

电子皮肤技术中的多模态柔性传感器开发

张 进

(江苏省丰县中等专业学校,江苏省徐州市,221600)

摘要 电子皮肤旨在模仿人类皮肤的感知功能,借助柔性传感器对压力、温度、湿度、应变等多种物理与化学信号进行实时监测,实现对外部环境以及人体生理状态的精确感知。不过,单一功能的柔性传感器如今已无法契合复杂多变的实际应用场景要求。多模态柔性传感器因具有可同时感知多种类型信号的特质,成为突破电子皮肤技术发展困境的核心方向。本文围绕电子皮肤技术中多模态柔性传感器的开发,针对其作用机理、关键技术应用展开探讨。

关键词 电子皮肤;多模态柔性传感器;开发

中图分类号:TP212 文献标识码:B

文章编号:1008-0899(2026)06-0035-03

电子皮肤技术从诞生伊始,就以仿生学为指导方向,尝试复制人类皮肤的感知智能,在医疗监测、智能机器人、虚拟现实等诸多领域打造更为自然且高效的交互界面。多模态柔性传感器的出现,为电子皮肤技术带来了变革性的突破。它借助功能材料以及微纳结构的创新设计,实现多种感知功能的有机整合,使得电子皮肤可如同人类真实皮肤那般具备全面的感知能力。目前,多模态柔性传感器的开发依旧处于技术攻坚的阶段,探索其未来应用的众多潜在可能性是一项关键的研究课题。

1 多模态柔性传感器在电子皮肤技术发展中的重要性

1.1 实现全面感知提升电子皮肤的感知精度与效率

人类的皮肤有同时感知压力、温度、湿度以及触觉等多种外界刺激的能力,之后会做出综合的反应,多模态柔性传感器的出现,让电子皮肤拥有了模拟人类皮肤这种多维感知能力的可能性,随着新材料、新工艺的发展,研究人员不再满足于利用触觉传感器采集力信息,也模拟生物皮肤复杂属性与功能(如皮肤自身的高柔性、自愈合、自清洁等属性以及皮肤对温度、湿度、硬度、粘度的感知能力^[1])。

作者简介:张进(1978~),男,江苏徐州丰县人,本科,高级讲师,研究方向:电子信息技术。

把压力传感器、温度传感器、应变传感器等多种不同功能的传感单元集成在柔性基底上,电子皮肤就可实时获取环境与人体的多元信息,并且进行融合处理。比如在医疗监护的场景当中,多模态柔性传感器可以监测患者的心率、血压等生理指标,还可感知体温的变化以及皮肤的湿度,以此更全面、精确地评估患者的健康状态。

1.2 拓展应用边界推动电子皮肤多领域应用落地

多模态柔性传感器赋予电子皮肤更为强大的功能,能使其契合不同领域多样的需求,推动电子皮肤在更多场景得以应用。在智能机器人领域,配备多模态柔性传感器的电子皮肤,可使机器人感知物体的形状、质地以及温度,实现更为精细的操作,比如灵巧地抓取易碎物品,或者在复杂环境中与人类进行安全且自然的交互协作。在虚拟现实(VR)和增强现实(AR)领域,多模态柔性传感器能让用户借助穿戴设备真切地感受到虚拟环境中的触觉、压力等反馈,提高沉浸感与交互体验,为VR/AR技术的普及应用提供有力支持。在运动监测领域,多模态柔性传感器可实时监测运动员的肌肉状态、运动姿态以及环境参数,帮助运动员优化训练方案,预防运动损伤。这些应用场景的拓展,让电子皮肤从实验室研究逐渐迈向产业化应用,创造出更大的经济价值与社会价值。

1.3 促进技术创新引领电子皮肤技术发展方向

多模态柔性传感器的研发涉及材料科学、微纳加工技术以及信号处理等众多学科领域,其发展进

程必定会推动相关技术实现创新与突破。在材料层面,需研发新型材料,这种材料要有出色的柔韧性、高灵敏度,同时还可兼容不同的传感功能。在制造工艺方面,对微纳加工技术提出了更高精度的要求,借助该技术可实现多种传感单元在柔性基底上的高密度集成。在信号处理领域,要着手开发更为先进的算法,以此来解决多模态信号的融合与解耦问题。成功攻克这些技术难题,不仅可提高多模态柔性传感器的性能,而且还会为电子皮肤技术的整体发展提供新的思路与方法。

2 多模态柔性传感器在电子皮肤中的作用机理

2.1 多元信号感知机制

多模态柔性传感器依靠不同材料的特性来实现多信号感知,在压力感知方面,大多时候运用压阻、电容以及压电原理,其中压阻式传感器会把碳纳米管等纳米材料混入柔性基底之中,当受到压力时,其内部导电通路发生变化,使电阻改变,以此输出电信号,电容式传感器是借助改变极板间距等方式引发电容变化,压电式传感器则是由于材料的压电效应产生电荷^[2]。温度感知依靠热电材料的塞贝克效应,基于温差产生热电势来检测温度;湿度感知利用聚合物等敏感材料,湿度变化会致使其电阻、电容或者质量改变,输出信号。这些依据不同原理的感知单元被集成在柔性基底上,为电子皮肤采集多元的原始数据。

2.2 信号传输与预处理机制

由传感器采集而来的微弱信号,需要经过稳定的传输过程以及预处理操作。柔性电子皮肤借助银纳米线、液态金属这类可拉伸导电材料来构建电路,如此一来,即便皮肤出现大幅度的变形情况,也可保证信号实现稳定传输。在预处理这一环节当中,滤波电路发挥作用去除环境噪声所带来的干扰,以此保证信号的纯净度。放大电路依据信号的特性以及传感器的灵敏度,把毫伏级别的微弱信号(如压力信号)放大到伏特级,方便后续进行模数转换以及数字处理,降低信号失真的可能性,为多模态信号融合奠定基础。

2.3 多模态信号融合处理机制

多元信号只有经过融合处理之后才可发挥出自身的价值。贝叶斯网络是基于概率推理的,它借助条件概率表来融合不同模态信号的概率分布,在

处理不确定性事件方面表现较为出色。卡尔曼滤波适用于动态系统,它会结合不同时刻以及多模态信号来对目标状态估计进行优化。深度学习神经网络有强大的特征提取能力,可构建深度网络以自动挖掘混合信号的复杂特征与关联。比如在人机交互当中,神经网络会融合压力信号与温度信号,精准地判断握持力度和物体温度,赋予电子皮肤智能决策的能力,使得其应用场景得到拓展。

3 多模态柔性传感器在电子皮肤技术发展中的应用建议

3.1 优化材料性能实现高效感知

材料的性能对于多模态柔性传感器的感知能力起着决定性作用,在压力传感单元当中,会把碳纳米管、石墨烯这类纳米材料和硅橡胶、聚氨酯等弹性体进行复合,借助纳米材料良好的导电性以及弹性体的柔韧性,搭建起高灵敏度的压阻网络,就拿碳纳米管/硅橡胶复合材料来说,当受到压力的时候,材料内部碳纳米管之间的接触电阻会出现变化,致使整体电阻值改变,这种电阻变化跟压力大小呈现出线性关系,从而实现对压力的精确测量。温度传感依靠碲化铋、氧化锰等热电材料,凭借对其纳米结构以及掺杂浓度进行调控,提高塞贝克效应。研究发现,把碲化铋制成纳米薄膜结构之后,其热电转换效率有所提高,可对0.1℃级的温度变化实现快速响应。湿度传感单元可以选用有溶胀特性的水凝胶材料,当水分子渗透到水凝胶内部时,会引起凝胶的离子迁移率和介电常数发生改变,借助检测这种变化,可输出对应的湿度信号。

3.2 创新结构设计实现功能集成

多模态传感器集成最关键的是合理的结构设计,采取分层堆叠结构,把具有不同功能的传感层如压力、温度、应变传感层等按照顺序叠加起来,各层之间用柔性绝缘介电层隔开,以此避免信号出现串扰。最下面的一层是温度传感层,中间的一层是压力传感层,最上面的一层是应变传感层,每层之间借助聚酰亚胺薄膜来实现绝缘隔离^[3]。在平面方向上,将同一类的传感单元以阵列的形式排列,提升空间分辨率。在医疗监测电子皮肤里,布置一个4×4的压力传感器阵列,可精确测绘出人体受压部位的分布状况,为褥疮预防提供数据支持。另外,设计可拉伸的柔性互连结构很关键,利用液态

金属制作成蛇形导电路径,在拉伸过程中,这种线路的蛇形结构会慢慢展开,保持良好的导电性。也可以采用弹性导电聚合物薄膜,连接各个传感单元与信号处理模块,保证电子皮肤在弯曲、拉伸等复杂形变的情况下,依然可维持稳定的信号传输以及功能实现。在实际应用当中,基于液态金属互连的电子皮肤,就算经历1000次以上的弯曲循环,信号传输稳定性依旧能保持在95%以上。

3.3 改进信号处理实现精准分析

多模态传感器所采集的原始信号要经过有效的处理之后才可发挥出其应有的价值。在电子皮肤中嵌入微型信号处理芯片,该芯片集成了低噪声放大器以及带通滤波器等电路模块,可对采集到的微弱信号进行放大及降噪等预处理工作,以此消除环境干扰。就压力信号而言,低噪声放大器可将微伏级别的原始信号放大至伏特级别,便于后续处理;带通滤波器则可滤除50Hz的工频干扰等噪声。运用自适应加权融合算法,依据不同的应用场景动态调整各模态信号的权重。在运动监测场景里,当检测到跑步动作时,系统会自动提升加速度与压力信号的权重,更准确地计算步数以及运动距离;在医疗监测过程中,提高心率、体温等信号的权重,以便及时发现异常生理指标。引入边缘计算技术,将部分数据处理工作提前到电子皮肤端,减少数据传输量,实现信号的实时分析以及快速反馈。

3.4 优化制造工艺实现量产应用

制造工艺的优化乃是推动多模态传感器规模化应用的根基。借助光刻以及喷墨打印等微纳加工技术,精准把控传感单元的图案化以及尺寸精度,实现高密度集成。就喷墨打印技术而言,依靠对喷头参数进行调节,可将导电墨水精准地打印在柔性基底之上,形成宽度仅为数十微米的电极图案。推进卷对卷印刷工艺的发展,借助连续化生产的方式,在大面积柔性基底上迅速制备传感器阵列,极大地降低生产成本。运用R2R工艺生产的柔性压力传感器阵列,生产效率明显提高。在封装环节采用聚二甲基硅氧烷等柔性封装材料,在保护传感器使其免受外界环境侵蚀的同时,维持电子皮肤的柔韧性以及贴合性。PDMS封装层有良好的防水

以及防尘性能,而且还可耐受一定程度的机械摩擦。凭借建立标准化工艺流程与质量控制体系,实现多模态柔性传感器的稳定量产,加快电子皮肤技术的产业化进程,为大规模应用奠定了基础^[4]。

3.5 完善测试体系确保性能可靠

构建全面的测试体系是保证传感器性能的必要举措。在力学性能测试环节,模拟电子皮肤在弯曲、扭转、拉伸等不同形变状态下的工作情形,检测传感器的灵敏度、线性度等参数的变化状况。举例而言,将电子皮肤反复弯曲至180°,测试1000次之后,压力传感器的灵敏度变化率要控制在 $\pm 5\%$ 以内。在环境适应性测试方面,将其放置于高温、低温、高湿度等极端环境之中,评估信号输出的稳定性。在高温环境里,温度传感器的测量误差要小于 $\pm 1^\circ\text{C}$,通过长期老化测试,监测传感器性能随时间的衰减态势,预估其使用寿命。运用仿真软件对多模态信号融合算法开展模拟验证,优化算法参数,提高信号处理精度,通过模拟不同场景下的信号输入,调整算法权重参数,使信号融合误差降低,多维度且系统性地测试,为多模态柔性传感器在电子皮肤中的可靠应用提供保障。

4 结语

综上所述,从初代传递到可自主修复,柔性电子皮肤在科技工作者的努力下完成了一次次蜕变。科技的发展往往始于各个原点、聚沙成塔,它的研发以及应用为智能交互创造了诸多可能性,从材料方面的创新到工艺上取得突破,从信号处理的优化再到多场景应用范围的拓展,每一次的探索都促使电子皮肤技术朝着更加智能和更加可靠的方向不断前进。

参考文献

- [1] 彭欢,熊鹏文,张宇,等.面向机器人交互识别的抗干扰多模态柔性电子皮肤[J].机器人,2025,47(1):55.
- [2] 熊作平.面向可穿戴电子的柔性触觉传感器阵列制备及应用研究[D].中国科学技术大学,2024.
- [3] 何崑,邓凌,林美霞,等.冬季运动智能柔性人台关键技术开发[J].纺织学报,2024,45(02):221-230.
- [4] 吴帅帅,高国伟,刘硕.高灵敏度柔性电子皮肤的研究与应用进展[J].传感器与微系统,2023,42(7):1-5.