

基于 Radon 变换的时空图像纹理角识别方法

李 涵 金世俊

(东南大学仪器科学与工程学院 南京 210096)

摘要: 时空图像测速法以河流表面自然特征为分析对象,检测生成的时空图像中的纹理主方向,根据物象变换关系、拍摄所得视频参数和纹理方向倾角的正切值计算出河流表面的一维时均流速。针对实际应用中生成的时空图像受噪声干扰而导致时空图像纹理倾斜角检测精度出现较大误差的问题,本文提出采用改进的同态滤波器来增强河流表面图像的纹理特征,采用融合了自适应直方图均衡化的频域滤波对时空图像去噪,再利用 Radon 变换检测纹理角方向。通过模拟纹理图像实验,较高、较低流速条件下实地河道实验证本文改进方法的有效性,实验结果表明,对于标准的模拟纹理图,Radon 变换角度检测结果相对误差小于 0.03%,对于干扰较多的复杂的实地河道环境,较低和较高流速条件下,基于 Radon 变换的时空图像纹理角识别结果与人工手动目测值间的相对误差分别小于 1.56% 和 1.80%。实验表明, Radon 变换法可行且较其他纹理角检测算法有更高的精度。

关键词: 河流流速测量;时空图像测速;同态滤波;频域滤波;Radon 变换

中图分类号: TP391 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.4050

Method of space-time image velocimetry based on Radon transform

Li Han Jin Shijun

(School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The space-time image velocimetry technique harnesses the natural features of river surfaces for analysis. By examining the predominant texture direction in the generated space-time images, it calculates the one-dimensional time-averaged flow velocity of the river surface, factoring in physical transformation relationships, captured video parameters, and the tangent of the texture inclination angle. In view of the problem that the accuracy of the spatiotemporal image texture inclination angle detection is greatly affected by noise interference in practical applications, this paper proposes to use an improved homomorphic filter to enhance the texture features of the river surface image, and adopts a frequency domain filter integrated with adaptive histogram equalization to denoise the spatiotemporal image. Subsequently, the Radon transform is deployed to pinpoint the texture's angular direction. Through simulated texture image experiments and on-site river experiments under high and low flow conditions, the effectiveness of the improved method proposed in this paper is verified. The findings reveal that, for standard simulated texture visuals, the Radon transform's angle detection holds a relative error of less than 0.03%. In on-site river laden with interference, the relative errors between the Radon transform-based spatiotemporal image texture angle detections and manual observations are less than 1.56% and 1.80% under low and high flow conditions, respectively. The experiment indicates that the Radon transform method is feasible and has higher accuracy compared to other texture angle detection algorithms.

Keywords: river flow measurement; STIV; homomorphic filtering algorithm; filtering technology; Radon transform

0 引言

我国河流山川众多,河流的综合利用在国家经济社会发展中占有重要的地位。河流水文信息反映了河流中水的时空分布和变化规律,对水文信息进行监测有助于判断洪

涝灾害强度、及时发布防汛抗旱预警、指导河流水量调度管理等。高洪时期流速和流量信息获取是山洪地质灾害防治的重要组成部分^[1]。

传统的侵入式流速测量仪在高洪时期易受泥沙干扰机械结构、难以入水且难以保障涉水测量人员的安全。近年

来, 基于图像法的测流技术发展迅速, 该技术为非接触式全流场测量, 具有测量设备简易、无需人工现场值守、全流场测量效率高、实时性强等优势。

根据河流表面图像速度分析方法的不同, 可分为大尺度粒子图像测速法(LSPIV)^[2]、大尺度粒子图像跟踪法(LSPTV)和时空图像测速法(STIV)。LSPIV 方法将相邻的两帧图片分为若干个小区域, 在前一帧图片上设置计算窗口, 在后一帧图片的对应位置设置更大尺度的搜索窗口, 在搜索窗口中选取与前一帧图像计算窗口同尺寸的区域为另一个计算窗口, 在搜索窗口中不断更换计算窗口的位置并重复空域互相关或频域快速傅里叶变换互相关分析的匹配计算过程, 最大的互相关值对应的搜索区域中心点即为前一帧图像计算窗口中心点一帧间隔时间后运动到的位置^[3]。计算大尺度图像中模板匹配的互相关系数, 需要高性能 CPU 和大量存储空间, 计算机资源消耗较大。

LSPTV 算法是一种跟踪流场中示踪粒子的运动轨迹得到流速场的图像测速方法, 相邻帧中, 结合附近粒子匹配概率研究单个粒子的匹配。该算法粒子匹配精度高但计算耗时较长且参数设置依靠人工经验, 不满足快速运算的实时性要求。且很难处理高浓度低分辨率粒子条件下河流表面的流速测量^[4]。

时空图像测速法(STIV)是一种以河流表面图像为分析对象, 在合成的时空图像(STI)中检测纹理主方向(MOT)以获得水面一维时间平均速度的测速方法^[5]。在拍摄得到的视频图像序列中, 首先需要沿着河流流向设置一系列平行且覆盖整个河宽的搜索线, 提取图像序列测速线上每个点处的灰度值, 并将整条测速线上的灰度值按时间顺序在时间轴 t 轴上排列生成二维的时空图像。时空图像的垂直坐标为时间, 其长度为从视频中抽取的图像序列的帧数。水平轴为测速线的横向坐标, 其长度为所设置测速线的像素长度。时空图像上显现了一系列方向一致的倾斜条纹, 这些倾斜条纹是由随水流移动的表面纹理产生的, 与时间轴正方向的夹角为时空图像纹理角。识别出倾斜条纹的倾斜角 θ , 利用倾斜角 θ 的正切值即可得到时间段内沿测速线方向河流流动的平均流速。

与 LSPIV 对比, STIV 采用单宽直线代替局部窗口作为分析对象, 空间分辨率提高, 相机架设的俯角参数要求比 LSPIV 方法低, LSPIV 为保证远离相机水域图像的空间分辨率要求相机俯角较大, 而 STIV 可满足相机俯角条件下的实际测量需要。STIV 的效率比 LSPIV 高, 计算速度为 LSPIV 的十倍, 实时性更强。STIV 在高浓度粒子水体条件下的适用性高于 LSPTV 算法。因此, 本文针对时空图像测速法进行研究改进。

Fujita 等^[6]于 2007 年提出了 STIV 方法, 并通过实验验证该测速方法在断面流量测量方面展现出了很好的性能, 同时 Fujita 等^[7]还开发了 KU-STIV 商业软件, 并成功运用于日本诸多河流的流速测量。时空图像测速法的核心

在于分析识别时空图像纹理角。纹理角检测方法可分为 3 种: 灰度梯度张量法(BGT)、二维自相关函数法(QESTA)和基于快速傅里叶变换(FFT)^[8]的方法。

BGT 将生成的时空图像划分为多个局部子窗口, 计算每个子窗口的纹理方向和相干性, 以相干性大小设置权重加权计算出整个时空图像的纹理主方向。子窗口中的纹理清晰度越高, 相干性参数就越大, 但是若时空图像中干扰纹理占据较大比重, 那么相干性参数会在包含噪声的区域取得较大值, 加权计算得到的纹理角就会出现较大误差。QESTA 采用时空图像强度分布的二维自相关函数衡量图像中像素与其相邻像素之间的相似性以检测时空图像纹理角。QESTA 有利于建立起时空图像质量评价指标, 但其在处理大尺度图像时需要更多的计算资源和耗时且对噪声敏感, 噪声干扰会导致计算得到的自相关系数产生偏差影响最终的角度识别结果。基于快速傅里叶变换的方法利用傅里叶变换的自动配准性质, 即图像中规则方向性纹理的频谱集中在过原点的直线条带上, 直线指向代表频谱主方向, 与纹理主方向正交垂直。FFT 对图像边缘的处理可能会引入不准确的频率分量干扰频谱主方向的识别, 且对于窗函数的选择需要根据经验进行调整。针对时空图像纹理识别的问题, 本文提出使用 Radon 变换进行纹理角识别, 该方法计算和实现简单, 可视性好且对噪声的鲁棒性较高。

时空图像的质量对时空图像纹理角识别的精度会造成影响, 噪声干扰较大的时空图像可能会得出误差较大的纹理角, 影响后续流速计算精度。所以, 对时空图像进行增强至关重要。目前, 时空图像增强算法有标准滤波器法(STD)和基于频域滤波技术^[10]的方法, 标准滤波器对图像垂直像素阵列进行归一化处理, 有助于去除阴影、障碍物等垂直方向的干扰, 使纹理图像更加清晰, 但是对于其他方向的干扰纹理作用不大。基于频域滤波的时空图像增强算法对时空图像进行傅里叶变换, 对频谱过原点的光谱条带进行线积分求出大概的频谱主方向, 再从频谱主方向出发, 取该方向上下角度范围内的扇形区域为滤波区域, 只保留有效的扇形区域的光谱信息^[11], 最后进行逆变换得到较为清晰的时空图像。但由于噪声干扰, 基于 FFT 识别出的粗略频谱主方向不一定准确, 可能会出现误检的情况, 若出现误检则扇形滤波区域保留的信息是噪声信息而滤去了有效信号。针对以上时空图像增强方法的问题, 本文提出融合自适应直方图均衡化的频域滤波时空图像增强法, 改善了扇形滤波器主方向的识别准确度。

1 河流表面及时空图像增强改进

1.1 基于改进形态滤波的河流表面图像增强

时空图像测速法首先要从拍摄得到的河流视频中按合适的帧间隔抽取一系列河流表面图像序列。河流表面除了波纹、涟漪等有效特征信号, 还存在背景干扰, 需要对河流表面图像进行增强处理。

在河流表面图像采集过程中, 图像通常是亮度-成像模型, 如下:

$$F(x, y) = i(x, y) \cdot r(x, y) \quad (1)$$

式中: $F(x, y)$ 为采集得到的图像, $i(x, y)$ 为照度分量, $r(x, y)$ 为反射分量。同态滤波先利用非线性的对数变换将乘性噪声转化为加性噪声, 最后再用指数反变换恢复原始信号^[12]。同态滤波步骤如下:

首先对式(1)取对数, 有:

$$\ln F(x, y) = \ln i(x, y) + \ln r(x, y) \quad (2)$$

接着, 对式(2)两边做傅里叶变换, 可得:

$$F(u, v) = I(u, v) + R(u, v) \quad (3)$$

利用同态滤波传递函数 $H(u, v)$ 对式(3)两边进行处理。得:

$$H(u, v)F(u, v) = H(u, v)I(u, v) + H(u, v)R(u, v) \quad (4)$$

然后, 对式(4)进行傅里叶逆变换, 可得:

$$h_f(x, y) = h_i(x, y) + h_r(x, y) \quad (5)$$

最后对式(5)两边取指数, 得:

$$g(x, y) = \exp[h_f(x, y)] = \exp[h_i(x, y)] + \exp[h_r(x, y)] \quad (6)$$

其中, $g(x, y)$ 为经同态滤波处理后的图像。

同态滤波器通过设计一个对高低频有不同响应的滤波函数, 减弱低频增强高频, 达到压缩图像动态范围和增强图像对比度的作用。因此, 同态滤波器的剖面图与高通滤波器的形状类似^[13], 如图 1 所示。

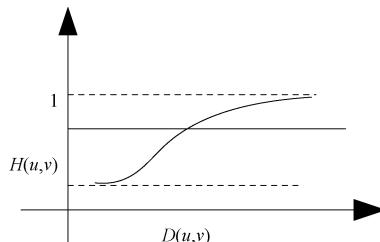


图 1 同态滤波器剖面图

本文采取改进的高斯型同态滤波器来进行同态滤波。改进的高斯型传递函数为:

$$H(u, v) = (\gamma_H - \gamma_L) [1 - e^{-c \frac{(D(u, v))^2}{D_0}}] + \gamma_L \quad (7)$$

其中, γ_L 为低频增益, γ_H 为高频增益, D_0 为截止频率, $D(u, v)$ 为频率 (u, v) 到中心频率 (u_0, v_0) 的欧式距离, 即:

$$D(u, v) = \sqrt{(u - u_0)^2 + (v - v_0)^2} \quad (8)$$

河流背景被视为低频信息, 示踪纹理特征包含边缘等细节信息被视为高频信息, 对河流表面图像进行压缩低频、提升高频可以实现河流水目标增强和背景抑制的效果。 γ_L 小于 1 代表削弱频域低频部分, γ_H 大于 1 代表增强频域高频部分, c 为常数用于在 γ_L 和 γ_H 之间过渡, 控制滤波器函数斜面的陡度。

如表 1 所示为本文改进的高斯滤波传递函数的参数取值。

表 1 改进的同态滤波传递函数参数

参数	参数取值
γ_H	1.5
γ_L	0.9
D_0	50
c	1.0
n	1

如图 2(a)所示为河流表面图像原图, 图 2(b)所示为经同态滤波增强后的河流表面图像。

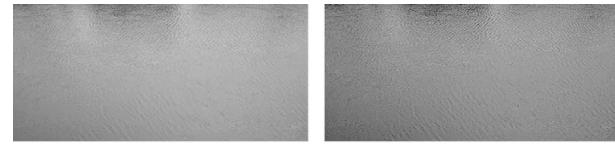


图 2 同态滤波河流表面纹理增强对比图

图 2(b)中经同态滤波处理后的河流表面图像, 河流表面波纹等纹理特征尤其是水面反光区域的波纹纹理与原图相比清晰度明显增强了。

1.2 融合自适应直方图均衡化的傅里叶频域滤波时空图像增强法

傅里叶变换频域滤波法基于傅里叶变换的自配准性质, 即将倾斜纹理特征看作由一系列倾斜直线组成的纹理, 在频域内会表现为穿过图像中心的, 与原图纹理方向正交的明亮条带。设计频域滤波器的形状和阈值以保留光谱条带部分, 对频谱其他部分信号进行滤除。再将频域图像转移到时域中, 即可得到纹理更清晰的时空图像。

首先, 对时空图像进行二维窗函数处理以消除频域内的泄露效应, 其次, 利用傅里叶变换将图像由时域转换到频域中, 再将频谱图由直角坐标转换为极坐标表示, 然后在极角为 $0^\circ \sim 180^\circ$ 的半圆内, 以 1° 为步进, 沿极坐标下频谱极角对应的极径作线积分, 积分公式为:

$$|F(\theta)| = \int_0^R |F(\rho, \theta)| d\rho \quad (9)$$

其中, 积分上限 R 为:

$$R = \min(N/2, M/2) \quad (10)$$

根据式(9)计算出的线积分最大值对应的角度即为频谱主方向。

接着, 根据频谱主方向设计关于极坐标原点中心对称的两个扇形区域作为频域滤波器, 令扇形的半径长度与上文进行线积分运算的积分上限长度相等, 扇形的圆心角为:

$$\begin{cases} [\theta - 5^\circ, \theta + 5^\circ], & \text{上部扇形} \\ [\theta + 175^\circ, \theta + 185^\circ], & \text{下部扇形} \end{cases} \quad (11)$$

最后, 对扇形滤波后的频谱图进行反中心变换, 二维离

散傅里叶逆变换得到去噪后纹理更加清晰的时空图像。

该方法在降雨、存在遮挡物、水面倒影和水面耀光等复杂光照环境下均取得了有效的滤波结果。但是该方法需要根据计算得到的粗略的频谱主方向来设置扇形滤波器的中心角。粗略计算得到的纹理主方向决定了该方法是否能够正确滤波。在噪声纹理信号大小大于有效纹理信号大小时,会出现扇形滤波器中心角误检的问题。

本文提出融合自适应直方图均衡化的频域滤波法来增强时空图像。

直方图均衡化^[14]即为将原始图像的灰度直方图的数据从较为集中的某个灰度区间扩展到在整个灰度区间上均匀分布。可以增加多数像素点的灰度动态范围,达到在整体上增强图像对比度的效果。直方图均衡化处理后,虽然图片背景对比度增强了,但是图像的细节信息也一定程度

上丢失了。为了解决细节丢失问题,可采用自适应直方图均衡化方法,将图像分成多个小块,对每一小块做直方图均衡化处理。这种方法可以更好地改进图像局部对比度并获得更多图像细节信息。

本文首先利用自适应直方图均衡化方法增强图像对比度来提高有效信号的大小,再将得到的图像进行频域滤波。如图 3(a)所示,为原始时空图像频域滤波的角度-积分折线图,图 3(b)为融合了自适应直方图均衡化的频域滤波的角度-积分折线图,图 3(a)中积分值最大值对应的角度为 0°,即原始时空图像中竖直方向的纹理噪声很大,噪声信号强度超过了有效信号,真实的角度应为红色虚线标注的值。图 3(b)中可看出,线积分值的大小整体上大于图 3(a)中的,说明经自适应直方图均衡化处理后的时空图像频域幅度谱更明显,且改进的融合算法有效地抑制了图像中垂直条带的干扰。

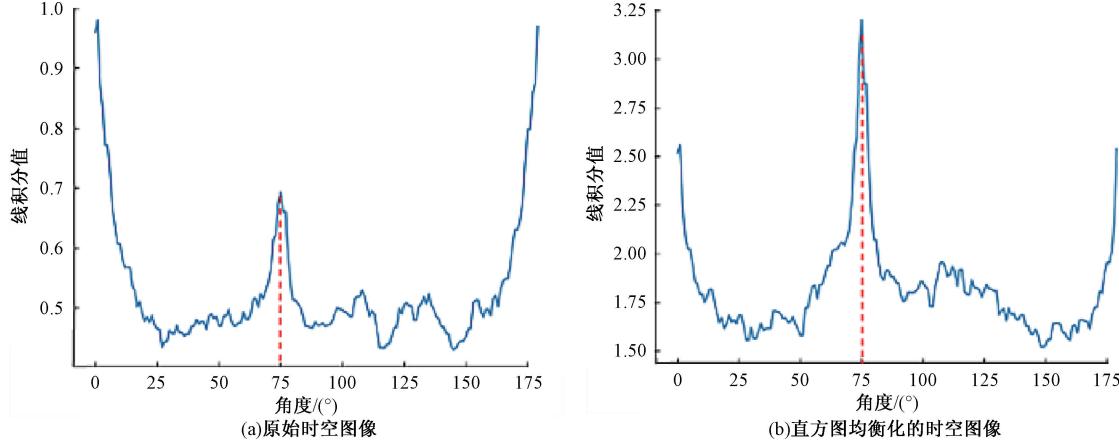


图 3 频域滤波角度-积分折线图

2 基于 Radon 变换的时空图像纹理角识别

二维 Radon 变换就是数字图像矩阵在某一特定角度射线方向上做投影变换^[15]。假定一幅二维图像为 $f(x, y)$,则定义 xOy 平面上的一条直线方程:

$$L: s = x \cos\theta + y \sin\theta \quad (12)$$

如图 4(a)所示, L 是 xOy 平面上的一条直线, s 为直线 L 到原点 O 的距离, θ 为直线 L 的法线与 x 轴正方向的夹角,给定 s 和 θ 的值能够唯一确定一条直线 L 。

二维图像 $f(x, y)$ 的 Radon 变换为 $f(x, y)$ 在已知直线 L 方向上的积分,即:

$$R(s, \theta) = \int_L f(x, y) dL \quad (13)$$

结合直线方程 $L(s, \theta): s - x \cos\theta - y \sin\theta = 0$, 设置 δ 冲击函数如下:

$$\delta(s - x \cos\theta - y \sin\theta) = \begin{cases} 0, & s - x \cos\theta - y \sin\theta \neq 0 \\ 1, & s - x \cos\theta - y \sin\theta = 0 \end{cases} \quad (14)$$

根据式(13)和(14),Radon 变换方程可改写为

$$R(s, \theta) = \iint f(x, y) \delta(s - x \cos\theta - y \sin\theta) dx dy \quad (15)$$

如图 4(b)所示为二维 Radon 变换的原理示意图,其中, R 即为图像灰度在直线 L 实线上的积分值。原本 xOy 坐标系下过图像的直线投影为 $sO\theta$ 坐标系下的一点,横坐标 θ 为 xOy 坐标系下直线的法线与 x 正方向的夹角,纵坐标为投影位置即原点到直线的距离,点的亮度像素为线上 $f(x, y)$ 的积分值。

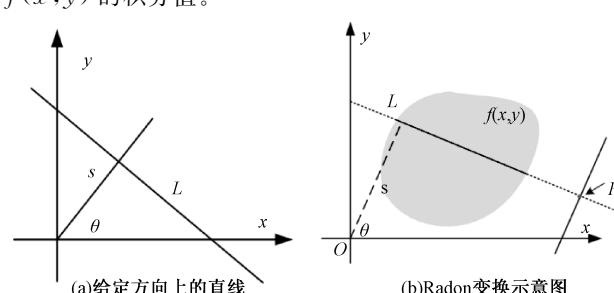


图 4 Radon 变换原理

时空图像的纹理主方向可看作是具有较多直线的方向。若沿着图像纹理的方向进行投影,那么 Radon 变换结

果在投影直线与纹理线重合时取得高值,当投影直线没有落在纹理直线上时取得低值,由上所述, Radon 变换结果通常在纹理主方向上有较大的变差,变差在主方向处具有局部极大值^[16],因此,利用 Radon 变换可以检测图像中的直线型趋势。

为了保持图像的方向性,可截取出时空图像的内接圆盘区域如图 5(b)所示,在内接圆盘区域上进行 Radon 变换。从 $0^\circ \sim 179^\circ$,每隔 0.1° 改变一次 Radon 变换的方向, Radon 变换结果如图 6 所示,横坐标为 1800 个积分角度范围,纵坐标为点到原点的距离, Radon 图像的灰度代表横坐标角度与纵坐标距离所确定的直线上原图像的灰度积分值,颜色条代表着灰度的变化范围。计算同一角度方向上投影积分的标准差,标准差最大值所对应的角度方向即为图像纹理主方向。如图 7 所示为不同方向上 Radon 变换标准差的折线图,该折线图有明显的尖峰,红色虚线标注处即为标准差最大值及其对应的角度。

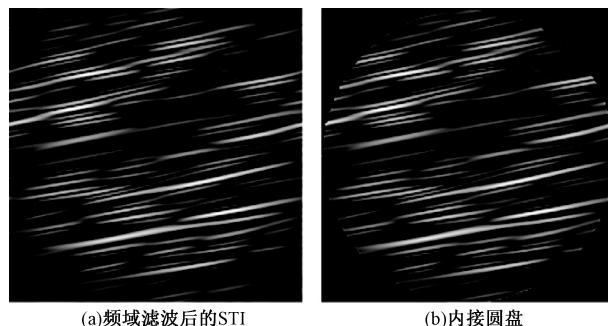


图 5 截取内接圆盘处理

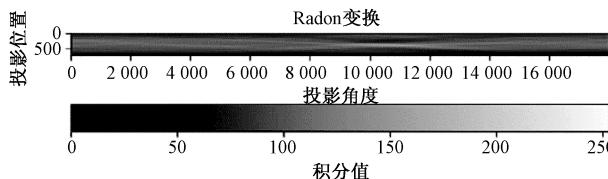


图 6 Radon 变换结果

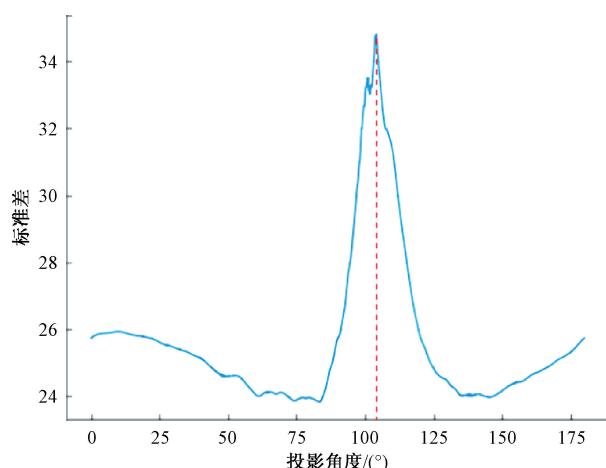


图 7 Radon 变换角度-标准差折线图

3 实验

3.1 模拟纹理图像 Radon 角度检测实验

对大量河流水面图像进行直方图分析,发现河流表面灰度值大部分处于 160 附近,因此首先生成灰度值为 160 的背景图,再在灰色背景图上叠加一系列垂直条纹,再利用旋转矩阵依次以 5° 的步进从 $0^\circ \sim 90^\circ$ 来旋转垂直条纹,生成 18 幅不同倾斜角度的纹理图片,如图 8 展示了一部分生成的合成纹理图片。

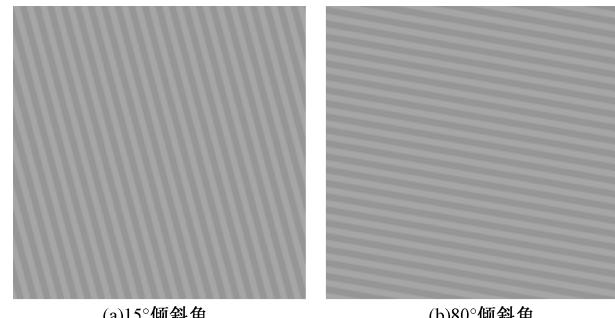


图 8 部分模拟纹理图

分别使用本文提出的 Radon-STIV 法、BGT、WESTA 和基于快速傅里叶变换的方法检测模拟图像序列的纹理主方向,纹理角检测结果绝对误差如表 2 所示。加粗数据为上述四种检测方法在单幅角度纹理图像上检测结果的误差最小值。

表 2 模拟图像序列纹理角度检测结果误差

真值	各纹理角识别方法检测误差			
	Radon	BGT	WESTA	FFT
0	0	0	0	0
5	0.01	0.14	0.3	0.2
10	0.01	0.21	0.4	0.3
15	0.05	0.2	0.4	0.1
20	0	0.14	0.5	0.3
25	0.03	0.09	0	0.4
30	0.01	0.05	0	0.5
35	0.02	0.03	0.5	0.4
40	0.05	0.01	0.1	0.1
45	0.04	0	0	0.1
50	0.04	0.01	0.1	0.1
55	0.02	0.03	0.5	0.5
60	0.01	0.05	0	0.6
65	0.03	0.09	0	0.6
70	0	0.14	0.5	0.09
75	0.05	0.2	0.4	0.3
80	0.01	0.21	0.4	0.6
85	0	0.14	0.3	0.6

由表 2 可看出,基于 Radon 变换方法的检测结果几乎与角度真值完全重合,基于灰度梯度张量法、二维自相关函数法和基于傅里叶变换方法的检测结果大体与角度真值一致,误差很小,但与本文方法相比与真值重合度较低。

本文 Radon-STIV 角度检测值、BGT 检测值、QUESTA 检测值和基于傅里叶变换方法的检测结果与真值的最大绝对误差分别为 0.05° 、 0.21° 、 0.5° 和 0.6° , 相对误差分别小于 0.03% 、小于 2.8% 、小于 6% 和小于 4% 。由误差数据可知在检测图像倾斜纹理角的应用中, 基于 Radon 变换方法的准确度更好。

3.2 较低流速工况下实地河道时空图像纹理角识别

如图 9 所示为拍摄得到的较低流速工况下河流表面视频图像, 拍摄得到的视频帧率为 25 帧每秒, 图像分辨率为 3840×2160 像素。对相机拍摄得到的视频每一帧抽取一帧图片, 共得到 826 张图像序列, 并对这些图像序列进行上文所述的同态滤波处理。

接下来, 以河流表面上部为起点高度, 取像素宽度为 740 的测速线, 以 100 个像素为测速线间的高度间隔, 可生成 12 条测速线。在图像拍摄得到的河道长度范围内沿流动方向分别设置 3 组同样高度和同样像素宽度的测速线, 共生成了 36 条测速线, 即可生成 36 张时空图像。如图 10 所示为实地河流测速线的时空图像示例。测速线共有 3 组, 从 0~35 依次编号, 如图 9 所示。

3 组测速线生成的时空图像纹理角识别结果分别在表 3 中列出。表 3 中显示了基于 Radon 变换、灰度梯度张量法、二维自相关函数法和基于傅里叶变换方法的纹理角度识别结果与目测手动测量值间的绝对误差, 加粗数据为单幅时空图像各检测方法所得结果的误差最小值。

由表中数据可知, 基于 Radon 变换的时空图像测速法的纹理角识别结果与目测手动测量值间的绝对误差最小, 且加粗数据为单幅时空图像各检测方法所得结果的误差最小值。

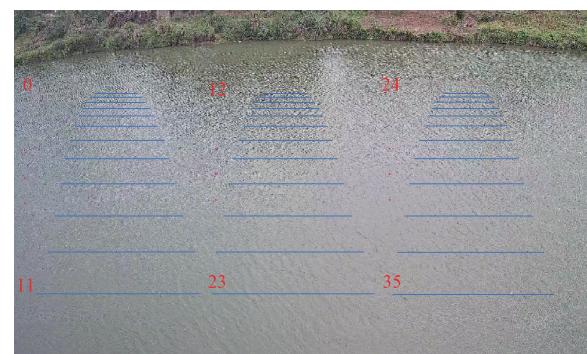


图 9 实地河流测速线设置

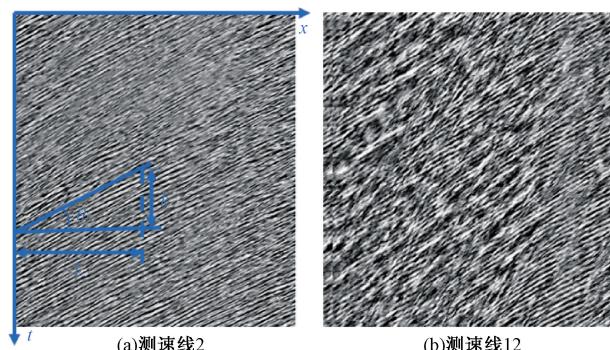


图 10 河流部分测速线的时空图像

检测结果与其他检测方法相比, 角度识别结果更贴近手动测量值。基于 Radon 变换的时空图像纹理角检测方法、灰度梯度张量法、二维自相关函数法和基于傅里叶变换的方法的相对误差分别小于 1.56% 、 1.98% 、 2.83% 和 1.88% , 由相对误差范围可见, 基于 Radon 变换的时空图像纹理角识别方法准确率更高。

表 3 较低流速河流时空图像纹理角检测结果误差

序号	Radon	BGT	QUESTA	FFT	序号	Radon	BGT	QUESTA	FFT
0	0.85	1.48	1.32	1.58	18	0.72	0.47	2.22	1.68
1	0.03	2.04	1.16	0.64	19	0.58	0.06	0.86	0.84
2	0.21	0.41	1.63	1.93	20	0.64	2.13	2.36	0.46
3	0.79	0.94	1.49	0.79	21	0.83	0.9	1.14	0.54
4	0.17	0.37	1.15	0.85	22	0.26	1.07	0.83	0.27
5	0.88	0.58	0.25	0.65	23	1.58	0.93	1.2	0.21
6	0.25	0.01	0.01	0.9	24	0.73	1.79	2.12	0.58
7	0.01	0.54	0.07	0.33	25	0.52	0.42	1.57	1.53
8	0.73	1.01	2.65	0.45	26	1.23	0.29	1.68	1.22
9	0.48	1.25	2.59	0.61	27	1.08	0.05	0.77	2.18
10	1.05	1.1	1.2	1	28	0.03	0.31	0.23	1.67
11	0.6	1.44	2.13	1.03	29	0.7	0.8	3.26	0.69
12	0.6	2.13	2.68	0.68	30	0.11	0.39	1.03	2.07
13	0.49	1.92	0.51	0.39	31	0.99	0.71	1.15	1.17
14	0.12	1.77	3.34	0.46	32	0.57	0.44	0.66	0.86
15	1	1.13	2.24	1.36	33	0.49	1.41	0.65	1.24
16	0.78	0.24	0.21	0.69	34	1.69	0.37	1.36	0.74
17	1.36	1.65	2.07	0.17	35	0.36	0.07	0.03	1.87

识别出时空图像纹理角 θ 即可得到时间段内沿测速线方向河流流动的平均流速。假设河流表面特征沿着测速线方向在时间 T 下移动的距离为 L , 对应在时空图像中, 则表示为在 k 帧下移动了 l 像素距离, 如图 10(a)所示, 河流表面流速计算公式如下:

$$v = \frac{L}{T} = \frac{l \cdot S_x}{k \cdot S_t} = \tan\theta \cdot S_x \cdot f_{ps} \quad (16)$$

式中: S_x (m/pixel) 为测速线的分辨率, 根据河流表面图像标定物象转换得出, f_{ps} (pixel/sec) 为所用相机帧率。

3.3 较高流速工况下实地河道时空图像纹理角识别

与实验 3.2 类似, 在同一河道上, 以相同的相机布设参数拍摄河流视频, 不同的是, 该视频拍摄于河流较高流速状态下。采用与实验 3.2 相同的视频抽帧和测速线设

置方式生成 36 幅时空图像。表 4 中列出了较高流速状态下河流时空图像纹理角识别结果。表 4 中给出了较高流速河流条件下基于 Radon 变换、灰度梯度张量法、二维自相关函数法和基于傅里叶变换方法的纹理角度识别结果与目测手动测量值间的绝对误差, 加粗数据为单幅时空图像各检测方法所得结果的误差最小值。由表中数据可知, 较高流速状态下基于 Radon 变换的时空图像测速法的纹理角检测结果与其他检测方法相比, 角度识别结果更贴近手动测量值。较高流速状态下基于 Radon 变换的时空图像纹理角检测方法、灰度梯度张量法、二维自相关函数法和基于傅里叶变换的方法的相对误差分别小于 1.80%, 2.72%, 2.86% 和 2.07%, 由相对误差范围可见, 基于 Radon 变换的时空图像纹理角识别方法准确率更高。

表 4 较低流速河流时空图像纹理角检测结果误差

序号	Radon	BGT	QUESTA	FFT	序号	Radon	BGT	QUESTA	FFT
0	0.19	0.4	0.4	0.29	18	0.07	0.95	0.36	0.25
1	0.11	0.52	2.89	0.1	19	0.38	0.62	0.55	0.26
2	1.38	0.87	1.11	0.19	20	0.66	0.92	1.27	1.08
3	0.45	1.71	1.1	1.81	21	0.78	1.32	0.05	0.66
4	0.19	0.09	1.37	1.08	22	1.43	1.23	0.65	1.16
5	0.68	1.57	0.9	0.99	23	0.77	2.75	0.26	1.85
6	0.46	1.69	0.63	2.02	24	0.08	0.5	0.34	0.47
7	0.91	0.37	1.4	0.19	25	0.16	0.33	0.61	1.08
8	1.83	0.98	1.73	0.32	26	0.57	1.48	1.12	1.77
9	0.13	0.54	0.28	0.29	27	0.45	1.98	0.74	1.95
10	0.7	0.91	0.92	1.29	28	1.45	0.78	1.73	0.96
11	0.43	1.75	0.43	0.93	29	0.72	1.3	0.81	1.08
12	0.13	0.78	0.4	0.19	30	0.1	0.59	0.19	1.52
13	0.63	1.16	1.94	1.65	31	0.2	1.52	0.2	1.61
14	0.04	2.07	0.37	1.98	32	0.47	0.3	0.99	0.2
15	0.92	1.63	1.07	1.64	33	0.5	0.7	0.94	1.35
16	0.5	1.18	0.47	2.04	34	0.54	0.57	0.89	0.02
17	0.78	0.69	0.84	0.05	35	0.43	0.64	0.41	0.62

由实验 3.2 和实验 3.3 可知, 基于 Radon 变换的时空图像纹理角测量方法在较低流速和较高流速条件下均可适用, 且纹理角识别准确率较其他 3 种纹理角识别方法较高。

4 结论

本文基于现有时空图像测速技术的研究, 提出了时空图像测速法在河流图像增强、时空图像增强和时空图像纹理角识别的改进方法。使用改进的高斯型同态滤波器进行河流表面图像增强, 有效增加了河流表面波纹纹理特征的清晰度。使用融合自适应直方图均衡化的频域滤波进行时空图像增强, 有效解决了频域滤波滤波器方向角误检

的问题。采用基于 Radon 变换的时空图像测速法进行时空图像纹理角检测, 检测结果较灰度梯度张量法、二维自相关函数法和基于傅里叶变换的时空图像测速法精度更高。本文采用模拟纹理图像、较高较低不同流速河道实验验证了基于 Radon 变换的时空图像测速法的可行性和有效性。环境复杂干扰较多的实地河道时空图像纹理角识别结果较理想的模拟倾斜图像角度检测结果误差较大, 要进一步改进时空图像增强方法滤去更多噪声干扰。

参考文献

- [1] 徐立中, 张振, 严锡君, 等. 非接触式明渠水流监测技术的发展现状[J]. 水利信息化, 2013, 114(3): 37-44, 50.

- [2] FUJITA I, MUSTE M, KRUGER A. Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications [J]. Journal of Hydraulic Research, 1998, 36(3): 397-414.
- [3] 曹列凯. 大尺度表面流场测量技术研发与应用[D]. 北京: 清华大学, 2019.
- [4] 禹明忠. PTV 技术和颗粒三维运动规律的研究[D]. 北京: 清华大学, 2002.
- [5] 赵浩源, 陈华, 刘维高, 等. 基于河流表面时空图像识别的测流方法[J]. 水资源研究, 2020, (1): 1-11.
- [6] FUJITA I, WATANABE H, TSUBAKI R. Development of a non-intrusive and efficient flow monitoring technique: The space-time image velocimetry(STIV)[J]. International Journal of River Basin Management, 2007, 5(2): 105-114.
- [7] FUJITA I, DEGUCHI T, DOI K, et al. Development of KU-STIV: software to measure surface velocity distribution and discharge from river surface images[C]. Proceedings of the Proceedings of the 37th IAHR World Congress, F, 2017.
- [8] FUJITA I, NOTOYA Y, TANI K, et al. Efficient and accurate estimation of water surface velocity in STIV[J]. Environmental Fluid Mechanics, 2019, 19: 1363-1378.
- [9] 王慧斌, 董伟, 张振, 等. 基于时空图像频谱的时均流场重建方法 [J]. 仪器仪表学报, 2015, 36 (3): 623-631.
- [10] ZHAO H, CHEN H, LIU B, et al. An improvement of the space-time image velocimetry combined with a new denoising method for estimating river discharge[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2021, 77: 101864.
- [11] 张振, 李华宝, 袁章, 等. 频域时空图像测速法的图像滤波器敏感性分析[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(2): 43-53.
- [12] 王智奇, 李荣冰, 刘建业, 等. 基于同态滤波和直方图均衡化的图像增强算法[J]. 电子测量技术, 2020, 43(24): 75-80.
- [13] 冯相辉. 一种改进的同态滤波图像增强算法[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2020, 32(1): 138-145.
- [14] 赵云龙, 葛广英编著. 智能图像处理 Python 和 OpenCV 实现[M]. 北京: 机械工业出版社, 2021.
- [15] 曹城华, 武文波, 王钰. 基于 Radon 变换的空间目标运动方向检测[J]. 光学精密工程, 2021, 29 (7): 1678-1685.
- [16] 李杰. 图像的方向多尺度分析及其应用研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2007.

作者简介

李涵, 硕士研究生, 主要研究方向为视频图像河流表面流速测量。

E-mail: 1014643996@qq.com

金世俊(通信作者), 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为服务机器人的环境监测及信息融合、路径规划、地图创建、图像分析、运行控制, 水声测试用系统及装备。

E-mail:jinsj@seu.edu.cn