

DOI: 10.13203/j.whugis20140041

文章编号: 1671-8860(2015)09-1169-07

利用嫦娥一号 CCD 相机邻轨下视影像生成月面 DEM

陈王丽¹ 孙 涛² 秦前清¹ 石 岩² 张 巍³ 林立宇¹

1 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 湖北 武汉, 430079

2 武汉大学电子信息学院, 湖北 武汉, 430079

3 华中光电技术研究所, 湖北 武汉, 430233

摘要: 嫦娥一号电荷耦合元件(charge coupled device, CCD)相机同轨前后视影像组成的立体像对的基高比较大, 立体像对在撞击坑边缘、山脉等地形起伏区域存在较大的遮挡和变形, 影响了 DEM 的精度。为弥补这一不足, 根据嫦娥一号 CCD 相机邻轨下视短基线立体像对成像模型, 本文提出了一种自适应窗口归一化互相关(normalized cross correlation, NCC)-相位相关(phase-only correlation, POC)视差估计的 DEM 生成方法。首先, 根据影像纹理特征计算各像素点对应的自适应窗口大小, 通过 NCC 方法估计立体像对左右片对应窗口的整数像素位移; 然后, 用 POC 方法估计亚像素位移; 最后, 将窗口的总位移作为窗口中心像素点的视差, 依次计算所有像素点的视差, 得到立体像对稠密亚像素视差图。模拟实验结果表明, 本文方法视差估计精度可达 ± 0.075 像素, 利用空间分辨率为 120 m 的嫦娥一号 CCD 邻轨下视影像生成的月面 DEM 与 LOLA 30 m 平面分辨率的 DEM 基本一致。

关键词: 嫦娥一号; DEM; 短基线立体像对; 视差估计; 相位相关

中图法分类号: P237.3; P208 文献标志码: A

我国第一颗月球探测卫星“嫦娥一号”于 2007-10-24 成功发射。之后, 研究人员利用嫦娥一号电荷耦合元件(charge coupled device, CCD)立体相机拍摄的影像(后视、下视、前视)及卫星轨道、姿态、激光高度计等辅助数据制作了全月影像图^[1-4]。但在月球表面地形起伏较大区域, 由于后视/前视影像组成的立体像对(基高比大于 0.6)之间存在较大的遮挡和变形, 对立体影像精确匹配造成了困难, 进而影响了月面 DEM 的精度。为弥补大基高比立体像对的这一不足, 本文提出了一种利用嫦娥一号 CCD 相机邻轨下视影像(简称为邻轨立体像对)生成月面 DEM 的方法。

嫦娥一号卫星的轨道高度为 200 km, 最大轨道间距约 35 km, 三线阵 CCD 相机的地面分辨率为 120 m, 影像幅宽 60 km, 相邻轨道的重叠率大于 40%^[5], 因此, 邻轨立体像对的基高比小于 0.175, 遮挡和变形较小, 更有利于提取月球表面的三维信息^[6-10]。

利用嫦娥一号 CCD 相机邻轨立体像对生成月面 DEM 的基本原理如图 1 所示。图 1 中, S_1 、 S_2 分别为邻轨影像投影中心, B 为基线, f 为相机主距, H 为物距, a_1 、 a_2 分别为目标点 A 在邻轨影像上的构象(a_1 、 a_2 为同名像点), 通过相似三角形可建立 A 点的高度 h ($h \ll H$) 和 A 点在左右像片上的视差 d 之间的关系:

$$\begin{cases} D = dR \\ \frac{D}{B} = \frac{h}{H - h} \approx \frac{h}{H} \end{cases} \quad (1)$$

从而得出:

$$h \approx \frac{HR}{B}d \quad (2)$$

式中, B 和 H 由成像时相机的位置决定; R 为影像的空间分辨率。那么, 唯一影响 h 的精度的因素就是目标在左右片投影的视差 d 的估计精度。整理式(2)得到:

$$d \approx \frac{h}{R} \frac{B}{H} \quad (3)$$

收稿日期: 2014-01-11

项目来源: 国家自然科学基金资助项目(41171450, 40601055, 41001256)。

第一作者: 陈王丽, 博士生, 主要从事遥感影像配准、恢复、超分辨率重建研究。E-mail: wlchen_85@163.com

通讯作者: 孙涛, 博士, 教授。E-mail: suntao@whu.edu.cn

由式(3)可见,对于同一目标点,其在立体像对中的视差与基高比成正比。当立体像对的基高比减小时,视差也随之减小,这就对视差估计的精度提出了更高的要求,一般要达到亚像素精度才能准确重建出目标的三维信息。

立体像对视差估计属于影像匹配的范畴。基于影像特征的匹配方法,如 SIFT^[11-12]方法,只能得到少量匹配特征点,无法获得稠密视差图。基于灰度的匹配方法对光照条件敏感,而月球多视影像通常存在光照条件不一致的情况。针对短基线(小基高比)立体像对的视差估计,法国国家太空研究中心(CNES)提出了多尺度精细相关(multi-resolution algorithm for refined correlation, MARC)方法^[7-8]。MARC 及其多种改进方法均基于归一化互相关(normalized cross correlation, NCC),是空间域匹配方法。相对于空间域匹配方法,频域匹配方法因具有较高的匹配精度和对光照条件不敏感的特性而成为目前研究的主要方法。其中,相位相关^[13-15](phase-only correlation, POC)是一种常用的频域匹配方法。文献[15]提出了一种改进的 POC 方法,并证明在影像仅存在理想的全局平移时,匹配精度优于 0.01 像素。文献[6]以此为基础,提出了一种基于 POC 的短基线立体像对视差估计方法,并根据估计视差重建出目标的三维模型。文献[6]以左片待估计像素点为中心,取固定大小的窗口,用 POC 方法计算其与右片对应窗口的位移量,作为待估计像素点的视差。这一方法的不足在于没有考虑窗口大小与影像纹理特征的关系,以及 POC 方法的精度随待匹配影像对相似度的提高而提高的特性。因此,本文针对文献[6]的方法做出两点改进:(1)根据影像的纹理特征计算自适应窗口大小;(2)将 NCC 整数像素匹配和 POC 亚像素匹配相结合。将此方法应用于嫦娥一号 CCD 相机邻轨立体像对,并提取了月面 DEM。

1 POC 影像匹配原理

假设 $f(n_1, n_2)$ 和 $g(n_1, n_2)$ 是定义在二维空间上的图像,其中, $n_1 = -M_1, \dots, M_1, n_2 = -M_2, \dots, M_2$, 则 $f(n_1, n_2)$ 和 $g(n_1, n_2)$ 的交叉相位谱为:

$$\hat{R}(k_1, k_2) = \frac{F(k_1, k_2)\bar{G}(k_1, k_2)}{|F(k_1, k_2)\bar{G}(k_1, k_2)|} = e^{j\theta(k_1, k_2)} \quad (4)$$

式中, $F(k_1, k_2)$ 、 $G(k_1, k_2)$ 分别为 $f(n_1, n_2)$ 和

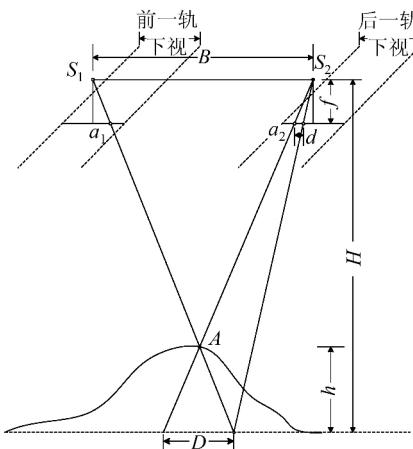


图 1 利用邻轨立体像对生成月面 DEM 原理

Fig. 1 DEM Generation from Nadir Images of Adjacent Tracks

$g(n_1, n_2)$ 的离散傅里叶变换; $\bar{G}(k_1, k_2)$ 是 $G(k_1, k_2)$ 的共轭转置; $\theta(k_1, k_2)$ 为 $F(k_1, k_2)$ 和 $G(k_1, k_2)$ 的相位差。

POC 函数 $\hat{r}(n_1, n_2)$ 即为 $\hat{R}(k_1, k_2)$ 的二维离散反傅里叶变换。根据傅里叶变换的平移性质,当 $g(n_1, n_2) = f(n_1 - \delta_1, n_2 - \delta_2)$ 时,其对应的 POC 函数可近似表示为:

$$\hat{r}(n_1, n_2) \approx \frac{\alpha}{N_1 N_2} \frac{\sin(\pi(n_1 + \delta_1))}{\sin(\frac{\pi}{N_1}(n_1 + \delta_1))} \frac{\sin(\pi(n_2 + \delta_2))}{\sin(\frac{\pi}{N_2}(n_2 + \delta_2))} \quad (5)$$

式中, α 为系数; $N_1 = 2M_1 + 1$; $N_2 = 2M_2 + 1$ 。

可见, $\hat{r}(n_1, n_2)$ 的峰值位置 (δ_1, δ_2) 即是 $f(n_1, n_2)$ 和 $g(n_1, n_2)$ 之间的位移量。

POC 函数峰值的锐利程度随着待匹配影像对相似度的降低而急剧下降。待匹配影像对越相似,式(5)中的 α 越接近于 1。因此,可以通过 α 来判断待匹配影像对的相似程度, α 值越高即意味着待匹配影像对越相似, 位移估计越可信。由于 POC 函数的峰值一般处于非整数位置,因此需要通过拟合来得到准确的峰值位置,从而得到亚像素精度的位移估计量。为提高精度,在 POC 函数拟合中需要进行以下处理。

1) 选择拟合窗口尺寸。由于 POC 函数具有明显的峰值,一般取峰值周围 $3 \times 3 \sim 9 \times 9$ 的窗口即可获得较满意的精度,本文选取 9×9 的拟合窗口。

2) 通过窗函数消除离散傅里叶变换(DFT)的周期效应。对信号加窗,可以有效消除由于信号非周期造成的频谱泄露,从而提高匹配精度,本文采用 hanning 窗。

3) 低通滤波。由于图像傅里叶变换的高频部分往往包含噪声等信息,通过对交叉相位谱 $\hat{R}(k_1, k_2)$ 低通滤波,可以提高 POC 函数参数估计的精度。本文采用标准差为 σ 的高斯低通滤波器:

$$H(k_1, k_2) \approx e^{-2\pi^2\sigma^2(k_1^2+k_2^2)} \quad (6)$$

$\hat{R}(k_1, k_2)$ 滤波后对应的 POC 函数为:

$$\hat{r}(n_1, n_2) \approx \frac{\alpha}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{((n_1+\delta_1)^2+(n_2+\delta_2)^2)}{2\sigma^2}} \quad (7)$$

本文采用 Levenberg-Marquardt (LM) 算法^[16]来拟合式(7)中 POC 函数的参数 $\alpha, \delta_1, \delta_2$, 从而得到影像对之间的亚像素精度位移估计 δ_1, δ_2 。

2 自适应窗口 NCC-POC 立体像对视差估计

对于嫦娥一号邻轨立体像对,本文以各像素点为中心某一大小的窗口的位移作为该像素点的视差,具体算法流程见图 2。首先以某一轨下视影像(参考影像)的像素点为中心,根据其邻域纹理特征计算自适应窗口大小;给定搜索范围,通过 NCC 方法在其邻轨下视影像上寻找与参考影像窗口最相似的窗口,得到该参考窗口的整数像素位移量;用 POC 方法估计参考窗口与最相似窗口的亚像素位移量;以窗口的全部位移量作为对应的中心像素点的位移量,即该像素点的视差;依次计算参考影像上所有像素点的视差,得到初始稠密亚像素视差图和不可信点分布图;经过后处理改正不可信点的视差,得到最终的视差图。

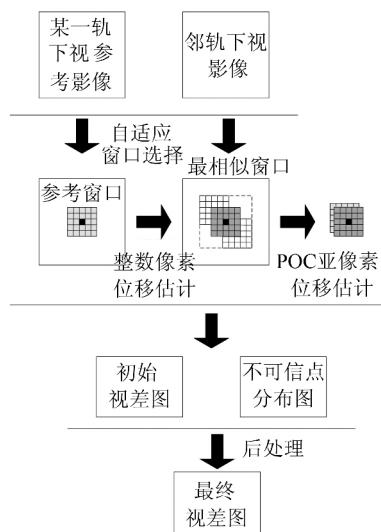


图 2 算法流程

Fig. 2 Framework of the Proposed Algorithm

2.1 自适应窗口选择

窗口大小的选择存在一个矛盾:一方面窗口越大 POC 方法越稳定;另一方面当中心像素点所在区域的地形复杂(高程变化剧烈)时,用窗口的位移量作为其对应中心像素点的位移量会产生较大的误差,因此窗口不宜过大。对月球影像而言,平坦区域纹理贫乏,窗口应尽可能大;地形复杂区域,纹理信息比较丰富,窗口尺寸在大于某一数值的前提下应尽可能小。本文采用文献[7]的方法来确定各个像素点对应的窗口大小。用 f 和 g 表示立体像对,其中 f 为参考影像。给定最大窗口半径 R_{\max} 和最小窗口半径 R_{\min} ,以参考影像像素点 $f(x_0)$ 为圆心, $r(R_{\min} \leq r \leq R_{\max})$ 为半径,在参考影像上选取窗口 $\varphi_{x_0, r}$,以使得式(8)取得最小值的窗口作为对应于该像素点的最优窗口。

$$N(f, \sigma_f, \varphi_{x_0, r}) = \frac{\sigma_f}{\|f\|_{\varphi_{x_0, r}} \sqrt{\langle d_{\varphi_{x_0, r}}^f, 1 \rangle_{\varphi_{x_0, r}}}} \quad (8)$$

式中, $d_{\varphi_{x_0, r}}^f = \frac{\|f\|_{\varphi_{x_0, r}}^2 f'^2(x) - \langle f, f' \rangle_{\varphi_{x_0, r}} f(x) f'(x)}{\|f\|_{\varphi_{x_0, r}}^4}$; σ_f 为与参考影像 f 的噪声水平有关的常数; $\|\cdot\|_{\varphi_{x_0, r}}$ 表示窗口 $\varphi_{x_0, r}$ 内的 L2 范数; $\langle \cdot, \cdot \rangle_{\varphi_{x_0, r}}$ 表示窗口内的内积。

2.2 NCC 整数像素位移估计

POC 方法的精度随待匹配影像窗口相似度的提高而提高,本文首先采用 NCC 方法在非参考影像上搜寻与参考影像窗口最相似的窗口,得到参考影像窗口的整数像素位移,再用 POC 方法估计亚像素位移。

以像素点 $f(x_0)$ 为圆心,根据 § 2.1 节的方法选取半径为 r 的最佳窗口 $\varphi_{x_0, r}$,在 g 的一定范围内逐点搜索匹配窗口,使得立体像对 f 和 g 在窗口内的 NCC 系数 ρ_{x_0} 取得最大值,得到 $f(x_0)$ 的整数像素位移量 (m_1, m_2) 。NCC 系数定义为:

$$\rho_{x_0}(m) = \frac{\langle \tau_m g - \bar{g}, f - \bar{f} \rangle_{\varphi_{x_0, r}}}{\| \tau_m g - \bar{g} \|_{\varphi_{x_0, r}} \| f - \bar{f} \|_{\varphi_{x_0, r}}} \quad (9)$$

式中, $m = (m_1, m_2)$; $\tau_m g = g(x - m)$ 表示将影像 g 在列和行方向分别移动 m_1 和 m_2 个像素; \bar{f} 和 \bar{g} 表示 f 和 g 在窗口内的均值。

就短基线立体像对而言,视差一般很小,因此限定在 g 上的搜索范围也较小。这样一方面有利于提高匹配的精确度,另一方面可以降低算法的时间消耗。

2.3 POC 亚像素位移估计

计算 f 中的参考窗口和其对应的 g 中匹配窗口的 POC 函数, 按式(7)拟合参数 $\alpha, \delta_1, \delta_2$, 则参考窗口总的位移量为 $(m_1 + \delta_1, m_2 + \delta_2)$, 即为参考窗口所对应中心像素点的视差。由于参数 α 可用于判定待匹配的两个窗口的相似程度, 给定阈值 t , 如果 $\alpha > t$, 则认为待匹配窗口的相似度高, 中心像素点的视差估计结果可信; 反之, 窗口的相似度低, 视差估计结果不可信, 并将该中心像素点标记为不可信点。

2.4 后处理

根据上述步骤计算参考影像所有像素点的视差, 得到完整视差图和不可信点分布图。不可信点的视差用其邻域内可信点的视差的加权平均来代替, 权重根据双边滤波器原理计算。最后, 对得到的视差图进行中值滤波, 使视差图更加平滑。

3 实验与分析

本文首先通过模拟实验定量验证所提视差估计方法的精度, 再将该方法应用于嫦娥一号 CCD 相机邻轨立体像对, 进而生成月面 DEM。

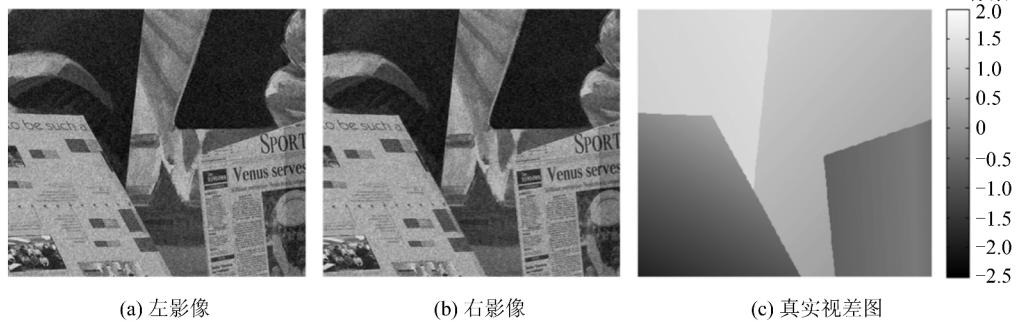


图 3 模拟实验立体像对及真实视差图

Fig. 3 Stereo Images and the Ground Truth

3.2 利用嫦娥一号 CCD 相机邻轨立体像对生成月面 DEM

邻轨影像成像时相机姿态不同, 在估计视差之前, 需要通过仿射变换^[17]来纠正由于相机姿态造成的影像变形。图 5 为月面一处具有明显地形特征的区域, 中心经纬度在 $[39.7^\circ, -60.4^\circ]$ 附近, 图 5(a)为第 201 轨下视局部影像, 图 5(b)是以图 5(a)为参考, 经仿射变换纠正后的第 202 轨下视局部影像。图 5 中横向为基线方向。本文方法估计的基线方向视差图及生成的 DEM 如图 6 所示, 同时将本文结果与美国国家航空航天局 (NASA) 公布的平面分辨率为 30 m 的月球 DEM 作对比, 该 DEM 由月球侦察轨道器 (LRO) 携带

3.1 模拟实验

模拟实验采用如图 3(a)、3(b)所示的立体像对, 像对仅在横向存在视差, 真实视差图如图 3(c)所示。图 3(a)对应的原图由 Middlebury (<http://vision.middlebury.edu/flow/data/>) 图像库提供, 为提高匹配精度, 本文在原图中加入了归一化方差为 0.005 的零均值高斯白噪声。Middlebury 提供的原真实视差图的视差范围为 $[-10, 7]$ 像素, 由于本文方法的目的在于获取高精度的小视差估计, 因此将原视差缩小 5 倍产生视差范围为 $[-2, 1.4]$ 像素的视差图(图 3(c))。图 3(b)由图 3(a)和视差图模拟生成。

图 4 为本文方法与文献[6]方法的对比, 其中, 图 4(a)为文献[6]方法得到的视差图, 均方根误差为 0.092 像素; 图 4(b)为本文方法得到的视差图, 均方根误差为 0.075 像素; 图 4(c)为在本文结果、文献[6]结果及真实视差图中取一行视差值作对比, 位置如图 4(a)中黑色直线所示。由此可见, 就模拟实验而言, 本文方法的精度高于文献[6]方法。从视觉效果上看, 本文结果在左下角和右下角两个区域内部过渡平滑, 更接近于真实视差图。

的月球激光测高计 (LOLA) 获取 (LOLA DEM 数据可在 http://imbrrium.mit.edu/BROWSE/LOLA_GDR/CYLINDRICAL.html 下载)。LRO 由 NASA 于美国东部时间 2009 年 6 月 18 日成功发射升空, 其携带的 LOLA 的测距精度达到 10 cm, 赤道处平面分辨率为 1 km, 两极处可达到 25 m^[18-19]。随后, NASA 公布了多种平面分辨率的月球 DEM 数据, 最高的是 30 m, 是目前分辨率最高的月球 DEM 数据。

图 6(a)为本文方法得到的基线方向视差图, 图 6(b)为视差图的三维显示, 图 6(c)为实验区域的三维显示, 图 6(d)为本文结果与 LOLA DEM 的对比, 剖面位置如图 5(a)中黑色直线所示。可

见,本文方法生成的实验区域 DEM 与全色影像能很好地吻合,表现出了较小的地形起伏特征,与 LOLA DEM 基本一致。由于本文方法没有考虑

控制点、准确的相机位置和姿态等信息,得到的 DEM 为相对高程,因此,图 6(d)所示本文结果以及 LOLA DEM 的剖面线均经过归一化处理。

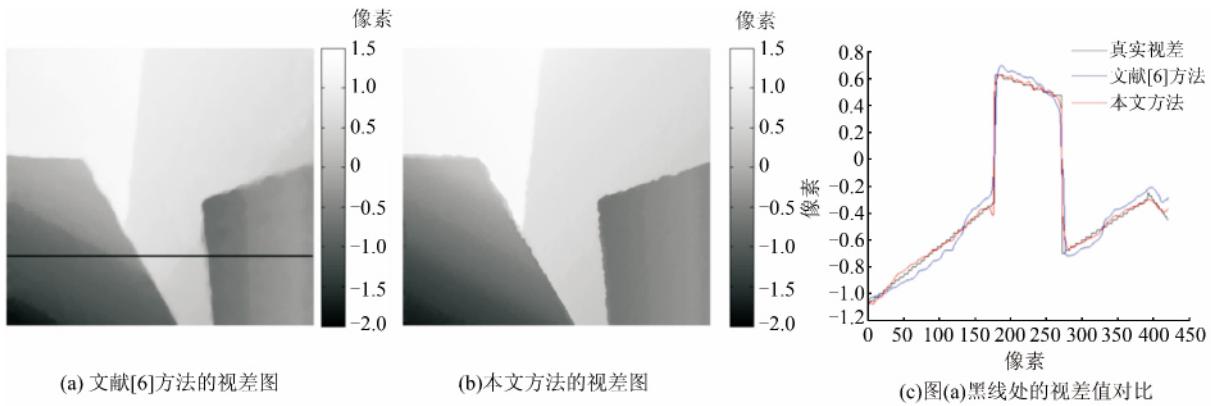
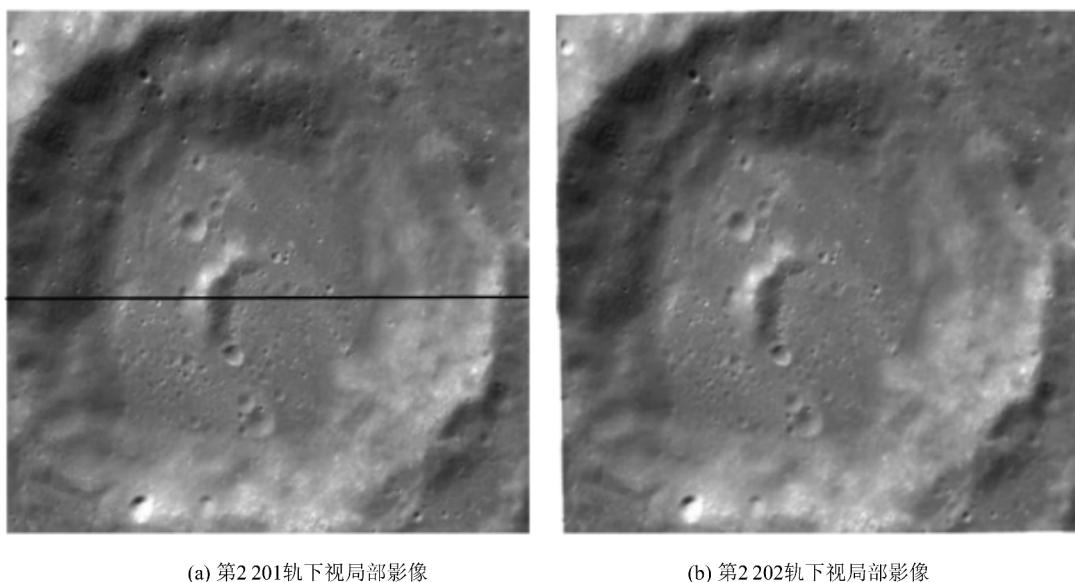


图 4 实验结果
Fig. 4 Experimental Results



(a) 第 201 轨下视局部影像 (b) 第 202 轨下视局部影像

图 5 嫦娥一号 CCD 相机邻轨立体像对

Fig. 5 Narrow Baseline Stereo Images Composed by Nadir Images of Chang'E-1 CCD Camera of Adjacent Tracks

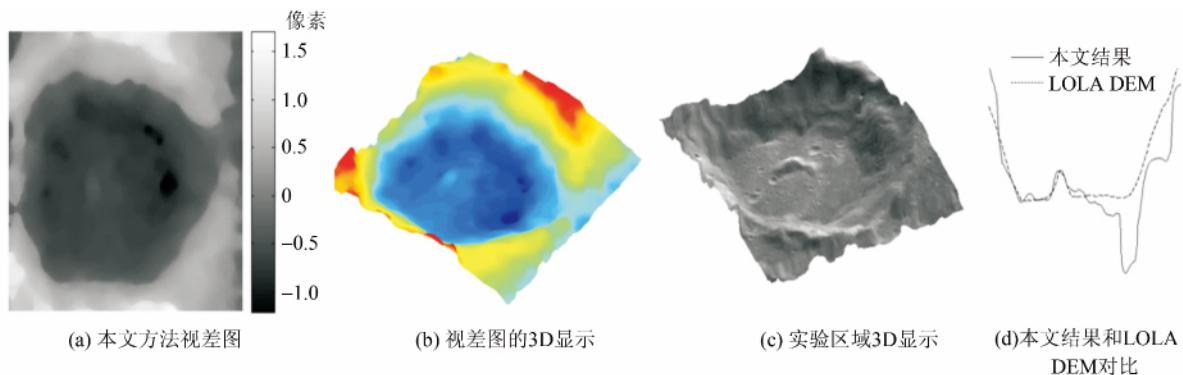


图 6 实验结果
Fig. 6 Experimental Results

4 结语

为弥补大基高比立体像对在月球表面地形起伏区域存在较大遮挡和变形的不足,本文提出了一种利用嫦娥一号 CCD 相机邻轨下视影像组成的短基线立体像对生成月面 DEM 的方法。利用空间分辨率为 120 m 的嫦娥一号 CCD 邻轨下视影像生成的月面 DEM 与 LOLA 30 m 平面分辨率的 DEM 基本一致。由于没有考虑控制点、相机位置和姿态等信息,本文提取的 DEM 为相对高程,可在传统 DEM 重建方法的基础上用于 DEM 加密等辅助计算。

致谢:感谢帝国理工学院地球科学与工程系刘建国教授对论文的研究和撰写提供的意见和建议。

参 考 文 献

- [1] Li Chunlai, Liu Jianjun, Ren Xin, et al. The Global Image for the Moon by the Chang'E-1: Data Processing and Lunar Cartography [J]. *Sci Chine (Earth Sci)*, 2010, 40(3): 294-306 (李春来, 刘建军, 任鑫, 等. 嫦娥一号图像数据处理与全月球影像制图[J]. 中国科学·地球科学, 2010, 40(3): 294-306)
- [2] Tian Hui. The Research to Modeling and Processing of Stereo Satellite Image Based on Chang'E-1 [D]. Beijing: China University of Geoscience, 2010 (田辉. 基于嫦娥一号卫星 CCD 立体影像处理模型与方法研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2010)
- [3] Zhang Ting. Research on the Lunar DEM Extraction Technology Based on Chang'E-2 Line Array CCD Image [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2012 (张亭. 嫦娥二号线阵 CCD 影像的月面 DEM 提取技术研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2012)
- [4] Li Chunlai, Ren Xin, Liu Jianjun, et al. Laser Altimetry Data of Chang'E-1 and the Global Lunar DEM Model [J]. *Sci Chine (Earth Sci)*, 2010, 40(3): 281-293 (李春来, 任鑫, 刘建军, 等. 嫦娥一号激光测距数据及全月球 DEM 模型[J]. 中国科学·地球科学, 2010, 40(3): 281-293)
- [5] Zhao Baochang, Yang Jianfeng, Wen Desheng, et al. Design and On-orbit Measurement of Chang'E-1 Satellite CCD Stereo Camera [J]. *Spacecraft Engineering*, 2009, 18(1): 30-36 (赵葆常, 杨建峰, 汶德胜, 等. 嫦娥一号卫星 CCD 立体相机的设计与在轨运行[J]. 航天器工程, 2009, 18(1): 30-36)
- [6] Morgan G L K, Liu Jianguo, Yan Hongshi. Precise Subpixel Disparity Measurement from Very Narrow Baseline Stereo [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(9): 424-433
- [7] Delon J, Rouge B. Small Baseline Stereovision [J]. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*, 2007, 28(3): 209-223
- [8] Igual L, Preciozzi J, Garrido L, et al. Automatic Low Baseline Stereo in Urban Areas [J]. *Inverse Problems and Imaging*, 2007, 1(2): 319-348
- [9] Bian Jilong, Men Chaoguang, Li Xiang. A Fast Stereo Matching Method Based on Small Baseline [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2012, 34(3): 517-522 (边继龙, 门朝光, 李香. 基于小基高比的快速立体匹配方法[J]. 电子与信息学报, 2012, 34(3): 517-522)
- [10] Sabater N, Blancher G, Moisan L, et al. Review of Low-Baseline Stereo Algorithms and Benchmarks [C]. SPIE Image and Signal Processing for Remote Sensing, Toulouse, France, 2010
- [11] WanXue, Zhang Zuxun, Ke Tao. An Improved SIFT Operator Based on the Theory of Zero-Crossing on Feature Extraction [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(3): 270-273 (万雪, 张祖勋, 柯涛. 一种利用零交叉理论的改进 SIFT 特征提取算法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2013, 38(3): 270-273)
- [12] Zhang Qian, Jia Yonghong, Hu Zhongwen. An Improved SIFT Algorithm for Multi-source Remote Sensing Image Registration [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(4): 455-459 (张谦, 贾永红, 胡忠文. 多源遥感影像配准中的 SIFT 特征匹配改进[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2013, 38(4): 455-459)
- [13] Pap L, Zou J J, Uy B. Accurate Measurement of Translational Shifts by Adaptively Masking Phase Correlation [J]. *Electronics Letters*, 2012, 48(1): 20-22
- [14] Ousguine S, Essanouni F, Essanouni L, et al. Motion Estimation of Aliased Images Using the Phase Correlation [C]. The 2nd International Conference on Innovative Computing Technology, Casablanca, Morocco, 2012
- [15] Takita K, Aoki T, Sasaki Y, et al. High Accuracy Subpixel Image Registration Based on Phase-Only Correlation [J]. *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, 2003, 86(8): 1925-1934
- [16] Lourakis M I A. A Brief Description of the Levenberg-Marquardt Algorithm implemented by levmar [R]. Institute of Computer Science Foundation for Research and Technology, Heraklion, Crete, Greece,

2005

- [17] Odeobez J M, Bouthemy P. A Robust Multiresolution Estimation of Parametric Motion Model [J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 1995, 6(4): 348-365
- [18] Zheng Yongchun, Zou Yongliao, Fu Xiaohui. LRO and LCROSS Missions: Overview and Enlightenment for Future Lunar Exploration [J]. *Spacecraft* Engineering, 2011, 20(4): 117-129 (郑勇春, 邹永廖, 付晓辉. LRO 和 LCROSS 探月计划: 科学探测的分析与启示[J]. 航天器工程, 2011, 20(4): 117-129)
- [19] Craig R, Tooley M B, Houghton R S, et al. Lunar Reconnaissance Orbiter Mission and Spacecraft Design [J]. *Space Science Review*, 2010, 150: 23-62

Lunar DEM Construction from Nadir Images of Chang'E-1 CCD Camera of Adjacent Tracks

CHEN Wangli¹ SUN Tao² QIN Qianqing¹ SHI Yan² ZHANG Wei³ LIN Liyu¹

1 State Key Laboratory for Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430079, China

3 Huazhong Institute of Electro-Optic, Wuhan 430233, China

Abstract: In order to construct a DEM of the moon's surface from narrow baseline stereo matching between nadir images of Chang'E-1 CCD camera of adjacent tracks, a NCC-POC based adaptive disparity estimation method is proposed. The estimated disparity map is used to construct the DEM. In the algorithm, NCC (normalized cross correlation) is applied with a texture based adaptive window to scan the pair of stereo images pixel by pixel. This process determines the integer disparity between corresponding pixels, and the POC (phase-only correlation) is applied to estimate high accuracy sub-pixel shifts. The total disparity between the corresponding pixels of the image pair is calculated as the summation of NCC measured integer disparity and the POC measure sub-pixel disparity. Via this two step disparity estimation procedure, a dense high accuracy disparity map was generated after essential post-processing to eliminate outlier values. Simulated experimental results show that the proposed method can achieve an accuracy of 0.075 pixel of RMSE. The DEM generated by the proposed method is consistent with the DEM at a resolution of 30 m, obtained by LOLA.

Key words: Chang'E-1; DEM; narrow baseline stereo images; disparity estimation; phase-only correlation

First author: CHEN Wangli, PhD candidate, specializes in registration, restoration and super-resolution of remote sensing images.
E-mail: wlchen_85@163.com

Corresponding author: SUN Tao, PhD, professor. E-mail: suntao@whu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41171450, 40601055, 41001256.