

微尺度模型试验的数字近景摄影测量

陈建华¹ 程 栋¹ 王 伟² 毛 野³

(1. 河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098 ; 2. 江苏省测绘局物资器材供应站, 江苏 南京 210003 ;
3. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要 根据数字近景摄影测量的原理和方法, 使用非量测相机拍摄微尺度模型立体像对, 采用数字图像影像匹配技术量测像片坐标, 建立三维立体模型, 自动生成模型表面形态变化图. 在河床演变趋势和航道整治微尺度模型试验中, 该方法成功地取得了长江河床模型试验镇江段河床表面形态变化的大量数据, 对分析相关的变化规律起到了积极作用. 分析表明, 数字近景摄影测量技术能够满足河床演变模型试验的研究需求.

关键词 微尺度模型; 数字近景摄影测量; 非量测相机

中图分类号 :TV149.2 ;P234.1 **文献标识码** :A **文章编号** :1000-198X(2008)01-0088-05

微尺度模型作为河工模型^[1], 具有模型尺度小、易于操作、快捷经济并能够用来向公众展示等优点, 是理想的河床演变试验工具. 目前的微尺度模型试验, 大都通过摄像、拍照等图片资料对试验结果进行定性分析, 缺乏定量分析. 在相关领域的泥石流水槽试验^[2]中, 曾使用加框标的非量测相机拍摄立体像对, 根据近景摄影测量原理量测泥石流表面特征点三维坐标, 定量分析泥石流的本质运动特征, 取得良好效果. 但是, 此方法需要对照相机进行改造——加框标, 由专业测量人员操作, 增加了试验的技术难度.

本文研究一种使用非量测相机拍摄立体像对的近景摄影测量方法, 不需要改造照相机, 而由非专业测量人员操作, 成果满足微尺度模型试验需要.

1 基本技术方案

微尺度模型(图 1)设置在有水沙循环系统的铁水箱内, 净尺寸为 $1.97\text{ m} \times 0.97\text{ m} \times 0.25\text{ m}$. 试验结束排干水后, 拍摄立体像对, 根据近景摄影测量原理量测表面特征点三维坐标, 以数据、地形图方式量化试验结果.

现有数码相机的像幅约为 $10\text{ mm} \times 13\text{ mm}$, 为尽可能提高测量精度, 采用像幅为 $35\text{ mm} \times 25\text{ mm}$ 的普通 135 相机(非量测相机)作为试验用相机.

1.1 建立三维控制网^[2]

确定测绘基准. 以模型长边的平行线为 X 轴, 方向从入水口到出水口, Y 轴垂直于 X 轴, 方向从右岸到左岸; Z 轴垂直于 XY 平面向上, 原点 O 设在右岸入水口附近的模型表面以下约 50 cm 处.

模型沿水流从上游到下游间隔 $20 \sim 50\text{ cm}$ 共布置了 20 个控制点(图 1 的 $\oplus$ 形标记)作为对河床周围的控制, 以确保从不同部位、角度拍照时都能够得到足够的像片控制点. 控制点标记为直径 20 mm 的圆靶形十字丝(图 2).

三维控制点平面坐标采用全站仪前方交会法施测, 点位精度 $\pm 0.3\text{ mm}$; 高程采用 II 等水准测量施测, 精度 $\pm 0.2\text{ mm}$.

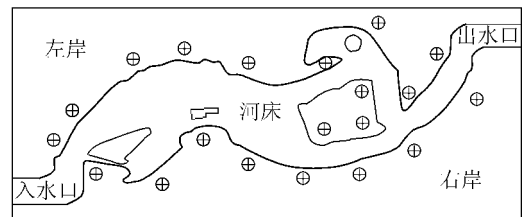


图 1 微尺度模型平面示意图

Fig.1 Sketch of microscale model

1.2 摄影及像片数字化

左右摄站设置在高约 3 m 的摄影台上,采用从模型正上方自上而下的长基线交向摄影方式摄影。交向角 $0^{\circ} \sim 20^{\circ}$,基线长 0.2 ~ 0.8 m 且与模型的长边平行。左右影像重叠度 90% 以上,摄影距离(摄站到模型表面平均距离)1.8 ~ 2.5 m,摄影比例尺 1:36 ~ 1:50。摄影基线、距离、范围及摄站位置等可根据需要进行调整。

拍摄的胶卷冲洗后,用扫描仪扫描成数字图像(位图)。扫描分辨率 1 200 ~ 2 000 dpi,像素尺寸 0.012 ~ 0.021 mm。图像存储格式为非压缩 tif 格式,扫描灰度级 256(每像素 8 位二进制)。用于像片坐标量测的数字图像需经过图像平滑处理。

1.3 像片坐标量测

像片坐标系:原点为像片(位图)中心, X 轴平行于横向扫描线向右; Y 轴平行于纵向扫描线向上。

控制点坐标量测^[3]。控制点标记为规则几何图形,像片坐标量测采用将图像放大后人工定位与重心法定位相结合的量测方式。

完成像对定向后,待定测点的像片坐标量测,由人工在放大的左像片上确定测点(左片坐标),根据同名核线原理采用单点最小二乘影像匹配方法^[4]测定右片同名点坐标。影像匹配窗口尺寸 9×9 像素。

1.4 像对定向

根据摄影测量原理^[5],在某物方空间坐标系内,摄影时物方点 $P(X, Y, Z)$ 及与其对应的像点 $p(x, y)$ 和摄影中心 $S(X_S, Y_S, Z_S)$ 点位于一直线上,即满足共线条件方程^[7]。对于非量测相机,应顾及相机内方位元素(x_0, y_0, f)得

$$\begin{cases} x = x_0 - f \frac{a_1(X - X_S) + b_1(Y - Y_S) + c_1(Z - Z_S)}{a_3(X - X_S) + b_3(Y - Y_S) + c_3(Z - Z_S)} \\ y = y_0 - f \frac{a_2(X - X_S) + b_2(Y - Y_S) + c_2(Z - Z_S)}{a_3(X - X_S) + b_3(Y - Y_S) + c_3(Z - Z_S)} \end{cases} \quad (1)$$

式中 $a_i, b_i, c_i (i = 1, 2, 3)$ 为像片的 3 个外方位角元素(a, b, c)组成的 9 个方向余弦。

对式(1)求全微分,得一般误差方程

$$\begin{cases} v_x = a_{11}dX_S + a_{12}dY_S + a_{13}dZ_S + a_{14}da + a_{15}db + a_{16}dc - \\ \quad a_{11}dX - a_{12}dY - a_{13}dZ + a_{17}dx_0 + a_{18}dy_0 + a_{19}df - l_x \\ v_y = a_{21}dX_S + a_{22}dY_S + a_{23}dZ_S + a_{24}da + a_{25}db + a_{26}dc - \\ \quad a_{21}dX - a_{22}dY - a_{23}dZ + a_{27}dx_0 + a_{28}dy_0 + a_{29}df - l_y \end{cases} \quad (2)$$

式中: v_x, v_y —— x, y 坐标改正数; $a_{11} \sim a_{19}, a_{21} \sim a_{29}$ ——系数。涉及非量测相机内方位元素(x_0, y_0, f)的系数^[8]为

$$\begin{cases} a_{17} = 1 & a_{18} = 0 & a_{19} = (x - x_0)/f \\ a_{27} = 0 & a_{28} = 1 & a_{29} = (y - y_0)/f \end{cases} \quad (3)$$

对控制点而言,式(2)中的 $dX = dY = dZ = 0$,余下 9 个定向未知数。在 1 张像片上观测 1 个控制点可列 2 个方程,因此至少需观测 5 个控制点,才能解算 9 个定向未知数完成定向。 n 个控制点像片坐标量测的单位权中误差 m_k 为^[6]

$$m_k = \sqrt{\frac{\mathbf{v}^T \mathbf{p} \mathbf{v}}{2n - 9}} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{v}$ ——改正数向量; $\mathbf{p}$ ——权矩阵。

1.5 表面形态量测

模型表面形态可根据特征点三维坐标,以三角形作为基本图形单元,建立模型表面三角网三维立体模型,自动跟踪等值(高)线予以描述^[2]。

在完成像对定向的立体像对上,量测模型表面特征点(待定点)左右像片坐标。对于待定点,式(2)中 9 个定向参数已知,其三维坐标未知数为 dX, dY, dZ 。根据每个待定点的左右像片坐标列出 2 组误差方程式,解算三维坐标。 n 个待定点像片坐标量测的单位权中误差 m_0 为

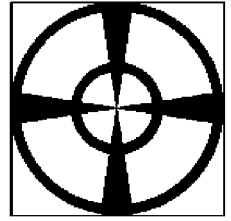


图 2 像片控制点标志
Fig.2 Control point mark of photograph

$$m_0 = \sqrt{\frac{\mathbf{v}^T \mathbf{p} \mathbf{v}}{n}}$$

(5)

设 Q_x, Q_y, Q_z 分别为 X, Y, Z 的协因数, 则待定点的平面精度 m_p 为^[6]

$$m_p = m_0 \sqrt{Q_x + Q_y}$$

(6)

高程精度 m_z 为^[6]

$$m_z = m_0 \sqrt{Q_z}$$

(7)

试验中, 通过布置检查点检验量测结果的可靠性.

2 应用实例

长江下游镇江段微尺度模型试验的目的是通过特大洪水对河床影响的模拟, 研究河床演变趋势和航道整治措施. 模拟试验由水利专家根据常用的河工模型理论, 采用大通站历史实测资料设计. 镇江段地形的平面参数的选取依据是国家海洋信息中心 1994 年 1 月印制的镇江港平面图, 水下地形特别是深泓线则根据镇江市水利局测绘大队 1996 年实测地形图制作. 模型制作的平面比例为 1:18 333, 垂向比例为 1:500.

试验过程: 先对原始模型进行 20 min 的模拟洪水冲刷, 停水后摄影立体像对 A; 再以同样的流量继续放水 10 min, 停水后摄影立体像对 B. 量测立体像对 A、B 表面形态, 根据变形情况, 分析河床(航道)演变趋势.

限于篇幅, 以下仅以立体像对 A 的数据来叙述试验结果.

2.1 摄影及像片数字化

摄影使用 Nikon 135 照相机, 焦距 50 mm 标准镜头, 像幅 35 mm×25 mm, 胶卷感光度 400.

左右摄站布设在高约 3 m 的摄影台上, 摄影距离 1.9 m, 基线长 0.74 m, 左右影像重叠度约 92%, 摄影比例尺为 1:38, 摄影范围为 1.33 m×0.95 m(图 3).

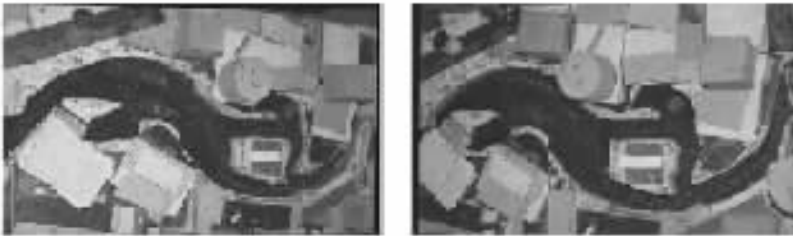


图3 模型立体像对 A
Fig.3 Stereoscopic pair A of microscale model

拍摄胶卷经冲洗后, 图像扫描灰度级 256, 分辨率 1 800 dpi, 像素尺寸 0.014 mm, 图像存储格式为非压缩 tif 格式.

2.2 像对定向

按 1.3 节像片坐标量测方法, 分别在左右像片观测 16 个控制点, 根据 1.4 节像对定向建立误差方程, 平差解算像对定向元素得 16 个控制点像片坐标量测的单位权中误差 $m_k = \pm 0.035$ mm. 相机内方位元素见表 1.

2.3 表面形态量测

完成立体像对定向后, 量测模型表面特征点左右像片坐标^[9]. 立体像对 A 共观测 97 个特征点, 平差后像片坐标量测的单位权中误差 $m_0 = \pm 0.028$ mm, 平均平面精度 $m_p = \pm 0.40$ mm, 平均高程精度 $m_z = \pm 1.02$ mm, 立体像对 A 部分测点的平差结果见表 2.

为了检验量测结果的可靠性^[10], 试验中布置了 2 个检查点, 检查结果见表 3.

表1 立体像对 A 相机内方位元素

Table 1 Interior orientation elements of camera for stereoscopic pair A

内方位元素	左像片		右像片	
	平差值	精度	平差值	精度
x_0	1.59	0.57	3.33	0.54
y_0	4.93	0.60	3.56	0.66
f	49.98	1.04	49.80	1.05

表2 立体像对 A 部分测点的平差结果

Table 2 Adjusted values for several measurement points on stereoscopic pair A

序号	X/cm	Y/cm	Z/cm	m_p/mm	m_z/mm
1	589.14	615.73	39.42	0.42	1.14
2	539.25	599.19	40.01	0.40	0.98
3	562.37	597.61	39.55	0.41	1.09
4	535.12	591.34	44.36	0.39	0.94
5	505.23	604.77	46.49	0.35	0.78
6	499.96	605.62	47.09	0.35	0.77

表 3 立体像对 A 检查点的检查结果

Table 3 Measured result for several check points on stereoscopic pair A

序号	$X_{测}/\text{cm}$	X/cm	$\Delta X/\text{mm}$	$Y_{测}/\text{cm}$	Y/cm	$\Delta Y/\text{mm}$	$Z_{测}/\text{cm}$	Z/cm	$\Delta Z/\text{mm}$
C1	487.42	487.39	0.3	630.71	630.65	0.6	51.13	51.21	-0.8
C2	573.62	573.67	-0.5	582.38	582.34	0.4	52.37	52.30	0.7

根据立体像对 A、B 模型表面特征点三维坐标绘制表面形态,如图 4 所示.图中高程单位为 m,等高距为 2.5 m.

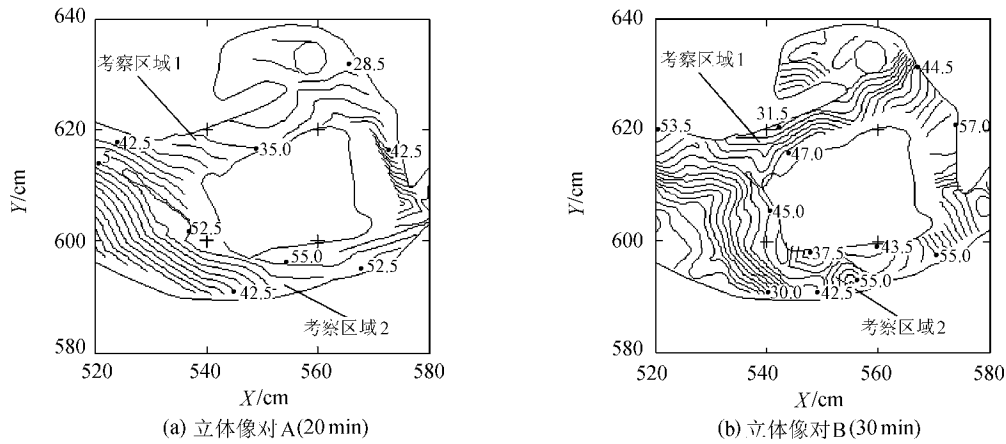


图 4 表面形态

Fig.4 Contour map for river bed

由图 4 可知,随着洪水作用的加强,长江该段汉江河道左岸将逐渐加深、右岸泥沙淤积将逐渐加剧.从高程数据上看,这种汉江左岸加深、右岸淤积的变形趋势表现为:考察区域 1 左岸由 35 m 冲深到 31 m,右岸由 42 m 淤积到 47 m,即左岸冲深了 4 m,右岸淤积了 5 m;考察区域 2 左岸由 55 m 加深到 37 m,右岸由 50 m 淤积到 55 m,左岸加深了 18 m,右岸淤积了 5 m.

3 讨论与分析

就像片坐标量测精度而言,控制点量测精度总是优于待定点量测精度,但在微尺度模型试验中却正好相反.如上述试验中, $m_k = \pm 0.035\text{ mm}$, $m_0 = \pm 0.028\text{ mm}$.其主要原因是非量测相机胶片发生变形.因为在像对定向时,由于控制点的制约,胶片变形表现为控制点的像片坐标改正,反映在平差结果上就是控制点像片坐标量测精度较低,同时降低了内方位元素(表 1)等定向元素的精度.显然,数码相机经过校正可以很好地解决这个问题.但是,CCD 尺寸为 35 mm×25 mm 的数码相机的价格很高,增加了试验成本.

在相机焦距和摄影距离固定的条件下,采用长基线交向摄影有利于提高待定点精度.试验中发现,摄影基线长度与距离之比宜在 1:2~1:8 之间,交向角不宜大于 20°.

纹理缺乏是试验模型图像的特点之一,匹配成功率约为 90%.所以,在实际观测时,需要适当的人工干预,纠正错误的影像匹配.

4 结 论

采用非量测相机拍摄微尺度模型的立体像对,应用数字近景摄影测量技术量测试验模型表面形态,解决了微尺度模型试验的地形测量问题,以数据、地形图方式量化的试验成果特别适用于多方案的分析与比较.该技术在微尺度模型研究领域的应用,有助于河工模型试验研究的数字化进程.使用非量测相机(Nikon 135)摄影,降低了试验对专业测量人员的依赖性,是对近景摄影测量技术的推广和发展.试验表明,数字近景摄影测量技术在微尺度模型河床演变试验中具有良好的应用前景.

参考文献:

[1] 惠遇甲,王桂仙.河工模型试验[M].北京:中国水利电力出版社,1999:96-144.

- [2] 陈建华,章书成,余斌.泥石流近景摄影测量及可视化[J].工程勘察,2003(1):61-63.
- [3] 陈建华,潘庆林.灵山大佛数字近景摄影测量[J].工程勘察,1998(5):51-55.
- [4] 张祖勋,张剑清.数字摄影测量学[M].武汉:武汉大学出版社,2002:159-169.
- [5] 李德仁,郑肇葆.解析摄影测量学[M].北京:测绘出版社,1992:68-71.
- [6] 武汉测绘科技大学测量平差教研室.测量平差基础[M].北京:测绘出版社,1996:83-114.
- [7] 金为铨,杨先宏,邵鸿潮,等.摄影测量学[M].武汉:武汉大学出版社,2003:53-62.
- [8] 冯文灏.近景摄影测量[M].武汉:武汉大学出版社,2002:138-140.
- [9] 熊兴华,陈鹰,钱曾波.一种快速、高精度和稳健的影像匹配算法[J].测绘学报,2005(2):40-45.
- [10] 余永生,毕卫涛.远景摄影测量的一种标定方法及其应用[J].北京大学学报:自然科学版,2006(3):1-4.

Digital close-range photogrammetry in microscale model tests

CHEN Jian-hua¹, CHENG Dong¹, WANG Wei², MAO Ye³

(1. College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Material and Instrument Supply Station, Jiangsu Provincial Bureau of Surveying and Mapping,
Nanjing 210003, China;

3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract According to the mechanism of digital close-range photogrammetry, a 3D stereo model was developed by use of the non-metric camera to take the stereoscopic pair of microscale model and the digital image matching technology to obtain the image coordinates, and then the contour map of model surface deformation was automatically drawn. With this method, a great number of data about river bed surface deformation of Zhengjiang section were obtained in microscale model test on the Yangtze River bed, which are effective for analysis of relevant laws. Analysis shows that the digital close-range photogrammetry can meet the requirement of model tests on river bed evolution.

Key words microscale model; digital close-range photogrammetry; non-metric camera

全国中文核心期刊 中国科技核心期刊
全国水利系统优秀期刊 华东地区优秀期刊 江苏省优秀期刊

《水利水电科技进展》征订启事

(邮发代号 28-244, CN32-1439/TV, ISSN1006-7647, 双月刊, A4 开本)

《水利水电科技进展》由河海大学主办,是全国中文核心期刊,中国科技核心期刊,全国水利系统优秀期刊,华东地区优秀期刊,江苏省优秀期刊.主要刊登水科学、水工程、水资源、水环境、水管理方面的科技论文,主要栏目有水问题论坛、研究探讨、工程技术、水管理、专题综述、国外动态等,适合与水利、水电、水科学、水工程、水资源、水环境有关的科研、工程、管理人员以及大专院校师生阅读.

《水利水电科技进展》由邮局发行,邮发代号 28-244,2008 年每期定价 10 元,全年 6 期共计 60 元.可在全国各地邮局订阅,也可直接向编辑部订阅.

编辑部地址 210098 南京市西康路 1 号 河海大学《水利水电科技进展》编辑部

联系电话 (025) 83786335 传真 (025) 83786335

E-mail: jz@hhu.edu.cn

http://kkb.hhu.edu.cn