

文章编号 1004-924X(2011)10-2419-08

基于偏振光传感器的移动机器人导航实验

褚金奎*, 陈文静, 王洪青, 戎成功
(大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要:根据沙蚁 *Cataglyphis* 的导航机理研制了一种检测天空偏振光的导航传感器。为测试传感器室外导航性能,设计了采用传感器输出的航向角控制移动机器人按特定轨迹运动的实验。首先,介绍传感器的结构原理及功能模型,为提高传感器精度,在室内用光学积分球模拟天空偏振光源,用精密转台对传感器输出角度进行补偿,补偿后传感器误差在 $\pm 0.2^\circ$ 以内。然后,简要说明采用的移动机器人平台结构和采用传感器导航的方法。最后,描述导航实验过程,得到了利用光电编码盘输出角度信息与利用偏振光传感器输出航向角两种导航方法的对比实验结果。结果显示,偏振光传感器导航相对于光电编码盘较为精确,二者平均位置误差分别是 1.17 cm 和 31.6 cm。实验证实偏振光传感器误差不随时间累积,能够自主完成移动机器人导航,可用于移动载体自主导航系统。

关键词:仿生机器人;移动机器人;天空偏振光;传感器;导航

中图分类号: TP212.14 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111910.2419

Mobile robot navigation tests with polarization sensors

CHU Jin-kui*, CHEN Wen-jing, WANG Hong-qing, RONG Cheng-gong

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

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

Abstract: A novel polarization sensor based on the mechanism of Sahara ant *Cataglyphis* was developed. To acquire the navigation performance of the sensor outside, several tests which used the output navigation angle of the sensor to control the mobile robot to move along a designed map was conducted. First, the structure and function prototype of the polarization sensor was presented. To improve the performance of polarization sensor, the optic integrating sphere was used as the polarized light source to replace the sky light, and the precision rotating table was taken as the standard angle to compensate the output angle of the sensor. After the compensation process, the angle output error of polarization sensor is within $\pm 0.2^\circ$. Then, the mobile robot and how to use the polarization sensor to control the robot were briefly introduced. Finally, the process of navigation tests and the navigation performance comparison of the optical encoder and the polarization sensor were given. Results show that the latter method is better than the first one, and their average navigation position errors are 1.17 cm and 31.6 cm, respectively. According to the tests, the error of the polarization sensor doesn't accumulate with the time and can give the navigation message independently. In conclusion, it would

收稿日期:2010-08-16;修订日期:2010-12-17.

基金项目:国家 973 重点基础研究发展计划资助(No. 2011CB302101, No. 2011CB302105);中央高校基本科研业务费专项资金资助(No. DUT10ZD104)

play an important role in the automation navigation systems in further way.

Key words: bionic robot; mobile robot; polarized sky light; sensor; navigation

1 引言

随着科学技术的发展,导航技术的应用越来越广泛,不仅是军事指挥和武器制导不可缺少的技术,在社会生产生活中也有极重要地位。目前,导航技术已广泛应用于大地测量、资源探测、自然灾害预测、交通运输、移动网络等方方面面。

导航系统需要通过各种导航传感器输出的位置、角度等信息判断其当前所在位置和下一步执行动作。因此导航传感器是导航技术的重要组成部分。目前,多数导航系统都是通过航位递推算法计算载体的位置,该算法计算过程中主要通过相对位移和相对角度来对导航系统进行定位,而计算过程中相对角度对最终导航系统的定位精度影响较大。因此,高精度的方向传感器的研制对导航系统尤为重要。

导航系统中应用广泛的方向传感器是速率陀螺仪和电磁罗盘^[1]。速率陀螺通过对载体角速度的积分得到载体的航向角。但是速率陀螺仪积分受零漂影响,误差随时间累积使精度降低。而电磁罗盘容易受到电磁干扰,在复杂环境中的应用受到限制,因此通过新导航方法获得方向信息的研究倍受研究者关注。

本文给出一种测量天空偏振光给出方向信息的导航传感器。此传感器是仿照昆虫的复眼结构搭建的。1809年,Arago发现了天空中的偏振现象,后来,芬兰学者 Jozsef Gal、Gabor Hhorvath、Viktor benno meyer-Rochow^[2]等人在芬兰的拉普兰对天空偏振光分布模式进行了测试,给出了24 h内,晴朗天空中偏振光的分布情况。随着对天空偏振光模式的深入了解,利用天空偏振光导航的研究也在同步进行。1949年,Von Frisch^[3]发现蜜蜂可以利用天空的紫外偏振光进行导航。1985年,Fred C. Dyer给出了亚洲蜜蜂导航的原理^[4]。瑞士学者 Rudiger Wehner^[5]讨论了利用偏振光制作导航传感器的可行性。为了测量天空的偏振光分布模式,本文搭建了天空偏振光测量

系统^[6],测量结果表明,在不同的气象条件下,天空偏振光分布的强度和方向信息都可用于导航。参照外国学者的研究,作者对沙蚁的复眼结构进行了进一步分析,建立了新的仿沙蚁偏振光传感器模型^[7-9],并最终搭建了仿生偏振光导航传感器。国内学者也做了相关研究,北京大学晏磊等对天空偏振光的分布模式进行了测试^[10],测试结果与我们课题组测试的实验结果类似,都说明天空偏振光分布模式稳定;哈尔滨工业大学的卢鸿谦^[11]则从理论上研究了天空偏振光导航、GPS、地磁导航、SINS组合导航,并且对三维空间利用偏振光导航进行了初步探索。

本文利用移动机器人平台测试了搭建的偏振光导航传感器室外导航效果。实验结果表明:偏振光传感器能够较精确地测出载体的绝对航向角,测量误差不随时间累积。

2 传感器结构原理及误差补偿

2.1 结构原理

偏振光传感器的偏振光检测结构是仿照昆虫复眼神经感杆搭建的。其中偏振光检测单元是根据昆虫复眼神经感杆设计的,包括对天空偏振光具有选择性的滤光片和对方向垂直的偏振光敏感的偏振片,以及光电二极管和对数放大器。设计的3个偏振光检测单元相互成 0° 、 60° 和 120° 。而传感器的偏振光处理单元是由ARM处理芯片和AD转换芯片组成,主要完成偏振光检测单元检测的天空偏振光的信息处理。天空偏振光信息通过传感器的偏振光检测结构后转换为以下电压信号^[7]:

$$P_1(\varphi) = \lg \frac{1 + d \cos(2\varphi)}{1 - d \cos(2\varphi)}, \quad (1)$$

$$P_2(\varphi) = \lg \frac{1 + d \cos(2\varphi - \frac{2\pi}{3})}{1 - d \cos(2\varphi - \frac{2\pi}{3})}, \quad (2)$$

$$P_3(\varphi) = \lg \frac{1 + d \cos(2\varphi - \frac{4\pi}{3})}{1 - d \cos(2\varphi - \frac{4\pi}{3})}. \quad (3)$$

式中 d 表示天空偏振光的偏振程度; φ 表示天空偏振光的偏振方位角(传感器输出的航向角),是传感器的参考方向与太阳子午线之间的夹角; $P_1(\varphi), P_2(\varphi), P_3(\varphi)$ 表示 3 个偏振光检测单元输出的带有天空偏振光信息的电压信号。经过公式 $\bar{P}(\varphi) = \frac{1}{10^{\beta(\varphi)} + 1}$ 变换整理后得到如下公式:

$$1 - 2\bar{P}_1(\varphi) = d\cos(2\varphi), \quad (4)$$

$$1 - 2\bar{P}_2(\varphi) = d\cos(2\varphi - \frac{2\pi}{3}), \quad (5)$$

$$1 - 2\bar{P}_3(\varphi) = d\cos(2\varphi - \frac{4\pi}{3}). \quad (6)$$

计算公式(5),(6)可以得到航向角:

$$\varphi = \frac{1}{2} \arctan \left\{ \frac{\bar{P}_1(\varphi) + 2\bar{P}_2(\varphi) - \frac{3}{2}}{\sqrt{3} \left[\bar{P}_1(\varphi) - \frac{1}{2} \right]} \right\}. \quad (7)$$

偏振光传感器采用基于 ARM7 的嵌入处理系统完成天空偏振光信息的采集和处理。计算后的航向角度由网口或者串口输出,用于移动机器人平台的导航控制。研制的传感器的实物如图 1 所示。



图 1 偏振光传感器

Fig. 1 Polarization sensor

2.2 误差补偿

偏振光传感器的偏振方向分析器在制作和安装时可能有结构误差;不能保证传感器的 3 个偏振方向分析器与传感器的主方向夹角分别是 $0^\circ, 60^\circ$ 和 120° ,这些误差使传感器精度降低,不进行误差补偿时,传感器输出航向角误差在 $\pm 2^\circ$ 左右,如图 2 所示。由于综合考虑机器人机械结构和安装误差等因素,机器人导航控制中采用的模糊控制器精度设定为 5° ,即最终导航精度为 5° ,也就是说传感器输出航向角精度应该更高才能更好地

满足控制要求,因此要对传感器输出的航向角进行误差补偿。

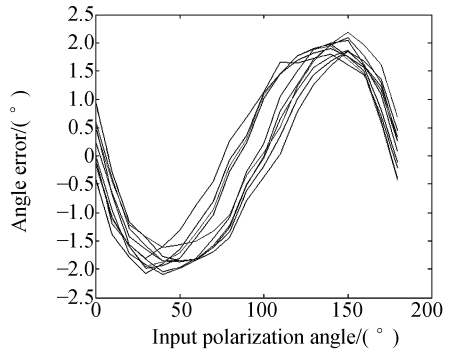


图 2 传感器误差曲线

Fig. 2 Angle error of the sensor

本文采用光学积分器为传感器标定提供稳定均一的偏振光,以模拟天空偏振光。积分球采用直流可调电源供电,供电电压为 6 V,电流为 1.251 A,积分球输出光强为 $150 \mu\text{mol}$ 。采用的精密转台由步进电机控制,控制精密转台的步进电机步距角为 1.8° ,控制时进行 10 细分,同时精密转台的减速比为 180,也就是步进电机每个脉冲转 0.18° ,精密转台旋转 0.001° ,即精密转台精度可达 0.001° ,测量仪器应该比被测量仪器的精度至少高一个数量级,因此采用精密转台补偿传感器误差是可行的。传感器标定或者误差补偿时,将量程分为 10 段,在每段中补偿就可以满足传感器输出要求。本文所述偏振光传感器输出航向角为 $0 \sim 180^\circ$,因此进行误差补偿时,将传感器输出量程分为 18 段,每隔 10° 补偿传感器误差一次,以满足传感器制作要求。传感器误差补偿过程如下:

首先,将传感器置于精密转台上,用步进电机控制转台每旋转 10° 停顿 3 s,旋转 5 周,得到 10 组传感器输出航向角度,如表 1 所示。每组数据中各个点所测量的数据是停顿 3 s 内传感器测量的航向角度平均值,取平均值后有效数据位增加,但是由于转台精度是 0.001° ,航向角度后几位无实际意义,这里没有将后几位数据进行舍入。以精密转台所转角度为精确值,得到传感器航向角度误差如图 2 所示,误差为 $\pm 2^\circ$ 。

其次,对得到的误差求均值,然后采用最小二乘法拟合误差均值曲线,如图 3(a)所示。采用的函数为:

$$f = x(1) + x(2)\sin(a) + x(3)\cos(a) + x(4)\sin(2a) + x(5)\cos(2a), \quad (8)$$

式中 $x(1) - x(5)$ 是函数系数, a 是表 1 中 10 组角度值的平均值组成的向量, f 是拟合后的函数

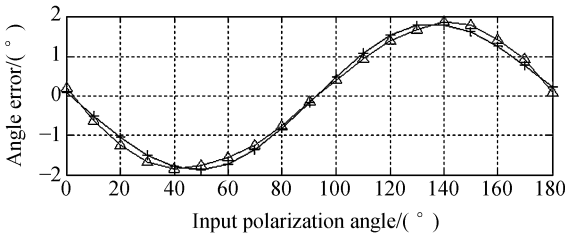
值,拟合过程即可找到 $\sum_{i=1}^{19} (f_i - a_i)^2$ 最小值时的函数 f 表达式,用其来补偿传感器输出的航向角。

由图 3 可以看出补偿后传感器输出航向角度误差在 $\pm 0.2^\circ$ 以内,精度有明显提高,可以满足移动机器人导航控制要求。

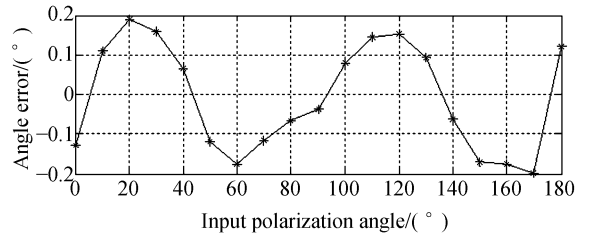
表 1 传感器输出航向角

Tab.1 Output angles of polarization sensor

角度	测试组									
	1 组	2 组	3 组	4 组	5 组	6 组	7 组	8 组	9 组	10 组
0°	0.938 5	0.242 5	0.607	0.465	-0.053 5	-0.416	-0.175 5	-0.135	0.542	0.004 5
10°	9.718 5	9.748 5	9.701	9.753	9.094 5	8.813	9.079 5	9.106	9.416	9.347 5
20°	18.939 5	18.884 5	18.917	18.988	18.641 5	18.613	18.610 5	18.61	18.64	18.672 5
30°	28.658	28.654 3	28.623 5	28.681 6	28.301 5	28.017	28.151 5	28.114	28.274 9	28.085 6
40°	38.223 5	38.144 5	38.144	38.381	38.402 5	38.093	38.128 5	38.062	37.949	37.904 5
50°	48.153 5	48.154 5	48.124	48.441	48.690 5	48.349	48.295 5	48.201	48.029	48.024 5
60°	58.173 5	58.164 5	58.184	58.491	59.132 5	58.773	58.647 5	58.563	58.189	58.164 5
70°	68.383 5	68.304 5	68.424	68.671	69.548 5	69.207	69.058 5	68.966	68.539	68.384 5
80°	78.663 5	78.564 5	78.764	78.961	80.278 5	79.937	79.818 5	79.736	78.919	78.734 5
90°	89.393 5	89.224 5	89.504	89.661	90.688 5	90.236	90.298 5	90.236	89.729	89.494 5
100°	99.823 5	99.634 5	99.974	100.071	101.138 5	101.026	101.088 5	101.026	100.229	100.004 5
110°	110.353 5	110.034 5	110.654	110.511	111.658 5	111.446	111.458 5	111.446	111.049	110.794 5
120°	121.002 5	120.787 5	121.161	121.231	121.638 5	121.776	121.768 5	121.776	121.496	121.261 5
130°	131.439 5	131.256 5	131.559	131.671	131.718 5	131.896	131.878 5	131.896	131.885	131.704 5
140°	141.670 5	141.600 5	141.754	141.979	141.798 5	141.986	141.948 5	141.986	141.999	141.966 5
150°	151.846 5	151.855 5	151.876	152.19	151.607 7	151.762 5	151.710 3	151.762 5	152.051	152.095 5
160°	161.601 5	161.672 5	161.582	161.97	161.438 5	161.501	161.457 5	161.501	161.617	161.768 5
170°	171.134 5	171.258 5	171.072	171.519	170.605 5	170.481 5	170.717	170.524	170.99	171.199 5
180°	180.341 5	180.447 5	180.248	180.683	179.565 5	179.603	179.565 5	179.603	180.079	180.273 5



(a) 补偿前
(a) Before compensation



(b) 补偿后
(b) After compensation

图 3 传感器误差曲线

Fig.3 Angle error curves of sensor

3 移动机器人平台

3.1 平台简介

移动机器人由决策层和执行层组成,决策层主要用于采集传感器数据,实现路径规划和发出指令功能;执行层接收指令控制移动机器人运动^[12]。移动机器人采用一种四轮并对称的驱动底盘,左右两轮为驱动轮,前后两轮为万向轮。两个驱动轮上分别装有 500 line 的光电编码盘,经过四倍频处理后,移动机器人每运动 1 mm,光电编码盘输出 3 个脉冲,这样可以通过每个驱动轮上的光电编码盘计算机器人运动的位移,同时也可以通过两个驱动轮上的光电编码盘求得移动机器人前进的角度,从而实现对移动机器人的导航。同时,将前文提到的偏振光传感器固定到移动机器人上,使偏振光传感器的零度方向与机器人主体方向重合,这样即通过偏振光传感器给出的方向信息和光电编码盘给出的位置信息进行移动机器人导航^[13],移动机器人实物如图 4 所示。



图 4 移动机器人实物图

Fig. 4 Mobile robot

3.2 实验导航方法

实验采用的导航方法为航位推算法,航位推算通过相对位移传感器和方向传感器来测量移动机器人的位移,进而推算出机器人当前的位置。具体过程如下:

假设在某一时刻 t_k ,可以公式(9)和(10)推算出移动机器人的位置 (x_k, y_k) :

$$x_k = x_0 + \sum_{i=0}^k s_i \cos \theta_i, \quad (9)$$

$$y_k = y_0 + \sum_{i=0}^k s_i \sin \theta_i. \quad (10)$$

如图 5 所示,公式中 (x_0, y_0) 是移动机器人在

t_0 时刻的初始位置, s_i, θ_i 分别是移动机器人从 t_i 时刻的位置 (x_i, y_i) 到 t_{i+1} 时刻的位置 (x_{i+1}, y_{i+1}) 的位移矢量的长度和绝对航向角(在建立的坐标系中的绝对角度)。 ω_i 是相对航向角,为连续 2 个绝对航向之差。

由其推算过程可以看出:方向和距离传感器的误差都会造成移动机器人位置误差的累积,尤其是方向传感器对最终推算结果的影响更为突出。

进行传感器室外移动机器人导航试验时,采用模糊控制器控制移动机器人的旋转角度,控制器精度设定为 5° ,由此传感器精度能够达到控制要求。实验中,一方面希望能证明偏振光传感器在室外确实可以用于导航;另一方面希望能利用偏振光传感器提高航位推算的精度,因此分别采用两种方法来获得相对航向角 ω_i 。方法一:将偏振光传感器的零通道方向和机器人本体主方向重合放置于机器人平台上,偏振光传感器输出的航向角作为相对航向角 ω_i ;方法二:通过移动机器人两个轮子上的光电编码盘之差经过换算得到相对航向角 ω_i 。具体计算过程是:转弯的时候,一个轮子几乎不动相当于圆点,另外一个轮子旋转,通过光电编码盘的计数,得到其轮子走过的弧长,因此转过的相对航向角 ω_i 可以弧长与两轮子之间的距离相比得到。两种方法都是通过光电编码盘获得位移矢量的长度 s_i 。

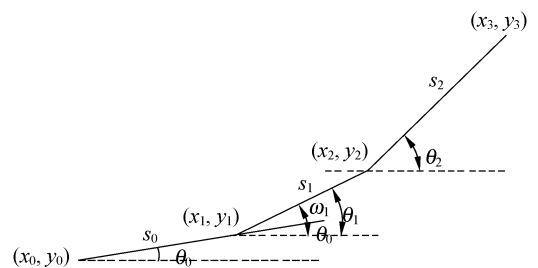


图 5 航位推算方法

Fig. 5 Principle of dead reckoning

4 传感器导航实验

4.1 实验轨迹

2010 年 11 月在大连理工大学机械工程学院停车场进行了导航实验,经纬度分别为北纬

38.879°、东经 121.527°。实验实际场景如图 4 所示,实验设定机器人的轨迹如图 6 所示,即由 5 段 2 m 长的线段组成的五角星形,总长 10 m。

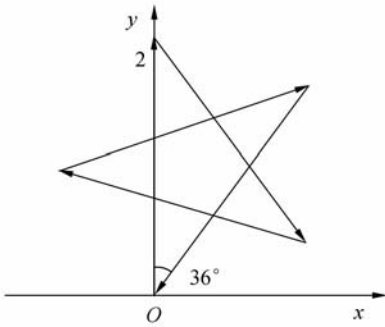


图 6 实验设定轨迹

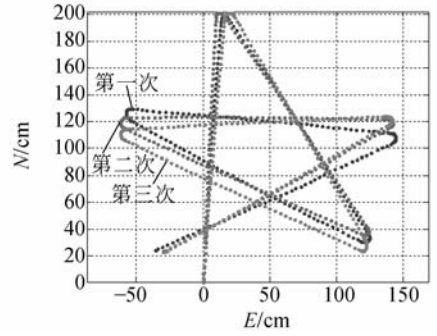
Fig. 6 Trajectory of experiments

实验进行了 6 次,其中 3 次实验是以偏振光传感器航向角作为导航控制的相对航向角,另外 3 次是通过移动机器人两个轮子上的光电编码盘之差经过换算得到相对航向角。

4.2 实验结果及讨论

对实验记录的数据采用 MATLAB 程序进行处理,结果如图 7 所示。图中分别是偏振光传感器导航和光电编码盘导航的第一、二、三次实验结果,横纵坐标分别是机器人位置 x 的坐标和 y 坐标,单位是 cm。传感器的导航性能通过每段直线的方向误差和最终位置误差(移动机器人终点和起始点之间的距离)来衡量。

首先,由图 7 可以明显看出采用偏振光传感器输出的航向角进行导航时,移动机器人的方向误差较小。在实验时,移动机器人做直线运动时方向误差较小,部分偏差是由于实验地点路面不平坦,机器人直线行走过程中受到干扰造成的,因



(b)光电编码盘的导航实验结果

(b)Results of navigation by optical encoder

图 7 两种导航实验结果比较

Fig. 7 Comparison of two navigation methods

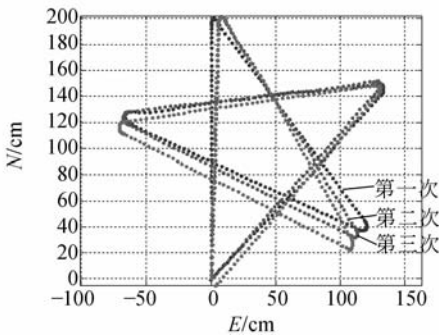
此这里只给出移动机器人采用偏振光传感器控制在图 6 中各个拐点处的导航方向误差,如表 2 所示。从表 2 中可以看出,偏振光传感器导航误差在 5°以内,而光电编码盘的导航误差在初始时相对精确,但随时间增加,误差越来越大,这也是图 7 中两种方法导航实验结果不同的原因。此实验数据一方面说明偏振光传感器能够进行室外移动机器人控制;另一方面说明偏振光传感器输出的导航角度信息误差不随时间累积,而光电编码盘给出的角度信息随时间累积,偏振光传感器导航性能优于光电编码盘。

表 2 偏振光传感器和光电编码盘导航误差对比

Tab. 2 Comparison of navigation error between polarization sensor and optical encoder (°)

方法	实验	第一拐点	第二拐点	第三拐点	第四拐点
偏振光	1 次	1.49	0.006	-0.43	0.75
	2 次	1.34	0.12	-1.19	-3.97
	3 次	1.79	-1.13	-2.21	3.49
光电编码盘	1 次	7.4	-0.1	-11.7	-7.9
	2 次	4.2	5	-12.2	-8.4
	3 次	6.8	-1.5	-9.1	-10.6

其次,采用偏振光传感器进行导航的位置误差也远远小于光电编码盘,实验结果对比数据如表 3 所示。当机器人轨迹较为复杂,轨迹中需要转弯较多时,偏振光传感器输出的航向角相对精确,不随时间累积,因此通过航位推算法得到的导航位置误差较小;而光电编码盘输出角度信息随时间累积,导致最终误差较大。



(a)偏振光传感器的导航实验结果

(a)Results of navigation by polarization sensor

表3 移动机器人位置误差

Tab.3 Position errors of mobile robot (cm)

位置误差(3次)	光电编码盘	偏振光传感器
平均误差	31.6	1.77
最大误差	36.1	3.5
最小误差	28.9	0.2

5 结 论

本文模仿沙蚁导航定位机理,研制了一种新型的偏振光传感器,偏振光传感器经过室内误差补偿后输出航向角度误差在 $\pm 0.2^\circ$ 以内。为了测试偏振光传感器的室外导航性能,使用搭建的移

动机器人平台进行了偏振光传感器导航和光电编码盘导航的对比实验。实验结果表明:偏振光传感器导航角度误差在 $\pm 5^\circ$ 以内,精度明显高于光电编码盘,并且其输出航向角不随时间累积;另外,在复杂需要转弯较多的轨迹中,偏振光传感器导航位置精度也明显优于光电编码盘,在进行五角星实验中,偏振光传感器和光电编码盘进行移动机器人控制的平均位置误差分别为1.17 cm和31.6 cm。综上所述,偏振光传感器能够用于室外移动机器人导航,并且其输出的绝对航向角误差不随时间累积,精度较高,计算方法简单,自主性高,是一种可以用于移动载体自主导航的高性能导航传感器,有进一步研究的价值。

参考文献:

- [1] BORENSTEIN J, EVERETT H R, FENG L, *et al.*. Mobile robot position: sensors and techniques [J]. *Journal of Robotic Systems*, 1997(14), 231-249.
- [2] 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*, 2001, 457: 2085-2099.
- [3] FRISCH K. Die Polarisation des Himmelslichtes als orientierender Faktor bei den T/inzen der Bienen [J]. *Experientia*, 1949, 5: 142-148.
- [4] DYER F C. Mechanisms of dance orientation in the Asian honey bee *Apis florae* L [J]. *Journal of Comparative Physiology A*, 1985, 157: 183-198.
- [5] WEHNER R. Polarization vision—a uniform sensory capacity [J]. *The Journal of Experimental Biology*, 2001, 204: 2589-2596.
- [6] 崔岩, 曹楠楠, 褚金奎, 等. 天空偏振光测量系统的设计[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)
- [7] 赵开春, 褚金奎, 姚弘轶, 等. Rayleigh 大气天空偏振光分布仿真与预测[J]. *四川大学学报*, 39: 287-291, 2007.
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: 287-291. (in Chinese)
- [8] 褚金奎, 赵开春, 王体昌, 等. 仿生偏振导航传感器实验模型的构建与标定[J]. *微纳电子技术*, 2007, (7/8): 376-378.
CHU J K, ZHAO K CH, WANG T CH, *et al.*. Construction and calibration for bionic navigation sensor [J]. *Micro/nano Electronic Technology*, 2007, (7/8): 376-378. (in Chinese)
- [9] 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: Phys.*, 2008, 148: 75-82.
- [10] 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.
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)
- [11] 卢鸿谦, 尹航, 黄显林. 偏振光/地磁/GPS/SINS 组合导航方法[J]. *宇航学报*, 2007, 28(4): 897-902.
LU H Q, YIN H, HUANG X L. Polarized-light/geomagnetism/GPS/SINS integrated navigation [J]. *Journal of Astronautics*, 2007, 28(4): 897-902. (in Chinese)
- [12] 李荣华, 褚金奎, 王洪青, 等. 机器人分层分布式控制系统设计与实现[J]. *微计算机信息*, 2008, 24(11-2): 229-230.

LI R H, CHU J K, WANG H Q, *et al.*. Design and realization of a stratified and distributed control system on robot [J]. *Control & Automation*, 2008, 24(11-2): 229-230. (in Chinese)

[13] CHU J K, WANG H Q, CHEN W J, *et al.*. Ap-

plication of a novel polarization sensor to mobile robot navigation [C]. *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, 2009: 3763-3768.

作者简介:



褚金奎(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事微机械电子系统(MEMS)、微传感器和微执行器、机构学、智能机器人和微机器人等方面的研究。E-mail: chujk@dlut.edu.cn



王洪青(1985—),男,山东烟台人,硕士,主要从事智能仪器控制方面的研究。Email: hongqing1072004@yahoo.com.cn



陈文静(1986—),女,内蒙赤峰人,硕士研究生,主要从事偏振光传感器的研究。E-mail: jingyu2004@126.com



戎成功(1987—),男,安徽阜阳人,硕士研究生,主要从事嵌入式系统开发及移动机器人控制方面的研究。Email: rchengong2008@163.com

● 下期预告

长焦距离轴三反光学系统的杂散光分析

李晓平,沙晟春,胡亭亮

(中国科学院 上海技术物理研究所,上海 200083)

为了满足现代遥感仪器对杂散光抑制的要求,对有中间像的长焦距离轴三反系统的杂散光特性进行了模拟分析。通过正追和倒追的分析方式,确定系统杂散光的主要来源,找到系统的重要面;根据分析结果,提出了相应的抑制措施;用系统重要面的变化定性评价杂散光的抑制效果。分析结果表明,采用抑制措施后可以很好地抑制系统的一次散射杂散光。用点源透过率 PST 定量评价光学系统的消杂散光能力。分别计算东西、南北方向离轴角为 $\pm 40^\circ$ 的 PST 值,并结合光机系统的应用环境对系统的杂散光抑制能力进行了定量分析。