

文章编号: 1004-7220(2023)04-0763-07

应用虚拟盒块测试系统评估脑卒中患者 上肢运动功能的可行性研究

董英¹, 刘笑宇^{1,2*}, 唐敏¹, 樊瑜波^{1,2,3*}

(1. 北京航空航天大学 生物与医学工程学院, 生物力学与力学生物学教育部重点实验室, 北京市生物医学工程高精尖创新中心, 北京 100083; 2. 北京航空航天大学 虚拟现实国家重点实验室, 北京 100083; 3. 北京航空航天大学 医学科学与工程学院, 北京 100083)

摘要:目的 评估力反馈设备结合虚拟现实技术设计的虚拟盒块测试(virtual box and block test, VBTT)用于远程评估上肢运动功能的可行性。方法 设计了一个 VBTT 系统用于评估上肢运动功能。该系统可用于计算受试者的 VBTT 得分、平均速度、运动谱弧长、耗能和平均抓握力。共招募 20 名健康受试者和 16 名脑卒中患者进行 VBTT。结果 脑卒中患者与健康受试者在 VBTT 参数的对比上均具有显著性差异($P < 0.05$);接收者工作特征(receiver operating characteristic, ROC)曲线表明,VBTT 参数可区分脑卒中患者和健康受试者的表现($P < 0.05$)。脑卒中患者 VBTT 参数与传统临床评估的相关性分析结果表明,VBTT 参数的共时效度;多元回归分析结果显示,VBTT 的运动学和力学参数能够补充性解释传统临床评估。结论 VBTT 可用于远程评估脑卒中患者的上肢运动功能。

关键词: 力反馈设备; 虚拟现实; 上肢; 运动功能; 脑卒中患者

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2023.04.019

Using Virtual Box and Block Test System as Assessment of Upper Limb Motor Function in Post-Stroke Patients: A Feasibility Study

DONG Ying¹, LIU Xiaoyu^{1,2*}, TANG Min¹, FAN Yubo^{1,2,3*}

(1. Beijing Advanced Innovation Center for Biomedical Engineering, Key Laboratory for Biomechanics and Mechanobiology of Ministry of Education, School of Biological Science and Medical Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China. 2. State Key Laboratory of Virtual Reality Technology and Systems, Beihang University, Beijing 100083, China; 3. School of Medical Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China)

Abstract: Objective To evaluate the feasibility of virtual box block test (VBTT) designed by force feedback device combined with virtual reality technology for remote evaluation of upper limb motor function. **Methods** A VBTT system for upper limb motor function assessment was designed. This system could be used to calculate the VBTT score, mean velocity, spectral arc length, energy consumption and mean grasping force of the subjects. In total 20 healthy subjects and 16 post-stroke patients were recruited to perform the VBTT. **Results** Significant differences were found in all VBTT parameters ($P < 0.05$) between post-stroke patients and healthy subjects. Receiver operating characteristic (ROC) curve analysis showed that the VBTT parameters were

收稿日期: 2023-01-05; 修回日期: 2023-02-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFC2007904), 国家自然科学基金项目(U20A20390, 11827803)

通信作者: 刘笑宇, 副教授, E-mail: x. y. liu@buaa. edu. cn; 樊瑜波, 教授, E-mail: yubofan@buaa. edu. cn

* 为共同通信作者

possible to distinguish the two groups ($P < 0.05$). The correlations between VBBT parameters and traditional clinical assessments indicated the concurrent validity of the VBBT. Multiple regression analysis showed that the kinematic and kinetic parameters of the VBBT could partially explain the variance of the traditional clinical assessments. **Conclusions** The VBBT can be used as a remote assessment of upper limb motor function in post-stroke patients.

Key words: force feedback device; virtual reality (VR); upper limb; motor function; post-stroke patients

正常的上肢运动功能包括精确抓握能力和操纵物体的能力,对人们的日常生活活动非常重要^[1]。然而,上肢运动功能经常受到多种疾病的影响,例如神经系统疾病、肌骨系统疾病和截肢等^[2-4]。多数情况下,上肢运动功能障碍长期存在。然而,由于一些难以克服的困难,例如康复治疗的支出太高和康复训练场所的距离太远,导致患者难以如期接受评估^[5]。在这种情况下,远程康复评估可以作为有效解此种困境的方法。

近年来,有不少研究利用虚拟现实(virtual reality, VR)技术对上肢运动功能进行远程评估。和传统临床评估相比,VR不仅可以提供更加客观和量化的评估结果,还可以自动地记录和计算出上肢运动功能参数,减少对治疗师的依赖^[6-10]。另外,力反馈技术的飞速发展也极大增强了使用者与虚拟环境交互过程中的沉浸感和感知性,提升了VR评估任务的生态有效性^[11-12]。研究显示,使用者可以通过力反馈设备模拟出的力、力矩、震动等实现与虚拟环境具有力触觉交互^[13]。力反馈设备的内置传感器不仅可以将在操作虚拟任务过程中的运动和位置信息实时发送给计算机,而且能够接收来自计算机计算的虚拟环境中各物体之间的作用力,通过执行器(如操作手柄)将力感反馈给使用者,让他们可以感受到虚拟环境中所交互物体的力学特点。总而言之,力反馈设备与VR相结合,可以为患者提供一个极其仿真的评估环境,患者在虚拟环境中执行评估任务时的运动功能可以表征为在现实世界中执行相同任务的运动功能^[14]。

盒块测试(box and block test, BBT)具有操作简单、耗时短和有效性高等优点,已被广泛应用于上肢的灵活性评估^[15]。近年来,有不少学者利用VR技术对BBT进行改善和量化,开发了多种虚拟环境下BBT。Cho等^[16]使用非沉浸式VR结合Kinect设备证明了脑卒中患者的BBT和非沉浸式VBBT之

间良好的相关性。然而,在该研究中,非沉浸式VR降低了患者的体验感。Oña等^[17]使用沉浸式头盔结合Leap motion开发了VR-BBT,发现在帕金森病患者中,VR-BBT与BBT评分中度相关。Alvarez-Rodríguez等^[18]利用了与Oña等^[17]相同的设备验证了虚拟BBT在脊髓损伤患者中的同时有效性。但是,以上研究无法实现触觉反馈。此外,这些研究都没有提供运动学和力学参数。Everard等^[19]使用触觉控制器与VR结合开发了BBT-VR,并证明该设备在脑卒中患者中的共时效度和可靠性,但是该触觉控制器不能对整个交互过程进行触觉、运动觉反馈,故该系统的体验感依然不理想。而且在该研究中仅提供了运动学参数,缺乏对力学参数的报道。缺少力触觉渲染,虚拟环境中的抓握运动与真实物理环境中的自然抓握运动显著不同^[20]。

为此,本课题组结合力反馈设备设计了一个虚拟盒块测试(virtual box and block test, VBBT)系统,受试者在任务执行期间可以感知物体的质地、刚度、重力等性能特点,使抓握运动更加自然、真实。在本课题组之前研究中,已经充分验证了该设备的可靠性以及一些参数的有效性^[21]。本研究试图挖掘新的运动学和力学参数,反映上肢运动的平滑性、灵活性、力度以及能量消耗,以期该参数能够准确评估脑卒中患者的上肢运动功能,为远程康复提供试验依据,奠定初步研究基础,推动康复评估新技术的发展。本文假设,这些参数对健康人和脑卒中患者具有区分能力,与传统的临床评估具有显著的相关性,且能补充性地解释临床评估结果。

1 试验内容和方法

1.1 试验对象

在北京市一个大型三甲医院的康复中心招募脑卒中患者,所有患者均符合脑卒中诊断标准^[22]。在北京航空航天大学附近的社区招募健康受试者。

脑卒中患者的纳入标准:①至少3个月前行脑CT或MRI检查诊断为脑卒中;②年龄大于18岁;③右利手且右侧肢体偏瘫;④坐位平衡2级及以上;⑤能够在1min内在BBT中成功转移至少3个物块;⑥具有一定的认知能力,能了解并执行整个试验过程。排除标准:①偏瘫侧上肢不稳定性骨折;②视觉及视觉认知障碍,如单侧忽略;③6个月内由视觉刺激(灯光、电视等)引起癫痫;④VR环境中眩晕。

健康受试者的纳入标准:①年龄在48~85岁之间;②可有慢性疾病,但不影响正常优势上肢功能;③矫正视力大于4.8,做VR试验时无晕屏等症状。排除标准:任何可能影响上肢运动的神经、肌骨系统疾病。

最终,共有16名脑卒中受试者[年龄(67.88±10.93)岁;男/女=11/5]和20名健康受试者[年龄(63.45±11.43)岁;男/女=13/7]纳入该研究,两组受试者在年龄($P=0.247$)和性别($P=0.813$)上差异无统计学意义。

本研究经北京航空航天大学生物与医学伦理委员会审核通过,在中国临床试验中心注册。所有受试者都被告知试验过程和注意事项并签署了知情同意书。

1.2 虚拟试验平台搭建

VBBT包括1个虚拟的带有隔板的盒子和若干虚拟物块,它们的尺寸与重量和BBT相同。在VBBT系统中,VR头盔(Oculus Rift, Facebook公司,美国)用来提供可视化、可交互的3D虚拟环境。力反馈设备(Omega.7, Force Dimension公司,瑞士)用于向受试者提供上肢与虚拟环境交互时的感知力。机器人的手柄在虚拟环境中显示为圆形抓取工具。当受试者操作手柄时,抓取工具在虚拟环境中也被同步操作。该任务中抓握力的阈值设置为0.2 N。抓握力小于阈值时,物块从抓握工具中掉落。在VBBT任务开始时,虚拟盒子的测试手(右手)一侧的中间位置出现1个虚拟物块。虚拟盒子和物块都具有其应具备的物理属性,包括质地、刚度和重量(物块质量9 g)。在VBBT试验中,当受试者成功地将1个物块从测试手一侧转移到对侧后,新的待转移的物块会在原物块所在的位置自动生成(见图1)。

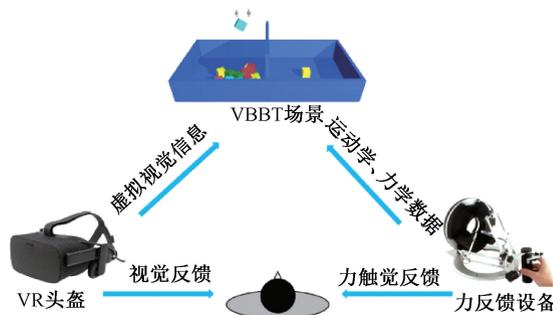


图1 VBBT系统

Fig. 1 VBBT system

1.3 试验流程和方法

对脑卒中患者进行传统的上肢运动功能评估和认知功能评估。传统的上肢运动功能评估包括BBT、手臂动作调查测试(action research arm test, ARAT)、Fugl-Meyer上肢运动功能评估(Fugl-Meyer assessment of the upper extremity, FMA-UE)、认知功能采用简易精神状态检查(mini-mental state examination, MMSE)。所有评估均根据先前研究中报告的标准说明进行^[15,23-25]。最后,再对患者进行VBBT。在整个试验过程中,若患者感到不舒服,立即停止试验。健康受试者只进行VBBT。

在VBBT中,受试者佩戴VR头盔,坐在高度可调的椅子上,力反馈设备放置在其正前方的桌面上。试验人员向受试者介绍力反馈设备的操作技巧,直到他们了解如何使用该设备进行试验。在正式进行VBBT前,需要让受试者先熟悉该试验过程。在熟悉的过程中,试验人员指示受试者从盒子的一侧拿起物块,越过障碍板,转移到盒子的另一侧,释放物块。直到他们完全熟悉如何利用力反馈设备与虚拟环境交互进行VBBT。最后,受试者在60 s时间内尽可能多地转移物块,直到虚拟盒子的测试侧没有新的物块生成为止。

1.4 运动学和力学参数

在本研究中,力反馈设备可以实时记录试验过程中转移物块的数量、虚拟物块的3D位置和速度以及上肢对虚拟物块的抓握力。其中,转移物块的数量为VBBT得分。原始数据的采样频率为100 Hz。使用6 Hz、2阶的低通巴特沃斯滤波器对数据进行过滤,计算出在执行VBBT过程中反映上肢运动功能的运动学和力学参数:①平均速度。每个受试者在VBBT过程中转移物块的平均速

度,可以直观地反映受试者上肢运动的效率^[8]。在本研究中,该数值越大,受试者的运动效率越高;② 运动谱弧长(spectral arc length, SPARC)。将上肢运动速度进行傅里叶转换后幅度谱的弧长,计算过程参照文献^[26],反映受试者上肢运动的平滑性。在本研究中,该数值越大,受试者的运动平滑性越好;③ 耗能。受试者克服物块重力和使物块产生竖直方向上的加速度所做的功的总和。反映受试者所消耗能量的大小^[27]。在本研究中,该数值越小,受试者的运动功能越好;④ 抓握力。在转移物块时,每个受试者在物块上所施加的力。在本研究中,该数值越大,受试者的肌力越正常。

1.5 统计学分析

采用 Matlab 2016a(MathWorks 公司,美国)计算运动学和力学参数。采用 SPSS 22.0(SPSS 公司,美国)对各个试验参数进行统计分析。使用直方图和 Shapiro-Wilk 检验探索每组数据是否呈正态分布。对两组数据进行对比时,根据正态分布分析结果,VBBT 得分、平均速度和平均抓握力采用独立样本 t 检验,SPARC 和耗能采用 Mann-Whitney U 检验。对两组有显著性差异($P < 0.05$)的参数进行接收者工作特征(receiver operating characteristic, ROC)曲线分析,来获得曲线下面积(area under the

curve, AUC)。通过计算约登指数来确定截止值,以将健康受试者与脑卒中患者区分开来。采用 Spearman 秩相关系数对 VBBT 参数与传统的临床评估进行相关性分析,来确定这些参数的共时效率。其中, $0 \leq |r| < 0.25$,相关性极小; $0.25 \leq |r| < 0.50$,弱相关; $0.50 \leq |r| < 0.75$,中度相关; $|r| \geq 0.75$,强相关。使用多元回归分析探索 VBBT 的运动学和力学参数对传统临床评估得分的可解释程度。进行多元回归分析前,先进行单变量回归。在最终的回归模型中,只有 $P < 0.05$ 的变量被保留。

2 结果

2.1 VBBT 参数对健康受试者和脑卒中患者的区分能力

统计分析显示,两组受试者的 VBBT 得分、平均速度、平均抓握力呈正态分布;SPARC 和耗能不是正态分布。对比健康受试者和脑卒中患者的 VBBT 参数发现,健康受试者与脑卒中患者的 VBBT 得分、平均速度、SPARC、平均抓握力和耗能均存在显著性差异($P < 0.05$)。以所有健康受试者 VBBT 参数的均值为标准值,将患者 P9 和 P14 的 VBBT 参数与该标准值进行对比。结果表明,两位患者分别存在上肢运动功能缺陷(见图 2)。

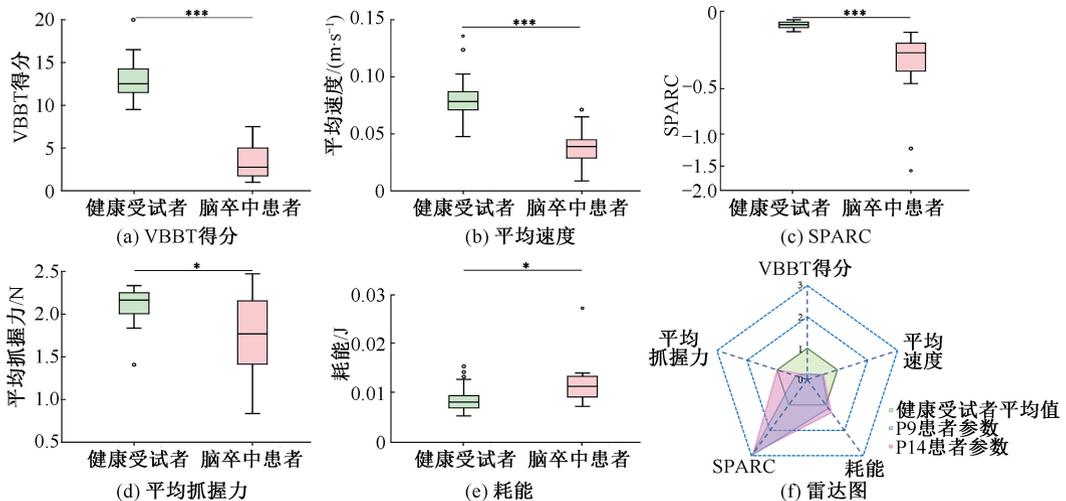


图2 健康受试者和脑卒中患者 VBBT 参数比较

Fig. 2 Comparison of VBBT parameters between healthy subjects and post-stroke patients (a) VBBT score, (b) Mean velocity, (c) SPARC, (d) Mean grasping force, (e) Energy consumption, (f) Radar chart

注: * $0.01 \leq P < 0.05$, ** $0.001 \leq P < 0.01$; *** $P < 0.001$ 。

对 VBBT 参数区分脑卒中患者和健康受试者能力进行比较,结果显示,VBBT 参数的 $AUC \geq 0.709$,

且具有较好的灵敏度(灵敏度 $\geq 80\%$)和特异性(特异性 $\geq 62.5\%$),见表 1。

表 1 VBBT 参数区分脑卒中患者和健康受试者能力比较

Tab. 1 Comparison of discrimination ability of VBBT parameters between healthy subjects and post-stroke patients

VBBT 参数	AUC	95% CI	P	截止值	灵敏度/%	特异性/%
VBBT 得分	1.000	1.000~1.000	<0.001	17	100	100
平均速度	0.966	0.916~1.000	<0.001	0.093	100	81.2
SPARC	1.000	1.000~1.000	<0.001	-0.206	100	100
耗能	0.744	0.579~0.908	0.013	0.019	80	75
平均抓握力	0.709	0.517~0.901	0.033	3.749	90	62.5

2.2 VBBT 参数与传统临床评估的关系

表 2 显示了 VBBT 参数与临床评估的 Spearman 秩相关系数。结果表明,VBBT 得分与 FMA-UE 呈中度相关,与 ARAT 和 BBT 呈强相关;平均速度与 FMA-UE 和 ARAT 呈中度相关,与 BBT 呈强相关;SPARC 与 FMA-UE 呈中度相关,与 ARAT 和 BBT 呈强相关;耗能与所有的临床评估都不相关;平均抓握力与 FMA-UE 和 ARAT 无显著相关性,与 BBT 呈中度相关。

表 2 VBBT 参数与临床评估的 Spearman 秩相关系数

Tab. 2 Spearman's rank correlation coefficients between VBBT parameters and traditional clinical assessments

临床评估	VBBT	平均速度	SPARC	耗能	平均抓握力
FMA-UE	0.607*	0.604*	0.560*	-0.134	0.229
ARAT	0.836***	0.581*	0.769***	-0.334	0.484
BBT	0.851***	0.807***	0.887***	-0.102	0.636**

注: * $0.01 \leq P < 0.05$, ** $0.001 \leq P < 0.01$; *** $P < 0.001$ 。

表 3 显示了从多元回归分析中获得的分别以 FMA-UE、ARAT 和 BBT 作为因变量的回归模型。结果发现,SPARC 解释了 FMA-UE 评分的 46.8% 和 ARAT 评分的 40.4%,平均速度和平均抓握力解释了 BBT 评分的 73.6%。

表 3 运动学和力学参数对传统临床评估的多元回归分析

Tab. 3 Multiple regression analysis of the kinematic and kinetic parameters against traditional clinical assessments

自变量	非标准化 β	调整后 R^2	F	模型 P 值
FMA-UE 为因变量 SPARC	-9.007	0.468	14.19	0.002
ARAT 为因变量 SPARC	-9.234	0.404	11.17	0.005
BBT 为因变量平均速度	209.270	0.736	21.96	<0.001
平均抓握力	5.300			

3 讨论

本研究利用力反馈设备结合 VR 技术设计了一种新型的可用于远程康复的评估任务——VBBT,通过采集该任务过程中转移物块的数量、平均速度、SPARC、耗能和平均抓握力等参数来特异性评估脑卒中患者上肢运动的灵活性、平滑性、能量消耗和力度,并验证了 VBBT 参数区分健康受试者和脑卒中患者的能力及其与传统临床评估的关系。为该设备用于远程康复评估提供初步的试验数据支持。

本文发现,VBBT 参数具有区分脑卒中患者和健康受试者的能力,可特异性评估脑卒中患者的上肢运动功能。本研究结果同先前的研究结果相似^[8,19,27],即脑卒中容易导致患者上肢运动的灵活性、平滑性降低、肌力减弱以及在执行任务的过程中所消耗的能量增加。从图 2(f)可以看出,VBBT 能特异性地检测出这些缺陷。图 2 显示,患者 P9 的 VBBT 得分上肢运动功能在灵活性、平滑性、能量消耗和力度上均存在缺陷;和患者 P9 相比,患者 P14 仅在前 3 项运动能力上存在缺陷。当 VBBT 应用于远程康复评估时,患者执行任务产生的评估结果可通过远程传输的方式传递给康复医师,医师可根据患者的具体缺陷进行远程康复指导,促进患者上肢功能的恢复。

VBBT 是一项以任务为导向的评估,不仅可以在身体的结构/功能层面对患者进行功能评估,也可以在活动层面进行量化评估。在《国际功能、残疾和健康分类》中,从功能、残疾和健康的角度将健康状况分为 3 个层面,其中,身体结构/功能和活动属于其中两个层面^[28]。身体结构/功能指身体的解剖结构以及各系统的生理或心理功能。本文认为,

运动学和力学参数,平均速度、SPARC、耗能和平均抓握力都可以看作是脑卒中患者的身体结构/功能。活动是指个体执行一项任务或完成一项行动的能力。VBBT得分可以看作是患者活动能力的表现。从VBBT参数与传统临床评估的相关性可以看出,VBBT参数与BBT和ARAT的相关性高于VBBT参数与FMA-UE的相关性,这是因为VBBT同BBT和ARAT一样,都属于ICF中活动层面的评估。在一定程度上,ICF中身体结构/功能层面的评估,可以看作是对活动层面评估结果的补充^[21]。

多元回归结果表明,VBBT参数中的运动学和力学参数部分解释传统临床评估,且具有统计学意义。其中,SPARC解释了FMA-UE评分的46.8%和ARAT评分的40.4%。这与先前的研究中的结论一致,即运动学测量解释身体结构损伤层面的能力比解释活动层面的能力更强^[29]。此外,平均速度和平均抓握力解释BBT的能力达到73.6%,本文推测原因是VBBT是以BBT为模板来开发。另一方面,许多常见的临床评估,如FMA-UE与ARAT都具有天花板效应^[28],对上肢运动功能恢复较好的患者来说缺乏敏感性。而VBBT参数可以精确地评估脑卒中患者的运动功能缺陷以及灵敏地反映上肢运动功能的变化,故VBBT参数可以在很大程度上弥补传统临床评估的不足。

然而,由于本文是为了证明力反馈设备和VR技术新开发的上肢运动功能评估任务——VBBT可用于远程康复评估而开展的一项初步研究,未来要将该设备进行商业化推广,还需要做到:
① 招募更多的健康受试者,建立不同年龄和性别的健康受试者的上肢运动功能标准以及非利手的功能标准,以增加该评估方式的信度和效度;
② 在患者招募方面,需广泛纳入患各种影响上肢运动功能的疾病的人群,验证VBBT在其他病种患者中的有效性。

4 结论

本文以BBT为模板,利用力反馈设备结合VR技术设计了用于评估上肢运动功能的VBBT任务。从该任务的原始数据中计算出VBBT参数,包括VBBT得分、平均速度、SPARC、耗能、平均抓握力等来反映上肢在执行虚拟任务过程中运动的灵活性、

平滑性、能量消耗、力度等特点。数据分析结果显示,VBBT评估结果能够精准、特异地反映脑卒中患者上肢运动功能存在的缺陷。本研究为VBBT用于远程康复提供了初步试验依据,在一定程度上推动了康复评估新技术的发展。

参考文献:

- [1] 彭广帅,樊星雨,刘笑宇,等. 柔性可穿戴康复手套的设计与控制[J]. 医用生物力学, 2019, 34(6): 479-484.
PENG GS, FAN XY, LIU XY, *et al.* Design and control of a soft and wearable robotic glove for hand rehabilitation [J]. *J Med Biomech*, 2019, 34(6): 479-484.
- [2] 赵梦文,胡志刚,王新征,等. 基于AnyBody脑卒中患者手部抓握训练的肌肉力学特性分析[J]. 医用生物力学, 2021, 36(5): 698-704.
ZHANG MW, HU ZG, WANG XZ, *et al.* Analysis on muscle mechanical properties of stroke patients' hand grasping training based on AnyBody [J]. *J Med Biomech*, 2021, 36(5): 698-704.
- [3] CETIN SY, BASAKCI CALIK B, AYAN A, *et al.* Validity and reliability of the unsupported upper-limb exercise test in individuals with rheumatoid arthritis [J]. *Int J Rheum Dis*, 2019, 22(11): 2025-2030.
- [4] FREY S, MOTAWAR B, BUCHANAN K, *et al.* Greater and more natural use of the upper limbs during everyday life by former amputees versus prosthesis users [J]. *Neurorehab Neural Re*, 2022, 36(3): 227-238.
- [5] PAGLIARI C, DI TELLA S, JONSDOTTIR J, *et al.* Effects of home-based virtual reality telerehabilitation system in people with multiple sclerosis: A randomized controlled trial [J]. *J Telemed Telecare*, 2021, doi: 10.1177/1357633X211054839.
- [6] TOBLER-AMMANN BC, DE BRUIN E D, FLUET M C, *et al.* Concurrent validity and test-retest reliability of the virtual peg insertion test to quantify upper limb function in patients with chronic stroke [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2016, 13: 8.
- [7] LEE SH, CUI J, LIU L, *et al.* An evidence-based intelligent method for upper-limb motor assessment via a VR training system on stroke rehabilitation [J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 65871-65881.
- [8] KANZLER CM, RINDERKNECHT MD, SCHWARZ A, *et al.* A data-driven framework for selecting and validating digital health metrics: Use-case in neurological sensorimotor impairments [J]. *NPJ Digit Med*, 2020, 3: 80.
- [9] LIU X, ZHU Y, HUO H, *et al.* Design of virtual guiding tasks with haptic feedback for assessing the wrist motor

- function of patients with upper motor neuron lesions [J]. *IEEE T Neur Sys Reh*, 2019, 27(5): 984-994.
- [10] BAI J, SONG A, LI H. Design and analysis of cloud upper limb rehabilitation system based on motion tracking for post-stroke patients [J]. *Appl Sci*, 2019, 9(8): 1620.
- [11] 谢叻, 张艳, 张天宇, 等. 虚拟手术中的力学变形和力觉感知[J]. *医用生物力学*, 2006, 21(3): 241-245.
- XIE L, ZHANG Y, ZHANG TY, *et al.* Tissue deformation and haptic feedback in virtual operation [J]. *J Med Biomech*, 2006, 21(3): 241-245.
- [12] JUŘÍK V, LINKOV V, DĚCKÝ P, *et al.* HMD-based VR tool for traffic psychological examination: Conceptualization and design proposition [J]. *Appl Sci*, 2021, 11(19): 8832.
- [13] 刘笑宇, 唐敏, 董英, 等. 虚拟康复的新进展: 基于力触觉反馈的上肢运动功能评估 [J]. *中国科学基金*, 2022, 36(2): 214-224.
- [14] ARLATI S, KEIJSEERS N, PAOLINI G, *et al.* Kinematics of aimed movements in ecological immersive virtual reality: A comparative study with real world [J]. *Virtual Real*, 2021, 26(3): 1-17.
- [15] MATHIOWETZ V, VOLLAND G, KASHMAN N, *et al.* Adult norms for the box and block test of manual dexterity [J]. *Am J Occup Ther*, 1985, 39(6): 386-391.
- [16] CHO S, KIM WS, PAIK NJ, *et al.* Upper-limb function assessment using VBBTs for stroke patients [J]. *IEEE Comput Graph*, 2016, 36(1): 70-78.
- [17] OÑA ED, JARDÓN A, CUESTA-GÓMEZ A, *et al.* Validity of a fully-immersive VR-based version of the box and blocks test for upper limb function assessment in Parkinson's disease [J]. *Sensors*, 2020, 20(10): 2773.
- [18] ALVAREZ-RODRÍGUEZ M, LÓPEZ-DOLADO E, SALAS-MONEDERO M, *et al.* Concurrent validity of a virtual version of box and block test for patients with neurological disorders [J]. *World J Neurosci*, 2020, 10(1): 79-89.
- [19] EVERARD G, OTMANE-TOLBA Y, ROSSELLI Z, *et al.* Concurrent validity of an immersive virtual reality version of the box and block test to assess manual dexterity among patients with stroke [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2022, 19(1): 7.
- [20] FURMANEK MP, SCHETTINO LF, YAROSSI M, *et al.* Coordination of reach-to-grasp in physical and haptic-free virtual environments [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2019, 16(1): 78.
- [21] DONG Y, LIU X, TANG M, *et al.* A haptic-feedback virtual reality system to improve the Box and Block Test (BBT) for upper extremity motor function assessment [J/OL]. *Virtual Real*, 2022, <https://doi.org/10.1007/s10055-022-00727-2>.
- [22] 中华医学会神经病学分会, 中华医学会神经病学分会脑血管病学组. 中国各类主要脑血管病诊断要点 2019 [J]. *中华神经科杂志*, 2019, 52(9): 710-715.
- [23] FUGL-MEYER AR, JAASKO L, LEYMAN I, *et al.* The post-stroke hemiplegic patient. 1. A method for evaluation of physical performance [J]. *Scand J Rehabil Med*, 1975, 7(1): 13-31.
- [24] YOZBATIRAN N, DER-YEGHIAIAN L, CRAMER SC. A standardized approach to performing the action research arm test [J]. *Neurorehabil Neural Repair*, 2008, 22(1): 78-90.
- [25] FOLSTEIN MF, FOLSTEIN SE, MCHUGH PR. "Minimal state": A practical method for grading the cognitive state of patients for the clinician [J]. *J Psychiatr Res*, 1975, 12(3): 189-198.
- [26] BALASUBRAMANIAN S, MELENDEZ-CALDERON A, ROBY-BRAMI A, *et al.* On the analysis of movement smoothness [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2015, 12: 112.
- [27] GARCIA-HERNANDEZ N, HUERTA-CERVANTES K, MUÑOZ-PEPI I, *et al.* Personalized touch-based exergame system for unilateral and bilateral rehabilitation training [J]. *Games Health J*, 2022, 11(3): 157-167.
- [28] World Health Organization. International classification of functioning, disability and health (ICF) [EB/OL]. <https://www.who.int/standards/classifications/international-classification-of-functioning-disability-and-health>.
- [29] HUSSAIN N, SUNNERHAGEN KS, MURPHY MA. End-point kinematics using virtual reality explaining upper limb impairment and activity capacity in stroke [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2019, 16(1): 82.