

基于 fNIRS 的 AR 引导穿刺训练系统的 工效与认知负荷研究

樊琳, 王殊轶, 王浴妃, 邹湘, 豆建生
(上海理工大学, 上海 200093)

摘要: **目的** 基于 fNIRS 对 AR 引导穿刺训练的手术导航系统展开神经人因学研究, 探究使用者与系统交互时的工效与认知负荷。**方法** 实验分为实验组 (AR 组) 与对照组 (B 超组), 被测对象在各自平台下完成穿刺任务。采集并处理任务中被测对象的近红外信号, 提取 HbO₂ 浓度相关的比例系数 β , 结合任务绩效、NASA-TLX 主观评分进行统计分析。**结果** 实验组 (AR 组) 与对照组 (B 超组) 相比, 穿刺任务中前额叶激活弱、穿刺时间短、成功率高, 2 组存在显著性差异 ($P < 0.05$); 在 NASA-TLX 得分中实验组 (AR 组) 低于对照组 (B 超组), 2 组存在显著性差异 ($P < 0.05$)。主客观评价结果表明实验组 (AR 组) 认知负荷低。**结论** AR 技术在穿刺训练中比 B 超工作效率高、认知负荷低, 表明 AR 引导的穿刺训练系统可用性更好, 为术前穿刺训练指导提供了一种新的方法。

关键词: AR 手术导航; fNIRS; 神经人因学; NASA-TLX

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2021)20-0146-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.20.014

Ergonomics and Cognitive Load of AR Guided Puncture Training System Based on fNIRS

FAN Lin, WANG Shu-yi, WANG Yu-qi, ZOU Xiang, DOU Jian-sheng
(University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

ABSTRACT: The aim is to conduct neuroergonomics research on the surgical navigation system of AR-guided puncture training based on fNIRS, and explore the work efficiency and cognitive load when users interact with the system. The experiments were divided into experimental group (AR group) and control group (B-ultrasound diagnostics group). The subjects completed the puncture task under their respective platforms, collecting and processing the near-infrared signals in the task, then extracted HbO₂ concentration-related proportional coefficient β , and finally the task performance and NASA-TLX subjective score were combined for statistical analysis. The results showed that compared with the B-ultrasound group, the AR group has weak prefrontal lobe activation, short puncture time, and high success rate in the puncture task, and there were significant differences between the two groups ($P < 0.05$). The NASA-TLX score of the experimental group was lower than that of the control group, indicating that the mental load of the AR group was low, and there was a significant difference between the two groups ($P < 0.05$). AR technology has higher work efficiency and lower cognitive load than B-ultrasound in puncture training, indicating that the AR-guided puncture training system is more usable and provides a new method for preoperative puncture training guidance.

KEY WORDS: AR surgical navigation; fNIRS; neuroergonomics; NASA-TLX

收稿日期: 2021-06-20

基金项目: 上海市教委科研创新项目 (12Y2098); 上海理工大学国家级项目培育课题 (13XGQ02)

作者简介: 樊琳 (1994—), 女, 吉林人, 上海理工大学硕士生, 主攻生物医学工程。

通信作者: 王殊轶 (1972—), 女, 辽宁人, 博士, 上海理工大学副教授, 主要研究方向为医疗器械人因工程设计、医疗器械可用性测试、机器视觉检测、增强现实虚拟现实辅助医疗诊疗。

人机交互中涉及较多复杂的心理活动,事后自主报告和行为记录只能在有限程度上反映用户交互过程的用户体验,无法检测用户的内隐反应^[1],实际上人因研究中所关注的心理加工过程多数与大脑皮层相关。有研究发现人机系统的效率及安全性,极大程度上依赖于操作者在操作过程中的认知负荷^[2]。增强现实(Augmented Reality,简称AR)技术可用于医疗手术导航中,将计算机生成的虚拟物体叠加在真实物体上,一起呈现在使用者的视野中,从而形成虚实结合的视觉图像,增强了医生对现实的把握与理解,大大降低了临床手术的风险。AR技术是外科手术的重要辅助手段,为手术的安全性和精确性提供支撑,探索操作者使用AR系统工作时大脑的认知负荷对医疗安全性具有重要意义。人机交互中,若用户认知负荷过高,会降低用户的处理能力,从而导致操作效率下降、失误率上升^[3]。而手术是一项复杂的体力与脑力工作,术中医生大脑的认知、判断、反应与协调支配着医生的每一步操作,这关乎患者的生命安全。近红外光谱成像(Functional Nearinfrared Spectroscopy,简称fNIRS)技术是一种能监测人机交互中认知情况的无损检测技术,近十年来发展迅速。它通过监控和记录脑内区域的血氧变化,能有效地测量出大脑激活情况^[4]。在用户执行任务时,外显认知活动程度与脑激活呈中高度相关,因此fNIRS信号为客观评估人机交互中的认知负荷提供了新的思路。

1 AR手术导航系统与fNIRS的认知研究

研究发现,人机交互过程中脑部活动会发生变化^[5],而神经人因学就是对工作状态下大脑认知功能的神经基础进行研究。大脑中前额叶(Prefrontal Cortex,简称PFC)皮层负责各种认知过程,包括执行、运动规划、决策、判断、工作记忆和保持注意力的能力,还涉及处理新颖事物的能力^[6]。利用脑成像技术研究医生的认知情况,可以加深对医生的决策过程和疲劳影响的理解^[7]。

功能性磁共振(Functional Magnetic Resonance imaging,简称fMRI)和fNIRS是较为常用的2种脑成像技术,用于测量脑局部血流的变化^[8]。fMRI时间分辨相对较差、价格昂贵、体积庞大,对被测对象活动限制较高;fNIRS系统体积小、便携,同时具有较高的时间分辨率,对实验环境要求低、适用范围广。因此,fNIRS更适用于人机交互测试。研究发现fNIRS可以监测出不同操作系统对人的脑力工作量的变化,即认知负荷方面的差异^[9]。Modi H N等^[10]利用fNIRS研究腹腔镜缝合手术中时间压力对PFC活动与技术性能带来的影响,结果表明术中压力会导致PFC活动减弱和技术性能下降;Sing H等^[11]通过fNIRS研究发现在不同手术平台(机器人手术和传统腹腔镜手术)进行手术缝合时医生的脑血流量变化不同,与腹

腔镜相比机器人手术可以提高技术性能,降低认知负荷;Shewokis P A等^[12]用fNIRS测量和评估了腹腔镜训练中学习者的学习水平,探究出认知负荷更低的训练方式,从而提高了学习效果。

大量研究发现AR手术导航可以帮助外科医生在手术中精确定位^[13]。Tabrizi I B等^[14]在神经外科脑肿瘤切除手术中使用AR技术辅助快速规划皮肤切口和实现脑表面肿瘤可视化;Zhu M等^[15]在整形外科手术中的研究发现,AR导航技术比徒手手术准备时间长,但截骨过程短、手术效果好、术中灵活性强;Rassweiler J等^[16]在经皮肾治疗中引入了AR技术,在与超声和透视的方法进行对比时发现受训者使用AR技术的时间最短。以上研究表明,AR技术可以协助医学生与从业者熟练掌握各种手术技巧,提高医生的情景意识,看到无法直接观察的人体内在结构,如内脏、骨骼、神经血管等。AR技术因其操作简便、交互性强的特点,临床应用愈加广泛^[17],因此探索AR在人机交互中人的认知情况,有助于提升AR医疗应用中的可用性。

临床上经皮肾穿刺建立穿刺通道主要采用B超定位^[18],其图像为二维平面,操作难度大,穿刺角度难掌握,穿刺路径规划性不强。肾穿刺过程中的方向、深度判断主要依靠术者临床经验。为解决上述问题,本文研究了一种基于AR技术的经皮肾穿刺训练系统。系统基于三维可视化和穿刺针跟踪定位的方法可以简化操作过程、提高穿刺的精准性、减少重复穿刺的次数,从而提高经皮肾穿刺的效率。AR设备的沉浸感与可移动性导致无法客观测量人与AR交互时的工作负荷,fNIRS使其成为可能。本文利用fNIRS对AR和B超引导穿刺训练系统展开神经人因学研究,通过实验探究不同操作平台的脑激活情况,研究操作者使用穿刺系统工作时的工效和认知负荷,即AR引导穿刺训练系统的可用性。

2 基于fNIRS的AR引导穿刺训练系统的神经人因学实验研究

2.1 fNIRS信号介绍及采集设备

fNIRS是一种非侵入且对人体无害的测量技术,利用波长为700 nm~900 nm的近红外光测量局部神经元激活后的血氧浓度变化。在头部放置光源发射器,距发射器2 cm~7 cm处放置近红外探测器,虽然大部分光波被大脑组织吸收,但是仍会有一部分光经过多次散射到达头皮,探测器则接收这些光信号^[19]。在实际生活中,作业者大脑的血氧水平会随需要处理的信息量的增加而增加,即随认知负荷的改变血氧浓度也会产生变化。

实验采用荷兰Atrinis公司研发的多通道近红外光谱成像系统,采样频率为10 Hz,仪器波长为840 nm、

755 nm, 包括 8 个发射器、2 个接收器, 探头间隔为 3.5 cm, 共 8 个通道。大多数高级认知处理过程都归因于前额叶皮层的活动, 因此本研究探测区域为前额叶。利用 NIRS_SPM 使用用户指定的通道的 MNI 坐标, 将 NIRS 通道空间配准到 MNI 坐标。被测对象在实验过程中要求避免大幅度头颈部运动、频繁眨眼等, 实验中尽量避免因躯体运动引起的噪声。fNIRS 探头及通道位置见图 1。

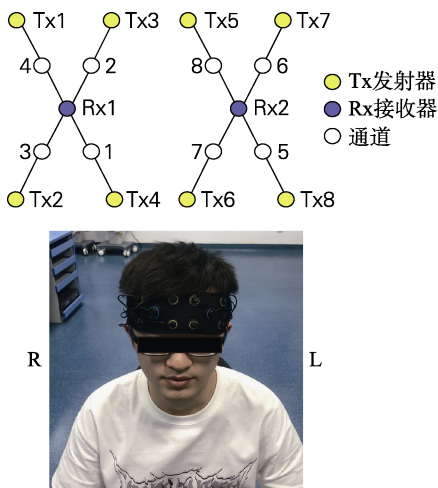


图 1 fNIRS 探头及通道位置
Fig.1 fNIRS probe and channel location

2.2 神经人因学评价实验

2.2.1 目的

本实验利用 fNIRS 探索使用 AR 引导穿刺训练系统时前额叶的激活情况, 即人机交互中的工效与认知负荷。包括根据被测对象在不同穿刺平台下进行手术穿刺时采集的近红外信号、行为绩效、主观问卷分数, 探究被测对象的认知负荷情况。

对实验组 (AR 组) 与对照组 (B 超组) 的各测试数据进行了正态分析、方差齐性检验, 对最小显著性差异法 (Least Significant Difference, 简称 LSD) 进行了显著结果校正, 显著差异为 $P < 0.05$, 独立样本 t 检验导出数据均用 SPSS 24.0 软件进行统计分析。

2.2.2 穿刺手术平台

手术平台场景见图 2。穿刺模型仿体见图 2 (a), 其材料为弹道凝胶, 密度、形状等物理特性非常接近人体肌肉组织, 3D 打印的肾脏模型被埋入弹道凝胶。AR 穿刺平台见图 2 (b), 将穿刺模型仿体三维重建, 对肾脏模型、穿刺针进行三维配准、渲染和细化后, 导入 HoloLens 头戴显示器进行模型呈现; 采用瑞典 Qualisys 光学式运动捕捉系统捕捉肾脏模型与穿刺针, 并利用 HoloLens 设备呈现模型。AR 平台穿刺场景见图 2 (c), B 超平台穿刺场景见图 2 (d)。B 超

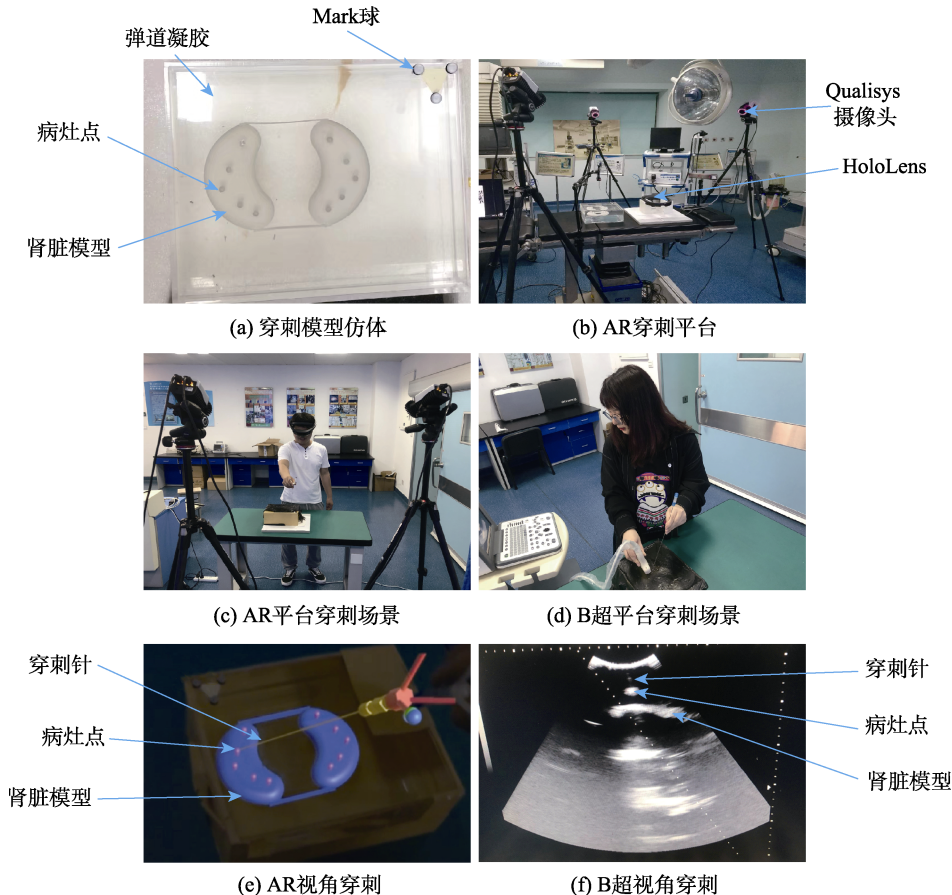


图 2 手术平台场景
Fig.2 Surgical platform scene

平台超声检测仪采用恩普数字 B 型超声诊断仪,此超声系统简洁精巧且有较好的组织优化成像能力,系统使用方便,能满足实验要求。穿刺成功的判别指标为 B 超探测穿刺针针尖与模型病灶点距离不超过 5 mm,因其满足临床医生提出的操作标准,正式实验时模型上面均覆有黑色不透明塑料布,被测对象肉眼不可见肾脏及病灶位置。AR 视角穿刺见图 2(e),B 超视角穿刺见图 2(f)。

2.2.3 实验过程

实验任务流程见图 3,被测对象在各自平台进行穿刺培训,达到实验要求后进行正式实验,正式实验中被测对象要完成 2 项任务:(1)任务开始前静息 30 s,在各自平台下进行穿刺任务,实验设计采用组块设计,每次穿刺完成后静息 15 s,然后进行下一次穿刺操作,fNIRS 实时采集 600 s 数据,将记录的每次穿刺时间与任务成功率作为行为绩效,用于后续分析;(2)穿刺结束后填写 NASA-TLX(NASA-Task Load Index)问卷,评估主观手术的满意度、工作表现和疲劳程度。

2.2.4 受试对象

ANSI/AAMI HE75:2009 标准^[20]指出医疗器械人因评测过程中,测试用户只需要 15~20 人就可以反映出人机交互存在的问题。在上海理工在校大学生中通过访谈方式招募被测对象 30 人(男性 16 人,女性 14 人),平均年龄在 25.1±0.8 岁,被测对象在培训前均无相关穿刺手术经验且未接触实验相关任务。被测对象被随机分配到实验组(AR 组)与对照组(B 超组),每组 15 人(男性 8 人,女性 7 人),被测对象均为右利手,听力、视力或矫正视力正常,无躯体和精神疾病。实验组的任务为在 AR 引导肾穿刺培训系统下进行穿刺,对照组的任务为在传统 B 超系统引导下进行穿刺。

2.3 fNIRS 数据处理方法

fNIRS 指标包括含氧血红蛋白(HbO₂)、脱氧血红蛋白(Hb)、总含氧量(HbT)浓度等。本研究将 HbO₂ 作为分析指标,因为 HbO₂ 对任务刺激最为敏感,所以该浓度的升高常作为皮层产生激活的表征。

近红外数据使用 NIRS_SPM、SPM8 对数据进行处理分析。首先在 NIRS_SPM 时间序列窗口中检查来自每个参与者的每个通道的数据,以了解信号完整性与实验设计时间轴的对应关系,然后对每个数据集用 NIRS_SPM 中小波最小描述长度(Wavelet-MDL)去趋势化,去除与非相关生物信号相关的信号波动^[21]。为了校正数据中的序列相关性,使用低通滤波器、血流动力学响应函数进行低通滤波和平滑处理。因为将血红蛋白浓度数据直接对比不同区域激活程度不具有统计意义,故本研究通过广义线性模型(General Linear Model,简称 GLM)^[22]对血红蛋白浓度数据进行进一步分析,得出具有统计学意义且与 HbO₂ 浓度相关的比例系数 β 值^[23],GLM 较为常用,其原理如下:

$$Y = \beta X + \varepsilon \tag{1}$$

其中, X 为自变量, Y 为因变量, β 为拟合系数, ε 为随机误差。在 fNIRS 数据中, Y 为某个体的 fNIRS 信号, X 为由心理实验变量和已知的大脑血流动力学反应特征函数创建的实验模型。通过 GLM 计算出 β 值,根据以往 fNIRS 相关的研究,HbO₂ 对任务刺激最为敏感,故选取 HbO₂ 的 β 值,并对各通道该值进行对比,得出不同刺激下脑区的激活情况。 β 代表了任务反应的振幅,该值越大激活程度越高,所付出的认知负荷越高。

3 结果分析

3.1 近红外数据统计分析

实验结束后共采集了 30 组近红外信号,数据处理后进行统计分析。2 组被测对象 8 个通道的 HbO₂ 的 β 值的平均值与标准差,见表 1。由表 1 可知实验组(AR 组) β 值小于对照组(B 超组);各组被测对象 8 个通道的所有 HbO₂ 的 β 值经独立样本 t 检验表明,2 组存在显著性差异($P<0.005$)。因为 HbO₂ 浓度与大脑激活程度呈正相关, β 值越大,对应脑区激活程度越高,所以实验组(AR 组)脑激活程度小于对照组(B 超组)。前人研究证明,PFC 反应越强烈

表 1 穿刺任务实验组(AR 组)与对照组(B 超组)各通道 β 值

Tab.1 Puncture task AR group and B-ultrasound group each channel β value

通道	对照组(B 超组) β 值	实验组(AR 组) β 值
1	0.85±1.19	0.14±0.39
2	0.43±2.05	-0.01±0.81
3	0.32±1.26	0.10±0.61
4	0.38±2.87	0.01±0.63
5	0.57±0.67	0.19±0.52
6	0.10±1.02	-0.03±0.64
7	0.60±1.05	0.06±0.61
8	0.66±1.46	-0.17±0.63

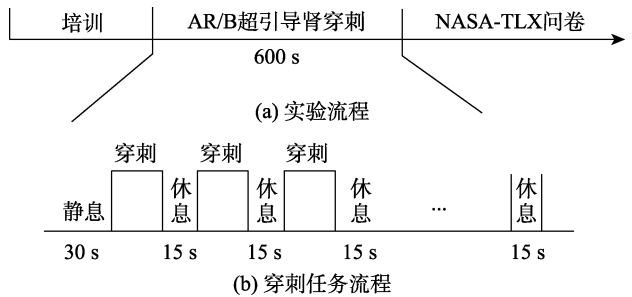


图 3 实验任务流程

Fig.3 Experiment assignment process

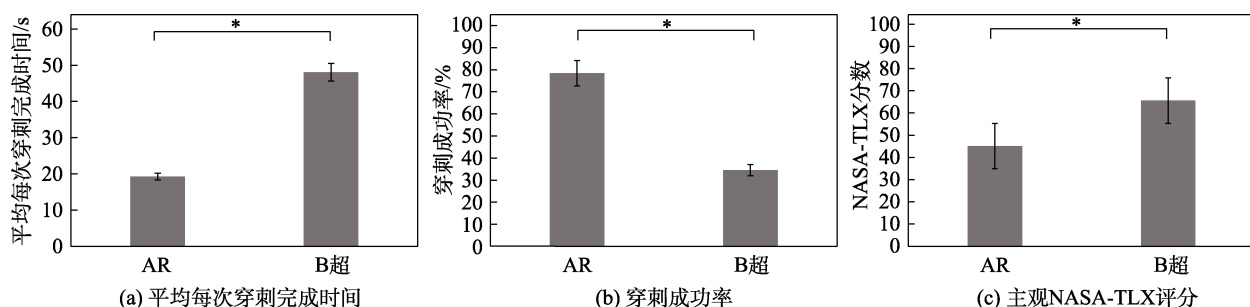


图4 客观穿刺任务绩效和主观 NASA-TLX 评分

Fig.4 Objective puncture task performance and subjective NASA-TLX score

注: *表示 t 检验 P 值小于 0.05

则代表需要更多的注意力^[24],这解释了对照组(B超组)具有较高的PFC激活的原因。使用AR设备完成穿刺任务与使用传统B超引导方式相比PFC激活较弱,因此与AR相比B超需要付出更多的认知负荷。

3.2 客观穿刺任务绩效

在穿刺任务中,实验组(AR组)平均每次穿刺完成时间(19.26 ± 4.27 s)少于对照组(B超组)(48.09 ± 15.39 s),经独立样本t检验分析 $P < 0.05$,差异有统计学意义,见图4(a)。在穿刺任务中,实验组(AR组)穿刺成功率($78.4\% \pm 7.74\%$)高于对照组(B超组)($34.5\% \pm 7.40\%$),经独立样本t检验分析 $P < 0.05$,差异有统计学意义,见图4(b)。2组穿刺任务的绩效表现存在显著性差异,基于AR的头戴显示器的经皮肾穿刺训练系统与临床B超引导穿刺相比,能显著缩短穿刺时间、提高任务成功率、降低操作难度,从而降低被测对象的认知负荷。

3.3 主观 NASA-TLX 评分

主观 NASA-TLX 评分见图4(c),实验组(AR组)评分(45.10 ± 14.83)低于对照组(B超组)评分(65.56 ± 5.64),2组经独立样本t检验,结果表明被测对象分数存在显著性差异($P < 0.05$)。认知负荷评估是评价人机交互系统的基础性研究,国内外研究指出 NASA-TLX 是迄今为止使用最广泛的主观认知负荷评估工具之一^[25]。其在评估认知负荷上的敏感性、效度和用户可接受性较高^[26],并且从脑力需求、体力需求、时间需求、业绩水平、努力程度和受挫程度6个维度对脑力认知负荷展开了综合评估。本研究 NASA-TLX 评价结果表明,对照组(B超组)认知负荷水平显著高于实验组(AR组),即对照组(B超组)分数高则认知负荷高,主观满意度差、工作表现差、疲劳程度强。

4 结语

本研究对AR引导的肾穿刺训练系统展开了神经人因学研究,结合了主观量表测试、绩效考核和近红外信号评估了不同操作平台的认知负荷和工效。研究

结果表明:(1)在测试过程中实验组(AR组)绩效表现好,被测对象每次穿刺任务完成时间短、成功率高,近红外数据中 HbO_2 的 β 值较小,脑激活程度较弱,认知负荷低;(2)2组被测对象的 β 值、完成时间、成功率、主观量表评分经独立样本t检验分析结果表明,2组存在显著性差异;(3)近红外实验结果与绩效结果、主观 NASA-TLX 量表分数对比,结果具有一致性。

上述结果表明,本研究中的主客观评价结果一致,AR肾穿刺训练系统比起B超在操作难度与认知负荷上降低了,操作者脑激活情况较弱、满意度高、工作表现好,AR肾穿刺训练系统是一种可用性较好的穿刺训练方法,有较好的临床应用价值。在后续研究中,将对被测对象进行培训学习,探究不同学习程度的被测对象在AR肾穿刺系统下的PFC激活情况,从而展开进一步的神经人因学研究。

参考文献:

- [1] 杨海波. 认知神经科学与人机交互的融合: 人机交互研究的新趋势[J]. 包装工程, 2019, 40(22): 55-63.
YANG Hai-bo. The Fusion of Cognitive Neuroscience and Human-Computer Interaction: New Trends in Human-Computer Interaction Research[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(22): 55-63.
- [2] FOY H J, PETER C. Mental Workload is Reflected in Driver Behaviour, Physiology, Eye Movements and Prefrontal Cortex Activation[J]. Applied Ergonomics, 2018, 73: 90-99.
- [3] 贺孝梅, 李剑钰. 人机交互中认知负荷的成因分析与设计策略研究[J]. 包装工程, 2020, 41(10): 24-30.
HE Xiao-mei, LI Jian-yu. Cause Analysis and Design Strategies of Cognitive Load in Human-computer Interaction[J]. Packing Engineering, 2020, 41(10): 24-30.
- [4] 胡飞, 钱程. 功能性近红外光谱技术前沿进展及其应用于用户体验度量的可能[J]. 设计艺术研究, 2019, 9(1): 7-14.
HU Fei, QIAN Cheng. Advances in Functional Near Infrared Spectroscopy and Its Possibility for Measuring the User Experience[J]. DESIGN RESEARCH, 2019, 9(1):

- 7-14.
- [5] NASEER, HONG. Classification of Functional Near-Infrared Spectroscopy Signals Corresponding to the Right and Left-Wrist Motor Imagery for Development of a Brain-computer Interface[J]. *Neurosci Lett*, 2013, 553: 84-89.
- [6] 司娟宁, 张文玥, 李雅欣, 等. 功能近红外光谱成像技术在大脑认知功能中的应用[J]. *立体定向和功能神经外科杂志*, 2018, 31(3): 65-68.
SI Juan-ning, ZHANG Wen-yue, LI Ya-xin, et al. Application of Functional Near Infrared Spectroscopy Imaging in Brain Cognitive Function[J]. *Chin Stereotact Funct Neurosurg*, 2018, 31(3): 65-68.
- [7] LEFF D R, YONGUE G, VLAEV I, et al. Contemplating the Next Maneuver[J]. *Annals of Surgery*, 2017, 265(2): 320-330.
- [8] 昌凡, 李豪喆, 张盛宇, 等. 基于 fNIRS 技术检测脑外伤所致轻度认知功能障碍者工作记忆[J]. *法医学杂志*, 2020, 36(1): 52-60.
CHANG Fan, LI Hao-zhe, ZHANG Sheng-yu, et al. Working Memory of Patients with Mild Cognitive Impairment due to Brain Trauma Based on fNIRS[J]. *Journal of Forensic Medicine*, 2020, 36(1): 52-60.
- [9] RYAN M K, RAJA P, RABIA M, et al. Into the Wild: Neuroergonomic Differentiation of Hand-Held and Augmented Reality Wearable Displays during Outdoor Navigation with Functional Near Infrared Spectroscopy[J]. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2016, 10(5): 12-16.
- [10] MODI H N, H SINGH, F ORIHUELA-ESPINA, et al. Temporal Stress in the Operating Room: Brain Engagement Promotes “Coping” and Disengagement Prompts “Choking”[J]. *Ann. Surg*, 2017; 267(15): 683-691.
- [11] SINGH H, MODI H N, RANJAN S, et al. Robotic Surgery Improves Technical Performance and Enhances Prefrontal Activation during High Temporal Demand[J]. *Annals of Biomedical Engineering*, 2018, 46(10): 1621-1636.
- [12] SHEWOKIS P A, SHARIFF F U, LIU Y, et al. Acquisition, Retention and Transfer of Simulated Laparoscopic Tasks Using fNIR and a Contextual Interference Paradigm[J]. *The American Journal of Surgery*, 2017, 213(2): 336-345.
- [13] 王宇希, 张凤军, 刘越. 增强现实技术研究现状及发展趋势[J]. *科技导报*, 2018, 36(10): 75-83.
WANG Yu-xi, ZHANG Feng-jun, LIU Yue. Research Status and Development Trend of Augmented Reality Technology[J]. *Science & Technology Review*, 2018, 36(10): 75-83.
- [14] TABRIZI I B, MAHVASH M. Augmented Reality-guided Neurosurgery: Accuracy And Intraoperative Application Of An Image Projection Technique[J]. *Neurosurg*, 2015, 123(1): 206-211.
- [15] ZHU M, LIU F, ZHOU C, et al. Does Intraoperative Navigation Improve the Accuracy of Mandibular Angle Osteotomy: Comparison between Augmented Reality Navigation, Individualised Templates and Free-Hand Techniques[J]. *Journal of Plastic, Reconstructive & Aesthetic Surgery*, 2018, 71(8): 1188-1195.
- [16] RASSWEILER J, RASSWEILER M C, MÜLLER M, et al. Augmented Reality for Percutaneous Renal Interventions[M]. London: *Advances in Image-Guided Urologic Surgery*, 2015.
- [17] 张楚茜, 张诗雷. 增强现实技术的研究进展及临床应用概述[J]. *组织工程与重建外科杂志*, 2018, 14(1): 23-26.
ZHANG Chu-xi, ZHANG Shi-lei. Research Progress and Clinical Application of Augmented Reality Technique [J]. *Journal of Tissue Engineering and Reconstructive Surgery*, 2018, 14(1): 23-26.
- [18] 李茂章, 李腾成, 司徒杰, 等. 新型无线与传统超声在经皮肾镜中引导穿刺效果的比较[J]. *中华腔镜泌尿外科杂志*, 2019(3): 149-152.
LI Mao-zhang, LI Teng-cheng, SI Tu-jie, et al. Comparison of a New Portable Wireless Ultrasound and a Traditional Wired Ultrasound in Puncture Guiding of Percutaneous Nephrolithotomy[J]. *Chin J Endourol*, 2019(3): 149-152.
- [19] 潘津津, 焦学军, 焦典, 等. 利用功能性近红外光谱法研究大脑皮层血氧情况随任务特征变化规律[J]. *光学学报*, 2015, 35(8): 236-242.
PAN Jin-jin, JIAO Xue-jun, JIAO Dian, et al. Study on Variation in Cortex Oxygen with Task Features Using Functional Near-Infrared Spectroscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(8): 236-242.
- [20] ANIS/AAMI HE75. Human Factors Engineering-Design of Medical Devices[S]. New York: ANSI, 2009.
- [21] KIM H Y, KIM E J, YOU J H, et al. Adaptive Locomotor Network Activation during Randomized Walking Speeds Using Functional Near-Infrared Spectroscopy[J]. *Technology & Health Care*, 2017, 25: 93-98.
- [22] UGA M, DAN I, SANO T, et al. Optimizing the General Linear Model for Functional Near-infrared Spectroscopy: An Adaptive Hemodynamic Response Function Approach[J]. *Neurophotonics*, 2014, 1(1): 15004.
- [23] 韩卓君. 基于 fNIRS 的不同技术水平太极拳练习者脑功能差异的研究[D]. 北京: 北京体育大学, 2019.
HAN Zhuo-jun. Study on Brain Function of Tai Chi Practitioners with Different Skill Levels Based on fNIRS [D]. Beijing: Beijing Sport University, 2019.
- [24] LEFF D R, ELWELL C E, ORIHUELA-ESPINA F, et al. Changes in Prefrontal Cortical Behaviour Depend upon Familiarity on a Bimanual Co-ordination Task: An fNIRS Study[J]. *Neuroimage*, 2008, 39(2): 805-813.
- [25] 余琦玮, 冯定忠, 徐新胜, 等. 基于 Lego 模拟的装配作业脑力负荷测量方法[J]. *工业工程与管理*, 2018(5): 53-59.
YU Qi-wei, FENG Ding-zhong, XU Xin-sheng, et al. Measurement of Mental Workload in Assembly Based on Lego Simulation[J]. *Industrial Engineering and Management*, 2018(5): 53-59.
- [26] NINO L, MARCHAK F, CLAUDIO D. Physical and Mental Workload Interactions in a Sterile Processing Department[J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2020, 76: 102902.