

文章编号 2095-1531(2016)03-0301-11

基于梯度和小波变换的水下距离选通图像去噪

许廷发*, 苏畅, 罗璇, 卞紫阳

(北京理工大学光电学院光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081)

摘要:水体的散射效应、激光光斑、成像器件的非理想化等因素使得图像出现大量无规律粒状噪声,它们增加了水下距离选通图像的背景噪声,模糊了目标轮廓,掩盖了目标细节,降低了图像的信噪比。针对上述问题本文提出了一种基于梯度和小波变换的去噪方法。首先对图像进行余弦小波变换,得到不同频率空间的图像集。低频空间引入新的图像梯度强化方法以提高图像的纹理信息量;对应非均匀性条带的 *LH* 或 *HL* 空间做曲面拟合处理以消除非均匀性条带的影响;在 *HH* 空间去噪过程中,低层空间做非局部均值处理以保留图像相似信息,高层空间做分数阶积分处理以保留图像细节信息。最后小波逆变换得到结果图像。从实验水槽中采集水下图像进行算法验证,将改进方法与已有算法对比分析。实验表明,本文所研究的水下去噪算法,能够平滑噪声且更大限度地保留图像细节纹理,在客观评价指标上提升了 6%。

关键词:水下图像;距离选通;图像去噪;梯度变换;小波变换

中图分类号:TP751.1 文献标识码:A doi:10.3788/CO.20160903.0301

Underwater range-gated image denoising based on gradient and wavelet transform

XU Ting-fa*, SU Chang, LUO Xuan, BIAN Zi-yang

(Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System of Ministry of Education, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

* Corresponding author, E-mail: xutingfa@163.com

Abstract: For the scattering effect of water, the laser spot, and other non-ideal imaging device, the image appears a large number of irregular granular noise. All of them increase the background noise of underwater range-gated images, blurring the target profile, obscuring details of the target, and reducing SNR. A denoising method based on gradient and wavelet transform is proposed. Firstly, the cosine wavelet transform is used to decompose the noisy image into many different frequency space image sets. For low frequency space image, a new image gradient enhancement method is used to improve the whole image's texture information. The *LH* or *HL* space images which have the information of non-uniform strips use the surface fitting method to eliminate the whole image's non-uniform strips. In the *HH* space denoising process, for the lower level space images, the non-local means method is used to preserve the whole image's similarity information, and for the upper space images, the fractional integral method is used to preserve the whole image's more details. Finally, the inverse wavelet transform is used to obtain the final image. Some contrast experiment are taken using underwa-

收稿日期:2016-01-22;修订日期:2016-02-28

基金项目:国家国际科技合作专项资助项目(No. 2014DFR1096)

Supported by International S&T Cooperation Program of China(No. 2014DFR1096)

ter images from the long sink. The results show that the denoise method proposed in this paper can smooth the noise and preserve more texture of the image at the same time that comparing with other contrast methods. The objective evaluating index is improved by 6%.

Key words: underwater imaging; range-gated imaging; image denoising; gradient transform; wavelet transform

1 引言

江河湖海的水资源勘探及海防都需要水下高分辨力的成像设备。水下光电成像技术快速且分辨率高,是水下设备的技术支持。水下光电成像一般有照明系统,水体对照明光的后向散射会严重干扰光电探测器,使直接观察目标的有效作用距离大大缩短。为此,人们提出6类改进的探测技术以提高水下光电成像的作用距离:距离选通光电成像技术、调制解调去除散射光技术、同步线扫描技术、结构光成像技术、偏振区分技术和多视角图像构造技术^[1]。其中,距离选通成像技术是目前水下最成熟有效的光电成像技术。然而,水下距离选通成像技术存在噪声量大、对比度差、照明不均匀的问题,需要图像后处理技术改善图像质量^[2]。其中一类是图像复原技术,通常为盲复原法^[3-4]。通过估计图像的退化机制,计算退化模型,然后恢复图像。目前水下图像复原技术因为水下物理退化机制复杂,估计模型偏差大,测量工作量大,适应性差,难以广泛应用。另一类是图像增强技术,直接对图像进行数学计算,依据需求有选择地增强图像,从而改善图像质量,目前应用广泛^[5-7],但是该过程中需要优秀的图像去噪作为支持。

常见的图像去噪方法包括新数字滤波器去噪法^[8]、基于小波变换的非局部层字典学习法^[9]、非局部变分法^[10]、小波阈值去噪法^[11]、高斯拟合估计法^[12]、梯度法^[13]、多模型混合法^[14]、其它字典学习法^[15]等,它们对水下距离选通图像针对性不强,直接使用去噪效果不明显。本文针对水下距离选通成像的特点,提出一种基于梯度和小波变换的水下距离选通图像去噪方法。首先对图像进行余弦小波变换,得到不同频率空间的图像集;低频空间引入新的图像梯度强化方法以提高图像的纹理信息量,对应非均匀性条带的 LH 或 HL 空

间做曲面拟合处理以消除非均匀性条带的影响,在 HH 空间去噪过程中,低层空间做非局部均值处理以保留图像相似信息,高层空间做分数阶积分处理以保留图像细节信息;最后小波逆变换得到结果图像。将改进算法与对照组对比,去噪效果较好。

2 水下距离选通成像原理及图像噪声来源分析

2.1 水下距离选通成像原理

水下距离选通成像系统以 Nd:YAG 固体脉冲激光器作为照射光源。 T_0 时刻激光发射入射光照明目标物体,由于 ICCD 探测器上的选通门关闭,水体的大量后向散射光不能进入探测器。探测完整目标所需时间 ΔT ,在激光脉冲宽度设置为稍大于 ΔT 时, T_1 时刻目标反射光到达探测器,选通门开启 ΔT 时间,ICCD 对探测目标完整成像,由此可屏蔽掉大部分水体后向散射光,增加水下光电成像系统的作用距离,如图1所示。水下距离选通成像技术可以将成像设备的探测距离提升数倍,使水下成像技术的可行性得到提高。

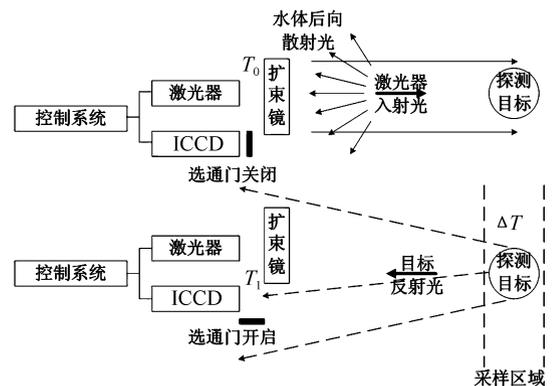


图1 水下距离选通成像原理

Fig. 1 Principle schematic of the underwater range-gated imaging

2.2 水的光学特性

海水中含有多种溶解物质和悬浮体,它们影响光的传播性、准直性,从而影响水下成像质量。海水对可见光中波长范围在 450 ~ 550 nm 的蓝绿光吸收最少,将该区间称为水体光学窗口。水下距离选通成像选用蓝绿光谱区的单色激光作为光源进行灰度成像。光在水中传播时会发生散射,分为前向散射和后向散射,前者是光在传输方向上的散射,后者是与传播方向相反的散射。前向散射使光的传播范围增大,使水下照明影响范围更广,但对准直性要求较高的距离选通成像系统不利,它提升了背景亮度,使目标与背景对比度下降。距离选通技术能够滤除大量的后向散射光,但是依然会有部分散射光进入成像系统。后向散射效应会在像平面上产生附加噪声,导致成像系统的信噪比下降,大大降低水下设备作用距离。

2.3 水下距离选通成像系统缺陷

影响水下距离选通成像系统成像质量的因素不只有水的光学特性,还有成像系统或器件本身的工艺和性能参数。

(1)激光散斑:物体表面的粗糙颗粒使光波发生衍射形成“位相光栅”。入射光波相位发生变化在空间发生干涉,表现在图像上,形成无规则分布的颗粒形状的散斑图像,使图像出现噪声,影响图像分辨力。

(2)选通门控信号跳动:距离选通成像系统对选通门的控制有严格的要求。通过控制选通门开启时间起点决定不同距离目标的探测,选通开启起点时间会严重影响成像目标的清晰度。选通门开启时间过短,目标信息接收不足,选通门开启时间过长,后向散射光进入过高。

(3)像增强器的噪声:像增强器中存在由荧光屏的低通性和电源纹波引起的光电噪声,使图像对比度降低,出现颗粒噪声。

(4)CCD 噪声:CCD 在电荷注入、转移和检测的过程中,都会带有噪声叠加。这些噪声孤立不相关,分布具有随机不确定性,对图像的影响也是随机性。

另外,系统的照明条件控制以及图像的采集

过程和传输过程,都会混入一定的噪声,降低图像的质量。

综上所述,水下距离选通图像颗粒噪声明显。水体的散射效应、激光光斑、成像器件的非理想化等,使得图像出现大量无规律粒状噪声,它们增加了图像背景噪声,模糊了目标轮廓,掩盖了目标细节,降低了图像的信噪比。

3 基于梯度和小波变换的水下距离选通图像去噪方法

基于上文分析,水下距离选通图像降质原因复杂,很难得到完美的图像退化模型,采用退化模板复原图像的手段目前阶段还存在很大难度。从实际效果出发,直接针对具体图像本身进行相适应的去噪操作,能够有效地提高图像质量。目前已有很多图像去噪的方法,但针对水下距离选通图像,这些方法需要改进。本文提出一种基于梯度和小波变换处理水下降质图像去噪的方法。

3.1 改进的快速最小误差曲面拟合法

噪声点被认为是图像矩阵中的一点异常值,使用曲面拟合可以很好地滤除该点。计算时,以图像非均匀性条带方向为基准,将图像分成沿条带方向的带有区域重叠的一系列矩形图像,如图2所示。对每个矩形图像进行最小误差的多项式曲面拟合(SF),重新得到新图像,该图像既实现了图像非均匀性的矫正,又实现了噪声的抑制。

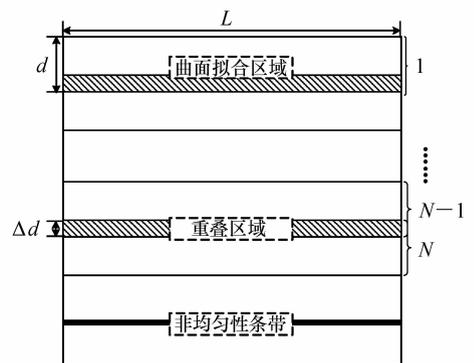


图2 曲面拟合示意图

Fig. 2 Schematic view of surface fitting

每个拟合矩形区域宽度为 d , 长度为 L , 为了

使各拟合矩形之间平滑连接,在选择每次拟合区域时,需要使前后两个拟合区域进行宽度为 Δd 的区域重叠,一般 $\Delta d < d$ 。数据拟合时,直接采用最小二乘法进行二元多项式拟合,并令 $d = p, L = q$,拟合值 $f(x, y)$ 表示为:

$$f(x, y) = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q a_{ij} x^{i-1} y^{j-1}, \quad (1)$$

式中, (x, y) 是拟合区域像素的坐标位置,令

$$x = \begin{bmatrix} 1 \\ x \\ x^2 \\ \vdots \\ x^{p-1} \end{bmatrix}, y = \begin{bmatrix} 1 \\ y \\ y^2 \\ \vdots \\ y^{q-1} \end{bmatrix}, \mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1q} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2q} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{p1} & a_{p2} & \cdots & a_{pq} \end{bmatrix},$$

$f(x, y) = x^T \mathbf{A} y$ 。拟合过程是求出 \mathbf{A} 的过程。直接进行最小二乘法的二维拟合:

$$h = \sum_{g=1}^n (f(x_g, y_g) - z_g)^2, \quad (2)$$

$$\frac{\partial h}{\partial a_{ij}} = 0, \quad (3)$$

式中, n 是原图像像素总数, z_g 是第 g 个的像素值大小。

上述式子需要解 $p \times q$ 个方程的线性方程组:

$$\begin{bmatrix} u_{11}(1,1) & u_{12}(1,1) & \cdots & u_{pq}(1,1) \\ u_{11}(1,2) & u_{12}(1,2) & \cdots & u_{pq}(1,2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{11}(p,q) & u_{12}(p,q) & \cdots & u_{pq}(p,q) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{12} \\ \vdots \\ a_{pq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v(1,1) \\ v(1,2) \\ \vdots \\ v(p,q) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中, $u_{\alpha\beta}(i, j) = \sum_{g=1}^n (x_g^{\alpha-1} y_g^{\beta-1} x_g^{i-1} y_g^{j-1})$, $v(i, j) = \sum_{g=1}^n x_g^{i-1} y_g^{j-1} z_g$ 。

上述方程求解不易,可以对其进行每行像素的多项式拟合,然后对每列像素进行多项式拟合,共进行 $L + d$ 个一元多项式拟合 $z = a_0 + a_1 x + \cdots + a_p x^p$,利用计算的时间序列化,大大降低了计算的空间复杂度。在计算时只需要解一系列的一元线性方程:

$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_i & \cdots & \sum_{i=1}^n x_i^p \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n x_i^2 & \cdots & \sum_{i=1}^n x_i^{p+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_i^p & \sum_{i=1}^n x_i^{p+1} & \cdots & \sum_{i=1}^n x_i^{2p} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n z_i \\ \sum_{i=1}^n x_i z_i \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_i^p z_i \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中, $x_i, i = 1, 2, \dots, n$ 是原始图像行或列的对应位置, $z_i, i = 1, 2, \dots, n$ 是图像原始行或列的值。

3.2 非局部均值法

Buades^[16]提出了非局部均值(NLM)的空间滤波器,在计算窗口 W_a 中使用一种添加像素权值的方法进行均值滤波。这种滤波器基于图像窗口的相似性进行图像处理,对加性噪声处理效果较好。

该权值的计算方法是^[17],定义一个窗口 W_b ($n \times n, W_b < W_a$),对窗口 W_a 中的每一个像素 I 及以 I 为中心的窗口 W_b 的所有像素(记为 A)与窗口 W_a 的中心像素 P 及以 P 为中心的窗口 W_b 的所有元素(记为 B)作对应运算,如图3所示。

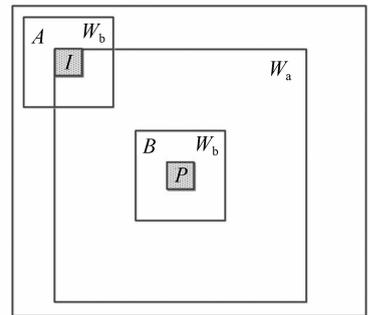


图3 非局部均值滤波原理

Fig. 3 Principle of the non-local mean filter

得到一个系数 k_l ,进而求得新的窗口 W_a 中心值 P' :

$$k_l = c \times \exp\left(-\frac{\|A - B\|_{2,\alpha}^2}{M}\right), \quad (6)$$

$$p' = \sum_{j \in W_a} k_l I_j, \quad (7)$$

式中, c 用来控制系数归一化, M 控制滤波强度规则, M 比较小时, \exp 指数值会比较大, 系数 k_l 比较大, 该处像素所占权重比重高, 两者相似性程度保持较大, 滤波过程中边缘性保持较好, $\|A - B\|_{2,\alpha}^2$ 是高斯加权欧式距离表达式, 表示像素 I 和像素 P 的相似性。系数 k_l 反映了像素点 I 与 P 之间的相似性, 如果相似性越大, 点 I 对点 P 的影响就越大, 在 W_a 窗口中所有像素的比重就越大, 系数 k_l 值就越大。

$\|A - B\|_{2,\alpha}^2$ 的计算公式如下:

$$\|A - B\|_{2,\alpha}^2 = G_\alpha(i, j) \times \sum_i^n \sum_j^n [A(i, j) - B(i, j)]^2, \quad (8)$$

式中, $G_\alpha(i, j)$ 是对应窗口大小的标准差为 α 的高斯分布函数, \times 是对应像素相乘。

一般的加性噪声表示为:

$$M' = M + o, \quad (9)$$

式中, M' 是被噪声污染的图像, M 是原始图像, o 是噪声。

在加性噪声图像中, 高斯加权欧式距离满足 M' 与 M 的最大相关性:

$$\partial \|A - B\|_{2,\alpha}^2 = \|A - B\|_{2,\alpha}^2 + 2\sigma^2, \quad (10)$$

式中, σ 是噪声标准差, 可以很好地反映图像之间的对应关系, 在去噪过程中, 能够保留图像原始的边缘信息。

NLM 方法同时考虑像素值得相似性与像素窗口的结构相似性, 与单独的比较像素值的均值滤波相比, 更能准确地描述图像的实际情况, 在滤波过程中, 能够更好地保持图像的结构特征, 比如图像纹理。

3.3 改进的分数阶积分法

分数阶微分在图像增强过程中加强图像边缘信息效果明显, 分数阶积分 (FOI) 是分数阶微分的逆运算, 所以控制好分数阶, 能够对噪声明显的图像取得较好的去噪效果。

Grumwald-Letnikov 定义分数阶积分是将函数表示为位移加权求和的方式, 经过简单的变换就

可以表示成函数与权值算子的卷积形式, 在处理频域信息时经过线性乘法就可以完成分数阶积分。

利用整数阶微分推导过程中的差分近似的方法, 将函数 $f(x)$ 在 x 附近的区域 n 等分, 每份大小为 h , 利用累积的方式求解导数。将连续函数经典的整数阶微分推广到分数, 就可以求解分数阶微分。函数 $f(x)$ 的 n 阶导数表示为:

$$f^n(x) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h^n} \sum_{k=0}^n f(x - kh). \quad (11)$$

如果 n 从整数变成了任意实数 v , 函数 $f(x)$ 的 v 阶导数表示为:

$$D^v f(x) = \lim_{h \rightarrow 0, n \rightarrow v} \frac{1}{h^n} \sum_{k=0}^n f(x - kh) = \lim_{h \rightarrow 0} h^{-v} (-1)^k \sum_{k=0}^n \frac{\Gamma(v+1)}{\Gamma(k+1)\Gamma(v-k+1)} \times f(x - kh). \quad (12)$$

由 v 阶导数表示可以推出 v 阶积分表示形式, 对原图像 Grumwald-Letnikov 分数阶积分^[18] 定义为:

$$I_a^v f(x) = \lim_{h \rightarrow 0, nh = b-a} h \sum_{k=0}^n \frac{\Gamma(v+k)}{\Gamma(k+1)\Gamma(v)} f(x - kh), \quad (13)$$

式中, Γ 是阶乘符号, I_a^v 是积分符号, v 是分数阶。

任意信号 $f(t)$ 经傅里叶变换后所得函数 $F(\omega)$ 之间导数、积分有对应关系:

$$\begin{cases} D^v f(t) = |\omega|^v \times e^{\left(\frac{i\omega t v}{2}\right)} \cdot D^v F(\omega) \\ I^v f(t) = |\omega|^{-v} \times e^{\left(\frac{-i\omega t v}{2}\right)} \cdot I^v F(\omega) \end{cases}. \quad (14)$$

由分数阶微分、积分可得, 分数阶积分函数被反映到各个频率的信号有不同程度的衰减, 由于有 e 指数的存在, 它是一种随着频率和积分次数增加的非线性急速衰减过程。分数阶积分算子在削弱信号高频部分的同时, 对其中的最高频部分进行了非线性的保留, 分数阶积分算子在加强信号低频部分的同时, 对其中的最低频部分也进行了一定的保留。这样, 经过分数阶积分算子在去除噪声的同时一定程度上保留了图像的边缘和纹理等细节信息, 从而使去噪后的图像不会产生严重的模糊现象。

计算时, 选择模板 W 进行处理得到图像 I' :

$$I' = \alpha I \otimes W + (1 - \alpha) I \otimes W \otimes \vec{L}, \quad (15)$$

式中, α 是权重系数, \vec{L} 是垂直非均匀性条带方向的方向模板, 可以加重在条带方向的滤波效果, 消除非均匀性条带。

模板 W 表示如图 4 所示。

W_n				W_n				W_n
	\ddots			\vdots			\ddots	
		W_2		W_2		W_2		
			W_1	W_1	W_1			
W_n	\dots	W_2	W_1	W_0	W_1	W_2	\dots	W_n
			W_1	W_1	W_1			
		W_2		W_2		W_2		
		W_2		W_2		W_2		
	\ddots			\vdots			\ddots	
W_n				W_n				W_n

图 4 分数阶积分模板

Fig. 4 Temple of the fractional order integral

$$W_n = \begin{cases} \frac{1}{s} & n = 0 \\ \frac{\Gamma(v+n)}{s\Gamma(n+1)} & n > 0 \end{cases},$$

式中, s 是归一化常数。

3.4 梯度强化的多尺度余弦小波去噪

上述 3 种方法各具特点, 能够对水下噪声图像起到明显的去噪效果。由于水下噪声图像噪声复杂, 包含乘性加性等各种噪声, 所以, 本文提出用离散余弦小波的方法将图像的各个尺度信息分别采用不同的去噪方式处理, 最终得到理想去噪效果。

小波变换能够将图像分解为方向和大小都不同的空间尺度信息, 离散余弦小波变换能够将图像按照低频信息 LL 、横向高频 LH 、纵向高频 HL 、对角高频 HH 四个维度进行逐层分解, 如图 5 所示, 这样的分解使得小波变换能够对信号进行信息归类。图像经过小波变换后, 图像的信号主要分布在低频信息尺度空间中, 高斯噪声信息均匀分布在各个频率尺度空间, 且幅值信息在低频空

间相较于图像信息很小, 图像的条带信息集中分布在横向或纵向高频信息尺度空间, 随机噪声在对角高频尺度空间的幅值明显。

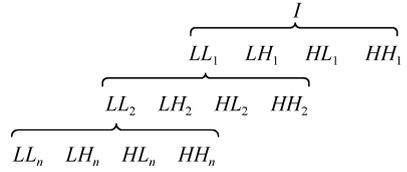


图 5 离散余弦小波变换空间示意图

Fig. 5 Space schematic corresponding to the discrete cosine wavelet transform

对图像进行多层小波分解, 可以获得不同尺度的图像信息。对于 LL 空间, 提高信息梯度, 可以较大幅度提高图像信息的纹理, 对于 LH 或者 HL 空间, 空间对应非均匀性条带信息较多, 两者中选择垂直条带方向的空间进行曲面拟合, 可以消除条带信息, 同时, 该空间的图像尺寸远比原图小, 大大提高曲面拟合速度。随机噪声在 HH 空间信息量大, 且主要分布在低层中, 对于该层空间使用不同尺度的非局部均值去噪方法, 能够保留图像相似性的同时去除更多随机噪声, 同时能够大大提高运行效率。对于高层 HH 空间, 图像纹理信息较多, 需要使用分数阶积分的方法, 去噪同时更多地保留图像细节信息。对每层不同尺度离线余弦小波空间信息采用对应处理方法, 最终得到理想去噪图像。

DWT 是离散余弦小波变换, $IDWT$ 是离散余弦小波逆变换, 算法原理如图 6 所示。

图 6 中梯度强化算子采用公式如下:

$$\begin{cases} A = \frac{t \lg(B) - M}{\lg(B) + N} \\ \alpha = [\beta(C - A)]^k \\ G(f) = \alpha \times \lg(1 + \alpha^{-1} \times f) \end{cases}, \quad (16)$$

式中, B 是图像背景亮度, 通过大尺度均值滤波求得, C 是图像对比度, f 是图像像素值, M 、 N 、 t 、 β 和 k 是系数根据情况调整, 但一般 $\beta = 0.1075$, $k = 2.1277$ 。

变换后的图像 I' 表示为:

$$I' = dI \times G(dI), \quad (17)$$

式中, dI 是图像梯度, dI 是归一化的梯度值。

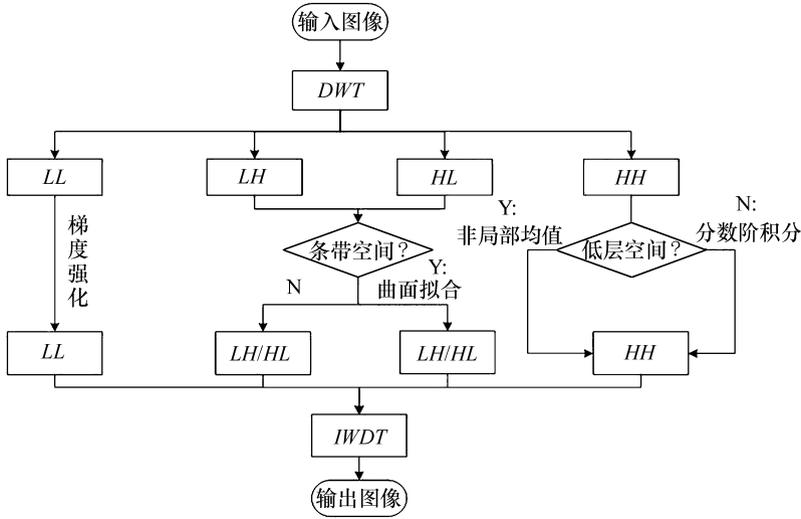


图6 本文提出的算法原理图

Fig. 6 Principle schematic of algorithm proposed in this paper

4 去噪实验效果分析

实验选取了一组从浑浊水体(衰减距离5~6 AL)的水槽中拍摄的15 m远的靶标图作为原始图,并将原始图像添加高斯噪声和随机噪声(加性和乘性噪声),用于模拟更远距离的水下退化图像。使用i3-350的4线程CPU、4G内存的计算机,在MATLAB2012b的环境下进行多线程算法仿真实验。对噪声图像分别进行快速最小误差曲面拟合(SF)、非局部均值(NLM)、分数阶积分(FOI)、双边滤波(BF)、三维块匹配(BM3D)^[19]的方法去噪处理,对比结果如图9所示,然后从主观、客观和耗时3个方面进行评价。

4.1 图像客观评价指标

(1) 峰值信噪比

峰值信噪比(PSNR)反映两幅图像的相似程度,图像的PSNR值越大,图像越相似。将去噪图像与原始无噪声图像对比,PSNR越大,说明图像质量越好,其计算公式为:

$$\text{PSNR} = 10 \times \log_2 \left(\frac{(W \times L \times 2^N)^2}{\sum_i \sum_j [A(i,j) - B(i,j)]^2} \right), \quad (18)$$

式中, W 和 L 分别是图像行数和列数, $A(i,j)$ 和 $B(i,j)$ 分别是参考图像和去噪图像在点 (i,j) 处

的灰度值, N 是图像像素位数。

(2) 通用质量评价指数(UIQI)

若两幅图像完全相同,则UIQI值为1,去噪图像越接近原始图像,UIQI值越接近1,去噪效果越好,其计算公式为:

$$U = \frac{4\sigma_{ij}\mu_i\mu_j}{(\sigma_i^2 + \sigma_j^2)(\mu_i^2 + \mu_j^2)}, \quad (19)$$

式中, σ_{ij} 是图像 i 和图像 j 的协方差, σ_i^2 是图像 i 的方差, σ_j^2 是图像 j 的方差, μ_i 是图像 i 的均值, μ_j 是图像 j 的均值。

4.2 去噪效果对比

将经过噪声叠加的原始退化图像分别按照前文方法处理,处理效果如图9所示。从主观和客观两个方面进行评价,结果显示如下:

噪声图像的细节纹理信息基本上被掩盖,观察质量差。曲面拟合去噪效果良好,但是拟合使图像过于模糊;非局部均值去噪方法受乘性噪声影响过重,图像噪声依然明显;分数阶积分去噪效果较好,但是积分过程模糊了图像边缘及纹理;双边滤波有一定去噪效果,但是其保边性对于噪声严重的图像去噪效果不佳;三维块匹配法去噪的同时较好的保留图像细节;本文方法充分考虑图像信息与噪声在小波空间的关系,对不同噪声进行不同方式的去除,同时适当增强了图像目标的梯度,保留图像边缘信息,图像去噪效果较好。

为了更好地评价处理效果,画出图像的三维

网格图,如图 10 所示。图 10 中,(a)原始图中各像素幅值过渡较为平滑,同时,在图像纹理及细节上有一定的阶跃信息;(b)噪声图中噪声信号明显,掩盖了许多图像细节信息;(c)曲面拟合结果图像噪声信号几乎滤除干净,但图像梯度信息丢失严重,图像细节纹理减少;(d)非局部均值处理图像噪声明显抑制,图像细节信息有保留;(e)分数阶积分处理结果,图像噪声明显抑制,图像细节信息有保留;(f)双边滤波处理高噪声图像去噪效果差;(g)三维块匹配去噪效果好,但平滑稍过度;(h)本文提出的小波处理结果图像噪声抑制明显,图像细节保留。

为了更直观地解释主观评价结果,选取年龄在 19~26 岁的 11 个男生和 4 个女生作图像评价,统计 15 人的评价数据取均值并向下取整给出主观打分表,如表 1 所示。

表 1 实验各图的主观评价表

Tab. 1 Subjective evaluation of test images

图像编号	图像名称	去噪效果	细节/纹理保留
a	原始图	9	9
b	噪声图	1	1
c	曲面拟合	8	3
d	非局部均值	6	6
e	分数阶积分	6	5
f	双边滤波	5	6
g	三维块匹配	7	7
h	本文方法	7	8

评分说明:

1~3 差,对于噪声抑制较差,对于细节/纹理保留较少,图像平滑过度;

4~6 中,对于噪声有一定抑制,对于细节/纹理有一定保留;

7~10 好,对于噪声有抑制明显,对于细节/纹理保留完好。

在客观数据信息方面,表 2、图 7 和图 8 显示表明,本文提出的保留梯度信息的离散余弦小波多尺度去噪方法与对照组作比较,去噪、保留细节、还原图像的效果最为优秀,至少有 5% 的评价指标的提升,同时在耗时方面有较大优势。

表 2 去噪方法效果评价指标

Tab. 2 Effect value comparison of these denoising methods

	PSNR	UIQI	耗时/s
噪声图	17.686 1	0.650 0	-
方法 A	22.483 3	0.892 6	26.834 8
方法 B	23.389 0	0.891 8	33.964 4
方法 C	20.785 1	0.827 9	3.789 2
方法 D	19.858 4	0.796 3	14.974 8
方法 E	25.120 2	0.918 3	21.890 7
方法 F	26.261 3	0.946 7	9.566 7

注:

方法 A 快速最小误差曲面拟合图像去噪

方法 B 非局部均值图像去噪

方法 C 分数阶积分图像去噪

方法 D 双边滤波图像去噪

方法 E 三维块匹配图像去噪

方法 F 本文图像去噪处理方法

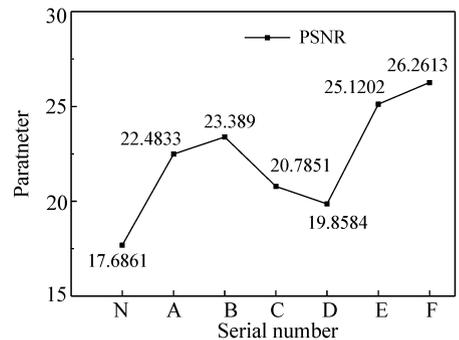


图 7 PSNR 对比图

Fig. 7 Contrast diagram of PSNR

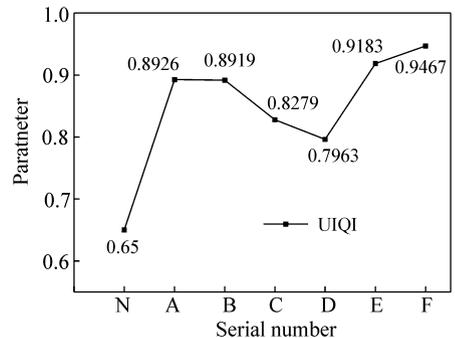


图 8 UIQI 对比图

Fig. 8 Contrast diagram of UIQI

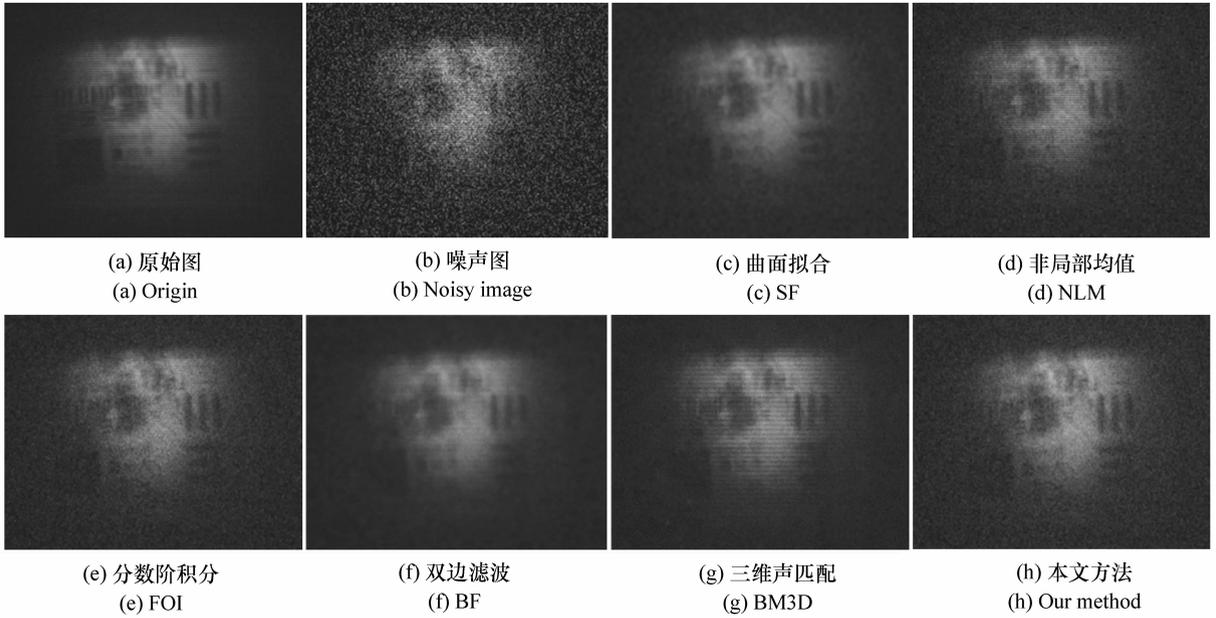


图9 去噪实验效果图

Fig.9 Results of the denoising experiments

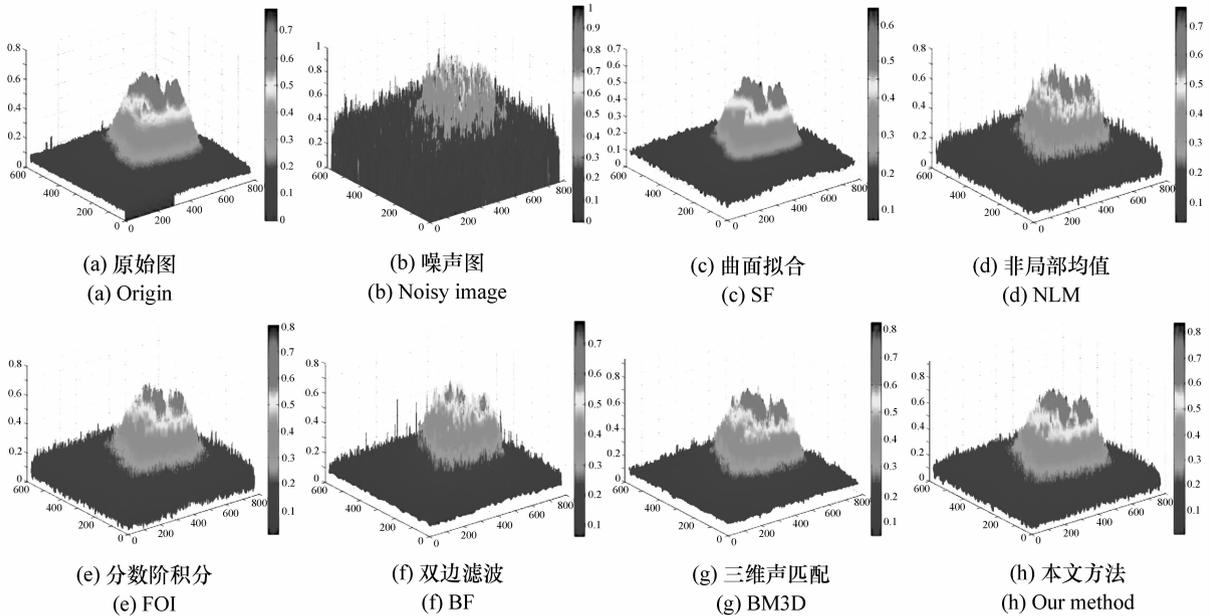


图10 去噪实验图像三维网格图

Fig.10 Three-dimensional grid map of denoising experiment images

5 结论

本文首先讨论了水下距离选通图像噪声的来源,水下距离选通图像的质量不仅与水体对照明

光和物体反射光的吸收、散射作用有关,还与成像系统有更为重要的关系,比如激光散斑、选通门控制信号、像增强器性能、CCD 工艺等都会增加图像的噪声。根据这些因素总结水下距离选通图像的噪声特点,讨论了几种图像去噪的方法,并根据

几种去噪算法的不足,结合小波能在不同空间尺度处理图像的特点,改进了图像去噪方法。低频空间信息做梯度强化处理能提高图像的纹理信息量,对应非均匀性条带的 LH 或 HL 空间做曲面拟合处理能消除非均匀性条带影响;低层 HH 空间做非局部均值处理能够保留图像相似性的同时去除更多随机噪声;高层 HH 空间,做分数阶积分处理能够在去噪的同时保留更多的图像细节信息。

本文最后从主观评价和客观指标对几种图像去噪方法的去噪效果进行了分析对比。实验结果表明,基于梯度和小波变换的水下距离选通图像去噪的方法相较于对照组,可以在去除噪声的过程中更好地保留图像细节信息,使图像恢复得更好,峰值信噪比提高均幅达 12%,通用质量评价指标提高均幅达 6%。

参考文献:

- [1] KOCAF D M, DALGLEISH F R, CAIMI F M, *et al.*. A focus on recent developments and trends in underwater imaging [J]. *Marine Technology Society Journal*, 2008, 42(1): 52-67.
- [2] 宋建中. 图像处理智能化的发展趋势[J]. *中国光学*, 2011, 4(5): 431-441.
SONG J ZH. Development trend of image processing intelligence[J]. *Chine Optics*, 2011, 4(5): 431-441. (in Chinese)
- [3] KANAIEV A V, HOU W, RESTAINO S R. Correction methods for underwater turbulence degraded imaging[J]. *SPIE*, 2014, 9242: 92421P-9.
- [4] 吴海滨, 刘超, 于晓洋, 等. 视频监控图像的运动模糊方向估计[J]. *液晶与显示*, 2014, 29(4): 580-585.
WU H B, LIU CH, YU X Y, *et al.*. Motion blurred direction estimation for video monitor image[J]. *Chinese J. Liquid Crystals and Displays*, 2014, 29(4): 580-585. (in Chinese)
- [5] 朱瑞飞, 魏群, 王超, 等. 基于随机点扩散函数的多帧湍流退化图像自适应复原方法[J]. *中国光学*, 2015, 8(3): 368-377.
ZHU R F, WEI Q, WANG CH, *et al.*. Adaptive restoration method of multi-frame turbulence-degraded images based on stochastic point spread function[J]. *Chine Optics*, 2015, 8(3): 368-377. (in Chinese)
- [6] 孙玉胜, 白克. 基于小波变换与加权滤波的电机红外图像增强[J]. *液晶与显示*, 2010, 25(3): 439-443.
SUN Y SH, BAI K. Enhancement of motor infrared image based on wavelet transform and weighted filtering[J]. *Chinese J. Liquid Crystals and Displays*, 2010, 25(3): 439-443. (in Chinese)
- [7] 王静轩, 尹传历. 基于 DSP 和 FPGA 的嵌入式实时图像增强系统[J]. *液晶与显示*, 2013, 28(3): 459-463.
WANG J X, YIN CH L. Embedded color image enhancement system based on DSP and FPGA[J]. *Chinese J. Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(3): 459-463. (in Chinese)
- [8] FREEMAN K, REICHER M, FREEMAN K, *et al.*. A novel approach for image denoising using digital filters[J]. *International Global J. Engineering Research (IGJER)*, 2015: 21-24.
- [9] YAN R, SHAO L, LIU Y. Nonlocal hierarchical dictionary learning using wavelets for image denoising[J]. *Image Processing, IEEE Transactions on*, 2013, 22(12): 4689-4698.
- [10] 杨文波, 马天玮, 刘剑. 非局部变分修复法去除高密度椒盐噪声[J]. *中国光学*, 2013, 6(6): 876-884.
YANG W B, MA T W, LIU J. Elimination of impulse noise by non-local variation inpainting method[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(6): 876-884. (in Chinese)
- [11] 刘希佳, 陈宇, 王文生, 等. 小目标识别的小波阈值去噪方法[J]. *中国光学*, 2012, 5(3): 248-256.
LIU X J, CHEN Y, WANG W SH. De-noising algorithm of wavelet threshold for small target detection[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(3): 248-256. (in Chinese)
- [12] 杨利红, 赵变红, 张星祥, 等. 点扩散函数高斯拟合估计与遥感图像恢复[J]. *中国光学*, 2012, 5(2): 181-188.
YANG L H, ZHAO B H, ZHANG X X, *et al.*. Gaussian fitted estimation of point spread function and remote sensing image restoration[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(2): 181-188. (in Chinese)
- [13] 任文琦, 王元全. 基于梯度矢量卷积场的四阶各向异性扩散及图像去噪[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(10): 2713-2719.

- REN W Q, WANG Y Q. GVC-based fourth-order anisotropic diffusion for image denoising[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(10):2713-2719. (in Chinese)
- [14] 刘巧红, 李斌, 林敏. 结合复方向滤波器组高斯尺度混合模型及非局部均值滤波的图像去噪[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(10):2806-2814.
- LIU Q H, LI B, LIN M. Image denoising with dual-directional filter bank GSM model and non-local mean filter[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(10):2806-2814. (in Chinese)
- [15] SHAO L, YAN R, LI X, *et al.*. From heuristic optimization to dictionary learning: a review and comprehensive comparison of image denoising algorithms[J]. *IEEE*, 2014, 44(7):1001-1013.
- [16] BUADES A, COLL B, MOREL J. A non-local algorithm for image denosing[J]. *IEEE*, 2005:60-65.
- [17] DEKEL T, MICHAELI T, IRANI M, *et al.*. Revealing and modifying non-local variations in a single image[J]. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2015, 34(6):227.
- [18] PU Y F, ZHOU J L, YUAN X. Fractional differential mask: a fractional differential based approach for multiscale texture enhancement[J]. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2010, 19(2):491-511.
- [19] DABOV K, FOI A, KATKOVNIK V, *et al.*. Image denoising by sparse 3-D transform-domain collaborative filtering[J]. *Image Processing, IEEE Transactions on*, 2007, 16(8):2080-2095.

作者简介:



许廷发(1968—),男,黑龙江肇东人,博士,教授,博士生导师,1992年、2000年于东北师范大学分别获得学士、硕士学位,2004年于中国科学院长春光学精密机械与研究所获得博士学位,2006年于华南理工大学电子与信息学院完成博士后工作,主要从事光电成像探测与识别等方面的研究。E-mail: xutingfa@163.com