

对于基于三维步态分析技术的神经网络康复训练评估系统的研究

林欣蓉 刘飞龙* 王雪莹 常雨旺 牟悦铭

华北理工大学 河北唐山 063210

摘要: 目的: 通过将三维步态分析技术的运动学捕捉和卷积神经网络算法的数据分类预测结合, 划分患者层级并提供相匹配的治疗方案。方法: 卷积神经网络 (CCN) 通过对输入图像进行卷积池化等建立可变形部件模型 (DPM) 实现对人体部件的识别检测系统。由根滤波器, 部件滤波器和滤波器之间相对位置组成, 再对卷积网络收集的特征图进行融合, 从而提高识别精度。结果: 通过对两种患者的划圈步态, 膝关节屈曲, 足下垂, 胫后肌痉挛, 足内翻, 肩、肘、内收; 下肢的髋关节伸展、内收并内旋、膝关节伸展、踝关节跖屈、内翻的数据采集, 获得的大量恢复数据进行可变形部件模型 (DPM) 分析, 从中识别出个性化治疗方案的关键因素。结论: 三维步态分析技术结合神经网络数据分类预测改善了偏瘫诊断技术存在的测量精度不足, 诊断方式繁琐, 医患比例悬殊较大等问题, 根据患者情况对康复方案进行及时调整, 以期降低二次脑卒中的概率。

关键词: 三维步态分析; 脑卒中康复方案; 偏瘫; 卷积神经网络

引言

脑卒中引起瘫痪主要是由于脑细胞损坏或坏死, 导致反射弧断裂不完整。根据全国脑卒中统计, 脑卒中发病率、病死率和复发率随年龄的增长而增加^[1]。脑卒中偏瘫对患者的日常生活产生了严重的影响, 但其康复过程涉及巨额的医疗开销和持续的资源投入, 为了减轻患者家庭的负担, 一个能够自动分析匹配并实时更新康复方案以及评估二次脑卒中风险的系统是非常有必要的。

为了更准确地量化脑卒中患者的步行能力, 临床工作者引入了三维步态分析系统^[2]。三维步态分析是一种基于计算机视觉、生物力学原理和运动捕捉技术对人体行走过程中的运动学、动力学和肌电图等参数进行量化评估的步态评估方法。通过对步速和步长等作为偏瘫患者的主要结局指标或次要结局指标^[3]的测量与收集, 对患者的步行能力做出初步评判。但如何更好地将这些“过载”数据与脑卒中患者功能障碍联系起来对评估者来说是一项挑战, 且三维步态分析技术因仪器昂贵、评估耗时长、使用空间固定、耗费空间大、产生数据较多且不易使用等同样限制了其在临床中的广泛应用^[2]。

神经网络强大的学习能力以及稳定的特征识别和预测功能, 可以更好地将测量数据和患者的功能障碍联系起来。卷积神经网络虽然检测速度与精度都优于传统机器方法, 但仍存在着低层特征提取准确率不高的问题。

针对上述问题, 本文设计了一个基于三维步态分析技术的神经网络康复训练评估系统, 通过三维步态分析技术和神经网络分析算法的有机结合, 将传统机器学习与深度学习相结合^[4], 根据患者情况制定个性化康复方案, 并保证实时检测更新评定数据及时更新方案。以期降低偏瘫患者二次复发的概率和提高患者的恢复效率。

1. 资料与方法

系统由流程算法模块、步态分析数据收集模块和康复方案设计模块几个部分组成 (如图 1)。步态分析数据收集模块主要是对偏瘫患者的相关关节角度、支撑期和摆动期以及步速、步频等数据进行收集分析, 判断患者偏瘫等级, 并传输至下一模块。流程算法模块主要利用卷积神经网络和可变形部件模型相关技术进行图像识别, 通过融合改进提高识别准确率, 将得出的诊断数据转化为患者的患病程度, 同时将诊断数据传递给康复方案设计模块。康复方案设计模块针

对中风偏瘫患者不同时期制定康复方案,包括多种措施,旨在提高患者相关能力,改善步态。

1.1 一般资料

1.1.1 步态分析数据收集模块

三维步态分析部分主要判断患者的步态特征,如步态周期、步长、步幅、步宽、关节运动角度等参数,进而分析患者的行走功能状态,并收集患者髋、膝、踝关节屈伸角度等数据。

1.1.2 流程算法模块

卷积神经网络(convolutional neural networks, CCN)是深度学习中常用的模型,通过对输入图像进行卷积池化等步骤实现对图像的识别^[6]。可变形部件模型(Deformable Part Model, DPM)是一种基于人体部件的识别检测系统。识别人体动作的模型 DPM 由根滤波器、部件滤波器和滤波器之间的相对位置构成。一般情况下根滤波器的分辨率较低,部件滤波器的分辨率较高^[4]。

1.1.3 康复方案设计模块

康复设计方案包括运动训练、物理治疗、心理干预等多方面的措施,通过康复目标设定、训练方法选择、训练强度调整等方面实施,旨在提高患者的肌肉力量、平衡能力、协调能力等,改善患者的步态。

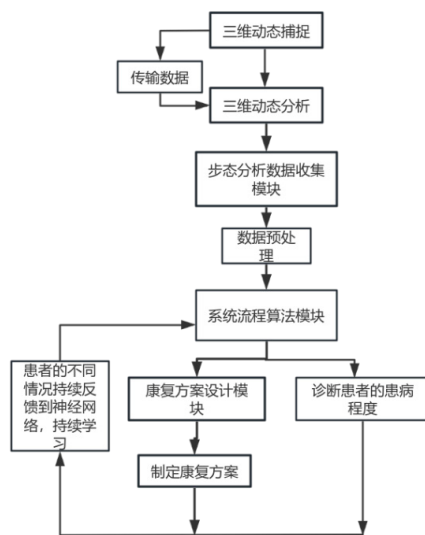


图 1 系统流程

1.2 方法

1.2.1 三维步态动作捕捉与训练系统的搭建

三维步态动作捕捉与训练系统近几年新型的步态分析

及训练系统^[5]以客观、定量、准确对患者步态进行分析及训练而被广泛运用于骨科及神经康复等领域^[6-7]。评估系统可通过分析影响脑卒中患者步行能力的主要步态问题(如偏瘫痉挛、肌力减退、关节活动受限、步行启动困难、跨步相延长等问题),对患者进行准确的诊断和恢复健康指导。

1.2.2. 预处理

在预处理阶段,检查数据是否存在异常值或缺失值,必要时进行数据插补或剔除异常数据点。再将其进行归一化处理, μ 是数据集的平均值, σ 是标准差,是标准化后的数据点。在归一化后,使用曲线拟合工具(Curve Fitting Toolbox)对关节角度变化进行多项式拟合,以平滑数据并建立角度与步态周期之间的关系。将归一化处理后的数据与其他数据集或已有的研究结果进行比较,以验证数据处理的准确性和有效性。

1.2.3 新卷积神经网络的建立

普通卷积神经网络虽然检测速度与精度都优于传统机器方法,但仍存在着特征提取准确率不高的问题。三维步态分析系统生成的数据量大,特征提取工作量多但准确率不高,将优化的 DPM 与可变形卷积网络提取的特征图在可变形池化层之前进行融合,有效提升了在特征提取初期阶段的精确度,克服了初级特征提取过程中的准确性偏低等问题。

将收集数据分为测试集与训练集(如图 A 图 B),DPM 可以分析大量的康复数据,从中识别出个性化治疗方案的关键因素。这种个性化的方法可以提高治疗效果,使每位患者都能够获得最合适的康复计划。康复过程中,DPM 可以持续监控患者的进展和状态,及时调整康复计划,以确保康复训练的有效性和持续性。

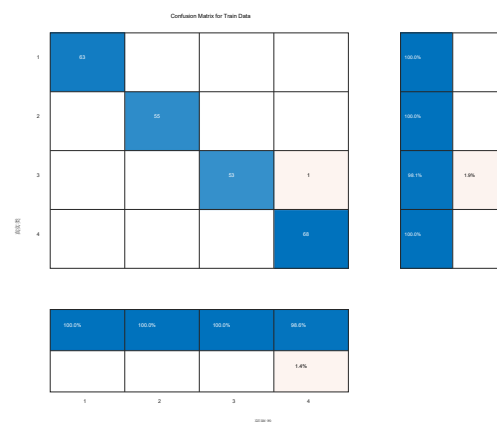


图 A: 测试集预测结果

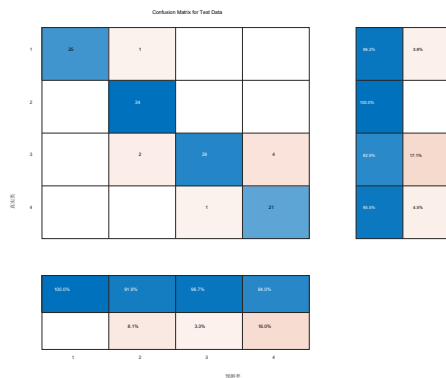


图 B: 训练集预测结果

2. 结果（相关患者参数由公开研究数据所获）

表 1 患者治疗前后距离相关参数比较 ($\bar{x} \pm s$)

项目	治疗前	治疗后	t	p
步速 (cm/s)	44.5 ± 12.5	66.0 ± 20.0	5.47	<0.01
步宽 (cm)	21.8 ± 4.8	20.9 ± 5.0	0.78	>0.05
患侧步长 (cm)	33.8 ± 10.5	46.8 ± 10.0	5.38	<0.01
患侧跨步长 (cm)	66.0 ± 19.5	86.7 ± 20.4	4.40	<0.01

注：定量数据以 ($\bar{x} \pm s$) 表示，采用 t 检验，以 $p \leq 0.05$ 为差距具有统计学意义。

2. 脑卒中偏瘫患者具体病例分析

病例概述：患者因脑卒中导致偏瘫，经 Brunnstrom 评级评估，其偏瘫肢体功能处于Ⅲ级阶段，表现为随意出现的共同运动，上肢可随意发起协同运动，手可抓握但不能伸展；下肢在坐和站立位有髋、膝、踝的协同性屈曲。

具体康复措施：(1) 体位摆放及床上训练：利用良姿位摆放技术，包括仰卧位、侧卧位等，以及进行翻身训练、从床坐起训练等，以增强患者的床上活动能力。(2) 坐位训练：进行坐位平衡训练，诱发平衡反应，训练躯干旋转、头颈运动、肩关节活动等，以提高患者的坐位稳定性和协调性。(3) 引导分离运动：在患者能够完成共同运动的基础上，逐渐引导其进行分离运动，如肘关节屈/伸分离运动、手指屈曲/伸展等。(4) 行走训练：在患者具备一定的下肢运动能力后，进行步行训练。(5) 日常生活练习：利用共同运动完成日常生活活动，如旋转门把手、穿衣袖、抓握小东西等。

使用的具体康复设备：(1) 治疗床：用于体位摆放及床上训练。(2) 平行杠：用于坐位训练和行走训练中的辅助支撑。(3) 助行器：用于行走训练中的辅助行走。(4) 手部功能训练器：用于引导分离运动中的手部训练。(5) 日常生活辅助器具：如粗柄勺子、戴套圈的筷子等，用于日常生活练习。

3. 讨论

本文利用三维步态分析检测技术结合神经网络机器学习研究改善脑卒中患者常见的偏瘫步态。通过该方法实现了对脑卒中患者全方位的步态分析和精准的算法运算，分析患者的诊断数据以快速地、准确地判断出患者的疾病程度，有效地提高低层特征提取准确率，使患者的诊断结果和制定的康复计划更加准确，同时使脑卒中患者进行诊断过程简便，减轻患者的不适，有效提升了脑卒中患者诊断效率。

参考文献：

[1] 贺飞. 张辽. 蒋志明. 丁彬. 刘婷婷. 汪富. 三维步态分析系统在评价虚拟现实技术干预脑卒中后偏瘫步态效果中的研究 [J]. 辽宁中医杂志 2024,(02),131-134+225. doi:10.13192/j.issn.1000-1719.2024.02.032.

[2] 胡填. 古剑雄. 三维步态分析技术在脑卒中后偏瘫步态中的应用进展 [J]. 实用心脑血管病杂志, 2021, 29(11): 124-128.

[3] 董晓琼. 吴月峰. 范虹. 张芳. 朱童. (2019). 步行支持带联合常规康复治疗改善脑卒中患者步态的疗效观察. (eds.) 2019 年浙江省医学会物理医学与康复学分会年会暨第二届西湖国际康复大会论文汇编 (pp.24-25). 绍兴市人民医院康复医学科.

[4] 王雪娇. 智敏. 基于可变形卷积神经网络的人体动作识别 [J]. 计算机工程与科学, 2021, 43(01): 105-111. 王雪娇, 智敏. 基于可变形卷积神经网络的人体动作识别 [J]. 计算机工程与科学, 2021, 43(01): 105-111.

[5] 刘会平. 何俊. 李佳. 三维步态分析比较健康大学生与下肢运动损伤大学生步态特征的差异 [J]. 基层医学论坛, 2023, 27(07): 1-4.

[6] 陈浩鹏. 谢辉. 傅维民. 王本杰. 赵德伟. 体质量指数对全髋关节置换后早期髋关节功能恢复影响的三维步态分析 [J]. 中国组织工程研究, 2020, (18), 2842-2847.

[7] 任小南. 脑卒中偏瘫患者康复治疗前后的三维步态分析 [J]. 白求恩医学杂志, 2018, (06), 570-571.

基金项目：

华北理工大学大学生创新创业训练计划“基于三维步态分析技术的神经网络康复训练评估系统”（编号：S202410081010）。