

# 基于偏振自适应融合图像的水下物证探测方法

高毅<sup>1</sup>, 于津强<sup>2</sup>, 张笑东<sup>3</sup>, 段锦<sup>2</sup>

(1. 中国刑事警察学院 痕迹检验鉴定技术公安部重点实验室, 辽宁 沈阳 110035;

2. 长春理工大学 电子信息工程学院, 吉林 长春 130022; 3. 沈阳工业大学 软件学院, 辽宁 沈阳 110870)

**摘要:** 偏振探测技术能够在复杂的背景环境中凸显出目标, 为我们提供了更为清晰和精准的目标识别能力。然而, 在法庭科学领域上, 利用偏振成像技术对水下物证进行探测搜寻的研究仍属空白。针对这一问题, 本文通过偏振成像装置, 对目标强度图像和偏振度图像进行融合。利用非下采样剪切波(non-subsampled shearlet transform, NSST)对图像进行分解后, 在高频子带提出了参数自适应的简化型脉冲耦合神经网络模型, 在低频子带则采用一种基于区域能量的自适应加权融合规则。在可见光下, 对3类典型目标进行相关算法比对实验。实验结果表明, 通过偏振成像技术可有效探测到水下物证, 利用本文提出的图像融合算法有效突出了水下物证的细节特征, 验证了偏振探测技术对水下物证成像的有效性, 有利于突破当下法庭科学领域水下物证探测技术的空白。

**关键词:** 偏振成像; 图像融合; 法庭科学; 水下物证; SPCNN

**中图分类号:** TP391.41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8891(2023)09-0962-07

## Underwater Evidence Detection Method Based on Polarization Fusion Image

GAO Yi<sup>1</sup>, YU Jinqiang<sup>2</sup>, ZHANG Xiaodong<sup>3</sup>, DUAN Jin<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Trace Inspection and Identification Technology, Ministry of Public Security, Criminal Investigation Police University of China, Shenyang 110035, China;

2. School of Electronics and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130012, China;

3. School of Software, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

**Abstract:** Polarization detection technology can highlight targets in complex background environments, providing us with clearer and more accurate target recognition. However, research on the use of polarization imaging in courtroom science, regarding the detection and search for underwater evidence, is lacking. To address this issue, this study fuses the polarization and target intensity images using a polarization imaging device. After decomposing the images using non-subsampled shear waves (NSST) into low and high-frequency sub-bands, a simplified impulse-coupled neural network model with adaptive parameters is proposed for the high-frequency sub-band, and an adaptive weighting fusion rule, based on region energy, is used for the low-frequency sub-band. Correlation algorithm comparison experiments were conducted for three typical targets at visible wavelengths. The experimental results show that underwater evidence can be effectively detected using polarization imaging technology. The image fusion algorithm proposed in this paper effectively highlights the detailed features of underwater evidence, verifying the effectiveness of polarization detection technology for underwater evidence imaging, which is conducive to breaking through the existing research gap in the field of courtroom science.

**Key words:** polarization imaging, image fusion, forensic science, underwater evidence, SPCNN

## 0 引言

偏振是光除了光谱、光强、位相以外的又一重要

物理特性。目标的反射、辐射的偏振态与表面状态和固有理化属性密切相关, 不同类型的物质具有不同的偏振特性。偏振图像可以反映不同材质、边缘和纹理

收稿日期: 2023-03-12; 修订日期: 2023-06-19.

作者简介: 高毅(1978-), 男, 硕士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事法庭科学, 物证技术等方面的研究。E-mail: 396406005@qq.com。

通信作者: 段锦(1971-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事图像处理、模式识别等方面的研究。E-mail: duanjin@vip.sina.com。

基金项目: 公安部科技强警基础工作专项项目(2020GABJC04); 中央高校基本科研业务费项目(中国刑警学院重大培育计划项目)(D2023003); 中国刑事警察学院科研基金项目(D2019036); 法庭科学湖北省重点实验室(湖北警官学院)资助课题(KFKT2022002)。

之间的差异,能够较好地描述物体不同的表面取向,可以用来表征目标及背景的状态特征。传统成像设备多是基于光强信息或波长信息的,不能直接获得目标的偏振信息。偏振成像技术是在传统成像的基础上增加了偏振维度信息,更有利于区分不同物体。因此,国内外研究学者针对偏振成像技术在军事、民用、航空等领域都在广泛地开展深入研究和实践应用。

水下成像及水下目标探测的工作主要应用于水下安全保障、水底环境探测和水下生物调查等方面。由于水体的折射、散射和吸收作用,目标光学特征会受到严重干扰或消减,这导致在将大气中成像探测方法应用于水下作业时的成像探测效果受到较大的影响<sup>[1-2]</sup>,效果也大打折扣。在对水下物体偏振成像的研究中发现,当偏振光通过水介质时,会与水分子和悬浮颗粒发生相互作用,并产生散射现象。悬浮颗粒的大小、形状、浓度、分布等因素都会影响散射光的强度和分布特性。一般来说,悬浮颗粒对偏振光的散射强度会随着波长的增加而减小。由这一现象可知,物体的偏振特性可有效地减少水下光线的散射与吸收,采用偏振成像技术,对于探测目标的细节信息的呈现有潜在的优势;相比于常规的强度图像,具有更好的偏振态保持特性,因而能更有效地对水下目标进行探测<sup>[3-4]</sup>。

较早的水下成像作业应用模型是由国外研究者 McGlamery 所提出的<sup>[5]</sup>,后来的学者在此基础上进行了不断的发展,提出了多种优化和改进方法,如:暗通道先验、红通道去雾、最小化信息损失等<sup>[6-8]</sup>。

水下偏振成像研究和应用开展较晚,Shen 等人发现水下环境中后向散射光与偏振特征存在密切联系<sup>[9]</sup>,并提出了经典水下偏振成像技术方法<sup>[10-11]</sup>,为以后水下环境偏振成像作业应用提供了基础理论和有益参考<sup>[12-14]</sup>。陈雄峰等提出水下偏振图像复原方法,有效提升水下图像质量<sup>[15]</sup>。长春理工大学提出自适应脉冲耦合神经网络优化模型,可有效探测水下目标的细节和特征<sup>[16]</sup>。

目前国内法庭科学领域正处于基础研究和平台构建阶段,物证鉴别传统手段急需改进和升级,急需借助于现代科技所提供的先进、高效的技术手段,作为物证鉴别传统手段的补充和扩展。鉴于国内外偏振成像技术的不断发展和日渐成熟,本文将该技术的优越特性和技术经验应用于水下物证搜寻和探测。本文将偏振成像技术及偏振图像融合方法,与法庭科学领域的水下物证探测技术相结合,在可见光波段下,探索水下物证的细节特征,以提升水下物证成像的可视效果。

## 1 算法模型

### 1.1 偏振成像基本原理

偏振光状态的完整描述需要 3 个参数,即光强、偏振度和偏振角。光强表示光矢量的平均振动幅度,偏振度描述完全偏振光占整个光强的比例,偏振角代表偏振光的振动方向。

偏振光可由 Stokes 参量  $I, Q, U, V$  来表示<sup>[13]</sup>,其中  $I$  为光强图像; $Q$  为线偏振光在  $0^\circ$ 、 $90^\circ$  方向上的光强差; $U$  为线偏振光在  $45^\circ$  和  $135^\circ$  方向上的光强差; $V$  为圆偏振分量,由于圆偏振分量极小,所以近似为零。

利用分焦平面偏振相机可同时得到  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  和  $135^\circ$  四个偏振方向图像,并计算出 Stokes 参量及线偏振度图像 DOLP 和偏振角图像 PA,公式(1)~(3)所示:

$$S = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \times (I(0^\circ) + I(45^\circ) + I(90^\circ) + I(135^\circ)) \\ I(0^\circ) - I(90^\circ) \\ I(45^\circ) - I(135^\circ) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$DOLP = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} \quad (2)$$

$$PA = \frac{1}{2} \arctan(U / Q) \quad (3)$$

### 1.2 图像融合方法

对于采集到的不同偏振方向水下物证图像,计算获得其偏振参量和偏振度、偏振角等信息,进一步采用图像融合方法获得水下偏振融合图像,以提高图像的清晰度和对比度,将有助于水下物证目标的特征提取和分析。

本文方案将光强图像  $I$  和线偏振度图像 DOLP 进行融合,其融合过程包括 4 个步骤:

1) 非下采样剪切波 (NSST) 分解:将原始偏振度图像和光强图像进行多尺度分解,获得图像在不同尺度和不同方向上的子带系数;

2) 高频子带系数融合:对于每个尺度下的高频方向子带系数,采用参数自适应简化型脉冲耦合神经网络进行融合,以提升高频信息的清晰度和对比度;

3) 低频子带系数融合:对于每个尺度下的低频子带系数,采用加权平均的融合策略,以提升低频信息的平滑度和保真度;

4) 图像重建:图像重建就是 NSST 的反向操作,将经过高频方向子带系数融合和低频子带系数融合后的子带系数进行合成,得到重建后的偏振融合图像。融合图像与源图像具有相同的大小和分辨率,并且避免了下采样过程中可能产生的混叠现象。

本文偏振图像融合方案如图 1 所示。

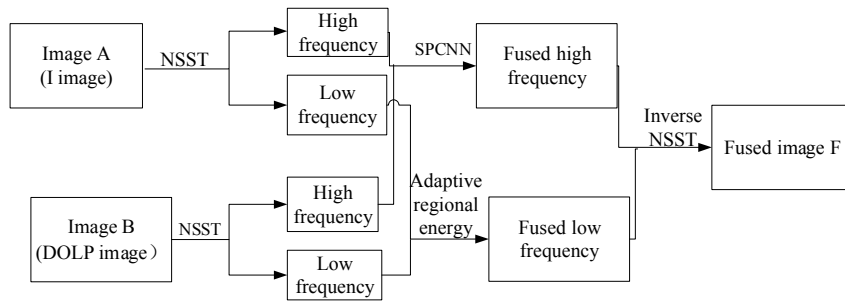


图1 偏振图像融合框图

Fig.1 Polarized image fusion scheme

### 1.2.1 图像分解

非下采样剪切波变换改进了剪切波变换 (shearlet transform, ST) 方法, 在复杂度和操作效率等方面低于小波变换、曲边变换, 同时不会伪吉布斯现象。

NSST 变换分为多尺度分解和多方向分解两步。在多尺度分解中, 输入图像经过非下采样金字塔 (non-subsampled pyramid, NSP) 处理后, 被分解为多个尺度的子带。在多方向分解中, 不同尺度的子带图像被进一步分解为多个方向的高频子带图像, 每个方向由一个剪切滤波器 (spatial filter, SF) 实现。

具体来说, NSST 变换对输入图像进行  $n$  级分解, 得到 1 个低频子带图像和  $n$  个大小相同, 但尺度不同的高频子带图像。每个高频子带图像都与一个剪切滤波器相关联, 该滤波器包含了该方向的高频信息。图 2 为 NSST 分解示意图, 其中, 源图像 Image 被分解成 2 个高频子带图像和 1 个低频子带图像。

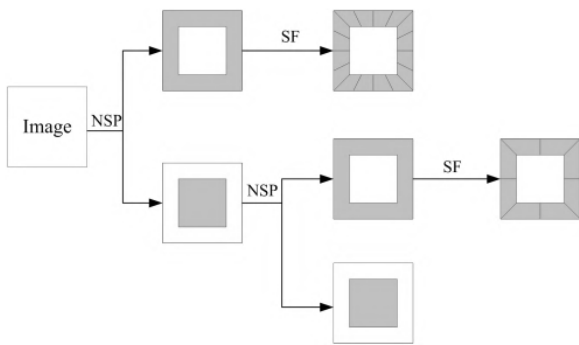


图2 NSST 分解示意图

Fig.2 NSST decomposition

### 1.2.2 高频子带融合

本文提出了一种基于简化脉冲耦合神经网络 (simplified pulse coupled neural network, SPCNN) 模型的融合方法。SPCNN 模型利用空间域和频率域信息对多源图像进行融合, 能够有效保留图像的细节和边缘特征, 这也正是本改进的目的所在。本文将高频子带系数的拉普拉斯能量引入到 SPCNN 模型中, 作为图像活性度的评价指标, 使得每个相邻像素之间具有相互传输贯通的特性, 从而实现有效而稳定的融合。

本方法将改进的拉普拉斯能量和作为 SPCNN 模型的输入, 即  $F_{ij}[n]=NSLP_S^{k,l}$ ,  $S=A,B$ 。其中拉普拉斯能量和用  $NSLP_S^{k,l}$  来表示:

$$NSLP_S^{k,l}(i,j) = \sum_{u=U}^U \sum_{v=-V}^V \omega(u,v) \cdot [LP_S^{k,l}(i+u,j+v)]^2 \quad (4)$$

定义第  $k$  尺度上第  $l$  方向上位置  $(i,j)$  的 NSST 系数为对应的改进拉普拉斯能量和。式中  $\omega(u,v)$  表示  $LP_S^{k,l}(i+u,j+v)$  所对应的系数权值矩阵<sup>[17]</sup>。

将整个迭代期间的总点火次数作为参考, 来评估高频子带图像的活性度。在每次迭代结束时, 通过公式(5)来计算总点火次数:

$$T_{ij}[n] = T_{ij}[n-1] + Y_{ij}[n] \quad (5)$$

每个神经元的点火次数是  $T_{ij}[n]$ ,  $N$  代表迭代总数。高频方向子带系数  $H_A^{k,l}$  和  $H_B^{k,l}$  的 SPCNN 点火次数分别为  $T_{A,ij}^{k,l}[n]$  和  $T_{B,ij}^{k,l}[n]$ 。

进一步选取具有高点火次数的系数作为融合系数, 如公式(6)所示:

$$H_F^{k,l}(i,j) = \begin{cases} H_A^{k,l}(i,j), T_{A,ij}^{k,l}[N] \geq T_{B,ij}^{k,l}[N] \\ H_B^{k,l}(i,j), T_{A,ij}^{k,l}[N] < T_{B,ij}^{k,l}[N] \end{cases} \quad (6)$$

### 1.2.3 低频子带融合

低频子带反映了源图像的主体结构和轮廓信息, 具有绝大部分的图像能量分布, 因此提高低频子带中各个区域亮度差异将有利于增强视觉效果和突出重要特征。本文采用基于区域能量的自适应加权融合规则, 以不同区域在两幅源图像中的能量占比来确定融合系数, 并且以达到减少模糊和失真的作用, 提高了图像质量; 使得融合后的图像亮度具有更好的对比度, 更适合于人眼观察。

定义中心点为  $(i,j)$ , 窗口区域的大小为  $M \times N$ , 加权能量由公式(7)表示:

$$E_{L_S}(i,j) = \sum_{m=-(M-1)/2}^{(M-1)/2} \sum_{n=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} \omega(m,n) \cdot [L_S(i+m,j+n)]^2 \quad (7)$$

实验中  $M \times N$  设定为  $3 \times 3$ 。  $L_S$  为待处理图像,  $S=A,B$ , 窗口系数  $\omega(m,n)=[1,2,1;2,4,2;1,2,1]/16$ 。融合后的低频子带系数为:

$$L_F(i, j) = p_A(i, j)L_A(i, j) + p_B(i, j)L_B(i, j) \quad (8)$$

式中:  $p(i, j)$ 为自适应权重因子:

$$\begin{cases} p_A(i, j) = \frac{E_{L_A}(i, j)}{E_{L_A}(i, j) + E_{L_B}(i, j)} \\ p_B(i, j) = \frac{E_{L_B}(i, j)}{E_{L_A}(i, j) + E_{L_B}(i, j)} \end{cases} \quad (9)$$

## 2 实验结果与分析

### 2.1 实验设备与环境

本文通过偏振成像实验装置开展测试实验, 实验装置包括图像采集设备、水体模拟环境及图像处理系统3个部分。图像采集设备采用可见光波段下的分焦平面偏振相机, 分辨率为  $2448 \times 2048$ , 帧率 30 FPS, 像素深度为 8 bit, 工作温度范围在  $0^\circ\text{C} \sim +45^\circ\text{C}$ 。实验水体模拟环境采用注水水槽, 在室内自然光条件下, 水深为 50 cm, 水质清晰, 可肉眼观察物证细节缺失。实验时首先将相机垂直平稳地固定于水面上, 防止相机晃动对采集的偏振图像造成影响; 然后将物证目标置于水槽中, 位于偏振相机正下方; 再将相机连接到计算机平台, 之后将对准目标物, 调整焦距和光圈使成像为最佳效果, 获取到不同角度的偏振图像。如图3和图4所示, 为实验原理和现场设备。

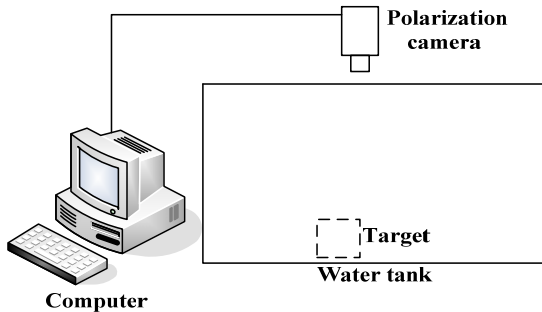


图3 实验设备结构原理

Fig.3 Experimental equipment structure

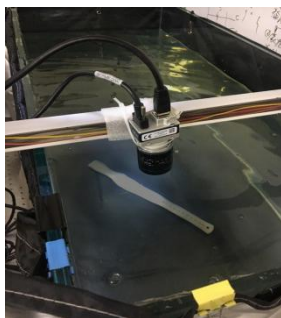


图4 实验设备

Fig.4 Experimental equipment

实验选取3类典型物证目标物, 包括物证比例尺、案件现场常见作案工具金属钝器和金属利器。

本文算法实验中, NSST分解级数为[4,4,8,8]; 选

用 pyrexc 滤波器; SPCNN 模型的迭代次数设定为 80; 初始化设置为  $Y_{ij}[0]=0$ ,  $U_{ij}[0]=0$ ,  $E_{ij}[0]=0$ 。

### 2.2 算法比对

将本文算法与 11 种采用了不同融合策略的相关融合方法开展比对, 比对算法见表 1。

表1 比对算法来源

Table 1 Comparison of algorithmic sources

Method	Methods of fusion
Method 1	Low frequency: take the mean High frequency: absolute values are taken to be large
Method 2	Low frequency: localized area energy is taken to be large High frequency: localized area energy is taken to be large
Method 3	Low frequency: local area spatial frequency taken large High frequency: local area spatial frequency taken large
Method 4	Based on the multiresolution singular value decomposition (MSVD) method <sup>[18]</sup>
Method 5	Multiscale wavelet method <sup>[19]</sup>
Method 6	A fusion method based on bootstrap filtering <sup>[20]</sup>
Method 7	Combined visual saliency map (VSM) and least squares approach <sup>[21]</sup>
Method 8	Methods based on latent low rank representation (LatLRR) <sup>[22]</sup>
Method 9	A pixel and intra-area based double counting complex wavelet (DTCWT) approach <sup>[23]</sup>
Method 10	Optimization method based on gradient transfer fusion (GTF) <sup>[24]</sup>
Method 11	Measuring local entropy based on the PCNN model <sup>[25]</sup>
Method 12	Methods in this paper

### 2.3 结果分析

#### 2.3.1 主观效果分析

实验对 3 种不同种类物证目标进行偏振图像融合, 实验 1, 2, 3 分别对应图 5, 6, 7。3 组实验均自然光环境下进行, 而图 7 除增加曝光率外, 与前两者环境一致。其中, 图 5 和图 6 的光照强度约为 50 lx, 图 7 的光照强度值约为 100 lx。从 3 组效果对比图可以看出, 采用本文算法融合后的偏振图像, 主要特征信息保存完好, 细节部分清晰可见, 图像噪声较低且未出现明显失真或模糊。方法 1、2、4、5、8、9 的融合图像整体亮度低, 不易观察; 方法 3、7、10 的融合图像亮度虽高, 但纹理欠清晰。而方法 1、方法 2 和方法 3 的融合图像的细节有一定的损失, 且出现部分模糊; 方法 11 的融合图像失真较为严重; 方法 6 的融合图像噪声较多。

### 2.3.2 客观评价分析

本文算法的图像客观评价指标采用标准差 (standard deviation, SD)、熵 (Entropy, EN)、互信息 (mutual information, MI) 和加权边缘信息保留值 ( $Q^{abf}$ )。标准差可衡量图像中所有像素灰度值的离散程度;熵用于评价图像信息的丰富程度;互信息衡量融合后图像与原始图像之间的关联程度;加权边缘信息保留值表示融合后图像中的源图像边缘信息的保留程度<sup>[26-28]</sup>。

比对算法的评价指标如表2~表4所示。从表中可以看出,本文方法熵指标在一组实验中略低于方法6,但方法6的融合图像有大量的噪点,因而导致熵

值偏高;标准差指标分别在二组实验中略低于方法3和方法10,而方法3和方法10的融合图像亮度虽高却损失了信息,纹理不够清晰自然;加权边缘信息在二组实验中略低于方法1,其余各项指标均高于其他算法。

本文的 SPCNN 方法相较于方法11的 PCNN 方法,不仅客观评价指标表现较优,且融合图像失真较小。

实验结果表明,将偏振光强图像和线偏振度图像进行信息数据的融合互补,对物证图像较多细节特征信息起到了增强的作用。

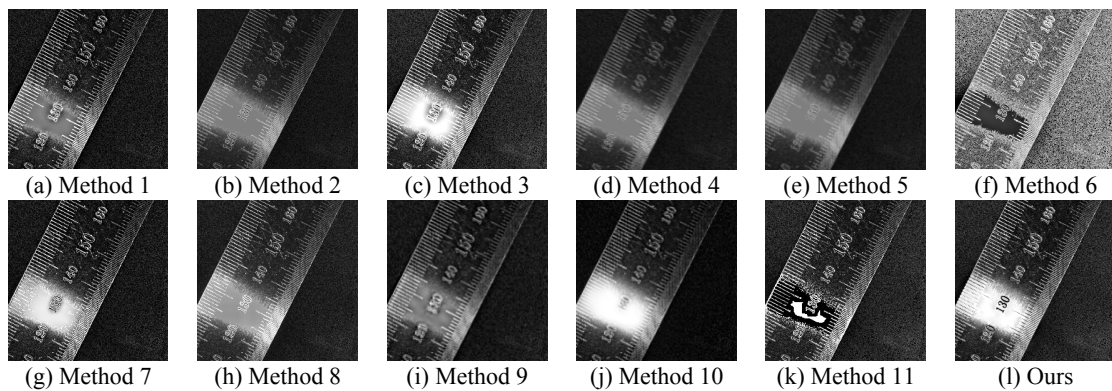


图5 实验1各算法融合结果

Fig.5 Fused images of experiment 1

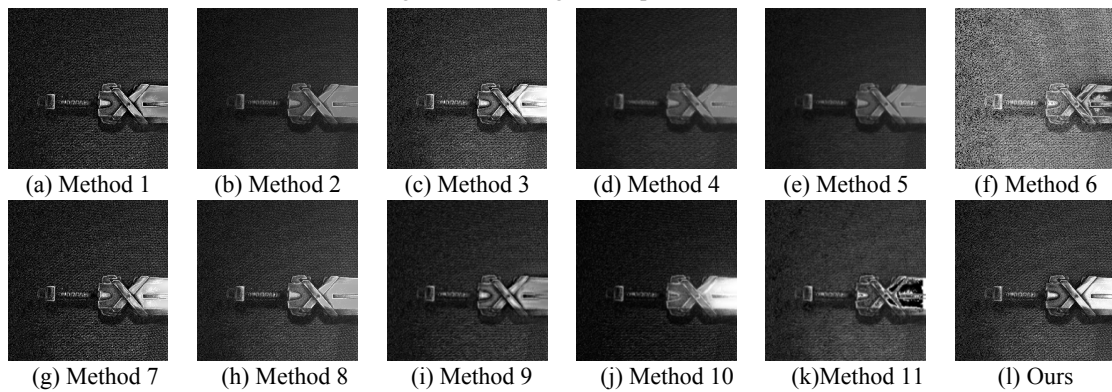


图6 实验2各算法融合结果

Fig.6 Fused images of experiment 2

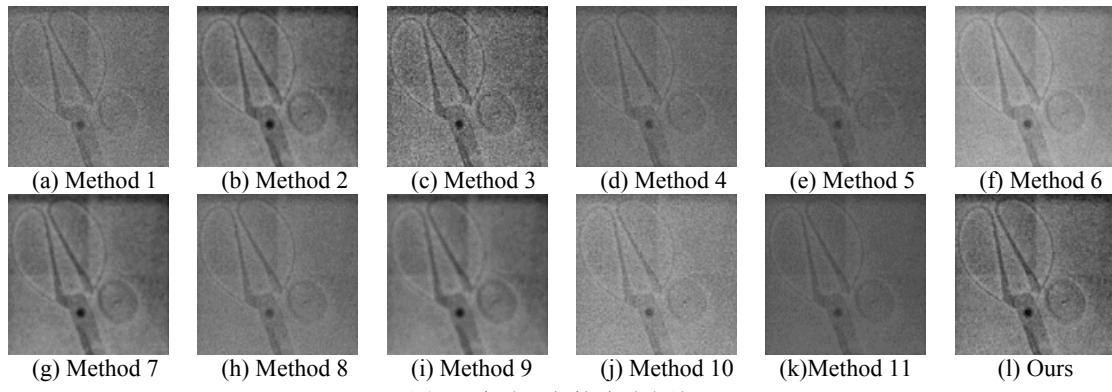


图7 实验3各算法融合结果

Fig.7 Fused images of experiment 3

表2 第一组实验各算法融合图像的评价指标值

Table 2 Evaluation value of experiment 1

Evaluation index	Method 1	Method 2	Method 3	Method 4	Method 5	Method 6
SD	56.6778	44.3967	61.1142	45.0537	44.2578	57.4242
EN	6.7723	6.2663	6.8461	6.7132	6.3059	7.3089
$Q^{abf}$	0.5202	0.3804	0.5115	0.1963	0.3671	0.4375
MI	3.3614	3.2694	3.4411	2.1876	3.5395	3.7182
	Method 7	Method 8	Method 9	Method 10	Method 11	Ours
SD	71.0913	57.8436	52.864	72.6199	60.6569	71.8362
EN	6.8551	6.8714	6.9262	6.3219	6.4077	7.3065
$Q^{abf}$	0.616	0.5863	0.3488	0.5945	0.672	0.6876
MI	3.6226	3.1841	3.2632	2.8624	4.0556	4.1478

表3 第二组实验各算法融合图像的评价指标值

Table 3 Evaluation value of experiment 2

Evaluation index	Method 1	Method 2	Method 3	Method 4	Method 5	Method 6
SD	24.603	15.8382	27.7079	19.9809	15.7362	28.43
EN	5.9118	5.3973	6.1907	5.7575	5.4024	6.4786
$Q^{abf}$	0.7552	0.3946	0.7525	0.4961	0.3708	0.3936
MI	1.6614	3.3193	2.1569	1.4321	3.3528	3.5814
	Method 7	Method 8	Method 9	Method 10	Method 11	Ours
SD	25.682	21.8504	24.4234	28.1476	26.8165	29.0425
EN	5.9289	5.7622	5.9289	6.0147	5.796	6.6484
$Q^{abf}$	0.7664	0.7017	0.7491	0.686	0.693	0.7548
MI	1.8397	2.3353	1.6062	2.0746	3.5282	4.1863

表4 第三组实验各算法融合图像的评价指标值

Table 4 Evaluation value of experiment 3

Evaluation index	Method 1	Method 2	Method 3	Method 4	Method 5	Method 6
SD	47.4696	37.8272	66.4415	39.187	37.7084	51.4002
EN	7.2589	6.8949	7.6891	7.0276	6.9039	7.5925
$Q^{abf}$	0.472	0.3749	0.4455	0.27	0.3707	0.3161
MI	2.8271	3.8016	3.3755	2.846	3.8673	2.0153
	Method 7	Method 8	Method 9	Method 10	Method 11	Ours
SD	51.4296	46.4801	45.9618	65.3107	63.6552	66.9828
EN	7.4264	7.2903	7.2644	7.6795	6.9369	7.8523
$Q^{abf}$	0.4537	0.4673	0.4369	0.5242	0.3981	0.5846
MI	3.041	3.0871	2.5922	3.2463	3.98	4.2387

### 3 结论

本文将水下偏振成像技术与水下物证探测相结合,提出基于参数自适应简化脉冲耦合神经网络模型的图像融合方法,并应用于法庭科学领域的水下物证探测研究中。通过此方法对水下物证图像的线偏振信息和光强信息进行融合,使水下物证的细节轮廓和特征更为显著。这对法庭科学领域物证探测技术与偏振成像技术相结合提供了良好的例证,实验成果具有较好的公安实战及法庭科学应用价值。

### 参考文献:

- [1] 孙传东, 陈良益, 高立民, 等. 水的光学特性及其对水下成像的影响[J]. 应用光学, 2000, 21(4): 39-46.  
SUN Chuandong, CHEN Liangyi, GAO Limin, et al. Optical properties of water and their effects on underwater imaging[J]. *Applied Optics*, 2000, 21(4): 39-46.
- [2] Schettini R, Corchs S. Underwater image processing: state of the art of restoration and image enhancement methods[J]. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2010, 2010(1): 1-14.
- [3] Cronin T W, Marshall J. Patterns and properties of polarized light in air and water[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2011, 366(1565): 619-626.
- [4] 李代林, 于洋, 李贵雷, 等. 水下材质识别技术的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(7): 071010.  
LI Dailin, YU Yang, LI Guilei, et al. Research on underwater material

- recognition technology[J]. *Advances in Lasers and Optoelectronics*, 2018, **55**(7): 071010.
- [5] Mcglamery B L. A computer model for underwater camera systems[J]. *Proc. of SPIE*, 1980, **208**(208): 221-231.
- [6] HE Kaiming, SUN Jian, Tang Xiaoou. Single image haze removal using dark channel prior[C]//*IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2009: 1956-1963, Doi: 10.1109/CVPR.2009.5206515.
- [7] Galdran A, Vazquez-Corral J, Pardo D, et al. A variational frame work for single image dehazing[C]//*European Conference on Computer Vision*, 2014, Doi: 10.1007/978-3-319-16199-0\_18.
- [8] LI C Y, GUO J C, CONG R M, et al. Underwater image enhancement by dehazing with minimum information loss and histogram distribution prior[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2019, **26**(12): 5664-5677.
- [9] SHEN L, Reda M, ZHAO Y. Image-matching enhancement using a polarized intensity-hue-saturation fusion method[J]. *Applied Optics*, 2021, **60**(13): 3699-3715.
- [10] WEI Y, HAN P, LIU F, et al. Enhancement of underwater vision by fully exploiting the polarization information from the stokes vector[J]. *Optics Express*, 2021, **29**(14): 22275-22287.
- [11] HAN P L, FEI L, ZHANG G, et al. Multi-scale analysis method of underwater polarization imaging[J]. *Acta Physica Sinica: Chinese Edition*, 2018, **67**(5): 054202.
- [12] LIU F, ZHANG S C, HAN P L, et al. Depolarization index from Mueller matrix descatters imaging in turbid water[J]. *Chinese Optics Letters*, 2022, **20**(2): 022601.
- [13] HUANG B, LIU T, HU H, et al. Underwater image recovery considering polarization effects of objects[J]. *Optics Express*, 2016, **24**(9): 9826-9838.
- [14] WU H, ZHAO M, LI F, et al. Underwater polarization-based single pixel imaging[J/OL]. *J. Soc. Inf. Display.*, 2020; **28**: 157-163. <https://doi.org/10.1002/jsid.838>
- [15] 陈雄锋, 阮驰. 多参数最优重构水下偏振成像复原方法[J/OL]. *兵工学报*: 1-11 [2022-09-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2176.TJ.20220708.0845.004.html>.  
CHEN Xiongfang, RUAN Chi. Multi-parameter optimal reconstruction of underwater polarization imaging recovery method[J/OL]. *Journal of Military Engineering*: 1-11 [2022-09-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2176.tj.20220708.0845.004.html>
- [16] 于津强, 段锦, 陈伟民, 等. 基于 NSST 与自适应 SPCNN 的水下偏振图像融合[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, **57**(6): 103-113.  
YU Jinqiang, DUAN Jin, CHEN Weimin, et al. Underwater polarization image fusion based on NSST and adaptive SPCNN[J]. *Advances in Lasers and Optoelectronics*, 2020, **57**(6): 103-113.
- [17] 江平, 张强, 李静, 等. 基于 NSST 和自适应 PCNN 的图像融合算法[J]. *激光与红外*, 2014, **44**(1): 108-113.  
JIANG Ping, ZHANG Qiang, LI Jing, et al. Image fusion algorithm based on NSST and adaptive PCNN[J]. *Laser and Infrared*, 2014, **44**(1): 108-113.
- [18] Minato S, Matsuoka T, Tsuji T. Singular-value decomposition analysis of source illumination in seismic interferometry by multidimensional deconvolution[J]. *Geophysics*, 2013, **78**(3): Q25-Q34.
- [19] 王利杰, 赵海丽, 祝勇, 等. 基于多尺度变换的水下偏振图像融合研究[J]. *应用激光*, 2018, **38**(5): 842-846.  
WANG Lijie, ZHAO Haili, ZHU Yong, et al. Research on underwater polarization image fusion based on multi-scale transform[J]. *Applied Laser*, 2018, **38**(5): 842-846.
- [20] ZHOU Z, DONG M, XIE X, et al. Fusion of infrared and visible images for night-vision context enhancement[J]. *Applied Optics*, 2016, **55**(23): 6480-6490.
- [21] MA J L, ZHOU Z Q, WANG B, et al. Infrared and visible image fusion based on visual saliency map and weighted least square optimization[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, **82**(5): 8-17.
- [22] LI H, WU X J. Infrared and visible image fusion using latent low-rank representation[J/OL]. [2018-12-18], [2019-07-03]. <https://arxiv.org/abs/1804.08992>.
- [23] XU Hui, YUAN Yihui, CHANG Benkang, et al. Image fusion based on complex wavelets and region segmentation[C]//2010 *International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCSM)*, 2010, **8**: 135-138, Doi: 10.1109/ICCSM.2010.5619112.
- [24] MA J, CHEN C, LI C, et al. Infrared and visible image fusion via gradient transfer and total variation minimization[J]. *Information Fusion*, 2016, **31**(9): 100-109
- [25] CAI M R, YANG J Y, CAI G H. Multi-focus image fusion algorithm using LP transformation and PCNN[C]//*IEEE International Conference on Software Engineering & Service Science of IEEE*, 2015: 261-265.
- [26] 陈广秋. 基于多尺度分析的多传感器图像融合技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015.  
CHEN Guangqiu. Research on Multi-sensor Image Fusion Technology Based on Multi-scale Analysis[D]. Changchun: Jilin University, 2015.
- [27] QU G, ZHANG D, YAN P. Information measure for performance of image fusion[J]. *Electronics Letters*, 2002, **38**(7): 313-315.
- [28] HONG R. Objective image fusion performance measure[J]. *Military Technical Courier*, 2000, **56**(2): 181-193.