航 空 学 报
Acta Aeronautica et Astronautica Sinica
Sep. 25 2020 Vol. 41 No. 9
ISSN 1000-6893 CN 11-1929/V
http://hkxb.buaa.edu.cn hkxb@buaa.edu.cn

引用格式：范颖，何晓峰，范晨，等. 多云天气条件下的大气偏振光定向方法[J]. 航空学报，2020，41(9)：324263. FAN Y，HE X F，FAN C，et al. Atmospheric polarized light orientation method in cloudy weather[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica，2019，41(9)：324263 (in Chinese). doi：10.7527/S1000-6893.2020.24263

多云天气条件下的大气偏振光定向方法

范颖，何晓峰*，范晨，胡小平，吴雪松，韩国良，罗凯鑫

国防科技大学 智能科学学院，长沙 410073

摘 要：针对多云天气情况下传统的偏振光定向算法精度下降的问题，提出了一种用于多云天气条件下的大气偏振光定向方法。首先，根据已知信息建立任意一个像素点的偏振光定向模型；然后，基于上一步得到的定向模型，利用随机抽样一致算法筛选出符合要求的内点，并根据筛选出的这些内点得出最符合要求的定向模型；最后，利用选取出的最优的定向模型解算出航向角，实现了基于大气偏振光的定向。通过实际数据证明了该方法的有效性，解算出的航向角误差在少云情况下小于0.5°、多云情况下小于1°。

关键词：偏振光；多云天气；定向；随机抽样；一致算法

中图分类号：V249.32+5 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6893(2020)09-324263-07

在自主导航领域，除了传统的惯性导航技术和卫星导航技术外，仿生导航已成为近年来自主导航领域的研究热点。随着生物学和仿生学的不断发展，其研究成果也为仿生导航技术的发展提供了有力的支撑。太阳光经过大气层的散射形成的天空偏振光是自然界的导航信息源，许多动物都会借助天空偏振光进行定向[1-3]。仿生偏振光导航就是以大气偏振模式为基础来获取载体的航向信息，具有全自主、抗干扰、测量误差不随时间积累等特点，适用于复杂环境下长航时、远距离的自主导航，在船舶、汽车、飞行器等领域具有广阔的应用前景[4-5]。

基于阵列式偏振光相机设计的光罗盘在结构上十分接近于昆虫的复眼结构，这种设计方式可以最有效地得到偏振信息[6-7]。现阶段用于偏振光定向的方法主要有2种：第1种是基于天空全部区域的偏振图像法；第2种是基于天空局部区域的点源式方法[8]。

清华大学的卢皓等提出了一种通过提取天空光偏振图像的特征来确定太阳方位角的方法。作者通过Hough变换将太阳子午线的二值图像变换到Hough空间，通过峰值确定了太阳方位角[9]。中北大学的学者提出了一种基于脉冲耦合神经网络(PCNN)的偏振光罗盘定向方法，该方法适用于恶劣天气条件，在晴朗天气下平均定向误差为0.180 5°，多云情况下的平均定向误差为0.878°，在晴朗的月夜下平均定向精度为0.712°[10]。北京航空航天大学的学者们研究了不同天气条件下的偏振光模式并基于偏振角的对称性提出一种新的导航方法[11]。大连理工大学的褚金奎团队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度提取算法(去除传感器各个偏振方向的干扰像素)，该方法定向精度为±0.25°，并且在室外有部分遮挡物的情况下表现出良好的鲁棒性[12]。国防科技大学的张文静等利用偏振角的对称性这一

收稿日期：2020-04-20；**退修日期**：2020-05-15；**录用日期**：2020-06-06；**网络出版时间**：2020-06-06 10:06
网络出版地址：http://hkxb.buaa.edu.cn/CN/html/20200922.html
基金项目：国家自然科学基金(61773394，61573371)；国防科技大学科研计划(ZK18-03-24)
* **通信作者**. E-mail：hexiaofeng@nudt.edu.cn

特点来确定太阳子午线，在多云情况下的定向精度在 2°以内[13]。华盛顿大学和昆士兰大学的 Powell 等利用水下的偏振模式完成了地理定位。通过使用仿皮皮虾的水下偏振相机进行实验证明该方法的定位精度可达 61 km[14]。

此外，无论是哪一种方法，目前公开发表的文献大多都是基于晴朗天气下的偏振光定向方法，但是在实际情况中，天气是复杂多变的，因此需要考虑其他的情况。在多云天气下，基于天空全部区域的偏振图像法会受到影响，因为天空的大部分区域都被云层遮挡住了，并且云层是流动的，该方法会受到干扰；基于天空局部区域的点源式方法只依赖于局部区域，不需要利用全部的天空区域就可以完成定向，因此寻找一种在多云的天气情况下还能保持较高定向精度的点源式定向方法具有十分重要的意义。

本文提出的用于多云天气条件下的大气偏振光定向方法能筛选出多云天气条件下分布区域最广的大气偏振模式，并根据该大气偏振模式得到最优的载体航向角，避免因云层遮挡和流动引起大气偏振模式不一致且不断变化，影响大气偏振光定向准确度的问题。

1 大气偏振光定向算法

1.1 大气偏振光定向原理

太阳光在经过大气层的散射后形成了具有偏振特性的偏振光，偏振光会以特定的规律稳定地分布在天空中。由于这种规律性，大气偏振光的分布图也被称作是天空的指纹[15-16]。

如图 1 所示，以观察者为原点建立天球坐标系，原点正上方就是天顶点。天顶点与太阳在天球坐标系上的点的连线就是太阳子午线。以太阳为中心向外发散的虚线环就是偏振光的分布图：每个虚线环上虚线段的切线方向就是天空偏振光 $\boldsymbol{E}$ 矢量的振动方向，虚线段的宽度代表最大 $\boldsymbol{E}$ 矢量的偏振度。由图 1 可知，偏振态的分布关于太阳子午线是对称的。

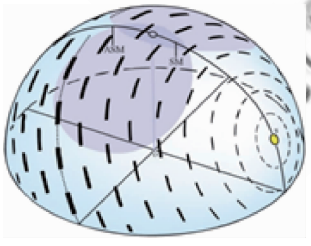


图 1 大气偏振光分布示意图

Fig. 1 Diagram of polarized light distribution in atmosphere

为了便于理解，基于右手法则建立如图 2 所示的坐标系[17]，φ 为偏振角；α、γ 为观测点的方位角和高度角；α_s、γ_s 分别为太阳的方位角和高度角。

相机坐标系（c 系）$O_cX_cY_cZ_c$：偏振相机与载体固联在一起，所以载体坐标系（b 系）与相机坐标系重合。各个坐标轴的方向是右-前-上。

入射光坐标系（i 系）：$O_iX_iY_iZ_i$：Z_i 轴指向入射光的方向，X_i 轴位于 $\Delta O_cPP'$ 垂直平面内，Y_i 轴可以通过右手法则获得。为了简明，图 2 中省略了 Y_i 轴。

由标准 Rayleigh 散射模型可知[18]，天空偏振光的最大 $\boldsymbol{E}$ 矢量垂直于观测向量 $\boldsymbol{OP}$ 和太阳向量 $\boldsymbol{OS}$ 构成的平面 ΔOPS，根据这一特性即可借助偏振光来完成定向[19]。

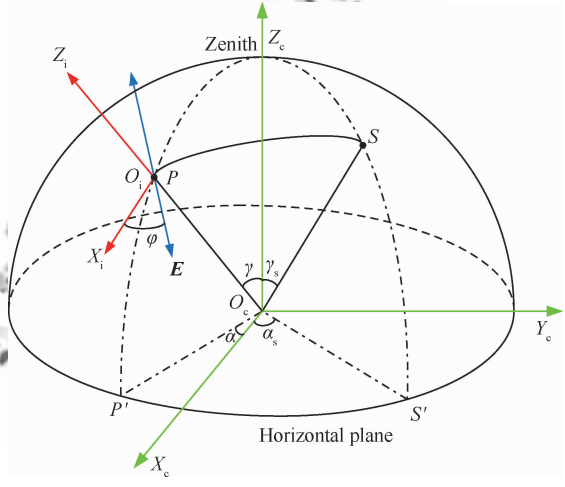


图 2 偏振光定向原理图

Fig. 2 Schematic diagram of polarized light orientation

1.2 大气偏振光定向模型的建立

根据标准 Rayleigh 散射模型得到的几何关系，在载体坐标系下建立偏振光定向模型为

$$\boldsymbol{a}_p^{\mathrm{b}} = s \cdot \boldsymbol{a}_l^{\mathrm{b}} \times \boldsymbol{a}_{\mathrm{s}}^{\mathrm{b}} \tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{a}_p^{\mathrm{b}}$ 为观测点 p 处偏振光最大 $\boldsymbol{E}$ 矢量振动方

向的单位矢量；$\boldsymbol{a}_l^{\mathrm{b}}$ 为观测方向 l 的单位矢量；$\boldsymbol{a}_{\mathrm{s}}^{\mathrm{b}}$ 为太阳方向的单位矢量。

将式(1)整理成[16]

$$\boldsymbol{a}_p^{\mathrm{b}} = s \cdot [\boldsymbol{a}_l^{\mathrm{b}} \times] \boldsymbol{A}_{\mathrm{s}}^{\mathrm{b}} \boldsymbol{x}_{\mathrm{s}} = s \cdot \boldsymbol{F}\boldsymbol{x}_{\mathrm{s}} \tag{2}$$

式中：$[\boldsymbol{a}_l^{\mathrm{b}} \times]$ 为 $\boldsymbol{a}_l^{\mathrm{b}}$ 的反对称矩阵。

令

$$\boldsymbol{a}_p^{\mathrm{b}} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{a}_p^{\mathrm{b}}(1) \\ \boldsymbol{a}_p^{\mathrm{b}}(2) \\ \boldsymbol{a}_p^{\mathrm{b}}(3) \end{bmatrix} \tag{3}$$

则由式(3)可得[16]

$$\frac{\boldsymbol{a}_p^{\mathrm{b}}(1)\sin\alpha - \boldsymbol{a}_p^{\mathrm{b}}(2)\cos\alpha}{\boldsymbol{a}_p^{\mathrm{b}}(3)} = \frac{\tan\varphi}{\sin\gamma} \tag{4}$$

令 $\boldsymbol{a} = \boldsymbol{F}\boldsymbol{x}_{\mathrm{s}}$，则

$$\boldsymbol{a}_p^{\mathrm{b}} = s \cdot \boldsymbol{F}\boldsymbol{x}_{\mathrm{s}} = s \cdot \boldsymbol{a} \tag{5}$$

将式(5)代入式(4)可得

$$\boldsymbol{a}(1)\sin\alpha\sin\gamma - \boldsymbol{a}(2)\cos\alpha\sin\gamma = \boldsymbol{a}(3)\tan\varphi \tag{6}$$

可以将式(6)写成

$$[\boldsymbol{a}(1) \quad \boldsymbol{a}(2) \quad \boldsymbol{a}(3)] \begin{bmatrix} \sin\alpha\sin\gamma \\ -\cos\alpha\sin\gamma \\ -\tan\varphi \end{bmatrix} = [(\boldsymbol{F}\boldsymbol{x}_{\mathrm{s}})(1) \quad (\boldsymbol{F}\boldsymbol{x}_{\mathrm{s}})(2) \quad (\boldsymbol{F}\boldsymbol{x}_{\mathrm{s}})(3)] \begin{bmatrix} \sin\alpha\sin\gamma \\ -\cos\alpha\sin\gamma \\ -\tan\varphi \end{bmatrix} = 0 \tag{7}$$

令

$$\boldsymbol{d} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{d}(1) \\ \boldsymbol{d}(2) \\ \boldsymbol{d}(3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin\alpha\sin\gamma \\ -\cos\alpha\sin\gamma \\ -\tan\varphi \end{bmatrix} \tag{8}$$

则式(7)可以写成

$$\boldsymbol{h}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x} = \boldsymbol{b} \tag{9}$$

式中：

$$\boldsymbol{h} = [\boldsymbol{F}(1)\boldsymbol{d}(1) \quad \boldsymbol{F}(2)\boldsymbol{d}(2)] \tag{10}$$

$$\boldsymbol{x} = [\cos(\psi + \alpha_{\mathrm{s}}) \quad \sin(\psi + \alpha_{\mathrm{s}})]^{\mathrm{T}} \tag{11}$$

$$\boldsymbol{b} = -\boldsymbol{F}(3)\boldsymbol{d}(3) \tag{12}$$

在测量出的每张偏振图像中，假设有 k 个有效的测量点，则有

$$[\boldsymbol{h}_1 \quad \boldsymbol{h}_2 \quad \cdots \quad \boldsymbol{h}_k]^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x} = [\boldsymbol{b}_1 \quad \boldsymbol{b}_2 \quad \cdots \quad \boldsymbol{b}_k]^{\mathrm{T}} \tag{13}$$

将式(13)整理即可得到多测量点的偏振光定向方程：

$$\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x} = \boldsymbol{b}^{\mathrm{T}} \tag{14}$$

但是由于实际测量中存在误差，因此在上述的定向方程中需要考虑误差项，则将式(14)改写为

$$(\boldsymbol{H} + \boldsymbol{E}_{\mathrm{s}})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x} = (\boldsymbol{b} + \boldsymbol{e}_{\mathrm{s}})^{\mathrm{T}} \tag{15}$$

式中：$\boldsymbol{E}_{\mathrm{s}}$ 和 $\boldsymbol{e}_{\mathrm{s}}$ 为实际测量中存在的噪声项。

将式(15)整理为

$$([-\boldsymbol{b} \quad \boldsymbol{H}] + [-\boldsymbol{e}_{\mathrm{s}} \quad \boldsymbol{E}_{\mathrm{s}}]) \begin{bmatrix} 1 \\ \boldsymbol{x} \end{bmatrix} = \boldsymbol{0} \tag{16}$$

令 $\boldsymbol{B} = [-\boldsymbol{b} \quad \boldsymbol{H}]$，$\boldsymbol{C} = [-\boldsymbol{e}_{\mathrm{s}} \quad \boldsymbol{E}_{\mathrm{s}}]$，$\boldsymbol{z} = [1 \quad \boldsymbol{x}]^{\mathrm{T}}$，则式(16)可以写为

$$(\boldsymbol{B} + \boldsymbol{C})\boldsymbol{z} = \boldsymbol{0} \tag{17}$$

利用全局最小二乘法求解上述方程，则可以将式(17)转化为求解以下目标函数：

$$\min \|\boldsymbol{B}\boldsymbol{z}\| = \min(\boldsymbol{z}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}\boldsymbol{z}), \text{s.t.}\ \boldsymbol{z}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{z} = 2 \tag{18}$$

即可知最优解 $\boldsymbol{z}_{\mathrm{best}}$ 为 $\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}$ 的最小特征值对应的最小特征向量[16]，则对于式(17)的最优解 $\boldsymbol{x}_{\mathrm{best}} = \boldsymbol{z}(2:3)$，那么根据式(11)可得航向角为

$$\psi = \begin{cases} \arctan\left(\dfrac{\boldsymbol{x}_{\mathrm{best}}(2)}{\boldsymbol{x}_{\mathrm{best}}(1)}\right) - \alpha_{\mathrm{s}} & \psi \in [0, 2\pi] \\ \arctan\left(\dfrac{\boldsymbol{x}_{\mathrm{best}}(2)}{\boldsymbol{x}_{\mathrm{best}}(1)}\right) - \alpha_{\mathrm{s}} + \pi & \psi \in [0, 2\pi] \end{cases} \tag{19}$$

2 多云天气条件下的大气偏振光定向方法

天气是影响偏振光定向精度的重要因素，不同的天气状况会影响大气偏振光的分布特性和变化规律。传统的定向算法在晴朗无云的天气下能够获得较好的定向精度，但是当天空出现云朵时，传统定向算法的效果就会大打折扣，因此本文基于传统的偏振光定向算法，结合实际的天气情况，提出了一种用于多云天气条件下的大气偏振光定向算法。

1) 获取任意一个像素点的偏振光定向模型

随机选取一个像素点并算出该点处的高度角 γ_{o} 和方位角 α_{o}：

$$\tan\gamma_{\mathrm{o}} = \frac{\sqrt{(x_p - x_{\mathrm{c}})^2 + (y_p - y_{\mathrm{c}})^2}}{f_{\mathrm{c}}} \tag{20}$$

$$\tan\alpha_{\mathrm{o}} = \frac{y_p - y_{\mathrm{c}}}{x_p - x_{\mathrm{c}}} \tag{21}$$

式中：(x_p, y_p) 为观测点 p 在图像中的像素点位置；$(x_{\mathrm{c}}, y_{\mathrm{c}})$ 为标定出来的相机主点像素；f_{c} 为标定出来的相机焦距。

利用选取的像素点并结合太阳星历，输入相应的时间和位置信息即可求得导航坐标系下的太阳高度角 γ_{s}，太阳方位角 α_{s}，利用偏振相机的输

出信息，通过最小二乘法即可算出偏振角 φ。

基于以上信息，根据标准的瑞利散射模型，在载体坐标系下建立偏振光定向模型：

$$\boldsymbol{a}_p^{\mathrm{b}} = s \cdot \boldsymbol{a}_l^{\mathrm{b}} \times \boldsymbol{a}_s^{\mathrm{b}} \tag{22}$$

2）利用随机抽样一致方法筛选出符合要求的内点

利用步骤 1）得到的偏振光定向模型去判断每一个像素点是否符合阈值要求，如果符合就归类为内点，如果不符合，就归类为外点：对于每一张图片，将每一个像素点代入步骤 1）中得到的偏振光定向模型中并求出其对应的判别相关向量的范数 $\|\boldsymbol{Bz}_{\mathrm{best}}\|$，然后判断每个像素点对应的判别相关向量的范数是否在事先设定好的阈值 δ 内：如果在，该像素点就被判定为内点，如果不在，就是外点。

3）利用选取出的最优模型解算出航向角

为了选取一个最适合的偏振光定向模型，重复步骤 1）、步骤 2），多次迭代，直到选取出一个能满足最多局内点要求的偏振光定向模型，基于此模型即可求出航向角。

3 实验验证

为了验证方法的有效性，在阴天多云情况下（2019 年 8 月 26 日下午 6：55-7：05）进行实验。在国防科技大学校园内某一天台处进行室外转动实验：将微阵列式偏振光罗盘固定在转台上，放置在水平处。转台共包含 391 个齿，每个齿约为 0.920 7°，重复定位精度可以达到 0.01°。

测试系统主要由 FLIR 偏振相机（采用 SONY 的 IMX250 偏振芯片）、笔记本电脑和高精度转台组成。偏振相机的焦距为 8 mm，像素为 2 048×2 448，每 4 个像素构成一个测量单元，偏振方向与参考方向的夹角分别为 0°、45°、90°和 135°，这样能够最有效地获取偏振信息，具体结构如图 3 所示。

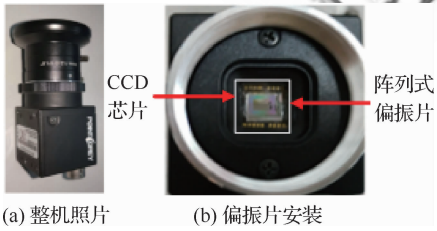


图 3 偏振相机实物图

Fig. 3 Polarization camera picture

在实验过程中，旋转单轴转台，在多个位置采集入射光：转台从 0 位开始，每次旋转 3 个步长（30 个齿），每个位置采集 2 帧图像。实验装置和实验过程图如图 4 所示。

由于云层是一直流动的，为了更好的说明天气情况，记录下这 10 min 内的天空云层变化图，如图 5 和图 6 所示。

图 5 和图 6 为经过处理的伪彩图，天空是淡蓝色，深蓝色、橘黄色和红色是云彩。从图中可以看到，云的数量由少变多，云层厚度也变厚，但是云层并未完全遮挡住全部的天空。为了验证本文

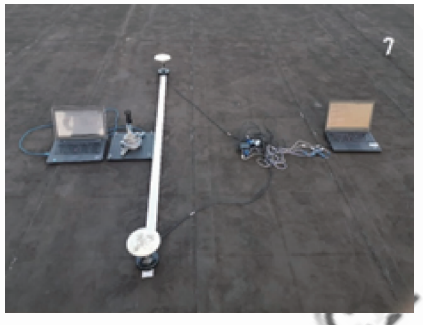


图 4 实验装置图

Fig. 4 Experimental device picture

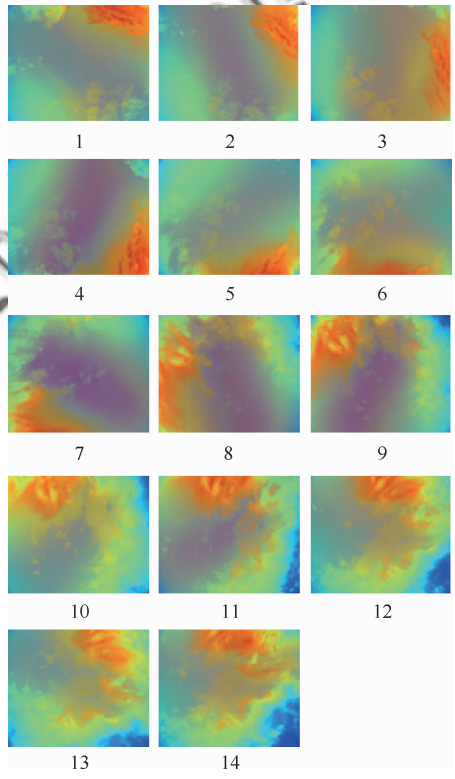


图 5 少云情况

Fig. 5 Situation of partly cloudy

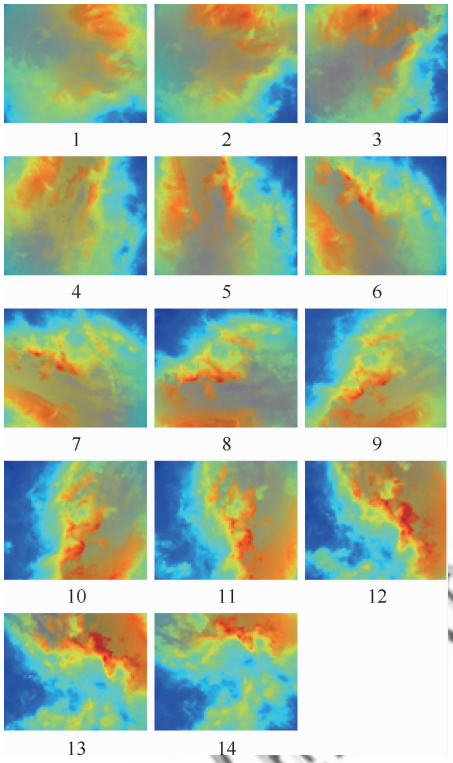


图 6 多云情况

Fig. 6 Situation of cloudy

提出的方法的有效性，利用文献[20]提出的一种较为常用的方法和本文提出的方法对这 2 组数据进行处理，结果如图 7 和图 8 所示。

从图 7 和图 8 可以看出，在多云情况下的定向误差比少云情况下的定向误差大。在云层较为稀薄时，偏振相机采集到的偏振光更多，因此定向精度更好，结果较为稳定；在云层较为厚重时，光线无法穿透云层，偏振相机只能采集到未被云层遮挡部分的偏振光，因此定向精度较差。由图 8

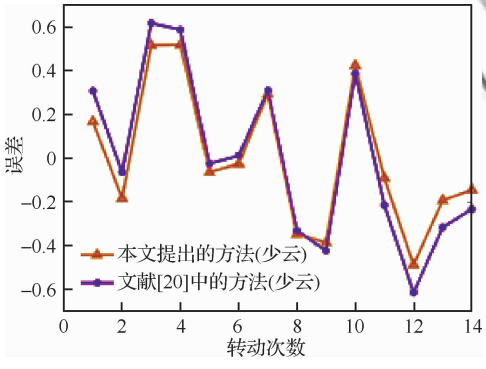


图 7 少云情况下 2 种方法的误差曲线

Fig. 7 Error curves of two methods in partly cloudy situation

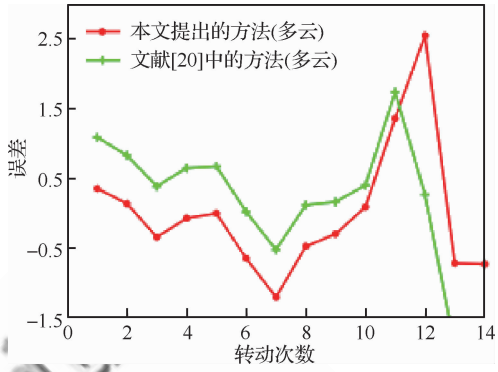


图 8 多云情况下 2 种方法的误差曲线

Fig. 8 Error curves of two methods in cloudy situation

可知，由于云层在实时流动，当云层由薄变厚时，定向精度也在发生变化。从图 7 可以看出，在少云情况下，2 种方法的精度相差不大；通过表 1 可知，在少云情况下，本文提出的方法比文献[20]中的方法精度提高了 25%。从图 8 可知，在多云情况下，本文提出的方法相比文献[20]中的方法更有优势；从表 1 可知，在多云情况下，本文提出的方法比文献[20]中的方法精度提高了 42.5%。

表 1 误差对比

Table 1 Error comparison

方法	天气	平均误差/(°)	标准差/(°)	均方根误差/(°)
本文提出的方法	少云	−0.168 0	0.321 2	0.362 5
	多云	−0.489 7	0.609 6	0.781 9
文献[20]中的方法	少云	−0.308 2	0.372 1	0.483 2
	多云	−0.172 3	1.349 2	1.360 1

4 结 论

在少云和多云 2 种情况下，本文提出的方法的精度都优于文献[20]中的方法；本文提出的方法在少云天气条件下的均方误差为 0.362 5°，在多云天气条件下的均方误差为 0.781 9°。

本文提出的方法主要在室外进行了静态实验，下一步将通过动态实验进行验证。此外，光罗盘在多云天气条件下的定向精度与少云天气条件下的定向精度还有一定差距，下一步的主要工作是提高光罗盘在多云天气条件下的定向精度。

参 考 文 献

[1] 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]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(9): 2109-2116 (in Chinese).

[2] 褚金奎，关乐，李世奇. 大气偏振模式图分布及仿生偏振导航技术[J]. 遥感学报，2018，22(6)：969-979.
CHU J K, GUAN L, LI S Q, et al. Atmospheric polarization field pattern distribution and polarization navigation technology[J]. Journal of Remote Sensing, 2018, 22(6): 969-979 (in Chinese).

[3] 范之国，徐超，吴川，等. 大气偏振模式特征及其在自主导航中的应用[J]. 现代防御技术，2017，45(3)：1-7.
FAN Z G, XU C, WU C, et al. Characteristics of atmospheric polarization pattern and its application in autonomous navigation[J]. Modern Defence Technology, 2017, 45(3): 1-7 (in Chinese).

[4] 范晨，胡小平，何晓峰，等. 仿生偏振光导航研究综述[C]//中国惯性技术学会第七届学术年会，2015.
FAN C, HU X P, HE X F, et al. Method of inertial aided polarized orientation[C]// Proceedings of the 7th Annual Meeting of China Institute of Inertial Technology, 2015 (in Chinese).

[5] 刘俊，赵菁，赵慧俊，等. 仿生光磁导航技术发展研究综述[J]. 飞控与探测，2019，2(4)：14-25.
LIU J, ZHAO J, ZHAO H J, et al. A review of research on development of bionic navigation technology[J]. Flight Control and Detection, 2019, 2(4): 14-25 (in Chinese).

[6] WEHNER R, MULLER M. The significance of direct sunlight and polarized skylight in the ant's celestial system of navigation[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2006, 103(33): 12575-12579.

[7] FOURCASSIE V, DAHBI A, CERDA X, et al. Orientation and navigation during adult transport between nests in the ant cataglypis iberica[J]. Naturwissenschaften, 2000, 87(7): 355-359.

[8] 高隽，范之国. 仿生偏振光导航方法[M]. 北京：科学出版社，2014：124-149.
GAO J, FAN Z G. Bionic polarized light navigation method[M]. Beijing: Science Press, 2014: 124-149 (in Chinese).

[9] 卢皓，赵开春，尤政. 基于偏振成像的方位角度解算算法的设计与验证[J]. 清华大学学报(自然科学版)，2014，54(11)：104-108.
LU H, ZHAO K C, YOU Z. Design and verification of an orientation algorithm based on polarization imaging[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2014, 54(11): 104-108 (in Chinese).

[10] TANG J, ZHANG N, LI D. Novel robust skylight compass method based on full-sky polarization imaging under harsh conditions[J]. Optics Express, 2016, 24(14): 15834-15844.

[11] ZHAO H J, XU W J, ZHANG Y. Polarization patterns under different sky conditions and a navigation method based on the symmetry of the AOP map of skylight[J]. Optics Express, 2018, 26(22): 28589-28603.

[12] 褚金奎，蹇慧君，刘泽. 阵列式偏振导航传感器及其鲁棒性算法实现[J]. 光学精密工程，2018，26(8)：237-243.
CHU J K, JIAN H J, LIU Z. Array polarization sen-sor for navigation and it's robust algorithm[J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(8): 237-243 (in Chinese).

[13] ZHANG W J, CAO Y, ZHANG X Z. Angle of sky light polarization derived from digital images of the sky under various conditions[J]. Applied Optics, 2017, 56(3): 587-595.

[14] POWELL S B, ROMAN G, MARSHALL J. Bioinspired polarization vision enables underwater geolocalization[J]. Science Advances, 2018, 4(4): 1-8.

[15] SALMAH K, DIAH S, ILLE G. Bio-inspired polarized skylight-based navigation sensors: A review[J]. Sensors, 2012, 12(11): 14232-14261.

[16] FAN C, HU X P, HE X F. Multicamera polarized vision for the orientation with the skylight polarization patterns [J]. Optical Engineering, 2018, 57(4): 1-9.

[17] 严恭敏，翁浚. 捷联惯导算法与组合导航原理[M]. 西安：西北工业大学出版社，2019：78-82.
YAN G M, WENG J. Strapdown inertial navigation algorithm and integrated navigation principle [M]. Xi'an: Northwestern polytechnical University Press, 2019: 78-82 (in Chinese).

[18] 王晨光，唐军，杨江涛，等. 基于瑞利散射的大气偏振模式检测与模型重建[J]. 中北大学学报(自然科学版)，2015，36(5)：570-576.
WANG C G, TANG J, YANG J T, et al. Detection and model reconstruction of atmospheric polarization pattern based on Rayleigh scattering theory[J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2015, 36(5): 570-576 (in Chinese).

[19] 王晨光，张楠，李大林，等. 利用全天域大气偏振检测的航向角解算[J]. 光电工程，2015，42(12)：60-66.
WANG C G, ZHANG N, LI D L, et al. Calculation of heading angle using all-sky atmosphere polarization[J]. Opto-Electronic Engineering, 2015, 42(12): 60-66 (in Chinese).

[20] 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 light [J]. Journal of Astronautics, 2015, 36(2): 211-216 (in Chinese).

（责任编辑：苏磊）

Atmospheric polarized light orientation method in cloudy weather

FAN Ying, HE Xiaofeng*, FAN Chen, HU Xiaoping, WU Xuesong, HAN Guoliang, LUO Kaixin

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

Abstract: Aiming at the problem that the precision of the traditional polarized light orientation algorithm decreases in cloudy weather, this paper proposes a method for atmospheric polarized light orientation in cloudy weather. First, the directional model of polarized light for any pixel is established according to the known information; then, based on the directional model, the interior points that meet the requirements are screened out using the random sampling consistent algorithm, and the most satisfactory directional model is achieved according to the selected interior points; finally, the optimal directional model is used to calculate the heading angle, thereby realizing the orientation via atmospheric polarized light. The validity of the method is proved by the actual data, and the calculated heading angle errors are smaller than 0.5° and 1° in partly cloudy and cloudy weather, respectively.

Keywords: polarized light; cloudy weather; orientation; random sampling; consensus algorithm

http://hkxb.buaa.edu.cn

Received: 2020-04-20; **Revised**: 2020-05-15; **Accepted**: 2020-06-06; **Published online**: 2020-06-06 10:06
URL: http://hkxb.buaa.edu.cn/CN/html/20200922.html
Foundation items: National Natural Science Foundation of China (61773394,61573371); Research Project of National University of Defense Technology (ZK18-03-24)

* **Corresponding author.** E-mail: hexiaofeng@nudt.edu.cn