

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.03.003

基于断面数据生成虚拟水尺的河道水位视觉测量方法

汪崎宇¹, 张 振^{1,2}, 张田雨¹, 王嘉诚¹

(1. 河海大学信息科学与工程学院; 2. 水利部水循环与水动力系统重点实验室)

摘要:为解决岸基摄像机在高洪期因水尺易被漂浮物缠绕、损坏而导致水位监测精度低、可靠性差的问题,基于单目视觉摄影测量原理,建立了图像水位线像素纵坐标与实际水位的映射关系,采用金字塔场景解析网络对水体与河岸进行语义分割,同时结合断面地形数据构建虚拟水尺,将水位线像素纵坐标转换为实际水位。实例验证结果表明:水位线检测的均方根误差小于 2 像素,通过合理的摄像机选型控制成像的高程空间分辨率,可使水位测量精度优于 2 cm;本文方法采用岸基倾斜布设,无需实体水尺与地面控制点,实现了完全非接触式水位在线监测,具有运维成本低、鲁棒性强、结果直观等优点,适用于天然河道、人工明渠等不规则断面场景。

关键词:水位测量;虚拟水尺;图像语义分割;水位线检测;深度学习

Visual measurement method of water level in rivers based on virtual water gauge generated by cross-section data

Wang Qiyu¹, Zhang Zhen^{1,2}, Zhang Tianyu¹, Wang Jiacheng¹

(1. College of Information Science and Engineering, Hohai University;

2. Key Laboratory of Hydrologic-Cycle and Hydrodynamic-System of Ministry of Water Resources)

Abstract: To address the problem of low accuracy and poor reliability of water level monitoring caused by water gauges being easily entangled by floating debris and damaged during flood periods under shore-based camera deployment, a mapping relationship between the pixel's vertical coordinate of the waterline in an image and the actual water level was established based on monocular photogrammetry. The pyramid scene parsing network was employed to perform semantic segmentation of water and riverbank regions. Meanwhile, cross-sectional terrain data were combined to construct a virtual water gauge, through which the pixel's vertical coordinate of the waterline was converted into the actual water level. Experimental results show that the root mean square error of waterline detection is less than 2 pixels. By properly selecting cameras to control the spatial resolution of imaging elevation, the accuracy of water level measurement can be better than 2 cm. With inclined shore-based camera deployment, the proposed method achieves fully non-contact online water level monitoring without requiring a physical water gauge or ground control points. It has the advantages of low operation and maintenance cost, strong robustness, and intuitive results and is applicable to irregular cross-sectional scenarios such as natural rivers and artificial open channels.

Key words: water level measurement; virtual water gauge; semantic segmentation of image; waterline detection; deep learning

水位测量是江河湖库水文监测的基础工作,及时、准确的水位测量对于水资源精细化管理和水灾害预警预报具有十分重要的意义^[1-3]。为了准确实时地测量水位,目前国内大多数水文监测站仍依赖传统的水位测量方法,主要包括人工测量和自动水位计测量。人工定时监测水尺获取水位虽然普遍,但该方法智能化程度低、准确性差,且在洪水等极端条件下存在安全隐患。在河流水文监测中,自动水位计测量技术可分为接触式和非接触式两类。接触式水位计(如浮子式水位计^[4]、压力式水位计^[5]、液介式超声波水位计)需要直接接触水体,容易受到水体环境因素的影响,导致测量故障或精度降低。非接触式水位计(如气介式超声波水位计^[6]、激光水位计^[7]、雷达水位计^[8])虽然避免了接触水体带来的问题,但是安装复杂,应用场景受限且成本较高。

随着计算机视觉技术的快速发展,基于视频监控的图像法水位测量逐渐成为研究热点。根据是否依赖物理水尺,该方法可分为两类:有水尺和无水尺。有水尺方法通过图像处理技术识别水尺信息,分为两种:

基金项目:江苏省水利科技项目(2021070)

作者简介:汪崎宇(1999—),男,硕士研究生,主要从事信息获取与处理研究。E-mail:231323020017@hhu.edu.cn

通信作者:张振(1985—),男,副教授,博士,主要从事光电成像与多传感器系统、图像法测流技术研究。E-mail:zz_hhuc@hhu.edu.cn

①识别水尺上的刻度线和字符^[9-11],从而确定实际水位值;②检测水尺的水位线,并利用模板配准或映射关系计算实际水位值^[12-15]。有水尺方法精度较高,已在水文测量中得到初步应用。但其受光照条件、漂浮物遮挡等环境因素的影响较大,且需依赖水尺在固定环境中的稳定安装。相比之下,无水尺方法通过检测图像中的水位线推算水位,避免了对水尺的依赖,具有更广泛的适用场景,但现有技术仍存在诸多局限。无水尺方法的核心问题之一是如何检测水位线位置。基于传统图像处理的水位线检测方法^[16]在水面耀光、倒影及干湿分界线等干扰下表现不佳。部分研究尝试引入深度学习技术,通过语义分割模型^[17-18]提高水位线检测的鲁棒性。无水尺方法的另一个核心问题在于如何将检测的水位线坐标转换为实际水位值。例如:孙英豪等^[19-20]通过计算水位线与控制点之间的相对距离推算水位值,该方法采用线性插值计算水位,操作简便,适用于断面平整、地形规则的水岸边坡,然而该方法需要提前布设控制点并要求相机处于平视视角下,不适应复杂地形;Kim 等^[21-22]通过标定得到图像中像素点和世界坐标之间的透视转换关系,利用转换关系计算图像中水位线的实际水位值,该方法仍需特定条件下的多个控制点,在控制点布设困难的场景下适用性较差;石晗耀等^[23]采用双目相机的视差原理提取水域三维信息,利用相机的内外参数计算水位线的三维坐标,该方法标定复杂并且随着距离的增加可靠性会降低,在野外河道水位测量中难以适用。综上,这些方法通常依赖特定的控制点布设,在复杂地形中的适应性较差,且通常仅输出数值,缺乏直观性^[24-25]。

鉴于此,本文提出一种基于断面数据生成虚拟水尺的河道水位视觉测量方法。该方法融合单目视觉摄影测量原理与深度学习语义分割技术,实现水位线高精度提取与虚拟水尺可视化。与传统水位测量方法相比,本文方法充分利用已有河道断面地形数据,无需布设实体水尺与地面控制点,可适用于复杂、不规则河道断面。通过宽断面天然河道与窄断面人工渠道两组对比实验,验证了所提方法的有效性,并对测量精度与误差来源进行了系统分析与评估。

1 测量方法

水位测量的基本流程如图 1 所示,具体步骤如下:①对采集图像进行畸变校正;②结合断面地形数据,根据水位线像素纵坐标与实际水位间可逆的关系,建立倾斜视角下的水位摄影测量模型;③选取包含水位最大变幅区域的感兴趣区域(region of interest, ROI)进行数据集构建;④训练金字塔场景解析网络(pyramid scene

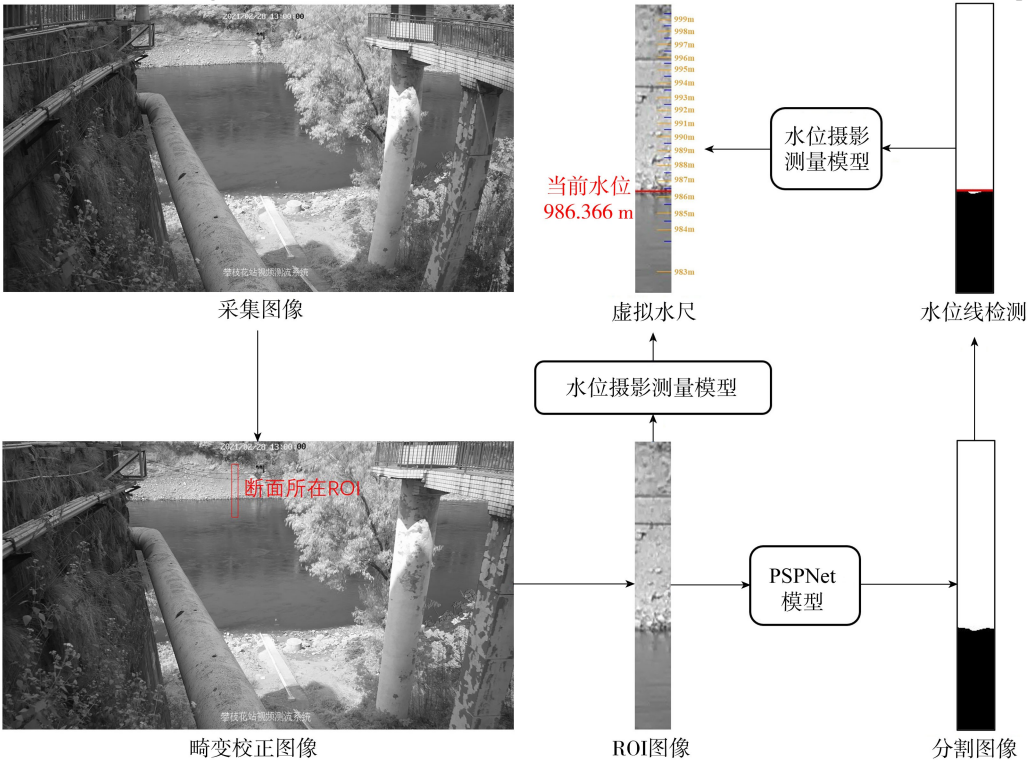


图 1 水位测量的基本流程

Fig. 1 Basic process of water level measurement

parsing network, PSPNet)模型,并对待测图像进行语义分割;⑤通过图像分割结果,确定水位线的像素纵坐标;⑥利用水位摄影测量模型在 ROI 图像中生成虚拟水尺,将水位线的像素纵坐标换算成实际水位,并在虚拟水尺中显示。

1.1 倾斜视角下的水位摄影测量模型

1.1.1 成像模型校准

由于镜头的畸变会导致图像变形,在测量之前先进行成像模型校准。校准过程采用平面棋盘格法,获取相机内参和畸变参数,完成图像的畸变校正。其内参矩阵 K 和畸变参数矩阵 D 如下:

$$K = \begin{bmatrix} f_x & 0 & C_x \\ 0 & f_y & C_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{1}$$

$$D = (k_1, k_2, p_1, p_2) \tag{2}$$

式中: C_x 、 C_y 分别为相机像主点在 x 、 y 方向上的像素坐标,像主点是相机光轴与成像平面的交点,其位置通常接近图像中心; f_x 、 f_y 分别为 x 、 y 方向上的等效焦距; k_1 、 k_2 为径向畸变系数; p_1 、 p_2 为切向畸变系数。设 (x, y) 为无畸变的图像坐标, (x', y') 为畸变图像坐标,采用式(3)进行校正。校正后的图像能反映实际几何关系,为后续的水位测量奠定基础。

$$\begin{cases} x' = x(1 + k_1r^2 + k_2r^4) + 2p_1y + p_2(r^2 + 2x^2) \\ y' = y(1 + k_1r^2 + k_2r^4) + 2p_2x + p_1(r^2 + 2y^2) \end{cases} \tag{3}$$
$$r^2 = x^2 + y^2$$

其中

1.1.2 倾斜视角下的中心透视投影模型

在实际水位测量中,相机通常以倾斜角度布设,因此建立了一种倾斜视角下的中心透视投影模型,将图像中的水位线像素纵坐标映射到实际水位值,如图 2(a) 所示。在物平面上以水流方向为 X 轴,断面方向为 Y 轴,高程为 Z 轴;将断面参考点(起点桩)作为 X 轴和 Y 轴的零点,黄海高程零点作为 Z 轴零点; (X_c, Y_c, Z_c) 为相机光心的世界坐标。通过对齐断面和调整云台,设置相机的横滚角和方位角为零,俯仰角 ω 为相机主光轴和物平面间的夹角,采用基于断面水位线定向的摄像机姿态角标定方法^[26]获取。

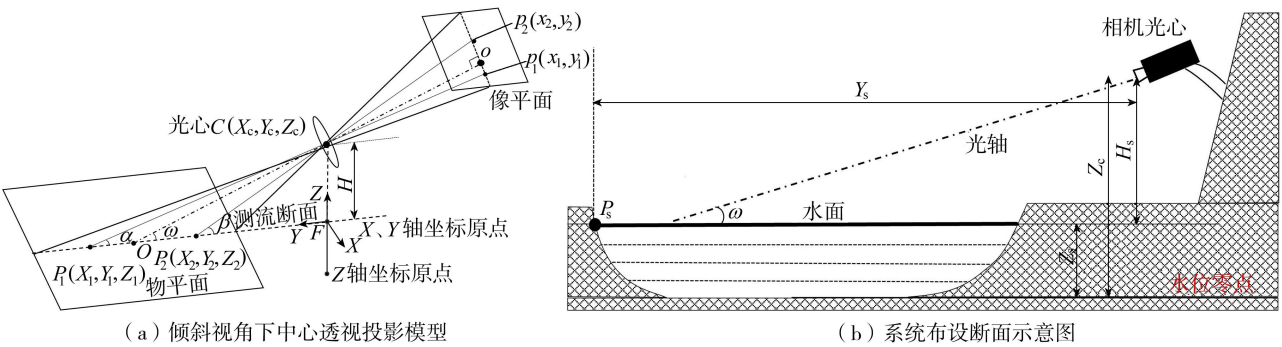


图 2 系统布设方案示意图

Fig.2 Schematic diagram of system layout

模型中物点 P , 光心 C 和像点 p 位于同一直线上,像主点 o 位于图像的正中间位置,坐标为 (x_o, y_o) 。像平面坐标 (x, y) 可用对应的像素坐标 (i, j) 表示:

$$\begin{cases} x = si \\ y = sj \end{cases} \tag{4}$$

式中: s 为图像传感器的像元尺寸。当物距远大于像距时,焦距和像距近似相等,焦距 f 可通过 f_x 、 f_y 计算得到:

$$f = s(f_x + f_y)/2 \tag{5}$$

当物点 P 的起点距大于 O 点起点距,即图 2(a) 中 P_1 点位置时。射线 P_1C 和射线 P_1O 的夹角为 α , P_1 在像平面上的投影点为 p_1 , H 为相机光心到物平面间的垂直距离, F 为对应的垂足点。由三角关系有:

$$\alpha = \omega - \arctan \left[s \left(\frac{n}{2} - j_1 \right) / f \right] \quad (6)$$

式中: n 为图像的高; j_1 为投影点 p_1 的像素纵坐标,可由像平面坐标 y 根据式(4)换算得到。

因为 $\tan \alpha = H/Y_1$,因此 H 可表示为:

$$H = Y_1 \tan \left\{ \omega - \arctan \left[s \left(\frac{n}{2} - j_1 \right) / f \right] \right\} \quad (7)$$

当物点 P 的起点距小于 O 点起点距,即图2(a)中 P_2 点位置时。同 P_1 点计算过程可得

$$H = Y_2 \tan \left\{ \omega + \arctan \left[s \left(j_2 - \frac{n}{2} \right) / f \right] \right\} \quad (8)$$

由于反正切函数是奇函数,所以对于 P_1 和 P_2 ,均可得到:

$$H = Y \tan \left\{ \omega + \arctan \left[s \left(j - \frac{n}{2} \right) / f \right] \right\} \quad (9)$$

如图2(b)所示,设水面与断面的交点 P_s 所对应的起点距和高程分别为 Y_s 和 Z_s ,以水面作为物平面,则相机光心到水面的垂直距离 $H_s = Z_c - Z_s$,由式(9)可得水位高程为:

$$Z_s = Z_c - Y_s \tan \left\{ \omega + \arctan \left[s \left(j_s - \frac{n}{2} \right) / f \right] \right\} \quad (10)$$

式中: j_s 为水位线的像素纵坐标。

根据物像变换的单源性,水位线像素纵坐标可唯一映射为实际水位值。当水岸垂直时,待测水位线的起点距 Y_s 为定值,可以直接代入水位线像素坐标计算水位值。若断面地形总体存在多个不同比降,需结合断面地形数据确定起点距与高程的关系,河流断面地形数据如图3所示。图中 Y_k 为断面 k 地形数据点对应的起点距, Z_k 为断面 k 对应的高程。 Y_s 为待测点 P_s 的起点距, Z_s 为待测点对应的水位高程,可以通过线性关系得到待测水位线的起点距:

$$Y_s = Y_k + \frac{(Z_s - Z_k)(Y_{k+1} - Y_k)}{Z_{k+1} - Z_k} \quad (11)$$

将式(11)代入式(10),得水位高程 Z_s (水岸垂直时亦满足):

$$Z_s = \left[Z_c + \frac{Z_k(Y_{k+1} - Y_k)g}{Z_{k+1} - Z_k} - Y_k g \right] (Z_{k+1} - Z_k) / [Z_{k+1} - Z_k + (Y_{k+1} - Y_k)g] \quad (12)$$

其中

$$g = \tan \left\{ \omega + \arctan \left[s \left(j_s - \frac{n}{2} \right) / f \right] \right\}$$

1.2 基于 PSPNet 模型的水位线检测方法

1.2.1 PSPNet 模型

水位线检测是测量的核心环节,直接决定水位测量的精度。传统方法在复杂环境(如光照变化和干湿分界线模糊)下表现不佳。为提高精度,采用 PSPNet 模型进行图像语义分割。PSPNet 模型通过聚合不同区域的上下文信息,在分割过程中捕捉全局细节,增强了对周围特征的提取能力,从而有效提高了分割精度。模型的输入为原图裁剪后的 ROI 图像,在特征提取阶段,图像经过四次下采样,尺寸被压缩至原始大小的 1/16,通过膨胀卷积扩大感受野。随后,16 倍下采样的特征图被输入金字塔池化模块,并划分为 4 组不同尺度进行池化,以提取全局与局部信息。池化后生成的特征图通过 1×1 卷积调整通道数至原始特征图的 1/4,保证与整体网络结构适配。随后,这些特征图通过双线性插值被上采样至原始尺寸,并与初始特征图拼接。拼接后,特征图经过 3×3 卷积进行特征整合,随后通过 1×1 卷积调整通道数。最终,特征图再次通过双线性插值上采样至输入图像大小,并由 Softmax 分类器完成像素级分类。PSPNet 模型结构如图 4 所示。

1.2.2 水位线检测

利用训练完成的 PSPNet 模型对待测 ROI 图像进行语义分割,生成二值图像。其中,河岸与水体的灰度

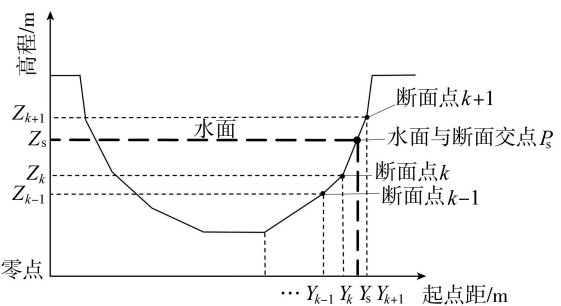


图3 河流断面地形数据

Fig. 3 River cross-section topography data

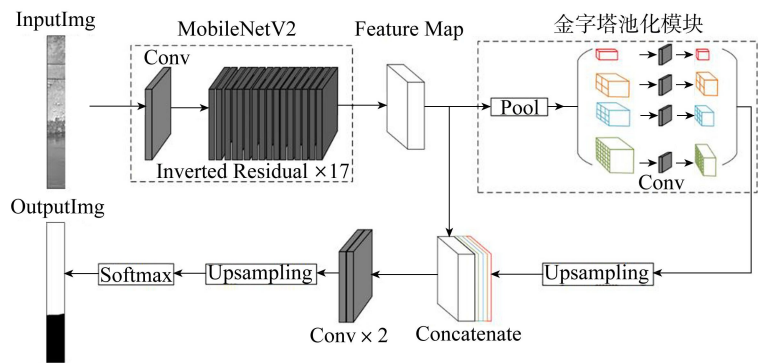


图 4 金字塔场景解析网络模型结构

Fig. 4 Model structure for pyramid scene parsing network

值分别设定为 255 和 0。通过逐列扫描图像,确定每列最后一个非零像素的位置,并计算其平均值,得到 ROI 图像中水位线像素纵坐标 v_s :

$$v_s = \sum_{w=1}^W v_w / W \tag{13}$$

其中

$$v_w = \max \{ r \mid I_{r,w} > 0, 1 \leq r \leq R \}$$

式中: $I_{r,w}$ 为 ROI 图像 I 在第 r 行第 w 列的像素值; W 为 ROI 图像的列数; R 为 ROI 图像的行数; v_w 为第 w 列中最后一个非零像素纵坐标。

将 v_s 转换到原始图像坐标系下,可得原图中水位线的像素纵坐标 j_s :

$$j_s = v_s + \Delta j \tag{14}$$

式中: Δj 为 ROI 图像左上角顶点在原图中的像素纵坐标偏移量。得到 j_s 后,将其代入式(12),即可计算得到对应的水位高程。

2 实例验证

通过两种典型场景下的试验验证所提方法的可行性与测量精度。测点 1 设于攀枝花水文站,用于检验本文方法在天然河道复杂地形及宽断面远距离测量条件下的性能;测点 2 选取河海大学金坛校区人工渠道,验证其在窄断面干湿分界线场景下的适用性。

2.1 测点 1

2.1.1 测站概况及试验设置

测点 1 位于四川省攀枝花市金沙江上的攀枝花水文站,是国家重要的报讯站和水文站,配备了缆道流速仪、双轨雷达流速仪、气泡式水位计等测流设备,同时具备人工校核的水位整编数据。河段断面宽约 200 m,断面控制条件较好。受上游水电站发电调度影响,河段水位变化频繁。为保障水文监测精度,需定期对断面地形进行复测。多次测量表明,断面形态总体变化不大,如图 5(a)所示。该测点环境较为复杂,存在水面耀光、倒影及干湿分界线模糊等现象。测量系统布设在河流右岸混凝土边坡上,如图 5(b)所示,摄像机固定于

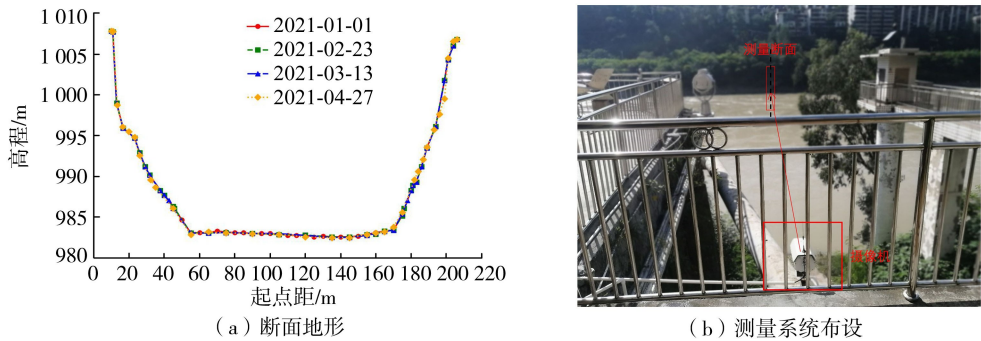


图 5 测点 1 断面地形及测量系统布设

Fig. 5 Cross-section topography and measurement system layout at measurement point 1

悬臂支架,选用海康威视 800 万像素枪式网络摄像机,安装位置的高程为 1 007.8 m,对应起点距为 2.906 m。试验中对摄像机进行内外参数标定,标定结果如下:图像宽 m 为 3 840 像素、 $n=2\,160$ 像素 $f_x=2\,876.507$ 像素、 $f_y=2\,884.631$ 像素、 $C_x=1\,947.382$ 像素、 $C_y=1\,043.743$ 像素、 $k_1=-0.407$ 、 $k_2=-0.217$ 、 $p_1=0.001$ 、 $p_2=0$ 、 $\omega=19.761^\circ$

2.1.2 数据集构建和 PSPNet 模型训练

试验选取水位线较为清晰的对岸区域作为检测对象,在畸变校正后图像中设置 400 像素×50 像素的 ROI 图像,如图 6(a)所示。该 ROI 图像覆盖水位范围为 983~999.5 m,将高程值每隔 0.5 m 带入水位摄影测量模型,换算为像素坐标,生成虚拟水尺,如图 6(b)所示。

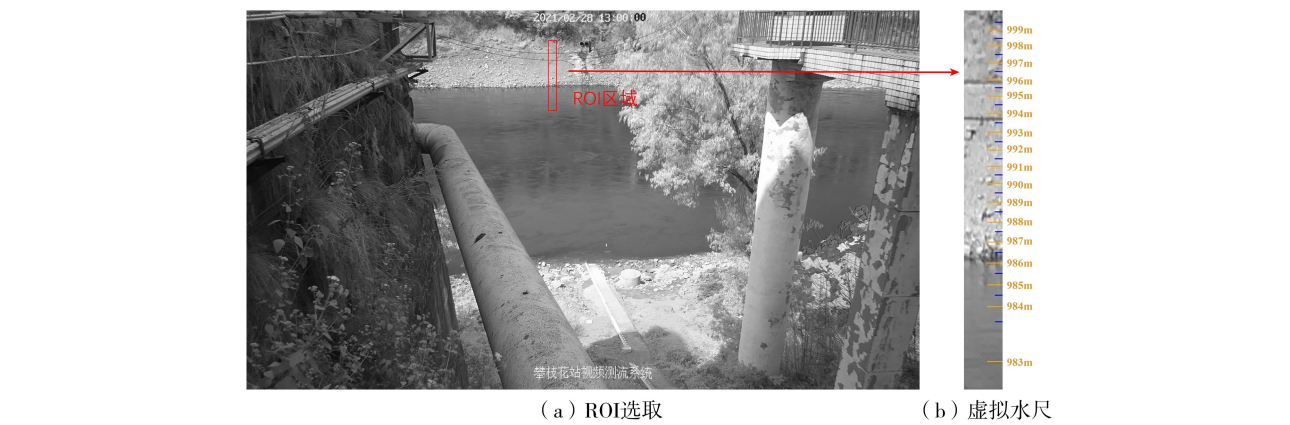


图 6 测点 1 的 ROI 选取及虚拟水尺生成

Fig. 6 Selection of ROI and generation of virtual water gauge at measurement point 1

数据集包括 2021 年 1—4 月在多种水文条件下采集的 2 874 张图像,训练集和测试集以 4 : 1 划分,分别包含 2 299 张与 575 张图像,水位范围为 986.15~993.48 m,并使用 Labelme 工具标注生成语义分割标签图。基于 Pytorch 框架对 PSPNet 模型进行端到端训练,输入和输出都为 400 像素×50 像素的图像。训练共迭代 100 次,前 50 次学习率为 0.000 1, Batch_size 为 16,后 50 次学习率调整为 0.000 01, Batch_size 为 8。

2.1.3 结果分析

试验选取该测点 2021 年 2 月 28 日每隔 1 h 的 24 组连续观测数据进行验证,该日干湿分界线特征明显,包括晴天、阴天和黑夜等多种光照变化,水位范围为 986.23~988.84 m,所使用的断面数据为 2021 年 2 月 23 日测量。将本文方法测量结果与水文站水位计实测值进行对比分析(图 7),均方根误差(RMSE)为 0.1 m,绝对误差小于 0.1 m 的数据量占比为 70.83%,小于 0.02 m 的仅占 25%。进一步分析发现,误差主要来源于以下两方面:①水位线检测误差。PSPNet 模型在水位线检测中存在一定误差。以人工获取的水位线像素坐标为参考基准,水位线检测结果的均方根误差为 1.69 像素。图 8 为水位线区域分割的整体可视化结果,图 8(a)中红色线条为模型检测水位线。在夜间弱光照时段(5:00—7:00、17:00—21:00)与白天强光反射及强烈倒影时段(9:00—11:00),受水位涨落与光照变化共同作用,干湿分界线特征复杂多变;同时受限于数据集标注规模及人眼标注本身存在的误差,上述时段检测的随机误差较大,难以有效控制。②高程空间分辨率的限制。由图 9 可知,高程空间分辨率受断面地形显著影响,高程与起点距的斜率越小,空间分辨率越小;斜率越大,空间分辨率越大。这是因为斜率较小时,高程变化较缓,被更多像素分摊;而斜率较大时,高程变化集中,每像素的高程变化值相应增大。在比测的高程范围 986.23~988.84 m,高程空间分辨率范围为 4~5 cm/像素,而该测点水位线检测均方根误差为 1.69 像素,导致最终水位测量误差较大。

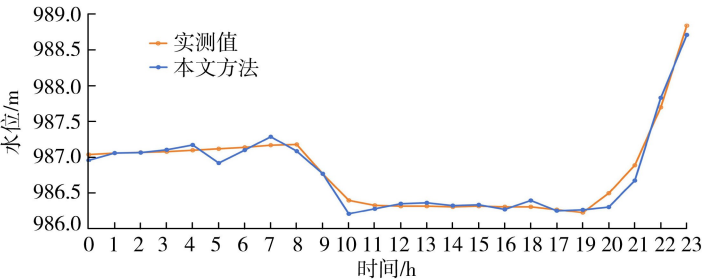


图 7 测点 1 水位比测

Fig. 7 Water level comparison at measurement point 1

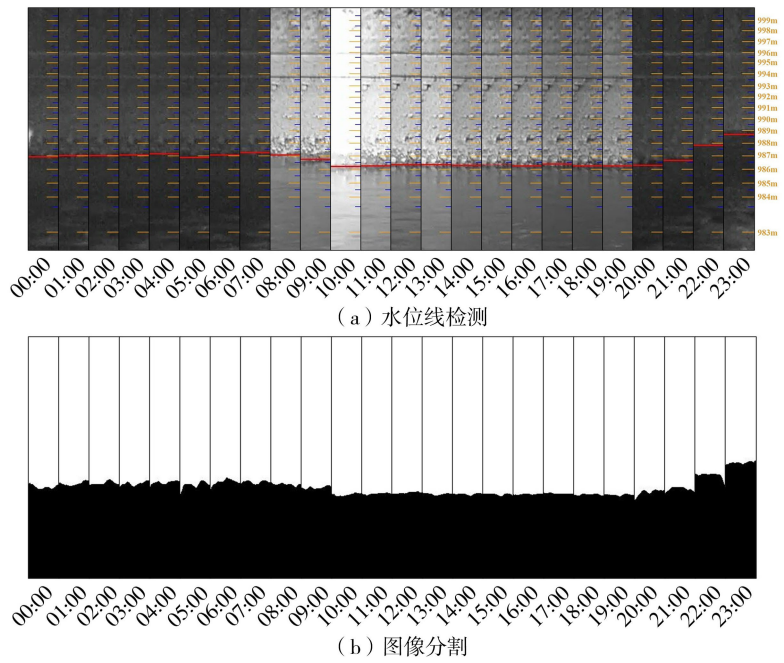


图 8 测点 1 水位线检测和分割

Fig. 8 Waterline detection and segmentation at measurement point 1

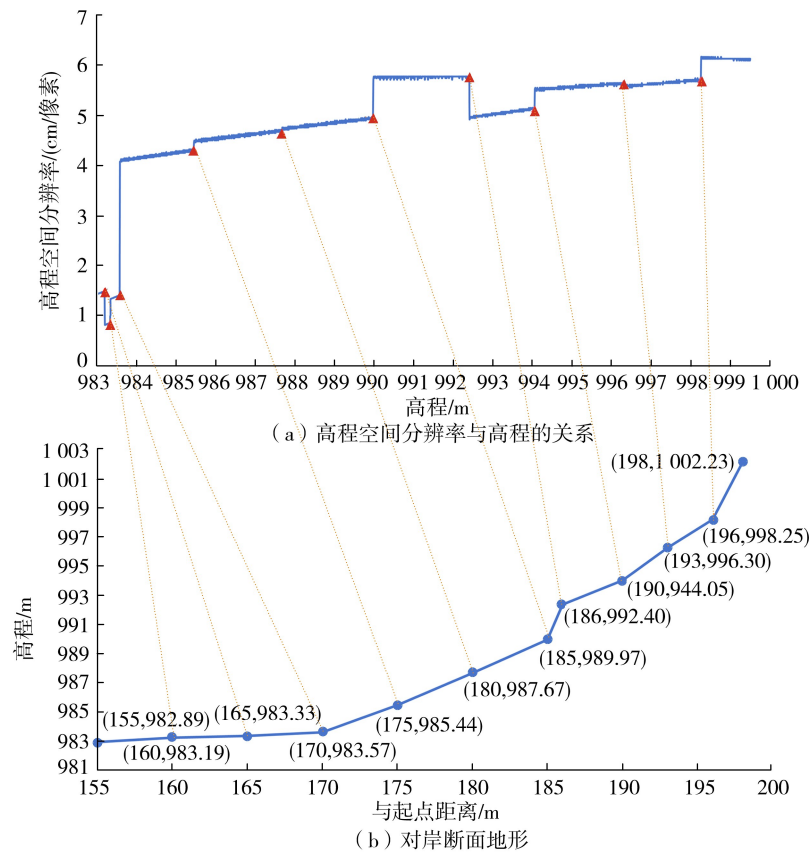


图 9 测点 1 高程空间分辨率与断面地形的关系

Fig. 9 Relationship between spatial resolution of elevation and cross-sectional topography at measurement point 1

2.2 测点 2

2.2.1 测站概况及试验设置

测点 2 位于河海大学金坛校区内人工渠道,该测点断面垂直,干湿分界线清晰,通过布设的物理水尺获取比测真值,现场的断面地形和测量系统布设如 10 所示。相机安装高程为 8.40 m,起点距为 0 m,内外参数

标定结果如下: $m=2560$ 像素、 $n=1440$ 像素、 $f_x=4201.030$ 像素、 $f_y=4150.197$ 像素、 $C_x=1322.558$ 像素、 $C_y=813.354$ 像素、 $k_1=-0.246$ 、 $k_2=-3.948$ 、 $p_1=0.002$ 、 $p_2=0.001$ 、 $\omega=35.45^\circ$

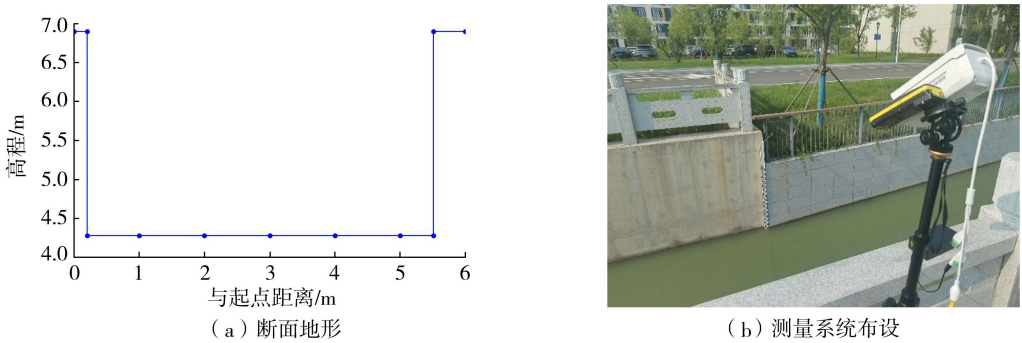


图 10 测点 2 断面地形及测量系统布设

Fig. 10 Cross-section topography and measurement system layout at measurement point 2

2.2.2 数据集构建和 PSPNet 模型训练

选取 ROI 图像覆盖水位 4.41~5.15 m,在 ROI 图像中生成虚拟水尺,如图 11 所示。由于该测点是临时搭建,且水位变化较小,通过垂直上下平移 ROI 图像模拟中低高水位,共采集 64 张标注图像用于训练。基于 Pytorch 框架对 PSPNet 模型进行端到端训练,输入和输出都为 400 像素×50 像素的图像。训练共迭代 100 次,学习率为 0.0001,Batch_size 为 8。

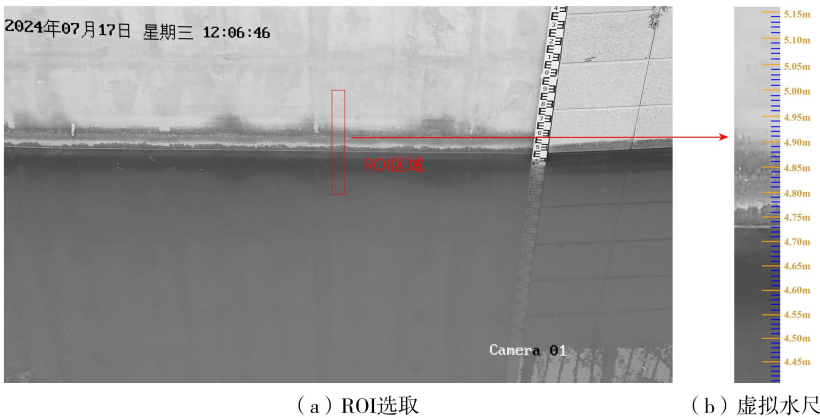


图 11 测点 2 的 ROI 选取及虚拟水尺生成

Fig. 11 Selection of ROI and generation of virtual water gauge at measurement point 2

2.2.3 结果分析

选取 2024 年 7 月 17 日 13:00—17:00 每 30 min 的 9 组连续观测数据,人工读取水尺作为真值。水位线区域的分割结果和水位线检测结果如图 12 所示,水位线检测均方根误差为 1.20 像素,对应水位测量均方根误差为 0.4 cm。选取 ROI 图像对应的高程空间分辨率介于 0.18~0.20 cm/像素之间,在这一条件下,水位测量不仅满足 2 cm 的精度要求,还实现了毫米级的高精度。

3 结 语

提出了一种采用断面数据生成虚拟水尺的河道水位视觉测量方法。该方法通过水位线像素纵坐标与断面地形数据建立可逆的水位摄影测量模型,从而实现水位线像素纵坐标到实际水位的精确映射。采用 PSPNet 模型对图像进行语义分割,在水面耀光、倒影及干湿分界线模糊等复杂环境下有效检测水位线,最终在图像中生成虚拟水尺及水位线,实现测量结果的可视化。该方法利用断面地形数据,无需布设水尺或控制点,适用于断面水位线清晰可见的场景,在天然河道和人工渠道中均表现出较高的精度和适用性。测点 1 的天然河道复杂环境中,水位线检测均方根误差为 1.69 像素,对应水位测量均方根误差为 10 cm,检测精度受环境光照条件和高程空间分辨率影响较大。测点 2 的人工渠道环境中,水位线检测均方根误差为 1.20 像素,对应水位测量均方根误差为 0.4 cm,达到了毫米级精度。该方法具有运维成本低,鲁棒性强,结

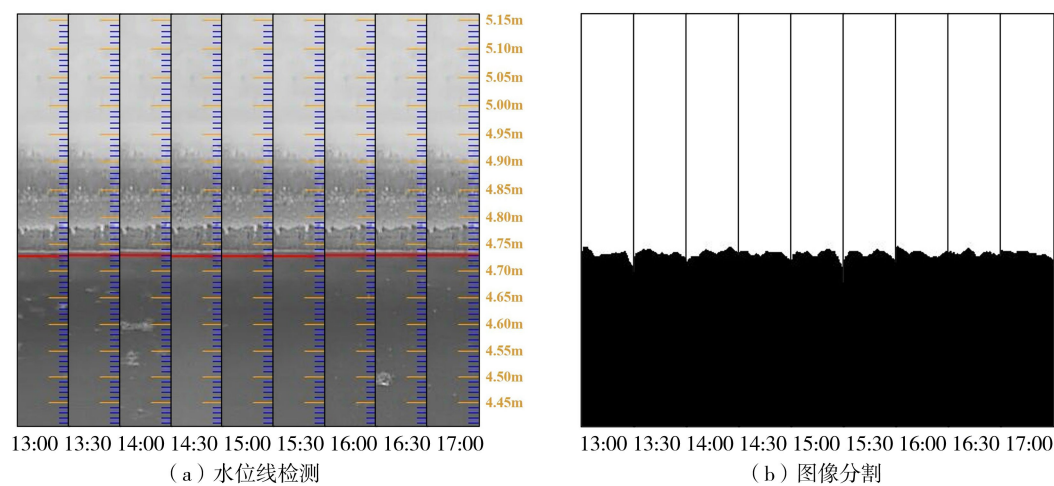


图 12 测点 2 水位线检测和分割结果

Fig. 12 Waterline detection and segmentation results at measurement point 2

果直观等优势。通过合理的摄像机选型来控制成像的高程空间分辨率可以使水位测量精度控制在 2 cm 以内。本文方法适用于天然河流和人工明渠等不规则监测断面。其中,天然河流场景更适用于断面形态相对稳定或能够通过水文站常规测流工作及时更新断面数据的测站;人工明渠场景由于断面形态稳定,具有更好的应用便利性和推广性。本文方法可与大尺度粒子图像测速法(LSPIV)、时空图像测速法(STIV)结合,基于单台摄像机实现完全非接触式的水位、流速、流量在线监测。然而,本文方法仍存在一定的局限性,例如在高程变化较小的宽断面地形中,受摄像机焦距、倾斜角度和图像分辨率影响,高程空间分辨率可能限制精度提升。此外,夜间低光照、强烈倒影和水面耀光等环境条件下,语义分割模型的鲁棒性仍需进一步优化。未来研究将重点分析误差来源,如断面高程梯度、摄像机参数、图像分辨率等,并建立完善的测量不确定性评估体系,以进一步提升方法的精度和适用性。

参考文献:

[1] Naderi M. Assessing level of water resources management based on water supply and availability concepts[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 305: 127086.

[2] 栾清华,秦志宇,王东,等. 城市暴雨道路积水监测技术及其应用进展[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 106-116. (Luan Qinghua, Qin Zhiyu, Wang Dong, et al. Review on monitoring technology of urban road waterlogging after rainstorm and its application[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 106-116. (in Chinese))

[3] 徐宗学,卢兴超,施奇妙. 城市暴雨洪涝灾害特征与风险评估研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2025, 45(1): 1-9. (Xu Zongxue, Lu Xingchao, Shi Qimiao. Research progress on urban flooding disaster characteristics and risk assessment[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2025, 45(1): 1-9. (in Chinese))

[4] 陈顺胜,周珂,吕忠烈. 浮子式水位计进水口改良研究[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(10): 3103-3104. (Chen Shunsheng, Zhou Ke, Lyu Zhonglie. Study on the water inlet of float-type stage gauge[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2014, 42(10): 3103-3104. (in Chinese))

[5] 丰建勤. 压力式水位计应用及精度分析[J]. 海洋测绘, 2002, 22(2): 52-54. (Feng Jianqin. The application of the pressure-type water gauge and its precision analysis[J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2002, 22(2): 52-54. (in Chinese))

[6] 马娟,张振,严锡君,等. 一种基于 ZigBee 技术的河工模型超声波水位计的设计[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(2): 89-94. (Ma Juan, Zhang Zhen, Yan Xijun, et al. Design of ZigBee-based ultrasonic water gauge for river model[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(2): 89-94. (in Chinese))

[7] 唐馨. 激光水位计在红水河都安水文站的应用[J]. 广西水利水电, 2012(6): 4-5. (Tang Xin. Application of laser water level gauge at Duan hydrological station on Hongshui River[J]. Guangxi Water Resources & Hydropower Engineering, 2012(6): 4-5. (in Chinese))

[8] 周冬生,宗军,张恒. 大量程大变率高精度雷达水位计关键技术研究[J]. 水文, 2017, 37(1): 68-71. (Zhou Dongsheng, Zong Jun, Zhang Heng. Key technology of radar water-level gauge with wide range and high precision[J]. Journal of China Hydrology, 2017, 37(1): 68-71. (in Chinese))

[9] Chen Guijun,Bai Kejia,Lin Zhengchun,et al. Method on water level ruler reading recognition based on image processing[J]. Signal,Image and Video Processing,2021,15(1):33-41.

[10] 房爱印,王永贤,尹曦萌,等. DetSegNet:一种基于检测和分割的高精度水尺水位检测网络[J]. 河海大学学报(自然科学版),2024,52(2):28-34. (Fang Aiyin,Wang Yongxian,Yin Ximeng,et al. DetSegNet:a high-precision water gauge level detection network based on detection and segmentation[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2024,52(2):28-34. (in Chinese))

[11] Lin F,Chang Wenyi,Lee L C,et al. Applications of image recognition for real-time water level and surface velocity[C]//2013 IEEE International Symposium on Multimedia. Anaheim:IEEE,2013:259-262.

[12] 张文静,张振,黄剑,等. 基于图像语义分割的水位智能监测方法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(5):24-30. (Zhang Wenjing,Zhang Zhen,Huang Jian,et al. Intelligent water-level monitoring method based on image semantic segmentation [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(5):24-30. (in Chinese))

[13] 张振,周扬,王慧斌,等. 标准双色水尺的图像法水位测量[J]. 仪器仪表学报,2018,39(9):236-245. (Zhang Zhen,Zhou Yang,Wang Huibin,et al. Image-based water level measurement with standard bicolor staff gauge [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2018,39(9):236-245. (in Chinese))

[14] Kim J D,Han Y J,Hahn H S. Image-based water level measurement method under stained ruler[J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation,2010,1(1):28-31.

[15] 李翊,兰华勇,严华. 基于图像处理和 BP 神经网络的水位识别研究[J]. 人民黄河,2015,37(12):12-15. (Li Yi,Lan Huayong,Yan Hua. Research on water-level recognition based on image processing and BP artificial neural network technology [J]. Yellow River,2015,37(12):12-15. (in Chinese))

[16] 鲍江,陶青川,张鹏. 基于图像处理的水位线检测算法[J]. 水电能源科学,2015,33(4):96-99. (Bao Jiang,Tao Qingchuan,Zhang Peng. Image processing based water level detection algorithm[J]. Water Resources and Power,2015,33(4):96-99. (in Chinese))

[17] 曹文卓,王太固,徐兵,等. 基于语义分割的船闸水位检测方法研究[J]. 仪器仪表学报,2023,44(2):238-247. (Cao Wenzhuo,Wang Taigu,Xu Bing,et al. Research on water level detection of ship lock based on semantic segmentation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2023,44(2):238-247. (in Chinese))

[18] 程淑红,赵考鹏,张仕军,等. 基于 U-net 的水位线检测[J]. 计量学报,2019,40(3):361-366. (Cheng Shuhong,Zhao Kaopeng,Zhang Shijun,et al. Water level detection based on U-net[J]. Acta Metrologica Sinica,2019,40(3):361-366. (in Chinese))

[19] 孙英豪,丁勇,李登华,等. 基于图像识别的无标尺水位测量技术研究[J]. 水利水运工程学报,2023(4):91-97. (Sun Yinghao,Ding Yong,Li Denghua,et al. Research on measuring technique of water level without scale based on image recognition [J]. Hydro-Science and Engineering,2023(4):91-97. (in Chinese))

[20] 孙传猛,魏宇,李欣宇,等. 复杂场景下无水尺水位的影像水位反演智能检测方法[J]. 测绘学报,2024,53(3):558-568. (Sun Chuanmeng,Wei Yu,Li Xinyu,et al. Intelligent detection method of image water level inversion for water level without water scale in complex scenes[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,2024,53(3):558-568. (in Chinese))

[21] Kim K,Lee N K,Han Y,et al. Remote detection and monitoring of a water level using narrow band channel[C]//Proceedings of the 6th WSEAS International Conference on Signal Processing,Robotics and Automation. Corfu:World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS),2007:25-30.

[22] 聂鼎,张龔,刘毅,等. 基于图像处理的小型水库水位测量方法[J]. 水电能源科学,2019,37(11):28-32. (Nie Ding,Zhang Yan,Liu Yi,et al. Water level measurement method of small reservoir based on image processing[J]. Water Resources and Power,2019,37(11):28-32. (in Chinese))

[23] 石晗耀,陶青川. 基于双目视觉的水位测量算法[J]. 现代计算机,2017(8):55-59. (Shi Hanyao,Tao Qingchuan. Water level measurement based on binocular vision[J]. Modern Computer,2017(8):55-59. (in Chinese))

[24] Chen Juifa,Liao Yuting,Wang Pochun. Development and deployment of a virtual water gauge system utilizing the ResNet-50 convolutional neural network for real-time river water level monitoring;a case study of the Keelung River in Taiwan[J]. Water,2023,16(1):158.

[25] Seibert J,Strobl B,Etter S,et al. Virtual staff gauges for crowd-based stream level observations[J]. Frontiers in Earth Science,2019,7:70.

[26] 张振,姜天生,赵丽君,等. 基于断面水边线定向的视频测流摄像机标定[J]. 电子与信息学报,2024,46(4):1428-1437. (Zhang Zhen,Jiang Tiansheng,Zhao Lijun,et al. Camera calibration using cross-section waterline orientation for video-based flow measurement[J]. Journal of Electronics & Information Technology,2024,46(4):1428-1437. (in Chinese))