

文章编号:1004-7220(2011)04-0321-04

预应力下大腿残肢站立中期时相的有限元分析

穆 晨, 钱秀清, 闫松华, 刘志成
(首都医科大学 生物医学工程学院, 北京 100069)

摘要: **目的** 研究大腿截肢患者在行走过程中站立中期时相下残肢的受力情况, 为建立完整的大腿接受腔测量与评估系统提供基础。 **方法** 首先根据计算机断层扫描图像三维重建大腿截肢患者的骨骼、肌肉软组织和接受腔的三维模型, 考虑步行中关节角度变化进行组装。然后, 建立模拟步态周期中站立中期时相受力的有限元模型, 对模型进行预应力影响下非线性大变形有限元分析。 **结果** 当考虑了步行中关节角度变化和预应力的影响以后, 计算所得的接触法向界面压力值最大值均位于残肢的末端部位, 为 257.66 kPa, 与实际测量患者步行中站立中期时相下最大应力 258.90 kPa 符合较好。 **结论** 考虑关节角度变化、预应力和摩擦的三维模型能够更为有效地模拟患者在步行中的受力情况。

关键词: 残肢; 关节角度变化; 预应力; CT 扫描; 有限元分析; 步态
中图分类号: R 318.01 **文献标志码:** A

Finite element analysis of interface pressure over the above-knee residual limb at mid stance with pre-stress

MU Chen, QIAN Xiu-qing, YAN Song-hua, LIU Zhi-cheng (School of Biomedical Engineering, Capital Medical University, Beijing 100069, China)

Abstract: Objective To investigate the interface pressure on above-knee residual limb at mid stance during walking, so as to provide basis for the establishment of measurement and evaluation system for the above-knee socket. **Methods** Based on CT images of the femur, soft tissue and above-knee socket of the patient with residual limb, the three-dimensional model was first built, and then to assemble them according to changes of the hip joint in a gait cycle. The finite element model was then established to simulate the loading conditions at mid stance during a gait cycle, and the effect of pre-stress was investigated by nonlinear large deformation analysis. **Results** If considering the effects such as joint changes and pre-stress, the maximum value by calculation for normal interface pressure distributed on the terminal of stump was 257.66 kPa, which could better match the maximum stress actually measured by the Mflex Sensor Distributing System as 258.9 kPa. **Conclusions** The three-dimensional finite element model with considering the factors such as hip joint change, pre-stress and friction could effectively simulate the stress condition of patient with residual limb during walking.

Key words: Residual limb; Joint change; Pre-stress; CT scans; Finite element analysis; Gait

假肢是为截肢者弥补肢体缺损和代偿其失去的肢体功能而制造、装配的人工肢体^[1]。伴随着经济的发展, 疾病、车祸、工伤等导致的肢体伤残在逐年增加, 安装假肢是截肢患者恢复活动能力和外观的主要康复手段。作用力通过残肢与接受腔间的接触

面传递, 接触面上局部载荷过大将导致残肢疼痛和皮肤损伤, 影响假肢的舒适性和可靠性。因此, 截肢患者残端和假肢接受腔形成的界面, 成为假肢设计者关注的重点。

自 20 世纪 70 年代起, 国内外学者利用有限元

收稿日期: 2011-07-01; 修回日期: 2011-07-20

通讯作者: 刘志成, Tel: (010)83911559; E-mail: zliu@ccmu.edu.cn.

方法,建立了多种模型研究残肢与接受腔之间的受力情况^[2]。有学者研究大腿残肢模型在二维情况下,考虑摩擦和预应力的影响,计算残肢表面受力情况;也有研究三维小腿模型,在考虑摩擦和预应力情况下,进行静态分析及动态分析^[2-5,7],结果较符合真实残肢受力情况,为研究假肢与接受腔之间的受力开创了很多新方法思路。然而,还没有学者对步行中三维关节角变化对接触腔与残肢之间的接触应力的影响进行研究。因此,建立一个考虑步行中关节角度变化、预应力和摩擦的三维大腿残肢模型,分析残肢与接受腔之间的应力分布,对于深入认识残肢-接受腔界面生物力学特性和提高假肢设计水平及性能非常必要。

本文在已有空间三维模型的基础上,以大腿截肢患者为研究对象,考虑行走中人体关节角度的变化,建立有摩擦和预应力影响的三维非线性残肢-接受腔有限元模型,对行走过程中站立中期时相(mid stance)的残肢界面压力进行仿真研究。

1 方法

1.1 模型建立

志愿者是1名年轻的大腿截肢患者,年龄31岁,身高175 cm,体重65 kg。患者右侧大腿因车祸截肢,中等残肢水平,残肢长380 mm,有10年穿着大腿假肢的经验。步态良好,残肢肌力5级,无屈伸挛缩,5°外展挛缩变形。患者使用坐骨承重式大腿假肢接受腔(total contact quadrilateral socket),承重自锁膝关节和SACH静踝假脚。患者平躺仰卧位,髋关节、膝关节自然伸展,采用加强断层扫描,CT机进行间隔2 mm图像采集。同时,接受腔也采用CT断层扫描采集图像。

基于骨骼、软组织和接受腔的CT断层扫描图片,首先应用比利时Materialise公司的MIMICS 11.0软件分别进行骨盆、股骨和患者的肌肉软组织结构的三维重建,模拟残肢在步行中站立中期时相下的受力情况。根据患者平躺仰卧位采集的图像,在残肢末端向上1 000 mm和1 500 mm处建立横截面,测量骨骼与软组织的位置关系来确定位置^[6]。再利用MOTION三维空间运动测试系统,测量患者的步态周期中站立中期时相下髋关节矢状面与额状面的关节角度,以股骨头中心为转动中心。调整时相

下的股骨、残肢肌肉软组织和接受腔与骨盆(身体躯干)的角度位置,利用比利时Materialise公司的MAGICS 13.0软件组装站立中期时相的残肢与接受腔的结构模型(见图1),将模型导入有限元软件ANSYS进行站立中期时相的数值模拟。

1.2 材料属性

为简化计算,所有组织假设为各向同性线弹性材料。骨骼的弹性模量为15 GPa,泊松比为0.3;肌肉的弹性模量为150 KPa,泊松比为0.45;接受腔的弹性模量为15 GPa,泊松比为0.3^[2]。

1.3 边界条件设定和分析

依照张明等^[3-5]提出的方法,模拟大腿截肢患者的步态周期特点,将分析设定分为两步:第1步施加预应力,模拟患者穿着假肢接受腔的受力情况。固定接受腔末端,在肢体近端施加力50 N,将肢体穿入接受腔中,残肢的表面与接受腔的内表面设定为摩擦接触(frictional),摩擦系数为0.5,采用面-面接触方式。肌肉软组织与骨盆、股骨设定为绑定接触(bonded),产生预应力。第2步模拟站立中期时相受力。首先通过FOOTSCAN获取患者步态中的地面反作用力,在保持第1步计算所得应力和变形的基础上,固定骨盆近端,在接受腔远端施加地面反作用力,采用非线性大变形分析。有限元网格划分采用2次10节点4面体单元,总共13 851个节点,60 243个单元。

1.4 实验测试

患者实测过程在专业的步态实验室中,应用FOOTSCAN、Mflex Sensor System压力测试系统和MOTION三维动态捕捉系统共同完成。首先,组装同步测试系统,同时采集患者的足底压力、地面反作用力、残肢表面的接触压力和空间三维患者下肢关节角度变化情况。为保证数据的真实可靠性,患者每次最少行走1个完整的步态周期,匀速行走记录5次数据,取平均值。测量过程中和间歇休息时段,保证测试者一直穿戴假肢,减少假肢穿脱带来接受腔位置改变的误差。

2 结果与讨论

站立中期时相下,计算残肢的末端、下端和口型圈部位的法向界面压力分布较为集中,其中最大值为257.66 kPa,位于残肢末端。剪切界面压力主要

分布于残肢末端、外下侧和口型圈的前、内及后侧,最大值为 74.27 kPa,位于残肢外下侧。残肢内、外、后侧剪切界面压力分布较为均匀(见图 2)。通过 Mflex Sensor System 压力测试系统测量所得的残肢末端法向界面压力最大值为 258.90 kPa。两者结果有较好的符合,证明在考虑关节角度的变化和预应力影响下的模型更为准确。

从实验结果可以发现,忽略关节角度改变的影响会产生一定的误差,但在站立中期时相下影响比较小,所以进行残肢与接受腔的接触界面压力分析时可以忽略他们的影响。但是预应力对于计算影响较大,忽略会导致残肢与接受腔的装配不符合真实情况,从而产生过高的应力集中现象(见表 1、图 3)。这与真实情况下患者步行中的受力不相符合。

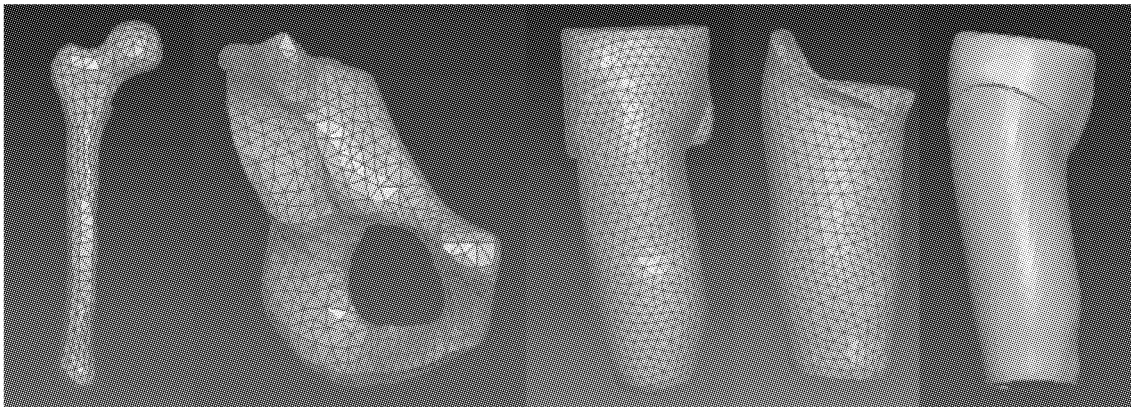


图 1 骨骼、肌肉软组织和接受腔模型
 Fig.1 Finite element models of the femur, soft tissue and socket

表 1 关节变化及预应力影响的计算结果与实测结果的对比
 Tab.1 Comparison of FEA results hip joint and pre-stress change considered and real measurement results

考虑预应力影响/kPa		不考虑预应力影响/kPa		实际测量 /kPa
调节关节 角度	未调节关节 角度	调节关节 角度	未调节关节 角度	
257.66	260.43	319.64	320.42	258.90

人们在步行过程中,大腿以股骨头中心为转动中心,在肌肉的驱使下实现空间三维的运动。一般有限元方法建立的模型,是以患者平躺位采集的图

像建立,与真实情况下患者步行中大腿残肢有偏差。患者常年穿着坐骨包容式大腿接受腔,导致有 5°外展挛缩变形,在站立中期时残肢的下端外侧和上端内侧会导致应力分布较为集中。前侧受力较小为制作接受腔时一般减少股三角部位的压缩程度,故步行中股三角区域受力较小,能够减少患者步行中因压迫血管和神经导致的不适。患者步行中残肢运动带动假肢的活动,残肢在接受腔中位置产生偏差。在研究大腿假肢步态周期中,残肢表面的受力情况,应考虑关节角度变化的影响。但在站立中期时相

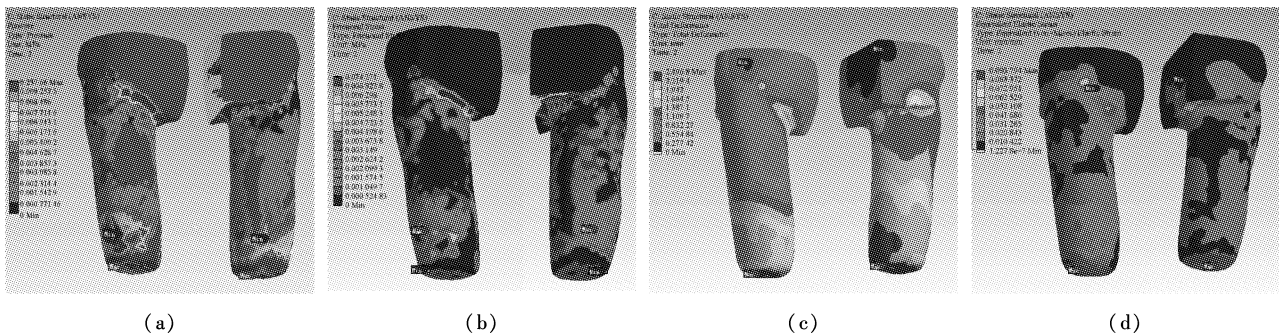


图 2 考虑预应力的接触法向界面压力 (a), 剪切界面压力 (b), 位移 (c) 和应变 (d) 云图
 Fig.2 Distribution of the contact normal interface pressure (a), shear interface pressure (b), deformation (c) and strain (d) with pre-stress considered at mid-stance

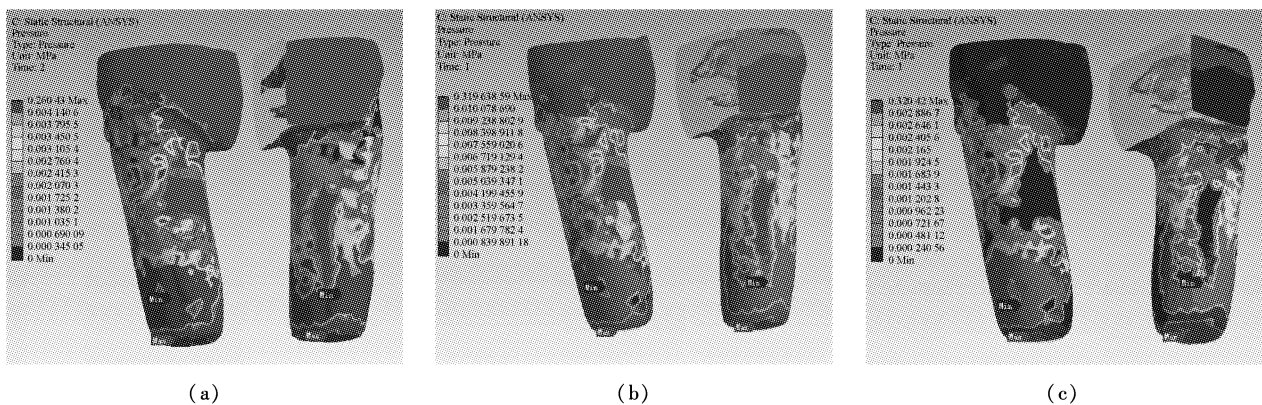


图3 考虑预应力和未调节关节角度(a)、未考虑预应力和考虑关节角度(b)、未考虑预应力和未调节关节角度(c)的接触法向界面压力云图
Fig.3 Normal interface pressure distribution with pre-stress considered and hip joint change ignored (a), with pre-stress ignored and hip joint change considered (b) and with pre-stress and hip joint change ignored (c) at mid-stance

时,关节角度变化不大,计算后误差较小,可以忽略。其他时相下关节角度变化的影响还需要研究。

患者的接受腔口型圈部位受力较大,是坐骨承重式大腿接受腔采用压缩残肢软组织从而达到负压吸附的效果,来固定和悬吊大腿假肢。为了保证较好的负压吸附效果,在接受腔口型圈附近部位会压缩量较大,所以在步行中伴随着肌肉的收缩膨胀,会产生较大的压力,令患者初次穿着接受腔时感觉不适。所以实验结果指导今后制作接受腔口型圈时,要在此部位进行较好的曲率过渡以减少应力集中,提高患者的舒适性。

在站立中期时相,残肢处于站立位,残肢的末端和坐骨结节位置为主要受力区域;同时,残肢其他部位相对受力较为均匀。但是大腿截肢患者在站立中期时相,患肢支撑时间相比于正常人时间要短很多^[1],主要是假肢的稳定性和舒适性不高,患者只有短暂的时间把重心放在患侧;同时残肢有 2° 的屈曲,保证残肢安全稳定,并导致残肢前侧受力较小,残肢的末端和坐骨结节位置主要受力。因此,改善大腿残肢的受力,使其受力均匀,患者感觉舒适,增加患侧支撑时间影响接受腔的舒适性,也关系到患者的安全稳定。

本研究的不足之处是没有考虑人体皮肤、肌肉和组织的材料非线性问题,同时进一步进行动态模拟仿真,故要在今后的研究中加以改进。

3 结论

考虑预应力影响的大腿残肢模型是分析大腿残

肢-接受腔受力的一种有效的有限元方法。要正确预测行走过程中残肢界面压力,不仅取决于残肢-假肢系统固有参数和外载,还应考虑髋关节角度变化引起的大腿残肢姿态变化。在站立中期时相下,关节角度变化较小,对分析大腿残肢-接受腔受力影响不大,故还需研究步态周期中其他时相下的影响。

参考文献:

- [1] 赵辉三主编. 假肢与矫形学[M]. 北京:华夏出版社, 2005: 22.
- [2] Zhang M, Mak A, Roberts VC. Finite element modeling of residual lower-limb in a prosthetic socket: A survey of the development in the first decade [J]. *Med Eng Phys*, 1998, 20(5): 360-373.
- [3] Zhang M, Roberts C. Comparison of computational analysis with clinical measurement of stresses on below-knee residual limb in a prosthetic socket [J]. *Med Eng Phys*, 2000, 22(9): 607-612.
- [4] Jia X, Zhang M, Lee WCC. Load transfer mechanics between transtibial prosthetic socket and residual limb-dynamic effects [J]. *J Biomech* 2004, 37(9): 1371-1377.
- [5] Zhang M, Turner-Smith AR, Tanner A, *et al*. Clinical investigation of the pressure and shear stress on the trans-tibial stump with a prosthesis [J]. *Med Eng Phys*, 1998, 20(3): 188-198.
- [6] Ruperez MJ, Monserrat C, Alemany S, *et al*. Contact model, fit process and, foot animation for the virtual simulator of the footwear comfort [J], *Comput Aided Design*, 2010, 42(5): 425-431.
- [7] 刘展,樊瑜波,张明,等. 一体化假肢的三维有限元分析[J]. *生物医学工程学杂志*, 2003, 20(4): 622-625.