

国土卫星成像过程的数学模拟与 几何失真恢复

郭兆曾 何志勤 李玲芝

巨涛 孟波

(北京卫星信息工程研究所)

1988年2月15日收稿

摘 要

本文在对卫星图像几何失真进行分析的基础上,用数学方法模拟了国土卫星空中成像的物理过程,提出了一种新的图像几何处理方法——混合法。该方法先用少量地标点(GCP)和 Powell 方法估算精化模型中的参数,以消除系统误差;再用平面拟合法校正残差,有效地提高了处理精度。影像的灰度重采样是用样条函数方法实现的。

关键词 卫星摄影 影像畸变 几何校正

一、概 述

国土卫星的成像方式是全景扫描,所获取的图像几何失真严重。卫星全景图像的精度主要受到卫星在空间的位置、卫星在轨道上的运动、卫星的姿态变化、地球曲率、地球自转、地表起伏、全景畸变等多种因素的影响,规律十分复杂,在很多情况下,必须进行几何处理才能满足实际需要。

本文仅以一个姿态角的测量误差 $\Delta\beta$ 作误差分析。如图1所示,卫星处于点 A , 星下点为 B , 无姿态误差时,拍摄地面 C 点。由于有姿态误差,实际拍摄的是地面上的 D 点(为进一步简化,设无高程误差)。由于姿态测量误差 $\Delta\beta$ 的引入,造成的误差为弧 CD 的长。

根据正弦定理有:

$$\frac{H}{\sin\left(\frac{\pi}{2} - (\alpha + \beta)\right)} = \frac{BC}{\sin\beta}$$

及 $BC = 2R \sin\alpha$

得

$$\alpha(\beta) = \frac{1}{2} \left[\sin^{-1} \left(\sin\beta \cdot \left(1 + \frac{H}{R} \right) - \beta \right) \right]$$

当 β 变至 $\beta + \Delta\beta$ 时, 即得

$$\widehat{CD} = R \cdot \left[\frac{\cos \beta \cdot \left(1 + \frac{H}{R}\right)}{\sqrt{1 - \sin^2 \beta \cdot \left(1 + \frac{H}{R}\right)}} - 1 \right] \Delta\beta$$

取 $H = 180\text{km}$, $R = 6375\text{km}$, $\Delta\beta = 0.1^\circ$, 则

$$\widehat{CD} = \begin{cases} 424.94\text{m} & \beta = 30^\circ \\ 656.53\text{m} & \beta = 45^\circ \\ 1444.92\text{m} & \beta = 60^\circ \end{cases}$$

显然, 这样的误差是不能忽视的。

由于重力、温度等环境条件的影响, 相机参数难以在地面精确测量, 卫星轨道数据也存在不同程度的误差, 而大气折射的影响更是难以描述。

从以上分析可以看出, 如果不引入少量地面控制点, 纯粹依赖于测量的姿态、轨道等参数来模拟摄影的物理过程, 难以得到高精度的处理结果。特别是对于畸变大的区域, 更是如此。为了克服这一缺点, 本文提出了卫星全景图像几何校正的混合法。该方法的优点是, 既克服了模拟卫星成像物理过程要严格依赖于轨道、姿态及相机等参数的缺点, 又克服了单纯控制点法需要大量地标点的不足。

本文导出的几何校正模型, 由两部分组成。第一部分, 根据空中摄影的物理过程, 利用坐标变换方法导出了几何校正公式, 用以校正上述诸确定因素产生的几何畸变; 第二部分, 讨论了用平面拟合方法和有限元法校正剩余畸变。这两部分结合在同一程序中, 由计算机一次完成。

在第一部分的公式中, 我们引入了地面高差的影响, 用样条函数方法建立了地面的数字高程模型。在模拟卫星成像空间物理过程时, 不直接使用测量的姿态、轨道等参数, 而是引入少量的地标点, 把姿态和轨道等数据作为参数, 使用 Powell 方法估值^[1], 得到了满意的结果。

该方法的另一特点是坐标空间的变换是由原片坐标系到新片坐标系。其优点是, 避免了由新片转换到原片带来的求解拍摄时间的困难。因此, 校正公式中可以包含更多的因素, 从而提高了校正精度。相应的, 重采样问题便成为本方法需要解决的另一个主要问题。文中讨论了采用样条函数的重采样方法, 实践证明, 这是解决这一问题的有效办法。

二、模型建立

我们利用矩阵变换方法建立数学模型。先给出不包括高程的几何校正公式, 求出像元对应地面目标的地理经纬度, 再以此为初值, 导出包括高程的几何校正模型

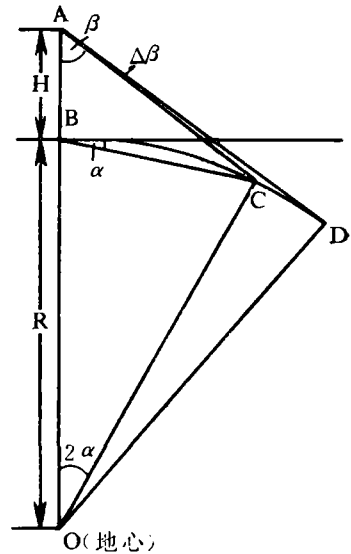


图 1 $\Delta\beta$ 误差示意图
Fig.1 $\Delta\beta$ error sketch scheme

1. 坐标系^[3]

为了建立像元与其对应的地面目标点之间的几何关系,先引进 5 个坐标系,再在此基础上建立校正公式。这 5 个坐标系为:混合坐标系 X_{i0} ; 瞬时地心坐标系 X_G ; 轨道坐标系 X_0 ; 卫星本体坐标系 X_b ; 瞬时摄影坐标系 X_p 。附录 A 和 B 分别给出了这五个坐标系及坐标变换矩阵。

2. 不包括高程的几何校正公式

下面首先推导计算像元对应的地面点地理经纬度的公式。地球采用克拉索夫椭球模型。

为了计算像元对应的地面目标点地理经纬度,需要把像元 P 在瞬时摄影坐标系中的坐标 (X_p, Y_p, Z_p) 投影到地球中心坐标系 (X_G, Y_G, Z_G) 。得知

$$\begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix} = [M_1][M_2][M_3] \begin{bmatrix} X_G \\ Y_G \\ Z_G \end{bmatrix}$$

而 $[M_i][M_i]^T = I$ (单位阵)

所以

$$\begin{bmatrix} X_G \\ Y_G \\ Z_G \end{bmatrix} = [M_1]^T[M_2]^T[M_3]^T \begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix} \quad (1)$$

记

$$[M] = [M_1]^T[M_2]^T[M_3]^T = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 $[M_1]$: 轨道变换矩阵^[3]; $[M_2]$: 姿态变换矩阵^[3]; $[M_3]$: 相机变换矩阵^[3]。

由以上推导可知,像元 (X_p, Y_p, Z_p) 对应的主光轴的方向余弦为

$$\vec{Z} = \begin{bmatrix} m_{13} \\ m_{23} \\ m_{33} \end{bmatrix} \quad (3)$$

再设摄影时刻卫星的星历位置为^[6,7]:

$$\vec{S} = \begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{bmatrix} = r \cos u \begin{bmatrix} \cos Q \\ \sin Q \\ 0 \end{bmatrix} + r \sin u \begin{bmatrix} -\sin Q \cos I \\ \cos Q \cos I \\ \sin I \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中 r : 轨道半径; u : 卫星从升交点起算的轨道角; Q : 升交点和 OX_G 轴夹角; I : 轨道倾角。

像元对应的地面目标点为

$$\vec{E} = \begin{bmatrix} X_{eG} \\ Y_{eG} \\ Z_{eG} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_e \cos \lambda'_e \cos \varphi'_e \\ a_e \sin \lambda'_e \cos \varphi'_e \\ c_e \sin \varphi'_e \end{bmatrix}$$

根据共线条件得:

$$\vec{E} = \vec{S} + u\vec{Z} \quad (5)$$

利用克拉索夫椭球模型, 可得地面点的地心经纬度:

$$\begin{cases} \varphi'_s = \arcsin \frac{Z_{cG}}{C_c} \\ \lambda'_s = \arctg \frac{Y_{cG}}{X_{cG}} \quad \left(\text{当 } \frac{Y_{cG}}{X_{cG}} < 0 \text{ 时, } \lambda'_s = \lambda'_s + \pi \right) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $a_c = 6378.245\text{km}$ (地球长半轴);

$C_c = 6356.86194\text{km}$ (地球短半轴);

$A = C_c^2(m_{13}^2 + m_{23}^2) + a_c^2 m_{33}^2$;

$B = C_c^2(X_s m_{13} + Y_s m_{23}) + a_c^2 Z_s m_{33}$;

$C = C_c^2(X_s^2 + Y_s^2) + a_c^2(Z_s^2 - C_c^2)$;

$$u = - \frac{B + \sqrt{B^2 - AC}}{A}$$

最后, 利用下述迭代公式求得目标点的地理纬度 φ

$$\varphi_{i+1} = \varphi'_s + \sin^{-1}(N_i e^2 \sin \varphi_i \cos \varphi_i / R) \quad (7)$$

式中:

$$e^2 = 0.006693421623;$$

$$R = \sqrt{X_s^2 + Y_s^2 + Z_s^2};$$

$$N_i = a_c / (1 - e^2 \sin^2 \varphi_i)^{\frac{1}{2}}$$

3. 包括高程的几何校正公式

下面来讨论地面高程的影响。假定已利用样条函数建立了地面的数字高程模型 (下文将详细讨论)。并设影像上任意一点 (x_p, y_p) 的高程为 $h(x_p, y_p)$, 则根据前面的讨论, 有以下关系式成立:

$$\begin{cases} X_{cG} = (N + h) \cos \varphi \cos \lambda \\ Y_{cG} = (N + h) \cos \varphi \sin \lambda \\ Z_{cG} = [N(1 - e^2) + h] \sin \varphi \end{cases} \quad (8)$$

式中:

$$N = \frac{a_c}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}};$$

φ 为地理纬度;

λ 为地理经度。

由(5)式和(8)式容易得出

$$\begin{cases} X_s + u m_{13} = (N + h) \cos \varphi \cos \lambda \\ Y_s + u m_{23} = (N + h) \cos \varphi \sin \lambda \\ Z_s + u m_{33} = [N(1 - e^2) + h] \sin \varphi \end{cases}$$

由该方程组第 3 式得

$$u = \frac{[N(1 - e^2) + h] \sin \varphi - Z_s}{m_{33}} \quad (9)$$

由方程组前两式得

$$(X_i + um_{13})^2 + (Y_i + um_{23})^2 = (N + h)^2 \cos^2 \varphi$$

最后得到 φ 的非线性代数方程

$$\begin{aligned} & \left\{ X_i + \frac{[N(1 - e^2) + h] \sin \varphi - Z_i \cdot m_{13}}{m_{33}} \cdot m_{13} \right\}^2 \\ & + \left\{ Y_i + \frac{[N(1 - e^2) + h] \sin \varphi - Z_i \cdot m_{23}}{m_{33}} \cdot m_{23} \right\}^2 \\ & - (N + h)^2 \cos^2 \varphi = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

用由(7)式解出的 φ 做初值,用迭代法解方程(10),求取 φ 的值。为了求取 λ ,则必须首先将 φ 值代入(9),求得 u ,然后代入下式获取。

$$\lambda = \sin^{-1} \left[\frac{Y_i + um_{23}}{(N + h) \cos \varphi} \right] \quad (11)$$

为了将纠正后的图像归化到统一的地图投影面上,便于与地图数据进行对比,必须将求出的地面点大地坐标 (λ, φ) 换算成高斯投影平面坐标 (x, y) ^[9]。运算公式罗列如下:

$$\begin{cases} x = x_0 + \frac{l^2 N}{2\rho''^2} \sin \varphi \cos \varphi + \frac{l^4 N}{24\rho''^4} \sin \varphi \cos^3 \varphi (5 - t^2 + 9\eta^2) \\ y = \frac{lN}{\rho''} \cos \varphi + \frac{l^3 N}{6\rho''^3} \cos^3 \varphi (1 - t^2 + \eta^2) + \frac{l^5 N}{120\rho''^5} \cos^5 \varphi (5 - 18t^2 + t^4) \end{cases} \quad (12)$$

式中: $t = \operatorname{tg} \varphi$;

$$l = \lambda - \lambda_0;$$

$$\eta = e'' \cos \varphi;$$

$$e'' = 0.00673852541468;$$

$$\frac{1}{\rho''} = 48481.3681 \times 10^{-10};$$

$$x_0 = C \left(A\varphi - \frac{1}{2} B \sin 2\varphi + \frac{1}{4} C \sin 4\varphi - \frac{1}{6} D \sin 6\varphi + \frac{1}{8} E \sin 8\varphi \right)$$

若 φ 以弧度表示,则有

$$C = 6399698.902\text{m}$$

$$A = 0.994977825457$$

$$B = 0.005011635865$$

$$C = 1.0518037 \times 10^{-5}$$

$$D = 2.0603 \times 10^{-7}$$

$$E = 3.9 \times 10^{-9}$$

三、参数反馈

为了保证几何校正精度,除了要有准确模拟卫星成像物理过程的数学模型外,参数的精确获取也是非常重要的。但在实际情况中,有些参数存在较大误差,难以直接应用,必

须进行优化。本文采用系统辨识方法结合地面控制点坐标进行参数反馈,对参数不断加以修正,满意地解决了这一问题。

设 (x_i, y_i) 和 (X_i, Y_i) ($i = 1, 2, \dots, m$) 分别为控制点在原片和在新片上的坐标, (x'_i, y'_i) 是 (x_i, y_i) 经校正公式计算后的坐标, 并设 (x'_i, y'_i) 依赖于姿态参数和卫星运行轨道参数 $\varphi, \theta, \psi, \dot{\varphi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}, U, Q, I$ 和 r 的取值。取

$$f(\theta, \varphi, \psi, \dot{\varphi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}, U, Q, I, r) = \sqrt{\sum_{i=1}^m [(x_i - x'_i)^2 + (y_i - y'_i)^2] / m} \quad (13)$$

式中 m 为选取的控制点个数。作为目标函数,利用 Powell 方法求 $\min(f)$ 的值,对参数进行优化,从而估算出卫星摄影瞬间姿态参数和轨道参数,把所得结果再代入前述的数学模型中,对原片进行几何校正。

四、残差的消除

利用前面所述的模拟成像过程的数学模型,满意地解决了由于系统误差产生的图像几何失真,但是所得结果往往仍不能满足需要,存在较大的偶然误差和系统残差。下面讨论用平面拟合方法和样条函数方法进一步进行精处理的问题。

平面拟合方法和样条函数方法都可以作为控制点法单独使用,并且都是非常有效的方法。但获取控制点的工作量将是很大的,有时甚至难以进行。

1. 平面拟合法

设 (x, y) 是由前述模型求出的任一点高斯平面坐标, (X, Y) 是该点正确的地图坐标,采用三次平面拟合,则下式成立:

$$\begin{cases} X = a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4xy + a_5y^2 + a_6x^3 + a_7x^2y + a_8xy^2 + a_9y^3 \\ Y = b_0 + b_1x + b_2y + b_3x^2 + b_4xy + b_5y^2 + b_6x^3 + b_7x^2y + b_8xy^2 + b_9y^3 \end{cases} \quad (14)$$

其中的系数 $a_0, a_1, a_2, \dots, a_9$ 和 b_0, b_1, \dots, b_9 借助于控制点坐标用最小二乘法获取,其矩阵表达式为(以 x 方程为例):

$$\Delta = (A^T A)^{-1} (A^T L) \quad (15)$$

其中: $\Delta = (a_0 \ a_1 \ a_2 \ \dots \ a_9)^T$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & x_1^2 & x_1 y_1 & y_1^2 & \dots & y_1^3 \\ 1 & x_2 & y_2 & x_2^2 & x_2 y_2 & y_2^2 & \dots & y_2^3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_m & y_m & x_m^2 & x_m y_m & y_m^2 & \dots & y_m^3 \end{bmatrix}$$

$$L = [l_{x_1} \ l_{x_2} \ \dots \ l_{x_m}]^T$$

$$l_{x_i} = X_i$$

应该指出的是,控制点的分布应尽可能地均匀,特别在边缘地方,应尽量选取控制点,以保证取得满意的结果。

2. 样条函数(或称有限元)方法

多项式插值方法无论在理论上(指收敛性)还是在实际计算中(如不稳定现象),高次的 Lagrange 插值一般是不可取的,若应用到几何校正中,就会影响到精度的提高。此外还有误差扩散问题,就是说局部控制点的误差会扩散到整个图像。为了解决精度问题,现在研究三角样条函数方法。

根据已选定的控制点,把整个图像分成若干个三角形,对每个三角形建立一个插值公式,同一个三角形内的像元就用同一个插值公式。

显然,除了插值公式外,还需要建立一组判别条件,用以确定图像上的任意像元,应该属于哪个三角形。

(1) 插值公式

任取一三角形 Δ_{ijm} , 其顶点由前述模型算出的坐标以及在地图上的正确坐标分别为 (x_i, y_i) , (x_j, y_j) , (x_m, y_m) 和 (X_i, Y_i) , (X_j, Y_j) , (X_m, Y_m) , 在 Δ_{ijm} 内任取一点 P , 其由模型算出坐标和地图坐标分别为 (x, y) 和 (X, Y) , 则样条插值函数应取为:

$$\begin{cases} X = a_1 + a_2x + a_3y \\ Y = a_4 + a_5x + a_6y \end{cases}$$

其中 a_1, a_2, \dots, a_6 是相应系数。上式经整理后可写为:

$$\begin{cases} X = \varphi_i X_i + \varphi_j X_j + \varphi_m X_m \\ Y = \varphi_i Y_i + \varphi_j Y_j + \varphi_m Y_m \end{cases} \quad (16)$$

式中

$$\begin{aligned} \varphi_i &= \frac{1 - \frac{y - y_m}{y_i - y_m} - \frac{x - x_j}{x_m - x_j}}{1 - \frac{y_i - y_m}{y_j - y_m} - \frac{x_i - x_j}{x_m - x_j}} \\ \varphi_j &= \frac{1 - \frac{y - y_i}{y_m - y_i} - \frac{x - x_m}{x_i - x_m}}{1 - \frac{y_j - y_i}{y_m - y_i} - \frac{x_j - x_m}{x_i - x_m}} \\ \varphi_m &= \frac{1 - \frac{y - y_j}{y_i - y_j} - \frac{x - x_i}{x_j - x_i}}{1 - \frac{y_m - y_i}{y_i - y_j} - \frac{x_m - x_i}{x_j - x_i}} \end{aligned}$$

(2) 判别条件

利用下述解析几何中的性质,建立判别条件。

性质: 平面上任一直线,把平面分为两部分,同一部分中的任意两点坐标,代入直线方程

$$f(x, y) = y - ax - b$$

所得的符号相同。

设三角形 Δ_{ijm} 的 \overline{ij} , \overline{jm} 和 \overline{mi} 与坐标轴不平行,其直线方程分别为:

$$\begin{aligned}y &= A_{ij}x + B_{ij} \\y &= A_{jm}x + B_{jm} \\y &= A_{mi}x + B_{mi}\end{aligned}$$

令

$$\begin{aligned}P_m &= \text{sign}(y_m - A_{ij}x_m - B_{ij}) \\P_j &= \text{sign}(y_j - A_{mi}x_j - B_{mi}) \\P_i &= \text{sign}(y_i - A_{jm}x_i - B_{jm})\end{aligned}$$

在平面 XY 上任取一点 (x_p, y_p) , 若同时满足以下三个不等式, 则点 (x_p, y_p) 在三角形 Δ_{ijm} 内, 反之亦然。

$$\begin{cases}P_m \cdot \text{sign}(y_p - A_{ij}x_p - B_{ij}) \geq 0 \\P_j \cdot \text{sign}(y_p - A_{mi}x_p - B_{mi}) \geq 0 \\P_i \cdot \text{sign}(y_p - A_{jm}x_p - B_{jm}) \geq 0\end{cases} \quad (17)$$

若 Δ_{ijm} 至少有一个边平行于坐标轴, 如 \overline{ij} 边平行于 Y 轴, 则 (17) 式中第一式应改为:

$$(x_p - x_i)(x_m - x_i) \geq 0 \quad (17')$$

余之类推。

公式(16), (17)和(17')就是本文所述样条函数方法的基本公式。经实际使用证明, 该方法是比较有效的。当然也可用其它形式给出判别条件, 此处不再赘述。

前面给出的平面拟合公式和样条函数公式都是从原片算到新片, 若要从新片计算到原片, 只需把公式等号两边的控制点坐标位置对换即可。

五、影像灰度重采样

前面导出的几何校正公式是把原片像元投影到新片上, 就是说, 在原片上的任一点, 用前面建立的对对应关系, 可以找出它在新片上的坐标。为了恢复成图像, 还需要把影像灰度值赋给该点。但经过像元位置空间变换以后, 在新片上必然会出现“空”的坐标点, 或几个像元挤压在一起的现象, 这就需要进行灰度的重新排列, 才能得到满意的图像。此即为影像灰度重采样(影像重构)。本文采用样条函数方法来解决这一问题。

重采样过程是几何校正过程中节省内存和减少机时的关键环节。文中采用快速查询分块调入的方法, 较好地解决了这一问题。

重采样的计算机实现, 包括两个步骤, 一是由新片到原片的像元位置变换; 二是对新片像元进行灰度赋值。具体做法是:

(1) 把原片分成适当大小的矩形网格, 利用前面讨论的方法算出网格点在新片上的坐标, 于是新片也相应地被分成了网格。

(2) 把每个四边形网格分成两个三角形, 并对三角形排序。

(3) 建立原片三角形与相应的新片三角形之间的插值公式。

(4) 对于每个三角形内的点, 用相应的插值公式进行位置坐标变换。

(5) 把新片分成若干块, 针对每块计算出它在原片的覆盖面, 然后分块调入内存, 进

行处理,以节省内存和减少 I/O 调用时间。

(6) 根据数据调入顺序,把三角形进行排序,以缩短查询时间。

(7) 采用最近邻域法进行灰度赋值。这对于国土卫星图像可以得到满意的结果。

六、数字高程模型

地面高程对几何校正精度的影响往往是不可忽视的,特别是对地形复杂的地区,尤为严重。为了适应前面讨论的几何校正模型,本文用样条函数方法,在原片上建立像元所对应的数字高程模型。其公式如下。

若

$$\begin{cases} P_m \cdot \text{sign}(y_p - A_{ij}x_p - B_{ij}) \geq 0 \\ P_j \cdot \text{sign}(y_p - A_{mi}x_p - B_{mi}) \geq 0 \\ P_i \cdot \text{sign}(y_p - A_{im}x_p - B_{im}) \geq 0 \end{cases}$$

成立,则有

$$h_p(x_p, y_p) = \varphi_i h_i + \varphi_j h_j + \varphi_m h_m$$

式中 $\varphi_i, \varphi_j, \varphi_m$ 和 P_i, P_j, P_m 与式(16)和(17)中相同。 h_i, h_j, h_m 为三角形顶点处的地面高程。

七、结 束 语

我们利用上述方法,先后对 1983 年宝钢地区和 1985 年北京地区的国土卫星图像进行了几何处理,上述两个子区均位于原片棱镜扫描角达 45° 的范围内,几何畸变非常严重。经处理后,两幅图像的图面均方根误差达到 50m,基本接近地标点选取、量测的误差。实践证明,该方法对国土卫星图像几何失真的恢复是行之有效的。

参 考 文 献

- [1] 席少霖、赵风治,最优化计算方法,上海科学技术出版社,1983年。
- [2] Robert B. Forrest, Simulation of Orbital Images—Sensor Geometry Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 47, No. 8, Aug. 1981.
- [3] Guo Zhaozeng, Duan Yongli, Li Li, Geometric Distortion Correction for Satellite Panoramic Pictures, BISRS' 1986, Beijing.
- [4] Michael Jackson, Clifford Gleave, George Hoffman and David Ackerman, A Parametrization of Theitek KA-80A Panoramic Camera, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 48, No. 5, May. 1982.
- [5] 方俊,地图投影学,科学出版社,1957年。
- [6] 刘林,人造地球卫星在临界角附近运动的解,天文学报,15(2),1974。
- [7] 刘林,一种人造地球卫星的摄动计算方法,天文学报,16(1)1975。

附录 A 坐标系

A1 混合坐标系 X_0

原点 O : 地球质量中心

Z_0 轴指向 t 时刻真极; X_0 轴指向假想春分点 ρ , 此点在 t 时刻的真赤道上, 并在真春分点 ρ 东边角距 $\mu + \Delta\mu$ 处; Y_0 轴在其赤道面上, 向东组成右手螺旋系统。其中 μ 是坐标历元 1950.0 到 t 时刻的赤经差。 $\Delta\mu$ 是 t 时刻的赤经章动。

A2 瞬时地心坐标系 X_s

原点 O : 地球质量中心

X_s 轴指向经度 0° ; Z_s 轴指向瞬时北极; $O-X_s Y_s Z_s$ 构成右手坐标系。

A3 轨道坐标系 X_o

原点 O : 卫星质量中心

Z_o 轴指向地心; X_o 轴沿飞行方向(飞行方向与 Z_o 轴垂直); $O-X_o Y_o Z_o$ 构成右手系。

A4 卫星本体坐标系 X_b

原点 O : 卫星质量中心

X_b 轴、 Y_b 轴和 Z_b 轴分别取卫星的三个主惯量轴, 且 X_b 轴沿纵轴方向。 $O-X_b Y_b Z_b$ 构成右手系。

A5 瞬时摄影坐标系 X_p

原点 O : 投影中心

Z_p 轴为像元理想位置(无像移补偿)和透视中心连线, 并指向地面, 当 Z_p 轴指向星下点时, X_p 轴与跑片方向垂直, $O-X_p Y_p Z_p$ 构成右手系。

附录 B 坐标变换矩阵

B1 从 X_s 到 X_0 的变换

$$[M_1] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos U & \sin U & 0 \\ -\sin U & \cos U & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos I & \sin I \\ 0 & -\sin I & \cos I \end{bmatrix} \\ \cdot \begin{bmatrix} \cos Q & \sin Q & 0 \\ -\sin Q & \cos Q & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

式中 Q 是升交点和 OX_s 轴夹角, I 是轨道倾角, U 是卫星从升交点起算的轨道角(幅角)。

B2 从 X_o 到 X_b 的变换

$$[M_2] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi \\ 0 & -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

式中 φ 是滚动角, θ 是俯仰角, ψ 是偏航角。

B3 从 X_b 到 X_p 的变换

$$[M_3] = \begin{bmatrix} \cos \nu & \sin \nu & 0 \\ -\sin \nu & \cos \nu & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix}$$

式中: $\alpha = -\frac{y_i}{f}$; f 为相机焦距; y_i 为任一像元像坐标; $\beta = \text{tg}^{-1}\left(\frac{x_i}{f}\right)$; $x'_i = x_i + 2(n-1)f \sin(\eta \cdot \alpha)$; x_i 为任一像元像坐标; n 为折射率; η 为比例系数; ν 为走片方向倾斜角。

The Simulation of Satellite Imaging Process and Distortion Correction

Guo Zhaozeng He Zhiqin Li Lingzhi
Ju Tao Meng Bo

(Beijing Institute of Satellite Information Engineering)

Abstract

Based on the distortion analysis of satellite panoramic images, a new geometric correction method is proposed in this paper.

Three main points are included in the method:

1. The mathematic simulation of satellite imaging process for systematic errors correction.

* Coordinate system transformation

* Powell optimization

2. Polynomial method for random distortions correction.

3. Image reconstruction

Key words Satellite imaging image distortion Geometric rectification