

嫦娥一号月面成像的高精度匹配及月貌三维重建

朱遵尚^{1,2} 苑 云^{1,2} 李 由^{1,2} 尚 洋^{1,2} 于起峰^{1,2}

(¹ 国防科技大学航天科学与工程学院, 湖南 长沙 410073
² 湖南省图像测量与视觉导航重点实验室, 湖南 长沙 410073)

摘要 针对嫦娥一号探月卫星 2C 级月面成像, 提出了基于待配点最优模板选择的二次函数形变补偿迭代匹配方法。仿真表明它能有效地适应地形起伏引起的图像形变, 匹配精度较高且稳定性好。在标准相关匹配的基础上结合所提出的方法完成了下视图与前、后视图的精确匹配, 采用三视图约束机制和顺序检验机制保证了匹配的稳健性。分析了线阵相机成像的仿射近似模型, 并以此为基础实现同轨三视重建。基于邻轨下视图同名特征点, 采用 RANSAC 方法估计邻轨三维坐标转换参数, 完成邻轨拼接。实验结果表明, 三维重建的月貌图能够更好地表达月球表面的形状和地形。

关键词 图像处理; 三维重建; 图像匹配; 三线阵 CCD; 二次函数形变; 嫦娥一号; 月面图像

中图分类号 TP751.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0211002

High Precision Matching and 3D Surface Reconstruction of Chang'E 1 Lunar Images

Zhu Zunshang^{1,2} Yuan Yun^{1,2} Li You^{1,2} Shang Yang^{1,2} Yu Qifeng^{1,2}

¹ College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China

² Hunan Key Laboratory of Videometrics and Vision Navigation, Changsha, Hunan 410073, China

Abstract An iterative matching method based on choosing optimal mask and representing deformation by the quadric function is proposed to solve the matching problem of 2C level lunar images by Chang'E 1 (CE1) lunar probe satellite. The simulation results show that it has high precision and stability which self adapts well to the relief terrain's imaging deformation. A precise matching is applied to the normal view, forward view and backward view of the CE1 image by combining the proposed method and the standard correlation method. Affine model approximating the imaging of line scanner camera is analyzed and applied to the same orbit's three-view reconstruction. The adjacent orbit's lunar terrain registration is realized by RANSAC estimation of three-dimensional (3D) coordinate transformation parameters led by matching feature points of adjacent normal views. The experiment results indicate that the shape and terrain of lunar surface can be better understood from the reconstructed results.

Key words image processing; three-dimensional reconstruction; image matching; three-line-scanner; quadric function deformation; Chang'E 1; lunar image

OCIS codes 100.2000; 100.3010; 110.3010; 110.4850

1 引 言

嫦娥一号从顺利抵达月球轨道到引导下的月面撞击, 成功完成了光荣的历史使命, 传回的大量探测

数据给中国人留下了宝贵的科研资料。工程的首要目标是对月球表面进行三维(3D)立体成像, 获取月球的三维影像^[1]并作几何仿真反演。完成这个目标

收稿日期: 2013-07-08; **收到修改稿日期**: 2013-09-30

基金项目: 国家 973 计划(2013CB733100)

作者简介: 朱遵尚(1986—), 男, 博士研究生, 主要从事图像处理、三维重建和视觉导航等方面的研究。

E-mail: zzs2623@nudt.edu.cn

导师简介: 于起峰(1958—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事计算机视觉和摄影测量等方面的研究。

E-mail: jmgc108@vip.163.com

的一个主要测量设备是三线阵相机。卫星传回的原始图像数据经过辐射校正、几何校正、光度校正后,以 2C 级产品形式向一般用户发放,这给月貌三维重建提供了诸多的便利。

在嫦娥卫星月貌成像的三维重建技术中,国内许多学者做出了大量有价值的研究。王任享^[2]主要利用空中三角测量的原理,以及在辅助测量数据条件下进行摄影测量^[3]的精度评估,并进一步利用光束法平差技术提高测绘精度^[4]。与此同时,基于三线阵 CCD 影像的高精度自动匹配和三维重建方法^[5]实现三维测量的方法也发展迅速。由于三维重建中需要较多同名匹配点,许多算法研究围绕提高匹配速度展开。崔腾飞等^[6]通过采用基于灰度的金字塔影像的动态窗口匹配的方法进行影像匹配。祝世平等^[7]提出了自适应分水岭算法的图割的立体匹配算法。王君铎等^[8]利用小波分析的多分辨率特性,构造了金字塔顶层影像误匹配剔除策略及金字塔底层影像匹配点的快速搜索策略。为减小匹配的搜索范围, Kim 等^[9-10]发展了类似面阵图像的核线理论,使搜索从二维降低到一维。张小虎等^[11]利用激光投影仪扫描辅助下的双目摄影测量方法,并从影像梯度与核线的关系解决立体影像同名点匹配问题。李进军等^[12]利用多模式局部特征检测与匹配、特征面片集初始化、膨胀、滤波等方法实现高效匹配。金字塔式匹配策略^[13]和遗传算法^[14]也是提高匹配速度的两个研究方向。在提高匹配精度方面,最常见的是基于仿射的最小二乘匹配方法,而对于影像纹理贫乏地区、地形起伏较大地区,即使运用精度较高的匹配算法(如多点最小二乘匹配)也无法达到预期的匹配精度^[15]。主要原因是这种方法在匹配模型假设上和模板尺寸选择上具有一定盲目性,未针对性地根据起伏地形在线阵相机成像的形变规律进行匹配。Zhu 等^[16]分析了线阵相机的成像模型,并利用成像模型对线阵相机获得的图像进行重建和拼接。Li 等^[17]分析了因地形起伏引起的图像形变规律,提出了基于高次函数形变补偿的匹配方法,对线阵影像高精度匹配具有重要的指导作用。

本文针对嫦娥一号探月卫星 2C 级月面成像,说明了使用仿射投影模型的合理性。结合成像模型分析了月面凹坑、凸起等地形地貌特征引起的影像形变规律,提出了基于待配点最优模板选择的二次函数形变补偿迭代匹配方法。该方法依据标准相关的匹配结果自动改变匹配模板的左右半径长度和区域,并采用高次形变函数表示匹配区域的图像变形,

对大变形区域匹配精度较高。联合三视约束机制和顺序检验机制检测误匹配点,保证稳健性。采用仿射模型,完成了同轨三视图的月貌三维重建。基于邻轨下视图同名特征点,采用 RANdom SAmple Consensus (RANSAC)方法估计邻轨三维坐标转换参数,拼接^[18-19]形成了月面平面基准坐标系下的三维月貌影像图。文中方法对推扫式三线阵相机的成像分析也具有借鉴意义,在嫦娥二号的相机设计^[20]中也可以应用推广。

2 嫦娥一号成像模型与分析

嫦娥一号卫星飞行过程中连续获取前视、正视和后视三线阵的数据。线阵在每一成像时刻,在光心与扫描线确定的平面(本文称投影面)内为一维中心透视投影,在推扫方向上为平行正投影。线阵推扫式相机是卫星常用的一类传感器,用一个线阵传感器一次获得一条影像线。当传感器移动时,传感器平面扫过空间的一个区域并每次获得一根图像线。图像的第二维由传感器的运动提供。线性推扫式模型假定传感器沿着一条直线相对地面做匀速运动。假定传感器阵列的方位相对于移动的方向是恒定的。

基于以上分析,可以建立嫦娥一号 2C 级产品的立体成像模型。如图 1(a)所示,假设卫星沿与月面水平面平行的直线 X_v 飞行,其扫描线方向为 Y_v 。定义世界坐标系的 X_w 轴平行于 X_v , Y_w 轴平行于 Y_v (本文称 $X_w O_w Y_w$ 为基准面), Z_w 轴垂直于月面水平面。下标 f, n, b 分别对应前、下、后视。以某时刻下视相机光心位置作为下视相机系原点 O_n , 其正下方所对应的月表点为世界坐标系原点 O_w , 前、后视相机对 O_w 成像时对应的光心位置为各自坐标系的原点 O_f, O_b 。定义三视相机的扫描线方向为 Y 方向,垂直于各自投影面的方向为 X 方向, Z 方向由右手定则确定。

图 1(b)为推扫式线阵相机成像示意图, X_v 为飞行方向,原点 O_c 为起始成像时刻光心位置, Y_c 为扫描线方向, X_c 为垂直于投影面的方向, Y_c 方向为缩放正投影, X_c 方向为正投影,其成像关系式为

$$\begin{cases} x = X_c / (\Delta s \cdot \cos \theta) \\ y = (f_y / d_y) \cdot Y_c / Z_c + p_y \end{cases}, \quad (1)$$

式中 Δs 为基线长, f_y 为焦距, d_y 为像元尺度, p_y 为 Z_c 轴与第一条扫描线交点的 y 坐标。记 $\alpha_x = 1/\Delta s$, $\alpha_y = f_y/d_y$ 相当于等效焦距。结合相机系的外参数旋转矩阵 \mathbf{R} 和平移向量 \mathbf{t} , 得:

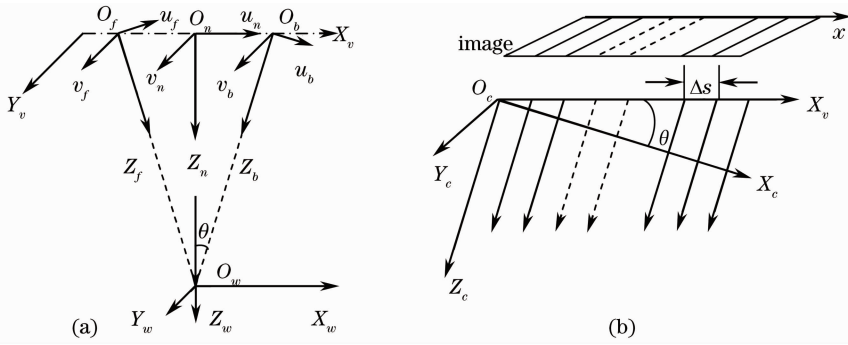


图1 三线阵成像原理示意图。(a)三线阵相机坐标系定义；(b)推扫式线阵相机成像几何

Fig. 1 Imaging principle of 3-line-scanner. (a) Coordinate system definition for 3-line-scanner camera; (b) view geometry of push-broom line camera

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \alpha_x / \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_y & p_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [\mathbf{R} \quad \mathbf{t}] \mathbf{X}_w = \mathbf{K} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{R}} & \hat{\mathbf{t}} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \mathbf{X}_w, \quad (2)$$

式中 $\mathbf{x} = [x, y, 1]^T$ 和 $\mathbf{X}_w = [X_w, Y_w, Z_w, 1]^T$ 分别为像点和物点齐次坐标, $\hat{\mathbf{R}}$ 为旋转矩阵的前两行元素, $\hat{\mathbf{t}}$ 为 \mathbf{t} 的前两个元素。

将三线阵相机投影模型应用到图 1(a)中所定义的世界坐标系中,得到三视相机各自对应的投影矩阵:

$$\mathbf{P}_n = \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_y & p_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_y & 0 & p_y \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\mathbf{P}_f = \begin{bmatrix} \alpha_x / \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_y & p_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & -\alpha_x \tan \theta & 0 \\ 0 & \alpha_y & 0 & p_y \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\mathbf{P}_b = \begin{bmatrix} \alpha_x / \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_y & p_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_x & 0 & \alpha_x \tan \theta & 0 \\ 0 & \alpha_y & 0 & p_y \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中 $\alpha_x = 1/\Delta s$ 为下视 x 方向等效焦距。由投影矩阵得到物像关系

$$\begin{bmatrix} x_n \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_x X_w \\ \alpha_y Y_w + p_y \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} x_f \\ y_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_x X_w - \alpha_x \tan \theta \cdot Z_w \\ \alpha_y Y_w + p_y \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} x_b \\ y_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_x X_w + \alpha_x \tan \theta \cdot Z_w \\ \alpha_y Y_w + p_y \end{bmatrix}. \quad (6)$$

由(6)式可以看出,当对不同线阵的成像进行匹配求取视差时,不同线阵的夹角 θ 不同,使得正交轴上 x 与 Z_w 存在非线性的缩放关系;因此在匹配过程中需要考虑补偿这一变形效应。而透视轴上与不同线阵的夹角无关,因此在线阵推扫过程中,透视轴 y 方向上的视差较小,且不受深度 Z_w 影响。

3 月面成像自适应图像匹配与三维重建

分析由月面凹坑、凸起等形貌高程变化导致的线阵成像的几何形变规律,可以指导高精度图像匹配。文献[18]以沿卫星运动方向倾斜的斜面为出发点,分析了起伏地形在星载三线阵相机不同传感器

上成像的形变模式,该方法匹配模板固定,适应性还有待进一步提高。本文根据仿射模型来分析月表点的高程变化对成像的影响,提出了基于待配点最优模板选择的二次函数形变补偿迭代匹配方法。

3.1 月面成像形变分析与高精度匹配方法

如图 1 中的物点 $\mathbf{X}_w [X_w, Y_w, Z_w, 1]^T$, 由(6)式分析物点坐标对像点坐标的影响。图 2 中 x_f, x_n, x_b 分别表示物点在三视图中的像点 x 坐标。由(6)式可知,在仿射模型假设下三视像点的 y 坐标与 Z_w 无关,当一个物点的 X_w, Y_w 坐标不变,而 Z_w 由零逐渐增大时,它所对应的 x_n 不变,而 x_f 渐小、 x_b 渐大,如图 2(a)所示。对于沿卫星运动方向的地表截

面,其地表点的 Y_w 都相等。若它们的 Z_w 随 X_w 由零线性增加,则地表截面在三视图上的像长度不等。相比于下视图中像 x_0x_n ,前视图中像 x_0x_f 线性缩短,后视图中像 x_0x_b 线性伸长,如图 2(b)所示。而

对于垂直于卫星运动方向的地表截面,其地表点的 X_w 都相等。若它们的 Z_w 随 Y_w 由零线性增加,地表截面的像 x_0x_f 和 x_0x_b 相对于 x_0x_n 发生“摆动”,如图 2(c)所示。

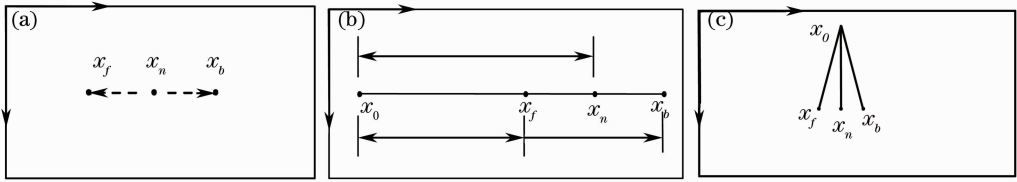


图 2 三视同名像点示意图。(a)一个物点的成像;(b)沿卫星运动方向;(c)垂直于卫星运动方向
Fig. 2 Corresponding image points from three-view. (a) Three-view imagery for single object point; (b) on motion direction; (c) perpendicular to motion direction

对世界坐标系的一个半圆球考察图像形变,其大圆在基准面上,其他点都在基准面以下。图 3 为仿射模型仿真图。在下视图上圆心位置不变(大圆中心),而在前视图上,随着 Z_w 增大,其他等高线上的圆像中心逐渐左移,且相对大圆中心的平移量与高程成线性关系。反之在后视图上逐渐右移。

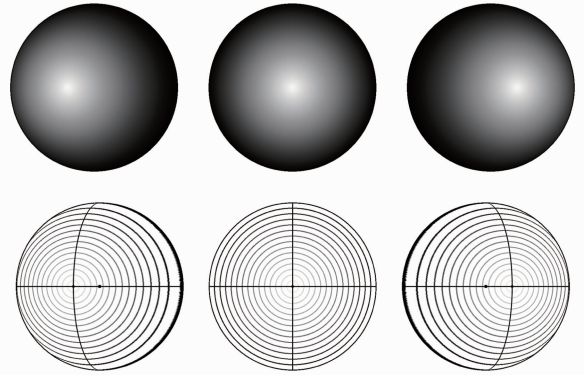


图 3 仿真形成的前、下、后视图像和对应的等高线
Fig. 3 Simulated three-view images and corresponding contour line

与下视图相比,半圆球在前、后视图上的像形变很大且不是仿射变形。大圆内侧附近区域变形最大,因为高程变化剧烈,且由于大圆半径最大导致的形放大更明显。顶点区域虽然视差最大,但因为高程变化缓慢,变形很小。图 4 为一组嫦娥一号相机对陨石坑的三视成像,与仿真图有相似的变形规律。

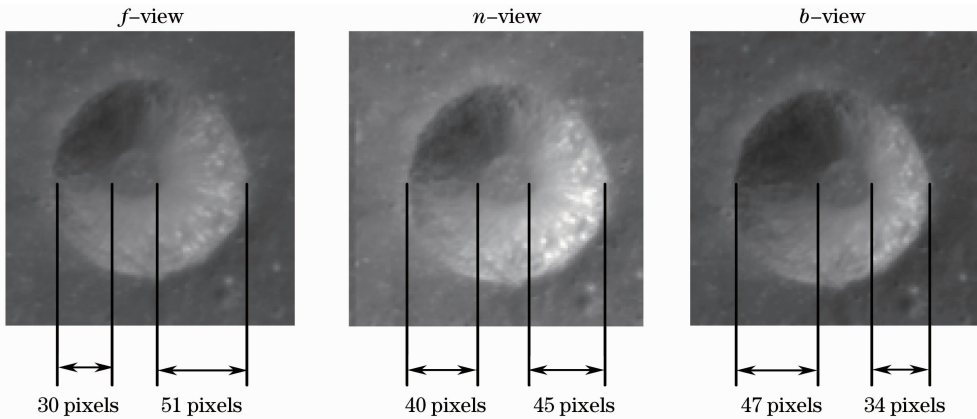


图 4 一组嫦娥一号三线阵 CCD 相机对陨石坑的三视成像
Fig. 4 Three-view imaging of the satellite borne 3-line-scanner camera to aerolite crater

由于嫦娥一号月像三视图上下视差几乎为零,匹配可只在 x 方向进行。针对月像变形较大区域,本文提出了基于待配点最优模板选择的二次函数形变补偿迭代匹配方法。如图 5(a)中沿卫星运动方向的地表截面,其形状为半圆弧。

半圆弧端点为 A 、 B ,顶点为 C ,它们在三视图中的像如图 5(b)中所示。以顶点 C 由下视图向后视图

匹配为例,它在下视图中的像点 C_n 为待匹配点,在后视图中的粗匹配点 C_{b_0} 可由标准相关得到,要求计算高精度匹配点 C_b 。易知 Z_w 由 A 到 C 单调增加,由 C 到 B 又单调减少。因此对待匹配点左侧用一个二次多项式形变函数近似表示拉伸效应,而对待匹配点右侧用另一个二次多项式形变函数近似表示缩短效应,结合(6)式的成像模型,本文用左、右侧的正

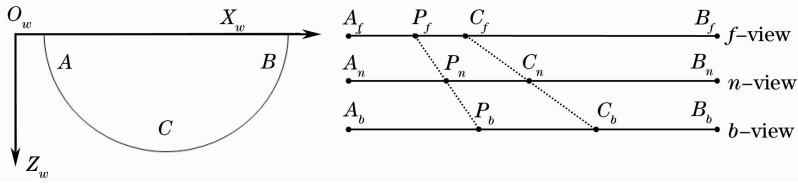


图5 半圆弧地表截面成像示意图。(a)空间中半圆弧；(b)半圆弧的三视成像

Fig. 5 Imaging of semicircle arc lunar surface section. (a) Semicircle arc; (b) three-view imaging of the semicircle arc

负视差最大值的二次多项式函数近似不同线阵之间的几何变形关系,如下所示:

$$x' = a_0 + a_1 x_+ + a_2 x_+^2 + a_3 x_- + a_4 x_-^2, \quad (7)$$

式中以匹配点为中心建立一维坐标系,式左右两边分别为后视图和下视图的 x 坐标, a_i 表示平移量和变形系数, x_+ 表示取 x 和零的最大值, x_- 表示取 x 和零的最小值。下视图上匹配点左、右两侧模板半径长度分别为 $A_n C_n$ 、 $C_n B_n$ 。A、B 在下视图中的像点 A_n 、 B_n 和在后视图中的像点 A_b 、 B_b 由标准相关匹配得到。匹配点左右两侧变形系数相互独立,初始值为 $[C_{b0} - C_n, A_f C_{f0} / A_n C_n, 0, C_{f0} B_f / C_n B_n, 0]^T$ 。采用

表1 取不同半径时顶点的下视图与后视图匹配的变形系数和相关系数

Table 1 Matching deformation and correlation coefficient of the acme from the normal view to the backward view with different radii

Radius / pixel	5	10	20	30	40	50
a_0 / pixel	0.57	0.51	0.42	0.27	0.19	0.08
a_1 / pixel	0.42	0.87	0.94	0.96	1.06	1.01
a_2 / pixel	0.0524	0.0023	-0.0001	-0.0003	-0.0008	-0.0007
a_3 / pixel	0.59	0.89	0.96	0.967	1.07	0.95
a_4 / pixel	-0.0478	-0.0043	-0.0009	-0.0009	-0.0005	-0.0008
Coef / %	98.712	99.901	99.984	99.991	99.987	99.994

对下视图上以大圆圆心为中心,不同半径的圆内所有点进行匹配,对比本文方法与仿射最小二乘方法(ALSM)的定位精度。仿射最小二乘模板固定为 $20 \text{ pixel} \times 20 \text{ pixel}$ 。表2给出了两种方法匹配结果与真实值误差的均方差,结果表明仿射最小二乘

表2 两种方法对不同半径区域内所有点的匹配结果与真实值误差的均方差(单位: pixel)

Table 2 Mean standard deviation of all image points in different-radius circular areas by two matching methods (unit: pixel)

Radius	5	10	20	30	40	50
ALSM	0.08	0.13	0.24	0.55	0.58	0.73
Proposed method	0.06	0.05	0.07	0.09	0.11	0.16

3.2 三维重建关键步骤

月貌三维重建的过程分为两大部分:同轨三视重建和邻轨拼接。算法流程如下。

3.2.1 粗匹配与精匹配

由于不同线阵之间存在相对偏移,在图像上即为相对视差,为了对月面进行重建,需要得到不同线阵的绝对视差,本文用月面基准去消除相对视差,从

最小二乘匹配原理迭代求解变形系数,可准确定位到亚像素。对于 $A_n C_n$ 上的任何待匹配点 P_n ,左、右侧匹配半径变成 $A_n P_n$ 、 $P_n C_n$,此时 P_n 两侧都为拉伸变形。采用此方法仍可实现高精度匹配。

用仿真图对本文方法进行验证。对于半圆球的顶点,左右两侧高程都是单调变化。模板的左右半径取相同大小,分析在不同模板半径下的匹配精度,结果如表1所示。仿真图大圆半径 50 pixel ,匹配的亚像素真实值为 0.13 pixel 。由结果可知,随着半径的增大,匹配亚像素定位精度 a_0 逐渐接近真实值,误差小于 0.1 pixel ,且相关系数(用 Coef 表示)很高。

在半径较小时,即圆球的顶点附近匹配精度较高,说明对此区域做仿射近似较为合理;在半径较大时,匹配误差明显增大,且不可控制,说明对大变形区域的仿射近似不合理。而本文方法在所有变形区域都能给出较高匹配精度,且结果稳定。

而得到绝对视差。月球表面以陨石坑和凸起居多,其高程大都具有从月面基准开始达到极大值又回到月面基准的特点,可认为月面基准上的点与相邻极值点之间的高程单调变化,本文匹配方法适用。在应用本文精匹配方法之前,采用标准相关匹配等粗匹配方法识别月面基准上的点和极值点。

1) 月面基准上点的识别。对同轨三视月像分

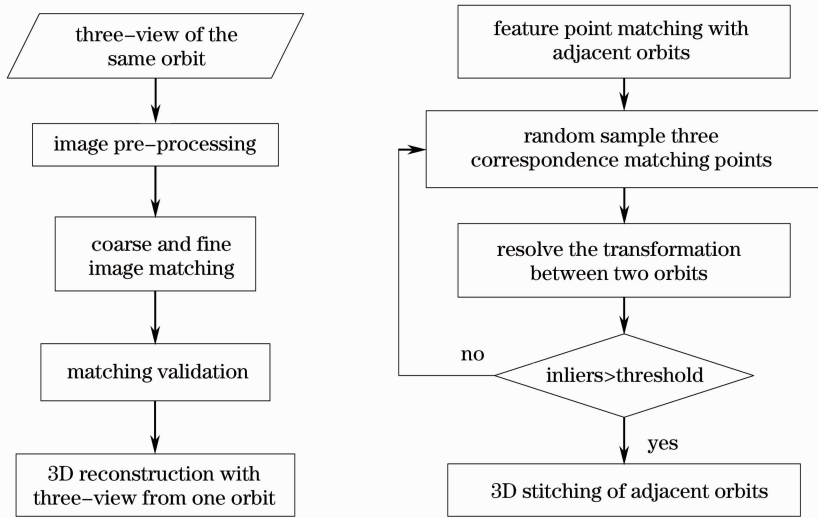


图6 月貌三维重建流程图

Fig. 6 Reconstruction flow chart of lunar surface

别由下视图向前、后视图匹配。先确定匹配区大致偏移量,再标准相关匹配得到视差值。具有同一视差值的像点所对应的物点都在同一水平面上,且月表上相对月面基准高程变化较小的点占更大比例,因此对于占最大比例的视差值所对应的像点,它们所对应的空间物点都在平行且十分接近月面基准的平面上,可把它们作为月面基准。

2) 极值点的识别。在3.1节仿真图分析中可知,高程极值点即半球顶点附近区域虽然视差很大,但图像变形很小,标准相关匹配结果可信,且用仿射最小二乘匹配能得到较高精度。将图像 x 方向上两相邻基准面间视差绝对值最大的点作为高程极值控制点,可加强对其他点的“约束力”。

在粗匹配基础上进行精匹配。对基准面控制点用相关系数拟合方法,对极值控制点用仿射最小二

乘匹配方法,对其他点用本文匹配方法进行高精度匹配得到亚像素匹配结果。所有匹配完成后各点视差自减掉下视相对视差,此时三视图像原点都对应世界坐标系原点。

3.2.2 匹配检验机制

三线阵 CCD 比单线阵或双线阵相机构像几何强度高,因为三视图之间的强力几何约束。由图4和图5中可看出,前、后视图在相机运动方向上总呈现相反的变形。可以得到三视同名像点之间关系

$$x_b - x_n = x_n - x_f, \quad y_n = y_b = y_f, \quad (8)$$

可知前、后视图的左右视差大小相等且方向相反。利用此三视约束机制可检测出错误匹配点,当两视差大小之差大于一定阈值时即认为匹配错误。

3.2.3 三维重建公式

由(6)式得到三维重建公式

$$\begin{cases} X_w = x_n / \alpha_x = (x_b + x_f) / 2\alpha_x \\ Y_w = (y_n - p_y) / \alpha_y = (y_b - p_y) / \alpha_y = (y_f - p_y) / \alpha_y \\ Z_w = (x_b - x_n) / \alpha_x \tan \theta = (x_n - x_f) / \alpha_x \tan \theta = (x_b - x_f) / 2\alpha_x \tan \theta \end{cases}, \quad (9)$$

式中内参数和三视夹角为固定值,在参数已知的条件下可以重建绝对尺度的月面。本文应用(9)式对同轨三视图像匹配结果重建三维月貌,重建尺度为像素。

3.2.4 邻轨拼接

同轨三维重建之后要进行邻轨拼接,采用由邻轨下视图像特征点提取和匹配引导的旋转矩阵 \mathbf{R} 和平移向量 \mathbf{T} 的RANSAC估计方法。对两轨下视

图像进行特征点提取与匹配,以二维同名点对应的三维空间点对作为计算的输入,其关系为

$$\mathbf{X} = \mathbf{R}\mathbf{X}' + \mathbf{T}, \quad (10)$$

式中 \mathbf{X}, \mathbf{X}' 为同名物点在两三维坐标系中坐标, \mathbf{R} 和 \mathbf{T} 为旋转矩阵和平移向量。理论上非共线三点唯一确定 \mathbf{R} 和 \mathbf{T} 。本文采用Cayley变换方法^[21]求解 \mathbf{R} ,而后求解 \mathbf{T} 。利用RANSAC算法多次随机抽取三个匹配点对计算 \mathbf{R}, \mathbf{T} ,以包含内点数最多的模型作为正确结果。

4 结果分析

为了验证算法的有效性,可以利用匹配的相关系数来对算法效果进行评估,并与仿射最小二乘匹配方法进行比较;通过一组数字表面模型(DSM)仿真图对算法的匹配精度进行测试;然后对一组嫦娥一号线阵相机的数据进行了匹配和重建实验。

1) 高精度匹配实验。

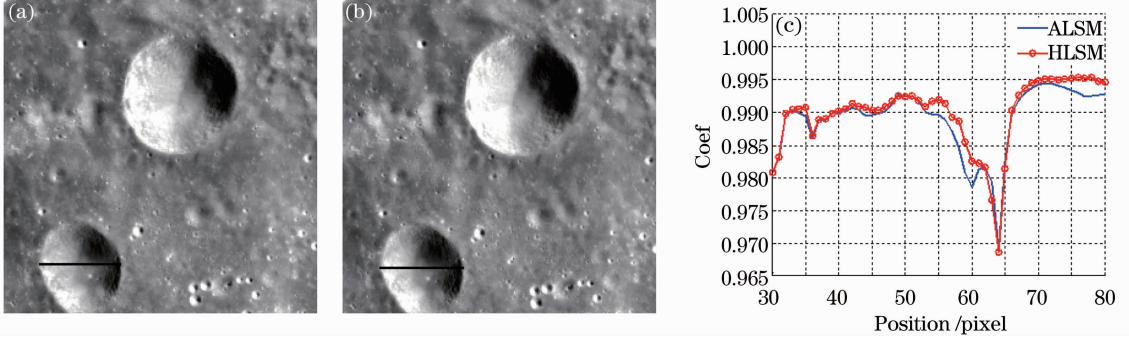


图7 本文方法与仿射最小二乘匹配的匹配精度比较。(a)正下视图像;(b)前视图像;(c)相关系数比较(黑线区域)

Fig. 7 Comparison of the matching precision of the proposed method. (a) Normal view; (b) forward view; (c) comparison of the correlation coefficients (dark line)

2) 利用 DSM 仿真图进行精度评估。

对一组 DSM 数据进行三线阵成像仿真,仿真的高程范围为 0~1000 m 高度起伏,并对仿真生成的图像进行本文方法的匹配验证。经过匹配重建后

表3 DSM 经过匹配重建后 x 方向误差(单位: pixel)

Table 3 Re-projection error obtained by the proposed method on x direction (unit: pixel)

Simulated image pairs	Total pixels	Re-projection error on x direction			
		Minimum	Maximum	Average	Median
n -view and b -view	293219	-0.90194	1.01223	-0.00363	0.07955
n -view and f -view	297853	-1.13799	0.48746	0.00986	0.07828

表4 DSM 经过匹配重建后 y 方向误差(单位: pixel)

Table 4 Re-projection error obtained by the proposed method on y direction (unit: pixel)

Simulated image pairs	Total pixels	Re-projection error on y direction			
		Minimum	Maximum	Average	Median
n -view and b -view	293219	-0.76927	0.88823	0.00061	0.0414
n -view and f -view	297853	-0.6184	0.6435	-0.00093	0.04171

表5 DSM 经过匹配重建后平面距离误差(单位: pixel)

Table 5 Error of distance to surface obtained by the proposed method (unit: pixel)

Simulated image pairs	Total pixels	Re-projection error			
		Minimum	Maximum	Average	Median
n -view and b -view	293219	6×10^{-5}	1.10924	0.07344	0.08968
n -view and f -view	297853	0.01	1.13915	0.07267	0.08869

3) 三维重建实验。

图 8(a)为邻轨重建的全局三维图,图 8(b)为局部三维图。为了检验拼接效果并未匀色。重建后的月貌图与原有二维图像具有同等分辨率,清晰度很

对本文提出的高次形变补偿的最小二乘拟合方法(HLSM)与基于仿射模型的最小二乘匹配(ALSM)进行了比较分析。采样两组不同视角和轨道的嫦娥图像数据,图 7 给出了配准相关系数的比较。由结果图 7(c)可以看出:当待匹配点的位置具有较大深度变化时,基于高次形变补偿的配准方法具有更高的定位精度。

的误差分布如表 3~5 所示, x 方向误差在 0.1 pixel 以内, y 方向误差在 0.05 pixel 以内,平面距离误差基本在 0.1 pixel 以内。说明该匹配方法能够实现较高的匹配精度。

高。同轨重建月貌图的地形连续性好,未发现单个高程突变点,邻轨之间拼接处过渡平滑,说明本文方法合理。

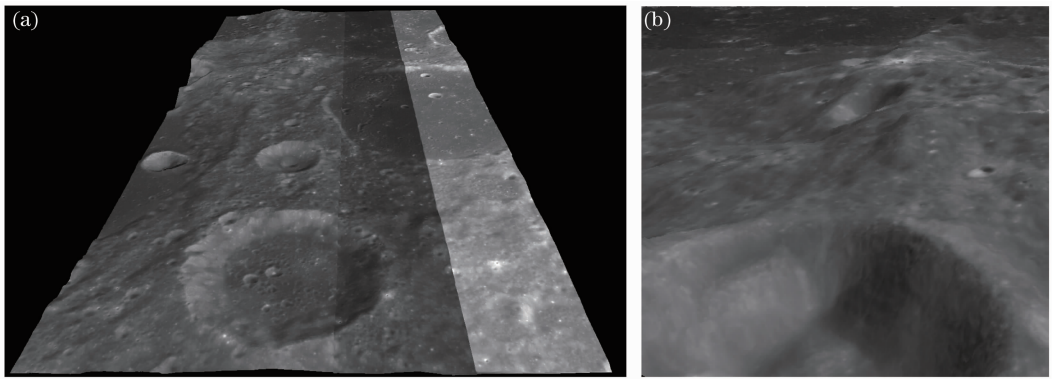


图 8 月貌重建图。(a)两轨重建的全局三维图;(b)局部月面三维图

Fig. 8 Reconstructed map of lunar surface. (a) Global 3D reconstructed map with two orbits; (b) local region of the lunar 3D map

5 结 论

本文提出的匹配方法能有效解决三线阵 CCD 对地形变化剧烈地区成像的难匹配问题,根据待匹配点两侧地形起伏特性选择最优模板并用二次函数近似地形引起的图像形变,精度高,稳健性好。对于其他三线阵 CCD 成像如有必要可增加辐射改变项。仿射模型对实际的中心投影成像有一定的近似性,但对 2C 级产品较为合适。若给定更加详细的信息可生成绝对尺度下的月貌图,更进一步可变换成球面图。

参 考 文 献

- Zhou Yang, Xu Qing, Kang Ning, *et al.*. Lunar geomorphy 3D visualization method [J]. *Acta Geodaetica Et Cartographica Sinica*, 2009, 38(6): 539-544.
周 杨, 徐 青, 康 宁, 等. 月面形貌的三维可视化算法[J]. *测绘学报*, 2009, 38(6): 539-544.
- Wang Renxiang. EFP bundle triangulation using lunar imagery obtained from satellite three-line-array camera [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2008, 33(4): 5-7.
王任享. 月球卫星三线阵 CCD 影像 EFP 光束法空中三角测量[J]. *测绘科学*, 2008, 33(4): 5-7.
- Wang Jianrong, Wang Renxiang, Hu Xin, *et al.*. The precision estimation in forward intersection of three-line array CCD imagery [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2009, 34(4): 9-10.
王建荣, 王任享, 胡 莘, 等. 三线阵 CCD 影像直接前方交会精度估算[J]. *测绘科学*, 2009, 34(4): 9-10.
- Wang Renxiang. Bundle adjustment of satellite borne three-line array CCD image [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2003, 28(4): 379-385.
王任享. 卫星三线阵 CCD 影像光束法平差研究[J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2003, 28(4): 379-385.
- Zhang Ning, Chang Lei, Xu Xiping. Research on the technology of three-dimensional reconstruction based on machine vision [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(5): 051001.
张 宁, 常 雷, 徐熙平. 基于机器视觉的三维重建技术研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(5): 051001.
- Cui Tengfei, Chen Shengbo, Wang Jingran. Three-dimensional modeling of the lunar surface based on stereo camera onboard

- Chang'E orbiter [J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2009, (4): 31-34.
- 崔腾飞, 陈圣波, 王景然. 基于“嫦娥”卫星三线阵 CCD 立体相机的月球表面三维建模[J]. *国土资源遥感*, 2009, (4): 31-34.
- Zhu Shiping, Yang Liu. Stereo matching algorithm with graph cuts based on adaptive watershed [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(3): 0315004.
祝世平, 杨 柳. 基于自适应分水岭的图割的立体匹配算法[J]. *光学学报*, 2013, 33(3): 0315004.
- Wang Junduo, Wang Riwei, Wen Xianbin, *et al.*. Fast matching algorithm of lunar CCD image [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(1): 011102.
王君铎, 汪日伟, 温显斌, 等. 月球 CCD 影像的快速匹配算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(1): 011102.
- S Kim, T Kim, W Park, *et al.*. An optimal interpolation scheme for producing a DEM from the automated stereo matching of full-scale SPOT images [C]. *Proceedings of International Society of Photogrammetry and Remote Sensing conference on Sensors and Mapping from Space*, Hanover, German, 1999.
- T Kim. A study on the epipolarity of linear pushbroom images [J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2000, 66(8): 961-966.
- Zhang Xiaohu, Ou Jianliang, Yuan Yun, *et al.*. Stack-yard 3D measurement based on photogrammetry and projected contour aiding [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(6): 0612002.
张小虎, 欧建良, 苑 云, 等. 投影轮廓线辅助下的堆场三维形貌摄影测量研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(6): 0612002.
- Li Jinjun, Zhao Hong. Feature patch-based vision measuring technique for complex surface and silhouette [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(8): 0812003.
李进军, 赵 宏. 基于特征面片的复杂型面轮廓视觉测量方法[J]. *光学学报*, 2011, 31(8): 0812003.
- Zhao Fei, Hu Xin, Guan Zequn, *et al.*. Study of automatic matching technology of image points for three line array CCD imaging [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2008, 33(4): 12-14.
赵 斐, 胡 莘, 关泽群, 等. 三线阵 CCD 影像的像点自动匹配技术研究[J]. *测绘科学*, 2008, 33(4): 12-14.
- Xiong Xinghua, Qian Zengbo, Wang Renxiang. A remote sensing image subpixel matching combined genetic algorithm with least square matching [J]. *Acta Geodaetica Et Cartographica Sinica*, 2001, 30(1): 54-59.
熊兴华, 钱曾波, 王任享. 遗传算法与最小二乘法相结合的遥感图像子像素匹配[J]. *测绘学报*, 2001, 30(1): 54-59.
- Wang Jianrong, Wang Xinyi, Li Jing, *et al.*. The application of

- three-line array CCD photogrammetry theory on the lunar exploration [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2008, 33(6): 19–20.
- 王建荣, 王新义, 李晶, 等. 三线阵 CCD 摄影测量理论在月球探测中的应用[J]. *测绘科学*, 2008, 33(6): 19–20.
- 16 Z G Zhu, A R Hanson, E M Riseman. Generalized parallel-perspective stereo mosaics from airborne video [J]. *IEEE Trans Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2004, 26(2): 226–237.
- 17 Li Lichun, Yu Qifeng, Yuan Yun, *et al.*. Super-resolution reconstruction and higher-degree function deformation model based matching for Chang'E-1 lunar images [J]. *Sci China Ser E-Tech Sci*, 2009, 52(12): 3468–3476.
- 18 T Kanade, M Okutomi. A stereo matching algorithm with an adaptive window: theory and experiment [J]. *IEEE Trans Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1994, 16(9): 920–932.
- 19 Jiao Chunlin, Gao Mantun, Shi Yikai. 3D terrain registration based on stereo vision [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2008, 44(23): 206–208.
- 焦春林, 高满屯, 史仪凯. 基于立体视觉的 3D 地形拼接 [J]. *计算机工程与应用*, 2008, 44(23): 206–208.
- 20 Zhao Baochang, Wen Desheng, Yang Jianfeng, *et al.*. Two bore-sight stereo mapping with single lens, TDI CCD pushing model imaging and compensations of the speed-to-height rate [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(9): 0900115.
- 赵葆常, 汶德胜, 杨建峰, 等. 单镜头两视角同轨立体成像、TDI CCD 自推扫和速高比补偿 [J]. *光学学报*, 2011, 31(9): 0900115.
- 21 R I Hartley, A Zisserman. *Multiple View Geometry in Computer Vision* [M]. Second ed. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2004.

栏目编辑：李志兰