

文章编号: 1001-1595(2010)01-0034-05

推扫式光学卫星影像系统几何校正产品的 3 维几何模型及定向算法研究

张 过^{1,2}, 厉芳婷³, 江万寿¹, 翟 亮², 唐新明²

1. 武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430079; 2. 中国测绘科学研究院, 北京 100039; 3. 中国电子科技集团公司 第十研究所, 四川 成都 610036

Study of Three-dimensional Geometric Model and Orientation Algorithms for Systemic Geometric Correction Product of Push-broom Optical Satellite Image

ZHANG Guo^{1,2}, LI Fangting³, JIANG Wanshou¹, ZHAI Liang², TANG Xinming²

1. State Key Laboratory for Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 2. Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100039, China; 3. The 10th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Chengdu 610036, China

Abstract: In general, the systemic geometric correction product of push-broom optical satellite image uses a pure two-dimensional affine transformation geometric model. However, this affine transformation geometric model ignores the deformation caused by uncorrected elevation variation during the geometric correction process. In order to solve that problem, it proposed a conceptual three-dimensional geometric model for systemic geometric correction product. On the basis of deducing three-dimensional geometric model, it also analyzed the feasibility of applying the RPC model to replace this three-dimensional geometric model, which SPOT 5 HRG images were used to verify. The result of the experiment indicates that the RPC model accurately identifies the deformation pattern for the geometrical correction product of push-broom optical satellite image. The RPC model simplifies three-dimensional geometric model for systemic geometric correction product, but does not compromise its accuracy.

Key words: systemic geometric correction product; three-dimensional geometric model; RPC model; orientation; SPOT 5

摘 要: 提出推扫式光学卫星影像系统几何校正产品的 3 维几何模型的概念, 在推导推扫式光学卫星影像系统几何校正产品的 3 维几何模型基础上, 对 RPC 模型用于表示推扫式光学卫星影像系统几何校正产品的 3 维几何模型的可行性进行分析, 并用 SPOT 5 HRG 影像以进行验证。实验表明, RPC 模型能够很好地用于表示推扫式光学卫星影像系统几何校正产品的高程起伏引起的变形规律, 基于该模型的影像定向精度不低于推扫式光学卫星影像辐射校正产品的严密成像几何模型。

关键词: 系统几何校正产品; 3 维几何模型; RPC 模型; 模型定向; SPOT 5

中图分类号: P237 文献标识码: A

基金项目: 国家自然科学基金(40601084, 40523005, 40801178); 国家 863 计划(2007AA120203, 2009AA12Z145); 科技部国际合作项目(2006DFA71570); 地理空间信息工程国家测绘局重点实验室开放基金(A1721)

1 引 言

通常意义上光学卫星遥感影像严密成像几何模型反映卫星遥感影像辐射校正产品的成像几何, 能有效反映传感器几何畸变、卫星轨道姿态变化、地球曲率及旋转、地形起伏等造成的影像畸变, 适用于多种光学卫星遥感的辐射校正产品^[1-5]。而星载推扫式光学卫星影像系统几何校正产品的几何模型是用仿射变换表示的, 反映了像素坐标和大地坐标(或地理坐标)之间的变换关系。该变换是一个纯粹的 2 维变换, 忽略了系统

几何校正过程中没有改正的高程引起的影像变形。如果高程引起的影像变形不大, 可以使用控制点按仿射变换或多项式模型进一步对影像进行纠正, 以提高影像的绝对定位精度。然而在影像倾角较大, 地形起伏明显时, 高程引起的影像变形往往较大, 并且无法用多项式来整体表示。

针对上述问题, 提出推扫式光学卫星影像系统几何校正产品的 3 维几何模型的概念, 通过 3 维几何模型对于成像过程中的高程变形规律加以表示, 以利于利用控制点等数据进行后续的处理, 从而提高系统纠正产品的应用潜力和价值。

首先从推扫式光学卫星影像系统几何校正产品的间接法纠正的原理出发, 推导推扫式光学卫星影像系统几何校正产品影像坐标和辐射纠正产品影像坐标的一一对应关系, 进而利用辐射纠正产品的严格成像模型构建系统几何校正产品的 3 维几何模型。然后类比辐射校正影像的通用成像模型, 提出用 RPC 模型表示系统几何校正产品的 3 维几何模型, 并基于 RPC 像方改正原理, 利用控制点进行高精度定向。最后使用 SPOT 5 HRG 影像进行对比实验验证。

2 推扫式光学卫星影像系统几何校正产品的 3 维几何模型

2.1 辐射校正产品严密成像几何模型

基于线阵 CCD 成像瞬间各 CCD 元扫描地面的视线方向矢量构建推扫式光学卫星影像辐射校正产品的严密成像几何模型, 通过求解成像瞬间各 CCD 元的视线方向与地球椭球模型的交点, 建立的像点与地面点之间一一对应的关系^[6-7]。

辐射校正产品的严密成像几何模型的正变换定义为从辐射校正产品像素坐标对应的光束和给定高程面交会得到的地理坐标, 可以由式(1)表示。

$$(D_{lat}, D_{lon}) = T(x, y, h) \quad (1)$$

模型的反变换定义为某一地面点地理坐标和对应的高程投影到辐射校正产品像素坐标的变换模型, 如式(2)

$$(x, y) = T^{-1}(D_{lat}, D_{lon}, h) \quad (2)$$

其中, (x, y) 为辐射校正产品上的像素坐标; (D_{lat}, D_{lon}, h) 为该点对应的地面点在 WGS84 下的经纬度和椭球高坐标。

2.2 系统几何校正产品的 3 维几何模型

和辐射校正产品的严密成像几何模型的概念类似, 系统几何校正产品的 3 维几何模型是建立系统几何校正产品的像素坐标和对应地面点坐标的关系。

系统几何校正产品是由辐射校正产品通过系统几何纠正得到的, 即系统几何校正产品和辐射校正产品之间存在一一对应关系。通过该对应关系和辐射校正产品的严密成像几何模型, 可建立系统几何校正产品上像素点和地面点坐标之间的关系, 即系统几何校正产品的 3 维几何模型。

已知某一点在椭球面上的大地坐标 (D_{lat}, D_{lon}) , 其投影平面上的坐标为 (D_{east}, D_{north}) , 那么

这两个坐标之间存在着函数关系, 即为投影变换关系^[8-9]。

$$\left. \begin{aligned} D_{east} &= F_1(D_{lat}, D_{lon}) \\ D_{north} &= F_2(D_{lat}, D_{lon}) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

上式是将大地坐标变换为投影面坐标的投影正变换, 将投影面坐标转化为大地经纬度坐标称为投影反变换^[8-9]:

$$\left. \begin{aligned} D_{lon} &= \varphi_1(D_{east}, D_{north}) \\ D_{lat} &= \varphi_2(D_{east}, D_{north}) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

从像素点坐标 (x, y) 变换到投影面坐标 (D_{east}, D_{north}) 可以通过下列变换公式^[10-11]

$$\left. \begin{aligned} D_{east} &= a + x \times dx \\ D_{north} &= b + y \times dy \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

其中, a, b 为偏移参数; dx, dy 为影像分辨率。

由上述公式可以推导出系统几何校正产品的 3 维几何模型的正变换。其步骤如图(1)所示。

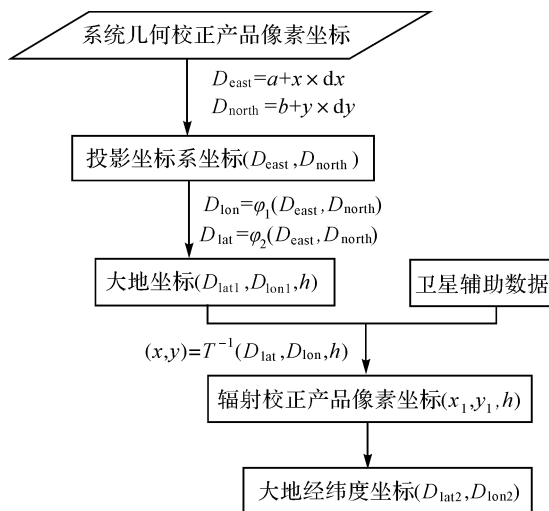


图 1 系统几何校正产品的 3 维几何模型的正变换

Fig. 1 The direct model of systemic geometric correction product's three-dimensional geometric mode

1. 根据式(5)将系统几何校正产品上的像素坐标 (x_2, y_2, h) 变换为投影面坐标 (D_{east}, D_{north}) ;
2. 根据式(4), 将投影面坐标 (D_{east}, D_{north}, h) 反投影为大地坐标 (D_{lat1}, D_{lon1}, h) ;
3. 通过辐射校正产品严密数学模型反变换式(2), 将 (D_{lat1}, D_{lon1}, h) 变换到辐射校正产品的像素坐标 (x_1, y_1, h) ;
4. 再通过式(1), 将辐射校正产品上的像素坐标变化为大地经纬度坐标 (D_{lat2}, D_{lon2}) 。

上述变换即建立推扫式卫星系统几何校正产品的 3 维几何模型的正变换。

由此推导出卫星系统几何校正产品 3 维几何模型的反变换算法,其步骤如下:

1. 由某点的大地经纬度坐标(D_{lat2}, D_{lon2}, h)通过式(2),计算该点在辐射校正产品上的像素坐标(x_1, y_1, h);
2. 由式(1),将(x_1, y_1, h)变换为大地坐标(D_{lat1}, D_{lon1}, h);
3. 根据投影变换式(3)将(D_{lat1}, D_{lon1}, h)变化为投影面坐标(D_{east}, D_{north});
4. 根据式(5),由投影面坐标(D_{east}, D_{north})计算系统几何校正产品像素坐标(x_2, y_2)。

由系统几何校正产品的正反变换模型,构建提出的卫星系统几何校正产品的 3 维几何模型。在该模型中,涉及到卫星辐射校正产品的严密成像几何模型,因此该模型不能独立与辐射校正产品严密成像几何模型直接应用,且系统几何校正产品的 3 维几何模型的正反变换都需要有迭代的过程,计算较为复杂,不能直接用于遥感影像的定向和定位。为此,需要找到一个简单的数学模型来替代系统几何校正产品的 3 维几何模型。

3 系统几何校正产品的 RPC 模型求解

RPC 模型将地面点大地坐标与其对应的像点坐标用比值多项式关联起来。为了增强参数求解的稳定性,将地面坐标和影像坐标正则化到 -1 和 1 之间。对于一个影像,定义如下比值多项式^[7]

$$\left. \begin{aligned} Y &= \frac{Num_L(P, L, H)}{Den_L(P, L, H)} \\ X &= \frac{Num_S(P, L, H)}{Den_S(P, L, H)} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中, (P, L, H) 为归一化的地面坐标; (X, Y) 为归一化的影像坐标; $Num_L(P, L, H)$ 、 $Den_L(P, L, H)$ 、 $Num_S(P, L, H)$ 、 $Den_S(P, L, H)$ 为归一化地面坐标的多项式

$$\left. \begin{aligned} P &= \frac{Latitude-LAT_OFF}{LAT_SCALE} \\ L &= \frac{Longitude-LONG_OFF}{LONG_SCALE} \\ H &= \frac{Height-H_EIGHT_OFF}{H_EIGHT_SCALE} \\ X &= \frac{Sample-SAMP_OFF}{SAMP_SCALE} \\ Y &= \frac{Line-LINE_OFF}{LINE_SCALE} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

根据文献 [7], 求解 RPC 模型参数。根据影

像覆盖范围,利用美国地质调查局提供的全球 1 km 分辨率 DEM, 计算该系统几何校正产品覆盖区域的最大最小椭球高。然后,在高程上以一定间隔分层,在平面上,以一定的格网大小建立地面规则格网,生成控制点地面坐标,最后利用系统几何校正产品的 3 维几何模型的反变换模型,计算控制点的影像坐标。加密控制格网和层,建立独立检查点。利用控制点坐标用计算系统几何校正产品坐标和地面坐标的归一化参数,将控制点和检查点坐标归一化。采用岭估计方法利用最小二乘平差原理解求 RPC 模型参数^[7],从而获得卫星系统几何校正产品的 RPC 模型参数,并用检查点进行检查。

4 外定向模型

根据辐射校正产品 RPC 模型定向原理^[7],在系统几何校正产品的影像面同样定义仿射变换

$$\left. \begin{aligned} y &= e_0 + e_1 sample + e_2 line \\ x &= f_0 + f_1 sample + f_2 line \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中, (x, y) 是控制点在影像上的量测坐标; e_0, f_0 是偏移参数; e_1, f_1 是 $sample$ 方向系数; e_2, f_2 是 $line$ 方向的系数。

在缺少控制点条件下,为了获得较好的精度,待求解的仿射变换参数需要分析。根据严密成像模型求解的 RPC 参数的精度和严密成像模型的精度一致,若仅有一个控制点,求解偏移参数 e_0 和 f_0 来消除平移误差;而单线阵推扫式卫星遥感影像在行方向(CCD 线阵)的变形比列方向(卫星运动方向)的变形小,当有两个控制点,求解平移参数(e_0 和 f_0)和 $line$ 方向的系数(e_2 和 f_2)可以获得较高的精度^[7]。

5 实验

本文采用北京地区 10 m 分辨率 SPOT 5 HRG 卫星数据来进行试验,该影像覆盖区域最高高程为 1 200 m,基本属于丘陵地。参考影像是北京地区 3 m 分辨率的参考 DOM 和 5 m 分辨率的 DEM。本文用于验证系统几何校正产品的 3 维几何模型和 RPC 模型验证的数据,是由该 SPOT 5 卫星辐射校正产品通过辐射校正产品严密成像几何模型正变换式(1)和投影正算式(3)得到的该卫星的系统几何校正产品。

5.1 RPC 参数解算实验

在 RPC 模型中,光学投影系统产生的误差用

有理多项式中的一次项来表示, 地球曲率、大气折射和镜头畸变等产生的误差能很好的用有理多项式中二次项来模型化, 其他一些未知的具有高阶分量的误差如相机震动等, 用有理多项式中的三次项来表示^[7]。RPC 模型有 9 种形式, 本文实验采用的是分母不同 3 阶 RPC 模型求解 RPC 参数。影像格网为 40 × 38, 高程分层为 15 层。其结果精度如表 1 所示。

表 1 SPOT 5 系统几何校正产品 RPC 模型控制点检查点精度

Tab. 2 Accuracy of control points and check points for 2A image RPC model of SPOT 5 / (10⁻² pixel)

	X		Y		平面	
	最大	中误差	最大	中误差	最大	中误差
检查点	-1.032	0.011	-0.027	0.001	1.032	0.011
控制点	-0.787	0.007	-0.020	0.002	0.787	0.007

由实验结果可以看出, 在采用分母不相等且在 3 阶多项式的情况下, 系统几何校正产品 RPC 模型参数求解的检查点平面精度为 1.1 × 10⁻⁴ pixel, 控制点平面精度为 0.7 × 10⁻⁴ pixel。

5.2 系统几何纠正产品的定向实验

该实验数据是北京地区 SPOT 5 卫星 10 m

分辨率的辐射校正产品通过上述制作过程得到的系统几何校正产品, 参考数据是北京地区 3 m 分辨率的 DOM。控制点分布如图 2 所示。

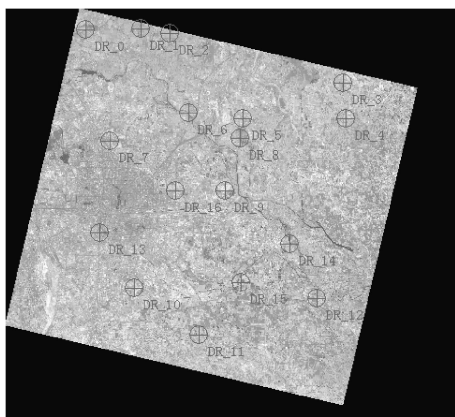


图 2 控制点分布示意图

Fig. 2 Schematic drawing of control points distribution

该实验分别采用零次平移变换、一次仿射变换进行。无控制点时, 选取均匀分布在影像上的 18 个点为检查点, 零次平移变换选用影像中心的检查点为控制点, 一次仿射变换采用分布在影像四角的检查点为控制点。结果如表 2 所示(控制点数据用倾斜加粗字体表示)。

表 2 系统几何校正产品 RPC 模型定向结果

Tab. 2 Orientation results of 2A image rigorous mathematics model

/ pixel

点号	定向前		像方平移变换		像方仿射变换	
	ErrX	ErrY	ErrX	ErrY	ErrX	ErrY
Gcp# 0	7.613 1	4.362 7	-1.061 1	1.691 1	-0.256 9	0.017 6
Gcp# 1	9.498 4	2.433 4	0.824 2	-0.238 3	1.347 3	-1.814 5
Gcp# 2	8.425 0	4.371 8	-0.249 2	1.700 1	0.090 5	0.197 8
Gcp# 3	9.748 7	3.354 4	1.074 5	0.682 8	0.224 4	-0.309 8
Gcp# 4	10.102 2	3.501 3	1.428 0	0.829 6	0.362 8	-0.024 8
Gcp# 5	9.922 2	3.142 8	1.248 0	0.471 2	0.715 6	-0.571 3
Gcp# 6	8.865 5	3.625 3	0.191 3	0.953 6	-0.025 5	-0.210 6
Gcp# 7	7.960 8	3.097 3	-0.713 4	0.425 7	-0.672 3	-0.781 5
Gcp# 8	10.811 4	2.426 4	2.137 2	-0.245 3	1.511 8	-1.221 2
Gcp# 9	10.145 2	3.980 9	1.471 0	1.309 3	0.621 8	0.505 8
Gcp# 10	9.986 9	3.249 3	1.312 7	0.577 6	0.383 3	-0.026 2
Gcp# 11	10.448 1	2.684 4	1.773 9	0.012 8	0.236 4	-0.293 5
Gcp# 12	10.125 5	2.933 1	1.451 3	0.261 4	-0.489 2	0.033 5
Gcp# 13	8.485 4	4.500 8	-0.188 8	1.829 1	-0.620 7	0.951 1
Gcp# 14	9.858 9	3.581 2	1.184 7	0.909 6	-0.304 2	0.426 4
Gcp# 15	10.140 9	3.380 8	1.466 8	0.709 1	0.011 6	0.281 6
Gcp# 16	8.674 2	2.671 7	0.000 0	0.000 0	-0.586 7	-0.897 0
Gcp# 17	9.065 4	2.715 7	0.391 2	0.044 0	-0.815 5	-0.489 3

对表 2 中检查点进行精度统计, 统计结果如表 3 所示。统计中用到的中误差计算公式为

$$m_0 = \sqrt{\frac{V^T V}{n}}$$

(V 为检查点残差向量, n 为检查点个数)

数)。

表 3 采用 RPC 模型定向结果统计

Tab. 3 Statistics of orientation results by RPC model

像方多项式模型	控制点数	检查点数	检查点精度/ pixel		
			M_x	M_y	M_{xy}
无	0	18	9.479 1	3.393 8	10.068 4
零次	1	17	1.203 3	0.943 3	1.529 0
一次	4	14	0.709 8	0.777 0	1.052 4

综合表 2 和表 3 的结果, 采用 RPC 模型对系统几何校正产品的定向, 利用 1 个控制点进行定向, 利用 17 个检查点进行检查, 精度在 1.5 个像元, 利用 4 个控制点进行定向, 14 个控制点进行检查, 定向精度在 1 个像元, 该定向精度与利用严密模型对 SPOT 辐射校正产品的精度相当^[7]。

6 结 论

提出推扫式光学卫星影像系统几何校正产品 3 维几何模型的概念, 并通过的数学推导, 构建系统几何校正产品的 3 维几何模型。为了简化模型, 利于对系统几何校正产品模型的应用, 推导并建立了系统几何校正产品的 RPC 模型, 并对其 RPC 参数的求解精度和基于该模型的定向精度做了实验分析。

从 PRC 模型参数求解实验的结果, 可以看出, 利用控制点求解分母不同且阶数为 3 阶的 RPC 模型, 其控制点平面精度为 0.7×10^{-4} pixel。利用检查点检查模型精度, 检查点的平面精度最大为 1.1×10^{-4} pixel。所以, 系统几何校正产品 RPC 模型解算得到较高精度的 RPC 模型参数。

利用 RPC 模型对系统几何校正产品定向实验结果可以看出, 无控制点时二级模型的定向精度可达到百米级, 当采用一个控制点时, 二级模型定向精度达到 1.5 个像素的精度, 与辐射校正产品的严密成像几何模型进行对比, 采用 4 个控制点, 能达到 1 个像素左右的精度, 基于推扫式光学卫星影像系统几何校正产品的 3 维几何模型构建的 RPC 模型的定向精度和辐射校正产品严密成像几何模型的精度一致。本文构建的 3 维几何模型可以进行系统几何校正产品的摄影测量处理, 可以为国产推扫式卫星影像产品级别的定义提供理论和试验依据。

参考文献:

[1] KIM T. Modeling Satellite Orbital Segments Using Orbit

Attitude Models[J]. Korean Journal of Remote Sensing, 2006, 22(1): 63-73.

- [2] DIETER F, DIRK S. Rigorous Photogrammetric Processing of High Resolution Satellite Imagery[J]. ISPRS, 2000, 33: 42-50.
- [3] OKAMOTO A. Orientation Theory of CCD Line-Scanner Images[J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Kyoto: ISPRS, 1988, 27 (B3): 609-617.
- [4] TAO VC, HU Yong. A Comprehensive Study of the Rational Function Model for Photogrammetric Processing[J]. PE & RS, 2001, 67(12): 13472-1357.
- [5] OKAMOTO A. Orientation and Construction of Models, Part III: Mathematical Basis of the Orientation Problem of One-Dimensional Central-Perspective Photographs[J]. PE & RS, 1981, 47(12): 1739-1752.
- [6] SPOT IMAGE. SPOT Satellite Geometry Handbook: SNT-73-12 SI[M]. Toulouse: SPOT Image, 2002.
- [7] ZHANG Guo. Rectification for High Resolution Remote Sensing Image under Lack of Ground Control Points[D]. Wuhan: Wuhan University, 2005. (张过. 缺少控制点的高分辨率卫星遥感影像几何纠正[D]. 武汉: 武汉大学, 2005.)
- [8] XU Shaoquan, WU Zuyang. Geodesy[M]. Wuhan: Wuhan Technical University of Surveying and Mapping Press, 1996: 239-249. (徐绍铨, 吴祖仰. 大地测量学[M]. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1996: 239-249.)
- [9] WANG Jiayao, SUN Qun, WANG Guangxia, et al. Principle and Method of Cartography[M]. Beijing: Science Press, 2006. (王家耀, 孙群, 王光霞, 等. 地图学原理与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2006)
- [10] ELMANDILI YAND, NOVAK K. Precision Rectification of SPOT Imagery Using the Direct Linear Transformation Model[J]. PE & RS, 1996, 62(1): 67-72.
- [11] ZHANG Zuxun, ZHANG Jianqing. Digital Photogrammetry[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2001. 76-77. (张祖勋, 张剑清. 数字摄影测量学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2001: 76-77.)

(责任编辑: 丛树平)

收稿日期: 2008-12-16

修回日期: 2009-08-24

第一作者简介: 张过(1976—), 男, 博士, 副教授, 从事航天摄影测量的理论与应用研究。

First author: ZHANG Guo(1976—), male, PhD, associate professor, majors in spaceborne photogrammetry.

E-mail: guozhang@whu.edu.cn