

DOI:10.11784/tdxbz201604060

基于 B 超成像的浑水地形可视化测量与模型重建

宋欢¹, 邹先坚^{1,2}, 王川婴², 韩增强², 马志敏¹

(1. 武汉大学电子信息学院, 武汉 430072;

2. 中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071)

摘要: 河工模型试验中, 浑水地形的实时观测与模型重建对研究泥沙运动与河床演变规律具有重要的意义。本文针对 B 超成像仪获取的水下实时地形图像, 提出了一种浑水地形的可视化实时测量与三维模型重建方法。该方法根据相近连续多帧图像中地形地貌的相似性和渐变性, 自动跟踪识别水下床面地形边界线, 实时监测水下地形的变化情况并进行三维重建。试验结果表明浑水地形的可视化测量误差和重建后的三维地形偏差均不大于 1 mm, 有效消除了床面附近运动泥沙颗粒的成像干扰, 再现了浑浊水流下的沙波地形原貌。该方法直观快捷、实时性好, 可作为水流泥沙运动规律研究和沙波地形观测及其冲淤情况分析的一种有效手段。

关键词: 超声成像; 浑水地形; 可视化测量; 三维模型重建; 实时观测

中图分类号: TV131

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2017)03-0255-07

Visual Measurement and Model Reconstruction of Topography Under Muddy Water Based on B-Mode Ultrasound Imaging

Song Huan¹, Zou Xianjian^{1,2}, Wang Chuanying², Han Zengqiang², Ma Zhimin¹

(1. School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: Real-time observation and model reconstruction of topography under muddy water are vital for the research of sediment movement and fluvial process in the model test of river engineering. In this paper, a real-time visual measurement and 3D model reconstruction method based on the ultrasonic images obtained by B-mode ultrasound imaging device is described for the topography under muddy water. Based on the similarity and gradual change of topography in the consecutive multi-frame images, this method can automatically identify underwater riverbed boundary lines, real-time monitor the change of topographic lines and then reconstruct their 3D model topography. Results show that the errors of both visual measurement and 3D reconstruction are less than 1 mm for muddy-water topography in model test. The method can effectively neglect the imaging interference of moving particles and reproduce the topography under muddy water. This method is visual, fast and real-time. It is an effective approach for water-sediment movement research, sand topography monitor and their riverbed erosion and deposition analysis in sediment-laden flow.

Keywords: ultrasound imaging; muddy-water topography; visual measurement; 3D model reconstruction; real-time observation

在河工模型试验中, 浑水地形的实时测量与三维重建一直是比较棘手的问题, 也是十分复杂又比较繁

琐的任务^[1-4]。为准确获取水下地形及其冲淤变化等信息, 需要寻找一种能够对水下地形信息进行实时观

收稿日期: 2016-04-21; 修回日期: 2016-07-24.

作者简介: 宋欢(1989—), 女, 博士研究生.

通讯作者: 邹先坚, zouxianjian@whu.edu.cn.

网络出版时间: 2016-08-25. 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/12.1127.N.20160825.1359.008.html>.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41402278, 41372317); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2014212020205).

Supported by the National Natural Science Foundation of China(No. 41402278 and No. 41372317) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities(No. 2014212020205).

测与重建的方法^[5-6]。目前,国内外已经研发了多种用于水下地形测量的仪器,如光电反射式和电阻式地形测量仪、超声和激光扫描式地形测量仪^[7-8]。在实际测量中,浑水意味着光学方法无法直接透视水体从而观测水底泥沙地形的运动变化情况;浑水泥沙颗粒的运动会导致床面地形边界的变化^[9],这就意味着传统的接触式测量方法会导致更大的测量误差,无法很好地解决这个测量问题。因此,现有的地形仪基本上无法实现浑水床面剖面地形非点式和接触式的可视化测量与模型重建,也无法对混浊水流情况下的泥沙地形(比如河工模型试验中水下粉煤灰地形)进行有效地实时观测与动态分析。

近年来,B超成像仪已成功应用在测量泥沙起动流速、水中含沙量及其垂线分布等方面^[10-11]。采用了高频超声扫描成像技术的B超成像仪指向性好、分辨率高,满足对水中泥沙颗粒和床底地形的测量分析要求^[10-16]。于是,笔者提出使用B超成像仪及相关信号处理技术来解决河工模型试验中水下地形的可视化测量与三维模型重建问题。利用B超成像仪对水下床面地形进行剖面扫描成像,从而获得剖面地形的视频图像。通过分析相邻多帧B超图像的信号特征和水底泥沙地形的运动特性,快速识别水底床面地形的边界线,再根据识别出的多条连续床面地形边界线进行线间曲线插值,进而重建了水下床面地形的三维模型图像,实现了浑水下模型地形的可视化测量与三维重建,再现了床面地形原貌及其冲刷淤积过程。

1 B超视频图像采集处理系统

为了实现水下地形的可视化测量与三维模型重建,本文利用B超成像仪构建了一个水下剖面地形的实时监测系统。该系统由三维定位测控平台、B超成像仪(APOGEE 1100)、玻璃水槽、计算机和B超图像采集与信号处理软件组成,系统框图见图1。在测量过程中,B超探头始终置于待测量区域的上方,并接触水面;三维定位测控平台搭载B超成像仪,并控制B超探头行走至指定区域进行B超图像采集,从而实现整个测量区域剖面地形的扫描成像与图像采集;经过计算机软件分析处理后即可观测水下地形的实时变化情况。另外,当整个床面扫描完成后,根据观测到的床面地形边界线进行信号分析与重组即可得到水下床面地形的三维模型图。

本文中,B超成像仪采集的视频图像文件是后缀名为.cin的视频文件,经转化后可得到连续的多帧BMP图像,其中1帧浑水地形的B超图像如图2所

示。在图2中,下方的亮带是水中泥沙地形的B超成像信号,泥沙地形成像亮带上方区域的灰色光斑点为水中悬浮运动的沙粒。在流速较大、浓度较高的浑水动床模型试验中,由于水沙的互相作用,且模型塑料沙比重很轻,床面及其附近沙粒的流动性很大,泥沙颗粒会在床面地形上进行翻滚、上扬或沉淀运动。泥沙颗粒在床面及之上的运动会导致B超图像部分区域相对模糊,特别是床面边界和凹凸区域,如图2中床面地形成像亮带的中心区域,由于泥沙起动运动而形成漂浮云状的白块。

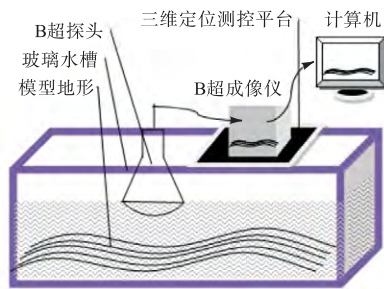


图1 B超视频图像采集处理系统

Fig.1 B-mode ultrasound acquisition and processing system

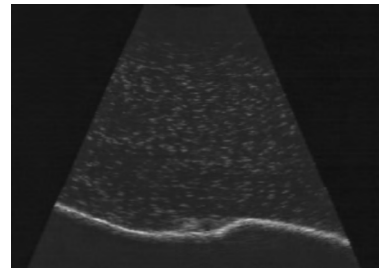


图2 浑水中泥沙地形的B超图像

Fig.2 B-mode ultrasound image of sediment topography under muddy water

2 水下地形可视化测量与动态分析

基于B超成像的浑水地形可视化测量与模型重建方法主要分如下几个步骤(见图3)进行:首先,自动识别B超图像中地形成像亮带;然后,把识别到的

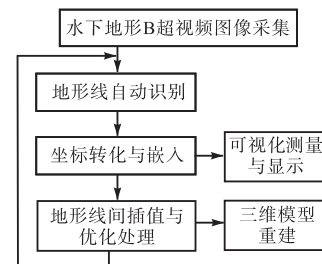


图3 本文方法步骤示意

Fig.3 Procedure schematic of this method proposed in this paper

床面地形边界线转化为实际对应的深度，并实时更新到 B 超视频图像中，从而实现水下地形的可视化测量；同时把连续测量的地形线累计到特定区域进行处理，最后实现水下地形的三维重建。

2.1 地形亮带特征与自动识别

由 B 超视频图像可知，B 超成像仪对水下地形的成像是一条在水平方向上延伸的亮带，这条亮带的特征可归纳为：①地形亮带有一定的宽度且中心区域灰度值较大，一般在 15 个像素宽左右；②床面地形及其上方的悬浮泥沙运动容易造成地形成像亮带的丢失或者变形；③亮带上边界处的灰度变化较为明显，如图 4 所示。图 4 中右侧显示了其中 1 帧 B 超图像某一列像素点(从上到下)的灰度变化情况。图中地形亮带处的灰度值比较突出，并且存在 1 个突变过程，突变点为地形亮带上的像素点，对应于实际地形的深度位置。据此，可以自动跟踪识别水下地形亮带的边界线。

于是，本文直接从 B 超获得的视频图像特征出发，根据床面地形超声成像亮带在水平方向上的连续性和局部特征进行地形亮带边界线的跟踪提取，如图 2 和图 4 所示。采用灰度与梯度之和的最大值作为地形边界处的判断依据^[17]，依次识别地形亮带边界线上的点，从而实现水下地形线的跟踪提取，具体实现步骤如图 4 中的左侧示意所示。

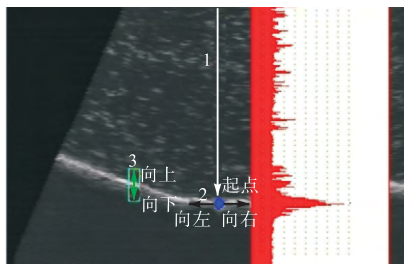


图 4 水下地形自动识别过程与成像亮带灰度特征
Fig.4 Automatic identification process of underwater topography and its imaging grey feature of bright band

在文献[17]所述方法的基础上，采用图像左上角为坐标原点，像素坐标从上往下和从左往右依次递增，设原图像为 $f(x, y)$ ，统计计算后的灰度梯度为 $g(x, y)$ 。本文采用更宽的领域 5×3 ，则点 (i, j) 处灰度幅值与梯度和 $g(i, j)$ 的计算方法为

$$g(i, j) = \frac{1}{5} \sum_{k=-2}^{+2} [f(i+1, j+k) - f(i-1, j+k) + f(i, j+k)] \quad (1)$$

为保证搜索到的特征点准确定位在地形亮带上，采用了如下改善措施：在 B 超图像中确定跟踪起点

时，取自上往下所有扫描过的像素点灰度平均值作为背景阈值 T_L ，取地形亮带区域所有像素点的灰度平均值作为目标阈值 T_H ；当函数 $f(x, y)$ 在点 $O(I_o, J_o)$ 处取得最大值 $g(I_o, J_o)$ ，意味着点 $O(I_o, J_o)$ 可能在地形亮带上，则同时在该点的左右两侧进行相同的操作得到 $O'(I_o', J_o')$ 和 $g(I_o', J_o')$ ， $O''(I_o'', J_o'')$ 和 $g(I_o'', J_o'')$ ，并保证它们满足限制条件

$$\begin{cases} |g(I_o, J_o) - g(I_o', J_o')| < T_H - T_L \\ |g(I_o, J_o) - g(I_o'', J_o'')| < T_H - T_L \\ g(I_o, J_o) > T_H \\ g(I_o', J_o') > T_H \\ g(I_o'', J_o'') > T_H \end{cases} \quad (2)$$

在判定跟踪起点 $O(I_o, J_o)$ 的情况下，自动跟踪识别地形线的过程是：根据领域灰度梯度特征，由当前已经判定的坐标点向左或向右依次判定下一个相邻坐标点。判定方法是依据如图 4 所示的地形亮带灰度梯度分布情况，计算出下一个地形亮带坐标点相对前一个坐标点的纵坐标 y 的偏移量 Δy ，即可得到下一个地形亮带坐标点 $(I_o + 1, J_o + \Delta y)$ ，以此类推，从而实现整个地形线的快速提取与识别。

在水流动态床沙环境中，地形上的泥沙颗粒因水流运动而运动，造成地形成像亮带部分区域的相对模糊。为减少该影响，在当前列的基础上继续往前探测地形，捕捉前面相对稳定的地形与当前位置的偏移量 Δy 并反馈回来。即在当前第 i 列的前 c 列(即 $i + c$ 列)进行同样的操作，得到偏移量 Δy_{i+c} ，然后取距离的倒数值为权值，并加权到当前列去，即

$$y_i = y_{i-1} + \Delta y_i + \Delta y_{i+c} / c \quad (3)$$

式中： y_i 为第 i 列的纵坐标； y_{i+1} 为第 $i + 1$ 列的纵坐标； c 在本文中取值为 5。

2.2 地形线转化与可视化测量

根据相邻帧频图像中地形亮带的相似性和渐变性，由上述方法和改善措施而跟踪提取到的地形线在经过适当的平滑滤波处理^[18]后即可得到 1 条符合水下地形实际情况的曲线，地形提取方法的实际应用效果如图 5 和图 6 中红色地形线所示。该曲线由像素坐标组成，需要转化为实际对应的深度距离坐标。本文使用的 B 超成像仪的横向和纵向分辨率均小于 1 mm。为进一步验证成像精度和每个像素点所对应的横向和纵向距离，笔者进行了有关的率定试验，即将 1 块标准的金属铝块(25 cm × 12 cm × 4 cm)水平放入水中成像，得到金属铝块宽度和高度方向的二维剖面图，即 B 超图像。该 B 超图像中金属铝块宽度对应于 35 个像素点距离，高度对应于 11 个像素点距

离. 由此可见, B 超图像中每个像素点所对应的纵向距离约为 0.363 mm, 横向距离约为 0.343 mm. 根据这个对应关系, 即可把地形线的像素坐标距离转化为实际地形的垂直深度距离和水平延伸距离.

水下地形自动识别的地形线经转化后得到实际工程上的距离, 并重新绘制到对应的 B 超图像中, 用以人性化显示. B 超视频图像中每帧 BMP 图像对应 1 个水下地形亮带, 每个亮带都自动识别出 1 条地形线, 每条地形线都重新绘制到每帧视频图像中, 这样就实现了水下地形的实时测量, 也实现了浑水泥沙地形的可视化监测, 如图 5 所示. 图 5 中红色曲线表示跟踪识别到的床面地形亮带线. 提取到的地形边界线是 1 条单像素宽的连续曲线, 与实际床面地形吻合较好, 能够反映床面地形受到水流泥沙的运动作用而起伏变化的情况.

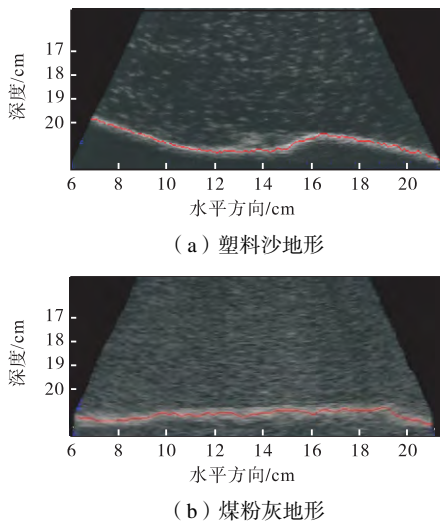


图 5 水流作用下泥沙地形的可视化测量效果图
Fig.5 Visual measuring result of sediment topography under the water flow

2.3 浑水地形动态测量与实时分析

由于 B 超成像仪的帧频可以保证在 30 Hz 以上, 对水下地形的成像速度也可以达到 24 帧/s 以上, 满足了人眼视觉暂留性要求, 故本文所述方法可以实现水下地形的实时动态测量. 通过对比前后帧地形线的变化情况还可以对水下地形进行实时动态分析, 从而实现泥沙地形的冲刷淤积情况分析. 仔细对比图 6(a)和图 6(b)中的 A、B、C 3 个监测点可知, 水下地形线 A、B、C 处已经发生了微小变化: A 处发生了泥沙的起动运动和冲刷, B 处和 C 处发生了泥沙的沉降和淤积.

此外, 由于泥沙地形运动的缓慢性 and 渐变性, 在短时间内相邻帧频图像中的地形线之间具有相似性和渐变性. 根据这种相似性可以实现多条地形线之

间的互相配比较准, 也可以根据这种渐变性实现水下地形运动的实时监测及其微小变化的实时分析. 由此可见, 浑水下模型地形的实时运动变化情况可以得到有效地监测和分析.

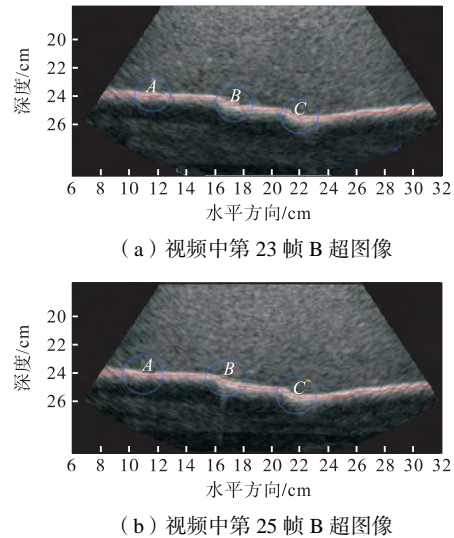


图 6 浑水地形的动态测量与冲刷淤积分析
Fig.6 Dynamic measurement of topography and analysis of its erosion and deposition under muddy water

3 水下地形三维模型重建与误差分析

水下地形的三维重建需要快速方便地获取大量的三维地形数据, 利用三维定位测控平台带动 B 超探头进行定点定位扫描成像可以满足该需求. 利用 B 超成像仪、三维定位控制平台可以对床面地形进行分段扫描或者进行连续扫描. 由于 B 超成像速度有限, 分段扫描可以把整个地形分为多个连续剖面, 然后行走指定剖面位置进行连续多次扫描图像, 从而获得每个剖面的精确二维数据, 最后把每个剖面二维地形数据按顺序组合成三维地形数据, 并通过地形线间的插值拟合以实现三维床面地形数据的补充和完整, 如图 7 所示. 图 7 由相对连续的 5 个二维剖面地形数据构成, x 轴为 5 个扫描点, y 轴为每个扫描点跟踪提取出的床面地形边界线(即 yz 平面), z 轴表示水深, x

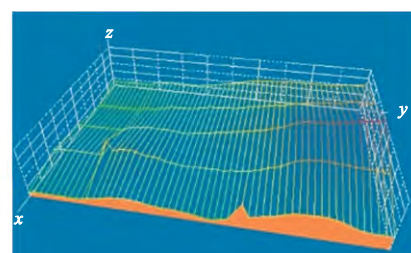


图 7 5 个剖面地形的三维图
Fig.7 A 3D map reconstructed with five topographic profile

轴表示 B 超探头扫描的方向. 由图 7 可以清晰地看到 5 个剖面地形构成的三维水下地形, 但由于地形剖面的采集间距比较大, 采集剖面也比较少, 故三维地形重建效果相对较差, 无法满足实际需求.

为了更加真实地再现水下地形, B 超成像仪可以在三维定位测控平台的帮助下进行连续地剖面扫描. 如水深约 300 mm 时, B 超探头发出高频超声波, 0.5 ms 之后可接收回波信号. 当探头水平扫描速度为 100 mm/s 时, 在每次超声波成像时间内探头移动的距离仅为 0.05 mm^[19]. 若给 B 超成像仪预留 10 倍的成像处理时间, 当 B 超的帧频取 20 Hz, 水平扫描速度为 200 mm/s 时, B 超探头在每次超声波成像时间内也仅移动 0.05 mm. 故可认为当 B 超探头以较低速度(小于 100 mm/s)行走时, 基本上不影响 B 超成像的质量和精度, 且能实现整个地形的快速扫描成像和三维重建. 其中 1 次连续扫描成像并经过处理之后的三维地形图如图 8 所示. 由图 8 可知, 浑水床面地形得到了三维重建, 效果较好. 使用本文方法, 在经过软件编程之后可以实现对水下床面地形的三维模型重建, 并实现图形的切割、旋转和地势分

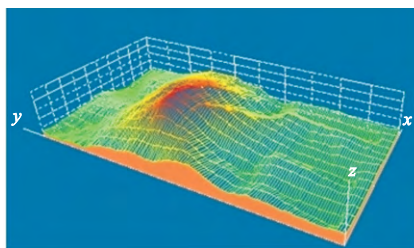


图 8 水下地形三维重建效果图

Fig.8 3D reconstruction of underwater topography

析, 还可显示床面地形的冲淤情况和沙波运动的监测情况.

在流速低于 400 mm/s 的清水模型试验中, B 超成像仪已经能够识别平均粒径大小为 0.1 mm 的模型试验沙, 并可进行成像观察和测量, 进一步考虑水流冲刷地形引起的泥沙颗粒运动, B 超成像仪对床面地形的识别精度应在 1 mm 以内^[17-20]. 实际上, B 超图像中每个像素点所代表的实际距离小于 0.4 mm, 而自动跟踪识别出来的地形线也不会超过两个像素点距离的误差即 0.8 mm, 故水下地形可视化测量和三维重建的精度应该可以控制在 1 mm 以内.

为了进一步验证浑水地形的可视化测量和三维重建精度, 笔者采用水平玻璃板作为定床, 并在玻璃板的前端铺上煤粉灰地形, 在一定流速下煤粉灰(平均粒径约 0.1 mm)会随着水流运动继而覆盖部分玻璃板. 在此基础上运用本文方法进行浑水地形测量与三维重建试验, 在结果中抽出其中 1 条地形线进行分析, 测量结果与水平玻璃线的对比分析如图 9(a)和 9(c)所示. 由图 9(c)可知, 包括玻璃板上沉积的薄薄 1 层煤粉灰地形在内, 测量误差也在 2 mm 以内. 该测量误差已经包含覆盖在玻璃板上的煤粉灰薄层, 而该薄层的厚度至少大于 1 mm, 因此, 实际测量误差应小于 1 mm. 为进一步验证实测地形的精度误差, 采用传统的探针测量方法在清水静水的模型地形上进行对比测量分析, 对比分析结果如图 9(b)和 9(d)所示. 由图 9(d)可知, B 超成像测量地形线与实测探针点的误差在 1 mm 以内, 故本文所述方法对水下地形的可视化测量与模型重建的误差不大于 1 mm.

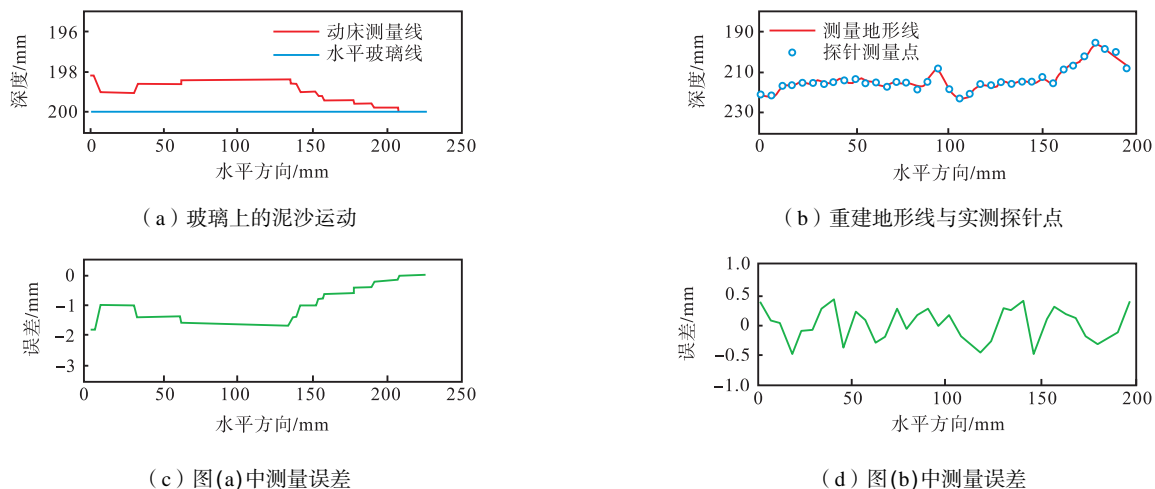


图 9 可视化测量与模型重建的误差分析

Fig.9 Error analysis of visual measurement and model reconstruction for underwater topography

4 结 语

针对河工模型试验中浑水地形的实时监测与动态分析等问题,本文提出了一种基于 B 超成像技术的浑水地形可视化测量与三维模型重建方法.该方法利用 B 超成像仪对水体进行实时成像并获取对应的视频图像,视频图像转化为单帧 BMP 图像进行水下地形亮带的自动识别,经过地形线坐标转化之后重新嵌入到视频图像中,从而实现了河工模型试验中水下地形的可视化测量;同时也根据相邻帧频图像之间的相似性和渐变原理进行地形线之间的插值拟合与比对矫正,从而实现了浑水地形下的三维模型地形重建,再现了水下地形原貌.该方法能够实现浑水地形的实时观测与动态分析,能够分析泥沙地形的冲刷淤积和床面沙波运动等情况.水下模型地形的可视化测量与模型重建误差小于 1 mm,测量地形和模型地形均与真实地形吻合较好,对河工模型水流泥沙的试验研究及有关实践活动具有重要的意义.该方法已经应用在实际项目中,运行情况良好.

参考文献:

- [1] 王晓玲, 孙小沛, 周正印, 等. 高填方渠道溃堤洪水三维风险图研究[J]. 天津大学学报: 自然科学与工程技术版, 2015, 48(8): 697-707.
Wang Xiaoling, Sun Xiaopei, Zhou Zhengyin, et al. Study on 3D dike-breach flood risk map of high fill channel[J]. *Journal of Tianjin University: Science and Technology*, 2015, 48(8): 697-707(in Chinese).
- [2] Bertin S, Friedrich H. Measurement of gravel-bed topography: Evaluation study applying statistical roughness analysis[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, 140(3): 269-279.
- [3] Yang J, Zhang J, Meng J. Underwater topography detection of Taiwan Shoal with SAR images[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2010, 28(3): 636-642.
- [4] 刘丽艳, 闻精精, 杨 洋, 等. 基于 MATLAB 的超声空化场表征与三维可视化[J]. 天津大学学报: 自然科学与工程技术版, 2013, 46(12): 1133-1138.
Liu Liyan, Wen Jingjing, Yang Yang, et al. Measurement and visualization of ultrasonic cavitation field based on MATLAB[J]. *Journal of Tianjin University: Science and Technology*, 2013, 46(12): 1133-1138(in Chinese).
- [5] 杜国明, 陈晓翔, 吴超羽, 等. 长时间尺度珠江口河网水下地形演变过程三维可视化实现及分析[J]. 水科学进展, 2005, 16(2): 181-184.
Du Guoming, Chen Xiaoxiang, Wu Chaoyu, et al. 3-D visualization and analysis for underwater terrain evolution of the Pearl River estuary networks in long-term span[J]. *Advances in Water Science*, 2005, 16(2): 181-184(in Chinese).
- [6] Lane S N, Richards K S, Chandler J H. Developments in monitoring and modelling small-scale river bed topography[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1994, 19(4): 349-368.
- [7] 陈 诚, 唐洪武, 陈 红, 等. 国内河工模型地形测量方法研究综述[J]. 水利水电科技进展, 2009, 29(2): 76-79, 94.
Chen Cheng, Tang Hongwu, Chen Hong, et al. Review of the research on topographic survey methods for physical river models in China[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2009, 29(2): 76-79, 94(in Chinese).
- [8] 赵海鸣, 卜英勇, 王纪婵, 等. 摆动式单波束超声波水下微地形探测[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2007, 38(5): 932-936.
Zhao Haiming, Bu Yingyong, Wang Jichan, et al. Detection of seabed cobalt-rich crusts micro-topography based on single-beam ultrasonic wave[J]. *Journal of Central South University: Science and Technology*, 2007, 38(5): 932-936(in Chinese).
- [9] 乔光全, 张金凤, 张庆河, 等. 紊流对黏性泥沙絮凝沉降影响的实验研究[J]. 天津大学学报: 自然科学与工程技术版, 2014, 47(9): 811-816.
Qiao Chuanguan, Zhang Jinfeng, Zhang Qinghe, et al. Experimental investigation of the influence of turbulence on the flocculation and settling of cohesive sediment[J]. *Journal of Tianjin University: Science and Technology*, 2014, 47(9): 811-816(in Chinese).
- [10] 马志敏, 邹先坚, 赵小红, 等. 基于 B 超成像的泥沙起动流速测量方法[J]. 水科学进展, 2015(1): 59-65.
Ma Zhimin, Zou Xianjian, Zhao Xiaohong, et al. A method of measuring sediment incipient velocity based on B-scan ultrasound imaging technique[J]. *Advances in Water Science*, 2015(1): 59-65(in Chinese).
- [11] 马志敏, 邹先坚, 赵小红, 等. 基于 B 超成像的低含沙量测量[J]. 应用基础与工程科学学报, 2013, 21(4): 796-803.
Ma Zhimin, Zou Xianjian, Zhao Xiaohong, et al. The

- measurement of low sediment concentration based on B-mode ultrasound images[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2013, 21(4): 796-803(in Chinese).
- [12] Parry J D, Holmes A K, Unwin M E, et al. The use of ultrasonic imaging to evaluate the effect of protozoan grazing and movement on the topography of bacterial biofilms[J]. *Letters in Applied Microbiology*, 2007, 45(4): 364-370.
- [13] Zou X, Ma Z, Zhao X, et al. B-scan ultrasound imaging measurement of suspended sediment concentration and its vertical distribution[J]. *Measurement Science and Technology*, 2014, 25(11): 115303.
- [14] 赵小红, 马志敏, 范北林, 等. 基于粒子运动分析的慢流速超声测量技术研究[J]. *仪器仪表学报*, 2008, 29(4): 845-849.
Zhao Xiaohong, Ma Zhimin, Fan Beilin, et al. Ultrasonic velocimetry based on particle displacement for slow flow[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2008, 29(4): 845-849(in Chinese).
- [15] 黄云开, 郑政, 杨柳. 基于MATLAB的三维超声成像及图像处理[J]. *仪器仪表学报*, 2009, 30(4): 840-847.
Huang Yunkai, Zheng Zheng, Yang Liu. Three dimension ultrasound imaging and image processing based on MATLAB[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009, 30(4): 840-847(in Chinese).
- [16] 李健, 郭薇, 杨晓霞, 等. 超声相控阵检测CFRP缺陷识别方法[J]. *天津大学学报: 自然科学与工程技术版*, 2015, 48(8): 750-756.
Li Jian, Guo Wei, Yang Xiaoxia, et al. A flaw classification method for ultrasonic phased array inspection of CFRP[J]. *Journal of Tianjin University: Science and Technology*, 2015, 48(8): 750-756(in Chinese).
- [17] 宋欢, 王川婴, 邹先坚, 等. 基于B超图像的水下模型地形提取方法[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2015, 23(2): 225-232.
Song Huan, Wang Chuanying, Zou Xianjian, et al. An extracting method of underwater model topography based on B-mode ultrasound images[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2015, 23(2): 225-232(in Chinese).
- [18] Zou X, Ma Z, Hu W, et al. B-mode ultrasound imaging measurement and 3D reconstruction of submerged topography in sediment-laden flow[J]. *Measurement*, 2015, 72: 20-31.
- [19] 马志敏, 范北林, 许明, 等. 河工模型三维地形测量系统的研制[J]. *长江科学院院报*, 2006, 23(1): 47-49, 60.
Ma Zhimin, Fan Beilin, Xu Ming, et al. Development of measuring instrument for 3-D river bed model topography[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2006, 23(1): 47-49, 60(in Chinese).
- [20] Kim H B, Hertzberg J R, Shandas R. Development and validation of echo PIV[J]. *Experiments in Fluids*, 2004, 36(3): 455-462.

(责任编辑:赵艳静)