

陆空协同多模态智能机器人系统发展战略研究

黄强, 孟非, 余张国, 林德福, 徐彬, 朵英贤

(北京理工大学, 北京 100081)

摘要: 陆空协同多模态智能机器人系统能够适应陆空环境, 具有多模态特征, 具有高级智能, 能够协同完成复杂任务。该系统在社会各领域具有广泛应用前景, 是促进全球科技、社会、经济发展的新动能。本文针对发展我国陆空协同多模态智能机器人系统的重大需求, 全面分析了该领域的国内外发展现状和我国目前存在的问题, 我国的地面、空中机器人及智能系统与国外存在较大差距, 但是陆空协同机器人系统各国都还处于起步阶段, 具有超越可能。本文提出了贯穿理论与关键技术、核心部件与单元、平台与系统装备, 以及系统应用的发展目标、发展布局、发展路线图和政策建议等, 从而形成相关技术体系、核心部件产业体系、智能机器人装备体系以及社会应用。研究表明陆空协同多模态智能机器人系统未来能够全方位融入智慧社会, 应用于智慧医疗、教育、家居、交通、制造等领域, 服务国计民生。

关键词: 智能机器人; 陆空协同; 多模态; 人工智能

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A

Development Strategy for Air–Ground Collaborative Multi-Modal Intelligent Robot System

Huang Qiang, Meng Fei, Yu Zhangguo, Lin Defu, Xu Bin, Duo Yingxian

(Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: An air–ground collaborative multi-modal intelligent robot system can adapt to air and ground environments, has multimodal characteristic and advanced intelligence, and is able to complete complex tasks. The system has broad application prospects in various fields of society and is a new driving force for global technological, social, and economic development. Considering the major demand for developing the air–ground collaborative multi-modal intelligent robot system in China, this study comprehensively analyzes the development status of the system in China and abroad and the existing problems in China. China currently lags behind the international advanced level in terms of the air–ground collaborative intelligent robot system development; however, it still has the opportunity to achieve the advanced level as the system is still developing in its infancy in countries worldwide. The system involves theories, key technologies, core components and units, platforms, system equipment, and system applications and aims to build related technical system, core component industry system, intelligent robot equipment system, and social applications. Moreover, we propose the development layout, roadmap, and suggestions for the development of the system. Research shows that the air–ground collaborative multi-modal intelligent robot system can be integrated into the future smart society in all aspects and be applied to fields such as smart medical, education, housing, transportation, and manufacturing, to contribute to the national economy and people’s livelihood.

Keywords: intelligent robot; air–ground collaboration; multi-modal; artificial intelligence

收稿日期: 2021-06-01; **修回日期:** 2021-07-25

通讯作者: 孟非, 北京理工大学博士后, 主要研究方向为智能机器人; E-mail: mfly0208@bit.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“陆空协同多模态智能机器人系统发展战略研究”(2019-XY-56)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

一、前言

党的“十九大”明确提出建设科技强国、数字中国、智慧社会的宏伟目标。习近平总书记在2014年两院院士大会上指出，机器人是制造业皇冠顶端的明珠，其研发、制造、应用是衡量一个国家科技创新和高端制造业水平的重要标志。

在国家政策的大力支持下，目前我国机器人及智能系统技术正得到飞速发展，工业机器人、服务机器人、特种机器人的研究和产业已经非常成熟，但是这些机器人及智能系统都难以适应人类居住的陆空立体环境，难以满足多任务需求。

陆空协同多模态智能机器人系统是能够适应陆空环境，具有多模态特征，具有高级智能，能够协同完成复杂任务的机器人及智能系统。陆空环境指以城市为代表的500 m以下空间，包括道路、建筑物、非结构地形、低空等；多模态特征指轮式、腿足、爬行、飞行等运动模式，包括单机器人运动模式可变，以及多机器人组合变形等；高级智能指自主智能、多体协同智能、人机交互智能等；复杂任务包括灾害救援、立体交通等。陆空协同多模态智能机器人系统在社会各领域具有广泛应用前景，是促进全球科技、社会、经济发展的新动能。

陆空协同多模态智能机器人系统将成为第四次工业革命的技术突破口，将引起人类社会的革命性变革。以蒸汽机为代表的第一次工业革命开创了蒸汽时代，以电力大规模应用为代表的第二次工业革命开创了电力时代，以计算机技术为代表的第三次工业革命开创了信息时代，而目前以机器人和人工智能为代表的第四次工业革命将引领人类进入智能时代。陆空协同多模态智能机器人系统能够完成一些通常需要人类智能才能完成的复杂工作，随着其技术不断发展与成熟，必将带来人类社会的革命性变革。

陆空协同多模态智能机器人系统是智慧社会的基石，将带来开启智慧社会、激发人工智能的“头雁效应”。未来的智慧社会必将是信息网络泛在化、基础设施智能化、产业发展数字化、社会治理精细化、普惠服务便捷化的状态。在智慧社会，人类将能够利用智能机器人技术构建全新的社会系统，各行各业通过智能机器人的应用可能产生巨大的业态

变化，越来越多的职业岗位将被智能机器人所替代，人类将迎来人机共生、人机共融的时代。在这种发展动力驱动下，多模态智能机器人科学技术必将产生未来科技引领的“头雁效应”。

二、陆空协同多模态智能机器人系统国内外发展现状分析

近年来，机器人及智能系统受到各国高度关注，争相出台相关政策，重点支持相关技术与产业发展[1]。目前，陆地、空中机器人及智能系统理论与装备都较为成熟，但是能够同时适应陆空环境的机器人及智能系统在社会各领域具有广泛应用前景，是未来的必然发展方向，受到世界各国越来越多的重视[2]。我国的地面、空中机器人及智能系统与美欧存在较大差距，但是陆空协同机器人系统各国都还处于起步阶段，具有超越可能。目前陆空协同多模态智能机器人理论与关键技术还没有形成体系，因此我国需要提前布局，抢占制高点。

（一）国外发展现状

机器人及智能系统是全球科技竞争的战略焦点，各发达国家竞相制定机器人发展重大战略，重点支持相关技术与产业发展。美国2017年推出了《国家机器人计划》2.0版本[3]，目标是建立美国在下一代机器人技术及应用方面的领先地位。俄罗斯发布了《俄罗斯2030年前国家人工智能发展战略》，目标是使其机器人居于世界领先地位，以提高人民生活质量，确保国家安全[4]。欧洲出资28亿欧元，创立世界上最大的民间资助机器人SPARC创新计划，目标是机器人充分进入人类生活[5]。日本政府发布《机器人新战略》[6]，成立“机器人革命协议会”，要继续保持其“机器人大国”的优势地位。

能够同时适应陆空环境的机器人及系统在社会各领域具有广泛应用前景，是未来的必然发展方向，各国都在加大投入以取得战略优势。美国机器人及智能系统技术处于领先地位，系统与装备已进入实用化。折叠翼式Transition两栖平台被誉为“世界上第一款真正意义上的飞行汽车”，其由美国Terafugia公司设计制造，是一种相当成熟的固定翼式飞行器与汽车结合的工业产品[7]。美国陆用机器

人与空中机器人都在互相扩展，其大力支持的飞行汽车是一种多功能运兵汽车，目的是进行兵力投送、人道主义援助、自然灾害救助等任务 [8]。

（二）国内发展现状

我国将智能制造与机器人项目纳入面向 2030 年的新一轮国家重大专项，并推出了“机器人产业发展规划（2016—2020 年）” [9]。明确要解决制约我国机器人产业发展的瓶颈问题，实现我国机器人技术与产业核心技术的自主可控，从而支撑智能机器人产业的持续发展。

目前机器人及智能系统相关的飞行器、无人车等都较为成熟，相关学科体系也较为成熟，并形成了完备产业链，但是陆空协同多模态智能机器人系统相关理论技术属于新兴学科和交叉学科，其内容覆盖机械工程、控制科学与工程、计算机科学与技术、兵器科学与技术、材料科学与工程、信息与通信工程、光学工程、化学工程与技术等学科，同时依赖于新型学科交叉融合创新。目前陆空协同多模态智能机器人理论与关键技术还没有形成体系，因此我国需要提前布局，占领制高点。

陆空协同机器人系统是国外限制的核心技术之一，必须构建自主体系系统发展。2018 年，美国商务部宣布禁止对中国出口人工智能（AI）、机器人等 14 类代表性新兴技术。2019 年，美国针对机器人与系统的地图、软件、高精度光学感知器件再次禁止出口有关技术。2020 年 6 月，美国限制中国香港获得机器人、AI 等高科技技术及产品。高端机器人核心部件被日本、美国、欧洲等国家和地区的公司垄断，并且高端型号对中国禁售。国内机器人所研制的伺服电机、减速器、伺服控制器、传感器等关键部件的性能指标远低于国际领先水平，70% 以上元器件依赖进口 [10]。国外研制的先进机器人多采用定制部件，根据系统性能提出部件指标需求，进行定制开发。我国的机器人研究多是工业部件的拼装模式，平台性能受限于部件性能，核心部件与国外存在代差，是智能机器人部件的“卡脖子”问题。因此我国亟需构建从部件到系统的自主体系，解决“卡脖子”问题。

陆空协同多模态智能机器人系统的发展可以从感知、融合、决策等理论技术，执行、计算等关键零部件，仿生、多域、重构、协同等平台系统和多

场景的应用来解决智能机器人的“卡脖子”问题，打破国外对我国高端机器人的限制和封锁。

我国的地面及空中机器人与美欧存在较大差距，但是陆空协同机器人系统还处于同一水平，具有超越可能。我国在该领域的研究近几年也取得了丰硕成果。北京理工大学近年来研究了基于纵列双涵道的水陆空多域机动载运车辆，集成了水面高速行驶、陆地高机动性行驶和空中多自由度可控机动行驶的三大主要功能，可以实现在各种气候条件以及复杂地形、交通状况下的综合高效机动运送能力 [11]。陆空协同机器人系统国内外研究都刚刚起步，处于同一水平，我国具有超越可能。

三、我国陆空协同多模态智能机器人系统发展存在的问题

我国目前对机器人及智能系统发展极为重视，出台了多项国家重大政策进行支持。我国机器人的拥有量已超越机器人的先发国家，成为世界第一。但是对于陆空多模态机器人系统发展仍然存在问题。

（一）缺乏陆空多模态机器人系统发展规划与支持

我国目前机器人及智能系统发展规划主要支持的是工业机器人、服务机器人、特种机器人等类型的机器人研究，这类机器人只能面向单一运动场景或任务，不具有广泛适用性。陆空多模态机器人系统在未来社会各领域具有广泛应用前景，是未来智慧社会的重要组成部分，美国、欧洲等制定了多项战略开展研究，并开展了多项计划，我国亟需构筑在该领域的先发优势，实现战略引领。

（二）陆空多模态机器人核心部件成为“卡脖子”问题

核心部件是制约机器人及智能系统性能的根本，目前我国在高端机器人系统驱动感知核心部件方面与国际领先水平存在的差距较大，高端部件被国外严重限制。国内机器人所研制的关键元件的性能指标远低于国际领先水平，主要元器件依赖进口 [12]。同时陆空多模态机器人核心部件没有形成类似于汽车、飞机等成熟的产业链体系，工业部件性能与机器人系统需求不相符。

（三）没有形成从理论研究到装备与应用的全链条

机器人及智能系统理论技术与装备应用需求连接不够紧密，需要面向国家战略，提出应用需求目标，攻克相关技术。高校、研究所的研究与装备研制单位、系统应用单位缺少沟通，相关技术取得突破后，在装备上取得应用的周期过长，平台功能设计没有与应用需求有机结合。因此应该采取从基础研究、关键技术、系统集成、装备研制、成果转化到产业化的“全链条”发展模式。瞄准前沿学术创新，学科交叉融合，产出原创性成果；瞄准产业发展，做好产品布局，形成可持续发展能力。

（四）人工智能与机器人硬件系统缺乏有机结合

目前人工智能偏向于计算机专业，仅限于数据处理，没有和执行任务的机器人及智能系统本体结合。人工智能无法独立地应对环境变化，在很多情况下机器人的工作都需要人类监督。同时，人工智能的感知能力还比较弱，只是在数据处理方面的工作比较有优势，但人工智能的分析和理解能力太弱，比起人类大脑来说对于聚焦相关信息的能力还差距较大。机器人及智能系统的感知和行动智能研究缺乏，没有引起足够重视。

四、陆空协同多模态智能机器人系统的发展目标与布局

针对陆空协同多模态智能机器人系统的国际发展形势和我国目前存在的问题，本文提出陆空协同多模态智能机器人系统发展目标、研究布局和发展路线图。

（一）总体目标

陆空协同多模态智能机器人系统瞄准智能科技、先进制造和国家安全等国家战略需求，贯穿理论与关键技术、核心部件与单元、平台与系统装备、以及社会系统应用，形成相关技术体系、核心部件产业体系、智能机器人装备体系以及社会应用，从而满足国家安全和经济社会发展的战略需求，引领智慧社会发展。

（二）发展布局

陆空协同多模态智能机器人的系统理论与关键

技术包括多模态机器人异构重组技术、机器人协同任务实时规划、多尺度感知与信息融合、高动态跨域组织网络理论、智群协作与对抗在线决策等。

陆空协同多模态智能机器人系统核心部件与单元包括高爆发驱动、高密度能源、刚柔一体化关节等执行部件与单元；仿生感知单元、自主导航、多维度通信等感知部件与单元；计算单元、智能芯片、网络运算系统等智能部件与单元。

平台与系统装备包括人型、四足动物、蛇、小型昆虫等仿生机器人；地面机动、飞行器等陆空多域机器人；单平台模态可变、多平台组合变形的机器人系统等重构机器人；陆空协同多机器人通信与指控系统、人机智能融合的协同控制系统等。

系统应用包括组成机器人无人班组，对城市进行安全维护；在地震或核泄漏等灾后，替代人进入危险环境作业；构建智慧城市立体交通系统，提高人们出行效率等灾害救援和立体交通应用。

（三）发展路线

1. 近期目标（2025 年）

突破多模态机器人异构重组、复杂环境建模与识别、机器人自主状态检测与估计等关键技术。研制高爆发驱动、高密度能源、刚柔一体化关节等执行部件与单元，自主导航、多维度通信等感知部件与单元，计算单元、网络运算系统等智能部件与单元。研制仿人型、四足动物、蛇、小型昆虫等仿生机器人；地面机动、飞行器等陆空多域机器人平台；陆空协同多机器人通信与指控系统。核心部件与单元实现 80% 自主可控，平台与系统装备技术成熟度达到 6 级，实现多平台自主协同任务演示。

2. 中期目标（2030 年）

突破机器人协同任务实时规划、多尺度感知与信息融合、恶劣环境生存与可靠性设计等关键技术。研制生物能驱动等执行部件与单元，仿生感知等感知部件与单元，智能芯片等智能部件与单元。研制单平台模态可变、多平台组合变形的重构机器人系统；人机智能融合的协同控制系统。核心部件与单元实现 100% 自主可控，平台与系统装备技术成熟度达到 8 级，实现灾害救援、立体交通等典型应用演示验证。

3. 长期目标（2040 年）

突破高动态跨域组织网络理论、智群协作与对

抗在线决策等技术，研制执行、感知、智能融合的部件与单元，研制机器人智能无人班组，形成机器人核心部件的产业体系和智能机器人装备体系，实现社会的广泛应用。

五、陆空协同多模态智能机器人系统发展建议

针对我国陆空协同多模态智能机器人系统发展的总体目标和布局，本文提出如下具体发展建议。

（一）面向国家战略需求，制定陆空协同多模态智能机器人系统总体发展规划，抢占制高点

围绕相关国家战略，由主管部门制定《陆空协同多模态智能机器人系统发展政策指南》等文件，对陆空协同多模态智能机器人系统的发展进行顶层设计与整体规划。着眼形成涵盖前沿基础、关键技术、装备/产品开发到成果转化的科技创新全产业链条，通过与国内外高水平研究机构、行业领军企业等组成“产学研用”联合体，有效汇聚协同创新战略资源力量，探索有效的协同机制，形成优势互补的协同发展模式；通过重大需求牵引持续开展系统研究，推动我国基础研究、应用基础研究及其关键技术突破，并有效转化为产业发展优势，从而满足国家安全和经济社会发展战略需求，引领智慧社会发展。

（二）制定核心部件研发计划，形成陆空多模态机器人专有核心部件与单元开发体系

围绕陆空多模态机器人核心部件建立专有研发体系，形成类似于汽车、飞机等成熟的产业链体系，从系统需求出发，提出核心部件指标，开展系统性研究。构建新型行业体制，保持制度优势，下大决心，坚持长期、稳定的研发投入，助力打赢硬核技术攻坚战。建立“卡脖子”核心多模态机器人部件攻关过程合作机制，优化评价激励机制，调动企业单位参与的积极性。

（三）加强人工智能软件算法与机器人系统硬件的有机融合，联合开展研究计划

建议发布关于软件智能算法和机器人本体二者并举的理论及关键技术研究计划。加强行业对机器

人本体智能的重视程度，将人工智能与机器人感知、行为智能深度融合，使人工智能研究不仅停留在数据处理层面，更能与机器人及智能硬件系统结合，利用感知与执行机构，自主应对环境变化，完成复杂作业任务。

（四）充分发挥各地区各单位的技术优势，打通从技术到产业化与应用的生态链

整合科研院校、高科技企业等创新资源，开展研发攻关、建立共享机制。加强科研单位与上下游企业深度合作，以核心技术攻关能力和工程化集成能力的突破为核心，通过有机协同领域上下游创新资源，完善机器人及智能系统创新链和产业链，构建先进机器人及智能系统产业。

（五）培养交叉学科、新兴学科领域专业师资队伍

针对陆空多模态机器人的基础理论、关键技术，完善领域学科布局，设立机器人专业，推动机器人领域一级学科建设，增加机器人相关学科方向的博士、硕士招生名额。鼓励高校在原有基础上拓宽机器人专业教育内容，重视机器人与数学、计算机科学、物理学、生物学等学科专业教育的交叉融合。加强“产学研”合作，鼓励高校、科研院所与企业等机构合作开展机器人学科建设。

（六）开展示范性工程建设

与航天、消防局、地震局等合作，推动陆空多模态机器人系统航天和救援示范基地建设，推动中国机器人救援行业指导标准制定。借助我国主导政府间合作战略与机构（“一带一路”、中非合作战略、上海合作组织、亚洲基础设施投资银行等）推广我国陆空多模态机器人系统技术与相关产品，推动中国技术向全球布局。

参考文献

- [1] 唐怀坤. 国内外人工智能的主要政策导向和发展动态 [J]. 中国无线电, 2018 (5): 45-46.
Tang H K. Main policy orientation and development trends of artificial intelligence at home and abroad [J]. China Radio, 2018 (5): 45-46.
- [2] 张佳林, 熊大顺, 毛子夏, 等. 新型陆空两栖平台技术与趋势 [J]. 汽车工程学报, 2019, 9(5): 332-341.
Zhang J L, Xiong D S, Mao Z X, et al. Technology development and trends of state-of-the-art air-ground amphibious platforms [J].

- Chinese Journal of Automotive Engineering, 2019, 9(5): 332–341.
- [3] 陶永, 王田苗, 刘辉, 等. 智能机器人研究现状及发展趋势的思考与建议 [J]. 高技术通讯, 2019, 29(2): 149–163.
Tao Y, Wang T M, Liu H, et al. Insights and suggestions on the current situation and development trend of intelligent robots [J]. Chinese High Technology Letters, 2019, 29(2): 149–163.
- [4] 蔡华悦, 未志元. 人工智能在各军事强国的发展 [J]. 国防科技, 2017, 38(5): 12–16.
Cai H Y, Wei Z Y. Development of artificial intelligence in major military forces [J]. National Defense Science & Technology, 2017, 38(5): 12–16.
- [5] 刘金国, 张学宾, 曲艳丽. 欧盟“SPARC”机器人研发计划解析 [J]. 机器人技术与应用, 2015 (2):24–29.
Liu J G, Zhang X B, Qu Y L. Analysis of european “SPARC” robot R&D program [J]. Robot Technique and Application, 2015 (2):24–29.
- [6] 赵淑钰. 人工智能各国战略解读:日本机器人新战略 [J]. 电信网络技术, 2017 (2): 45–47.
Zhao S Y. Artificial intelligence strategy interpretation: New robot strategy in Japan [J]. Telecommunications Network Technology, 2017 (2): 45–47.
- [7] 张扬军, 钱煜平, 诸葛伟林, 等. 飞行汽车的研究发展与关键技术 [J]. 汽车安全与节能学报, 2020, 11(1): 1–16.
Zhang Y J, Qian Y P, Zhuge W L, et al. Progress and key technologies of flying cars [J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2020, 11(1): 1–16.
- [8] 夏红梅, 张欣景, 胡训强. 国外陆空两栖平台发展研究 [J]. 舰船电子工程, 2017, 37(4): 18–20.
Xia H M, Zhang X J, Hu X Q. Development of foreign air-ground amphibious platform [J]. Ship Electronic Engineering, 2017, 37(4): 18–20.
- [9] 《机器人技术与应用》编辑部. 解读《机器人产业发展规划(2016—2020年)》[J]. 机器人技术与应用, 2016 (3): 23–27.
Editorial department of *Robot Technique and Application*. Interpretation of *Robot industry development plan (2016–2020)* [J]. Robot Technique and Application, 2016 (3): 23–27.
- [10] 高峰, 郭为忠. 中国机器人的发展战略思考 [J]. 机械工程学报, 2016, 52(7): 1–5.
Gao F, Guo W Z. Thinking of the development strategy of robots in China [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(7): 1–5.
- [11] 汪洋, 徐彬, 项昌乐. 涵道式陆空车辆空中飞行品质分析 [C]. 上海: 2016中国汽车工程学会年会, 2016.
Wang Y, Xu B, Xiang C L. Analysis of air flight quality of ducted land and air vehicles [C]. Shanghai: 2016 China Society of Automotive Engineering Annual Meeting, 2016.
- [12] 罗连发, 储梦洁, 刘俊俊. 机器人的发展: 中国与国际的比较 [J]. 宏观质量研究, 2019, 7(3): 38–50.
Luo L F, Chu M J, Liu J J. The development of robots: comparison between China and the world [J]. Journal of Macro-quality Research, 2019, 7(3): 38–50.