

张今, 王亚琼, 陈杰. 基于运动恢复结构的小行星三维重构和形貌分析[J]. 智能计算机与应用, 2024, 14(4): 136–140. DOI: 10.20169/j.issn.2095-2163.240420

## 基于运动恢复结构的小行星三维重构和形貌分析

张今<sup>1,2</sup>, 王亚琼<sup>1,2</sup>, 陈杰<sup>1,2</sup>

(1 上海市航天测绘遥感与空间探测重点实验室, 上海 200092; 2 同济大学 测绘与地理信息学院, 上海 200092)

**摘要:** 小行星探测已成为深空探测中重要内容, 三维重建是小行星探测过程中的关键步骤, 对探测器导航、探测区域选址、引力场建模等均具有重要意义。本文研究了利用运动恢复结构的小行星三维重构方法, 利用小行星 162173Ryugu 与 25143Itokawa 的探测数据构建了其三维形状重构, 分析了建模结果, 探索了改进方式, 并根据重构结果对 162173Ryugu 进行了形貌分析, 对 162173Ryugu 表面的陨石坑进行了识别与分类。研究表明, 利用运动恢复结构方法可以有效地构建小行星的三维形貌, 支撑小行星探测任务。

**关键词:** 小行星探测; 三维形状重构; 形貌分析; 运动恢复结构

中图分类号: P183; TP391.41

文献标志码: A

文章编号: 2095-2163(2024)04-0136-05

## Shape reconstruction and topography analysis of asteroids with structure-from-motion

ZHANG Jin<sup>1,2</sup>, WANG Yaqiong<sup>1,2</sup>, CHEN Jie<sup>1,2</sup>

(1 Shanghai Key Laboratory of Space Mapping and Remote Sensing for Planetary Exploration, Shanghai 200093, China;

2 College of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai, 200092)

**Abstract:** Asteroid detection has become an important part of deep space exploration. Three-dimensional reconstruction is a key step in asteroid detection, which is of great significance to probe navigation, detection area location and gravitational field modeling. In this paper, the three-dimensional reconstruction method of the asteroid using the motion recovery structure is studied, and the three-dimensional shape reconstruction of the asteroid 162173Ryugu and 25143Itokawa is constructed by using the detection data of the asteroid, the modeling results are analyzed and the improvement methods are explored, and the morphology of 162173Ryugu is analyzed according to the reconstruction results. The craters on the surface of 162173Ryugu were identified and classified. The study shows that the motion recovery structure method can effectively construct the three-dimensional morphology of the asteroid and support the asteroid detection mission.

**Key words:** asteroid exploration; three-dimensional shape reconstruction; topography analysis; structure-from-motion

## 0 引言

小行星探测是未来航天活动的重要方向<sup>[1-2]</sup>。在小行星探测过程中, 三维重构是小行星探测器导航与小行星表面着陆的必要先决条件<sup>[3-5]</sup>。Walsh 等<sup>[6]</sup>的研究表明, 精确的三维重构模型能够为小行星探测的轨道修正、引力场建模、着陆区选址等任务提供支撑, 也能够帮助探测器在着陆过程中更好地避障与实时操作。例如 Hayabusa2 等探测器进行采样任务时利用高精度细致三维模型进行了探测最优选取<sup>[7]</sup>。此外, Yada 等<sup>[8]</sup>结合小行星样本与三

维模型, 可有效分析小行星地形地貌的形成原因; 同时, Sakatani 等<sup>[7]</sup>提出在分析小行星内部结构与演化过程时, 三维模型也常用于重要参考。

受限于深空小行星观测距离, 利用地面对小行星的观测数据构建的三维形状模型精度往往很难满足探测任务需求<sup>[9]</sup>。因此需要借助探测过程中的雷达数据和图像观测数据进行三维重建, 主要的研究方法包括两类: 一类是通过辐射或机械技术, 基于结构光技术的 Kinect 传感器和 ToF (Time of Flight) 相机的主动方法; 另一类是对目标物体的反射情况进行测量, 使用基于图像处理的方式来解算物体的

基金项目: 国家自然科学基金项目(41822106)。

作者简介: 张今(1999-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 深空测绘遥感。Email: 2133691@tongji.edu.cn

收稿日期: 2024-01-06

三维结构的被动方法<sup>[10]</sup>。

Demura 等<sup>[11]</sup>用基于影像的方法重建 Itokawa 的全球表面形状模型,模型主要是通过立体测量技术生成的;Fujiwara 等<sup>[12-13]</sup>则是先使用光度观测和雷达观测来获得初始形状模型,然后利用3种独立的方法分别构建形状模型,并根据形状模型估计了 Itokawa 的体积;Watanabe 等<sup>[14]</sup>使用两种方法重建 Ryugu 的表面模型,一种是 Gaskell 等<sup>[15]</sup>提出的 SPC (Stereo-Photo Clinometry) 方法,另一种是 Schwartz 等<sup>[16]</sup>提出的运动恢复结构 (Structure from Motion, SfM) 方法,其中 SfM 方法是日本宇宙航空研究开发机构 (Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA) 在任务中重点使用的。

SfM 是一种数字摄影测量学三维重构方法,具备效率高、成本低的优点<sup>[17-18]</sup>。SfM 方法借助更快速的特征匹配算法从不同视角的影像里提取重叠区域的空间位置信息,只需基于建模对象的若干影像,就能够高效得到其三维模型且质量较高,同时对摄像机的拍摄位置、图像尺度及拍摄焦距没有要求,拥有高自动化程度,所以已被应用到深空探测领域。Hirata 等<sup>[19]</sup>借助 SfM 重建 Ryugu 的模型,取得了很好的效果。在一些工程任务中,使用 SfM 的方法所获取的三维地形可堪比 LiDAR 数据的质量,有时能优于 LiDAR 数据,但 SfM 的获取成本则更低。

本文研究了基于运动恢复结构的小行星三维形状重构,主要以 162173Ryugu 探测任务数据为例,基于运动恢复结构小行星进行了三维重构,并基于重构结果对 162173Ryugu 表面形貌特征进行了分析。

## 1 方法

### 1.1 运动恢复结构方法

运动恢复结构方法 (SfM) 不需要预先获取相机的参数信息且基于无序的影像来进行三维重建,具体 SfM 的稀疏重建过程如图 1 所示。

本文使用增量式的 SfM 建模方法,可分为 2 个主要阶段:

第一阶段,图像间的匹配分析。着手提取特征和执行匹配操作,只有那些达到预定匹配点数目标准的图像对才会被选中进行后续处理,计算被选中的图像之间的极线几何关系,并估算出基础矩阵  $F$ ; 利用 RANSAC (Random Sample Consensus) 算法,本文进一步消除了不良匹配点,从而精炼匹配结果。在多个图像中可识别同一 3D 点,并且这些图像中的对应特征已经被正确关联时,本文将这些特征合

并,为后续的几何估算过程提供数据基础,以便准确估算出该 3D 点的位置。一系列与单一 3D 场景点相匹配的特征集,称之为特征轨迹。

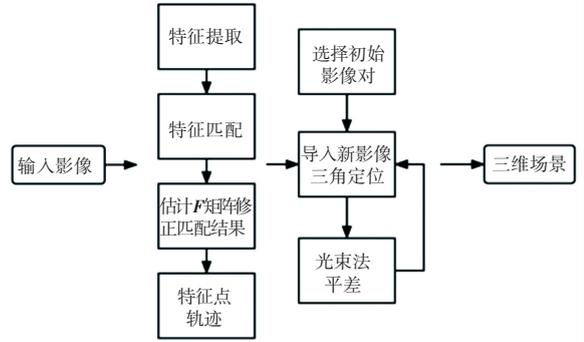


图 1 基于 SfM 的稀疏重建过程

Fig. 1 Sparse reconstruction process based on SfM

第二阶段,结构的运动分析。首先挑选出最佳的图像匹配对以初始化流程;其次,在这两幅选定的图像中执行三角测量,以构建对应的 3D 场景点;对于已经重建的相机参数 (无论是内部还是外部参数) 以及 3D 场景点,本文采用光束平差法 (Bundle Adjustment, BA) 进一步优化。通过逐步添加图像,执行三角测量和光束平差,直到整个系统收敛,最终估算出相机参数和三维场景的几何信息,形成一个稀疏的三维点云模型。

运动恢复结构算法的结果是借助影像提取的特征点得到的,因此输出的特征点较为分散,也称为构建稀疏点云,不能直接作为构建面的素材,还须额外使用其他的方法加强稀疏点云构建的效果。

### 1.2 多视图系统

多视图系统 (Multi Views System, MVS) 可以加强稀疏点云的构建效果, MVS 与 SfM 的点云结果在效果与机理上有显著差异。SfM 所生成的是稀疏点云,本质是从相机影像恢复相机之间的几何关系, MVS 生成的是密集点云。SfM 是获得的一些相机参数和相机之间的几何关系可以用于进一步提取特征并生成稀疏点云,而 MVS 是对 SfM 的结果结合影像进行细化从而生成所谓的密集点重构,也就是使点云稠密化, MVS 也被用于稠密点云构建或者密集点云构建。MVS 方法就是将不同影像上的相同点,也就是不同角度、距离拍摄的相同点进行对齐匹配,以求强化构建的点云的密集性。

MVS 方法生成的密集点云是基于相机的一系列多视影像,使用 SfM 和 MVS 方法生成密集三维点云,具有效率高、限制少、效果好、自动化等优点,获取的三维形状纹理丰富。

## 2 实验

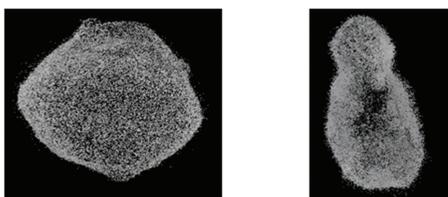
### 2.1 数据

三维形状重构实验所用到的 25143Itokawa 与 162173Ryugu 的影像均来源于 JAXA 官网发布的影像,其中 162173Ryugu 影像共有 3 组,分别为 2018 年 7 月 10 日、2018 年 7 月 12 日、2018 年 8 月 1 日不同运行轨道的影像,共 391 张影像;25143Itokawa 影像有 3 组不同的运行轨道,共 281 张影像。本文小行星的建模方法,参考了 JAXA 研究过程,SfM 过程中所使用的影像经过了一定筛选,为保证所有影像能够正确进行对齐与使用,最终剔除了出现过曝、过暗、目标丢失、模糊等问题的影像。

### 2.2 构建稀疏点云

虽然图像特征匹配的步骤是自动化的,但需要手动设置与删除来纠正错误对齐的图像。在图像配准的同时对照相机的内部参数,包括失真系数进行估计。对齐影像过程中,降低连接点数量的限制可以提高影像匹配成功率,使更多影像成功对齐与匹配,但会损失一定匹配精度。更换影像对齐顺序也对影像最终对齐效果有影响,尽量用连续的影像作为匹配顺序,以提高建模质量。然而,严格定义参数可能会导致部分角度偏差较大的影像对齐失败,在预先定义的参数的松散性和图像配准的成功率之间存在着一种权衡。

因为影像数量足够多,但影像总体质量一般,所以图像配准过程中关键点限制与连接点限制的参数分别设置为 40 000 与 8 000,以适应影像情况。如图 2(a) 所示,Ryugu 的稀疏点云构建结果良好,分布平均且连续,但如图 2(b) 所示,Itokawa 的稀疏点云构建在低纬地区出现了空洞,与该区域地形起伏过大有关,如果对局部进行更紧密的影像获取,则能对空洞部分进行重建。



(a) Ryugu 小行星 (b) Itokawa 小行星

图 2 稀疏点云生成结果

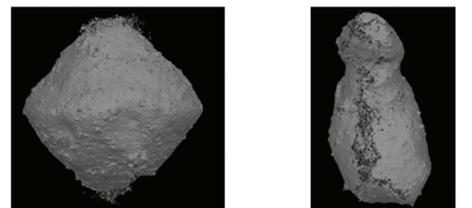
Fig. 2 Sparse point clouds produce results

### 2.3 构建密集点云

稀疏点云比较粗糙,无法直接用于重建小行星

表面。通过改变图像选择,可以从覆盖范围广的图像集合中获得全局形状,或者从局部特写图像集合中获得覆盖范围小但更加精细的地形模型。不同的密集点云生成方法,会在不同建模区域产生效果差异,选择轻度或进取的深度过滤生成方式能够很大程度上弥合由于原始影像不足带来的建模空缺,但在与影像进行对比后,通常与实际情况有较大误差,为保证建模准确性以便后续形貌研究,建议禁用深度过滤。生成密集点云后,需要手动剔除离散点,以提高多边形网格模型结果的精度。

如图 3(a) 所示,Ryugu 的密集点云生成结果除两级地区生成了较多离散点且有孔洞外,其余区域的点云稠密且连续,共计得到 6 486 410 个点;如图 3(b) 所示,Itokawa 的密集点云生成结果由于上一步稀疏点云结果不理想,且没有影像补充进行弥补,故需要进一步处理。



(a) Ryugu 小行星 (b) Itokawa 小行星

图 3 密集点云生成结果

Fig. 3 Dense point clouds produce results

### 2.4 建立三维多边形网格模型

基于密集点云生成三维多边形网格模型,启用插值计算。Ryugu 的三维模型获取到 1 291 175 个三维平面。

基于原始影像生成纹理并对三维模型进行贴图,映射模式设置为通用,混合模式选择马赛克。

Ryugu 的三维重构结果如图 4(a) 所示,低纬度地区重构结果良好,纹理清晰,能够清楚地分辨陨石坑与巨石,但两极地区有建模黑斑,其产生原因是 Hayabusa2 绕飞轨道基本处于 Ryugu 赤道平面,故影像数据对两极地区始终无较正面的拍摄,很难进行精确的成像。如果飞行器轨道能跨越两极进行绕飞,则能很好弥补这方面的建模不足,考虑探测任务的着陆采样选址在低纬地区,对两极模型精度需求并不高,因此实验结果可以用于后续分析。

Itokawa 的三维重构结果如图 4(b) 所示,绝大多数区域重构结果良好,但中部有一片地形起伏巨大的“山脊”,坡度过大导致密集点云生成过程中容易生成过多错误值,影响建模结果。Itokawa 相比 Ryugu 的三维重构结果更好,主要是由于 Hayabusa

的绕飞任务轨迹更丰富,获取了更多不同角度的影像,“山脊”的重构不足,可以通过 SPC (STEREO

PHOTO CLINOMETRY)方法进行弥补,进而增加模型精度。

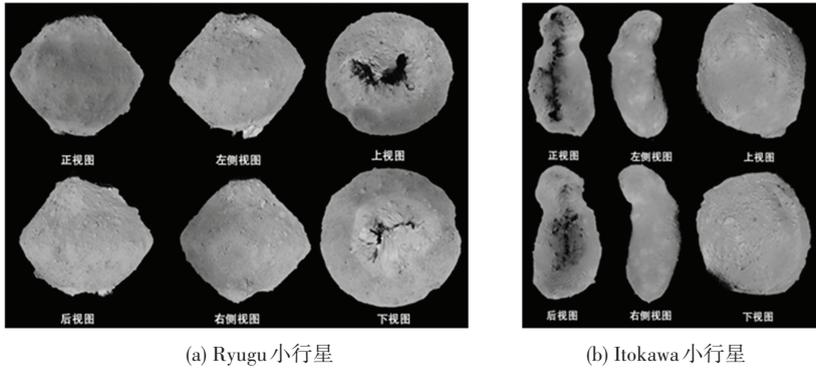


图4 SfM重建小行星形状模型的六面视图

Fig. 4 SfM reconstructs a six-sided view of the asteroid shape model

本文采用了不同的 SfM 具体参数模拟两极地区,但由于影像数据缺失致使建模结果没有较大区别,但都会与实际情况有出入,不太理想;低纬地区影像数据清晰且丰富,但 Itokawa 小行星有部分地形较为复杂的区域,比如陡崖等地形,因为 SfM 处理不够稠密,会产生无法处理的离散点导致建模结果有误差,可以通过手动剔除离散点的方式减小误差。

### 3 结果分析

#### 3.1 三维重构结果分析

由于 162173Ryugu 的形状真值比较难获得,一般采用间接的指标来反映重建质量。重建获得共计 6 486 410个 3D 点,由于影像数量较多,对于仅用于分析三维形貌而言是足够的。

将实验得到的 Ryugu 的三维形状重构结果与 Cho 等<sup>[20]</sup>得到的数据进行对比,因为 SfM 生成的模型只有相对比例没有绝对尺寸,所以本文用已知的最长主轴标定其尺寸,其余主轴长的误差相对较小,见表 1。

表 1 建模结果与误差

Table 1 Modeling results and errors

特征	实验结果/m	误差/%
Ryugu a 轴长	502	0.00
Ryugu b 轴长	446	-0.45
Ryugu c 轴长	442	0.90

#### 3.2 162173Ryugu 表面陨石坑分析

陨石坑和巨石是 162173Ryugu 表面最突出的表面特征之一。本文研究进一步基于构建的三维模型,分析了 Ryugu 表面陨石坑的分布情况。

可以从所得到的三维重构模型结果中找到 32 个清晰的陨石坑与 22 个尚可辨认的陨石坑。撞击

坑的深径比 ( $d/D$ ) 指的是陨石坑直径与深度之比,可描述撞击坑的形状以及各种行星表面特征<sup>[21]</sup>,对于 Ryugu 的陨石坑分析有借鉴意义。本文使用了 SfM 所建立的模型为主要参考基准,计算了识别的坑的深径比,其中绝大多数陨石坑位于 Ryugu 的赤道附近,直径较大的陨石坑大多分布在赤道上。

陨石坑的形状,特别是其深径比,可以为探测行星体的内部结构和表面过程提供重要的依据。研究发现整个陨石坑的深径比范围为 0.04~0.13,平均深径比为 0.10,这可以为后续小行星的地质等方面研究提供数据支撑。本文把 Ryugu 上直径大于 50 m 的陨石坑定义为大坑,大坑的深径比普遍随着直径增加而减小;小坑 ( $D < 50$  m) 的深径比随直径的增加而增加,这意味着 Ryugu 上的一个较小的陨石坑形成一个较浅的陨石坑口。Ryugu 的表面环境很可能会抑制陨石坑的深度,不会过小或过大。

对于 Ryugu 表面的巨石进行分析,可从模型上清晰地分辨出最大的巨石位于 Ryugu 的南半球,其直径约为 80 m,且周围少有大的陨石坑,原因值得进一步探究。

### 4 结束语

小行星三维形状重构及其相关研究是深空探测的关键挑战,为大量重要探测任务提供技术支持。本文研究了基于运动恢复结构的三维建模方法,利用 Hayabusa 与 Hayabusa 2 任务采集的影像数据分别对 Itokawa 与 Ryugu 进行了三维形状重构,获得了两颗目标小行星的三维模型。但 Itokawa 的“山脊”地区由于地形复杂导致建模效果不理想,Ryugu 的两极地区由于影像缺失导致建模效果不理想。为此,本文对获得的 Ryugu 三维模型进行了三维形貌

分析,在现有陨石坑数据的基础上又识别了4个陨石坑,发现了其深径比等特征的关联性,可以为中国未来小行星任务中的形状重构以及着陆选址提供支撑。但研究发现本文对于两颗目标小行星的部分地区建模精度依然不足,需要结合SPC等方法或补充对应区域更多高质量的影像来提高建模精度,以便进行更准确的形貌分析与其他研究。

## 参考文献

- [1] 石俊. 基于光度学的小天体三维建模方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [2] 钟佳耿, 鄢建国, 李明. 小天体探测任务及形状建模综述[J]. 地球物理学进展, 2022, 37(1): 142-151.
- [3] 张荣桥, 黄江川, 赫荣伟, 等. 小行星探测发展综述[J]. 深空探测学报, 2019, 6(5): 417-423, 455.
- [4] 黄江川, 李翔宇, 乔栋, 等. 小天体多目标多模式探测任务设计[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2019, 49(8): 114-124.
- [5] 李春来, 刘建军, 严韦, 等. 小行星探测科学目标进展与展望[J]. 深空探测学报, 2019, 6(5): 424-436.
- [6] WALSH K, JAWIN E, BALLOUZ R L, et al. Craters, boulders and regolith of (101955) Bennu indicative of an old and dynamic surface[J]. Nature Geoscience, 2019, 12(4): 242-246.
- [7] SAKATANI N, TANAKA S, OKADA T, et al. Anomalous porous boulders on (162173) Ryugu as primordial materials from its parent body[J]. Nature Astronomy, 2021, 5(8): 766-774.
- [8] YADA T, ABE M, OKADA T, et al. Preliminary analysis of the Hayabusa2 samples returned from C-type asteroid Ryugu[J]. Nature Astronomy, 2022, 6(2): 214-220.
- [9] 张翔, 季江徽. 近地小行星地基雷达探测研究现状[J]. 天文学进展, 2014, 32(1): 16.
- [10] BARNOUIN O S, DALY M G, PALMER E E, et al. Author Correction: Shape of (101955) Bennu indicative of a rubble pile with internal stiffness[J]. Nature Geoscience, 2020, 13(11): 764.
- [11] DEMURA H. Shape of asteroid Itokawa[J]. Bulletin of the Society for Science on Form, 2006, 312(5778): 1347-1349.
- [12] FUJIWARA A. Asteroid Itokawa observed by Hayabusa[J]. Bulletin of the Society for Science on Form, 2006, 21: 1-2.
- [13] FUJIWARA A, KAWAGUCHI J, YEOMANS D, et al. The rubble-pile asteroid Itokawa as observed by Hayabusa[J]. Science, 2006, 312(5778): 1330-1334.
- [14] WATANABE S, HIRABAYASHI M, HIRATA N, et al. Hayabusa2 observations of the top-shape carbonaceous asteroid 162173 Ryugu[J]. Science, 2019, 364(6437): 268-272.
- [15] GASKELL R W, BARNOUIN-JHA O S, SCHEERES D J, et al. Characterizing and navigating small bodies with imaging data[J]. Meteoritics & Planetary Science, 2008, 43(6): 1049-1061.
- [16] SCHWARTZ C, SCHNABEL R, DEGENER P, et al. PhotoPath: Single Image Path Depictions from Multiple Photographs[M]. Václav Skala - UNION Agency, 2010.
- [17] FONSTAD M A, DIETRICH J T, COURVILLE B C, et al. Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2013, 38(4): 421-430.
- [18] YABUTA H. Arrival, touchdown and sequel to the voyage of Hayabusa2[J]. Nature Astronomy, 2019, 3(4): 287-289.
- [19] HIRATA N, MORI Y. Asteroid shape reconstruction by structure-from-motion method with bundler and pmvs2[C]//Proceedings of Japan Geoscience Union Meeting. 2014: u06-p17.
- [20] CHO Y, MOROTA T, KANAMARU M, et al. Geologic history and crater morphology of asteroid (162173) Ryugu[J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2021, 126(8): e2020JE006572.
- [21] NOGUCHI R, HIRATA N, HIRATA N, et al. Crater depth-to-diameter ratios on asteroid 162173 Ryugu[J]. Icarus, 2021, 354: 114016.