

# 基于 RPC 模型的 IKONOS 卫星影像高精度立体定位

刘 军, 王冬红, 毛国苗

(信息工程大学 测绘学院, 河南 郑州 450052)

## High Precision Stereo Positioning of IKONOS Satellite Images Based on RPC Model

LIU Jun, WANG Dong-hong, MAO Guo-miao

**摘要:** 简单介绍 IKONOS 卫星的基本情况及其影像的 RPC 模型, 重点推导基于 RPC 模型的立体定位算法, 并给出补偿 RPC 模型系统误差的物方方案和像方方案。实验结果表明, 这些方案能有效地消除 RPC 模型的系统误差, 达到的定位精度能满足 1:1 万比例尺的地形图测绘要求。

**关键词:** 有理函数模型; RPC; 立体定位; 相似变换

IKONOS 卫星是 Space Imaging 公司为满足高解析度和高精度空间信息获取而设计制造。IKONOS-1 于 1999 年 4 月 27 日发射失败, 同年 9 月 24 日, IKONOS-2 发射成功, 紧接着于 10 月 12 日成功接收第 1 张影像, 卫星的设计寿命 7 年。IKONOS 是世界上第 1 颗高分辨率商业遥感卫星, 它将改变航天摄影测量停留在中小比例尺的现状, 为较大比例尺的地形图测绘提供理想的数据源。

### 一、基本情况

IKONOS 卫星由 Lockheed Martin 公司制造, 由 Athena II 火箭于加州范登堡空军基地发射成功。它采用高  $98.1^\circ$  的太阳同步轨道, 平均飞行高度 681 km, 轨道周期 98.3 min, 通过赤道时间为当地时间上午 10:30。

卫星的传感器系统由美国 Eastman Kodak 公司研制, 其中的全色传感器由 13 816 个 CCD 单元以线阵列排成, CCD 单元的物理尺寸为  $12\ \mu\text{m} \times 12\ \mu\text{m}$ , 多光谱传感器分 4 个波段, 每个波段由 3 454 个 CCD 单元组成。传感器光学系统的等效焦距为 10 m, 视场角为  $0.931^\circ$ , 星下点的地面分辨率在全色波段最高可达 0.82 m, 多光谱可达 3.28 m, 扫描宽度约为 11 km。卫星的传感器系统机械设计十分灵活, 可以任意方位角成像, 偏离正底点摆动可达  $60^\circ$ , 不仅可绕飞行方向侧视观测, 也可通过沿飞行方向的前后摆动形成同轨立体覆盖, 具有推扫、横扫成像能力。

### 二、IKONOS 立体影像的几何模型

灵活的成像方式、精确的轨道及姿态控制导致 IKONOS 影像的严格几何模型极为复杂, 难以严格解算。为了简化用户处理, 同时不泄漏传感器的核心成像参数, Space Imaging 采用有理多项式 (Rational Polynomial Camera-RPC) 模型作为 IKONOS 立体影像定位的几何模型。

RPC 模型的实质是有理函数模型 (Rational Function Model-RFM), 其定义如下<sup>[1,2]</sup>:

$$s = \frac{\text{Num}s(U, V, W)}{\text{Den}s(U, V, W)} \quad l = \frac{\text{Num}l(U, V, W)}{\text{Den}l(U, V, W)} \quad (1)$$

式中,  $(U, V, W)$  是标准化后的地面点空间坐标 (纬度  $\phi$ , 经度  $\lambda$  和高程  $h$ ),  $(s, l)$  是标准化后的像点坐标  $(S, L)$ 。Nums  $(U, V, W)$ , Dens  $(U, V, W)$ , Numl  $(U, V, W)$ , Denl  $(U, V, W)$  都是如下形式的多项式:

$$p = a_1 + a_2 V + a_3 U + a_4 W + a_5 VU + a_6 VW + a_7 UW + a_8 V^2 + a_9 U^2 + a_{10} W^2 + a_{11} UVW + a_{12} V^3 + a_{13} VU^2 + a_{14} VW^2 + a_{15} V^2 U + a_{16} U^3 + a_{17} UW^2 + a_{18} V^2 W + a_{19} U^2 W + a_{20} W^3$$

地面坐标和像点坐标的标准化原理为

$$\left. \begin{aligned} U &= (\phi - \phi_0) / \phi_s \\ V &= (\lambda - \lambda_0) / \lambda_s \\ W &= (h - h_0) / h_s \\ s &= (S - S_0) / S_s \\ l &= (L - L_0) / L_s \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中,  $(\phi_0, \lambda_0, h_0, S_0, L_0)$  为标准化平移参数,  $(\phi_s, \lambda_s, h_s, S_s, L_s)$  为标准化比例参数, 它们与 RPC 模型的 4 个多项式的 80 个系数共同保存在 Space Imaging 提供给用户的 RPC 文件中。

IKONOS 影像 RPC 模型的建立采用“独立于地形”的方式, 即首先利用星载 GPS 测定的卫星轨道参数及恒星相机、陀螺测定的姿态参数建立严格几何模型, 之后利用严格模型生成大量均匀分布的虚拟地面控制点, 再利用这些控制点计算 RPC 模型参数, 其实质是利用 RPC 模型拟合严格几何模型。J.Grodecki 的实验证明, RPC 模型拟合的最大误差不超过 0.04 个像素, 均方差优于 0.01 个像素<sup>[1, 2]</sup>。

### 三、立体定位的基本原理

RPC 模型不直接支持像点坐标到空间坐标的转换, 解算地面点的空间坐标需要对 RPC 模型进行适当变形。综合式(1), 式(2), 可将像点原始坐标  $(S, L)$  表示为

$$\begin{aligned} S &= S_0 F(\phi, \lambda, h) + S_0 \\ L &= L_0 G(\phi, \lambda, h) + L_0 \end{aligned} \tag{3}$$

式中,  $F(\phi, \lambda, h) = \frac{Nums(U, V, W)}{Dens(U, V, W)}$

$$G(\phi, \lambda, h) = \frac{Numl(U, V, W)}{Denl(U, V, W)}$$

将式(3)泰勒展开为一次项, 于是求解地面点空间坐标的误差方程为

$$\begin{aligned} v_S &= \frac{\partial S}{\partial \phi} \Delta \phi + \frac{\partial S}{\partial \lambda} \Delta \lambda + \frac{\partial S}{\partial h} \Delta h - (S - S_0) \\ v_L &= \frac{\partial L}{\partial \phi} \Delta \phi + \frac{\partial L}{\partial \lambda} \Delta \lambda + \frac{\partial L}{\partial h} \Delta h - (L - L_0) \end{aligned}$$

则根据同名像点的像坐标  $(S_l, L_l), (S_r, L_r)$ , 可列出以下误差方程

$$\begin{bmatrix} v_{Sl} \\ v_{Sr} \\ v_{Ll} \\ v_{Lr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial S_l}{\partial \phi} & \frac{\partial S_l}{\partial \lambda} & \frac{\partial S_l}{\partial h} \\ \frac{\partial S_r}{\partial \phi} & \frac{\partial S_r}{\partial \lambda} & \frac{\partial S_r}{\partial h} \\ \frac{\partial L_l}{\partial \phi} & \frac{\partial L_l}{\partial \lambda} & \frac{\partial L_l}{\partial h} \\ \frac{\partial L_r}{\partial \phi} & \frac{\partial L_r}{\partial \lambda} & \frac{\partial L_r}{\partial h} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \phi \\ \Delta \lambda \\ \Delta h \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} S_l - S_0 \\ S_r - S_0 \\ L_l - L_0 \\ L_r - L_0 \end{bmatrix} \tag{4}$$
$$v = A \Delta - l$$

式中, 各偏导数的具体形式可参见文献[4]。于是依据最小二乘原理, 可计算出地面坐标改正数  $\Delta$

$$\Delta = [\Delta \phi \quad \Delta \lambda \quad \Delta h]^T = (A^T A)^{-1} A^T l$$

地面坐标的解算需要迭代进行, 初始值可简单取为标准化平移参数的平均值。由 RPC 模型直接交会出的地面坐标  $(\phi, \lambda, h)$  采用 WGS-84 坐标系,

需要转换到用户定义的局部测图坐标系中。

### 四、RPC 模型的系统误差补偿

由于 IKONOS 标准立体影像产品仅利用星载 GPS 和恒星相机测定的卫星位置和姿态信息生成, 没有使用地面控制, 故存在较大的系统性误差。墨尔本大学 C.S.Fraser 教授的实验表明, 尽管 RPC 模型在像方的定位误差达到 29 个像素和 17 个像素, 但各点的误差大小相近, 方向基本相同, 呈现较强的系统性<sup>[3]</sup>。为了提高立体定位精度, 需要利用地面控制点来补偿 RPC 模型的系统误差。

#### 1. 物方方案

物方补偿方案是以 RPC 模型直接交会出的空间坐标即模型坐标  $(X_{RPC}, Y_{RPC}, Z_{RPC})$  为基础, 通过对其进行某种变换来消除系统性误差。

#### 1. RPC 模型+物方平移(RPC &GT)方案

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{RPC} \\ Y_{RPC} \\ Z_{RPC} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix}$$

其中  $(X_0, Y_0, Z_0)$  为 RPC 模型坐标系原点在测图坐标系的坐标, 可利用一个或多个地面控制点解算。

#### 2. RPC 模型+相似变换(RPC &ST)方案

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \lambda R \begin{bmatrix} X_{RPC} \\ Y_{RPC} \\ Z_{RPC} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix}$$

其中,  $\lambda$  是尺度常量,  $R$  为由 RPC 模型坐标系到测图坐标系的旋转角  $(\Phi, \Omega, K)$  构成的旋转矩阵。RPC &ST 方案是对 RPC &GT 方案的进一步扩充, 它严格建立了 RPC 模型坐标系和测图坐标系之间的几何关系。空间相似变换中共有 7 个独立参数, 至少需要 3 个地面控制点才能解算。

#### 2. 像方方案

像方方案的实质是先消除像点坐标的系统性误差, 之后利用改正后的像点交会地面点, 即将式(3)所示的像点坐标  $(S, L)$  和地面点坐标  $(\phi, \lambda, h)$  之间的关系修正为

$$\begin{cases} S + \Delta S = S_0 F(\phi, \lambda, h) + S_0 \\ L + \Delta L = L_0 G(\phi, \lambda, h) + L_0 \end{cases}$$

其中,  $\Delta S, \Delta L$  为像点坐标的系统误差, J. Grodecki 提出了如下的表示方式:

$$\begin{cases} \Delta S = e_0 + e_s S + e_L L + e_{SL} SL + e_{L^2} L^2 + e_{S^2} S^2 + \dots \\ \Delta L = f_0 + f_s S + f_L L + f_{SL} SL + f_{L^2} L^2 + f_{S^2} S^2 + \dots \end{cases}$$

其中,  $e_0, e_s, e_L, \Delta$  和  $f_0, f_s, f_L, \Delta$  为改正参数<sup>[3]</sup>。

当影像条带不超过 50 km 时, 可简单将  $\Delta S,$

$\Delta L$  表示为  $\Delta S = e_0$  及  $\Delta L = f_0$ , 相当于对像坐标系进行平移, 可称之为“RPC 模型 + 像方平移方案 (RPC &IT)”, 此时可以利用  $\Delta S, \Delta L$  更新原始的 RPC 模型为

$$l = G(\phi, \lambda, h) - \frac{\Delta L}{L_S} = \frac{Num_L(U, V, W)}{Den_L(U, V, W)} - \Delta L_n =$$
$$\frac{Num_L^C(U, V, W)}{Den_L(U, V, W)}$$
$$s = F(\phi, \lambda, h) - \frac{\Delta S}{S_S} = \frac{Num_S(U, V, W)}{Den_S(U, V, W)} - \Delta S_n =$$
$$\frac{Num_S^C(U, V, W)}{Den_S(U, V, W)}$$

(5)

式(5)是经像坐 标系统误差改正的 RPC 模型 (C-RPC 模型), 它将原始 RPC 模型中的  $a_k$  替换成  $(a_k - \Delta L_nb_k)$ ,  $c_k$  替换成  $(c_k - \Delta S_nd_k)$  ( $k = 1, 2, \cdots, 20$ ), 直接消除了 RPC 模型本身的系统性误差<sup>[6]</sup>。

五、实验及结论

实验采用的数据是锦州地区 IKONOS 标准立体影像, 像幅大小均为 11 212 像素×14 040 像素, 在立体覆盖区野外实测了 38 个明显地物点(道路交叉点、房角点、田角), 根据各种定位模型的需求, 将其中少数 GPS 点作为地面控制点, 其余作为检查点。

表 1 统计了检查点上各种模型的定位误差, 表 2 是 RPC &ST 模型的部分相似变换参数。

表 1 锦州 IKONOS 影像各种模型定位精度比较

| 定位方案   | GCP | $M_X$ | $M_Y$ | $M_Z$ | $X_{\max}$ | $Y_{\max}$ | $Z_{\max}$ |
|--------|-----|-------|-------|-------|------------|------------|------------|
| RPC    | 0   | 6.702 | 3.648 | 8.531 | 9.656      | 5.981      | 11.373     |
| RPC&GT | 1   | 1.863 | 1.698 | 1.429 | 4.459      | 4.127      | 3.601      |
| RPC&GT | 4   | 1.236 | 1.133 | 1.270 | 3.094      | 3.068      | 3.371      |
| RPC&ST | 4   | 1.259 | 1.123 | 1.188 | 3.299      | 3.030      | 4.026      |
| RPC&IT | 1   | 1.970 | 1.665 | 1.491 | 4.679      | 4.081      | 3.748      |
| RPC&IT | 4   | 1.277 | 1.129 | 1.264 | 3.238      | 2.963      | 3.272      |
| C-RPC  | 4   | 1.277 | 1.129 | 1.264 | 3.238      | 2.963      | 3.272      |

表 2 RPC &ST 模型的相似变换参数

| $\lambda$ | $\Phi/(^{\circ})$ | $\Omega/(^{\circ})$ | $K/(^{\circ})$ |
|-----------|-------------------|---------------------|----------------|
| 1.000 016 | -0.009 950        | -0.004 775          | 0.000 614      |

经过分析我们不难得出如下结论。

1. 整体看来, 无论采用物方补偿还是像方补偿的方式, 只需少量的地面控制点, 就能有效地消除 RPC 模型中的系统性误差, 定位精度可以满足

1:10 000比例尺地形图的测绘要求。

2. RPC &GT 及 RPC &IT 方案虽然只是简单地将坐标系平移, 仅利用 1 个地面控制点就能有效地提高定位精度, 随着控制点数量的增加, 精度能进一步优化。

3. RPC &ST 方案在理论上比 RPC &GT 严密, 但在本实验中对定位精度的改善作用不明显, 并且表 2 中相似变换参数的计算结果也表明, RPC 模型坐标系与测图坐标系之间基本只存在平移变换, 因而只要控制点分布均匀, 采用 RPC &GT 方案也可达到与 RPC &ST 方案相当的定位精度。

4. 比较 RPC &IT(4 GCP)和 C-RPC 方案的实验结果可以发现, 当像点坐标采用平移的改正方式时, 可以成功地更新原始的 RPC 模型, 这样就可直接利用改正后的同名像点交会出地面点, 大大减少了后续处理的工作量。

Space Imaging 公司利用 RPC 模型处理 IKONOS 卫星影像, 达到一举多得的效果。首先, 它不仅成功地实现了对传感器成像核心信息的保密, 同时还保证了立体定位精度; 其次, 采用 RPC 模型作为成像几何模型, 可以不提供原始影像, 只销售经几何校正后的影像产品, 这样就额外赚取影像几何校正的利润; 再者, RPC 模型形式简单, 使用方便, 降低了对终端用户专业知识的要求, 扩大了用户群范围。数字地球公司 (DigitalGlobe) 也将 RPC 模型作为 QuickBird 卫星影像的几何模型之一。目前, 我国也自主研发了较高分辨率的遥感卫星, 并获取了大量的对地观测影像, 未来几年还有发射更高分辨率卫星的计划。这些高分辨率的卫星影像拥有巨大的应用市场, 如能实现其商业化, 不仅能获取巨额回报, 还可筹资进一步推动后续卫星的发展。要解决卫星传感器核心信息保密与商业化之间的矛盾, Space Imaging 对 IKONOS 的成功经验值得我们借鉴。

参考文献:

[ 1 ] GRODECKI J, DIAL G. IKONOS Geometric Accuracy [ A ]. Proceedings of ISPRS Working Groups I/2 I/5 and I/7 on “ High Resolution Mapping from Space 2001” [ C ]. Hanover: [ s. n. ], 2001.

[ 2 ] GRODECKI J. IKONOS Stereo Feature Extraction-RPC Approach[ A ]. ASPRS 2001 Annual Conference Proceedings[ C ]. Saint Louis[ s. n. ], 2001.

[ 3 ] GRODECKI J, DIAL G. Block Adjustment of High-Resolution Satellite Images Described by Rational Polynomials[ J ]. PE&RS, 2003, (1). (下转第 9 页)

## 6. 建立相邻等值线的拓扑关系区域。

在边界线上由等值线点和线段端点组成了  $n$  个线段区域。如图 2 所示, 所有的等值线点和边界线段端点共有 39 个点, 组成 38 个线段。

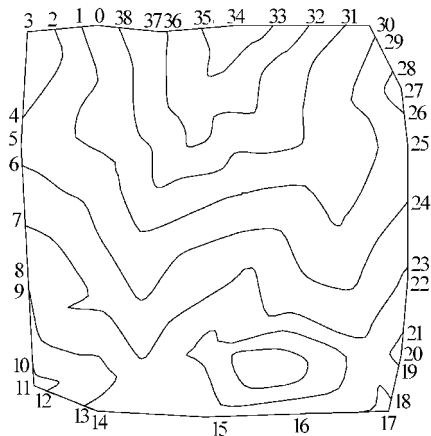


图 2 不规则区域边界及等值线

在建立拓扑关系时, 先从第一点开始, 即 0 号点开始, 首个拓扑区域的第一个点为 0 号点, 按逆时针方向, 找下一个点即 1 号点, 若 1 号点为等值线点, 则判断其是线头还是线尾, 若为线头则寻找线尾点的下一个点, 如此循环直至找到起点 0 号点, 由此便建立一个充填区域。在寻找点的过程中, 凡是找到的点的线段全部作标记, 如 0-1 段, 作了标记的线段不参加其他区域的组成。

若 1 号点是边界线段端点则继续找下一个点, 然后再循环上述步骤, 即可建立区域。

将所边界点遍历, 若没有被标记, 则作为起始点, 建立充填区域, 这样即可生成所有的充填区域。由于篇幅所限具体程序清单不再列出。

## 五、应用实例

本文根据一组实测数据, 生成 TIN, 并追踪出等值距为 20 的所有等值线(如图 2)。按上述算法自动生成区域边界线并检测出所有落在边界线上的等值线, 从而形成由边界线端点和等值线点组成的边界线: 0-1, ..., 38-0。最后按上述算法自动建立了等值线之间的拓扑关系, 生成的等值线填充图见图 3。



图 3 实测数据生成的不规则区域等值线填充图

图 3 表明, 在不规则区域内, 不论等值线是开曲线, 还是闭曲线, 本文算法均可自动建立它们之间的拓扑关系。

## 六、结 论

本文根据任意离散点数据, 在建立 TIN 的基础上, 自动生成不规则区域的边界线, 在追踪等值线后, 自动检测出落在区域边界线上所有的等值线点, 并根据边界线段端点及落在边界线段上的等值线点, 自动生成新的边界线段, 由此自动建立等值线间的拓扑关系, 形成了单一的充填区域, 实现了等值线的颜色充填。

通过实例应用表明, 本文所提出的算法稳定、可靠、快速, 可适用于任意比例尺、任意形状的区域和任意等值线间距的等值线填充。在不规则区域内的等值线, 不论是开曲线还是闭曲线, 均可自动建立它们之间的拓扑关系, 可应用于区域的周长、面积和体积等计算, 也可应用于地理信息系统与计算机图形学等领域。

## 参考文献:

- [1] 吴自银, 高金耀. 一种基于格网的快速等值线充填算法[J]. 测绘学报, 1999, 28(4): 350-354.
- [2] 袁修孝, 龚健雅. 顾及地形特征线的数字高程模型软件包[J]. 武汉测绘科技大学学报, 1995, 20(5).
- [3] 孙玉国. 拓扑空间关系描述与 2DT-String 空间关系表达[D]. 武汉: 武汉测绘科技大学, 1993.
- [4] 张登荣, 刘绍华, 毛天露, 等. 等值线自动建立拓扑关系算法与快速填充应用[J]. 中国图象图形学报, 2001, 6(A)(3): 264-269.

(上接第 3 页)

- [4] 刘 军. 高分辨率卫星 CCD 立体影像定位技术研究[D]. 郑州: 信息工程大学测绘学院, 2000.
- [5] FRASER C S, HANLEY H B, YAMAKAWA T. 3D Geopositioning Accuracy of IKONOS Imagery [J].

Photogrammetry Record 2002, (4).

- [6] FRASER C S, HANLEY H B. Bias Compensation in Rational Functions for IKONOS Satellite Imagery [J]. PE & RS, 2003 (1).