

The Application of Computer Assisted Rehabilitation Environment in Rehabilitation Evaluation and Training

Ming Shao^{1*}, Xia He¹, Jing Liu^{1#}, Ruisong Liao¹, Xuejing Zheng¹, Dong Liu², Zeliang Shan², Yinghan Qin³, Chengpan Wang³, Yingchun Mei³, Zhi Yan^{1,3#}

¹Affiliated Sichuan Provincial Rehabilitation Hospital of Chengdu University of TCM/Sichuan Bayi Rehabilitation Center, Chengdu Sichuan

²Tianfu College of SWUFE, Chengdu Sichuan

³Liaoning Normal University, Dalian Liaoning

Email: 1961523453@qq.com, #269807602@qq.com, #yan_family@126.com

Received: Dec. 6th, 2019; accepted: Dec. 19th, 2019; published: Dec. 26th, 2019

Abstract

Objective: To summarize the background, working principle and application of the computer assisted rehabilitation environment in the study of modern rehabilitation medicine treatment, and to clarify its advantages in the rehabilitation of limb movement disorder. **Methods:** Through the network retrieval articles in PubMed database, China CNKI database, VIP database for virtual reality environment (virtual reality environment), computer assisted rehabilitation environment (computer assisted rehabilitation environment), movement disorders, rehabilitation (Dyskinesia rehabilitation), retrieval time for 1999 and 2015, excluding low correlation, repeatability, old literatures, a total of 31 articles were reviewed. **Results:** The virtual environment of the dual task of the computer assisted rehabilitation environment is helpful to improve the ability of the patients' limb movement to make the interaction, interest and safety of the rehabilitation training. Computer aided rehabilitation environment has important clinical value and broad application prospects in the field of rehabilitation. It is worth further development and application in the field of rehabilitation of limb movement disorders.

Keywords

CAREN System, Evaluation and Training, Application Research

*第一作者。

#通讯作者。

计算机辅助康复环境在康复评定与训练中的应用研究

邵明^{1*}, 何霞¹, 刘静^{1#}, 廖瑞松¹, 郑学敬¹, 刘冬², 单泽良², 秦英瀚³, 王成盼³, 梅英春³, 颜智^{1,3#}

¹成都中医药大学附属四川省康复医院/四川省八一康复中心, 四川 成都

²西南财经大学天府学院, 四川 成都

³辽宁师范大学, 辽宁 大连

Email: 1961523453@qq.com, *269807602@qq.com, #yan_family@126.com

收稿日期: 2019年12月6日; 录用日期: 2019年12月19日; 发布日期: 2019年12月26日

摘要

目的: 对计算机辅助康复环境的诞生背景、工作原理及其在现代康复医学治疗研究中的应用进行综述, 阐明其在肢体运动障碍康复中的优势。方法: 通过网络检索PubMed数据库、中国知网数据库、维普数据库有关虚拟现实环境(virtual reality environment)、计算机辅助康复环境(Computer assisted rehabilitation environment)、运动障碍康复(Dyskinesia rehabilitation)的文章, 检索时间为1999年~2015年, 排除相关性低、重复性、陈旧文献, 共保留31篇文章进行综述。结果: 计算机辅助康复环境设置的双任务的虚拟环境有助于提高患者的肢体运动能力使康复训练的互动性、趣味性、安全性得以呈现。计算机辅助康复环境在康复领域具有重要的临床价值和广泛的应用前景, 值得进行进一步的开发性研究及在肢体运动障碍康复领域进行推广应用。

关键词

计算机辅助康复环境, 评定与训练, 应用研究

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着社会发展, 人口老龄化进程加快, 慢性病患者率不断上升, 对康复服务的形式和能力也提出更高要求[1]。随着运动训练越来越为临床康复治疗所重视, 运动训练开始应用到临床康复治疗之中, 为病人的康复提供了很大帮助[2]。康复评定贯穿于康复治疗的全过程, 在康复治疗中占有很重要的地位, 也是康复治疗不可缺少的重要环节[3]。计算机辅助虚拟康复环境(Computer Assisted Rehabilitation Environment, CAREN)是由运动平台、虚拟环境(投影屏幕)、运动捕捉、中央控制所组成的一个康复系统。CAREN系统可以对步态进行分析、评估与康复训练, 与传统三维步态分析相比, 其具有快捷、实时、准确、定量、安全等特点。卡伦康复系统应用于步态评估中在国内鲜有所闻, 但在国外却屡屡出现在各大

科研刊物和研究报告上。本文旨在对计算机辅助康复环境的诞生背景、工作原理及其在现代康复医学治疗研究中的应用进行综述, 阐明其在肢体运动障碍康复中的优势。

2. 计算机辅助康复环境系统简介

计算机辅助康复环境, 简称“卡伦”(Computer Assisted Rehabilitation Environment, CAREN)是由荷兰 Motek 医疗科研公司设计研究制造的, 该公司给出的定义是集成人类运动行为包括个人信息录入、评估和功能训练的硬件和软件的康复系统。计算机辅助康复环境为患者提供虚拟现实环境, 在环境中进行视觉、听觉、触觉和运动平台干扰, 并要求患者完成各种场景任务, 提高肢体运动能力和运动能力, 实现运动和平和控制, 达到运动康复的目的[4]。

3. 计算机辅助康复环境研究现状

计算机辅助康复环境发明于 20 世纪 90 年代, 据有关资料记载[5], 早期的计算机辅助康复环境在使用方面具有局限性, 作为一种技术手段主要针对于脑卒中患者的肢体障碍恢复, 也有少量专题报道显示计算机辅助康复环境早期也应用于军队截肢的军人对患侧肢体的适应性改善[6]。计算机辅助康复环境的工作原理是建立在虚拟现实技术应用的基础上, 虚拟现实技术可以创建和体验虚拟世界的计算机仿真系统, 它利用计算机生成一种模拟环境是一种多源信息融合的交互式的三维动态视景和实体行为的系统仿真使用户融入到该环境中[7]。

Eerden [8]是第一个描述计算机辅助康复环境的学者, 他在 1999 年的计算机辅助康复环境介绍一文中描述计算机辅助康复环境的开发目的是为了详细测量计算机控制的运动平台对人体运动系统进行干扰的数据, 再将获得的运动数据输入仿真人体模型, 计算和评估关节的瞬间力量和肌肉激活程度。

通过反应时模式, 可以推断受试者的运动系统的发力点, 找到运动系统中导致功能性障碍的主要问题, 进而确定需要康复的关节和肌肉群。计算机辅助康复环境通过修正使肌力不足的患者在系统中实现二次适应, 这种对患者的补偿性策略使患者的康复信心增强, 有更好的治疗态度。Eerden 认为卡伦不仅是一个测试和训练环境, 它几乎能无限的探索患者的运动行为, 也是研究运动控制的出色工具, 卡伦系统具备 6 个自由度的运动平台, 同时可通过惯性传感器、测力板、电测角计、生物压力反馈装置和带传感器的运动测量装置来测量患者的生物力学信息反馈, 以帮助患者尽早建立新的肢体运动反馈。X(横轴)、Y(纵轴)、Z(垂直轴)为三个方向的轴。三个轴相互垂直形成三个平面即纵面(YZ 平面)、横面(XZ 平面)和水平面(XY 平面)。M1~M4 为四个标记点, 用于建立默认的旋转轴[9](如图 1)。

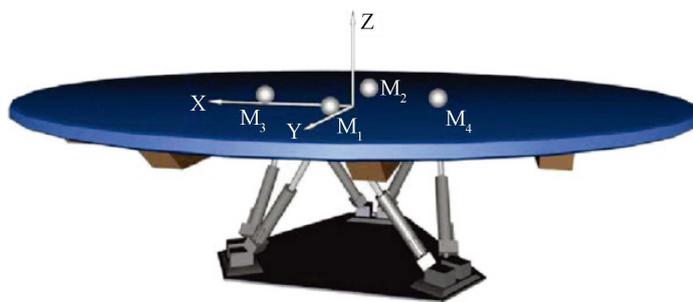


Figure 1. 6 degrees of freedom motion platform
图 1. 6 个自由度运动平台

Giggins [10]文章中描述了不同类型的生物反馈康复疗法, 在文章中指出计算机辅助康复环境是建立在生物反馈系统的原理上创造的。生物反馈治疗已在康复领域得到广泛的应用, 它可以向患者反馈提供

很多的未知的生物学信息,生物反馈可以分为生物力学反馈和生理信息反馈。生理信息反馈包括神经肌肉生理信息反馈(比如肌电图),心血管信息反馈(比如心率、血压等)和呼吸系统信息反馈。生物力学生物反馈包括运动测试、姿势控制和身体力量评估等。惯性传感器、测力板、电测角计、生物压力反馈装置和带传感器的运动测量装置等都可以用来提供生物力学信息反馈,比如一个压力板可用来提供患者力量反馈和姿势控制能力反馈,这些生物力学反馈测试系统都集成应用于计算机辅助康复环境。

4. 计算机辅助康复环境在肢体运动障碍康复中应用现状

虚拟现实技术可以为患者提供身处复杂实体环境的机会,但是身体并不承担任何风险,从而为他们提供广泛的参与运动训练的机会,或者为患者提供体验各种人体姿势和行走的机会[11]。El Maksoud [12]研究虚拟现实技术的人机互动,其主要目的是找到一种最佳的解决方案使患者能够在虚拟环境中模拟现实生活的行走。他通过临床研究发现,脑卒中患者能够很快接受并适应卡伦的训练方式,他们可以走进一个虚拟的环境中,按照个人需求在6个自由度的运动平台上进行任何角度的步态训练。

Gates DH [13]大腿截肢患者在计算机辅助康复环境(CAREN)和地面行走的比较研究中比较了大腿截肢患者在地上行走和计算机辅助虚拟现实环境跑步机(CAREN)行走的训练变化。研究对象为7例创伤性大腿截肢患者和27例正常人对照组。以同样的速度在地上和CAREN跑步机上行走。观察所有试验中收集的时空、全身运动学和运动学变异参数。结果显示在下肢运动学差异很小($<2.5(\circ)$),走在CAREN对照组骨盆和躯干运动时冠状和矢状面表现出下降,而大腿截肢患者没有。两组在卡伦在跑步机上行走均表现出增加台阶宽度的变化,但只有微小运动的变化。这项研究的结果表明,在虚拟环境中的跑步机训练应该与对照组结果高度相似。

Isaacson [14]研究证实计算机辅助康复环境能帮助受伤军人康复身体功能和肢体障碍。Isaacson在文章中指出,战争中士兵受伤与普通残疾人不同,因为被炸弹炸伤的士兵损伤的部位是随机的,损伤性质各种各样十分复杂,因此需要更新颖的康复工具进行系统治疗,帮助受伤士兵快速回到部队或者能够正常生活。计算机辅助康复环境能够满足为受伤士兵治疗的苛刻要求,计算机辅助康复环境独特的康复特点,使受伤士兵能够进入接近真实生活的临床环境,康复师通过收集运动学和动力学数据并进行分析,设计出康复方案。

Barton [9]研究认为,通常运动平台的功能应用于人体平衡研究受限制,由于旋转只允许按照规定的轴进行旋转,当运行至平台表面时表现为运动自由度过约束,不能进行复合运动,因此不能直接研究近端关节的控制机制。Barton认为卡伦运动平台自转轴有三个位面,通过旋转支撑面在周围重建关节轴产生干扰,运动平台围绕着重建关节轴进行旋转,而不是围绕规定轴进行旋转,因此计算机辅助康复环境通过旋转轴能精确的将运动平台调整到任意位置,能够克服其他运动平台的角度限制,是计算机辅助康复环境的优势所在,这是计算机辅助康复环境运动平台基准控制系统。

Kizony [15]认为神经功能缺失的患者通常伴有肢体运动能力和运动能力的双重功能障碍,因此他利用计算机辅助康复环境设计了双重任务研究虚拟环境训练脑卒中患者步态的可行性。他从社区中选取10例患有脑卒中的老年人与同年龄段的健康老年人作为对照组进行步态对比试验。受试者在运动平台上行走,同时在屏幕上设置一个虚拟的杂货店通道,第一次他们被要求在通道上走过去(单任务),第二次他们被要求在通道上走,同时在走步的过程中完成购买商品(双任务)。实验结果显示,脑卒中组在两次实验中都比健康组走的慢且步长短,但是单次任务中,脑卒中的步速变化大且步长短,而在增加了购买商品的双重任务中脑卒中组患者的步速和步长都有所增加,双重任务比单次任务中的失误率也更低。由此看来,通过计算机辅助康复环境设置双任务的虚拟环境有助于提高患者的肢体运动能力,提高患者的步行训练效果。

5. 计算机辅助康复环境相比传统康复治疗中优势体现

5.1. 计算机辅助康复环境可提高康复生态效度

传统的临床康复方法在限制生态效度方面已经受到批判, 因为传统临床康复目的是改善日常行为, 但是训练系统与真实世界的关联度和相似度有相对性, 模拟任务可能做得很好, 但是在现实生活中却很难将模拟任务有效的应用[16]。而卡伦的虚拟现实技术能够弥补传统模拟任务训练的不足之处, 卡伦可以为患者提供所需要的虚拟现实场景, 在虚拟现实环境中可进行测试和训练, 虚拟现实环境不仅看起来像真实世界, 它可以通过严格的科学控制和复制的场景控制, 将现实环境完成的呈现在虚拟环境中, 增加了模拟任务的真实感和复杂性, 使患者的康复训练更加接近真实世界, 更具有临床价值[17][18]。计算机辅助康复环境与患者的交互性增强, 患者康复的生态效度提高。Sessoms PH [19]观察使用计算机辅助康复环境(CAREN)对接受前庭运动疗法的受试者重心转移和步态的改善进度变化。两组患者每天一次训练: 一组交替做 CAREN 和传统前庭运动疗法每天一次, 共 12 次, 另一组只做(CAREN)每天一次, 共 12 次。这两组相互比较并与健康对照组在 CAREN 执行相似的任务数据比较结果显示, 那些参与 12 次(CAREN)训练的患者在步态速度方面已经有较大的改善($P = 0.014$), 并且在重心转移方面的得分表现出了与健康对照组人群相类似的数据($P < 0.001$)。

5.2. 可以控制训练难度和进阶训练

计算机辅助康复环境的优势之一就是可以有效控制训练的刺激, 还可以按照患者的康复情况安排进阶训练。许多肢体功能障碍的患者不可能完成真实环境中模拟任务, 比如搬箱子、射击等动作, 动作的难度更是难以控制。而在计算机辅助康复环境中, 可针对患者的损伤程度设计相应的训练, 而且没有空间和道具的限制, 难度可通过计算机软件进行有效控制。Kim [17][18][19][20]专注于虚拟训练系统的开发, 他曾经设计一个搬箱子系统, 系统中他将帮箱子动作分为 6 个难度, 在虚拟环境中第一难度是将箱子搬起再放下, 第二等级是将箱子搬起转身放到另一边, 第三个难度是在虚拟环境中设置多个叠放在一起的箱子, 受试者每次搬一个叠放在另一边, 第四个难度是受试者搬起箱子在跑台上沿直道走一段路放到规定地点, 第五个难度是受试者搬起箱子在凹凸不平的路面行走并放在规定地点。Schultheis 等人[21][22][23]通过计算机辅助康复环境对创伤性脑损伤患者进行虚拟驾驶训练, 开始只要求患者“驾驶车辆在直道行驶”, 不能偏离跑道, 随着康复水平的提高进行进阶训练, 要求患者“驾驶车辆加速和减速”, 后来在公路上设置其他车辆, 要求患者“驾驶车辆进行避让”, 最后患者可以在“高速公路上轻松驾驶”, 实验证实计算机辅助康复环境的这种虚拟现实运动康复手段不仅能够有效康复患者的运动能力, 还可以进行有效的难度控制和进阶训练, 同时计算机辅助康复环境的沉浸式视觉和听觉系统还有助于提高患者的肢体运动能力。

5.3. 实时训练反馈

Deutsch [24][25][26]运用计算机辅助康复环境的实时动作反馈特点为脑卒中上肢功能障碍的患者进行运动康复。为了增强患者的上肢活动度, Deutsch 想到一个办法, 运用计算机辅助康复环境的实时动作反馈在投影屏幕上成像, 要求患者通过上肢各个角度的运动在大屏幕上进行绘画, 通过记录运动轨迹画出各种图案, 在进行手指训练时, 要求患者戴数据手套在大屏幕上弹钢琴或键盘。实验结果显示大部分患者的上肢活动能力都有所改善, 有一名患者甚至可以用受伤的手完成打领带的动作。计算机辅助康复环境的实时训练反馈主要得益于出色的动作捕捉系统和摄像机数据分析系统, 前者的作用更大。患者身着带有动作传感器的标志物和数据手套进行运动训练, 加上摄像机系统的支持, 能够实时监控患者的动作幅度、角度、次数等, 为了使患者达到训练要求可在投影屏幕上预设运动轨迹, 患者可以直观的明确

训练目标,实时观测到自己动作完成情况,对患者完成动作的质量提出更高的要求,能够随时对患者的动作进行评估。如果患者在训练过程中偷懒、不认真等都会被记录。

5.4. 环境安全,不受空间限制

在对运动功能障碍患者进行康复训练时首先要保证患者的人身安全,避免二次受伤。计算机辅助康复环境是一个独立的封闭的虚拟训练环境,不同于患者在现实环境中的训练,面临各种各样的风险,而且在训练过程中计算机辅助康复环境有一根悬吊绳挂在患者的身上,防止其跌倒。在现实环境中,由于客观因素限制,不能经常改变训练地点,患者一般在医院康复中心进行治疗,长时间在同一地点进行重复训练,会降低患者训练的积极性。而计算机辅助康复环境则可以摆脱空间限制,让患者体验不同的训练环境,比如前面所说的“脑卒中患者驾驶体验”,患者亲自驾驶车辆训练是不现实的,通可以让患者在驾驶环境下进行康复训练,能有效提高患者训练的积极性。计算机辅助康复环境还可以配合运动基地的变化,模拟路面的凹凸不平,让患者进行“爬山”“滑雪”等虚拟环境下的训练。

5.5. 充分利用患者自身认知和本能

Sohlberg [27]-[32]为了帮助脑卒中患者恢复运动能力,他通过虚拟系统设计了一项游戏任务,在一个四周着火的房间里让患者根据提示路线进行撤离,动作任务包括蹲下、跨越障碍物、行走、躲闪等,虚拟的大火和警报声给患者造成视觉和听觉刺激,激发了患者的肢体运动能力和本能,提高了神经支配能力,一些脑卒中患者在游戏任务中完成了平时做不到的动作。

6. 展望

6.1. 降低康复费用,可复制的康复模式

目前一对一的康复模式要消耗大量的人力和物力,一名康复师同一时间内只能对一名患者进行治疗,费时费力。计算机辅助康复环境的广泛应用或许能够改变现状,降低患者的康复费用,在未来计算机辅助康复环境经过大量样本的临床实验,康复系统会更加完善,加上计算机辅助康复环境具有实时反馈监控、训练难度可控和完美的评价系统可以实现康复治疗师在对患者进行准确诊断之后将数据输入计算机辅助康复环境,让患者自行在系统中训练,治疗只需要做好监控就可以,由一对一转变为一对多,患者由被动康复转变为主动康复,可提高康复的效果和效率。

6.2. 远程康复

这里所说的远程康复不是现在运用的患者与治疗师的电脑视频实现一对一的传统康复模式,而是要求患者进行远程康复首先要有一个计算机辅助康复环境,无论是在家里、社区还是附近医院,运用计算机辅助康复环境的动作捕捉、摄影机、步态等系统对患者病情进行评估并记录数据,治疗师对数据进行分析,进而制定康复计划,治疗师甚至可以不用与患者交流,患者的评估数据是患者病情最直观的说明,对计算机辅助康复环境的大数据分析是实现远程康复的关键因素。

6.3. 游戏任务升级,沉浸感增强

计算机图像学的发展可以帮助我们制作出任何需要的虚拟情景模式,甚至可以通过全息成像技术设计出我们熟悉的家庭环境,游戏产业的发展和游戏软件的开发,可以进一步丰富计算机辅助康复环境的游戏模式和任务难度。目前4D电影的发展为计算机辅助康复环境虚拟现实技术的升级提供了支持,最理想化的虚拟现实技术可以使患者完全沉浸在计算机辅助康复环境中,分不出现实环境与虚拟环境。患者在这样的环境中进行训练,没有空间、地域限制,更加接近于真实世界,使训练获得的运动技能可以

直接应用到现实生活中。

7. 结论

目前,最早的相关文献见于 De Groot [33]等人于 2003 年发表一个案例研究中,他们首次将卡伦康复系统应用于穿戴不同矫形器的腓骨再生障碍性贫血患者的步态训练中。该研究的研究团队表明,卡伦系统能够使患者在一个相对安全的模拟环境下进行不同矫形器的穿戴效果评估,从而为医师及假肢技师为患者适配矫形器提供一定参考。经过长达半年的步态周期性评估和步态训练,De Groot 等人发现,卡伦系统不仅能帮助进行矫形器的调整改良,还能够帮助患者适应不同类型的矫形器,提高原本适配度不高的矫形器的适配度,令患者更容易地接受矫形器。此次治疗结果表明:卡伦有潜力评估矫形鞋、矫形器、小腿假肢的治疗效果,卡伦系统的治疗可以作为截肢者康复计划的一部分进行。从这个角度上来看,本研究也产生了相近的结果,四组患者所产生的不同评估结果均与其所适配的不同脚板的优略相符,这就表明了卡伦康复系统能有效地适用于小腿假肢不同脚板的适配性步态评估,并得出相对可靠的结论。

2006 年, J·G·Barton [34]等人将卡伦系统应用于中风患者治疗后期的步态训练中。研究表明,卒中后的患者能够在卡伦康复系统的虚拟环境获得一般治疗室内练或室外训练都难以达到的效果。而在世界的区域性武装冲突和恐怖袭击频繁发生造成严重肢体障碍创伤的士兵和平民比例处于 3.5%~14% [25]。由此看来,无论是平民还是军队中,肢体功能障碍的患病率呈持续攀升,虽然经过治疗患者能够幸存,但是患者要想恢复正常自主生活能力和基本运动能力还需要长时间的后续康复治疗。因此,找到一种能够提高患者的治疗积极性和治疗效果的康复系统或方式成为了近年来康复学界关注和研究的热点。Gottshall KR [16]等在利用计算机辅助康复环境结合传统运动疗法的这项研究中,四例轻度创伤性脑损伤患者在传统的前庭运动疗法的基础上增加计算机辅助康复环境(CAREN)训练,每周 2 次共 6 周。6 周后,所有患者在平衡、步态和视觉交流表现出改善。证实了计算机辅助康复环境(CAREN)在脑损伤相关的缺陷的康复训练中的有效性。

计算机辅助康复环境应用范围广泛并在肢体运动障碍康复领域中具有一定优势,值得进行进一步的实验性研究及在肢体运动障碍康复领域进行推广应用。

基金项目

中国康复医疗机构联盟特别重大项目: 20160001; 四川省医学会: S16061; 四川省科技计划项目: 2018JY0664; 国家重点研发计划项目: 2016YFC0105900; 国家体育总局体育科学技术研究项目: QG201644; 辽宁省自然科学基金项目: 20180550069; 20180550; 广东省重点领域研发计划项目: 2018B030339001; 国家重点研发计划: 2018YFC2001600。

参考文献

- [1] 陈刚, 周萍, 窦蕾, 等. 上海市康复医疗资源与服务开展现状调查[J]. 中国康复理论与实践, 2015, 21(12): 1475-1478.
- [2] 杨发明. 运动训练课程在康复治疗技术专业开设的必要性的思考[J]. 课程教育研究, 2015(23): 243.
- [3] 王花敏. 康复评定在康复治疗中的重要性[J]. 中国医学工程, 2013, 21(9): 175.
- [4] Dores, A.R., Carvalho, I.P., Barbosa, F., et al. (2012) Computer-Assisted Rehabilitation Program—Virtual Reality (CARP-VR): A Program for Cognitive Rehabilitation of Executive Dysfunction. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 90-100. https://doi.org/10.1007/978-3-642-31800-9_10
- [5] De Groot, I.J.M., Even Zohar, O., Haspels, R., et al. (2003) CAREN (Computer Assisted Rehabilitation Environment): A Novel Way to Improve Shoe Efficacy. *Prosthetics and Orthotics International*, 27, 158-162. <https://doi.org/10.1080/03093640308726673>

- [6] Collinsa, J.-D., Markhama, A., Servicea, K., *et al.* (2015) A Systematic Literature Review of the Use and Effectiveness of the Computer Assisted Rehabilitation Environment for Research and Rehabilitation as It Relates to the Wounded Warrior. *Work*, **50**, 121-129. <https://doi.org/10.3233/WOR-141927>
- [7] Weiss, P.L., Keshner, E.A. and Levin, M.F. (2014) *Virtual Reality Technologies for Health and Clinical Applications*. Springer Science + Business Media, New York, 217-226.
- [8] van der Eerden, W.J., Otten, E., May, G., *et al.* (1999) CAREN—Computer Assisted Rehabilitation Environment. *Studies in Health Technology and Informatics*, **62**, 373-378.
- [9] Barton, G.J., Vanrenterghem, J., Lees, A., *et al.* (2006) A Method for Manipulating a Movable Platform's Axes of Rotation: A Novel Use of the CAREN System. *Gait Posture*, **24**, 510-514. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2005.12.011>
- [10] Giggins, O.M., Persson, U.M. and Caulfield, B. (2013) Biofeedback in Rehabilitation. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, **10**, 60-71. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-10-60>
- [11] Gates, D.H., Darter, B.J., Dingwell, J.B., *et al.* (2012) Comparison of Walking Overground and in a Computer Assisted Rehabilitation Environment (CAREN) in Individuals with and without Transtibial Amputation. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, **11**, 81-91. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-9-81>
- [12] El Makssoud, H., Richards, C.L. and Comeau, F. (2009) Dynamic Control of a Moving Platform Using the CAREN System to Optimize Walking in Virtual Reality Environments. In: *Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC 2009), Annual International Conference of the IEEE*, IEEE, Minneapolis, 2384-2387. <https://doi.org/10.1109/EMBS.2009.5334973>
- [13] Gates, D.H., Darter, B.J., Dingwell, J.B., *et al.* (2012) Comparison of Walking Overground and in a Computer Assisted Rehabilitation Environment (CAREN) in Individuals with and without Transtibial Amputation. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, **9**, 81. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-9-81>
- [14] Isaacson, B.M., Swanson, T.M. and Pasquina, P.F. (2013) The Use of a Computer-Assisted Research Environment (CAREN) for Enhancing Wounded Warrior Rehabilitation Regimens. *The Journal of Spinal Cord Medicine*, **4**, 296-299. <https://doi.org/10.1179/2045772313Y.0000000119>
- [15] Kizony, R., Levin, M.F., Hughey, L., *et al.* (2010) Cognitive Load and Dual-Task Performance during Locomotion Poststroke: A Feasibility Study Using a Functional Virtual Environment. *Physical Therapy*, **2**, 252-260. <https://doi.org/10.2522/ptj.20090061>
- [16] Gottshall, K.R., Sessoms, P.H. and Bartlett, J.L. (2012) Vestibular Physical Therapy Intervention: Utilizing a Computer Assisted Rehabilitation Environment in Lieu of Traditional Physical Therapy. In: *Engineering in Medicine and Biology Society, 2012 Annual International Conference of the IEEE*, IEEE, San Diego, 6141-6144. <https://doi.org/10.1109/EMBC.2012.6347395>
- [17] Subramanian, S., Knaut, L.A. and Beaudoin, C. (2007) Virtual Reality Environments for Post-Stroke Arm Rehabilitation. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, **1**, 20-25. <https://doi.org/10.1186/1743-0003-4-20>
- [18] Gelat, T., Pellec, A.L. and Breniere, Y. (2006) Evidence for a Common Process in Gait Initiation and Stepping on to a New Level to Reach Gait Velocity. *Experimental Brain Research*, **170**, 336-344. <https://doi.org/10.1007/s00221-005-0214-8>
- [19] Sessoms, P.H., Gottshall, K.R., Collins, J.D., *et al.* (2015) V Improvements in Gait Speed and Weight Shift of Persons with Traumatic Brain Injury and Vestibular Dysfunction Using a Virtual Reality Computer-Assisted Rehabilitation Environment. *Military Medicine*, **180**, 143-149. <https://doi.org/10.7205/MILMED-D-14-00385>
- [20] Kim, G.J., Baek, S. and Lee, S. (2003) Retargetting and Evaluation for VR Based Motion Training of Free Motions. *The Visual Computer*, **4**, 222-242. <https://doi.org/10.1007/s00371-003-0194-2>
- [21] Sjodahl, C., Jarnlo, G.B., Soderberg, B. and Persson, B.M. (2003) Pelvic Motion in Trans-Femoral Amputees in the Frontal and Transverse Plane before and after Special Gait Re-Education. *Prosthetics and Orthotics International*, **27**, 227-237. <https://doi.org/10.1080/03093640308726686>
- [22] Norvell, D.C., Czerniecki, J.M., Reiber, G.E., *et al.* (2005) The Prevalence of Knee Pain and Symptomatic Knee Osteoarthritis among Veteran Traumatic Amputees and Nonamputees. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, **86**, 487-493. <https://doi.org/10.1016/j.apmr.2004.04.034>
- [23] Kulkarni, J., Gaine, W.J., Buckley, J.G., *et al.* (2005) Chronic Low Back Pain in Traumatic Lower Limb Amputees. *Clinical Rehabilitation*, **19**, 81-86. <https://doi.org/10.1191/0269215505cr819oa>
- [24] Schultheis, M., Rizzo, A.A., Bowerly, T., *et al.* (2002) Virtual Environments for the Assessment of Attention and Memory Processes: The Virtual Classroom and Office. *Proceedings of the International Conference on Disability, Virtual Reality and Associated Technology*, Reading, 17-19.
- [25] van der Meer, R. (2014) Recent Developments in Computer Assisted Rehabilitation Environments. *Military Medical Research*, **1**, 22-29. <https://doi.org/10.1186/2054-9369-1-22>

-
- [26] Beltran, E.J., Dingwell, J.B. and Wilken, J.M. (2015) Margins of Stability in Young Adults with Traumatic Transtibial Amputation Walking in Destabilizing Environments. *Journal of Biomechanics*, **47**, 1138-1143. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2013.12.011>
- [27] Deutsch, J.E., Latonio, J., Burdea, G.C., *et al.* (2001) Post-Stroke Rehabilitation with the Rutgers Ankle System: A Case Study. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, **4**, 416-430. <https://doi.org/10.1162/1054746011470262>
- [28] Houdijk, H., Hak, L., van Dieën, J.H. and van der Wurff, P. (2014) Stepping Asymmetry among Individuals with Unilateral Transtibial Limb Loss Might Be Functional in Terms of Gait Stability. *Physical Therapy*, **94**, 1480-1488. <https://doi.org/10.2522/ptj.20130431>
- [29] Plotnik, M., Azrad, T., Bondi, M., Bahat, Y., Gimmon, Y., Zeilig, G., Inzelberg, R. and Siev-Ner, I. (2015) Self-Selected Gait Speed over Ground versus Self-Paced Treadmill Walking, a Solution for a Paradox. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, **12**, 20. <https://doi.org/10.1186/s12984-015-0002-z>
- [30] Sohlberg, M.M. and Mateer, C.A. (2001) *Cognitive Rehabilitation: An Integrative Neuropsychological Approach*. Guilford Press, New York, 492-495.
- [31] Werner, K.M., Linberg, A. and Wolf, E.J. (2012) Balance Recovery Kinematics after a Lateral Perturbation in Patients with Transfemoral Amputations. Paper Presented at the American Society of Biomechanics.
- [32] Houdijk, H., Pollmann, E., Groenewold, M., *et al.* (2009) The Energy Cost for the Step-to-Step Transition in Amputee Walking. *Gait Posture*, **30**, 35-40. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2009.02.009>
- [33] De Groot, I.J.M., Zohar, O.E., Haspels, R., Van Keeken, H. and Otten, E. (2003) CAREN Computer Assisted Rehabilitation Environment: A Novel Way to Improve Shoe Efficacy. *Prosthetics and Orthotics International*, **27**, 158. <https://doi.org/10.1080/03093640308726673>
- [34] Barton, J.G., Vanrenterghem, J., Lees, A. and Lake, M. (2006) A Method for Manipulating a Movable Platform's Axes of Rotation: A Novel Use of the CAREN System. *Gait and Posture*, **24**, 510-514. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2005.12.011>