

基于水下结构光扫描系统的结构光带中心提取方法初步研究

宫本兴^{1*}, 王国宇²

¹江苏理工学院电气信息工程学院, 江苏 常州 213000;

²中国海洋大学电子信息工程学院, 山东 青岛 266000

摘要 水下结构光带中心提取的主要困难是散射问题和目标表面纹理导致的反射光分布不均问题。提出了一种水下信息采集新方法, 此方法利用结构光扫描目标实现卷积过程, 解决了非均匀照明引起的后向散射背景非均匀分布问题, 同时, 从统计的角度也降低了噪声起伏的不确定性; 基于此系统, 提出了一种“虚拟孔径”方法, 以消除后向散射; 提出了一种利用复原图像去除目标纹理提高中心提取准确率的方法, 此方法使传统中心提取方法可应用于包含细节信息的水下目标, 拓展了传统中心提取方法的应用范围。水下实验验证了所提方法的可行性和有效性。

关键词 水下信息采集; 结构光照明; 扫描成像; 后向散射; 中心提取

中图分类号 O436.2

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1601004

Preliminary Study on Structured Light Strip Center Extraction Method Based on Underwater Structured Light Scanning System

Gong Benxing^{1*}, Wang Guoyu²

¹*School of Electrical & Information Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213000, Jiangsu, China;*

²*College of Electrical Information Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266000, Shandong, China*

Abstract Scattering and an uneven distribution of reflected light owing to the target surface texture are the main issues in extracting the structured light strip center in underwater. Herein, we proposed a new approach for underwater information acquisition. In this method, the targets are scanned using structured light for the convolution process, thereby solving the nonuniform distribution of a backscattered background because of nonuniform illumination. Furthermore, the uncertainty of noise fluctuations is reduced from a statistical viewpoint. A virtual aperture method is proposed to eliminate backscattering using this system. Moreover, a method for improving the accuracy of the center extraction is proposed using the restored image to remove the target surface texture, by using the method, conventional center extraction methods can be applied to the underwater targets containing texture, thus widening their application range. Underwater experiments were performed to verify the feasibility and effectiveness of the proposed method.

Key words underwater information collection; structured light illumination; scanning imaging; backscattering; center extraction

1 引言

随着海洋资源和能源开发技术的发展, 人类对海洋探测的范围和深度要求在逐步扩大, 载人深航器在海洋深处探测中的优势远远不如水下机器人探测设备。利用声和光在水中的传输特性进行鱼群探测、水

底导航、海底地貌探测等是常用的水下探测方式, 相比于声呐技术, 在水下目标识别等需要近距离观测的场景下, 光学传感技术^[1]可以获得分辨率更高、细节更丰富的图像信息。随着远程遥控式水下潜器(ROV)^[2]和自主式水下潜器(AOV)^[3]的深入研究和广泛应用, 以光学传感技术为代表的视觉技术在水下作业中的应用越

收稿日期: 2021-08-10; 修回日期: 2021-08-14; 录用日期: 2021-08-17

基金项目: 国家自然科学基金(61571407)

通信作者: *benxinggong@jsut.edu.cn

来越多,小型化的摄像系统已经成为多数水下潜航器实现观测、导航和定位等功能的首选装备。目前基于 ROV/AUV 应用的水下视觉系统所面临的主要需求就是:在动态和非均匀照明条件下,如何利用计算机视觉技术提高对二维和三维信息的感知能力^[4]。

海水介质对光的吸收和散射,会导致水下成像系统的作用距离缩短、对比度降低以及质量下降。照明光一般由探照灯产生,光束中间强,四周渐弱,导致获得的图像亮度不均,对于照明和成像系统分离的系统,这一问题普遍存在。目前几乎所有的水下图像处理方法都利用图像增强的方法来减少非均匀光照的影响^[5],进而使得图像的亮度看起来更加均衡。但依据光度学模型所阐述的成像原理^[6],只有将目标光学特性和照明因素分离,才是解决非均匀照明问题的物理方案。

在实际的水下视觉应用过程中,相比于单纯依靠声呐,利用光学图像传感器获取简单的二维信号,进而对周边环境准确地进行三维探测^[7-8]能够获得更为直观全面的信息,三维信息获取已成为水下相关活动必要的需求。然而,由于水下成像环境的特殊性,现有的三维测量技术^[9-10]很难直接应用。水下三维测量方法研究对拓展三维测量技术应用和提高水下三维探测能力具有十分重要的意义。线结构光扫描技术^[11]作为基于光学三角法的非接触式测量技术,被广泛应用于三维测量、三维图像重构、质量检测、焊缝跟踪等领域。在应用中,光源发射出有一定宽度的线结构光,线状光束图像有一定的像素宽度,准确提取线结构光图像的中心线是实现高精度测量的关键,因此需要寻找快速精确的中心提取算法^[12]。传统的光条中心提取算法仅适用于表面光滑、没有纹理的目标^[13],存在应用局限。不同纹理的光学特性不同,会对光场分布造成影响,打乱光条横截面的亮度分布规律,导致中心提取准确性大大降低。

本文基于结构光照明构建了水下光学扫描成像系统,利用积分合成方法获得水下目标复原图像;基于复原图像,提出了一种结构光带中心提取的改进方案;对比传统激光扫描系统,所提方案保留了水下目标的颜色信息,获得了效果改善的 RGB 复原图像。

2 基本原理

2.1 扫描成像原理

经典的结构光测量系统^[14]如图 1 所示,激光器投射的一个光平面扫过目标表面,标定相机坐标和激光器坐标之间的对应关系,通过检测光平面和目标表面的交叉曲线的图像位置,就可以计算该曲线上每个点的 3D 坐标。

考虑结构光为分布已知的非均匀照明模式,传感器接收的扫描图像可以等效为在空间上目标各个部分的信息对同一入射光的连续响应。在空间上对每一幅

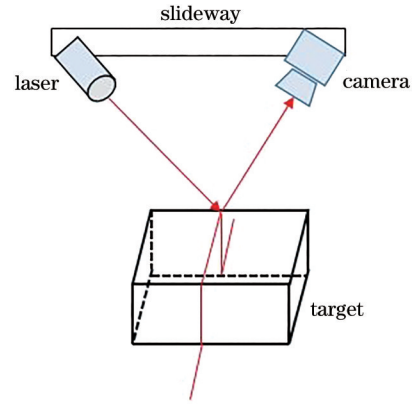


图 1 结构光测量系统

Fig. 1 Structured light measurement system

扫描图像进行积分,则所有序列扫描图像的积分结果构成了目标的反射函数和点扩散函数的卷积结果,线性系统的冲击响应由入射光分布来等效,在形式上即构成线性系统,对目标复原图像的获取问题可转换为在非均匀照明系统对退化图像进行复原的问题。以一维情况为例,目标与成像系统在水平方向上产生相对运动,则某一时刻,以成像系统的坐标系为参考,当目标与成像系统产生的位移为 s 时,传感器接收到的理想情况下的水下扫描图像可以表示为

$$f(x, y, s) = I(x)O(x - s), \quad (1)$$

式中: I 为照明光的光场分布函数; O 为目标反射函数。传感器接收到的水下退化图像可以表示为

$$g(x, y, s) = h_p(x, y) * [O(x - s, y)I(x)] + n(x, y), \quad (2)$$

$$I(x) = h_b(x) * I(x), \quad (3)$$

式中: $h_p(x, y)$ 表示水下成像点扩散函数,由目标反射光向 CCD 传输过程中发生的前向散射决定; $h_b(x)$ 表示扩散函数,在照明光向目标投射的过程中产生; $n(x, y)$ 表示后向散射背景噪声,视其为加性噪声来处理。假定 $h_p(x, y)$ 可以分离,即

$$h_p(x, y) = h_x(x)h_y(y), \quad (4)$$

则式(2)可以改写为

$$g(x, y, s) = [h_x(x)h_y(y)] * [O(x - s, y)I(x)] + n(x, y). \quad (5)$$

对图像域进行一维水平方向的积分,并考虑如下关系:

$$\int h(x) dx = 1, \quad (6)$$

$$\int h(x) f(x) dx = \int f(x) dx, \quad (7)$$

可得

$$G(s, y) = O(s, y) * I(s) * h_o(s, y) + N(s, y), \quad (8)$$

其中,

$$h_o(s, y) = h_y(y)h_b(s), \quad (9)$$

$$N(s, y) = \int n(x - s, y) dx, \quad (10)$$

式中: $I(s)$ 的分布先验已知; $h_0(s, y)$ 可以通过实验所用的条形光来进行估计。借助前面介绍过的线性系统的相关理论, 照明无关图像的提取问题便转换为水下退化图像的复原问题。对传感器接收到的扫描图像在空间上进行一维水平方向上的积分, 可以得到积分合成图像 $G(s, y)$, 这一过程与水下图像的退化过程是等效的。

本文提出了一种利用结构光照明实现水下目标复原的思路, 通过结构光照明模式下的扫描成像获得目标积分合成图像, 应用图像复原方法获取目标复原图像。当目标在照明光场中连续移动时, 序列图像的求和就构成了目标图像与照明分布函数的卷积输出。因此, 目标二维信息提取就变成一个线性复原问题, 扫描成像系统思路如图 2 所示。

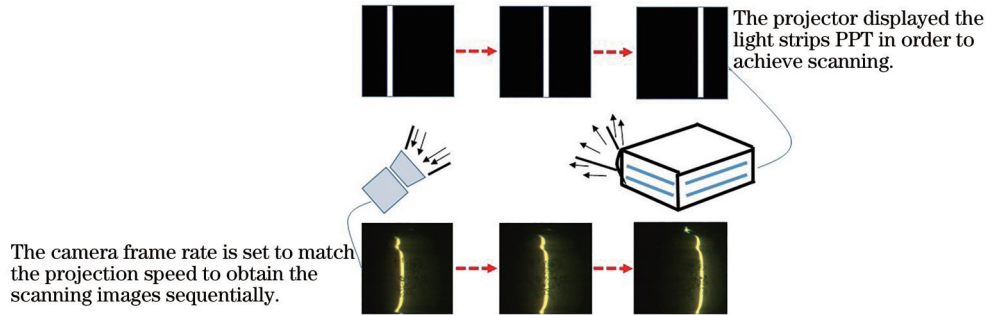


图 2 结构光照明模式扫描成像思路

Fig. 2 Scanning imaging idea based on structured light illumination mode

此方法的一个重要应用就是结构光测距时的图像合成, 当照明光源是高度结构化的, 如线状或条状, 视觉系统成为传统的结构光三角测量系统, 而水下测量通常只能以光源扫描或系统整体运动实现, 由此获得的序列图像包含了目标的整体信息。此方法的优点是: 求和运算消除了非均匀照明引起的后向散射背景非均匀分布问题, 同时从统计的角度也降低了估计的不确定性。

2.2 中心提取改进算法

依据 2.1 节算法描述拼接图像 g , 可表示为

$$g(t) = I(t) * R(t), \quad (11)$$

式中: R 为复原图像。对式(11)进行傅里叶变换, 频域上的积分合成退化图像等于目标图像与结构光分布的乘积, 表达式为

$$G(t) = I(t)R(t). \quad (12)$$

对式(12)等号两边取对数, 有

$$\ln G = \ln(RI) = \ln R + \ln I, \quad (13)$$

得到光条图像的对数值为

$$\ln I = \ln G - \ln R. \quad (14)$$

对式(14)等号两边取指数, 可以求得理想情况下去除了目标表面纹理的纯光条图像, 即

$$I = e^{\ln G - \ln R}. \quad (15)$$

利用复原图像可以去除帧图像中所包含的目标纹理, 得到结构光图像, 对其应用传统的光条中心提取算法可以获得结构光带中心位置, 拓展了传统光条中心提取算法的应用范围。

2.3 应用“虚拟孔径”抑制后向散射

水下三维测量的主要困难是水体对光波的散射效应。散射介质中的结构光产生的后向散射背景的亮度沿投影方向呈指数下降, 终止于表面的交叉处。单帧图

像中的入射结构光在投射过程中产生一个面状的后向散射光分布, 在积分合成计算中形成强烈的后向散射叠加背景, 直接影响解卷积复原的效果和中心提取过程。

借鉴同步扫描成像原理, 在 CCD 成像中, 对扫描中的每一帧图像进行加窗操作, 即在投射光面与目标表面相交的位置设置一个窗口掩模, 只提取窗口内的图像数据进行积分运算, 从而排除其他位置上的后向散射光成分。其功能与同步扫描系统相同, 但是窄视场受到虚拟“光圈”的限制, 而不是同步扫描系统中光学传感器物理设置的限制, 将此种方法称为“虚拟接收孔径”方法。窗口掩模的大小与投射的结构光的空间分布模式有关, 也与积分合成图像进行解卷积复原时的点扩散函数估计有关。初步采用的方法是: 设置阈值, 首先确定无后向散射一侧(投射光面与目标表面相交位置的外侧)的窗口起点位置, 然后根据已知的投射光分布形式确定与后向散射平面重叠的另一侧的终点位置。需要说明的是, 加窗操作在去除后向散射光的同时, 也会导致照明区域目标信号的损失(截断效应), 但是这种改变在理论上可以解释为解卷积复原中的点扩散函数的改变, 在通过解卷积方法进行复原时不会对目标信号造成损失。

窗口掩模的尺寸取决于实际设计应用, 希望保留结构光平面并尽可能地去后向散射光。由于投影光条是设计已知的, 可以预设阈值, 确定光条(与背散射光片相对)窗口的起始点, 然后根据光条宽度确定结束点。考虑到表面反照率的噪声和纹理可能引起反射表面光的不确定性, 在阈值处理之前应用平滑滤波器。确定单帧图像的窗口掩模过程如图 3 所示。

去除后向散射光的单帧图像不是精确场景的图像, 但是在条纹照明的情况下, 所施加的虚拟孔径的窄

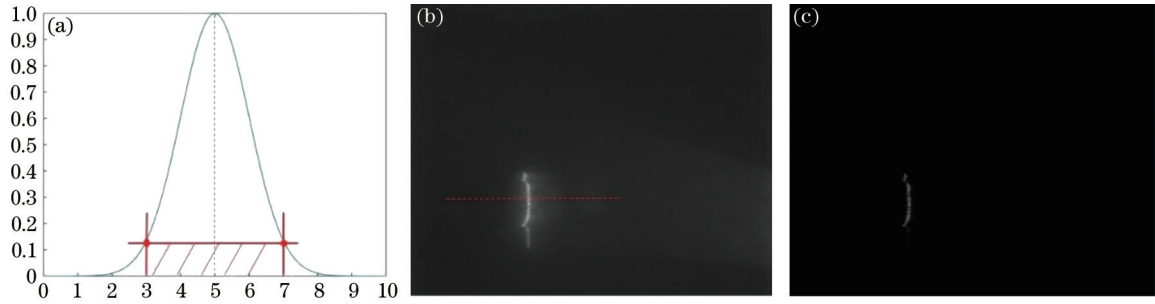


图 3 窗口掩模的确定。(a) 投射光条的横截面强度分布和窗口的预设阈值; (b) 平滑滤波后, 沿 x 方向(虚线)的灰度分布; (c) 去除后向散射光的单帧图像

Fig. 3 Determination of window mask. (a) Cross-sectional intensity distribution of the projected light strip and the preset threshold of the window mask; (b) gray value distribution along the x direction (dotted line) after smoothing and filtering; (c) single-frame image without backscattered light

视场可以显著地消除后向散射光。掩蔽操作不可避免地涉及每帧图像上的场景丢失, 理论上, 场景的这种损失可以解释为窗口化操作改变了照明图案, 可以作为

场景复原与估计点扩散函数一起处理。

2.4 实验过程及结果

所提方法的处理流程如图 4 所示。

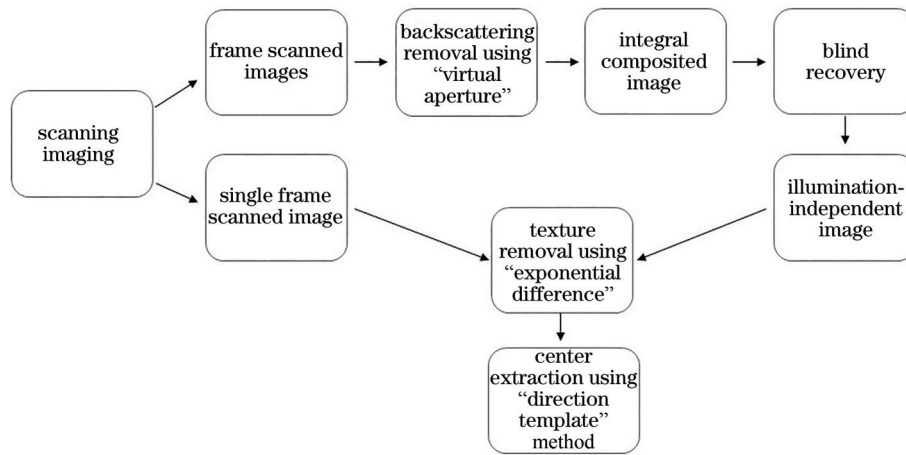


图 4 获得照明无关图像与中心提取的流程图

Fig. 4 Flow chart of obtaining illumination-independent image and center extraction

根据算法理论搭建水下实验平台, 如图 5 所示, 模拟单光源主动照明的水下环境, 成像过程在暗室进行。实验目标放置于规格为 $300\text{ cm} \times 150\text{ cm} \times 150\text{ cm}$ 的玻璃水箱中, 玻璃观测窗有抗反射涂层; 添加牛奶和不溶于水的氢氧化铝模拟浑浊度未知的成像环境; 使用投影仪作为成像光源, 连续放映 PPT 实现扫描过程;

成像传感器为 JAI-GO-5000-PGE CCD 相机, 连续成像过程保存为视频模式, 单帧最大分辨率为 2560×2048 , 最大帧率 22; 调整 CCD 帧率与 PPT 放映间隔同步, 实现同步扫描成像。成像结果如图 6 所示。

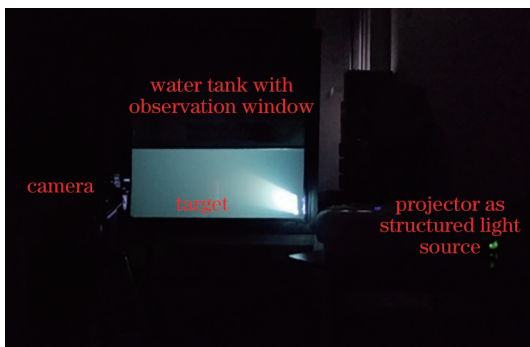


图 5 实验设置

Fig. 5 Experimental setup

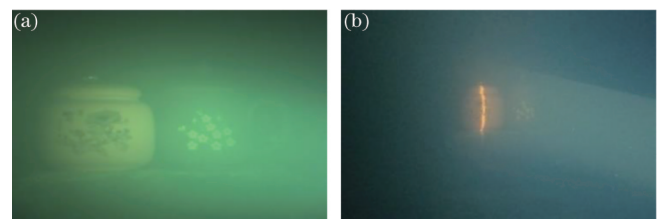


图 6 浑浊水体中成像。(a) 泛照明图像; (b) 结构光扫描图像

Fig. 6 Imaging in turbid water. (a) Pan-lighting image; (b) structured-light scanned image

在浑浊度未知的水体中进行实验数据采集, 应用“虚拟孔径方法”去除后向散射, 获得的实验结果如图 7 所示。与图 7(a) 原始积分合成图像相比, 图 7(b) 去除后向散射后的积分合成图像整体对比度显著提

高,后向散射噪声引起的“雾化”背景被大幅度去除,图 7(c)复原图像所包含的目标表面纹理细节信息更多。为了定量评估“虚拟孔径”方法去除后向散射效果,通过平均梯度图像说明所提方法的有效性,梯度

图像对比如图 8 所示,“虚拟孔径”方法去除后向散射的复原图像的梯度图像[如图 8(d)所示]细节明显增多,说明了“虚拟孔径”方法改善后向散射影响的有效性。

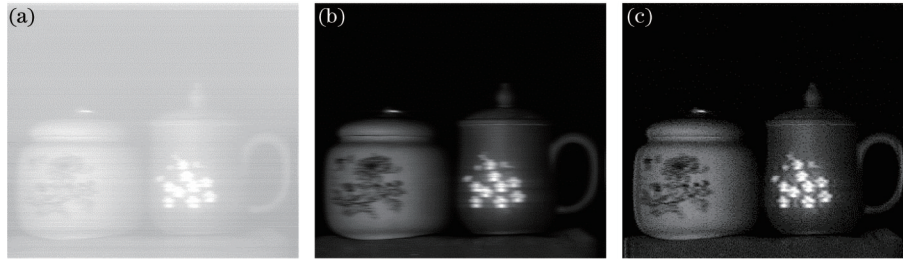


图 7 “虚拟孔径”方法去后向散射。(a)积分合成图像;(b)去后向散射图像;(c)复原图像

Fig. 7 Backscattering removal using “virtual aperture”. (a) Integral composited image; (b) backscattering removal image; (c) restored image

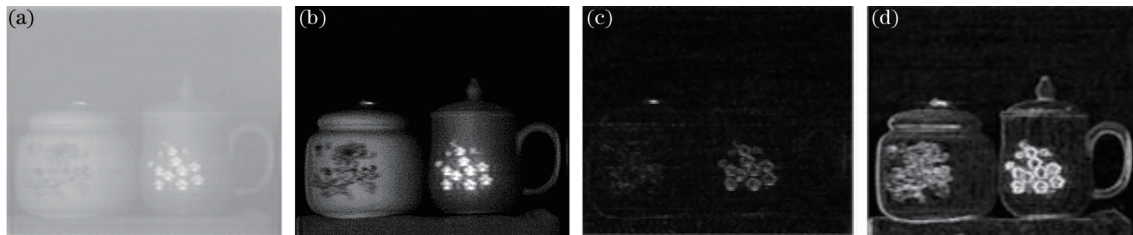


图 8 去除后向散射前后复原图像和平均梯度图像。(a)去除后向散射前复原图像;(b)去除后向散射后复原图像;(c)图 8(a)的梯度图像;(d)图 8(b)的梯度图像

Fig. 8 Restored images and average gradient images before and after removing backscattering. (a) Restored image before backscattering removal; (b) restored image after backscattering removal; (c) average gradient image of Fig. 8 (a); (d) average gradient image of Fig. 8 (b)

对单帧图像应用“虚拟孔径”方法去除后向散射干扰,根据算法描述,对得到的结果与照明无关图像指数求差,得到光带图像,应用方向模板法进行中心提取,

实验结果如图 9 所示。结果表明,利用照明无关图像去除目标纹理对提高中心提取的准确性是有效的,虽然图 9(c)指数求差后的显示图像仍没有达到单独保

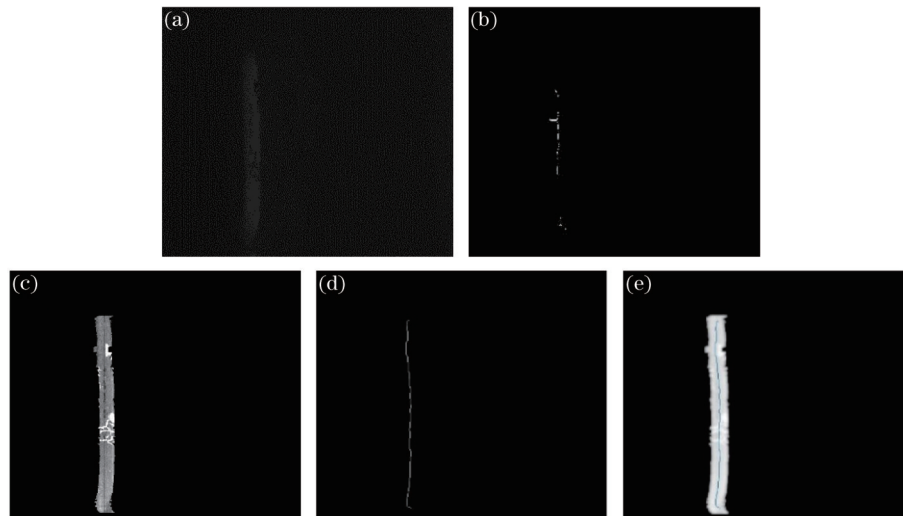


图 9 中心提取实验结果。(a)“虚拟孔径”方法去除后向散射后的单帧图像;(b)“方向模板”法的中心提取结果;(c)应用照明无关图像去除纹理后得到的光条图像;(d)去除纹理后,“方向模板”法的中心提取结果;(e)图 9(d)中心线在光带中的位置

Fig. 9 Experimental results of center extraction. (a) Single-frame image after backscattering removal by “virtual aperture” method; (b) center extraction result using the “direction template” method; (c) light stripe image after texture removal by applying illumination-independent image; (d) center extraction result using the “direction template” method after texture removal; (e) position of the center line of Fig. 9 (d) in the light strip

留光场信息且完全没有噪声干扰的程度,但与图 9(b)直接中心提取的结果相比,所提方法获得的中心线[如图 9(d)所示]更连续,在原始图像中的位置[如图 9(e)所示]也更接近于理想情况。

与传统激光扫描系统相比,采用的结构光扫描系统的主要优势是:激光虽然具有亮度高、能量充足的特点,但同时存在单色性的限制,在水下进行目标信息获取时,光学照明系统能够完整保留水下目标的颜色信息,利用分通道复原方法可以得到效果更好的彩色图像。这是应用光学系统进行水下目标二维信息获取的优势之一。应用“虚拟接收孔径”方法进行后向散射去除后,得到的目标 RGB 实验结果如图 10 所示,利用

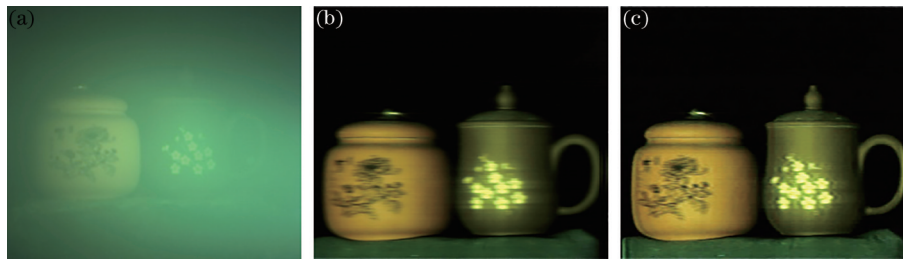


图 10 分通道处理结果。(a)泛照明图像;(b)积分合成图像;(c)复原图像

Fig. 10 Sub channel processing results. (a) Pan-illumination image; (b) integral composited image; (c) restored image

表 1 彩色图像结果评价

Table 1 Evaluation of color images

Parameter	Pan-illumination image	Integral composited image	Restored image
UCIQE	0.2966	0.4079	0.4156
UIQM	2.1845	20.7037	20.8307

3 结 论

提出了一种利用结构光序列进行扫描成像获得目标照明无关图像的新方法,以采集水下目标信息,该方法可以应用于水下结构光测距的图像合成和三维信息获取。采用照明与传感器分离的成像系统设计,通过扫描方式实现空间上的卷积退化过程,卷积核作为先验条件(光场分布函数)已知,只需考虑其在散射介质中传播时的扩散,即可以进行复原;提出了一种利用“虚拟孔径”去除后向散射的方法,得到了效果改善的复原图像;提出了一种利用照明无关图像去除目标纹理提升中心提取准确率的方法,该方法利用照明无关图像去除目标纹理影响,获得结构光带信息,解决了传统光条提取算法要求待测目标表面不能具有复杂纹理的限制,结合本文结构光扫描成像过程,在获得待测目标图像信息的同时,使得三维信息估计成为可能;基于光学系统优势,进行了 RGB 分通道处理,得到了主观评价更好的彩色复原图像;设计了水下实验验证了所提方法的有效性,获得了效果改善的水下目标图像,基于照明无关图像的中心提取改进算法对中心线位置匹

underwater color image quality evaluation (UCIQE)^[15]和 underwater image quality measures (UIQM)^[16]进行结果评价。UCIQE 是色度、饱和度和对比度的线性组合,能够量化表征水下图像的不均匀色偏、模糊和低对比度问题,计算数值越大,表明水下彩色图像质量越好。UIQM 是一种基于人眼视觉系统激励的无参考水下图像质量评价指标,针对水下图像的退化机理与成像特点,采用色彩测量指标 (UICM)、清晰度测量指标 (UISM)、对比度测量指标 (UIConM) 作为评价依据,将 UIQM 表示为三者的线性组合,其值越大,表示图像的颜色平衡、清晰度、对比度越佳。计算结果如表 1 所示。

配程度明显提高,提升了结构光带中心提取的准确性;在结果评价方面,除主观视觉评价,通过平均梯度图像、中心线在结构光带中的位置、UCIQE 和 UIQM 彩色图像评价指标,定量评价了所提方法的有效性。

相比于传统束光源泛照明成像方式,本文采用的扫描成像方案获得的复原图像分辨率更好,对比度更高,改善了水下成像过程中后向散射干扰的问题,能够在一定程度上解决恶劣散射介质中的强后向散射覆盖问题。与所提方法相近的水下同步扫描方式,整体系统设置复杂,很难在实验室条件下实现,因此仅对所提方法进行了可行性验证。利用投影仪进行的实验过程没有复杂的系统标定过程,实验步骤明确,扫描结构光可通过 MATLAB 软件设计,具备可复现性。

所提中心提取改善方案在获得目标二维图像信息的同时,提升了目标三维信息估计的准确性。通常水下测量通过光源连续扫描、光学图像传感器自身位置变化或测量系统整体移动实现,虽然获得的图像均包含待测目标的整体信息,但传统的图像拼接算法因局部照明范围太小缺乏足够用来拼接的相关信息。本文通过物理方式实现数学卷积过程,运算速度快,获得的信息完整,求和的过程也可以消除照明不均匀引起的后向散射背景分布不均匀的问题,对后期估计的准确性有积极意义。本文研究内容一方面丰富了序列扫描方法获得照明无关图像的意义,另一方面,光条中心提取的思路不仅可以应用于水下的三维探测场景,对常规空气介质中的光条中心提取算法的应用场景也有重要的拓展作用。

水下目标的中心提取准确度与水体浑浊度密切相

关,提取精度与后向散射去除程度密切相关,因此水下目标的三维测量过程与目标的二维信息提取算法密切相关。所提方案在解决水下目标二维信息处理的同时提高了三维测量精度,对未来水下潜器探测系统的搭建有一定启发意义。

这次没有进行系统的 3D 校准,因此未考虑成像表面的 3D 重建。基于目标二维信息进行三维信息重建的研究将是未来的工作。

参 考 文 献

- [1] 郭银景, 吴琪, 苑娇娇, 等. 水下光学图像处理研究进展[J]. 电子与信息学报, 2021, 43(2): 426-435.
Guo Y J, Wu Q, Yuan J J, et al. Research progress on underwater optical image processing[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2021, 43(2): 426-435.
- [2] Michel D. Remotely operated vehicles[J]. Marine Technology Society Journal, 2005, 39(3): 128.
- [3] Ahmed A, Duan W Y. Overview on the development of autonomous underwater vehicles (AUVs)[J]. Journal of Ship Mechanics, 2016, 20(6): 768-787.
- [4] Gokhale R, Kumar R. Analysis of three dimensional object reconstruction method for underwater images[J]. Journal of Scientific & Technology Research, 2013, 2(6): 85-88.
- [5] 王蕊. 单幅雾天及水下图像的复原方法研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
Wang R. The research of single image recovery in fog and underwater[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
- [6] 迟泽英, 陈文建. 应用光学与光学设计基础[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2013.
Chi Z Y, Chen W J. Applied optics and optical design fundamentals[M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2013.
- [7] 王宗义. 线结构光视觉传感器与水下三维探测[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2005.
Wang Z Y. Structured light sensor and underwater 3D inspecting system[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2005.
- [8] 徐顺雨, 徐晓. 一种基于多次反射像的三维测量方法[J]. 光学学报, 2020, 40(16): 1612001.
Xu S Y, Xu X. A three-dimensional measurement method based on multiple reflected images[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(16): 1612001.
- [9] Feng W H, Li X. The theory and application of the structure light engineering surveying based on a laser theodolite with three freedoms of rotation[J]. Geo-Spatial Information Science, 2001, 4(1): 28-36.
- [10] Steger C. An unbiased detector of curvilinear structures[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 20(2): 113-125.
- [11] 解则晓, 李绪勇, 辛少辉, 等. 水下线结构光自扫描三维测量技术[J]. 中国激光, 2010, 37(8): 2010-2014.
Xie Z X, Li X Y, Xin S H, et al. Underwater line structured-light self-scan three-dimension measuring technology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(8): 2010-2014.
- [12] 杨尉. 结构光光条中心提取方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
Yang W. Research on method for extracting center of structured light stripe[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009.
- [13] 李莹莹, 张志毅, 袁林. 线结构光光条中心提取综述[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(10): 100002.
Li Y Y, Zhang Z Y, Yuan L. Survey on linear structured light stripe center extraction[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(10): 100002.
- [14] 李中伟. 基于数字光栅投影的结构光三维测量技术与系统研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
Li Z W. Research on structured light 3D measuring technology and system based on digital fringe projection [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009.
- [15] Yang M, Sowmya A. New image quality evaluation metric for underwater video[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2014, 21(10): 1215-1219.
- [16] Panetta K, Gao C, Agaian S. Human-visual-system-inspired underwater image quality measures[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2016, 41(3): 541-551.