

引用格式: SHEN Lei, QIU Su, JIN Weiqi, et al. An Underwater Tomographic 3D Imaging Method and System Based on Binocular Range Gating[J]. Acta Photonica Sinica, 2026, 55(7):0711001

沈磊,裘溯,金伟其,等.一种基于双目距离选通的水下层析三维成像方法与系统[J].光子学报,2026,55(7):0711001

一种基于双目距离选通的水下层析三维成像方法与系统

沈磊¹,裘溯¹,金伟其¹,钟鑫²,朱世豪¹,于相之¹,彭光越¹

(1 北京理工大学 光电学院 光电成像技术与系统教育部重点实验室,北京 100081)

(2 中国科学院半导体研究所 光电系统实验室,北京 100083)

摘 要:针对现有水下光学成像系统探测距离有限、三维成像精度及其实时性较差的局限,提出了一种基于双目选通成像的水下层析三维成像方法,采用高性能三代双选通像增强型互补金属氧化物半导体+蓝绿脉冲激光器,将激光距离选通成像和双目立体视觉结合,研制了一种基于双目距离选通的水下层析三维成像系统。建立了水下相机成像模型及双目参数标定方法,采用基于颜色恒常性的图像增强算法对左、右图像进行增强,通过基于神经网络的快速立体匹配算法得出稠密视差图,结合视差图和双目参数计算得到深度图,获取图像目标的深度信息,实现水下场景的三维重建。实验表明:系统水下探测距离可达6个水体衰减长度以上,在3个衰减长度下的距离分辨率不低于50 mm,帧频不低于25 帧;在水下4.9–5.9 m的探测距离下深度估计误差为10–20 mm,深度差测量误差为2–2.5 mm;在10.19 m,2.83 m,1.95 m三种水体衰减长度下约6.4 m成像距离处的深度估计误差为25–120 mm,深度差测量误差为2.5–6.0 mm。为水下光学成像系统实现远距离三维实时成像提供了一种可行的技术实现方式。

关键词:水下光学成像;层析三维成像;双目立体视觉;水下场景;距离选通;距离分辨率;图像增强

中图分类号:TN29

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20265507.0711001

0 引言

随着海洋资源勘探、开发与利用的日益深入,以及水下工程复杂度日趋提高,实现水下高分辨率成像技术成为众多水下装备作业^[1–3]迫切需要解决的问题。当前水下成像以声呐和光学成像为主,声呐作为目前主要的水下成像设备,存在分辨率低、图像质量差等问题,难以满足小暗目标的探测与识别。水下光学成像技术具有分辨率高、图像质量好等优点,能够有效弥补声呐成像的盲区,但受水质影响较为明显。提高水下光学成像的探测距离、视场和场景三维成像能力成为人们关注的重点^[4]。

水下光学成像技术始终围绕“看得清”和“看得远”这两个问题开展研究,主要影响因素是水体及其所含悬浮微粒等对光束强烈的吸收^[5]和散射^[6]作用。对此,研究人员提出了多种主动或被动水下光学成像方法。被动光学成像是指利用自然光、环境光来获取景物图像的方法(如被动偏振成像^[7]、双目立体视觉成像^[8]、光场成像^[9]等),但由于水体强烈的吸收和散射效应,水下光照的衰减使自然照明只能在浅水区域实现被动成像,且成像距离很短。主动光学成像利用连续光源或激光照明来获取景物图像,其中连续光源照明实现水下三维成像一般采用结构光成像^[10]或双目立体成像方法,但由于水体后向散射使系统成像距离受限,约为1个水体衰减长度(Attenuation Length, AL)。而采用脉冲激光光源,则发展了激光距离选通成像^[11]、单光子成像^[12–13]等模式,是目前水下光学远距离成像的重要模式。

激光距离选通成像通过脉冲激光与成像电子快门的同步和延迟控制,选择性接收景物层析范围的反射

基金项目:中关村国家自主创新示范区优化创新创业生态环境支持基金(20230481197),珠海市科技创新专项基金(2220004003077)

第一作者:沈磊(2001—),男,学生,硕士生,主要研究方向为微光与超宽波段成像。Email: 840488106@qq.com

通讯作者:裘溯(1973—),男,讲师,博士,主要研究方向为光电成像技术与系统。Email: edmondqiu@bit.edu.cn

收稿日期:2026-03-02;录用日期:2026-04-07

<http://www.photon.ac.cn>

信号,减少后向散射光,提高系统成像清晰度,成像距离可达到6-8 AL。目前采用激光距离选通成像获取三维景物信息的方法包括步进延时、增益调制、距离能量相关等^[14-16],此类方法常依赖多帧选通图像序列进行时序或能量解析以实现三维重建,在实时性方面存在一定局限。单光子成像通过探测目标反射的单光子信号并结合时间相关单光子计数技术实现三维重建,可实现远距离探测,但其往往受限于探测器响应特性与数据采集效率,存在系统成本高、成像帧率低等问题。JIN Dongdong等^[17]实现了一种便携式水下激光门控三维成像系统,探测器采用国产二代像增强器与商用相机耦合,系统重量小于15 kg,水下成像距离可达5-7 AL,三维成像精度优于10 mm。WU Guanlin等^[18]设计了基于时间门控选通单光子雪崩二极管(Time Gate-Single Photon Avalanche Diode, TG-SPAD)的水下三维成像系统,通过图像预处理的和三维滤波算法,有效提升了系统水下成像距离和清晰度。LV Sheng等^[19]提出了一种基于偏振差分鬼成像的水下双目三维成像方法,利用鬼成像强抗干扰性的优势,克服水下浑浊介质条件下的非均匀照明问题,实现了对30 mm目标的三维成像。OU Yaming等^[20]设计了一种双目视觉与结构光相结合的三维重构系统,通过引入多频投影技术和多层次特征匹配算法,实现了对水面下目标场景的三维成像。实际上,虽然双目立体成像在陆上和被动成像中已展现出精度与实时性优势,但其被动成像模式受光照限制严重,且由于ns级选通像增强型电荷耦合器件(Intensified Charge-Coupled Device, ICCD)或增强型互补金属氧化物半导体(Intensified Complementary Metal-Oxide-Semiconductor, ICMOS)价高且普及率不足,以往的研究很少涉及水下双目距离选通成像方法。这些研究表明,现有水下光学成像方法往往聚焦于成像距离、清晰度、精度或实时性的单一维度提升,在多指标的协同优化上存在一定局限,三维探测能力不足,因此亟需一种兼顾远距离成像与实时三维重建的水下光学成像方法。

针对现有技术的局限,本文研究一种基于双目距离选通的水下层析三维成像方法,将激光距离选通的水层析成像技术与双目立体视觉的实时三维重建特性相结合,提出一种面向水下场景三维信息获取的系统实现方案,旨在统一框架下实现成像距离、重建精度和实时性的协同优化。结合激光距离选通在水下远距离层析成像的优势,以及双目立体视觉在三维场景重构上的快捷有效性,研制一种基于双目距离选通的水下层析三维成像系统,以快速获取水下目标环境的三维信息,为相关水下成像系统设计提供实验参考。

1 基于双目距离选通的水下层析三维成像系统

1.1 激光距离选通成像方法

典型的激光距离选通成像系统由脉冲激光器、选通成像相机和同步控制模块等组成。其中,同步控制模块保证脉冲激光器和选通成像相机工作时序的同步,并控制激光脉冲和选通脉冲间的延时、门宽和重频等参数。激光距离选通层析成像的工作原理如图1所示^[21],脉冲激光器作为照射光源向目标发射激光脉冲,当经(大气或水体等)传输过程中的散射辐射进入成像系统时,探测器处于关闭状态,系统不产生响应;只有在景物附近反射的辐射传输至成像系统时,电子选通门开启,ICCD或ICMOS成像系统接收并增强信号获得选通图像。由此可屏蔽掉大部分的水体后向散射光,提高目标成像的图像对比度,增加水下光电成像系统的作用距离,具有图像清晰,信噪比、对比度高等优点。图1(b)给出了距离选通成像的时序关系图,其中波形1为脉冲激光输出时钟脉冲, T 为激光脉冲周期,即重频 f 的倒数;波形2为激光脉冲在传输路径上散射介质产生的后向散射;波形3为激光脉冲自目标反射到成像系统的辐射, τ 为同步控制模块设定选通相机开启延迟时间;波形4为成像器件的选通脉冲, t_w 为选通门宽。

1.2 双目立体成像模型

双目立体视觉在两个不同位置获取同一目标左右两幅图像,而后建立两幅图像中该目标相同特征点的匹配关系,对各特征点利用三角测量原理计算得到其三维信息,多特征点三维信息的组合即为该目标的空间三维信息。利用双目立体视觉技术可实现对目标与相机的深度、目标三维大小、空间两点距离等多种信息的感知^[22-24]。双目立体视觉系统对环境目标的三维感知过程,通常包括图像获取、相机标定、图像校正、立体匹配与深度获取。

通常双目立体视觉系统由左/右两个参数相同,且平行的相机同时对目标进行拍摄,获取目标的左/右目图片,计算出目标的深度值。如图2所示, P 是待测三维空间坐标点; O_l 、 O_r 是左和右相机的光心; B 是左右

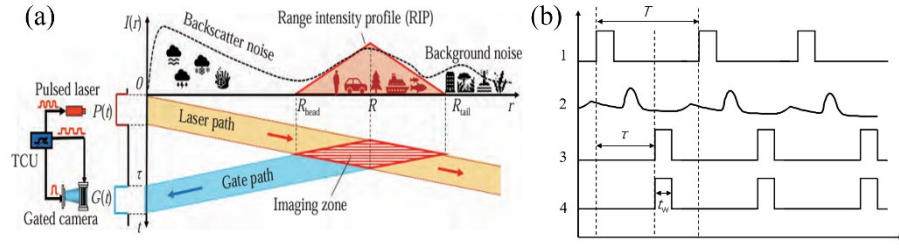


图1 典型激光距离选通层析成像原理图。(a)工作原理;(b)时序关系

Fig.1 Schematic diagram of typical laser range-gated tomographic imaging. (a) Working principle; (b) Timing relationship

相机的光心距离,称为基线距离;左右相机焦距均为 f ; P 点距相机光心的垂直距离为 Z ,即为深度; P_l 、 P_r 是 P 点在左/右相机成像面的投影点,对应横坐标为分别 x_l 和 x_r ,则 P 点在左右相机成像的视差为 $d = x_l - x_r$ 。

由于 $\triangle PO_lO_r$ 与 $\triangle PP_lP_r$ 相似,根据几何关系可得

$$\frac{Z}{Z+f} = \frac{B}{B+x_l-x_r} \quad (1)$$

视差 $d = x_l - x_r$,整理可得

$$Z = \frac{Bf}{d} \quad (2)$$

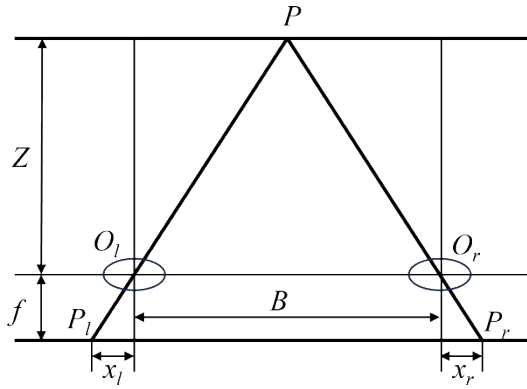


图2 立体视觉模型

Fig. 2 Stereo vision model

由于 B 与 f 为相机内参,可通过相机事先标定获取,精度取决标定方法,一般较为固定和准确;视差 x 由左右相机的像点立体匹配获取,精度除依赖匹配算法外,还受目标环境和距离影响。通过微分法对深度公式进行变换,可得到深度误差 ΔZ 与视差误差 Δd 的关系。对公式(2)两边同时取微分,得

$$\frac{dZ}{dd} = -\frac{Bf}{d^2} \quad (3)$$

从而,深度误差取绝对值后为

$$\Delta Z = \left| \frac{dZ}{dd} \right| \Delta d = \frac{Bf}{d^2} \Delta d \quad (4)$$

联立公式(2)、(4),可得

$$\Delta Z = \frac{Z^2 \Delta d}{Bf} \quad (5)$$

这表明对于远距离物体,即使是小的视差误差 Δd 也会造成较大的深度误差 ΔZ ;相反,增加焦距 f 或基线距离 B 可以减小深度误差 ΔZ 。

1.3 双目距离选通的水下层析三维成像系统设计

本文在典型激光距离选通成像系统的基础上,结合双目立体视觉技术,设计了一套新型水下层析三维成像系统,如图3所示,系统主要由1套蓝绿脉冲光激光器、双门控选通成像相机、光束匀化器、压电微位移

台、光端机、压电运动控制器、光电复合缆、耐压舱及上位机组成,集成蓝绿脉冲激光发射、门控选通成像、供电及通信传输模块等模块。

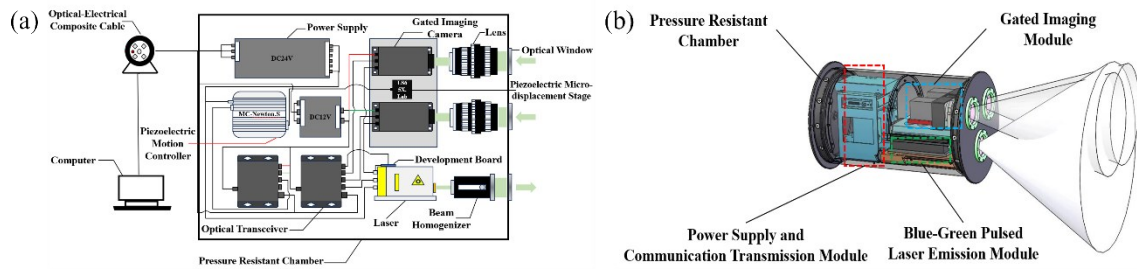


图3 水下层析三维成像系统的组成及结构图。(a)组成图;(b)结构图

Fig. 3 Composition and structure diagram of underwater tomographic 3D imaging system. (a) Composition; (b) Structure

在上位机的通信控制下,由激光器外触发双门控相机实现同步工作,设置脉冲激光出光与门控选通相机之间的延迟时间及相机选通门宽,屏蔽大部分路程的水体后向散射,只对目标及附近区域的层析场景进行选通成像;双门控相机输出的两路视频信号经光端机、防水连接器和光电复合缆传输至上位机;上位机对两路视频信号进行预处理与图像增强,并进行双目立体视觉的三维图像重构,得到场景的深度图、获取目标距离,实现目标的三维成像与显示。



图4 蓝绿脉冲激光器

Fig. 4 Blue-Green pulsed laser

1.3.1 蓝绿脉冲激光发射模块

蓝绿脉冲激光发射模块主要包括蓝绿脉冲激光器和光束匀化器。如图4所示,采用 Explorer XP 蓝绿脉冲激光器(波长 532 nm,重复频率 10~300 kHz,最大单脉冲能量为 0.2 mJ,脉冲宽度小于 8 ns,发散角小于 4.5 mrad),受上位机控制出光,并外触发双门控相机同步工作。光束匀化器使激光束可根据实际目标距离与大小调节扩束镜扩大倍率,最大发散角为 45°;开发板在上位机控制下输出不同模式电压以控制激光器开闭,充当软开关。

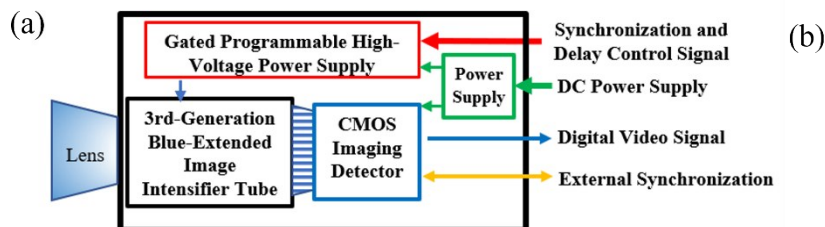


图5 门控选通相机及其模块结构组成。(a)相机内部组成框图;(b)选通相机实物图

Fig. 5 Gated camera and its modular structure composition. (a) Internal composition block diagram of the gated camera; (b) Physical photograph of the gated camera

1.3.2 门控选通成像模块

门控选通成像模块主要由双门控选通成像相机、成像镜头与压电微位移台组成(如图5和图6所示)。门控选通成像相机由国产蓝延伸三代像增强器+ns级程控选通高压电源+CMOS成像相机定制而成,在532 nm波段具有高灵敏度,可对微弱的场景光信号进行放大;全局快门CMOS成像相机(1英寸靶面,像元尺寸11 μm ,像元规模1280 $\times$ 1024,最大帧频50 Hz)与像增强器通过光纤面板直耦,对增强的场景图像进行采集并转化为数字视频信号输出;ns级选通程控高压电源通过串口通信接收上位机同步和延迟信号(阴极门宽3 ns-20 ms,阴极触发频率10-300 kHz,阴极延迟调整步进不大于200 ps),控制像增强器的开启或关闭状态。门控选通相机通过A类射频同轴连接器(Super-Subminiature Version A, SSMA)接口与激光器连接,由激光器外触发工作,并接收上位机设置的门宽、延迟、微通道板(Microchannel Plate, MCP)等参数。

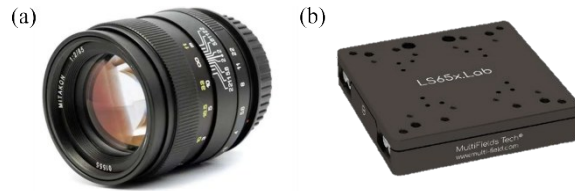


图6 镜头与调焦。(a) 85 mm/F2.0定焦镜头;(b)压电微位移台
Fig. 6 Lens and focusing. (a) 85 mm/F2.0 fixed focal length lens; (b) Piezoelectric micro-displacement stage

由于现有电动调焦/变焦镜头体积较大,且镜头F数较大,为了保证光学镜头能尽可能有效地接收场景辐射,选用了中一光学的85 mm/F2.0定焦镜头如图6(a)所示。同时选用卓立汉光LS65x.Lab压电微位移台,通过前后微位移实现双目选通相机的同步调焦。

1.3.3 供电及通信传输模块

供电及通信传输模块主要包括多路电源、双向光端机和压电运动控制器(如图7所示)。多路电源负责对系统内部各个模块进行供电,保证系统正常工作;双向光端机由主机端(接收机)和设备端(发射机)两部分组成,用于光电信号的转换,通过光纤传输信号,实现系统内部模块与上位机在光纤中的远距离、高速通信和信号传输,最大传输距离可达250 m;压电运动控制器通过电机接口与位移台连接,负责与上位机通信,输出电压控制压电位移台移动,最高可达75 V,默认输出频率为20 kHz。

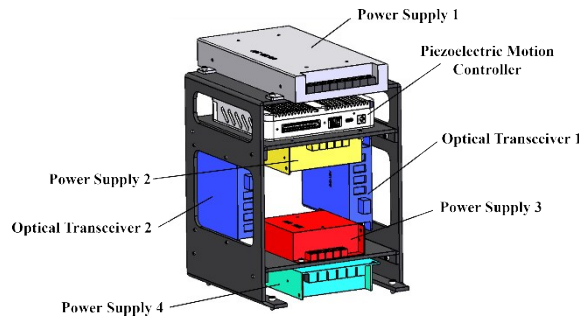


图7 供电及通信传输模块
Fig. 7 Power supply and communication transmission module

1.3.4 水下层析三维成像系统集成

水下层析三维成像系统的其它集成组件包含光电复合缆和耐压舱。光电复合缆集成光纤和导电金属线,能同时传输光信号和电能,满足系统预定水压条件下的远程供电与通信需求;耐压舱采用圆柱形结构设计,基于高强度铝合金精密铸造,舱体长度600 mm,厚度7 mm,最大外径323.85 mm,内径313.85 mm,前后端盖厚度设计为38 mm,最大外径为364 mm。为满足器件成像需求,在耐压舱前端盖设计了三个D85 $\times$ 10熔融石英玻璃视窗,通光口径为65 mm,玻璃厚度为10 mm,后端盖集成水密接口与气泵接口,分别用于水密连接器和验证舱体密封性能。系统整体重量不超过40 kg,工作功耗低于150 W,可承压10个大气压(100 m水深)。依据前述系统结构设计,水下层析立体成像系统样机的实物图如图8所示。



图8 系统样机实物

Fig. 8 Physical prototype of the system

2 水下双目立体视觉与系统标定

2.1 水下相机模型

相机在进行成像时,实际的场景经过数次坐标系转换最终显示在图片或显示器上。为了更好地描述物体三维信息到图像的转换过程,采用如图9所示的世界坐标系、相机坐标系、图像坐标系和像素坐标系来简化复杂的转换过程。

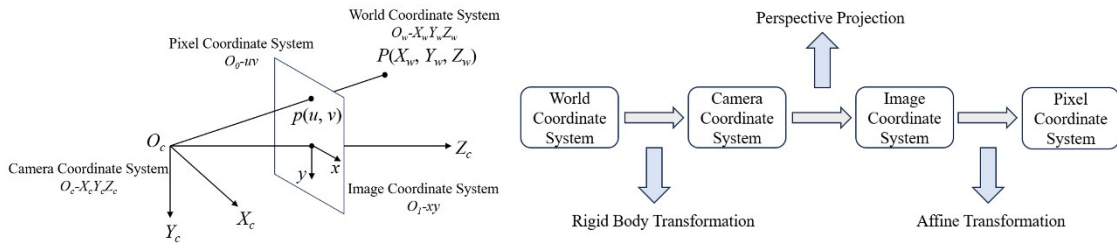


图9 坐标系变换关系

Fig. 9 Coordinate system transformation relationship

由世界坐标系到像素坐标系的整体坐标系变换公式为

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{f}{d_x} & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \frac{f}{d_y} & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = M_1 M_2 \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中, (X_w, Y_w, Z_w) 为世界坐标系下的物理坐标; (u, v) 为该点对应的在像素坐标系下的像素坐标; Z_c 为尺度因子; f 为相机焦距; d_x, d_y 表示每一行、列的像素在相机感光板上的物理长度; (u_0, v_0) 为图像零点的像素坐标, 其组合矩阵为相机的内参矩阵 M_1 , 内参矩阵取决于相机的内部参数; R 为旋转矩阵, T 为平移矢量, 其组合矩阵为相机的外参矩阵 M_2 , 外参矩阵取决于相机坐标系和世界坐标系的相对位置。物体在相机显示屏上的像素坐标 (u, v) 通过相机的内参矩阵 M_1 变换为以相机中心为原点的相机坐标, 在经过外参矩阵 M_2 变换为通用的世界坐标。相机标定的主要目的就是获得相机的内参矩阵和外参矩阵。

将双目相机应用于水下时, 需要封装于防水耐压舱中, 舱体前端加装玻璃窗口, 目标场景的光线进入相机成像平面的过程包含从水介质进入玻璃窗, 玻璃窗进入空气, 空气再进入相机光心。由于玻璃窗两侧的介质不同, 光线在射入相机的过程中会发生两次折射, 陆上环境存在一定区别, 不能直接套用常规的陆上成像模型。根据 Jaffe^[25] 的水下环境光传播模型, 在使用玻璃窗较薄的情况下(对光的折射可忽略), 把两次折射等价成一次从水到空气的折射过程, 可将水下相机简化为如图10的成像模型。假设玻璃窗所在平面与相机成像平面平行, 世界坐标系下一点 $P(X_w, Y_w, Z_w)$ 入射的光线与玻璃窗相交于点 $P(x_r, y_r, z_r)$, 光线在 P 点发生折射, 通过镜头后在相机成像面 $p(u, v)$ 点成像。玻璃窗到相机镜头中心的距离为 d ; 相机焦距为 f ;

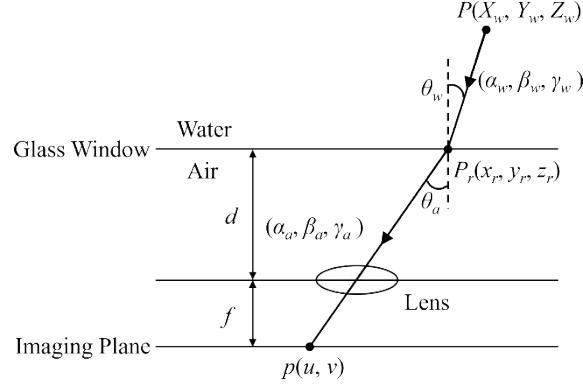


图 10 水下相机成像模型

Fig. 10 Underwater camera imaging model

$(\alpha_w, \beta_w, \gamma_w)^T$ 和 $(\alpha_a, \beta_a, \gamma_a)^T$ 分别为入射光线发生折射前后的方向向量; θ_w 与 θ_a 分别为光线在水、空气中与光轴的夹角。

根据图 10 水下相机成像折射模型,可导得水下相机成像的变换关系为

$$k \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/dx & 0 & u_0 \\ 0 & 1/dy & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_0 r & 0 & 0 & -\frac{n_0 dx_u r}{f} \\ 0 & n_0 r & 0 & -\frac{n_0 dy_u r}{f} \\ 0 & 0 & -\frac{n_0}{\sqrt{n_0^2 + (f/r)^2 - 1}} & \frac{n_0 d}{\sqrt{n_0^2 + (f/r)^2 - 1}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中, $n_0=n_a/n_w$, n_a 、 n_w 分别为光线在空气和水介质中的折射率;设 (x_u, y_u) 为像素点在成像平面上的二维物理坐标, $r=\sqrt{x_u^2 + y_u^2 + f^2}$ 为折射光线和分界面的交点与像平面像点之间的直线距离; k 为尺度因子。

由于水下相机的成像模型与空气中的成像模型并不相同,空气中的标定结果不能直接应用到水下,需要在水下环境对双目相机进行标定。

2.2 相机水下标定与校正

双目视觉系统要得到目标距离,要确保两台相机的位姿确定、焦距已知,且要求必要的精度,这要求对双目相机内外参数进行标定。通过标定不仅可得到相机的各种参数,也可知道空间任意一点在两个相机中的成像位置,同时消除畸变,从而获得更准确的视差。

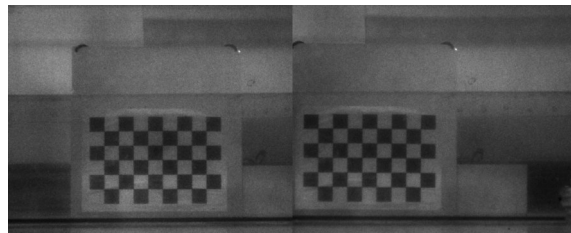


图 11 水下标定板原始图像

Fig. 11 Original image of the underwater calibration board

使用张氏标定法^[26]进行实际相机的水下标定。标定板为角点数 8×5 的黑白方格棋盘,通过未标定的双目相机采集以左右图像为一组的不同角度、不同倾斜度约 20-30 组的水下原始图像(如图 11 所示)。由于棋盘格大小已知,可得到每一个角点在世界坐标系下的物理坐标,由此利用角点在世界坐标系的物理坐标与每一个角点的像素坐标的对应关系,并参考水下相机成像模型完成相机的标定,获得相机的内外参矩阵、畸变参数。双目选通相机的水下标定结果如表 1 所示, f_x 和 f_y 为相机焦距参数; (u_0, v_0) 为相机主点坐标; R 和 T 为左右相机的相对位姿转换矩阵; k 和 p 分别为相机的径向和切向畸变系数; e_r 为平均重投影误差。

表 1 相机标定参数
Table 1 Camera Calibration Parameters

Parameters	Left camera	Right camera
(f_x, f_y)	(5452.8755, 5504.7512)	(5473.5621, 5505.2436)
(u_0, v_0)	(420.4412, 877.0856)	(301.6550, 781.9005)
R	$\begin{bmatrix} 0.9995 & 0.014 & 0.0294 \\ 0.0133 & 0.9997 & 0.0219 \\ -0.0297 & -0.0215 & 0.9993 \end{bmatrix}$	
T	$[-148.0108, -0.5629, 2.9906]^T$	
(k_1, k_2)	(-0.6535, 1.9338)	(-0.5018, 1.0702)
(p_1, p_2)	(-0.0170, -0.0084)	(-0.0035, -0.0181)
e_r	0.1986	0.2076

由于摆放误差与相机本身因素,双目相机很难保证像面完全平行,进而导致极线不平行。进行立体匹配时要根据极线约束原理,搜索同一图像在左右两像面的对应位置,若每次都要计算两条极线的表达式会使立体匹配进行困难。若将两像面进行极线校正,便可将两幅图像对齐,每对对应点都会出现在同一条极线上,大幅提升立体匹配的精度和速度,即在标定后进行极线校正是双目立体视觉中必要的操作。

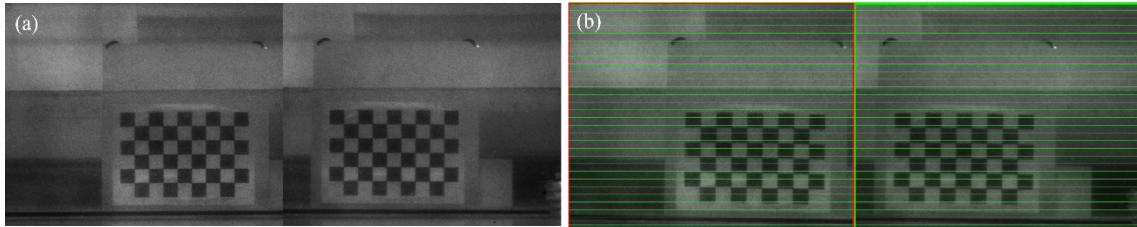


图 12 双目立体视觉系统校正实验的双目图像。(a)校正前;(b)校正后

Fig. 12 Binocular images from binocular stereo vision system calibration experiment. (a) Before calibration; (b) After calibration

采用开源计算机视觉库(Open Source Computer Vision Library, OpenCV)的 StereoRectify 函数实现 Bouguet 极线校正^[27],输入标定所得双目系统的内参矩阵、外参矩阵、畸变系数及图片尺寸,便可输出得到校正需要的左右相机的旋转矩阵 R_l, R_r 与校正投影矩阵 P_l, P_r 。校正实验如图 12 所示,校正后的双目图像不仅极线对齐,也消除了畸变。除了校正所需的矩阵, StereoRectify 函数还输出一个重投影矩阵 Q ,表示物体在世界坐标系的坐标点与在系统左视图点的投影关系,成为后续深度图计算的关键,即给定任意一个点的齐次像素坐标与视差,便可通过 Q 进行三维坐标重建,获取深度信息。

3 实验与分析

3.1 水下二维成像实验

二维成像实验分别在水槽和水池进行。实验室水槽环境和目标如图 13 所示,其中水槽长约 16 m,直径约 0.4 m;测试目标除选用 USAF 1951 分辨率靶标外,还加入了小山和鱼模型。将测试目标放置在距水槽观察窗口不同距离的位置进行测量,其中分辨率靶标在约 12 m 处,其余模型均分布在约 6 m 处。

低对比度水下成像既在视觉上难以分辨水下景物,还会降低立体匹配中特征点的可检测性与匹配精

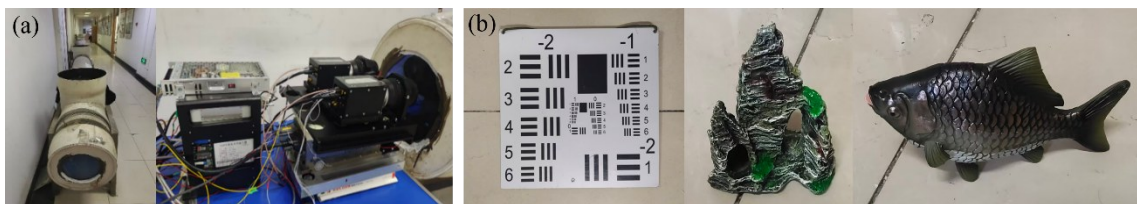


图 13 实验室水槽的二维成像实验。(a)实验环境;(b)实验目标

Fig. 13 2D imaging experiment of a laboratory water tank. (a) Experimental environment; (b) Experimental target

度,因此需进行水下图像的增强处理^[28]。我们采用基于 Retinex 的自适应直方图均衡化(Adaptive Histogram Equalization, AHE)增强方法^[29]进行水下图像的对比度增强:首先采用单尺度 Retinex 算法(尺度为 100)对原始灰度图像进行光照分量和反射分量的分离,在对数域计算得到反射分量;之后对反射分量提取实部并做线性对比拉伸,以适配 AHE 算法的输入格式,最后进行自适应直方图均衡化(块大小为 8×8 ,插值邻域为当前子块的 4 邻域)处理,得到增强后的灰度图像。从图 14 原始和增强图像的对比可看出,增强图像的对比度明显增大,能获取更多信息和细节。

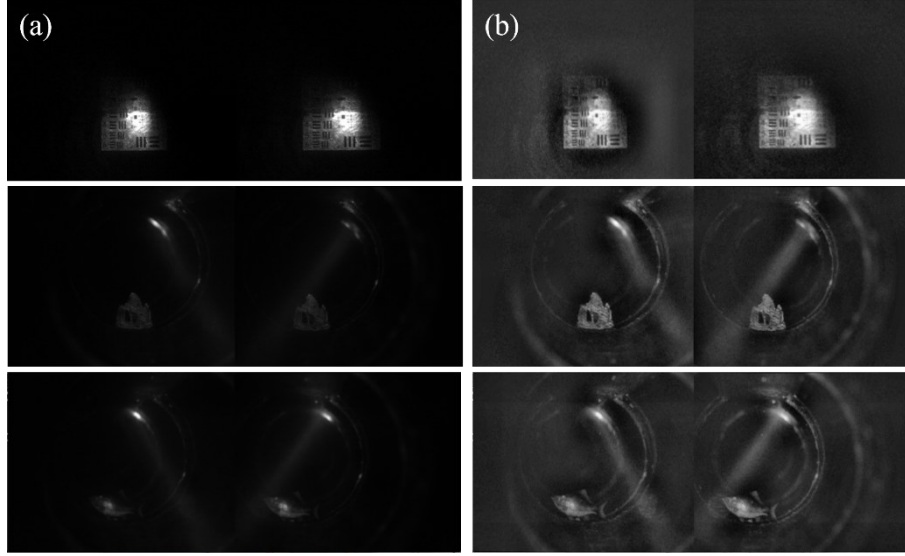


图 14 水槽内双相机的水下二维成像及其增强效果。(a) 原始图像;(b) 增强图像

Fig. 14 Underwater 2D imaging and enhancement effect of dual cameras in water tank. (a) Original image; (b) Enhanced image

在室外水池开展了不同水体衰减长度下的系统成像实验。其中水池长约 20 m,宽约 1 m,深约 1.2 m。采用自制测量仪^[30]进行水体蓝绿光衰减长度 AL 的测量,选用纯度为 99%、粒径 $1 \mu\text{m}$ 的 SiO_2 颗粒作为添加物,对水体进行污化处理,定量融水后在实验水池不同位置处均匀添加,并分别取样测试水质,记录数据。在不添加杂质的情况下,实验水池的初始衰减长度约为 10.19 m,符合常见自来水水质;在加入 3、6 和 8 g 的 SiO_2 添加物后,水体衰减长度 AL 分别降低为 5.42、2.83 和 1.95 m,衰减效果明显。二维成像实验如图 15 所示,将系统样机沉至池底,使用 USAF 1951 分辨率测试靶作为待测目标,放置在距离系统 12.6 m 处,在不同水体衰减长度下分别展进行像实验。

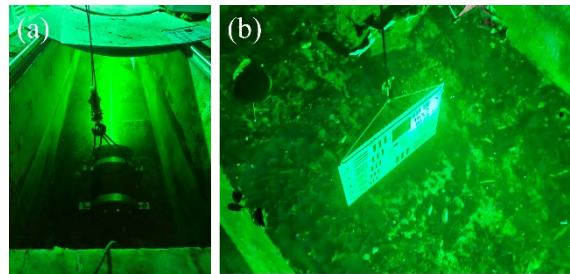


图 15 水池二维成像实验。(a) 实验环境;(b) 实验目标

Fig. 15 2D imaging experiment in the pool. (a) Experimental environment; (b) Experimental target

图 16 给出初始无添加物($\text{AL} \approx 10.19 \text{ m}$)和添加 8g SiO_2 ($\text{AL} \approx 1.95 \text{ m}$)的水池成像结果。可以看出:1) 在水池无添加物环境下,原始图像在 USAF 1951 靶标中最高能分辨第-2 组 2 元素;在经过算法增强后,图像整体对比度提升,能分辨第-2 组 6 元素,整体分辨率提升约 $22/3-1=58.74\%$;2) 在添加 8g 颗粒物后,由于光波受杂质颗粒散射和吸收加剧,原始选通成像的对比度严重下降,难以有效发现靶标;在经过对比度增强后,对分辨率测试靶中被激光照射的目标区域系统具有一定的探测分辨能力,可分辨第-1 组 2 元素此时,目

标距离 12.6 m 对应约 6.5 AL 的探测距离。

综上所述,复杂恶劣水域下距离选通成像的探测距离和图像清晰度都得到明显的提升。

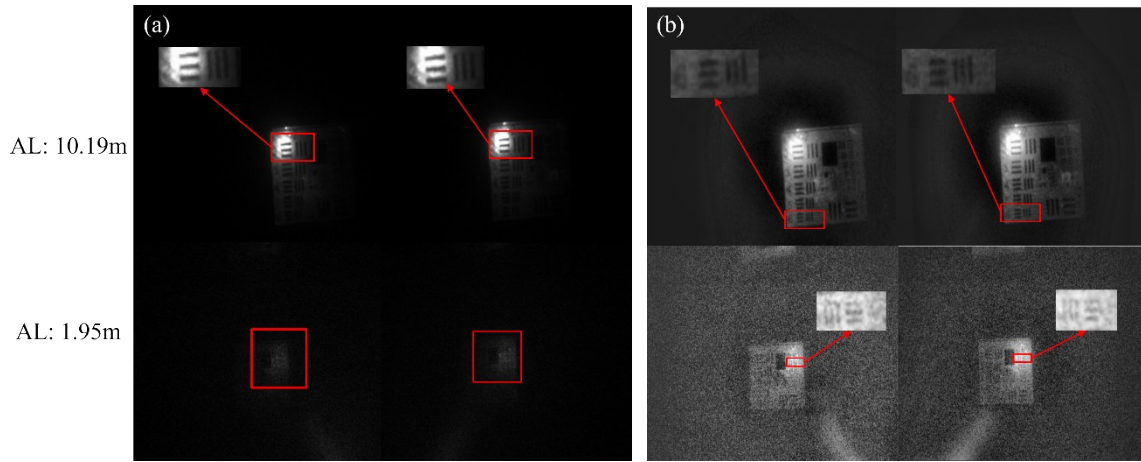


图 16 不同水体衰减长度 AL 下水池二维成像效果图。(a)原始图像;(b)增强图像

Fig. 16 Underwater 2D imaging results in the pool with different water AL. (a) Original image; (b) Enhanced image

3.2 场景深度图像重建实验

深度图像重建实验同样在水槽和水池进行。水槽实验使用双目选通相机在选通模式下获取水下目标的双目实时帧对图像(图像尺寸为 640×512),经过立体校正与图像增强预处理后,使用基于神经网络的快速立体匹配算法 BGNet^[31]获取稠密视差图(图像尺寸为 640×512),根据视差图和标定的重投影矩阵计算得到深度图,进而获取场景目标的深度信息。对图 13(b)小山、鱼等模型的双目立体成像的伪彩色深度图如图 17 所示。可以看出,重建的深度图较好地还原了目标的轮廓信息,且能够获得部分纹理特征信息,目标表面颜色深度平滑,无明显缺漏。整个重建过程在上位机 PC(型号为 XiaoXinPro 16 ARH7)实时进行,执行时间为 38–42 ms,输出帧频基本稳定在 25 fps,其中单帧双目图像的 BGNet 推理耗时为 25–30 ms,占用了约 70% 的执行时间,图像增强处理为 6–8 ms,占用总时长约 17%,其他流程(包括立体校正、深度计算等)占用剩余约 13% 时间。表明在水下环境下,通过距离选通结合双目深度图像重构具备三维实时成像的能力。

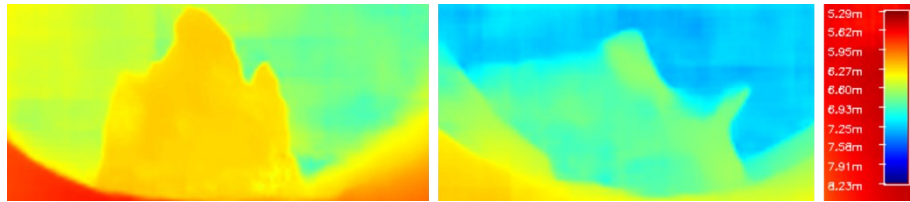


图 17 水槽内小山和鱼模型水下双目选通立体成像的深度图

Fig. 17 Depth map of underwater binocular range-gated stereo imaging for small hills and fish models in water tank

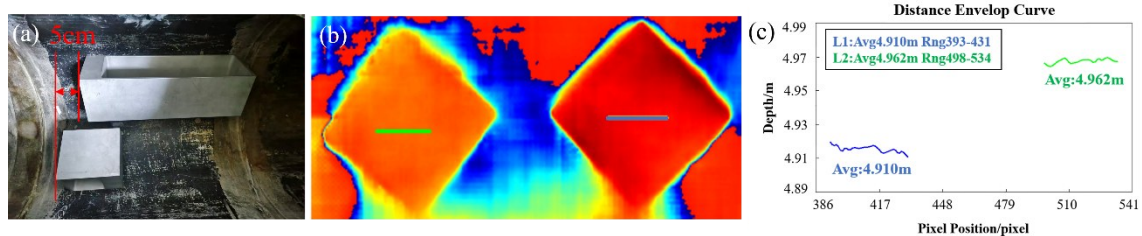


图 18 水槽水下环境下立体靶标深度重建实验。(a)实验目标;(b)深度图;(c)像素位置-深度曲线

Fig. 18 Depth reconstruction experiment of stereo target in underwater tank environment. (a) Experimental target; (b) Depth map; (c) Pixel position-depth curve

为客观评价系统水下深度重建效果和目标分辨能力,在水池展开系统深度重建精度与距离分辨率的测试试验(如图 18 所示)。由 1.2 节对双目立体深度模型(公式 2)的分析可知,深度误差主要来源于相机标定误差与立体匹配视差误差。本实验中,视差误差的大小除受水体散射程度显著影响外,还与目标在视场中的占比直接相关:过小的视场占比会压缩目标可提取的有效特征区域,导致可匹配特征点数急剧减少,进而放大视差估计误差;同时,水体散射会进一步降低目标图像对比度与信噪比,加剧特征提取与匹配的不确定性,二者共同作用会显著增大深度估计误差。因此,本实验将目标距离控制在保证目标具备一定视场占比的范围内,以抑制视差误差的过度放大。首先按图 18(a)所示方式确定两个立体靶标的位置,其中小靶标为 100 mm×100 mm×100 mm,大靶标前端面位于其深度方向的中间位置,即大小靶标具有 50 mm 的深度差;其次将目标依次放置在距离水槽观察窗口 4.9 m、5.4 m、5.9 m 三种不同位置进行多组深度图像重建;之后对于大小靶标重建出深度图(如图 18(b)所示),选取深度(颜色)分布均匀的一行像素分别绘制像素位置-深度曲线,并以此行范围(Range, Rng)像素的深度均值作为单次深度测量结果,以深度平均差值作为两靶标单次深度差测试值,其中 4.9 m 处的单次深度重建结果如图 18(c)所示;最后将同一位置下的多组深度测量结果进行处理,去除与同组其他数据相差较大的测量值后取平均值(Average, Avg),作为最终目标的深度测量值,同理深度差测量值也以这种方式获取。

表 2 给出了三种距离下深度测量误差和深度差测量误差,可以看出:对于深度测量误差,系统在水槽环境三种距离下为 10~20 mm,且随着成像距离的增大,整体误差呈上升的趋势,这与双目立体深度误差模型(公式 5)的规律是一致的;深度差测量误差为 2~2.5 mm,且随成像距离的增大呈缓慢上升趋势,这是由于 4.9~5.9 m 景深内,选通相机整体成像质量相差较小,不同距离下立体匹配的视差误差接近,同时未添加杂质的情况下成像质量较高,视差误差本身也较小,深度差测量误差主要来源于两个目标平面深度平方的差值,由于实际深度差只有 50 mm,这个差值随距离的增大而变大的趋势较为缓慢。

表 2 不同距离下深度误差对比
Table 2 Comparison of depth errors at different distances

Serial number	Actual value (m)	Measured value (m)	Error (mm)	Measured value of depth difference (mm)	Error (mm)
1	4.90	4.9105	10.5	52.1	2.1
	4.95	4.9626	12.6		
2	5.40	5.4131	13.1	52.2	2.2
	5.45	5.4653	15.3		
3	5.90	5.9160	16.0	52.4	2.4
	5.95	5.9684	18.4		

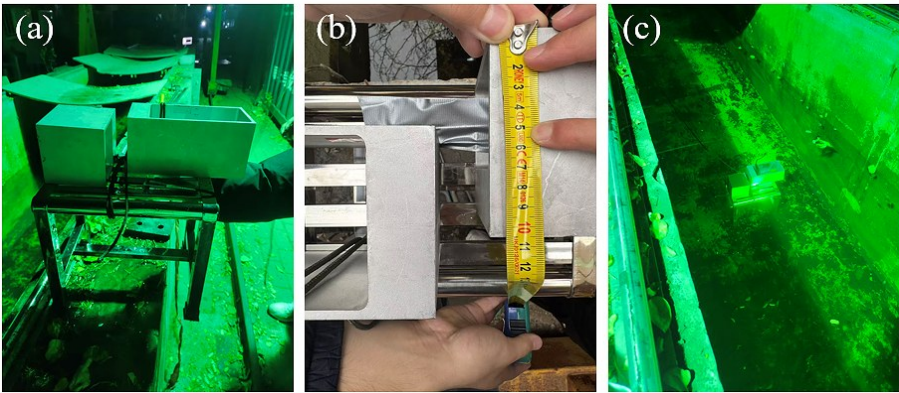


图 19 水池深度图像重建实验。(a)实验目标;(b)深度差;(c)目标场景

Fig. 19 Depth image reconstruction experiment in the pool. (a) Experimental target; (b) Depth difference; (c) Target scene

为测定水质对系统三维重建效果的影响,在水池环境开展不同 AL 下系统深度重建精度与距离分辨率的测试试验(如图 19 所示)。首先以 50 mm 的深度差固定两个立体靶标,放置在距离系统观察窗口约 6.4 m

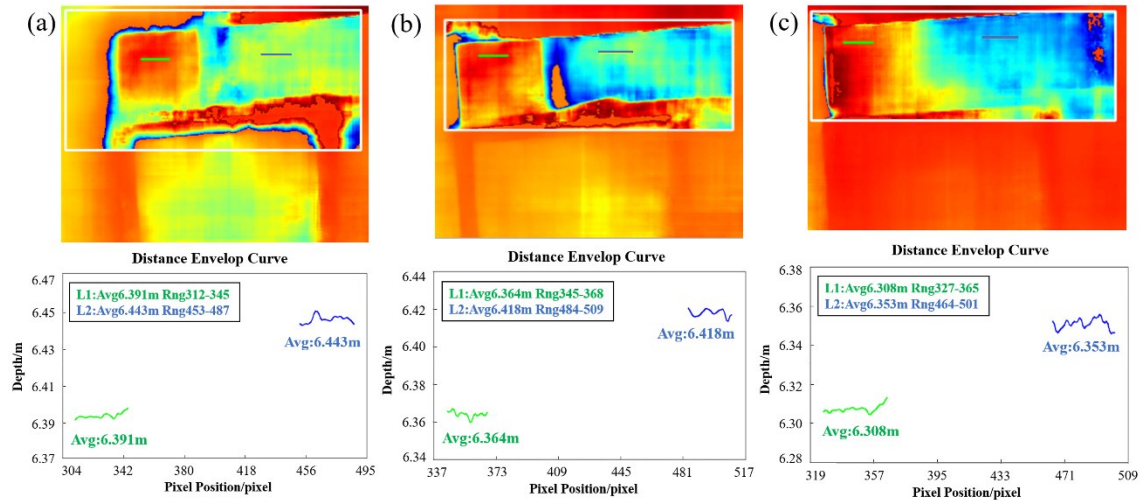


图20 不同衰减长度下深度重建结果。(a)10.19m衰减长度;(b)2.83m衰减长度;(c)1.95m衰减长度

Fig. 20 Depth reconstruction results under different attenuation lengths. (a) AL: 10.19 m; (b) AL: 2.83 m; (c) AL: 1.95 m

处;并分别在10.19、2.83、1.95 m三种水体衰减长度下进行多组深度图像重建(如图20所示),绘制像素位置-深度曲线、确定单次深度测量值和深度差测试值;最后将同一水质下的多组深度测量结果进行处理,去除与同组其他数据相差较大的测量值后取平均值,得到目标的深度测量值和深度差测量值。

表3给出了三种水质下距离约6.4 m处的深度测量误差和深度差测量误差,可以看出:对于深度测量误差,系统在水池环境三种水质下为25~120 mm,且随着水体衰减长度的降低,整体误差呈快速上升的趋势。这主要是因为水质的变差造成了图像对比度的下降,为此增大相机MCP以提高图像对比度的同时也引入了更多噪声,且杂质颗粒对激光的强散射也会使得立体靶标区域的光照均匀性受到影响,使得整体双目图像质量降低,立体匹配中的视差估计误差由此成倍增大,深度误差也随之线性增大;深度差测量误差为2.5~6.0 mm,其大小同样随衰减长度的降低呈上升趋势,且其上升速度明显快于表3中随距离增大的误差增幅速度,这也是受视差估计误差迅速增大的影响。

表3 不同衰减长度下深度误差对比

Table 3 Comparison of depth errors under different attenuation lengths

Attenuation lengths (m)	Actual value (m)	Measured value (m)	Error (mm)	Measured value of depth difference (mm)	Error (mm)
10.19	6.42	6.3904	29.6	52.8	2.8
	6.47	6.4432	26.8		
2.83	6.42	6.3630	57.0	54.3	4.3
	6.47	6.4173	52.7		
1.95	6.42	6.3098	110.2	44.1	5.9
	6.47	6.3539	116.1		

4 结论

针对现有水下光学成像系统受水体散射严重,三维成像精度与实时性较差的局限,论文提出了一种基于双目距离选通的水下层析三维成像思想,结合距离选通成像和双目立体视觉技术的优势,采用高性能三代双选通像增强ICMOS+蓝绿脉冲激光器,研制了一套水下双目层析三维成像实验系统;通过改进retinex算法对水下左、右原始图像进行增强,获得高对比度二维图像;通过快速立体匹配算法BGNet获得视差图,结合视差图和标定参数计算得到深度图,获取图像目标的深度信息,验证了该系统在水下三维成像中的可行性。表4给出了系统性能参数,在本文实验条件与系统配置下,实验表明:系统在AL=1.95 m的水体中的探测距离不低于12.6 m(6.5 AL),在6.4 m(3.3 AL)距离下的距离分辨率不低于50 mm,实时性可达25 fps;在水下4.9~5.9 m的成像距离下系统的深度估计误差为10~20 mm,深度差测量误差为2~2.5 mm;在10.19

m, 2.83 m, 1.95 m 三种水体衰减长度下约 6.4 m 成像距离处的深度估计误差为 25–120 mm, 深度差测量误差为 2.5–6.0 mm。综上所述, 基于双目距离选通的水下层析三维成像系统具有一定的远距离三维实时成像能力。

表 4 系统性能参数
Table 4 System performance parameters

Parameters	Value
Underwater detection range	≥ 6.5 AL
Range resolution	≤ 50 mm@3.3 AL
Real-time performance	25 fps
Depth estimation error	10–120 mm
Depth difference measurement error	2–6 mm

通常激光距离选通成像能够达到 5–7 AL 的探测距离, 例如, 在 AL $\approx$ 10 m 的游泳池水质能够达到 50 m 以上的探测距离。在本文实现的系统中, 双目距离选通的水下层析三维成像技术能够获得高质量的水下目标场景图像, 在军事、民用(水下管道探测、水库内坝故障检测等)领域具有一定的应用潜力。进一步优化水下激光照明、图像滤波与增强、双目立体匹配网络等方法, 可望获得更优的水下目标三维成像性能; 针对应用条件优化系统结构设计可进一步提升系统性能, 为水下探测与导航等应用提供更可靠的数据支持。

致谢 感谢微光夜视技术重点实验室与合肥濯新光电科技有限公司在高性能距离选通成像相机研制方面提供的技术支持与帮助。

参考文献

[1] SHEN Ying, ZHAO Chuanjiang, LIU Yu, et al. Underwater optical imaging: key technologies and applications review[J]. IEEE Access, 2021, 9: 85500–85514.

[2] PANETTA K, GAO Chen, AGAIAN S. Human-visual-system inspired underwater image quality measures[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2016, 41(3): 541–551.

[3] WANG Yuhang, WANG Xinyu, ZHANG Jinghui, et al. Review and prospect of underwater 3D imaging detection[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2024, 61(22): 29–42.
王宇航, 王新宇, 张景辉, 等. 水下三维光学成像探测技术综述及展望[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(22): 29–42.

[4] ZHUANG Peixian, WANG Chenyu, LIU Fei, et al. Image field-of-view enhancement: An overview[J]. CAAI Artificial Intelligence Research, 2026.

[5] ARST H. Optical properties and remote sensing of multicomponential water bodies[M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2003.

[6] WANG Xiangke, ZHANG Hui, ZHENG Zhiqiang. Analysis of back-scattering restraining of range-gated imaging technique[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(12): 1997–2000.
王祥科, 张辉, 郑志强. 距离选通技术对后向散射抑制作用的理论分析[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(12): 1997–2000.

[7] LI Yifeng, ZHOU Shun, LI Pangyue, et al. Three-dimensional reconstruction method integrating active and passive polarization based on structured light[J]. Acta Photonica Sinica, 2024, 53(12): 1210002.
李宜峰, 周顺, 李庞跃, 等. 基于结构光的偏振主被动融合三维重建方法[J]. 光子学报, 2024, 53(12): 1210002.

[8] ZHUANG Sufeng, JI Yong, TU Dawei, et al. Underwater RGB-D camera based on binocular stereo vision[J]. Acta Photonica Sinica, 2022, 51(4): 0404003.
庄苏锋, 吉勇, 屠大维, 等. 基于双目立体视觉的水下 RGB-D 相机[J]. 光子学报, 2022, 51(4): 0404003.

[9] ZHUANG Peixian, ZHANG Xinheng, TONG Junjie, et al. Underwater light field imaging: A survey[J]. CAAI Artificial Intelligence Research, 2025, 4: 9150051.

[10] ZHANG Jinghui, WANG Yuhang, ZHANG Tao, et al. A study on refraction error compensation method for underwater spinning laser scanning three-dimensional imaging[J]. Sensors, 2024, 24(2): 343.

[11] LV Wenlei, ZHANG Xu, LIU Ke. Design and Experimental Study on a Range-Gated Underwater Laser Imaging System [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(8): 198–202.
吕文磊, 张旭, 刘可. 一种距离选通水下激光成像系统设计与实验研究[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(8): 198–202.

[12] MACCARONE A, DRUMMOND K, MCCARTHY A, et al. Submerged single-photon LiDAR imaging sensor used for real-time 3D scene reconstruction in scattering underwater environments[J]. Optics Express, 2023, 31(10): 16690–

- 16708.
- [13] LI Weiwei, ZHANG Tongyi, KANG Yan, et al. Color non-line-of-sight imaging based on time-correlated single photon counting[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2024, 53(11): 1111001.
李薇薇, 张同意, 康岩, 等. 基于时间相关单光子计数的彩色非视域成像[J]. *光子学报*, 2024, 53(11): 1111001.
 - [14] YIN Xiaojun, CHENG Hu, YANG Kecheng, et al. Bayesian reconstruction method for underwater 3D range-gated imaging enhancement[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(2): 370-379.
 - [15] JIN Chenfei, SUN Xiudong, ZHAO Yuan, et al. Gain-modulated three-dimensional active imaging with depth-independent depth accuracy[J]. *Optics Letters*, 2009, 34(22): 3550-3552.
 - [16] Walia A, Walz S, Bijelic M, et al. Gated2gated: self-supervised depth estimation from gated images[C]. *IEEE*, 2022: 2801-2811.
 - [17] JIN Dongdong, PEI Chonglei, JI Chunheng, et al. Research on portable underwater laser range gated imaging system[C]. *SPIE*, 2023, 12617: 126176T.
 - [18] WU Guanlin, YU Xiangzhi, ZHU Shihao, alet, Preprocessing method for underwater time-gated SPAD-array-based images utilizing Retinex and BM3D[J]. *Applied Optics*, 2025, 64(14), 3842-3855.
 - [19] LV Sheng, ZHANG Wenxue, ZHANG Minghua, et al. Underwater binocular 3D imaging method based on polarization difference ghost imaging[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2025, 186: 108856.
 - [20] YamingOU, FAN Junfeng, ZHOU Chao, et al. Binocular structured light 3-D reconstruction system for low-light underwater environments: Design, modeling, and laser-based calibration[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, 72: 1-14.
 - [21] WANG Xinwei, SUN Liang, ZHANG Yue, et al. Advances of laser range-gated three-dimensional imaging (invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2024, 53(4): 31-49.
王新伟, 孙亮, 张岳, 等. 激光距离选通三维成像技术研究进展(特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2024, 53(4): 31-49.
 - [22] STEFANO M. Stereo vision: algorithms and applications [D]. Bologna: University of Bologna, 2013.
 - [23] TIPPETTS B, LEE D J, LILLYWHITE K, et al. Review of stereo vision algorithms and their suitability for resource limited systems[J]. *Journal of Real-Time Image Processing*, 2016, 11(1): 5-25.
 - [24] RUSSAKOVSKY O, DENG Jia, SU Hao, et al. Image Net Large Scale Visual Recognition Challenge[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2015, 115(3): 211-252.
 - [25] JAFFE J S. Computer modeling and the design of optimal underwater imaging systems[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1990, 15(2): 101-111.
 - [26] ZHANG Zhengyou. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(11): 1330-1334.
 - [27] FUSIELLO A, TRUCCO E, VERRI A. A compact algorithm for rectification of stereo pairs[J]. *Machine Vision and Applications*, 2000, 12(1): 16-22.
 - [28] ULLAH H, ZHOU Shun, DU Kaiyu, et al. Intrinsic dark-field Fourier ptychographic diffraction tomography under non-matched illumination[J]. *iOptics*, 2025, 1(1): 100006.
 - [29] LI Dayi, ZHOU Jingchun, WANG Shiyin, et al. Adaptive weighted multiscale retinex for underwater image enhancement[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2023, 123: 106457.
 - [30] DING Kun, HUANG Youwei, JIN Weiqi, et al. Experimental study on the relationship between attenuation coefficient of Blue-green laser transmission and the water turbidity[J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(8): 467-471.
丁琨, 黄有为, 金伟其, 等. 水下蓝绿激光传输的衰减系数与水体浊度关系的实验研究[J]. *红外技术*, 2013, 35(8): 467-471.
 - [31] XU Binfeng, XU Yuhua, YANG Xiaoli, et al. Bilateral Grid Learning for Stereo Matching Networks[C]. *CVPR*, 2021: 12492-12501.

An Underwater Tomographic 3D Imaging Method and System Based on Binocular Range Gating

SHEN Lei¹, QIU Su¹, JIN Weiqi¹, ZHONG Xin², ZHU Shihao¹, YU Xiangzhi¹, PENG Guanyue¹

(1 MOE Key Laboratory of Optoelectronic Imaging Technology and System, School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

(2 Optoelectronics System Laboratory, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083,

(China)

Abstract: With the proposal of China's maritime strategy, the demand for underwater observation technologies and equipment has become increasingly urgent. Existing underwater optical imaging methods often focus on improving a single aspect, such as imaging range, clarity, 3D reconstruction accuracy, or real-time performance, yet face limitations in achieving a balanced integration of these factors. The three-dimensional detection range remains insufficient, and there are challenges in balancing real-time operation, accuracy, and system control complexity. To address these issues, this study proposes an underwater 3D imaging method that combines range-gated imaging with binocular stereo vision. The aim is to integrate the advantages of range-gated imaging in long-distance tomographic imaging and the efficiency of binocular stereo vision in 3D reconstruction, enabling high-resolution, real-time 3D imaging in complex underwater environments. In particular, the proposed method seeks to simultaneously improve imaging distance, reconstruction accuracy, and computational efficiency within a unified framework. To conduct underwater three-dimensional imaging, we design and develop a binocular range-gated underwater tomographic 3D imaging system. This system primarily consists of a blue-green pulsed laser emission module, a gated imaging module, a power supply and communication transmission module, an optical-electrical composite cable, a pressure-resistant housing, and an upper computer. Each module is integrated to ensure stable operation under underwater pressure conditions and to support underwater communication and real-time data processing. The system achieves gated imaging through the synchronized control of pulsed laser illumination and gated camera exposure, thereby suppressing backscatter and enhancing image contrast. To address the issue of refractive effects at water interfaces during underwater imaging, an underwater camera model that considers the refraction effects at the water-glass-air interface is established. Combined with Zhang Zhengyou's calibration method, underwater camera calibration and correction are implemented. This calibration process ensures accurate estimation of intrinsic and extrinsic parameters, which is essential for reliable depth recovery. For the preprocessed and corrected left and right original underwater images, a Retinex-based adaptive histogram equalization algorithm is applied to enhance contrast. This enhancement step effectively improves the visibility of low-contrast regions and increases the robustness of subsequent stereo matching. A fast neural network-based stereo matching algorithm (BGNet) is then employed to generate dense disparity maps. Finally, using calibrated parameters (reprojection matrix Q), the disparity maps are converted into depth maps to obtain depth information of the target objects, thereby achieving three-dimensional reconstruction of the underwater scene. The entire processing pipeline is optimized and accelerated to ensure that image enhancement, disparity estimation, and depth reconstruction can be executed efficiently in real time. We conduct underwater two-dimensional imaging experiments and depth reconstruction experiments in both laboratory water tanks and outdoor pools. In the two-dimensional imaging experiments, combined with image enhancement algorithms, the system achieves high-resolution imaging detection of various targets such as USAF 1951 resolution target, fish models, and coral models in the water tank environment. Compared with the original gated images, the enhanced results exhibit significantly improved contrast and clearer structural details. In highly turbid water (with an attenuation length of 1.95 m), the imaging distance exceeds 6 attenuation lengths. This demonstrates the effectiveness of range-gated imaging in suppressing backscatter and extending the imaging range under severe scattering conditions. In the depth reconstruction experiments, the system performs real-time three-dimensional imaging of different targets in the water tank environment, achieving a frame rate of 25 fps. Within the distance range of 4.9 to 5.9 meters underwater, the depth estimation error is 10–20 mm, and the depth difference measurement error is 2–2.5 mm. In pools with varying turbidity levels (attenuation lengths of 10.19 m, 2.83 m, and 1.95 m), the system achieves a range resolution better than 5 cm at 3 attenuation lengths, with depth estimation errors of 25–120 mm and depth difference errors of 2.5–6.0 mm. Although the reconstruction accuracy decreases with increasing turbidity, the system still maintains stable depth estimation capability. The experiments demonstrate that even under low illumination and high scattering conditions, the system can effectively reconstruct three-dimensional scenes while maintaining good texture and edge information preservation. The proposed binocular range-gated underwater tomographic 3D imaging system successfully integrates the advantages of range-gated technology for long-distance underwater tomographic imaging with the efficiency and effectiveness of binocular stereo vision in 3D reconstruction. It demonstrates robust performance across various water quality conditions and distance

ranges, providing a new research approach and practical solution for long-distance, high-resolution, real-time 3D underwater imaging. The system shows promising application potential in underwater engineering exploration, marine scientific surveys, and dam safety inspections. Future work may focus on optimizing laser beam emission through specialized coupling lenses to homogenize the laser spot, thereby improving underwater illumination uniformity and reducing the impact of lighting variations on accuracy. Additionally, leveraging underwater binocular datasets for training or integrating other stereo matching algorithms will enhance the stereo network's matching precision, further improving the system's 3D imaging accuracy in dynamic and turbid underwater environments. Further improvements in hardware integration and algorithm optimization are expected to enhance system stability and broaden its practical application scope.

Key words: Underwater optical imaging; Tomographic three-dimensional imaging; Binocular stereo vision; Underwater scenes; Range-gated; Range resolution; Image enhancement

OCIS Codes: 110.0113; 110.6955; 330.1400; 150.6910; 010.4450

CSTR: 32255.14.gzxb20265507.0711001