

水下超视距三角形距离能量相关三维成像(特邀)

王新伟^{1,2}, 孙亮¹, 雷平顺¹, 范松涛¹, 董晗¹, 杨于清¹, 钟鑫¹, 陈嘉男¹, 何军¹, 周燕^{1,2}

- (1. 中国科学院半导体研究所 光电系统实验室, 北京 100083;
2. 中国科学院大学 电子电气与通信工程学院, 北京 100049)

摘要: 水下超视距三角形距离能量相关三维成像是一种新型的快速非扫描三维成像技术, 可填补水下摄像机(空间分辨率高但作用距离近、无三维信息)与水下声呐(作用距离远但空间分辨率低)间的技术空白。介绍了水下距离能量相关三维成像国内外研究进展, 并重点介绍中国科学院半导体研究所在水下成像方面开展的三角形距离能量相关三维成像的研究工作, 提出了一种融合多脉冲延时积分的三角形距离能量相关三维成像, 梳理了多脉冲延时积分景深调节技术下的典型时域工作参数, 研制的水下激光选通三维成像系统“绿瞳”、“凤眼”和“龙睛”可实现探测距离大于 4.8 AL 的超视距百万像素三维成像, 已用于渔网等微小目标探测、海洋生物原位探测、水下光学详查等应用中。

关键词: 距离选通三维成像; 距离能量相关; 水下超视距成像; 水下成像

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0903001

Underwater 3D triangular range–intensity correlation imaging beyond visibility range(*invited*)

Wang Xinwei^{1,2}, Sun Liang¹, Lei Pingshun¹, Fan Songtao¹, Dong Han¹, Yang Yuqing¹, Zhong Xin¹,
Chen Jianan¹, He Jun¹, Zhou Yan^{1,2}

- (1. Optoelectronic System Laboratory, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;
2. School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Underwater 3D triangular range–intensity correlation imaging(RICI) is a novel scannerless 3D imaging technique beyond underwater visibility range, and can fill the current gap between short–range high–resolution conventional video cameras without 3D information and long–range low–resolution sonar systems. The development of 3D RICI was reviewed, and the introduction of 3D triangular RICI in the Institute of Semiconductors, CAS was focused. A 3D triangular RICI with multi–pulse time delay integration method was proposed, and the typical time parameters in the method were given. The prototype 3D range–gated imaging systems of Lvtong, Fengyan, Longjing were established, and can realize

收稿日期:2018–06–13; 修订日期:2018–07–17

基金项目:中国科学院重点部署项目;国家重点研发计划(2016YFC0302503);国家自然科学基金(61875189)

作者简介:王新伟(1982–),男,研究员,博士,主要从事主动成像、激光三维成像、水下成像、智能视频监控等领域的研究。

Email: wangxinwei@semi.ac.cn

3D imaging with 1 360 pixel×1 024 pixel beyond the visibility range of 4.8 AL. The systems have been used in fishnet detection, marine in situ detection, underwater target detection and recognition.

Key words: three dimensional range-gated imaging; range-intensity correlation; underwater imaging beyond visibility range; underwater imaging

0 引言

水下探测是海洋资源开发以及现代海战的关键技术,尤其是可直观显示目标形貌和水下工况的成像技术,倍受水下工程人员、海洋科学家和海军的青睐,成为国际研究热点。经过近 20 年的发展已出现了各种成像声呐和水下摄像机,但是,仍无法满足水下目标搜寻识别^[1-2]、海洋生物原位探测^[3-4]、水下机器人渔网避障^[5]等应用对远距离、快速、高分辨率三维成像的技术需求。

声呐是目前主要的水下遥感设备,但是,由于存在分辨率低、目标边缘模糊、形状畸变等问题,因此,往往难以有效识别目标,无法满足油气管道(直径几十 cm)、水下电缆(直径 cm 级)、水雷、失事舰船飞机、水下文物、渔网(线粗亚 mm~mm 级)、海洋生物等识别应用需求,尤其是自动图像识别十分困难。光学成像可获取直观、高分辨率的图像,且相关图像处理技术成熟,利于判别油气管道腐蚀程度、船体及水工设施裂纹裂缝、残骸文字信息、渔网识别、生物种类等。但是,水下光学成像存在以下问题:

(1) 水下光学成像作用距离近

由于受海水吸收和散射等影响,作用距离较近,通常为两三个衰减长度,往往无法满足远距离探测需求。文中将作用距离超过水下视距的水下光学成像称为超视距成像。该水下视距采用美国 WET Labs 公司定义^[6],其大小为 4.8 个衰减长度。

(2) 难以实现快速、高分辨率水下三维成像

传统水下光学成像只能获得二维强度图像,对于对比度低的目标则无法准确识别。如可获得目标的三维图像,则可利用目标与背景的空间差异以及自身几何形状有效地发现和识别目标。目前较为成熟的水下激光扫描三维成像,虽然距离分辨率较高,但是空间分辨率低,且扫描成像机制导致成像速率低,无法满足海洋生物量化分析、水下机器人目标搜寻识别

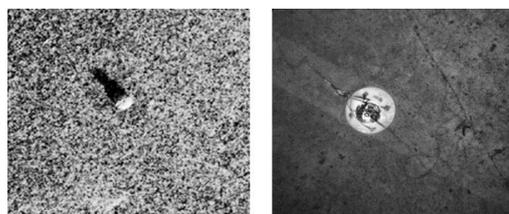
及渔网避障等应用中快速、高分辨率探测技术需求。

综上所述及分析,传统的成像声呐和光学成像难以满足水下目标搜寻识别、海洋生物原位探测、水下机器人渔网避障等应用对远距离、快速、高分辨率三维成像的技术需求,因此,需要发展新型的远距离、快速、高分辨率三维成像技术,同时需具备基本的符合人眼视觉特征的光学二维成像功能,可实现目标高分辨率二维强度图像和三维图像的获取,以满足动目标探测和识别需求。针对此,中国科学院半导体研究所(下面简称中科院半导体所)提出并发展了水下三角形距离能量相关三维成像技术,文中将介绍水下三角形距离能量相关三维成像的工作原理及近年来开展的水下典型应用研究情况。

1 水下三维成像技术发展现状

1.1 水下三维成像技术总体概况

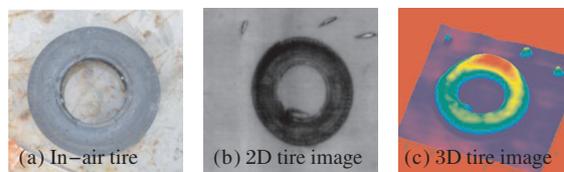
相比声呐成像,光学成像具有分辨高的特点,如图 1 所示,但是,传统的水下光学成像丢失了目标空间信息,无法实现低对比度目标探测,如图 2 所示的轮胎和水雷。而水下三维成像则可利用目标的形貌实现目标的探测和识别,并可对目标距离、特征尺寸等进行测量,满足地形地貌测绘及水下避障等应用。



(a) 声呐图像 (b) 二维光学图像
(a) Sonar image (b) 2D optical image

图 1 水下声呐图像与光学图像^[2]

Fig.1 Underwater sonar and optical images^[2]



(a) In-air tire (b) 2D tire image (c) 3D tire image

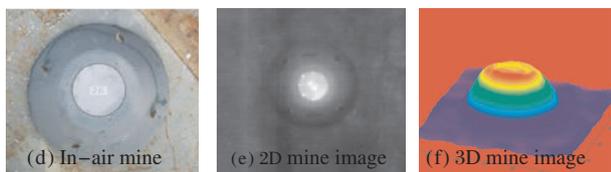


图 2 水下三维图像探测低对比度目标探测^[7-8]

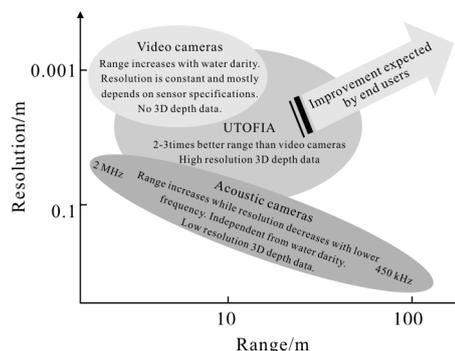
Fig.2 Underwater low contrast target detection based on 3D imaging^[7-8]

目前水下三维光学成像主要有激光扫描三维成像、双目立体视觉三维成像、条纹管三维成像以及距离选通三维成像。其中,双目立体视觉三维成像主要用于<3 m 近距离成像^[9];激光扫描三维成像包括点扫和线扫两种方式,机械扫描工作方式使得实时和高分辨率不可兼得,动平台运动成像时空间分辨率较低,且图像易受运动扰动畸变^[9];条纹管三维成像和距离选通三维成像都能获得目标高分辨率的二维强度图像和三维图像,通过对海水后向散射进行时域滤波处理可将探测距离提高至传统水下成像的两三倍^[10],在水下>10 m 高分辨率探测成像方面具有一定的优势。条纹管三维成像获得图像是条带图像,需要拼接处理才能获得全帧二维图像和三维图像^[8]。不同于条纹管三维成像,距离选通成像则可利用 ICCD 直接获得全帧二维图像,节省了数据量,成像更直观,在快速高分辨率三维成像方面近年来也取得了系列突破。

1.2 水下距离选通三维成像研究现状

2018 年 2 月 12 日欧洲新闻电视台以“下一代水下摄像机”为标题报道了欧盟 UTOFIA 在渔业资源评估的工作。UTOFIA 项目启动于 2015 年 2 月,隶属于欧洲 H2020 计划,该项目由欧洲不同国家的 7 个单位参与,致力于研制下一代水下摄像机,具备视频帧频三维成像功能,相比于传统水下成像探测距离提高两三倍,相比声呐空间分辨率提高 1 个数量级,从而填补水下摄像机(空间分辨率高但作用距离近)与水下声呐(作用距离远但空间分辨率低)间的技术空白,如图 3 所示,用于海洋生物科学研究、渔业资源评估、海底垃圾监测、潜航器自主回收等^[11]。UTOFIA 采用的是距离选通三维成像技术。图 3(b)是 UTOFIA 系统的照片,由水下相机、电源箱、计算机组成,图 3(c)、(d)是其[1, 5]m 典型距离范围内的二

维成像和三维成像效果。UTOFIA 系统的典型指标为:激光器波长 532 nm,重复频率 1 kHz,平均功率约 3 W,激光脉宽 1.8 ns,像素数 1 280×1 024,工作距离



(a) UTOFIA 计划研究目标

(a) UTOFIA project purpose



(b) UTOFIA 系统

(b) UTOFIA system



(c) 二维强度图像

(c) 2D image



(d) 三维图像

(d) 3D image

图 3 欧盟 UTOFIA 计划(2015~2018 年)^[12]

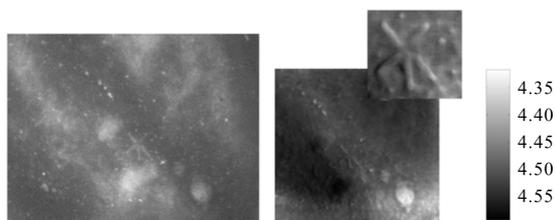
Fig.3 Europe UTOFIA project(2015~2018)^[12]

三四个衰减长度,工作视场(对角线)70°,工作水深 300 m。

目前水下距离选通三维成像技术主要包括时间切片扫描三维成像和距离能量相关三维成像。时间切片扫描三维成像是 2004 年丹麦国防研究组织提出的^[12],该方法通过延时步进扫描的方式获取大量精细空间切片实现三维重建,因此,存在实时性差和数据量大的问题。距离能量相关三维成像技术则有效解决了时间切片选通三维成像存在的实时性差和数据量大的问题,最早由法德圣路易斯研究院 ISL 于 2007 年提出^[13],通过两幅空间交叠的选通图像间的距离能量相关性获取目标距离信息,实现距离超分辨率三维重建,因此,该技术又被称为“距离选通超分辨率三维成像”。目前主要发展了两种距离能量相关三维成像技术,包括法德 ISL 提出的梯形距离能量相关三维成像^[13]和中科院半导体所提出的三角形距离能量相关三维成像^[14],其中前者选通切片图像具有梯形距离能量包络特征,后者具有三角形距离能量包络特征。2014 年以来,法德 ISL 和中科院半导体所分别就梯形和三角形距离能量相关三维成像进行了海试试验。法德 SIL 的 SeaLVi4 系统的照片及三维图像效果如图 4 所示,已开展了水下导航、水雷探测、地形地貌测量等应用研究^[15-16]。



(a) SeaLVi4 系统
(a) SeaLVi4 system



(b) 海星强度图像(左)和三维图像(右)
(b) Starfish intensity image(left)and 3D image(right)

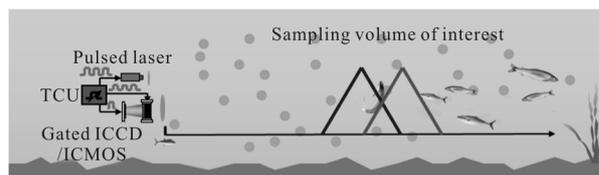
图 4 法德 ISL 的 SeaLVi4 系统及成像效果

Fig.4 SeaLVi4 system from ISL and its images

研究表明^[17-18],相比于梯形距离能量相关三维成像,三角形距离能量相关三维成像的距离分辨率可提高约三倍,因此,在高距离分辨率三维成像方面更具优势。

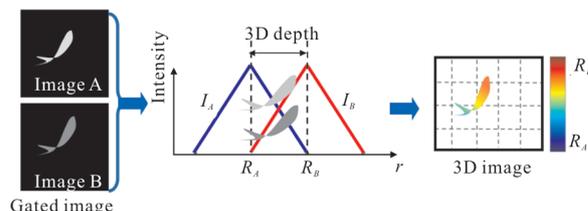
2 水下三角形距离能量相关三维成像

三角形距离能量相关三维成像是中科院半导体所在 2011 年报道的^[19],如图 5 所示。在水下成像应用中,采用蓝绿光脉冲激光器作为照明光源,采用具有选通功能的 ICCD 或 ICMOS 作为成像器件,通过时序控制器 TCU 控制激光脉冲和选通脉冲间延时,实现感兴趣区空间采样。工作中,TCU 产生 ABAB 型工作时序,获取采样区的 ABAB 型二维选通图像序列,其中在 A 型帧中选通脉冲和激光脉冲间的选通延时均为 τ_A ,在 B 型帧中选通延时均为 τ_B 。



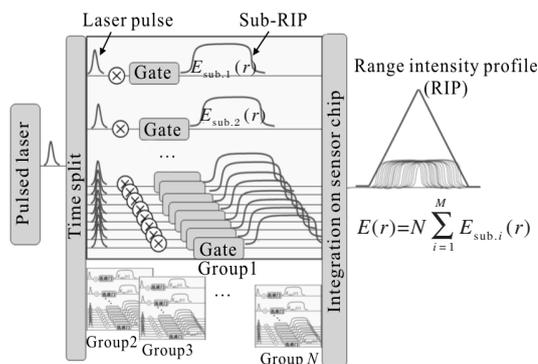
(a) 空间采样场景示意图

(a) Scene scheme of sampling volume



(b) 三角形距离能量相关算法

(b) Triangular range-intensity correlation algorithm



(c) 多脉冲延时积分景深调节技术

(c) Multi-pulse time delay integration method for flexible depth of view

图 5 三角形距离能量相关三维成像

Fig.5 3D triangular range-intensity correlation imaging

为实现三维重建,选通门宽与激光脉宽大小相等,在卷积作用下,当激光脉冲和选通脉冲均为矩形脉冲时,感兴趣空间采样区的距离能量包络为三角形,其中三角形包络的上升沿称为头信号区,下降沿称为尾信号区。延时 τ_A 和 τ_B 满足 $\tau_B = \tau_A + t_L$,其中为 t_L 激光脉宽。如图 5(a)所示 A 帧的尾信号与 B 帧的头信号交叠,通过建立 A 帧和 B 帧交叠区能量灰度比关系可获得目标的距离信息 r 。

$$r = \frac{\tau_A c}{2n} + \frac{I_{\text{head},B}}{I_{\text{head},B} + I_{\text{tail},A}} \frac{t_L c}{2n} \quad (1)$$

式中: $I_{\text{tail},A}$ 和 $I_{\text{head},B}$ 分别是二维切片图像 A 的尾信号区灰度值和二维切片图像 B 的头信号区灰度值; n 为水的折射率。三维成像的景深为:

$$D = \frac{t_L c}{2n} \quad (2)$$

公式(2)表明激光脉宽决定着三角形距离能量相关三维成像的景深。

对于距离能量相关三维成像,无论是梯形相关算法还是三角形相关算法均需要矩形激光脉冲和矩形选通脉冲。激光脉冲和选通脉冲的矩形特征影响着超分辨率三维成像质量,特别是距离分辨率。对于选通脉冲,目前商业用选通 ICCD/ICMOS 的选通门宽已达到百 ps 级,可输出 ns 级至 μs 级矩形选通脉冲。但是,用于水下成像的 532 nm 固体激光器的激光脉形大多为高斯型或类高斯型,难以输出矩形激光脉冲,且激光脉宽难以调节,从而限制了三维成像景深调节。针对此,提出了多脉冲延时积分整形(MPTDI)技术^[20],其工作原理及其工作时序如图 5(c)所示,在成像器件(CCD/CMOS)一帧曝光时间里,含 N 个脉冲组,每个脉冲组含 M 个脉冲对,每个脉冲对内含一个激光脉冲和一个选通脉冲,不同脉冲对内的激光脉冲和选通脉冲间的选通延时不同,从而可实现不同距离处的空间采样,形成 $N \times M$ 幅子帧,并由 CCD/CMOS 实现子帧内积分,各子帧距离能量包络叠加生成目标距离能量包络,从而实现利用窄脉冲激光获得任意脉宽激光脉冲的目的。该方法可利用窄脉冲激光器构造不同景深的梯形或三角形包络,实现工作景深可调的距离能量相关三维成像。

对于 MPTDI 技术下选通图像每个像素获得目标能量为:

$$E(r) = N \sum_{i=1}^M E_{\text{sub},i}(r) = N \sum_{i=1}^M \int_0^{\infty} P(t-2r/c) G(t-\tau_i) dt \quad (3)$$

式中: N 为脉冲组数量; M 为脉冲对数量; $P(t)$ 和 $G(t)$ 分别是激光脉冲和选通脉冲函数; r 为目标距离信息; τ_i 为第 i 个脉冲对选通延时。由公式 (3) 可推出 MPTDI 技术下获得的距离选通切片图像的特征参量如图 6 所示。

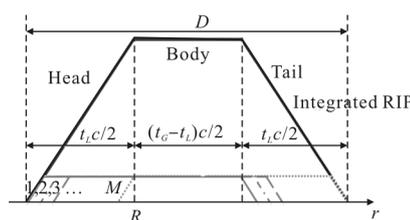


图 6 MPTDI 下的距离能量包络

Fig.6 Range intensity profiles under MPTDI

选通距离 R 为:

$$R = \frac{[\tau_i + (M-1)\delta\tau]c}{2n} \quad (4)$$

等效选通门宽 t_G 为:

$$t_G = t_g \quad (5)$$

等效激光脉宽 t_L 为:

$$t_L = t_l + (M-1)\delta\tau \quad (6)$$

距离选通切片图像的景深 D 为:

$$D = \frac{(t_L - t_G)c}{2n} \quad (7)$$

头信号区景深 D_{head} 为:

$$D_{\text{head}} = \frac{t_L c}{2n} \quad (8)$$

尾信号区景深 D_{tail} 与头信号区景深大小一致。头信号区是指目标距离选通空间能量包络的上升沿,尾信号区是指目标距离选通空间能量包络的下降沿。

多脉冲延时积分景深调节方法解决了 532 nm 矩形方波激光脉冲难以获得以及脉宽不可调无法实现大景深高距离分辨率三维成像的问题,大大拓宽水下选通相关三维成像激光器的选择范围,从而提高成像系统设计的灵活性,增强系统实用性。

3 水下三角形距离能量相关三维成像系统及其应用研究

近年来,中科院半导体所开展了大量三角形距离能量相关三维成像技术的研究工作,包括大气环境下成像和水下成像^[21-24],在水下成像方面研制了系列水下激光三维成像系统,其代表性系统有:

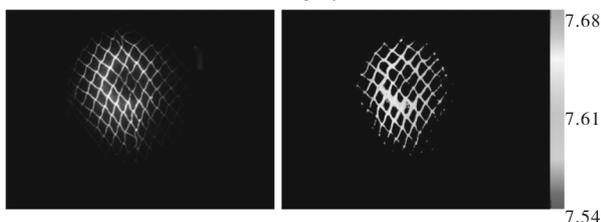
(1) 用于渔网等微小目标探测的超视距激光选通三维成像系统“绿瞳”

超视距激光选通三维成像系统“绿瞳”主要是用于 mm 级渔网等水下微小目标的远距离探测,可服务于水下机器人渔网避障等应用。绿瞳系统采用 532 nm 激光器作为照明光源,重复频率为 30~50 kHz,平均功率不小于 3 W,激光脉宽为 8 ns,选通 ICCD 像素为 1 360×1 024,最小选通门宽不大于 5 ns,三维帧频 5 Hz,成像视场 1~6°,最大工作距离不小于 5 个衰减长度,大于传统水下摄像机的 1~3 个衰减长度的探测距离,最大工作水深 100 m。绿瞳系统的照片如图 7(a)所示,该系统利用三角形距离能像相关三维成像可获得渔网的距离信息,并可利用强度图像进行渔网识别,渔网识别距离可达 5.7 个衰减长度^[25]。图 7(b)是 7.6 m 距离渔网的成像效果。



(a) 绿瞳系统

(a) Lvtong system



(b) 7.6 m 渔网的强度图像(左)和三维图像(右)

(b) Fishnet intensity image(left) and 3D image(right) at 7.6 m

图 7 绿瞳系统及其渔网探测成像效果

Fig.7 Lvtong sytem and fishnet images

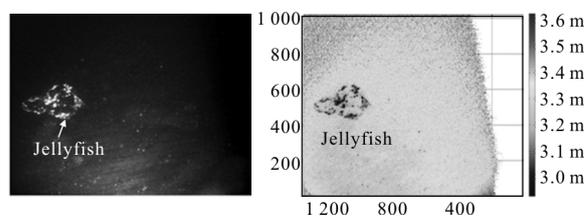
(2) 海洋生物激光三维原位探测系统“凤眼”

海洋生物激光三维原位监测系统“凤眼”采用了融合 MPTDI 的三角形距离能量相关三维成像技术,是一种可实现 mm 级到 cm 级大动态范围海洋生物三维原位监测的装备,可获取海洋生物的尺寸、丰度、运动轨迹等量化信息,典型作用距离 5 m、最小距离分辨率可达 1 cm、最小水平分辨率优于 1 mm,最大工作深度不小于 3 000 m。凤眼系统采用的 532 nm 激光器的脉宽为~1 ns,典型工作频率 30 kHz,平均功率约为 0.5 W,选通 ICCD 像素为 1 360×1 024,最小选通门宽为 3 ns。凤眼系统照片见图 8(a),图 8(b)为 2018 年 6 月底搭载中国科学院深海科学与工程研究所的凤凰号着陆器在南海水域获得约 1 070 m 水深下的水母图像。当前原位探测技术已成为研究海洋生物的技术发展趋势。传统的海洋生物原位探测主要是辅助光源照明的水下摄像机,作用距离受水质影响严重,且二维图像丢失空间信息,只能满足观测需求,难以获得尺寸、数量、丰度、时空分布、运动轨迹等量化信息。凤眼系统可解决上述问题,为海洋生物原位探测及量化分析提供新的手段。



(a) 凤眼系统

(a) Fengyan system



(b) 1 070 m 水深下水母的强度图像(左)和三维图像(右)

(b) Jellyfish intensity image(left) and 3D image(right)

at the depth 1 070 m

图 8 凤眼系统及其水母探测成像效果

Fig.8 Fengyan sytem and jellyfish images

为实现远距离探测,绿瞳和风眼系统采用了小视场工作,无法满足海底管线检测、水下考古、失事舰船飞机搜寻等大范围探测应用,针对此,中科院半导体所还研制了面阵摆扫激光三维成像系统“龙睛”,该系统同样采用了三角形距离能量相关三维成像技术,不同于绿瞳和风眼系统,龙睛系统中采用了扫描转台,可实现面阵摆扫宽幅成像,可同时获得二维强度图像和三维图像。龙睛系统的照片如图 9 所示。



图 9 龙睛系统

Fig.9 Longjing system

4 结束语

文中主要介绍了水下距离选通三维成像技术的研究现状,重点介绍了中科院半导体所三角形距离能量相关三维成像的工作原理和多脉冲延时积分景深调节技术下的典型时域工作参数,并介绍了中科院半导体所近年来研制的水下激光选通三维成像系统绿瞳、风眼和龙睛及其典型应用情况。

近年来,水下三维成像的技术需求日益明确和急迫,特别是在水下机器人等无人平台技术的快速发展的大背景下,无人平台代替潜航员及载人平台完成水下作业已成为技术趋势,包括海洋科学研究、水下工程作业、水下能源开采以及水下军事侦察等应用,水下光学成像需要同时获取高分辨率二维强度图像以及三维图像,其中强度图像可获取目标纹理信息,用于目标识别,三维图像可用于目标定位及量化测量。相比于声呐,水下光学成像的作用距离较近,但是空间分辨率远高于声呐。如何提高水下光学成像的作用距离已成为国际的研究热点,尤其是远距离、快速、高分辨率三维成像。

从时间上看,距离选通成像技术并不是一项新技术,其研究最早可追溯到 20 世纪 60 年代,但是长期受到器件水平的制约,发展缓慢。进入 20 世纪 90 年代,随着激光器和选通成像器件的迅速发展,距离

选通成像技术开始用于水下成像。2004 年提出的时间切片选通三维成像技术实现了距离选通三维成像,但是存在实时性差和数据量的问题。直至 2007 年距离能量相关三维成像技术的提出,才较好地解决了上述时间切片成像存在的问题。经过 10 年的发展,距离能量相关三维成像已在海底地貌测量、水下导航、渔网避障、海洋生物原位探测,水下光学详查等应用中崭露头角。由于距离能量相关三维成像技术继承了距离选通成像抑制海水后向散射作用距离远的技术特点,因此,相比于激光扫描成像、双目立体视觉成像,在远距离、快速、高分辨率三维成像方面具有优势。

综上所述,距离能量相关三维成像技术值得进一步深入研究,有望形成产品及装备提高水下光学探测能力。

致谢:

感谢中国科学院沈阳自动化研究所、中国科学院深海科学与工程研究所等单位对中科院半导体所水下激光选通三维成像系统湖试及海试提供的水下平台支持。

参考文献:

- [1] Russell B Wynn, Veerle A I Huvenne, Timothy P Le Bas, et al. Autonomous Underwater Vehicles (AUVs): Their past, present and future contributions to the advancement of marine geoscience [J]. *Marine Geology*, 2014, 352: 451-468.
- [2] Pivind Midtgaard, Morten Nakjem. Unmanned system for stand-off under water minehunting [C]//Undersea Defence Technology, 2016.
- [3] Maureen Mellody. Robust Methods for the Analysis of Images and Videos for Fisheries Stock Assessment: Summary of a Workshop [M]. Washington DC: The National Academies Press, 2015.
- [4] Sun Xiaoxia, Sun Song. Automated marine plankton image techniques and its application [J]. *Advances in Earth Science*, 2014, 29(6): 748-755.
- [5] Office of Naval Research. Large Displacement Unmanned Underwater Vehicle Innovative Naval Prototype Technology[R]. ONR BAA 11-025, 2011.
- [6] Ronald J, Zaneveld V, Pegau W S. Robust underwater

- visibility parameter [J]. *Optics Express*, 2003, 11(23): 2997–3009.
- [7] Andrew Nevis, Russell J Hilton, Sam J Taylor, et al. The advantages of three-dimensional electro-optic imaging sensors [C]//SPIE, 2003, 5083: 225–237.
- [8] Andrew J Nevis. Automated processing for streak tube imaging lidar data [C]//SPIE, 2003, 5089: 119–129.
- [9] Miquel Massot-Campos, Gabriel Oliver-Codin. Optical sensors and methods for underwater 3D reconstruction [J]. *Sensor*, 2015, 15: 31525–31557.
- [10] Jules S Jaffe, Kad D Moore, John McLean, et al. Underwater optical imaging: status and prospects [J]. *Oceanography*, 2011, 14(3): 64–75.
- [11] <http://www.utofia.eu/>.
- [12] Busck J, Heiselberg H. Gated viewing and high-accuracy three-dimensional laser radar [J]. *Applied Optics*, 2004, 43(24): 4705–4710.
- [13] Laurenzis M, Christnacher F, Monnin D. Long-range three-dimensional active imaging with superresolution depth mapping [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(21): 3146–3148.
- [14] Wang Xinwei, Li Youfu, Zhou Yan. Triangular-range-intensity profile spatial-correlation method for 3D super-resolution range-gated imaging [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(30): 7399–7046.
- [15] David Monnin, Gwenäel Schmitt, Colin Fischer, et al. Active-imaging-based underwater navigation [C]//SPIE, 2015, 9649: 96490H.
- [16] Christnacher F, Laurenzis M, Monnin D, et al. 3D Laser Gated Viewing from a moving submarine platform [C]//SPIE, 2014, 9250: 92500F.
- [17] Wang Xinwei, Li Youfu, Zhou Yan. Triangular-range-intensity profile spatial-correlation method for 3D super-resolution range-gated imaging [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(30): 7399–7046.
- [18] Zhang Xiuda, Wu Yulin, Chen Huifang, et al. High-resolution three-dimensional active imaging with uniform distance resolution [J]. *Optics Communications*, 2014, 312: 47–51.
- [19] Wang Xinwei, Zhou Yan, Fan Songtao, et al. Four-dimensional flash trajectory imaging using time-delay-modulated range-gated viewing [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(3): 364–366.
- [20] Wang Xinwei, Li Youfu, Zhou Yan. Multi-pulse time delay integration method for flexible 3D super-resolution range-gated imaging [J]. *Optics Express*, 2015, 23(6): 7820–7831.
- [21] Wang Xinwei, Liu Xiaoquan, You Ruirong, et al. Three dimensional super-resolution range-gated imaging and its applications [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(8): 0824001. (in Chinese)
王新伟, 刘晓泉, 游瑞蓉, 等. 距离选通超分辨率三维成像及其应用[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(8): 0824001.
- [22] You Ruirong, Wang Xinwei, Zhou Yan. Multi-resolution MCS auto focus method in range-gated imaging system for underwater [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(7): 0726003. (in Chinese)
游瑞蓉, 王新伟, 周燕. 水下距离选通成像多分辨率爬山自动聚焦法[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(7): 0726003.
- [23] Wang Xinwei, Liu Xiaoquan, Ren Pengdao, et al. Underwater three dimensional range-gated laser imaging based on triangular-range-intensity profile spatial-correlation method (Invited paper) [C]//SPIE, 2016, 10020: 1002006.
- [24] Liu Xiaoquan, Wang Xinwei, Ren Pengdao, et al. Automatic fishing net detection and recognition based on optical gated viewing for underwater obstacle avoidance[J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(8): 083101.