

文章编号: 1003-501X(2010)01-0095-06

三线阵立体测绘相机构像及误差模型的建立

王 智, 张立平, 李朝辉

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘要: 为了满足立体测绘系统的定位精度要求, 在三线阵立体测绘相机研制基础上, 通过建立三线阵立体测绘相机实用构像模型, 确立被探测地面点在地面坐标系中的坐标与其像点在 CCD 坐标系中的坐标以及在统一的像平面坐标系中的坐标之间的数学关系式; 并在此基础上, 推导了三线阵立体测绘实用误差模型, 分析影响系统定位精度的主要误差源, 并根据相机参数进行综合定位精度分析, 结果表明该系统可达到无控定位精度 50 m 的精度要求, 同时验证了构像模型及误差模型的正确性。

关键词: 三线阵 CCD 相机; 立体测绘; 构像模型; 误差模型

中图分类号: TP702

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1003-501X.2010.01.17

Imaging and Error Model of Three-linear Tridimensional Mapping Camera

WANG Zhi, ZHANG Li-ping, LI Zhao-hui

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: To meet the requirements of positioning accuracy of tridimensional mapping system, based on development of three-linear CCD camera, the practical imaging model of three-linear tridimensional mapping camera was constructed to confirm mathematics formula between the ground point in earth coordinate system and its image point in CCD sensor coordinate system and in uniform image plane coordinate system. Then, the practical error model was deduced to analyze main error source, and integrated positioning accuracy was analyzed according to camera parameter. The results indicated that the positioning accuracy can reach 50 meters under the condition of non-control ground point, meet the requirements of user and verify validity of imaging and error model.

Key words: three-linear CCD camera; tridimensional mapping; conformation model; error model

0 引言

航天摄影测量领域发展到今天, 已由传统的返回式摄影测量相机发展到今天的传输型摄影测量相机, 记录介质也由原来的胶片发展到由传感器获取立体影像, 并且传感器获取立体影像的方式日渐复杂, 有单线阵 CCD 传感器绕飞行方向侧摆(如 SPOT)或三线阵(如 MOMS)的方式获取立体影像, 也有同轨多角度获取立体像对的方式(如 Ikonos)。

三线阵立体测绘相机就是利用线阵 CCD 作为成像传感器的一种航天遥感器, 它是由具有独立镜头的三台线阵 CCD 相机组成, 这三台相机保持一定的位置关系, 对地面推扫形成三幅具有一定视角且相互重叠的航带图像。每条影像线都是在某一时刻由线阵 CCD 获得, 这条影像线对应于成像时刻的相机的外方位元素以及相机的内方位元素, 根据摄影测量理论, 当已知相邻时刻航带图像的外方位元素以及像点坐标, 可利用前方交会原理求解地面坐标。因此利用三线阵立体测绘相机获得的航带图像进行地表三维信息的提

收稿日期: 2009-05-18; 收到修改稿日期: 2009-07-13

基金项目: 中国科学院“优秀博士学位论文、院长奖获得者科研启动专项资金”

作者简介: 王智(1978-), 男(汉族), 山东寿光人。副研究员, 博士, 主要从事航天遥感器的研制工作。E-mail: wz070611@126.com。

取, 需要建立 CCD 构像的数学模型以及定位误差模型。

1 三线阵立体测绘相机构像的数学模型

三线阵 CCD 相机构像的数学模型是指被探测的地面点在地面坐标系中的坐标与它的像点在传感器坐标系中的坐标以及在统一的像平面坐标系中的坐标之间的数学关系式。

1.1 地面点坐标变换数学模型的建立^[1-2]

首先建立地面点坐标变换的模型, 该模型与具体的传感器几何形态无关, 该模型包括以下坐标系: 地面坐标系($D-X$ 、 Y 、 Z)、卫星坐标系($\bar{s}-\bar{u}$ 、 \bar{v} 、 \bar{w})、相机坐标系($s-u$ 、 v 、 w), 如图 1 所示。

1) 地面坐标系($D-X$ 、 Y 、 Z)

采用 WGS84 参考系, 坐标的原点是地球的质心, Z 轴指向参考系的协议北极, X 轴指向零度子午面和赤道的交点, Y 轴和 Z 、 X 轴构成右手坐标系。

2) 卫星坐标系($\bar{s}-\bar{u}$ 、 \bar{v} 、 \bar{w})

坐标系的原点靠近卫星的质心, \bar{w} 轴指向地面, \bar{u} 轴指向飞行方向, \bar{v} 轴构成右手直角坐标系且垂直于飞行方向。

3) 相机坐标系($s-u$ 、 v 、 w)

相机坐标相对于卫星坐标是相对固定的。它的原点是相机光学投影中心, w 轴与正视相机光学视轴平行且指向地面, u 轴指向扫描飞行方向, v 轴构成右手坐标系且平行于 CCD 阵列的长度方向。

a) 由地面坐标系到卫星坐标系的转换

$$\begin{bmatrix} \bar{u} \\ \bar{v} \\ \bar{w} \end{bmatrix} = \mathbf{M}_1 \begin{bmatrix} X - X_{\bar{s}} \\ Y - Y_{\bar{s}} \\ Z - Z_{\bar{s}} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$X_{\bar{s}}$, $Y_{\bar{s}}$, $Z_{\bar{s}}$ 描述地面坐标到飞行器坐标的偏移量, \mathbf{M}_1 是地面坐标系到卫星坐标系的角度旋转矩阵。

b) 由卫星坐标系到相机坐标系的转换

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \mathbf{M}_2 \begin{bmatrix} \bar{u} - CX \\ \bar{v} - CY \\ \bar{w} - CZ \end{bmatrix} \quad (2)$$

CX , CY , CZ 描述相机投影中心相对于卫星坐标中心的偏移量, \mathbf{M}_2 是卫星坐标到相机坐标的角度旋转矩阵。

1.2 三线阵 CCD 相机实用构像数学模型的建立

该模型包括: CCD 阵列坐标系(D)、像点坐标。

1) CCD 阵列坐标系(D):

成像平面上, CCD 阵列每一行中的每个探测器列都是整数坐标, 从 0 到 $N-1$ 。而 CCD 阵列坐标 Y_D 沿相机坐标系 v 的递减方向增加且指向 v 的正方向。它的 Z_D 轴与相机 w 轴平行, X_D 轴构成右手直角坐标且指向飞行方向。如图 2 所示。

2) 像点坐标:

像点坐标表达成为(行, 列)的形式。列数沿右方向递增, 行数沿向下方向递增。左上角坐标为(0, 0)。CCD 阵列中的第 0 列, 对应像点坐标中的第 0 列。如图 3 所示。

由相机坐标系到 CCD 阵列坐标系(x , $-y$)到像点坐标(x , y)的转换如下:

CCD 阵列的方向与卫星运行方向相垂直, 这是一种动态摄影, 严格的构像关系只能按照线阵 CCD 建立, 即在某摄影瞬间, 线阵 CCD 与所摄地面存在严格的中心投影关系。三线阵 CCD 相机分为正视、前视、

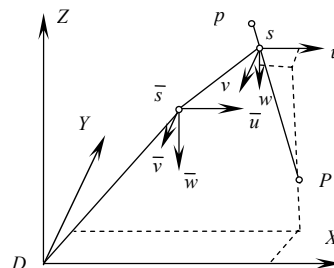


图 1 地面点坐标变换的数学模型

Fig.1 Mathematic model of coordinate conversion of ground point

后视相机, 其中正视相机为垂直式摄影方式, 前、后视相机与正视相机分别有 25° 夹角, 为非垂直式摄影方式。

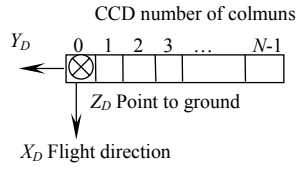


图 2 CCD 阵列坐标系

Fig.2 Coordinate system of CCD line

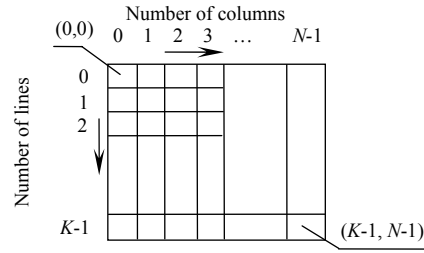


图 3 像点坐标

Fig.3 Coordinate of image point

a) 正视相机, 其相机坐标系到 CCD 阵列坐标系 $(x, -y)$ 到像点坐标 (x, y) 的转换如下:

对于每根扫描线, x 的值为 0, y 的值就是像点所在的列。行坐标 x 的作用是作为每一扫描行的时间标定来计算出对应每行的外方位元素。

$$\begin{bmatrix} 0 + x_0 \\ -y + y_0 \\ f \end{bmatrix} = \lambda \mathbf{M}_3 \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (3)$$

λ 为缩放比例尺, \mathbf{M}_3 是探测器坐标绕相机 w 轴的旋转矩阵

$$\mathbf{M}_3 = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

由式(1)、(2)、(3)在忽略相机投影中心相对于卫星坐标中心的偏移量时得到:

$$\begin{bmatrix} 0 + x_0 \\ -y + y_0 \\ f \end{bmatrix} = \lambda \mathbf{M} \begin{bmatrix} X - X_s \\ Y - Y_s \\ Z - Z_s \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} (X) \\ (Y) \\ (Z) \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中: $\mathbf{M} = \mathbf{M}_3 \cdot \mathbf{M}_2 \cdot \mathbf{M}_1$, $f = \lambda(Z)$, $-y + y_0 = \lambda(Y)$, $x_0 = \lambda(X)$, 把 $\lambda = f/(Z)$ 代入, 则式(4)变为正视相机构像模型:

$$F_x = x_0 - f \frac{(X)}{(Z)} = 0, F_y = -y + y_0 - f \frac{(Y)}{(Z)} = 0 \quad (5)$$

b) 前、后视 CCD 相机, 其相机坐标系到 CCD 阵列坐标系 $(x, -y)$ 到像点坐标 (x, y) 的转换如下:

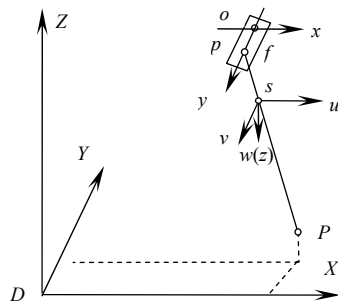


图 4 正视相机构像数学模型

Fig.4 Imaging mathematic model of orthographic camera

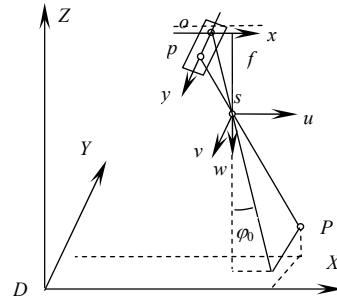


图 5 前视相机构像数学模型

Fig.5 Imaging mathematic model of forward camera

CCD 阵列坐标系可认为是由相机坐标系绕 v 轴旋转 φ_0 角得到, 规定前视相机 φ_0 角为正, 后视相机 φ_0 为负, 图 5 表示的是前视相机的构像数学模型。

这时, 前视相机坐标系, 由(4)式乘以一个旋转矩阵 \mathbf{A}

$$A = \begin{bmatrix} \cos \varphi_0 & 0 & -\sin \varphi_0 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi_0 & 0 & \cos \varphi_0 \end{bmatrix}$$

得到

$$\begin{bmatrix} 0 + x_0 \\ -y + y_0 \\ f \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} \cos \varphi_0 & 0 & \sin \varphi_0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi_0 & 0 & \cos \varphi_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (X) \\ (Y) \\ (Z) \end{bmatrix} \quad (6)$$

解式(6)得前视相机连续摄影构像模型

$$\begin{cases} F_x = x_0 - f \frac{(X) \cos \varphi_0 + (Z) \sin \varphi_0}{(Z) \cos \varphi_0 - (X) \sin \varphi_0} = 0 \\ F_y = -y + y_0 - f \frac{(Y)}{(Z) \cos \varphi_0 - (X) \sin \varphi_0} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

后视相机的构像模型与前视相机相同, 只需把 φ_0 变为 $-\varphi_0$ 即可。

2 三线阵立体测绘实用误差模型的建立^[3]

立体测绘系统的测绘精度主要受以下几个方面的影响: 1) 外方位元素(角元素、位置元素)的影响; 2) 姿态角误差的影响(星敏感器光轴指向精度、星地相机光轴夹角测定精度、前(后)视相机与正视相机间夹角稳定性精度); 3) 影像点坐标及焦距误差。

为了保障立体测绘系统的综合定位精度, 基于空间前方交会原理, 推导了地面目标点定位精度的实用模型。

根据摄影测量原理, 同名摄影光线空间前方交会地面点坐标的计算公式为

$$\begin{cases} X_P = X_s + NX \\ Y_P = Y_s + \frac{1}{2}(NY + N'Y' + B_Y) \\ Z_P = Z_s + NZ \end{cases} \quad (8)$$

式中: X_P 、 Y_P 、 Z_P 为地面点 P 的坐标, X_s 、 Y_s 、 Z_s 为左投影光线过 P 点时摄站位置坐标, X 、 Y 、 Z 为 P 点的左像空间坐标系坐标, X' 、 Y' 、 Z' 为 P 点的右像空间坐标系坐标, N 、 N' 为左右投影光线缩放系数, B_X 、 B_Y 、 B_Z 为摄影基线分量。

$$\begin{cases} N = \frac{B_X Z' - B_Z X'}{XZ' - X'Z} \\ N' = \frac{B_X Z - B_Z X}{XZ' - X'Z} \end{cases} \quad (9); \quad \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \\ a'_1 & a'_2 & a'_3 \\ b'_1 & b'_2 & b'_3 \\ c'_1 & c'_2 & c'_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \\ x \\ y \\ -f' \end{bmatrix} \quad (10)$$

(a_i, b_i, c_i) 与 (a'_i, b'_i, c'_i) ($i=1,2,3$)为大地坐标系与卫星坐标系间的旋转矩阵, 是摄影时刻卫星姿态角 φ 、 ω 、 κ 与 φ' 、 ω' 、 κ' 的函数。

空间前方交会地面点坐标的误差方程可由对式(8)进行微分得出:

$$\begin{cases} dX_P = dX_s + NdX + XdN \\ dY_P = dY_s + \frac{1}{2}(NdY + YdN + N'dY' + Y'dN' + dB_Y) \\ dZ_P = dZ_s + NdZ + ZdN \end{cases} \quad (11)$$

经简化整理后得实用误差方程:

$$\begin{cases} dX_p = dX_s + \frac{1}{2}dB_x - \frac{1}{2}\tan\varphi dB_z - \frac{m(y+y')}{2\cos\varphi}d\kappa + \frac{m}{\cos\varphi}dx \\ dY_p = dY_s + \frac{y+y'}{2b_x}dB_x + \frac{1}{2}dB_y - \frac{(y-y')}{2b_x}\tan\varphi dB_z + \frac{m}{2}\cot\varphi(y+y')d\varphi + \\ \quad m(f + \frac{y^2+y'^2}{2f})dw + \frac{m[y'^2\sin\varphi^2 - y'\cos\varphi^2(y+y')]}{2b_x\cos\varphi}d\kappa + \frac{m}{2f}\tan\varphi(y-y')dx \\ dZ_p = dZ_s - \frac{f\cos\varphi}{b_x}dB_x + \frac{1}{2}dB_z + \frac{mf}{\sin\varphi}d\varphi - m\cos\varphi df + \frac{m(y'-y)}{2\sin\varphi}d\kappa \end{cases} \quad (12)$$

3 定位精度分析

现根据三线阵立体测绘相机参数计算式(12)中的系数。已知相机主要参数为:

前(后)视相机焦距: $f=f'=717$ mm; 像元尺寸: $6.5\ \mu\text{m}\times 6.5\ \mu\text{m}$; 线阵像元数: 12 000; 前(后)视相机与正视相机光轴间夹角: $\varphi=\varphi'=\pm 25^\circ$; 轨道高度: $H=500$ km; 地面像元分辨率: 5 m; 地球半径: 6 378 km。

将以上条件及各点坐标分别代入式(12)得到中误差公式:

$$\begin{cases} M_x^2 = m_{x_s}^2 + 0.25m_{B_x}^2 + 0.054\ 38m_{B_z}^2 + 0.000\ 42m_{\kappa}^2 + 720\ 772.3m_{\omega}^2 \\ M_y^2 = m_{y_s}^2 + 0.585\ 2\times 10^{-8}m_{B_x}^2 + 0.25m_{B_y}^2 + 1.27\times 10^{-9}m_{B_z}^2 + 0.159\ 9m_{\varphi}^2 + \\ \quad 7.153\ 7m_{\omega}^2 + 0.003\ 95m_{\kappa}^2 + 0.000\ 626m_{\omega}^2 \\ M_z^2 = m_{z_s}^2 + 0.988\ 6m_{B_x}^2 + 0.25m_{B_z}^2 + 0.194\ 1m_{\varphi}^2 + 486\ 296.325\ 2m_f^2 + 0.000\ 019\ 45m_{\kappa}^2 \end{cases} \quad (13)$$

式中: M_x 、 M_y 、 M_z 为地面目标点在地面坐标的位置误差; m_{x_s} 、 m_{y_s} 、 m_{z_s} 为摄站位置误差; m_{φ} 、 m_{ω} 、 m_{κ} 为姿态角误差; m_{B_x} 、 m_{B_y} 、 m_{B_z} 为摄影基线测量误差; m_x 、 m_y 为点 (x,y) 测量误差; m_f 相机焦距的变化误差。

根据文献[6]研究成果得出的地图比例尺、等高距的选择与地面像元分辨率、相对高程误差关系图表 1 所示。

相对高程误差可利用式(13)的第 3 式, 去掉 m_{z_s} 项进行估算, 即:

$$\begin{aligned} M_{\Delta h}^2 &= 0.988\ 6m_{B_x}^2 + 0\cdot m_{B_y}^2 + 0.25m_{B_z}^2 + 0.194\ 1m_{\varphi}^2 + 0\cdot m_{\omega}^2 + \\ &\quad 0.000\ 019\ 45m_{\kappa}^2 + 486\ 296.325\ 2m_f^2 + 0\cdot m_x^2 + 0\cdot m_y^2 \end{aligned} \quad (14)$$

3.1 误差源分析

3.1.1 基线误差影响

基线 $B=v\cdot t$, 基线误差为

$$m_B = (v^2 \cdot m_t^2 + t^2 \cdot m_v^2)^{1/2} \quad (15)$$

式中: v 为卫星速度, t 为卫星基线飞行时间。规定计时精度 $m_t=0.1$ ms, 测速误差 $m_v=0.05$ m/s; $v=7.6$ km/s, $t=(R+H)/v\tan\varphi=66.17$ s 代入式(15)得基线误差: $m_B=3.394\ 7$ m。按以下比例估算各基线分量误差:

$$m_{B_x} = 0.9m_B = 3.055\ \text{m}; \quad m_{B_y} = 0.3m_B = 1.018\ \text{m}; \quad m_{B_z} = 0.3m_B = 1.018\ \text{m}$$

代入式(14)的前三项得基线分量对高程的影响值: $m_{\Delta h1} = \pm 3.079$ m。

3.1.2 姿态角误差的影响

姿态角误差源有: 星敏感器光轴指向误差、星地相机光轴夹角测量误差、姿态角内插误差、发射失重等引起的夹角变化等。根据现有设备条件, 估计各误差如下:

- 1) 星敏感器光轴指向精度优于 $\pm 5''(3\sigma)$;
- 2) 姿态角内插精度: $\pm 7.07''$;
- 3) 星敏感器与正视相机光轴夹角的测量误差: $5''$;

表 1 地图比例尺与地面像元分辨率和相对高程误差的关系

MS /ten thousand	GSD/m	CI/m	σ_h /m
5	5	20	6
2.5	2.5	10	3

4) 前、后视相机与正视相机光轴夹角的测量误差: $2''$;

5) 发射失重引起的夹角变化值: $\pm 15''$; 相机(前、后视相机)光轴指向总误差:

$$m_{\beta} = \sqrt{7.07^2 + (5^2 + 2^2 + 15^2)/3} = 11.6''$$

则 $m_{\varphi} = m_{\omega} = m_{\kappa} \approx 11.6''$, 代入式(14)得姿态角误差对高程的影响值: $m_{\Delta h_2} = \pm 5.11 \text{ m}$ 。

3.1.3 影像点坐标及焦距误差的影响

影像点坐标的误差源包括: 影像相关量测误差(0.36 pixels)、内方位元素测量误差(0.2 pixels)、相机畸变校正误差(3.9 μm), 所以总的像点量测精度 $m_x = m_y = 0.00475 \text{ mm}$ 。

焦距测量误差 $m_f = 0.020 \text{ mm}$, 代入式(14)得焦距测量精度对高程的影响: $m_{\Delta h_3} = 0.14 \text{ m}$ 。

3.2 综合定位精度

根据以上误差源分析可得出, 三线阵立体测绘的综合相对高程误差:

$$m_{\Delta h} = (m_{\Delta h_1}^2 + m_{\Delta h_2}^2 + m_{\Delta h_3}^2)^{1/2} = \pm 5.97 \text{ m}$$

满足表 1 中的精度关系。

在无地面控制点条件下, 综合绝对定位精度不但包含上述误差源的系统误差和随机误差, 同时也受卫星轨道定位精度的影响, 当规定卫星轨道位置精度为 $\pm 10 \text{ m}$ 时, 其三坐标的分量可分解为: $m_{x_s} = \pm 6.12 \text{ m}$; $m_{y_s} = \pm 6.12 \text{ m}$; $m_{z_s} = \pm 5 \text{ m}$ 代入式(13)可得: $M_x = 7.49 \text{ m}$; $M_y = 31.97 \text{ m}$; $M_z = 7.79 \text{ m}$ 。因此, 综合绝对定位误差为: $\sqrt{7.49^2 + 31.97^2 + 7.79^2} = 33.75 \text{ m}$, 满足用户提出的定位误差 50 m 的精度要求。

4 结 论

在研究三线阵立体测绘相机的基础上, 建立了三线阵立体测绘相机的实用构像模型, 并在构像模型基础上, 建立了三线阵立体测绘系统的实用误差模型, 依据其构像模型及误差模型, 并根据三线阵立体测绘相机的参数, 得到了三线阵立体测绘相对高程误差以及综合定位精度, 由分析结果可知, 满足用户提出的定位精度要求, 同时验证了本文建立的构像模型和误差模型的正确性。

参考文献:

- [1] 钱曾波, 刘静宇, 肖国超. 航天摄影测量 [M]. 北京: 解放军出版社, 1992.
QIAN Ceng-bo, LIU Jing-yu, XIAO Guo-chao. **Space Photogrammetry** [M]. Beijing: Publishing House of the Chinese People's Liberation Army, 1992.
- [2] 颜昌翔, 王家骥. 航相机像移补偿计算的坐标变换方法 [J]. 光学 精密工程, 2000, 8(3): 203-207.
YAN Chang-xiang, WANG Jia-qi. Method of coordinate transformation for IM&MC calculation in aerospace camera system [J]. **Optics and Precision Engineering**, 2000, 8(3): 203-207.
- [3] 张绪茂. 前方空间交会精度估算公式及在航天摄影测量系统工程中的应用 [J]. 解放军测绘研究所学报, 1999, 19(3): 1-11.
ZHANG Xu-mao. Formulas of the Precision Estimating in Space Forward Intersection and its Application in Space Photogrammetry System Engineering [J]. **Journal of the Chinese People's Liberation Army Mapping Institute**, 1999, 19(3): 1-11.
- [4] 胡莘, 曹喜滨. 三线阵立体测绘卫星的测绘精度分析 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2008, 40(5): 695-699.
HU Xin, CAO Xi-bin. Analysis on Precision of stereo mapping microsatellite using three-line array CCD images [J]. **Journal of HARBIN Institute of Technology**, 2008, 40(5): 695-699.
- [5] LIGHT D L. Characteristics of remote sensors for mapping and earth science applications [J]. **Photogrammetric Engineering & Remote sensing**(S0099-1112), 1990, 56(12): 1613-1623.
- [6] Takanori Iwata. Precision Attitude and Position Determination for the Advanced Land Observing Satellite(ALOS) [J]. **Enabling Sensor and Platform Technologies for Space-borne Remote Sensing, Proceedings of SPIE(S0277-786X)**, 2005, 5659: 34-50.