

上肢机器人在脑卒中上肢本体感觉评估中应用的研究进展

陈泽健 王纯 夏楠 古再丽努尔 黄晓琳

华中科技大学同济医学院附属同济医院康复医学科, 武汉 430030

通信作者: 黄晓琳, Email: xiaolinh2006@126.com

【摘要】 本体感觉障碍在脑卒中患者中十分常见但易被忽视, 本体感觉障碍可加重患者的上肢运动障碍, 并影响运动功能预后。本文从脑卒中上肢本体感觉障碍、临床采用的简易和成套评估工具以及机器人评估等方面, 对上肢机器人在脑卒中上肢本体感觉评估中应用的研究进展进行综述, 旨在为上肢机器人在脑卒中上肢本体感觉的评估提供参考依据。

【关键词】 脑卒中; 上肢; 机器人; 本体感觉; 评估

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (91648203)

Funding: National Natural Science Foundation of China (91648203)

DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1424.2020.03.020

脑卒中是一组突然起病、以局灶性神经功能缺失为共同特征的急性脑血管疾病, 包括脑梗死、脑出血及蛛网膜下腔出血^[1]。脑卒中是世界三大死亡原因之一和首要致残原因, 脑卒中后 6 个月, 仍有 30%~66% 的患者存在上肢运动功能障碍, 影响其日常生活活动能力和生活质量^[2-3]。本体感觉是躯体功能的重要组成部分, 据统计约有 50%~65% 脑卒中患者存在上肢本体感觉障碍^[4-5], 本体感觉障碍可加重患者的上肢运动功能障碍^[6], 并影响上肢运动功能恢复和上肢功能预后^[4,7]。偏瘫上肢本体感觉评估和本体感觉训练有助于患者上肢运动功能和日常生活活动能力 (activities of daily living, ADL) 的改善^[8-9]。

临床常用的评估工具虽使用简便, 但灵敏度和特异度不高, 对本体感觉康复训练指导意义有限。上肢机器人是脑卒中康复治疗中的一种新兴技术, 可为患者提供精细化评估和大量、重复、反馈、可量化的任务导向性训练^[2,10-12]。近年来, 随着科学技术的发展, 许多研究证实, 上肢机器人可将评估和训练一体化、精细化, 即上肢机器人在脑卒中上肢本体感觉的评估和康复训练中具有明显优势^[4,13-15]。本文旨在对上肢机器人在脑卒中上肢本体感觉评估的研究进展进行综述, 以期对脑卒中上肢本体感觉的评估提供参考依据。

脑卒中上肢本体感觉障碍

本体感觉是骨骼肌、肌腱、关节等运动器官以及皮肤本身在运动或静止时产生的感觉, 包括位置觉 (Position sense) 和运动觉 (Motion sense, 包括振动觉 (Vibration sense))^[4,16]。外周本体感觉经神经传导至中央后回、中央旁小叶、中央前回以及小脑等部位, 对运动的速度、方向、位置以及幅度等参数进行精细调控, 参与姿势控制与平衡保持、协调性动作、运动学习以及错误动作纠正等运动过程^[16]。

本体感觉传导通路中任何部位损伤, 都可能导致本体感觉障碍。由于脑卒中损伤部位不同, 不同患者的表现异质性较大。Kenzie 等^[5]通过影像学与症状学相关性研究发现, 速度感知障碍与中央后回、缘上回损伤有关, 运动幅度感知障碍与右侧中央前回、岛叶前部、颞上回损伤有关, 运动方向感知障碍与

双侧中央后回、双侧缘上回、右侧颞上回有关。持续性的位置觉和运动觉障碍还可能存在缘上回、颞横回以及弓状束损伤相关^[17]。此外, 丘脑腹后外侧核、内囊后肢、后顶叶、顶上小叶等与感觉处理脑区密切相关区域的受损, 可引起传导通路损伤, 也可引起本体感觉障碍^[18-19]。

缺乏正常、前馈的本体感觉输入, 患者可能出现肌张力控制、姿势调节以及随意运动功能异常^[8], 尤其在脱离视觉时^[20], 对上肢运动的感知下降, 上肢多关节协调能力随之下降^[21]。另外, 本体感觉障碍也会影响运动学习过程, 影响上肢康复训练的效果^[22]。评估脑卒中患者功能受损情况有助于康复方案制定, 然而目前上肢康复治疗主要在于运动功能, 对本体感觉障碍的关注程度仍不足, 上肢本体感觉评估与训练应当引起临床医师和治疗师的重视^[23-24]。

脑卒中上肢本体感觉常用评估

根据目前研究进展, 脑卒中上肢本体感觉常用评估主要包括临床简易评估、成套量表评估和神经电生理评估等。

一、临床简易评估

临床上通常采用简易评估, 采用徒手健侧和患侧上肢动作匹配测试, 或方向辨别测试。临床简易评估较为简便, 有助于对患者本体感觉进行快速筛查, 但现有临床简易评估缺乏一致性和敏感度, 有必要采用量化、客观的评估方式^[25]。

临床简易评估方式主要有拇指定位测试 (thumb location test, TLT)^[26-27]、上肢位置觉测试 (position sense test)^[26]、重量区分试验 (weight discrimination)^[28]、测力计测试 (dynamometer)^[29-30]等。

拇指定位测试时让患者闭上双眼, 用健手找到患手拇指并握住, 根据表现分为 4 个等级: 正常为患者可以准确找到健侧手拇指并握住; 轻度受损为患者开始找不到健侧拇指但能马上纠正; 中度受损为只能顺着前臂找到拇指; 重度受损为找不到健侧拇指^[31]。该动作测试 3 次, 按照最差的 1 次评价。上肢位置觉测试、重量区分试验、测力计测试、运动觉^[4,8]等测试也是基于闭眼状态, 以健侧上肢作为标准, 以目测或者采用问卷、测

力计、量角器^[28,30]甚至智能手机^[32]等工具,对患者双上肢测试后的匹配程度进行评价^[25]。

二、成套量表评估

成套量表评估主要包括 Fugl-Meyer 量表 (Fugl-Meyer assessment, FMA) 中的感觉功能评估^[33]、Nottingham 感觉评估量表 (Nottingham sensory assessment, NSA) 及其改良版本^[24,34-35]、Rivermead 躯体感觉评估量表^[14]以及功能活动测试 (Functional Test, FT)^[28]等。成套量表大多采用运动结果作为反馈指标,容易忽略对运动过程中参数反馈的检测,如一些评估量表存在主观成分,在评估时若患者含糊其辞或直接说无法识别运动方向,则显然患者无法得分;而且,有的量表只需要区分两个方向,即使患者随便回答也有存在回答正确的情况,此时需要测试者认真区分患者真实情况,导致评估不够客观。另外,评价结果为等级资料,难以体现患者细微的变化,一定程度上会造成评价信息量损失,且存在地板效应和天花板效应^[27]。

FMA 量表感觉评估包括轻触觉和本体感觉,其中上肢部分按照评估顺序包括肩关节、肘关节、腕关节、拇指四个部分,从健侧开始演示动作,然后转换同关节患侧,让患者闭上眼区分“上”、“下”的被动关节位置觉,每个关节本体感觉正常得 2 分,受损得 1 分,缺失得 0 分^[33]。

NSA 量表是根据临床实践发展而来的实用性感觉评估量表,包括触觉、本体感觉、实体觉和两点辨别觉 4 部分。本体感觉部分根据动作执行情况、方向、关节位置进行分类,得分为 0~3 分^[28,37-38],0 分代表察觉不到肢体的被动运动,1 分代表能察觉动作但无法区分方向,2 分代表能识别运动方向但具体位置误差超过 10°,3 分代表双侧误差在 10°以内。评估结果具有良好的评分者内信度,但评分者间信度较差,只能作为筛查量表^[35]。

Rivermead 躯体感觉评估量表评估主要包括区分动作有无及动作方向两个方面,采用 0 和 1 的形式进行评价。

Lima 等采用功能活动测试,让患者进行 7 项连续性任务 (拉上拉链、解开纽扣、解开并系上尼龙带、使用叉子、削铅笔、把水倒进玻璃杯、用健手帮助患侧手戴上手套),患者先睁眼完成 FT,再闭眼进行评估计分,每个任务能在 15s 内完成则计 1 分,总分 7 分^[35]。

三、神经电生理评估

神经电生理评估主要有体感诱发电位 (somatosensory evoked potential, SSEP)^[6,38]和运动诱发电位 (motor evoked potential, MEP)^[8],评估本体感觉传导通路以及感觉运动整合中枢的完整情况,有助于对通路受损情况进行了解,为康复计划制定提供依据。由于还需对功能和参与情况进行评价,故神经电生理评估也有其局限性。

Semrau 等^[41]提出,上述评估的评估者内、评估者间信度、效度、敏感度高低不一,尚不能成为上肢本体感觉评估的标准方式。此外,Winward 等^[42]认为,本体感觉恢复具有特异性,因此在评估时应尽可能采用更加全面、细致的评估工具,对患者进行全面的了解,评估康复治疗对上肢本体感觉的效果,制定针对性更强、以康复目标为导向的训练计划,促进患者上肢功能的恢复^[24]。

Squeri 等^[13]认为,应当将上肢本体感觉评估和训练一体化,本体感觉训练过程,健侧上肢的位置可以做为患侧上肢运动的目标,通过传入与传出信号之间的匹配、强化来促进脑卒

中患者上肢功能的恢复。上肢机器人可在提供大量、反馈训练的同时,给患者提供量化、过程式的上肢本体感觉评估,并根据评估结果调整训练方案,更有助于对患者上肢本体感觉作出更加针对性、敏感、精确、客观的评估^[4,43-44]。

上肢机器人本体感觉评估

一、位置觉评估

上肢机器人位置觉评估采用动作匹配任务 (robotic matching task),通过测试动作与目标动作的匹配程度评价患者的本体感觉^[25]。一种是双上肢动作匹配任务,即机器人将患者患侧上肢摆到某一位置,让健侧上肢做出镜像匹配的任务;另一种是患侧上肢动作匹配任务,即将患侧上肢摆好位置后让患者记住该位置,机器人将患侧上肢摆回起始位,再让患者执行该目标动作^[7,45]。

双上肢匹配任务需要双上肢机器人,对设备的要求较高。Dukelow 等^[33]采用 KINARM 机器人将患者患侧上肢多关节摆到不同位置,在消除视觉干扰下,让患者健侧上肢运动到镜像位置,通过两侧运动匹配程度进行评价。该研究结果显示,患者与正常受试者之间的测试结果具有显著差异,受试者内、测试者间一致性良好,机器人评估与拇指定位测试阳性的患者数接近。Cusmano 等^[25]进一步研究发现,多关节之间本体感觉存在相互影响,配合使用磁力仪、传感器等运动分析工具更能记录患者上肢多关节动作。

然而,Simo 等^[44]认为,双上肢动作匹配任务中,中枢神经系统信息整合能力下降,或者对侧上肢的本体感觉障碍都可以导致最终测试结果出现阳性,有必要设计只包括患侧上肢的本体感觉测试。Gurari 等^[46]证实了这一观点,由于丘脑、内囊、基底节区损伤或者两侧大脑半球信息交流能力下降,导致“健侧”上肢存在位置觉障碍,既往采用双侧上肢动作匹配任务,检查结果有可能为假阳性。另外,若测试动作幅度过大,可能会给患者产生提示,如肘关节测试过程可能引起肩关节抖动,肩关节测试过程可能引起头部、躯干以及衣物抖动,因此测试幅度应尽可能小。

患侧上肢动作匹配任务可以避免健侧上肢对结果的干扰,但根据具体研究任务,应当制定相应的病人纳入排除标准。Deblock 等^[14]采用 KINARM 单平面外骨骼机器人与 VR 技术对患侧上肢进行动作匹配任务,先将患侧上肢多关节摆到不同位置,患者将患侧上肢运动到在机器人上看到虚拟位置。该研究结果显示,患侧上肢动作匹配任务具有良好的测试间一致性,测量误差为 1.5°,而临床上采用的腕关节位置觉测试误差为 5.9°~6.1°,表明其精度明显优于临床简易评估^[14]。该测试对患者记忆要求并不高,但对其他认知功能和上肢运动功能具有一定要求,故在使用该测试方式时应当排除视觉障碍、极度疲劳、患侧忽略以及注意障碍的患者^[14]。Contu 等^[15]采用的 H-man 执行机器人采取全程被动的测试方式,要求患者在除去视觉下记住目标位置,当上肢运动到目标位置时告诉研究者,上肢运动模式异常甚至运动能力较差的患者均能完成测试,该研究结果支持机器人评估的有效性。

二、运动觉评估

运动觉评估包括动作匹配任务和本体感觉阈值测试。运动觉匹配任务与位置觉评估类似,Semrau 等^[47]使用 KINARM

双上肢外骨骼机器人,记录评估过程双侧上肢动作时间与空间参数,结果显示,61%的脑卒中患者存在上肢运动觉障碍,评估结果具有良好的测试者内、测试者间一致性^[41]。此外,评估结果与拇指定位测试、功能独立性量表(functional independence measure, FIM)和 Chedoke-McMaster 脑卒中评定量表(Chedoke-McMaster stroke assessment, CMSA)相关,表明运动觉障碍还可能运动功能障碍的重要原因。

除了上肢动作匹配任务,上肢机器人本体感觉评估还可采用本体感觉阈值测试。Elangovan 等^[48]采用重复测量研究发现,本体感觉阈值测试和上肢动作匹配任务考察的是本体感觉的不同维度。阈值测试从传入的感觉反馈角度出发,而动作匹配任务对受试者感觉运动处理能力有一定要求,工作记忆障碍、双侧大脑信息传递能力下降以及对侧上肢本体感觉障碍均可能对测试结果造成影响,应当根据测试目的选用适合的测试对患者功能进行评价。

本体感觉阈值测试通过机器人给患侧上肢提供随机两个方向的关节活动,让患者区分不同活动得到其阈值。Cappello 等^[49]设定活动正确率为 75%时的活动强度为识别阈值,在三维腕-手机器人中让受试者做腕屈伸、桡侧尺侧偏、旋前旋后三个维度的本体感觉阈值测试,建立自适应贝叶斯算法,当患者能正确区分患侧手运动方向时,运动范围减小;反之,运动范围增大。随着测试次数增多,受试者的辨别能力逐渐稳定,测试 50 次时可以得到受试者的本体感觉阈值^[50]。该研究结果显示,正常人上述三个维度的本体感觉阈值为 $1.13^{\circ} \sim 2.15^{\circ}$,而 NSA 量表的区分标准达 10° 。通过大量样本的测试,可以得出正常值参考范围,该测试具有更高的精度、信度和效度。Mrotek 等^[51]测试了肩肘的本体感觉阈值,前后得到的阈值一致性较好,而且与 FMA 量表结果高度负相关($\rho = -0.982, P < 0.001$)^[52],正常受试者与没有上肢本体感觉障碍的患者,在本体感觉阈值存在统计学差异,表明上肢动作察觉测试可以作为一种更为客观、量化、敏感的评估方式^[51]。

三、本体感觉评估

除了对位置觉和运动觉进行单独研究,还有研究者对患者整体本体感觉能力进行了评估。Kenzie 等^[7]和 Sonja 等^[17]在研究中同时采用了前臂位置觉与运动觉匹配任务,将所得参数进行综合处理,并且与拇指定位测试、CT、MRI 等做了相关性分析,得出本体感觉正常与异常的临界值,证明了整体评估的有效性。

四、上肢机器人评估参数

根据目前研究进展,机器人评估上肢本体感觉参数主要因评估的本体感觉项目和评估方式而异,动作匹配任务采用这些参数以描述实际动作与目标动作之间在空间和时间上的匹配程度,而在阈值测试这些参数用于描述受试者对于上肢运动的察觉能力。故而评估参数可分为:空间匹配程度参数、时间匹配程度参数、阈值参数和复合参数四类。

第一类为空间匹配程度参数,可分为相对参数、绝对参数、辅助程度参数等。

1. 相对参数包括:变异性(variability, Var)——上肢实际动作终末位置之间距离的标准差,变异性主要来源于测试上肢本体感觉障碍,也可能来自中枢本体感觉整合障碍^[33];空间缩放比/运动距离比——测试上肢实际动作空间距离(或范围)与目标动作空间距离(或范围)之比^[22,33];系统性偏移——上肢实际

动作与目标动作终末位置距离的标准差^[14,33];分布——阈值测试中,以受试者刺激强度为横坐标,判断出运动方向为纵坐标,描绘出两者相关曲线后,每点分布与曲线的吻合程度。^[53]

2. 绝对参数包括:平均误差(mean error, ME)——上肢实际动作与目标动作终末位置距离的平均值^[25,46];常数误差(constant error, CE)——上肢实际动作与目标动作终末位置的距离,CE 为正值代表实际动作过度,反之为不足^[46];绝对误差(absolute error, AE)——上肢实际动作与目标动作终末位置距离的绝对值^[20];标记误差(signed error, SE)——上肢实际动作与目标动作终末位置距起始点距离之差^[15],反映受试者对运动距离的感知能力;增益误差(error gain, EG)——实际位置(自变量)与估计位置(因变量)之间的回归线的斜率^[20],用于表示实际位置与目标位置的吻合程度;起始角度误差(initial direction error, IDE)——上肢实际动作与目标动作起始运动角度的比值^[41]。

3. 辅助程度参数包括:平均视觉辅助(average Visual Assistance, VA)——上肢动作完成过程中,需要视觉信息辅助的距离占全过程距离的百分比^[20],辅助程度越低,表明患者对于上肢位置和运动的感知能力越高;视觉辅助激活数(number of visual assistance activation, NVA)——测试者在测试过程中要求视觉辅助的次数^[20];主动运动指数(active movement index, AMI)——测试过程测试不依靠上肢机器人辅助,主动完成测试动作占全过程距离的百分比^[20]。

第二类为时间匹配程度参数包括反应延迟时间(response latency, RL)和峰速比(Peak Speed Ratio, PSR),其中 RL 是指双上肢运动觉匹配任务中,健侧上肢启动运动与患侧上肢被动运动的时间差^[41],该参数不仅反映了上肢运动觉,还反映了中枢感觉运动整合能力;PSR 是指上肢实际动作与目标动作起始运动过程最大速度的比值^[41],可以体现测试者对速度的感知能力。

第三类为本体感觉阈值(proprioceptive threshold/detection threshold, PT/DT),测试者在测试过程有一定比例的情况能识别出上肢运动的刺激强度^[49,53]。

第四类也是最后一类为复合参数。为了更加合理地使用数据,Kenzie^[7]等、Sonja^[17]等将上肢本体感觉评估的参数转换为复合型参数。通过与临床评估的相关性分析,最终采用考虑不同参数之间存在关联性的 M 分(马氏距离),作为评价卒中患者上肢本体感觉的复合参数。然而, M 分和拇指定位测试之间的相关程度为仅为 $0.32 \sim 0.33 (P < 0.001)$,这可能与目前评估采集的信息量不足、患者疲劳有关,另外 M 分评估范围并未包括上肢远端,所以针对的可能是不同位置的本体感觉功能。

小结

上肢本体感觉障碍在脑卒中患者中十分常见,本体感觉障碍会加重患者上肢运动功能障碍,影响上肢运动功能恢复及其预后。根据研究进展,目前临床上采用的本体感觉评估方式较为主观,难以量化,信度效度较低^[16]。神经电生理、影像学检查结果虽有助于了解患者神经传导通路损伤情况,但对康复治疗的指导意义不大。研究结果显示,上肢机器人可以提供大量、重复、有反馈的康复训练,在康复治疗中的应用越来越广泛,近年来随着技术的改进,其在本体感觉中的评估作用也显现出来^[7]。

根据本体感觉的定义和分类,研究者设计了位置觉匹配任务、运动觉匹配任务以及本体感觉阈值测试,对患者上肢本体

感觉进行了更为客观、量化、精细的评估。评估是康复治疗的基础,根据规范化的上肢机器人评估结果,可以设定上肢运动目标,增加运动过程的反馈信息,利用机器人本身的优势,使评估和治疗一体化。

然而,目前上肢机器人在脑卒中患者上肢本体感觉评估中仍存在一些不足。第一,现有可评估的设备中大部分为单一平面评估,而脑卒中患者上肢功能训练是任务导向性训练,即在三维空间中进行伸手、抓握以及操作不同物件等活动,所以上肢评估活动应尽可能与患者实际活动相贴近,上肢机器人在设计上也应当是多维度的设计^[54-55]。第二,由于机器条件限制、价格高昂,目前大部分研究仅针对上肢近端本体感觉,然而远端的本体感觉与上肢精细功能联系密切,所以应当在机器人以及评估任务中将上肢远端纳入考虑范围,设计多关节、多角度的设备。第三,评价患者上肢本体感觉的参数较为单一,针对的是本体感觉不同维度,因此未来研究除了研究某一参数外,还应采用多种参数,数据图示化、立体化等参数处理方式,提高所得参数信度、效度。第四,现有研究样本量较小,且研究纳入排除标准不一^[56],因此未来研究可通过正常人与脑卒中患者评估,建立上肢本体感觉参考范围。最后,康复机器人是涉及医学、生物力学、机器人工程学、软件学等多学科的产物,上肢本体感觉评估需要这些学科紧密结合,以患者康复为导向,上肢机器人在脑卒中上肢本体感觉评估中的应用仍需持续、深入研究。

参 考 文 献

- [1] Langhorne P, Bernhardt J, Kwakkel G. Stroke rehabilitation[J]. *Lancet*, 2011, 377 (9778) : 1693-1702. DOI: 10.1016/S0140-6736 (11) 60325-5.
- [2] Veerbeek JM, Langbroek-Amersfoort AC, van Wegen EE, et al. Effects of Robot-Assisted Therapy for the Upper Limb After Stroke[J]. *Neuro-rehabil Neural Repair*, 2017, 31 (2) : 107-121. DOI: 10.1177/1545968316666957.
- [3] Tsu AP, Abrams GM, Byl NN. Poststroke upper limb recovery[J]. *Semin Neurol*, 2014, 34 (5) : 485-495. DOI: 10.1055/s-0034-1396002.
- [4] Findlater SE, Dukelow SP. Upper extremity proprioception after stroke: bridging the gap between neuroscience and rehabilitation[J]. *J Mot Behav*, 2017, 49 (1) : 27-34. DOI: 10.1080/00222895.2016.1219303.
- [5] Kenzie JM, Semrau JA, Findlater SE, et al. Localization of impaired kinesthetic processing post-stroke[J]. *Front Hum Neurosci*, 2016, 10: 505. DOI: 10.1080/00222895.2016.1219303.
- [6] Meyer S, Karttunen AH, Thijs V, et al. How do somatosensory deficits in the arm and hand relate to upper limb impairment, activity, and participation problems after stroke? A systematic review [J]. *Phys Ther*, 2014, 94 (9) : 1220-1231. DOI: 10.2522/ptj.20130271.
- [7] Kenzie JM, Semrau JA, Hill MD, et al. A composite robotic-based measure of upper limb proprioception[J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2017, 14 (1) : 114. DOI: 10.1186/s12984-017-0329-8.
- [8] Mansfield A, Meijer K, Aman JE, et al. The effectiveness of proprioceptive training for improving motor function: a systematic review[J]. *Geriatr Gerontol Int*, 2014, 8: 1075. DOI: 10.3389/fnhum.2014.01075.
- [9] Kiper P, Baba A, Agostini M, et al. Proprioceptive Based Training for stroke recovery. Proposal of new treatment modality for rehabilitation of upper limb in neurological diseases[J]. *Arch Physiother*, 2015, 5: 6. DOI: 10.1186/s40945-015-0007-8.
- [10] Bertani R, Melegari C, De Cola MC, et al. Effects of robot-assisted upper limb rehabilitation in stroke patients: a systematic review with meta-analysis[J]. *Neurol Sci*, 2017, 38 (9) : 1561-1569. DOI: 10.1007/s10072-017-2995-5.
- [11] Poli P, Morone G, Rosati G, et al. Robotic technologies and rehabilitation: new tools for stroke patients' therapy [J]. *Biomed Res Int*, 2013, 2013: 153872. DOI: 10.1155/2013/153872.
- [12] Mazzoleni S, Duret C. Combining Upper limb robotic rehabilitation with other therapeutic approaches after stroke: current status, rationale, and challenges [J]. *Biomed Res Int*, 2017, 2017: 8905637. DOI: 10.1155/2017/8905637.
- [13] Squeri V, Zenzeri J, Morasso P, et al. Integrating proprioceptive assessment with proprioceptive training of stroke patients [J]. *IEEE Int Conf Rehabil Robot*, 2011, 2011: 5975500. DOI: 10.1109/ICORR.2011.5975500.
- [14] Deblock-Bellamy A, Batcho CS, Mercier C, et al. Quantification of upper limb position sense using an exoskeleton and a virtual reality display [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2018, 15 (1) : 24. DOI: 10.1186/s12984-018-0367-x.
- [15] Contu S, Hussain A, Kager S, et al. Proprioceptive assessment in clinical settings: Evaluation of joint position sense in upper limb post-stroke using a robotic manipulator [J]. *PloS one*, 2017, 12 (11) : e0183257. DOI: 10.1371/journal.pone.0183257.
- [16] Hughes CM, Tommasino P, Budhota A, et al. Upper extremity proprioception in healthy aging and stroke populations, and the effects of therapist- and robot-based rehabilitation therapies on proprioceptive function[J]. *Front Hum Neurosci*, 2015, 9: 120. DOI: 10.3389/fnhum.2015.00120.
- [17] Findlater SE, Hawe RL, Semrau JA, et al. Lesion locations associated with persistent proprioceptive impairment in the upper limbs after stroke[J]. *Neuroimage Clin*, 2018, 20: 955-971. DOI: 10.1016/j.nicl.2018.10.003.
- [18] Lee MY, Kim SH, Choi BY, et al. Functional MRI finding by proprioceptive input in patients with thalamic hemorrhage[J]. *NeuroRehabilitation*, 2012, 30 (2) : 131-136. DOI: 10.3233/NRE-2012-0736.
- [19] Proske U, Gandevia SC. The proprioceptive senses: their roles in signaling body shape, body position and movement, and muscle force [J]. *Physiol Rev*, 2012, 92 (4) : 1651-1697. DOI: 10.1152/physrev.00048.2011.
- [20] Colombo R, Mazzone A, Delconte C, et al. Development of a system architecture for evaluation and training of proprioceptive deficits of the upper limb [J]. *Comput Intell Neurosci*, 2018, 2018: 4132820. DOI: 10.1155/2018/4132820.
- [21] Mrotek LA. The arm movement selection (AMD) test: a fast robotic test of proprioceptive acuity in the arm [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2017, 14 (1) : 64. DOI: 10.1186/s12984-017-0269-3.
- [22] Iandolo R, Squeri V, De Santis D, et al. Testing proprioception in intrinsic and extrinsic coordinate systems: is there a difference? [J]. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*, 2014, 2014: 6961-6964. DOI: 10.1109/EMBC.2014.6945229.
- [23] Carey LM, Matyas TA. Frequency of discriminative sensory loss in the hand after stroke in a rehabilitation setting [J]. *J Rehabil Med*, 2011, 43 (3) : 257-263. DOI: 10.2340/16501977-0662.
- [24] Wu CY, Chuang IC, Ma HI, et al. Validity and responsiveness of the revised Nottingham sensation assessment for outcome evaluation in

- stroke rehabilitation [J]. *Am J Occup Ther*, 2016, 70 (2) : 7002290040p1-8. DOI: 10.5014/ajot.2016.018390.
- [25] Cusmano I, Sterpi I, Mazzone A, et al. Evaluation of upper limb sense of position in healthy individuals and patients after stroke [J]. *J Healthc Eng*, 2014, 5 (2) : 145-162. DOI: 10.1260/2040-2295.5.2.145.
- [26] Dukelow SP, Herter TM, Moore KD, et al. Quantitative assessment of limb position sense following stroke [J]. *Neurorehabil Neural Repair*, 2010, 24 (2) : 178-187. DOI: 10.1177/1545968309345267.
- [27] Simo LS, Ghez C, Botzer L, et al. A quantitative and standardized robotic method for the evaluation of arm proprioception after stroke [J]. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*, 2011, 2011 : 8227-8230. DOI: 10.1109/IEMBS.2011.6092029.
- [28] Doyle S, Bennett S, Fasoli SE, et al. Interventions for sensory impairment in the upper limb after stroke [J]. *Cochrane Database Syst Rev*, 2010, 6 : Cd006331. DOI: 10.1002/14651858.Cd006331.pub2.
- [29] Connell LA, Lincoln NB, Radford KA. Somatosensory impairment after stroke: frequency of different deficits and their recovery [J]. *Clin Rehabil*, 2008, 22 (8) : 758-767. DOI: 10.1177/0269215508090674.
- [30] Rand D. Proprioception deficits in chronic stroke-Upper extremity function and daily living [J]. *PLoS one*, 2018, 13 (3) : e0195043. DOI: 10.1371/journal.pone.0195043.
- [31] Mourcou Q, Fleury A, Diot B, et al. Mobile phone-based joint angle measurement for functional assessment and rehabilitation of proprioception [J]. *Biomed Res Int*, 2015, 2015 : 328142. DOI: 10.1155/2015/328142.
- [32] Meyer S, Kessner SS, Cheng B, et al. Voxel-based lesion-symptom mapping of stroke lesions underlying somatosensory deficits [J]. *Neuroimage Clin*, 2016, 10 : 257-266. DOI: 10.1016/j.nicl.2015.12.005.
- [33] Sullivan KJ, Tilson JK, Cen SY, et al. Fugl-Meyer assessment of sensorimotor function after stroke: standardized training procedure for clinical practice and clinical trials [J]. *Stroke*, 2011, 42 (2) : 427-432. DOI: 10.1161/STROKEAHA.110.592766.
- [34] Lima NM, Menegatti KC, Yu E, et al. Motor and sensory effects of ipsilesional upper extremity hypothermia and contralesional sensory training for chronic stroke patients [J]. *Top Stroke Rehabil*, 2015, 22 (1) : 44-55. DOI: 10.1179/1074935714Z.00000000023.
- [35] Meyer S, De Bruyn N, Lafosse C, et al. Somatosensory impairments in the upper limb poststroke: distribution and association with motor function and visuospatial neglect [J]. *Neurorehabil Neural Repair*, 2016, 30 (8) : 731-742. DOI: 10.1177/1545968315624779.
- [36] Boccuni L, Meyer S, Kessner SS, et al. Is There dull or proportional somatosensory recovery in the upper limb after stroke? Investigating behavioral outcome and neural correlates [J]. *Neurorehabil Neural Repair*, 2018, 32 (8) : 691-700. DOI: 10.1177/1545968318787060.
- [37] Kuczynski AM, Semrau JA, Kirton A, et al. Kinesthetic deficits after perinatal stroke: robotic measurement in hemiparetic children [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2017, 14 (1) : 13. DOI: 10.1186/s12984-017-0221-6.
- [38] Meyer S, Kessner SS, Cheng B, et al. Voxel-based lesion-symptom mapping of stroke lesions underlying somatosensory deficits [J]. *Neuroimage Clin*, 2016, 10 : 257-266. DOI: 10.1016/j.nicl.2015.12.005.
- [39] Nam HS, Koh S. Recovery of proprioception in the upper extremity by robotic mirror therapy: a clinical pilot study for proof of concept [J]. *J Korean Med Sci*, 2017, 32 (10) : 1568-1575. DOI: 10.3346/jkms.2017.32.10.1568.
- [40] Jang SH. Contra-lesional somatosensory cortex activity and somatosensory recovery in two stroke patients [J]. *J Rehabil Med*, 2011, 43 (3) : 268-270. DOI: 10.2340/16501977-0654.
- [41] Semrau JA, Herter TM, Scott SH, et al. Inter-rater reliability of kinesthetic measurements with the KINARM robotic exoskeleton [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2017, 14 (1) : 42. DOI: 10.1186/s12984-017-0260-z.
- [42] Winward CE, Halligan PW, Wade DT. Somatosensory recovery: a longitudinal study of the first 6 months after unilateral stroke [J]. *Disabil Rehabil*, 2007, 29 (4) : 293-299. DOI: 10.1080/09638280600756489.
- [43] Rinderknecht MD, Lambercy O, Raible V, et al. Reliability, validity, and clinical feasibility of a rapid and objective assessment of post-stroke deficits in hand proprioception [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2018, 15 (1) : 47. DOI: 10.1186/s12984-018-0387-6.
- [44] Simo L, Botzer L, Ghez C, et al. A robotic test of proprioception within the hemiparetic arm post-stroke [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2014, 11 : 77. DOI: 10.1186/1743-0003-11-77.
- [45] Gurari N, Drogos JM, Lopez S, et al. Impact of motor task execution on an individual's ability to mirror forearm positions [J]. *Exp Brain Res*, 2018, 236 (3) : 765-777. DOI: 10.1007/s00221-018-5173-y.
- [46] Gurari N, Drogos JM, Dewald JPA. Individuals with chronic hemiparetic stroke can correctly match forearm positions within a single arm [J]. *Clin Neurophysiol*, 2017, 128 (1) : 18-30. DOI: 10.1016/j.clinph.2016.10.009.
- [47] Semrau JA, Herter TM, Scott SH, et al. Robotic identification of kinesthetic deficits after stroke [J]. *Stroke*, 2013, 44 (12) : 3414-3421. DOI: 10.1161/STROKEAHA.113.002058.
- [48] Elangovan N, Herrmann A, Konczak J. Assessing proprioceptive function: evaluating joint position matching methods against psychophysical thresholds [J]. *Phys Ther*, 2014, 94 (4) : 553-561. DOI: 10.2522/ptj.20130103.
- [49] Cappello L, Contu S, Konczak J, et al. Wrist proprioceptive acuity: a comprehensive robot-aided assessment [J]. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*, 2015, 2015 : 3594-3597. DOI: 10.1109/EMBC.2015.7319170.
- [50] Cappello L, Elangovan N, Contu S, et al. Robot-aided assessment of wrist proprioception [J]. *Front Hum Neurosci*, 2015, 9 : 198. DOI: 10.3389/fnhum.2015.00198.
- [51] Soechting JF, Mrotek LA, Flanders M. Time constants in the perception of a change in the direction of motion in humans [J]. *Neurosci Lett*, 2003, 348 (1) : 56-60. DOI: 10.1016/s0304-3940(03)00712-2.
- [52] Bengtson MC, Mrotek LA, Stoeckmann T, et al. The arm motion detection (AMD) test [J]. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*, 2014, 2014 : 5349-5352. DOI: 10.1109/EMBC.2014.6944834.
- [53] De Santis D, Zenzeri J, Casadio M, et al. Robot-assisted training of the kinesthetic sense: enhancing proprioception after stroke [J]. *Front Hum Neurosci*, 2014, 8 : 1037. DOI: 10.3389/fnhum.2014.01037.
- [54] Dukelow SP, Herter TM, Bagg SD, et al. The independence of deficits in position sense and visually guided reaching following stroke [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2012, 9 : 72. DOI: 10.1186/1743-0003-9-72.
- [55] Colombo R, Pisano F, Micera S, et al. Assessing mechanisms of recovery during robot-aided neurorehabilitation of the upper limb [J]. *Neurorehabil Neural Repair*, 2008, 22 (1) : 50-63. DOI: 10.1177/1545968307303401.
- [56] 孙亚, 金敏敏, 李岩, 等. 上肢机器人辅助训练对恢复期脑卒中患者肩关节本体感觉的影响 [J]. *中华物理医学与康复杂志*, 2017, 39 (11) : 806-810. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-1242.2017.11.002.

(修回日期:2020-01-03)

(本文编辑:阮仕衡)