坡模型试验中的应用

徐福卫, 陈海玉

(襄樊学院 土木工程系, 湖北 襄樊 441053)

**摘要:** 综合考虑自动网格法和摄影测量技术各自的优缺点, 提出了数字网格摄影测量法。介绍了该方法的原理与步骤, 并将其应用到室内某滑坡模型试验的位移测试中。试验证明: 数字网格摄影测量法可以快速、准确对模型体观测点位移进行量测, 精度达到次毫米级, 是一种比较理想的滑坡模型位移测试方法。

**关键词:** 自动网格法; 摄影测量法; 数字网格摄影测量法; 模型试验; 位移测试

**中图分类号:** P232 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2009)02-0216-05

## Close-range Photogrammetry Based on Digital Grids and Its Application in Landslide Model Tests

XU Fu-wei, CHEN Hai-yu

(Department of Civil Engineering, Xiangfan University, Xiangfan 441053, Hubei, China)

**Abstract** Thinking over all the advantages and disadvantages of Auto-Grid Method and Photogrammetry, the authors put forward a new method of non-contact measurement named close-range photogrammetry based on digital grids. In this paper, its principle and operation process are introduced and an example used to measure the displacement of an indoor landslide model is given. The experiment result improves that close-range photogrammetry based on digital grids could fleetly and accurately measure the displacement of test model and is a preferable displacement measurement method in landslide model test.

**Key words:** auto-grid method; photogrammetry; close-range photogrammetry based on digital grids; model test; displacement measurement

### 0 引言

数值计算、现场试验和室内模型试验是目前国内外滑坡研究的 3 种主要手段, 其中模型试验可以模拟岩土问题复杂的边界条件, 能考虑到更多的不确定因素, 进而模拟和再现客观过程, 因此具有不可替代的作用。模型试验中, 变形是十分重要的测量内容之一。目前在模型试验中应用较多的位移测量方法<sup>[1]</sup>基本可以分为接触式量测法和非接触式量测法。滑坡模型试验环境复杂, 材料特殊, 运用一般的机械式测量或电容传感器测量等接触式量测法往往不能很好地达到试验目的, 这是因为:

①试验体的封闭式或半封闭式特点使得采用机械式方法进行量测比较困难; ②试验体材料的三相特

性使得采用百分表、千分表或粘贴应变片法进行量测比较困难; ③由于一般位移传感器要求一端固定, 一端量测, 不适用于试验体侧面位移测量。因此, 不得不借助于非接触式测量方法。

目前在滑坡模型试验位移测试中应用较多的非接触式量测方法有自动网格法和摄影测量法。自动网格法是在传统网格法基础上利用现代电子技术, 如高分辨率 CCD 拍摄加载前后网格点图, 再借助数字图像处理和分析技术, 自动识别变形前后两幅网格图的点信息。因其原理简单, 试验条件容易实现, 操作简便, 精度较高, 因而应用比较广泛。关锷等<sup>[2]</sup>研究了网格法的原理和计算步骤; 权铁汉等<sup>[3]</sup>利用网格法对皮革材料进行了拉伸实验, 实现了大变形的自动高精度测量; 冯传玉等<sup>[4]</sup>应用自动

收稿日期: 2008-07-10

作者简介: 徐福卫(1976-)男, 江西都昌人, 讲师, 工学硕士, 从事工程计算与试验研究。E-mail: xfw76@126.com

网格法测量带孔洞大样品的变形; 白义如等<sup>[5]</sup>利用自动网格法来测量金山店地下采矿引起地表沉降的模型位移场, 该试验逼真地模拟了地下不同开采水平引起的地表变形和危岩移动过程; 罗先启等<sup>[6]</sup>将修改后的网格法程序应用于石榴树包滑坡物理模型位移量测中, 获得坡体在模拟三峡水库水位运行过程中的位移规律, 类似工作还有很多。自动网格法的优点在于通过对网格点进行编码, 可以明确各网格点间的相互关系及各网格图上网格点的对应关系, 大大提高了数据处理速度和精度, 但主要缺点在于它忽视了非理想透镜体对相片成像的影响, 而简单认为实物与相片之间只存在比例关系。

摄影测量就是对研究对象进行摄影, 根据所获得的构像信息, 从几何和物理方面进行分析研究, 从而对所摄对象的本质提供各种资料, 是一门以影像信息重建三维空间中物体几何表面的科学, 其实质是要根据像点的位置推求出物点的位置。目前, 摄影测量技术较多的应用于地形摄影测量<sup>[7]</sup>, 随着电子技术、摄影仪器的快速发展, 摄影测量技术也越来越多地被应用到近景摄影测量中。摄影测量法虽然在确立像-物空间关系方面有其独特的特点, 但精确的摄影测量要求使用专门的光学量测设备, 通常用于静态物体形状的测量, 就已有实例来看, 采用摄影测量法进行连续性量测的还很少。

笔者提出的数字网格摄影测量技术结合自动网格法和摄影测量法各自的特点, 它的基本原理是将待测标志点置于控制点范围内——标志点与控制点相互成网格点阵, 用数码相机拍下网格图片(包括待测点与控制点), 对获取的图片进行处理, 计算点的像坐标, 对点编码, 再通过控制点确定构像与实物间的空间几何关系, 推求像坐标与物坐标间转换计算式, 进而利用这个转换关系由待测点的像坐标计算出其物坐标来。其测量步骤包括拍照片并进行预处理、提取网格点的坐标信息、对网格点进行编码、确定像-物坐标关系和像差纠正。

## 1 数字网格摄影测量技术原理

### 1.1 数字图片的预处理

数码相机拍摄到的图片由于受电压、温度、光照等环境因素的影响, 除因相机质量造成的固有噪声、偶然噪声、黑斑像元等, 还存在待测点与背景区别不明显等问题, 且图片格式、大小一般与图片处理程序要求的格式、大小不符, 必须对图片进行亮

度、对比度、颜色调整及局部颜色加强等处理, 使图片上的网格点清晰可辨。

### 1.2 网格点坐标信息的提取和编码

#### 1.2.1 网格点分割

所谓分割, 就是将节点与背景分离的过程。

分割过程的基本思想是: 先给定一个阈值(灰度值); 如果网格为黑背景下的白节点, 逐点扫描图像上的像点, 当某点的灰度值低于该点的阈值时, 就将该点的灰度值置为 0(黑背景色); 当某点的灰度值高于该点的阈值时, 保持该点的灰度值不变。如果网格为白背景下的黑节点, 同样逐点扫描图像上的像点, 当某点的灰度值高于该点的阈值时, 就将该点的灰度值置为 255(白背景色); 当某点的灰度值低于该点的阈值时, 保持该点的灰度值不变。

经过这样的判断, 节点就可以从背景中确定和隔离出来。

#### 1.2.2 网格点重心计算

对数字图像来说, 网格节点是一个区域而非一个“点”, 因而存在节点的定位问题, 节点的定位精度直接影响位移的测量精度。

目前, 较为理想的定位算法是重心算法, 即以节点的灰度重心标志节点的位置。

假设像素排布阵列的行和列分别为  $x, y$  方向, 这样, 在确定坐标原点的位置后, 任意一像素的位置由一对整数唯一地表达出来。为了更精确地计算出各节点的重心坐标, 对于白节点黑背景的情况, 节点灰度值为  $I(x, y)$ , 则任一节点的重心坐标  $(\bar{x}, \bar{y})$ , 可按式(1)求出各节点坐标

$$\begin{cases} \bar{x} = \frac{\sum \sum xI(x, y)}{\sum \sum I(x, y)} \\ \bar{y} = \frac{\sum \sum yI(x, y)}{\sum \sum I(x, y)} \end{cases} \quad (1)$$

对于白背景黑节点的情况, 在计算节点重心坐标之前, 则需要先进行黑白灰度反转, 再进行节点的灰度重心计算。

#### 1.2.3 节点编码

当变形前后网格的分割和重心提取结束后, 要找出节点的一一对应关系, 也就是对节点进行编码, 可参考文献[2]提供的编码方法。对于某些自动编码无法完成的节点, 可直接给定编码。

### 1.3 物-像坐标关系的建立

根据透镜成像原理<sup>[8]</sup>, 物-像空间关系可用

式(2)表示

$$\begin{cases} x + \frac{l_1 X + l_2 Y + l_3 Z + l_4}{l_9 X + l_{10} Y + l_{11} Z + 1} = 0 \\ y + \frac{l_5 X + l_6 Y + l_7 Z + l_8}{l_9 X + l_{10} Y + l_{11} Z + 1} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $x, y$  为像坐标;  $X, Y, Z$  为物坐标;  $l$  为投影透视系数。各  $l$  系数值与相机的内、外方位元素等因素有关, 可以通过任意 4 个控制点的已知像坐标  $(x, y)$  和物坐标  $(X, Y)$  来求解出来。当观测点位于同一平面, 即  $Z=0$  时, 式(2)可简化为

$$\begin{cases} x + \frac{l_1 X + l_2 Y + l_4}{l_9 X + l_{10} Y + 1} = 0 \\ y + \frac{l_5 X + l_6 Y + l_8}{l_9 X + l_{10} Y + 1} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

#### 1.4 像差纠正

数码相机无底片, 因而试验图片设计的像差主要由镜头畸变和光学折射引起的偏差两部分组成。

##### 1.4.1 镜头畸变差

数码相机在加工、安装过程中都存在一定的误差, 这一误差引起构象畸变。普通数码相机与传统光学摄影测量专业相机相比, 由相机本身引起的畸变差更大。畸变差由径向畸变差和非径向畸变差两部分组成<sup>[8]</sup>, 计算式如下

$$\Delta x = x(k_1 + k_2 r^2 + k_3 r^4) + p_1[r^2 + 2(x-x_0)^2] + 2p_2(x-x_0)(y-y_0) \quad (4)$$

$$\Delta y = y(k_1 + k_2 r^2 + k_3 r^4) + p_2[r^2 + 2(y-y_0)^2] + 2p_1(x-x_0)(y-y_0) \quad (5)$$

式中:  $\Delta x, \Delta y$  为畸变差;  $x, y$  为点的像距;  $r$  为像点向径 ( $r = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}$ );  $k_1, k_2, k_3$  为径向畸变系数;  $p_1, p_2$  为非径向畸变系数。

畸变系数 ( $k_1, k_2, k_3, p_1, p_2$ ) 与相机质量, 拍摄方式有关。

通过式(3)求出的各投影透视变换系数所用的像坐标  $(x, y)$  本身就含有畸变差, 这会导致透视投影系数及畸变系数不准确, 所以, 应采用透视投影系数与畸变系数交替解算方法, 其步骤为:

(1) 利用某 4 个控制点的像、物坐标计算 8 个投影透视变换系数初始值。

(2) 利用解算出的 8 个投影透视变换系数求出另外 3 个 (或 3 个以上) 控制点的像坐标, 其与像片量测值之间的差值即为这 3 个点的畸变差。

(3) 将这 3 个点的畸变差代入上式中, 以此求

出 5 个畸变系数初始值。

(4) 利用解算出的 5 个畸变系数对步骤 1 中所取 4 个控制点的像坐标进行纠正, 再利用纠正后的物-像坐标, 重新求解 8 个投影透视变换系数。

(5) 重复 (2) ~ (4) 步骤, 直至控制点像坐标的畸变差值趋于稳定, 确定此时的各投影透视系数和畸变系数。

根据以上步骤计算的投影透视系数和畸变系数, 点的物坐标  $(X, Y)$  的计算式可由式(3)转换得

$$\begin{cases} X = \frac{(l_4 - x)(y l_8 - l_6) - (l_7 - y)(x l_8 - l_3)}{(x l_1 - l_2)(y l_8 - l_6) - (y l_1 - l_5)(x l_8 - l_3)} \\ Y = \frac{(l_4 - x)(y l_1 - l_5) - (l_7 - y)(x l_1 - l_2)}{(x l_8 - l_3)(y l_1 - l_5) - (y l_8 - l_6)(x l_1 - l_2)} \end{cases} \quad (6)$$

##### 1.4.2 光线折射差

当被测物体处于玻璃试验槽内时, 光线从试验槽内射出来, 投射到物镜系统, 要经过玻璃、大气两种介质, 由于光线在这两种介质中的传播速度不同, 必然导致折射误差。由式(6)计算所得点的物坐标包含了折射差。

假设玻璃厚度为  $d$ , 镜头与玻璃的距离为  $l'$ , 已知玻璃折射率为  $n$ , 如图 1、2。

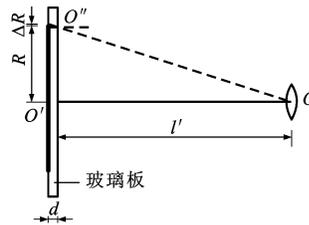


图 1 光的折射

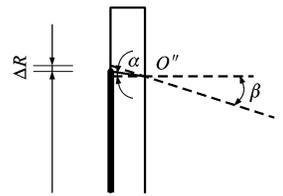


图 2 放大图

Fig. 1 Light Refraction

Fig. 2 Magnified Part

由光的折射可知

$$d \tan \alpha + l' \tan \beta = R \quad (7)$$

$$n = \frac{\sin \beta}{\sin \alpha}$$

则  $\Delta R = (l' + d) \tan \beta - R$

由于实际试验时,  $R$  为未知量, 因此, 对上式需重新考虑, 观察图 2 光线的折射, 可以发现光线折射差亦可表示为

$$\Delta R = d(\tan \beta - \tan \alpha) \quad (8)$$

由几何关系可知

$$\tan \beta = \frac{R + \Delta R}{l' + d} \quad (9)$$

式中:  $R + \Delta R$  为量测值。

由于  $\alpha, \beta$  存在着关系  $n = \frac{\sin \beta}{\sin \alpha}$ , 故

$$\tan \alpha = \tan \left[ \arcsin \left[ \frac{\sin \beta}{n} \right] \right] = \left\{ \begin{array}{l} X^* = X - \Delta X \\ Y^* = Y - \Delta Y \end{array} \right. \quad (13)$$

$$\tan \left\{ \arcsin \left[ \frac{1}{n} \sin \left[ \arctan \frac{R + \Delta R}{l + d} \right] \right] \right\} \quad (10)$$

令  $R' = R + \Delta R$ , 则有

$$\Delta X = X \frac{\Delta R}{R'} \quad (11)$$

$$\Delta Y = Y \frac{\Delta R}{R'} \quad (12)$$

于是, 网格点的真实坐标  $(X^*, Y^*)$  为

表 1 观测点坐标计算值与真实值的比较

Tab. 1 Comparison Between Real and Calculated Coordinate of Monitoring Spots

点号	横坐标 真实值/mm	像坐标/ pixel	自动网格法的计算结果			数字网格摄影测量法的计算结果		
			坐标值	差值	相对误差/%	坐标值	差值	相对误差/%
0	-180	33.967	-182.680	-2.678	1.49	-179.530	0.470	-0.26
1	-120	128.776	-122.230	-2.233	1.87	-119.430	0.570	-0.48
2	-60	223.382	-61.220	-1.217	2.03	-59.335	0.665	-1.18
3	0	316.044	0.840	-0.841		-0.540	-0.540	
4	60	411.604	59.080	-0.917	-1.53	59.810	-0.192	-0.32
5	120	506.985	118.890	-1.107	0.93	119.530	-0.468	-0.39
6	180	602.957	180.080	0.079	0.04	179.890	-0.112	-0.06
			平均值	-1.273	0.80	平均值	0.055	-0.26

两种方法的计算结果与真实值之间的差值对比如图 3。

从表 1 和图 3 可以看出, 考虑镜头畸变和光线折射影响的数字网格摄影测量法的计算结果比自动网格法的计算结果更接近真实值。

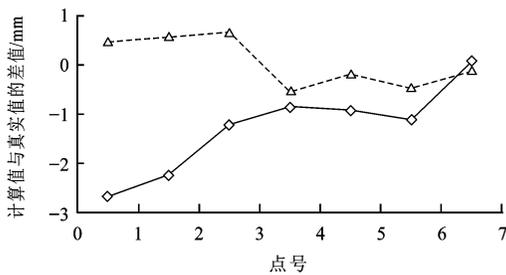


图 3 坐标计算值与真实值之间差值对比

fig. 3 Comparison Between Calculated and Real Coordinate

### 3 实例应用

试验槽为钢化玻璃制成, 体积为  $90 \text{ cm} \times 40 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ , 滑坡模型剖面和试验工况如图 4、5, 滑面用 C25 水泥浆抹面而成, 滑体材料的体积分数配比为: 粒径为  $20 \sim 50 \text{ mm}$  的砾粒为 50%, 粒径为  $0.5 \sim 2.0 \text{ mm}$  的砂粒为 25%, 粒径小于  $0.5 \text{ mm}$  的颗粒为 25%, 拌和用水为 10%。

## 2 自动网格法与数字网格摄影测量法对比

打印一横排观测点贴于光滑墙上, 用数码相机拍下相片, 采用数字图像技术提取观测点坐标, 然后分别用自动网格法、数字网格摄影测量法计算观测点的横坐标, 计算结果见表 1。

### 滑坡模型试验测

量标志点网如图 4。8 个待测标志点半径为  $5 \text{ mm}$ , 外半径为  $18 \text{ mm}$ , 外白内黑以方便读图, 点背后有一长度约  $1.5 \text{ cm}$  的钉插入土体, 使得土体的变形表

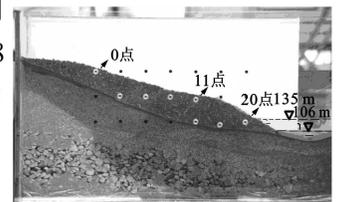


图 4 试验模型  
Fig. 4 Test Model

现为待测点的移动; 周围 13 个黑点形成控制网, 点半径为  $8 \text{ mm}$ ; 各点间距约  $60 \text{ mm}$ , 控制点与待测点互成正交阵列, 以便于编码。受滑坡剖面形状的限制, 个别观测点不能严格布置到设计位置, 可适当作小范围调整。

试验工况说明, 试验将模拟某滑坡体在经历库区蓄水和夏季连续降雨后的变形发展情况, 6 次模拟降雨的降雨量如图 5, 总降雨量为  $2 \text{ mm}$ 。

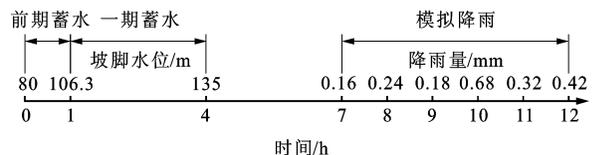


图 5 试验设计

Fig. 5 Experimental Design

数码相机正对模型槽正面中心, 拍摄距离为 3.5 m, 像片像幅为  $640 \times 480$  pixel, 调整焦距, 使滑体模型布满整个像幅; 试验过程中, 20 min 左右拍摄一次像片, 数码相机位置基本保持不变。

试验结束时, 滑体前缘和后缘均产生细小裂缝。滑体表面的 0、11、20 三点水平位移、垂直位移及其整体位移如图 6~8。

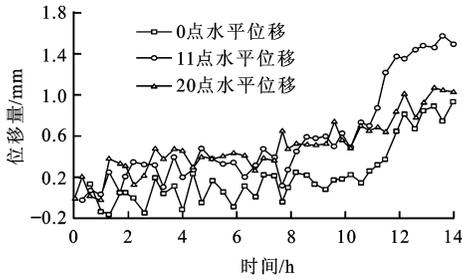


图 6 观测点水平位移与时间关系曲线

Fig 6 Horizontal Displacement of Monitoring Spots with Time

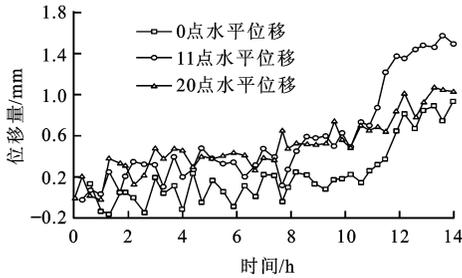


图 7 观测点垂直位移与时间关系曲线

Fig 7 Vertical Displacement of Monitoring Spots with Time

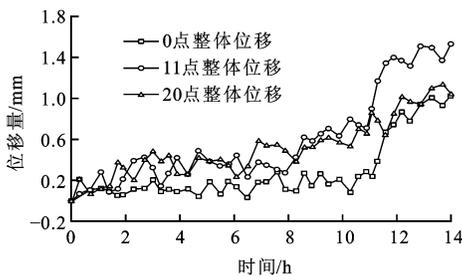


图 8 观测点整体位移与时间关系曲线

Fig 8 Whole Displacement of Monitoring Spots

试验结束时, 0 点最大  $x$  向位移为 0.9 mm,  $y$  向最大位移为 0.5 mm, 总体最大位移达到 1.1 mm。11 点最大  $x$  向位移为 1.7 mm,  $y$  向最大位移为 0.4 mm, 总体最大位移达到 1.7 mm。20 点最大  $x$  向位移为 1.2 mm,  $y$  向最大位移为 0.2 mm, 总体最大位移达到 1.2 mm。

从图上可以看出, 坡体在第 4 次模拟降雨后发生了较大变形后又达到新平衡状态, 此后的降雨对坡体变形的影响并不大, 坡体最大变形量约 1.7 mm。

试验结束时滑体位移情况如图 9。

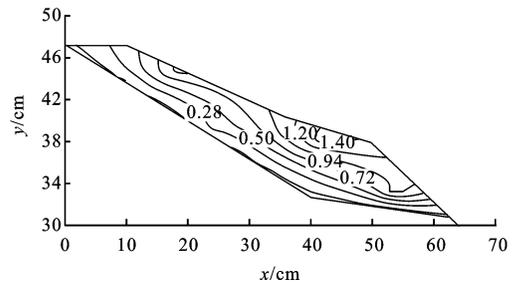


图 9 试验结束时滑体位移等值线

Fig 9 Displacement Contour When the Experiment Ended

## 4 结语

(1) 由于考虑了镜头畸变、光线折射等因素对相机成像真实度的影响, 数字网格摄影测量方法的计算精度要比自动网格法的计算精度更高; 另外由于数字网格摄影测量法采纳了自动网格法利用正交网格来实现自动编码的思想, 保证了较高的工作效率。

(2) 采用数字网格摄影测量法获得的滑体位移与时间关系图与真实滑坡体在库水浸泡和连续降雨情况下的变形发展规律基本符合, 该方法应用于滑坡模型试验位移测试是合理、可行的。

(3) 对表 1 的相对误差分析可以看出, 不管是采用自动网格法还是数字网格摄影测量法来计算点坐标, 相对误差都较小。因此, 要使得试验结果更精确, 应在试验开始前便对所有点的位置进行精确定位 (如采用水准仪和经纬仪), 使得观测点的位移初始值更准确。

### 参考文献:

- [1] 王文静, 程秀芝, 张申. 模型试验位移测量技术的研究[J]. 能源技术与管理, 2005, 23(3): 59-61.
- [2] 关锴, 何世平, 伍小平, 等. 网格法的自动检测技术研究[J]. 固体力学学报, 1996, 17(4): 290-295.
- [3] 权铁汉, 陆宏伟, 于起峰. 网格法及其在大变形测量中的应用[J]. 实验力学, 2000, 15(1): 83-91.
- [4] 冯传玉, 王晓文, 韩耘, 等. 应用自动网格法测量带孔洞大样品的变形[J]. 实验力学, 2001, 16(4): 359-365.
- [5] 白义如, 任维中, 白世伟. 利用自动网格法测量模型试验位移场[J]. 矿山压力与顶板管理, 2003, 20(1): 89-91.
- [6] 罗先启, 陈海玉, 沈辉, 等. 自动网格法在大型滑坡模型试验位移测试中的应用[J]. 岩土力学, 2005, 26(2): 231-234.
- [7] 王任享, 王建荣, 赵斐, 等. 利用地面控制点进行卫星摄影三线阵 CCD 相机的动态检测[J]. 地球科学与环境学报, 2006, 28(2): 1-5.
- [8] 王之卓. 摄影测量原理[M]. 北京: 测绘出版社, 1979.