



他们接力给康复机器人“提智”

■本报记者 赵广立



患者体验假肢手。 受访者供图

如果你有幸接触并了解国家自然科学基金联合基金项目“面向肢体功能重建的智能康复机器人基础理论与关键技术”(以下简称联合基金项目)，你可能会被这两件样机产品所吸引。

一件是一只不足1千克、“长”着五根灵巧手指的假肢手。它能通过采集分析佩戴者的肌电信号，实现佩戴者对假肢手的自主控制，比如做出握拳、放松、伸展、抓取小球等动作，还能比出“OK”“好的”手势。

另一件是一套“基于下肢运动想象和机器人辅助的脑控自主行走训练系统”。患者戴上脑电帽，靠自己的意念想象行走、上楼梯、下楼梯等动作，就能驱动这套系统自主地完成行走、上下阶梯。

“这两件样机是项目组为帮助两类失能患者而长期钻研的成果，凝聚着大家多年的心血。”联合基金项目负责人、中国科学院自动化研究所(以下简称自动化所)研究员侯增广对《中国科学报》说。

“一类是因中风、脊椎损伤导致神经损伤后有肢体功能障碍的患者，一类是因截肢等原因缺失肢体的患者。我们希望应用目前先进的技术帮助他们重建肢体功能、重拾生活的信心和快乐。”团队成员、自动化所研究员王卫群告诉《中国科学报》，近年来他们在联合基金项目支持下，与国内多家科研单位强强联合，实现了这两类设备相关的多项理论和技术突破。

康复机器人，想说“智能”不容易

在“万物皆可智能”的今天，康复机器人想要变智能，却不是一件容易的事。

早在20世纪80至90年代，西方国家已开始探索康复机器人的雏形。在那之后的一二十年里，康复机器人主要靠机械臂等辅助手段，通过简单的机械结构帮助患者完成肢体被动训练。受限于当时的传感器技术与控制算法，设备仅能实现单一轨迹的重复运动，与“智能化”相去甚远。

20年前，侯增广投身医工交叉领域，希望将自动化技术与医学相结合，用于治病救人。在让康复机器人变得更加智能这条路上，他探索了很久。据了解，侯增广团队在康复机器人

领域探索10年后，才发表了在该领域的第一篇国际期刊论文。

但他坚定地认为“这条路能走通”。在他看来，人工智能和机器人是相伴而生、相辅相成的。机器人是验证人工智能最好的平台，同时也是检验人工智能算法、方法的一个有效工具。

“最早的康复机器人主要是帮助患者行走，如果我们把器具看作是初始的前端，从趋势上可以预见机器人将能非常有效地代替人类进行康复治疗工作。一方面是恢复运动能力，另一方面是帮助生活不能自理的人或生活能力下降的患者恢复并保持他们原来的生活能力，甚至提高他们的生活质量。”在一次报告分享中，侯增广如是说。

2011年，王卫群主动结束了自己5年“电子工程师”的生涯，来到自动化所从侯增广攻读博士学位。他说，自己当时是被康复机器人的研究意义和技术挑战所吸引。

“早期的康复机器人并不能说是智能的。我们的项目名称加上‘智能’两字的最重要原因是让患者主动参与到康复训练或日常活动中来，这需要突破许多智能化技术。”王卫群解释说，“主动参与的意思是，患者有想法

的时候，我们得把他的想法识别出来；患者有异常状态，要能实时监控，机器人的状态也要随之调整。”

侯增广告诉记者，临床早有结论，患者主动参与康复训练，与被设备带着训练是有区别的。已有实践证明，引导患者“主动康复”的训练方式，远比被动力牵引更有效。

强强接力，铺平临床应用道路

为掌握“主动”，侯增广团队在联合基金项目支持下，联合国内5家优势单位通力协作，突破前沿智能化技术，并“集成”到康复机器人身上。

灵巧假肢手由这一领域有显著优势的3个研究团队通力合作研制完成。华中科技大学教授熊蔡华团队基于机构仿生学，做出拥有16个“关节”，5个驱动器的假肢手主体，它的五指既能独立运动也可协调运动，可模拟人类的日常运动功能；中国科学院深圳先进技术研究院研究员李光林团队主攻“肌肉电信号采集”，他们从蜘蛛丝中汲取灵感，研制了超薄、超贴肤的柔性可拉伸电极和微针电极阵列，能可靠采集肌电信号；李光林团队还联手时任中国科学技术大学教授的李智军团队，为假肢手开发“神经接口芯片”，给假肢手装上“大脑”，使其能“读懂患者想法”，精准响应患者的运动指令。

王卫群介绍，在下肢康复智能机器人系统中，团队增加了“脑电信号”作为识别患者意图的信号来源。

“在这套系统中，我们引入了脑机接口技术，提出了基于功能电刺激和虚拟现实反馈的运动想象脑机接口新范式。”他告诉记者，这款机器人集成了人机交互显示屏，能实时播放跟踪患者运动的虚拟现实场景；患者需要根据虚

拟场景的变化进行主动决策，如看到平地或台阶，决定自己要正常迈步还是要上下台阶。显然，脑电信号的处理在此过程中扮演的角色至关重要。为此，团队专门提出了面向脑电信号高效解码的一系列算法，以实现对截瘫患者下肢运动意图的在线准确解码。

“通过整合生物电信号(肌电、脑电等)和机械运动信号、环境感知信号，我们建立了多维度信息融合模型，实现人体运动意图的快速精确定识别。”侯增广介绍，团队同时研发了自适应控制算法与人机协同控制策略，避免机器人“过度辅助”，引导形成“患者主导”的训练模式，从而显著提升人机交互的柔顺性与安全性。

此外，联合基金项目合作单位国家康复辅具研究中心、华中科技大学附属同济医院负责为假肢手、下肢康复智能机器人系统的功能和性能进行检测和临床验证。

“目前相关样机已经在数十例患者身上试用，得到了医患一致好评。”王卫群告诉《中国科学报》，有一名卧床半年的女孩在试用了下肢康复智能机器人后说，她重新找回了自己上下台阶的记忆。“我们希望样机从实验室走出去，在临幊上用起来。”

联合基金让团队“有驱力去专注做事”

“联合基金项目的支持让大家能够专注于

研发。”王卫群说，假肢手以及智能康复机器人的设计及制备，属于复杂系统的开发，涉及的学科、团队、技术路线繁多，“需要倾注很多精力”，特别“需要沉下心来”去做研发工作，而联合基金项目管理不过多干预研究过程，在技术路线探索上赋予一定自由度和包容性，这使得各合作团队都能够“有驱力去专注做事”。

他对记者说，引入脑机接口技术手段实现对患者意图的实时在线识别，从一开始就是一只“拦路虎”。

“我们平时看到的脑机接口信号，大多是在静态下获取的，没有其他干扰；但在康复机器人上，患者是运动的，人在运动中会产生多种生理信号，例如眨一下眼睛、扭一下脖子都会产生明显的肌电信号，会显著干扰脑电信号的识别。”王卫群说，在这种情况下，要可靠解码脑电信号是非常难的。“光是没有稳健的支持，我们恐怕没法沉下心来去解决这类难题。”

作为项目负责人，侯增广认为联合基金项目的支持恰逢其时，对推动我国康复机器人领域发展具有重要意义。“康复机器人在中国有很大的市场和商业契机。但我国起步较晚，还缺乏成熟的产品。康复机器人将来的发展趋势有很多主线，而基于人机交互的控制是康复机器人发展的一条重要主线。”

域、跨领域、跨部门的协同创新提供了哪些制度保障或激励机制？

侯增广团队：相对而言，联合基金项目在管理上不过度干预团队的研究过程，只要是有利于实现最终研究目标的调整都是被允许的，大家在各自课题下能更好地去挖掘潜力、解决难题。

《中国科学报》：对于未来进一步优化联合基金机制、促进更多“从0到1”的突破，你们有哪些建议？

侯增广团队：我们认为很多科研探索都是无法提前精确规划的，如果考核指标定得太精细，反而可能妨碍创新。

用最小成本让万颗卫星高效互联

■本报见习记者 李媛

从2019年开始，随着我国卫星发射数量呈指数级增长，西安电子科技大学智能宽带无线通信网络科研团队在国家自然科学基金企业创新发展联合基金项目“面向跨域系统的递阶动态资源调度理论和方法”(以下简称企业创新发展联合基金项目)的支持下，历经从变图、压缩图到超图的理论探索，最终实现了对万颗卫星网络资源的全局表征和智能调控。



盛敏(右三)与学生进行技术交流。 受访者供图

背10个单词的能力，但由于记忆方式不科学，导致1分钟只能背2个，而在不断强化记忆下，他觉得能记住4个就很好了。但是，如果他知道了自己能力边界及影响记忆效率的关键因素，就可以用科学的方法不断优化自己的学习方式，从而逼近10个。“我们的技术就是要让系统资源利用率不断逼近理论极限。”盛敏解释道。

面对成像卫星资源闲置与传输资源短缺并存的现象，团队开创的跨域管理技术可实现不同物理资源的智能协调，最大化发挥卫星的整体价值。

攻克克难 突破技术壁垒

然而，企业创新发展联合基金项目在进行过程中面临种种困难。“整个技术攻关过程就像是黑暗中的探索，无先例可循，全靠持续学习、深度思考和顽强拼搏。”盛敏如此形容研发历程。

对此，西安电子科技大学教授周笛深有感触。“在立项的时候，我们觉得技术方案写得再清晰，按照逻辑是完全能够实现的。”周笛介绍，团队当时使用了时间扩展图去刻画网络资源，用表征的方式将卫星的资源状态清楚罗列。“申请完企业创新发展联合基金项目就发现，按照60颗卫星的解决思路，已经不能满足前沿技术发展了。”周笛坦言，在将理论成果落实到大规模部署场景时，随着卫星互联数量的增长，遇到了存储效率瓶颈。

尝试，失败，再尝试，再失败……大半年时间过去了，在尝试了多种方法无效的情况下，周笛偶然在一篇跨学科的文章中找到思路。

按照卫星轨道周期性变化运动，如果有100颗卫星，星间链路连接关系矩阵的空间是 100×100 ，那么就需要存储这么大的矩阵来表征星间链路状态信息。如果网络的规模再增大，比如有上万颗星，那么所需要的存储空间势必会呈指数级增长，而卫星的存储资源有限，主要是用来存储有效数据的。周笛利用压缩感知的理论突破技术瓶颈，发现在2000颗卫星的规模下，存储空间占用相较于传统的时变图的方法压缩千倍以上。

“简单点说，就是利用卫星间的连接关系矩阵在频域上的稀疏性以及在空间上的旋转封闭性，设计出高效的跨域资源稀疏表征模型及算法，实现了低空间复杂度对大规模星座的变图的方法。”周笛举例说，如果一个人具备1分钟

资源精准表征。”周笛介绍。团队设计出了创新框架，其核心是让这些异构的星座通过地面中转以及星间链路互联互通，用最小的链路“成本”，实现星座的高效互联。

仿真平台研发同样波折重重。“我们开始想用一台计算机做模拟，但后来发现根本达不到1万颗卫星实时模拟的要求，即便是简化了也不行，最多只能到2000颗。”西安电子科技大学副教授白卫岗表示，尽管他们很快想到了多机级联，但随后发现虽然解决了规模性问题，仿真时间又成了大问题。

他举例说，改写代码里一句话，代价就是重新做一次仿真，但一次仿真就需要3至5天。“这不仅仅是科研问题，对未来整个卫星互联网测试、运维也是极大的挑战。仿真时间效率会导致整个系统看着是好的，但实际上并不好。”

查找文献、向同行请教、找商业公司……在做了大量调研后，团队发现，目前国内没有人能解决这个问题。“下定决心，靠自己做！”盛敏说。

基于仿真效率问题的深入分析，团队从两个关键方向另辟蹊径：首先，团队通过虚拟分组转移机制，每个传输分组分配一个标签，无论是卫星节点内的数据传递还是卫星间的分组交互，都可以在标签传递的同时模拟数据传

输过程，让仿真硬件处理能力集中于仿真过程，而不是数据搬移过程。

其次，团队利用层次化仿真资源循环技术，高效支持时钟级别的仿真资源并发挥操作，有效解决大规模网络仿真中业务突发强、并发事件多导致的处理速度问题。解决了关键核心问题后，团队很快设计出“面向跨域系统的大规模卫星网络仿真测试系统”。

原来一台机器只能做100多颗卫星的模拟，现在模拟能力提升两三倍。“只有把仿真系统的资源利用率提升，才能保证规模化实施。”白卫岗说。

手机连接卫星 即将照进现实

如何知道卫星网络的路由协议在空中好不好用？“大规模卫星网络仿真测试系统”可以完成这项任务。

“只要把协议放在仿真系统中，就能测出吞吐量、时延、故障、恢复时间等。”白卫岗介绍，通过该系统做验证，可以运用到卫星的前期设计中，也可以在发射前进行，再也不用等到迭代的时候去修正。

以往，这种验证大多使用国外的软件，但

在仿真测试的过程中，需要更换语言系统。“国产化后，仿真测试系统的语言跟实物语言体系一致，用起来更方便。”目前，这套系统已在卫星开发机构中得到验证。

“仿真效率的提高可以节省几个月的时间，不需要花费更多时间成本再去迭代。”白卫岗补充道。这套系统同时支持数字孪生应用，通过地面复现在轨卫星状态，实现故障提前预警。其核心在于通过算法预测系统未来状态，与服务端对比后持续优化。“科研攻坚时期虽困难重重，但团队展现出强大战斗力，成果超出预期。”盛敏表示，目前团队已形成从基础研究到平台实施的全产业链创新能力。

尽管该项目主要面向卫星建设和发展，但普通用户仍然可以期待。

随着空间网络发展，未来手机直接接入卫星资源终端。“我们的系统能精确测算手机指令传输时长和服务响应时间。”白卫岗表示，尽管现在说起来有点前沿，但相信很快就能变为现实。

周笛补充说，果农可以通过遥感卫星资源看到卫星拍摄的大片果园图片，实现远程监管；救灾人员在地面基站受影响后协调遥感卫星拍摄灾后情况，协同通信卫星提供实时灾害数据回传，背后都离不开团队的技术支撑。

为了进一步提升大规模卫星网络的仿真验证及评估效率，团队目前已经开展第二代仿真的研发工作。团队期望在保障仿真系统实时性的同时，进一步降低仿真系统对算力的需求，用较少的算力实现管理万颗以上的跨域卫星资源。

《中国科学报》：面对没有先例、没有指导的前沿技术探索，你们攻克克难取得了成功。面对青年科研人员，你有什么建议？

盛敏：如果你思考过，那么你就去行动，并继续思考。

每一件事情能够做成功是由很多要素决定的，要去学习别人的优点，将这些优点汲取到自己身上，再去消化，就会不断进步。

同时，年轻人要看长远，专注每天进步的0.01，累积起来可能就是很大的一个数。

《中国科学报》：面对没有先例、没有指导的前沿技术探索，你们攻克克难取得了成功。面对青年科研人员，你有什么建议？

盛敏：如果你思考过，那么你就去行动，并继续思考。

每一件事情能够做成功是由很多要素决定的，要去学习别人的优点，将这些优点汲取到自己身上，再去消化，就会不断进步。

同时，年轻人要看长远，专注每天进步的0.01，累积起来可能就是很大的一个数。