

文章编号: 1007-4619 (2001) 04-0295-05

TM 图像的 SOMP 几何纠正法

任留成^{1,2}, 朱重光¹, 郑 柯¹, 曹兆丰¹, 郭 军¹, 赵 清¹

(1. 中国科学院 遥感应用研究所图像室, 北京 100101; 2. 郑州测绘学院, 河南 郑州 450052)

摘 要: 针对缺少地面控制点(GCP)的遥感影像, 探讨一种几何精纠正的新方法, 就是把空间投影理论应用于遥感图像的几何精纠正中, 利用空间斜墨卡托投影(SOMP)和少量地面控制点对遥感影像实施几何精纠正。该方法理论严密, 算法速度快捷, 适用性强。通过对广州地区的 TM 影像进行的几何精纠正实验, 该方法十分有效, 几何精纠正精度在一个像素左右。

关键词: 几何精纠正; 空间斜墨卡托投影(SOMP)方法; 少控制点的影像

中图分类号: TP751.1 **文献标识码:** A

1 引 言

遥感图像传统的几何精纠正方法不外乎多项式纠正法和共线方程式纠正法等。多项式纠正法回避了传感器成像时的实际几何状态, 直接对变形的影像进行强纠, 为了提高纠正精度, 必需选取大量的地面控制点(GCP); 共线方程式纠正法需要提供卫星的姿态参数, 或者根据一定数量的 GCP 来反演姿态参数, 然后再对图像进行纠正。上述两种方法及其纠正精度都严格的依赖 GCP, 当地面控制点不足时, 往往是纠正精度达不到要求, 有时甚至无法进行精纠正。

在卫星图像的成像过程中, 卫星的飞行、轨道的进动等都与地球的自转存在着相对运动, 使得像点与地面点的几何位置关系都与时间有关, 因此, 对于动态获取的遥感影像的几何误差, 必须建立一种动态的几何精纠正方法。SOM 投影精确地模拟了卫星动态成像的几何关系, 它使图像在扫描范围之内只需少量 GCP, 就能直接建立影像与投影之间、像点与地面点之间严格的数学关系, 它能以连续无误的比例尺表示卫星同一轨道的不同图幅的地面轨迹, 并能由已知图幅外推处于同一飞行轨道上其它未知

图幅的位置, 还能对覆盖全球的 251 圈轨道(对 Landsat 而言)的图像进行连续处理, 没有间断。特别是对缺少控制点的影像进行几何精纠正, 此方法更有效。利用此方法纠正影像, 最少需要 3 个控制点, 一般是只需要 6—10 个即能满足 2 个像元以内的精度要求。控制点点位要求尽量分布均匀。

本文采用空间斜墨卡托投影(SOMP)几何纠正法, 建立空间投影与遥感影像的严密对应关系。通过对广州地区的 TM 图像(分辨率 30 m)进行了几何精纠正实验, 选择了 22 个 GCP, 其中 6 个是参加计算的点, 其余 16 个是检查点。经实验证明, 几何精纠正精度大约在一个像元左右。

2 几何模型

卫星扫描成像是一个动态过程, 其中包括 4 种相对运动: 扫描镜摆动、卫星沿轨道运动、地球自转和轨道进动。由于这些动态因素的影响, 影像不可避免地会产生变形, 而且时间 t 成为图像点位的参数。我们假想有一动态圆柱瞬时切于卫星星下点轨迹线^[1], 直接建立扫描影像与该圆柱面的一种对应关系, 按此关系把图像记录到圆柱面上, 即可得到图像的一种数学模型。

收稿日期: 2000-08-28; 修订日期: 2000-11-12

基金项目: 中国科学院知识创新工程基金资助。

作者简介: 任留成(1963—), 男, 博士后, 中国科学院遥感应用研究所图像室, 郑州测绘学院副教授。主要研究方向是遥感图像处理 and 遥感影像制图, 发表论文 30 余篇

如图 1 所示, 动态圆柱面沿着卫星轨迹与地球相切, 并沿着它的轴以补偿速率在振动, 其速率随纬度不同而变化。该模型很好地模拟了卫星遥感成像的物理过程, 消除了卫星飞行、轨道进动、地球自转、地球弯曲等因素所造成的图像畸变影响, 能依据少量地面控制点, 直接建立图像与投影系统之间的变化关系。这种模型能以连续无误的比例尺表示卫星同一飞行轨道的不同图幅的地面轨迹, 能使同一飞行轨道的带形图幅统一在一个坐标系内。

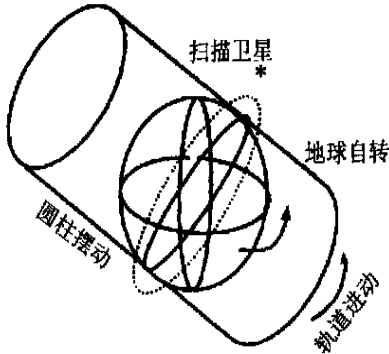


图 1 几何模拟图形

Fig. 1 geometric simulative graph

3 几何纠正的数学模型及其线性化

根据上述几何模型设计, 我们可以严格的推导出 SOM 投影公式^[2]。把卫星飞行方向作为 x 轴, 卫星轨道与赤道的交点即升交点作为原点, 按右手系构成直角坐标系。投影公式为

$$X = a \int_0^{\lambda''} \frac{HI - S^2}{(J^2 + S^2)^{1/2}} d\lambda - \frac{S}{F(J^2 + S^2)^{1/2}} \text{Intg} \left[\frac{\pi}{4} + \frac{\phi''}{2} \right] \quad (1)$$

$$Y = a \int_0^{\lambda''} \frac{S(H+I)}{(J^2 + S^2)^{1/2}} d\lambda + \frac{J}{F(J^2 + S^2)^{1/2}} \text{Intg} \left[\frac{\pi}{4} + \frac{\phi''}{2} \right] \quad (2)$$

上述公式线性化为

$$\begin{aligned} X/a = & A_0 \lambda''/2 + A_2 \sin 2\lambda''/2 + A_4 \sin 4\lambda''/4 \\ & + A_6 \sin 6\lambda''/6 - (B_1 \cos \lambda'' + B_3 \cos 3\lambda'' \\ & + B_5 \cos 5\lambda'') \text{Intg}(45^\circ + \phi''/2) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} Y/a = & C_1 \sin \lambda'' + C_3 \sin 3\lambda''/3 + C_5 \sin 5\lambda''/5 \\ & + C_7 \sin 7\lambda''/7 + (D_0/2 + D_2 \cos 2\lambda'' \\ & + D_4 \cos 4\lambda'') \text{Intg}(45^\circ + \phi''/2) \end{aligned} \quad (4)$$

公式(1)、(2)的反解变换式为:

$$A_0 \lambda''/2 = (X/a) + (Y/a)(G_1 \cos \lambda'' + G_3 \cos 3\lambda''$$

$$\begin{aligned} & + G_5 \cos 5\lambda'' + \dots - E_2 \sin 2\lambda'' \\ & - E_4 \sin 4\lambda'' - E_6 \sin 6\lambda'' - \dots \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{Intg}(\pi/4 + \phi''/2) = & (Y/a - C_1 \sin \lambda'' - C_3 \sin 3\lambda''/3 \\ & - C_5 \sin 5\lambda''/5)/(D_0/2 \\ & + D_2 \cos 2\lambda'' + D_4 \cos 4\lambda'') \end{aligned} \quad (6)$$

其中:

$$A_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{2\pi} \frac{HI - S^2}{(J^2 + S^2)^{1/2}} \cos n\lambda'' d\lambda''$$

$$B_n = \frac{1}{\pi n} \int_0^{2\pi} \frac{S}{F(J^2 + S^2)^{1/2}} \cos n\lambda'' d\lambda''$$

$$C_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \frac{S(H+I)}{(J^2 + S^2)^{1/2}} \cos n\lambda'' d\lambda''$$

$$D_n = \frac{1}{\pi n} \int_0^{2\pi} \frac{J}{F(J^2 + S^2)^{1/2}} \cos n\lambda'' d\lambda''$$

$$G_n = \frac{1}{J\pi n} \int_0^{2\pi} S \cos n\lambda'' d\lambda''$$

$$E_2 = A_2 + (C_1 G_1 + C_3 G_1 - C_1 G_3 + C_5 G_3 - C_3 G_5)/2$$

$$E_4 = A_4 + (C_3 G_1 + C_1 G_3 + C_5 G_1 - C_1 D_5)/2$$

$$E_6 = A_6 + (C_5 G_1 + C_1 G_5 + C_3 G_3)/2$$

$$S = \frac{P_2}{P_1} \left[\frac{1 + T \sin^2 \lambda''}{(1 + W \sin^2 \lambda'')(1 + Q \sin^2 \lambda'')} \right]^{1/2} \sin i \cos \lambda''$$

$$H = \sqrt{\frac{1 + Q \sin^2 \lambda''}{1 + W \sin^2 \lambda''}} \left[\frac{1 + W \sin^2 \lambda''}{(1 + Q \sin^2 \lambda'')^2} - \frac{P_2}{P_1} \cos i \right]$$

$$F = \sqrt{\frac{1 + Q \sin^2 \lambda''}{1 + T \sin^2 \lambda''}} \left[1 + \frac{u(1 + Q \sin^2 \lambda'')^2}{(1 + W \sin^2 \lambda'')(1 + T \sin^2 \lambda'')} \right]$$

$$J = (1 - e^2)^3,$$

$$Q = e^2 \sin^2 i / (1 - e^2),$$

$$T = e^2 \sin^2(2 - e^2) / (1 - e^2)^2$$

$$W = [(1 - e^2 \cos^2 i) / (1 - e^2)]^2 - 1,$$

$$u = e^2 \cos^2 i / (1 - e^2),$$

P_1 为地球自转周期, P_2 为卫星运行周期, e 为地球第一偏心率。

以上各参数可由卫星轨道参数和椭球参数求出, 详见文献[2], [3]或[4]。

4 图像纠正过程及试验结果

本文采用广州地区的 TM 影像数据做几何精纠正试验, 如图 2 为原始的 TM 影像, 像元大小是 30 m × 30 m, 像幅大小为 6466 像元 × 5728 行, 控制点选自 1:100000 地形图, 共选取 22 个参考点作为控制点和检查点, 参考点如表 1 所示, 其中选取第 5, 7, 1, 13, 15,

17, 18 点这 6 个点参加计算, 其余的为检查点。

表 1 参考点像元坐标与大地坐标对照表

Table 1 comparing list of geographical coordinates and pixel coordinates of reference point

序号	像元	行	经度	纬度
1	1697.0	184.0	113.176003	23.543786
2	2720.0	82.0	113.549758	23.516667
3	1545.0	1536.0	113.069906	23.188878
4	2228.0	1698.0	113.260603	23.116206
5	3988.0	1496.0	113.778819	23.094656
6	1585.0	2929.0	113.018767	22.814211
7	3129.0	2999.0	113.460633	22.730711
8	4391.0	2827.0	113.832383	22.721747
9	1268.0	4078.0	112.876350	22.520100
10	2523.0	4140.0	113.234831	22.450397
11	3862.0	4273.0	113.613717	22.357694
12	416.0	5538.0	112.567192	22.164653
13	4392.0	269.0	113.953572	23.404797
14	5226.0	137.0	114.200797	23.403486
15	6352.0	157.0	114.525967	23.347756
16	5116.0	1498.0	114.103369	23.044983
17	5934.0	1439.0	114.343064	23.024103
18	5254.0	2839.0	114.080483	22.680464
19	6098.0	3028.0	114.314025	22.593528
20	421.0	2843.0	112.687178	22.886047
21	1492.0	156.0	113.118175	23.560178
22	442.0	1551.0	112.750819	23.231406

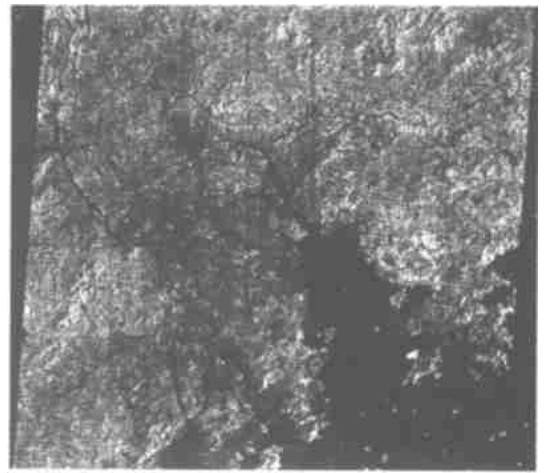


图 2 原始影像

Fig. 2 Original image

利用 SOMP 几何精纠正法的主要处理过程如图 3。

利用二次多项式建立影像坐标 (x, y) 与 SOM 坐标 (X, Y) 的对应关系为:

$$X = a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4xy + a_5y^2 \quad (7)$$

$$Y = b_0 + b_1x + b_2y + b_3x^2 + b_4xy + b_5y^2 \quad (8)$$

把表 1 中的第 3, 5, 7, 13, 17, 18 点等 6 个点代入 (3), (4) 式和 (7), (8) 式即可求得:

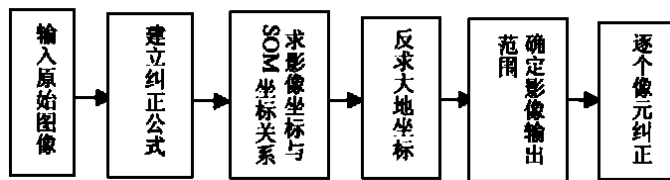


图 3 几何精纠正流程图

Fig. 3 Flow chart of geometrical precise correction

$$\begin{aligned}
 a_0 &= 2656117.302301, & a_1 &= -6.823242, \\
 a_2 &= -30.558187, & a_3 &= 0.000153, \\
 a_4 &= -0.000106, & a_5 &= 0.000291. \\
 b_0 &= -197946.215961, & b_1 &= -29.297675, \\
 b_2 &= 7.281344, & b_3 &= -0.000018, \\
 b_4 &= -0.000030, & b_5 &= -0.000210
 \end{aligned}$$

上述系数完全确定了建立影像坐标 (x, y) 与 SOM 坐标 (X, Y) 的对应关系式。把上述系数代入 (7), (8) 式, 通过表 1 中剩余的 16 个检查点验证, 16 个检查点的 SOM 坐标中误差为 7.3 m, 最大误差为 31.25 m, 说明 (7), (8) 两式正确地描述了影像坐标 (x, y) 与 SOM 坐标 (X, Y) 的对应关系。

我们可以根据 SOM 投影反解公式 (5), (6) 对原

始影像进行 GCP 加密, 在 6466 像元 \times 5728 行的图像上按 600 像元 \times 500 行均匀地加密 81 个 GCP, 然后利用这 81 个 GCP, 用 PCI 图像处理软件对图像进行几何精纠正处理, 纠正结果如图 4。

纠正精度的检查方法是: 根据公式 (1) - (8), 求出 16 个检查点在纠正后影像上的大地经纬度, 然后换算出高斯坐标 (记为 x_g, y_g , 单位是 m), 通过新高斯坐标 x'_g, y'_g 与原高斯坐标 x_g, y_g 之差得到几何纠正后的误差:

$$Dx_g = x'_g - x_g, \quad Dy_g = y'_g - y_g,$$

$$Ds = \sqrt{(Dx_g)^2 + (Dy_g)^2};$$

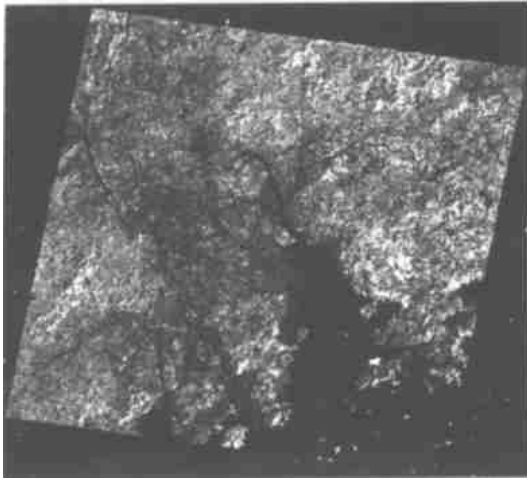


图 4 纠正后影像

Fig. 4 Corrected image

取表 1 中的前 20 个点作为计算点,利用多项式纠正法对原始图像(图 2)进行几何精纠正,得到的纠正图像为图 5。

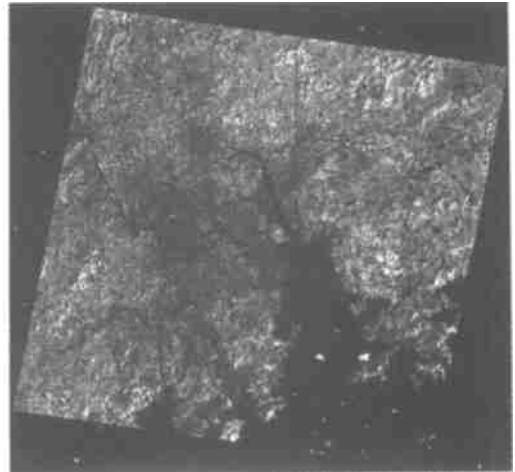


图 5 多项式方法纠正后的图像

Fig. 5 The image corrected by polynomial method

纠正精度如表 2。

表 2 纠正精度表

Table 2 List of corrective precision

序号	x_g 方向绝对误差 Dx_g	y_g 方向绝对误差 Dy_g	距离绝对误差 Ds
1	29.638733	27.248902	40.23
2	36.218178	4.315323	36.45
3	48.146758	5.042035	48.41
4	-33.033104	35.900311	48.76
6	6.3988777	24.213905	25.03
8	-23.410467	0.468231	23.42
9	-13.781623	7.256516	15.58
10	-19.315890	43.769161	47.84
11	-20.500537	41.897135	46.65
12	10.900007	-27.514207	29.58
14	-24.509196	-10.355182	26.6
16	31.190971	5.537228	31.68
19	5.978819	-34.930746	35.44
20	-34.673886	12.943192	37.0
21	-2.271490	5.601638	6.04
22	-24.66494	-22.491976	33.38

表 2 中误差的计算公式为:

$$D = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{16} (Ds_i)^2}{16}} \quad (9)$$

根据(9)式,利用表 2 中数据求得,纠正精度中误差为 35.28 m,相当于 1.17 个像元。从表 2 分析知,纠正后 x_g 方向的最大误差为 48.14 m, y_g 方向的最大误差为 43.77 m,距离向的最大误差为 48.76 m。

另外选取下列 8 个点作为检查点(表 3)。

表 3 多项式纠正检查点

Table 3 Examine points used by polynomial correction

序号	像元	行	经度	纬度
1	235	4051	112.579842	22.569681
2	4998	4292	113.939789	22.304267
3	1365	5522	112.840722	22.128506
4	2823	5628	113.253675	22.039014
5	4468	5672	113.724208	21.958467
6	6109	4378	114.253133	22.232333
7	1492	156	113.118175	23.560178
8	442	1551	112.750819	23.231406

对照 1:10 万地形图检查纠正后的精度如表 4。

表 4 多项式纠正精度表

Table 4 Precision list of polynomial correction

序号	x_g 方向绝对误差 Dx_g	y_g 方向绝对误差 Dy_g	距离绝对误差 Ds
1	33.235893	27.248903	42.98
2	16.762309	41.231134	44.51
3	5.409863	51.042333	51.33
4	-43.033123	35.209903	55.60
5	2.399012	10.222193	10.5
6	44.566091	14.874345	46.99
7	17.239834	25.577819	30.85
8	-32.660339	1.399921	32.69

5 结 语

最后,我们与多项式纠正法进行一下比较。选

根据(9)式,利用表 4 数据求得,纠正精度中误差为 41.67 m,相当于 1.39 个像元。从表 4 分析知,纠正

后 x_g 方向的最大误差为 44.57 m, y_g 方向的最大误差为 51.04 m, 距离向的最大误差为 55.6 m。

综上所述, 本文提出一种新方法, 即 SOMP 几何纠正法, 解决了缺少地面控制点(GCP)地区遥感影像的几何精纠正问题。通过空间投影与遥感影像成像过程中的严格对应关系, 建立了影像的几何纠正模型。经过实验证明, 该方法理论严密, 算法快捷, 纠正精度高, 对少控制点的影像无疑是一种有效的方法。

参 考 文 献 (References)

[1] Alden. P. Colvocoresses. Space Oblique Mercator Projection [C].

Translation corpus of remote sensing. Beijing: Mapping Publishing company, 1983.

[2] J. P. Snyder. Space oblique mercator projection mathematical development [J]. *Geological Survey Bulletin* 1518, 1980; 1-108.

[3] J. P. Snyder. The space oblique mercator projection [J]. *PE&RS*. 1978, 44(5); 585-596.

[4] Yang Q H. Principle and method of transformation of map projection [M]. Beijing, PLA Publishing company, 1989. [杨启和. 地图投影变换原理及方法. 北京: 解放军出版社, 1989.]

SOMP Geometric Exact Correction Method of TM Image

REN Liu-cheng^{1,2}, ZHU Chong-guang¹, ZHENG Ke¹, CAO Zhao-feng¹, GUO Jun¹, ZHAO Qing¹

(1. Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. Zhengzhou Institute of Surveying and Mapping, Henan 450052, China)

Abstract: Aiming at remote sensing images of less ground reference point, we discuss a new geometric exact correction method in this paper. The method applies the theory of space map projection to geometric exact correction of remote sensing images, using spatial oblique mercator projection theory and a few ground reference points to do the geometry exact correction of images. The method is of strictness theory and rapidness arithmetic throughout the experiment of TM image of Guangzhou region, the precision of exact correction is less than one pixel.

Key words: geometric exact correction; SOMP method; images with less ground reference points