



导航制导与传感技术研究领域若干问题的思考与展望

郭雷^{1*}, 房建成^{2*}

1. 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 北京 100191

2. 北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191

* 通信作者. E-mail: lguo@buaa.edu.cn, fangjiancheng@buaa.edu.cn

收稿日期: 2016-12-05; 接受日期: 2017-03-24; 网络出版日期: 2017-09-01

国家自然科学基金 (批准号: 61421063, 61661136007, 61320106010, 61627810) 和科技部国际科技合作专项 (批准号: 2013DFE-13040) 资助项目

摘要 导航制导与传感技术学科是自动化学科的一个重要分支, 该学科研究运动体的位置、速度、姿态等运动信息以及相关环境与目标特征信息的获取和感知方法, 在此基础上研究运动体的导引规律、控制策略以及实现途径. 导航制导与传感技术关系到国家安全和国民经济建设, 属于基础性、战略性和前沿性的军民两用高新技术. 本文在国家自然科学基金委员会信息科学部学科论证会的基础上, 进一步总结梳理了导航制导与传感技术学科的发展动态与研究现状, 重点强调了被控对象与任务目标、任务环境、感知手段、执行机构以及布局结构的一体化设计和多学科交叉的研究思想, 从共性基础理论、关键工艺与核心技术等不同层面阐述近期本学科的重点研究领域和研究方向.

关键词 导航制导与传感, 飞行器控制, 组合导航, 传感器与执行器

1 引言

导航制导与传感技术学科是自动化学科的一个重要分支, 其中导航和传感技术主要研究运动体与运载体的位置、速度、姿态等运动参数和所处环境、任务目标特征信息的获取和感知; 制导技术主要研究运动体的导引规律以及按照导引规律控制运动体到达目的地的控制理论与技术. 导航制导与传感技术关系到国家安全和国民经济建设, 属于基础性、战略性和前沿性的军民两用高新技术, 其发展一直受到国防和国民经济建设重大需求的牵引, 受到了世界各国的高度关注和重视^[1~4].

近年来, 在载人航天与探月工程、高超声速飞行器、高分辨率对地观测系统、大型飞机、机器人、导航与位置服务等国家重大需求的牵引下, 导航制导与传感技术作为我国中长期科技发展规划多个重大专项的关键技术之一, 已成为自动化学科领域不可缺少的重要组成部分, 在国家安全和国民经济建

引用格式: 郭雷, 房建成. 导航制导与传感技术研究领域若干问题的思考与展望. 中国科学: 信息科学, 2017, 47: 1198–1208, doi: 10.1360/N112016-00275
Guo L, Fang J C. Recent prospects on some problems of navigation guidance and sensing technology (in Chinese). Sci Sin Inform, 2017, 47: 1198–1208, doi: 10.1360/N112016-00275

设中具有重要战略意义^[5~7]. 在促进学科发展方面, 正如 20 世纪 60 年代航空航天的发展需求催生了现代控制理论的发展一样, 近年来航空航天等领域的迫切需求也正牵引并孕育着自动化学科新型导航、控制与传感技术领域基础理论和关键技术的迅猛发展; 同时, 导航制导与传感技术逐渐成为一项包括控制理论方法以及传感器、执行器和控制系统设计的交叉科学和综合技术, 该技术的研究往往涉及光学、机械、电磁、量子、计算机与智能等学科的交叉融合.

目前, 在国家安全、航空航天等领域导航制导与传感技术竞争日益激烈, 对运动体与运载体(航天器、飞机、地面车辆、水下航行器等)导航制导与传感技术的要求越来越高. 例如, 在民用导航与位置服务领域, 室内外无缝导航和物联网发展迅速, 市场规模急剧增长, 仅在刚刚过去的 2015 年, 我国北斗导航产业产值估计达到 2000 亿元^[8]. 另一方面, 随着量子导航、仿生导航、物理场匹配导航、视觉导航等技术的快速发展, 也给导航与传感技术的突破带来新的机遇和新的挑战^[9~16]. 在飞行器制导与控制方面, 航空器(特别是无人机)、航天器以及临近空间飞行器观测、跟踪、捕获、打击等任务性能指标日益提高, 对于深空深海、强干扰、高动态等复杂环境的适应性、可靠性和精确性要求也已成为本学科方向的重大挑战.

导航制导与传感领域涉及信息科学、控制科学、系统科学以及航空航天、机械制造、传感技术等基础学科, 是一门快速发展的交叉学科. 本文结合近年来国家重大需求和国内外技术发展前沿, 从基础性、前沿性研究的视角探讨近期导航制导与传感技术学科的整体规划和顶层设计, 梳理近期优选重点发展领域和凝练重大科学问题, 以推动导航制导与传感技术学科基础性科学理论及关键技术的快速发展, 满足国家安全和国民经济建设的迫切需求.

2 研究现状及研究目标

从国家安全角度, 导航制导与传感技术是保卫领土、领空、海疆, 开拓空间疆域, 争夺制空、制天、制海权的核心技术; 同时, 该项技术也在遥感测绘、环境资源、交通运输、精密制造、精确测量等民用领域以及机器人、互联网+等国家优先发展方向起着不可替代的重要作用, 经济和社会效益巨大. 随着国民经济的发展和国防建设的需要, 高超声速飞行器、高分辨率对地观测、深空探测、空间在轨服务等国家重大工程对高性能导航制导与传感技术的需求越来越迫切. 无论是从国防安全还是从高新技术竞争的角度, 该技术领域技术封锁和保密程度较高, 亟需鼓励自主创新、注重自主知识产权的保护.

目前, 美国、欧洲等发达国家和地区在高性能导航制导与传感技术方面发展迅猛、技术先进, 已形成了明显的战略优势. 同时, 在该技术领域国外长期对我国进行不同程度的技术封锁, 国际交流和合作受到制约和限制. 近年来, 我国在导航制导与传感技术领域尽管取得了长足的进展, 但同国外先进技术相比仍有较大差距.

(1) 基础研究的总体规模偏小、研究团队和资金投入相对不足. 我国多数研究团队是工业部门的科研和工程技术人员, 以应用需求牵引开展工程性研究, 科研工作的重心是型号任务, 而不是前瞻性、前沿性和基础性研究方向; 另一方面, 本学科需要具备一定的关于被控对象的研究门槛, 高等学校和中国科学院等单位从事本学科研究的人员较少, 除北京航空航天大学、哈尔滨工业大学、北京理工大学、西北工业大学等个别学校之外, 学科建设处于相对弱势. 总体上来看, 本学科在前沿性、创新性基础理论研究方面投入不足.

(2) 部分理论研究成果与实际应用严重脱节, 原创性地提炼科学问题的能力不足, 可用于解决实际应用问题的理论方法较少, 理论成果过于注重公式推导, 而忽略了工程的约束和要求, “碎片化”现象严重. 这个现象是由目前过于追求论文和引用的科研评估体系决定的. 对于导航制导与传感技术学科

而言,一方面应该鼓励工业部门的工程师敢于创新性地应用新方法、新技术;另一方面,本学科应该把能否超前地提炼科学问题、解决工程实际中的难题作为检验理论工作价值的重要标准,鼓励理论研究人员更紧密地结合工程实践。

(3) 现有的导航与控制技术的综合能力不足,难以满足我国对于空间站建设、探月工程、深空探测、深海勘探等复杂重大工程的需求。复杂、未知、不确定甚至拒止、对抗环境给高精度导航和控制技术带来重大挑战。例如,在导航与位置服务领域,国外室内外无缝导航精度已经达到分米级,而我国仍有一定差距。另外,分离地研究导航制导与传感技术的成果较多,导航制导与传感系统的一体化设计和研究能力严重不足。

(4) 与导航制导与控制技术相关的传感与控制仪器仪表水平有待提高。导航传感器和控制执行器作为导航、制导与控制系统的核心部件,很大程度上决定着导航制导与控制的精度。传统的导航传感器和控制执行器已不能满足高精度、高动态、高可靠导航制导与控制的需求,迫切需要导航传感器和控制执行器新机理和新技术的突破。如随着量子调控技术的发展,国外研制的高精度原子自旋陀螺仪,精度已经达到 $10^{-4}^{\circ}/h$,目前在向 $10^{-6}^{\circ}/h$ 的精度迈进;体积小、重量轻、成本低的核磁共振原子自旋陀螺仪,精度已经突破 $10^{-2}^{\circ}/h$,正在接近 $10^{-3}^{\circ}/h$ [16];在航天器姿态控制执行机构技术方面,具有高精度、极微振动、长寿命特点的磁悬浮惯性动量轮和控制力矩陀螺得到了快速发展,将用于天文观测、超高分辨率遥感等“超稳超静”卫星平台 [17]。

总之,我国正在实施的载人航天与探月工程、高超声速飞行器、高分辨率对地观测系统、大型飞机、机器人、导航与位置服务等多个国家重大专项,迫切需要先进的导航制导与传感技术。导航制导与传感技术已成为我国中长期科技发展规划多个重大专项的关键技术之一,决定着这些重大专项实施的成败。“十三五”期间,应该加强导航制导与传感领域的基础研究以及前瞻性、前沿性的技术探索与自主创新,重视理论研究与实际应用的密切结合,鼓励导航制导与传感领域的一体化与系统化研究,培养一批从事导航制导与传感技术基础研究的高水平人才,促进我国在本学科领域尽快完成从跟跑、并跑到领跑的角色转换,推动我国导航制导与传感技术学科的快速发展。

我们应该充分认识到,作为涉及航空航天、先进制造等领域的高新技术,导航制导与传感学科长期受到不同程度的技术封锁,保密性较强。与其他控制理论方向不同,本学科应该更加重视知识产权的保护,避免采用以论文和引用为唯一导向的评估手段,注重提炼科学问题和解决工程难题的能力和水平。在研究方法方面,本学科应该强调“目标-对象-环境”(objective-plant-environment, OPE)和“感知-对象-控制”(perception-plant-control, PPC)和“传感器-对象-执行器”(sensor-plant-actuator, SPA)的一体化设计和研究思想,要把理论研究、仿真实验和工程实践紧密结合,逐步减少过度追求论文数量的评估方式和注重公式推导的碎片化研究方法。

3 若干重点研究领域和研究方向

3.1 深空深海复杂运动体的自主导航与控制

3.1.1 研究目标与内涵

深空和深海工作环境测控手段匮乏、未知程度较高,受多源干扰的影响,具有极大的不确定性,因此对于自主性有更高的要求。深空深海运动体本身的结构往往也呈现大型化、复杂化的特点,对任务目标具有长时间、远航程、高精度、高可靠等苛刻要求,同时可以提供的参照信息源稀缺且获取困难。因此,如何实现这样一类复杂运动体的自主导航与控制,对自动化领域的科技工作者带来极大挑战。

深空探测器在复杂未知环境中飞行, 需要利用自主导航与控制技术来实时完成复杂特定的飞行或探测任务^[18,19], 主要包括探测器的巡航飞行、接近飞越、下降着陆等任务阶段. 深海潜器面临深海复杂未知环境下的大范围导航与探测, 可用导航资源少, 惯性信息、海洋环境与海洋地球物理场信息和声学辅助信息成为自主导航的主要信息源^[20,21].

3.1.2 研究需求与研究现状

与地球轨道航天器相比, 深空环境下探测器的飞行距离更远、运行时间更长、任务环境更复杂. 深空探测器由于难以依赖地面测控网进行导航与控制, 在精确性、实时性和可靠性等诸多方面受到限制, 难以满足探测器着陆和捕获等特殊任务阶段的要求, 具有智能性和适应性的自主导航与制导控制技术是解决这些问题的有效途径. 根据我国 2030 年前深空探测发展规划, 2020 年前后我国将自主开展火星环绕和着陆探测以及小行星附着探测等任务. 随着深空探测任务向多样性和复杂性发展, 对自主导航和控制系统性能的要求越来越高. 然而, 大气特性/引力摄动等多源干扰的影响、导航信息源缺乏、近行星周围引力场不规则等因素, 给深空导航制导和控制带来了困难与挑战, 因此, 我国亟需研究深空探测器高精度高可靠性自主导航与控制技术^[4,12,18,19].

海洋问题历来是国家战略问题, 我国在深海勘测技术领域的落后状态, 以及以美国为首的国家实行的岛链封锁对我国领海安全构成了严重威胁. 因此, 亟需开展深海高精度高可靠性导航与感知探测技术研究, 构建不确定环境下深海高精度高可靠性导航与探测基础理论框架, 建立和完善不确定环境下深海高精度高可靠性导航与探测的方法与技术, 突破技术瓶颈制约. 深海高精度高可靠性导航与探测领域的核心技术, 主要针对深海环境的复杂性、可用导航资源少和运载体长时间工作等特点. 从目前深海潜器自主导航与控制的发展现状看, 开展深海环境长航时高精度自主导航与控制技术的研究刻不容缓^[20~22].

3.1.3 研究意义与应用前景

自主导航与控制是实现深空探测特殊阶段导航与控制任务的必备技术手段, 能够显著降低深空航天器对地面测控的依赖程度, 提高生存能力, 成为保证深空航天器安全和探测任务成功实施的关键. 高性能自主导航与控制技术能够显著提高航天器导航与控制系统的精度和可靠性, 满足各类高性能深空探测任务的需求, 为实现我国深空探测重大工程任务奠定理论方法和技术基础. 该项技术必将在我国自主火星和小行星探测任务以及后续深入无人月球探测任务中发挥关键作用, 也将在未来的地外天体载人登陆等任务中发挥更大作用.

深海高精度高可靠性导航与探测技术是一项军民结合的重要基础技术, 是一个国家开发深海资源, 确保国家海洋经济可持续发展的重要技术支撑; 也是一个国家增强海军实力、提高海军武器装备技术水平的重要技术基础. 解决不确定环境下深海高精度高可靠性自主导航与探测领域关键科学问题, 构建基础理论框架、建立和完善相应的方法与技术, 可为深海长航时导航与探测的关键技术创新提供理论与方法支撑.

深空深海运动体的导航和控制技术涉及多学科交叉和一体化系统集成, 未来的研究趋势是基于任务和目标、考虑作业环境的被控对象导航和控制系统设计、方法研究和系统实现, 逐步体现“目标 – 对象 – 环境”和“感知 – 对象 – 控制”和“传感器 – 对象 – 执行器”的一体化设计和研究思想. 该项技术将显著提高我国复杂环境下深空深海高精度高可靠性导航与探测领域的基础研究水平, 解决复杂环境下深空深海导航与探测领域的技术难点, 为推进我国空间和海洋战略的跨越式发展奠定理论

基础.

3.1.4 主要研究内容

(1) 深空探测器高性能自主导航和控制方法与技术. 主要研究内容包括: 长航时运载体的高精度自主导航理论与方法; 有限信息下自主导航与鲁棒估计理论; 复杂不确定环境下的多源信息融合与抗干扰导航技术; 围绕接近、附着和在轨服务任务的多约束自适应制导与控制方法; 基于轨迹在线生成的姿轨耦合智能控制方法; 多源干扰环境精确导航与控制系统的验证与评估技术.

(2) 深海不确定环境下的高性能导航和探测方法与技术. 主要研究内容包括: 长航时潜器惯性导航理论与方法; 海洋地球物理场与地理位置的相关性与可用性理论; 深海环境仿生感知理论与技术; 多潜器编队协同导航机制与机理; 多传感器信息融合理论与方法; 深海不确定环境下快速探测和认知机理研究; 深海不确定环境下的 SLAM 理论和方法; 深海环境下高精度高可靠性导航技术应用平台验证技术.

3.2 面向可变空间作业任务的高精度制导与控制技术

3.2.1 研究目标与内涵

空间作业是指在空间利用单个或多个运动体开展的空间操作任务, 包括空间站交会对接与在轨服务, 空间目标探测、接近与捕获, 小卫星组网编队与协同飞行等自主任务, 其中高精度的导航、制导与协同控制系统的设计是其中的关键技术.

3.2.2 研究需求与研究现状

目前, 包括中国在内的多个航天大国均已完成了空间合作目标的自主交会对接、绕飞、逼近、组合体姿轨控制等技术, 未来的发展重点将在于制导与控制精度的提升和针对非合作目标的探测任务. 由于具有模型复杂、不确定性高、任务难度大、设计要求高等特点, 相应的制导与控制系统的的设计具有很大挑战. 同时, 由于单一运动体在完成某些空间作业任务时存在高成本、复杂结构、低可靠性、维护代价高等缺点, 利用多个小型同构多运动体作为替代方案在近年来得到快速拓展, 而更加具有一般性的异构多运动体协同工作将成为下一步发展方向.

3.2.3 研究意义与应用前景

结合我国在空间探测、空间碎片及空间安全领域未来发展技术需求, 开展具有针对性的空间作业任务关键技术攻关, 可带来显著的社会和经济效益, 对于空间资源利用及空间安全将起到积极推动作用.

3.2.4 主要研究内容

(1) 挠性多体空间运动体特征建模方法. 针对具有挠性附件、运动机构等大范围高动态具有多源干扰不确定性及变拓扑结构的复杂空间运动体, 研究具有一般性的特征提取和动态建模技术, 重点解决空间合作/非合作目标组合体、高超声速飞行器、仿生机器人等复杂环境、复杂任务运动体的动力学建模与表征问题.

(2) 非合作运动目标相对位姿测量与估计技术. 包括非合作目标特征几何分布与位姿关系建模技术, 基于视觉及测距信息的非合作目标三维建模技术, 非合作高速翻滚目标位姿估计与跟踪方法, 多源复合相对导航信息融合技术等问题.

(3) 空间交会及捕获任务先进制导与控制技术. 包括合作/非合作目标逼近全过程制导与控制技术, 大挠性空间飞行器高精度快速逼近制导与控制技术, 大椭圆轨道非合作翻滚目标超近距离位姿跟踪技术, 飞爪或绳系附着器等柔性连接情形下组合飞行器姿轨控制方法, 多飞行器抓捕路径规划以及构形/姿态的协同控制方法.

(4) 异构多运动体复合制导与控制技术. 包括多目标、多约束条件下异构多运动体快速轨迹规划, 考虑通讯时滞、数据丢包、测量噪声和未知干扰的异构运动体分布式协同制导与控制, 考虑障碍规避的有限时间快速协同轨迹跟踪制导, 考虑执行机构特性的多运动体姿态协同控制, 基于局部信息的异构多运动体分布式自主决策与优化, 基于分布式信息的异构多运动体系统故障诊断与容错控制.

3.3 新型导航敏感器和执行器的机理与技术

3.3.1 研究目标与内涵

导航传感器是敏感和获取运载体位置、速度、姿态等运动参数和所处环境特征信息的部件; 执行器是按照导引规律控制运载体的部件. 导航传感器和执行器作为导航、制导与控制系统的核心部分, 很大程度上决定着导航制导与控制的精度. 开展新型导航传感器和执行器的机理和技术研究, 对促进我国导航制导与控制系统的跨代发展将提供强有力的技术支撑.

3.3.2 研究需求与研究现状

在深空探测、高分辨率对地观测、深海空间站等国家重大需求的牵引下, 我国对空间和水下探索及利用的深度和广度都在不断深化和扩大, 相应地对承载探索任务的运载体导航制导与控制系统性能也提出了更高要求. 导航传感器和控制执行器作为导航、制导与控制系统的核心部件, 是导航制导与传感技术学科的重要组成部分和研究热点, 面临着日益严峻的挑战. 国外在该方面长期对我国进行不同程度的技术封锁, 国内外研究水平差距较大; 美国等西方发达国家达到的精度比我国要高 1 ~ 2 个数量级, 我国的传感器和执行器精度和可靠性距离国际先进水平还有较大差距. 传统机理的导航传感器和控制执行器已不能满足要求, 迫切需要探索研究基于新机理的导航传感器和控制执行器^[15~17, 23].

3.3.3 研究意义与应用前景

随着我国深空探测、高分辨率对地观测系统、大型飞机等国家重大专项的实施, 针对复杂和极端环境的新型导航传感器和控制执行器的要求日益提高. 导航传感器和执行器新原理和新方法的突破, 可望满足深空深海等复杂环境下运载体(深空探测器、深海潜器)的长时间高精度自主导航与控制系统、超高速飞行器大范围高动态条件下的导航制导和控制系统、大型复杂挠性航天器强干扰情况下的姿轨测量与稳定及机动控制系统、多飞行器快速协同导航制导与控制系统、大延迟高精度在轨操作路径规划与协同控制系统、行星和小行星等定点着陆导航制导和控制系统的迫切要求. 因而, 开展新型导航传感器和执行器的机理和技术研究具有重要的科学研究意义与工程应用价值.

3.3.4 主要研究内容

(1) 在新型导航传感器方面. (a) 基于量子调控理论与方法的量子导航传感器: SERF 原子自旋陀螺仪、核磁共振原子自旋陀螺仪、原子干涉陀螺仪、基于结构限域介质的惯性测量仪、双光子纠缠导航传感器等技术; (b) 物理场匹配导航传感器: 原子自旋磁强计、冷原子干涉重力仪、基于石墨烯材料的高性能压力传感器等的理论与方法; (c) 新型仿生传感器技术、基于动物行为特性的组合仿生导航传感器技术.

(2) 在新型执行器方面. (a) 航天器磁悬浮姿态控制执行机构技术; (b) 基于电场虚拟帆的新型无工质空间推进技术; (c) 新型电推进器技术; (d) 微纳操控技术与执行机构技术; (e) 基于智能材料的新型执行器.

3.4 开放和拒止环境下无缝定位导航技术及应用

3.4.1 研究目标与内涵

针对城市路面、隧道、停车场、商场、交通枢纽、展会等公众开放环境下的车辆自动/辅助驾驶、机器人运动控制、人员定位导航的实际应用需求, 结合移动互联网、云计算、大数据技术的最新发展, 研究云端数据和终端数据相结合, 基于多种异构、异步、断续、大拖尾误差分布信号/信息融合的定位导航基础理论与方法, 实现车辆、机器人和人员在公众开放环境中全天候快速的定位导航, 并选择典型场景进行验证和应用. 特别地, 要重点研究在干扰、遮挡、屏蔽和拒止环境下保持自主定位导航能力的手段和方法, 加强新型导航定位手段和信息融合方式的研究.

3.4.2 研究需求与研究现状

利用现代信息技术提供更加便捷、高效、灵活的公共管理和社会服务, 对于提高群众的生活质量、提升政府的公共服务水平具有重要意义. 实时无缝获取车辆、自动作业机器人和人员在移动过程中的位置、方向、速度等信息, 并在此基础上实现车辆的智能自动/辅助驾驶、人员移动的高效疏导, 是体现城市信息化水平的重要方面^[24].

目前, 车辆和人员定位导航主要依赖卫星导航手段, 但在高楼遮挡路面、隧道、室内停车场、商场、交通枢纽、展会等公众开放环境下, 往往由于信号受到遮挡或电磁干扰, 其无法提供高精度、高鲁棒性的导航服务. 近年来, 出现了如 WiFi 导航、视觉匹配、低成本惯导、UWB (Ultra wideband) 导航、仿生导航等新型定位手段, 但多手段融合定位的技术尚不成熟, 不能全面满足应用需求.

借助移动互联网、大数据、云计算等新技术以及新型传感技术, 可以在云端汇集海量用户的导航数据, 并通过数据云端与用户终端的交互式协同, 向用户提供更好的定位导航服务, 为开放环境下无缝定位导航提供了全新的解决思路.

3.4.3 研究意义与应用前景

本方向拟结合上述应用需求与技术背景, 以新型传感技术为依托, 以云端和终端交互式协同、多种定位手段融合为主要技术手段, 着力解决开放环境下无缝定位导航的基础模型和方法问题, 并在典型的场景下开展验证和应用. 该方向对于充实导航定位基础理论具有重要的理论意义, 对于形成一套开放环境下无缝定位导航问题的解决方案具有重要的实用价值.

3.4.4 主要研究内容

- (1) 运动信息的新型感知和获取方法;
- (2) 云端/终端交互式大数据融合协同导航理论与方法;
- (3) 异构、异步、断续、大拖尾误差量测下的信息融合理论与方法;
- (4) 基于无线电、光学、惯性、地磁等多源信息的智能融合与决策方法;
- (5) 开放和拒止环境下无缝定位导航技术的验证与应用.

4 人才培养与国际合作方面的建议

国内导航制导与传感技术领域的研究大部分仍为应用导向,基础理论的研究与实际应用脱节严重,总体基础研究水平与国际先进水平相比存在一定差距.此外,该领域技术保密性强,受到不同程度的技术封锁.因此,我国应在基础研究和跨学科交叉研究方面引进相关高端人才,加强国际交流与合作,把基础研究、应用基础研究及应用研究紧密结合起来,重视知识产权的保护,加强导航制导与传感技术领域的系统化和一体化研究.

人才培养方面,导航制导与传感技术学科是典型的交叉学科,要加强本学科优秀人才的培养和创新能力、创新群体的建设.在政策方面建议对本学科领域高水平人才队伍建设进行倾斜,根据本学科领域的发展特点,调整相应的人才评价体系和标准,保证本学科领域优秀人才和创新团队能够在各层次人才(优青、杰青)和创新群体评审中占有一席之地;加大对交叉型青年人才队伍的资助,培养一大批该领域的中青年专家;加强国际上相关领域的高端人才引进力度,建立国内外导航制导与传感技术领域交叉型人才库,积极促进人才在各单位间的流动,保障导航制导与传感技术领域人才队伍的和谐可持续发展.

国际合作方面,建立全方位、多层次、多渠道、多形式的国际交流与合作模式.从3个层面开展国际交流与合作:一是积极参加国际会议和学术交流,二是开展双边交流和项目合作,三是以我国为主建立国际合作研究基地,充分利用国际基础研究的前沿水平来推动国内的基础研究和技术应用.进一步夯实我国导航制导与传感技术领域已有的国际合作基础,特别是在量子传感、仿生导航、导航制导与控制方法等方向的合作研究,促进在系统层面以及技术层面的深入发展.

5 结语

导航制导与传感技术是涉及国家安全和国民经济建设,属于基础性、战略性、交叉性和前沿性的军民两用高新技术,其发展一直受到国防和国民经济建设重大需求的牵引,得到了世界各国的高度关注和重视.另一方面,该技术领域长期以来受到一定程度的技术封锁,亟需打破封锁,自主创新.为促进导航制导与传感技术的发展,提升我国在技术领域的核心竞争力,需加强该领域基础性、前沿性和交叉性的创新研究,加强理论研究与实际应用的密切联系,加强传感、导航与控制技术领域的系统化、一体化研究,加大相关交叉学科领域的交流与合作.

值得指出的是,上述研究方向是根据目前导航制导与传感技术的研究现状,结合自动控制和信息融合理论的发展动态,并按照国内外航空航天领域近阶段的需求总结得到的,难免挂一漏万.一些重要的研究方向前期已经得到了国家自然科学基金委员会和其他部门的重点支持,还有一些方向将进一步进行系统性的论证,在未来逐步集中力量开展研究.这些研究方向包括:飞行器非线性自适应轨迹

姿态一体化控制与优化; 多约束多目标运动体识别、跟踪和优化; 多源异构传感器的非高斯非线性信息融合理论; 飞行器的故障检测、预报和容错控制技术; 新型传感器和控制执行机构的设计和 optimization; 传感、导航和控制系统和一体化设计和 optimization 等。

未来的研究重点是逐步从控制方法和理论的研究拓展到可应用于目标运动体的导航和控制算法的研究, 进而从算法的研究拓展到导航和控制系统实验装置、测试装置和物理仿真平台的研究, 最终应用于各类运动体的传感、导航和控制系统设计和研制, 并服务于国家重大需求和实际工程。考虑到导航制导与传感技术学科的特殊性, 未来的研究应强调环境、对象和目标的一体化设计, 总体与控制系统的一体化设计, 以及传感、制导和控制的一体化设计; 进一步强调干扰、对抗和故障等复杂和极端环境下整体系统的行为表征、性能分析和优化设计。逐步改变目前重视文章数量、忽视技术创新的片面倾向, 把基础理论研究、测试分析技术与实际工程应用有机结合。

建议国家自然科学基金委员会在现有导航制导与传感技术领域支持的基础上, 在项目申报、人才支持计划、经费管理、结题验收等政策和资金资助方面加大扶植力度, 进一步提高本学科方向各类项目的支持力度, 强化支持已经开展的各类项目, 进一步改进针对本学科领域的评价标准和体系。建议本学科应避免以论文数量和论文评价为唯一评估标准的片面做法, 应以需求和问题为导向, 强调自主知识产权的保护, 强调实际验证和重大工程应用对理论研究的评价作用, 特别要重视研究成果对于打破国际技术封锁、提升我国的自主创新能力的贡献。建议国家自然科学基金委员会针对优先发展领域设立与国家重大工程相衔接的重大计划、重大项目和重点项目群, 同时提供专项资金资助相关国际会议、国际研讨和先进仪器仪表展览会等活动, 达到提高本领域学术水平、开阔视野的目的。最终提升我国在导航制导与传感技术领域的核心竞争力和国际影响力, 全面服务于我国的国民经济建设和国防现代化建设。

致谢 本文是在国家自然科学基金委员会信息科学部十三五学科规划会议有关讨论的基础上经过总结提炼而形成的, 感谢参加讨论会的各位同事和专家。特别感谢王子才院士、吴宏鑫院士、柴天佑院士、包为民院士、王巍院士的悉心指导。

参考文献

- 1 Qi F R. Manned space and development. Eng Sci, 2000, 2: 1-6 [戚发轫. 载人航天技术及其发展. 中国工程科学, 2000, 2: 1-6]
- 2 Ye P J, Huang J C, Sun Z Z, et al. The process and experience in the development of chinese lunar probe. Sci Sin Technol, 2014, 44: 543-558 [叶培建, 黄江川, 孙泽洲, 等. 中国月球探测器发展历程和经验初探. 中国科学: 技术科学, 2014, 44: 543-558]
- 3 Groves P D. Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems. Boston: Artech House, 2013
- 4 Wu H X, Hu J, Xie Y C. Spacecraft intelligent autonomous control: past, present, and future. Aerosp Control Appl, 2016, 42: 1-6 [吴宏鑫, 胡军, 谢永春. 航天器智能自主控制研究的回顾与展望. 空间控制技术与应用, 2016, 42: 1-6]
- 5 Feng P D. Ideas for developing airborne equipments of China's large aircraft. Acta Aeronaut et Astronaut Sin, 2008, 29: 681-685 [冯培德. 发展中国大型飞机机载设备的思考. 航空学报, 2008, 29: 681-685]
- 6 Bao W M. Present situation and development tendency of aerospace control techniques. Acta Automatica Sin, 2013, 39: 697-702 [包为民. 航天飞行器控制技术研究现状与发展趋势. 自动化学报, 2013, 39: 697-702]
- 7 王鹏. 2014-2015 年中国北斗导航产业发展蓝皮书. 北京: 人民出版社, 2015
- 8 Paull L, Saeedi S, Seto M, et al. AUV navigation and localization: a review. IEEE J Oceanic Eng, 2014, 39: 131-149

- 9 房建成, 郭雷. 导航技术. 2007-2008 控制科学与工程学科发展报告, 2008
- 10 吴文启, 何晓峰, 胡小平. 导航技术发展研究. 2012-2013 控制科学与工程学科发展报告, 2014
- 11 Yu X, Zhang Y. Progress in aerospace sciences sense and avoid technologies with applications to unmanned aircraft systems: review and prospects. *Prog Aerosp Sci*, 2015, 74: 152-166
- 12 Wang D Y, Huang X Y. Survey of autonomous navigation and control for deep space exploration. *Aerosp Control Appl*, 2009, 35: 6-12 [王大轶, 黄翔宇. 深空探测自主导航与控制技术综述. *空间控制技术与应用*, 2009, 35: 6-12]
- 13 Wang J H. Development of foreign navigation positionin technologies. *Aerosp China*, 2010, (8): 30-34 [王杰华. 国外各种导航定位技术最新进展. *中国航天*, 2010, (8): 30-34]
- 14 Chen Z J, Zhang R L, Zhang P, et al. Flight control: challenges and opportunities. *Acta Autom Sin*, 2013, 39: 703-710 [陈宗基, 张汝麟, 张平, 等. 飞行器控制面临的机遇与挑战. *自动化学报*, 2013, 39: 703-710]
- 15 Schmidt G T. INS/GPS Technology Trends. In: NATO RTO Lecture Series, RTO-EN-SET-116, Low-Cost Navigation Sensors and Integration Technology. NATO: Brussels, 2011. 1-24
- 16 Fang J C, Qin J. Advances in atomic gyroscopes: a view from inertial navigation applications. *Sensors*, 2012, 12: 6331-6346
- 17 Liu B, Fang J C, Liu G. Design of a magnetically suspended gyrowheel and analysis of key technologies. *Acta Aeronaut et Astronaut Sin*, 2011, 32: 1478-1487 [刘彬, 房建成, 刘刚. 一种磁悬浮陀螺飞轮方案设计与关键技术分析. *航空学报*, 2011, 32: 1478-1487]
- 18 宁晓琳, 吴伟仁, 房建成. 深空探测器自主天文导航方法. 西安: 西北工业大学出版社, 2010
- 19 Cui P Y, Xu R, Zhu S Y, et al. State of the art and development trends of on-board autonomy technology for deep space explorer. *Acta Aeronaut et Astronaut Sin*, 2014, 35: 13-28 [崔平远, 徐瑞, 朱圣英, 等. 深空探测器自主技术发展现状与趋势. *航空学报*, 2014, 35: 13-28]
- 20 Li J, Xu D M, Song B W, et al. Development and prospect of AUV navigation technology. *Shipbuilding China*, 2004, 45: 70-77 [李俊, 徐德民, 宋保维, 等. 自主式水下潜器导航技术发展现状与展望. *中国造船*, 2004, 45: 70-77]
- 21 Sun D J, Zheng C E. Study on the development trend of underwater acoustic navigation and positioning technologies. *J Ocean Technol*, 2015, 34: 64-68 [孙大军, 郑翠娥. 水声导航、定位技术发展趋势探讨. *海洋技术学报*, 2015, 34: 64-68]
- 22 Stutters L, Liu H, Tiltman C, et al. Navigation technologies for autonomous underwater vehicles. *IEEE Trans Syst Man Cybern Part C Appl Rev*, 2008, 38: 581-589
- 23 Wang W. Status and development trend of inertial technology. *Acta Automatica Sin*, 2013, 39: 723-729 [王巍. 惯性技术研究现状及发展趋势. *自动化学报*, 2013, 39: 723-729]
- 24 Zhuang C H, Zhao Z H, Zhang Y Q, et al. Overview on seamless positioning technologies of satellite navigation. *J Nav Position*, 2014, 2: 34-40 [庄春华, 赵治华, 张益青, 等. 卫星导航定位技术综述. *导航定位学报*, 2014, 2: 34-40]

Recent prospects on some problems of navigation guidance and sensing technology

Lei GUO^{1*} & Jiancheng FANG^{2*}

1. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;
2. School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

* Corresponding author. E-mail: lguo@buaa.edu.cn, fangjiancheng@buaa.edu.cn

Abstract Navigation guidance and sensing technology is an important branch of automation dealing with the methods employed for the acquisition and sensing of the position, velocity, and attitude of the moving body, as well as the relevant environment and the characteristic information of the target. Based on this, the research of the guidance law, control strategy of the moving body and the realization manner is studied. As a fundamental, strategic, and advanced technology, navigation guidance and sensing technology is related to national security and national economy construction. Based on the subject workshops by NSFC (National Natural Science Foundation of China), in this paper we further summarize the recent development trend and research status of navigation guidance and sensing technology, with emphasis on the integrated design and interdisciplinary research on controlled object and task object, task environment, sensing method, implementation mechanism, and layout structure. Finally, we elaborate the key research areas and research directions of this subject from different aspects, such as common basic theory, key technology, and core technology.

Keywords navigation guidance and sensing, aircraft control, integrated navigation, sensor and actuator



Lei GUO was born in Qufu, China, in 1966. He received the B.S. and M.S. degrees from Qufu Normal University, Qufu, in 1988 and 1991, respectively, and the Ph.D. degree in control engineering from Southeast University, Nanjing, China, in 1997. He is the “Changjiang” distinguished professor of the Ministry of Education of China, at Beihang University (BUAA). His research interests include control theory of uncertain and stochastic systems,

high-precision navigation and control system technology, with their applications to aerospace systems.



Jiancheng FANG was born in Shandong, China, in 1965. He received the B.S. degree in electrical engineering from Shandong University of Technology, Jinan, China, in 1983, the M.S. degree in automotive engineering from Xi'an Jiao Tong University, Xi'an, China, in 1988, and the Ph.D. degree in mechanical engineering from Southeast University, Nanjing, China, in 1996. He is an academician of Chinese Academy of Sciences, the vice president of Beihang University, the director of Sino-UK Space Science & Technology Joint Laboratory, Science and Technology on Inertial Laboratory, National Key Laboratory of Fundamental Science for National Defense, “Novel Inertial Instrument and Navigation System Technology”. His research interest includes inertial instrument and navigation technology, with a focus on high-precision inertial actuators for altitude control of new-generation spacecraft and high-performance inertial measurement instruments for airborne accurate earth observation.