

文章编号 1004-924X(2018)08-2067-07

阵列式偏振导航传感器及其鲁棒性算法实现

褚金奎*, 蹇慧君, 刘 泽, 张 然

(大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要:当昆虫视野内存在部分遮挡时,能够依靠其复眼背部边缘区域中偏振敏感多小眼结构,感知天空偏振光信息进行导航。模仿该偏振敏感多小眼结构设计了阵列式偏振导航传感器。实际应用中,传感器视野内的随机遮挡、金属纳米光栅偏振器局部缺陷和尖锐噪声等造成各偏振方向内存在干扰像素影响偏振光强提取,基于线性灰度拉伸的 Otsu 阈值分割及 3σ 法则,提出了一种具有鲁棒性的偏振光强提取算法。首先,详述了传感器的偏振导航算法和传感器组成;然后,基于 MFC 对话框项目,开发了传感器的实时监控界面,实时显示偏振信息变化,数据更新率达 10 Hz;最后,对传感器进行了测试实验。标定实验结果表明:该传感器性能稳定,定向精度 $\pm 0.25^\circ$;在室外有无遮挡条件下的对比实验结果表明:该传感器能适应视野内的部分遮挡环境,具有较好的鲁棒性。

关键词:阵列式偏振导航传感器;偏振敏感多小眼结构;鲁棒性

中图分类号: TP212 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182608.2067

Array polarization sensor for navigation and its robust algorithm

CHU Jin-kui*, JIAN Hui-jun, LIU Ze, ZHANG Ran

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

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

Abstract: In the compound eyes of several insects, the dorsal rim area has regularly arranged polarization sensitive ommatidium. Insects rely on this special structure to extract the polarization information of skylight to facilitate navigation when the insect's eye view was partially occluded. An array polarization sensor was designed for navigation by imitating this special structure. In practical applications, the sensor was disturbed by many factors such as random partial occlusion of the view, multi-oriented wire-grid polarizer defect, and sharp noise. To address these problems, this paper proposes a novel and robust polarization intensity extraction algorithm, which was based on linear gray stretch, Otsu threshold segmentation, and the 3σ theorem. The polarization algorithm was discussed and the structure of the sensor was presented. Based on the MFC and OpenCV, a real-time control and monitor software interface of the sensor was developed, which can display polarization information with data update rates up to 10 Hz. The angle polarization measurement test results indicate that the sensor is stable and the angle error is $\pm 0.25^\circ$. Robust tests under outdoor conditions with and without occlusion indicate that the sensor can adapt to changes in random shade environments, which is indicative of the robustness of the approach.

收稿日期: 2017-10-25; **修订日期:** 2017-12-06.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51675076; No. 51505062); 国家自然科学基金创新研究群体项目资助 (No. 51621064); 中央高校基本科研业务费资助项目 (No. DUT17GF109, No. DUT16TD20); 联合基金资助项目 (No. 6141B08100303)

Key words: array polarization sensor for navigation; arranged polarization sensitive ommatidium structure; robust

1 引言

研究发现,自然界中许多昆虫可以感知天空偏振光信息进行导航,如沙蚁^[1],蟋蟀^[2],君主斑蝶^[3]和蜚螂^[4]等。国内外研究人员模仿昆虫偏振敏感结构和机理,对仿生偏振导航传感器开展了广泛的研究。美国洛克菲勒大学 Brines 等人^[5]设计开发了点源式的天空偏振光检测系统,瑞士学者 Lambrinos 等人^[6-7]通过模仿沙蚁偏振导航机理,设计了多通道的偏振光检测装置,并先后在两代移动机器人上进行导航,验证了偏振光应用于导航定向的可行性。德国学者 Schmolke 等人^[8]在室内人造偏振光环境下,实现了移动机器人的路径跟踪。澳大利亚学者 Chahl 等人^[9]模仿蜻蜓偏振敏感导航机理,将研制的包含 3 个独立敏感单元的偏振光传感器搭载在无人机上,进行了航向角的测量。国内,大连理工大学褚金奎教授课题组^[10-11]研制了六通道仿生偏振导航传感器,并成功用于室外移动机器人导航。合肥工业大学高隽研究组^[12]研究了平面四通道大气偏振信息检测传感器样机。哈尔滨工业大学刘佳琦等人^[13]搭建了三通道的偏振光测量平台。

目前研究的仿生偏振导航传感器各偏振方向中包含单个偏振敏感单元,分辨率低,视野内存在遮挡时的鲁棒性差。生物行为学与形态学实验显示,昆虫复眼背部边缘区域(Dorsal Rim Area, DRA)有对偏振振动矢量敏感而且规则排列的特殊小眼结构,使昆虫容易感知天空偏振光方位角信息^[14]。DRA 内偏振敏感多小眼结构能够提高偏振视觉系统的鲁棒性及绝对灵敏度,当视野内存在云、树叶、飞鸟等干扰因素时,可以依靠其他未被干扰影响的偏振敏感小眼实现导航^[15],因此模仿昆虫偏振敏感多小眼结构设计偏振导航传感器,能够提高传感器各偏振方向的分辨率,进而提高偏振光传感器被遮挡时的鲁棒性,增强偏振导航的环境适应性。

所在课题组,刘泽等人^[16]模仿昆虫复眼 DRA 区域中偏振敏感多小眼结构,通过纳米压印工艺研制了多方向金属纳米光栅偏振器并将其集

成在了感光像素阵列上,为提高偏振导航的鲁棒性提供了硬件基础。李彬等人^[17]基于该偏振光栅传感器搭建了一套成像式仿生偏振导航装置并研究了偏振导航算法。

以偏振光栅传感器作为关键器件所设计的偏振导航传感器,在解算偏振方位角前,首先要提取各偏振方向的光强值。在实际应用中,由于受到金属纳米光栅偏振器局部缺陷,传感器视野内云、树叶等随机遮挡,尖锐噪声等不可控因素的干扰,造成各偏振方向内存在干扰像素点。目前传感器各偏振方向光强值的提取方法是通过选取各偏振方向内像素灰度值分布均匀的区域,此区域内灰度均值作为光强值测量值^[17]。此方法降低了对各偏振方向数据量的利用率,而且在传感器视野内存在遮挡时的适应性差。本文针对传感器被部分遮挡时,各偏振方向像素的灰度特性,基于线性灰度拉伸的 Otsu 阈值分割及 3σ 法则,提出了一种具有鲁棒性的偏振光强提取算法。设计了阵列式偏振导航传感器,在 MFC 框架下开发了传感器的实时控制监控界面,实时采集、处理和显示偏振信息。传感器实验测试结果表明该传感器性能稳定,精度高,能适应室外部分遮挡环境,具有较好的鲁棒性。

2 阵列式偏振导航传感器的导航算法

2.1 偏振方位角求解方法

可用斯托克斯矢量表示天空偏振光的状态,如下式所示:

$$\mathbf{S} = [I \ Q \ U \ V]^T, \quad (1)$$

式中: I 与入射光强成正比, Q 和 U 分别表示两个相互正交方向的线偏振信息, V 表示圆偏振信息。

偏振器对入射光偏振状态的改变可由米勒矩阵表示^[18]。出射光斯托克斯矢量为:

$$\mathbf{S}' = [I' \ Q' \ U' \ V']^T = \mathbf{P}_\alpha * \mathbf{S} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\alpha & \sin 2\alpha & 0 \\ \cos 2\alpha & \cos^2 2\alpha & \cos 2\alpha \sin 2\alpha & 0 \\ \sin 2\alpha & \cos 2\alpha \sin 2\alpha & \sin^2 2\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \\ V \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中: \mathbf{S} 为入射光的斯托克斯矢量, α 为偏振器的偏振角度, \mathbf{P}_α 为米勒矩阵。整理得, 出射光光强如式(3)所示:

$$I'(\alpha) = \frac{1}{2}(I + Q\cos 2\alpha + U\sin 2\alpha), \quad (3)$$

式中: I, Q, U 为未知量, $I'(\alpha)$ 为待测量。只要知道 3 个或 3 个以上角度偏振器下的光强, 就能够求解出未知量。金属纳米光栅偏振器上压印了 6 个偏振化方向, 分别为 $\alpha_1 = 0^\circ, \alpha_2 = 90^\circ, \alpha_3 = 60^\circ, \alpha_4 = 150^\circ, \alpha_5 = 120^\circ, \alpha_6 = 210^\circ$ 。将 6 个偏振化方向和出射光强按编号代入公式(3)后得:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 \\ \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 0 \\ \frac{1}{2} & -\frac{1}{4} & \frac{\sqrt{3}}{4} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{4} & -\frac{\sqrt{3}}{4} \\ \frac{1}{2} & -\frac{1}{4} & -\frac{\sqrt{3}}{4} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{4} & \frac{\sqrt{3}}{4} \end{bmatrix}, \mathbf{A} * \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1' \\ I_2' \\ I_3' \\ I_4' \\ I_5' \\ I_6' \end{bmatrix}. \quad (4)$$

六偏振化方向阵列属于冗余配置, 先求矩阵 \mathbf{A} 的伪逆矩阵:

$$\text{Inv}\mathbf{A} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T, \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \end{bmatrix} = \text{Inv}\mathbf{A} * \begin{bmatrix} I_1' \\ I_2' \\ I_3' \\ I_4' \\ I_5' \\ I_6' \end{bmatrix}. \quad (6)$$

将 Q, U 代入下面公式即可求得偏振方位角,

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[\frac{U}{Q} \right]. \quad (7)$$

2.2 一种具有鲁棒性的偏振光强提取算法

在解算偏振方位角前, 首先要测量得到各偏振方向的出射光强值。理想情况下, 对同一入射光, 各方向内像素点的灰度值相同。各偏振方向内所有像素点的灰度均值为出射光强测量值。

在实际应用中, 金属纳米光栅偏振器, 受制作工艺的限制, 偏振阵列内存在局部缺陷^[19], 造成偏振成像出现暗斑(如图 1(a)所示); 传感器视野内也可能存在树叶、飞鸟、云等随机遮挡(如图 1

(b)所示); 偏振成像时受尖锐噪声, 过曝光的影响也可能存在异常像素点。上述不可控干扰因素造成各偏振方向内存在干扰像素, 本文从图像分析和统计学的角度分离干扰像素, 提取各偏振方向的光强值。具体算法步骤如下:

(1) 截取各偏振方向像素矩阵

偏振光栅传感器采集的一帧偏振图像数据的大小为 $1\ 280 \times 1\ 024$, 6 个偏振阵列在图像中的坐标固定不变, 每个偏振方向包含 250×250 个像素大小。首先从偏振图像中截取各偏振方向的像素矩阵:

$$\mathbf{A}_{1,2,\dots,6} = \mathbf{f}_{1,2,\dots,6}(x, y) = \begin{bmatrix} f(0,0) & f(0,1) & \dots & f(0,249) \\ f(1,0) & f(1,1) & \dots & f(1,249) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f(249,0) & f(249,1) & \dots & f(249,249) \end{bmatrix}. \quad (8)$$

(2) 基于线性灰度拉伸的 Otsu 阈值分割

Otsu 阈值分割方法自适应强, 对有明显双峰直方图图像的阈值分割效果良好, 且是几种经典的阈值分割法中运行时间最少的, 适用于实时采集图像的处理^[20]。传感器视野内遮挡效果不明显时(如图 1(c)所示), 遮挡物与天空的对比度低, 单纯的 Otsu 阈值分割效果一般^[21-22]。为提高各偏振方向内遮挡与天空灰度对比度, 增强 Otsu 阈值分割效果, 在进行阈值分割前, 先对各偏振方向的像素矩阵进行线性灰度拉伸^[23], 拉伸函数如下:

$$g_{1,2,\dots,6}(x, y) = \begin{cases} c & 0 \leq f_{1,2,\dots,6}(x, y) < a \\ \frac{(d-c)}{(b-a)} f_{1,2,\dots,6}(x, y) + c & a \leq f_{1,2,\dots,6}(x, y) < b \\ d & b \leq f_{1,2,\dots,6}(x, y) < 255 \end{cases} \quad (9)$$

假设原像素矩阵 $\mathbf{f}_{1,2,\dots,6}(x, y)$ 的灰度变化区间为 $[a, b]$, 通过图像分段线性变化后, 将灰度区间扩展到 $[c, d]$ 。再对灰度增强后的图像进行 Otsu 阈值分割, 分割函数如下:

$$h_{1,2,\dots,6}(x, y) = \begin{cases} 1 & g_{1,2,\dots,6}(x, y) > T \\ 0 & g_{1,2,\dots,6}(x, y) \leq T \end{cases} \quad (10)$$

(3) 归零化 $\mathbf{f}_{1,2,\dots,6}(x, y)$ 矩阵内无效像素点灰度值:

$$k_{1,2,\dots,6}(x, y) = h_{1,2,\dots,6}(x, y) \cdot \mathbf{f}_{1,2,\dots,6}(x, y). \quad (11)$$

经过上述处理后, 像素点中还可能包含过亮

和未被阈值分割掉的干扰像素点。针对如上问题,本文通过 3σ 法则^[16] 进一步剔除干扰像素。

(4) 统计 $k_{1,2,\dots,6}(x, y)$ 矩阵内所有非零像素灰度均值 \bar{p} 和标准差 σ 。通过 3σ 法则设定阈值,求 $k_{1,2,\dots,6}(x, y)$ 二值化矩阵:

$$l_{1,2,\dots,6}(x, y) = \begin{cases} 1 & |k_{1,2,\dots,6}(x, y) - \bar{p}| \leq 3\sigma \\ 0 & |k_{1,2,\dots,6}(x, y) - \bar{p}| > 3\sigma \end{cases} \quad (12)$$

(5) 归零化 $k_{1,2,\dots,6}(x, y)$ 矩阵内干扰像素灰度值:

$$z_{1,2,\dots,6}(x, y) = k_{1,2,\dots,6}(x, y) \cdot l_{1,2,\dots,6}(x, y). \quad (13)$$

经过以上的处理后,干扰像素得到有效分离,不同遮挡情况的处理效果如图 1(d)、(e)、(f) 所示。图 1(a)、(b)、(c) 分别为传感器在无遮挡、树枝遮挡、云遮挡下的偏振成像原图;(d)、(e)、(f) 分别为不同遮挡情况下各偏振方向处理结果。

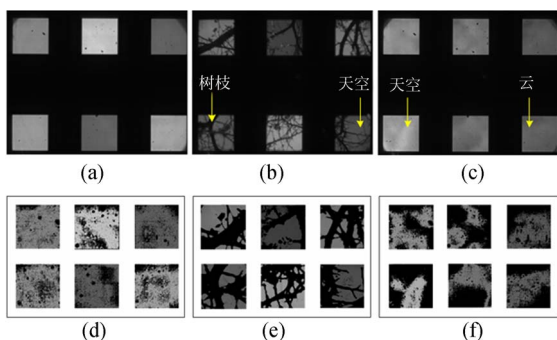


图 1 不同遮挡情况下处理效果对比图

Fig. 1 Comparison image of actual processing effect under different occlusion condition

(6) 统计 $z_{1,2,\dots,6}(x, y)$ 矩阵内所有非零像素点的灰度均值 \bar{p} , \bar{p} 即为最终测量得到的各偏振方向的出射光强。

3 阵列式偏振导航传感器

3.1 传感器的硬件组成

图 2 为阵列式偏振导航传感器硬件结构图。它主要由工业镜头、偏振光栅传感器、USB 控制器、PC 等组成。偏振光栅传感器各偏振方向上包含 250×250 个偏振像素,理论上,各偏振方向只要存在一个未被干扰的偏振像素即可用于解算方位角,实现偏振导航,这种结构为提高偏振导航的鲁棒性提供了硬件基础。偏振光栅传感器最大分

辨率 $1280H \times 1024V$, 像元尺寸为 $5.2 \mu\text{m} \times 5.2 \mu\text{m}$, 数据传输速率最高可达 48 M/s。为保证图像数据的实时传输,选择 Cypress 公司生产的 CY7C68013A USB 芯片控制数据的传输,该芯片提供了强大的功能,包括 USB 接口以及 8051 兼容指令系统,并向下兼容全速 USB 接口^[24]。

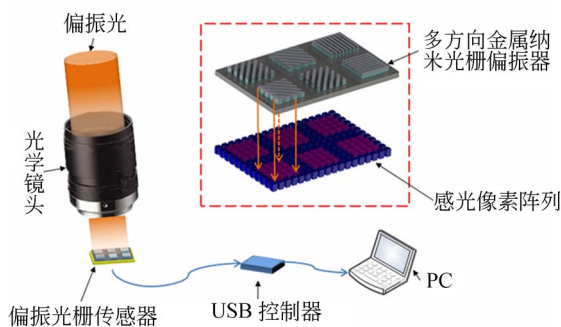


图 2 传感器硬件结构示意图

Fig. 2 Hardware block diagram of sensor

传感器工作时,USB 控制器通过 I2C 接口配置偏振光栅传感器的内部寄存器,并工作在 Slave FIFO 模式下,将像素数据通过 USB 接口高速传输给上位机。

3.2 传感器的软件设计

在 Visual Studio 2013 平台下,基于 MFC 对话框项目和 OpenCV,利用多线程技术开发了传感器的实时可视化监控软件,软件的程序流程图如图 3 所示。由于金属纳米光栅偏振器各偏振阵列的偏振性能不同,首先通过归一化的方法^[19]对金属纳米光栅偏振器透射率进行校正处理,使各偏振阵列获得统一强度标准。实时显示界面如下图 4 所示,包括初始化参数设置,实时动态显示偏振图像、各偏振阵列光强和偏振方位角的功能,数据更新率达 10 Hz。

4 实验测试与结果分析

4.1 传感器室内标定实验

在积分球测试平台下进行了室内标定实验^[19]。实验时,转台单次顺时针旋转 10° , 单次停顿 5 s, 循环 36 次。本文进行了五组实验,得到传感器原始误差大小在 $\pm 0.6^\circ$ 内。传感器金属纳米光栅偏振器透射率校正参数来源于同一强度标准下的先验数据。实时采集时,虽然对透射率误差进行了校正,但是各偏振方向的光强幅值依然存

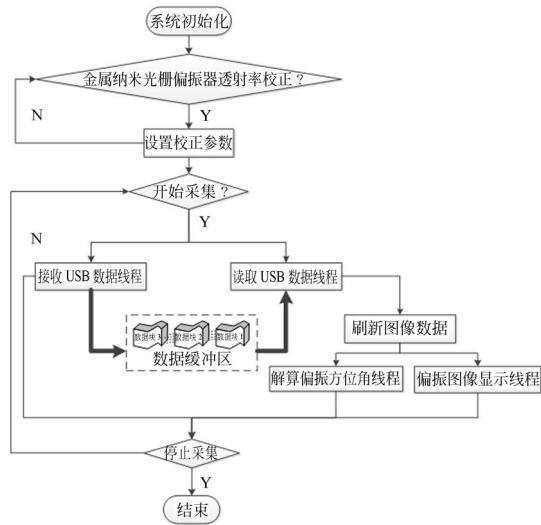


图 3 传感器偏振信息采集程序运行流程框图
Fig. 3 Flow chart of polarization information acquisition

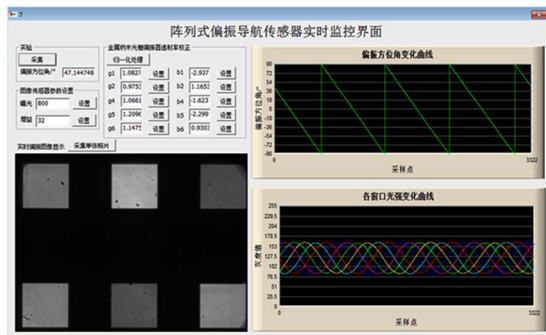


图 4 传感器实时监控界面显示
Fig. 4 Real-time control and monitor software interface of sensor

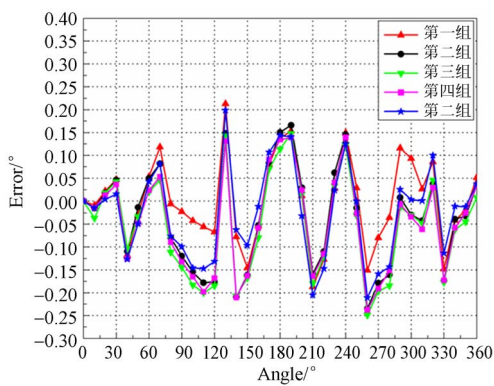


图 5 误差补偿后传感器测角误差与旋转角度关系
Fig. 5 Measured angle error as a function of rotation angle after error compensation of the sensor

在偏差,是传感器误差的主要来源。利用最小二乘曲线拟合的方法^[25]对各组误差曲线进行了补偿,补偿后的传感器误差在 $\pm 0.25^\circ$,如图 5 所示。

4.2 室外遮挡条件下传感器鲁棒性实验

为了便于测试外部遮挡环境干扰对传感器测角精度和稳定性的影响,将传感器固定在精密转台上,放置在室外树枝遮挡条件下进行了测试实验(如图 6 所示)。实验时间为上午 10 点,天气晴朗,地点在大连理工大学机械楼楼顶。本文分别进行了传感器在无遮挡和有遮挡环境下的实验。实验时,转台带动传感器单次顺时针旋转 10° ,停顿 5 s,循环 18 次。测试过程中,外部遮挡对传感器各偏振方向的影响随着转台的转动而不断变化。误差补偿后的实验结果如图 7 所示,由结果可知,传感器的测角精度未受遮挡环境的影响,误差在 $\pm 1.5^\circ$ 内,表现出较好的鲁棒性。

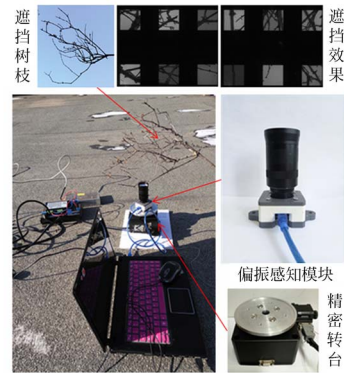


图 6 室外遮挡环境下传感器的测试实验
Fig. 6 Test of sensor under outdoor occlusion condition

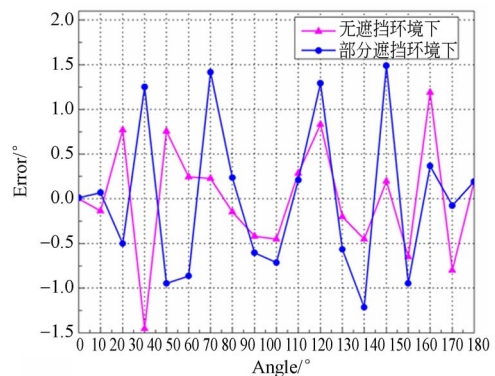


图 7 误差补偿后传感器在室外不同遮挡环境下的测角误差与旋转角度关系

Fig. 7 Measured angle error as a function of rotation angle after error compensation of the sensor under outdoor different occlusion condition

5 结 论

为提高偏振导航传感器各偏振方向的分辨率,增强传感器在干扰环境下的适应性,本文模仿昆虫复眼 DRA 区域规则排列的多偏振敏感小眼结构,设计了一种阵列偏振导航传感器。为解决传感器数据实时采集和处理的问题,开发了传感器的实时控制监控界面,数据更新率达 10 Hz。

针对目前偏振导航算法在传感器视野内存在遮挡时自适应差的问题,基于各偏振方向图像的灰度特性,提出了一种具有鲁棒性的偏振光强提取算法。为提高对传感器各偏振方向干扰像素的

去除效果,首先通过线性灰度拉伸的方法增强各偏振方向内遮挡与天空的对比度,提高 Otsu 阈值分割的效果;其次通过 3σ 法则设定阈值对遗留的干扰像素进一步剔除。

最后对传感器进行了测试实验,传感器在均匀偏振光环境下的原始误差在 $\pm 0.6^\circ$ 内,经补偿后的误差在 $\pm 0.25^\circ$ 内。在室外无遮挡和有遮挡的环境下,经过补偿后的传感器误差均在 $\pm 1.5^\circ$ 内。传感器在视野内存在遮挡时,测角精度未受影响,鲁棒性较好。

目前传感器是在室外部分遮挡环境下的测试,下一步的主要工作是对该传感器在室外有云层等复杂干扰环境下进行实验测试和验证。

参考文献:

- [1] LABHART T. Polarization-opponent interneurons in the insect visual system[J]. *Nature*, 1988, 331(6155): 435-437.
- [2] BRUNNER D, LABHART T. Behavioural evidence for polarization vision in crickets[J]. *Physiological entomology*, 1987, 12(1): 1-10.
- [3] REPERT S M, ZHU H, WHITE R H. Polarized light helps monarch butterflies navigate[J]. *Current Biology*, 2004, 14(2): 155-158.
- [4] GÁL J, HORVÁTH G, BARTA A, et al.. Polarization of the moonlit clear night sky measured by full - sky imaging polarimetry at full Moon: Comparison of the polarization of moonlit and sunlit skies[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2001, 106(D19): 22647-22653.
- [5] BRINES M L, GOULD J L. Skylight polarization patterns and animal orientation[J]. *Journal of Experimental Biology*, 1982, 96(1): 69-91.
- [6] LAMBRINOS D, KOBAYASHI H, PFEIFER R, et al.. An autonomous agent navigating with a polarized light compass [J]. *Adaptive behavior*, 1997, 6(1): 131-161.
- [7] LAMBRINOS D, LLER R M, LABHART T, et al.. A mobile robot employing insect strategies for navigation [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2000, 30: 39-64.
- [8] SCHMOLKE A, MALLLOT H, NEUROWISSENSCHAFT K. Polarization compass for robot navigation[C]. *The Fifth German Workshop on Artificial Life*. 2002: 163-167.
- [9] CHAHL J, MIZUTANI A. Biomimetic attitude and orientation sensors[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, 12(2): 289-297.
- [10] ZHAO K, CHU J, WANG T, et al.. A novel angle algorithm of polarization sensor for navigation [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2009, 58(8): 2791-2796.
- [11] 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.
CHU J K, CHNEG W J, WANG H Q, et al.. Mobile robot navigation tests with polarization sensors[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011(10): 2419-2426. (in Chinese)
- [12] 范宁生,张旭东,范之国,等.仿生 POL 神经元的偏振光导航传感器研究 [J]. *传感器与微系统*, 2011, 30(9): 53-56.
FAN N S, ZHANG X D, FAN Z G, et al.. Study on polarized light navigation sensor of imitating biological POL neurons [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2011, 30(9): 53-56. (in Chinese)
- [13] 刘佳琦.偏振光辅助定姿在组合导航中的应用 [D]. 哈尔滨工业大学, 2010.
LIU J Q. *Polarized-light-aided attitude determination in integrated navigation systems* [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese)
- [14] LABHART T, MEYER E P. Detectors for polarized skylight in insects: a survey of ommatidial specializations in the dorsal rim area of the compound eye[J]. *Microscopy research and technique*, 1999, 47(6): 368-379.

- [15] 褚金奎,张然,王志文,等. 仿生偏振光导航传感器研究进展[J]. 科学通报, 2016 (23): 2568-2577.
CHU J K, ZHANG R, WANG Z W, Progress on bio-inspired polarized skylight navigation sensor [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2016 (23): 2568-2577. (in Chinese)
- [16] LIU Z, ZHANG R, WANG Z, *et al.*. Integrated polarization-dependent sensor for autonomous navigation[J]. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2015, 14 (1): 015001-015001.
- [17] LI B, GUAN L, LI S, *et al.*. A robust adaptive angle algorithm for imaging bionic polarization navigation sensor [J]. *Key Engineering Materials*, 2015.
- [18] 阿查姆 RMA. 椭圆偏振测量和偏振光[M]. 科学出版社, 1986.
AZZAM RMA. *Ellipsometry and polarized light* [M]. Science Press, 1986. (in Chinese)
- [19] 褚金奎,王志文,张英杰,等. 多方向金属光栅偏振器及在偏振导航中的应用[J]. 光学精密工程, 2012, 20(10): 2237-2244.
CHU J K, WANG Z W, ZAHNG Y J, *et al.*. Multi-orientated wire-grid polarizer and its application for polarization navigation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(10): 2237-2244. (in Chinese)
- [20] 张川川,王俊元,杜文华,等. 快速 Canny 算子提取刀具图像边缘的研究[J]. 测试技术学报, 2015, 29(2): 133-135.
ZHANG C, WANG J, DU W, *et al.*. Research on quick canny operator of tool's edge extraction[J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2015, 29(2): 133-135. (in Chinese)
- [21] 魏伟一. 基于小波域灰度拉伸的 Otsu 图像阈值分割[J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 2009, 45(6): 46-48.
WEI W. New Otsu image segmentation based on intensity stretching on DWT fields[J]. *Engineering Journal of Northwest Normal University (Natural Science)*, 2009, 45(6): 46-48. (in Chinese)
- [22] 何志勇,孙立宁,黄伟国,等. 基于 Otsu 准则和直线截距直方图的阈值分割[J]. 光学精密工程, 2012, 20(10): 2315-2323.
HE Z Y, SUN L N, HUANG W G, *et al.*. Thresholding segmentation algorithm based on Otsu criterion and line intercept histogram[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(10): 2315-2323. (in Chinese)
- [23] 殷年. 基于线性拉伸的遥感图像处理[J]. 光电子技术与信息, 1998, 11(5): 29-33.
YING N. Image processing based on linear extension of gray level [J]. *Optoelectronic Technology and Information*. 1998, 11(5): 29-33. (in Chinese)
- [24] 司鸾,蔡怀宇,黄战华,等. 基于 USB2.0 的 CMOS 图像实时采集系统设计[J]. 电子测量技术, 2007, 30(4): 117-119.
SI Q, CAI H Y, HUANG Z H, *et al.*. Design of a real-time acquisition system of CMOS image based on USB2.0 [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2007, 30(4): 117-119. (in Chinese)
- [25] 王伟斌,邱长全. 基于最小二乘曲线拟合的信号调理电路误差补偿方法[J]. 计算机测量与控制, 2009, 17(11): 2286-2291.
WANG W, QIU C. Image processing based on linear extension of gray level [J]. *Computer Measurement and Control*, 2009, 17(11): 2286-2291. (in Chinese)

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、仿生传感器和机电测试技术等方面的研究。E-mail: chujk@dlut.edu.cn



蹇慧君(1990—),女,山东临沂人,硕士研究生,2014年于山东理工大学获得学士学位,主要从事与成像式仿生偏振光导航相关的研究。E-mail: janedut@163.com