引文格式:张过,王善绣,徐青,等.陆域无路导航理论方法与关键技术[J].武汉大学学报(信息科学版),2026,51(10):2167-2179.DOI:10.13203/j.whugis20260301

Citation:ZHANG Guo,WANG Shanxiu,XU Qing,et al.Theory, Methods and Key Technologies of Terrestrial Off-Road Navigation[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2026,51(10):2167-2179.DOI:10.13203/j.whugis20260301

陆域无路导航理论方法与关键技术

张 过[1] 王善绣[2] 徐 青[3] 周新建[4] 朱春阳[1]

1 武汉大学测绘遥感信息工程全国重点实验室,湖北 武汉,430079

2 中国卫星导航定位应用管理中心,北京,100088

3 信息工程大学地理空间信息学院,河南 郑州,450001

4 陆军研究院,江苏 无锡,214035

摘 要:经典车辆导航系统以道路网络为基础,通过构建道路网拓扑关系以及实时道路交通情况按照交通规则实现路径规划与引导服务,发展已相对成熟。然而在复杂自然环境、灾害应急救援以及野外生产作业等场景中,道路缺失、失能或道路与非道路区域交替出现,经典道路导航难以满足机动需求。聚焦航天遥感支撑的陆域无路导航理论方法,明确无路导航的基本概念、应用需求,围绕陆域通行要素提取的可靠性、时变条件下车辆通过性认知和任务驱动的规划决策引导3个科学问题,梳理"环境感知测量—通过性认知预测—规划决策引导"的理论框架,讨论通行要素遥感智能解译、多尺度通过性动态建模、多主体协同规划与引导及导航服务等关键技术。对地表覆盖数据、几何通过性及支承通过性模型的验证结果分析表明,基于土壤力学参数约束的支承通过性模型能够较好预测车辆速度,实现了从航天遥感信息到车辆通过能力评价的转换。现有结果为陆域通行要素获取和车辆通过性评价提供了依据,为航天遥感信息向陆域导航应用的转化提供分析框架与技术参考。

关键词:陆域无路导航;航天遥感;车辆通过性;路径规划;导航引导

中图分类号:TP208 **文献标识码**:A **收稿日期**:2026-07-02

DOI:10.13203/j.whugis20260301 **文章编号**:1671-8860(2026)10-2167-13

Theory, Methods and Key Technologies of Terrestrial Off-Road Navigation

ZHANG Guo[1] *WANG Shanxiu*[2] *XU Qing*[3] *ZHOU Xinjian*[4] *ZHU Chunyang*[1]

1 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 China National Administration of GNSS and Applications, Beijing 100088, China

3 School of Geospatial Information, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China

4 Army Research Institute, Wuxi 214035, China

Abstract: **Objectives**: Conventional vehicle navigation systems are well established, providing route planning and guidance based on road network topology, real-time traffic conditions, and traffic rules. However, they cannot adequately meet mobility requirements in complex natural environments, disaster response, and field operations where roads are absent, unusable, or interspersed with off-road areas. **Methods**: This paper proposes the theory and methods of terrestrial off-road navigation supported by spaceborne remote sensing. The basic concepts and application requirements of off-road navigation are clarified. Three scientific questions are examined, including reliable extraction of terrestrial traversability-related factors, vehicle traversability assessment under time-varying conditions, and the task-driven planning, decision-making and guidance. A theoretical framework comprising environmental perception and measurement, traversability assessment and prediction, and planning, decision-making, and guidance is outlined. Key technologies are discussed, including intelligent interpretation of traversability-related factors from remote sensing data, multiscale dynamic traversability modeling, multi-agent collaborative planning and guidance, and navigation services. A tracked-vehicle field test in the Chuzhou test area is used to analyze

基金项目:国家重点研发计划(2023YFB3905500,2024YFF0617400);国家自然科学基金区域创新发展联合基金重点项目(U24A20589)。

第一作者:张过,博士,教授,研究方向为航天摄影测量。guozhang@whu.edu.cn

validation results for land-cover data, geometric traversability, and traversability models based on soil bearing capacity. **Results**: The traversability model constrained by soil mechanical parameters predicts vehicle speed reasonably well, demonstrating the translation of spaceborne remote sensing information into vehicle traversability assessment. The available results provide evidence supporting terrestrial traversability-related factor acquisition and vehicle traversability evaluation. **Conclusions**: This study provides an analytical framework and technical reference for applying spaceborne remote sensing information to terrestrial navigation, with traversability assessment connecting environmental observations to vehicle mobility evaluation.

Key words: terrestrial off-road navigation; spaceborne remote sensing; vehicle traversability; path planning; navigation guidance

定位导航是支撑地球空间信息获取、环境认知和自主决策的重要基础技术,其主要任务是在各种环境中支持机动平台的位置确定、状态估计、路径规划与运动引导。随着智能化技术的发展,特别是无人平台的出现,定位导航技术已由经典的位置服务逐渐向环境解译和自主决策方向快速演进,成为智能交通、无人系统、智慧海洋、低空经济和军事行动等领域的重要支撑[1-3]。

长期以来,以全球导航卫星系统(global navigation satellite system,GNSS)提供的位置基准、数字地图提供的空间信息表达、道路网络提供的结构化通行约束共同构成了现代导航定位体系的基本框架,极大地推动了道路交通、物流运输和移动互联网等领域的发展[4-5],与此同时,也模糊了定位与导航之间的概念区别。定位的核心是搞清楚“在哪里”,测量并输出目标的空间位置坐标(经纬度、高度等),支持静态和动态场景,对位置精度要求高;而导航的核心是“怎么从出发点行进到目的地”,专门针对机动平台,实时获取位置、速度、姿态信息,结合规划路线并引导行进。定位是导航的核心基础,没有精准的位置信息就难以开展后续的路线规划;导航是定位最广泛的延伸应用,导航过程中需要不断调用定位功能来确认当前位置,确保行进方向准确,本文对此特加以区别。GNSS提供了强大的定位功能,但在导航应用方面,特别是无路环境中的机动平台的导航方面,还存在一系列问题,需对理论方法与技术进行系统深入的研究。导航应用涉及陆域、海域和空域等不同环境,各类机动主体的运动方式、环境约束和信息需求存在显著差异。为使科学问题、关键技术与验证案例相互对应,本文将讨论范围限定为航天遥感支撑的陆域无路导航,以轮式车辆、履带车辆及地面移动机器人为主要对象,重点分析地形、植被、土壤、水文和障碍物等环境要素对机动通行的影响。海域航行、两栖陆海衔接及低空飞行不纳入本文的具体技术分析与验证范围。

1 导航技术的发展、难点与挑战

1.1 导航技术的发展

从导航对象和环境约束的发展过程来看,导航技术经历了由道路导航向越野导航,再向无路导航发展的演进过程。道路导航主要解决结构化道路网络中最优路径选择与车辆引导问题,越野导航则针对局部非结构化地形环境,通过感知地形特征、分析地形通过性,实现车辆、机器人等平台的自主移动。无路导航进一步突破地理空间中道路和人工设施的限制,关注既有道路网络无法完整保障的机动任务,依据环境条件和车辆能力生成可通行空间,并依据任务要求完成路径规划与行进引导。本文讨论其中的陆域应用,其技术内容包括通行要素获取、通过性评价、导航地图构建、路径规划与引导服务。

航天遥感具有覆盖范围广、观测周期稳定和多谱段多尺度信息获取能力强等优势,通过高分辨率光学、合成孔径雷达(synthetic aperture radar,SAR)及激光雷达(light detection and ranging,LiDAR)等观测数据,为复杂环境的大范围、多维度的空间认知提供支撑,是构建大范围导航电子地图的数据基础。遥感测绘领域围绕数字高程模型构建、地表覆盖分类、三维场景重建及数字地球等方向开展了大量研究,为复杂环境空间信息获取提供了重要基础[6-8]。近年来,基于深度学习的遥感智能解译、多源遥感数据融合技术进一步提升了环境信息提取能力,为构建面向导航应用的环境认知模型提供了新的技术途径[9-11]。然而,现有遥感研究主要关注地物识别、空间表达和环境监测,对导航任务所关注的“哪能走”“怎么走”等问题研究不足,尚未形成从遥感观测、通行要素提取、环境通过性建模到导航决策支持的理论体系。

随着高分辨率对地观测和人工智能技术的发展,利用遥感数据开展复杂环境感知与导航支

撑逐渐成为新的研究方向[12-13]。围绕越野导航开展了大量研究,形成了以视觉、LiDAR、毫米波雷达及惯性导航为核心的自主导航技术体系[14-15]。相关研究重点关注局部环境感知、地形可通行性分析、路径规划和自主避障,并提出了基于深度学习、多传感器融合和强化学习的环境建模与导航决策方法,在无人驾驶车辆、移动机器人和星球车导航等领域取得了重要进展[16-17]。然而,现有越野导航技术仍主要依赖车载、机载等近距离传感器获取局部环境信息,受限于传感器作用范围和观测条件,难以满足大范围、跨区域自主机动任务需求[18]。尤其是在复杂自然环境中,仅依靠局部感知通常需要采用探测、判断、移动的渐进式导航方式,不能提前获取大范围环境通行信息,存在全局路径规划能力不足和任务失败风险高等问题。

导航路径规划是导航系统的核心功能,可根据用户需求生成最短距离、最快通行等多种备选路线,结合实时路况动态调整,规避拥堵路段,大幅缩短出行耗时,降低意外延误率。路径规划从传统依赖静态地图的Dijkstra、A^*图搜索算法,演进为人工智能深度融合的新体系,通过长短期记忆网络、Transformer等时序模型,结合历史路况、天气、节假日等多维数据,实现未来路段流量提前预测,达成“未发生先导航”的动态预判能力。但极端场景适配不足,在无路越野、密林峡谷、长隧道等无信号/无常规路网的场景以及动态突变的环境中,常规路径规划算法依赖的路网数据失效,容易出现定位漂移、路线规划完全偏离、局部不可通行等问题。

1.2　难点与挑战

现有道路导航本质上建立在结构化空间约束基础之上,其过程依赖道路网络、电子地图和局部传感器获取的环境信息进行路径规划和导航引导。当机动平台进入山区、森林、荒漠、湿地及灾害现场等无道路或道路失能区域时,环境不再存在明确的路径拓扑关系,地形起伏、植被覆盖、水文条件、土壤承载能力及动态气象等因素共同决定平台的实际通行能力,经典导航模式难以有效描述环境与平台之间的交互关系,路径规划可靠性降低甚至导航任务失败[19-20]。面向缺乏道路约束的复杂自然环境,突破经典道路导航模式,构建能够支撑自主感知、通过性分析和路径决策的无路导航理论与方法,成为导航技术、遥感测绘和智能无人系统发展的重要方向[21-22]。即使任务区域存在部分可用道路,也仍需分析道路与非道路区域之间的连接条件,确定驶离和重新进入道路的位置,并在道路状态或环境条件变化时调整路线。因此,无路导航的需求并非仅源于道路不存在,也源于既有道路无法或难以完整保障机动任务。

上述需求使得无路导航面临3个相互关联的挑战:一是通行要素的可靠获取。导航所需信息不仅包括地物位置和类别,还包括地形起伏、障碍尺度、地表承载能力及水文状态等影响实际通行的属性,需解决多源观测尺度不一致、信息缺失和数据现势性不足等问题。二是环境与机动主体耦合的通过性认知。同一区域对不同尺寸、载荷和运动能力的主体可能具有不同的通行条件,同一主体的通过能力也会随环境变化而改变,因此需要建立环境状态和主体能力之间的映射关系。三是道路与非道路区域的联合规划及动态引导。导航需在统一考虑通行可行性与代价的基础上,处理不同区域之间的连接、机动主体的运动约束及任务执行中的环境变化,将候选路径转化为可执行的行动方案。

围绕上述挑战,本文聚焦陆域车辆在道路缺失、失能及道路与非道路区域交替出现条件下的导航需求,构建“环境感知测量—通过性认知预测—规划决策引导”的理论框架,讨论陆域通行要素提取的可靠性、时变条件下的通过性认知以及任务驱动下的机动规划决策与引导,为航天遥感信息向导航应用的转化提供思路和技术支撑。

2　无路导航理论框架

随着无人系统、移动机器人和自主驾驶技术的发展,机动导航技术的研究对象、环境表达方式和路径规划方法不断演进(表1)。本文提出的无路导航并非对道路导航和越野导航的简单扩展,而是面向多类型复杂自然环境提出的一种全域自主导航体系。其研究对象由道路网络或局部非结构化地形扩展至连续动态变化的复杂自然空间,环境信息来源由道路地图和近距离传感器感知扩展至航天遥感、多源对地观测与平台自主感知相融合的多尺度环境信息[13,23-24],路径规划则由道路网络图搜索和局部地形通过性分析,进一步发展为面向环境认知和动态约束的自主导航决策。形成以航天遥感提供的大范围多尺度环境先验信息为基础、融合机动平台实时感知与运动状态信息的自主导航新模式:路径选择由

表1 不同机动导航技术的对比

Table 1 Comparison of Different Types of Vehicle Navigation Technologies

类型	道路导航	局部越野导航	陆域无路导航
导航主体	道路车辆	越野车辆、机器人	轮式车辆、履带车辆、地面机器人
通行环境	交通路网	局部越野环境	无路及有路-无路混合区域
数据来源	电子地图	车载传感器	航天遥感+多源感知
路径规划	网络图搜索	可通行性分析	环境认知约束规划
应用场景	道路交通	越野车辆引导	野外生产作业及应急机动
评价方式	道路状态	地形可通过性	通过性计算与测试

依赖道路网络转变为复杂环境中的自主通行认知,规划方式由单平台局部实时规划拓展为全域环境驱动的多平台协同导航。

2.1 无路导航的基本概念与导航需求

无路导航是指在缺乏可用道路网络或既有道路无法满足机动任务需求的复杂非结构化环境中,通过环境感知、通过性分析、路径规划与运动引导,支持机动平台从起始点安全到达目标点的导航技术体系。其需求主要来自道路缺失、道路因灾害或其他因素失能、任务目标位于道路网络之外,以及行进过程中需要在道路与非道路区域之间转换等场景。因此,“无路”并不要求任务区域完全不存在道路,而是指机动路径不能完全依赖既有道路网络确定,需要依据环境条件、机动平台能力与任务约束生成。无路导航的一般概念可适用于不同类型的机动环境,但本文仅讨论陆域应用,以轮式车辆、履带车辆及地面移动机器人为主要对象。本文所述道路与非道路区域衔接,指陆域内部不同通行空间之间的连接,不涉及两栖平台的陆海转换。

无路导航重点解决“哪里能够通行、以何种方式通行、如何到达目标”等问题。与依据道路拓扑选择路线相比,无路导航需要结合机动平台的几何尺寸、载荷、动力性能和运动方式,分析地形、植被、水文、地表承载能力及障碍物等要素对通行的影响,确定可通行区域、通行条件与通行代价。在此基础上,综合安全、时间、能耗等任务要求规划可执行路径,并根据环境变化和行进过程中的感知反馈及时调整路线,实现从通行区域判定到路径规划与运动引导的连续支持。

当任务区域存在可用道路时,无路导航应充分利用道路提供的通行条件,联合道路网络与非道路区域的通过性信息开展路径规划。有道路区域需考虑交通规则、道路状态及通行限制,非道路区域需依据环境与机动平台之间的作用关系判断可行性,两者衔接处还需检查路肩、边沟、坡坎及转向空间等条件。此时,导航需求由单一道路路径选择或非道路路径生成,转变为道路与非道路区域的联合规划、出入道路位置选择及行进模式转换,相应需要统一不同区域的通行代价表达,并在道路失能或环境变化时重新评价连接关系和候选路线。

2.2 陆域无路导航的科学问题

无路导航是机动平台、环境要素和任务目标共同作用下的通过性认知与规划决策过程。航天遥感获取的地形地貌、植被覆盖、水文条件、土壤状态和障碍物分布等信息构成区域通行要素场。车辆的几何尺寸、载荷、接地特性和动力学性能决定其对环境的适应能力。任务目标、时间要求和安全约束则限定路径选择与行进方式。因此,需要揭示环境通行要素与车辆运动能力之间的作用关系,并将其转化为可计算、可更新的通行空间和规划约束。

围绕这一过程,本文将无路导航的关键科学问题归纳为复杂环境时变通行要素场驱动的机动平台的通行机理,其科学内涵是在复杂自然环境中,机动平台时变运动状态、多尺度通行要素场以及环境与平台动态交互三者之间的作用过程,通过建立环境感知、通过性认知和导航决策之间的统一理论模型,实现从复杂环境信息获取到自主导航决策的全过程理论描述。围绕这一关键科学问题,进一步凝练形成3个相互关联、逐层递进的核心科学问题,即复杂陆域环境下通行要素提取的可靠性、时变条件下车辆通过性认知、任务驱动下机动平台机动规划决策与引导。

2.2.1 复杂陆域环境下通行要素提取的可靠性

复杂陆域环境通行要素的高可靠获取是无路导航环境感知的基础,其直接决定后续通过性认知和导航决策的有效性。与道路导航依赖道路网络和测绘信息不同,无路导航面向的是缺乏结构化空间约束的自然环境,导航需要获得地形地貌、植被覆盖、水文条件、土壤性质及障碍物分

布等静态(缓变)环境要素。这些要素不仅具有显著的空间异质性和尺度差异,同时受到季节变化、气象条件和人类活动等因素影响,呈现出明显的时空分布特征。因此,如何从多源遥感观测数据中稳定、准确地提取决定机动能力的关键通行要素,是构建无路导航理论体系首先需要解决的科学问题。

现有遥感测绘技术在满足机动导航的静态(缓变)通行要素需求方面,仍存在复杂环境精细表达能力不足和要素信息精度不够的问题。在陆域环境中,现有导航电子地图和遥感产品主要侧重于地物空间位置和几何形态表达,对于植被冠层结构、土壤承载能力、地表湿度及动态水文条件等影响通行能力的属性信息描述不足[20-21]。

进一步,除观测能力限制外,多源遥感数据在支撑导航电子地图研制时还面临可靠性评价不足的问题。由于不同遥感传感器具有不同的观测机理、空间尺度和时间分辨率,数据融合过程中容易产生尺度不一致、信息缺失和不确定性累积等问题。同时,智能解译模型受样本分布、标注质量、场景差异以及环境扰动影响,在复杂区域应用时容易出现模型泛化能力下降和解译结果不稳定等现象,形成新的瓶颈。无路导航需揭示遥感观测过程、环境物理属性与智能解译结果之间的内在关联,从而提高目标识别和分类精度,复杂陆域环境下通行要素可靠提取的成为核心科学问题。

本文提出遥感智能解译可靠性理论,突破经典遥感信息提取侧重目标识别的模式,综合考虑环境物理属性、遥感观测过程和智能解译模型的不确定性,构建静态(缓变)要素提取的可靠性理论体系。其中,静态要素提取重点研究多源遥感数据对地形、植被、水文、土壤及障碍物等关键通行要素的稳定表达方法,建立环境物理属性与遥感观测特征之间的关联关系。具体而言,需要从样本可靠性、模型可靠性和场景推理可靠性3个层面分析影响通行要素提取可信度的主要因素,研究遥感数据质量、样本分布特征、模型泛化能力以及复杂环境扰动对解译结果可靠性的作用机制。进一步构建融合物理机理约束与数据驱动方法的可靠性评估与优化方法,实现通行要素提取结果在不同区域、不同环境和不同尺度条件下的稳定表达,为无路导航中的通过性认知和自主导航决策规划与引导提供可信的环境信息基础。

2.2.2　时变条件下陆域通过性认知

通过性认知预测是连接复杂环境感知与自主导航决策的核心环节,其本质是建立环境状态与机动平台运动能力之间的映射关系,回答无路环境中“哪里可以通过、以何种方式通过以及通过的代价是什么”等基本问题。道路导航以铺装路网为基础,其通行空间和通行能力相对稳定,时变主要考虑道路交通流状态、突发交通事件和道路状态更新等。相比之下,无路导航除了需考虑环境状态变化外,还需根据环境与车辆能力的相互作用,动态确定可通行空间及通行代价。相比之下,无路导航面向的是山区、荒漠、森林等缺乏固定道路约束的复杂自然环境,机动路径并非预先存在,而需要根据环境状态和平台能力动态生成。因此,通过性认知不仅是无路导航区别于经典道路导航的理论基础,也是实现从有路导航向无路导航跨越的关键。

无道路环境中,机动空间具有显著的动态性和不确定性。陆域环境中,土壤湿度、植被状态、水文条件、地表承载能力等因素随季节和气象条件不断变化,导致同一空间位置的通行能力具有明显差异。此外,陆域无道路区域缺少类似道路电子地图的空间表达方式,经典导航体系无法描述自然环境中的可通行区域和通行代价,难以支撑无人系统在复杂环境中的自主机动。如何在时变条件下将非结构化自然环境转化为可计算、可预知、可通行的数字通行空间,是通过性认知预测的核心科学问题。

围绕上述问题,需要突破道路网络表达模式,建立面向陆域环境的动态通过性认知预测理论。其核心思想是揭示环境要素、平台性能和任务需求之间的耦合关系,构建随环境变化动态更新的通过性模型,实现由静态地形分析向动态环境认知跨越。具体而言,通过融合长时间序列遥感观测、地学知识和环境演化模型,挖掘土壤、水文、植被等通行要素的时空演化规律,参考阿尔法地球特征空间嵌入向量方案,构建陆域时变通行要素深时地球基础模型,揭示陆域时变通行要素时空演化规律,形成陆域通过性分层认知模型,结合最新的多源遥感数据,实现对时变通行要素的准确预测。

进一步,对于陆域环境,应综合考虑车辆几何参数、地形条件和地表力学属性,建立包含几何通过性、支承通过性、安全通过性和定位通过性的分层通过性评价体系,将非铺装区域转化为

可计算的数字路网。其中,几何通过性主要描述地形起伏、坡度、障碍物等空间约束对车辆运动的影响;支承通过性反映土壤强度、湿度和植被覆盖等地表属性对车辆承载能力和运动稳定性的影响;安全通过性和定位通过性进一步考虑灾害风险、通信条件和导航可靠性等因素。

本文定义的可通行区域是在给定机动主体、环境状态条件下,能够满足安全运动约束并完成有效移动的空间区域,障碍区域是由于地形、地表条件或环境风险导致机动主体无法满足运动约束的区域。可通行区和不可通行区均应针对给定车辆、环境状态和任务约束确定,对信息不足、无法可靠判定的区域,应标记为待判定区域,并采取补充观测或保守规划措施。

通过性表示为:

$$T_r = f(E,P,C,t) \tag{1}$$

式中,E表示环境状态;P表示机动主体能力;C表示任务约束;t表示环境变化时间。

对于陆域车辆,通过性进一步分解为:

$$T_r = w_1 G + w_2 S + w_3 R + w_4 D \tag{2}$$

式中,G表示几何通过性;S表示支承通过性;R表示安全通过性;D表示定位通过性;$w_1 \sim w_4$分别表示不同主体对应不同权重。例如履带车辆更加关注支承通过性,而轮式车辆更加关注坡度和附着条件。

2.2.3 任务驱动下机动规划决策与引导

任务驱动下机动规划决策与导航引导是在通过性认知基础上,将任务目标转化为可执行路径和机动方案的过程。无路导航面向的是复杂陆域环境下多主体、多任务、多约束条件下的自主机动问题。在完成通行要素可靠获取和通过性认知的基础上,导航系统需要进一步解决“如何组织行动、如何协同机动以及如何动态调整”等问题。

现有导航决策方法主要建立在结构化道路环境和单平台运动基础上,以满足任务约束的最优到达为目标,在已知道路网络中根据交通状态和道路约束生成行驶路径,并依据道路变化情况进行局部提示和路径调整,这类方法并不考虑多平台时空协同问题,难以适应无路环境中道路动态生成、通行能力持续变化以及多平台协同耦合等复杂条件。在山区、荒漠和灾害现场等开放环境中,机动路径并非预先存在,而是随着环境状态、任务目标和平台能力不断变化。同时,机动平台之间存在任务分工、空间协同、资源竞争和行动约束,仅面向单平台的规划方法难以满足复杂任务场景下的协同行动需求。因此,任务驱动下机动导航决策与引导是核心科学问题,即如何在复杂时变陆域环境和多主体协同约束条件下,实现环境、任务和平台能力耦合驱动的自主行动策略规划与动态博弈规划。

解决本科学问题的研究重点不是经典意义上的路径优化方法改进升级,而是在数字路网支撑下,实现复杂环境中机动平台行动策略的自主生成与协同演化。最终形成任务驱动的自主导航决策理论与协同引导方法,需突破经典导航中“路径搜索”的范式,建立面向无路环境的“路径规划策略化”理论,使导航系统能够依据任务目标、环境状态和集群协同关系,动态生成、评估和调整机动行动方案,支撑陆域机动平台在复杂开放环境中的自主、协同和可靠机动。

本文提出构建任务、环境和平台三者耦合的智能决策理论。核心思想是在动态数字路网基础上,将任务目标、平台性能、编组关系以及环境变化因素统一纳入导航决策模型,建立多层次、多主体协同机动智能体模型,实现从单平台路径规划向集群行动策略生成转变。其中,中心单元智能体负责任务理解和整体行动规划,编组机动智能体负责协同路径生成与资源协调,平台智能体负责局部环境响应和运动控制,通过多智能体协同学习和动态优化实现复杂环境下的自主决策。同时,针对无路环境中通行条件持续变化的问题,建立考虑通行后效影响的动态规划机制,将平台运动对环境状态的反馈纳入决策过程。例如,在松软地表环境中,前序车辆运动可能改变土壤承载能力和地表形态,进而影响后续单元通行能力。此外,融合多智能体强化学习、分布式预测控制和博弈优化等理论,构建面向陆域协同机动的智能决策方法,实现任务理解、环境预测、路径规划和协同控制的一体化。通过学习不同任务场景下环境变化、平台行为和群体协同之间的关系,使机动平台能够在突发障碍、环境变化和任务调整条件下自主完成策略更新,实现由规划一条路径向生成一套行动策略的转变,实现无路导航从环境认知测量、通过性评价预测到导航决策规划的完整闭环。

2.3 无路导航理论方法体系

无路导航的理论基础是建立环境信息、平台能力与导航决策之间的统一映射关系,实现复杂环境的感知测量、认知预测、行动决策。近年来,

随着高分光学、SAR、LiDAR、卫星测高、多光谱和高光谱遥感等航天遥感技术的快速发展,复杂自然环境的大范围、多尺度、高时效感知能力得到显著提升,为无路导航提供了稳定、连续的环境信息来源。同时,多源遥感数据融合、遥感智能解译及对地观测大模型等技术的发展,使遥感信息逐渐由经典地理信息获取向环境认知和智能决策支撑拓展,为构建环境认知驱动的导航理论提供了新的技术基础[22,25-26]。

基于此,本文提出航天遥感支撑的无路导航理论框架,如图1所示。该框架是以航天遥感提供的复杂陆域环境先验为基础,以环境通过性分析实现复杂环境机动能力表达,以自主导航决策实现复杂环境中的智能路径规划,形成“环境感知测量—通过性认知预测—规划决策引导”的理论方法体系。

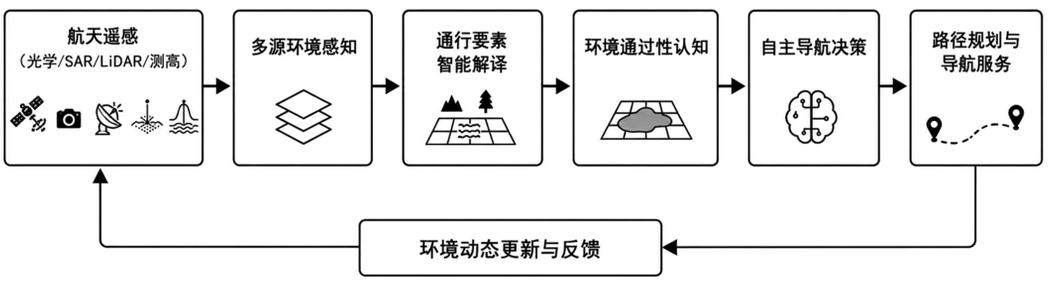


图1　航天遥感支撑的陆域无路导航理论框架

Fig. 1　Framework of Terrestrial Off-Road Navigation Supported by Spaceborne Remote Sensing

环境感知是无路导航的信息基础,通过融合光学遥感、SAR、LiDAR、卫星测高、重力场反演及气象遥感等多源对地观测数据,实现陆域中地形地貌、植被、水文、土壤等通行要素的智能获取,为导航提供陆域环境先验信息。通过性认知是无路导航区别于传统道路导航和越野导航的核心理论环节,其目的是建立环境要素与机动平台运动能力之间的映射关系,将遥感获取的环境信息转换为可量化的环境通过能力,实现环境信息、平台能力、通行风险的统一表达。导航决策则综合任务目标、平台性能、动态环境变化及协同约束,在环境通过性模型基础上完成路径搜索、方案优化和自主导航,实现由依路导航向依环境导航的模式转变。导航服务作为该框架面向应用的最终输出,为多主体自主机动提供持续的导航支撑,并依托任务执行过程中持续获取的遥感观测和平台感知信息,实现环境模型和导航策略的动态迭代更新,形成环境感知、环境认知、导航决策和导航服务相互反馈、自适应演化的闭环。

与经典道路导航相比,该理论突破了道路网络约束,将导航对象由道路网络扩展至全域复杂自然环境;与现有越野导航相比,该框架进一步突破局部传感器感知范围有限的约束,充分发挥航天遥感大范围、全天候、多尺度观测优势,实现全域环境感知与局部自主感知的协同融合;同时,将遥感信息获取、环境通过性建模和自主导航决策统一为同一理论体系,建立了环境感知驱动、环境认知约束、导航决策优化的统一表达框架,为多场景复杂环境自主导航提供了理论基础,也为全域自主导航、数字孪生导航及空天地海一体化导航的发展提供了新的思路。

3　无路导航的关键技术

前文构建了航天遥感支撑的无路导航理论框架,明确了无路导航以环境感知测量、通过性认知预测和自主规划决策与导航引导为核心的基本逻辑。其中,环境感知测量回答“环境是什么”,通过性认知预测回答“能否通过、以何种效率和风险通过”,规划决策与导航引导回答“如何到达目标”。无路导航关键技术并非若干独立技术的简单组合,而是围绕环境信息获取、环境能力表达和导航决策形成的完整技术体系。

本文提出了复杂环境通行要素遥感智能解译、多尺度通过性动态建模、多主体自主规划决策和导航引导等支撑无路导航四大关键技术。其中,通行要素智能解译支持获取可靠的环境要素,多尺度通过性动态建模支持无路区域数字路网构建与优化,自主导航决策支撑完成机动路径策略优化,智能导航服务完成集群机动协同引导,由此构成无路导航区别于经典导航的关键技术体系,是多源遥感支撑无路导航的核心技术,如图2所示。

3.1　复杂环境通行要素遥感智能解译

复杂自然环境中的导航决策依赖于对环境

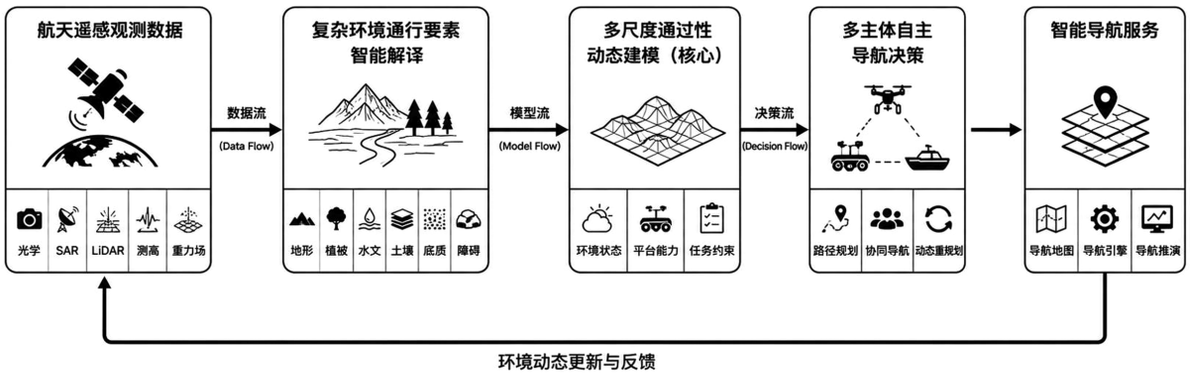


图2 多源遥感支持无路导航关键技术

Fig. 2 Key Technologies of Off-Road Navigation Supported by Multi-source Remote Sensing

通行能力的准确表达,而能否通行首先取决于环境要素反演的精度与可靠性。因此,复杂环境通行要素遥感智能解译是无路导航环境感知的基础。与传统遥感地物分类不同,无路导航中的环境感知并非以识别地物类别为最终目标,而是根据机动主体运动约束,提取影响通过能力的关键环境变量。

对陆域车辆而言,坡度、障碍高度决定几何通过能力,植被结构和地表覆盖影响运动阻碍程度,土壤含水量和力学属性影响车辆承载和牵引能力,水体和灾害区域则可能直接形成不可通行区域。因此,环境感知的目标不再是单纯获取地理要素,而是提取影响平台通过能力的关键通行因子。

近年来,高分辨率光学遥感、SAR、LiDAR、星载测高、高光谱遥感以及遥感基础模型的发展,为复杂环境多源信息获取提供了新的技术支撑。通过融合多源遥感观测和智能解译方法,可形成覆盖陆域、潮间带、海域和低空的统一通行要素数据库,为环境通过性分析提供可靠的环境先验信息。

3.2 多尺度环境通过性动态建模

通过性动态建模是无路导航关键技术体系的核心,其作用是建立环境信息与平台运动能力之间的映射关系,实现环境感知向导航决策的转换。对于道路导航而言,铺装道路本身已经完成了环境约束表达,可以直接用道路网络进行路径搜索;而无路导航面向的是缺乏道路网络约束的复杂自然环境,环境是否能够通行、能够以何种代价通行,需要通过环境通过性建模加以回答。因此,通过性认知不仅是无路导航区别于道路导航和越野导航的重要标志,也是航天遥感环境感知成果发挥导航支撑作用的关键环节。

经典通过性分析主要针对车辆越野环境开展研究,以坡度、障碍物、地面承载力等因素作为评价指标。实际上,平台是否能够通过某一区域,不仅取决于环境属性,还与平台动力学性能、机动方式、载荷能力以及任务目标密切相关。因此,环境通过性应定义为环境状态与平台能力共同作用下形成的综合通行能力。

为此,本文提出多尺度环境通过性动态建模方法,建立环境要素、平台能力和任务约束三类因素耦合表达模型。环境要素包括地形、水文、植被、土壤及障碍物等信息;平台能力包括车辆通过能力及集群协同能力;任务约束包括任务目标、时间要求、安全风险及协同约束等。三类因素共同构成环境通过性动态模型(式(1))。该模型能够描述复杂环境中环境动态变化与平台能力共同作用下的环境通过能力,实现环境信息向导航信息的转换。

对于车辆主体,环境输入包括坡度、障碍高度、地表覆盖、土壤含水量、土壤承载能力,主体参数包括车辆尺寸、接地压力、最大爬坡能力、越障能力、动力性能,输出包括可通行区域、限制通行区域、不可通行区域、通行代价。

该模型可将连续自然环境转换为面向导航的数字通行空间,同时,通过陆域动态时变通行要素预测技术,实现环境通过性的实时更新和动态预测,为复杂环境自主导航提供连续环境支撑。

3.3 多主体协同自主规划决策与导航引导

导航决策是在环境通过性认知基础上,将任务目标转化为可执行路径与机动方案的核心环节。无路导航需要综合环境状态、机动主体能力和任务约束,在可通行空间内进行路径规划,并结合行进过程中的实时感知完成运动引导。规划结果不仅应实现起始点与目标点之间的连通,还应满足机动主体的转弯、越障、速度和稳定性等要求,以及任务规定的时间、能耗和

安全约束。

当任务区域存在可用道路时,应联合道路网络与非道路区域的可通行空间进行规划。有道路区域依据道路拓扑、通行规则和实时状态确定可用连接,非道路区域依据环境通过性模型生成候选路径,两者通过满足通行条件的出入点衔接。出入点的选择需检查路肩、边沟、坡坎、通道宽度和转向空间,避免出现道路段与非道路段分别可通行、连接位置却无法通过的情况。在满足上述约束的基础上,统一不同区域的时间、能耗与风险等代价表达,比较全程道路、全程非道路及道路与非道路混合等可行方案,确定符合任务需求的路线。道路损毁或局部通行条件变化时,应重新评价相关路段、出入点及非道路连接,调整路线与行进方式。

在多主体任务中,应首先依据各主体的尺寸、载荷和运动能力分别确定可通行空间,再开展任务分配与协同路径规划。对于共享狭窄通道、道路出入点或其他受限区域的主体,需协调通行顺序、时间间隔和空间占用,减少冲突与等待;对于松软地表等重复通行可能改变环境状态的区域,还需考虑前序主体形成的车辙、沉陷等对后续通行的影响。由此,将单主体路径可行性与多主体时空协同约束共同纳入规划过程,形成适应任务分工和环境变化的机动方案。

导航引导应融合航天遥感提供的区域环境先验与平台实时感知,实现全局规划、局部避障和运动控制的衔接。当新发现的障碍、道路状态或地表条件与原有地图不一致时,应更新通过性信息,并依据风险程度采取减速、停车确认、局部绕行或重规划。图搜索、模型预测控制及多主体优化等方法可用于不同层次的规划与引导,其选择应与环境表达、运动约束和更新需求相匹配,形成通过性评价、路径规划、执行反馈和动态调整的闭环。

3.4　可信导航服务

导航服务是无路导航理论框架面向应用的最终输出,其任务是在持续环境感知和自主导航决策基础上,为不同平台提供实时导航保障和智能信息服务。无路导航服务需要高现势性的导航图与对未来环境变化的预测能力。依托航天遥感持续观测、多源环境感知、数字孪生环境更新以及云边协同计算技术,可构建覆盖陆域、潮间带、海域和低空的全域导航服务技术体系,实现导航图动态更新、环境风险预警、路径在线优化及导航态势推演等功能。同时,通过导航服务与环境感知、环境通过性认知及导航决策之间的信息反馈,可不断修正环境模型和导航策略,形成环境感知测量、通过性认知、规划决策与导航引导、导航服务、环境更新的闭环运行机制,使无路导航具备持续学习、自适应优化和动态演进能力,为复杂自然环境中的自主机动提供长期稳定的导航服务。

4　航天遥感支撑陆域无路导航关键环节验证

本文提出的理论方法与技术形成了面向陆域无路导航的数据产品和算法模型,针对理论框架中的环境感知测量和通过性认知预测两个关键环节开展实验验证,重点评价航天遥感环境信息获取、通过性模型构建以及车辆运动响应预测的有效性。无路环境不存在既有通行路网,需利用航天多源遥感数据生成数字路网。只有将地形、植被、水文、土壤等环境要素信息正确转化为数字路网上的属性,数字路网才能真正服务于路径规划与自主引导。从无路导航技术体系来看,多源遥感环境感知解决的是环境中有什么的问题,而通过性认知解决的是环境是否适合通过以及如何通过的问题,导航决策则是在通过性认知结果基础上的进一步优化。因此,通过性模型的准确性和可靠性直接决定了导航路径规划的可行性。如果环境通过性评价存在偏差,即使采用先进的路径搜索和智能决策方法,也可能产生不可执行路径,甚至导致机动任务失败。因此,通过性验证是评价航天遥感支撑无路导航能力的核心,试验验证的数据产品、算法模型,以及试验场地选择、试验设计、评价指标等主要围绕正确性与通过性验证进行。由于完整导航过程还涉及实时定位、路径规划、运动控制和复杂环境动态反馈,目前试验主要验证环境认知和通过性评价能力,不对完整自主导航成功率作出评价。

4.1　试验方法与试验内容

本文以滁州试验区某型履带车辆试验为案例,分析陆域无路导航中通行基础数据、几何通过性与支承通过性模型的验证结果。该案例对应本文环境感知与通过性认知环节,不涉及海域航行、两栖陆海衔接和低空导航。表 2 给出了案例涉及的试验方法、试验内容以及与通过性对应

关系。其中地表类别和土壤参数评价属于输入层,几何通过性点验证属于判定层,车辙和车速比较属于局部车辆与地面交互层。

表3给出了支持陆上无道路导航的部分主要数据产品,这些产品构成了不可或缺的地理信息底座与胁迫信息底座。陆域导航更关注地形细节、地表覆盖和浅表土壤属性[21,27],需要进行验证。

表2 试验方法、试验内容以及与通过性对应关系

Table 2 Experiment Information of Method, Content and Traversability Assessment

试验方法	具体内容	与通过性对应关系
导航路测试验	地表覆盖分类产品验证	几何通过性基础数据验证
	几何通过性可通行区域验证	几何通过性验证
实地原位采集和测试	星地同步试验	支承通过性基础数据验证
	土壤采集原位试验	
	贝氏仪原位试验	
实地实车试验	车辙车速测量	支承通过性验证
实验室内试验	土壤样品分类	支承通过性基础数据验证
	土壤三轴试验	

表3 航天遥感无道路导航主要数据产品

Table 3 Main Data Products of Off-Road Navigation Supported by Spaceborne Remote Sensing

产品类型	关键性能指标	在无道路导航中的作用
数字高程模型	格网大小≤5 m,平地高程精度优于1 m,山地优于5 m	地形分析核心数据,用于坡度、坡向分析等
地表覆盖分类产品	空间分辨率1 m,总体分类精度≥83%	识别植被、水体、建筑物等地物类型,是几何通过性判断的基础
土壤参数反演产品	土壤含水量RMSE≤0.063 cm^3/cm^3,土壤类型预测精度约75%	支承通过性计算的直接输入,实现车辆-地面交互力学计算
地质灾害易发性分区图	模型预测精度达92.07%	用于评估安全通过性,标识长期高风险区域

4.2 陆域复杂环境通过性验证

通过系统设计的野外试验,对无路导航体系的陆域关键性能进行了实证分析,本次试验主要验证了基础数据产品及通过性模型的准确性。采用笔者研究团队所提出的数字路网构建方法[21],于2024年11月在滁州试验区利用某型履带车辆展开基础数据和通过性数据验证,评估地表覆盖数据、土壤力学参数及车辆通过性预测的准确性。试验区整体范围和实装试验区域如图3所示。

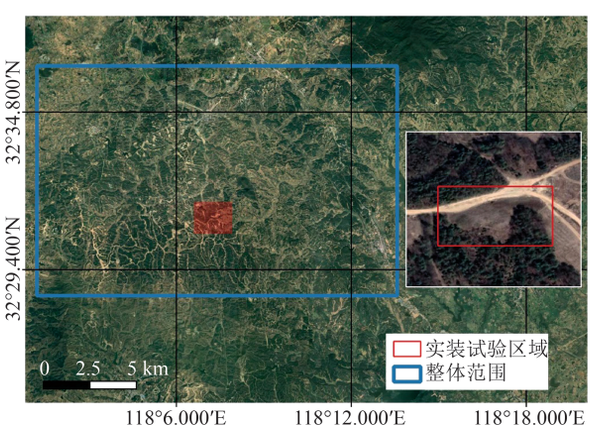


图3 试验区范围和实装试验区域

Fig. 3 Test Area and Actual Vehicle Testing Zone

试验区域地表覆盖数据分辨率为1 m,包含裸地、林地、耕地、水体、构筑物等类别。基于93个实地采样点的对比分析,原始地表覆盖数据有67个正确点,分类准确率为72.04%。地表覆盖产品为2020年数据,试验时间滞后约4 a,考虑到数据时相差异,引入历史影像进行现势性修正后,正确分类点提升至75个,总体精度达80.64%。从几何通过性影响角度评估,未修正时对通行判断有显著影响的误分类点为22个,无影响或影响较小的为71个,数据对几何通过性计算的贡献精度为76.34%;现势性修正后,有影响点降至7个,无影响点增至86个,贡献精度显著提升至92.47%,表明数据现势性是影响通过性建模可靠性的关键因素。

支承通过性基础数据通过星地同步试验、原位取土与贝氏仪测量获取。土壤物理要素方面,基于哨兵1号与哨兵2号卫星遥感反演的土壤含水量经WET-2 KIT探针验证,中误差为0.049 cm^3/cm^3,绝对误差为0.014 cm^3/cm^3,精度良好,主要误差源为植被覆盖。土样分类经颗粒筛分与液塑限试验,实测与预测均分类准确。

土壤本构要素的遥感反演结果与三轴压缩试验对比显示,弹性模量、内摩擦角、黏聚力的平均绝对误差分别为0.55 MPa、7.48°和4.03 kPa。土壤力学Bekker参数反演与贝氏仪实测对比表明,沉陷指数、黏聚变形模量、摩擦变形模量的平均绝对误差分别为0.768、1 195.98 kN/m^{n+1}和10 256.1 kN/m^{n+2},误差主要源于土壤含水率反演偏差及现场测量变异性。

在通过性模型验证方面,几何通过性实地验证共布设38个点,其中32个点与实地通行情况一致,准确率为84.2%。支承通过性验证通过车辆在2个监测点的10次重复通过试验,结合北斗GNSS定位与自制激光车辙测量系统获取轨迹与沉陷数据。以第4次行驶轨迹为例,实测最大车速为8.834 km/h,环境预测最大车速为8.496 km/h,误差3.82%;相同位移处速度误差为6.68%。在车辙深度预测中,环境预测平均深度0.044 m,最大深度0.065 m,而实测沉陷为0.085 m,计算误差为−2.0 cm。

试验结果表明,土壤本构关系与力学参数反演结果显示,遥感环境信息与地面试验数据融合能够较好地反演土壤弹性模量和黏聚力等关键参数,而内摩擦角及Bekker参数受区域土壤非均质性、尺度效应及观测条件影响,预测精度相对较低,但整体误差满足工程应用需求。进一步的支承通过性预测结果表明,基于土壤力学参数约束的车辆运动状态预测能够较好反映不同地表条件下车辆速度变化和车辙形成过程,验证了通过性模型在非铺装道路环境中的有效性。

融合航天遥感观测信息与地表物理属性建模方法,能够提升无道路环境下通行能力的量化表达水平,为车辆自主机动路径规划提供有效环境先验。基于高分辨率遥感影像、数字高程模型、土壤参数反演产品及地面实测数据,构建融合地表覆盖、地形条件和地表力学属性的环境通过性评价模型。试验结果表明,基于遥感反演土壤物理力学参数的支承通过性模型能够较好反映车辆速度变化和车辙形成过程,预测误差满足工程应用需求。验证结果表明,通过性认知能够有效实现从遥感环境信息获取到机动能力评价的转换,为无路区域构建数字路网提供可靠依据,是连接环境感知测量与导航决策规划与引导的关键环节。与此同时,由于复杂自然环境具有显著的区域差异性和时变特征,土壤参数反演精度和通过性模型泛化能力仍受到样本覆盖范围、遥感尺度效应以及环境动态变化等因素制约。后续研究需进一步融合多时相遥感观测、地面实测数据和平台运动反馈信息,完善不同区域、不同地表类型下的通过性参数体系,提高时变条件下通过性认知模型的稳定性和适用范围。现有试验主要提供陆域履带车辆通过性分析的局部证据,道路与非道路混合路线执行、动态重规划及多车辆协同仍需通过专门试验评价。

5　结　语

针对现有导航方法难以适应道路缺失、道路失能以及道路与非道路区域交替出现等复杂陆域环境机动需求的问题,本文聚焦航天遥感支撑的陆域无路导航理论与关键技术,系统分析了无路导航的发展背景、应用需求和技术挑战,围绕复杂陆域环境下静态(缓变)通行要素可靠提取、时变条件下陆域通过性认知以及任务驱动的规划决策与引导等关键科学问题,构建了“环境感知测量—通过性认知预测—规划决策引导”的理论框架,提出了复杂环境通行要素遥感智能解译、多尺度通过性动态建模、多主体协同规划与导航引导以及智能导航服务等关键技术体系。

本文提出的陆域无路导航理论突破了传统导航依赖固定道路网络的研究范式,将航天遥感获取的区域环境信息与机动主体运动能力相结合,实现了从地表信息获取到可通行空间表达、从环境认知到导航决策支持的理论延伸。其中,通过性认知作为连接环境感知测量与导航决策规划的核心环节,将地形、植被、土壤、水文及障碍物等环境要素转化为面向机动主体的通行能力评价,为无路区域数字通行空间构建和路径规划提供基础支撑。

结合滁州试验区履带车辆案例,本文对陆域无路导航中的环境感知测量和通过性认知两个关键环节进行了验证。试验结果表明,基于遥感反演环境参数和土壤力学属性约束的支承通过性模型能够较好反映车辆速度变化和沉陷过程,实现了遥感环境信息向车辆通过能力评价的转换。需要指出的是,现有试验主要验证了环境认知和通过性评价能力,对于道路与非道路混合条件下的完整路径执行、动态重规划、多车辆协同以及不同区域环境适应性,仍需开展进一步系统验证。

未来,陆域无路导航仍需围绕多源遥感动态感知、环境-主体耦合通过性建模、实时导航决策

以及多智能体协同机动等方向开展深入研究。通过融合多时相遥感观测、地面实测数据和平台运动反馈信息,进一步完善不同地表类型、不同机动主体和不同任务条件下的通过性评价体系,提高复杂动态环境下导航模型的稳定性和泛化能力,推动航天遥感信息由环境观测向智能导航服务的深化应用。

参 考 文 献

[1] NAHAVANDI S, ALIZADEHSANI R, NAHAVANDI D, et al. A Comprehensive Review on Autonomous Navigation[J]. *ACM Computing Surveys*, 2025, 57(9): 1-67.

[2] PADEN B, ČÁP M, YONG S Z, et al. A Survey of Motion Planning and Control Techniques for Self-Driving Urban Vehicles[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 2016, 1(1): 33-55.

[3] KENDOUL F. Survey of Advances in Guidance, Navigation, and Control of Unmanned Rotorcraft Systems[J]. *Journal of Field Robotics*, 2012, 29(2): 315-378.

[4] KAPLAN E D, HEGARTY C J. Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications[M]. 3rd ed. Boston: Artech House, 2017.

[5] GROVES P D. Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems[M]. 2nd ed. Boston: Artech House, 2013.

[6] STUMPF R P, HOLDERIED K, SINCLAIR M. Determination of Water Depth with High-Resolution Satellite Imagery over Variable Bottom Types[J]. *Limnology and Oceanography*, 2003, 48(1part2): 547-556.

[7] SANDWELL D T, SMITH W H F. Marine Gravity Anomaly from Geosat and ERS 1 Satellite Altimetry[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1997, 102(B5): 10039-10054.

[8] RICHARDS J A, JIA X P. Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction[M]. Heidelberg: Springer, 2006.

[9] MAXWELL A E, WARNER T A, FANG F. Implementation of Machine-Learning Classification in Remote Sensing: An Applied Review[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2018, 39(9): 2784-2817.

[10] LEHTOLA V V, KOEVA M, ELBERINK S O, et al. Digital Twin of a City: Review of Technology Serving City Needs[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2022, 114: 102915.

[11] REICHSTEIN M, CAMPS-VALLS G, STEVENS B, et al. Deep Learning and Process Understanding for Data-Driven Earth System Science[J]. *Nature*, 2019, 566(7743): 195-204.

[12] ZHOU N, ZHANG G, ZHU C Y, et al. An Unstructured Roadless Environment Navigation Map Construction Method Based on Remote Sensing[J]. *Geo-spatial Information Science*, 2026, 29(3): 1897-1918.

[13] EDER M, PRINZ R, SCHÖGGL F, et al. Traversability Analysis for Off-Road Environments Using Locomotion Experiments and Earth Observation Data[J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2023, 168: 104494.

[14] MUSAU H, RUGANUZA D, INDAH D, et al. A Review of Off-Road Datasets, Sensor Technologies and Terrain Traversability Analysis[J]. *SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility*, 2025, 7(5): 2568-2588.

[15] E CARVALHO A, PORTUGAL D, PEIXOTO P. On Terrain Traversability Analysis in Unstructured Environments: Recent Advances in Forest Applications[J]. *Intelligent Service Robotics*, 2025, 18(2): 195-213.

[16] ZHU Y J, WAN HASAN W Z, HARUN RAMLI H R, et al. Deep Reinforcement Learning of Mobile Robot Navigation in Dynamic Environment: A Review[J]. *Sensors*, 2025, 25(11): 3394.

[17] ARAFIN T, HOSEN A, NAJDOVSKI Z, et al. Advances and Trends in Terrain Classification Methods for Off-Road Perception[J]. *Journal of Field Robotics*, 2025, 42(7): 3515-3544.

[18] PAPADAKIS P. Terrain Traversability Analysis Methods for Unmanned Ground Vehicles: A Survey[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2013, 26(4): 1373-1385.

[19] 刘经南, 郭文飞, 郭迟, 等. 智能时代泛在测绘的再思考[J]. 测绘学报, 2020, 49(4): 403-414.
LIU Jingnan, GUO Wenfei, GUO Chi, et al. Rethinking Ubiquitous Mapping in the Intelligent Age[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2020, 49(4): 403-414.

[20] 裴宏宇, 杨功流, 全伟, 等. 基于数值微分计算的SERF原子自旋惯性测量动态仿真[J]. 导航定位与授时, 2021, 8(2): 1-7.
PEI Hongyu, YANG Gongliu, QUAN Wei, et al. Dynamic Simulation of SERF Atomic Spin Inertial Measurement Based on Numerical Differential Algorithm[J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2021, 8(2): 1-7.

[21] 张过, 朱春阳, 周宁, 等. 航天遥感无路导航数字路网构建与初步验证[J]. 上海航天(中英文), 2026, 43(2): 1-15.
ZHANG Guo, ZHU Chunyang, ZHOU Ning, et al. Construction and Preliminary Verification of Aerospace Remote Sensing-Based Digital Road Network for Roadless Navigation[J]. *Aerospace Shanghai* (*Chinese & English*), 2026, 43(2): 1-15.

[22] WU K, ZHANG Y Y, RU L X, et al. A Semantic-Enhanced Multi-Modal Remote Sensing Foundation Model for Earth Observation[J]. *Nature Machine Intelligence*, 2025, 7(8): 1235-1249.

[23] 张过, 秦绪文, 朱春阳, 等. 从有路导航走向无路导航[J]. 自然资源遥感, 2024, 36(4): 1-8.
ZHANG Guo, QIN Xuwen, ZHU Chunyang, et al. Navigation: From On-Road to Off-Road[J]. *Remote Sensing for Natural Resources*, 2024, 36(4): 1-8.

[24] LONGLEY P A, GOODCHILD M F, MAGUIRE D J, et al. Geographic Information Science and Systems[M]. 4th ed. West Sussex, UK: Wiley & Sons, 2015.

[25] ZHU X X, TUIA D, MOU L C, et al. Deep Learning in Remote Sensing: A Comprehensive Review and List of Resources[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2017, 5(4): 8-36.

[26] XIAO A R, XUAN W H, WANG J J, et al. Foundation Models for Remote Sensing and Earth Observation: A Survey[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2025, 13(4): 297-324.

[27] 朱春阳, 张过, 周宁, 等. 无道路环境车辆支承通过性全遥感反演方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2025, 50(11): 2247-2259.
ZHU Chunyang, ZHANG Guo, ZHOU Ning, et al. Remote Sensing-Based Inversion Method for Vehicle Trafficability in Off-Road Environments[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2025, 50(11): 2247-2259.