

文章编号: 1007-2780(2012)05-0713-05

基于 GPS 基准点的航空吊舱垂直下视 目标定位方法研究

宋悦铭, 孙敬辉, 王 帅

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033, E-mail: songym525@sina.com)

摘 要: 传统的无人机目标定位技术要求在外场对惯导基准, 减振器基座和光电平台坐标系之间进行复杂的标校, 利用空间坐标系转换理论对地面目标进行定位。但由于各坐标系之间标校的偏差和飞机经纬度的误差, 使得定位结果精度较低。航空吊舱采用惯导系统和光电转台固联的安装方式, 可以彻底消除减振器带来的误差。光电转台在垂直下视状态下, 利用飞机海拔高度和激光测距值就可以算出目标点海拔高度。同时利用目标点和 GPS 基准点之间的像素关系并结合基准点地理经纬度可以准确计算出目标点的 GPS 坐标。通过仿真实验可以看出航空吊舱在垂直下视模式下, 基于 GPS 基准点进行地面目标定位的方法可以得到较高的精度。相比空间坐标变换的定位方法节省了复杂的系统标校过程, 简化了算法公式, 不仅提高了定位精度, 还增加了解算的实时性。

关 键 词: 航空吊舱; 垂直下视; 坐标转换; 目标定位; GPS 基准点

中图分类号: V249.32 文献标识码: A DOI: 10.3788/YJYXS20122705.0713

Air Pod Target Location Method Research Using GPS Datum Mark in Vertical Down of View

SONG Yue-ming, SUN Jing-hui, WANG Shuai

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China, E-mail: songym525@sina.com)

Abstract: Traditional UAS targeting technology uses space coordinate transformation theory to locate targets. It requires complicated calibration between INS benchmark, shock absorber base and optical turret coordinate. The accuracy of locating results is low due to the deviation of coordinate calibration and the latitude and longitude error of UAS. Errors brought by shock absorber can be eliminated thoroughly when INS and optical turret solid alliance installed in air pod. Using height value of airplane and laser distance measurement value, optical turret can work out the height of target in vertical down of view. It can also calculate GPS coordinate of target accurately using pixels relationship between target and GPS datum mark combined with the latitude and longitude of datum mark. Simulation test shows an accuracy result of ground target locating method based on GPS datum mark when air pod in vertical down of view status. Comparing with space coordinate transformation locating method, it saves complicated system calibration process, simplifies arithmetic formula, improves the locating accuracy and enhances the real-time feature of solution.

Key words: air pod; vertical down of view; coordinate transformation; target location; GPS datum mark

收稿日期: 2011-12-15; 修订日期: 2012-03-03

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)重点项目(No. 2008AA121803)

作者简介: 宋悦铭(1981—), 男, 吉林长春人, 硕士, 副研究员, 主要研究航拍成像处理技术和目标定位解算方法。

1 引 言

随着国内外航空产业的蓬勃发展,飞机系统对航空光学吊舱的功能和技术指标要求也越来越高,光学吊舱已经不再是简单的成像和角度测量传感器,而是一个对侦查目标具有高精度位置解算和跟踪探测的综合光电侦察设备^[1]。尤其是近几年无人攻击机和卫星中继型无人机的迅速发展更是要求光电平台必须具备对目标的自主定位/引导功能,以完善和提高无人机系统的战术指标,更加准确、快捷地获取战场情报,为取得作战胜利提供重要的保证。

传统的无人机目标定位技术要求在外场对惯导基准、减振器基座和光电平台坐标系之间进行复杂的标校,利用空间坐标系转换理论对地面目标进行定位。但由于各坐标系之间标校的偏差和飞机经纬度的误差,使得定位结果精度较低。

航空吊舱采用惯导系统和光电转台固联的安装方式,可以彻底消除减振器带来的误差。光电转台在垂直下视状态下,对地拍摄的图像均为正交影射的图像,无需进行投影校正和旋转等处理,可以直接用于后期的图像情报处理。利用飞机海拔高度和激光测距值就可以算出目标点海拔高度。同时利用相关跟踪或重心跟踪等图像匹配方法实时计算出目标点和 GPS 基准点之间的像素偏差,并结合基准点地理经纬度就可以准确地计算出目标点的 GPS 坐标。

2 航空吊舱垂直下视原理

2.1 航空吊舱系统组成

航空吊舱一般挂装在有人侦察机机翼位置或无人侦察机机腹位置处,它可以实现沿飞机纵轴正向、反向 180° 两种挂装方式^[2],可分别用于观测飞机前半球和后半球的地面目标。吊舱系统组成如图 1 所示。

航空吊舱的结构由 3 部分组成,即头部、中段和尾段。头部半球是一个陀螺稳定的二自由度光电转台,内装载可见光摄像机、电视跟踪和激光测距。可实现变方位的手动或自动电视跟踪。

吊舱中段装载惯性导航系统、机载数据采集与记录分析系统、主控计算机、吊舱电源分配器等。电视图像记录在视频图像记录器中;光电平台角度数据及载机常规飞行姿态等参数则被记录

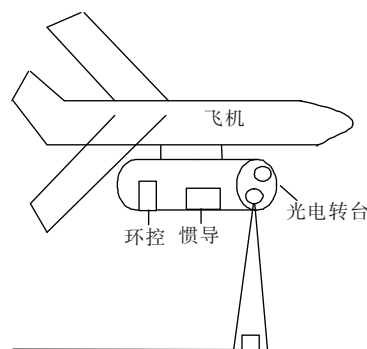


图 1 航空吊舱系统组成示意图

Fig. 1 Air pod system frame

在数据采集系统中,以供地面回放和事后数据处理。

吊舱尾段装载蒸发循环制冷的吊舱环境控制系统。通过专门设计的空气管道,将冷空气或热空气分别送入吊舱的中部和头部,确保吊舱头部及中部的光电设备能够在适宜的环境温度下可靠地工作。

2.2 航空吊舱垂直下视原理

对于外方位框架结合内俯仰框架形式的光电转台,垂直下视是目标引导的一种特殊情况,其原理是以光电转台自身的 GPS 经纬度和地面海拔高度实时做为目标引导的输入信息,然后基于空间各个坐标系之间的齐次变换理论建立测量方程^[3],解算目标引导角度,最后通过实时控制光电转台方位框角度 β 和俯仰框角度 θ 的转动,以保持平台坐标系和地理坐标系的完全重合,使得光学镜头的视轴垂直于地球椭球面。为了建立测量方程,首先建立空间坐标系,如图 2 所示^[9]。

首先按照各坐标系间的关系建立坐标系间的转换方程,然后综合各个转换方程就可得到目标引导公式^[6]。在这里,我们需要用到 4 个坐标系,

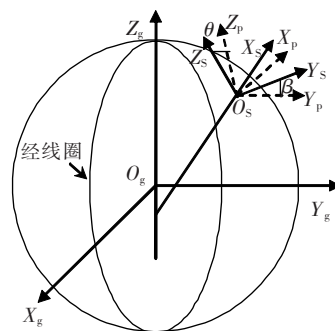


图 2 空间坐标系示意图

Fig. 2 Space coordinate system

分别是大地坐标系 $C(O_c-X_cY_cZ_c)$ 、大地直角坐标系 $G(O_g-X_gY_gZ_g)$ 、地理坐标系 $S(O_s-X_sY_sZ_s)$ 、平台坐标系 $P(O_p-X_pY_pZ_p)$ 。各个坐标系间的转换关系如图 3 所示^[4]。

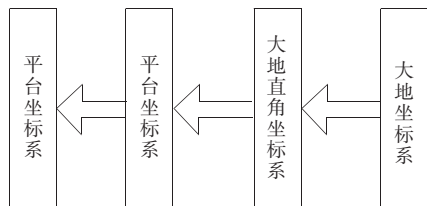


图 3 坐标系转换示意图

Fig. 3 Coordinate transformation

考虑空气动力学原理,航空吊舱装配光电转台的安装方式通常是外框架转动轴系平行于机身方向安装。因此,航空吊舱上的光电转台都具有外横滚框架结合内俯仰框架的特殊结构形式。因为在航空吊舱内部,惯导设备是平行于舱体安装的,如图 1 所示,因此惯导的基准面坐标系和光电转台的平台坐标系是平行的^[8]。地理坐标系到平台坐标系的三轴旋转角就是惯导的三轴姿态角。这样就大大简化了目标引导角解算的坐标转换关系。

我们只需要将惯导横滚和俯仰的姿态角分别做为光电转台垂直下视横滚框架和俯仰框架引导角的输入值就可以实现光学镜头的实时垂直下视。

3 基于 GPS 基准点的目标定位方法

3.1 像素类地关系

在垂直下视工作模式下,由于光学镜头始终垂直于地球椭球面^[5],因此镜头 CCD 靶面始终与地面成像区域平行。镜头焦距为 f ,激光测距值为 R ,像元大小为 e ,像元在地面的长度为 L 。其空间几何关系如图 4 所示。由三角形相似关系可以得出:

$$\frac{R}{f} = \frac{L}{e} \quad (1)$$

$$L = \frac{R \cdot e}{f} \quad (2)$$

因为在同一幅图像中 e 、 f 和 R 的值是固定的,所以图像中每一个像素代表的地面长度都是相等的。

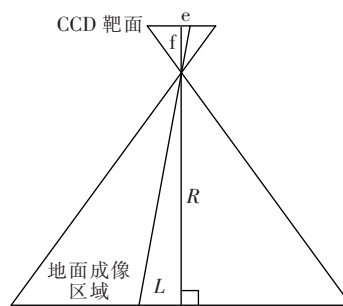


图 4 像元地面投影示意图

Fig. 4 Pixels projection

3.2 定位公式推导

在图像中十字丝纵轴代表飞机航向。通过目标点和基准点之间的像素关系可以求出两点之间的地面距离。再由直角三角形三边关系可以求出目标点相对基准点的经度方向上的距离和纬度方向上的距离^[7],进而求解出目标点的经纬度。图像平面几何关系如图 5 所示。

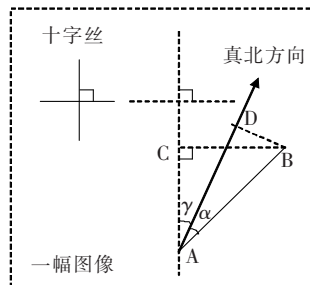


图 5 图像平面几何关系示意图

Fig. 5 Image plane geometry

具体算法如下:

A 点是基准点,纬度为 G ,经度为 E 。B 点是目标点。 γ 是偏航角,通过图像相关跟踪算法求出 A、B 两点之间在纵向间隔 n 个像素,在横向间隔 m 个像素。镜头焦距为 f ,激光测距值为 R ,像元大小为 e ,像元在地面的长度为 L 。在图像区域内经线圈上 0.001° 代表的地面距离是 S_1 ,纬线圈上 0.001° 代表的地面距离是 S_2 。

$$S_1 = 40\,008\,600 / 360\,000 = 111.135 \text{ m}$$

$$S_2 = 40\,075\,560 \cdot \cos(G) / 360\,000 = 111.321 \cos(G) \text{ m}$$

由图 5 可得:

$$\overline{AC} = n \cdot L = \frac{n \cdot R \cdot e}{f} \quad (3)$$

$$\overline{BC} = m \cdot L = \frac{m \cdot R \cdot e}{f} \quad (4)$$

所以:

$$\overline{AB} = \sqrt{\overline{AC}^2 + \overline{BC}^2} = \frac{R \cdot e}{f} \cdot \sqrt{n^2 + m^2} \quad (5)$$

因为

$$\alpha + \gamma = \arctan(\overline{BC} / \overline{AC}) = \arctan(m/n)$$

所以

$$\alpha = \arctan(m/n) - \gamma \quad (6)$$

由直角三角形 ADB 可得

$$\overline{DB} = \overline{AB} \cdot \sin \alpha = \frac{R \cdot e}{f} \cdot \sqrt{n^2 + m^2} \cdot \sin(\arctan(m/n) - \gamma) \quad (7)$$

$$\overline{AD} = \overline{AB} \cdot \cos \alpha = \frac{R \cdot e}{f} \cdot \sqrt{n^2 + m^2} \cdot \cos(\arctan(m/n) - \gamma) \quad (8)$$

设目标点 B 的纬度是 G_B , 经度是 E_B , 则:

$$G_B = G + \frac{\overline{AD}}{S_1 \cdot 10^3} = G + \frac{R \cdot e \cdot \sqrt{n^2 + m^2} \cdot \cos(\arctan(m/n) - \gamma)}{f \cdot 1.111\,35 \cdot 10^5} \quad (9)$$

$$E_B = E + \frac{\overline{DB}}{S_2 \cdot 10^3} = E + \frac{R \cdot e \cdot \sqrt{n^2 + m^2} \cdot \sin(\arctan(m/n) - \gamma)}{f \cdot 1.113\,21 \cdot \cos(G) \cdot 10^5} \quad (10)$$

4 理论推算

假设使用定焦相机, 像元大小为 $4.1 \mu\text{m}$, 焦距 70 mm , 激光测距值 5 km , 偏航角 30° , m 为 700 , n 为 850 。GPS 基准点经度是 116.38° , 纬度是 40.112° 海拔高度 500 m 。飞机上使用差分 GPS, 飞机海拔高度为 $4\,254 \text{ m}$ 。各输入量的误差均方差如表 1 所示。

表 1 输入量误差均方差表

Table 1 Input error RMS

像元大小	焦距	偏航角	激光测距值	飞机海拔高度
$0.2 \mu\text{m}$	2 mm	0.2°	3 m	2 m
视轴偏角	m	n	基准点经度	基准点纬度
5°	0.5	0.5	$2 \times 10^{-5} (^\circ)$	$2 \times 10^{-5} (^\circ)$

设目标点纬度真值为 G_z , 纬度误差为 I_G , 经度误差为 I_E , 海拔高度误差为 I_H , 平面定位误差为 I_P , 纬度误差均方差为 J_G , 经度误差均方差为 J_E , 海拔高度误差均方差为 J_H , 平面定位 (CEP)

误差均方差为 J_P , 测量数据样本数量^[10] 为 n , 有如下公式:

$$I_P = \left[\left(\frac{I_G \cdot 110}{0.001} \right)^2 + \left(\frac{I_E \cdot 110 \cdot \cos G_z}{0.001} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

$$J_G = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (I_G(i))^2}{n} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

$$J_E = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (I_E(i))^2}{n} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

$$J_H = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (I_H(i))^2}{n} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

$$J_P = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (I_P(i))^2}{n} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

根据输入变量的真实值和均方根误差, 在 MATLAB 中建立 $10\,000$ 个随机变量数组的样本模型^[11], 利用式(11)~式(15), 通过蒙特卡罗法仿真计算出目标定位大地坐标误差的均方差值如表 2 所示, 并得出目标的定位精度分布^[7] 如图 6 所示。

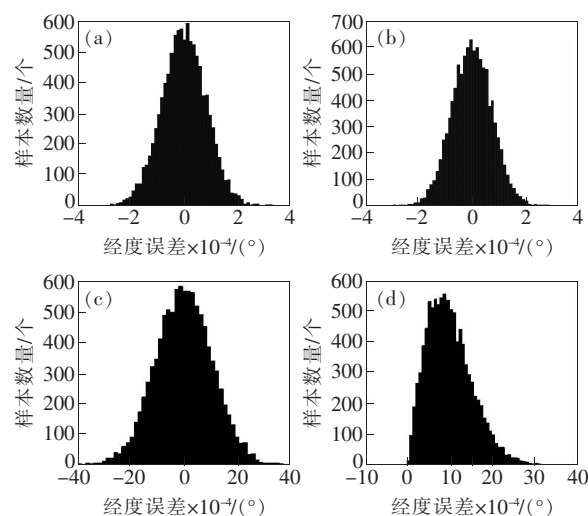


图 6 定位误差分布图

Fig. 6 Location errors distribution

表 2 目标定位大地坐标误差均方差表

Table 2 Object coordinate error RMS

目标定位大地坐标	误差均方差
纬度	$7 \times 10^{-5} (^\circ)$
经度	$8 \times 10^{-5} (^\circ)$
海拔高度	10 m
平面定位	11 m

通过仿真计算得出:

从图6(c)的分布图中可以看出,虽然目标海拔高度定位误差最大可达到30 m。但6(a)和6(b)表明目标经纬度定位误差的均方差都相对较小,从6(d)中可以看出目标平面定位误差基本能够控制在25 m以内。通过上面的推导和仿真可以得出,利用GPS基准点求解目标经纬度和海拔高度的方法能够得到较高的目标定位精度,满足实际使用要求。

5 结 论

通过理论推导和仿真实验可以看出航空吊舱在垂直下视模式下,基于GPS基准点进行地面目

标定位的方法可以得到较高的精度。相比空间坐标变换的定位方法节省了复杂的系统标校过程,简化了算法公式,不仅提高了定位精度,还增加了解算的实时性。

但整套算法的精度主要取决于基准点的GPS坐标精度,因此基准点坐标一定要准确。同时尽量均匀分布基准点,保证每幅图像中都有基准点,这样才能确保目标定位精度的一致性和连续性。并且在求解目标海拔高度过程中,要用到飞机的海拔高度和激光测距值,因此这两项数据也要尽量精准,普通GPS的海拔高度误差有20 m,不能满足需要,可以考虑在飞机上安装差分GPS设备以满足定位要求。

参 考 文 献:

- [1] 孙辉,张葆,刘晶红,等. 航空光电成像电子稳像技术[J]. 光学精密工程,2007,15(8):1280-1286.
- [2] 贾平,张葆. 航空光电侦察平台关键技术及其发展[J]. 光学精密工程,2003,11(1):82-88.
- [3] 金光. 机载光电跟踪测量的目标定位误差分析和研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2001.
- [4] 王家骥,金光,颜昌翔. 机载光电跟踪测量设备的目标定位误差分析[J]. 光学精密工程,2005,13(2):105-116.
- [5] 李延兴,张静华,张俊青. 一种由地心直角坐标到大地坐标的直接转换[J]. 大地测量与地球动力学,2007,27(2):37-46.
- [6] 陈文建,纪明,张建峰. 地理跟踪过程中光电吊仓惯性定位技术研究[J]. 应用光学,2007,28(6):675-679.
- [7] 巩晓东,李秀望. 利用航空遥感象片量算面积的精度分析[J]. 测绘工程,2000,9(1):42-46.
- [8] 宋悦铭,刘晶红,沈宏海,等. 基于GPS定位的光电转台红外监测亚像元火点面积估算方法[J]. 液晶与显示,2011,26(增):170-173.
- [9] 常军. 机载雷达目标的大地坐标定位[J]. 电讯技术,2003,43(2):97-100.
- [10] Vermeille H. Direct transformation from geocentric coordinates to geodetic coordinates[J]. J. Geod., 2002,76(8):451-454.
- [11] John B. Lundberg. Alternative algorithms for the GPS static positioning solution[J]. Applied Mathematics and Computation, 2001,119(4):21-34.
- [12] Euler H, Goad C C. On optional filtering of GPS Dual-frequency observations without using orbit information bullet in geodesique[J]. J. Navigation, 1991,65(2):130-143.