嫦娥四号月面巡视器全景相机制图方法

司马兵^{1,2}, 彭松³, 马友青¹, 温博³, 刘少创^{1*}

1. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国空间飞行器总体设计部, 北京 100094

* E-mail: liusc@radi.ac.cn

收稿日期: 2019-05-09; 接受日期: 2019-10-09; 网络版发表日期: 2019-11-22

国家自然科学基金青年基金(编号: 41601494)资助项目

摘要 作为嫦娥四号月面巡视器的科学载荷, 全景相机不仅承担着探测月面地质的任务, 同时可以用于制图和地形重建, 直接服务于巡视器的导航规划工作. 在试验场选用一种模型方法用于前期标定实验, 但为了后期制图工作的方便往往需要选用另一种模型, 基于此, 本文提出了一种基于畸变模型参数转换的去畸变方法, 技巧性地解决了标定模型和制图模型不一致的问题, 并融合支持像点(support points)稠密匹配、空间前方交会、最小二乘光束法平差、离散点云生成、德劳内三角化等多项技术, 将全景相机影像用于制图工作. 基于月面巡视器在LE00210站点拍摄的全景相机影像, 在实验室构建控制场对本文提出的畸变模型参数转换方法进行了可行性和精度测试, 结果表明畸变模型转换后定位精度优于1.6 cm, 相对距离精度优于4%, 并成功应用于嫦娥四号巡视器全景相机制图.

关键词 嫦娥四号, 月面巡视器, 地形重建, 去畸变, 遥操作

1 引言

嫦娥四号于2018年12月8日在西昌卫星发射中心发射, 并于2019年1月3日在月球背面冯·卡门撞击坑(45.5°S, 177.56°E)成功软着陆, 是人类探测器首次着陆月球背面, 实现了在地月拉格朗日L2点的中继通讯. 全景相机影像制图, 尤其是重建出远处的地形地貌, 能够有效地为巡视器路径规划和导航定位提供参考. 在月面特殊的成像环境下, 如低对比度、缺乏纹理、阴影遮挡等, 加之全景相机有畸变大、视场小等特性,

导致月面巡视器全景相机制图相较于导航相机制图有更大难度. 目前地形重建算法主要有基于静态阴影的单幅图像重建技术^[1], 基于原始地形和等高线数据的多分辨率拼接技术^[2], 基于动态规划算法^[3]、图割算法^[4,5]和人工智能方法^[6]进行匹配的视觉重建方法等, 而基于多幅影像的重建方法对月面全景相机制图至关重要. 近年来, 国内外一些学者针对月面制图对算法进行了不同程度的改进. 李明磊等人^[7]采用基于动态规划的立体匹配算法, 在嫦娥三号巡视器制图中得到了较好的效果. Jie和Huang^[8]提出了基于运动的长基线

引用格式: 司马兵, 彭松, 马友青, 等. 嫦娥四号月面巡视器全景相机制图方法. 中国科学: 技术科学, 2020, 50: 151–160

Sima B, Peng S, Ma Y Q, et al. Research on a mapping method of Chang'E-4 lunar rover's panoramic camera (in Chinese). Sci Sin Tech, 2020, 50: 151–160, doi: 10.1360/SST-2019-0176

双目立体视觉模型, 实现了适用月球表面的地形三维重建算法。

全景相机成像时存在几何畸变, 需要通过去畸变恢复实际的成像信息。由于后期基于开放性编程库制图时采用的畸变模型与在正样试验场标定时使用的畸变模型不同, 标定后的畸变模型参数不能直接应用于制图模型, 给制图工作带来不便。标定模型结果经由畸变模型参数的数学转换, 能够得到一套可靠的制图模型结果, 从而应用于后续制图工作。基于以上分析, 本文提出了畸变模型的数学转换方法, 采用基于支持像点(support points)的立体匹配算法, 介绍了全景相机制图的操作流程, 并成功应用于嫦娥四号月面巡视器全景相机影像, 实现了全景相机的高精度制图。

2 全景相机制图流程

嫦娥四号月面巡视器上安装有1对全景相机, 装于相机桅杆上, 是一对窄视场相机, 月面距离为1.5 m, 基线长为270 mm, 像元物理尺寸为 $7.4\ \mu\text{m}$, 如图1所示。全景相机是科学载荷, 主要用于对地质、地形和地貌的科学研究。

OpenCV是开放性计算机视觉库(open source computer vision library)的简称, 丰富的API接口函数和强大的图像处理能力使它在制图等领域有着广泛的应用, 因此采用基于OpenCV库的算法进行制图工作。月面巡视器全景相机制图的目的是通过影像预处理, 畸变模型转换和畸变改正, 密集匹配生成视差图, 离散点云生成, 模型重建等一系列流程, 高精度地生成月

图1 月面巡视器上的相机

Figure 1 Cameras equipped on the lunar rover.

面数字高程模型(digital elevation model, DEM)和具有图像纹理信息的正射影像图(digital orthophoto map, DOM). 算法要求有一定的重叠度, 因此月面巡视器在某一位置通过桅杆的左右旋转和上下俯仰, 使全景相机在不同姿态角成像时, 要保证两个相机的影像间应有一定的重叠度, 相邻影像间也要有一定的重叠度。月面巡视器全景相机制图流程如图2所示。

2.1 影像预处理

首先对全景相机采集的影像进行质量检查, 然后进行高斯滤波、伽马变换以及直方图均衡化等预处理, 去除影像噪点, 减弱光照条件的影响, 增强图像对比度。预处理工作能够提高影像质量, 减小数据源本身的误差。

图2 全景相机制图流程图

Figure 2 Pancam mapping flow chart.

2.2 相机标定和去畸变

相机标定通常采用两种方式: 通过相机多角度对特定标定板成像的方式和采用布设高精度控制场的方式. 常用的去畸变模型有摄影测量畸变模型^[9]、Photomatrix畸变模型^[10]和Tsai畸变模型^[11]等. 在嫦娥四号月面巡视器正样标定实验时, 通过布设高精度的控制场, 基于Photomatrix畸变模型对全景相机内参数、外参数以及畸变系数进行了高精度标定. 本节对3种畸变模型进行简要介绍, 并给出其数学表达式.

(1) 摄影测量畸变模型

摄影测量是利用摄影技术进行测量, 主要目的是要保证测量的精度和准确性, 在数字化成像时代, 随着CCD/CMOS的数字化航空成像仪的普及, 摄影测量开始使用桶形畸变和枕形畸变的概念以解决畸变问题, 不断发展出基于径向畸变和切向畸变的畸变模型. 摄影测量畸变模型的数学形式为

$$\Delta x = (x - x_0) \cdot (k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + k_4 r^8 + k_5 r^{10}) + p_1 \cdot [r^2 + 2(x - x_0)^2] + 2p_2 \cdot (x - x_0) \cdot (y - y_0), \quad (1)$$

$$\Delta y = (y - y_0) \cdot (k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + k_4 r^8 + k_5 r^{10}) + p_2 \cdot [r^2 + 2(y - y_0)^2] + 2p_1 \cdot (x - x_0) \cdot (y - y_0), \quad (2)$$

$$r^2 = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2. \quad (3)$$

式(1)~(3)表示摄影测量模型在 X 方向和 Y 方向上坐标的畸变量. 其中, (x_0, y_0) 为主点坐标, $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, p_1, p_2$ 为模型畸变系数, 由标定结果给出. (x, y) 为畸变前像点坐标, $(\Delta x, \Delta y)$ 为像点相应的畸变差. 坐标采用标准化的像素单位.

(2) Tsai畸变模型

畸变量可分为在 X 方向和 Y 方向上, 这种畸变量只考虑径向畸变, 根据径向畸变的线性关系, 即畸变后坐标与畸变前坐标具有比例约束关系, Tsai于1987年发展出了先线性求解后非线性优化的Tsai畸变模型. Tsai畸变模型的数学形式为

$$x = \frac{u(\text{undistorted}) - c_x}{f_x}, \quad (4)$$

$$y = \frac{v(\text{undistorted}) - c_y}{f_y}, \quad (5)$$

$$r^2 = x^2 + y^2, \quad (6)$$

$$x' = x \frac{1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6}{1 + k_4 r^2 + k_5 r^4 + k_6 r^6} + 2p_1 xy + p_2 (r^2 + 2x^2) + s_1 r^2 + s_2 r^4, \quad (7)$$

$$y' = y \frac{1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6}{1 + k_4 r^2 + k_5 r^4 + k_6 r^6} + 2p_2 xy + p_1 (r^2 + 2y^2) + s_1 r^2 + s_2 r^4, \quad (8)$$

$$u(\text{distorted}) = f_x * x' + c_x, \quad (9)$$

$$v(\text{distorted}) = f_y * y' + c_y. \quad (10)$$

式(4)~(10)表示Tsai模型在 X 方向和 Y 方向上坐标的畸变量. 其中 (c_x, c_y) 为主点坐标, $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, p_1, p_2, s_1, s_2$ 为模型畸变系数, f_x 与 f_y 分别为 X 方向和 Y 方向上的主距, 由标定结果给出. $(u(\text{undistorted}), v(\text{undistorted}))$ 为畸变前像点坐标, $(u(\text{distorted}), v(\text{distorted}))$ 为去畸变后像点坐标, 即畸变差等于畸变后坐标与畸变前坐标之差. 坐标和主距采用标准化的像素单位.

(3) Photomatrix畸变模型

澳大利亚Photomatrix公司的主要业务是通过摄影图像高精度地完成3D地形重建, 同时发展出了一套基于Photomatrix畸变模型的用于非工业近景摄影测量领域的标定系统, 该模型与Fryer和Brown^[12]用于校正镜头畸变的10参数校正法类似, 在径向畸变和切向畸变的基础上还考虑了仿射和非正交化的畸变. Photomatrix畸变模型的数学形式为

$$x = x(\text{distorted}) - xp, \quad (11)$$

$$y = y(\text{distorted}) - yp, \quad (12)$$

$$r^2 = x^2 + y^2, \quad (13)$$

$$dr = K_1 r^3 + K_2 r^5 + K_3 r^7, \quad (14)$$

$$x(\text{undistorted}) = x + x \frac{dr}{r} + P_1 (r^2 + 2x^2) + 2P_2 xy + B_1 x + B_2 y, \quad (15)$$

$$y(\text{undistorted}) = y + y \frac{dr}{r} + P_2 (r^2 + 2y^2) + 2P_1 xy. \quad (16)$$

式(11)~(16)表示Photomatrix模型在 X 方向和 Y 方向上坐标的畸变量. 其中, (xp, yp) 为主点坐标, $K_1, K_2, K_3, P_1, P_2, B_1, B_2$ 为畸变系数, 由标定结果给出. $(x(\text{distorted}), y(\text{distorted}))$ 为畸变前像点坐标, $(x(\text{undistorted}), y(\text{undistorted}))$ 为畸变量. 由于该模型使用非标准化的

像素单位, 因此畸变前坐标以mm为单位表示, 畸变量采用标准化的像素单位。

2.3 畸变模型参数转换方法

在使用OpenCV库进行大多数的制图工作时, 畸变模型通常采用Tsai模型的简单形式: 只需要 k_1, k_2, p_1, p_2 4个畸变系数即可. 令 $k_3, k_4, k_5, k_6, s_1, s_2$ 为0, 式(7)和(8)右式变为线性方程, 即

$$x' = x(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) + 2p_1 xy + p_2(r^2 + 2x^2), \quad (17)$$

$$y' = y(1 + k_1 r^2 + k_2 r^4) + 2p_2 xy + p_1(r^2 + 2y^2). \quad (18)$$

线性形式给了我们一个高精度求解Tsai畸变模型参数方法的启发. 第一种方法是基于特定的标定板或控制场, 提取像点坐标和物方点坐标, 排列成特定的坐标数据结构, 依据基于Tsai畸变模型的张正友平板标定法^[13]进行解算, 亦可直接基于共线方程建立数学表达式进行解算, 但该方法解算相对复杂. 第二种方法是一种技巧性方法, 输入像点坐标, 依据一种畸变模型计算出畸变量, 然后通过式(19)~(22)所示的畸变模型参数数学变换方法得到Tsai畸变模型参数, 此后便可在OpenCV库中应用这些参数以期完成制图工作. 需要注意的是, 在此过程中假定内参数保持不变. 给定像点坐标和畸变量, 将等式(7)和(8)合并改写为矩阵形式有:

$$\begin{pmatrix} x' - x \\ y' - y \end{pmatrix}_i = \begin{pmatrix} xr^2 & xr^4 & 2xy & r^2 + 2x^2 \\ yr^2 & yr^4 & r^2 + 2y^2 & 2xy \end{pmatrix}_i \begin{pmatrix} k_1 \\ k_2 \\ p_1 \\ p_2 \end{pmatrix}, \quad (19)$$

图3 (网络版彩图)立体匹配算法示意图

Figure 3 (Color online) Illustration of stereo matching algorithm.

$$(x, y)_i = \left(\frac{u(\text{before}) - c_x}{f_x}, \frac{v(\text{before}) - c_y}{f_y} \right)_i, \quad (20)$$

$$(x', y')_i = \left(\frac{u(\text{after}) - c_x}{f_x}, \frac{v(\text{after}) - c_y}{f_y} \right)_i, \quad (21)$$

$$(r^2)_i = (x^2 + y^2)_i, \quad (22)$$

其中, 下标 i 表示第 i 个像点坐标和相应的畸变量. 建立如式(19)所示的线性方程组 $\mathbf{AX}=\mathbf{B}$, 方程共有4个未知数(4个畸变参数 k_1, k_2, p_1, p_2), 一共可列出 $2i$ 个方程(通常取 $i>10$), 因此可以通过最小二乘或拟最小残差方法求解畸变参数.

同样地, 由于各个畸变模型的线性性质, Photometric模型能够转换至摄影测量模型, 摄影测量模型也能够转换至Tsai模型, 在转换过程中, 线性方程组 $\mathbf{AX}=\mathbf{B}$ 的组成矩阵 $\mathbf{AB}$ 将根据目标模型的数学形式发生改变, 但本质上与式(19)类似. 为了验证模型转换精度, 根据Photometric模型求解出Tsai模型和摄影测量模型参数, 并计算了绝对坐标差值和相对距离差值, 结果将在实验结果分析部分展示.

2.4 立体匹配

在左右图像间自动匹配一些可以稳健稠密匹配的支持像点^[14], 然后以这些点为顶点, 进行德劳内三角化, 再通过三角化得到的平面, 对三角形内部的像素点视差进行插值, 从而获得稠密匹配点和视差图. 算法流程示意图如图3所示.

支持像点选择: 对原始立体图像进行 9×9 窗口的竖直和水平方向的Sobel滤波, 获得待选像点集的向

量, 并对该向量进行1范数计算, 获得足够数量的稳健的支持像点. 采用最优匹配和次优匹配的匹配阈值, 剔除错误的匹配支持像点.

构建基于支持像点和待匹配图像的概率模型 $p(d_n, o_n^{(l)}, o_n^{(r)}, S)$: 基于支持像点的像素坐标和视差以及左图像像素坐标, 构建先验概率函数 $p(d_n | S, o_n^{(l)})$, 获得左图像视差; 然后构建图像稠密匹配的相似函数 $p(o_n^{(r)} | o_n^{(l)}, d_n)$, 基于左图像视差和左图像的像素坐标, 获得右图像的匹配像素坐标. 对左图像每个像素重复上述步骤100次以上, 最后对多次计算得到的右图像像素坐标取平均, 以得到精确匹配的像素坐标.

视差估计: 在上一步骤的基础上, 构建基于极线校正的立体图像像素坐标和像素值、支持像点的最大后验估计: $d_n^* = \arg\max p(d_n | o_n^{(l)}, o_n^{(r)}, \dots, o_N^{(r)}, S)$.

匹配验证: 立体图像分别通过上述步骤获得相应视差图, 然后对其左右视差图像进行连续性检查. 若在一定阈值范围内, 可视为视差估计最优.

2.5 离散点云生成

为了能够整体平差计算, 需要进行影像匹配, 建立多幅影像之间的联系. 首先通过划分影像内的区域格网, 限制提取的特征点数量, 保留更为明显的目标, 然后基于几何相对关系和附加约束条件的Affine-SIFT特征匹配方法^[15]获取连接点匹配点对. 在完成匹配计算后, 依据处理数据的特殊性, 采用唯一性约束、极线几何约束、仿射变换约束和人工检查4种约束. 基于中心投影的共线方程, 将标定参数和连接点坐标作为输入, 并引入惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)数据, 建立加权总体最小二乘的立体图像条带网光束法平差模型, 计算出月面巡视器高精度的位姿坐标^[16].

利用获取的视差图, 通过前方交会(三角测量)获得在相机坐标系下的三维点云, 然后通过多摄站月面巡视器的高精度位置坐标和坐标转换框架, 将三维点云纳入到全局坐标系下, 完成多摄站点云的生成和拼接.

2.6 DEM和DOM生成

DEM表示地形三维向量的有限序列, DOM存储图像的纹理特征. 利用多摄站的点云数据, 通过构建德劳内三角网和栅格化, 可以得到DEM和DOM.

(1) DEM生成

点云预处理: 对离散点云的高程进行横切分层, 统计每个分割区域内的点云数量, 将分割区内小于一定阈值的点作为粗差剔除.

构建虚拟格网与规则格网: 首先构建虚拟格网, 将原始离散点云分为 $N_x \times N_y$ 个网格 (N_x 和 N_y 分别代表 X 方向和 Y 方向上的网格个数), 采用最大高程和最近邻方法对格网内的数据做内插处理, 重新组织成规则格网.

内插: 利用虚拟格网进行分层次滤波, 然后依据IDW(反距离加权)方法内插生成DEM.

(2) DOM生成

坐标模型映射: 建立线性方程组, 解算正射影像各像素点与离散点云坐标之间的映射关系.

规则格网可见性计算: 准确地确定三维重建的点云在原始图像上的可见性图像集, 借助重建点云的可见性来推测规则格网的可见性.

规则面片选择: 一个规则格网对应正射影像的一个面片, 但是一个面片可能在多个原始图像上可见, 因此最终的正射影像的面片对应于哪个图像需要一种选择机制. 建立基于马尔科夫随机场的能量函数, 考虑影像成像条件和规则格网边界, 通过能量函数的最小化, 得到各格网最优的标记号, 保证相邻面片的纹理一致性.

匀光: 基于图像梯度场, 在图像空间以图像梯度差值实现全局匀光, 保持目标区域原有的梯度变化, 同时最小化目标图像边界的灰度差异, 可以最大限度地消除格网边界的拼接缝.

3 结果

在嫦娥四号正样标定场进行标定实验, 将两台全景相机固定在约270 mm的基线上, 对高精度控制场进行成像, 然后基于Photometrix畸变模型的标定算法, 对全景相机左右相机内外参数以及畸变系数进行了精确的标定, 标定图像如图4所示(图像大小为1176像素×865像素), 内参数和畸变系数标定结果如表1所示(主点和主距以标准化像素为单位).

需要注意的是, 该模型定义的像平面坐标系是以影像中心为原点, X 轴指向右侧, Y 轴指向下侧. 通过自主开发的点位坐标提取软件, 可以从标定影像中提取出高精度的同名像点坐标, 软件定义的像平面坐标系

图4 (网络版彩图)标定影像

Figure 4 (Color online) A pair of image for calibration.

表1 基于Photometrix畸变模型的标定结果

Table 1 Calibration results based on Photometrix distortion model

系数	B相机(左)	A相机(右)
x_p	1.6562838	-1.965878
y_p	0.6054595	-24.473649
f_x	3397.972973	3396.891892
f_y	3397.972973	3396.891892
K_1	5.6613×10^{-7}	-8.7695×10^{-7}
K_2	3.5207×10^{-8}	6.3169×10^{-8}
K_3	-1.3835×10^{-10}	-2.640×10^{-10}
P_1	1.9053×10^{-6}	1.6107×10^{-6}
P_2	1.4390×10^{-6}	-5.0584×10^{-6}
B_1	1.9856×10^{-5}	4.2724×10^{-5}
B_2	1.8739×10^{-5}	-3.9761×10^{-5}

是一般意义下的像平面坐标系,即以影像左上角为原点, X 轴指向右侧, Y 轴指向下侧. 因此在实际畸变差计算中,需将提取出的像点坐标平移至以影像中心,即(588, 432.5)为原点,然后由畸变模型数学表达式和标定参数值计算出畸变差,如表2所示.

在标定完成并计算出畸变差后,由于畸变模型的不一致性,需要由Photometrix模型参数转换为基于Tsai畸变模型的OpenCV参数,以便在后期制图时使用. 首先将原始像点坐标和相应的畸变量代入畸变模型参数转换方程,依据式(19)~(22)组成矩阵 $\mathbf{A}$ 和矩阵 $\mathbf{B}$,采用最小二乘或拟最小残差方法分别求解出摄影测量畸变模型参数和基于Tsai模型的OpenCV畸变参数. “玉兔二号”巡视器在月面移动时,全景相机在LE00210摄站拍摄了28对立体影像(此时,月面巡视器桅杆的俯仰角为 -18.898°),影像缩略图如图5所示.

从图上可以看出,左右影像的重叠度很高. 受全景相机视场和畸变的影响,在制图前应检查左右影像的编码是否与实际相符,然后将参数转换结果用于在轨的真实立体影像. 依据图2的操作流程,即去畸变和极线校正后,经由立体稠密匹配、定位和影像拼接重建出离散点云,最后生成DEM和DOM等地形产品,如图6所示.

在巡视器本体坐标系下生成的DEM和DOM上方出现了两块空白区域,结合全景相机在该站点的第22~24对原始影像,认为是巡视器太阳翼电池板和桅杆的阴影遮挡了地形. “玉兔二号”巡视器行走到该站点时,接收到的遥测坐标为(18.481, -64.557 , 0.387),这是巡视器在着陆北东地坐标系下的坐标. 从DOM上选取空白区域的一个点,如A点,其在着陆北东地坐标系下的坐标为(17.091, -58.605 , 0.477). XY 坐标之间的相对关系符合坐标系指向,即以巡视器中心为原点, X 轴指向东, Y 轴指向北, Z 轴指向地面.

在求得畸变模型参数后,结果发现各个模型畸变差之间的绝对差值有95%都在0.5像素以内. 考虑到模型间的差异性,选取一对正样场影像,提取出左右影像上的同名像点坐标,通过空间前方交会算法获得在控制场坐标系下的三维点坐标,并与在控制场坐标系下由高精度全站仪测量出的实际三维坐标进行比较. 同时,从全景相机在轨影像中无法实际测量三维点坐标,因此使用两对同名像点间的距离作为评判标准,分析各个模型计算结果的相对距离精度,以此作为去畸变模型转换和生成地形产品的精度,结果如表3所示.

从表3可以看出,使用初始的Photometrix畸变模型得到的绝对坐标精度在1 cm以内,经转换后得到的Tsai模型和摄影测量模型绝对坐标精度均在1.6 cm以

表 2 像点坐标及其畸变差

Table 2 Image coordination and distortion

	Image point coordinate				Photometrix distortion			
	L_x	L_y	R_x	R_y	ΔL_x	ΔL_y	ΔR_x	ΔR_y
1	221.8462	601.4231	92.9231	604.2692	-2.73396	1.24108	-3.63457	1.63318
2	1060.8462	659.6538	931.8462	665.1923	3.47466	1.67206	2.57356	2.08405
3	271.6154	430.4231	183.4615	434.5000	-2.36569	-0.02432	-2.96457	0.37696
4	377.9231	484.7307	281.0000	488.6538	-1.57903	0.37755	-2.24278	0.77771
5	451.7692	408.5000	262.3846	317.2692	-1.03260	-0.18656	-2.38052	-0.49052
6	357.5385	312.9615	577.9231	370.2692	-1.72989	-0.89353	-0.04547	-0.09830
7	659.6923	366.1923	742.2308	369.9615	0.50599	-0.49964	1.17046	-0.10059
8	825.3077	365.8846	833.6154	455.9615	1.73154	-0.50191	1.84671	0.53581
9	925.5385	451.5769	935.3846	337.6538	2.47327	0.13222	2.59990	-0.33969
10	1042.3846	487.6538	341.5385	186.1154	3.33780	0.39920	-1.79474	-1.46107
11	1032.9231	333.1923	409.4615	136.5000	3.26792	-0.74384	-1.29208	-1.82824
12	405.3846	181.5000	865.9231	236.4231	-1.37586	-1.86634	2.08590	-1.08880
13	467.0769	132.2692	881.4615	17.9615	-0.91935	-2.23065	2.20100	-2.70552
14	932.0769	232.5000	696.0769	38.9615	2.52163	-1.48897	0.82903	-2.55008

图 5 全景相机在LE00210点的在轨影像(28对, 左图为左相机影像, 右图为右相机影像)

Figure 5 PanCam images located in Site LE00210 (28 pairs; Left: Left images, Right: Right images).

图 6 (网络版彩图)生成的DEM和DOM
Figure 6 (Color online) Generated DEM and DOM.

表 3 坐标结果和相对距离结果比较^{a)}

Table 3 Comparison of coordination results and relative distance^{a)}

	实际坐标 (mm)			模型差异 Δ (mm)			距离 (mm)	相对距离精度 (%)		
	X	Y	Z	Photometrix	Tsai	Photogrammetry		Photometrix	Tsai	Photogrammetry
1	-557.825	687.619	3646.955	4.423	5.746	4.709	904.209	0.09	0.35	0.14
2	343.939	746.791	3616.734	6.210	13.413	10.292	1177.619	0.20	1.32	0.08
3	-556.502	880.442	4363.815	1.412	14.783	4.629	221.992	1.64	2.37	2.72
4	-414.181	862.738	4194.370	4.750	7.434	3.256	216.517	0.04	0.23	0.11
5	-439.398	688.835	4320.866	1.718	7.464	1.327	498.075	0.82	3.03	2.30
6	-51.654	892.351	4558.174	8.858	15.685	15.081	223.342	1.07	1.42	1.74
7	165.924	868.847	4513.577	3.627	5.315	12.902	251.745	0.20	1.68	0.15
8	275.143	870.423	4286.764	2.822	10.709	13.269	225.402	0.10	0.19	3.78
9	393.091	682.073	4249.103	3.068	11.090	3.171	1151.959	0.72	1.12	0.55
10	-402.524	856.494	5063.709	8.930	8.669	11.279	211.177	3.41	2.35	3.38
11	-315.112	864.964	5255.759	0.531	2.944	2.860	736.760	0.16	0.61	0.39
12	357.473	888.036	4955.905	1.375	11.188	3.451	313.095	0.36	0.05	0.71
13	380.353	613.794	5105.224	8.022	2.671	14.978	690.201	0.95	0.32	1.90
14	125.568	887.394	5685.400	1.294	5.208	1.102				

a) $\Delta = \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2}$, ΔX , ΔY , ΔZ 分别表示模型得到的物方点坐标与实际坐标在XYZ方向上的差值.

内; 相对距离精度大多在1.5%以内, 最差不超过4%, 有效表明了畸变模型参数转换方法的可靠性. 对于最终生成的DEM和DOM, 使用绝对坐标精度和相对距离

精度作为月面地形恢复的评价因子, 反映了三维地形的重建精度, 结果表明使用全景相机能够高精度地完成制图工作.

4 结论

本文对嫦娥四号月面巡视器科学载荷的全景相机制图和地形重建方法进行了研究, 采用计算机视觉方法首次实现了基于全景相机立体影像的制图工作, 并针对标定模型和制图模型不匹配的问题提出了模型参数转换的技巧性方法. 通过对立体影像同名像点的提取和畸变差计算, 可实现多种畸变模型参数之间的高精度转换, 利用转换后的Tsai模型参数结果采用基于支持像点的影像立体匹配、定位和离散点云生成方法, 在OpenCV框架下实现了对全景相机在轨影像的

DEM和DOM生成. 参数转换方法利用原有的畸变模型结果可实现向另一畸变模型的数学变换, 提供了解决“标定时使用的畸变模型与后期制图时使用的畸变模型不同, 从而导致无法直接使用标定后畸变参数”这一问题一个解决方法, 该方法的可行性和高精度性也为相机标定提供了新的思路. 通过模拟试验表明, 模型转换后重建出的三维点绝对坐标精度在1.6 cm以内, 两点间的相对距离精度最差不超过4%, 并且该方法已成功应用于嫦娥四号月面巡视器的全景相机制图工作, 顺利保障了路径规划和导航定位的进行.

致谢 特别感谢中国航天科技集团第五研究院总体部的各位专家教授, 为本文提供行文思路和数据支持, 同时感谢课题组同学的大力帮助, 使得本文顺利完成.

参考文献

- Domrongwatthanayotin B, Roeksabutr A, Chongchaewchamnanand M, et al. A simple static-shadow based algorithm for 3D complex-terrain surface reconstruction. In: IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Seoul, 2005. 1738–1741
- David M. Reconstruction of surface from planar contours. Dissertation for Doctoral Degree. Seattle: University of Washington, 1994
- Zhao M, Li X B, Lang R L. Improved adaptive stereo matching using double dynamic programming with correlation of row and column. In: 2010 2nd International Conference on Signal Processing Systems. Dalian, 2010. V3-95–V3-100
- Wang H, Ray N, Zhang H. Graph-cut optimization of the ratio of functions and its application to image segmentation. In: 2008 15th IEEE International Conference on Image Processing. Las Vegas, 2008. 749–752
- Faliu Y, Moon I. Image segmentation: A survey of graph-cut methods. In: 2012 International Conference on Systems and Informatics. Shanghai, 2012. 1936–1941
- Žbontar J, Lecun Y. Stereo matching by training a convolutional neural network to compare image patches. J Mach Learn Res, 2015, 17: 1–32
- Li M L, Liu S C, Peng S, et al. Improved dynamic programming in the lunar terrain reconstruction (in Chinese). Opto-Electron Eng, 2013, 40: 6–11 [李明磊, 刘少创, 彭松, 等. 基于改进动态规划法的月面地形三维重建. 光电工程, 2013, 40: 6–11]
- Jie M, Huang X L. A lunar terrain reconstruction method using long base-line stereo vision. In: Chinese Control Conference. Zhangjiajie, 2007. 488–492
- Zhang Z X, Zhang J Q. Digital Photogrammetry (in Chinese). Wuhan: Wuhan University Press, 2002 [张祖勋, 张建清. 数字摄影测量学. 武汉: 武汉大学出版社, 2002]
- Photometrix. The Australis Image Coordinate Correction Model. Melbourne, Australia: Photometrix Pty Ltd, 2004
- Tsai R Y. An efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision. In: Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Miami Beach, 1986. 364–374
- Fryer J G, Brown D C. Lens distortion for close-range photogrammetry. Photogramm Eng Remote Sens, 1986, 52: 51–58
- Zhang Z Y. A flexible new technique for camera calibration. IEEE Trans Pattern Anal Machine Intell, 2000, 22: 1330–1334
- Geiger A, Roser M, Urtasun R. Efficient large-scale stereo matching. In: Asian Conference on Computer Vision. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010
- Yu G, Morel J M. A fully affine invariant image comparison method. In: Proceeding of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP). Taipei, 2009
- Qing M Y, Chuang L S, Bo W, et al. Weighted total least squares for the visual localization of a planetary rover. Photogramm Eng Remote Sens, 2018, 84: 605–618

Research on a mapping method of Chang'E-4 lunar rover's panoramic camera

SIMA Bing^{1,2}, PENG Song³, MA YouQing¹, WEN Bo³ & LIU ShaoChuang¹

¹ Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³ Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China

As a scientific payload of Chang'E-4 lunar rover, the panoramic camera not only detects lunar geology but can be directly used for mapping and constructing the lunar terrain in the lunar rover's navigation and planning. We choose one model for calibrating the camera early; however, we often need to choose another model for the convenience of mapping work afterward. This paper proposes a distortion removal method based on the model parameter transformation algorithm, which overcomes the mismatch problem between the mapping model and the calibration model. The support points dense matching, spatial forward intersection, least-square bundle adjustment, discrete point cloud generation, and Delaunay triangulation technique are used together to achieve the topographic mapping work of panoramic camera images. A control field is constructed in the laboratory and used to test the feasibility and accuracy of the proposed distortion model parameter transformation method using the images taken by Chang'E-4 lunar rover's panoramic camera located in Site LE00210. The result shows that after distortion model transformation, the position accuracy was higher than 1.6 cm, while the relative distance accuracy was higher than 4%. The proposed algorithm has been successfully applied to the mapping work of Chang'E-4 lunar rover's panoramic camera.

Chang'E-4, lunar rover, terrain reconstruction, distortion removal, teleoperation

doi: [10.1360/SST-2019-0176](https://doi.org/10.1360/SST-2019-0176)