

基于对比实验的水下图像质量提升方法研究

于亦飞, 李 煊, 贺榆珊, 谢金城, 朱萧伟, 杨如白

(中国计量大学 质量与安全工程学院, 浙江 杭州 310018)

摘 要: 受水介质对光线的散折射及吸收作用、光照条件变化和成像距离等因素影响, 水下图像中往往存在对比度低、模糊严重等问题。针对上述问题, 结合学者们在水下图像质量提升方面的研究, 以 3 个水下图像集为对象, 选取了 9 种不同的图像质量提升方法(包括增强和复原方法)进行水下图像对比实验, 并从耗时、峰值信噪比、结构相似度、平均梯度、熵值和标准差 6 方面对实验结果进行分析, 得到不同方法之间的优劣情况。其中直方图均衡化和引导滤波的实验结果图像效果最佳, 且获得了整体较好的数据结果, 这为后续研究提供了方向。

关键词: 水下图像处理; 图像质量; 直方图均衡化; 引导滤波

中图分类号: TN911.73; TP317.4

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.200398

中文引用格式: 于亦飞, 李煊, 贺榆珊, 等. 基于对比实验的水下图像质量提升方法研究[J]. 电子技术应用, 2021, 47(6): 82-86, 91.

英文引用格式: Yu Yifei, Li Xuan, He Yushan, et al. Research on underwater image quality improvement methods based on comparative experiments[J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(6): 82-86, 91.

Research on underwater image quality improvement methods based on comparative experiments

Yu Yifei, Li Xuan, He Yushan, Xie Jincheng, Zhu Xiaowei, Yang Rubai

(School of Quality and Safety Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Under the influence of dispersive refraction and absorption of light caused by water medium, variation of illumination condition, and imaging distance, there are always some problems such as low contrast and serious blur devaluing the underwater image. Aiming at above problems, based on some researches which improving image quality, this paper chooses three different of underwater image datasets as targets and nine image quality improvement methods (which contains image enhancement and image restoration methods) to carry out the underwater comparative experiments, while analyzing the experimental results from six separate aspects such as time-consuming, peak signal to noise ratio, structural similarity measure, average gradient, entropy, and standard deviation. Experimental results shows that Histogram Equalization and Guided Filter performed the best according to the processed images, and achieved relatively satisfactory data results on the whole, which was believed to laid a basic foundation for further study.

Key words: underwater image processing; image quality; histogram equalization; guided filter

0 引言

海洋是生命的摇篮、资源的宝库、交通的命脉、战略的要地, 合理开发和利用海洋资源与国家的兴衰紧密相连^[1]。海洋开发离不开各种视觉传感器, 常见的水下成像传感器包括声成像、激光成像和可见光成像(全文简称“光成像”)。相对于声成像和激光成像, 光成像传感器具有分辨率高、信息获取全面且不易受干扰等特点, 尤其在近距离水下目标和环境信息获取中, 具有不可比拟的优势。

然而, 不同于陆上光成像, 水下光成像过程中, 受水介质对光线散折射及吸收作用、光照条件变化和成像距离等因素影响, 水下图像往往存在模糊严重、对比度低等问题^[2]。

针对这些问题, 学者们研究了一系列的水下图像质量提升方法, 如王马华等人^[3]考虑内外尺度对波结构函数影响, 结合折射率谱, 改进水下湍流退化模型以提高复原方法先验知识的完备性, 并采用约束最小二乘滤波法进行退化图像复原; 张赫等人^[4]提出了基于大气湍流模型获取水下图像退化函数的方法, 通过反复实验对比图像的复原效果, 获得模型参数; TRUCCO E 等人^[5]基于简化的 Jaffe-McGlamery 模型提出了自校准恢复滤波器, 该滤波器基于两个假设, 一是假设均匀照明(浅水中的直射阳光), 另一个是前向散射作为主要的衰减成分而忽略后向散射和直接成分, 对每一幅图像, 其中的光学参数由优化一个基于全局对比度评价函数估计得到。这些方法都是通过降低模糊、提高对比度来实现水下图像

质量的提升。

本文选用不同的图像质量提升方法,通过水下对比实验分析不同方法对水下图像质量提升的效果优劣,以确定效果较好的方法,作为进一步研究的方向。另外,为便于开展方法研究,设计并编写完成软件界面。

1 方法介绍

本文按照空间域、变换域和典型方法这3类,选取对应图像质量提升方法。

1.1 空间域类方法

空间域类方法中,本文选用了3种方法,包括高斯滤波、二维顺序统计量滤波及直方图均衡化法。

(1)高斯滤波去噪就是对整幅图像像素值进行加权平均,针对每一个像素点的值,都由其本身值和邻域内的其他像素值经过加权平均后得到。

(2)二维顺序统计量滤波则是中值滤波的推广,是将 n 个非零数值按从小到大排序后处于第 k 个位置的元素作为滤波器的输出。

(3)直方图均衡化法是把原始图像的灰度直方图从比较集中的某个灰度区间变成在全部灰度范围内的均匀分布。

1.2 变换域类方法

变换域类方法中,本文选用了3种方法,包括维纳滤波、二维快速傅里叶变换以及BM3D。

(1)维纳滤波是使原始图像和复原图像之间均方误差最小的复原方法。

(2)二维快速傅里叶变换是将图像的灰度分布函数变换为图像的频率分布函数,即傅里叶变换提供了另外一个角度来观察图像。

(3)BM3D模型由KOSTADIN D等人^[6-7]提出,通过将二维图像转换成三维图像,并进行块堆叠和协同滤波,来改进图像的峰值信噪比和图像主观视觉。模型主要包含两大步骤:基础估计和最终估计,每个步骤可通过相似块匹配、协同滤波和整合三步完成。

1.3 典型方法

典型方法是指在近几年水下图像质量提升研究中采用较多的方法。本文选用3种方法,包括基于视网膜理论的一种方法、暗通道先验法及引导滤波。

(1)基于视网膜理论^[8](Retinex-based theory)的图像增强目的就是使从原始图像中估计出入射光,从而分解出反射率,消除光照不均的影响,以改善图像的视觉效果,正如人类视觉系统那样。

(2)暗通道先验法^[9]中,统计大量无雾图像后发现每幅图像的R、G、B3个颜色通道中,总有一个通道的灰度值很低,几乎趋向于0。基于此,提出了暗通道先验的去雾算法。

(3)引导滤波是通过一张引导图,对输入图像进行滤波处理,使最后的输出图像大体上与输入图像相似,但纹理部分与引导图相似,是在保持边缘情况下,达到平滑效果的一种滤波算法。

2 水下图像质量提升对比实验及结果分析

2.1 实验图像的选取

本节对上述3类方法中选取的几种代表性方法进行指标测试与比较,基于水下图像复原的特殊性,质量提升后的图像没有真实图像可以作为参考,故只针对质量提升后图像本身和原始实验图像进行对比。

实验图像的选择:从Fish4Knowledge^[10-11]数据库中挑选了2组水下实验图像样本,从ANCUTIC O等人^[12]的水下图像增强中的色彩平衡与融合研究中择取1组实验图像样本,以物体在视野中成像的距离远近为依据,每组样本中各选取3幅图像用于实验。

2.2 评价指标介绍

由于目前有关水下图像质量提升性能客观评价的指标很少,本文在对比和分析其他类型图像质量提升的指标后,采用耗时、图像峰值信噪比(PSNR)、结构相似度(SSIM)、平均梯度、熵值和标准差6个指标来衡量不同方法对图像复原的优劣情况。

2.3 实验结果

2.3.1 空间域类方法实验结果

本节采用空间域类的高斯滤波、二维顺序统计量滤波以及直方图均衡化法对选取的9幅图像分别处理,并将处理结果列于图1中。随后采用6种评价指标对实验结果进行分析,获得的实验数据列于表1中。



图1 空间域类方法处理结果图像

表 1 空间域类方法定量比较结果

方法	时间/s	指标				
		峰值 信噪比	结构 相似度	平均梯度 增值/%	熵值 增值/%	标准差 增值
高斯 滤波	0.07	33.07	0.97	-0.66	0.54	-0.44
	0.10	29.38	0.87	-1.57	-1.35	-0.74
	0.48	33.13	0.97	-0.66	1.24	-0.47
	0.06	23.31	0.86	-4.40	3.34	-3.49
	0.07	22.97	0.85	-4.61	4.25	-3.61
	0.23	23.96	0.87	-4.19	3.97	-2.75
	0.07	39.26	1.00	-0.17	-1.91	-0.13
	0.08	36.58	1.00	-0.45	-2.43	-0.34
	0.08	37.82	0.99	-0.16	-1.68	-0.28
二维 顺序 统计量 滤波	0.07	23.98	0.94	-0.19	0.79	-0.72
	0.41	23.17	0.94	-0.42	1.03	-0.66
	0.22	24.14	0.94	-0.20	3.06	-0.37
	0.03	14.94	0.69	-1.76	14.49	-0.17
	0.03	14.76	0.68	-1.92	12.69	0.36
	0.03	15.68	0.71	-1.63	19.75	-1.32
	0.07	32.31	1.00	-0.12	-1.99	-0.30
	0.04	28.80	0.99	-0.23	-3.43	-0.69
	0.29	29.97	0.99	-0.04	5.21	0.68
直方图 均衡化	0.09	25.28	0.76	0.09	14.12	-0.33
	0.09	28.10	0.79	0.03	11.88	4.59
	0.09	27.25	0.78	0.08	14.91	4.91
	0.03	17.84	0.67	-0.54	20.50	-6.75
	0.03	17.68	0.70	-0.57	21.95	-7.64
	0.03	16.95	0.60	-0.44	26.71	-9.58
	0.20	10.53	0.07	0.36	103.61	39.19
	0.08	12.31	0.09	1.06	93.26	40.10
	0.20	10.83	0.13	0.49	119.46	40.62

图 1(a)~(d)分别表示原始水下图像,以及高斯滤波、二维顺序统计量滤波和直方图均衡化法处理的结果图像。

表 1 每个方法下的 9 行数据分别表示图 1 中该方法自上而下对应 9 幅处理结果图像的指标数据值。

综合图 1 和表 1 的实验结果和数据可知:二维顺序统计量滤波和直方图均衡化的耗时整体最少;高斯滤波的峰值信噪比、结构相似度指标值最高,这说明该方法造成的图像失真最少;直方图均衡化的平均梯度、熵值与标准差增值最高,说明该方法能有效增大图像的清晰度并提高图像的信息覆盖率。

综合上述分析可知:空间域类方法进行水下图像增强时,直方图均衡化效果最好,高斯滤波其次,二维顺序统计量滤波效果一般。

2.3.2 变换域类方法实验结果

本节采用变换域类的维纳滤波、二维快速傅里叶变换以及 BM3D 方法对选取的 9 幅图像分别处理,并将处理结果列于图 2 中。随后采用 6 种评价指标对实验结果进行分析,获得的实验数据列于表 2 中。

图 2(a)~(d)分别表示原始水下图像,以及维纳滤波、二维快速傅里叶变换和 BM3D 的处理结果图像。

图 2 中 9 张图像和表 2 中数据的对应关系与上文图 1 和表 1 的对应关系相同。



图 2 变换域类方法处理结果图像

综合图 2 和表 2 的实验结果和数据可知:维纳滤波的耗时整体最少;维纳滤波和 BM3D 的峰值信噪比、结构相似度指标最高,这说明这两种方法造成的图像失真最少;二维快速傅里叶变换的平均梯度、熵值与标准差增值总体来说最高,说明该方法能有效增大图像的清晰度和提高图像的信息覆盖率。

综合上述分析可知:变换域类方法进行水下图像增强时,二维快速傅里叶变换效果最好,维纳滤波其次, BM3D 效果一般。

2.3.3 典型方法实验结果

本节采用了典型方法的 Retinex-based、暗通道先验法以及引导滤波对选取的 9 幅图像分别处理,并将处理结果列于图 3 中。随后采用 6 种评价指标对实验结果进行分析,获得的实验数据列于表 3 中。

图 3(a)~(d)分别表示原始水下图像,以及 Retinex-based、暗通道先验法和引导滤波的处理结果图像。

图 3 中 9 张图像和表 3 中数据的对应关系与上文图 1 和表 1 的对应关系相同。

综合图 3 和表 3 的实验结果和数据可知:引导滤波的耗时整体最少;引导滤波的峰值信噪比、结构相似度指标整体最高,这说明这种方法造成的图像失真最少;Retinex-based 的平均梯度、熵值与标准差增值总

表2 变换域类方法定量比较结果

方法	指标					
	时间/s	峰值 信噪比	结构 相似度	平均梯度 增值/%	熵值 增值/%	标准差 增值
维纳 滤波	0.74	44.81	0.99	-0.05	1.27	-0.05
	0.14	45.12	0.99	-0.03	2.60	-0.04
	0.34	44.69	0.99	-0.05	1.55	-0.05
	0.32	30.41	0.94	-1.58	-0.77	-1.46
	0.04	29.89	0.94	-1.70	0.04	-1.54
	0.03	31.07	0.95	-1.45	1.01	-1.15
	0.16	41.98	1.00	-0.15	-1.40	-0.08
	0.07	39.31	1.00	-0.33	-1.63	-0.23
	0.15	42.28	1.00	-0.11	-1.10	-0.17
	0.29	20.57	0.85	0.35	0.76	0.00
二维 快速 傅里叶 变换	0.45	21.47	0.87	0.17	0.57	0.01
	0.24	20.56	0.86	0.26	1.16	0.00
	0.11	13.81	0.50	0.41	1.43	-0.35
	0.11	13.86	0.51	0.31	2.09	-0.38
	0.33	14.79	0.55	0.49	1.96	-0.33
	0.74	29.42	0.99	0.03	-0.78	-0.02
	0.21	25.20	0.98	0.22	-0.26	-0.01
	0.52	27.82	0.98	0.04	-0.01	0.00
	85.25	40.77	0.98	-0.11	0.18	-10.45
	26.49	39.35	0.98	-0.20	1.74	-16.82
BM3D	79.54	41.22	0.98	-0.09	0.32	-6.56
	6.02	32.32	0.95	-1.05	-2.58	-104.62
	6.08	32.36	0.96	-1.03	-2.90	-104.68
	6.24	33.24	0.96	-0.91	-2.18	-83.46
	88.40	48.34	1.00	-0.01	-0.30	-0.85
	29.03	46.77	1.00	-0.04	-0.76	-3.74
	87.35	48.43	1.00	-0.01	-0.50	-2.25

表3 典型方法定量比较结果

方法	指标					
	时间/s	峰值 信噪比	结构 相似度	平均梯度 增值/%	熵值 增值/%	标准差 增值
Retinex- based	10.80	22.96	0.77	-0.42	-14.78	-12.95
	3.62	25.03	0.80	-0.78	-16.82	-8.28
	3.15	26.13	0.78	-0.41	-10.70	-7.89
	1.24	19.29	0.63	-2.07	-34.50	-17.96
	1.45	18.96	0.64	-2.18	-29.28	-19.08
	6.92	18.42	0.57	-1.99	-26.89	-21.12
	3.62	12.01	0.06	0.20	76.00	27.04
	1.87	13.22	0.08	0.57	74.04	28.53
	3.27	13.61	0.13	0.39	88.47	27.80
	1.64	26.33	0.89	0.04	-30.79	5.55
暗通道	1.45	26.82	0.88	0.03	-17.00	5.44
	1.58	25.99	0.88	0.05	-7.67	6.29
	0.37	31.17	0.99	0.15	5.44	2.11
	0.39	31.54	0.99	0.12	5.99	1.97
	0.39	31.23	0.99	0.13	5.50	2.00
	3.86	24.60	0.98	0.03	6.83	6.18
	1.23	21.80	0.97	0.11	9.12	7.56
	3.62	26.53	0.98	0.05	25.94	7.67
	0.25	41.63	0.99	-0.12	1.73	-0.16
	0.25	35.17	0.89	-0.49	-0.49	-0.32
引导 滤波	0.60	41.64	0.99	-0.12	2.21	-0.17
	0.10	30.15	0.94	-1.47	-1.15	-1.54
	0.12	29.77	0.94	-1.56	-0.07	-1.62
	0.10	30.36	0.94	-1.47	0.54	-1.30
	0.48	39.33	1.00	-0.17	-1.88	-0.13
	0.20	36.89	1.00	-0.43	-2.43	-0.33
	0.79	37.96	1.00	-0.16	-1.80	-0.28



图3 典型方法处理结果图像

体最高,说明该方法能有效增大图像的清晰度和提高图像的信息覆盖率,但适用图像较少;暗通道先验法的平均梯度、熵值与标准差增值也能一定程度增高,适用图像更多,但指标增值不明显,不能更为有效地改善图像质量。

综合上述分析可知:典型方法进行水下图像增强时,引导滤波效果最好,Retinex-based 和暗通道先验法次之。

综上所述,对水下图像质量提升而言,在空间域类方法中,直方图均衡化的效果最好;在变换域类方法中,二维快速傅里叶变换效果最好;在典型方法中,引导滤波效果最好。

在上述几种最好的方法中,耗时最少的是直方图均衡化;峰值信噪比、结构相似度指标整体最高的是引导滤波,这表明引导滤波造成的图像失真最少;平均梯度更好的是二维快速傅里叶变换;熵值与标准差增值总体来说最高的是直方图均衡化,表明它能有效提高图像的清晰度和信息覆盖率,但适用图像较少。

整体数据表明,直方图均衡化与引导滤波所具有的优势更为明显,二维快速傅里叶变换虽在变换域类方法中效果较好,但在处理水下图像时优势明显不如另外两个方法。

3 软件界面与说明

3.1 编写目的

编写图像处理界面的目的是为了将图像处理结果和数据更直接地显示出来,减少方法研究的时间,也有利于后续在此基础上进行更深入的方法研究。

3.2 软件界面总体结构

根据目的,本设计界面总体结构如图4所示。

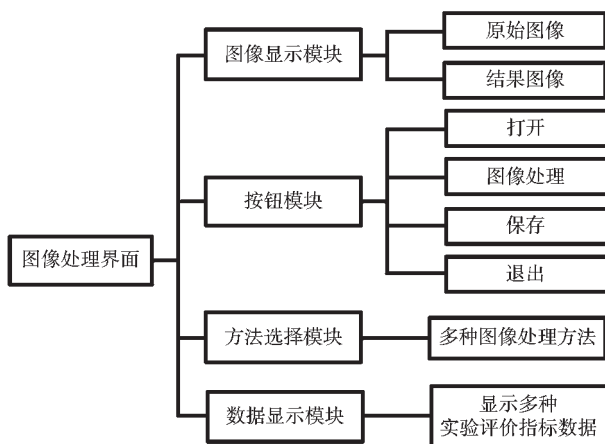


图4 总体结构图

3.3 软件界面运行环境及编程语言

该界面是基于MATLAB2018a的Windows窗体应用程序,是由MATLAB中的GUIDE工具设计而成的GUI界面,软件系统支持Microsoft Windows XP/Windows 7等多种平台。

3.4 界面各模块设计

(1)方法选择模块:用于选择图像处理方法,其中包含上述9种方法。

(2)图像显示模块:用于显示原始水下图像和处理后的结果图像。

(3)数据显示模块:用于显示实验评价指标数据结果,包括耗时、峰值信噪比、结构相似度、平均梯度、熵值和标准差。

(4)保存模块:将生成的结果图像保存到对应文件夹中。

界面图像处理流程图如图5所示,能够直观地展示各个模块的功能以及模块之间的相互联系。

3.5 软件界面

图6所示为软件操作具体界面。

4 结论

针对水下光成像往往存在的模糊严重、对比度低等问题,并结合国内外学者关于水下图像质量提升方法的研究现状,本文共选取9种空间域类、变换域类和典型方法进行水下图像质量提升对比实验,以3个图像集为对象,并采用耗时、峰值信噪比、结构相似度、平均梯度、熵值和标准差6个评价指标对实验结果图像进行分

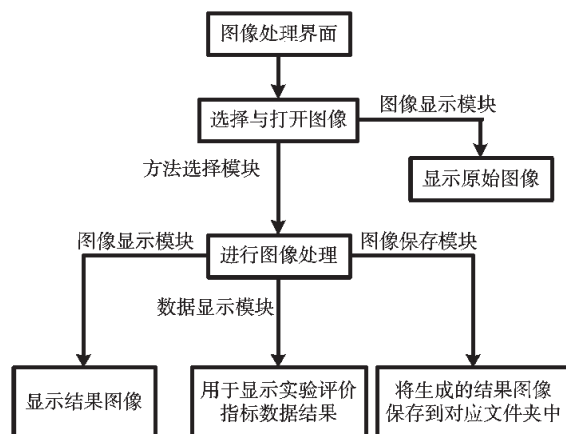


图5 界面图像处理流程图



图6 软件界面

析,完成对现有方法的对比研究。实验结果表明:在提升(包括增强和复原)水下图像质量的方法中,直方图均衡化和引导滤波的图像效果最佳,且获得了整体较好的数据结果,二维快速傅里叶变换次之,而高斯滤波、二维顺序统计量滤波、维纳滤波、BM3D、Retinex-based和暗通道先验法则相对较差。

根据本文研究,后续将基于直方图均衡化和引导滤波展开进一步研究工作,编写的软件界面也为方法研究提供了便利。

参考文献

- [1] 刘赐贵.关于建设海洋强国的若干思考[J].海洋开发与管理,2012,29(12):8-10.
- [2] SANZ P J, RIDAO P, OLIVER G, et al. TRIDENT an european project targeted to increase the autonomy levels for underwater intervention missions[C]. San Diego: Oceans, 2013: 1-10.
- [3] 王马华, 赵正敏, 王士湖, 等. 基于改进湍流模型和偏振成像技术的水下退化图像复原方法[J]. 农业工程学报, 2013, 29(21): 203-209.
- [4] 鲁国春, 聂武, 张赫. 基于模拟方法的水下图像复原[J]. 大连海事大学学报, 2011, 37(3): 70-72.
- [5] TRUCCO E, OLMOS-ANTILLON A T. Self-tuning underwater image restoration[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2006, 31(2): 511-519.

(下转第91页)

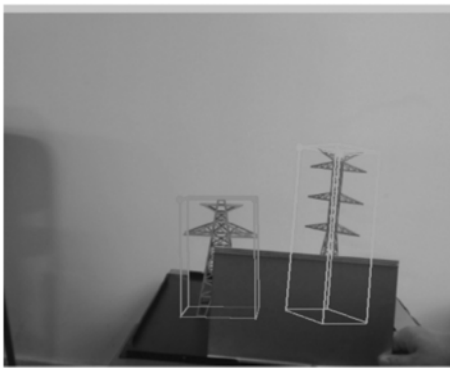


图6 模型遮挡识别实验

挡的情况,这将为无人机的智能化奠定良好的基础。

参考文献

- [1] 余小高,余小鹏.一种基于角相似性的k-最近邻搜索算法[J].计算机应用研究,2009,26(9):3296-3299.
- [2] 宋源,梁雪春,张然.基于统计特性随机森林算法的特征选择[J].计算机应用,2015,35(5):1459-1461,1466.
- [3] Cai Congzhong, Wang Wanlu, Chen Yuzong, et al. Support vector machine classification of physical and biological datasets[J]. International Journal of Modern Physics C Computational Physics & Physical Computation, 2003, 14(5): 575-585.
- [4] GKIOXARI G, HARIHARAN B, GIRSHICK R, et al. R-CNNs for pose estimation and action detection[J]. arXiv: 1406.5212 [cs.CV], 2014.
- [5] HE K, ZHANG X, REN S, et al. Spatial pyramid pooling in deep convolutional networks for visual recognition[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence,

2014, 37(9): 1904-1916.

- [6] GIRSHICK R. Fast R-CNN[C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, 2015: 1440-1448.
- [7] SALVADOR A, GIRO-I-NIETO X, MARQUES F, et al. Faster R-CNN features for instance search[C]. 2016 IEEE Conference on CVPRW, 2016.
- [8] REDMON J, FARHADI A. YOLO9000: better, faster, stronger[C]. 2017 IEEE Conference on CVPR, 2017.
- [9] LIU W, ANGUELOV D, ERHAN D, et al. SSD: single shot MultiBox detector[C]. Computer Vision-ECCV 2016, 2016: 21-37.
- [10] 郭军. 引入上下文信息的可见光遥感图像目标检测与识别方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014.
- [11] 王慧利, 朱明. 聚类与几何特征相结合的遥感图像多类人造目标检测算法[J]. 光电子: 激光, 2015, 26(5): 992-999.
- [12] 吴一全, 周杨, 龙云淋. 基于自适应参数支持向量机的高光谱遥感图像小目标检测[J]. 光学学报, 2015(9): 330-339.
- [13] 林煜东. 复杂背景下的光学遥感图像目标检测算法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- [14] 李湘誉, 王彩玲, 李宇, 等. 窗口融合特征对比度的光学遥感目标检测[J]. 光学精密工程, 2016, 24(8): 2067-2077.
- [15] TREMBLAY J, TO T, SUNDARALINGAM B, et al. Deep object pose estimation for semantic robotic grasping of household objects[J]. arXiv: 1809.10790, 2018.
- [16] LI S, CHI X, MING X. A robust O(n) solution to the

(下转第95页)

(上接第86页)

- [6] KOSTADIN D, ALESSANDRO F, VLADIMIR K, et al. Image denoising by sparse 3D transform-domain collaborative learning[J]. IEEE Transactions on Image Processing: a publication of the IEEE Signal Processing Society, 2007, 16(8): 2080-2095.
- [7] 徐少平, 张兴强, 江顺亮, 等. 局部均值噪声估计的3维滤波降噪算法[J]. 中国图象图形学报, 2017, 22(4): 422-434.
- [8] FU X, ZHUANG P, HUANG Y, et al. A retinex-based enhancing approach for single underwater image [C]. Paris: IEEE International Conference on Image Processing, 2014: 4572-4576.
- [9] RAANAN F. Singel image dehazing[J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(3): 1-9.
- [10] BOOM B J, HE J, PALAZZO S, et al. A research tool for longterm and continuous analysis of fish assemblage in

coral-reefs using underwater camera footage[J]. Ecological Informatics, 2014, 23(9): 83-97.

- [11] Fish4Knowledge[EB/OL]. (2019-08-27)[2020-05-19]. <http://groups.inf.ed.ac.uk/f4k/>.
- [12] ANCUTI C O, ANCUTI C, DE VLEESCHOUWER C, et al. Color balance and fusion for underwater image enhancement[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2018, 27(1): 379-393.

(收稿日期: 2020-05-19)

作者简介:

于亦飞(1997-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 图像处理、图像质量评价。

李焯(1988-), 通信作者, 女, 博士, 讲师, 主要研究方向: 图像处理、机器视觉, E-mail: lixuan1271@hotmail.com。

贺榆珊(1998-), 女, 本科, 主要研究方向: 图像处理、图像质量评价。



扫码下载电子文档

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所