

·信号与信息处理·

## 一种机载成像系统目标定位新方法

依玉峰<sup>1,2</sup>, 田 宏<sup>1</sup>

(1. 光电信息控制和安全技术重点实验室, 天津 300308; 2. 中国电子科技集团公司光电研究院, 天津 300308)

**摘要:**提出一种机载成像系统目标被动定位算法,应用机载成像设备,实现对图像中目标的精确定位。首先,根据镜头设计参数,计算得到理想小孔成像模型下图像中目标点坐标信息,并根据图像视场和分辨率,计算得到目标在成像系统坐标系下空间信息;其次,根据成像系统安装位置信息和载机姿态信息,计算得到目标在惯导坐标系下空间位置信息;最后,根据载机经纬度和高度信息,计算得到目标实际位置信息。通过对采集到的实验数据进行分析,结果表明,文中方法具有较高的定位精度和处理效率。

**关键词:**目标定位;机载成像系统;镜头设计参数;理想小孔成像模型;惯导坐标系

中图分类号: TP 228.42

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2017)-01-0030-05

## A Novel Target Localization Algorithm Based on Airborne Imaging System

YI Yu-feng<sup>1,2</sup>, TIAN Hong<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Electro-optical Information Control and Security Technology, Tianjin 300308, China;

2. Academy of Opto-Electronics, China Electronics Technology Group Corporation (AOE CETE), Tianjin 300308, China)

**Abstract:** A passive target localization algorithm based on airborne imaging system is proposed. The precise calculation of target location can be achieved by using airborne imaging devices. Firstly, according to the lens design parameters, the target coordinate information in the image can be mapped to the location under ideal camera model. The target space coordinate information in the camera coordinate system can be calculated by using the image view and image resolution. Secondly, the target space location information in the inertia navigation coordinate system can be calculated by using the imaging system installation location and airborne posture information. Finally, according to the latitude, the longitude and the altitude of the airborne location, the target actual location can be calculated. The experimental results demonstrate that our proposed algorithm can achieve accurate target localization in less time.

**Key words:** target localization; airborne imaging system; lens design parameter; ideal camera model; inertia navigation coordinate system

随着现代科学技术的发展,机载目标探测技术获得了日新月异的发展,如何对检测到的地面目标进行精确定位,是目标探测技术中一个难点问题。在过去几十年,雷达、激光、红外、可见光等设备被广泛地应用到机载平台中,并在目标检测中发挥了重要的作用。利用机载平台目标检测设备进行精确、快速的目标定位<sup>[1-3]</sup>,有利于对周围环境态势的

把握、指挥决策的正确性,对目标的威胁等级分析具有重要现实意义。

机载地面目标定位一般采用机载雷达和激光设备进行目标的定位,载机发射雷达或激光信号,根据接收到从目标反射回来的信号的时间差来估计载机与目标的距离,再根据发射雷达或激光信号的角度来确定目标和发射器的角度,从而计算出载

机与目标的相对位置信息。有代表性的雷达和激光目标定位算法包括:Martin Einemo提出的一种基于多输入多输出雷达系统权重系数最小均方根算法<sup>[4]</sup>,算法通过线性分段测量发射器到目标和目标到接收器的距离和,并建立一种约束二次方程用于目标定位。Jonathan Bosse提出一种基于雷达网的直接目标定位方法<sup>[5]</sup>,通过优化目标函数来获取最佳目标位置,获得精度较高的目标定位结果。Yang Junqing提出一种基于精密激光跟踪私服控制系统移动目标位置测量方法<sup>[6]</sup>,应用一种改进的自适应模糊PID控制算法,并将其应用到单轴激光束快速跟踪测试中,获得较好的测试结果。然而,机载雷达和激光地面目标定位技术有其自身的局限性,雷达采用主动探测方式,具有易被察觉、自身隐蔽性不好的缺陷;当目标距离较远时,目标定位精度下降。因此,如何有效地利用机载平台光学成像设备实现精确、快速的目标被动定位,具有重要的现实意义。

提出一种基于机载成像系统目标定位算法,根据目标在机载成像系统输出图像中坐标和载机惯导输出的载机位置信息和载机姿态信息,计算目标所在位置的经纬度。为了提高计算精度,对目标在图像中坐标点进行畸变校准处理,消除由于镜头设计和装配原因造成的目标成像位置偏差,获取理想小孔成像模型下目标坐标信息;应用欧拉方程计算在东北天坐标系下,从光学中心出发目标成像点与目标实际位置之间连线的射线方程;最后,根据经纬度定义和载机位置信息,应用球面两点间角度计算方法,计算目标所在位置经纬度。

## 1 机载成像系统目标定位算法

应用相机安装角度信息和载机惯导信息对图像中目标进行定位,首先要根据相机镜头设计参数,对图像中目标点坐标进行畸变校正处理<sup>[7-8]</sup>,获得理想小孔成像模型下目标坐标点;根据图像保留视场和图像分辨率大小,计算得到目标与成像中心点连线所在射线上一点,再根据载机姿态信息,能够计算得到该点在东北天坐标系下坐标,再应用载机经纬度和高度信息,计算目标所在位置经纬度信息。

### 1.1 畸变校正

受相机镜头设计和实现的影响,相机输出图像

存在一定的几何畸变,需要经过畸变校正处理,获得理想小孔成像模型下目标点坐标。根据测量得到镜头畸变参数和输出图像畸变中心,通过几何变换得到理想图像像点与实际图像点之间的映射关系。畸变校正原理图如图1所示。

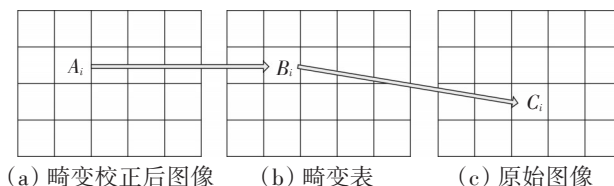


图1 畸变校正原理图

图1中 $A_i$ 为畸变校正后的图像中第 $i$ 个像点的坐标值; $B_i$ 为畸变校正表中第 $i$ 个元素值,存储原始图像地址信息; $C_i$ 为目标点在原始图像中的坐标值。通过查找畸变校正表,得到了理想小孔成像模型下目标点坐标与原始图像中目标点坐标的映射关系。畸变校正映射关系如下式所示

$$A_i = C_i[B_i] \quad (1)$$

对输出原始图像畸变校正效果图如图2所示。受镜头设计因素的影响,相机输出网格图像存在一定的几何畸变,并且越靠近边缘视场畸变越严重(如图2a所示),通过对图像进行畸变校正处理得到无畸变图像(如图2b所示)。

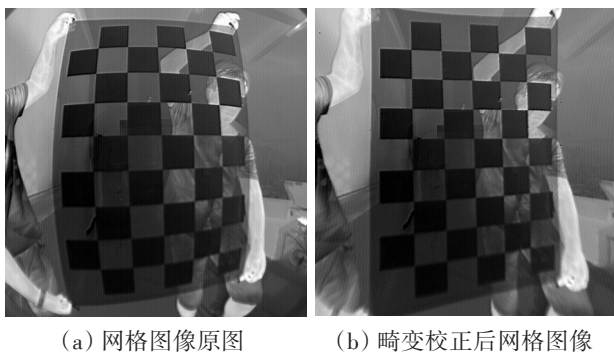


图2 畸变校正效果图

### 1.2 目标点空间坐标计算

计算目标点在东北天坐标系下的射线方程,首先要定义算法中涉及到的坐标系。基于机载成像系统目标定位算法中包括三个坐标系:相机坐标系、载机坐标系和东北天坐标系(如图3所示)。相机坐标系 $o-xyz$ 的原点 $o$ 位于相机的投影中心, $ox$ 轴

为光轴,垂直于镜头向外, $oy$ 平行于成像平面,指向成像平面的下方, $oz$ 平行于成像平面,指向成像平面的右方。载机坐标系 $o-XYZ$ 的原点 $o$ 位于每台相机投影中心上, $oX$ 轴平行于机身并指向右, $oY$ 轴平行于机身并指向机头方向, $oZ$ 轴垂直于 $oXY$ 面向上。东北天坐标系 $o-x_gy_gz_g$ , $ox_g$ 轴沿纬线切线方向指向东, $oy_g$ 轴沿经线切线方向指向北, $oz_g$ 轴为地心与 $o$ 点连线的延长线指向天。

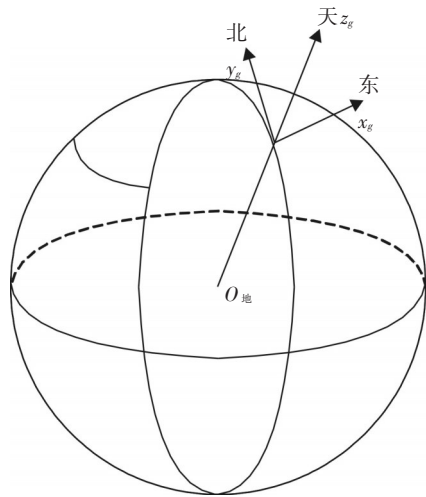
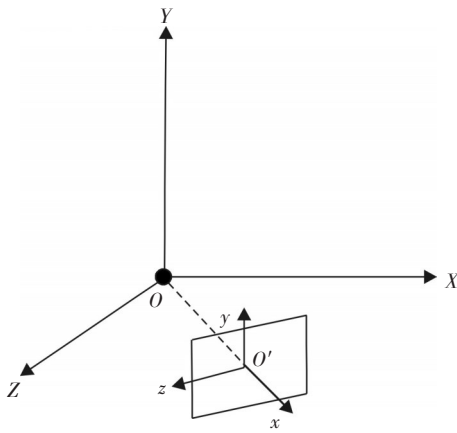


图3 三种坐标系示意图

根据相机输出图像分辨率和视场大小,计算出成像面中心与相机投影中心的距离,其计算公式如下式所示

$$d = \frac{w}{2 \times \tan(\text{angle})} \quad (2)$$

式中, $w$ 为输出图像宽度; $\text{angle}$ 为输出图像半视场大小。

通过上述分析,得到在相机坐标系中目标点 $(m, n)$ 与投影中心连线与成像面交点坐标 $(d, n-w/2$

$2, w/2-m)$ ,通过坐标转换计算目标点在东北天坐标系下空间坐标。设相机相对于载机安装角为 $(y_f, p_f, r_f)$ ,载机姿态信息 $(y_g, p_g, r_g)$ ,则目标在成像面投影点坐标 $(d, n-w/2, w/2-m)$ 在东北天坐标系下坐标 $(x_g, y_g, z_g)$ 计算公式如下式所示

$$A_{y,p,r} = \begin{bmatrix} \cos(y)\cos(p) - \sin(p)\cos(r) + \sin(y)\cos(p)\sin(r) \\ \sin(p)\sin(r) + \sin(y)\cos(p)\cos(r) \\ \cos(y)\sin(p) \cos(p)\cos(r) + \sin(y)\sin(p)\sin(r) - \\ \cos(p)\sin(r) + \sin(y)\sin(p)\cos(r) - \\ \sin(y) \cos(y)\sin(r) \cos(y)\cos(r) \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} d \\ n - w/2 \\ w/2 - m \end{bmatrix} \quad [x_g, y_g, z_g]^T = A_{y_g, p_g, r_g} \cdot A_{y_f, p_f, r_f} \cdot B \quad (3)$$

式中, $A_{y,p,r}$ 角度 $(y, p, r)$ 对应的转换矩阵; $B$ 为目标点 $(m, n)$ 与相机投影中心连线在成像面投影坐标。

### 1.3 目标点经纬度计算

经度是地球上一点离一根被称为本初子午线的南北方向走线夹角的度数,本初子午线以东为东经,以西为西经;纬度是指某点与地球球心的连线和地球赤道面所成的线面角,地球赤道面以北为北纬,以南为南纬,图4为东北天坐标系。根据经纬度

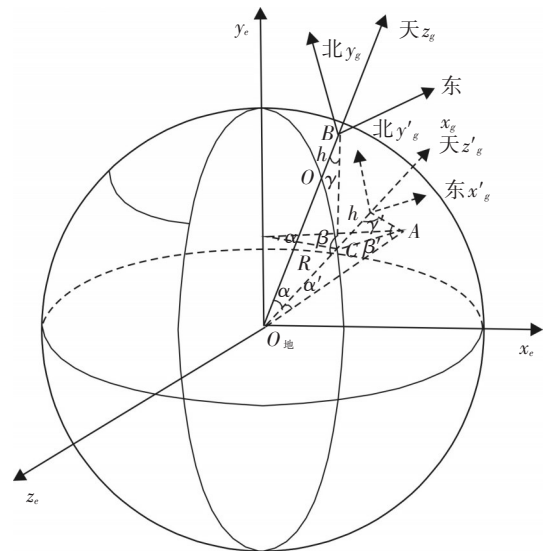


图4 目标位置计算示意图

定义来计算图像中目标点的位置信息。

由于探测器视场较小且载机飞行高度较低,视场内目标与载机距离较近,因此,可以忽略不计地

球弧面对计算误差的影响。根据计算得到的目标在东北天坐标系下的射线方程,可以计算得到目标在 $y$ 轴投影与在 $z$ 轴投影夹角 $\gamma$ 为

$$\gamma = \arctan\left(\frac{y_g}{z_g}\right) \quad (4)$$

再应用正弦定理,能够计算得到目标所在纬度与载机所在经度投影点( $C$ 点)与地心连线和载机( $B$ 点)与地心连线所成夹角 $\alpha$ 为

$$\beta = \arcsin\left(\frac{R+h}{R} \times \sin\gamma\right)$$

$$\alpha = \begin{cases} 180 - \beta - \gamma & \text{if } y_g \geq 0 \\ \beta + \gamma - 180 & \text{if } y_g < 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中, $R$ 为地球半径, $R=6\,371\,004\text{ m}$ ; $h$ 为载机飞行高度。

已知载机经纬度信息( $lon_p, lat_p$ )和目标在东北天坐标系下射线方程,能够计算得到目标经纬度信息。其中,目标纬度 $lat_o$ 计算如下式所示

$$lat_o = \begin{cases} 180 - (lat_p + \alpha) & \text{if } (lat_p + \alpha) > 90 \\ -180 - (lat_p + \alpha) & \text{if } (lat_p + \alpha) < -90 \\ lat_p + \alpha & \text{else} \end{cases} \quad (6)$$

同理,计算目标在 $x$ 轴投影与在 $z$ 轴投影夹角 $\gamma'$ 为

$$\gamma' = \arctan\left(\frac{x_g}{z_g}\right) \quad (7)$$

应用正弦定理计算目标所在纬度与载机所在经度投影点( $C$ 点)与地心连线和目标点( $A$ 点)与地心连线所成夹角 $\alpha'$ 为

$$\beta' = \arcsin\left(\frac{R+h}{R} \times \sin\gamma'\right)$$

$$\alpha' = \begin{cases} 180 - \beta' - \gamma' & \text{if } x_g \geq 0 \\ \beta' + \gamma' - 180 & \text{if } x_g < 0 \end{cases} \quad (8)$$

计算目标纬度为 $lat_o$ 时, $A$ 点和 $C$ 点到大地坐标系 $z$ 轴垂线夹角 $\alpha''$ 为

$$\alpha'' = 2 \times \arcsin\left(\sin(\alpha'/2) / \cos(lat_o)\right) \quad (9)$$

再根据载机经纬度信息( $lon_p, lat_p$ ),计算目标经度 $lon_o$ 为

$$lon_o = \begin{cases} (lon_p + \alpha'') - 360 & \text{if } (lon_p + \alpha'') > 180 \\ (lon_p + \alpha'') + 360 & \text{if } (lon_p + \alpha'') < -180 \\ lon_p + \alpha'' & \text{else} \end{cases} \quad (10)$$

## 2 实验结果与分析

为验证文中算法的可行性,进行了外场试飞试验,选取5幅图像(如图5所示)。

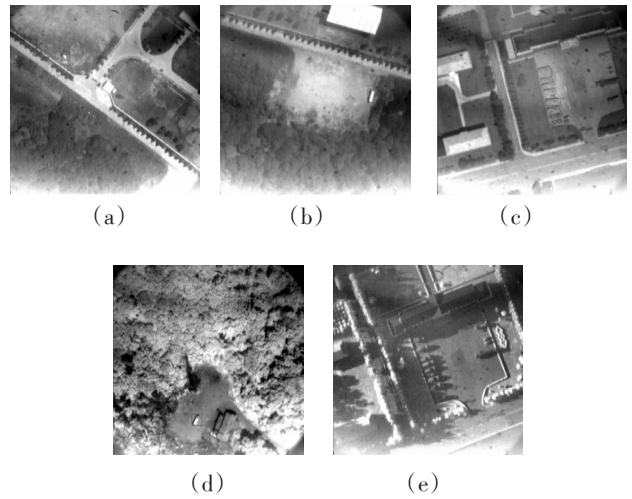


图5 外场试验图像

根据载机位置信息和载机姿态信息计算图像中目标点的经纬度,并将计算值与实测的目标位置信息进行比较,得到计算误差。系统采用可见光相机输出图像,实验环境在主频2.66 GHz、内存2.0 GB的PC机上,采用VC++6.0编程实现。

表1中记录获取图5a~图5e时刻载机位置信息(包括载机精度、纬度和地高),载机姿态信息(包括载机方位角、俯仰角和横滚角),并记录图像中目标所在区域中心点坐标信息。

表1 载机惯导及目标位置信息

图像	载机位置			载机姿态			目标位置	
	经度/(°)	纬度/(°)	地高/m	方位/(°)	俯仰/(°)	横滚/(°)	行坐标	列坐标
图5a	121.207 474	40.970 559	638	261.2	-0.4	-0.23	297	277
图5b	121.206 688	40.969 961	635	264.79	-2.09	0.25	815	489
图5c	121.198 570	40.952 685	621	201.89	10.39	1.22	620	521
图5d	121.170 334	40.926 615	523	172.8	2.7	0.18	447	837
图5e	121.198 685	40.953 493	624	195.3	6.59	0.03	526	566

根据载机当前经纬度信息、载机地高、载机姿态信息和目标在图像中坐标,能够计算得到目标经纬度信息。然而,由于存在光学系统装配误差、相机与载机安装误差、惯导数据误差,造成计算得到的目标位置信息与实际目标位置信息存在偏差。

将计算结果与实际测量得到的目标位置信息进行比较得到实际计算误差,计算结果如表2所示。当载机姿态信息中俯仰角和横滚角较大时,相机光轴偏离较大,造成误差增大。算法执行效率较高,平均运算时间0.017 7 ms。

表2 计算结果

图像	计算目标位置信息		实测目标位置信息		误差	效率
	经度/(°)	纬度/(°)	经度/(°)	纬度/(°)	长度/m	时间/ms
图5a	121.207 909	40.970 354	121.207 827	40.970 318	7.972 8	0.018 1
图5b	121.206 500	40.969 897	121.206 408	40.969 821	11.462 1	0.017 8
图5c	121.198 133	40.951 575	121.198 021	40.951 490	13.349 6	0.017 0
图5d	121.169 967	40.926 419	121.169 879	40.926 353	10.429 1	0.018 5
图5e	121.198 376	40.952 867	121.198 266	40.952 801	11.811 6	0.017 2

### 3 结 论

提出一种新颖的基于机载光学成像系统目标定位算法,根据图像中目标点坐标、载机位置信息和载机姿态信息,构建了目标所在位置经纬度计算方程。与基于雷达目标定位方法相比,此方法采用被动方式进行目标定位,具有自身隐蔽性好、不易被察觉等优势。

机载光学成像系统目标定位精度取决于光学成像系统装配精度、相机安装精度和机载惯导信息的准确性,为了提高目标定位精度,通过人工标定方法减弱光学成像系统装配误差和相机安装误差的影响。由于算法仅涉及复杂度较低的三维矩阵运算和球面两点间夹角运算,算法运算效率高。

### 参考文献

- [1] 徐诚,黄大庆. 无人机光电侦测平台目标定位误差分析[J]. 2013, 34(10):2265-2270.
- [2] 高卓,江泽,邓麟. 机载光电吊舱目标定位技术研究[J].

导航定位学报, 2013, 1(4):74-78.

- [3] LI Xing-long, YAO Wen-jin, ZHU Li-kun, et al. Ground target localization algorithm for semi-active laser terminal correction projectile[J]. Defence Technology, 2016, 12: 234-241.
- [4] Martin Einemo, Hing Cheung So. Weighted least squares algorithm for target localization in distributed MIMO radar[J]. Signal Processing, 2015, 115:144-150.
- [5] Jonathan Bosse, Oleg Krasnow, Alexander Yarovoy. Direct target localization with an active radar network[J]. Signal Processing, 2016, 125:21-35.
- [6] YANG Ju-qing, WANG Da-yong, ZHOU Wei-hu. Precision laser tracking servo control system for moving target position measurement[J]. Optik, 2017, 131:994-1002.
- [7] Wang L, Ju H H. Extrinsic calibration of a fisheye camera and inertial measurement unit[C]//Proceedings of IEEE Conference on Machine Learning and Cybernetics, 2009: 2424-2432.
- [8] Zhu H J, Wang X J, Y C i. An elliptical function model for fisheye camera[C]//Proc of the 8<sup>th</sup> World Congress on intelligent control and automation, IEEE, 2011:248-253.