

推扫式光学卫星遥感影像产品三维几何模型研究及应用

张过^{①②}, 刘斌^①, 江万寿^①, 王长委^{①③}

(^①武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079;

^②国家测绘局卫星测绘应用中心, 北京 10830; ^③华南农业大学信息学院, 广州 510642)

摘要: 推扫式光学卫星遥感影像系统校正与精纠正的几何模型通常用一个二维仿射变换模型表示, 系统几何校正产品和精纠正产品中仍然包含了地形起伏信息。为了对这些信息加以应用, 本文仿照 RFM(有理函数模型)用于辐射校正产品几何处理的思路, 提出利用 RFM 对系统几何校正产品、精纠正产品求解 RPC 参数并进行三维几何处理的技术和方法。分别利用一景北京地区 10m 和 2.5m 分辨率 SPOT5 HRG 各级影像产品进行了正射纠正试验, 利用北京地区两景异轨 5m 分辨率 SPOT5 HRG 的各级影像产品进行了立体定向试验, 结果表明, 各级影像产品的三维几何模型可以用三阶分母不相同的 RFM 替代, 与直接应用辐射校正产品影像模型进行正射纠正和立体定向的精度一致。

关键词: 三维几何模型; RFM; 正射纠正; 立体定向; SPOT5

doi: 10.3969/j.issn.1000-3177.2011.02.011

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3177(2011)114-0058-05

Study and Application of the Three-dimensional Geometric Model of Products of Push-broom Optical Satellite Image

ZHANG Guo^{①②}, LIU Bin^①, JIANG Wan shou^①, Wang Chang wei^{①③}

(^① State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan 430079;

^② Satellite of Surveying and Mapping Application Center of State Bureau of Surveying and Mapping, Beijing 10830;

^③ College of Informatics; South China Agricultural University, Guangzhou 510642)

Abstract: The traditional systemic geometric correction and exact rectification of push-broom optical satellite image uses a pure two-dimensional affine transformation geometric model. The product rectifying is not completely, the terrain information is kept in the products. In order to make use of the information, this paper proposed a conceptual three-dimensional geometric model for systemic geometric correction and exact rectified product. On the basis of deducing three-dimensional geometric model, the paper also analyzed the feasibility of applying the RFM to replace this three-dimensional geometric model. Ortho product has been made from all the levels of products based on the three-dimensional geometric model. A comparison between the accuracies of stereo orientation with systemic geometric correction product and the raw product has been made. SPOT5 HRG and HRG images were used to verify. The result of the experiment indicates that the PRC model accurately identifies the deformation pattern of the geometrical corrected product of push-broom optical satellite image. The RFM simplifies the three-dimensional geometric model for systemic geometric correction product, but does not compromise its accuracy. Therefore, this paper provides an innovative, theoretical, and experimental basis for the definition of image product levels.

Key words: three-dimensional geometric model; PFM; ortho rectify; stereo orientation; SPOT5

收稿日期: 2010-03-18 修订日期: 2010-05-07

基金项目: 国家科技支撑(2011BAB01B01), 国家自然科学基金(40930532), 国家 863(2007AA120203, 2009AA12Z145, 2008AA121203)。

作者简介: 张过(1976~), 男, 副教授, 主要研究航天摄影测量。

E-mail: guozhang@whu.edu.cn

1 引言

目前,星载光学推扫式卫星遥感影像产品的商业化运作中,各个商业卫星都定制了独有的产品分级,用户可以根据不同需求,选择自己所需的不同级别产品。虽然各种卫星产品的分级标准并不一样,但是根据卫星影像产品的制作流程,综合各商业卫星的几何分级定义,本文对星载光学推扫式卫星遥感影像产品的分级进行了统一的界定:辐射校正产品是指经过辐射纠正和一定的传感器几何校正(如 CCD 条带拼接),但没有经过进一步几何处理的原始影像;系统几何校正影像产品是指按照一定的地球投影,以一定地面分辨率投影在地球椭圆面上的产品;精纠正影像产品是指经过一定数量的控制点精化成像几何模型,以一定地面分辨率投影在地球椭圆面上的几何产品;正射产品,即通过控制点精化成像几何模型,用 DEM(数字高程模型)消除了高差引起的投影差,以一定地面分辨率投影在地球椭圆面上的产品。可以看出,系统几何校正产品、精纠正产品没有进行地形改正,因而保留了地形起伏信息,正射影像产品含有不完整的地形信息(可能含有残留的地形信息)。而系统几何校正产品、精纠正产品以及正射纠正影像产品的几何模型通常情况下用仿射变换来表示,该几何模型是一个二维几何模型,缺失了三维几何信息。因此,建立系统几何校正影像产品、精纠正影像产品的三维几何模型有着很强实用意义。

通常意义上,光学卫星遥感影像严密成像几何模型反映了卫星遥感影像的成像几何,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,可以应用于多种光学卫星遥感的辐射校正影像产品^[1-5]。该模型以共线方程为基础,在像方坐标和物方坐标间建立严密的成像几何关系,它的解算必须已知传感器的位置、速度和姿态等参数。而不同的卫星辐射校正产品的严密成像几何模型各不相同,不便于遥感影像的应用。为了简化遥感影像的处理与应用,用于替代光学遥感影像的严密成像几何模型的与传感器无关的通用的成像模型—RFM 应运而生^[5]。目前,所有的通用商业软件均已支持 RFM 模型。

为了提高我国遥感卫星影像的应用水平,本文提出把 RFM 应用于系统几何校正影像产品、精纠正影像产品。带有 RPC 参数的系统几何校正产品、精纠正产品,不仅具有传统几何产品的特性,同时保持了

卫星传感器成像时的高程信息,可以同辐射校正产品一样用于摄影测量的立体处理和正射影像生产。

为了使星载光学推扫式卫星遥感影像各级产品能支持带几何模型的处理,本文首先构建了卫星的辐射校正产品的几何模型,并以此为基础,提出并构建了卫星影像系统几何校正影像产品、精纠正影像产品的三维几何模型。为了应用的需求,本文研究 RFM 模型替代各级几何产品的严密几何模型的可行性,并基于 RFM 的正射纠正,分别生产正射影像,通过对各级影像生成的正射影像和高精度地面参考影像比较;同时利用立体像对进行立体定向,对比各级产品立体定向的精度,验证了本文的理论方法。

2 三维几何模型的建立

要建立系统几何校正产品、精纠正产品的三维几何模型,必须从其生产流程出发,重新建立该产品高程面方向的几何变形规律。模型的建立需要以下三个步骤:首先,利用卫星的辅助数据,建立辐射校正产品严密成像模型。其次,通过辐射校正产品与系统几何校正产品、精纠正产品的关系建立系统几何产品的严密三维几何模型。最后,根据利用 RFM 来表示系统几何产品的三维几何模型,为商业化应用打下基础。

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,通过解求成像瞬间各 CCD 元的视线方向与地球椭圆模型的交点,建立的像点与地面点之间一一对应的关系^[6]。

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,可以由公式(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,如公式(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三维几何模型

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三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。

已知某一点在椭球面上的大地坐标为 (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^[7-8]。

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

上式是将大地坐标变换为投影面坐标的投影正变换, 而将投影面坐标转化为大地经纬度坐标称为投影反变换^[7-8]:

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

从像素点坐标 (x, y) 变换到投影面坐标 $(east, north)$ 可以通过下列变换公式

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

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三维几何模型的正变换。流程如图 1。

- (1) 根据公式(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) 根据公式(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公式(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) 再通过公式(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}) 。

上述变换即建立并推导了卫星系统几何校正产品的三维几何模型的正变换。其逆变换即为三维几何模型的反变换。

2.3 精纠正产品的三维几何模型

由于精纠正影像是通过一定数量的控制点采用定义在影像面的仿射变换^[5]来校正影像上行列方向的误差。

在辐射校正影像上定义仿射变换:

$$\begin{aligned} y_1 &= e_0 + e_1 \cdot sample + e_2 \cdot line \\ x_1 &= f_0 + f_1 \cdot sample + f_2 \cdot line \end{aligned} \quad (6)$$

式中, (x_1, y_1) 是控制点在辐射校正影像上的量测坐标。 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。

精纠正影像产品的几何模型和系统几何校正影像产品几何模型类似, 只是在辐射校正影像面上增加了一个仿射变换, 其严密几何模型的正变换如图 1 所示(虚线框内即为增加的仿射变换过程):

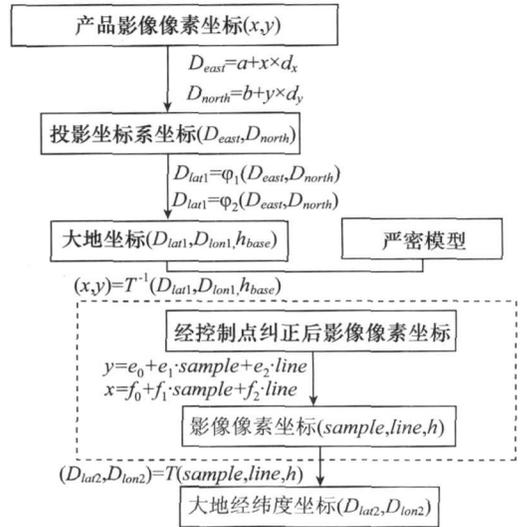


图 1 产品严密模型正变换流程图

2.3 各级产品的 RFM 模型

在系统几何校正产品和精纠正产品的正反变换模型中, 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三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。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三维几何模型, 而 RFM 能够很好地解决以上问题。

求解 RPC 参数, 并验证 RFM 对于严密几何模型的可替代性: 根据影像覆盖范围, 利用美国地质调查局提供的全球 1km 分辨率 DEM, 计算该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和精纠正产品的三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。采用岭估计方法利用最小二乘平差原理解求 RPC 参数, 并用检查点进行精度检查^[5]。

3 实验

本文采用北京地区的一景 10m 分辨率和一景 2.5m 分辨率的 SPOT HRG 影像进行正射纠正的验证实验; 并用两景北京地区分辨率为 5m 的 SPOT 5 HRG 卫星异轨立体数据来进行立体验证试验。各景影像覆盖的区域基本相同, 皆为北京城区。该地区地形平坦, 地面起伏不大, 属于平地地区地形。并且通过获取试验地区的航空摄影测量影像, 生成出的该地区 3m 分辨率的 DOM(正射影像), 以

及高精度的 DEM 作为参考数据,用于获取该地区的控制点和检查点。

3.1 RPC 解算实验

在 RFM 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地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^[5]。RFM 有 9 种形式,本文实验采用的是分母不同的 3 阶 RPC 模型求解 RPC。其结果精度如表 1 所示:

表 1 各影像产品 RFM 模拟精度(单位: 10^{-2} 像素)

| 影像产品 | 精度类型 | X | | Y | | 平面 | |
|---------------------|------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|
| | | 最大 | 中误差 | 最大 | 中误差 | 最大 | 中误差 |
| SPOT 2.5m 系统几何校正产品 | 检查点 | 0.767 | 0.143 | 0.736 | 0.169 | 0.938 | 0.221 |
| | 控制点 | 1.002 | 0.164 | 0.952 | 0.191 | 1.207 | 0.252 |
| SPOT 2.5m 精纠正产品 | 检查点 | 0.767 | 0.143 | 0.736 | 0.169 | 0.938 | 0.221 |
| | 控制点 | 1.003 | 0.164 | 0.951 | 0.191 | 1.207 | 0.252 |
| SPOT 10m 系统几何校正产品 | 检查点 | -0.18 | 0.044 | -0.243 | 0.065 | 0.253 | 0.078 |
| | 控制点 | 0.288 | 0.056 | 0.331 | 0.085 | 0.371 | 0.101 |
| SPOT 10m 精纠正产品 | 检查点 | -0.18 | 0.044 | -0.243 | 0.065 | 0.253 | 0.078 |
| | 控制点 | 0.288 | 0.056 | 0.331 | 0.085 | 0.371 | 0.101 |
| SPOT 5m 第一景系统几何校正产品 | 检查点 | 1.236 | 0.037 | 0.752 | 0.047 | 1.447 | 0.060 |
| | 控制点 | 7.005 | 0.055 | 3.800 | 0.058 | 7.969 | 0.080 |
| SPOT 5m 第一景精纠正产品 | 检查点 | 0.107 | 0.020 | -0.127 | 0.022 | 0.130 | 0.030 |
| | 控制点 | 15.025 | 0.090 | 8.221 | 0.070 | 17.127 | 0.114 |
| SPOT 5m 第二景系统几何校正产品 | 检查点 | 0.107 | 0.020 | -0.127 | 0.022 | 0.130 | 0.030 |
| | 控制点 | 0.130 | 0.022 | -0.148 | 0.025 | 0.154 | 0.034 |
| SPOT 5m 第二景精纠正产品 | 检查点 | 0.107 | 0.020 | -0.127 | 0.022 | 0.130 | 0.030 |
| | 控制点 | 0.130 | 0.022 | -0.148 | 0.025 | 0.153 | 0.034 |

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,系统几何校正产品和精纠正产品的 RFM 模型参数求解的检查点平面精度为 0.030×10^{-2} 像素,控制点平面精度为 0.114×10^{-2} 像素,满足精度要求。

3.2 正射纠正精度对比

对本文提出并建立的各级产品的三维模型进行正射纠正^[5],各级产品的正射纠正产品能完全的叠合,并以一景正射产品为基准与 3m 分辨率的参考 DOM 进行绝对精度对比,在影像面上选取均匀分布的 9 个点,分布图如图 2。

表 2 显示: SPOT 2.5m 正射纠正影像以 3m 分辨率 DOM 为参考的精度,其中最大平面误差为 4.49m; SPOT 10m 正射纠正影像以 3m 分辨率 DOM 为参考的精度,其中最大误差为 6.77m;考虑到选点误差以及参考影像的精度,误差均在允许范围内。

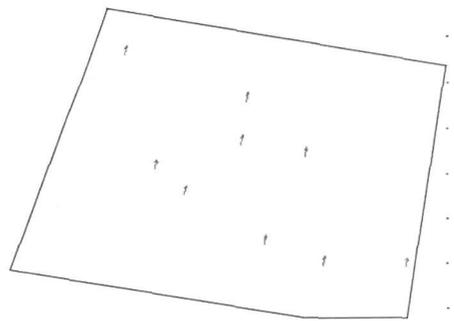


图 2 正射纠正产品检查点分布示意图

表 2 几何纠正影像精度表(单位 m)

| 实验数据 | 误差类型 | 残差 | | |
|-----------|------|------------|------------|------|
| | | ΔX | ΔY | 平面 |
| SPOT 2.5m | 中误差 | 1.87 | 1.33 | 0.92 |
| | 最大误差 | 4.25 | 3.04 | 4.49 |
| SPOT 10m | 中误差 | 2.36 | 1.72 | 2.95 |
| | 最大误差 | 6.07 | 3.34 | 6.77 |

3.3 立体定向精度对比

分别对辐射纠正产品和系统几何纠正产品以及精纠正影像进行立体定向,在各级影像上选取相同的分布均匀的12对控制点,以及16对分布均匀的加密点进行立体定向^[9]。

表3表明HRG辐射纠正产品与系统几何纠正产品的定向结果中误差平面在0.021m,高程在0.120m,最大误差平面为0.090m,高程为0.268m。考虑到选点误差,可以认定两级产品的立体定向精度一致;辐射纠正产品与精纠正产品的定向结果中误差平面在0.023m,高程在0.082m,而最大误差平面为0.086m,高程为0.248m。可以认定两级产品的立体定向精度一致。

表3 SPOT5 HRG 立体定向精度比较(单位: m)

| 对比数据 | 误差类型 | 残差 | |
|-------------------|------|-------|--------|
| | | 平面 | 高程 |
| 辐射校正产品与系统几何校正产品对比 | 中误差 | 0.021 | 0.120 |
| | 最大误差 | 0.090 | -0.268 |
| 辐射校正产品与精纠正产品对比 | 中误差 | 0.023 | 0.082 |
| | 最大误差 | 0.086 | -0.248 |

4 结束语

本文通过重建推扫式光学卫星影像系统几何校正产品及精纠正产品三维几何模型,并求解RFM来表示重建的三维模型。通过基于RFM的正射纠正来验证三维几何模型的平面精度以及通过三维模型进行了立体定向来验证模型的高程精度。

从PRC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RPM,其控制点平面精度和检查点平面精度均优于5%像素,可以替代各级影像的复杂严密模型进行后续的纠正和定向处理。

基于各级影像制作的正射影像精度优于一个像素,能精确的套合,进一步证明了本文理论的严密性和实用性。通过RFM对系统几何校正产品及精纠正立体定向的实验结果可以看出,利用本文构建的三维立体模型进行立体定向,与辐射纠正产品的立体定向精度一样。因此本文构建的三维几何模型可以进行系统几何校正及精纠正产品的摄影测量处理,也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] Understanding Satellite Orbital Modelling[EB/OL]. The help of PCI software, Geomatica_V90\HLP\orthoeng.chm: :/Chapter_25.html
- [2] Taejung Kim. Modeling satellite orbital segments using orbit attitude models[J]. Korean Journal of Remote Sensing, 2006, 22(1): 63- 73.
- [3] Dieter F., Dirk S. Rigorous photogrammetric processing of high resolution satellite imagery [C]//ISPRS, 2000, Vol. XXXIII: 42- 50.
- [4] Okamoto. A orientation theory of CCD line scanner images [C]// International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Japan: ISPRS, 1988, 27(B3): 609- 617.
- [5] TAO V C, HU Yong. A comprehensive study of the rational function model for photogrammetric processing[J]. PE & RS, 2001, 67(12): 1347- 1357.
- [6] Okamoto, A.. Orientation and construction of models part3 mathematical basis of the orientation problem of one dimensional central perspective[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1981, 47(12): 1739- 1752.
- [7] El-Mandili, Yand Novak, K. Precision rectification of SPOT imagery using the direct linear transformation model[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1996: 67- 72.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] SPOT Satellite Geometry Handbook[M]. S NT- 73- 12- SI. SPOT IM AGE, 2002, Edition F Revision 0: 1- 74.
- [11] 徐绍铭,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.
- [12] 王家耀,孙群,王光霞,等. 地图学[M]. 郑州: 解放军信息工程大学测绘学院, 2003: 48- 50.