

2025 年度拟提名陕西省自然科学奖项目公示内容

一、项目名称

空间多域融合精细作业理论及其应用

二、提名者及提名意见

提名者：陕西省教育厅

提名意见：

该成果围绕在轨服务及星表作业基础理论与应用问题，揭示了特征匹配与测量定位的耦合影响机理及空间机器人动力学耦合机理，提出了视觉信息与环境约束融合的作业状态感知理论、融合操控能力映射的任务递阶分解与协调灵巧耦合规划方法、模型精确补偿的预设性能安全柔顺控制方法，形成了测量-感知-任务融合、任务-运动-轨迹规划融合、能力-安全-操控融合的多域融合空间精细作业理论，实现了空间作业的精准性、灵巧性、柔顺性与可靠性要求，推动了在轨服务及星表作业领域的理论发展。研究成果选题准确，研究起点高，理论上有创新，发表的论著国内外引用率较高，受到国内外学术界的好评和认可，对相关研究有引领和示范作用，有重要的学术价值和理论意义，对学科建设和经济社会发展有重要的指导作用。

成果材料齐全、规范，无知识产权纠纷，人员排序无争议，符合陕西省自然科学奖提名条件。特提名为陕西省自然科学二等奖。

三、项目简介

该项目属于图像处理，飞行器控制、导航技术，机器人控制领域。

研究背景：面向我国科技创新 2030-重大项目“深空探测及空间飞行器在轨服务与维护系统”，利用空间机器人开展精细作业是完成在轨维修、碎片清理、组装建造、星表采样等多样化任务的关键支撑手段，是世界航天科技发展与应用的前沿，决定了我国在未来国际航天领域的占位。中国国家航天局、美国国家航空航天局、欧洲航天局、日本宇宙航空研究开发机构等国内外航天科研院所纷纷在各类调研报告和发展白皮书中指出，空间精细作业是未来航天科技发展与应用的关键，相关基础理论与方法亟待突破。

空间精细作业具有任务安全可靠度高、作业灵巧精准度高、管控智能融合度高等特点与要求。然而，空间环境恶劣复杂、作业任务需求多变、信网认知多域并存，使得开展空间精细作业面临三大难题：一是非结构环境中精确测量难，空间光照/温度复杂多变、目标构型/地形无法预知，导致对作业对象和环境的精确测量极具挑战；二是复杂时空下安全作业规划难，空间精细作业涉及到任务层与运动层的耦合规划，如何在时空交叠、动态安全、资源有限等动态多约束下快速生成作业任务序列与运动参考轨迹是航天领域的一大挑战；三是复杂模型特性下精准控制难，作业过程中涉及刚柔接触变形、拓扑动态时变、测

量/模型不确定等问题，极易引发控制失稳甚至导致任务失败。

现有的国内外空间操控与作业方法研究，主要局限于“以功能模块为主导”的研究思路，将感知-规划-控制分割为单独的功能模块进行研究，未充分考虑空间作业环境、目标、任务的复杂多变性及功能间的耦合和一体化需求，无法满足未来航天科技发展与应用对空间精细作业的要求。项目团队颠覆了上述传统空间作业体系的局限，以“多域融合”为总体思想，创立了视觉信息与环境约束融合的作业状态感知理论，实现了“信息-环境-动作”的融合感知；揭示了空间机器人动力学耦合新机理，实现了“能力-任务-运动”的融合规划；发展了无模型预设性能控制理论和方法，实现了“运动-安全-性能”的融合控制。系统性解决了空间精细作业“测得精、调得快、控得准、融合好”等一系列关键科学问题。

科学发现与创新成果：自 2013 年起，在国家 863 计划、国家自然科学基金等项目资助下，围绕空间精细作业“测得精、调得快、控得准、融合好”等关键科学问题与发展需求开展深入研究，取得了具有重要科学意义和国际影响的创新性成果。

1) 针对空间非结构化环境中复杂作业过程的精细感知难题，提出了利用环境约束辅助减小作业状态不确定度的方法，揭示了特征匹配与测量定位的耦合影响机理，创立了视觉信息与环境约束融合的作业状态感知理论，实现了空间精细作业的信息-环境-动作融合感知，空间作业测量导引精度达毫米级。

2) 针对受限空间内复杂时序与能力约束下的灵巧规划难题，揭示了空间机器人动力学耦合新机理，发现了提升目标状态估计实时性的 Jet Transport 机制，提出了离散任务约束逐级松弛的任务递阶分解与协调灵巧运动耦合规划方法，实现了空间精细作业的能力-任务-运动的融合规划，使空间作业规划效率提升了一个数量级。

3) 针对空间模型特性不清、臂座耦合影响下的精准控制难题，发现了性能包络影响控制特性的规律，发展了无模型预设性能控制方法，提出了环境交互场景下的安全柔顺控制理论，构建了空间作业动力学精准辨识与操控体系，实现了空间精细作业的运动-安全-性能融合控制，使空间作业控制精度提高了 12 倍。

科学价值与同行引用评价：项目团队在 IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Syst., IEEE Trans. Cybern., Aerosp. Sci. Technol., Nonlinear Dyn., ISA Trans.等宇航、控制领域的顶级期刊发表高水平学术论文 108 篇，6 篇代表性论著论文得到美、英、德、日、中等 21 个国家学者的积极引用，Web of Science 他引 306 次，Scopus 他引 335 次。德国国家工程院院士、汉堡大学张建伟教授评价“created a grasping algorithm”（创建了抓取算法）；美国自动控制委员会主席 Jurek Sasiadek 评价“optimization approach was proposed”（提出了新优化算法）；中国工程院周志成院士评价“an effective supplement to the direct capture capability of space robot”（可有效提升空间机器人抓捕能力）；此外，项目成果受到航天领域

著名专家英国 Surrey 大学机器人工程主席 Mini C. Saaj 教授、国际空间站 Canadarm 机械臂技术负责人 Ou Ma 教授、加拿大航天局首席科学家 F. Aghili 教授，以及吴伟仁院士、曹喜滨院士、段广仁院士等引用和正面评价。探月与航天工程中心、北京空间机电研究所（508 所）、上海航天控制技术研究所（803 所）、航天系统部测控处、西安卫星测控中心等研究机构在各自型号任务和试验研究中多次应用项目成果。共授权发明专利 24 项。

研究成果应用：1)项目成果成功应用于人类首次月背巡视（嫦娥 4 号）、我国首次月面采样任务（嫦娥 5 号），突破了非结构化环境感知、纹理匮乏图像匹配、复杂光照滤除、天地协同任务运动规划与精细作业控制等难题，为我国月面探测任务的成功实施提供了理论和技术支撑；2)成功应用于高轨新技术试验卫星，解决了人在回路的机械臂操控、空间机器人操控能力评估、受限空间内灵巧机械臂的安全最优运动规划等难题，推动了我国空间精细作业技术的发展；3)成功应用于上海航天控制技术研究所某重点预研型号任务，实现了多臂机器人对目标的同步/异步抓取，可实现对不大于 15 度/秒的自旋和翻滚非合作目标的稳定控制，有效解决了空间多臂机器人实时安全运动规划与控制问题，大幅提高了卫星空间操控精度和智能化水平。

人才培养与学科建设：项目执行期内，第一完成人担任航天飞行动力学技术国家级重点实验室副主任。第二完成人入选陕西省“青年科技新星”、军委科技委青年托举人才计划。第三完成人获得 2021 年中国航天贡献奖，入选战略支援部队青年科技英才。第四完成人受聘国家 863 计划航天航空技术领域重大项目专家组成员、航天飞行动力学技术国家级重点实验室学术委员会委员。项目团队形成了空间智能操控和空间科学技术应用研究新方向，推动了航空宇航科学与技术学科的发展。

四、客观评价

该成果由项目主要完成人自主独立创建与发展，对空间机器人、在轨服务与维护、深空探测等领域的研究起到开创性引领和推动作用，具有十分广泛的学术影响，得到了大量高度评价，引用期刊包括 IEEE T SMC、IEEE T Robot、AST、JGCD、航空学报等国内外控制、宇航领域顶级期刊。

针对重要科学发现 1 的典型学术评价：项目团队提出了视觉信息与环境约束域融合的主动感知理论框架，日本东京大学、大阪大学，德国汉堡大学，国内清华大学、中科院自动化所等知名科研机构对该成果的重要意义做出了客观评价。德国国家工程院张建伟院士在其专著（Tactile Sensing, Skill Learning, and Robotic Dexterous Manipulation, Academic Press, 2022）中评价该成果通过对环境约束域分析建模，创立了融合视觉的三维物体抓取方法（“created a vision-based 3-D grasping algorithm for grasping 3-D objects”）；郑南宁院士（IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Syst., 2021, 51: 3014-3025）评价该成果发展了基于三维模型的机器人抓取作业方法（“robotic grasping methods are developed based on three-dimensional models”）。东京大学 Kanehiro F.教授（IEEE Trans. Robot., 2021, 37: 166-184）评价该成果融

合了环境约束域规划稳定抓取作业 (“used the attractive regions of an object to plan stable grasps”)。中科院自动化所总工程师徐德研究员 (Int. J. Adv. Robot. Syst., 2019: 1-15) 评价该成果极大地提高了抓取操作的灵活性和可靠性 (“dramatically increases the flexibility and reliability”)。国家杰出青年基金获得者、IEEE fellow 孙富春教授 (SCI. CHINA: Info. Sci., 2014, 57: 1-11; IEEE Trans. Cyber., 2017, 47: 4509-4520) 评价该成果能够根据目标状态自主规划抓取策略 (“grasp planning strategies are established corresponding to the object model”), 对动态未知环境中的机器人感知与操作起到非常重要的作用 (“play very important role for robot perception and manipulation in dynamic or unknown environment”)。针对空间连续作业中的视觉测量引导问题, 提出了图像多尺度特征传递与测量校验分析理论, 解决了空间复杂光照引起特征随机失效影响下的持续精确测量的难题。探月工程总设计师吴伟仁院士评价该成果形成的专著是国内**第一本**介绍月面遥操作中计算机视觉技术的专著, 系统阐述了空间操作中有关计算机视觉的理论、方法和技术, 学术性强, 方法研究系统深入, 对航天测控领域具有重要参考价值。该成果获哈尔滨工业大学、南京航空航天大学等单位引用, 采用该书提出的多尺度特征提取及目标识别定位算法在应用中取得很好的效果 (“通过将极值点周围的采样点进行曲线拟合, 构建相应的拟合函数, 精确求解关键点的位置与尺度”)。

针对重要科学发现 2 的典型学术评价: 项目团队提出了中心式的基于改进智能优化算法的自主任务规划和重规划方法, 克服了复杂空间任务所面临的多子系统约束耦合、复杂任务逻辑序列、有限通信拓扑架构等难题。哈尔滨工程大学水声工程学院院长乔钢教授 (IET Radar Sonar Navig., 2022, 16: 501-514) 指出该成果可大幅降低状态估计的在线计算压力 (“save huge amount online computing resources”)。南京航空航天大学李爽教授 (Aerosp. Sci. Technol., 2021, 109: 106446) 指出该成果可用于单/双臂空间机器人系统, 能够获得全局最优解 (“obtain the global optimal solution”)。周志成院士 (Adv. Space Res., 2020, 66: 951-962) 认为该成果用于空间碎片消旋, 可有效提升 (“an effective supplement”) 空间机器人的直接抓捕能力。我国首个空间机器人重大项目任务总师梁斌教授在论文 (Acta Astronaut., 2020, 167: 189-200) 中大量引用了该成果相关工作, 并在此基础上开发了冗余空间机器人任务与运动规划的多目标优化方法, 可有效地解决多个体、多任务的自主规划问题。针对空间机械臂与其基座之间存在动力学耦合效应, 提出了评估空间机器人动力学耦合程度与机械臂操作能力的两种新测度: **动力学耦合因子与动力学操作椭圆**。英国 Surrey 大学机器人工程主席 Mini C. Saaj 教授 (Adv. Space Res., 2020, 65: 2247-2262) 进行了大篇幅的介绍 (“The coupled dynamics translate into the fact ...”), 并以此研究为基础, 建立了全新的基于微小卫星+机器人的控制体系。在空间机器人能力映射分析基础上, 系统地提出了空间机器人运动规划体系。美国自动控制委员会主席、Automatica 和 J. Gui. Cont. Dyn. 副主编 Jurek Sasiadek 教授 (Multibody Syst. Dyn., 2020, 50: 71-96) 指出多臂机器人相比单臂机器人作业的高效优势 (“more efficient”), 并引用该成果作为双

臂协调轨迹规划的典型案例。段广仁院士 (Int. J. Control Autom. Syst., 2018, 16: 2103-2113) 将该类方法作为一类独具优势方法进行了推广 (“a novel and natural choice”), 高度评价了该方法的三大优势: 可同步调整位姿、无需燃料消耗、伺服控制性能保证跟踪精度优异, 并以此方法为基础, 构建了新的空间机器人位姿稳定自适应控制方法。

针对重要科学发现 3 的典型学术评价: 项目团队提出了无模型、低复杂度的预设性能控制理论, 摆脱了传统控制方法对于系统模型参数与外部扰动的依赖, 并且控制指令的生成不需要耗时的迭代运算, 在此基础上发展了预设性能控制与自适应动态规划方法的融合框架。北京航空航天大学胡庆雷教授 (航空学报, 2022, 43(10): 527351) 指出该成果 “无需对模型参数和干扰进行先验估计, 能够保证系统满足预设的暂稳态性能要求”。曹喜滨院士 (Aerosp. Sci. Technol., 2021, 112: 106667) 肯定了该成果在抑制姿态误差和角速度误差方面的效果 (“can constrain the attitude and angular-velocity errors of the spacecraft”), 并在该方法框架下引入准滑模控制方法与神经网络工具, 形成了一种适用于航天器机动的鲁棒控制方案。哈尔滨工业大学马广富教授 (Nonlinear Dyn., 2019, 96: 1909-1926) 评价该成果适于解决高性能要求的控制问题 (“the control problems with high-performance specifications”), 并进一步探索了预设性能控制方法在挠性空间结构振动抑制方面的应用。加拿大航天局首席科学家 F. Aghili 教授 (J. Guid. Control Dyn., 2020, 43: 981-988) 充分肯定了用于空间机器人开展消旋与协调控制任务的有效性 (“detumbling strategy and coordination control of kinematically redundant space robot after capturing a tumbling target was proposed”)。新加坡工程院院士 Shuzhi Sam Ge (IEEE Trans. Fuzzy Syst., 2022, 30: 5116-5127) 评价该方法有良好的前景, 可实现用户指定的跟踪性能 (“a promising way to achieve user-specified tracking performance”)。项目团队独立提出的事件驱动的预设性能控制方法, 能够大幅降低控制律的更新周期, 减缓执行器的老化, 属于控制领域中的探索性工作 (Neurocomputing, 2018, 315: 310-321)。曹喜滨院士和段广仁院士指出 (J. Frankl. Inst., 2019, 356: 9474-9501), 传统时间驱动的控制方式对信号传输频率和功耗要求较高, 不符合即插即拔模块化航天器的发展趋势, 有必要发展事件驱动的先进控制策略 (“great practical value”)。

工程应用及评价: 项目成果应用于**人类首次月背巡视、我国首次月面采样任务**、高轨新技术试验卫星、重点预研型号等操控作业任务, 实现了多域融合条件下测量导引精度、任务运动规划效率、作业控制精度的大幅提升, 满足了空间机器人精细作业的灵巧性、柔顺性与可靠性要求, 受到探月与航天工程中心、航天系统部测控处、北京空间机电研究所、上海航天控制工程研究所、西安卫星测控中心等工程应用单位的高度评价, 应用效果十分突出, 提升了我国空间精细作业能力, 对我国争取与维护空间利益, 占领高边疆具有重大的战略意义。

五、代表性论文专著目录（不超过 8 条，其中代表性论文不超过 5 篇，代表性专著不超过 3 部）

序号	论文专著名称	刊名	作者	年卷 页码	发表时间	通讯作者	第一作者	国内作者	他引总次数	检索数据库	知识产权是否归国内所有
1	Vision-based 3-D grasping of 3-D objects with a simple 2-D gripper	IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems	Chuankai Liu, Hong Qiao, Jianhua Su, Peng Zhang	2014 年 44 卷 605-620 页	2013 年 7 月 3 日	Hong Qiao	Chuankai Liu	刘传凯、乔红、苏建华、张鹏	44	Scopus	是
2	Jet transport particle filter for attitude estimation of tumbling space objects	Aerospace Science and Technology	Chuan Ma, Zixuan Zheng, Jianlin Chen, Jianping Yuan	2020 年 107 卷 106330 页	2020 年 11 月 11 日	Zixuan Zheng	Chuan Ma	马川、郑子轩、陈建林、袁建平	11	Scopus	是
3	Coordinated trajectory planning of dual-arm space robot using constrained particle swarm optimization	Acta Astronautica	Mingming Wang, Jianjun Luo, Jianping Yuan, Ulrich Walter	2018 年 146 卷 259-272 页	2018 年 3 月 9 日	Jianjun Luo, Jianping Yuan	Mingming Wang	王明明、罗建军、袁建平	106	Scopus	是

4	Low-complexity prescribed performance control for spacecraft attitude stabilization and tracking	Aerospace Science and Technology	Jianjun Luo, Zeyang Yin, CaishengWei, Jianping Yuan	2018 年 74 卷 173-183 页	2018 年 2 月 2 日	Jianjun Luo, Zeyang Yin	Jianjun Luo	罗建军、殷泽阳、魏才盛、袁建平	88	Scopus	是
5	Detumbling strategy and coordination control of kinematically redundant space robot after capturing a tumbling target	Nonlinear Dynamics	Mingming Wang, Jianjun Luo, Jianping Yuan, Ulrich Walter	2018 年 92 卷 1023-1043	2018 年 8 月 2 日	Jianjun Luo	Mingming Wang	王明明、罗建军、袁建平	80	Scopus	是
6	月球车遥操作中的计算机视觉技术	国防工业出版社	王保丰, 刘传凯	/	2016 年	刘传凯	王保丰	王保丰、刘传凯	6	知网	是
合 计									304		

六、主要完成人情况（不超过 6 人）

姓名	排名	行政职务	技术职称	工作单位	完成单位	对本项目贡献
王明明	1	重点实验室副主任	副教授	西北工业大学	西北工业大学	对发现点(2)(3)做出了重要贡献，代表性论著 3、5。
郑子轩	2	空间操作技术研究所副所长	副教授	西北工业大学	西北工业大学	对发现点(2)(3)做出了重要贡献，代表性论著 2。
刘传凯	3	无	高工	北京航天飞行控制中心	北京航天飞行控制中心	对发现点(1)(2)做出了重要贡献，代表性论著 1、6。
罗建军	4	无	教授	西北工业大学	西北工业大学	对发现点(2)(3)做出了重要贡献，代表性论著 3、4、5。

七、主要完成单位情况（不超过 3 个）

完成单位	排名	对本项目主要贡献（限 600 字）
西北工业大学	1	为解决空间精细作业中的规划与控制难题，组织成立了项目研究团队，开展了任务递阶分解的作业复杂逻辑与动作时序解耦生成、基于操控能力映射的协调灵巧运动规划、模型精确补偿的预设性能安全柔顺控制理论与方法研究；结合具体的航天型号任务，开展了空间精细作业的技术攻关与地面验证等前沿工作。单位为本项目研究的顺利进行和成功应用提供了充分的理论、技术以及研究人力支持，为我国高轨新技术试验卫星、非合作目标交会与抓捕操控集成实验系统、大型航天器在轨操控地面实验系统等任务的圆满完成提供了有力支撑。
北京航天飞行控制中心	2	为解决空间复杂环境中精细作业的精确测量与感知难题，组织成立了项目研究团队，开展了视觉信息与环境约束融合的机构稳定抓取作业理论，以及机器人操作环境约束下的视觉主动感知方法研究；结合具体的航天型号任务，进一步开展了月面采样机械臂、空间站机械臂遥操作等任务。单位为本项目研究的顺利进行和成功应用提供了充分的理论、技术以及研究人力支持，有力保证了我国月球探测、非合作目标交会与抓捕操控集成实验系统等任务的圆满完成。

八、完成人合作关系说明

项目负责人王明明与项目参与人郑子轩、刘传凯、罗建军隶属于航天飞行动力学技术重点实验室，航天飞行动力学技术重点实验室是由北京航天飞行控制中心和西北工业大学联合设立的国家级重点实验室。王明明担任重点实验室副主任，罗建军为研究团队负责人，王明明、郑子轩、刘传凯为团队主要成员。第一完成人、第二完成人和第四完成人同属西北工业大学空间操控技术创新研究团队。

第二完成人为项目团队的青年骨干教师，与第四完成人合作发表论文 2 篇，申请国家发明专利 2 项；与第一、第四完成人共同开展了重要科学发现二中的航天器在轨操控规划研究，并成功应用于我国实践系列卫星型号任务。

第三完成人与第一完成人合作开展研究并取得系列成果，与第一、第四完成人合作发表论文 4 篇，申请国家发明专利 4 项。与第二完成人合作承担科研项目 1 项。

第四完成人为第一、第二完成人团队的学科带头人，与第一完成人合作开展相关研究工作。已合作发表高水平论文 52 篇，合作申请国家发明专利 45 项，合作承担科研项目 12 项。