·康复工程·

一种康复治疗技术临床教学仿真机器人原型机的研制和初步评估*

刘 霖[1] 朱 琳[1] 孙晨曦[1] 曹 磊[1] 刘秀贞[1] 胡 洁[1] 任宇鹏[2] 宋为群[1,3]

摘要

目的：尝试设计制造一种模拟卒中患者典型痉挛的教学仿真机器人原型机，并对其仿真效果进行初步评估。

方法：根据简化公式：$F=B\dot{\theta}(t)+K\theta(t)+A$设计并制造了教学仿真机器人的原型机。公式中，肌肉张力（F）：代表机器人原型机在研究者被动运动原型机移动臂时所产生的阻力；补偿力（A）：为克服原型机系统内部阻力而产生的力；$K\theta(t)$：原型机系统根据牵拉关节角度变化θ的产生的阻力变化。关节角度θ越大，原型机产生阻力越大；$B\dot{\theta}(t)$：原型机系统根据牵拉角速度$\dot{\theta}$模拟阻力变化，角速度$\dot{\theta}$越高，原型机产生阻力越大。教学仿真机器人原型机在每位评估者进行评定时运行随机化程序，随机呈现20次屈肘肌群Ashworth评级1、2、3、4级中的任意一项，以文本的形式在后台进行记录。评估者需要对机器人随机仿真模拟呈现的20次痉挛进行评定和记录，而后和机器人后台记录信息进行一致性分析。

结果：原型机共随机呈现不同Ashworth评级共440次，1—4级分别呈现119、109、98、114次。使用R软件进行一致性分析，Ashworth 1—4级机器人仿真模拟和人工评定的一致率分别为：0.905、0.832、0.736、0.931，总体一致率为0.884。

结论：教学机器人原型机对于卒中后典型痉挛仿真度较高，具备成为康复治疗学临床教学工具的潜能。

关键词 模拟教学；康复教育；模拟患者；机器人辅助技术；痉挛

中图分类号：R496 **文献标识码**：B **文章编号**：1001-1242（2023）-05-0662-03

痉挛是卒中后偏瘫患者的常见症状，痉挛的临床评定也是卒中后康复的重要组成部分。在痉挛评定中，临床常用的量表为Ashworth量表和改良Ashworth量表[1]。这两个量表运用于卒中后痉挛的评定简易、快捷，是康复医师和康复治疗师必备的临床基本功。同时，使用Ashworth量表和改良Ashworth量表评定痉挛，也是康复临床教学中的重点。但是，在痉挛评定康复临床教学中，由于卒中患者痉挛情况易变、被试患者耐受度下降[2]，即使同一名患者也可能出现同一评定时间段而肌肉张力不同的情况，从而对学生的学习造成一定的影响。另外，没有进入临床实习的本科学生，可能很少有机会参与患者的评定或治疗工作。在进行课堂教学后，由于缺乏实践机会，造成“学用脱节”，不能“学以致用”的情况。

针对以上教学中出现的问题，我们借鉴先前的研究经验[12]，以张立群等[13]对痉挛的阐述作为核心原理，结合康复医学、康复治疗学临床医务人员的实践经验，设计并制造了一款模拟肘关节屈肌肌群“卒中后典型痉挛”的教学仿真机器人原型机，用于康复临床模拟教学，并对机器人的模拟效果进行了初步的验证。

1 机器人原型机的构造及原理

教学仿真机器人原型机由首都医科大学宣武医院康复医学科设计，其中包括原型机的硬件构架、软件操作方式和具体参数设定。原型机硬件委托北京力泰克医疗科技有限公司加工制造，原型机软件控制程序代码委托公司工程师编写。

1.1 机器人原型机的构造

教学仿真机器人原型机包括主机部分和控制原型机的电脑。原型机主机部分由肌张力阻力生成组件（ELF_EL动力器件，可二次编程开发）、力矩传感器、肌张力模拟控制器、可安装仿生移动臂的握持把手、教学软件通信端口、系统桌面固定装置构成，见图1（a）。控制原型机的电脑通过教学软件通信端口对原型机主机进行控制，按照卒中后痉挛出现的原理及Ashworth量表的评定方法对控制软件系统进行了设计。按照Ashworth量表的评定要求，如图2所示，操作者以“尽可能快的速度”扳动握持把手，即时速度信息、角度信息输入系统；系统按照预先设定“Ashworth分级相关参数”对上述信息进行翻译、处理后，通过肌张力阻力生成组件产生一个相对于当前关节运动速度和运动角度的阻力，然后经握持

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2023.05.014

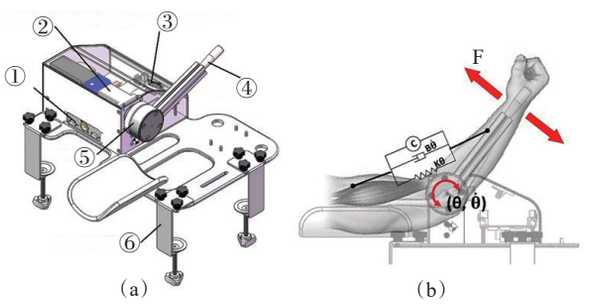
*基金项目：首都医科大学2020年教育教学改革科研课题（2020JYJX110）

1 首都医科大学宣武医院康复医学科，北京市，100053；2 北京力泰克医疗科技有限公司；3 通讯作者

第一作者简介：刘霖，男，硕士，副主任技师；收稿日期：2021-08-22

把手反馈给操作者,令操作者产生Ashworth量表评定时出现的不同“手感”;同时,力矩传感器会将操作者施加于原型机的实时力矩反馈回系统,辅助系统修正及向操作者实时反馈。

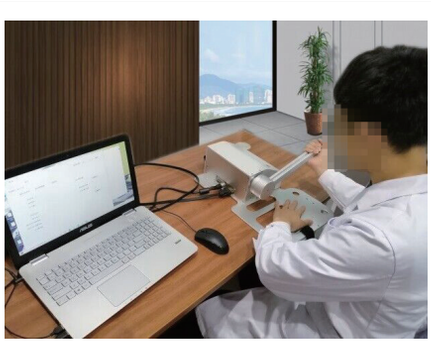
图1 教学仿真机器人原型机构造及工作原理



(a) (b)

(a)教学仿真机器人原型机的结构;(b)教学仿真机器人原型机的模拟原理。F:痉挛阻力;$\dot{\theta}$:关节运动速度;θ:关节运动角度;$B\dot{\theta}$:关节运动速度相关阻力;$K\theta$:关节活动角度相关阻力
①教学软件通讯口;②肌张力阻力生成组件;③肌张力模拟控制器;④握持把手;⑤力矩传感器;⑥系统桌面固定装置

图2 原型机的实际操作



1.2 原型机工作原理

脑卒中后的肌肉痉挛,表现为关节进行一定速度的被动运动以及运动到一定角度时,出现明显的肌肉张力升高,即产生一定的“阻力”(F)。在这个产生“阻力”(F)的过程中,包含了“反射”和“非反射”两种成分。“反射”成分包括动态牵张反射(dynamic stretch reflex)F_{B1}和紧张性牵张反射(tonic stretch reflex)F_{K1};“非反射”成分包括粘滞阻尼(viscous damping)F_{B2}和弹性刚度(elastic stiffness)F_{K2}。其中,F_{B1}与F_{B2}和关节的运动速度$\dot{\theta}$相关;F_{K1}和F_{K2}与关节活动的角度θ相关。所以,使用机器人进行模拟在一定关节运动速度和关节运动角度的情况下出现的肌肉张力变化可表述为以下公式:

$$F = F_{B1} + F_{B2} + F_{K1} + F_{K2} = B_1(\lambda)\dot{\theta}(t) + B_2(\lambda)\dot{\theta}(t) + K_1(\lambda)\theta(t) + K_2(\lambda)\theta(t)$$

其中B_1和B_2系数和关节运动速度相关,K_1和K_2系数和关节运动角度相关。所以,利用机器人实现模拟痉挛过程中,通过调整以上几个系数,可能达到模拟不同程度卒中后痉挛的目的。考虑到本研究是一个初步的尝试,故我们令$B_1 = B_2$,$K_1 = K_2$。将上述模型简化为一个“阻尼器”(产生阻力和关节运动速度$\dot{\theta}$相关)和“弹簧”(产生阻力和关节运动角度θ相关)的组合结构,见图1(b)。即牵拉越快,产生阻力越高;牵拉关节角度越大,产生阻力越高。上述结构用如下简化数学模型进行表述:

$$F = F_{B1} + F_{B2} + F_{K1} + F_{K2} = B\dot{\theta}(t) + K\theta(t)$$

在本实验中,考虑机器人系统在运行当中也会出现内部阻力,故在公式中增加补偿力A(Assistive)。故最终的公式为:

$$F = B\dot{\theta}(t) + K\theta(t) + A$$

以上述公式作为基础,通过对参数B、K、A的调整和选择,本实验初步尝试使用机器人原型机对痉挛肘关节屈肌肌群的Ashworth1、2、3、4级进行模拟。

2 机器人参数设定和效果评估

2.1 机器人参数设定

机器人模拟不同等级痉挛的内部参数,由三位课题组人员共同确定完成。三位课题组成员均为高年资临床康复从业人员。使用和原型机配套的软件系统,对内部参数进行调整。在进行参数确定时,三位研究人员均需要同意该参数可以代表某Ashworth分级时,该参数方可进行确认。

2.2 效果测试和评估

参与教学仿真机器人效果评估人员为首都医科大学宣武医院康复医学科的临床工作人员共22名,其中康复医师5名,康复治疗师17名;所有参与人员均首次使用教学仿真机器人。为保证评估测试的准确性和严谨性,前期参与机器人参数设定的研究人员不进行效果评估测试。

2.3 评估测试内容

教学仿真机器人运行随机化程序,随机模拟呈现屈肘肌群Ashworth评级1级、2级、3级、4级中的任意一项,一共呈现20次。机器人随机呈现的痉挛等级以文本文档的形式进行后台记录,参与评测人员无法知晓。机器人随机呈现痉挛后,参评人员须对呈现的痉挛等级进行评定,并将评定结果按照机器人的呈现顺序进行记录。

3 评定方法

使用R统计软件对所有数据进行统计计算,用Kappa系数和95%置信区间(95%CI)对一致性进行描述。

4 结果

见表1—2。

5 讨论

5.1 机器人辅助技术模拟教学

表1　机器人原型机模拟呈现情况和人工评定情况

机器人模拟Ashworth分级	人工评定Ashworth分级				总数（呈现率）
	1	2	3	4	
1	114	5	0	0	119（27.0%）
2	12	89	8	0	109（24.8%）
3	0	13	78	7	98（22.3%）
4	0	0	20	94	114（25.9%）
合计	126	107	106	101	440

表2　各等级一致率

Ashworth分级	一致率	95%CI
1	0.905	（0.853，0.957）
2	0.832	（0.760，0.904）
3	0.736	（0.651，0.821）
4	0.931	（0.880，0.981）
合计	0.884	（0.857，0.911）

模拟教学（simulation-based education，SBE）是一种创造学习环境，并让学生在受控的仿真学习环境中进行临床技能学习的方法[3]。Greenwood等[4]的研究证明，在康复治疗师临床教学当中，25%的教学内容可以被“模拟教学”取代。在模拟教学中，经常使用的教学方法有“模拟患者”（simulated patients，SP）或“标准化患者”（standardized patients，SP）[5]。这种方法通过培训，使受训者可准确模拟现实环境中患者的表现。

一项有关SP在康复治疗师教学中作用的荟萃分析显示，SP是一种可部分替代传统康复治疗师临床实习的教学方法，在初级康复治疗师的教学中具备很高的价值。虽然SP具备上述优点，但是其在临床教学中的开展却并不广泛。阻碍SP在康复治疗师临床教学开展的原因可能是缺乏教学资源、教学设备和教学经费[6]。

针对上述问题，有学者提出了使用机器人辅助技术模拟患者的病理模式，达到部分取代SP的目的。在既往的研究中，曾使用多种手段提取患者的生物学信号，而后通过分析进行患者病理模式数学建模，再使用机器人进行仿真，从而尝试达到模拟教学的目的[7—10]，但其研究中还是存在一些问题。首先，进行患者病理模式数学建模的生物学信号，仅来自于有限的数名患者，可能不具有广泛的代表性；其次，大部分仿真教学机器人没有经过多位临床专业人员的一致性检验，其“仿真”程度有待检验[7—10]。另外，有的设计强调了教学机器人模拟痉挛像“Ashworth分级”，在其设计中完全按照Ashworth分级对于“关节运动角度和肌肉痉挛的变化描述”进行设计，而忽视卒中后痉挛的本质实际上是“速度倚赖性的肌肉张力异常升高”和“关节不同程度挛缩”的总和[14]。

5.2　教学机器人的设计思路探讨

鉴于上述研究中出现的问题，我们使用了不同的逻辑对教学机器人进行了设计。首先，机器人对于痉挛模拟的核心逻辑对应了卒中患者异常肌肉张力出现的机制。患者卒中后因为缺乏上运动神经元的调控，出现了“速度倚赖性肌肉张力升高”，随着痉挛的加重，关节活动变少，后期还可出现不同程度的关节挛缩。所以，基于本实验的基本公式 $F = B\dot{\theta}(t) + K\theta(t) + A$，对于不同痉挛程度的模拟逻辑就变成了“参数 B、K、A 的不同配比选择”。其次，本实验不同于既往实验使用“有限的患者数据”进行仿真模拟的方式。我们在已有建模的基础上，使用“临床高年资康复医务工作者的临床经验”对不同Ashworth分级对应的参数 B 和参数 K 进行确定，而后“多位临床康复工作者进行一致性检测”的方法对教学仿真机器人进行验证。以上的方法实际符合康复临床教学的流程和特点。在临床教学中，带教教师通常会以语言和实际操作的方式将自己对患者情况的“感受”告知实习学生或低年资治疗师。在这种模式中，带教教师的多年临床经验就成为了决定教学成功与否的重要因素。最后，通过一致性检测发现，仿真教学机器人呈现的痉挛和人工评定的总体一致率为0.884，说明教学机器人原型机对于卒中后典型痉挛仿真度较高，可能具备了成为康复治疗师临床教学工具的潜能，同时也证明了以“临床高年资康复医务工作者的经验”为导向进行教学机器人设计的可行性。

5.3　实验不足和展望

虽然初步实验显示了仿真模拟的准确性和设计思路的可行性，但是实验结果显示机器人的痉挛模拟对于Ashworth 3级并不理想，一致率为0.73，在今后的工作中，需要对等级参数进行重新设定和调整。另外，患者的痉挛会根据被动运动速度的不同而产生变化，而本次实验中仅使用“最快牵伸速度”对仿真教学机器人进行检测，在后期的工作中拟增加使用考虑速度因素的TARDIEU量表[12]对机器人进行更为细致的检测以及功能升级。

6　结论

教学机器人原型机对于卒中后典型痉挛仿真度较高，可能具备了成为康复治疗师临床教学工具的潜能；初步证明了以“临床高年资康复医务工作者的经验”为导向进行教学机器人设计的可行性。

参考文献

[1] Gregson JM，Leathley M，Moore AP，et al. Reliability of the Tone Assessment Scale and the modified Ashworth scale as clinical tools for assessing poststroke spasticity[J]. Arch Phys Med Rehabil，1999，80(9)：1013.

[2] Winstein CJ，Stein J，Arena R，et al. Guidelines for adult stroke rehabilitation and recovery：A guideline for health-

（下转第671页）