

doi: 10.6046/rzyyg.2023198

引用格式: 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 G, Qin X W, Zhu C Y, et al. Navigation: From on-road to off-road[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2024, 36(4): 1-8.)

从有路导航走向无路导航

张过¹, 秦绪文², 朱春阳¹, 王善绣³, 徐青⁴, 运晓宇¹

(1. 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079; 2. 中国自然资源航空物探遥感中心, 北京 100083; 3. 中国卫星导航定位应用管理中心, 北京 100088; 4. 战略支援部队信息工程大学地理空间信息学院, 郑州 450001)

摘要: 在有路导航日臻成熟的背景下, 该文结合车辆在复杂非结构化环境下对导航服务的需求, 提出了无路导航这一多学科交叉研究方向。首先, 介绍了有路导航的发展及无路导航的需求场景, 基于车辆通过性的4个具体方面, 提出了从有路导航走向无路导航过程中的科学问题, 包括地理-地质通行要素精细化遥感探测、无路区域软地面土壤参数遥感获取、气候变化对地面特性的定量影响机理, 阐明了无路导航的研究导向; 然后, 归纳了车辆通过性计算与表征技术、无路区域数字路网构建技术、无路导航智能路径规划技术等关键技术, 提出了“无路区域有路化”的技术途径与无路区域数字路网的概念, 构建了无路导航技术体系; 最后, 结合无路导航相关技术的实践, 展现了其应用潜力。无路导航的研究将进一步丰富导航的内涵, 拓宽导航应用边界。

关键词: 无路导航; 导航电子地图; 通过性; 数字路网; 无路区域有路化

中图法分类号: P 23; TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2024)04-0001-08

0 引言

王之卓院士曾指出: 当代的科学技术都在经历着一体化及理论体系整体化的发展, 形成了不同学科间相交界的边缘学科, 掌握跨学科的科学知识才能解决科学领域的重大问题^[1]。在当代科学技术加速化发展的背景下, 多学科的交叉融合是学科发展的必然趋势。导航集定位、地图功能于一体, 是信息化社会运转的刚性需求。随着北斗的全球组网, 导航位置增强服务已形成覆盖全国的亚米级实时定位服务^[2], 定位能力大幅提升。导航地图作为重要的导航信息载体, 融合了众多学科的理论和技术, 是当前研究的热点, 具有巨大的发展潜力。

车载导航地图经历了数字化的发展历程, 最早的车载导航采用滚轴纸质地图加汽车陀螺仪定位实现^[3], 导航范围仅限于纸质地图范围。导航地图进入电子地图时代后, 所记录的信息更加丰富, 导航电子地图数据内容主要包括道路数据、背景数据、注记数据、POI数据等基本数据。导航电子地图也经历了多代发展, 从地图交互形式来看, 随着3S技术与互联网技术的融合, 导航地图从预置离线电子地图

发展到基于云服务的在线电子地图。以高德地图、百度地图为代表的导航电子地图软件系统方案供应商, 基于用户信息与互联网出行大数据, 目前能够实现高频率道路采集、实时路况更新、交通拥堵规避以及其他智能化服务, 极大地满足了人们的日常出行需求。

从服务对象来看, 随着汽车步入智能时代, 导航地图从服务人“给人看”的导航电子地图开始向服务车“给机器看”的高精地图发展。高精地图拥有亚米级的地图精度, 同时在地图内容上包含实时交通信息和高级驾驶辅助系统所需的道路相关要素数据。导航服务与自动驾驶开始紧密结合, 高精度地图可以为自动驾驶提供定位、感知、规划、决策等多种能力。高精地图的研究成为热点, 各大地图厂商也纷纷与整车厂商合作, 在高精度地图领域展开竞争。国外高精地图相关企业在自动驾驶的需求和高精地图制作实践过程中, 逐步探索制定了高精地图数据规范, 例如导航数据标准(navigation data standard, NDS)、OpenDRIVE等^[4-5], 规定了道路拓扑关系与道路相关要素表示方法。国内地图厂商以高德地图、百度地图为代表, 提供基于道路数据的有路导航服务, 通过传统图商、大数据、众包以及交管部门

收稿日期: 2023-07-03; 修订日期: 2023-09-04

第一作者: 张过(1976-), 男, 教授, 主要研究方向为几何定量遥感。Email: guozhang@whu.edu.cn。

通信作者: 朱春阳(1995-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为摄影测量与遥感。Email: chunyangzhu@whu.edu.cn。

等获取测绘地理信息数据,建立覆盖全国的导航地图,实现分钟级更新,融入人们日常生活,广泛服务于交通、物流、规划等行业,已具有成熟的应用模式。

当前导航地图主要面对道路场景,称为有路导航,等级道路是车辆通行的理想环境。而陆地表面以无路区域为主,全球共有 1.32 亿 km² 的土地,其中约 1.05 亿没有道路覆盖^[6],地球陆地表面 80% 属于无路区域,在野外复杂无路环境下的导航有诸多现实需求。

在战场环境下,道路类型的基础设施容易受到攻击、环境变化或自然灾害破坏,所以部队必须具备保持在结构化和非结构化环境的机动力与导航能力^[7]。在 2022 年 2 月爆发的俄乌冲突中,乌克兰高速公路较少,乡间土路很多,2 月份气温较低时,道路和野外地面相对硬实,有利于车辆通行;3 月份气温上升后,平原黑土区域出现大规模冻融,土地融化翻浆,导致俄军装甲部队重型车辆大规模通行困难,大量作战车辆装备被迫遗弃。

在越野自驾、越野拉力等活动中,山地、腹地、海滨、沙漠、热带雨林等少路和无路环境是主要偏好环境^[8]。“十四五”时期,我国将全面进入大众旅游时代,旅游业发展处于重要战略机遇期。随着消费升级、疫情带来的出行需求变化,我国的自驾游市场快速发展,自驾线路由东向西纵深化发展延伸,精品自驾线路中有近 6 成集中在西部地区,新自驾游产品对线路安全和设计规划的需求不断增长;随着出行环境变化与汽车出行个性化,越野自驾市场逐渐成为汽车销量增长的新蓝海,人们对于汽车越野性和导航功能的要求也在大幅提升。

在军事行动、野外考察、地质勘探、应急测绘、抢险救灾、越野自驾等场景下,交通环境以无路越野为主,空间尺度大且不具备结构化道路及先验地图^[9],这些场景对导航服务仍有强烈需求。因此,将导航地图从道路拓展到道路以外场景,构建无路环境的“高精地图”,实现从有路导航到无路导航的跨越,已势在必行。本文基于无路场景下的导航服务需求,提出无路导航研究方向,阐述其内涵以及科学和技术问题。

1 无路导航

1.1 无路导航定义

无路导航(Roadless Navigation)主要研究在少路和无路环境下的环境信息遥感提取、环境建模、导航定位、路径规划、引导控制等方法,建立满足地面车辆导航需求的无路导航系统,解决现有车辆在复

杂非结构化环境下“在哪里、到哪里、哪能走、怎么走”的问题,属于多学科交叉融合的综合性研究。

1.2 无路导航核心概念

无路导航的核心概念是车辆通过性。车辆通过性指以一定的车速通过越野道路、无路地区地面的能力^[10-11],是环境与车辆交互作用的结果。根据车辆通过性影响因素进行归纳分类,可分为几何通过性、支承通过性、安全通过性、导航通过性 4 个方面。

几何通过性指车辆能够以足够高的平均车速通过凹凸不平地面及各种障碍的能力,受车辆几何参数、车辆动力性能、地形(坡度、坡向)、自然与人工障碍物、地表覆盖(植被、水系、居民地等)、地质条件等因素影响。

支承通过性指车辆能够以足够高的平均车速通过松软地面的能力,受车辆结构、车辆动力性能、浅地表土壤力学特性的影响。

安全通过性主指地质灾害(崩塌、滑坡、泥石流等)胁迫下以及动态威胁影响下的车辆安全通行概率,受地质灾害等影响。

导航通过性指在卫星导航信号干扰条件下,车辆自身的连续导航定位与导航控制能力仍能发挥作用的概率,受卫星导航终端的抗干扰能力和卫星导航干扰综合影响。

2 无路导航的科学问题

无路导航围绕车辆通过性信息获取,需要探测提取可靠的环境要素,在这过程中存在对应的科学问题。

2.1 地理-地质通行要素精细化遥感探测

为确定车辆与环境的交互作用对车辆通过性的影响,与通行相关的地理-地质要素是必要数据^[12-13],例如地理条件(坡度、坡向、地表覆盖)、地质条件、地质灾害、天然和人工障碍等。

随着我国高分辨率光学卫星的发展,影像分辨率从米级逐步提升至亚米级,我国自主获取全球高精度地理信息能力得到大幅提高^[14],可获取满足无路导航精度要求的地面几何特性数据。随着人工智能深度学习技术的发展,地表覆盖分类技术正向自动化、智能化方向快速发展^[15],可提供地面的基本地理条件信息^[16-18];但还需研究障碍物高度、水深等地物精细属性的进一步提取。

当前地质岩土体等信息仍需要外业实地踏勘或原位测量^[19];对地质灾害大多能提取易发性区域,但缺少影响程度和范围信息。要实现地质要素的精细化遥感探测,还存在以下难点:岩体土体赋存于

浅地表及地下,环境复杂、植被覆盖程度高,需要反演计算;地质胁迫(崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害)提取依赖于地灾易发性分区图或人工解译^[20],且一般地灾区域受植被和土层覆盖^[21],难以直接获取地灾危害程度,也需要建模反演。

因此地理-地质通行要素精细化遥感探测机理与方法还需进一步研究。

2.2 无路区域软地面土壤参数遥感获取

一般情况下,车辆是否发生陷车由支承通过性决定,支承通过性主要研究松软地面(土壤、沙漠、雪地、沼泽等)与行走机构(轮胎、履带)的交互特性对车辆牵引能力的影响。目前已经形成一系列地面土壤参数用于车辆与地面相互作用定量建模,被称为 Bekker-Wong 参数,纳入了国际地面车辆系统学会(international society for terrain-vehicle systems, ISTVS)2020 年更新的标准中^[22]。

实现地面土壤参数的遥感获取可以支持大范围支承通过性计算^[23]。当前,遥感可以利用光学卫星、微波雷达卫星反演土壤含水量、土壤质地等土壤物理参数^[24-26],但这些土壤物理参数无法直接用于支承通过性计算,需要结合土力学理论以及土壤原位测量数据,与不排水抗剪强度、不排水变形模量、库伦摩擦角等土力学基本物理量建立关系,间接构建遥感土壤物理参数到 Bekker-Wong 参数的反演模型。通过遥感反演软地面土壤参数作为无路导航中的科学问题需要重点深入研究。

2.3 天候变化对地面特性的定量影响机理

实际导航过程中,天候变化会导致无路区域地面特性动态变化;要提高无路导航准确性,必须考虑天候变化对地面特性的定量影响。土壤水分、积雪、土壤冻融是陆表能量与水、碳循环中的重要因子^[27],降雨、降雪、气温等天候变化导致松软地面(土壤、沙漠、雪地、沼泽等)水热参数、力学参数的变化,地面特性和环境的可通行区域也随之发生变化,车辆的通过性也会改变。冻土是常见的地表类型,多年冻土广泛分布在欧亚大陆北部、北美北部等高纬地区和中低纬度的高山高原^[28]。冻土对天候变化敏感,冻土区域在气温较低时,冻结的土壤强度可支持通行;气温升高时,冻土融化沉降导致地面通行性降低。

天候变化主要以影响土壤参数来间接影响通过性,天候变化对地面特性的定量影响机理是无路导航中不能忽视的科学问题。

3 无路导航关键技术

无路导航假设环境中隐含着车辆可以通过的区

域,在探测提取可靠的环境要素的基础之上,还需要对通过性进行计算和表征。

3.1 车辆通过性计算与表征技术

车辆通过性作为无路导航的核心,是进行路径规划的基础。车辆通过性的确定需要满足几何通过性、支承通过性、安全通过性、导航通过性 4 个条件。通过对 4 种通过性的计算结果进行表征和综合评价,可确定车辆的通过性。

几何通过性一般考虑车辆的间隙失效,包括触头失效、顶起失效、托尾失效。几何通过性计算主要涉及车辆几何结构与地面的匹配过程,即车辆不同部位与地面的碰撞检测。

支承通过性计算主要涉及车辆地面力学交互建模等技术。由于车辆行走机构受力特性、行走机构和地面土壤力学特性之间的复杂的压力-沉降关系、剪切-位移关系等方面的原因,使得车辆与地面的相互作用分析比较复杂^[29-30]。对车辆地面力学的研究仍处于发展阶段,并产生了经验方法、半经验方法、数值模拟、机器学习等多种研究方法^[31]。基于半经验方法和数值模拟,建立车辆地面力学交互模型,可计算车辆牵引特性和地面变形。

安全通过性计算需要提取地灾易发性分区和地质灾害隐患点。微波遥感可以穿透植被及干燥地物等,排除地面覆盖物的干扰,对于探测地面沉降、地面塌陷等地质灾害十分重要^[32]。通过地灾易发性分区可以获取地质灾害静态分布;通过星载 InSAR 地表形变监测可以提取地质灾害高发区的时间序列形变信息^[33],获取动态变化特征;两者结合,可实现地质胁迫提取。

导航通过性受卫星导航终端的抗干扰能力和卫星导航干扰综合影响。卫星导航干扰会使导航终端错误定位定时或失去定位能力^[34],从而破坏导航功能的实现。卫星导航欺骗式干扰具有较大危害性和高度隐蔽性,是卫星导航干扰的主要类型^[35]。卫星导航终端在信号体制和硬件设计上应具有抗欺骗干扰能力^[36],应能及时识别欺骗信号。基于终端接收信号和导航区域周边地理信息可进行卫星导航干扰态势提取,对区域范围内干扰源进行感知识别和定位,生成全局干扰信息。以导航干扰态势为基础,反演导航信号干扰强度分布,获取导航通过性。

3.2 无路区域数字路网构建技术

栅格地图由于移动硬件内存与性能的限制,难以以为路径规划和导航控制提供很好的支持。无路导航采用无路区域有路化的思想,构建无路区域的全连通矢量网络图,结合车辆通过性的空间分布,剔除不可通行的边与节点,建立可通行基础路网结构;

考虑实际导航与驾驶轨迹需求,借鉴实际道路勘察设计方法,对基础路网的拓扑结构在平面、纵断面、横断面 3 个维度进行优化^[37-39]。平面优化主要对路网线型、连接进行优化,满足车辆行驶轨迹的二阶导数平滑;纵断面优化针对路网表面的起伏、坡度进行优化,尽量减少起伏和爬坡对车辆驾驶难度的影响;横断面优化考虑数字路的容量,对横向空间进行优化。

无路区域有路化的结果是形成一张无路区域的“数字路网”,实现复杂非结构化环境的结构化,作为通过性数据的载体和路径规划的数据结构。

3.3 无路导航编队路径规划技术

路径规划本质上是优化问题,依据某种准则在工作空间中构建连接起点位置和终点位置的序列点或线路。路径规划在移动机器人领域研究较多,是自动驾驶的关键技术。可根据环境信息获取程度分为全局路径规划和局部路径规划;根据是否具有学习能力,可以划分为传统方法和智能方法^[40-42]。无路导航路径规划面对的复杂环境既包含结构化环境又包括非结构化环境,同时无路导航路径规划还需根据不同应用需求兼顾其他因素,无路场景中车辆多以车队形式出行,例如车队协同与编队导航^[43-45],需要多学科知识的交叉融合,将具有不同优势的算法有效结合成更加高效的复合型路径规划算法。

4 无路导航相关技术案例分析

无路导航涉及领域和技术较多,本文提供相关案例和部分已有研究作为参考。

4.1 北约标准机动模型

北约标准机动模型(NATO reference mobility model, NRMM)发展历史悠久,集成度较高,在车辆通过性评估方面具有重要参考价值。

北约标准机动模型主要用于北约国家的车辆设计、采办和作战规划,集成了车辆动力学模型、土壤分布数据、地形参数、障碍物类型、驾驶员模型等数据和模型,利用圆锥指数等评估可通行/不可通行(Go/No-Go)区域、车辆速度分布等机动性指标^[46]。20 世纪 70 年代,美军先后提出了 AMC-71, AMC-74 和 AMM-75 等多个车辆越野机动性计算机模拟评估模型,其中 AMC-74 是 NRMM 的前身^[47]。NRMM 以经验和半经验模型为基础并使用较旧的数据和技术开发^[48],因此 2014 年北约开始了下一代北约标准机动模型(Next-generation NATO reference mobility model, NG-NRMM)的研究建设,NG-

NRMM 的建设主要包括地理信息系统地形和机动性制图、简单地形力学、复杂地形力学、智能车辆机动性评估、不确定性处理方法研究、模型测试验证和确认等 6 个重点研究领域^[49-50](图 1)。

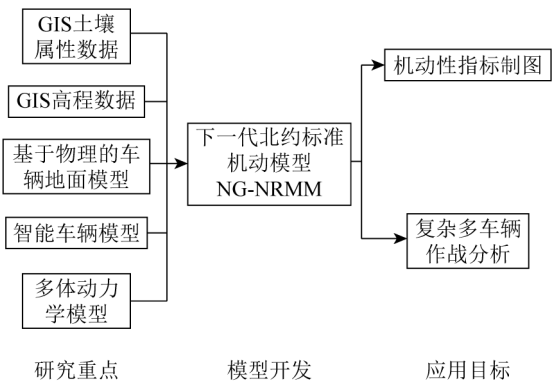


图 1 NG-NRMM 建设内容

Fig.1 Construction content of NG-NRMM

从北约标准机动模型(NRMM)及其下一代(NG-NRMM)发展趋势可以看出,北约标准机动模型从机动性评估出发积极与人工智能、遥感地理信息、数值模拟仿真等技术结合,主要涵盖了车辆的几何通过性、支承通过性的计算,同时逐渐拓展其应用范围,其发展思路和技术值得借鉴。

4.2 基于 Bekker 和 Janosi-Hanamoto 模型的车辆支承通过性计算

通过车辆地面力学仿真,可实现车辆的支承通过性计算。采用 Bekker 承压模型与 Janosi-Hanamoto 剪切模型,结合车辆多体动力学对轮胎-软土地面接触进行数值模拟(图 2)。

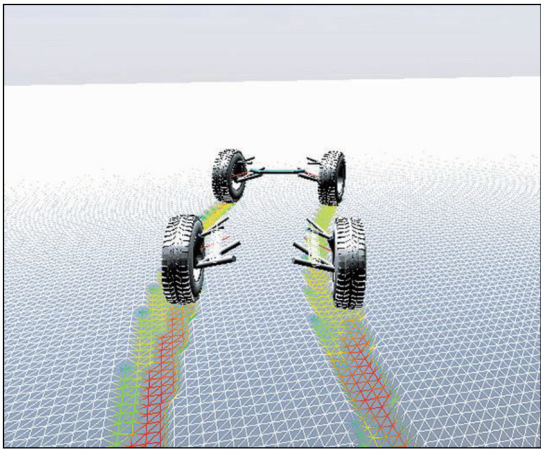


图 2 基于 Bekker&Janosi-Hanamoto 模型的数值模拟

Fig.2 Numerical simulation based on Bekker & Janosi-Hanamoto model

模型所需的参数输入主要包括土壤的黏聚力、内摩擦角、沉陷指数、黏聚变形模量、摩擦变形模量等 Bekker 参数,以及库伦摩擦角、Janosi 剪切系数,可以计算车辆的速度、发动机转速、发动机转矩,模

拟地面下陷程度(车辙)。从初步试验可知数值模拟结果主要依赖于真实土壤参数,如果能够通过遥感手段大范围获取地面土壤参数,可有效计算支承通过性,获取车辆速度。

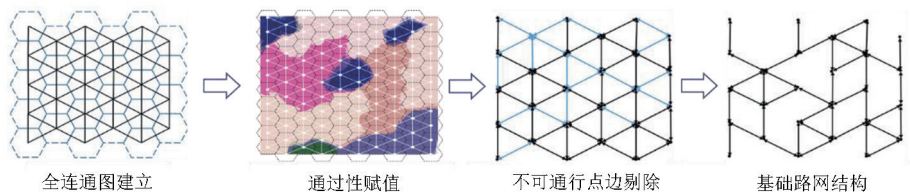


图3 数字路网基础路网结构构建技术路线

Fig.3 Technical route of digital road network infrastructure construction

在无路区域进行多尺度剖分,建立最小通行单元,以通行单元中心点为结点,以中心点连线为边,形成基础路网。结合通过性计算结果,对点和边进行赋值。对具有相同属性的边进行合并,在不可通行区域内的点和边进行删除,得到数字路网的基础结构。从图3可知,基础路网结构不满足实际驾驶与导航需求,最后需要对基础路网的形态进一步优化。

5 结论

1)在有路导航逐渐成熟的背景下,无路导航以少路或无路环境下的导航需求为牵引,将通行区域从道路拓展到道路之外,旨在实现车辆在复杂非结构化环境下的导航,是多学科交叉融合的综合研究方向,在军事、经济、野外勘探、应急测绘、抢险救灾等方面具有广泛的应用价值。

2)通过对车辆通过性进行概念拓展,本文总结了无路导航实现过程中的3大科学问题:地理-地质通行要素精细化遥感探测机理、无路区域软地面土壤参数遥感获取、天候变化对地面特性的定量影响机理;以及3大关键技术:车辆通过性计算与表征技术、无路区域数字路网构建技术、无路导航智能路径规划技术。并在北约标准机动模型的案例分析中展现了其应用效果和应用潜力,同时介绍了支撑通过性数值模拟实验、数字路网基础结构构建的技术路线,说明无路导航科学问题与关键技术的进一步研究方向。

3)有路导航走向无路导航,是复杂非结构化环境导航需求推动下的必然趋势;无路导航是多学科交叉融合趋势下的必然产物,其实现对环境感知、环境建模、导航定位、路径规划、引导控制等能力提出了更高的要求,将极大推动相关领域研究。未来,随着无路导航系统的建立与完善,无路导航系统在军事、应急测绘等领域的应用,将增强各学科的联系,

4.3 数字路网基础结构构建

数字路网基础结构构建是形成数字路网的第一步,本文提出数字路网基础结构构建的初步技术路线(图3)。

促进技术的融合与发展,进一步丰富导航的内涵,拓宽导航应用边界。

参考文献(References):

[1] 王之卓. 展望测绘学科的发展前景——纪念《测绘学报》创刊三十周年[J]. 测绘学报, 1987, 16(2): 83-85.
Wang Z Z. Looking forward to the development prospect of Surveying and Mapping—Commemorating the 30th anniversary of the publication of Journal of Surveying and Mapping[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 1987, 16(2): 83-85.

[2] 李德仁, 洪勇, 王密, 等. 测绘遥感能为智能驾驶做什么?[J]. 测绘学报, 2021, 50(11): 1421-1431.
Li D R, Hong Y, Wang M, et al. What can surveying and remote sensing do for intelligent driving? [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2021, 50(11): 1421-1431.

[3] Liu R, Wang J, Zhang B. High definition map for automated driving: Overview and analysis [J]. Journal of Navigation, 2020, 73(2): 324-341.

[4] 余卓渊, 闫国年, 张夕宁, 等. 全息高精度导航地图: 概念及理论模型[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(4): 760-771.
Yu Z Y, lyu G N, Zhang X N, et al. Pan-information-based high precision navigation map: Concept and theoretical model [J]. Journal of Geo-Information Science, 2020, 22(4): 760-771.

[5] 张攀, 刘经南. 通用化高精地图数据模型[J]. 测绘学报, 2021, 50(11): 1432-1446.
Zhang P, Liu J N. A generalized data model of high definition maps [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2021, 50(11): 1432-1446.

[6] Ibisch P L, Hoffmann M T, Kreft S, et al. A global map of roadless areas and their conservation status [J]. Science, 2016, 354(6318): 1423-1427.

[7] Jayakumar P, Gorsich D, Hudson C, et al. Quantitative assessment of modelling and simulation tools for autonomous navigation of military vehicles over off-road terrains [J]. International Journal of Vehicle Performance, 2020, 6(3): 327.

[8] 于海波, 吴必虎. 国外自驾游研究进展[J]. 旅游学刊, 2011, 26(3): 55-61.
Yu H B, Wu B H. Progress about the study of overseas self-driving travel [J]. Tourism Tribune, 2011, 26(3): 55-61.

[9] Ort T, Paull L, Rus D. Autonomous vehicle navigation in rural envi-

- ronments without detailed prior maps [C]//2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Brisbane, QLD, Australia. IEEE, 2018; 2040–2047.
- [10] 刁增祥, 余建星. 军用车辆的机动性等级和模型[J]. 汽车工程, 2005, 27(3): 354–357.
- Diao Z X, Yu J X. Mobility grade and model of military vehicles [J]. *Automotive Engineering*, 2005, 27(3): 354–357.
- [11] 余志生. 汽车理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2019.
- Yu Z S. *Automobile theory* [M]. Beijing: China Machine Press, 2019.
- [12] Rada J, Rybansky M, Dohnal F. The impact of the accuracy of terrain surface data on the navigation of off-road vehicles[J]. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2021, 10(3): 106.
- [13] 孙 昂, 杨清华, 刘 智, 等. 西里古里走廊地区道路交通: 分布特征、通行能力与地质环境[J]. 自然资源遥感, 2021, 33(3): 138–147. doi: 10.6046/zrzyyg.2020421.
- Sun A, Yang Q H, Liu Z, et al. Transportation in the Siliguri Corridor, West Bengal, India: Distribution characteristics, trafficability, and geological environment [J]. *Remote Sensing for Natural Resources*, 2021, 33(3): 138–147. doi: 10.6046/zrzyyg.2020421.
- [14] 李德仁, 张 过, 蒋永华, 等. 论大数据视角下的地球空间信息学的机遇与挑战[J]. 大数据, 2022, 8(2): 3–14.
- Li D R, Zhang G, Jiang Y H, et al. Opportunities and challenges of geo-spatial information science from the perspective of big data [J]. *Big Data Research*, 2022, 8(2): 3–14.
- [15] 冯权珑, 牛博文, 朱德海, 等. 土地利用/覆被深度学习遥感分类研究综述[J]. 农业机械学报, 2022, 53(3): 1–17.
- Feng Q L, Niu B W, Zhu D H, et al. Review for deep learning in land use and land cover remote sensing classification [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(3): 1–17.
- [16] 康晋洁, 戚浩平, 杨清华, 等. 道路通行障碍物遥感检测与通过性评价[J]. 国土资源遥感, 2020, 32(2): 94–102. doi: 10.6046/gtzyyg.2020.02.13.
- Kang J J, Qi H P, Yang Q H, et al. Study of remote sensing detection method for road obstacle and accessibility evaluation [J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2020, 32(2): 94–102. doi: 10.6046/gtzyyg.2020.02.13.
- [17] 郑雄伟, 彭 宇, 尚 坤. 基于国产卫星的遥感地质解译能力评估[J]. 自然资源遥感, 2021, 33(3): 1–10. doi: 10.6046/zrzyyg.2020357.
- Zheng X W, Peng B, Shang K. Assessment of the interpretation ability of domestic satellites in geological remote sensing [J]. *Remote Sensing for Natural Resources*, 2021, 33(3): 1–10. doi: 10.6046/zrzyyg.2020357.
- [18] 梁茜亚, 王卷乐, 李朋飞, 等. 基于 GF-1 影像的蒙古高原干旱半干旱地区自然道路提取——以蒙古国古尔班特斯苏木为例[J]. 自然资源遥感, 2023, 35(2): 122–131. doi: 10.6046/zrzyyg.2022117.
- Liang X Y, Wang J L, Li P F, et al. GF-1 images-based information extraction of natural roads in arid and semi-arid regions of the Mongolian Plateau: A case study of Gurvantes Soum, Mongolia [J]. *Remote Sensing for Natural Resources*, 2023, 35(2): 122–131. doi: 10.6046/zrzyyg.2022117.
- [19] 陈富强, 刘亚林, 高 旭, 等. 遥感技术在中尼铁路工程地质勘察中的应用[J]. 自然资源遥感, 2021, 33(4): 219–226. doi: 10.6046/zrzyyg.2020403.
- Chen F Q, Liu Y L, Gao X, et al. Application of remote sensing technology to the engineering geological survey for the construction of the China–Nepal railway [J]. *Remote Sensing for Natural Resources*, 2021, 33(4): 219–226. doi: 10.6046/zrzyyg.2020403.
- [20] 辛荣芳, 李宗仁, 张 焜, 等. 青海省湟水流域地质灾害动态变化遥感监测[J]. 自然资源遥感, 2022, 34(4): 254–261. doi: 10.6046/zrzyyg.2021313.
- Xin R F, Li Z R, Zhang K, et al. Remote sensing monitoring of the dynamic changes in geologic hazards in the Huangshui River Basin of Qinghai Province [J]. *Remote Sensing for Natural Resources*, 2022, 34(4): 254–261. doi: 10.6046/zrzyyg.2021313.
- [21] 王 绚, 范宣梅, 杨 帆, 等. 植被茂密山区地质灾害遥感解译方法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(11): 1771–1781.
- Wang X, Fan X M, Yang F, et al. Remote sensing interpretation method of geological hazards in lush mountainous area [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(11): 1771–1781.
- [22] Wong J Y. *Theory of ground vehicles* [M]. Hoboken: Wiley, 2022.
- [23] 李坤伟, 游 雄, 张 欣, 等. 基于多源数据的土壤越野通行性评估[J]. 测绘科学技术学报, 2018, 35(2): 206–210.
- Li K W, You X, Zhang X, et al. Evaluation of soil trafficability based on multi-source data [J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2018, 35(2): 206–210.
- [24] 艾 璐, 孙淑怡, 李书光, 等. 光学与 SAR 遥感协同反演土壤水分研究进展[J]. 自然资源遥感, 2021, 33(4): 10–18. doi: 10.6046/zrzyyg.2020416.
- Ai L, Sun S Y, Li S G, et al. Research progress on the cooperative inversion of soil moisture using optical and SAR remote sensing [J]. *Remote Sensing for Natural Resources*, 2021, 33(4): 10–18. doi: 10.6046/zrzyyg.2020416.
- [25] Ewing J, Oommen T, Jayakumar P, et al. Utilizing hyperspectral remote sensing for soil gradation [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(20): 3312.
- [26] Bousbih S, Zribi M, Pelletier C, et al. Soil texture estimation using radar and optical data from sentinel-1 and sentinel-2 [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(13): 1520.
- [27] 蒋玲梅, 崔慧珍, 王功雪, 等. 积雪、土壤冻融与土壤水分遥感监测研究进展[J]. 遥感技术与应用, 2020, 35(6): 1237–1262.
- Jiang L M, Cui H Z, Wang G X, et al. Progress on remote sensing of snow, surface soil frozen/thaw state and soil moisture [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2020, 35(6): 1237–1262.
- [28] Zhang T, Barry R G, Knowles K, et al. Statistics and characteristics of permafrost and ground-ice distribution in the Northern Hemisphere [J]. *Polar Geography*, 2008, 31(1/2): 47–68.
- [29] 姚 禹, 王 博, 高 智. 履带-地面耦合系统机理分析与建模[J]. 长春工业大学学报, 2018, 39(6): 528–533, 633.
- Yao Y, Wang B, Gao Z. Mechanism analysis and modeling of track-soil coupling system [J]. *Journal of Changchun University of Technology*, 2018, 39(6): 528–533, 633.
- [30] 陈 鼎. 基于地面分形特性的轮地相互作用机理研究及其应用[D]. 厦门: 厦门大学, 2019.
- Chen D. Research and application of tire-soil interaction mecha-

- nism based on soil fractal characteristics [D]. Xiamen: Xiamen University, 2019.
- [31] 华 琛,牛润新,余 彪.地面车辆机动性评估方法与应用[J].吉林大学学报(工学版),2022,52(6):1229-1244.
Hua C, Niu R X, Yu B. Methods and applications of ground vehicle mobility evaluation [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2022, 52(6): 1229-1244.
- [32] 邵 芸,张 茗,谢 酬.地质灾害遥感综合监测现状与展望[J].地质与资源,2022,31(3):381-394.
Shao Y, Zhang M, Xie C. Present situation and prospect of comprehensive monitoring in geological hazard by remote sensing[J]. Geology and Resources, 2022, 31(3): 381-394.
- [33] 许 强.对地质灾害隐患早期识别相关问题的认识与思考[J].武汉大学学报(信息科学版),2020,45(11):1651-1659.
Xu Q. Understanding and consideration of related issues in early identification of potential geohazards [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(11): 1651-1659.
- [34] 高扬骏,李广云,吕志伟.卫星导航干扰技术的现状及展望[J].测绘与空间地理信息,2022,45(6):13-18.
Gao Y J, Li G Y, Lyu Z W. Current situation and prospect of satellite navigation interference technology [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2022, 45(6): 13-18.
- [35] 王 君,郭 妍,唐康华,等.卫星导航欺骗式干扰技术发展趋势综述[J].导航与控制,2022,21(1):13-24.
Wang J, Guo Y, Tang K H, et al. Development trend of spoofing jamming technology for satellite navigation [J]. Navigation and Control, 2022, 21(1): 13-24.
- [36] 黄 龙,唐小妹,王飞雪.卫星导航接收机抗欺骗干扰方法研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2011,36(11):1344-1347.
Huang L, Tang X M, Wang F X. Anti - spoofing techniques for GNSS receiver [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2011, 36(11): 1344-1347.
- [37] Babapour R, Naghdi R, Ghajar I, et al. Forest road profile optimization using meta-heuristic techniques [J]. Applied Soft Computing, 2018, 64: 126-137.
- [38] Casal G, Santamarina D, Vázquez-Méndez M E. Optimization of horizontal alignment geometry in road design and reconstruction [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2017, 74: 261-274.
- [39] Park J, Abdel-Aty M. Safety performance of combinations of traffic and roadway cross-sectional design elements at straight and curved segments [J]. Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems, 2017, 143(6): 04017015.
- [40] 霍凤财,迟 金,黄梓健,等.移动机器人路径规划算法综述[J].吉林大学学报(信息科学版),2018,36(6):639-647.
Huo F C, Chi J, Huang Z J, et al. Review of path planning for mobile robots [J]. Journal of Jilin University (Information Science Edition), 2018, 36(6): 639-647.
- [41] 李晓旭,马兴录,王先鹏.移动机器人路径规划算法综述[J].计算机测量与控制,2022,30(7):9-19.
Li X X, Ma X L, Wang X P. A survey of path planning algorithms for mobile robots [J]. Computer Measurement & Control, 2022, 30(7): 9-19.
- [42] 闫皎洁,张锬石,胡希平.基于强化学习的路径规划技术综述[J].计算机工程,2021,47(10):16-25.
Yan J J, Zhang Q S, Hu X P. Review of path planning techniques based on reinforcement learning [J]. Computer Engineering, 2021, 47(10): 16-25.
- [43] Cook J T, Ray L E, Lever J H. Dynamics modeling and robotic-assist, leader-follower control of tractor convoys [J]. Journal of Terramechanics, 2018, 75: 57-72.
- [44] Godoy J, Artuñedo A, Beteta M, et al. Corridors-based navigation for automated vehicles convoy in off-road environments [J]. IFAC-PapersOnLine, 2022, 55(14): 71-76.
- [45] Mao W, Liu Z, Liu H, et al. Research progress on synergistic technologies of agricultural multi-robots [J]. Applied Sciences, 2021, 11(4): 1448.
- [46] Haley P W, Jurkat M P, Brady Jr P M, et al. NATO reference mobility model, Edition 1, Users guide. Volume 2. Obstacle Module [R]. (1979).
- [47] Bradbury M, Dasch J, Gonzalez R, et al. Next-generation NATO reference mobility model (NG-NRMM) [J]. Tank Automotive Research, Development and Engineering Center (TARDEC), Warren, MI, 2016.
- [48] Wong J Y, Jayakumar P, Toma E, et al. A review of mobility metrics for next generation vehicle mobility models [J]. Journal of Terramechanics, 2020, 87: 11-20.
- [49] McCullough M, Jayakumar P, Dasch J, et al. The Next Generation NATO Reference mobility model development [J]. Journal of Terramechanics, 2017, 73: 49-60.
- [50] Wasfy T, Jayakumar P. Next-generation NATO reference mobility model complex terramechanics - part 1: Definition and literature review [J]. Journal of Terramechanics, 2021, 96: 45-57.

Navigation: From on-road to off-road

ZHANG Guo¹, QIN Xuwen², ZHU Chunyang¹, WANG Shanxiu³, XU Qing⁴, YUN Xiaoyu¹

(1. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 2. China Aero Geophysical Survey and Remote Sensing Center for Natural Resources, Beijing 100083, China; 3. China National Administration of GNSS and Applications, Beijing 100088, China; 4. Institute of Geospatial Information, Strategic Support Force Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In the context of the growing maturity of on-road navigation, this study proposed a cross-disciplinary research direction-off-road navigation-based on the demands for navigation services in complex and unstructured

environments. First, the development of on-road navigation and the demand scenarios of off-road navigation were introduced. Based on four specific aspects of vehicle trafficability, scientific issues in the transition from on-road to off-road navigation were presented, including refining remote sensing detection of geographical and geological trafficability elements, remote sensing-based retrieval of soft soil parameters in off-road areas, and quantitative mechanisms behind the impacts of climatic change on ground characteristics. Accordingly, the research direction of off-road navigation was clarified. Then, key technologies like vehicle trafficability calculation and characterization, digital road network construction in off-road areas, and intelligent path planning for off-road navigation were summarized. The technical approach of roadization for off-road areas and the concept of a digital road network for off-road areas were introduced, followed by the establishment of a comprehensive technology system for off-road navigation. Finally, in combination with practical applications, the potential of off-road navigation was confirmed. Research on off-road navigation will further enrich the connotation of navigation and expand its application boundaries.

Keywords: off-road navigation; electronic navigation map; trafficability; digital road network; roadization for an off-road area

(责任编辑: 李 瑜)

=====

熊盛青等荣获自然资源科学技术奖一等奖

自然资源科学技术奖是经国家奖励办备案面向全国自然资源行业的重要科学技术奖项,旨在奖励在科技活动中做出突出贡献的单位和个人。中国自然资源航空物探遥感中心“航空地球物理与遥感地质”国家重点领域创新团队联合中国人民解放军国防科技大学、北京自动化控制设备研究所完成的“航空重力关键技术突破及应用”荣获自然资源科学技术奖一等奖,主要完成人为熊盛青、周道卿、周锡华、曹聚亮、罗锋、胡平华、曹宝宝、姜作喜、张开东、屈进红、郑宇舟、蔡劭琨、胡悦、王冠鑫、胡夏炜。

该项目攻克了航空重力传感器等“卡脖子”技术,自主研制出两种类型航空重力仪,实现了高端装备研制技术的自主创新和重大突破;突破了强动态干扰下信噪分离等系列关键技术,研制出航空重力数据处理方法和软件,实现了航空重力技术“软装备”的国产化;创建了我国航空重力勘查技术体系,实现了地质调查、能源资源勘查、工程地质安全风险评价、测绘、融合应用等领域的重大应用。相关成果获授权发明专利 25 项、实用新型专利 4 项、软件著作权 15 项,制定行业和内部技术标准 3 项,出版专著 3 部,发表论文 47 篇。项目成果总体达到国际先进水平,在起伏飞行条件下的仪器测量精度、稳定性等方面达到国际领先水平,实现了我国资源领域航空重力勘查技术从无到规模化生产的跨越,产生了显著的社会和经济效益,已成为新一轮找矿突破战略行动优先推广的高新技术。



(万建华,2024 年 11 月 20 日报道)