

## 自动康复评定方法在脑卒中运动功能评定中的应用

李文豪<sup>1,2,3</sup>, 吴凯<sup>2,3,4,5,6</sup>, 李懿<sup>1,2,3</sup>, 王冲<sup>7</sup>, 陈泽斌<sup>7</sup>, 高晨洋<sup>4</sup>, 邓泽亚<sup>8</sup>, 周静<sup>2,3,5,9</sup>

1. 华南理工大学自动化科学与工程学院, 广东 广州 510006; 2. 广东省精神疾病转化医学工程技术研究中心, 广东 广州 510370; 3. 广东省老年痴呆诊断与康复工程技术研究中心, 广东 广州 510500; 4. 华南理工大学生物医学科学与工程学院, 广东 广州 511442; 5. 华南理工大学国家人体组织功能重建工程技术研究中心, 广东 广州 510006; 6. 广东省第二人民医院人工智能医疗应用研究所, 广东 广州 510317; 7. 佛山科学技术学院机电工程与自动化学院, 广东 佛山 528000; 8. 广州双悠生物科技有限责任公司, 广东 广州 510535; 9. 华南理工大学材料科学与工程学院, 广东 广州 510006

**【摘要】**自动康复评定方法依靠各种传感器对脑卒中患者的运动功能进行自动评分或分级,在评定过程中尽量减少甚至无需医师参与,具有评定流程少、评定时间短、评定效率高的优点。本研究概述了自动康复评定的基本原理和一般流程,根据评定的不同角度将自动康复评定方法分为基于运动捕捉技术、神经生理信号和多信息融合3类,从评定原理、传感器、评价指标等多方面总结近年来的研究进展,并分析了自动康复评定方法目前存在的一些难点。

**【关键词】**脑卒中; 康复评定; 自动评定; 运动功能评定; 综述

**【中图分类号】**R318

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2023)07-0876-08

### Application of automatic rehabilitation evaluation in motor function assessment in stroke patients: a review

LI Wenhao<sup>1,2,3</sup>, WU Kai<sup>2,3,4,5,6</sup>, LI Yi<sup>1,2,3</sup>, WANG Chong<sup>7</sup>, CHEN Zebin<sup>7</sup>, GAO Chenyang<sup>4</sup>, DENG Zeya<sup>8</sup>, ZHOU Jing<sup>2,3,5,9</sup>

1. School of Automation Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. Guangdong Engineering Technology Research Center for Translational Medicine of Mental Disorders, Guangzhou 510370, China; 3. Guangdong Engineering Technology Research Center for Diagnosis and Rehabilitation of Dementia, Guangzhou 510500, China; 4. School of Biomedical Sciences and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 511442, China; 5. National Engineering Research Center for Tissue Restoration and Reconstruction, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China; 6. Institute for Healthcare Artificial Intelligence Application, Guangdong Second Provincial General Hospital, Guangzhou 510317, China; 7. School of Mechatronic Engineering and Automation, Foshan University, Foshan 528000, China; 8. Brain Power System Co., Ltd, Guangzhou 510535, China; 9. School of Material Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China

**Abstract:** The automatic rehabilitation evaluation methods rely on a variety of sensors to automatically score or grade the motor function in stroke patients, which minimizes or even does not require the participation of physicians in the evaluation process, and has the advantages of simple process, quick assessment and high efficiency. Herein the basic principle and the general process of automatic rehabilitation evaluation are reviewed. According to the dimensions of the evaluation, the automatic rehabilitation evaluation methods are divided into 3 categories which are based on motion capture technology, neurophysiological signals, and multi-information combination, respectively. The research advances in recent years are summarized from various aspects such as evaluation principles, sensors, evaluation indicators and others, and the difficulties existing in automatic rehabilitation evaluation are also analyzed.

**Keywords:** stroke; rehabilitation evaluation; automatic evaluation; motor function assessment; review

**【收稿日期】**2023-01-11

**【基金项目】**国家重点研发计划(2019YFC0118800, 2019YFC0118805, 2019YFC0118804, 2019YFC0118802, 2020YFC2004300, 2020YFC2004301, 2021YFC2009400, 2021YFC2009404); 国家自然科学基金(72174082); 广东省科技重点领域研发计划项目(2020B0101130020, 2020B0404010002, 2018B030335001); 广东省自然科学基金杰出青年项目(2021B1515020064); 广东省普通高校重点实验室项目(2020KSYS001); 广州市科技计划(201903010032, 202103000032, 202206010077, 202206060005, 202206080005, 202206010034)

**【作者简介】**李文豪, 研究方向: 康复机器人, E-mail: liwenhao\_scut@163.com

**【通信作者】**周静, 博士, 研究方向: 生物医学信号处理、医学人工智能, E-mail: hellozj@scut.edu.cn

## 前言

脑卒中是在我国位列第一的减寿病因,约有80%的脑卒中患者伴有肢体功能障碍,15%~30%患者严重残疾,导致自主生活能力、生活质量急剧下降<sup>[1-3]</sup>。目前我国脑卒中患病率和发病率呈增长趋势,且患病率、发病率、死亡率和伤残调整寿命年均高于英美日等发达国家同期水平,脑卒中的诊治工作任重道远<sup>[4]</sup>。现有研究表明,对脑卒中患者及时进行康复治疗能有效促进肢体功能恢复,减少继发障碍,降低复发风险,且在病情稳定后越早进行康复治疗,运动功能恢复的可能性越大,效果越好<sup>[5-6]</sup>。

康复评定是脑卒中肢体运动功能障碍诊断和康复治疗的前提和基础<sup>[7]</sup>,传统的康复评定方法主要分为量表法和生物力学测试法两种<sup>[8]</sup>。康复量表法具有高信度和高效度的优点,目前已广泛用于临床康复评定和诊断<sup>[9-11]</sup>,但作为一种人工评定方法,其评定结果很大程度上依靠医师的主观经验,具有较强主观性<sup>[12-13]</sup>。相较量表法,生物力学测试法具有客观、

定量的优点,但更偏向于对肌肉状态而不是整体运动功能进行评价,且进行测试时需要专业设备和一定实验条件,限制了其广泛应用<sup>[14-15]</sup>。自动康复评定则尝试保留量表法的专业性和生物力学测试法的客观性,同时尽量简化评定流程、缩短评定时间、减少评定工作,以此提升评定效率<sup>[16]</sup>。自动康复评定方法相较于传统方法更有优势,一方面在于自动康复评定方法可减轻康复医师繁重的评定工作,让医师将更多时间投入到康复训练方案的制定中<sup>[17]</sup>,另一方面,自动康复评定技术能很好地与远程康复、智慧康复等结合,满足日益增长的社区康复及居家康复的需求<sup>[18]</sup>。

## 1 自动康复评定原理及基本流程

自动康复评定是基于传感器的自动检测及评价技术,替代医师进行康复评定,一般包括4大步骤,即评定方案选择、预实验验证、评定模型训练、评定结果输出<sup>[19]</sup>,其基本流程如图1所示。

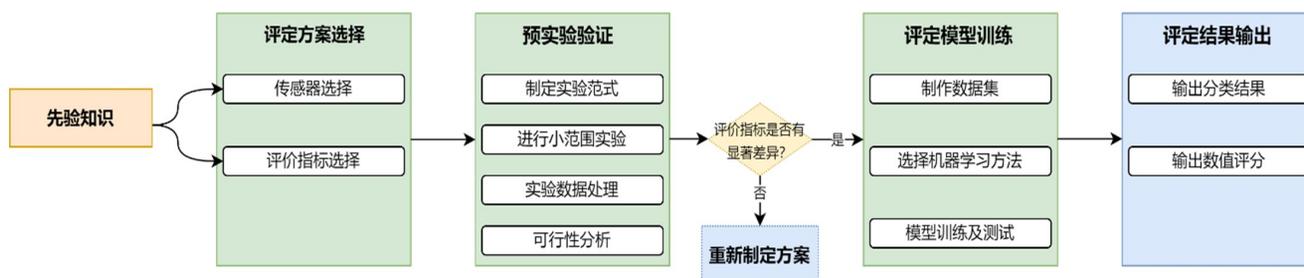


图1 自动康复评定基本流程图

Figure 1 Flowchart of automatic rehabilitation evaluation

评定方案选择是研究者根据先验知识,选择可用于评定脑卒中患者运动功能的生理信息或相关指标的过程,主要包括传感器和评价指标的选择。常用的传感器包括深度摄像头、惯性传感器等运动捕捉传感器以及脑电、肌电等神经生理信息传感器;评价指标即从传感器数据中提取一些能反映受试者运动功能或神经功能的特征,如受试者的运动姿态、运动速度、脑功能激活情况、皮层-肌肉功能连接性等。脑卒中的运动功能康复常被认为是神经重塑的过程,因此康复过程的运动信息和神经信息常用于反映脑卒中患者的康复进程<sup>[20]</sup>。

预实验验证是研究者为了验证所选传感器和评价指标用于自动康复评定的可行性而设计的,主要是增强评定结果的说服力,同时为后续研究工作制定实验范式。在预实验中,研究人员往往会招募不

同等级的运动功能障碍患者,要求被试者佩戴传感器完成特定量表中的规定动作,医师根据量表给出评分结果,通过计算机分析传感器数据得到评价指标,最后将量表结果与评价指标进行相关性分析,若有显著相关性,则表示该评价指标可用于自动康复评定<sup>[21]</sup>。

评定模型训练则反映了评价指标与量表分级或评分的映射关系,它将预实验作为实验范式,采集足够多的受试者数据制作数据集,用于评定模型的训练和优化。目前康复评定常用的评定模型包括机器学习模型和推理模型等。

评定结果输出是自动康复评定的输出结果,根据其表现形式可分为两种:一种是分级形式,该结果与量表方法所得出的评定结果在表现形式上相同,如Brunnstrom分期等级;另一种是数值形式,其与分

级有一定相关性,能更精确地反映康复过程中患者运动功能的恢复情况,使用数值作为评定结果的自动康复评定方法也称定量康复或精确康复<sup>[22]</sup>。

本研究根据评定方案的不同角度,将自动康复评定方法分为3类:基于运动捕捉技术的评定方法、基于神经生理信息的评定方法、多信息融合的评定方法,并从评定原理、传感器、评价指标等方面综述近年来的研究进展。

## 2 基于运动捕捉技术的评定方法

### 2.1 基本原理

基于运动捕捉技术的评定方法与量表方法的评定过程相同,只是基于运动捕捉技术的评定方法使用传感器替代医师进行“观察”,通过运动捕捉传感器采集的数据计算多个评价指标来描述整个运动过程,最后根据推理模型或机器学习模型给出评分<sup>[23-25]</sup>。

### 2.2 常用传感器

目前最常用于运动捕捉康复评定的传感器有两种,即惯性传感器和深度摄像头。惯性传感器通过获取各轴的加速度值来区分人体不同的姿态和动作,一般可制成可穿戴设备<sup>[26]</sup>。脑卒中患者由于自身运动功能损伤,存在佩戴不方便、不舒适等问题。另外惯性传感器只能检测局部运动状态,如果要描述肢体不同部位的运动情况,则需根据具体动作佩戴多个传感器<sup>[27]</sup>。深度摄像头通过视频的方式直接获取患者评定过程的动作和姿态,无需额外辅助定位设备即可提取全身姿态信息,可节省实验时间和成本<sup>[28]</sup>,且该摄像头可与体感游戏结合,拓展性强<sup>[29]</sup>,但使用时需固定安放,用于康复评定时需提前布置实验空间<sup>[30]</sup>。

### 2.3 评价指标

最常用于运动捕捉康复评定的评价指标包括运动学、动力学和统计学指标。运动学指标描述受试者运动的时空状况,常用于康复评定中的运动学指标包括主动运动范围、工作空间包络面相对表面积<sup>[7]</sup>、运动平滑度、运动速度、运动时间等;动力学指标量化力、功、能量消耗和与受试者的运动行为相关的功率,主要包括短时能量、频带能量比、运动强度等;统计学指标描述信号中的一些统计学特性,如过零点、几何均值、信号极值、均方根值等。

### 2.4 应用进展

近年来已出现大量将运动捕捉技术应用于康复评定的研究,如陈少发等<sup>[31]</sup>采用九轴惯性传感器对Fugl-Meyer运动功能评估量表(FMA)上肢部分中同

一运动的3个不同评分等级的动作进行检测与识别,为自动评定的可行性提供依据;Li等<sup>[32]</sup>通过惯性传感器计算躯干平衡性、运动范围、运动速度、运动平滑度等评价指标,发现其与FMA评分有显著相关性。也有研究对比了自动评定与传统评定所需时间, Lee等<sup>[17]</sup>测试了使用Kinect自动评定与医师评定所花费的时间,结果表明自动评定可节省85%的时间。另外,有研究发现脑卒中患者在完成康复评定动作的过程中,可能会出现错误的肢体代偿行为,影响评定结果, Khoramdel等<sup>[33]</sup>提出基于Kinect的深度学习方用于检测这种行为。

目前,虚拟现实(Virtual Reality, VR)游戏越来越多地应用于康复训练以提升康复训练的趣味性和多样性,结合VR游戏进行康复评定,实现训练-评定一体化,也成为研究的一个热点。Lee等<sup>[34]</sup>使用Kinect和肌电信号计算手臂运动速度和肌肉激活度作为评价指标,对使用VR游戏进行康复训练的脑卒中患者的康复过程进行评价,结果表明完成3期训练后的患者,手臂运动速度和肌肉激活度有较大提升。Lee等<sup>[35]</sup>设计了一种VR篮球游戏用于康复训练,并使用Kinect记录训练过程,提取运动偏移量、移动速度、移动效率、最大瞬时速度等运动特征作为评价指标,经过24 d的康复训练后,将受试者康复训练前后的评价指标和FMA、上肢功能测试量表(TEMPA)、Wolf运动功能测试量表(WMFT)的评分进行相关性分析,结果表明,脑卒中患者康复训练前后的评价指标与运动能量量表评分均有显著相关性。

基于运动捕捉技术的评定方法采用惯性传感器和深度摄像头将评定过程的运动表现进行量化,直接从运动层面描述患者的运动功能康复情况,其评定结果与运动能量量表结果有强相关性。相关研究如表1所示,表中的最佳结果包括 $r$ 值和分类准确率accuracy。其中 $r$ 值表示评价指标与量表得分的相关系数,相关系数越高,则代表该评价指标可更好地反映受试者的运动功能,表中记录了研究得到的最高的 $r$ 值及其评价指标;accuracy表示评定模型可得到的最佳分类准确率。

## 3 基于神经生理信息的评定方法

基于运动捕捉技术的评定方法得到的结果具有直接、可信度高的优点,容易被临床接受,但一般认为脑卒中患者出现的运动功能障碍是由脑运动区损伤导致的,康复训练不仅是运动功能恢复的过程,也是神经重塑的过程,因此神经生理信息分析方法也广泛用于脑卒中康复的自动评定。

表1 基于运动捕捉技术的自动康复评定研究

Table 1 Recent studies of automatic motor function assessment based on motion capture technology

参考文献	实验人数	对照量表	传感器	评价指标	评定模型	最佳结果
白敬 <sup>[7]</sup> ,2019	SP=8 NC=5	FMA	Kinect	RSA JA DTWD	自适应网络模糊推理	$r=0.86$ (RSA) accuracy=91.67%(RSA)
Lee 等 <sup>[17]</sup> ,2018	SP=9	FMA	Kinect	ROM	模糊推理	$r=0.940$
Li 等 <sup>[32]</sup> ,2016	SP=35 NC=11	FMA	IMU	TS ROM JA MV SOM	线性模型	$r>0.5$ (线性模型预测结果)
Adams 等 <sup>[36]</sup> ,2015	SP=14	WMFT	Kinect	MT MV MAPR	-	$r=0.95$ (MAPR)
Zhang 等 <sup>[37]</sup> ,2016	SP=21 NC=8	Brunnstrom	Kinect、 IMU	DTWD	K近邻	$r=0.86$ accuracy=82.1%
朱吉鸽等 <sup>[38]</sup> ,2019	SP=10	FMA	IMU	患侧相对健侧 的归一化对数 似然概率值	-	$r=0.758$
Hussain 等 <sup>[39]</sup> ,2020	SP=66	ABILHAND	Kinect	MT MV	-	$r=-0.750$ (MT)

SP:脑卒中患者;NC:健康对照者;RSA:可达工作空间表面积;MV:运动速率;MT:运动时间;ABILHAND:ABILHAND双手测试量表;TS:肢体平衡性;ROM:运动可达范围;SOM:运动平滑度;MAPR:运动阻滞比;JA:关节角度;DTWD:动态时间规整距离

### 3.1 基本原理

根据运动再学习理论,中枢神经系统损伤后恢复运动功能的训练可以视为一种再学习或重新学习的过程<sup>[40]</sup>,基于神经生理信息的评定方法试图找到该恢复过程与各种神经生理信号之间的关系,直接在生理层面上描述神经系统的恢复情况。

### 3.2 常用生理信息

目前常用于自动康复评定的生理信息包括肌电(Electromyography, EMG)、脑电(Electroencephalogram, EEG)及脑功能信息等。由于不同神经生理信号表征的是人体神经系统的不同模态,很难找到一种共通的评价指标和分析方法用于不同的神经生理信号,因此本研究将单独介绍每种神经生理信息的原理、评价指标和相关研究。

**3.2.1 EMG 信号** EMG采集设备分为侵入式和非侵入式两种,由于侵入式设备对体会造成一定损伤,因此康复评定常采用非侵入式设备采集表面肌电信号(Surface Electromyography, sEMG)。sEMG是通过放置在肌肉皮肤上的电极测量肌肉收缩时产生的电势变化得到的,是显示EMG活动发生和静息状况最直接的表现形式,可在一定程度上反映肌肉收缩

的幅度和力量<sup>[41]</sup>。

目前sEMG已应用于康复治疗中,如EMG生物反馈疗法、痉挛的评估等<sup>[42]</sup>。近年来,大量研究发现EMG信号变化与肌肉活动的局部疲劳程度、肌力水平、肌肉激活模式、运动单位兴奋传导速度、多肌群协调性等肌肉活动和中枢控制特征的变化规律有密切相关性<sup>[43]</sup>,这为sEMG应用于康复评定提供了证据支撑。目前已有研究验证了sEMG用于康复评定的可行性,如刘瑶杰<sup>[44]</sup>将sEMG的均方根和肌电积分值作为评估指标,与脑卒中偏瘫患者的Brunnstrom分期等级进行统计学分析,结果表明该评估指标与患者Brunnstrom分期等级显著性相关;Wang等<sup>[45]</sup>则验证了sEMG的均方根、绝对均值、过零点数、波长等信号特征与受试者的Brunnstrom分期等级显著相关,并将其作为评价指标,采用集成学习对不同Brunnstrom分期等级的受试者进行分类,准确率达到94%;Rasool等<sup>[46]</sup>通过对比健患两侧肱二头肌的sEMG差异性区分健康受试和脑卒中患者,提出一种空间分析方法用于肌电图分析的思路;Budhota等<sup>[47]</sup>则使用sEMG的平均积分值用于分析受试者的运动功能,结果表明该指标在健康受试和脑卒中患者间存在显著差异性。

sEMG在反映局部肌肉内在活动、状态、运动意图等方面有较大优势,但sEMG只能测量局部肌肉的运作情况,无法直接反映肢体的整体运动情况,因此在应用于康复评定时,常与运动捕捉传感器结合使用<sup>[48]</sup>。

**3.2.2 EEG信号** 大脑皮层由大量神经元构成,神经元在活动时会产生放电现象,这种放电在区域上的总和组成一种有节律的信号,即EEG信号。EEG信号具有频率低、幅值小、非平稳、非线性、随机性强等特点。相较于EMG信号,EEG信号很难从时域上进行有效分析,一般会采用频域、时频域、非线性方法或统计学方法进行分析<sup>[49]</sup>。

EEG信号从一定程度上表征了脑部的活动,可反映由于中枢神经改变而引起脑部疾病的病理特征,临床上最常用于癫痫和精神疾病的诊治<sup>[50]</sup>。脑损伤导致中枢神经的运动区异常是脑卒中引发运动功能障碍的原因。是否能通过对EEG信号的分析来反映脑损伤或恢复程度是研究者关注的一大问题。近年来,有研究验证了EEG信号应用于脑卒中运动功能康复评定的可行性。Park等<sup>[51]</sup>尝试使用EEG追踪脑卒中患者运动功能的康复情况,在一个月的康复训练过程中记录脑卒中患者在主动运动、被动运动、运动现象等运动任务中的EEG信号和FMA评分,研究发现EEG信号的 $\beta$ 波段的功率变化与FMA评分有显著相关性,为EEG信号用于运动功能评估提供实验支撑;Zhang等<sup>[52]</sup>研究EEG用于上肢运动功能评估的可行性,收集14名脑卒中患者的EEG数据作为数据集训练机器学习模型,然后将接受康复训练和未接受康复训练的被试进行纵向对比,将对应的机器学习模型结果和FMA得出的结果进行分析,研究发现两者有显著相关性。事件相关去同步(Event-Related Desynchronization, ERD)和事件相关同步也常作为特征用于任务态EEG信号分析中。Park等<sup>[53]</sup>发现脑卒中患者的ERD较健康受试更低;Ray等<sup>[54]</sup>在此基础上采集30名脑卒中患者尝试移动患肢时的EEG信号,发现大脑皮层运动区受损的脑卒中患者ERD更低,表明EEG信号的ERD特征有应用于自动康复评定的潜力。除对运动EEG进行分析外,静息态EEG也应用于预测脑卒中患者的运动功能,如Trujillo等<sup>[55]</sup>采集静息态EEG信号,提取 $\delta$ 、 $\alpha$ 波段功率比、大脑对称指数等特征,发现这些特征与受试者的FMA评分有显著相关性。

EEG信号能在一定程度上反映运动功能恢复状况,但由于其空间分辨率低,很难对病灶进行定位和分析,单独使用EEG用于运动功能评价缺少说服力。一般认为,EEG与sEMG存在一定联系,在运动时,

EEG存在诱发sEMG的信号成分,因此EEG一般与sEMG结合,采用皮层-肌肉同步耦合分析方法用于脑卒中引发的运动功能评价。

**3.2.3 脑血氧信号** 对于脑卒中患者,造成其肢体运动障碍的根源是神经环路受损,故康复评估和训练也应基于患者的脑功能状态进行评定<sup>[56]</sup>。大脑在完成某些功能时,如听觉、运动等,会增加其特定区域的活跃程度,表现为特定区域的血氧水平变化,因此脑血氧信号可用于描述大脑的功能活动,从而进行脑功能成像。采用脑血氧信号进行脑功能成像的方法根据成像原理不同可分为功能性磁共振成像(Functional Magnetic Resonance Imagine, fMRI)和功能性近红外光谱法(Functional Near-Infrared Spectroscopy, fNIRS)。

fMRI是基于血氧水平依赖(Blood Oxygenation Level Dependent, BOLD)进行脑功能成像的,即当神经细胞兴奋时,局部脑血流量增加,周围血管床内脱氧血红蛋白量相对下降, $T_2$ 弛豫时间延长,表现为信号增强,通过测量脑区的这种信号变化便可得到当前时间段的脑功能状态<sup>[57]</sup>。fMRI具有高精度、高空间分辨率、可靠性强的优点,但时间分辨率较低,且由于设备昂贵且笨重,限于医院和实验室场景使用<sup>[58]</sup>。fNIRS则是利用血液的主要成分对600~900 nm近红外光的散射性来获得大脑活动时氧合血红蛋白和脱氧血红蛋白的变化情况。当大脑局部脑区功能活动活跃时,局部脑血流量和氧代谢率发生变化,从而导致血氧浓度变化,fNIRS通过检测这种变化可间接获得脑功能活动情况<sup>[59]</sup>。fNIRS的时间分辨率较高,且检测设备较为轻便,一般制成可穿戴设备,可用于居家、社区等场景中,但其空间分辨率较低。

杨浩等<sup>[60]</sup>运用静息态fMRI探究不同程度运动功能障碍脑卒中患者的脑局部一致性(Regional Homogeneity, ReHo)变化,发现其中一些脑区的ReHo与患者运动功能评分存在相关性,提示ReHo可作为评估脑卒中患者运动功能障碍的一个重要脑功能指标;Zhang等<sup>[61]</sup>采用静息态fMRI研究脑功能连接(Functional Connectivity, FC)在运动功能恢复过程中的变化情况,发现运动区(M1)的FC与FMA评分有显著相关性,说明运动区的FC指标有应用于运动功能自动康复评定的潜力;张腾宇等<sup>[56]</sup>选取120例脑卒中患者采集头部左/右前额叶、左/右运动区和左/右枕叶共6个脑区的皮层血氧数据,计算不同脑区的激活度、侧偏性以及功能连接等作为脑功能评估指标,并结合Brunnstrom评定量表、Holden步行能力分级量表、Berg平衡量表和改良的Ashworth量表等进行评分,对不同部位的康复训练处方进行自动预测,

该方法可用于评估、训练一体化的智能康复训练系统,为训练方案的自适应调整提供解决方案。

脑血氧信号描述大脑不同脑区的活动状态,可进一步分析得到不同脑区之间的功能连接特性,直接反映脑卒中患者运动功能恢复过程的脑功能变化,揭示脑卒中导致运动功能障碍的根本原因,其结果提供了一部分解剖学上的解释,更容易在临床上被接受。

## 4 基于多信息融合的康复评定

脑卒中导致的运动功能障碍的康复评定不仅要反映运动功能的恢复情况,更要获得中枢神经的康复情况,因此多信息融合的康复评定较单信息更全面。目前对于多信息融合的康复评定方法主要包括运动-神经信息融合分析方法、皮层-肌肉耦合分析方法。

### 4.1 运动-神经信息融合分析方法

基于运动捕捉技术的评定方法能较好地描述受试者的运动功能恢复情况,但不能评价神经系统的恢复情况,而基于神经生理信号的评定方法能描述受试者神经系统的恢复情况,但很难兼顾运动功能。将两种方法结合,同时采集运动信号和神经信号并进行融合分析,则可从多维度反映脑卒中患者的恢复情况。已有研究表明运动-神经信息融合分析方法较单信息方法更有优势。如朱吉鸽等<sup>[62]</sup>采集55个处于不同Brunnstrom分期的脑卒中患者在康复评估过程中的上肢运动姿态和sEMG数据并提取数据特征,然后将其输入模糊支持向量机进行分类,结果表明运动姿态与EMG结合的分类器对脑卒中患者上肢运动功能实时评估的准确率平均达到83%,较单纯基于运动姿态(75%)或EMG(74%)具有更好的评估效果。

### 4.2 皮层-肌肉耦合分析方法

通常认为脑卒中患者的运动功能障碍是由于大脑皮层的运动区与肌肉的功能连接性降低导致的,而康复训练正是恢复或重建皮层和肌肉之间的功能连接的过程<sup>[63]</sup>。这种功能连接通常用皮层-肌肉相干性来进行量化。EEG信号和EMG信号能直接反映运动神经系统的功能状态,所以皮层肌肉间的耦合连接可通过EMG信号的同步耦合分析来测量。EMG信号同步耦合分析即获取大脑运动意识驱动与肌肉运动响应之间的功能联系特征<sup>[64]</sup>。

Krauth等<sup>[63]</sup>观察脑卒中患者康复过程的皮层肌肉耦合相干性指标,发现随着康复训练的进行,皮层肌肉耦合相干性数值也随之增长,为皮层肌肉耦合相干性用于康复评定提供实验支撑。Xu等<sup>[65]</sup>针对

EMG信号同步耦合存在的时间延迟问题,提出一种具有时滞的皮层肌肉相干性的分析方法,该方法的效果更符合生理学事实。对相干性耦合的问题,高云园等<sup>[66]</sup>选取大脑运动区和躯体感觉区的EEG信号和EMG信号做多频段双向耦合相干性分析,发现无论上行(EMG->EEG)还是下行(EEG->EMG),随着握力的增大,EEG能量、相干幅值和耦合强度均向高频段转移,该研究结果为探索基于皮层肌肉相干性的双向手部运动信息解码和上肢运动功能障碍分析提供依据。

## 5 总结与展望

基于运动捕捉技术的评定方法采用惯性传感器和深度摄像头作为运动捕捉传感器,分析受试者的实际运动状态,能较好描述受试者的运动功能恢复情况,但无法反映受试者神经系统的恢复情况;基于神经生理信号的评定方法使用EMG、EEG、脑血氧信息评价受试者脑功能损伤的恢复程度,间接反映受试者神经系统的恢复情况,但又难以兼顾运动功能的评价。运动-神经信息融合分析方法则将两种方法进行互补,提供一种更全面、精确、有效地评价康复效果的评定方法。皮层-肌肉耦合分析方法依据皮层-肌肉功能连接性,从病理根源层面分析脑卒中患者的康复过程,具有很大的应用潜力。

尽管运动-神经信息融合分析方法利用了运动和神经两个模态信息,但大多数研究都是将两者的特征直接输入到模型中进行预测,未对两者特征进行融合分析。融合运动特征和神经特征用于康复评定是一个新的研究方向。目前,皮层-肌肉耦合分析是基于EEG和EMG进行计算,将更多的神经信息如脑氧、肌氧用于皮层-肌肉耦合分析能否提高分析的准确度也是值得研究的问题。

目前自动评定的实验范式一般遵循运动功能评定量表制定,但运动功能评定量表的动作较多,且评分不够精细,有时并非自动评定方法的实验范式的最佳选择。由于研究者选择的实验范式各不相同,不同实验中的数据不可共用,评定模型只能在小样本上进行训练,很难有较强说服力。因此,设计统一、能反映受试者运动功能、适于自动评定的实验范式也是未来研究的重点。

## 【参考文献】

- [1] GBD 2019 Stroke Collaborators. Global, regional, and national burden of stroke and its risk factors, 1990-2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019[J]. *Lancet Neurol*, 2021, 20(10): 795-820.
- [2] 王陇德.《中国脑卒中防治报告2019》概要[J]. *中国脑血管病杂志*, 2020, 17(5): 272-281.

- Wang LD. Brief report on stroke prevention and treatment in China, 2019[J]. Chinese Journal of Cerebrovascular Diseases, 2020, 17(5): 272-281.
- [3] 王陇德, 吉训明, 康德智, 等.《中国卒中中心报告2020》概要[J]. 中国脑血管病杂志, 2021, 18(11): 737-743.
- Wang LD, Ji XM, Kang DZ, et al. Brief report on stroke prevention and treatment in China, 2020[J]. Chinese Journal of Cerebrovascular Diseases, 2021, 18(11): 737-743.
- [4] 王亚楠, 吴思卿, 刘鸣. 中国脑卒中15年变化趋势和特点[J]. 华西医学, 2021, 36(6): 803-807.
- Wang YN, Wu SM, Liu M. Temporal trends and characteristics of stroke in China in the past 15 years[J]. West China Medical Journal, 2021, 36(6): 803-807.
- [5] 张通. 中国脑卒中康复治疗指南(2011完全版)[J]. 中国康复理论与实践, 2012, 18(4): 301-318.
- Zhang T. China stroke rehabilitation treatment guide (2011 full version) [J]. Chinese Journal of Rehabilitation Theory and Practice, 2012, 18(4): 301-318.
- [6] Liu L, Chen W, Zhou H, et al. Chinese Stroke Association Stroke Council Guideline Writing Committee. Chinese Stroke Association guidelines for clinical management of cerebrovascular disorders: executive summary and 2019 update of clinical management of ischaemic cerebrovascular diseases[J]. Stroke Vasc Neurol, 2020, 5(2): 159-176.
- [7] 白敬. 上肢康复机器人关键技术及康复评定的研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
- Bai J. Research on the key technology of rehabilitation robot and assessment for upper limb[D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
- [8] 姜荣荣, 陈艳, 潘翠环. 脑卒中后上肢和手运动功能康复评定的研究进展[J]. 中国康复理论与实践, 2015, 21(10): 1173-1177.
- Jiang RR, Chen Y, Pan CH. Advance in assessment of upper limb and hand motor function in patients after stroke[J]. Chinese Journal of Rehabilitation Theory and Practice, 2015, 21(10): 1173-1177.
- [9] Kim H, Her J, Ko J, et al. Reliability, concurrent validity, and responsiveness of the Fugl-Meyer assessment (FMA) for hemiplegic patients[J]. J Phys Ther Sci, 2012, 24(9): 893-899.
- [10] Wolf SL, Catlin PA, Ellis M, et al. Assessing Wolf Motor function test as outcome measure for research in patients after stroke[J]. Stroke, 2001, 32(7): 1635-1639.
- [11] Hsieh YW, Wu CY, Lin KC, et al. Responsiveness and validity of three outcome measures of motor function after stroke rehabilitation[J]. Stroke, 2009, 40(4): 1386-1391.
- [12] Vinod HD. A survey of ridge regression and related techniques for improvements over ordinary least squares[J]. Rev Econ Stat, 1978: 121-131.
- [13] Gladstone DJ, Danells CJ, Black SE. The Fugl-Meyer assessment of motor recovery after stroke: a critical review of its measurement properties[J]. Neurorehabil Neural Repair, 2002, 16(3): 232-240.
- [14] 宣磊, 吴建贤, 潘家武. 等速技术在康复医学领域中的研究进展[J]. 中国康复理论与实践, 2019, 25(7): 788-792.
- Xuan L, Wu JX, Pan JW. Advance in isokinetic concept for rehabilitation medicine (review)[J]. Chinese Journal of Rehabilitation Theory and Practice, 2019, 25(7): 788-792.
- [15] 吕俊良, 王志强, 于莉莉, 等. 等速技术和弹力带阻抗运动在脑卒中康复领域应用的研究进展[J]. 实用临床医药杂志, 2020, 24(10): 28-32.
- Lü JL, Wang ZQ, Yu LL, et al. Research progress of isokinetic technique and resistance exercise of elastic band in rehabilitation of cerebral stroke[J]. Journal of Clinical Medicine in Practice, 2020, 24(10): 28-32.
- [16] Seung HL, Ye JH, Hwang JL, et al. Proof-of-concept of a sensor-based evaluation method for better sensitivity of upper-extremity motor function assessment[J]. Sensors, 2021, 21: 17.
- [17] Lee S, Lee YS, Kim J. Automated evaluation of upper-limb motor function impairment using Fugl-Meyer assessment[J]. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng, 2018, 26(1): 125-134.
- [18] 何龙龙, 黄国志. 可穿戴设备在脑卒中患者康复评定中的应用进展[J]. 中国康复医学杂志, 2020, 35(2): 224-227.
- He LL, Huang GZ. Application progress of wearable devices in rehabilitation assessment of stroke patients[J]. Chinese Journal of Rehabilitation Medicine, 2020, 35(2): 224-227.
- [19] Oña Simbaña ED, Sánchez-Herrera Baeza P, Jardón Huete A, et al. Review of automated systems for upper limbs functional assessment in neurorehabilitation[J]. IEEE Access, 2019, 7: 32352-32367.
- [20] Schaechter JD. Motor rehabilitation and brain plasticity after hemiparetic stroke[J]. Prog Neurobiol, 2004, 73(1): 61-72.
- [21] Lee S, Song M, Kim J. Towards clinically relevant automatic assessment of upper-limb motor function impairment[C]. 2016 IEEE-EMBS International Conference on Biomedical and Health Informatics, 2016.
- [22] 吴毅. 脑卒中康复的精准评定[J]. 康复学报, 2016, 26(5): 1-7.
- Wu Y. Precision evaluation of rehabilitation after stroke [J]. Rehabilitation Medicine, 2016, 26(5): 1-7.
- [23] Wang L, Liu J, Lan J. Feature evaluation of upper limb exercise rehabilitation interactive system based on Kinect[J]. IEEE Access, 2019, 7: 165985-165996.
- [24] Gao M, Zhang W, Qian Z, et al. Automatic assessment of the wrist movement function in a haptic virtual environment for home-based stroke rehabilitation[C]. IEEE Canadian Conference on Electrical & Computer Engineering, 2018.
- [25] Otten P, Son SH, Kim J. Automating stroke patient evaluation using sensor data and SVM[C]. 2014 IEEE 7th International Conference on Service-Oriented Computing and Applications, 2014.
- [26] Maceira-Elvira P, Popa T. Wearable technology in stroke rehabilitation [J]. J Neuroeng Rehabil, 2019, 16: 142.
- [27] Yang CC, Hsu YL. A review of accelerometry-based wearable motion detectors for physical activity monitoring[J]. Sensors, 2010, 10: 7772-7788.
- [28] Bonnechère B, Sholukha V. 3D analysis of upper limbs motion during rehabilitation exercises using the Kinect sensor[J]. Sensors, 2018, 18: 2216.
- [29] Almasi S, Shahmoradi L, Ansari NN, et al. Kinect-based virtual rehabilitation for upper extremity motor recovery in chronic stroke [C]. 2020 International Serious Games Symposium, 2020.
- [30] Scano A, Caimmi M, Chiavenna A, et al. Kinect one-based biomechanical assessment of upper-limb performance compared to clinical scales in post-stroke patients [C]. 2015 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2015.
- [31] 陈少发, 马强, 赵君豪, 等. 基于上肢运动评分的动作检测与动作识别的方法研究[J]. 中国康复医学杂志, 2019, 34(6): 707-710.
- Chen SF, Ma Q, Zhao JH, et al. Research on methods of motion detection and recognition based on upper limb motion score [J]. Chinese Journal of Rehabilitation Medicine, 2019, 34(6): 707-710.
- [32] Li J, Pan B, Jin T, et al. A single task assessment system of upper-limb motor function after stroke[J]. Technol Health Care, 2016, 24: 707-715.
- [33] Khoramdel J, Moori A, Moghaddam MM, et al. Compensatory movement detection in upper limb rehabilitation with deep learning methods[C]. 2021 9th RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM), 2021.
- [34] Lee HL, Khairunizam W, Cahyadi BN, et al. Progress monitoring in upper limb stroke rehabilitation by using muscle activation and hand speed[J]. J Phys Conf Ser, 2019, 1529: 042019.
- [35] Lee SH, Cui J, Liu L, et al. An evidence-based intelligent method for upper-limb motor assessment via a VR training system on stroke rehabilitation[J]. IEEE Access, 2021, 9: 65871-65881.
- [36] Adams RJ, Lichter MD, Krepkovich ET, et al. Assessing upper extremity motor function in practice of virtual activities of daily living [J]. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng, 2015, 23(2): 287-296.
- [37] Zhang Z, Fang Q, Gu X. Objective assessment of upper-limb mobility for poststroke rehabilitation[J]. IEEE Trans Biomed Eng, 2016, 63(4): 859-868.
- [38] 朱吉鸽, 李进飞, 徐国政. 运动姿态与肌电融合的脑卒中上肢运动功能评估系统的可行性研究[J]. 中国康复理论与实践, 2019, 25(10): 1172-1176.
- Zhu JG, Li JF, Xu GZ. Feasibility of upper-limb motor function assessment system using movement posture and electromyography[J]. Chinese Journal of Rehabilitation Theory and Practice, 2019, 25(10): 1172-1176.
- [39] Hussain N, Alt Murphy M, Lundgren-Nilsson Å, et al. Relationship between self-reported and objectively measured manual ability varies during the first year post-stroke[J]. Sci Rep, 2020, 5093: 10.
- [40] Chan DY, Chan CC, Au DK. Motor relearning programme for stroke

- patients: a randomized controlled trial[J]. Clin Rehabil, 2006, 20(3): 191-200.
- [41] 徐冬蕾. 基于表面肌电信号的下肢康复状态评估[D]. 长春: 长春大学, 2020.  
Xu DL. Evaluation of lower extremity rehabilitation based on sEMG [D]. Changchun: Changchun University, 2020.
- [42] 李建华. 表面肌电图的康复临床评估应用进展[J]. 实用医院临床杂志, 2014, 11(5): 4-6.  
Li JH. Application progress of surface electromyography in rehabilitation evaluation[J]. Practical Journal of Clinical Medicine, 2014, 11(5): 4-6.
- [43] 罗梦, 周国平, 杨路, 等. 表面肌电图在脑卒中后运动功能障碍康复中的应用[J]. 中国康复, 2017, 32(1): 67-70.  
Luo M, Zhou GP, Yang L, et al. Application of surface electromyography in rehabilitation of motor dysfunction after stroke [J]. Chinese Journal of Rehabilitation, 2017, 32(1): 67-70.
- [44] 刘瑶杰. 基于虚拟现实的上肢康复评估及训练决策方法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.  
Liu YJ. Research on rehabilitation assessment and train decision for upper extremity based on virtual reality [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2020.
- [45] Wang F, Zhang D, Hu S, et al. Brunnstrom stage automatic evaluation for stroke patients by using multi-channel sEMG [C]. 2020 42nd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society, 2020.
- [46] Rasool G, Afsharipour B, Suresh NL, et al. Spatial analysis of muscular activations in stroke survivors [C]. 2015 37th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2015.
- [47] Budhota A, Hussain A, Hughes C, et al. Role of EMG as a complementary tool for assessment of motor impairment [C]. 2016 6th IEEE International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics (BioRob), 2016.
- [48] 苏崇钦. 基于肌电—惯性信息的上肢康复评价系统设计[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2017.  
Su CQ. Based on electromyography-inertial information of upper limb rehabilitation evaluation system design [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2017.
- [49] 王灿. 基于脑电信号的脑卒中分类研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2019.  
Wang C. Study on classification of stroke based on EEG signal [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2019.
- [50] 潘智林, 熊冬生, 李嘉慧, 等. 精神分裂症患者脑电图研究综述[J]. 医疗卫生装备, 2019, 40(10): 99-103.  
Pan ZL, Xiong DS, Li JH, et al. Electroencephalogram study on schizophrenia [J]. Chinese Medical Equipment Journal, 2019, 40(10): 99-103.
- [51] Park W, Kim YH, Kim SP, et al. EEG patterns of subacute stroke patients performing motor tasks correlate with motor functional outcome: preliminary results [C]. 2016 38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 2016: 4674-4677.
- [52] Zhang X, D'Arcy R, Chen L, et al. The feasibility of longitudinal upper extremity motor function assessment using EEG [J]. Sensors, 2020, 20: 5487.
- [53] Park W, Kwon GH, Kim YH, et al. EEG response varies with lesion location in patients with chronic stroke [J]. J Neuroeng Rehabil, 2016, 13(2): 21.
- [54] Ray AM, López-Larraz E, Figueiredo TC, et al. Movement-related brain oscillations vary with lesion location in severely paralyzed chronic stroke patients [C]. 2017 39th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 2017.
- [55] Trujillo P, Mastropietro A, Scano A, et al. Quantitative EEG for predicting upper limb motor recovery in chronic stroke robot-assisted rehabilitation [J]. IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng, 2017, 25(7): 1058-1067.
- [56] 张腾宇, 张静莎, 徐功斌, 等. 融合脑功能和运动评估的脑卒中康复训练处方推荐模型构建[J]. 中国生物医学工程学报, 2021, 40(4): 394-400.  
Zhang TY, Zhang JS, Xu GC, et al. Establishment of a rehabilitation training prescription recommended model for stroke based on brain function and movement assessment [J]. Chinese Journal of Biomedical Engineering, 2021, 40(4): 394-400.
- [57] 王莉. 应用脑功能成像技术研究脑卒中运动想象疗法神经康复机制[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.  
Wang L. Application of functional brain imaging techniques in studying neural mechanism underlying motor imagery in the treatment of stroke patients [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.
- [58] 张豪杰, 李芳, 李晔金子, 等. 神经影像在卒中后脑可塑性机制中的应用进展[J]. 中国康复理论与实践, 2021, 27(1): 48-53.  
Zhang HJ, Li F, Li CJ, et al. Advance in application of neuroimaging in plasticity mechanism after stroke (review) [J]. Chinese Journal of Rehabilitation Theory and Practice, 2021, 27(1): 48-53.
- [59] 孙金燕. 利用脑电及光电联合检测分别研究注意中的定向和执行控制[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.  
Sun JY. Attention orienting and executive control respectively studied with event-related electroencephalography and a multi-modality optical-electrophysiology method [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
- [60] 杨浩, 余秋蓉, 魏斌, 等. 脑卒中运动功能障碍的局部一致性fMRI研究[J]. 中国康复医学杂志, 2020, 35(1): 10-16.  
Yang H, Yu QR, Wei Y, et al. Brain regional homogeneity alterations at resting state in the patients with motor deficits after stroke [J]. Chinese Journal of Rehabilitation Medicine, 2020, 35(1): 10-16.
- [61] Zhang Y, Liu H, Wang L, et al. Relationship between functional connectivity and motor function assessment in stroke patients with hemiplegia: a resting-state functional MRI study [J]. Neuroradiology, 2016, 58(5): 503-511.
- [62] 朱吉鸽, 徐国政, 李进飞. 姿态与肌电融合的脑卒中患者上肢运动功能实时评估方法[J]. 中国康复医学杂志, 2019, 34(12): 1449-1455.  
Zhu JG, Xu GZ, Li JF. Upper-limb motor function real-time assessment method for stroke patients using posture and electromyography [J]. Chinese Journal of Rehabilitation Medicine, 2019, 34(12): 1449-1455.
- [63] Krauth R, Schwertner J, Vogt S, et al. Cortico-muscular coherence is reduced acutely post-stroke and increases bilaterally during motor recovery: a pilot study [J]. Front Neurol, 2019, 10: 126.
- [64] 李素娟, 刘苏, 蓝贺, 等. 脑肌电信号同步耦合分析方法研究进展[J]. 生物医学工程学报, 2019, 36(2): 334-337.  
Li SJ, Liu S, Lan H, et al. Research progress on analysis methods in electroencephalography-electromyography synchronous coupling [J]. Journal of Biomedical Engineering, 2019, 36(2): 334-337.
- [65] Xu Y, Mc Clelland VM, Cvetkovic Z, et al. Delay estimation between EEG and EMG *via* coherence with time lag [C]. 2016 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, 2016.
- [66] 高云园, 任磊磊, 张迎春, 等. 基于相干性的多频段脑肌电信号双向耦合分析[J]. 传感技术学报, 2017, 30(10): 1465-1471.  
Gao YY, Ren LL, Zhang YC, et al. Multiband EEG-EMG bidirectional coupling analysis based on cortico-muscular coherence [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2017, 30(10): 1465-1471.

(编辑:谭斯允)