

doi:10.3788/gzxb20154409.0912003

利用大气偏振模式确定姿态参数的方法

任建斌, 刘俊, 唐军, 王晨光, 张楠, 李大林, 杨江涛

(中北大学 电子测试技术国家重点实验室 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 太原 030051)

摘要:为了满足无人飞行器自主导航对姿态参数提取的需求,提出一种利用大气偏振模式稳定性分布的特征提取飞行器俯仰角和滚转角的方法.从刻画大气光学传输特性的 Rayleigh 散射理论出发,建立了天空偏振光分布的理论和实测两种模式.利用优化算法,从偏振信息中提取出导航用的天空特征点——太阳空间位置,并利用太阳和天顶固定的时空关系,获取天顶点位置信息.利用天顶点坐标建立姿态变换矩阵,解算俯仰角和滚转角大小.通过模拟飞行器控制台,利用理论和实测两种偏振模式数据分析验证,解算的俯仰角均方根误差分别为 0.002° 和 0.0031° ,滚转角均方根误差分别为 0.0236° 和 0.0227° .该偏振方法获取姿态参数时计算简单,解算精确度高.

关键词: Rayleigh 散射; 大气偏振模式; 导航; 姿态

中图分类号: P401; Q241.2

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)09-0912003-7

Attitude Parameters Determination by the Skylight Polarization Pattern

REN Jian-bin, LIU Jun, TANG Jun, WANG Chen-guang, ZHANG Nan, LI Da-lin, YANG Jiang-tao

(Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement, Science and Technology on Electronic Test and Measurement Laboratory, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: To address the issue of attitude determination for the autonomous navigation of the unmanned vehicles, an approach to define the pitch and roll angle of the vehicle by means of the stable distribution of skylight polarization pattern was proposed. Firstly, based on the Rayleigh scattering theory, we establish the theoretical and practical detected patterns of the polarized skylight. Secondly, through optimization, we obtain the data of the astronomical marker—the location of the sun based on the polarization data detected. Then, with respect to the relatively consistent space-time relation between the sun and the zenith, the location of the zenith is thus figured out. Finally, the coordinate of the zenith is adopted to establish the attitude rotation matrix and by which to work out the pitch and roll angles. In addition, by setting up a simulation vehicle platform to acquire the theoretical and practical polarization data, the effectiveness of the approach is tested. The calculated root-mean-square errors of the pitch angle are 0.002° and 0.0031° respectively for the theoretical and practical simulation test, and errors of the roll angle are 0.0236° and 0.0227° respectively. The results show that the approach to attitude determination through polarization detecting has advantages in easy handling and high accuracy.

Key words: Rayleigh scattering; Skylight polarization pattern; Navigation; Attitude

OCIS Codes: 120.5410; 010.1290; 290.1310; 290.5855; 290.5870

0 引言

近年来,利用大气偏振模式进行的仿生导航成为导航领域研究的热点内容^[1].大气偏振模式是由于空气中分子、粒子的散射作用而形成的具有稳定分布的自然现象^[2].研究表明,许多动物都可以利用大气偏振

模式为每日的外出觅食活动提供导航参考^[3].例如,生活在北非沙漠中的一种蚂蚁,在缺乏足够视觉和嗅觉的高温环境中,蜿蜒前行数百米,在获取到食物后,能沿近乎直线的路径准确归巢^[4].蜜蜂每日蜿蜒飞行数千千米寻找蜜源,采食后能准确归巢并将蜜源方位信息以摇摆舞形式传递给同伴,其主要依据的就是大气偏

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目子课题(No. 2012CB723404)、山西省高等学校优秀青年学术带头人支持计划、国家自然科学基金杰出青年基金(No. 51225504)和面上项目(No. 61171056)资助

第一作者: 任建斌(1977—),男,讲师,博士研究生,主要研究方向为偏振光导航信息处理. Email: renjianbin@nuc.edu.cn

导师(通讯作者): 刘俊(1968—),男,教授,博士,主要研究方向为微纳米技术、惯性测试技术及仿生导航. Email: liuj@nuc.edu.cn

收稿日期: 2015-03-09; **录用日期:** 2015-07-27

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

振模式^[5]. 经过近几十年的生物行为学和解剖学研究, 人们已经掌握昆虫偏振感知和导航行为的生物机理^[6]. 在此基础上, 研制出人工的偏振传感器和导航方法并将之应用到机器人航向角的确定中^[7-8], 实现对机器人的精准导航. 因其在短时间内很难人为破坏和干扰, 并且误差不随时间积累, 特别适合弱/无卫星信号的陌生环境下的自主导航, 因此, 偏振光导航越来越受到各方面的关注, 具有广泛的应用前景^[9].

目前的偏振光导航技术主要采用六通道的偏振光传感器, 根据 Point-source 测量原理, 采集单点的偏振信息, 解算航向角^[10]; 或者作为辅助手段, 与惯性器件或 GPS 组合导航, 修正导航方法中的误差积累和漂移^[11-12]. 导航精度主要依赖于传感器的测量精度, 当偏振信息受到干扰(如雾霾天气或地面强反射), 则测量的精度大大降低. 为解决导航信息的稳定性获取问题, 人们正考虑用大范围的偏振信息及稳定分布的偏振模式作为导航的参考, 目前的偏振传感器研究也利用纳米压印技术朝着阵列化方向发展, 以实现天空各个方向点偏振信息的同步测量. 人们研究发现, 昆虫导航中应用的不是天空单点的偏振信息, 而是整个(或部分)具有稳定分布的偏振模式, 从中提取太阳方位信息和太阳子午线与体轴夹角, 用以确定航向^[13-14].

当采集到大范围的偏振信息时, 就获取到了整个稳定分布的偏振模式, 这种具有稳定空间结构的偏振态蕴含丰富的方向信息, 不仅能为地面运动车辆或机器人提供航向角信息, 也可为飞行器空间姿态的确定提供稳定的参考. 本文提出一种利用大气偏振模式稳定性分布特征解算飞行器俯仰角和滚转角的方法. 该方法从大气偏振模式产生的理论模型出发, 通过大范围采集的偏振数据提取太阳空间位置, 并利用太阳与天顶点固定的时空关系, 获取天顶点位置信息, 建立姿态变换矩阵, 解算姿态信息.

1 Rayleigh 大气偏振模式及特征提取

大气偏振模式和天空特征点位置信息的获取是导航的基础, 本节分别利用瑞利单次散射理论和偏振分析仪器搭建的测量平台, 重建了晴朗天空条件下大气偏振的理论模式和实测模式. 从偏振模式中获取特征点空间位置信息可通过最小二乘法^[15]或聚类分析^[16]等方法实现. 为使论述简洁, 这里我们只给出利用聚类分析获取的结果, 更详细的论述请参考相关文献.

1.1 大气偏振模式

发自太阳的光线在进入地球大气层之前是不具有偏振特性的自然光, 即其光矢量的振动在沿垂直于传播方向的平面内朝各个可能的方向. 进入大气层后, 由于空气中分子、粒子的散射作用, 部分光线光矢量的振动以某种固定的形态, 形成了偏振光. 研究表明, 空

气中由于粒子的散射作用而形成的偏振光主要是线偏振光^[2], 大量偏振光和自然光叠加, 形成了具有稳定分布模式的偏振态, 是地球的自然属性之一, 其所蕴含的方向场和强度场信息, 可为沙蚁、蜜蜂等昆虫或人造飞行器提供可靠的导航信息.

理想情况下的大气偏振模式如图 1, 短线的粗细表示偏振强度场的分布模式, 短线的方向表示线偏光的 E -矢量分布模式^[17]. 在任意观测位置(O 点), 天空中大气偏振模式具有相对稳定的特征, 存在两条基本的对称线: 一条是过太阳(S)和天顶(Z)的太阳-反太阳子午线(SM - ASM), 偏振度关于子午线对称分布, E -矢量方向关于子午线逆对称分布; 另一条是与太阳角距为 90° 的最大偏振度线, 大气偏振模式关于最大偏振度线对称, 在对称线所在的位置, 偏振度最大, 距离偏振度线越远, 偏振度越小, 太阳子午线附近的偏振度要小于反太阳子午线附近的偏振度. 随着太阳的向西运动(大约 $15^\circ/h$), 太阳高度角和方位角不断变化, 对称线和整个大气偏振模式以天顶为中心旋转, 但大气偏振模式始终保持对称^[18].

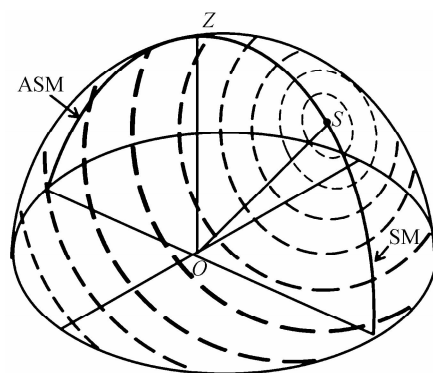


图 1 大气偏振模式

Fig. 1 Pattern of polarized light in the daylight sky

1.2 空间显著特征点位置信息提取

在大气偏振模式的稳定分布中, 太阳具有以下几个特征: a) 光强最强; b) 偏振度为零; c) E -矢量方向水平. 这里, 将偏振度作为数据聚类的依据. 根据前面的分析, 太阳方向的偏振度为零, 并且偏振度随着空间位置(散射角逐渐增大)以同心圆的方式渐增, 在与太阳角距 90° 的位置达到最大(最大偏振度线). 选取偏振度接近于零的数据点 $p_i = (\theta_i, \varphi_i)$ 作为聚类的对象, 将中性点作为孤立噪声点剔除, 对所对应数据点的高度角 θ_i 和方位角 φ_i 进行聚类($i=1, 2, \dots, N$).

太阳子午线的主要特点是沿着这条曲线, 每个点处的 E -矢量振动方向水平(即偏振角 $\chi=90^\circ$). 基于此特点, 将所有满足条件 $\chi_0 < \chi < 90^\circ$ 以及 $-90^\circ < \chi < \chi_1$ (χ_0, χ_1 为设定的阈值)的 E -矢量数据 $\chi_i = (\theta_i, \varphi_i)$ 作为聚类的对象, 对其高度角 θ_i 和方位角 φ_i 进行聚类, 求取类中心, 并对所求结果进行曲线拟合, 确定其在二维

平面上的投影与参考坐标的转角,所得结果即为所检测的太阳子午线位置.为此构建并最小化目标函数

$$J = \sum_{v=1}^k \sum_{i=1}^n (\mu_{iv})^m (d_{iv})^2 \quad (1)$$

其中, d_{iv} 为第 i 个数据点到第 v 类中心的距离, μ_{iv} 为数据点 x_i 属于第 v 类的隶属度.在此划分下,第 v 类的类中心为

$$p_v = \frac{\sum_{i=1}^n (\mu_{iv})^m x_i}{\sum_{i=1}^n (\mu_{iv})^m} \quad v=1, 2, \dots, k \quad (2)$$

将相应类中心分别作为所求太阳和太阳子午线空间位置.

2 姿态角的确定

获取到太阳投影点坐标后,利用参考系下太阳与天顶点固定的时空关系将检测到的太阳坐标转换为天顶点坐标,进而建立姿态变换矩阵方程,解算姿态角.

$$\mathbf{R}_{A \rightarrow B} = \begin{pmatrix} \cos \psi \cos \phi - \sin \vartheta \sin \psi \sin \phi & \sin \vartheta \cos \psi \sin \phi + \sin \psi \cos \phi & -\cos \vartheta \sin \phi \\ -\cos \vartheta \sin \psi & \cos \vartheta \cos \psi & \sin \vartheta \\ \cos \psi \sin \phi + \sin \vartheta \sin \psi \cos \phi & \sin \psi \sin \phi - \sin \vartheta \cos \psi \cos \phi & \cos \vartheta \cos \phi \end{pmatrix} \quad (4)$$

表示由参考系到体系的旋转矩阵.

2.2 天顶点空间位置的确定

尽管天顶点在地面参考系中有明显的几何特征(坐标为),在导航中有着重要的参考意义,但由于在实际导航中这个点的偏振信息不具唯一性,直接通过检测偏振信息获取其位置参数有一定困难.考虑到太阳与天顶点存在固定的时空关系(某一时刻,理论太阳高度角和方位角可由天文公式计算得出),当机载偏振光传感器检测偏振信息,获取到载体坐标系下的太阳位置时,就可借助这种固定时空关系求取天顶点坐标.

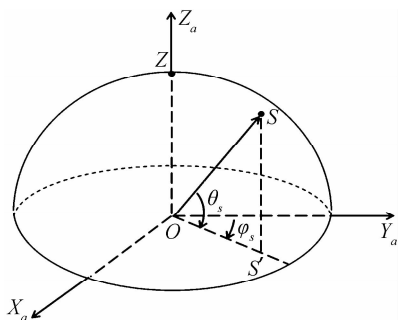


图2 太阳投影点与天顶点几何位置关系

Fig. 2 The geometrical relationship of the solar projection and zenith

太阳和天顶固定的时空关系体现在太阳高度角 θ_s 和方位角 φ_s 的变化上(图2).由太阳投影点 S 求取天顶点 Z 可通过以下两步实现:首先将向量 \vec{OS} 绕 Z_a 轴逆时针方向转过 φ_s 角,再绕着 X_a 轴逆时针方向转过 $\frac{\pi}{2} - \theta_s$ 角度,两次转动对应的旋转矩阵分别为

2.1 坐标系及坐标变换

空间姿态由飞行器体坐标系相对于地面参考系的转动关系确定.为方便论述,选取东北天坐标系作为参考系,即参考系原点 O_a 选为地面某点(如地面发射点或观测点), X_a 轴指向正东, Y_a 轴指向正北, Z_a 轴垂直向上,指向天顶.体坐标系与飞行器固连,原点 O_b 选在重心处, X_b 取为横轴,向右为正, Y_b 轴取为纵轴,向前为正, Z_b 轴垂直向上,满足右手规则.

姿态角可由参考系到体系的三次转动实现.首先让两套坐标系重合,体系绕参考系的 Z 轴转过 φ 角,称为偏航角,再绕 X 轴转过 ϑ 角,称为俯仰角,再绕 Y 轴转过 ϕ 角,称为滚转角.写成矩阵形式为

$$\mathbf{X}_B = \mathbf{R}_{A \rightarrow B} \mathbf{X}_A = \mathbf{R}_Y(\phi) \mathbf{R}_X(\vartheta) \mathbf{R}_Z(\varphi) \mathbf{X}_A \quad (3)$$

其中

$$\mathbf{R}_Z = \begin{pmatrix} \cos \varphi_s & -\sin \varphi_s & 0 \\ \sin \varphi_s & \cos \varphi_s & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{R}_X = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \sin \theta_s & -\cos \theta_s \\ 0 & \cos \theta_s & \sin \theta_s \end{pmatrix} \quad (6)$$

式中 (θ_s, φ_s) 为理论太阳位置,可由太阳历计算得出^[19].于是,太阳和天顶点的这种固定关系就体现在从太阳到天顶点的转动矩阵

$$\mathbf{R}_{S \rightarrow Z} = \mathbf{R}_X \mathbf{R}_Z = \begin{pmatrix} \cos \varphi_s & -\sin \varphi_s & 0 \\ \sin \theta_s \sin \varphi_s & \sin \theta_s \cos \varphi_s & -\cos \theta_s \\ \cos \theta_s \sin \varphi_s & \cos \theta_s \cos \varphi_s & \sin \theta_s \end{pmatrix} \quad (7)$$

上,一旦有一个点的坐标确定,则另一点的坐标也可随之确定.

设在体坐标系下天顶点 Z 的坐标为 $(N_x, N_y, N_z)^T$.太阳投影点坐标为 $(S'_x, S'_y, S'_z)^T$,两者之间的关系为

$$\begin{pmatrix} N_x \\ N_y \\ N_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \varphi_s & -\sin \varphi_s & 0 \\ \sin \theta_s \sin \varphi_s & \sin \theta_s \cos \varphi_s & -\cos \theta_s \\ \cos \theta_s \sin \varphi_s & \cos \theta_s \cos \varphi_s & \sin \theta_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S'_x \\ S'_y \\ S'_z \end{pmatrix} \quad (8)$$

当通过偏振信息解算获取到太阳投影点坐标后,就可由式(8)确定出天顶点坐标.

2.3 利用天顶点坐标变换解算姿态

在飞行器运动过程中,机载偏振传感器实时检测大气偏振信息并从中提取天空显著特征点位置信息.选取天顶点作为天空显著特征点,通过检测天空偏振信息追

踪其坐标变化,建立姿态矩阵方程,求解姿态参数.

设 $Z(Z_x, Z_y, Z_z)$ 为参考系下的天顶点坐标, $N(N_x, N_y, N_z)$ 为体坐标系下的坐标,二者的关系为

$$\begin{pmatrix} N_x \\ N_y \\ N_z \end{pmatrix} = \mathbf{R}_{A \rightarrow B} \begin{pmatrix} Z_x \\ Z_y \\ Z_z \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{pmatrix} N_x \\ N_y \\ N_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \vartheta \cos \phi - \sin \vartheta \sin \psi \sin \phi & \sin \vartheta \cos \psi \sin \phi + \sin \vartheta \cos \phi & -\cos \vartheta \sin \phi \\ -\cos \vartheta \sin \psi & \cos \vartheta \cos \psi & \sin \vartheta \\ \cos \psi \sin \phi + \sin \vartheta \sin \psi \cos \phi & \sin \psi \sin \phi - \sin \vartheta \cos \psi \cos \phi & \cos \vartheta \cos \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (10)$$

展开有

$$\begin{cases} N_x = -\cos \vartheta \sin \phi \\ N_y = \sin \vartheta \\ N_z = \cos \vartheta \cos \phi \end{cases} \quad (11)$$

从中解出俯仰角和滚转角分别为

$$\vartheta = \arcsin(N_y) \quad (12)$$

$$\phi = \arctan\left(\frac{-N_x}{N_z}\right) \quad (13)$$

2.4 姿态解算算法描述

基于大气偏振模式的姿态角获取方法,是利用大气偏振模式作为输入,通过改变偏振模式中坐标方向,代替运载体的位姿变化,再通过对空间显著特征点的坐标提取,求解出映射矩阵中的姿态角.仿真方法流程图如图 3.

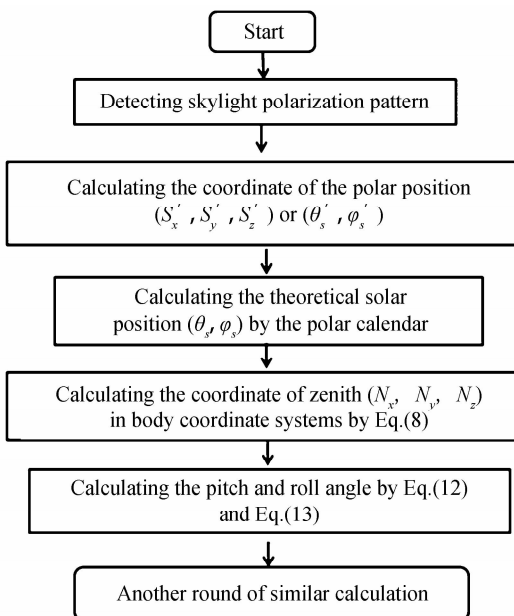


图 3 空间姿态角信息获取的方法框图

Fig. 3 process of space attitude capture

3 实验仿真

建立一个模拟的飞行器转动控制平台以验证所提的姿态解算方法,如图 4.

由于在参考系下,天顶点坐标可写成 $(0, 0, 1)$, 于是有

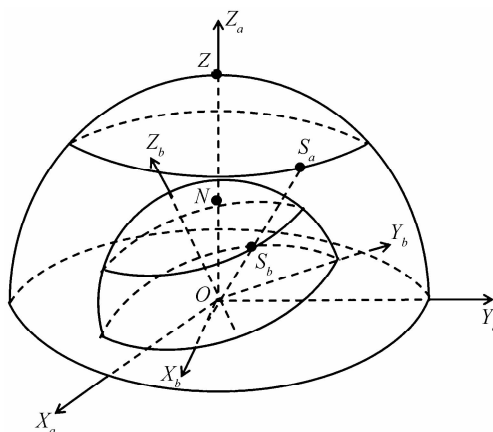


图 4 虚拟飞行器转动控制台

Fig. 4 Simulated vehicle rotating control system

用外部大球面表示参考系下的偏振模式,用内部小球面表示体坐标系下的偏振模式.当飞行器无姿态变化时,体坐标系三轴方向与参考系方向一致.太阳投影点和天顶点在两套坐标系下的坐标相同.当飞行器出现姿态变化时(体系偏转),此时机载偏振光所检测到的偏振模式随其姿态变化而变化.由检测的偏振信息解算太阳坐标 $S_b = (S_x, S_y, S_z)$ 并将之转化为天顶点坐标 $N(N_x, N_y, N_z)$,然后利用前述方法解算俯仰角和滚转角的大小(由于天顶点的特殊性,该方法不能用来确定偏航角).为方便验证,每次仿真我们任意固定其中一个角度,让另外一个角度变化从 -90° 到 90° ,然后由算法解算姿态角及误差变化曲线.

3.1 基于理论大气偏振模式的姿态获取

基于对大气光学传输特性的研究,人们能够模拟出不同天气条件下的大气偏振模式.在天气晴好时偏振模式主要是由瑞利单次散射形成的,而在其它天气条件下,大气偏振模式具有多次米散射特征.这里,利用瑞利单次散射理论建立晴朗天空下的大气偏振模式.根据瑞利散射理论^[20-21],当太阳坐标为 $S(1, \theta_s, \varphi_s)$,天空半球上任一点 $P(1, \theta, \varphi)$ 处的偏振度为

$$P = P_{\max} \sin^2 \gamma / (1 + \cos^2 \gamma) \quad (14)$$

式中, P_{\max} 表示最大偏振度(理论值为 1,晴朗天空时约 0.7^[22]), γ 为入射光的散射角,满足

$$\cos \gamma = \sin \theta_s \sin \theta_c \cos (\varphi_s - \varphi) + \cos \theta_c \cos \theta_s \quad (15)$$

偏振角(即电场的振动方向与测量点所在的当地子午线夹角)为

$$\chi = \arctan \frac{\cos \theta_c \cos \theta_s - \sin \theta_c \cos (\varphi - \varphi_s) \sin \theta_s}{\sin (\varphi - \varphi_s) \sin \theta_s} \quad (16)$$

式(16)表示偏振模式的 E 矢量方向场。

对于由瑞利散射理论建立的理想大气偏振模式,通过控制体坐标系相对于参考系的转动获取不同姿态下的偏振模式,通过优化算法检测天顶点坐标。

图 5 给出了模拟飞行器姿态随横轴 X_b 从 -90° 至 90° 变化,固定纵轴 Y_b 偏转 30° 时解算的俯仰角和滚转角变化曲线及误差曲线。图 6 给出了姿态随纵轴 Y_b 从 -90° 至 90° 变化,固定横轴 X_b 偏转 -35° 时俯仰角和滚转角变化曲线及误差曲线。可以看出,当飞行器偏转角度较小时,该方法能准确解算出姿态变化的角度值,但当飞行器偏转角度过大时,由于传感器检测的有效偏振模式区域减小,使得解算误差有所增大,但由于理论数据较好,整体偏差不会过大,最大偏差仅有 0.1° 。两组实验中解算的俯仰角的均方根误差分别为 0.002° 和 0.0031° ,滚转角的解算均方根误差分别为 0.0236° 和 0.0227° 。

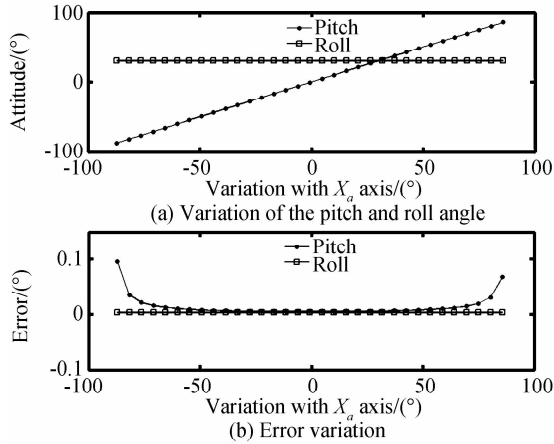


图 5 姿态角随横轴从 -90° 至 90° 变化
Fig. 5 Attitude variation with the transverse axis from -90° to 90°

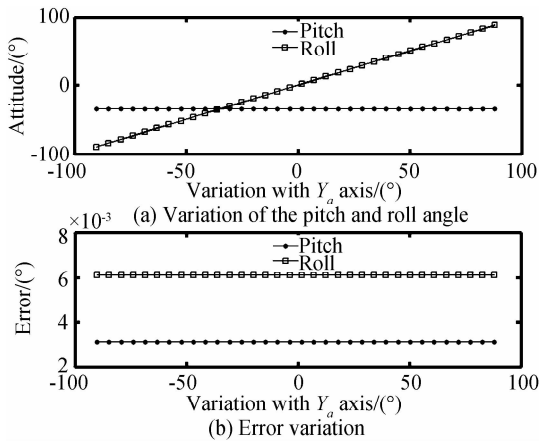


图 6 姿态角随纵轴从 -90° 至 90° 变化
Fig. 6 Attitude variation with the longitudinal axis from -90° to 90°

3.2 基于实测模式的姿态获取

为了获取真实大气偏振模式,利用单反相机加装全景镜头搭建了偏振成像检测系统,如图 7,该检测系统由上至下分别为:滤镜、单反相机、偏振膜、云台、水平仪及三脚架。检测时,首先调整水平仪,使云台保持水平,然后利用指南针校准云台,使其零点对准地平面坐标系下的正南方向,最后,旋转云台到指定的角度,对天空进行连续拍摄。由于偏振信息的解算需要用到至少三个方向上的光强信息,需要在尽可能短的时间内保持各种参数不变并实现三次连续拍摄,然后对所获取的信息进行图像处理,利用式(17)~(19)解算各方向上的偏振信息,并重建出大气偏振的三维模式。

$$\text{总光强} \quad I = I_{0^\circ} + I_{90^\circ} = I_{45^\circ} + I_{135^\circ} \quad (17)$$

$$\text{偏振度} \quad d = \sqrt{\frac{(I_{0^\circ} - I_{90^\circ})^2 + (I_{45^\circ} - I_{135^\circ})^2}{I}} \quad (18)$$

$$\text{偏振角} \quad \varphi = \frac{1}{2} \arctan \frac{I_{45^\circ} - I_{135^\circ}}{I_{0^\circ} - I_{90^\circ}} \quad (19)$$

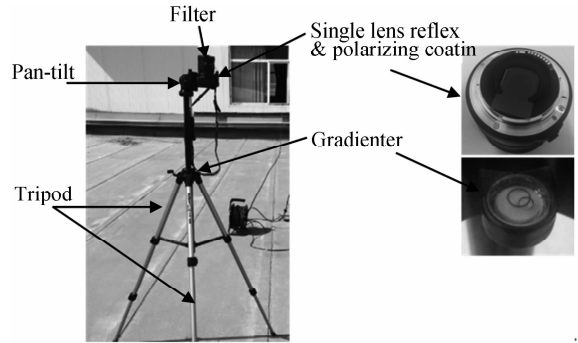


图 7 偏振成像检测系统

Fig. 7 The polarization imaging detection system

利用成像系统获取的实际大气偏振模式相比于理论模式有一定的偏差,通过对检测数据进行降噪处理,并重复上述实验过程,获取到比较满意的姿态解算曲线,相应的解算误差也在可接受的范围之内,表明文中所提姿态解算方法有很好的可靠性。

图 8 给出了姿态角随横轴 X_b 从 -90° 至 90° 变化,固定纵轴 Y_b 偏转 -30° 的变化曲线及误差曲线。图 9 给出了姿态角随纵轴 Y_b 从 -90° 至 90° 变化,固定横轴 X_b 偏转 20° 时的变化曲线及误差曲线。可以看出,当飞行器偏转角度较小时,利用实测数据依然能解算出准确度较高的姿态变化曲线,但当偏转角度过大(接近 $\pm 90^\circ$)时,解算的姿态角误差也会增大,最大偏差接近 1° 。两组实验中解算的俯仰角均方根误差分别为 0.0738° 和 0.2430° ,滚转角的解算均方根误差分别为 0.0619° 和 0.0954° 。

从实验结果来看,文中所提姿态解算的方法准确

地通过偏振信息检测获取天空特征点坐标并解算出姿态参数. 误差产生的来源有两个, 一是由偏振信息提取特征点坐标时的算法误差, 二是当飞行器偏转过大时, 机载传感器检测天空时测量范围减小引起的测量误差. 前者可通过现代优化方法降低, 后者的减少可利用 MEMS 技术对偏振传感器阵列微型化, 增加单位面积上的传感器数目, 获取更大检测区域来实现.

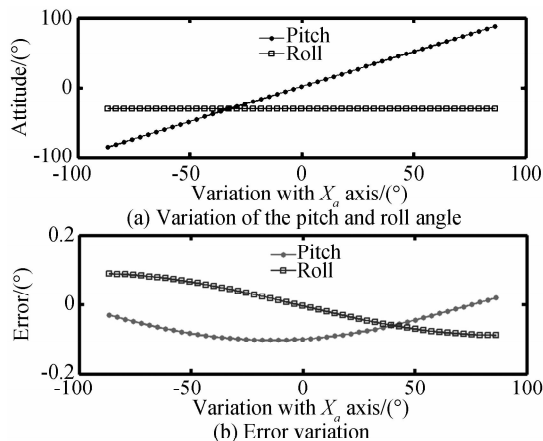


图 8 姿态角随横轴从 -90° 至 90° 变化
Fig. 8 Attitude variation with the transverse axis from -90° to 90°

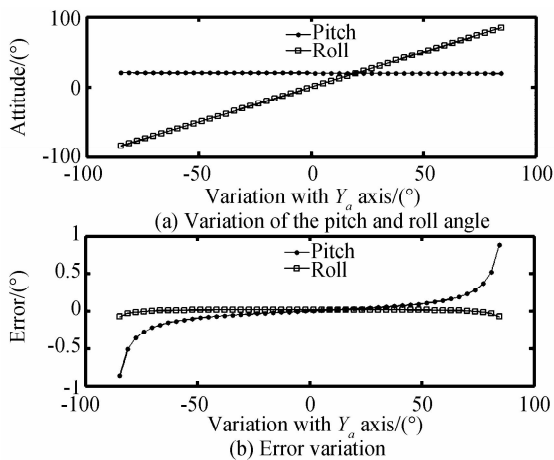


图 9 姿态角随纵轴从 -90° 至 90° 变化
Fig. 9 Attitude variation with the longitudinal axis from -90° to 90°

4 结论

利用大气偏振模式进行导航是对昆虫导航机长期生物学研究结果的实际应用, 可为飞行器自主导航提供一种新的途径. 在利用大气偏振模式进行导航的过程中, 天空特征点空间位置信息的获取是确定飞行器空间姿态的关键. 本文根据偏振模式规律性分布的特点, 利用优化方法对采集的偏振数据进行处理, 提取了太阳空间位置信息, 并根据太阳投影点与天顶点固定的时空关系求取天顶点在体坐标系下的坐标, 从而建立姿态变换矩阵方程, 解算了俯仰角与滚转角信息.

方法的有效性通过两组实验得以确证, 一组是利用瑞利单次散射理论建立的理论大气偏振模式, 一组是利用转台和偏振分析仪获取的实际大气偏振模式. 通过建立的虚拟飞行器姿态控制平台, 对所采集的数据, 利用文中所提方法求取飞行器空间姿态变化曲线及误差曲线, 获取准确的俯仰角和滚转角信息. 实验表明, 解算结果与理论值相符, 方法具有一定的可靠性.

参考文献

- [1] KARMAN S B, DIAH S Z M, GEBESSHUBER I C. Bio-inspired polarized skylight-based navigation sensors: a review [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, **12**(10): 14232-14261.
- [2] STRUTT J. On the light from the sky, its polarization and colour[J]. *Philosophical Magazine Series 4*, 1871, **41**(271): 107-120.
- [3] BRINES M L, GOULD J L. Skylight polarization patterns and animal orientation [J]. *Journal of Experimental Biology*, 1982, **96**(2): 69-91.
- [4] WEHNER R. Desert and navigation: How miniature brains solve complex tasks [J]. *Journal of Comparative physiology*, 2003, **189**(8): 579-588.
- [5] ROSSEL S. Navigation by bees using polarized skylight[J]. *Journal of Experimental Biology*, 1993, **104**(4): 695-708.
- [6] LABHART T. Polarization-opponent interneurons in the insect visual system [J]. *Nature*, 1988, **331**(6155): 435-437.
- [7] CHU J K, ZHAO K Z, ZHANG Q. Construction and performance test of a novel polarization sensor for navigation [J]. *Sensors and Actuators A: Physics*, 2008, **148**(1): 75-82.
- [8] CHU J K, WANG H, CHEN W, et al. Application of a novel polarization sensor to mobile robot navigation [C]. In Proceedings of International Conference on Mechatronics and Automation. ICMA'09, Changchun, China, 9-12 August 2009, 579-588.
- [9] WANG G H, GUO Z D, ZHU H, 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.
- [10] ZHAO K C, CHU J K, WANG T, et al. A novel angle algorithm of polarization sensor for navigation [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2009, **58**(8): 2791-2796.
- [11] FAN Z, GAO J, PAN D, et al. The implementation of a new integrated navigation solution with polarized-light assisting with geomagnetism and GPS [J]. *Geomatics Information Science of Wuhan University*, 2009, **34**(11): 1324-1327.
- [12] LU H Q, HUANG X L, YIN H. Principles and applications of polarized-light-aided attitude determination in integrated navigation [C]. Proceedings of the 25th Chinese control conference, Harbin, China, 2006.
- [13] WEHNER R. Polarization vision—a uniform sensory capacity [J]. *The Journal of Experimental Biology*, 2001, **204**: 2589-2596.
- [14] DUELLI P, WEHNER R. The spectral sensitivity of polarized light orientation in *Cataglyphis bicolor* [J]. *Journal of Comp Physiol*, 1973, **86**: 37-53.
- [15] WANG F, TANG J, REN J B, et al. Optimized calculation of solar position with the Rayleigh atmosphere polarization pattern [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(12): 1201002.
王飞, 唐军, 任建斌, 等. 基于 Rayleigh 大气偏振模式的太阳

- 空间位置优化计算[J]. 光子学报, 2014, **43**(12): 1201002.
- [16] REN J B, LIU J, TANG J, *et al.* A skylight polarization pattern-based approach to the location of the sun and solar meridian[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(7):0701002. 任建斌,刘俊,唐军,等. 一种利用大气偏振模式确定太阳和太阳子午线空间位置的方法[J]. 光子学报, **44**(7):0701002.
- [17] WEHNER R. Himmelsnavigation bei insecten neurophysiologie und verhalten[J]. *Neujahrsbl Naturforsch Ges Zürich*, 1982, **184**: 1-132.
- [18] BRINES M L. Dynamic patterns of skylight polarization as clock and compass[J]. *Journal of Theor Biology*, 1980, **86**: 507-512.
- [19] WANG W W, SUN F, LIU C X, *et al.* The algorithm continuously used to calculate the apparent place of celestial body in the solar system[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2000, **21**(5):18-23. 王文武,孙枫,刘承香,等. 太阳系天体视位置的长期计算方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2000, **21**(5):18-23.
- [20] BUENZLI E, SCHMID H M. A grid of polarization models for rayleigh scattering planetary atmosphere[C]. *Astronomy & Astrophysics manuscript no. 11760*, 2009.
- [21] PREETHAM A J, SHIRLEY P, SMITS B E A. A practice model for daylight[C]. In *Siggraph 1999, Computer Graphics Proceedings, Rockwood A Annual Conference Series*, 1999, 91-100.
- [22] GEHRELS T. Wavelength dependence of the polarization of the sunlit sky [J]. *Journal of The Optical Society of America*. 1962, **52**(10):1164-1173.