

文章编号 1004-924X(2012)11-2492-08

机载成像系统像移计算模型与误差分析

孙 辉*, 张淑梅

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 中科院航空光学成像与
测量重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要:研究了机载成像系统的像移及其对成像质量与相机分辨率的影响。为准确获取像移矢量,实现成像系统像移补偿,提出了一种基于坐标变换的机载成像系统像移计算模型。通过线性坐标变换,建立了从地面目标景物到成像系统像面的坐标变换模型,推导了地面目标景物在成像系统像面的解析表达式,根据坐标在相机积分时间内的变化来确定像移矢量。分析了成像系统像移误差的主要来源,讨论了载机轨道坐标、飞行姿态角和相机视轴角误差对像移计算结果的影响,采用蒙特卡罗方法分析和统计了像移计算误差。样本实验结果表明,在载机姿态角和相机摆角不变条件下,像移量与载机速度成正比,与目标距离成反比,像移误差随着参数误差的增加而增加,其中载机经度和纬度误差是影响像移计算误差的重要因素。结果显示本文方法对机载成像系统的像移补偿具有实用价值。

关键词:机载成像系统;像移;载机运动;载机姿态角;相机视轴角;蒙特卡罗法

中图分类号:V245.6;TP274 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122011.2492

Computation model and error budget for image motion of aerial imaging system

SUN Hui*, ZHANG Shu-mei

(Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics,
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: sunh@ciomp.ac.cn

Abstract: The image motion of an aerial imaging system was researched and its effects on imaging quality and the resolution of the camera were analyzed. In order to obtain and compensate the image motion of the aerial imaging system, a computation model of image motion based on coordinate transformation was proposed. The coordinate transformation model from a ground object to a sensor plane was established by using linear coordinate transformation, and the computation formula of image motion was derived based on the different coordinates of the same ground object during camera exposure. The sources of image shift error of the imaging system were analyzed and the influences of various error factors including the aircraft motion, attitude angle and the camera swing angle on image shift calculation were discussed. Then, the calculation error budget and synthesis with Mont Carlo method was presented. The experimental result shows that the image motion is directly proportional to the ve-

收稿日期:2011-10-19;修订日期:2012-02-10.

基金项目:国家 973 重点基础研究发展计划资助项目(No. 2009CB72400607);国防预研基金资助项目(No. 402070301);国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2008AA121803)

locity of aircraft, and inversely proportional to the distance between aircraft and ground object when the attitude angle and camera swing angle are constant. Furthermore, the calculation error becomes greater with the increase of the parameter disturbance, especially the measuring errors of aircraft motion in longitude and latitude. It concludes that this method is efficient and will be useful to the image motion compensation of aerial imaging systems.

Key words: aerial imaging system; image motion; aircraft motion; aircraft attitude angle; camera swing angle; Monto Carlo method

1 引 言

机载成像系统是在地面成像系统基础上发展起来的一种空中侦察、探测、监视系统。机载成像系统利用机载平台的机动性和灵活性来增大成像系统的探测距离和侦察范围,以提高系统的作战和监视能力,在军事侦察、地质探测、灾害预测等领域发挥了越来越重要的作用。

在机载、星载成像系统的成像过程中,由于载机与目标景物之间的相对运动,目标影像在成像系统靶面上会形成像移,导致图像质量下降。影响像移的因素很多,载机飞行轨道变化、载机飞行姿态改变和相机视轴角度变化等都会对像移的大小和方向产生一定影响^[1-2]。像移矢量参数反映了成像系统的运动成像特性,是像移补偿、图像复原的基础,因此,如何准确地分析和求解像移矢量参数,计算像移速度或点扩散函数(Point Spread Function, PSF),实现对成像系统的像移补偿或图像复原,是机载成像系统需要解决的关键技术之一^[3-5]。

国内外专家学者针对不同应用领域,提出了许多行之有效的方法来解决星载、机载成像系统TDICCD相机、三线阵立体测绘相机、斜视画幅遥感相机的像移计算和补偿问题^[6-10]。本文根据机载成像系统工作原理,分析了现有像移矢量计算方法的特点及适用范围,结合实际工程应用需求,通过建立从地面景物点到成像系统像面的6个坐标系和8次线性变换,构建出计算像移矢量的数学模型,采用蒙特卡罗法进行了误差分析。最后,通过理论分析和实验验证,研究了载机运行轨道、载机飞行姿态和成像系统视轴指向角度等参数对像移计算结果和误差的影响。

2 运动空间与坐标变换

2.1 坐标系定义及坐标变换

机载成像系统拍摄地面景物时,由于地面景物与成像系统之间的相对运动,在相机积分过程中,地物影像在成像系统像面会产生相应的像移。像移是一个既有大小又有方向的位移矢量,可通过地物与像面之间的位置变化关系求得。

从地面景物到光学成像系统像面的坐标变换中,共涉及6个坐标系,即地心直角坐标系G、大地(地理)坐标系E、载机地理坐标系S、载机坐标系A、成像系统相机坐标系C和像面坐标系P,本文全部采用右手系。

2.1.1 地心直角坐标系 $G(G_x, G_y, G_z)$

地心直角坐标系是一个惯性坐标系,原点O在地球质心, G_x 轴指向地球本初子午线与赤道的交点, G_z 轴与地球的极轴重合指向正北极, G_y 轴垂直于 OG_xG_z 平面, G_x, G_y, G_z 构成右手系,如图1所示。

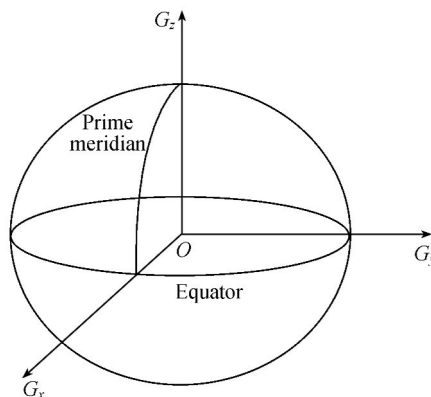


图 1 地心直角坐标系

Fig. 1 Geocentric cartesian coordinate system

该坐标系与地球紧密结合在一起,随地球绕 G_z 按逆时针方向旋转。

2.1.2 大地(地理)坐标系 $E(\lambda, \phi, h)$

大地(地理)坐标系使用与地球相近的参考椭球描述地球,采用大地经度、纬度和大地高程表示空间点的位置。经度 λ 定义为空间点与参考椭球的自转轴所在的面与参考椭球的本初子午面的夹角,纬度 ϕ 定义为空间点与参考椭球面的法线与赤道面的夹角,大地高 h 定义为空间点沿着参考椭球的法线方向到参考椭球面的距离,如图 2 所示。

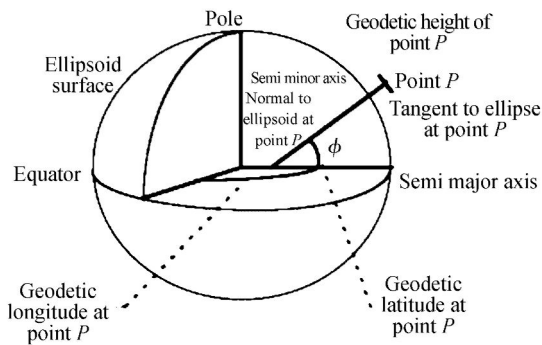


图 2 大地(地理)坐标系

Fig. 2 Geodetic coordinate system

从 E 系到 G 系的变换公式为:

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \\ G_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (N+h)\cos\phi\cos\lambda \\ (N+h)\cos\phi\sin\lambda \\ [(N(1-e^2)+h)\sin\phi] \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式(1)中

$$N = N(\phi) = \frac{a^2}{\sqrt{a^2\cos^2(\phi) + b^2\sin^2(\phi)}},$$

$$e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2},$$

a, b 分别表示参考椭球的长、短半轴长度。

2.1.3 载机地理坐标系 $S(S_x, S_y, S_z)$

该坐标系是一个惯性坐标系,原点 O 在载机质心与载机运行轨道重合处, S_x 轴指向正北, S_z 轴指向正东, S_y 轴垂直于 OS_xS_z 平面指向天向。

如果已知载机轨道点的大地坐标为 $S_0(\lambda, \phi, h)$, 可根据公式(1)计算 S 系在 G 系的坐标。

2.1.4 载机坐标系 $A(A_x, A_y, A_z)$

坐标原点 O 与 S 系原点重合, A_x 轴沿载机中轴线指向机头方向, A_z 轴沿机翼方向向右为

正, A_y 轴垂直于 OA_xA_z 平面指向载机上方。

载机姿态由航向角 ψ 、俯仰角 θ 和横滚角 ϕ 3 个参数描述,它们分别表示绕 A_y, A_z 和 A_x 轴转动的角度,因此 S 系到 A 系坐标变换公式可表示为:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \\ 0 \end{bmatrix} = \mathbf{Q}_3 \mathbf{Q}_2 \mathbf{Q}_1 \begin{bmatrix} S_x \\ S_y \\ S_z \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式(2)中 $\mathbf{Q}_1, \mathbf{Q}_2, \mathbf{Q}_3$ 分别表示绕 S_y, S_z, S_x 轴的旋转矩阵,定义如下:

$$\mathbf{Q}_1 = \begin{bmatrix} \cos\phi & 0 & -\sin\phi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin\phi & 0 & \cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{Q}_2 = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{Q}_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi & \sin\varphi & 0 \\ 0 & -\sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

2.1.5 成像系统坐标系 $C(C_x, C_y, C_z)$

坐标原点 O 是成像系统焦点,与载机坐标系原点重合, C_x 轴与物镜平面垂直,沿视轴指向目标中心, C_z 轴在物镜平面内与 C_x 垂直向右, C_y 轴在物镜平面内与 OC_xC_z 平面垂直。

下面讨论从 A 系到 C 系的变换关系。设在载机坐标系(A 系)下,成像系统观测方位角为 A 、俯仰角为 E ,则 A 系到 C 系的坐标变换公式为:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_x \\ C_y \\ C_z \\ 0 \end{bmatrix} = \mathbf{Q}_5 \mathbf{Q}_4 \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式(3)中 $\mathbf{Q}_4, \mathbf{Q}_5$ 表示 A 系在 C 系下的旋转矩阵,定义如下:

$$\mathbf{Q}_4 = \begin{bmatrix} \cos A & 0 & \sin A & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin A & 0 & \cos A & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$Q_5 = \begin{bmatrix} \cos E & \sin E & 0 & 0 \\ -\sin E & \cos E & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2.1.6 像面坐标系 $P(P_x, P_y, P_z)$

坐标原点 O 在像面中心, C 系沿 C_x 轴平移 $-f$ (f 表示成像系统物镜焦距) 即得到 P 系, OP_yP_z 组成像面。

根据几何光学原理, 当物距 $\rho > 2f$ 时, 目标在像面上成缩小、倒立的实像, 比例系数 $\frac{f}{\rho}$ 。因此, 从 C 系到 P 系的变换公式为:

$$P = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \\ 0 \end{bmatrix} = Q_5 \begin{bmatrix} C_x \\ C_y \\ C_z \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式(4)中, Q_5 表示比例缩放和平移变换矩阵, 定义如下:

$$Q_5 = \begin{bmatrix} \frac{f}{\rho} & 0 & 0 & -f \\ 0 & -\frac{f}{\rho} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{f}{\rho} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2.2 目标运动坐标计算

像移是地面景物在成像传感器靶面上的影像在相机积分时间内的运动矢量, 反映了同一地物点影像在不同时刻的位置变化关系。如何建立地面景物点与影像点之间的对应关系, 是本文重点讨论的关键问题。

不失一般性, 本文讨论从载机地理坐标系 (S 系) 到像面坐标系 (P 系) 的变换关系。

首先对载机和目标进行空间定位, 定位参数由 GPS 或 INS 等系统给出。设载机大地坐标为 (λ, ϕ, h) , 目标大地坐标为 (λ_0, ϕ_0, h_0) , 第一步需要计算目标在载机地理坐标系 (S 系) 的坐标。

根据公式(1), 分别计算载机和目标在地心直角坐标系的坐标, 然后进行坐标平移和旋转变换。因此, 目标在载机地理坐标系 (S 系) 下的坐标计算如下:

$$S = \begin{bmatrix} S_x \\ S_y \\ S_z \\ 0 \end{bmatrix} = R_\phi R_\lambda \left(\begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \\ 0 \end{bmatrix} \right). \quad (5)$$

(5) 式中,

$$R_\phi = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi & 0 & 0 \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$R_\lambda = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \lambda & \sin \lambda & 0 \\ 0 & -\sin \lambda & \cos \lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$u = \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (N(\phi_0)(1 - e^2) + h_0) \sin \phi_0 \\ N(\phi_0) \cos \phi_0 \cos \lambda_0 \\ N(\phi_0) \cos \phi_0 \sin \lambda_0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$v = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (N(\phi)(1 - e^2) + h) \sin \phi \\ N(\phi) \cos \phi \cos \lambda \\ N(\phi) \cos \phi \sin \lambda \\ 0 \end{bmatrix}.$$

根据式(5)可计算出目标距离 ρ :

$$\rho = \sqrt{(u_x - v_x)^2 + (u_y - v_y)^2 + (u_z - v_z)^2}.$$

结合式(2)、式(3)、式(4)、式(5), 可推导出目标在像面坐标系 (P 系) 的坐标计算公式如下:

$$P = \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \\ 1 \end{bmatrix} = Q_5 Q_6 Q_1 Q_3 Q_2 Q_1 R_\phi R_\lambda (u - v). \quad (6)$$

3 像移计算与误差分析

3.1 像移计算

展开式(6), 即可得到地物像点坐标:

$$\begin{cases} p_x = \frac{f}{\rho} (a_x \cos A \cos E + a_y \sin E + a_z \sin A \cos E) - f \\ p_y = \frac{f}{\rho} (a_x \cos A \sin E - a_y \cos E + a_z \sin E \sin A), \\ p_z = \frac{f}{\rho} (a_x \sin A - a_z \cos A) \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中,

$$\begin{cases} a_x = s_x \cos \psi \cos \theta + s_y \sin \theta - s_z \sin \psi \cos \theta \\ a_y = s_x (\sin \psi \sin \varphi - \cos \psi \sin \theta \cos \varphi) + s_y \cos \theta \cos \varphi + s_z (\cos \psi \sin \varphi + \sin \psi \sin \theta \cos \varphi), \\ a_z = s_x (\sin \psi \cos \varphi + \cos \psi \sin \theta \sin \varphi) - s_y \cos \theta \sin \varphi + s_z (\cos \psi \cos \varphi - \sin \psi \sin \theta \sin \varphi) \end{cases}$$

$$\begin{cases} s_x = (u_x - v_x) \cos \phi - (u_y - v_y) \sin \phi \cos \lambda - (u_z - v_z) \sin \phi \sin \lambda \\ s_y = (u_x - v_x) \sin \phi + (u_y - v_y) \cos \phi \cos \lambda + (u_z - v_z) \cos \phi \sin \lambda, \\ s_z = -(u_y - v_y) \sin \lambda + (u_z - v_z) \cos \lambda \end{cases}$$

其中： $\lambda = \lambda(t)$ 表示 t 时刻载机经度； $\phi = \phi(t)$ 表示 t 时刻载机纬度； $h = h(t)$ 表示 t 时刻载机大地高程； $\psi = \psi(t)$ 表示 t 时刻载机航向角； $\theta = \theta(t)$ 表示 t 时刻载机俯仰角； $\varphi = \varphi(t)$ 表示 t 时刻载机横滚角； $A = A(t)$ 表示 t 时刻成像系统方位角； $E = E(t)$ 表示 t 时刻成像系统俯仰角； $u_x = u_x(\lambda(t), \phi(t), h(t))$ 表示 t 时刻地物地心坐标的 X 分量； $u_y = u_y(\lambda(t), \phi(t), h(t))$ 表示 t 时刻地物地心坐标的 Y 分量； $u_z = u_z(\lambda(t), \phi(t), h(t))$ 表示 t 时刻地物地心坐标的 Z 分量； $\rho = \rho(\lambda(t), \phi(t), h(t))$ 表示 t 时刻载机与地物之间的距离； $p_x = p_x(t)$ 表示 t 时刻影像坐标水平分量； $p_y = p_y(t)$ 表示 t 时刻影像坐标垂直分量。

由此在相机积分时间 Δt 内，像移量可表示为：

$$m(t) = \sqrt{(p_x(t + \Delta t) - p_x(t))^2 + (p_y(t + \Delta t) - p_y(t))^2}. \quad (8)$$

像移方向即偏流角为：

$$\alpha(t) = \arctan \left[\frac{p_y(t + \Delta t) - p_y(t)}{p_x(t + \Delta t) - p_x(t)} \right]. \quad (9)$$

3.2 误差分析

3.2.1 误差来源

影响像移计算精度的因素主要包括系统误差、算法误差和测量误差等，其中，系统误差包括：成像系统安装误差、成像系统轴系误差、光学系统像差、镜头焦距值误差。

测量误差主要包括：载机定位误差、目标定位误差、载机姿态测量误差、相机指向角度测量误差。其中，系统误差可以使用定标设备进行误差标定，再通过算法调整和误差修正消除或减小其对计算结果的影响；算法误差主要在坐标系之间相互转换时产生，例如从 WGS-84 到 BJZ-54 坐标系，一般来说转换误差只有几米的误差，对计算结果影响不大，本文不在此赘述。

测量误差是随机误差，是由于测量设备自身精度、环境等客观因素造成的。由于目标定位误差可以与载机定位误差合并考虑，所以本文只讨论载机定位误差、载机姿态误差和视轴指向角度误差对像移计算误差的影响，定义误差计算模型如下：

$$\Delta m = \Delta m(\Delta \psi, \Delta \theta, \Delta \varphi, \Delta \phi, \Delta \lambda, \Delta h, \Delta A, \Delta E). \quad (10)$$

3.2.2 蒙特卡罗统计分析

式(10)说明像移计算误差取决于 $(\Delta \psi, \Delta \theta, \Delta \varphi, \Delta \phi, \Delta \lambda, \Delta h, \Delta A, \Delta E)$ 各项数值，一般来说，可通过对式(8)的全微分运算，即对各项变量求偏导，根据各项参数误差求出合成后的像移误差。然而，从公式(8)可以看出，像移计算公式较为复杂，且公式中包含的参数较多，微分计算公式将更加庞大和复杂，采用人工方法计算误差难以完成。

蒙特卡罗(Monte Carlo)方法，或称计算机随机模拟方法，是一种基于“随机数”的计算方法，目前已经广泛用于仿真各种物理问题，其基本思路是通过使用随机抽样统计来估算数学函数，如求解定积分等。基于蒙特卡罗分析的统计特性，在实际应用中，通过构造符合一定规则的随机数来解决数学上的各种问题。对于那些由于计算过于复杂而难以得到解析解或者根本没有解析解的问题，蒙特卡罗方法是一种有效的求数值解的方法，在数值计算、系统仿真和设计规划等方面得到广泛应用，其仿真结果的准确性也得到多方面的验证^[11-12]。

基于蒙特卡罗方法的上述特点，本文使用该方法求解像移量和偏流角的计算误差。载机位置、载机姿态和相机指向角度误差服从均值为 0 的正态分布，通过对参数和误差分布进行随机抽样处理，根据公式(8)和(9)计算像移量和偏流角，可得到计算结果和误差分布。虽然计算过程中可能包含一些误差，但是随着随机抽取样本数量的增加，结果也会越来越精确。

基本步骤如下:

- (1) 确定参数变量与误差分布空间;
- (2) 根据误差分布空间,生成载机位置(λ_i, ϕ_i, h_i)、载机姿态($\psi_i, \theta_i, \varphi_i$)和相机指向角度(A_i, E_i)的随机分布参数;
- (3) 将参数带入公式(8)和(9),计算像移量值 $m_i(t)$ 和偏流角度值 $\alpha_i(t)$;
- (4) 统计计算结果,计算 $m_i(t)$ 和 $\alpha_i(t)$ 的方差。

4 实验结果分析

为验证和检验本文方法,使用文中方法和公式进行目标影像的像移量和偏流角度计算及误差分析实验,依据实验数据,讨论像移量与载机运动的关系,同时进一步分析系统各项参数误差对像移量计算精度的影响。

实验中使用的的基本参数是:目标经纬度($40^\circ, 100^\circ$)、目标高度 $h=0$;载机航迹经纬度($40.1^\circ, 100.1^\circ$)、轨道高度 $H=8\ 000\ \text{m}$;载机姿态角 $\psi=10^\circ, \theta=20^\circ, \varphi=5^\circ$;成像系统焦距 $f=1\ 000\ \text{mm}$ 、积分时间 $t=1/500\ \text{s}$; CCD 像面分辨率为 $1\ 024 \times 1\ 024$,像元尺寸为 $7.2\ \mu\text{m} \times 7.2\ \mu\text{m}$ 。

图 3、图 4 分别显示了目标像移量与载机速度、目标距离的关系曲线。从图中可以看出,在载机飞行姿态和相机指向角度不变的条件下,像移量大体与载机速度成正比,与目标距离成反比。在上述实验参数条件下,在目标距离为 1 km 和 10 km 处的像移量分别为 $54\ \mu\text{m}$ 和 $6.8\ \mu\text{m}$,分别约占 7 pixel 和 1 pixel。像移会导致图像清晰度下降,是影响成像质量的重要因素,因此,为提高系统成像质量,在获取准确的像移矢量后,可以采用像移补偿技术来消除像移影响,输出清晰图像;也可以采用图像复原技术,通过建立运动模糊模型对产生模糊的图像进行逆滤波,恢复原始清晰图像。

图 5、图 6、图 7 分别显示了载机经纬度误差、载机姿态角误差、成像系统角度误差与像移量相对误差关系曲线。从图中可以看出,由上述参数误差带来的像移计算误差整体上呈增长趋势,在等量的角度误差条件下,由载机经纬度误差产生的像移计算误差远远大于由载机姿态角误差和成像系统角度误差产生的误差。因此,通过提高载机大地坐标和姿态角度测量精度,以及提高成像系统测角精度和安装精度,都可以有效减小像移矢量的计算误差。

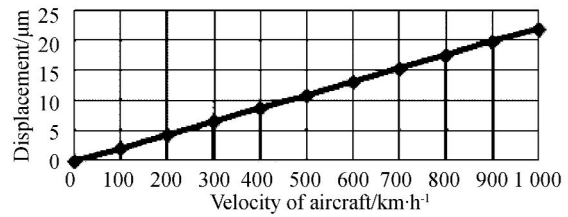


图 3 像移量与载机速度关系曲线

Fig. 3 Relationship between image motion and velocity of carrier aircraft

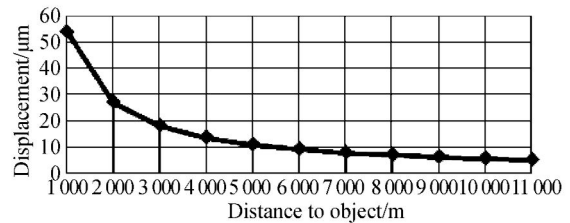


图 4 像移量与目标距离关系曲线

Fig. 4 Relationship between image motion and distance to object

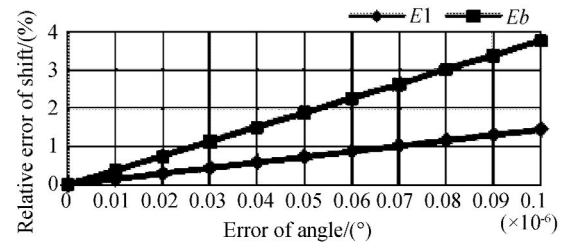


图 5 载机轨道参数误差与像移误差关系曲线

Fig. 5 Relationship between orbital parameters of carrier aircraft and shift error

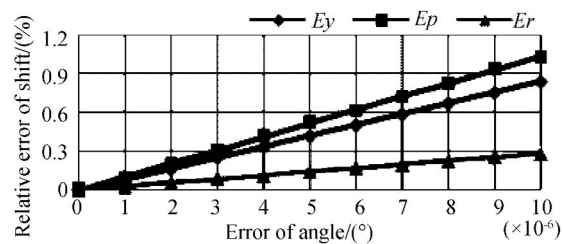


图 6 载机姿态角误差与像移误差关系曲线

Fig. 6 Relationship between attitude errors of carrier aircraft and shift error

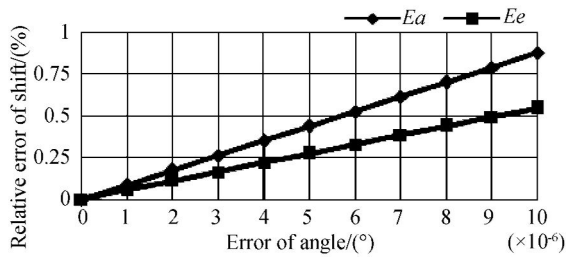


图 7 相机摆角误差与像移误差关系曲线

Fig. 7 Relationship between shift error and camera swing angle error

5 结 论

本文通过坐标变换与误差分析,对如何计算机

载成像系统的像移矢量进行了初步探索和有益尝试。从载机和目标的定位数据出发,通过建立 6 个坐标系和坐标系之间的 8 次变换,推导出目标在成像系统像面的影像坐标计算公式,采用蒙特卡罗统计分析法处理像移计算误差问题,具有一定的理论和应用价值。

通过实验数据分析了成像系统参数与像移矢量的关系。结果表明,大体上来说,像移量大小与载机速度成正比,与目标距离成反比。在像移计算误差方面,讨论了载机定位误差,载机姿态误差和成像系统角度误差的影响,其中载机经度、纬度误差产生的计算误差对像移计算结果影响较大,载机姿态角误差、成像系统角度误差产生的误差相对影响较小。本文的研究将对实际工程应用中误差的合理分配和精度控制具有一定的指导意义。

参考文献:

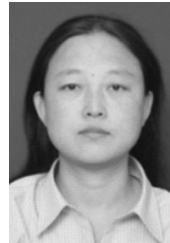
- [1] 闫得杰,徐抒岩,韩诚山. 飞行器姿态对空间相机像移补偿的影响[J]. 光学精密工程, 2008, 16(11): 2199-2203.
YAN D J, XU SH Y, HAN CH SH. Effect of aircraft attitude on image motion compensation of space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11): 2199-2203. (in Chinese)
- [2] 姚呈康,李庆辉,胡琳. 星载遥感相机像移分析[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(5): 901-914.
YAO CH K, LI Q H, HU L. Analysis of image motion of satellite remote sensing camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(5): 901-914. (in Chinese)
- [3] 王运,颜昌翔. 基于差分法的空间相机像移速度矢量计算[J]. 光学精密工程, 2011, 19(5): 1054-1060.
WANG Y, YAN CH X. Computation of image motion velocity vector for space camera based on difference method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(5): 1054-1060. (in Chinese)
- [4] 许永森,丁亚林,田海英,等. 斜视状态下航空遥感器像移的计算与补偿[J]. 光学精密工程, 2007, 15(11): 1779-1783.
XU Y S, DING Y L, TIAN H Y, et al.. Calculation and compensation for image motion of aerial remote sensor in oblique situation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(11): 1779-1783. (in Chinese)
- [5] 张玉欣,刘宇,葛文奇. 像移补偿技术的发展与展望[J]. 中国光学与应用光学, 2010, 3(2): 112-118.
ZHANG Y X, LIU Y, GE W Q. Development and prospect of image motion compensation technology [J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2010, 3(2): 112-118. (in Chinese)
- [6] WANG J Q, YU P, YAN C X, et al.. Space optical remote sensor image motion velocity vector computational modeling, error budget and synthesis [J]. *Chinese Optics Letters*, 2005, 3(7): 414-417.
- [7] 袁孝康. 空间相机的像移速度矢量计算模型[J]. 上海航天, 2008, 3: 1-5.
YUAN X K. Computation modeling of image motion velocity for spaceborne cameras [J]. *Aerospace Shanghai*, 2008, 3: 1-5. (in Chinese)
- [8] 翟林培,刘明,修吉宏. 考虑飞机姿态角时倾斜航空相机像移速度计算[J]. 光学精密工程, 2006, 14(3): 490-494.
ZHAI L P, LIU M, XIU J H. Calculation of image motion velocity considering airplane gesture angle in oblique aerial camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3): 490-494. (in Chinese)
- [9] 李晓云,杜伟. 星载 TDICCD 相机像移对成像质量的影响分析[J]. 航天器工程, 2011, 20(3): 51-55.
LI X Y, DU W. Analysis of image motion effect on satellite TDICCD camera image quality [J]. *Spacecraft Engineering*, 2011, 20(3): 51-55. (in Chinese)

- [10] 贺东雷,曹喜滨. 三线阵 CCD 立体测绘卫星像移姿态跟踪补偿研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006,38(10):1744-1747.
HE D L, CAO X B. Image motion compensation of three lines CCD camera stereo mapping satellite by attitude tracking[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2006,38(10):1744-1747. (in Chinese)
- [11] 徐利治. 现代数学手册:随机数学卷[M]. 武汉:华中科技大学出版社, 2000.
XU L ZH. *Modern Mathematics Handbook: Stochastic Mathematics*[M]. Wuhan: Hua Zhong University of Science and Technology Press, 2000. (in Chinese)
- [12] 刘琳,张兴德,贺谊亮. 基于蒙特卡洛模拟法的红外光学系统公差分析[J]. 激光与红外, 2010,40(5):496-499.
LIU L, ZHANG X D, HE Y L. Monte Carlo simulation and its application in the IR optical system [J]. *Laser & Infrared*, 2010,40(5):496-499. (in Chinese)

作者简介:



孙 辉(1963—),男,吉林柳河人,研究员,1985年于吉林大学数学系获得理学学士学位,主要从事数字图像处理及计算机仿真研究。E-mail: sunh@ciomp.ac.cn



张淑梅(1964—),女,吉林长春人,研究员,1986年于吉林工业大学电子系自动化专业获得学士学位,主要从事光电测量设备的研制。E-mail: zhangsm_ciomp@yahoo.com.cn

● 下期预告

渐进多焦点眼用镜片的个性化设计

唐运海¹,吴泉英¹,钱 霖²,刘 琳²

(1. 苏州科技学院 数理学院,江苏 苏州 215009;

2. 苏州大学物理科学与技术学院光电系,江苏 苏州 215006)

阐述了渐进多焦点眼用镜片通道和视近区位置的个性化设计方法。推导出与渐进多焦点眼用镜片佩戴者瞳距,镜片到眼球旋转中心的距离以及镜片球光度分布和镜片的棱镜效应相关的镜片矢高偏移公式,并提出一种在渐进多焦点眼用镜片设计中加入该偏移量的方法。在给出的设计实例中,镜片视远区中心点偏移了 0.5 mm,视近区中心点偏移了 3 mm。与对称设计相比,偏移后视远区和阅读区的球光度变化在 0.03 屈光度以内。视远区散光度分布没有因为镜片通道和视近区的位置偏移而改变,保持了视远区球光度和散光度分布的对称性。本个性化设计方法使老视眼患者在视近物时,视线自然地通过渐进多焦点眼用镜片的渐变通道或视近区,且该处的球光度也与视物所需球光度相符,提高了渐进多焦点眼用镜片佩戴者的佩戴舒适度和适应渐进多焦点眼用镜片的能力。