

星载遥感影像几何精校正算法分析比较

李立钢^{1,2,3} 刘波^{1,4} 尤红建² 彭海良² 吴一戎²

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所,西安 710068)

(2 中国科学院电子学研究所微波成像技术国家重点实验室,北京 100080)

(3 中国科学院研究生院,北京 100039)

(4 中国科学院空间中心,北京 100080)

摘要 在系统分析星载遥感影像的多种几何精校正算法,并从必须的控制点数目、算法复杂性、适用性能等几个方面予以综合比较后,选用 RadarSat 和 QuickBirdII 影像各一幅进行实验,讨论了不同算法不同控制点数目对星载遥感影像几何精校正准确度的影响.结果表明:当获取的控制点准确度高且分布均匀时,不同算法的校正准确度总体上随控制点数目增多而提高,但当控制点达到一定程度后,则增长缓慢;三次有理函数在星载光学影像几何精校正算法中准确度最高;严密投影仿射变换模型是针对少地面控制点的星载光学影像的一种有效的校正算法;直接线性变换模型、自校验直接线性变换模型、扩展的直接线性变换模型适用于商业光学遥感影像几何精校正处理;对于星载雷达影像,距离-多普勒模型准确度稳定,用少量的控制点即可达到较高的校正准确度.

关键词 星载遥感影像;几何精校正;算法;校正准确度;综合比较

中图分类号 TN953 **文献标识码** A

0 引言

伴随着航天摄影测量技术的高速发展,雷达、光学等传感器获取的卫星遥感影像越来越多,如 QuickBird、IKONOS、SPOT、RadarSat、ENVISAT 等.如何对其进行精确定位并进行有效利用成为人们关注的问题.

鉴于卫星运行商对大多数卫星的轨道参量及成像参量都予以保密,因而直接利用构像模型进行严格几何校正是不可能的.因此在实际应用中通常基于地面控制点对星载遥感影像进行几何精校正.常用的算法有:一般多项式、有理函数模型、共线方程模型、雷达距离-多普勒模型、直接线性变换模型、自校验直接线性变换模型、扩展性直接线性变换模型、严密投影仿射变换模型等.针对这些算法、国内外许多学者进行了大量细致的研究,如 El-Manadili^[1]、F. Savopol^[2] 等采用直接线性变换模型对 SPOT 影像、IRS-1C 影像进行了几何精校正;Younian Wang^[3] 提出并采用自校验直接线性变换模型在 SPOT 影像、IRS-1C 影像几何精校正处理中取得了较高的准确度;尤红建等^[4] 对 RadarSat 影像进行了基于雷达距离-多普勒模型的校正;Zhang Jianqin 等^[5] 提出并采用基于仿射变换的严格几何模型进行了精校正处理;Tao C Vincent^[6~9]、Yong Hu^[10] 等对有理函数模型进行了讨论;朱书龙等分

析了线阵推扫式影像几何精校正算法的准确度.

本文分类比较了星载遥感影像的多种几何精校正算法,并从校正准确度、算法复杂性、控制点数目、算法特点等几个方面进行了分析.几何精校正算法涉及一般二次多项式、一般三次多项式、有理函数模型、共线方程模型、雷达距离-多普勒模型、直接线性变换模型、自校验直接线性变换模型、扩展性直接线性变换模型、严密投影仿射变换模型等.实验中分别选用 RadarSat 影像、QuickBird II 影像进行几何精校正实验.结果表明:控制点准确度高且分布均匀时,三次有理函数模型在星载光学影像几何精校正算法中准确度最高;严密投影仿射变换模型是针对少控制点的星载光学影像几何精校正的一种有效方法;雷达距离-多普勒模型校正准确度较高,适用于星载雷达影像的几何精校正处理.

1 星载遥感影像几何精校正算法

1.1 通用几何精校正算法

1.1.1 一般多项式校正算法

一般多项式几何精校正算法的具体表达式

$$\begin{cases} x = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n a_{ij} X^i Y^j \\ y = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n b_{ij} x^i Y^j \end{cases} \quad (1)$$

式中, (x, y) 为像点的像平面坐标; (X, Y) 为其对应地面点的地面坐标.这里多项式的阶数一般不大于三次,通常讨论一般二次多项式和一般三次多项式.一般多项式算法直接对影像的几何变形进行数学模

拟,因而适用于各种类型的传感器,但其未考虑地形的影像,故只适合平坦地区,准确度有限.一般多项式算法解算稳定,形式简单,在实际中利用率较高.

1.1.2 有理函数算法

有理函数模型是用有理函数逼近二维像平面和三维物空间对应关系.有理函数正解形式表示为

$$\begin{cases} r_n = \frac{p_1(X_n, Y_n, Z_n)}{p_2(X_n, Y_n, Z_n)} \\ c_n = \frac{p_3(X_n, Y_n, Z_n)}{p_4(X_n, Y_n, Z_n)} \end{cases} \quad (2)$$

式中, (r_n, c_n) 和 (X_n, Y_n, Z_n) 分别表示像点坐标 (r, c) 和地面坐标 (X, Y, Z) 经平移和缩放后的归一化坐标,取值位于 $(-1.0 \sim 1.0)$ 之间.有理函数模型采用归一化坐标的目的是减少计算过程中由于数据数量级差别过大引入的舍入误差.有理函数中多项式每一项的各个坐标分量 X, Y, Z 的幂最大不超过 3, 每一项各个坐标分量的幂的总和也不超过 3 (一般有 1, 2, 3 三种取值).分母项 p_2, p_4 的取值可以有两种情况: $p_2 = p_4, p_2 \neq p_4$.

有理函数模型不需要知道卫星轨道信息及成像参量,且其系数包含了各种因素的影响(传感器构造、地球曲率、大气折光等),因此适用于大多数传感器;但高阶有理函数模型计算复杂,通常由于参量过多会导致解的不稳定性;而且模型系数没有具体物理含义,因此校正准确度存在一定局限性.

1.2 针对雷达影像几何精校正算法

1.2.1 距离-多普勒算法

基于星载雷达图像的特点,采用斜距和多普勒方程建立斜距图像坐标 (x, y) 和地面坐标 (X_P, Y_P, Z_P) 之间的对应关系

$$\begin{cases} r_0 + x \cdot M_X = [(X_P - X_S)^2 + (Y_P - Y_S)^2 + (Z_P - Z_S)^2]^{1/2} \\ [V_X(X_S - X_P) + V_Y(Y_S - Y_P) + V_Z(Z_S - Z_P)] / (r_0 + x \cdot M_X) = (f_D \lambda)^{1/2} \end{cases} \quad (3)$$

式中, r_0 为近地点地斜距, λ 为雷达的波长, M_X 为斜距的分辨率,一般都是已知的参量, f_D 为多普勒中心频率,可以在成像处理中进行计算.

鉴于运行在高空中的卫星平台,一般运行稳定,用加速度、速度、位置状态变量就可以描述出卫星平台的运动规律.则根据牛顿力学,可以知道任意时刻的卫星位置和速度为

$$\begin{cases} X_S = X_0 + V_{X0}t + 2^{-1}a_{Xt}^2 \\ Y_S = Y_0 + V_{Y0}t + 2^{-1}a_{Yt}^2 \\ Z_S = Z_0 + V_{Z0}t + 2^{-1}a_{Zt}^2 \\ V_X = V_{X0} + a_{Xt} \\ V_Y = V_{Y0} + a_{Yt} \\ V_Z = V_{Z0} + a_{Zt} \end{cases} \quad (4)$$

时间 t 是和扫描的行密切相关的,即: $t = y/PRF$, PRF 为 SAR 的脉冲重复频率,是一个固定的已知量.于是就得到了斜距图像坐标和地面坐标之间的对应关系.

斜距-多普勒校正算法考虑了雷达成像机理,因而适合于星载雷达图像的几何精校正.但模型系数的求解需要知道一些成像参量.

1.3 针对光学影像几何精校正算法

1.3.1 共线方程算法

目前大部分光学遥感均采用线阵 CCD 传感器推扫获取地面的图像,每行影像与地面符合严格的中心投影关系,并且都有各自的外方位元素,因此图像坐标 (x_i, y_i) 和地面坐标 (X, Y, Z) 符合共线方程,其表达式为^[12]

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ -f \end{bmatrix} = \frac{1}{\lambda} M_i^T \begin{bmatrix} X - X_{Si} \\ Y - Y_{Si} \\ Z - Z_{Si} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, (X, Y, Z) 为地面点的物方空间坐标, (X_{Si}, Y_{Si}, Z_{Si}) 为第 i 行投影中心的物方空间坐标, λ 为比例因子, M_i 是由第 i 扫描行外方位角元素 $\varphi_i, \omega_i, \kappa_i$ 构成的旋转矩阵.

鉴于星载 CCD 传感器姿态平稳,因此在一定的范围内,可以近似认为外方位元素随时间线性变化.假设每幅影像的像平面坐标原点在中央扫描行的中点,则可认为各扫描行的外方位元素随 y 值线性变化,这样就可将外方位元素表示为

$$\begin{cases} X_{Si} = X_{S0} + \Delta X_S \cdot y \\ Y_{Si} = Y_{S0} + \Delta Y_S \cdot y \\ Z_{Si} = Z_{S0} + \Delta Z_S \cdot y \\ \varphi_i = \varphi_0 + \Delta \varphi \cdot y \\ \omega_i = \omega_0 + \Delta \omega \cdot y \\ \kappa_i = \kappa_0 + \Delta \kappa \cdot y \end{cases} \quad (6)$$

式中, $(X_{S0}, Y_{S0}, Z_{S0}, \varphi_0, \omega_0, \kappa_0)$ 为中央扫描行的外方位元素, $(\Delta X_S, \Delta Y_S, \Delta Z_S, \Delta \varphi, \Delta \omega, \Delta \kappa)$ 为外方位元素的一阶变化率,计 12 个参量.根据最小二乘理论,构造误差方程,每幅相邻影像至少选取 6 个控制点反算 12 个定向参量,从而求解出待校正影像相邻景的外方位元素及其一阶线性变化率.共线方程算法理论严密,充分考虑了星载光学影像的成像几何关系,因而模型的定位准确度较高.但模型的定向参量之间存在很强的相关性,导致参量求解有时不稳定.

1.3.2 直接线性变换算法

直接线性变换模型的表达式为

$$\begin{cases} x = \frac{L_1 X + L_2 Y + L_3 Z + L_4}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1} \\ y = \frac{L_5 X + L_6 Y + L_7 Z + L_8}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1} \end{cases} \quad (7)$$

式中, (x, y) 为像点的像平面坐标; (X, Y, Z) 为相应地面点的地面坐标; $(L_1 \sim L_{11})$ 为直接线性变换算法的系数. 该模型直接建立了像平面坐标系与物空间坐标的关系, 形式简单, 解算方便, 不需要内外方位元素. 但这种方法在推导过程中将动态推扫式影像等同于静态画幅式影像进行处理, 没有考虑每景影像外方位元素随时间变化的特点, 因而准确度受到一定影响.

1.3.3 自校验直接线性变换算法

自校验直接线性变换算法可表示为

$$\begin{cases} x = \frac{L_1 X + L_2 Y + L_3 Z + L_4}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1} \\ y = \frac{L_5 X + L_6 Y + L_7 Z + L_8}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1} + L_{12} xy \end{cases} \quad (8)$$

式中, (x, y) 为像点的像平面坐标; (X, Y, Z) 为相应地面点的地面坐标; $(L_1 \sim L_{12})$ 为自校验直接线性变换算法的系数. 该算法直接建立了像平面坐标系与物空间坐标系的关系, 形式简单, 解算方便, 不需要任何的传感器参量; 同时考虑了外方位元素随时间变化的特点, 增加了对像点坐标的改正, 因而准确度较高.

1.3.4 扩展的直接线性变换算法

扩展的直接线性变换算法的表达式为

$$\begin{cases} x = \frac{L_1 X + L_2 Y + L_3 Z + L_4}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1} + L_{12} x^2 \\ y = \frac{L_5 X + L_6 Y + L_7 Z + L_8}{L_9 X + L_{10} Y + L_{11} Z + 1} + L_{13} xy \end{cases} \quad (9)$$

式中, (x, y) 为像点的像平面坐标; (X, Y, Z) 为相应

地面点的地面坐标; $(L_1 \sim L_{13})$ 为扩展的直接线性变换算法的系数. 该算法是在直接线性变换模型的基础上改化而成的, 考虑了每景影像外方位元素随时间改动的特点, 因而适合处理一些未公开传感器和星历信息的高分辨率遥感影像且校正准确度较高.

1.3.5 严密投影仿射变换算法

严密的投影仿射变换模型可表示为

$$\begin{cases} \frac{f - \frac{Z}{m \cos \alpha}}{f - (x - x_0) \tan \alpha} (x - x_0) = \\ a_0 + a_1 X + a_2 Y + a_3 Z \\ y - y_0 = b_0 + b_1 X + b_2 Y + b_3 Z \end{cases} \quad (10)$$

式中, (x, y) 为像点的像平面坐标; (X, Y, Z) 为相应地面点的地面坐标; f 为投影焦距, m 为模型比例尺, 其定义为卫星飞行高度与投影焦距的比值, 一般都是已知. 侧视角 α 及 $a_0, a_1, a_2, a_3, b_0, b_1, b_2, b_3$ 是待求模型的参量, 可通过建立误差方程, 由地面控制点平差而得. 严密的投影仿射变换算法有效克服了定向参量的相关性, 故求解较稳定; 同时用较少的控制点达到较高的校正准确度.

2 星载遥感影像几何精校正算法综合比较

根据地面控制点对星载遥感影像进行几何精校正处理, 涉及的多种精校正算法可从以下几个方面予以综合分析, 如表 1.

表 1 星载遥感影像不同几何精校正算法综合比较

算法	适用传感器	对轨道和传感器参量要求	算法复杂性(影像像素个数为 N)	必须的控制点数目	准确度及其性能
一般二次多项式	通用	无	$(10 \text{ 次加法} + 16 \text{ 次乘法}) \times N$	6	适合于平坦地区, 解算简单
一般三次多项式	通用	无	$(18 \text{ 次加法} + 40 \text{ 次乘法}) \times N$	10	准确度较高, 解算复杂, 计算量大, 适用于平坦地区
二次有理函数	通用	无	$(30 \text{ 次加法} + 53 \text{ 次乘法}) \times N$	15	准确度高, 解算复杂, 过多的参量可能导致解的不稳定性. 准确度与控制点分布及地形密切相关
三次有理函数	通用	无	$(57 \text{ 次加法} + 134 \text{ 次乘法}) \times N$	30	准确度高, 解算复杂, 参量过多可能导致解得不稳定. 准确度与控制点分布及地形密切相关
斜距-多普勒模型	星载雷达	近地点斜距、雷达波长、斜距分辨率、多普勒平移参量, 一般都已知或在成像中获取	迭代求解	6	准确度较高, 考虑了雷达成像的机理, 但定向参量可能存在强相关性
共线方程模型	星载线阵 CCD	飞行高度、焦距, 一般都已知	$(20 \text{ 次加法} + 14 \text{ 次乘法}) \times (N)$	6	准确度较高, 考虑了光学成像的几何关系, 但定向参量强相关性导致了解的不稳定
直接线性变换模型	星载线阵 CCD	无	$(9 \text{ 次加法} + 11 \text{ 次乘法}) \times N$	6	准确度较高, 解算简单、求解稳定, 适合于未公开传感器信息的高分辨率光学影像处理

自校验直接线性变换	星载线阵 CCD	无	(10 次加法 + 11 次乘法) × N	6	准确度高, 解算简单, 求解稳定, 考虑外方位元素随时间变化的特点, 适合多种商业遥感光学卫星影像的几何精校正
扩展的直接线性变换模型	星载线阵 CCD	无	(11 次加法 + 13 次乘法) × N	7	准确度高, 解算简单, 求解稳定, 适合于未公开传感器信息的高分辨率光学影像处理
严密的投影仿射变换模型	星载线阵 CCD	飞行高度、焦距、一般都已知	(11 次加法 + 20 次乘法) × N	5	准确度高, 解算简单、求解稳定、考虑了线阵 CCD 成像几何, 无需传感器的信息, 是一种综合性能佳的校正模型

3 实验结果及准确度评测

基于上述星载遥感影像几何精校正算法的综合分析, 本文分别选用了星载雷达影像、星载高分辨率光学影像各一幅^[13,14]来进行实验. 通过具体数据给出了各种几何精校正算法的实验准确度, 讨论了控制点数目对校正准确度的影响.

实验一数据为北京地区的 RadarSat 影像, 图像大小为 7555 × 11378, 图像分辨率为 10 m. 从 1 : 50000 地形图上采集均匀分布控制点, 同时固定 15 个检查点以便讨论星载雷达影像不同校正算法、不同控制点数目校正准确度. 表 2 列出了实验中 RadarSat 的几何精校正准确度. 图 1 给出了不同几何精校正算法的检查点准确度随控制点数目变化关系.

从图 1 可以看出, 当获取的控制点准确度高且其分布均匀时, 星载雷达影像几何校正算法的校正准确度随控制点数目增多而提高, 但当控制点达到一定数量后则增长缓慢; 一般二次多项式(2rd Polynomial)在平坦地区取得了较高准确度; 一般三次多项式(3rd Polynomial)在实验中也获得了很高的校正准确度; 雷达距离-多普勒模型(R-D Model)

表 2 RadarSat 影像的校正准确度(单位: 像素)

校正方法	数目		X 轴中误差		Y 轴中误差	
	控制点	检查点	控制点	检查点	控制点	检查点
一般二次多项式	6	15	0.00	20.00	0.00	1.9
	9	15	1.72	2.19	1.40	8.3
	10	15	1.87	1.75	2.44	4.1
	15	15	1.89	2.41	2.47	1.92
	20	15	2.12	3.31	2.45	1.92
	25	15	1.80	3.20	2.30	1.60
	30	15	1.80	2.24	2.12	1.65
	35	15	1.80	2.05	2.13	1.78
一般三次多项式	40	15	1.88	1.33	2.02	1.76
	10	15	0.00	18.80	0.00	13.0
	15	15	0.67	3.97	1.84	3.72
	20	15	1.30	5.68	1.76	3.48
	25	15	1.39	3.47	2.04	1.98
	30	15	1.38	2.37	1.90	1.51
	35	15	1.35	2.17	1.85	1.54
	40	15	1.51	1.29	1.79	1.58

校正方法	数目		X 轴中误差		Y 轴中误差	
	控制点	检查点	控制点	检查点	控制点	检查点
雷达距离-多普勒模型	6	15	2.29	2.68	1.81	1.98
	9	15	2.13	3.18	2.87	1.95
	10	15	2.01	3.16	3.06	2.19
	15	15	1.97	3.66	3.00	2.38
	20	15	2.12	4.33	3.07	2.51
	25	15	1.89	4.05	2.80	2.49
	30	15	1.94	3.81	2.65	2.54
	35	15	1.89	3.48	2.60	2.62
二次有理函数模型	40	15	2.30	2.51	2.61	2.56
	15	15	0.30	3.59	0.16	7.61
	20	15	0.64	3.60	1.01	7.40
	25	15	0.83	4.52	1.52	4.04
	30	15	1.12	4.57	1.73	4.90
	35	15	1.30	3.94	1.67	4.82
	40	15	2.32	3.77	2.92	3.26
	三次有理函数模型	30	15	0.01	12.8	0.01
35		15	0.36	3.21	0.35	7.60
40		15	0.79	2.69	0.77	2.81

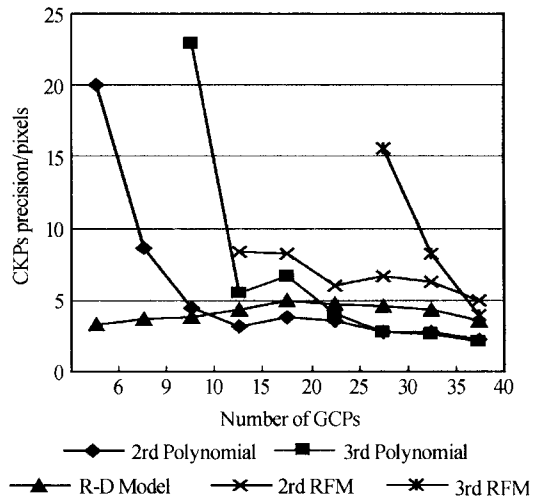


图 1 RadarSat 影像的校正准确度随控制点数目变化关系
Fig. 1 The relationship between the rectification accuracy and the number of GCPs for RadarSat

考虑了雷达的成像机理, 只需少的控制点就可达到较高的定位准确度; 二次有理函数模型(2rd RFM)和三次有理函数模型(3rd RFM)校正准确度较差且需要大量的控制点, 在星载雷达影像几何精校正处理中并没有表现出很好的优越性. 事实上这与有理函数模型纯以数学形式来反映影像变形有很大关系.

实验二选用 QuickBird II 全色影像,图像大小 20447×7721,图像分辨率为 0.65 m;所选地区基本为城区,地形平坦. 控制点、检查点通过高精度 GPS 实际采集,固定 15 个检查点以便于讨论星载光学影像不同校正算法不同控制点数量的校正准确度. 表 3 给出了实验中 QuickBird II 全色影像的几何精校正准确度,图 2 示意了不同几何精校正算法的检查点准确度随控制点数量的变化关系.

从图 2 可以看出,当获取的控制点准确度高且其均匀分布时,多种几何精校正模型的校正准确度总体上随控制点的数目增多而提高,但当控制点达到一定数目后,则准确度提高缓慢. 三次有理函数

表 3 QuickBird II 全色影像几何精校正的准确度(单位:像素)

校正方法	数目		X 轴中误差		Y 轴中误差	
	控制点	检查点	控制点	检查点	控制点	检查点
一般二次多项式	9	15	0.9	3.73	1.99	7.31
	10	15	1.06	2.07	1.93	4.7
	15	15	1.11	1.49	1.67	3.44
	20	15	1.13	1.41	1.06	2.79
	25	15	1.06	1.43	1.15	2.5
	30	15	1.10	1.36	1.39	2.31
	35	15	1.40	1.17	1.58	2.23
一般三次多项式	10	15	0	3.01	0	5.4
	15	15	0.63	1.46	1.13	3.56
	20	15	0.74	1.59	1.33	2.7
	25	15	0.84	1.36	1.43	2.23
	30	15	0.84	1.26	1.46	1.5
	35	15	1.14	1.39	1.76	1.9
直接线性变换模型	9	15	2.37	2.4	1.27	1.67
	10	15	2.36	2	1.27	1.54
	15	15	2.23	1.64	1.21	1.5
	20	15	2	1.47	1.47	1.54
	25	15	1.74	1.43	1.63	1.44
	30	15	1.6	1.34	1.8	1.49
扩展的直接线性变换模型	35	15	1.69	1.23	2.09	1.67
	9	15	1.16	2.07	0.83	3.29
	10	15	1.06	2.04	0.91	2.53
	15	15	1.36	1.93	1.21	2.36
	20	15	1.4	1.81	1.4	2.17
	25	15	1.39	1.69	1.56	1.89
自校验直接线性变换模型	30	15	1.4	1.57	1.83	1.83
	35	15	1.57	1.56	2.14	2
	9	15	1.5	2.04	3.21	3.47
	10	15	1.14	2.11	0.94	1.86
	15	15	1.36	1.93	1.2	2.33
	20	15	1.4	1.83	1.37	2.1
二次有理函数模型	25	15	1.43	1.7	1.51	1.79
	30	15	1.5	1.6	1.63	1.59
	35	15	1.66	1.6	1.83	1.9
	9	15	0.1	1.91	0.03	4.83
	35	15	0.14	0.97	0.47	0.96
三次有理函数模型	9	15	1.1	1.64	2.36	2.47
	10	15	1.01	1.64	2.67	2.1
	15	15	1.21	1.57	2.69	1.91
	20	15	1.3	1.51	2.46	1.81
	25	15	1.3	1.44	2.36	1.77
共线方程模型	30	15	1.27	1.37	2.33	1.66
	35	15	1.47	1.27	2.46	1.56
	15	15	0.01	2.47	0.07	6.7
	20	15	0.33	1.27	0.64	3.04
	25	15	0.39	1.39	0.67	1.54

校正方法	数目		X 轴中误差		Y 轴中误差	
	控制点	检查点	控制点	检查点	控制点	检查点
严密投影仿射变换模型	9	15	1.94	1.83	2.89	2.23
	10	15	1.93	1.53	2.63	2.37
	15	15	1.73	1.39	2.64	1.74
	20	15	1.61	1.44	2.46	1.66
	25	15	1.46	1.34	2.23	1.44
二次有理函数模型	30	15	1.34	1.23	2.19	1.44
	35	15	1.49	1.09	2.34	1.53
	15	15	0.01	2.47	0.07	6.7
	20	15	0.33	1.27	0.64	3.04
	25	15	0.39	1.39	0.67	1.54
三次有理函数模型	30	15	0.5	1.27	0.96	1.43
	35	15	0.56	1.3	1.03	1.37
	9	15	1.1	1.64	2.36	2.47
	10	15	1.01	1.64	2.67	2.1
	15	15	1.21	1.57	2.69	1.91
共线方程模型	20	15	1.3	1.51	2.46	1.81
	25	15	1.3	1.44	2.36	1.77
	30	15	1.27	1.37	2.33	1.66
	35	15	1.47	1.27	2.46	1.56

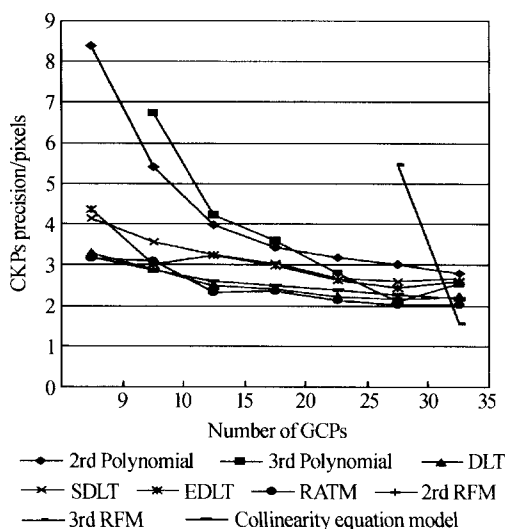


图 2 QuickBird II 影像的校正准确度随控制点数目变化关系
Fig. 2 The relationship between the rectification accuracy and the number of GCPs for QuickBird II image

模型准确度相对最高,但需要采集较多的控制点;对于平坦地区,一般二次多项式(2rd Polynomial)和一般三次多项式(3rd Polynomial)也可以达到像素级别准确度. 直接线性变换(DLT)、自校验直接线性变换(SDLT)、扩展的直接线性变换(EDLT)等模型准确度变化平稳且准确度较高,因而适用于少控制点的星载光学影像几何精校正处理. 实验同时表明:共线方程模型(Collinearity Equation Model)考虑了光学影像的成像特性,故校正准确度高,但在求解过程中有时不稳定;严密投影仿射变换模型利用

少量的控制点达到很高准确度,因而可以作为一种简单有效的校正方法在实际中应用。

5 结论

星载遥感影像通常很难得到获取影像的传感器参量及卫星轨道信息,因此直接基于严格构像模型对其进行精确定位是不可能的。实际应用中利用地面控制点对星载遥感影像进行几何精校正处理,涉及到了多种几何精校正算法。从以上理论分析和实验结果可以得出:对于星载光学遥感影像,三次有理函数模型准确度最高,但需要的控制点数目多且计算量大;严密投影仿射变换、直接线性变换、自校验直接线性变换、扩展的直接线性变换等模型需要控制点少、求解稳定、计算量小、准确度高,因而适用于少控制点星载光学影像,尤其是商业遥感影像的几何精校正处理;雷达-距离多普勒模型用少量的控制点就能得到较高的校正准确度,因而适用于星载雷达影像的几何精校正处理;多项式模型解算简单,针对多源影像,在平坦地区取得较高的准确度。事实上,星载遥感影像几何精校正的准确度不仅仅与校正算法有关,而且还受到控制点准确度、控制点分布及地形起伏等因素的影响。本文则在控制点准确度高且其分布均匀的前提下综合分析比较了多种几何精校正算法,并探讨了不同算法下的校正准确度,得出的结论对于实际应用具有一定的指导意义。控制点分布及地形起伏等对校正准确度的影响将是下一步研究的内容。

参考文献

- Novak EL, Manadlili. Precision rectification of spot imagery using the direct linear transformation model. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1996, **62**(1): 67~72
- Savopol F, Costas Armenakis C. Modeling of the IRS-1C satellite pan stereo-imagery using the DLT Model. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1998, **32**(4): 511~514
- Wang Y N. Automated triangulation of linear scanner imagery. In: Proceedings of ISPRS Work Groups I/1, I/3, IV/4 on Sensors and Mapping from Space 1999. Hanover, Germany, 1999, unpaginated CD-ROM
- 尤红建, 丁赤飏, 吴一戎. 基于 GCP/DEM 的星载 SAR 图像高精度对地定位. *电子与信息学报*, 2004, **26**(Z): 283~288
You H J, Ding C B, Wu Y R. *Journal of Electronics of Information Technology*, 2004, **26**(Suppl.): 283~288
- 张剑清, 张祖勋. 高分辨率遥感影像基于仿射变换的严格几何模型. *武汉大学学报信息科学版*, 2002, **27**(6): 555~559
Zhang J Q, Zhang Z X. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2002, **27**(6): 555~559
- Tao C Vincent, Yong Hu. Image rectification using a generic sensor model-rational function model. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2000, **XIX**(B3): 359~366
- Tao C Vincent, Yong Hu. Study of the rational function model for image rectification. The 22nd Canadian Symposium on Remote Sensing. Victoria, 2000, 22~25; 55~64
- Tao C Vincent, Yong Hu. A comprehensive study of the rational function model for photogrammetric processing. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2001, **67**(12): 1347~1357
- Tao C Vincent, Yong Hu. Use of the rational function model for image rectification. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2001, **27**(6): 593~602
- 朱书龙, 史文中, 张艳, 等. 线阵推扫式影像近似几何校正算法的准确度比较. *遥感学报*, 2004, **8**(3): 220~226
Zhu S L, Shi W Z, Zhang Y, et al. *Journal of Remote Sensing*, 2004, **8**(3): 220~226
- Yong Hu, Tao C Vincent. Updating solutions of rational function model using additional control points for enhanced photogrammetric processing. In: Proceedings of ISPRS Working Groups I/2, I/5 and I/7 on High Resolution Mapping from Space 2001. Hanover, Germany, 2001. 19~21; 243~251
- 张永生, 巩丹超, 等. 高分辨率遥感卫星应用—成像模型、处理算法及应用技术. 北京: 科学出版社, 2004. 17~20
Zhang Y S, Gong D C, et al. *The Application of High Resolution Satellite — The Imaging Model, Processing Algorithm & Application Technology*. Beijing: Science Press, 2004. 17~20
- 李峰, 胡岩峰, 曾志明, 等. 一种遥感影像基于内容检索模型的研究与设计. *光子学报*, 2004, **33**(12): 1522~1525
Li F, Hu Y F, Zeng Zh M, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(12): 1522~1525
- 胡岩峰, 刘波, 李峰, 等. 一种基于统计分析的图像变化检测方法. *光子学报*, 2005, **34**(1): 146~149
Hu Y F, Liu B, Li F, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(1): 146~149

The Comprehensive Comparison of Several Algorithms for Precision Rectification of Satellite Imagery

Li Ligang^{1,2,3}, Liu Bo^{1,4}, You Hongjian², Peng Hailiang², Wu Yirong²

¹ Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068

² Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, The National Key Laboratory of Microwave Imaging Technology, Beijing 100080

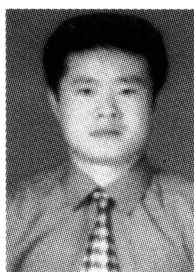
³ Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039

⁴ Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080

Received date: 2005-10-12

Abstract Ground Control Points (GCPs) which include radar imagery, optic imagery and so on are used to rectify satellite imagery precisely, because orbit ephemeris and sensor parameters are often unavailable in practical application. In this paper, different kinds of precision rectification algorithms are introduced first, then a comprehensive comparison of several algorithms is carried out from the viewpoints of GCP number, the algorithm complexity, the applicability and so on, and in the end RadarSat and QuickBirdII images are applied to test the accuracy of different precision rectification algorithms and the relationship between the accuracy and the number of GCPs. Experimental results show that the higher accuracy can be achieved with more GCPs, but the accuracy improve slowly when the number of GCPs increase to a certain extent. The accuracy of 3rd rational function model is the best for optic imagery. The rigor geometric model based on affine transform is a good algorithm for optic imagery with few GCPs. The direct linear transformation model, the self-calibration direct linear transformation model and the extensive direct linear transformation model can be used for commercial optic imagery and reach a high accuracy. For radar imagery, the accuracy of the Range-Doppler model is stable and the model achieves high accuracy with few GCPs.

Keywords Satellite imagery; Precision rectification; Algorithm; Rectification accuracy; Comprehensive comparison



Li Ligang was born in 1979. He received his B. S. degree from Northwest Normal University in 2001. Now he is a Ph. D. candidate in Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS and is studying at Institute of Electronics of CAS. His current research interest is image processing of remote sensing.