

基于运动捕捉技术分析髋关节各自由度的运动能力

<https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-4344.3784>

张海峰, 赵 灿, 刘美晓, 宋翠荣, 庞 胤

2095-4344.3784

投稿日期: 2020-05-11

送审日期: 2020-05-15

采用日期: 2020-06-17

在线日期: 2020-10-16

中图分类号:

R459.9; R318; G804.6

文章编号:

2095-4344(2021)12-01815-05

文献标识码: A

文章快速阅读:

文章亮点一

△应用动作捕捉技术, 分析了髋关节各自由度的运动极值, 为准确评估人体关节运动功能开辟了新方法;

△导出运动中的生物角度-时间曲线, 可为运动员科学训练、预防损伤及康复治疗提供理论依据。

试验过程:

- (1) 选择30名青年健康男性受试者;
- (2) 应用动作捕捉技术, 实时捕捉记录髋关节前屈、后伸、外展、内收、旋内、旋外等运动轨迹, 建立运动模型。

观察指标:

观察受试者髋关节在矢状轴、冠状轴、垂直轴上的最大运动幅度及时间。

试验结果:

- (1) 髋关节在矢状面上的屈伸范围远大于冠状面的内收外展及水平面上的旋内、旋外活动;
- (2) 髋关节在前屈、后伸、外展、旋外运动的主动阶段, 角加速度较大; 复位运动中, 加速度较小。

文题释义:

运动捕捉技术: 应用高速摄像机实时捕捉记录人体运动关键点空间坐标变化轨迹, 通过处理软件建立运动模型, 对动作进行时空参数和运动学参数分析, 探索运动规律。

各自由度的运动能力: 自由度为质点在空间运动的方向, 髋关节可以围绕冠状轴、矢状轴、垂直轴做前屈与后伸、外展与内收、旋内与旋外运动, 具有3个自由度。运动能力指运动所具备的能力, 包括运动幅度、速度、角速度、加速度等, 分析运动能力, 可为评估关节功能、科学锻炼、制定康复方案提供理论依据。

摘要

背景: 髋关节结构复杂, 在支持体质量、日常活动中起着重要的作用, 尚无客观评估其运动能力的方法。

目的: 分析髋关节在围绕矢状轴、冠状轴、垂直轴运动过程的时空参数, 总结运动参数变化规律。

方法: 选择30名受试者, 通过三维动作捕捉系统, 捕捉受试者髋关节前屈、后伸、外展、内收、旋内、旋外及复位的运动轨迹, 计算分析不同自由度运动中的最大幅度与角度变化。

结果与结论: ①通过建立髋关节运动模型, 获得髋关节在矢状面、冠状面、水平面的活动范围, 计算出各平面的运动极值; ②导出不同平面运动中角度-时间的变化曲线, 总结出髋关节运动的变化规律: 髋关节在矢状面上的屈伸范围远大于冠状面的内收外展及水平面上的旋内、旋外活动; 髋关节在前屈、后伸、外展、旋外运动的主动阶段角加速度较大, 复位运动中加速度较小; ③提示基于运动捕捉技术建立运动学模型, 分析运动学数据, 可为髋关节功能的准确评估、运动损伤的预防及康复、体育训练、生物力学分析等研究提供一定借鉴。

关键词: 骨; 髋关节; 运动捕捉; 运动模型; 自由度; 运动能力

Analysis of various degrees of freedom of the hip movement based on motion capture technology

Zhang Haifeng, Zhao Can, Liu Meixiao, Song Cuirong, Pang Yin

Cangzhou Medical College, Cangzhou 061000, Hebei Province, China

Zhang Haifeng, Master, Associate professor, Cangzhou Medical College, Cangzhou 061000, Hebei Province, China

Song Cuirong, Master, Associate chief physician, Lecturer, Cangzhou Medical College, Cangzhou 061000, Hebei Province, China

Zhang Haifeng and Song Cuirong contributed equally to this paper.

Corresponding author: Pang Yin, Master, Physician, Cangzhou Medical College, Cangzhou 061000, Hebei Province, China

Abstract

BACKGROUND: The hip joint is a complex structure, and plays an important role in supporting weight and daily activities, and there is no objective way to assess its athletic ability.

OBJECTIVE: To analyze the time and space parameters of hip joint in the process of motion around sagittal axis, coronal axis and vertical axis, and to summarize the variation rules of motion parameters.

METHODS: Thirty subjects were selected to capture the movement track of hip forward flexion, backward extension, abduction, adduction, rotation in, rotation out and reduction through three-dimensional motion capture system, calculate and analyze the maximum amplitude and angle changes in different degrees of freedom movement.

沧州医学高等专科学校, 河北省沧州市 061000

第一作者: 张海峰, 男, 1981年生, 2014年河北医科大学毕业, 硕士, 副教授, 主要从事人体三维重建、运动生物力学与康复研究。

并列第一作者: 宋翠荣, 女, 1977年生, 2007年天津医科大学毕业, 硕士, 副主任医师, 讲师, 主要从事损伤与修复研究。

通讯作者: 庞胤, 硕士, 医师, 沧州医学高等专科学校, 河北省沧州市 061000

<https://orcid.org/0000-0001-9330-3497> (张海峰)

基金资助: 河北省卫健委指导项目, 项目负责人: 张海峰

引用本文: 张海峰, 赵灿, 刘美晓, 宋翠荣, 庞胤. 基于运动捕捉技术分析髋关节各自由度的运动能力 [J]. 中国组织工程研究, 2021, 25(12):1815-1819.



RESULTS AND CONCLUSION: (1) By establishing the motion model of the hip joint to obtain the range of motion of the hip in the sagittal plane, coronal plane and horizontal plane. The extreme values of the motion of each plane were calculated. (2) The angle-time change curve of the motion of the hip in different planes was exported. The change rule of the motion of the hip was summarized: the flexion and extension range of the hip on sagittal plane was much larger than the adduction and abduction of the coronal plane and inward and outward rotation on a horizontal plane. The angular acceleration of the hip joint was larger in the active stages of forward flexion, backward extension, abduction and outward rotation, and the acceleration was smaller in the resetting movement. (3) The establishment of kinematic model based on motion capture technology and the analysis of kinematic data can provide some references for the accurate assessment of hip function, and the prevention or rehabilitation of injuries, sports training, biomechanical analysis and other studies.

Key words: bone; hip joint; motion capture; motion model; degree of freedom; athletic ability

Funding: the Hebei Provincial Health Commission Guidance Project (to ZHF)

How to cite this article: ZHANG HF, ZHAO C, LIU MX, SONG CR, PANG Y. Analysis of various degrees of freedom of the hip movement based on motion capture technology. *Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu*. 2021;25(12):1815-1819.

0 引言 Introduction

随着经济水平的不断提高,人们健康意识逐渐增强,全民健身理念迅猛发展。但是,人们在运动健身过程中存在一定的盲目性与盲从性^[1],缺乏针对性与实效性,锻炼效果不理想,甚至导致慢性损伤。

运动学以研究质点或模型的运动为基础,从几何角度描述和分析物体位置随时间的变化规律,涉及到物理学、数学等多学科的理论,是一门综合性学科^[2-3]。运动学参数包括运动轨迹、路径、位移、速度、加速度、角速度、角加速度等,分析运动学参数,对评估关节功能、指导运动方式、损伤预防、康复训练、体能锻炼具有重要意义。

近年来,随三维动作捕捉技术的发展,国内外众多机构、专家、学者相继开展人体运动学方面的研究,国外起步较早,如 KERRIGA 等^[4]分析了步行中的运动学参数, SCHUTTE 等^[5]对脑卒中患者进行了步态测试;国内开展略晚,孙嘉利等^[6]阐述了步态分析在临床诊断中的应用;赵辉等^[7]分析了步态在膝关节置换术中的影响。其中大部分研究集中于行走、慢跑的步态分析,研究对象多为膝关节、踝关节;而髋关节运动能力是反映人体运动功能的一个重要指标,其活动范围与角度对运动功能评估有着不可替代的地位和作用^[8],然而未见有关髋关节运动能力的相关研究。

此次研究基于三维运动捕捉技术,对 30 名受试者髋关节不同自由度的运动过程进行实时捕捉,记录髋关节运动轨迹,建立运动模型;定量分析运动幅度、角速度等相关参数,为关节功能评估、康复训练、体育健身提供科学的理论指导。

1 对象和方法 Subjects and methods

1.1 设计 运动学测试与分析试验。

1.2 时间及地点 于 2019 年 7 至 11 月在沧州医学高等专科学校科技实验中心完成。

1.3 对象 选择沧州医学高等专科学校 30 名男性大一学生作为受试者,提前告知试验目的、方法,并签订知情同意书。受试者要求条件:年龄(20.1±0.5)岁,身高(1.73±0.10)m,体质量(62.4±0.7)kg;身体健康,解剖结构和功能正常,运动能力良好,无任何下肢损伤,24 h 内未从事剧烈运动。

1.4 方法

1.4.1 运动捕捉系统 采集受试者运动数据的硬件设备为三维红外运动捕捉系统(Vicon Motion Analysis 公司,英国),

配置与参数设定:装配 12 台红外摄像头,选择 7 mm 的红外反光 Marker 球作为标识点,捕捉频率 100 Hz。

1.4.2 粘贴 mark 点 受试者身穿深色紧身衣裤,在下肢粘贴固定发光标识点,即 Marker 点,选择优势侧肢体髂前上棘、髂后上棘、股骨大转子、股骨内上髁、股骨外上髁、股骨中部内侧面与外侧面、前面与后面,合计 9 个反光点^[9-10],见图 1。



图 1 | 标识点粘贴示意图

Figure 1 | Paste the schematic diagram of the marker points

1.4.3 摄像头校正 标识点粘贴完毕后,校准摄像头,设置 Vicon 数据采集软件测量模式、采集区域,根据屏幕显示调整受试者所站位置,使之处于摄像机的捕捉区域。建立空间直角坐标系,以空间原点为基准,左右方向为 X 轴,前后方向为 Y 轴,上下方向为 Z 轴^[11-12]。

1.4.4 数据采集 试验前关闭门窗,遮挡一切发光的物体,避免外界光线对数据采集的影响。启动三维运动捕捉设备,输入受试者信息、试验时间、采集频率,开始试验。

试验内容:受试者在采集前练习 3-5 次,听到开始信号后,按照动作要求(选取优势侧下肢,身体直立、最大幅度、最快速度),髋关节依次做前屈、后伸、内收、外展、旋内、旋外及复位动作;每个动作做 20 次。Vicon 三维运动捕捉系统追踪记录 marker 点运动轨迹,将受试者髋关节的位置变化转化为空间矢量变量。所有受试者数据均由固定人员实施、记录,以“.c3d”文件存储。

1.4.5 数据处理 所用分析软件为 Vicon Nexus Workstation(Vicon Motion Analysis 公司,英国),版本为 1.8.5。打开采集的运动数据,检验受试者标识点数、标识点间的连接关系,运动轨迹。运动中固定的标识点至少需要两台摄像机捕捉到,若没有捕捉到,出现标识点的“闪现”或“丢失”现象^[13]。标识点丢失即为无效数据,需要进行补点修复,按照运动轨迹,逐帧查找,点击“补间数据”,追踪显示,依次连接,保证运动轨迹的完整。修复完成后,再对运动数据采用低通滤波处理,插值计算,以“TRC 文件”,输出保存,见图 2。

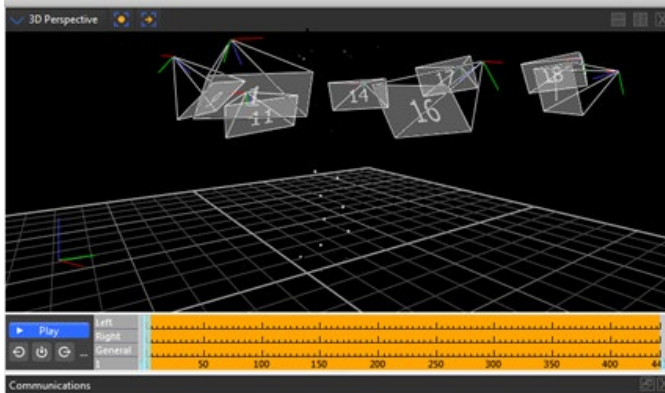


图2 | 数据分析, 检验标识点

Figure 2 | Data analysis, testing standard pilot

此次研究主要从髋关节在各个平面中的最大运动幅度、角度随时间变化过程两方面来分析髋关节的运动能力。

1.4.6 建立下肢运动模型 经过对标识点命名, 将所采集的运动学信号数据去除噪点、删补轨迹等一系列处理, 建立下肢运动模型, 在三维窗口展示髋关节的各种运动轨迹; 数据栏可以显示运动中每一帧图像的速度、角度。图像采集频率为 100 Hz, 帧与帧间隔为 0.01 s, 根据公式: 速度 = 距离 / 时间, 可以计算出角速度。

1.4.7 获得运动学参数 髋关节的关节角度为股骨的长轴线与垂直于地面的参考线之间的夹角, 前屈角度为正, 后伸角度为负; 外展角度为正, 内收角度为负; 旋外角度为正, 旋内角度为负 [14-16]。

1.5 主要观察指标 受试者髋关节在矢状轴、冠状轴、垂直轴上的最大运动幅度与时间, 分析计算极值、速度与角速度等运动学数据。

1.6 统计学分析 将所有受试者髋关节运动幅度、角度等运动学数据导入 SPSS 20.0 统计软件分析离散度, 选择 95% 置信区间, 计算平均值, 以 $\bar{x} \pm s$ 表示, 最终获得各自由度髋关节的活动范围及最大幅度 (极值)。

2 结果 Results

2.1 参与者数量分析 30 名受试者均完成测试, 以避免受试者由于肌肉疲劳导致的运动幅度偏差, 选择 95% 的置信区间进行分析。

2.2 试验流程图 见图 3。

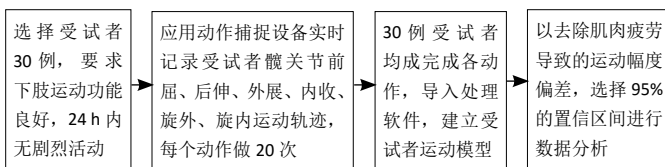


图3 | 试验流程图

Figure 3 | Trial flow chart

2.3 髋关节各自由度运动极值 髋关节围绕不同的运动轴 (冠状轴、矢状轴、垂直轴), 在不同的运动面 (矢状面、冠状面、水平面) 中的最大运动角度与时间见表 1。

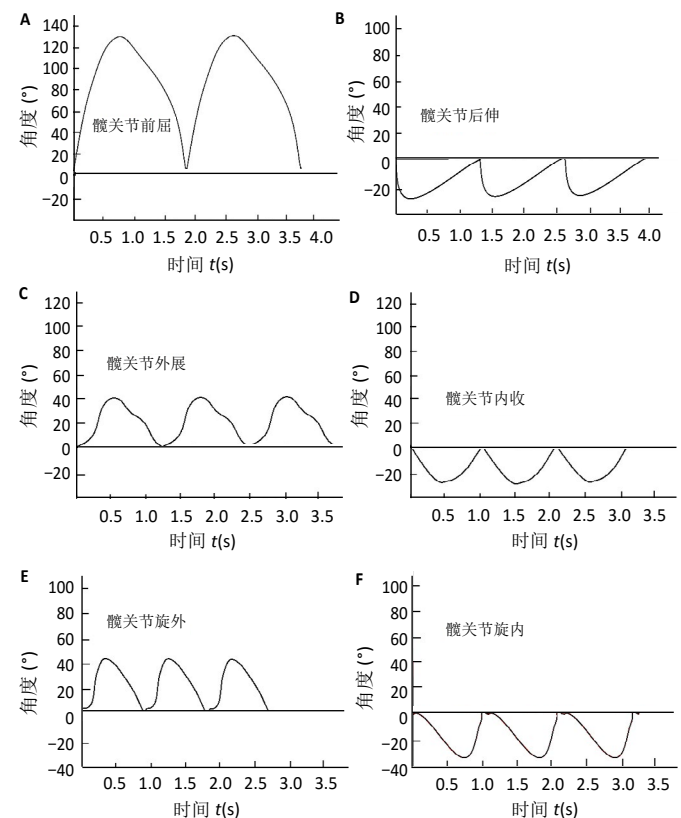
表 1 | 髋关节在各种运动中的最大运动角度与时间 ($\bar{x} \pm s$, $n=30$)

Table 1 | Extremum and time of the hip in various movements

关节运动	运动面	最大运动角度 (°)	时间 (s)
前屈	矢状面	132.43±8.63	1.82±0.31
后伸	矢状面	15.27±5.18	1.39±0.12
外展	冠状面	39.51±7.66	1.19±0.08
内收	冠状面	28.73±3.55	1.08±0.15
旋外	水平面	43.78±5.71	0.91±0.13
旋内	水平面	38.64±4.09	1.02±0.07

由上表可以看出, 髋关节在矢状面的屈伸范围明显大于在冠状面的外展内收及水平面的旋内和旋外; 在时间上, 矢状面的屈伸耗时较长, 旋内旋外耗时较短。

2.4 生成角度时间变化曲线 选择运动学数据的 95% 置信区间, 导出髋关节在各自由度运动过程的角度 - 时间变化曲线见图 4。



图注: 图 A 为矢状面前屈与复位运动角度 - 时间曲线; B 为矢状面后伸与复位运动角度 - 时间曲线; C 为冠状面外展与复位运动角度 - 时间曲线; D 为冠状面内收与复位运动角度时间曲线; E 为水平面旋外与复位运动角度时间曲线; F 为水平面旋内与复位运动角度时间曲线

图 4 | 髋关节运动角度 - 时间曲线

Figure 4 | Angle-time curves of motion of the hip

由上图曲线可以看出, 运动过程中, 髋关节角度随时间而变化, 但是角度 - 时间变化非线性关系。前屈、后伸运动在开始阶段, 角度变化明显, 曲线较陡直; 复位过程, 曲线斜率较平, 角度变化减缓。外展运动中, 曲线呈“S”形, 初期角度变化较慢随后变快, 又逐渐减慢, 至最大幅度; 恢复阶段, 曲线相对低平。内收与复位运动中, 曲线大至呈对称形状。旋外运动, 初期角度变化较慢随后变快, 又逐渐减

慢,至最大幅度;恢复阶段,曲线斜率降低,大致呈线性。旋内运动,斜率较小,角度变化较慢,至最大幅度;复位过程,斜率较大,角度变化较快。

3 讨论 Discussion

运动能力指个体运动或训练所具有的能力,包括力量、速度、耐力及柔韧性等方面;与身体结构、肌肉、心肺功能密切相关,是个体形态、功能与心理素质多种因素的综合表现。近年来,关节功能障碍“腰腿疼”发病率逐年增高,科研人员对人体下肢的运动能力分析成为一热点^[17]。人体下肢关节有髋关节、膝关节和踝关节,髋关节的运动能力表现在围绕各运动轴上的运动幅度和运动速度。然而,人体结构复杂,测量髋关节运动幅度,传统研究方法主观性较强,难以准确评估关节的运动能力;不同机构与学者研究结论差距较大,缺乏权威性^[18]。

随计算机技术的发展,兴起了运动捕捉技术,在运动目标的关键位置粘贴标记点,由红外摄像系统实时追踪、记录目标的移动轨迹,通过计算机进行图像解析计算,获得全方位的运动学参数来分析运动能力。与以往分析方法相比,采集数据真实,结果可靠,提高了分析的准确性和科学性,广泛用于体育、医学、军事等领域^[19-21]。但是,相关下肢运动能力的研究多集中在步态分析,或上下楼梯,或某一动作,尚未见运动极值的分析^[22-24]。此次研究基于运动捕捉技术,实时捕捉、记录髋关节在不同自由度的运动信息,经检测、修补,成功构建了下肢运动模型,客观、准确地计算出了髋关节在矢状面、冠状面、水平面运动中的最大幅度即极值^[25]。

2018年《中国人口老龄化发展趋势预测报告》表明,到2023年国内老年人口将达到2.7亿;流行病学研究表明,1.42%的老年人患有关节功能障碍。国内养老服务体系尚不健全,如何准确评估老年人肢体运动功能是当前医学界面临的难题^[26-28],此次研究可为客观评价老年人髋关节的运动能力提供一定借鉴。

此外,此次研究绘出髋关节不同运动中的角度-时间曲线,根据斜率,可以计算出瞬时角速度;斜率改变,表明存在角速度的变化,即存在角加速度。由曲线图可见,前屈、后伸、外展、旋外4种运动的开始阶段角加速度较大,复位阶段角加速度较小;旋内运动实施阶段角加速度较小,复位阶段角加速度较大;内收由于运动幅度较小,主动实施与复位大致呈对称状,角加速度大致相等。根据牛顿定理,加速度的产生来源于力^[29],髋关节在不同运动与复位过程中,关节合力在不断变化,应力分布不均衡将导致关节损伤,即下肢运动损伤易发生在应力极值的时刻。临床病例调查表明,人体长期进行剧烈运动,常导致关节损伤,士兵、运动员是关节损伤的高发人群^[30];髋关节运动损伤常发生在超幅度运动,或快速运动过程中;膝关节在屈曲时做强力外翻或内翻、内旋或外旋,半月板上随股骨髁活动,下面与胫骨平台之间形成旋转摩擦剪力,超过了半月板允许范围,即引起半月

板的损伤,符合此次研究角加速度的变化即应力改变与临床损伤的内在联系,可为相关运动生物力学研究的设计提供一定参考。

医学康复是通过日常锻炼或专项运动等方式帮助患者最大程度地恢复运动能力^[31-33]。有学者分析了外展不同角度以及不同负荷对髋关节应力分布及应变的报道^[34-35],但此类研究大都是静态或运动中某一体位的力学分析,或模拟体质量负荷,未考虑运动过程中肌肉力的影响,结果有待进一步完善。下一步计划联合测力台与肌电信号采集设备^[36-39],获得受试者的力学信息,导入有限元分析平台,从传统的静态力学分析深入到动态力学研究,分析运动中关节的应力与应变规律;有助于医护人员设计科学的治疗方案,监测人体下肢运动能力,对治疗效果的评价具有重要意义。

人类的体能在不断提高,体育向更快、更高、更强的目标发展,世界纪录不断被刷新又被打破。基于三维动作捕捉技术实时记录运动过程,全面定量地分析运动学参数,与标准动作对比,直观展示动作的不足与自身缺陷^[40-42],从而设计针对性的练习并进行改善,为提高训练效果提供科学指导。

总之,基于运动捕捉技术将运动过程转化为数学模型进行参数分析,可为运动员乃至广大民众的科学训练、全民健身避免运动损伤提供科学依据,进而改善和提高国民体质,有着较高的应用价值与广阔前景,值得更深一步研究和探索。

致谢: 此次研究是课题组同仁的努力的成果,在此向全体课题组成员致以崇高的敬意和感谢!同时感谢参与项目测试的学生!

作者贡献: 张海峰负责试验设计与实施及撰写论文,赵灿、刘美晓负责数据采集,宋翠荣负责收集文献、数据分析,庞鹿负责技术指导、试验评估与审核。

经费支持: 该文章接受了“河北省卫健委指导项目”的基金资助。所有作者声明,经费支持没有影响文章观点和对研究数据客观结果的统计分析及其报道。

利益冲突: 文中试验采用动作捕捉设备,文章的全部作者声明,没有接受该设备公司的任何资助,在课题研究和文章撰写过程,不存在利益冲突。

机构伦理问题: 该研究方案的实施符合《赫尔辛基宣言》和沧州医学高等专科学校对研究的相关伦理要求(审批时间:2019年6月)。

知情同意问题: 参与试验的志愿者为自愿参加,均对试验过程完全知情同意,在充分了解试验方案的前提下签署了“知情同意书”。

写作指南: 该研究遵守《观察性临床研究报告指南》(STROBE指南)。

文章查重: 文章出版前已经过专业反剽窃文献检测系统进行3次查重。

文章外审: 文章经小同行外审专家双盲外审,同行评议认为文章符合期刊发稿宗旨。

生物统计学声明: 文章统计学方法已经沧州医学高等专科学校医学统计学专家审核。

文章版权: 文章出版前杂志已与全体作者授权人签署了版权相关协议。

开放获取声明: 这是一篇开放获取文章,根据《知识共享许可协议》“署名-非商业性使用-相同方式共享4.0”条款,在合理引用的情况下,允许他人以非商业性目的基于原文内容编辑、调整和扩展,同时允许任何用户阅读、下载、拷贝、传递、打印、检索、超级链接该文献,并为之建立索引,用作软件的输入数据或其它任何合法用途。

4 参考文献 References

- [1] 郭敏. 老年人盲目健身, 当心半月板损伤 [N]. 中国中医药报, 2018-5-4.
- [2] 李彦林. 运动医学 - 新兴的朝阳学科 [J]. 昆明医科大学学报, 2014, 35(3):1-3.
- [3] CULIVER A, GARRISON JC, CREED KM, et al. Correlation Among Y-Balance Test-Lower Quarter Composite Scores, Hip Musculoskeletal Characteristics, and Pitching Kinematics in NCAA Division I Baseball Pitchers. *J Sport Rehabil.* 2019;28(5):432-437.
- [4] KERRIGAN DC, THIRUNARAYAN MA, SHEFFLER LR, et al. A tool to assess biomechanical gait efficiency: a preliminary clinical study. *Am J Phys Med Rehabil.* 1996;75(1):3-8.
- [5] SCHUTTE LM, NARAYANAN U, STOUT JL, et al. An index for quantifying deviations from normal gait. *Gait Posture.* 2000;11(1):25-31.
- [6] 孙嘉利, 唐丹, 钟世镇. 三维步态分析的研究与应用 [J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2007, 11(5):944-948.
- [7] 赵辉, 吴海山. 步态分析在全膝关节置换手术中的应用 [J]. 中华骨科杂志, 2010, 30(6):630-634.
- [8] 王宇, 郑义, 张健. 髓关节主动运动幅度与被动运动幅度的定量关系 [C]. 中国运动生物力学分会, 深圳, 2018.
- [9] 王辉昊, 张旻, 牛文鑫, 等. 三维运动捕捉技术在颈椎整复手法中肢体运动轨迹的在体研究 [J]. 中国骨伤, 2015, 28(10):940-944.
- [10] 谭菁华, 晏怡果. 光学式三维运动捕捉在运动系统相关研究中的应用 [J]. 海南医学, 2018, 29(14):2029-2332.
- [11] 韩树洋. 人体关节生物力学实验及仿真研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014:1-148.
- [12] 毛玉蓉, 陈娜, 陈沛铭, 等. 健康中老年人上肢负重状态下利手和非利手的三维运动学分析 [J]. 中国组织工程研究, 2015, 19(42):6776-6781.
- [13] 马倩颖, 吴瑞林, 王亚猛, 等. 基于动作捕捉的减重条件下心理疲劳状态测量技术 [J]. 航天医学与医学工程, 2019, 32(4):291-298.
- [14] 苏健蛟, 张颖慧, 马世坤. 不同级别优秀散打运动员鞭腿技术动作特征及其对击打速度的影响 [J]. 武汉体育学院学报, 2018, 52(1):87-94.
- [15] 张振华, 刘永涛. 全髌关节置换后髌关节前屈后伸活动范围计算 [J]. 临床医学工程, 2010, 17(2):4-6.
- [16] 刘永涛, 张振华. 髌臼外展角与前倾角动态变化规律的数学方法解析 [J]. 中国组织工程研究与临床康复, 2009, 13(35):6973-6975.
- [17] 张浩, 陈子超. 增强式训练对运动员下肢运动能力影响的 Meta 分析 [J]. 湖北体育科技, 2020, 39(4):318-322+330.
- [18] 王书海, 赵海浪, 武少广, 等. 人体下肢运动能力测评研究 [J]. 河北工业科技, 2016, 33(6):474-478.
- [19] 冯利正, 陈健. 运动捕捉技术在体育运动中的应用 [J]. 杭州师范学院学报 (医学版), 2005, 25(5):419-422.
- [20] 邱晓文, 贺西京, 黄思华, 等. 人体脊柱三维运动测量分析方法新进展 [J]. 中国骨伤, 2015, 28(5):476-481.
- [21] 谭菁华, 晏怡果. 光学式三维运动捕捉在运动系统相关研究中的应用 [J]. 海南医学, 2018, 29(14):2029-2032.
- [22] BAKKE D, BESIER T. Shape model constrained scaling improves repeatability of gait data. *J Biomech.* 2020;107:109838.
- [23] 戴园园. 老年人上下楼梯的运动学分析 [D]. 广州: 广州体育学院, 2019.
- [24] 张宇成, 郝卫亚, 李建设, 等. 优秀运动员两种跳马动作落地的运动学分析 [J]. 浙江体育科学, 2019, 41(1):102-107.
- [25] 彭志强, 敬龙军. 我国柔韧素质训练研究发展趋势及可视化分析 [J]. 体育科技文献通报, 2020, 28(7):157-160.
- [26] 王雪, 赵成玉, 白灵丽, 等. 中国社区居家养老现状 [J]. 中国老年学杂志, 2019, 39(4):1012-1015.
- [27] 陈红. 老年人健康状况及其影响因素分析 [D]. 石家庄: 河北大学, 2017:1-60.
- [28] 王晶晶, 葛高琪, 郭翼天, 等. 国内外社区居家养老模式现状 [J]. 中国老年学杂志, 2017, 37(5):1277-1279.
- [29] 龚爱平. 基于嵌入式机器视觉的信息采集与处理技术研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [30] 赵勇, 王钢. 踝关节扭伤的生物力学与运动学研究进展 [J]. 中国骨伤, 2015, 28(4):374-377.
- [31] 崔承坤. 面向偏瘫康复的人体下肢运动数据智能分析方法与实验 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2018:1-146.
- [32] YAN M, FU Z, QIN T, et al. Associations of sleep duration and prediabetes prevalence in a middle-aged and elderly Chinese population with regard to age and hypertension: The China Health and Retirement Longitudinal Study baseline survey. *J Diabetes.* 2018;10(11):847-856.
- [33] GIAQUINTO S, GALLI M, NOLFE G. A polynomial function of gait performance. *Funct Neurol.* 2007;22(1):43-46.
- [34] 张海峰, 宋翠琴, 赵文涛, 等. 髌关节外展角度对股骨颈应力分布的影响 [J]. 生物医学工程杂志, 2016, 33(2):274-278.
- [35] 徐锋鹏, 胡敏, 黄俊豪, 等. 不同类型运动对骨密度影响的研究进展 [J]. 上海体育学院学报, 2017, 41(1):55-60.
- [36] 蒋磊, 李宁, 夏美燕, 等. 膝骨关节炎对老年女性步态以及肌电活动的影响 [J]. 中华预防医学杂志, 2020, 54(3):320-322.
- [37] 李旭鸿, 喻美鑫, 范年春, 等. 老年女性不同步行增速策略的下肢关节角度和角速度变化 [J]. 中国运动医学杂志, 2019, 38(9):748-754.
- [38] TITCHENAL MR, ASAY JL, FAVRE J, et al. Effects of high heel wear and increased weight on the knee during walking. *J Orthop Res.* 2015;33(3):405-411.
- [39] 吴肖洁, 李翰君, 刘卉, 等. 不同压力弹力袜对青年女性穿高跟鞋步行时下肢关节负荷及肌肉疲劳的影响 [J]. 中国康复医学杂志, 2016, 31(9):995-1000.
- [40] 黄玉飞. 动作仿真技术在体育运动训练领域的应用研究 [J]. 安阳工学院学报, 2018, 17(4):111-114.
- [41] 张莉清, 宋子玉. 篮球技术下肢动作肌电和关节角度特征 [J]. 中国运动医学杂志, 2014, 33(7):658-663.
- [42] NOVAK D, RIENER R. A survey of sensor fusion methods in wearable robotics. *Rob Auton Syst.* 2015;73:155-170.