

# 基于瑞利大气偏振模式的太阳空间位置解算方法

闫皓<sup>1,2</sup> 唐军<sup>1,2</sup> 张楠<sup>1,2</sup> 杨江涛<sup>1,2</sup> 王晨光<sup>1,2</sup> 梁建琦<sup>1,2</sup> 钱坤<sup>1,2</sup> 伍大锦<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中北大学电子测试技术国家重点实验室, 山西 太原 030051

<sup>2</sup>中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051

**摘要** 在利用大气偏振模式进行导航的领域中,太阳空间位置是一个非常重要的导航特征信息,太阳空间位置的获取是导航应用中的一个重要的问题。提出一种基于瑞利大气偏振模式和 K-means 聚类算法获取太阳空间位置的计算方法。从大气瑞利理论所建立的全天域大气偏振模式出发,根据大气偏振模式中偏振度(DOP)的基本规律对偏振度数据进行 K-means 聚类分析,将太阳空间位置的求解转换为求解 K-means 类中心的问题,通过算法仿真实验和实测实验进行验证。实验表明,在晴朗天气条件下同一天不同时刻求解的太阳位置方位角和高度角误差均小于  $0.01^\circ$ 。算法误差平稳,相对误差可以达到更高的精度,可以有效地利用大气偏振模式解算太阳空间位置。

**关键词** 大气光学; 大气偏振模式; 太阳空间位置; 数据分析算法

**中图分类号** P401 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP53.120103

## Calculation of Solar Spatial Position Based on Rayleigh Atmosphere Polarization Pattern

Yan Hao<sup>1,2</sup> Tang Jun<sup>1,2</sup> Zhang Nan<sup>1,2</sup> Yang Jiangtao<sup>1,2</sup> Wang Chenguang<sup>1,2</sup>  
Liang Jianqi<sup>1,2</sup> Qian Kun<sup>1,2</sup> Wu Dajin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> National Key Laboratory for Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China

<sup>2</sup> Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement, Ministry of Education North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China

**Abstract** Solar spatial position is a very important navigation information in the field of navigation by using atmospheric polarization pattern. And how to get the solar spatial position is very important in navigation. A method based on Rayleigh atmosphere polarization pattern and K-means clustering algorithm is introduced to calculate the solar spatial position. The atmospheric polarized model of skylight is established on the basis of the Rayleigh scattering theory of atmosphere. According to the basic regularities of atmospheric polarization pattern, data of the polarization (DOP) are analyzed by the method of K-means clustering algorithm. The problem of solving position of the sun is transformed into the problem of solving the center of K-means cluster. Finally, the simulation experiment and practical experiment are carried out to verify the algorithm. The experiment shows that, at different times of the same day under clear weather, the errors of the solar position and altitude angle are all less than  $0.01^\circ$ . The algorithm error is smooth, and the relative error can reach higher precision. The solar spatial space can be effectively solved by atmospheric polarization pattern.

**Key words** atmospheric optics; atmospheric polarization pattern; solar spatial position; data analysis algorithm

**OCIS codes** 010.1290; 290.1310; 290.5870

**收稿日期:** 2016-07-27; **收到修改稿日期:** 2016-08-09; **网络出版日期:** 2016-11-20

**基金项目:** 国家自然科学基金青年基金(61503347,51225504)

**作者简介:** 闫皓(1992—),男,硕士研究生,主要从事仿生偏振光导航方面的研究。E-mail: allen080607@163.com

**导师简介:** 唐军(1981—),男,博士,副教授,硕士生导师,主要从事仿生导航、惯性技术、MEMS器件与集成等方面的研究。E-mail: tangjun@nuc.edu.cn(通信联系人)

# 1 引言

太阳光在大气的传输过程中会发生偏振现象,形成了大气偏振模式<sup>[1-2]</sup>。大气偏振模式中蕴含丰富的偏振信息可以为偏振光导航提供稳定的参考信息<sup>[3-5]</sup>。大气偏振模式是一种自然属性,短时间内很难受到人为干扰,而且相对于惯性导航,大气偏振模式导航误差不会随时间而累积,因为这些优点,基于大气偏振模式的导航成为近些年的研究热点<sup>[6-7]</sup>。

目前,国内外学者在大气偏振模式导航方面做了许多工作。其中,Lambrinos等<sup>[8]</sup>研制了基于大气偏振模式导航的 Sahabot 型机器人,成功实现了对机器人方位角的测试,证实了基于大气偏振模式导航的可行性<sup>[9-10]</sup>。Zhao等<sup>[11-13]</sup>研制了点源式偏振光传感器,成功将偏振光传感器应用于机器人导航,实现了精度为 $0.2^\circ$ 的导航;田柳等<sup>[14]</sup>从仿生学角度提出利用全天域大气偏振模式进行导航;同时两个团队也在基于大气偏振模式获取载体三维姿态信息方面做了初步的探索研究<sup>[15]</sup>。

太阳空间位置作为一个重要的导航特征点,获取精准的太阳空间位置是基于大气偏振模式导航的一个关键问题。在太阳位置获取方面,传统的方法(如纬度定位跟踪、太阳光强跟踪、五点法跟踪等<sup>[16-17]</sup>)总体来讲分为两大类:一类是利用天文历对太阳的位置进行计算,利用天文历方法就必须获取到高精度的时间信息,该方法广泛应用在固定时间地点的太阳能采集。当地理位置变动或长时间检测后会出现较大的误差,而且随着地点的变化太阳时角的变化都需要重新校正,因此无法应用在导航领域。另一类是基于视觉法对太阳光斑进行检测<sup>[18-20]</sup>,视觉法不受时间和位置的影响,但是视觉法的获取要求必须获取到理想的太阳光斑并且要将太阳光斑与其他信息严格区分,视觉法需要处理大量的无序数据,多次滤波的处理也会破坏原始的信息,所以从获取精度来讲,视觉法也不适合于高精度导航。

本文基于瑞利大气偏振模式和 K-means 聚类算法获取太阳空间位置的计算方法。首先,从基于大气瑞利理论所建立的全天域大气偏振模式出发。根据大气偏振模式中偏振度(DOP)的基本规律对偏振度进行分类,将太阳的空间位置的求解转换为求解 K-means 类中心的问题。相较于传统的太阳位置求解方法,本方法不受地点时间的限制,并且保持较高的解算精度,在实际应用中有很重要的意义。

## 2 基本原理

### 2.1 基于瑞利模型大气偏振度分布获取

建立基于瑞利模型的全天域大气偏振度分布<sup>[21-22]</sup>,如图1所示。观测者在点O观测点P的偏振信息,P点在球面坐标可以被 $h$ 高度角、 $\alpha$ 方位角唯一表示。同样的,太阳S可以被太阳高度角 $h_s$ 、太阳方位角 $a_s$ 唯一描述。 $\theta$ 为 $\angle POS$ ,假设单点太阳光经瑞利散射进入观测者视线,则P点的偏振度 $P(\theta)$ 为

$$P(\theta) = \frac{1 - \cos^2 \theta}{1 + \cos^2 \theta} P_{\max} \quad (1)$$

式中 $P_{\max}$ 为测试瑞利模型下最大偏振度值<sup>[23]</sup>。再通过对坐标系的观察,Z、P、S构成了一个球面三角形,根据球面余弦定理可得:

$$\cos \theta = \sin h \sin h_s + \cos h_s \cos h_s \cos(\alpha_s - \alpha) \quad (2)$$

联立(1)、(2)式即可算出散射光线的观测点P的偏振度,记做 $P = f_{\text{DOP}}(h_s, a_s, h, a)$ 。当获取到单一观测点的偏振度后,分别计算观测点 $h \in (0, 90^\circ)$ 、 $a \in (0, 360^\circ)$ 下所有的偏振度数据即为整个全天域半球大气偏振度分布。

基于瑞利散射理论的大气偏振分布模式的基本规律是偏振度分布关于太阳子午线呈对称分布,偏振度随着与太阳的角距的增加而变大,并在距离 $90^\circ$ 时达到最大,然后又不断减小;根据这个大气偏振模式的基本分布规律,利用全天域大气偏振度的同心圆对太阳空间位置进行计算。

### 2.2 K-means 数据聚类法提取太阳空间位置

K-means 算法是基于距离的聚类算法,算法采用数据点之间的距离大小作为数据相关性的指标。该算法认为簇是由距离靠近的对象组成的,因此把得到紧凑且独立的簇作为最终目标<sup>[24]</sup>。

全天域大气偏振度数据分布的基本规律是偏振度分布关于太阳子午线呈对称分布,偏振度随着与太阳的角距的增加而变大,并在距离 $90^\circ$ 时达到最大,然后又不断减小。且偏振度范围为 $0 \sim 1$ ,实测中偏振度分

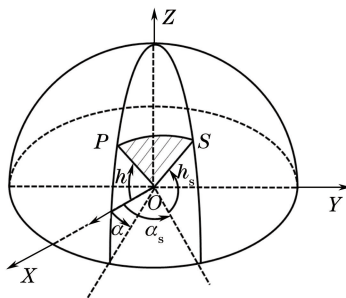


图 1 坐标示意图

Fig. 1 Schematic diagram of coordinate

布范围为往往在 0~0.6 之间。

首先将偏振度值抽象转换为距离矢量,然后将偏振度数据  $N$  分为  $K$  类,距离评价指标为  $J$ ,K-means 算法将选取任意  $K$  个对象初始聚类中心。 $\tau_{nk}$  在偏振度数据点  $n$  被归类到  $k$  的时候为 1,否则为 0。完成初始分类后进行迭代计算,固定  $\mu_k$ ,选择最优的  $\tau_{nk}$ ,观察公式发现将数据点划分到离它最近的那个中心  $K$  就能保证评价指标  $J$  最小。下一步则固定  $\tau_{nk}$ ,再求最优的  $\mu_k$ 。将  $J$  对  $\mu_k$  求导并令导数等于零,很容易得到  $J$  最小的时候  $\mu_k$  应该满足:

$$\mu_k = \frac{\sum_n \tau_{nk} x_n}{\sum_n \tau_{nk}} \tag{3}$$

以此中心代表初始簇中心。然后计算所有数据与类中心的矢量距离,重新计算类中心。一次迭代运算完成,新的类中心就会被确定,直到评价指标  $J$  最小:

$$J = \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K \tau_{nk} \|x_n - \mu_k\|^2 \tag{4}$$

当  $J$  不再变化时说明算法已经收敛,K-means 认为最佳的类中心已经被确定,从偏振度数据角度来讲,就是偏振度值相似的已经被 K-means 算法分成了  $K$  类且已经迭代出了  $K$  个数据簇中心。偏振度基本分布规律在太阳位置附近的偏振度为 0~0.3,而且呈同心圆均匀分布,由此,K-means 所求得的数据簇中心坐标就是太阳空间位置。图 2(a)为全天域偏振度分布图,图 2(b)为 K-means 聚类数据簇分布图,图 2(c)为 K-means 数据簇中心即太阳空间位置提取结果。

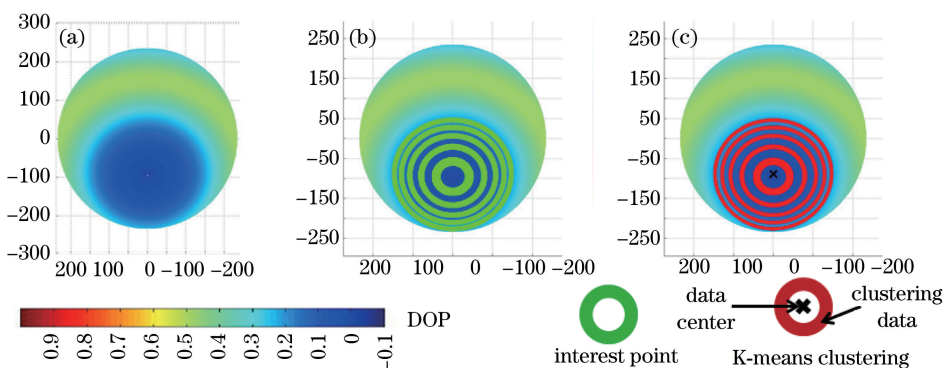


图 2 K-means 聚类算法太阳空间位置提取。(a)大气偏振模式偏振度分布;(b) K-means 聚类数据簇;(c) K-means 簇中心  
Fig. 2 Solar spatial position extraction of K-means cluster algorithm. (a) Polarization degree distribution of atmospheric polarization; (b) K-means clustering data; (c) K-means cluster center

### 3 实验结果

#### 3.1 算法仿真实验

仿真实验假设太阳  $h_s \in (0, 90)$ ,  $a_s \in (0, 360^\circ)$ 。分别根据 2.1 所示的基于瑞利大气偏振模式的基本计

算方法,计算每一组太阳位置下的偏振度数据分布。即可获取到 32400 组太阳位置下的瑞利大气偏振度数据分布图。然后再根据 2.2 节中所示的 K-means 聚类法分别对太阳的位置进行计算。

图 3 反映了算法在太阳空间位置  $h_s \in (0, 90)$ 、 $a_s \in (0, 360^\circ)$  算法的计算误差分布规律。瑞利模型的大气偏振度分布重新根据 K-means 聚类法计算的太阳位置误差如图 3(a)和(c)所示,可以看出,本算法所求的太阳方位角和高度角误差都在  $0.01^\circ$  以内。而且误差分布很平稳。从图 3(b)和(d)上可以看出,从残差平方和来分析,求解精度都达到了  $0.001^\circ \sim 0.00001^\circ$ 。通过对算法性能的测试分析,算法误差达到了  $0.01^\circ$ ,并且误差分布平稳。

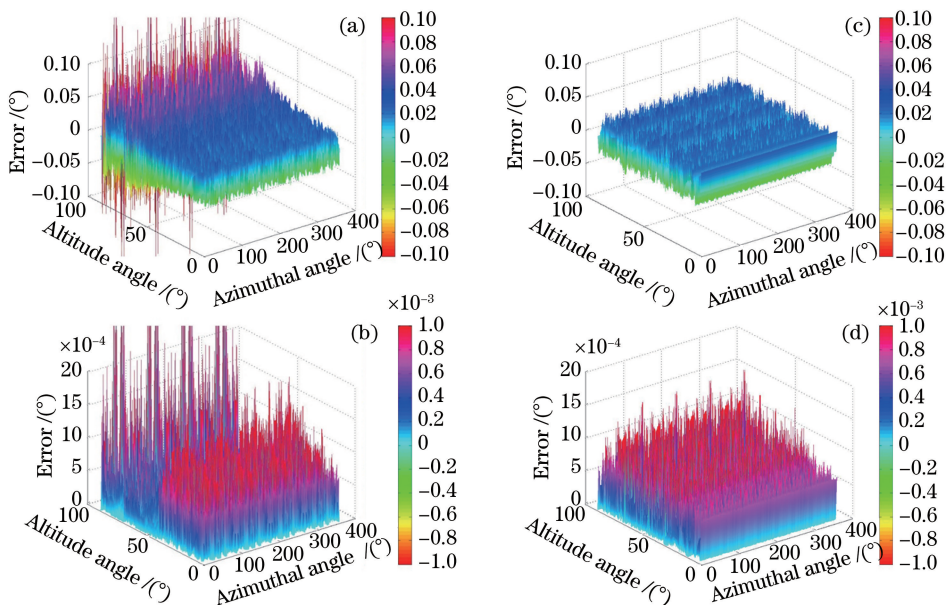


图 3 误差分布图。(a)方位角误差;(b)高度角误差;(c)方位角残差平方和;(d)高度角残差平方和

Fig. 3 Error distribution figure. (a) Azimuth error; (b) altitude error; (c) azimuth residual sum of squares; (d) altitude residual sum of squares

### 3.2 实测实验

实际大气偏振度分布与理论的瑞利模型有很大的差距,特别是在云雾天表现得更加明显。实验中为了能够验证算法的有效性,在 2016 年 4 月 13 日 8 时至 17 时之间每隔一小时对偏振数据进行一次采集,2016 年 4 月 13 日天气非常晴朗,天空可见度很好,这也就保证了实际采集的偏振度数据能够尽可能地与瑞利模型相一致,采集地点为山西太原中北大学科研楼,地点经度为东经  $112.443^\circ$ ,纬度为北纬  $35.015^\circ$ ,中北大学位于太原北郊,远离市区,受到的环境污染很少,可以极大地避开雾霾等粉尘对实验环境的干扰。外场实验利用偏振分析仪(型号:PAX5710VIS-T),偏振分析仪只可以捕获单点偏振度数据,实验中将偏振分析仪和高精度转台组合搭建了实验平台(图 4),利用转台改变观测高度角逐层扫描天空半球,测量每个空间位置上的偏振信息,然后重建全天域偏振度分布。每个整点时刻对数据进行采集计算。图 5(a)列为全天域偏振度数据分布,图 5(b)列为聚类数据簇,图 5(c)列为 K-means 数据簇中心位置,也就是所解算的太阳空间位置。

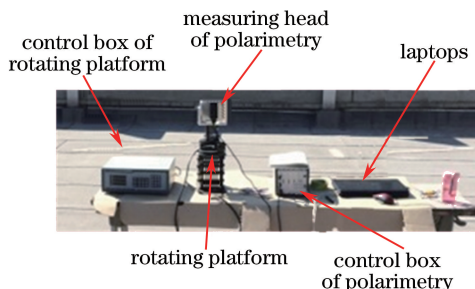


图 4 大气偏振模式测量系统

Fig. 4 Detecting system of the atmospheric polarization pattern

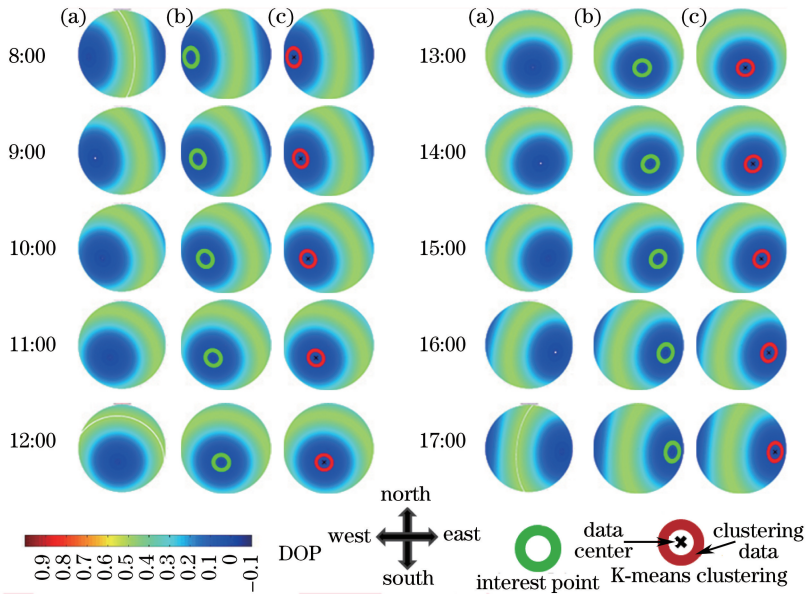


图 5 实验数据图。(a)大气偏振模式偏振度分布;(b)K-means 聚类数据簇;(c)K-means 簇中心

Fig. 5 Experimental data figure. (a) Polarization degree distribution of atmospheric polarization; (b) K-means clustering data; (c) K-means cluster center

图 6(a)为太阳空间位置理论与实验分布图,太阳理论位置由太阳历结合国家授时中心时间计算而得。图 6(b)为误差绝对值分布,从图中可以看出本方法可以求解出太阳空间位置,且误差均在  $0.01^\circ$  以下,从线性拟合来分析,方位角误差均分布在  $0.03^\circ$  左右,高度角解算误差分布在  $0.024^\circ$  左右,而且误差分布很均匀。

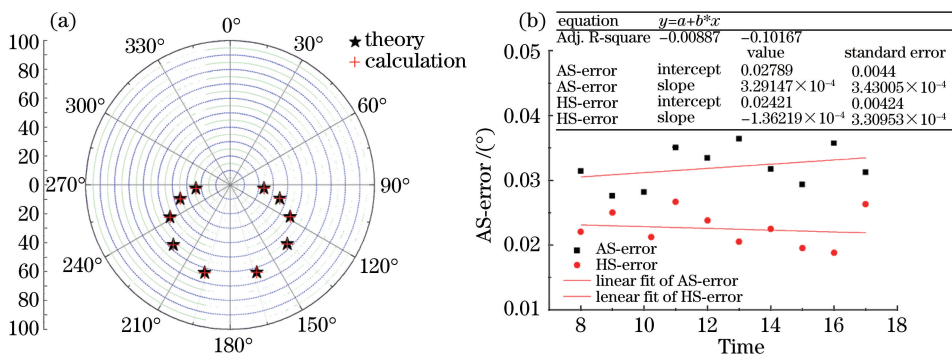


图 6 实验数据分析图。(a)实验数据图;(b)实验误差图

Fig. 6 Experimental data analysis diagram. (a) Experimental data; (b) experimental error

## 4 结 论

在研究基于瑞利大气偏振分布模型的基础上,根据偏振度数据的分布特点特征引入 K-means 聚类算法对太阳空间位置进行解算并通过实验对算法进行验证。算法性能仿真证实本算法所求的太阳方位角和高度角误差都在  $0.01^\circ$  以内,而且误差分布很平稳,所解算到的太阳位置的相对误差还可以降低。实验结果表明:在晴朗天气的条件下同一天不同时刻求解的太阳位置方位角和高度角误差均小于  $0.01^\circ$ 。在偏振光导航领域,可以为载体提供稳定的特征参考点。利用本算法提供的太阳空间位置解算空间飞行器的三维姿态以及解算算法在不同天气情况下的适用性是后续开展的主要工作。太阳作为大气偏振模式中显著的特征点,不仅在偏振光导航领域有重要的作用,而且在太阳能利用领域也有广阔的应用前景。

## 参 考 文 献

- 1 Horváth G, Barta A, Pomozi I, *et al.* On the trail of Vikings with polarized skylight: experimental study of the

- atmospheric optical prerequisites allowing polarimetric navigation by Viking seafarers[J]. *Philos T R Soc B*, 2011, 366(1565): 772-782.
- 2 Cronin T W, Warrant E J, Greiner B. Celestial polarization patterns during twilight[J]. *Appl Optics*, 2006, 45(22): 5582-5589.
- 3 Wang Qichao, Zhao Dapeng, Wang Jiachun, *et al.* Recognition of camouflage targets with multi-spectral polarization detection system[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2013, 40(3): 29-34.  
王启超, 赵大鹏, 汪家春, 等. 多光谱偏振探测对伪装目标的识别研究[J]. *光电工程*, 2013, 40(3): 29-34.
- 4 Sun Xia, Zhao Huijie. Retrieval algorithm for optical parameters of aerosol over land surface from POLDER data[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(7): 1772-1777.  
孙 夏, 赵慧洁. 基于 POLDER 数据反演陆地上空气气溶胶光学特性[J]. *光学学报*, 2009, 29(7): 1772-1777.
- 5 Zhao Yunsheng, Huang Fang, Jin Lun, *et al.* Study on polarizing reflectance characteristics of plant simple leaf[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2000, 4(2): 131-135.  
赵云升, 黄 方, 金 伦, 等. 植物单叶偏振反射特征研究[J]. *遥感学报*, 2000, 4(2): 131-135.
- 6 Träger U, Homberg U. Polarization-sensitive descending neurons in the locust: connecting the brain to thoracic ganglia[J]. *J Neurosci*, 2011, 31(6): 2238-2247.
- 7 Higashi Y, Tokuami H, Kimura H. Robot navigation using polarized light sensor without crossed-analyzer[J]. 6th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics, 2011, 110.
- 8 Lambrinos D, Möller R, Labhart T, *et al.* A mobile robot employing insect strategies for navigation[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2000, 30(1): 39-64.
- 9 Cui Wenyu, Zhang Yunjie, Yi Weining, *et al.* System design and implementation of multi-angle polarimeter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(8): 0828003.  
崔文煜, 张运杰, 易维宁, 等. 多角度偏振辐射计系统设计与实现[J]. *光学学报*, 2012, 32(8): 0828003.
- 10 Wang Wei, Chu Jinkui, Cui Yan, *et al.* Modeling of atmospheric polarization pattern based on vector radiative transfer[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(5): 0513001.  
王 威, 褚金奎, 崔 岩, 等. 基于矢量辐射传输的大气偏振建模[J]. *中国激光*, 2013, 40(5): 0513001.
- 11 Zhao K C, Chu J K, Wang T C, *et al.* A novel angle algorithm of polarization sensor for navigation[J]. *IEEE T Instrum Meas*, 2009, 58(8): 2791-2796.
- 12 Chu Jinkui, Chen Wenjing, Wang Hongqing, *et al.* Mobile robot navigation tests with polarization sensors[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(10): 2419-2426.  
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): 2421-2426.
- 13 Zhao Kaichun, Chu Jinkui, Zhang Qiang, *et al.* A novel polarization angle sensor and error compensation algorithm for navigation[J]. *Journal of Astronautics*, 2009, 30(2): 503-509.  
赵开春, 褚金奎, 张 强, 等. 新型仿生偏振测角传感器及角度误差补偿算法[J]. *宇航学报*, 2009, 30(2): 503-509.
- 14 Tian Liu, Gao Juan, Fan Zhiguo, *et al.* The method of the navigation direction angle calculation with the distribution of the atmosphere polarization pattern[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2012, 40(1): 141-146.  
田 柳, 高 隼, 范之国, 等. 基于大气偏振模式分布规律的导航方向角计算方法[J]. *电子学报*, 2012, 40(1): 141-146.
- 15 高 隼, 范之国, 王 昕, 等. 基于大气偏振模式空间特征的三维姿态获取方法: CN102589544A[P]. 2012-07-18.
- 16 Chen Wei, Li Jianhong. Optical performance analysis for parabolic-trough focusing collector with several tracking modes[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2003, 24(4): 477-482.  
陈 维, 李戡洪. 抛物柱面聚焦的几种跟踪方式的光学性能分析[J]. *太阳能学报*, 2003, 24(4): 477-482.
- 17 Zhang Dongyu, Ning Duo, Han Jiangzhou, *et al.* Single-dimension dragging and double-dimensions tracing intelligent solar tracking system[J]. *Control & Automation*, 2006, 22(16): 158-160.  
张东煜, 宁 铎, 韩讲周, 等. 一维驱动二维跟踪太阳自动跟踪系统设计[J]. *微计算机信息*, 2006, 22(16): 158-160.
- 18 Wang X H, Wang J P, Zhang C W. Research of an omnibearing sun locating method with fisheye picture based on transform domain algorithm[C]. *Proceedings of International Conference on Intelligent Computing*, 2006: 1169-1174.
- 19 Zhang Cheng, Wang Jiaye. 3D model reconstruction from fisheye images and virtual walk-through[J]. *Journal of*

- Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2004, 11(1): 79-84.
- 张 诚, 汪嘉业. 对鱼眼照片场景实现三维重建和虚拟浏览[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2004, 11(1): 79-84.
- 20 Jia Yunde, Lu Hongjing, Liu Wanchun. Fish lens camera stereo vision for dense depth map recovery[J]. Chinese Journal of Computers, 2000, 23(12): 1332-1336.
- 贾云得, 吕宏静, 刘万春. 鱼眼变形立体图像恢复稠密深度图的方法[J]. 计算机学报, 2000, 23(12): 1332-1336.
- 21 Zhang Nan, Wang Fei, Liu Jun, *et al.* Spatial distribution polarization pattern acquisition based on polarization imaging technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(9): 091101.
- 张 楠, 王 飞, 刘 俊, 等. 基于偏振成像技术的空间大气偏振模式分布获取[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(9): 091101.
- 22 Wang Ziqian, Zhang Xudong, Jin Haihong, *et al.* All sky turbid atmospheric polarization pattern modeling based on Monte Carlo method[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(10): 1013001.
- 王子谦, 张旭东, 金海红, 等. 基于 Monte Carlo 方法的混浊大气偏振模式全天域建模[J]. 中国激光, 2014, 41(10): 1013001.
- 23 Ji Eryou, Gu Guo hua, Bo Lianfa, *et al.* Three-channel polarization imaging systems and system error correction method [J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(1): 0111002.
- 季尔优, 顾国华, 柏连发, 等. 三通道偏振成像系统及系统误差校正方法[J]. 光子学报, 2014, 43(1): 0111002.
- 24 Solem J E. Programming computer vision with python[M]. Beijing: The People's Posts and Telecommunications Press, 2014: 137-139.
- 索利姆. Python 计算机视觉编程[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2014: 137-139.