

信息与知识获取传感器调研

杨泉¹ 苏柏闻² 钱文韬³
2022211286¹ 2022212263² 2022211152³

摘要

这篇调研报告是我们小组针对传感器的研究与学习总结。我们将从触摸传感器、声音传感器、环境与可持续化分析、创新与思考这四个板块进行阐述。希望这份报告在总结工作的同时，能为传感器的相关发展带来一些星星之火的力量。

分工：杨泉——触摸传感器、创新与思考；钱文韬：声音传感器；苏柏闻——环境与可持续化分析；

关键词：传感器、可持续化、未来创新

1 触摸传感器

目前，移动设备触摸传感器主要包括电阻式、电容式、红外线、表面声波和压电式等类型 [9, 15]。电阻式传感器通过两层导电薄膜受压接触定位触点，成本低但仅支持单点触控；电容式传感器分为自电容和互电容两类 [18]，前者通过电极与人体间的电容变化检测触控或悬停位置，后者利用行列电极耦合电容实现多点触控，已成为智能手机主流技术；红外线传感器依赖屏幕边缘的红外光束网格定位遮挡物，适用于大屏设备但精度较低；表面声波传感器通过声波衰减检测触点，透光率高但易受污染；压电式传感器则通过压力形变生成信号，常见于压力触控功能（如 3D Touch）。此外，现代技术多采用混合方案，例如将电容传感器与握持检测结合，提升交互感知维度。

在这其中，电容式传感器是当前主流技术 [4]，其核心原理依赖于电场变化。自电容模式通过测量单个电极与人体间的电容值变化，可检测手指接近高度（悬停）和粗略位置，但多点触控时易出现“鬼影”；互电容模式则通过行列电极的交叉点独立检测耦合电容变化，精确定位多点触控坐标。例如，手机屏幕在用户触摸时，互电容传感器会逐行扫描电场干扰信号，实时计算触点坐标，同时结合自电容检测手指悬停轨迹。技术演进上，In-Cell 和 On-Cell 方案将传感器集成到显示屏内部，减少厚度并提升灵敏度；未来趋势则聚焦多模态融合（如电容 + 压力 + 温度传感）和 AI 算法优化，通过预判用户意图实现无缝交互 [6]。

近年来，移动设备触摸传感器的研究与应用在国内外均呈现多维突破。国外研究以技术创新为核心，聚焦高精度交互与多模态感知融合，例如微软提出的预触摸（Pre-

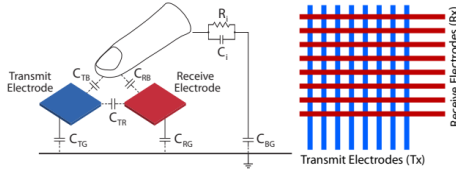


图 1: 互电容触摸感应原理

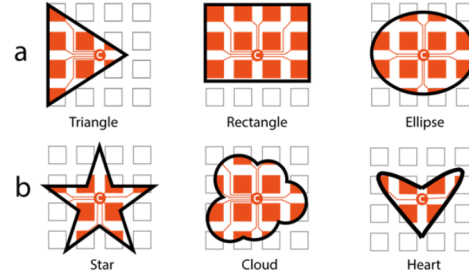


图 2: 常见的触摸连接器接线

Touch) 技术通过自电容矩阵实现多指悬停与握持检测，三星、苹果则分别探索了压力传感 (3D Touch) 和低延迟触控反馈；学术领域围绕轨迹预测、手势意图识别等方向展开 [13, 15]，如 MIT Media Lab 在柔性触觉传感器上的探索为可穿戴设备交互提供了新思路。国内研究则更注重产业落地与场景适配，华为、小米等企业在电容触控芯片的灵敏度和抗干扰能力上持续优化，并推动屏下指纹、车载触控等垂直领域应用，学术界则结合 AI 算法提升复杂场景下的触控语义理解（如中科院在动态手势识别中的深度学习模型）移动设备触摸传感器对环境的影响主要体现在资源消耗与电子废弃物增长两方面。其制造依赖稀土金属和复杂半导体材料，开采与提炼过程可能造成生态破坏（如土壤污染、水资源消耗），而频繁的设备更新换代加速了电子垃圾的堆积 [9]，2021 年全球电子废弃物已达 5740 万吨，其中仅 20% 被规范回收。此外，电容式传感器的高精度需求催生了多层 PCB 板与纳米涂层技术，生产过程中高能耗与化学溶剂使用进一步增加碳足迹。社会层面，触摸传感器虽提升了数字包容性（如为残障用户提供手势交互），但也加剧了数字鸿沟——依赖触控操作的设备可能排斥不熟悉技术的老年群体，而矿产开采背后的劳工权益问题（如刚果钴矿争议）则凸显供应链伦理挑战。可持续发展需推动模块化设计延长设备寿命、开发生物可降解传感器材料，并通过循环经济降低全生命周期环境影响 [3]。

进一步地，一种新型传感器趋势——预触摸传感器开始走进大众视野 [7]。现有移动触摸交互研究（如 Medusa 的悬停控件、Air+Touch 的混合手势）多聚焦于单一模态的显性操作，而传统触摸屏因局限于二维接触点感知，无法捕捉人类抓握行为的连续性特征（如抓握姿态对手指轨迹的约束、接触前的手部运动意图）。这种割裂导致交互设计难以匹配自然的人体工效，例如单手拇指操作因缺乏握持上下文感知而被迫采用低效的全局界面适配，多指协同动作（如捏合缩放）也因缺乏悬停阶段的运动预测需依赖接触后延迟响应，形成“感知-反馈”的语义断层 [12]。预触摸技术通过融合边缘握持传感与多指悬停追踪，在三维空间重建了“抓握-接近-接触”的连续行为链条，其创新性体现为将传感维度从平面触点扩展至人体工效上下文 [10]。这种多模态融合（如通过握持方向自动翻转控件布局、依据悬停轨迹预判操作类型）使移动交互从被动响应转向主动适配，更贴近人类自然动作的隐含意图。相较于压力传感 (3D Touch) 或单点悬停（三星浮动触控）等单点增强方案，预触摸通过握持与悬停的协同感知，为混合手势



图 3: 预触摸技术

(如拇指触控 + 食指悬停呼出菜单) 和动态界面 (Ad-Lib Interface) 提供了真正的上下文驱动框架, 标志着移动交互从” 触控反馈” 向” 行为预判” 的范式转变 [7]。

2 声音传感器

智能手机声音传感器通过捕捉声波振动实现环境感知, 其核心原理包括声电转换、信号处理等环节。以 MEMS 麦克风为例, 其利用电容变化将声波转化为电信号, 硬件设计需平衡微型化与性能需求 [5]。值得注意的是, 智能手机的音频信号路径涉及传感器、模数转换器和操作系统协同工作, 这种成熟架构为低成本声学测量提供了基础 [5]。相较于人类听觉系统, 声音传感器在技术参数上具有显著优势, 例如 PowerPhone 通过软件重构将采样率提升至 192kHz, 使传感分辨率从 7cm 突破至 1cm, 甚至能检测 2 m 的细微振动 [2]。这种硬件性能的提升不仅为技术发展奠定基础, 也直接催生了更复杂的应用场景。例如, BatMapper 利用声学信号构建室内平面图时, 通过概率回声关联算法将距离精度控制在 1-2 厘米, 其底层逻辑正是基于高精度声波传播时间的解算 [19]。

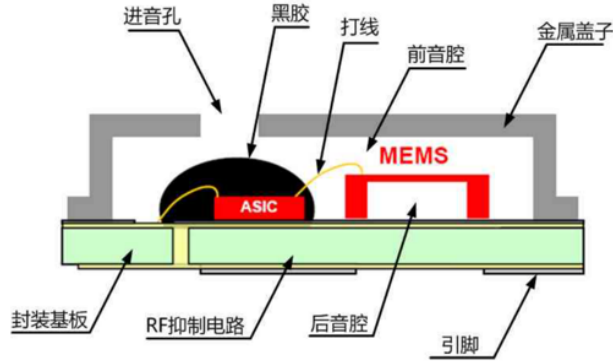


图 4: mems 麦克风结构图

随着传感精度的提升，声音传感器的应用场景从基础功能快速扩展至健康监测、环境感知等多元化领域。以驾驶安全为例，D³-Guard 系统通过分析多普勒频移识别点头、打哈欠等疲劳驾驶行为，准确率达 93.31%^[17]，其原理类似于人类对动作声音的条件反射。而在环境感知方面，AcuTe 利用双麦克风测算声速变化，以 0.3°C 中位精度实现环境温度监测^[1]，这种技术突破使得智能手机能够替代传统高能耗专业设备，直接支持碳中和目标。然而，技术的泛化能力也带来了不可忽视的隐私风险——KeystrokeSniffer 算法通过声学信号窃取键盘输入，即使在未知环境和受害者情况下，击键预测准确率仍达 79.5%^[8]，这揭示了高性能传感器在恶意攻击中的潜在威胁。

隐私与安全的挑战促使研究者探索防护技术与伦理平衡机制。例如，MicPrint 提出通过麦克风硬件指纹实现设备认证，要求用户主动遮挡麦克风孔以触发特征采集，在噪声环境下仍保持高可靠性^[11]。这种“主动式权限”设计为安全防护提供了新思路，但其应用效果仍受限于用户行为习惯。更具隐蔽性的攻击手段也在同步演进，例如 OISMic 利用智能手机光学防抖组件的电磁泄漏实现窃听，其原型电路可捕获 0.1mm 级振动引发的信号^[14]。此类攻击突破了传统传感器的权限限制，凸显了技术发展中攻防博弈的复杂性。

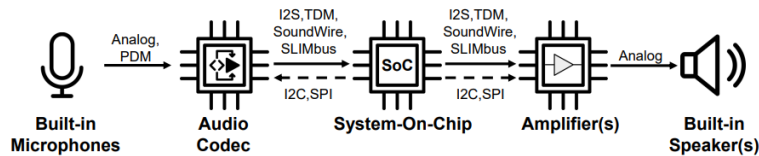


图 5: 传统音频处理链路

在技术迭代与安全博弈的背景下，声音传感器的社会影响呈现双面性。从资源效率角度看，BatMapper 仅需 2-3 分钟步行即可生成室内地图，较传统测绘减少 90% 工作量^[19]，而 UFace 系统通过分析声音信号识别 7 种面部表情，准确率 87.8%^[16]，这些创新降低了专用硬件部署成本。然而，伦理问题随之凸显：疲劳驾驶检测系统需持续采集车内声学数据，可能暴露用户对话内容^[17]；表情识别技术虽推动无障碍交互发展，

但也可能侵犯个人情绪隐私 [16]。这种矛盾要求技术开发者在便利性与隐私权之间建立动态平衡，例如欧盟 GDPR 的“隐私设计”原则可被整合至传感器开发流程中。

当前技术瓶颈主要集中在环境适应性与系统鲁棒性层面。例如，BatMapper 在门检测中存在 8% 的误差率 [19]，而 KeystrokeSniffer 在强噪声场景下的性能尚未充分验证 [8]。突破这些限制需多维度创新：在硬件层面，可探索生物可降解材料减少 MEMS 器件的环境冲击 [5]；在算法层面，D³-Guard 采用的 LSTM 网络可移植至终端芯片，结合差分隐私技术降低数据泄露风险（文本 4、7）；在系统架构层面，需建立声学模块接口标准促进设备回收 [19]，延长智能手机传感器的生命周期。

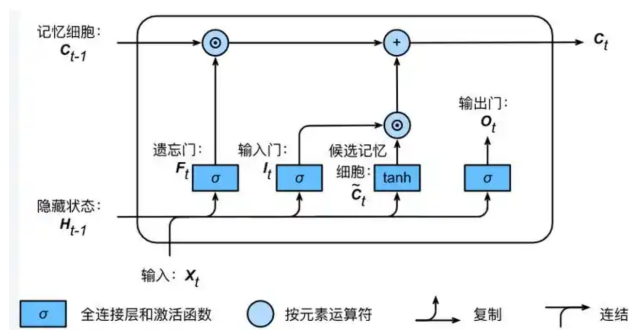


图 6: LSTM 结构图

未来发展方向将聚焦于技术融合与社会化协同。一方面，多模态感知成为必然趋势——UFace 已尝试融合声学 with 视觉特征 [16]，而 OISMic 揭示的电磁信号特性可被反向用于开发新型加密协议 [14]。另一方面，可持续发展路径需产学研协同推进：通过推广 MicPrint 的硬件指纹机制 [11] 和 AcuTe 的众包测温模式 [1]，构建兼顾效率与安全的生态系统。只有通过跨学科协作，声音传感器才能从“单一感知工具”转型为支撑智慧城市、绿色医疗的核心基础设施。

3 环境与可持续化分析

传感器技术的普及与应用在推动数字社会进步的同时，也深刻影响着环境与社会可持续发展轨迹。从环境维度看，传感器（如智能手机中的电容式触摸屏 [18] 和 MEMS 麦克风 [5]）的制造过程消耗大量稀土金属、半导体材料和能源。稀土开采常伴随严重的生态破坏，包括土壤污染和水资源消耗，而多层 PCB 板、纳米涂层以及精密 MEMS 器件的生产则涉及高能耗工艺和化学溶剂使用，显著增加了碳足迹。更严峻的是，设备快速更新换代导致电子废弃物激增（2021 年全球已达 5740 万吨¹），其中仅有少部分被规范回收，含有有害物质的废弃传感器成为长期的环境负担，加剧资源枯竭和土地污染风险。

在社会层面，传感器技术呈现出显著的“双刃剑”效应。一方面，它极大提升了信息获取的便捷性和人机交互的自然度，赋能残障人士（如通过手势交互）、提升公共安

¹<https://news.sciencenet.cn/htmlnews/2021/10/466970.shtm>

全（如疲劳驾驶检测）、优化资源效率（如声学测绘减少工作量），并催生了低成本环境监测（如众包测温）等创新应用，增强了社会的包容性和韧性。然而，另一方面，高性能传感能力也带来了严峻的隐私挑战：声音传感器可被恶意利用来进行窃取甚至进行隐蔽窃听，触摸交互结合 AI 意图分析可能过度窥探用户行为；同时，对触控交互的高度依赖可能加深数字鸿沟，排斥不熟悉技术的老年群体……

上面的担忧绝非空穴来风，关于传感器可持续化的发展，不仅仅局限于环境因素，传感器被恶意利用以及隐私泄露等社会因素也应该被重点考虑。以前文的声音传感器为例，已有论文揭示智能手机的高精度麦克风可被恶意利用 [8]，通过声波分析（时间差 TDoA 和能量衰减 PSD）在完全未知环境（键盘类型、麦克风位置）和陌生用户习惯下实现键盘窃听，如下图结果所示——攻击者仅需将手机置于受害者附近（有效半径 15cm），即可在嘈杂环境中以 79.5% 的准确率还原击键内容，这进一步暴露了手机传感能力与隐私保护的深层矛盾：性能越强的传感器一旦被滥用，用户将面临“无感知、零接触”的隐私泄露风险。

Words	degree	university	children	what	book	promotion	campaign	honey	quiet
Length	6	10	8	4	4	9	8	5	5
Position in results (User1)	1	1	1	1	1	1	1	1	2
Position in results (User2)	1	1	1	1	3	1	1	1	2
Position in results (User3)	1	1	1	2	1	1	2	1	1
Average position	1.00	1.00	1.00	1.33	1.67	1.00	1.33	1.00	1.67
Words	bring	misfortune	friend	country	nothing	proceed	could	just	zoom
Length	5	10	6	7	7	7	5	4	4
Position in results (User1)	1	1	1	1	1	2	5	1	3
Position in results (User2)	1	1	3	4	1	1	1	1	2
Position in results (User3)	1	1	1	5	1	1	1	1	1
Average position	1.00	1.00	1.67	3.33	1.00	1.33	2.33	1.00	2.00

图 7: 单词预测：结果中的位置意味着预测结果中哪个位置是真正的单词

迈向可持续的未来，传感器技术亟需在创新与责任间寻求平衡。环境层面，需推动模块化设计延长设备寿命，研发可生物降解的传感器材料以减少电子垃圾和污染，并建立完善的循环经济体系提升资源回收率。社会层面，必须将“隐私设计”原则（如主动式权限控制 MicPrint）和伦理考量嵌入技术开发全周期，通过严格的法规（如 GDPR: General Data Protection Regulation ²），并设计更具包容性的交互方式以弥合数字鸿沟。唯有通过技术创新、政策引导和公众意识的协同，传感器才能真正成为驱动环境友好型社会进步的核心力量，而非可持续性发展的瓶颈。

²<https://gdpr-info.eu/>

4 创新与思考

毫无疑问，传感器技术正在革新，正在经历从单一功能感知向多模态融合、从被动响应向主动预判的深刻范式转变。触摸传感器领域，以预触摸（Pre-Touch）技术为代表的创新，通过将握持姿态、多指悬停轨迹与平面触点感知深度融合，构建了“抓握-接近-接触”的连续三维行为链条，实现了从“感知触点”到“理解意图”的跨越。这不仅显著提升了人机交互的自然度与效率（如依据握持方向动态调整 UI、预判操作类型），更开创了“上下文驱动交互”的新框架，为混合手势（如拇指触控 + 食指悬停）和自适应界面（如 Ad-Lib Interface）提供了技术基石。声音传感器领域则展现出硬件性能极限突破（如高采样率、声波振动检测）与普适化应用场景（如无源测温、室内测绘）的双重创新潜力，其将智能手机转化为低成本、高精度的环境感知平台。然而，这些强大的感知能力如同一把双刃剑，其带来的深度隐私侵犯风险（如声波窃听、无感行为监测）和环境资源消耗（稀土开采、电子垃圾）凸显了技术创新与社会责任、环境可持续性之间亟待弥合的鸿沟。

正如前面提到的，面向未来，传感器技术的创新方向应超越单纯性能参数的提升，致力于构建“负责任感知”的新范式。一方面，需深化多模态融合与 AI 赋能，例如将电容触摸的压力、温度信号与声音传感器的环境参数结合，结合深度学习模型实现更精准、更符合人体工效的意图理解与环境感知，甚至探索传感器群（如多设备协同）构建分布式感知网络的可能。另一方面，必须将“隐私设计”、“包容性设计”与“循环设计”理念深度融入技术生命周期：在硬件层面推动生物可降解材料、模块化结构与能源效率优化；在算法层面嵌入差分隐私、联邦学习等机制保障数据安全；在交互层面兼顾触控的便捷性与传统方式的包容性（如为视障用户保留触觉反馈、为老年用户简化操作）。唯有构建技术创新、伦理约束、环境友好三者协同发展的生态体系，移动设备传感器才能真正从信息获取工具进化为推动社会福祉提升、助力可持续发展的核心引擎。

References

- [1] Chao Cai, Zhe Chen, Henglin Pu, Liyuan Ye, Menglan Hu, and Jun Luo. Acute: acoustic thermometer empowered by a single smartphone. In *Proceedings of the 18th Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, SenSys '20, page 28–41, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery. ISBN 9781450375900. doi: 10.1145/3384419.3430714.
- [2] Shirui Cao, Dong Li, Sunghoon Ivan Lee, and Jie Xiong. Powerphone: Unleashing the acoustic sensing capability of smartphones. In *Proceedings of the 29th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, ACM MobiCom '23. Association for Computing Machinery, 2023. ISBN 9781450399906. doi: 10.1145/3570361.3613270.
- [3] Diego López de Ipiña, Iñaki Vázquez, and David Sainz. Interacting with our environment through sentient mobile phones. In *The 2nd International Workshop on Ubiquitous Computing*, volume 2, pages 19–27. SCITEPRESS, 2005.
- [4] Li Du. An overview of mobile capacitive touch technologies trends. *arXiv preprint arXiv:1612.08227*, 2016.
- [5] Benjamin M Faber. Acoustical measurements with smartphones: Possibilities and limitations. *Acoustics today*, 13(2):10–17, 2017.
- [6] Robert Hardy and Enrico Rukzio. Touch & interact: touch-based interaction of mobile phones with displays. In *Proceedings of the 10th international conference on Human computer interaction with mobile devices and services*, pages 245–254, 2008.
- [7] Ken Hinckley, Seongkook Heo, Michel Pahud, Christian Holz, Hrvoje Benko, Abigail Sellen, Richard Banks, Kenton O'Hara, Gavin Smyth, and William Buxton. Pre-touch sensing for mobile interaction. In *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 2869–2881, 2016.
- [8] Jinyang Huang, Jia-Xuan Bai, Xiang Zhang, Zhi Liu, Yuanhao Feng, Jianchun Liu, Xiao Sun, Mianxiong Dong, and Meng Li. Keystrokesniffer: An off-the-shelf smartphone can eavesdrop on your privacy from anywhere. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 19:6840–6855, 2024. doi: 10.1109/TIFS.2024.3424301.
- [9] Wazir Zada Khan, Yang Xiang, Mohammed Y Aalsalem, and Quratulain Arshad. Mobile phone sensing systems: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 15(1):402–427, 2012.

- [10] Huy Viet Le, Sven Mayer, Patrick Bader, Frank Bastian, and Niels Henze. Interaction methods and use cases for a full-touch sensing smartphone. In *Proceedings of the 2017 CHI conference extended abstracts on human factors in computing systems*, pages 2730–2737, 2017.
- [11] Yongwoo Lee, Jingjie Li, and Younghyun Kim. Micprint: acoustic sensor fingerprinting for spoof-resistant mobile device authentication. In *Proceedings of the 16th EAI International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Computing, Networking and Services, MobiQuitous '19*, page 248–257, New York, NY, USA, 2020. Association for Computing Machinery. ISBN 9781450372831. doi: 10.1145/3360774.3360801.
- [12] Mahsan Rofouei, Andrew Wilson, AJ Brush, and Stewart Tansley. Your phone or mine? fusing body, touch and device sensing for multi-user device-display interaction. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pages 1915–1918, 2012.
- [13] Dominik Schmidt, Fadi Chehimi, Enrico Rukzio, and Hans Gellersen. Phonetouch: a technique for direct phone interaction on surfaces. In *Proceedings of the 23rd annual ACM symposium on User interface software and technology*, pages 13–16, 2010.
- [14] Ziyu Shao, Yuchen Su, Yicong Du, Shiyue Huang, Tingyuan Yang, Hongbo Liu, Yanzhi Ren, Bo Liu, Huan Dai, and Shuai Li. Oismic: Acoustic eavesdropping exploiting sound-induced ois vibrations in smartphones. In *2024 21st Annual IEEE International Conference on Sensing, Communication, and Networking (SECON)*, pages 1–9, 2024. doi: 10.1109/SECON64284.2024.10934876.
- [15] Tam Vu, Akash Baid, Simon Gao, Marco Gruteser, Richard Howard, Janne Lindqvist, Predrag Spasojevic, and Jeffrey Walling. Capacitive touch communication: A technique to input data through devices’ touch screen. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 13(1):4–19, 2014. doi: 10.1109/TMC.2013.116.
- [16] Shuning Wang, Linghui Zhong, Yongjian Fu, Lili Chen, Ju Ren, and Yaoyue Zhang. Uface: Your smartphone can ”hear” your facial expression! *Proc. ACM Interact. Mob. Wearable Ubiquitous Technol.*, 8(1), March 2024. doi: 10.1145/3643546.
- [17] Yadong Xie, Fan Li, Yue Wu, Song Yang, and Yu Wang. Real-time detection for drowsy driving via acoustic sensing on smartphones. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 20(8):2671–2685, 2021. doi: 10.1109/TMC.2020.2984278.
- [18] Ik-Seok Yang and Oh-Kyong Kwon. A touch controller using differential sensing method for on-cell capacitive touch screen panel systems. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 57(3):1027–1032, 2011.

- [19] Bing Zhou, Mohammed Elbadry, Ruipeng Gao, and Fan Ye. Batmapper: Acoustic sensing based indoor floor plan construction using smartphones. In *Proceedings of the 15th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*, MobiSys '17, page 42–55, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery. ISBN 9781450349284. doi: 10.1145/3081333.3081363.