

基于地理位置信息的图像配准方法及精度分析

乔 川^{1,2}, 丁亚林¹, 许永森¹, 姚 园¹, 王 浩¹

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

摘要 针对传统图像配准技术难以对海洋、沙漠、草原等特征不明显区域航空遥感图像进行配准的问题,提出了一种基于地理位置信息的航空遥感图像配准算法。依据载机定位定向系统测量的载机位置、姿态信息以及航空相机中位置编码器测量的框架角位置信息,利用齐次坐标变换的方法求解配准点在大地坐标系下的投影。利用世界大地坐标系-84 坐标系定义的地球椭球模型确定匹配点的经纬度信息,将相同地理位置信息的配准点进行配准。采用蒙特卡罗法仿真分析了载机姿态位置信息及框架角位置信息对配准精度及定位精度的影响。采用实际的航空遥感图像进行实验,结果表明,在载机飞行高度低于 2000 m,拍摄倾斜角小于 18° 时,配准精度可优于 3 m,遥感图像中的海上控制点的定位精度优于 35 m。

关键词 遥感; 图像配准; 地理位置信息; 误差分析; 目标地理定位

中图分类号 V248.1; V249 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0828001

Image Registration Method Based on Geo-Location Information and Precision Analysis

Qiao Chuan^{1,2}, Ding Yalin¹, Xu Yongsan¹, Yao Yuan¹, Wang Hao¹

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

Abstract Traditional image registration techniques are inadaptable to aerial remote sensing image which does not have obvious feature points, such as ocean, desert, and grassland. A registration algorithm is proposed for aerial remote sensing image based on geo-location information. Using aircraft position and attitude information measured by airborne position and orientation system and the gimbal angle from the encoder in an aerial camera, the projection of registration point in geodetic coordinate system is solved by homogeneous coordinate transformation. Using the earth ellipsoidal model which is defined by the world geodetic system-84, the longitude and latitude information for matching points are solved, and the matching points with the same geo-location information are registered. The influence of the aircraft position and attitude and the gimbal angle on geo-location accuracy and registration accuracy is analyzed with Monte Carlo method. Experiments were carried out using actual aerial remote sensing images. Experimental results show that the registration accuracy is less than 3 m, and the positioning accuracy of sea control point in remote sensing image is less than 35 m, when the flight height of plane is below 2000 m and the photography inclination angle is less than 18°.

Key words remote sensing; image registration; geo-location information; error analysis; target geo-location

OCIS codes 280.4788; 280.4991; 120.0280

1 引 言

航空遥感平台获取图像时,受载机飞行高度和相机焦距的限制,单张图像很难完全包含感兴趣的区域。

收稿日期: 2017-01-18; 收到修改稿日期: 2017-03-16

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(61405192)、吉林省科技发展计划(20140520114JH)

作者简介: 乔 川(1991—),男,博士研究生,主要从事航空遥感成像定位及扫描方面的研究。E-mail: qc_chuan@163.com

导师简介: 丁亚林(1964—),男,研究员,博士生导师,主要从事航空遥感成像与航空相机总体技术方面的研究。

E-mail: dingyl_1964@126.com(通信联系人)

为了得到更多目标区域的信息,可以通过将不同角度的图像拼接融合,构造一幅全景图达到扩展视场范围的目的。传统的航空遥感图像拼接主要包括图像的几何校正、图像预处理、图像配准和图像融合等 4 个步骤。图像配准是航空遥感图像拼接的关键步骤,是指对图像间的匹配信息进行提取,再在提取出的信息中寻找最佳的匹配,完成图像间的对齐^[1-3]。

为了提高航空遥感图像的配准精度,国内外学者已经对图像配准算法进行了大量研究。航空遥感图像的配准可分为基于特征的配准和基于区域的配准。基于特征的配准主要包括基于边缘强度特征图像配准算法^[4-7]、基于几何特征和形态学图像配准算法^[8-9]、基于二值稳健尺度不变关键点(BRISK)^[10]和快速稳健性特征(SURF)^[11-13]图像配准算法。基于区域的配准主要包括互相关法^[14]、最大互信息法^[15]、基于快速傅里叶变换的相位相关法^[16]和小波变换法^[17]。但对于海洋、沙漠、草原等场景的航空遥感图像,场景实时变化且无明显特征点,以上提到的配准方法都难以对其进行配准。

为此,提出了基于地理位置信息的图像拼接技术,即依据载机定位定向系统(POS)测量的载机位置、姿态信息以及航空相机中位置编码器测量的框架角位置信息,利用齐次坐标变换方法求解匹配点在大地坐标系下的投影,利用世界大地坐标系-84(WGS-84)定义的地球椭球模型确定匹配点的经纬度信息,将相同地理位置信息的配准点进行配准。该方法不会受到航空遥感图像特征及纹理的影响,对海洋、沙漠、草原等特征不明显的场景可进行配准,提高航空遥感图像配准精度。

2 基于地理信息航空遥感图像配准

2.1 基本坐标变换

在目标定位和图像配准过程中需要用到 4 个基本的坐标系:地球坐标系(ECEF)、地理坐标系(NED)、载机坐标系(AC)和相机坐标系(S)。用 C_A^B 表示从 A 坐标系到 B 坐标系的变换矩阵,表示如下

$$\begin{bmatrix} x_B \\ y_B \\ z_B \\ 1 \end{bmatrix} = C_A^B \times \begin{bmatrix} x_A \\ y_A \\ z_A \\ 1 \end{bmatrix}, C_B^A = (C_A^B)^{-1}, \quad (1)$$

式中 $[x_A \ y_A \ z_A]^T$ 和 $[x_B \ y_B \ z_B]^T$ 为同一点分别在 A 坐标系和 B 坐标系下的坐标。

根据 WGS-84 坐标系定义的地球椭球模型,建立地球坐标系 $E-X_E Y_E Z_E$,如图 1 所示。原点处于地球质心, EX_E 轴指向本初子午线与赤道的交点, EZ_E 轴指向地理北极, EY_E 轴与其他两轴组成右手坐标系。WGS-84 定义的地球椭球模型^[18-19]可表述为

$$\frac{x_E^2}{R_E^2} + \frac{y_E^2}{R_E^2} + \frac{z_E^2}{R_P^2} = 1, \quad (2)$$

地球椭球第一偏心率

$$e = \frac{\sqrt{R_E^2 - R_P^2}}{R_E}, \quad (3)$$

式中半长轴 $R_E = 6378137$ m,半短轴 $R_P = 6356752$ m。

POS 给出载机的位置信息包括经度信息 λ_A 、纬度信息 φ_A 和大地高信息 h_A 。根据几何关系不难算出载机在地球坐标系下的坐标为

$$\begin{bmatrix} x_A^E \\ y_A^E \\ z_A^E \end{bmatrix} = \begin{cases} (R_{NA} + h_A) \cos \varphi_A \cos \lambda_A \\ (R_{NA} + h_A) \cos \varphi_A \sin \lambda_A \\ [R_{NA}(1 - e^2) + h_A] \sin \varphi_A \end{cases}, \quad (4)$$

式中 R_{NA} 为载机对应卯酉圈的曲率半径, $R_{NA} = \frac{R_E}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi_A}}$ 。

建立图 2 所示地理坐标系 $A-NED$ 和载机坐标系 $A-X_A Y_A Z_A$ 。

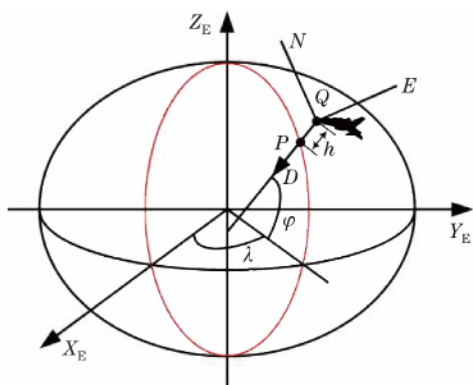


图 1 地球坐标系与地理坐标系

Fig. 1 Schematic of ECEF coordinate and NED coordinate

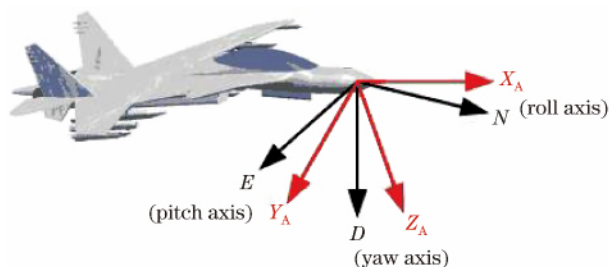


图 2 地理坐标系和载机坐标系示意图

Fig. 2 Schematic of NED coordinate and AC coordinate

地理坐标系中 AN 和 AE 坐标轴分别指向正北和正东, AD 轴 WGS-84 定义的椭球切面向下, 则

$$\mathbf{C}_{\text{ECEF}}^{\text{NED}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & R_{NA} + h_A \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} -\sin \varphi_A & 0 & \cos \varphi_A & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\cos \varphi_A & 0 & -\sin \varphi_A & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \lambda_A & \sin \lambda_A & 0 & 0 \\ -\sin \lambda_A & \cos \lambda_A & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & R_{NA} e^2 \sin \varphi_A \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{\circ} \quad (5)$$

载机坐标系^[20]的 AX_A 和 AY_A 坐标轴分别指向载机机头和右翼方向, AZ_A 轴在载机纵向对称面内垂直载机向下。在航空相机拍摄过程中, 载机姿态分别为航向角 ψ 、俯仰角 θ 、横滚角 φ , 则

$$\mathbf{C}_{\text{NED}}^{\text{AC}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ 0 & -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{\circ} \quad (6)$$

航空相机基本结构如图 3 所示。建立图 4 所示航空相机坐标系 $S-X_s Y_s Z_s$, 原点处于航空相机光学系统中心, SZ_s 轴为视轴方向。当相机内外框架角均为 0 时, 相机坐标系与载机坐标系完全重合。拍摄时相机

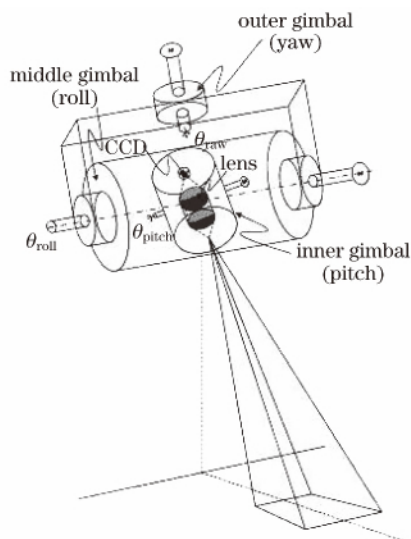


图 3 航空相机结构示意图

Fig. 3 Diagram of aerial camera

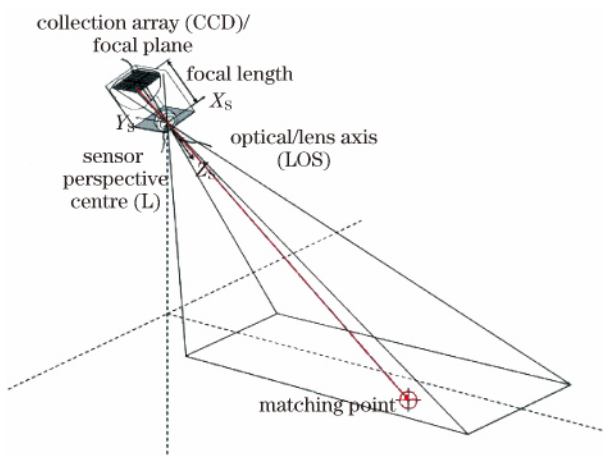


图 4 航空相机坐标系

Fig. 4 Schematic of aerial camera coordinate

的框架角分别为 θ_{yaw} 、 θ_{roll} 、 θ_{pitch} , 则

$$\mathbf{C}_{\text{AC}}^{\text{S}} = \begin{bmatrix} \cos\theta_{\text{pitch}} & 0 & -\sin\theta_{\text{pitch}} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin\theta_{\text{pitch}} & 0 & \cos\theta_{\text{pitch}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_{\text{roll}} & \sin\theta_{\text{roll}} & 0 \\ 0 & -\sin\theta_{\text{roll}} & \cos\theta_{\text{roll}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos\theta_{\text{yaw}} & \sin\theta_{\text{yaw}} & 0 & 0 \\ -\sin\theta_{\text{yaw}} & \cos\theta_{\text{yaw}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

2.2 基于地球椭球模型的配准点定位

拍摄时图像中配准点在 CCD 上的投影如图 5 所示。若 CCD 像元尺寸为 a , 航空相机焦距为 f , 像元个数为 $M \times N$, 配准点在 CCD 上的投影点在 (i, j) 像元内, 则配准点的投影位置在相机坐标系下的坐标 T_s' 为

$$T_s' = \left[a \times \left(\frac{M+1}{2} - i \right) \quad a \times \left(j - \frac{N+1}{2} \right) \quad -f \right]^T. \quad (8)$$

对于理想光学系统成像, 目标处于 T_s 与相机坐标系原点连线的延长线上。

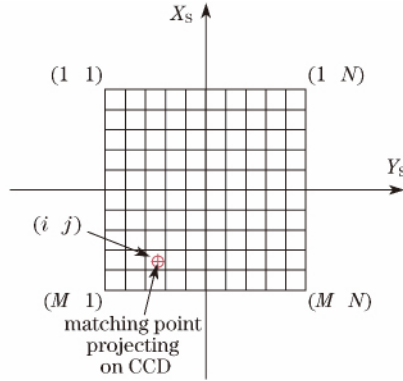


图 5 配准点在 CCD 上的投影示意图

Fig. 5 Schematic of matching point projecting on CCD

则 CCD 上的目标投影在地球坐标系下的坐标为

$$T_E' = \begin{bmatrix} x_{T'}^E \\ y_{T'}^E \\ z_{T'}^E \end{bmatrix} = \mathbf{C}_{\text{NED}}^{\text{ECEF}} \times \mathbf{C}_{\text{AC}}^{\text{NED}} \times \mathbf{C}_{\text{S}}^{\text{AC}} \times T_s'. \quad (9)$$

相机坐标系原点与载机坐标系原点重合, 因此其原点坐标为 $O_E = [x_S^E \quad y_S^E \quad z_S^E]^T$ 。则目标在地球坐标系下的坐标 $[x_T^E \quad y_T^E \quad z_T^E]^T$ 满足

$$\frac{x_T^E - x_S^E}{x_{T'}^E - x_S^E} = \frac{y_T^E - y_S^E}{y_{T'}^E - y_S^E} = \frac{z_T^E - z_S^E}{z_{T'}^E - z_S^E}. \quad (10)$$

拍摄目标区域的大地高为 h , 则

$$\frac{(x_T^E)^2}{(R_E + h)^2} + \frac{(y_T^E)^2}{(R_E + h)^2} + \frac{(z_T^E)^2}{(R_P + h)^2} = 1. \quad (11)$$

联立(10)式和(11)式即可解得目标在地球坐标系下的坐标 $[x_T^E \quad y_T^E \quad z_T^E]^T$ 。

目标的经纬度信息通过其在大地坐标系下的坐标得到。由于采用 WGS-84 给出的地球椭球模型, 因此无法准确得到其纬度及大地高。为此, 采用迭代法进行求解, 规定北半球纬度为正, 南半球纬度为负; 东半球经度为正, 西半球经度为负。迭代公式为

$$\begin{cases} R_{N0} = R_E \\ h_0 = \sqrt{(x_T^E)^2 + (y_T^E)^2 + (z_T^E)^2} - \sqrt{R_E R_P} \\ \varphi_0 = \arctan \left\{ \frac{z_T^E}{\sqrt{(x_T^E)^2 + (y_T^E)^2}} \left[1 - \frac{e^2 N_0}{(N_0 + h_0)} \right]^{-1} \right\} \end{cases}, \quad (12)$$

$$\begin{cases} R_{Ni} = R_E \sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi_{i-1}} \\ h_i = \frac{\sqrt{(x_T^E)^2 + (y_T^E)^2}}{\cos \varphi_{i-1}} - R_{Ni} \\ \varphi_i = \arctan \left\{ \frac{z_T^E}{\sqrt{(x_T^E)^2 + (y_T^E)^2}} \left[1 - \frac{e^2 R_{Ni}}{(R_{Ni} + h_i)} \right]^{-1} \right\} \end{cases}, \quad (13)$$

初值由(12)式给出,通过(13)式进行迭代。一般迭代4次,即可保证目标海拔 h_T 的计算精度为0.001 m,目标纬度 φ_T 的计算精度为0.00001"。目标经度信息为

$$\lambda = \arctan\left(\frac{y_T^E}{x_T^E}\right), \quad (14)$$

式中

$$\lambda_T = \begin{cases} \lambda, & x_T^E > 0 \\ \lambda + \pi, & x_T^E < 0, \lambda < 0. \\ \lambda - \pi, & x_T^E < 0, \lambda > 0 \end{cases} \quad (15)$$

2.3 基于地理信息的图像配准

航空遥感图像的拍摄区域如图6所示。载机分别在位置1和位置2拍摄两张遥感图像,通过定位算法确定两张遥感图像的拍摄区域,得到重叠区域为图中四边形ABCD。要实现两幅航空图像间的配准,至少要在重叠区域内选取3个不共线的配准点进行配准。配准点选取越多,配准精度越高,但受限于载机位置姿态及航空相机位置编码器的测量精度,同时选取过多的配准点会影响配准的速度。此配准方法不会受到图像特征及纹理的影响,因此无需考虑配准点处的图像特征信息,即可在重叠区域均匀地选取配准点。

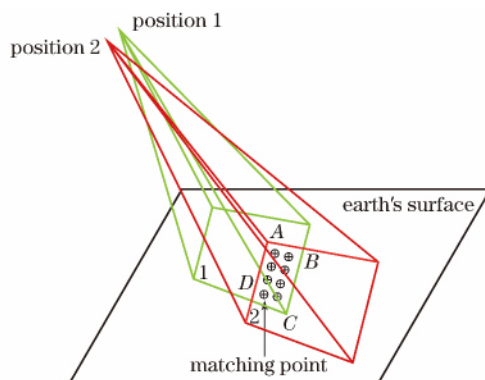


图6 航空遥感图像的拍摄区域

Fig. 6 Shooting area of aerial remote sensing image

拍摄第一幅航空遥感图像的地面分辨率(GSD)为 G_{SD} ,两幅航空遥感图像重叠区域的大地高为 h_M ,则对应的经纬度分辨率为

$$\varphi_{GSD} = \frac{G_{SD}}{R_{MN} + h_M}, \quad \lambda_{GSD} = \frac{G_{SD}}{(R_{NN} + h_M) \cos \varphi_M}, \quad (16)$$

式中 $R_{MM} = \frac{R_E(1-e^2)}{(1-e^2 \sin^2 \varphi)^{3/2}}$, $R_{NM} = \frac{R_E}{\sqrt{1-e^2 \sin^2 \varphi}}$ 分别为重叠区域对应的子午圈和卯酉圈的曲率半径。

若两相邻配准点在第一幅航空遥感图像上相差 n pixel,取第(1,1)个配准点 M_{11} 在重叠区域的西南角,其经度为 λ_{M11} ,纬度为 φ_{M11} ,第 (i,j) 个配准点的经纬度坐标可表示为

$$[\varphi_{Mij}, \lambda_{Mij}]^T = [\varphi_{M11}, \lambda_{M11}]^T + [(i-1)n\varphi_{GSD}, (j-1)n\lambda_{GSD}]^T, \quad (17)$$

式中 $i, j = 1, 2, 3, \dots$ 。

配准点 M 在地球坐标系下的坐标为

$$M_E = \begin{bmatrix} x_M^E \\ y_M^E \\ z_M^E \end{bmatrix} = \begin{cases} (R_{NM} + h_M) \cos \varphi_M \cos \lambda_M \\ (R_{NM} + h_M) \cos \varphi_M \sin \lambda_M \\ [R_{NM}(1-e^2) + h_M] \sin \varphi_M \end{cases}, \quad (18)$$

M 点在相机坐标系下的坐标为

$$M_s = \begin{bmatrix} x_M^S \\ y_M^S \\ z_M^S \end{bmatrix} = C_{AC}^S \times C_{NED}^{AC} \times C_{ECEF}^{NED} \times M_E. \quad (19)$$

理想光学系统 M 点在 CCD 上的投影点 M' 位于 M 点与相机坐标系原点的连线延长线上,则在相机坐标系下 M' 点的坐标 $M'_S = [x_{M'}^S \ y_{M'}^S \ z_{M'}^S]^T$ 满足

$$\frac{x_M^S}{x_{M'}^S} = \frac{y_M^S}{y_{M'}^S} = \frac{z_M^S}{z_{M'}^S}, \quad (20)$$

同时 M'_S 位于 CCD 平面上,于是有 $z_{M'}^S = -f$,由此可解得配准点 M 在 CCD 上的投影点 M' 。

图 7 为两幅航空遥感图像的配准示意图,第 (i, j) 配准点 M_{ij} 在两幅航空遥感图像上的投影分别为 $M_{ij}^{1'}$ 和 $M_{ij}^{2'}$,记为一组匹配点,具体配准点选取流程如图 8 所示。通过选取多组匹配点对遥感图像进行匹配。

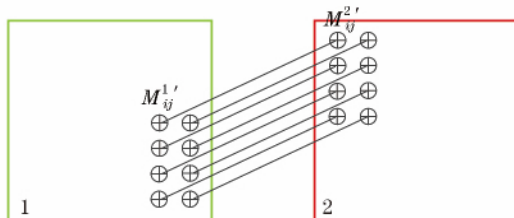


图 7 航空遥感图像配准示意图

Fig. 7 Diagram of aerial remote sensing image registration

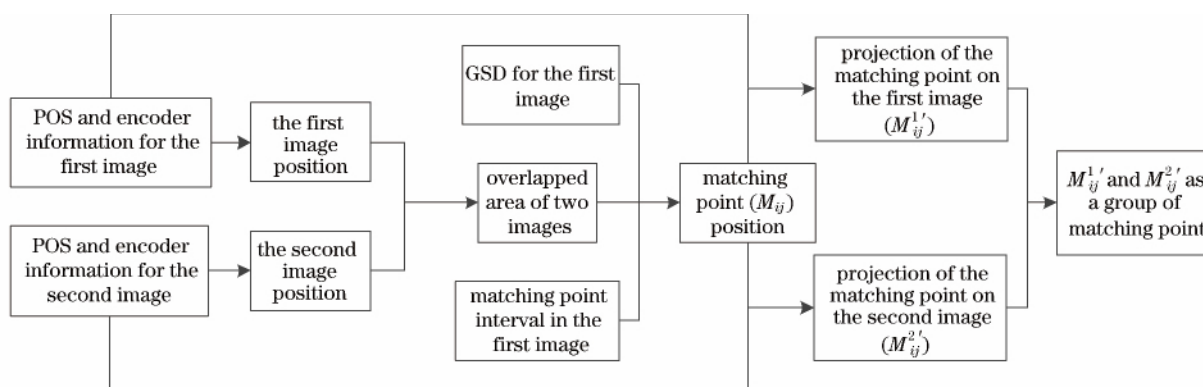


图 8 配准点选取流程图

Fig. 8 Flow chart of selecting matching point

3 目标定位及图像配准误差分析

机载 POS 系统测量出的载机位置、姿态角信息及相机编码器输出的框架角位置信息均会存在误差,这将导致目标定位误差和图像配准误差。误差分析是衡量定位及配准算法的重要环节。本文采用蒙特卡罗法对目标定位误差和图像配准误差进行分析。

3.1 蒙特卡罗分析方法

蒙特卡罗法又称随机模拟法,通过计算机产生符合条件的随机数据,用于替代实际实验中难以获得的数据。

采用蒙特卡罗法建立的误差分析模型为

$$\Delta y = f(x_1 + \Delta x_1, x_2 + \Delta x_2, \dots, x_n + \Delta x_n) - f(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (21)$$

式中 Δy 为函数值 y 的误差, Δx_k 为 x_k 的误差,假定误差随机变量 Δx_k 服从正态分布,则其误差模型可描述为

$$\Delta x_k = R_i \sigma_{x_k}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, N, \quad (22)$$

式中 R_i 为伪随机数,服从标准正态分布, N 为样本空间的大小, σ_{x_k} 为参数 x_k 的测量标准差。

仿真分析各参数 (x_1, x_2, \dots, x_n) 的真实计算函数值 y ,并作为误差分析中的名义值;将各参数的随机误差序列 $(\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n)$ 加入到各个参数中;根据(21)式计算函数值误差 Δy ,并对误差值进行统计分析。

3.2 目标定位误差分析

对 CCD 中心目标进行定位,以表 1 中的参数,取 $N = 10000$,通过蒙特卡罗法进行仿真分析。

表 1 目标定位仿真实验数据
Table 1 Data in geo-location simulation program

Symbol		Nominal value	Standard deviation
Aircraft GPS position	$\varphi_A / (^{\circ})$	35.0215	0.0001
	$\lambda_A / (^{\circ})$	121.6955	0.0001
	h_A / m	2000	5
Aircraft attitude	$\psi / (^{\circ})$	45.50	0.02
	$\theta / (^{\circ})$	3.50	0.01
	$\varphi / (^{\circ})$	0.00	0.01
Gimbal angle	$\theta_{\text{yaw}} / (^{\circ})$	-0.50	0.01
	$\theta_{\text{roll}} / (^{\circ})$	18.000	0.006
	$\theta_{\text{pitch}} / (^{\circ})$	-2.600	0.006

仿真实验采用海洋区域的数据,在定位过程中海浪随时变化,认为载机定位过程中海面存在的标准差为 1 m 的大地高起伏。定位结果如图 9 所示,第 i 次定位结果记为 (φ_i, λ_i) ,目标位置为 (φ_T, λ_T) ,则其定位的纬度标准差和经度标准差分别为

$$\sigma_{\varphi} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\varphi_i - \varphi_T)^2}, \sigma_{\lambda} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\lambda_i - \lambda_T)^2}, \quad (23)$$

计算得定位纬度标准差为 $1.0050 \times 10^{-4}^{\circ}$,经度标准差为 $1.0085 \times 10^{-4}^{\circ}$ 。

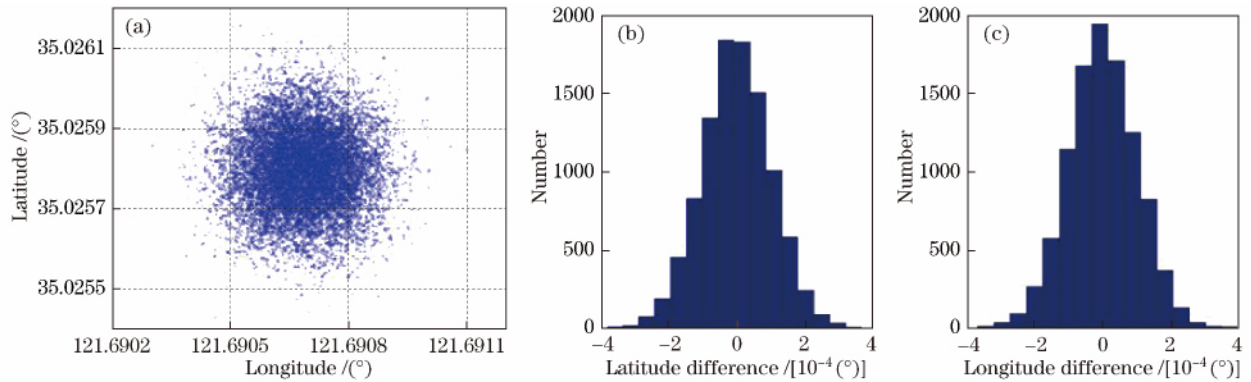


图 9 定位点及其误差概率分布图。(a)定位点分布;(b)纬度误差概率分布;(c)经度误差概率分布

Fig. 9 Distribution of geo-location point and its error probability. (a) Distribution of geo-location point ;
(b) distribution of latitude error probability; (c) distribution of longitude error probability

根据 WGS-84 定义的地球椭球模型,当目标纬度为 φ_T ,子午圈和卯酉圈的曲率半径分别为

$$R_{\text{MT}} = \frac{R_E (1 - e^2)}{(1 - e^2 \sin^2 \varphi_T)^{3/2}}, R_{\text{NT}} = \frac{R_E}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi_T}}. \quad (24)$$

定义目标定位的圆概率误差为

$$\sigma_r = \sqrt{[\sigma_{\lambda} (R_{\text{NT}} + h_T) \cos \varphi_T]^2 + [\sigma_{\varphi} (R_{\text{MT}} + h_T)]^2}, \quad (25)$$

式中 σ_{λ} 和 σ_{φ} 分别为目标定位的经度标准差和纬度标准差。

考虑到相机采用摆扫成像的方式进行工作,分析横滚框架角从 10° 摆扫到 82° 时采用地球椭球模型对地目标定位圆概率误差,结果如图 10 所示。结果显示,相机摆扫角度越大其定位精度越低。在横滚框架角度小于 80° 时,可保证航空遥感图像的定位精度小于 35 m。

3.3 图像配准误差分析

航空相机采用摆扫方式工作,一般需要配准拼接的航空遥感图像的拍摄间隔不会超过 5 s,因此在考虑图像配准时,载机在拍摄两幅航空遥感图像时的位置相对误差会大大减低。以表 2 中的参数,取 $N=10000$,通过蒙特卡罗法对航空遥感图像配准进行仿真分析。

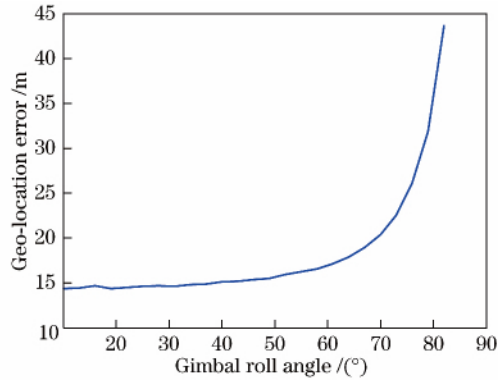


图 10 目标定位圆概率误差随摆扫角度变化曲线

Fig. 10 Circular error probability of geo-location with different gimbal roll angles

表 2 图像配准仿真实验数据

Table 2 Data in image registration simulation experiment

Symbol		Nominal value (photo1)	Nominal value (photo2)	Standard deviation	Relative standard deviation
Aircraft GPS position	$\varphi_A / (^{\circ})$	35.0215	35.0216	0.0001	0.00002
	$\lambda_A / (^{\circ})$	121.6955	121.6956	0.0001	0.00002
	h_A / m	2000	2003	5	1
Aircraft attitude	$\psi / (^{\circ})$	45.50	45.80	0.02	0.01
	$\theta / (^{\circ})$	3.500	3.600	0.01	0.005
	$\varphi / (^{\circ})$	0.00	0.00	0.01	0.005
Gimbal angle	$\theta_{\text{yaw}} / (^{\circ})$	-0.50	-0.70	0.01	0.01
	$\theta_{\text{roll}} / (^{\circ})$	18.000	6.000	0.006	0.006
	$\theta_{\text{pitch}} / (^{\circ})$	-2.600	-6.800	0.006	0.006

取航空相机探测器的像元个数为 2048×2048 , 像元尺寸为 $10 \mu\text{m}$, 相机焦距为 75 mm , 寻找的配准点位于北纬 35.0230° 、东经 121.6908° 。第一幅和第二幅航空遥感图像中配准点投影在 CCD 上的分布如图 11(a) 和 11(b) 所示。图 12 为两幅图像投影点的相对位置。

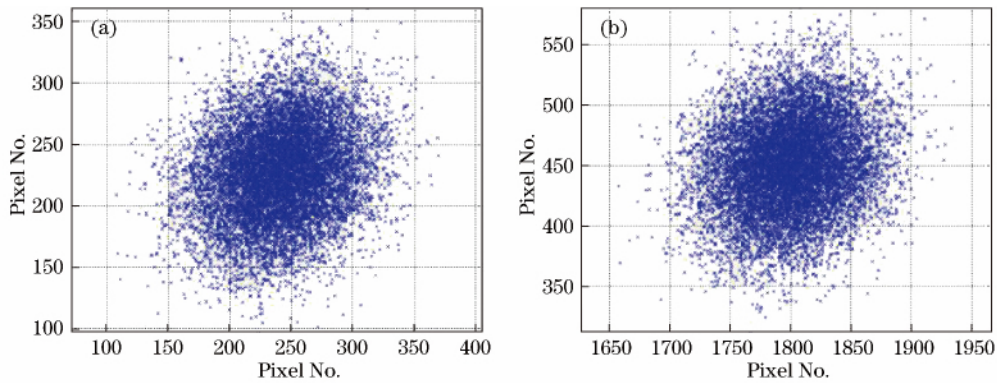


图 11 配准点在 CCD 上的投影分布。(a) 第一幅图像;(b) 第二幅图像

Fig. 11 Distribution of matching point projecting on CCD. (a) The first image ; (b) the second image

配准点在 CCD 上投影的圆概率误差为

$$\sigma_r = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}, \quad (26)$$

式中 σ_x 和 σ_y 分别为配准点在 x 方向和 y 方向的投影点的标准差。

配准点在两幅航空遥感图像上的投影圆概率误差分别为 53.03 pixel 和 53.56 pixel, 配准点在两幅航空图像上投影的相对圆概率误差为 10.87 pixel。载机距离配准点 2053 m, 一个像素在地面的投影为 0.27 m,

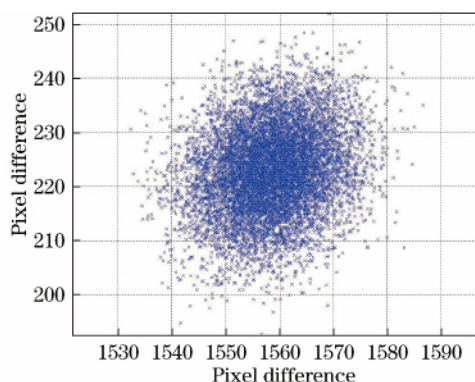


图 12 两幅航空遥感图像的配准点在 CCD 上投影的相对分布

Fig. 12 Relative distribution of matching point projecting on CCD in two aerial remote sensing images

配准点投影圆概率误差为 53 pixel, 面投影区域为 14.51 m 与定位圆概率误差相符。两幅航空图像投影的相对圆概率误差为 10.87 pixel, 对应地面配准精度小于 3 m。

4 飞行实验验证

4.1 地面景物验证

对地面景物拍摄两幅航空遥感图像, 在图中选取 4 个配准点进行配准, 结果如图 13 所示。将定位结果与 Google Earth 进行比较, 结果如表 3 所示。

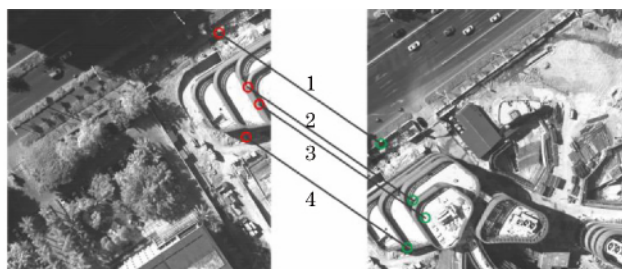


图 13 地面景物图像配准结果

Fig. 13 Registration results of ground scenery image

表 3 配准结果与 Google Earth 比较

Table 3 Comparison of the registration results with the Google Earth

Sample number		1	2	3	4
Matching point position	Latitude / (°)	18.27448	18.27433	18.27430	18.27414
	Longitude / (°)	109.51244	109.51246	109.51250	109.51244
Google Earth position	Latitude / (°)	18.27429	18.27413	18.27410	18.27391
	Longitude / (°)	109.51221	109.51224	109.51228	109.51225
Position error / m		32.15	32.11	31.36	31.78

对地面景物航空遥感图像的定位配准结果显示定位精度优于 35 m。比较两张图上的 4 组配准点可以看出, 配准误差优于 3 m, 表明该定位配准算法是可行的。

4.2 海洋遥感图像配准

拍摄两组航空遥感图像, 分别对其进行配准, 结果如图 14 所示。图 14(a) 中实验船位置为北纬 35.02732°、东经 121.69051°; 图 14(b) 中实验船位置为北纬 35.06914°、东经 121.71237°。

图 14 中实验船只船体长为 15 m, 航行速度小于 14.816 km/h, 同组两幅图像的拍摄时间间隔为 0.25 s, 可认为拍摄过程中船没有移动。拍摄两组航空图像时, 载机距离实验船只的距离分别为 2087 m 和 2041 m, 地面像元分辨率分别为 0.278 m 和 0.272 m。定位及配准结果如表 4 所示。

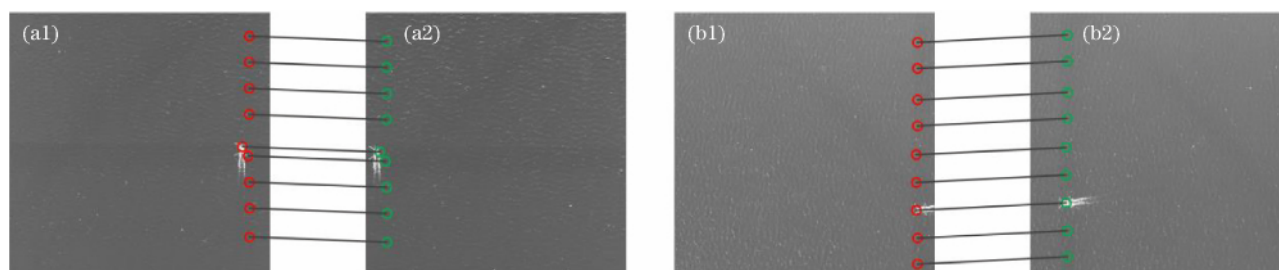


图 14 两组海洋航空遥感图像配准

Fig. 14 Registration results of two ocean aerial remote sensing images

表 4 两组海洋航空遥感图像定位及配准结果

Table 4 Geo-location and registration results of two ocean aerial remote sensing images

Sample number	Fig. 14(a1)	Fig. 14(a2)	Fig. 14(b1)	Fig. 14(b2)
AC altitude /m	2043.1	2043.1	1997.3	1997.3
Roll gimbal angle /($^{\circ}$)	6.17	18.13	-17.96	-6.05
Geo-location of boat	Latitude /($^{\circ}$)	35.02716	35.02715	35.06437
	Longitude /($^{\circ}$)	121.69073	121.69076	121.71215
Geo-location error /m	26.80	29.60	28.31	26.12
Registration error /m		2.95		2.40
Registration error /pixel		10.61		8.82

图 14 所示的海洋遥感图像,由于海浪无规则且实时变化,传统的方法难以进行配准,采用文中方法进行配准,不会受到航空图像特征及纹理的影响。实验结果表明,在载机飞行高度小于 2000 m 时,海洋目标的定位精度优于 35 m,海洋遥感图像的配准精度优于 3 m。飞行实验的定位误差比仿真实验的定位误差大,主要是因为相机安装过程中无法保证框架坐标轴与载机坐标轴完全重合,因此,要提高定位精度需要对安装误差进行标定。框架的安装误差不会影响相对的定位精度,因此对图像的配准精度影响不大。

5 结 论

依据载机姿态位置信息和相机框架角位置信息,利用 WGS-84 定义的地球椭球模型,求取航空遥感图像的经纬度信息,对图像进行定位配准;采用蒙特卡罗法对定位及配准误差进行分析,并通过实际飞行实验验证该算法的有效性。该方法可较好地航空遥感图像进行配准,在飞行高度小于 2000 m,拍摄角度小于 18° 时,定位精度优于 35 m,配准精度优于 3 m。该方法通过确定航空遥感图像的经纬度信息,将相同经纬度信息的配准点进行配准,不需要进行特征提取,对于传统配准方式难以配准的海洋、沙漠和草原等特征点不明显的区域也可以进行配准,配准精度不受航空图像特征及纹理的影响。随着机载导航系统和航空相机控制测量系统的发展,航空相机定位精度及航空遥感图像的配准精度将会进一步提高。

参 考 文 献

- [1] Wang Juan, Shi Jun, Wu Xianxiang. Survey of image mosaics technique[J]. Application Research of Computers, 2008, 25(7): 1940-1943, 1947.
王娟,师军,吴宪祥. 图像拼接技术综述[J]. 计算机应用, 2008, 25(7): 1940-1943, 1947.
- [2] Di Yingchen, Chen Yunping, Chen Yingying, *et al.* Survey on image mosaic algorithm of unmanned aerial vehicle[J]. Journal of Computer Applications, 2011, 31(1): 170-174.
狄颖辰,陈云坪,陈莹莹,等. 无人机图像拼接算法综述[J]. 计算机应用, 2011, 31(1): 170-174.
- [3] Zhou Qian. Research of automatic remote sensing image mosaic technique[D]. Xi'an: Xidian University, 2012.
周茜. 遥感影像自动拼接技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.
- [4] Wu Fenxia, Li Hong. Fusion parallel algorithm based on the edge of the image intensity matching[J]. Electronic Design Engineering, 2014, 22(23): 168-173.

- 吴粉侠, 李 红. 基于边缘强度匹配的图像融合并行算法的研究[J]. 电子设计工程, 2014, 22(23): 168-173.
- [5] Li Ying, Wei Hezhang. Study of scene matching algorithm based on edge strength[J]. Tactical Missile Technology, 2010(2): 59-63.
- 李 莹, 魏合章. 基于边缘强度特征的影像匹配算法比较分析[J]. 战术导弹技术, 2010(2): 59-63.
- [6] He Peipei, Wan Youchuan, Yang Wei, *et al.* Automatic registration of urban laser point cloud with aerial image data based on straight-lines[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5): 0528001.
- 何培培, 万幼川, 杨 威, 等. 基于线特征的城区激光点云与影像自动配准[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0528001.
- [7] Huang Yuan, Da Feipeng, Tao Haiqi. An automatic registration algorithm for point cloud based on feature extraction[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(3): 0308002.
- 黄 源, 达飞鹏, 陶海齐. 一种基于特征提取的点云自动配准算法[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0308002.
- [8] Wu Mengqi, Li Zhongwei, Zhong Kai, *et al.* Adaptive point cloud registration method based on geometric features and photometric features[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 0215002.
- 伍梦琦, 李中伟, 钟 凯, 等. 基于几何特征和图像特征的点云自适应拼接方法[J]. 光学学报, 2015, 35(2): 0215002.
- [9] Wang Zhishe, Yang Fengbao, Ji Li'e, *et al.* Optical and SAR image registration based on cluster segmentation and mathematical morphology[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0215002.
- 王志社, 杨风暴, 纪利娥, 等. 基于聚类分割和形态学的可见光与 SAR 图像配准[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0215002.
- [10] Wei Xing, Fan Shaosheng, Gao Shan. Rapid matching and transform algorithm of images based on the BRISK[J]. Electronic Measurement Technology, 2015, 38(3): 43-47.
- 卫 星, 樊绍胜, 高 山. 基于 BRISK 的图像快速匹配与变换算法[J]. 电子测量技术, 2015, 38(3): 43-47.
- [11] Hu Y H, Li B J, Shi L P. The remote sensing image matching based on SURF algorithm[C]. SPIE, 2014, 9142: 91421T.
- [12] Yang K D, Zhao W J, Li D J, *et al.* Missile placement analysis based on improved SURF feature matching algorithm[C]. SPIE, 2015, 9443: 94430S.
- [13] Zhang Huajun, Li Guihua, Liu Cheng, *et al.* Reliable initial guess based on SURF feature matching in digital image correlation[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(11): 1112005.
- 张华俊, 李桂华, 刘 程, 等. 基于 SURF 特征匹配的数字图像相关变形初值可靠估计[J]. 光学学报, 2013, 33(11): 1112005.
- [14] Liu Yingfei, Liao Guisheng, Yang Zhiwei. Fast region correlation SAR image coregistration method based on interferometric phase effect elimination[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2011, 26(5): 526-530.
- 刘钰菲, 廖桂生, 杨志伟. 快速区域互相关 InSAR 图像配准方法[J]. 数据采集与处理, 2011, 26(5): 526-530.
- [15] Li Jingyu, Shen Huanquan, Cheng Yan, *et al.* Algorithm of medical image registration based on maximum mutual information[J]. Chinese Journal of Interventional Imaging and Therapy, 2010, 7(3): 325-327.
- 李靖宇, 沈焕泉, 程 燕, 等. 基于最大互信息的医学图像配准算法[J]. 中国介入影像与治疗学, 2010, 7(3): 325-327.
- [16] Yang Aiping, Hou Zhengxin, Wang Chengyou, *et al.* Image registration based on all phase spectrum analysis[J]. Journal of Tianjin University, 2008, 41(12): 1465-1472.
- 杨爱萍, 侯正信, 王成优, 等. 基于全相位频谱分析的图像配准[J]. 天津大学学报, 2008, 41(12): 1465-1472.
- [17] Cao Wen, Li Bicheng, Deng Zijian. An image registration method based on wavelet transformation[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2004(2): 16-19.
- 曹 闻, 李弼程, 邓子建. 一种基于小波变换的图像配准方法[J]. 测绘通报, 2004(2): 16-19.
- [18] Zhou Qianfei, Liu Jinghong, Xiong Wenzhuo, *et al.* Multi-target self-determination orientation system based on airborne photoelectric imaging platform[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0112005.
- 周前飞, 刘晶红, 熊文卓, 等. 机载光电成像平台的多目标自主定位系统研究[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0112005.
- [19] Siouris G. Aerospace avionics system: a modern synthesis[M]. New York: Academic Press, 1993.
- [20] Hilkert J M. Kinematic algorithms for line-of-sight pointing and scanning using INS/GPS position and velocity information[C]. SPIE, 2005, 5810: 11-22.