

· 综述 ·

机器人辅助步行训练在康复领域中的研究进展

锁冬梅 范金涛 傅帆 刘海杰

目前,机器人辅助技术已在康复领域内得到了广泛应用。临床上普遍认为,对脑卒中、脊髓损伤和脑外伤患者早期介入机器人辅助步行训练(robot-assisted gait training, RAGT)可帮助其重建正常步态,恢复步行能力,但目前多数研究的样本量较小,缺乏空白对照,仍需进行大样本研究。基于上述背景,本文就 RAGT 系统在康复领域中的研究进展做一综述。

RAGT 系统的概念

RAGT 系统是一种可对患者肢体提供外部支持,在步行时使患肢产生正常运动模式的机电设备,目前的 RAGT 系统分为两类,一类是固定于训练平台并与下肢平行的机电外骨骼;另一类是固定于足部的机电外骨骼^[1]。RAGT 系统是由动力平台、减重系统和一个与腿部或足部相连的驱动装置共同组成。上述部分均可通过计算机来对平台步速实行控制调整,以尽可能提供给患者平滑、准确、协调的腿部运动,如在摆动相时可给予患者屈髋屈膝动力。

一、外骨骼助行腿

外骨骼助行腿是 RAGT 系统的核心部分。外骨骼助行腿是双腿对称的助行结构,每条腿有 2~3 个自由度,髋、膝、踝关节各有 1 个自由度,每个关节处均装有角度传感器,用于检测关节的转动角度。

二、减重支撑系统

减重支撑系统主要由支架、减重机构、支撑平衡机构和控制系统组成,可通过滑轮改变电机驱动力及减重力的方向。

三、动力平台

跑步平台是 RAGT 系统的重要组成部分,它的主要作用是为患者提供部分体重支持,约 5~80 kg,与外骨骼助行腿协调随动,以实现患者的原地步态康复训练。另有 2 个安全按钮,患者需要时可自行紧急停止运动^[2]。患者和治疗师可通过 RAGT 系统的电脑屏幕对平台速度、关节速度、关节角度和其它步行训练信息实行动态观察和严密监测^[3]。

RAGT 系统在康复领域中的应用

一、应用于脑卒中患者

研究^[4]表明,对于脑卒中或不完全脊髓损伤等神经源性损伤患者,通过平台或地面步行训练可提高其步行能力。减重平台步态训练需要 3 个或 3 个以上的治疗师来稳定患者的骨盆平衡并指导其下肢运动,根据患者的患病情况,治疗师需要在支撑期稳定患侧膝关节以支撑患者体重,在摆动期辅助患者抬起膝关节。该法的缺点为治疗师易感疲劳,且训练效果与治疗师经验密切相关,评价缺乏客观性^[3]。RAGT 系统的优点为安全性好、可重复运动、不受发病时间限制、可客观地进行功能评价

等^[4]。有研究指出,应用 RAGT 系统联合物理治疗比单一的步态训练更容易获得独立步行能力^[5]。Fisher 等^[1]将病程在 12 个月内的 20 例脑卒中患者分为 2 组,对照组采用牵张及肌力训练联合地面步行训练,治疗组则采用牵张及肌力训练联合 RAGT,时间均为 30 min,治疗后对患者 8 m 步行所需时间、3 min 步行距离及 Tinetti 平衡量表评分进行比较,发现 2 组患者治疗前后各项指标均有不同程度提高,但组间差异无统计学意义。德国一项研究^[6]选取 155 例不能行走的急性脑卒中患者,将其分为 A、B 两组,患者的循环状态均保持稳定,A 组采用每天 20 min 的 RAGT 和 25 min 的 PT 训练,B 组只采用 45 min 的 PT 训练,共 4 周,治疗后 A 组共 53% 的患者重获了独立步行能力,B 组仅为 22%;A 组 Barthel 指数评分 > 75 分的患者共 44 人,B 组仅 21 人。Coenen 等^[7]为了评定 RAGT 与地面步行的肌肉活动情况,采用肌电图对 10 名脑卒中患者及 10 名健康人下肢的 7 块主要肌肉(腓肠肌、胫前肌、半腱肌、股直肌、长收肌、臀大肌、臀中肌)进行分析,入选患者的步行功能分级均为 5 级,即可独立步行和上下楼梯,脑卒中患者先进行 RAGT,休息 10 min 后再进行地面步行训练,健康人作为对照组,按照平台设定的 2.2 km/h 速度行走,收集 7 块主要肌肉的活动信息,采用肌电图测定后发现地面步行组患者的支撑期比值为 0.9,与 RAGT 组患者相比,地面步行组患者患肢中股直肌、半腱肌、臀中肌和胫前肌均有较高频率的肌肉活动,且 RAGT 组除长收肌以外所有肌肉的振幅均小于地面步行组,原因可能是机器设备的支持作用相对较强。

二、应用于脊髓损伤患者

脊髓损伤患者的随意运动通常会受到影响,在神经康复领域通常会采用不同的康复手段,如人工辅助平地训练、人工辅助平台训练等。可在数天或数周内开始离床训练的四肢轻瘫患者不需其它特殊治疗,较严重的脊髓损伤患者则涉及到与机器人有关的特殊运动治疗。RAGT 系统出现于二十世纪九十年代,且其在脊髓损伤康复中的作用已在近 20 年内得到了证实^[8]。Swinnen 等^[4]就 RAGT 对脊髓损伤的治疗作用做了大量研究后指出,RAGT 系统虽然能提供较长时间的运动训练,改善与肢体功能和活动相关的指标,但研究样本量小,方法存在缺陷,训练过程存有异质性。

在肢体功能改善方面,有研究^[9]在采用 Ashworth 法进行评定时指出患者的痉挛情况并没有发生改变,而在采用脊髓损伤的痉挛评价工具评定时则发现治疗 8 周后的伸肌痉挛得分明显下降。还有研究^[4]表明,治疗后下肢力量运动评分明显增高,但单一肌群肌力增高这一情况并无特异性。在个体活动方面,一项预实验^[10]证明了 RAGT 可提高步速与耐力,增加步行距离,提高步行能力,但 Berg 平衡评分差异无统计学意义。还有研究^[4]指出,不同运动训练方式均可提高步速,且各组间没有明显差别,但在步行训练的同时辅以电刺激治疗会产生更好的康复效果,RAGT 对步行能力较差的患者有更明显的改善效果,

而步行能力好的患者训练效率低,对于慢速步行组,RAGT 可提高其 57% 的步速,而对于快速步行组,步速有可能降低 19%。

三、应用于多发性硬化患者

多发性硬化是以炎症反应、神经胶质增生及脱髓鞘病变为特征的慢性神经系统疾病。Schwartz 等^[11]对多发性硬化功能障碍评分在 1.0~6.5 分的 260 例受试者相关进行研究,证实了运动治疗在肌肉力量、功能、运动耐力及运动活动等方面均具有明显效果。多发性硬化的运动治疗包括牵伸训练、加强躯干控制训练、转移训练、步行训练和选择合适的辅助支具。研究^[12-13]表明,通过减重平台训练,多发性硬化患者的肌肉力量、痉挛状态、耐力、平衡和步行速度等方面均得到了不同程度提高。Beer 等^[14]应用 RAGT 对 19 例多发性硬化患者进行治疗后,发现患者的步速、步行距离及伸膝肌力均有所提高。还有研究^[15]表明,高强度训练带来的康复效果可能更为优异,但患者的耐受性可能会变差。RAGT 可在不增加疲劳程度的前提下,尽可能提供给患者高强度的训练,对于慢性多发性硬化患者来说,RAGT 与传统步行训练相比,其在离床活动、决策及功能独立性等方面的优势更加明显。有报道^[11]指出,RAGT 或平台训练刺激脑干脊髓中心后,对多发性硬化患者的平衡恢复有积极作用。Wier 等^[16]将患者分为无机器人辅助的减重步行训练组和有机器人辅助的步行训练组,治疗后,发现 2 组在躯体健康状态、改良疲劳影响量表评分、疼痛影响量表评分、知觉缺失问卷调查及生活满意度 5 个方面的改善效果较为明显,但组间差异无统计学意义。有机器人辅助的步行训练组患者的躯体健康状态得分较高。由此可反映出早期介入 RAGT 的优势。RAGT 可提高患者生活质量,可能的原因为机体释放内啡肽,使疼痛负担减轻,提高了肌力,增强了有氧适应能力。

四、应用于帕金森病患者

帕金森病是一种以步态异常为特征的慢性退化性神经疾病。冰冻步态(freezing of gait, FOG)是帕金森病的一种临床表现。Lo 等^[17]选取 5 名伴 FOG 帕金森病患者,给予 10 次 RAGT,每次训练 30 min,嘱患者在无支持状态下行走 25 步,训练起始时有 40% 的体重支持,平台速度为 1.5 km/h,随着体重支持减少,步行速度增加至 2.2~2.5 km/h,治疗后,受试者自我感觉 FOG 程度减轻,发生次数减少,FOG 问卷显示改善率为 41.7%,步速和步长分别提高 24.1% 和 23.8%,活动性、日常生活能力、情感、社会支持、认知及身体不适感等生活质量指标均有明显改善。Picelli 等^[18]将 34 例帕金森病患者分为 2 组,RAGT 组患者的训练分为 2 个阶段,阶段之间休息 10 min,每个阶段共训练 15 min,两个阶段的支持体重分别为 20% 和 10%,速度分别为 1.3 km/h 和 1.6 km/h,PT 组除下肢关节活动、肌力训练及运动协调性训练外,无其它特殊训练,结果显示 RAGT 组治疗后即时和治疗后 1 个月的指标评分均优于 PT 组,证明 RAGT 可通过改善帕金森病患者的姿势不稳定性,从而提高其平衡能力。

RAGT 的可能机制

一、运动再学习

脑卒中患者常常会出现步速下降、步幅缩短等异常步态,同时伴随日常生活能力的降低^[19]。一项 Meta 分析指出,大量的运动治疗有利于提高日常生活能力,训练时间与步行能力间呈

正相关^[20]。人类在熟悉环境下的步行是相对机械化的过程^[21],所以不断重复的步态训练是提高步行能力的有效方法之一。对于神经元损伤的患者,减重平台步行训练可使患者的步长、步速及耐力得到显著改善^[22]。早期介入 RAGT 的目的是促使尚不具备独立步行条件的患者尽早进行步行训练,刺激其“中枢模式发生器”和大脑皮质功能,激活受累大脑半球的感觉区及运动区活动,介入越早,脑的可塑性越好,运动功能恢复的潜力也越大^[23]。

二、提高步态的对称性

平衡控制是步行的关键因素,当发生运动干扰时,平衡控制可以为稳定躯体而做出各种姿态调整。Coenen 等^[7]认为,RAGT 可以使躯干保持稳定,减少股四头肌、腓绳肌、胫前肌及腓肠肌的肌肉活动,为对称性肌肉活动做准备,更适合脑卒中后运动技巧的恢复。而 Lo 等^[17]认为,RAGT 可能会加重帕金森病患者步态的不对称性,但可从一定程度上提高步态的协调性、连续性和节律性。

三、提高心肺适应能力

脑卒中患者往往存在运动功能减退、感觉缺失或平衡失调等问题,导致心肺适应能力下降。一定强度的循环、呼吸训练可改善患者的感觉运动功能,降低其心血管疾病的发病率^[24]。

影响 RAGT 治疗效果的相关因素

一、虚拟现实环境

虚拟现实环境是近年来神经康复领域的一项创新,其对于训练本身来说是一种干扰,作用尚存在争议。因步态训练机器人的自身功能较强,可按照设定程序来移动患者下肢,缺乏动机和主动参与性^[25]。在 RAGT 中,患者的积极参与对改善神经可塑性和提高运动控制能力很重要^[26]。

二、视觉反馈

人类的运动能力可通过本体感觉和视觉反馈得到加强,即在反馈;外部反馈则由外部环境产生,如治疗师及教练的指令声音等。综合了机器人训练、评估等功能的 RAGT 不仅可提高即时训练成绩,还可改善脑卒中后患者的近期运动学习效果。Kim 等^[21]将 39 例健康人随机分为视觉指导组、运动指导组和视觉联合运动指导组,每组接受 60 min 的 RAGT,结果显示视觉联合运动指导组在运动轨迹上的变化最大,且该组可将训练后步态维持 2 h 左右,在改变步态效果方面优于视觉指导组和运动指导组。虽然受试者均为健康人,且训练效果在 2 h 后消失,但该结果为脑卒中及其它中枢神经系统受损的患者提供了一种步态再训练的可能途径^[26]。

三、生物协调性

步态机器人康复的协同性可能包括躯体水平和心理水平两个层面,在躯体水平上,机器人必须考虑患者的体能情况并对其体能情况的变化作出反应性调整;在心理水平上,机器人需要综合患者的认知能力和精神参与性。积极的精神和参与应答有助于提高训练效果。对于闭链运动来说,临床医生如果可提供一种以患者为中心的康复治疗方式,那么良好的身体素质和心理状态将可能有利于提高机器人的康复疗效潜力。

四、体重支持量及平台速度

Hidler 等^[27]对健康人进行调查分析,发现机器平台的速度在 1.5~2.7 km/h 时,肌肉的活动形式没有任何差别。另一研

究发现^[28],随着步速增加,健康人肌肉的活动强度也按比例增加,且可根据患者的运动恢复情况调整平台速度、支持体重和训练模式,即个体化治疗模式。

结 语

目前,机器人辅助技术已在临床上得到了广泛应用。综合现有资料,本文认为脑卒中、脊髓损伤及脑外伤后早期行 RAGT,可帮助患者早日重建正常步态,恢复步行能力。充分调动患者的主观积极性后,康复效果会更加突出。应用 RAGT 进行步态恢复是可行的,且其是为治疗师减负和进行高强度康复训练的可选方法之一。此外,RAGT 对多发性硬化和帕金森病患者的步态恢复也有一定疗效,但多数研究的样本量较小,缺乏空白对照,需进行大样本研究。在今后的研究工作中,还需增加与生活质量和社会参与有关的评价内容。

参 考 文 献

- [1] Fisher S, Lucas L, Thrasher TA. Robot-assisted gait training for patients with hemiparesis due to stroke. *Top Stroke Rehabil*, 2011, 18: 269-276.
- [2] 方彬, 沈林勇, 李荫湘, 等. 步行康复训练机器人协调控制的研究. *机电工程*, 2010, 27: 106-110.
- [3] Chang WH, Kim MS, Huh JP, et al. Effects of robot-assisted gait training on cardiopulmonary fitness in subacute stroke patients: a randomized controlled study. *Neurorehabil Neural Repair*, 2012, 26: 318-324.
- [4] Swinnen E, Duerinckx S, Baeyens JP, et al. Effectiveness of robot-assisted gait training in persons with spinal cord injury: a systematic review. *J Rehabil Med*, 2010, 42: 520-526.
- [5] Mehrholz J, Pohl M. Electromechanical-assisted gait training after stroke: a systematic review comparing end-effector and exoskeleton devices. *J Rehabil Med*, 2012, 44: 193-199.
- [6] Hesse S, Mehrholz J, Werner C. Robot-assisted upper and lower limb rehabilitation after stroke: walking and arm/hand function. *Dtsch Arztebl Int*, 2008, 105: 330-336.
- [7] Coenen P, van Werven G, van Nunen MP, et al. Robot-assisted walking vs overground walking in stroke patients: an evaluation of muscle activity. *J Rehabil Med*, 2012, 44: 331-337.
- [8] Wirz M, Bastiaenen C, de Bie R, et al. Effectiveness of automated locomotor training in patients with acute incomplete spinal cord injury: a randomized controlled multicenter trial. *BMC Neurol*, 2011, 11: 60.
- [9] Wirz M, Zemon DH, Rupp R, et al. Effectiveness of automated locomotor training in patients with chronic incomplete spinal cord injury: a multicenter trial. *Arch Phys Med Rehabil*, 2005, 86: 672-680.
- [10] Hornby TG, Zemon DH, Campbell D. Robotic-assisted, body-weight-supported treadmill training in individuals following motor incomplete spinal cord injury. *Phys Ther*, 2005, 85: 52-66.
- [11] Schwartz I, Sajin A, Moreh E, et al. Robot-assisted gait training in multiple sclerosis patients: a randomized trial. *Mult Scler*, 2012, 18: 881-890.
- [12] Smedal T, Lygren H, Myhr KM, et al. Balance and gait improved in patients with MS after physiotherapy based on the Bobath concept. *Physiother Res Int*, 2006, 11: 104-116.
- [13] Giesser B, Beres-Jones J, Budovitch A, et al. Locomotor training using body weight support on a treadmill improves mobility in persons with multiple sclerosis: a pilot study. *Mult Scler*, 2007, 13: 224-231.
- [14] Beer S, Aschbacher B, Manoglou D, et al. Robot-assisted gait training in multiple sclerosis: a pilot randomized trial. *Mult Scler*, 2008, 14: 231-236.
- [15] Collett J, Dawes H, Meaney A, et al. Exercise for multiple sclerosis: a single-blind randomized trial comparing three exercise intensities. *Mult Scler*, 2011, 17: 594-603.
- [16] Wier LM, Hatcher MS, Triche EW, et al. Effect of robot-assisted versus conventional body-weight-supported treadmill training on quality of life for people with multiple sclerosis. *J Rehabil Res Dev*, 2011, 48: 483-492.
- [17] Lo AC, Chang VC, Gianfrancesco MA, et al. Reduction of freezing of gait in Parkinson's disease by repetitive robot-assisted treadmill training: a pilot study. *J Neuroeng Rehabil*, 2010, 7: 51.
- [18] Picelli A, Melotti C, Origano F, et al. Does robotic gait training improve balance in Parkinson's disease? A randomized controlled trial. *Parkinsonism Relat Disord*, 2012, 18: 990-993.
- [19] Kim CM, Eng JJ. The relationship of lower-extremity muscle torque to locomotor performance in people with stroke. *Phys Ther*, 2003, 83: 49-57.
- [20] Kwakkel G, van Peppen R, Wagenaar RC, et al. Effects of augmented exercise therapy time after stroke: a meta-analysis. *Stroke*, 2004, 35: 2529-2539.
- [21] Kim SH, Banala SK, Brackbill EA, et al. Robot-assisted modifications of gait in healthy individuals. *Exp Brain Res*, 2010, 202: 809-824.
- [22] Hussain S, Xie SQ, Liu G. Robot assisted treadmill training: mechanisms and training strategies. *Med Eng Phys*, 2011, 33: 527-533.
- [23] Werner C, Von Frankenberg S, Treig T, et al. Treadmill training with partial body weight support and an electromechanical gait trainer for restoration of gait in subacute stroke patients: a randomized crossover study. *Stroke*, 2002, 33: 2895-2901.
- [24] Gordon NF, Gulanick M, Costa F, et al. Physical activity and exercise recommendations for stroke survivors: an American Heart Association scientific statement from the Council on Clinical Cardiology, Subcommittee on Exercise, Cardiac Rehabilitation, and Prevention; the Council on Cardiovascular Nursing; the Council on Nutrition, Physical Activity, and Metabolism; and the Stroke Council. *Circulation*, 2004, 109: 2031-2041.
- [25] Emken JL, Reinkensmeyer DJ. Robot-enhanced motor learning: accelerating internal model formation during locomotion by transient dynamic amplification. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 2005, 13: 33-39.
- [26] Lünenburger L, Colombo G, Riener R. Biofeedback for robotic gait rehabilitation. *J Neuroeng Rehabil*, 2007, 4: 1.
- [27] Hidler JM, Wall AE. Alterations in muscle activation patterns during robotic-assisted walking. *Clin Biomech*, 2005, 20: 184-193.
- [28] Hof AL, Elzinga H, Grimmius W, et al. Speed dependence of averaged EMG profiles in walking. *Gait Posture*, 2002, 16: 78-86.

(修回日期: 2013-03-20)

(本文编辑: 凌 琛)