

机载光电成像平台的多目标自主定位系统研究

周前飞^{1,2,3} 刘晶红^{1,3} 熊文卓^{1,3} 宋悦铭^{1,3}

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

²中国科学院大学, 北京 100049

³中国科学院航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033

摘要 为同时对多个目标实施实时或准实时定位,建立了机载光电成像平台多目标自主定位系统,针对该系统提出一种基于像元视线向量的多目标自主定位模型。通过目标检测算法得到视场中各目标的像素坐标,根据单面阵电荷耦合器件(CCD)传感器的成像原理,构造各目标的视线向量并计算其与图像中心主目标的像元视线角,结合已测得的主目标相对光电平台的方位角、高低角和距离,计算出各目标与机载光电平台的角度与距离关系,应用全球定位系统(GPS)、航姿测量技术获取载机的位置姿态信息,通过齐次坐标变换方法计算出单幅图像中多个目标的大地坐标。针对镜头畸变引起的定位误差,提出基于畸变率的方法进行畸变修正。在1100 m高空对地面目标定位时,多目标定位的圆概率误差(CEP)约为28.74 m,大地高定位误差约为18 m,能同时对50个目标进行实时地理定位。当镜头畸变率为2%时,畸变修正后圆概率误差减小了7%。该多目标自主定位方法具有效率高,便于工程应用的优点。

关键词 测量;多目标自主定位;视线向量;齐次坐标变换;畸变修正;递归最小二乘

中图分类号 V249

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0112005

Multi-Target Self-Determination Orientation System Based on Airborne Photoelectric Imaging Platform

Zhou Qianfei^{1,2,3} Liu Jinghong^{1,3} Xiong Wenzhuo^{1,3} Song Yueming^{1,3}

¹Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

³Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

Abstract In order to achieve multiple targets in real-time or near real-time orientation, a multi-target self-determination orientation system based on airborne photoelectric imaging platform is established and a precise multi-target self-determination orientation model based on line-of-sight vector of pixel is proposed for the system. Using target detection algorithms to obtain the precise pixel coordinates of each target, the line-of-sight vectors of each target are constructed based on image forming principles for single-plane array charge coupled device (CCD) sensors, and the view angles of pixel between the main target at image center and other targets are calculated. Combining with the azimuth angle, elevation angle and the distance between the main target and the photoelectric

收稿日期: 2014-08-01; 收到修改稿日期: 2014-08-29

基金项目: 吉林省重大科技攻关项目(11ZDGG001)、装备预研项目(402040203)、国家林业公益性行业科研专项(201204515)

作者简介: 周前飞(1989—),男,博士研究生,主要从事机载光电成像平台目标定位技术,航空图像畸变校正与配准技术,嵌入式图像处理系统技术等方面的研究。E-mail: wgzhouqfei@126.com

导师简介: 刘晶红(1967—),女,硕士,研究员,博士生导师,主要从事机载光电成像测量设备方面的研究。E-mail: liu1577@126.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

platform, the distance and angle relations between other targets and the photoelectric platform are calculated. Based on the position and attitude information of aircraft, which is obtained by the global positioning system (GPS) heading and attitude measuring system, the homogeneous coordinate transformation method is applied to calculate the geodetic coordinates of multiple targets in a single image. For the orientation error caused by the lens distortion, a method based on the lens distortion ratio is presented to correct it. When flying at an altitude of 1100 m, the circular error probable (CEP) of multi-target self-determination orientation system is approximately 28.74 m, and the height error is about 18 m. It can geolocate 50 targets in a single image in real-time. When the lens distortion ratio is 2%, the CEP of multiple targets position data is reduced by 7% after correcting the lens distortion. The multi-target self-determination orientation method has high efficiency and is convenient for engineering application.

Key words measurement; multi-target self-determination orientation; line-of-sight vector; homogeneous coordinate transformation; distortion correction; recursive least squares

OCIS codes 120.0280; 280.3400; 280.4788; 110.2970; 110.2990

1 引 言

机载光电成像平台是集可见光摄像机、红外热像仪、电视跟踪器、激光测距机、角度传感器等高精度测量设备于一体,用于实现航空侦察、目标瞄准、跟踪、定位等功能的全天候光电侦察设备。一般机载光电平台采用单点定位法,通过姿态测量/激光测距定位模型对图像中心十字丝指向目标进行定位;对多个目标实施定位则需要频繁改变光电平台的空间指向进行多次定位,消耗时间长,难以同时对多个目标实施实时或准实时定位。传统的单目标定位方法无法适应现代战场态势实时多变,目标数量多的情况,如何利用机载光电平台实现多目标快速定位成为航空光电侦察领域的新课题^[1-10]。

闫明等^[1]根据光电系统给出的多个目标相对于主定位目标的角度关系,结合飞机的绝对海拔高度计算出各目标与光电平台的距离,通过坐标变换对地面多个固定/静止目标进行定位,当目标的海拔高度不为零时会导致较大的定位误差。Han等^[2]采用SIFT算法提取同一目标在不同帧图像中的特征点,通过三维重建计算出该目标与光电平台的相对高度进行定位,高度估计精度与相邻两帧图像投影中心之间的距离有关,需要进行特征匹配,计算量大,不利于实现实时定位。宋悦铭等^[3]根据航空吊舱垂直下视状态下各目标点和基准点之间的像素偏差关系,结合基准点地理经纬度计算出多个目标点的大地坐标。Morbidì等^[4]提出基于无人机群的主动目标跟踪和联合定位方法,采用卡尔曼滤波器估计目标的位置,Qu等^[5]提出了一种基于各架无人机之间的方位角的联合定位方法。这些方法基于传感器数据融合技术,涉及复杂的无人机群航线控制问题^[6],需要多架无人机协调工作,硬件成本高。柴敏等^[7]提出根据测站站址差将光电经纬仪的测角信息与雷达的测距信息进行数据融合,实现联合交会定位,能显著提高目标定位精度。Farmani等^[8]提出一种基于扩展卡尔曼滤波的光电平台多目标定位方法,结合动态加权图方法确定目标密集区域,然后采用模型预测控制算法对摄像机姿态参数进行优化,减小多目标定位误差。

针对上述多目标定位方法存在的目标定位精度较低、实时性较差、硬件设备复杂等问题,本文提出一种机载单站多目标快速定位方法,该方法主要针对中小型无人机搭载的光电平台,采用单面阵电荷耦合器件(CCD)传感器实施中空飞行侦察,飞行高度较低(一般小于3000 m),视场角为30°~40°,单幅图像地面覆盖范围为1~2 km,多数情况下不会有太大的起伏,可认为近似平坦,单幅图像中各目标与飞机之间的相对高度相同,根据单面阵CCD传感器的成像原理建立多目标定位模型,采用像元视线向量法计算出各目标与光电平台之间的距离与角度关系,通过齐次坐标变换得到单幅图像中各目标的大地坐标,实现单幅图像多目标的实时或准实时定位,并在此基础上讨论了进一步提高多目标定位精度的方法。

2 多目标自主定位系统的构成及其工作原理

系统由光电成像平台、全球定位系统(GPS)、航空姿态测量系统即惯性测量单元(IMU)组成,如图1所示。GPS定位系统、航姿测量系统固定于光电平台水平基准面上,与光电平台结合直接实现目标自主定位^[9]。光电平台搜索到地面目标后,将主目标锁定在视场中心,输出视轴相对航姿测量系统的方位角和高低角、主目标相对光电平台的距离等信息,同时采集GPS定位系统输出的定位数据、航姿测量系统输出的光电平台姿态数据,

进行坐标转换,计算出主目标的大地坐标。对于视场内的其他目标(这里称为次目标),可利用目标检测模块输出它们的像素坐标,构造各目标的视线向量并计算其与主目标的像元视线角,结合主目标相对光电平台的方位角、高低角和距离,计算出各目标与光电平台的距离与角度关系,通过齐次坐标变换,输出次目标的大地坐标。目标检测模块采用图像分割法、帧差法或光流法同时检测出多个静止或运动目标的像素坐标^[10-11],由于篇幅限制在这里不再详细阐述,假设所有目标的像素坐标均已给出,供系统定位使用。

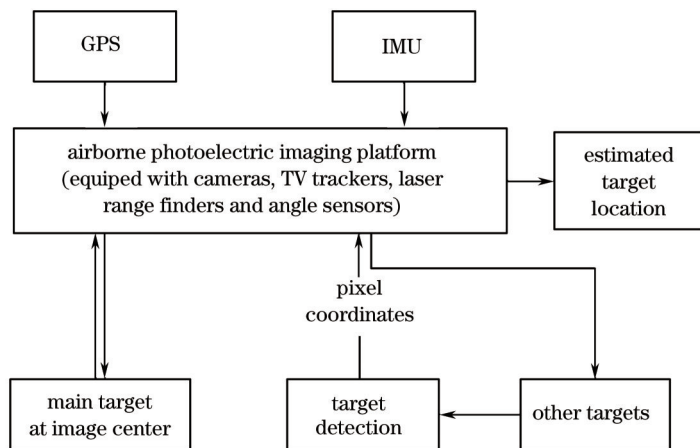


图1 多目标自主定位系统组成示意图

Fig.1 Sketch of multi-target self-determination orientation system

3 多目标自主定位系统的关键技术

3.1 建立多目标定位模型

3.1.1 坐标系定义

系统使用了五个坐标系,如图2所示,各坐标系的定义分别阐述如下。摄像机坐标系:原点为摄像机投影中心, x_c 轴、 y_c 轴分别与图像平面 u 轴(标记图像的列)、 v 轴(标记图像的行)平行且方向一致。载机坐标系:原点为航姿测量系统质心, x_b 轴为航姿测量系统的 0° 方向, y_b 轴为航姿测量系统的 90° 方向, z_b 轴通过右手螺旋定则确定,光电平台输出的方位角 Θ 和高低角 Ψ 及距离 λ_1 是相对该坐标系的。载机地理坐标系:原点位于航姿测量系统质心,为北东地(NED)坐标系,航姿测量系统输出的载机航向角 β ,俯仰角 ε 和横滚角 γ 是相对该坐标系的。

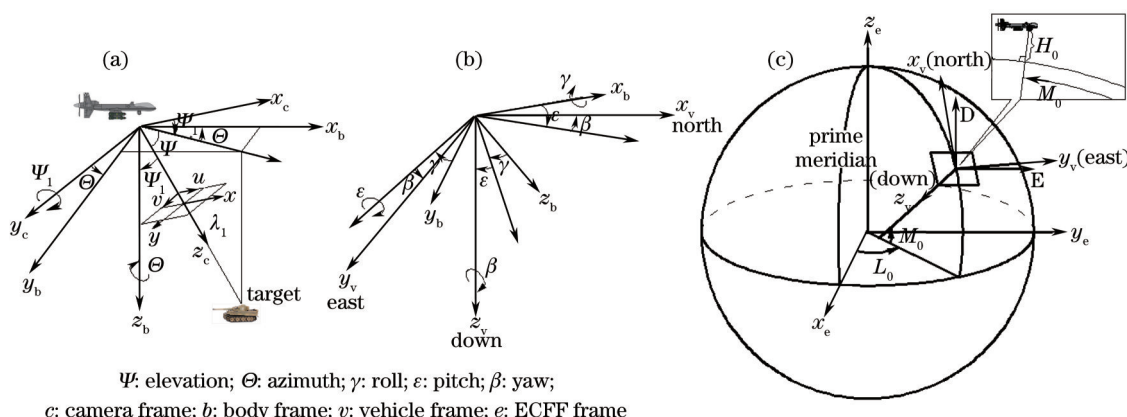


图2 各坐标系的定义及其相互关系示意图

Fig.2 Definition of each coordinate frame and correlation diagram

世界大地测量系统(WGS-84)地心空间直角坐标系(ECEF):原点为地球质心, z_e 轴指向国际时间服务机构(BIH)1984.0定义的协议地极(CTP)方向, x_e 轴指向BIH1984.0的零度子午面和CTP赤道的交点, y_e 轴和 z_e 、 x_e 轴构成右手坐标系。WGS-84大地坐标系:坐标原点和三轴指向与空间直角坐标系相同,采用大地经度 L 、大地纬度 M 和大地高 H 来描述空间位置,GPS输出的载机位置 (L_0, M_0, H_0) 是相对大地坐标系的。图2(a)为摄像机

坐标系与载机坐标系的关系图,图 2(b)为载机坐标系与载机地理坐标系的关系图,图 2(c)为载机地理坐标系与地心空间直角坐标系的关系图。

3.1.2 多目标定位模型

如图 2(a)所示,主目标位于摄像机视场中心,在摄像机坐标系中的齐次坐标为 $[x_c \ y_c \ z_c \ 1]^T = [0 \ 0 \ \lambda_1 \ 1]^T$, 经过从摄像机坐标系到 WGS-84 大地坐标系等五个坐标系的坐标转换,可计算出主目标在大地坐标系中的地理坐标,如图 3 所示。

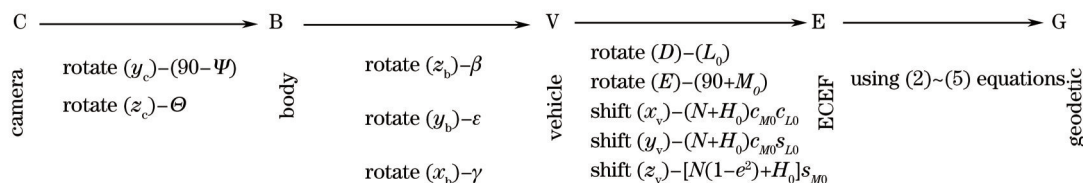


图 3 多目标自主定位的坐标转换流程

Fig.3 Coordinate transformation process for multi-target self-determination orientation

先计算出主目标在地心空间直角坐标系中的坐标为

$$\begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ z_e \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -c_{L_0}s_{M_0} & -s_{L_0} & -c_{L_0}c_{M_0} & (N+H_0)c_{M_0}c_{L_0} \\ -s_{L_0}s_{M_0} & c_{L_0} & -c_{M_0}s_{L_0} & (N+H_0)c_{M_0}s_{L_0} \\ c_{M_0} & 0 & -s_{M_0} & [N(1-e^2)+H_0]s_{M_0} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} c_\varepsilon c_\beta & -c_\gamma s_\beta + s_\gamma s_\varepsilon c_\beta & s_\gamma s_\beta + c_\gamma s_\varepsilon c_\beta & 0 \\ c_\varepsilon s_\beta & c_\gamma c_\beta + s_\gamma s_\varepsilon s_\beta & -s_\gamma c_\beta + c_\gamma s_\varepsilon s_\beta & 0 \\ -s_\varepsilon & s_\gamma c_\varepsilon & c_\gamma c_\varepsilon & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_\theta s_\psi & -s_\theta & c_\theta c_\psi & 0 \\ s_\psi s_\theta & c_\theta & s_\theta c_\psi & 0 \\ -c_\psi & 0 & s_\psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 $c_* = \cos(*)$, $s_* = \sin(*)$ 。

然后根据地心空间直角坐标系到大地坐标系的转换公式,得到主目标的大地坐标为^[12-13]

$$U = \arctan \frac{az_e}{b\sqrt{x_e^2 + y_e^2}}, \quad (2)$$

$$L = \begin{cases} \arctan(y_e/x_e), & x_e > 0 \\ \pi + \arctan(y_e/x_e), & x_e < 0 \text{ 且 } y_e > 0, \\ -\pi + \arctan(y_e/x_e), & x_e < 0 \text{ 且 } y_e < 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$M = \arctan \frac{z_e + be'^2 \sin^3 U}{\sqrt{x_e^2 + y_e^2} - ae^2 \cos^3 U}, \quad (4)$$

$$H = \frac{\sqrt{x_e^2 + y_e^2}}{\cos M} - N. \quad (5)$$

(1)~(5)式中椭球长半轴 $a=6378137.0$ m, 椭球短半轴 $b=6356752.0$ m, 椭球第一偏心率 $e = \sqrt{a^2 - b^2}/a$, 椭球第二偏心率 $e' = \sqrt{a^2 - b^2}/b$, 椭球卯西圈曲率半径 $N = a/\sqrt{1 - e^2 \sin^2 M}$ 。

次目标定位关键在于建立其几何定位模型,由次目标的像素坐标求解其在摄像机坐标系中的坐标 (x_c, y_c, z_c) , 然后根据(1)~(5)式的坐标转换方法计算其大地坐标。假设单幅图像对应的地面区域平坦,各目标与光电平台之间的相对高度相同,根据单面阵 CCD 传感器的成像原理,建立多目标定位模型如图 4 所示。

假设不存在图像畸变,主目标 P 在图像上对应的像点 F 位于图像中心,投影中心 G ,次目标 Q 及其在图像上对应的像点 T 三点在一条直线上,满足针孔成像模型,则各目标与光电平台的相对高度为

$$h = \lambda_1 \cos \alpha = \lambda_2 \cos \beta, \quad (6)$$

式中 h 为相对高度, λ_1 为光电平台到主目标的距离, λ_2 为光电平台到次目标的距离,设主目标 P , 次目标 Q ,

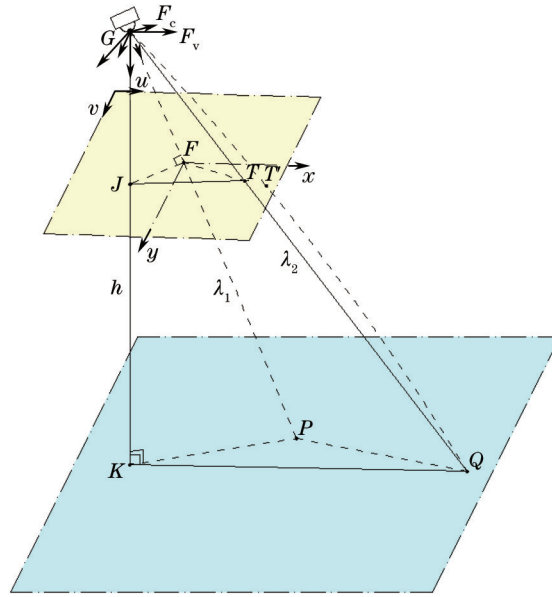


图 4 多目标定位模型

Fig.4 Model of multi-target orientation

机下点 K 的视线向量分别为 $s = GF$, $t = GT$, $j = GJ$, α 是 s 与 j 之间的像元视线角, β 是 t 与 j 之间的像元视线角, 可以得到^[14]

$$\cos \alpha = \frac{s \cdot j}{\|s\| \|j\|}, \cos \beta = \frac{t \cdot j}{\|t\| \|j\|}, \quad (7)$$

式中视线向量 s , t 在摄像机坐标系中的坐标为 $s = F_c^T [0 \ 0 \ f]^T$, $t = F_c^T [u - u_0 \ v - v_0 \ f]^T$, 其中 f 为摄像机焦距, 单位为 pixel, (u_0, v_0) 为点 F 的像素坐标, (u, v) 为点 T 的像素坐标, 视线向量 j 沿载机地理坐标系的 z 轴向下, 其在载机地理坐标系中的坐标为

$$j = F_v^T j_v = F_v^T [0 \ 0 \ j_v]^T. \quad (8)$$

求解 j 在摄像坐标系下的坐标为

$$j_c = R_{cv} j_v = R_{cb} R_{bv} j_v = \begin{bmatrix} c_\theta c_\psi & c_\psi s_\theta & -s_\psi \\ -s_\theta & c_\theta & 0 \\ c_\theta s_\psi & s_\theta s_\psi & c_\psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_\varepsilon c_\beta & c_\varepsilon s_\beta & -s_\varepsilon \\ c_\beta s_\gamma s_\varepsilon - c_\gamma s_\beta & c_\gamma c_\beta + s_\gamma s_\varepsilon s_\beta & c_\varepsilon s_\gamma \\ s_\gamma s_\beta + c_\gamma c_\beta s_\varepsilon & c_\gamma s_\varepsilon s_\beta - c_\beta s_\gamma & c_\gamma c_\varepsilon \end{bmatrix} j_v, \quad (9)$$

式中 R_{bv} 表示从载机地理坐标系到载机坐标系的旋转矩阵, R_{cb} 表示从载机坐标系到摄像机坐标系的旋转矩阵, R_{cv} 表示从载机地理坐标系到摄像机坐标系的旋转矩阵。

设 σ 为载机地理坐标系 z 轴与摄像机坐标系 z_c 轴之间的夹角, 根据图 4 中的几何关系得

$$f = j_v \cos \sigma, \quad (10)$$

$$\cos \frac{1}{2} \sigma = \pm \frac{1}{2} (1 + \text{tr } R_{cv})^{1/2}, \quad (11)$$

因此

$$j_v = \frac{f}{\cos \sigma} = \frac{f}{2 \left(\cos \frac{1}{2} \sigma \right)^2 - 1} = \frac{2f}{\text{tr } R_{cv} - 1}. \quad (12)$$

将 j_v 的值代入(8)、(9)式中, 得到 j 在摄像机坐标系中的坐标 j_c , 然后将 j_c 代入(7)中得到 $\cos \alpha$, $\cos \beta$, 最后根据已知的主目标距离值 λ_1 , 结合(6)式计算出相对高度 h 和次目标距离值 λ_2 。根据次目标距离值 λ_2 及其在摄像机坐标系中的视线向量 t , 可计算出次目标在摄像机坐标系中的坐标为

$$\begin{bmatrix} x_c & y_c & z_c \end{bmatrix}^T = \lambda_2 \frac{t}{\|t\|}. \quad (13)$$

最后,将 x_c, y_c, z_c 的值代入(1)~(5)式计算得到次目标的大地经度 L 、大地纬度 M 和大地高 H 。

3.2 提高多目标定位精度的方法

3.2.1 畸变修正

上述多目标定位模型是在假设不存在图像畸变的条件下进行的,实际上由于成像系统本身的设计、加工、装调和环控等原因会使图像产生一定畸变^[15],使像点和物点间的投影射线不能在全视场范围内严格满足直线传播的要求,发生了某种程度的弯曲,如图4所示,目标在图像平面的对应像点从理想位置 T 移动到畸变点位置 T' ,投影中心 G 、像点 T' 、物点 Q 三点不在一条直线上,不满足针孔成像模型,按上述模型计算目标的定位数据会导致较大的误差,必须对畸变进行修正。畸变修正是指根据摄像机的畸变模型由目标在畸变图像中的像点 T' 计算出其在理想图像中的位置 T ,然后用目标理想像点 T 的像素坐标计算目标的大地坐标。

这里引入畸变率的定义为^[16]

$$D = \frac{\eta - \zeta}{\zeta} \times 100\%, \quad (14)$$

式中 D 为镜头畸变率, η 为实际成像高度, ζ 为理想成像高度。

一般自行设计的光学镜头都会给出对应的畸变率,可以据此进行修正。由(14)式可推出理想成像位置 ζ 为

$$\zeta = \frac{\eta}{1 + D}. \quad (15)$$

引入图像物理坐标,如图4所示,图像物理坐标系的原点位于摄像机光轴与图像平面的交点即主点位置, x 轴、 y 轴分别与 u 轴、 v 轴平行且方向一致,该坐标以 m 或 mm 为单位。设目标在畸变图像中的像素坐标为 (u_d, v_d) ,物理坐标为 (x_d, y_d) ,在理想图像中的像素坐标为 (u_r, v_r) ,物理坐标为 (x_r, y_r) ,实际校正流程如下:

1) 根据目标在畸变图像中的像素坐标计算其物理坐标为

$$x_d = (u_d - u_1)d_x, \quad y_d = (v_d - v_1)d_y, \quad (16)$$

式中 u_1, v_1 是图像主点的像素坐标, d_x 和 d_y 是单个像素在 x 与 y 方向的物理尺寸。

2) 根据系统给出的畸变率 D , 计算理想像点的物理坐标为

$$x_r = \frac{x_d}{1 + D}, \quad y_r = \frac{y_d}{1 + D}. \quad (17)$$

3) 由理想像点的物理坐标计算其像素坐标

$$u_r = u_1 + x_r/d_x, \quad v_r = v_1 + y_r/d_y. \quad (18)$$

4) 最后将目标理想像素坐标代入3.1节的定位模型中,计算出畸变修正后目标的大地坐标。

3.2.2 RLS滤波实现多个静止目标的快速精确定位

对于地面静止目标,在理想无误差条件下不同帧图像对其定位数据是相同的,因此可采用递归最小二乘算法(RLS)对多帧图像的定位数据进行滤波处理,减小随机误差,提高目标定位精度。设 t 帧图像的原始定位数据为 $x_k(k=1, 2, \dots, t)$, RLS算法流程如图5所示。

图中 $I_{1 \times 1}$ 为 1×1 的单位矩阵,原始数据 x_k 经过 RLS 滤波后得到的数据为 $X_k(k=1, 2, \dots, t)$, 这里的 x 可以是经度 L , 纬度 M 和大地高 H 。

为提高 RLS 算法的收敛速度,设法提高单位时间中用于定位的图像帧数,取 1 s 中用于定位的图像帧数与视频图像帧频一致,当飞机的速度已知时,相应时刻的 GPS 数据可以采用航位推算来确定。在 WGS-84 地心空间直角坐标系下,飞机的推算坐标为^[9]

$$x_e = x_{e0} + \int_0^n V_x \cdot dt, \quad (19)$$

$$y_e = y_{e0} + \int_0^n V_y \cdot dt, \quad (20)$$

式中 x_{e0}, y_{e0} 为初始时刻的坐标, V_x, V_y 为飞机航速在 x, y 方向的分量。

根据航位推算公式,可以补偿 GPS 数据更新率引起的误差,使 RLS 算法快速收敛到稳定值,实现对地面

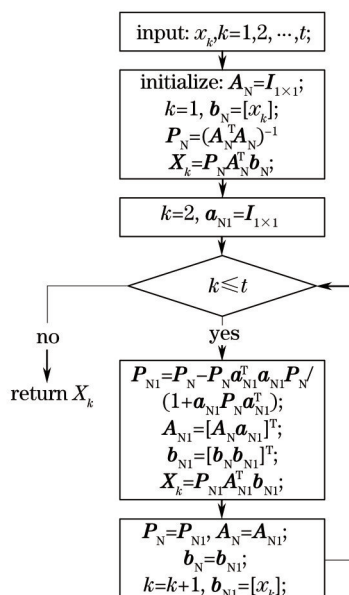


图 5 RLS 算法流程图

Fig.5 Flowchart of RLS algorithm

多个静止目标的快速精确定位。

4 实验与讨论

4.1 实验方案设计与仪器说明

实验分为以下四部分：

1) 采用蒙特卡罗法对多目标定位误差进行仿真分析,得到多目标定位的期望误差。

2) 进行单帧航拍图像定位实验。将实际航拍图像及其对应的位置姿态数据代入多目标定位程序中进行目标位置解算,同时采用高精度的 GPS 接收机在地面测量各目标的定位数据,作为目标定位的名义值,比较计算值和名义值,得到单帧图像多目标定位精度;对镜头畸变引起的定位误差进行修正,再比较目标大地坐标的计算值和名义值,得到畸变修正后的多目标定位精度。

3) 进行多帧图像定位实验。对于多个地面静止目标,采用 RLS 算法对多帧图像的定位数据进行自适应估计,比较 RLS 滤波后的结果和名义值,得到 RLS 滤波后的目标定位精度。

4) 对多个地面运动目标进行实时定位跟踪,根据每帧图像的定位数据和时间间隔,可以得到各目标的运动轨迹,计算出各目标的运动速度。

这里采用 Geo Explorer 3000 系列 GPS 接收机作为地面测量仪器,该仪器有 14 个通道,包括 12 个 L1 编码和载波,2 个星基增强系统(SBAS),集成实时双通道 SBAS 跟踪技术,支持实时差分修正,能够获得实时亚米级定位精度,采用 Trimble DeltaPhase 技术后处理可获得 50 cm 的定位精度。

4.2 实验一: 蒙特卡罗法分析多目标定位误差

误差分析是衡量定位方法优劣的重要环节。应用全微分法对机载光电平台的测量方程进行目标定位误差分析比较困难,这里采用蒙特卡罗法分析多目标定位误差。蒙特卡罗法的理论基础为大数定理和伯努利定理^[7],根据蒙特卡罗法建立多目标自主定位误差模型:

$$[\Delta L \quad \Delta M \quad \Delta H]^T = F'(X) - F'(X - \Delta X), \quad (21)$$

式中 $\Delta L, \Delta M, \Delta H$ 为各目标的定位误差, ΔX 为定位参数误差。

以某实际航拍图像数据作为实验对象,图像大小为 1024 pixel×768 pixel,像元大小为 5.5 μm×5.5 μm,应用 GPS、姿态测量和激光测距技术得到图像拍摄时刻光电平台的位置姿态数据如表 1 所示,各参数的均方根误差根据相应测量设备产品说明书提供的最大标称误差确定,图像中 7 个次目标的像素坐标通过目标检测算法得到。

表 1 光电平台的位置姿态数据

Table 1 Locations and attitudes of the photoelectric platform

Designation	Symbol	Nominal value	Error
Aircraft's longitude	$L_0 / (^\circ)$	112.680649	2×10^{-4}
Aircraft's latitude	$M_0 / (^\circ)$	35.125225	1.5×10^{-4}
Aircraft's altitude	H_0 / m	1140	15
Aircraft's pitch angle	$\varepsilon / (^\circ)$	2.1	0.4
Aircraft's roll angle	$\gamma / (^\circ)$	0.0	0.4
Aircraft's yaw angle	$\beta / (^\circ)$	290.5	1.5
Platform's azimuth angle	$\Theta / (^\circ)$	89.9	0.2
Platform's elevation angle	$\Psi / (^\circ)$	-112.9	0.2
Laser ranging value	λ_1 / m	965	5
Pixel coordinates of sub-target 1,2,3,4, 5,6,7	$(u,v) / \text{pixel}$	(386,304),(352,379),(511,277),(379,524),(854,463), (756,584), (685,706).	10
Camera's focal length	f / mm	50.0	0.2

根据上述各参数的名义值和误差,在 Matlab 软件中建立 10000 个随机变量数组的样本模型,利用 (1)~(13)式和(21)式,通过蒙特卡罗法计算出本次目标定位实验中各目标大地坐标误差的均方差值(RMSE)如表 2 所示。

表 2 多目标定位的期望误差

Table 2 Expected errors of multi-target orientation

	Longitude RMSE $/ (^\circ)$	Latitude RMSE $/ (^\circ)$	Altitude RMSE /m
Main target	0.000307	0.000166	25.33
Sub-target 1	0.000231	0.000245	25.33
Sub-target 2	0.000340	0.000199	26.12
Sub-target 3	0.000292	0.000265	25.33
Sub-target 4	0.000235	0.000338	25.33
Sub-target 5	0.000311	0.000345	24.56
Sub-target 6	0.000532	0.000166	26.13
Sub-target 7	0.000237	0.000383	25.34

4.3 实验二:单帧航拍图像的多目标定位与畸变修正

将表 1 中的数据代入(1)~(13)式计算得到单帧图像中各目标的大地坐标如表 3 所示。

表 3 各目标大地坐标的计算值

Table 3 Calculated values in the geodetic coordinates of each target

	Longitude $/ (^\circ)$	Latitude $/ (^\circ)$	Altitude /m
Main target	112.679882	35.125060	171.81
Sub-target 1	112.679058	35.124549	171.82
Sub-target 2	112.680080	35.123993	171.81
Sub-target 3	112.679133	35.125134	171.81
Sub-target 4	112.678723	35.124990	171.82
Sub-target 5	112.680868	35.123948	171.81
Sub-target 6	112.679510	35.123628	171.82
Sub-target 7	112.678275	35.124593	171.82

将表 3 中各目标大地坐标的计算值与采用 GPS 接收机在地面测量得到的各目标大地坐标名义值进行比较,得到单帧图像中各目标的定位误差如表 4 所示。

比较表 4 和表 2 的数据,各目标的定位误差均在期望误差范围内。各目标的大地高定位误差均约为 18 m,各目标的实际高度相差很小,与 3.1.2 节模型假设“单幅图像对应的地面区域平坦,各目标与光电平台之

表4 单帧图像中各目标定位误差

Table 4 Orientation errors of each target in a single image

	Longitude error /($^{\circ}$)	Latitude error /($^{\circ}$)	Altitude error /m
Main target	0.000217	0.000027	17.81
Sub-target 1	-0.000081	0.000180	17.82
Sub-target 2	-0.000261	-0.000111	18.81
Sub-target 3	0.000194	0.000207	17.81
Sub-target 4	0.000090	0.000294	17.82
Sub-target 5	-0.000221	-0.000303	16.81
Sub-target 6	-0.000485	-0.000007	18.82
Sub-target 7	-0.000095	0.000344	17.82

间的相对高度相同”基本符合。

次目标的经纬度定位误差大于主目标的经纬度定位误差,分析原因如下:1)主、次目标的斜距不同引起的误差,越靠近图像边缘的目标斜距越大,定位误差越大^[9];2)计算相对高度、次目标与光电平台距离的过程中,航姿测量误差和光电平台测角误差引起的坐标转换误差;3)目标检测过程中提取次目标像素坐标的误差;4)图像畸变引起的次目标像素坐标误差。降低飞行高度 H_0 或增大平台高低角 Ψ (水平向前为 0°)减小目标斜距,可以减小目标定位误差,这需要结合飞行情况通盘考虑;选用高精度航姿测量系统、提高光电平台测角精度,可以减小目标定位误差,这需要考虑硬件成本问题;提高目标检测位置精度或进行畸变修正也可以减小目标定位误差,因此,主要讨论畸变修正对多目标定位精度的影响。

实验采用基于畸变率的修正方法对多目标定位误差进行修正,关键是求出各成像位置处的畸变率。实验中的摄像机镜头已经采用了光学校正技术,剩余畸变率通过光学设备测量得到,如表5所示。

表5 镜头畸变率的测量值

Table 5 Measured values of the lens distortion ratio

Field of view w	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
Distortion ratio /%	0	0.003	0.057	0.160	0.309	0.500	0.731	1.000	1.303	1.637	2.000

表5中 w_0 表示1视场,图像中心为0视场, w 计算为

$$w_0 = \arctan(\eta_{\max}/f), w = \frac{\arctan(\eta/f)}{w_0} \quad (22)$$

采用多项式模型对上述数据进行分段拟合,如图6所示,其中拟合误差小于 10^{-14} 。

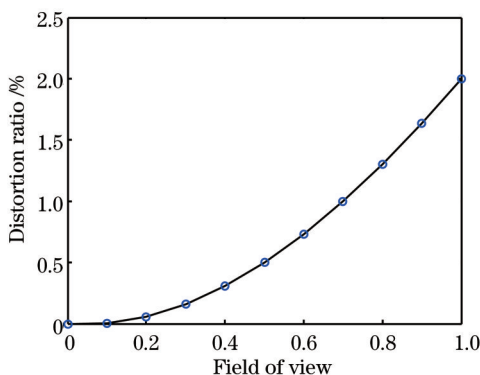


图6 镜头畸变率曲线

Fig.6 Curve of the lens distortion ratio

根据图6可确定各成像位置的畸变率,再由光学设备测得主点位置的像素坐标,代入(16)~(18)式计算出目标在理想图像中的像素坐标,将目标理想像素坐标代入(1)~(13)式中,计算出畸变修正后各目标的定位数据,与各目标大地坐标的名义值进行比较,得到畸变修正后各目标的定位误差如表6所示。

表 6 畸变修正后的各目标定位误差

Table 6 Orientation errors of each target after distortion correction

	Longitude error /($^{\circ}$)	Latitude error /($^{\circ}$)	Altitude error /m	Pixel coordinates of targets /pixel
Main target	0.000217	0.000027	17.81	(512.00, 383.99)
Sub-target 1	-0.000110	0.000163	17.82	(391.06, 306.08)
Sub-target 2	-0.000259	-0.000067	18.81	(360.11, 378.32)
Sub-target 3	0.000173	0.000207	17.81	(511.86, 280.58)
Sub-target 4	0.000016	0.000285	17.82	(386.18, 516.48)
Sub-target 5	-0.000256	-0.000243	16.81	(838.99, 458.38)
Sub-target 6	-0.000439	0.000103	18.82	(746.46, 574.63)
Sub-target 7	-0.000117	0.000306	17.82	(678.45, 691.36)

比较表 6 和表 4 的数据,可以看出畸变修正后各目标的经纬度误差普遍比修正前小,大地高定位误差基本不变。对于离图像中心越远的次目标,经纬度误差减小幅度越大,畸变修正能够进一步提高次目标的定位精度,从而提高多目标定位的整体精度。

目标定位精度和炮弹、导弹命中精度通常采用圆概率误差(CEP)进行评价^[18]。以目标点为圆心,弹着概率为 50% 的圆域半径,记为 CEP。该定义包含了弹着点或定位精度的随机误差和系统误差。以被定位目标为原点建立直角坐标系 $o-xy$,目标的横向定位误差 x 和纵向定位偏差 y 可分别由表 4、6 中目标的经度、纬度误差换算得到,假设横向定位偏差 x 和纵向定位偏差 y 均服从正态分布,则 (x,y) 的联合概率密度函数为

$$f(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-\rho^2}} \exp\left\{-\frac{1}{2(1-\rho^2)}\left[\frac{(x-\mu_x)^2}{\sigma_x^2} - \frac{2\rho(x-\mu_x)(y-\mu_y)}{\sigma_x\sigma_y} + \frac{(y-\mu_y)^2}{\sigma_y^2}\right]\right\}. \quad (23)$$

式中 σ_x, σ_y 分别为横向,纵向定位偏差的标准差, μ_x, μ_y 分别为横向,纵向定位偏差的均值, ρ 为横向,纵向定位偏差的相关系数, $0 \leq |\rho| < 1$ 。

令 $x = r \cos \theta, y = r \sin \theta, r = \sqrt{x^2 + y^2}$, 满足下式的 R 即为 CEP

$$\frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-\rho^2}} \int_0^R \int_0^{2\pi} r \exp\left\{-\frac{1}{2(1-\rho^2)}\left[\frac{(rc_\theta - \mu_x)^2}{\sigma_x^2} - \frac{2\rho(rc_\theta - \mu_x)(rs_\theta - \mu_y)}{\sigma_x\sigma_y} + \frac{(rs_\theta - \mu_y)^2}{\sigma_y^2}\right]\right\} dr d\theta = 0.5, \quad (24)$$

式中 $c_\theta = \cos \theta, s_\theta = \sin \theta$ 。

设有样本量为 n 的精度评定样本: $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$, 则样本均值、标准差、相关系数分别为

$$\begin{aligned} \hat{\mu}_x &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \hat{\mu}_y = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \hat{\mu}_r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i, \hat{\sigma}_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{\mu}_x)^2}, \hat{\sigma}_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{\mu}_y)^2}, \\ \hat{\sigma}_r &= \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (r_i - \hat{\mu}_r)^2}, \hat{\rho} = \frac{\sum_{i=1}^n [(x_i - \hat{\mu}_x)(y_i - \hat{\mu}_y)]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{\mu}_x)^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{\mu}_y)^2}}. \end{aligned} \quad (25)$$

式中 μ_x, σ_x 分别为总的均值误差和标准差,若 $\mu_x, \mu_y, \mu_r, \sigma_x, \sigma_y, \sigma_r, \rho$ 未知,则将 $\mu_x, \mu_y, \mu_r, \sigma_x, \sigma_y, \sigma_r, \rho$ 用 $\hat{\mu}_x, \hat{\mu}_y, \hat{\mu}_r, \hat{\sigma}_x, \hat{\sigma}_y, \hat{\sigma}_r, \hat{\rho}$ 代替。

通过查阅资料和计算,在样本量不小于 30 个时,圆概率误差的统计结果置信度可以达到 90%^[18]。因此,对 5 幅航拍图像进行多目标定位及畸变修正实验,分别得到畸变修正前后 32 个目标定位数据样本,其中第 1 幅图像 8 个,第 2 幅图像 6 个,第 3 幅图像 5 个,第 4 幅图像 5 个,第 5 幅图像 8 个。对样本数据进行正态性检验和独立性检验,发现样本符合正态分布但不独立(畸变修正前样本相关系数 $\hat{\rho}_1 = 0.6618$,畸变修正后的样本相关系数 $\hat{\rho}_2 = 0.5607$)。

采用(24)、(25)式对畸变修正前的多目标定位数据进行处理计算圆概率误差,其中 x,y 方向的系统误差分别为17.41 m,20.34 m, x,y 方向的随机误差分别为7.77 m,10.05 m,总的均值误差和标准差分别为28.98 m和6.08 m;按(24)式采用数值积分的方法计算得到32个样本中有16个位于半径为28.74m的圆内,概率为50%,如图7中实线圆内外的数据样本量所示,畸变修正前多目标定位的圆概率误差 CEP1 为28.74 m;采用(24)、(25)式对畸变修正后的多目标定位数据进行处理计算圆概率误差,其中 x,y 方向的系统误差分别为17.04 m,18.63 m; x,y 方向的随机误差分别为6.86 m,8.25 m,总的均值误差和标准差分别为26.91m和5.31 m;按(24)式采用数值积分的方法计算得到32个样本中有16个位于半径为26.80 m的圆内,概率为50%,如图7中虚线圆内外的数据样本量所示,畸变修正后多目标定位的圆概率误差 CEP2 为26.80 m,比畸变修正前减少了7%。

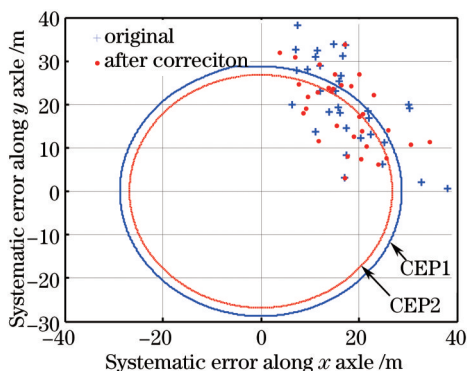


图7 畸变校正后的目标定位数据样本分布和 CEP 示意图

Fig.7 Sample distribution of target location data after distortion correction and sketch map of CEP

为了对比多目标定位算法的性能,将测量结果与文献[1-2]中方法的定位精度进行比较如表7所示。从表7中可以看出,文中目标定位精度远高于文献[1]的定位精度,接近于文献[2]的定位精度,但是文献[2]定位精度与相邻两幅图像投影中心之间的距离(即基线长度)有关,为取得较高的定位精度,基线长度应取较大值,则用于定位的相邻两幅图像之间的时间相隔较大,同时由于需要采用SIFT算法提取多帧图像中的特征点进行三维重建,算法计算量大,不利于实时实现。本文定位算法在 Matlab 平台上编程实现,CPU 主频为3.3 GHz,内存容量为4 G,计算单个目标的定位数据平均耗时0.2 ms,计算单个目标的定位数据并对其进行畸变修正平均耗时0.4 ms,视频图像大约40 ms/frame,根据采样定理需要在20 ms左右完成解算,该定位算法至少可满足同时对50个目标进行实时定位的要求。因此,该定位算法在定位精度和实时性方面具有很大优势。

表7 本文算法与文献[1-2]算法的定位精度对比

Table 7 Orientation accuracy comparison between the proposed algorithm and the algorithms from Reference[1-2]

Algorithm	Error mean /m	Error standard /m	Flight altitude /m	Notes
Reference [1]	282.21	280.53	452.8	
Reference [2]	68.00	35.00	Over 1000	Baseline: 900 m
	26.00	8.00	Over 1000	Baseline: 1410 m
Proposed	28.98	6.08	1140	
Proposed (after correction)	26.91	5.31	1140	

4.4 实验三:多个地面静止目标定位的 RLS 滤波

上述实验中各目标均为地面静止目标,采用 RLS 算法对第1幅图像为起始时刻的150帧图像的定位数据进行自适应估计,得到的 RLS 滤波前后第1幅图像中8个目标的定位结果如图8所示(图中不同颜色的●分别表示8个目标的原始定位数据,□,◁,▷,☆,▽,○,◇,△分别表示 RLS 滤波后主目标和次目标1,2,...,7的定位数据)。从图8中可以看出 RLS 滤波后,各目标定位数据的离散度明显减小,迅速收敛到目标真实位置附近的一个小区域内。图9显示了 RLS 滤波过程中次目标2的平面定位误差随图像帧数(对应时间)的变化过程,从图9中可以看出在对100~150帧图像(对应时间为3~5 s)的定位数据进行滤波处理后,目标定位误

差快速收敛到稳定值。

比较 RLS 滤波达到稳定状态后的结果和各目标大地坐标名义值,得到 RLS 滤波后的目标大地坐标定位误差如表 8 所示。

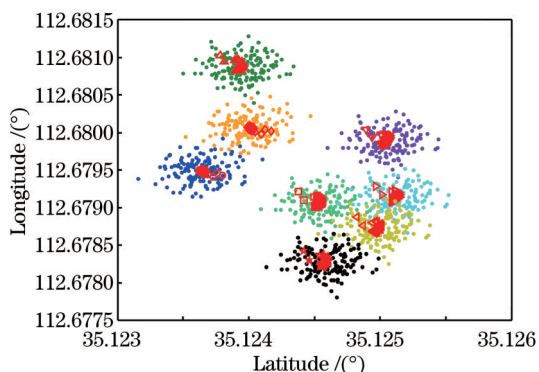


图 8 RLS 滤波后的定位结果

Fig.8 Localization results after RLS filtering

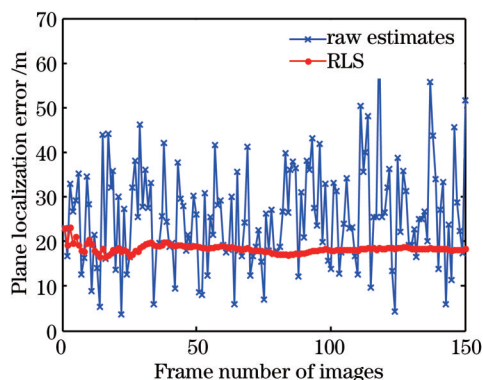


图 9 RLS 滤波后的平面定位误差

Fig.9 Plane localization errors after RLS

表 8 RLS 滤波后的各目标定位误差

Table 8 Orientation errors of each target after RLS filtering

	Longitude error/(°)	Latitude error/(°)	Altitude error/m
Main target	0.000167	0.000016	15.33
Sub-target 1	-0.000005	0.000131	15.33
Sub-target 2	-0.000193	-0.000086	16.08
Sub-target 3	0.000150	0.000151	15.33
Sub-target 4	0.000073	0.000217	15.33
Sub-target 5	-0.000164	-0.000230	14.58
Sub-target 6	-0.000361	-0.000007	16.08
Sub-target 7	-0.000065	0.000255	15.33

比较表 8 和表 4 的数据,可以看出 RLS 滤波后各目标的经纬度误差明显比单帧图像多目标定位误差小,大地高定位误差也略有减小。

为计算 RLS 滤波后的圆概率误差,对 4.3 节中其余 4 幅航拍图像进行多目标定位的 RLS 滤波实验,得到 RLS 滤波后 32 个目标的定位数据样本。采用(24)、(25)式对 RLS 滤波后的多目标定位数据进行处理计算圆概率误差,其中 x, y 方向的系统误差分别为 13.78 m, 14.53 m; x, y 方向的随机误差分别为 5.79 m, 7.34 m,按(24)式采用数值积分的方法计算得到 32 个样本中有 17 个位于半径为 21.52 m 的圆内,概率为 53%,如图 10 中虚线圆内外的数据样本量所示,RLS 滤波后多目标定位的圆概率误差 CEP3 为 21.52 m,与单帧图像多目

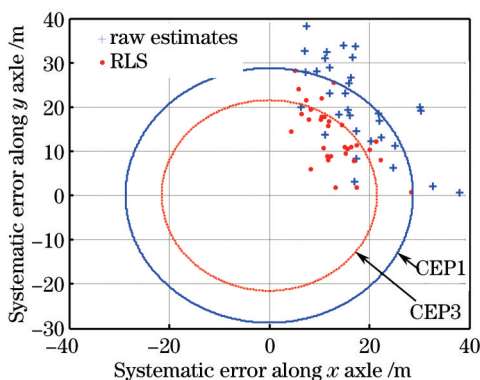


图 10 RLS 滤波后的目标定位数据样本分布和 CEP 示意图

Fig.10 Sample distribution of target location data after RLS filtering and sketch map of CEP

标定定位的圆概率误差 CEP1 相比减小了 25%。

4.5 实验四: 多个地面运动目标的实时定位跟踪

实验对某高速公路航拍视频图像中的 4 个运动目标进行实时定位跟踪, 如图 11 所示(图像部分区域)。每帧图像大小为 1024 pixel×768 pixel, 像元大小为 5.5 μm×5.5 μm, 焦距 $f=73.6$ mm, 选取位于图像中心的主目标和 3 个位于图像其它位置的次目标, 第 1 帧图像中各目标的像素坐标和对应时刻光电平台的位姿数据如表 9 所示。

表 9 光电平台的位置姿态数据

Table 9 Locations and attitudes datas of the photoelectric platform

Aircraft's position	Longitude $L_0 / (^\circ)$	Latitude $M_0 / (^\circ)$	Altitude H_0 / m
	120.906624	42.608521	2505
Aircraft's attitude	Pitch angle $\varepsilon / (^\circ)$	Roll angle $\gamma / (^\circ)$	Yaw angle $\beta / (^\circ)$
	2.0	-1.8	350.2
Platform's attitude and position	Azimuth $\Theta / (^\circ)$	Elevation $\Psi / (^\circ)$	Range λ_1 / m
	-117.8	-46.7	3240
Pixel coordinates of sub-targets	Sub-target 1 /pixel	Sub-target 2 /pixel	Sub-target 3 /pixel
	(453, 342)	(476, 251)	(504, 213)

从视频图像中按时间顺序抽取 9 帧图像, 计算每帧图像中各目标的定位数据, 得到各目标的空间位置分布如图 11 所示, 同时以第 1 帧图像中主目标位置为坐标原点, 将各目标的空间位置向地面投影, 得到各目标的平面运动轨迹如图 12 所示。

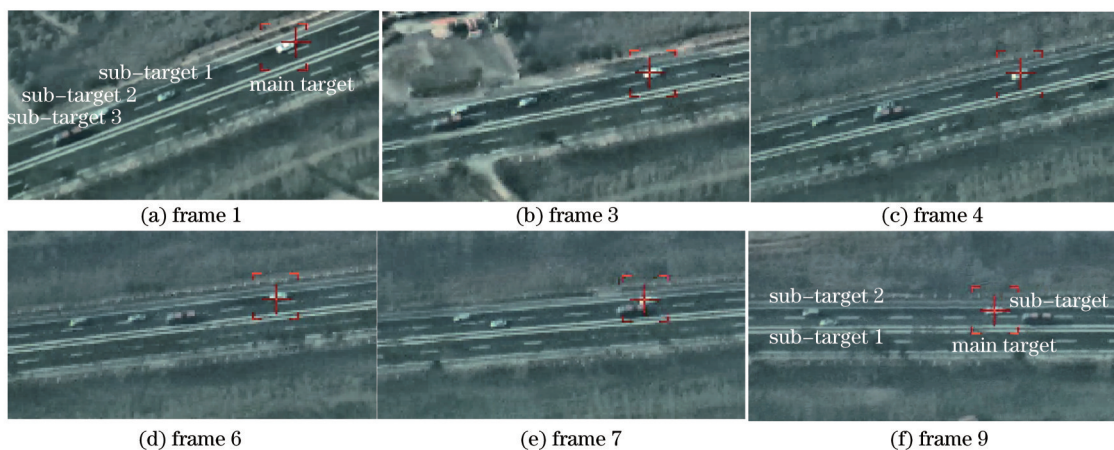


图 11 多运动目标的航拍视频图像

Fig. 11 Multiple moving targets in aerial video imagery

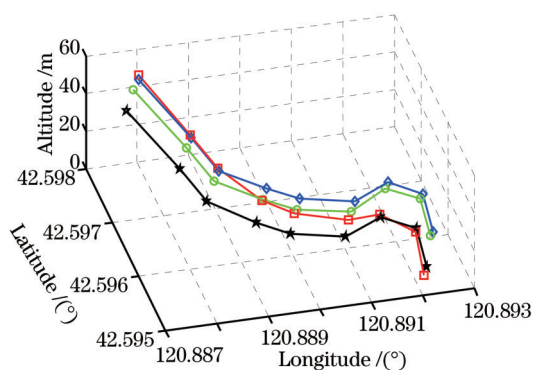


图 12 多运动目标的空间位置分布

Fig.12 Spatial position distribution of multiple moving targets

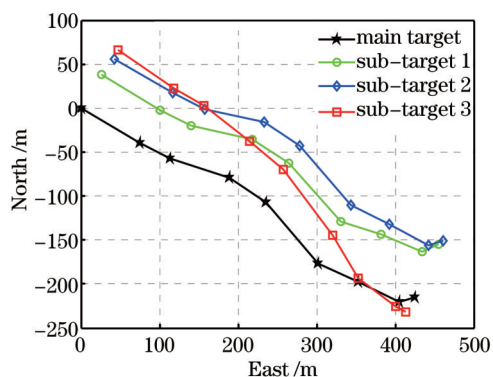


图 13 多运动目标的平面运动轨迹

Fig.13 Plane motion trail of multiple moving targets

由于航拍视频图像拍摄时刻的载机航向角和光电平台方位角一般不为0,因此航拍图像存在一定的旋转变形,由谷歌地图获得该高速公路段航拍图像的正射投影图像如图14所示,由图14可知,公路的实际方向为西北-东南方向。根据针孔成像模型可得,物点和像点关于摄像机投影中心成对称关系,像点的运动方向与物点相反。由图11和14可以看出,各目标像点由东南向西北方向运动,所以实际目标由西北向东南运动,这与图12和13的定位结果符合。

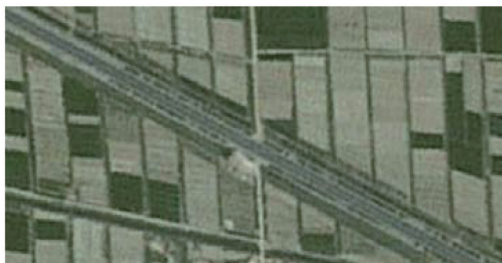


图14 高速公路段航拍图像的正射影像

Fig.14 Ortho image of expressway in aerial imagery

根据图12和13分析各目标的运动过程如下:第1帧图像中各目标按从前到后的位置顺序排列依次为次目标3、次目标2、次目标1、主目标;在第3~4帧图像中,次目标2开始赶上并超过次目标3;在第4~6帧图像中,次目标1开始赶上并超过次目标3;在第7~9帧图像中,主目标开始赶上并超过次目标3;最后各目标按前后顺序排列依次为次目标2,次目标1,主目标,次目标3。这与图11视频图像中各目标的运动情况完全符合,说明该目标定位算法能够对多个运动目标进行实时准确定位跟踪。如果已知相邻两帧图像的时间间隔,还可以计算出各个目标的运动速度。该实验进一步验证了多目标定位模型的正确性。

5 结 论

为提高机载光电成像平台的侦察效率,建立了机载光电平台多目标自主定位系统,对系统所采用的多目标定位模型和进一步提高多目标定位精度的方法进行了研究。建立了多个坐标系模型,根据图像中心主目标与光电平台的距离、角度关系,结合次目标与主目标的像素偏差量,采用视线向量法计算出各目标在摄像机坐标系中的坐标,通过齐次坐标变换计算出单帧图像中多个目标的大地坐标。在此基础上提出两种提高多目标定位精度的方法:1)提出基于畸变率的方法修正镜头畸变引起的定位误差;2)采用RLS滤波与航位推算结合的方法处理多帧图像的定位数据,对地面多个静止目标进行快速精确定位。利用蒙特卡罗思想建立了定位误差模型,对多目标定位算法进行误差仿真分析,得到给定参数条件下的定位误差范围,其中GPS和航姿系统的测量精度如表1所示。对飞行实测数据的实验结果表明,多目标自主定位方法的定位结果在期望误差范围内,在1100m高空对地面目标定位时,多目标定位的CEP约为28.74m,大地高定位误差约为18m,镜头畸变率为2%时,畸变修正后多目标定位的CEP减小了7%,能够同时对50个目标进行实时定位与畸变修正。对于多个地面静止目标,采用RLS算法对多帧图像的定位数据进行自适应估计,得到的CEP与单帧图像多目标定位相比减小了25%。多目标定位方法与目标检测技术相结合能够对多个运动目标进行动态定位跟踪,得到多个运动目标的运动轨迹和运动速度等参数,对实现多目标的侦察与打击一体化具有重要意义。多目标定位模型的前提是假设单幅图像对应的地面区域平坦,各目标与飞机之间的相对高度相同,主要适用于中低空飞行的中小型无人机搭载的光电平台,下一步将继续研究不受限于单幅图像对应的地面区域平坦假设的机载光电平台多目标定位算法。

参 考 文 献

- 1 Yan Ming, Du Pei, Wang Huilin, *et al.*. Ground multi-target positioning algorithm for airborne optoelectronic system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, 33(4): 717-720.
闫 明, 杜 佩, 王惠林, 等. 机载光电系统的地面多目标定位算法[J]. *应用光学*, 2012, 33(4): 717-720.
- 2 K Han, G N DeSouza. Multiple targets geolocation using SIFT and stereo vision on airborne video sequences [C]. *The 2009 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2009: 5327-5332.

- 3 Song Yueming, Sun Jinghui, Wang Shuai. Air pod target location method research using GPS datum mark in vertical down of view [J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2012, 27(5): 714-717.
宋悦铭, 孙敬辉, 王 帅. 基于 GPS 基准点的航空吊舱垂直下视目标定位方法研究[J]. 液晶与显示, 2012, 27(5): 714-717.
- 4 F Morbidi, G L Mariottini. Active target tracking and cooperative localization for teams of aerial vehicles [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 21(5): 1694-1707.
- 5 Y Qu, J Wu, Y Zhang. Cooperative localization based on the azimuth angles among multiple UAVs [C]. 2013 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2013: 818-823.
- 6 P W Sarunic, R J. Evans. Trajectory control of autonomous fixed-wing aircraft performing multiple target passive detection and tracking[C]. Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP), 2010 Sixth International Conference on. IEEE, 2010: 169-174.
- 7 Chai Min, Yu Hui, Song Weihong, *et al.*. Joint positioning method for data fusion of photo-electric theodolite and radar [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(12): 1212002.
柴 敏, 余 慧, 宋卫红, 等. 光学无线电测量信息融合定位方法[J]. 光学学报, 2012, 32(12): 1212002.
- 8 N Farmani, L Sun, D Pack. An optimal sensor management technique for unmanned aerial vehicles tracking multiple mobile ground targets [C]. 2014 International Conference on. IEEE, 2014: 570-576.
- 9 Liu Jinghong, Sun Hui, Zhang Bao, *et al.*. Target self-determination orientation based on aerial photoelectric imaging platform [J]. Optical Precision Engineering, 2007, 15(8): 1305-1309.
刘晶红, 孙 辉, 张 葆, 等. 航空光电成像平台的目标自主定位[J]. 光学精密工程, 2007, 15(8): 1305-1309.
- 10 Zhao Rujin, Liu Enhai, Zhang Qiheng, *et al.*. A method of extended target tracking based on inertia ellipse and pose compensation [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(3):0315001.
赵汝进, 刘恩海, 张启衡, 等. 一种基于惯量椭圆姿态补偿的扩展目标精确定位方法[J]. 光学学报, 2014, 34(3): 0315001.
- 11 Chen Haixin, Gu Guohua, Qian Weixian, *et al.*. A method for moving target detection on a moving camera in the presence of a strong parallax [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 0509002.
陈海欣, 顾国华, 钱惟贤, 等. 一种运动相机强视差下运动目标检测方法[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0509002.
- 12 Zhang Huahai, Zheng Nanshan. The simple formula to compute geodetic coordinate from rectangular space coordinate [J]. Gns World of China, 2002, 27(4): 9-12.
张华海, 郑南山. 由空间直角坐标计算大地坐标的简便公式[J]. 全球定位系统, 2002, 27(4): 9-12.
- 13 B R Bowring. Transformation from spatial to geographical coordinates [J]. Survey Review, 1976, 23(18): 323-327.
- 14 Yan Li, Jiang Yun, Wang Jun. Building of rigorous geometric processing model based on line-of-sight vector of ZY-3 imagery [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2013, 38(12): 1451-1455.
闫 利, 姜 芸, 王 军. 利用视线向量的资源三号卫星影像严格几何处理模型[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2013, 38(12): 1451-1455.
- 15 Huang Junhui, Wang Zhao, Xue Qi, *et al.*. Calibration of camera with rational function lens distortion model [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(5): 0508001.
黄军辉, 王 昭, 薛 琦, 等. 基于有理函数式镜头畸变模型的摄像机标定[J]. 中国激光, 2011, 41(5): 0508001.
- 16 Cui Hongzhou, Kong Yuan, Zhou Qibo, *et al.*. Image geometric correction based on distortion ratio [J]. Journal of Applied Optics, 2006, 27(3): 183-185 .
崔洪州, 孔 渊, 周起勃, 等. 基于畸变率的图像几何校正[J]. 应用光学, 2006, 27(3): 183-185.
- 17 Sheng Weidong, Long Yunli, Zhou Yiyu. Analysis of target location accuracy in space-based optical-sensor network [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(2): 0228001.
盛卫东, 龙云利, 周一宇. 天基光学传感器网络目标定位精度分析[J]. 光学学报, 2011, 31(2): 0228001.
- 18 Zhang Le, Li Wuzhou, Ju Yangfeng, *et al.*. Positioning accuracy evaluation method based on CEP [J]. Command Control & Simulation, 2013, 35(1): 111-114.
张 乐, 李武周, 巨养锋, 等. 基于圆概率误差的定位精度评定办法[J]. 指挥控制与仿真, 2013, 35(1): 111-114.

栏目编辑: 苏 岑