

# 少控制点的推扫式卫星姿态参数外推方法研究

陈建胜<sup>1,2)</sup> 杨健<sup>1)</sup> 赵鸿志<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>(中国科学院遥感应用研究所,北京 100101) <sup>2)</sup>(中国科学院研究生院,北京 100049)

<sup>3)</sup>(航天东方红卫星有限公司,北京 100094)

**摘要** 线阵推扫式传感器目前已经广泛应用于当代航空和航天摄影测量与遥感领域,为摄影测量与遥感应用开辟了崭新的途径。基于少控制点的推扫式卫星姿态外推研究成为新的研究方向,对较难获得控制点区域的目标定位具有重要意义。针对单线推扫式传感器影像多中心成像的特点,建立基于共线方程的传感器模型。采用空间后方交会的方法求解各扫描行的定向参数,当外推距离较远时采用单控制点进行定向参数改正。实验数据采取国内某地区同一轨道上的连续6景 SPOT 影像进行目标定位。分析外推的实验结果,当外推距离为 240 km 时,误差为 1 km 左右,利用单控制点进行误差补偿后,纠正结果明显优于前者,达到了 1 km 以下。但纠正结果仍不能让人满意,还有待进一步提高。

**关键词** 线阵推扫式传感器 共线方程 外推 少控制点

中图法分类号: TP751 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2009)08-1469-06

## Research on Extrapolation of Attitude Parameters of Push-broom Satellite with Few Ground Control Points

CHEN Jian-sheng<sup>1,2)</sup>, YANG Jian<sup>1)</sup>, ZHAO Hong-zhi<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>(Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101) <sup>2)</sup>(Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049) <sup>3)</sup>(Aerospace Dongfanghong Satellite Company Limited, Beijing 100094)

**Abstract** Linear array push-broom sensors have been widely researched and applied in the aerospace area and remote sensing applications, and have started a new approach for photogrammetry and remote sensing application. Research on extrapolation of attitude parameters of push-broom satellite with less ground points have become a new research. It is very important to target objects in a region where it is difficult to obtain ground control points. According to the characteristics of multiple central perspective imaging, we built the sensors model based on collinear equations. We solve orientation parameters of different scan lines by space resection. When the extrapolative depth is large, we take a single ground control point as the constrains. The experiment data is six Spot images of the same orbit in our country. We analyzed the extrapolative results: when the extrapolative depth is 240 km, the mean error is about 1 km, when extrapolation considers a single ground control point, the result is better than the former and the mean error is below 1 km. We can improve our results in the future by collecting other related information for the extrapolative image.

**Keywords** linear array push-broom sensors, collinear equation, extrapolation, few ground control point

基金项目:国家航天局航天遥感论证中心 HJ-1 卫星数据研究专题(07K00110KJ)

收稿日期:2009-05-20; 改回日期:2009-06-01

第一作者简介:陈建胜(1986 ~ ),男,中国科学院遥感应用研究所信号与信息处理专业硕士研究生。主要研究方向为遥感图像处理。

E-mail: haojknm@126.com

## 1 引言

线阵 CCD 推扫式传感器其突出的优势表现在目标定位与立体测图上,法国的 SPOT 卫星、印度的 IRS-1D 卫星、美国的 IKNOS、QuickBird 卫星都载有线阵 CCD 推扫式传感器,在今后可预期的一段时间内,该类传感器仍具有很好的发展前景<sup>[1]</sup>。长期以来,对遥感影像的纠正多采用控制点纠正的方法,该方法需要较多数量分布良好、精度较高的地面控制点,但对于地面特征不明显、人员无法到达的区域,控制点较难或根本无法获得。因此遥感影像的少控制点纠正成为几何纠正中亟待解决的问题。Sadeghian 将有理函数模型与轨道参数模型进行了比较,证明了严密的轨道参数模型要比有理函数模型准确度高<sup>[2]</sup>。Smith 等人对传感器模型中的外方位元素求解进行了深入研究,并在自动化定向方面取得突破<sup>[3]</sup>,袁修孝、张过利用推扫式构像方程对影像进行目标定位,取得较好的精度<sup>[4]</sup>,并基于卫星运动物理特性进行轨道外推<sup>[5]</sup>,杨海峰提出了一种新的简化轨道摄动力模型,利用该模型实现轨道外推<sup>[6]</sup>。蔡伟柯提出了一种利用目标模型投影和真实影像中目标区域的重合程度求解目标位置和姿态参数的方法<sup>[7]</sup>。目前推扫式传感器影像外推目标定位主要是根据卫星受力模型或系统辅助参数进行,本文从启算景控制点出发,利用启算景的控制点求解卫星定位参数及其变化率,从而实现外推目标定位。其中算法研究主要涉及如何利用启算景的控制点求解卫星定位参数和如何将求解到的定位参数进行平差。

## 2 目标定位算法研究

### 2.1 基于共线方程的传感器模型

线阵 CCD 传感器采用推扫式成像,获得连续的影像条带。每一扫描行影像与被摄物体之间具有严格的中心投影关系,并且都有各自的外方位元素。传感器沿着轨道( $Y$ 方向)的垂直方向对地面扫描,每扫描一行,就构成一条中心投影的影像。传感器在垂直于轨道的方向会进行倾斜扫描,设倾角为  $\theta$ ,影像点在行方向上的偏移为  $c$ ,传感器焦距为  $f$ ,首先应将影像坐标进行旋转改正,得到近似竖直摄影影像坐标  $x', y', z'$ <sup>[8]</sup>。

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & -\sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c \\ 0 \\ -f \end{bmatrix} \quad (1)$$

由式(1)进行变形得到:

$$\begin{aligned} x &= -f \frac{x'}{z} = -f \frac{c \cos(\theta) + f \sin(\theta)}{f \cos(\theta) - c \sin(\theta)} \\ y &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

通过得到的近似竖直摄影影像坐标  $x, y$ , 建立瞬时像平面坐标系,设第  $i$  行的外方位元素为  $(X_{Si}, Y_{Si}, Z_{Si}, \varphi_{Si}, \omega_{Si}, \kappa_{Si})$ , 得到瞬时构像方程式为

$$\begin{bmatrix} x_i \\ 0 \\ -f \end{bmatrix} = \frac{1}{\lambda} \mathbf{M}_i^T \begin{bmatrix} X - X_{Si} \\ Y - Y_{Si} \\ Z - Z_{Si} \end{bmatrix} \quad (3)$$

或

$$\begin{cases} x_i = -f \frac{a_1(X - X_{Si}) + b_1(Y - Y_{Si}) + c_1(Z - Z_{Si})}{a_3(X - X_{Si}) + b_3(Y - Y_{Si}) + c_3(Z - Z_{Si})} \\ y_i = 0 = -f \frac{a_2(X - X_{Si}) + b_2(Y - Y_{Si}) + c_2(Z - Z_{Si})}{a_3(X - X_{Si}) + b_3(Y - Y_{Si}) + c_3(Z - Z_{Si})} \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $(X, Y, Z)$  为地面点的空间坐标,  $\lambda$  为比例因子,  $\mathbf{M}_i$  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,  $a_i, b_i, c_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) 是  $\mathbf{M}_i$  中的各元素。

通常要精确求解每一扫描行的外方位元素是不可能的。但由于星载 CCD 传感器受外界阻力小,飞行轨道平稳,因此在一定范围内,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<sup>[9]</sup>, 这样就可将外方位元素表示为

$$\begin{cases} X_{Si} = X_{s0} + \dot{X}_s \cdot y + \ddot{X}_s \cdot y^2 \\ Y_{Si} = Y_{s0} + \dot{Y}_s \cdot y + \ddot{Y}_s \cdot y^2 \\ Z_{Si} = Z_{s0} + \dot{Z}_s \cdot y + \ddot{Z}_s \cdot y^2 \\ \varphi_{Si} = \varphi_{s0} + \dot{\varphi}_s \cdot y \\ \omega_{Si} = \omega_{s0} + \dot{\omega}_s \cdot y \\ \kappa_{Si} = \kappa_{s0} + \dot{\kappa}_s \cdot y + \ddot{\kappa}_s \cdot y^2 \end{cases} \quad (5)$$

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,  $(\dot{X}_s, \dot{Y}_s, \dot{Z}_s, \dot{\varphi}_s, \dot{\omega}_s, \dot{\kappa}_s)$  为外方位元素的一阶变化率,  $(\ddot{X}_s, \ddot{Y}_s, \ddot{Z}_s, \ddot{\kappa}_s)$  为外方位元素的二阶变化率。由于外推的时间较长,为保证精度,

故取二阶变化率 $(\ddot{X}_s, \ddot{Y}_s, \ddot{Z}_s, \ddot{\kappa}_s)$ 。严格成像模型的外方位元素解算采取后方交会条件平差模型<sup>[10]</sup>。

## 2.2 空间后方交会条件平差模型

经典的空间后方交会是把6个外方位元素作为未知数,每一个控制点可以列立两个方程,若有3个地面点坐标控制点,就可以求解出6个外方位元素。但为了提高精度和计算结果的可靠性,必须有足够的多余观测参量,采用最小二乘方法中的间接平差原理进行求解。在实际计算中,通常把控制点的地面坐标视为真值,把相应的像点坐标视为观测值,加入相应的改正数,每个控制点可以列立两个误差方程式,最后形成总的误差方程式,然后组成法方程,解答后求出6个外方位元素的改正数,进而获得6个外方位元素的平差值。该方法最少的控制点数量为3个,一般要求为6个以上,如果控制点数量少于3个,就无法获得固定解,必须寻求新的计算模型。本文需求16个外方位元素的改正数,故需要至少8个控制点。

设 $L = (l_1, l_2, l_3, \dots, l_{15}, l_{16})$ 为对应外方位元素 $(X_{s0}, Y_{s0}, Z_{s0}, \varphi_0, \omega_0, \kappa_0, \dot{X}_s, \dot{Y}_s, \dot{Z}_s, \dot{\varphi}_s, \dot{\omega}_s, \dot{\kappa}_s, \ddot{X}_s, \ddot{Y}_s, \ddot{Z}_s, \ddot{\kappa}_s)$ 的值。

将式(5)线性化后,得到基本误差方程:

$$B \cdot V + W = 0 \quad (6)$$

其中, $V = (\Delta X_{s0}, \Delta Y_{s0}, \Delta Z_{s0}, \Delta \varphi_0, \Delta \omega_0, \Delta \kappa_0, \Delta \dot{X}_s, \Delta \dot{Y}_s, \Delta \dot{Z}_s, \Delta \dot{\varphi}_s, \Delta \dot{\omega}_s, \Delta \dot{\kappa}_s, \Delta \ddot{X}_s, \Delta \ddot{Y}_s, \Delta \ddot{Z}_s, \Delta \ddot{\kappa}_s)$

$$B = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & \cdots & b_{15} & b_{16} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & \cdots & b_{25} & b_{26} \end{pmatrix}$$

$$W = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \end{bmatrix}$$

$V$ 为对应的观测值的改正数向量, $b_{ij}$ 是关于3个姿态角的函数。 $W$ 为观测值初值。

根据条件平差原理,得到法方程

$$N \cdot K + W = 0 \quad (7)$$

其中, $K$ 为联系数向量, $N$ 为法方程系数矩阵

由 $N = B \cdot P^{-1} \cdot B^T$ , $P$ 为观测值权矩阵,则

$$K = -N_{aa}^{-1} \cdot W;$$

$$V = P^{-1} \cdot B^T \cdot K;$$

$$\hat{L} = L + V$$

得到各观测值的最或然值。

为了提高精度,采用逐次平差,把上一次的平差值作为观测值重新平差,进行迭代,从而获得精确的外方位元素值<sup>[11]</sup>。

## 3 定位参数解算流程

### 3.1 定位参数解算流程

线阵推扫式影像方位的解算过程可归纳如下:

(1)按式(1)进行镜位角改正,得到近似竖直摄影影像坐标 $x, y$ 。

(2)根据 $n$ 个启算景控制点像点之间的距离 $d_i$ 和相应地面点之间的距离 $D_i$ ,计算近似比例尺 $M$ 进而得到卫星传感器的初始高度 $Z_{s0}$ 和位置 $(X_{s0}, Y_{s0})$ :

$$M \approx \frac{\sum_{i=0}^{n-1} \left( \frac{D_i}{d_i} \right)}{n} \quad (8)$$

$$Z_{s0} \approx fM$$

由于

$$\frac{X_i - X_{s0}}{x_i - x_0} \approx \frac{Y_i - Y_{s0}}{y_i - y_0} \approx M \quad (9)$$

所以有

$$\left\{ \begin{array}{l} X_{s0} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} [X_i - M(x_i - x_0)] \\ Y_{s0} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} [Y_i - M(y_i - y_0)] \end{array} \right\} \quad (10)$$

(3)确定式(5)中的外方位元素的近似值及其随轨道运动的变化近似值:

$(X_{s0}, Y_{s0}, Z_{s0}, \varphi_0, \omega_0, \kappa_0, \dot{X}_s, \dot{Y}_s, \dot{Z}_s, \dot{\varphi}_s, \dot{\omega}_s, \dot{\kappa}_s, \ddot{X}_s, \ddot{Y}_s, \ddot{Z}_s, \ddot{\kappa}_s)$

(4)按式(5)逐点计算外方位元素和旋转矩阵。

(5)利用空间后方交会条件平差模型,求解方程并得到外方位元素的改正数。

(6)将得到的改正数加入到初始值当中,即可得到各点的外方位元素,同时判断各改正数是否小于收敛阈值或超过最大迭代次数,如大于收敛阈值且未超过最大迭代次数则重复步骤3至步骤6。否则,迭代结束,得到各点外方位元素。图1为定位参数解算流程图。

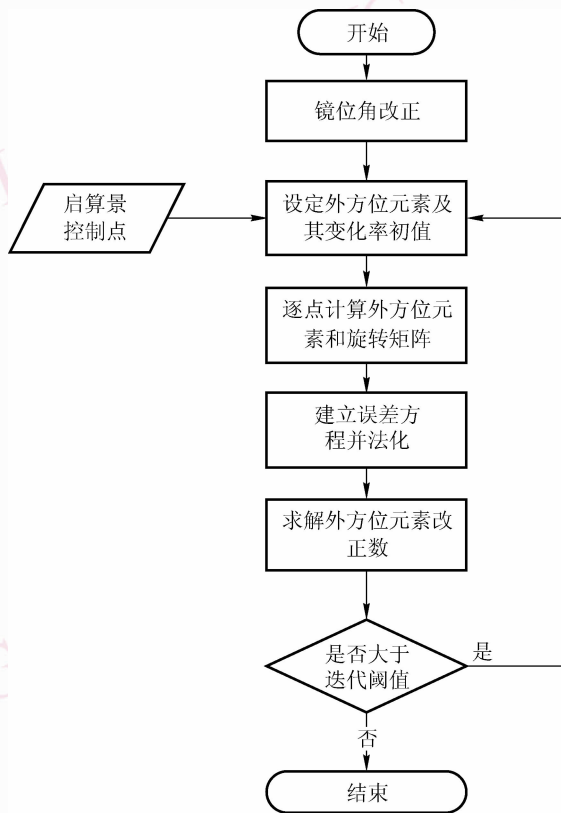


图 1 定位参数解算流程图

Fig. 1 Solving locating parameters flow chart

### 3.2 基于单控制点的误差补偿

假设卫星运行真实轨道未知, 仅仅根据第 1 景控制点获得的信息很难准确估计较远景的卫星运动状态, 故需要较远景的相关信息进行改正。影响其几何纠正精度的误差基本可以分为两类, 因此, 一类参数纠正行方向的误差, 一类参数纠正列方向的误差, 其中行误差吸收外方位元素变化率在行方向上的影响, 列误差吸收外方位元素在列方向上的影响, 可以采用定义在影像面上的仿射变换来纠正此类误差, 在影像上定义的仿射变换<sup>[12]</sup>为

$$\begin{cases} y = a_0 + a_1 r + a_2 l \\ x = b_0 + b_1 r + b_2 l \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $(r, l)$  为影像行列号,  $(x, y)$  为地理坐标,  $a_i, b_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) 为待求参数。

根据式(11)可对每个控制点列线性方程, 根据最小二乘平差求解仿射变换系数, 根据求解的改正数提高外推定位精度。在缺少控制点的条件下, 为获得良好的精度, 待求解的仿射变换系数需要进行分析。这里只取一个控制点, 故可以只求解偏移参数  $(a_0, b_0)$  来消除平移误差。

## 4 实验及结果分析

以国内某地区的同轨 6 景 SPOT-2 影像为例, 根据上述基于共线方程的外推原理以及单控制点补偿方法, 首先利用起始景的控制点计算该卫星运行时外方位元素的变化率, 这里假设外方位元素是按线性变化。然后分别对这 6 景图像进行无控制点外推纠正和单控制点外推纠正。在每景外推影像上选取多个分布均匀的明显地物点作为检查点, 检验其纠正精度。图 2、图 3 分别为启算景和第 6 景进行单控制点外推纠正的原图与结果图。

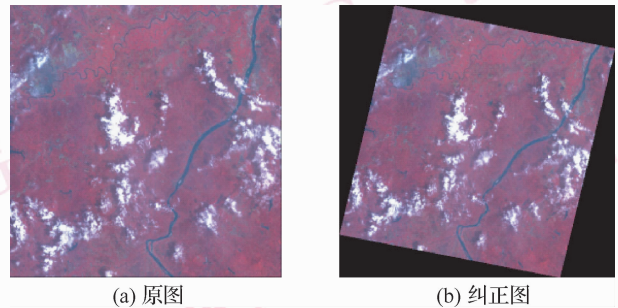


图 2 启算景原图及纠正结果

Fig. 2 The first image and corrected image

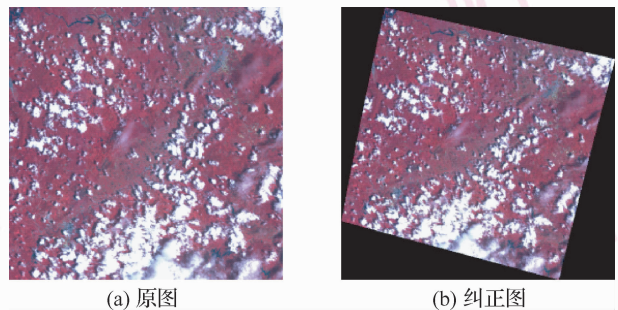


图 3 第 6 景原图及纠正结果

Fig. 3 The sixth image and corrected image

表 1、表 2 分别为进行无控制点外推纠正和单控制点外推纠正的精度分析。

将表 1 与表 2 进行比较, 以外推深度为横轴, 以平面中误差为纵轴, 得到图 4。

由图 4 可以看出, 在无控制点作为约束的条件下, 随着外推深度的加大, 外推定位精度误差呈较快趋势增长, 当将单控制点引入作为约束条件时, 外推定位精度明显改善, 但随着外推深度加大, 外推定位精度误差仍存在增长趋势。

表 1 无控制点外推定位精度分析

Tab. 1 Precision of extrapolation with no GCP

外推深度 (km)	60	120	180	240	300
检查点个数	8	7	7	8	7
X 最小误差 (km)	0.02	0.07	0.22	0.52	1.55
X 最大误差 (km)	0.1	0.15	0.31	0.84	2.31
Y 最小误差 (km)	0.03	0.09	0.33	0.87	2.12
Y 最大误差 (km)	0.1	0.2	0.45	1.26	2.82
平面最小误差 (km)	0.04	0.11	0.39	0.94	2.51
平面最大误差 (km)	0.14	0.25	0.54	1.44	3.44
平面中误差 (km)	0.08	0.2	0.51	1.3	3.16

表 2 单控制点外推定位精度分析

Tab. 2 Precision of extrapolation with single GCP

外推深度 (km)	60	120	180	240	300
检查点个数	7	6	6	7	6
X 最小误差 (km)	0	0.03	0.07	0.13	0.2
X 最大误差 (km)	0.03	0.08	0.25	0.53	0.89
Y 最小误差 (km)	0.01	0.05	0.12	0.2	0.32
Y 最大误差 (km)	0.04	0.1	0.31	0.67	1.28
平面最小误差 (km)	0.02	0.05	0.13	0.23	0.37
平面最大误差 (km)	0.05	0.12	0.39	0.85	1.55
平面中误差 (km)	0.04	0.08	0.36	0.82	1.35

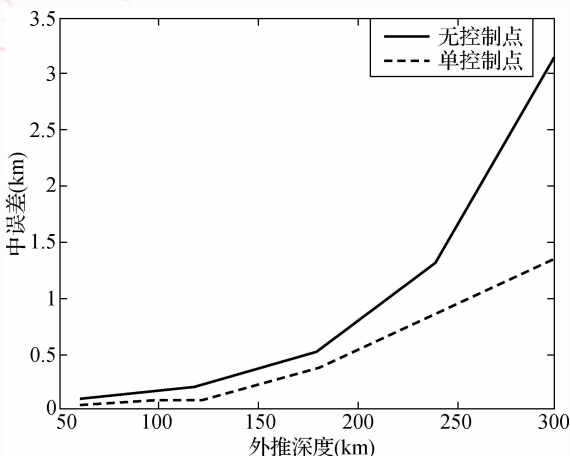


图 4 无控制点与单控制点外推定位精度比较

Fig. 4 Comparison of precision between no GCP and single GCP

## 5 结论

依据基于共线方程的传感器模型进行外推建模,并利用单控制点进行系统误差补偿,获得了较好的外推精度,验证了其模型在外推应用中的正确性。本方法适用于在没有外方位元素的条件下,完全依靠地面控制点进行外推纠正的情形,当卫星的飞行姿态不稳定时,对其外推结果影响较大甚至导致无法正确外推目标定位。由于外方位元素的求解是基于在一定范围内,不同扫描行的外方位元素是在跟时间线性相关的假设下进行的,但当外推深度较大时,这一假设不成立,所以当外推范围较大时,如何对其外方位元素进行约束改正是下一步要解决的问题。

## 参考文献 (References)

- 1 Poli D, Zhang L, Gruen A. Orientation of satellite and airborne imagery from multi-line push-broom sensors with a rigorous sensor model [J]. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing, 2004, **35**(B1):130-135.
- 2 Sadeghian S, Valadan Zoej. Comparative testes of mathematical models for accuracy potential of point measurements in IKONOS geo image [J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2004, **35**(B2):586-591.
- 3 Smith M, Park G. Absolute and exterior orientation using linear features [J]. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 2000, **33**(B3):850-857.
- 4 Yuan Xiu-xiao, Zhang Guo. Object location of satellite imagery under lacking ground control points [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2003, **28**(5):505-509. [袁修孝,张过. 缺少控制点的卫星遥感对地目标定位 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2003, **28**(5):505-509.]
- 5 Yuan Xiu-xiao, Zhang Guo, Wu Chun-hua. Extrapolative location of high resolution remote sensing imageries [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2005, **30**(7):575-579. [袁修孝,张过,吴春华. 缺少控制点的卫星遥感影像外推定位 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2005, **30**(7):575-579.]
- 6 Yang Hai-feng, Hou Chao-zhen. Orbit extrapolation method of remote sensing satellite [J]. Global Positioning System, 2007, **32**(6):1-4. [杨海峰,侯朝楨. 遥感卫星的轨道外推方法 [J]. 全球定位系统, 2007, **32**(6):1-4.]
- 7 Cai Wei-ke, Wen Gong-jian, Xi Fei. A method for pose estimation based on single camera and object model [J]. International Journal of Computer Vision, 2008, **13**(3):513-518. [蔡伟柯,文贡坚,习飞. 一种基于模型的单相机姿态估计方法 [J]. 中国图象图形学报, 2008, **13**(3):513-518.]
- 8 Zhang Yong-sheng, Gong Fan-chao. Application of High-resolution

- Remote Sensing Satellite [M]. Beijing: Beijing Science Press 2004: 16-22. [张永生, 巩凡超著. 高分辨率遥感卫星应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004.]
- 9 Chen Ying. Remote Sensing Image of Digital Photogrammetry [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2003: 51-60. [陈鹰编著. 遥感影像的数字摄影测量[M]. 上海: 同济大学出版社, 2003: 51-60.]
- 10 Wang Wei-xi, Song Wei-dong. Mathematic model of space resection adjustment [J]. Journal of Liaoning Technical University, 2005, 24(2): 169-171. [王伟玺, 宋伟东. 空间后方交会的条件平差数学模型[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2005, 24(2): 169-171.]
- 11 Yan Qin, Zhang Zu-xun, Zhang Jian-qing. Orientation of remote sensing images taken by CCD from different orbits [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2001, 26(3): 270-274. [燕琴, 张祖勋, 张剑清. 异轨遥感 CCD 影像外方位元素的解求[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2001, 26(3): 270-274.]
- 12 Zhang Guo. The Rectification of High-resolution Remote Sensing Image on Lacking Ground Control Point [D]. Wuhan: Wuhan University, 2005: 60-70. [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: 60-70.]