

# 基于 Hough 变换的太阳子午线提取方法

崔岩\*, 周鑫昌, 刘亚飞, 刘康, 褚金奎

大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024

**摘要** 针对测试环境下偏振光分布模式复杂, 特征点发散造成最小二乘法拟合太阳子午线时精度降低的问题, 提出了一种基于 Hough 变换的太阳子午线提取方法。搭建了偏振光分布模式测试系统, 利用 Stokes 矢量原理得到偏振光方位角分布模式, 通过设置特征阈值获取太阳子午线特征区域。使用 Canny 算子检测特征区域边缘, 运用 Hough 变换检测边缘直线方向, 结合对称性分布关系获取太阳子午线方位角。通过测试实验, 对比分析了所提方法与最小二乘法的测量精确度。实验结果表明, 在特征阈值为  $3 < N \leq 6$  时, 所提方法的测量精确度高于最小二乘法, 测量正确度提升了 5.53%~87.84%, 测量精密度提升了 1.81%~92.68%。

**关键词** 大气光学; 航向角; 太阳子午线; Hough 变换; 最小二乘法

中图分类号 P427.1; TP391

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.1701002

## Solar Meridian Extraction Method Based on Hough Transformation

Cui Yan\*, Zhou Xinchang, Liu Yafei, Liu Kang, Chu Jinkui

Key Laboratory for Precision and Non-Traditional Machining Technology, Ministry of Education,  
Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China

**Abstract** Regarding the problem that the distribution pattern of polarized light is complex in test environments and the divergence of feature points reduces the accuracy of fitting solar meridian using the least square method, we propose a solar meridian extraction method based on Hough transformation. First, we build a polarized light distribution pattern test system and obtain the polarization azimuth distribution model based on the Stokes vector principle. By setting the feature threshold, we obtain the feature area of the solar meridian. Then, we detect the feature area edge and direction of the edge lines using the Canny operator and Hough transformation, respectively. Next, we calculate the solar meridian azimuth by combining the symmetry distribution relationship. Through the test experiment, we compare the measurement accuracy of the proposed method with that of the least square method. The experimental results show that the proposed method has higher measurement accuracy than the least square method. When the feature threshold is  $3 < N \leq 6$ , the measurement correctness and measurement precision of the proposed method improved by 5.53%-87.84% and 1.81%-92.68%, respectively, compared with the least square method.

**Key words** atmospheric optics; heading angle; solar meridian; Hough transformation; least square method

**OCIS codes** 010.1290; 290.5855; 010.1310

## 1 引 言

一些昆虫在觅食过程中表现出的优异导航能力<sup>[1-2]</sup>引起了众多研究人员的关注。研究人员对此进行了大量的研究, 发现这是一种基于天空偏振光分布模式的导航方法, 并有研究表明, 天空偏振光分布模式与太阳的位置密切相关, 且以太阳子午线为中心线对称分布。太阳子午线能够作为偏振光导航

方法中的导航参考线<sup>[3]</sup>, 其提取精度会关系到航向角获取的准确性。因此高精度的太阳子午线提取方法是偏振光导航的核心问题之一。

Hegedüs 等<sup>[4-5]</sup>分析了在不同天气条件下的天空偏振光分布模式规律, 为偏振光导航信息的获取奠定了理论基础。田柳等<sup>[6-7]</sup>提出了一种利用太阳子午线获取航向角的方法。王飞等<sup>[8]</sup>提出了一种通过偏振光信息确定理想大气下太阳空间位置的方

收稿日期: 2020-03-23; 修回日期: 2020-04-16; 录用日期: 2020-06-01

基金项目: 国家自然科学基金(51675076)

\* E-mail: yanc@dlut.edu.cn

法。Ma 等<sup>[9]</sup>评估了偏振光方位角分布模式的精度并提出了一种太阳子午线提取方法。任建斌等<sup>[10]</sup>利用聚类分析确定了太阳子午线的位置。Lu 等<sup>[11]</sup>通过仿真实验,得到理想条件下太阳子午线上的  $E$  矢量角度为  $90^\circ$ ,并结合 Hough 变换算法提取出了太阳子午线。范之国等<sup>[12]</sup>将太阳的空间位置作为特征点,提出了一种利用偏振光分布模式获取载体三维姿态信息的方法。Zhao 等<sup>[13]</sup>通过实验验证了不同天气条件下对称性获取太阳子午线的可靠性。Guan 等<sup>[14]</sup>提出了一种动态获取太阳子午线方向的方法,并通过户外动态实验证明了该方法的有效性。

在测试环境下,针对最小二乘法因特征点发散而在拟合太阳子午线时精度降低的问题,本文提出了一种基于 Hough 变换的太阳子午线提取方法。

基于 Stokes 矢量原理,利用成像式偏振光测试系统获取偏振光方位角分布模式,运用所提方法提取太阳子午线方位角,并对所提方法与最小二乘法的提取精度进行对比,结果证明了所提方法在测试环境下的优越性。

## 2 基本原理

基于 Hough 变换的太阳子午线提取方法的具体步骤如图 1 所示。拍摄  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  三个偏振方向的天空原始图;基于 Stokes 矢量原理,获取偏振光方位角分布模式;设置特征阈值得到太阳子午线特征区域;使用 Canny 算子检测特征区域的边缘;运用 Hough 变换检测边缘直线方向,并结合对称性分布关系获取太阳子午线方位角。

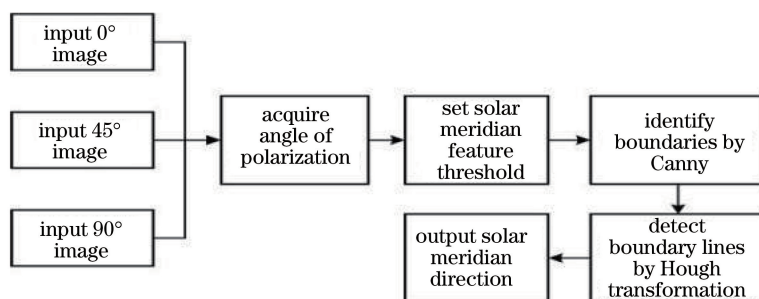


图 1 基于 Hough 变换的太阳子午线提取方法流程图

Fig. 1 Flow chart of extraction method of solar meridian based on Hough transformation

### 2.1 Hough 变换原理

Hough 变换是一种能够提取图像中直线特征的技术,主要通过投票算法来检测直线特征,原理如图 2 所示。图 2(a)所示的直角坐标系中的直线可用参数方程  $\rho = x \cos \theta + y \sin \theta$  表示,该直线在图 2(b)所示的极坐标系中可用点  $P_1(\theta, \rho)$  表示。在极坐标系中存在着多个累加单元,每个累加单元上对

应一个累加器且初始值为 0,当正弦曲线经过累加单元一次,则对应累加单元的累加器数值会加 1。直线上  $X_1, X_2, X_3$  三个点转换到极坐标系中为 3 条分别对应的正弦曲线,点  $P_1(\theta, \rho)$  为交点,这表示向该交点所在的累加单元投票 3 次,则对应的累加器数值增加 3。Hough 变换是通过查找极坐标系中各累加单元的累加器峰值来实现检测直线特征的。

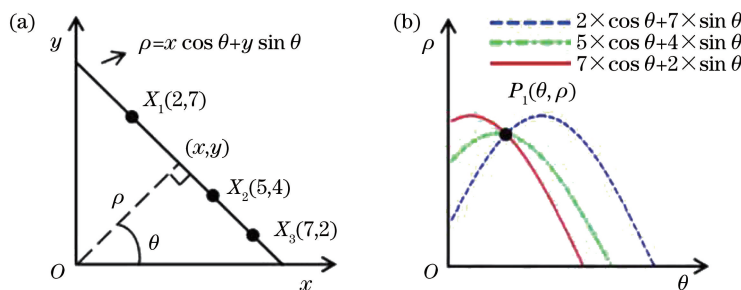


图 2 Hough 变换原理。(a)直角坐标系;(b)极坐标系

Fig. 2 Principle of Hough transformation. (a) Rectangular coordinate system; (b) polar coordinate system

### 2.2 太阳子午线提取方法原理

#### 2.2.1 太阳子午线特征阈值定义

天空偏振光方位角分布模式关于太阳子午线呈

对称分布<sup>[15]</sup>,如图 3 所示,通过颜色区分不同的偏振方位角值,正负号代表方向。利用太阳子午线特征阈值  $N$  可以得到太阳子午线特征区域,特征阈值

$N$  的取值范围为  $N \in (0, 90)$ , 太阳子午线特征区域是偏振方位角值为  $[-90, -90 + N] \cup [90 - N, 90]$  所形成的区域。

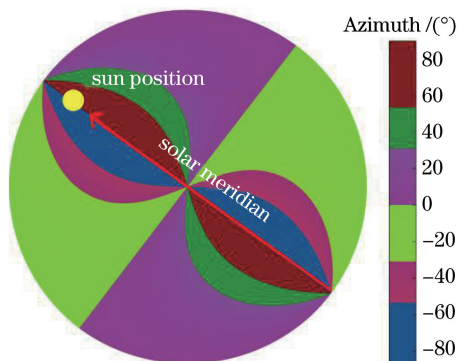


图 3 天空偏振光方位角分布模式

Fig. 3 Azimuth distribution model of sky polarized light

### 2.2.2 太阳子午线特征区域边缘检测

太阳子午线特征区域具有明显的边缘, 在图像处理中边缘表现为灰度值显著突变。根据课题组的研究经验<sup>[16]</sup>, 与 Sobel 算子、Roberts 算子及 Prewitt 算子相比, Canny 算子在检测太阳子午线特征区域边缘时效果更佳。图 4 表示太阳子午线特征区域经灰度化处理之后, 使用 Canny 算子检测边缘的结果。

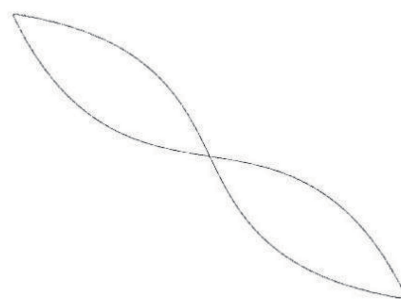


图 4 Canny 算子的边缘检测结果

Fig. 4 Edge detection result of Canny operator

### 2.2.3 太阳子午线方位角计算

在经过 Canny 算子处理后, 太阳子午线特征区域的局部边缘表现出了直线特征, 图 5 表示 Hough 变换检测边缘直线特征的结果。

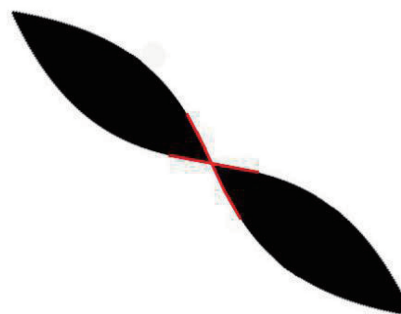


图 5 Hough 变换检测边缘直线特征的结果

Fig. 5 Result of edge line feature detected by Hough transformation

系, 通过加权平均法计算出太阳子午线方位角。

## 2.3 仿真实验与分析

### 2.3.1 太阳子午线特征区域的仿真分析

设置不同的特征阈值  $N$  能够获取不同的太阳子午线特征区域, 以  $N = 3$  代表特征阈值范围为  $1 < N \leq 3$  时的太阳子午线特征区域, 以  $N = 6$  代表特征阈值范围为  $3 < N \leq 6$  时的太阳子午线特征区域, 以此类推, 得到了图 6 所示的在不同特征阈值范围下的太阳子午线特征区域。

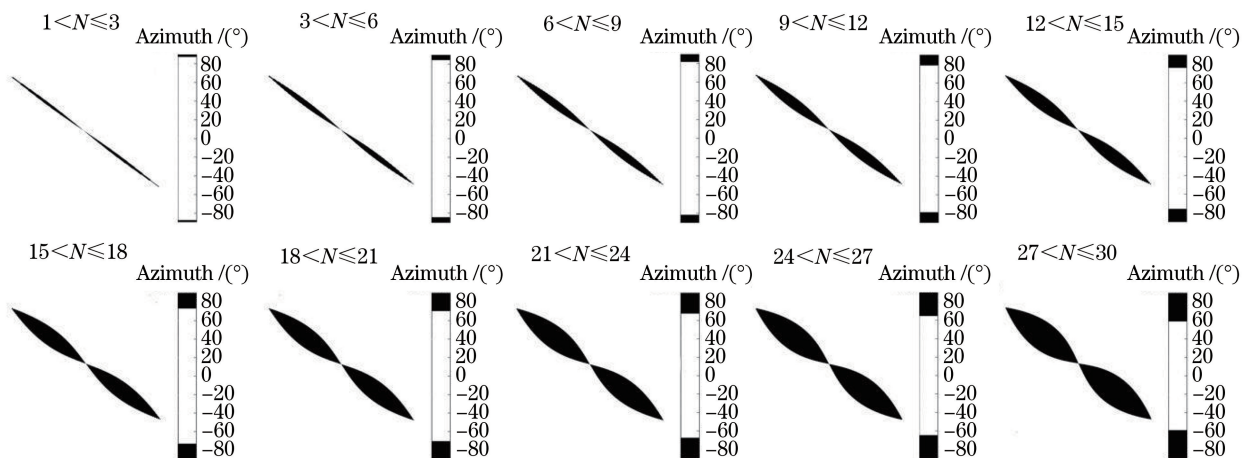


图 6 不同阈值范围下的太阳子午线特征区域

Fig. 6 Feature area of solar meridian in different threshold ranges

由图 6 可知,当特征阈值  $N$  较小时,太阳子午线特征区域较小且对称性分布关系不明显,因此  $N$  不宜过小。当特征阈值  $N$  较大时,太阳子午线特征区域变大,但引入了更多的噪声,影响了提取精度。因此所提方法选取特征阈值范围  $1 < N \leq 15$  进行分析。

### 2.3.2 噪声干扰仿真分析

基于 Rayleigh 散射理论,对 2020 年 1 月 14 日大连(121°38' E, 38°54' N)15:00 时的天空偏振光

方位角分布模式进行仿真,根据天文年历计算得到太阳子午线方位角理论值为 47.067°,设置特征阈值  $N=12$ ,得到了太阳子午线特征区域。在测试环境下,不良光照和高温会使测试图像产生噪声,利用高斯噪声模拟了噪声干扰,得到了具有不同信噪比(SNR)的太阳子午线特征区域,结果如图 7(a)所示。利用所提方法和最小二乘法分别对提取的太阳子午线进行仿真,结果如图 7(b)、(c)所示,方位角计算结果对比如表 1 所示。

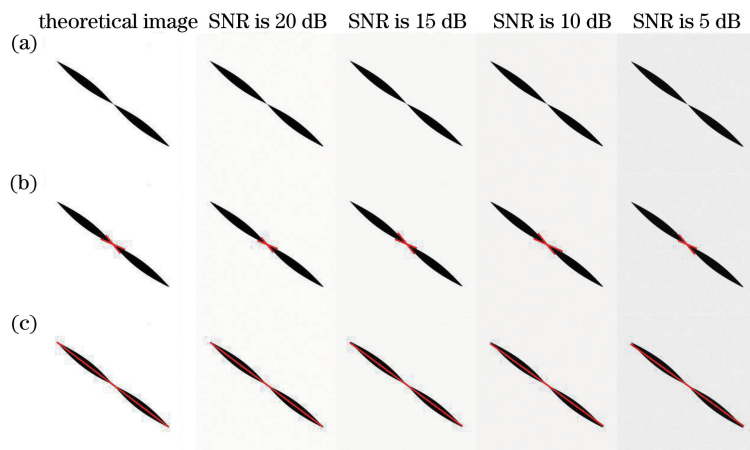


图 7 不同方法的仿真结果。(a)原图;(b)所提方法;(c)最小二乘法

Fig. 7 Simulation results of different methods. (a) Original image; (b) proposed method; (c) least square method

表 1 方位角计算结果对比

Table 1 Comparison of azimuth calculation results

Method	Theoretical value	SNR is 20 dB	SNR is 15 dB	SNR is 10 dB	SNR is 5 dB
Proposed method	47.089°	47.090°	47.088°	47.091°	47.096°
Least square method	47.038°	46.783°	46.513°	46.125°	45.618°

由表 1 可知,随着信噪比不断降低,最小二乘法与理论值偏离范围为 0.029°~1.449°,偏离程度逐渐增大。所提方法与理论值偏离范围为 0.021°~0.029°,偏离程度相对较小。由仿真结果可知,在受到相同噪声干扰时,所提方法抵抗噪声干扰的效果更优。

## 3 太阳子午线提取方法测试

### 3.1 搭建天空偏振光分布模式测试系统

成像式天空偏振光分布模式测试系统<sup>[17-18]</sup>由线性偏振片、鱼镜头、照相机、三脚架及笔记本电脑组成。通过旋转线性偏振片获取 0°,45°,90°三个偏振方向的天空原始图,基于 Stokes 矢量描述偏振光的原理<sup>[19]</sup>,利用 Matlab 软件进行处理可以得到真实测试环境下的天空偏振光分布模式。

### 3.2 测试结果与分析

采集了 7 组测试样本进行分析,每组测试样本

的测试时间为 15:00~16:30,采集方式为每隔 15 min 采集一次数据,测试结果如图 8 所示。

在特征阈值范围  $1 < N \leq 15$  下,利用所提方法计算到了太阳子午线方位角的测量值。为了估算测量值与真值的偏离程度,通过天文年历计算到了太阳子午线方位角的理论值,并计算了成像式测试系统的固定误差,修正了每组测试样本的测量值。设每组测试样本在 15:00~16:30 的太阳子午线方位角测量值分别为  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$  及  $x_7$ ,对应的理论值分别为  $x_{10}, x_{20}, x_{30}, x_{40}, x_{50}, x_{60}$  及  $x_{70}$ ,则测试系统的固定误差  $F$  的表达式为

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{i0})}{n}, \quad (1)$$

式中: $n$  为每组测试样本中测量值的数量。利用(1)式可得到测试系统的固定误差  $F$ ,从而修正了每组测试样本的测量值,对测量值与理论值作差,得到每组测试样本的测量值在不同测试时刻下的绝对误差

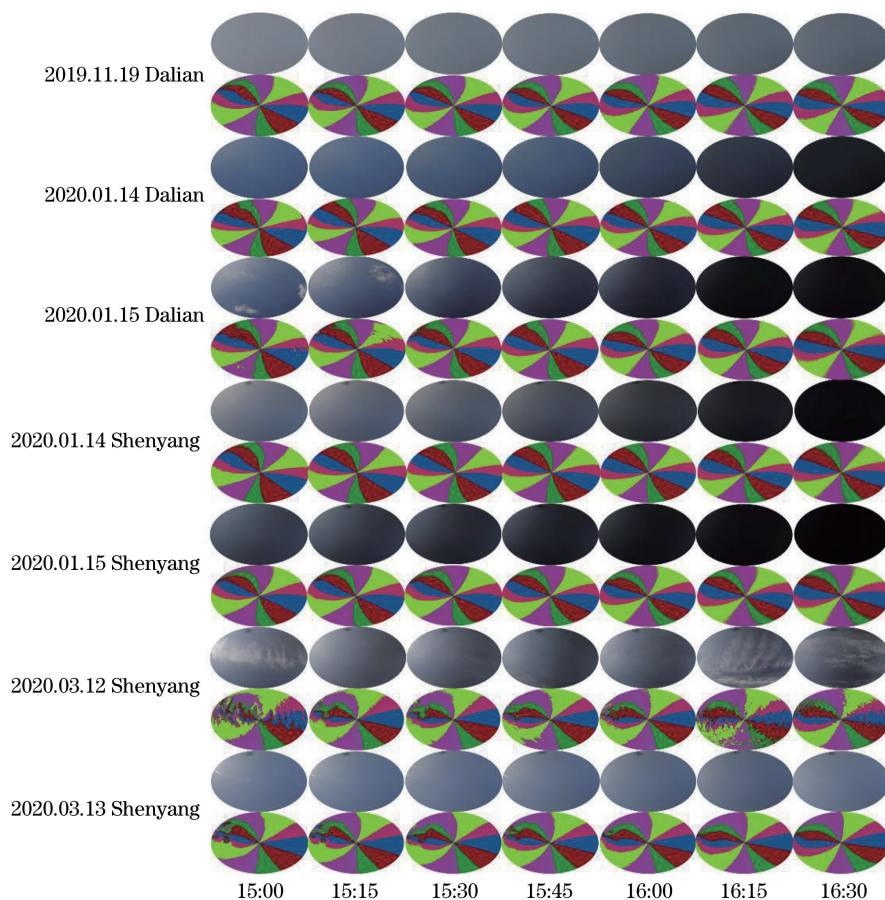


图 8 样本测试结果

Fig. 8 Sample test results

值。7 组测试样本绝对误差值的均值如图 9 所示。

由图 9 可以看出,特征阈值  $N$  对测量值的绝对误差有一定影响。为了对比分析所提方法在 5 组特征阈值  $N$  下的测量精确度,统计分析了 15:00 ~ 16:30 下 7 个测量值的绝对误差,分别计算了每组特征阈值下绝对误差大小的平均值与方差值,结果如图 10 所示。

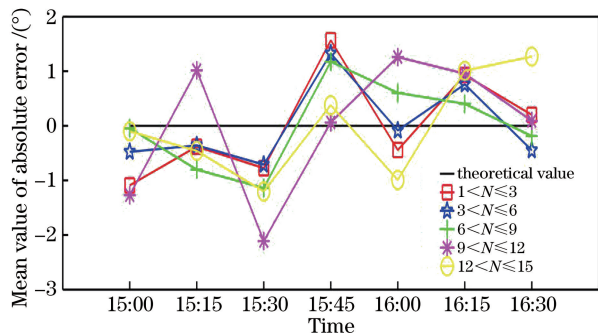


图 9 绝对误差值的均值

Fig. 9 Mean value of absolute error

由图 10 可以看出,相比于其他的特征阈值范围,当特征阈值为  $3 < N \leq 6$  时,平均值最小,这表示

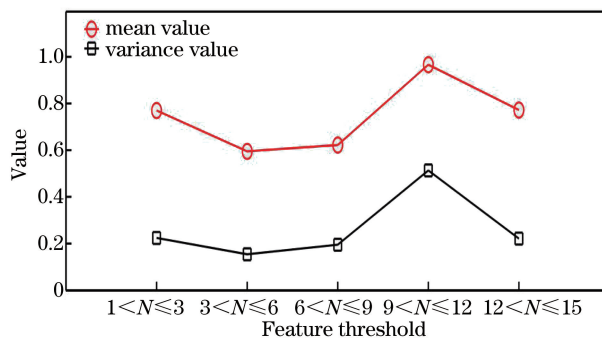


图 10 不同特征阈值下的精确度对比

Fig. 10 Comparison of accuracy under different feature thresholds

测量值偏离理论值最小;此特征阈值下的方差值也最小,表示测量值绝对误差大小与均值间的离散程度最低。可知,所提方法在此特征阈值下的测量精确度最佳。

将最小二乘法的测量值代入(1)式进行计算,修正了每组测试样本中最小二乘法的测量值。在特征阈值为  $3 < N \leq 6$ ,相同测试环境下,对比分析了所提方法与最小二乘法的测量精确度。测量精确度由

测量正确度与测量精密度共同表征。测量正确度指的是测量值与理论值的接近程度；测量精密度指的是多次测量同一对象，测量值之间的一致程度。以7组测试样本绝对误差大小的平均值评估正确度，以7组测试样本绝对误差大小的相对标准偏差评估精密度。平均值  $A$  与相对标准偏差  $R_{SD}$  的计算公式为

$$\begin{cases} A = \frac{\sum_{i=1}^n |E_i|}{n} \\ R_{SD} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (|E_i| - A)^2}{n - 1}} \cdot \frac{1}{A} \end{cases} \quad (2)$$

式中： $E_i$  为第  $i$  个样本测量值的绝对误差。所提方法与最小二乘法关于测量正确度的结果如图 11 所示，关于测量精密度的结果如图 12 所示。

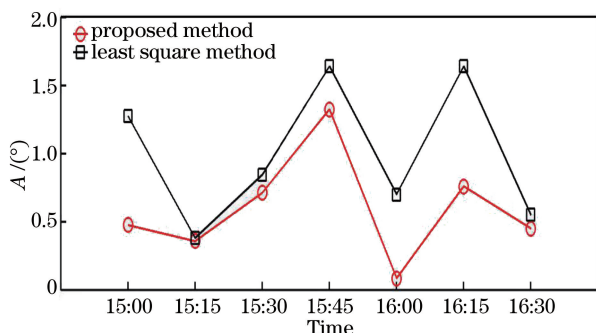


图 11 测量正确度对比

Fig. 11 Comparison of measurement correctness

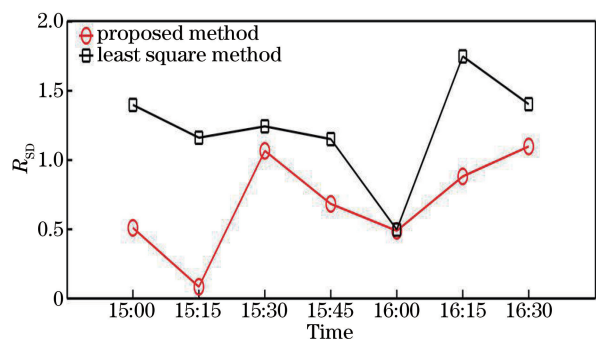


图 12 测量精密度对比

Fig. 12 Comparison of measurement precision

由图 11 可以看出，根据所提方法的测量值计算得到的  $A$  为  $0.085^\circ \sim 1.324^\circ$ ，根据最小二乘法的测量值计算得到的  $A$  为  $0.380^\circ \sim 1.640^\circ$ 。在各测试时刻下，所提方法的测量正确度均高于最小二乘法，利用  $(x_a - x_b) / x_a \times 100\%$  计算正确度相对提升幅度，其中  $x_a$  为最小二乘法的  $A$  值， $x_b$  为所提方法的  $A$  值。根据图 11 数据计算可知，所提方法的测量正确度相

比最小二乘法提升了  $5.53\% \sim 87.84\%$ 。

由图 12 可以看出，根据所提方法的测量值计算得到的  $R_{SD}$  为  $0.084 \sim 1.098$ ，根据最小二乘法的测量值计算得到的  $R_{SD}$  为  $0.497 \sim 1.748$ 。在各测试时刻下，所提方法的测量精密度均高于最小二乘法，根据图 12 数据计算可知，所提方法的测量精密度相比最小二乘法提升了  $1.81\% \sim 92.68\%$ 。

## 4 结 论

提出了基于 Hough 变换的太阳子午线提取方法，利用搭建的成像式偏振光测试系统采集数据，通过与最小二乘法进行对比分析，证明了所提方法在测试环境下的优势。所提方法通过对偏振光方位角分布模式设置特征阈值得到太阳子午线特征区域，利用 Canny 算子检测特征区域边缘，运用 Hough 变换检测边缘直线的方向，结合对称性分布关系获取太阳子午线方位角，有效地提高了太阳子午线的测量正确度。实验结果表明，所提方法在特征阈值为  $3 < N \leq 6$  时，测量正确度高于最小二乘法，测量正确度提升了  $5.53\% \sim 87.84\%$ ，测量精密度提升了  $1.81\% \sim 92.68\%$ 。

## 参 考 文 献

- [1] Dacke M, Nilsson D E, Warrant E J, et al. Built-in polarizers form part of a compass organ in spiders [J]. Nature, 1999, 401(6752): 470-473.
- [2] Muheim R, Phillips J B, Akesson S. Polarized light cues underlie compass calibration in migratory songbirds [J]. Science, 2006, 313(5788): 837-839.
- [3] Yan L, Guan G X, Chen J B, et al. The bionic orientation mechanism in the skylight polarization pattern [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2009, 45(4): 616-620.  
晏磊, 关桂霞, 陈家斌, 等. 基于天空偏振光分布模式的仿生导航定向机理初探 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 2009, 45(4): 616-620.
- [4] Hegedüs R, Akesson S, Horváth G. Polarization patterns of thick clouds: overcast skies have distribution of the angle of polarization similar to that of clear skies [J]. Journal of the Optical Society of America A, 2007, 24(8): 2347-2356.
- [5] Dahlberg A R, Pust N J, Shaw J A. Effects of surface reflectance on skylight polarization measurements at the Mauna Loa Observatory [J]. Optics Express, 2011, 19(17): 16008-16021.
- [6] Tian L, Gao J, Fan Z G, et al. The method of the navigation direction angle calculation with the

- distribution of the atmospheric polarization pattern [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2012, 40(1): 141-146.  
田柳, 高隽, 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.
- [7] Tian L, Gao J, Fan Z G, et al. The method of the navigation direction angle acquisition based on the symmetry detection of the atmosphere polarization mode[J]. *Signal Processing*, 2011, 27(11): 1701-1705.  
田柳, 高隽, 范之国, 等. 基于大气偏振模式对称性检测的航向角获取方法 [J]. *信号处理*, 2011, 27(11): 1701-1705.
- [8] Wang F, Tang J, Ren J B, et al. Optimized calculation of solar spatial position with the Rayleigh atmosphere polarization pattern[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(12): 12011002.  
王飞, 唐军, 任建斌, 等. 基于 Rayleigh 大气偏振模式的太阳空间位置优化计算 [J]. *光子学报*, 2014, 43(12): 12011002.
- [9] Ma T, Hu X P, Zhang L L, et al. An evaluation of skylight polarization patterns for navigation [J]. *Sensors*, 2015, 15(3): 5895-5913.
- [10] Ren J B, Liu J, Tang J, et al. Skylight polarization pattern-based approach to the location of the sun and solar meridian[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(7): 0701002.  
任建斌, 刘俊, 唐军, 等. 利用大气偏振模式确定太阳和太阳子午线空间位置法 [J]. *光子学报*, 2015, 44(7): 0701002.
- [11] Lu H, Zhao K C, You Z, et al. Angle algorithm based on Hough transform for imaging polarization navigation sensor[J]. *Optics Express*, 2015, 23(6): 7248-7262.
- [12] Fan Z G, Chen M L, Wang B, et al. Three-dimensional attitude information obtained by the skylight polarization pattern[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(6): 1248-1256.  
范之国, 陈曼丽, 王波, 等. 基于大气偏振模式的三维姿态信息获取 [J]. *光学精密工程*, 2016, 24(6): 1248-1256.
- [13] Zhao H J, Xu W J, Zhang Y, et al. 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.
- [14] Guan L, Liu S, Chu J K, et al. A novel algorithm for estimating the relative rotation angle of solar azimuth through single-pixel rings from polar coordinate transformation for imaging polarization navigation sensors[J]. *Optik*, 2019, 178: 868-878.
- [15] Guan G X, Yan L, Chen J B, et al. Analysing dynamic property of skylight polarization pattern graph [J]. *Computer Applications and Software*, 2009, 26(12): 179-181.  
关桂霞, 晏磊, 陈家斌, 等. 天空偏振模式图动态特性分析 [J]. *计算机应用与软件*, 2009, 26(12): 179-181.
- [16] Xie N. Measurement and image study of sky polarization mode in the East China Sea[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018: 37-39.  
谢楠. 东海海域天空偏振模式测试与图像研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2018: 37-39.
- [17] Cui Y, Zhang X G, Zhou X C, et al. Effect of aerosol on polarization distribution of sky light[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(6): 0601001.  
崔岩, 张西光, 周鑫昌, 等. 气溶胶对天空光偏振分布的影响 [J]. *光学学报*, 2019, 39(6): 0601001.
- [18] Cui Y, Zhao J Y, Guan L, et al. Simulation and measurement of skylight polarization distribution in Yellow Sea[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(10): 1001004.  
崔岩, 赵金勇, 关乐, 等. 黄海海域天空光偏振分布仿真与测试 [J]. *光学学报*, 2017, 37(10): 1001004.
- [19] Cui Y, Chen X L, Chu J K, et al. Study on polarization pattern of full moonlight in clear sky[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(10): 1012002.  
崔岩, 陈小龙, 褚金奎, 等. 晴朗天气下满月偏振模式的研究 [J]. *光学学报*, 2014, 34(10): 1012002.