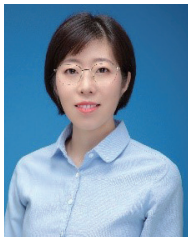
专论——探索智能康复设备的中医应用

栏目主编：王丽珍



王丽珍，国家杰青/优青，教育部青年创新团队负责人，北航蓝天学者、青拔人才。主要从事损伤修复与康复生物力学，主持国家自然科学基金委“叶企孙”科学基金、国际合作重点、国家十三五/十四五重点研发课题、北京市自然科学基金重点专题等项目。在Nat. Commun, Adv Sci等知名期刊发表论文百余篇，获教育部自然科学奖一等奖等。兼任世界华人生物医学工程协会（WACBE）理事兼青委会主席、亚太地区生物力学协会（APAB）理事兼女科学家委员会主席、中国力学学会常务理事、中国力学学会/中国生物医学工程学会生物力学分会副主任委员等。

栏目简介：

随着人口老龄化到来，发展智能中医诊疗技术服务于康复是国家需求，且具有非常广阔的临床康复前景。基于中医诊疗机理的可穿戴康复装备近年来越来越受到关注，结合新型脑功能成像技术、脑机接口技术、人工智能技术、机器人技术等推进康复机理、康复技术、康复范式的创新突破具有积极作用，有望为临床康复方法创新提供理论指导和技术支撑。

VR/AR/MR 与生物力学交叉技术在针灸辅助训练中的应用

刘宇兰[1] 王磊[2] 刘子轩[3] 韩世龙[4] 李沐蓉[5*] 王丽珍[6] 樊瑜波[7]

[1.杭州市北京航空航天大学国际创新研究院（北京航空航天大学国际创新学院）医工交叉科创中心，杭州 311115；
2.杭州市北京航空航天大学国际创新研究院（北京航空航天大学国际创新学院）医工交叉科创中心，杭州 311115]

【摘要】 目的 当前针灸发展中存在的教学方式传统、效率低下、技术难以量化及人才培养周期长等问题，本文探讨虚拟现实、增强现实、混合现实及生物力学交叉技术在针灸教学和临床实践中的应用价值，重点对针灸交互力量化和应用特征技术展开分析。**方法** 选取近十年国内外相关研究，对针灸辅助系统的力反馈、特征技术及功能实现进行总结区分。**结果** 虚拟现实、增强现实及混合现实应用于针灸辅助时都与生物力学反馈密切结合，各自技术实现有所侧重，能够实现针灸知识辅助记忆、穴位定位、针刺训练等功能，但存在边端计算能力限制、力反馈模型精细度不足、功能集成度欠缺等问题。**结论** 需在力反馈精细化、算法轻量化与多场景集成化方向持续优化，结合大语言模型推动针灸教学与临床实践的智能化转型。

【关键词】 虚拟现实；增强现实；混合现实；生物力学；力反馈；穴位定位

【中图分类号】 TH77; TP18; R734.2 **【文献标识码】** A **【DOI】** 10.11876/mimt202502001

The application of VR/AR/MR combined with biomechanics in acupuncture assisted training

Yulan Liu[1], Lei Wang[2], Zixuan Liu[3], Shilong Han[4], Murong Li[5], Lizhen Wang[6], Yubo Fan[7]*

(1. Medical Engineering&Engineering Medicine Innovation Center, Hangzhou International Innovation Institute of Beihang University (International Innovation Institute of Beihang University), Hangzhou 311115;2. Medical Engineering&Engineering Medicine Innovation Center, Hangzhou International Innovation Institute of Beihang University (International Innovation Institute of Beihang University), Hangzhou 311115)

【Abstract】 Objective In the current development of acupuncture and moxibustion, there are problems such as traditional

基金项目：国家自然科学基金项目（No.52405043）；浙江省自然科学基金项目（No.LQ24F030017）；国家自然科学基金杰青项目（No.12425209）

第一作者：刘宇兰，女，硕士研究生在读，研究方向：多针穿刺路径规划、针灸智能化

通讯作者：李沐蓉，女，博士，副研究员，研究方向：多针穿刺路径规划、手术机器人、智能针灸

teaching methods, low efficiency, difficult quantification of technology and long training cycle of talents. This paper discusses the application value of virtual reality, augmented reality, mixed reality and biomechanical cross technology in acupuncture and moxibustion teaching and clinical practice, focusing on the analysis of acupuncture and moxibustion interactive power and application characteristic technology. **Methods** Selecting the relevant researches at home and abroad in recent ten years, the force feedback, characteristic technique and function realization of acupuncture auxiliary system were summarized and distinguished. **Results** Virtual reality, augmented reality and mixed reality were closely combined with biomechanical feedback when applied to acupuncture assistance, and their respective technologies were focused on realizing functions such as acupuncture knowledge assisted memory, acupuncture point positioning, acupuncture training, etc., but there were some problems such as the limitation of edge computing power, insufficient precision of force feedback model, and insufficient functional integration.**Conclusions** Continuous optimization should be carried out in the direction of force feedback refinement, algorithm lightweight and multi-scene integration, and intelligent transformation of acupuncture and moxibustion teaching and clinical practice should be promoted by combining with large language model.

【**Key words**】 Virtual reality(VR); Augmented reality(AR); Mixed reality(MR); Biomechanics；Force feedback；Acupoint location

针灸是中华传统医学的精华，在国际医疗领域占据重要地位[1]。传统的针灸教学多采用基于经验的“面对面”传授模式。学习者不仅需要系统学习经络腧穴学、刺法灸法学以及针灸治疗学等知识[2]，掌握穴位的位置、功效和各类针灸理论，还需着重培养实际的针刺操作技能。在手法操作过程中，针体同时受到持针手施加的主动力以及腧穴软组织产生的被动力。这些力的作用会促使针体周围的机体组织发生相应变化，进而产生不同的针刺效果[3]。力对力进行定量评价，有助于提高针灸治疗的精准度。然而，传统针灸教学模式使得学习者难以直观感受操作效果，评价也大多依靠主观判断，缺乏客观、稳定的量化与评价体系。近年来，虚拟现实（Virtual Reality，VR）、增强现实（Augmented Reality，AR）及混合现实（Mixed Reality，MR）、生物力学迅猛发展，为针灸领域，特别是针灸定量化研究及教学的交互发展带来新突破。

针灸评价过程涉及进针的准确性、手法的规范性、患者的反馈（是否得气）等方面。力的定量评价有助于推动针灸的标准化、可视化与精准化发展展。通过对生物力学与VR、AR和MR等沉浸式技术[4,5]交叉融合，研究针刺过程中的力学交互等复杂问题，并提供可重复使用的仿真量化学习场景，能够客观评估操作水平，为深入理解针灸的作用机制提供新的视角和数据支持，有助于推动针灸力的大小、速度等参数的数据化与精细化，提升针灸教学质量以及临床治疗的规范性[6]。

1 针灸交互力定量化技术

交互力反馈是VR、AR、MR技术辅助针刺训练时的共有技术，是针灸定量化技术的一个重要组成部分。由于针灸手法体系极为繁杂，依据不同疾病的病理机制、经络气血的盛衰变化以及穴位的特性，衍生出包含力度、角度、方向、深度等多要素的进针方式[7]。力反馈技术通过精确的针刺交互力检测与建模及实时反馈生成，辅助用户体验更加多元、精确的进针手法，快速掌握进针要领。

1.1 针刺交互力检测与建模技术

1.1.1 交互力检测

针刺力的检测旨在获取针灸过程中的生物力学数据，以此分析进针特点，这是复现针刺力的基础。丁光宏等[8]通过针刺力监测设备采集六种基本手法下的针体受力状况，发现在人体曲池穴上运用的针刺频率集中于1.2Hz。Lee等[9]通过Acusensor2测量了人体六个不同穴位在针灸操作时产生的扭矩幅度，经比较发现，针刺背部的生物力大于上肢和躯体前部的生物力，下肢的针刺生物力大于上肢。针对不同病症，针刺方向、深度、时间间隔等均是影响疗效的因素，例如众多研究表明深刺效果优于浅刺[10]。以上情况表明，穴位、手法等都是导致针刺生物力学差异的重要变量，印证了建立穴位针刺生物力学数据库的重要性。

1.1.2 针刺生物力学建模

针刺生物力学建模为还原进针视觉效果和实时反作用力计算提供依据。Papadopoulos等[11]指出，AR/MR系统中需结合组织物理特性模拟生物力学响应，以增强虚实融合的真实性。有研究人员通过改进质点弹簧模型来优化皮肤形变模型[12,13]，如丁龙辉[14]通过对表面正六边形面模型改进，采用质点—弹簧法建立具有拓扑关系的模型，并加入虚拟体弹簧，使得人体表皮软组织形变模型更具逼真效果。Yao等[15]将人体组织视为多层结构，并确定筋膜是对针作用力的主要结构，针在刺入筋膜前轴向力逐渐增大，刺入筋膜后轴向力骤减，这对针刺力

精确建模具有提示意义。

1.2 力反馈生成技术

力反馈生成技术同样是影响虚拟环境中针刺交互力还原度的一个重要因素。在VR针灸系统中，力反馈的生成常常依赖于Phantom Omni、Novint Falcon等设备，当当这些设备连接到虚拟针刺系统时，会随着针刺入虚拟人体穴位产生相应力感，让用户感受到针刺的真实效果[16,17]。然而，这种力触觉再现设备存在机械结构间摩擦力和惯性量的问题，影响了力触觉再现的真实性。Du等[18]研发的AR徒手针刺交互系统使用非接触式电磁力反馈装置来提供交互力反馈，该系统被证实相较于鼠标和手柄交互方式执行特定任务时，其计算时间和沉浸感表现更为优。

管力反馈融合沉浸式技术能够提升针刺训练的操作真实感，但过往的研究均未能将“得气”这一关键针感复现到虚拟训练场景中。而实际上，“得气”是对被针灸者与针灸者针刺当下感受的概括描述，对于提示选穴、进针手法正确与否具有参考意义[19]。对于针灸者而言，得气时其手上针感与生物力学属性相关，直接关系到力反馈生成的准确程度。未来，从得气的时间特异性、穴位特异性等方面开展得气的生物力学特性研究，并将其融入虚拟针刺力反馈模型中，是精确还原针刺进针感受的途径之一。

2 VR/AR/MR应用于针灸辅助中的特征技术

融合了力反馈的VR/AR/MR针灸辅助系统，能够为用户带来更为真实、直观的交互体验。不同的沉浸式技术应用于针灸辅助系统时，各自具备独特的技术特点，我们将在2.1、2.2、2.3中详细分析。

2.1 VR中的三维虚拟模型的建模与可视化技术

VR具备沉浸感、想象性、交互性和多感知性等特征[20]，其中，三维虚拟模型的建模与可视化技术是VR针灸训练系统的核心。相较于阚等[21]研发的仅能使用鼠标和键盘来模拟基本针灸操作的虚拟训练器，许多研究[22–24]以VR头盔和Unity3D为工具，开发虚拟人模型。通过多场景切换，以及全景图作为三维空间背景，构建出完整的虚拟针灸教学环境。Wang等[25]提出一套基于四维成像技术的针灸培训系统，教师可利用该系统，为学生讲解穴位、经络及解剖结构等针灸学相关知识点。Liao等[26]在构建3D人体模型时，对顶点数据进行优化，去除冗余；同时建立三角形–顶点索引数组的人体模型拓扑结构，以提升系统的实时性。奥晓静等[27]应用Unity3D软件，整合儿童数字化断层解剖数据集，建立了首个集仿真腧穴定位、三维腧穴解剖、针刺训练、临床教学等多功能于一体的儿童颈项部腧穴三维数字可视化系统，具有较高的应用价值。

综上所述，基于VR技术的针灸训练系统，侧重于创建具有穴位标志、经络及解剖可视化的虚拟人体模型，供用户学习。由于VR技术强调在虚拟世界中感受现实元素，无法直接应用于真实人体。因此，研究人员提出基于AR的针灸辅助训练系统。

2.2 AR中的动态特征配准技术

动态配准技术是基于AR的针灸辅助系统的核心。与VR强调构建沉浸式虚拟环境不同，AR将虚拟元素叠加到真实物体上，更注重增强用户对现实世界的感知。这使得AR在针灸辅助训练系统中的应用，主要集中在穴位定位方面。

2.2.1 穴位特征提取及定位技术

进行穴位定位时，首要任务是建立地标[28]，地标建立依赖于目标区域检测和特征提取技术。现有研究主要是将传统穴位定位方法与AI算法相融合。受数据集、算法性能和计算负担的限制，大部分研究选择脸部区域[28–34]，其次是耳部[28,35,36]。在传统针灸学常用的穴位定位方法中，比例骨测量法（B–cun）和解剖标志法，因利用率高、精度高而被广泛应用[37]。Zhang等[28]采用B–cun测量方法，选择印堂、前发际线中点和瞳孔作为关键地标，根据这些地标之间的距离来确定穴位的位置和单位“寸”的长度，以此确定脸部各部分的长度和宽度，并采用预训练的TFLite模型进行实时面部对齐，最终在用户面部叠加468个语义解剖面部地标，并作为定位耳部地标的基础。但有学者[29]指出，这种基于寸的定位方法没有考虑到不同个体的脸型差异而存在局限。Su等[30]利用ML Kit的面部检测模块实时识别面部特征和轮廓，通过跟踪面部特征点作为参考点，计算出个性化“寸”以定位穴位。以上研究都是局部穴位定位，戴红芬等[38]构建的基于特征配准的可交互人体腧穴模型打破这一限制。该模型能够根据真实人体体态特征进行变换，最终显示全身各腧穴的大致定位，但其定位精度有待提升。

2.2.2 穴位跟踪注册技术

为进一步提高穴位定位的准确性和鲁棒性，研究人员引入穴位跟踪注册技术。通过实时更新特征点、优化相机姿态等方式，解决虚实注册准确性、定位实时性等问题。Lan等[34]通过ICP算法，将实时点云与三维可变形模型（3D Morphable Model，3DMM）对齐，优化相机姿态，以确保穴位配准的几何一致性。于俊伟等[36]通过单应性矩阵求解方法，计算摄像机相对目标图像的位置和姿态，并引

入Tukey M－estimator算法，提高位姿估计精度，实现了AR耳部针灸系统的精准虚实融合。

综上，AR在辅助穴位定位中展现出巨大优势，但由于交互性较差，在针刺训练辅助方面存在局限。

2.3 MR中的虚实交互技术

有别于VR和AR，MR既能在虚拟中保留现实，又能将现实转化为虚拟，真实和虚拟对象均可与用户进行交互[39]，虚实交互是MR针灸训练系统的关键技术之一。Sun等[40]设计的针灸训练原型系统，基于裸手追踪与姿态估计技术，能够模拟真实持针手势（如拇、食指持针动作），让学员在3D人体模型上直接进行虚拟针刺操作，增强肌肉记忆与空间感知。该系统可实时标注穴位与经络分布，并通过碰撞检测算法，评估针刺角度与深度的准确性，以视觉效果呈现。在这种交互形式下，虚拟针刺操作完全替代实体针具，既避免了物理损耗，又带来直观的操作体验。然而，由于在人机交互领域设计自然的互动形式存在一定难度，MR 在针灸辅助方面的应用仍处于初级阶段。

3 VR/AR/MR应用于针灸辅助的功能应用场景

OpenGL和Unity均具备出色的跨平台特性，能够将所创建的针灸虚拟三维模型及操作环境，部署到不同的硬件平台之上，如各类VR头盔、AR眼镜Google Glass和MR头盔Microsoft HoloLens等。表1从显示设备和图形渲染交互组件这两个维度，针对VR/AR/MR针灸辅助系统的软硬件展开了统计，这些组件能够满足用户在针灸教育、穴位定位以及针刺训练等方面的需求。而表2则围绕功能实现方面，结合3.1、3.2、3.3的内容进行了文献总结。

3.1 针灸辅助记忆

沉浸式技术能够构建教学场景并进行演示，助力针灸学知识的教学与练习。高红磊等[24]研发的VR针灸训练系统，可在UI界面展示取穴名称、位置以及主治病症等信息，并且支持查询功能，辅助学生记忆知识点。Sun等[39]的MR针灸系统能够将解剖结构与经络、穴位的关系可视化，有助于用户深入理解经络腧穴学。

3.2 穴位辅助定位

AR针灸系统的轻量化与移动化设计，使其在临床以及大众保健的穴位辅助定位场景中应用更为广泛。例如，诸多穴位配准算法均可部署在Android和iPhone移动设备[28–30,32–36]，引导用户在没有专业医师指导的情况下，实现快速穴位定位。然而，由于追求轻量化和移动化设计，硬件计算能力受到限制，现有系统的定位区域主要集中在脸部，难以兼顾定位准确性高和覆盖范围广这两个优势。

3.3 针灸穿刺训练

在针刺训练方面，现有系统的交互形式包括徒手捏虚拟针[18,40]、虚拟手与虚拟针交互[27]等，用户不仅能够感知真实针灸的手感，还能通过视觉反馈判断虚拟针的角度、深度是否准确。Neto等[16,17]还借助渲染技术创建能量流动的视觉效果，进针时能量流会因穴位组合而特异性激活，用户可依据治疗方案进行调整。相较于VR仅支持全虚拟场景，无法感知真实世界，MR不仅能够提供沉浸式的场景学习环境，还能借助虚实融合技术，使场景还原度更高，适用于手眼协作强度高的针刺手法练习场景，具有更大的应用潜力。见表1，表2。

表1 VR/AR/MR针灸辅助系统（表格中简称为VR/AR/MR）的软硬件分类

		VR	AR	MR
显示设备	PC	[13,27]		
	手机		[28–30,32–36]	
	VR头盔	[22,24]		
	Google Glass		[31]	
	Microsoft HoloLens		[18,22]	[37,40]
图形渲染交互组件	Unity3D	[13,21–24,27]	[18]	[37,40]

表2 VR/AR/MR针灸辅助系统的文献分类汇总

		VR	AR	MR
针灸辅助记忆		[13,22,25,27]		[40]
穴位定位	全身		[38]	
	局部		[28–36]	[37]
针刺训练	全身	[13,16,17]	[18]	[40]
	局部	[27]	[22]	

4 结论与未来发展趋势分析

本文从技术视角，对沉浸式技术在针灸辅助领域的应用现状展开分析，总结了VR/AR/MR与生物力学交叉技术在辅助针灸应用中的系统构成及功能分类。沉浸式技术面向学生、医师和健康管理者等不同群体，为针灸教学的客观量化以及临床实践场景构建了创新性的学习与实践平台。通过多模态融合，极大地提升了针灸教学的交互性与真实感。

然而，受限于边端计算能力，现有的研究难以凭借较小算力达成全身穴位个性化配准的要求。在系统保真度方面，当前研究构建的力反馈模型中，由于针灸生物力学模型未充分考量针刺作用力的穴位特异性、个体特异性，以及 “得气”时针感的重现，致使反馈力感知的精细程度不足。在功能集成度上，目前

尚无集针灸穴位经络知识记忆学习、穴位定位辅助和针刺训练辅助这三大功能于一体的集成系统。

未来，沉浸式技术针灸辅助系统仍需在算法轻量化、多场景拓展、力反馈高保真度、功能集成化等方向进行深度优化。与此同时，结合大语言模型实现个性化训练指导、决策辅助，推动针灸教学与临床实践向智能化升级，也将成为未来重要的发展趋势。

[参 考 文 献]

[1] 白丽丽,张红星,潘小丽.智能针灸设备的发展现状和产业趋势分析[J].时珍国医国药,2024,35(9):2239-2243.

[2] 廖颖,蒋晶,熊坚,等.虚拟现实技术在针灸领域应用现状与热点分析[J].中医康复,2024,1(3):49-54.

[3] 李莎.基于运动学和动力学的针刺手法刺激量量化研究进展[J].中国中医药现代远程教育,2021,19(14):204-208.

[4] Tang YM, Chau KY, Kwok APK, et al. A systematic review of immersive technology applications for medical practice and education-trends, application areas, recipients, teaching contents, evaluation methods, and performance[J]. Educ Res Rev, 2022, 35:100429.

[5] Zhang J, Yu N, Wang B, et al. Trends in the use of augmented reality, virtual reality, and mixed reality in surgical research: a global bibliometric and visualized analysis[J]. Indian J Surg, 2022, 84(Suppl 1):52-69.

[6] 饶晓丹,于海波,吴剑煌,等.虚拟针灸教学系统在《针灸学》操作教学课程的实践体会[J].中国针灸,2020,40(8):877-879.

[7] 苑功名,郭义,郭永明,等.计算针灸学对针刺手法研究的启示[J].世界中医药,2024,19(22):3555-3558.

[8] 丁光宏,沈雪勇,戴建华,等.针刺提插和捻转手法运针频率在得气与非得气状态的差异[J].中国针灸,2002,22(10):32-34.

[9] Lee IS, Lee T, Shin WC, et al. Haptic simulation for acupuncture needle manipulation[J]. J Altern Complem Med, 2014, 20(8):654-660.

[10] 刘超达,秦晨阳,李波漩,等.针刺手法量学中时间、频率、方向和深度的研究进展[J].针灸临床杂志,2023,39(2):105-110.

[11] Papadopoulos T, Evangelidis K, Kaskalis TH, et al. Interactions in augmented and mixed reality: An overview[J]. Appl Sci, 2021, 11(18):8752.

[12] 钟家平.基于Unity的虚拟现实中医推拿教学系统[D].南昌:南昌大学,2023.

[13] 陈玉良.基于虚拟现实的针灸学习实践系统的设计与实现[D].南昌:南昌大学,2023.

[14] 丁龙辉.虚拟针刺手术软组织形变建模与力反馈算法研究[D].天津:天津工业大学,2018.

[15] Yao W, Yu Y, Ding G. A hybrid method to study the mechanical information induced by needle rotating[J]. Math Methods Appl Sci, 2018, 41(15):5939-5950.

[16] Neto PPM, Rodrigues MAF. A virtual simulator for acupuncture[C]//2018 20th Symposium on Virtual and Augmented Reality (SVR). IEEE, 2018:10-17.

[17] Neto PPM, Aguiar MCLN, Rodrigues M A F. Virtual Acupuncture System Based on Physics Engine and Force Feedback[C]//2020 22nd Symposium on Virtual and Augmented Reality (SVR). IEEE, 2020:356-362.

[18] Du G, Li Y, Su K, et al. A Mobile Natural Human–Robot Interaction Method for Virtual Chinese Acupuncture[J]. IEEE T Instrum Meas, 2022, 72:1-10.

[19] 袁芳,赵冰璁,王麟鹏,等.从针感量表特点探索火针量表的研究思路[J].中华中医药杂志,2024,39(1):279-283.

[20] 庞瑞涵,晏峻峰.近10年虚拟仿真技术在针灸学科中的研究进展[J].中国当代医药,2023,30(8):38-42.

[21] 阚红星,陈光恩,徐伟,等.基于Unity3D的中医针灸教学训练测评系统设计[J].电脑知识与技术,2020,16(1):40-41.

[22] 石伟.基于VR/AR的针灸教学实践平台设计与实现[D].西安:长安大学,2020.

[23] 耿晓敏,胡芳睿,王正义,等.基于Unity3D的虚拟针灸教学实践辅助系统[J].科技风,2019,32(23):80+90.

[24] 高红磊,阚红星,高勇,等.基于HTC VIVE的虚拟针灸教学软件设计研究[J].微型电脑应用,2020,36(3):25-27.

[25] Wang Y, Zhang M. Application of virtual reality and 4d imaging technology in the wisdom of interactive guidance of acupuncture and massage[C]//2022 3rd International Conference on Electronics and Sustainable Communication Systems (ICESC). IEEE, 2022:1314-1317.

[26] Liao X, Yuan Z, Si W, et al. Research on the key technologies of virtual acupuncture simulation based on JOGL[C]//The 3rd International Conference on Information Sciences and Interaction Sciences. IEEE, 2010:124-126.

[27] 奥晓静,李琨,刘宇航,等.儿童颈项部腧穴三维数字可视化系统研发与应用[J].中国组织工程研究,2025,29(9):1834-1840.

[28] Zhang M, Schulze JP, Zhang D. E-faceatlasAR: extend atlas of facial acupuncture points with auricular maps in augmented reality for self-acupressure[J]. Virtual Reality, 2022, 26(4):1763-1776.

[29] Lan KC, Litscher G. Robot-controlled acupuncture—an innovative step towards modernization of the ancient traditional medical treatment method[J]. Medicines, 2019, 6(3):87.

[30] Su MT, Chiang ML, Tsai CH, et al. An acupoint health care system with real-time acupoint localization and visualization in augmented reality[J]. Mul Syst, 2023, 29(4):2217-2238.

[31] Jiang H, Starkman J, Kuo CH, et al. Acu glass: quantifying acupuncture therapy using Google Glass[C]//Proceedings of the 10th EAI international conference on body area networks. 2015:7-10.

[32] Wei CY, Xu BY, Zhao YX. Design of Interactive System for Acupoint Analysis Based on Augmented Reality[C]//2023 Asia Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC). IEEE, 2023:902-909.

[33] Chen YZ, Maigre C, Hu M C, et al. Localization of acupoints using augmented reality[C]//Proceedings of the 8th ACM on Multimedia Systems Conference. 2017:239-241.

[34] Lan KC, Hu MC, Chen YZ, et al. The application of 3D morphable model (3DMM) for real-time visualization of acupoints on a smartphone[J]. IEEE Sens J, 2020, 21(3):3289-3300.

[35] 房露.基于iPhone的增强现实研究与应用[D].郑州:河南工业大学,2017.

[36] 于俊伟,房露,鲁传政.耳部针灸模型的移动增强现实虚实融合[J].计算机工程与设计,2018,39(5):1497-1501.

[37] Chen X, Yang H, Ji Y, et al. 3D Real-time Face Acupoints Recognition System Based on HoloLens 2[C]//2021 7th International Conference on Computer and Communications (ICCC). IEEE, 2021:932-938.

[38] 戴红芬,胡畔,刘娟,等.基于增强现实和双目视觉技术的针灸辅助系统[J].自动化技术与应用,2018,37(4):26-30.

[39] 谢国军.混合现实中实时虚实交互技术研究与实现[D].西安:西安电子科技大学,2021.

[40] Sun Q, Huang J, Zhang H, et al. Design and development of a mixed reality acupuncture training system[C]//2023 IEEE Conference Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR). IEEE, 2023:265-275.