

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9771.2019.02.017

· 临床研究 ·

实时视觉轨迹反馈对上肢运动学习的影响

李娜^{1,2,3}, 崔志琴¹, 施长城², 左国坤^{2,3}

1. 中北大学, 山西太原市 030051; 2. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 慈溪生物医学工程研究所, 浙江宁波市 315399; 3. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 先进制造技术研究所, 浙江宁波市 315201

通讯作者: 左国坤、施长城。E-mail: moonstone@nimte.ac.cn(左国坤); changchengshi@nimte.ac.cn(施长城)

基金项目: 1. 国家自然科学基金项目(No. 11504372); 2. 宁波市社会发展重大科技专项(No. 2016C11021; No. 20181ZDYF020153); 3. 浙江省重点研发计划项目(No. 2019C03090)

摘要

目的 探究健康志愿者使用康复机器人进行上肢画圆运动中实时视觉轨迹反馈对于志愿者运动学习能力的影响。

方法 2018 年 7 至 9 月, 右利手健康志愿者 24 例按运动能力基准水平测试分为两组, 一组包含视觉、成绩和实时轨迹三种反馈(V+KP+KR 组), 另一组仅包含视觉和成绩两种反馈(V+KR 组), 两组均进行各自不同条件下的顺时针画圆任务训练, 每节 20 次, 共 5 节, 3 d 后进行 1 节保持测试。通过设计的圆度偏移量(RS)和完成时间两个参数对两组运动过程进行评估。

结果 两因素重复测量方差分析显示, RS 值组间和组内均存在交互作用($F = 6.029, P < 0.001$); 分析组间单独效应, 除第 5 节训练外($F = 8.775, P = 0.658$), V+KP+KR 组 RS 值均显著高于 V+KR 组($F > 13.126, P < 0.001$); 分析组内单独效应, 两组组内都有非常高度显著性差异($F > 12.465, P < 0.001$)。对于完成时间, 组间和组内不存在交互作用($F = 1.606, P = 0.228$), 组间主效应不显著($F = 0.55, P = 0.477$), 组内主效应显著($F = 3.95, P = 0.031$)。

结论 实时轨迹反馈可以帮助志愿者在运动学习早期阶段快速掌握运动任务要领, 从而帮助其提升新任务的快速学习能力, 但在运动学习中后期对于运动学习能力的提升效果不显著。志愿者在运动学习中后期对于实时轨迹反馈的依赖性逐渐减少, 进而更加依靠运动本体感觉来完成任务。

关键词 上肢运动学习; 上肢运动康复训练; 视觉反馈; 结果反馈; 实时轨迹反馈

Effect of Real-time Visual Trajectory Feedback on Upper Limb Movement Learning

LI Na^{1,2,3}, CUI Zhi-qin¹, SHI Chang-cheng², ZUO Guo-kun^{2,3}

1. North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China; 2. Cixi Institute of Biomedical Engineering, Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo, Zhejiang 315399, China; 3. Institute of Advanced Manufacturing Technology, Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo, Zhejiang 315201, China

Correspondence to ZUO Guo-kun, SHI Chang-cheng. E-mail: moonstone@nimte.ac.cn (ZUO Guo-kun); changchengshi@nimte.ac.cn (SHI Chang-cheng)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 11504372), Major Scientific and Technological Projects for Social Development in Ningbo City (No. 2016C11021; No. 20181ZDYF020153) and Key Research and Development Program of Zhejiang (No. 2019C03090)

Abstract

Objective To explore the effect of real-time visual trajectory feedback on the motor learning ability of healthy volunteers during upper limb circle-drawing movements by using rehabilitation robots.

Methods From July to September, 2018, 24 right-handed healthy volunteers were divided into two groups according to

作者简介: 李娜(1994-), 女, 汉族, 山西晋中市人, 硕士研究生, 主要研究方向: 康复工程。通讯作者: 左国坤(1970-), 男, 汉族, 湖南湘潭市人, 研究员, 博士研究生导师。施长城(1981-), 男, 汉族, 重庆市人, 副研究员, 硕士研究生导师。

the baseline level of motor ability, one group received three kinds of feedbacks including visual, result and real-time trajectory feedbacks (V+KP+KR group), and the other group only received two kinds of feedbacks including visual and performance (V+KR group). Both groups were trained in clockwise circle drawing task under different conditions for five sessions, 20 times per session, and then underwent one session of maintenance test after three days. The motor learning processes of two groups were evaluated and analyzed by two parameters including roundness score and completion time.

Results By using two-factor repeated measures variance analysis, it was found that there were intergroup and intragroup interactions ($F = 6.029, P < 0.001$). The intergroup individual effects showed that except for the fifth training session ($F = 8.775, P = 0.658$), the values of roundness score in other sessions were higher in V+KP+KR group than in V+KR group ($F > 13.126, P < 0.001$). The intragroup individual effects showed that there were significant differences among sessions in both groups ($F > 12.465, P < 0.001$). For completion time, there was no intergroup and intragroup interactions ($F = 1.606, P = 0.228$), the intergroup main effect was not significant ($F = 0.55, P = 0.477$), and the intragroup main effect was significant ($F = 3.95, P = 0.031$).

Conclusion Real-time trajectory feedback can help volunteers quickly understand the essentials of motor tasks at the early stage of motor learning, thus helping them to improve the fast learning ability of new tasks, but the improvement effect on motor learning during middle and late stages is not obvious. The dependence of volunteers on real-time trajectory feedback gradually decreases in the middle and later stages of motor learning, and they might rely on proprioception to complete tasks.

Key words: upper limb motor learning; upper limb motor rehabilitation training; visual feedback; knowledge of results; real-time trajectory feedback

[中图分类号] R493 [文献标识码] A [文章编号] 1006-9771(2019)02-0217-07

[本文著录格式] 李娜,崔志琴,施长城,等. 实时视觉轨迹反馈对上肢运动学习的影响[J]. 中国康复理论与实践, 2019, 25(2): 217-223.

CITED AS: LI Na, CUI Zhi-qin, SHI Chang-cheng, et al. Effect of Real-time Visual Trajectory Feedback on Upper Limb Movement Learning [J]. Chin J Rehabil Theory Pract, 2019, 25(2): 217-223.

脑卒中是一种急性脑血管疾病, 全国每年新发病患者约200万, 且患病率逐年上升, 给社会和家庭带来极大的经济负担^[1-2]。随着医疗水平提高, 脑卒中死亡率逐渐降低, 但也导致致残率进一步上升。卒中后约有2/3患者遗留有一侧上肢功能障碍, 而上肢功能在患者生活自理方面起到至关重要的作用^[3]。上肢康复机器人技术^[4-5]可以通过视觉、听觉和触觉刺激反馈辅助患者进行大量重复、功能导向性的康复训练^[6], 减轻康复医师的体力压力, 逐渐得到广泛的关注。然而, 如何优化设计外界刺激的形式与辅助策略以帮助患者更快、更稳定地进行上肢运动学习与功能恢复仍需研究。多年从事康复机器人研究的 Krebs 等^[7]和 Marchal-Crespo 等^[8]也指出, 需要进一步研究和探索更优化的康复机器人辅助策略。

运动学习理论是被用作研究运动功能康复训练的重要工具^[9-11]。目前普遍接受的理论是增强反馈可以有效提高运动学习能力, 这里的增强反馈指的是视觉、听觉、触力觉等的外部反馈^[12]。在增强反馈中,

视觉反馈信息在传入信息中占主导地位^[13-19], 在运动中, 我们会结合视觉反馈和本体感觉信息进行决策^[20]。其中, 本体感觉的提升有利于运动学习和康复效果^[21]。视觉反馈研究领域现有两种主流的假说。

一种为任务的特定性假说(specificity of practice hypothesis)^[22]。该假说认为, 当一种传入信息占主导地位(如视觉)时, 会忽视其他传入信息(如本体感觉), 并且会严重依赖于主导的传入信息反馈, 这种依赖性会一直持续下去且随着训练的增加而逐渐增强, 不利于运动员的训练和患者的康复治疗。在这一假说的支持下很多学者做了一些试验来验证, 他们通过减少视觉信息^[12,16,23-25]、扭曲的错误视觉信息^[26]、增加负载^[22]等方式来削弱视觉的主导地位, 这种在训练中削弱视觉反馈组在转移测试(没有视觉反馈)中会较在训练中提供全部视觉反馈组有更好的准确性。而在 Blandin 等^[16]和 Tremblay 等^[22]的试验中, 对于训练次数增加组在转移测试中表现更好的解释不是很明确。

另一种假说指出运动学习的早期阶段可能会依赖

于传入信息来校准运动错误,而在运动学习的后期则会更多依赖于本体感觉^[27]。这一假说可能更符合运动控制理论中所提到的最低代价原则,运动控制理论指出运动是由前馈和反馈组成的闭合回路,前馈系统预测运动指令,反馈信息来纠正运动中的错误,而在运动控制中人们希望以最小的努力获得最大的回报^[28-29],可能随着运动学习的进行,学习到的能力更多地转移到前馈中,即更加依赖本体感觉^[30-31],而对反馈信息的依赖会减少。Hinder等^[15]的实验显示,随着试验的进行,运动时间缩短,这可能是因为随着训练次数的增加对外部反馈的需求变少。根据这一假说,我们应该在运动学习初期不考虑运动后期撤销外部反馈的辅助,尽可能使人学习到该运动能力,运动学习后期人们可能会为了减少代价自主分配所依赖的信息。

如何设计视觉反馈以使人能够快速有效地学习到某一运动是我们应该关注的问题。Sigrist等^[12,32]指出目前对于运动中错误的自我认知在运动学习中十分重要,但是有利的视觉提示方式尚不明确。Wei等^[33]指出反馈的设计应该使视觉和本体感觉都与运动产生关联。Hinder^[15]提出相较于结果反馈(knowledge of results, KR),可能对于表现的认知反馈(knowledge of performance, KP)更能有利于一个新的任务适应性。但是KP对于运动学习的影响机制尚不明确,有待进一步研究。本文以实时显示的视觉轨迹作为KP的一种形式来进行KP影响机制的研究,以期能设计更有利于患者运动康复训练的一种反馈形式。

为了探究实时KP在画圆任务运动学习中的作用,并探究随着训练组的变化对反馈信息的依赖的影响。相较于简单的点到点运动,画圆任务较为复杂。本试验均提供视觉提示(visual cues, V),本文设计V+KP+KR组和V+KR组进行对照试验。两组试验在画圆任务中都有V(代理点)反馈和KR(运动结束时的分数显

示)反馈。此外,V+KP+KR组在运动过程中显示实时运动过的轨迹,即增加KP。KP的增加会使传入人体的反馈信息增多。

1 系统设计

1.1 硬件系统

本文采用本团队自主研发的末端牵引式康复机器人系统作为硬件,用Unity4.6.0编写的程序生成Android应用程序。

图1a为本研究中人体上肢进行画圆任务的示意图。试验任务是志愿者主动发力操控摇杆完成,在任务中志愿者处于主动模式,即机器人系统通过摩擦力和重力补偿,志愿者在操作中基本没有阻力和阻尼感。志愿者坐在设备的左后方并使用右手操纵摇杆,主要通过肩、肘关节的协同运动来完成任务。

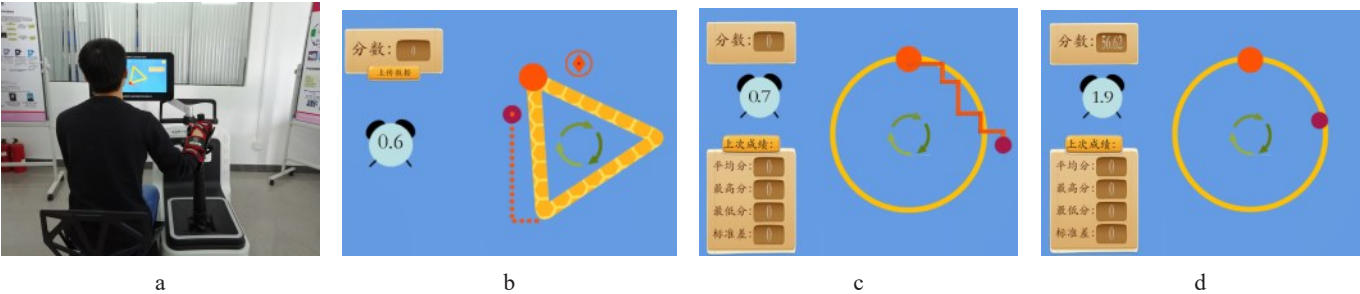
1.2 软件系统

本文画圆游戏使用Unity4.6.0编写。图1b为基准水平(Baseline)测试任务,图1c和图1d为本次画圆任务。Baseline任务和画圆任务都为5 s画圆任务,圆的大小和位置一致,所采取的评分机制一致。Baseline任务采取跟随三角形旋转形式是为了在不影响画圆任务的情况下测试志愿者在5 s内顺时针画相同大小的圆的能力。

1.3 评分机制

画圆任务要求志愿者在5 s内尽可能准确地画圆,若画圆时间超过5 s则记为0分,若时间在5 s内,则按照准确性打分。评分参数为圆度偏移量(roundness score, RS)和完成时间(完成时间记录20次画圆任务的总时间)。RS计算方法如下所示。

$$D_i = \sqrt{(x_i - x_o)^2 + (y_i - y_o)^2} \quad (1)$$



注: a.末端牵引式上肢运动;b.基准水平测试任务;c.V+KP+KR组画圆任务;d.V+KR组画圆任务

图1 画圆游戏任务示意图

$$RS = \frac{R - \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (D_i - R)^2}{N}}}{R} \times 100 \quad (2)$$

其中, D_i 为摇杆末端控制的代理点 (x_i, y_i) 和圆心 (x_0, y_0) 两点的距离, 取值范围为 $(0, 2R)$ 。

2 方法

2.1 对象

2018年7月至9月, 选择中科院材料所右利手学生和教师24例进行试验, 包括17例男性和7例女性, 年龄24~37岁, 平均 (26.71 ± 3.61) 岁, 无上肢运动功能障碍, 此次试验仅针对志愿者右侧上肢顺时针画圆运动。

2.2 测试方法

24例志愿者需要首先完成 Baseline 测试, Baseline 测试分组后经过1个月左右进行5节训练、训练后经过3d再进行保持测试。

2.2.1 受试者运动能力的基准水平测试

由于不同个体存在不同的技能水平, 其个体差异性会影响其完成任务的准确性, 面对同一任务, 不同个体的难度感知不同, 若是个体感知难度大, 可能打击自信^[34], 而感知太简单则激发不了挑战性^[35], 从而影响结果。

为了排除志愿者本身能力的影响, 设计如图1b所示的 Baseline 任务来测试志愿者的画圆能力是否一致。Baseline 任务采取三角形旋转、代理点跟随的任务方式, 当代理点重新回到原橙色初始位置表示完成一圈任务。其中, 三角形旋转一圈的时间为5s, 志愿者需要实时控制代理点跟随三角形旋转完成画图任务, 若完成时间超过5s则记为0分, 且该分数会在屏幕左上角显示; 若志愿者在5s内完成任务, 则屏幕左上角分数为RS值。通过0分值来衡量是否能在5s内完成任务, 通过RS值来衡量任务的准确性。每位志愿者共进行10次顺时针 Baseline 任务, 然后进行统计学分析并根据分析结果进行分组, 以确保两组志愿者任务完成水平相对一致。

2.2.2 运动学习训练

经过 Baseline 测试后将志愿者分成无显著性差异的两组。图1c所示为 V+KP+KR 组完成画圆任务的反馈内容, 该反馈下志愿者可看到实时的代理点位置以及画圆任务的实时视觉轨迹。图1d所示为 V+KR 组完成画圆任务的反馈内容, 此反馈下只能看到实时的代

理点的位置, 没有实时视觉轨迹。两组在完成画圆任务后均可在屏幕左上角看到每画完一圈后的成绩, 以及5s的倒计时情况。

两组志愿者分别进行5节训练, 每两节间休息1~2min, 每节完成20次顺时针画圆任务, 每次画圆任务完成后均会在屏幕上显示成绩, 每节任务完成后会显示该试验节的平均成绩, 并在下一节训练时, 本次的平均成绩将会在屏幕左下角显示。本试验共需要完成100次顺时针画圆, 总耗时约20min。其中, 所有志愿者完成第1节训练后, 在其休息间隙对其进行一个问卷调查; 在完成5节训练后, 再进行一次问卷调查。

训练试验经过3d后, 两组志愿者进行和训练任务相同内容的一节试验, 并再次填写问卷调查。这节试验作为一个学习能力的保持测试, 以查看两组学习任务的保持能力。

2.3 统计学分析

采用 SPSS 22.0 进行统计学分析。计量资料均符合正态分布或近似正态分布, 以 $(\bar{x} \pm s)$ 表示。为了确保试验中两组的志愿者能力没有差异, 把24例志愿者的 Baseline 成绩进行排名, 以前12名和后12名分为两组, 采用独立样本 t 检验, 分析志愿者的5s内画圆的运动能力是否一致, 若无显著性差异则认为所有志愿者完成顺时针画圆的准确性和完成时间的能力一致, 将24人随机分为两组。若有显著性差异, 则按照排名序号奇数和偶数号重新分为两组, 对重新分的两组进行独立样本 t 检验。对两组进行两因素重复测量方差分析 $2(V+KP+KR \text{ 组、} V+KR \text{ 组}) \times 6(5 \text{ 节训练} + 1 \text{ 节保持测试})$ 、单因素方差分析。显著性水平 $\alpha = 0.05$ 。

3 结果

3.1 Baseline 结果分析

将24例志愿者的成绩排列, 前12名成绩 (61.14 ± 29.70) 与后12名 (39.56 ± 37.21) 有非常高度显著性差异 $(t = 4.968, P < 0.001)$ 。将两组志愿者重新排列成新的两组, 所有的成绩无显著性差异 $(t = 0.809, P = 0.420)$, 两组除去0分值后的数据无显著性差异 $(t = 1.176, P = 0.241)$, 两组0分值的个数无显著性差异 $(t = 0.462, P = 0.649)$ 。

3.2 试验结果分析

3.2.1 RS 值

除0分值后, 两组训练节和保持节的RS值如图2所示。对两组进行两因素重复测量方差分析 $2(V+KP+$

KR 组和 V+KR 组)×6(5 节训练+1 节保持测试), 结果显示组间和组内存在交互作用($F = 6.029, P < 0.001$)。对组间进行 6 次单独效应分析, 两组除了在第 5 节无显著性差异外($P > 0.05$), 其余节均存在非常高度显著性差异($P < 0.001$)。见表 1。

对组内因素进行 2 次单独效应分析, 对于 V+KP+KR 组, 组内因素有非常高度显著性差异($F = 12.465, P < 0.001$); 对于 V+KR 组, 组内因素也存在非常高度显著性差异($F = 35.612, P < 0.001$)。对两组都进行单因素方差分析, 发现两组的保持节都和第 1 节训练有非常高度显著性差异($P < 0.001$), 和第 2 节训练无显著性差异(V+KP+KR 组 $P = 0.444$, V+KR 组 $P = 0.308$)。

3.2.2 完成时间

对两组完成时间进行两因素重复测量方差分析 2 (V+KP+KR 组和 V+KR 组)×6 (5 次训练节+1 节保持测试), 结果显示组间和组内不存在交互作用($F = 1.606, P = 0.228$), 组间主效应不显著($F = 0.55, P = 0.477$), 组内主效应显著($F = 3.95, P = 0.031$)。对两组均进行单因素方差分析, V+KR 组各节无显著性差异($P > 0.05$), V+KP+KR 组的第一节训练和保持节有显著性差异($P = 0.015$)。虽然完成时间的组间差异不显著, 但是 V+KP+KR 组的完成时间略高于 V+KR 组。见图 3。

4 讨论

本文通过研究健康志愿者在 KP 反馈下的运动学习状况, 从而探究更好的运动学习策略, 以期待能将较好的反馈策略用于脑卒中患者的再学习康复训练中。

两组的 0 分值的个数无显著性差异, 这说明本实验志愿者对于 5 s 内完成顺时针画圆的任务是较为一致的。且在问卷调查中志愿者反馈只有在最初的几次画圆任务中会注意到 5 s 的时间, 在随后的试验中都靠本体感觉大致的时间, 更多的关注点在准确性上。

从运动准确性来看, V+KP+KR 组能够快速达到一个较高的准确度, 成绩缓步提高, 在第 5 节测试时, 两组能够达到相同的水平; 而从保持节来看, 两组都较第 5 节试验成绩降低, V+KP+KR 组成绩高于 V+KR 组, 不过两组都和各自组第 2 节训练水平相当。从第 5 节训练来看, 两组都能到达相同的水平, 说明 KP 不是达成运动准确性的必要条件。从整个试验过程来看, V+KP+KR 组在运动初期和保持测试都表现出优势, 增加 KP 会增加反馈信息的处理^[29], 提供更多的反馈信息, 对于初次接受的较难的 5 s 画圆运动可能减少认知的负载, 且在 5 s 内可能能够快速对任务有一个很好的对错误的自我认知^[12]。从保持节看, V+KP+KR 组的成绩高于 V+KR 组, 这可能是 V+KP+KR 组增加反馈从而付出了更多的努力, 运动的控制是希

表 1 两组 RS 分值对比

组别	n	节 1	节 2	节 3	节 4	节 5	保持节
V+KP+KR 组	12	86.52±4.60	88.06±3.55	88.68±3.41	89.37±3.35	88.90±3.34	88.33±3.98
V+KR 组	12	83.29±6.85	86.15±5.25	88.96±5.40	87.32±4.10	88.66±4.12	86.65±4.97
F 值		31.994	22.653	16.146	36.913	8.775	13.126
P 值		< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	0.658	< 0.001

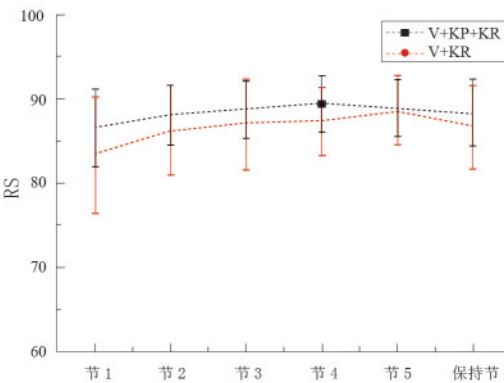


图 2 两组分 RS 值比较

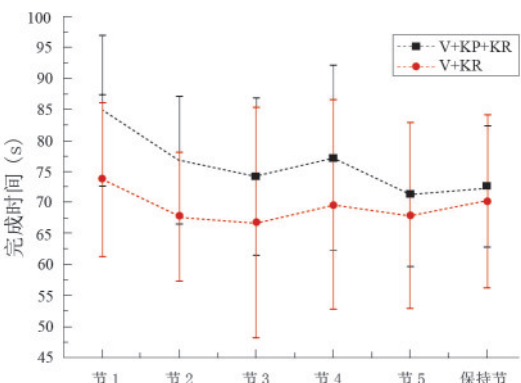


图 3 两组完成时间比较

望付出更少的努力去获得更多的回报^[29], 而如果付出努力多的话则有可能会增强运动记忆。

从运动时间来看, 组内的主效应显著, 也就是说, 虽然我们规定完成时间为5 s, 但是志愿者完成画圆任务的时间也会越来越短。完成时间的缩短有两个可能: 一方面, 随着训练次数的增加, 任务的学习加强, 前馈信息增加, 所需要的反馈信息减少, 这支持本研究最初的假设, 即虽然外部传入信息不变, 但随着运动学习的进行, 人们可能更多依赖本体感觉^[27]; 另一方面, 从Shadmehr教授的运动控制理论来讲, 人们趋向于花费更少代价去获得更多, 且越早获得回报越好, 在任务相同的情况下, 花费时间越少越好。虽然时间在减少, 但是成绩并没有减少。虽然无显著性差异, 从图3可看到, V+KP+KR组的平均完成时间要高于V+KR组, 这是因为V+KP+KR组比V+KR组多了实时轨迹的视觉反馈, 可能需要付出更多的时间在反馈运动控制模型中获取和整合反馈信息^[29], 也因此付出更多的努力, 能够专注于画圆任务的准确性。两组的完成时间都随着任务训练的增加而有着降低的趋势, 这可能是因为随着训练的增加, 志愿者对反馈信息的依赖降低了^[15]。

在试验的过程中发现, 志愿者的主观能动性也在发挥着重要作用^[36-37]。在完成一节任务后, 志愿者看到成绩, 会有“我这次比上次成绩更好”“这次因为没有按时完成, 有个0分影响了我的成绩, 下次能够更好地完成”等的感受, 这说明KR可能在对于志愿者的自我认知中发挥着重要的作用, KR可以在一定程度上提高个体完成任务的积极性^[38]。对于脑卒中患者, 这种量化的评估并且在线反馈的形式, 可能有利于提高患者的康复积极性, 特别是当患者自己看到自己的能力提高, 更加相信自己能够恢复, 进而促进多巴胺的分泌, 更有利于运动学习^[39]。此外, “0分”也能激励志愿者进一步挑战自我, 更加努力。总之, 人的主观能动性也起到重要作用, 关键是如何调控才能使志愿者既有自信又有挑战性, 其调控机制有待进一步深入研究^[34-35]。

综上所述, 实时的轨迹反馈可以帮助个体快速学习一项任务, 这对于脑卒中患者的初期康复训练可能比较有利。运动时间的减少初步验证运动学习后期对视觉反馈依赖的降低和本体感觉的增强。但是, 本研究没有转移试验的测试, 所以还不能充分证实这一点, 接下来的工作重点将以此展开。另外, 人的主观

能动性也是影响运动学习的重要因素, 针对脑卒中患者的康复训练游戏设计需要多考虑这一因素, 只有能够激发患者的主观能动性才能够更有利于康复训练, 促进患者主动训练, 提升康复训练效果。

[参考文献]

- [1] 王陇德, 王金环, 彭斌, 等. «中国脑卒中防治报告2016»概要[J]. 中国脑血管病杂志, 2017, 14(4): 217-224.
- [2] 王陇德. 中国脑卒中防治工程的现状与未来[J]. 第二军医大学学报, 2018, 39(9): 941-943.
- [3] 李周, 周虹, 孙莹, 等. 综合康复评估及训练系统在脑卒中患者上肢及手的运动控制训练中的应用[J]. 中国康复医学杂志, 2013, 28(7): 663-664.
- [4] 王丽, 张秀峰, 马岩, 等. 脑卒中患者上肢康复机器人及评价方法综述[J]. 北京生物医学工程, 2015, 34(5): 526-532.
- [5] Krebs H I, Aisen M L, Volpe B T, et al. Quantization of continuous arm movements in humans with brain injury [J]. Proc Natl Acad Sci U S A, 1999, 96(8): 4645-4649.
- [6] 邵丽, 赵永波. 脑卒中康复与神经可塑性[J]. 中风与神经疾病杂志, 2006, 23(1): 126-128.
- [7] Krebs H I, Palazzolo J J, Dipietro L, et al. Rehabilitation robotics: performance-based progressive robot-assisted therapy [J]. Auton Robot, 2003, 15(1): 7-20.
- [8] Marchal-Crespo L, Reinkensmeyer D J. Review of control strategies for robotic movement training after neurologic injury [J]. J Neuroeng Rehabil, 2009, 6: 20.
- [9] Lotze M, Braun C, Birbaumer N, et al. Motor learning elicited by voluntary drive [J]. Brain, 2003, 126(4): 866-872.
- [10] Krakauer J W. The applicability of motor learning to neurorehabilitation [M]//Dietz V, Ward N. Oxford Textbook of Neurorehabilitation. Oxford, UK: OUP Oxford, 2015: 55-63.
- [11] Crum E O, Baltz M J, Krause D A. The use of motor learning and neural plasticity in rehabilitation for ataxic hemiparesis: a case report [J]. Phys Theory Pract, 2019: 1-10. doi: 10.1080/09593985.2019.1566941. [Epub ahead of print].
- [12] Sigrist R, Rauter G, Riener R, et al. Augmented visual, auditory, haptic, and multimodal feedback in motor learning: a review [J]. Psychon Bull Rev, 2013, 20(1): 21-53.
- [13] Bernier P M, Chua R, Franks I M. Is proprioception calibrated during visually guided movements? [J]. Exp Brain Res, 2005, 167(2): 292-296.
- [14] Robin C, Toussaint L, Blandin Y, et al. Specificity of learning in a video-aiming task: modifying the salience of dynamic visual cues [J]. J Mot Behav, 2005, 37(5): 367-376.
- [15] Hinder M R, Tresilian J R, Riek S, et al. The contribution of visual feedback to visuomotor adaptation: how much and

- when? [J]. *Brain Res*, 2008, 1197: 123-134.
- [16] Blandin Y, Toussaint L, Shea C H. Specificity of practice: interaction between concurrent sensory information and terminal feedback [J]. *J Exp Psychol Learn Mem Cogn*, 2008, 34(4): 994-1000.
- [17] Toussaint L, Meugnot A, Badets A, et al. The specificity of practice hypothesis in goal-directed movements: visual dominance or proprioception neglect? [J]. *Psychol Res*, 2017, 81(2): 407-414.
- [18] Goodman R, Crainic V A, Basted S R, et al. Amending ongoing upper-limb reaches: visual and proprioceptive contributions? [J]. *Multisens Res*, 2018, 31(5): 455-480.
- [19] Sharer E A, Mostofsky S H, Pascual-Leone A, et al. Isolating visual and proprioceptive components of motor sequence learning in ASD [J]. *Autism Res*, 2016, 9(5): 563-569.
- [20] Gaffin-Cahn E, Hudson T E, Landy M S. Did I do that? Detecting a perturbation to visual feedback in a reaching task [J]. *J Vis*, 2019, 19(1): 5, 1-18.
- [21] Sugiyama T, Liew S L. The Effects of sensory manipulations on motor behavior: from basic science to clinical rehabilitation [J]. *J Mot Behav*, 2017, 49(1): 67-77.
- [22] Tremblay L, Proteau L. Specificity of practice: the case of powerlifting [J]. *Res Q Exerc Sport*, 1998, 69(3): 284-289.
- [23] Marchal-Crespo L, Rappo N, Riener R. The effectiveness of robotic training depends on motor task characteristics [J]. *Exp Brain Res*, 2017, 235(12): 3799-3816.
- [24] 金亚虹,章建成,任杰. 视觉反馈对结果反馈时间点适宜值的影响 [J]. *北京体育大学学报*, 2010, 33(12): 68-71.
- [25] Kuling I A, de Brouwer A J, Smeets J B J, et al. Correcting for natural visuo-proprioceptive matching errors based on reward as opposed to error feedback does not lead to higher retention [J]. *Exp Brain Res*, 2018. doi: 10.1007/s00221-018-5456-3. [Epub ahead of print]
- [26] Wei Y, Bajaj P, Scheidt R, et al. Visual error augmentation for enhancing motor learning and rehabilitative relearning [C]. *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 2005.
- [27] Fleishman E A, Rich S. Role of kinesthetic and spatialvisual abilities in perceptual-motor learning [J]. *J Exp Psychol*, 1963, 66: 6-11.
- [28] Shadmehr R, Krakauer J W. A computational neuroanatomy for motor control [J]. *Exp Brain Res*, 2008, 185(3): 359-381.
- [29] Shadmehr R, Mussa-Ivaldi S. *Biological Learning and Control: How the Brain Builds Representations, Predicts Events, and Makes Decisions* [M]. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 2012.
- [30] van der Kooij K, Overvliet K E, Smeets J B J. Temporally stable adaptation is robust, incomplete and specific [J]. *Eur J Neurosci*, 2016, 44(9): 2708-2715.
- [31] Crevecoeur F, Munoz D P, Scott S H. Dynamic multisensory integration: somatosensory speed trumps visual accuracy during feedback control [J]. *J Neurosci*, 2016, 36(33): 8598-8611.
- [32] Barros J A C, Yantha Z D, Carter M J, et al. Examining the impact of error estimation on the effects of self-controlled feedback [J]. *Hum Mov Sci*, 2019, 63: 182-198.
- [33] Wei K, Kording K. Relevance of error: what drives motor adaptation? [J]. *J Neurophysiol*, 2009, 101(2): 655-664.
- [34] Reinkensmeyer D J, Housman S J. "If I can't do it once, why do it a hundred times?": Connecting volition to movement success in a virtual environment motivates people to exercise the arm after stroke [C]. *Virtual Rehabilitation, IEEE*, 2007.
- [35] Guadagnoli M A, Lee T D. Challenge point: a framework for conceptualizing the effects of various practice conditions in motor learning [J]. *J Mot Behav*, 2004, 36(2): 212-224.
- [36] Wulf G, Lewthwaite R. Optimizing performance through intrinsic motivation and attention for learning: The OPTIMAL theory of motor learning [J]. *Psychon Bull Rev*, 2016, 23(5): 1382-1414.
- [37] Lewthwaite R, Wulf G. Optimizing motivation and attention for motor performance and learning [J]. *Curr Opin Psychol*, 2017, 16: 38-42.
- [38] Salmoni A W, Schmidt R A, Walter C B. Knowledge of results and motor learning: a review and critical reappraisal [J]. *Psychol Bull*, 1984, 95(3): 355-386.
- [39] Pila O, Duret C, Laborne F X, et al. Pattern of improvement in upper limb pointing task kinematics after a 3-month training program with robotic assistance in stroke [J]. *J Neuroeng Rehabil*, 2017, 14(1): 105.

(收稿日期:2018-12-05 修回日期:2019-01-29)