

基于计算集成成像的水下目标成像

赵雪微¹, 王尧尧¹, 宋丽培¹, 张勃¹, 赵星^{1,2}

¹南开大学现代光学研究所光学信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300350;

²天津市光电传感器与传感网络技术重点实验室, 天津 300350

摘要 针对水下遥操作作业时目标深度定位及水下复杂环境成像困难的问题, 利用基于相机阵列的信息获取系统, 使用基于深度的集成成像三维重建算法及相邻像素灰度方差评价函数, 实现了一次处理可同时实现有遮挡情况下目标的深度估计及清晰成像。应用 LabVIEW 软件编程建立了 CCD 相机自动扫描阵列成像系统, 对存在遮挡物的水中目标场景进行成像及深度重建实验, 场景中位于不同深度的 3 个独立目标重建深度值与实际深度值的误差分别为 0.21%、1.26% 和 1.34%。实验结果表明, 应用该方法仅需一次重建即可去除遮挡物, 并获得目标的深度值。

关键词 成像系统; 集成成像; 计算重建; 水下成像; 深度获取

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0109001

Underwater Target Imaging Based on Computational Integral Imaging

Zhao Xuewei¹, Wang Yaoyao¹, Song Lipei¹, Zhang Bo¹, Zhao Xing^{1,2}

¹Key Laboratory of Optical Information Science and Technology, Ministry of Education, Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300350, China;

²Tianjin Key Laboratory of Optoelectronic Sensor and Sensing Network Technology, Tianjin 300350, China

Abstract To solve the problems of depth location of underwater targets and complex underwater imaging environment during underwater teleoperation, an information acquisition system based on the camera array and an integral imaging three-dimensional reconstruction algorithm based on depth and sum modulus difference evaluation function are used to achieve the target depth estimation and clear imaging with occlusion simultaneously. A CCD camera automatic scanning array imaging system is established by the programming of LabVIEW software. Imaging and depth reconstruction experiments of occluded underwater targets are carried out. Errors of three independent targets' reconstruction depths and the actual depths at different depth are 0.21%, 1.26% and 1.34% respectively. Experimental results show that this method can remove the occlusion and obtain the depth value of target simultaneously after only one reconstruction.

Key words imaging systems; integral imaging; computational reconstruction; underwater imaging; depth acquisition

OCIS codes 110.6880; 110.1758; 100.6890

1 引 言

随着人类海洋活动的展开, 水下作业需求越来越多。水下遥操作是解决水下作业需求的有效方法。遥操作系统, 也称为临场感遥控作业系统,

是一种基于人机交互的机器人作业系统, 研究水下目标的精准定位和清晰成像将对遥操作作业有重要的指导作用。目前对水下目标定位已经取得了一定的研究成果^[1]。肖心远等^[2]提出基于极线约束的立体匹配方法, 实现了双目立体视觉的空

收稿日期: 2017-07-27; 收到修改稿日期: 2017-08-23

基金项目: 国家自然科学基金(11474169, 61675100)、天津市应用基础与前沿技术研究计划(15JCYBJC16900)

作者简介: 赵雪微(1993—), 女, 硕士研究生, 主要从事三维成像技术及光学信息处理方面的研究。

E-mail: 13752018753@163.com

导师简介: 赵星(1980—), 男, 博士, 教授, 主要从事三维成像技术、应用光学及光学信息处理等方面的研究。

E-mail: zhaoxingtjnk@nankai.edu.cn(通信联系人)

间定位,匹配精度满足水下焊缝作业跟踪要求。徐筱龙等^[3]通过对陆地机器人采用的单目视觉定位算法 MonoSLAM 进行分析改进,提出了水下单目视觉定位算法,视觉定位精度得到较大提高。吴清潇等^[4]提出一种基于单目视觉位姿测量原理的水下机器人悬停定位方法,利用 3 个特征点间的位置约束来求解特征点的空间坐标,可实时精确测量观察目标的三维位姿。除了目标精准定位外,目标的清晰成像也是水下作业状态监控的重要需求,但由于水下的特殊环境,水下成像时目标物经常受到多种遮挡物的干扰,影响作业过程的实时监控。以水下焊接为例,水下焊接时电弧的加热作用会使水发生汽化,产生大量气泡,对焊接区域造成扰动,影响成像清晰度。水下焊接过程中不可避免地会产生大量烟尘、金属碎屑等,由于水的作用,不能被及时排开,给焊接过程的遥感操控带来困难。目前,针对这些问题,一般采取图像处理方法来提高图像质量^[5]。徐鹏飞等^[6]针对水下各种干扰,分析了干扰产生的原因及相应的图像处理办法。肖心远等^[7]采用复合滤光片有效去除弧光的影响,针对图像模糊、对比度低的特点,采用模糊增强图像处理技术,结合最大类间方差法选择最佳阈值,得到了精细的提取边缘。何银水等^[8]采用模糊集方法获得局部阈值,用贝叶斯最小概率模式识别对 V 形焊缝线进行识别,可准确得到焊缝中心位置。

以上对深度定位的研究大都采用单目或双目视觉系统,单目视觉系统装置简单,数据量少,但要获得物体的深度信息,必须操控机器人从不同角度拍摄,实时性差。双目立体视觉系统利用两台摄像机拍摄同一场景的两个不同角度的信息,并对拍摄信息进行处理,其对深度的获取建立在视差的计算上;该系统要求两台相机的摆放要成一定的几何角度,视野重合面积越大越好,考虑相机光轴的交角时定位算法比较复杂;不考虑交角时定位会产生较大误差。对于水下复杂环境下目标物的清晰成像,以上单目或双目视觉系统必须经过一系列复杂的图像处理过程,不能同时获取物体深度信息及严重遮挡时物体的清晰图像。由此可见,传统技术方法中,目标定位与遮挡下清晰图像的获取是两个相互独立的过程,需要用原理完全不同的算法分别完成,难以集成于一次处理过程中。多目立体视觉系统可利用由多个相机组成的相机阵列同时从不同角度对同一场景进行成像,获得物体不同视角的信息。相比于单目

视觉系统,多目立体视觉系统获得了更多维度的目标信息,为在水下目标成像应用中,通过一次信息处理同时实现水下目标的深度定位和清晰成像提供了可能。集成成像技术基于一种多目立体视觉系统,已广泛应用于三维图像识别、三维场景可视化、立体显微成像技术等领域^[9-12]。本文将集成成像三维重建技术应用到水下目标定位及成像中,只需一次计算即可同时得到目标物的深度信息和遮挡时目标的清晰成像,达到了同时获取目标物深度信息及解决水下作业过程中各种遮挡物遮蔽问题的目的。

2 基本原理

2.1 计算集成成像技术

集成成像可采用透镜阵列或相机阵列快速获取目标不同视角的信息,并将所有元素图像(每个记录三维物体不同视角信息的图像)组合成为元素图像阵列(EIA)。依据光路可逆原理,将与记录参数相同的透镜阵列置于 EIA 前,即可重新会聚 EIA 发出的光线,实现三维场景的光学重现^[13]。如使用计算机仿真这一再现过程,利用计算集成成像技术可突破硬件参数的限制,获得效果更好的三维场景数字再现。基于深度的集成成像三维重建算法是目前研究应用最为广泛的计算重构方法之一^[14]。图 1 为该重建算法的示意图。根据小孔成像原理,将每一个元素图像通过对应的针孔反向投影放大到物空间,在深度重建平面内进行重叠可以还原出三维场景某一特定深度平面内的信息,重叠部分的灰度信息由此位置处所有投影像素点的灰度均值决定。通过在不同的深度位置处重复以上过程,就可以得到完整的物体三维信息。

图 2 通过在 xoy 平面内展示元素图像 I_p 投影到深度为 z 的平面上的过程,说明了这种重建算法的计算原理,其中 g 为 EIA 与透镜阵列之间的距离。将该原理扩展到三维空间中,当第 p 行、第 q 列的元素图像 I_{pq} 以放大率 $M = z/g$ 投影到深度为 z 的重建平面上时,根据光度学中的距离平方反比定律,元素图像 I_{pq} 对重建平面上坐标为 (x, y) 的像素灰度值 $O_{pq}(x, y)$ 的贡献可以表示为^[14]

$$O_{pq}(x, y) = \frac{I_{pq} \left(s_x p - \frac{x - s_x p}{M}, s_y q - \frac{y - s_y q}{M} \right)}{(z + g)^2 + [(x - s_x p)^2 + (y - s_y q)^2] \left(1 + \frac{1}{M} \right)^2}, \quad (1)$$

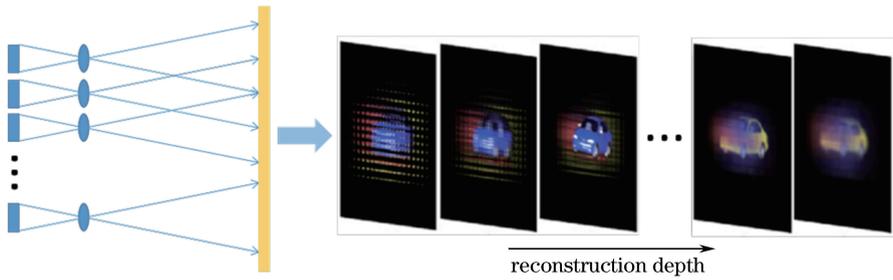


图 1 深度重建算法原理示意图

Fig. 1 Principle diagram of depth reconstruction algorithm

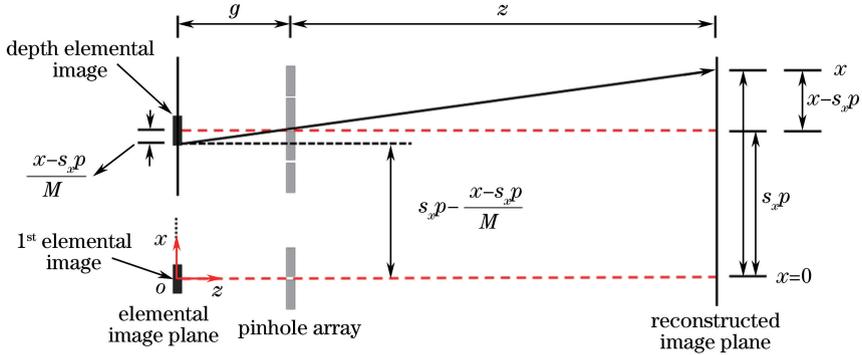


图 2 深度重建方法的计算原理

Fig. 2 Calculation principle of depth reconstruction method

式中 s_x 和 s_y 为单个元素图像在 x 方向和 y 方向上的大小,分母为深度为 z 的平面内投影像素 $O_{pq}(x, y)$ 到元素图像上对应像素距离的平方,坐标 x 和 y 的取值范围分别满足 $s_x(p - M/2) \leq x \leq s_x(p + M/2)$ 和 $s_y(q - M/2) \leq y \leq s_y(q + M/2)$ 。

当所有元素图像在深度为 z 的平面上投影叠加后,坐标为 (x, y) 的像素灰度值 $O(x, y)$ 即为所有投影在此处的像素灰度值的平均值,其表达式为

$$O(x, y) = \frac{\sum_{p=0}^{m-1} \sum_{q=0}^{n-1} O_{pq}(x, y)}{mn}, \quad (2)$$

式中 m 和 n 分别为 x, y 方向上元素图像的个数。

2.2 基于集成成像技术的水下目标成像及重建方法

相机阵列记录系统可以获得大视场、高分辨率的元素图像,适用于实际大场景的三维成像。考虑到水下成像环境的特殊性,为了获得较好的图像质量,可以利用相机阵列成像系统快速获取水下目标不同视角的物体信息。

将获取的 EIA 用于上述计算集成成像重建过程中,如图 3 所示,将所有元素图像反向投影叠加,若物点 A 的实际深度与重建平面 1 的深度相同,则 A 在所有元素图像上的记录像点 $A'_i (i=1, 2, 3, 4, 5)$ 经过叠加重建后将会聚重叠于重建平面 1 上的同一位置,形成清晰的重建像点 A'' ,此时,位于其他深

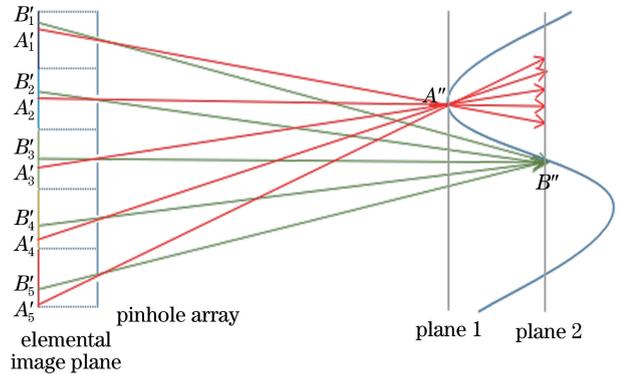


图 3 重建像的聚焦与离焦

Fig. 3 Focus and defocus of reconstruction images

度处的物点 B 在重建平面 1 上无法重叠于同一位置,形成弥散的光斑,即出现离焦模糊现象。同理,在重建平面 2 上将会得到清晰重建像点 B'' 和 A 的模糊重建像,从而可区分不同深度的物点信息。利用计算集成成像重建算法可一次重建得到沿轴向具有不同深度值 z 的图像序列,且随着重建深度 z 的变化,三维场景中位于不同深度的物体,将会在图像序列中以清晰聚焦和模糊离焦的重建像交替出现,因此,对于一次重建所得的图像序列,不仅可以通过对深度平面重建像的聚焦评价精确获取目标深度信息,还能同时有效去除位于其他深度平面内的遮挡信息。将该方法应用到水下目标成像中时,可以通

过一次信息处理同时实现水下目标的深度定位和清晰成像。

水下目标成像时一般存在水体浑浊、照明不均等普遍问题,因此,在应用计算集成成像技术进行信息处理前,也需要仿照传统方法采用降噪、增强对比度等技术对图像进行预处理,以适应水下特殊的成像环境。在一次重建获得图像序列后,为精确确定目标深度,可采用相邻像素灰度方差(SMD)评价函数对深度平面重建像进行聚焦评

价^[15]。SMD函数是一个形式简单但很有效的聚焦评价函数,广泛应用于序列图像的聚焦评估。在图像内容信息基本不变的情况下,将图像相邻像素差的绝对值之和作为评价函数,以函数取最大值作为图像聚焦的判断标准。据此,在应用计算集成成像技术对三维场景进行一次重建时,可以同时计算获得重建序列图像的SMD函数值,并确定目标的深度值。完整的水下目标成像及处理流程如图4所示。

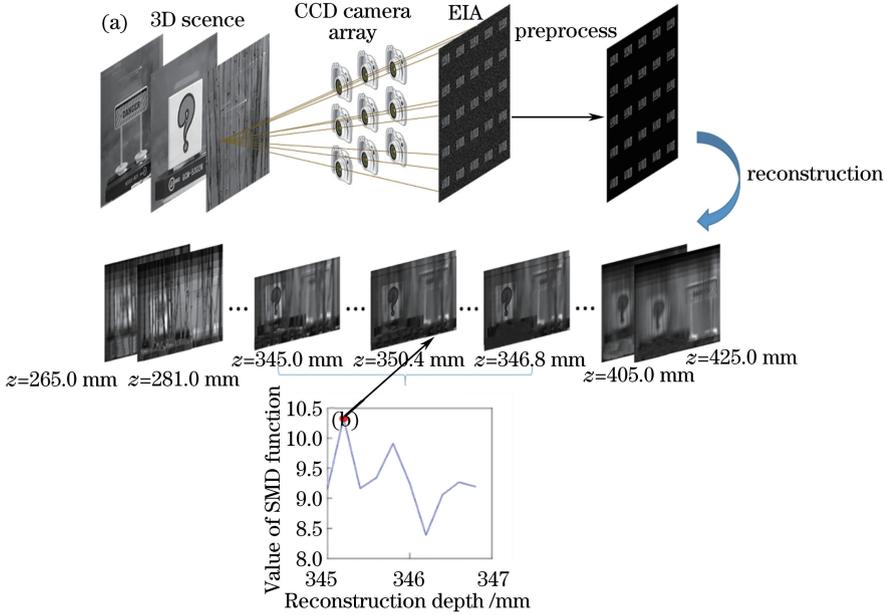


图4 (a)基于计算集成成像的水下目标成像及处理流程图;(b) SMD函数值随重建深度的变化

Fig. 4 (a) Underwater target imaging and processing flow based on computational integral imaging; (b) variation in value of SMD function with reconstruction depth

根据该流程,先由 CCD 相机阵列系统获取目标场景的 EIA,经预处理后应用计算集成成像深度重建算法获得具有不同深度值的图像序列及重建图像的 SMD 函数值,通过 SMD 函数的极大值位置即可确定目标的准确深度值,同时利用聚焦和离焦效应区分不同深度的目标,实现一次信息处理同时获得水下目标的精确深度和清晰图像。

上述处理流程的关键是基于深度的计算集成成像三维重建方法,该方法将每个元素图像反向投影至目标空间深度平面,再经像素叠加得到该深度平面的重建图像,其重建图像的横向分辨率与元素图像分辨率有关,并随重建深度的增加而减小;重建图像序列的纵向最小间隔与成像器件分辨率和阵列维数等参数有关,并随重建深度的增加而增大,且沿轴向呈阶梯状不均匀分布^[12]。由于目标的深度数值是根据重建图像序列的 SMD 函数的最大值确定的,对于基于计算集成成像的水下目标成像而言,重

建图像的横向分辨率和图像序列的纵向最小间隔对于目标深度定位的精度,以及去除遮挡物后目标清晰成像的效果均有影响。

3 实验及结果

3.1 系统搭建及图像记录

为了验证该处理技术可以同时实现目标的深度定位和遮挡物的去除,直接对照明较均匀的清澈水中目标进行成像,将所得图像作为对水下环境目标成像预处理后的结果,用于后续重建和处理。采用 CCD 相机阵列记录物体三维信息,其中 CCD 相机阵列获取由单个 CCD 相机在二维平面上扫描拍摄实现,实验装置如图 5(a)所示。为实现相机在二维平面内的自动扫描拍摄,应用 LabVIEW 软件(LabVIEW 14.0)编程实现了位移台(LSPD-700FG)和 CCD 相机(Chameleon CMLN-13S2M-CS,10 倍变焦物镜)的自动控制,图 5(b)为单个 CCD 相机的扫描路径图。通

过在 LabVIEW 软件中输入 x 方向间隔、 y 方向间隔、相机拍摄时间间隔等参数,即可使 CCD 相机沿

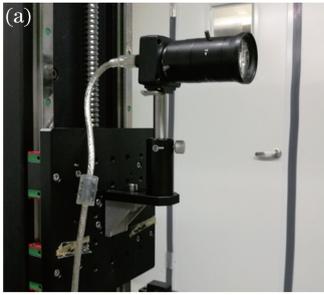


图 5(b)的路径自动扫描拍摄,该系统操作简单,方便控制。

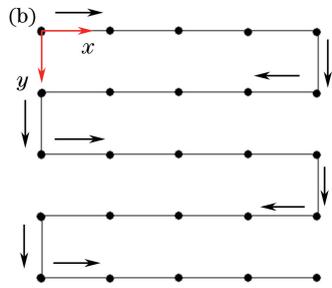


图 5 记录系统。(a) CCD 扫描系统;(b)扫描路径

Fig. 5 Record system. (a) CCD scanning system; (b) scanning path

图 6 为实验场景示意图。用装有水的容器模拟水下环境,三维场景为标有“DANGER”字样的警示牌和符号“?”组成,在该三维场景前方放置了一些用于遮挡的树枝,用来模拟水下焊缝时障碍物遮挡的影响。遮挡物与镜头间的距离 $z_1=281.4$ mm,符号“?”与镜头间的距离 $z_2=350.4$ mm,“DANGER”警示牌与镜头间的距离 $z_3=403.4$ mm。实验参数如表 1 所示。

可以看到,由于前方遮挡物的存在,后面的三维目标场景被部分遮挡,不能识别。

表 1 实验参数

Table 1 Experimental parameters

Parameter	Value
Resolution of CCD /pixel×pixel	1296×964
Pixel size / μm	3.75
Size of image plane /mm×mm	4.86×3.62
Total number of elemental images	25
Focal length of camera f /mm	60

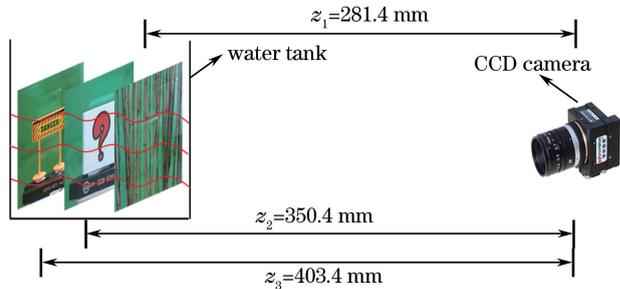


图 6 实验场景示意图

Fig. 6 Schematic of experimental scenes

面阵 CCD 的像素数为 1296 pixel×964 pixel,设定 CCD 的扫描间隔为 5 mm,对三维物体进行扫描式阵列记录,对记录得到的元素图像进行裁剪拼接,得到 EIA,如图 7(a)所示。图 7(b)、(c)为不同视角下的单个元素图像。从得到的元素图像中

3.2 重建实验与结果

在三维场景再现过程中,采用基于深度的集成成像三维重建算法实现对三维场景不同深度目标物体的重建,得到了如图 4 中所示的沿轴向具有不同深度值 z 的图像序列和相应的 SMD 函数值。将一定范围内不同深度的重建图像 SMD 函数值绘制成如图 8 所示的曲线图,其中图 8(d)~(f)分别为图 8(a)~(c)虚线部分的局部放大结果。根据 SMD 函数的峰值可以确定树枝遮挡物、符号“?”和警示牌的深度值分别为 282.0、345.2、409.0 mm,与物体实际深度分别存在 0.21%、1.26%、1.34% 的误差,误差值在可接受的范围内。

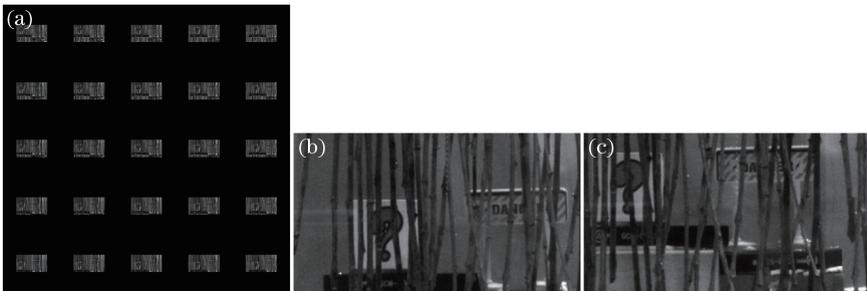


图 7 记录的图像。(a) EIA;(b)元素图像(第 1 行、第 1 列);(c)元素图像(第 5 行、第 5 列)

Fig. 7 Recorded images. (a) EIA; (b) elemental image (first row, first column); (c) elemental image (fifth row, fifth column)

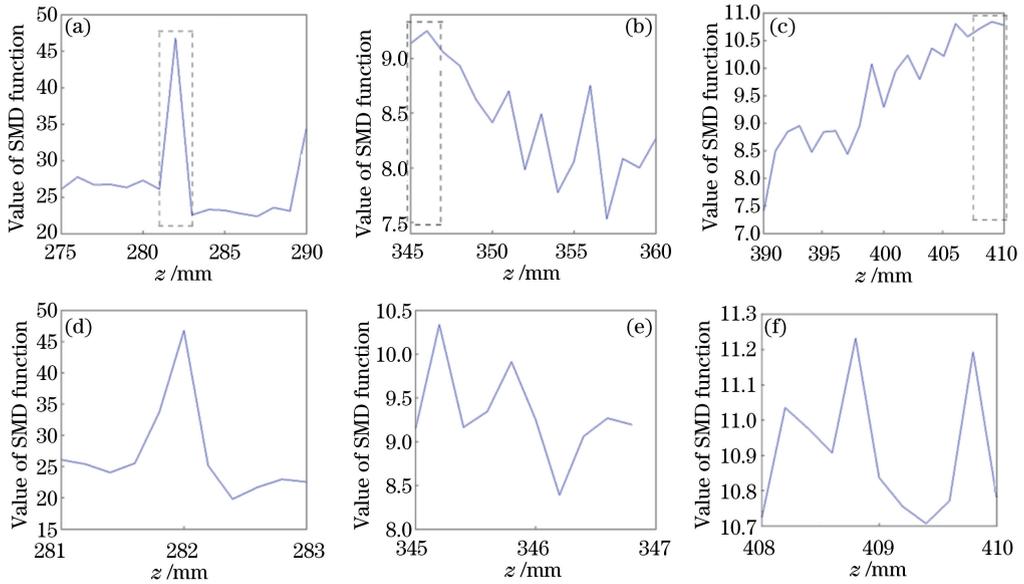


图 8 深度范围为(a) 275~290 mm, (b) 345~360 mm 和(c) 390~410 mm 的 SMD 函数值;
(d)~(f)图 8(a)~(c)中虚线部分的放大结果

Fig. 8 Values of SMD function at depth ranges of (a) 275-290 mm, (b) 345-360 mm and (c) 390-410 mm;
(d)-(f) enlarge images of dashed line part in Figs. 8(a)-(c)

相应的深度平面重建图像如图 9(a)~(c)所示。从图 9(b)和图 9(c)中可见,通过一次重建处理,可以得到目标的精确深度数值,重建过程中的离焦效应有效去除了树枝遮挡物对目标成像的影响,

使得三维场景中不同深度的目标信息可以被清晰识别。从图中结果可知,由于重建图像分辨率与重建深度有关,因此随着重建深度的增加,重建图像的分辨率和遮挡物的去除效果也有所下降。



图 9 不同深度的重建图像。(a) $z=282.0$ mm; (b) $z=345.2$ mm; (c) $z=408.8$ mm

Fig. 9 Reconstruction images at different depths. (a) $z=282.0$ mm; (b) $z=345.2$ mm; (c) $z=408.8$ mm

由实验结果可知,使用基于深度的计算集成成像三维重建方法,能够实现水下目标场景三维信息的计算重建,与传统的水下目标定位与图像处理技术相比,该方法只需要对信息进行一次重建处理,便可以同时实现水下目标的深度定位和遮挡物的去除,满足水下复杂环境下对目标同时进行深度定位和清晰成像的要求。

次重建处理后,获得具有不同深度值的图像序列。通过对深度平面重建像的聚焦评价,不仅可精确获取目标深度信息,还能去除位于其他深度平面内的遮挡信息。实验结果表明,该系统以及深度重建方法,可以在精确获得目标物深度信息的同时,有效解决水下复杂环境中目标物被严重遮挡的问题,对水下遥操作作业时目标的定位和清晰成像有一定的理论指导作用。

4 结 论

基于计算集成成像方法研究了水下复杂环境下成像过程中目标的精确定位和清晰成像技术。采用 CCD 相机自动扫描系统获取高分辨率的二维 EIA,利用基于深度的计算集成成像三维重建算法进行一

参 考 文 献

[1] Zhang Q, Dong Y, Li H B, *et al.* Underwater curve constraint model based on non-parallel binocular vision [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(3): 0315001.

- 张强, 董玉, 李海滨, 等. 非平行双目视觉系统水下成像的极线约束模型[J]. 光学学报, 2016, 36(3): 0315001.
- [2] Xiao X Y, Jiang B, Ni J Z, *et al.* Research on underwater welding seam feature matching of robot binocular vision based on epipolar constraint[J]. *Manufacturing Automation*, 2012, 34(5): 119-123.
肖心远, 蒋波, 倪江忠, 等. 基于极线约束的机器人双目视觉水下焊缝特征匹配研究[J]. 制造业自动化, 2012, 34(5): 119-123.
- [3] Xu X L, Xu G H, Chen J. Mono-vision localization system of underwater robot[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2010, 29(7): 109-114.
徐筱龙, 徐国华, 陈俊. 水下机器人的单目视觉定位系统[J]. 传感器与微系统, 2010, 29(7): 109-114.
- [4] Wu Q X, Li S, Hao Y M, *et al.* Model-based vision for station keeping of an underwater vehicle[J]. *Chinese High Technology Letters*, 2005, 15(10): 27-32.
吴清潇, 李硕, 郝颖明, 等. 基于模型的水下机器人视觉悬停定位技术[J]. 高科技通讯, 2005, 15(10): 27-32.
- [5] Wang B, Wan L, Li Y, *et al.* Underwater laser image segmentation method based on adaptive pulse coupled neural networks[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(4): 0410004.
王博, 万磊, 李晔, 等. 基于自适应脉冲耦合神经网络的水下激光图像分割方法[J]. 光学学报, 2015, 35(4): 0410004.
- [6] 徐鹏飞, 张华, 贾剑平, 等. 水下焊接机器人视觉传感系统图像干扰因素分析[J]. 焊接, 2008, 5: 33-37.
- [7] Xiao X Y, Shi Y H, Wang G R, *et al.* Research on binocular stereo vision system of robot underwater seam tracking [J]. *Welding Technology*, 2009, 38(1): 37-40.
肖心远, 石永华, 王国荣, 等. 机器人水下焊缝跟踪中双目立体视觉系统[J]. 焊接技术, 2009, 38(1): 37-40.
- [8] He Y S, Yang J, Yu Z H. Recognition for underwater welding seam based on laser vision system [J]. *Electric Welding Machine*, 2012, 42(11): 15-20.
何银水, 杨杰, 余卓骅. 基于激光视觉系统的水下焊接焊缝识别[J]. 电焊机, 2012, 42(11): 15-20.
- [9] Sawada S, Kakeya H. Integral volumetric imaging using decentered elemental lenses[J]. *Optics Express*, 2012, 20(23): 25902-25913.
- [10] Burckhardt C B. Optimum parameters and resolution limitation of integral photography[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1968, 58(1): 71-76.
- [11] Javidi B, Okano F, Son J-Y. Three-dimensional imaging, visualization, and display[M]. New York: Springer, 2009.
- [12] Zhang J, Zhou L Q, Zhang B, *et al.* Study on reconstruction resolution of integral imaging technique based on ray-tracing method [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(11): 1108004.
张娟, 周立秋, 张勃, 等. 基于光线追迹的集成成像技术重建分辨率研究[J]. 中国激光, 2015, 42(11): 1108004.
- [13] Hong J, Kim Y, Choi H-J, *et al.* Three-dimensional display technologies of recent interest: Principles, status, and issues [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(34): H87-H115.
- [14] Hong S-H, Jang J-S, Javidi B. Three-dimensional volumetric object reconstruction using computational integral imaging[J]. *Optics Express*, 2004, 12(3): 483-491.
- [15] Cui Z L, Xu C S. Research of quantitative measurements of image sharpness[J]. *Experimental Technology and Management*, 2012, 29(5): 49-51.
崔作龙, 徐长松. 图像清晰度的量化测量探究[J]. 实验技术与管理, 2012, 29(5): 49-51.