



图像增强技术在码头水下结构 外观巡检中的应用^{*}

徐鲁强¹, 陶冶¹, 陈广桐¹, 柏强², 李翔², 刘广会¹

(1. 辽宁港口集团有限公司专业能力中心, 辽宁 大连 116004;

2. 大连港口设计研究院有限公司, 辽宁 大连 116023)

摘要:定期开展码头水下结构的外观巡检是码头平稳运行的重要保障。通过分析现有的检测方法,发现获取图像质量不佳是采用视觉技术实施外观巡检的主要限制条件。结合相关检测作业的要求,创新提出将人造多幅欠曝光算法与颜色通道补偿方式进行融合,并通过试验验证使用图像增强算法的水下拍摄图像的视觉质量。结果表明,多曝光与颜色补偿可有效提升水下图像的对比度、恢复细节信息并进行颜色矫正,且运算效率高;图像增强算法可有效提升水下拍摄图像的视觉质量,帮助技术人员及时识别水下结构缺陷;试验中SIFT特征点匹配数量说明提出的算法有利于后续开展缺陷的自动识别及测量研究。

关键词:水下结构外观检查; 图像增强算法; 视觉质量; 运算效率

中图分类号: TP 301.6; U 656.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)06-0042-08

Application of image enhancement technology for appearance inspection of wharf underwater structure

XU LU-qiang¹, TAO YE¹, CHEN GUANG-tong¹, BAI QIANG², LI XIANG², LIU GUANG-hui¹

(1. Centre of Technology, Liaoning Port Group Co., Ltd., Dalian 116004, China;

2. Dalian Port Design & Research Institute Co., Ltd., Dalian 116023, China)

Abstract: Regular inspection of the appearance of underwater structure is an important prerequisite for the smooth operation of a wharf. By the analysis of existing inspection methods, we find that the poor image quality is the main limitation of the application of the visual techniques in the appearance inspection of underwater structure. Combining with the requirement of inspecting underwater structure, we innovatively integrated the artificial multi-underexposure fusion strategy with the color channel compensation method, and verify the visual quality of the underwater image of the image enhancement method by test. The results show that the multi-exposure fusion and color compensation can effectively enhance contrast, recover details, and correct color-cast of the underwater image with high computation efficiency. The image enhancement method can improve the visual quality of underwater images, and help engineers recognize the existing deficiencies of the wharf in time. The number of the matched pairs of SIFT feature points indicates that the proposed algorithm is also beneficial to the subsequent research of automatic deficiency recognition and measurement.

Keywords: appearance inspection of underwater structure; image enhancement algorithm; visual quality; computational efficiency

收稿日期: 2020-11-28

*基金项目: 辽宁省交通科技计划项目(201902)

作者简介: 徐鲁强(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事港口工程数字化技术研究。

码头的水下结构在长久的使用过程中会因海浪冲刷及荷载作用, 出现不同程度的裂缝、漏筋、掏空等缺陷。通过定期开展码头水下结构的外观巡检, 可及时发现相关缺陷及位置信息, 为港口运营方下一步的维修、改造计划提供影像资料支撑, 避免安全事故的发生。然而, 在改革开放 40 余年的历程中, 我国已兴建大量的码头设施, 有调查研究表明: 2016 年, 在全国抽样调查的 4 877 个码头泊位中, 仅 506 个泊位有检测记录, 而其中检测超过 3 次的泊位仅 56 个^[1], 形势不容乐观。码头水下结构的外观巡检须采取危险性较高且结果受主观因素影响较大的传统人工水下探摸方式, 故相关记录很少, 为港口正常作业带来诸多隐患。因此, 提出方便、有效的巡检手段是亟待解决的问题。

技术人员提出许多可替代传统人工水下探摸方式的现代化检测手段, 大体可分为 4 种: 1) 采用水上平台方式搭设二维声呐检测仪器的方法, 其检测范围大多较小, 一般无法覆盖全部泊位的水下结构, 且对平台本身的稳定性要求极高, 不适用于定期开展码头水下结构的外观巡检工作; 2) 采用在水上平台搭设三维全景成像声呐系统, 该方法可形成三维立体图像且识别度较高, 但检测范围有限, 无法有效呈现被测水下结构的整体技术状态, 大多需要大量复杂的拼接处理, 工作量大; 3) 采用特制水上平台及支架搭配多波束检测扫测法, 该方法可有效对整体水下结构进行外观检测, 但特定的平台及支架制作、拆运步骤繁琐, 耗时较长, 容易影响码头的正常作业, 故适用性不强; 4) 采用水下机器人(载人型水下机器人 AUV、遥控型水下机器人 ROV)搭载高清摄像头的方式进行相关巡检任务, 该方法在水下实施, 可通过轨迹设置或人工遥控的方式采集全部水下结构的影像数据, 操作较为简便, 对风浪的要求不高且易发现结构缺陷。但其获取的图像易受光在水中的吸收、散射作用的影响, 图像效果不清晰, 对后期缺陷识别工作造成阻碍^[2-3]。

通过分析发现, 相比于声成像技术, 采用水

下机器人搭载高清摄像头方式操作简便且对码头正常生产作业影响较小, 但因光在水中的吸收、散射作用影响而造成获取的图像不够清晰是限制此项技术实际应用的主要限制条件。虽然, 已有研究提出很多水下图像增强算法, 但在码头水下外观巡检中具有实际应用价值的算法应具备以下主要特点: 1) 增强后的图像应该具有高质量的细节信息, 可为后续的识别及测量工作提供有效的影像资料; 2) 应具有较高的运算效率, 可快速处理水下巡检过程中获取的照片及视频帧; 3) 应具备较强的通用性, 即成熟的水下图像增强算法不仅适用于一片海域、一种退化类型, 针对各种类型的水下图像均应起到良好的视觉质量增强效果。

因此, 本文从视觉质量增强效果、运算实时性及算法应用的鲁棒性 3 个维度出发, 对现阶段先进的 AMEF 算法^[4]、UDCP 算法^[5]、融合算法^[6]、两步策略^[7]、L2UWE 算法^[8]和基于深度学习的 UWCNN 算法^[9]等图像增强算法开展研究, 创新提出在现有大气去雾中的人造多幅欠曝光融合算法(AMEF 算法)的基础上, 添加红色通道补偿的计算, 该算法可有效提升图像对比度、恢复退化细节信息并校正颜色偏差, 同时具有较强的鲁棒性, 可为码头水下结构的自动巡检的实际应用提供良好的图像资料, 克服视觉技术在码头水下结构巡检中应用的限制。

本文的创新点为: 1) 首次将图像增强技术应用于码头水下结构的外观巡检的具体场景中, 通过本文算法增强后的水下外观巡检图像具有较好的视觉质量; 2) 通过对人造多曝光融合算法在码头水下结构外观巡检工作中的缺陷分析, 创新提出在原有的算法过程中增添颜色通道补偿的计算, 可有效纠正水下图像色偏, 提高图像的对比度和清晰度且算法鲁棒性较强, 满足码头水下结构外观检测的实际要求; 3) 通过科学的定性及定量的理论分析与现场试验, 充分验证本文算法在码头水下外观巡检中的可行性。该算法的提出对今后促进视觉检测技术在码头水下结构外观巡检的实际应用具有重要的价值和意义。

1 基于多曝光融合和颜色补偿的图像增强算法

1.1 AMEF 算法分析

AMEF 算法是由葡萄牙科学家 Galdran 于 2018 年针对空气中的有雾图像提出的图像增强算法，该算法采用经典多尺度融合策略作为核心公式：

$$J_l(x, y) = \sum_{k=1}^K G_l \{ \bar{W}_k(x, y) \} L_l \{ E_k(x, y) \} \quad (1)$$

式中： (x, y) 为像素位置(坐标)； $J_l(x, y)$ 为第 l 层融合结果图像； $\bar{W}_k(x, y)$ 为第 k 幅欠曝光图像的总权重系数； $G_l \{ \bar{W}_k(x, y) \}$ 为高斯金字塔分解的第 l 层的第 k 幅欠曝光图像的总权重系数； $E_k(x, y)$ 为待融合的各版本图像(此方法中为经伽马变换后的各欠曝光版本图像)； $L_l \{ E_k(x, y) \}$ 为拉普拉斯金字塔分解的第 l 层的全部 K 幅欠曝光图像。最后，从拉普拉斯金字塔分级的 l 层融合结果从底层到顶层进行逐层融合，得到最终的融合结果 $J(x, y)$ 。

Galdran 发现通过变换一幅图像的伽马值可以影响该幅图像不同亮度区域的细节信息的视觉体现。于是，他将直接拍摄的有雾图像 $I(x, y)$ 采用 $I_t(x, y) = I(x, y)^\gamma = E_{k=\gamma}(x, y)$ 进行变换，得到原图像 $I(x, y)$ 的伽马变换图像即欠曝光版本图像 $E_k(x, y)$ ， γ 的值经观察取 5，因此欠曝光图像全部的生成数量 $K=5$ 。则：

$$E_k(x, y) = \{ E_{\gamma=1}(x, y), E_{\gamma=2}(x, y), E_{\gamma=3}(x, y), \\ E_{\gamma=4}(x, y), E_{\gamma=5}(x, y) \} \quad (2)$$

同时，Galdran 利用对比度 $W_c^k(x, y) = \frac{\partial^2 E_k}{\partial x^2}(x, y) + \frac{\partial^2 E_k}{\partial y^2}(x, y)$ 与饱和度 $W_s^k(x, y) = \sum_{C \in \{R, G, B\}} \left[E_k^C(x, y) - \frac{E_k^R(x, y) + E_k^G(x, y) + E_k^B(x, y)}{3} \right]^2$

(其中 C 为颜色通道变量， R, G, B 分别为红、绿、蓝色通道)作为多曝光融合策略中的权重系数，通过 $W_k(x, y) = W_c^k(x, y) W_s^k(x, y)$ 将两权重系数进行相乘得到第 k 幅欠曝光图像的总权重。为了避免出现过度加成现象，将 $W_k(x, y)$ 进行标准化处理

($\bar{W}_k(x, y) < 1$)，从而确定第 k 幅欠曝光图像的总权重 $\bar{W}_k(x, y)$ 。通过确定的 $\bar{W}_k(x, y)$ 和 $E_k(x, y)$ 代入式(1)中求得最终融合图像。

AMEF 算法具有可恢复空气中有雾图像细节信息，提升对比度且运算效率高的特性。但该算法的设计初衷仅针对空气中有雾图像的成像特性，由于水下图像会因各种颜色的光波长度不同而引发不同程度的颜色失真，使 AMEF 算法无法有效纠正水下图像的色偏，也给码头技术人员有效识别结构缺陷造成一定的困扰。因此，本文创新提出在 AMEF 算法的基础上增加基于颜色通道补偿方式的水下图像色彩纠偏计算，进一步提升相关图像的视觉质量，帮助后续的基于视觉技术的缺陷识别、测量工作，从而提升采用自动化视觉手段实现码头水下结构巡检的实际应用价值。

1.2 基于颜色补偿通道技术的色彩纠偏算法

水下拍摄的图像会因各种颜色的光波长度不同而造成不同程度的颜色失真，但绝大多数的水下图像呈现出蓝、绿色调。色彩通道是由红、蓝、绿 3 种原色组成，红色因其光波最短，吸收的最多因此无法有效呈现出其应有的视觉效果。因此，本文提出通过由蓝色、绿色的颜色通道对红色通道进行补偿的方式进行颜色纠偏，同时为了保证避免出现补偿过度的现象，设定原图像红色通道中强度值已超过最大强度值 95% 的像素点将不被补偿，公式为：

$$I_{re}(x, y) = I_r(x, y) + \frac{\alpha}{2} (\bar{I}_g - \bar{I}_r) [1 - I_r(x, y)] I_g(x, y) + \\ \frac{\alpha}{2} (\bar{I}_b - \bar{I}_r) [1 - I_r(x, y)] I_b(x, y) \quad (3)$$

式中： $I_{re}(x, y)$ 为补偿后的图像红色通道强度； $I_r(x, y)$ 、 $I_g(x, y)$ 、 $I_b(x, y)$ 分别为原图像红、绿、蓝色通道的强度值； \bar{I}_r 、 \bar{I}_g 、 \bar{I}_b 分别为原图像红、绿、蓝色通道的平均强度值； α 为常数参数，经大量验证其值取 1 时视觉效果最好。为了保证色彩纠

偏的准确性, 根据颜色恒常性的假设, 对补偿后的图像采用经典 Gray-World^[10] 白平衡的方式进行

处理, 从而得到满足码头水下结构巡检要求的图像, 本文算法流程见图 1。

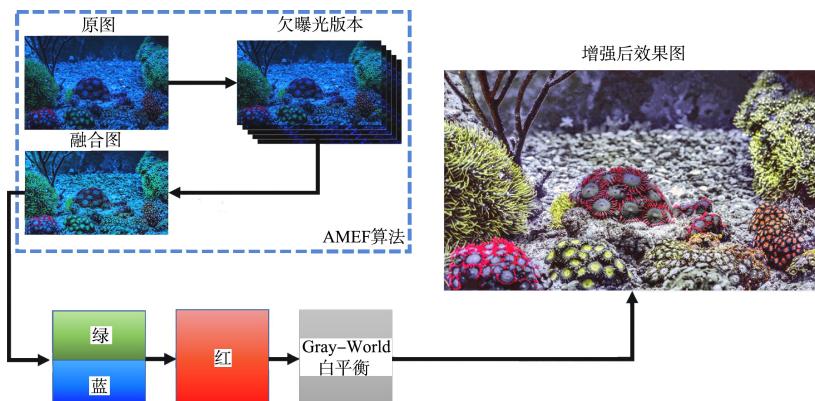
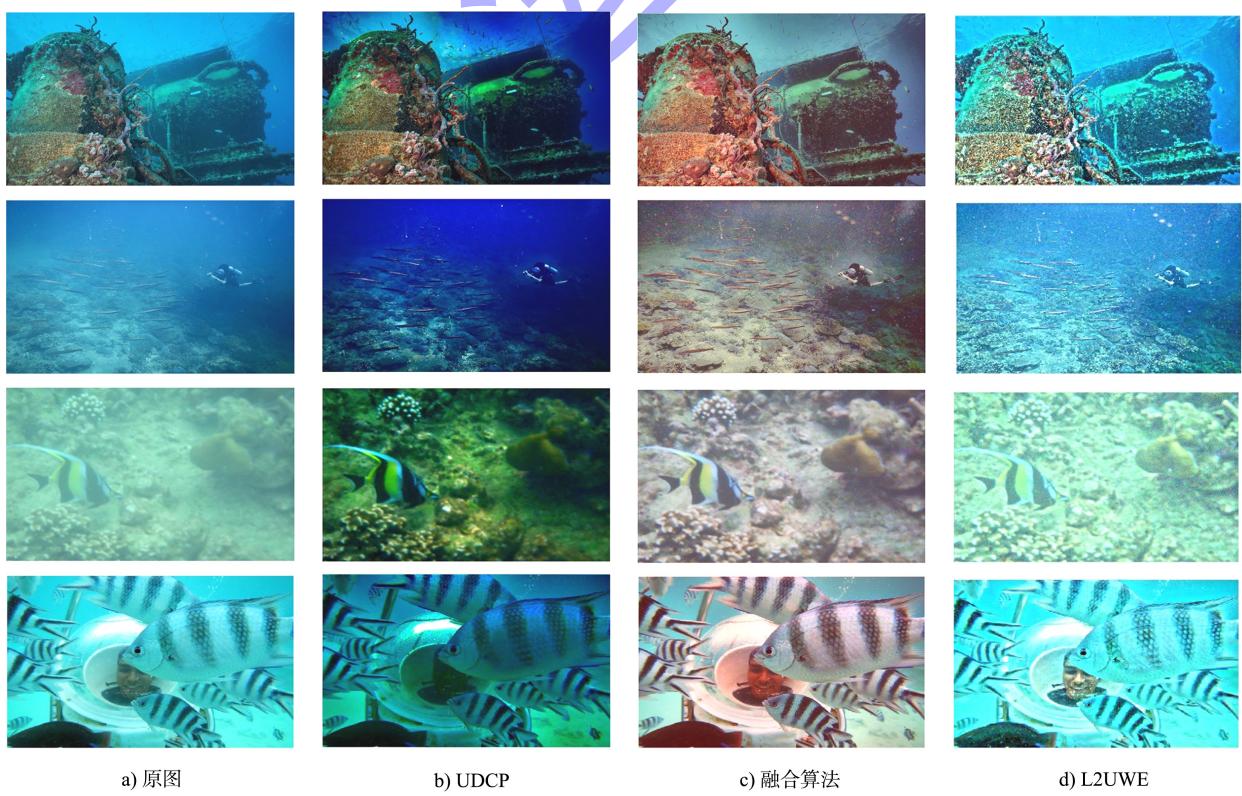


图 1 本文算法流程

2 理论分析

为验证本文算法的有效性, 通过与现阶段先进的水下图像增强算法(UDCP 算法、融合算法、两步策略、L2UWE 算法和基于深度学习的 UWCNN

算法)在增强不同退化程度图像的视觉质量及运算效率两个维度进行比较, 说明本文算法的先进性。图像增强效果对比如图 2 所示。



a) 原图

b) UDCP

c) 融合算法

d) L2UWE

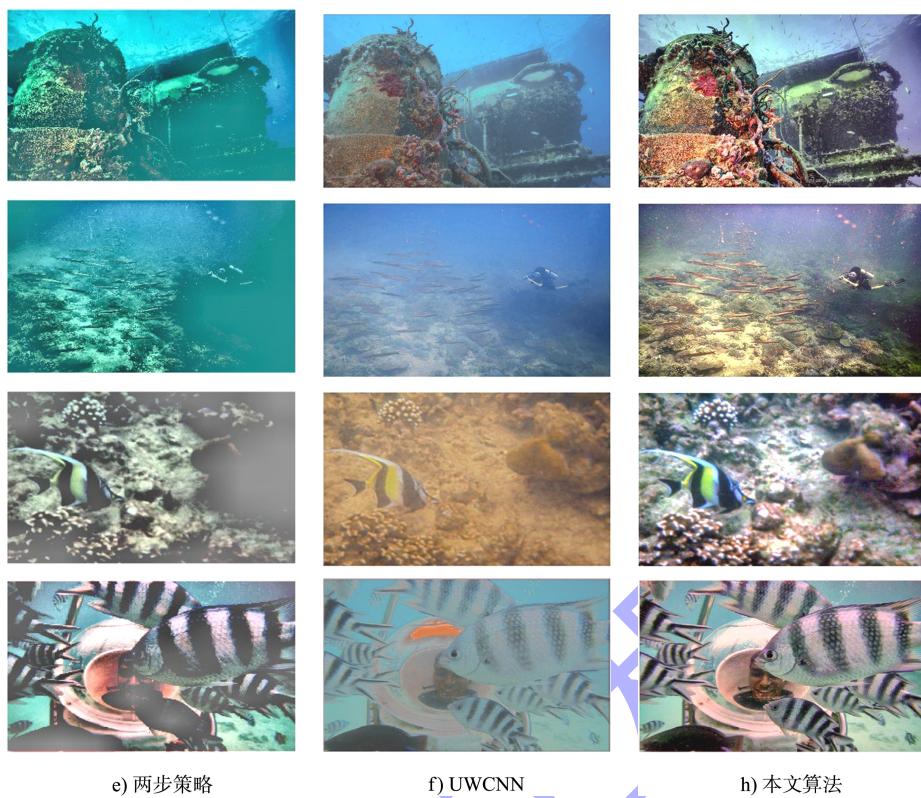


图 2 不同增强算法的效果对比

从图 2 可看出, 本文算法增强后的图像相比于其他增强算法具有更好的图像视觉质量, 无论是在对比度、恢复图像细节信息及颜色矫正方面均有明显提升。为客观地体现水下图像质量增强的程度, 本文引用被研究人员广泛认可且专门为水下图像质量评价而设计的水下彩色图像质量评价指标 UCIQE^[11] 对相关图片进行定量比较, UCIQE 的计算方法为:

$$UCIQE = c_1 \sigma_e + c_2 \cdot \text{con}_l + c_3 \mu_s \quad (4)$$

式中: σ_c 为图像色度的标准偏差; con_l 为图像亮度的对比度; μ_s 为平均饱和度的平均值; c_1 、 c_2 及 c_3 分别为经大量试验结果验证后确定的常数系数。

分别设置为 0.468 0、0.274 5 和 0.257 6，UCIQE 的值越大代表所增强的图像视觉质量效果越好。

为验证本文算法的鲁棒性，尽量减少样本选取特性造成的影响，从水下图像数据库中提取 500 幅水下图像分别采用不同的增强算法进行处理，由于篇幅有限，仅展示相关图像不同增强算法的平均定量对比结果。为保证同样的限制条件，本文的试验数据均在相同的硬件条件下计算获取：搭载 Intel I5-8300H CPU@ 2.3 GHz、16G 内存及 NVIDIA GeForce GTX 1060 显卡的笔记本电脑，且所有图像分辨率设置为 480×720 。500 幅图像的平均定量比较结果如图 3 所示。



图 3 500 幅图片不同增强算法的平均定量比较结果

根据定量数据对比结果可以看出: 水下图像增强效果最好的前 3 名为本文算法、UDCP 及融合算法; 而运算耗时最短的前 3 名为 UWCNN、本文算法及两步策略。虽然基于深度学习的 UWCNN 算法有更高的运算效率, 但因缺少有效的训练数据集, 其增强效果并不理想。通过增强效果及运算效率两项评价指标综合分析, 本文算法可较好满足用于码头水下结构定期检测的图像增强算法的相关要求。

3 现场试验分析

为进一步验证本文增强算法的实际应用性, 采用现场试验方式对本文算法的有效性进行论证。本次试验对象为大连港某泊位, 泊位结构为沉箱重力式, 长度为 180 m, 泊位底高程 10 m, 靠泊能力 5 000 t。本次试验由大连海事大学提供的 ROV 载体 (第二类 A 级) 搭载 Bowtech 的 SURVEYOR 高清彩色摄像机实施。试验过程中 ROV 载体在距岸壁 0.5 m 左右位置由水面下潜至基床, 随后在左右 5 m 范围内横向移动。随后 ROV

载体以每上升 2 m 在左右 5 m 范围内横向移动的操作反复进行, 直至漏出水面, 以上操作轨迹分别在泊位相距 10 m 的点位上重复上述操作直至覆盖整个泊位, ROV 一次行驶轨迹如图 4 中的粗线所示。

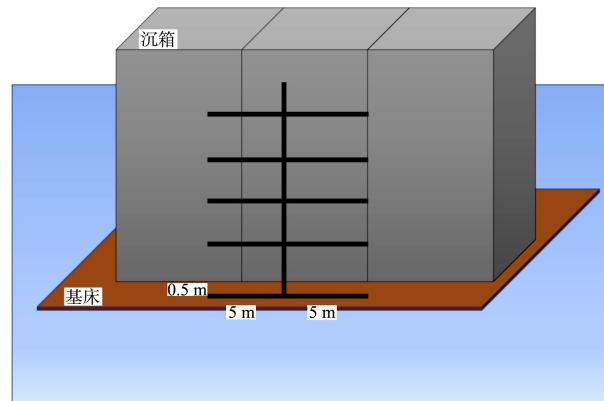
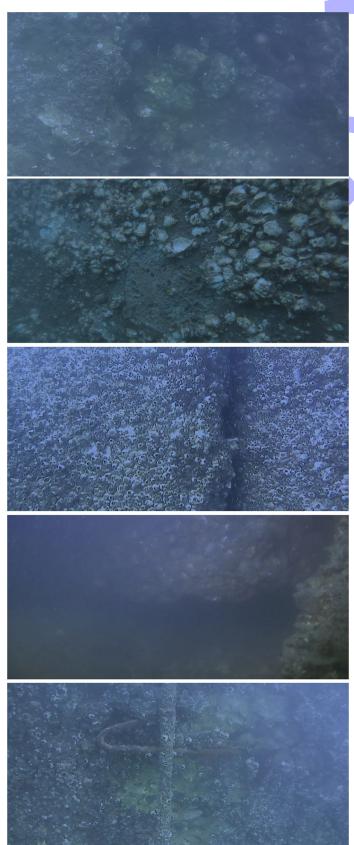
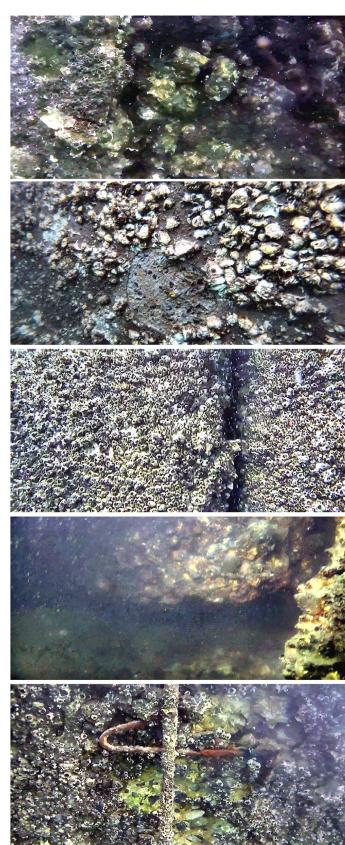


图 4 ROV 一次运行轨迹

搭载的摄像机进行全过程录像, 后期将录像每隔 2 s 进行一次视频帧提取操作并进行相应图像增强处理, 本次试验所发现结构缺陷中拍摄原图与增强后对比效果如图 5 所示。



a) 原图



b) 增强后图像

图 5 结构缺陷的原图及增强后效果对比

由图 5 可看出, 本文算法可有效增强试验所拍摄码头水下结构照片, 辅助技术人员及时发现码头水下结构缺陷(沉箱破损洞穿、集料外漏、混凝土方块断裂、基床掏空、破损漏筋等), 采取相应的维修措施避免安全事故的发生。同时, 为验证本文算法对后期开展缺陷的自动识别和测量具有重要意义, 首先选取连续两张照片(相差 2 s 拍摄)构成一对图像组, 对选取图像组的图像分别采用本文增强算法进行处理。然后, 运用尺度不变特

征变换(SIFT)^[12]描述各组图片的局部特征, 并对两组图像特征点的匹配数量进行比较。其中 SIFT 的运算过程主要分为: 1) 提取关键特征点, 搜索尺度空间上的图像位置, 再通过高斯微分函数识别潜在的具有尺度和旋转不变的兴趣点; 2) 定位关键点并确定特征方向, 在每个候选的位置上, 通过一个拟合精细的模型来确定位置和尺度; 3) 通过将特征点对进行两两匹配建立对应关系来进行 SIFT 运算。运算结果如图 6 所示。

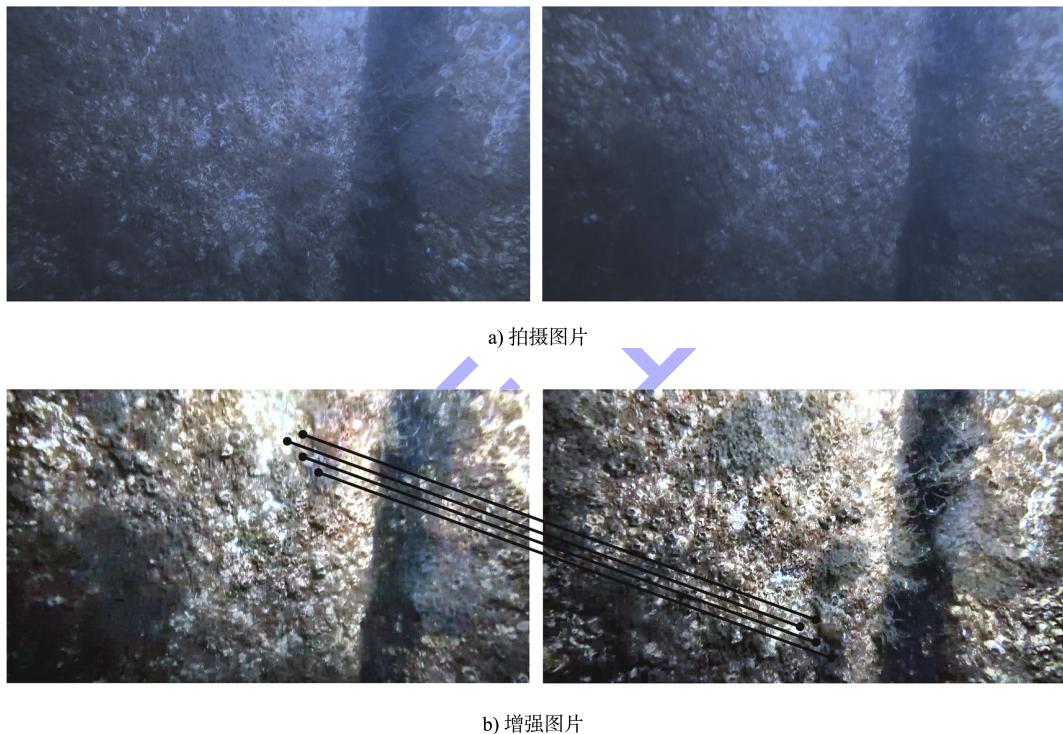


图 6 特征点匹配数量比较

可以看出, 未经增强的图像特征点匹配对数为 0, 而本文算法增强后的图像匹配出 4 对匹配特征点。此结果说明, 增强后的图像有利于后期开展缺陷的自动识别及测量研究。

4 结语

1) 通过对现有先进检测方法的分析发现, 相比于声成像技术, 采用水下机器人搭载高清摄像头方式操作简便且对码头正常生产作业影响较小, 但因光在水中的吸收、散射作用影响而造成获取的图像不够清晰是限制此项技术应用的主要限制条件。

2) 通过对大气图像人造多幅欠曝光融合算法(AMEF 算法)进行分析, 针对其在水下图像中的欠缺之处, 在原有 AMEF 算法基础上创新提出添加颜色通道补偿的计算。本文算法可有效提升图像对比度、恢复细节信息并进行颜色矫正且运算效率较高, 可满足码头水下结构外观检测的实际要求。

3) 通过定性及定量的理论分析, 本文算法在提升水下图像视觉质量及运算速度方面, 与当今先进图像增强算法相比具有一定优势, 且鲁棒性较高, 为现阶段可应用于码头水下结构巡检的水下图像增强算法。

4) 通过现场试验分析, 本文算法可有效增强水下图像的视觉质量, 协助技术人员及时发现存在的结构缺陷, 为码头运营方下一步的维修、改造计划提供相应的影像资料支撑。同时, 试验中基于SIFT特征点描述子的特征点配对数量也可说明人造多曝光融合算法有利于后期开展缺陷的自动识别及测量研究工作。

5) 本文的研究结果对今后促进视觉检测技术在码头水下结构外观巡检的实际应用具有重要的价值和意义。

参考文献:

- [1] 赵立鹏, 张建国, 陈浩宇, 等. 对港口设施维护与管理对策的思考[J]. 港工技术, 2014, 51(1): 28-30, 51.
- [2] 张莹, 康路遥, 许吉羊. 航道整治建筑物水下检测方法初探[J]. 中国水运, 2020(9): 130-132.
- [3] SHIN C, HAN H S, JANG I A, et al. Development of unmanned inspection equipment for gravity type port structures[C]//IEEE. 2014 Oceans-St. John's Conference. New York: IEEE, 2014: 1-4.
- [4] GALDRAN A. Image dehazing by artificial multiple-exposure image fusion[J]. Signal processing, 2018, 149: 135-147.
- [5] DREWS P L J, NASCIMENTO E R, BOTELHO S S C, et al. Underwater depth estimation and image restoration based on single images[J]. IEEE computer graphics and applications, 2016, 36(2): 24-35.
- [6] ANCUTI C O, ANCUTI C, VLEESCHOUWER C, et al. Color balance and fusion for underwater image enhancement[J]. IEEE trans image process, 2018, 27(1): 379-393.
- [7] FU X Y, FAN Z W, LING M, et al. Two-step approach for single underwater image enhancement [C]//IEEE. 25th International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems. New York: IEEE, 2018: 789-794.
- [8] MARQUES T P, ALBU A B. L2UWE: a framework for the efficient enhancement of low-light underwater images using local contrast and multi-scale fusion[C]// IEEE. 2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops. New York: IEEE, 2020: 2286-2295.
- [9] LI C Y, ANWAR S, PORIKLI F. Underwater scene prior inspired deep underwater image and video enhancement[J]. Pattern recognition, 2020, 98(2): 45-72.
- [10] BUCHSBAUM G. Spatial processor model for object colour perception[J]. Journal of the Franklin Institute, 1980, 310(1): 1-26.
- [11] YANG M, SOWMYA A. An underwater color image quality evaluation metric [J]. IEEE transactions on image processing, 2015, 24(12): 6062-6071.
- [12] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. International journal of computer vision, 2004, 60(2): 91-110.

(本文编辑 王璁)

(上接第32页)

- [11] BAZLI M, ASHRAFI H A, OSKOUEI A V, et al. Experiments and probabilistic models of bond strength between GFRP bar and different types of concrete under aggressive environments [J]. Construction and building materials, 2017, 148(1): 429-443.
- [12] 李强. 低速横向冲击荷载下 CFRP 加固钢管性能研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [13] OH R O, PARK C G. Fracture and long-term aging

characteristics of GFRP clamping plates for improved movable weirs [J]. Polymers and polymer composites, 2019, 27(4): 143-154.

- [14] American Society of Testing Materials. Standard test method for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete: ASTM C876-80 [S]. West Conshohocken: ASTM, 1980.

(本文编辑 王璁)