

文章编号:1004-7220(2016)06-0495-06

# 基于不同刚体模型对老年女性步态的仿真研究

袁晓平<sup>1</sup>, 郑明星<sup>2</sup>, 杜正<sup>2</sup>, 李旭鸿<sup>3</sup>

(1. 杭州电子科技大学 信息工程学院, 杭州 310018; 2. 杭州师范大学 体育与健康学院, 杭州 310036;  
3. 浙江体育科学研究所, 杭州 310004)

**摘要:** **目的** 比较不同的多刚体模型在模拟老年女性步行过程中的仿真精度,并在最优模型的基础上探索行走速度对膝关节负荷的影响。**方法** 在人体运动仿真软件 ADAMS/LifeMOD 中分别建立 19 个环节(M1)、16 个环节(M2)和 12 个环节(M3)的个性化人体模型和地面,并依次进行步态的仿真研究。**结果** 综合比较 3 种模型仿真得到的垂直地面反作用力、步行时间和下肢关节角度,M2 模型最适用于重现步态的实际情况。当老年女性加快步行速度时,垂直地面反作用力峰值、膝关节力矩和功率峰值都得到明显提高。**结论** 建议老年女性多加强股四头肌的力量锻炼,以改善其步行行为。同时,研究结果在临床上也可作为膝骨关节炎患者的康复治疗提供参考依据。

**关键词:** 老年女性; 步态; 多刚体模型; 仿真

**中图分类号:** R 318.01 **文献标志码:** A

**DOI:** 10.3871/j.1004-7220.2016.06.495

## A simulation study on gait in elderly women based on different rigid-body models

YUAN Xiao-ping<sup>1</sup>, ZHENG Ming-xing<sup>2</sup>, DU Zheng<sup>2</sup>, LI Xu-hong<sup>3</sup> (1. *Information Engineering School, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China*; 2. *School of Physical Education and Health, Hangzhou Normal University, Hangzhou 310036, China*; 3. *Zhejiang Research Institute of Sport Science, Hangzhou 310004, China*)

**Abstract:** **Objective** By comparing the accuracy of different multi-rigid-body models used for simulating walking process of elderly women, to explore the effect of walking speed on the load of knee joints based on the obtained optimal model. **Methods** In human motion simulation software ADAMS/LifeMOD, the individualized human body models with 19 (M1), 16 (M2) or 12 (M3) links and the corresponding grounds were established, respectively. Then, the dynamic simulation of gait based on 3 models was conducted in turn. **Results** By comparing the vertical ground reaction force (vGRF), the walking time, the lower extremity joint angles among 3 models, M2 was the most applicable model to reproduce the real performance of gait. When elderly woman fastened their walking speed, the peak values of vGRF, the knee joint torque and power peak were all increased significantly. **Conclusions** It is suggested that elderly women should do more training for their quadriceps to improve their walking behavior. The research findings also provide references for rehabilitation treatment of knee osteoarthritis patients in clinic.

**Key words:** Elderly women; Gait; Multi-rigid-body model; Simulation

骨关节炎(osteoarthritis, OA)是老年人群中最为常见的关节疾病之一,常发于膝关节等部位,且女性

患病率高于男性<sup>[1-2]</sup>。这将致使老年女性丧失一定的独立生活能力,给社会和家庭也带来很多困扰和

收稿日期:2016-01-03; 修回日期:2016-04-06

基金项目:浙江省公益性技术应用研究项目(2014C33226),国家体育总局全民健身领域研究项目(2015B083)。

通信作者:李旭鸿,副研究员, Tel: (0571)85062271; E-mail: lxhong928@163.com。

压力<sup>[3]</sup>。因此,针对老年女性在步行过程中下肢关节承载的负荷引起广泛关注<sup>[4-6]</sup>。遗憾的是,上述研究所建立的人体模型环节数量较少,与实际人体解剖结构存在一定差别,同时也无法精确量化步行过程中老年女性下肢关节所承载的负荷情况。基于此,本文利用人体运动仿真软件ADAMS/LifeMOD建立不同环节的个性化多刚体模型,将解析获取的运动学数据导入模型,通过拉格朗日乘子法进行动力学运算;探讨不同刚体模型的仿真精度以及步行速度对膝关节负荷的影响,为老年人群膝关节关节炎的发病机制、预防、康复治疗研究提供参考依据。

## 1 方法

### 1.1 实验对象

1名老年女性(年龄:67岁,身高:155cm,体重:61.4kg)自愿参加本实验测试,要求其无视觉和前庭功能障碍,且近两年内在肌肉骨骼、神经系统等方面无疾病,能够独立生活。受试对象了解和接受实验测试,并签署知情同意书。

### 1.2 测试方法

**1.2.1 三维运动学数据采集** 利用红外高速运动捕捉系统 QUALISYS (QTM公司,瑞典)和9台Oqus300+型号摄像头完成受试对象6次成功(左、右脚分别踏在两块三维测力台上)步行过程的数据采集,采样频率为500Hz。受试者全身粘贴14个直径为19mm的红外反光标志球,并且分别完成自然行走(comfortable walking, CW)和快速行走(fast walking, FW)各3次。KISTLER三维测力台两块(KISTLER公司,瑞士),型号为9287C(长×宽:900mm×600mm),外置信号放大器的采样频率为1kHz,通过数模转换器与QUALISYS系统连接并同步。利用版本为5.1.7.0的VISUAL 3D™(C-MOTION公司,美国)完成运动学和动力学参数的处理,其中运动学解析位置是以LifeMOD模型中14个标志点(marker)为标准(见图1)。最后,通过Butterworth分别对运动学和动力学数据进行低通滤波,截止频率分别为12,50Hz。

**1.2.2 个性化人体模型的建立** 根据ADAMS/LifeMOD中人体形态参数测试标准,完成受试对象头、颈、躯干、上肢和下肢各个环节长度和周长的测量,并通过人体惯性参数回归方程获取惯性参数

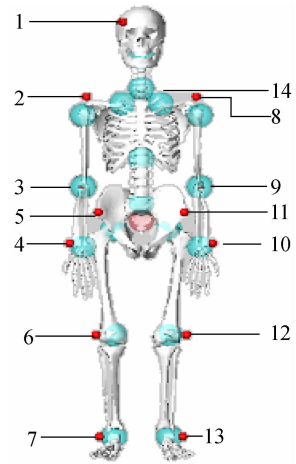


图1 基于LifeMOD人体关节的选取标准

Fig.1 Selected criteria of human body joint based on LifeMOD

(环节质量、质心、转动惯量等)。结合人体行走特征,在ADAMS/LifeMOD中建立3个不同环节的多刚体模型。模型1(M1):19个环节(详见本课题组前期研究<sup>[7-9]</sup>);模型2(M2):在M1的基础上将头和颈部、前臂和手分别视为1个环节,共16个环节;模型3(M3):在M2的基础上将肩和上、中、下躯干视为1个环节,共12个环节<sup>[10]</sup>。

ADAMS/LifeMOD中是基于拉格朗日乘子法求解代数微分方程组,继而得到相关的动力学参数。系统动力学方程统一的矩阵形式为:

$$\left. \begin{aligned} M\ddot{r} + \Phi_r^T \lambda - Q_r &= 0 \\ \dot{\Gamma} - \frac{\partial T}{\partial p} + \Phi_p^T \lambda - Q_p &= 0 \\ \Gamma - B^T J B \dot{p} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $M$ 、 $\Gamma$ 、 $T$ 分别为广义质量、广义角动量和动能矩阵, $\Phi_r^T$ 、 $\Phi_p^T$ 是对广义坐标 $r$ 、 $p$ 的偏导数, $Q_r$ 、 $Q_p$ 分别为对应于 $r$ 、 $p$ 的广义力列阵, $\lambda = [\lambda_1 \lambda_2 \cdots \lambda_{6 \times n}]^T$ 是拉格朗日乘子列阵, $n$ 为多刚体模型的环节数。 $B^T$ 为刚体质心参考坐标系与惯性系间的坐标变换矩阵, $J$ 为刚体相对质心的惯性张量。

**1.2.3 仿真流程与敏感度分析** 首先,将红外高速运动捕捉系统解析的运动学数据导入LifeMOD中,完成2个环节之间的链接,调整人体模型的空间位置后进行平衡分析。随后,创建地面并与人体模型接触,通过逆向、正向动力学实现步行过程的仿真模拟,具体方法参考本课题组前期研究<sup>[7-10]</sup>。将3种

模型仿真得到的下肢踝、膝和髌关节在矢状面内角度变化和垂直地面反作用力 (vertical ground reaction force, vGRF) 分别与实际步行过程中采集的运动学和动力学数据进行均方根差运算:

$$\Delta\delta = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (YK\alpha_i - YS\alpha_i)^2} \quad (2)$$

式中:  $YK\alpha$  和  $YS\alpha$  分别为实际与仿真获得的数据,  $n$  为每条曲线的数据个数。随后求平均值:

$$S = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \Delta\delta_i \quad (3)$$

式中:  $m=8$ , 左、右下肢矢状面内的踝、膝和髌关节的角度变化和 vGRF 变化共计 8 条曲线。S 值越小, 说明仿真模型的精度越高。

**1.2.4 指标的选择和定义** 选取 vGRF、关节力矩和关节功率等指标, 探索老年女性步行过程中速度对其膝关节负荷的影响。其中, 定义踝关节背屈、膝、髌关节屈曲的角度和力矩为正值 (+), 对应踝关节跖屈、膝、髌关节伸展的角度和力矩为负值 (-), 详见图 2。另外, 关节功率则定义为关节角速度与力矩的乘积, 正、负值则分别代表能量产生和吸收。同时, 对 vGRF、关节力矩和功率分别采用体重 (body weight, BW) 标准化。

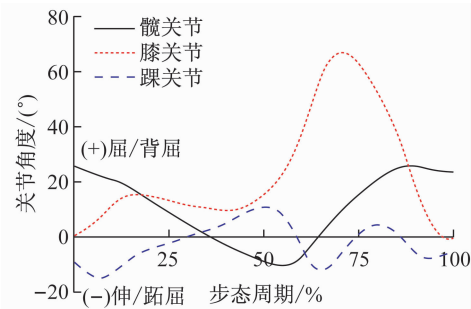


图2 步行过程中关节角度和力矩定义

Fig.2 Definition of the joint angle and torque during a gait cycle

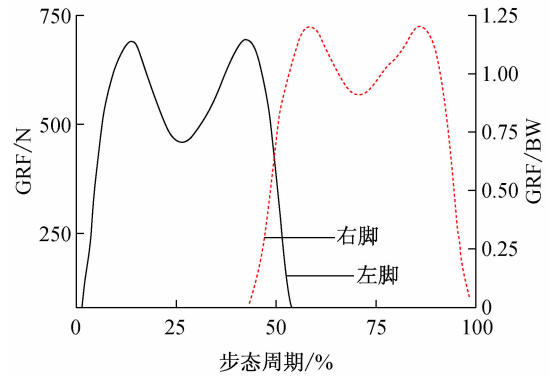
## 2 结果

### 2.1 不同刚体模型的仿真精度

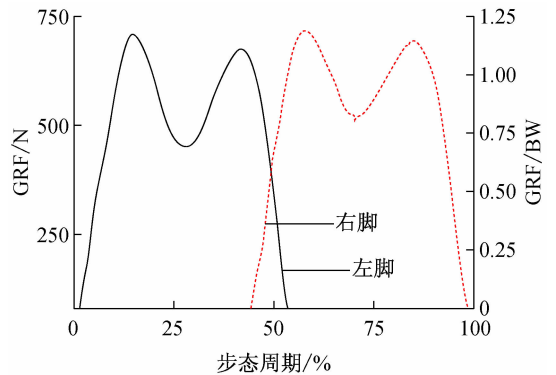
步态是一种周期性运动。本文结果显示, 不同环节多刚体模型仿真得到的步行过程并不一致 (最大差值为 5 ms), 其中 M2 模型与实际最为接近; 为了方便后期的统一处理, 需要做归一化处理。因此, 选择三维测力台出现信号即右脚跟触板瞬间为初始

时刻, 而终止点则是选择最短的步行过程为标准。

3 种多刚体模型 M1、M2 和 M3 的仿真精度分别为 1.797、1.016 和 1.577, 说明 16 个环节的 M2 模型能较为真实地反映老年人的步行过程。同时, 利用复相关系数 (CMC) [7-9] 也得出 M2 仿真得到的 vGRF 与实际采集较为吻合, 其 CMC 值为 0.987 (见图 3)。



(a) 三维测力台结果



(b) 仿真结果

图3 步行实际测试与 M2 仿真得到的垂直地面反作用力曲线

Fig.3 vGRF curves of actual movement and simulation results from M2 during a gait cycle (a) Measurement results from 3D force platform, (b) Simulation results

另外, 老年女性步行过程中下肢踝、膝和髌关节角度的变化在 3 种多刚体模型中的仿真数据与实际采集均较为相似 (CMC > 0.850)。同时, 3 种多刚体模型膝关节的仿真精度与实际情况差异较大, 踝关节次之, 髌关节最好 ( $\Delta\delta$  均值依次为 2.325、1.043 和 1.023)。而膝关节角度变化除了 a、b 处的差异较大之外, 3 种模型仿真的膝关节屈曲变化趋势均与实际运动学解析结果非常吻合, 且 M2 模型仿真精度最优 (见图 4)。

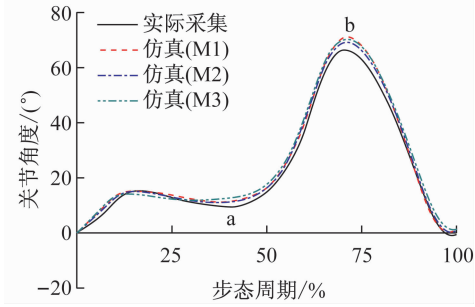


图4 步行实际测试与模型仿真得到的膝关节角度变化曲线

Fig. 4 Knee joint angle curves of actual movement and simulation results from models during a gait cycle

## 2.2 步行速度对GRF、关节力矩和功率的影响

当老年女性尽可能FW时,不论是实际采集还是模拟仿真,其左、右侧下肢承受的vGRF峰值都明显高于CW。同时,CW时,左、右脚支撑期的触地瞬间(initial contact, IC)和支撑相末期(terminal stance, TS)的vGRF峰值较为接近(700 N)。而老年女性FW时,左、右脚支撑期IC阶段的vGRF峰值明显高于TS阶段,且前后相差150 N(见图5)。

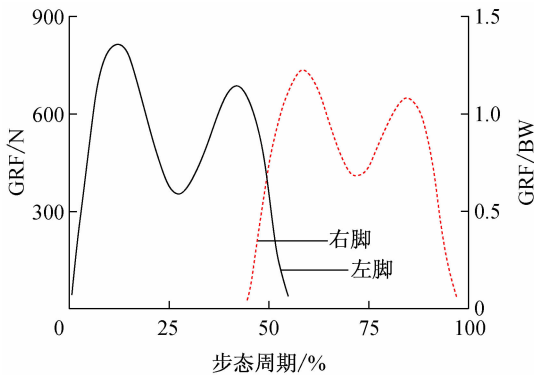


图5 快速步行过程中实际测试的垂直地面反作用力曲线

Fig. 5 vGRF curve of actual movement during fast walking in a gait cycle

在最优模型M2的基础上进行膝关节负荷的仿真研究。结果发现,CW和FW两种行走方式下老年女性在支撑中期和摆动前期出现膝关节力矩和功率的峰值。同时,随着行走速度的加快,老年女性下肢膝关节力矩峰值和功率峰值都出现明显的增大(见表1)。

表1 基于M2刚体模型获得老年女性不同步速过程中下肢膝关节力矩和功率峰值

Tab. 1 Knee joint torque and power peak in the elderly woman at different walking speed based on M2 rigid model

| 时相<br>行走方式     | 支撑中期             |                  | 摆动前期                |                     |
|----------------|------------------|------------------|---------------------|---------------------|
|                | CW               | FW               | CW                  | FW                  |
| 关节力矩/<br>(N·m) | 25.70<br>(0.42)* | 43.78<br>(0.71)* | 22.84<br>(0.37)*    | 31.41<br>(0.51)*    |
| 功率/W           | 34.26<br>(0.56)# | 69.47<br>(1.13)# | -118.96<br>(-1.94)# | -191.57<br>(-3.12)# |

注: \* 单位为  $N \cdot m \cdot kg^{-1}$ , # 单位为  $W \cdot kg^{-1}$

## 3 讨论

从理论上讲,更为复杂的人体模型可以精确再现人体运动过程;而且多刚体模型对人体环节的细化程度越高,其重现运动效果就越好<sup>[11-13]</sup>。然而,过多的环节又常常致使模型运算、优化、评估等方面的难度加大<sup>[14-15]</sup>。因此,创建一个运动的目标模型或成本函数并不简单,因为人体运动过程常受到运动目标的生理、环境等因素的制约。因此,本文结合实际的步行动作,建立不同环节的多刚体模型进行仿真精度分析,希望在最优模型的基础上开展老年女性步态过程中下肢膝关节负荷的研究,旨在为膝骨关节炎的发病机制、预防、康复治疗研究提供参考依据。

人体多刚体模型的动力学仿真或优化计算结果通常需要与人体实验结果进行对比分析,并进一步完成模型可行性或可信度的验证<sup>[14]</sup>,而且实际测量vGRF与仿真vGRF值之间的一致性也常用于评价刚体模型的可靠性<sup>[16]</sup>。因此,本文选择步行过程中的时间、下肢踝、膝、髌关节角度变化和冲击力-时间特征3个方面进行不同多刚体模型的仿真精度分析。结果发现,3种多刚体模型M1、M2和M3的仿真精度分别为1.797、1.016和1.577,说明16个环节的M2模型能够较真实地反映老年人的步行过程。同时,利用复相关系数(CMC)得出M2模型仿真得到的vGRF与实际采集的数据曲线特征较为吻合(见图3),其CMC值为0.987,也远优于M1和M3模型。然而,在这3种不同环节数的多刚体模型中,仿真得到老年女性步行过程下肢踝、膝和髌关节

角度的变化情况与实际采集均较为相似( $CMC > 0.850$ )。并且由 M2 模型仿真得到的膝关节屈曲变化趋势均与实际运动学解析结果相似(见图 4);步行时间也最为接近,时间差仅为 2 ms。综上所述, M2 模型的仿真精度最高,即 16 个环节的人体多刚体模型最适合步态的动力学仿真研究。

当老年女性 FW 时,其左、右下肢触地过程中的 vGRF 峰值都高于 CW(见图 3、5)。这与 Keller 等<sup>[17]</sup>的研究结果相似,人体步行速度范围通常为 0.5 ~ 2.0 m/s,且随着步行速度的加快,vGRF 峰值将随之线性增大。在 CW 时,老年女性左、右脚在 IC 和 TS 两个阶段的 vGRF 峰值较为接近,约为 1.16 BW;但是在 FW 时,左、右脚支撑期 IC 阶段的 vGRF 峰值明显高于 TS 阶段(见图 5),说明老年人在 CW 时采取较为平缓的着地模式,再自然过渡到支撑时相,可以有效地控制下肢平衡<sup>[18-19]</sup>。当步速加快后,整个步行过程的 vGRF 都随之增大,特别 TS 阶段通过加大与地面的相互作用来增加支撑力矩,进而提高行走速度<sup>[20]</sup>。

利用最优模型 M2 展开膝关节负荷仿真研究的结果表明,CW 和 FW 两种行走方式下,老年女性在支撑中期和摆动前期均出现膝关节力矩和功率峰值(见表 1)。随着行走速度的加快,老年女性下肢膝关节力矩峰值和功率峰值都出现明显的增大。这与 Riley 等<sup>[5]</sup>和 Kerrigan 等<sup>[21]</sup>的研究结果一致,表明老年人群的股四头肌相对发达,且在一定程度上能满足维持其 FW 的肌肉力量需求。但与年轻人相比较,支撑中期和摆动前期较小的膝关节力矩和功率峰值,则反映出老年人群膝关节伸肌或股四头肌力量的薄弱<sup>[21]</sup>。随着增龄老年女性肌力流失加剧,致使其股四头肌肌力下降,以至于在 FW 中无法维持身体平衡稳定,无形中增加了膝关节的损伤风险<sup>[22]</sup>。因此,建议老年人在日常活动中应加强股四头肌的力量锻炼,增加下肢关节的平衡控制及改善老年人的步行行为,进而降低老年女性膝骨关节炎的发生。

本文利用不同多刚体模型开展对老年女性步行过程的尝试性探索,并未考虑肌肉的颤摆影响,这对关节力矩和功率等仿真结果必然会带来一定的影响。因此,未来需要进行深入的生物力学研究,进一步开展老年女性行走过程中不同速度对其下肢关节

力矩、功率和做功的影响,以及下肢肌肉力量与 vGRF、行走能力、步长之间的相互关系,共同为促进老年女性健康提供科学指导。

## 4 结语

本文利用不同环节的多刚体模型进行老年女性步态的仿真研究。结果显示,M2 模型(16 个环节)的仿真精度最高,可以用于后期步态的动力学仿真模拟。随着步行速度的加快,老年女性着地过程的 vGRF 峰值、膝关节力矩和功率峰值均随之增大。建议老年女性通过加强股四头肌力量锻炼,增加下肢关节的平衡控制,改善步行行为。

## 参考文献:

- [1] 李儒军,林剑浩. 骨关节炎流行病学研究进展[J]. 中国临床医生, 2010, 38(7): 6-10.
- [2] 林海丹,何成奇. 运动疗法治疗膝骨关节炎临床研究的国外研究进展[J]. 中国修复重建外科杂志, 2008, 22(11): 1389-1392.
- [3] Brooks PM. Impact of osteoarthritis on individuals and society: How much disability? Social consequences and health economic implications [J]. *Curr Opin Rheumatol*, 2002, 14(5): 573-577.
- [4] DEVITA P, HORTOBAGYI T. Age causes a redistribution of joint torques and powers during gait [J]. *J Appl Physiol*, 2000, 88(5): 1804-1811.
- [5] RILEY PO, DELLACROCE U, KERRIGAN DC. Effect of age on lower extremity joint moment contributions to gait speed [J]. *Gait Posture*, 2001, 14(3): 264-270.
- [6] LAROCHE DP, MILLETT ED, KRALIAN RJ. Low strength is related to diminished ground reaction forces and walking performance in older women [J]. *Gait Posture*, 2011, 33(4): 668-672.
- [7] 李旭鸿,郝卫亚,于佳彬,等. 基于 LifeMoD 对跳马过程中体操运动员-落地垫动力学关系的计算机仿真[J]. 体育科学, 2013, 33(3): 81-87.
- [8] 李旭鸿,郝卫亚,吴成亮,等. 基于 LifeMoD 对跳马运动员推手动作的动力学仿真研究[J]. 中国体育科技, 2014, 50(6): 53-58.
- [9] 李旭鸿,郝卫亚,肖晓飞,等. 基于 LifeMoD 对体操运动员踏跳过程的仿真研究[J]. 北京体育大学学报, 2015, 38(11): 65-69.
- [10] 肖晓飞,郝卫亚,李旭鸿,等. 基于不同刚体模型的体操落地冲击动力学比较研究[J]. 北京体育大学学报, 2015, 38(3): 78-83.

- [11] HATZE H. A comprehensive model for human motion simulation and its application to the take-off phase of the long jump [J]. *J Biomech*, 1981, 14(3): 135-142.
- [12] GRUBER K, RUDER H, DENOTH J, *et al*. A comparative study of impact dynamics: Wobbling mass model versus rigid body models [J]. *J Biomech*, 1998, 31(5): 439-444.
- [13] MILLS C, YEADON MR, PAIN MTG. Modifying landing mat material properties may decrease peak contact forces but increase forefoot forces in gymnastics landings [J]. *Sports Biomech*, 2010, 9(3): 153-164.
- [14] 郝卫亚. 人体运动的生物力学建模与计算机仿真进展[J]. *医用生物力学*, 2011, 26(2): 97-104.  
HAO WY. Advances in biomechanical modeling and computer simulation of human movement [J]. *J Med Biomech*, 2011, 26(2): 97-104.
- [15] 张希安, 叶铭, 王成焘. 基于肌骨模型的肌肉力计算方法及其面临的若干问题[J]. *医用生物力学*, 2008, 23(6): 475-479.  
ZHANG XA, YE M, WANG CT. Musculoskeletal model based method for predicting muscle force and related issues [J]. *J Med Biomech*, 2008, 23(6): 475-479.
- [16] GITTOES MJR, KERWIN DG, BREWIN MA. Sensitivity of loading to the timing of joint kinematic strategies in simulated forefoot impact landings [J]. *J Appl Biomech*, 2009, 25(3): 229-237.
- [17] KELLER TS, WEISBERGER AM, RAY JL, *et al*. Relationship between vertical ground reaction force and speed during walking, slow jogging, and running [J]. *Clin Biomech*, 1996, 11(5): 253-259.
- [18] WINTER DA, PATLA AE, FRANK JS, *et al*. Biomechanical walking pattern changes in the fit and healthy elderly [J]. *Phys Ther*, 1990, 70(6): 340-347.
- [19] LAURETANI F, RUSSO CR, BANDINELLI S, *et al*. Age-associated changes in skeletal muscles and their effect on mobility: An operational diagnosis of sarcopenia [J]. *J Appl Physiol*, 2003, 95(5): 1851-1860.
- [20] RILEY PO, CROCE UD, KERRIGAN DC. Propulsive adaptation to changing gait speed [J]. *J Biomech*, 2001, 34(2): 197-202.
- [21] KERRIGAN DC, TODD MK, DELLA CU, *et al*. Biomechanical gait alterations independent of speed in the healthy elderly: Evidence for specific limiting impairments [J]. *Arch Phys Med Rehabil*, 1998, 79(3): 317-322.
- [22] SEGAL NA, TODA Y. Absolute reduction in lower limb lean body mass in Japanese women with knee osteoarthritis [J]. *J Clin Rheumatol*, 2005, 11(5): 245-249.