

玉兔号月球车全景相机的正交变换投影模型

张 烁¹ 李群智² 温 博² 刘少创³

1 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

2 北京空间飞行器总体设计部,北京,100094

3 中国科学院遥感与数字地球研究所,北京,100101

摘 要:玉兔号安装了一对全景相机,全景相机使用的镜头设计为视场小的长焦距镜头,这种镜头的光线束入射角较小,若采用传统的透视投影模型进行相机检校可能会造成法方程式系数矩阵的病态。针对这一特点,本文提出一种基于正交变换模型的相机检校方法,通过真实数据试验证明,该方法具有很高的精度和稳定性,可以用于对玉兔号月球车的全景相机进行检校。

关键词:玉兔号;全景相机;长焦距;正交变换模型

中图法分类号:P231.5

文献标志码:A

月球车是一种能够在月球表面执行巡视科学探测任务的航天器^[1]。玉兔号是我国自主研制的首个月球车,它拥有我国最先进机器人的称号。国外从 20 世纪 60 年代开始研制巡视探测器,已经成功研制的巡视探测器有美国的勇气号、机遇号 and 好奇号火星车,前苏联的月球车 1 号和月球车 2 号。玉兔号安装的立体相机,包括一对导航相机、一对全景相机和一对避障相机。对立体相机的检校是开展月球车导航定位、地形恢复和路径规划的前提条件。

最早开展有关巡视探测器立体相机检校的是美国的 NASA 和 JPL。Yakimovsky 等提出了一种 CAHV 模型,该模型应用于美国的勇气号和机遇号火星车的导航相机,用 C 、 A 、 H 和 V 4 个矢量来表达从物方坐标到像方坐标的变换^[2]。Gennery 在 CAHV 模型的基础上,增加一个向量 O 和一个三元组 R 用以描述径向畸变,从而将 CAHV 模型改进为 CAHVOR 模型,CAHVOR 模型正是勇气号和机遇号火星车的全景相机采用的相机模型^[3]。为了对勇气号和机遇号火星车的避障相机(鱼镜头)进行建模,Gennery 将 CAHVOR 模型改进为 CAHVORE 模型,增加的向量 E 用以重新描述光线束在像平面上投影的位置^[4]。张正友提出了利用影像匹配的方法对巡

视探测器的相机进行标定^[5]。王保丰提出了一种月球车避障相机的两步法标定方法^[6]。文献[2-4]提出的方法在美国 MER 计划中得到了很好的验证。文献[5,6]提出的方法也具有一定的适用性。

玉兔号的全景相机设计为视场小的长焦距镜头。针对这一特点,本文提出了一种基于正交变换模型的相机检校方法,通过真实数据试验证明该文方法具有很高的精度和稳定性,可以用于对玉兔号月球车的全景相机进行检校。

1 正交变换模型

在透视投影下,摄影中心、像点和物点之间的关系可用共线方程式描述^[7]:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X - X_S \\ Y - Y_S \\ Z - Z_S \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, λ 定义为构像的比例尺^[7]。将式(1)两边同时乘以一个任意常数 s ,并将 λ 移到等式左边,则式(1)变换为以下形式:

$$\frac{s}{\lambda} \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_a \\ y_a \\ -\frac{s}{\lambda}f \end{bmatrix} = s \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X - X_S \\ Y - Y_S \\ Z - Z_S \end{bmatrix} \quad (2)$$

收稿日期:2013-11-01

项目来源:国家自然科学基金资助项目(41071298)。

第一作者:张烁,博士生。主要从事数字近景摄影测量的理论研究。E-mail:zhangshoupe@163.com

通讯作者:刘少创,博士,研究员。E-mail:liusc@irsa.ac.cn

将 X_s, Y_s, Z_s 移到公式的左边, 则式(2)变为:

$$\begin{bmatrix} x_a - X'_s \\ y_a - Y'_s \\ -\frac{s}{\lambda}f - Z'_s \end{bmatrix} = s \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中,

$$\begin{bmatrix} X'_s \\ Y'_s \\ Z'_s \end{bmatrix} = -s \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(3)中的第 1 和第 2 行所描述的仿射变换模型表达式如下^[8]:

$$\begin{aligned} x_a &= A_1 X + A_2 Y + A_3 Z + A_4 \\ y_a &= A_5 X + A_6 Y + A_7 Z + A_8 \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $(X, Y, Z)^T$ 为物方任意一点的坐标; $(x_a, y_a)^T$ 为空间一点经过仿射变换后的像点坐标; A_1, A_2, \dots, A_8 为变换参数。

若矢量 $\mathbf{a}_x = (A_1, A_2, A_3)$ 和矢量 $\mathbf{a}_y = (A_5, A_6, A_7)$ 相互垂直, 则 $\mathbf{a}_x \cdot \mathbf{a}_y = 0$, 这表示光线束从物方垂直入射到像方, 具体的表达式如下^[8]:

$$A_1 A_5 + A_2 A_6 + A_3 A_7 = 0 \quad (6)$$

矢量 \mathbf{a}_x 和矢量 \mathbf{a}_y 的模相等, 这说明 x_a 方向和 y_a 方向的比例因子相等, 其具体的表达式如下^[8]:

$$A_1^2 + A_2^2 + A_3^2 = A_5^2 + A_6^2 + A_7^2 \quad (7)$$

上述式(5)~式(7)即为正交变换模型。

2 相机检校模型

2.1 仿射变换中像点坐标的表达式

共线方程的反演形式为^[7]:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \frac{1}{\lambda} \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{bmatrix} \quad (8)$$

根据式(9)的第 3 行, 可以推导出:

$$\lambda = \frac{c_1 x + c_2 y - c_3 f}{Z - Z_s} \quad (9)$$

s 的定义与 λ 不同。 s 理论上可以取任意值, 它定义是: 调整平均摄影距离 H , 使 H 与主距 f 相等。 H 是 Z 方向上的平均摄影距离, $H = \bar{Z} - Z_s$, s 的具体计算公式为^[8]:

$$s = -\frac{c_3 f}{Z - Z_s} = -\frac{c_3 f}{H} \quad (10)$$

像点坐标的改正模型取如下的形式:

$$\begin{aligned} x' &= x - (x - x_0) K_1 r^2 \\ y' &= y - (y - y_0) K_1 r^2 \end{aligned}$$

$$r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} \quad (11)$$

将式(9)~式(11)带入式(2), 可以推导出仿射变换中像点坐标的表达式^[9]:

$$\begin{aligned} x_a &= \frac{Z - Z_s}{H} \frac{c_3 f}{c_3 f - c_1 x' - c_2 y'} x' \\ y_a &= \frac{Z - Z_s}{H} \frac{c_3 f}{c_3 f - c_1 x' - c_2 y'} y' \end{aligned} \quad (12)$$

2.2 外方位元素

根据式(3)和式(5)可以推导出:

$$\begin{bmatrix} A_1 & A_2 & A_3 \\ A_5 & A_6 & A_7 \end{bmatrix} = s \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

由于向量 $\mathbf{r}_1 = (a_1, b_1, c_1)$ 和 $\mathbf{r}_2 = (a_2, b_2, c_2)$ 的模均等于 1, 因此:

$$s^2 = A_1^2 + A_2^2 + A_3^2 \quad (14)$$

根据式(6)、式(7)和式(13)可以解算出向量 \mathbf{r}_1 和 \mathbf{r}_2 , 根据旋转矩阵的正交性质, 可以解算出向量 $\mathbf{r}_3 = (a_3, b_3, c_3)$ 如下^[9]:

$$\begin{aligned} a_3 &= \pm \sqrt{1 - a_1^2 - a_2^2} \\ b_3 &= \pm \sqrt{1 - b_1^2 - b_2^2} \\ c_3 &= \pm \sqrt{1 - c_1^2 - c_2^2} \end{aligned} \quad (15)$$

若已知主距 f , 则根据式(8)推导出^[9]:

$$Z_s = \frac{c_3 f}{s} + \bar{Z} \quad (16)$$

根据式(3), 可推导出^[9]:

$$\begin{aligned} X_s &= -\frac{A_4 + A_2 Y_s + A_3 Z_s}{A_1} \\ Y_s &= \frac{A_1 A_8 - A_4 A_5 - A_3 A_5 Z_s + A_1 A_7 Z_s}{A_2 A_5 - A_1 A_6} \end{aligned} \quad (17)$$

2.3 平差模型和它的解

将式(12)带入式(5), 并线性化为:

$$\mathbf{A}\mathbf{V} + B_1 \mathbf{X}_1 + B_2 \mathbf{X}_2 + B_3 \mathbf{X}_3 - \mathbf{W} = 0 \quad (18)$$

式中, $\mathbf{V} = (v_x, v_y)^T$ 是像点坐标的改正数向量; $\mathbf{X}_1 = (\Delta f, \Delta x_0, \Delta y_0, \Delta K_1)^T$ 是内参数的增量向量; $\mathbf{X}_2 = (\Delta A_1, \Delta A_2, \dots, \Delta A_8)^T$ 是变换参数的增量向量; $\mathbf{X}_3 = (\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)^T$ 是控制点坐标的增量向量; $\mathbf{W} = (w_x, w_y)^T$ 是像点坐标的残差向量。

式(6)和式(7)是正交投影的约束条件, 对其进行线性化后得到如下形式:

$$\mathbf{C}\mathbf{T} - \mathbf{G} = 0 \quad (19)$$

式中, $\mathbf{T} = (\Delta A_1, \Delta A_2, \dots, \Delta A_8)^T$ 是变换参数的增量向量; $\mathbf{G} = (g_1, g_2)^T$ 是常数项向量。

根据式(18)和式(19)可以进一步将模型优化为:

$$\begin{aligned} \min & \quad \mathbf{V}^T \mathbf{P}\mathbf{V} \\ \text{s. t.} & \quad \mathbf{A}\mathbf{V} + \mathbf{B}\mathbf{x} - \mathbf{W} = 0 \quad \mathbf{P} \\ & \quad \mathbf{C}\mathbf{x} - \mathbf{G} = 0 \end{aligned} \quad (20)$$

该模型为附有约束条件的条件平差模型,可以按照最小二乘法求解该模型^[10]。

其计算流程图如图1所示。

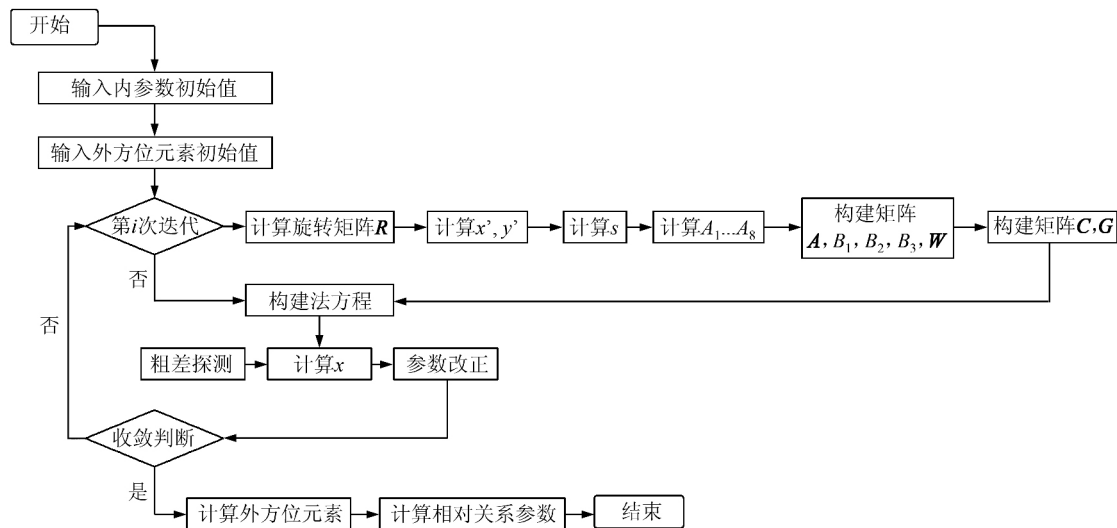


图1 计算流程

Fig. 1 Flowchart of Calculation

3 试验及结果分析

3.1 试验概述

2013年7月~9月,在控制场的条件下,针对玉兔号月球车验证器和正样器的全景相机开展了检校试验(验证器和正样器的设计完全相同),获得了两组试验数据,试验的方法和流程完全相同。以下称验证器全景相机获取的数据为试验1,正样器全景相机获取的数据为试验2。

试验在一洁净度极高的室内环境进行。在相机视场范围内均匀布设标志点,测量标志点的三维坐标时,采用普通测量的前方交会解算平面坐标 X 和 Y ,采用“间接高程”方法解算 Z ^[11]。玉兔号固定安装在支架车上,全景相机距离地面高度约2 m。桅杆的展开角、偏航角和俯仰角固定为 0° 、 0° 和 -35° ,通过移动支架车分别从8个不同的位置对控制场成像,获取8对立体像对。试验过程中使用的各项参数如表1所示。

表1 试验参数

Tab. 1 Experimental Parameters

参数项	试验1	试验2
主距/mm	55	55
基线距离/mm	260	260
立体像对数/对	8	8
控制点数	44	34
检查点数	20	10
X 和 Y 的中误差/mm	0.232 0	0.229 4
Z 的中误差/mm	0.250 4	0.271 3

成像的瞬间,安装在玉兔号上的IMU和里程计会获取车体在物方坐标系下的位置和姿态,经过一系列的坐标和姿态转换将车体的位置和姿态转换为像片的外方位元素初始值。坐标和姿态转换的过程中,需借助IGPS测定各个坐标系之间固定的旋转矩阵和偏移量。在提取像点坐标时,采用人工提点的方式,首先对待提点的局部区域进行梯度倒数加权平滑,然后将此区域放大10倍,最后提取出该像点的坐标值,提取精度达到亚像素级。

3.2 检校结果的中误差

单位权中误差的计算公式如下:

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{\mathbf{V}^T \mathbf{P} \mathbf{V}}{c - u + s}} \quad (21)$$

式中, c 为观测值的总数; u 为未知参数的个数; s 为限制条件的个数。

参数中误差的计算公式如下:

$$\sigma_{xx} = \sigma_0 \sqrt{Q_{xx}} \quad (22)$$

式中, σ_{xx} 主对角线元素为检校参数的中误差; Q_{xx} 表示检校参数的协因数阵,其具体表达形式参见文献[10]。

表2给出了利用本文方法对试验1和试验2的数据进行处理,得到的全景相机内参数的中误差统计结果。

从表2的结果中可以看出,试验1计算出的单位权中误差和参数中误差小于试验2的结果,这在左相机和右相机的结果中呈现出一致的规律

表 2 全景相机内参数的中误差/像素

Tab. 2 RMSE of Pancam Intrinsic Parameters/pixel

参数项	试验 1		试验 2	
	左相机	右相机	左相机	右相机
σ_0	0.089 9	0.085 1	0.094 2	0.096 8
σ_{x_0}	0.311 9	0.339 8	0.347 8	0.392 5
σ_{y_0}	0.469 0	0.428 5	0.491 9	0.417 4
σ_f	0.370 5	0.334 1	0.333 5	0.363 1
$\sigma_{K1}/10^{-8}$	1.178 7	1.126 1	1.124 9	1.739 5

性,说明对于本文方法增加使用控制点的数量有助于提高检校结果的精度。对比试验 1 和试验 2 的结果,发现单位权中误差和参数中误差的统计值都很小并且差别不大,说明本文方法具有很高的精度和稳定性。

表 3 给出了利用本文方法对试验 1 和试验 2 的数据进行处理,得到的全景相机相对关系参数的中误差。全景相机相对关系参数定义为:右全景相机坐标系相对于左全景相机坐标系的位置($\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$)和姿态($\Delta \varphi, \Delta \omega, \Delta \kappa$)参数,相机坐标系定义为: X, Y 轴位于像平面内, X 轴指向右, Y 轴指向上, Z 轴与 X, Y 轴构成右手系。中误差的计算公式如下:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2} \quad (23)$$

表 4 检查点误差/mm

Tab. 4 Accuracy of Check Point

试验	最大残差			最小残差			中误差		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
试验 1	0.105 9	-0.076 4	-0.112 8	0.032 7	-0.037 2	0.056 3	0.069 9	0.047 3	0.085 9
试验 2	0.108 2	0.079 2	-0.125 3	0.035 1	0.037 0	0.061 6	0.072 4	0.051 9	0.086 2

从表 4 的结果中可以看出,试验 1 和试验 2 计算得到的检查点误差差别不大,中误差的统计值很小,说明本文方法具有很高的精度和稳定性。

4 结 语

针对长焦距相机光线束入射角小的特点,本文提出了一种基于正交变换模型的相机检校方法,并使用该方法对玉兔号月球车的全景相机进行检校,试验结果证明了该方法具有很高的精度和稳定性。

参 考 文 献

[1] Sun Zezhou, Jia Yang, Zhang Hao. Technological Advancements and Promotion Roles of Chang'e-3 Lunar Probe Mission[J]. *Sci China Tech Sci*, 2013,

式中, N 表示数值的个数; x_i 表示具体数值; μ 表示数值的平均值。

表 3 全景相机相对关系参数的中误差

Tab. 3 RMSE of Pancam Relative Orientation Elements

参数项	试验 1	试验 2
$\sigma_{\Delta X}/\text{mm}$	0.287 5	0.314 7
$\sigma_{\Delta Y}/\text{mm}$	0.247 2	0.378 3
$\sigma_{\Delta Z}/\text{mm}$	0.431 9	0.524 9
$\sigma_{\Delta \varphi}/(^{\circ})$	0.010 4	0.013 1
$\sigma_{\Delta \omega}/(^{\circ})$	0.036 3	0.049 7
$\sigma_{\Delta \kappa}/(^{\circ})$	0.004 3	0.006 2

从表 3 的结果中可以看出,试验 1 的相对关系参数的中误差结果要小于试验 2 的结果,说明对于本文方法增加使用控制点的数量有助于提高检校结果的精度。对比试验 1 和试验 2,发现 Z 方向中误差大于 X, Y 方向中误差,说明控制点在纵深方向的分布情况和测量精度对全景相机相对关系线元素 Z 分量的精度有影响。

3.3 检查点误差

利用本文方法对试验 1 和试验 2 的数据处理后得到的全景相机的内参数和外方位元素,采用立体前方交会计算检查点在物方坐标系下的坐标,并与全站仪测得的检查点坐标进行对比,统计结果如表 4 所示。

43(11):1 186-1 191(孙泽洲,贾阳,张焯.嫦娥三号探测器技术进步与推动[J].中国科学·技术科学,2013,43(11):1 186-1 191)

[2] Yakimovsky Y, Cunningham R. A System for Extracting Three-Dimensional Measurements from a Stereo Pair of TV Cameras[J]. *Computer Graphics and Image Processing*, 1978, 7(2):195-210

[3] Gennery D B. Least-Squares Camera Calibration Including Lens Distortion and Automatic Editing of Calibration Points[J]. *Calibration and Orientation of Cameras in Computer Vision*, 2001, 34:123-136

[4] Gennery D B. Generalized Camera Calibration Including Fish-Eye Lenses[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2006, 68(3):239-266

[5] Zhang Z Y. A Stereovision System for a Planetary Rover: Calibration, Correlation, Registration, and Fusion [J]. *Machine Vision and Applications*, 1997, 10:27-34

- [6] Wang Baofeng, Mao Xiaoyan, Tang Geshi. A Calibration Method for Fish-Eye Camera of Lunar Rover [J]. *Journal of Astronautics*, 2011, 32(4):933-939(王保丰, 毛晓艳, 唐歌实. 月球车鱼眼相机的检校方法研究[J]. *宇航学报*, 2011, 32(4):933-939)
- [7] Wang Zhizuo. Photogrammetry[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2007(王之卓. 摄影测量原理[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2007)
- [8] One T, Hattori S. Fundamental Principles of Image Orientation Using Orthogonal Projection Model[J]. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2002, 34(B3):194-199
- [9] Stamatopoulos C, Fraser C. Calibration of Long Focal Length Cameras in Close Range Photogrammetry[J]. *The Photogrammetric Record*, 2011, 26(135):339-360
- [10] Department of Surveying Adjustment, Wuhan Technical University of Surveying and Mapping. Basic Surveying Adjustment[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1994(武汉测绘科技大学测量平差教研室. 测量平差基础[M]. 北京: 测绘出版社, 1994)
- [11] Feng Wenhao. Close-range Photogrammetry[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2002(冯文灏. 近景摄影测量-物体外形与运动状态的摄影法测定[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002)

Orthogonal Projection Model of Jade Rabbit Lunar Rover Pancam

ZHANG Shuo¹ LI Qunzhi² WEN Bo² LIU Shaochuang³

¹ School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

² Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China

³ Institute of Remote Sensing and Digital Earth Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract: The scientific instruments on the Jade Rabbit include a pair of Pancams designed with narrow fields of view and long-focus. Because the light beams incident angle of this kind of lens is relatively small, if a camera is calibrated by the traditional perspective projection model, the coefficient matrix of its normal equation maybe ill-conditioned. A calibration approach based on orthogonal projection model is proposed. Experimental results reveal that this approach can be used in calibration of the Jade Rabbit Pancams with high accuracy and stability.

Key words: Jade Rabbit; pancam; long-focus; orthogonal projection model

First author: ZHANG Shuo, PhD candidate, specializes in the theories and methods of digital close range photogrammetry.

E-mail: zhangshoupc@163.com

Corresponding author: LIU Shaochuang, PhD, professor. E-mail: liusc@irsa.ac.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, No. 41071298.