

基于手功能评估系统的“腕背伸”动作定量评估*

陆雅婷¹ 陆小锋¹ 王聪¹ 赵泽伟¹ 贾杰² 陈树耿²

(1. 上海大学通信与信息工程学院 上海 200444; 2. 复旦大学附属华山医院 上海 200444)

摘要: 目前临床上采用基于传统量表评估和手工测量作为针对脑卒中偏瘫患者手功能康复的主要评估方法, 这种方法存在误差大、依赖人力效率低下、评估结果不连续等缺陷, 难以满足病人康复治疗需求。提出了一种基于多维视觉手功能康复评估系统的手功能代表性康复动作“腕背伸”的定量评估方法, 采用最新的光学动作捕捉设备与计算机视觉技术对“腕背伸”动作参数进行捕捉, 通过多维度精准视觉采集与智能分析, 得到患者患病手与健康手运动数据并进行处理分析, 给出康复评估结果。详细介绍了该系统的软硬件结构、数据采集过程、评估结果分析等, 并将评估结果与传统量表结果、手工测量结果进行对比分析, 实验结果满足临床所需精度要求且可以更加精准、灵活的反映病人康复情况, 对传统评估方式进行补充, 弥补了评估不连续性、非精准性的缺点。

关键词: 手功能康复; 定量评估; 腕背伸

中图分类号: TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4030

Quantitative evaluation method of wrist extension based on hand function evaluation system

Lu Yating¹ Ling Xiaofeng¹ Wang Cong¹ Zhao Zewei¹ Jia Jie² Chen Shugeng²

(1. School of Communication and Information Engineering,

Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. Huashan Hospital Affiliated to Fudan University, Shanghai 200444, China)

Abstract: At present, assessment based on traditional scale and manual measure are the main methods for evaluation of hand function for stroke patient. However, due to the disadvantages of large errors, poor efficiency and discontinuous evaluation results, it's difficult for these methods to meet rehabilitation needs. This paper presents a quantitative evaluation method of wrist extension based on multidimensional vision evaluation system, the system captures action parameter using optical motion capture device and computer vision technology, it can get the motion data of patient's both hands through multidimensional vision acquisition and intelligent analysis and presents the analysis result. This paper introduces hardware and software structure of the system, data acquisition process and analysis of evaluation result in detail and the result is compared with the result of traditional scale and manual measurement. In this paper, we use the 'wrist back' as an example for experiment, the result can meet the requirements of clinical accuracy and can be more accurate and flexible. This method also can make up for the shortcomings of discontinuity and non-precision.

Keywords: hand function rehabilitation; quantitative assessment; wrist extension

0 引言

流行病学调查结果显示:我国每年脑卒中发病率为217/10万,患者数逾150万,致残率高达86.5%^[1]。在病人的长期康复训练过程中,上肢功能的恢复对于患者后期生活质量的改善具有重要的作用。其中,手功能在上肢整体功能中占有重要地位^[2]。随着康复训练及治疗的介入,部分患者在6个月以内手功能方面会有不同程度的恢复^[3]。康复评估是康复治疗的前提,合适且准确的评估可

以反映出患者当前运动功能情况和康复治疗的效果。目前临床上康复评估方法主要分为在康复训练方案的制定和实施中,目前主要依据上肢功能类量表目前主要包括:上肢运动功能Fugl-Meyer评定法(Fugl-Meyer assessment upper extremity, FMA-UE),上肢动作研究量表(action research arm test, ARAT), Wolf运动功能测量量表(Wolf motor function test, WMFT)等量表进行定性的康复程度评估,其中FMA是以Brunnstrom运动恢复分期(Brunnstrom's

收稿日期:2017-03

* 基金项目:上海市科学技术委员会科研计划项目(16441905300)资助

motor recovery stage, BMRS)为基础,进一步细化、量化而得,将与运动功能恢复密切相关的四肢的运动、感觉、平衡、关节活动度和疼痛综合起来的一种定量评价方法,反应的是上肢动作损伤水平^[4]。FMA-UE 是评价脑卒中后上肢运动功能疗效效果的最常用量表,常作为检验其他量表效度的金标准^[5-6]。Kim 等人^[7]研究 FMA-UE 有较高的信度和效度,能够可靠、有效地评估偏瘫患者的上肢运动功能;陈瑞金^[8]等研究认为,中文版的 FMA-UE 有优良的效度,他们还得出了 FMA-UE 最小临床意义变化值(minimal clinically important difference, MCID)为 4.6 分,这将可判定脑卒中患者治疗后实际评分的变化,即评分的提高是否具有临床意义,避免误差的出现。Selvaraj 等人^[9]应用 FMA-UE 评价首次出血或缺血性脑卒中患者,发现它能很好的反映手臂及手部运动功能改善程度;Mazzoleni 等人^[10]认为 FMA-UE 能很好的评估恢复期脑卒中患者肩部及肘部的运动功能;Orihuela 等人^[11]发现 FMA-UE 可敏感的反映恢复期上肢轻偏瘫患者的肩、肘、前臂、手、腕的运动功能及协调性的提高程度;Sin 等人^[12]发现恢复期脑卒中患者肩关节活动度的改善情况也可通过 FMA-UE 进行评价。通过以上研究可以看出, FMA-UE 能很好的评估肩、肘、前臂、手、腕的运动功能及协调性,评价内容较为详细,但是对手指精细活动的评估有所欠缺。目前临床采用的方案主要分为基于 FMA-UE 量表的定性评估和医生采用角度尺手工测量的方法。但这两种方案均有较大的主观性,严重依赖不同康复医师的经验。本文所提出的多维视觉手功能康复评估系统利用先进的光学动作检测设备,精准捕捉患者手部运动数据,并以患者的健康手参数作为参照,得出患病手当前的恢复程度百分比。该系统解决了传统方案过于依赖人力效率低下的问题,弥补了评估结果不连续、主观性较大的缺点。

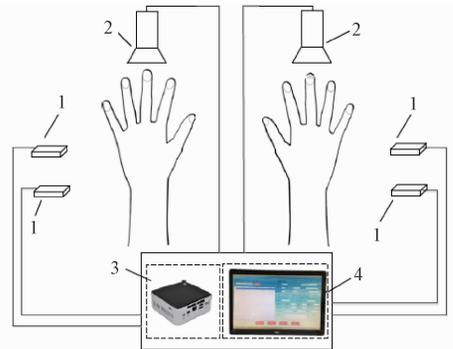
1 多维视觉手功能康复系统设计

1.1 系统硬件平台

1.1.1 穿戴式传感器方案与非接触式视觉方案

目前,为了得到患者手指、手掌、手腕等部位的定量运动数据,主要采取的方案分为:穿戴式传感器方案与非接触式视觉方案。基于各类穿戴式模块的传感器方案主要借助加速度传感器、电子陀螺仪等电子测量芯片,得到肢体的速度、位移、加速度等运动参数,进一步借助各类算法模拟出肢体的运动过程和空间位置^[13-14]。具有计算相对简单、得到运动信息精度较高等优点,然而目前大部分穿戴式传感器方案仍然处于实验室阶段,将传感器与服装“机械”地结合起来,限制了患者运动的自由性,尤其是针对手部精细的动作评估,容易产生较大的误差。非接触式视觉方案是基于摄像机所采集的视频及图像数据,根据其特征进行分析^[15-17],可以做到患者的待测部位没有任何差异性需求,只需要摆放在可识别的指定位置即可,但是由于目前计算机

视觉和模式识别算法的发展还远没有达到可识别任意人手动作的程度,即使一些复杂的算法在经过多重深度学习,对手动动作有较高的识别率,但是由于脑卒中患者患手在运动方面功能较弱,针对特定动作的运动过程不具有统一的规范性,同时实际测试中还存在着手部关节遮挡、重叠、动作多义性等无法解决的难题。本文针对目前手功能康复评估所常用的 Fugl-Meyer 评定法对应的一套脑卒中后手功能康复评估动作,以腕背伸为代表,借助最新的光学智能动作捕捉设备与计算机视觉技术,通过多维精准视觉采集与智能分析,提出了基于多维视觉智能分析系统(如图 1 所示)的手功能定量评估方法。该方案借鉴了传感器方案和单纯视觉方案的优缺点,采用光学动作捕捉与视觉动作监测的方案。利用光学智能动作捕捉设备,实时获取到手指、手掌和手腕各关节点的三维空间数据与多项运动矢量信息,分析出手部关节的多种运动参量,作为手功能康复定量评估标准的系统评估参数。同时,利用摄像头采集到的视频信号,进行计算机视觉分析,基于手位置的自动检测和动态跟踪,动态监测患者在评估过程中手部放置位置。触控屏用于对系统进行操控并实时显示视频流数据。



1—光学智能动作捕捉设备;2—光学摄像头;3—主机;4—触控屏

图 1 多维视觉智能分析系统

1.1.2 硬件框架

系统平台包括(如图 2 所示):光学动作设备 1 共 4 台,其中每台光学动作捕捉设备包含 1 个双目灰阶摄像头和 3 个红外摄像头,依靠设备的内部集成算法,可以获取到患者待测手的骨骼关节点的空间位置;视频捕捉设备 2 共 2 台,通过双路数字视频信号实时采集与计算机分析技术,动态监测患者在健康手建库和患病手评估过程中手部放置于实时动作的空间位置,保证患者的健康手和患病手在正确的运动范围内,保证后续动作参数提取的正确性和稳定性;核心算法设计 3 以及交互式触摸屏 4 和交互平台 5。

其中光学动作捕捉设备坐标系示意图如图 3 所示。

1.2 系统软件设计

本系统借助最新的光学智能动作捕捉设备与计算机视觉技术,通过多维度精准视觉采集与智能分析,在手功能康复领域首次提出了基于多维视觉智能分析的手功能定量评

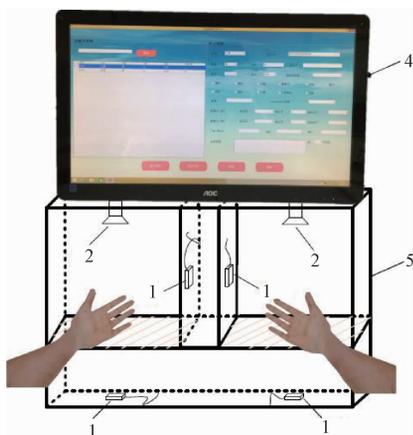


图2 定量评估系统硬件平台

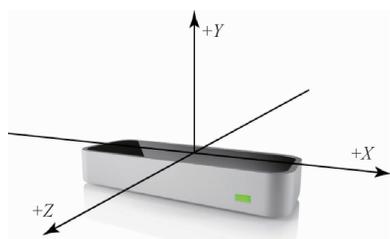


图3 光学动作捕捉设备及其坐标系示意图

估标准。在多维视觉手功能康复定量评估系统中借鉴了传感器方案与单纯视觉方案的优缺点,采用光学动作捕捉与视觉动作监测的方案。利用采集的视频信号,进行计算机视觉分析,基于手位置的自动检测与动态跟踪,结合智能语

音提示模块,动态监测患者在手建模与患手评估过程中手部放置与实时动作的空间位置。利用光学智能动作捕捉设备,实时获取手指、手掌、手腕各个关节的三维空间数据与多项运动矢量信息,结合最新开发的针对不同手功能评估动作的特定智能分析算法,进行特征数据降维与特征点模式匹配,进而分析出手部关节的多种运动参量,作为手功能康复定量评估标准的系统评估参数。

综上所述,系统软件平台设计需满足以下设计要求:

1)对视频动作进行定量描述,并完成图像评估指标的确定。根据定量描述及指标内容,用图像分析的方法完成自动评估;

2)建立病人数据库,对病人基本信息、康复情况、评估结果等信息进行记录、分析、给出报告;

3)医生操作方便,具有图像演示及图像辅助功能。

1.2.1 手功能评估界面设计

手功能评估界面主要分为3大类,第1类为开机登录,主要有分类登录、用途选择(包括健手建库、患手评估、信息管理和数据分析)等功能;第2类为康复评估相关设计,主要包括:健手建模、患手评估、患者信息管理和评估信息分析等功能;第3类为开发者系统维护相关界面,主要包括:开发及系统维护过程中,对程序的增减、修改、数据库管理以及用户需要增加的功能扩展。

1.2.2 数据库设计

多维视觉手功能康复定量评估系统数据库部分包括基本信息管理、评估记录管理、评估数据管理3大主要功能模块,每个主要功能模块又分为若干子模块,系统主要流程及模块调用关系如图4所示。

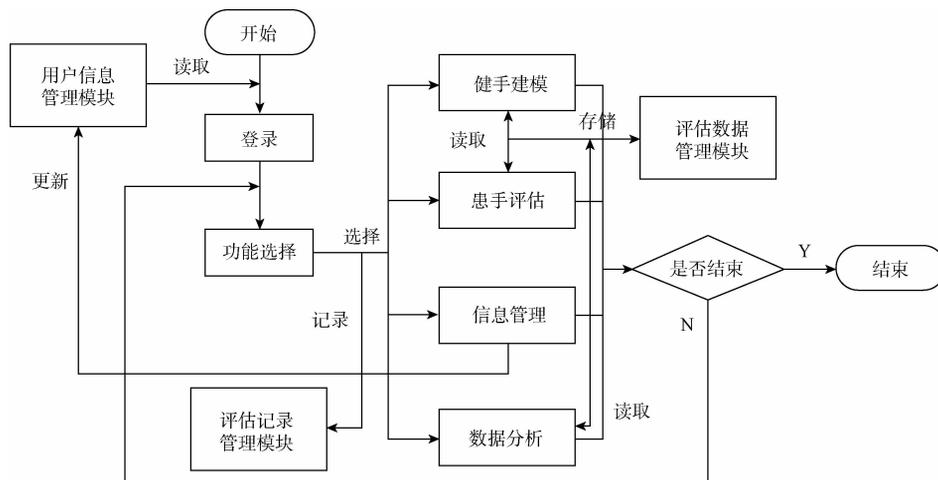


图4 系统主流程示意图

由上图可知,登陆成功后选择信息管理模块对当前测试病人基本信息进行查询、修改或录入。针对初次或者二次发病的病人,首先选择需要测试的手功能动作进行健手建模,获得健康手相关评估参数后进行患手评估,获取患

病手评估参数并读取健手数据进行对比分析,分析结果存入数据管理模块。如动作全部测试完毕,则结束本次评估。

2 “腕背伸”动作量表描述

腕关节,又称桡腕关节,是典型的椭圆关节。腕关节由手的舟骨、月骨和三角骨的近侧关节面作为关节头,桡骨的腕关节面和尺骨头下方的关节盘作为关节窝而构成。桡腕关节可作屈、伸、展、收及环转运动,其中伸的幅度比屈的小,这是由于桡腕掌侧韧带较为坚韧,使后伸的运动受到限制。仰向手背方向运动称为伸腕,也叫掌的背伸。参与完成动作的主要肌群为前臂伸肌群,具体为桡侧腕长伸肌、桡侧腕短伸肌、尺侧腕伸肌、指伸肌、示指伸肌。

当对病人腕背伸功能位进行康复评估时,待测手掌自然平放,掌心向下,以腕关节为轴,向上抬伸至极值。腕背伸的正常活动范围(腕背伸角)为 $0^{\circ} \sim 180^{\circ}$,腕背伸角在临床中采用医生通过角度尺手工测量的方法得到。

根据 FMA-UE 量表对腕背伸功能为恢复程度描述如表 1 所示:

表 1 FMA-UE 量表对腕背伸功能为恢复程度描述

	0 分	1 分	2 分
腕背伸	不能背伸腕关节达 15°	可完成,但不能抗拒阻力	轻微阻力仍可保持腕背伸

FMA-UE 量表将手功能动作划分为 0、1、2 分,其中:0 分代表完全不能进行,1 分代表部分完成,2 分代表正常进行。

3 “腕背伸”动作系统算法描述

基于“腕背伸”动作的手功能康复程度定量评估算法,包括与“腕背伸”动作定义相对应的量化计算定义、患者的测试步骤和定量评估过程。定量评估过程包括患者“腕背伸”动作的数据采集、预处理、评估参数计算。通过光学动作捕捉设备实时捕捉并处理手部从手指到手掌、手腕的各个关节三维空间数据,并以患者的健康手为对比对象,以最大腕背伸角大小、运动过程中平均角速度、平均角加速度恢复百分比的得分形式给出患者在整个康复训练过程中针对“腕背伸”动作的定量描述。

3.1 “腕背伸”计算定义

手掌方向向量和手腕方向向量在 YOZ 平面上的投影的夹角。

3.2 患者测试步骤

图 5 为华山医院医生使用本系统对患者进行康复评估。对于初次评估的病人,需首先采用以下步骤(如图 6 所示)进行健康手建库与患病手评估。对于二次发病的病人,由于二次发病后病情具有不确定性,故需重新进行健康手建库的过程。



图 5 医生为患者进行康复评估

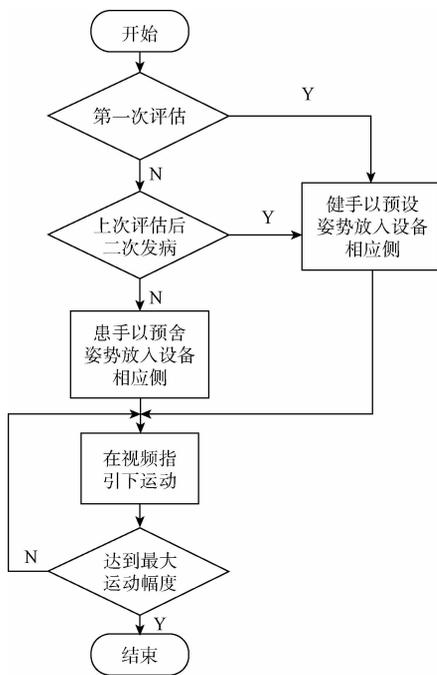


图 6 患者测试流程

3.3 定量评估过程

3.3.1 数据采集

通过光学捕捉设备精确获取手部各关节三维空间坐标后,提取出相关位置参数,如图 7 所示。中指掌骨关节尖端坐标 A,中指掌骨关节末端坐标 B,则手指指向向量 $\vec{V}_2 = \overrightarrow{AB}$ 。以及沿手腕指向手掌方向腕关节方向向量 \vec{V}_1 。

3.3.2 数据预处理

由于脑卒中病人的恢复程度具有不确定性,部分患者手掌无法完全伸直,即不能保证手腕和手指向量严格位于同一平面内。为排除该因素干扰,分别取 \vec{V}_1 、 \vec{V}_2 在竖直平

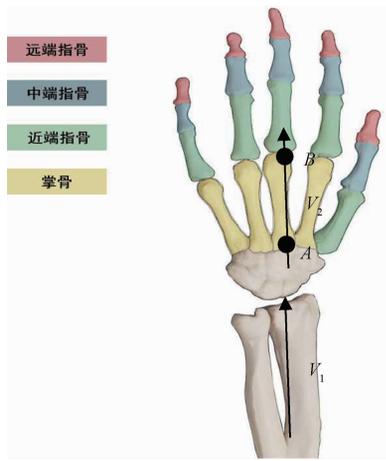


图7 手掌向量示意图

面YOZ内的投影 $\vec{V}'_1|_{x=0}$ 和 $\vec{V}'_2|_{x=0}$ 。 \vec{V}'_1 和 \vec{V}'_2 的夹角即定义为腕背伸角 θ 。

$$\theta = \arccos\left(\frac{\vec{V}'_1 \cdot \vec{V}'_2}{|\vec{V}'_1| |\vec{V}'_2|}\right) \quad (1)$$

3.3.3 评估参数计算

定量评估过程中的评估参数计算包括:

- 1) 手在初始位置时,将腕背伸角 θ_0 、腕向量和中指掌骨关节向量 \vec{V}_1 、 \vec{V}_2 ,当前时间 t 存入数据库中;
- 2) 开始运动时,腕背伸角每变化 1° 时,存入对应的帧数 f 、腕背伸角 θ 、腕向量 \vec{V}_1 、中指掌骨关节向量 \vec{V}_2 和当前时间 t ;
- 3) 腕背伸角偏转大于 1° 时,判断当前帧获取的角度和前一次入库角度的大小,将较大值存入 θ_{max} 中;
- 4) 当腕背伸角达到最大后,患者手部开始往回运动,回到初始位置时,停止数据采集,此时将 θ_{max} 写入数据库中。

3.3.4 评估结果统计方法

- 1) 最大腕背伸角 θ

$$\theta = \theta_{max} - \theta_0 \quad (2)$$

- 2) 每偏转 1° 的角速度 ω

$$\omega = \frac{\theta' - \theta_1}{t' - t_1} \quad (3)$$

式中: θ' 、 t' 为当前帧获取到的角度和录入时间, θ_1 、 t_1 为前一帧获取到的角度和录入时间。

- 3) 运动过程中的每偏转 1° 平均角速度

$$\bar{\omega} = \frac{\sum_i \omega_i}{N} \quad (4)$$

式中: i 为偏转度数, n 为最大偏转角度, N 为总偏转度数。

- 4) 腕背伸角加速度 α

$$\alpha = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \quad (5)$$

式中: $\Delta\omega$ 为角速度变化量, Δt 为时间变化量。

- 5) 运动过程中,每偏转 1° 平均角加速度

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum_i \alpha_i}{N} \quad (6)$$

式中: i 为偏转度数, n 为偏转最大角度, N 为总偏转度数。

3.4 评估结果获取

在数据处理的过程中,得到健手最大腕背伸角 θ_h ,平均角速度 $\bar{\omega}_h$,平均角加速度 $\bar{\alpha}_h$,针对同一个病人的不同康复时期,健手库中的数据作为相对标准数据,如无二次发病,健手库数据保持不变。

每次进行“腕背伸”评估时,患手库的数据进行更新,设本次患病手最大腕背伸角 $\frac{\alpha_u}{\alpha_h} \times 100\% \theta_h$,平均角速度 $\bar{\omega}_u$,平均角加速度 $\bar{\alpha}_u$,则

$$\text{患健手角度比值} = \frac{\theta_u}{\theta_h} \times 100\% \quad (7)$$

$$\text{患健手平均角速度比值} = \frac{\bar{\omega}_u}{\bar{\omega}_h} \times 100\% \quad (8)$$

$$\text{患健手平均角加速度比值} = \frac{\bar{\alpha}_u}{\bar{\alpha}_h} \times 100\% \quad (9)$$

以患病手和健康手角度比值为主要参考,患病手和健康手的运动角速度和加速度比值作为医生进行阶段性总结的参考,具有临床意义。

4 实验结果分析

4.1 手工与仪器测量结果对比

实验对20位志愿者的“腕背伸”动作分别进行手工角度尺测量和仪器测量特征角度。舍弃由于系统的不稳定和志愿者测试时操作不当等外部因素造成的误差较大的数据,取15位志愿者数据进行对比。为保证测量标准的一致性,手工测量与仪器测量结果均采用左手为测量对象进行对比,且记录所有角度均为志愿者能伸展的极限值。每位志愿者每个动作测试两次,取平均值。实验结果如表2所示。

表2 背伸角手工与仪器实验测量结果对比 ($^\circ$)

实验测量项目	实验测量结果							
病人ID	1	2	3	4	5	6	7	8
手工测量	65	72	64	66	75	80	67	79
仪器测量	63	73	60	64	77	77	69	84
相对误差/%	-3	1	-6	-3	3	-4	3	6
病人ID	9	10	11	12	13	14	15	
手工测量	60	82	70	63	80	64	70	
仪器测量	65	80	70	61	79	66	67	
相对误差/%	8	-2	0	-3	-1	3	-4	

由表2可以得出,背伸角测试过程中,仪器测量和手工测量的平均误差为3.3%,满足医院误差低于5%的要

求。因此背伸角测量结果具有临床参考意义。分析该误差主要来源是由于:

1)人的手背并不是严格的平面,尤其是患者的病手,更加无法达到绷直的状态,故角度尺无法与手部待测对象(手背与手指)完全贴合,只能靠医生的主观判断大致确定贴合程度符合要求与否;

2)由于骨骼不可通过肉眼直接观测,手工测量只能主观推测出大致范围,无法精准获取到手部的骨骼数据;

3)由于测量过程中需要角度尺与测量对象时刻保持贴合,对手部运动造成干扰;

4)评估过程中由于手部运动导致的角度尺位置偏移也是引起误差的主要原因。

4.2 定量与量表评估结果分析

实验对15位志愿者的“腕背伸”动作进行量表定性评估和定量评估结果对比,如表3所示。设定志愿者的左手为健康手,右手为患病手进行测试,为保证测试结果的普适性,15位志愿者等分为3组,1~5号志愿者动作幅度满足0分要求(完全不能进行),6~10号志愿者动作幅度满足1分要求(部分完成),11~15号志愿者动作幅度满足2分要求(正常进行),进行测试。

表3 “腕背伸”动作量表与定量实验评估结果

实验测量项目	定量实验结果							
病人 ID	1	2	3	4	5	6	7	8
定性评估得分	0	0	0	0	0	1	1	1
定量评估得分	7	14	11	24	5	34	65	75
病人 ID	9	10	11	12	13	14	15	
定性评估得分	1	1	2	2	2	2	2	
定量评估得分	77	46	93	87	103	110	101	

从表3的实验结果看出,定量评估结果与量表评估结果具有一致性,且较传统定性评估,定量评估方法可更好的反映病人的手部运动细节和阶段性恢复情况。

4.3 实验结果总结

由上述结果可以得到以下结论:

与医生手工测量方式相对比,本文所采用的多维视觉手功能康复评估系统可以:

1)达到较高的测量精度;

2)节约时间成本,简化医生评估步骤,使医生可以全流程观察患者手部整体运动情况;

3)排除由于手工操作引起的主观误差;

4)全程测量数据存档备份,方便医生随时调用查阅,了解患者情况。

与传统量表评估方法相比,定量评估在保证传统定性评估结果趋势基本一致的前提下,可以提供更加精确的量化评估结果:

1)避免过度依赖医生经验判断导致评估结果主观性

较大等问题;

2)在病人的康复过程中,本文所提系统可以提供连续性的评估结果,提高患者康复信心的同时,方便医生针对病人各个阶段细微的病情变化进行诊断,及时调整康复策略。

5 结 论

本文提出了一种基于光学智能动作捕捉设备的多维视觉手功能康复评估系统,并以脑卒中康复过程中典型动作“腕背伸”为例进行实验,证明了本系统相较传统评估方法具有更高的精准性。主要取得了如下成果:

设计并制作了多维视觉手功能康复评估样机;手功能康复评估系统平台搭建,主要包括:手功能康复核心算法设计、用户界面设计以及数据库设计;提出了一种定量上肢康复评估标准:以患者健康手为评估基准,针对特定康复动作参数,以百分比形式得到连续、精准的患手康复评估结果;验证该定量评估方法具有有效性,可以更加精准、灵活的反映病人康复情况,对传统量表进行了补充,弥补了传统量表评估不连续性、非精准性的缺点。

参考文献

- [1] 杨佼佼,张喜锐. 脑卒中偏瘫患者运动功能康复护理研究进展[J]. 护理学报,2012(4):15-17.
- [2] 孙岚,徐俊峰,曲学坤,等. 康复训练配合穴位电刺激对偏瘫患者手功能恢复的影响[J]. 中国康复理论与实践,2010(2):121-123.
- [3] 贾杰. 脑卒中后手功能康复应评价和治疗并重[J]. 上海医药,2014(2):6-9.
- [4] 林淑芳,徐颖,叶晓倩,等. 脑卒中上肢运动功能评价量表在康复中的应用[J]. 中国康复,2015(6):424-427.
- [5] PAGE S J, LEVINE P. Psychometric properties and administrator of the wrist/hand subscales of the Fugl-Meyer assessment in minimally impaired upper extremity hemiparesis in stroke[J]. Arch Phys Med Rehabil,2012,93(12),2373-2376.
- [6] SULLIVAN K J, TILSON J K. Fugl-Meyer assessment of sensorimotor function after stroke: standard training procedure for clinical practice and clinical trials[J]. Stroke,2011,42(2):427-432.
- [7] KIM H, HER J. Reliability, concurrent validity, and responsiveness of the Fugl-Meyer assessment (FMA) for hemiplegic patients [J]. Journal of Physical Therapy Science,2012,24(9):893-899.
- [8] 陈瑞全,吴建贤,沈显山. 中文版 Fugl-Meyer 运动功能评定量表的最小临床意义变化值的研究[J]. 安徽医科大学学报,2015,50(4):519-522.
- [9] SAMUELKAMALESHKUMAR S, REETHAJANET-

- SUREKA S. Mirror therapy enhances motor performance in the paretic upper limb after stroke; a pilot randomized controlled trial [J]. Arch Phys Med Rehabil, 2014, 95(11):2000-2005.
- [10] MAZZOLENI S, CRECCHI R. Robot-assisted upper limb rehabilitation in chronic stroke patients[J]. Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc, 2011, 48(4):355-368.
- [11] ORIHUELA E F, FERNANDEZ D C. Neural reorganization accompanying upper limb motor rehabilitation from stroke with virtual reality-based gesture therapy [J]. Top Stroke Rehabil, 2013, 20(3):197-209.
- [12] SIN H, LEE G. Additional virtual reality training using Xbox Kinect in stroke survivors with hemiplegia [J]. Am J Phys Med Rehabil, 2013, 92(10): 871-880.
- [13] 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(5):443-446, 453.
- [14] 朱桁序, 姜文刚, 林永才. 用于机器人示教的人体手臂运动捕捉方法研究[J]. 电子测量技术, 2016, 39(7): 136-140.
- [15] 潘月浩, 宋执环, 杜往泽, 等. 适用于老年公寓的动作识别设计方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 30(1):29-35.
- [16] 王恬, 李庆武, 刘艳, 等. 利用姿势估计实现人体异常行为识别[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(10): 2366-2372.
- [17] 周美丽, 白宗文. 基于形状特征的图像检索系统的设计[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(6):82-84.

作者简介

陆雅婷, 1993年出生, 硕士研究生, 主要研究方向为图像处理与识别。

E-mail: ytlu93@126.com