

基于上肢运动评分的动作检测与动作识别的方法研究*

陈少发¹ 马强¹ 赵君豪¹ 何婕¹ 但果^{1,2,3}

摘要

目的:研究一种对Fugl-Meyer运动功能评分法上肢部分(FMA-UE)中同一运动中不同评分等级的动作进行自动检测与识别的方法。

方法:系统采用了一套基于九轴传感器MPU9250的运动采集模块,可采集患者在运动过程中的加速度、角速度及磁力等信息。传感器佩带于受试者腕部,通过无线Wi-Fi的方式传输至电脑端。电脑端接收来自传感器的数据并进行动作检测,分析受试者是否开始运动。当检测到一个完整的动作结束后,对动作进行识别以区分FMA上肢部分中同一运动的三个不同等级。

结果:对于同一上肢运动的三种不同难度等级,系统平均识别率达98.68%。

结论:该方法在脑卒中患者的FMA上肢部分的功能评估中具有一定的应用价值。

关键词 九轴传感器;动作识别;FMA上肢部分

中图分类号:R496 **文献标识码:**B **文章编号:**1001-1242(2019)-06-0707-04

脑卒中是由于脑血管阻塞或者脑血管出血导致大脑供血不足而引起的一种脑血管疾病,据《中国心血管病报告2016》,我国现有脑卒中患者1300万,且患病率仍处于上升阶段^[1]。脑卒中中具有发病率高、死亡率高、致残率高、复发率高等特点,其中偏瘫是脑卒中严重后遗症之一。脑卒中患者的运动训练可以不断地重塑神经元的连接,以弥补大脑损伤部位的功能缺失^[2]。在患者进行运动康复训练的过程中,定期地进行运动功能评估,可以了解患者的恢复情况并指导下一步的康复训练计划。

学者们采用传感器对患者的动作进行分析与评估,客观地评价其运动功能的恢复状况。北京工业大学的研究人员采用六轴加速度计MPU6050采集运动数据,并对垂直静止、弯曲静止等7个动作进行分类识别。系统使用了基于径向核函数的支持向量机分类器的方法,识别率为90%^[3],但实验所选动作集并非来自康复功能评定量表,其结果在康复训练中的指导性欠缺。来自中国科学院苏州生物医学工程研究所的研究人员,采用两个三轴加速度计与六个弯曲传感器,对Fugl-Meyer中的7个特定动作进行识别,系统拟合度达0.917^[4]。系统通过7个特定动作与Fugl-Meyer评定量表评分的相关性,建立一套对应关系,在一定程度上能反映患者的康复状况,但未区分与识别不同的康复动作。复旦大学的廖

梦佳等^[5]采用三轴加速度计ADXL345与无线Wi-Fi的方式进行上肢动作采集,用于识别肩关节屈曲90°、手触腰椎、肘关节屈曲等3个不同的动作,但系统采用的动作集相互间的特异性大,识别难度较低。

以上研究所选取的动作集特异性大,且未进行FMA中不同难度等级的动作进行识别。FMA根据一个项目的完成情况给予不同评分,一般分为三个等级,不能完成、部分完成与顺利完成,现有研究只针对于顺利完成这一种情况进行识别,没有对其他的两种情况进行分析。对于同一个动作的完成程度进行评价,可反馈患者运动功能康复状态。基于以上分析与其他学者的研究,本文提出了一种对FMA上肢部分中同一运动的三个不同评分等级的动作进行检测与识别的方法。

1 运动采集系统

系统由九轴传感器MPU9250、Wi-Fi传输模块、主机数据采集端三部分组成。九轴传感器由三轴加速度计、三轴陀螺仪以及三轴磁力计组成,相对于三轴加速度传感器与六轴传感器而言,九轴传感器采集了更多的运动信息,可获得更精确与更稳定的传感器数据,同时也避免了缺少磁力计而引起的“漂移现象”。系统采用无线Wi-Fi的传输模式,在不影

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2019.06.016

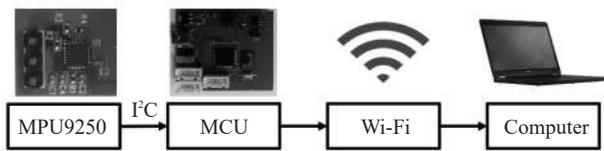
*基金项目:深圳市基础研究(学科布局)项目(JCYJ20160608173106220)

1 深圳大学医学部生物医学工程学院,深圳,518060; 2 深圳市神经科学研究院; 3 通讯作者
作者简介:陈少发,男,硕士; 收稿日期:2018-01-02

响传输效率的前提下,增加了采集模块的便捷性与可穿戴性。上位机通过 Wi-Fi 适配器接收来自传感器的数据,并实时记录试验数据。

在进行上肢康复训练运动的过程中,腕部的运动比肘部、肩部包含了更多的运动信息,在一定程度上可以反映上肢运动的特点,故传感器佩戴于受试者腕部,以采集受试者在康复训练过程中的关节活动。由试验员指导受试者 FMA 上肢部分中各动作及不同评分等级下的要求,受试者按照指定的动作进行康复训练运动。见图 1。

图 1 系统结构图



2 试验设计与数据采集

FMA 是一种针对脑卒中运动功能损失情况进行评定的量表,它旨在评估中风后偏瘫患者的运动、平衡、感觉、关节等功能。目前在临床和研究中用于确定疾病严重程度,描述运动恢复情况,评估治疗效果以及计划后期治疗方案等。FMA 的评分基于患者的实际运动表现,在量表上一般用三个等级对项目能力进行打分,0分代表不能完成该项目,1分代表可以部分完成该项目,2分代表可以完成该项目。FMA 根据患者的运动表现进行评估,一般由治疗师徒手或者指导下完成,不需要借助其他工具,而 Wolf 运动功能测试(Wolf motor function test, WMFT)与组块测试(box and block test, BBT)等评价方法主要考量患者与外界物体的互动表现,根据互动的成功与否进行运动功能评估。由于本研究仅对受试者的上肢运动信息进行采集与分析,不对互动的外界物体的运动进行采集,故选择 FMA 上肢部分作为本研究的运动功能评估量表。通过运动传感器采集的数据结合 FMA 上肢部分对患者的运动情况进行识别,可以客观地分析出患者每个项目的完成情况,一方面可协助治疗师进行运动功能评估,另一方面可为患者提供一种社区式或家庭式的康复训练评价方法。

FMA 上肢部分适用于偏瘫患者的上肢运动功能评定,其中包含 33 项评定项目。试验选取了 FMA 上肢部分中的三个动作,分别为手触腰椎、肩关节屈曲 90°(肘关节 0°时)、前臂旋前或旋后(在肩关节 0°肘关节 90°时),每个动作包含了三个不同的评分等级,试验要求受试者依次完成下表所示的动作。见表 1。

试验过程:试验员准备九轴传感器一个,电脑一台,采集

表 1 实验采集的动作

动作名称	评分等级
手触腰椎	0分:没有明显活动 1分:手必须通过髂前上棘 2分:能顺利进行
肩关节屈曲 90° (肘关节 0°时)	0分:开始时手臂立即外展或肘关节屈曲 1分:肩关节外展及肘关节屈曲发生较晚 2分:能顺利充分进行
前臂旋前或旋后 (在肩关节 0°肘关节 90°时)	0分:在进行该活动时肩关节 0°但肘关节不能保持 90°和完全不能完成该动作 1分:肩关节正位时能在一定范围内主动完成该动作 2分:完全旋前或旋后活动自如

软件一套。试验员告知受试者试验目的与试验过程,让受试者保持坐姿,使用绑带将传感器固定于手腕部位,使受试者手臂自然放置于大腿上,掌心朝下,每完成一个动作后,回到初始位置。传感器采样率为 100Hz,需佩戴于腕关节处^[6],并确保在运动过程中,传感器所在位置的肌肉组织不会产生较大的形变。对同一受试者的同一评分等级的动作进行连续采集,同一动作重复 10 次为一组。采集完成一组动作后作适当休息后进行下一组动作的采集。注意事项:对同一难度等级的动作重复采集 10 次,采集的过程中连续记录数据;试验过程中,受试者需按试验员的指导完成规定的动作,不得有其他的大幅身体动作,如转动身体、站立或者走动等。

本次试验采集到的数据来自 10 例健康受试者,每例受试者采集 9 组不同的动作数据,每个动作采集 10 次,共 900 个动作集。见表 2。

3 动作检测与动作识别

数据处理分为两个部分,分别为动作检测与动作识别。试验过程中试验数据为连续采集,每个动作之间含有一定的静止数据,动作检测算法可以从连续数据中提取出有运动的关键数据段,区分动作数据段与静止数据段。动作识别算法用于识别不同的动作并进行分类。在完成一个 Fugl-Meyer 评分量表中的一个动作时,对同一个动作会有多个评分等级,不同的评分等级下动作的要求也不同,对其进行区分,可评估患者的完成程度,进一步指导患者进行康复训练。数据处理流程见图 2。

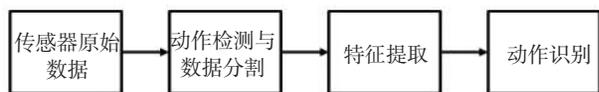
3.1 动作检测与数据分割

由于采集到的运动数据是连续的,在进行动作识别之前,需要将受试者有效的动作数据提取出来,并划分好每一个动作的起止位置。系统求出三轴加速度计的几何均值^[7],并采用短时能量与过零率法来进行动作检测与数据分割。动作检测算法利用双门限—三态转换机制^[8]来确定信号的起

表2 受试者基本参数

姓名	性别	年龄	身高(cm)	体重(kg)
田*	男	24	175	73
赵*	男	23	181	95
吴*	男	24	172	67
谭*	男	24	160	55
马*	男	25	180	75
陈*	男	26	173	60
冯*	女	22	156	47
候*	男	23	175	65
胡*	女	23	159	52
周*	男	24	165	53

图2 数据处理流程图



点与终点,从而分割出原始数据中的有效数据。

几何均值公式如下,其中 a_x, a_y, a_z 分别为加速度计在 x 轴方向、 y 轴方向、 z 轴方向的加速度。

$$\sqrt{(a_x^2 + a_y^2 + a_z^2)/3}$$

短时能量公式如下,其中波形时域信号为 $x(t)$,加窗分帧后第 n 帧信号为 $X_n(m)$ 。

$$E_n = \sum_{m=0}^{N-1} X_n^2(m)$$

过零率公式如下,其中信号为 $X_n(m)$ 。

$$Z_n = \frac{1}{2} \sum_{m=0}^{N-1} |\text{sgn}[X_n(m)] - \text{sgn}[X_n(m-1)]|$$

上式中, $\text{sgn}[]$ 是符号函数,即

$$\text{sgn}[X] = \begin{cases} 1, & (x \geq 0) \\ -1, & (x < 0) \end{cases}$$

此部分的错误主要来源于两个方面:①信号幅度相对较小,系统误判为无效数据;②受试者其他的生理运动或外界噪声导致信号幅度超过阈值,系统误判为有效数据。以下给出三个不同动作的动作检测率,系统平均检出率达到 99.67%。见表3。

3.2 动作识别

系统的特征选自九个轴的原始数据的均值、标准差、均方根特征,共 27 个特征值。均值用于反映原始数据中每个动作的平均幅度信息,标准差用于反映每个不同动作的波动性大小信息,均方根用于反映数据的离散程度。

系统比较了三种不同的分类算法,分别为 K 近邻分类器、随机森林分类器、支持向量机。分类过程中,采用五折交叉验证的方法,将特征数据与动作标签平均分为五类,其中四组用于训练分类器,最后一组用于验证分类器的准确率,

重复五次,求出平均识别率。

系统验证了 FMA 上肢部分中的三个动作,分别为手触腰椎、肩关节屈曲、前臂旋前,每个动作含有 3 种不同的评分难度,识别系统根据九轴原始数据提取出的 27 个特征,将 3 种不同难度等级的动作区识别并区分出来。由表 4 可以看出,采用 K 近邻分类器的效果较另外两种分类器算法的准确率高,平均识别率为 99.01%。

此外,系统对于 FMA 上肢部分中 9 个不同动作采用同样的识别方法,结果显示 K 近邻分类器算法的准确率较高,平均识别率为 98.44%。见表 5。

综合考虑系统的检出率与动作识别率,采用九轴传感器数据对同一部位 3 种不同等级的动作的识别率为 98.68%,对三个部位 9 种不同动作的识别率为 98.11%。

4 结果

目前常见的上肢运动识别主要有以下三种:光学运动捕捉技术、基于表面肌电的动作识别、基于惯性传感器的动作识别^[9]。①光学运动捕捉的精准度高,常用于影视创作,但其设备费用昂贵,维护成本高,需要穿着特殊服装等,不适宜用于运动康复的情景。②基于表面肌电的动作识别技术在记录患者的肌电水平的同时,可对患者的特定动作进行识别,但肌电信号弱,易受干扰,在实际应用场景中的识别效果不佳^[10]。③基于惯性传感器的动作识别技术,可记录患者肢体的运动轨迹,分析关节活动度,识别特定动作等,结合无线 WiFi 技术,可以适宜更多的应用场景。

本文所采用的九轴数据进行动作检测与动作识别算法可以有效地区分受试者在进行同一 FMA 上肢部分的动作中

表3 动作检出率

项目	动作总数	动作检测数	误检个数	动作检出率 (%)
手触腰椎 3 种难度	300	298	2	99.33
肩关节屈曲 3 种难度	300	300	0	100.00
前臂旋前 3 种难度	300	301	1	99.67
总计	900	899	3	99.89

表4 九轴传感器对不同评分等级动作识别率

项目	动作总数	K 近邻 (%)	随机森林 (%)	支持向量机 (%)
手触腰椎 3 种难度	300	98.01	97.54	95.01
肩关节屈曲 3 种难度	300	100.00	99.72	99.36
前臂旋前 3 种难度	300	99.03	97.11	99.00
总计	900	99.01	98.12	97.79

表5 九轴传感器对 9 种不同动作识别率

项目	实际动作总数	K 近邻 (%)	随机森林 (%)	支持向量机 (%)
9 种不同动作	900	98.44	93.77	93.10

不同等级间的差异,客观地为FMA 上肢部分的动作进行评分。在进行早期运动康复训练的过程中,患者可能会不自觉地通过健侧的代偿动作尽可能地使患侧的动作达到项目要求。这种异常的运动模式会给康复训练造成严重影响,因此要避免患者在康复训练过程中过早地出现代偿动作。目前本系统通过单个九轴传感器对受试者的运动进行捕捉与分析,对代偿动作不灵敏。但硬件系统以主从的方式进行开发并预留了多个传感器接口,理论上可以支持人体上肢的肩、肘、腕六个大关节进行运动捕捉,从而识别出患者的代偿动作并在康复训练过程中对其进行提醒。将系统与传统的运动康复训练相结合,在康复训练过程中,患者根据治疗师的指导进行标准运动康复,而该系统可根据患的动作识别出对应的评分等级,从而反映其康复水平。此外,该系统在硬件上采用微型机电系统(micro-electro-mechanical system, MEMS)传感器,实现了便捷性与可穿戴性^[1],未来可拓展至社区医疗系统中,患者在社区中即可得到专业、准确的运动康复评分与运动康复指导。

该系统也存在着一些局限性,另一方面,本系统仅能识别上肢动作,无法完成对躯干动作与下肢动作进行识别。此外,本研究目前采用健康受试模拟康复动作的方式进行,与临床患者的上肢运动模式存在差异,在拓展至脑卒中患者的运动评估时,需要进一步进行临床实验。

参考文献

[1] 陈伟伟,高润霖,刘力生,等.《中国心血管病报告2016》概要[J].中

国循环杂志,2017,32(6):521—530.

- [2] Johansson BB. Brain plasticity and stroke rehabilitation. The Willis lecture[J]. Stroke, 2000, 31(1):223—230.
- [3] 张俊杰,孙光民,李煜,等.基于加速度传感器的上肢运动信息采集与姿态识别[J].北京工业大学学报,2017,43(7):978—986.
- [4] Yu L, Xiong D, Guo L, et al. A remote quantitative Fugl-Meyer assessment framework for stroke patients based on wearable sensor networks[J]. Comput Methods Programs Biomed, 2016, (128):100—110.
- [5] 廖梦佳,秦亚杰,汪源源,等.基于多传感器融合的用于脑卒中患者的可穿戴式上肢动作识别系统[J].中国康复医学杂志,2015, 30(5):443—446.
- [6] Patel S, Hughes R, Hester T, et al. A novel approach to monitor rehabilitation outcomes in stroke survivors using wearable technology[J]. Proceedings of the IEEE, 2010,98 (3): 450—461.
- [7] 洪俊,赵子恺.一种基于加速度信息的上肢动作识别研究方法[J].机床与液压,2014,42(15):50—53.
- [8] 张仁志,崔慧娟.基于短时能量的语音端点检测算法研究[J].电声技术,2005,(7):52—54.
- [9] 张金栋.基于加速度传感器的人体前臂动作识别[J].电子世界, 2016,(11):90.
- [10] Ding H, He Q, Zeng L, et al. Motion intent recognition of individual fingers based on mechanomyogram[J]. Pattern Recognition Letters, 2017, 88(C):41—48.
- [11] 胡成全,王凯,何丽莉,等.基于MEMS六轴传感器的上肢运动识别系统[J].大连理工大学学报,2017,57(1):92—99.