

文章编号 1004-924X(2017)02-0312-07

## 多方向偏振光实时定位样机的设计与搭建

褚金奎\*, 张慧霞, 王寅龙, 时 超

(大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116023)

**摘要:** 为了提高偏振光导航定位的可靠性和实时性, 提出了一种利用多方向偏振光的自主式导航定位方法并搭建了样机。通过样机多方向阵列结构中的偏振光导航传感器实时检测天空多个方向的偏振光信息, 并对这些信息进行优选和融合处理, 计算得到更加可靠且准确的太阳空间位置。最后根据太阳空间位置, 结合时间和地磁场分布信息, 计算样机所在位置的经纬度, 实现实时定位。基于可视化软件 LabVIEW 编写样机上位机程序, 能够实时采集样机中传感器数据, 同步处理计算且实时显示载体地点经纬度, 数据更新率可达 10 Hz。静态测试结果表明, 定位样机性能稳定, 经度方向上的定位精度为  $\pm 0.4^\circ$ , 纬度方向上为  $\pm 1.2^\circ$ , 定位精度较高, 可应用于实际导航。

**关键词:** 偏振光学; 实时定位; 天空偏振光; 自主式导航; LabVIEW

中图分类号: V249.32; O436.3 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20172402.0312

## Design and construction of autonomous real-time position prototype based on multi-polarized skylight

CHU Jin-kui\*, ZHANG Hui-xia, WANG Yin-long, SHI Chao

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

\* Corresponding author, E-mail: chujk@dut.edu.cn

**Abstract:** In order to improve the reliability and real-time performance of polarized skylight navigation, a independent position method based on multi-polarized lights was proposed and a navigation prototype was constructed. The prototype included five polarized light sensors, which were arranged in multi-direction array for the detection of polarization information in multiple directions of the sky. With the polarization information optimized and converged, the sun spatial position information was calculated more reliably and accurately. Finally, the position information of the prototype was determined according to the sun spatial position information, the time and the geomagnetic field information, thus realizing real-time position. The PC program of the prototype completed by LabVIEW can collect and process the date from the sensors in real time, meanwhile calculate and display the longitude and latitude of the location of the prototype synchronously, with a data update rate up to 10 Hz. The test results show that position accuracies are  $\pm 0.4^\circ$  and  $\pm 1.2^\circ$  in longitude and latitude respectively, which indicate that the navigation prototype is feasible and stable and can be applied to real navigations.

收稿日期: 2016-08-30; 修订日期: 2016-10-12.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51675076, No. 51505062, No. 51305057, No. 51321004)

**Key words:** polarization optics; real-time position; skylight polarization; autonomous navigation; LabVIEW

## 1 引言

随着科学技术的发展,导航技术的应用越来越广泛,不但在国民经济建设方面发挥着重要作用,而且在国防军事上有着极其重要的位置。依据导航原理的不同,目前常用的导航定位技术主要分为以下四种:卫星导航、无线电导航、惯性导航和天文导航,这些导航技术各具特点。卫星导航<sup>[1]</sup>定位精度高,但属于非自主导航。无线电导航系统<sup>[2]</sup>依赖于陆基台站,自主性差,易受到屏蔽干扰。惯性导航系统<sup>[3]</sup>自主性强、精度很高,但是其误差随时间积累,无法长时间满足高精度的要求。天文导航<sup>[4]</sup>是一种完全自主的导航方式,具有极强的抗干扰能力,但是系统结构复杂,其主要部件星敏传感器的成本高,造价昂贵。因此,亟待研发一种自主性强、抗干扰能力强、精度高,且投资运营成本较低的定位系统。

大自然蕴藏着大量的智慧和能量,近年来随着仿生学的进步,许多科研工作者展开了对自然界的探索。人们发现太阳发出的自然光在传输过程中,被大气层中的粒子散射和吸收,形成偏振现象。在晴朗无云的条件下,瑞利散射理论与试验研究均表明,天空中具有相对稳定的偏振模式<sup>[5-6]</sup>,其中蕴含着丰富的光场矢量、大气和地表环境以及空间方向和位置等信息。自然界中的许多生物有着高度敏感的偏振视觉系统,能捕捉到这些信息实现导航。沙哈拉沙漠的一种蚂蚁 *Cataglyphis* 在距离巢穴 200 m 远的地方觅食后,利用偏振光信息来矫正其归巢航向,可沿近乎直线的轨迹归巢<sup>[7]</sup>。此外,一些鸟类可以利用天空偏振光来矫正其自身的生理磁罗盘来实现定位,从而完成从西半球到东半球的大迁徙<sup>[4,8]</sup>。仿生偏振光导航是一种基于太阳光自然偏振特性的导航方法,与卫星导航和无线电导航相比自主性强,且在大范围中很难受到人为干扰;与惯性导航相比,误差不随时间积累;与天文导航相比结构简单、成本低,因此成为了国内外的研究热点。

目前,国内外在偏振光导航方面做了大量的研究工作。国外学者 Lambrinos 等人基于仿生

偏振导航机理,设计了仿生偏振视觉传感器并应用在无人机上进行导航,验证了偏振光应用于导航定向的可行性<sup>[9]</sup>。SZÁZ D 等人利用天空偏振光可以得到正北方向的信息<sup>[10]</sup>。大连理工大学褚金奎教授团队设计了天空偏振光测量系统,搭建了导航传感器样机,并改进了导航算法,进行误差补偿<sup>[11-15]</sup>。实验测试表明:即使在天空偏振光发生显著变化的情况下,偏振光传感器的定向误差精度可达 $\pm 0.2^\circ$ 。合肥工业大学范之国教授团队提出了一种利用大气偏振模式得到太阳空间位置信息,从而获取载体三维姿态信息的方法<sup>[16]</sup>。以上研究都采用天空偏振光信息实现导航定向,而对于利用偏振信息实现导航定位的相关研究却鲜有报道。

受自然界某些鸟类可以利用偏振光信息和地磁场信息实现导航定位的启发,本课题组提出了一种基于偏振光和地磁场的导航定位方法<sup>[17]</sup>。该定位方法是一种无源的自主式导航方法,对无卫星信号环境下的自主导航具有重大意义。本文提出了一种基于多方向偏振光的导航定位方法,提高了偏振光导航定位系统的稳定性。并搭建了定位样机,实现了定位信息的实时计算和显示,实验结果表明该定位样机性能稳定、可靠,有着广泛的应用前景。

## 2 多方向偏振光导航定位方法

基于瑞利散射理论,在某时某地,天空偏振光具有相对稳定的分布模式,在该模式下天空中任意一点的偏振光的偏振方向总是垂直于由太阳、观测点和被观测点组成的平面,因此太阳空间矢量(观测点和太阳构成的向量)垂直于天空中任意不同两点的偏振方向矢量所构成的平面<sup>[5,18]</sup>。则由天空中任意两点偏振光的偏振方向可以解算得到太阳的空间位置信息。天文学上,某时某地太阳的空间位置信息可以根据当地的时间和经纬度坐标确定。本文研究的导航定位技术将太阳位置信息、地磁场信息和时间信息等进行组合计算,从而求解经纬度,实现定位。

理论上太阳空间矢量可以由天空中两点的偏

振方向矢量计算得到,但是若这两个偏振方向矢量平行,或者测试过程中某一个偏振光传感器检测方向的光线被遮挡,又或者该检测点是天空偏振光分布模式的中性点(该点处偏振度为 0,无偏振光信号),就无法得到准确的太阳位置信息。为了提高定位系统的鲁棒性,本文提出了一种基于多方向偏振光的导航定位方法。如图 1 所示,其中  $O$  为观测者位置, $S$  为太阳, $Z$  为观测者天顶点, $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5$  为天空中 5 点偏振光的偏振方向矢量, $S_0$  为太阳方向矢量。根据瑞利散射原理, $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5$  都与  $S_0$  垂直。在全局坐标系中,太阳方向矢量为:

$$S_0 = (S_x \ S_y \ S_z)^T = (P_i \times P_j)^T, \quad (1)$$

$(i, j=1, 2, 3, 4, 5 \text{ 且 } i \neq j)$

其中: $S_x, S_y, S_z$  为太阳方向矢量在全局坐标系中的 3 个分量; $P_i$  和  $P_j$  表示优选得到的偏振方向矢量。根据偏振光传感器的测量原理<sup>[12]</sup>及测量分析<sup>[19]</sup>可知,测量方向偏振光的偏振度越大,偏振光传感器的测角精度相对越高。本文研究的定位方法根据 5 个偏振光传感器测量得到的偏振度和偏振方位角信息,优选出相对比较准确的两个偏振方向矢量解算太阳空间矢量,提高太阳空间位置信息的可靠性和准确性,从而提高定位样机的稳定性和可靠性。

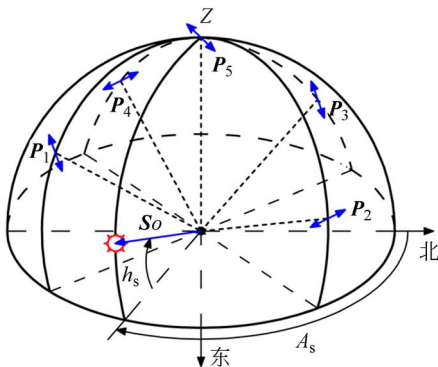


图 1 太阳方向矢量与偏振方向矢量的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of solar vectors and polarized-light vectors

如图 1 所示,设太阳方向矢量  $S_0$  在载体坐标系中的投影与正北方向的夹角为太阳方位角  $A_s$ ,设由北向东顺时针为正。与设定的载体坐标系  $X$  轴的夹角为太阳的伪方位角  $A_s'$ ,太阳的高度角为  $h_s$ 。在载体坐标系中太阳的方位信息可以表

示为:

$$\begin{cases} \cos(A_s') = S_x / \sqrt{S_x^2 + S_y^2} \\ \sin(A_s') = S_y / \sqrt{S_x^2 + S_y^2} \\ \tan(h_s) = S_z / \sqrt{S_x^2 + S_y^2} \end{cases} \quad (2)$$

根据天文三角形可建立如下方程:

$$\begin{cases} \cos(A_s) = \frac{\sin \delta - \sin h_s \sin \phi}{\cos h_s \cos \phi} \\ \sin(h_s) = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega \end{cases} \quad (3)$$

其中: $\phi$  为地理纬度, $\delta$  为太阳赤纬, $\omega$  为当地太阳时角。依据当地时间和位置信息, $\omega$  可以表示为:

$$\omega = \eta + 15(UT_1 + E) - 180, \quad (4)$$

其中: $\eta$  为地理经度, $E$  为时差, $UT_1$  为通过格林子午线地区的当地时间。 $UT_1$  可以根据测试上位机获得,根据时间查询星历表可以获得准确的太阳赤纬  $\delta$  和时差  $E$ <sup>[20]</sup>。

为了得到  $A_s'$  与  $A_s$  的关系,本文在定位系统中引入电子罗盘传感器,用以测得测试位置地磁北极与电子罗盘参考轴的夹角  $H$ 。 $A_s, A_s'$  和  $H$  的函数关系为:

$$A_s = A_s' + D + H + \alpha, \quad (5)$$

其中: $\alpha$  由计算时所建立的坐标系之间的关系确定,为已知量; $D$  为测试地点的磁偏角,利用 IGRF (International Geomagnetic Reference Field)<sup>[21]</sup> 模型可以准确得到磁偏角信息。该参数与测试地点的经度  $\eta$ 、纬度  $\phi$ 、地心高度  $r$  和协调世界时 UTC 相关。UTC 与  $UT_1$  的偏差不超过 0.9 s,其微小差异可以忽略不计,地心高度  $r$  为已知量。磁偏角参数  $D$  只与测试地点的经度  $\eta$  和纬度  $\phi$  相关,即有:

$$D = f(\phi, \eta). \quad (6)$$

将式(4)、式(5)代入式(3)中可得:

$$\cos(A_s' + D + H + \alpha) = \frac{\sin \delta - \sin h_s \sin \phi}{\cos h_s \cos \phi}, \quad (7)$$

$$\sin h_s = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos(\eta + 15(UT_1 + E) - 180). \quad (8)$$

联立式(6)、式(7)、式(8)3 个方程,便可求得测试地点的经度  $\eta$ 、纬度  $\phi$  和磁偏角  $D$  的数值解,但是无法得到解析解。

### 3 基于多方向偏振光的定位样机设计

#### 3.1 样机的硬件系统

基于多方向偏振光的定位样机主要由 5 个偏

振光传感器、三维电子罗盘和样机固定构架等组成。样机的外观如图 2 所示,5 个偏振光传感器的安装面分别为  $A_1 \sim A_5$ ,电子罗盘安装在  $A_0$  面上。其中面  $A_0$  和  $A_5$  平行,面  $A_1, A_2, A_3, A_4$  不相邻两面互相垂直,相邻两面的夹角为  $45^\circ$ ,且都与面  $A_5$  成  $45^\circ$  夹角。

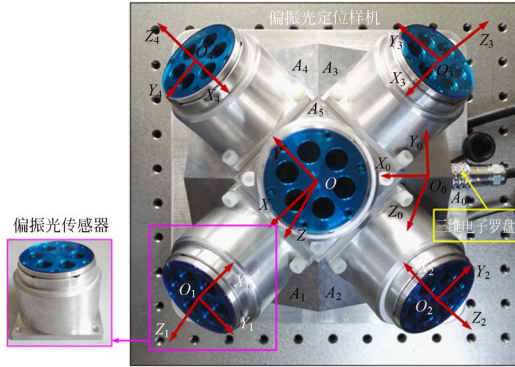
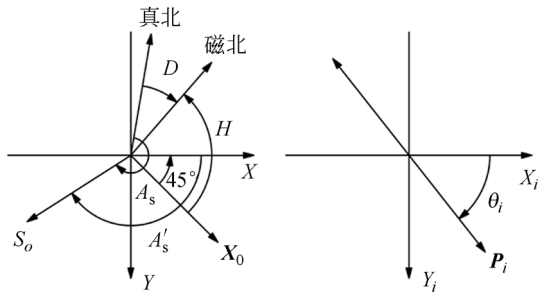


图 2 定位样机实物图

Fig. 2 Real map of position prototype

如图 2 所示,分别在面  $A_0 \sim A_5$  上建立 6 个左手坐标系  $O_0-X_0Y_0Z_0, O_1-X_1Y_1Z_1, O_2-X_2Y_2Z_2, O_3-X_3Y_3Z_3, O_4-X_4Y_4Z_4, O_5-XYZ$ 。设定  $O_5-XYZ$  为载体坐标系,其余 5 个为局部坐标系。根据样机部件安装的相对关系,在载体坐标  $O_5-XYZ$  中,  $A_s', A_s, H, D$  的关系如图 3(a) 所示,对应关系可以表示为:

$$A_s = A_s' + D + H - 45. \quad (9)$$



(a)  $D, H, A_s'$  和  $A_s$  的示意图 (b)  $\theta_i$  在  $O_i-X_iY_iZ_i$  中的示意图  
(a) Directions of  $D, H, A_s'$  and  $A_s$  (b) Direction of  $\theta_i$

图 3  $D, H, A_s', A_s$  和  $\theta_i$  在坐标系统中的示意图

Fig. 3 Schematic diagram of  $\theta_i, D, H, A_s'$  and  $A_s$  in coordinate systems

5 个偏振光传感器测得的偏振方向矢量  $\mathbf{P}_i'$  在对应的局部坐标系中的投影如图 3(b) 所示,其

中,  $\mathbf{P}_i'$  为传感器测得的偏振方向矢量在对应的局部坐标系中的投影,  $\theta_i$  为对应测量方向偏振光的偏振方位角。则  $\mathbf{P}_i'$  可以表示为:

$$\mathbf{P}_i' = k_i (\cos \theta_i \quad \sin \theta_i \quad 0) \quad (i=1,2,3,4,5), \quad (10)$$

其中  $k_i$  取值为 1 或 -1。

根据样机固定构架的结构可以得到 4 个局部坐标系到载体坐标系的旋转矩阵。则 5 个偏振光传感器测得的偏振方向矢量  $\mathbf{P}_1 \sim \mathbf{P}_5$  在载体坐标系中可以表示为:

$$\mathbf{P}_1 = k_1 (-\sqrt{2}/2 \cos \theta_1 \quad -\sin \theta_1 \quad \sqrt{2}/2 \cos \theta_1)$$

$$\mathbf{P}_2 = k_2 (-\sin \theta_2 \quad \sqrt{2}/2 \cos \theta_2 \quad \sqrt{2}/2 \cos \theta_2)$$

$$\mathbf{P}_3 = k_3 (\sqrt{2}/2 \cos \theta_3 \quad \sin \theta_3 \quad \sqrt{2}/2 \cos \theta_3)$$

$$\mathbf{P}_4 = k_4 (\sin \theta_4 \quad -\sqrt{2}/2 \cos \theta_4 \quad \sqrt{2}/2 \cos \theta_4)$$

$$\mathbf{P}_5 = k_5 (\cos \theta_5 \quad \sin \theta_5 \quad 0)$$

(11)

由这 5 个偏振方向矢量分别计算太阳方向矢量  $\mathbf{S}_{ij}$  为:

$$\mathbf{S}_{ij} = (\mathbf{S}_x \quad \mathbf{S}_y \quad \mathbf{S}_z)^T = \mathbf{K}_{ij} [\mathbf{P}_i(\theta_i) \times \mathbf{P}_j(\theta_j)]^T$$

$$(i, j=1,2,3,4,5 \text{ 且 } i \neq j), \quad (12)$$

式中  $K_{ij}$  取值为 1 或 -1。由式(2)解算出太阳的空间位置信息。当  $K_{ij} = 1$  时,太阳的高度角和伪方位角的值为  $h_s$  和  $A_s'$ ; 则当  $K_{ij} = -1$  时,对应的太阳高度角和伪方位角的值为  $-h_s$  和  $A_s' + 180$ 。而  $K_{ij}$  的取值可以用肉眼大致得到太阳伪方位角来判断。

根据定位原理,将最终得到的太阳空间位置信息(高度角  $h_s$  和伪方位角  $A_s'$ ),电子罗盘传感器测得航向角  $H$  和式(9)代入到式(6)、式(7)、式(8) 3 个方程中,解算测试地点的经纬度。

### 3.2 样机上位机系统

基于 LabVIEW 可视化软件完成样机的上位机系统,系统结构如图 4 所示,主要包括系统初始化模块,多传感器数据的接收和初步处理模块,太阳空间位置的计算和融合处理模块,测试地点经纬度解算模块以及实时动态显示模块。其中,系统初始化模块主要包括系统资源配置、样机中多传感器的数据传输同步处理和全球地磁偏角分布数据加载模块。实时显示模块提供人机交互接口,完成系统的初步设置和信息输出,显示界面如图 5 所示,可显示日期、时间、样机中传感器输出数据、太阳的位置信息(高度角  $h_s$  和伪方位角  $A_s'$ )、经纬度和定位地图,数据更新率可达 10 Hz。

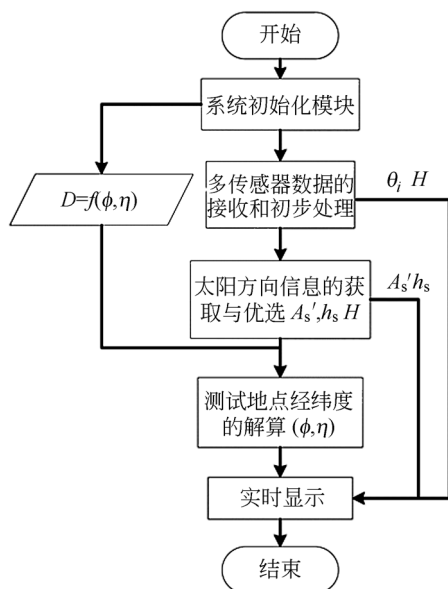


图 4 定位样机的上位机系统运行流程框图

Fig. 4 Flowchart of PC program of position prototype

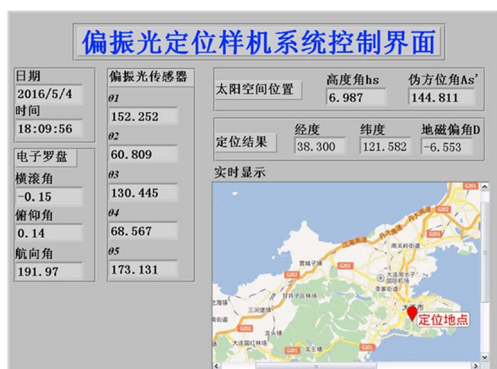


图 5 定位样机的上位机程序控制界面

Fig. 5 Control interface of PC program of position prototype

#### 4 实验测试与结果分析

样机测试地点在大连理工大学机械东楼顶楼,这样可以防止周围建筑物挡住样机的光源信号。具体位置信息为:经度  $121^{\circ}32'38''N$ , 纬度  $38^{\circ}52'45''E$ 。测试时间为 2016 年 5 月 4 日 17:45:15 到 18:38:13。实验装置如图 6 所示。

测试前,根据全姿态三维电子罗盘反馈的横滚角和俯仰角信息,调节样机底部的 4 个脚座将样机调至水平状态。样机中偏振光传感器的精度为  $\pm 0.2^{\circ}$ <sup>[13]</sup>,电子罗盘的精度为  $\pm 0.5^{\circ}$ 。测试时,



图 6 样机室外实验图

Fig. 6 Photograph of position prototype in field

经上位机 LabVIEW 软件程序处理,实时获得太阳的空间位置信息和测试地点的经纬度信息。测试结果如图 7 和图 8 所示。

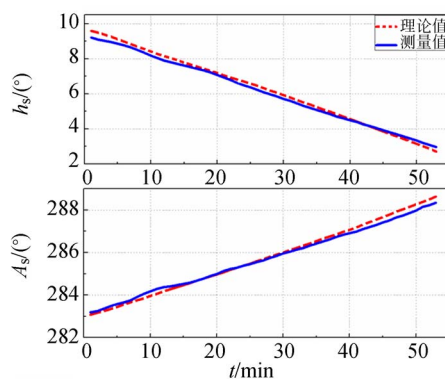


图 7 太阳空间位置对比图

Fig. 7 Comparison of sun position between theoretical and measured values

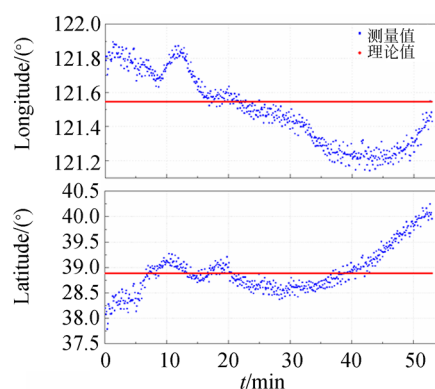


图 8 定位精度测试结果对比图

Fig. 8 Comparison of measured position accuracies with theoretical ones

图 7 表示测试得到的太阳空间位置(高度角

$h_s$  和方位角  $A_s$ ) 的对比图。虚线表示理论值,实线是实验测试值。可以看出,本次测试过程中,定位样机测试得到的太阳空间位置的高度角和方位角的误差均保持在  $\pm 0.3^\circ$  以内。

如图 8 所示,在本次测试时间内,样机经度方向上的定位精度可达  $\pm 0.4^\circ$ ,纬度方向上可达  $\pm 1.2^\circ$ 。实验结果表明,该样机可以实现稳定、实时的定位。

## 5 结 论

为了提高偏振光导航定位的可靠性和实时性,本文提出一种基于多方向偏振光的定位方法并搭建了定位样机。该样机具有轴对称和中心对称的特性,可以同时测量天空中 5 个不同方向的

偏振光信息。通过优选和融合处理,提高了每次测量得到太阳空间位置信息的可能性和准确度,从而提高了定位样机的稳定性和可靠性。为解决样机中多传感器数据实时采集和处理的问题,本文基于 LabVIEW 软件完成了定位样机上位机程序,用以实现实时定位。在长达近 1 h 的静态测试过程中,样机的定位精度可保持在:经度  $\pm 0.4^\circ$ ,纬度  $\pm 1.2^\circ$ 。该实验结果表明,样机的定位精度较高。此外,该偏振光导航定位技术是完全自主式的,误差不随时间积累。搭建的样机整体结构简单、造价低,具有很好的应用前景。

本课题组致力于高精度和高集成度偏振光传感器<sup>[22-23]</sup>的研究,下一步将分析影响样机定位精度的因素,优化算法和样机整体结构,从而进一步提高样机的定位精度。

## 参考文献:

- [1] DOW J M, NEILAN R E, RIZOS C. The international GNSS service in a changing landscape of global navigation satellite systems [J]. *J. Geodesy*, 2009, 83(3-4): 191-198.
- [2] CAFFERY J J, STUBER G L. Overview of radiolocation in CDMA cellular systems [J]. *IEEE Commun Mag.*, 1998, 36(4): 38-45.
- [3] RAMANANDAN A, CHEN A N, FARRELL J A. Inertial navigation aiding by stationary updates [J]. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, 2012, 13(1): 235-248.
- [4] VULFOVICH B, FOGILEV V. New ideas for celestial navigation in the third millennium [J]. *J. Navigation*, 2010, 63(2): 373-378.
- [5] GÁL J, HORVATH 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 the Arctic Circle [J]. *Proceedings of the Royal Society A-mathematical Physical and Engineering Sciences*, 2001, 457: 1385-1399.
- [6] 赵开春, 褚金奎, 姚弘轶, 等. Rayleigh 大气天空光偏振分布仿真与预测 [J]. *四川大学学报: 工程科学版*, 2007, 39(S1): 287-291.
- ZHAO K CH, CHU J K, YAO H Y, et al.. Simulation and prediction for Rayleigh skylight polarization distribution [J]. *Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition*, 2007, 39 (S1): 287-291. (in Chinese)
- [7] WEHNER R G K F. Calibration processes in desert ant navigation: Vector courses and systematic search [J]. *J. Comp. Physiol A Neuroethol Sens. Neural Behav. Physiol.*, 2002, 188(9): 683-693.
- [8] MUHEIM R, PHILLIPS J B, AKESSON S. Polarized light cues underlie compass calibration in migratory song birds [J]. *Science*, 2006, 313(5788): 837-839.
- [9] LAMBRINOS D, MÖLLER R, LABHART T, et al.. A mobile robot employing insect strategies for navigation [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2000, 30(1-2): 39-64.
- [10] SZÁZ D, FARKAS A, BARTA A, et al.. North error estimation based on solar elevation errors in the third step of sky-polarimetric Viking navigation [J]. *Proceeding of the Royal: Mathematical Physical, and Engineering Sciences*, 2016, 472(2191): 20160171.
- [11] 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, CHNEG 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)

- [12] CHU J K, ZHAO K CH, ZHANG Q, *et al.*. Construction and performance test of a novel polarization sensor for navigation[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2008, 148(1): 75-82.
- [13] ZHAO K CH, CHU J K, WANG T CH, *et al.*. A novel angle algorithm of polarization sensor for navigation[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2009, 58(8): 2791-2796.
- [14] LIU Z, ZHANG R, WANG ZH W, *et al.*. Integrated polarization-dependent sensor for autonomous navigation[J]. *Journal of Micro/Nanolithography MEMS and MOEMS*, 2015, 14(1): 0150011.
- [15] CUI Y, CAO N N, CHU J K, *et al.*. Design of skylight polarization measurement system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(6): 1431-1435.
- [16] 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.
- FAN ZH G, XHEN M L, WANG B, *et al.*. Three-dimensional attitude information obtained by the skylight polarization pattern[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(6): 1248-1256. (in Chinese)
- [17] WANG Y L, CHU J K, ZHANG R, *et al.*. A novel autonomous real-time position method based on polarized light and geomagnetic field[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 9725.
- [18] POMOZI I, HORVÁTH G, WEHNER R. How the clear-sky angle of polarization pattern continues underneath clouds: Full-sky measurements and implications for animal orientation[J]. *J. Exp. Biol.*, 2001, 204: 2933-2942.
- [19] 王璐, 王寅龙, 王志文, 等. 基于集成光电探测器的仿生偏振光导航传感器[J]. *传感器与微系统*, 2016, 35(1): 91-94.
- WANG L, WANG Y L, WANG ZH W, *et al.*. Bionic polarized light navigation sensor based on integrated photodetector[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2016, 35(1): 91-94. (in Chinese)
- [20] 中国科学院紫金山天文台. 2016 年中国天文年历 [M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- Purple Mountain Observatory of Chinese Academy of Science. *Astronomical Almanac of China in 2016* [M]. Beijing: Science Press, 2015. (in Chinese)
- [21] FINLAY C C, MAUS S, BEGGAN C D, *et al.*. International geomagnetic reference field: the eleventh generation[J]. *Geophysical Journal International*, 2010, 183(3): 1216-1230.
- [22] CHU J K, WANG ZH W, ZHANG Y J, *et al.*. Integrated blue-sensitive polarization-dependent photodetector[J]. *Journal of Micro/Nanolithography MEMS and MOEMS*, 2013, 12(3): 33005.
- [23] CHU J K, WANG ZH W, GUAN L, *et al.*. Integrated polarization dependent photodetector and its application for polarization navigation [J]. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2014, 26(5): 469-472.

#### 作者简介:



褚金奎(1965—),男,河南平顶山人,博士,教授,博士生导师,1986年于杭州电子科技大学获得学士学位,1989年于西安科技大学获得硕士学位,1992年于北京航空航天大学获得博士学位,主要从事智能机器人、仿生传感器和微机电测试技术等方面的研究。E-mail: chujk@dlut.edu.cn



张慧霞(1990—),女,湖北荆州人,硕士研究生,2014年于大连交通大学获得学士学位,主要从事仿生偏振光导航装置的研究。E-mail: huizi2014@163.com