基于嫦娥五号探测器立体监视相机图像的高精度地形重建试验研究

马友青¹, 郑燕红^{2*}, 金晟毅², 张烁¹, 鄢咏折¹, 吴运佳¹, 刘少创¹

1. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100101;

2. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094

* E-mail: zhengyhsince2018@hotmail.com

收稿日期: 2020-12-21; 接受日期: 2021-05-26; 网络版发表日期: 2021-08-27

国家自然科学基金(批准号: 42071447, 41601494)资助项目

摘要 为嫦娥五号探测器表取采样封装任务提供地形信息, 本文提出了基于立体监视相机图像的高精度地形重建方法. 首先阐述了基于立体监视相机图像的高精度地形重建流程, 然后分析了重建点云精度的影响因素. 将实验场内位于机械臂根部坐标系下的实测点云作为基准, 并假设图像重建点云与实测点云仅存在缩放、平移和旋转的固定转换关系, 创新性地提出了粗配准与精配准相结合的点云几何配准方法, 以实现图像地形重建精度的进一步提高. 最后, 通过我国嫦娥五号探测器的表取采样封装试验, 验证了上述假设的合理性, 本文提出的方法具有较高的点云重建精度(图像重建点云与实测点云的平均距离小于6.0 mm; 方差数值低于13.0 mm)和应用稳定性, 降低了地形重建环节中各种因素对点云的综合影响程度, 将进一步运用在嫦娥五号探测器在轨采样封装任务中.

关键词 嫦娥五号探测器, 采样返回, 立体图像, 地形重建, 点云配准

1 引言

在我国探月工程中, 嫦娥五号探测器由着陆器和上升器组成, 于2020年12月1日降落在Mons Rümker区域(40.8°N, 58.1°W)^[1], 实现了区域软着陆及采样返回, 标志着探月工程实现了“绕、落、回”三步走目标. Mons Rümker区域位于风暴洋(Oceanus Procellarum)北部, 整体轮廓近似椭圆形, 最高处高于周围月海表面1.3 km, 面积约3700 km². 该区域分布有大量与火山活动有关的地貌, 如火山穹窿、火山锥、月溪、皱脊等, 是研究月球火山活动历史和火山作用特点的重要区

域^[2,3]. 按照工程任务设计, 返回的月球样品包括月表铲取样和岩芯钻取样两种形式, 样品重量约为2 kg, 钻取样的取样深度小于2 m. 在嫦娥五号探测器在轨表取采样封装任务中, 位于着陆器侧边的立体监视相机提供采样封装设备工作状态的图像信息, 机械臂根据感兴趣目标位置运动至一定位置并释放钻取机构装置. 待月表土壤样品表取结束后, 机械臂将运动至上升器顶部, 释放样品至密封罐里, 完成月表样品采集和封装工作. 因此, 精确的地形信息对表取采样封装任务的成功完成起着极为关键的作用. 在嫦娥五号探测器器地交互过程中, 利用立体监视相机分析机械臂末端

引用格式: 马友青, 郑燕红, 金晟毅, 等. 基于嫦娥五号探测器立体监视相机图像的高精度地形重建试验研究. 中国科学: 技术科学, 2022, 52: 1509–1520
Ma Y Q, Zheng Y H, Jin S Y, et al. Experimental research on a precise terrain reconstruction algorithm based on stereo images for the Chang'E-5 lunar sample return mission (in Chinese). Sci Sin Tech, 2022, 52: 1509–1520, doi: 10.1360/SST-2020-0500

位置, 利用图像信息辅助地面操作人员分析采样过程中关键点的准确状态. 准确生成在机械臂根部坐标系下的采样区域地形和关键点的位置信息, 有利于机械臂展开移动、钻取机构运动等策略的生成, 有利于节省探测器能源、提高工作效率和降低工程任务风险.

嫦娥五号着陆器立体相机系统由一对监视相机、一对全景相机和若干其他相机构成. 其中, 只有立体监视相机感知采样区域的地形信息, 获取立体图像, 如图1所示.

基于立体图像的常规地形重建方法包括相机标定、立体匹配、点云生成和坐标转换等环节. 在相机标定环节, 美国的勇气号和机遇号火星车使用了基于矢量的相机模型^[4,5], 解决了物方坐标系向像方坐标系的变换问题. 张烁和刘少创等人^[6-8]完成了嫦娥三号、四号月球车立体导航、全景相机的高精度标定. 在嫦娥四号“玉兔2号”月球车在轨任务中, 马友青等人^[9-11]提出了相机在轨标定方法. 在立体匹配环节, 方法主要包括相关系数^[12]、区域生长和稠密匹配^[13,14]、动态规划匹配^[15]等, 以实现月面地形的平滑过渡和无缝拼接^[16]. 在点云生成环节, 主要采用前方交会的方法^[10,17-22], 获得在左监视相机坐标系下的图像重建点云. 通过相机标定环节获取的相机外方位元素(相机坐标系与物方坐标系的位姿参数), 即可将上述图像重建点云转换至机械臂坐标系下. 然而, 在嫦娥五号着陆器地面表取采样封装实验和运输过程中, 会进行相机系统拆除和安装等操作, 导致相机与机械臂根部的固定几何关系并非固定不变, 先前标定的相机外方位元素将不再准确. 标定相机外参数的控制场标定方法^[6-8]需

要布设高精度的三维控制场. 三维控制场是一种能够被视觉测量系统感知的立体空间, 通常在空间内放置有标定或测量用特征物体, 如特征点、投射光斑等. 受制于现场试验环境, 该相机标定方法难以经常使用. 另外, 相关学者^[9]通过精确测量相机立方镜坐标系与物方坐标系的位姿参数, 然后利用物方坐标系作为桥梁, 将获得相机坐标系与相机立方镜坐标系的几何位姿关系. 航天器总装立方镜是一种规则的正六面体, 其任意相邻面的垂直度优于 $3''$, 有5个面镀银, 至少有3个面的中心线上刻有细十字丝. 立方镜各面的法线可以直接通过经纬仪进行测量, 并构建立方镜坐标系(简称立方镜系). 因此, 在航天器的研制过程中, 常常用立方镜系来代表器件的空间位置. 在实际测量过程中, 左监视相机基座安装一部立方镜并构建左监视相机立方镜系, 且在嫦娥五号探测器实验、运输过程中保持不变. 然而, 在每次相机重新安装后, 依旧需要借助经纬仪等外测设备测量立方镜系与物方坐标系的位姿关系, 限制了该方法的进一步使用. 因此, 基于立体监视图像的地形重建质量受到了相机标定、密集匹配^[23-25]、坐标转换以及实际任务操作等多种因素的影响, 导致其重建的地形精度较低, 难以满足嫦娥五号探测器的多次表取采样封装任务需求.

在嫦娥五号探测器发射前的表取采样封装实验中, 结构光扫描仪获得在机械臂根部坐标系下的采样区域点云(定义为实测点云), 实现采样区地形的高精度扫描, 以配合机械臂表取采样任务. 实测点云的精度(优于 1.0 mm)要高于图像重建点云, 将实测点云作为基准, 并假设实测点云与图像重建点云仅存在缩放、平移和旋转的固定转换关系, 提出了图像重建点云和实测点云的几何配准方法, 以实现图像地形重建精度的进一步提高. 经过点云几何配准之后, 使图像重建点云尽可能接近实测点云. 在后续的立体监视相机图像地形重建任务中, 将不再需要实测点云.

2 相关工作

点云几何配准是计算机图形学、计算机视觉和机器人领域共同关注的关键问题之一. 给定两片点云模型, 点云几何配准的目标是找出最优的空间变换关系, 使得它们的重叠部分对齐. 影响点云几何配准的因素主要包括^[26]: (1) 噪声(noise)、野值点(outlier)以及空

图1 (网络版彩图)嫦娥五号着陆器结构示意图
Figure 1 (Color online) Structural diagram of the Chang'E-5 probe.

洞的点(missing points)^[27], (2) 较小的点云重叠区域^[28]和遮挡; (3) 点云存在部分相似特征; (4) 点云的分布^[29], 一般来说距离越远, 点云分布较少, 反之, 则分布较多; (5) 点云数量巨大^[30]. 通常, 点云几何配准方法分为粗配准和精配准.

粗配准方法一般基于点特征、角点特征以及线或面构成的特征, 并在此基础上完成对齐. 在描述特征点时, 相关学者提出了三维形状描述子^[31]、自编码器^[32]、语义描述子^[33,34]. 在描述更高层次的广义点特征时, 相关学者从点云中提取直线^[35]、曲线^[36]、平面^[37,38]和曲面^[39], 作为点云配准的约束条件, 以提升点云配准方法的鲁棒性. 相较于点特征提取算子, 广义点特征方法更依赖于场景里的直线、曲线以及平滑曲面等信息, 在自然环境下, 尤其在月球表面环境中, 该方法将不再适用. 特征描述完成后, 通过计算特征之间的相似性进行特征匹配. 然而, 在重复或者相似地形区域, 简单的局部几何特征难以获得最佳匹配, 甚至错匹配. 为抑制野值点和点云分布的不均匀性等引起的错匹配现象, 用体素结构^[40,41]表征点云的方法引起了相关学者的广泛关注.

在点云精配准领域内, 随机采样一致性算法^[42]和迭代最近点(iterative closest point, ICP)算法是运用较为广泛的方法. ICP算法以某一点云为基准, 在当前相对位姿关系下搜索最近点对, 通过最小二乘估计一个刚性变换, 以最小化这些点对的均方距离, 之后更新待变换点云的相对位姿关系, 并迭代此步骤^[43-45]. 然而该方法极易陷入局部极小, 因此两片点云的初始匹配精度和噪声程度极大影响了算法的结果. Bouaziz等人^[46]提出了稀疏ICP算法, 用稀疏范数来替换原来的2-范数, 获得了更好的配准效果. Fitzgibbon^[47]提出了基于Levenberg-Marquardt (LM)算法的点云配准方法, 并融合了Huber核函数, 使其具备一定的抗噪能力. 韩宝昌等人^[48]提出一种区域层次上的自动点云配准算法, 把区域作为基本的配准对象, 将全局配准分解为多个规模更小的区域配准, 通过重叠的区域恢复区域间局部的刚体变换; 其次引入可信性和一致性的概念, 通过求解一个优化问题从一系列区域配准中得到全局配准; 最后用稀疏ICP算法进行精确配准. Biber和Straßer^[49]另辟蹊径, 将点云划分为若干个格网, 并在每个格网内用正态分布函数来拟合属于这个格网内的所有点云, 然后优化待匹配点云位姿信息, 使其匹配该

分布. 这种方法避免了噪声引起的点云误配准问题, 然而仍旧依赖于理想的点云间初始位姿关系和重合率, 易陷入局部极小. 经典的四点一致性(4-points congruent sets, 4PCS)点云粗配准算法及其改进算法^[34], 均采用随机采样一致性策略. 另外, 在点云精配准时, 会遇到数据量较为庞大的情况, 需要采用降采样的策略. 然而, 降采样会损失点云局部细节, 因此, 采用高斯差(difference of Gaussians, DoG)关键点^[28]、简化版点特征直方图(simplified point feature histogram, SPFH)关键点^[44]和尺度不变特征变换(scale invariant feature transform, SIFT)关键点^[45]等特征点提取方法也是一种较好的方案.

无论是粗配准还是精配准方法, 点云几何配准模型仍未运用在月面地形重建中. 本文在常规地形重建方法获得低精度地形点云的基础上, 尝试结合实测点云数据, 采用粗配准与精配准相结合的方案, 实现图像重建点云的进一步配准. 因此, 新方法具有以下优点: (1) 抑制了相机标定、立体匹配和坐标转换步骤引起的地形重建整体误差; (2) 在点云精配准步骤中, 引入了总体最小二乘模型, 有别于常规点云几何配准采用的最小二乘模型, 使其具有更完备的理论性. 在给出嫦娥五号探测器立体监视相机图像重建点云流程的基础上, 本文对点云几何配准模型进行原理的阐述. 通过嫦娥五号探测器(验证器)监视相机图像地形重建试验性的研究, 表明了新方法具有可行性和高精度的特性.

3 嫦娥五号探测器立体监视图像的地形重建流程

嫦娥五号着陆后, 为开展表取和钻取采样工作, 在采样区域生成基于机械臂根部坐标系下的相关地形产品. 机械臂根部坐标系X轴和Y轴构成水平面, Z轴垂直向上, 三轴构成直角坐标系. 首先, 通过地面标定试验场获得相机内方位元素(相机主距、主点以及畸变系数)和相机相对位姿参数, 对立体监视相机图像进行核线校正、密集匹配, 并利用前方交会算法获得点云坐标. 然后, 结合相机外方位元素(监视相机与机械臂根部坐标系的位姿参数), 将上述点云坐标纳入到机械臂根部系下, 即生成图像重建点云. 针对空洞的点云, 需要采用分块克里金内插方法进行点云的修补. 最后, 结

合实测点云, 构建点云几何配准模型, 依次进行点云几何粗配准、精配准, 实现图像重建点云的进一步精化。具体流程如图2所示。

3.1 相机标定

在嫦娥五号探测器发射之前的地面实验中, 布设高精度的三维控制场。三维控制场是一种能够被视觉测量系统感知的立体空间, 通常在空间内放置有标定或测量用特征物体, 如特征点、投射光斑等。本次地面实验的控制场环境如图3所示。

在模拟月壤区域内的地面和测杆上布设116个特征点(作为控制点), 利用三台经纬仪测量出在控制场系下的三维坐标。采用基于Harris算法的角点检测方法^[23]提取控制点对应的图像特征点, 精度优于1 pixels。为获取高精度的相机标定参数, 本文采用基于控制点的相机几何标定模型, 以共线条件方程^[8]为基础, 以图像特征点像点坐标、控制点的测量坐标和相机外方位元素的初始值为输入。对共线条件方程进行线性化:

$$\begin{cases} v_x = \frac{\partial x}{\partial X_S} \Delta X_S + \frac{\partial x}{\partial Y_S} \Delta Y_S + \frac{\partial x}{\partial Z_S} \Delta Z_S + \frac{\partial x}{\partial \varphi} \Delta \varphi \\ \quad + \frac{\partial x}{\partial \omega} \Delta \omega + \frac{\partial x}{\partial \kappa} \Delta \kappa + \frac{\partial x}{\partial f} \Delta f + \frac{\partial x}{\partial x_0} \Delta x_0 \\ \quad + \frac{\partial x}{\partial y_0} \Delta y_0 + \frac{\partial x}{\partial k_1} \Delta k_1 + \frac{\partial x}{\partial k_2} \Delta k_2 \\ \quad + \frac{\partial x}{\partial p_1} \Delta p_1 + \frac{\partial x}{\partial p_2} \Delta p_2 - l_x, \\ v_y = \frac{\partial y}{\partial X_S} \Delta X_S + \frac{\partial y}{\partial Y_S} \Delta Y_S + \frac{\partial y}{\partial Z_S} \Delta Z_S + \frac{\partial y}{\partial \varphi} \Delta \varphi \\ \quad + \frac{\partial y}{\partial \omega} \Delta \omega + \frac{\partial y}{\partial \kappa} \Delta \kappa + \frac{\partial y}{\partial f} \Delta f + \frac{\partial y}{\partial x_0} \Delta x_0 \\ \quad + \frac{\partial y}{\partial y_0} \Delta y_0 + \frac{\partial y}{\partial k_1} \Delta k_1 + \frac{\partial y}{\partial k_2} \Delta k_2 \\ \quad + \frac{\partial y}{\partial p_1} \Delta p_1 + \frac{\partial y}{\partial p_2} \Delta p_2 - l_y, \end{cases} \quad (1)$$

式中, X_S, Y_S, Z_S 为控制场系下的相机外方位线元素; $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, c_1, c_2, c_3$ 构成旋转矩阵 $\mathbf{R}_{S-C}$, 其独立元素为相机外方位角元素 φ, ω, κ ; X, Y, Z 为控制点三维坐标, 在计算过程中视为真值; v_x, v_y 表示像点坐标的改正量; $\Delta X_S, \Delta Y_S, \Delta Z_S$ 和 $\Delta \varphi, \Delta \omega, \Delta \kappa$ 分别表示相机外方位线元素和角元素的增量; $\Delta f, \Delta x_0, \Delta y_0$ 分别表示相机主距 f 和像主点坐标 (x_0, y_0) 的增量; $\Delta k_1, \Delta k_2, \Delta p_1, \Delta p_2$ 表示畸变系数的增量; l_x, l_y 表示残差。将式(1)改写为

图2 (网络版彩图)嫦娥五号探测器立体监视相机图像的地形重建流程示意

Figure 2 (Color online) Workflow of terrain reconstruction based on the stereo images in the Chang'E-5 lunar sample return.

$$\mathbf{V} = \mathbf{B}\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{l} \quad \mathbf{P}, \quad (2)$$

式中, $\mathbf{V} = [v_x \ v_y]^T$ 表示像点坐标的改正量向量; $\mathbf{l} = [l_x \ l_y]^T$ 表示残差向量; $\hat{\mathbf{x}} = [\mathbf{x}_E \ \mathbf{x}_I]^T$ 为相机待标定参数的增量向量; $\mathbf{x}_E = [\Delta X_S \ \Delta Y_S \ \Delta Z_S \ \Delta \varphi \ \Delta \omega \ \Delta \kappa]$ 为相机外方位元素的增量向量; $\mathbf{x}_I = [\Delta f \ \Delta x_0 \ \Delta y_0 \ \Delta k_1 \ \Delta k_2 \ \Delta p_1 \ \Delta p_2]$ 为相机内方位元素的增量。 $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial [\mathbf{x}_E \ \mathbf{x}_I]} & \frac{\partial y}{\partial [\mathbf{x}_E \ \mathbf{x}_I]} \end{bmatrix}^T$ 为系数矩阵, 具体表达式见文献^[9]。 $\mathbf{P}$ 表示权矩阵。对式(2)进行间接平差^[24]得到

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{N}_{BB}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{l}, \quad (3)$$

式中, $\mathbf{N}_{BB} = \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{B}$; 单位权方差为 $\sigma_0 = \sqrt{\mathbf{V}^T \mathbf{P} \mathbf{V} / (n - u)}$, n 表示观测值总数, u 表示待估计参数的个数。参数中误差为 $\sigma_{\hat{\mathbf{x}}} = \sigma_0 \sqrt{\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}}}}$, $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{x}}\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{N}_{BB}^{-1}$, 表示待标定参数的协

图 3 (网络版彩图)嫦娥五号探测器立体监视相机图像和对应的三维控制场
Figure 3 (Color online) Stereo images and the corresponding control field in the ground experiment.

因数矩阵, 即所有待标定参数的理论精度数值。

通过公共连接点(控制点)计算控制场系与机械臂根部系的位姿关系, 然后通过控制场系作为桥梁, 将机械臂根部系与左监视相机系关联起来, 即将式(2)计算的立体相机外方位元素纳入到机械臂根部系下。同时, 以左监视相机系为基准, 将立体相机外方位元素进一步计算出监视相机相对位姿参数。

3.2 密集匹配

根据上述监视相机相对位姿参数进行图像的核线校正, 获得核线校正后的图像。在立体核线图像间自动匹配一些支持像点(support points)^[25], 然后以这些点为顶点, 进行Delaunay三角化处理, 获得三角形面片, 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, 具体步骤如下。

(1) 自动匹配支持像点。对立体核线图像进行 9×9 像素窗口的竖直和水平方向的Sobel滤波^[25], 获得候选像点的向量, 并对该向量进行 L_1 范数计算, 获得足够数量的稳健支持像点集合 S 。设置最优匹配和次优匹配的匹配阈值, 以剔除错误的支持像点。

(2) 对支持像点集合 S 进行Delaunay三角化处理, 形成多个三角形区域。在每个三角形内, 基于三个顶点(支持像点)的已知精确视差值进行最大验后估计, 并插值该三角区域内其他像点的视差 d_n^* :

$$d_n^* = \operatorname{argmax}_p(d_n, o_n^{\text{left}}, o_1^{\text{right}}, \dots, o_N^{\text{right}}, S), \quad (4)$$

式中, d_n 为视差, o_n^{left} 和 o_n^{right} 为同名匹配像点,

$$p(d_n, o_n^{\text{left}}, o_n^{\text{right}}, S) \propto p(d_n | o_n^{\text{left}}, S) p(o_n^{\text{right}} | o_n^{\text{left}}, d_n),$$

符号 $\propto$ 表示正比例, N 为其他像点的数量。

(3) 匹配验证: 对左右视差图像进行连续性检查, 在一定阈值范围内, 可视为视差最优估计。

3.3 图像重建点云生成

利用获取到的视差图, 通过前方交会(三角测量), 获得在左监视相机系下的三维点云。然后通过左监视相机外方位元素, 将点云坐标转换到机械臂根部系下, 即生成图像重建点云。另外, 立体监视相机因为视角的原因无法获得石块、月坑等地面的部分信息, 导致重建的点云出现空洞现象, 需采用分块克里金内插方法进行修补。

3.4 图像重建点云的几何配准

在嫦娥五号探测器表取采样封装实验中, 利用cloudcompare软件中的点云距离计算模块统计图像重建点云与实测点云的距离, 如图4所示。

在图4中, 彩色点云为图像重建点云, 灰色的点云为实测点云, 图像重建点云与实测点云的距离用不同颜色进行区域配色, 且两种点云的区域一致。统计的距离如图5所示。

在图5中, 横坐标表示点云的距离差, 单位为mm, 纵坐标代表特定距离下的点的数量。经过统计, 图像重建点云与实测点云的距离的平均值为14.3 mm, 标准差为22.1 mm。与表取机械臂与探测器及器表设备的安全设置距离(10 mm)相比较, 图像重建点云的精度难以保

图4 图像重建点云与实测点云示意

Figure 4 Diagram of the terrain reconstruction result and the measured 3D points.

图5 点云距离与点的数量分布图

Figure 5 Distribution diagram of the distance and the number of the point cloud.

证表取和钻取机构工作的安全性。另外,从图4中可以发现,相对于实测点云,图像重建点云在高程方向上存在左低右高的现象,即存在一定角度的旋转。

立体监视相机相对位姿参数和图像视差使图像重建点云间距存在缩放现象,坐标转换使图像重建点云存在平移和旋转现象。因此,本文假设图像重建点云与实测点云存在缩放、平移和旋转的固定转换关系。通过图像重建点云与实测点云的几何配准(包含几何粗配准和精配准),以提高采样区域点云的重建精度。

3.4.1 几何粗配准

在几何粗配准阶段,(1)首先对图像重建点云与实

测点云进行降采样处理,减小点云数据大小。(2)在此基础上,计算三维点的法线和快速点特征直方图(fast point feature histogram, FPFH)特征^[31]。在计算FPFH时,分别计算查询点 p 的 k 邻域中的SPFH,然后再加权生成最后的FPFH。

$$FPFH(p) = SPFH(p) + \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \left(\frac{1}{w_k} \cdot SPFH(p_k) \right), \quad (5)$$

式中, w_k 为权重,表示查询点 p 与邻近点 p_k 之间的距离。(3)从图像重建点云里选取 n 个采样点,且采样点之间的距离需大于设定的阈值。在实测点云里查找与上述采样点具有FPFH特征最高相似度的一个点作为对应的匹配点。通过该步骤,将生成 n 个匹配点对。(4)采用随机采样一致性方法,对上述 n 个匹配点对进行配准,当满足变换后的“距离误差和”函数最小时,即表明该次变换为最优变换。通过该步骤,完成图像重建点云与实测点云之间的几何粗配准,为后续的几何精配准提供点云刚体转换的初始值。

3.4.2 几何精配准

在精配准阶段,(1)对几何粗配准的图像重建点云的每一个点 p_i^1 ,寻找在实测点云里距离最近的对应点 p_i^2 ,组成初始对应点对。(2)根据方向向量阈值进行初始对应点对的剔除,保留对应关系较好的点对。(3)采用随机采样一致性方法和总体最小二乘方法实现点云的最优配准^[10],即对应点集之间的距离均方误差最小。传统点云几何精配准一般采用基于高斯马尔科夫模型(GM模型)的最小二乘方法,但其前提是偶然误差只存在于观测向量中,系数矩阵不含有误差。然而在点云几何精配准模型(相似三维变换模型)中,观测向量与系数矩阵均存在误差,需要建立总体最小二乘模型:

$$\mathbf{C}_{n \times 3} = \rho \mathbf{D}_{n \times 3} \boldsymbol{\xi} + \mathbf{1}_{n \times 1} \mathbf{T}, \quad (6)$$

式中,点云几何配准参数为点云间的平移向量 $\mathbf{T} = [\Delta X \ \Delta Y \ \Delta Z]^T$ 、 3×3 的旋转矩阵 $\boldsymbol{\xi}$ (由 φ, ω, κ 等3个独立角元素构成)和比例系数 ρ 。在式(6)中,下标 n 为对应点对的个数, $\mathbf{C}_{n \times 3}$ 和 $\mathbf{D}_{n \times 3}$ 分别为实测点云和图像重建点云中 n 个三维点坐标构成的矩阵, $\mathbf{1}_{n \times 1}$ 为元素为1的向量。在实测点云中,坐标测量精度为0.2 mm。将实测点云和图像重建点云中的三维坐标视为观测值时,令其含有随机误差 $\mathbf{E}_C, \mathbf{E}_D$ 。当误差平方和满足

$\text{sum} = \text{vec}(\mathbf{E}_C)^T \mathbf{W}_C \text{vec}(\mathbf{E}_C) + \text{vec}(\mathbf{E}_D)^T \mathbf{W}_D \text{vec}(\mathbf{E}_D)$ 最小时, 采用正交Procrustes和总体最小二乘平差获得点云几何配准参数^[10]. $\mathbf{W}_C$ 和 $\mathbf{W}_D$ 为实测点云和图像重建点云坐标观测量的权矩阵, 表示其精度. vec 为矩阵拉直运算. 一般来说, 相较于图像重建点云, 实测点云的精度要高两个数量级以上. 在采用随机采样一致性方法时, 统计该次测试点对的均方根误差 $\sigma_0 = \sqrt{\text{sum}/(N-7)}$, $N = 2 \times 3 \times n$ 为观测量总数. 当某次测试的均方根误差最小时, 该次计算的点云配准参数作为最终的计算结果, 使图像重建点云更接近实测点云, 完成高精度的点云重建流程.

4 试验验证

在验证本文提出的高精度点云重建方法时, 需构建满足嫦娥五号探测器采样封装实验任务的测试场. 在中国空间技术研究院室内试验场里, 布置一台与嫦娥五号探测器(正样器)功能和性能一致的验证器. 在相机标定阶段, 布置如图6所示的控制场, 控制场位于表取采样区域内. 放置20个不同高度的测杆, 利用三台经纬仪测量116个靶标点在控制场系下的三维坐标.

4.1 相机几何标定测试

在测试相机几何标定时, 利用控制点(56个靶标点)和立体图像数据. 本文采用基于Harris算法的角点检测方法^[23]提取控制点对应的图像特征点, 特征提取精度优于1 pixel. 在应用式(3)时, 算法收敛(收敛次数为5)时的单位权方差 σ_0 为0.42 pixel. 立体监视相机的标定参数如表1和2所示.

在表1中, 畸变系数 k_1 , k_2 , p_1 , p_2 已经转换为Tasi模型^[50], 适用于opencv视觉库.

在此基础上, 对其余60个靶标点进行立体图像测量, 获得其在控制场下的三维坐标 (X_1, Y_1, Z_1) , 结合经纬仪的测量坐标 (X_2, Y_2, Z_2) , 其图像测量精度 $\Delta = \sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2 + (Z_1 - Z_2)^2}$ 如图7所示.

从图7可以看到, 靶标点与机械臂根部的距离为1.5~4.0 m, 其图像测量精度为0.1~21.8 mm, 平均值为3.4 mm. 同时, 随着距离的增大, 靶标点的图像测量精度数值呈指数型增大, 表示图像测量精度显著降低.

由于在上述相机标定测试结束后, 相机底座继续

图6 (网络版彩图)控制点分布图

Figure 6 (Color online) Distribution diagram of the control points.

表1 监视相机A/B的内方位元素

Table 1 Inner orientation elements of the stereo camera A/B

参数项	监视相机A	监视相机B
f (pixel)	2102.09	2102.74
x_0 (pixel)	1182.76	1206.91
y_0 (pixel)	858.57	902.13
k_1	-0.024769037	-0.01737311
k_2	-0.003973396	-0.041371328
p_1	0.0000295619	-0.000354846
p_2	-0.000722025	-0.000610306

表2 监视相机A/B的相对位姿参数

Table 2 Relative attitude and position parameters of the stereo camera A/B

旋转矩阵			位移向量 (mm)
0.999993	-0.003562	0.000815	-200.195
0.003568	0.999969	-0.006916	-0.969
-0.000790	0.006919	0.999975	-1.105

进行了多次拆装, 因此, 在后续的表取采样封装实验中, 相机内方位元素和相机相对位姿参数可视为保持不变, 但是左监视相机的外方位元素将发生某种程度的变化. 下一节将以表取采样封装实验的测试数据进

图 7 (网络版彩图)靶标点图像测量精度与距离的关系
Figure 7 (Color online) Distribution diagram of the 3D measured precision and the distance of the target points.

行地形重建测试。

4.2 表取采样区域地形重建测试

为验证本文提出的高精度地形重建方法, 首先, 将承载月壤的平板结构水平放置, 立体监视相机成像; 然后, 结合结构光扫描仪获取的实测点云, 利用本文提出的地形重建方法, 以获取图像重建点云与实测点云的几何配准参数, 如表3所示; 最后, 统计修正后的图像重建点云与实测点云的距离差, 如图8所示。

在计算FPFH特征值时, 搜索半径设置为0.05 m。依据未配准的点云重建精度(平均值为14.3 mm)和实测点云的测量精度(0.2 mm), 将对角矩阵 $\mathbf{W}_C$ 和 $\mathbf{W}_D$ 的元素分别设为70和1。点云配准模型的均方根误差 σ_0 为0.316 mm, 比例系数 ρ 为1.00189。

在图8中, 横坐标表示点云的距离差, 单位为mm, 纵坐标代表特定距离下的点的数量。经过统计, 图像重建点云与实测点云的距离的平均值为-0.09 mm, 标准差为8.84 mm。相较于未修正的点云重建精度(平均值为14.3 mm, 标准差为22.1 mm), 修正后的点云精度有了明显的提升。图9给出了立体图像重建表取采样区域的稠密点云。

为进一步验证不同场景下图像重建点云方法的适用性, 首先, 将平板结构倾斜放置(与水平面呈 $\pm 3^\circ$); 然后立体监视相机成像, 同时结构光扫描仪进行地形扫描获得实测点云; 最后, 结合表3和立体图像, 生成精细化后的图像重建点云, 统计其与实测点云的距离。

图10(a)和图11(a)为未采用几何配准参数的图像重建点云与实测点云的距离统计结果, 平均精度分别为26.85和-20.49 mm, 方差分别为9.88和16.16 mm。

表 3 图像重建点云与实测点云的几何配准参数

Table 3 Geometric registration parameters between the reconstructed and measured points

旋转矩阵			位移向量 (mm)
0.993563	-0.004419	0.002663	-11.411
0.004432	0.993555	-0.004792	-16.742
-0.002641	0.004804	0.993561	-14.019

图 8 (网络版彩图)点云距离与点的数量分布(水平放置)
Figure 8 (Color online) Distribution diagram of the distance and the number of the point cloud (horizontal direction).

图 9 (网络版彩图)立体图像重建表取采样区域的稠密点云
Figure 9 (Color online) Dense point cloud in the sampling area.

图10(b)和图11(b)为采用几何配准参数后的图像重建点云与实测点云的距离统计结果, 平均精度分别为5.17和4.36 mm, 方差分别为6.37和12.77 mm。

通过对比图10和11, 图像重建点云经过修正后, 平均距离和方差数值更小, 即图像重建点云与实测点云的平均距离小于6.0 mm, 方差数值低于13.0 mm, 表明本文假设的图像重建点云与实测点云仅存在缩放、平

图 10 (网络版彩图)点云距离与点的数量分布(平板结构水平向下 3°). (a) 未进行点云配准; (b) 已进行点云配准

Figure 10 (Color online) Distribution diagrams of the distance and the number of the point cloud (downward). (a) Before point registration; (b) after point registration.

图 11 (网络版彩图)点云距离与点的数量分布(平板结构水平向上 3°). (a) 未进行点云配准; (b) 已进行点云配准

Figure 11 (Color online) Distribution diagrams of the distance and the number of the point cloud (upward). (a) Before point registration; (b) after point registration.

移和旋转的固定转换关系是可行的, 且生成的地形数据能满足高精度的地形重建要求(10 mm).

需要说明的是, 为解决图8、10以及11中方差数值较大的问题, 需要采取下面两种措施. 由于立体相机视角的原因, 月坑、石头等局部区域存在地形遮挡的情况, 图像重建点云存在空洞的情况, 即使采用分块克里金内插方法进行点云的修补, 也难以真实模拟局部实际地形. 因此, 在统计图像重建点云的精度时, 可采取将图像重建点云的空白区域不作为评价点云精度的输入数据. 另外, 改善图像重建点云的质量也是提高点云精度的一种途径. 对图像重建点云进行Delaunay三角化和平滑处理, 在保证点云局部细节的同时, 对点

云噪点进行剔除. 以图11中的图像重建点云为例, 经过上述两步骤的处理, 图像重建点云与实测点云的距离平均值为2.31 mm, 方差为7.86 mm.

5 结果与讨论

本文以我国嫦娥五号探测器采样返回任务中的地形重建问题为研究对象, 提出了基于立体监视相机图像的高精度地形重建方法, 并利用嫦娥五号探测器(验证器)的地面试验数据进行验证, 得到以下结论.

(1) 基于立体监视相机图像的高精度地形重建方法能够获取精细地形信息, 为机械臂表取和钻取采样

任务提供基础数据, 图像重建点云与实测点云的平均距离小于6.0 mm, 方差数值低于13.0 mm.

由于图像地形重建步骤包含了相机标定、密集匹配、前方交会和坐标转换等流程, 同时考虑到采样封装任务中监视相机的多次拆装, 导致原先标定的相机外方位元素(相当于原先的坐标转换参数)不再准确, 即坐标转换精度显著降低. 因此, 影响地形重建精度的因素包括相机标定精度、密集匹配精度、坐标转换精度等. 本文提出的高精度地形重建方法在常规图像点云重建结果的基础上, 假设图像重建点云与实测点云仅存在缩放、平移和旋转的固定转换关系, 利用实测点云数据进行图像重建点云的误差修正和精化. 因此, 本文提出的地形重建方法具有以下优点: (i) 降低了地

形重建环节中各种因素对点云的综合影响程度, 提高了地形重建的整体精度; (ii) 验证了图像重建点云与实测点云存在缩放、平移和旋转的固定转换关系假设的合理性, 在点云几何配准中引入了总体最小二乘模型, 有别于常规最小二乘模型, 使其具有更完备的理论性; (iii) 方法在地面实验的验证下具有一定的适用性, 对嫦娥五号在轨采样任务具有一定的指导意义.

(2) 由于涉及图像密集匹配, 基于立体监视相机图像的高精度地形重建方法与图像成像质量等密切相关. 月球表面无大气存在, 图像易出现曝光过度、弱纹理等情况, 将影响图像密集匹配的精度, 进而影响地形重建效果. 因此, 研究特殊环境下的图像密集匹配是后续研究和工程实践的一个重要方向.

参考文献

- Li F, Zhu C, Hao W, et al. An improved digital elevation model of the lunar mons rümker region based on multisource altimeter data. *Remote Sens*, 2018, 10: 1442
- Qian Y Q, Xiao L, Zhao S Y, et al. Geology and scientific significance of the Rümker region in northern Oceanus Procellarum: China's Chang'E-5 landing region. *J Geophys Res Planets*, 2018, 123: 1407–1430
- Hao W, Zhu C, Li F, et al. Illumination and communication conditions at the Mons Rümker region based on the improved Lunar Orbiter Laser Altimeter data. *Planet Space Sci*, 2019, 168: 73–82
- Di K, Li R. CAHVOR camera model and its photogrammetric conversion for planetary applications. *J Geophys Res*, 2004, 109: E04004
- Gennery D B. Generalized camera calibration including fish-eye lenses. *Int J Comput Vision*, 2006, 68: 239–266
- Zhang S, Li Q Z, Wen B, et al. Orthogonal projection model of Jade Rabbit lunar rover pancam (in Chinese). *Geomat Inform Sci Wuhan Univ*, 2014, 39: 804–808 [张烁, 李群智, 温博, 等. 玉兔号月球车全景相机的正交变换投影模型. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2014, 39: 804–808]
- Liu S C, Jia Y, Ma Y Q, et al. High precision localization of the Chang'E-3 lunar rover (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2015, 60: 372–378 [刘少创, 贾阳, 马友青, 等. 嫦娥三号月面巡视月球车高精度定位. *科学通报*, 2015, 60: 372–378]
- Zhang S, Xu Y M, Liu S C, et al. Calibration of Chang'E-3 lunar rover stereo-camera system based on control field (in Chinese). *Geomat Inform Sci Wuhan Univ*, 2015, 40: 1509–1513 [张烁, 徐亚明, 刘少创, 等. 嫦娥-3号月面巡视探测器立体相机的控制场检校. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2015, 40: 1509–1513]
- Ma Y Q, Peng S, Wen B, et al. Experimental research of precise terrain occlusion prediction algorithm based on image sequences of the Chang'E-4 lunar rover (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2020, 50: 54–68 [马友青, 彭松, 温博, 等. 基于嫦娥四号月球车图像的地形遮挡高精度预报试验研究. *中国科学: 技术科学*, 2020, 50: 54–68]
- Ma Y Q, Liu S C, Jia Y, et al. Experimental research of navigation and localization algorithm based on stereo images for the lunar rover (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2014, 44: 1097–1104 [马友青, 刘少创, 贾阳, 等. 基于立体图像的月球车导航定位试验研究. *中国科学: 技术科学*, 2014, 44: 1097–1104]
- 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
- Xu F, Di K, Li R, et al. Automatic feature registration and DEM generation for martian surface mapping. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXIV, Part 2, ISPRS Commission II. Xi'an, 2002. 549–554
- Hou J, Qi N M. Stereo matching algorithm for lunar rover (in Chinese). *J Nanjing Univ Sci Technol*, 2008, 32: 176–180 [侯建, 齐乃明. 月球车视觉系统立体匹配算法研究. *南京理工大学学报(自然科学版)*, 2008, 32: 176–180]
- Dai X B, Wang L, Ju H H. A method of environment reconstruction for lunar rover (in Chinese). *Comput Measure Control*, 2011, 19: 1699–1701

[戴宪彪, 王亮, 居鹤华. 一种月球车的环境重建方法. 计算机测量与控制, 2011, 19: 1699–1701]

- 15 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]
- 16 Wu W R, Zhou J L, Wang B F, et al. Key technologies in the teleoperation of Chang'E-3 "Jade Rabbit" rover (in Chinese). *Sci China Inf Sci*, 2014, 44: 425–440 [吴伟仁, 周建亮, 王保丰, 等. 嫦娥三号“玉兔号”巡视器遥操作中的关键技术. 中国科学: 信息科学, 2014, 44: 425–440]
- 17 Di K, Xu F, Wang J, et al. Photogrammetric processing of rover imagery of the 2003 Mars Exploration Rover mission. *ISPRS J Photogramm Remote Sens*, 2008, 63: 181–201
- 18 Liu Z Q, Di K C, Peng M, et al. High precision landing site mapping and rover localization for Chang'e-3 mission. *Sci China-Phys Mech Astron*, 2015, 58: 1–11
- 19 Ma Y Q. Research on navigation and localization of CE-3 lunar rover (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Wuhan: Wuhan University, 2014. 32–40 [马友青. 嫦娥三号月面巡视月球车导航定位技术研究. 博士学位论文. 武汉: 武汉大学, 2014. 32–40]
- 20 Olson C F, Abi-Rached H. Wide-baseline stereo vision for terrain mapping. *Machine Vision Appl*, 2010, 21: 713–725
- 21 Di K, Peng M. Wide baseline mapping for mars rovers. *Photogramm Eng Remote Sens*, 2011, 77: 609–618
- 22 Peng M, Wan W H, Wu K, et al. Topographic mapping capability analysis of Chang'e-3 Navcam stereo images and three-dimensional terrain reconstruction for mission operations (in Chinese). *J Remote Sens*, 2014, 18: 995–1002 [彭嫚, 万文辉, 吴凯, 等. 嫦娥三号导航相机测图能力分析 & 地形重建. 遥感学报, 2014, 18: 995–1002]
- 23 Harris C G, Stephens M. A combined corner and edge detector. In: *Proceedings of the 4th Alvey Vision Conference*. Alvey, 1988. 147–151
- 24 Zhang J Q, Pan L, Wang S G. Photogrammetry (in Chinese). 2nd ed. Wuhan: Wuhan University Press, 2009. 54–72 [张剑清, 潘励, 王树根. 摄影测量学. 第二版. 武汉: 武汉大学出版社, 2009. 54–72]
- 25 Geiger A, Roser M, Urtasun R. Efficient large-scale stereo matching. In: *10th Asian Conference on Computer Vision*. Queenstown, 2010
- 26 Xu Y, Boerner R, Yao W, et al. Pairwise coarse registration of point clouds in urban scenes using voxel-based 4-planes congruent sets. *ISPRS J Photogramm Remote Sens*, 2019, 151: 106–123
- 27 Zai D, Li J, Guo Y, et al. Pairwise registration of TLS point clouds using covariance descriptors and a non-cooperative game. *ISPRS J Photogramm Remote Sens*, 2017, 134: 15–29
- 28 Theiler P W, Wegner J D, Schindler K. Globally consistent registration of terrestrial laser scans via graph optimization. *ISPRS J Photogramm Remote Sens*, 2015, 109: 126–138
- 29 Hackel T, Wegner J D, Schindler K. Fast semantic segmentation of 3D point clouds with strongly varying density. In: *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume III-3. Prague, 2016. 177–184
- 30 Theiler P W, Wegner J D, Schindler K. Keypoint-based 4-Points Congruent Sets – Automated marker-less registration of laser scans. *ISPRS J Photogramm Remote Sens*, 2014, 96: 149–163
- 31 Rusu R B, Blodow N, Beetz M. Fast point feature histograms (FPFH) for 3D registration. In: *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Kobe, 2009. 3212–3217
- 32 Elbaz G, Avraham T, Fischer A. 3D point cloud registration for localization using a deep neural network auto-encoder. In: *2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. Honolulu, 2017
- 33 Yang B, Dong Z, Liang F, et al. Automatic registration of large-scale urban scene point clouds based on semantic feature points. *ISPRS J Photogramm Remote Sens*, 2016, 113: 43–58
- 34 Ge X. Automatic markerless registration of point clouds with semantic-keypoint-based 4-points congruent sets. *ISPRS J Photogramm Remote Sens*, 2017, 130: 344–357
- 35 Habib A, Ghanma M, Morgan M, et al. Photogrammetric and lidar data registration using linear features. *Photogramm Eng Remote Sens*, 2005, 71: 699–707
- 36 Yang B, Zang Y. Automated registration of dense terrestrial laser-scanning point clouds using curves. *ISPRS J Photogramm Remote Sens*, 2014, 95: 109–121
- 37 Xiao J, Adler B, Zhang J, et al. Planar segment based three-dimensional point cloud registration in outdoor environments. *J Field Robot*, 2013, 30: 552–582
- 38 Xu Y, Boerner R, Yao W, et al. Automated coarse registration of point clouds in 3D urban scenes using voxel based plane constraint. *ISPRS Ann Photogramm Remote Sens Spatial Inf Sci*, 2017, IV-2/W4: 185–191

- 39 Ge X, Wunderlich T. Surface-based matching of 3D point clouds with variable coordinates in source and target system. *ISPRS J Photogramm Remote Sens*, 2016, 111: 1–12
- 40 Vo A V, Truong-Hong L, Laefer D F, et al. Octree-based region growing for point cloud segmentation. *ISPRS J Photogrammetry Remote Sens*, 2015, 104: 88–100
- 41 Wang J, Lindenbergh R, Shen Y, et al. Coarse point cloud registration by EGI matching of voxel clusters. *ISPRS Ann Photogramm Remote Sens Spatial Inf Sci*, 2016, III-5: 97–103
- 42 Fischler M A, Bolles R C. Random sample consensus. *Commun ACM*, 1981, 24: 381–395
- 43 Besl P J, McKay N D. A method for registration of 3-D shapes. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell*, 1992, 14: 239–256
- 44 Weber T, Hänsch R, Hellwich O. Automatic registration of unordered point clouds acquired by kinect sensors using an overlap heuristic. *ISPRS J Photogramm Remote Sens*, 2015, 102: 96–109
- 45 Weinmann M, Weinmann M, Hinz S, et al. Fast and automatic image-based registration of tls data. *ISPRS J Photogramm Remote Sens*, 2011, 66: S62–S70
- 46 Bouaziz S, Tagliasacchi A, Pauly M. Sparse iterative closest point. *Comput Graphics Forum*, 2013, 32: 113–123
- 47 Fitzgibbon A W. Robust registration of 2D and 3D point sets. *Image Vision Comput*, 2002, 21: 1145–1153
- 48 Han B C, Cao J J, Su Z X. Automatic point clouds registration based on regions (in Chinese). *J Computer-Aided Design Computer Graphics*, 2015, 27: 313–319 [韩宝昌, 曹俊杰, 苏志勋. 一种区域层次上的自动点云配准算法. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2015, 27: 313–319]
- 49 Biber P, Straßer W. The normal distributions transform: A new approach to laser scan matching. In: *Proceedings 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003)*. Las Vegas: IEEE, 2003. 2743–2748
- 50 Tsai R Y. An efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision. In: *The Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Miami Beach, 1986. 364–374

Experimental research on a precise terrain reconstruction algorithm based on stereo images for the Chang'E-5 lunar sample return mission

MA YouQing¹, ZHENG YanHong², JIN ShengYi², ZHANG Shuo¹, YAN YongZhe¹,
WU YunJia¹ & LIU ShaoChuang¹

¹ *Aerospace Information Research Institute of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;*

² *Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China*

An exact terrain reconstruction algorithm based on stereo images is proposed for the Chang'E-5 lunar sample return mission. First, the paper presents a brief introduction to the proposed algorithm. Then, an analysis of the factors influencing terrain reconstruction and the geometric transformation model between the reconstructed and measured points are described. Finally, some conclusions drawn based on the experiment results of China's Chang'E-5 probe system are presented. The approved algorithm can achieve high accuracy (the mean distance between the reconstructed and measured points was less than 6.0 mm, and the variance was less than 13.0 mm) and stability for terrain reconstruction.

Chang'E-5 probe system, sample return, stereo images, terrain reconstruction, point registration

doi: [10.1360/SST-2020-0500](https://doi.org/10.1360/SST-2020-0500)