

壮丽70年·奋斗新时代

编者按

“电子信息”是近几年频频出现的一个词。得益于计算机技术、通信技术和高密度存储技术的迅速发展,电子信息技术和产品展现了广阔的市场前景。科学家充分利用云环境下海量图像视频的特征进行编码和处理,提供了缓解海量数据存储和传输压力并有效利用的新思路和新方法。具有独特性质的石墨烯,在电路、电子器件制造等领域发挥着重要作用,为我国电子信息技术开辟了新天地。

我们不难发现,在电子信息科学研究中,有相当大一部分与实际应用联系紧密,而应用技术的发展也离不开

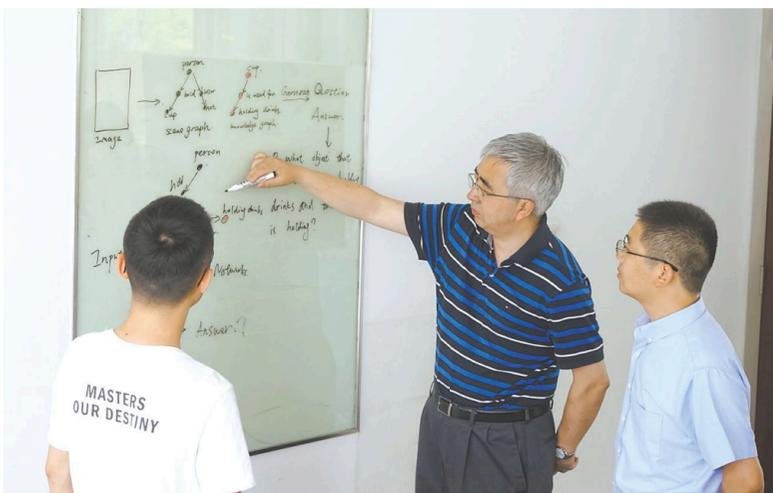
基础理论研究,两者相辅相成、互相作用。为此,中国科学家立足国家实际需求、瞄准领域研究前沿,进行探索性理论研究并发展应用技术,取得了长足进展和丰厚回报。

一直以来,国家自然科学基金重大项目面向国家经济建设、社会可持续发展和科技发展的重大需求,选择具有战略意义的关键科学问题,汇集创新力量,充分发挥导向和带动作用,积极推进各项理论研究投入应用。

本期自然科学基金版将总结国家自然科学基金重大项目取得的研究进展,展示其取得的成绩。

云时代的图像视频新“气质”

■本报见习记者 程唯珈



项目组成员在讨论利用海量图像的结构化理解

项目组供图

随着社交媒体的迅速普及,Flickr、YouTube、Facebook、微信、优酷、抖音……这些服务已经成为大众日常生活的一部分。人们更习惯用图像和视频记录自己和周围的人和事。

当我们在不经意间把海量的图像和视频存储在虚拟但又实在的云端时,大多数人不会发觉,图像和视频其实悄然占据了云环境中数据量的绝大部分。

今天的互联网上,图像和视频已经成为存储和传输带宽的最大消耗者。

据统计,YouTube 视频网站上每天需要存储的视频超过7万小时,Facebook 社交网络上每天存储的图像就有2.5亿张。随着图像视频采集装置的普及,今天我们的手机视频、监控视频在急速增长,据预测到2020年全球的存储数据将超过40ZB(1ZB=10²¹字节),其中超过90%的数据是图像、视频数据。

面对这些数据洪流,即使是互联网看似海量的存储和高速的传输也显得难以维系。其实,这些图像和视频除了提供给人类观看之外,还能够为机器通过图像/视频观看并理解世界提供新的机遇。

来自云环境的图像视频挑战

数据,让一切有迹可循、有源可溯——眼见为实、一图胜千言、有图有真相……

随着以图像和视频为代表的媒体数据的不增加,以及数据在网络上云存储以及云计算的普及和应用的多样化,人们已经进入了“云环境”下的媒体时代。图像视频数据相应地呈现出数量巨大、交换频繁、应用多样的特征。

随着各类多媒体在信息获取、传播和应用领域重要性的凸显,图像和视频数据在整个云环境面临众多挑战。如何高效存储和传输这些数据?怎么挖掘出有价值的内容?如何让机器从海量的数据中学习满足多种应用的知识?人们期待着答复。

“假设存储的效率提升一倍,就意味着同样的存储容量能够将存储的监控数据保存周期加倍,或者每年节约一半的存储费用。对于传输而言,编码效率的提升或传输模式的改变同样可以带来巨大的变化。编码效率提升4倍,则意味着用传输高清视频的成本能够实现超高清的传输。对图像、视频内容的抽象和理解有望带来更为重要的影响。”中国科学院计算技术研究所研究员陈熙霖告诉《中国科学报》,与人类对世界的观察不同,以往几十年中人们一直期望赋予计算机对世界观察和理解的能力,但由于数据量不足,这一理想一直在不断的尝试之中,而云环境下的海量图像和视频数据为这一梦想带来了新的可能。

因此,对非结构的图像与视频而言,如何实现高效的表达和结构化成为首当其冲的科学问题。

2013年,国家自然科学基金委员会(以下简称自然科学基金委)发布重大项目“云环境下的图像视频群体协同表达与处理”申请指南,陈熙霖带领的中科院计算所团队联合来自北京大学、中国科学技术大学、清华大学和北京工业大学的研究团队进行申请,并最终获批。

陈熙霖表示,面向互联网云环境的高效图像视频表达、编码和处理技术是一项巨大的挑战,其中有诸多科学问题待解。

“我们把不同来源但存在较强相关性的图像和视频数据称为群体图像或视频数据,它们之间除了传统的时间、空间相关之外,还在图像间或视频间蕴含着丰富的相关性和冗余信息,这为从表达、编码、传输到评价和利用提供了新的机遇和可能。”他说。

为了实现上述目标,项目从图像视频群体数据的数据结构与紧耦合、群体化图像视频编码、视觉失真可容忍的传输理论方法、主观一致的图像质量评价方法和面向群体数据的云媒体标准和验证平台等方面开展研究攻关。

图像视频的结构化与冗余消除

图像视频群体数据的结构化与紧耦合表达的目的是将非结构的图像视频数据转化为机器能够理解的结构化数据,并且希望这种结构化能够形成和人类感知一致的表示。

这种一致表现在多个方面。以黄猫、白猫和老虎为例,从类别上说前两者属于同类,但是从颜色划分,黄猫和老虎在颜色分布上具有更好的相似性。为了表示这种多重相似性,需

要在这些对象的表达中嵌入多重的特征描述。

研究人员介绍,以往的方法需要为每一个不同的表示维度提供相应的训练数据,当这些不同维度的性质相组合时,将会产生“组合爆炸”的问题。于是提供训练数据将成为一项几乎不可能完成的任务。为此,研究人员提出了一种有效利用不完整信息的学习方法,从而实现了对于多种性质的嵌入表达,更加细致地刻画了对象特征,建立了类人的对视觉对象的层次化描述。

进一步,如何让计算机对可视对象具有语义上的理解,实现从可视空间到语义空间的联系也是赋予机器具有视觉智能的重要挑战。

“一个例子是我们知道传说中的麒麟是‘狮头、鹿角、牛尾、一角带肉’,当我们看到相应的画面,并具有对狮、鹿、牛等的基本认知时,便会推断出麒麟。类似地,项目组探索了让计算机具有触觉旁通,连接已知与未知,通过局部推断全局认知的能力。”陈熙霖介绍,为此团队在文字和图像之间建立了一种类似语义到图像的“翻译系统”,实现对开放场景下的图像理解,并让机器在学习中自动归纳,形成类似语言的表示体系,从而赋予计算机类似儿童的看图理解能力。

为了在云端环境下存储海量的图像视频数据,需要建立数据的高效压缩手段。利用群体图像视频间存在的超越以往编码中所利用的时间、空间之外的群体数据间蕴含的语义冗余,实现了更加高效的编码,项目组通过层次结构化的表达,自动发现群体图像视频中的语义冗余,为新一代的群体数据编码提供消除冗余的新维度。

由北京工业大学教授尹宝才带领的团队针对群体化图像视频的编码开展了深入研究,发展了群体图像编码的技术和方法,实现了利用群体数据的自编码和基于群体数据的个体编码方法,开发并开源了结合深度学习的低复杂度高效群体编码系统。

图像视频体验新升级

传统上度量压缩图像质量的方法都采用客观指标,如采用信噪比等。对此陈熙霖解释,“信噪比和人类的感知未必一致,并不是说信噪比越高,人的视觉感受就会越好。”如何实现与人类主观感知一致的质量评价是一个重要的挑战。

针对这一科学难题,来自中国科学技术大学的研究团队在李厚强教授带领下,围绕图像视频质量评价、图像质量评价参考库建设等方面开展攻关,取得了重要的研究突破。研究团队巧妙地利用神经科学中的自由能原理,将其拓展应用于图像感知质量评价,不用比较压缩前后的图像即可实现“打分”,实现了模拟人类感知机理的图像质量评价。

同时该团队还提出了面向混合失真的码流级视频编码质量评价方法,这一方法被ITU-T接受,成为标准的一部分,被应用到H.264视频编码的质量评价中。

这一主观质量评价方法可以同时支撑对编码和传输阶段的视觉失真度量。结合这一度量,项目组提出了失真可容忍的图像视频传输方法。

从数学家香农提出信息论开始,在传输上,人们一直考虑的是在给定的信道上传输码率和失真间的平衡。随着移动传输环境的普及,在平衡上述因素的同时加入功率因素,这不仅关乎降低功耗、提升电池寿命,也能够更好地保护用户免受电磁辐射的影响。

同济大学教授吴俊团队围绕视觉失真可容忍的视频传输技术开展研究,提出了通过灵活的功率分配和对重点数据的保护实现更有效平衡的传输方法,通过利用群体数据的冗余,并将传输图像的基本部分和细节部分分别采用不同的方式传输,优化了信道失真的视觉容忍程度,通过包括信道实数编码、陪集编码等,显著提升了同样信道条件下的主观传输质量,并利用云环境下学习的细节特征改善了接受图像的细节感受。

实践是检验真理的唯一标准

一系列关键技术被攻克让项目运行顺利,但是否能够有效提升图像视频的数据运行还需“现场练兵”。“以互联网图像和监控视频为例,应用组建立了面向云媒体的编码服务验证平台,以此在实践中验证成果。”陈熙霖说。

由北京工业大学教授黄铁军领衔的云媒体标准和验证平台课题组开发的视觉特征压缩技术,一次查询只需上传4KB特征数据,可节省98%的流量。相关成果已被腾讯、百度等互联网公司采纳并投入实际运营,在腾讯微信智能开放平台中的大规模图像搜索识别云服务以及百度识图、手机百度等产品中得到应用,服务上亿用户。

此外,课题组还研制了监控视频采集存储设备与大数据处理平台。其中场景视频压缩技术能把监控视频的压缩效率提高到国际标准的3倍以上,在青岛、贵阳等地得到应用。在青岛,城区公共交通通行效率提高了约30%,交通违法行为查处率提升了近40倍。

团队目前牵头制定的面向云环境的新一代AVS云媒体编码标准,实现编码效率的成倍提升,有望早日成为国家标准或IEEE标准。

陈熙霖认为,这些成果的取得离不开自然科学基金委的大力支持和项目组全体研究人员的辛勤工作。谈到过去5年的体会,“如何从当前和未来需求出发,提出具有重要意义的‘真’问题是科研工作的关键。”

回顾该重大项目执行5年期间,研究人员的这些成果在国际上产生了重要影响。据谷歌学术统计项目完成的论文成果中,引用超过50次的论文有26篇,超过100次的论文有11篇,单篇最高引用350余次。得益于前期积累和研究的连续性,项目组获得了多项国家级和省部级科研奖励。

在这一重大项目支持下,这支脚踏实地的科研团队获得了快速的成长,过去5年,项目组中多位成员获得了包括自然科学基金委国家杰出青年科学基金和优秀青年科学基金项目等资助,如今他们正迈向新的探索之旅。

陈熙霖表示,对人类而言,70%以上的信息都来源于视觉,智能视觉系统同样如此。因此探索图像和视频的高效存储、传输和理解对实现开放环境下的人工智能研究和应用具有重要的推动作用。

石墨烯以其独特的结构和性能蕴含了丰富而新奇的物理与化学性质,成为兼具优良力学、热学、光学和电学特性于一体的神奇材料,在信息器件与电路等领域具有广阔的应用前景,是目前信息科学发展最为迅速和活跃的研究前沿之一。

近年来,石墨烯研究已取得了一系列重要进展,新发现、新成果不断涌现,但总体来说在实用化信息器件方面仍面临诸多挑战。特别是基于高质量大面积石墨烯的信息器件构筑及其特性研究备受关注。

自2014年起,在国家自然科学基金重大项目“介电衬底上高质量大面积石墨烯信息器件的构筑与特性研究”支持下,中国科学院瞄准领域研究前沿,针对石墨烯信息器件的一些关键基础问题,开展新概念、新方法和新技术的研究,在石墨烯信息器件的重大科学问题上取得了一系列进展。

超级材料石墨烯独特又完美

石墨烯是由单层碳原子紧密堆积而成的二维蜂窝状晶格结构,这种独特而完美的结构使其具有优异而神奇的特性。例如,石墨烯具有100倍于硅的超高载流子迁移率、高达130GPa的强度、很好的柔韧性,以及近20%的伸展率、超高热导率、高达2600平方米每克的比表面积,并且几近透明,在很宽的波段内光吸收只有2.3%。

这些优异的物理性质使石墨烯在射频晶体管、超灵敏传感器、柔性透明导电薄膜、超强和高导复合材料、高性能锂离子电池和超级电容器等方面展现出巨大的应用潜力。

“高”“大”石墨烯制备绝非易事

“能否在介电衬底上大面积、高质量地制备石墨烯是其应用能否真正实现的关键前提和基础,也是石墨烯研究领域的重点和热点。”该重大项目负责人、中国科学院物理研究所研究员顾立志告诉《中国科学报》。

自2004年以来,科学家们已发展出多种制备石墨烯的方法,包括机械剥离法、SiC或金属单晶表面外延生长法、化学氧化剥离法、插层剥离法及化学气相沉积(CVD)法等。其中,CVD法由于具有可控性高、结晶质量好、均匀、薄膜尺寸大等优势而成为制备石墨烯最为普遍的方法之一。

CVD法大多以过渡金属为生长基底,借助于其较高的化学催化活性,促进碳源裂解并在金属表面吸附、扩散、成核、生长形成石墨烯。通过调控生长过程的参数,可以实现大面积、层数可控、高质量且结构均一连续的石墨烯薄膜,经过工艺优化,可实现超大面积石墨烯单晶生长。

值得一提的是,在实际应用过程中,金属表面形成的石墨烯一般需要转移至介电衬底上,才可以进行下一步的器件加工。复杂的转移过程不可避免地带来石墨烯的破损、褶皱、金属、溶剂残留污染以及操作繁琐、一致性差、成本高昂等问题。

为解决这一问题,研究者将目光投向了在介电衬底表面直接生长石墨烯。“如果能在介电衬底上直接可控制备大面积、高质量的石墨烯,就可以直接利用目前的微电子技术制备器件,实现与硅技术融合,这将会极大促进石墨烯的广泛应用和长足发展。”项目组成员、中国科学院院士高鸿钧表示。

然而,由于介电衬底表面能较低,对碳源小分子的裂解以及石墨烯形成所产生的催化作用十分微弱,因而在介电衬底上直接生长石墨烯是一个研究难点。

长出“高”“大”石墨烯

如何将石墨烯的优异性能在器件中呈现出来?面对这一挑战,项目组改进了石墨烯的生长手段,尝试在多种介电衬底上生长石墨烯。

研究人员通过巧妙控制碳源的通入量和实验温度,利用扫描隧道显微镜直接观测到石墨烯生长初期的前驱体单元,以及前驱体单元在石墨烯成核阶段形成的链状结构。课题负责人、中国科学院物理研究所研究员杜世堂向《中国科学报》表示:“前驱体的发现表明,可以考虑通过控制碳源的通入来影响前驱体的产生,进而实现高质量、大面积石墨烯的可控生长。”

基于此,该课题组在国际上首次提出并利用“插层法”实现原位、无损地将Si、Ge、Mg、Hf等几种材料插入石墨烯与金属的界面之间,并克服重重困难对插层结构进行原位氧化,经过无数次实验摸索,终于获得高绝缘性的介电插层,实现了介电衬底上高质量、大面积的石墨烯材料生长。同时,通过石墨烯量子器件的加工印证了介电插层的有

效性,引起了国际同行的关注与好评。

此外,研究人员还采用非金属催化的CVD方法,在多种绝缘基底上实现了微米尺度石墨烯单晶的直接生长和可控制备,获得大面积均匀的单层石墨烯膜,薄膜尺寸达3英寸。“这也为项目后期石墨烯器件的构筑与性能调控,以及高性能石墨烯器件的制备与优化提供了条件。”课题负责人、中国科学院化学研究所研究员于贵说。

为了将上述介电衬底上生长的高质量石墨烯应用于信息功能器件,中国科学院物理研究所研究员杨海方等人发明了一种双层掩模工艺,实现了亚10纳米石墨烯可控制备的精确、可控功能结构的精确、可控制备,解决了绝缘的介电衬底上利用电子束曝光制备石墨烯纳米结构的难题。同时采用电子束曝光及紫外光刻混合曝光方法,在4英寸的介电衬底上实现了石墨烯传感器器件和射频晶体管阵列的精确、大面积、一致性高效制备。

石墨烯器件的批量制备与优化

具有众多新奇特性的石墨烯被认为是一种非常有前景的信息功能材料。因此,电子器件和电路是石墨烯应用的首选领域,也是研究最为广泛的领域。石墨烯可以应用于磁传感器、高频电路、气体传感、光传感、柔性电子学等诸多方面。

顾立志告诉记者,项目组围绕石墨烯应用于构筑信息器件与电路的需求,在注意发展介电衬底上大面积、高质量石墨烯的可控制备及特性的同时,也积极探索基于石墨烯信息器件的构筑与集成。“在研究信息功能的石墨烯纳米结构制备及性能调控的基础上,我们制备了多种石墨烯信息功能器件并对其性质进行了深入研究。”他说。

研究人员提出了一种石墨烯波紋结构应力传感器,使应力测量范围超过30%,并设计出基于隧穿效应的纳米石墨烯薄膜应力传感器,使灵敏度因子提高到500以上。在实际应用中,可以根据需求选择不同表面电阻和灵敏度的石墨烯来构造应力传感器。

“这种基于石墨烯隧穿效应的应力传感器具有可拉伸、灵敏度、稳定性强、透明等特点,其在人造皮肤、触摸屏等方面显示了巨大的应用潜力。”顾立志说。

石墨烯超高的载流子迁移率、低载流子浓度和很好的稳定性,是制备霍尔元件的绝佳电子材料。

课题负责人、北京大学教授彭练才发展了一种工艺简单、成本低廉的石墨烯微加工技术,克服了器件接触电阻大这一难题,批量制备出了具备超高灵敏度和分辨率的石墨烯霍尔元件。该石墨烯霍尔元件的磁灵敏度达2093 V/AT,分辨率达1 mG/Hz^{0.5},是目前最为灵敏和精确的石墨烯霍尔元件。“这种高灵敏度的霍尔传感器能够探测更小的磁场,降低后端放大电路的成本,因而有巨大的市场前景。”彭练才告诉《中国科学报》。

此外,研究人员基于柔性石墨烯霍尔传感器,开发了一款柔性可穿戴位置传感系统。“将传感器贴在用户手指上,当磁体靠近磁源,根据霍尔效应,输出的电压会有一个跳变。我们通过记录并处理电压信号,创新性地实现了虚拟键盘、虚拟电子琴和无线触控码锁的演示。”彭练才介绍,这种高灵敏度的柔性磁传感器有望应用于无线触控码输入、可穿戴娱乐和工业控制中的安全防护等领域。

此外,项目组还研制出具有独立功能的石墨烯/硅基CMOS线性霍尔集成电路、石墨烯振荡器、混频器和短沟道器件等。这一系列具有自主知识产权的高性能新原理石墨烯信息器件,有效提升了我国石墨烯信息器件的自主研发能力和在该领域的学术影响力,同时也造就了一支创新能力强、多学科交叉的国际一流研究队伍。

介电衬底长出“高”“大”石墨烯

■本报见习记者 辛雨



顾立志(前排右二)课题组正进行石墨烯量子器件加工。项目组供图