

引用格式: CHU Jinkui, CHEN Jianhua, LI Jinshan, et al. Polarized Light/binocular Vision Bionic Integrated Navigation Method [J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(5):0528001

褚金奎,陈建华,李金山,等.一种偏振光/双目视觉仿生组合导航方法[J].光子学报,2021,50(5):0528001

一种偏振光/双目视觉仿生组合导航方法

褚金奎,陈建华,李金山,佟坤,李晋,胡瀚珮

(大连理工大学 机械工程学院 微系统研究中心, 辽宁 大连 116024)

摘 要:针对复杂干扰环境下智能移动机器人自主导航问题,为了实现低成本、高精度、强鲁棒性、完全自主的导航,提出了一种偏振光/双目视觉仿生组合导航方法。首先,设计了图优化紧耦合的组合算法,推导优化函数并将偏振定向传感器/双目视觉传感器的数据融合,然后,搭建仿生偏振定向传感器/双目视觉传感器仿生组合导航实验平台,最后,通过室外汽车搭载实验对该仿生组合导航系统的性能进行了测试,并与传统视觉算法进行了比较。结果显示:航向角精度较传统视觉算法提高了38.9%,位置精度提高了8.9%。该组合导航系统可以减小传统视觉算法航向角误差、提高鲁棒性,而且使用仿生偏振定向传感器实时性好、抗干扰能力强,可以满足室外地面载体导航时的精度和可靠性要求,同时该组合导航系统使用两种仿生导航方式,更加接近生物导航机理。

关键词:实时定位与地图构建系统;仿生偏振定向传感器;仿生组合导航

中图分类号:P161.3;U666.1

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20215005.0528001

Polarized Light/binocular Vision Bionic Integrated Navigation Method

CHU Jinkui, CHEN Jianhua, LI Jinshan, TONG Kun, LI Jin, HU Hanpei

(Microsystem Research Center, School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract: A bionic integrated navigation method of polarized light/binocular vision is proposed to realize the low-cost, high-precision, strong robustness and completely autonomous navigation for intelligent mobile robot under complicated disturbing environment. Firstly, based on graph-based optimization, a tightly-coupled navigation algorithm is designed. By constructing the optimization function, the data of polarization sensor and binocular vision sensor are fused. Then, the experimental platform of the bionic integrated navigation method is built. Finally, the performance of the bionic integrated navigation method is tested through the outdoor vehicle carrying experiment, and compared with the traditional vision algorithm. The results show that the heading angle accuracy is improved by 38.9% and the position accuracy is improved by 8.9% compared with the traditional vision algorithm. The proposed method can reduce the heading angle error of vision algorithm and improve the robustness. Moreover, the bionic polarization sensor has the advantages of good real-time performance and strong anti-interference ability, which can meet the accuracy and reliability requirements of outdoor ground carrier navigation. The proposed method uses two kinds of bionic navigation methods, which make comprehensive use of the advantages of biological navigation.

Key words: Simultaneous localization and mapping; Bionic polarization directional sensors; Bionic combination navigation

OCIS Codes: 280.1415; 150.0155; 150.4232; 150.5758; 010.0280

基金项目:国家自然科学基金(No.51675076),中国高校基本科研业务费(Nos.DUT17GF109, DUT20LAB303)

第一作者:褚金奎(1965—),男,教授,博士,主要研究方向为智能机器人、仿生传感器和微机电测试技术。Email: chujk@dlut.edu.cn

收稿日期:2020-12-09;录用日期:2021-01-28

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

0 引言

随着现代科学技术的不断发展,导航技术在交通运输、资源勘探、移动通信等许多领域发挥着越来越重要的作用。目前的常见的导航技术主要有惯性导航、卫星导航、天文导航、地磁导航等^[1-4],惯性导航自主性好、短时精度高、不受干扰等优点,但是长时间积分过程会产生累积误差,而高精度的惯导价格昂贵;卫星导航具有全球性、全天候的特性,但易受干扰,在有高大建筑的街道、茂密的丛林中无法正常使用^[5];天文导航根据已知天体位置来计算载体姿态,存在最大的缺点是精度低、集成度不高;地磁导航易受环境磁性材料产生磁场的影响。因此通过新的研究思路和方法,寻求新的导航方式成为现在研究的热门。

近些年实时定位与地图构建系统(Simultaneous Localization and Mapping, SLAM)得到深入研究,主要模仿生物双眼测距定位^[6],已经成为移动机器人在未知环境下自主导航和规划的关键技术,它可以看作是移动机器人构建环境地图的过程,同时利用新构建的地图提取位置和方向^[7],广泛应用于无人驾驶车辆^[8-9]、智能机器人^[10]、增强现实等领域^[11-12]。常用于SLAM的传感器有单目相机^[13]、双目相机^[14]和深度相机等^[15]。但是由于SLAM是纯视觉导航算法,对环境的适应性差,精度低,会产生纯旋转误差大等问题。

由于单一传感器导航能力有限,将多种导航方式进行合理组合,可有效的改善导航性能。DISSANAYAKE G等^[16]提出了视觉与惯性组合的方法,使用立体相机和IMU通过最小化重投影和惯性优化函数来估计相机的姿态、速度和IMU偏差,这种组合导航方式成本高,会产生累积误差;SAMARASEKERA S等^[17]提出一种采用单目摄像机、带有三轴陀螺仪和加速度计的MEMS型惯性测量单元(IMU)和GPS单元,以精确和高鲁棒的方式跟踪摄像机在6个自由度下的运动,但在GPS信号在不好的时候会产生严重丢失问题。ZHANG Xiao等^[18]将MEMS惯性器件与RatSLAM进行组合,弥补了惯性器件误差随时间累积等缺点。生物学家研究发现自然界中许多生物有着神奇的导航能力,仿生偏振导航就是仿照昆虫研制的一种新导航方式^[19-23],具有自主性好,抗电磁干扰的优点。WU Jin等^[24]将偏振光/地磁/GPS/SINS组合起来,成功应用到四悬翼无人机上,提高抗磁干扰能力。WANG Daobin等^[25]将偏振光与UKF_SLAM进行组合,一定程度上提高了SLAM导航精度,但使用的是滤波方法,下一时刻位置只与上一时刻位置有关,缺少考虑其它时刻。综上所述,目前大多将惯性器件等传感器与SLAM组合,偏振光与SLAM组合大都为基于滤波的松耦合,不利于异常诊断,抗干扰能力弱,偏振光与SLAM紧耦合的研究鲜有报道。

本文在视觉SLAM导航算法的基础上,引入了仿生偏振定向传感器,设计了一种仿生偏振定向传感器/双目视觉传感器组合导航系统,利用图优化将多传感器数据进行融合,完成多传感器紧耦合,设计了基于车载导航实验平台的室外导航实验,并与传统SLAM导航进行对比,证明了该组合导航系统具有较强的抗干扰能力、自主性好、精度高,能够为地面汽车提供准确的导航信息,未来具有广阔应用前景,也为组合导航提供一种新思路。

1 天空偏振分布理论及仿生偏振导航传感器测向原理

研究发现大气中主要包含气体分子为78%的 N_2 和21%的 O_2 ,固体颗粒为气溶胶和冰晶等成分,当太阳光进入大气中由于与空气中的气体分子和气溶胶碰撞发生散射作用,在天空中分布规律且稳定的偏振光,在晴朗无云的天气条件下,大气中小直径的粒子占多数,可以采用瑞利散射理论模型^[26],本文主要针对晴朗天空使用瑞利散射理论建立偏振光场分布模型。

本文选用东北天坐标系为导航坐标系(n),右前上坐标系为载体坐标系(b),将仿生偏振定向传感器与载体系固联,定义三个姿态角为俯仰角(ϕ)、横滚角(θ)、航向角(ψ),见图1。由瑞利散射理论,天空任意一点的偏振方向(偏振 E 矢量)总是垂直太阳 S 、观测点 O 和被观测点 P 组成的 OSP 平面。仿生偏振定向传感器设计结构及原理可参考文献[27-28],通过传感器测量天顶点入射光偏振 E 矢量与传感器体轴的夹角,进而计算传感器与太阳子午线的夹角求得航向角。

偏振 E 矢量在导航坐标系中表示为

$$E^n = [e_x \quad e_y \quad e_z]^T \quad (1)$$

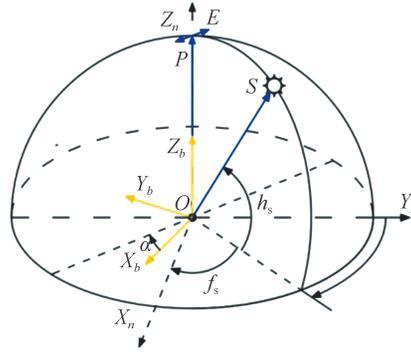


图1 偏振光定向原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of polarized light orientation principle

α 为仿生偏振定向传感器的体轴与观测点偏振 E 矢量之间的夹角,可以得到的偏振 E 矢量在载体坐标系中的坐标表示为

$$E^b = [\cos \alpha \quad \sin \alpha \quad 0]^T \quad (2)$$

通过方向余弦矩阵可以实现 b 系和 n 系之间相互转换,载体坐标系到导航坐标系的方向余弦矩阵为 C_b^n ,即

$$E^n = C_b^n E^b \quad (3)$$

方向余弦矩阵 C_b^n 展开为

$$C_b^n = \begin{bmatrix} \cos\phi \cos\psi + \sin\phi \sin\theta \sin\psi & \sin\psi \cos\theta & \sin\phi \cos\psi - \cos\phi \sin\theta \sin\psi \\ -\cos\phi \sin\psi + \sin\phi \sin\theta \cos\psi & \cos\psi \cos\theta & -\sin\phi \sin\psi - \cos\phi \sin\theta \cos\psi \\ -\sin\phi \cos\theta & \sin\theta & \cos\phi \cos\theta \end{bmatrix} \quad (4)$$

由观测点为天顶点,则 $\theta=0$ 、 $\phi=0$,实际过程中如果不能正对天顶点会影响仿生偏振定向传感器的测量精度,文献^[29]提出一种补偿算法,有效的提高传感器的角度输出精度。传感器视线方向可表示为

$$OP_n = [0 \quad 0 \quad 1]^T \quad (5)$$

h_s, f_s 分别表示太阳高度角和太阳方位角,太阳视线在导航坐标系下的投影坐标可以表示为

$$OS_n = [\cos h_s \cos f_s \quad \cos h_s \sin f_s \quad \sin h_s]^T \quad (6)$$

由瑞利散射理论可知

$$E^n = OS_b \times OP_n \quad (7)$$

联立式(1)~(7),可以求得航向角

$$\psi = \alpha + f_s + \frac{\pi}{2} \quad (8)$$

2 多传感器组合导航算法

该融合方案的系统结构设计如图2所示,包括双目相机、仿生偏振定向传感器。其中,仿生偏振定向传感器可提供航向信息,双目相机通过视觉SLAM算法可解算得到位置、速度等姿态信息^[30]。由于地面移动导航主要取决于航向角、速度和位置信息,而视觉SLAM在导航过程中航向角在连续转弯的情况下误差会很大,双目相机在环境不好的情况下会丢失速度信息。仿生偏振定向传感器输出的角度信息可以用来修正航向角,以视觉SLAM算法解算的航向角与仿生偏振定向传感器所测得的航向角之差作为优化变量,采用非线性优化将误差优化到最小,得到最接近真实情况的航向角,达到精确导航的目的。

$$h_{ij} = h(C_i, X_j)^T \quad (13)$$

式中, C_i 为相机运动每帧图像, 即相机姿态, X_j 为相机观察到的路标, h_{ij} 为一个地球坐标系下的点 X_j 转换到相机坐标系下投影到图像上所得的像素坐标。

$$\begin{cases} d = \frac{fb}{z} \\ d = u_L - u_R \end{cases} \quad (14)$$

式中, z 为路标特征点的投影深度, d 为视差, b 为基线, f 为焦距, u_L 与 u_R 分别为统一特征点在左目和右目上的像素坐标。

双目视觉传感器可以获得路标的像素坐标 (u, v) 和深度信息 Z , 因此, 以双目视觉传感器获得的像素坐标与换算出的像素坐标差作为第一维与第二维误差项, 左目投影到右目上像素坐标差作为第三维误差项, 双目视觉传感器解算航向角与偏振光测量航向角之差作为第四维误差项, 为

$$\begin{cases} e_1 = u - f_x \frac{X}{Z} - c_x \\ e_2 = v - f_y \frac{Y}{Z} - c_y \\ e_3 = u_L - u_R + \frac{bf}{Z} \\ e_4 = p_i - \psi_i \end{cases} \quad (15)$$

式中, e 为误差项, u, v 为像素坐标, X, Y, Z 为特征点三维坐标, f 为横焦距, c_x 与 c_y 为像素原点在图像平面上横纵向平移, b 为基线, p 为偏振光传感器所测航向角。

根据式(13)~(15)构建优化函数, 有

$$\arg \min_{C_1 \dots C_m, X_1 \dots X_n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \|h(C_i, X_j) - \hat{x}_{ij}\|_{\Sigma_{ij}} + \sum_{i=1}^{m-1} \|f(C_i, P_j) - C_{i+1}\|_{\Gamma_i} \quad (16)$$

优化函数中包含两部分, 第一部分表示观测值与真实之间的误差, 第二部分表示 SLAM 航向角与偏振光测量角度之间的误差, 其中, 假设图像观测点符合高斯分布 $x_{ij} \sim N(\hat{x}_{ij}, \Sigma_{ij})$ 。 $f(C_i, P_j)$ 为偏振光数据 P_j 作用于 C_i 后的运动参数, Γ_i 为运动方程的协方差矩阵。通过优化使得这两项误差和达到最小, 可以解得一组最优 $C_1 \dots C_m, X_1 \dots X_n$ 和 P_j 。

最后, 根据构建的 BA 优化函数, 计算出最优的位置, 姿态信息, 实现多传感器信息融合, 见图 3。

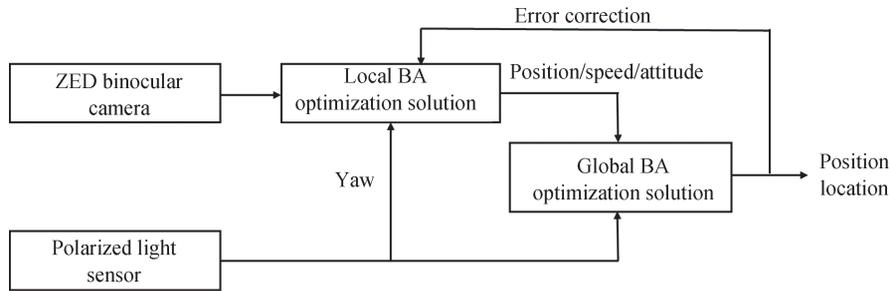


图 3 组合导航方案

Fig. 3 Combined navigation solutions

3 组合导航平台设计与实验

3.1 实验平台

自主搭建组合导航实验平台如图 4 所示。组合导航平台的主体为两层分隔的铝合金板支架, 用于安装传感器、电源等其它相关设备, 其中控制系统采用笔记本电脑上搭建 ROS 机器人操作系统进行控制, ROS 上搭建了双目视觉传感器驱动程序、偏振光传感器驱动程序、高精度的光纤惯导 SPAN-CPT 驱动软件和改进的 SLAM 程序, 笔记本上搭载有 NVIDIA GeForce GTX1050 的 GPU, 可以快速处理双目视觉传感器采集到的图片信息, 进行位姿解算; 本课题组研发的偏振光传感器安装在平台的正上方, 无遮挡, 并且传感器体

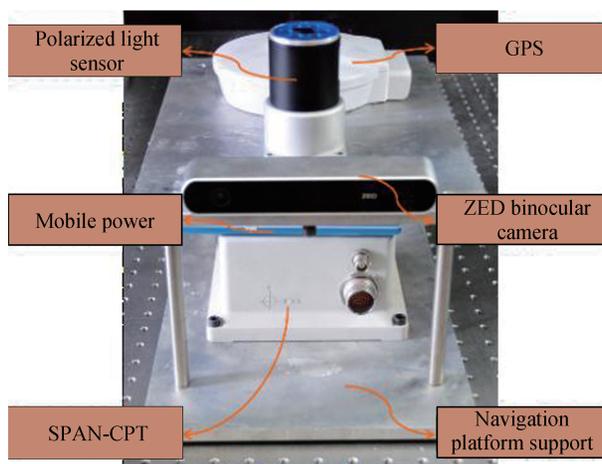
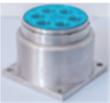


图4 仿生组合导航系统平台搭建
Fig. 4 Bionic combined navigation system platform building

轴方向组合导航平台的正前方保持一致,通过USB串口与ROS之间进行数据传输,用来提供航向信息进行修正航向角;高精度的光纤惯导SPAN-CPT安装在组合导航平台中间层,它的GPS安装在组合导航平台上方,偏振光传感器旁边的位置上,它的测量值作为偏振光/SLAM组合导航控制系统姿态的标准参考信息;移动电源可以为整个导航系统提供电能,提高续航能力。组合导航平台使用传感器性能参数如表1所示。

表1 传感器参数
Table 1 Sensor parameters

Picture	Type of sensor	Model	Accuracy	Sample frequency
	Polarized light sensor	Independent development	Indoor 0.1° Outdoor <math>< 2^\circ</math>	20 Hz
	Binocular visual sensor	ZED-Stereolabs	<math>< 0.2\text{ m}</math> Scope 0~20 m	15~60 Hz
	GNSS+INS	SPAN-CPT	Pitch 0.015° Roll 0.015° Yaw 0.05°	100 Hz

3.2 室外导航实验与结果

室外车载导航实验时,任何传感器的误差都会影响导航的精度,对于地面导航系统,航向误差对整个导航系统的影响更为突出,一旦航向角出现误差会使载体轨迹与实际行驶轨迹发生严重偏离,并且随着时间的累积,偏离程度会越来越大。偏振光传感器可以为地面载体导航提供航向信息,并且自主性好,无累积误差,抗干扰能力强,可以稳定准确的提高导航精度。

本文采用自主搭建的仿生组合导航实验平台分别进行角度对比试验和车载导航实验,在有连续转弯的环境条件下分别进行了基于偏振光/双目视觉的组合导航系统和传统双目视觉SLAM导航系统的对比实验,描述如下。

3.2.1 角度对比实验

实验地点选择大连理工大学机械东楼停车场,经纬度分别为北纬38.880 383°,东经121.532 249°,时间为11月26日下午3点30分,天气晴朗,太阳高度角为9.75°,太阳方位角为52.73°,本文中该实验分别将偏振光传感器和双目视觉传感器固定在精密转台上,电脑给定转台标准角度,分别记录双目视觉传感器解算的角度和偏振光传感器所测量的航向角度。实验中,转台连续缓慢转从0°开始旋转到180°,再继续从-180°转到0°,每经过90°停止30 s,连续旋转一周,如图5所示。

图6是不同传感器解算的航向角。可以明显看出,采用偏振光解算出航向角误差小于使用双目视觉传感器解算出的航向角,在进行角度测试时,一方面因为误差导致,而另一方面双目视觉SLAM在120~160s和200~220s时因为采集画面时远处有车辆行驶,造成双目视觉传感器在解算角度时出现较大误差,角度误差对比数据如表2所示。

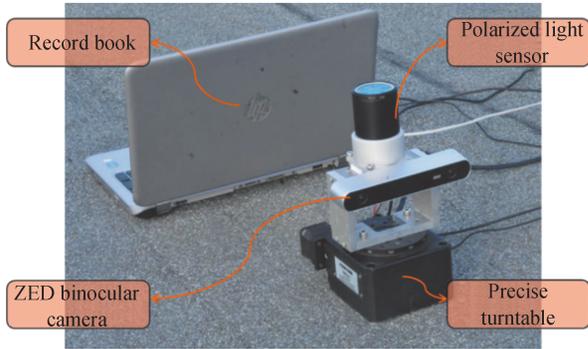


图5 角度实验装置

Fig. 5 Angle experimental apparatus

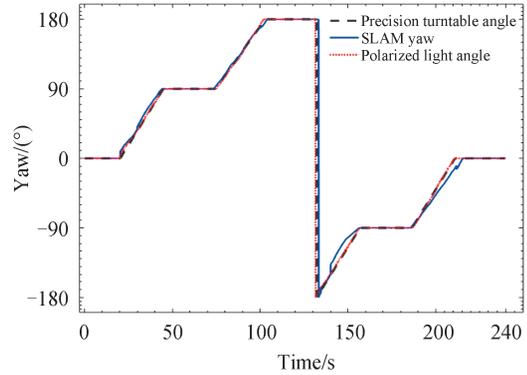


图6 SLAM与偏振光航向角对比

Fig. 6 SLAM versus polarized light heading angle

表2 两种导航方式下误差对比

Table 2 Result of two type integrated navigation system

Error	SLAM yaw angle	Polarized light angle
Angle offset / (°)	4.28	1.59

可以看出偏振光的导航解算航向角精度较传统双目视觉SLAM导航解算航向角精度提高了。实验结果也说明了在环境中运动物体干扰对SLAM角度解算会产生较大影响,偏振光传感器则具有较强的抗干扰能力,实时性好,但只能提供二维航向角信息,将偏振光传感器应用于双目视觉SLAM系统上,可以为SLAM提供更精确的航向角信息。

3.2.2 室外车载导航实验

实验地点选择辽宁省大连市甘井子区高新园小平岛别墅中心广场,经纬度分别为北纬38.832°,东经121.503°。实验时间为2020年11月11日下午3点,天气晴朗,太阳高度角为16.50°,太阳方位角为50.09°。实验实际轨迹是一个半径为70m的近似圆形,周长约为377m,绕行5圈,车载平台如图7所示,实验记录地点如图8所示。



图7 车载导航实验平台

Fig. 7 Experimental platform for vehicle navigation



图8 实验记录地点

Fig. 8 Laboratory recording site

实验数据记录采用ROS机器人操作系统的rosvbag功能包,同时录制偏振光传感器、双目视觉传感器和SPAN-CPT实时数据,偏振光传感器采用20Hz,双目视觉传感器采用10Hz,SPAN-CPT采用100Hz,SPAN-CPT可作为组合导航系统姿态的标准参考信息,录制数据集可以线下实时重复播放模拟实际场景,

避免实际运行时每次轨迹不一致对不同组合导航系统性能评估造成影响。

车载导航轨迹如图9所示,航向角数据如图10所示,黑色线条表示理论轨迹和理论航向角,红色轨迹表示偏振光/双目视觉传感器组合导航系统的轨迹和航向角,蓝色轨迹表示双目视觉SLAM导航的轨迹和航向角。SLAM轨迹评估主要利用ATE(绝对轨迹误差)和RPE(相对位姿误差)两种方法。评估方法描述如下:ATE通过直接计算SPAN-CPT位姿的真实值分别与偏振光/SLAM组合导航系统和视觉SLAM导航系统估计值之间的差,首先根据位姿的时间戳将SPAN-CPT真实轨迹和组合导航系统估计值进行对齐,然后计算每对位姿之间的差值。RPE用于计算相同两个时间戳上的位姿变化量的差,在用时间戳对齐之后,SPAN-CPT真实位姿和估计位姿每隔1 m计算位姿变化量,然后对该变化量做差,可以计算组合导航系统的漂移和轨迹误差,本文主要基于RPE性能评估,评估如图11~12所示。

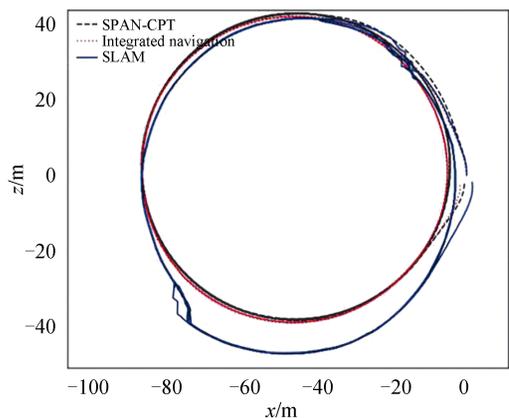


图9 车载导航轨迹

Fig. 9 Vehicle navigation track

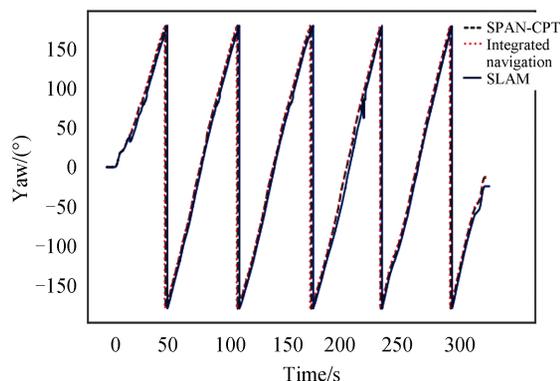


图10 车载导航航向角

Fig. 10 Vehicle-mounted navigation heading angle

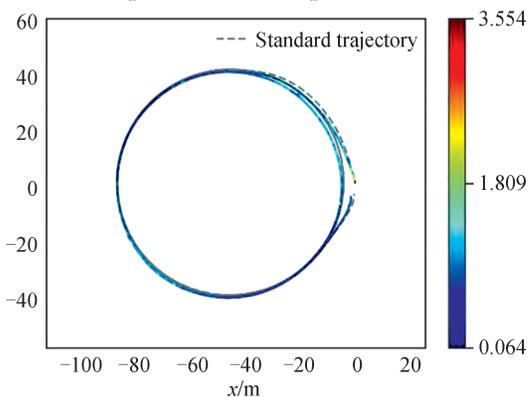


图11 偏振光/SLAM组合RPE误差

Fig. 11 RPE error in polarized light /SLAM combination

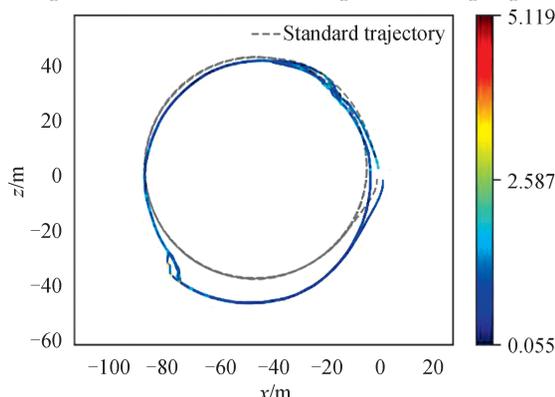


图12 SLAM导航RPE误差

Fig. 12 RPE error in SLAM navigation

角度和位置对比如表3~4所示,可以得到偏振光/SLAM组合导航系统的平均位置误差为0.83 m,平均角度误差为0.33°,纯视觉SLAM导航系统的平均位置误差为0.91 m,平均角度误差为0.59°,在车载导航轨迹图(-75, -30)处,航向角图(200, -90)处因为环境特征点少、纯视觉SLAM导航的数据波动较大,对比采用偏振光/双目视觉组合导航系统的轨迹具有明显偏差,在环境特征点少角度解算误差大的时候偏振光/SLAM组合导航系统不受影响。通过图10和表3可以看出在连续转角的情况下,相比于纯视觉SALM轨迹精度提高了8.6%,航向角精度提高了38.6%,由上述实验可以看出采用偏振光/SLAM组合导航系统具有

表3 两种导航方式下角度误差对比

Table 3 Comparison of angle error in two navigation modes

Angle error	Maximum error/(°)	Mean error/(°)	RMSE/(°)	Std/(°)
SLAM	21.58	0.54	1.48	1.38
Bionic integrated navigation	8.11	0.33	0.67	0.58

表4 两种导航方式下位置误差对比
Table 4 Comparison of position error in two navigation modes

Position error	Maximum error/m	Mean error/m	RMSE/m	Std/m
SLAM	5.12	0.91	0.99	0.42
Bionic integrated navigation	3.55	0.83	0.93	0.40

较高的精度,且实时性好、误差不随时间累积。

4 结论

本文提出了一种仿生偏振光传感器与SLAM系统中多传感器融合的方法,设计了基于偏振光/双目视觉传感器的组合导航算法,搭建了组合导航实验平台,在室外进行了车载实验,并与传统视觉SLAM导航方式进行了对比。实验结果表明:传统SLAM导航系统平均位置误差与角度误差分别为0.91 m、0.54°,偏振光/双目视觉传感器组合导航系统平均位置误差与角度误差分别为0.83 m、0.33°。航向角精度较传统SLAM导航系统提高了38.9%,位置精度提高了8.9%,可以证明偏振光/双目视觉传感器组合导航系统优于传统纯视觉SLAM导航精度。

本文提出的组合导航方法可以用于地面二维空间导航控制。基于偏振光/双目视觉传感器的组合导航与传统视觉SLAM导航相比,可以显著提高导航精度,一定程度上解决了视觉SLAM连续转角误差大和纯旋转不能初始化的问题,使用偏振光传感器后系统具有实时性好、抗干扰能力强等优点,同时该组合导航系统使用纯光学器件,更加接近生物导航机理,为仿生导航提供了一些参考,目前点源式仿生偏振定向传感器适用于晴朗无云的环境条件下,少量云雾对该传感器的影响不大。光线强弱只会在传感器正对太阳光时候有影响,在阴天和多云天气条件会存在影响,后续工作研究穿透性较强的紫外波段偏振光^[32]、成像式偏振光传感器以及去云算法的研究,以增强偏振光传感器的使用范围。

参考文献

- [1] 秦永元. 惯性导航[M]. 北京:科学出版社,2006.
- [2] WEI Wei, WU Yunyun. Status and prospect of INS/CNS/GNSS integrated navigation technology [J]. Modern Navigation, 2014, 5(1): 62-65.
魏伟,武云云. 惯性/天文/卫星组合导航技术的现状与展望[J]. 现代导航, 2014, 5(1): 62-65.
- [3] QUAN W, LI J, GONG X, et al. INS/CNS/GNSS integrated navigation technology[M]. Heidelberg: Springer, 2015.
- [4] ZHOU Jun, GE Zhilei, SHI Guiguo, et al. Key technique and development for geomagnetic navigation[J]. Journal of Astronautics, 2008, 29(5): 1467-1472.
周军,葛致磊,施桂国,等. 地磁导航发展与关键技术[J]. 宇航学报, 2008, 29(5): 1467-1472.
- [5] LIU Yanliang, ZHENG Haiping, XU Yantian, et al. Development status and trend of global navigation satellite system[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2019, 7(1): 18-21.
刘艳亮,张海平,徐彦田,等. 全球卫星导航系统的现状与进展[J]. 导航定位学报, 2019, 7(1): 18-21.
- [6] ZHAO Yunxiu, QUAN Wei, HAN Cheng, et al. Perceptive distance estimating based on comfort information for stereo images[J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(2): 0215001.
赵云秀,权巍,韩成,等. 基于立体舒适度的立体图像感知距离估计[J]. 光子学报, 2020, 49(2): 0215001.
- [7] CADENA C. Past, present, and future of simultaneous localization and mapping: Toward the robust-perception age[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2016, 32(6): 1309-1332.
- [8] XU Yunxi. Stereo visual localization based on generalized orthogonal iterative algorithm[J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(8): 1225-1230.
许允喜. 基于广义正交迭代算法的立体视觉定位[J]. 光子学报, 2011, 40(8): 1225-1230.
- [9] SHEN S J. Multi-sensor fusion for robust autonomous flight in indoor and outdoor environments with a rotorcraft MAV [C]. 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2014.
- [10] LEE T J, KIM C H, CHO D D, A monocular vision sensor-based efficient SLAM method for indoor service robots[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 66(1): 318-328.
- [11] SAEEDI S. Navigating the landscape for real-time localization and mapping for robotics and virtual and augmented reality [C]. Proceedings of the IEEE, 2018, 106(11): 2020-2039.
- [12] DAVISON A J. Mono SLAM: Real-time single camera SLAM[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2007(6): 1052-1067.
- [13] LIN Y, GAO F, QIN T, et al. Autonomous aerial navigation using monocular visual-inertial fusion[J]. Journal of Field

- Robotics, 2017, 34(12):21732.
- [14] MUR-ARTAL R, TARDOS J D. ORB-SLAM2: an open-source SLAM system for monocular, stereo and RGB-D Cameras[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2016, 33(5):1255-1262.
- [15] YOUSIF K, TAGUCHI Y, RAMALINGAM S. MonoRGBD-SLAM: Simultaneous localization and mapping using both monocular and RGBD cameras[C]. IEEE, 2017.
- [16] DISSANAYAKE G, NEWMAN P, CLARK S, et al. A solution to the simultaneous localization and map building (SLAM) problem[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2013, 17(3):229-241.
- [17] OSKIPER T, SAMARASEKERA S, KUMAR R. Multi-sensor navigation algorithm using monocular camera, IMU and GPS for large scale augmented reality [C]. 2012 IEEE international symposium on mixed and augmented reality (ISMAR), 2012.
- [18] ZHANG Xiao, HU Xiaoping, ZHANG Lilian, et al. An improved bionic navigation algorithm based on RatSLAM[J]. Navigation and Control, 2015, 14(5):73-79, 47.
张潇, 胡小平, 张礼廉, 等. 一种改进的RatSLAM仿生导航算法[J]. 导航与控制, 2015, 14(5):73-79, 47.
- [19] WEHNER R, GALLIZZI K, FREI C, et al. Calibration processes in desert ant navigation: vector courses and systematic search[J]. Journal of Comparative Physiology A: Sensory, Neural, and Behavioral Physiology, 2002, 188(9): 683-693.
- [20] MULLER M, WEHNER R. Path integration in desert ants, *fortisecataglyphis*[C]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1988, 85(14): 5287-5290.
- [21] REPPERT S M, ZHU H, WHITE R H. Polarized light helps monarch butterflies navigate[J]. Current Biology, 2004, 14(2): 155-158.
- [22] DACKE M, DOAN T A, O'CARROLL D C. Polarized light detection in spiders[J]. Journal of Experimental Biology, 2001, 204(14):2481-2490.
- [23] WANG Guanghui, GUO Zhengdong, 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.
- [24] CHU Jinkui, WU Jin, LI Jinshan, et al. Application of polarization sensor in quadrotor helicopter[J]. Acta Electronica Sinica, 2020, 48(1): 198-203.
褚金奎, 武进, 李金山, 等. 偏振光传感器在四旋翼飞行器中的应用[J]. 电子学报, 2020, 48(1): 198-203.
- [25] WANG Daobin. The research of SLAM algorithm based on the sky polarized light[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014.
王道斌. 基于天空偏振光的SLAM方法的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014.
- [26] ZHAO Kaichun, CHU jinkui, YAO Hongyi, et al. Simulation and prediction for rayleigh skylight polarization distribution [J]. Advanced Engineering Sciences, 2007, 59(s1):287-291.
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, 59(s1): 287-291.
- [27] ZHAO Kaichun, CHU jinkui. Study of angle measurement optoelectronic model on emulating polarization-sensitive compound eye of insect[J]. Micronanoelectronic Technology, 2005, (12): 541-545.
褚金奎, 赵开春. 仿昆虫复眼偏振敏感测角光电模型研究[J]. 微纳电子技术, 2005, (12): 541-545.
- [28] CHU Jinkui, ZHAO Kaichun, WANG Tichang, et al. Research on a novel polarization sensor for navigation[C]. IEEE, 2007.
- [29] ZHI W, CHU J K, LI J S, et al. A novel attitude determination system aided by polarization sensor[J]. Sensors, 2018, 18(1):158.
- [30] MUR-ARTAL R, TARDOS J D. ORB-SLAM2: an open-source SLAM system for monocular, stereo and RGB-D cameras[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2016, 33(5):1255-1262.
- [31] 高翔, 张涛. 视觉SLAM14讲从理论到实践[M]. 北京: 电子工业出版社.
- [32] ANDRAS B, GABOR H. Why is it advantageous for animals to detect celestial polarization in the ultraviolet? Skylight polarization under clouds and canopies is strongest in the UV[J]. Journal of Theoretical Biology, 2004, 226(4):429-437.