

DOI: 10.13382/j.jemi.B1902705

水下主动激光扫描系统中光场记录及 散射背景分离研究*

吉 勇¹ 屠大维¹ 张 旭¹ 李 晨²

(1. 上海大学 机电工程与自动化学院 上海 200444; 2. 华中科技大学 机械科学与工程学院 武汉 430074)

摘 要:传统水下主动激光扫描系统采用普通相机对反射光接收记录,反射激光点被掩埋在背景噪声中无法分离,影响成像质量。该文在水下激光主动扫描成像系统中采用光场相机记录了包括激光反射光线和各种散射背景杂光的位置和方向信息,为抑制散射背景杂光提供了可能。在后续光场记录图像处理中,首先,对记录的光场图像进行前后两次重聚焦,第一次是对激光照射到物面激光光点的重聚焦,第二次是对激光光点前景散射光的重聚焦,再对两幅图像进行差分处理;提出一种计算机自动判断流程,使得差分所得图像上激光点的衬度最大,或足够大。实验结果表明,上述方法可以达到较好的散射背景抑制作用,是对现有同步扫描主动激光成像系统空间分离散射背景抑制技术的必要补充。

关键词:主动激光扫描;散射背景分离;光场成像;重聚焦;差分
中图分类号: TH744; TN211 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.5040

Research on light field recording and scattering background separation in underwater active laser scanning system

Ji Yong¹ Tu Dawei¹ Zhang Xu¹ Li Chen²

(1. School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, China;
2. School of Mechatronic Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract:The traditional underwater active laser scanning system uses ordinary camera to receive and record reflected light. The reflected laser point is buried in the background noise and cannot be separated, which affects the image quality. In this paper, the position and direction information of laser reflected light and scattered background stray light are recorded by light field camera in underwater laser active scanning imaging system, providing the possibility to suppress scattering background stray light. In the subsequent processing of light field recording image. Firstly, the recorded light field images are refocused twice. The first is the refocusing of the laser light spot on the object surface and the second is the refocusing of the scattered light in the foreground of the laser light spot. Then, the differential processing is applied to the two refocusing images, and a computer automatic judging process is proposed to make the contrast of laser point on the differential image maximum or large enough. The experimental results show that the above method can effectively suppress the scattering background, and it will be a necessary supplement to the existing space separation scattering background suppression technology of synchronous scanning active laser imaging system.

Keywords:active laser scanning; scattering background separation; light field imaging; refocusing; difference

0 引 言

水下视觉在海底资源勘探、海洋开发、水下探测、水下反恐等方面有广泛的应用^[1-2]。如将其安装在扫测艇上,用于海底地貌、暗礁的勘探以及海底资源位置的测

定;将其安装在机器人上,用于水下工程的建设、检修和打捞作业;将其安装在潜器上,开展水下搜索、探测和侦查,预防水下恐怖犯罪的发生。水下声成像的图像分辨力低,目标细节无法从图像中获取,难以满足上述应用需要;水下光成像,尤其是水下主动激光成像可弥补声成像的不足。然而,由于水介质具有较强的吸收和散射光学

特性,激光在水下传播受到了较大的衰减作用,限制了成像探测距离,也影响了水下激光成像系统的成像质量^[3]。目前,已有多种水下激光主动成像技术和方法,如,基于时间分离的距离选通法^[4-5]、基于空间分离的同步扫描法^[6-7],以及基于偏振抑制的偏振成像法^[8]等。朱平安等^[4]基于距离选通法提出一种激光主动成像系统,通过距离选通技术克服大气后向散射和背景杂光的影响。金攀等^[7]通过建模仿真为水下激光同步扫描成像系统的设计提供了理论依据。徐梦溪等^[8]基于偏振成像探测技术采用三通道图像传感器同步偏振成像从而计算线偏振度图像。这些方法都能够起到一定程度抑制散射的作用,但仍需要进一步改进完善。此外,除发射激光散射外,还有背景光(如太阳光)在水中的散射光、微生物荧光,以及各种散射光的多次散射等影响。

光是载体,携带了场景的所有信息,场景中所有光线的总和构成光场。每条光线在介质中传播具有位置 (x, y, z) 、方向 (θ, φ) 、频率 λ 、偏振态 p 、辐射强度 r 和时间 t 等多种属性,可用全光函数来描述。图1所示为水下主动激光成像系统接收系统物方区域水下光场构成,包括发射激光的目标反射光、激光后向散射光、激光前向散射光、太阳光等背景光及其散射光、微生物荧光、多次散射光等。水下激光主动扫描视觉系统正是要从光场总量中感知激光光点,通过扫描获取目标三维信息。本文针对主动激光扫描成像系统,采用光场成像接收记录方法,通过对接收记录的光场图像处理,将各种散射光线与成像光线相分离,提高激光光点的清晰度,为激光获取目标信息提供保障。

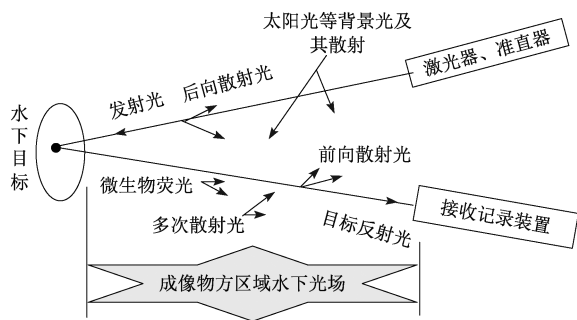


图1 水下主动激光成像系统物方区域光场

Fig. 1 Light field in object area of underwater active laser imaging system

1 水下主动激光同步扫描光场成像记录

本文以主动激光同步扫描成像系统为基础^[9-10],所谓同步扫描是接收视场方向与扫描发射方向同步,使得接收器视场与激光发射水体空间交叠区域尽量较少,达到空间分离,一定程度上抑制后向散射光的效果。图2

所示为其典型光路。由于除后向散射光外,还有其他各种散射,水下激光同步扫描成像系统仍不可避免地受到其他散射光的影响。图2中激光照射光点 A 在接收系统中的像点为 A' ,根据同步扫描三角测距原理,只要获得点 A' 的位置坐标,就可以计算确定点 A 的三维坐标,并通过对整个物面光栅轨迹扫描得到整个物面的三维信息^[9]。然而,传统的同步扫描水下激光成像系统采用普通相机接收点 A 反射光,物方所有光线,包括成像光和各种散射光全部记录在相机CCD光敏面上,所有光线的方向、位置等光场信息难以区分,导致像点 A' 掩埋在背景噪声中无法分离(图2光点图像)。

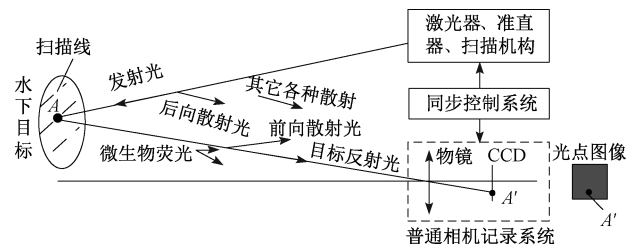


图2 同步扫描水下激光成像系统的典型光路图

Fig. 2 Typical light path of synchronous scanning underwater laser imaging system

1996年Levoy在全光函数光场表达基础上提出四维光场参数化表示方法,如图3所示。图3中,任意一条光线可表征为位置信息 (u, v) 和方向(角度)信息 (x, y) 。假设 $u-v$ 面是光学系统的主面, $x-y$ 面是探测器所在平面。 $L_F(x, y, u, v)$ 代表给定光线的光辐射量,下标 F 代表两平面之间的距离,像面上接受到的辐射量可表示为^[11]:

$$E_F(x, y) = \frac{1}{F^2} \iint L_F(x, y, u, v) A(u, v) \cos^4 \theta du dv \quad (1)$$

式中: θ 为光线 $L_F(x, y, u, v)$ 与 $u-v$ 面法线的夹角; $A(u, v)$ 为光瞳函数。

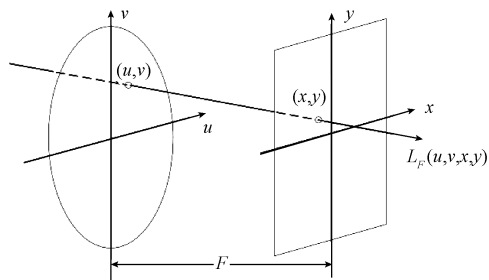


图3 光场的四维参数化表示

Fig. 3 Four dimensional parametric representation of light field

通过数值积分近似求解,可得到每一条光线在探测器平面上的辐射能量,便可得到一幅数字图像。

在上述基础上,2005年Ng发明了第一台手持式光场相机,并成功实现了商品化,由主透镜系统、微透镜阵列和光电探测器3部分构成。主透镜像面处放置微透镜阵列,探测器放置在微透镜的焦距处,主透镜的主面与探测器阵列满足物象共轭关系,主透镜系统的光瞳经过单个微透镜所成的像正好覆盖光电探测器的若干像素点。将微透镜阵列的坐标作为空间位置坐标 (x,y) ,每个微透镜下的探测器单元坐标对应于主透镜平面的采样坐标 (u,v) ,即角度采样,如图4所示(图4只表示二维光场采样情况)。可见,不同于普通相机,光场相机记录了光场中每条光线的位置、方向信息^[12]。

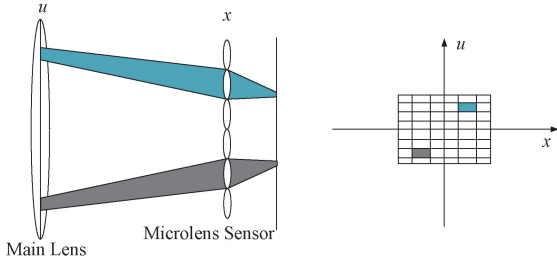


图4 微透镜阵列光场相机的光场采样示意图

Fig. 4 light field sampling diagram of microlens array light field camera

将光场相机用于水下激光主动扫描系统,如图5所示,记录了水下光场每条光线的位置和方向信息,为水下散射背景分离提供了可能。图6所示为其光场记录等效光路。

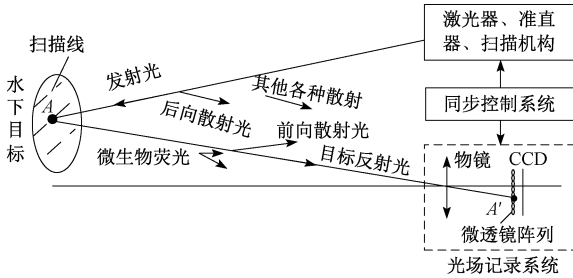


图5 水下激光同步扫描光场记录

Fig. 5 Light field record of underwater laser synchronous scanning

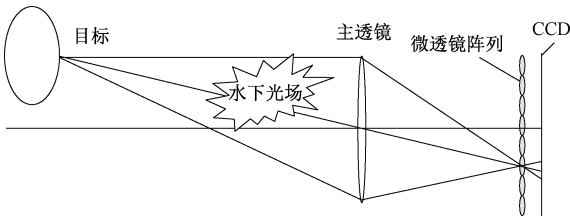


图6 光场记录等效光路

Fig. 6 Equivalent light path diagram of optical field recording

2 散射背景分离

2.1 光场重聚焦

光场重聚焦是利用光场记录中保留位置、角度信息的特点,实现先拍照,后对焦的一种计算成像技术^[13-14]。假定 $x-y$ 和 $u-v$ 平面无穷大,且光瞳之外的光线 $L_F(x,y,u,v)=0$,引入近轴近似后,式(1)简化为:

$$E_F(x,y) = \frac{1}{F^2} \iint L_F(x,y,u,v) du dv \quad (2)$$

假设光场接收器实际像面在 $x-y$ 位置,对焦后重聚焦像面位置为 $x'-y'$,光瞳与探测器的距离为 F ,与重聚焦像平面的距离为 F' 。其中 $F'=\alpha \cdot F$ 。各参数之间的关系的一维空间表示如图7所示。此时重聚焦后的光场变为 $L_{(F'=\alpha F)}(x',y',u,v)$ 。

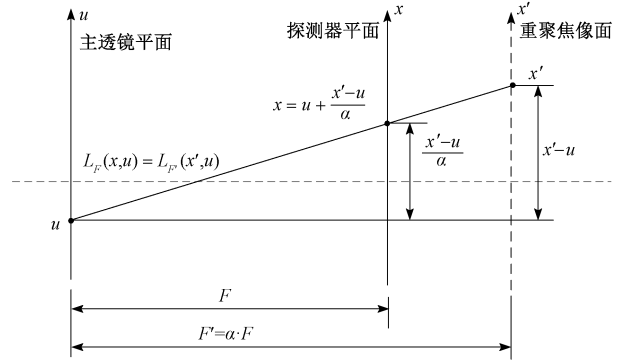


图7 参数关系

Fig. 7 Parameter diagram

对于同一条光线其光辐射量的值相同,于是 $L_{(F'=\alpha F)}(x',y',u,v) = L_F(x,y,u,v)$ 简写成二维形式为 $L_{F'}(x',u) = L_F(x,u)$ 。由图7光线与 u,x,x' 三个平面的交点比例关系可知:

$$x = u + \frac{x' - u}{\alpha} \quad (3)$$

于是:

$$L_{F'}(x',u) = L_F(x,u) = L_F\left(u + \frac{x' - u}{\alpha}, u\right) \quad (4)$$

所以,重聚焦后的光场为:

$$L_{(F'=\alpha F)}(x',y',u,v) = L_F(x,y,u,v) = L_F\left(\frac{x'}{\alpha} + u\left(1 - \frac{1}{\alpha}\right), \frac{y'}{\alpha} + v\left(1 - \frac{1}{\alpha}\right), u, v\right) \quad (5)$$

重聚焦像面的积分数字图像为:

$$E_F(x',y') = \frac{1}{\alpha^2 F^2} \iint L_F\left(\frac{x'}{\alpha} + u\left(1 - \frac{1}{\alpha}\right), \frac{y'}{\alpha} + v\left(1 - \frac{1}{\alpha}\right), u, v\right) du dv \quad (6)$$

根据上述公式,对于不同对焦深度的重聚焦像平面,选取不同的 α 值进行积分运算,便可以用获取的标准四维光场信息计算出其成像图像。

2.2 散射背景分离

利用光场重聚焦原理对物体表面照射激光点所在平面重聚焦成像,获取激光点对焦清晰图像,设此时 $\alpha = 1$ 。改变对焦深度($\alpha > 1$),对前景重聚焦,获取物面前景重聚焦图像。如图8(a)所示, s_1 平面是激光点 A' 的聚焦平面,其到透镜的距离为 F , s_2 是改变对焦深度后的散射光重聚焦平面,其到透镜的距离为 F' 。

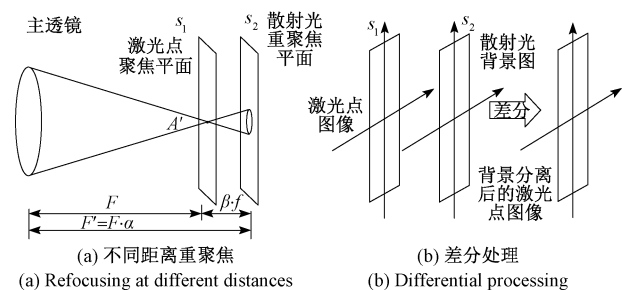


图8 水下光场重聚焦及差分处理

Fig. 8 Underwater optical field refocusing and differential processing

考虑到在一定深度范围内散射光能量呈各向均匀性,因此在 α 变化适当范围内,得到的散射背景光场强度基本相同,而由于离焦的原因,像点 A' 能量被消弱。因此,将激光像点 A' 对应的重聚焦图像与其前景重聚焦背景散射图像作差分处理(图8(b)),即可以起到抑制散射背景光的作用,达到激光像点与散射背景光分离的目的。

光场相机内部程序是通过改变对焦深度系数 β 对不同深度平面进行重聚焦处理,其中 β 与 α 的关系为 $\alpha = \frac{F'}{F} = \frac{F + \beta \cdot f}{F}$,如图8(a)所示。 F 是微透镜阵列到主透镜的距离即主透镜的焦距, f 是CCD成像元件到微透镜阵列的距离即微透镜的焦距。激光点聚焦平面处的 $\alpha = 1$,其相应的深度系数 $\beta = 0$ 。前景重聚焦时, $\alpha > 1$,相应 $\beta > 0$ 。利用光场重聚焦原理对物体表面照射激光点所在平面 s_1 重聚焦成像,获取激光点对焦清晰图像,此时 $\beta = 0$ 。改变深度系数 β ($\beta > 0$),对前景平面重聚焦,获取物面前景重聚焦图像。

实际处理时,需要对两幅重聚焦差分图像所得的反射光点对比度评价,并由计算机自动判定。引进衬度的概念,其定义为^[15]:

$$C = \frac{B_0 - B_b}{B_b} \quad (7)$$

式中: B_0 为差分所得激光点的强度; B_b 为差分所得图像面各像素平均强度值。改变 β 值,得到不同前景深度重聚焦图像,将物面激光点聚焦图像与之差分,按照式(7)计算激光光点衬度。为了获得符合衬度要求的差分图像,计算机自动寻找最合适深度参数 β 值,具体算法流程如下:对激光点重聚焦,此时 β 值为0;首先尝试选择 β 值增长步长 $astep$,对当前 β 值进行前景图像的重聚焦处理;将激光点重聚焦图像与前景重聚焦图像差分,对差分后的激光点图像计算衬度值;按步长增大 β 值,重复上述重聚焦、差分、衬度值计算过程;如果衬度值比前一过程明显减小,如大于0.1以上,则修改步长 $astep$,重复上述过程;如果衬度值比前一过程增大,或只是较小波动,如0.1以内,则继续上述过程;如果衬度值对光点分辨已经足够,如 ≥ 1.0 ,或保持较小范围内波动,如0.1以内,则停止 β 值增长,确定其为合适值。最终得到的差分图像就是将背景散射抑制分离后的激光反射光点图像。这一计算机自动判定过程如图9所示。

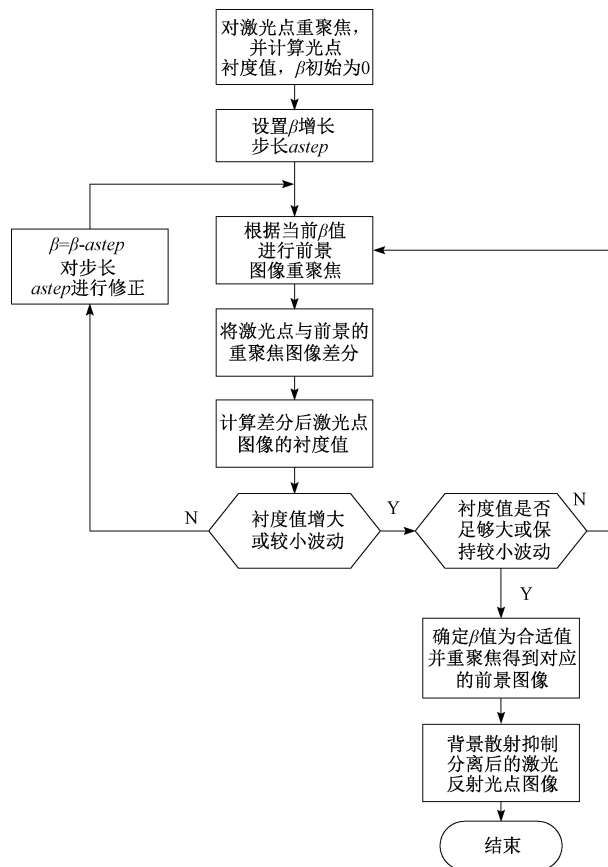


图9 反射光点衬度自动判定流程

Fig. 9 Flow chart of automatic determination of contrast of reflected light points

3 实验及分析

本文采用 Lytro 公司的 Lytro Illum 光场相机,在一水槽中倒入不同量的以改变水的浊度,在不同浊度的水下环境中进行激光主动照射散射背景分离实验。图 10(a)为低浊度水中实验情况,其中图 10(a1)为激光点照射到某一物体表面对焦清晰图像,图像上激光点衬度值为 0.260 2;图 10(a2)为前景散射光图像,其对应的 β 值为 0.9;图 10(a3)为图 10(a1)、(a2)差分后的激光点图像,其衬度值为 2.118 6。图 10(b)为高浊度水中实验情况,其中图 10(b1)为激光点照射到同一物体表面对焦清晰图像,图像上激光点的衬度值为 0.177 9;图 10(b2)为前景散射光图像,其对应的 β 值为 0.9;图 10(b3)为图 10(b1)和(b2)差分后的激光点图像,其衬度值为 1.370 9。处理结果表明对于不同浊度水下环境,通过激光点重聚焦图像与前景散射光差分处理,可以有效的提高图像激光点的衬度。

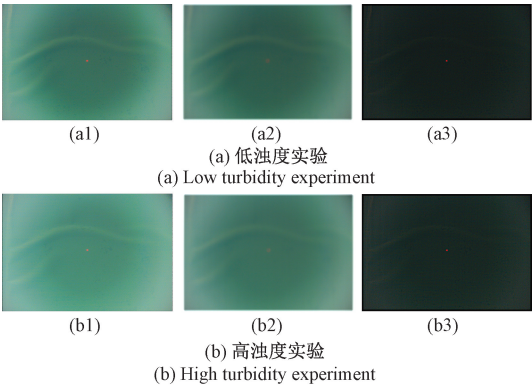


图 10 低浊度及高浊度水环境实验情况
Fig. 10 Experimental situation of water environment with low and high turbidity

实验时需要依靠计算自动判定,以确定合适的前景重聚焦位置,即确定对焦深度系数 β 。对激光点重聚焦清晰位置时 $\beta=0$,实验时取步长 $\Delta\beta=0.05$,计算机通过步长,改变对焦深度系数 β 值,获取不同对焦深度平面的散射光背景重聚焦图像,将激光点重聚焦清晰图像与其进行差分处理得到差分图像,并计算差分后图像激光点的衬度值。表 1 为不同 β 值对应的差分图像上激光点的衬度值。图 11 所示为依据表 1 作出的不同 β 值与差分图像激光光点衬度值的关系曲线。从中可以看出, $\beta=0.55$ 时差分图像上激光点的衬度值已经达到足够大小,足以分辨其位置,程序最终确定的 β 值为 0.55。图 12 所示为选取其中不同 β 值对应的差分处理后的激光点图像。可以看出,当 $\beta=0.55$ 时,对应的差分后图像激光点衬度明显提高。

表 1 不同对焦深度差分后图像上激光点的衬度值
Table 1 Contrast value of laser point on the image after different focusing depth difference

$\beta=0.05$	$\beta=0.1$	$\beta=0.15$	$\beta=0.2$	$\beta=0.25$
0.270 3	0.312 9	0.361 9	0.412 2	0.491 8
$\beta=0.3$	$\beta=0.35$	$\beta=0.4$	$\beta=0.45$	$\beta=0.5$
0.572 2	0.663 9	0.7395	0.842 0	0.922 9
$\beta=0.55$	$\beta=0.6$			
1.011 2	1.096 4			

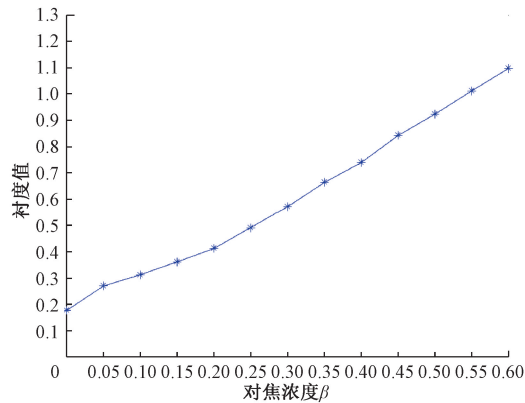


图 11 不同对焦深度系数 β 的差分图像激光点衬度值
Fig. 11 Laser point contrast value of differential image with different focus depth coefficient β

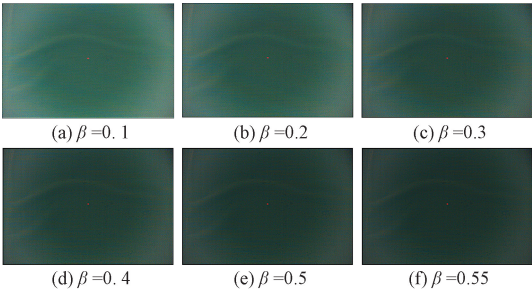


图 12 不同对焦深度系数 β 的差分图像
Fig. 12 Difference image of different focusing depth coefficient β

4 结 论

本文将光场成像技术应用到水下激光主动扫描成像系统,记录了激光系统水下全部光场,包括激光反射光线和各种散射背景杂光的位置和方向信息,为激光反射光与散射背景杂光分离提供了可能。提出一种基于光场前后两次重聚焦,再作差分处理的散射背景光分离算法,第 1 次重聚焦是对激光照射到物面激光光点的重聚焦,第 2 次重聚焦是对激光光点前景散射光的重聚焦,对前后两幅图像差分处理,使差分所得图像上激光点的衬度得以提高。为确定第 2 次重聚焦的合适位置,提出一种计算机自动判断流程,依据这一流程,可确定第二次重聚焦对

焦深度系数 β ,从而使得差分所得图像上激光点的衬度最大,或足够大。实验结果表明,采用光场记录的水下激光主动成像系统,以及以此为基础的散射背景分离算法及计算机自动判定流程,可以达到较好的散射背景抑制作用,是对现有同步扫描主动激光成像空间分离散射背景抑制技术的必要补充。

参考文献

- [1] 全向前,陈祥子,全永前,等. 深海光学照明与成像系统分析及进展[J]. 中国光学,2018,11(2):153-165.
QUAN X Q, CHEN X Z, QUAN Y Q, et al. Analysis and research progress of deep-sea optical illumination and imaging system[J]. Chinese Optics, 2018, 11(2): 153-165.
- [2] 陈超,杨鸿儒,吴磊,等. 水下目标光电探测技术及其进展[J]. 应用光学,2012,32(6):1059-1066.
CHEN CH, YANG H R, WU L, et al. Underwater target detection with electro-optical system[J]. Journal of Applied Optics, 2012, 32(6):1059-1066.
- [3] 杨玉峰,秦建华,李挺. 海水中悬浮物的光散射特性研究[J]. 电子测量与仪器学报,2018,32(7):145-150.
YANG Y F, QIN J H, LI T. Study on the light scattering of suspended particles in seawater[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(7):145-150.
- [4] 朱平安,胡春生. 一种基于距离选通方法的激光主动成像系统研究[J]. 电脑知识与技术,2011,7(11):2645-2646.
ZHU P A, HU CH SH. Research on laser active imaging system based on range gating[J]. Computer Knowledge and Technology, 2011, 7(11):2645-2646.
- [5] 葛卫龙,华良洪,张晓晖. 距离选通水下成像中基于等水体后向散射光能量的目标搜索方法[J]. 红外与激光工程,2013,42(10):2677-2681.
GE W L, HUA L H, ZHANG X H. Target searching method based on equal energy of water backscattering light in range-gated underwater[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(10):2677-2681.
- [6] 王培红. 水下运动目标大范围远距离成像技术研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2010.
WANG P H. The research on image formation technology of underwater movement goal in wide and long-distance[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010.
- [7] 金攀,屠大维,张旭. 水下同步扫描三角测距成像理论建模及仿真分析[J]. 应用光学,2018,39(6):92-98.
JIN P, TU D W, ZHANG X. Theoretical modeling and simulation analysis of underwater synchronous scanning triangulation imaging[J]. Journal of Applied Optics, 2018, 39(6):92-98.
- [8] 徐梦溪,王慧斌,陈婷,等. 三通道同步偏振成像及观测目标检测方法[J]. 仪器仪表学报,2013,34(11):2408-2417.
XU M X, WANG H B, CHEN T, et al. Research on three-channel synchronous polarization imaging and target detection method[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(11):2408-2417.
- [9] 张旭,费凯,屠大维. 同步扫描三角测距成像系统的精确建模与分析[J]. 光电子·激光,2015(2):295-302.
ZHANG X, FEI K, TU D W. Modeling and analysis of synchronized scanning triangulation[J]. Optoelectron · Laser, 2015(2):295-302.
- [10] TU D W, JIN P, ZHANG X. Geometrical model of laser triangulation system based on synchronized scanners[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2019.
- [11] 冯曼,胡国星. 光场成像原理及其历史进程[J]. 中国科技信息,2017(23):47-48.
FENG M, HU G X. Principle and history of optical field imaging[J]. Scientific and Technical Information of China, 2017(23):47-48.
- [12] 杨凡,袁艳,周志良. 光场相机成像质量评价方法研究[J]. 现代电子技术,2011,34(6):4-6.
YANG F, YUAN Y, ZHOU ZH L. Study on imaging quality evaluation of light field camera[J]. Modern Electronics Technique, 2011, 34(6):4-6.
- [13] 张旭,李晨. 微透镜阵列式光场成像模型及其标定方法[J]. 光学学报,2014,34(12):103-115.
ZHANG X, Li C. Calibration and imaging model of light field camera with microlens array[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(12):103-115.
- [14] 周志良. 光场成像技术研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2012.
ZHOU ZH L. Research on light field imaging technology[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2012.
- [15] 孙晶华. 提高水下激光成像衬度的方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2010.
SUN J H, Research on methods to improve the contrast of underwater laser imaging[D]. Harbin: Harbin University of Engineering, 2010.

作者简介



吉勇,2018年于河海大学获得学士学位,现为上海大学硕士研究生,主要研究方向为机器视觉和图像处理。

E-mail:jiyongjohn@shu.edu.cn

Ji Yong received his B. Sc. degree from Hohai University in 2018. He is currently a

M.Sc. candidate at Shanghai University. His main research interests are machine vision and image processing.



屠大维 (通信作者), 分别在 1987 年、1989 年和 1993 年在浙江大学分别获得学士学位、硕士学位和博士学位, 现为上海大学教授、博士研究生导师, 主要研究方向为光电检测、精密机械及仪器、机器视觉及伺服控制等。

E-mail: tdw@shu.edu.cn

Tu Dawei (Corresponding author) received B. Sc., M. Sc. and Ph. D. from Zhejiang University in 1987, 1989 and 1993, respectively. He is currently a professor and doctoral supervisor at the School of Mechanical Engineering and Automation of Shanghai University. His main research interests are photoelectric detection, precision machinery and instruments, machine vision and servo control.