

小天体智能附着技术研究进展

梁子璇^{1,2}, 鲁冰洁^{1,2}, 崔平远^{1,2}, 朱圣英^{1,2}, 徐 瑞^{1,2}, 葛丹桐^{1,2}, 宝音贺西³, 邵 巍⁴

(1. 北京理工大学 深空探测技术研究所, 北京 100081; 2. 深空自主导航与控制工信部重点实验室, 北京 100081;
3. 清华大学 航天航空学院, 北京 100084; 4. 青岛科技大学 自动化与电子工程学院, 青岛 266100)

摘 要: 面向小天体探测与开发稳健附着的需求, 结合国内外小天体附着探测任务, 分析了小天体智能附着技术的需求, 综述了目前的研究进展。回顾了小天体附着探测的相关工程任务、介绍了小天体传统的刚性附着模式与新型智能柔性附着的概念、梳理了小天体智能附着技术的需求, 在此基础上从动力学、任务规划、感知、导航、制导与控制等方面归纳总结了智能附着技术的研究进展, 对小天体附着技术的发展趋势进行了展望。

关键词: 小天体; 智能附着; 柔性附着; 任务规划; 导航制导与控制

中图分类号: V448.2

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2024)03-0213-12

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2024.20240035

引用格式: 梁子璇, 鲁冰洁, 崔平远, 等. 小天体智能附着技术研究进展[J]. 深空探测学报(中英文), 2024, 11(3): 213-224.

Reference format: LIANG Z X, LU B J, CUI P Y, et al. Research progress of technologies for intelligent landing on small celestial bodies[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2024, 11(3): 213-224.

引 言

小天体(包含小行星和彗星)蕴藏着太阳系早期丰富的信息, 是深空探测领域研究的热点。1991年, 美国的太空探测器“伽利略号”(Galileo)近距离飞越和观测了主带小行星“加斯普拉”(951 Gaspra), 揭开了人类探索地外小天体的序幕^[1]。随着空间科学技术的不断进步, 小天体探测手段逐渐由早期的飞越探测发展到环绕探测、原位探测与采样返回。小天体表面成分的勘探可为地外天体资源开采、地球生命与水的起源研究等提供高科学价值的信息, 而实现小天体表面附着则是开展原位探测与采样返回等任务的基础。

目前, 中国正在研制小天体探测任务的“天问二号”探测器, 并计划于2025年发射。国际上, 已先后实施了5次小天体附着探测任务, 包括美国的“近地小行星交会”(Near Earth Asteroid Rendezvous, NEAR)和“冥王号”(Origins, Spectral Interpretation, Resource Identification, and Security-Regolith Explorer, OSIRIS-REx)、日本的“隼鸟号”(Hayabusa)和“隼鸟二号”(Hayabusa 2), 以及欧洲的“罗塞塔号”(Rosetta)。其中, NEAR任务实现了人类探测器首次在小天体表面着陆; “隼鸟号”则实现了首次小天体表面取样返回。

小天体距离地球遥远且成像暗弱, 地面无法进行详细观测, 先验信息匮乏。在附着任务中, 探测器/着陆器通常先环绕目标天体飞行, 观测并采集数据, 再离轨下降到达小天体表面, 通过缓冲锚定等装置实现表面稳定附着。由于小天体尺寸小、引力弱、形貌崎岖, 动力学环境复杂, 着陆任务在动力学建模、任务规划、形貌感知、状态估计、制导控制等方面存在一系列的技术挑战。为实现小天体表面稳健附着, 着陆器应具备自主应对微弱引力与复杂不确定环境的能力。为此, 需发展小天体智能附着技术。

本文将结合小天体附着探测相关工程任务, 介绍传统的小天体刚性附着模式与新型的智能柔性附着概念, 进而梳理小天体附着智能技术的需求。在此基础上, 围绕小天体智能附着技术的进展情况, 从附着动力学智能技术、附着任务智能规划技术、智能感知与匹配技术、智能导航技术、智能制导与控制技术等方面归纳总结研究进展, 并探讨小天体智能附着技术的发展趋势。

1 小天体附着任务

小天体探测手段包括飞越探测、环绕探测、原位探测与采样返回等。世界各国对小天体进行了多次飞

越、环绕方式的探测^[2]。中国的“嫦娥二号”和美国的Galileo、“克莱门汀”(Clementine)、“深空一号”(Deep space 1)、“卡西尼-惠更斯”(Cassini-Huygens)、“星尘号”(Stardust)、“新视野号”(New Horizons)等早期任务均完成了对目标小天体的飞越探测,获取了目标小天体近距离光学图像等科学数据;美国国家航空航天局(National Aeronautics Space and Administration, NASA)的“露西号”(Lucy)、“灵神星”(Psyche)等任务还将飞越或环绕探测更多不同轨道分布(主带、特洛伊)、不同光谱类型(P型、D型、M型)的小天体。与飞越探测和环绕探测相比,原位探测与采样返回可以帮助人类直接获取小天体表面成分的数据,而小天体附着是实现原位探测与采样返回的重要前提。

NASA已实施了两次小天体附着探测任务,分别为NEAR任务和“冥王星”任务。2001年2月12日,NEAR探测器以1.5~1.8 m/s的垂直速度成功附着在小天体“爱神星”(433 Eros)表面^[3],实现了人类探测器在小天体表面的首次附着。“冥王星”于2016年9月发射,该任务对一颗近似球状的碳质小行星“贝努”(101955 Bennu)进行了探测和采样。针对采样任务的需求,“冥王星”采用“接触即走”(Touch And Go, TAG)的附着方式^[4],即探测器下降到目标表面后,只短暂停留数秒,通过采样臂采集目标表面的样品,随后加速上升离开其表面。2023年10月,装有101955贝努表面岩石和尘埃的“冥王星”样品舱返回地球,为研究地球上水和有机物的起源提供了有效的科学信息^[5]。

日本宇宙航空研究开发机构(Japan Aerospace eXploration Agency, JAXA)进行了“隼鸟号”和“隼鸟二号”两次小天体附着探测任务,实现了小天体表面样品采集和返回,并投放了一系列携带科学载荷的小型着陆器进行巡视探测。“隼鸟号”于2005年9月12日到达S型小行星“糸川”(25143 Itokawa),是最早使用TAG方式完成附着采样任务的航天器。该任务还投放了第一枚小型跳跃式着陆巡视器(Micro-Nano Experimental Robot Vehicle for the Asteroid, MINERVA)。在实际工程中,由于投放高度和速度与预期有一定的偏差,MINERVA发生了逃逸,未能成功下降到达Itokawa表面开展巡视探测^[6]。后续的“隼鸟二号”于2018年6月到达探测目标——C型小行星“龙宫”(162173 Ryugu),该任务同样采用TAG模式对小行星(Ryugu)实施了附着采样。此外,“隼鸟二号”还成功投放了一枚移动小行星表面侦察登陆器(Mobile Asteroid Surface Scout, MASCOT)和两枚MINERVA-

II小型着陆巡视器,实现了在小天体表面的巡视探测^[7]。

欧洲航天局(European Space Agency, ESA)的“罗塞塔号”任务实现了在彗星表面的首次附着,并发现了目标彗星表面的磷元素和丰富的有机物^[8]。“罗塞塔号”于2004年3月发射,并在11月释放“菲莱”(Philae)着陆器于彗星67P/Churyumov-Gerasimenko表面。然而由于附着时缓冲锚定装置失效,“菲莱”发生了反弹和历时数小时的翻滚,落入没有太阳光照的阴影区。最终,“菲莱”在电量耗尽后失联,尽管实现了一些科学探测目标,但未能完成原定的表面长期探测计划^[9]。

中国即将实施的“天问二号”小天体探测任务,周期约为10年,一次任务探测多个天体,并计划完成对近地小行星469219 Kamo'oalewa的附着采样以及对主带彗星311P的环绕探测。469219 Kamo'oalewa是地球的一颗“准卫星”,表面矿物成分与月球硅酸盐类似^[10],实现该目标的附着采样探测,对地月起源与演化研究具有重要的科学价值。

2 小天体附着过程与智能技术需求

2.1 小天体附着过程

由于小天体先验信息匮乏,探测器在接近目标小天体后,通常先环绕小天体观测获取地形等详细信息。随后,探测器通过脉冲机动离开环绕轨道,并逐渐下降附着到小天体表面。以NEAR任务为例,过程如图1所示^[11],探测器经历约一年的绕飞观测后,下降并附着在Eros表面。探测器从离轨到附着采用了5次制动,其中1次用于离轨、4次用于减速。由于NEAR探测器采用预先设定好的时序控制进行着陆,只能实现速度控制,不具备在线任务规划、自主感知避障、精

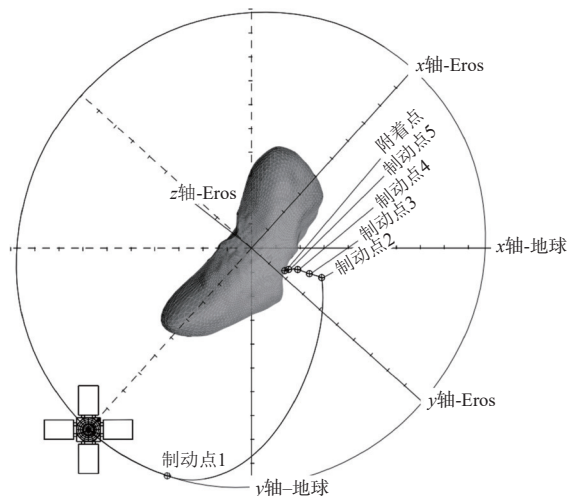


图1 NEAR探测器离轨制动附着过程^[11]

Fig. 1 De-orbit maneuver and landing process of NEAR^[11]

确着陆制导等能力。

现有小天体附着任务的探测器一般采用刚性立方体构型, 考虑到接触小天体弱引力表面后可能会发生的反弹逃逸, 部分探测器装有缓冲、锚定装置以增强附着稳定性。当探测器下降到小天体表面时, 缓冲装置可消耗残余速度, 锚定装置将探测器固定在目标小天体表面。已实施的“罗塞塔”任务中, “菲莱”着陆器配置了缓冲着陆支架和两枚用于固定的“鱼叉”^[9]。此外, “菲莱”着陆器的主动下降系统(Active Descent System, ADS)还会在探测器达到小天体表面时提供几秒向下的推力, 进一步防止着陆器反弹失控。在“菲莱”实际附着的过程中, ADS系统未能打开, 导致“鱼叉”未能发射; 尽管缓冲装置消耗了“菲莱”90%的残余动能, 着陆器仍发生了反弹与翻滚, 严重缩短了其工作寿命^[12]。由此可见, 对于引力弱、逃逸速度低的小天体附着任务, 传统的刚性附着模式存在较高的着陆风险。

针对现有刚性附着模式存在的反弹、倾覆和翻滚风险, 崔平远等^[13-14]提出了小天体表面智能柔性附着的概念, 其附着过程如图2所示。附着过程启动时, 柔性着陆器在小天体表面上方展开呈面状; 随后, 通过节点推力器的控制下降到小天体表面; 当柔性着陆器与小天体表面接触时, 柔性材料可吸收着陆器的残余动能, 防止着陆器在小天体表面发生反弹; 同时, 面状构型还可以增大着陆器与小天体表面的接触面积, 从而降低着陆器发生倾覆或翻滚的风险。

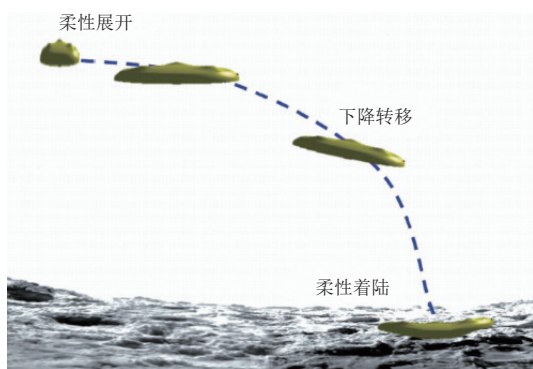


图2 柔性附着过程示意图^[14]
Fig. 2 The flexible probe for flexible landing^[14]

2.2 小天体附着智能技术需求

与月球、火星等大天体相比, 小天体尺寸小、自旋快, 表面引力弱(例如, 101955 Bennu的表面引力加速度不足 10^{-4} m/s^2)。在附着时, 着陆器可容忍的末端速度误差很小, 在接触小天体表面时容易发生反弹甚至逃逸。同时, 小天体星表形状不规则、局部形貌

起伏大, 表面分布着陨石坑、岩石、碎石堆等, 平坦附着区域较少。在附着时, 着陆器易与表面石块发生碰撞损毁, 或着陆在不平整的表面发生倾覆。此外, 小天体所在的深空环境复杂暗弱, 存在太阳光压等未知扰动, 进一步为着陆器的附着过程增加了不确定性。

鉴于小天体附着探测任务的特点, 无论是传统的刚性附着模式还是新型的柔性附着模式, 都存在一系列技术难题。因此, 亟需发展实现稳健附着的相关技术, 尤其是具备高自主、高可靠性的智能附着技术: ①小天体表面引力场分布不规则、动力学复杂, 需建立高精度的引力场与动力学模型; ②小天体距离地球遥远、探测任务通讯时延大, 需发展附着任务智能规划技术; ③小天体自旋快、先验信息匮乏、环境暗弱, 需发展附着智能感知与匹配技术; ④小天体表面特征复杂、导航信息有限, 需发展附着智能导航技术; ⑤小天体表面形貌障碍多、附着环境不确定, 需发展附着智能制导控制技术。

3 小天体智能附着技术进展

3.1 小天体引力场与附着动力学

小天体引力场与附着动力学研究是小天体智能附着技术的基础。随着人工智能技术的发展, 小天体引力场研究焦点转向传统引力场建模方法结合神经网络, 以期实现小天体不规则引力场的高效准确计算和实时在线参数辨识。小天体附着动力学是在小天体引力场研究的基础上, 进一步考虑着陆器动力学、碰撞动力学。由于小天体独特的弱引力场和不规则表面, 以智能柔性材料为主体结构的柔性着陆器得到越来越多的关注, 小天体柔性附着动力学成为当下的研究热点。

1) 小天体引力场建模与辨识

目前主流的小天体引力场建模方法有质点群法、球谐函数方法、椭球谐函数方法及多面体法等。质点群法^[15]将小天体离散为许多均质球体, 将不同区域的引力等效为均质球体引力的叠加。质点群法可通过在均质球体设置不同的密度仿真内部存在空洞的小天体或者变密度小天体的引力场, 模型简单直观。但质点群法存在计算效率低的缺点, 在计算小天体内部引力场时可能出现计算奇异的问题。球谐函数方法^[16]使用一系列的球面调和函数对引力场进行建模, 优势在于可得到一个连续的引力场计算模型, 且根据任务需求可任意选取拟合阶数和计算球域, 适用于小天体着陆制导控制理论的研究。但该方法的空间适用范围有限, 在接近小天体表面时需多次重新划定计算收敛球

域并重新计算球谐系数。多面体引力场建模方法^[17]是目前小天体着陆探测研究最常用的引力场建模方法,优势在于计算精度高、适用范围广,可拟合小天体表面和内部的引力场,目前的研究也大多假定多面体法结果为准确的小天体引力场数据。但多面体法在计算面单元边界位置处的引力时会出现奇异问题,且一般用于均质小天体的引力场建模。

小天体引力场高效建模方法对于小天体探测任务仿真研究具有较大的意义。偶极子模型^[18]将细长小天体等效为简单的偶极子,可实现细长小天体引力场的高效解析计算,在小天体动力学环境理论研究得到了广泛的应用。低精度的球谐/椭球谐函数方法也可以实现小天体引力场的高效计算。前述方法为提高计算效率,在引力场计算精度上存在一定的不足。网格插值法^[19]通过将计算空间离散为均匀三维网格,结合多面体法或真实引力场数据计算网格点的引力场数据,并使用简单插值方法求解任意空间位置的引力场,实现了小天体引力场高效高精度的计算,但该方法需要占用较大的存储空间。神经网络能够以任意高的精度近似任何连续函数,结合多面体法或真实引力场数据生成的训练集和验证集,对神经网络进行预训练,可以生成高效高精度的小天体引力场模型^[20]。

在实际探测任务中,小天体引力场参数在线智能识别对于建立高精度引力场模型具有重大的意义。随着小天体附着探测任务的立项,小天体引力场在线智能识别研究的重要性日益凸显。反馈神经网络具备联想记忆和优化计算能力,可随着小天体引力场丰富的数据不断输入在线辨识引力场模型参数。结合Hopfield反馈神经网络和球谐/椭球谐函数方法^[21],进而实现对球谐/椭球谐参数的在线智能识别,最终得到高精度引力场的模型,但该方法受球谐/椭球谐函数收敛球域的限制。结合Hopfield反馈神经网络和偶极子模型^[22],可实现细长小天体引力场模型的在线辨识。

2) 小天体附着动力学

质点接触动力学是复杂附着探测研究的基础。小天体表面结构十分复杂,目前主流理论认为小天体表面结构可能有碎石堆、风化层、冰层等^[23],这导致小天体的接触力学性能十分复杂多样。而通过地面观测,研究者也难以确定小天体表面的接触力学性能。围绕这一难题,相关研究也提出了多种理论模型。目前常用的小天体表面接触动力学模型大多基于Hertz接触理论^[24]和Hunt-crossly阻尼理论^[25]。Lankarani等^[26]将Hertz接触理论扩展到恢复系数接近1的接触情况。Hu等^[27]进一步将Hertz接触理论扩展到适用于任意范围

的恢复系数接触建模。Poursina等^[28]从仿真效果出发,提出使用多项式拟合的方法确定Hertz接触理论参数,得到实际碰撞恢复系数与理论契合的碰撞模型。

对于复杂的小天体着陆器,质点接触动力学存在过度简化的问题,需进一步考虑刚体附着动力学。针对这一问题,Scheeres等^[29]提出刚性球与小天体表面的接触模型,并由此分析了刚性球在小天体表面碰撞翻滚的情况。Wal等^[19]提出任意多面体外形的刚性着陆器与小天体表面的接触模型,推动了小天体表面着陆器运动仿真研究的发展。基于上述研究,Zeng等^[30]仿真讨论了不同形状刚性着陆器在小天体表面的附着性能;Zhang等^[31]讨论了小天体着陆器质量分布对附着结果的影响。也有学者针对小天体表面的风化层,提出使用离散元方法建立小天体模型并通过离散球体和着陆器的接触模型建立小天体表面与着陆器的接触模型^[32],但该方法不适用于碎石堆类型的小天体表面,且计算量极大。

柔性着陆器对于小天体弱引力崎岖表面具有更好的适应能力^[33],其动力学建模是其它技术研究的基础。柔性着陆器的节点之间存在柔性的物理连接,受力关系复杂、非线性强。在近似表征时,以包含3个节点的着陆器为例,基于“弹簧-阻尼-扭簧”建立的简化模型如图3所示,该模型可用于柔性附着的导航、制导与控制律设计。Yan等^[34]提出一种使用柔性材料为连接结构的柔性着陆器模型,并通过仿真讨论了该着陆器在小天体附着探测的独特优势。智能柔性着陆器的研发还可与逐渐成熟的软体机器人技术相结合,应用智能柔性驱动器或柔性传感器,有望在未来小天体探测任务中得到应用。例如,Feng等^[35]为小天体着陆器设计了一种柔性可展开立方体结构,其外壳由形状记忆聚合物制成,该结构具有消散动能和减弱反弹的功能。

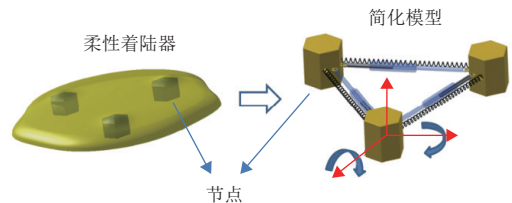


图3 柔性着陆器及简化模型示意图^[34]

Fig. 3 Flexible lander and its simplified model^[34]

3.2 小天体附着任务智能规划技术

小天体附着过程时间短,地面通信延时大,且附着环境不确定、附着活动多、约束复杂。智能任务规划是实现探测器/着陆器自主在轨运行的基础,自主

生成满足任务目标的安全活动序列, 并能在出现突发情况时对已有规划及时进行调整修复, 从而实现安全附着。

1) 小天体探测任务规划技术

“罗塞塔”探测器的星载计算机搭载的RSSC (Rosetta SGS Scheduling Component) [36]具有自主进行在轨管理功能, 包括设备管理、数据管理、姿态自主控制、轨道控制、异常分析和评估等, 使探测器能够自主进行决策和控制。“罗塞塔”探测器的规划过程如图4所示。RSSC的自主规划使用的是ASPEN规划框架与XML语言, 规划过程使用优先级调度算法, 算法中每一项科学活动都被赋予了优先级。

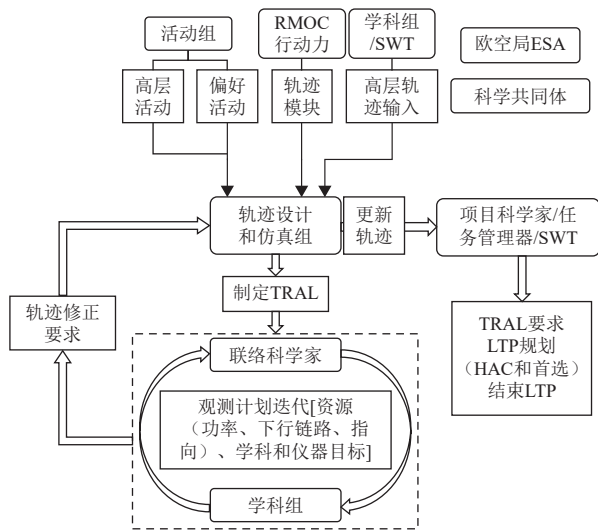


图4 “罗塞塔”规划过程

Fig. 4 Science planning process of Rosetta

“罗塞塔”携带的“菲莱”着陆器也开发了一个运行调度工具MOST^[37], 专门为在限制条件下规划“菲莱”科学任务而设计。MOST制定的可行规划满足能源、数据管理和活动的优先关系或仪器之间的不兼容性方面的一些限制。

OSIRIS-REx探测器为实现对Bennu科学任务和导航观测的规划, 开发了一个可配置工具包^[38-39], 可根据任务设计进行配置, 并生成活动图, 执行飞行规则和约束检查, 为观测规划提供了一个自主框架, 且在未来的探测任务中可继续利用该框架来加快规划。

2) 柔性附着任务规划技术

在复杂环境下快速正确地生成规划序列是小天体柔性附着自主任务规划的核心。柔性着陆器具有节点间活动并行、约束耦合复杂、柔性作用不确定等特点。针对柔性着陆器多节点活动并行的问题, 集中式规划方法给节点带来高计算负载, 并使系统易于发生

单点故障。因此, Zhao等^[40]设计了一种保护隐私的去中心化多智能体任务规划框架, 提出了分布式多智能体迭代协商任务分配方法, 采用延迟接受协商模式, 设计了考虑着陆器节点的任务扩展和负载平衡的信息一致性机制, 快速生成合理的附着规划解。

针对规划过程中着陆器多节点时间约束耦合问题, 王棒等^[41]提出了动态弧一致时间约束推理方法, 设计时间零点约束优先添加策略, 限制新添加约束的传播范围, 局部求解时间网络一致性, 提高了时间约束推理的效率, 有效增强了柔性附着任务规划的实时性。同时考虑到附着过程的避障、通信等活动, 需要在任务规划的基础上, 根据当前状态自主生成姿态路径, 实现姿态自主控制。为解决柔性约束下姿态机动规划的问题, Zhu等^[42]提出了一种柔性着陆器姿态机动路径规划的多目标优化方法。建立了3节点着陆器耦合动力学模型, 利用局部优化扩展策略, 生成符合指向约束的初始路径, 并设计了一种具有非支配排序解的种群进化算法, 提高了姿态规划计算的效率。

受小天体环境不确定性及柔性操控不确定性的影响, 着陆器在附着过程中可能出现规划序列执行的偏差, 导致任务执行失败。因此着陆器需具备自主应对突发异常的能力, Xu等^[43]对连续执行模式下规划序列修复的问题进行了研究, 提出了基于调控因子的动态修复方法, 通过逻辑-资源双循环, 从执行失败的规划序列中快速分离出可执行的动作。在部分动作继续执行的同时, 设计时间裕度、目标可达性、修复估计耗时等多个调控因子, 作为启发式引导修复搜索, 使着陆器在有限时间内完成失败动作的快速修复, 增强柔性附着任务执行的连续性, 提高附着任务的安全性。

3.3 小天体附着智能感知与匹配技术

精确识别小天体表面形貌特征, 并完成稳定匹配是实现自主导航等附着任务的前提与基础。OSIRIS-REx在一天内不同时刻拍摄的Bennu图像如图5所示^[44]。由于小天体具有自旋特性, 相机与目标可能会产生较大的相对视角及光照亮度阴影变化。同时由于小天体表面形貌复杂多样, 先验信息有限, 造成特征感知与匹配困难。

1) 附着环境智能感知

小天体表面存在岩石、陨石坑等形貌特征, 但由于形状不规则、环境复杂、先验信息有限且受到阴影变化的影响, 造成特征感知困难。近年来, 国内外学者研究了小天体形貌的图像处理识别方法和小天体三维形貌构建方法。

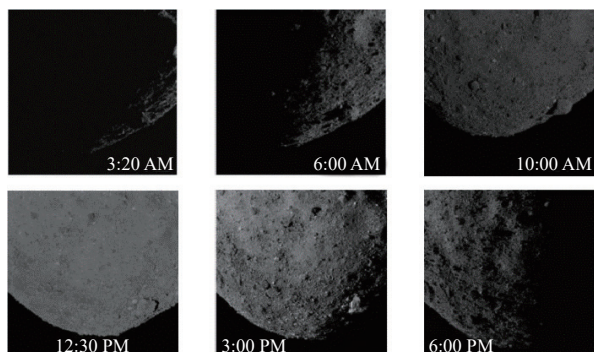


图5 不同光照下的101955 Bennu图像^[44]

Fig. 5 Images of 101955 Bennu under different lighting conditions^[44]

利用图像识别处理的方法, 主要包含边缘检测、边缘拟合等, 对陨石坑、岩石的形状及大小有一定的要求, 且受光照条件影响较大^[45]。与传统算法相比, 深度学习方法具有较强的挖掘数据潜在特征的能力, 在提取陨石坑、岩石等地表特征时有着明显优势, 能够在不同光照、视角的环境下实现陨石坑识别, 具有较高的检测率^[46]。Chen等^[47]设计单阶段陨石坑检测网络DPCDN, 利用快速提取层FEL减少网络参数并提升检测速度。Pugliatti等^[48]基于U-net网络实现小天体图像陨石坑、岩石的检测, 取得了良好的泛化性能。为实现小天体复杂附着环境的动态特征感知, 应进一步提高网络模型对大视角及光照变化的适应能力。

利用图像数据重建小天体三维形貌时, 常用的技术分为基于光度及摄影测量的方法^[49]。基于光度测量的方法假定目标物体为Lambert表面, 根据图像明暗度信息计算物体的相对高度, 进而恢复目标地形。基于摄影测量的方法利用摄影成像模型, 根据相机参数信息以及三维空间的几何特征实现三维重构。Watanabe等^[50]基于光度测量法重构出Ryugu的表面模型, 从而获取小天体表面形状与地形特征。Edmundson等^[51]基于摄影测量控制的方法重构了101955 Bennu的全球数字地形模型。然而光度测量法存在难以对阴影区域进行恢复的问题, 同时摄影测量法对目标纹理要求较高, 因此需要进一步利用深度学习等方法提升光照阴影变化下小天体三维形貌感知精度。

2) 附着形貌动态匹配

在附着过程中基于提取的形貌特征进行匹配时, 尺度、旋转、视角、光照等多种变化会显著影响匹配精度。因此实现小天体复杂环境形貌动态匹配是一项具有挑战性的任务。

针对小天体附着形貌动态匹配问题, 以往的小天体探测任务中大多采用立体光度测量(Stereo-Photo Clinometry, SPC)^[52]技术, 使用拍摄图像来估计斜坡

的立体视差和表面阴影, 并结合着陆器先验位姿渲染图像, 利用归一化互相关算法完成模板匹配。由于算法匹配精度非常依赖三维形貌及光照建模的精确性, 且算法计算复杂、数据量大, 其应用受到限制。

小天体存在陨石坑等导航陆标, 对检测到的陨石坑进行匹配能够进一步获取导航信息。建立陨石坑匹配的关键在于寻找不同相机视角观测下陨石坑之间不变的关系。Hanak等^[53]利用内角以及陨石坑半径与质心距离的比值信息实现陨石坑三角形的匹配, 但该方法主要适用于近似正视图的情况。此外, 国外学者使用深度学习网络提取陨石坑特征并与陨石坑数据库进行匹配^[54-55], 达到了较好的匹配效果。基于深度学习的特征检测和描述方法被证明在应用于特征匹配时明显优于传统特征描述符方法, 特别是在尺度和视角发生较大变化的场景中^[56]。ASLFeat^[57]通过模拟局部几何变化学习不变特征, 可提高特征匹配精度; SuperGlue^[58]利用图注意力机制学习得到具有全局感受野和跨图像上下文敏感的特征描述符, 可获得高质量的特征点匹配。小天体表面环境复杂, 存在弱纹理、无纹理区域, 现有技术往往只对单一特征进行识别与匹配, 导致难以获取鲁棒匹配结果, 需要进一步探究多特征复合表征的动态形貌匹配算法。

3.4 小天体附着智能导航技术

着陆器在下降过程中利用敏感器获取观测信息, 对自身状态进行实时估计, 是实现小天体表面精确附着的必要条件。然而小天体环境先验信息匮乏, 着陆器观测手段受限, 在附着过程中能够获取的观测信息有限。同时, 在小天体弱引力多扰动环境下, 系统模型非线性、观测噪声不确定, 为实现高精度自主导航带来困难。

1) 状态估计与特征优选

自主光学导航是小天体附着过程中常用的导航方式, 通过提取匹配已知导航陆标或帧间图像特征, 获取着陆器状态观测信息, 对其状态进行实时估计^[59]。结合附着过程特点, Zhu等^[60]研究了基于导航陆标视线夹角的状态估计方法, 利用陆标视线夹角建立观测方程, 对位姿进行解耦估计。Cui等^[61]提出基于陨石坑边缘曲线特征匹配导航方法, 通过建立陨石坑椭圆曲线观测与着陆器位姿几何关系, 将相对导航与绝对导航相结合, 实现了着陆器绝对位姿的持续估计。

为进一步提高光学导航性能, 研究中常从系统可观测性出发, 对导航陆标、机会特征等观测信息进行优化选取。导航系统可观测性反映了系统根据外部观测信息确定自身状态的能力^[62-63], 为进一步刻画系统观

测的难易程度及状态估计精度, 研究中提出了多种可观测性的量化描述方法^[64-66], 如可观测性矩阵条件数、Gramian矩阵范数、Fisher信息矩阵的迹或行列式、系统误差协方差矩阵的迹等。在上述理论的基础上, Zhu等^[60]提出动态导航特征优选方法, 基于观测矩阵分析特征分布对导航精度的影响, 并利用模拟退火算法求解得到最优特征观测构型。Xiu等^[67]进一步考虑导航观测误差的特性, 综合观测误差、匹配误差、观测构型等因素影响, 提出了导航特征融合评价优选方法, 提高附着光学导航精度。Xu等^[68]引入附着过程导航特征可见性约束, 基于线性协方差分析建立导航特征数据库, 实现导航特征观测序列的离线规划。考虑到实际任务导航特征观测受着陆器状态不确定性影响, Xiu等^[69]提出视场交集计算方法, 用于确定导航特征的选取范围, 并进一步将特征重复观测情况加入评价指标, 在时间维度对导航特征观测序列进行优化。

随着智能技术的快速发展, 近年来一些学者开始研究将智能学习方法用于着陆器自主导航中。其中, 一类典型方法是在传统滤波估计方法中引入智能算法, 提高导航性能。例如, Gao等^[70]和Xiong等^[71]将强化学习和导航滤波器设计相结合, 提出自适应滤波方法, 通过学习最优噪声协方差矩阵, 提高深空复杂环境下自主导航精度。Pesce等^[72]在传统滤波的框架下, 通过神经网络补偿外界扰动及未建模项, 提高着陆器状态估计性能。Park等^[73]利用网络建立图像到着陆器姿态的映射关系, 并将其作为系统观测设计噪声自适应补偿的卡尔曼滤波方法, 对着陆器姿态实现鲁棒估计。

此外, 为直接利用智能方法实现状态估计, PROENÇA^[74]设计了二分支网络, 分别对输入图像进行回归与分类, 并利用回归分支进行位置估计、软分类分支实现姿态估计。Huang等^[75]设计特征点回归子网络提取图像特征, 并构建姿态估计子网络建立二维特征点与三维姿态的映射关系, 通过将两个子网络进行串联实现系统状态估计。

2) 柔性附着状态表征与估计

在小天体柔性附着过程中, 着陆器主要通过导航相机、激光测距仪等光学导航传感器实现状态估计。将安装导航传感器的局部刚性区域称为测量节点。为实现柔性附着自主导航, 首先需要对柔性附着状态进行描述。柔性着陆器的整体位姿可通过多个节点的状态进行近似表征。崔平远等^[13]提出柔性着陆器“等效面”概念, 利用多节点确定等效面的中心位置和速度来近似表示柔性着陆器的位置和速度, 定义等效面与着陆平面的夹角为等效面倾角, 利用等效面倾角近似表

征柔性着陆器的姿态。

与刚性附着相比, 柔性着陆器在附着过程中存在柔性形变、节点间运动状态强耦合的特点, 导致节点状态精确估计困难。同时, 受着陆器尺寸的限制, 节点间距离较短, 导致利用节点位置计算柔性着陆器姿态时, 等效面倾角对节点位置估计误差敏感。为此, 崔平远等^[13]提出柔性附着状态协同估计方法, 如图6所示, 利用节点间关联观测信息修正节点状态独立估计结果, 进而实现柔性着陆器位置、速度和姿态的估计。在此基础上, 通过在滤波器设计中引入节点构型^[76]、节点间相对距离约束^[77], 建立柔性约束非线性滤波估计方法, 可进一步改善滤波收敛性能, 提高节点和柔性着陆器整体状态估计的精度。

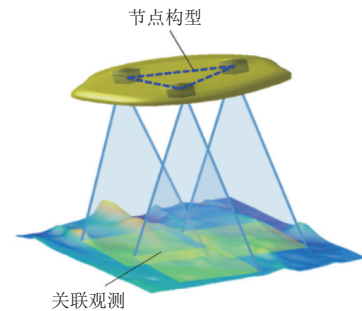


图6 柔性附着多节点协同估计

Fig. 6 Multi-node cooperative estimation during flexible landing

3.5 小天体附着智能制导与控制技术

小天体表面形貌复杂且引力微弱, 附着任务一般要求“双零”约束^[78], 即不只要求位置偏差为零, 还要求相对速度为零, 对制导与控制技术提出了较高的要求。然而, 小天体引力不规则、先验信息匮乏, 且附着过程面临复杂未知的环境与扰动。因此, 在小天体附着过程中, 着陆器需要具备高自主性、高可靠性的智能制导控制的能力。

1) 刚性附着智能制导控制

传统的小天体附着制导方法, 主要围绕刚性着陆器设计, 主要有解析反馈制导和“轨迹优化+轨迹跟踪”两类。解析制导类的典型代表有“阿波罗”制导、ZEM/ZEV (Zero-Effort-Miss/Zero-Effort-Velocity) 制导^[79]、凸曲率避障制导^[80]等。该类方法形式简洁、计算量小, 但一般只能得到燃耗次优解, 且无法处理复杂约束。轨迹优化跟踪类制导则可以预先离线优化一条标称附着轨迹, 考虑约束并使燃耗等性能指标最优。Nakano等^[81]基于间接法优化得到了小天体最优附着轨迹, 并通过同伦法克服了协态变量初值敏感问题。Pinson等^[82]基于序列凸优化方法, 得到了小天体不

规则引力场下的燃耗最优附着轨迹。在小天体附着过程中,由于环境扰动和不确定性的存在,需要控制着陆器实时跟踪标称轨迹,常用的跟踪控制方法主要有PID控制、滑模控制、模型预测控制^[83]等。以上控制方法也应用于附着过程中对着陆器的姿态控制或耦合姿轨一体化控制^[84]。

随着人工智能技术的不断发展,智能算法给附着制导与控制提供了新的方案,提高了附着的智能化水平。人工智能是模拟、拓展人类智能行为的技术,包括深度学习、强化学习、元学习等智能方法。近些年,智能方法因其强大的非线性映射能力和策略探索能力被应用于小天体附着的制导控制。智能方法能够直接拟合制导控制中难以解析表示的复杂规律,或与传统的解析方法结合。Cheng等^[85]针对不规则小天体快速着陆的控制方法进行了研究,使用神经网络拟合间接法的初始解,并简化了复杂引力的求解,提升了控制指令的求解速度。Furfaro等^[86]提出了一种自适应的ZEM/ZEV制导方法,将强化学习与ZEM/ZEV结合,通过神经网络给出制导参数,实现不同环境下制导参数的自适应调节。Qi等^[87]提出了一种奖励自动调整的强化学习方法,通过多目标奖励函数的自主调节提高训练速度,实现着陆器的姿态控制。Gaudet等^[88]针对小天体自主探测提出了一种终端自适应制导方法,通过元学习的方式使制导策略能够应对不同的小天体特性、传感器和执行机构误差。通过使用智能方法,增强了制导控制方法的适用范围,提高了小天体附着的稳健性。

2) 柔性附着智能制导控制

与刚性附着相比,柔性附着可以提升小天体表面着陆时的容忍速度。然而,柔性探测器构型时变、动力学高维非线性、约束复杂、节点间控制耦合,对附着过程制导与控制提出了新的挑战。

针对复杂约束下柔性附着制导与控制的问题,Liang等^[89]基于可控集理论,求解了耦合约束下柔性附着的可行初始部署区域。Zhai等^[90]将节点间的柔性连接近似简化为“弹簧-阻尼”模型,基于高斯伪谱法优化得到柔性探测器的多约束最优附着轨迹。Chen等^[33]采用同伦法实现刚性向柔性着陆优化问题的平滑过渡,基于序列凸优化得到柔性探测器的燃耗最优附着轨迹。在考虑柔性探测器姿态的控制问题中,为克服柔性形变带来的转动惯量时变等难题,以各节点位置高度之差取代传统姿态变量,近似表征柔性探测器整体姿态的平稳性,如图7所示。在此基础上,Zhang等^[91]设计附着燃耗与平稳性的加权性能指标,基于最优控

制理论实现了柔性探测器的最优解析制导。Cui等^[92]提出了一种基于约束非齐次近似序列黎卡蒂方程(CIASRE)的最优姿态控制方法,通过饱和函数构造和动力学伪线性化,建立并迭代求解解析CIASRE问题,实现了柔性探测器的快速最优姿态控制。

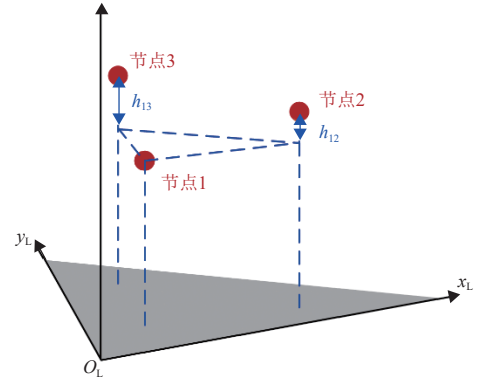


图7 柔性探测器节点高度差^[91]

Fig. 7 Altitude difference among three nodes of flexible probe^[91]

智能算法的学习和拓展能提升柔性附着制导控制系统的自主性与适用范围。Zhao等^[94]在解析制导律的基础上,通过双延迟深度确定性策略梯度算法训练神经网络,用于拟合节点状态与多节点控制指令的关系,提高了柔性附着的稳健性与附着精度。Lu等^[93]针对柔性附着中着陆器姿态控制问题,设计柔性附着智能控制方法,使用神经网络拟合柔性力,通过节点高度差反馈控制与柔性力智能补偿的方式,控制柔性着陆器的姿态保持与姿态机动。Yan等^[95]针对小天体柔性附着问题,基于参数多项式和非奇异滑模设计附着轨迹和姿态控制器,通过生成集搜索优化附着时间,通过径向基函数网络自适应得到柔性等效项,最终实现对姿轨耦合的柔性着陆器的一体化制导控制。在柔性附着制导控制中,智能算法能够有效解决柔性力高维非线性带来的计算困难,并综合考虑节点运动耦合带来的影响。

4 结束语

由于小天体尺寸小、引力弱、形貌崎岖、动力学环境复杂,附着任务面临一系列的技术挑战。本文结合传统的刚性与新型的智能柔性附着模式,梳理了小天体附着的智能技术需求,从附着动力学中的智能技术、附着任务智能规划技术、智能感知与匹配技术、智能导航技术、智能制导与控制技术等方面归纳总结研究进展。未来面向场景更复杂、技术要求更高的小天体附着任务,还有以下几个方面的问题值得进一步探讨和研究。

1) 复杂形貌条件下附着动力学建模的问题。小天体表面可能同时存在风化层、碎石堆、冰层,表面物质的接触性质存在较大不确定性,进而影响小天体着陆器的附着效果。为此,需考虑多种小天体表面和接触性质高度不确定情况,开展着陆器的附着动力学与稳定性研究。

2) 复杂环境下附着智能决策与规划的问题。小天体环境不完全确知,且气体尘埃喷发、地形崎岖复杂等特点均会对附着过程自主运行造成干扰,影响小天体附着任务的可靠性和安全性。为提高附着探测器的智能性和复杂环境实时应对能力,需深入开展小天体附着在线智能决策和任务规划技术。

3) 小天体附着环境智能协同感知的问题。小天体表面形貌特征的感知结果受光照条件变化、着陆器运动状态等因素影响较大。在大范围尺度、视角与环境动态变化的情况下,感知精度与匹配准确率难以保证,需在多种测量信息智能协同感知技术上进行深入研究。

4) 柔性附着状态智能协同估计问题。在小天体不确定环境中,可用于自主定位的导航信息稀疏,同时柔性连接下测量节点相对位姿动态变化,为柔性附着状态的精准估计带来困难,应结合柔性附着行为和多元导航信息分布特点,围绕智能协同导航技术开展进一步研究。

5) 柔性着陆器强耦合智能控制问题。对于柔性着陆器,整体质心运动和构型姿态运动是通过同一组推力器操控的,存在姿轨耦合;同时柔性着陆器的柔性变形会影响控制推力指向变化,而控制推力又引起柔性变形,进一步加强了耦合效应,故需深入研究柔性附着强耦合控制机理与智能控制技术。

参 考 文 献

- [1] YEOMANS D K, CHODAS P W, KEESEY M S, et al. Targeting an asteroid-the Galileo spacecraft's encounter with 951 Gaspra[J]. *Astronomical Journal*, 1993, 105(4): 1547-1552.
- [2] AZADMANESH M, ROSHANIAN J, HASSANALIAN M. On the importance of studying asteroids: a comprehensive review[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2023, 142: 100957.
- [3] VEVERKA J, FARQUHAR B, ROBINSON M, et al. The landing of the NEAR-Shoemaker spacecraft on asteroid 433 Eros[J]. *Nature*, 2001, 413(6854): 390-393.
- [4] BIERHAUS E B, CLARK B C, HARRIS J W, et al. The OSIRIS-REx spacecraft and the touch-and-go sample acquisition mechanism(TAG-SAM)[J]. *Space Science Reviews*, 2018, 214: 107.
- [5] HENSHALL T. The surface of asteroid Bennu[J]. *Nature Reviews Materials*, 2019, 4(4): 228.
- [6] KAWAGUCHI J, FUJIWARA A, UESUGI T. Hayabusa-its technology and science accomplishment summary and Hayabusa-2[J]. *Acta Astronautica*, 2008, 62(10-11): 639-647.
- [7] TSUDA Y, SAIKI T, TERUI F, et al. Hayabusa 2 mission status: landing, roving and cratering on asteroid Ryugu[J]. *Acta Astronautica*, 2020, 171: 42-54.
- [8] GOESMANN F, ROSENBAUER H, BREDEHÖFT J H, et al. Organic compounds on comet 67P/Churyumov-Gerasimenko revealed by COSAC mass spectrometry[J]. *Science*, 2015, 349(6247): 6891-6893.
- [9] GEURTS K, FANTINATI C, ULAMEC S, et al. Rosetta lander: on-comet operations execution and recovery after the unexpected landing[C]//Proceedings of SpaceOps 2016 Conference. Daejeon, Korea: AIAA, 2016.
- [10] SHARKEY B N L, REDDY V, MALHOTRA R, et al. Lunar-like silicate material forms the Earth quasi-satellite(469219)2016 HO3 Kamo'oalewa[J]. *Communications Earth & Environment*, 2021, 2: 231.
- [11] ANTREASIAN P G, CHESLEY S R, MILLER J K, et al. The design and navigation of the NEAR-Shoemaker landing on Eros[C]//Proceedings of AAS/AIAA Astrodynamics Specialists Conference. Quebec, Canada: AIAA, 2001.
- [12] ROLL R, WITTE L. ROSETTA lander Philae: touch-down reconstruction[J]. *Planetary and Space Science*, 2016, 125: 12-19.
- [13] 崔平远, 陆晓萱, 朱圣英, 等. 小天体柔性附着状态协同估计方法[J]. *宇航学报*, 2022, 43(9): 1219-1226.
- [14] CUI P Y, LU X X, ZHU S Y, et al. Cooperative state estimation method for small celestial body flexible landing[J]. *Journal of Astronautics*, 2022, 43(9): 1219-1226.
- [15] 崔平远, 张成宇, 朱圣英, 等. 小天体柔性附着技术[J]. *宇航学报*, 2023, 44(6): 805-816.
- [16] CUI P Y, ZHANG C Y, ZHU S Y, et al. Technologies for flexible landing on small celestial bodies[J]. *Journal of Astronautics*, 2023, 44(6): 805-816.
- [17] PARK R S, WERNER R A, BHASKARAN S. Estimating small-body gravity field from shape model and navigation data[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2010, 33(1): 1-10.
- [18] BARNETT C T. Theoretical modeling of the magnetic and gravitational fields of an arbitrarily shaped three-dimensional body[J]. *Geophysics*, 1976, 41(6): 1353-1364.
- [19] WERNER R A. The gravitational potential of a homogeneous polyhedron or don't cut corners[J]. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 1994, 59(3): 253-278.
- [20] ZHANG Y H, QIAN Y J, LI X, et al. Resonant orbit search and stability analysis for elongated asteroids[J]. *Astrodynamics*, 2023, 7(1): 51-67.
- [21] WAL S V, REID R G, SCHEERES D J. Simulation of nonspherical asteroid landers: contact modeling and shape effects on bouncing[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2019, 57(3): 1-22.
- [22] CHENG L, WANG Z B, JIANG F H, et al. Fast generation of optimal asteroid landing trajectories using deep neural networks[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2020, 56(4): 2642-2655.
- [23] PASQUALE A, SILVESTRINI S, CAPANNOLO A, et al. Small bodies non-uniform gravity field on-board learning through Hopfield neural networks[J]. *Planetary and Space Science*, 2022, 212: 105425.
- [24] ZHAO Y J, YANG H W, LI S, et al. On-board modeling of gravity fields of elongated asteroids using Hopfield neural networks[J].

- Astrodynamics*, 2023, 7(1): 101-114.
- [23] WANG T Z, QUAN Q Q, TANG D W, et al. Progress in the development of small-celestial-body anchoring robots[J]. *Nature Astronomy*, 2023, 7: 380-390.
- [24] YE K, LI L, ZHU H P. A note on the Hertz contact model with nonlinear damping for pounding simulation[J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 2009, 38(9): 1151-1163.
- [25] HUNT K H, CROSSLEY F. Coefficient of restitution interpreted as damping in vibroimpact[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1975, 42(2): 440.
- [26] LANKARANI H M, NIKRAVESH P E. Continuous contact force models for impact analysis in multibody systems[J]. *Nonlinear Dynamics*, 1994, 5(2): 193-207.
- [27] HU S W, GUO X L. A dissipative contact force model for impact analysis in multibody dynamics[J]. *Multibody System Dynamics*, 2015, 35(2): 131-151.
- [28] POURSIINA M, NIKRAVESH P E. Optimal damping coefficient for a class of continuous contact models[J]. *Multibody System Dynamics*, 2020, 50(2): 169-188.
- [29] TARDIVEL S, SCHEERES D J, MICHEL P, et al. Contact motion on surface of asteroid[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2014, 51(6): 1857-1871.
- [30] ZENG X Y, WEN T G, LI Z W, et al. Natural landing simulations on generated local rocky terrains for asteroid cubic lander[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2022, 58(4): 3492-3508.
- [31] ZHANG Y L, LI J F, ZENG X Y, et al. High-fidelity landing simulation of small body landers: modeling and mass distribution effects on bouncing motion[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2021, 119(1): 107149.
- [32] CHENG B, YU Y, BAOYIN H X. Numerical simulations of the controlled motion of a hopping asteroid lander on the regolith surface[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2019, 485(3): 3088-3096.
- [33] CHEN Z L, LONG J T, CUI P Y. Trajectory design for landing on small celestial body with flexible lander[J]. *Acta Astronautica*, 2023, 212: 492-504.
- [34] YAN W F, FENG R Y, BAOYIN H X. Stability of a flexible asteroid lander with landing control[J]. *Aerospace*, 2022, 9(11): 719.
- [35] FENG R Y, ZHANG Y, LIU J Y, et al. Soft robotic perspective and concept for planetary small body exploration[J]. *Soft Robotics*, 2022, 9(5): 889-899.
- [36] VALLAT C, ALTOBELLI N, GEIGER B, et al. The science planning process on the Rosetta mission[J]. *Acta Astronautica*, 2017, 133: 244-257.
- [37] MOUSSI A, FRONTON J F, GAUDON P, et al. The Philae lander: science planning and operations[J]. *Acta Astronautica*, 2016, 125: 92-104.
- [38] POLIT A T, BALRAM-KNUTSON S S, AUDI E, et al. Science operations planning and implementation for the OSIRIS-REX mission, Part 1: Process[C]//Proceedings of 2022 IEEE Aerospace Conference(AERO). Big Sky: IEEE, 2022.
- [39] BALRAM-KNUTSON S S, LAMBERT D, AUDI E, et al. Science operations planning and implementation for the OSIRIS-REX mission, Part 2: Toolkit[C]//2022 IEEE Aerospace Conference(AERO). Big Sky: IEEE, 2022.
- [40] ZHAO Y T, XU R, JIANG H P, et al. Decentralized privacy-preserving onboard mission planning for multi-probe system[J]. *Acta Astronautica*, 2021, 179: 130-145.
- [41] 王棒, 徐瑞, 李朝玉, 等. 小天体柔性着陆任务规划的动态时间约束推理方法[J]. *宇航学报*, 2024, 45(2): 212-221.
- WANG B, XU R, LI Z Y, et al. Dynamic temporal constraint reasoning method for flexible landing mission planning of small celestial body[J]. *Journal of Astronautics*, 2024, 45(2): 212-221.
- [42] ZHU Z, XU R, LI Z Y, et al. Multi-objective optimization of attitude maneuver planning for flexible asteroid lander using population evolutionary algorithm[C]//Proceedings of 74th International Astronautical Congress. Baku, Azerbaijan: IAC, 2023.
- [43] XU R, CHEN C, LU S Y, et al. Autonomous recovery from spacecraft plan failures by regulatory repair while retaining operability[J]. *Aerospace*, 2022, 9: 40.
- [44] GOLISH D R, DELLAGIUSTINA D N, LI J Y, et al. Disk-resolved photometric modeling and properties of asteroid(101955)Bennu[J]. *Icarus*, 2021, 357: 113724.
- [45] SILVESTRINI S, LAVAGNA M. Deep learning and artificial neural networks for spacecraft dynamics, navigation and control[J]. *Drones*, 2022, 6: 270.
- [46] LU T T, HU W D, LIU C, et al. Relative pose estimation of a lander using crater detection and matching[J]. *Optical Engineering*, 2016, 55(2): 023102.
- [47] PUGLIATTI M, MAESTRINI M. Small-body segmentation based on morphological features with a UNet architecture[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2022, 59(6): 1821-1835.
- [48] CHEN Z H, JIANG J. Crater detection and recognition method for pose estimation[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(17): 3467.
- [49] 蓝朝桢, 耿迅, 徐青, 等. 基于序列影像的小天体三维形状重建方法研究[J]. *深空探测学报(中英文)*, 2014, 1(2): 140-145.
- LAN C Z, GENG X, XU Q, et al. 3D shape reconstruction for small celestial body based on sequence images[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2014, 1(2): 140-145.
- [50] WATANABE S, HIRABAYASHI M, HIRATA N, et al. Hayabusa 2 observations of the top-shaped carbonaceous asteroid 162173 Ryugu[J]. *Science*, 2019, 364(6437): 268-272.
- [51] EDMUNDSON K L, BECKER K J, BECKER T L, et al. Photogrammetric processing of Osiris-Rex images of Asteroid(101955)Bennu[J]. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2020, V-3-2020: 587-594.
- [52] GASKELL R W, BARNOUIN-JHA O S, SCHEERES D J, et al. Characterizing and navigating small bodies with imaging data[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2010, 43(6): 1049-1061.
- [53] HANAK C, CRAIN T, BISHOP R. Crater identification algorithm for the lost in low lunar orbit scenario[C]//Proceedings of 33rd Annual AAS Guidance and Control. Breckenridge, CO: AIAA, 2010.
- [54] DOWNES L M, STEINER T J, HOW J P. Neural network approach to crater detection for lunar terrain relative navigation[J]. *Journal of Aerospace Information Systems*, 2021, 18(7): 391-403.
- [55] SILVESTRINI S, PICCININ M, ZANOTTI G, et al. Optical navigation for Lunar landing based on Convolutional Neural Network crater detector[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2022, 123: 107503.
- [56] DRIVER T, SKINNER K A, DOR M, et al. Astrovision: towards

- autonomous feature detection and description for missions to small bodies using deep learning[J]. *Acta Astronautica*, 2023, 210: 393-410.
- [57] LUO Z X, ZHOU L, BAI X Y, et al. ASLFeat: learning local features of accurate shape and localization[C]//Proceedings of 2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR). Seattle: IEEE, 2020.
- [58] SARLIN P-E, DETONE D, MALISIEWICZ T, et al. Superglue: learning feature matching with graph neural networks[C]//Proceedings of 2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Seattle: IEEE, 2020.
- [59] GE D T, CUI P Y, ZHU S Y. Recent development of autonomous GNC technologies for small celestial body descent and landing[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2019, 110: 100551.
- [60] ZHU S Y, LIU D C, LIU Y, et al. Observability-based visual navigation using landmarks measuring angle for pinpoint landing[J]. *Acta Astronautica*, 2019, 155: 313-324.
- [61] CUI P Y, GAO X Z, ZHU S Y, et al. Visual navigation based on curve matching for planetary landing in unknown environments[J]. *Acta Astronautica*, 2020, 170: 261-274.
- [62] KALMAN R E. On the general theory of control systems[J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 1960, 1(1): 491-502.
- [63] 王大轶, 董天舒, 侯博文, 等. 一类欠观测系统的可观性研究[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2022, 52(1): 214502.
- WANG D Y, DONG T S, HOU B W, et al. Observability of a class of under-observation systems[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2022, 52: 214502.
- [64] 常晓华, 崔平远, 王晓明, 等. 基于条件数的能观性度量方法及在自主导航系统中的应用[J]. *宇航学报*, 2010, 31(5): 1331-1337.
- CHANG X H, CUI P Y, WANG X M, et al. A condition number-based observability analysis method and its application in autonomous navigation system[J]. *Journal of Astronautics*, 2010, 31(5): 1331-1337.
- [65] ZHAO Z D, YU Z S, CUI P Y. A beacon configuration optimization method based on Fisher information for Mars atmospheric entry[J]. *Acta Astronautica*, 2017, 133: 467-475.
- [66] SUN D B, CRASSIDIS J L. Observability analysis of six-degree-of-freedom configuration determination using vector-observations[J]. *Journal of Guidance Control and Dynamics*, 2002, 25(6): 1149-1157.
- [67] XIU Y, ZHU S Y, XU R, et al. Optimal crater landmark selection based on optical navigation performance factors for planetary landing[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2023, 36(3): 254-270.
- [68] XU C, HUANG X Y, LI M D, et al. Landmark database selection for vision-aided inertial navigation in planetary landing missions[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2021, 118: 107040.
- [69] XIU W B, LONG J T, ZHU S Y, et al. Landmark robust selection for asteroid landing visual navigation[J]. *Acta Astronautica*, 2024, 214: 665-676.
- [70] GAO X L, LUO H Y, NING B K, et al. RL-AKF: an adaptive kalman filter navigation algorithm based on reinforcement learning for ground vehicles[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(11): 1704.
- [71] XIONG K, WEI C L, ZHANG H Y. Q-learning for noise covariance adaptation in extended KALMAN filter[J]. *Asian Journal of Control*, 2020, 23(4): 1803-1816.
- [72] PESCE V, SILVESTRINI S, LAVAGNA M. Radial basis function neural network aided adaptive extended Kalman filter for spacecraft relative navigation[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2020, 96: 105527.
- [73] PARK T H, D'AMICO S. Adaptive neural-network-based unscented Kalman filter for robust pose tracking of noncooperative spacecraft[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2023, 46(9): 1671-1688.
- [74] PROENÇA P F, GAO Y. Deep learning for spacecraft pose estimation from photorealistic rendering[C]//Proceedings of 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA). Paris, France: IEEE, 2020.
- [75] HUANG H R, SONG B, ZHAO G P, et al. End-to-end monocular pose estimation for uncooperative spacecraft based on direct regression network[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2023, 59: 5.
- [76] GE D T, CUI P Y, LU X. Parallel state estimation under flexible connections in small celestial body landings[C]//Proceedings of 72nd International Astronautical Congress. Dubai: IAC, 2021.
- [77] CHE M, CHEN Z, GE D T. Constrained unscented kalman filtering with improved reliability for small celestial body relative navigation[C]//Proceedings of 74th International Astronautical Congress. Baku, Azerbaijan: IAC, 2023.
- [78] 崔平远, 袁旭, 朱圣英, 等. 小天体自主附着技术研究进展[J]. *宇航学报*, 2016, 37(7): 759-767.
- CUI P Y, YUAN X, ZHU S Y, et al. Research progress of small body autonomous landing techniques[J]. *Journal of Astronautics*, 2016, 37(7): 759-767.
- [79] HAWKINS M, GUO Y, WIE B. ZEM/ZEV feedback guidance application to fuel-efficient orbital maneuvers around an irregular-shaped asteroid[C]//Proceeding of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Minneapolis, Minnesota: AIAA, 2012.
- [80] CUI P Y, QIN T, ZHU S Y, et al. Trajectory curvature guidance for Mars landings in hazardous terrains[J]. *Automatica*, 2018, 93: 161-171.
- [81] NAKANO R, TAHERI E, HIRABAYASHI M. Time-optimal and fuel-optimal trajectories for asteroid landing via indirect optimization[C]//Proceedings of AIAA SCITECH 2022 Forum. San Diego, CA: AIAA, 2022.
- [82] PINSON R, LU P. Trajectory design employing convex optimization for landing on irregularly shaped asteroids[C]//Proceedings of AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference. Long Beach, California: AIAA, 2016.
- [83] ALANDIHALLAJ M, ASSADIAN N. Soft landing on an irregular shape asteroid using Multiple-Horizon Multiple-Model Predictive Control[J]. *Acta Astronautica*, 2017, 140: 225-234.
- [84] LEE U, MESBAHI M. Constrained autonomous precision landing via dual quaternions and model predictive control[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2017, 40(2): 292-308.
- [85] CHENG L, WANG Z B, SONG Y, et al. Real-time optimal control for irregular asteroid landings using deep neural networks[J]. *Acta Astronautica*, 2020, 170: 66-79.
- [86] FURFARO R, SCORSOGLIO A, LINARES R, et al. Adaptive generalized ZEM-ZEV feedback guidance for planetary landing via a deep reinforcement learning approach[J]. *Acta Astronautica*, 2020, 171: 156-171.
- [87] QI J, GAO H B, YU H T, et al. Integrated attitude and landing control for quadruped robots in asteroid landing mission scenarios using reinforcement learning[J]. *Acta Astronautica*, 2023, 204: 599-610.
- [88] GAUDET B, LINARES R, FURFARO R. Terminal adaptive guidance

- via reinforcement meta-learning: applications to autonomous asteroid close-proximity operations[J]. *Acta Astronautica*, 2020, 171: 1-13.
- [89] LIANG Z X, LU B J, ZHU S Y. Controllable cone for horizontal landing on asteroids using a flexible probe[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2024, 145: 108869.
- [90] ZHAI G, LI J, SUN Y Y, et al. Research on asteroid landing with a new flexible spacecraft[J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2022, 35(5): 04022068.
- [91] ZHANG C, LIANG Z X, CUI P Y, et al. Distributed guidance for flexible spacecraft landing on asteroid[C]//Proceedings of 3rd International Astronautical Congress. Paris, France: IAC, 2022.
- [92] CUI P Y, ZHANG C Y, LIANG Z X. Optimal attitude control for landing on asteroid with a flexible lander[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2024, 149.
- [93] LU B J, LIANG Z X, ZHU S Y. Intelligent cooperative control method for flexible probe landing on small celestial bodies[C]//Proceedings of 74th International Astronautical Congress. Baku, Azerbaijan: IAC, 2023.
- [94] ZHAO D Y, ZHU S Y, CUI P Y. Intelligent fuel-optimal guidance strategy for small body flexible landing[C]//Proceedings of 73rd International Astronautical Congress. Paris, France: IAC, 2022.
- [95] YAN W F, BAOYIN H X. Position-attitude coupling guidance and control for asteroid landing with a flexible lander[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2023, 141: 108567.

作者简介:

梁子璇(1988-),男,教授,博士生导师,主要研究方向:飞行器轨迹优化与制导控制、小天体探测与防御。

通信地址:北京市海淀区中关村南大街5号北京理工大学宇航学院(100081)

电话:(010)68913550

E-mail: liangzx@bit.edu.cn

崔平远(1961-),男,教授,博士生导师,主要研究方向:飞行器自主导航与控制、深空探测器自主技术与轨道设计。本文通信作者。

通信地址:北京市海淀区中关村南大街5号北京理工大学宇航学院(100081)

电话:(010)68918611

E-mail: cuiPY@bit.edu.cn

Research Progress of Technologies for Intelligent Landing on Small Celestial Bodies

LIANG Zixuan^{1,2}, LU Bingjie^{1,2}, CUI Pingyuan^{1,2}, ZHU Shengying^{1,2}, XU Rui^{1,2},
GE Dantong^{1,2}, BAOYIN Hexi³, SHAO Wei⁴

(1. Institute of Deep Space Exploration, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Key Laboratory of Autonomous Navigation and Control for Deep Space Exploration, Ministry of Industry and Information Technology, Beijing 100081, China; 3. School of Aerospace Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

4. College of Automation and Electronic Engineering, Qingdao University of Science & Technology, Qingdao 266100, China)

Abstract: To meet the robust landing requirement in the exploration and exploitation of small celestial bodies, based on the landing exploration missions in China and abroad, the requirements of intelligent landing technologies were analyzed and the corresponding research progress was discussed. Firstly, the landing exploration missions for small celestial bodies were reviewed. Then, the traditional rigid landing mode and the novel intelligent flexible landing concept of small celestial bodies were introduced, and the intelligent technology requirements of small celestial body landing were sorted out. On this basis, the research progress on intelligent landing technologies was summarized from the aspects of dynamics, mission planning, perception, navigation, guidance and control. Finally, the development trend of landing technology of small celestial bodies is envisioned.

Keywords: small celestial body; intelligent landing; flexible landing; mission planning; guidance navigation and control

Highlights:

- Research progress on intelligent landing technologies for small celestial bodies is systematically discussed.
- Small celestial body landing missions implemented in the world so far are summarized.
- Intelligent landing technologies for small celestial bodies involve dynamics, mission planning, perception, navigation, guidance and control.
- The development trend of landing technology of small celestial bodies is envisioned.

[责任编辑: 杨晓燕, 英文审校: 宋利辉]