



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 117291960 A

(43) 申请公布日 2023. 12. 26

(21) 申请号 202311245969.0

(22) 申请日 2023.09.26

(71) 申请人 同济大学

地址 200092 上海市杨浦区四平路1239号

(72) 发明人 叶真 黄荣 徐聿升 徐思彦

周米玉 童小华 谢欢 冯永玖

刘世杰

(74) 专利代理机构 上海科盛知识产权代理有限

公司 31225

专利代理师 宣慧兰

(51) Int. Cl.

G06T 7/33 (2017.01)

G06T 17/05 (2011.01)

G06T 19/20 (2011.01)

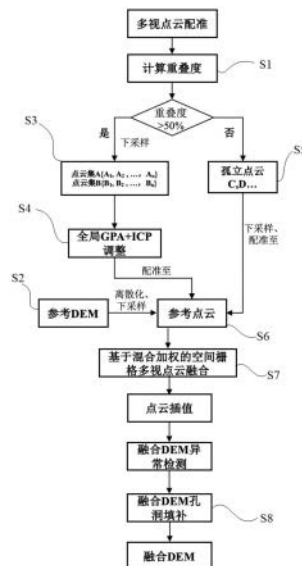
权利要求书2页 说明书8页 附图5页

(54) 发明名称

一种基于重叠度分类的月表点云全局配准方法和设备

(57) 摘要

本发明涉及一种基于重叠度分类的月表点云全局配准方法和设备,方法包括如下步骤:获取多个重叠或部分重叠的点云,提取各个点云的边界并计算点云间的重叠度,基于重叠度以及预设的预设阈值将点云分为重叠点云集和孤立点云集;获取月表的参考数字地形模型,通过离散得到参考点云,针对所述重叠点云集和孤立点云集中的各个单景点云进行密度一致处理;针对所述重叠点云集,基于全局广义普式分析和迭代最近点算法与所述参考点云进行迭代配准;针对所述孤立点云集,基于迭代最近点算法与所述参考点云进行配准;完成全局点云配准,得到全局配准后的多视点云。与现有技术相比,本发明能够生成质量更高的融合地形模型。



1. 一种基于重叠度分类的月表点云全局配准方法,其特征在于,包括如下步骤:

获取多个重叠或部分重叠的点云,提取各个点云的边界并计算点云间的重叠度,基于重叠度以及预设的预设阈值将点云分为重叠点云集和孤立点云集;

获取月表的参考数字地形模型,通过离散得到参考点云,针对所述重叠点云集和孤立点云集中的各个单景点云进行密度一致处理;

针对所述重叠点云集,基于全局广义普式分析和迭代最近点算法与所述参考点云进行迭代配准;

针对所述孤立点云集,基于迭代最近点算法与所述参考点云进行配准;

完成全局点云配准,得到全局配准后的多视点云。

2. 根据权利要求1所述的一种基于重叠度分类的月表点云全局配准方法,其特征在于,所述的点云间的重叠度的计算过程包括:

将点云投影在二维平面上,基于alpha shapes算法获取点云的边界点集,基于凸包算法对所述边界点集进行简化,通过geos库计算点云间的重叠度。

3. 根据权利要求1所述的一种基于重叠度分类的月表点云全局配准方法,其特征在于,所述的密度一致处理包括:

通过体素滤波,使所述重叠点云集和孤立点云集中的各个单景点云的密度与所述参考点云的密度一致。

4. 根据权利要求1所述的一种基于重叠度分类的月表点云全局配准方法,其特征在于,针对所述的重叠点云集进行配准的过程包括:

针对各个点云内的各个点,在其余点云中搜索最邻近匹配关系,基于所述最邻近匹配关系以及预设的目标函数,计算各个点云的旋转矩阵和平移矩阵,并对点云进行更新,重复执行本步骤直至满足预设的全局收敛条件,完成配准。

5. 根据权利要求4所述的一种基于重叠度分类的月表点云全局配准方法,其特征在于,所述的全局收敛条件为:

迭代次数超过预设值,或全局配准前后的全局配准误差小于预设值,其中,所述的全局配准误差基于点云到质心云的对应点距离的平均值,所述质心云基于每个最邻近匹配关系的独立子集计算得到。

6. 根据权利要求4所述的一种基于重叠度分类的月表点云全局配准方法,其特征在于,所述的目标函数为:

$$m \sum_{i < j} \|A_i^p - K\|^2 = m \sum_{i < j} \text{tr}((A_i^p - K)^T M_i (A_i^p - K))$$

其中,m为重叠点云集数量, $A_1, A_2, \dots, A_m$ 分别表示m个点集,p为点云集中点云的数量,令 $A_i^p = A_i T_i + j t_i^T$ ,T为旋转矩阵,j为 $p \times 1$ 的单位向量,t为平移矩阵, $p \times p$ 矩阵 $M_i$ 表示点集的可见性,1为可见,0为缺失, $K = (\sum_{i=1}^m M_i)^{-1} (\sum_{i=1}^m M_i (A_i T_i + j t_i^T))$ 。

7. 根据权利要求1所述的一种基于重叠度分类的月表点云全局配准方法,其特征在于,还包括:

基于全局配准后的多视点云,采用基于三角测量误差与距离混合加权的空间栅格融合策略得到融合点云,并插值得到融合数字地形模型;

针对所述融合数字地形模型进行基于坡度的异常值检测与基于轮廓检测的孔洞填补，完成点云与数字地形模型的融合。

8. 根据权利要求7所述的一种基于重叠度分类的月表点云全局配准方法，其特征在于，所述的融合数字地形模型的获取过程包括：

基于全局配准后的多视点云三位点集合的三个坐标轴上的极值，计算点云最小包围盒的尺寸参数；

基于设置的体素小栅格边长将所述最小包围盒划分成多个空间栅格并进行编号；

采用三角测量误差与距离混合加权的融合策略计算空间栅格融合值，得到所述融合数字地形模型。

9. 根据权利要求8所述的一种基于重叠度分类的月表点云全局配准方法，其特征在于，所述的空间栅格融合值的计算采用下式实现：

$$w_{i,t} = \alpha_1 \frac{1}{d_{i,t}} + \alpha_2 \frac{1}{e_{i,t}}$$

$$\bar{z}_t = \frac{\sum_{i=1}^k w_{i,t} z_{i,t}}{\sum_{i=1}^k w_{i,t}}$$

其中， $w_{i,t}$ 表示第 $i^{\text{th}}$ 点对 $t^{\text{th}}$ 网格中的权重， $\bar{z}_t$ 表示所述空间栅格融合值， $d_{i,t}$ 和 $e_{i,t}$ 分别表示第 $i$ 个点与第 $t$ 个网格中心之间的欧几里得距离和三角剖分误差， $\alpha_1$ 和 $\alpha_2$ 分别是三角测量相对误差和距离项的权重值。

10. 一种电子设备，其特征在于，包括：一个或多个处理器以及存储器，所述存储器内储存有一个或多个程序，所述一个或多个程序包括用于执行如权利要求1-9任一所述基于重叠度分类的月表点云全局配准方法的指令。

## 一种基于重叠度分类的月表点云全局配准方法和设备

### 技术领域

[0001] 本发明涉及点云配准与融合领域,尤其是涉及一种基于重叠度分类的月表点云全局配准方法和设备。

### 背景技术

[0002] 由于摄影测量和计算机视觉技术的飞速进步,由影像密集匹配生成的三维点云因其准确、可靠、较低成本,已成为月球地形测绘的重要数据来源。受到相机外方姿态精度、密集匹配精度等因素的影响,点云间仍会存在分层、错层等现象,这对后续多视点云融合将会造成很大的难度。为实现月表的大范围制图需求,须对由多视点云进行全局配准,提升点云间的位置一致性,并在融合阶段采用合适的定权策略获得质量更高的融合地形模型。

[0003] 点云全局配准相对两景点云配准是一个更复杂、更有挑战性的研究问题,主要分为顺序配准和全局配准。顺序配准方法涉及每次对两个重叠视图进行顺序对齐,全局配准主要解决的是顺序配准过程中产生的累计配准误差,均匀地将误差分配到所有重叠视图上。

[0004] 中国申请公开号CN 110009667 A提供了一种基于罗德里格斯变换的多视点云全局配准方法,首先在获取多块取自不同视角、块与块之间部分重叠的多视点云的基础上,寻找具有重叠关系的任意两块点云之间的匹配点对,并以此计算每块点云相较于自身的对应旋转变换矩阵与平移变换向量,然后利用罗德里格斯变换将全部计算得到旋转变换矩阵转化为旋转变换向量,并将旋转变换向量与平移变换向量合并作为观测值代入到多视点云全局优化模型中,通过多次迭代平差计算,获得多视扫描面点云各自最优的变换矩阵,从而完成多视角扫描面点云的整体精确配准。

[0005] 上述申请可以实现存在一定重叠关系的多视点云的全局配准,但是,其并未针对不同的重叠度进行分类处理,导致配准精度不理想。

### 发明内容

[0006] 本发明的目的就是为了解决上述现有技术存在的缺陷而提供一种基于重叠度分类的月表点云全局配准方法和设备,以解决或部分解决点云配准精度不理想的问题。

[0007] 本发明的目的可以通过以下技术方案来实现:

[0008] 本发明的一个方面,提供了一种基于重叠度分类的月表点云全局配准方法,包括如下步骤:

[0009] 获取多个重叠或部分重叠的点云,提取各个点云的边界并计算点云间的重叠度,基于重叠度以及预设的预设阈值将点云分为重叠点云集和孤立点云集;

[0010] 获取月表的参考数字地形模型,通过离散得到参考点云,针对所述重叠点云集和孤立点云集中的各个单景点云进行密度一致处理;

[0011] 针对所述重叠点云集,基于全局广义普式分析和迭代最近点算法与所述参考点云进行迭代配准;

[0012] 针对所述孤立点云集,基于迭代最近点算法与所述参考点云进行配准;

[0013] 完成全局点云配准,得到全局配准后的多视点云。

[0014] 作为优选的技术方案,所述的点云间的重叠度的计算过程包括:

[0015] 将点云投影在二维平面上,基于alpha shapes算法获取点云的边界点集,基于凸包算法对所述边界点集进行简化,通过geos库计算点云间的重叠度。

[0016] 作为优选的技术方案,所述的密度一致处理包括:

[0017] 通过体素滤波,使所述重叠点云集和孤立点云集中的各个单景点云的密度与所述参考点云的密度一致。

[0018] 作为优选的技术方案,针对所述的重叠点云集进行配准的过程包括:

[0019] 针对各个点云内的各个点,在其余点云中搜索最邻近匹配关系,基于所述最邻近匹配关系以及预设的目标函数,计算各个点云的旋转矩阵和平移矩阵,并对点云进行更新,重复执行本步骤直至满足预设的全局收敛条件,完成配准。

[0020] 作为优选的技术方案,所述的全局收敛条件为:

[0021] 迭代次数超过预设值,或全局配准前后的全局配准误差小于预设值,其中,所述的全局配准误差基于点云到质心云的对应点距离的平均值,所述质心云基于每个最邻近匹配关系的独立子集计算得到。

[0022] 作为优选的技术方案,所述的目标函数为:

$$[0023] \quad m \sum_{i < j} \|A_i^p - K\|^2 = m \sum_{i < j} \text{tr}((A_i^p - K)^T M_i (A_i^p - K))$$

[0024] 其中,m为重叠点云集数量, $A_1, A_2, \dots, A_m$ 分别表示m个点集,p为点云集中点云的数量,令 $A_i^p = A_i T_i + j t_i^T$ ,T为旋转矩阵,j为 $p \times 1$ 的单位向量,t为平移矩阵, $p \times p$ 矩阵 $M_i$ 表示点集的可见性,1为可见,0为缺失, $K = (\sum_{i=1}^m M_i)^{-1} (\sum_{i=1}^m M_i (A_i T_i + j t_i^T))$ 。

[0025] 作为优选的技术方案,还包括:

[0026] 基于全局配准后的多视点云,采用基于三角测量误差与距离混合加权的空间栅格融合策略得到融合点云,并插值得到融合数字地形模型;

[0027] 针对所述融合数字地形模型进行基于坡度的异常值检测与基于轮廓检测的孔洞填补,完成点云与数字地形模型的融合。

[0028] 作为优选的技术方案,所述的融合数字地形模型的获取过程包括:

[0029] 基于全局配准后的多视点云三位点集合的三个坐标轴上的极值,计算点云最小包围盒的尺寸参数;

[0030] 基于设置的体素小栅格边长将所述最小包围盒划分成多个空间栅格并进行编号;

[0031] 采用三角测量误差与距离混合加权的融合策略计算空间栅格融合值,得到所述融合数字地形模型。

[0032] 作为优选的技术方案,所述的空间栅格融合值的计算采用下式实现:

$$[0033] \quad w_{i,t} = \alpha_1 \frac{1}{\sum_{i=1}^k \frac{1}{d_{i,t}}} + \alpha_2 \frac{1}{\sum_{i=1}^k \frac{1}{e_{i,t}}}$$

$$[0034] \quad \bar{z}_t = \frac{\sum_{i=1}^k w_{i,t} z_{i,t}}{\sum_{i=1}^k w_{i,t}}$$

[0035] 其中,  $w_{i,t}$  表示第  $i^{\text{th}}$  点对  $t^{\text{th}}$  网格中的权重,  $\bar{z}_t$  表示所述空间栅格融合值,  $d_{i,t}$  和  $e_{i,t}$  分别表示第  $i$  个点与第  $t$  个网格中心之间的欧几里得距离和三角剖分误差,  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  分别是三角测量相对误差和距离项的权重值。

[0036] 本发明的另一个方面, 提供了一种电子设备, 包括: 一个或多个处理器以及存储器, 所述存储器内储存有一个或多个程序, 所述一个或多个程序包括用于执行上述基于重叠度分类的月表点云全局配准方法的指令。

[0037] 与现有技术相比, 本发明具有以下优点:

[0038] (1) 点云配准精度高: 本发明克服或部分克服了复杂点云覆盖情况多视点云配准精度不高的不足, 将全局GPA+ICP调整与基于参考点云的ICP配准相结合, 利用一种根据重叠度分类分别利用以上两种方法的月表点云全局配准方法, 实现了月表多视点云的全局配准, 提升点云间的位置一致性与绝对精度。

[0039] (2) 配准效率高: 现有的全局配准方法, 未充分考虑现实摄影测量点云较低的重叠率, 对于复杂的点云分布情况无法保证可靠的配准精度, 本发明基于重叠度进行分类, 对不同的重叠情况分别采用全局GPA+ICP调整与基于参考点云的ICP配准两种策略, 分别保证两种情况下的配准精度, 同时利用密度一致处理后的点云作为输入数据, 提升多视点云配准的时间效率。

[0040] (3) 融合数字地形模型准确度高: 本发明采用了综合考虑三维点三角测量误差与距离的定权策略, 用于多视点云融合, 有效消除多视点云仍存在的细微几何不一致性, 同时生成平滑的地形模型, 同时本文对融合地形模型进行了异常值检测与孔洞填补, 保证地形模型的完整性与精度。

## 附图说明

[0041] 图1为实施例中基于重叠度分类的月表点云全局配准方法的流程图;

[0042] 图2为实施例中点云覆盖情况与重叠度大于50%的点云集分布情况示意图;

[0043] 图3为实施例中参考DEM与参考点云示意图;

[0044] 图4为实施例中点云密度统一前后示意图;

[0045] 图5为实施例中GPA+ICP全局配准前后投影点云分布情况示意图;

[0046] 图6为实施例中基于坡度的异常栅格检测示意图;

[0047] 图7为实施例中基于轮廓检测的孔洞填补示意图;

[0048] 图8为实施例中融合DEM与山体阴影图。

## 具体实施方式

[0049] 下面将结合本发明实施例中的附图, 对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述, 显然, 所描述的实施例是本发明的一部分实施例, 而不是全部实施例。基于本发

明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动的前提下所获得的所有其他实施例,都应属于本发明保护的范围。

[0050] 实施例1

[0051] 为了提供根据重叠度分类的月表点云全局配准与融合方法,克服因为复杂的点云覆盖情况带来的配准误差的不确定性,提升多视点云全局配准后的位置一致性,从而生成质量更高的融合地形模型,参见图1,本实施例提供了一种基于重叠度分类的月表点云全局配准方法,包括如下步骤。

[0052] S1,获取各个点云边界,计算点云间重叠度。本步骤具体包括如下子步骤。

[0053] S11,将点投影在二维平面上;

[0054] S12,使用alpha shapes算法获取点云边界点集;

[0055] S13,利用凸包算法简化点云边界点集;

[0056] S14,通过geos库计算点云间重叠度。

[0057] 其中,点云为月球轨道器多视LROC NAC影像生成的摄影测量点云,点云总数量 $\geq 3$ 。

[0058] 参见图2,(a)为本文Apollo17着陆区域共计12景点云的覆盖情况,分别计算其点云间的重叠度。得到点云集 $a\{4,8,11,12\}$ ,其点云间重叠度大于50%,有充分的重叠度(如图2中的(b));对其余孤立点云采用基于参考点云的ICP配准,以点云2、3、5为例。

[0059] S2,对参考数字地形模型(DEM)进行离散化得到参考点云。

[0060] 具体的,通过给每一个像素单元产生一个三维点,赋予其地理坐标与高程信息,地理坐标通过DEM头文件中的起始坐标信息与x、y方向的地面分辨率计算可得,高程信息为每个像素的像素值。

[0061] 本申请参考DEM选取SLDEM2015数据(下载地址:<http://imbrium.mit.edu/EXTRAS/SLDEM2015/>),分辨率约为60m/pix,对其进行预处理,包括高程值归算、投影、裁剪步骤,按照上述离散化方法得到三维点云。图3的(a)(b)分别为参考DEM及参考点云。

[0062] S3,针对S1中重叠度计算后的云图进行处理,获取与参考点云密度一致的下采样点云。

[0063] 具体的,通过体素滤波保证单景点云下采样后密度与参考点云一致,公式为:

$$[0064] \begin{cases} i = \left\lfloor \frac{(X_i - X_{\min})}{cell} \right\rfloor \\ j = \left\lfloor \frac{(Y_i - Y_{\min})}{cell} \right\rfloor \\ k = \left\lfloor \frac{(Z_i - Z_{\min})}{cell} \right\rfloor \end{cases}$$

[0065] 其中,点云点集最小值为 $X_{\min}$ 、 $Y_{\min}$ 、 $Z_{\min}$ ,体素栅格边长为cell,第t个体素网格编号为(i,j,k), $t = i \cdot l_x + j \cdot l_y + k$ 。

[0066] 通过体素滤波,调参得到下采样参数:60。图4的(a)(b)为点云下采样前后情况,红色点为SLDEM点云,蓝色为单景点云,可以直观地得到两者点云密度趋于一致。

[0067] S4,对重叠度高的点云集采用全局广义普氏分析和迭代最近点(GPA+ICP)算法配准,评估其全局调整精度。本步骤包括如下子步骤。

[0068] S41,对每景点云内的所有点在其余点云视图中搜索“最邻近匹配关系”。

[0069] 具体的,对于迭代最近点(ICP)算法最邻近搜索得到的对应点,定义当点 $p_i \in A_i$ 与 $p_j \in A_j$ 互为最邻近点(即 $p_i$ 在 $A_j$ 中的最邻近点为 $p_j$ , $p_j$ 在 $A_i$ 中的最邻近点为 $p_i$ )为“最邻近匹配关系”。

[0070] S42,对每一个最邻近匹配关系的独立子集求取质心 $K$ 。

[0071] S43,通过最小化函数解求每个点云的旋转矩阵 $T_1, T_2, \dots, T_m$ ,平移矩阵 $t_1, t_2, \dots, t_m$ 。

[0072] 其中,最小化目标函数为:

$$[0073] \quad m \sum_{i < j} \|A_i^p - K\|^2 = m \sum_{i < j} \text{tr}((A_i^p - K)^T M_i (A_i^p - K))$$

[0074] 其中, $m$ 为点云集数量(点集 $A_1, A_2, \dots, A_m$ ), $p$ 为点集数量,令 $A_i^p = A_i T_i + j t_i^T$ , $T$ 为 $3 \times 3$ 的旋转矩阵, $j$ 为 $p \times 1$ 的单位向量, $t$ 为 $3 \times 1$ 的平移矩阵,引入 $p \times p$ 矩阵 $M_i$ 来表示点集的可见性,1为可见,0为缺失,令 $K = (\sum_{i=1}^m M_i)^{-1} (\sum_{i=1}^m M_i (A_i T_i + j t_i^T))$ 。

[0075] S44,通过得到的变换矩阵作用在各景点云,得到更新后点云。

[0076] S45,返回步骤S41,迭代直至全局收敛。

[0077] 具体的,采用Point-to-Point ICP对两者进行配准,分别设置最大迭代次数、两次变换矩阵之间的差值、均方误差值作为ICP迭代收敛的条件。

[0078] 迭代计算完成后,通过计算GPA+ICP全局配准误差、绝对配准误差评估本方法的精度。

[0079] 对单景点云分别下采样至150米,再利用下采样后的点云作为全局调整的输入数据,分别有16346、12710、9995、28206个三维点。本文设置的迭代终止条件为 $(\text{errAfter} - \text{errPrev}) / \text{errAfter} < 1e-10$ 或迭代次数达到100次, $\text{errAfter}$ 与 $\text{errPrev}$ 分别为全局调整前后的全局配准误差(指每景点云到质心云的对应点距离的平均值),全局调整过程共迭代31次至收敛。表1为四景点云全局ICP调整得到的RT变换矩阵。图5的(a)(b)分别为全局调整前后点云分布情况,直观看到配准前点云间明显存在高程不一致性,点云11明显高于另外三景,全局配准后可以看到四景点云间保持着良好的空间自洽性。

[0080] 表1点云集RT矩阵

| 序号 | 旋转矩阵  | 平移向量  |
|----|---|---|
| 4  | $\begin{bmatrix} 0.999996 & 0.000115 & -0.002689 \\ -0.000114 & 1 & 0.000398 \\ 0.002689 & -0.000397 & 0.999996 \end{bmatrix}$        | $\begin{pmatrix} -92.918 \\ -485.517 \\ 11696.6 \end{pmatrix}$    |
| 8  | $\begin{bmatrix} 0.999997 & -0.000369 & -0.002689 \\ -0.000369 & 1 & -0.000342 \\ 0.002531 & 0.000341 & 0.999997 \end{bmatrix}$       | $\begin{pmatrix} 215.018 \\ 1568.3 \\ 10558.3 \end{pmatrix}$      |
| 11 | $\begin{bmatrix} 1.000552 & 0.002692 & 0.000284 \\ -0.002692 & 1.000552 & -0.000500 \\ -0.000285 & 0.000499 & 1.000555 \end{bmatrix}$ | $\begin{pmatrix} -3198.629 \\ 3623.892 \\ -391.274 \end{pmatrix}$ |
| 12 | $\begin{bmatrix} 0.999991 & 5.8210e-05 & 0.004165 \\ -5.87024e-05 & 1 & 0.000118 \\ -0.004165 & -0.000118 & 0.999991 \end{bmatrix}$   | $\begin{pmatrix} -65.964 \\ -250.136 \\ -17667.9 \end{pmatrix}$   |

[0082] S5,对全局调整过的点云群利用ICP配准至参考点云,对重叠度低的孤立点云直接配准至参考点云。



[0083] 对经过全局GPA+ICP配准的四景点云(点云集a)进行整体配准至参考点云上,ICP具体的配置参数为:最大迭代次数:500;两次变换矩阵之间的差值:1e-10;均方误差:1,求解得到的RT变换矩阵如表2所示;针对与邻近点云重叠度很低的孤立点云,直接将其配准到参考点云上,ICP配准参数与上述一致,下面列举点云2、3、5的单景配准效果,其RT矩阵如表2所示。

[0084] 表2点云集与孤立点云RT矩阵

| 序号               | 旋转矩阵   | 平移向量  |
|------------------|--|---|
| [0085] 4&8&11&12 | $\begin{pmatrix} 0.999999 & -0.000135 & 0.001156 \\ -0.000114 & 1 & -6.758e-05 \\ 0.002689 & -0.000397 & 0.999999 \end{pmatrix}$ | $\begin{pmatrix} 81.095 \\ 577.085 \\ -4929.59 \end{pmatrix}$   |
| 2                | $\begin{pmatrix} 1 & -0.000144 & 1.93376e-05 \\ 0.000144 & 1 & -0.000448 \\ -1.92721e-05 & 0.000448 & 1 \end{pmatrix}$           | $\begin{pmatrix} 91.475 \\ 614.323 \\ -352.489 \end{pmatrix}$   |
| [0086] 3         | $\begin{pmatrix} 1 & 2.73763e-06 & 0.000154 \\ -2.66759e-06 & 1 & -0.000597 \\ -0.000154 & 0.000597 & 1 \end{pmatrix}$           | $\begin{pmatrix} 18.9457 \\ -15.8658 \\ -994.968 \end{pmatrix}$ |
| 5                | $\begin{pmatrix} 1 & 0.000191 & 5.33097e-05 \\ -0.000191 & 1 & 0.000414 \\ -5.32135e-05 & -0.000414 & 1 \end{pmatrix}$           | $\begin{pmatrix} -123.349 \\ -811.305 \\ 76.3312 \end{pmatrix}$ |

[0087] S6,利用多种检核方法对全局点云配准精度进行评价。

[0088] 首先评估全局GPA+ICP配准精度,全局GPA+ICP配准误差(指每景点云到质心云的对应点距离的平均值)从误差14.0388米下降到7.04875米,其次通过评估全局配准前后每对点云间的误差来对整体配准精度进行反映,具体见表3,点云间不存在重叠或重叠区很小用“/”表示。从表中可知全局配准后,点云间的配准误差均值有了明显的下降,例如点云4与点云12配准误差均值由43米下降到5.2米,标准差也有不同幅度的下降,说明其配准误差更集中。

[0089] 表3全局GPA+ICP配准前后点云间偏差统计表

| 点云对        | 全局配准前/m |       |        | 全局配准后/m |       |        |
|------------|---------|-------|--------|---------|-------|--------|
|            | 均值      | 标准差   | 最大值    | 均值      | 标准差   | 最大值    |
| [0090] 4&8 | 10.54   | 7.79  | 330.25 | 5.86    | 5.34  | 336.25 |
| 4&11       | 33.58   | 8.39  | 660.46 | 2.43    | 6.44  | 630.54 |
| 4&12       | 43.02   | 10.81 | 86.00  | 5.21    | 4.500 | 54.33  |
| 8&11       | 23.17   | 9.05  | 661.79 | 6.83    | 8.13  | 636.37 |
| 8&12       | 21.58   | 6.60  | 309.00 | 4.14    | 3.56  | 291.67 |
| 11&12      | /       |       |        | /       |       |        |

[0091] 其次,对与参考点云配准前后的该点云集进行绝对精度评定,利用LOLA激光检核点评估其绝对配准精度。共选取710个激光检核点,配准前后点云与LOLA激光检核点之间的绝对偏差相关统计量如表4所示,绝对偏差RMSE由30.13m下降到3.86m,同时标准差也大幅度下降,说明整体偏差都大幅减小并且更加集中。针对孤立点云配准,配准前后孤立点云与LOLA激光检核点之间的绝对偏差相关统计量如下表5所示,可以得到:单景点云配准前与参考点云的误差各异,例如点云2误差较小,点云3、5误差较大,该情况主要是受到外方精度的影响;配准后,单景点云与LOLA激光点的绝对偏差均值在3米左右,绝对偏差在3~4米,其误差都有了显著的下降,说明单景点云的配准效果佳,都已与参考点云对齐。所有点云都通过

上述全局配准策略进行全局调整,保证其空间位置的自洽性和绝对精度。

[0092] 表4配准前后点云集DEM与LOLA激光检核点之间的绝对偏差表

| 统计量/m | 与参考点云配准前点云集/m | 与参考点云配准后点云集/m |
|-------|---------------|---------------|
| 平均值   | 30.128071     | 3.862629      |
| RMSE  | 30.971710     | 4.567587      |
| 最小值   | 17.846924     | 0.005859      |
| 最大值   | 47.712158     | 11.714233     |

[0093]

[0094] 表5配准前后单景DEM与LOLA激光检核点之间的绝对偏差表

| 空间栅格 | 激光点数量 | 配准前/m  |          | 配准后/m  |          |
|------|-------|--------|----------|--------|----------|
|      |       | 绝对偏差均值 | 绝对偏差RMSE | 绝对偏差均值 | 绝对偏差RMSE |
| 2    | 321   | 6.33   | 9.01     | 3.07   | 3.98     |
| 3    | 192   | 33.82  | 35.17    | 2.98   | 3.64     |
| 5    | 160   | 47.52  | 48.06    | 2.59   | 3.20     |

[0095]

[0096] S7,针对全局配准后的多视点云,采用三角测量误差与距离混合加权的空间栅格融合策略得到融合点云,并插值得到融合DEM。本步骤包括如下子步骤。

[0097] S71,根据多视点云三维点集合的X、Y、Z三个坐标轴上的最大、最小值求得点云最小包围盒的边长 $l_x$ 、 $l_y$ 、 $l_z$ ;

[0098] S72,设置体素小栅格边长cell,将最小包围盒划分成M\*N\*L个空间栅格;

[0099] S73,对每个空间栅格编号,确定每个三维点所属的空间栅格;

[0100] S74,采用考虑三角测量误差与距离混合加权的融合策略计算空间栅格融合值。

[0101] 其中,空间栅格值的定权公式与栅格值计算公式为:

[0102] 
$$w_{i,t} = \alpha_1 \frac{1}{\sum_{i=1}^k \frac{1}{d_{i,t}}} + \alpha_2 \frac{1}{\sum_{i=1}^k \frac{1}{e_{i,t}}}$$

[0103] 
$$z_t = \frac{\sum_{i=1}^k w_{i,t} z_{i,t}}{\sum_{i=1}^k w_{i,t}}$$

[0104] 其中, $w_{i,t}$ 表示第 $i^{th}$ 点对 $t^{th}$ 网格中的权重, $d_{i,t}$ 和 $e_{i,t}$ 分别表示第 $i$ 个点与第 $t$ 个网格中心之间的欧几里得距离和三角剖分误差。 $\alpha_1$ 和 $\alpha_2$ 分别是三角测量相对误差和距离项的权重值。 $z_t$ 为融合空间栅格值。

[0105] 本发明定权公式分别设置 $\alpha_1=0.5$ , $\alpha_2=0.5$ 。通过融合和插值得到融合的地形模型。

[0106] S8,对融合DEM进行基于坡度的异常值检测与基于轮廓检测的孔洞填补。

[0107] 具体的,基于坡度的异常栅格检测公式为:

[0108]  $Threshold_x = k \cdot RMSE_{DSC}$

[0109]  $Threshold_y = k \cdot RMSE_{DSC}$

[0110] 其中,DSC(Differences in Slope Change)为单点坡度变化差值,通过计算每个数据点在同一方向上的DSC值之和,计算出每个格网该总和的RMSE值即 $RMSE_{DSC}$ 。阈值设置为各方向RMSE的k倍。

[0111] 首先,在异常检测侧,取 $k=3$ ,则 $Threshold_x=0.196135$ , $Threshold_y=0.197602$ 。在融合DEM共计18605325个栅格中检索865个像素为粗差值。图6为放大区域的异常检测情况。

[0112] 其次,在孔洞填补方面,根据融合DEM的二值图,检测所有轮廓并保存至链表,以Freeman链码的方式输出轮廓,并对x、y两个方向进行线性插值填补。图7为放大区域的孔洞填补示意图。经过以上后处理步骤,最终融合DEM与山体阴影图如图8所示。

[0113] 实施例2

[0114] 在实施例1基础上,本实施例提供了一种电子设备,包括:一个或多个处理器以及存储器,所述存储器内储存有一个或多个程序,所述一个或多个程序包括用于执行上述基于重叠度分类的月表点云全局配准方法的指令。

[0115] 本申请将采用全局配准方法在不需要视图顺序的先验知识的情况下对多景点云进行调整,同时针对多景点云复杂的分布情况,根据重叠度进行分类,采用全局GPA+ICP调整与基于参考点云的ICP配准相结合的全局配准方法。在点云融合侧,采用考虑三角测量误差与距离混合加权的融合策略,实现了多景点云的融合,有效消除点云间的细微矛盾并实现数据去冗,同时对融合地形模型进行后处理,能保证其完整性与精度。

[0116] 以上所述,仅为本发明的具体实施方式,但本发明的保护范围并不局限于此,任何熟悉本技术领域的技术人员在本发明揭露的技术范围内,可轻易想到各种等效的修改或替换,这些修改或替换都应涵盖在本发明的保护范围之内。因此,本发明的保护范围应以权利要求的保护范围为准。

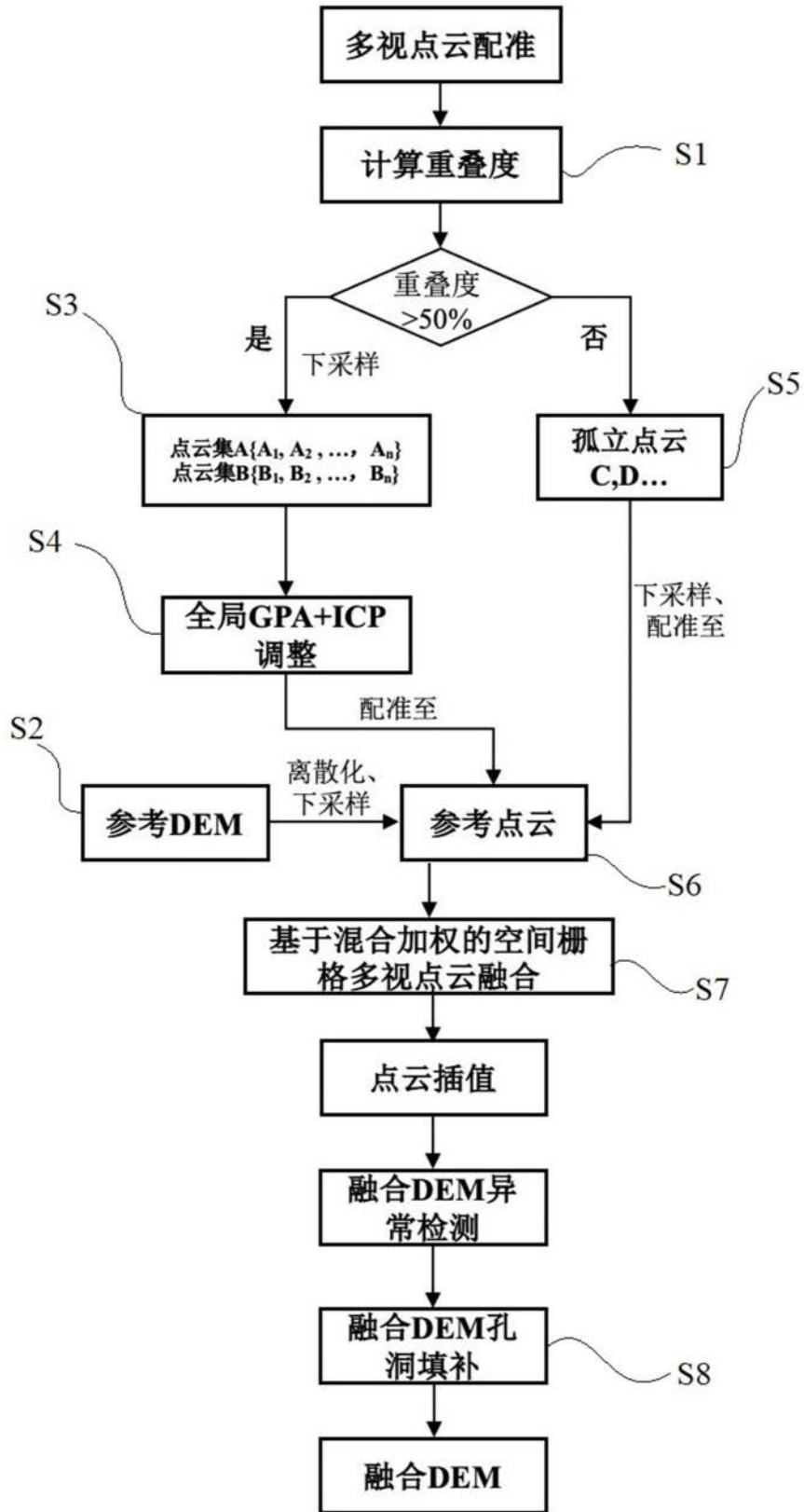
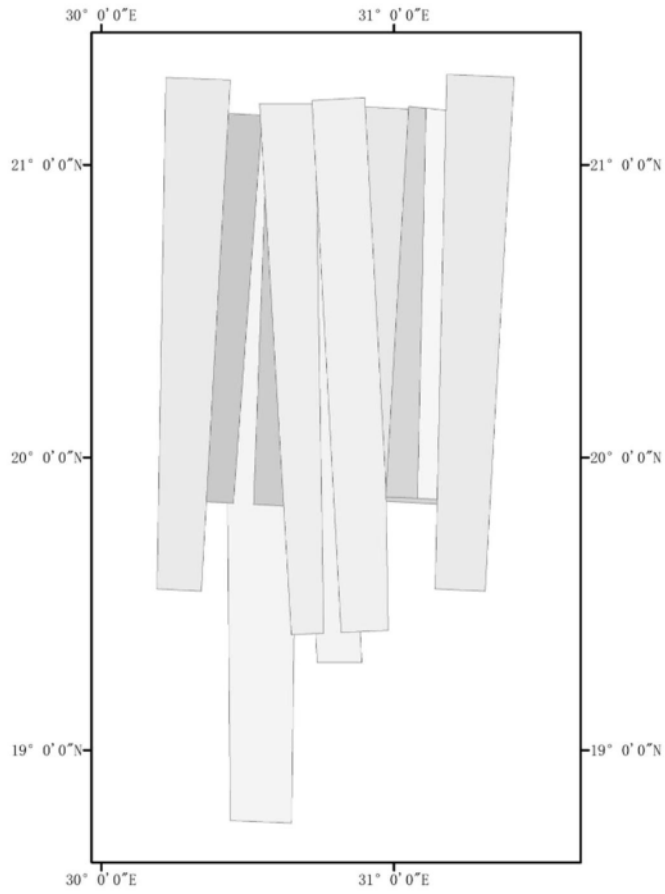
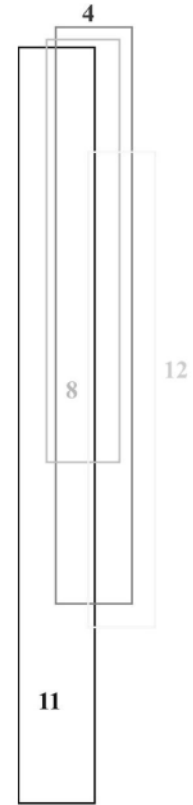


图1

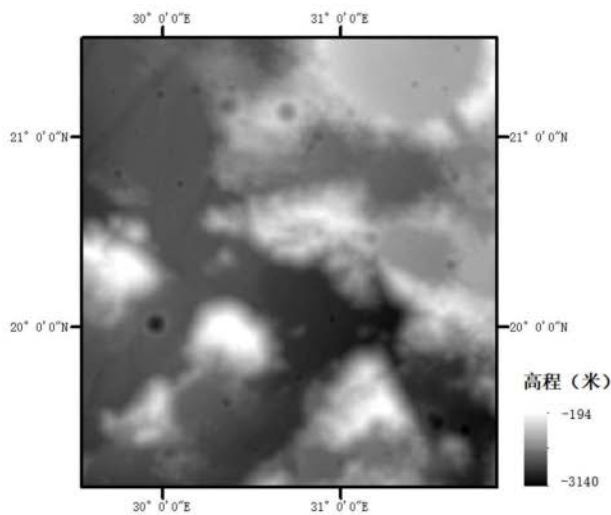


(a)点云分布情况

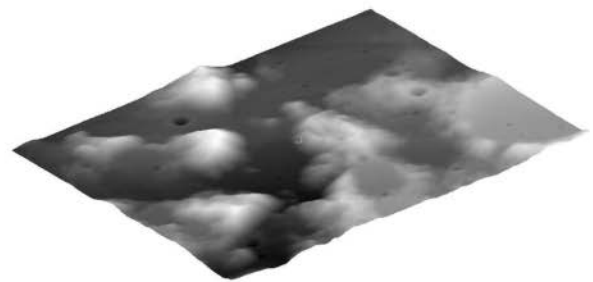


(b)重叠度高的点云集分布

图2

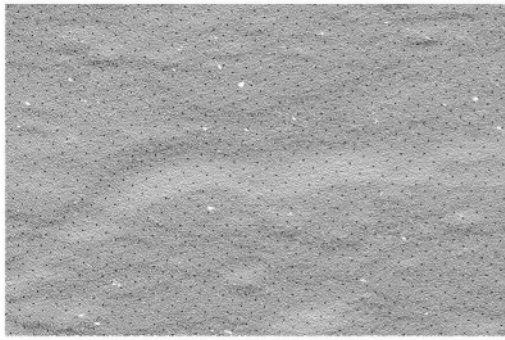


(a) 实验区域 SLDEM

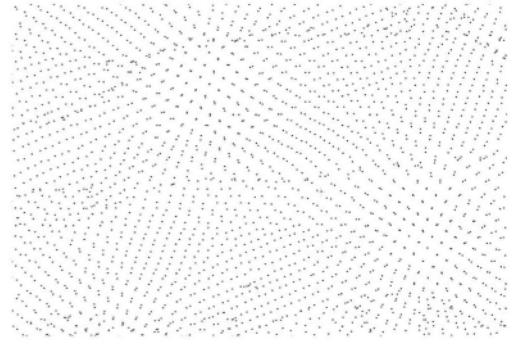


(b) 实验区域 SLDEM 离散化点云

图3



(a) 密度统一前

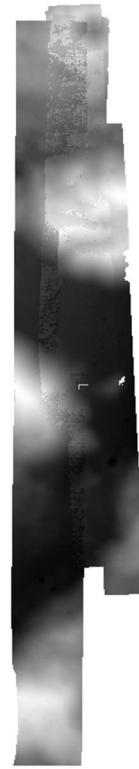


(b) 密度统一后

图4

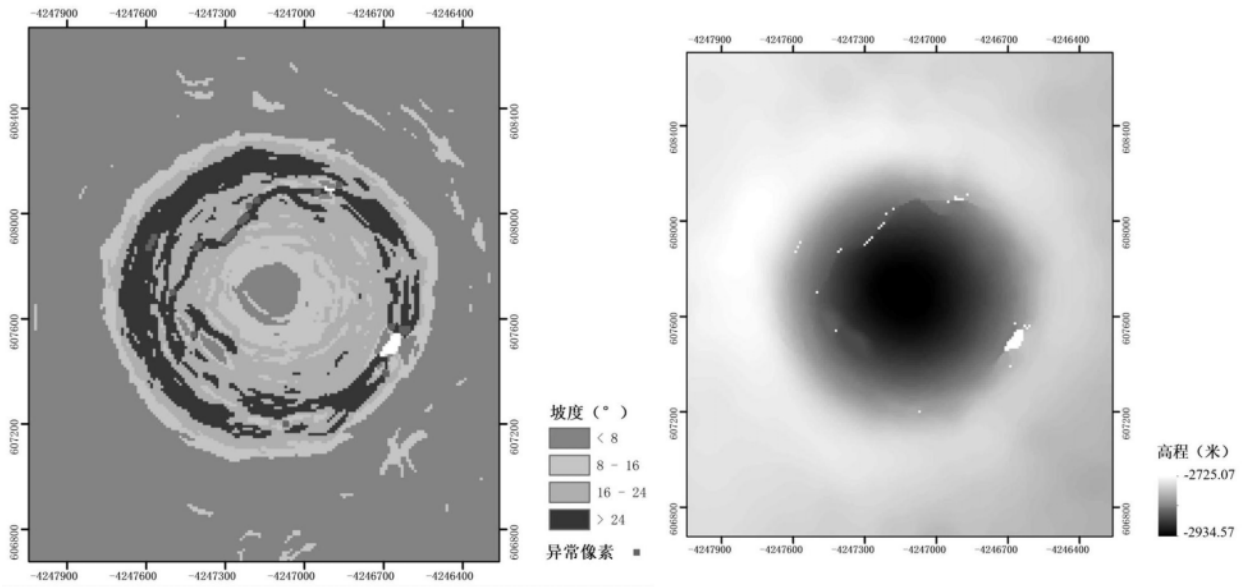


(b) 全局配准前投影点云分布



(c) 全局配准后投影点云分布

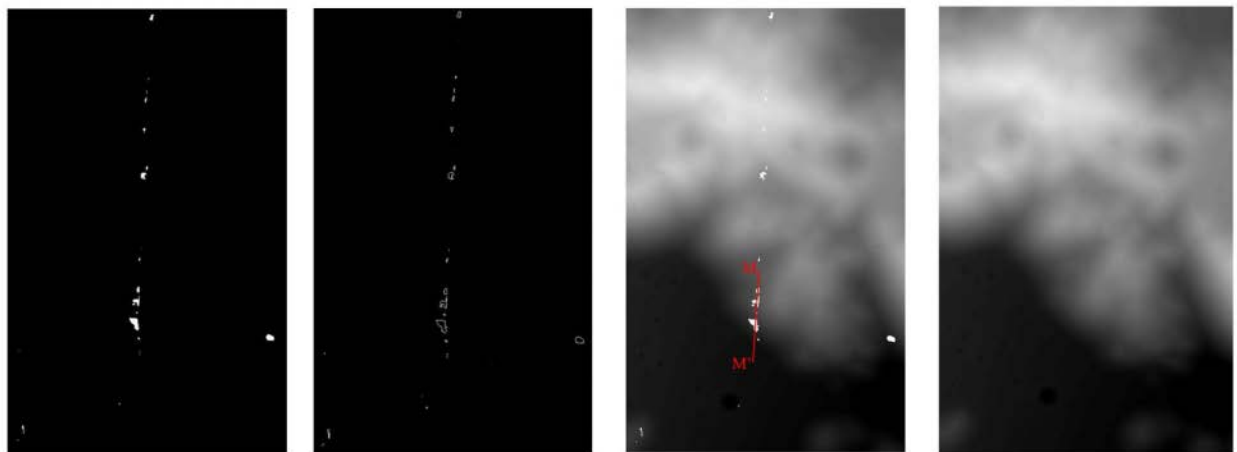
图5



(a) 异常像素检测情况

(b) 剔除异常值后 DEM

图6



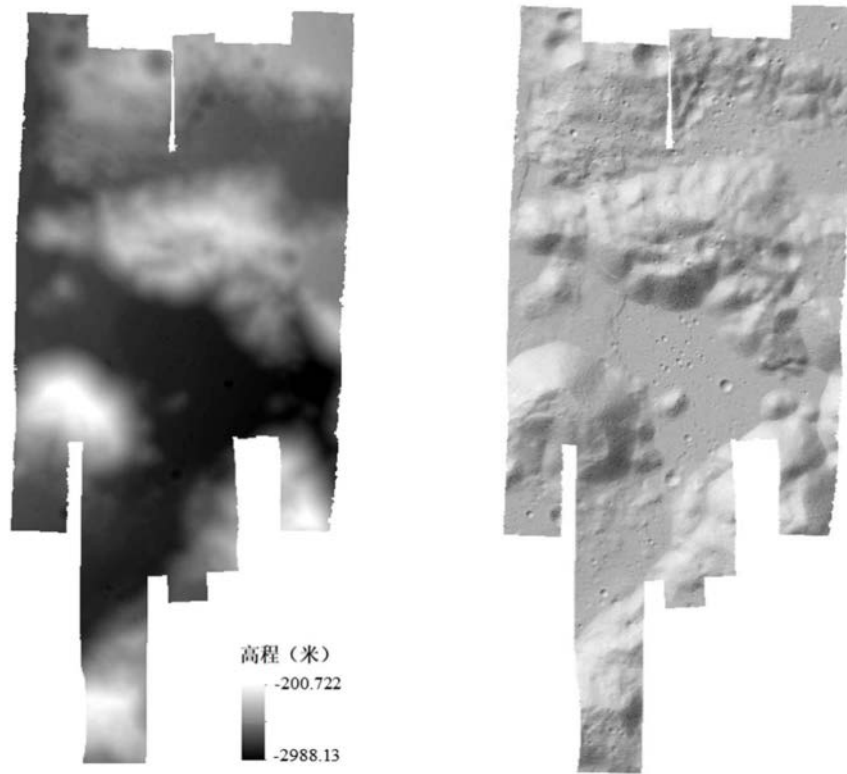
(a) 孔洞二值图

(b) 轮廓检测图

(c) 原始 DEM

(d) 孔洞填补后 DEM

图7



(a) Apollo17 融合 DEM (10m/px) (b) Apollo17 区域山体阴影渲染图

图8