

文章编号: 1004-0374(2010)12-1235-06

“中国力学虚拟人”研究及应用

王成焘*, 王冬梅, 白雪岭, 叶 铭

(上海交通大学机械与动力工程学院, 生物医学制造与生命质量工程研究所, 上海200240)

摘要: 该课题利用“中国可视化人”项目研究成果和志愿者的相关数据, 建立了人体全身和部分细分部位的骨肌系统生物力学仿真模型。模型可以按真实对象进行改造, 并可植入人工关节等植入物。在所建实验平台中, 通过运动捕捉系统测得的或人为设计的运动数据, 模型可以仿真人体各种行为运动, 进行动力学分析, 计算关节力、关节力矩和肌肉力。成果集成在所开发的软件CMVHuman1.0中, 完成软件注册登记, 并建立了产业化服务体系。成果已在临床医学和植入物设计中获得广泛应用, 并扩大到体育科学、人体工程学、航空、航天和虚拟士兵等领域。

关键词: 人体; 骨肌系统; 生物力学; 仿真分析

中图分类号: R322.7

文献标识码: A

The research of “Mechanical Virtual Human of China” and its application

WANG Cheng-tao*, WANG Dong-mei, BAI Xue-ling, YE Ming

(Institute of Biomedical Manufacturing and Life Quality Engineering, School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai200240, China)

Abstract: Based on the research achievements from the ‘Chinese Visible Human Project’ and some related data collected from volunteers, this study presents a platform for the biomechanics modeling of human musculoskeletal system, including the whole human body and its several sub-parts. These models can be transformed according to a specific subject, and the simulation of the implantation of artificial joints and prosthesis can also be achieved. With the data obtained from the motion capture system in the experimental platform or manually input parameters, various human motions can be simulated, while kinematics and dynamics analysis, including the calculation of joint forces, joint moments and muscle power, can also be achieved. The significant research outcome is the release of a state-of-the-art software, named as CMVHuman1.0. With the certificate issued by the software registration agencies in China, this software has been commercialized, providing users with a variety of long-lasting services. Nowadays, it has been widely applied in clinical medicine and implant design, and extended to various fields including sports science, ergonomics, aerospace engineering, virtual soldiers, etc.

Key words: human body; musculoskeletal system; biomechanics; simulation analysis

1 研究背景

人体骨肌系统生物力学仿真分析是临床医学、医疗器械设计、人体工程学、体育与艺术科学、航空、航天与军事科学领域重要的研究内容。长期以来, 在和医学界合作的过程中, 运用这项技术分析了一系列的临床医学问题, 包括骨肌系统损伤的机理、临床手术和植入物的创新设计、患体功能重建和康复等, 范围遍及人体从颅骨到足踝全身所有部

位, 如颅骨破损、上下颌骨修复、牙列正畸、脊柱侧弯的力学矫正、骨盆的冲击损伤、糖尿病和拇外翻足的力学分析, 以及人工肩、髌、膝、踝关节设计等。每次合作都要从骨肌系统几何建模开

收稿日期: 2010-08-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(30530230)

*通讯作者 E-mail: ctwang@sjtu.edu.cn

始, 工作重复, 水平难以提高。为进行这类研究工作, 研究人员必须投入大量精力熟悉使用医学图像处理与建模、力学仿真、有限元分析等多个商品软件, 增加工作难度, 特别对于医生和他们的研究生, 往往很难胜任。针对这一情况, 决定建立一个标准的中国人骨肌系统生物力学仿真模型, 既可以供全身力学分析使用, 也可以用于人体某一部位的力学分析, 在对人体没有个性需求的情况下, 研究者可以直接使用该模型, 也可通过改造, 转化为真实研究对象的模型。同时决定开展系统的相关基础理论与技术研究, 构建一个包含运动参数处理与仿真、运动学与动力学分析、肌肉力计算、有限元建模在内的技术系统, 开发相关的软件, 形成一个完整的人体骨肌系统生物力学仿真工具平台。这样, 将在计算机三维虚拟空间里, 构造一个活动的、力学领域的数字人, 它可以仿真人体行为运动, 给出发生在人体骨肌系统中的各种运动学、动力学和应力应变等力学信息, 定名为“中国力学虚拟人”, 使其成为各相关领域研究中的有力技术支撑。该科学命题获得国家自然科学基金委生命科学部重点资助(NO. 30530230), 研究时间2006年1月至2009年12月。项目已按时结题, 2010年1月通过验收。

2 人体骨肌系统生物力学仿真建模

为建立中国力学虚拟人骨肌系统生物力学仿真

模型, 我们选用重庆第三军医大学“中国可视化人”研究成果中一位35岁男性遗体捐献者冷冻切片数据, 尸体冰冻温度 -35°C , 最小片间距 0.1 mm , 共2518张, 数据图像的像素为 3072×2048 。在该大学解剖专家的指导下, 利用本课题开发的图像处理软件, 完成了人体全身骨组织轮廓的提取, 通过三维几何建模, 构建成全身骨骼面模型(图1a)^[1]。通过提取肌肉组织的轮廓和三维建模, 研究了用力线替代肌肉的原理和准则, 将全身148块力学相关肌肉转化为458根力线, 建成人体全身骨肌系统生物力学仿真模型(图1b)。考虑到该志愿者局部解剖形态不完美, 另选样本建立了头部和上下牙列典型几何模型。考虑到足部骨肌系统结构复杂, “中国可视化人”只能提供死亡姿态解剖数据, 而后续研究需各种行为姿态下的骨肌关系数据, 故另取活体样本建立了足部骨肌系统多姿态力学模型。为深入研究发生在膝关节内部的力学行为, 建立了基于膝关节细部软硬组织解剖结构的生物力学仿真模型。上述专项模型供这些部位的专业研究使用。上述模型都融入所开发软件的模型库中, 内容丰富典型, 可满足各种专业研究的需要。

3 人体骨肌系统生物力学仿真分析软件 CMV-Human 1.0

本项目将人体分解为若干分段, 将每个分段视为刚体, 将该分段质量视为集中质量, 附着于相应

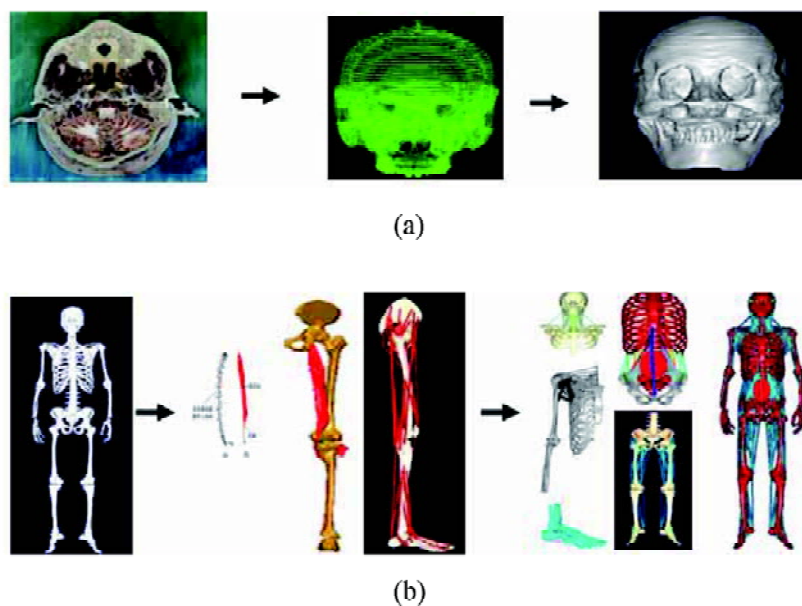


图1 “中国力学虚拟人”人体骨肌系统生物力学仿真建模

骨骼模型中, 用多刚体动力学原理进行人体动力学计算。为求取关节力和肌肉力, 我们建立了基于反向动力学原理的肌肉力优化算法和基于正向动力学原理的优化算法, 并开发了相关计算模块^[2-4], 为将标准人体骨骼模型转换为实际研究对象的骨骼模型, 我们建立了基于对象骨骼正位与侧位 X 光片的几何转化计算方法, 开发了相应的软件模块。根据实际研究需要, 发现一些理想的或处于极限状态的行为运动无法通过捕捉志愿者的运动参数实现, 我们创新开发了运动设计软件, 可形象地运用屏幕中的虚拟人体设计这些运动。为满足常规的有限元分析需要, 我们建立了标准人体 206 块骨骼的网格模型, 将其融入数据库中。在数据库中同时存入了通过测量获得的人体典型行为运动数据, 包括走与跑、骑自行车、上下阶梯与坡度、下蹲、下跪、盘腿坐等。在这些研究工作成果上我们开发了“中国力学虚拟人”人体骨肌系统生物力学仿真分析软件 CMVHuman 1.0, 图 2 是该软件主界面和各功能模块的子界面。

点击 CMVHuman 主界面相应按钮, 可调用如下功能软件: (1) 点击模型调用按钮, 可从数据库中调用人体全身或四大部分的骨肌系统生物力学仿真模型, 图 2a 至图 2d 为四个专业模型的工作界面, 通过该界面可以调用其中的几何模型或有限元网格

模型; (2) 运动捕捉系统测量数据处理软件, 可实现人体骨肌系统的运动仿真, 并在三维虚拟环境中显示(图 2e); (3) 创新研发的运动设计软件, 可人为设计运动或将所测试运动修正(图 4f); (4) 运动学、动力学分析软件(图 4g)及肌肉力估算软件(图 4f), 后者包含基于和不基于肌电信号两种肌肉力算法; (4) 数据库, 内部存有典型中国人体骨肌系统模型、全部 206 块骨骼的有限元模型以及本项目测试所得人体典型运动谱。此外, 还附有我国人体工程学相关数据资料, 以及人体骨骼和软组织的相关物理参数, 后者部分数据来自本项目测试结果。软件全部界面由专业公司设计, 并完成软件的注册登记(软著登字第 0218785 号)。

4 人体骨肌系统生物力学实验平台的建立和应用

在项目试验研究推动下, 建成了专门从事人体骨肌系统生物力学的实验平台, 装备有 NDI 公司的人体运动捕捉系统、三维足底力测试平台和足底压力测试设备、关节模拟设备等, 利用该平台完成了人体典型行为运动谱的测量工作(图 3)。

为了验证课题仿真结果的正确性, 建立了各种尸体试验能力, 见图 4, 其中图 4(b) 为与英国 Salford 大学和上海华山医院合作建立的基于尸体足踝生物力学的大型试验台, 具有 5 自由度、10 个加载器,

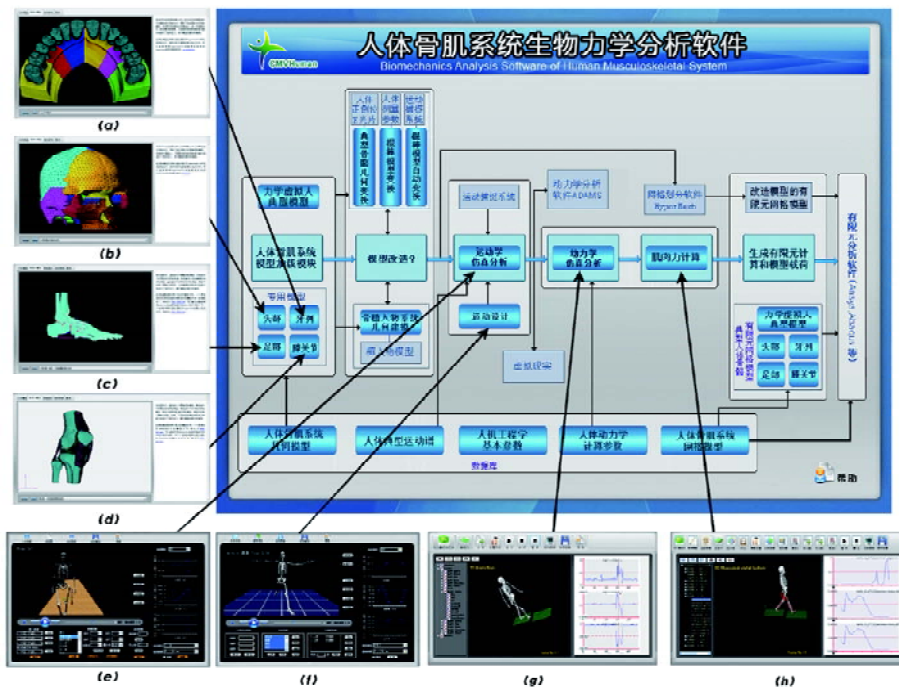


图 2 “中国力学虚拟人” 人体骨肌系统生物力学仿真分析软件 CMVHuman 1.0

全部由计算机控制，在国际同类试验台中属技术最先进的试验装置，总投资 60 万元。英国皇家学会和国家科学自然科学基金面上项目都给予了该项目资助。图 4(a)中利用 6 件人体下肢尸体样本进行了天然膝关节和人工膝关节下蹲运动的模拟试验，测量了从 0°~130° 屈曲运动过程中膝关节表面运动和接触压力分布情况，并和膝关节生物力学仿真模型计算结果进行了对比，见图 5。从直方图可见，左

右膝关节工作表面计算接触应力和测试所得接触应力变化规律一致，数值也比较接近。

5 “中国力学虚拟人”网站与服务体系的建设

为将科研成果用于支撑国内外该领域科研工作的需要，我们和国内专业从事生物力学软、硬件研发与经营的上海硅步科学仪器有限公司合作，在上海交通大学数字医学教育部工程研究中心内，建立



图 3 人体骨肌系统生物力学实验平台与典型行为运动测试

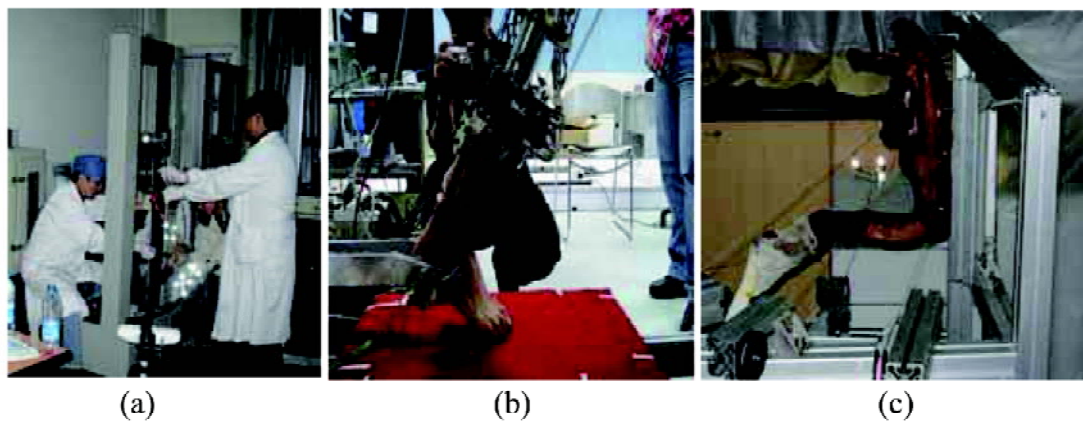


图 4 基于尸体的生物力学试验

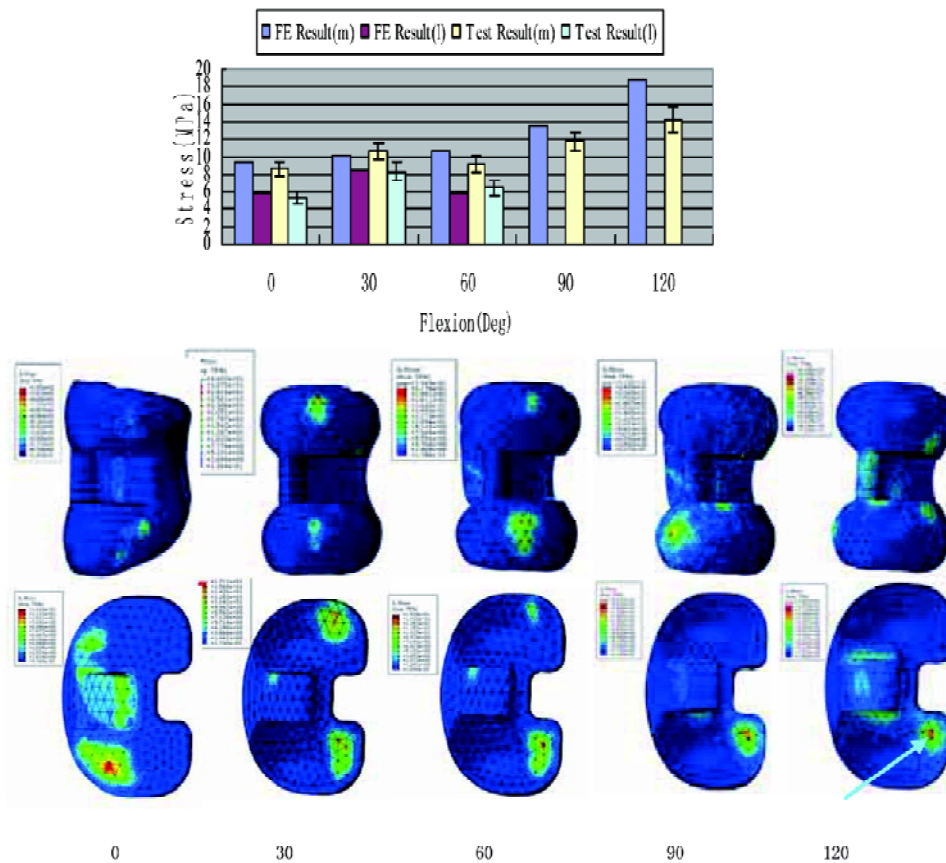


图 5 人工膝关节仿真计算与测试结果比较

了具有产业性质的中国力学虚拟人网站。网站工作人员由两部分组成：专业从事网站管理和计算的工程师和兼职的通讯计算工程师。后者是原来从事中国力学虚拟人研究工作已毕业的研究生，他们在上海的大专院校任教，同时继续从事生物力学领域的研究工作；由于都是原课题某一部分的研究者，对业务非常熟悉，虽然不能全职工作，但具有很高的工作效率。网站主要针对那些具有生物力学分析需求，但又不是专业从事生物力学研究的用户，特别是广大的临床医学工作者，同时也为国内从事骨科植入物设计的企业开展生物力学计算服务。实践证明，网站的服务受到广泛的欢迎，承接了很多仿真计算业务，支持我国医生和企业 在骨科植入物方面的创新研究工作。

6 成果及其应用与推广

在项目开展过程中和验收后，我们运用该项技术开展了多项医工结合的研究项目，包括：与上海市第九人民医院共同开展的有关人工下颌骨、可摘局部义齿、上颌骨缺损重建生物力学研究；与第一

人民医院共同开展的骨盆髌髌关节退变机理研究；与中山医院共同开展的脊柱冲击损伤研究；与上海仁济医院共同开展的青少年脊柱侧弯生物力学研究^[5,6]、天然与人工肩关节研究^[7]；与上海市华山医院共同开展的足部拇外翻和糖尿病足生物力学研究^[8,9]；与上海市第六人民医院共同开展的人工髌关节脱位、关节柄松动生物力学机理研究等。

2008 年，依托本项目的阶段性成果，我们申报国家自然科学基金重大国际合作项目，获得批准立项，题目为“亚洲人种髌、膝关节特性研究及人工髌、膝关节基本设计”(项目号：30810103908)。中方申请单位为上海交通大学本项目组，中方合作方为中国矿业大学、深圳清华大学研究院，日方合作单位为日本名古屋大学和名古屋工业大学。各方的研究团队都含医工两方面的专家，除系统开展大样本的亚洲人种髌、膝关节解剖分析外，将充分利用骨肌系统生物力学仿真系统，系统测量亚洲人种和民族频发的行为和动作，开展生物力学分析，研究关节的活动范围和关节力，利用本项目开发的膝关节生物力学仿真软件，对所设计的人工膝关节进

行分析,使其不仅适应患者术后必需的步态行走功能,而且能够最大限度地满足广大亚洲地区患者的生活行为需要。

应北京国家康复辅具工程中心的要求,将力学虚拟人部分软件和下肢假肢安装患者术后评定技术相结合,开发了指导辅具安装的专用软件。目前正在与华山医院合作,开展中国力学虚拟人研究成果在下肢康复医学领域的应用研究,将本课题的研究成果推广到康复医学领域。

配合上海交通大学航天航空学院的建设,利用本课题的研究成果,建立力学虚拟飞行员模型,开展大型客机驾驶舱人机工程学的研究;同时作为合作单位,利用虚拟人建模技术开展了航天和军事领域的力学虚拟人研究工作。

通过该课题,培养了博士生 10 名,硕士生 6 名,博士后 1 名,深造生物力学青年教师 2 名;送一名博士生赴英国 Salford 大学就力学虚拟人足部生物力学开展合作研究一年;按中国—哥伦比亚文化交流协定,接受一名哥伦比亚硕士留学生参加中国力学虚拟人足部课题研究。

本项目理论和应用研究成果共发表论文 48 篇,其中 SCI/EI 收录 20 篇。2009 年,作为我国最高的科技专著出版基金——国家科学技术学术著作出版基金立项资助,由科学出版社于 2010 年出版专著《中国力学虚拟人—人体骨肌系统生物力学仿真与分析》,将“中国力学虚拟人”的研究成果上升为系统的理论技术体系。

课题验收后获得了各领域研究课题和计算服务项目,这充分体现了该项工作的学术价值和社会需求。

7 今后工作的展望

在建模过程中提出了很多假设,例如:将肌肉用力线替代,将人体视为由机械铰链连接的多刚体,并将各分段质量简化为集中质量等等。这些假设将随着计算机技术和生物力学研究的不断发展,逐渐为更真实的建模技术所替代。但是,鉴于人体的复杂性和多样性,人体骨肌系统的生物力学仿真技术将是一项能够不断逼近人体现实,而又无法达到现实的技术。

人体肌肉力的计算目前还是一门很不成熟的科学,它受人体神经系统的支配,充满个体化因素的影响,很难用实验手段加以验证。但是,这是骨肌系统生物力学必须突破的瓶颈,它将成为我们今后致力于研究的重点。我们将进一步完善尸体试验手段,争取在理论和试验两方面取得进一步的研究成果。

目前我国市场上充满国外的建模和生物力学分析软件,他们不仅价格昂贵,掌握着知识产权,而且只具有人体骨肌系统生物力学研究中所需要的部分功能。CMVHuman 是具有我国自主知识产权,具有较完整分析功能的软件,有希望成为该领域的品牌软件产品,但是和国外软件相比还存在差距,特别是在人机界面的设计上,还存在很多待完善之处,我们将通过软件产业的模式不断加以完善和提高。

[参 考 文 献]

- [1] Wang J, Ye M, Liu Z, et al. Precision of cortical bone reconstruction based on 3D CT scans. *Comput Med Imaging Graph*, 2009, 33 (3): 235-41
- [2] Wei GF, Wang CT, Bai XL, et al. A wavelet-based algorithm to predict muscle force from surface electromyography signal *in vivo*. *Comput Methods Biomech Biomed Engin* (Accepted)
- [3] Wei GF, Zhang XA, Tang G, et al. A method of human biodynamic measurement based on virtual marker technology and wavelet algorithm. *Instrum Sci Technol*, 2010, 38 (1): 83-95
- [4] Wei GF, Bai XL, Wang HS, et al. Component mode synthesis approach to estimate tibial strains in gait. *J Med Engin Technol*, 2009, 33 (6): 488-95
- [5] Nie WZ, Ye M, Liu ZD, et al. The patient-specific brace design and biomechanical analysis of adolescent idiopathic scoliosis. *J Biomech Eng*, 2009, 131 (4): 041007
- [6] Nie WZ, Ye M, Wang ZY, et al. Infinite models in scoliosis: a review of the literature and analysis of personal experiences. *Biomed Tech (Berl)*, 2008, 53 (4): 174-80
- [7] Zhang LL, Yuan BX, Wang CT, et al. Comparison of anatomical shoulder prostheses and the proximal humeri of Chinese people. *Proc Inst Mech Eng H*, 2007, 221 (8): 921-7
- [8] Tao K, Wang DM, Wang CT, et al. An *in vivo* experimental validation of a computational model of human foot. *J Bion Eng*, 2009, 6 (4): 387-97
- [9] 陶凯, 王冬梅, 王成焘, 等. 基于三维有限元静态分析的人体足部生物力学研究. *中国生物医学工程学报*, 2007, (5): 763-6 (+780)