

doi:10.3788/gzxb20154407.0701002

利用大气偏振模式确定太阳和太阳子午线 空间位置法

任建斌, 刘俊, 唐军, 王晨光, 王飞, 张楠

(中北大学 电子测试技术国家重点实验室; 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 太原 030051)

摘要: 为了满足偏振光导航中对天空特征点位置信息的需求, 提出一种基于 Rayleigh 大气偏振模式的太阳和太阳子午线空间位置的计算方法. 首先分别利用瑞利单次散射理论和偏振分析仪重建了理论和实测大气偏振模式, 再根据大气偏振分布模式的特点, 对所采集的偏振度数据和 E -矢量数据进行聚类分析, 利用偏振度数据确定太阳位置, E -矢量数据确定太阳子午线位置, 将求取太阳和太阳子午线空间位置的问题转化为确定相应类中心的问题. 最后对所提方法分别就大气偏振的理论模式和实测模式进行实验分析, 与最小二乘法利用偏振数据反推太阳位置法相比, 该方法有效地利用了偏振模式整体分布的稳定性特点, 可以通过采集大范围偏振信息获取较准确的空间显著特征点位置, 得到较好的实测数据处理结果.

关键词: 大气光学; 大气偏振模式; Rayleigh 散射; 聚类分析; 太阳位置; 太阳子午线; 导航

中图分类号: P401; Q241.2

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)07-0701002-6

Skylight Polarization Pattern-based Approach to the Location of the Sun and Solar Meridian

REN Jian-bin, LIU Jun, TANG Jun, WANG Chen-guang, WANG Fei, ZHANG Nan

(Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement; Science and Technology on Electronic Test and Measurement Laboratory, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: An approach to the location of the sun and meridian by means of the Rayleigh skylight polarization pattern was introduced, given that the polarized-light-aided navigation relies heavily on the position of some astronomical markers. Combining with the theoretical analysis based on the single Rayleigh scattering theory, the skylight polarization pattern was practically detected using the polarization analyzer. Then, with respect to the distribution stability of the polarization pattern, the information collected was clustered to locate the position of the sun with the polarization degree data, and that of the solar meridian with the E -vector data respectively. In this way, the location problem was changed to figure out the clustering center. Finally, the approach was tested through experiments on the theoretical and practical detected polarization pattern. Compared with the way of obtaining the solar location by the least square method, this approach can effectively take use of the stable distribution of the polarization pattern, locate the accurate position of astronomical marker based on the polarization information detected on a large scale, and skillfully process the captured data.

Key words: Atmospheric optics; Skylight polarization pattern; Rayleigh scattering; Clustering analysis; Position of the sun; Solar meridian; Navigation

OCIS Codes: 010.1290; 290.1310; 290.5855; 290.5870

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目子课题(No. 2012CB723404)、山西省高等学校优秀青年学术带头人支持计划、国家自然科学基金杰出青年基金(No. 51225504)和面上项目(No. 61171056)资助

第一作者: 任建斌(1977-), 男, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向为偏振光导航信息处理. Email: renjianbin@nuc.edu.cn

导师(通讯作者): 刘俊(1968-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为微纳米技术、惯性测试技术及仿生导航. Email: liujun@nuc.edu.cn

收稿日期: 2015-01-14; **录用日期:** 2015-04-24

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

近年来,利用大气偏振模式进行的仿生导航成为导航领域研究的热点^[1-2].大气偏振模式是由于空气中分子、粒子的散射作用而形成的具有稳定分布的自然现象^[3].研究表明,许多昆虫如沙蚁、蜜蜂、蝗虫、蟋蟀等都可以利用大气偏振模式实现每日的外出觅食导航^[4-6].经过近几十年的生物行为学和解剖学研究,人们已经掌握昆虫偏振感知和导航行为的生物机理.在此基础上,已研制出人工偏振传感器和导航法并将之应用到机器人航向角的确定中^[7-8],实现对机器人的精准导航.因其在短时间内很难人为破坏和干扰,特别适合弱/无卫星信号的陌生环境下的自主导航,因此,偏振光导航越来越受到各方面的关注,具有广泛的应用前景^[9].

目前,偏振光导航技术主要采用六通道偏振光传感器,采集单点偏振信息,解算航向角^[10].导航准确度主要依赖于传感器的准确度.当偏振信息受到干扰(如雾霾天气或地面强反射)时,测量准确度大大降低.为解决这个问题,科研人员正考虑用大范围偏振信息及稳定分布的偏振模式作为导航参考,偏振传感器研究也朝着阵列化发展.研究发现,昆虫导航中应用的不是天空单点的偏振信息,而是整个(或部分)具有稳定分布的偏振模式,从中提取太阳方位信息和太阳子午线与体轴夹角,用以确定航向^[11-12].因此,太阳和太阳子午线位置信息的提取是偏振光导航应用的关键^[13].

本文从大气偏振模式产生的理论模型出发,利用大气偏振模式稳定分布的特征,对大范围采集的偏振度和 E -矢量数据进行聚类分析,将求解天空特征空间位置的问题转化为求取类中心的问题,利用迭代优化法确定最优解,并通过理论数据仿真和实测数据实验验证了该方法的有效性.

1 Rayleigh 大气偏振模式

1.1 大气偏振模式

发自太阳的光线在进入地球大气层之前是不具有偏振特性的自然光,即其光矢量的振动在沿垂直于传播方向的平面内朝各个可能的方向.进入大气层后,由于空气中分子、粒子的散射作用,部分光线光矢量的振动以某种固定的形态,形成了偏振光.研究表明,空气中由于粒子的散射作用而形成的偏振光主要是线偏振光^[14],大量偏振光和自然光叠加,形成了具有稳定分布模式的偏振态,是地球的自然属性之一,其所蕴含的方向场和强度场信息,可为沙蚁、蜜蜂、蝗虫、蟋蟀等膜翅目昆虫提供可靠的导航信息.

理想情况下的大气偏振模式如图 1 所示,短线的粗细表示偏振强度场的分布模式,短线的方向表示线

偏光的 E -矢量分布模式^[15].在任意观测位置(O 点),天空中大气偏振模式具有相对稳定的特征,存在两条基本的对称线:一条是过太阳(S)和天顶(Z)的太阳-反太阳子午线(SM - ASM),偏振度关于子午线对称分布, E -矢量方向关于子午线逆对称分布;另一条是与太阳角距为 90° 的最大偏振度线,大气偏振模式关于最大偏振度线对称,在对称线所在的位置,偏振度最大,距离偏振度线越远,偏振度越小,太阳子午线附近的偏振度要小于反太阳子午线附近的偏振度.随着太阳的向西运动(大约 $15^\circ/h$),太阳高度角和方位角不断变化,对称线和整个大气偏振模式以天顶为中心旋转,但大气偏振模式始终保持对称性^[16].

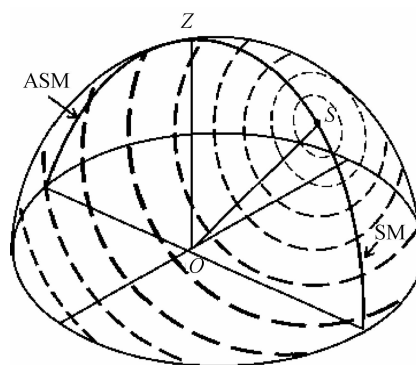


图 1 大气偏振模式

Fig. 1 Pattern of polarized light in the daylight sky

1.2 Rayleigh 大气偏振模式

利用大气光学传输特性能够模拟出不同天气条件下的大气偏振模式.通常认为在天气晴好时偏振模式主要是由瑞利单次散射形成的,而在其它天气条件下,大气偏振模式具有多次米散射特征.利用瑞利单次散射理论建立的晴朗天空下大气偏振模式见图 2.根据瑞利散射理论^[3,17],当太阳坐标为 $S(1, \theta_s, \varphi_s)$,天空半球上任一点 $P(1, \theta, \varphi)$ 处的偏振度为

$$P = P_{\max} \sin^2 \gamma / (1 + \cos^2 \gamma) \quad (1)$$

式中, P_{\max} 表示最大偏振度(理论值为 1,晴朗天空时约 0.7), γ 为入射光的散射角,满足

$$\cos \gamma = \sin \theta_s \sin \theta \cos(\varphi_s - \varphi) + \cos \theta \cos \theta_s \quad (2)$$

E -矢量方向(即电场的振动方向与测量点所在的当地子午线夹角)为

$$\chi = \arctan \frac{\cos \theta \cos \theta_s - \sin \theta \cos(\varphi - \varphi_s) \sin \theta_s}{\sin(\varphi - \varphi_s) \sin \theta_s} \quad (3)$$

它表示偏振模式的方向场.

以观测点为原点,按右手规则建立东北天坐标系,被测点 P 的高度角 θ 取值范围为 $-90^\circ \sim 90^\circ$,由地平圈向天顶方向为正;方位角 φ 的取值范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$,以正北方向为起点,顺时针方向为正.太阳高度角 θ_s 和方位角 φ_s 定义及取值范围类同.通过 Matlab 软件对计算数据仿真,建立了晴朗天空下的大气偏振模式(图 2;太原,2014 年 3 月 17 日上午 8:30).图 2(a)、(b)分

别表示偏振度(DOP, Degree of Polarization)分布的三维和二维投影模式,图 2(c)、(d)分别表示偏振角(AOP, Angle of Polarization)分布的三维和二维投影

模式.从图中可以明显分辨出太阳、太阳子午线、最大偏振度线及相应的对称模式.

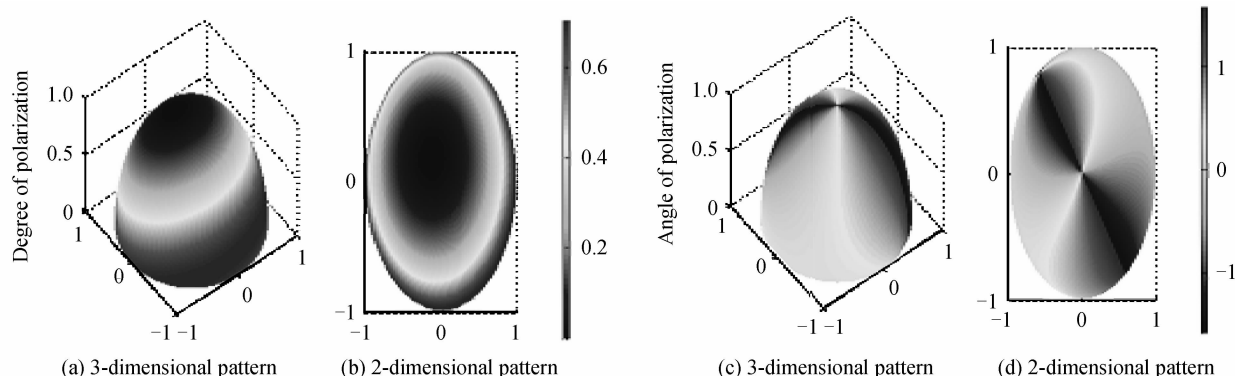


图 2 理论大气偏振模式

Fig. 2 Theoretical skylight polarization pattern

1.3 实测大气偏振模式

为了获取真实大气偏振模式,利用偏振分析仪(型号:PAX5710VIS-T)和转台搭建了检测平台(图 3),逐层扫描天空半球,测量每个空间位置上的偏振信息,转

台初始位置的校准和扫描角度范围及方向与理论仿真的过程一致.

测量中,设置测量点高度角 θ 从 0° 到 90° ,方位角 φ 从 0° 到 360° ,每隔 0.5° 记录一次(整个持续过程大约两分钟).然后将所采集的数据传输到个人电脑,利用 Matlab 软件按东北天坐标系重建出实际大气偏振模式(图 4:太原,2014 年 3 月 20 日上午 9:30).

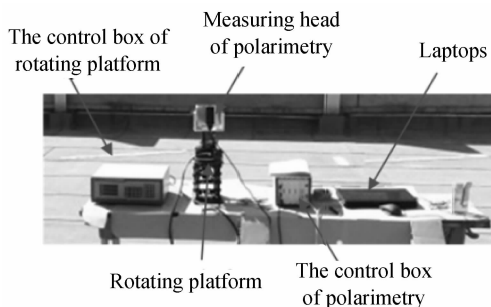


图 3 大气偏振模式的测量系统

Fig. 3 Measurement of skylight polarization pattern

图 4(a)、(b)分别表示偏振度分布的三维和二维投影模式,图 4(c)、(d)分别表示偏振角分布的三维和二维投影模式.由于检测过程中,太阳方向上直射光强过大,使得该方向上测量到的数据出现了偏差,重建出来的偏振模式中太阳位置不明显,但太阳子午线、最大偏振度线及相应的对称模式依旧清晰可见.

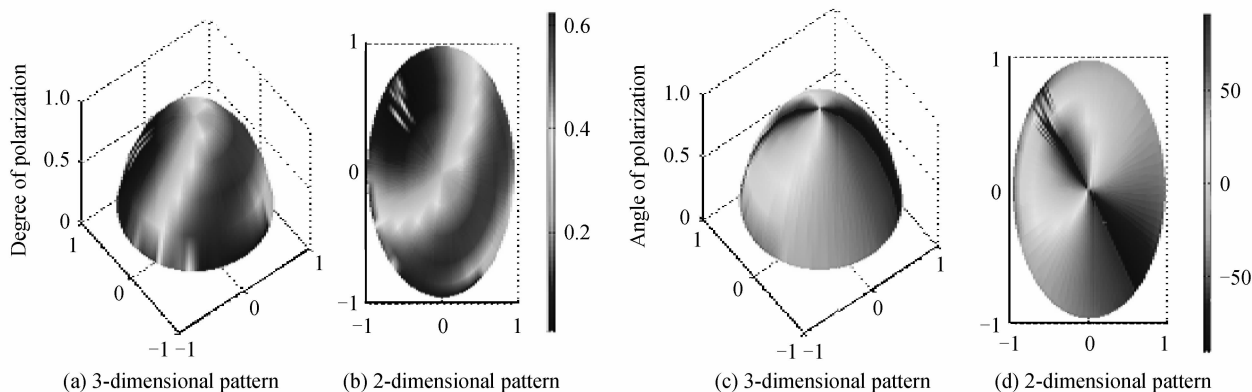


图 4 实测大气偏振模式

Fig. 4 Actually detected skylight polarization pattern

2 太阳及太阳子午线的聚类分析

获取到稳定分布的大气偏振模式后,如何从中提取出准确的太阳位置和太阳子午线位置信息是利用其实现导航的关键.本节在分析偏振模式特点的基础上,

将确定空间位置的问题转化为求取相应类中心的问题,分别对所采集的偏振度和 E -矢量数据进行聚类,将类中心作为所求的空间位置.

2.1 模糊 C-均值聚类

模糊 C-均值聚类是利用模糊集理论对数据进行

类别划分,是分析数据内部结构的一种常用的方法.它将 N 个数据点 $\{x_1, x_2 \dots x_N\}$ 分成 k 类,依据数据点到类中心距离最小、隶属度最大原则,利用迭代优化算法,最小化目标函数,即

$$J = \sum_{v=1}^k \sum_{i=1}^n (\mu_{iv})^m (d_{iv})^2 \quad (4)$$

式中, d_{iv} 为第 i 个数据点到第 v 类中心的距离, μ_{iv} 为数据点 x_i 属于第 v 类的隶属度.在此划分下,第 v 类的类中心为

$$p_v = \frac{\sum_{i=1}^N (\mu_{iv})^m x_i}{\sum_{i=1}^N (\mu_{iv})^m} \quad v=1, 2 \dots k \quad (5)$$

考虑到大气偏振模式的规律性,即(a)太阳位置偏振度为零,偏振度随散射角 γ 的增大而增大;(b)太阳子午线上 E -矢量方向水平(即电场振动方向与当地子午线夹角 $\chi=90^\circ$).将所采集到的数据中偏振度接近于零的数据 $P_i = \text{DOP}(S, \theta_i, \varphi_i), i=1, 2, \dots, N$ 和 E -矢量振动接近水平方向的数据点 $\chi_i = \text{AOP}(S, \theta_i, \varphi_i), i=1, 2, \dots, N$ 分别进行聚类,确定类中心,作为所求的太阳位置和太阳子午线的位置.

2.2 太阳位置的确定

太阳作为天空最显著的特征点,在导航应用中具有极其重要的地位.在大气偏振模式的稳定分布中,太阳具有光强最强、偏振度为零和 E -矢量方向水平的特征.本文将偏振度作为数据聚类依据,分析可知,太阳位置的偏振度为零,并且偏振度随着空间位置(散射角逐渐增大)以同心圆的方式渐增,在与太阳角距 90° 的位置达到最大(最大偏振度线).选取偏振度接近于零的数据点 $p_i = (\theta_i, \varphi_i)$ 作为聚类的对象,将中性点作为孤立噪音点剔除,对所对应数据点的高度角 θ_i 和方位角 φ_i 进行聚类($i=1, 2 \dots N$),求取类中心.

2.3 太阳子午线位置的确定

太阳子午线作为大气偏振模式稳定分布的标志之一,具有明显的特征,其主要特点是沿着太阳子午线,每个点处的 E -矢量振动方向水平(即 $\chi=90^\circ$).基于此特点,将所有满足条件 $\chi_0 < \chi < 90^\circ$ 以及 $-90^\circ < \chi < \chi_1$ (χ_0, χ_1 为设定的阈值)的 E -矢量数据 $\chi_i = (\theta_i, \varphi_i)$ 作为聚类的对象,对其高度角 θ_i 和方位角 φ_i 进行聚类,求取类中心,并对所求结果进行曲线拟合,确定其在二维平面上的投影与参考坐标的转角,所得结果即为所检测的太阳子午线位置.

2.4 迭代优化过程

模糊 C -均值聚类方法最大优点是对初值的选取不敏感,任意指定位置初值 $p_v^0 = (\theta_0, \varphi_0)$, θ_0, φ_0 分别为任选的高度角和方位角,利用交替优化的方法分别计算隶属度函数,即

$$\mu_{iv}^{(j)} = \frac{1}{\sum_{w=1}^k (d_{iv}^{(2)} / d_{iw}^{(2)})^{1/(m-1)}} \quad (6)$$

和类中心

$$p_v^{(j+1)} = \frac{\sum_{i=1}^m (\mu_{iv}^{(j)})^m x_i}{\sum_{i=1}^m (\mu_{iv}^{(j)})^m} \quad (7)$$

式中

$$d_{iv}^{(j)} = \|x_i - p_v^{(j)}\| \quad (8)$$

为第 i 个数据点 x_i 到第 v 类中心 P_v 的距离,上标 j 表示迭代次数.

对偏振度类,选取类中心 $p_v^{(j)} = (\theta_j, \varphi_j)$ 为太阳位置,即太阳高度角和方位角分别为 $\theta = \theta_j$ 和 $\varphi = \varphi_j$;对偏振角类,选取类中心作为太阳子午线位置(曲线),将其投影到二维平面上并对类中心拟合,可确定出太阳子午线投影位置.

3 实验仿真

为了验证所提方法的有效性,本文设计两组实验:实验 1 利用瑞利模型获取的偏振数据确定理论太阳和太阳子午线位置;实验 2 利用转台获取的实际偏振数据,获取实际太阳和太阳子午线位置.

3.1 理论大气偏振模式的聚类仿真

对理论仿真的偏振模式,利用 2.4 节中的迭代过程,分别对偏振度数据和 E -矢量数据进行聚类(图 5),确定其类中心作为所求的太阳位置(点 A:高度角 $21.517 0^\circ$,方位角 $109.827 3^\circ$)和太阳子午线位置(曲

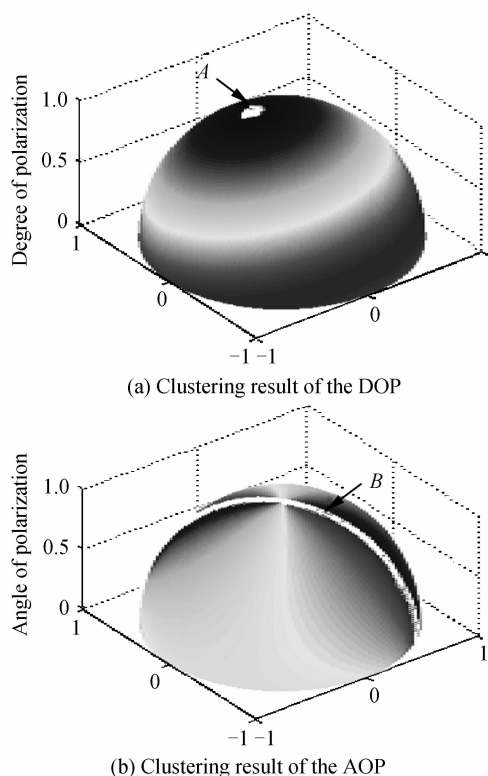


图 5 理论大气偏振模式下太阳和太阳子午线位置聚类结果
Fig. 5 Clustering result of the solar and solar meridian location with theoretical skylight polarization pattern

线 B: 转角 109.7921°). 与图 2(a) 和 (c): 高度角 21.0651° , 方位角 109.5633° 对比可以看出, 所求结果具有较高的准确度.

为计算解算误差, 仿真了 2014 年 3 月 17 日太原地区从早 8:00 到下午 18:00 每隔半小时的偏振数据并记录每次采样的计算误差(图 6). 从图中可以看出, 太阳高度角、太阳方位角和太阳子午线三个计算量的误差波动范围很小, 均小于 0.5° , 这三个量共计 21 次计算的均方根误差分别为 0.2559° , 0.3060° 和 0.1271° .

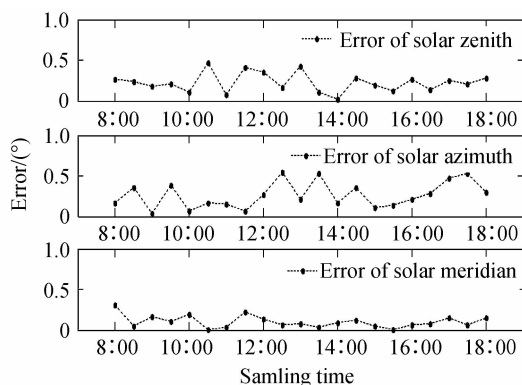


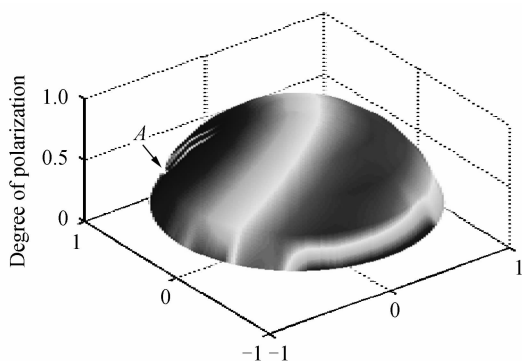
图 6 理论模式下太阳和太阳子午线位置随观测时间的误差变化

Fig. 6 Error variation of the solar and solar meridian location with time under theoretical polarization pattern

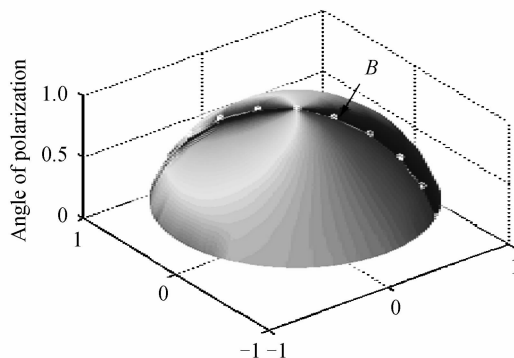
3.2 实际大气偏振模式的聚类仿真

对由实测数据建立的偏振模式, 用本文方法, 分别对偏振度数据和 E-矢量数据进行聚类(图 7), 确定其类中心作为所求的太阳位置和太阳子午线位置.

测试当天天气晴好, 总体能见度保持在 20 km 左右, 云量 $<5\%$, 光学厚度 0.283, 空气质量指数(AQI) 63, 空气质量等级为良, 平均 PM2.5 为 $26(\mu\text{g}/\text{m}^3)$, 符合瑞利散射模型条件. 图 7(a) 是对偏振度聚类的结果, 可以看出, 由于太阳方向上光强过大, 对测量数据造成了干扰, 使得聚类时所计算的太阳位置(点 A: 高度角 31.93560° , 方位角 121.4593°)与理论位置相比(高度角 32.7547° , 方位角 120.5886°)有较大偏差. 图 7(b) 是



(a) Clustering result of the DOP



(b) Clustering result of the AOP

图 7 实际大气偏振模式下太阳和太阳子午线位置聚类结果
Fig. 7 Clustering result of the solar and solar meridian location with the actually detected skylight polarization

对偏振角聚类的结果, 由于对太阳子午线位置的确定依据的是大范围的数据, 所得结果具有较高的准确性(曲线 B: 转角 121.2738°), 这个结果也和生物偏振感知研究的结论一致.

为计算解算误差, 测量了 2014 年 3 月 20 日太原地区从早 8:00 到下午 18:00 每隔半小时的偏振数据并记录每次采样的计算误差(图 8). 从图中可以看出, 太阳高度角、太阳方位角和太阳子午线三个计算量的解算误差比理论模式下的计算误差大, 最大误差接近 2° , 但误差波动的幅度较小, 说明该方法比较稳定. 这三个量共计 21 次计算的均方根误差分别为 1.1356° , 1.2372° 和 0.9328° .

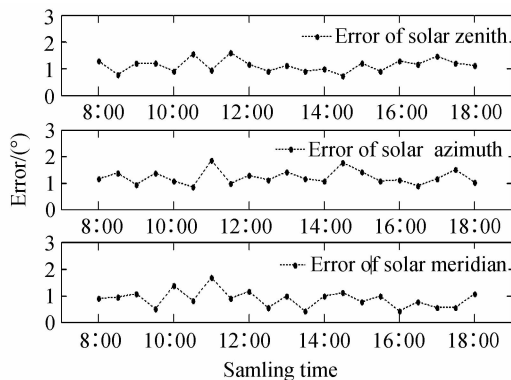


图 8 实测模式下太阳和太阳子午线位置随观测时间的误差变化

Fig. 8 Error variation of the solar and solar meridian location with time under detected polarization pattern

4 结论

利用大气偏振模式进行导航是对昆虫导航机理长期生物学研究结果的实际应用, 可为机器人航向角的获取提供新的方法. 在利用大气偏振模式导航的过程中, 太阳和太阳子午线位置的确定是实现精准导航的关键. 本文根据偏振模式规律性分布的特点, 利用模糊聚类分析的方法对偏振数据进行分析, 分别就偏振度

和 E-矢量方向两组数据进行数据分析,确定类中心,将其作为所求取的太阳位置和太阳子午线位置.方法的有效性通过两组实验数据得以确证,一组是利用瑞利单次散射理论,建立晴朗天空的大气偏振模式;一组是利用转台和偏振分析仪,搭建测量平台,获取实际大气偏振模式.对所采集的数据,利用文中所提方法分别就偏振度和 E-矢量对采集点位置进行聚类,获取准确的太阳和太阳子午线位置信息.实验表明,所求结果与实际数据相符,该方法具有一定的可靠性.但本文中偏振数据的获取限定为瑞利单次散射模式,实际导航应用中,这种情况出现的概率较小,并且实际大气偏振模式与大气光学厚度、地表特征等条件密切相关,故将本文方法应用于一般天气条件下具有多次米散射特征的大气偏振数据以及月光偏振数据处理等问题还需进一步深入研究.

本文所提方法在偏振光导航中航向角的解算有着重要的应用价值.在实际导航中,通过车载偏振光传感器,实时获取偏振信息,用该方法可解算出太阳和太阳子午线位置,利用太阳方位确定行进方向,利用子午线与体轴夹角确定航向角大小,可实时解算出罗盘信息,为偏振光导航应用解决了一个关键的技术问题.

参考文献

- [1] KARMAN S B, DIAH S Z M, GEBESSHUBER I C. Bio-inspired polarized skylight-based navigation sensors: A review [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, **12**(10): 14232-14261.
- [2] WEHNER R. Desert and navigation: How miniature brains solve complex tasks[J]. *Journal of Comparative Physiology*, 2003, **189**(8): 579-588.
- [3] BUENZLI E, SCHMID H M. A grid of polarization models for rayleigh scattering planetary atmosphere[C]. *Astronomy & Astrophysics Manuscript no*, 11760, 2009.
- [4] BRINES M L, GOULD J L. Skylight polarization patterns and animal orientation [J]. *Journal of Experimental Biology*, 1982, **96**(2): 69-91.
- [5] ROSSEL S. Navigation by bees using polarized skylight[J]. *Journal of Experimental Biology*, 1993, **104**(4): 695-708.
- [6] MAPPE M, HOMGERG U. Behavioral analysis of polarization vision in tethered flying locusts[J]. *Journal of Comparative Physiology*, 2004, **190**(1): 61-68.
- [7] CHU J K, ZHAO K Z, ZHANG Q. Construction and performance test of a novel polarization sensor for navigation [J]. *Sensors and Actuators A: Physics*, 2008, **148**(1): 75-82.
- [8] ZHAO K C, CHU J K, WANG T, ZHANG Q. A novel angle algorithm of polarization sensor for navigation [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2009, **58**(8): 2791-2796.
- [9] WANG Guang-Hui, GUO Zheng-Dong, ZHU Hai, et al. Capability analysis of polarized light celestial positioning[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(1): 11-14. 王光辉,郭正东,朱海,等. 偏振光天文导航定位能力分析[J]. *光子学报*, 2012, **41**(1): 11-14.
- [10] CHU J K, WANG H, CHEN W, LI R. Application of a novel polarization sensor to mobile robot navigation[C]. In *Proceedings of International Conference on Mechatronics and Automation. ICMA'09, Changchun, China, 9-12 August 2009*, 579-588.
- [11] WEHNER R. Polarization vision—a uniform sensory capacity [J]. *Journals of Experimental Biology*, 2001, **204**(4): 2589-2596.
- [12] DUELLI P, WEHNER R. The spectral sensitivity of polarized light orientation in *Cataglyphis bicolor*[J]. *Journal of Comparative Physiology*, 1973, **86**(1): 37-53.
- [13] WANG Fei, TANG Jun, REN Jian-Bin, et al. Optimized calculation of solar position with the Rayleigh atmosphere polarization pattern [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(12): 1201002. 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): 1201002.
- [14] STRUTT J. On the light from the sky, its polarization and colour [J]. *Philosophical Magazine Series 4*, 1871, **41**(271): 107-120.
- [15] WEHNER R. Himmelsnavigation bei insecten neurophysiologie und verhalten [J]. *Neujahrsbl Naturforsch Ges Zürich*, 1982, **184**: 1-132.
- [16] BRINES M L. Dynamic patterns of skylight polarization as clock and compass [J]. *Journal Of Theor Biology*, 1980, **86**: 507-512.
- [17] PREETHAM A J, SHIRLEY P, SMITS B E A. A practice model for daylight [C]. In *Siggraph 1999, Computer Graphics Proceedings, Rockwood A Annual Conference Series*, 1999, 91-100.