

文章编号: 1007-4619(2004)03-0220-07

# 线阵推扫式影像近似几何校正算法的精度比较

朱述龙<sup>1</sup>, 史文中<sup>2</sup>, 张艳<sup>1</sup>, 朱宝山<sup>1</sup>

(1. 信息工程大学 测绘学院, 河南 郑州 450052; 2. 香港理工大学 土地测量与地理资讯系, 香港)

**摘要:**线阵推扫式影像严格几何校正需要轨道星历参数和传感器参数,但在实际应用中有时无法得到这些数据,此时一般采用直接线性变换、一般多项式、改进多项式、有理函数等模型进行近似几何校正。在简要介绍了几种近似算法的数学模型后,重点讨论了利用 SPOT 和 IKONOS 图像所进行的各种实验分析和精度比较。结果表明:有理函数模型精度最高,可达到子像素级;直接线性变换模型的精度在控制点分布状态良好时可达 2 个像素;一般多项式模型的精度,对于平坦地区的影像大约在 1 个像素左右,但受地形起伏的影响较大;改进多项式模型的精度随多项式的阶数变化而变化,几乎不受地形起伏的影响,选择适当阶数的改进多项式模型可以获得较高的几何校正精度。此外,在选择某一种方法进行线阵推扫式影像近似几何校正的时候,还应该综合考虑精度、算法复杂性、对已知数据的要求等多种因素。实验表明:对于线阵推扫式影像的近似几何校正,改进多项式模型精度较高、计算量较小、对控制点要求较低,是一种较好的近似几何校正算法。

**关键词:**线阵推扫式影像;几何校正;精度比较;共线方程模型;直接线性变换模型;一般多项式模型;改进多项式模型;有理函数模型

中图分类号: TP751.1 文献标识码: A

## 1 引言

线阵推扫式影像是一系列垂直于航线的影像线构成的连续影像带,其中每条影像线由线阵列传感器获得。SPOT 卫星的 HRV, MOMS-1 卫星的 MESSR、JERS-1 的 OPS, Space Imaging 公司的 IKONOS、IRS-1C 等都可以提供这种影像。线阵推扫式影像几何关系稳定,影像质量高,可用于遥感制图领域。

利用线阵推扫式影像进行遥感制图时,必须经过几何校正。如果按照共线方程模型进行严格几何校正,虽然精度很高,但必须已知轨道星历参数和传感器参数。在实际应用中,有时无法得到这些数据,因此只能采用近似校正方法。适用于遥感影像近似几何校正的算法有:直接线性变换、一般多项式、改进多项式和有理函数模型。许多学者对这些近似几何校正算法进行了研究,如 Yasser<sup>[1]</sup>和 Savopol<sup>[2]</sup>利用直接线性变换模型进行 SPOT 影像的几何校正和

IRS-1C 影像的三维重建; David<sup>[3]</sup>、Jay<sup>[4]</sup>和 Baltasavias<sup>[5]</sup>对 SPOT 等线阵影像进行多项式校正,并研究了不同类型控制点对精度的影响; Vincent<sup>[6-8]</sup>、Dowman<sup>[9]</sup>、Fraser<sup>[10]</sup>及 Clive<sup>[11]</sup>对有理函数模型在 IKONOS 影像几何校正和三维重建中的应用进行了研究。

对于线阵推扫式影像,哪种近似几何校正算法精度最高?到目前为止,还没有文献对其进行系统性的比较研究。在本文中,作者分别利用直接线性变换、一般多项式、改进多项式和有理函数模型等 4 种算法对 SPOT 和 IKONOS 两种线阵推扫式影像进行了近似几何校正实验,并重点对精度、计算量等指标进行了比较和分析。结果表明:有理函数模型可达到子像素级的高精度;直接线性变换模型在控制点分布状态良好时可达 2 个像素左右的精度;一般多项式模型的精度受地形起伏的影响较大,对于平坦地区的影像精度大约在 1 个像素左右;改进多项式模型的精度随多项式的阶数变化而变化,几乎不受地形起伏的影响,选择适当阶数的改进多项式模型可以获得较高的精

收稿日期: 2002-11-01; 修订日期: 2003-01-23

基金项目: 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室开放基金项目资助。

作者简介: 朱述龙(1964-),男,1997年6月在解放军测绘学院获博士学位,现为解放军信息工程大学测绘学院教授。主要从事遥感信息处理的理论和应用研究,已发表论文30余篇,出版著作3部,获军队科技进步一等奖一项,二等奖两项。

©1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

度。此外,在选择线阵推扫式影像近似几何校正的算法时,还应该综合考虑精度、算法复杂性、对已知数据的要求等多种因素。实验结果表明:对于线阵推扫式影像的近似几何校正,改进多项式模型精度较高、计算量较小、对控制点的数目和分布要求较低,是一种较好的近似几何校正算法。

## 2 线阵推扫式影像几何校正算法

### 2.1 严格几何校正算法优缺点

线阵列推扫式影像是行中心投影影像,即同一扫描行上的像点具有相同的外方位元素,不同扫描行之间的像点具有不同的外方位元素。该影像第  $i$  扫描行上任一像点与其对应地面点之间满足共线方程:

$$\left. \begin{aligned} x_i &= -f \frac{a_1(X - X_{si}) + b_1(Y - Y_{si}) + c_1(Z - Z_{si})}{a_3(X - X_{si}) + b_3(Y - Y_{si}) + c_3(Z - Z_{si})} \\ 0 &= -f \frac{a_2(X - X_{si}) + b_2(Y - Y_{si}) + c_2(Z - Z_{si})}{a_3(X - X_{si}) + b_3(Y - Y_{si}) + c_3(Z - Z_{si})} \end{aligned} \right\} (1)$$

其中  $(x_i, 0)$  为第  $i$  扫描行上像点的像平面坐标,  $(X, Y, Z)$  为其对应地面点的大地坐标,  $(X_{si}, Y_{si}, Z_{si})$  为第  $i$  扫描行的摄站坐标,  $(a_i, b_i, c_i)$  为旋转矩阵中的元素,由第  $i$  扫描行的外方位角元素  $(\varphi_i, \omega_i, \kappa_i)$  确定,具体关系参阅文献[12]。

在实际应用中,要确定每个扫描行影像的外方位元素是比较困难的。但线阵列推扫式影像成像过程中,姿态比较平稳,一般认为每个扫描行影像的外方位元素随时间线性变化,即:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_i &= \varphi_0 + \dot{\varphi} \cdot y \\ \omega_i &= \omega_0 + \dot{\omega} \cdot y \\ \kappa_i &= \kappa_0 + \dot{\kappa} \cdot y \\ X_{si} &= X_{s0} + \dot{X}_s \cdot y \\ Y_{si} &= Y_{s0} + \dot{Y}_s \cdot y \\ Z_{si} &= Z_{s0} + \dot{Z}_s \cdot y \end{aligned} \right\} (2)$$

其中  $(\varphi_i, \omega_i, \kappa_i, X_{si}, Y_{si}, Z_{si})$  为第  $i$  扫描行的外方位元素,  $y$  为该扫描行沿飞行方向的像平面坐标,  $(\varphi_0, \omega_0, \kappa_0, X_{s0}, Y_{s0}, Z_{s0})$  为中心扫描行的外方位元素,  $(\dot{\varphi}, \dot{\omega}, \dot{\kappa}, \dot{X}_s, \dot{Y}_s, \dot{Z}_s)$  为外方位元素的一阶变率。对于每一景影像,方程(1)共有 12 个未知参数。如果已知 6 个以上控制点就可以求解方程(1)中的 12 个未知参数,然后进行重采样得到正射影像。严格几何校正是一个迭代求解的过程,每个像元大约需要 6—7 次迭代。

线阵列推扫式影像严格几何校正算法理论严

密,校正精度很高。前提是必须已知轨道星历参数和传感器参数,但在实际应用中,有时无法得到这些参数,此时只能采用直接线性变换、多项式、有理函数等近似校正算法。

### 2.2 近似校正算法

#### 2.2.1 直接线性变换校正算法

直接线性变换模型的表达式:

$$\left. \begin{aligned} u + \frac{XL_1 + YL_2 + ZL_3 + L_4}{XL_9 + YL_{10} + ZL_{11} + 1} &= 0 \\ v + \frac{XL_5 + YL_6 + ZL_7 + L_8}{XL_9 + YL_{10} + ZL_{11} + 1} &= 0 \end{aligned} \right\} (3)$$

式中,  $(u, v)$  为像点的像平面坐标;  $(X, Y, Z)$  为其对应地面点的大地坐标;  $(L_1 - L_{11})$  为直接线性变换参数。直接线性变换直接建立像平面坐标与物空间坐标的关系式,形式简单,解算简便,不需要轨道星历参数和传感器参数,但没有考虑每景影像外方位元素随时间变化的特点,将动态推扫式影像等同于静态画幅式影像进行处理,所以校正精度理论上应低于共线方程算法。

#### 2.2.2 一般多项式校正算法

一般多项式校正算法的表达形式如下:

$$\left. \begin{aligned} u &= a_{00} + a_{10}X + a_{01}Y + a_{20}X^2 + \\ &\quad a_{11}XY + a_{02}Y^2 + a_{30}X^3 + a_{21}X^2Y + \\ &\quad a_{12}XY^2 + a_{03}Y^3 + \dots \\ v &= b_{00} + b_{10}X + b_{01}Y + b_{20}X^2 + \\ &\quad b_{11}XY + b_{02}Y^2 + b_{30}X^3 + b_{21}X^2Y + \\ &\quad b_{12}XY^2 + b_{03}Y^3 + \dots \end{aligned} \right\} (4)$$

式中,  $(u, v)$  为像点的像平面坐标;  $(X, Y)$  为其对应地面点的大地坐标;  $a_{ij}, b_{ij}$  为多项式的系数 ( $i$  表示  $X$  的幂,  $j$  表示  $Y$  的幂)。一般多项式解算简便,运算量较小,但忽略了地形起伏引起的影像变形,仅适合于地形起伏平缓地区的影像校正。

#### 2.2.3 改进的多项式校正算法

为克服一般多项式的缺陷,引入地面高程值,得到下面的改进多项式:

$$\left. \begin{aligned} u &= a_{000} + a_{100}X + a_{010}Y + a_{001}Z + \\ &\quad a_{200}X^2 + a_{020}Y^2 + a_{002}Z^2 + a_{110}XY + \\ &\quad a_{101}XZ + a_{011}YZ + \dots \\ v &= b_{000} + b_{100}X + b_{010}Y + b_{001}Z + \\ &\quad b_{200}X^2 + b_{020}Y^2 + b_{002}Z^2 + b_{110}XY + \\ &\quad b_{101}XZ + b_{011}YZ + \dots \end{aligned} \right\} (5)$$

改进多项式解算简便,运算量较小,且考虑了地形起伏引起的影响,只要选择适当阶数的改进多项式模型,是可以获得较高几何校正精度的。

### 2.2.4 有理函数模型校正算法

有理函数模型是利用有理函数逼近二维像平面与三维物空间的对应关系。有理函数一般形式为:

$$u = \frac{p_1(X, Y, Z)}{p_3(X, Y, Z)} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array} \right\} \quad (6)$$

$$v = \frac{p_2(X, Y, Z)}{p_4(X, Y, Z)}$$

$$p_1(X, Y, Z) = \sum_{i=0}^{m_1} \sum_{j=0}^{m_2} \sum_{k=0}^{m_3} a_{ijk} X^i Y^j Z^k$$

$$p_2(X, Y, Z) = \sum_{i=0}^{m_1} \sum_{j=0}^{m_2} \sum_{k=0}^{m_3} b_{ijk} X^i Y^j Z^k$$

$$p_3(X, Y, Z) = \sum_{i=0}^{m_1} \sum_{j=0}^{m_2} \sum_{k=0}^{m_3} c_{ijk} X^i Y^j Z^k$$

$$p_4(X, Y, Z) = \sum_{i=0}^{m_1} \sum_{j=0}^{m_2} \sum_{k=0}^{m_3} d_{ijk} X^i Y^j Z^k$$

式中,  $(u, v)$  为像点的像平面坐标;  $(X, Y, Z)$  为其对应地面点的大地坐标;  $a_{ijk}, b_{ijk}, c_{ijk}, d_{ijk}$  为有理函数系数。

在解算过程中,如果数值较大,可对  $(u, v)$  和  $(X, Y, Z)$  正态归一化后,再解算。有理函数可取不同的次数,并且  $p_3(X, Y, Z)$  和  $p_4(X, Y, Z)$  的形式可以相同,控制点数目至少应等于有理函数系数总和的

一半,即  $\text{int} \left[ \left( \sum_{i=0}^{m_1} \sum_{j=0}^{m_2} \sum_{k=0}^{m_3} 1 + \sum_{i=0}^{m_1} \sum_{j=0}^{m_2} \sum_{k=0}^{m_3} 1 + \sum_{i=0}^{m_1} \sum_{j=0}^{m_2} \sum_{k=0}^{m_3} 1 + \sum_{i=0}^{m_1} \sum_{j=0}^{m_2} \sum_{k=0}^{m_3} 1 \right) / 2 \right] + 1$ , 次数越高,要求控制点越多,例如  $p_3(X, Y, Z) = p_4(X, Y, Z)$ , 且其次数为 3 时有 59 个未知数,至少需要 30 个控制点才能求解这些未知参数,并且控制点要在物空间平面和高程范围内均匀分布。

有理函数模型是多项式模型的广义形式,引入了较多的定向参数,校正精度较高,但解算复杂、运算量较大,并且要求大量的控制点。可以看出:直接线性变换公式是有理函数模型的特例。

## 3 实验研究

### 3.1 实验数据

实验采用的影像数据是 1 景唐山地区的 1A 级 SPOT 全色影像(图 1)和 1 景香港地区的 IKONOS 全色影像(图 2)。SPOT 影像是 1986 年获取的,卫星飞行高度为 830020.6m,相机焦距为 1082mm,像元半径为

13 $\mu$ m,地面区域覆盖面积为 60km  $\times$  60km,最大高程差约 500m。SPOT 影像共有 57 个控制点,它们是从 12 幅 1:50000 数字化地形图上采集的,由于无法进行立体量测,控制点基本是从平坦地区选取的,控制点的最大高程差约 100m。由于控制点的高程分布与该地区地形起伏不完全一致(地面区域最大高程差约 500m,而控制点的最大高程差约 100m),在一定程度上会影响几何校正的精度。IKONOS 影像是 2000 年获取的,太阳方位角为 156.4342 $^\circ$ ,高度角为 43.99996 $^\circ$ ,扫描方向分辨率为 0.91m,飞行方向分辨率为 0.86m,缺少轨道星历参数和相机参数,地面区域覆盖面积 11km  $\times$  11km。IKONOS 影像共有 38 个控制点,控制点的高程分布与该地区地形起伏基本一致。图 1 和图 2 中的三角符号用于表示控制点。

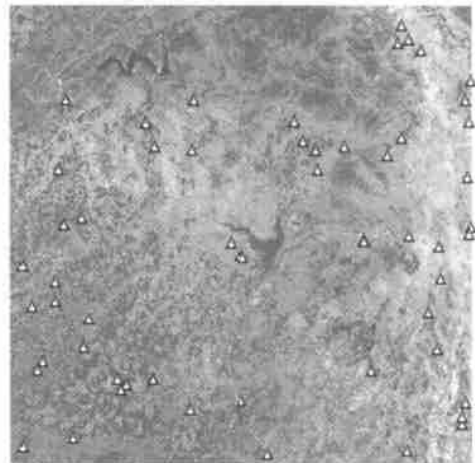


图 1 唐山地区的 SPOT 全色影像  
Fig.1 SPOT panchromatic image showing Tangshan



图 2 香港地区的 IKONOS 全色影像  
Fig.2 IKONOS panchromatic image showing HongKong

### 3.2 实验结果及分析

对于直接线性变换、一般多项式、改进多项式

表1 SPOT影像的校正精度  
Table 1 The rectification precision of SPOT image

校正方法	控制点数目	控制点 x 轴中误差	控制点 y 轴中误差	检查点数目	检查点 x 轴中误差	检查点 y 轴中误差
共线方程	9	0.41	0.51	48	1.04	1.06
	18	0.30	0.36	39	0.99	1.01
	27	0.24	0.32	30	0.85	1.06
直接线性变换	9	4.94	2.42	48	4.80	3.25
	18	4.62	2.32	39	4.47	2.79
	27	4.28	2.34	30	4.33	2.75
一般二次多项式	9	0.75	0.88	48	1.37	1.33
	18	0.68	0.72	39	1.27	1.33
	27	0.69	0.59	30	0.99	1.30
一次改进多项式	9	6.65	0.87	48	6.05	1.16
	18	6.38	0.93	39	5.86	1.28
	27	5.90	0.97	30	5.80	1.25
二次改进多项式	18	0.49	0.59	39	1.13	1.27
	27	0.43	0.55	30	1.01	1.19
二次有理函数	18	0.40	0.44	39	1.15	1.11
	27	0.32	0.36	30	0.95	1.05

和有理函数等近似校正模型进行精度比较,本文进行了两组实验,其中一般多项式和有理函数取二阶模型,改进多项式分别取一阶、二阶模型。实验1是针对SPOT影像的,实验结果见表1,图3给出了不同近似校正算法的精度随控制点数目变化的关系,图3中控制点和检查点的精度为x轴和y轴中误差的均值。

从图3中可以看出:二次有理函数模型精度最高,控制点的校正精度达到子像素级,检查点的校正精度略超过1个像素,接近共线方程模型的精度;直

接线性变换模型精度最低,在4个像素左右;一般二次多项式模型精度较高,在1个像素左右,这说明一般二次多项式模型刚好能反映该图像平坦地区的变形规律;一次改进多项式模型精度较低,而二次改进多项式模型精度较高,接近有理函数模型,引起这种精度差别的原因在于SPOT影像视场角较宽,地面覆盖面积较大,多种因素影响影像的变形,影像变形规律较为复杂,与二次改进多项式相比,一次改进多项式次数过低,难以描述影像变形规律,所以精度较低。

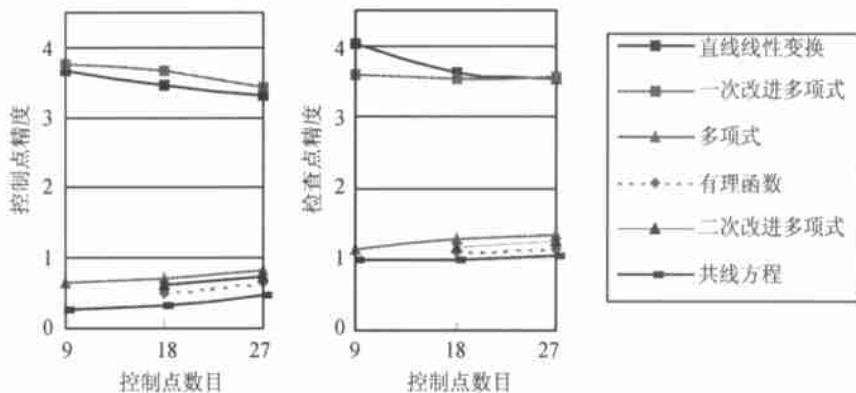


图3 SPOT 全色影像的校正精度

表 2 IKONOS 影像的校正精度

Table 2 The rectification precision of IKONOS image

校正方法	控制点数目	控制点 x 轴中误差	控制点 y 轴中误差	检查点数目	检查点 x 轴中误差	检查点 y 轴中误差
直接线性变换	9	1.013	1.820	29	2.726	1.137
	18	0.689	0.861	20	1.998	1.296
	27	0.652	0.623	11	1.901	1.019
一般二次多项式	9	3.059	25.171	29	4.025	24.571
	18	4.075	20.033	20	4.403	23.573
	27	2.178	19.309	11	3.615	18.839
一次改进多项式	9	0.946	0.788	29	1.140	1.102
	18	0.376	0.330	20	1.115	1.021
	27	0.275	0.272	11	0.981	0.819
二次改进多项式	18	2.377	2.977	20	3.931	3.152
	27	1.102	1.695	11	2.460	2.051
二次有理函数	18	0.020	0.025	20	0.020	0.030
	27	0.002	0.010	11	0.014	0.015

实验 2 是针对 IKONOS 影像的,由于 IKONOS 影像不具备轨道星历参数和传感器参数,实验 2 无法对其进行严格校正,各近似校正模型的实验结果见表 2,图 4 给出了不同近似校正算法的精度随控制点数目变化的关系,图 4 中控制点和检查点的精度为 x 轴和 y 轴中误差的均值。

从图 4 中可以看出:有理函数模型的校正精度最高,全部达到子像素级;直接线性变换模型的校正精度在 2 个像素左右;一般二次多项式模型的校正精度很

差,超出了 10 个像素;一次改进多项式模型的校正精度较高,在 1 个像素左右,仅低于有理函数模型,二次改进多项式模型的校正精度降低到 2—3 个像素左右,引起这种现象的原因在于 IKONOS 影像视场角较窄,地面覆盖面积较小(每景 IKONOS 影像地面覆盖面积约为 SPOT 影像的 1/30),影像变形规律较为简单,与一次改进多项式相比,二次改进多项式次数过高与影像变形规律不吻合,所以精度较低。这说明只要选择适当阶数的改进多项式模型,可以取得理想的几何校正精度。

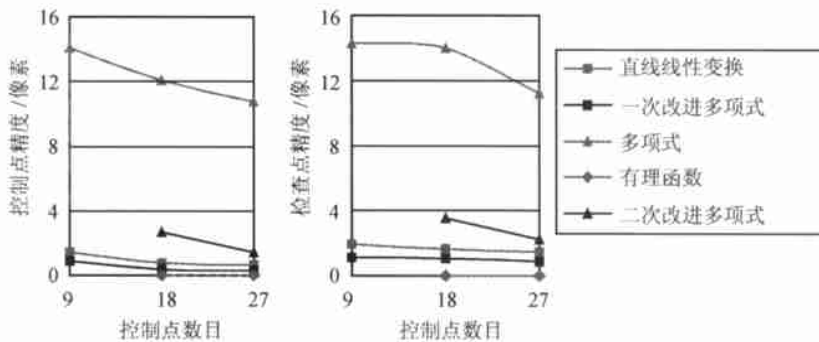


图 4 IKONOS 影像的校正精度

Fig.4 Rectification precision of IKONOS image

综合分析图 3 和图 4,我们可以看出:有理函数模型精度最高,基本可达到子像素级;直接线性变换模型精度较低,在控制点分布状态良好时可达 2 个像素左右;一般多项式模型只适用于地形起伏平缓地区的影像校正,地形起伏较大时,精度急剧下降;改进多项式模型的精度随阶数变化而变化,几乎

不受地形起伏的影响,当改进多项式模型符合影像变化规律时可以取得较高的精度。

图 3 和图 4 还表明:控制点数目的增多并不能显著提高校正精度。实验中还发现,如果改变控制点的平面和高程分布状态,造成控制点的局部密集或局部稀疏,精度也会降低。这说明影像校正只需

要一定数量的精度较高、空间分布较好的控制点,太多的控制点并不能提高几何校正精度。

表3从精度、算法复杂性、对控制点空间分布、对

轨道与传感器参数的要求等方面对4种近似校正模型进行了全面比较。其中复杂性用不同算法对同一景影像进行纠正所需的运算次数作为定量比较标准。

表3 不同校正算法的综合比较

Table 3 Comprehensive comparison of different rectification algorithms

方法	精度	算法复杂性(影像像元总数为 $N$ )	必需的制点数目	对控制点空间分布要求	对轨道和传感器参数要求
一般二次多项式	只适用于平坦地区	$(10 \text{ 次加法} + 16 \text{ 次乘法}) \times N$	6	均匀分布	不要求已知参数
一次改进多项式	模型符合影像变形规律时较高	$(6 \text{ 次加法} + 6 \text{ 次乘法}) \times N$	4	均匀分布	不要求已知参数
二次改进多项式	模型符合影像变形规律时较高	$(18 \text{ 次加法} + 30 \text{ 次乘法}) \times N$	10	均匀分布	不要求已知参数
直接线性变换	较低	$(12 \text{ 次加法} + 14 \text{ 次乘法}) \times N$	6	均匀分布	不要求已知参数
二次有理函数	接近共线方程	$(27 \text{ 次加法} + 47 \text{ 次乘法}) \times N$	15	均匀分布	不要求已知参数
共线方程	最高	$(20 \text{ 次加法} + 14 \text{ 次乘法}) \times (7N)$	6	均匀分布	要求已知参数

## 4 结 论

线阵列影像严格几何校正需要轨道星历参数和传感器参数,但在实际应用中有时无法得到这些参数,此时一般采用直接线性变换、一般多项式、改进多项式、有理函数等模型进行近似几何校正。理论分析和实验结果表明:有理函数模型不要求已知轨道和传感器参数,精度最高,可达到子像素级,但计算量较大,且要求大量空间分布较好的控制点;直接线性变换模型形式简单、解算简便、不要求已知轨道和传感器参数,仅要求少量空间分布较好的控制点,但精度较低;一般多项式模型形式简单,运算量较小,不要求已知轨道和传感器参数,对控制点要求较低,但受地形起伏影响较大,只适用于平坦地区的影像校正;改进多项式模型运算量较小,解算简单,仅要求数量不多、空间分布较好的控制点,精度随多项式的阶数变化而变化,几乎不受地形起伏的影响,当改进多项式模型符合影像变形规律时精度较高。因此在进行线阵列影像近似几何校正的时候,可综合考虑精度、算法复杂性、对已知数据要求等多方面因素,选择适当的近似影像几何校正算法。

## 参 考 文 献 (References)

[1] Yasser E-M, Kurt N. Precision Rectification of SPOT Imagery Using the Direct Linear Transformation Model [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 1996, 62(1): 67—72.

[2] Savopol F, Armenakis C. Modelling of IRS-1C Satellite Pan Imagery Using the DLT Approach [J]. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1998, 32(4): 511—514.

[3] David P S, Saumeul F A. Accuracy of Rectification Using Topographic Map versus GPS Ground Control Points [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2001, 67(5): 565—570.

[4] Jay G. Non-Differential GPS as an Alternative Source of Planimetric Control for Rectifying Satellite Imagery [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2001, 67(1): 49—55.

[5] Baltasvias E S. Metric Information Extraction from SPOT Images and the Role of Polynomial Mapping Functions [J]. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1992, 29(B4): 358—364.

[6] Vincent C T, Yong H A. Comprehensive Study of the Rational Function Model for Photogrammetric Processing [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2001, 67(12): 1347—1357.

[7] Vincent C T, Yong H. Updating Solutions of the Rational Function Model Using Additional Control Information [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2002, 68(7): 715—724.

[8] Vincent C T, Yong H. 3D Reconstruction Methods Based on the Rational Function Model [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2002, 68(7): 705—716.

[9] Dowman I, Dolloff J T. An Evaluation of Rational Functions for Photogrammetric Restitution [J]. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2000, 33(B3/1): 252—266.

[10] Fraser C S, Baltasvias E, Gruen A. Processing of Ikonos Imagery for Submeter 3D Positioning and Building Extraction [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2002, 56(2): 177—194.

[11] Clive S F, Happy B, Hanley T Y. Three-dimensional Geopositioning Accuracy of IKONOS Imagery [J]. *Photogrammetric Record*, 2002, 17(99): 465—479.

[12] Liu J Y. Aerial Photogrammetry [M]. Beijing: PLA Press, 1995. [刘静宇. 航空摄影测量学 [M]. 北京: 解放军出版社, 1995.]

## Precision Comparison of Several Algorithms for Approximate Rectification of Linear Array Push-broom Imagery

ZHU Shu-long<sup>1</sup>, SHI Wen-zhong<sup>2</sup>, ZHANG Yan<sup>1</sup>, ZHU Bao-shan<sup>1</sup>

( 1. Faculty of Surveying and Mapping, Information Engineering University, Zhengzhou 450052, China ;

2. LSGL, HongKong Polytechnic University, HongKong)

**Abstract:** Orbit ephemeris and camera data are needed for strict geometric rectification of linear array push-broom imagery, which are often unavailable in practical applications. As a result, the direct linear transform (DLT), average polynomial, improved polynomial and rational function model (RFM) methods are widely used for the approximate geometric rectification of this kind of imagery. In this paper, after a brief introduction of several approximate rectification algorithms, the emphasis is put on experimental analysis and precision comparison of different kinds of approximate rectification algorithms using real SPOT and IKONOS images. Experimental results show that the precision of RFM method is the best and can reach sub-pixel accuracy, the precision of DLT method is about two pixels on the condition of good distribution of control points, the precision of average polynomial method is about one pixel for fiat terrain and much worse for uneven terrain, i. e., varying greatly with different kinds of terrains, and the precision of improved polynomial methods varies with the order of polynomials and is nearly irrelative to the types of terrains. If the proper improved polynomial method is selected for image rectification, the higher precision can be obtained. Additionally, the balance among precision, complexity, requirements for known data should also be considered for choosing methods from these four approximate image rectification algorithms. Experimental results also show that the improved polynomial method is a better choice for approximate rectification of linear array push-broom imagery, from the viewpoints of precision, complexity, the number and spatial distribution of control-points and so on.

**Key words:** linear array push-broom imagery; geometric rectification; precision comparison; collinearity equation; direct linear transform (DLT); average polynomial; improved polynomial; rational function model (RFM)