

·综述·

骨骼关键点检测技术在康复评估中的应用进展*

王睿¹ 朱业安¹ 卢巍^{2,3}

人体骨骼关键点对于描述人体姿态,预测人体行为至关重要,骨骼关键点检测技术是捕捉人体姿态、预测人体行为、判别人体行为异常的重要方法。该方法可以协助完成关节活动度测定、平衡与协调功能测评、步态分析和肌力分析等多种康复医学评定项目。相对于临床医生常用的主观观察和量表技术,该方法能够实现定量分析,能更敏感的感知患者的病情变化。与传统的三维运动分析系统相比,该方法操作简单,省时省力,且不需要配置大量数据采样装置。本文首先对比了几种骨骼关键点检测技术的优势与不足,突出基于微软 Kinect 深度摄像头及其开发包技术的骨骼关键点检测技术是目前最为成熟的骨骼关键点检测技术;然后对基于微软 Kinect 深度摄像头及其开发包技术的骨骼关键点检测技术在康复评估应用的信效度方面作出综述。

1 骨骼关键点检测技术的概述

人体骨骼关键点检测:主要检测人体的一些关键点,如关节、五官等,其主要是通过检测人体关键骨骼点的空间坐标来描述人体的骨骼信息,可分为单人人体骨骼关键点检测和多人人体骨骼关键点检测;人体骨骼关键点检测是计算机视觉领域的基础性技术,在计算机视觉的其他相关领域的研究中都起到了基础性的作用,如行为识别、人物跟踪、步态识别等相关领域;具体应用主要集中在智能视频监控,患者监护系统,人机交互,虚拟现实,人体动画,运动员辅助训练等^[1]。近年来,随着深度学习技术的发展,人体骨骼关键点的检测效果不断提升,已经广泛应用于计算机视觉的相关领域,也逐渐受到康复领域学者的关注。本节主要介绍几种骨骼关键点检测技术:基于红外技术的三维运动捕捉系统的检测和基于微软 Kinect 深度摄像头及其开发包技术的检测,以及基于超声技术及录像视频技术的检测;并对对比了几种骨骼关键点检测技术的优势与不足。

1.1 基于红外技术的三维动作捕捉系统的检测

近几年来,运动捕捉技术的稳定性、操作效率、应用弹性以及降低系统成本等方面得到了迅速的提高。如今的动作

捕捉技术可以迅速记录人体、物体的动作和运动轨迹,进行延时分析或多次回放。通过被捕捉的信息,我们可以生成并建立两个维度的空间信息:简单的可以生成某一时刻人体、物体的空间位置,而复杂的则可以计算出任何面部或躯干肌肉的细微变形,能够准确呈现人或物的空间位置、速度、加速度、角度、角速度、角加速度等六自由度信息。

一般的康复训练往往是通过医生对患者的姿态进行肉眼观察,但是当医生诊断出患者姿态异常时,患者往往已经出现较为严重的骨骼异常。使用三维动作捕捉系统在患者康复训练过程中进行检测,可以极大地提高检测的精度。通过对三维动作捕捉系统采集的数据进行可视化操作,医生可以多角度、更直观的诊断患者恢复情况,从而提高康复训练的有效性^[2]。动作捕捉系统还可以与测力台、表面肌电等输出模拟信号的设备进行同步,结合 OrthoTrak、SIMM 等软件,同时对受试者的步态、肌肉长度、表面肌电、受力等数据进行分析。医生想要对患者的特定骨骼区域做更深层次的检测,可以将荧光标记球贴在患者对应的关节处,然后利用三维捕捉系统,生成该关节的运动轨迹和速度、加速度等参量以作分析,对不同关键骨骼点的定量分析对于患者的治疗和训练计划会有很大的益处。

1.2 基于微软 Kinect 深度摄像头及其开发包技术的检测

随着在深度视频序列中跟踪人体骨骼算法的不断改进,骨骼信息作为更加抽象且高层次的人体特征,有广泛的应用。微软公司开发的产品 Kinect 深度相机因具有光线不敏感特性,以及更加全面的三维特性,受到广泛关注。它的深度成像系统由三部分组成:激光发射器、不均匀透明介质和 CMOS 感光元件^[3]。Kinect 深度相机主要提供三大类原始数据信息,包括深度数据流、彩色视频流、原始音频流,同时分别对应骨骼跟踪、身份识别、语音识别三个处理过程^[4-5]。

骨骼关键点检测算法是 Kinect 的核心算法,是 Kinect 实现人机非接触的重要基础,也是开发者运用此技术开发出各种基于体感人机交互的重要应用。其通过红外投影机和红外摄像头捕捉深度图像,生成周围环境的景深图像,从

DOI:10.3969/j.issn.1001-1242.2020.07.025

*基金项目:国家自然科学基金资助项目(51765019);江西省科技厅重点研发计划项目(20192BBG70011)

1 华东交通大学(南区)虚拟现实与交互技术研究院,江西南昌,330013; 2 江西省人民医院康复医学科; 3 通讯作者
第一作者简介:王睿,男,硕士研究生; 收稿日期:2019-02-22

中分离出人体骨骼图,识别出人体关节部位,最终根据骨骼追踪的25个人体关键节点生成一幅完整的骨架系统^[9](它在Windows系统下可以标定人体特征的25个骨骼关节点,在Linux系统中可获取到15个关节点数据)。对于这些关节点的每一个位置给出以mm为单位的{x,y,z}坐标。骨骼关键点检测算法则通过处理深度图像信息来识别关节位置,该算法首先通过深度图像的每个像素进行评估来判断人体的不同部位,并且根据决策树分类器来指定每一个像素在每一个对应躯体部分的可能性,从而挑选出躯体部分最大几率的区域,然后由计算分类器指出关节位置的相对位置作为躯体的特定部位^[2,7]。在这之后,根据用户的可视范围内的位置信息对其身体骨架进行标定,最终实时追踪到人体上25个骨骼关节坐标^[6,8-9]。为了能将人体骨骼模型与深度图像相结合,需要采用Kinect SDK提供的方法用Map Skeleton PointDepth软件将骨骼点数据从骨骼数据空间转换到深度数据的二维空间中去^[10]。由Kinect获取的数据经过特征提取、特征重要性排序等算法处理后可以完成关节活动度测定、平衡与协调功能测评、步态分析和肌力分析等多种康复医学评定项目。

1.3 基于超声技术及录像视频技术的检测

超声定位步态分析技术:该技术是基于超声三点定位法的人体下肢关节运动轨迹仪,用于测量分析人体行走过程中的下肢步态,该仪器通过曲线拟合技术重建受试者下肢步态,可在屏幕上以多个视角直观形象地重现下肢步态的彩色棒图和关节的运动轨迹。是步态诊断和研究的良好工具。

单纯摄像头分析技术:该方法属于定量步态分析方法,是采用高速摄像设备的三维步态分析,其主要测量定量步态分析的参数:时间-距离参数、运动学参数、动力学参数;并对已获得的参数进行分析。目前常用的临床步态分析系统进行定量步态分析的频率已经达到每秒60帧以上,测量长度的误差小于1mm^[11]。

1.4 几种技术的优劣对比

基于红外技术的三维动作捕捉系统能获得更高准确性的测量数据,利用这些数据可以计算得到运动学参数:运动的形态、速度和方向等参数,包括跨步特征、关节角度曲线、角度-角度图等诊断指标参数。这些参数对患者的诊断和指定康复计划以及康复训练的效果进展都有至关重要的作用。

基于红外技术的三维运动捕捉系统虽然可以保留患者每一次的行走轨迹和数据,可以形成精确可视化的行走轨迹和空间坐标数据^[13-14],但是三维运动捕捉系统也有一定的劣势:与其他的量化仪器之间的可融合度较低、它所得到的数据并不能直接为其他软件或算法使用等等。此外基于红外技术的三维运动捕捉系统的价格也十分昂贵,价格从50万—100万元之间不等,并且这项设备的操作流程十分繁琐,且

通用性较差,同一套案例并不能通用到其他的个体上。

与基于红外技术的三维运动捕捉系统相比,基于微软Kinect的深度相机的运动捕捉系统所捕获的深度数据能够提供额外的第三维度的深度信息。该信息不仅对光照的变化不敏感,而且能够忽略由于衣服、皮肤、头发以及背景产生的颜色差异,并且其算法相较于基于红外技术的三维运动捕捉系统的检测易于实现,时间复杂度较低,对骨骼点的处理也更加灵活,它的通用性更高,算法的灵活度也比较好,适用于不同个体的患者;并且在运动学参数的获取方面,使用Kinect测得的数据以及计算而得的参量通过深度图像的算法计算也可以得到和基于红外技术的三维运动捕捉系统相近的结果。而在价格方面成本要比基于红外技术的三维运动捕捉系统价格低得多,整个系统的硬件设备只需一台Kinect深度摄像头,配上对应算法的人工成本的花费可控制在万元左右,可大幅度减轻患者的经济负担。且便携性、可操作性高,患者在家里进行康复训练、检测、评定,不必再往返医院排队做再评定,省时省力。

超声定位步态分析技术可得到各关节在各时刻的三维空间坐标,所以该技术可以重建基于各个观察角度的下肢运动轨迹,为各种正常、异常步态的测量和诊断提供了极其灵活的选择,同时还可以显示下肢整体运动棒图或各个关节的运动轨迹。但是超声步态分析技术需要繁复的数据采集工作以及受试者需要佩戴各种接收、发送信号的相关电路,这为测量的效率与准确性造成了影响。单纯摄像头分析技术不需要昂贵的设计,评价快速方便;但是结果具有一定的主观性,与观察者的观察技术水平和临床经验有着直接关系。检查者难以准确的在短时间内完成多部位、多环节的分析。

综合这几种骨骼关键点检测技术的优劣对比,可以得出基于微软Kinect深度摄像头及其开发包技术的检测技术是目前最为成熟,综合效果、准确率最好且性价比最高的技术。因此,本文着重对基于微软Kinect深度摄像头及其开发包技术的骨骼关键点检测技术在康复评估中的应用进行综述。

2 基于微软Kinect深度摄像头及其开发包技术的骨骼关键点检测技术在康复评估中的应用

骨骼关键点检测技术在康复评定中起着重要的作用,它的应用使得康复评定更加有效、精准、可靠。其应用主要表现在以下几个方面:关节活动度、平衡能力、步态分析、肌力分析。基于微软Kinect深度摄像头及其开发包技术的检测相较于基于红外技术的三维运动捕捉系统的检测、超声定位步态分析技术以及单纯摄像头分析技术更适用于临床研究,因此下文将简述基于微软Kinect深度摄像头及其开发包技术的骨骼关键点检测技术在以上几个方面的应用。

2.1 在关节活动度方面的应用

关节活动范围的测定是评定肌肉、骨骼、神经病损患者的基本步骤,是评定关节运动功能损害的范围与程度指标之一。Triwiyanto等^[15]采用Kinect相机收集深度和彩色图像数据,同时使用数字测斜仪提供矢状面和正面平面的关节角度的地面实况测量,得出了小于0.5°的可靠性系数,说明了Kinect相机无标记运动捕捉系统准确测量下肢运动学的可行性。Xu等^[16]将Kinect传感器识别的关节中心位置与其相应的运动跟踪系统识别的对应物进行直接比较,其结果证明了将关节角度和逆动力与Kinect结合来确定关节中心位置的可行性。Schmitz等^[17]为了研究Kinect无标记相机系统量化下肢关节角度的能力,比较了在深蹲期间基于标记的运动捕捉系统和Kinect系统分别计算膝关节和臀部的关节角度,结果显示两个系统的相对误差小于0.9°,证明了Kinect无标记运动捕捉系统在临床应用的可行性。

可见,已经有部分针对关节活动度的研究使用了Kinect骨骼关键点检测技术,其研究结果与展现出来的效果已经达到了可临床应用的标准,它可以辅助医师做一些病情诊断、辅助康复训练使训练效果更显著;但是Kinect骨骼关键点检测技术还无法识别更精细的骨骼位置,并且还无法做到与智能算法相结合以实现自动识别的效果。

2.2 在平衡能力方面的应用

目前临床对平衡功能的评定主要包括目测法、量表评定法和平衡测试仪评定法三种。目测法和量表评定法主观性较强,精确程度不够;平衡测试仪虽然能够将平衡功能检测量化,更客观地反映平衡功能,但是受仪器平面单一压力传感器的影响,难以立体、全面、实时地反映人体在功能活动中的平衡功能状态。研究表明运用Kinect体感交互技术来进行人体平衡能力的评定所得到的结果会更加精准、可靠,并且使评定过程不再枯燥、评定结果实时获取。

为了验证Kinect用于评估站立平衡和姿态控制的可靠性和有效性,Clark等^[18]对30例健康成人进行了两次相隔一周的动态和静态训练,使用Kinect骨架跟踪算法和3DMA算法同时记录标记坐标和关节角度数据,得出在动态和静态训练中Kinect对站立平衡和姿态控制都具有较好的评估效果。Den等^[19-20]为了改善老年人在康复训练中的平衡能力,将Kinect交互系统与踩踏、减肥练习结合起来,结果表明在康复训练中加入Kinect交互系统不但具有改善老年人的平衡能力的有效性而且呈现出更沉浸、专注的效果。杨文璐等^[21]利用Kinect设备获取人体骨骼信息,用于训练脑卒中患者恢复平衡能力。他们将体感交互技术与unity 3D技术相结合建立一套平衡评估系统,依据输出的角度参数并结合设计的平衡判定标准得出对应的平衡能力的衡量指标。Van等^[22]提出了基于Kinect交互的平衡能力训练系统,经过该系统训练6周后,实验对象在平衡能力测试的四个项目中的重

心摆动情况有明显的改善。

近年来,不少针对平衡能力训练和评估的研究都结合了Kinect骨骼关键点检测技术。基于Kinect的骨骼体感信息运用于临床的康复评定中可以使医师和患者的交流不仅仅限于言语上的反馈,还具有可视化的交互式反馈信息;同时,与传统的平衡能力训练相比,Kinect呈现出的交互训练方式更易引起患者训练的兴趣,如王文静等^[23]提出的基于Kinect交互的平衡能力训练系统,使训练效果得到了提高。但是,如果该系统能够实现家庭化,使患者不用往返医院和家里,足不出户也可以进行训练,其康复周期也会相应缩短。

2.3 在步态分析方面的应用

步态分析是研究步行规律的检查方法,在临床康复中,通过步态分析获得定量的步态数据,从而为分析患者异常步态原因、矫正异常步态、制定康复治疗计划以及评估康复干预效果提供依据^[10-12]。步态分析也是骨骼关键点检测技术一直以来应用最多的研究内容,评估检测指标主要有以下参数:运动学分析、模式识别以及时一空参数分析。

运动学分析:Yoon J等^[24]将27例帕金森患者的前臂远端绑上沙袋,使用Kinect获取相关运动学参数,并与上肢不负重时的参数进行对比,发现上肢负重可以促进上肢和骨盆运动,引起步态模式的改变,结果表明帕金森患者在步行康复训练时加上上肢负重可以改善步行。Eltoukhy等^[25]分别使用三维运动分析系统和Kinect对帕金森患者和正常健康老年人的步态进行了分析,发现Kinect获取的数据对区分两组受试者之间的差异具有足够的灵敏度,和三维运动分析系统的结果有较高的一致性。Auvinet等^[24,26]使用Kinect生成几个步态周期的深度图像,提出了ILong方法来检测步态数据的纵向不对称性,ILong方法证明即使少量的步态周期也足以检测步态的不对称性。这为临床医生观察、分析在跑步机上行走的患者的步态周期内提供了纵向时空步态分析(gait analysis, GA)指数。

模式识别以及时一空参数分析:Dolatabadi等^[27-28]研究了Kinect用于步态时空参数测量的有效性,结果表明Kinect能有效地测量健康成年人的步态时空参数。Latorre等^[29]对使用Kinect采集的卒中后患者的步态时空参数是否可靠进行了研究,发现虽然结果的准确性有限,但能够很好地补充传统测量工具。

在步态方面,Kinect传感器已被证明在膝关节和髌关节运动学在多功能性训练中,以及与步态相关的时空变量中对矢状面的评估是有效的^[30-31]。最近,Eltoukhy等^[24]做了一项研究:在使用Kinect传感器评估地面步态分析的步态特征时,使用复杂的多Kinect阵列来评估10m步行测试,进一步使用单个Kinect传感器评估地下步行步态期间的下肢运动学和时空特征,表明Kinect对PD患者进行地上步态评估具

有有效性和可靠性。

可以看出大多数研究者都将 Kinect 骨骼关键点检测技术纳入了步态分析的研究当中,因此加入骨骼关键点检测技术的步态分析可以应用在医疗诊断方面:病理步态可能反映相关病症,或症状本身的因果关系。步态的研究可以用于诊断和干预策略,并在未来的发展中应用于康复工程。但是,美中不足是很少有研究将 Kinect 系统捕获的数据与智能算法结合起来,以实现偏瘫步态的自动识别用于辅助临床医生诊断。

2.4 在肌力分析方面的应用

肌力评定一般包括简单仪器(便携式测力计评定)、大型仪器(等速测力仪评定)和手法肌力检查等方法。但是目前临床上得到广泛应用的是手法肌力检查,它不借助任何仪器,仅靠检查者徒手对受试者进行肌力测定的方法。这一方法的优点是:简便易行,但是缺点是:肌力评定全靠检查者的主观判断,误差无法评估,精准度较差;因此,需要更加准确、高效的评定方法。

Eltoukhy 等^[32-35]为了能够避免手法肌力检查所产生的无法估计的误差,又能够达到昂贵的肌力仪器所测得的效果提出了一项可行的替代方案:使用 AnyBody 建模系统结合 Kinect 驱动的骨骼肌肉模型,来预测帕金森患者步态期间的三维地面反作用力。结果验证了 Kinect 传感器有可能成为预测帕金森患者步态时产生的地面反作用力的有效临床评估工具。Peng YH 等^[36-38]基于从 AnyBody 管理模型库中提取的通用骨骼肌肉模型,使用 AnyBody 建模软件开发全膝关节置换术的受试者特异性全身骨骼肌肉模型对在行走期间的地面反作用力和力矩以及膝关节接触力以合理的准确度同时预测,其中仅采用 Kinect 的运动捕捉作为输入,该过程不再依赖肌力测量工具也可以测得地面反作用力、力矩以及膝关节接触力,对进一步了解种植体失效机理和改进全膝关节置换术设计具有重要意义,值得临床应用。Chen 等^[39-40]在步行模拟过程中使用特定主体的骨骼肌肉多体运动学模型成功预测了全膝关节置换术的体内运动学,并且具有合理的准确度。因此,得出 Kinect 骨骼关键点检测技术建立的骨骼肌肉模型与 AnyBody 建模系统相结合可以解决临床许多问题。

目前,已经有部分研究者将肌力分析与 Kinect 骨骼关键点检测技术相结合,得到了较为可靠、积极的结果,大部分研究成果都值得被临床应用来辅助医师做诊断、制定治疗方案,但是其所针对的疾病以及肌群数目还较为有限,还需做进一步研究,将其推广到更广泛的疾病、肌群中,使其得以应用。

3 小结

在康复医疗领域,神经系统以及骨骼肌肉系统受损的患者对于高精度、高效率的伤病评估以及高质量的康复治疗的需求

需求越来越多,在临床确诊中,医生所得到的能够提供确诊的因素主要为 CT 片以及主观经验上的对伤情的判断,该方法虽然在临床诊治中普遍的应用,但缺陷也一目了然,医生耗时耗力、所提供的病情相关的量化数据缺少,导致确诊结果的准确率无法高概率保证等。而骨骼关键点检测技术是可以为外科医生提供全面信息的,该技术可以提供关节活动度测定、平衡与协调功能测评、步态分析和肌力分析等多种康复医学评定项目;这可以辅助医生做出更准确的确诊,在康复阶段定期做测评还能使医生根据康复进展从而实时改进康复治疗方案,这就将医生更多的精力投射在了患者的康复训练效果上而不是伤病的评估上。同样的,患者在康复训练过程中使用骨骼关键点检测技术不但能够可视化自己患病部位的各种信息,而且交互式的康复训练方式更容易引导患者积极地训练。

目前国内医院在基于微软 Kinect 深度摄像头及其开发包技术的骨骼关键点检测方面,只能进行简单的识别和应用,对其精度及检测范围尚不满意,无法将整套评估-康复系统很好地应用于临床上。分析其主要原因为:骨骼关键点检测技术没有和智能算法相结合以实现关节活动度、平衡能力、步态分析、肌力分析的自动识别来辅助临床医生做诊断以及康复评估。这一新技术可以有效降低康复治疗成本,提高康复行业的服务能力,但是没能改善康复医师短缺的现状;如果骨骼关键点检测技术的评估-康复系统能够实现家庭化,可有效缓解康复医师及家庭医生短缺的现状。对于患者而言,足不出户可以实现康复-评估的良性循环,这也是相得益彰的。人工智能的飞速发展在未来会给患者带来一套全新、全面、智能化和信息化的临床康复评估系统。

参考文献

- [1] 于瑞云,苏展,谢青,等.基于空间分割的人体模型骨骼提取算法[J/OL].计算机学报,2018;1-12[2019-02-21].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1826.TP.20181126.1724.006.html>.
- [2] 张均,朱波.基于动作捕捉的医疗康复检测系统[J].电子世界,2018,(8):161,163.
- [3] 王松林,徐文胜.基于 Kinect 深度信息与骨骼信息的手指尖识别方法[J].计算机工程与应用,2016,52(3):169—173,235.
- [4] 许艳,侯振杰,梁久祯,等.深度图像与骨骼数据的多特征融合人体行为识别[J].小型微型计算机系统,2018,39(8):1865—1870.
- [5] Ribo A, Warchol D, Oszust M, et al. An approach to gesture recognition with skeletal data using dynamic time warping and nearest neighbour classifier[J]. International Journal of Intelligent Systems and Applications, 2016, 8(6): 1—8.
- [6] 黄静,魏智真,李国翠,等.结合 Kinect 的上肢运动康复系统的研究进展[J].中国康复医学杂志,2017,32(9):1082—1086.
- [7] Asaeda M, Kuwahara W, Fujita N, et al. Validity of motion analysis using the Kinect system to evaluate single leg stance in patients with hip disorders[J]. Gait & Posture,

- 2018,62: 458—462.
- [8] 马玲玲,姚新苗,王健,等.帕金森病姿势控制的研究进展[J].中国康复医学杂志,2017,32(3):373—376.
- [9] 赵肖奕,陈丽霞.虚拟现实技术在卒中患者康复中的应用[J].中国康复医学杂志,2018,33(4):486—489.
- [10] Geiger M, Supiot A, Pradon D, et al. Minimal detectable change of kinematic and spatiotemporal parameters in patients with chronic stroke across three sessions of gait analysis[J]. Human Movement Science, 2019,DOI: 10.1016/j.humov.2019.01.011
- [11] 宋心刚,段朝阳.用GPS测量步态参数[J].按摩与康复医学,2018,9(23):89—92.
- [12] 王浩伦,朱业安,徐唯祎,等.步态识别特征的提取和重要性排序[J].中国医学物理学杂志,2019,36(7):811—817.
- [13] 孙志成,王彤.三维运动分析系统在康复医学评估检测中的应用进展[J].中国康复医学杂志,2018,33(2):234—238.
- [14] Ounpuu S, Gorton GE, Bagley A, et al. Variation in kinematic and spatiotemporal gait parameters by Gross Motor Function Classification System level in children and adolescents with cerebral palsy[J]. Developmental Medicine & Child Neurology, 2015, 57(10): 955—962.
- [15] Triwiyanto T, Wahyunggoro O, Nugroho HA, et al. Muscle fatigue compensation of the electromyography signal for elbow joint angle estimation using adaptive feature[J]. Computers & Electrical Engineering, 2018,71: 284—293.
- [16] Xu X, McGorry RW. The validity of the first and second generation Microsoft Kinect™ for identifying joint center locations during static postures[J]. Applied Ergonomics, 2015, 49: 47—54.
- [17] Schmitz A, Ye M, Boggess G, et al. The measurement of in vivo joint angles during a squat using a single camera markerless motion capture system as compared to a marker based system[J]. Gait & Posture, 2015, 41(2): 694—698.
- [18] Clark RA, Pua Y, Oliveira CC, et al. Reliability and concurrent validity of the Microsoft Xbox One Kinect for assessment of standing balance and postural control[J]. Gait & Posture, 2015, 42(2): 210—213.
- [19] Den Berg M V, Sherrington C, Killington M, et al. Video and computer-based interactive exercises are safe and improve task-specific balance in geriatric and neurological rehabilitation: a randomised trial[J]. Journal of Physiotherapy, 2016, 62(1): 20—28.
- [20] 梁嘉欣,黄国志.可穿戴设备应用于脑卒中康复治疗的研究进展[J].中国康复医学杂志,2018,33(9):1108—1112.
- [21] 杨文璐,葛晓艳,李世杰,等.基于Kinect的平衡能力评估系统[J].传感器与微系统,2018,37(6):105—107+114.
- [22] Van Diest M, Stegenga J, Wortche HJ, et al. Exergames for unsupervised balance training at home: A pilot study in healthy older adults[J]. Gait & Posture, 2016,44: 161—167.
- [23] 王文静.基于体感交互的平衡能力训练系统研究[D].南京师范大学,2017.
- [24] Yoon J, Park J, Park K B, et al. The effects of additional arm weights on arm-swing magnitude and gait patterns in Parkinson's disease[J]. Clinical Neurophysiology, 2016, 127(1): 693—697.
- [25] Eltoukhy M, Kuenze C, Oh J, et al. Microsoft Kinect can distinguish differences in over-ground gait between older persons with and without Parkinson's disease[J]. Medical Engineering & Physics, 2017,44: 1—7.
- [26] Auvinet E, Multon F, Meunier J, et al. New lower-limb gait asymmetry indices based on a depth camera[J]. Sensors, 2015, 15(3): 4605—4623.
- [27] Dolatabadi E, Taati B, Mihailidis A. Concurrent validity of the Microsoft Kinect for Windows v2 for Measuring Spatiotemporal Gait Parameters[J]. Med Eng Phys, 2016, 38(9):952—958.
- [28] 朱业安,徐唯祎,王睿,等.偏瘫步态障碍的自动识别和分析[J].生物医学工程杂志,2019,36(2):306—314.
- [29] Latorre J, Lorens R, Colomer C, et al. Reliability and comparison of kinect-based methods for estimating spatiotemporal gait parameters of healthy and post-stroke individuals[J]. J Biom, 2018, 72(27):268—273.
- [30] Prakash C, Kumar R, Mittal N, et al. Vision based identification of joint coordinates for marker-less gait analysis[J]. Procedia Computer Science, 2018,132: 68—75
- [31] 侯莹,刘丽华,江钟立.帕金森病运动症状的评估与康复治疗进展[J].中国康复医学杂志,2018,33(11):1356—1360.
- [32] Eltoukhy M, Kuenze C, Michael SA, et al. Prediction of ground reaction forces for Parkinson's disease patients using a kinect-driven musculoskeletal gait analysis model[J]. Med Eng Phys, 2017, 9(50):75—82.
- [33] Van Hove S, Verbruggen JP, Willems P, et al. Vertical ground reaction forces in patients after calcaneal trauma surgery[J]. Gait & Posture, 2017,58: 523—526.
- [34] Wang M, Wang X, Fan Z, et al. Research on feature extraction algorithm for plantar pressure image and gait analysis in stroke patients[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2019,58: 525—531.
- [35] Vanheule V, Delpont H, Andersen MS, et al. Evaluation of predicted knee function for component malrotation in total knee arthroplasty[J]. Medical Engineering & Physics, 2017, 40(1): 56—64.
- [36] Peng YH, Zhang ZF, Gao YC, et al. Concurrent prediction of ground reaction forces and moments and tibiofemoral contact forces during walking using musculoskeletal modelling[J]. Med Eng Phys, 2018, 26(52):31—40.
- [37] Shriram K, Govindaraj AB, Vivek AN, et al. Functional outcome of single stage bilateral total knee replacement measured using oxford knee score[J]. Journal of Arthroscopy and Joint Surgery, 2019,6(2):94—97.
- [38] Van Hulle R, Schwartz C, Denoel V, et al. P 054 - Evaluation of ground reaction forces by inverse dynamics analysis[J]. Gait & Posture, 2018,65:72—73.
- [39] Chen ZX, Zhang ZF, Wang L, et al. Evaluation of A Subject-specific Musculoskeletal Modelling Framework for Load Prediction in Total Knee Arthroplasty[J]. Med Eng Phys, 2016, 38(8):708—716.
- [40] Ardestani MM, Zhenxian C, Noori H, et al. Computational analysis of knee joint stability following total knee arthroplasty[J]. Journal of Biomechanics, 2019,DOI: 10.1016/j.jbiomech.2019.01.029