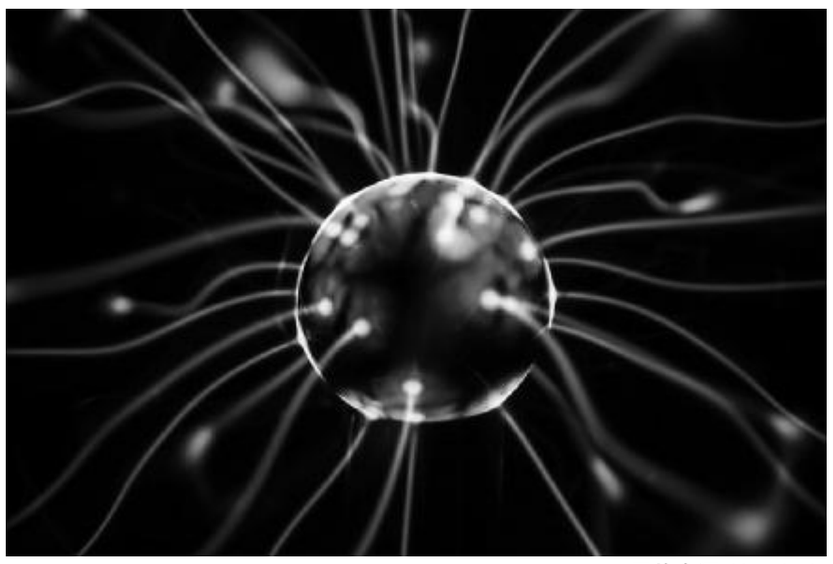
寻找类脑计算的设计“范式”

■本报记者 陈彬

无论是千百年前的偃师传说，还是近代以来各种科幻小说，让机器人像人类一样思考和行事，一直都是人类的梦想。然而要实现这一梦想，就必须给机器人一颗类似人类的“大脑”。为此，人类在不断探索着脑科学的奥秘，用机器模拟生物神经网络的结构和信息加工的潜力，后者就是类脑计算，也叫神经形态计算。

当前，类脑计算在世界范围内尚处于初步探索阶段，也正因为如此，目前该领域还没有形成公认的技术标准与方案。不过近日，清华大学计算机科学与技术系研究员张悠慧团队和类脑计算研究中心主任施路平团队与合作者在《自然》杂志发表的一篇题为《一种类脑计算系统层次结构》的论文，正在尝试改变这一现状。

“这篇论文填补了类脑计算系统领域完备性理论与相应的类脑计算系统层次结构方面的空白。”受访时，中国工程院院士、清华大学计算机科学与技术系教授郑纬民评价道。



图片来源：Unsplash

> “研究团队提出了类脑计算的完备性，同时构建了一个相应的类脑计算机层次结构。在这个结构中，最上层为具有图灵完备性的软件层，它可以在目前认知范围内，支持一切可计算函数。底层为具有类脑完备性的硬件，在这两层之间，则是由他们提出的一套构造性算法实现编译适配。

缺失的理论基础

在通用计算领域有两个著名概念——“图灵完备性”和“冯·诺依曼体系结构”。前者用来衡量计算系统是否能够用来解决通用计算问题，后者则是通用计算机运作的体系结构，该结构具有存储部件与计算部件分离、程序与数据统一存储等特性。

“通俗地说，一台机器是只能解决一个问题还是能解决通用计算问题？如果属于后者，那么就可以说是具有图灵完备性的。”在接受《中国科学报》采访时，张悠慧介绍说，可以简单地将冯·诺依曼体系结构理解为一种能够实现图灵完备性的处理器抽象模型。

“图灵完备性与冯·诺依曼体系结构可以使通用计算领域在软件层、编译层和硬件层具有统一的范式，从而使不同层次各自发展而又可以无缝兼容。”张悠慧表示，这两个基本概念几乎构建起了目前所有处理器、计算机、手机等设备的基本架构。

然而，类脑计算系统领域并没有属于自己的“图灵完备性”和“冯·诺依曼体系结构”。

“‘类脑计算’与‘通用计算’有很多不同。”施路平介绍，通用计算遵循图灵计算规则，极其注重每一步计算过程的精确性，而类脑计算往往是通过参数拟合去近似。“它不在乎过程，只在乎最后结果的意义和特性。”他表示，正是这样的区别，提出了对新的完备性理论和体系结构的需求。

然而，现有类脑计算系统研究大多聚焦于具体的芯片、工具链、应用和算法的创新实现，而忽略了从宏观和抽象层面对计算完备性和体系结构进行思考。“通用计算领域的图灵完备性和冯·诺依曼体系结构都非常基础，其概念也十分普及，以至于很多人都很难意识到，对于新兴的类脑计算系统领域，这是一个需要首先解决的问题。”张悠慧说，寻找类脑计算完备性，从而为类脑计算系统设计建立理论基础，也就成为了科研人员的努力方向。

新颖的观点

研究过程中，团队成员思考的出发点，正是基于通用计算与类脑计算在计算方式上的不同。

相较于图灵计算对每个计算步骤精确性的苛求，类脑计算由于主要是通过神经网络完成，其一大特性是不追求过程的精确，而是更注重结果拟合，“基于此，团队提出了类脑计算的完备性，同时构建了一个相应的类脑计算机层次结构。”张悠慧说，在这个结构中，最上层为具有图灵完备性的软件层，它可以在目前认知范围内，支持一切可计算函数。底层为具有类脑完备性的硬件，在这两层之间，则是由他们提出的一套构造性算法实现编译适配。

“该算法可以将任何一个程序转换成类脑计算完备性上的等价模型。换言之，任意图灵可计算函数都可以转换为类脑计算完备硬件上的模型，这意味着类脑计算系统也可以支持通用计算，从而极大地扩展了类脑计算系统的应用领域，也使类脑计算软硬件各自独立发展成为可能。”张悠慧说。

特别值得一提的是，明确类脑计算机层次结构，除了实现不同层次之间的去耦合之外，也有望为各相关学科的研究人员“减负”。

类脑计算是典型的交叉学科，涉及脑科学、微电子、计算机等。这意味着在研究中，专业壁垒会增加学科之间互相理解、协同配合的难度。研究团队所提出的层次结构，可以使相关研究领域间的任务分工与接口更为清晰，有利于不同学科的研究人员专注于其专业领域、促进协同发展。

对此，《自然》杂志的一位审稿人认为，“这是一个新颖的观点，并可能被证明是神经形态计算领域及对人工智能追求的重大发展”。而郑纬民则直接评价：“这一基础研究的突破，要远比做出三五台类脑计算的机器重要得多。”

可期的未来

在类脑计算领域，清华大学已经布局多年。2014 年，该校成立了类脑研究中心。作为中心主任，对于目前类脑计算的发展态势，施路平有着自己的理解。

“如果现在回头去看图灵、冯·诺依曼等学术先驱的设想，会发现他们其实原本就是打算发展以类脑计算为基础的通用人工智能的，只是由于当时条件不具备，才逐渐走向了一个问题一个解决方案的‘窄人工智能’。”施路平说，现如今，人类已经迎来了发展类脑计算的良好契机。

究其原因，可以分为以下四个方面。

“首先是随着科技的进步，人类对大脑的理解愈加深入，甚至可以说是到了理解脑的‘关口’；其次，超级计算机的发展让科研人员可以做到更高水平的模拟仿真；第三，大数据、云计算等技术的发展，使人类可以建立一个和脑交相呼应的系统，实现彼此间的借鉴；最后，纳米技术的发展可以制造出与大脑能耗级别相当的先进器件。”施路平说。

早在 2016 年，《自然》杂志就曾刊文指出，类脑计算不但是迈向通用人工智能的极具潜力的路径，类脑计算架构与芯片也是后摩尔时代体系结构重大发展方向之一。

谈及未来，张悠慧表示团队将从理论层面和系统层面同时发力。其中，在理论层面，团队将更关注类脑应用的“神经形态特性”，持续完善完备性理论；在系统层面，团队则将致力于研发受脑启发的支持通用计算的新型计算机系统结构与芯片。

“团队还特别关注一个问题，就是如何扩展类脑完备系统的硬件原语，使之更好地适配通用计算。这是一个非常有意思的问题，在这个方面我们已经开展了相关的研究，希望能有好的消息。”张悠慧说。

相关论文信息：*https://doi.org/10.1038/s41586-020-2782-y*

机器人协同变身“电子艺术家”

■本报见习记者 任芳言

10 余个机器人同时在白纸上作画，会产生怎样的作品？近日，美国佐治亚理工学院的研究团队实现了这一构想。

12 台同样规格、同样大小的机器人在画布上有条不紊地涂抹五种颜色，最终绘制出渐变色彩的画作：从黄色、橙色到粉色，再到青色和蓝色——尽管机器人的笔画略显抽象，但不难看出这是一幅夕阳风景画。

这些机器人之所以能完整地绘制出一幅作品，与它们的灵活应变，以及彼此间的协同控制有密切关联。但在实际应用中，通过集群控制实现机器人多机协同，还面临着一系列挑战。

一群“电子艺术家”

论文第一作者、佐治亚理工学院机器人与智能机器研究所的玛利亚·桑托斯（Mar í a Santos）与同事在《机器人与人工智能前沿》上详细介绍了这些绘画机器人的任务范围。

研究中，桑托斯等人设计了一套控制系统。实际操作时，研究者无需给每一个机器人各发送一遍指令，带有协作功能的 10 余个机器人就能在指定区域涂抹颜色。不过，实验中机器人绘出的“颜色”并不是来自现实世界的涂料，而是高架投影仪将其在画布上的运动轨迹可视化的结果。

机器人之间可通过无线通信联络，每个单独的机器人可以识别自己在画布中所处的位置，并知晓其与周边机器人的相对位置关系。

按照研究者的设计系统，指挥者告知在画布的某一区域需要涂抹何种颜色、颜色的深浅程度后，机器人就会按指令行进，以不同速度、角度在画布上直进、拐弯、回头或绕圈，机器人的运动轨迹随时间推移而累积，最终完成上色任务。

这套系统还可实现人与机器人群体的互动。机器人可根据下达指令的变化，切换不同喷涂颜色。每种机器人可携带一种或多种颜色，若机器人本身携带的颜色与指令不符，它会与画布上的其他机器人合作，共同调配出最大程度与指令相近的颜色。

但这些机器人并非只会无休止地在画布上涂抹，除了适应指令切换，机器人还会根据自身绘画能力做调整，甚至知道何时“休息”，比如当多台机器人在画布不同区域同时按近似轨迹运动时，若设计者发出的指令中不包括黄色，那么携带黄色的机器人则会停止行进，不再继续涂抹颜色。

群体控制对交互要求更高

机器人能完成抽象的画作，意味着其在场景中遇到的不确定性增加，其适应能力要达到更高标准。

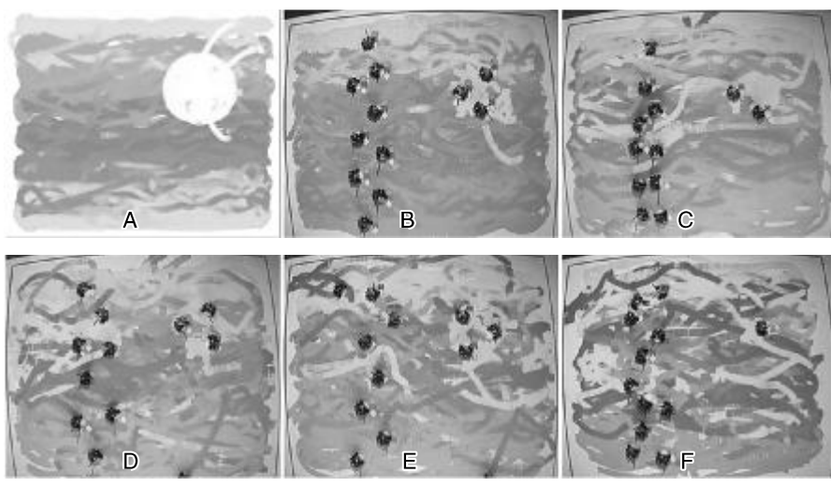
“机器人的群体控制不仅包括发出指令的主控信号，机器人个体也要有一定环境感知能力，包括个体空间位置感知、周围环境状态认知。”中国科学院自动化研究所（以下简称自动化所）惠州中科先进制造研究中心副研究员郑碎武告诉《中国科学报》，机器人能协作涂色、绘画均属于在特定应用场景中的群体任务，需要机器人个体对环境的感知和局部交互能力，运动轨迹生成、复杂色调制等都涉及到个体之间的交互。

在实际生活中，机器人批量同时完成任务已有应用。如京东、亚马逊等公司在仓储物流中利用多个机器人完成分拣和运输。

“中央调度负责总体指挥，机器人本身也要有一定智慧。”珞石机器人联合创始人韩峰涛在采访中表示，在此类场景中，中央调度端负责总体协调，向各个机器人发送指令，而机器人个体的移动轨迹则由其自行决定。

但在物流仓储等场景中，机器人的任务、活动轨迹相对固定，活动范围内的未知因素相对较少，更多的还是靠中央调度下发指令，机器人接收指令、不断完成分拣任务也在相对独立的条件下进行。

“现阶段普遍可以实现集中控制，但集群之间的控制还有很多问题要解决。”若联科技创始人金洁告诉《中国科学报》，目前集群组网有两种方式：中央集中式控制和无线网格网络自组网。前者更常见，但个体的行进距离受限，后者虽距离范围更大，但若想真正落地应用，还需要有可靠的通信网络，确保其更稳定且低时延。



机器人通过群体配合，可制作出一幅完整的画作。

图片来源：Frontiers in Robotics and AI

“架构在集群上端调度规划、分派给单体机器，需要形成实时通信，要知道目标物和障碍物的位置，系统复杂度会更高。”金洁表示，如果没有距离覆盖范围较大的可靠通信，对组网发展、任务调度和规划来说都是空谈。

与人工智能结合尚待时日

更全面的机器人群体智能控制，“可能任务导向不会太强，机器人之间的交互程度更高”。郑碎武表示，机器人协作绘画类似于机器人踢足球，最终目标是把球踢进球门，机器人个体间的协作和调配涉及共同决策。

采访中，有专家表示，控制机器人协同作画之类的任务，可能大多都不涉及人工智能。目前来看，要将机器人群体控制与人工智能相结合，还有很长的一段路要走。

在金洁看来，自动控制和人工智能在某些方面能够融合，比如障碍物感知、无人机的降落地点选取，“但两者间还是会有一些边界，比如控制系统，因为自动控制相对更确定，而人工智能还是有概率问题”。

“如果要在群体控制中引入人工智能、形成群体智能决策，机器人个体首先要有初级人工智能。”在郑碎武看来，目前人工智能、深度学习的应用场景仍多见于大数据领域，如人脸图像识别或语音识别，自主智能训练、完善算法都需要大量数据。

其间，机器人要将在不同场景中的行为变成数据模式，输入人工智能模型中，积累到一定程度、具备一些自主能力后，才可以面对未知指令生成正确决策。“如果这种行为达到了，再去让机器人群体完成复杂智能任务，还是可以实现的。但机器人个体必须具备一些基本的、初步的人工智能能力。”郑碎武表示。

相关论文信息：*https://doi.org/10.3389/frobt.2020.580415*

学术经纬

智慧城市该如何建

■郭仁忠

智慧城市建设中，来自计算机、通信、物联网、物流、交通、城市规划等各领域的专家学者都在踊跃参与。这是一个新的领域，存在不少问题，需要思考。

这场“狂欢”有几个特点。一是学术跨界。检索近几年智慧城市的相关论文发现，与计算机系统架构和网络通信有关的约占 19%，与计算机理论相关的约占 12%，与电子电器工程相关的约占 33%，与地理信息测绘有关的约占 19%。

二是热度长期持续。从 2011 年至今，智慧城市的研究热点只在新冠肺炎疫情严重时出现小低谷，此外都保持着较高的社会关注度。互联网数据中心（IDC）的一项分析认为，未来 5 年，中国在智慧城市方面的投入，每年将保持 15%~16%的增长，远高于 GDP 增长率。

三是概念迭出。城市是一个“复杂巨系统”，横跨文理工，融合天地生，涉及产学研。各领域专家的思想和观点，必然会刻上其专业或工作背景印记。不同领域的专家有不同的视角和诉求，因此认识和理解的智慧城市也千差万别。目前，相关的概念有城市大脑、数字孪生、大数据平台、操作系统、中枢神经系统、城市信息模型（CIM）等。

尽管概念很多，但不同观点背后有着相同的逻辑，建设智慧城市，必须回答一个关键问题：智慧城市究竟该怎么建？

无限智慧工程 重复“昨天的故事”

经常能看到，一个路口装十几个摄像头，甚至几十个。为什么要装这么多摄像头？因为这些设备的产权主体不同，相关部门的系统独立，因此摄像头、传感器等设备也是独立的。

很多城市的智慧城市建设规划得很好，其建设原则、建设目标、建设规划描述得美轮美奂，具体的任务落实单位也有十几个，非常具体、详细。遗憾的是，其工作模式十分传统。

智慧城市建设会催生智慧交通、智慧应急、智慧安防、智慧城管、智慧社区、智慧教学等。这么多各自独立的“智慧”，其实只是无限的智慧工程重复“昨天的故事”。这样的智慧城市建设不过是给传统的、部门化的信息系统贴上了“智慧”的标签。

过去信息化的逻辑是线下业务在线化，比如管理信息系统、规划信息系统、土地管理系统等，都用系统化的、规范化的软件工程来开发，是以单一业务或部门业务为需求导向的系统。其结果是出现了功能和用户非常明确，“纵向耦合、横向隔离”的信息系统。

这些信息系统，从城市感知到信息传输、数据处理再到最后应用，相当于“自己吃菜自己种”，是典型的自给自足模式。纵向耦合、横向隔离的部门信息化，导致信息孤岛化、应用重复化。

数据需要“上架”

中国工程院院士王家耀认为，智慧城市是城市信息化的高级阶段。这是个非常准确的概念。城市信息化的高级阶段不是某些部门的信息化，而是一个“复杂巨系统”的信息化。按照以往做软件工程的方法进行智慧城市建设将面临两大挑战。一是复杂性难以处理。各部门的业务流程是非常清晰的，但把城市所有职能放一起，没人能理得清，没有模型能把城市的功能全部集成起来。二是创新难以预见。智慧城市究竟能干什么，实际上还说不太清楚。有了大数据，还要从数据里面发现知识、发现规律，投入使用。这是个创新的过程，但创新的东西难以预见。

郭仁忠

因此，智慧城市建设的首要问题，是复杂的数据和业务无法按照软件工程的方法集成，形成数据库，形成信息系统。同时，新技术、新数据会产生新的需求，这些需求或许暂时想不到，也不可能预先设计一个流程图或逻辑框架。

既然智慧城市是城市信息化的升级版，那就把复杂问题简单化，思考城市是怎么发展起来的。城市建设是个逐级推进的过程，其基础设施与商业开发应分别进行。比如，先把道路、水、电管网完成，然后进行商业开发。智慧城市建设也应该遵从这个逻辑，先建信息基础设施，然后再建相关的应用系统。

传统智慧城市建设分为城市感知、数据获取和应用开发三个层次。但仅有这个三层架构还不够，还需要在其中加个数据平台，形成“感知—数据—平台—应用”四层结构。其中，数据平台就像超市的“货架”，各种商品到超市后要“上架”才方便人们寻找。数据平台要在一个开放的开发框架下，“向下屏蔽复杂异构世界，向上赋能开放多元应用”，把过去部门化的信息系统从纵向耦合，使其变为横向耦合，“以开放性包容复杂性、保障创新性”。

这个系统可以称作“智慧城市操作系统”。在这个四层结构中，下面的三层是信息基础设施。智慧城市建设的顶层设计、统筹规划主要在下面三层进行。上面的应用层内容很多，人类无法穷尽，也无法做顶层设计，而是要调动公众的智慧，让用户和科研人员从这个“超市”获得数据，根据特定需要加工、开发应用。

基于 GIS 的城市操作系统

城市数据是十足的“大数据”，其特点是多元异构、时空交错。如何建大数据平台、怎么把它组织起来、怎么“上架”是个重要问题。其实，最好的办法是利用三维地理信息系统（GIS）模型，因为所有数据都发生在城市的地理空间中，所有数据都有其位置属性。所有数据都可以用位置属性这个“关键词”进行关联，进行管理。

这个基于三维地理模型的操作系统是智慧城市“基础之基础、核心之核心、关键之关键”。它必须是可视化的、可仿真的、可模拟的。有了这样一个“超市”，数据集成后就可以做很多分析，比如通过摄像头了解某区域的人口分布，进行空间管理，遇到紧急情况可用系统来优化疏散，缩短避险时间，如做立体仓储、商场热力图，建设云端博物馆，进行数字化体验式购物等。

基于三维地理模型的智慧城市操作系统是智慧城市建设的基本逻辑，但并非唯一逻辑。智慧城市建设可以遵循不同的逻辑智慧城市也不应仅坚守一个平台。

（作者系中国工程院院士，本报记者张双虎据其在 2020GIS 软件技术大会上的发言整理）

速递

数字经济赋能高质量发展论坛举行

本报讯 近日，数字经济赋能高质量发展暨北京工商大学 70 周年校庆高端学术论坛在北京工商大学召开。论坛上，各界专家学者就数字经济赋能高质量发展的前沿趋势和最新成果，以及数字化转型中的理论和实践问题进行了集中探讨。

北京工商大学数字经济研究院执行院长葛红玲表示，数字经济是一个系统工程，也是一个重大战略，发展数字经济需要协同发力。

发言中，她提出了五个协同：一是要国际国内协同，通过规则对接数据的国际流动；二是要线上线下协同，通过数字产业化、产业数字化实现双向赋能、同向共振；三是要主体和载体协同，壮大企业、拓展园区和平台，推动数字技术、网络平台的协调联动；四是要发展和安全协同，处理好数字经济发展与数字治理和网络安全的关系；五是要政产学研协同。 **（陈彬）**