DOI: 10.16781/j.CN31-2187/R.20240651

·综　述·

可穿戴贴片式超声成像在实时无创可视化监测领域的研究进展

刘　甜[1]，赵佳琦[1,2*]，李晓兵[3]，郭芳琪[1]，李　慧[1]，蒋卓韵[3]，聂生东[3]，陶　乐[2]
1. 同济大学附属上海市第四人民医院超声医学科，上海 200434
2. 海军军医大学（第二军医大学）第二附属医院超声诊断科，上海 200003
3. 上海理工大学，上海 200093

［**摘要**］ 随着现代医疗科技的不断发展，可穿戴贴片式超声技术逐步成为动态实时监测人体可视化信息的重要手段。该技术将超声成像的精确性与可穿戴设备的便捷性相结合，实现了对人体内部生理参数的持续、动态监测，为医疗诊断和健康监测提供了更为精准、高效的方法。可穿戴贴片式超声能够实时获取人体内部的图像信息，包括心脏、血管、肌肉、骨骼等各个部位的结构和功能状态，为疾病的早期发现和诊断提供了有力支持。本文综述了可穿戴贴片式超声的主要临床应用场景和前沿研究进展，并讨论了该成像技术在未来所面临的机遇和挑战。

［**关键词**］ 超声成像；可穿戴超声；贴片式超声；可视化；无创监测
［**引用本文**］ 刘甜，赵佳琦，李晓兵，等. 可穿戴贴片式超声成像在实时无创可视化监测领域的研究进展［J］. 海军军医大学学报，2025，46（9）：1201-1206. DOI: 10.16781/j.CN31-2187/R.20240651.

Wearable patch ultrasound imaging in real-time non-invasive visual monitoring: research progress

LIU Tian[1], ZHAO Jiaqi[1,2*], LI Xiaobing[3], GUO Fangqi[1], LI Hui[1], JIANG Zhuoyun[3], NIE Shengdong[3], TAO Le[2]
1. Department of Ultrasound, Shanghai Fourth People's Hospital, Tongji University, Shanghai 200434, China
2. Department of Ultrasound, The Second Affiliated Hospital of Naval Medical University (Second Military Medical University), Shanghai 200003, China
3. University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

［**Abstract**］ With the continuous advancement of modern medical technology, wearable patch ultrasound technology is emerging as a crucial tool for real-time and dynamic monitoring of visual information within the human body. This technology seamlessly integrates the precision of ultrasound with the convenience of wearable devices, enabling continuous and dynamic monitoring of internal physiological parameters, and providing a more accurate and efficient method for medical diagnosis and health monitoring. Wearable patch ultrasound can obtain the image information of human body in real time, including the structure and functional status of the heart, blood vessels, muscles, and bones, facilitating early disease detection and diagnosis. This review summarizes the major clinical application scenarios and frontier research advances of wearable patch ultrasound and discusses the opportunities and challenges in the future.

［**Key words**］ ultrasonic imaging; wearable ultrasound; patch ultrasound; visualization; non-invasive monitoring
［**Citation**］ LIU T, ZHAO J, LI X, et al. Wearable patch ultrasound imaging in real-time non-invasive visual monitoring: research progress［J］. Acad J Naval Med Univ, 2025, 46(9): 1201-1206. DOI: 10.16781/j.CN31-2187/R.20240651.

［**收稿日期**］ 2024-09-18　［**接受日期**］ 2024-12-17
［**基金项目**］ 国家自然科学基金（81501492），上海市自然科学基金（20ZR1457900），海军军医大学第二附属医院人才建设三年行动计划——“金字塔人才工程”军事医学人才项目（1009），同济大学附属上海市第四人民医院科研启动专项（SYKYQD06101），上海市虹口区卫生健康委员会医学科研课题面上项目（虹卫 2302-26），上海市虹口区卫生健康委员会临床重点扶持专科建设项目（HKLCFC202404），同济大学附属上海市第四人民医院学科助推计划临床研究重点项目（SY-XKZT-2023-2002）. Supported by National Natural Science Foundation of China (81501492), Natural Science Foundation of Shanghai (20ZR1457900), Military Medical Talent Project of “Pyramid Talent Program” of Three-year Action Plan for Talent Construction of The Second Affiliated Hospital of Naval Medical University (1009), Scientific Research Initiation Project of Shanghai Fourth People's Hospital Affiliated to Tongji University (SYKYQD06101), General Program of Medical Research Project of Health Commission of Shanghai Hongkou District (HW2302-26), Clinical Key Supporting Project of Health Commission of Shanghai Hongkou District (HKLCFC202404), and Clinical Key Research Project in Discipline-driven Plan of Shanghai Fourth People's Hospital Affiliated to Tongji University (SY-XKZT-2023-2002).
［**作者简介**］ 刘　甜，住院医师. E-mail: chelantiankong@163.com
*通信作者（Corresponding author）. E-mail: qiqiblue67@163.com

随着现代医疗科技的不断发展，可穿戴贴片式超声技术以其独特的优势正逐步成为动态实时监测人体可视化信息的新兴手段。该技术将超声波的精确性与柔性可穿戴设备的便捷性相结合，实现了对人体内部生理参数的持续、动态监测，为医疗诊断和健康监测提供了更为精准、高效的方法。可穿戴贴片式超声设备设计紧凑、佩戴舒适，不会对用户的日常生活造成显著影响，只需贴在相应部位即可自动完成扫描，无须依赖特定人员的操作，提高了使用便捷性，也降低了人力成本。此外，这种设备直接贴附于皮肤，无须使用耦合凝胶，消除了扫查过程中可能存在的感染隐患。近年来，该技术已逐步实现实时获取人体内部的动态影像信息，能够监测心脏、血管、肌肉、骨骼等各个部位的结构和功能状态，为疾病的早期发现和诊断提供了有力支持。在实际应用中，可穿戴贴片式超声技术不仅适用于医疗机构的专业诊断，还可广泛应用于家庭健康监测、运动员体能评估以及健康管理、康复治疗等领域，其高精度、实时反馈的特性使用户能够及时了解自身健康状态，为个体化治疗和康复提供重要依据[1]。本文围绕可穿戴贴片式超声的主要临床应用场景和前沿研究进展进行综述，并讨论了该成像技术在未来所面临的机遇和挑战。

1　可穿戴贴片式超声技术简介

1.1　*起源与发展*　超声成像技术是一种无创成像技术，利用高频声波生成体内器官和组织的图像，帮助评估体内情况。传统的超声设备通常是大型且刚性的，需要在医院或临床环境中使用。随着半导体技术和材料科学的发展，20世纪80年代至90年代，便携式超声设备问世，使超声成像技术得以应用在床旁或急救环境中。20世纪末至21世纪初，随着智能手表和健身追踪器等可穿戴设备的普及和兴起，研究者开始思考如何将超声成像技术集成到可穿戴设备中。可穿戴超声设备的出现得益于柔性电子技术的发展，柔性电子器件的出现使得将超声传感器制作成柔性、可弯曲的形式成为可能[2]。大约在2010年代，可穿戴超声设备的原型开始出现在科研探索中，它既结合了柔性电子和传统超声技术特点，利用柔性传感器阵列实现对心血管系统、肌肉组织等的实时监测，也为日后实时可穿戴贴片式超声设备的发展奠定了坚实基础。2024年，荷兰国家应用科学研究院（Netherlands Organization for Applied Science Research，TNO）提出一种基于压电聚合物热压印的箔上超声换能器PillarWave，它是目前世界上首款可对人体表面适形成像的传感贴片[3]，这也是可穿戴贴片式超声真正落地商业化的重要突破。

1.2　*成像原理*　可穿戴贴片式超声的成像原理是基于传统超声成像技术并经过适应和改进，将超声技术集成到柔性的贴片状设备中，柔性贴片通常配有用于信号处理和数据传输的集成电路，这使生成的图像数据可以通过无线技术传输到外部设备（如智能手机或计算机等终端）用于诊断分析[4]。贴片式超声工作原理包括超声波的发射和接收、信号接收、图像生成和数据传输等过程，贴片内的超声传感器使用压电材料（如石英或聚合物）将电信号转换为超声波并发射到体内组织中，这些超声波遇到不同组织界面时会反射回来，反射回来的超声波被传感器接收并转换为回波信号，接收到的信号通过内置的处理电路进行分析和处理，生成能够反映体内结构的超声图像，从而方便进行病情监测和疾病诊断。

1.3　*技术结构设计*　可穿戴超声技术在工科领域的研究大多集中在柔性和可拉伸超声换能器、生物贴附和声学友好界面、便携式超声数据采集和无线通信、人工智能驱动的成像和控制等方面。目前可穿戴声学传感器主流结构设计包括压电式/电容式微机械超声换能器（piezoelectric/capacitive micromachined ultrasonic transducer，pMUT/cMUT）、表面声波传感器（surface acoustic wave sensor，SAW）和三电纳米发电机（triboelectric nanogenerator，TENG）等方式[5]。pMUT利用压电效应产生和接收超声波信号，cMUT则是在施加交流电压时将电信号转换为超声波信号的换能器；SAW与集成电路技术的兼容性极佳，在模数通信、环境和生物医学传感领域应用广泛；TENG可以集成到纺织品中，作为可穿戴声学传感器的重要组成部分，在实际医疗诊断中具有巨大潜力。在电气互联装置方面，图案化工艺和薄膜沉积是柔性电子制造的核心技术，可穿戴电子设备电气互连制造的图案化技术包括光刻技术、喷墨打印技术、转印技术和激光直写技术等。其他创新领域还包括更多的新型可穿戴材料、新型换能器、高效的数据采集和传输系统、轻量化电子设备以及智能图像重建等[6]。而在医学领域，医生更加关注可穿戴贴片式超声设备能否更好地满足使用的便捷性、动态监测的实时连续性等需求，以及

目前监测成像效果能否使更多的患者从中获益。

2　可穿戴贴片式超声的主要应用场景

可穿戴贴片式超声具有无创、便携、实时监测等特点，能够准确获取人体生理、组织结构和血流灌注的可视化信息，从而弥补传统超声设备的不足，适用于更加全面的应用场景，尤其是在社区、家庭等非正式医疗环境中能帮助临床医生实时监测患者病情变化、制定及时有效的临床决策[7]。

2.1　重症病情持续监测　重症患者病情复杂且变化迅速，因此实时多系统监测人体生理各项指标的动态变化至关重要。重症患者常见心力衰竭、休克、血压波动，需要定期实时监测心脏功能、血管状态及中心血压等信息，以便临床医生及时调整治疗方案。在心功能方面，可穿戴超声监测仪能够进行连续的心功能监测，自动从连续图像记录中得到左心室容积，获得关键心脏性能指标（如舒缩容积、心输出量和射血分数）等波形[8]；在血管状态方面，有研究人员成功利用可穿戴贴片式超声技术测量人体皮肤下14 cm深处的血流，还可以利用相控阵技术引导超声波束评估附近的血管状态[9]；在血压方面，传统的中心血压测量方法往往需要侵入性操作，采用无创中心血压监测对于早期发现和诊断心血管疾病、评估治疗效果和预防心血管事件具有重要意义[10]，而可穿戴超声技术提供了一种无创的替代方案。因此，可穿戴贴片式超声能够帮助医生更好地了解重症患者的病情变化，制定个体化的治疗计划。

2.2　器官功能的连续性监测　在某些特定人群中，内脏器官功能的连续性实时监测对于识别病情意义重大。例如，通过贴片式超声监测长期卧床患者的膀胱残余尿量能够实时评估膀胱功能、判断和监测疾病进展，且具有重复使用、无需耦合凝胶、无须旋转和依赖专业操作人员、易于清洁、适用于家庭护理环境等优势，可作为患者日常护理的重要辅助工具[11]。对于肝移植术后患者，肝脏质地硬化可能预示着排斥反应或急性肝衰竭等严重并发症的发生[12]，可穿戴贴片式超声能够通过密切监测肝脏硬度的变化判断移植术后肝脏的生理状态。Liu等[13]通过小型超声贴片监测大鼠的肝脏硬度变化，成功发现早期急性肝衰竭迹象。这些便捷和连续的监测手段在重要内脏器官功能的连续性监测方面提供了可视化证据。

2.3　运动生理学监测　人体在运动或行走时会不断经历动态机械负荷，但过度负荷可能导致肌肉疲劳而增加受伤风险，在运动人群中尤甚[14]。因此，动态评估肌肉骨骼系统内部的机械负荷对于运动损伤的风险预测具有重要价值。在运动受伤或术后康复人群中，监测受损肌肉组织承受的负荷变化对于促进组织修复同样重要。Hallock等[15]研究证实在运动过程尤其在等长收缩时，肌肉厚度、肌束长度和羽状角等参数的变化与肌肉输出力量密切相关；而在动态运动中，肌肉的形态变化和收缩类型不同也会导致变形模式和力学效果存在差异。King等[16]使用一种新型的低功耗可穿戴分布式实时超声同步肌肉骨骼评估设备提取超声特征，并使用线性岭回归模型预测地面反作用力，评估等长下蹲任务中的肌肉力量，证明了可穿戴超声设备用于肌肉力量评估的可行性。因此，通过可穿戴超声监测方法能够为运动人群的体能训练、康复干预等提供运动生理学层面的影像学依据。

2.4　远程医疗信息采集　利用可穿戴贴片式超声设备收集到的影像数据可以通过远程通信技术进行传输，提高了医疗服务的可及性。对于居住在偏远地区或医疗资源匮乏地区的患者，可穿戴贴片式超声检查可以使他们无须长途跋涉即可获得专业的超声诊断，为医疗资源分配不均、地理位置限制等问题提供了有效解决方案。可穿戴贴片式超声能够连续监测慢性病患者的健康状况，而这些数据可以定期上传至远程医疗平台，供医生远程监测与随访，实现慢性病的科学管理[17]。在突发公共卫生事件中，也可利用可穿戴贴片式超声和远程技术进行紧急医疗支持。利用远程技术采集可穿戴贴片式超声的影像数据并与其他健康数据整合形成长期的健康档案，能够帮助医生更好地了解患者的健康史，以便提供更全面的医疗服务。

3　可穿戴贴片式超声技术研究前沿进展

相比传统的生理学监测手段，可穿戴贴片式超声虽然能够提供可视化、多维度指标并有效反馈人体组织的深层信息，然而要实现最佳监测效果，首要技术难点是设计出柔性的、微型化的、与人体长时间贴附性好、高分辨率成像的超声传感器。多学科交叉融合发展特别是纳米材料与超声医学的结合推动了柔性贴片式超声技术的持续研发，技术的进步促进了可穿戴柔性贴片式超声技术在医疗监测、运动科学和个体化医疗等领域的进一步应用，有望

为未来的健康管理和疾病预防提供新的解决方案。

3.1　心血管系统监测技术进展　心血管疾病现已成为全球重大公共卫生问题及民生问题。血流动力学监测、心脏功能评估、血压监测等重要信息参数除了在重症患者病情监测中发挥重要作用外，对于慢性心血管病患者预测心血管事件的风险、指导心血管疾病介入治疗亦具有重要意义。

徐升团队在可穿戴超声技术领域取得了重大进展。2018年，该团队开发了一款可穿戴柔性贴片式超声设备，该设备可以通过超声波脉冲实时、持续测量中心血压[18]。2021年，他们研发出新颖灵活、可伸缩的传感器贴片，该贴片结合了化学传感（葡萄糖、乳酸、乙醇和咖啡因）和血压监测，可以贴在胸部、颈部等部位持续监测人体深层次的血管状况[19]。2023年，该团队开发了一种可以检测运动中生理数据的全集成自主可穿戴式超声系统贴片——USoP（ultrasonic-system-on-patch），该设备的一大突破是将柔性可穿戴超声贴片式探头传感器的测量深度提升到了皮肤下18 cm的水平，具有无创、连续、深层次监测等优点，能够实时跟踪移动目标并自动进行数据采集和处理，实现对移动目标深部组织的长期监测。研究表明，在运动的受试者身上，USoP可以连续监测生理信号，包括中心血压、心率、心输出量、潮气量等[20]。该技术是柔性超声传感技术从有线到无线、从人工操作到自主传感的一大革新，这一研究成果进一步推进了深层组织信号的持续监测和医疗物联网的发展。

Wang等[21]设计了一种薄型、轻便且贴合皮肤的可穿戴多普勒超声设备，用于连续监测深层动脉的血流速度，采用双束多普勒方法避免了声束-血流角度影响，实验结果显示该贴片式超声设备能准确测量血流速度，具有提升手术后患者护理质量的潜力。Kenny等[22]从无线可穿戴超声设备获取的血流数据中得到一种新的频谱指数（颈内静脉与颈总动脉多普勒功率比值，V/A_{POWER}），该指数能够准确反映中心静脉压即心脏前负荷的变化，并且具有较高的灵敏度和特异度，临床应用潜力较大。

3.2　内脏器官实时监测技术进展　内脏器官的连续实时监测可以帮助临床医生及时评估多器官功能及长期跟踪患者病情，以实现早期干预和全程管理。近年来，可穿戴贴片式超声监测在人体多器官的连续成像领域已有诸多出色成果。2022年Wang等[23]展示了一款新颖独特的超声贴片——生物贴附超声（bioadhesive ultrasound，BAUS）探头。该探头实现了高密度元件的排列，每平方厘米有400个压电元件，具备精细成像能力，且小巧轻便；耦合层由水凝胶-弹性体混合物组成，可达到48 h内稳固贴附；探头被环氧树脂密封，确保了长期应用中的稳定性及可靠性。脉冲回波测试结果证实该探头的成像分辨率优于现有的可穿戴超声设备。BAUS成像平台可对人体多器官进行48 h连续成像，包括血管、心脏、肌肉、膈、胃和肺。研究人员使用该成像平台观察了坐位和站立位时人体主要血管直径的变化，还捕捉到人体更深部器官的具体细节，例如：志愿者体育锻炼0.5 h后左心室明显增大，横膈运动在幅度和频率上更显著；当志愿者饮用450 mL果汁后胃窦横截面积会逐渐减小。2023年Hu等[8]研发了一款可穿戴心脏超声成像贴片，该贴片具有压电换能器阵列、液体金属复合电极和三嵌段共聚物封装，因此体积微小且可24 h长时间佩戴使用；研究团队还开发了应用深度神经网络从连续图像流中提取关键信息的人工智能算法，该算法能从连续监测深度学习模型中自动提取左心室容积并生成关键心脏功能指标。这项技术不仅可用于心脏成像，还可推广到其他深层组织的成像，如下腔静脉、腹主动脉、脊柱和肝脏等。

对于儿童群体的病情监测能够采用的影像学手段仍然有限，超声技术无创、无辐射、使用方便，是首选监测方法。van Leuteren等[24]验证了可穿戴贴片式超声设备在儿童膀胱尿量监测中的有效性和便携性，为临床尿动力学超声监测提供了新的优化方案。而后Dagdeviren团队研发了一种具有机械适应性的适形超声膀胱贴片（conformable ultrasound bladder patch，cUSB-Patch），该贴片使用了具有高压特性的钐和镧掺杂$Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3$-$PbTiO_3$陶瓷作为原料制造的工作频率为2～5 MHz的64阵元相控阵换能器，可以对深度15 cm的膀胱进行成像，轴向分辨率＜0.6 mm，同时能够获取两个方向的图像，从而实时无创监测膀胱体积[11]。2024年，Toymus等[25]结合柔性、气囊式超声换能器以及小型控制电子元件设计了一种柔性无线膀胱容量监测设备，利用多个换能器进行A型超声测量，结合低功耗接收电路和用于膀胱容量估算的球形拟合算法，实现了膀胱容量的自主连续监测，且适用于不同形状和大小的膀胱，具有较高准确性。

3.3　运动训练动态监测技术进展　在运动场景

中，传统超声可以检测特定扫描部位的深部肌肉组织并分析回声信号以获得肌肉收缩变形信息，而柔性可穿戴超声贴片贴合皮肤且不受运动影响，能够实时获取肌肉组织物理参数的变化，有利于早期检测运动中的异常模式或应力，因而对肌骨疾病诊断、运动损伤评估和康复保健预后评估具有指导意义[26-28]。Huang等[29]在25名健康男性受试者中验证了一种实时贴片式超声成像（real-time ultrasound imaging，RUSI）系统作为视觉生物反馈增强肌肉收缩训练的效果，发现进行胸部飞鸟练习实验并接受RUSI生物反馈时受试者的胸大肌厚度显著增加（$P<0.001$），结果表明RUSI作为生物反馈能有效提升目标肌肉的收缩能力，可以在力量训练中实时调整运动模式、纠正不正确训练姿势和力度、专注于目标肌肉的正确训练。Yang等[26]报道了一种新型可穿戴多通道A型超声系统用于非侵入性监测肌肉收缩并使用优化的迷你型传感器获取肌肉形态实时变化等运动数据，该系统采用了卷积神经网络、支持向量机、随机森林、长短时记忆网络、K-邻近算法等机器学习算法，帮助贴片式超声自动识别肌肉的健康状态、预测疲劳、评估训练效果、优化康复方案，为个体化运动和康复计划提供科学依据，用于精准指导训练提升运动表现。除了对肌肉运动进行监测，Jin等[30]还在可穿戴贴片式A型超声换能器跟踪肌肉厚度变化的基础上进一步成功估算肘部和膝部关节扭矩，用于衡量关节运动能力和关节负荷状况，其误差低于7.6%，决定系数（R^2）值超过0.92。这种通过使用贴片式超声设备实时监测关节扭矩的新方法有助于教练和运动员及时优化训练动作，避免关节负荷较大的训练损伤，以确保训练的高效率和安全性。这些可穿戴贴片式超声设备在运动训练领域的前沿技术探索为训练伤防治和康复干预提供了新思路。

4　小结与展望

随着研究技术不断改进和超声应用领域的拓展，可穿戴贴片式超声彰显了现代医学影像成果在健康监测领域的最新进展，具有广阔的应用前景和发展潜力。从技术层面来看，可穿戴超声设备的精度和分辨率仍可进一步提升，以提高诊断和疗效评估的准确性；可穿戴设备的能量消耗和续航通常受限于电池容量和能量管理，对于需要长时间连续监测的场景，设备的续航能力有望得到进一步加强；此外，随着材料科学和工程技术的不断发展，贴片式超声设备的便携性和舒适性也将得到进一步提升，使用户能够更长时间佩戴并享受实时监测的便利。从应用层面来看，可穿戴贴片式超声技术还可在更多领域得到应用，例如在慢性病管理中，居家患者可以通过佩戴贴片式超声定期自我监测病情，从而及时调整治疗方案，提高治疗效果和生活质量；在公共卫生领域，该技术也可以用于大规模人群的健康筛查和动态监测，帮助政府和社会及时发现和控制疾病的传播，降低经济成本；此外，随着人工智能和大数据技术的不断发展，可穿戴贴片式超声设备有望与之融合实现更高级的功能和应用，例如通过人工智能技术对大量的超声数据进行深度分析和挖掘，从而发现新的疾病标志物和治疗方法；通过大数据技术实现对全球范围内人群健康状况的监测和分析，为公共卫生政策的制定提供有力支持。相信在未来，可穿戴贴片式超声能够实现与临床应用更加紧密的结合，涌现出更多的技术创新和研究突破。

［参 考 文 献］

［1］ HU H, HU C, GUO W, et al. Wearable ultrasound devices: an emerging era for biomedicine and clinical translation[J]. Ultrasonics, 2024, 142: 107401. DOI: 10.1016/j.ultras.2024.107401.

［2］ WANG C, XIA K, WANG H, et al. Advanced carbon for flexible and wearable electronics[J]. Adv Mater, 2019, 31(9): e1801072. DOI: 10.1002/adma.201801072.

［3］ VAN NEER P L M J, PETERS L C J M, VERBEEK R G F A, et al. Flexible large-area ultrasound arrays for medical applications made using embossed polymer structures[J]. Nat Commun, 2024, 15(1): 2802. DOI: 10.1038/s41467-024-47074-1.

［4］ CHEN S, QI J, FAN S, et al. Flexible wearable sensors for cardiovascular health monitoring[J]. Adv Healthc Mater, 2021, 10(17): e2100116. DOI: 10.1002/adhm.202100116.

［5］ LI Y, LI Y, ZHANG R, et al. Progress in wearable acoustical sensors for diagnostic applications[J]. Biosens Bioelectron, 2023, 237: 115509. DOI: 10.1016/j.bios.2023.115509.

［6］ HUANG H, WU R S, LIN M, et al. Emerging wearable ultrasound technology[J]. IEEE Trans Ultrason Ferroelectr Freq Contr, 2024, 71(7): 713-729. DOI: 10.1109/TUFFC.2023.3327143.

［7］ SONG P, ANDRE M, CHITNIS P, et al. Clinical, safety, and engineering perspectives on wearable ultrasound technology: a review[J]. IEEE Trans Ultrason

Ferroelectr Freq Contr, 2024, 71(7): 730-744. DOI: 10.1109/TUFFC.2023.3342150.

[8] HU H, HUANG H, LI M, et al. A wearable cardiac ultrasound imager[J]. Nature, 2023, 613(7945): 667-675. DOI: 10.1038/s41586-022-05498-z.

[9] WANG C, QI B, LIN M, et al. Continuous monitoring of deep-tissue haemodynamics with stretchable ultrasonic phased arrays[J]. Nat Biomed Eng, 2021, 5(7): 749-758. DOI: 10.1038/s41551-021-00763-4.

[10] VINCENT J L, PELOSI P, PEARSE R, et al. Perioperative cardiovascular monitoring of high-risk patients: a consensus of 12[J]. Crit Care, 2015, 19(1): 224. DOI: 10.1186/s13054-015-0932-7.

[11] ZHANG L, MARCUS C, LIN D, et al. A conformable phased-array ultrasound patch for bladder volume monitoring[J]. Nat Electron, 2023, 7(1): 77-90. DOI: 10.1038/s41928-023-01068-x.

[12] DECHÊNE A, SOWA J P, GIESELER R K, et al. Acute liver failure is associated with elevated liver stiffness and hepatic stellate cell activation[J]. Hepatology, 2010, 52(3): 1008-1016. DOI: 10.1002/hep.23754.

[13] LIU H C, ZENG Y, GONG C, et al. Wearable bioadhesive ultrasound shear wave elastography[J]. Sci Adv, 2024, 10(6): eadk8426. DOI: 10.1126/sciadv.adk8426.

[14] DREW M K, COOK J, FINCH C F. Sports-related workload and injury risk: simply knowing the risks will not prevent injuries: narrative review[J]. Br J Sports Med, 2016, 50(21): 1306-1308. DOI: 10.1136/bjsports-2015-095871.

[15] HALLOCK L A, VELU A, SCHWARTZ A, et al. Muscle deformation correlates with output force during isometric contraction[C]//2020 8th IEEE RAS/EMBS International Conference for Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob). November 29-December 1, 2020. New York City, NY, USA. IEEE, 2020: 1188-1195.

[16] KING E L, PATWARDHAN S, BASHATAH A, et al. Distributed wearable ultrasound sensors predict isometric ground reaction force[J]. Sensors (Basel), 2024, 24(15): 5023. DOI: 10.3390/s24155023.

[17] ZHU X, CAHAN A. Wearable technologies and telehealth in care management for chronic illness[M]// WEAVER C A, BALL M J, KIM G R, et al. Healthcare information management systems. Cham: Springer, 2016: 375-398.

[18] WANG C, LI X, HU H, et al. Monitoring of the central blood pressure waveform via a conformal ultrasonic device[J]. Nat Biomed Eng, 2018, 2(9): 687-695. DOI: 10.1038/s41551-018-0287-x.

[19] SEMPIONATTO J R, LIN M, YIN L, et al. An epidermal patch for the simultaneous monitoring of haemodynamic and metabolic biomarkers[J]. Nat Biomed Eng, 2021, 5(7): 737-748. DOI: 10.1038/s41551-021-00685-1.

[20] LIN M, ZHANG Z, GAO X, et al. A fully integrated wearable ultrasound system to monitor deep tissues in moving subjects[J]. Nat Biotechnol, 2024, 42(3): 448-457. DOI: 10.1038/s41587-023-01800-0.

[21] WANG F, JIN P, FENG Y, et al. Flexible Doppler ultrasound device for the monitoring of blood flow velocity[J]. Sci Adv, 2021, 7(44): eabi9283. DOI: 10.1126/sciadv.abi9283.

[22] KENNY J S, YANG Z, CLARKE G, et al. A novel spectral index for tracking preload change from a wireless, wearable Doppler ultrasound[J]. Diagnostics (Basel), 2023, 13(9): 1590. DOI: 10.3390/diagnostics13091590.

[23] WANG C, CHEN X, WANG L, et al. Bioadhesive ultrasound for long-term continuous imaging of diverse organs[J]. Science, 2022, 377(6605): 517-523. DOI: 10.1126/science.abo2542.

[24] VAN LEUTEREN P G, KLIJN A J, DE JONG T P V M, et al. SENS-U: validation of a wearable ultrasonic bladder monitor in children during urodynamic studies[J]. J Pediatr Urol, 2018, 14(6): 569.e1-569.e6. DOI: 10.1016/j.jpurol.2018.07.018.

[25] TOYMUS A T, YENER U C, BARDAKCI E, et al. An integrated and flexible ultrasonic device for continuous bladder volume monitoring[J]. Nat Commun, 2024, 15(1): 7216. DOI: 10.1038/s41467-024-50397-8.

[26] YANG X, CHEN Z, HETTIARACHCHI N, et al. A wearable ultrasound system for sensing muscular morphological deformations[J]. IEEE Trans Syst Man Cybern Syst, 2021, 51(6): 3370-3379. DOI: 10.1109/TSMC.2019.2924984.

[27] ALMOHIMEED I, AGARWAL M, ONO Y. Wearable ultrasonic sensor using double-layer PVDF films for monitoring tissue motion[C]//2018 IEEE Canadian Conference on Electrical & Computer Engineering (CCECE). May 13-16, 2018, Quebec, QC, Canada. IEEE, 2018: 1-4. DOI: 10.1109/CCECE.2018.8447859.

[28] ALMOHIMEED I, ONO Y. Ultrasound measurement of skeletal muscle contractile parameters using flexible and wearable single-element ultrasonic sensor[J]. Sensors (Basel), 2020, 20(13): 3616. DOI: 10.3390/s20133616.

[29] HUANG Z H, MA C Z, WANG L K, et al. Real-time visual biofeedback via wearable ultrasound imaging can enhance the muscle contraction training outcome of young adults[J]. J Strength Cond Res, 2022, 36(4): 941-947. DOI: 10.1519/JSC.0000000000004230.

[30] JIN Y, ALVAREZ J T, SUITOR E L, et al. Estimation of joint torque in dynamic activities using wearable A-mode ultrasound[J]. Nat Commun, 2024, 15(1): 5756. DOI: 10.1038/s41467-024-50038-0.

［本文编辑］　孙　岩