

文章编号 1004-924X(2021)10-2465-16

河流自然水体中三维视觉测量

许 丽^{1*}, 周永昊¹, 陆桂明^{1*}, 周金峰², 张 帆¹, 罗文字¹

(1. 华北水利水电大学 物理与电子学院, 河南 郑州 450011;

2. 中国移动通信集团公司, 北京 100033)

摘要:针对水体浑浊所造成水下图像退化和多介质引起的光线路径改变等问题,提出了基于径向多线结构光的水下视觉测量方法。首先,建立了基于折射的水下视觉测量模型,在投影仪垂直于折射平面投射且光平面经过投射光轴的条件下,陆上光平面和水下光平面共面,陆上标定可代替水下标定;采用蒙特卡洛模拟方法,分析了像点误差对点云计算精度的影响。其次,设计了黑白交错的中心旋转径向多线编码光模式;采用黑白条纹边缘作为测量点,减弱了编码光解码对图像质量的依赖性;通过中心旋转的方式,提高了表面的测量分辨率。最后,在 $1\text{ m}\times 1.2\text{ m}\times 0.8\text{ m}$ 的水体中加入泥沙模拟自然河流水体环境,实验分析了浑浊水体对条纹提取、编码光解码和三维视觉测量精度的影响。实验结果表明,该方法在 $1\ 500\text{ mm}$ 的测量距离上,对清水条件下的瓷瓶进行了不规则表面的三维表面测量;对清水、含有 $40, 60$ 和 90 g 泥沙的浑水中规则物体进行三维表面测量,获得了平面残差分别为 $0.95, 1.93, 5.43$ 和 21.43 mm 的测量结果;当泥沙量超过某数值(如 60 g)时,条纹提取精度急剧恶化,泥沙量为 40 和 90 g 的浑水中测量平面拟合残差从 1.93 mm 增加到 21.43 mm 。

关键词:三维视觉测量;河流水下测量;结构光;径向多线投影模式

中图分类号:TP394.1;TH691.9 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20212910.2465

River underwater 3D vision measurement method

XU Li^{1*}, ZHOU Yong-hao¹, LU Gui-ming^{1*}, ZHOU Jin-feng², ZHANG Fan¹, LUO Wen-yu¹

(1. School of Physics and Electronics, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China;

2. China Mobile Communications Corporation, Beijing 100033, China)

* Corresponding author, E-mail: xuli@ncwu.edu.cn; lugm@ncwu.edu.cn

Abstract: Aiming to remedy the degradation of underwater images owing to turbidity of mud and sand in the natural river water, and the change of light caused by underwater refraction, an underwater vision measurement method based on radial multi-line structured light is proposed in this study. First, an underwater visual measurement model based on refraction is constructed. When the projector axis is perpendicular to the refracted plane and the light-plane passes through the projected axis, landed light plane is coplanar with underwater ones, which can avoid the underwater calibration processes. The Monte Carlo simulation method is used to analyze the influence of the imaging point errors on the underwater 3D vision measurement model. Next, an interlaced central rotation radial multi-line light mode is designed. Black and white stripes are used as the projection modes to reduce the dependence on the image quality. Measurement stripes are

收稿日期:2021-03-18;修订日期:2021-05-09.

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 51609086, No. U1804148);河南省科技攻关项目(No. 182102210059)

increased, and measurement resolution is improved through central rotations. Finally, 3D topography measurement experiments on the surface of underwater objects are made, in which the influence of turbid water on the edge extraction accuracy, coded light decoding, and 3D vision measurement are analyzed. In the experiment, sediments with different weights are added in a water volume of $1\text{ m} \times 1.2\text{ m} \times 0.8\text{ m}$, which simulates the natural water environment. The experiment shows that at a measurement distance of 1500 mm, the surface of a bottle is measured in clean water, with a plane residual error of 0.95 mm; the plane residual errors are respectively 1.93 mm, 5.43 mm, 21.43 mm in muddy water with 40 g, 60 g, 90 g of sediment. When the amount of sediment exceeds a certain value (such as 60 g sediment in this experiment), the accuracy of fringe extraction deteriorates sharply. The residual error of measurement plane fitting in muddy water with 40 g and 90 g of sediment increases from 1.93 mm to 21.43 mm.

Key words: 3D vision measurement; underwater vision measurement of river; structured light system; radial multi-stripe model

1 引 言

我国河湖资源丰富,建国以来已建设了大量的水利工程。水利工程作为国民经济的重要基础设施,在防灾减灾和缓解水资源供需矛盾等方面发挥了重要的作用。由于各类水工结构长期承受水压和温度等诸多因素的影响,大量水利工程出现了不同程度的裂缝、渗透、磨损等安全问题。准确及时地获取水工结构形变和缺损信息非常必要,特别对水下水工结构的形貌探测尤为重要^[1-2]。

目前对河流水下形貌探测的方法主要有基于声学的方法和基于视觉的方法。基于声学的方法主要用来估计目标物体的大致大小、确定目标与声纳的距离,用来进行水下地形大范围三维信息获取和水下目标定位^[3-4];视觉测量方法在近距离、高精度、实时性作业场合有着独特的优势,在水下探测领域中占据着重要的地位^[5]。

结构光技术作为视觉测量的常用方法之一,被广泛应用于逆向工程、文物三维重建、工业三维检测等多个领域^[6-8],但在河湖水下形貌探测的应用较少。结构光技术是基于光学三角法测量原理,由投射器将一定模式的结构光投射于物体表面形成特征点,根据 CCD 摄像机拍摄到的图像,并依据光学三角约束关系,获取目标物体的三维信息^[9-10]。影响结构光三维测量精度因素有测量图像中有效信息的提取精度和三维模型的

准确性^[11]。河流自然水体环境对视觉测量的影响有两个方面:其一,水中大颗粒悬浮粒子、浮游生物所引起的散射造成水下测量图像退化严重。前向散射导致细节模糊,纹理信息丢失;后向散射导致图像对比度降低,图像出现雾化模糊现象,进而引起特征点提取困难问题^[12-13]。其二,水下视觉测量设备多被封闭在玻璃等透明材料内,光线经历空气-玻璃-水三个传输阶段。多次折射过程使得视觉测量由线性过程转换为非线性过程^[14-15]。

为了提高水下视觉三维测量的精度,专家们进行了大量研究。哈尔滨工业大学王宗义教授在水下测量时利用激光三角法的原理进行折射补偿,将摄像机拍摄水下物体时的被测点补偿到陆上三维坐标系下^[16]。中国海洋大学解则晓教授对水下光平面的偏移和像点坐标进行修正,采用折射补偿的方式通过陆上标定参数完成水下目标测量^[17]。这类方法一般情况下只能作近似测量,难以得到较高的测量精度。Fan H 假设虚拟对象点位于真实对象点的正上方,建立虚拟物体点与真实物体点之间的几何关系,并在此基础上建立了基于“虚实”关系的平面折射模型^[18]。标定过程多采用空气和水下标定相结合的方式,增加了模型参数的个数和标定实现难度。

针对自然河流水体中视觉测量存在水下成像质量差、多介质光线出现多次折射现象和测量

过程相对静态等特点,本文提出了基于折射的水下视觉测量模型;采用蒙特卡洛模拟方法,分析了自然水体像点误差对该模型计算精度的影响。利用黑白条纹对水下背景噪声的高鲁棒性,结合水工结构形貌探测相对静止的情况,提出了径向多条纹模式编解码方法;该模式的编解码方法在牺牲一定的时间分辨率的代价下,适应自然水体中浑浊成像条件,获得密集的三维形貌数据。建立了水下视觉测量系统,在 1 500 mm 的测量距离上对水下瓷瓶进行三维形貌测量,在清水、含有 40,60 和 90 g 泥沙的浑水中可以获得平面残差分别为 0.95, 1.93, 5.43 和 21.43 mm 的测量结果。

2 自然水体中的水下视觉测量模型

在水下形貌视觉测量过程中,水下物体表面反射的光线由水中传入摄像机时需要通过水体、玻璃罩和空气三种介质。由于水、玻璃、空气三者折射率不同,光线发生多次折射现象,传统透视投影模型已不适用于水下测量。

2.1 基于折射的水下视觉测量模型

如图 1 所示, $oxyz$ 为摄像机坐标系, OXY 为摄像机像平面坐标系, L_w, L_g 和 L_a 分别为成像过程中水中入射光线、玻璃中折射光线和空气中折射光线的方向矢量。 L_{pa}, L_{pg} 和 L_{pw} 分别为空气中投影入射光线、玻璃中折射光线和水中投影折射光线的方向矢量。 $N_p(a, b, c)$ 为折射平面 π_1 归一化法向量参数。 W 为玻璃介质的厚度, n_a, n_w 和 n_g 为

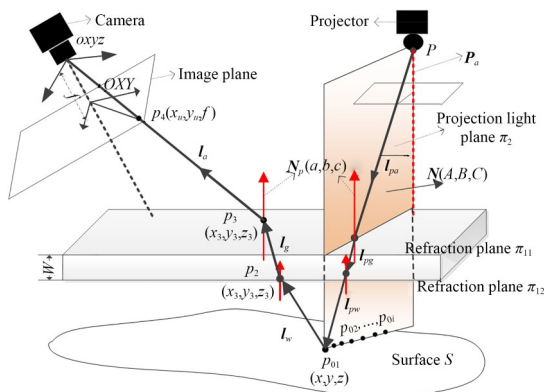


图 1 基于折射的水下测量模型

Fig.1 Model of underwater measurement based on refraction

空气、水和玻璃的折射率。

在投射过程中,空气中投影仪投射光线 L_{pa} 到折射玻璃面,经过多次折射后到达水下被测表面 S 。当投影仪投射光轴 P_a 垂直折射平面 π_{11} 投射,投射光轴 P_a 与折射平面法向量 N_p 平行。投影光轴 P_a 与投射光线 L_{pa} 相交于投影中心 P 。因此,投影光轴 P_a 、投影入射光线 L_{pa} 和投影折射光线 L_{pg} 三线共面于投影光平面 π_2 。也就是说,当投影设备垂直于折射平面 π_1 投射(即投射光轴 L_{pa} 垂直于折射平面 π_{11} ,且通过投影光平面 π_2)时,玻璃中投射光平面和空气中投射光平面共面。假设玻璃上下折射面相互平行,两个折射面的法线方向均为 N_p 。根据多次折射分析,投影入射光线 L_{pa} 和投影折射光线 L_{pw} 位于折射平面法线 N_p 的两边,且三线共面,即水下投射光平面、玻璃中投射光平面和空气中投射光平面为同一平面^[19]。 $n(A, B, C, D)$ 为投影结构光平面 π_2 的归一化法向量参数。投影光平面 π_2 与水下物体表面的交点 p_{01}, \dots, p_{0i} 为水下物体表面上的被测点。

以被测点 $p_{01}(x, y, z)$ 为例,分析其成像过程。经点 p_{01} 反射的光线经过界面 π_{11} 和 π_{12} 两次折射后,成像于摄像机像平面上点 p_4 ,入射光线与折射上下平面交于点 p_3 和 p_2 。物点 p_{01} 和点 p_2 构成水下入射光线 L_w ,交点 p_3 和 p_2 构成玻璃内折射光线 L_g 。

空气中成像光线传播路径中的折射矢量 l_a 可由被测物点的像点 $p_4(x_u, y_u, f)$ 与摄像机原点 o 表示为 op_4 。折射平面交点 $p_3(x_3, y_3, z_3)$ 可由成像折射光线 l_a 和折射平面 π_{11} 相交得到。

$$p_3 = \frac{-d}{ax_u + by_u + cf} p_4 \quad (1)$$

当玻璃上下折射面相互平行,两个折射面的法线方向同为 $N_p(a, b, c)$ 。根据 Snell 定律的矢量形式,玻璃中光路 l_g 和空气中光路 l_a 之间的关系为:

$$l_g = n_1 l_a + (\sqrt{1 - n_1^2 + g_1^2} - g_1) \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中: $g_1 = \frac{n_1(ax_u + by_u + cf)}{\sqrt{x_u^2 + y_u^2 + f^2}}$, n_1 为 空/玻璃相

对折射率($n_1=n_a/n_g$),根据线面相交可得出玻璃下平面的交点 $p_2(x_2, y_2, z_2)$ 。

$$p_2 = p_3 + \frac{W}{n_p \cdot l_g} l_g. \quad (3)$$

经过相互平行两折射面后,入射光路 l_w 和折射光路 l_a 之间的关系为:

$$l_w = n_2 l_g + (\sqrt{1 - n_2^2 + g_2^2} - g_2) \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中: $g_2 = \frac{n_2(ax_2 + by_2 + cz_2)}{\sqrt{x_2^2 + y_2^2 + z_2^2}}$, n_2 为玻璃/水相

$$\begin{cases} x = x_2 + \lambda \left\{ \frac{n_a x_u}{n_w \sqrt{x_u^2 + y_u^2 + f^2}} + a \left[n_2 (\sqrt{1 - n_1^2 + g_1^2} - g_1) + (\sqrt{1 - n_2^2 + g_2^2} - g_2) \right] \right\} \\ y = y_2 + \lambda \left\{ \frac{n_a y_u}{n_w \sqrt{x_u^2 + y_u^2 + f^2}} + b \left[n_2 (\sqrt{1 - n_1^2 + g_1^2} - g_1) + (\sqrt{1 - n_2^2 + g_2^2} - g_2) \right] \right\} \\ z = z_2 + \lambda \left\{ \frac{n_a f}{n_w \sqrt{x_u^2 + y_u^2 + f^2}} + c \left[n_2 (\sqrt{1 - n_1^2 + g_1^2} - g_1) + (\sqrt{1 - n_2^2 + g_2^2} - g_2) \right] \right\} \end{cases}. \quad (7)$$

2.2 自然水体环境对三维测量精度的影响

根据以上公式可知,水下三维测量精度受限于像点坐标 (x_u, y_u) 、相对折射率 n 、相机焦距 f 、折射平面和光平面法向量 $(N_p(a, b, c, d), N(A, B, C, D))$ 等参数的获取精度。像点坐标和相对折射率误差主要来源于自然水体环境;相机焦距、折射平面和光平面的参数误差来源于标定过程。这里主要分析自然水体环境对三维测量精度的影响,采用蒙特卡洛统计分析方法,对测量模型中三维测量坐标相对于图像坐标 (x_u, y_u) 误差的鲁棒性进行分析。在每个参数上加入的不同相对均值和方差的随机噪声,计算 10 000 次以上,分析同一方差下三维点云坐标计算相对误差随噪声相对均值的变化情况。

如图 2 所示,当图像坐标 (x_u, y_u) 加入相对方差为 0.1 的噪声时,三维点云的计算误差相对均值为 0.1。当图像坐标 (x_u, y_u) 加入相对方差为 0.1 和相对均值在 $[-0.1, 0.1]$ 范围内的噪声时,三维点云的计算误差相对均值约为 0.06。假设图像坐标真实值为(1 000, 1 000)pixel,像点提取误差为 5 pixels(相对误差为 0.005),测量相对误差为 0.04。当测量距离为 1 500 mm,可以得到误差均值为 60 mm 的点云计算结果。加大图像

对折射率($n_2=n_g/n_w$)。根据点线关系,被测物点 $p_{01}(x, y, z)$ 可表示为:

$$p_{01} = p_2 + \lambda l_w, \quad (5)$$

其中, λ 为比例系数,由被测物点的位置决定。投射光平面 π_2 与水下入射光路 l_w 相交于被测物点,即 $p_{01} = l_w \cap \pi_2$,由此可得出公式(1)中的比例系数 λ 为:

$$\lambda = \frac{-[A \ B \ C \ D] \cdot [x_2 \ y_2 \ z_2 \ 1]^T}{[A \ B \ C] \cdot l_w^T}. \quad (6)$$

水下被测点 $p_{01}(x, y, z)$ 可表示为:

坐标 (x_u, y_u) 噪声的相对均值和方差时,三维点云的计算误差明显增大。

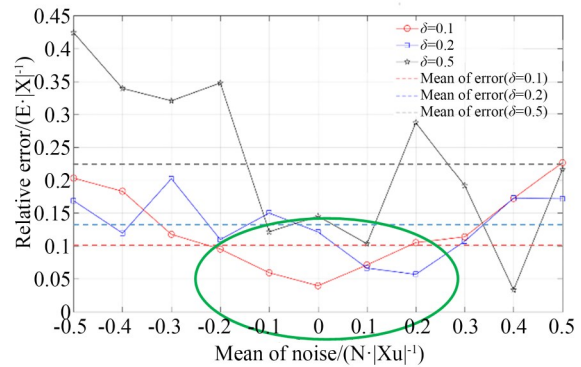


图 2 像点提取误差对三维测量误差的影响

Fig. 2 Error analysis of 3D measurement due to image point extraction error

根据以上分析可知,自然水体引起点云坐标计算误差主要来源于水下图像模糊所引起的像点坐标提取误差。在 2 000 mm 以内的测量距离上进行河流水下三维视觉测量,只要像点提取相对误差在 10% 以内,可以获得误差在 ± 1 dm 以内三维点云计算结果。

3 自然水体中投射模式设计与解码

3.1 投影编码光设计

根据编码光设计不同,编码光可分为强度编码光和相位编码光两大类。强度编码光包括散斑编码光^[20]、多线编码光^[21]和二值编码光(如空间编码的DeBruijn码^[22-23]和时间编码的格雷码^[24]);相位编码光包括单频正弦光栅^[25]和复合正弦光栅^[26]。其中,二值编码光是误差最小的编码方式,对成像条件和图像质量具有良好的鲁棒性和抗噪性,被广泛地应用到工业零部件检测、逆向工程、文物数字化等应用领域。

由于光线在自然水体中存在严重的衰减和散射等现象,水下图像存在图像模糊、特征提取困难等情况,本文设计黑白交错中心旋转径向多线编码光模式。如图3所示,以黑白边缘作为测量条纹,以水平边缘S1作为参考轴,按逆时针顺序依次间隔45°为条纹S6、S11和S16;将图3(a)投影模式按逆时针方向依次旋转9°,18°,27°,36°得到图3(b)、(c)、(d)和(e)中的中心旋转投影编码光模式;5场投影模式中每隔9°得到一条条纹线,可以获得20条条纹,与投影中心P构成20个光平面。

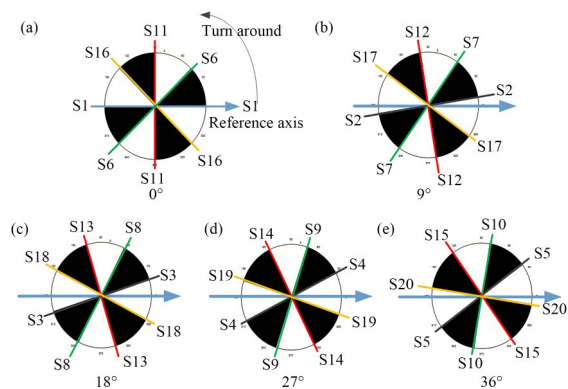


图3 结构光系统投影模式设计(a)基准投射模式;(b)~(e)多场中心旋转投影模式

Fig. 3 Design of projection model in structured light system (a) The model of projection; (b)~(e) Multi-field center rotation projection models

对单场投射而言,相邻结构光条纹的夹角为45°,可增大条纹边缘解码的容错性,适应水下降质图像的特点,降低了条纹的误匹配率;结合河

流水下形貌测量多为静态测量的特点,采用多场次投射,获得多条测量条纹,提高了对被测物体的扫描分辨率,可以更好地获取被测物体的形貌特征。

3.2 浑水图像的条纹解码

在多条纹结构光模型中,一条条纹对应一个测量光平面,条纹的正确提取和解码在结构光测量过程中至关重要。由于自然水体中颗粒物对投射光源的散射作用,水下图像存在雾状模糊、对比度下降等现象,对准确获取物体表面特征信息造成干扰。

投影仪投射的编码条纹图像为多场共点的条纹簇,采用极坐标下的条纹表达式来描述条纹,利用各个条纹相对于参考轴的夹角解码条纹。如图4所示,浑水图像的条纹解码过程分为极坐标参数校正、浑水图像清晰化预处理、条纹提取和解码四个步骤。

第一步:极坐标参数校正

建立条纹簇的极坐标系需要事前确定极坐标中心和参考轴。首先,在清水中投射编码模式,采集平面模板的测量图,提取条纹边缘像点。采用牛顿迭代法,拟合对应的条纹直线簇。利用优化运算的方法,估计出直线簇的交点,即为条纹极坐标的中心。

在本文折射测量模型中,投影仪垂直投射,摄像机倾斜拍摄。对编码条纹进行解码前,需要校正成像面的极轴。采集第一场编码光图像,选取分布±45°两条直线上的条纹像点。根据像点信息,拟合出条纹像点所在的直线方程。利用两直线倾角 δ_1 和 δ_2 ,以倾角为 $(\delta_1 + \delta_2)/2$ 过交点的直线作为极轴。

第二步:去除浑水图像的雾状模糊

事先向当前水体中投射全白模式,分析采集图像的特点,获得图像雾状模糊模板;利用模板运算削弱浑水图像的雾状模糊;采用高通滤波的方法,加强条纹边缘信息。

第三步:条纹提取

对预处理后的水下图像进行边缘检测,提取条纹边缘像素点。利用标定过程中所估计出径向多线条纹的交点作为极坐标中心,将像素点坐标转为极坐标值,建立条纹解码极坐标系。

第四步:根据极径和极角对条纹进行解码。

单场条纹图中,条纹间隔角度均匀分布于 180° 范围内,相邻条纹间最大角度偏移量为 45° 。这里相邻条纹间偏移范围选取 $(-20^\circ, 20^\circ]$ 。通过5场投影编码图获得20条测量条纹。5场编码图得到相邻条纹间的角度间隔为 9° 。

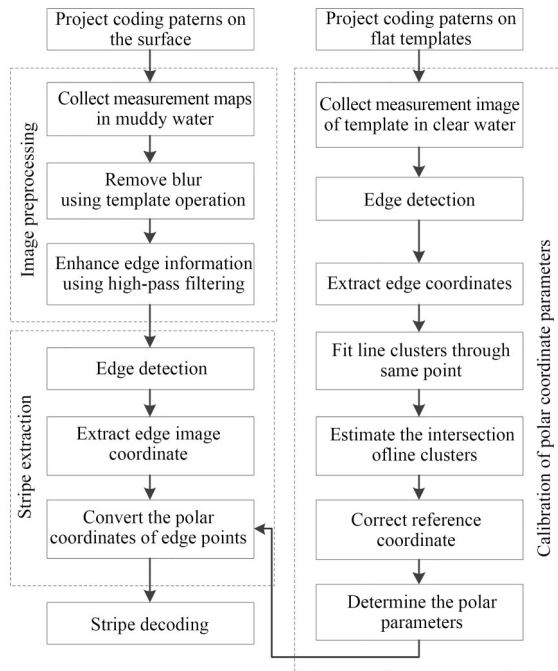


图4 浑水图像的条纹解码过程

Fig. 4 Stripe decoding of image under turbid water

如图5所示,以第一场测量图为例,四条参考条纹的倾角分别为 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 和 135° 。四条条纹角度范围分别为 $(-20^\circ, 20^\circ], (25^\circ, 65^\circ], (70^\circ, 110^\circ]$ 和 $(115^\circ, 155^\circ]$ 。判断测量像点在极坐标系上极角 θ_p 符合的区间范围为对应的条纹编码(光平面序号)。图中黑点表示测量图中的有效像点,红色星点表示无效像点。测量像点 A_1 和 A_2 的极角分别为 θ_1 和 θ_2 , θ_1 和 θ_2 均满足角度区间 $(-20^\circ, 20^\circ]$,被判别为条纹S1上测量点;测量像点 A_3 的极角 θ_3 满足角度范围 $(25^\circ, 65^\circ]$,则被判断为条纹S2上的测量点;测量像点 A_4 的极角 θ_4 不满足以上四个角度范围,被视为无效像点。

以上分析可得,第 i 场投影编码图像中,第 k 条条纹上像点的解码规则为:

$$Snum=5i+k$$

$$\theta_p \in (i \times 45^\circ + k \times 9^\circ - 20^\circ, i \times 45^\circ + k \times 9^\circ + 20^\circ,$$

(8)

其中: $Snum$ 为第 k 条条纹的解码值, θ_p 为测量像点的极角, p 为测量像点的序号。

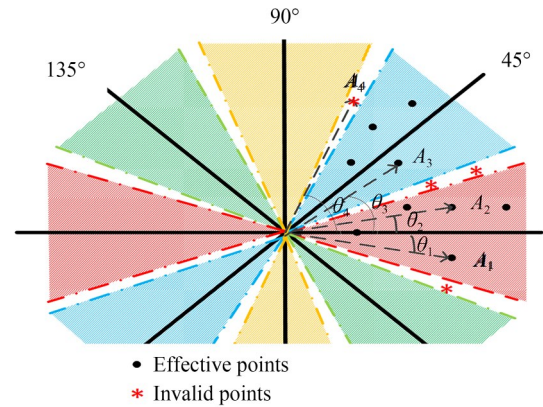


图5 第一场测量图的条纹解码规则示例

Fig. 5 Example of stripe decoding rules for the first field measurement pattern

4 水下结构光系统参数标定

根据公式(7)所示,水下被测点 $p_{01}(x, y, z)$ 坐标计算公式中需要事先确定的参数有玻璃介质的厚度 W ,空气中、玻璃中和水下的折射率(n_a, n_g 和 n_w);需要事先标定的参数有相机光学参数(焦距 f 、平移向量 T 和旋转矩阵 R)、折射平面参数 $N_p(a, b, c, d)$ 和光平面参数 $N(A, B, C, D)$ 。因此,水下结构光系统标定共分为三部分。

第一步:摄像机参数(相机焦距 f 、畸变系数 k 和外部参数(R 和 T))的标定。由于摄像机内外参数受成像环境的影响不大。这里采用空气中的相机标定方法,利用空气中靶标平面上已知特征点完成摄像机参数标定。

第二步:投影光平面参数($N(A, B, C, D)$)标定。根据以上水下视觉测量模型可知,当投影光轴垂直于折射平面,且通过光平面时,水下投射光平面和空气中投射光平面共面,可利用空气中光平面参数的标定方法进行水下投射光平面参数标定。投射光平面和被测物体表面相交曲线上的点即为测量点。由于测量点的任意性,无法

事先得到各个光平面上的标定。本文采用交比不变法,利用靶标上的已知特征点间接求得标定点的三维坐标。通过多次获取结构光平面上的多组标定完成光平面参数标定。

第三步:折射平面参数($N_p(a, b, c, d)$)标定。结构光视觉系统在水下测量过程中常将投影设备和成像设备封闭在透明箱体中,折射平面的标定可借助结构光系统在空气中对投射平面的测量数据进行。通过计算出来的折射平面上测量点,优化估计折射平面参数。这里暂不考虑水下环境对折射平面参数的影响。

4.1 摄像机参数标定

摄像机标定采用基于径向排列约束的两步标定算法对摄像机参数进行标定^[27]。由摄像机采集棋盘格图像,采用角点检测算法提取棋盘格中的角点像坐标。以棋盘格平面靶标的中心建立世界坐标系,利用已知的靶标上角点坐标和对应的像坐标求解摄像机内外参数,其中靶标角点世界坐标和像坐标分布如图 6 所示,得出的摄像机标定参数如表 1 所示。

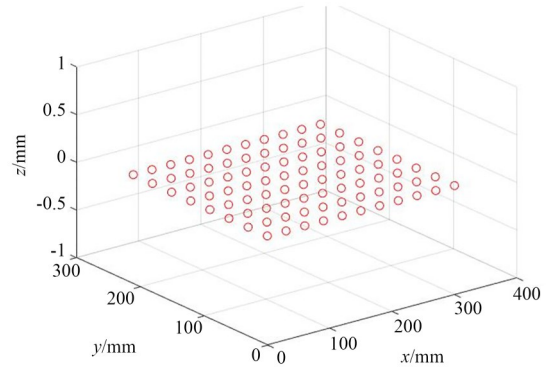
4.2 光平面参数标定

4.2.1 标定点计算

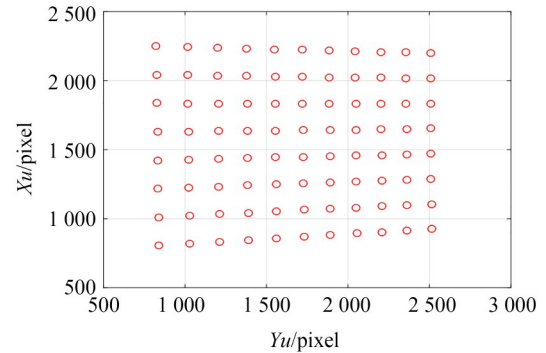
如图 7,光条纹投射到平面靶标上为直线 L_2 , E_1, E_2, E_3 为平面靶标上位于直线 L_1 上的特征点,它们在世界坐标系下的坐标分别为 $E_1(x_{w1}, y_{w1}, 0), E_2(x_{w2}, y_{w2}, 0), E_3(x_{w3}, y_{w3}, 0)$, 与特征点相对应的图像点为 $e_1(X_{u1}, Y_{u1}), e_2(X_{u2}, Y_{u2}), e_3(X_{u3}, Y_{u3})$, 光条纹与靶标平面上共线特征点所在直线的交点 $E_x(x_{wx}, y_{wx}, 0)$ 为标定点, 其对应图像点为 $e_x(X_{ux}, Y_{ux})$ 。在像坐标系下,通过求解特征点所在拟合直线和光条纹所在拟合直线的交点,得到标定点的像点坐标 e_x 。根据交比不变原理可知^[28]:

$$Cr(e_1, e_2, e_3, e_x) = Cr(E_1, E_2, E_3, E_x). \quad (9)$$

$$\begin{cases} x_{wx} = \frac{q_1(x_{w1}x_{w2} - x_{w2}x_{w3}) + q_2(x_{w1}x_{w3} - x_{w1}x_{w2})}{q_1(x_{w1} - x_{w3}) + q_2(x_{w3} - x_{w2})} \\ y_{wy} = \frac{q_3(y_{w1}y_{w2} - y_{w2}y_{w3}) + q_4(y_{w1}y_{w3} - y_{w1}y_{w2})}{q_3(y_{w1} - y_{w3}) + q_4(y_{w3} - y_{w2})} \end{cases}, \quad (10)$$



(a) 角点世界坐标分布
(a) World coordinates of corners



(b) 角点图像坐标分布
(b) Imaging coordinates of corners

图 6 棋盘格平面靶和角点的世界坐标和像点坐标
Fig. 6 World coordinates and imaging coordinates of corners on planar target with checkerboard

表 1 摄像机标定参数

Tab. 1 Camera calibration parameters

Parameters	Calibration results
Focal length f	40.347 1 mm
Distortion coefficient k	$-1.477 14 \times 10^{-4}$
Rotation matrix R	$\begin{bmatrix} 0.8195 & 0.0066 & 0.5730 \\ 0.0254 & -0.9994 & -0.0248 \\ 0.5725 & 0.0349 & -0.8192 \end{bmatrix}$
Translation vector T	$[-156.3 \quad 135.21 \quad 1208.6]^T$

标定点在世界坐标系的坐标为:

其中:

$$\begin{cases} q_1 = (X_{u1} - X_{ux})(X_{u2} - X_{u3}) \\ q_2 = (X_{u1} - X_{ux})(X_{u1} - X_{u3}) \\ q_3 = (Y_{u1} - Y_{ux})(Y_{u2} - Y_{u3}) \\ q_4 = (Y_{u1} - Y_{ux})(Y_{u1} - Y_{u3}) \end{cases} \quad (11)$$

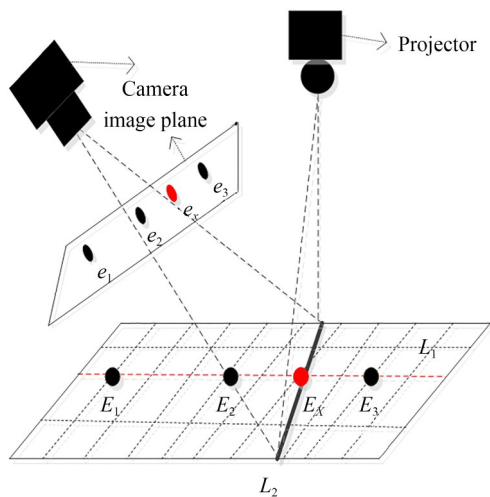


图 7 光平面标定原理

Fig. 7 Principle of light-plane calibration

在实际计算中,参与交比计算的特征点只有 3 个,所以计算结果很容易受到特征点噪声影响。为了克服噪声影响,所选取的靶标上共线特征点数 N 多于 3 个,通过计算 C_N^3 个特征点,然后求取均值得到该标定点的坐标值。

4.2.2 光平面参数估计

由光平面建模可知,光平面方程可用线性方程组求解表示:

$$M_{j \times 3} n = E, \quad (12)$$

其中: $M_{j \times 3}$ 为标定所构成的系数矩阵, j 为标定点的个数 ($j \geq 3$), E 为单位向量。为了保证所求光平面参数的准确性,使用多组标定采用非线性优化迭代的方法对光平面参数进行求解。系统中涉及的光平面参数如表 2 所示。

4.2.3 折射平面参数标定

利用已经建立的视觉测量系统对空气中的折射平面进行三维测量,通过采集折射平面上 5100 个测量点,求得折射平面参数为:

$$N_p = [-0.46 \quad 0.05 \quad 0.69 \quad -1452.36].$$

表 2 投影光平面参数

Tab. 2 Parameters of light-plane

Number	Parameters of light plane
s1	[-0.21 0.14 0.02 -2 230.23]
s2	[0.21 -0.44 0.60 -947.08]
s3	[0.34 0.08 0.86 -1 390.66]
s4	[0.18 0.45 0.39 -1 266.22]
s5	[0.02 0.03 0.09 -1 283.23]
s6	[0.16 -0.47 0.48 -1 325.53]
s7	[0.34 -0.03 0.87 -1 407.2]
s8	[0.23 0.44 0.53 -1 258.42]
s9	[0.03 0.19 0.04 -1 313.53]
s10	[0.11 -0.46 0.33 -1 176.72]
s11	[0.32 -0.15 0.85 -1 344.52]
s12	[0.28 0.39 0.65 -1 253.26]
s13	[0.07 0.33 0.13 -1 288.32]
s14	[0.06 -0.40 0.80 -1 202.45]
s15	[0.31 -0.31 0.75 -1 257.33]
s16	[0.12 0.46 0.25 -1 548.47]
s17	[0.22 -0.34 0.57 -1 214.20]
s18	[0.11 -0.13 0.01 -1 138.64]
s19	[0.28 -0.29 0.51 -1 281.25]
s20	[0.35 0.25 0.77 -1 434.21]

5 自然水体中三维视觉测量实验分析

5.1 水下视觉测量实验

如图 8 所示,水下视觉系统由尼康 D90 摄像机(最高分辨率为 $4\ 288 \times 2\ 848$)、爱普生 CH-TW610 的投影仪(亮度为 $3\ 000\ \text{lm}$,标准分辨率为 $1\ 920 \times 1\ 028$,对比度为 $15\ 000:1$,投影尺寸为 $30 \sim 300$ 英寸)组成。在标定中使用电动三维平移台(重复精度 $5\ \mu\text{m}$,分辨率 $2\ \mu\text{m}$)和平面靶标(9×12 个黑白相间的小方格,每个方格尺寸为 $30 \times 30\ \text{mm}$),平面靶标的加工精度为 $0.05\ \text{mm}$,相机和投影仪固定在支架上,其二者光轴夹角约为 30° 。假设水箱折射平面平整,利用水平仪测得折射平面倾角为 α ,设置投影仪垂直投射,调节投影仪支架倾角为 $90^\circ - \alpha$,保证投影仪垂直投射到折射平面上。水箱厚度 W 为 $7\ \text{mm}$,水箱尺寸为 $1\ \text{m} \times 1.2\ \text{m} \times 1\ \text{m}$,物体被放置在注水的水箱

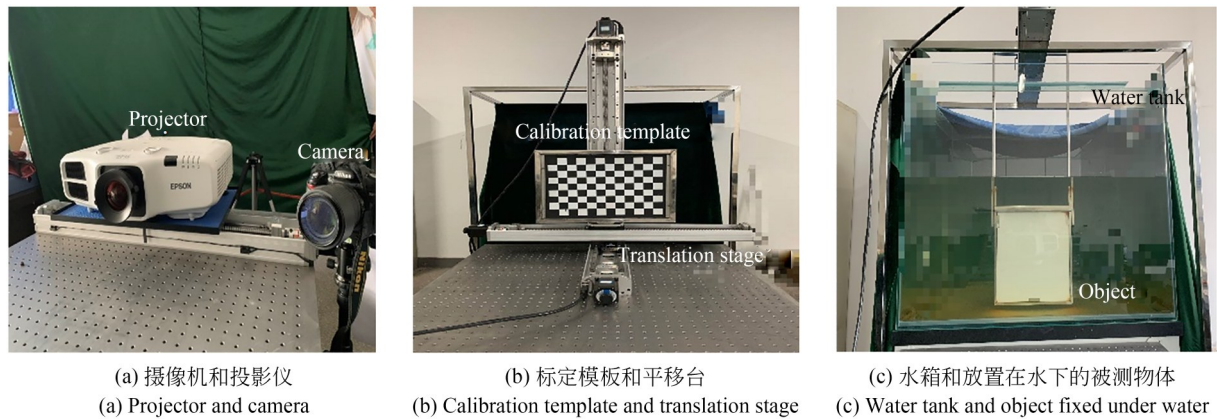


图 8 水下结构光系统构成

Fig. 8 Components of underwater structured light system

里,在水中加入泥沙模拟河流自然水体环境。空气中折射率 n_a 为 1,水中折射率 n_w 为 1.33,水箱玻璃的折射率 n_g 为 1.66。

5.2 清水中视觉测量实验分析

为了排除水体浑浊对三维测量的影响,本实验先在清水条件下获取物体的三维形貌,以便分析在本课题中所建立的水下视觉测量折射模型的可行性,为后期在自然水体下对物体进行三维

测量奠定理论基础。

将瓷瓶放置在装满清水的实验玻璃水槽内,其测量距离估算为 1 500 mm,将图 3 中设计的五场模式结构光模式以垂直折射平面的方式投射到瓷瓶表面上,摄像机采集到带有结构光投射模式的图像(如图 9)。通过线缆将图像传输到计算机内,在计算机提取图像中所包含的光条纹信息,依据 2.1 节的水下视觉测量折射模型,获取瓷瓶表面的三维信息。

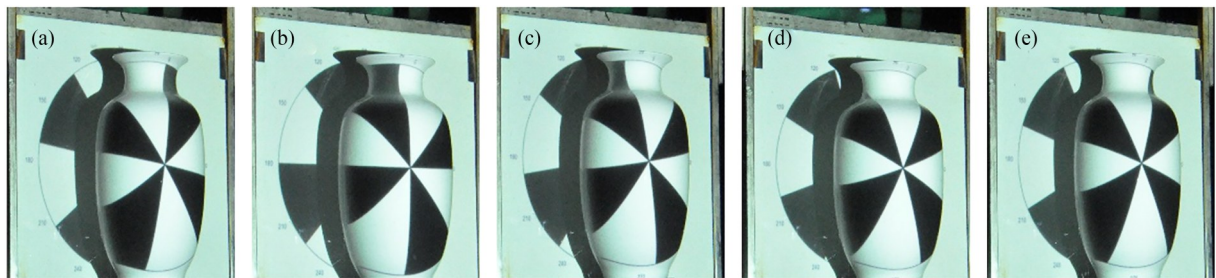


图 9 水下瓷瓶测量图像序列(a)~(e)5场投影模式的测量图像序列

Fig. 9 Underwater image acquisition sequence (a)~(e) Measurement images of projection period with five fields

在每一场模式结构光投射下,会有 4 个光平面,共存在 20 条光条纹。为了更直观的展现所提取条纹的位置分布,选择用极坐标的形式来存储和记录光条纹的信息。由于越靠近极点的位置,其光条纹分辨率越低,越容易造成光条纹提取的计算误差,为了减少这种误差,用极径 $r \geq 10$ pixels 范围内的光条纹信息点去获取瓷瓶表面的三维点云。单场提取的光条纹和五场一共提取的光条纹分布分别如图 10(a),10(b)所示,同一颜色代表同场投射中的 4 条光条纹,不同颜色代表

不同场次投射下的光条纹,每一条光条纹代表着一个投影光平面。利用测量得到的三维点云进行表面拟合,生成被测物体表面如图 10(c)所示。

5.3 浑浊水体中视觉测量实验分析

为了实验分析浑浊水体对水下三维形貌测量的影响,这里在 $1 \text{ m} \times 1.2 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$ 的水体中加入不同重量的泥沙,在 1 500 mm 的测量距离上,分别对不同浑水条件下的平面物体进行三维形貌测量。由于水体浑浊所引起的图像退化影

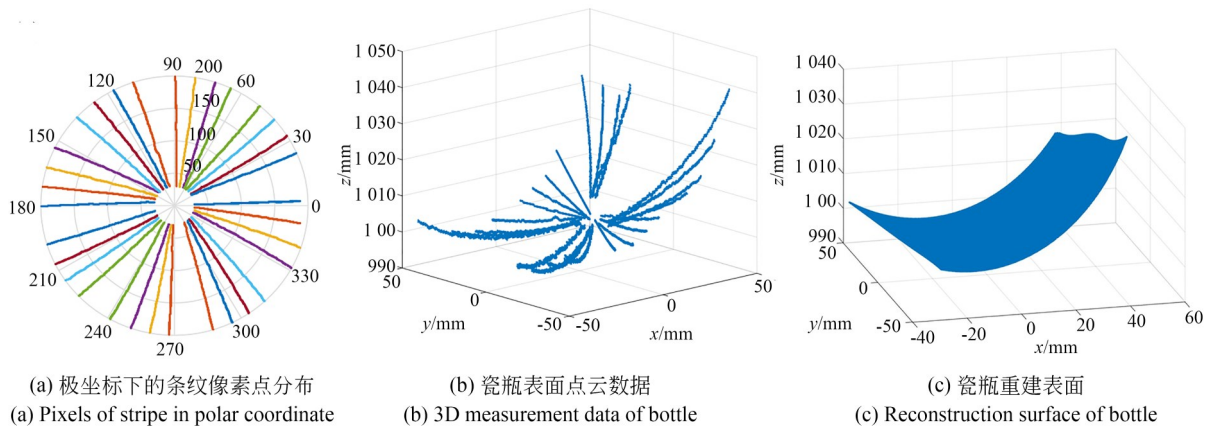


图 10 水下瓷瓶测量过程

Fig. 10 Underwater measurement process of bottle

响图像测量点的坐标提取和解码误差,最后影响到三维测量的计算精度。本文从浑浊水体对图像条纹提取和解码的影响,以及对三维测量精度的影响两方面进行实验分析。

5.3.1 浑浊水体中条纹提取和解码

以第一场测量过程为例,选取清水和含有 40, 60 和 90 g 泥沙的三种浑水条件进行实验分析。由于浑水泥沙颗粒所引起的图像雾状模糊,图像从清晰度、黑白条纹对比度等方面有明显退化,提取的条纹边缘像素也出现了偏移。

5.3.1.1 浑水图像的条纹提取

如图 11(a0)~11(a3)所示,随着水体浑浊程度的增加,浑水图像呈现雾状模糊现象,黑白块条纹边缘特性越来越不清晰。通过计算各类图像的平均梯度数据发现,由于水下雾化模糊,图像颗粒感提升,水下条纹图像的平均梯度(Average gradient)缓增,图像的平均梯度从 2.15 增加到 2.50。随着浑浊情况的增加,图像二值化结果显示黑白边缘分界逐渐模糊,边缘上噪声增加,边缘特征弱化。从条纹提取结果可以看出,水下条纹提取毛刺增加,边缘扩大,浑水图像边缘提取位置有一定的偏移。对比清水和 90 g 浑水的条纹提取结果和细节图(图 11(d0)和 11(d3))可知,清水中黑白条纹边缘像素提取无毛刺,基本符合直线分布;90 g 浑水条纹提取细节图像中边缘模糊,条纹边缘出现大量毛刺,甚至出现条纹边缘位置的偏移。

根据 2.1 节水下测量模型可知,当条纹边缘直线垂直于折射平面到水体中平面物体,测量图

像中的条纹边缘也应为直线。为了评价条纹边缘像点的提取精度,这里采用条纹边缘上直线拟合残差来衡量。从条纹提取细节结果可以看出水体越浑浊,浑水图像的直线拟合和清水图像的直线拟合偏离越大。清水图像的直线拟合残差为 0.41 pixel;随着浑浊程度的增加,浑水图像的直线拟合残差分别为 0.77, 4.24 和 27.09 pixel。

从以上数据可以看出,随着水体中泥沙含量的增加,图像质量逐渐退化,条纹提取误差加大。但图像退化质量和条纹提取误差并不随泥沙含量的增加线性恶化。当水体浑浊超出某一数值时,图像质量急剧退化,严重影响条纹提取,造成条纹解码错误,从而引起视觉测量失败。

5.3.1.2 浑水图像的条纹解码

在本文提出的多条纹结构光模型中,一条条纹对应一个测量光平面,条纹的正确解码在结构光测量过程中至关重要。根据条纹编码规则公式(8)可知,采用各个条纹相对于初始条纹的夹角来区分条纹。本文采用单场条纹图中包含 4 条条纹,通过 5 场投影测量图获得 20 条测量条纹。这样,单场条纹间隔角度均匀分布于 360° 范围内,相邻条纹间最大角度偏移量为 45°,相邻条纹间偏移范围选取 $(-22.5^\circ, 22.5^\circ]$ 。每个条纹的解码规则和四种水体的条纹图解码结果如表 3 所示。当加入 90 g 泥沙的浑水时,水下图像模糊加剧,条纹提取精度急剧下降,进而引起条纹解码错误。

5.3.2 浑浊水体对三维测量精度影响

为了分析浑浊水体对三维形貌数据计算影

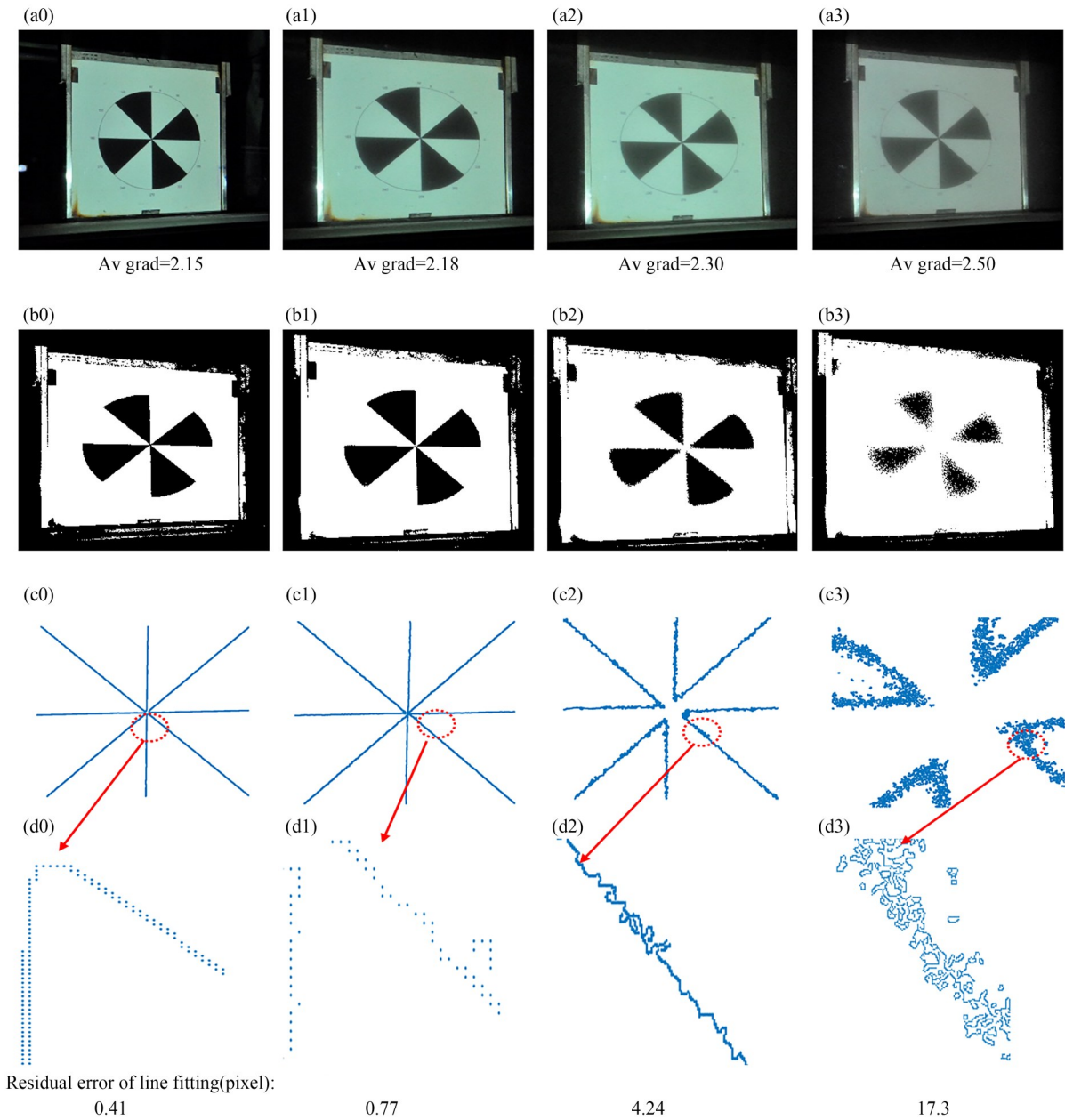


图 11 不同水体中的图像和条纹提取结果分析(a0)~(a3)不同水体中采集的图像;(b0)~(b3)不同水体中图像二值化结果;(c0)~(c3)不同水体中图像的条纹提取结果;(d0)~(d3)不同水体中条纹提取细节结果

Fig. 11 Analysis of image and stripe extraction results in different turbid water (a0)~(a3) Images of different turbid water; (b0)~(b3) Binary images of different turbid water; (c0)~(c3) Stripe extraction in different turbid water; (d0)~(d3) Detail of stripe extraction

响程度,这里对清水和各类浑水情况下三维测量进行实验分析。从图 12(a0)~12(a3)可以看出,随着水体浑浊程度的增加,平面重建结果从光滑平面逐渐变得粗糙;平面拟合残差也逐步加大,清水条件下平面拟合残差为 0.95 mm,含有 40 g 泥沙的浑水下平面拟合残差为 1.93 mm,含有 60 g 泥沙的浑水下平面拟合残差为 5.43 mm,

含有 90 g 泥沙的浑水下平面拟合残差为 21.43 mm。清水和三种不同浑水水体中条纹解码结果如表 3 所示,其中 Muddy water1-3 分别表示含 40,60 和 90 g 泥沙的浑水环境。以第一场条纹解码为例,一场测量图像中包括条纹 s1,s6,s11 和 s16。四条条纹根据各自的编码规则对条纹直线

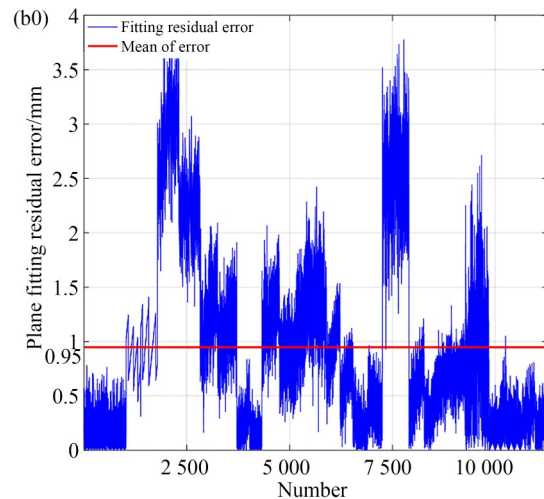
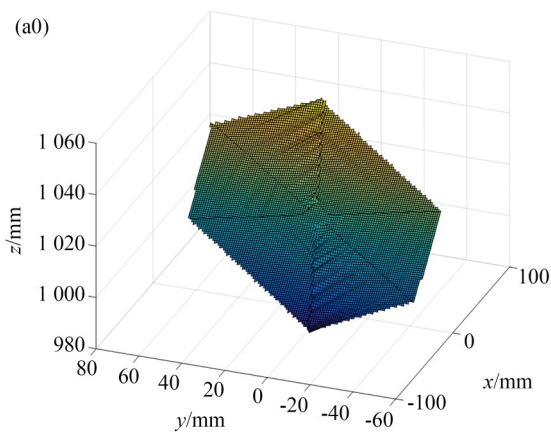
表 3 四种水体的条纹解码结果

Tab. 3 Stripe decoding results of four different water with silt

Field	Stripe	Standard polar angle θ	Decoding rules	Clear water		Muddy water 1 (40 g)		Muddy water 2 (60 g)		Muddy water 3 (90 g)	
				Fitting angle θ	Decoding result	Fitting angle θ	Decoding result	Fitting angle θ	Decoding result	Fitting angle θ	Decoding result
Field 1	s1	0°	$\theta \in (-22.5^\circ, 22.5^\circ]$	0.85°	s1	-5.15°	s1	-4.14°	s1	-24.59°	Error
	s6	45°	$\theta \in (22.5^\circ, 67.5^\circ]$	53.61°	s6	55.46°	s6	53.83°	s6	50.78°	s6
	s11	90°	$\theta \in (67.5^\circ, 112.5^\circ]$	98.11°	s11	95°	s11	97.13°	s11	87.05°	s11
	s16	135°	$\theta \in (112.5^\circ, 157.5^\circ]$	136.78°	s16	138.44°	s16	137.86°	s16	121.87°	s16
Field 2	s2	9°	$\theta \in (-13.5^\circ, 31.5^\circ]$	11.28°	s2	12.03°	s2	11.03°	s2	-22.35°	Error
	s7	54°	$\theta \in (31.5^\circ, 76.5^\circ]$	63.52°	s7	67.75°	s7	66.08°	s7	72.42°	s7
	s12	99°	$\theta \in (76.5^\circ, 121.5^\circ]$	105.68°	s12	100.54°	s12	102.84°	s12	113.69°	s12
	s17	144°	$\theta \in (121.5^\circ, 166.5^\circ]$	144.68°	s17	148.4°	s17	146.42°	s17	150.4°	s17
Field 3	s3	18°	$\theta \in (-4.5^\circ, 40.5^\circ]$	21.72°	s3	13.34°	s3	20.35°	s3	30.83°	s3
	s8	63°	$\theta \in (40.5^\circ, 85.5^\circ]$	73.16°	s8	78.69°	s8	73.62°	s8	80.96°	s8
	s13	108°	$\theta \in (85.5^\circ, 130.5^\circ]$	113.13°	s13	104.37°	s13	112.37°	s13	125.81°	s13
	s18	153°	$\theta \in (130.5^\circ, 175.5^\circ]$	153.28°	s18	162.42°	s18	154.65°	s18	162.2°	s18
Field 4	s4	27°	$\theta \in (4.5^\circ, 49.5^\circ]$	32.76°	s4	30.37°	s4	31.91°	s4	45.5°	s4
	s9	72°	$\theta \in (49.5^\circ, 94.5^\circ]$	81.83°	s9	86.69°	s9	85.18°	s9	90.54°	s9
	s14	117°	$\theta \in (94.5^\circ, 139.5^\circ]$	121.01°	s14	116.34°	s14	117.21°	s14	119.59°	s14
	s19	162°	$\theta \in (139.5^\circ, 184.5^\circ]$	161.74°	s19	163.98°	s19	161.9°	s19	170.69°	s19
Field 5	s5	36°	$\theta \in (13.5^\circ, 58.5^\circ]$	43.49°	s5	40.85°	s5	42.51°	s5	50.81°	s5
	s10	81°	$\theta \in (58.5^\circ, 103.5^\circ]$	90.31°	s10	94.43°	s10	92.93°	s10	97.58°	s10
	s15	126°	$\theta \in (103.5^\circ, 148.5^\circ]$	128.64°	s15	125.07°	s15	126.09°	s15	140.78°	s15
	s20	171°	$\theta \in (148.5^\circ, 193.5^\circ]$	171.4°	s20	173.11°	s20	172.05°	s20	195.47°	Error

拟合角度进行解码,四条条纹在清水、40和60 g 浑水中解码均为正确结果,条纹s1在 Muddy water3中测量图中,由于浑水图像模糊引起条纹拟合角度为-24.59°,解码结果出现错误。五场测

量图像在清水和三种浑水中的解码过程中,只有在 Muddy water3中出现了三次条纹解码错误。当水体浑浊到一定程度引起条纹解码错误时,三维测量误差会急剧增加。



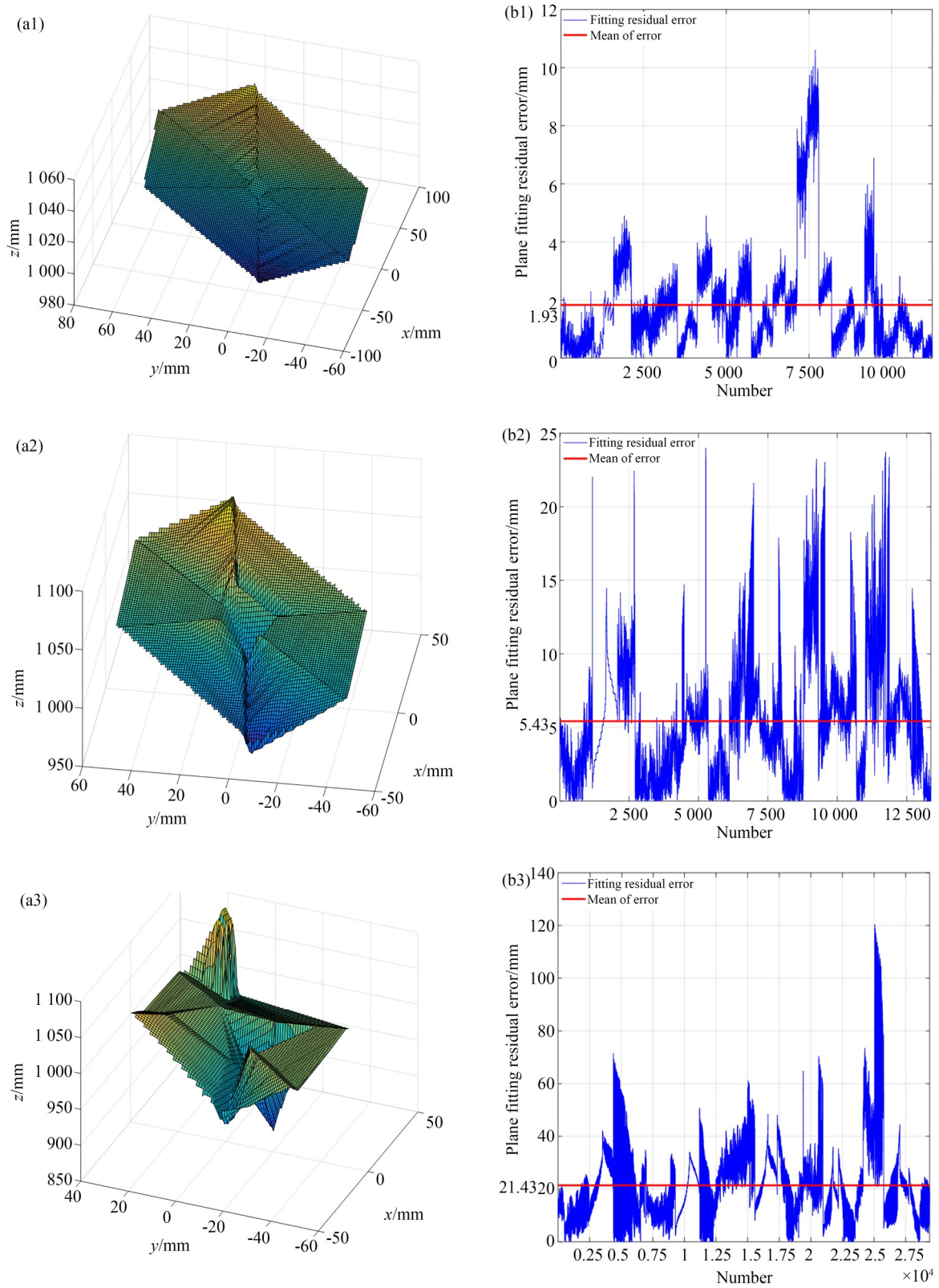


图 12 不同浑浊水体中水下平面物体三维形貌测量结果(a0)~(a3)清水和三种浑水中测量表面图;(b0)~(b3)清水和三种浑水中平面拟合残差数据

Fig. 12 3D results of planar object under different turbid water(a0)~(a3) Measurement surfaces under clear water and three different turbid water; (b0)~(b3) Results of plane fitting residuals under clear water and three different turbid water

通过以上实验分析可看出,如表 4 和图 13 所示,随着水体浑浊程度的增加,三维测量误差加大(在 60 g 以内泥沙的情况下,条纹提取误差和三维测量误差随着泥沙量的增加近线性增加);当水体浑浊到一定程度(泥沙含量到 90 g)时,水下图像雾化现象严重带来测量像点提取误差加大和条纹解码错误时,视觉测量精度和相对于测量距离的相对误差急剧下降。

表 4 浑浊水体对三维视觉测量的影响

Tab. 4 Influence of turbid water on 3D vision measurement

Water type	Error of stripe extraction(pixel)	Error of 3D measurement (mm)	Relative measurement error (%)
Clear water	0.41	0.95	0.06
Muddy water1	0.77	1.93	0.13
Muddy water2	4.24	5.43	0.36
Muddy water3	27.09	21.43	1.43

6 结 论

基于视觉的三维形貌测量技术已在工业检测、逆向工程、大型工程形貌缺损探测等方面得到了广泛应用,该技术凭借着高精度、高速、非接触等优点,已成为目前非接触三维形貌测量中的主要方法。

在水下三维测量过程中,由于非线性折射影

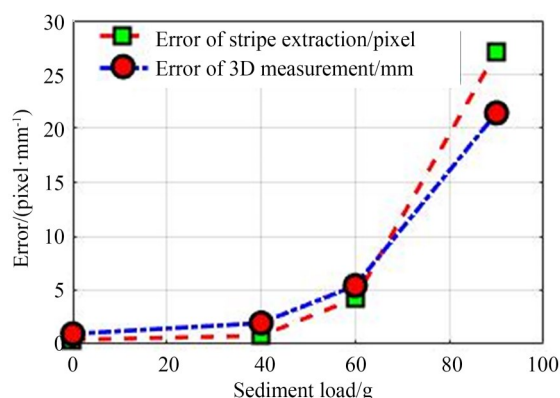


图 13 不同浑浊水体的条纹提取误差和视觉测量误差
Fig. 13 Error of stripe extraction and 3D vision measurement due to different turbid water

响以及水下图像退化的问题,使其不利于在实际中的应用。为此,本文从水下测量折射模型和适应退化水下图像特性两方面提出了一种基于多线结构光的水下视觉测量方法。建立了摄像机像平面中二维点与水下被测目标三维点的一一对应关系;分析了浑水条件下像点提取误差和空/水相对折射率扰动对三维点云计算的影响程度;设计了黑白相间的中心旋转结构光条纹,适应了浑水图像降质的情况。实验结果证明,该方法在 1 500 mm 的测量距离上,清水环境下对瓷瓶自由表面进行测量获得较好的重建效果,对平面获得平面残差为 0.95 mm 的测量结果;在含有 40, 60 和 90 g 泥沙的浑水中进行平面三维测量,可以获得平面残差分别为 1.93, 5.43 和 21.43 mm 的测量结果。

参考文献:

- [1] 李维平, 方忠旺. 基于水域机器人的水下地形测量系统研究与应用[J]. 北京测绘, 2019, 33(9): 1098-1101.
LI W P, FANG ZH W. Research and application of underwater topographic surveying system based on water robot[J]. *Beijing Surveying and Mapping*, 2019, 33(9): 1098-1101. (in Chinese)
- [2] 陈齐. 基于无人机航测及水下地形测量的水利工程高精度 DEM 构建研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2020, 43(1): 205-208.
CHEN Q. Construction of high-precision DEM for water conservancy project based on UAV aerial sur-

- vey and underwater topographic survey[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2020, 43(1): 205-208. (in Chinese)
- [3] 王凤瑞. 多波束测深系统在大浪淀水库水下地形测量中的应用[J]. 水利科技与经济, 2015, 21(1): 18-19.
WANG F R. Application of multi-beam sounding System in Da Lang Dian reservoir underwater topographic survey[J]. *Water Conservancy Science and Technology and Economy*, 2015, 21(1): 18-19. (in Chinese)
- [4] 马坤, 王平, 王俊雷, 等. 多波束测深技术在黄河床面形态观测中的应用[J]. 人民黄河, 2018, 40(2): 18-20, 41.

- MA K, WANG P, WANG J L, *et al.* Application of multi-beam sounding technology in the observation of Yellow River bed morphology [J]. *Yellow River*, 2018, 40(2): 18-20, 41. (in Chinese)
- [5] 万至达, 张学武, 盛金保, 等. 水下结构物表面缺陷的仿生双目视觉测量[J]. *水利水运工程学报*, 2019(2): 71-78.
- WAN ZH D, ZHANG X W, SHENG J B, *et al.* Bionic binocular vision measurement of surface defects of underwater structures [J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2019(2): 71-78. (in Chinese)
- [6] 丁超, 唐力伟, 曹立军, 等. 基于结构光的身管膛线高度差检测[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(4): 545-553.
- DING CH, TANG L W, CAO L J, *et al.* Height difference detection of barrel rifling based on structured light [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(4): 545-553. (in Chinese)
- [7] 王华, 邢春齐, 高金刚, 等. 点云频域配准的双目双线结构光列车轮对检测[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(3): 616-624.
- WANG H, XING CH Q, GAO J G, *et al.* Detection of wheel-set size of rail vehicle using double 2D laser displacement sensors based on point cloud data registration in frequency domain [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(3): 616-624. (in Chinese)
- [8] 雷国斌. 固体发动机内绝热层表面三维缺陷检测与修补[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- LEI G B. *Three-dimensional Defect Detection and Repair on the Surface of Thermal Insulation Layer in Solid Motor* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020. (in Chinese)
- [9] 李勇, 张广汇, 马利红, 等. 条纹投影动态三维表面成像技术综述[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(3): 91-103.
- LI Y, ZHANG G H, MA L H, *et al.* Review of dynamic three-dimensional surface imaging based on fringe projection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(3): 91-103. (in Chinese)
- [10] 左超, 张晓磊, 胡岩, 等. 3D真的来了吗?: 三维结构光传感器漫谈[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(3): 9-53.
- ZUO CH, ZHANG X L, HU Y, *et al.* Has 3D finally come of age? —An introduction to 3D structured-light sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(3): 9-53. (in Chinese)
- [11] 刘宾, 王黎明, 赵霞. 基于CCD尺寸测量中图像边缘退化及恢复技术研究[J]. *应用光学*, 2013, 34(6): 995-999.
- LIU B, WANG L M, ZHAO X. Restoration of degraded edge in size measurement based on CCD image [J]. *Journal of Applied Optics*, 2013, 34(6): 995-999. (in Chinese)
- [12] 袁清钰. 条纹管激光雷达水下三维成像及图像处理研究[D]. 深圳: 深圳大学, 2018.
- YUAN Q Y. *Research on Underwater Three-dimensional Imaging and Image Processing of Streak Tube Imaging Lidar* [D]. Shenzhen, China: Shenzhen University, 2018. (in Chinese)
- [13] 邹文. 水下航行器视觉系统设计与图像清晰化算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- ZOU W. *Research on Vision System Designing and Image Dehazing Algorithm of Underwater Vehicles* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese)
- [14] LAVEST J M, RIVES G, LAPRESTÉ J T. Dry camera calibration for underwater applications [J]. *Machine Vision and Applications*, 2003, 13(5/6): 245-253.
- [15] KWON Y H, CASEBOLT J B. Effects of light refraction on the accuracy of camera calibration and reconstruction in underwater motion analysis [J]. *Sports Biomechanics*, 2006, 5(2): 315-340.
- [16] 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. (in Chinese)
- [17] 解则晓, 余江姝, 迟书凯, 等. 非平行双目视觉系统水下标定与测量[J]. *光学学报*, 2019, 39(9): 195-204.
- XIE Z X, YU J SH, CHI SH K, *et al.* Underwater calibration and measurement based on non-parallel stereovision [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(9): 195-204. (in Chinese)
- [18] FAN H, QI L, JU Y K, *et al.* Refractive laser triangulation and photometric stereo in underwater environment [C]. 2017: 113101.
- [19] 许丽, 周永昊, 张帆, 等. 基于光平面约束的水下三维视觉测量系统[J]. *中国激光*, 2020, 47(9): 0904004.
- XU L, ZHOU Y H, ZHANG F, *et al.* Underwater three-dimensional measurement vision system using light-plane constraint [J]. *Chinese Journal of*

- Lasers*, 2020, 47(9): 0904004. (in Chinese)
- [20] SJÖDAHL M, SYNNERGRÉN P. Measurement of shape by using projected random patterns and temporal digital speckle photography[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(10): 1990.
- [21] ETTL S, AROLD O, YANG Z, *et al.* Flying triangulation: an optical 3D sensor for the motion-robust acquisition of complex objects[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(2): 281-289.
- [22] PAGÈS J, SALVI J, COLLEWET C, *et al.* Optimised De Bruijn patterns for one-shot shape acquisition[J]. *Image and Vision Computing*, 2005, 23(8): 707-720.
- [23] 张启灿, 吴周杰. 基于格雷码图案投影的结构光三维成像技术[J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(3): 78-90.
- ZHANG Q CH, WU ZH J. Three-dimensional imaging technique based on Gray-coded structured illumination[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(3): 78-90. (in Chinese)
- [24] INOKUCHI S. Range imaging system for 3D object recognition[J]. *ICPR*, 1984, 1984: 806-808.
- [25] QIAN K M. Windowed Fourier transform for fringe pattern analysis[J]. *Applied Optics*, 2004, 43(13): 2695.
- [26] ZUO C, FENG S J, HUANG L, *et al.* Phase shifting algorithms for fringe projection profilometry: a review[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 109: 23-59.
- [27] TSAI R. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses[J]. *IEEE Journal on Robotics and Automation*, 1987, 3(4): 323-344.
- [28] 许丽, 张之江. 基于共面靶标的结构光标定方法[J]. *光电子激光*, 2009, 20(8): 1063-1069.
- XU L, ZHANG ZH J. Calibration in structured light system using coplanar target[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2009, 20(8): 1063-1069. (in Chinese)

作者简介:



许丽(1978—),女,河南驻马店人,博士,教授,硕士生导师,2000年于哈尔滨工业大学获得学士学位,2006年于上海大学获得硕士学位,2009年于上海大学获得博士学位,主要从事光学测量、水下三维形貌测量、计算机视觉等方面的研究。E-mail: xuli@ncwu.edu.cn

作者简介:



陆桂明(1964—),男,广西南宁人,博士,教授,硕士生导师,1987年于华北水利水电大学获得学士学位,2006年于武汉水利水电大学获得硕士学位,2009年于河海大学获得博士学位,主要从事水利信息化,大数据处理等方面的研究。E-mail: lugm@ncwu.edu.cn