

人工嗅觉技术研发进展

路奇^{1,2}, 杨佳伟^{1,2}, 张煜¹, 徐迎庆^{1,2*}

1. 清华大学美术学院, 北京 100084

2. 清华大学未来实验室, 北京 100084

摘要 介绍了人工嗅觉感知技术的概念, 梳理了仿生类和化学分析类的人工嗅觉技术发展脉络; 以清华大学未来实验室嗅觉计算组在人工嗅觉与嗅觉计算方面的研究作为案例, 阐述了该领域从人工嗅觉技术到嗅觉计算技术的发展趋势。分析了当前面临的技术挑战和可能的解决路径, 展望了嗅觉计算在智能家居、智慧农业、医疗健康等行业的落地应用。

关键词 人工嗅觉; 嗅觉计算; 气味采集; 气味识别

在人的五感中, 视觉和听觉被用于接收波属性的信息(可见光、声音), 触觉用来接收压力、温度、纹理等物理信息, 而嗅觉和味觉感受的是化学信息。随着科技的进步, 人类对于信息本质的了解越来越透彻, 各种电子感官技术也应运而生, 例如视听觉领域最常见的摄影机、照相机、录音机等。此外, 波属性相关的传感技术已经延伸到很多人感官范围以外的范畴, 如超声波、毫米波等。其他物理信息的获取则更常见, 例如日用的体重计、温度计, 而在化学信息领域, 有依靠分析分子结构进行探测的分析仪器, 也有依靠化学反应进行识别的传感技术等。

现代人工智能在视听觉信息处理和应用领域取得了很大的成功, 基于人工智能的图形图像识别是当前最主流的感知技术, 目前已经有很多实际应

用, 例如物体识别、行为理解等。但对于颜色、材质纹理等视觉特征相近的物体, 视觉识别则比较困难, 例如白酒和纯净水在外观上就很难鉴别。事物本身承载的信息常常是多模态的, 换一个维度入手解决问题就会容易很多, 例如在识别酒与水的问题上, 使用人工嗅觉方法不仅简单快速, 且成本较低。从信息本质来看, 嗅觉信息代表着物质的物理和化学信息, 其泛在性决定了建立人工嗅觉系统、嗅觉信息数据集和嗅觉计算理论, 具有深远的战略意义和广阔的应用范围。然而相比于计算机视觉, 人工嗅觉感知与计算技术在数据规模、计算算法、应用设计等方面尚未被广泛探索。

本文从相关研究、技术与应用展望等层面探讨人工嗅觉与嗅觉计算的发展, 介绍领域内前沿工作, 分析系列挑战及其可能的解决路径。

收稿日期: 2021-11-27; 修回日期: 2022-08-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(62172252); 清华大学国强研究院项目(2020GQG0004); 中国博士后科学基金项目(2021M691801)

作者简介: 路奇, 助理研究员, 研究方向为人工嗅觉感知与计算、嗅觉界面设计、实体交互, 电子信箱: luq@mail.tsinghua.edu.cn; 徐迎庆(通信作者), 教授, 研究方向为人机交互、计算机图形学、文化遗产数字化等, 电子信箱: yqxu@tsinghua.edu.cn

引用格式: 路奇, 杨佳伟, 张煜, 等. 人工嗅觉技术研发进展[J]. 科技导报, 2023, 41(8): 26-35; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.08.003

1 人工嗅觉系统简介

感知技术通常由采集器(硬件)与识别算法(软件)构成,嗅觉也是如此,例如人依靠肺部呼吸提供动能吸入气体,鼻腔是一个采集腔体使得气体可以与黏液层、嗅体细胞纤毛的接触,这就构成了一个完整的采集系统:人的鼻腔内有约1000种嗅觉受体细胞(总数约500万个)集中在指甲盖大小的区域内,构成了大规模阵列型的感知单元。这些嗅觉受体细胞产生的神经兴奋传递给大脑进行模式识别,进而产生了嗅觉认知,大脑中的腹侧前额叶后部、颞叶内侧、眶额皮质(orbitofrontal cortex)、脑岛(insular)、下丘脑(hypothalamus)、背内侧丘脑(dorsal medial thalamus)、海马(hippocampus)等区域是运算单元^[1],其内运行着的各种神经网络模式则可以算作识别算法^[2]。

人工嗅觉系统是用人造技术模拟嗅觉能力,从获取信息的角度思考,人工嗅觉本质是识别多成分构成的化学混合物(multi-component chemical mixtures, MCM)^[3],所以无论用什么方法,只要能识别此类信息,广义上都可以算作人工嗅觉系统。

由相关研究综合来看,研究人员已开拓出2大类人工嗅觉技术思路:一种是仿生法,模仿生物嗅觉的机制,通过多种不同响应特性的气体传感器构建阵列并进行信息采集,之后用机器学习处理这些信息以达到应用目的;另一种是化学解析法,利用各类谱学分析手段解构混合物中单个组分的构成和含量。2种方法各有优劣,一般的理解是化学解析法解释性更强,更容易剖析气味构成从而重构气味,而仿生法一般被认为更接近人自身的认知行为,同时更为关键的是相比昂贵复杂且速度慢的化学分析仪器,仿生电子鼻阵列容易做成便携式应用,且操作简单速度快。

1.1 仿生类电子鼻技术

最早的仿生人工嗅觉系统研究要追溯到20世纪80年代^[4],到目前为止,人工嗅觉研究取得了一定的进展,电子鼻技术被应用于农业、生物医学、化妆品、环境、食品、制造业、军事、制药、监测等各种领域^[5]。

1.1.1 基本原理

大部分人工嗅觉系统的工作原理是使用一些不同的非选择性化学传感器组成阵列,阵列中每个传感器都能够检测一系列不同气体,而不仅仅是一种气体,同时其灵敏度不同于阵列中其他传感器的灵敏度,这种特征使电子鼻的响应取决于气味中所含整体化学信息,原理与生物嗅觉机制类似^[6]。尽管该领域研究已经有30多年的历史,但目前尚未有人工嗅觉系统能够表现出与生物嗅觉相媲美的性能,后者在特异性、鲁棒性、检测极限、编码能力、随时间变化的稳定性、响应时间、大小、功耗和便携性方面优于任何人工嗅探设备^[7]。随着对生物嗅觉机制研究的深入,仿生电子鼻研究在未来能够追上甚至超越生物嗅觉水平^[8-10]。

由于组成阵列的传感器具有不同的灵敏度和选择性,每个传感器会对同一个气体有不同的响应。电子鼻针对气体产生的响应就是每个传感器产生的电子信号组合成的模式图谱,该模式图谱的维度实际低于气味包含的化学信息总量(即图谱不能完全代表该气味的化学信息,信息在数字化过程中有损失)。电子鼻产生的模式图谱传输到计算机上,被数据分析算法进行处理和识别(图1)。为了进行气味识别,初始阶段需要收集所有要分辨的化学模式的电子鼻图谱组成训练数据集,通过算法训练构成模型后,通过运行模型对气味进行识别。电子鼻的最大优势在于它们可以感知样品的“气味”,而无需像传统分析仪器(如气相色谱-质谱联用

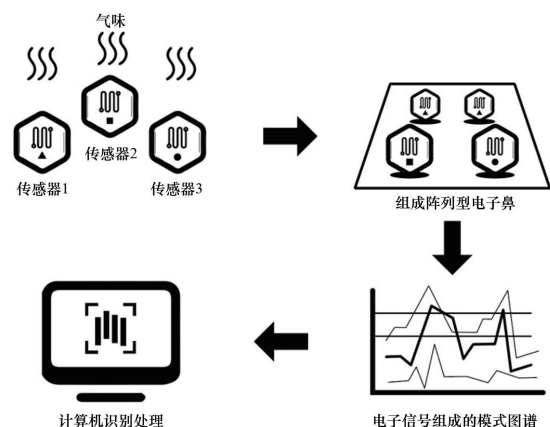


图1 阵列型电子鼻工作原理图

仪)那样对样品进行组分分离,再分别进行分析(复杂且耗时),而一些新兴的谱学技术如离子迁移谱,虽然识别速度快,但是同样造价昂贵,不适合民用场景。

1.1.2 气体传感器

好的电子鼻传感器需要满足一些条件,如广泛的选择性和对不同分析物的高灵敏度、快速的响应时间和恢复时间等,基本上和生物的嗅觉受体特征近似,这些功能可以使人工嗅觉系统像动物一样在短时间内检测并区分出大量气味^[11]。为了使电子鼻系统整体保持稳定且可被重复生产,单个传感器必须具有很好的稳定性和鲁棒性。其他的要求还包括抗干扰性,如环境的湿度和温度变化,因为电子鼻可能被部署到的环境通常不可控。但是,几乎所有已知的化学传感器都对这些环境变量表现出一定的交叉敏感性,这种影响不能轻易消除,因此只能尽量使用对温湿度敏感度较低的传感器,并且在阵列的外围系统中对环境变量加以控制,以保证传感器响应尽量仅与气味本身有关。

一个气体传感器通常由换能器和涂覆在其上的敏感材料构成,敏感材料捕获气味分子并产生自身物理属性上的变化,进而引起经过换能器的电信号发生变化。常见的气体传感器类型有金属氧化物半导体式(MOS)传感器、导电聚合物传感器、压电传感器、化学电容型传感器、电位型气敏传感器、热电式气敏传感器、光学式气敏传感器等。目前常用的是前3种,每种传感器各有优缺点,金属氧化物传感器原理制作容易、价格相对低廉、经久耐用,是工业中最常用的气敏传感器,缺点是需要高温反应条件、功耗较高、响应随时间有漂移。导电聚合物型传感器原理与金属氧化物类似,都是被测气体改变敏感材料的导电特性,但其是常温下工作,缺点是电聚合化过程比较困难和耗时,不同生产批次会有偏差,也会随时间漂移。压电传感器以石英晶体微天平(QCM)和表面声波(SAW)的压电传感器为代表^[12],它主要利用了压电材料的压电效应,被测气体会改变传感器的共振频率,从而被检出,该类型传感器功耗低、尺寸小、灵敏度较高而且不随温度变化,缺点是需要配套高频信号发生器、频率

检出器、电子检测电路较复杂、共振频率会随着活性薄膜的老化发生漂移^[13]。

1.1.3 识别算法

电子鼻对气味的智能识别算法数据处理大致可分为2个过程,数据预处理与模式识别。数据预处理通常包括滤噪、标准化、基线校正等操作。由于受传感器不稳定性、环境干扰、材料老化等因素影响,测量数据存在高频噪声以及基线漂移(静息态不稳)等现象,其中高频噪声可以通过低通滤波器滤除,而基线漂移可以看作一种低频噪声波动用相应的高通滤波器滤除。也有研究者通过模式识别的方法去除漂移现象,例如 Vito 等^[14]采用半监督学习方法、Liu 等^[15]采用域自适应方法等。同时,一些具体的应用要求使用一些特殊的处理方法,例如 Martinez 等^[16]通过盲反卷积操作(blind deconvolution)将气敏传感器所测得的低频、延时信号恢复成快速、符合真实输入气体变化的信号,减少了因金属氧化物反应速率慢而造成的测量延时问题。

电子鼻的大多数应用场景都可以归类为分类问题或回归问题,因此可以应用模式识别或机器学习的方法对预处理后的数据进行分析。数据计算有多种方法,可以采用统计分析式方法。例如,主成分分析(PCA, principal components analysis)、K-近邻算法(KNN, K-nearest neighbor)、线性判别分析(LDA, linear discriminant analysis)、支持向量机(SVM, support vector machine)等,或使用含有隐藏层和非线性激活函数的人工神经网络方法,例如前馈神经网络(FNN, feedforward neural network)、图神经网络(GNN, graph neural networks)等。例如 Lammers 等^[17]通过电子鼻监测用户暴露在污染环境前后所呼出气体,并通过偏最小二乘判别法(PLSDA, partial least squares discriminant analysis)将呼气数据二分类。Hayasaka 等^[18]利用多层感知机和前反馈神经网络区分水汽、甲醇、乙醇3种气体,并采用交叉验证防止模型过拟合。另外,由于电子鼻硬件通常采用传感器阵列的方式,数据可能达到很高的维度,因此主成分分析等数据降维方式能够在保留绝大部分信息的情况下简化数据规模。

1.1.4 商用电子鼻产品简介

很多人工嗅觉应用研究可以直接借助商品化电子鼻技术,这里介绍一些商业化的电子鼻设备:Alpha MOS公司生产的HERACLES Neo电子鼻^[19],使用的是快速气相色谱技术;AIRSENSE Analytics公司生产的i-PEN, PEN2, PEN3, GDA, GDA2电子鼻,使用的是MOS传感器和电化学传感器^[20];Cyrano Sciences公司(现被Smiths Group公司收购)生产的Cyrano 320电子鼻(基于石墨聚合物传感器)。

在电子鼻领域使用生物传感器或者仿生传感器作为阵列基础,是最近几年的发展趋势,不过生物传感器的稳定性、长期重复使用的能力还有待考证^[21-22]。例如,美国初创公司Aromyx使用嗅体蛋白构成的阵列进行样品的风味分析^[23],但他们的技术目前的缺陷是嗅体蛋白活性时间有限,需要制备过后尽快使用,并且检测时间较长、工序较繁琐,需要专业的操作,这决定了它只能用于专业的实验室检测。Aryballe公司生产的Neose Pro,采用了一种被称为iSPR的生物传感技术^[24],从介绍来看应该是脱胎于表面等离子共振(SPR, surface plasmon resonance)技术^[25],这项技术被广泛应用于分析生物分子之间的相互作用情况,因此可被用于分析生物芯片对气味分子的捕获情况。

1.2 化学分析类人工嗅觉技术

除了常规的基于金属氧化物半导体传感器的电子鼻,谱学手段也是一类重要的气体分析方法,包括了光谱、质谱、色谱等手段。在谱学领域也有一些小型化工作,试图使其成为一种“鼻”技术。

红外吸收光谱法是物质分析领域中的一种重要方法,通过测定气体的红外吸收光谱,可以对气体分子的构型进行重建,从而得知气体的种类,实现气体检测。随着集成光电子学与MEMS(微机电系统, micro electro mechanical systems)加工工艺的发展,片上红外光谱仪的工作报道越来越多,这为小型便携式红外气体传感器的发展带来了新的可能。Yu等^[26]报道了一种利用算法重建光谱的片上光谱仪方案,利用不同参数的光子晶体对入射光不同的散射作用得到一系列调制谱,再利用每个不同调制谱的合成光强反推出原入射谱线。Hasan等^[27]

使用窄带隙纳米线制作了中红外微型光谱仪,纳米线既作为窄带滤波器,又作为光接收器,大大压缩了光谱仪的尺寸。以集成红外光谱仪为基础的人工嗅觉检测设备被称为“光子鼻”。

质谱法通过测量电离后气体分子的质合比,来确定其分子组成。一个质谱仪通常包含离子源、质量分析器、离子检测器以及配套的真空和进样系统,这使得质谱仪的小型化难度较大,价格也比较高^[28]。如果能够实现便携式的质谱仪解决方案,对于拓展人工嗅觉的边界有着重要的意义。徐伟等^[29]基于一种新的频率扫描方法开发了微型质谱仪。它接近砖块的大小,被命名为“Brick Mass Spectrometer”。这种新的频率扫描技术不仅可以降低微型质谱仪的尺寸和功耗,还可以提高其分析性能,特别是在质量范围和分辨率方面。欧阳证等^[30]开发了多孔聚合物涂层转移浓缩方法,用于脂质的直接质谱分析,浓缩速度快,可对小体积生物流体样品中的脂质进行分析和量化。但是目前质谱仪相对半导体传感电子鼻体积仍然较大,限制了其使用场景。

色谱法是一种利用物质的不同物性来对其进行空间分离的手段。色谱法的小型化工作开展的很早,1979年,Terry等^[31]就使用湿法刻蚀技术在硅衬底上刻蚀出了圆形螺线色谱柱。近年来基于MEMS技术的片上色谱仪技术发展迅猛,出现了多种沟道类型的片上色谱仪,也出现了具有热敏结构和悬浮结构的增强式解决方案^[32-33],从体积上来讲足够小,是集成化电子鼻可能的底层传感单元。

2 嗅觉计算工作简介

清华大学未来实验室嗅觉计算组(简称“嗅觉组”)的研究方向是“嗅觉计算与界面设计”,本质是通过设计和构建目标适配的软硬件融合交互系统,对空间中可挥发性化学信息进行采集、感知、处理和解析,并且基于以上信息做出智能决策和自然交互反馈。其中,通用嗅觉计算的核心是大规模收集嗅觉信息,构建数据库,并且利用大数据分析和人工智能技术建立多模态融合的机器学习模型,针对

具体应用场景和任务目标,对收集到的嗅觉信息进行数字化解析,并做出决策(气味聚类、识别、推荐等)。

嗅觉组对于人工嗅觉的研究,并不局限于狭义的电子鼻阵列,通常会着眼于具体应用场景开发针对性的技术与解决方案。例如,在基于机器嗅觉的嗅觉界面设计方面,嗅觉组设计开发了“嗅豆”系列电子鼻平台(图2),并且围绕该平台进行了一系列应用设计。此外,嗅觉组针对蔬果和家居日常等气味源大类进行数据采集实验,试图通过电子鼻进行蔬果生命周期的全局监测和对家居生活提供智能辅助控制。在前沿技术探索方面,嗅觉组正在研发新的人工嗅觉硬件系统,试图将不同领域的创新技术与嗅觉认知理解融合,例如加入MEMS技术、荧光淬灭技术和近红外光学检测技术等,力争在识别效率和精度、数据维度等层面取得新的突破,以更好地满足实际应用需求^[34]。

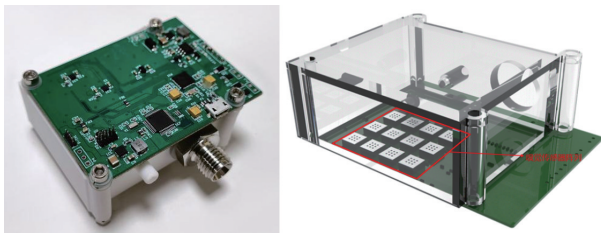


图2 嗅豆电子鼻3代

除了硬件技术研究,人工嗅觉的另一主要研究方向是处理各种与气味(气体成分)识别相关的机器学习任务,这些任务无疑都建构在其所采集到的嗅觉数据基础上。嗅觉大数据、嗅觉计算与人工智能的结合将会创造更多新的应用机会,因此目前嗅觉组在建构各种类型的气味数据库,气味分析与数据可视化、多模态虚拟场景的气味渲染等研究也在同步进行中^[35]。

嗅觉组的研究工作涉及到计算机科学、电子工程、材料学、化学,以及设计学、人机工学、心理学等大规模的学科交叉,具有很强的学科融合创新的特性。

3 技术挑战与发展趋势

3.1 稳定性、重复性、选择性、检测限与识别范围

现有的传感器技术普遍存在着稳定性、可重复性差和选择性差等问题。传感器信号容易受到环境条件(温湿度等)的影响、抗干扰能力差。同品类传感器批次不同,信号的稳定性与重复性也存在差异。除此之外,传感器识别范围也存在着很大的局限性。为提高传感器的识别范围,通常将检测不同物质的传感器组成阵列。即便如此,商用传感器对于可挥发性有机物的识别仍比较宽泛,难以对含有不同官能团的有机分子特异性响应(例如对不同香水的识别。在香水中,香氛物质含量较低,大部分为溶剂,而大部分传感器对香水溶剂的响应信号均较强,其信号掩盖了传感器对香氛物质的响应信号)。因此需要在传感器的新机制、新工艺和新材料等方面进行努力,提高单一传感器的稳定性、重复性和选择性,同时进一步提高其检测限。

3.2 检测时间

当前应用的阵列传感器,检测待测物所需的时间比较长,这很大程度限制了传感器的时效性。为缩短传感器的检测时间,可行的解决思路为:(1)改善气体采集系统的气路,降低死体积;(2)对信号变化做数据处理,用未达到信号峰值的数据,比较不同物质的不同;(3)采用更小尺寸的气体传感器,提高对外界变化的灵敏度;(4)开发新型气敏材料,提高待测分子内外扩散效率,缩短响应时间。

3.3 小型化

目前成熟的阵列传感器产品尺寸较大,功耗较高,难以满足随身携带的需求。因此,需要采用新技术,优化传感器阵列及其配套模块,以降低集成后传感器阵列及配套模块的尺寸和功耗。Wyszynski等^[36]通过模仿生物嗅觉,制备了单一管壳内集中16通道化学电阻传感器阵列的原型,发现其具有稳定的响应和较高的灵敏度,为阵列传感器的小型化提供了思路。人工嗅觉系统小型化有多方面的好处,一方面是可以更加方便的嵌入到各种场景中,另外随着小型化中采用全新的工艺(如

MEMS加工),其功耗、响应时间、量产成本也会随之降低^[37]。

3.4 人工嗅觉算法

构建精准的气味识别算法模型需要可靠的数据集支持,此处“可靠”包含数据的代表性、可重复性、可再现性、体量等多个层面。基于当前最新的电子鼻建立气味数据集的时间成本较高,除了从电子鼻硬件层面优化采集时间以更高效地建立足量的数据库,算法层面的优化主要在于研发小样本学习的方法^[38],让电子鼻可以基于更小的数据库来工作是未来值得研究的气味数据学习方向。

此外,目前电子鼻采集的部分气味数据存在重复性低的问题,导致算法模型投入使用时的精度低于模型训练时的精度,主要原因是气敏材料的性能会随时间的推移而衰退,这一问题可通过引入时间变量,研发基于时间序列的气味识别算法来改善,在多个时间段规律性地采集针对相同样本的传感器阵列输出数据,建立传感器输出值的时间序列模型,借助当前传感器的状态信息和传感器的输出信息,提升传统的气味识别算法气味识别的准确度。

在研发小样本学习算法和时间序列算法的同时,电子鼻的通用性算法也有待进一步研究。由于传感器数据与硬件和环境条件密切相关,算法模型往往只针对单一的电子鼻硬件、气路及场景有效,对其他硬件平台或应用场景的迁移性较差^[39],提升模型迁移性的关键是建立一套完整、标准的气味数据集,将身边常见的气味源数字化,供学术研究及工业应用使用,支持通用性算法模型的研发^[40]。

尽管高精度是气味识别算法的第一要素^[41],算法的运行速度、训练难易程度、计算所需内存、对异常值的鲁棒性、对不确定性的度量依然是未来值得探索的研究方向。算法研发需充分考虑以上要素,方能应对各类技术挑战,使人工嗅觉长足发展^[42]。

3.5 多技术融合

气味分子由于其种类多样,具有不同物理化学特性,这既是气味分子具有不同味道的原因,也给电子嗅觉的实现带来了挑战。当前的气味传感检测手段很多,对于应用于电子嗅觉的技术来说,应当具备小型化、便携化、低能耗的特性,还应具备一

定的使用寿命。从使用的底层机制上来进行区分,大体可以分为化学传感、物理传感、生物传感3类。可能的手段千差万别,但是每种技术手段都只能“管中窥豹”,都具有各自的局限性,难以在兼顾小型化、便携化的同时,实现通用的电子嗅觉。

电子鼻作为集成化的传感阵列,其底层是由具备特异性气味指纹特性提取功能的单个传感器构成。使用标准化的单个底层气味检测技术模块封装,可以根据数据提取的需要选择不同技术手段的检测模块来进行集成,以适应于不同的适用场景。

近年来,多模态技术随着机器学习的发展而被广泛应用,通过多种技术手段的结合提高数据的维度,从而提高预测的准确度。随着科技手段的不断进步,单个传感技术手段的准确性和可靠性一定会不断提高。同时我们也需要多模态融合电子嗅觉来提高气味指纹数据的维度,多模态融合是未来通用化电子嗅觉的必由之路。将多模态的概念应用于电子嗅觉本身,利用不同底层技术手段来提取气味的指纹数据,可以提高气味识别的准确性与鲁棒性,更能反映出气味世界的丰富多样。

3.6 配套技术专业软硬件融合

随着数据量的扩充,电子嗅觉相关技术的发展也要依靠计算机算法和专业硬件技术的发展。例如,Intel公司研究人员为气味数据分析专门打造了神经网络芯片(Intel Loihi)和适配的算法,可以在线快速完成模型学习和识别气味样品^[43];Arm公司研究人员借助MEMS以及柔性芯片加工技术的进步,使得制造带有片上机器学习引擎的柔性电子鼻成为可能^[44]。此外,机器人技术对于移动式气味源搜寻也会起到重要的支持作用,例如集群机器人、水下机器人等技术可以搭载电子嗅觉设备,在不同空间、环境中搜寻特定气味源的位置(危险品、污水源等)。

4 应用展望

当前研究者普遍将关注点集中于计算机视觉、自然语言处理等领域,而嗅觉相关应用是一片蓝海,具有巨大的研究潜力和应用价值。在“数据为

王”时代,电子气味信息有望成为新的数据规模增长点,嗅觉组的另一主要目标就是挖掘嗅觉数据的应用潜力,构建“计算嗅觉”所需要的基础软硬件条件,努力打造嗅觉数据库,为产业应用提供基础技术支持。

在具体应用方面,不管是新兴科技产业还是传统产业,嗅觉计算都存在广泛的应用前景,一些潜在应用领域如下。

1) 智能家居与电子商务。

对于智能家居而言,嗅觉感知技术和其他感知技术的结合可以加深对环境、用户行为的理解,使管理系统更智能。此外,基于气味呈现的各种嗅觉应用也可以达到提升整个家居体验的作用。气味数字化技术还可以同机器人技术、远程终端控制技术相结合,为家庭打造更为智能的操作终端,当前已经有机器人相关研究开始进行气味源寻迹等方面的探索。

在电子商务领域,气味搜索是基于电子嗅觉技术的搜索应用。众所周知,当前的搜索引擎通常是基于文字输入,近年来随着技术的发展也开始陆续有基于图片、声音的搜索服务推出。嗅觉组认为搜索的渠道必将继续扩展,其中气味是当前搜索技术非常值得探索的领域,因为随着互联网电商的发展,消费者对产品质量的要求越来越高,而气味作为很多商品的重要属性,是消费者衡量产品质量的重要标准之一。从一个方面来讲,气味无法在网络上传播,只能将气味转化为数字化数据表征出来,因此电子嗅觉技术成为了较理想气味输入手段。

2) 新零售与智能农业。

新零售与智能农业都是近些年兴起的发展理念,强调利用创新的科技、管理、服务设计为传统行业赋予新的能量,同时二者具有非常紧密的联系。农产品及其他生鲜产品的质量检测是机器嗅觉的传统擅长领域,因此随着相关技术的逐渐成熟,机器嗅觉终端可以在产地、零售店中部署,为生产者和消费者提供产品质检、果蔬成熟度预测等增值服务。同时相关采集数据还可以用于建立厂家与零售店联动的产品数据库、以大数据为指导的物流仓储调动管理机制、分级定价策略指定、过期生鲜快

速分拣等领域,使得服务链条中的诸多利益相关者都能够从中获益,对于消费者可以保证买到产品的质量,对于商家可以减少浪费、降低成本,对于供应方可以增加收入,对于服务人员可以提升效率等。

3) 医疗健康。

未来在医疗健康领域,个性化的医疗服务需要获取每个患者的复杂生物信息,例如个人的体味、汗液、口气等各种分泌物的“气味”,它们在一定程度上可以反映身体的健康状况,通过分析这些“气味”来进行无创检测、快速检测是一个具有潜力的应用场景。尤其是新冠疫情中,我们的周围无时无刻不存在着环境风险或潜在传染源,基于电子鼻技术的呼出气体检测初筛新冠成为了热门研究课题^[45]。目前已经有数家单位宣布其人工嗅觉技术可以进行相关检测并具有较高的可靠性^[46];此外,类似研究还包括:通过识别口气中含有的丙酮浓度来检测糖尿病、肺癌的筛查,开展幽门螺旋杆菌检测等(需要事先服用药剂),尽管类似病情的诊断有相关的全球标准,但在具有相同诊断的个体患者之间也会存在很大的异质性,未来的医疗电子鼻也将有望对个体患者的病况进行分层。随着越来越多具有特异性响应的敏感材料被开发出来,嗅觉检测的应用范围可以继续拓宽,在大数据和人工智能的驱动下,嗅觉检测可以提供预测性的见解,使评估效果更佳具有针对性,患者或普通人可以足不出户对自己的健康状态进行查询和监测,以此建立的个人气味健康数据库也将为后续的诊疗提供有效的判断依据。

未来,以人工嗅觉机器大数据库为基础的嗅觉计算、嗅觉用户界面,将会是以视听觉信息处理为主的人工智能发展的有力补充,在食品安全、环境监测、危险品检测、智慧农业等国家战略重点应用中发挥重要作用,通过微型化、联网化、阵列化的动态识别方式,结合未来通信网络技术(5G/6G)实现全方位的立体监测和智能决策;在医疗健康、智能家居、互联网电商与新零售等贴近百姓生活的产业领域,嗅觉计算与应用设计赋予机器各式各样的“嗅觉”能力,如通过体味或口气监测疾病、理解家居行为和和环境变化、预测生鲜产品的生命周期等,

从而为提升老百姓的生活品质、共建可持续发展的经济与社会贡献绵薄之力。

5 结论

评述了人工嗅觉与嗅觉计算技术的研究进展,包括传统意义上的电子鼻技术和一些新兴的小型化谱学技术等。探讨了本领域当前的一些技术挑战和可能的应对思路。展望了嗅觉计算的未来发展方向及其实际应用。嗅觉作为一种尚未被计算机科学全面囊括的重要信息渠道,有着非常广泛的研究潜力。气味虽然看不见摸不着,但是在我们的生活中无处不在,贯穿了人们的衣食住行。高效的分析气味、挖掘数据的价值是嗅觉计算在产业落地的重中之重。在物联网时代,以数字气味识别、嗅觉大数据为核心技术的嗅觉用户界面可以在诸多新兴领域发挥积极作用。

参考文献(References)

- [1] 陈炜, 陈科璞, 周斌, 等. 嗅觉与感觉信息整合[J]. 科技导报, 2017, 35(19): 29-36.
- [2] Wang P Y, Sun Y, Axel R, et al. Evolving the olfactory system with machine learning[J]. *Neuron*, 2021, 109(23): 3879-3892.
- [3] Burlachenko J, Kruglenko I, Snopok B, et al. Sample handling for electronic nose technology: State of the art and future trends[J]. *Trends in Analytical Chemistry*, 2016, 82: 222-236.
- [4] Persaud K, Dodd G. Analysis of discrimination mechanisms in the mammalian olfactory system using a model nose[J]. *Nature*, 1982, 299(5881): 352-355.
- [5] Alam H, Saeed S H. Modern applications of electronic nose: A review[J]. *International Journal of Electrical & Computer Engineering*, 2013, 3(1): 52-63.
- [6] Cave J W, Kenneth J, Mitropoulos A N. Progress in the development of olfactory-based bioelectronic chemosensors[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2019, 123: 211-222.
- [7] Bernabei M, Pantalei S, Persaud K C. Large-scale chemical sensor arrays for machine olfaction[J]. *Essentials of Machine Olfaction and Taste*, 2016(1): 49-85.
- [8] Ban C, Min X, Xu J, et al. An artificial olfactory memory system for monitoring and recording of volatile organic compounds[J]. *Advanced Materials Technologies*, 2021, 6(11): 2100366.
- [9] Gao Z, Chen S, Li R, et al. An artificial olfactory system with sensing, memory and self-protection capabilities[J]. *Nano Energy*, 2021, 86: 106078.
- [10] Misawa N, Fujii S, Kamiya K, et al. Construction of a biohybrid odorant sensor using biological olfactory receptors embedded into bilayer lipid membrane on a chip [J]. *ACS sensors*, 2019, 4(3): 711-716.
- [11] Sun F, Lu Q, Feng S, et al. Flexible artificial sensory systems based on neuromorphic devices[J]. *ACS Nano*, 2021, 15(3): 3875-3899.
- [12] Wyszynski B, Nakamoto T. Linking biological and artificial olfaction: Biomimetic quartz crystal microbalance odor sensors[J]. *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 2009, 4(3):334-338.
- [13] 骆德汉. 仿生嗅觉原理, 系统及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [14] de Vito S, Fattoruso G, Pardo M, et al. Semi-supervised learning techniques in artificial olfaction: A novel approach to classification problems and drift counteraction [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, 12(11): 3215-3224.
- [15] Liu Q, Li X, Ye M, et al. Drift compensation for electronic nose by semi-supervised domain adaption[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2013, 14(3): 657-665.
- [16] Martinez D, Burgués J, Marco S. Fast measurements with MOX sensors: A least-squares approach to blind deconvolution[J]. *Sensors*, 2019, 19(18): 4029.
- [17] Lammers A, Neerinx A H, Vijverberg S J H, et al. The impact of short-term exposure to air pollution on the exhaled breath of healthy adults[J]. *Sensors*, 2021, 21(7): 2518.
- [18] Hayasaka T, Lin A, Copa V C, et al. An electronic nose using a single graphene FET and machine learning for water, methanol, and ethanol[J]. *Microsystems & Nano-engineering*, 2020, 6(1): 1-13.
- [19] Heracles Neo, flash gas chromatography electronic nose [EB/OL]. (2021-01-01) [2021-10-07]. <https://www.alpha-mos.com/heracles-smell-analysis>.
- [20] Analytics GmbH. products[EB/OL]. (2021-01-01)[2021-10-07]. <https://airsense.com/en/products>.
- [21] Mining biological intelligence for actionable insights[EB/OL]. (2021-01-01)[2021-10-07]. <https://aromyx.com>.
- [22] About us[EB/OL]. (2021-01-01) [2021-10-07]. <https://>

- aryballe.com/.
- [23] Son M, Park T H. The bioelectronic nose and tongue using olfactory and taste receptors: Analytical tools for food quality and safety assessment[J]. *Biotechnology advances*, 2018, 36(2): 371–379.
- [24] Jung Y H, Park B, Kim J U, et al. Bioinspired electronics for artificial sensory systems[J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(34): 1803637.
- [25] Kazy E M, Weerakkody J S, Hurot C, et al. An overview of artificial olfaction systems with a focus on surface plasmon resonance for the analysis of volatile organic compounds[J]. *Biosensors*, 2021, 11(8): 244.
- [26] Wang Z, Yi S, Chen A, et al. Single-shot on-chip spectral sensors based on photonic crystal slabs[J]. *Nature Communications*, 2019, doi:10.1038/s41467-019-08994-5.
- [27] Yang Z Y, Albrow-Owen T, Cui H X, et al. Single-nanowire spectrometers[J]. *Science*, 2019, 365(6457): 6064–6069.
- [28] 周浩林. 小型化质谱设计的探究[J]. *仪表技术*, 2014(4): 6.
- [29] Jiang T, Zhang H, Tang Y, et al. A "brick mass spectrometer" driven by a sinusoidal frequency scanning technique[J]. *Analytical Chemistry*, 2017, 89(10): 5578.
- [30] Zhang W, Chiang S, Li Z, et al. A polymer coating transfer enrichment method for direct mass spectrometry analysis of lipids in biofluid samples[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2019, 58(18): 6064–6069.
- [31] Terry S C, Jerman J H, Angell J B. A gas chromatographic air analyzer fabricated on a silicon wafer[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1979, 26(12): 1880–1886.
- [32] Narayanan S, Agah M. Fabrication and characterization of a suspended TCD integrated with a gas separation column[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2013, 22(5): 1166–1173.
- [33] Bo-Wen T, Fei F, Bin Z, et al. Study of monolithic integrated micro gas chromatography chip[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2018, 46(9): 1363–1371.
- [34] 路奇, 吴昊, 梁婉, 等. 基于气味采集的嗅觉输入界面探索[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2020, 32(7): 1018–1025.
- [35] 黄立, 张静怡, 吴昊, 等. 针对气味数据的交互式聚类可视分析框架[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2020, 32(7): 1026–1041.
- [36] Wyszynski B, Yatabe R, Nakao A, et al. Array of chemosensitive resistors with composites of gas chromatography (GC) materials and carbon black for detection and recognition of VOCs: A basic study[J]. *Sensors*, 2017, 17(7): 1606.
- [37] Rebordão G, Palma S I C J, Roque A C A. Microfluidics in gas sensing and artificial olfaction[J]. *Sensors*, 2020, 20(20): 5742.
- [38] Wang Y, Yao Q, Kwok J T, et al. Generalizing from a few examples: A survey on few-shot learning[J]. *ACM Computing Surveys (CSUR)*. 2020, 53(3): 1–34.
- [39] Röck F, Barsan N, Weimar U. Electronic nose: Current status and future trends[J]. *Chemical Reviews*, 2008, 108(2): 705–725.
- [40] Tran N, Kepple D, Shuvaev S, et al. DeepNose: Using artificial neural networks to represent the space of odors[J]. *International Conference on Machine Learning*. New York: PMLR, 2019: 6305–6314.
- [41] Hu W, Wan L, Jian Y, Ren C, et al. Electronic noses: From advanced materials to sensors aided with data processing[J]. *Advanced Materials Technologies*. 2019, 4(2): 1800488.
- [42] Chen Z, Chen Z, Song Z, et al. Smart gas sensor arrays powered by artificial intelligence[J]. *Journal of Semiconductors*, 2019, 40(11): 111601.
- [43] Imam N, Cleland T A. Rapid online learning and robust recall in a neuromorphic olfactory circuit[J]. *Nature Machine Intelligence*. 2020, 2(3): 181–91.
- [44] Ozer E, Kufel J, Myers J, et al. A hardwired machine learning processing engine fabricated with submicron metal-oxide thin-film transistors on a flexible substrate[J]. *Nature Electronics*. 2020, 3(7): 419–25.
- [45] Landhuis E. Seven technologies to watch in 2021[EB/OL]. (2021-03-11) [2021-10-06]. <http://www.nature.com/articles/d41586-021-00191-z#ref-CR15>.
- [46] Reprise de souffle face à la COVID-19[EB/OL]. (2021-03-30) [2021-10-06]. <https://www.cnrs.fr/fr/reprise-de-souffle-face-la-covid-19>.

Development and prospect of artificial olfaction technology

LU Qi^{1,2}, YANG Jiawei^{1,2}, ZHANG Yu², XU Yingqing^{1,2*}

1. The Future Laboratory, Tsinghua University, Beijing 100084, China
2. Academy of Arts & Design, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract As a kind of chemical information, odor is ubiquitous in life. Therefore, the research of artificial olfaction technology has far-reaching strategic significance and wide application scope. This paper firstly introduces the concept and definition of artificial olfactory perception technology, and compares the development of artificial olfactory technology of bionic type and chemical analysis type with related researches; meanwhile, the research work of Olfactory Computing Group in artificial olfaction and olfactory computing is used as a case study to further elaborate the development trend from artificial olfactory technology to olfactory computing technology in this field. In addition, this paper illustrates the current technical challenges and possible solution paths of olfactory computing research, as well as the prospect of landing applications of olfactory computing in smart home, smart agriculture, medical health and other industries. The huge potential value of odor information in real environment has not been fully explored, so the research of artificial olfaction technology for different application scenarios may become an important research topic in the future.

Keywords artificial olfaction; olfactory computing; odor collection; odor recognition ●



(责任编辑 徐丽娇)