

文章编号 1004-924X(2015)09-2429-09

## 天空偏振模式对仿生偏振光定向的影响及实验

范 晨, 胡小平\*, 何晓峰, 练军想, 王玉杰  
(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:**针对工程应用中仿生偏振光罗盘易受天气和太阳位置等因素的影响,存在定向精度低、稳定性差等问题,研究了天空偏振模式对偏振光定向的影响机理。建立了含有偏振模型误差的偏振光定向模型,推导了仿生偏振光罗盘的航向角解算方法;然后系统分析了模型误差对偏振光定向精度的影响机理,指出了载体水平角和太阳高度角是决定模型误差影响程度的主要因素;最后设计了静态实验与跑车测试,评估了不同水平角和太阳高度角时,模型误差对偏振光定向精度的影响。结果表明:当太阳高度角  $h_s < 40^\circ$  时,偏振光定向误差为  $0.729^\circ$ ;当  $40^\circ < h_s < 75^\circ$  时,误差为  $3.764^\circ$ ;精度明显降低。另外,载体水平角越大,模型误差角对定向精度的影响程度也越显著;载体水平时,定向误差为  $0.323^\circ$ ,而倾斜后误差增大为  $1.352^\circ$ 。文中对仿生偏振光定向的影响机理分析为补偿偏振模型误差,实现高精度偏振光定向提供了理论依据。

**关键词:**偏振光导航;天空偏振模型;偏振光定向;定向算法;航向角误差

**中图分类号:** V249.32; O436.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152309.2429

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

FAN Chen, HU Xiao-ping\*, HE Xiao-feng, LIAN Jun-xiang, WANG Yu-jie

(College of Mechatronic Engineering and Automation,  
National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

\* Corresponding author, E-mail: xph\_nudt@hotmail.com

**Abstract:** To solve the problems of directional precision errors and low stability existed in a bionic polarized light compass caused by the weather and sun position or other factors, the effect mechanism of sky polarization mode on polarized orientation was researched. A polarized orientation model including model errors was built and the algorithm to calculate a heading angle for the bionic polarized compass was deduced. Then, the influence of the model errors on the polarized orientation precision was analyzed systematically. It points out that the horizontal angle and the solar altitude angle are main factors to determine the impact of the model errors. Finally, a static experiment and a dynamic car test were designed. The influence of polarized model errors on the polarized orientation precision was assessed in different horizontal angles and solar altitude angles. The results indicate that when the solar altitude angle is less than  $40^\circ$ , the error of polarized orientation is  $0.729^\circ$ . When the angle is between  $40^\circ$  and  $75^\circ$ , the precision is evidently decreased, and the error is  $3.764^\circ$ . Moreover, the impact of polarized model is also evidently increased as the horizontal angle. When the vehicle runs in a level,

收稿日期: 2015-04-02; 修订日期: 2015-06-01.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 61104201); 国防科技大学科研计划资助项目(No. JC14-03-04)

the error is  $0.323^\circ$ . After inclining, the error is increased to  $1.352^\circ$ . The error mechanism proposed provides theoretical references for compensating model errors and improving the precision of polarized orientation.

**Key words:** polarized light navigation; skylight polarization pattern; polarized orientation; orientation algorithm; heading angle error

## 1 引言

太阳光经过大气层能够产生稳定的偏振模式<sup>[1]</sup>,自然界的部分昆虫和候鸟就是利用复眼检测天空偏振光分布来实现自主导航的<sup>[2-3]</sup>。准确描述天空偏振模式是仿生偏振光导航研究的基础<sup>[4]</sup>。1982年,美国学者 M. L. Brines 等设计了点源式天空偏振测量仪,获得了粗略的天空偏振态分布模式<sup>[5]</sup>。瑞士 Wehner 教授基于 Rayleigh 散射定律,将天空偏振模式的形成简化为入射自然光在天球表面的多次单点 Rayleigh 散射过程,构建了一种标准大气偏振模型<sup>[6-7]</sup>。随后 J. Gal 等人通过对北极地区天空偏振模式的测量验证了实际的大气偏振模式分布与 Rayleigh 散射模型得到的大气偏振模式相似,且具有相同的变化规律<sup>[8]</sup>。1988年,R. L. Lee 等人应用数字图像处理技术研究了基于 Stokes 参数的多次散射偏振模式,得到了天空偏振现象更加准确的解释<sup>[9]</sup>。

与传统的惯性、卫星和地磁等导航方法相比,基于自然偏振特性的仿生偏振光导航具有抗干扰性强,误差不积累、适用范围广等优势<sup>[10]</sup>,比较适合复杂环境下的长航时、远距离自主导航。瑞士学者 Lambrino 等人研究了基于沙漠蚂蚁感知偏振光实现导航的策略,设计了基于 POL-神经元模型的偏振光罗盘,并成功应用于移动机器人导航<sup>[11]</sup>。美国国家航空航天局(NASA)的 S. Thkooor 等人提出了利用大气偏振光辅助的组合导航方法,可用于未来的火星探测<sup>[12]</sup>。在国内,储金奎等对仿生光电模型进行了性能测试,搭建了天空偏振光模式探测装置,并将其应用于机器人导航<sup>[13-14]</sup>。高隼、范之国等研究了大气偏振模式检测及仿生偏振光导航,充分验证了偏振光导航与定位的可行性<sup>[15-17]</sup>。杨中光等研究了偏振光传感器测角的误差因素与补偿方法<sup>[18]</sup>。王玉杰等基于标准大气模型研究了仿生偏振光定向算法<sup>[19]</sup>。此外,还有研究者设计了天空偏振模式自

动探测系统,提高了偏振模式的获取效率<sup>[20]</sup>。

虽然国内外研究学者对天空偏振光学特性及仿生偏振光导航进行了大量研究,但对于天空偏振模式对仿生偏振光定向的影响机理缺乏深入分析。本文针对工程中仿生偏振光罗盘易受天气和太阳等因素的影响,存在定向精度低且不稳定等问题,系统分析了大气偏振模型误差对偏振光定向的影响机理,建立了含偏振模型误差的偏振光定向模型,推导了仿生偏振光罗盘的航向角解算方法,并设计了实验,对理论分析进行了验证,为补偿模型误差,提高仿生偏振光罗盘定向精度提供了理论依据。

## 2 偏振光定向原理

传统的偏振光定向算法均是基于由 Rayleigh 散射得到的标准大气偏振模型,其基本原理是入射光的  $\mathbf{E}$  矢量方向垂直于太阳、观测者和天空观测点所构成的平面,利用这一特殊的几何关系即可实现偏振光定向<sup>[19]</sup>。而在实际应用中,太阳光经过大气层时会由于大气粒子的不均匀分布而发生多次散射和多重散射的耦合<sup>[9]</sup>,因此实际的天空偏振模型与标准大气偏振模型存在一定的误差,即垂直关系不一定成立。

在统计光学中,太阳光经过大气层不管发生多次 Rayleigh 散射、Mie 散射还是其他散射,偏振光罗盘所接收的光总含有偏振光,即入射光的  $\mathbf{E}$  矢量方向始终存在并垂直于入射光方向。因此,无论是标准或非标准的大气偏振模型,虽然入射光的  $\mathbf{E}$  矢量方向不一定垂直于太阳、观测者和天空观测点所构成的平面,但一定位于偏振光罗盘的测量平面内。

图 1 为仿生偏振光定向原理示意图。偏振光罗盘为测量原点,太阳、测量原点与天空观测点所构成的平面为图中的阴影面。在理想天气条件下,标准大气偏振模型的  $\mathbf{E}$  矢量方向垂直于阴影面;而  $\mathbf{E}'$  为实际观测的光矢量方向,两者在同一

平面内,它们之间的夹角为偏振模型误差角  $\xi$ ,太阳视线方向与观测方向的夹角为散射角  $\alpha$ 。

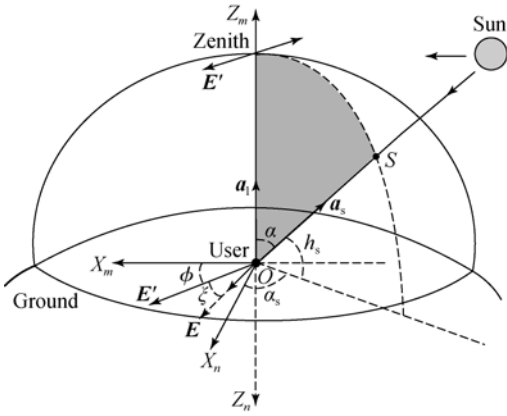


图 1 仿生偏振光定向原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of bionic polarization orientation

根据空间向量理论可知,偏振光罗盘观测的入射光的  $E$  矢量  $a_p$  可用太阳视线方向的单位矢量  $a_s$ 、天顶视线方向的单位矢量  $a_i$  以及  $a_s \times a_i$  构成的坐标系表示,即可得到非标准大气偏振模式下,含模型误差的偏振光定向模型为:

$$a_p^m = s_1 a_s^m + s_2 a_i^m + s_3 a_s^m \times a_i^m, \quad (1)$$

$$s_1 = -\frac{\sin \xi}{\sin \alpha}, s_2 = \frac{\sin \xi}{\tan \alpha}, s_3 = \frac{\cos \xi}{\sin \alpha}, \quad (2)$$

式中:  $s_1, s_2$  和  $s_3$  为  $a_p$  在 3 个轴向的模长。

在理想条件下,天空的偏振模式可用标准大气偏振模型描述<sup>[8]</sup>,此时  $\xi=0$ ,则式(1)就转化为传统的偏振光定向模型,即:

$$a_p^m = sa_s^m \times a_i^m. \quad (3)$$

而在实际中,基于 Rayleigh 散射的标准大气偏振模型并不能准确描述天空的偏振模式,存在模型误差且并不为零。与理想模型相比,式(1)考虑了模型误差,更适合用于解算实际的仿生偏振光航向角。

### 3 含模型误差的偏振光定向算法

定义北-东-地地理坐标系为导航系( $n$ 系),前-右-下坐标系为载体系( $b$ 系)。导航系到载体系的转动顺序为:先绕  $Z_n$ 轴转动  $\psi$ ,再绕  $Y'_n$ 轴转动  $\theta$ ,最后绕  $X'_n$ 轴转动  $r$ 角,相应的 3 个姿态角分别称为航向角、俯仰角和滚动角( $\psi, \theta, r$ ),它们构成了从导航系到载体系的方向余弦矩阵  $C_n^b$ 。

如图 1 所示,偏振罗盘的坐标系为  $m$  系,  $OX_m$ 为偏振罗盘内偏振片的安装方向基准,与  $OX_b$ 重合,  $OZ_m$ 为观测方向,指向天顶,  $O-X_m Y_m Z_m$ 构成右手坐标系。入射光  $E$  矢量方向与  $OX_m$ 的夹角为偏振罗盘测量输出的偏振角  $\varphi$ 。为避免图形过于复杂,  $OY_m, OY_n$ 等均未标出,可通过右手法则得到。

入射光的  $E$  矢量  $a_p$  与天顶视线方向的单位矢量  $a_i$  在  $m$  系中的投影分别为:

$$a_p^m = [\cos \varphi \quad \sin \varphi \quad 0]^T, \quad (4)$$

$$a_i^m = [0 \quad 0 \quad 1]^T. \quad (5)$$

太阳位置通常用太阳方位角  $\alpha_s$  与高度角  $h_s$  来描述,如图 1 所示,具体计算方法可参考文献[21]。

太阳视线方向的单位矢量在  $n$  系中的投影为:

$$a_s^n = [\cos h_s \cos \alpha_s \quad -\cos h_s \sin \alpha_s \quad -\sin h_s]^T. \quad (6)$$

通过方向余弦矩阵,可将太阳视线方向的单位矢量  $a_s^n$  投影到  $m$  系中,即:

$$a_s^m = C_b^m C_n^b a_s^n, \quad (7)$$

其中从导航系到载体系的方向余弦矩阵  $C_n^b$  可参考文献[22]得到。偏振光罗盘与载体固联安装,其中  $X_m$ 轴与  $X_b$ 轴重合,  $Z_m$ 轴与  $Z_b$ 轴成相反方向,  $O-X_b Y_b Z_b$ 成右手坐标系,即可确定  $Y_b$ 轴方向,则从载体系到偏振罗盘的坐标的方向余弦矩阵为:

$$C_b^m = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

将式(4)、(5)和(7)代入式(1),整理后得:

$$u \sin(\alpha_s + \varphi) + v \cos(\alpha_s + \varphi) + g = 0. \quad (9)$$

式中:

$$\begin{aligned} u &= \cos r(1 + \tan \xi \cot \varphi), \\ v &= \cot \varphi \cos \theta - \sin r \sin \theta - \\ &\quad \tan \xi (\cos \theta + \sin r \sin \theta \cot \varphi), \\ g &= \tan h_s (\cos \theta \sin r + \sin \theta \cot \varphi) - \\ &\quad \tan \xi \tan h_s (\sin \theta - \sin r \cos \theta \cot \varphi). \end{aligned} \quad (10)$$

求解方程(9)可得含模型误差的偏振光定向的航向角计算公式:

$$\begin{aligned} \psi &= \arcsin \left[ \frac{-g}{\sqrt{u^2 + v^2}} \right] - \alpha_s - \beta, \\ \psi &= \pi - \arcsin \left[ \frac{-g}{\sqrt{u^2 + v^2}} \right] - \alpha_s - \beta, \end{aligned} \quad (11)$$

式中:  $\beta = \arctan 2(v, u)$ ,  $\pi$  为航向角的模糊度。

#### 4 模型误差对偏振光定向的影响机理

仿生偏振光罗盘在实际工程应用中常涉及到陆地车辆和航空无人机导航,此时其水平姿态角会随着载体的运动而发生变化。例如车辆或飞机转弯时,载体受向心力作用而倾斜,滚动角发生变化;车辆爬坡或飞机起降过程中,俯仰角会发生变化。结合上文推导的航向角计算公式,可知模型误差对偏振光定向精度的影响主要取决于载体的水平角和太阳高度角。本文依据这 3 个量分别讨论了模型误差对偏振光定向精度的影响。

首先,由模型误差引起的航向角误差为:

$$\Delta\psi = \psi(\xi) - \psi(0), \quad (12)$$

其中: $\psi(0)$ 为未考虑模型误差的航向角,令  $\xi=0$  代入式(11)可得  $\psi(0)$ 。

联立式(11)和式(12)可得航向角的误差方程为:

$$\Delta\psi = \arcsin\left[\frac{-g(\xi)}{\sqrt{u(\xi)^2 + v(\xi)^2}}\right] + \arctan\left[\frac{v(\xi)}{u(\xi)}\right] - \arcsin\left[\frac{-g(0)}{\sqrt{u(0)^2 + v(0)^2}}\right] + \arctan\left[\frac{v(0)}{u(0)}\right]. \quad (13)$$

##### 4.1 不同水平角时模型误差的影响

为表明模型误差对航向角精度的影响程度,定义模型误差的影响因子为:

$$F = \frac{\Delta\psi}{\xi}, \quad (14)$$

式中: $\Delta\psi$ 为航向角误差, $\xi$ 为相应的模型误差。

当偏振罗盘水平时, $r = \theta = 0^\circ$ ;当载体水平运动时,滚动角和俯仰角近似为零,代入式(13)可得:

$$\Delta\psi = \xi. \quad (15)$$

此时,模型误差角会等比例地传递给航向角,模型误差的影响因子为 1。通过图 1 的几何关系也可得到相同的结论。

当偏振罗盘倾斜时, $r$ 与 $\theta$ 至少有一个不为零;当载体转弯或起降时,俯仰角或滚动角必然不为零。通过式(13)可知,此时的模型误差不是线性传递关系,随着水平角的变化,模型误差的影响也不同。图 2 给出了不同水平角时模型误差的影响因子曲线,此时太阳高度角 $h_s = 45^\circ$ 。

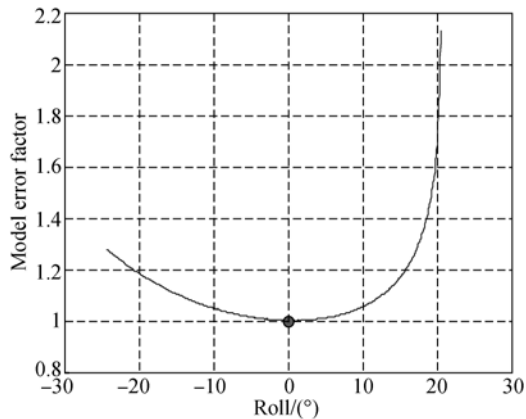


图 2 不同水平角时模型误差影响因子曲线

Fig. 2 Curve of model error factor at different horizontal angles

载体在运动中,滚动角与俯仰角的变化一一对应,因此仅以滚动角的变化为横坐标。由图 2 可知,当载体水平时,误差影响因子为 1,图中实心点所示,与前文的分析结论符合;而随着载体的倾斜程度变大,模型误差引起的航向角误差会随着水平角的变化呈非线性增长,并且载体的水平角越大,影响因子越大。当 $|r| < 10^\circ$  ( $|\theta| < 15^\circ$ )时,模型误差的影响因子约为 1;当 $10^\circ < |r| < 20^\circ$  ( $15^\circ < |\theta| < 35^\circ$ ),模型误差的影响因子平均值为 1.78。后文的实际测试结果表明,即使在晴朗无云的天气条件下,大气的模型误差也在 $5^\circ$ 以内,因此若要满足高精度的偏振光导航应用需求(航向角误差小于 $0.2^\circ$ ),模型误差至少应当补偿至 $0.12^\circ$ 以内。

此外,当水平角变化时,模型误差会使得用于航向角解算的反三角函数值大于 1,如式(16),从而造成航向角解算出现奇异。在偏振光罗盘的实际测试中,航向解算会随着云层的增多而出现“异常跳跃”,这是由于云层的增多引起模型误差角变大,从而使得航向角解算出现了奇异。

$$\left| \frac{-g(\xi)}{\sqrt{u(\xi)^2 + v(\xi)^2}} \right| > 1. \quad (16)$$

##### 4.2 不同太阳高度角时模型误差的影响

若仅讨论太阳高度角 $h_s$ 的影响,需确定 $r, \theta$ 和 $\varphi$ 等变量,代入误差方程(13),整理后得误差因子为:

$$F(h_s) = \arcsin(K \tan h_s) + 1. \quad (17)$$

对上式求导可知, $F'$ 始终大于零,即 $F(h_s)$ 为

单调递增函数。由于太阳高度角  $h_s$  始终大于零,因此  $F(h_s)$  的最小值约为 1。

图 3 表示一天中太阳高度角的变化曲线(7:30—20:00)。在清晨和傍晚时分,太阳处于地平线附近,高度角较小,随着时间变化,太阳高度角先变大后减小,在 13:30 左右达到最大值,如实心点所示。

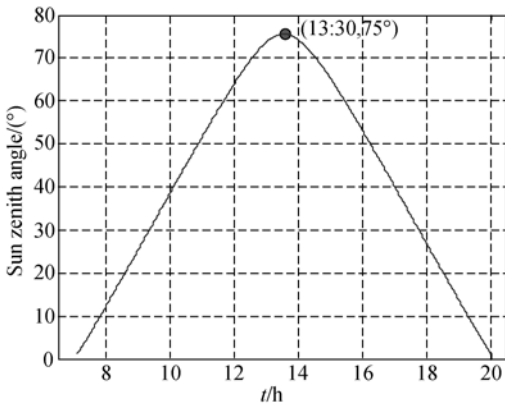


图 3 不同时间太阳高度角的变化曲线

Fig. 3 Curve of solar elevation angle in daytime

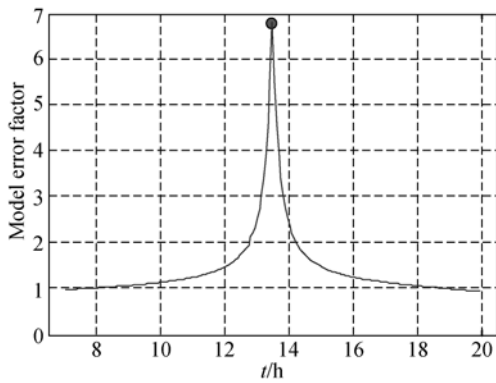


图 4 不同时间模型误差因子的变化曲线

Fig. 4 Curve of model error factor in daytime

图 4 为不同时间模型误差的影响因子变化曲线。从图中可以看出,误差影响因子的变化趋势与太阳高度角的变化趋势大体相同,呈渐强-峰值-渐弱的变化过程,符合式(17)的特性。在清晨和傍晚时分,太阳高度角较小,模型误差对航向角的影响因子约为 1,式(17)取最小值。随着太阳高度角的增大,误差影响也变大,其中在高度角达到最大时,模型误差的影响也达到最大,影响因子值约为 6.85,如图中实心点所示。下午时分,太

阳高度角减小,误差的影响也减弱,在 20 点左右,影响因子重新减至 1 左右。上述讨论也可以解释自然界的部分候鸟(鸽子)在迁徙过程中,为何会在清晨和傍晚的时候利用偏振光进行寻北<sup>[23]</sup>,因为此时天空偏振模型误差的影响最小。

总之,模型误差对偏振光定向精度的影响不容忽视。载体水平角与太阳高度角是决定影响程度的主要因素。载体的倾斜程度越大,模型误差的影响也越大,尤其对于机动性强的应用场合,模型误差的影响会更加明显。太阳高度角的影响也不可避免,并且高度角越大影响也越显著,清晨和傍晚时的偏振光定向误差影响因子明显小于中午时分。因此,一方面要研究模型误差的补偿方法;另一方面还要参考自然界的候鸟,选择合适的时机进行偏振光定向,尽量减小模型误差的影响。

## 5 实验验证

在国防科大校园内分别进行了静态实验和跑车测试。静态实验针对不同太阳高度角时,模型误差对仿生偏振光罗盘定向精度的影响;跑车测试用于验证车辆运动时模型误差的影响情况。

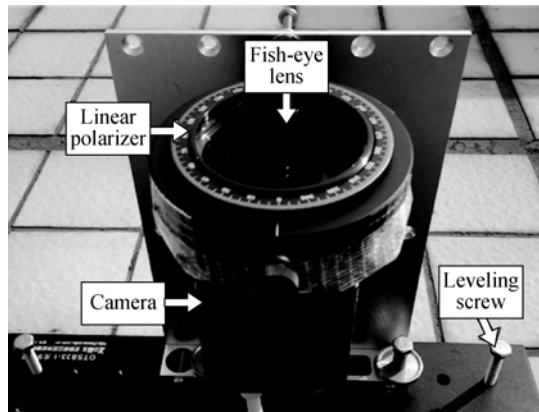


图 5 天空偏振模式测量装置

Fig. 5 Polarization measurement equipment

### 5.1 静态实验

实验地点在楼顶开阔地带(东经 112.992°,北纬 28.220°),时间从上午 7:00 至下午 18:20,天气晴朗。首先用天空偏振模式测量装置(图 5)对实际天空的偏振模式进行了测量。该装置主要由线偏振片、鱼镜头和 CCD 相机等组成。经过

散射的太阳光透过线偏振片投影到相机的 CCD 上,通过图像信息反映天空的偏振模式,其工作原理见文献[24];然后利用仿生偏振光罗盘进行定向解算,相机同步记录天空的偏振信息。如图 6 所示,仿生偏振光罗盘主要由滤光片、偏振片和光电二极管组成,有 3 个检测通道,测量输出为偏振角和偏振度,通过上位机得到航向角,其工作原理参考文献[11]。

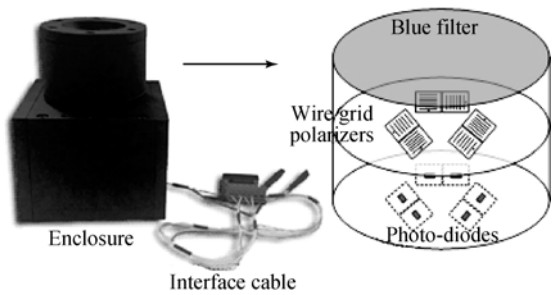


图 6 仿生偏振光罗盘结构图

Fig. 6 Structure of bionic polarization-light compass

图 7 给出了当天实测的天空偏振角的误差分布情况(即模型误差)。可以看出,即使在晴朗无云的天气条件下,模型误差最大可达 5°,并且天空 90%的区域误差在 3°以内。可见研究天空偏振模式的影响机理,对于模型误差的补偿是很有必要的。

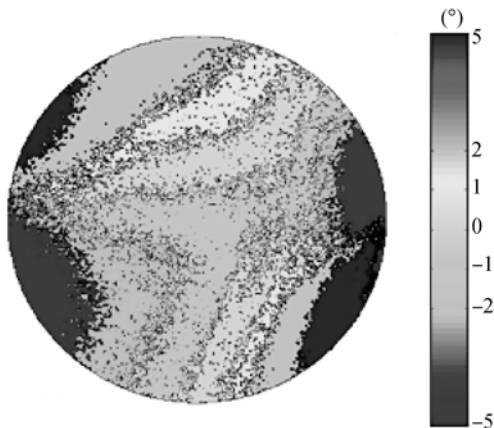


图 7 实际天空中的模型误差

Fig. 7 Distribution of model errors in actual observations

图 8 为实测一天的仿生偏振光罗盘航向角的误差变化曲线。表 1 为航向角误差的统计结果。实验期间,天空中的云较少,可以认为这段时间内

的天空偏振模式比较稳定,图片中的圆圈代表太阳。从图中可以看出,实验开始至上午 10 点左右,太阳高度角  $h_s < 40^\circ$ ,航向角误差较小且变化平缓,此段时间内,误差影响因子在 1 左右,且变化不大(图 4),表 1 中此段时间内的平均航向误差约为  $0.833^\circ$ ;从 11 点开始,太阳高度角变大,引起误差因子变化明显加强(图 4),导致航向角误差变化也较快,波动较大,呈先增后减的变化过程(表 1),太阳高度角也呈相同的变化趋势( $40^\circ < h_s < 75^\circ$ ),并在 13:32 左右达到最大值,约为  $7.722^\circ$ ,此时太阳高度角也达到最大;16 点之后,太阳高度角逐渐减小,航向角误差也减小,并重新趋于平缓,平均误差约为  $0.639^\circ$ 。从变化曲线和统计结果可以看出,太阳高度角对模型误差的影响程度起着关键作用,当  $h_s < 40^\circ$ 时,航向角平均误差约为  $0.729^\circ$ ;当  $40^\circ < h_s < 75^\circ$ 时,平均误差约为  $3.764^\circ$ 。可见,随着高度角的变大,模型误差的影响加剧,导致仿生偏振光罗盘的定向精度降低,与理论分析一致。

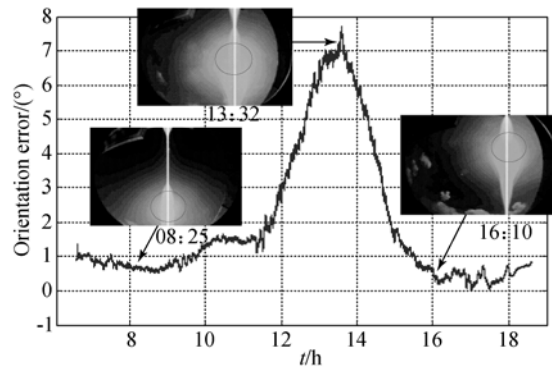


图 8 一天中的航向角误差曲线

Fig. 8 Curve of heading errors in daytime

表 1 不同高度角时的航向误差统计结果

Tab. 1 Statistical result of heading errors at different solar elevation angles

时间段	太阳高度角/(°)	航向误差/(°)	
		平均值	最大值
7:00—10:00	$h_s < 40$	0.833	1.415
10:01—12:00	$40 < h_s < 65$	1.675	3.096
12:01—14:00	$65 < h_s < 75$	5.683	7.722
14:01—17:00	$40 < h_s < 75$	2.259	5.861
17:01—18:20	$h_s < 40$	0.639	0.851

5.2 跑车测试

跑车测试在校内体育馆附近进行,将偏振光罗盘安装在车顶,选择的路径包括坡、弯、直道等典型路段,用于检测不同水平角时,模型误差角的影响程度。车内安装有高精度的激光惯导系统,用于提供航向基准。车辆运行轨迹如图 9 所示。

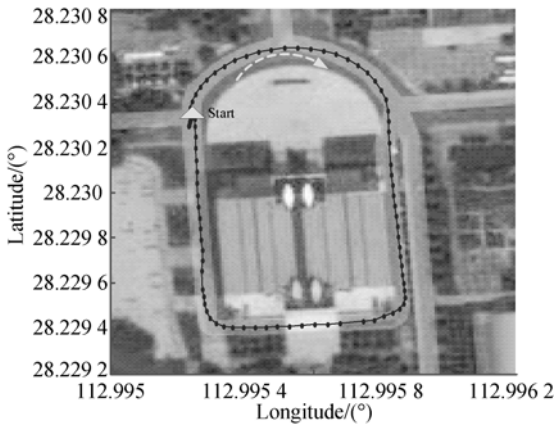


图 9 跑车测试轨迹

Fig. 9 Testing track of vehicle

图 10 给出了车辆运行中航向角的变化曲线,可以看出,仿生偏振光罗盘基本能够跟随参考航向的变化,但在车辆转弯(30~45 s)、爬坡(50~75 s)路段内,偏振光定向出现较大的误差,而在平直路段(85~125 s)误差较小。图 11 为车辆从爬坡、转弯到直行过程中,水平角与航向误差的变化曲线,表 2 为此段时间内的航向误差统计结果。从图中可知,航向角误差较大的点均出现在水平角变化剧烈的时刻,在载体水平角变化段内,航向角误差均值为 1.352°(表 2),并且标准差较大,说明航向角精度受模型误差的影响显著;但在最后的直行阶段,水平角比较稳定且近似为零,此路段内误差也保持稳定,约为 0.323°,标准差为 0.251°。与变化段相比,航向角受模型误差的影响较小,精度较高。从表 2 也可以看出,在水平角变化的路段中,航向角误差较大,整个路段的仿生偏振光罗盘的定向误差较大,为 1.115°。根据测试结果可知,不同水平角时,模型误差的影响程度也不同,并且随着水平角的变大,影响程度也越大,特别是对于一些动态性高的载体,影响程度会更加明显。

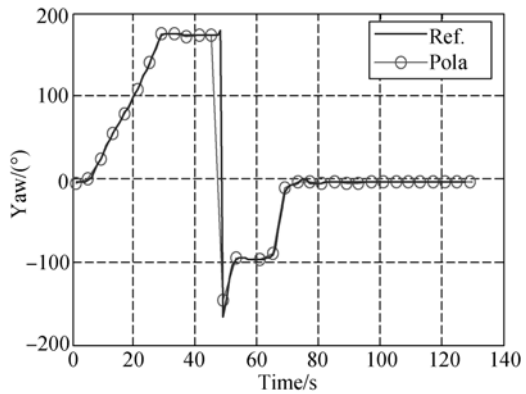


图 10 车辆航向角的变化曲线

Fig. 10 Curves of heading error of vehicle

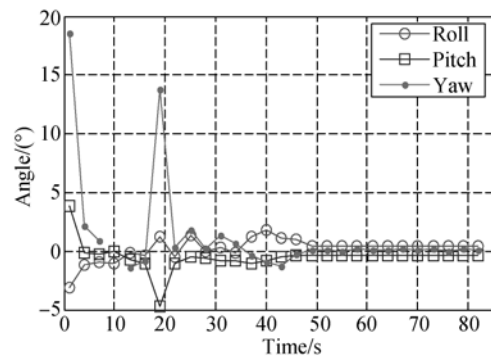


图 11 航向误差与水平角的变化曲线

Fig. 11 Curves of heading error to horizontal angle

表 2 不同水平角时的航向误差统计值

Tab. 2 Statistical result of heading errors at different horizontal angles

水平角	航向角误差/(°)	
	平均值	标准差
变化段(1~44 s)	1.352	3.754
稳定段(45~80 s)	0.323	0.251
整体路段(1~125 s)	1.115	3.319

6 结 论

本文根据偏振光定向基本原理,建立了非理想天气条件下的偏振光定向模型,并推导了航向角解算方法。研究了模型误差对偏振光定向的影响机理,指出了水平角和太阳高度角是决定模型误差影响程度的主要因素。静态实验与跑车测试结果证明:当太阳高度角  $h_s < 40^\circ$  时(清晨和傍晚),仿生偏振光的定向误差为  $0.729^\circ$ ;而当  $40^\circ < h_s < 75^\circ$ (中午)时,误差为  $3.764^\circ$ ,可见随着太阳

高度角的变大,模型误差的影响也加剧,导致仿生偏振光的定向精度明显下降。水平角对模型误差也起着相同的作用,倾斜程度越大,误差影响也越大,载体水平运动时,定向误差为  $0.323^\circ$ ,倾斜后误差增大为  $1.352^\circ$ 。因此在仿生偏振光罗盘的

实际应用中,一方面可通过补偿偏振模型误差来提高仿生偏振光罗盘的定向精度;另一方面由于太阳高度角的影响不可避免,需要选择合适的时间,尽量减小模型误差的影响,以增强仿生偏振光罗盘的实用性。

#### 参考文献:

- [1] BERRY M, DENNIS M, LEE R R. Polarization singularities in the clear sky [J]. *New Journal of Physics*, 2004, 6:1-4.
- [2] COLLETT M, COLLETT T S, BISCH S, et al.. Local and global vectors in desert ant navigation [J]. *Nature*, 1998, 394(6690):269-272.
- [3] WEHNER R. Desert ant navigation; how miniature brains solve complex tasks [J]. *Journal of Comparative Physiology A*, 2003, 189(8):579-588.
- [4] POMOZI I, HORVATH G, WEHNER R. How the clear-sky angle of polarization pattern continues underneath clouds; full-sky measurements and implications for animal orientation [J]. *Journal of Experimental Biology*, 2001, 204:2933-2942.
- [5] BRINES M L, GOULD J L. Skylight polarization patterns and animal orientation [J]. *Journal of Experimental Biology*, 1982, 96:69-91.
- [6] RAYLEIGH L. On the light from the sky, its polarization and color [J]. *Phil. Mag*, 1871, 61:107-279.
- [7] WEHNER R. Polarization vision—a uniform sensory capacity? [J]. *Journal of Experimental Biology*, 2001, 204:2589-2596.
- [8] GAL J. Polarization patterns of the summer sky and its neutral points measured by full-sky imaging polarimetry in Finnish Lapland north of the Arctic Circle [J]. *Proc. R. Soc. Lond. A*, 2001, 457:1385-1399.
- [9] LEE R L. Digital imaging of clear-sky polarization [J]. *Applied Optics*, 1998, 37(9):1465-1476.
- [10] 祝燕华, 蔡体菁, 徐泽杨. 基于大气偏振光定向的重力辅助惯性导航算法[J]. *中国惯性技术学报*, 2013, 21(5):620-624.
- ZHU Y H, CAI T J, XU Z Y. Atmospheric polarization and gravity aided inertial navigation algorithm [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2013, 21(5):620-624. (in Chinese)
- [11] LAMBRINOS D, MOLLER R, LABHART T, et al.. A mobile robot employing insect strategies for navigation [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2000, 30(1-2):39-64.
- [12] THAKOOR S, MOROOKIAN J M, CHAHL J, et al.. BEES: exploring mars with bioinspired technologies [J]. *Computer*, 2004, 37(9):8-47.
- [13] 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)
- [14] 崔岩, 曹楠楠, 储金奎, 等. 天空偏振光测量系统设计[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(6):1413-1435.
- CUI Y, CAO N N, CHU J K, et al.. Design of skylight polarization measurement system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(6):1413-1435. (in Chinese)
- [15] WANG X, GAO J, FAN Z. Empirical corroboration of an earlier theoretical resolution to the UV paradox of insect polarized skylight orientation [J]. *Naturwissenschaften*, 2014, 101(2):95-103.
- [16] 王昕, 高隽, 范之国, 等. 偏振光导航测角歧义性问题的解决方法[J]. *电子学报*, 2014, 42(11):2184-2190.
- WANG X, GAO J, FAN ZH G, et al.. The solution of the problem of the ambiguity of angle calculation in the polarized skylight navigation [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2014, 42(11):2184-2190. (in Chinese)
- [17] 吴良海, 张骏, 范之国, 等. 多次散射因素下天空偏振光模式的解析模型[J]. *物理学报*, 2014, 63(11):1142011-1142017.
- WU L H, ZHANG J, FAN ZH G, et al.. An analytical model for skylight polarization pattern with multiple scattering [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2014, 63(11):1142011-1142017. (in Chinese)
- [18] 杨中光, 周军, 黄河, 等. 偏振导航传感器测角误差分析与补偿[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(6):1424-1429.
- YANG ZH G, ZHOU J, HUANG H, et al.. A-



- nalysis and compensation of angle errors of polarization navigation sensors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(6):1424-1429. (in Chinese)
- [19] 王玉杰,胡小平,练军想,等. 仿生偏振光定向算法及误差分析[J]. 宇航学报,2015,36(2):211-216. WANG Y J, HU X P, LIAN J X, *et al.*. Algorithms and error analysis of bionic orientation based on polarized lights [J]. *Journal of Astronautics*, 2015,36(2):211-216. (in Chinese)
- [20] 赵开春,卢皓,尤政,等. 天空光偏振模式自动探测装置[J]. 光学精密工程,2013,21(2):239-245. ZHAO K CH, LU H, YOU ZH, *et al.*. Automatic detection system for skylight polarized pattern [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013,21(2):239-245. (in Chinese)
- [21] GRENA R. An algorithm for computation of the position [J]. *Solar Energy*, 2008, 82 (5): 462-470.
- [22] TITTERTON D H, WESTON J L. *Strapdown Inertial Navigation Technology* [M]. 2nd Ed.. Massachusetts: Institution of Engineering and Technology, 2004.
- [23] WILTSCHKO R, WILTSCHKO W. Pigeon homing: change in migrational strategy during ontogeny [J]. *Animal Behavior*, 1985,33:583-590.
- [24] WANG Y J, HU X P, LIAN J X, *et al.*. Design of a device for sky light polarization measurements [J]. *Sensors*, 2014,14:14916-14931.

## 作者简介:



范晨(1988—),男,陕西渭南人,博士研究生,主要从事仿生偏振光导航、微惯性导航及视觉导航等方面的研究。E-mail: fanchen\_nudt@yeah.net

## 导师简介:



胡小平(1960—),男,四川泸州人,教授,博士生导师,主要从事仿生导航、导航制导与控制等相关领域的研究。E-mail: xph\_nudt@hotmail.com

(版权所有 未经许可 不得转载)