

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2024.05.028

# 基于联合特征定位的水文标尺识别方法

贲剑虹, 娄幸媛, 付曼蓉

(陕西省水利电力勘测设计研究院, 陕西 西安 710001)

**摘要:** 为解决现有基于视觉特征的水位测量方法在光照变化强烈以及成像质量模糊等恶劣环境下存在定位精度差和识别鲁棒性弱等问题, 提出一种多特征联合定位的水尺识别方法。首先利用水尺的几何结构和颜色特征对水尺图像进行粗定位得到水尺候选区域, 再提取候选区域的方向梯度直方图特征输入支持向量机得到水尺精定位, 然后结合形态学算子和投影法实现字符和水尺刻度分割, 通过自建水尺字符库来增强字符模型的泛化性能, 最后采用 LeNet-5 框架对归一化、标准化字符进行识别并输出水尺识别结果。仿真结果表明, 在不同视距和视角条件下水尺字符和刻度的识别准确率达到 99.4%, 有效提高了恶劣环境下水尺识别的准确性和鲁棒性。

**关键词:** 水尺识别; 联合定位; 支持向量机; 形态学算子; 卷积神经网络 LeNet-5

中图分类号: TP391.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2024)05-0199-07

## Water Gauge Measurement Based on Joint Feature Location

YUN Jianhong, LOU Xingyuan, FU Manrong

(Shaanxi Province Institute of Water Resources and Electric Power Investigation and Design, Xi'an, Shaanxi 710001, China)

**Abstract:** Water level measurement is one of the key issues of hydrological observation. To solve the problems of existing water gauge recognition methods which are poor positioning accuracy and recognition robustness in harsh environments, this paper proposes a multi-feature joint localization-based water gauge recognition method. Firstly, the geometric structure and color features of the water gauge are used to roughly locate the water gauge image to obtain candidate areas. Then, the directional gradient histogram features of the candidate areas are extracted and input into the support vector machine to obtain accurate water gauge positioning; Then, combining morphological operators and projection methods to achieve character and water gauge scale segmentation. Finally, the convolutional neural network LeNet5 is used to recognize normalized and standardized characters and output the water gauge recognition results. To improve the accuracy of water gauge recognition under different perspectives and line of sight conditions, a self built water gauge character library is used to enhance the generalization performance of the character model. Simulation results show that the proposed algorithm, which achieves the recognition accuracy of characters and scales about 99.4%, effectively improves the accuracy and robustness of water gauge recognition in harsh environments.

**Keywords:** water gauge recognition; joint localization; support vector machine; convolutional neural network LeNet-5

推进智慧水利建设是实现新阶段水利事业高质量发展的重要路径之一<sup>[1]</sup>。2022 年我国洪涝干旱灾害导致的直接经济损失占当年各类自然灾害总损失的 75.50%, 精准、实时获取江河湖泊水位数据是

实现精细化水务管控和洪涝灾害预警的重要环节。水位测量是水文监测的关键要素之一, 监控摄像机和无人机巡检已逐渐应用于河流与水库的水位监测并得到广泛关注<sup>[2]</sup>, 将图像处理和人工智能应用于

收稿日期: 2024-05-20

修稿日期: 2024-06-20

基金项目: 陕西省水利科技项目“基于陕西骨干水网的水资源多维均衡调配关键技术”(2024SLKJ-14)

作者简介: 贲剑虹(1979—), 男, 高级工程师, 主要从事电气自动化、智慧水利等方面工作。E-mail: yjhkq@qq.com

通讯作者: 娄幸媛(1992—), 女, 工程师, 主要从事电气自动化、智慧水利等方面工作。E-mail: 915235702@qq.com

水位测量技术已成为重要的研究和应用方向<sup>[3]</sup>。

近年来,许多学者开展了基于水尺图像视觉分析的水位测量方法研究。周衡等<sup>[4]</sup>提出了一种基于视频图像的水位监测方法,利用水尺刻度对相机进行标定,用图像差分法提取水位变化区域,计算图像水位线坐标,根据相机标定结果算得实际水位高度。孙传猛等<sup>[5]</sup>提出一种融合改进 YOLOv5 与卡尔曼滤波原理的无水尺水位智能检测方法。刘凯华等<sup>[6]</sup>提出了基于加权有向图的高精度、鲁棒性好的船舶水尺重建和水位识别方法。张文静等<sup>[7]</sup>提出了基于深度学习的水位识别方法,在语义分割图像中检测水位线的像素位置,将其转化为实际水位值。孙英豪等<sup>[8]</sup>利用 U-net 神经网络训练得到水体区域和非水体区域的图像语义分割模型,借助图像识别获取水位线坐标,采用线性插值和坐标拟合的方法计算水位。夏平等<sup>[9]</sup>提出了一种基于改进的超像素与图割算法的视觉水位识别算法。王述强等<sup>[10]</sup>采用改进了 FCOS 模型检测水位的位置,使用 DeepLab-v3 分割水位线,最终得到准确的水位值。刘子奇等<sup>[11]</sup>提出了基于单目视觉的水位测量方法,采用深度学习构建水面分割模型自动提取水位线;再根据空间映射关系和断面约束计算水位线像素坐标对应的三维空间坐标,进而得到水位值。在上述这些方法中,基于传统计算机视觉水位检测技术鲁棒性较差,不适用于雨天、雾霾、雪天等复杂恶劣场景。基于深度学习的水位检测技术大大提高了检测精度<sup>[12]</sup>,但模型复杂、参数多、费时低效,且需要大量训练数据。考虑到拍摄视角、恶劣天气、复杂周边和水面污染等干扰因素的影响,有效实现恶劣场景下的水位精准检测成为亟待解决的难题。

针对上述问题,本文拟提出一种恶劣环境下多特征联合定位的水尺识别方法。通过引入水尺轮廓特征、颜色特征和方向梯度直方图(Histogram of Oriented Gradients, HOG)特征,结合支持向量机(Support Vector Machine, SVM)方法构建水尺模型,实现多特征联合水尺区域精确定位;采用形态学算子和投影法定位字符区域并分割字符和水尺刻度;引入卷积神经网络 LeNet-5 实现字符识别和水位检测,同时通过自建字符库扩充训练样本增强字符泛化性。通过试验表明,该方法可以有效识别倾斜、污渍、锈迹、轻微变形、模糊等情况下的水尺刻度,满足恶劣环境下水尺识别的准确性、稳定性和实时性。

## 1 水尺定位

水尺定位是水位检测的前提,其定位精度直接

影响后续识别准确度。目前水尺定位主要分为固定水尺和分割水尺。对于黑河水库、三原西郊水库等大中型水库,基本都设有放水塔及泄洪洞室,水尺标注在放水塔处,随着库区变化,通过观察漏出水面水尺确定水位高程。对于大量小型水库,水尺按检修线路布置,间隔 3 m~5 m,当水位达到某一高度,通过观察水尺确定库区水位。然而,在实际环境中受到污渍、倾斜、模糊、磨损、变形、光照不均等因素的影响,无关信息或者缺失水尺刻度信息会严重影响水尺定位精度,从而对于水库的安全运行造成一定的影响。

为了提高恶劣环境下水位定位精度,本文采用先粗后精的二次定位方法。

### 1.1 粗略定位阶段

在粗略定位阶段,分别通过字符颜色特征和边缘轮廓特征确定水尺候选区域。为了增强水尺信息,对水面图像进行预处理,并使用局部直方图均衡化来提高图像对比度。

(1) 通过将预处理图像的颜色空间转换为 HSV 空间,并根据颜色分量范围提取颜色特征;颜色空间图像中每个像素点的颜色都是由 R(红)、G(绿)、B(蓝)这三个分量决定的,而每个分量取值范围在 0~255 之间,那么彩色图像的每个像素点有 16 777 216(256 × 256 × 256) 种取值可能。而灰度图像就是指 R、G、B 分量值相等的一种单通道颜色图像,所以它的每个像素点就只有 0~255 这 256 种可能的取值。某一像素点的灰度可用式(1)表示,将水尺粗略定位<sup>[13]</sup>。

$$\begin{cases} Gray_1(x, y) = R(x, y) \\ Gray_2(x, y) = G(x, y) \\ Gray_3(x, y) = B(x, y) \end{cases} \quad (1)$$

(2) 上一步经 HSV 转换后,需对定位水尺边缘进行检测,通过 Sobel 算子边缘检测,得到完整的水尺边缘灰度后,即确定了基本图像范围,对于 Sobel 算子有水平和垂直两个不同方向的算子。分别检测水尺水平和垂直两个方向的边缘,作为一种经典图形边缘检查工具,具有天然的平滑效果。以水平方向的 Sobel 算子为例,对图像上的每个像素点进行操作时,将其与周围 3 × 3 范围内的像素点进行加权平均。对应的 Sobel 算子中的权重将被应用于周围像素的亮度值。具体地,对应像素点的水平边缘强度定义为该像素点左右两侧像素亮度值的差的绝对值乘以对应的 Sobel 算子的权重。同理可得到垂直方向上 Sobel 算子的权重。在边缘检测过程中,将

Sobel 算子与图像进行卷积运算,得到水平方向和垂直方向的梯度分量,即  $G_x$  和  $G_y$ ,通过计算梯度的模值和方向来确定像素点是否属于边缘<sup>[14]</sup>。具体算法如下式:

$$G_x = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$G_y = \begin{pmatrix} -1 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{pmatrix}$$

$$GM = \text{sqrt}(G_x^2 + G_y^2) \quad (3)$$

$$GD = \text{atan2}(G_x^2 + G_y^2)$$

(3) 通过 Sobel 算子在预处理图像上提取边缘特征,在提取的边缘特征后,需要对无效数据进行剔除,主要通过自适应阈值方法去除无用信息,自适应阈值可以根据图像的局部特征自动确定阈值,主要应对复杂天气状况时水位水尺不同亮度和对比度,识别各种的水位水尺图像。通过设置几何特征范围(面积、纵横比、旋转角度等)来过滤掉非水尺区域,将剩余的矩形区域映射到预处理图像并进行 Radon 变换旋转校正,获得水尺候选区域。Radon 变换可以将复杂天气的水位水尺按某一角度进行投影,投影的距离处于极值时所对应的角度为水位水尺的倾斜角。图像有污迹或者光照不均衡不会影响 Radon 变换得到的倾斜角,尤其是复杂天气光照、水面反射的影响引起的识别倾斜。投影公式为:

$$\begin{cases} R(x') = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x' \cos\theta - y' \sin\theta, x' \sin\theta - y' \cos\theta) dy' \\ [x', y'] = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \times [x, y] \end{cases} \quad (4)$$

正常水位水尺不会发生水平倾斜,当复杂天气时,反射角度基本不会大于  $60^\circ$ ,本文使用 Radon 变换对进行水平边缘检测后的图像在  $0^\circ \sim 60^\circ$  进行投影<sup>[15-17]</sup>。

## 1.2 精细定位阶段

在精细定位阶段,根据水尺梯度和纹理信息密集的特点,本文使用 HOG 和 SVM 建立水尺模型。HOG 是基于边缘与梯度的描述,通过局部梯度方向直方图能够有效地描述局部目标的形状。通过灰度化的水位水尺灰度图像,计算其像素点  $(x, y)$  梯度大小以及方向:将图像划分为  $3 \times 3$  的单位,得到特征值。

通过水尺特征值组合精确定位识别到信息后,通过 SVM 核函数确定精确边缘<sup>[18]</sup>。SVM 的核函数

采用径向基函数(RBF),核函数可以实现从低维空间到高维空间的映射,使样本数据线性可分。径向基函数由下式给出:

$$K(x_i, x_j) = \exp\left(-\frac{\|x_i - x_j\|}{2\sigma^2}\right) \quad (5)$$

式中:  $x_i$  和  $x_j$  分别是第  $i$  个和第  $j$  个水尺样本点;  $\sigma = 1/\sqrt{2\text{gamma}}$  为标准差。

为获取水尺的最佳位置,本文中采用水尺区域的交比参数来选择最佳位置区域,如下式所示:

$$P = \frac{A_e \cap A_c}{A_e \cup A_c} \quad (6)$$

式中:  $A_e$  是边缘特征位置区域的面积,  $A_c$  是颜色特征位置区域的面积。设置交叉合并率阈值  $T_p$ , 根据以下原则选择最佳水尺位置:

(1) 位置区域中的水尺颜色像素百分比越大,该区域包含完整水尺的可能性就越大。

(2) 当候选区域中的水尺颜色像素百分比相似时,位置区域的面积应该更大,以确保可以定位完整的水尺。

(3) 位置区域的纵横比应更接近额定纵横比,但考虑到水尺的变形,重要性应低于水尺颜色像素的比例。

根据上述原理,将水尺颜色像素的百分比权重  $w_{\text{rule}}$ 、面积权重  $w_{\text{area}}$  和纵横比权重  $w_{\text{ratio}}$  分别设置为 0.7、0.1 和 0.2。水尺区域的位置得分如下式所示:

$$S_i = w_{\text{rule}} f_{\text{rule}} + w_{\text{area}} f_{\text{area}} + w_{\text{ratio}} f_{\text{ratio}} \quad (7)$$

$$\begin{cases} f_{\text{rule}} = n_{\text{rule}}/A \\ f_{\text{area}} = \text{abs}(1 - A/A_{\text{min}}) \\ f_{\text{ratio}} = -\text{abs}(W/H - N_{\text{ratio}})/N_{\text{ratio}} \end{cases} \quad (8)$$

根据上式选择位置得分最高的分数作为水尺最佳位置区域。

## 2 字符分割

字符分割目的是让分割后字符图像仅包含单个字符和刻度信息,尽可能减少冗余信息的干扰。字符分割有以下难点:对于实际环境中存在水尺污渍、生锈、边缘破损、刻度不全等问题,直接进行分割的效果并不好,会包含很多冗余信息或造成刻度、字符粘连,最终影响水位识别效果。因此,针对上述问题,本文在投影法的基础上进行了改进,结合形态学算子获取更好的字符分割效果。

投影法根据同一方向的不同颜色像素占比确定字符和水尺区域。其中,水平投影确定字符大致高

度并确定上下边框位置,垂直投影确定字符大致宽度并确定左右边框位置。考虑到各类干扰因素的影响,直接使用投影法分割字符效果不好,这里对其字符区域进行预处理。

针对提高分割精确度和去除冗余信息问题,先去除标尺边框,再确认字符区域的方法去除大部分冗余信息,设定最大、最小分割范围去除无关区域。针对字符粘连问题,若检测出的字符区域超过最大宽度,但其区域的一半宽度满足字符宽度范围,则要从中间将区域分为两半,解决字符粘连现象。为准确获取完整的字符和水尺刻度,采用闭操作处理,将字符和刻度边缘平滑化,便于精准定位。针对光照不均匀问题,采用形态学算子对原始图像进行处理,通过顶帽操作和黑帽操作增强被阴影遮住的字符区域亮度和外部轮廓,从而获取更加清晰的字符和刻度。

字符分割的具体步骤如下:

(1) 通过灰度化、顶帽操作、黑帽操作和二值化对水尺图像进行预处理。

(2) 对步骤(1)中获得的图像采用闭运算,使用灰度投影算法计算水平和垂直白色像素的比例。当比例大于 0.8 时,删除水尺边框区域和边框外的区域。

(3) 在定位步骤(2)中获得图像的单个字符区域:首先,分别设置水平和垂直阈值,白色像素比例首先超过阈值然后降至阈值以下的区间为单个字符区间。间隔应满足设定范围。

(4) 如果间隔满足下式条件:

$$\begin{cases} T_{wmin} \leq x_w/2 < T_{wmax} \\ T_{hmin} \leq x_h < T_{hmax} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $x_w$  和  $x_h$  分别表示单个字符间隔的宽度和高度; $T_{wmin}$ 、 $T_{wmax}$  分别表示字符的最小和最大宽度; $T_{hmin}$ 、 $T_{hmax}$  分别表示字符的最小和最大高度。

判断为粘性字符,字符宽度范围从中间分为两个区间,字符高度范围保持不变。

(5) 对于步骤(1)中获得的图像,去除边界区域、水尺外的区域刻度钉区域,根据刻度规范间隔对字符进行分割。

根据上述步骤,可以去除数字刻度以外的无关信息,提高了后续数字刻度识别的准确性。

### 3 水位刻度识别

前一节已经对水位水尺精确定位,并对字符分割,但是 HOG 特征结合支持向量机的方法能够有效

对水位水尺进行检测,但无法有效的获取水位水尺的边缘信息。卷积神经网络能够自动获取特征,对图像中待识别目标有着强大的描述能力。但当它在对原始数据进行不断的抽象过程中,随着网络层数的加深,每层的输出变得越来越抽象,描述能力也越来越强。而 HOG 特征是提取像素级的梯度方向特征,对于高度抽象的特征无法提取有效的信息<sup>[19]</sup>。

水位刻度识别的具体步骤为:先将分割的水位字符图像尺度归一化为  $20 \times 20$ , 然后按照水尺字符排列顺序从左至右把分割图像依次放入对应类型的卷积神经网络模型中,利用卷积池化层提取字符图像的高维特征,通过全连接层识别并输出字符识别结果。这里,使用 LeNet-5 卷积神经网络进行识别,它具有很高的识别精度和很强的鲁棒性<sup>[20]</sup>。其结构图如图 1 所示。其中第一层为输入层,第二层和第四层为卷积层,经过卷积运算,原信号特征得以增强,并且噪音也得到降低。第三层和第五层为池化层,层层相关性后,对图像进行子抽样,保留了水位水尺的有用信息,剔除了无用信息及数据,提高在训练过程的计算量。第六层第七层为全连接层,经过卷积和池化操作所获得的数据信息综合在一起,把图像特征信息变成一维,全连接层的输出可以作为输出层的输入。本文中输入图像尺寸大小为  $20 \times 20$ , 经过层卷积后输出  $10 \times 10 \times 64$  后,池化层滤波为  $5 \times 5 \times 64$ , 经两级全连接层输出 512 维。

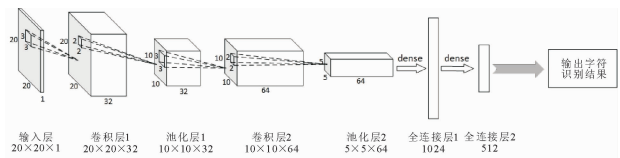


图 1 卷积神经网络结构图

卷积层是由一个个卷积核构成卷积核就是权值向量,卷积层所进行的操作是:卷积核按照一定的步长对输入卷积层的数据进行卷积操作,具体就是输入数据与卷积核对应的数据相乘再相加,如下式:

$$x_{i+1} = x_i \otimes w_i + b \quad (10)$$

激活函数层对卷积层输出的特征数据施加非线性变换,得到数据中复杂模式和特征;将上一层的输出作为自变量依次代入激活函数,这里采用 ReLU 函数作为激活函数。

$$\begin{cases} p^{l(i,j)} = \max(x^{l(i,j)}) \\ p^{l(i,j)} = \frac{1}{w} \sum_{(j-1)w+1}^{jw} x^{l(i,j)} \end{cases} \quad (11)$$

为提升模型训练性能,这里采用自适应矩估计算法(Adaptive Moment Estimation, ADAM)作为优化器,通过自适应调整学习率,使得参数更新更加稳定和高效。

为了提升字符识别的准确性和稳定性,除采用MINIST数据集进行样本训练外,还可通过自建字符库增加了特殊字符样本的数量和样本较少字符的数量。自建新样本生成步骤如下:

(1) 搜索各种字体风格的字符,并将其转换为黑底白字的字符图像。为了改善后续污染因素的影响,将字符图像的大小设置为 $80 \times 80$ 。

(2) 在字符图像中添加随机偏移污染因子。

(3) 添加不同程度的腐蚀或膨胀污染因素,以模拟不均匀的光照和字符污损等。

(4) 添加随机噪声污染因子,噪声大小不同,模拟不同大小的污渍。

(5) 采用不同程度的高斯模糊和二值化来模拟水尺刻度的模糊情况,增强其他污染因素的影响。

(6) 将字符图像的比例转换为 $20 \times 20$ ,并生成新的字符样本。

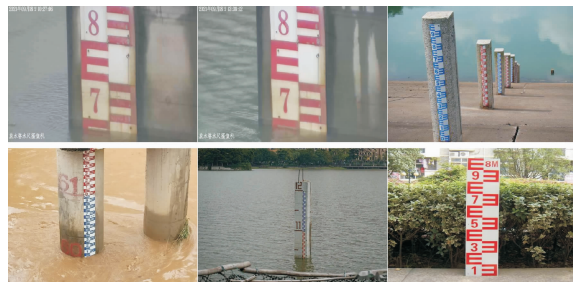
## 4 试验结果与分析

为了测试本文提出的水尺识别方法,选取HOG+k-最近邻(KNN)、人工神经网络(ANN)、HOG+ANN和本文算法进行仿真实验和性能对比。水尺模型采集917张完整水尺图像作为正样本,采集989张截取部分水尺图像作为负样本,如图2所示。共制作2734个数字字符样本、1521个英文字母字符样本,按7:3的比例分为训练集和验证集。

### 4.1 水尺建模试验

由图2可知,虽然水尺具有统一标准,但实际使用环境中受各种因素的影响,水尺的类型、颜色存在多种类型。本文利用水尺HOG特征结合SVM建立水尺模型,增强水尺定位的精度和字符分割的准确性。经过多次水尺建模试验,SVM的RBF核函数与水尺模型准确率的关系如图3所示,其中,选取 $C=5$ , $\gamma=1$ 时准确率最高。

为了验证水尺模型的性能,这里采用“特征+核函数”的不同组合方式进行建模比较,分别是“原始图像+径向基核函数(RBF)”、“HOG特征+线性函数(LINE)”、“HOG特征+径向基核函数(RBF)”三种建模方法。表1给出了三种水尺模型的准确率。从表1可以看出,所采用“水尺HOG特征+RBF核函数”的建模准确率最好。



(a) 正样本



(b) 负样本

图2 部分水尺图像

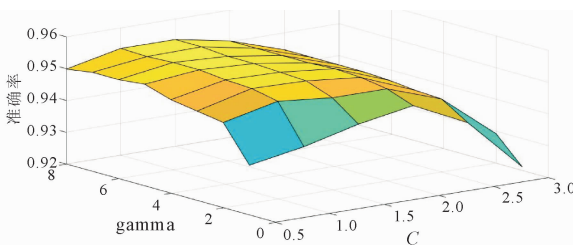


图3 RBF核函数参数与准确率关系

表1 不同方法水尺建模准确率对比

水尺特征	SVM核函数	准确率
原始图像	RBF	0.7783
HOG	LINE	0.9030
HOG	RBF	0.9536

为了验证本文所提水尺定位方法的有效性,选取100张水尺图片进行测试,采用交并比(Intersection over Union, IoU)作为评价指标衡量水尺定位精度。

$$IoU = \frac{A_L \cap A_R}{A_L \cup A_R} \quad (12)$$

式中: $A_L$ 是水尺定位区域; $A_R$ 是水尺实际区域。

经测试,本文提出的水尺定位方法有效避免了水尺信息的丢失,平均IoU为85.44%,定位准确性

达到了 91.1%。

## 4.2 水尺识别试验

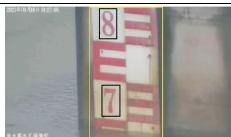
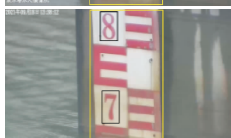
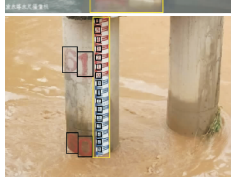
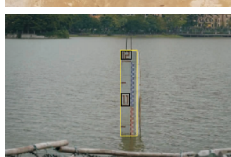
为验证水尺识别的准确性,选取几种识别方法进行对比,数字字符和水尺刻度的识别准确率如表 2 所示。其中,卷积神经网络模型采用小批量梯度下降法训练,dropout 设置参数为 0.9,初始学习率为 0.02,随着批次的增加,学习率逐渐减少。从表 2 可以看出,所提出的方法在水尺字符识别和刻度识别两方面均能获取最好的效果。

表 2 不同方法水尺识别准确率对比

水尺识别方法	数字字符/%	水尺刻度/%
HOG + KNN	98.6	97.1
ANN	99.2	99.2
HOG + ANN	99.4	98.0
本文提出的方法	99.4	99.4

为测试本文提出的水尺识别方法,选取部分水尺图像进行验证,具体识别结果如表 3 所示。其中,序号 1、2 为不同时刻采集同一个水尺,图像质量较好,但水位变化不明显;序号 3 为背景复杂、字符标记不明显的水尺图像;序号 4 为光照较暗下采集的水尺图像。从表 3 可以看出,在针对模糊、含污渍、轻微变形等水尺图像尺的情况下,可以实现水尺精确定位和字符精确分割,提高在恶劣条件下水位监测的鲁棒性和准确度。

表 3 部分水尺图像识别结果

序号	水尺定位和字符识别	识别刻度	刻度读取/cm
1		6.82	682
2		6.82	682
3		60.10	6010
4		10.32	1032

## 5 结 语

为了提高恶劣环境下水位监测的准确率,本文提出了一种多特征联合定位的水尺识别方法。该方法采用水尺的颜色和边缘特征进行水尺粗定位,通过 HOG 特征 + SVM 建立水尺模型并实现水尺精确定位,采用形态学算子和改进投影法准确分割字符和刻度,通过卷积神经网络实现水尺识别,有效提高了污渍、生锈、粘连、模糊等干扰因素水尺识别的准确性和鲁棒性。在后续工作中,将进一步提高强光和互遮挡环境下水尺识别的抗干扰性,并优化水尺模型的泛化性从而提升不同环境中算法的泛化性。

## 参考文献:

- [1] 赵科锋,曹慧群,林 莉,等. 人工智能视频识别在水利数字孪生中的典型应用[J]. 长江科学院院报, 2023,40(3):186-190.
- [2] 陈继明. 智慧水利发展现状及关键技术研究进展[J]. 河南水利与南水北调,2023,52(2):101-102.
- [3] 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.
- [4] 周 衡,仲思东. 基于视频图像的水位监测方法研究[J]. 半导体光电,2019,40(3):390-394.
- [5] 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.
- [6] 刘凯华,严红平,沙宝银,等. 利用加权有向图的船舶水尺重建与水位识别[J]. 计算机辅助设计与图形学学报,2023,35(7):1077-1085.
- [7] 张文静,张 振,黄 剑,等. 基于深度学习的图像法水位智能监测方法[J/OL]. 河海大学学报(自然科学版),1-11[2024-08-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1117.TV.20230417.0853.002.html>.
- [8] 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.
- [9] 夏 平,王 峰,雷帮军,等. 基于超像素和图割算法的智能视觉水位识别[J]. 计算机仿真,2021,38(3):430-436,441.
- [10] 王述强,张 飞,艾小坚. 基于卷积神经网络的监控图像水位识别[J]. 江西水利科技,2023,49(5):320-326.
- [11] 刘子奇,李丹勋,朱德军,等. 基于单目视觉的无水尺水位测量方法[J/OL]. 仪器仪表学报,1-13[2024-08-20]. <https://doi.org/10.19650/j.cnki.cjsi.J2412570>.

- [12] 陈 翠,刘正伟,陈晓生,等.基于图像处理的水位信息自动提取技术[J].水利信息化,2016(1):48-55.
- [13] 赵科锋,曹慧群,林 莉,等.人工智能视频识别在水利数字孪生中的典型应用[J].长江科学院院报,2023,40(3):186-190.
- [14] 万里勇,汪 浩,罗文兵.HSV空间的明度对数斜率变换的低照图像增强[J].传感技术学报,2024,37(7):1202-1209.
- [15] 蒋道丹.基于改进 Sobel 算子的输送带图像边缘检测研究[J].矿业装备,2024(5):10-12.
- [16] 周光波,张培珍,莫晴舒,等.基于 Radon 投影与改进卷积神经网络的小样本水下目标声呐图像识别方法[J/OL].哈尔滨工程大学学报,1-9[2024-10-11].[http://](http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1390.U.20240827.1001.012.html)
- [17] 张 莉,孟范泽,刘思霖,等.基于投影法和卷积神经网络的手写汉字图像分割研究[J].电子技术应用,2021,47(11):73-75,80.
- [18] 陈奕怡.基于图像处理的水位尺读取研究[D].南京:东南大学,2022.
- [19] 徐 萌,路 稳,方 澄,等.融合光流特征和显著性检测的目标跟踪算法[J].计算机应用与软件,2024,41(2):164-171,187.
- [20] 赵艳芹,童朝娣,张 恒.基于 LeNet-5 卷积神经网络的车牌字符识别[J].黑龙江科技大学学报,2019,29(3):382-386.

(上接第 152 页)

- [11] 门江东,曾 勇,曾渝茜,等.养护工艺参数对连续刚构桥 0#块混凝土早期温度场影响[J].北京交通大学学报,2021,45(2):8-18.
- [12] 王 凯,张 勇,刘建磊,等.基于 BP 神经网络的混凝土箱梁最大温度梯度预测[J].铁道科学与工程学报,2024,21(2):837-850.
- [13] 门 凡.混凝土长梁在温度应力下的抗裂研究[D].西安:长安大学,2022.
- [14] 朱伯芳.大体积混凝土温度应力与温度控制[M].第2版.北京:中国水利水电出版社,2012.
- [15] 大体积混凝土施工标准:GB 50496—2018[S].北京:中国建筑工业出版社,2018.
- [16] 民用建筑热工设计规范:GB 50176—2016[S].北京:中国建筑工业出版社,2017.
- [17] 朱伯芳.混凝土热力学性能随龄期变化的组合指数公式[J].水利学报,2011,42(1):1-7.
- [18] Kou S, Huo M L, Jin L A, et al. Comparative study on calculation methods of temperature field of mass concrete structures in subway stations [C]//Proceedings of the International Conference on Industrial Design and Environmental Engineering, IDEE 2023, November 24-26, 2023, Zhengzhou, China. 2024.
- [19] 张增起,石梦晓,王 强,等.等效龄期法在大体积混凝土性能预测中的准确性[J].清华大学学报(自然科学版),2016,56(8):806-810.
- [20] Y Hansen P E, Pedersen E J. Maturity computer for controlled curing and hardening of concrete strength[J]. Nordisk Betong, 1977,1(19):19-34.
- [21] 崔 微,吴甲一,宋慧芳.考虑水化度对热学参数影响的早期混凝土温度场分析[J].东南大学学报(自然科学版),2015,45(4):792-798.
- [22] 陈 辉,邓 刚,张延亿,等.考虑温度变化和长期变形的面板堆石坝模拟门[J].水力发电学报,2021,40(10):124-134.
- [23] 钟惟亮,丁 昊,范立峰.基于 BP 神经网络的地聚物混凝土微观参数标定研究[J/OL].工程力学:1-10[2024-10-09].[http://](http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2595.03.20231226.0959.016.html)
- [24] 王 放,周宜红,赵春菊,等.考虑测点灵敏度的大体积混凝土热学参数反演方法研究[J].水力发电学报,2017,36(12):95-104.
- [25] 王新刚,王起才,周 岩,等.基于人工神经网络的大体积混凝土温度场预测[J].混凝土,2006(9):21-24.
- [26] 张文伟.早龄期混凝土温湿度场试验研究及数值模拟[D].西安:西安理工大学,2022.
- [27] 何 鹏.水电工程大体积混凝土温度裂缝控制及实例分析[M].中国建筑工业出版社,2013.

- 2020-2027.
- [6] 陈秀秀,叶 盛,潘海龙,等. 水库运行对河流水文情势影响——以龙羊峡、小浪底水库为例[J]. 中国农村水利水电,2022(4):1-18.
- [7] 郭文献,王艳芳,李 越,等. 三峡水库对宜昌站生态水文情势影响研究[J]. 中国农村水利水电,2018(1):51-53.
- [8] 邓志民,刘扬扬,樊 皓. 鄂北调水工程对汉江中下游水文情势的影响[J]. 中国农村水利水电,2017(4):125-128.
- [9] 郭佳陇. 月潭水库建成对下游河道水文情势影响分析[J]. 水利科技与经济,2015,21(10):64-67.
- [10] 赵建华,刘翠善,王国庆,等. 近 60 年来黄河流域气候变化及河川径流演变与响应[J]. 华北水利水电大学学报,2018,39(3):1-5.
- [11] 王国重,李中原,杨 丹,等. 沙颍河干流河南段河道生态基流价值估算与分析[J/OL]. 水土保持研究,1-6 [2024-06-13]. <https://link.cnki.net/urlid/61.1272.P.20240611.1051.003>.
- [12] 徐 源. 多闸坝控制下沙颍河水质水量变化特征研究[D]. 武汉:武汉大学,2017:9-26.
- [13] 田进宽,郭佳航,左其亭,等. 沙颍河流域水资源配置思路与计算模型[J]. 水资源保护,2022,38(2):62-67.
- [14] 李中轩,吴国玺,许淑娜,等. 颍河上游新石器时期的地貌变迁对史前聚落分布的影响[J]. 第四纪研究,2018,38(2):380-392.
- [15] 周光涛. 呼兰河流域河川径流年内分配变化特征分析[J]. 水电能源科学,2018,36(9):39-43.
- [16] 李 斌,解建仓,胡彦华,等. 西安市近 60 年降水量和气温变化趋势及突变分析[J]. 南水北调与水利科技,2016,14(2):55-61.
- [17] 金保明,高兰兰,颜望栋. 基于 Kendall 与 R/S 法的年最大洪峰流量变化特性分析[J]. 水力发电,2016,42(11):20-23.
- [18] 杨金艳,赵 超,刘光生,等. 基于 Mann-Kendall 和 R / S 法的水文序列变化趋势分析——以苏州市为例[J]. 水利水电技术,2017,48(2):27-30,137.
- [19] 陆建宇,王秀庆,王学斌,等. 径流年内分配不均匀性的度量指标及其应用[J]. 水力发电,2015,41(11):28-32.
- [20] 张 媛,李常斌,王刘明,等. 几种河川径流序列突变检验方法的对比[J]. 水利水电技术,2020,51(2):38-47.
- [21] 焦迎乐,席献军. 人类活动对颍河白沙水库水文情势影响分析[J]. 河南水利与南水北调,2011(16):9-10,13.
- [22] 李 琳. 河南省白沙水库入库径流分析[J]. 河南水利与南水北调,2015(13):59-61.
- [23] 黄斌斌,郝成元,李若男,等. 气候变化及人类活动对地表径流改变的贡献率及其量化方法研究进展[J]. 自然资源学报,2018,33(5):899-910.
- [24] 戴韵秋,石 朋,胡健伟,等. 气候变化和人类活动对流域径流的影响分析——以沙颍河为例[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2018,40(1):15-19.
- [25] 王 文,王靖淑,陶奕源,等. 人类活动对水文干旱形成与发展的影响研究进展[J]. 水文,2020,40(3):1-8.
- [26] 陈 晨,张刘东,倪匡迪,等. 基于 Tennant 和 R2-CROSS 的滇池流域河流生态需水量计算[J]. 广西水利水电,2021(4):31-34,43.
- [27] 杨寅群,刘雅纯,赵琰鑫,等. 安徽省某大型综合利用水库生态基流研究[J]. 人民长江,2015,46(9):63-67.
- [28] Suen J, Eheart J W. Reservoir management to balance ecosystem and human needs: Incorporating the paradigm of the ecological flow regime [J]. Water Resources Research, 2006,42(3):1-9.

(上接第 191 页)

- [13] 朱明勇,耿 欧,孙 倩,等. 内粘钢板法加固盾构隧道衬砌管片的力学性能试验研究[J]. 特种结构,2022,39(2):9-14.
- [14] 张 磊,柳 献. 盾构隧道加固用复合型材承载力计算方法研究[J]. 城市轨道交通研究,2023,26(5):169-176.
- [15] 邓世舜,沈张勇,柳 献,等. 地铁盾构隧道复合腔体构件性能试验研究[J]. 城市轨道交通研究,2022,25(6):31-36,42.
- [16] 彭良亮,李 迅,沈张勇,等. 盾构隧道复合腔体构件腔内注浆技术研究[J]. 建筑施工,2020,42(9):1740-1741.
- [17] 公路隧道设计规范:JTG D70—2004[S]. 北京:人民交通出版社,2004.