

嫦娥三号全景相机图像全景镶嵌方法的研究

吴凡路^{1,2,3} 刘建军^{1,3} 任 鑫^{1,3} 李春来^{1,3}

(¹ 中国科学院国家天文台, 北京 100012; ² 中国科学院大学, 北京 100049)
³ 中国科学院月球与深空探测重点实验室, 北京 100012)

摘要 为实现嫦娥三号月球车全景相机图像的无缝镶嵌, 针对全景相机序列图像光照不均、月表影像的特殊性等问题, 提出了一种基于加速稳健特征(SURF)算法的嫦娥三号全景相机图像全景镶嵌方法。采用 SURF 算法提取特征点, 用 SURF 描述子的欧氏距离作为判定度量进行特征匹配。求取相邻两幅图像间的变换矩阵, 并利用 Levenberg-Marquardt 非线性优化算法进行优化。采用基于线性插值的渐入渐出方法对图像重叠区域进行融合, 实现月表图像的无缝镶嵌。结果显示, 该方法针对嫦娥三号全景相机图像实现了快速准确的镶嵌, 生成的镶嵌图满足月球车探测目标选取及路径规划的需求。

关键词 机器视觉; 全景镶嵌; 图像匹配; 图像融合; 嫦娥三号; 玉兔号月球车

中图分类号 V476.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0915001

Research on Panoramic Mosaics Method of Chang'E-3 Pancam Images

Wu Fanlu^{1,2,3} Liu Jianjun^{1,3} Ren Xin^{1,3} Li Chunlai^{1,3}

¹ National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China

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

³ Key Laboratory of Lunar and Deep Space Exploration, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China

Abstract Considering the uneven illumination of Chang'E-3 pancam images sequences and the particularity of the lunar surface image, a new panoramic mosaics method based on speed up robust features (SURF) algorithm is put forward to achieve the panoramic mosaics of Chang'E-3 pancam images. The feature points of images are extracted using SURF algorithm, and euclidean distance of SURF descriptor is used as the measurement to obtain the corresponding image points. The transformation matrix are calculated and optimized between adjacent images by Levenberg-Marquardt algorithm. Fusion images can be achieved by using the fade in fade out method based on linear interpolation, realizing seamless mosaic of the lunar surface image. The results show that this method can achieve mosaic of Chang'E-3 pancam images in a rapid and accurate way, and the mosaic satisfy the demands of rover for selecting detect target and path planning.

Key words machine vision; panoramic mosaics; image registration; image fusion; Chang'E-3; Yutu lunar rover

OCIS codes 150.0155; 350.6090; 150.1135; 040.1490; 100.2000

1 引 言

2013 年 12 月 2 日 01 时 30 分成功发射的嫦娥三号月球探测器由月球软着陆探测器(简称“着陆器”)和月面巡视探测器(简称“巡视器”,即“玉兔号”月球车)构成。着陆器配置了地形地貌相机、降落相

机、月基光学望远镜和极紫外相机共 4 种有效载荷, 巡视器配置了全景相机、测月雷达、红外成像光谱仪和粒子激发 X 射线谱仪共 4 种有效载荷。其中, 全景相机的主要功能是获取高分辨率的巡视区月表三维光学图像, 和其他载荷配合共同完成巡视区地形

收稿日期: 2014-01-27; **收到修改稿日期**: 2014-04-22

基金项目: 国家重大专项(探月工程)、国家自然科学基金面上项目(41371414, 11273037)、国家自然科学基金青年科学基金(41304021)

作者简介: 吴凡路(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事双目立体视觉、全景镶嵌等方面的研究。E-mail: wufl@nao.cas.cn

导师简介: 李春来(1965—), 男, 硕士, 研究员, 主要从事月球与深空探测、陨石学、行星遥感等方面的研究。

E-mail: licl@nao.cas.cn

地貌、撞击坑、地质构造以及综合研究的科学目标^[1-2]。为实现上述科学目标,需要对全景相机获取的序列图像进行镶嵌处理。

图像镶嵌是指将成像系统所获取的具有衔接重叠部分的一系列图像合成一张超大视角高分辨率图像乃至 360°全景图的技术。目前在空间探测、三维重建、虚拟现实、数字视频、运动分析、遥感图像处理、医学图像处理等领域有着广泛的应用。例如,中国首次月球探测工程全月球影像图等^[3-4]、美国国家航空航天局(NASA)的勇气号与机遇号火星车获得的全景图像^[5-6]都是科学家利用图像镶嵌技术合成的。在行星科学研究中,科学家需用镶嵌图来获取较大范围的研究数据^[7],并在大视场下对研究结果进行分析,利用镶嵌图来表达研究结果^[8]。在嫦娥三号月球车的探测目标选取及路径规划过程中,研究人员需利用大视场镶嵌图获取正确的方位信息。

图像镶嵌的主要步骤是图像几何校正、图像预处理、图像匹配和图像融合,其中图像匹配是主要难点。目前图像匹配算法主要分为两类:基于特征的匹配方法和基于区域的匹配方法^[9-11]。基于特征的匹配方法通过提取图像边缘^[12]、轮廓、角点^[13-14]等明显特征进行匹配,是目前图像匹配的研究热点和主要发展方向。基于区域的匹配方法,通过计算

相邻图像之间衔接重叠区域的灰度统计信息,然后根据特定的相似度量作为匹配准则进行匹配,经典方法是相位相关法^[15-16]。但是月表地物类型单一,月表影像灰度动态范围相对集中,月表反照率和影像对比度较低,纹理特征不丰富、反差较低、具有明显的区域特征;受成像时刻太阳高度角的影响,不同光照条件下成像差异较大。月表影像的上述特殊性显然使得基于区域的匹配方法无法应用于嫦娥三号全景相机图像。

为实现嫦娥三号全景相机图像的无缝镶嵌,提出了一种基于加速稳健特征(SURF)算法的嫦娥三号全景相机图像全景镶嵌方法,对嫦娥三号全景相机序列图像光照不均、月表影像的特殊性等问题进行了有效处理。

2 全景镶嵌方法

图 1 给出了嫦娥三号全景相机图像全景镶嵌的流程。首先对原始图像作几何校正及图像预处理;其次对相邻图像进行特征点提取与匹配,随后求取两幅图像间的变换矩阵并利用 Levenberg-Marquardt(LM)非线性优化算法^[17]进行优化;然后采用基于线性插值的渐入渐出方法对图像重叠区域进行融合,实现全景相机图像的无缝镶嵌。

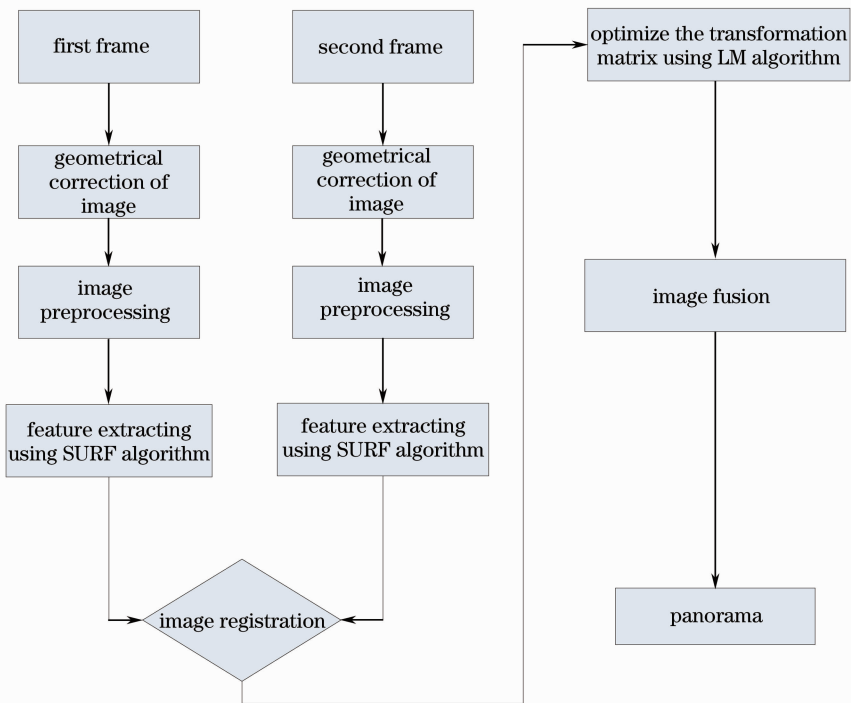


图 1 嫦娥三号全景相机图像全景镶嵌流程图

Fig. 1 Flow chart of panoramic mosaics of Chang'E-3 pancam image

2.1 图像几何校正

为了消除或降低图像几何畸变对匹配的影响,要对原始图像进行几何校正处理。嫦娥三号发射前,利用基于圆形标志点的标定方法对全景相机进行几何标定^[18],获得的参数对原始图像进行几何校正。一般情况下,校正后影像的整像素点坐标对应于原始影像的非整像素点坐标,这就需要进行插值。综合考虑插值效果与计算量,采用双线性插值法进行插值。

2.2 图像预处理

图像预处理是用来消除或减小待匹配图像之间的灰度偏差,使图像匹配过程能够顺利的进行。月表影像纹理特征不丰富、反差较低、具有明显的区域特征,因而为更有利于特征提取与匹配,需要通过预处理增强图像。噪声是数字图像不可避免的一个问题,噪声对于特征提取与图像匹配算法具有一定的影响,因此图像需要通过预处理过程消除噪声。

在嫦娥三号着陆器与巡视器两器互拍阶段,全景相机成像模式为彩色成像,为较好的展现着陆器的全貌,需要对获取的图像数据进行辐射校正(包括暗电流校正、相对定标、模式归一化等处理)、彩色复原、彩色校正等处理。暗电流校正处理主要是消除全景相机探测单元中残存的暗电流对图像数据的影响;相对定标处理主要是修正由于全景相机在制作过程中引入的系统误差,包括光、机、电及电荷耦合器件(CCD)像元响应不一致性等;工作模式归一化处理主要是消除不同工作模式(增益与曝光时间设置不同)条件下获取的图像数据亮度值之间存在的差异。

2.3 图像匹配

2.3.1 特征提取及匹配

根据月表影像的特点,特征提取算子需要在影像变形、灰度变化、亮度变化和噪声等方面具有较好的适应能力。尺度不变特征(SIFT)^[19]是一种能对图像旋转、尺度缩放、仿射变换、视角变化、光照变化等图像变化因素保持一定的不变性,而对物体运动、遮挡、噪声等因素也保持较强可匹配性的图像局部特征描述算子。SIFT算法具有旋转不变性和尺度不变性的特点,是目前图像镶嵌领域最为流行的算法,但是SIFT特征点运算速度较慢,并且误匹配仍然存在^[20]。SURF^[21-24]是在SIFT基础上提出的一种稳健的特征提取算法,在速度方面相比SIFT算法大约提高3倍^[25]。SURF算法特征提取的具体步骤如下:

- 1) 尺度空间极值检测;
- 2) 特征点方向确定;
- 3) 特征点 SURF 描述子生成。

两幅图像特征点描述子的欧氏距离 L 可表示为

$$L_{ij} = \sqrt{(D_{i1} - d_{j1})^2 + (D_{i2} - d_{j2})^2 + \dots + (D_{i64} - d_{j64})^2}, \quad (1)$$

式中 $D_{i1}, D_{i2}, \dots, D_{i64}$ 为第一幅图像中第 i 个特征点的 SURF 描述子的 64 个分量, $d_{j1}, d_{j2}, \dots, d_{j64}$ 为第二幅图像中第 j 个特征点的 SURF 描述子的 64 个分量。

利用描述子的欧氏距离比作为判定度量进行特征粗匹配,匹配过程如下:取第一幅图像中的某个特征点 D_i , 计算第二幅图像中的特征点 d_j 与它的欧氏距离,然后找出与 D_i 对应的最近邻点 d_s 与次近邻点 d_t , 计算最近邻点欧氏距离与次近邻点欧氏距离之比,如果比值小于阈值 e 即满足(2)式则认为 D_i 与 d_s 为匹配点(同名点),否则认为 D_i 无匹配点。

$$\frac{L_{is}}{L_{it}} \leq e. \quad (2)$$

为提高匹配精度,提出利用描述子的最小欧氏距离作为判定度量进行匹配提纯,对所有匹配点对应的欧氏距离按数值从小到大排序,值越小代表匹配精度越高,取前 s 个值对应的点作为最终的匹配点。采用该判定度量进行匹配提纯可以获得指定数目的最终匹配点。

2.3.2 变换矩阵的求解与优化

经过特征匹配得到了第一幅图像和第二幅图像之间的一组映射点集,利用这一组映射点集估算图像的变换矩阵 \mathbf{M} 。在某一站点,嫦娥三号全景相机获取的序列图像之间只存在旋转关系,故映射点集存在如下关系:

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1 & m_2 & m_3 \\ m_4 & m_5 & m_6 \\ m_7 & m_8 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中 (x_1, y_1) 为同名点在第一幅图像中的坐标, (x_2, y_2) 为同名点在第二幅图像中的坐标。可得

$$\begin{cases} x_1 m_1 + y_1 m_2 + m_3 - x_2 x_1 m_7 - x_2 y_1 m_8 = x_2 \\ x_1 m_4 + y_1 m_5 + m_6 - y_2 x_1 m_7 - y_2 y_1 m_8 = y_2 \end{cases}, \quad (4)$$

取四对同名点代入(4)式利用最小二乘法即可求解变换矩阵 \mathbf{M} 。为了进一步提高配准精度,使用 Levenberg-Marquardt 非线性优化算法^[17]来优化变换矩阵。

嫦娥三号全景相机序列图像全景镶嵌时,首先计算出序列图像中相邻图像之间的变换矩阵,然后

根据这些变换矩阵求出序列图像中任意两幅图像之间的变换矩阵,如图 2 所示。

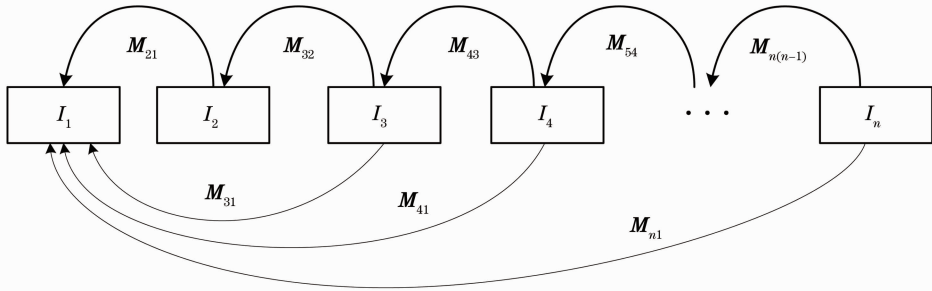


图 2 全景镶嵌示意图

Fig. 2 Schematic of panoramic mosaics

2.4 图像融合

图像融合的目的是使镶嵌图像的非重叠区域保持各自的信息,重叠区域平滑过渡,实现图像的无缝

镶嵌。采用基于线性插值的渐入渐出方法对图像重叠区域进行融合。 I_1 、 I_2 为待镶嵌的两幅图像, I 为镶嵌融合后的图像,则有:

$$I(x, y) = \begin{cases} \beta I_1(x, y) + (1 - \beta) I_2(x, y), & (x, y) \in I_1 \cap I_2 \\ I_1(x, y), & (x, y) \in I_1 \\ I_2(x, y), & (x, y) \in I_2 \end{cases}, \quad (5)$$

式中 β 为渐变因子,其定义式为

$$\beta = \frac{x_{\max} - x}{x_{\max} - x_{\min}}, \quad (6)$$

式中 $[x_{\min}, x_{\max}]$ 为 I_1 、 I_2 在 x 轴的重叠区域。

利用(4)式求得变换矩阵 M_{21} 并优化后,可得 I_2 的 4 个角点在 I_1 坐标系中的坐标,从而确定了 I_1 、 I_2 的重叠区域,再利用(5)式进行重叠区域的融合。

上述 $I_2(x, y)$ 为第二幅图像 I_2 经变换矩阵 M_{21} 投影到 I_1 坐标系中的灰度值(彩色图像则为 R 、 G 、 B 值),投影后图像的整像素点坐标可能对应于原始图像的非整像素点坐标,这就需要进行插值。综合考虑插值效果与计算量,本文采用双线性插值法进行插值。

2.5 投影矩阵变换

直接用原始图像做镶嵌会破坏实际场景的视觉

一致性,因此对原始图像中的每幅图像做柱面投影变换。所谓柱面投影变换就是把原始图像统一映射到一个柱面坐标空间,然后对柱面图像实施镶嵌,使每幅图像上的像素点在观察空间中的方位信息具有一致性。

如图 3 所示,原始图像 I 宽度为 W ,高度为 H , J 为 I 经投影变换后形成的柱面图像。取图像 I 上的任意一点 P ,它在原图像上的坐标为 (x, y) ,坐标原点为左上角的像素点,单位为像素,经过柱面投影变换后在柱面图像 J 中的对应点为 P' ,在 J 中的坐标是 (x', y') 。对于点 P ,沿 $x-z$ 平面和沿 $y-z$ 平面的截面图分别如图 3(b)、(c) 所示。由图 3 可得柱面投影变换公式如下

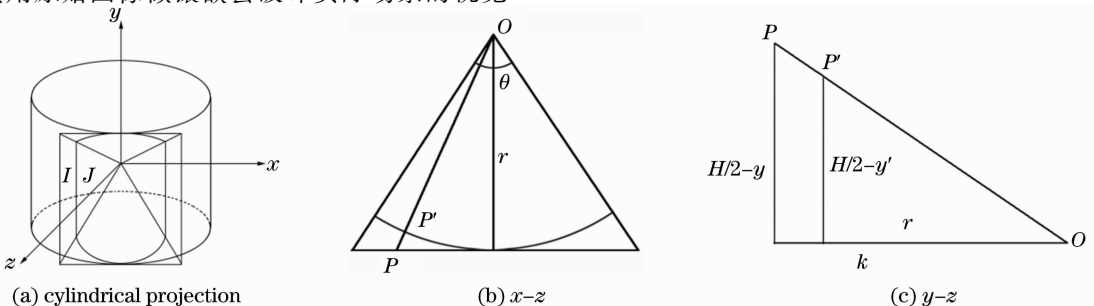


图 3 柱面投影变换示意图

Fig. 3 Schematic of cylindrical projection

$$\begin{cases} x' = r \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) + r \sin\left[\arctan\left(\frac{x - \frac{W}{2}}{r}\right)\right] \\ y' = \frac{H}{2} + \frac{r\left(y - \frac{H}{2}\right)}{k} \end{cases}, \quad (7)$$

式中 θ 表示每张图像所需的角(即相机的视场角), r 表示焦距, 由图可得

$$r = \frac{W}{2 \tan(\theta/2)}, \quad (8)$$

$$k = \sqrt{r^2 + \left(x - \frac{W}{2}\right)^2}. \quad (9)$$

3 实验结果及分析

3.1 特征提取与匹配实验

为验证所提方法的可行性, 选取 4 幅嫦娥三号全景相机拍摄的月表图像进行特征提取及匹配实验, 原始图像如图 4 所示。其中图 4(a)、(b) 为相邻图像, 图 4(c)、(d) 为顺光成像情况下获取的相邻图像, 相比图 4(a)、(b) 图像纹理信息较少。

分别利用 SURF、SIFT 算法对上述图像进行特征提取, 设置合适的特征提取阈值使得对于(a)图两种算法提取的特征点数接近, 然后再对其余图像进行特征提取, 获得的特征点数如表 1 所示。

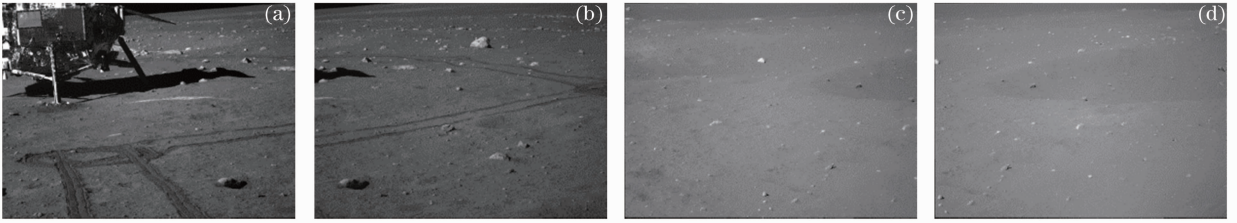


图 4 嫦娥三号全景相机图像

Fig. 4 Chang'E-3 pancam images

表 1 特征提取结果

Table 1 Results of feature extraction

| Algorithm | a | b | c | d |
|-----------|------|------|------|------|
| SIFT | 5445 | 3496 | 874 | 753 |
| SURF | 4955 | 4911 | 3267 | 2430 |

从表 1 可以看出, SURF 算法相比 SIFT 算法更适应于序列图像光照不均、月表影像的特殊性等问题。

采用欧氏距离比作为相似性判定度量分别对 SIFT、SURF 算法提取的特征点进行匹配, 阈值 e 从 0.7 逐渐变化到 0.2, 匹配点数目、有无明显误匹配点的情况如表 2 所示, 表中 T 代表无明显误匹配点, F 代表有明显误匹配点。

表 2 匹配结果

Table 2 Matching results

| e | a-b | | c-d | |
|------|---------|---------|---------|---------|
| | SIFT | SURF | SIFT | SURF |
| 0.70 | 890 (F) | 786 (F) | 242 (F) | 573 (F) |
| 0.65 | 855 (F) | 754 (F) | 226 (F) | 546 (F) |
| 0.60 | 813 (F) | 725 (F) | 214 (F) | 513 (F) |
| 0.55 | 767 (F) | 682 (F) | 198 (T) | 471 (T) |
| 0.50 | 716 (F) | 636 (F) | 182 (T) | 411 (T) |
| 0.45 | 652 (F) | 580 (T) | 163 (T) | 349 (T) |
| 0.40 | 570 (F) | 493 (T) | 139 (T) | 282 (T) |
| 0.35 | 474 (F) | 388 (T) | 111 (T) | 211 (T) |
| 0.30 | 365 (F) | 277 (T) | 87 (T) | 127 (T) |
| 0.25 | 261 (T) | 160 (T) | 61 (T) | 70 (T) |
| 0.20 | 151 (T) | 75 (T) | 35 (T) | 35 (T) |

从表 2 中可以看出, 虽然在阈值 e 取相同值时, SURF 算法在匹配点数目上并无优势, 但是 SURF 算法更稳健, 特征点提取、匹配的精度更高, 特别是对光照不均的月表图像。如图 5 所示为(a)、(b)两幅图在 e 取 0.4 时两种算法特征匹配的结果。

进一步考虑图像光照不均、月表影像的特殊性等问题, 利用 SIFT 算法对 2013 年 12 月 23 日嫦娥三号全景相机左相机获取的 56 幅图像之间的相邻图像均进行了特征提取、匹配实验, 为了实现大量图像匹配的自动化处理, 设定阈值 $e=0.2$ 。实验结果显示, 虽然没有明显误匹配点, 但是在顺光成像情况下获取的图像之间匹配点数目较少, 不利于变换矩阵的求解与优化。为满足变换矩阵求解与优化的需求, 设定阈值 $e=0.4$ 再次进行特征提取与匹配, 实验结果显示匹配点数目增多但是随之也会出现明显误匹配点, 为提纯匹配点采用随机抽样一致 (RANSAC) 算法剔除误匹配点^[20,26-28]。

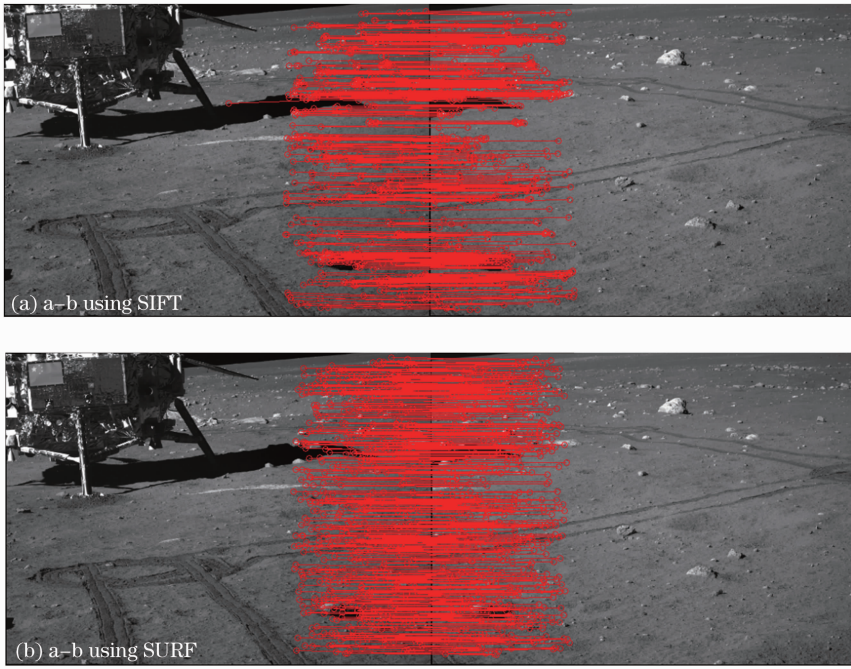


图 5 $e=0.4$ 时特征匹配示意图

Fig. 5 Schematic of feature matching when $e=0.4$

而利用 SURF 算法对上述图像进行特征提取、匹配实验,设定阈值 $e=0.4$,实验结果显示无明显误匹配点,且匹配点数目满足变换矩阵求解与优化的需求。

经过实验验证,最终的匹配点数目从 200 逐渐变化到 80 时,变换矩阵的微小变化对镶嵌结果没有

明显影响。综合考虑图像间光照不均时的匹配点数目、匹配精度以及镶嵌效果,针对嫦娥三号全景相机图像阈值 e 取 0.4、阈值 s 取 100。

3.2 图像融合实验

选取两幅嫦娥三号全景相机拍摄的月表相邻图像按本文方法进行图像融合实验,原始图像与镶嵌

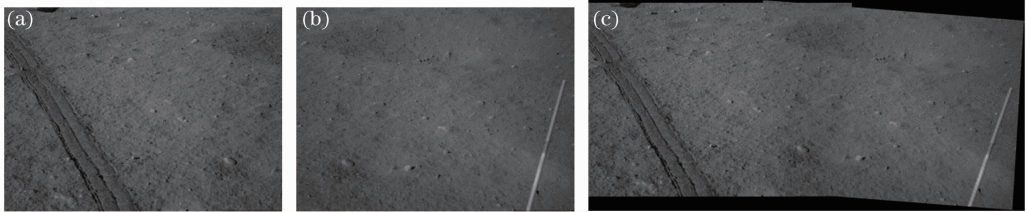


图 6 原始图像与镶嵌图像

Fig. 6 Original images and mosaic image

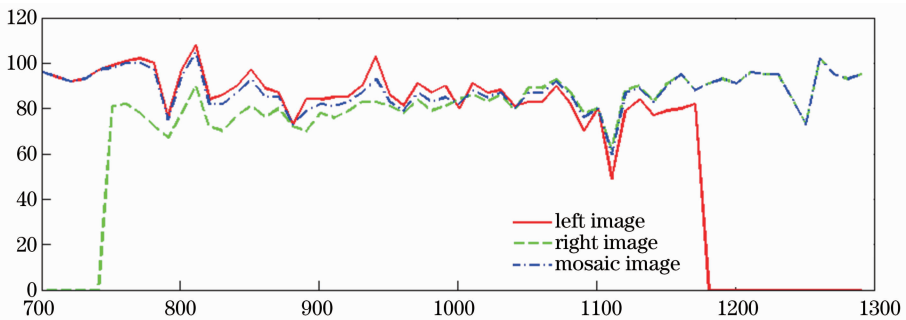


图 7 灰度值示意图

Fig. 7 Schematic of gray value

图像如图 6 所示。任意提取左、右、镶嵌图像中一行像素的灰度值,在重叠区域与附近相邻区域的灰度值如图 7 所示,图 7 中横轴方向为像素坐标,纵轴方向为相应的灰度值。从图 7 中可以看出,左、右图像重叠区域的灰度值并不一致,当采用的融合算法不适宜时,在重叠区域的边缘会产生拼接缝等镶嵌误差;按本文方法进行图像融合则实现了重叠区域与附近相邻区域的平滑过渡。

3.3 嫦娥三号全景相机图像镶嵌实验

本文实验是在 Windows 7 下利用 Matlab R2012b 编程实现的,实验图像获取于 2013 年 12 月 23 日,成像位置为巡视器第一个月面工作日的第一个探测点 S1 点,选取其中 5 幅相邻的图像如图 8 所示。采用文中提出的镶嵌方法获得的全景图如图 9 所示,柱面全景图如图 10 所示。

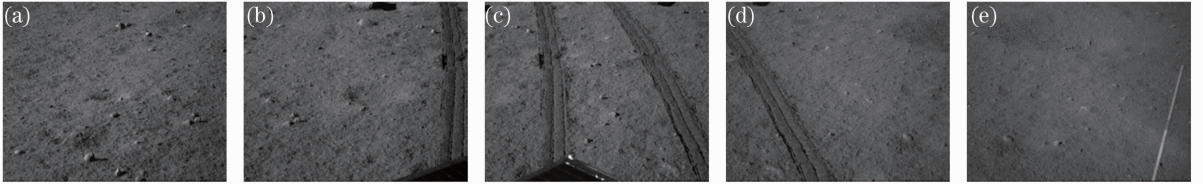


图 8 原始图像

Fig. 8 Original images

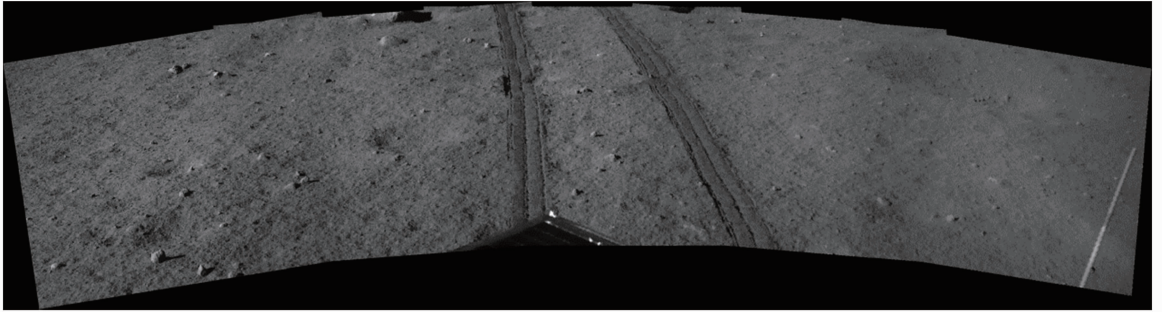


图 9 全景图

Fig. 9 Panoramic image

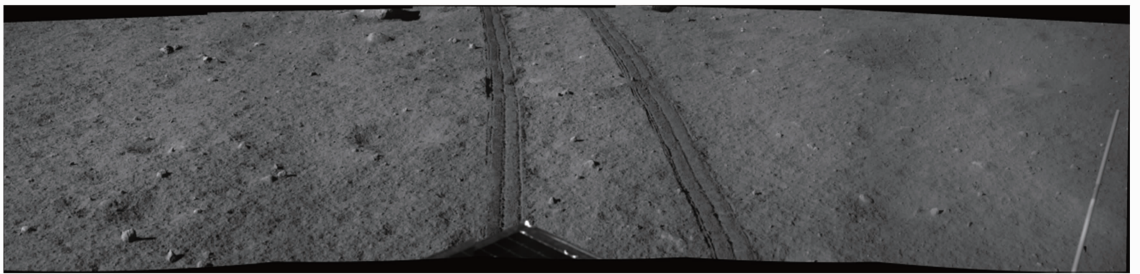


图 10 柱面全景图

Fig. 10 Cylindrical panoramic image

另一组实验图像为获取于 2013 年 12 月 15 日的 6 幅着陆器彩色图像,此时巡视器位于着陆器正北方向约 10 m 处,全景相机设置为自动曝光模式,由于背景的差异造成 6 幅图像的整体亮度差异较大,如图 11 所示。

如图 12 所示为采用文中的镶嵌方法得到的着

陆器全景。可以看出有效解决了嫦娥三号全景相机序列图像亮度不均、结构纹理信息少等特殊问题。

上述三种实验的结果表明,提出的基于 SURF 算法的嫦娥三号全景相机图像全景镶嵌方法能够实现月表图像的无缝镶嵌、图像重叠区域的平滑过渡,且视觉效果无明显差异。

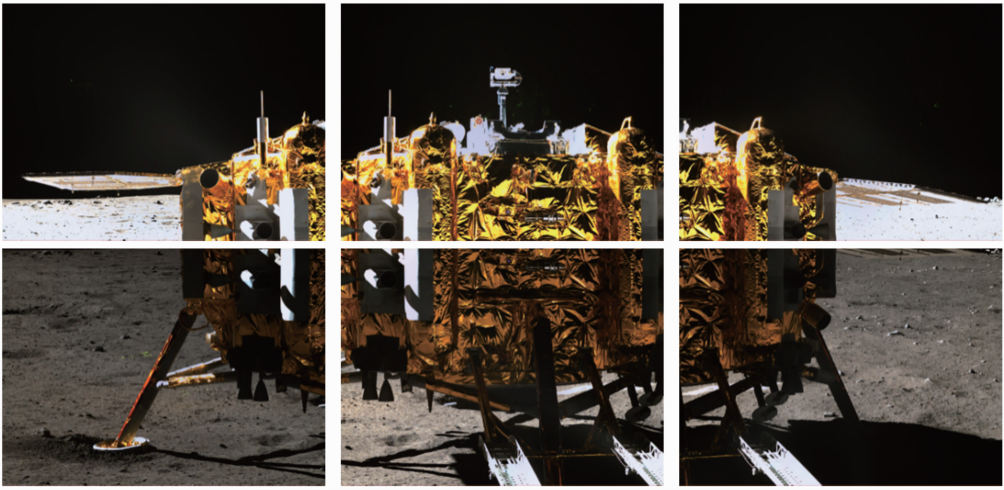


图 11 A 点原始图像

Fig. 11 Original images recorded at point A

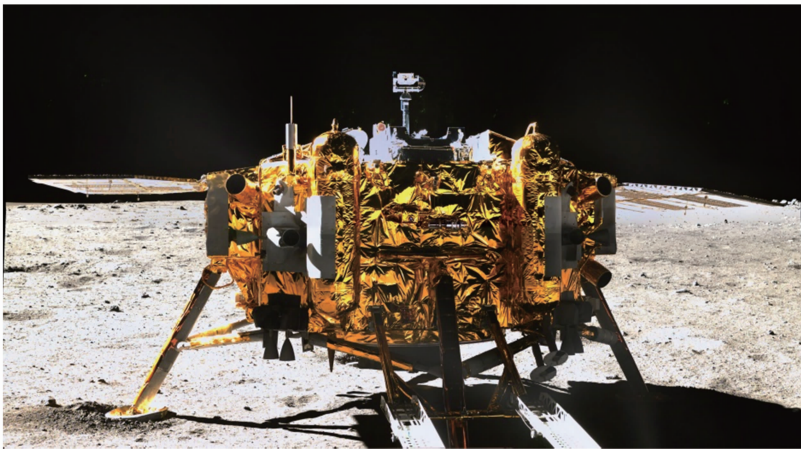


图 12 着陆器全景

Fig. 12 Lander panoramic

4 结 论

针对全景相机序列图像光照不均、月表影像的特殊性等问题,利用 SURF 算法提取图像特征点,采用 SURF 描述子的欧氏距离比作为判定度量进行特征粗匹配、采用 SURF 描述子的最小欧氏距离作为判定度量进行匹配提纯,然后采用基于线性插值的渐入渐出方法对图像重叠区域进行融合,实现月表图像的无缝镶嵌。实验结果表明,提出的方法是一种实现嫦娥三号全景相机图像无缝镶嵌的有效方法,生成的镶嵌图满足月球车探测目标选取及路径规划的需求,可为开发相关图像处理软件提供一种算法参考。

致谢 感谢探月工程嫦娥三号任务全体参研人员;感谢国家天文台月球与深空探测研究部提供嫦娥三

号全景相机数据;感谢评审人的修改建议。

参 考 文 献

- 1 Ouyang Ziyuan. Introduction to Lunar Science [M]. Beijing: China Astronautics Publishing House, 2005. 304-318.
欧阳自远. 月球科学概论[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2005. 304-318.
- 2 Ye Peijian, Rao Wei. Application of photoelectricity technology for deep space exploration in China [J]. Spacecraft Recovery and Remote Sensing, 2011, 32(2): 1-11.
叶培建, 饶 伟. 光电技术在中国深空探测中的应用[J]. 航天返回与遥感, 2011, 32(2): 1-11.
- 3 Li Chunlai, Liu Jianjun, Mu Lingli, *et al.*. The Chang'E-1 Image Atlas of the Moon [M]. Beijing: SinoMaps Press, 2010. 8-15.
李春来, 刘建军, 牟伶俐, 等. 嫦娥一号全月球影像图集[M]. 北京: 中国地图出版社, 2010. 8-15.
- 4 Li Chunlai, Liu Jianjun, Mu Lingli, *et al.*. The Chang'E-1 Topographic Atlas of the Moon [M]. Beijing: Sino Maps Press, 2013. 6-13.
李春来, 刘建军, 牟伶俐, 等. 嫦娥一号全月球地形图集[M]. 北京: 中国地图出版社, 2013. 6-13.
- 5 J F Bell, S W Squyres, R E Arvidson, *et al.*. Pancam

- multispectral imaging results from the Spirit rover at Gusev crater [J]. *Science*, 2004, 305(5685): 800–807.
- 6 J F Bell, S W Squyres, R E Arvidson, *et al.*. Pancam multispectral imaging results from the Opportunity rover at Meridiani planum[J]. *Sinence*, 2004, 306(5702): 1703–1709.
- 7 J P Grotzinger, D Y Sumner, L C Kah, *et al.*. A habitable fluvio-lacustrine environment at Yellowknife bay, Gale crater, Mars [J]. *Science*, 2014, 343(6169): 1242777.
- 8 D F Blake, R V Morris, G Kocurek, *et al.*. Curiosity at Gale crater, Mars; characterization and analysis of the rocknest sand shadow [J]. *Science*, 2013, 341(6153): 1239505.
- 9 L G Brown. A survey of image registration techniques [J]. *ACM Computing Surveys*, 1992, 24(4):325–376.
- 10 Liu Xiaochun, Zhong Tao, Yu Qifeng, *et al.*. Multi-modal image registration based on local frequency information using modified simplex-simulated annealing algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(6): 0615002.
 刘晓春, 钟涛, 于起峰, 等. 基于局部频率信息和单纯型-模拟退火的异源图像配准[J]. *光学学报*, 2013, 33(6): 0615002.
- 11 J Matas, O Chum, M Urban, *et al.*. Robust wide-baseline stereo from maximally stable extremal regions [J]. *Image and Vision Computing*, 2004, 22(10): 761–767.
- 12 J Canny. A computational approach to edge detection [J]. *IEEE Trans PAMI*, 1986, 8(6): 679–698.
- 13 C Harris, M Stephens. A combined corner and edge detector [C]. *Alvey Vision Conference*, 1988. 147–151.
- 14 F Mokhtarian, R Suomela. Robust image corner detection through curvature scale space [J]. *IEEE Trans PAMI*, 1998, 20(12): 1376–1381.
- 15 C D Kuglin, D D Hines. The phase correlation image alignment method [C]. *IEEE Conference on Cybernetics and Society*, 1975. 163–175.
- 16 Wu Xianxiang, Guo Baolong, Wang Juan. Cylindrical panoramic image automatic algorithm based on phase correlation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(7): 1824–1829.
 吴宪祥, 郭宝龙, 王娟. 基于相位相关的柱面全景图像自动拼接算法[J]. *光学学报*, 2009, 29(7): 1824–1829.
- 17 J J More. The Levenberg-Marquardt Algorithm; Implementation and Theory [M]. Berlin Heidelberg: Springer, 1978. 105–116.
- 18 Wu Fanlu, Liu Jianjun, Ren Xin, *et al.*. Deep space exploration panoramic camera calibration technique based on circular markers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(11): 1115002.
 吴凡路, 刘建军, 任鑫, 等. 基于圆形标志点的深空探测全景相机标定方法[J]. *光学学报*, 2013, 33(11): 1115002.
- 19 D G Lowe. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. *International J Computer Vision*, 2004, 60(2): 91–110.
- 20 M Brown, D G Lowe. Automatic panoramic image stitching using invariant features [J]. *International J Computer Vision*, 2007, 74(1): 59–73.
- 21 H Bay, A Ess, T Tuytelaars, *et al.*. Speeded-up robust features (SURF) [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2008, 110(3): 346–359.
- 22 J Knopp, M Prasad, G Willems, *et al.*. Hough Transform and 3D SURF for Robust Three Dimensional Classification [M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2010. 589–602.
- 23 C Strecha, A M Bronstein, M M Bronstein, *et al.*. LDAHash: improved matching with smaller descriptors [J]. *IEEE Trans PAMI*, 2012, 34(1): 66–78.
- 24 J Niu, F Yang, L Shi. Improved method of automatic image stitching based on SURF [C]. *2013 First International Symposium on Future Information and Communication Technologies for Ubiquitous*. IEEE, 2013, 1–5.
- 25 H Bay, A Ess, T Tuytelaars. Surf: Speeded Up Robust Features [M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2006. 404–417.
- 26 M A Fischler, R C Bolles. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography [J]. *Communications of the ACM*, 1981, 24(6): 381–395.
- 27 Lei Yuzhen, Li Zhongwei, Zhong Kai, *et al.*. Mismatching marked points correction method based on random sample consensus algorithm [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(3): 0315002.
 雷玉珍, 李中伟, 钟凯, 等. 基于随机抽样一致算法的误匹配标志点校正方法[J]. *光学学报*, 2013, 33(3): 0315002.
- 28 Hu Shaoxing, Wang Weida, Chai Jin, *et al.*. Method of remote sensing images dense matching based on multi-scale features [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(s2): s211001.
 胡少兴, 王惟达, 柴进, 等. 基于多尺度特征的遥感图像密集匹配方法[J]. *光学学报*, 2013, 33(s2): s211001.

栏目编辑：张浩佳