



## 偏振光传感器的无人船导航与编队应用

褚金奎, 林木音, 王寅龙, 李金山, 郭晓庆

引用本文:

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 Jin-kui, LIN Mu-yin, WANG Yin-long, et al. Application of polarization sensor to unmanned surface vehicle navigation and formation[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(8): 1661–1669.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/OPE.20202808.1661>

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 仿生偏振视觉定位定向机理与实验

Mechanisms of bionic positioning and orientation based on polarization vision and corresponding experiments

*光学精密工程*. 2016, 24(9): 2109–2116 <https://doi.org/10.3788/OPE.20162409.2109>

### 阵列式偏振导航传感器及其鲁棒性算法实现

Array polarization sensor for navigation and its robust algorithm

*光学精密工程*. 2018, 26(8): 2067–2073 <https://doi.org/10.3788/OPE.20182608.2067>

### 多方向偏振光实时定位样机的设计与搭建

Design and construction of autonomous real-time position prototype based on multi-polarized skylight

*光学精密工程*. 2017, 25(2): 312–318 <https://doi.org/10.3788/OPE.20172402.0312>

### 天空实时全偏振成像探测器设计与搭建

Design and construction of real-time all-polarization imaging detector for skylight

*光学精密工程*. 2018, 26(4): 816–824 <https://doi.org/10.3788/OPE.20182604.0816>

### 天空偏振模式对仿生偏振光定向的影响及实验

Influence of skylight polarization pattern on bionic polarized orientation and corresponding experiments

*光学精密工程*. 2015, 23(9): 2429–2437 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152309.2429>

文章编号 1004-924X(2020)08-1661-09

## 偏振光传感器的无人船导航与编队应用

褚金奎\*, 林木音, 王寅龙, 李金山, 郭晓庆  
(大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要:**为了实现偏振光传感器在水面波动环境下及编队协同情境下的应用,并提升无人船导航的抗电磁干扰能力,设计了一种基于偏振光传感器、微惯性测量单元(MIMU)及全球定位系统(GPS)的组合导航系统,为偏振光传感器集成了云台底座,并搭建偏振光无人船平台进行了导航及编队实验。介绍了偏振光导航原理及无人船编队原理;基于卡尔曼滤波设计了偏振光传感器/MIMU/GPS组合导航算法;基于上述组合导航算法进行了无人船的循迹与编队实验。循迹对比实验结果表明:无人船利用偏振光传感器进行组合导航的航向角误差为 $6.055^\circ$ ,位置误差为 $0.209\text{ m}$ ,在磁罗盘受干扰的情况下偏振光组合导航系统仍可正常工作;编队实验结果表明:领航船循迹误差为 $0.425\text{ m}$ ,跟随船编队误差为 $0.707\text{ m}$ 。该偏振光传感器可应用于水面环境导航,偏振光组合导航系统可用于无人船导航与编队。

**关键词:**偏振光传感器;组合导航;无人船;循迹;协同编队

**中图分类号:**TP212.14 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20202808.1661

## Application of polarization sensor to unmanned surface vehicle navigation and formation

CHU Jin-kui\*, LIN Mu-yin, WANG Yin-long, LI Jin-shan, GUO Xiao-qing

(College of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

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

**Abstract:** It is necessary to improve the anti-electromagnetic interference ability of unmanned surface vehicle(USV) navigation; one method is to apply polarization sensors in fluctuant water environments and formation coordination. In this study, an integrated navigation system was designed based on a polarization sensor, micro inertial measurement unit (MIMU), and global positioning system (GPS). A gimbal was mounted for the polarization sensor, and a USV experimental platform was built for navigation and formation experiments. First, the principle of polarized light navigation and USV formation were introduced. Subsequently, the integrated navigation system with a polarization sensor was designed based on Kalman filtering. Finally, tracking and formation of USV experiments were performed based on the integrated navigation system. The results of the tracking experiment show that the heading angle error and position error of the polarization sensor/MIMU/GPS integrated navigation system are  $6.055^\circ$  and  $0.209\text{ m}$ , respectively. The polarized light integrated navigation system could

收稿日期:2020-01-15;修订日期:2020-02-11.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51675076);创新研究群体项目(No. 51621064)

work normally even if the magnetic compass was disturbed. The results of the formation experiment show that the leader tracking error is 0.425 m, and the follower formation error is 0.707 m. The polarization sensor can be used in fluctuant water circumstance navigation, and the polarized light integrated navigation system can be used in USV navigation and formation.

**Key words:** polarization sensor; integrated navigation system; unmanned surface vehicle; tracking; formation

## 1 引言

地球约三分之二的面积被海洋覆盖,但仅有为数不多的海域被完全探索<sup>[1]</sup>。气候变化、环境异常、资源探索、国家安全等问题都引发了商业、科学和军事领域对自主水面航行器(Unmanned Surface Vehicle, USV)即无人船的强烈需求。因此,无人船得到了极大的发展,具有目标探测、环境感知与自主航行等功能。但单个无人船的作业能力、搭载资源有限,难以执行复杂的规模性任务,通过控制多无人船编队协同执行任务,扩大了其作业范围,提高了作业效率与任务复杂度<sup>[2]</sup>。

然而,导航与编队协同以个体的导航信息准确性为基石,无人船的传感器受环境的干扰会导致个体的失控与编队的失稳。无人船采用的惯性导航、地磁导航等传统导航方式存在误差累积、易受干扰等缺点<sup>[3]</sup>,难以在复杂的水上环境(环境噪声、传感器漂移、时变模型的不确定性、传感器误差)中获得精确稳定的航向、位置信息<sup>[4]</sup>,因此,结合其他传感器来辅助提高导航性能受到学者们的关注。Mohamed 等人<sup>[5]</sup>提出一种匹配相机前后时刻图像求位移的算法,在无 GPS 环境下将单目相机作为视觉里程计与惯导组合进行无人船导航。Naus 等人<sup>[6]</sup>利用激光雷达辅助进行无人船航行、转向速度的精确控制。Jeff<sup>[7]</sup>将多普勒测速仪与惯导组合应用于无人船导航。雷达被用来探测航行中的障碍物<sup>[8-9]</sup>。上述文献均仅在位置、速度信息上进行修正,航向信息仍采用传统地磁导航方式。而在海上环境复杂、地球磁场迁移变化<sup>[10]</sup>、磁罗盘易被干扰的今天,亟需采用新型传感器来辅助校正航向信息。

偏振光导航是一种新兴的导航方式,借鉴昆虫利用天空偏振光进行导航的思想发展而来,具

有无误差积累、不易受到干扰的特性。1949年, Frisch<sup>[11]</sup>发现了蜜蜂利用天空偏振光进行导航。1997年, Lambrinos 等人<sup>[12]</sup>基于昆虫偏振光导航思想搭建了偏振光导航传感器用于地面机器人导航,证实了利用天空偏振光信息导航的可行性。2008年,褚金奎等人<sup>[13]</sup>搭建了国内首个六通道偏振光传感器,并实现了无人车的偏振光自主导航<sup>[14]</sup>。2012年, Chahl 等人<sup>[15]</sup>将偏振光传感器搭载于无人机测量其航向角。2017年,胡小平等人<sup>[16]</sup>提出一种偏振光组合导航方案并通过跑车实验证实了可行性。2018年, Julien 等人<sup>[17]</sup>利用两通道紫外偏振光传感器实现了六足机器人的循迹。偏振光传感器同时也被广泛研究应用于定位<sup>[18-21]</sup>、定姿<sup>[22]</sup>与组合导航中<sup>[23-25]</sup>。2018年,陈永台等人<sup>[26]</sup>搭建了全天空偏振成像探测器。2019年,万振华等人<sup>[27]</sup>对成像式偏振光传感器进行了误差模型的建立与验证。上述文献的偏振光导航应用环境均为平稳环境,而在波动水面的非稳定环境下载体无法始终保持水平状态,从而影响偏振光传感器的测量精度。支炜等人<sup>[22]</sup>对偏振光传感器倾斜的问题提出了补偿算法。卢鸿谦等人<sup>[23]</sup>推导了偏振光在三维环境组合导航的应用原理并进行了仿真分析。

为了实现偏振光传感器在水面波动环境下及编队协同情境下的应用,并提升无人船导航的抗电磁干扰能力,本文首先设计了偏振光传感器/MIMU/GPS组合导航算法,并搭建了偏振光传感器的无人船实验平台,同时将偏振光传感器集成于云台以提升它在波动环境下的输出稳定性;然后与传统地磁导航方式进行了循迹对比实验,证实了偏振光传感器应用于水面环境的可行性及在磁罗盘受干扰情况下偏振光组合导航系统仍可正常工作;最后进行了无人船的编队实验,实现了基于偏振光组合导航系统的无人船编队航行。

## 2 偏振光组合导航与编队原理

### 2.1 偏振光导航原理

太阳辐射的无偏振态自然光在穿过大气层时被大气中的粒子吸收和散射, 发生瑞利散射和米氏散射, 从而在天空中产生稳定且规律分布的偏振光。天空中任意一点偏振光的偏振方向( $\mathbf{E}$  矢量)总是垂直于由太阳、观测点和被观测点组成的平面。基于天空偏振光分布模式, 本文采用的偏振光导航传感器通过测量其体轴与天顶点入射光  $\mathbf{E}$  矢量方向的夹角, 从而计算得到其体轴与太阳子午线的夹角来获得航向角。

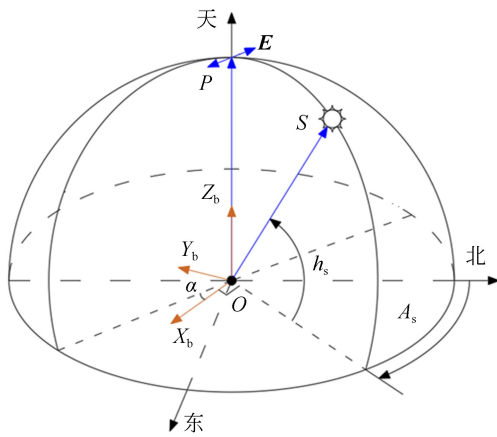


图 1 偏振光导航原理

Fig. 1 Principle diagram of polarized light navigation

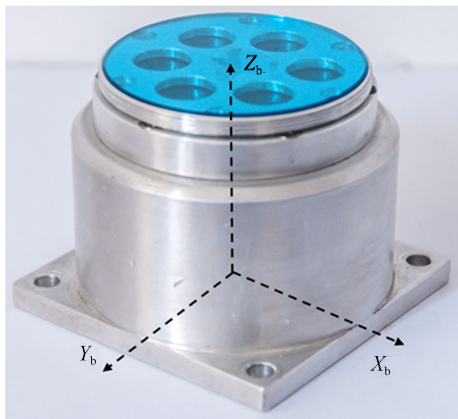


图 2 偏振光传感器坐标系

Fig. 2 Coordinate system of polarization sensor

世界坐标系为东北天坐标系如图 1 所示, 图中  $S$  点为太阳,  $P$  点为传感器观测点,  $b$  系为传感器坐标系,  $A_s$  为太阳方位角,  $h_s$  为太阳高度角,  $\mathbf{E}$  矢量为传感器观测点处偏振光的振动方向,  $\alpha$  为偏振光传感器体轴与其观测点  $\mathbf{E}$  矢量的夹角。载体坐标系为偏振光传感器的前右上坐标系, 如图 2 所示。偏振光  $\mathbf{E}$  矢量在世界坐标系下表示为  $\mathbf{E}_n = [e_x \ e_y \ e_z]^T$ , 由偏振光传感器测得为入射偏振光偏振方向与其体轴的夹角, 则偏振光  $\mathbf{E}$  矢量在载体坐标系表示为:  $\mathbf{E}_b = [\cos \alpha \ \sin \alpha \ 0]^T$ , 通过方向余弦转换矩阵 (DCM) 可实现  $\mathbf{E}$  矢量在两坐标系间的转换, 即:

$$\mathbf{E}_n = \mathbf{C}_b^n \cdot \mathbf{E}_b. \quad (1)$$

观测点为天顶点即有:  $\mathbf{OP}_n = [0 \ 0 \ 1]^T$ , 则  $\theta=0, \varphi=0$ , 方向余弦转换矩阵可简化为:

$$\mathbf{C}_b^n = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

太阳矢量  $\mathbf{OS}$  在世界坐标系的表示为:

$$\mathbf{OS}_n = [\cos(h_s)\cos(A_s) \ \cos(h_s)\sin(A_s) \ \sin(h_s)]^T. \quad (3)$$

由瑞利散射规律得到:

$$\mathbf{E}_n = \mathbf{OS}_n \times \mathbf{OP}_n. \quad (4)$$

联立式(1)~式(4)即可得到航向角:

$$\psi = \alpha + A_s + \frac{\pi}{2}. \quad (5)$$

### 2.2 偏振光组合导航算法

偏振光组合导航系统组成如图 3 所示, 包含了偏振光传感器、加速度计、陀螺仪及 GPS 模块。通过偏振光传感器获得航向角, GPS 获得位置及速度, 利用加速度计与陀螺仪惯性解算位置和速度及姿态。以 GPS、偏振光传感器测得的位置/速度/姿态与惯性组件 MIMU 解算的位置/速度/姿态的差值作为观测量, 通过卡尔曼滤波器预测位置/速度/姿态误差, 最后将误差通过 PI 控制器返回 MIMU 惯性解算作为补偿, 以补偿后的姿态、位置和速度数据作为输出。对比直接输出卡尔曼滤波器预测姿态、位置的方式提高了姿态、位置信息的更新频率。

卡尔曼滤波器状态方程:

$$\mathbf{X}' = \mathbf{F}\mathbf{X} + \mathbf{W}, \quad (6)$$

其中状态量定义为:  $\mathbf{X}_0^n = [\delta\theta \ \delta P \ \delta U]^T$ , 姿态

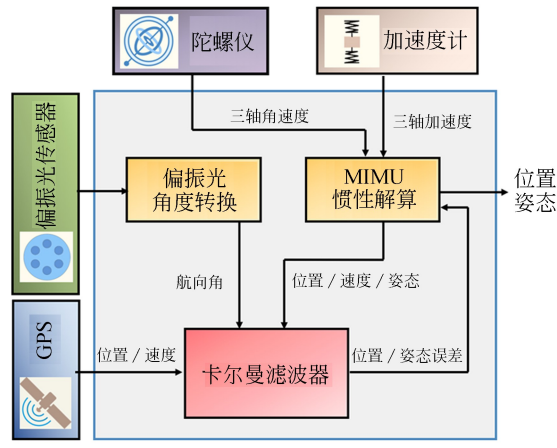


图 3 偏振光传感器/MIMU/GPS 组合导航系统框图  
Fig. 3 Block diagram of polarization sensor / MIMU/GPS integrated navigation system

角误差为:  $\delta\Theta^n = [\delta\varphi \ \delta\theta \ \delta\psi]^T$ , 速度误差表示为:  $\delta U^n = [\delta u \ \delta v \ \delta w]^T$ , 位置误差表示为:  $\delta P^n = [\delta n \ \delta e \ \delta d]^T$ ,  $F$  为状态转移矩阵, 即捷联惯性导航系统误差方程的系统矩阵<sup>[28]</sup>,  $W$  为过程高斯白噪声。观测方程定义为:

$$Z = HX + V. \quad (7)$$

以 GPS 与偏振光传感器的输出与 MIMU 解算的差值作为观测量, 则:

$$Z = [\psi_{\text{MIMU}} - \psi_{\text{pol}} \quad P_{\text{MIMU}} - P_{\text{GPS}} \quad U_{\text{MIMU}} - U_{\text{GPS}}]. \quad (8)$$

GPS 与偏振光传感器的测量误差为:

$$V = [v_{\text{GPS-V}} \quad v_{\text{GPS-P}} \quad v_{\text{POL}}], \quad (9)$$

$H$  为状态量与观测量转换矩阵:

$$H = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0_{3 \times 1} & 0_{3 \times 1} \\ 0_{3 \times 1} & I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 1} & 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

定义偏振光/MIMU/GPS 组合导航系统的输出为  $Y'$ , 则可表示为  $Y' = [\Theta' \ P' \ U']^T$ , MIMU 惯性解算输出为  $Y = [\Theta \ P \ U]^T$ , 将卡尔曼滤波器预测状态误差通过 PI 控制器补偿给 MIMU 姿态解算系统并输出可表达为:

$$Y'_k = Y_k + K_P X'_k + K_I \sum_{i=0}^k X'_i. \quad (11)$$

其中  $K_P, K_I$  为比例、积分系数, 下标  $k$  代表时刻。

### 2.3 编队控制策略

编队控制策略基于制导-导航的思想, 领航船获得自身 GPS 坐标后, 将它与预设队形的跟随

船位置矢量加和后得到跟随船的期望坐标并广播, 跟随船收到期望坐标信息后根据自身位置由各跟随船控制器导航至目标点, 编队策略如图 4 所示。

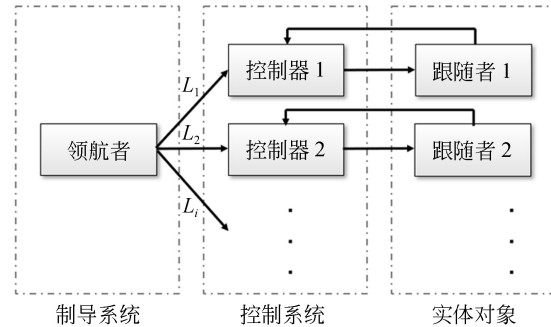


图 4 无人船编队策略框图

Fig. 4 Block diagram of USV formation strategy

以路径跟踪、队形保持任务为例, 首先定义领航船和所有从船的相对位置向量  $L_i, i=1, 2, 3, \dots$ , 如图 5 所示, 在东北坐标系下,  $L_1, L_2$  为预设队形跟随船与领航船相对位置矢量, 领航船将自身 GPS 坐标与相对位置向量  $L_i$  加和得到各从船的期望位置并发送。独立的设置各从船的控制导航系统以实现从船自治, 使接收到领航船广播的期望坐标后根据自身的实时位置自动导航。

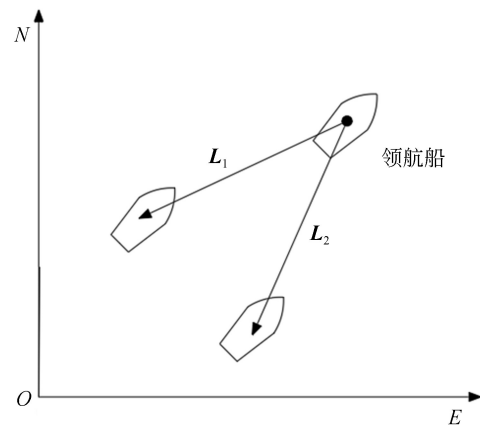


图 5 无人船预设队形定义

Fig. 5 Definition of USV preset formation

定义跟随船的期望路径为:

$$\eta_{di}(\theta) = \eta_d(\theta) + R(\psi(\theta))L_i, \quad (12)$$

式中:  $L_i = [x_i \ y_i \ 0]^T$ ,  $\eta_d(\theta)$  为领航船路径,  $\theta$

为所设定路径的变化参数,如实现为队形保持策略,则  $\theta$  保持为常数。 $R(\psi_d(\theta))$  为转换为世界坐标系下的转换矩阵,即:

$$R(\psi_d(\theta)) = \begin{bmatrix} \cos \psi_d(\theta) & -\sin \psi_d(\theta) & 0 \\ \sin \psi_d(\theta) & \cos \psi_d(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

若实现队形保持即有:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\eta_{di}(\theta)_t - P_i) = 0. \quad (14)$$

各跟随船实际坐标与期望坐标误差趋近于 0,  $P_i$  为跟随船实际坐标。

### 3 偏振光传感器的无人船实验

#### 3.1 实验平台

无人船实验平台(如图 6)采用 Pixhawk 控制平台,搭载了 MPU6000 惯性传感器(包含三轴加速度计、三轴陀螺仪),并另外集成了 L3GD20 陀螺仪与 LSM303D 加速度计,组成双惯性器件平台进行惯性姿态、位置及速度的解算,电子罗盘 HMC5883L 用以提供航向角信息。在无人船顶部安装有 M8N GPS 模块用以提供位置、速度信息;2.4G 数传模块用以与地面站实现信息交互、任务规划;遥控器用以切换偏振光组合导航系统与磁罗盘组合导航系统;在无人船尾部搭载了本课题组研发的偏振光导航传感器<sup>[29]</sup>,用以提供航向角信息,并为其集成云台底座以提升波动情况下的输出稳定性(如图 7)。无人船实验平台采用传感器精度信息如表 1 所示。



图 6 无人船实验平台

Fig. 6 USV experimental platform

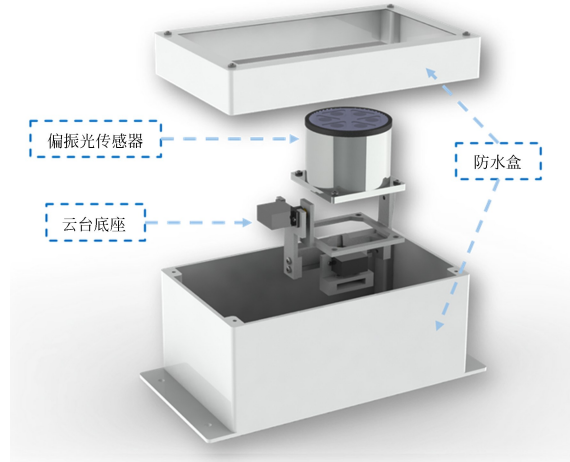


图 7 偏振光传感器集成云台结构

Fig. 7 Structure diagram of polarization sensor integrated gimbal

表 1 组合导航系统传感器精度信息

Tab. 1 Accuracy information of integrated navigation system sensor

传感器	型号	精度	采样频率/Hz
MIMU-1	MPU6000	131 LSB/((°) · s <sup>-1</sup> ) 4096 LSB/g	100
MIMU-2	L3GD20 LSM303D	70 mdps/digit 0.732 mg/LSB	100
GPS	NEO-M8N	2 m CEP	10
电子罗盘	HMC5883	1°~2°	10
偏振光传感器	自主研发	室内:0.1° 室外<2°	10

#### 3.2 循迹对比实验

实验地点为大连海事大学心海湖(121°31'26"E,38°52'8.4"N)。实验时间为 2019 年 8 月 22 日 17 时 40 分,实验天气晴朗无云。实验预设轨迹为 15 m 的正方形。无人船航行速度设定为 0.5 m/s。

实验中使无人船沿预定方形路径连续航行两圈,其中第一圈采用偏振光传感器/MIMU/GPS 组合导航系统,第二圈切换为磁罗盘/MIMU/GPS 导航系统。记录航行轨迹数据如图 8 所示,航向角数据如图 9 所示。利用 GPS 数据分段求解实际轨迹与预设轨迹的偏离程度与航向角偏差,结果如表 2 所示。位置偏差求解方法:首先利用 4 个设定角点坐标求解设定路径方程的 4 段线

段,随后将实际轨迹 GPS 坐标点按对应线段分为 4 组求位置偏差,最后对所有偏差加和求取均值作为偏离程度(由于无人船设定在航点半径 1 m 范围内视为到达,并向下一航点做转向调整,故在此范围内不考虑偏差)。航向角偏差求解方法:通过 SD 卡记录的航向角与预设轨迹航向角做差得到航向角偏差,对所有坐标点处航向角偏差求均值作为航向角偏差。

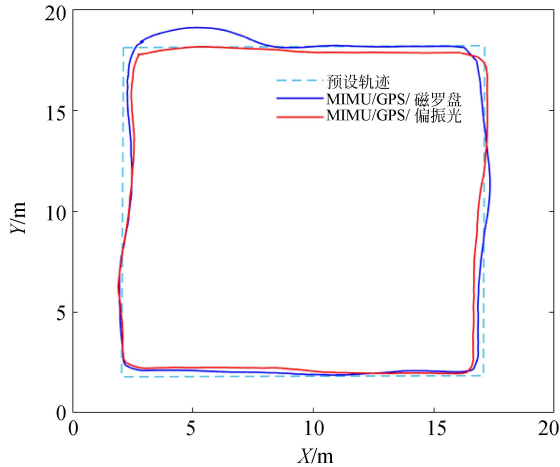


图 8 无人船循迹实验轨迹

Fig. 8 Experimental tracks of USVs

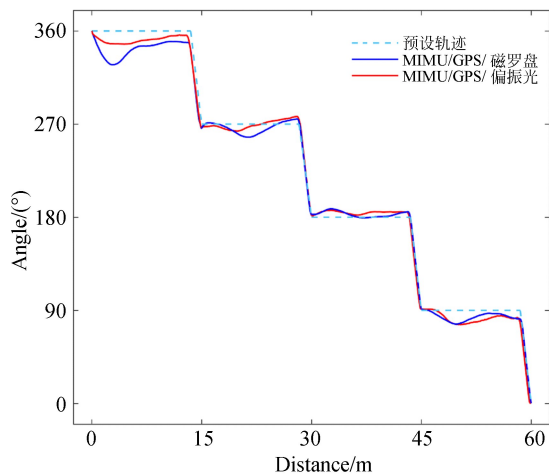


图 9 无人船航向角

Fig. 9 Heading angle of USVs

通过图 8、图 9 与表 2 可以得到,偏振光传感器/MIMU/GPS 组合导航系统轨迹偏离预设轨迹平均值为 0.209 m,航向角偏差为 6.055°。磁罗盘/MIMS/GPS 组合导航系统偏离预设轨迹平

均值为 0.248 m,航向角偏差为 7.897°。在轨迹图 8 的(5,18)处、航向角图 9 的 360°区域磁罗盘受到干扰精度降低、数据波动较大,对比采用偏振光组合导航系统的无人船轨迹具有明显偏差。在磁罗盘短时间受到干扰的情况下偏振光组合导航系统不受影响,将偏振光导航传感器融入后导航循迹精度提升了 15.7%;航向角精度提高 23.3%。由此可知,偏振光组合导航系统具有较高的鲁棒性,且误差不随时间累积、实时性好。

表 2 两种导航方式下误差对比

Tab. 2 Error comparison between two integrated navigation systems

导航方式	位置偏差/m	航向角偏差/(°)
磁罗盘/MIMU/GPS	0.248	7.897
偏振光/MIMU/GPS	0.209	6.055

### 3.3 编队实验

实验地点为大连海事大学心海湖(121°31'26" E, 38°52'8.4"N)。实验时间为 2019 年 12 月 13 日 15 时 30 分,实验天气晴朗无云。实验预设轨迹为边长 7.5 m 的“W”形。无人船导航系统采用偏振光传感器/MIMU/GPS 系统。

实验中设定黑色无人船为领航船,领航速度为 0.5 m/s,红色无人船为跟随船,跟随速度为 0.7 m/s。领航船领先跟随船距离 1.5 m 成跟随状编队行驶(如图 10)。使领航船沿预设轨迹航行一周,并通过 2.4G 数传模块链接跟随船向其实时发送期望坐标(期望坐标由领航船 GPS 坐标



图 10 无人船编队

Fig. 10 Photo of USVs formation experiment

与预设队形的跟随船相对位置向量  $L_i$  矢量加和得到)。跟随船接收到领航船广播的期望坐标后由该船导航控制器自动导航至期望点。

编队实验航行轨迹如图 11 所示。将领航船轨迹与预设编队矢量  $L_i$  加和得到跟随船的期望路径, 由于本实验设定为跟随队形故跟随船理论轨迹与领航船轨迹重合。通过计算得到领航者的轨迹误差为 0.425 m, 跟随者的轨迹误差为 0.707 m。领航船轨迹误差的计算方法同上述循迹实验位置误差计算, 区别是将航点处的位置偏差计算在内。跟随船轨迹误差的计算方法为: 将两船 GPS 航点对齐后计算相应的位置误差加和求均值后作为轨迹误差。

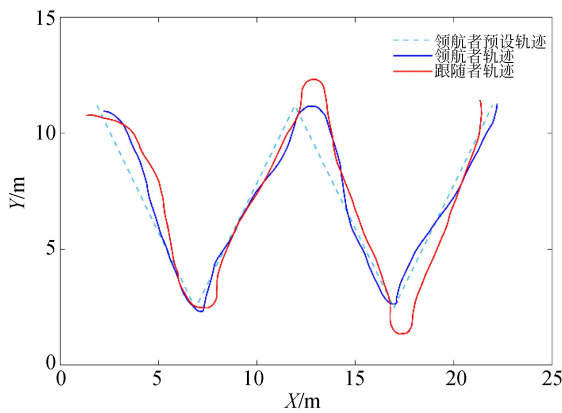


图 11 无人船编队实验轨迹

Fig. 11 Experimental tracks of USVs formation

在实际编队过程中, 由于领航船转向半径小, 跟随船转弯处仍保持预设队形, 故跟随船期望点在转弯处偏离领航船轨迹(如图 12),  $t_1, t_2$  时刻领航者与跟随者轨迹基本重合, 但在  $t_3$  时刻领航者迅速转向并保持预设队形, 使跟随者期望坐标点偏离领航者轨迹,  $t_4$  时刻后又重合。  $t_3$  时刻偏离误差理论值为:  $|L_i| - R$ , 其中  $R$  为领航船转向半径。在  $t_1, t_2, t_4$  直线段时刻的偏离误差理论值为:  $|L_i| \sin(\theta)$ , 其中  $\theta$  为领航船行驶在直线轨迹中

的实时航向角输出与预设轨迹切向的角度差值。

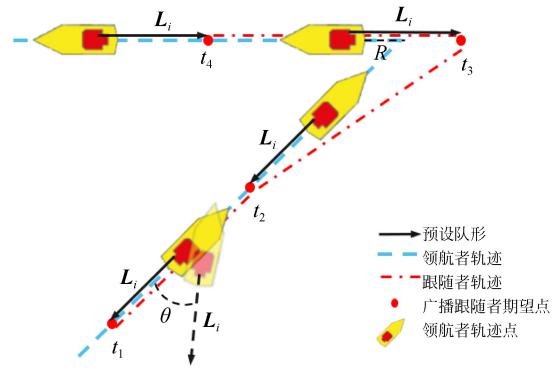


图 12 跟随者轨迹偏差理论图

Fig. 12 Principle diagram of tracking bias

## 4 结 论

为了实现偏振光传感器在水面波动环境下及编队协同情境下的应用, 并提升无人船导航的抗电磁干扰能力。本文设计了偏振光传感器/MIMU/GPS 组合导航算法, 搭建了偏振光无人船导航平台进行导航与编队实验。循迹对比实验结果表明: 偏振光组合导航系统航向角误差为  $6.055^\circ$ , 循迹位置误差为 0.209 m, 在磁罗盘短时受到干扰的情况下该组合导航系统不受影响。编队实验结果表明: 领航船循迹误差为 0.425 m, 跟随者编队的轨迹误差为 0.707 m, 偏振光组合导航系统可应用于无人船导航与编队。

目前, 偏振光无人船导航平台仅应用于湖面环境, 下一步的工作是通过云台底座的姿态芯片感知补偿后仍存在的小倾斜度误差并输入偏振光传感器的计算芯片, 在此基础上加入补偿算法使传感器输出更加稳定。同时进行湖面、河面、海面环境下的无人船同轨迹循迹对比实验, 进一步验证偏振光组合导航系统应用于水面导航的可行性。

### 参考文献:

[1] YUH J, MARANI G, BLIDBERG D R. Applications of marine robotic vehicles [J]. *Intelligent Service Robotics*, 2011, 4(4): 221-231.  
 [2] LIU Z X, ZHANG Y M, YU X, et al.. Unmanned

surface vehicles: an overview of developments and challenges[J]. *Annual Reviews in Control*, 2016, 41: 71-93.  
 [3] BORENSTEIN J, EVERETT H R, FENG L, et al.. Mobile robot positioning: Sensors and techniques[J]. *Journal of Robotic Systems*, 1997, 14

- (4): 231-249.
- [4] BIBULI M, BRUZZONE G, CACCIA M, *et al.*. Path-following algorithms and experiments for an unmanned surface vehicle[J]. *Journal of Field Robotics*, 2009, 26(8): 669-688.
- [5] MOSTAFA M Z, KHATER H A, RIZK M R, *et al.*. A novel GPS/RAVO/MEMS-INS smartphone-sensor-integrated method to enhance USV navigation systems during GPS outages[J]. *Measurement Science and Technology*, 2019, 30(9): 095103.
- [6] NAUS K, MARCHEL L. Use of a weighted ICP algorithm to precisely determine USV movement parameters[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(17): 3530.
- [7] SNYDER J. Doppler Velocity Log (DVL) navigation for observation-class ROVs[C]. *Oceans 2010 Mts/Ieee Seattle*, 20-23 Sept. 2010, Seattle, WA, USA. IEEE, 2010: 1-9.
- [8] WEON, IHN-SIK. Obstacle avoidance of unmanned surface vehicle based on 3D lidar for VFH algorithm[J]. *Asia-pacific Journal of Multimedia Services Convergent with Art, Humanities, and Sociology*, 2018, 8(3): 945-953.
- [9] 王贵槐, 谢朔, 柳晨光, 等. 基于激光雷达的内河无人船障碍物识别方法[J]. *光学技术*, 2018, 44(5): 602-608.
- WANG G H, XIE S, LIU CH G, *et al.*. Obstacle identification method based on laser radar for inland unmanned vessel[J]. *Optical Technique*, 2018, 44(5): 602-608. (in Chinese)
- [10] WITZE A. Earth's magnetic field is acting up and geologists don't know why[J]. *Nature*, 2019, 565(7738): 143-144.
- [11] V FRISCH K. Die polarisation des himmelslichtes als orientierender faktor bei den Tänzen der Bienen[J]. *Experientia*, 1949, 5(4): 142-148.
- [12] LAMBRINOS D, MÖLLER R, LABHART T, *et al.*. A mobile robot employing insect strategies for navigation[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2000, 30(1/2): 39-64.
- [13] CHU J K, ZHAO K C, ZHANG Q, *et al.*. Construction and performance test of a novel polarization sensor for navigation[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2008, 148(1): 75-82.
- [14] 褚金奎, 陈文静, 王洪青, 等. 基于偏振光传感器的移动机器人导航实验[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(10): 2419-2426.
- CHU J K, CHEN W J, WANG H Q, *et al.*. Mobile robot navigation tests with polarization sensors[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(10): 2419-2426. (in Chinese)
- [15] CHAHL J, MIZUTANI A. Biomimetic attitude and orientation sensors[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, 12(2): 289-297.
- [16] FAN C, HU X P, HE X F, *et al.*. Integrated polarized skylight sensor and MIMU with a metric map for urban ground navigation[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 18(4): 1714-1722.
- [17] JULIEN D, JULIEN S, STÉPHANE V. A hexapod walking robot mimicking navigation strategies of desert ants cataglyphis[C]. *Conference on Biomimetic and Biohybrid Systems, Paris, P. R. Switzerland: Springer Cham*, 2018: 145-156.
- [18] 褚金奎, 张慧霞, 王寅龙, 等. 多方向偏振光实时定位样机的设计与搭建[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(2): 312-318.
- CHU J K, ZHANG H X, WANG Y L, *et al.*. Design and construction of autonomous real-time position prototype based on multi-polarized skylight[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(2): 312-318. (in Chinese)
- [19] WANG Y L, CHU J K, ZHANG R, *et al.*. A novel autonomous real-time position method based on polarized light and geomagnetic field[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 9725.
- [20] 王玉杰, 胡小平, 练军想, 等. 仿生偏振视觉定位定向机理与实验[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(9): 2109-2116.
- WANG Y J, HU X P, LIAN J X, *et al.*. Mechanisms of bionic positioning and orientation based on polarization vision and corresponding experiments[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(9): 2109-2116. (in Chinese)
- [21] LIU J, YANG J T, WANG Y B, *et al.*. Global positioning method based on polarized light compass system[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018, 89(5): 054503.
- [22] ZHI W, CHU J K, LI J S, *et al.*. A novel attitude determination system aided by polarization sensor[J]. *Sensors*, 2018, 18(1): 158.
- [23] 卢鸿谦, 尹航, 黄显林. 偏振光/地磁/GPS/SINS组合导航方法[J]. *宇航学报*, 2007, 28(4): 897-902.
- LU H Q, YIN H, HUANG X L. Polarized-light/

- geomagnetism/GPS/SINS integrated navigation [J]. *Journal of Astronautics*, 2007, 28(4): 897-902. (in Chinese)
- [24] 范之国,高隽,潘登凯,等. 利用偏振光、地磁、GPS进行多信息源融合导航方法的研究与实现[J]. *武汉大学学报:信息科学版*, 2009, 34(11): 1324-1327.  
FAN ZH G, GAO J, PAN D K, *et al.*. The implementation of a new integrated navigation solution with polarized-light assisting with geomagnetism and GPS[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(11): 1324-1327. (in Chinese)
- [25] GUO X Q, CHU J K, WANG Y L, *et al.*. Formation experiment with heading angle reference using sky polarization pattern at twilight[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(34): 9331-9337.
- [26] 陈永台,张然,林威,等. 天空实时全偏振成像探测器设计与搭建[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(4): 816-824.  
CHEN Y T, ZHANG R, LIN W, *et al.*. Design and construction of real-time all-polarization imaging detector for skylight [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(4): 816-824. (in Chinese)
- [27] 万振华,赵开春,褚金奎. 基于偏振成像的定向传感器误差建模与验证[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(8): 1688-1696.  
WAN ZH H, ZHAO K CH, CHU J K. Modeling and analysis of orientation measurement error based on polarization imaging[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(8): 1688-1696. (in Chinese)
- [28] TITTERTON D, JOHN L, WESTON. *Strap-down Inertial Navigation Technology* [M]. 2nd Edition. London: Institution of Engineering and Technology, 2004.
- [29] WANG Y L, CHU J K, ZHANG R, *et al.*. A bio-inspired polarization sensor with high outdoor accuracy and central-symmetry calibration method with integrating sphere [J]. *Sensors*, 2019, 19(16): 3448.

#### 作者简介:



**褚金奎**(1965—),男,河南平顶山人,博士,教授,博士生导师,1986年于杭州电子科技大学获得学士学位,1989年于西安科技大学获得硕士学位,1992年于北京航空航天大学获得博士学位,主要从事智能机器人、仿生传感器和微机电测试技术等方面的研究。E-mail: chujk@dlut.edu.cn



**林木音**(1994—),男,内蒙赤峰人,硕士研究生,2018年于北京科技大学获得学士学位,主要从事偏振光导航方面的研究。E-mail: linmuyin@mail.dlut.edu.cn