

文章编号:1004-7220(2016)04-0362-07

人体运动分析的发展与应用回顾

蔡宗远^{1,2,4}, 王少白^{3*}, 李国安⁴

- (1. 上海交通大学 生物医学工程学院, 上海 200240; 2. 上海交通大学医学院附属第九人民医院 骨科, 上海 200011;
3. 上海体育学院 运动科学学院, 运动健身科技省部共建教育部重点实验室, 上海 200438;
4. Massachusetts General Hospital / Harvard Medical School, Boston, MA 02114, USA)

摘要: 运动分析是研究人体运动的一门学问。通过对运动过程的分析,可以简化运动过程,方便运动标准化、提高运动效率。目前运动分析技术已广泛应用于医疗、运动科学、康复、娱乐等领域。从临床来说,运动分析已被运用于各种神经骨骼肌肉系统相关的疾病诊断、个性化治疗规划,也是评估治疗效果与医疗器材,包括骨科植入物、矫辅具以及康复器材的重要客观科学工具。未来运动分析方法的进步,将同时带动骨科、康复科、精准个体化医疗和医学工程等领域的进步。本文从骨科生物力学的角度,介绍运动分析的发展简史、现代常见的运动捕捉技术与设备、运动分析的临床应用与限制以及未来运动分析可能的发展方向。

关键词: 运动分析; 运动捕捉; 生物力学; 康复

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.3871/j.1004-7220.2016.04.362

Human motion analysis: A review of its development and applications

TSAI Tsung-yuan^{1,2,4}, WANG Shao-bai^{3*}, LI Guo-an⁴ (1. School of Biomedical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Department of Orthopedics, Shanghai Ninth People's Hospital, Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, Shanghai 200011, China; 3. Key Laboratory of Exercise and Health Sciences of Ministry of Education, Shanghai University of Sport, Shanghai, 200438, China; 4. Massachusetts General Hospital / Harvard Medical School, Boston, MA 02114, USA)

Abstract: Motion analysis is the science that quantitatively investigates human body movement. Motion analysis can help simplify human body motion when performing complex tasks, facilitate standardization of the movement and improve the efficiency of carrying out the tasks. Currently, motion analysis has been widely applied in many fields of the daily life, including medicine, sports science, rehabilitation, entertainment, etc. In clinics, motion analysis had been used in not only the diagnoses of various neuromusculoskeletal diseases and patient-specific treatment planning, but also in the evaluation of outcomes of medical devices such as orthopedic implants and rehabilitation equipment. Therefore, the development of accurate and user-friendly motion analysis techniques will greatly advance the orthopedic surgeries, rehabilitation applications, precision medicine and medical engineering research. This article briefly introduces the history of motion analysis science, typical motion capture technologies, and then discusses the clinical applications of contemporary motion analysis methods as well as its future development.

Key words: Motion analysis; Motion capture; Biomechanics; Rehabilitation

收稿日期:2016-07-05; 修回日期:2016-08-01

通信作者:李国安,教授,E-mail: Li. Guoan@mgh.harvard.edu。

* 共同第一作者

运动分析,顾名思义为研究人体运动的一门学问。早期的人体运动分析研究,旨在了解人体进行各种活动时的身体运动,并且将运动分解成许多细微瞬间加以分析。通过对运动过程的分析,可以简化运动过程,方便运动标准化、提高运动效率。现代运动分析是以科学手段测量人体的运动特征以及各关节的运动与力学表现,量化分析各肢体间相对运动情形、关节所承受的作用力等。目前运动分析技术已广泛应用在医疗、运动科学、康复、娱乐等诸多领域,对提高手术的精准度、落实康复动作执行、监测日常活动过程、进行互动式电玩游戏、录制电影特效等起到不可或缺的作用。从临床来说,运动分析已被运用于各种神经骨骼肌肉系统相关的疾病诊断、个性化治疗规划,也是评估治疗效果与医疗器材,包括骨科植入物、矫辅具以及康复器材的重要客观科学工具。未来运动分析方法的进步,将同时带动骨科、康复科、精准个性化医疗和医学工程等领域的进步。本文从骨科生物力学的角度,介绍运动分析的发展简史、现代常见的运动捕捉技术与设备、运动分析的临床应用与限制以及未来运动分析可能的发展方向。

1 运动分析的发展简史

回顾历史上人体运动分析的进展,会发现常常是当时社会的发展驱动着运动分析技术的前进。在欧洲文艺复兴时期,达·芬奇(Leonardo da Vinci, 1452-1519)出自对人物绘画的兴趣,进行了人体解剖^[1]。他详细研究了人体结构、仔细观察人体动作,使其画作中的人物不仅结构精确,而且姿态完美,也因此成为历史上最著名的画家之一。1836年,Weber兄弟是最早一批利用图形化动作分析方法定量测量人体运动时的时间和位移参数^[2],也引导随后的科学家应用科学方式量化测量人体运动。Etienne Jules Marey (1838-1904)利用气压原理测量足部与地面之间的相互作用力,是有纪录的第一个测力板装置^[3]。Edward Muybridge (1830-1904)利用自己开发的高速摄影技术来记录马匹的运动,成功地拍摄到马匹跑步时四蹄同时离地^[4]。Muybridge的高速摄影技术后来成为现代电影拍摄的起源,因而被称为摄影学之父;他的方法使人们得以观察到各种动作的细节,带领运动分析进入摄影

测量的阶段;他对运动分析贡献卓著,也引领出后续一系列的应用。Frank B. Gilbreth (1868-1924)为了探究建筑工人最有效率的砌砖动作,率先利用摄影技术记录工人砌砖时的各种动作;在纪录工人动作时,他在工人手上绑上小灯泡,并加上间断开关使得灯泡闪烁,利用灯泡亮暗轨迹的长度和方向来测量动作的速度和方向;通过科学地研究和分析,他将手部动作分解为17种基本动作,简化了砌砖动作的数量,制定出更有效而省时间的砌砖方法^[5]。Gilbreth接着致力于研究进行不同工作的最有效率方法,也因此被人们称为动作研究之父。

计算机发明以前,用摄影技术进行运动分析必须依靠大量人力,分析者必须在每一个画格上手动取得特征点的座标,取点过程耗时费力,测量到的也仅是二维运动数据,无法进行三维测量。到了19世纪晚期,德国人体解剖学者 Wilhelm Braune 及数学家 Otto Fischer 为了研究装备重量对士兵的影响^[6],合作发展了三维运动分析测量方法。他们应用摄影捕捉技术、人体数学模型、肢体段质量参数与地面反作用力,根据牛顿力学定律计算而得到各关节的合力与合力矩,其测量原则即为现代的逆向动力分析。然而,受限于当时的计算手段,计算一个人走数步的资料,需要耗费几个月的时间。到了20世纪中期,为了更好地治疗在世界大战中受伤的士兵,美国加州大学进行了一系列人体运动分析研究^[7-8],为现代的运动分析提供了良好的基础。随着计算机运算能力的进步以及摄影相关技术的发展,运动分析技术也随之取得重大突破,以往需用大量人力手动取点、况且费时的运算都已被克服。新科技的进展,在提高运动分析的效率的同时也增强了精确度、可信度,由此应运而生了许多基于不同测量方法的运动分析系统。

2 运动捕捉技术与设备

现代运动分析系统,主要通过应用不同技术追踪黏贴在皮肤上的反光标记球的移动轨迹,配合多连杆运动模型,计算关节运动。运动分析根据运动参数、不同肢体段质量参数、测力板测量到的地面反作用力,运用牛顿力学定律,以逆向动力分析计算而得到各关节的合力与合力矩。主要常见的运动捕捉设备,可分为光学式、电磁式、惯性式测量装置。

运用红外线反光标记与红外线摄影机的运动捕捉系统,是现在最常见且最普遍运用的光学式运动分析设备。使用多部红外线摄影机记录下红外线反光球的反射,确定反光球在影像上的位置,搭配影像处理,便可以自动计算出反光球中心点在影像上的位置。只要同一个反光球能被两台以上的摄影机同时拍摄到,便可以利用直接线性转换方法(direct linear transformation)^[9-10]与立体摄影术(stereophotogrammetry)^[11]计算反光球中心点在空间中的三维轨迹。应用此系统,在一个物体上必须黏贴至少3个反光标记,就能定义物体的座标系统,精确描述物体在空间中的位置和方向。然而,利用多部摄影机和系统主机的传统运动分析系统体积庞大、移动不便、价格昂贵,在应用上受到很大的限制,其在临床上的推广一直以来存在障碍。最近,有学者应用数字导航设备开发出了小体积、便携式、操作方便的三维关节动态检测的系统^[12]。此系统由于两个摄影机相对位置固定,使用前不需进行系统校正。通过模块化流程设计以及对红外线反光球阵列的追踪,小型三维关节动态检测系统可对活体关节在承重状态下、功能性运动过程中的运动学特征进行动态数字化评估,对推广运动分析在临床医院进行即时诊断和现场应用具有巨大价值。但是使用红外线的设备在户外阳光强烈的地点,可能受限于过强红外线产生的信号干扰,会造成测量的困难与误差。

电磁式的运动追踪设备,使用一个电磁发射设备在空间中产生磁场,通过数个传感器贴附在不同肢段上,感测运动时产生的磁场变化,计算出感测器在空间的位置及方向^[13]。此设备使用单一个传感器便可以测量6个自由度,但由于感测器有一定的重量与体积,在使用时有可能影响动作。使用电磁追踪设备时,要注意周围环境可能引起的电磁场变化,影响测量的精确度,例如测量现场周围的金属组件都有可能干扰电磁场。

惯性式运动分析装置,主要是利用陀螺仪与加速仪^[14]。由于现代微电机的发展,加速仪和陀螺仪都可以微型化,便于携带,并且已经广泛应用于手机等智能型装置中,其特点是因耗电量低,无需外部配套设备捕捉,所以可长时间追踪人体运动。对角加速度以及线性加速度两次积分,可以求取物体在空间中的位置和角度。然而在积分过程中,会产生误

差,长时间的追踪可能累积严重误差。

上述测量方法都是在人体表面黏贴标记或感测组件,以求取标记或是感应组件的运动来代表人体运动,然而皮肤与骨骼之间隔着软组织,在人体移动时会产生软组织变形,使得感应组件与底下的骨骼产生相对位移,即为运动分析技术最大的误差来源之一:软组织移动误差。侵入式的测量方法使用骨钉把反光标记或感应组件直接固定在骨头^[15]。此方法虽然能直接精确测量到骨骼运动,但侵入式的手段限制了软组织在骨骼上的自然位移,也影响了受测者的运动,还让受测者暴露在感染的风险之中。由于道德的问题,侵入式测量方法在活体运动测量的应用受到很大限制,但仍有应用于动物模型报道^[16]。因此,发展非侵入式、精确的运动分析量测方法,是测量到活体自然功能性运动时关节运动参数的必须手段。

3 医用影像分析技术

X光射线的发现以及医学影像技术的发展,提供了以非侵入式手段直接测量骨骼技术的契机。传统的X光片,可直接拍摄骨骼影像,进行二维测量。Torzilli等^[17]用特定平面拍摄膝关节胫骨前后位移,即膝关节骨头相对应位置的X光影像。由于其来源为二维影像,尽管可用数学推算其他方向的旋转角度,然而估算值的误差较大。X光立体摄影术,在物体上嵌入的钽制小圆球标记,使用两个X光成像系统同步拍摄钽制小圆球物体的影像,藉由数学运算获得物体的三维空间位置。其测量位置可精确至 $10 \sim 250 \mu\text{m}$,角度可精确至 $0.03^\circ \sim 0.6^\circ$,是拥有很高精确度的三维运动学测量方法^[18]。目前,X光立体摄影术已广泛运用于各领域,例如肿瘤学(oncology)、齿科医学(odontology)以及整形手术(plastic surgery)与神经手术(neurosurgery)等临床手术中^[19]。此种方法虽然精确,却属于侵入式方法,仅能用在静态位置的测量。动态X光系统(Fluoroscopy),可连续摄取动态影像。目前动态X光系统多为影像增强器成像系统,将不可见X光转换成可见光后成像,然而成像过程中会受到输入荧光屏的外型影响,X光电子束也会受到周围电磁场的影响。输出荧光屏本身的几何形状以及后续录像设备的特性也会造成影像扭曲(image distortion),故输出影像需要影像校正

后才可进行分析。Baltzopoulos^[20]提出利用多项式来校正动态 X 光影像扭曲的方法,并且利用动态 X 光系统测量膝关节在屈伸动作时髌骨韧带的力臂及髌骨韧带与胫骨平面的角度。为了校正影像扭曲, Baltzopoulos 设计了一个 5 mm 厚并于每 10 mm 间隔处镶上铁丝的平板校正器,其铁丝的交点即为计算所需的校正点。从影像上选取校正点位置后,透过高次多项式计算求得校正参数,将影像校正回正确位置,其误差分析所得误差为(0.246 ± 0.111) mm。然而动态 X 光技术所获得的影像数据也仅限于二维,并不能完整描述人体关节的三维运动。计算机断层扫描(computer tomography, CT)与核磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)方法可以得到一系列的骨骼与软组织断面影像,通过影像分析与堆叠技术,可以得到精确的三维重建骨骼模型和关节骨骼相对位置关系。然而,此测量手段不能应用在动态动作的测量上,无法定量测量活体关节运动,由于 CT 和 MRI 的机器位置限制,通常也无法做到负重位下的人体测量。

利用单平面动态 X 光(一套设备)而不需要植入标记的三维运动测量方法由 Scott Banks 提出^[21]。他应用三维飞行器外型辨识的方法^[22],来测量人工全膝关节的三维运动。Banks 利用人工全膝关节在 X 光下清晰可见的特性,透过动态 X 光记录运动时的连续影像,配合人工全膝关节的计算机立体模型,将 X 光拍摄的影像轮廓与模型投影所得的轮廓进行比对。比对算法用 Wallace 和 Mitchell^[23] 及 Wallace 和 Wintz^[22] 提出的傅里叶算子(Fourier descriptor)描述每个轮廓,并藉由各轮廓间傅里叶算子的不同来比对并寻得最优化的人工全膝关节的空间位置。得到人工关节组件的位置之后,进一步计算人工全膝关节的运动。然而,单平面动态 X 光系统的点光源投影模型具有天生的缺陷,当被测量物体远离 X 光光源时,影像的放大率下降,会造成平面外方向平移较大误差,无法精确测量关节 6 个自由度的运动。

使用单平面动态 X 光搭配三维骨骼模型测量骨骼位置的方法,在 20 世纪末期由 Weese 等^[24] 以及 Penney 等^[25] 学者提出,应用在脊柱位置与方位的测量。早先此方法仅被用来做单一位置的测量,以进行后续的手术导引,并未应用于活体关节的连

续动态运动的测量。李国安与 Scott Tashman 等学者分别开发了双平面动态 X 光追踪技术,此方法应用两个二维动态 X 光影像与三维骨骼模型,使用优化手段进行双平面的三维模型和二维影像比对,找到最匹配的三维模型位置,以求得活体关节功能性动作时的三维运动。此技术已被应用于人体的各个主要关节,包括髌关节、膝关节、脊柱、踝关节等^[26-30];同时也已应用到骨骼肌肉系统相关疾病研究,引导出一系列关于活体骨关节生物力学的重要研究发现^[31-34]。双平面动态 X 光技术让人们可以一窥活体关节运动的奥秘,然而,受限于成像平面的尺寸以及 X 射线的放射剂量,双平面动态 X 光方法目前仍然只能应用在局部关节运动的测量上,无法同时观测全身关节运动。

4 运动分析的应用与限制

运动分析的技术同时也被应用到娱乐产业,包含近年非常热门的体感电玩^[35]。不需要按键,而是直接用动作进行游戏的模式受到许多消费者喜爱,至今已经发行了无数体感游戏。运动分析在电影产业的应用,包含动画人物的动作模拟、3D 电影的特效制作等,全都需要运动分析技术,如 2015 年底上映的《星际大战-原力觉醒》这部著名的 3D 电影。

临床上,运动分析技术已经被广泛应用于各类与人体动作相关的研究,例如脑性麻痹(cerebral palsy)^[36-38]、中风(stroke)^[39-41]、骨性关节炎(osteoarthritis)^[42-44]、前十字韧带损伤(anterior cruciate ligament deficient)^[45-47]及其重建(reconstruction)^[48-49]、脊髓损伤(spinal cord injury)^[50-52]、人工全膝关节置换(total knee replacement)^[53-57]等。例如:通过比较正常人与脑性麻痹病人的步态发现,脑性麻痹患者的关节受力因肌肉力量与控制的缺陷而与正常人不同,使这类患者的下肢关节容易受损。

基于医学影像追踪技术针对单一关节的运动测量方法,也被用来评估不同的人工全膝关节设计对膝关节运动学的影响。结果显示,不同人工全膝关节设计在功能运动的表现上明显受到其形状及设计和医师置换技巧的影响,所测量到的人工关节运动与正常人的膝关节运动不尽相同,表明目前人工全膝关节的设计仍有改善空间^[58-59]。运动分析技术在医疗上还有许多应用,如用来实时追踪手术、进行

手术导航、测量受测者平日的活动度、睡眠品质、康复动作的指导、老人跌倒的监测等。

虽然运动分析已被应用在许多临床议题上,可以提供许多信息以利于临床人员判读评估,但运动分析依然有其不足的地方。主要是运动分析设备的价格不菲、粘贴标记耗费时间以及分析软件设计不够周全。临床人员常常受软硬件技术限制,而无法大量应用到各类不同患者身上。估算人体运动时关节内力至今仍是生物力学研究中最大的挑战之一,现在的运动分析技术也仍然无法用非侵入式的方法提供关节内力的信息。目前使用非侵入方法的研究仍限于探讨活体运动中运动学与动力学相关的变量,包括关节角度、位移及力矩等。

5 运动分析的未来发展方向

应用运动分析来评估与诊断神经骨骼肌肉系统疾病有其优点与必要性,科学量化的运动分析手段也将持续在临床骨科与康复工程等领域扮演着重要的角色。通过运动分析技术获取关节各方向的不稳定表现,以辅助运动损伤的诊断;评估病人接受不同治疗方法、辅具、植入物之后的表现,可回馈到治疗,以矫正异常关节运动或参数,协助病人恢复正常功能。因此,可以预期运动分析将会持续发展,同时驱动临床疾病的诊断与治疗的进步。然而,目前大多数的运动分析系统不易携带、价格昂贵、后处理程序繁杂,限制了运动分析应用的普及率。未来的运动分析设备需要更轻便、可携、容易操作和进行数据分析、价格合理,如此才能真正落实且普及运动分析的各种应用。未来运动分析可能有以下几个发展方向。首先,降低皮肤移动误差造成的影响,提高目前运动分析方法的精确度;发展无标记分析系统,使得运动分析的应用更方便,节省准备时间;发展可常规放入人工植入物内的力学与运动学传感器技术,以记录骨骼内力和运动数据;研发使用更简易、价格更合理、易于携行的运动分析系统,有助于开展更多临床运动分析的应用。期望未来,更进步的运动分析技术能对临床骨科、运动科学、康复工程、居家护理等领域产生积极正面的影响,提高大众健康水平。

参考文献:

- [1] O'MALLEY CD, SAUNDERS JB. Leonardo da Vinci on the human body: The anatomical, physiological, and embryological drawings of Leonardo da Vinci: with translations, emendations and a biographical introduction [M]. USA: Gramercy Books, 1952.
- [2] WEBER W, WEBER EF. Mechanik der menschlichen gewerkzeuge: Eine anatomisch-physiologische Untersuchung [M]. Germany: Ulan Press, 1836.
- [3] MAREY E. De la mesure dans les differents acts de la locomotion [J]. Comptes Rendues de l'Academie des Sciences de Paris, 1883, 97: 820-825.
- [4] MUYBRIDGE E. Animal locomotion: An electrophotographic investigation of consecutive phases of animal movements. 1872-1875 [D]. Pennsylvania: University of Pennsylvania, 1887.
- [5] GILBRETH FB, GILBRETH LM. Classifying the elements of work [J]. Management Administration, 1924, 8: 151-154.
- [6] BRAUNE W, FISCHER O. Der Gang des Menschen: I. Theil: Versuche am unbelasteten und belasteten Menschen [M]: Germany: BS Hirzel, 1985.
- [7] EBERHART HD, INMAN V, SAUNDERS J, et al. Fundamental studies of human locomotion and other information relating to design of artificial limbs [M]//Report to the National Research Council. USA: [s. n.], 1947.
- [8] INMAN VT, RALSTON HJ, TODD F. Human walking [M]. USA: Williams & Wilkins, 1981.
- [9] ABDEL-AAZIZ Y, KARARA H. Direct linear transformation from comparator co. ordinates into object space coordinates in close range photogrammetry [C]//Proceedings of ASP Symposium on Close Range Photogrammetry. Fall Church: [s. n.], 1971.
- [10] HATZE H. 1988. High-precision three-dimensional photogrammetric calibration and object space reconstruction using a modified DLT-approach [J]. J Biomech, 1988, 21(7): 533-538.
- [11] BUTTERFIELD R, HARKNESS R, ANDREWS K. A stereophotogrammetric method for measuring displacement fields [J]. Géotechnique, 1970, 20: 308-314.
- [12] YU Z, YAO Z, WANG S, et al. Motion analysis of Chinese normal knees during gait based on a novel portable system [J]. Gait Posture, 2015, 41(3): 763-768.
- [13] AN KN, JACOBSEN M, BERGLUND L, et al. Application of a magnetic tracking device to kinesiological studies [J]. J Biomech, 1988, 21(7): 613617-615620.
- [14] VERPLAETSE C. Inertial proprioceptive devices: Self-motion-sensing toys and tools [J]. IBM Systems J, 1996, 35: 639-650.
- [15] REINSCHMIDT C, VAN DEN BOGERT AJ, NIGG B, et al. Effect of skin movement on the analysis of skeletal

- knee joint motion during running [J]. *J Biomech*, 1997, 30(7): 729-732.
- [16] GUSHUE DL, HOUCK J, LERNER AL. Rabbit knee joint biomechanics: Motion analysis and modeling of forces during hopping [J]. *J Orthop Res*, 2005, 23(4): 735-742.
- [17] TORZILLI P, GREENBERG R, INSALL J. An *in vivo* biomechanical evaluation of anterior-posterior motion of the knee. Roentgenographic measurement technique, stress machine, and stable population [J]. *J Bone Joint Surg Am*, 1981, 63(6): 960-968.
- [18] SELVIK G. Roentgen stereophotogrammetry. A method for the study of the kinematics of the skeletal system [J]. *Acta Orthop Scand Suppl*, 1989, 232: 1-51.
- [19] KÄRRHOLM J. Roentgen stereophotogrammetry: Review of orthopedic applications [J]. *Acta Orthopaedica Scandinavica*, 1989, 60(4): 491-503.
- [20] BALZPOULOS V. A videofluoroscopy method for optical distortion correction and measurement of knee-joint kinematics [J]. *Clin Biomech*, 1995, 10(2): 85-92.
- [21] BANKS SA. Model based 3D kinematic estimation from 2D perspective silhouettes: Application with total knee prostheses [D]. Massachusetts; Massachusetts Institute of Technology, 1992.
- [22] WALLACE TP, MITCHELL OR. Analysis of three-dimensional movement using Fourier descriptors [M]//IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. USA; IEEE, 1980; 583-588.
- [23] WALLACE TP, WINTZ PA. An efficient three-dimensional aircraft recognition algorithm using normalized Fourier descriptors [J]. *Comput Graph Image Process*, 1980, 13(2): 99-126.
- [24] WEESE J, PENNEY GP, DESMEDT P, *et al.* Voxel-based 2-D/3-D registration of fluoroscopy images and CT scans for image-guided surgery [J]. *IEEE Trans Inf Technol Biomed*, 1997, 1(4): 284-293.
- [25] PENNEY GP, WEESE J, LITTLE JA, *et al.* A comparison of similarity measures for use in 2-D-3-D medical image registration [J]. *IEEE Trans Med Imag*, 1998, 17(4): 586-595.
- [26] TSAI TY, LI JS, WANG S, *et al.* A novel dual fluoroscopic imaging method for determination of THA kinematics: *In-vitro* and *in-vivo* study [J]. *J Biomech*, 2013, 46(7): 1300-1314.
- [27] LI G, WUERZ TH, DEFRATE LE. Feasibility of using orthogonal fluoroscopic images to measure *in vivo* joint kinematics [J]. *J Biomech Eng*, 2004, 126(2): 314-318.
- [28] WANG S, PASSIAS PG, XIA Q, *et al.* *In-vivo* lumbar intervertebral disc geometric deformation during functional postures [C]//Proceedings of the ASME Summer Bioengineering Conference. Lake Tahoe; ASME, 2009; 843-844.
- [29] DE ASLA RJ, WAN L, RUBASH HE, *et al.* Six DOF *in vivo* kinematics of the ankle joint complex: Application of a combined dual-orthogonal fluoroscopic and magnetic resonance imaging technique [J]. *J Orthop Res*, 2006, 24(5): 1019-1027.
- [30] TASHMAN S, ANDERST W. *In-vivo* measurement of dynamic joint motion using high speed biplane radiography and CT: Application to canine ACL deficiency [J]. *J Biomech Eng*, 2003, 125(2): 238-245.
- [31] LI G, MOSES JM, PAPANNAGARI R, *et al.* Anterior cruciate ligament deficiency alters the *in vivo* motion of the tibiofemoral cartilage contact points in both the anteroposterior and mediolateral directions [J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2006, 88(8): 1826-1834.
- [32] LI G, SUGGS J, HANSON G, *et al.* Three-dimensional tibiofemoral articular contact kinematics of a cruciate-retaining total knee arthroplasty [J]. *J Bone Joint Surg Am*, 2006, 88(2): 395-402.
- [33] HANSON GR, PARK SE, SUGGS JF, *et al.* *In vivo* kneeling biomechanics after posterior stabilized total knee arthroplasty [J]. *J Orthop Sci*, 2007, 12(5): 476-483.
- [34] TASHMAN S, COLLON D, ANDERSON K, *et al.* Abnormal rotational knee motion during running after anterior cruciate ligament reconstruction [J]. *Am J Sports Med*, 2004, 32(4): 975-983.
- [35] PASCH M, BIANCHI-BERTHOUEZ N, VAN DIJK B, *et al.* Movement-based sports video games: Investigating motivation and gaming experience [J]. *Entertainment Computing*, 2009, 1(2): 49-61.
- [36] FABRY G, LIU XC, MOLENAERS G. Gait pattern in patients with spastic diplegic cerebral palsy who underwent staged operations [J]. *J Pediatr Orthop B*, 1999, 8(1): 33-38.
- [37] GAGE JR. The clinical use of kinetics for evaluation of pathological gait in cerebral palsy [J]. *Instr Course Lect*, 1995, 44: 507-15.
- [38] GAGE JR. Gait analysis in cerebral palsy [M]. London: MacKeith Press, 1991.
- [39] BUURKE JH, KLEISSEN RF, NENE A, *et al.* A feasibility study of remote consultation to determine suitability for surgery in stroke rehabilitation [J]. *J Telemed Telecare*, 2004, 10(2): 108-112.
- [40] TAKEBE K, BASMAJIAN JV. 1976. Gait analysis in stroke patients to assess treatments of foot-drop [J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 1976, 57(1): 305-310.
- [41] WAGENAAR RC, MEIJER OG, VAN WIERINGEN PC, *et al.* The functional recovery of stroke: A comparison between neuro-developmental treatment and the

- Brunnstrom method [J]. Scand J Rehabil Med, 1990, 22(1): 1-8.
- [42] ASTEPHEN JL, DELUZIO KJ. A multivariate gait data analysis technique: Application to knee osteoarthritis [J]. Proc Inst Mech Eng H, 2004, 218(4): 271-279.
- [43] GOH JC, BOSE K, KHOO BC. Gait analysis study on patients with varus osteoarthritis of the knee [J]. Clin Orthop Relat Res, 1993, 294: 223-231.
- [44] KAUFMAN KR, HUGHES C, MORREY BF, *et al.* Gait characteristics of patients with knee osteoarthritis [J]. J Biomech, 2001, 34(7): 907-915.
- [45] YAMAMOTO T, NIWA S, HATTORI T, *et al.* 1998. Gait analysis of ACL deficient knees. Angular velocities and flexion-extension moment around the knee joint [J]. Biomed Mater Eng, 1998, 8(3-4): 219-225.
- [46] KNOLL Z, KOCSIS L, KISS RM. Gait patterns before and after anterior cruciate ligament reconstruction [J]. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc, 1997, 5(1): 14-21.
- [47] KNOLL Z, KISS RM, KOCSIS L. Gait adaptation in ACL deficient patients before and after anterior cruciate ligament reconstruction surgery [J]. J Electromyogr Kinesiol, 2004, 14(3): 287-294.
- [48] ANDRIACCHI TP. Functional analysis of pre- and post-knee surgery: Total knee arthroplasty and ACL reconstruction [J]. J Biomech Eng, 1993, 115(4B): 575-581.
- [49] BULGHERONI P, BULGHERONI MV, ANDRINI L, *et al.* Gait patterns after anterior cruciate ligament reconstruction [J]. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc, 1997, 5(1): 14-21.
- [50] KRAWETZ P, NANCE P. Gait analysis of spinal cord injured subjects: Effects of injury level and spasticity [J]. Arch Phys Med Rehabil, 1996, 77(7): 635-638.
- [51] PATRICK JH. Case for gait analysis as part of the management of incomplete spinal cord injury [J]. Spinal Cord, 2003, 41(9): 479-482.
- [52] SMITH PA, HASSANI S, REINERS K, *et al.* Gait analysis in children and adolescents with spinal cord injuries [J]. J Spinal Cord Med, 2004, 27(Suppl 1): S44-49.
- [53] ANDRIACCHI TP, GALANTE JO, FERMIER RW. The influence of total knee-replacement design on walking and stair-climbing [J]. J Bone Joint Surg Am, 1982, 64(9): 1328-1335.
- [54] CHEN PQ, CHENG CK, SHANG HC, *et al.* Gait analysis after total knee replacement for degenerative arthritis [J]. J Formos Med Assoc, 1991, 90(2): 160-166.
- [55] BORDEN LS, PERRY JE, DAVIS BL, *et al.* A biomechanical evaluation of one-stage vs two-stage bilateral knee arthroplasty patients [J]. Gait Posture, 1999, 9(1): 24-30.
- [56] FANTOZZI S, BENEDETTI MG, LEARDINI A, *et al.* Fluoroscopic and gait analysis of the functional performance in stair ascent of two total knee replacement designs [J]. Gait Posture, 2003, 17(3): 225-234.
- [57] CATANI F, BENEDETTI MG, DE FELICE R, *et al.* Mobile and fixed bearing total knee prosthesis functional comparison during stair climbing [J]. Clin Biomech, 2011, 18(5): 410-418.
- [58] LI C, HOSSEINI A, TSAI TY, *et al.* Articular contact kinematics of the knee before and after a cruciate retaining total knee arthroplasty [J]. J Orthop Res, 2015, 33(3): 349-358.
- [59] YUE B, VARADARAJAN KM, MOYNIHAN AL, *et al.* Kinematics of medial osteoarthritic knees before and after posterior cruciate ligament retaining total knee arthroplasty [J]. J Orthop Res, 2011, 29(1): 40-46.