

中图法分类号: P185.7 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2025)06-2239-18

论文引用格式: Yin J H, Zhao X Y, Cui L Y and Wei X D. 2025. Image intelligence processing technology in asteroid exploration. Journal of Image and Graphics, 30(6):2239-2256(尹继豪, 赵欣语, 崔林艳, 魏晓东. 2025. 小行星抵近探测中的图像智能处理技术进展. 中国图象图形学报, 30(6):2239-2256)[DOI:10.11834/jig.240776]

小行星抵近探测中的图像智能处理技术进展

尹继豪*, 赵欣语, 崔林艳, 魏晓东

北京航空航天大学宇航学院, 北京 100191

摘要: 小行星是太阳系中重要的天体, 保留了早期形成和演化的历史信息, 可能提供地球生命与水起源的线索。自20世纪90年代以来, 针对小行星的科学探测和在轨处置活动逐渐增多, 成为深空探测领域的热点。在小行星抵近探测任务中, 探测器在不同距离拍摄的图像数据是研究小行星表面特征和物理特性的主要来源。然而, 小行星表面复杂的地貌结构、动态变化的光照条件以及探测器与目标之间不断变化的姿态, 导致获取的图像数据具有高度的独特性和多样性, 使传统图像处理技术在适应性上存在不足。引入图像智能技术进行自动化处理与分析, 将增强小行星探测任务对深空环境的认知能力, 提升科学效益和成功率。本文系统综述小行星抵近探测任务中图像智能处理技术的研究现状与发展趋势, 围绕表面地物识别、三维形貌重建和物理特性反演3个关键方向, 全面分析现有技术的优势与局限, 结合深度学习、多源数据融合等最新技术, 讨论其在小行星复杂表面环境中的适应性与应用潜力。本文还对国内外产业界和学术界的成功经验与技术路径进行总结, 剖析当前技术在数据标准化、模型泛化性及实际任务应用中的不足。最后, 探讨未来研究的发展趋势, 为推进小行星探测任务的技术创新提供参考。

关键词: 小行星探测; 图像处理; 人工智能(AI); 地物识别; 形貌感知; 物理特性分析

Progress in image intelligence processing technology in asteroid exploration

Yin Jihao*, Zhao Xinyu, Cui Linyan, Wei Xiaodong

School of Aeronautic Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract: Asteroids are critical celestial bodies in our solar system, holding essential information about the early stages of planetary formation and evolution. These small rocky bodies are considered remnants from the early solar system, providing potential insights into the origins of life and water on Earth. Since the 1990s, asteroid exploration missions have steadily increased, becoming a central focus in deep space exploration. These missions aim not only to study asteroids as ancient objects but also to explore their potential as resources for future space exploration. The origins of asteroid exploration can be traced back to the 1970s. As interest in these bodies grew, space agencies like National Aeronautics and Space Administration (NASA) and the European Space Agency (ESA) began conducting successful unmanned missions. NASA's Galileo spacecraft, for example, made the first flyby of asteroid 951 Gaspra in 1991, marking a key milestone and laying the groundwork for subsequent missions. The Dawn spacecraft, launched later, conducted detailed observations of asteroids Vesta and Ceres, providing substantial data on asteroid composition and origin. Furthermore, China's Chang'e-2 mission performed a successful flyby of asteroid 4179 Toutatis in 2012, demonstrating the feasibility of asteroid exploration. In the coming years, a sample-return mission targeting Earth's quasi-satellites and main-belt comets is planned. These early mis-

收稿日期: 2024-12-26; 修回日期: 2025-02-18; 预印本日期: 2025-02-25

* 通信作者: 尹继豪 jihaoyin@buaa.edu.cn

基金项目: “新一代人工智能”国家科技重大专项(2022ZD017402)

Supported by: National Science and Technology Major Project (2022ZD017402)

sions not only proved the feasibility of exploring asteroids but also provided valuable technical experience that has been integral in advancing scientific understanding and future exploration strategies. Close-range asteroid exploration involves spacecraft capturing image data from various distances, which is essential for studying the asteroid's surface features and physical properties. However, acquiring high-quality images presents significant challenges. The asteroid's surface is often irregular and complex, with a wide range of topographical features such as craters, boulders, and ridges. Moreover, dynamic lighting conditions and the constantly changing attitude of the spacecraft introduce further complications, making the captured images highly unique and diverse. Traditional image processing techniques often struggle to adapt to this variability. To overcome these challenges, integrating intelligent image processing technologies is crucial. AI-driven automation can enhance the spacecraft's ability to perceive and analyze the environment in real time, thereby improving the overall scientific outcomes and increasing the success rates of asteroid exploration missions. One of the primary objectives of asteroid exploration is the intelligent analysis of surface images to identify key features, such as surface objects and obstacles, and predict the scientific value of surface deposits. This ability to analyze surface data is critical for hazard avoidance and selecting safe landing and sampling locations. The uniqueness of asteroid surface morphology, coupled with the scarcity of relevant datasets, poses a major challenge. Recent research has increasingly focused on combining deep neural networks with techniques such as transfer learning and few-shot learning. These approaches are particularly useful when large datasets are unavailable, allowing the models to generalize from smaller sets of data. The generalization capability of large pretrained models, which have been trained on extensive image datasets, offers new possibilities for improving recognition accuracy and performance in asteroid exploration. Another significant aspect of asteroid exploration is the intelligent perception and reconstruction of the asteroid's 3D topography. Detailed 3D models are essential for making decisions about landing, attachment, and sample collection. Typically, generating these models requires the spacecraft to orbit the asteroid multiple times, which is one of the most time-consuming phases of close-range exploration. In addition, asteroid surface images often have a large dynamic range and high texture similarity, complicating the restoration of the 3D surface and its use in accurate localization. As a result, considerable research has been conducted on efficient methods for gathering image data, integrating this information, and reconstructing accurate 3D models of asteroid surfaces. Recent advancements in implicit 3D representations and generative models have shown promise in overcoming these challenges. These approaches enable more precise mapping and facilitate the use of 3D topographic data, significantly enhancing spacecraft navigation and surface analysis capabilities. The inversion of asteroid physical properties — such as surface material composition, weathering processes, and weak gravitational fields — is another key objective of exploration. Inversion of these properties requires combining image data with multisource data, such as spectral and orbital data, which allow for a more direct method of studying the asteroid's physical characteristics. However, the wide variety in asteroid composition, structure, and surface conditions complicates this task. Limited premission knowledge about the target asteroid indicates that traditional inversion models often need to be tailored specifically to each new mission. To address this, researchers have developed generalized models that can be adapted to various types of asteroid, enabling more accurate predictions of their physical properties. Such advancements are critical for understanding the formation and evolution of asteroids, as well as their potential for resource extraction. The integration of artificial intelligence (AI) and advanced image processing techniques has significant potential for enhancing asteroid exploration. As AI and machine learning, particularly deep learning, evolve, they are increasingly applied to challenges such as asteroid surface analysis, 3D topography reconstruction, and physical property inversion. The future of asteroid exploration will focus on improving AI algorithms' adaptability to handle diverse data types and conditions. Developing robust and generalizable models capable of understanding complex asteroid surfaces, integrating multisource data, and accurately modeling 3D topographies will be key to mission success. As technology advances, on-board, real-time processing of asteroid images using intelligent algorithms will likely become feasible, enabling spacecraft to make immediate decisions about landing and sampling, thereby enhancing mission efficiency and safety. In conclusion, the field of image intelligence in asteroid exploration is evolving rapidly. The use of machine learning, especially deep learning and large pretrained models, is improving the accuracy of surface analysis, topography reconstruction, and physical property inversion. These advancements will play a crucial role in future deep space missions, offering essential insights into the origins of life and water on Earth. As asteroid exploration develops,

intelligent image processing will be vital to maximize the scientific return of these missions, ensuring their safety and efficiency and advancing humanity's understanding of our solar system.

Key words: asteroid exploration; image processing; artificial intelligence (AI); feature recognition; morphology sensing; physical properties analysis

0 引言

小行星作为太阳系中数量众多的天体,因其蕴藏的丰富科学价值和潜在资源开发前景,成为近年来深空探测领域的重要研究目标。小行星不仅提供了有关早期太阳系形成的关键线索,还可能蕴含对地球未来可持续发展具有重要意义的矿产资源。因此,深入研究小行星的物理特性和表面环境,对推动人类对宇宙的探索 and 开发具有重要的理论和实践意义。随着深空探测技术的飞速发展,针对小行星的抵近探测任务日益增多,图像处理技术在小行星表面探测、地形识别及任务规划等方面发挥着至关重要的作用。小行星表面的图像不仅是探测器着陆和采样的重要依据,也是解码小行星表面物理特性、揭示太阳系起源与演化的关键数据来源。通过对图像数据的深入分析,研究人员能够获取关于小行星的形态、成分和环境的宝贵信息,从而为后续的科学研究和资源开发提供重要支持。

早期的小行星探测任务可以追溯到20世纪70年代,随着美国国家航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)、欧洲空间局(European Space Agency, ESA)等航天机构对小行星探测兴趣的增加,多个无人探测器任务相继取得成功。例如,NASA的“伽利略号”探测器(Venera等,1994)在1991年首次飞越小行星951 Gaspra,并为后续任务奠定了基础。紧接着,“黎明号”(Dawn)探测器(Russell和Raymond,2011)对灶神星和谷神星的详细探测,为研究小行星的组成和起源提供了大量数据。此外,我国于2012年在嫦娥二号再拓展任务中成功实施了对4179号小行星的飞越探测,并计划于2025年开展以地球准卫星和主带彗星为探测对象的采样—返回任务。这些任务不仅展示了小行星探测的可行性,也为后续的科学探索提供了宝贵的经验与技术支持,推动了人类对小行星的进一步研究。

小行星图像处理主要依赖人工标注与传统图像处理方法,如滤波和边缘检测等技术对地物和障碍

物的分析。然而,随着小行星探测任务的复杂性增加,传统方法在深空恶劣环境下的适用性逐渐显现出局限性。小行星表面的复杂地貌结构、动态变化的光照条件,以及探测器与目标之间不断变化的姿态,导致获取的图像数据具有很强的独特性和多样性,使得传统图像处理技术在适应性上面临重大挑战。引入图像智能处理技术成为解决小行星探测数据处理问题的关键,结合计算机视觉、人工智能以及多学科研究成果,智能处理技术能够高效、精准地分析小行星表面数据,克服图像噪声干扰和数据稀缺等问题。近年来,深度学习和人工智能技术的迅猛发展,使得图像智能处理技术逐渐成为应对小行星图像处理挑战的重要工具。

当前,小行星探测任务中的图像智能处理技术研究主要集中在3个方面:

1)小行星表面图像的智能理解。小行星表面图像的智能理解,旨在识别小行星表面地物及障碍物、预测表面沉积物科学价值等,服务于表面采样过程中的危险规避、科学探测的位置选,是提升抵近探测任务安全性和探测器环境适应性的重要手段。由于小行星表面形态特征的独特性导致了相关数据的稀缺,近年来本方向主要关注深度神经网络结合迁移学习、小样本学习等路径;大规模预训练模型的泛化性及灵活性为该方向提供了新的思路。本报告拟系统地整理和综述相关数据集、研究进展和应用情况。

2)小行星三维形貌的智能感知。小行星三维形貌为探测器着陆附着、采样等任务提供决策依据。恢复小行星的三维形貌通常要求探测器在目标小行星附近反复绕飞,是抵近探测任务中耗时最长的阶段。同时,小行星表面图像动态范围大、纹理相似度高,给三维形貌的恢复和利用三维形貌定位带来了困难,如何高效获取图像数据、有效融合图像信息并高精度刻画的小行星三维形貌是本领域研究的重点。近年来,结合隐式三维表征、生成式模型等最新图像处理技术的方法相继提出。本报告拟对相关研究进展进行综述研究。

3)小行星物理特性智能反演。小行星物理特性

的反演是抵近探测任务重要的科学目的。图像数据与多源数据(如光谱数据、轨道数据等)联合处理,是反演小行星的表面物质成分、表面风化过程和弱引力场等物理特性的直接方法。然而不同小行星的特性及结构迥异、任务前对目标小行星的了解有限,传统的特性反演方式要针对不同目标小行星重新设计数学模型。本报告拟对最新的研究进展和应用情况进行综述。

随着深空探测任务的日益增多,图像智能处理技术在小行星探测中的应用前景广阔,逐渐从实验室研究走向产业应用。全球多个航天机构和科技公司已启动小行星探测任务的商业化探索。美国的“OSIRIS-REx”任务、日本的“隼鸟2号”任务均展示了小行星样品采集与返回的潜力。与此同时,私营航天公司如太空探索技术公司(SpaceX)和行星资源公司(Planetary Resources)等,也将目光投向小行星资源开发领域,计划通过探测与开采小行星的矿物资源来服务地球经济的发展。

小行星抵近探测中的图像智能处理技术不仅是

推动深空探测任务的重要工具,也是未来太空开发和行星研究领域的技术核心,具有深远的科学与应用意义。

1 国际研究现状

在小行星探测任务中,人工智能技术的应用主要集中在3个关键领域:地物识别、三维形貌感知和物理特性分析。以下将按照小行星探测时间顺序对国际上小行星探测任务中图像处理、图像智能处理方法的应用情况进行阐明,并对国际上每个领域的学术研究发展现状与水平进行概述。

1.1 产业界应用现状

在国际上的历次小行星探测任务中,图像处理技术已经在绕飞、着陆附着和精细探测上发挥了关键作用。各国航天机构正在逐步应用或计划应用先进的智能图像理解、三维形貌感知和物理反演等技术,以提升任务的自主性和数据分析能力,如表1所示。

表1 国际小行星探测任务中图像处理技术应用和计划应用情况

Table 1 The application and planned use of image processing technologies in international asteroid exploration missions

国家/机构	任务名称	年份	主要目标小行星	图像处理技术应用情况
美国 NASA	尼尔号 NEAR (Veverka 等, 2001b)	1996	爱神星 Eros	视觉定位、导航
欧洲空间局 ESA	罗塞塔号 Rosetta (Glassmeier 等, 2007)	2004	丘留莫夫—格拉西缅科彗星 67P/Churyumov-Gerasimenko	无线电跟踪和地标观测导航
美国 NASA	黎明号 Dawn (Russell 和 Raymond, 2011)	2007	灶神星 Vesta 谷神星 Ceres	光学地标跟踪、重力探测任务
日本 JAXA	隼鸟2号 Hayabusa2 (Tsuda 等, 2013)	2014	龙宫 Ryugu	人工地标识别、视觉导航附着、三维形貌重建
美国 NASA	冥王号 OSIRIS-REx (Lauretta 等, 2017)	2016	贝努 Benu	表面地物识别、地标导航、三维形貌重建
美国 NASA	DART (Cheng 等, 2018)	2021	双小行星系统 Didymos、Dimorphos	小行星识别与导航
欧洲空间局 ESA	赫拉号 Hera (Michel 等, 2022)	2024	双小行星系统 Didymos、Dimorphos	表面地物识别、自主视觉导航
日本 JAXA	火星月球计划 MMX (Campagnola 等, 2018)	2026 (计划)	火卫一 Phobos	表面地物识别、三维形貌重建、自主导航定位

NASA 很早就开展近地小行星探测任务, NASA 的尼尔号任务首次实现了对小行星的环绕飞行并成功着陆,通过分析小行星表面特征帮助导航和科学观测。低空飞行成像揭示了一个进化的表面,岩石和陨石坑的分布表明几次撞击事件的喷出物覆盖了

成像的区域 (Veverka 等, 2001a)。ESA 的罗塞塔号任务在彗星探测中应用了平方根信息滤波器,结合无线电跟踪数据和星载相机拍摄的表面地标来实现导航 (Muñoz 等, 2015),并逐步从人工操作选择地表转向基于 SPC (stereophotoclinometry) 技术的自动化

流程,大幅降低了地面操作的工作负担(Lauer等, 2012; De Santayana和Lauer, 2015)。

NASA的黎明号任务对灶神星和谷神星进行了精细的引力测绘,通过图像亮度模型和坡度分析构建地标,为航天器定位和重力测量提供了数据支持,并结合多普勒数据,深入理解了天体的内部结构(Konopliv等, 2011)。

日本宇航开发机构(Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA)的隼鸟2号探测任务通过实时光学导航和人工地标技术支持了探测器的自主导航和着陆(Ogawa等, 2020)。并结合SPC和SfM(structure from motion)技术,详细重建了小行星的三维形貌,为后续的采样任务和地质研究奠定了基础(Watanabe等, 2019)。

NASA的OSIRIS-Rex号前往近地小行星贝努,并于2020年10月20日从贝努表面收集了岩石和灰尘样本。采用自然地标导航,将实时拍摄的图像与贝努小行星的数字地形模型进行匹配,以估计探测器的实时位置和速度(Williams等, 2018)。通过基于相机的SPC方法和基于激光雷达高度计推断的方法构建了高质量的数字地形模型(Barnouin等, 2020)。此外, DART(double asteroid redirection test)任务采用视觉系统SMART Nav实现了对双小行星系统的识别,并在撞击前基于像素亮度和尺寸自动识别撞击目标,引导探测器撞击目标小行星Dimorphos(Daly等, 2023),为行星防御任务积累了宝贵经验。ESA的赫拉号任务计划进一步提升小行星表面智能识别和自主导航技术(Michel等, 2022)。

未来,日本的火星月球计划也将继续推进采样和通信技术的升级,表明全球航天机构在深空探测领域的持续努力和创新。

1.2 学术界研究现状

在学术界,小行星探测的研究正朝着更加智能化的方向发展。基于历次小行星探测任务中获取的数据以及仿真环境中渲染的数据,研究者们利用先进的计算机视觉和人工智能技术,开发了多种深度学习算法和多源数据融合分析方法,致力于提升对小行星表面地物特征的精准识别和三维形貌的精确重建,并通过智能反演技术深入分析其物理特性,为任务规划和科学研究提供了更全面、可靠的数据支持。

1.2.1 小行星表面图像智能理解

小行星表面图像的智能理解主要包括对表面地物的识别与分析,这在探测器执行采样、着陆等任务时,对规划和决策至关重要。国际上对这一领域的研究起源可以追溯到上世纪末期。随着深空探测任务的兴起,科学家们逐渐认识到,全面、精准地理解小行星表面环境是成功执行任务的基础。小行星表面图像理解的主要目标是获取小行星的详细表面图像,以识别其关键地形特征,例如陨石坑、岩石等。早期的图像分析方法主要依赖于手动和半自动的图像处理技术,通过操作人员的视觉辨识来提取小行星表面的地物信息。尽管这些方法在有限条件下能够识别出一些关键特征,但在深空探测任务的环境下存在明显的局限性。小行星表面形态复杂、光照条件不稳定,探测器位置的变化使成像角度不断变化,这些因素都增加了传统方法的难度。为了提升识别与分类的效率和准确性,国际科学界近年来开始探索更加先进的技术手段,如基于机器学习和深度学习的智能处理方法。这些方法有效地解决了传统技术的不足,使得小行星表面图像的智能理解能够更好地服务于后续任务的着陆、导航以及科学分析。

1)小行星表面图像智能理解数据集。小行星表面图像智能理解技术的发展高度依赖于高质量数据集的支持。数据集的丰富性和多样性直接决定了地物识别算法的训练效果和模型的泛化能力。然而,由于小行星探测任务的稀缺性及其表面环境的独特性,目前缺少公开的大规模、高质量以及精确标注的小行星图像数据集。当前学术界的研究主要依赖于研究者根据具体任务需求自行收集和标注的数据集。

Pugliatti等人(2022)提出的数据集包含陨石坑和岩石的掩码,能全面评估模型性能,自动生成数据集的过程具有较高的参考价值,如图1所示。该数据集由4个子集组成,其中D-1用于标准测试,D-2提供3 000幅合成图像,D-3包含56幅飞跃轨迹场景图,D-4提供59幅真实图像。前3个子集主要评估合成数据特征,D-4则展示了仿真与真实数据的差异。实验结果表明,该数据集在陨石坑建模上有一定局限,合成数据与真实数据的差距仍需通过更多真实标注图像来弥补。

Latorre等人(2023)使用两个主要数据集:月球

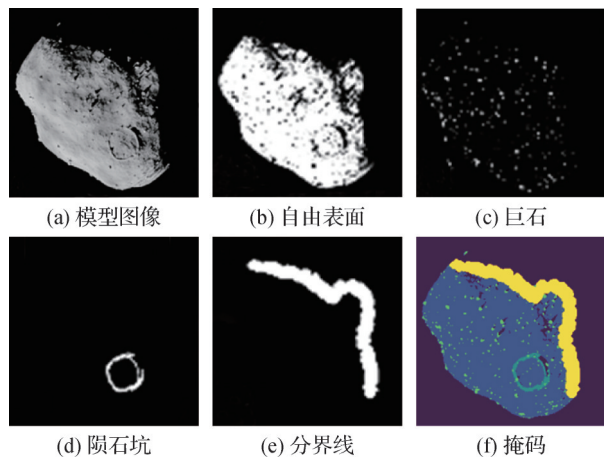


图1 数据集图像与掩码(Pugliatti等,2022)

Fig. 1 Dataset images and masks(Pugliatti et al., 2022)
((a) model image; (b) free surface; (c) boulders; (d) craters;
(e) terminator; (f) mask)

数据集和谷神星数据集。月球数据集基于 LRO (lunar reconnaissance orbiter) 和 SELENE Kaguya 合并的数字高程模型 (digital elevation model, DEM) (Barker 等, 2016), 包含 45 000 幅 256×256 像素的图像, 分为训练集 30 000 幅、验证集 7 500 幅和测试集 7 500 幅。地面真实掩膜通过相关目录生成, 主要标记陨石坑的边缘。谷神星数据集基于“黎明”号探测器的数据 (Roatsch 等, 2016), 涵盖了约 98% 的小行星表面, 包含不同视角的图像和对应的陨石坑掩膜。其优势在于覆盖广泛, 适用于跨视角建模。但该数据集的分辨率不均, 某些区域较低, 影响精细特征的捕捉。整体而言, 这两个数据集适用于月球和小行星的表面特征建模, 但仍需更高分辨率和多样化的数据来提升模型性能。

数据集在小行星图像智能理解技术的发展中扮演着不可或缺的角色。未来数据集的建设应进一步标准化, 包括: 结合远距离和近距离图像, 涵盖抵近过程中不同尺度和光照条件下的数据, 以应对深空任务中的未知性和多变性; 结合虚拟和真实数据, 多颗星数据标注增强数据的多样性和泛化能力; 建立统一的数据格式、标注规范和评估标准, 推动数据共享, 促进跨任务应用; 构建多任务统一的数据集, 并强化测试集的多样性, 提升模型在实际应用中的适应性。

2) 小行星表面图像智能理解关键技术。近年来, 针对月球、火星等地外天体表面陨石坑和岩石的识别在传统算法和深度学习方面的研究不断发展,

为小行星表面图像智能理解积累了丰富的经验。这些技术不仅提高了陨石坑和岩石的检测精度, 还为小行星探测任务的路径规划和安全决策提供了强有力的支持。

在陨石坑识别方面, 研究者通常采用立体视觉、目标检测和图像分割等方法。Matthies 等人 (2022) 针对月球表面探测开发了基于 3D 点云、立体视觉两种传统撞击坑检测算法, 以及一种结合 YOLOv4 (you-only-look-once v4) 检测和椭圆拟合技术对单目图像进行候选陨石坑分析的方法。随后, Cauligi 等人 (2023) 在 ShadowNav 工作中引入了混合视差不连续性检测和 Canny 边缘检测算法 (Canny, 1986), 提升了在光照不良区域的陨石坑检测能力。基于图像分割的陨石坑识别多采用 U-Net 架构, DeLatte 等人 (2019) 利用基于 U-Net 的分段卷积神经网络从火星白天的红外照片中分割陨石坑, 识别精度达到 65%~75%。DeepMoon 项目 (Silburt 等, 2019) 则使用 U-Net 从月球数字高程图中确定陨石坑的位置和大小, 测试集中恢复了 92% 的陨石坑, 几乎是总检测数量的两倍, 表明了深度学习在快速自动提取太阳系陨石坑方面的潜力。

在岩石识别方面, 小行星、月球和火星表面的岩石通常源于撞击碎裂, 形成广泛的岩石群体。这些岩石的形态和分布与地球上因化学和核爆炸或火山活动产生的巨石群体具有一定相似性, 单个巨石场可能包括数十万块岩石 (Bart 和 Melosh, 2010)。岩石识别通常采用基于规则的方法与基于深度学习的方法。基于规则的方法通过检测岩石的阴影 (Hood 等, 2022) 或分析岩石与表面像素亮度的对比度 (Nagle-McNaughton 等, 2020) 来实现。基于规则的方法在平坦的水平表面上表现较好, 因为它们能够有效区分巨石与其他粗糙元素的阴影。然而, 这些方法的局限在于, 地形坡度会影响阴影长度, 导致误差。此外, 阴影检测在很大程度上依赖于球形巨石的假设, 因此无法准确反映实际巨石的形状和方向特征。在高照明角度下, 或岩石部分被掩埋时, 这类算法的性能往往会受到显著影响。基于深度学习的方法通常使用目标检测、语义分割或实例分割任务的基线模型, 如图 2 所示。例如 Prieur 等人 (2023) 选用实例分割模型 Mask R-CNN (mask region-based convolutional neural network) (He 等, 2017), 利用分布在 753 个图像图块中的 30 000 多个岩石来训练模型, 成

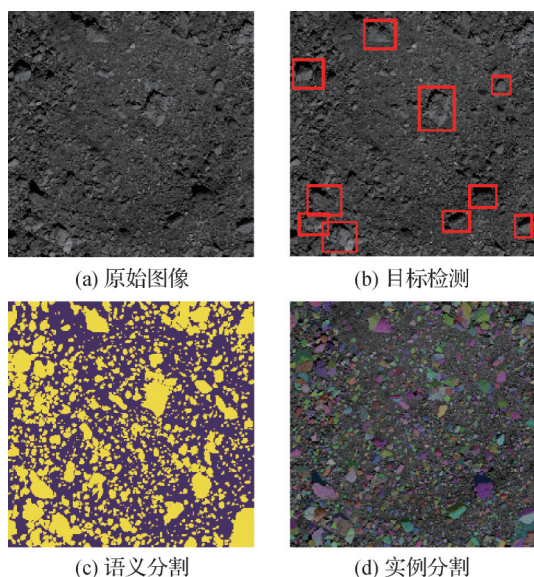


图2 天体表面岩石识别的典型方法示意图

Fig. 2 The typical methods for celestial surface rock recognition ((a) original image; (b) object detection; (c) semantic segmentation; (d) instance segmentation)

功检测并勾勒地球、月球和火星上几个位置的巨石。

这些研究方法及积累的数据为小行星表面地物识别的算法研究提供了重要支持。例如, Latorre 等人(2023)提出利用从月球到谷神星的迁移学习进行小行星实时自主陨石坑识别。他们在 DeepMoon (Silburt 等, 2019)月球数据的基础上, 使用 1 000 幅谷神星图像微调 U-Net, 达到 79.96% 的最佳 F1 值, 证明了迁移学习在不同地质特征以及不同图像分辨率下的有效性。这也表明, 历次深空探测任务的历史数据对后续任务的支持是不可忽视的。

Pugliatti 等人(2022)提出一种基于 U-Net 的小行星表面多种地物语义分割方法。利用 Blender 软件和光线追踪技术自动生成陨石坑、巨石和表面阴影等地物的标注数据, 通过合成图像与真实地形相结合, 构建了丰富的数据集, 用于训练卷积神经网络。结果表明, 卷积神经网络被证明能够以较高的准确度来分割图像, 且有良好的 mIoU (mean intersection-over-union) 值, 卷积神经网络还被证明能够将其性能推广到训练期间从未见过的模型上, 但性能略有下降。

总体而言, 智能化地物识别技术的发展, 为提升小行星探测任务的自主性和精确度奠定了坚实的基础。相比月面、火星等地外天体场景, 小行星的表面环境更加复杂, 且形态结构存在更多的不确定性, 因

此小行星表面图像智能理解相关技术的泛化性仍面临挑战。未来, 随着算法的不断优化以及更大规模训练数据的加入, 这些技术有望进一步提高小行星表面地物识别的效率和精度, 从而支持更加复杂的探测任务实施。

3) 基于地物识别的着陆选址和导航技术。地物识别在深空探测任务中具有关键作用, 尤其在着陆选址和导航技术方面。随着对小行星和月球表面环境的深入研究, 科学家们越来越依赖智能算法对地物进行高效识别, 以支持后续的科学探索任务。有效的地物识别不仅为安全的着陆区域选择提供了基础, 还为探测器的自主导航奠定了坚实的技术基础。

在着陆选址方面, 主要依赖对陨石坑和石块的识别结果, 进行人工或智能分析, 以规避危险区域, 确保安全着陆。例如, Caroselli 等人(2024)利用卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)进行岩石识别, 进而识别安全与危险的着陆区域。基于 Didymos 小行星场景的仿真环境与数据集, 该研究通过智能方法训练网络生成可靠的风险地图, 为提高着陆器的自主性和安全性提供了重要的技术支持。这种方法的成功应用, 标志着人工智能在深空任务中的潜力, 推动了未来更多探测任务的安全实施。

在导航技术方面, 传统方法通常需要人工选取标志物以对齐图像, 在通信困难情况下导航解决方案的有效性受到影响。Lunarnav (Daftry 等, 2023) 针对不同传感方式开发了陨石坑检测算法, 并基于检测结果通过撞击坑匹配和状态估计, 开发了基于陨石坑的定位算法, 算法思路如图 3 所示。

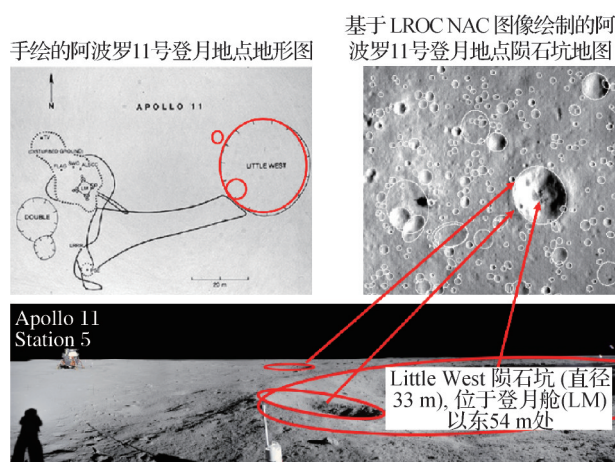


图3 LunarNav 整体系统概念(Daftry 等, 2023)

Fig. 3 Illustration of LunarNav's overall system concept (Daftry et al., 2023)

研究表明,在真实和模拟月球数据集上,该算法在白天的定位误差小于 5 m,展示了基于陨石坑的导航定位算法在实际应用中的可靠性。此外,Pugliatti 和 Topputo(2022)也基于小行星地物识别结果开发了导航算法,提出一种利用分割图的小体应用导航方法。该方法利用 CNN 生成航天器位置的粗略估计,结合归一化互相关技术,对于 Didymos 和 Hartley 合成数据集,准确率分别为 75.94% 和 68.60%,证明卷积神经网络能够在各种照明条件下与归一化互相关结合使用,以显著提升在复杂环境中的自主导航能力。

基于小行星表面图像智能理解的光学导航技术,极大提升了探测器在复杂环境下的自主导航能力。未来,随着地物识别算法和导航技术的进一步融合,这种技术有望在更多深空探测任务中得到推广和应用,为实现深空自主探测提供更加稳定和高效的解决方案。

1.2.2 小行星三维形貌智能感知

小行星的三维形貌感知是探测任务中的关键环节,通过准确重建其三维形貌,可以深入了解小行星的表面结构特征,从而支持航天器的精准操作,并为研究小行星的起源、演化及其物理特性提供科学依据。近年来,通用场景下的三维形貌感知技术发展迅速,传统影像处理方法不断优化,基于深度学习的新兴技术也在快速崛起。接下来,将概述这些技术的演进趋势,并探讨国际上在小行星场景下三维重建技术的最新进展和研究水平。

1)通用场景下的三维形貌感知关键技术。三维形貌感知的目标是重建场景的密集三维结构。在基于图像的三维重建中,多视图立体几何(multi-view stereo, MVS)算法通过融合多个视角的图像信息,生成精确的三维表示。近年来,深度学习的快速发展推动了传统 MVS 技术的优化,催生了众多先进的三维形貌感知方法。

传统 MVS 算法通过不同视角的图像匹配来估计场景的三维结构,已成为图像三维重建的基础。COLMAP(Schönberger 等,2016)是其中的代表性方法之一。它利用特征点匹配和稀疏三维重建技术,首先优化相机位姿和三维点位置,接着通过密集匹配生成详细的三维点云。COLMAP 在多视图数据处理中的表现稳定,虽然计算复杂度较高,需要较长的处理时间和较大的存储空间,但仍然广泛用于相机

外参恢复,其位姿估计结果作为许多深度学习方法的输入。

深度学习推动了三维形貌感知技术的快速演进,主要方法包括基于深度图、体素、神经辐射场(neural radiance fields, NeRF)和三维高斯泼溅法。基于深度图的方法通常包含相机校准、视图选择、多视图深度估计和深度融合流程,利用神经网络直接从输入图像中提取深度信息,与传统 MVS 结合,可实现高精度的三维重建。基于体素(voxel)的方法通过将场景分割为规则的三维网格(体素),并利用体积表示和隐式函数来估计几何形状。例如,符号距离函数(signed distance function, SDF)是一种常见的体素表示方式,通过估计距离场来获取三维形状。Murez 等人(2020)提出一种端到端三维重建方法,从一组提出的 RGB 图像直接回归一个截断的符号距离函数(truncated signed distance function, TSDF)。这种方法的优点在于能够直接处理复杂的几何结构,适用于小型场景。然而,由于需要在空间中存储大量的体素,这类方法的内存消耗非常高,难以应用于大规模场景的重建。NeRF(Mildenhall 等,2022)是一种近年来兴起的新兴技术,采用神经网络来表示场景的体积信息。与传统方法不同,NeRF 通过优化体积渲染过程,从训练图像中学习视角相关的光线传输,进而合成新视角下的图像。由于 NeRF 能在细节表现上达到很高的精度,特别是在复杂光照条件下,近年来在三维重建和新视角合成领域得到了广泛应用。三维高斯泼溅(3D Gaussian splatting)(Kerbl 等,2023)是一种利用概率图像表示进行三维重建的方法。通过在空间中分布无数个高斯球形体来表示三维结构,这种方法既可以用来生成点云,也能够用于光滑的表面重建。与 NeRF 类似,三维高斯泼溅方法在新视角合成中表现良好,但其优点在于可以更灵活地适应稀疏数据。在处理高噪声环境或数据量不足的情况下,三维高斯泼溅方法仍能保持较高的重建质量。

总的来说,三维形貌感知技术的迅速发展使得基于图像的三维重建方法在精度和计算效率上都取得了显著提升。传统的 MVS 方法如 COLMAP 在稳定性和处理多视角数据的能力上表现突出,而基于深度学习的新兴方法则在处理复杂的场景结构和光照条件方面具有优势。特别是基于 NeRF 和三维高斯泼溅的技术,通过神经网络和概率表示的引入,使

得新视角合成和点云生成的质量大幅提高,正在推动三维形貌感知技术向更高效、更精确的方向发展。

2)小行星三维形貌感知关键技术。小行星形貌的重建也是影响抵近和附着策略的重要因素,国外学术界的研究主要是立体摄影测量(stereophotography, SPG)和立体光度测量(SPG)是重建小行星表面模型的两种主要基于图像的算法。

SPG是一种利用多视角影像生成三维模型的经典方法。工作流程通常包括立体图像选择、特征匹配以获取立体对,以及通过这些立体对计算连接点的图像坐标。接着,使用束调整法计算外部定向参数和连接点的三维坐标,最终将这些局部子集融合为一个完整的表面模型(Scholten等,2019)。然而,SPG的性能在实际应用中仍然面临一些挑战。首先,小行星表面可能存在大量无纹理区域或光照变化较大的场景,这会导致特征匹配困难,从而降低重建的精度。其次,由于航天器的轨道限制,不同视角的图像可能存在较大差异,进一步增加了立体对的获取难度。因此,在实际任务中,如何选择合适的视角和改进匹配算法,是提高SPG效果的关键。

SPC是一种结合了SPG和光度测量的技术,旨在弥补SPG在纹理匹配方面的不足。SPC首先通过SPG计算出“地图像”(maplets)的三维位置,这些地图像是局部的表面块,包含几何形状和反照率信息。然后,SPC使用光度测量技术进行像素间的坡度估计,从而生成高分辨率的地形细节(Gaskell等,2008)。与SPG相比,SPC能够在低分辨率图像中恢复出更多的细节信息,因此在一些小行星探测任务中表现出色。SPC用于重建系川、灶神星、龙宫和贝努等小行星的表面,为科学研究和任务规划提供了详细的地形信息。然而,SPC通常采用从粗到精的策略,通过迭代逐步细化和更新形状模型,因此需要人工辅助和大量图像,准备和处理时间较长。

SPG和SPC是两种主要的小行星表面重建方法,各具优势与局限性。SPG在多视角数据的利用和特征匹配方面效率较高,但在无纹理或光照变化较大的区域中表现有限。相比之下,SPC通过结合光度信息,能够在复杂表面上恢复更多细节,但其处理流程复杂,对图像质量的要求较高,增加了应用难度。未来亟需开发更高效的算法和更智能的多视角选择策略,以提升重建精度和效率。

1.2.3 小行星物理特性智能反演

随着空间探测任务的深入开展,小行星的物理特性研究成为行星科学的重要课题之一。通过对小行星地表物理特性和引力场的智能反演,科学家们可以更全面地了解小行星的形成与演化历史。下面将从地表物理特性和引力场两个方面进行综述,并探讨当前的研究进展。

1)小行星的地质起源和演化推断。数字地形图对于小行星的地质起源和演化推断至关重要(Barnouin等,2020),OSIRIS-REx任务为此提供了关键的数据支持,研究者通过高分辨率影像分析、三维形状建模与重建、热红外图像分析以及多波段数据处理等技术的结合,全面理解小行星的表面特性、内部结构和热物理特性。这些方法相辅相成,为解释小行星的地质历史和动力学行为奠定了重要基础。

Lauretta等人(2015)整合多种观测和分析数据,对Bennu的物理、地质和动力学特性进行了全面研究。他们通过详细的表面图像分析,揭示了Bennu的地表特征、岩石分布以及表面粗糙度。这些高分辨率的图像数据为小行星的地质特性研究提供了直接的视觉证据,同时也帮助建立了Bennu的三维形状模型。结合多种成像和图像处理技术,这些数据为科学研究提供了关键的实证基础,进一步提高了对Bennu地表和内部结构的理解。Reuter等人(2018)聚焦于Bennu表面成分的分析,通过OVIRS仪器获取的高空间分辨率光谱数据,揭示了Bennu表面的矿物和化学成分。这些光谱数据使研究团队能够识别小行星表面物质的种类和分布,帮助选择最适合采样的地点。这种方法有效地补充了其他影像和热数据分析,提供了更为综合的表面特性图谱。DellaGiustina等人(2019)进一步的研究充分展示了多学科技术的融合优势。他们基于OSIRIS-REx任务的多源数据,提出一种结合热辐射(OSIRIS-REx visible and infrared spectrometer和OSIRIS-REx thermal emission spectrometer)与光学成像(OCAMS系列相机)的分析方法,通过测量表面温度分布,推导出小行星的热惯性和颗粒特性。而光学数据则用于分析地表形貌和反射率,帮助理解物质的分布与特性。这项研究中,该研究团队采用了Monte Carlo方法来评估模型参数的不确定性,并通过自动化图像拼接与光度校正技术,显著提升了数据融合处理的精确性。结果显示,贝努表面整体粗糙,布满巨石,反照

率较低,表面粒子年龄从母体巨石的破坏到微米级粒子的原位产生不等。这一发现深化了对“碎石堆”小行星地表物理性质的理解,并为未来的着陆和采样任务设计提供了科学依据。

2)小行星引力场。在小行星引力场研究中,主要有两种常用的计算方法:轨道跟踪法和形状建模法。轨道跟踪法利用探测器的轨道数据,通过建立星地链路模型,提取引力摄动信息,并使用反演技术推导出小行星的引力场。形状建模法则基于探测器和地面观测获取的影像数据,构建小行星的三维形状模型。在假设小行星密度均匀的前提下,根据该形状模型可以计算得到其引力场的分布。Miller等人(2002)通过比较基于均质密度的形状模型和轨道跟踪数据解算得到Eros引力场,发现两者之间的差异可能是由于质量分布变化引起。这些研究为揭示Eros的内部结构特性提供了关键的线索,Garnier等人(2002)利用多普勒跟踪数据计算了Eros的椭球谐模型和球谐模型的引力场,并通过对两者的对比分析,提出在Eros的末端、Psyche陨石坑和Himeros撞击坑区域均存在重力异常。Chesley等人(2014)结合Yarkovsky效应和热惯性测量结果,计算得出了Bennu的质量。此外,Sebera等人(2016)利用多面体模型法建立了360阶的Bennu引力场模型,满足了探测器精准导航的需求。

2 国内研究进展

针对小行星探测任务,中国的相关研究也取得了显著进展,人工智能技术在地物识别、三维形貌感知和物理特性分析等关键领域的应用不断深入。近年来,中国航天机构和科研团队通过自主研发和国际合作,积极推动小行星探测任务中图像智能处理技术的创新与发展。以下将介绍国内在这些领域的主要研究成果和应用情况,并对相关技术的研究现状和发展水平进行概述。

2.1 产业界应用现状

自2007年“嫦娥一号”月球探测器成功发射以来,中国在深空探测领域取得了显著进展,先后执行了7次深空探测任务,覆盖了月球、火星等多个目标天体,产出了大量原创性科研成果,逐步建立了较为完善的深空探测科研和工程体系。

其中,嫦娥二号于2011年完成既定月球探测任

务后,率先进行了日地拉格朗日L2点的探测,并于2012年12月成功对小行星图塔蒂斯实现了交会飞越。这是中国首次针对小行星的探测任务,通过一次发射实现了月球、L2点和小行星的多目标、多任务探测,整体技术水平达到国际先进水平(于登云和马继楠,2022)。

中国计划于2025年开展首次小行星采样返回任务,即“天问二号”任务。在30多年的小天体探测发展历程中,美国、欧洲和日本相继完成了具有标志性的探测任务,取得了丰富的科学成果。而中国的“天问二号”任务起步较高,规划在3年内完成对近地小行星的探测和样本返回,未来10年内更进一步开展主带小行星的环绕探测,以实现中国在小行星探测领域的跨越式发展(李春来等,2024)。天问二号设置了5大类科学目标,涵盖29项具体的科学研究内容(李春来等,2024),这对小行星图像智能处理技术提出更高的要求。

2.2 学术界研究现状

国内的学术界针对小行星图像智能处理技术在基础研究和技术创新方面也取得了显著进展。近年来,研究人员围绕地物识别、三维形貌感知和物理特性分析等关键技术展开了深入探索,为小行星探测任务的智能化和自主化奠定了理论和技术基础。以下将介绍国内在这些学术研究方向上的主要进展和成就。

2.2.1 小行星表面图像智能理解

在小行星表面图像智能理解方面,国内的研究也主要从关键技术、数据集和下游任务应用3个方向展开。研究团队在算法优化、深度学习模型开发等技术层面不断创新,同时也积极推进高质量数据集的建设,接下来详细介绍国内在这3个方面的研究情况。

1)小行星表面图像智能理解数据集。国内在小行星表面图像智能理解的数据集构建方面,与国际上的情况类似,尚未形成广泛使用的标准化标注数据集,研究者主要依赖于针对具体任务自行收集和标注的数据。这种现象反映了小行星探测任务中图像数据获取的挑战性和多样性,同时也揭示了标准化数据集在提升技术推广与应用方面的迫切需求。

在具体实践中,一些研究团队围绕小行星地物识别构建了独立的数据集。例如有研究利用来自谷神星和灶神星的900多幅图像进行训练,数据通过

Labelme 注释,并在后续评估中使用了爱神星以及其他图像来严格测试模型的性能(Li等,2024)。另一项有代表性的研究是对贝努小行星的研究(Zhu等,2021),在该项目中,研究者使用NASA OSIRIS-REx任务收集的2 155幅高分辨率图像,通过拼接和校正,制作了贝努表面的全球地图,分辨率达到了每像素2英寸(约5 cm),这在全球行星体映射中属较高水平。选定特定区域并切割成 300×300 像素的小块,共计884个小块。通过手动筛选和标注,最终保留了729个用于模型训练,并采用Mosaic技术进行数据增强,以提高模型的泛化和鲁棒性。

这些数据集的构建实践不仅展示了国内在小行星表面图像智能理解上的探索与创新,也反映了当前数据资源不足和标注标准缺乏带来的技术挑战。应进一步推动标准化数据集的开发,以促进国内外学术界和工程领域更紧密的合作。

2)小行星表面图像智能理解关键技术。近年来,国内外对于小行星表面图像的智能理解相关研究逐渐从传统的图像处理方法转向基于深度学习的智能技术。这些技术在小行星探测任务中扮演了关键角色,特别在陨石坑、岩石等地物的检测和分类方面。国内研究机构也在积极推进这一领域的发展,例如通过引入多源数据融合和主动学习方法,进一步提高了地物识别的精度和稳定性。

在陨石坑识别方面,传统的边缘检测和梯度滤波技术曾是早期陨石坑检测的主要方法,崔平远等人(2020)详细探讨了这些技术的应用。然而,传统方法在处理弱光和复杂纹理时,通常会面临准确度下降的问题,徐青等人(2016)通过序列图像构建了Vesta小行星的三维形貌,并提出基于等值线分析的特征提取方法。这类方法在独立模型的连接过程中易出现地形测量误差累积,影响探测器的导航和定位。解决该问题可以考虑引入多源数据如激光测距仪,与影像信息进行联合平差以提升识别稳定性。随着深度学习技术的兴起,Li等人(2024)提出基于CSE-Net的检测方法,利用空间特征自融合金字塔和多尺度特征融合结构,有效提升了小尺寸陨石坑的分割精度。与传统方法相比,深度学习技术不仅能够处理复杂的表面纹理,还能在不同光照条件下保持较高的分割性能。Wu等人(2018)提出主动机器学习方法进行自动陨石坑检测的方法。该方法包括两个过程:首先通过已标记的正负样本训练分类

器,以生成初步的陨石坑检测结果。接着,该方法会根据三维信息进行反馈,进一步对检测结果进行分类和更新,最终提高检测的准确性。在研究中,重点提取直径大于100 m的陨石坑。

对于岩石识别,Li和Wu(2018)针对月面提出基于光学图像中沿照明方向的梯度差异的自动岩石检测方法,其基本思想是,阳光的入射角随表面波动而变化,因此当地面特征在图像中成像时,它们的亮度分布是不同的。除了此类基于规则的方法,Zhu等人(2021)通过改进的YOLOv5(you-only-look-once v5)模型检测到Bennu小行星表面共计257 238个石块,并根据直径将其分为不同尺度。此外,分析显示 $0^\circ \sim 45^\circ \text{S}$ 区域的陨石数量最多,约占总数的34%,且南半球的陨石数量超过北半球,突出特定区域内的岩石分布特征。通过可视化手段展示了不同区域岩石的分布情况,这些分析不仅揭示了小行星表面的地质构成,还为未来的行星探测任务提供了重要的参考。

目前,国内小行星表面图像智能理解的技术有一定的发展,深度学习在提高地物识别的准确性和适应性方面展现出巨大潜力。传统方法在精度和稳定性上仍有不足,特别是在面对复杂的地形、光照条件以及数据标注不足的情况下。深度学习方法依赖于大量标注数据的训练,虽然在性能上优于传统方法,但其计算开销较高,在实际应用中需要考虑计算资源的限制。

3)基于地物识别的着陆选址和导航任务。在小行星探测任务中,地物识别不仅仅用于科学探测,还在着陆选址与导航任务中发挥了重要作用。国内的研究者在该领域也进行了系列研究,通过引入多种图像分析技术和智能算法,为探测器的安全着陆和导航提供了可靠的技术支持。

对于着陆选址,Wu等人(2018)自动检测岩石并采用主动机器学习方法检测陨石坑,分别构建了候选着陆区域的岩石丰度图和陨石坑分布图,通过分析地形特征,识别出不适合安全着陆的局部区域。这些分析结果不仅帮助选定了安全的着陆点,还揭示了月球表面地质的丰富细节。在候选着陆区,约90%的区域岩石丰度低于1%,这表明大部分区域相对平坦,适合安全着陆。只有0.9%的区域岩石丰度超过7%,这些区域主要集中在大陨石坑附近,可能对着陆造成潜在危险,该区域的平均陨石坑密度为

每 100 平方公里约 250 个,表明陨石坑的分布情况。陨石坑的存在及其形态特征对于着陆点的评估至关重要,因为它们可能影响着陆器的安全性和操作能力。研究结果不仅有助于选择合适的着陆点,还提供了关于月球表面地质的新见解,揭示了岩石丰度、陨石坑密度、陨石坑成熟度与地表年龄之间的关系。

地物识别也用于精确的导航任务,例如基于陨石坑拟合姿态信息的导航技术,能够在复杂地形下提供准确的探测器定位结果。Li 等人(2024)提出一种新颖的视觉导航匹配方法,利用卷积神经网络实现陨石坑的准确分割及陨石坑匹配,并引入一种创新的不规则区域描述符构造方法,如图 4 所示。该方法专为表征陨石坑而定制,提高了匹配过程的精度,在小行星场景照明和旋转变化表现出显著的适应能力。

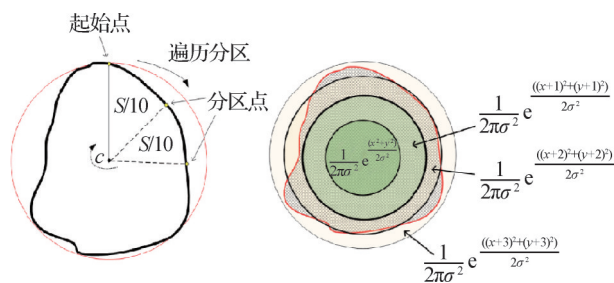


图 4 不规则区域描述符构造方法(Li 等, 2024)

Fig. 4 Construction method of irregular region descriptors (Li et al., 2024)

基于深度学习的方法在地物识别上展现了较高的准确性和适应性,能够处理复杂环境中的变化,具备支持着陆选址、导航等后续任务的能力。但在实际应用中,仍需针对光照、特征多样性和数据获取等问题开展更深入的研究,以提高模型的鲁棒性和实用性。

2.2.2 小行星三维形貌智能感知

近年来,国内在小行星三维形貌感知方面也取得了重要进展,对立体摄影测量(SPG)和立体光度测量(SPC)进行深入研究和应用。例如,徐青等人(2016)提出一种基于立体相机的三维地形重建方法,首先通过立体相机获取重叠区域的三维地形,再利用前后立体模型中的连接点,将各个独立模型拼接成一个完整的地形信息,并通过整体最小二乘平差算法确定小行星的形貌模型及其特征。这种方法能够有效整合不同视角的数据,提高了模型的完整性和精度。

除了传统方法的应用,国内研究还紧跟国际前沿技术,积极探索基于深度学习的新兴方法。Chen 等人(2024a)提出一种基于全连通神经网络的神经隐式方法,能够利用稀疏图像集进行小行星的高质量形状建模。该方法通过引入多尺度周围点的信息增强对细节的捕捉,并采用基于掩膜的分类采样策略,有效缓解了神经隐式方法的过度平滑问题,实现思路如图 5 所示。在对小行星系川和龙宫的实验中,即使在相机覆盖范围有限的条件下,该方法也能生成与传统方法一致的全面形状模型,并显著减少数据处理时间。

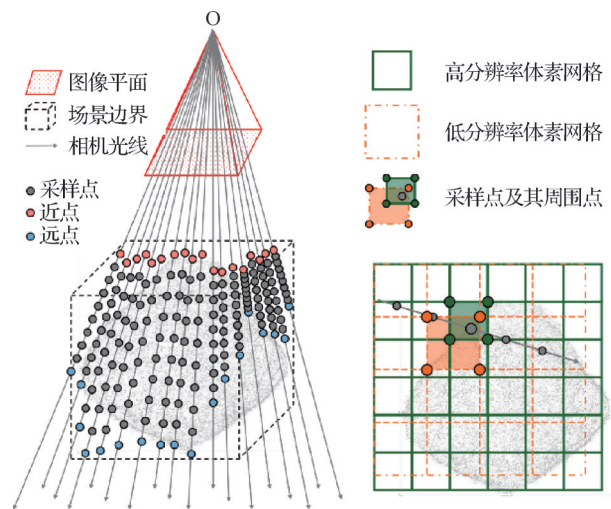


图 5 三维点采样示意(Chen 等, 2024a)

Fig. 5 The illustration of 3D points sampling (Chen et al., 2024a)

此外, Asteroid-NeRF (Chen 等, 2024b), 基于神经辐射场(NeRF)和有符号距离场(SDF)技术,结合多视图姿态图像生成三维模型,并通过外观嵌入适应不同光照条件,确保几何一致性。通过多视图光度一致性约束 SDF,该方法在不同太阳角度和光照条件下优化重建效果。在小行星系川和贝努的实验中, Asteroid-NeRF 展示了优异性能,弥补了 SPG 和 SPC 的不足,能够生成高度详细的表面模型。

国内对小行星三维形貌感知的研究覆盖了从传统方法到基于深度学习的新兴技术,通过 SPG 和 SPC 等经典方法积累了丰富的实践经验,并在神经网络和神经辐射场的基础上开发了创新的重建技术。随着技术的不断进步,预计未来将涌现出更多高效且智能的三维形貌重建方法,为小行星探测及其他深空探测任务带来更多可能性。

2.2.3 小行星物理特性智能反演

国内在小行星物理特性研究方面逐步开展了一系列相关研究。虽然相比国际上已有的成果,我国在小行星地质学和引力场建模等方面起步较晚,但通过引入国际探测任务的数据分析和自主研发的研究方法,国内科研团队正在积累经验,逐步缩小与国际先进水平的差距。

1)小行星的地质起源和演化推断。尽管我国在小行星地质学方面的发展相对滞后,但近年来已有所进步,特别是在火星地质和小行星物质组成的研究上逐渐取得了成果。刘洋等人(2021)通过对火星表面多样地貌特征的研究,验证了火星在早期经历了复杂的地质活动,包括撞击、火山活动和水流侵蚀等过程。他们的研究解决了长期以来关于火星早期气候条件的争议,证明火星在其演化历史中可能经历过间歇性的变暖事件,这些事件引发了山谷网络和河流侵蚀地貌的形成,同时促进了含水矿物的沉积。该研究强调,未来应将火星表面地质过程与水文循环和三维气候模型相结合,以进一步重建火星的气候演化历史。周婷等人(2023)研究揭示了C型小行星的物质组成及其空间风化改造特征。他们通过对遥感光谱与碳质球粒陨石光谱的对比分析,验证了C型小行星表面存在含 Fe^{3+} 的水合矿物,并揭示出这些小行星表面受空间风化影响,矿物成分发生变化,导致光谱特征偏蓝化。该研究有效解决了由于空间风化效应导致的遥感光谱与地面样品匹配难题,证明了C型小行星表面长期暴露在太阳风、高能粒子和微陨石撞击下,其物质成分和光谱特性均受到了改造。这一成果对于准确解译小行星的遥感光谱数据、理解小行星的演化历史以及指导未来的采样返回任务具有重要意义。

2)小行星引力场。在小行星引力场的研究中,国内学者通过引入国际探测任务的数据分析,结合自主开发的建模方法,逐渐建立了具有中国特色的研究路径。

张振江等人(2010)基于传统的三轴椭球体模型和NASA公布的Eros形状模型,利用多面体模型法计算了Eros的引力场。通过与NEAR探测器轨道数据解算得到的引力场进行对比分析,他们发现,基于NASA形状模型的多面体模型法所得引力场与实际数据的最大误差不超过6%,这表明该方法在提高引力场计算精度方面具有显著优势。崔祜涛等人

(2012)进一步利用多面体模型法计算了Eros的引力场,验证了国外学者Garmier等人(2022)提出的小行星末端存在负重力异常的结论。国内对火卫一(Phobos)引力场的研究也有所进展,主要集中在数据分析和模型的改进(史弦等,2012;杨轩等,2019)。

3 国内外研究进展比较

国际团队在小行星表面图像智能理解方面开发了许多用于陨石坑和岩石识别的先进算法,这些技术已经在产业中投入应用,为深空探测任务提供了关键支持。例如,美国NASA的OSIRIS-REx任务利用视觉导航技术,结合地标匹配算法,成功完成了对Bennu小行星的样本采集,大幅提高了任务自主性。DART任务的精准打击则验证了视觉识别在防御性探测中的潜力。这些技术展现了国际团队在任务执行和技术转化方面的优势。相比之下,国内在这一领域的研究相对起步较晚,近年来通过引入深度学习和多源数据融合方法取得了较快发展。国内研究团队已在算法优化和模型开发上取得了重要进展,但在算法的泛化性和数据集的多样性上与国际先进水平还有差距。特别是缺乏实际任务的长期积累,限制了算法的实际应用效果。值得注意的是,无论国内还是国际,在公开、标准化和广泛认可的小行星图像数据集建设上都存在不足。

在小行星三维形貌智能感知方面,国际团队主要采用SPG和SPC方法,例如NASA的OSIRIS-REx和日本JAXA的Hayabusa2任务都使用SPC技术,实现了小行星表面的高分辨率三维建模,这些任务积累了丰富的经验,表明国际团队在技术成熟度和任务自主性上的领先地位。国内团队在SPG和SPC技术的研究上有深入探索,并积极跟进国际技术发展趋势。在传统技术基础上,国内研究者也开展了基于NeRF和SDF模型的三维重建研究,尤其是在处理多视角数据时,提出创新的算法来提高建模精度和处理效率。在数据覆盖有限的情况下,国内研究者通过神经网络方法有效提升了处理速度,取得了与国际方法一致的结果。具体来说,使用SPC方法时网格平均边长为0.595 m,而根据Chen等人(2024a)的研究,Asteroid-NeRF模型的网格平均边长为0.311 m,显示出更精细的细节。进一步量化性能差异时,国内Asteroid-NeRF方法与SPC模型的

差异较小,均值为0.058 m,标准差为0.858 m,显示出较强的一致性。这表明国内在探索传统与新兴技术结合上取得了重要突破,在新兴技术的探索中展现了创新潜力。

小行星物理特性智能反演方面,国际上采用了多种反演方法。通过结合多源数据(如光谱、热辐射和激光雷达数据),NASA、欧洲和日本的任务也在逐步采用和改进这些技术,致力于提升对小行星的科学理解。国内在小行星物理特性分析上通过积极引入国际探测任务的数据和技术,已经积累了一定的经验,还需通过更多实际任务提升数据分析能力,进一步完善物理特性反演技术。

国内外在小行星探测任务中的研究各具亮点,也各有不足。国际团队凭借多年任务经验,在算法成熟度、任务自主性和技术转化方面有显著优势,特别是在实时处理和多源数据融合技术的成熟应用上。相较而言,国内团队近几年通过技术引入和创新发展,提升了研究水平,尤其在深度学习和算法融合上表现出创新潜力。然而,由于缺乏长期的任务经验积累和标准化数据支持,国内技术的实用性和算法的泛化性还需进一步加强。

4 发展趋势与展望

在未来小行星探测任务中,技术的进一步发展将极大提升探测器的自主性和精确性,尤其在物地识别、三维形貌感知和物理特性分析等关键领域。

在表面图像智能理解方面,引入大规模预训练模型如SAM(segment anything model)(Kirillov等,2023)、Grounding DINO(Liu等,2025)等深度学习技术将成为趋势。这些模型在图像分割、物体检测和语义分析上展现出强大的能力,在三维形貌感知方面,由于小行星表面光照条件复杂,且数据采集受限于稀疏视角,未来的研究需要重点解决在动态光照、阴影干扰和视角变化情况下,如何有效提取小行星表面结构。在物理特性分析方面,多源数据的综合利用将继续发挥重要作用。任务设计将更加注重多源数据融合与深度学习算法的结合,通过跨模态数据的关联分析,提高物理特性反演的准确性,从而更深入地理解小行星的演化历史。

与此同时,标准化数据集的建设对于国内外小行星探测技术的发展至关重要,亟需提供一致的评

估基准,促进技术的快速推广,促进全球科研机构间的合作。对于中国而言,在探月工程“绕”“落”“回”阶段性成果和“天问一号”火星探测任务成功的基础上,下一步将迈向“天问二号”小行星探测任务。天问二号是中国首次针对小行星的探测任务,融合了采样返回、空间探测和技术验证等目标,为国内科研团队在深空探测领域的技术创新提供了宝贵机会。

未来的小行星探测任务将依赖于新技术的不断融合,包括引入大规模预训练模型、开发稀疏视角的重建方法和综合利用多源数据。同时,标准化数据集的建设和技术合作的深化,将成为推动深空探测技术发展的重要支柱。随着天问二号等任务的推进,中国在关键技术领域的进展将助力国际深空探测的创新,为提升全球合作中的话语权提供坚实基础。

5 结语

本报告综述了小行星抵近探测任务中的图像智能处理技术,从表面地物识别、三维形貌感知和物理特性反演3个方面,系统分析了当前技术在国内外产业界的应用现状与学术研究的最新进展。随着天问二号任务的推进及相关技术的深入发展,未来的研究方向将集中在高质量数据集建设、高精度三维重建、多源数据融合处理分析以及实时处理等关键领域。这些研究方向不仅将为天问二号任务的成功实施提供技术支撑,也将推动我国在深空探测技术领域实现跨越式发展,同时为国际合作和深空探测技术的整体进步贡献力量。

致谢:本文由中国图象图形学学会空间信息感知与决策专业委员会组织撰写,该专业委员会链接为<https://www.csig.org.cn/16/202309/51298.html>。

参考文献(References)

- Barker M K, Mazarico E, Neumann G A, Zuber M T, Haruyama J and Smith D E. 2016. A new lunar digital elevation model from the Lunar Orbiter Laser Altimeter and SELENE Terrain Camera. *Icarus*, 273: 346-355 [DOI: 10.1016/j.icarus.2015.07.039]
- Barnouin O S, Daly M G, Palmer E E, Johnson C L, Gaskell R W, Al Asad M, Bierhaus E B, Craft K L, Ernst C M, Espiritu R C, Nair H, Neumann G A, Nguyen L, Nolan M C, Mazarico E, Perry M E, Philpott L C, Roberts J H, Steele R J, Seabrook J, Susorney H C M, Weirich J R and Lauretta D S. 2020. Digital terrain mapping

- by the OSIRIS-REx mission. *Planetary and Space Science*, 180: #104764 [DOI: 10.1016/j.pss.2019.104764]
- Bart G D and Melosh H J. 2010. Distributions of boulders ejected from lunar craters. *Icarus*, 209 (2): 337-357 [DOI: 10.1016/j.icarus.2010.05.023]
- Campagnola S, Yam C H, Tsuda Y, Ogawa N and Kawakatsu Y. 2018. Mission analysis for the Martian Moons Explorer (MMX) mission. *Acta Astronautica*, 146: 409-417 [DOI: 10.1016/j.actaastro.2018.03.024]
- Canny J. 1986. A computational approach to edge detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, PAMI-8 (6): 679-698 [DOI: 10.1109/TPAMI.1986.4767851]
- Caroselli E, Belien F, Falke A, Curti F and Förstner R. 2024. Deep learning-based passive hazard detection for asteroid landing in unexplored environment//Proceedings of the 44th Annual American Astronautical Society Guidance, Navigation, and Control Conference, 2022. Cham, Switzerland: Springer: 319-334
- Cauligi A, Swan R M, Ono H, Daftry S, Elliott J, Matthies L and Atha D. 2023. ShadowNav: crater-based localization for nighttime and permanently shadowed region lunar navigation//Proceedings of 2023 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, USA: IEEE: 1-12
- Chen H, Hu X Y, Willner K, Ye Z, Damme F, Gläser P, Zheng Y J, Tong X H, Hußmann H and Oberst J. 2024a. Neural implicit shape modeling for small planetary bodies from multi-view images using a mask-based classification sampling strategy. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 212: 122-145 [DOI: 10.1016/j.isprs.2024.04.029]
- Chen S H, Wu B, Li H L, Li Z J and Liu Y. 2024b. Asteroid-NeRF: a deep-learning method for 3D surface reconstruction of asteroids. *Astronomy and Astrophysics*, 687: #A278 [DOI: 10.1051/0004-6361/202450053]
- Cheng A F, Rivkin A S, Michel P, Atchison J, Barnouin O, Benner L, Chabot N L, Ernst C, Fahnestock E G, Kueppers M, Pravec P, Rainey E, Richardson D C, Stickle A M and Thomas C. 2018. AIDA DART asteroid deflection test: planetary defense and science objectives. *Planetary and Space Science*, 157: 104-115 [DOI: 10.1016/j.pss.2018.02.015]
- Chesley S R, Farnocchia D, Nolan M C, Vokrouhlický D, Chodas P W, Milani A, Spoto F, Rozitis B, Benner L A M, Bottke W F, Busch M W, Emery J P, Howell E S, Lauretta D S, Margot J L and Taylor P A. 2014. Orbit and bulk density of the OSIRIS-REx target Asteroid (101955) Bennu. *Icarus*, 235: 5-22 [DOI: 10.1016/j.icarus.2014.02.020]
- Cui H T, Zhang Z J and Yu M. 2012. Computing and analysis of gravity field of Eros433 using polyhedron model. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 44 (3): 17-22, 80 (崔祜涛, 张振江, 余萌. 2012. 多面体模型的Eros433引力场计算与分析. 哈尔滨工业大学学报, 44 (3): 17-22, 80) [DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.2012.03.004]
- Cui P Y, Jia H, Zhu S Y and Lu X X. 2020. Research progress on optical navigation feature recognition and extraction technologies for small body exploration. *Journal of Astronautics*, 41 (7): 880-888 (崔平远, 贾贺, 朱圣英, 陆晓萱. 2020. 小天体光学导航特征识别与提取研究进展. 宇航学报, 41 (7): 880-888) [DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2020.07.006]
- Daftry S, Chen Z L, Cheng Y, Tepsuporn S, Khattak S, Matthies L, Coltin B, Naal U, Ma L M and Deans M. 2023. LunarNav: crater-based localization for long-range autonomous lunar rover navigation//Proceedings of 2023 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, USA: IEEE: 1-15
- Daly R T, Ernst C M, Barnouin O S, Chabot N L, Rivkin A S, Cheng A F, Adams E Y, Agrusa H F, Abel E D, Alford A L, Asphaug E I, Atchison J A, Badger A R, Baki P, Ballouz R L, Bekker D L, Bellerose J, Bhaskaran S, Buratti B J, Cambioni S, Chen M H, Chesley S R, Chiu G, Collins G S, Cox M W, DeCoster M E, Erickson P S, Espiritu R C, Faber A S, Farnham T L, Ferrari F, Fletcher Z J, Gaskell R W, Graninger D M, Haque M A, Harrington-Duff P A, Hefter S, Herreros I, Hirabayashi M, Huang P M, Hsieh S Y W, Jacobson S A, Jenkins S N, Jensenius M A, John J W, Jutzi M, Kohout T, Krueger T O, Laipert F E, Lopez N R, Luther R, Lucchetti A, Mages D M, Marchi S, Martin A C, McQuaide M E, Michel P, Moskovitz N A, Murphy I W, Murdoch N, Naidu S P, Nair H, Nolan M C, Ormó J, Pajola M, Palmer E E, Peachey J M, Pravec P, Raducan S D, Ramesh K T, Ramirez J R, Reynolds E L, Richman J E, Robin C Q, Rodriguez L M, Roufberg L M, Rush B P, Sawyer C A, Scheeres D J, Scheirich P, Schwartz S R, Shannon M P, Shapiro B N, Shearer C E, Smith E J, Steele R J, Steckloff J K, Stickle A M, Sunshine J M, Superfin E A, Tarzi Z B, Thomas C A, Thomas J R, Trigo-Rodríguez J M, Tropic B T, Vaughan A T, Velez D, Waller C D, Wilson D S, Wortman K A and Zhang Y. 2023. Successful kinetic impact into an asteroid for planetary defence. *Nature*, 616 (7957): 443-447 [DOI: 10.1038/s41586-023-05810-5]
- De Santayana R P and Lauer M. 2015. Optical measurements for Rosetta navigation near the comet//Proceedings of the 25th International Symposium on Space Flight Dynamics (ISSFD). Munich, Germany: International Symposium on Space Flight Dynamics: 19-23
- DeLatta D M, Crites S T, Guttenberg N, Tasker E J and Yairi T. 2019. Segmentation convolutional neural networks for automatic crater detection on Mars. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 12(8): 2944-2957 [DOI: 10.1109/JSTARS.2019.2918302]
- DellaGiustina D N, Emery J P, Golish D R, Rozitis B, Bennett C A, Burke K N, Ballouz R L, Becker K J, Christensen P R, Drouet d' Aubigny C Y, Hamilton V E, Reuter D C, Rizk B, Simon A A, Asphaug E, Bandfield J L, Barnouin O S, Barucci M A, Bierhaus E B, Binzel R P, Bottke W F, Bowles N E, Campins H, Clark B C, Clark B E, Connolly H C Jr, Daly M G, de Leon J, Delbo M, Deshapriya J D P, Elder C M, Fornasier S, Hergenrother C W, Howell E S, Jawin E R, Kaplan H H, Karetta T R, Le Corre L, Li

- J Y, Licandro J, Lim L F, Michel P, Molaro J, Nolan M C, Pajola M, Popescu M, Rizos Garcia J L, Ryan A, Schwartz S R, Shultz N, Siegler M A, Smith P H, Tatsumi E, Thomas C A, Walsh K J, Wolner C W V, Zou X D, Lauretta D S and The OSIRIS-REx Team. 2019. Properties of rubble-pile asteroid (101955) Bennu from OSIRIS-REx imaging and thermal analysis. *Nature Astronomy*, 3(4): 341-351 [DOI: 10.1038/s41550-019-0731-1]
- Garnier R, Barriot J P, Konopliv A S and Yeomans D K. 2002. Modeling of the Eros gravity field as an ellipsoidal harmonic expansion from the NEAR Doppler tracking data. *Geophysical Research Letters*, 29(8): #1231 [DOI: 10.1029/2001GL013768]
- Gaskell R W, Barnouin-Jha O S, Scheeres D J, Konopliv A S, Mukai T, Abe S, Saito J, Ishiguro M, Kubota T, Hashimoto T, Kawaguchi J, Yoshikawa M, Shirakawa K, Kominato T, Hirata N and Demura H. 2008. Characterizing and navigating small bodies with imaging data. *Meteoritics and Planetary Science*, 43(6): 1049-1061 [DOI: 10.1111/j.1945-5100.2008.tb00692.x]
- Glassmeier K H, Boehnhardt H, Koschny D, Kürt E and Richter L. 2007. The Rosetta mission: flying towards the origin of the solar system. *Space Science Reviews*, 128(1): 1-21 [DOI: 10.1007/s11214-006-9140-8]
- He K M, Gkioxari G, Dollár P and Girshick R. 2017. Mask R-CNN//Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV). Venice, Italy: IEEE: 2980-2988 [DOI: 10.1109/ICCV.2017.322]
- Hood D R, Sholes S F, Karunatillake S, Fassett C I, Ewing R C and Levy J. 2022. The Martian boulder automatic recognition system, MBARS. *Earth and Space Science*, 9(9): #e2022EA002410 [DOI: 10.1029/2022EA002410]
- Kerbl B, Kopanas G, Leimkühler T and Drettakis G. 2023. 3D Gaussian splatting for real-time radiance field rendering. *ACM Transactions on Graphics*, 42(4): #139 [DOI: 10.1145/3592433]
- Kirillov A, Mintun E, Ravi N, Mao H Z, Rolland C, Gustafson L, Xiao T T, Whitehead S, Berg A C, Lo W Y, Dollár P and Girshick R. 2023. Segment anything//Proceedings of 2023 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV). Paris, France: IEEE: 3992-4003 [DOI: 10.1109/ICCV51070.2023.00371]
- Konopliv A S, Asmar S W, Bills B G, Mastrodemos N, Park R S, Raymond C A, Smith D E and Zuber M T. 2011. The Dawn gravity investigation at Vesta and Ceres. *Space Science Reviews*, 163(1/4): 461-486 [DOI: 10.1007/s11214-011-9794-8]
- Latorre F, Spiller D, Sasidharan S T, Basheer S and Curti F. 2023. Transfer learning for real-time crater detection on asteroids using a fully convolutional neural network. *Icarus*, 394: #115434 [DOI: 10.1016/j.icarus.2023.115434]
- Lauer M, Kielbassa S and Pardo R. 2012. Optical measurements for attitude control and shape reconstruction at the Rosetta flyby of asteroid Lutetia//ISSFD2012 Paper, International Symposium of Space Flight Dynamics. Pasadena, California, USA: International Symposium of Space Flight Dynamics
- Lauretta D S, Balram-Knutson S S, Beshore E, Boynton W V, Drouet d'Aubigny C, DellaGiustina D N, Enos H L, Golish D R, Hergenrother C W, Howell E S, Bennett C A, Morton E T, Nolan M C, Rizk B, Roper H L, Bartels A E, Bos B J, Dworkin J P, Highsmith D E, Lorenz D A, Lim L F, Mink R, Moreau M C, Nuth J A, Reuter D C, Simon A A, Bierhaus E B, Bryan B H, Ballouz R, Barnouin O S, Binzel R P, Bottke W F, Hamilton V E, Walsh K J, Chesley S R, Christensen P R, Clark B E, Connolly H C, Crombie M K, Daly M G, Emery J P, McCoy T J, McMahon J W, Scheeres D J, Messenger S, Nakamura-Messenger K, Richter K and Sandford S A. 2017. OSIRIS-REx: sample return from asteroid (101955) Bennu. *Space Science Reviews*, 212(1): 925-984 [DOI: 10.1007/s11214-017-0405-1]
- Lauretta D S, Bartels A E, Barucci M A, Bierhaus E B, Binzel R P, Bottke W F, Campins H, Chesley S R, Clark B C, Clark B E, Cloutis E A, Connolly H C, Crombie M K, Delbó M, Dworkin J P, Emery J P, Glavin D P, Hamilton V E, Hergenrother C W, Johnson C L, Keller L P, Michel P, Nolan M C, Sandford S A, Scheeres D J, Simon A A, Sutter B M, Vokrouhlický D and Walsh K J. 2015. The OSIRIS-REx target asteroid (101955) Bennu: constraints on its physical, geological, and dynamical nature from astronomical observations. *Meteoritics and Planetary Science*, 50(4): 834-849 [DOI: 10.1111/maps.12353]
- Li C L, Liu J J, Ren X, Yan W, Zhang Z B, Li H Y and Ouyang Z Y. 2024. Scientific objectives and payloads configuration of the Tianwen-2 mission. *Journal of Deep Space Exploration*, 11(3): 304-310 (李春来, 刘建军, 任鑫, 严韦, 张舟斌, 李海英, 欧阳自远. 2024. “天问二号”任务科学目标和有效载荷配置. *深空探测学报(中英文)*, 11(3): 304-310 [DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2024.20230185])
- Li S, Gu T H, Liu Y J and Shao W. 2024. Accurate semantic segmentation of small-body craters for navigation. *Acta Astronautica*, 219: 183-194 [DOI: 10.1016/j.actaastro.2024.03.012]
- Li Y and Wu B. 2018. Analysis of rock abundance on lunar surface from orbital and descent images using automatic rock detection. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 123(5): 1061-1088 [DOI: 10.1029/2017JE005496]
- Liu S L, Zeng Z Y, Ren T H, Li F, Zhang H, Yang J, Jiang Q, Li C Y, Yang, J W, Su H, Zhu J and Zhang L. 2025. Grounding DINO: marrying DINO with grounded pre-training for open-set object detection//Proceedings of the 18th European Conference on Computer Vision (ECCV 2024). Milan, Italy: Springer: 38-55 [DOI: 10.1007/978-3-031-72970-6_3]
- Liu Y, Wu X, Liu Z H and Zou Y L. 2021. Geological evolution and habitable environment of Mars: progress and prospects. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 52(4): 416-436 (刘洋, 吴兴, 刘正豪, 邹永廖. 2021. 火星的地质演化和宜居环境研究进展. *地球与行星物理论评*, 52(4): 416-436 [DOI: 10.19975/j.dqyxx.2021-025])
- Matthies L, Daftry S, Tepsuporn S, Cheng Y, Atha D, Swan R M,

- Ravichandar S and Ono M. 2022. Lunar rover localization using craters as landmarks//Proceedings of 2022 IEEE Aerospace Conference (AERO). Big Sky, USA: IEEE: 1-17
- Michel P, Küppers M, Bagatin A C, Carry B, Charnoz S, de Leon J, Fitzsimmons A, Gordo P, Green S F, Hérique A, Juzi M, Karatekin Ö, Kohout T, Lazzarin M, Murdoch N, Okada T, Palomba E, Pravec P, Snodgrass C, Tortora P, Tsiganis K, Ulamec S, Vincent J B, Wünnemann K, Zhang Y, Raducan S D, Dotto E, Chabot N, Cheng A F, Rivkin A, Barnouin O, Ernst C, Stickle A, Richardson D C, Thomas C, Arakawa M, Miyamoto H, Nakamura A, Sugita S, Yoshikawa M, Abell P, Asphaug E, Ballouz R L, Bottke W F Jr, Lauretta D S, Walsh K J, Martino P and Carnelli I. 2022. The ESA Hera mission: detailed characterization of the DART impact outcome and of the binary asteroid (65803) Didymos. *The Planetary Science Journal*, 3(7): #160 [DOI: 10.3847/PSJ/ac6f52]
- Mildenhall B, Srinivasan P P, Tancik M, Barron J T, Ramamoorthi R and Ng R. 2022. NeRF: representing scenes as neural radiance fields for view synthesis. *Communications of the ACM*, 65(1): 99-106 [DOI: 10.1145/3503250]
- Miller J K, Konopliv A S, Antreasian P G, Bordi J J, Chesley S, Helfrich C E, Owen W M, Wang T C, Williams B G, Yeomans D K and Scheeres D J. 2002. Determination of shape, gravity, and rotational state of asteroid 433 Eros. *Icarus*, 155(1): 3-17 [DOI: 10.1006/icar.2001.6753]
- Muñoz P, Budnik F, Companys V, Godard B, Casas C M, Morley T and Janarthanan V. 2015. Rosetta navigation during lander delivery phase and reconstruction of Philae descent trajectory and rebound//25th International Symposium on Space Flight Dynamics. Munich, Germany: European Space Operations Centre: 1-20
- Murez Z, van As T, Bartolozzi J, Sinha A, Badrinarayanan V and Rabinovich A. 2020. Atlas: end-to-end 3D scene reconstruction from posed images//Proceedings of the 16th European Conference on Computer Vision — ECCV 2020. Glasgow, UK: Springer: 414-431 [DOI: 10.1007/978-3-030-58571-6_25]
- Nagle-McNaughton T P, Williams J M, Gallegos Z E, Wilkie H A, Martinez D C and Scuderi L A. 2020. Geographic information system based detection and quantification of boulders using HiRISE imagery: a case study in Jezero Crater. *Journal of Applied Remote Sensing*, 14(1): #014522 [DOI: 10.1117/1.JRS.14.014522]
- Ogawa N, Terui F, Mimasu Y, Yoshikawa K, Ono G, Yasuda S, Matsushima K, Masuda T, Hihara H, Sano J, Matsuhisa T, Danno S, Yamada M, Yokota Y, Takei Y, Saiki T and Tsuda Y. 2020. Image-based autonomous navigation of Hayabusa2 using artificial landmarks: the design and brief in-flight results of the first landing on asteroid Ryugu. *Astrodynamics*, 4(2): 89-103 [DOI: 10.1007/s42064-020-0070-0]
- Prieur N C, Amaro B, Gonzalez E, Kerner H, Medvedev S, Rubanenko L, Werner S C, Xiao Z Y, Zastrozhnov D and Lapôtre M G A. 2023. Automatic characterization of boulders on planetary surfaces from high-resolution satellite images. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 128(11): #e2023JE008013 [DOI: 10.1029/2023JE008013]
- Pugliatti M, Maestrini M, Di Lizia P and Topputo F. 2022. On-board small-body semantic segmentation based on morphological features with U-Net. *Advances in the Astronautical Sciences*, 176: 603-622
- Pugliatti M and Topputo F. 2022. Navigation about irregular bodies through segmentation maps. *Advances in the Astronautical Sciences* [EB/OL]. [2024-12-16]. <https://re.public.polimi.it/handle/11311/1163932>
- Reuter D C, Simon A A, Hair J, Lunsford A, Manthripragada S, Bly V, Bos B, Brambora C, Caldwell E, Casto G, Dolch Z, Finneran P, Jennings D, Jhabvala M, Matson E, McLelland M, Roher W, Sullivan T, Weigle E, Wen Y, Wilson D and Lauretta D S. 2018. The OSIRIS-REx visible and InfraRed spectrometer (OVIRS): spectral maps of the asteroid Bennu. *Space Science Reviews*, 214(2): #54 [DOI: 10.1007/s11214-018-0482-9]
- Roatsch T, Kersten E, Matz K D, Preusker F, Scholten F, Jaumann R, Raymond C A and Russell C T. 2016. High-resolution Ceres high altitude mapping orbit atlas derived from dawn framing camera images. *Planetary and Space Science*, 129: 103-107 [DOI: 10.1016/j.pss.2016.05.011]
- Russell C T and Raymond C A. 2011. The dawn mission to Vesta and Ceres. *Space Science Reviews*, 163(1-4): 3-23 [DOI: 10.1007/s11214-011-9836-2]
- Scholten F, Preusker F, Elgner S, Matz K D, Jaumann R, Hamm M, Schröder S E, Koncz A, Schmitz N, Trauthan F, Grott M, Biele J, Ho T M, Kameda S and Sugita S. 2019. The Hayabusa2 lander MASCOT on the surface of asteroid (162173) Ryugu — stereophotogrammetric analysis of MASCam image data. *Astronomy and Astrophysics*, 632: #L5 [DOI: 10.1051/0004-6361/201936760]
- Schönberger J L, Zheng E, Frahm J M and Pollefeys M. 2016. Pixelwise view selection for unstructured multi-view stereo//Proceedings of the 14th European Conference on Computer Vision — ECCV 2016. Amsterdam, the Netherlands: Springer: 501-518 [DOI: 10.1007/978-3-319-46487-9_31]
- Sebera J, Bezděk A, Pešek I and Henyeh T. 2016. Spheroidal models of the exterior gravitational field of Asteroids Bennu and Castalia. *Icarus*, 272: 70-79 [DOI: 10.1016/j.icarus.2016.02.038]
- Shi X, Ping J S, Ye S H and Oberst J. 2012. Analysis of shape-based gravity field model for Phobos. *Spacecraft Engineering*, 21(2): 6-11 (史弦, 平劲松, 叶叔华, Oberst J. 2012. 基于形状的火卫一重力场研究. *航天器工程*, 21(2): 6-11) [DOI: 10.3969/j.issn.1673-8748.2012.02.004]
- Silburt A, Ali-Dib M, Zhu C C, Jackson A, Valencia D, Kissin Y, Tamayo D and Menou K. 2019. Lunar crater identification via deep learning. *Icarus*, 317: 27-38 [DOI: 10.1016/j.icarus.2018.06.022]
- Tsuda Y, Yoshikawa M, Abe M, Minamino H and Nakazawa S. 2013. System design of the Hayabusa 2 — Asteroid sample return mission to 1999 JU3. *Acta Astronautica*, 91: 356-362 [DOI: 10.1016/

- j.actaastro.2013.06.028]
- Veverka J, Belton M, Klaasen K and Chapman C. 1994. Galileo's encounter with 951 Gaspra: overview. *Icarus*, 107 (1): 2-17 [DOI: 10.1006/icar.1994.1002]
- Veverka J, Farquhar B, Robinson M, Thomas P, Murchie S, Harch A, Antreasian P G, Chesley S R, Miller J K, Owen W M Jr, Williams B G, Yeomans D, Dunham D, Heyler G, Holdridge M, Nelson R L, Whittenburg K E, Ray J C, Carcich B, Cheng A, Chapman C, Bell III J F, Bell M, Bussey B, Clark B, Domingue D, Gaffey M J, Hawkins E, Izenberg N, Joseph J, Kirk R, Lucey P, Malin M, McFadden L, Merline W J, Peterson C, Prockter L, Warren J and Wellnitz D. 2001b. The landing of the NEAR-Shoemaker spacecraft on asteroid 433 Eros. *Nature*, 413 (6854): 390-393 [DOI: 10.1038/35096507]
- Veverka J, Thomas P C, Robinson M, Murchie S, Chapman C, Bell M, Harch A, Merline W J, Bell J F III, Bussey B, Carcich B, Cheng A, Clark B, Domingue D, Dunham D, Farquhar R, Gaffey M J, Hawkins E, Izenberg N, Joseph J, Kirk R, Li H, Lucey P, Malin M, McFadden L, Miller J K, Owen W M Jr, Peterson C, Prockter L, Warren J, Wellnitz D, Williams B G and Yeomans D K. 2001a. Imaging of small-scale features on 433 Eros from NEAR: evidence for a complex regolith. *Science*, 292 (5516): 484-488 [DOI: 10.1126/science.1058651]
- Watanabe S, Hirabayashi M, Hirata N, Hirata N, Noguchi R, Shimaki Y, Ikeda H, Tatsumi E, Yoshikawa M, Kikuchi S, Yabuta H, Nakamura T, Tachibana S, Ishihara Y, Morota T, Kitazato K, Sakatani N, Matsumoto K, Wada K, Senshu H, Honda C, Michikami T, Takeuchi H, Kouyama T, Honda R, Kameda S, Fuse T, Miyamoto H, Komatsu G, Sugita S, Okada T, Namiki N, Arakawa M, Ishiguro M, Abe M, Gaskell R, Palmer E, Barnouin O S, Michel P, French A S, McMahon J W, Scheeres D J, Abell P A, Yamamoto Y, Tanaka S, Shirai K, Matsuoka M, Yamada M, Yokota Y, Suzuki H, Yoshioka K, Cho Y, Tanaka S, Nishikawa N, Sugiyama T, Kikuchi H, Hemmi R, Yamaguchi T, Ogawa N, Ono G, Mimasu Y, Yoshikawa K, Takahashi T, Takei Y, Fujii A, Hirose C, Iwata T, Hayakawa M, Hosoda S, Mori O, Sawada H, Shimada T, Soldini S, Yano H, Tsukizaki R, Ozaki M, Iijima Y, Ogawa K, Fujimoto M, Ho T M, Moussi A, Jaumann R, Bibring J P, Krause C, Terui F, Saiki T, Nakazawa S and Tsuda Y. 2019. Hayabusa2 arrives at the carbonaceous asteroid 162173 Ryugu — a spinning top-shaped rubble pile. *Science*, 364 (6437): 268-272 [DOI: 10.1126/science.aav8032]
- Williams B, Antreasian P, Carranza E, Jackman C, Leonard J, Nelson D, Page B, Stanbridge D, Wibben D, Williams K, Moreau M, Berry K, Getzandanner K, Liounis A, Mashiku A, Highsmith D, Sutter B and Laurretta D S. 2018. OSIRIS-REx flight dynamics and navigation design. *Space Science Reviews*, 214(4): #69 [DOI: 10.1007/s11214-018-0501-x]
- Wu B, Huang J, Li Y, Wang Y R and Peng J. 2018. Rock abundance and crater density in the candidate Chang'E-5 landing region on the moon. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 123 (12): 3256-3272 [DOI: 10.1029/2018JE005820]
- Xu Q, Wang D, Xing S and Lan C Z. 2016. Mapping and characterization techniques of asteroid topography. *Journal of Deep Space Exploration*, 3(4): 356-362 (徐青, 王栋, 邢帅, 蓝朝楨. 2016. 小行星形貌测绘与表征技术. *深空探测学报*, 3(4): 356-362) [DOI: 10.15982/j.issn.2095-7777.2016.04.007]
- Yang X, Yan J G, Liu S H, Ye M, Jin W T and Li F. 2019. Low-degree gravity field recovery of Phobos based on MEX flyby data. *Scientia Sinica Physica, Mechanica and Astronomica*, 49 (5): #059501 (杨轩, 鄢建国, 刘山洪, 叶茂, 金炜桐, 李斐. 2019. 基于火星快车飞掠数据的火卫一低阶重力场反演. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 49(5): #059501 [DOI: 10.1360/SSPMA2018-00249]
- Yu D Y and Ma J N. 2022. Progress and prospect of deep space exploration in China. *Science and Technology Foresight*, 1(1): 17-27 (于登云, 马继楠. 2022. 中国深空探测进展与展望. *前瞻科技*, 1(1): 17-27) [DOI: 10.3981/j.issn.2097-0781.2022.01.002]
- Zhang Z J, Cui H T and Ren G F. 2010. Modeling for the gravitation potential environment of an irregular-shaped asteroid and the spherical harmonic coefficient estimation. *Spacecraft Environment Engineering*, 27(3): 383-388 (张振江, 崔祐涛, 任高峰. 2010. 不规则形状小行星引力环境建模及球谐系数求取方法. *航天器环境工程*, 27(3): 383-388) [DOI: 10.3969/j.issn.1673-1379.2010.03.024]
- Zhou T, Tang H, Miao B K, Zeng X J, Xia Z P, Yu W, Zhou C J and He E C. 2023. Review of the spectral effects of space weathering on C-type asteroids. *Chinese Journal of Space Science*, 43 (4): 647-660 (周婷, 唐红, 缪秉魁, 曾小家, 夏志鹏, 于雯, 周传娇, 贺恩成. 2023. 空间风化对C型小行星的光谱影响研究概述. *空间科学学报*, 43(4): 647-660) [DOI: 10.11728/cjss2023.04.2022-0058]
- Zhu L L, Geng X, Li Z and Liu C. 2021. Improving YOLOv5 with attention mechanism for detecting boulders from planetary images. *Remote Sensing*, 13(18): #3776 [DOI: 10.3390/rs13183776]

作者简介

尹继豪,男,教授,主要研究方向为面向深空探测的人工智能理论与应用。E-mail: jihaoyin@buaa.edu.cn

赵欣语,女,博士研究生,主要研究方向为计算机视觉、视觉定位、图像配准和深空探测。E-mail: xinyuzhao@buaa.edu.cn

崔林艳,女,副教授,主要研究方向为SLAM、计算机视觉和深空探测。E-mail: cuiily@buaa.edu.cn

魏晓东,男,博士研究生,主要研究方向为计算机视觉、强化学习、三维重建和深空探测。

E-mail: buaweixiaodong@buaa.edu.cn