

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2020.04.003

# 基于像素化偏振芯片的仿生偏振光罗盘技术

韩国良, 胡小平, 何晓峰, 范晨, 范颖

(国防科技大学智能科学学院, 长沙 410073)

**摘要:** 仿生光罗盘是一种通过借鉴动物视觉器官感知太阳偏振光信息(包括月光)的机理来获得载体航向信息的航向传感器。首先介绍了面向多光谱的像素化的偏振芯片结构参数化设计准则, 给出了一种易于集成和小型化的仿生光罗盘总体设计方案, 并对仿生光罗盘的主要误差源进行了分析; 随后, 提出了一种基于天空偏振图像解算载体航向的新方法, 并对其环境适应性进行了初步分析; 最后, 对仿生光罗盘样机进行了静态实验和车载实验, 在晴朗天空背景下仿生光罗盘的定向精度优于  $0.5^\circ$ 。

**关键词:** 仿生导航; 仿生偏振光罗盘; 像素化偏振芯片

中图分类号: O436

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 2095-8110(2020)04-0019-07



## A Technology About Bionic Polarized Light Compass Based on Pixelated Polarizing Chip

HAN Guo-liang, HU Xiao-ping, HE Xiao-feng, FAN Chen, FAN Ying

(College of Intelligence Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** The bionic polarized light compass is a sensor that obtains the heading information by referring to the mechanism of the animal's visual organs to sense the polarized light information of the sun (or moonlight). In this paper, the parameter design criteria of pixelated polarizers are introduced. And the overall design scheme of a bionic polarized light compass are proposed, which is easy to integrate and miniaturize. The main error sources affecting the orientation accuracy of the polarized light compass are analyzed. A new method for estimating the heading of the carrier based on the polarized image of the sky are proposed. And its environmental adaptability is analyzed. The results of static experiment and vehicle experiment show that the orientation accuracy of the polarized light compass under clear sky is better than  $0.5^\circ$ .

**Key words:** Bionic navigation; Bionic polarized light compass; Pixelated polarizing chip

### 0 引言

生物学家发现, 沙漠蚂蚁能够利用背部边缘区域

的小眼感知天空偏振光, 获取全天空大气偏振模式, 并从中提取可靠的航向信息, 引导自身觅食和返巢等行为<sup>[1]</sup>。1999年, 苏黎世大学的 D. Lambrinos 等受

收稿日期: 2020-01-28; 修订日期: 2020-02-27

基金项目: 国家自然科学基金(61573371, 61773394); 国防科技大学科研计划(ZK18-03-24)

作者简介: 韩国良(1991-), 男, 博士研究生, 主要从事仿生导航方面的研究。E-mail: hanguoliang09@nudt.edu.cn

通信作者: 何晓峰(1979-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事惯性基组合导航技术方面的研究。

E-mail: hexiaofeng@nudt.edu.cn

沙漠蚂蚁依靠偏振敏感(Polarization, POL)神经元获取航向信息的启发,研制了基于POL-神经元模型的点源式偏振光传感器,并成功地应用到移动机器人 Sahabot 的自主导航中,完成了偏振光定向实验验证<sup>[2]</sup>。国内学者,如褚金奎教授、胡小平教授等团队,研制了点源式偏振光传感器样机,并开展了相关实验<sup>[3-4]</sup>。

点源式偏振测量结构简单,但易受天空云层遮挡的影响,无法有效利用全天空偏振模式信息,图像式偏振测量可以很好地解决这一问题<sup>[5-6]</sup>。基于多目相机的偏振光传感器,可以实时地获取天空偏振模式,满足载体的动态性要求,但其存在体积大、过于笨重的问题,不适于小型载体的偏振光导航<sup>[7-8]</sup>。2015年,张文静等以生物复眼的导航能力为灵感,设计了一种基于光场相机的偏振成像系统,可以实时检测出整个天空的偏振模式<sup>[9]</sup>。

偏振器件是偏振光罗盘设计中的关键组成部件。基于多目相机和光场相机的偏振光传感器体积过大、价格昂贵,难以应用到小型无人平台上。随着微纳加工水平的提高,金属纳米光栅的制备工艺日益成熟,与传统偏振器件相比,不仅体积小、结构紧凑,且易于和感光器件集成,具有巨大的应用前景<sup>[10]</sup>。

图像式偏振光罗盘在获取天空偏振图像后,需要从偏振模式中提取太阳子午线。当前主要有两种方法,一种是基于瑞利散射模型<sup>[11]</sup>,它描述了散射光的最大偏振 $E$ 矢量垂直于散射面的现象;另一种是利用大气偏振模式的对称性,通过提取偏振模式的对称轴估计太阳子午线方向<sup>[12]</sup>。

本文给出了一种易于集成和小型化的仿生光罗盘总体设计方案,介绍了其关键器件像素化偏振芯片的结构参数化设计准则;分析了仿生光罗盘的主要误差源及其对定向精度的影响;最后,提出了一种基于天空偏振图像解算载体航向的新方法。

## 1 仿生光罗盘总体设计

### 1.1 仿生光罗盘的结构

仿生偏振光罗盘主要由偏振光成像系统、微惯性测量单元(三轴陀螺、三轴加速度计和三轴磁强计)、微处理器和时钟芯片组成。偏振光成像系统测量天空偏振信息,微惯性测量单元提供水平姿态信息,微处理器计算处理偏振光定向,时钟芯片提供时间信息。

偏振光成像系统是仿生偏振光罗盘的核心部件,其结构如图1所示,由镜头、像素化偏振芯片和后端电路组成。像素化偏振芯片在CCD/CMOS的每一个像元上刻蚀金属光栅,实现光栅与感光芯片的一体化集成,它包含若干个偏振测量单元,每个测量单元包含 $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 和 $135^\circ$ 这4个偏振方向。

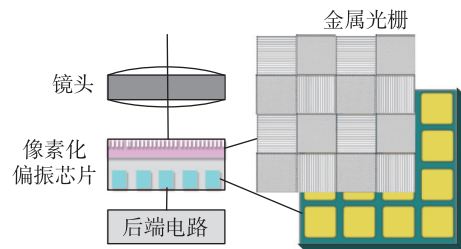


图1 偏振光成像系统结构示意图

Fig. 1 Structure schematic diagram of polarized light imaging system

### 1.2 像素化偏振芯片参数设计

如图2所示,以金属表面法线和入射光所在平面为入射面,入射光的电矢量可以分解为垂直于入射面的分量(TE波)和平行于入射面的分量(TM波)。TE波激发金属线电子形成电流,使得该入射光分量被反射,而金属在TM波方向上有空气隙无法引发电流,因此透射光仅包含TM波。

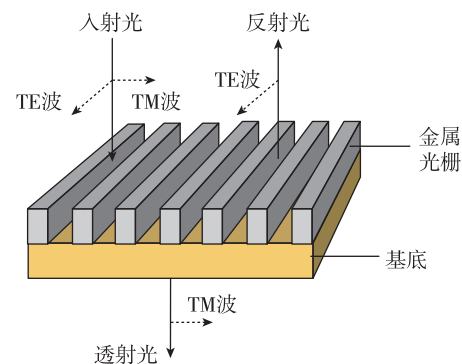


图2 金属光栅示意图

Fig. 2 Schematic diagram of wire-grid polarizer

在金属材料 and 光栅面型的选择上,需从偏振透射率和消光比两方面考虑。在铝、铬、金铂等金属中,铝的偏振透射率和消光比都较高,因此选用铝作为金属光栅的制作材料。相比于正弦、三角和梯形面型,矩形面型的光栅在可见光波段的透射率最高,且消光比也满足偏振光导航的需求,因此选用矩形面型<sup>[10]</sup>。

金属光栅的偏振性能由光栅周期  $p$  与入射光波长  $\lambda$  决定。光栅周期大于入射光波长时,金属光栅不具有偏振性能。当  $p$  和  $\lambda$  的比例达到一定条件时,出现瑞利共振现象,此时光栅对入射光的透射率急剧降低,反射率大幅提高。临界周期满足式(1)的条件

$$p(n \pm \sin\theta) = k\lambda \quad (1)$$

其中,  $k$  为衍射级次,  $n$  为基底折射率,  $\theta$  为入射角度。

在设计金属光栅的周期时,应保证仅有零级衍射出现,因此衍射级次  $k$  应小于临界值 1。为应对多种入射条件,光线入射角  $\theta$  的最大值可取  $30^\circ$ ,玻璃基底的折射率约为 1.5,  $p$  的取值应满足

$$p < \frac{k\lambda}{n + \sin\theta} = \frac{1}{2}\lambda \quad (2)$$

因此,对于可见光波段(400~760nm)的入射光,光栅的周期应小于 200nm;对于昆虫复眼敏感的紫外波段(330~400nm)的入射光,光栅周期应小于 160nm。

金属光栅的占空比和深度不改变临界周期。当占空比在 0~0.9 之间变动时,光栅的透射效率随占空比的增加而增大,而消光比随着占空比的增加而减小,综合考虑最佳占空比选为 0.5。随着光栅深度的增加,透过率周期性递减,消光比指数级增加。光栅深度的设计应在透过率和消光比之间权衡,文献建议深宽比应控制在 4:1 以内<sup>[13]</sup>。

## 2 基于天空偏振图像的载体航向解算方法

### 2.1 大气偏振模式测量

大气偏振模式是一种常见的自然偏振光现象。当无偏的自然光与大气中的粒子、尘埃发生散射后会形成具有特定偏振特性的偏振光。

用 Stokes 向量<sup>[14]</sup>来表示部分偏振光,Stokes 向量包含 4 个参数  $\mathbf{S}=[S_0, S_1, S_2, S_3]$ ,大多数情况下圆偏振分量可以忽略,在偏振探测中认为  $S_3 \equiv 0$ ,则偏振光透过方向为  $\theta$  的偏振片后的光强为

$$I(\theta) = \frac{1}{2}(S_0 + S_1 \cos(2\theta) + S_2 \sin(2\theta)) \quad (3)$$

当  $\theta$  分别取  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  和  $135^\circ$  时,那么 Stokes 分量可以通过式(4)求得

$$\begin{aligned} S_0 &= \frac{1}{2}(I(0^\circ) + I(45^\circ) + I(90^\circ) + I(135^\circ)) \\ S_1 &= I(0^\circ) - I(90^\circ) \\ S_2 &= I(45^\circ) - I(135^\circ) \end{aligned} \quad (4)$$

入射光的偏振度和偏振角的计算方法为

$$\begin{aligned} \text{DoLP} &= \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0} \\ \text{AoP} &= \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{S_2}{S_1}\right) \end{aligned} \quad (5)$$

### 2.2 基于偏振图像对称轴提取的定向方法

如图 3 所示,  $\varphi(x, y)$  为天空偏振角模式,假设  $\varphi(x, y)$  关于  $t$  轴对称,且  $t$  轴相对于  $x$  轴有  $\xi$  角度的旋转。则有如下变换关系

$$\begin{bmatrix} t \\ s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\xi & \sin\xi \\ -\sin\xi & \cos\xi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (6)$$

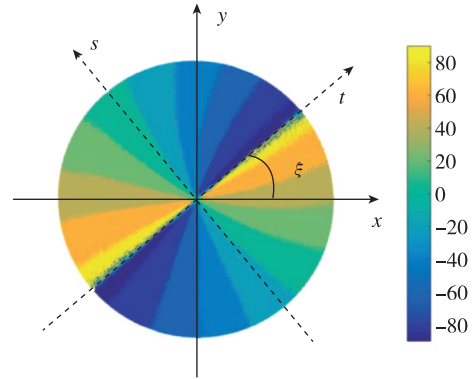


图3 二维对称性的测量

Fig. 3 Measurement of two dimensional symmetry

当  $\varphi(t, s) = \varphi(t, -s)$  时,图像为轴对称;当  $\varphi(t, s) = -\varphi(t, -s)$  时,图像为反轴对称。针对提取太阳子午线这个问题,由瑞利散射模型可知偏振角模式服从反轴对称。

图像关于  $t$  轴的对称性可以用式(7)计算

$$S_\xi\{\varphi\} = \frac{\iint |\varphi(t, s) + \varphi(t, -s)| ds dt}{\iint ds dt} \quad (7)$$

其中,  $S_\xi\{\varphi\} > 0$ 。

已知天空偏振图像,载体航向可通过如下步骤计算得到:

步骤 1:计算局部天空偏振模式;

步骤 2:提取  $90^\circ$  和  $-90^\circ$  附近的像素点,采用 Hough 变换初步估计太阳子午线方向  $\xi_0$ ;

步骤 3:设定一个阈值  $\epsilon$ ,在实验中令  $\epsilon = 1^\circ$ ,根据式(8)求得最优子午线方向  $\xi^*$

$$\xi^* = \operatorname{argmin} S_\xi\{\varphi\} \mid \xi \in [\xi_0 - \epsilon, \xi_0 + \epsilon] \quad (8)$$

步骤 4:已知当地时间和位置信息后,根据天文年历,可以得到地理坐标系下太阳天顶角  $\gamma_s$  和方位

角  $\alpha_s$ 。根据太阳方位角  $\alpha_s$  和太阳子午线方向  $\xi^*$ ，计算出地理坐标系下载体的航向角为

$$\varphi = \alpha_s - \xi^* \quad (9)$$

### 3 误差分析

晴朗天气条件下,大气散射过程服从一阶瑞利散射模型,即散射光的最大  $E$  矢量方向垂直于散射面。对于图像式偏振光罗盘,假设不考虑镜头,将偏振光罗盘水平放置时,感光芯片中所有像素将接受来自天顶的偏振光。下面分析光罗盘倾斜时,水平姿态角误差和太阳位置误差引起的航向角估计误差。

首先考虑水平倾角引起的航向误差。如图4所示,  $O$  为观测者所在的位置,  $S$  为太阳在天球上的位置,  $S'$  为太阳在水平面上的投影。坐标系  $O-X_1Y_1Z_1$  表示水平参考坐标系,光罗盘水平放置时,  $OX_1Y_1$  平面平行于偏振芯片的表面,  $X_1$  轴为参考轴,  $Z_1$  为罗盘光轴方向,指向天顶,与天球交于  $Q$  点。天顶方向入射光的  $E$  矢量垂直于散射面  $OQS$ 。此时,太阳方位为  $\alpha_s$ , 太阳天顶角为  $\gamma_s$ ,  $E$  矢量方向可表示为

$$e_Q^t = \overrightarrow{OQ}^t \times \overrightarrow{OS}^t \quad (10)$$

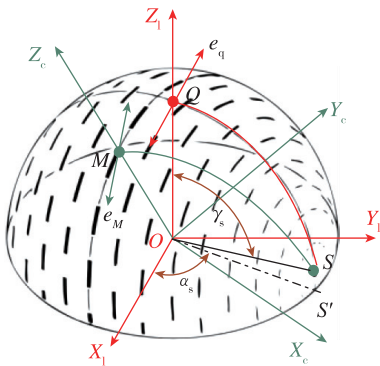


图4 光罗盘倾斜前后入射光  $E$  矢量

Fig. 4  $E$ -vector of incident light before and after tilt of the sensor

光罗盘倾斜时,测量得到的偏振  $E$  矢量不再是天顶入射光的,不能用来表示航向角的变化。假设光罗盘的滚动角和俯仰角分别为  $\Delta\delta$  和  $\Delta\theta$ , 坐标系  $O-X_cY_cZ_c$  表示光罗盘倾斜后的坐标系,其中  $Z_c$  为罗盘倾斜后的光轴方向,与天球交于  $M$  点,则

$$\overrightarrow{OM}^c = [0 \ 0 \ 1]^T \quad (11)$$

将  $\overrightarrow{OM}$  表示在水平参考坐标系下

$$\overrightarrow{OM}^1 = (\mathbf{R}_1^c)^T \overrightarrow{OM}^c \quad (12)$$

其中

$$\mathbf{R}_1^c = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\Delta\delta & \sin\Delta\delta \\ 0 & -\sin\Delta\delta & \cos\Delta\delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\Delta\theta & 0 & -\sin\Delta\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\Delta\theta & 0 & \cos\Delta\theta \end{bmatrix}$$

图4中太阳方向矢量可以表示为

$$\overrightarrow{OS}^1 = \begin{bmatrix} \sin\gamma_s \cos\alpha_s \\ \sin\gamma_s \sin\alpha_s \\ \cos\gamma_s \end{bmatrix} \quad (13)$$

散射光的  $E$  矢量方向垂直于散射面  $OMS$ ,  $E$  矢量在相机系下可表示为

$$e_M^c = \mathbf{R}_1^c e_M^1 = \mathbf{R}_1^c (k \overrightarrow{OM}^1 \times \overrightarrow{OS}^1) \quad (14)$$

不考虑太阳方位误差,由水平姿态角偏差引起的航向估计误差为

$$\Delta\varphi = \alpha_s + \arctan2(e_M^c(1), e_M^c(2)) \quad (15)$$

其中,  $\arctan2$  为四象限反正切函数,  $e_M^c(1)$  和  $e_M^c(2)$  分别为向量  $e_M^c$  的第一和第二个元素

$$e_M^c(1) = \sin\Delta\delta \cos\gamma_s \cos\Delta\theta + \sin\gamma_s \sin\alpha_s \cos\Delta\delta + \sin\gamma_s \cos\alpha_s \sin\Delta\delta \sin\Delta\theta$$

$$e_M^c(2) = \sin\Delta\theta \cos\gamma_s - \sin\gamma_s \cos\alpha_s \cos\Delta\delta \quad (16)$$

1) 若  $\Delta\delta = 0$ ,  $\gamma_s$  分别取  $90^\circ$  和  $80^\circ$ ,  $\Delta\varphi$  随太阳方位角  $\alpha_s$  和  $\Delta\theta$  的变化如图5所示。当太阳天顶角相同时,光罗盘倾角越大,不同太阳方位角  $\alpha_s$  下定向误差越大;当光罗盘倾角相同时,太阳天顶角越小,不同太阳方位角  $\alpha_s$  下定向误差越大。

2) 如图5所示,当  $\alpha_s$  在  $[-\pi, \pi]$  之间变化时,  $\Delta\varphi$  有极大值。为了计算太阳高度角引起的航向角偏差,令

$$\alpha_s = \operatorname{argmax}(\Delta\varphi(\alpha_s)) \quad (17)$$

从图6中可以看到,当水平姿态角相同时,太阳天顶角越小,航向角估计误差越大。当太阳天顶角小于  $20^\circ$  时,即使  $1^\circ$  的倾角,也将导致接近  $3^\circ$  的航向角误差。当太阳天顶角相同时,水平角越大,航向误差越大。Muheim 等<sup>[15]</sup>发现萨凡纳麻雀使用日出和日落时的偏振导航结果标定自身磁罗盘信息,也许是因为太阳天顶角大时,水平角对偏振  $E$  矢量测量的影响较小。

3) 航向误差关于水平姿态的变化受到太阳高度的影响。图7展示了太阳天顶角分别为  $90^\circ$  和  $45^\circ$ , 俯仰角和滚动角都存在时,航向角误差关于水平姿态角的变化。从图7可以看出,误差图关于水平姿态角呈轴对称分布,但图形并不相同,天顶角为  $90^\circ$  时的误差图近似为菱形,天顶角为  $45^\circ$  时的误差图近似为椭圆形。

当太阳位置有误差时,航向误差的计算依然可

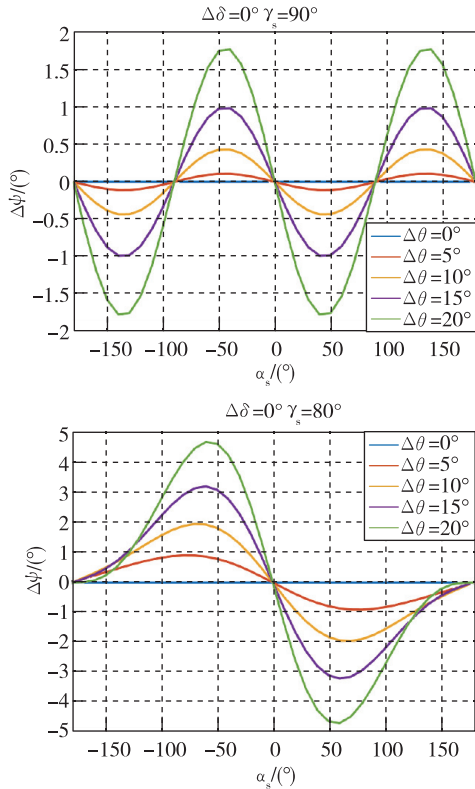


图 5 太阳天顶角为 80° 和 90° 时, 航向角误差随太阳方位角和传感器水平姿态角的变化

Fig. 5 When the solar zenith angle is 80° or 90°, the heading angle error changes with the solar azimuth and the sensor horizontal attitude angle

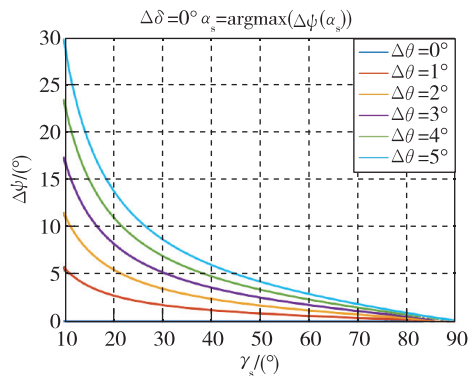


图 6 航向角误差关于太阳天顶角和水平姿态角的变化曲线

Fig. 6 Variation curve of heading angle error with respect to solar zenith angle and horizontal attitude angle

以根据式(15), 但需将式(16)中  $\gamma_s$  和  $\alpha_s$  分别替换为  $\gamma_s + \Delta\gamma_s$  和  $\alpha_s + \Delta\alpha_s$ 。特别地, 当水平姿态角无误差, 太阳位置有误差时, 有

$$\Delta\varphi = -\Delta\alpha_s \quad (18)$$

上述分析对点光源式偏振光传感器同样适用。

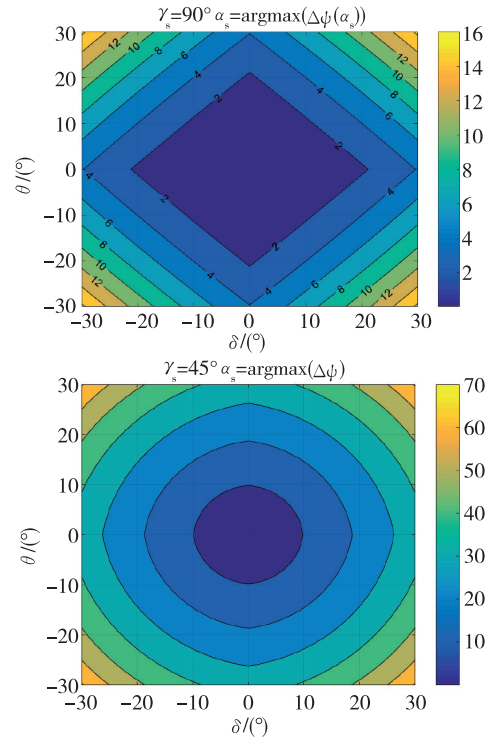


图 7 航向角误差与光罗盘水平姿态角的关系

Fig. 7 Relationship between heading angle error and horizontal attitude angle of polarized light compass

#### 4 静态实验和车载实验

仿生偏振光罗盘的分辨率为 2048 像素 × 2448 像素, 视场角约为 90°, 采集频率为 1Hz。静态实验中, 将偏振光罗盘置于单轴转台之上, 转台一周总计 391 格, 每格为 (360/391)°, 转台精度优于 0.01°。以 30 格为间隔, 旋转转台并采集偏振图像, 将偏振光罗盘的输出与转台基准进行比较, 从而评估定向精度。

图 8 展示了偏振光罗盘位于不同方位时天空偏振角模式的变化。此时, 天气晴朗, 太阳天顶角约为 90°。当载体旋转时, 偏振角模式会转动相应的角度, 图 8 中红色直线表示太阳子午线方向。静态实验的误差曲线如图 9 所示。

用车载实验评估动态情况下偏振光罗盘的定向精度, 将偏振光罗盘置于车顶。基准为 GNSS/惯性组合导航系统(XW\_GI7690), 基准航向精度优于 0.03°。天气晴朗, 太阳天顶角约为 85°。图 10 展示了 300s 行驶时间内, 基准航向曲线和光罗盘定向误差曲线。

表 1 展示了静态实验和车载实验的定向误差。静态实验中, 航向误差的标准差为 0.28°, 最大误差

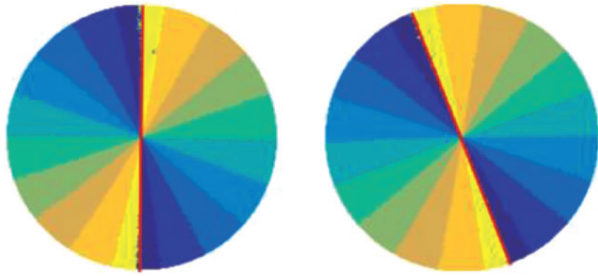


图8 偏振角模式的转动

Fig. 8 Rotation of polarization pattern

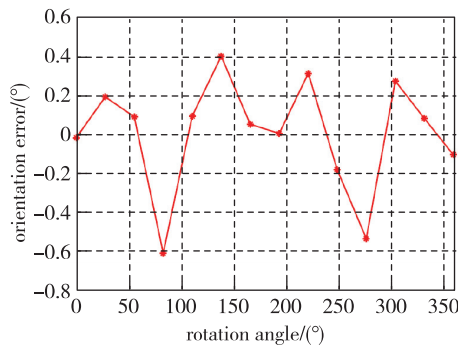


图9 静态实验定向误差曲线

Fig. 9 Orientation error curve of static experiment

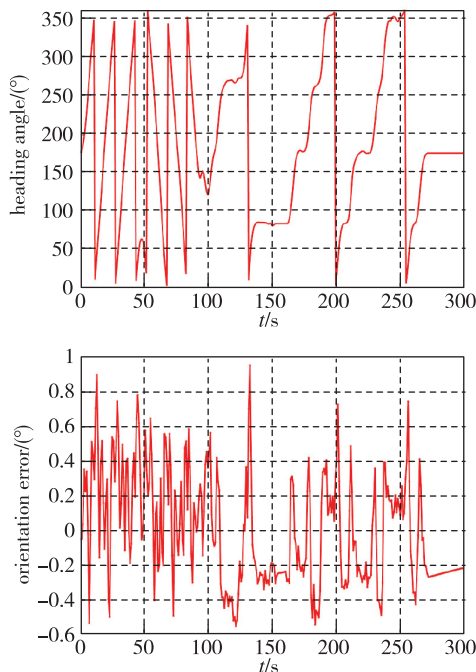


图10 车载实验的基准航向和光罗盘定向误差曲线

Fig. 10 Reference heading of vehicle experiment and orientation error curve of polarized light compass

0.32°,最大误差为0.94°。静态实验和车载实验表明,在晴朗天空背景下仿生光罗盘的定向精度优于0.5°。

表1 静态实验和车载实验定向误差

Tab. 1 Orientation error of static experiment and vehicle experiment

实验类型	标准差/(°)	最大误差/(°)
静态实验	0.2894	0.6109
车载实验	0.3231	0.9484

## 5 结论

本文针对小型化无人平台的自主导航问题,提出了一种易于集成和小型化的仿生光罗盘总体设计方案,算法分析与实验结果表明:

1)本文提出的基于天空偏振图像的载体航向估计方法,可实现对航向信息的感知。在晴朗天空下,日落时车载实验的定向精度优于0.5°,可为无人平台的自主导航提供稳定的航向约束。

2)偏振光罗盘的定向精度受俯仰角、滚动角、太阳高度、太阳方位的影响:

- 当太阳天顶角小于20°时,即使1°的水平倾角,也将导致接近3°的航向角误差。日出和日落时偏振光定向结果受水平倾角的影响最小,在组合导航时,可用于标定其他传感器的初始航向。

- 当太阳天顶角和方位角相同时,光罗盘倾角越大,定向误差越大;当光罗盘倾角和太阳方位角相同时,太阳天顶角越小,定向误差越大。

- 当光罗盘水平放置,存在太阳位置误差时,航向误差仅与太阳方位角误差有关。

3)未来将在多种天气条件及不同太阳位置下分析偏振光罗盘的定向精度,并进行实验验证。

## 参考文献

- [1] Duelli P, Wehner R. The spectral sensitivity of polarized light orientation in *Cataglyphis bicolor* (Formicidae, Hymenoptera) [J]. *Journal of Comparative Physiology*, 1973, 86(1): 37-53.
- [2] 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.
- [3] Chu J, Zhao K, Zhang Q, et al. Construction and performance test of a novel polarization sensor for navigation[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*,

为0.6109°;车载实验中,航向误差的标准差为

- 2008, 148(1): 75-82.
- [4] Wang Y, Hu X, Lian J, et al. Design of a device for sky light polarization measurements [J]. *Sensors*, 2014, 14(8): 14916-31.
- [5] Fan C, Hu X, Lian J, et al. Design and calibration of a novel camera-based bio-inspired polarization navigation sensor [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(10): 3640-3648.
- [6] Ma T, Hu X, Zhang L, et al. An evaluation of sky-light polarization patterns for navigation [J]. *Sensors*, 2015, 15(3): 5895-5913.
- [7] Wang D, Liang H, Zhu H, et al. A bionic camera-based polarization navigation sensor [J]. *Sensors*, 2014, 14(7): 13006-13023.
- [8] Wang Y, Hu X, Lian J, et al. Bionic orientation and visual enhancement with a novel polarization camera [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(5): 1316-1324.
- [9] Zhang W, Cao Y, Zhang X, et al. Sky light polarization detection with linear polarizer triplet in light field camera inspired by insect vision [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(30): 8962.
- [10] 张娜, 褚金奎, 赵开春, 等. 基于严格耦合波理论的亚波长金属光栅偏振器设计 [C] // 中国微米/纳米技术学术年会, 2006.
- Zhang Na, Chu Jinkui, Zhao Kaichun, et al. The design of the subwavelength wire-grid polarizers based on rigorous couple-wave theory [C] // *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2006 (in Chinese).
- [11] Han G, Hu X, Lian J, et al. Design and calibration of a novel bio-inspired pixelated polarized light compass [J]. *Sensors*, 2017, 17(11): 2623.
- [12] Ma T, Hu X, Zhang L, et al. An evaluation of sky-light polarization patterns for navigation [J]. *Sensors*, 2015, 15(3): 5895-5913.
- [13] Perkins R T, Hansen D P, Gardner E W, et al. Broadband wire grid polarizer for the visible spectrum [P]. United States Patent 6122103, 2000.
- [14] Stokes G G. On the composition and resolution of streams of polarized light from different sources [J]. *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, 1852, 9: 399.
- [15] Muheim R, Phillips J B, Åkesson S. Polarized light cues underlie compass calibration in migratory songbirds [J]. *Science*, 2006, 313(5788): 837-839.