

DOI: 10.19816/j.cnki.10-1594/tn.2022.04.002

无人自主智能系统技术前沿和发展趋势

——访北京理工大学马宏宾教授

张莹^{1,2}, 李琼^{1,2}

(1. 北京市科学技术研究院信息与人工智能技术研究所 北京 100089; 2. 《微纳电子与智能制造》编辑部 北京 100089)

编者按:随着《中国制造 2025》的发布,我国将智能制造作为建设制造强国的有力手段。机器视觉作为人工智能领域的重要分支,在目标识别、产品检验、物体定位等方面得到广泛应用,对制造业的发展起到了重大促进作用。《微纳电子与智能制造》有幸采访到北京理工大学教授马宏宾,为读者介绍机器视觉和智能系统领域的研究现状,以及机械臂、工业软件开发和工程应用方面的实践经验,分析领域内的技术挑战及未来的关注方向,并对国际自主智能机器人大赛(International Competition of Autonomous Running Robots)企业命题赛及我国智能制造的发展提出建议。

关键词:智能系统;控制理论;机械臂;机器视觉;智能制造

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A **国家标准学科分类代码:**520

马宏宾,1978年生,2006年7月毕业于中国科学院数学与系统科学研究院。2009年8月至今为北京理工大学教授。IEEE及中国自动化学会高级会员。以“适应·学习·认知”为中心针对机器人、无人车、无人机及兵棋推演等智能系统开展多方面的研究。曾入选教育部新世纪优秀人才支持计划和北京市优秀人才资助计划,获霍英东高等院校青年教师奖、北京市自然科学奖、吴文俊人工智能科学奖、优秀科技成果大赛金奖、中国创新挑战赛优秀奖等奖励。担任信标委人工智能分委会委员,参与多项国家标准立项及研制。发表SCI/EI检索论文百余篇,与合作者出版多部专著及英文章节。受邀参与撰写中国控制理论战略报告自适应控制部分及《中国大百科全书》“自适应”词条。

《微纳电子与智能制造》:您在复杂系统与控制理论领域有许多深入的研究,请您简要介绍一下该领域的发展阶段和技术进展。对于研究中出现的控制理论与深度学习相结合的方法,请您谈谈对此种组合的理解。

马宏宾:复杂系统和控制理论的研究是在不同的背景下开展的,随着研究进展,研究领域逐渐交叉。在科学研究中,还原论是一种哲学思想,它认为复杂的系统、事务、现象可以通过将其化解为各部分



之组合的方法,加以理解和描述。复杂系统的有趣之处在于整体不等于各部分的简单叠加,即所谓的“1+1>2”。人们发现相互关联、相互作用的系统之间一旦耦合起来,即使每个个体都很简单,也可能产生一些在个体层面看不到的现象或规律,这就是涌现。自然科学和社会科学领域中有很多例子,人们意识到其中存在共性后,逐渐开展对复杂系统的专门研究。从整体上来讲,对复杂系统的研究体现了人类探

索科学技术的历程,从简单到复杂,从单一到多元,从具象到抽象,从实践到理论,再进一步指导实践。

复杂系统作为一个多学科交叉领域,其研究需要认识到两点:第一,系统本身由许多个体组成;第二,个体之间相互关联、相互作用,共同促进系统演化。复杂系统研究涉及多个领域,产生了许多重要的理论。John Holland 提出复杂适应系统理念,指出复杂系统具有适应性和不确定性,适应性是复杂性的根本,并且整个系统在解决问题时存在鲁棒性,即每个节点可能是脆弱的,但是通过节点间相互作用连接形成的大系统中,某些节点的脆弱性可能就不会对系统产生影响。该领域发展的代表性书籍有 *Complexity*、*Hidden Order*、*Emergence* 等。1998 年, Duncan J. Watts 和 Steven Strogatz 在 *Nature* 联合发表论文,提出了著名的“小世界网络”理论和 WS 小世界模型,社交网络中的“六度分隔”就是这一理论的典型应用。1999 年, Albert-László Barabási 和 Réka Albert 在 *Science* 发文,提出通过网络生长和偏好依附的模型,可以构建标度无关网络模型,网络节点的度分布满足幂律分布,本质上体现网络不同尺度上的自相似性,这一重要成果引发了后续的持续研究。我国许多前辈科学家在复杂系统领域也开展了卓有成效的工作,例如钱学森先生总结提出的开放的复杂巨系统理念,对我国许多科技工程和难题的突破都有重要影响。复杂系统的研究应该重点关注对象之间的关系,以及这些关系呈现出来的涌现。对于 ChatGPT,有专家从复杂系统涌现的角度来阐述大语言模型在模型参数与训练数据增加到一定程度所体现出的惊人能力。

始于不同的研究背景,控制理论最开始与复杂系统并无交集。人们在认识世界的过程中,意识到不仅要认识世界,还要去改造世界,并在改造世界的过程中逐渐形成了控制论,特别是控制理论。经典的控制论从输入输出关系来考虑,围绕线性系统,以单输入单输出为主,解决了非常多的工程问题。1948 年, Noebert Wiener 发表了革命性著作 *Cybernetics or the Control and Communication in the Animal and the Machine*,首次提出 cybernetics 一词,奠定了经典控制论的基石。Wiener 发现,研究不同背景的系统的关键是认识其背后的数学规律,对于不同的系统,分析输入和输出之间的关系,就有可能采用类似的数学模型。

控制论的范畴很大,但狭义控制理论的历史并不长。1960 年,卡尔曼开创了现代控制理论,将控

制论从经典控制论的范畴中解放出来。他提出,研究一个系统不仅可以聚焦于输入和输出之间的关系,还可以更加深入研究系统内部的机理,让“状态”成为连接输入和输出的桥梁。现代控制理论可以从抽象的角度研究控制系统,甚至不必考虑任何具体的背景,因此逐渐发展成为数学的理论。

在课程教学中,我们通常将系统视为已知内容去研究控制理论。但在实际应用中,控制理论的研究重点在于如何在系统未知或部分未知的情况下精准稳定地控制系统,从而催生出自适应控制,研究如何在存在不确定性的情况下控制系统。

复杂系统和控制理论的一个典型交集在于多智能体系统 (multi-agent system) 模型及衍生出的研究,这是控制理论从研究单个系统到研究多个系统 (系统的系统) 范式的根本变化。控制理论关注个体和整体的关系,特别关注所谓的群体智能,如多智能体协同控制。协同控制的基本问题包括一致性控制、会合控制、聚结控制和编队控制等,其中后三者可视为一致性控制的推广与特例。多智能体系统达到一致 (状态最终趋同) 是实现协调控制的首要条件,国内外众多知名研究团队对此开展了大量工作。北京理工大学复杂系统智能控制与决策国家重点实验室 (现为自主智能无人系统全国重点实验室) 在陈杰院士的带领下,通过连续举办多年的多智能体论坛汇聚国内外专家学者开展交流合作,在无人自主智能系统方面进行探索并实现应用。我主要围绕具有不确定强耦合的多智能体系统展开研究,开拓了分散自适应控制与分散自适应滤波等研究方向。从理论研究到技术应用,离不开实际的应用对象。受益于付梦印院士的指引与指导,我们团队在参与研发无人车的过程中,针对背景中的不确定性问题,通过对实际对象的研究,充分利用可用信息和知识,以动态反馈来应对各种不确定性的不利影响。本人率领团队在该方向做了许多相关工作,荣获了 2021 年北京市自然科学奖与 2017 年吴文俊人工智能科学技术奖。

控制理论经过长期可靠的证明,可对系统进行理论分析和建模,而深度学习最大的缺点之一就是可解释性差,难以在实践中应用。将控制理论与深度学习结合,可以提高模型的可解释性,同时帮助创建高维复杂模型。尽管计算机领域和控制领域的研究背景不同,但在解决问题的思路存在很多相通和交叉融合之处。在计算机视觉领域,研究人员通过引入反馈机制来提升目标检测效果的研究就是一

个例证。控制理论和复杂系统的发展进程中,很重要的一点是系统存在不确定性,因此如何让系统更加稳定、不出问题,就受益于反馈作用。反馈作用与动态系统密切相关,闭环研究动态系统的关系,利用反馈可以指导下一步的学习。通过引入反馈机制,可以将控制理论与深度学习融合,取得很好的效果。实际上,在深度学习领域,LSTM、强化学习等都涉及到反馈机制,更基础的深度神经网络,特别是卷积神经网络的反向传播算法,也是基于反馈机制发挥作用的。受限于计算机领域的研究背景,很多人没有意识到其中已经包含了控制理论的思想。

从控制理论专家的角度来看,目前人工智能的很多研究成果还无法实现效果的稳定性和确定性,很多算法仍缺乏系统、深入的理论分析和数学证明。人工智能的基础理论,特别是数学基础部分,目前尚处于初级阶段,需要更多的关注,值得深入研究。未来,人工智能和控制理论、复杂系统的结合,特别是在模型可解释性方面的应用,还有很大的探索空间与涌现机理。

《微纳电子与智能制造》:您在无人车、机器人、无人机等智能系统上做了大量基础性及应用性研究工作,并且获得了许多奖项。作为自主智能无人系统国家重点实验室的一名骨干,请问您在研究过程中,遇到了哪些问题,是通过什么方式解决的?该领域目前仍然需要关注的难点是什么?

马宏宾:由于系统中存在未知的关键参数或结构,无人车、机器人等研究领域最大的困难是不确定性。我在博士期间师从郭雷院士,学习了自适应估计和控制。郭雷院士在系统科学、数学技巧和哲学思想方面的深邃思考,对我的研究生涯产生了根本性影响,也是我目前所有工作的思路源泉。在北京理工大学工作期间,付梦印院士对工程应用的深刻见解也启发我将数学理论融入工程实践来解决工程中的关键难题。在鼓励理工结合的思想指导下,针对智能系统的不确定性,我尝试融合数学思想、实际数据、问题特点、先验知识和对智能系统的认识以解决具体问题。例如,卡尔曼滤波是导航技术中的核心算法,但实际应用中往往不能提前确定模型的关键参数(如噪声的方差阵),从而提炼出一个待解决的理论问题。利用反馈思想,从系统不断产生的数据中动态估计噪声统计特性,催生出边估计边滤波的自适应卡尔曼滤波。再比如,对于人和机器人的交互和协作,提炼出数学模型后,发现存在许多未知参数和函数,故而引入自适应估计算法,对这些不确

定性进行估计。此外,控制系统中的很多问题归根结底都是优化问题。对此,在优化算法中引入自适应思想,对参数进行动态调整,加速收敛,提出自适应粒子群优化等新的优化方法。总的来说,研究中我更关注问题的结构特点,将其与数据、先验知识进行结合,从而更加关注可解释性、背后的机理和其中的不确定性,对系统做一定的评估和预测。

在环境恶劣、要求严苛的工业应用中,系统数据是多模态的,有各种各样的数据源、数据类型、噪声等。无人智能系统领域存在众多难点,有算法方面的限制,但更多的是实际系统的工程化问题。为了解决这些难点,既要求在算法上有新的见解和洞察力,还要求在物理系统上有更好的工程化理解,满足结构优化、场景任务需求,降低成本和功耗。因此,要以系统论的观点看问题,而非简单理解为机器学习问题,不能只关注单一指标,要从整体上看能否落地,能否真正发挥作用,解决问题。

《微纳电子与智能制造》:您带领团队自主设计了模块化、可组合、可定制的新型机械臂关节、多自由度机械臂等,请您简要介绍一下机械臂的工作原理及您做出的主要改进。

马宏宾:我们团队在机械臂领域有丰富的经验,主要涉及以下4个方面:

第一是机械臂本体的设计。机械臂构型基本都是固定的,但不同的应用场景对执行机构有不同的需求。因此,我们设计了模块化、可组合、可定制的机械臂关节,类似于乐高积木,可以灵活搭配来实现不同场景下的应用。此外,我们还组合了减速机和其他零部件,打造出轻量、小巧的关节,并将其产品化。

第二是控制器。机械臂最核心的技术之一是控制器。对企业调研发现,EtherCAT作为一个性能卓越的通讯协议是未来的发展趋势。因此,我们开发了基于EtherCAT的控制器,并将其产品化。此外,还基于实时Linux在嵌入式系统上实现了低成本、高灵活性的机械臂适配。

第三是智能化。为了让机械臂在实际应用中解决各种问题,我们开展了大量的工作,包括路径规划、运动控制等。例如,对于打磨机器人,通过3D相机形成点云,用算法进行自动建模,并确定如何打磨、如何生成轨迹以及打磨时如何进行控制。

第四是人机交互与协作。在2018年世界机器人大会双臂协作机器人比赛闭幕式上,我受邀做了关于协作机器人的报告。在日本东京举办的国际智能机器人与应用大会上,我受邀介绍了团队在人机

协作方面的工作,我们将自适应估计和自适应控制融入其中,让机器人能够理解人的意图并适应人的行为。

此外,我们还进行了一些机械臂建模相关的工作。即,给定一个机械臂,通过数据进行辨识,得出其DH参数。

《微纳电子与智能制造》:视觉是机器人感知环境的重要手段,机器视觉大幅提高了工业生产的自动化程度。请问目前常用的目标识别和检测算法有哪些?自然场景下的识别与检测应用还存在什么问题?需要关注哪些方向?

马宏宾:目前,已经有很多目标识别和检测的算法,比如目标检测中常用的YOLO系列算法。除了深度学习,还有一些传统的图像处理算法和机器学习算法可用于目标识别和检测。

现在人们普遍讨论的一个问题是计算机视觉入门容易,但实际应用很难,很多技术由于鲁棒性问题无法落地。真实场景与数据集图像之间存在偏差,导致有些算法在数据集上表现良好,在实际场景中却无法使用。自然场景中光照条件的变化很大,因此自然场景下的识别和检测的最大问题是鲁棒性和环境适应性问题。

根据研究经验,实际解决问题并不是依赖单一技术或单一算法的应用,而是要结合问题的特点、场景和要解决的任务,利用好已有的技术或设计全新的算法。因此,在实际应用中,需要通用性技术的基础上发展针对性技术来满足实际场景中苛刻的性能指标要求。我们团队有一个共享的技术池,其中应用到了前面提到的自适应估计和自适应优化的思想。我们从可用性和可靠性的角度出发,使用这些指导思想和自己开发的算法库,在具体场景中进行一定的定制,研发软件和设备来切实解决场景中的问题。

《微纳电子与智能制造》:产学研深度融合,能够强化目标导向,促进科技成果转化。对此,2022国际自主智能机器人大赛紧跟企业需求,设置了“焊缝识别”命题赛。未来,我们想要持续推进企业命题赛,更好地发挥其作用,请您对企业命题赛的设置给出一些建议,并谈谈如何对接企业需求的比赛内容,切实提升学生的工程实践水平。

马宏宾:这个比赛的初衷很好,并且从视觉切入也是一个不错的选择。视觉入门比较容易,参赛学生能够快速上手并锻炼能力。视觉作为一个重要领域,切入点非常丰富,有许多不同的需求。选手设计

的算法如果能够在来自实际场景的数据集上取得不错的成绩,就会有一定的应用价值。因此,可以一直坚持视觉这个方向,与更多企业对接,关注工业制造业中产品的质检、装配等。另外,如果与机器人结合,关注实际的可用性和泛化能力,实现柔性场景中的使用,虽然比赛难度会增加,但会更有意义。

总的来说,如果大赛能够更多地关联工业和企业的实际需求,解决一些行业中的痛点和难点,比如室外的自然条件、高速度、高精度等,将比在数据集上刷榜更有价值。

《微纳电子与智能制造》:我国智能制造应用推广的进展较为缓慢,与一些工业发达的国家相比仍存在较大差距,您认为我国智能制造全面提升的瓶颈是什么?您对产业发展有何政策建议?

马宏宾:智能制造是我国从工业大国走向工业强国的保障,得到了高度重视,但也面临着许多问题。

智能制造包含很多技术,如云层面的工业互联网。过去几年,国家非常重视云层面的发展,ERP、MES等技术已经得到推广。但在端的层面,特别是智能装备方面,我国与西方发达国家的差距仍然较为明显。企业有自动化需求,但针对具体的工艺缺乏现成设备,同时又不愿或无法承担研发成本。装备研发的前期投入和风险都较大,科研人员往往有心但无力承担。因此,智能装备的发展空间很大,但需要从政策方面解决这个困境。

为了实现智能制造的全面提升,需要大家沉下来,关注细分行业、领域,针对痛点和难点,顺应国家倡导的“专精特新”,整合多方政策资源,联合起来解决问题,共同促进整个产业链的发展。技术瓶颈并不是无法克服的难题,关键是能否沉下心来踏实干事,以及是否能够建立好产业链和供应链体系。

《微纳电子与智能制造》:您提到整合细分领域形成合力,能够真正推动装备的智能制造。从您熟悉的视觉检测领域,您能否讲一下还有哪些细化的环节是少有人做,或者是还有空间去做的?

马宏宾:视觉领域还有很多研究方向值得科研人员探索。例如,工业相机的性能与人眼相差很远,目前市面上的相机种类很多,但同质化比较严重。很多细分场景仍有一些需求对成像设备提出新的要求。

工业场景具有个性化、碎片化的特点,我国不仅在工业设备上存在不足,在工业软件方面也存在显著短板。国内许多公司在开发视觉应用,但大多都

是简单的集成。我们团队致力于开发底层的、模块化的工业软件,希望未来能够降低应用门槛,通过简单的组合搭配,适配各种场景,解决应用场景中的问题。同样地,这个领域也有很大的发展空间。

另外,需要将机器视觉技术和工业互联网相结合,使其成为一个真正的基础设施。该方向也有很多工作可以推进。

《微纳电子与智能制造》:您刚才提到正在做一些模块化且能够适配各种场景的软件系统或硬件模

块,能否介绍一下目前大概是处在什么样的研发阶段,大概需要多长时间的能够真正应用到实际需求中?

马宏宾:我们从对接的需求中选取了一些典型进行关键技术研发。目前已经生产出样机,并且在一些项目中得到了应用。从可用性的角度来看,今年就可以使用它来改变过去每个项目都要从头开始定制开发的模式。但要想实现国外工业软件那样的规模,可能还需要 3~5 年的时间。