

# 利用共线方程对空间实验室影象 进行数字几何纠正

舒 宁

## 摘要

本文论述了利用共线方程对空间实验室影象实施数字几何纠正的理论依据、数据准备、外方位元素解求过程中参数的确定及锚点纠正法的可行性和纠正精度，提出了纠正过程中几个必须注意的环节，以提高精度，缩短机时。同时还介绍了自编软件包的组成。

**【关键词】** 共线方程；锚点纠正法；投影差分析；数字地面模型；切平面坐标系；邻带坐标换算

## 1 试验区域的基本情况及投影差分析

装载在美国航天飞机空间试验室上的量测摄影机于1983年12月2日在我国西藏地区拍摄的彩红外像片(摄站高程为247 700m，主距为305.123mm)引起我国摄影测量工作者的很大兴趣。由于这种摄影如同航空摄影一样，也是框幅式的，航向重迭80%，因此就有可能进行测图尝试。其数字几何纠正方法亦可采用空间后方交会共线方程法。

为了研究用严格公式纠正航天遥感影象，我们选取了像幅内一幅1:10万地形图的影象窗。但要进行数字纠正，首先必须将彩红外底片数字化。在NOVA-SCANDIG扫描鼓上以50μm的扫描孔经数字化后，由于像片比例尺为1:82万，所以数字化影象象素地面分辨力为41m。

试验区域为西藏班戈县境内西扎乡及其周围邻乡的一部分，面积为44×34km<sup>2</sup>，系最邻近图廓线的公里格网线所圈定的范围。这个地域内的高差为1 100多米。像底点就在覆盖这个地区的影象窗的最北部。

之所以要采取严格公式进行纠正，是由于地形起伏、地球曲率所造成的像片投影差比较大。下面对投影差作一分析。

若取离像底点的距离为30mm，高差为1 000m的像点，据地形起伏引起的投影差公式

$$\delta h = r \cdot h/H,$$

本文1987年12月15日收到。

由于  $H$  定为 243 000m，有  $\delta h$  为 0.12mm，相当于地面上 98.4m，那么在 1 : 10 万图上就是 0.984mm，是成图允许误差的两倍多，所以这种影响必须考虑。这只是在试验区内的投影差估计。若考虑整个像幅，由于底点附近高程在 4 600m 左右，而像幅所涉地区南端念青唐古拉山高达 7 000m 以上，若以  $r = 100$ mm，高差  $h = 2 000$ m 计，则  $\delta h = 0.82$ mm，在 1 : 10 万图上它相当于 6.724mm 的位移。所以地形所造成的投影差是必须加以纠正的。即便在试验区，这种投影差也是十分显著的，故数字纠正必须采取严密公式，即

$$(x - x_0) = -f \frac{a_1(X - X_s) + b_1(Y - Y_s) + c_1(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)};$$

$$(y - y_0) = -f \frac{a_2(X - X_s) + b_2(Y - Y_s) + c_2(Z - Z_s)}{a_3(X - X_s) + b_3(Y - Y_s) + c_3(Z - Z_s)}.$$

这一公式是建立在地球曲率影响很小情况下的航片构像几何公式。然而空间试验室像片是在航高为 240km 左右的高空摄取的，像幅所涉地域范围大约为  $185 \times 185 \text{ km}^2$ ，如同陆地卫星影象，地球曲率的影响不能不考虑。它所造成的投影差估算公式为

$$\delta e = -\frac{r^3}{2R} \cdot \frac{H}{f^2},$$

$R$  为地球半径，这里按 6 400km 算。那么当  $r$  为 100mm 时，有  $\delta e = 0.204$ mm，在 1 : 10 万图上就是 1.673mm，可见地球曲率所造成的投影差很大。在采取共线方程法实施数字纠正时，公式中的地面坐标系统必须采取切平面直角坐标系。当选取控制点以解算外方位元素时，必须将地图上的高斯坐标转化为以底点附近某点为切点的切平面直角坐标系坐标。

虽然在试验区内地球曲率所引起的投影差可忽略不计（当  $r = 30$ mm 时  $\delta e$  为 0.006mm，在 1 : 10 万图上只是 0.049mm），但解算外方位元素须据均匀分布于像幅内的控制点进行，故必须考虑高斯坐标系到切平面坐标系的坐标换算。

## 2 基本数据的准备

数字化后的影象坐标系统是由行、列表示的，与像片坐标系统并非一回事。而共线方程式中所要求的是像片坐标，这就要进行坐标换算，或者说重心化。在空间试验室像片检定说明书上已经写明像主点、框标点的 PPS 坐标（即像主点坐标系），这些坐标即常规的像片坐标系统坐标。由于说明书还写明了像主点自检校参数，即内定向参数，故对 PPS 坐标还须作修正。在量测了框标的影象坐标后就可计算出影象坐标与像片坐标之间的换算系数。在 ARIES-Ⅲ 图象处理系统监视屏幕上显示 4 个包含框标的影象窗，读出框标的影象坐标，加上其像片坐标同时键入计算机，建立一个框标坐标文件，即完成上述两个坐标系统转换的准备工作。依框标坐标文件经计算得 4 个框标点的拟合中误差为

$$m_x = 0.032 \text{ mm}, m_y = 0.030 \text{ mm},$$

均为 0.6 个象素。

如前所述，利用共线方程必须在切平面坐标系统内进行。那末首先需要确定这一坐标系统的原点位置。从理论上讲，它应是底点的位置。利用底点四周若干控制点的多项式拟合是可以解求的，但只能得到平面坐标，其高程值仍需在地形图上量测，这样得到的高程是不精确的，实际的处理方法可在地形图上底点附近找三角点，或高程注记点，这样得到的高程准确。

说明书上无航高记录。由试验解算的航天飞机摄站高程值为 247 761.143m，在确定切平面坐标原点后，即可得到航高初始值。

控制点的选取是在 1:10万图上进行的。在西藏地区，这是比例尺最大的图。像片覆盖地区涉及 30 张 1:10万图，跨两个 6 度带（第45、46带）。在地形图上量取坐标后还需将第45带的坐标换算到第46带，为此需有专门的坐标换带计算程序。控制点的像片坐标是通过量取其影象坐标换算而得。在图象处理系统监视屏幕上量取控制点影象坐标是比较容易做到的，影象可通过控制板缩放，以利量测影象坐标时，使量测误差控制在半个象素左右。试验中共量取 61 个控制点坐标，其高斯坐标经换带计算统一到第46带，而后键入计算机，建立控制点文件。

利用共线方程式实施纠正是为了解决地形起伏所致投影差的影响，进行空间后交计算时必须有高程数据，因此必须对地形图作数字化工作。在数字化桌上由专门的程序控制，将等高线、高程注记点及三角点进行数字化，等高线跟踪数字化的密度依数字高程模型（DEM）栅格数据间距而定。试验区域为 8-46-25 图幅内一个矩形地区，要求 DEM 间距 200m。为此，在等高线密集处，仅将计曲线数字化，而在河谷稀疏处甚至需要人工补加等高线。数字化的结果是两个数据文件，一为等高线矢量型数据文件，二为散列点坐标文件，然后据此产生 DEM。

### 3 外方位元素的解算

利用共线方程实施几何纠正的关键之一是将外方位元素解算出来。除了选取控制点作解算的准备外，还有 3 项参量必须确定：第 1 是外方位元素的初值；第 2 是迭代解算的限差值；第 3 是迭代解算的次数。

确定外方位元素的初始值，主要的是解决  $\kappa$  的初值。一般  $\varphi$ 、 $\omega$  的初值赋零。为了确定  $\kappa$  的初值，首先选取大致分布在像片坐标系四角的 4 个控制点，在切平面坐标系统内按一次多项式拟合，得到

$$\begin{aligned} X &= a_0 + a_1 x + a_2 y, \\ Y &= b_0 + b_1 x + b_2 y, \end{aligned}$$

则  $\kappa_0 = \arctg\left(\left|\frac{SN}{CS}\right|\right)$ ，

其中

$$SN = \left( \frac{b_1}{DS} - \frac{a_2}{DP} \right) / 2, \quad CS = \left( \frac{a_1}{DS} + \frac{b_2}{DP} \right) / 2,$$

$$DS = \sqrt{a_1^2 + b_1^2}, \quad DP = \sqrt{a_2^2 + b_2^2}.$$

且  $\kappa_0 = \begin{cases} \kappa_0, & \kappa_0 \text{ 在第一象限;} \\ \pi - \kappa_0, & \kappa_0 \text{ 在第二象限;} \\ \pi + \kappa_0, & \kappa_0 \text{ 在第三象限;} \\ 2\pi - \kappa_0, & \kappa_0 \text{ 在第四象限.} \end{cases}$

确定  $\kappa_0$  在何象限由上式中  $SN$  (作为  $\kappa_0$  的正弦近似值) 和  $CS$  (作为  $\kappa_0$  的余弦近似值) 来判断。

迭代限差值由下式确定：

$$\Delta\alpha = 0.1 \times PR/H,$$

其中  $PR$  为象素分辨力,  $H$  为航高。根据 1 : 10 万成图要求, 0.4mm 相当于地面 40m, 正好是数字化影象的一个象素, 那么在解求外方位元素过程中就应要求一个更小数量级的精度, 即 0.1 个象素, 故  $\Delta\alpha$  由上式确定。试验中  $\Delta\alpha$  为  $1.61 \times 10^{-5}$ , 当  $d\kappa$ 、 $d\omega$ 、 $d\varphi$  值小于  $\Delta\alpha$  时即可停止迭代。

迭代次数定为 10。根据文献 [1], 当  $m_x = m_y \leq 5 \mu\text{m}$  时, 可取  $2.91 \times 10^{-5} < \Delta\alpha < 2.91 \times 10^{-4}$ , 一般迭代次数为 3 ~ 4 次。但文献指的是航空像片后方交会计算, 这里是航天摄影资料, 外方位元素初始值的确定方式不完全一样, 故在试验中将迭代次数定为 10, 当  $\kappa$ 、 $\omega$ 、 $\varphi$  的改正值收敛较慢时, 迭代 10 次即可结束。

上述 3 项参数确定之后, 开始解求外方位元素。此次试验解求时用了 15 个控制点, 其拟合残差及中误差如下 (单位: mm) :

点号	DX	DY	点号	DX	DY
1	0.039	0.021	9	0.017	0.001
2	-0.039	-0.007	10	0.030	0.009
3	0.019	0.032	11	0.016	0.027
4	0.005	-0.049	12	-0.044	-0.004
5	-0.016	0.016	13	0.037	-0.010
6	-0.027	0.009	14	-0.028	0.030
7	0.003	-0.030	15	-0.008	-0.003
8	-0.004	-0.038			

$$m_x = 0.0259, \quad m_y = 0.0237.$$

在 22 个检查点上的残差及中误差为:

点号	DX	DY	点号	DX	DY
1	0.039	0.031	12	0.033	0.070
2	-0.082	0.017	13	0.026	0.042
3	0.090	0.037	14	0.058	-0.049
4	0.057	0.057	15	-0.008	-0.038
5	-0.022	-0.090	16	-0.042	0.054
6	-0.069	-0.050	17	0.096	0.014
7	-0.085	-0.088	18	-0.074	-0.010
8	0.060	-0.008	19	-0.086	-0.054
9	-0.027	-0.046	20	0.012	0.056
10	-0.051	0.032	21	0.082	0.074
11	0.022	0.040	22	0.062	-0.038

$$m_x = 0.060, \quad m_y = 0.050.$$

由15个控制点解算外方位元素，得到 $\varphi$ 、 $\omega$ 、 $\kappa$ 的改正值为

$$d\varphi = 0.78 \times 10^{-5}, d\omega = 0.66 \times 10^{-5}, d\kappa = 0.18 \times 10^{-5}.$$

## 4 锚点纠正

若利用共线方程逐点纠正是十分耗时的，且没有必要。在外方位元素解算出来之后，可采取在锚点上按共线方程法纠正，其它点则以邻近的4个锚点作控制点，以多项式进行纠正的方法。

锚点间距定为2 000m，即间隔50个象素。这里实际上是确定了一个格网，格网点按共线方程纠正，得到其影象坐标和高斯坐标，格网内的点再按4个邻近格网点计算一次多项式系数以进行纠正。4个锚点的拟合中误差相当小，80%的中误差不超过5  $\mu\text{m}$ ，最小的仅0.0004个象素。超过5  $\mu\text{m}$ 最大的是0.93个象素（仅一处），其余均小于0.65个象素，其中大部分在0.1~0.2个象素之间。所有锚点的拟合中误差为： $m_x = 0.038$ （象素）， $m_y = 0.067$ （象素）。

完成纠正之后，为了进一步检查精度，在已纠正的影像上选取检查点作一次多项式拟合，其结果如下（单位：m）：

点 号	DX	DY	点 号	DX	DY
1	29.2	6.1	4	27.7	32.7
2	-34.6	25.8	5	-19.8	0.8
3	-6.5	-38	6	3.8	-30.4
$m_x = 21.4, m_y = 19.0$					

在纠正后的影象窗中选取检查点是比较困难的，故这里只选取了6个点作为检查点，其中误差为20m，即1/2个象素。由此可见，这一纠正精度可以满足1:5万成图要求，因为它基本上处于1:5万图上0.4mm的允许误差范围内。但由于西藏地区最大比例尺地形图只有1:10万，故未能实施。

## 5 软件包的组成

利用共线方程实施纠正所用到的程序都是自编的，并非图象处理系统原有软件。因此，纠正的成功既检验了程序，又充实了图象处理系统。

软件的组成包括两个主程序，18个子程序。

**主程序 1：CLRCT**

功能：

- 1) 输入有关参量如航高、主距、切平面坐标原点的高斯坐标、影象文件的参数及控制点文件等；
- 2) 控制点的挑选、外方位元素的解算、检查点上的计算；
- 3) 锚点纠正、记录锚点坐标；
- 4) 多项式纠正。

### 主程序 2: PLRT

功能: 在读入锚点坐标文件后的多项式纠正, 可加上公里格网。

#### 子程序:

- ① CRDNTTR: 坐标转换计算 (高斯坐标系 $\leftrightarrow$ 地理坐标系 $\leftrightarrow$ 切平面坐标系);
- ② POLCOEFF: 多项式拟合, 系数解算;
- ③ POLTRANSF: 根据多项式系数计算所需要的坐标 (或象方、或物方);
- ④ EECOEFF: 误差方程式系数的计算;
- ⑤ COLTRANSF: 后交计算;
- ⑥ ORTHMTR: 余弦矢量的计算;
- ⑦ PIVINV: 矩阵求逆计算;
- ⑧ MULTMTV: 矩阵相乘计算;
- ⑨ NORMAL: 法方程系数解算;
- ⑩ RESAMP: 灰度重采样计算;
- ⑪ NEWGRAD: 计算或键入输出影象范围;
- ⑫ KILOGRAD: 加上公里格网;
- ⑬ READBLK: 读入盘文件一个或几个记录;
- ⑭ MTFUNC: 磁带读写;
- ⑮ MAXMIN: 根据多项式计算内、外存交换的行界 (最大和最小行号);
- ⑯ CHAREQ: 键入字符的核对;
- ⑰ STRNAM: 自动建立文件名;
- ⑱ CHANNEL: 磁带机选择。

除上述程序外, 还有两个部分的软件。其一是地图数字化软件, 主要包括: DIG——等高线及高程注记点数字化; DFUMW, TWDGMP——实现矢量数据到栅格数据的转换; DTMTR——将 DTM 文件行序倒置。其二是图象处理系统上已有的程序 GC, 供选取控制点。

## 6 几个值得注意的问题

共线方程法几何纠正的软件化充实了现有的图象处理系统, 解决了在需要消除因地形起伏所致投影差影响时的实施问题, 达到了预定的目的。但要使软件进一步完善, 使利用共线方程法进行纠正时的一些环节更趋合理, 尚有以下几个问题值得注意:

#### 1) 选取控制点时, 影象坐标可取子象素

此次选取控制点时, 是利用屏幕显示方式进行的, 屏幕上点的坐标的显示均为整数。然而在选点时, 往往有光标向左移一个象素似乎差了半个象素; 向右移一个象素又似乎多了半个象素的情况。当然也包括上、下移动比较的情况。以整数记录影象坐标已经感到有点误差, 而这个误差可以人为地加以修正。由于控制点坐标文件是键入的, 完全可以以子象素来记录控制点影象坐标, 这样是可能改善控制点精度的。

此外, 地形图坐标量测时, 由于西藏地区最大比例尺地形图只有 1:10万, 故只能在 1:10万图上量测, 倘有较大比例尺图时, 是应该在较大比例尺图上量取控制点坐标的。

## 2) 内外存交换问题

由于影象文件往往较大，不能全部读入内存，在重采样计算灰度内插时，内外存数据交换就成了大问题。此次试验中，每计算锚点格网中的一个方格时，都要计算确定须读入的影象窗的起始行和最后一行，然后据此读入灰度数据。整个影象纠正耗时 1 小时。原始影象为 1950 行，1600 行，纠正得 850 行，1104 列。看来内外存数据交换量太大，占机时太多，不甚理想。这种方法在旋角  $\kappa$  为  $50^\circ$  左右的情况下是不得已的。在  $\kappa$  角较小的情况下，可按图 1 的方法读入，即按两行锚点所需的原始数据（长虚线圈出的部分）输入。

在  $\kappa$  角较大的情况下，如此次试验，锚点数为  $18 \times 23$ ，内外存交换量为  $17 \times 22$  次（374 次），若按图 2 之方式，即每  $3 \times 3$  个锚点所需原始数据输入一次，就可减至原来的  $1/4$ ，即大约 90 次左右就够了，如此计算时间可望大大减少。

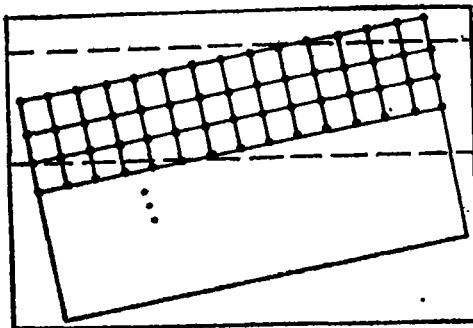


图 1

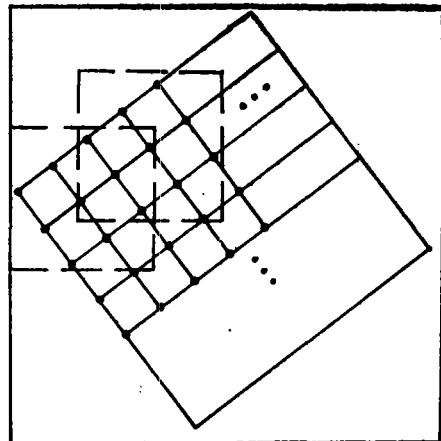


图 2

## 3) 重复计算问题

4 个锚点组成的一个“块”，试验中每块  $50 \times 50$  个点，由于与邻块有“接边”处，故至少有 100 个点（四角上的块）重复计算，当中的块则有 200 个点重复计算。按当中的块计，有  $200 \times 15 \times 20$  即 6 万个点重复了计算，这也是耗时的原因，软件中可考虑减少这样的重复。

## 4) 锚点多项式拟合问题

在锚点块内进行多项式纠正时，须以 4 个锚点作控制。试验中在作多项式拟合时，取一次多项式作纠正数学模型，这仅是在  $2 \times 2 \text{ km}^2$  的范围内作旋转平移。大部分的块在锚点上的拟合误差很小，但也有个别的块锚点拟合误差较大，说明统一用一次多项式有点问题。倘若设置一误差阈值，超过者改用二次多项式，结果就会好些。这样做的问题是需要 6 个锚点，可考虑将下一块（或邻近块）的两个非邻接锚点同时用来计算多项式系数。

## 5) 扫描孔径问题

彩红外影象数字化是在 NOVA 机上作的。由于磁带机密度限制，以  $50 \mu\text{m}$  的孔径扫描只能将半幅影象数字化，记录在一盘磁带上，只有用两盘磁带才能记录全幅扫描数据。要想提高纠正精度，用更加小的孔径如  $25 \mu\text{m}$  扫描，则需 4 盘磁带，这样就由于非整幅连续扫描带来拼接误差和 4 部分影象色调的不一致。倘用 CCD 扫描输入装置，虽一个记录可达 4096 个

象素, 要整幅扫描, 还是达不到一个象素  $25\mu\text{m}$  的分辨率。因此, 最好是在 PDS 平面扫描仪上进行数字化, 才可能保证整幅扫描后一个象素为  $25\mu\text{m}$  或更小。

## 参 考 文 献

- [1] 王之卓, 摄影测量原理, 测绘出版社, 1979。
- [2] 杨凯、文沃根, 遥感多光谱扫描 (MSS) 数字影象的几何纠正, 武汉测绘学院学报, 1, 1982。

# On the Digital Geometrical Rectifications for the Spacelab Images by Using Colinearity Equations

Shu Ning

## Abstract

This paper discusses the fundamental and data preparation in digital geometric rectification for Spacelab images by using colinearity equations, the determination of the parameters in the calculation of the exterior elements, the flexibility and rectification accuracy of the "Anchor Points Rectification Approach", and several important steps in the rectification procedure for higher accuracy and the shorter CPU time.

This paper also introduces the composition of the software package concerning the rectification.

**[Key words]** colinearity equation; anchor point rectifying approach; projective error analysis; Digital Terrain Model; tangent plan coordinate system; coordinate transformation between neighbour meridional belts