

文章编号 1004-924X(2013)02-0239-07

天空光偏振模式自动探测装置

赵开春^{1*}, 卢 皓^{1,2}, 尤 政¹

(1. 清华大学 精密仪器与机械学系, 北京 100084; 2. 军械工程学院, 河北 石家庄 050003)

摘要:为了获得较高的天空偏振光导航精度,研究了天空光偏振模式的模型。设计了天空光偏振模式自动探测装置,用于获取大量的天空光偏振模式信息并构建天空光偏振模式模型。该装置克服了传统天空偏振光分布模式探测仪器操作繁琐,效率低的缺点,利用计算机控制角度旋转和相机拍照协同工作,能够简单快捷地实现一键采集一组天空偏振图像。测试显示,该装置能够准确地在预期位置完成偏振图像的采集工作。获得的图像偏振模式明显,对于光强度的探测精度优于 $0.2375(3\sigma)$ 灰度值(8 bits),平均每个测量点耗时 3.02 s ,采集效率较传统偏振模式探测仪器大为提高,能够实现天空光偏振模式的有效探测。

关键词:天空光偏振模式; Rayleigh 散射; 偏振光测量; 偏振导航

中图分类号: P415.3; TP212 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132102.0239

Automatic detection system for skylight polarized pattern

ZHAO Kai-chun^{1*}, LU Hao^{1,2}, YOU Zheng¹

(1. *Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*

2. Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China)

** Corresponding author, E-mail: kaichunz@mail.tsinghua.edu.cn*

Abstract: To obtain higher navigation accuracy of skylight polarization, the polarization model for skylight was researched. An automatic detecting system of skylight polarized pattern was designed to get a large number of images to build an accurate model of skylight. The system overcomes the complex operation and the low efficiency from traditional detecting systems. It integrates a camera and the control system of precision rotating platform in an acquisition system to acquire the polarized images rapidly and easily in a key gathering a group of images. The test indicates that the acquisition system can get all of images in the angle that we expect, and can obtain images with a clear polarized pattern. Furthermore, the detecting accuracy is better than $0.2375(3\sigma)$ gray level (8 bits) for light intensity and average time-consuming is 3.02 s for every measuring point. These results demonstrate that the system has higher detecting efficiency and can execute an efficient detection of skylight polarized pattern.

Key words: skylight polarized pattern; Rayleigh scattering; polarized light measurement; polarization navigation

收稿日期: 2012-07-17; 修订日期: 2012-09-05.

基金项目: 中国博士后科学基金特别资助项目(201104127)

1 引言

生物学家研究表明,沙蚁等昆虫的复眼具有对天空偏振光敏感的独特结构,能够感知天空偏振光强度和方向的分布模式,并利用该模式来实现导航定位^[1]。仿生偏振导航微传感器就是模仿沙蚁复眼偏振敏感结构,利用偏振光进行导航定位的传感器。相比传统的导航设备,它具有体积小、精度高、灵敏度好、集成度高及抗干扰能力强等特点,因而在导航工程领域有着极其广阔的应用前景。天空光偏振分布模式的探测与分析对于构建偏振导航传感器系统环境的特征模型,提高偏振导航传感器的综合性能,具有非常重要的意义。自从 1809 年 Arago 发现天空散射光的偏振现象以来,国内外学者对天空光偏振现象进行了大量研究^[2-7]。芬兰学者 Jozsef Gal^[8]等在芬兰的 Lapland 对昼间晴朗天空中的偏振光分布模式进行了研究。瑞士学者 Rudiger Wehner^[9]讨论了利用偏振光制作导航传感器的可行性。在国内,大连理工大学的褚金奎^[10-13]等搭建了天空偏振光模式探测装置,对天空偏振光模式进行了探测,并将其应用于机器人导航。北京大学的晏磊^[14]等通过测试天空偏振光的分布模式,证明了天空存在稳定的偏振模式。

目前,天空偏振光的探测有许多种方法^[2-7], Brines 和 Gould^[15]使用偏振计对天空中某一点的偏振状态进行探测,但该方法局限于对天空中某点进行探测;Horvath 等提出了全天空偏振光测量方法^[7],该方法使用单反相机作为光学探头,不过探测仪器体积大,不利于自动化集成,而且大部分操作需要手动实施,效率较低。

本文根据天空光偏振模式的形成机理以及偏振光的检测方法,参考国内外偏振探测仪器的设计方案,构建了一套自动化的天空偏振光探测装置,并对其性能进行了测试与标定。最后利用该装置进行了天空光偏振模式探测的实验研究。

2 天空偏振模式形成机理及检测方法

太阳光穿透大气层的时候会发生散射,这种散射分为很多类型:按散射次数分可为一次散射和二次散射;按产生散射的微粒的大小可分为

Mie's 散射和 Rayleigh 散射。Mie's 散射是由具有较大的直径或与光线波长相当的微粒引起的, Rayleigh 散射是由直径比光线波长小得多的微粒引起的。大气中的主要成分为气体分子和气溶胶,由于 Rayleigh 散射模型是建立在远小于光线波长的微粒散射的基础上,因此大气中较大的气溶胶不会引起 Rayleigh 散射。

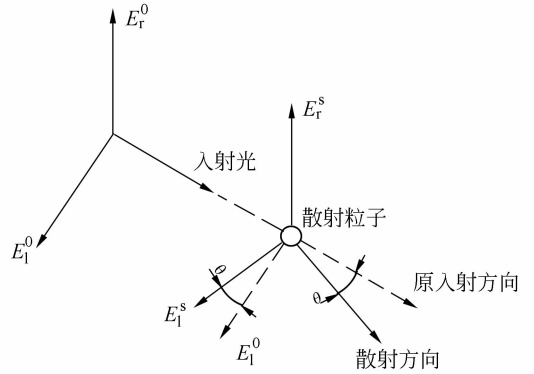


图 1 Rayleigh 散射模型

Fig. 1 Model of Rayleigh scattering

Rayleigh 散射的过程如图 1^[1]所示,定义 θ 为入射光方向与观测方向的夹角。 E_r^0 与 E_t^0 分别为太阳发出的自然光的垂直分量与水平分量,光线入射到散射粒子会激发出散射电场 E_r^s 和 E_t^s , E_r^s 与 E_r^0 相互平行,而 E_t^s 与 E_t^0 则会有一个夹角 θ ,因此, E_t^s 与 $E_t^0 \cos \theta$ 成正比。由于光强 $I = E^2$, 因此有:

$$\begin{cases} I_t^0 \cos^2 \theta \propto I_t^s, \\ I_r^0 \propto I_r^s \end{cases} \quad (1)$$

由上式可知, Rayleigh 散射改变了光的偏振状态,偏振度定义为:

$$P(\theta) = \frac{I_r(\theta) - I_t(\theta)}{I_r(\theta) + I_t(\theta)}, \quad (2)$$

将式(1)代入式(2),得:

$$P(\theta) = \frac{1 - \cos^2 \theta}{1 + \cos^2 \theta}, P_{\max} = \frac{\sin^2 \theta}{1 + \cos^2 \theta} P_{\max}. \quad (3)$$

由式(3)可知,散射角为 0° 和 180° 时,为无偏振状态,出射光线仍是自然光;在其它位置是部分线偏振光。然而,由于分子和粒子的多次散射以及地表反射,即使在白天无云的天空中存在很多中性点,也不会有偏振度为 100% 的点出现。因此,地球上固定观测点在观测某一时刻阳光的散射光时,地球上不同点的散射光线会有不同的 θ ,

也就会有不同的偏振度。太阳在天球上某个固定位置则会使天空具有一定的偏振模式,通过探测天空的偏振模式即可解算出导航信息。

基于斯托克斯矢量的模型是描述偏振光的一种常用方法,其优点在于其宏观可测量性。斯托克斯参量有 4 个分量,即 $S=[I \ Q \ U \ V]$ 。在遥感测试的场合,斯托克斯参量的表现形式为 $S=[I \ Q \ U \ V]$,定义式如下:

$$I=S_0=\langle \tilde{E}_x^2(t) \rangle + \langle \tilde{E}_y^2(t) \rangle;$$

$$Q=S_1=\langle \tilde{E}_x^2(t) \rangle - \langle \tilde{E}_y^2(t) \rangle;$$

$$U=S_2=2\langle \tilde{E}_x(t)\tilde{E}_y(t)\cos[\delta_y(t)-\delta_x(t)] \rangle;$$

$$V=S_3=2\langle \tilde{E}_x(t)\tilde{E}_y(t)\sin[\delta_y(t)-\delta_x(t)] \rangle;$$

其中: I 表示光的总强度, Q 表示 x 轴方向上的强度, U 表示 45° 方向上的强度, V 代表右旋圆偏振光。由于右旋偏振光在仪器的测量值中几乎可以忽略^[1],因此认为 $V=0$ 。

若偏振主轴与描述斯托克斯矢量选定的 x 轴夹角为 α ,则感光器件接收到的透射光强度为^[1]:

$$I(\alpha)=\langle E_x^2 \rangle \cos^2 \alpha + \langle E_y^2 \rangle \sin^2 \alpha + \langle E_x E_y \rangle \sin 2\alpha.$$

化简得到:

$$I(\alpha)=\frac{1}{2}(I+Q\cos 2\alpha+U\sin 2\alpha). \quad (4)$$

偏振度 P 定义为:

$$P=\frac{\sqrt{Q^2+U^2+V^2}}{I}.$$

由于 $V=0$,因此:

$$\begin{cases} P=\sqrt{Q^2+U^2}/I \\ \theta=\frac{1}{2}\arctan(U/Q) \end{cases}. \quad (5)$$

由式(4)可知,一般只需知道 3 个不同 α 下的强度值就可以解算出斯托克斯矢量,由斯托克斯矢量即可解算出偏振方位角。

3 工作原理

该系统采用光机电一体化系统的设计,由光学系统,机械结构,自动控制系统组成。探测装置的机械结构如图 2 所示,由底座、精密转台、遮光筒、相机支架、相机、偏振片与滤光片组成。其中,相机通过支架与精密转台底座一块固连在底座上;偏振片与滤光片构成偏振探头,通过遮光筒与精密转台连接,随精密转台一同转动。天空中含有偏振成分的可见光经过蓝色滤光片后变为蓝色

光,再经线性偏振片检偏,检偏后光线经过镜头光学系统,投射到感光元件上成像,不同像素点的亮度值即为该点检偏后的光强度。遮光筒在随精密转台转动的同时会带动偏振片转动,因此可以通过控制步进电机间接实现偏振片的转动,从而达到检偏的目的。

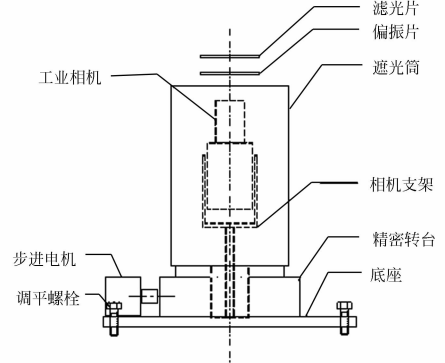


图 2 天空偏振模式探测装置机械结构图

Fig. 2 Structure of detection system of skylight polarized pattern

由于在一定时间特定地点天空上观测点的偏振方向是一定的,根据式(4),通过改变线性偏振夹角 α 测量的光强度值可以得到 3 个关于斯托克斯矢量中 4 个分量的方程组。为了计算方便分别取 α 等于 $0, 60, 120^\circ$ 3 个方向,得到方程组:

$$\begin{cases} I(0)=\frac{1}{2}(I+Q) \\ I(\frac{\pi}{3})=\frac{1}{2}(I-\frac{1}{2}Q+\frac{\sqrt{3}}{2}U) \\ I(\frac{2\pi}{3})=\frac{1}{2}(I-\frac{1}{2}Q-\frac{\sqrt{3}}{2}U) \end{cases}. \quad (6)$$

通过解方程组即可得到斯托克斯矢量,从而解算出视场中各点的偏振角和偏振度等参数。

在某点测量多组照片用于解算偏振光的参数是一项非常繁琐的工作,天空偏振模式探测系统简化了这项工作,它能够在上位机的程序控制下使相机在所需要的偏振角度曝光,从而方便快捷地得到一组天空偏振模式的照片。

4 图像采集自动控制系统设计

4.1 硬件设计

该系统的硬件设计如图 3 所示,系统由上位

机,电机控制器以及工业相机组成。上位机在系统中处于核心地位,控制电机控制部分和工业相机协同工作。其中,电机控制部分由电机控制器和步进电机组成,电机控制器通过 RS-232 串行接口与上位机通信,控制电机运行;相机部分由工业相机及 USB 接口组成,在上位机的控制下完成曝光以及数据采集。

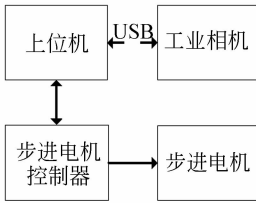


图 3 自动控制系统结构图

Fig. 3 Block diagram of automatic control system

图片采集部分采用陕西维视公司的 MV-130 型 130 万像素黑白 CMOS 工业相机,采用 USB2.0 接口实现相机的控制和图像的采集。

电机控制部分使用 STM32 单片机通过 RS-232 串行总线与上位机进行通信,串口电平通过 MAX3232 芯片进行电平转换。STM32 在得到上位机的命令后向步进电机驱动器芯片 TB6560 发出一定频率和一定次数的脉冲,控制步进电机旋转相应的步数。由于本系统经常在室外工作,机动性要求较强,因此采用 +12 V 锂电池作为一次电源,一次电源供给电机驱动板和 +3.3 V 二次电源。其中,+12 V 供给步进电机驱动板,+3.3 V 供给单片机以及逻辑电路。单片机输出的控制信号通过光耦隔离与 TB6560 的控制引脚端连接,TB6560 根据输入脉冲序列产生相应的长度和频率脉冲序列。该设计对步进电机采取 16 细分控制,电机的控制精度可达 0.1125° ,即转台

精度为 0.00125° 。电机控制器硬件的工作原理如图 4 所示。

4.2 软件设计

软件设计分为上位机软件和控制器软件,上位软件能够控制工业相机的曝光参数、曝光时间以及图像采集,同时能够与电机控制器通信,向控制器发送命令控制转台转动。控制器软件能够通过 RS-232C 接口与上位机通信,控制电机的转动方向,转动速度以及转动角度,并能够向上位机发送步进电机的工作状态。

上位机软件由维视图像的 MV-130UM 黑白数字工业相机提供的 SDK 二次开发得到,软件除了具有原始 SDK 的图像采集功能之外,还能控制转台旋转。转台与相机相互协调工作采集偏振图像以及实现“一键自动采集功能”。转台控制通过上位机向转台控制器发送控制命令来实现,串口软件接口通过 MCommm 控件实现^[16]。

步进电机控制器的核心是 STM32F103C8T6 核心板。上位机对控制器的控制,状态的检测以及步进电机的控制都在 STM32 单片机上实现。单片机主要用来接收上位机发来的控制命令,然后产生脉冲使步进电机转动。

上位机程序中图像的“一键自动采集”功能是通过串口的发送命令与接收来自电机控制器的确认信号的方式驱动的。在自动采集之前,操作者应当开串口,对图像采集次数,正反转,以及每次采集的角度差等进行设置。

“一键自动采集”的过程可以理解为一个“类 while”循环结构。循环体执行以下任务:上位机向相机发送命令采集一张图像并保存;上位机生成并发送转台旋转命令;循环体执行结束后,控制器接收并执行命令。单片机发送握手消息的过程将“程序指针”转向循环入口。循环条件为:已采集图像数量 $npic$ 小于目标采集图像数量 m_times ,同时采集开始标志 $trig$ 的值为 2。当点击“开始”时,上位机首先无条件执行循环体一次,并无条件返回循环入口,判断循环条件,条件假则自动采集过程结束,条件真则执行循环体,并对 $npic$ 进行自加。当 $npic = m_times$ 时,自动采集过程结束。由此可见,整个过程中转台会按规定角度旋转 m_times 次,并且在每次旋转之前采集一幅图像,一共得到 m_times 幅图像。自动采集流程图见图 5。

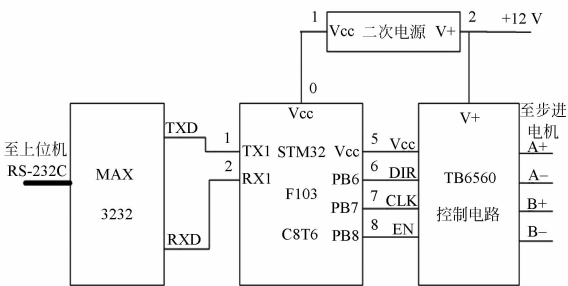


图 4 步进电机控制器结构图

Fig. 4 Block diagram of controller of stepper motor

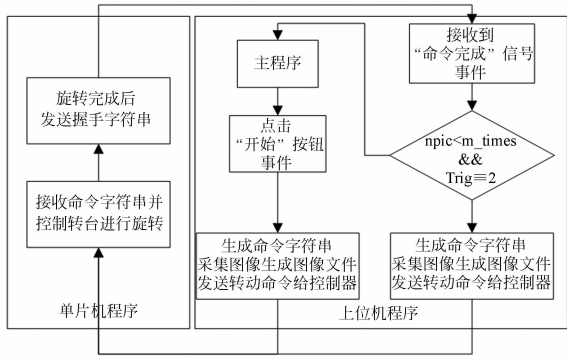


图 5 偏振图像自动采集流程图

Fig. 5 Flowchart of automatic image capture

5 实验数据

测试系统性能时,采用的线偏振光光源由稳定的均匀光源通过线偏振器得到,对该装置进行重复测试,共采集 14 组数据,每组数据包含 34 个图像数据,每个图像数据的采集间隔为 10° ,编号分别为 $N(N=1,2,\dots,34)$ 。为了减小像素的随机噪声,原图像上随机取 9 个像素区域(1 个像素及其 8 个邻域)求算术平均值,得到强度值 $I(N)$ (灰度为 8 bits)。

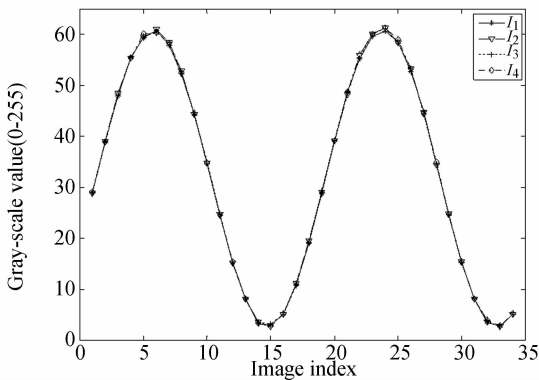


图 6 第 1 组至第 4 组数据的强度值曲线

Fig. 6 Intensity plots of data from Group 1 to Group 4

图 6 为第 1 组至第 4 组的强度值曲线。测试时,仪器探测 350 个点耗时 1 155 s,每个点测量时间的平均值为 3.02 s。

由图 6 可知,第 1 组至第 4 组的强度值曲线基本重合。对各组数据中相同点的强度值进行参数估计,各点均值的 99% 置信区间如表 1 所示,强度值精度控制在 0.237 5 灰阶值(8 bits)以内。

表 1 系统强度值测量标定结果

Tab. 1 Results of intensity measurement calibration

图像序号	精度 3σ	图像序号	精度 3σ
1	$\pm 0.131 5$	18	$\pm 0.099 7$
2	$\pm 0.073 7$	19	$\pm 0.104 8$
3	$\pm 0.177 7$	20	$\pm 0.121 1$
4	$\pm 0.237 5$	21	$\pm 0.143 8$
5	$\pm 0.214 4$	22	$\pm 0.226 4$
6	$\pm 0.101 2$	23	$\pm 0.228 0$
7	$\pm 0.140 3$	24	$\pm 0.211 4$
8	$\pm 0.188 3$	25	$\pm 0.111 4$
9	$\pm 0.150 7$	26	$\pm 0.146 0$
10	$\pm 0.138 1$	27	$\pm 0.148 2$
11	$\pm 0.137 4$	28	$\pm 0.168 3$
12	$\pm 0.064 4$	29	$\pm 0.115 9$
13	$\pm 0.055 0$	30	$\pm 0.073 2$
14	$\pm 0.130 4$	31	$\pm 0.070 4$
15	$\pm 0.137 0$	32	$\pm 0.102 6$
16	$\pm 0.043 3$	33	$\pm 0.091 4$
17	$\pm 0.128 5$	34	$\pm 0.047 5$

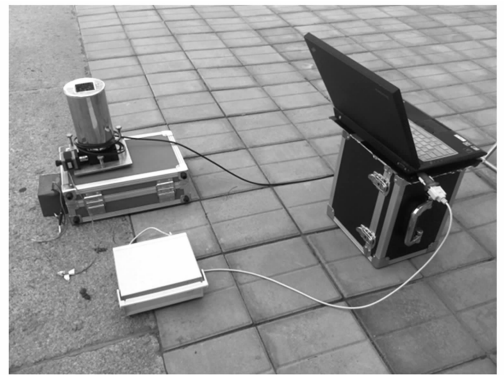


图 7 天空偏振光测试装置

Fig. 7 Automatic detection system of skylight polarized pattern

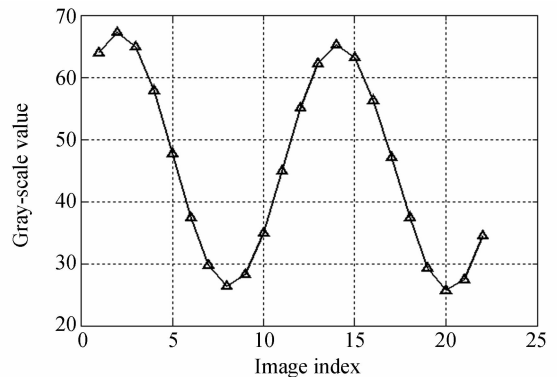


图 8 图像强度曲线

Fig. 8 Plot of image intensity

室外实验于 7 月 2 日 19 点 33 分在清华大学中央主楼北侧(40°0'N, 116°18'E)进行, 当时天气状况良好, 天空有少许絮状云。实验装置如图 7 所示, 采集图像如图 9(a)所示。图 9(b)为使用 3 幅图像解算得到的天空中各点的偏振角度,

图 9(c)为解算得到的天空光的偏振度图。由计算结果可以看出, 偏振模式明显并符合 Rayleigh 散射规律。对采集到的每幅图像中固定的像素区域的灰度值求平均值, 得到 $I(N)$, 强度值曲线如图 8 所示。

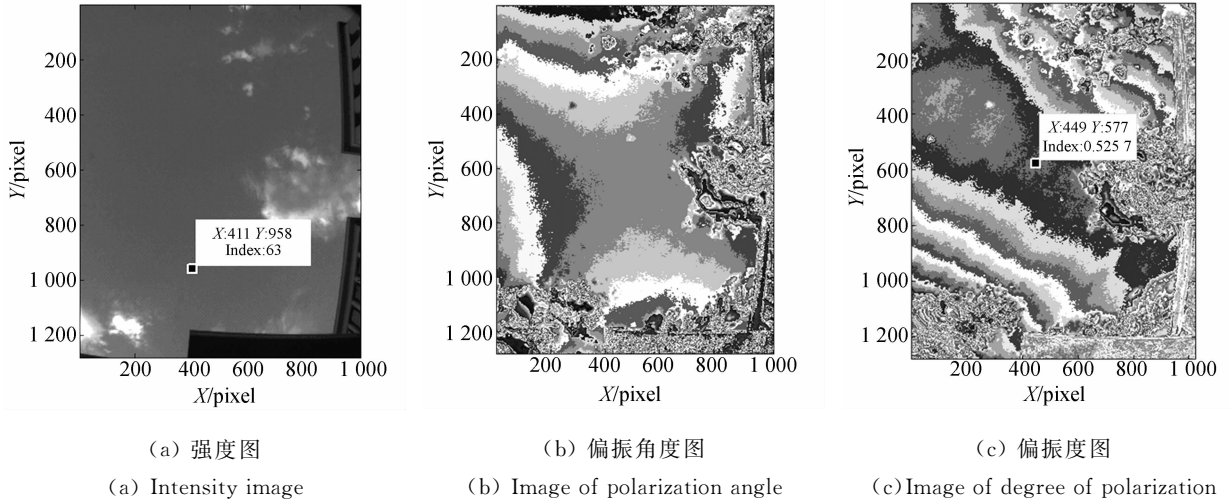


图 9 采集到的图像及其处理结果

Fig. 9 Images acquired and images processed

6 结 论

天空偏振光导航作为一种新颖的导航技术, 具有良好的研究价值与发展前途。本文设计了一种自动化的天空偏振模式探测仪器, 该仪器能够在上位机的控制下自动地对当地的天空偏振模式

进行探测, 并能够准确、快速、便捷地采集天空的偏振图像, 其光强探测精度优于 0.237 5 灰度值 (3δ); 每个测量点平均耗时 3.02 s, 效率较传统偏振模式探测仪器大为提高, 能够大量采集天空偏振光图像。此装置为天空偏振图像算法的深入研究和偏振导航传感器的进一步研制奠定了基础。

参考文献:

- [1] 姚弘轶. 面向仿生微纳导航系统的天空偏振光研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
YAO H Y. *Research on the skylight polarization for the bionic micro-nano navigation system* [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006. (in Chinese)
- [2] SMITH G S. The polarization of skylight: an example from nature [J]. *Am. J. Phys.*, 2007, 75 (1): 25-35.
- [3] CHENG X, WANG X ZH. Numerical study on the wavelength-dependent polarization of light scattered by aqueous droplets for RGB spectrums [J]. *Opt. Int. J. Light Electron. Opt.*, 2010, 121(11): 974-979.

- [4] 曹楠楠. 应用于仿生导航的天空散射光的偏振特性研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
CAO N N. *Research on polarized characteristics of scattering skylight for the bionic navigation* [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008. (in Chinese)
- [5] HEGEDUS R, AKESSON S, HORVATH G. Polarization patterns of thick clouds: overcast skies have distribution of the angle of polarization similar to that of clear skies [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2007, 2(48): 2347-2356.
- [6] HEGEDUS R, AKESSON R, WEHNER R, et al.. Could Vikings have navigated under foggy and cloudy conditions by skylight polarization on the atmospheric optical prerequisites of polarimetric Viking navigation

- under foggy and cloudy skies[J]. *Proc. R. Soc. A*, 2007,463:1081-1095.
- [7] HORVATH G, BARTA A, GAL J, *et al.*. Ground-based full-sky imaging polarimetry of rapidly changing skies and its use for polarimetric cloud detection [J]. *Appl. Opt.*, 2002,41(3):543-559.
- [8] GAL J, HHORVATH G, MEYER-ROCHOW V B, *et al.*. Polarization patterns of the summer sky and its neutral points measured by full-sky imaging polarimetry in Finnish Lapland north of Arctic Circle[J]. *The Royal Society*, 2011, 457: 2085-2099.
- [9] WEHNER R. Polarization vision—a uniform sensory capacity [J]. *The Journal of Experimental Biology*, 2011, 204:2589-2596.
- [10] 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)
- [11] 褚金奎,王威,崔岩,等.气溶胶对天空偏振辐射影响的测量[J].*光学精密工程*, 2012,20(3):520-526.
CHU J K, WANG W, CUI Y, *et al.*. Measurement for influence of aerosols on polarized sky radiance [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(3): 520-526. (in Chinese)
- [12] 崔岩,曹楠楠,褚金奎,等.天空偏振光测量系统设计[J].*光学精密工程*, 2009,17(6):1431-1435.
CUI Y, CAO N N, CHU J K, *et al.*. Design of skylight polarization measurement system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(6):1431-1435. (in Chinese)
- [13] CHU J K, ZHAO K CH, ZHANG Q, *et al.*. Construction and performance test of a novel polarization sensor for navigation[J]. *Sensors & Actuators; A. Physical.*, 2008,148(1):75-82.
- [14] 晏磊,关桂霞,陈易斌,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.
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. (in Chinese)
- [15] BRINES M L, GOULD J L. Skylight polarization patterns and animal orientation [J]. *Journal of Experimental Biology*, 1982, 215(14):69-91.
- [16] 龚建伟,熊光明. *Visual C++/Turbo C 串口通信编程实践*[M]. 北京:电子工业出版社, 2004.
GONG J W, XIONG G M. *Programm Practice of Visual C++/Turbo Serial Communication*[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry. (in Chinese)

作者简介:



赵开春(1973—),男,辽宁大连人,博士,助理研究员,清华大学精密仪器与机械学教师,研究领域为微纳仿生光栅器件的设计、制备与测试,仿生导航传感器的设计、构建与环境试验,微小卫星的姿态测量与控制技术。E-mail: kaichunz@mail. tsinghua. edu. cn



卢皓(1989—),男,北京人,硕士研究生,2007年于海军航空工程学院获得学士学位,主要从事仿生导航传感器环境试验方面的研究。E-mail: luha-oak47@sohu. com



尤政(1963—),男,江苏扬州人,博士,教授,博士生导师,研究方向为微米/纳米技术,微光机电系统集成,微纳卫星技术。E-mail: yz-dpi@mail. tsinghua. edu. cn