

文章编号 1004-924X(2024)12-1801-11

## 基于 Snell 窗及偏振模式的水下载体航姿测量

辛润宏<sup>1</sup>, 张 然<sup>1,2\*</sup>, 褚金奎<sup>1,2</sup>, 巩文哲<sup>1</sup>, 李云鹏<sup>1</sup>, 程潇欧<sup>3</sup>

(1. 大连理工大学 辽宁省微纳米系统重点实验室, 辽宁 大连 116024;

2. 大连理工大学 宁波研究院, 辽宁 大连 116024;

3. 大连船舶重工集团有限公司, 辽宁 大连 116011)

**摘要:**提出了一种在水下通过 Snell 窗获得偏振分布模式与天顶点坐标,进而得到水下载体的航姿信息(即航向角、横滚角与俯仰角)的方法。在载体上安装鱼镜头与偏振相机,在水下拍摄天空,得到偏振角分布模式。建立小孔成像模型得到相机的内外参数矩阵以及镜头畸变系数,对偏振角分布模式进行畸变校正,进而得到太阳子午线特征区域,使用 Canny 算子检测得到特征区域边缘,由霍夫直线检测算法计算出太阳子午线与水下载体体轴夹角,得到航向角。通过实验得到不同光入射角与偏振角误差的函数关系,进行误差补偿,减小由于鱼镜头改变入射光偏振态带来的偏振角测量误差,进而提高太阳子午线与水下载体体轴夹角的测量精度。利用灰度阈值检测算法筛选出图像中的天顶点坐标,进而计算载体的横滚角与俯仰角,经过实验验证了算法的准确性。搭建了模拟水下环境的实验平台,实验结果表明:该方法得到的航向角平均绝对误差为  $0.5303^\circ$ 。在  $[-50^\circ, 50^\circ]$  角度范围内,横滚角与俯仰角平均绝对误差为  $0.7544^\circ$  与  $0.6213^\circ$ ,满足水下导航的精度需求。

**关键词:**水下导航; Snell 窗; 偏振分布; 图像处理

**中图分类号:** TN967.2; U666.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20243212.1801

## A method for underwater vehicle attitude measurement based on Snell's window and its polarization mode

XIN Runhong<sup>1</sup>, ZHANG Ran<sup>1,2\*</sup>, CHU Jinkui<sup>1,2</sup>, GONG Wenzhe<sup>1</sup>, LI Yunpeng<sup>1</sup>, CHENG Xiaoou<sup>3</sup>

(1. Technology Liaoning Provincial Key Laboratory of Micro Nanosystems, Dalian University, Dalian 116024, China;

2. Technology Ningbo Research Institute, Dalian University, Dalian 116000, China;

3. Dalian Shipbuilding Industry Group Co., Ltd., Dalian 116011, China)

\* Corresponding author, E-mail: zhangr@dlut.edu.cn

**Abstract:** This paper proposed a method to observe the celestial polarization pattern and the coordinate of zenith through Snell's window, which consequently yields the navigation information of the carrier, i. e., yaw angle, roll angle, and pitch angle. A fish-eye lens and an imaging polarimeter were installed on the carrier to capture the sky and obtain the celestial polarization pattern. First, a pinhole imaging model was established to obtain both the internal and external parameter matrices of the camera and the distortion coef-

收稿日期: 2024-03-23; 修订日期: 2024-04-20.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 52275281, No. 52175265); 中央高校基本科研业务费资助项目 (No. DUT21ZD101, No. DUT21GF308)

ficients of the lens. A distortion correction was applied to the polarization pattern to obtain the solar meridian characteristic region. A Canny operator was used to detect the edge of the characteristic region, after which a Hough line detection algorithm was used to calculate the angle between the solar meridian and the carrier's axis, yielding the Yaw angle. Second, the relationship between incidence angles and the error of polarization angle was abstracted as a function through experiments. Error compensation based on the function was performed to reduce the measurement error of the polarization angle caused by changes in the incident light polarization state of the fish-eye lens, hence improving the accuracy of measuring the angle between the solar meridian and the carrier axis. Third, the grayscale threshold detection algorithm was used to calculate the coordinates of the zenith in the image, and therefore the roll and pitch angles of the carrier. The accuracy of the algorithm was verified through experiments. Lastly, an experimental platform was constructed to simulate an underwater environment. Results show that the mean absolute error of the yaw angle calculated by this method is  $0.5303^\circ$ . Within the range of  $[-50^\circ, 50^\circ]$ , the mean absolute error of the roll angle and pitch angle are  $0.7544^\circ$  and  $0.6213^\circ$ , respectively, which meets the accuracy requirements of underwater navigation.

**Key words:** underwater navigation; snell window; polarization distribution; image processing

## 1 引言

海洋是蕴藏着大量资源的宝库。为了更好地开发海洋资源,人们在水下机器人导航、水下资源勘探、水下成像<sup>[1-6]</sup>等领域进行了大量研究。航姿信息(即水下载体的航向角、横滚角与俯仰角)获取是水下导航领域中的一重要技术。目前水下载体可通过卫星、无线电、惯性敏感器件、地磁、水声学等方法获取航姿信息<sup>[7]</sup>。其中卫星、无线电信号在水下的电磁损耗很大,难以在水下使用;惯性敏感器件的航向误差会随时间累积,需要辅助手段定期消除误差;对于地磁方法,目前难以准确构建水下生物地磁导航模型,且该方法容易受到磁异常干扰;水声学方法受到应答器的限制,存在范围局限性<sup>[8-10]</sup>。

近年来,仿生偏振导航技术逐渐成为研究热点,该技术通过偏振光传感器采集环境中的偏振信息实现导航定位。太阳光经过大气散射、气-水界面折射、水分子散射等光学过程,在水下形成具有一定规律的分布模式。由于空气与水的折射率不同,在水下向天空观察时,视野会被压缩在一个  $97.5^\circ$  的锥形区域内,这个窗口就是 Snell 窗。

关于水下偏振分布模式的研究近年来取得了一定进展。田连标等人利用菲涅尔公式、Cox-Munk 波浪模型构建了平静水面与波浪水面的偏

振传输模型,讨论了不同太阳高度、风速、风向等对水下偏振分布的影响<sup>[11]</sup>。成昊远等人提出了一种基于穆勒矩阵和斯托克斯矢量的水下偏振分布模型,并通过实验验证了模型的正确性<sup>[12]</sup>。随后将米氏散射理论与蒙特卡罗数值模拟方法结合,构建了浑浊水下偏振分布模型<sup>[13]</sup>。顾敬桥等人考虑大气多次散射情况,构建了基于波浪水下偏振光分布模式的气-水模型,并通过实验验证了该模型可以准确表征典型波浪水下的偏振光分布模式特征<sup>[14]</sup>。

人们对水下生物偏振导航的机理研究取得了一定的突破,相关仪器技术也得到了发展。研究发现许多海洋生物,例如草虾与虹鳟鱼可以在水下利用天空偏振分布模式进行导航<sup>[15-16]</sup>。Powell 等人提出了只考虑单次瑞利散射条件下的水下定位方法,其精度达到了  $6\text{ m/km}$ <sup>[17]</sup>。Dupeyroux J 等人提出了一种紫外单像素点定向方法,在清澈浅水区进行了偏振定向实验,得到的结果与地面测量结果相仿<sup>[18]</sup>。Patel R N 等人证明了螳螂虾利用头顶的偏振模式进行定向<sup>[19]</sup>。胡鹏伟等人提出一种基于 Snell 窗口的水下光罗盘太阳位置跟踪算法,天顶角与太阳方位角的误差分别为  $0.3^\circ$  与  $1.3^\circ$ <sup>[20]</sup>,随后建立了仿虾眼水下偏振与惯性组合导航模型,经过实验验证了该方法可将偏振航向误差不累计与惯导短时动态稳定的优势互补<sup>[21]</sup>。为了更加直接、精确地获得水

下载体的航姿信息,彻底解决水下偏振-惯导组合导航系统的动态稳定性问题,需要充分利用 Snell 窗口中的光学信息,并对成像系统进行偏振误差标定,提高测量精度。

基于以上原因,本文提出了一种在载体上安装偏振相机与鱼镜头,在水下基于 Snell 窗及其偏振模式获取水下载体航姿信息的方法。通过确定太阳子午线与体轴夹角计算航向角,并通过偏振误差标定减少鱼镜头带来的误差;结合灰度阈值筛选识别出 Snell 窗中的天顶点,并根据该信息计算水下载体的横滚角与俯仰角。室外实验结果表明,该方法计算得到的角度精度较高,满足水下导航需求。

## 2 航向角的获取与偏振误差标定

### 2.1 水下成像特点

当一束光从折射率为  $n_1$  的介质传输到折射率为  $n_2$  的介质边界时,入射角  $\theta_1$  与折射角  $\theta_2$  满足如下关系:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2. \quad (1)$$

空气的折射率  $n_1=1$ ,水的折射率  $n_2=1.33$ 。来自天空的光始终在水面上方,即入射角始终小于  $90^\circ$ ,那么可以得到折射角为:

$$\theta_2 = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1\right) < \arcsin\left(\frac{1}{1.33}\right) = 48.75^\circ. \quad (2)$$

折射角始终在  $48.75^\circ$  以内。如图 1 所示,从水下观察天空时视野被压缩在一个  $97.5^\circ$  的锥形区域内,这个锥形区域就是 Snell 窗。

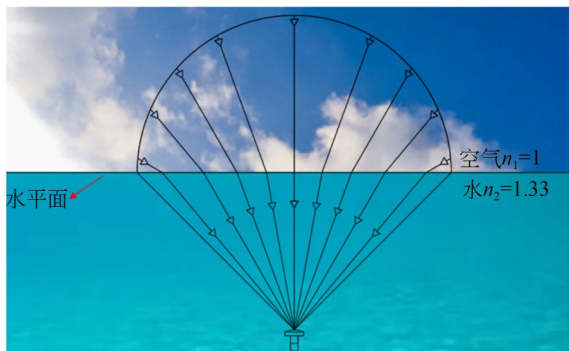


图 1 Snell 窗示意图

Fig. 1 Diagram of Snell window

实验中使用的鱼镜头视场角为  $185^\circ$ ,大于 Snell 窗的视野范围。在水下使用它拍摄天空,便能通过 Snell 窗获得偏振信息从而计算航向角。Snell 窗中点即是天顶点,通过图像中的天顶点坐标可以计算出水下载体的横滚角与俯仰角。

### 2.2 航向角获取原理

使用偏振相机搭载鱼镜头拍摄图像后,利用斯托克斯矢量表征 Snell 窗中的偏振信息,得到太阳子午线与载体体轴之间的夹角  $\psi_{SM}$ ,最后查阅天文年历,获取航向角。

斯托克斯矢量由 4 个参量组成,如式(3)所示:

$$S = \begin{Bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} I_{0^\circ} + I_{90^\circ} \\ I_{0^\circ} - I_{90^\circ} \\ I_{45^\circ} - I_{135^\circ} \\ I_r - I_l \end{Bmatrix}, \quad (3)$$

其中: $S_0$ 为检测到的总光强, $S_1$ 为  $0^\circ$ 偏振分量  $I_{0^\circ}$  与  $90^\circ$ 偏振分量  $I_{90^\circ}$  的光强度差值, $S_2$ 为  $45^\circ$ 偏振分量  $I_{45^\circ}$  和  $135^\circ$ 偏振分量  $I_{135^\circ}$  的光强度差值, $S_3$ 为左旋偏振分量  $I_l$  和右旋圆偏振分量  $I_r$  的光强度差值。

偏振相机中的 CMOS 传感器由微透镜阵列、偏振片阵列与像素阵列组成。其中偏振片阵列的每个像元上都有 4 个不同角度的偏振片,对应检测  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  和  $135^\circ$  的偏振分量。偏振相机结构如图 2 所示,每 4 个像元为一组,即可计算出该像素点的斯托克斯矢量,并根据式(4)与式(5)进一步计算入射光的偏振度  $DOP$  与偏振角  $AOP$ :

$$DOP = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0}, \quad (4)$$

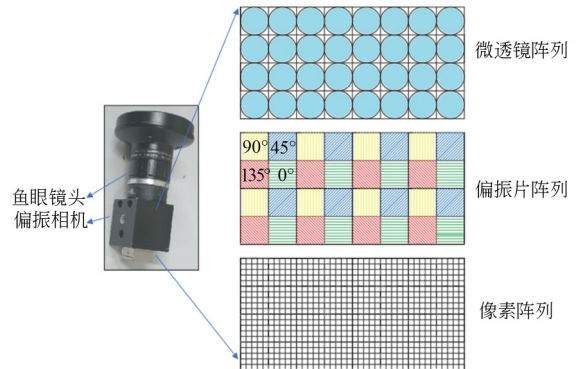


图 2 图像采集设备示意图

Fig. 2 Diagram of image acquisition equipment

$$AOP = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{S_2}{S_1}\right) \quad (5)$$

$$AOE = \begin{cases} AOP(i,j) - \arctan\left(\frac{i - \frac{h}{2}}{j - \frac{w}{2}}\right), & (-90^\circ \leq AOE(i,j) \leq 90^\circ) \\ AOP(i,j) - \arctan\left(\frac{i - \frac{h}{2}}{j - \frac{w}{2}}\right) - 180^\circ, & (AOE(i,j) > 90^\circ) \\ AOP(i,j) - \arctan\left(\frac{i - \frac{h}{2}}{j - \frac{w}{2}}\right) + 180^\circ, & (AOE(i,j) < -90^\circ) \end{cases} \quad (6)$$

其中： $i$ 为图像像素横坐标， $j$ 为图像像素纵坐标； $h$ 与 $w$ 为图像的高和宽。根据偏振分布规律，太阳子午线上的点偏振方位角为 $\pm 90^\circ$ 。因此可以由这些点构成的直线得到太阳子午线与载体体轴的夹角 $\psi_{SM}$ 。

航向角 $\psi$ 、太阳子午线与载体体轴的夹角 $\psi_{SM}$ 、太阳子午线与地理正北方向的夹角 $\psi_s$ 之间的关系如图3所示。

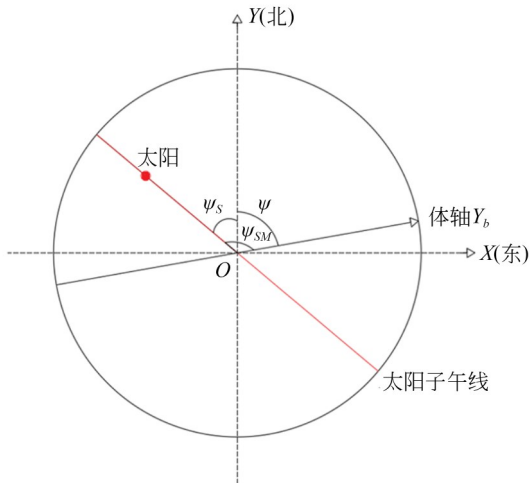


图3 航向角获取方法示意图  
Fig. 3 Diagram of obtaining yaw angle

可以看出，航向角 $\psi$ 可由式(7)得到：

$$\psi = \psi_{SM} - \psi_s, \quad (7)$$

式中， $\psi_{SM}$ 已经得到， $\psi_s$ 与观测地点的时间、经纬度有关，可以通过查询天文年历得到，进而可以由公式(7)计算出航向角 $\psi$ 。

计算得到偏振角后，便可以由式(6)计算偏振方位角 $AOE$ ，即当地子午线切线方向的夹角。

### 2.3 偏振误差标定

鱼镜头是一种广角镜头，存在着较大的径向畸变，使得观测到的偏振角发生变化，从而影响太阳子午线的提取精度，因此需要对鱼镜头进行标定<sup>[22]</sup>。经过实验发现，鱼镜头对偏振角的影响主要与光的入射角有关。在实际实验中，需要通过Snell窗在图像中的相对位置来确定光的入射角，因此需要先构建像素与光入射角的关系。

图4所示为偏振误差标定模型。天空光经水面折射形成平行光，因此将射出平行光的远心光源作为标定时光源。当鱼镜头随水下载体姿态变化时会改变光的入射角，载体在某个方向上的姿态变化范围为 $[0^\circ, 90^\circ]$ 。鱼镜头与偏振相机安装在三自由度精密转台与精密旋转转台上，远心光源产生的光斑为圆形，调节三自由度精密转台，令光斑圆心与图像中心重合，此时远心光源与鱼镜头的光轴对齐。随后调节精密旋转转台来调节光入射角，每次旋转 $10^\circ$ ，共旋转

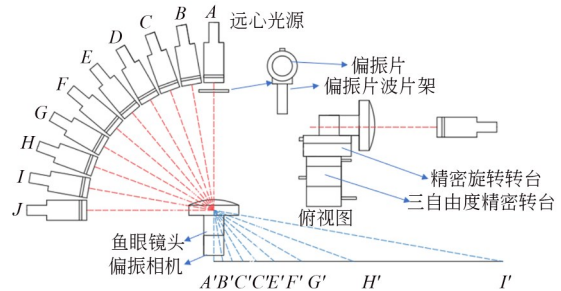


图4 偏振误差标定模型  
Fig. 4 Polarization error calibration model

9 次。记录每次旋转时光源在图像中的像素坐标,使用 MATLAB 中的曲线拟合工具进行曲线拟合,便可以得到像素与入射角之间的函数关系。

随后构建入射角与偏振角误差之间的函数关系。依然使用图 4 所示的实验装置。在远心光源前安装一个偏振片与可以控制偏振片光轴旋转角度的偏振片波片架,每当远心光源旋转到一个固定角度,利用偏振片波片架将远心光源前的偏振片光轴从  $0^\circ$  开始旋转,每次旋转  $10^\circ$ ,共旋转 17 次( $0^\circ$  与  $180^\circ$  相同),从而记录偏振角所有变化范围内,即  $[0^\circ, 180^\circ]$  范围内的偏振角误差变化。在固定远心光源与偏振片的角度后,拍摄多张照片,取采集到的偏振角平均值,将其与理论偏振角的差值作为该点的偏振角误差值。使用 MATLAB 中的曲线拟合工具进行曲线拟合,便可以得到偏振误差随光入射角的函数关系。

为验证得到的函数关系的准确性,随机取理论上误差较大的步长中点,如远心光源分别旋转  $5^\circ, 15^\circ, 45^\circ$ , 偏振片光轴旋转  $25^\circ, 55^\circ, 125^\circ$  等,共 60 组。检测各组的偏振角,计算其偏振误差是否满足曲线得到的规律。实验结果表明,偏振角与预测值之间的平均绝对误差为  $0.1713^\circ$ ,验证了该函数关系的准确性。

#### 2.4 畸变校正与直线检测算法

由偏振相机的偏振片阵列采集到的偏振信息根据式(5)计算得到偏振角。经过偏振误差标定后,根据式(6)计算得到偏振方位角,偏振方位角以太阳子午线为对称轴对称分布。由于鱼眼镜头的制造误差以及安装误差会导致图像产生畸变扭曲问题,图像畸变的特点是图像中心不会产生畸变,越远离图像中心位置,图像产生的畸变扭曲就越大。偏振方位角的对称轴会产生一定的扭曲,这会影响到后续直线检测算法检测出的太阳子午线的精度,进而影响解算出的航向角的精度。畸变还会影响后续算法中 Snell 窗中点坐标检测精度,从而影响横滚角、俯仰角的检测精度。因此需要进行畸变校正。通过一种基于平面靶标标定方法<sup>[23]</sup>,建立小孔成像模型得到相机的内外参数矩阵以及镜头畸变系数,从而可以通过算法校正图像。

在完成畸变校正后,为提升图像质量,降低

噪声带来的影响,对图像进一步进行中值滤波、高斯滤波处理<sup>[3]</sup>。通过一种基于霍夫变换的太阳子午线提取方法<sup>[24]</sup>,对偏振方位角分布模式进行处理从而得到太阳子午线特征区域,使用 Canny 算子检测得到特征区域边缘,利用霍夫变换检测边缘直线方向,根据对称性分布规律得到太阳子午线与载体体轴之间的夹角。

为验证获取航向角方法的准确性,本文在如图 4 所示的实验装置中进行了模拟太阳子午线采集实验。远心光源发射出的光经过偏振片形成的偏振分布模式可以模拟天空中太阳发出的光形成的偏振分布模式。实验中使用的偏振片为 Edmund 的  $12.5 \times 12.5$  mm 超宽带线栅线性偏振镜,适用波长  $400 \sim 700$  nm,线偏振光透过率高于 43%,消光比高于  $1\ 000:1$ 。在  $500$  nm 左右,线偏振光透过率可  $84\% \sim 93\%$ ,消光比为  $3\ 000:1$  到  $10\ 000:1$ 。调节波片架使偏振片光轴随机转过三个不同角度。此时算法检测的直线为偏振片光轴,得到的角度为偏振片光轴相对原位置转动的角度。将算法(具体流程见图 7)检测出的偏振片光轴角度与实际值的平均绝对误差作为评价指标。偏振片光轴的 3 个随机角度为  $67.5^\circ, 112.5^\circ$  与  $172.5^\circ$ ,为模拟实际应用过程中偏振相机与鱼镜头随水下载体的姿态变化而变化,改变光入射角,从  $10^\circ$  开始,每次增加  $10^\circ$ ,直至  $90^\circ$ ,每个角度进行多次测量取平均值。未经过畸变矫正处理的算法检测结果与理论值的平均绝对误差分别为  $1.8425^\circ, 1.2632^\circ$  与  $0.9647^\circ$ 。经过畸变矫正处理的实验算法检测结果与理论值的平均绝对误差分别为  $0.1397^\circ, 0.1344^\circ$  与  $0.1517^\circ$ ,畸变处理过程让航向角的解算精度平均提高了  $1.2149^\circ$ ,验证了畸变矫正处理过程的必要性以及本文提出的航向角获取方法的准确性。

### 3 横滚角、俯仰角获取算法

#### 3.1 横滚角、俯仰角获取原理

为方便论述,选取东北天为导航坐标系,即观测点  $O_a$  为原点,  $X_a$  指向正东,  $Y_a$  指向正北,  $Z_a$  指向天顶。选取右前上为载体坐标系,载体质心  $O_b$  为原点,  $X_b$  为横轴,向右为正,  $Y_b$  为载体体轴,向前为正,  $Z_b$  垂直向上,满足右手规则。将相机

安装在载体的质心,即将两个坐标系的原点重合,二者的关系如图 5 所示。

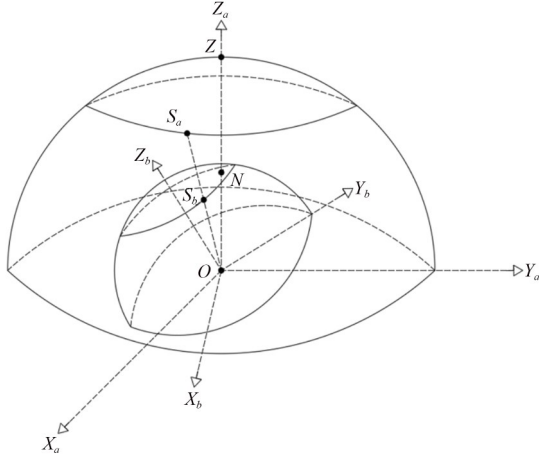


图 5 载体坐标系与导航坐标系示意图

Fig. 5 Diagram of carrier coordinate system and navigation coordinate system

$$R_{A \rightarrow B} = \begin{pmatrix} \cos \psi \cos \gamma - \sin \psi \sin \gamma \sin \vartheta & \sin \vartheta \cos \psi \sin \gamma + \sin \psi \cos \gamma & -\cos \vartheta \sin \gamma \\ -\cos \vartheta \sin \psi & \cos \vartheta \cos \psi & \sin \vartheta \\ \cos \psi \sin \gamma + \sin \vartheta \sin \psi \cos \gamma & \sin \psi \sin \gamma - \sin \vartheta \cos \psi \cos \gamma & \cos \vartheta \cos \gamma \end{pmatrix}, \quad (11)$$

2.1 节介绍了 Snell 窗的成像特点,在水下观测天空时,观测到的 Snell 窗中心点坐标即为天顶点在载体坐标系  $X_b O Y_b$  平面上投影的坐标。天顶点  $N$  在载体坐标系中的位置如图 5 所示。为了让天顶点坐标归一化,将鱼镜头拍摄  $90^\circ$  入射光时对应的像素坐标与图像中心点之间的差值作为载体坐标系的半球半径,则天顶点一定落在半球半径之内。将得到的天顶点的坐标  $N_x'$ ,  $N_y'$  分别与图像中心点做差,再将得到的值除以半球半径,便可以得到归一化的天顶点坐标  $N_x$ ,  $N_y$ 。利用几何关系求出落在半球上的  $N_z$ ,便可以得到归一化的载体坐标系下天顶点坐标  $(N_x, N_y, N_z)$  天顶点在导航坐标系下的坐标与天顶点在载体坐标系下的坐标满足式(12)的关系:

$$\begin{pmatrix} N_x \\ N_y \\ N_z \end{pmatrix} = R_{A \rightarrow B} \begin{pmatrix} Z_x \\ Z_y \\ Z_z \end{pmatrix}. \quad (12)$$

天顶点在导航坐标系中的坐标为  $(0, 0, 1)$ , 将其与  $R_{A \rightarrow B}$  代入公式(12)并化简,得到横滚角  $\gamma$  与俯仰角  $\vartheta$  为:

$$\vartheta = \arcsin(N_y), \quad (13)$$

图中点  $Z$  与点  $S_a$  为导航坐标系中的天顶点与太阳位置,点  $N$  与点  $S_b$  为二者在载体坐标系中的投影。

导航坐标系依次沿  $Z$  轴转过航向角  $\psi$ , 沿  $Y$  轴转过横滚角  $\gamma$ , 再沿  $X$  轴转过俯仰角  $\vartheta$  可与载体坐标系重合,三次旋转对应的旋转矩阵为:

$$R_z(\psi) = \begin{pmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 1 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 1 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

$$R_y(\gamma) = \begin{pmatrix} \cos \gamma & 0 & -\sin \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{pmatrix}, \quad (9)$$

$$R_x(\vartheta) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \vartheta & -\sin \vartheta \\ 0 & \sin \vartheta & \cos \vartheta \end{pmatrix}. \quad (10)$$

将三个矩阵相乘,即可得到从导航坐标系变换到载体坐标系的旋转矩阵  $R_{A \rightarrow B}$ :

$$\gamma = \arctan\left(\frac{-N_x}{N_z}\right). \quad (14)$$

### 3.2 中心点检测算法

根据 Snell 窗的成像特点,Snell 窗中的光亮度较高,Snell 窗外为消光区域,亮度较低。通过灰度阈值检测的方法,可以获取 Snell 窗的中点坐标。图像中每个像素的灰度值计算方法为:

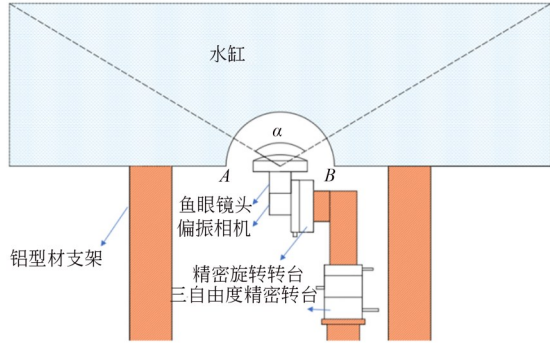
$$I'(\phi) = \frac{1}{2} (S_0 + S_1 \cos 2\phi + S_2 \cos 2\phi), \quad (15)$$

其中:  $S_0, S_1, S_2$ , 为斯托克斯矢量,  $\phi$  为入射光与载体体轴之间的夹角。

为获取 Snell 窗中的信息,本文使用了一种基于灰度阈值筛选的图像处理方法<sup>[25]</sup>。由于 Snell 窗内的亮度与 Snell 窗外的消光部分存在亮度差(详见 2.1 节水下成像特点),根据亮度计算图像中每个像素点的灰度值,设置图像中最亮的前 70% 的像素灰度值为阈值,对图像进行二值化分割处理。将得到的二值图像作为索引矩阵,便可以得到位于 Snell 窗口内的像素坐标,计算这些像素坐标的平均值,便可以得到 Snell 窗中点的坐标值。

在实际采集天顶点坐标的实验环境中,灰度阈值检测方法会受到水面波浪的影响,从而影响计算

出的姿态角精度。为确定该方法的精度,搭建了如图 6 所示的实验平台进行了实验。其中图 6(a)为实验平台示意图,图 6(b)为实验平台实物图。



(a) 实验平台示意图

(a) Schematic diagram of experimental platform



(b) 实验平台实物图

(b) Physical image of experimental platform

图 6 水下环境模拟实验平台

Fig. 6 Diagram of underwater environment simulation experimental platform

实验平台主要由水缸、搭载了鱼镜头的偏振相机、精密旋转转台、三自由度精密转台组成。相机观测点与水缸边缘的视场角  $\alpha$  大于  $97.5^\circ$ , 从而保证可以观测到完整的 Snell 窗。实验时, 通过三自由度转台调节相机位置, 使得相机成像中水缸的中心与图像的中心重合。相机两侧, 水缸上的 A, B 点理论上与相机呈  $90^\circ$ , 使它们在成像中的位置与 2.3 节中得到的  $90^\circ$  入射光在鱼镜头中的成像位置重合。在相机周围覆盖黑色绒布模拟水下环境中 Snell 窗外的消光部分。将水缸装满水, 通过精密旋转转台带动偏振相机转动, 从而模拟载体姿态变换时带动偏振相机转动。先使得偏振相机竖直向上, 随后每次旋转  $10^\circ$ , 直至  $90^\circ$ 。转台固定后搅动水面, 使用算法得到受风浪影响水面下得到的中点坐标, 计算该坐

标与 2.3 节中得到的理论上的中点坐标之间的差值。在中点检测过程中, 鱼镜头的径向畸变会对检测结果造成影响。在未经过畸变处理的实验中, 该方法经波浪影响后检测出的中点误差平均为 8.52 个像素。经过畸变处理的实验中, 该方法经波浪影响后检测出的中点误差在 3 个像素以内。实验结果表明, 畸变处理过程令横滚角的检测精度平均提升了  $2.4732^\circ$ , 俯仰角的检测精度平均提升了  $1.8365^\circ$ , 验证了畸变处理可以有效提升横滚角、俯仰角的检测精度。

根据公式 (13) 与公式 (14), 可以计算出像素误差与姿态角误差之间的关系。俯仰角与横滚角的取值范围都是  $[-90^\circ, 90^\circ]$ , 随着姿态角的绝对值增加, 像素误差对角度误差的影响越来越显著, 对精度的要求越来越高。结合实验结果进行计算, 本方法对  $[-50^\circ, 50^\circ]$  范围内的姿态角测量精度可以满足水下导航需求。

## 4 测量实验与结果

### 4.1 实验配置

本实验图像处理算法流程如图 7 所示。

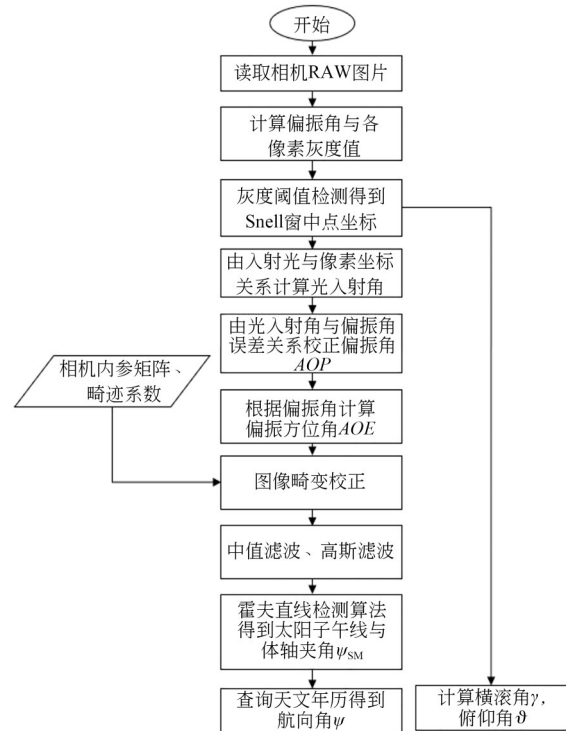


图 7 航姿信息获取流程

Fig. 7 Process of obtaining attitude information

实验使用的偏振相机型号为 PHX050S-P, 分辨率  $2\,448 \times 2\,048$ , 实验使用的偏振相机型号为 PHX050S-P, 分辨率  $2\,448 \times 2\,048$ , 对于波长  $400 \sim 680\text{ nm}$  的光, 偏振滤光器消光比高于  $100:1$ , 最高为  $425:1$ 。量子效率高于  $30\%$ , 在  $530\text{ nm}$  左右, 量子效率可达  $50\%$ 。焦平面偏光成像, 可以在一次拍摄中得到偏振角度为  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  与  $135^\circ$  的线偏振光强度图像。鱼镜头型号为 FE185C046HA-1, 视场角为  $185^\circ$ , 焦距  $1.4\text{ mm}$ , 光圈 F1.4-F16, 该镜头在  $400 \sim 700\text{ nm}$  范围内的透过率高于  $50\%$ , 在  $530\text{ nm}$  左右达到近  $85\%$ 。实验时间为 2023 年 12 月 28 日上午, 天空晴朗无云, 西南风 5 到 6 级, 阵风 7 级。在大连理工大学知方楼前, 坐标为  $(121.510\,6, 38.880\,28)$ , 将搭载了鱼镜头的偏振相机安装在图 6 所示的实验平台中, 将水缸加满水, 实时获取航向角、横滚角与俯仰角。实验时图像位数为 12 位, 增益为  $0\text{ dB}$ , 根据天气情况调整曝光时间, 为

$500 \sim 2\,500\ \mu\text{s}$ 。根据 3.2 中的内容, 本算法可以准确地计算出  $[-50^\circ, 50^\circ]$  的横滚角与俯仰角, 将该范围作为本次实验的转台旋转角度范围。在 2.3, 2.4 的标定过程中, 本文选择的入射光角度步长为  $10^\circ$ , 经实验验证该步长可以使得算法有足够的精度。在本次实验中, 入射光角度即对应转台带动相机转过的角度, 因此角度变化步长同样定为  $10^\circ$ , 并选择了理论上误差最大的步长中点, 即  $15^\circ, 25^\circ$  等角度, 从而验证本文算法的精确性。当相机正对天空时, 采集到的图像不会受到图像畸变、偏振角误差等因素影响, 此时可以采集到准确的航向角<sup>[26]</sup>。实验中采用随机时间间隔, 每次精密转台转过固定角度, 计算得到的航向角与相机正对天空时采集到的航向角的平均绝对误差; 计算算法得到的横滚角、俯仰角与精密转台横滚角、俯仰角的平均绝对误差, 将它们作为评价指标验证算法的准确性。实验结果如图 8 所示。

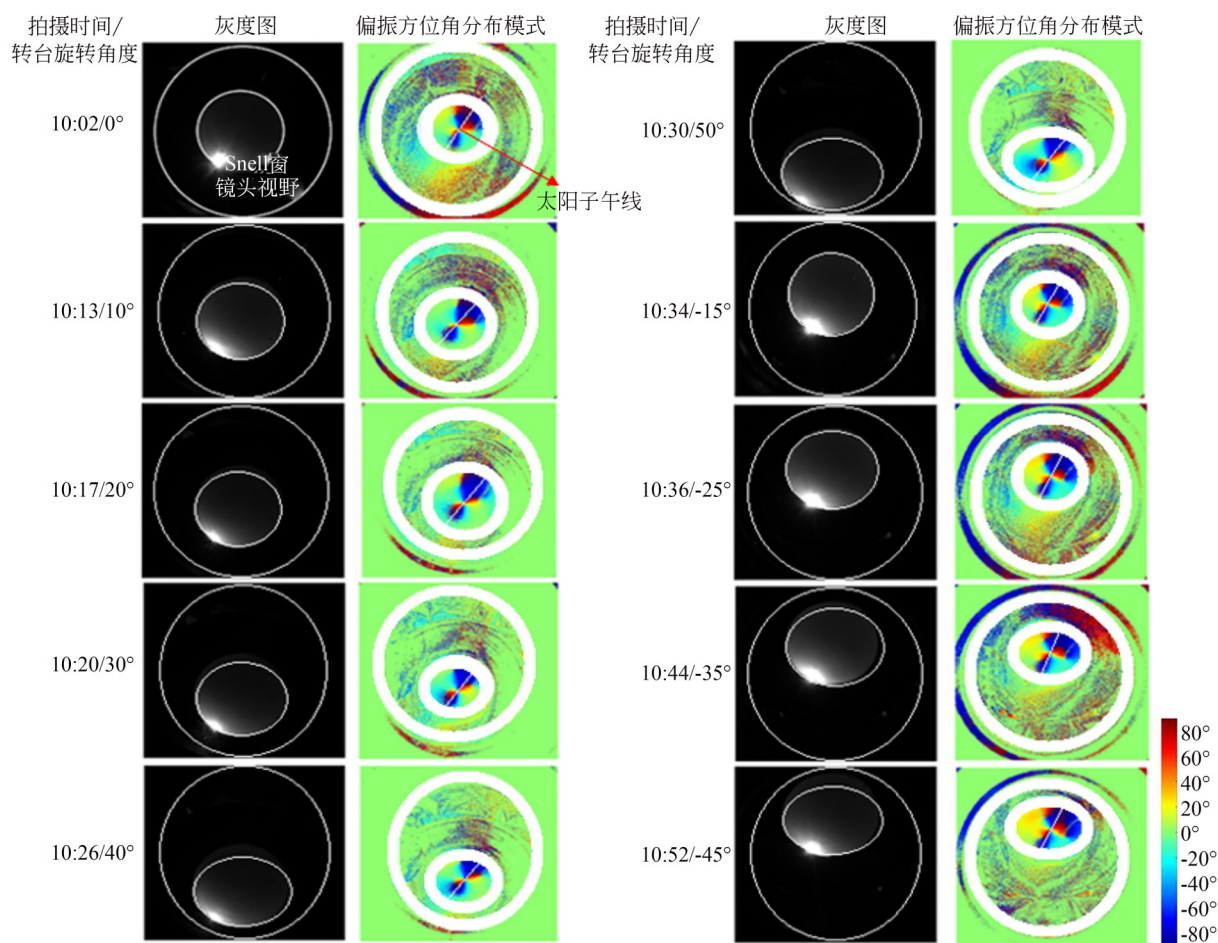


图 8 12 月 28 日上午实验效果图

Fig. 8 Experimental rendering on the morning of December 28th

## 4.2 结果分析

第一组图片旋转转台旋转角度为  $0^\circ$ , 此时相机正对天空。灰度图与偏振方位角分布模式图中的白色圆圈分别画出了 Snell 窗与鱼镜头视野范围, 偏振方位角分布模式中的白色线画出了太阳子午线。图中的角度负值代表与正值旋转角度相反。从图中可以观察到, 相机正对天空时采集的图像没有受到鱼镜头畸变带来的影响, Snell 窗为圆形, 在镜头视野中心。随着精密旋转转台带动相机旋转, Snell 窗在视野范围中会进行

移动, 转台转过的角度越大, Snell 窗就越接近视野边缘, 且从圆形被压缩成椭圆形。经畸变处理、偏振误差补偿之后的偏振角分布模式图呈现明显的“8”字形分布, 从图中可以提取出太阳子午线。通过灰度阈值检测算法可以获得变化之后的 Snell 窗中点坐标, 即载体坐标系下的天顶点坐标, 并根据该坐标计算载体的横滚角与俯仰角。本次实验的实验数据如表 1 所示。由此可见, 通过本文方法得到的航向角、俯仰角与滚转角精度满足水下导航需求。

表 1 实验数据

Tab. 1 Experimental data

( $^\circ$ )

实验日期与时间	横滚角绝对误差	俯仰角绝对误差	航向角绝对误差
2023-12-28 10:02	0.468 7	0.616 2	0.458 2
2023-12-28 10:13	0.706 9	0.718 3	0.464 2
2023-12-28 10:17	0.852 3	0.837 4	0.528 2
2023-12-28 10:20	0.833 2	0.773 2	0.573 8
2023-12-28 10:26	0.905 6	0.449 1	0.604 8
2023-12-28 10:30	0.941 3	0.651 8	0.884 2
2023-12-28 10:34	0.621 5	0.434 7	0.431 2
2023-12-28 10:36	0.737 8	0.591 4	0.412 2
2023-12-28 10:44	0.542 8	0.542 1	0.479 4
2023-12-28 10:52	0.934 2	0.598 5	0.445 8
平均绝对误差	0.754 4	0.621 3	0.530 3

## 5 结 论

本文提出了一种在水下通过 Snell 窗获取偏振分布模式与天顶点坐标, 进而计算水下载体航姿信息的方法。该方法将搭载了鱼镜头的偏振相机安装在载体上, 在水下对天空拍摄图像, 根据斯托克斯矢量原理得到偏振方位角分布模式, 对图像进行畸变校正后, 通过 Canny 算子检测太阳子午线特征区域边缘, 利用霍夫变换检测边缘直线方向, 结合偏振方位角分布模式的对称性获得太阳子午线与体轴夹角, 查询天文年历获

得航向角; 通过灰度阈值检测算法计算出载体坐标系下的天顶点坐标, 得到横滚角与俯仰角。搭建了模拟水下环境的实验平台, 实验结果表明算法得到的航向角平均绝对误差为  $0.5303^\circ$ 。在  $[-50^\circ, 50^\circ]$  角度范围内, 横滚角与俯仰角平均绝对误差为  $0.7544^\circ$  与  $0.6213^\circ$ 。满足水下导航的精度需求。为了以后在水下实际环境中应用, 后续将本文提出的水下偏振导航方法与惯性导航方法结合, 设计一套水下偏振-惯导组合导航系统, 解决目前存在的水下偏振-惯导组合导航系统动态稳定性问题。

## 参考文献:

- [1] 范刚, 张亚, 赵河明, 等. 水下机器人定位导航技术发展现状与分析[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(3): 22-29.

FAN G, ZHANG Y, ZHAO H M, *et al.* Underwater robot positioning and navigation technology development status and analysis[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2022, 43(3): 22-29. (in Chinese)

- [2] 褚金奎, 林木音, 王寅龙, 等. 偏振光传感器的无人船导航与编队应用[J]. 光学精密工程, 2020, 28(8): 1661-1669.  
CHU J K, LIN M Y, WANG Y L, *et al.* Application of polarization sensor to unmanned surface vehicle navigation and formation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2020, 28(8): 1661-1669. (in Chinese)
- [3] 张然, 桂心远, 成昊远, 等. 基于偏振成像的低光照强背景噪声下的目标位姿估计[J]. 光学精密工程, 2021, 29(4): 647-655.  
ZHANG R, GUI X Y, CHENG H Y, *et al.* Target pose estimation based on polarization imaging in low light and strong background noise[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2021, 29(4): 647-655. (in Chinese)
- [4] LI C, GUO C, REN W, *et al.* An underwater image enhancement benchmark dataset and beyond [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2019, 29: 4376-4389.
- [5] 褚金奎, 张培奇, 成昊远, 等. 基于特定偏振态成像的水下图像去散射方法[J]. 光学精密工程, 2021, 29(5): 1207-1215.  
CHU J K, ZHANG P Q, CHENG H Y, *et al.* De-scattering method of underwater image based on imaging of specific polarization state [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2021, 29(5): 1207-1215. (in Chinese)
- [6] 巩文哲, 褚金奎, 成昊远, 等. 基于无监督学习和注意力机制的水下偏振图像融合[J]. 光学精密工程, 2023, 31(21): 3212-3220.  
GONG W Z, CHU J K, CHENG H Y, *et al.* Underwater polarization image fusion based on unsupervised learning and attention mechanisms [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(21): 3212-3220. (in Chinese)
- [7] 吴新冬, 申冲, 曹慧亮, 等. 水下仿生光磁导航技术综述[J]. 战术导弹技术, 2023(4): 13-25.  
WU X D, SHEN C, CAO H L, *et al.* Survey of underwater biomimetic polarization and geomagnetic navigation technology [J]. *Tactical Missile Technology*, 2023(4): 13-25. (in Chinese)
- [8] SCHMIDT G T. Navigation sensors and systems in GNSS degraded and denied environments [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2015, 28(1): 1-10.
- [9] WANG S Z, ZHAN X Q, ZHAI Y W, *et al.* Highly reliable relative navigation for multi-UAV formation flight in urban environments [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2021, 34(7): 257-270.
- [10] 徐博, 郝芮, 王超, 等. 水下潜航器的惯导/超短基线/多普勒测速信息融合及容错验证[J]. 光学精密工程, 2017, 25(9): 2508-2515.  
XU B, HAO R, WANG C, *et al.* INS/USBL/DVL information fusion and fault-tolerant verification for underwater vehicles [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(9): 2508-2515. (in Chinese)
- [11] 褚金奎, 田连标, 成昊远, 等. 天空光主导的波浪水面下偏振分布模型仿真[J]. 光学学报, 2020, 40(20): 2001002.  
CHU J K, TIAN L B, CHENG H Y, *et al.* Simulation of polarization distribution model under wavy water surfaces dominated by skylight [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(20): 2001002. (in Chinese)
- [12] CHENG H Y, CHU J K, ZHANG R, *et al.* Underwater polarization patterns considering single Rayleigh scattering of water molecules [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2020, 41(13): 4947-4962.
- [13] CHENG H Y, CHU J K, ZHANG R, *et al.* Simulation and measurement of the effect of various factors on underwater polarization patterns [J]. *Optik*, 2021, 237: 166637.
- [14] 顾敬桥, 李高杰, 胡鹏伟, 等. 基于大气多次散射的波浪水下偏振模式研究[J]. 中国光学(中英文), 2023, 16(6): 1324-1332.  
GU J Q, LI G J, HU P W, *et al.* The polarization mode of underwater waves based on atmospheric multiple scattering [J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(6): 1324-1332. (in Chinese)
- [15] HORVÁTH G, VARJÚ D. Underwater refraction-polarization patterns of skylight perceived by aquatic animals through Snell's window of the flat water surface [J]. *Vision Research*, 1995, 35(12): 1651-1666.
- [16] PARKYN D C, AUSTIN J D, HAWRYSHYN C W. Acquisition of polarized-light orientation in salmonids under laboratory conditions [J]. *Animal behaviour*, 2003, 65(5): 893-904.
- [17] POWELL S B, GARNETT R, MARSHALL J, *et al.* Bioinspired polarization vision enables underwater geolocation [J]. *Science Advances*, 2018, 4(4): eaao6841.
- [18] JULIEN D, STÉPHANE V, SERRES JULIEN R. An ant-inspired celestial compass applied to autonomous outdoor robot navigation [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2018, 117: 40-56.

- [19] PATEL R N, CRONIN T W. Mantis shrimp navigate home using celestial and idiothetic path integration[J]. *Current Biology: CB*, 2020, 30(11): 1981-1987. e3.
- [20] HU P W, YANG J, GUO L, *et al.* Solar-tracking methodology based on refraction-polarization in Snell's window for underwater navigation[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2022, 35 (3) : 380-389.
- [21] 胡鹏伟, 杨健, 王奥博, 等. 仿虾眼水下偏振/惯性组合动态定姿方法及系统设计[C]. 中国自动化学会过程控制专业委员会, 中国自动化学会. 第 33 届中国过程控制会议论文集, 2022: 1. HU P W, YANG J, WANG A B, *et al.* Shrimp-Eye inspired underwater polarization/ins integrated dynamic attitude determination: methodology and system development [C]. *Process Control Professional Committee of China Automation Society, China Automation Society Proceedings of the 33rd China Process Control Conference School of Automation Science and Electrical Engineering*, 2022: 1. (in Chinese)
- [22] 张然, 蔡弘, 关乐, 等. 多云天气天空偏振定向方法[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(7): 1499-1510. ZHANG R, CAI H, GUAN L, *et al.* Polarization orientation method for cloudy sky[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2021, 29(7): 1499-1510. (in Chinese)
- [23] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22 (11): 1330-1334.
- [24] 崔岩, 周鑫昌, 刘亚飞, 等. 基于 Hough 变换的太阳子午线提取方法[J]. *光学学报*, 2020, 40 (17): 1701002. CUI Y, ZHOU X C, LIU Y F, *et al.* Solar meridian extraction method based on Hough transformation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40 (17) : 1701002. (in Chinese)
- [25] 张瑞文. 基于随机畸变补偿的水下对空成像图像复原关键技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019. ZHANG R W. *Key Technology Research on Image Restoration for Imaging Through Water-air Interface from Underwater Based on Random Distortion Compensation* [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)
- [26] 蔡弘, 张然, 关乐, 等. 晴朗天气下全天空域偏振定向方法[J]. *机电工程技术*, 2021, 50(9) : 10-13. CAI H, ZHANG R, GUAN L, *et al.* Polarization orientation method for whole sky area in sunny weather[J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2021, 50(9): 10-13. (in Chinese)

## 作者简介:



辛润宏(2000—),男,辽宁大连人,硕士研究生,2022年于东北大学获得学士学位,主要从事水下仿生偏振光导航方面的研究。E-mail:979960592@qq.co

## 通讯作者:



张然(1984—),男,辽宁锦州人,博士,副教授,博士生导师,2007年、2013年于大连理工大学分别获得学士、博士学位,主要从事仿生偏振光导航、仿生视觉认知技术、亚波长光学结构设计与微纳传感器、执行器等方面的研究。E-mail: zhangr@dlut.edu.cn