

## 偏振光传感器在四旋翼飞行器中的应用

褚金奎, 武 进, 李金山, 支 炜

(大连理工大学机械工程学院, 辽宁大连 116023)

**摘 要:** 为了实现偏振光传感器在实际三维空间中的导航应用,设计了一种基于仿生偏振光导航传感器、微惯性测量单元(MIMU)与全球定位系统(GPS)的组合导航控制系统,并实际应用到了四旋翼导航控制之中. 本文首先介绍了偏振光传感器的功能模型和测角原理. 其次采用扩展卡尔曼滤波(EKF)技术设计了偏振光传感器、MIMU、GPS的信息融合算法,通过室外飞行试验对该导航系统的性能进行了测试,并与传统MIMU/GPS/电子罗盘导航系统进行了比较. 结果显示:在有磁场干扰环境下,基于偏振光的导航控制系统平均位置精度较传统导航系统提高了50.4%. 实验结果表明:该导航控制系统实时性好、精度较高、抗电磁干扰能力强,且误差不随时间累积,基本满足移动载体进行自主导航时的精度和可靠性要求.

**关键词:** 偏振光传感器; 四旋翼; 导航; 扩展卡尔曼滤波

**中图分类号:** TP212.9      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112(2020)01-0198-06

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>      **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2020.01.024

## Application of Polarization Sensor in Quadrotor Helicopter

CHU Jin-kui, WU Jin, LI Jin-shan, ZHI Wei

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

**Abstract:** In order to apply the polarization sensor to the real three-dimensional navigation, an integrated navigation control system was designed based on the bionic polarized light navigation sensor, micro inertial measurement unit (MIMU) and global positioning system (GPS), and was applied to the quadrotor navigation control. Firstly, the functional model and angle measurement principle of the polarization sensor was presented. Then, the extended Kalman filter (EKF) technology was used to design the information fusion algorithm of the polarization sensor, MIMU and GPS. The performance of the navigation system was validated by an outdoor flight experiment and was compared with the traditional MIMU/GPS/compass navigation system. The results show that the mean position accuracy of the navigation system based on polarized light is 50.4% higher than that of the traditional navigation system in the presence of magnetic interference. It is indicated that the polarized light navigation control system has good real-time performance, high precision, strong anti-electromagnetic interference capability and the error does not accumulate over time, which can meet the accuracy and reliability requirements when the mobile carrier implements autonomous navigation.

**Key words:** polarization sensor; quadrotor; navigation; extended Kalman filter (EKF)

### 1 引言

作为四旋翼飞行器控制系统的重要组成部分,导航系统一直备受研究者关注. 精确的导航信息是实现四旋翼飞行器稳定控制和自主导航的重要因素. 现有导航系统中角速率陀螺体和电子罗盘可以提供航向信息<sup>[1]</sup>. 由于角速率陀螺受零漂影响,误差会随着时间累积使精度降低,而电子罗盘易受外界磁场干扰,在室外复杂环境中的应用受到极大限制. 因此,研究新型导航

传感器获取精确姿态信息成为研究热点.

偏振光导航是一种新型的导航方式,其思想借鉴于地球上一些昆虫的导航<sup>[2,3]</sup>,是一种完全自主的导航方式,具有误差不随时间累积,抗电磁干扰等优点,在未来移动载体导航中具有较高的应用价值. 目前,国内外学者已经对其进行了大量相关研究<sup>[4-8]</sup>. 在应用研究方面, Dimitrios Lambrins 等人<sup>[9]</sup>模仿沙蚁复眼结构,搭建了一个角度测量装置,并在地面移动机器人上进行了实验,验证了偏振光的导航机理. 文献[10]利用自主设

计的六通道偏振光导航传感器,成功进行了地面移动机器人应用实验<sup>[11]</sup>.文献[12]基于偏振光传感器提出了一种适用于城市路面车辆的组合导航方法,并通过跑车实验验证了该组合导航方法的可行性.以上研究均为二维平面导航,它和三维导航在各自侧重点和应用上有所不同,地面移动载体的导航为二维平面导航,而三维导航需要实时测量载体(无人机、导弹等)位置和姿态信息,难度相对较大.为了将其扩展到三维空间的导航,文献[13]从理论上推导了偏振光用于三维空间的组合导航的原理,通过仿真实验验证了该组合导航方法的可行性.在实际三维导航中,载体不能一直保持水平状态,会影响偏振光传感器的测量精度.针对偏振光传感器在三维空间中由于倾斜所造成的测量误差这一问题,文献[8]提出一种补偿算法,有效的提高了传感器的测角精度.综上所述,目前偏振光导航的研究多侧重于地面移动载体的二维导航定向,而对于偏振光传感器的无人机三维导航应用研究鲜有报道.

为实现偏振光传感器在实际三维空间中的导航应用,并确保在特殊环境下的隐蔽性和抗干扰能力,本文设计了一种基于偏振光/MIMU/GPS的组合导航控制系统,利用EKF算法对多传感器信息进行融合,设计了基于四旋翼实验平台的室外导航控制实验,对该导航系统得性能进行了测试,实现了四旋翼飞行器预定航迹自主飞行控制,证明了该导航控制系统具有较强的抗干扰能力,且实时性好、精度高,能够为无人机提供准确的导航信息,具有广阔的应用前景,也为偏振光传感器在无人机中的应用提供了参考.

## 2 偏振光传感器的定向原理

本文选择北东地坐标系为导航坐标系( $n$ ),前右下坐标下坐标系为载体坐标系( $b$ ),偏振光传感器与载体固接在一起,这里可以认为偏振光传感器的体坐标系与载体坐标系重合,如图1所示,其中 $S$ 表示太阳位置, $OP$ 表示观测方向.导航坐标系到载体坐标系的方向余弦矩阵为 $C_n^b$ ,三个姿态角分别定义为俯仰角( $\gamma$ )、横滚角( $\theta$ )、航向角( $\psi$ ).

偏振光的传感器的工作原理和结构设计图可参考文献[14,15].根据偏振光传感器测量得到的偏振角 $\alpha$ ,可以计算得到入射光 $E$ 矢量方向在载体坐标系中的表示:

$$\mathbf{e}_p^b = [\cos\alpha \quad \sin\alpha \quad 0]^T \quad (1)$$

传感器视线方向在 $b$ 系中的表示为:

$$\mathbf{a}_{op}^b = [0 \quad 0 \quad -1]^T \quad (2)$$

根据瑞丽散射模型,入射光 $E$ 矢量方向垂直于OSP平面,因此有如下关系:

$$\mathbf{e}_p^b = k\mathbf{a}_{op}^b \times \mathbf{C}_n^b \mathbf{a}_{os}^n \quad (3)$$

其中, $k$ 为常数.

太阳视线方向在导航坐标系下的投影可表示为:

$$\mathbf{a}_{os}^n = [\cosh_s \cos f_s \quad -\cosh_s \sin f_s \quad -\sinh_s]^T \quad (4)$$

其中 $h_s, f_s$ 分别表示太阳高度角和太阳方位角.联立式(1)~(4)可求得导航坐标系下的航向角:

$$\psi = \arctan \frac{A}{B} - \arcsin\left(\frac{-C}{\sqrt{A^2 + B^2}}\right) - f_s \quad \text{或}$$

$$\psi = \arctan \frac{A}{B} - \arcsin\left(\frac{-C}{\sqrt{A^2 + B^2}}\right) - f_s + \pi$$

其中:

$$\begin{cases} A = \sin\gamma \sin\theta + \cot\alpha \cos\theta \\ B = \cos\gamma \\ C = (\cot\alpha \sin\theta - \sin\gamma \cos\theta) \tan h_s \end{cases}$$

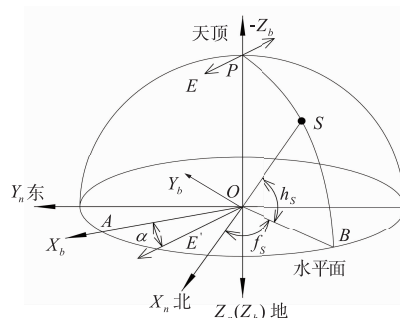


图1 偏振光定向原理示意图

## 3 多传感器信息融合算法

该融合方案的系统结构设计如图2所示,包括MIMU、偏振光传感器、GPS.其中,偏振光传感器提供航向信息,GPS提供位置和速度信息.MIMU中的加速度计可以用来修正俯仰角和横滚角<sup>[16,17]</sup>,以MIMU解算的航向角、位置、速度和偏振光传感器、GPS所测得的航向角、位置、速度之差作为观测量,采用卡尔曼滤波去估计组合导航系统的误差状态,并用这些误差状态的估计值去修正系统,以减小导航误差,达到精确导航的目的.

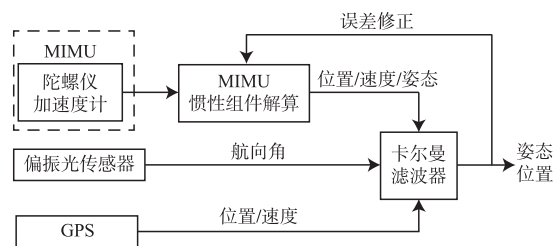


图2 组合导航方案

### 3.1 状态方程构建

首先定义15维误差状态向量 $X$ 如下:

$$X = [\delta\varphi \quad \delta v \quad \delta p \quad \varepsilon \quad \nabla]^T \quad (5)$$

其中,  $\delta\varphi = [\delta\gamma \quad \delta\theta \quad \delta\psi]$  为姿态误差角,  $\delta v = [\delta v_N \quad \delta v_E \quad \delta v_D]$  为速度误差,  $\delta p = [\delta L \quad \delta\lambda \quad \delta h]$  为位置误差,  $\varepsilon = [\varepsilon_{gx} \quad \varepsilon_{gy} \quad \varepsilon_{gz}]$  为陀螺仪漂移误差,  $\nabla = [\nabla_{ax} \quad \nabla_{ay} \quad \nabla_{az}]$  为加速度计零漂误差。

卡尔曼滤波器的状态方程定义如下:

$$\dot{X} = FX + W \quad (6)$$

其中,  $F$  为状态转移矩阵, 即捷联惯性导航系统误差方程的系统矩阵, 可参考文献[18],  $W$  为过程高斯白噪声。

### 3.2 观测方程构建

本文选择 GPS 和偏振光导航传感器为观测对象, 系统的观测向量定义如下:

$$Z = [Z_{GPS} \quad Z_{pol}]^T \quad (7)$$

其中,  $Z_{GPS}$  表示以 GPS 为观测对象的观测矢量,  $Z_{pol}$  表示以偏振光传感器为观测对象的观测矢量。

GPS 可以测得载体的速度和位置信息, 因此, 以 GPS 为观测对象的观测矢量定义如下:

$$Z_{GPS} = \begin{bmatrix} Z_v \\ Z_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{MIMU} - V_{GPS} \\ P_{MIMU} - P_{GPS} \end{bmatrix} = H_{GPS} X + v_{GPS} \quad (8)$$

其中,  $V_{GPS}$  和  $V_{MIMU}$  分别表示 GPS 获得速度、MIMU 获得速度;  $P_{GPS}$  和  $P_{MIMU}$  分别表示 GPS 获得位置和 MIMU 获得位置,  $H_{GPS} = [0_{6 \times 3} \quad I_{6 \times 6} \quad 0_{6 \times 6}]$ ,  $v_{GPS}$  表示 GPS 的观测噪声。

取 MIMU 解算得到的航向角  $\psi_{MIMU}$  和偏振光传感器输出的航向角  $\psi_{pol}$  之差作为观测量, 设载体的实际航向角为  $\psi$ , 则 MIMU 解算得到的航向角可表示为:

$$\psi_{MIMU} = \psi + \delta\psi_{MIMU} \quad (9)$$

偏振光传感器输出的航向角可表示为:

$$\psi_{pol} = \psi + \delta\psi_{pol} \quad (10)$$

式(9)、(10)中,  $\delta\psi_{MIMU}$  是 MIMU 解算输出的航向角误差,  $\delta\psi_{pol}$  偏振光传感器的航向角误差。

则航向角观测方程为:

$$Z_{pol} = \psi_{MIMU} - \psi_{pol} = \delta\psi_{MIMU} - \delta\psi_{pol} = H_{pol} X + v_{\psi} \quad (11)$$

其中,  $H_{pol} = [0_{1 \times 2} \quad 1 \quad 0_{1 \times 12}]$ ;  $v_{\psi} = \delta\psi_{pol}$  为偏振光传感器航向角的量测白噪声。

因此, 系统的观测方程定义为:

$$Z = HX + V \quad (12)$$

其中,  $H = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 1} & 0_{3 \times 1} & 0_{3 \times 1} & I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 6} \\ 0_{3 \times 1} & 0_{3 \times 1} & 0_{3 \times 1} & 0_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 6} \\ 0 & 0 & 1 & 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 6} \end{bmatrix}$ ,  $V$  为观测噪声。

最后, 根据扩展卡尔曼滤波递推过程, 可以计算出最优位置, 姿态信息, 从而实现多传感器信息融合。

## 4 传感器应用实验

### 4.1 实验平台

自主搭建的四旋翼实验平台如图 3 所示。其中, 控制系统选用 Pixhawk (PIX) 飞控系统, 它集成了含有 3 轴 MEMS 陀螺仪、3 轴 MEMS 加速度计的惯性传感器 MPU6000 和 3 轴电子罗盘 HMC5883L; 偏振光传感器安装在四旋翼机体正上方, 无遮挡, 并保证传感器体轴方向和四旋翼机头方向一致, 通过串口与 PIX 飞控系统之间实现数据传输; GPS 安装在机体上方, 为四旋翼提供位置信息; 高精度 MEMS 航姿参考系统 MTI-300 的测量值作为偏振光/MIMU/GPS 组合导航控制系统姿态的参考信息; 无线数据传输模块可以实现四旋翼和地面站之间的数据传输, 通过地面站可以实时观察四旋翼的飞行状态; 遥控器能够实现偏振光/MIMU/GPS 和电子罗盘/MIMU/GPS 两种组合导航方式的切换。机载传感器的详细性能参数如表 1 所示。

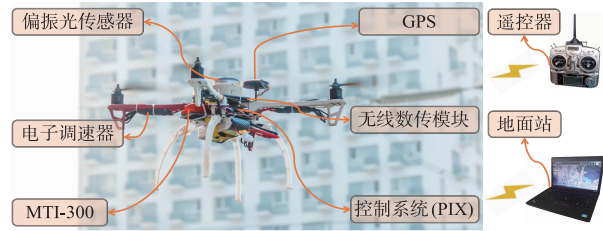


图3 四旋翼实验平台

表 1 传感器性能

传感器类别	型号	性能	采样频率
AHRS	MTI-300	俯仰角 0.3° 横滚角 0.3° 航向角 1°	20Hz
MIMU	MPU-6000	131 LSB/(°/s) 4096 LSB/g	100Hz
GPS	U-BLOX	2.5m CEP/4.0m	10Hz
偏振光传感器	自主研发	室内 0.1°; 室外 <2°	10Hz
电子罗盘	HMC5883L	航向精度 1°~2°	10Hz

### 4.2 室外飞行实验与结果

无人机自主飞行时, 任何传感器的误差都会影响导航精度, 航向误差影响更为突出, 会使得飞行器偏离航线, 造成位置误差的累积。偏振光传感器可以为无人机提供航向信息, 且测量无误差累积, 抗干扰能力强, 能够有效的提高导航精度。

本文采用自主搭建的四旋翼实验平台进行了基于偏振光/MIMU/GPS 组合导航系统的导航控制实验, 并在有电磁干扰环境下分别进行了基于偏振光传感器/MIMU/GPS 的组合导航控制系统和传统电子罗盘/

MIMU/GPS 组合导航系统<sup>[19]</sup>的对比实验,描述如下。

#### 4.2.1 偏振光/MIMU/GPS 组合导航实验

实验地点选择大连理工大学西部校区,经纬度分别为北纬 38.888°,东经 121.512°。实验时间为 2018 年 6 月 24 日上午 6 点,当时天气晴朗,无风,太阳高度角为 15.27°,太阳方位角为 71.03°。实验目标轨迹是一个边长为 20m 的正方形,轨迹总长 80m,飞行高度 15m。

实验中,采用基于偏振光传感器/MIMU/GPS 的组合导航控制系统进行导航实验,并搭载 MTI-300 实时测量并记录四旋翼姿态信息,作为偏振光导航控制系统姿态的标准参考信息,四旋翼无人机连续飞行两圈。图 4 为四旋翼实际飞行轨迹,红色的线条表示理论轨迹,经过计算得到的平均位置误差为 0.514m。计算方法描述如下:理论轨迹是通过四个目标点提前设定的,经纬度是已知的,将轨迹分为上下左右四段分别进行处理,由于四旋翼到达每个目标点时会做姿态调整,因此不考虑距离每个目标点 1m 范围内的位置,分别计算上下两段轨迹上每个点在经度方向上的位置误差,可求出经度方向的平均位置误差,用同样的方法可以计算出左右两段轨迹在纬度方向上的平均位置误差,进而可以计算出四旋翼实际飞行轨迹的平均位置误差。图 5 为姿态角变化曲线,可以看出,采用扩展卡尔曼滤波融合后的姿态角具有较高的鲁棒性,且实时性好、无累积误差累积。图 6 为姿态角误差曲线,俯仰角和横滚角误差在  $\pm 2^\circ$  范围内变化,均方根误差分别为  $0.801^\circ$ 、 $0.819^\circ$ ,航向角误差基本在  $\pm 6^\circ$  范围内变化,均方根误差为  $3.436^\circ$ ,完全可以满足无人机实时导航需求。

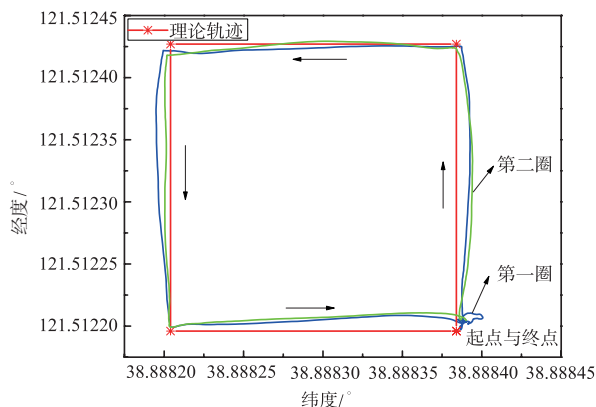


图4 偏振光/MIMU/GPS组合导航实验结果

#### 4.2.2 对比实验

实验地点依然选择大连理工大学西部校区,经纬度分别为北纬 38.885°,东经 121.510°。该区域有高压线经过,会产生较强的电磁干扰,因此,在该环境下进行偏振光/MIMU/GPS 的组合导航实验,可以有效验证偏振光传感器抗电磁干扰能力,也为无人机在强干扰环境下作业(如无人机高压线检修等)提供新的导航

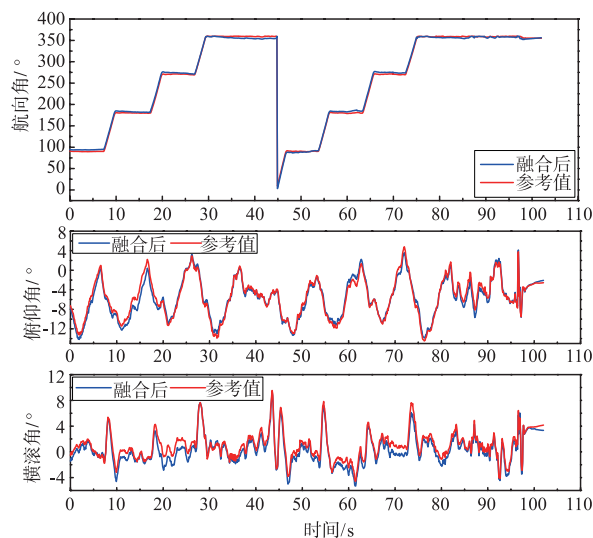


图5 偏振光/MIMU/GPS组合导航姿态角曲线

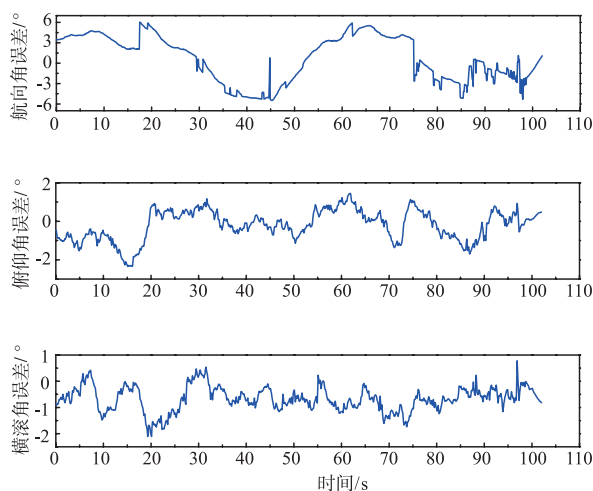


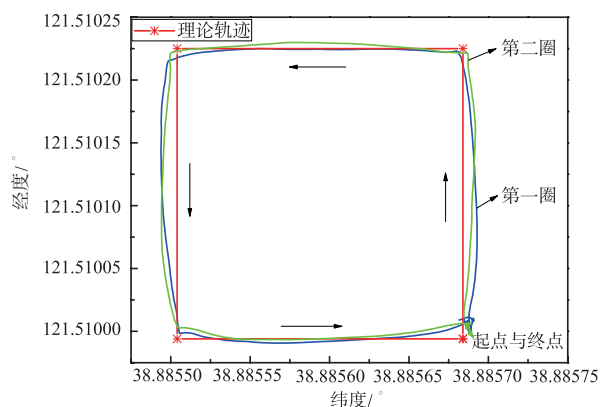
图6 偏振光/MIMU/GPS组合导航姿态角误差曲线

思路。

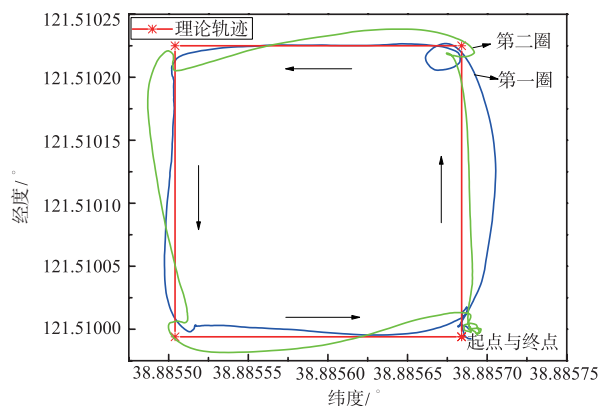
本文中该对比实验的目标轨迹依然是边长为 20m 的正方形,飞行高度为 15m。实验中,分别采用两套导航系统在同一位置、同一目标轨迹下进行了导航实验,一种是本文设计的基于偏振光传感器/MIMU/GPS 的组合导航控制系统,一种是传统的电子罗盘/MIMU/GPS 组合导航系统,在这两套导航系统中都采用了相同的惯性传感器,每一种导航方式下,四旋翼无人机连续飞行两圈。下文给出实验结果。

图 7 是不同导航方式的四旋翼无人机实际飞行轨迹。可以明显看出,采用偏振光/MIMU/GPS 组合导航系统导航时四旋翼的位置误差较小,航向保持飞行时,部分轨迹偏离理论轨迹,一方面是风等不确定因素造成的误差,另一方面也和控制器模型有关,而采用电子罗盘导航时四旋翼位置误差较大,主要原因是由于电磁干扰的存在,造成电子罗盘的测量值出现较大偏差,进

而使得每次到达航点进行悬停时,四旋翼会偏离目标航点,飞往下一个航点时会造成更大的位置误差.位置误差对比数据如表 2 所示,误差计算方法同 4.2.1 小节,可以看出基于偏振光的导航控制系统平均位置精度较传统导航系统提高了 50.4%.实验结果也说明了在有磁场干扰环境下,偏振光/MIMU/GPS 组合导航系统较电子罗盘/MIMU/GPS 具有较强的抗电磁干扰能力,实时性好,能够实现复杂环境下无人机的实时导航控制.



(a) 偏振光/MIMU/GPS组合导航实验结果



(b) 电子罗盘/MIMU/GPS组合导航实验结果

图7 不同导航方式下飞行轨迹对比图

表 2 两种导航方式下的四旋翼位置误差(单位:m)

导航方式	位置误差	纬度方向平均位置误差	经度方向平均位置误差	平均位置误差
	偏振光/MIMU/GPS		0.6455	0.2037
电子罗盘/MIMU/GPS		0.7384	0.9797	0.859

## 5 结论

本文为了实现偏振光导航传感器在三维空间无人机的应用,并确保在特殊环境下的隐蔽性和抗干扰能力,设计了基于偏振光传感器导航控制系统,并成功的在四旋翼无人机上进行了实时导航控制实验,并与传统的导航方式进行了对比.实验结果表明:偏振光/

MIMU/GPS 组合导航系统和传统电子罗盘/MIMU/GPS 导航系统的平均位置误差分别为 0.426m 和 0.859m,平均位置精度较传统导航系统提高了 50.4%.这也证明偏振光传感器的性能在一定程度上优于电子罗盘.

综上所述,偏振光传感器能够用于三维空间无人机的实时导航控制.基于偏振光传感器/MIMU/GPS 的组合导航控制系统能够准确的输出无人机的导航信息,具有实时性好、抗干扰能力强、无误差累积的特性,提高了四旋翼无人机自主飞行的安全性,满足移动载体进行自主导航时的精度和可靠性要求,也为偏振光传感器在三维空间中的导航提供了参考.

## 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(4): 231–249.
- [2] HORVÁTH G, WEHNER R. Skylight polarization as perceived by desert ants and measured by video polarimetry [J]. *Journal of Comparative Physiology A*, 1999, 184(1): 1–7.
- [3] ROSSEL S, WEHNER R. The bee's map of the evector pattern in the sky [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1982, 79(14): 4451–4455.
- [4] 范之国, 高隽, 潘登凯, 等. 利用偏振光、地磁、GPS 进行多信息源融合导航方法的研究与实现 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2009, 34(11): 1324–1327.  
FAN Z G, GAO J, PAN D K, et al. The implementation of a new integrated navigation solution with polarized-light assisting with geomagnetism and GPS [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(11): 1324–1327. (in Chinese)
- [5] CHAHL J, MIZUTANI A. Biomimetic attitude and orientation sensors [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, 12(2): 289–297.
- [6] 王玉杰, 胡小平, 练军想, 等. 仿生偏振视觉定位定向机理与实验 [J]. *光学精密工程*, 2016, 24(09): 2109–2116.  
WANG Y J, HU X P, LIAN J X, et al. Mechanisms of bionic positioning and orientation based on polarization vision and corresponding experiments [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(09): 2109–2116. (in Chinese)
- [7] 王昕, 高隽, 范之国, 等. 偏振光导航测角歧义性问题的解决方法 [J]. *电子学报*, 2014, 42(11): 2184–2190.  
WANG X, GAO J, FAN Z-G, et al. The solution to the problem of the ambiguity of angle calculation in the polarized skylight navigation [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2014, 42(11): 2184–2190. (in Chinese)
- [8] ZHI W, CHU J K, LI J S, et al. A novel attitude determina-

- tion system aided by polarization sensor[J]. *Sensors*, 2018, 18(1):158.
- [9] LAMBRINOS D, LLER R M, LABHART T, et al. A mobile robot employing insect strategies for navigation[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2000, 30(1):39-64.
- [10] CHU J K, ZHAO K C, 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.
- [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, CHEN W J, WANG H Q, et al. Mobile robot navigation tests with polarization sensors[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(10):2419-2426. (in Chinese)
- [12] FAN C, HU X P, He X F, et al. Integrated polarized skylight sensor and MIMU with a metric map for urban ground navigation[J]. *IEEE Sensor Journal*, 2017, 18(4):1714-1722.
- [13] 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)
- [14] 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, 42(12):541-545.
- CHU J K, ZHAO K C. Study of angle measurement optoelectronic model on emulating polarization sensitive compound eye of insect[J]. *Micronano Electronic Technology*, 2005, 42(12):541-545. (in Chinese)
- [15] CHU J K, ZHAO K C, WANG T C, et al. Research on a novel polarization sensor for navigation[A]. *Proceedings of the 2007 International Conference on Information Acquisition*[C]. Jeju City, Korea, 2007. 241-246.
- [16] FENG K, LI J, ZHANG X M, SHEN C, et al. A new quaternion-based Kalman filter for real-time attitude estimation using the two-step geometrically-intuitive correction algorithm[J]. *Sensors*, 2017, 17(9):2146.
- [17] 黎永键, 赵祚喜, 高俊文. MEMS 惯性传感器融合的水平姿态解算方法[J]. *南京师范大学学报(工程技术版)*, 2015, 15(02):20-26.
- LI Y J, ZHAO Z X, GAO J W. Design of horizontal attitude estimation using MEMS inertial sensor[J]. *Journal of Nanjing Normal University (Engineering and Technology Edition)*, 2015, 15(02):20-26. (in Chinese)
- [18] TITTERTON D, WESTON J. *Strapdown Inertial Navigation Technology (2nd Edition)* [M]. Institution of Engineering and Technology, 2004.
- [19] SABATELLI S, GALGANI M, FANUCCI L, et al. A double stage Kalman filter for orientation tracking with an integrated processor in 9-D IMU[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2013, 62(3):590-598.

### 作者简介



褚金奎(通信作者) 男, 1965 年生于河南平顶山. 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



武进 男, 1993 年生于甘肃白银. 2016 年于燕山大学获得学士学位. 现为硕士研究生, 主要从事四旋翼无人机控制系统研究.

E-mail: 18742526931@163.com