

基于大气偏振模式的三维姿态角解算方法

杨江涛*, 王健安, 王银, 胡啸

太原科技大学电子信息工程学院, 山西 太原 030024

摘要 为了满足无人飞行器自主导航对姿态参数的迫切需求,提出一种利用大气偏振信息获取载体三维姿态信息的方法。首先充分解析大气偏振模式;然后采用 K -means 聚类算法解算太阳在空间中的位置信息;最后利用磁罗盘与载体体轴夹角获取载体的航向信息。在已知航向角的基础上,对导航坐标进行基准变换。首先将天顶点与太阳位置处于同一轴向,使得天顶点与太阳位置矢量处于同一基准并同时旋转;然后根据天顶点与太阳位置固有的高度夹角,将俯仰角与横滚角的计算进行转换;最后通过一系列的转换和计算得到横滚角和俯仰角的信息。实验结果表明,利用大气偏振模式解算的太阳位置可获得有效的载体姿态信息,模拟仿真的解算精度可达 0.01° ,外场实验的精度可达 0.1° 。

关键词 成像系统; 大气偏振模式; K -means 聚类算法; 导航; 姿态

中图分类号 V279; V249.3

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.221107

Calculation Method of Three-dimensional Attitude Angle Based on Atmospheric Polarization Pattern

Yang Jiangtao*, Wang Jian'an, Wang Yin, Hu Xiao

School of Electronics Information Engineering, Taiyuan University of Science & Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China

Abstract In this study, a method is proposed to obtain the three-dimensional attitude information of carriers based on the atmospheric polarization pattern to meet the urgent need of obtaining attitude parameters for ensuring the autonomous navigation of unmanned aerial vehicles. Initially, the atmospheric polarization mode is completely analyzed. Then, the K -means clustering algorithm is used to calculate the position of sun in space. Finally, the angle between the magnetic compass and the carrier body is used to obtain the heading information of the carrier. The navigation coordinates are transformed into a reference based on the known heading angle. First, the zenith and sun are observed to be on the same axis; thus, the zenith and sun position vectors are on the same reference and rotate together. Then, the pitch and roll angles are calculated according to the inherent height angle between the zenith and sun. Finally, the roll and pitch angle information are obtained through several conversions and calculations. The experimental results show that effective carrier attitude information can be obtained based on the position of the sun calculated in the atmospheric polarization mode, the accuracy of the simulation can reach 0.01° , whereas that of the field experiment can reach 0.1° .

Key words imaging systems; atmospheric polarization pattern; K -means clustering algorithm; navigation; attitude

OCIS codes 110.5405; 290.5855; 100.4994; 100.3008

1 引言

太阳光进入大气层后会受到大气层中粒子的散射作用以及地面的反射作用,导致其偏振态发生

变化,从而形成含有丰富光场矢量信息的大气偏振模式,其分布模式具有特定时空连续分布的规律^[1-2]。利用这种分布规律可为偏振光导航提供非常稳定且可靠的信号源,因此关于大气偏振模式的

收稿日期: 2020-04-11; 修回日期: 2020-04-27; 录用日期: 2020-04-30

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(61905172)、博士科研启动基金(20192015)、来晋优秀博士奖励基金项目(20192068)

* E-mail: yangjiangtao6567@tyust.edu.cn

研究在导航领域中具有非常重要的应用价值^[3-6]。

目前,不管是国外还是国内的科学家都已经对大气偏振模式进行了较为充分的研究。其中 Lambrinos 等^[7]通过研制的 Sahabot 偏振导航机器人实现了对大气偏振模式的解算,成功测量了机器人的方位角,并对大气偏振模式的可行性进行了验证^[8-9];澳大利亚的 Chahl 等^[10]对大气偏振模式进行了检测与解算,成功实现了对飞行载体的精确导航与自由控制。

国内的研究者虽然起步较晚,但是对于大气偏振模式也有一定的研究。其中大连理工大学的褚金奎团队^[11-13]研究了一种基于电源式的偏振光传感器,成功实现了对机器人的精确导航,精度达到了 0.2°;合肥工业大学高隼团队^[14]基于仿生学原理提出了充分利用全天域的大气偏振模式,并使用其进行偏振光导航;近些年这两个团队又对大气偏振模式在三维姿态信息提取方面进行了初步的理论探索与研究^[15-16]。

综上所述,本文提出一种利用大气偏振信息解算载体三维姿态信息的方法。该方法从大气偏振模式产生的理论模型出发,采用 K 均值(K -means)聚类算法解算太阳在空间中的位置,并根据太阳矢量与天球顶点的空间关系,将太阳矢量的转动转换成天球顶点的转动,从而建立姿态转换矩阵以解算姿态信息。大气固有的偏振模式中包含的偏振信息可以实现载体三维姿态角的解算,这对实现偏振光精确导航具有非常重要的意义。

2 原理及方法

2.1 坐标系及坐标变换

姿态角是由飞行器坐标系与地面参考系的转动关系所决定的。为了更能简便理解,建立的坐标系及坐标转换的示意图,如图 1(a)所示,其中 X'_b 为 X_b 在地面上的投影。将东北天坐标系作为选取的参考系,以原点 O_a 作为地面的发射点或观测点, X_a 、 Y_a 和 Z_a 分别指向正东、正北和天顶,此时称之为 A 系。将载体坐标系与飞行器捷联,以质心作为原点 O_b ,以右为正的横轴 X_b 、以前为正的纵轴 Y_b 及垂直向上的 Z_b 轴均满足右手定则,此时称之为 B 系。将偏振光传感器固定于飞行器的正上方,使其几何对称轴与飞行器体轴始终保持一致。

姿态角为 B 系与 A 系之间的关系,定义如下。

将载体纵轴 X_b 与地面的夹角设为俯仰角 ν ,以抬头方向为正,以低头方向为负;将 X'_b 与 X_a 之间的

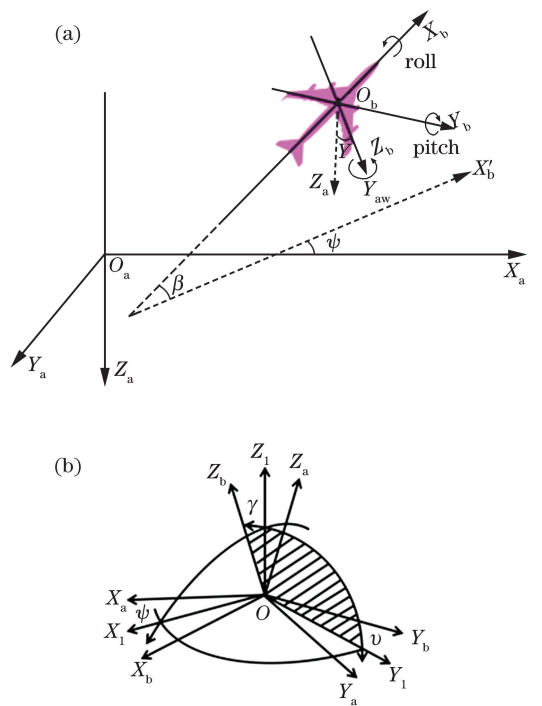


图 1 姿态坐标系示意图。(a)坐标系及坐标变换;(b)姿态角变换

Fig. 1 Schematic of posture coordinate system.

(a) coordi-nate system and coordinate transformation;

(b) attitude angle transformation

夹角设为偏航角 ψ ,以飞机的头部向左偏, ψ 为正;将 B 系中飞行器的体轴 Z_b 与 A 系中的 Z_a 之间的夹角设为滚转角 γ ,以飞行器向左倾斜, γ 为负。某一时间点,飞行器的空间姿态可通过旋转 A 系三次得到与 B 系间的三个夹角来确定,如图 1(b)所示。首先绕 OZ_a 轴将 A 系旋转 ψ ,这时 OX_a 轴和 OY_a 轴分别转到 OX_1 和 OY_1 的位置;然后绕 OX_1 轴将 $O-X_1Y_1Z_a$ 旋转 ν ,这时 OY_1 和 OZ_a 分别转到 OY_b 和 OZ_1 的位置;最后绕 OY_b 轴将 $O-X_bY_1Z_1$ 旋转 γ ,经过三次旋转致使 A 系与 B 系一致,三次旋转得到的旋转矩阵分别为

$$\mathbf{R}_Z(\psi) = \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\mathbf{R}_X(\nu) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \nu & \sin \nu \\ 0 & -\sin \nu & \cos \nu \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\mathbf{R}_Y(\gamma) = \begin{bmatrix} \cos \gamma & 0 & -\sin \gamma \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \gamma & 0 & \cos \gamma \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中: $\mathbf{R}_Z(\psi)$ 为绕 Z 轴旋转 ψ 的旋转矩阵;

$R_X(\nu)$ 为绕 X 轴旋转 ν 的旋转矩阵; $R_Y(\gamma)$ 为绕 Y 轴旋转 γ 的旋转矩阵。A 系到 B 系的旋转矩阵为 (1)~(3) 式的乘积, 即

$X_B = R_{A \rightarrow B} X_A = R_Y(\gamma) R_X(\nu) R_Z(\psi) X_A$, (4)
 式中: X_A 为 A 系的旋转矩阵; X_B 为 B 系的旋转矩阵; $R_{A \rightarrow B}$ 为

$$R_{A \rightarrow B} = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \gamma - \sin \nu \sin \psi \sin \gamma & \sin \nu \cos \psi \sin \gamma + \sin \psi \cos \gamma & -\cos \nu \sin \gamma \\ -\cos \nu \sin \psi & \cos \nu \cos \psi & \sin \nu \\ \cos \psi \sin \gamma + \sin \nu \sin \psi \cos \gamma & \sin \psi \sin \gamma - \sin \nu \cos \psi \cos \gamma & \cos \nu \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (5)$$

2.2 采用 K-means 聚类算法解算太阳的位置

首先建立一个大气偏振模式模型^[17], 如图 2 所示, 其中圆中心为观测者的观测位置, P 点表示被观测点, 其高度角和方位角分别用 h 和 α 来表示, S 表示太阳的位置, 其高度角和方位角分别用 h_s 和 α_s 来表示。假设一束太阳光通过 Rayleigh 散射后到达观察者的眼睛, 那么 P 点的偏振度 $P(\theta)$ ^[18] 可表示为

$$P(\theta) = \frac{1 - \cos^2 \theta}{1 + \cos^2 \theta} P_{\max}, \quad (6)$$

式中: P_{\max} 为大气偏振模式中的最大偏振度。然后观察由 Z、P 和 S 三点构成的球面三角形, 根据球面余弦定理可得

$$\cos \theta = \sin h \sin h_s + \cos h_s \cos h_s \cos(\alpha_s - \alpha) \quad (7)$$

将(6)式和(7)式联立后进行解算, 得到散射光的偏振度 $P = x_{\text{DOP}}(h_s, \alpha_s, h, \alpha)$ 。全天域的大气偏振模式可通过无数个单点模型获取而得到。

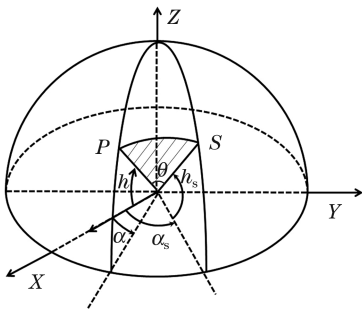


图 2 大气偏振模式模型

Fig.2 Atmospheric polarization model

大气偏振模式中, 偏振度的分布规律是以太阳子午线为中心呈对称分布, 其随着太阳角距的减少而变小, 并当角度为 90° 时达到最大, 接着逐渐减小^[3-5], 此时偏振度值在 $0 \sim 1$ 之间, 但在实际的测试中偏振度值一般在 $0 \sim 0.6$ 之间。根据偏振度的同心圆分布规律, 可解算太阳的空间位置。

K-means 算法是以各个数据点之间的距离作

为性能指标的聚类算法, 其以紧凑且独立的簇作为最终目标。

使用距离矢量代表偏振度值, 并将偏振度的数据 N 分成 K 类, 用 J 来表示距离评价指标。采用 K-means 算法将随机选取 L 个对象作为初始聚类中心, 通过

$$\mu_k = \frac{\sum_n \tau_{nk} x_n}{\sum_n \tau_{nk}} \quad (8)$$

对数据进行归类, 当偏振度数据被归类到 L 时, τ_{nk} 值为 1, 否则为 0。式中: μ_k 为第 k 个聚类中心的位置, 其中 $k \in 1, 2, 3, \dots, L$; τ_{nk} 为将所有的点分配到 L 的系数; x_n 为输入数据; $1 \leq n \leq N$ 。等分类结束后对数据进行迭代计算, 将 μ_k 固定, 选取最优的 τ_{nk} 值。由(8)式可知, 如果将数据归类到离其最近的 L 中就能得到 J 的最小值。下一步则固定 τ_{nk} , 再求解最优的 μ_k 值, 以此中心代表初始簇的中心, 然后解算其他数据和类中心之间的距离, 对类中心进行重新计算, 每次迭代后就会产生新的类中心, 以此类推, 直到得到最小的 J 值为止, 表达式为

$$J = \sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^L \tau_{nk} |x_n - \mu_k|^2 \quad (9)$$

J 的最小值确定后, 证明算法已经收敛, 此时确定的类中心为最佳的类中心。换句话说, 就是偏振度值已通过 K-means 算法迭代出 L 个数据簇中心, 则偏振度是以同心圆的方式均匀分布于太阳的附近, 此时偏振度值为 $0 \sim 0.3$ 。由此可得, 数据簇的中心位置便为太阳的空间位置。偏振度在全天域空中的分布如图 3(a) 所示, K-means 聚类数据簇如图 3(b) 所示, K-means 簇中心如图 3(c) 所示, 其是太阳的空间位置。

2.3 姿态角的计算方法

以参考系的原点作为观测点, X、Y 和 Z 轴分别指向正南、正西和天顶。载体的初始状态与导航坐标系重合, 所有坐标轴的转动方向都为逆时针方向^[10], 转动方向如图 4 所示。

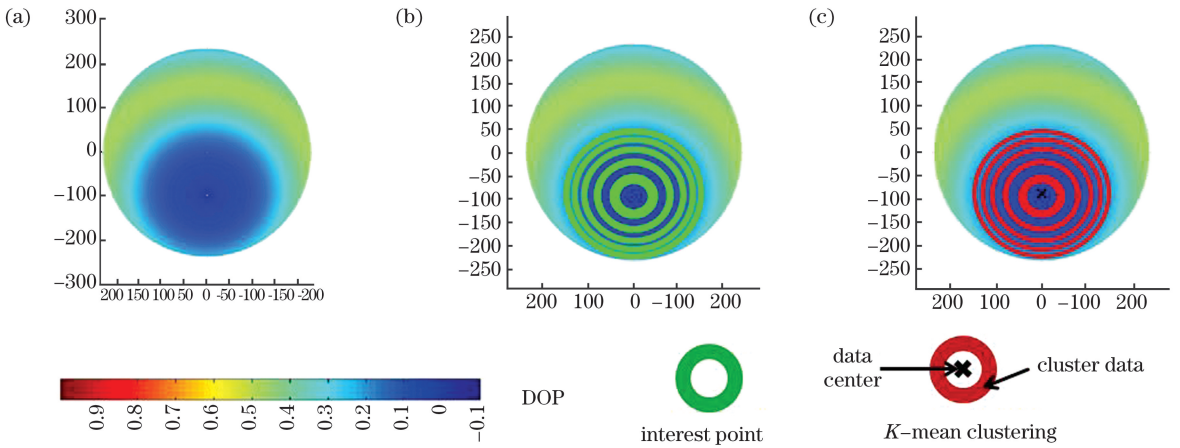


图 3 太阳空间位置的提取。(a)偏振度在全天域空中的分布;(b) K-means 聚类数据簇;(c) K-means 簇中心
Fig. 3 Extraction of space position of sun. (a) Distribution of degree of polarization in entire sky; (b) K-means cluster data cluster; (c) K-means cluster center

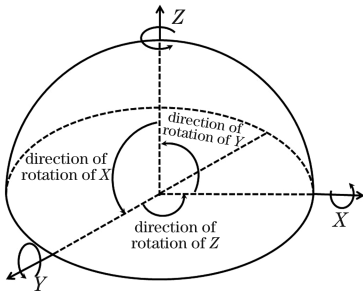


图 4 转动方向示意图
Fig. 4 Schematic of rotation direction

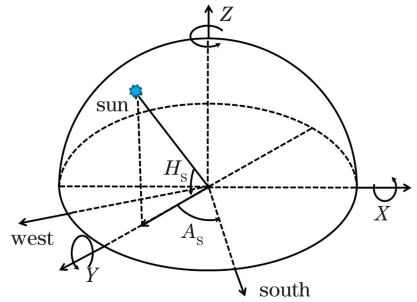


图 5 基准变换示意图
Fig. 5 Reference transformation diagram

在刚体运动学的理论中,每次转动都会产生一个转动矩阵。如果令两个坐标系重合,则载体需分别绕 Z、X 和 Y 轴旋转,转角分别称为航向角、俯仰角和横滚角^[11],分别使用 H、P 和 R 来表示。某一坐标的变换如果分为几次变换来实现,那么此时的转动矩阵等于每次变换转动矩阵的乘积,但转动矩阵相乘的次序与每次变换的次序相反^[12]。

在利用欧拉角来描述的姿态矩阵中,载体的姿态将依照 Y、X 和 Z 轴的顺序转动而生成。首先对整个大地导航坐标系进行基准变换,改变太阳在坐标系中的初始基准。旋转导航坐标系即可使太阳的位置矢量在 XY 投影面上的投影点与 Y 轴重合,如图 5 所示,其中 H_s 和 A_s 分别为太阳的高度角和方位角。

完成初始基准变换后,设太阳的位置矢量 $\mathbf{S} = [x \ y \ z]$,姿态变换后太阳的位置矢量 $\mathbf{S}_A = [x_A \ y_A \ z_A]$,即两者关系可由 $\mathbf{S}_A = \mathbf{R}_Z \mathbf{R}_X \mathbf{R}_Y \mathbf{S}$ 来表示, \mathbf{R}_Z 、 \mathbf{R}_X 和 \mathbf{R}_Y 分别表示太阳位置矢量航向角、俯仰角和横滚角的转动矩阵。通过转动 Y、X 和 Z 轴,最后一次旋转航向角。当航向发生变化时,可以先将载

体绕 Z 轴旋转 $-H$ 角,即 $\mathbf{S}'_A = \mathbf{R}_Z^{-1} \mathbf{R}_Z \mathbf{R}_X \mathbf{R}_Y \mathbf{S}$,简化为 $\mathbf{S}'_A = \mathbf{E} \mathbf{R}_X \mathbf{R}_Y \mathbf{S}$,其中 \mathbf{E} 为单位矩阵,坐标基准仍然处于图 5 的情况,这样就可以避免当航向角发生变化时对算法的影响。

假设航向未发生变化,则对体坐标的天球顶点进行分析,其中天球顶点 $\mathbf{V} = [0 \ 0 \ 1]$ 。对载体的天球顶点进行 Z、Y 和 X 轴的转动,由于天球顶点的坐标具有绕 Z 轴旋转将被锁死,所以天球顶点只进行 X 轴和 Y 轴的转动,由天顶点姿态变换后的坐标可由 $\mathbf{V}_A = \mathbf{R}_{vX} \mathbf{R}_{vY} \mathbf{R}_{vZ} \mathbf{V}$ 来表示,其中 \mathbf{R}_{vX} 、 \mathbf{R}_{vY} 和 \mathbf{R}_{vZ} 分别表示天球顶点矢量的航向角、俯仰角和横滚角的转动矩阵。由于绕 X 轴的天球顶点在 XY 投影面上的投影点与太阳位置矢量一样位于 Y 轴,而且太阳位置矢量可以通过天球顶点旋转 $\pi/2 - \alpha_s$ 来得到,所以可以将天球顶点旋转 $P' = (\pi/2 - h_s) + P$ 后与太阳发生第二次重合,第三次旋转即天球顶点绕 X 轴转动与太阳位置矢量重合,这可以将太阳位置矢量的转动转换成天球顶点的转动,其中 P' 为天球顶点的俯仰角。根据转动理

论, 地球顶点的转动可表示为

$$\mathbf{V}_A = \mathbf{R}_{vX} \mathbf{R}_{vY} \mathbf{R}_{vZ} \mathbf{V}, \quad (10)$$

$$\mathbf{R}_{XYZ} = \begin{bmatrix} \cos R \cos H + \sin R \sin P' \sin H & -\cos R \sin H + \sin P' \sin R \cos H & -\cos P' \sin R \\ \cos P' \sin H & \cos P' \cos H & \sin P' \\ \cos R \cos H - \sin R \sin P' \sin H & -\sin R \sin H - \sin P' \cos R \cos H & \cos P' \cos R \end{bmatrix}, \quad (11)$$

式中: \mathbf{R}_{XYZ} 为地球顶点的转动矩阵。设 $\mathbf{V}_A = [C_X C_Y C_Z]$, 则可以得到

$$C_Y = \sin P', \quad (12)$$

$$-\frac{C_X}{C_Z} = \frac{-\cos P' \sin R}{\cos P' \cos R} = \arctan R. \quad (13)$$

至此就可以求得 \mathbf{R} 和 P' , P 可以通过 $P' = (\pi/2 - h_s) + P$ 来求解。

3 实验

实验测试平台如图 6 所示。图 6(a) 为测试平台的整体搭建, 包含三轴三脚架、装有偏振片的鱼镜头以及上位机。图 6(b) 为载体绑定一个高精度的姿态航向参考系统(AHRS), 用来检测航向角。载体的转动轴如图 6(c) 所示, 鱼镜头的坐标轴如图 6(d) 所示。载体的转动由三轴三脚架来实现, 将采集的数据输入到上位机中并进行三维姿态角的解算。

图 7 为模拟仿真的数据, 图 7(a) 为全天域大气偏振度的数据分布, 图 7(b) 为经过权重聚类后的数据点, 图 7(c) 为采用 K -mean 算法迭代类中心的计算结果。表 1 为仿真获取的太阳位置矢量坐标及姿态角的解算结果, 姿态角变换后的太

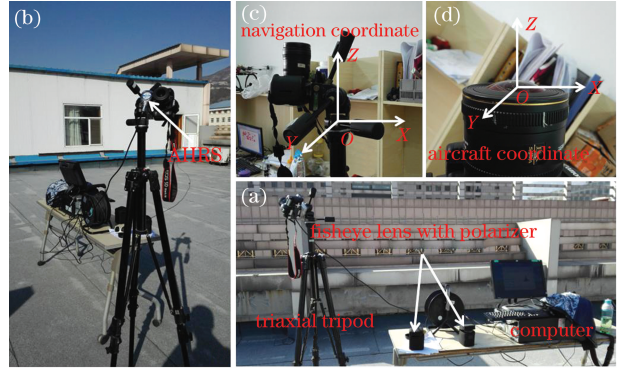


图 6 大气偏振模式测量系统。(a) 测试平台; (b) 搭载 AHRS 的平台; (c) 载体的转动轴; (d) 鱼镜头的坐标轴

Fig. 6 Atmospheric polarization mode measurement system. (a) Test platform; (b) platform equipped with AHRS; (c) rotation axis of carrier; (d) coordinate axis of fisheye lens

阳位置矢量由 K -means 聚类算法聚类中心而获得。获取到太阳位置矢量, 即可解算姿态角的信息。

P 和 R 从 -20° 到 20° 的交替变换曲线如图 8(a) 所示, 其误差曲线如图 8(b) 所示, 其中横轴代表测试序列。

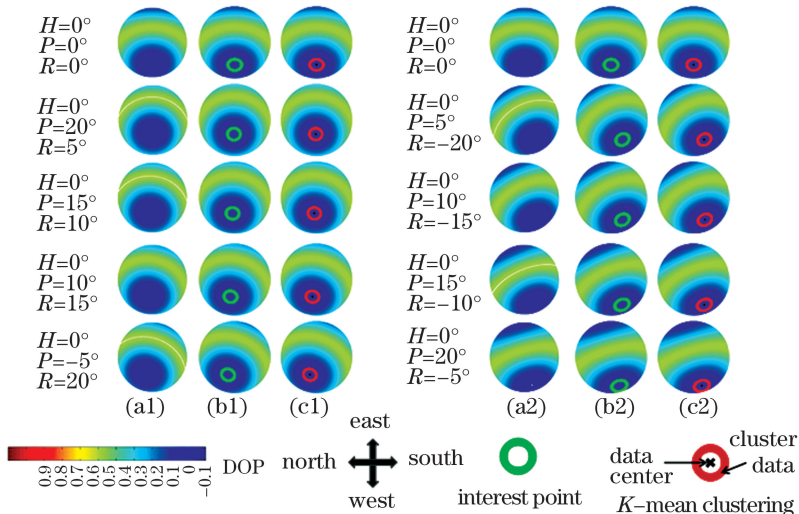


图 7 不同方法得到的仿真数据。(a1)(a2) 全天域大气偏振度; (b1)(b2) 权重聚类; (c1)(c2) K -mean 算法
Fig. 7 Simulation datas obtained by different methods. (a1)(a2) Degree of atmospheric polarization in entire sky; (b1)(b2) weighted clustering; (c1)(c2) K -mean algorithm

表1 太阳位置矢量坐标及姿态角的解算结果

Table 1 Solving results of sun position vector coordinates and attitude angle

Rotate angle / (°)			Sun coordinate			Attitude angle / (°)		
H	P	R	X	Y	Z	H	P	R
0	0	0	0.000	0.600	0.800	0.000	-0.010	0.012
0	-20	5	-0.083	0.290	0.953	0.000	-20.022	4.978
0	-15	10	-0.161	0.373	0.914	0.000	-14.979	9.990
0	-10	15	-0.231	0.452	0.862	0.000	-10.008	15.002
0	-5	20	-0.290	0.528	0.798	0.000	-5.010	19.972
0	0	0	0.000	0.600	0.800	0.000	-0.010	0.011
0	5	-20	0.255	0.668	0.700	0.000	5.033	-20.016
0	10	-15	0.177	0.730	0.660	0.000	10.006	-15.012
0	15	-10	0.107	0.787	0.608	0.000	15.026	-9.981
0	20	-5	0.048	0.838	0.544	0.000	20.050	-5.042

从图8可以看到,提出的姿态解算算法可以精确地解算天空中特征点的三维姿态,模拟仿真的解算精度可达0.01°。

测试地点为山西省太原市崛微山顶,其经度为东经112.24°,纬度为北纬37.59°,时间为2019年12月1日10:00。图9(a)为采集的原始图像,

图9(b)为偏振度在全天域空中的分布情况,图9(c)为采用K-means聚类算法对太阳位置矢量的提取结果。表2为检测的解算数据,初始姿态由三轴三脚架与AHRS两者给出,姿态角变换后的太阳位置矢量由K-means聚类算法聚类中心而获得。当获取到太阳位置矢量时,即可解算姿态角的信息。

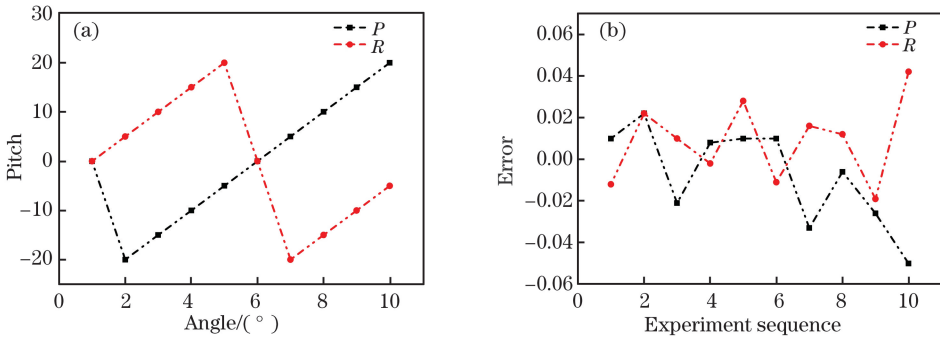


图8 俯仰角和横滚角的角度变化及误差分布。(a)角度变化曲线;(b)角度误差变化曲线

Fig. 8 Angle change and error distribution of pitch angle and roll angle. (a) Angle variation curves; (b) angle error variation curves

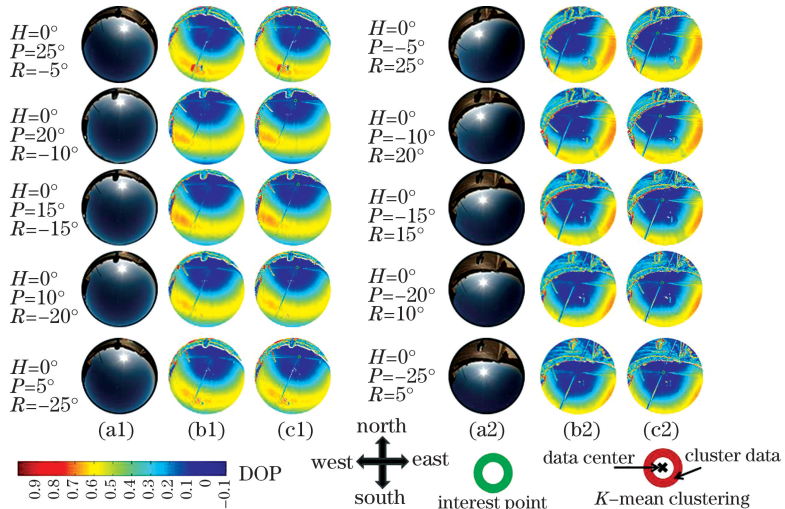


图9 外场实验数据。(a1)(a2)原始图像;(b1)(b2)偏振度分布;(c1)(c2)太阳位置矢量

Fig. 9 Field experiment datas. (a1) (a2) Original images; (b1) (b2) polarization distribution; (c1) (c2) sun position vector

表2 检测的解算数据
Table 2 Solution data of detection

$H/(^\circ)$	$P/(^\circ)$	$R/(^\circ)$	Sun coordinate			Error of $P/(^\circ)$	Error of $R/(^\circ)$
			X	Y	Z		
0.033	25.133	-5.125	0.576	-0.073	0.814	-0.133	0.125
0.087	19.987	-9.969	0.647	-0.132	0.751	0.013	-0.031
0.035	15.067	-14.984	0.710	-0.182	0.680	-0.067	-0.016
0.100	9.768	-20.229	0.772	-0.220	0.597	0.232	0.229
0.008	5.017	-25.260	0.822	-0.243	0.515	-0.017	0.260
0.044	-0.156	0.232	0.870	0.002	0.494	0.156	-0.232
0.000	-5.203	25.701	0.910	0.180	0.374	0.203	-0.701
0.022	-9.918	19.722	0.941	0.114	0.318	-0.082	0.278
0.052	-14.714	15.060	0.966	0.067	0.249	-0.286	-0.060
0.053	-19.761	9.194	0.985	0.028	0.173	-0.239	0.806
0.017	-22.445	4.219	0.992	0.009	0.122	-0.555	0.781

外场实验测试结果如图10所示。图10(a)为 P 从 -25° 到 25° 的变换曲线, R 从 -5° 到 -25° 再从 25° 到 5° 的变化曲线, 横轴为测试序列。图10(b)为解算角度的误差。从图10可以看到, 当飞行器的偏

转角度较小时, 利用实测数据可精确解算姿态角的变化情况, 但当飞行器的偏转角过大时, 受制于鱼眼镜头的采集范围, K -means 算法对太阳位置矢量的检测有较大偏差, 外场实验精度可以达到 0.1° 。

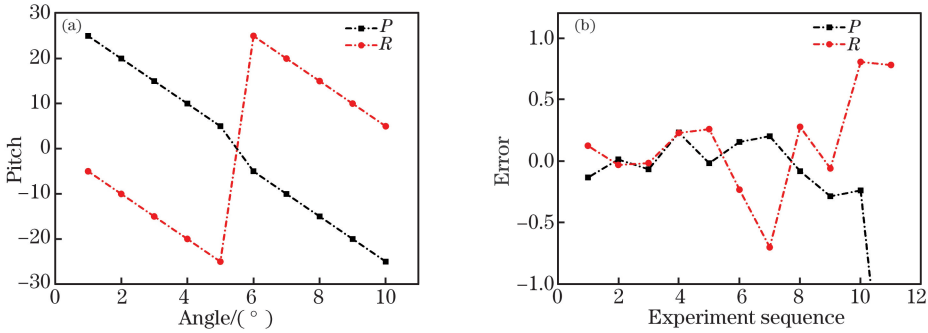


图10 外场实验测试。(a)外场实验测试角度变化曲线;(b)外场实验角度误差曲线

Fig.10 Field experiment test. (a) Test angle variation curves in field experiment; (b) angle error curves in field experiment

提出的姿态解算算法通过检测大气偏振模式中的信息可以精确解算飞行器的三维姿态角, 而误差来源有两个: 一是三脚架的转动角度不够精准; 二是当飞行器的偏转角过大时, 受制于鱼眼镜头的成像范围, 使得 K -means 算法出现误差。对于第一个误差, 后续将搭建高精度转台进行实验。对于第二个误差, 后续将调研高精度的图像传感器, 获取更大的检测区域来实现。

惯导系统不论是在军事领域还是民航领域都发挥着重要的导航作用, 但是当飞行器长航时, 尤其现在的无人机长期处于实时监测的环境中, 其姿态角会因误差积累而发生偏移, 如图11所示, 其中 I_s 为惯导系统的航向角、 P_s 为惯导系统的俯仰角和 R_s 为惯导系统的横滚角。偏振光对姿态的测量

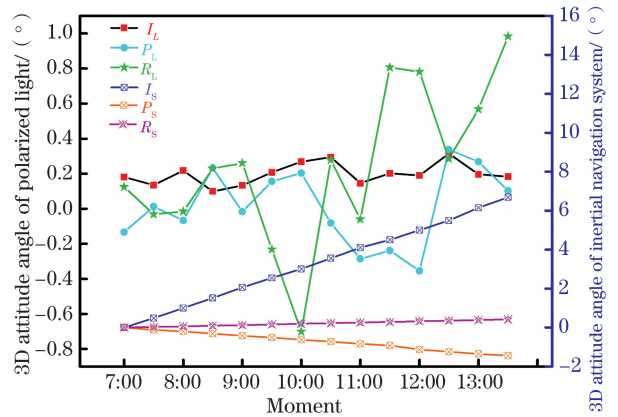


图11 偏振光的姿态与惯导系统的姿态对比

Fig.11 Polarized light attitude and inertial navigation system attitude comparison

误差如图 11 所示,其中 I_L 为偏振光的航向角、 P_L 为偏振光的俯仰角和 R_L 为偏振光的横滚角。从图 11 可以看到,经过 6 h 的测量,姿态角都发生漂移,尤其航向角的误差达到 7° ,偏振光的航向角的最大误差为 0.3142° ,最小误差为 0.0987° ,俯仰角的最大误差为 0.2860° ,最小误差为 0.0806° ,横滚角的最大误差为 0.9821° ,最小误差为 0.0245° 。将来可将偏振光与惯性系统进行组合,利用偏振光的长期稳定的特点来弥补惯导系统的误差随时间漂移的问题,一同为无人机监测与武器制导充分发挥两者各自的优势并取长补短。

4 结 论

依据太阳的空间位置这一稳定的导航参考坐标,为飞行器的三维姿态角解算提供一种新的方法,所提方法在大气偏振模式的导航领域中有着重要的应用价值。通过偏振光传感器阵列来采集大范围的偏振信息,进而解算太阳的空间位置,再利用所提方法来解算三维姿态信息。基于仿生原理的偏振光导航依靠的大气偏振模式属于一种自然属性,因此偏振光导航属于自主导航,所提方法在小型无人机自主导航侦察的方面具有广泛的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Liu J, Zhao D H, Wang C G, et al. Attitude calculation method based on full-sky atmospheric polarization mode [J]. Review of Scientific Instruments, 2019, 90(1): 015009.
- [2] Horváth G, Barta A, Pomozi I, et al. On the trail of Vikings with polarized skylight: experimental study of the atmospheric optical prerequisites allowing polarimetric navigation by Viking seafarers [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 2011, 366(1565): 772-782.
- [3] Zhang W F, Man Z S, Ge X L, et al. Fast dehazing method based on polarization optics [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(14): 141103.
张文飞, 满忠胜, 葛筱璐, 等. 一种快速实现的偏振光学去雾方法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(14): 141103.
- [4] Cui Y, Zhang X G, Zhou X C, et al. Effect of aerosol on polarization distribution of sky light [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(6): 0601001.
崔岩, 张西光, 周鑫昌, 等. 气溶胶对天空光偏振分布的影响[J]. 光学学报, 2019, 39(6): 0601001.

- [5] Gao J, Wang L, Bo M, et al. Information acquisition in desert ant navigation [J]. International Journal of Information Acquisition, 2006, 3(1): 33-43.
- [6] Hegedüs R, Åkesson S, Horváth G. Polarization patterns of thick clouds: overcast skies have distribution of the angle of polarization similar to that of clear skies [J]. Journal of the Optical Society of America A, 2007, 24(8): 2347-2356.
- [7] 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.
- [8] Rossel S, Wehner R. How bees analyse the polarization patterns in the sky [J]. Journal of Comparative Physiology A, 1984, 154(5): 607-615.
- [9] Yang J T, Yan H, Liu W Y, et al. A detecting method for the position of the sun using the full-sky three channel polarization imaging system [J]. China Sciencepaper, 2018, 13(5): 547-551.
杨江涛, 闫皓, 刘文耀, 等. 基于三通道全天域偏振成像系统太阳位置检测方法 [J]. 中国科技论文, 2018, 13(5): 547-551.
- [10] Chahl J, Mizutani A. Biomimetic attitude and orientation sensors [J]. IEEE Sensors Journal, 2012, 12(2): 289-297.
- [11] Zhao K C, Chu J K, Wang T C, et al. A novel angle algorithm of polarization sensor for navigation [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58(8): 2791-2796.
- [12] 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.
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.
- [13] Wang W, Chu J K, Cui Y, et al. Modeling of atmospheric polarization pattern based on vector radiative transfer [J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(5): 0513001.
王威, 褚金奎, 崔岩, 等. 基于矢量辐射传输的大气偏振建模 [J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0513001.
- [14] Li Y B, Gao J, Wang X, et al. Independent channel measurement method of polarization compass information and the design of sensor [J]. Opto-Electronic Engineering, 2015, 42(7): 12-18.
李逸博, 高隼, 王昕, 等. 独立通道偏振罗盘信息检测方法 & 传感器设计 [J]. 光电工程, 2015, 42(7): 12-18.

- [15] Fan Z G, Chen M L, Wang B, et al. Three-dimensional attitude information obtained by the skylight polarization pattern[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(6): 1248-1256.
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.
- [16] Chu J K, Zhang R, Wang Z W, et al. Progress on bio-inspired polarized skylight navigation sensor[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2016, 61(23): 2568-2577.
褚金奎, 张然, 王志文, 等. 仿生偏振光导航传感器研究进展[J]. *科学通报*, 2016, 61(23): 2568-2577.
- [17] Tang J, Zhang N, Li D L, et al. Novel robust skylight compass method based on full-sky polarization imaging under harsh conditions [J]. *Optics Express*, 2016, 24(14): 15834-15844.
- [18] Zhao H J, Xing Jn, Gu X F, et al. Polarization imaging in atmospheric environment based on polarized reflectance retrieval [J]. *Chinese Optics Letters*, 2019, 17(1): 012601.