



骨肌系统生物力学

建模与仿真

Biomechanical Modelling and Simulation on
Musculoskeletal System

主编 樊瑜波 王丽珍



本书赠73例实操视频
一步一步教你建模仿真

人民卫生出版社
PEOPLE'S MEDICAL PUBLISHING HOUSE

骨肌系统生物力学 建模与仿真

主 编 樊瑜波 王丽珍

编 者 (以姓氏笔画为序)

王亚伟 王宇星 王丽珍 王 超 田 山 刘笑宇 李 慧
郑 东 项 嫔 姚 杰 都承斐 莫中军 倪义坤 徐 鹏
高元明 郭俊超 唐桥虹 储照伟 樊瑜波

秘 书 冯成龙

人民卫生出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

骨肌系统生物力学建模与仿真 / 樊瑜波, 王丽珍主编. —北京: 人民卫生出版社, 2017

ISBN 978-7-117-25158-7

I. ①骨… II. ①樊… ②王… III. ①肌肉骨骼系统-生物力学-系统建模②肌肉骨骼系统-生物力学-系统仿真 IV. ①R322.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 226412 号

人卫智网	www.ipmph.com	医学教育、学术、考试、健康, 购书智慧智能综合服务平台
人卫官网	www.pmph.com	人卫官方资讯发布平台

版权所有, 侵权必究!

骨肌系统生物力学建模与仿真

主 编: 樊瑜波 王丽珍

出版发行: 人民卫生出版社 (中继线 010-59780011)

地 址: 北京市朝阳区潘家园南里 19 号

邮 编: 100021

E - mail: pmph@pmph.com

购书热线: 010-59787592 010-59787584 010-65264830

印 刷: 三河市宏达印刷有限公司 (胜利)

经 销: 新华书店

开 本: 889 × 1194 1/16 印张: 30

字 数: 684 千字

版 次: 2018 年 6 月第 1 版 2018 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

标准书号: ISBN 978-7-117-25158-7/R · 25159

定 价: 218.00 元

打击盗版举报电话: 010-59787491 E-mail: WQ@pmph.com

(凡属印装质量问题请与本社市场营销中心联系退换)

骨肌系统生物力学 建模与仿真

主编 简介



樊瑜波

教授,博士生导师

北京航空航天大学生物与医学工程学院院长

国家康复辅具研究中心主任

“生物力学与力生物学”教育部重点实验室主任

国家杰出青年科学基金获得者、教育部“长江学者”特聘教授,美国医学与生物工程院会士(AIMBE Fellow)。在生物力学工程、医疗器械生物力学设计与评价、组织工程、康复工程、航空航天医学工程等领域,取得了一系列创新成果,所带领团队已成为国家自然科学基金创新群体(2015)和科技部重点领域创新团队(2014)、教育部高等学校科学研究优秀成果奖自然科学奖一等奖(2015)、中国生物医学工程学会黄家驷生物医学工程奖(基础研究类)一等奖(2017)。

兼任

世界生物力学理事会(WCB)理事

国际生物医学工程联合会(IFMBE)执委

亚太生物力学理事会(APAB)理事

世界华人生物医学工程协会(WACBE)前任主席

中国生物医学工程学会前任理事长

中国生物医学工程学会中国力学学会生物力学专业委员会(分会)主任委员

SCI 期刊 *Medical Engineering & Physics* 编委、《医用生物力学》和《生物医学工程杂志》副主编

主编 简介



王丽珍

副教授

就职于北京航空航天大学生物与医学工程学院

主要研究方向为损伤与康复生物力学。获北航蓝天新秀、北航优秀博士论文、十佳期刊论文获得者等,已发表国际期刊论文 30 余篇。作为负责人主持国家自然科学基金、国家重点研发计划项目子课题等 5 项,以骨干成员参与国家自然科学基金创新群体项目“骨和心血管生物力学与力生物学”、科技部重点领域“植介入医疗器械的生物力学与力生物学”创新团队研究工作,获教育部高等学校科学研究优秀成果奖自然科学奖一等奖(2015)、中国生物医学工程学会黄家驷生物医学工程奖(基础研究类)一等奖(2017)。

兼任

国际矫形与创伤外科学会(SICOT)基础组委员

中国生物医学工程学会中国力学学会生物力学专业委员会委员

中国生物医学工程青年委员会副主任委员

SCI 期刊 *Journal of Mechanics in Medicine and Biology* 副主编, *Journal of Medical Imaging and Health Informatics* 编委

前言

建模仿真是骨肌系统生物力学研究的一种重要手段,在探索人体疾病发病机理和完善治疗方案等方面发挥着重要的作用。近年来,随着生物力学学科不断细化发展和研究队伍不断壮大,骨肌系统建模仿真技术被越来越多地应用于医疗器械研发、航空航天人体防护等领域,已成为骨科、口腔、眼科等生物力学领域中基本的研究方法。

骨肌系统是实现各种运动的生理基础,是人体与外界进行相互作用的根本。随着计算机科学、力学理论、医学理论的不完善与发展,骨肌系统建模与仿真技术经历了从二维到三维、从局部到系统、从宏观到微观的发展历程。与此同时,骨肌系统生物力学也随着建模仿真技术的提升而朝着更为精细和深入的方向发展。骨肌系统建模仿真大体来说可以分成两类,一是宏观尺度上的骨肌系统器官与组织的建模仿真,主要针对人体骨肌系统整体或局部的力学响应机制方面的研究;二是微观尺度上的骨肌微结构的建模仿真,主要针对骨肌系统疾病发生、治疗与康复的力学、生物学机制研究。

骨肌系统建模过程需要详细考虑的主要因素有:真实的模型结构,基于人体解剖学结构特征参数提取、精确的解剖学结构三维扫描图像、人体冷冻切片数据库等不同数据来源的模型建立;准确的材料属性,考虑皮质骨、松质骨、肌肉纤维、韧带等基本组织的精确力学属性;精确的边界条件,考虑肌肉在骨的附着位置、骨和肌肉的运动学和动力学特性,得出较为真实的力学响应结构;模型的有效性验证,通过实验数据来证明所建立模型的有效性和可靠性。最后基于建模仿真技术针对研究需求开展研究和分析应用。

通过生物力学建模仿真方法,我国在骨肌系统相关问题的研究领域已经开展了大量的工作,并取得了一批具有国际水平的新成果。尽管在对不同的组织和器官进行生物力学建模仿真时,需要考虑的结构和功能各有差异,但这些建模仿真的思路大体相同。即紧密围绕临床问题,以临床病例(影像)为基础,应用固体力学理论、系统生物信息和控制理论,结合先进的应力场测试和医学影像技术,宏观与微观相结合、动物实验与力学模型及数值模拟相结合,对相关组织和器官进行建模与定量分析,从而建立精确规范的无创检测和分析技术,以及进行个体化治疗方案的生物力学设计。

十余年来,本团队针对脊柱、口腔、眼部、膝关节、头颈等部位的临床医学、航空防护及康复相关问题,开展了骨肌生物力学建模与应用研究,并取得了丰硕的研究成果。本书内容涉及骨肌系统建模与仿真的基本原理、方法以及所涉及的必备的解剖学等知识,针对具体研究问题设置了详细的算例,以帮助读者更快速的学习骨肌建模的基本原理和方法。算例涉及骨肌生物力学建模的冲击损伤

和临床应用研究等相关内容。

1. 在冲击损伤生物力学建模方面,介绍了头部、脊柱、足踝膝、眼球等不同部位的冲击损伤生物力学仿真过程。

(1) 建立了包括人体头颈、胸、腰部椎体、间盘和韧带的非线性有限元及多刚体动力学模型耦合的模拟平台,据此研究了飞行员弹射、过载、及过载约束的生物力学影响特征。

(2) 建立了包含足、踝、膝的生物力学模型,研究了跳落着陆损伤的生物力学机制和防护方法。

(3) 建立了一个全眼球有限元模型,包括了视网膜、角膜、巩膜、晶状体、玻璃体、房水以及眼眶等重要眼组织,研究了弹丸碰撞导致视网膜脱落、爆炸冲击损伤眼球、白内障眼球钝体碰撞损伤机制等问题。

2. 在骨肌生物力学建模的临床应用研究方面,围绕骨科手术方案优化、骨内植物的优化设计等进行了详细介绍。

(1) 脊柱的生物力学建模与应用:利用包含头颈胸腰椎体、间盘和韧带的非线性有限元模型平台,研究了椎内固定器械生物力学优化、人工椎间盘优化设计、脊椎融合术、椎间盘置换术、及混合(融合+置换)手术的生物力学特性。

(2) 骨重建过程的生物力学模拟及应用:针对在口腔种植体,建立了基于力学适应变化和微观损伤修复机制的骨重建算法,模拟预测了口腔种植体周围松质骨骨小梁分布形态的变化。

(3) 下肢关节建模及模拟研究:模型包含了骨、软骨、半月板和韧带等组织,并考虑了韧带的超弹性特性和半月板等组织的各向异性特性,应用模型针对前交叉韧带手术重建等进行模拟,对手术中涉

及的单 / 双束重建、隧道角度、固定骨钉尺寸的生物力学特征等进行分析。

本书是在主编所带领团队十余年的研究基础上编写完成的,其内容包含了编者对骨肌系统建模与仿真原理和方法丰富的经验和对学生学习过程常见问题的提炼,在前辈、同道的关怀和指导下、编者们的精诚团结与协作努力下顺利完成。本书得到了国家自然科学基金创新群体项目(No.11421202)、国家重点研发计划(2016YFB1101100)、国家科学技术学术著作出版基金(2016-A-018)的联合资助。

本书内容由生物力学与力生物学教育部重点实验室骨肌系统建模与仿真研究室成员组成的编

者团队完成,封面用图由重庆大学生物工程学院生物医学工程系本科生樊星雨同学绘制,书中所附视频编辑工作由秘书北京航空航天大学生物与医学工程学院冯成龙博士完成,在此一并致谢。同时向有志于学习骨肌系统建模与仿真技术的各行各业的人士表示衷心的感谢。

编写中难免有错漏和不足之处,为了提高本书质量,以供再版修改,热切希望读者批评指正。

樊瑜波 王丽珍

2017年10月

目录

第一章 骨肌系统概论 _3

第一节 骨肌系统解剖学 _4

一、骨 _4

二、肌肉 _8

三、骨连结 _15

第二节 骨学概论 _23

一、骨结构 _23

二、密质骨 _25

三、松质骨 _25

四、骨的细胞成分 _26

五、骨的化学成分 _27

六、骨的发育和生长 _27

七、骨重建理论 _29

第三节 骨肌系统生物力学基本理论 _30

一、骨肌生物力学基本概念 _30

二、骨肌系统本构关系 _33

三、骨肌建模仿真基本原理 _39

第二章 建模仿真常用软件及其力学原理 _47

第一节 影像学图像获取 _48

- 一、CT 与 Micro-CT 成像原理 _48
- 二、MRI 与 Micro-MRI 成像原理 _51
- 三、建模仿真用图的图像采集 _52

第二节 基于医学图像的骨肌系统三维建模 _54

- 一、建模简介 _54
- 二、图像预处理 _55
- 三、三维模型重建 _56
- 四、常用软件介绍及实例 _57

第三节 基于 CAD 的骨肌系统精细化处理方法 _74

- 一、医学数字化建模综述 _74
- 二、Geomagic 介绍 _75
- 三、SolidWorks 介绍 _79
- 四、Rapidform 介绍 _83

第四节 骨的材料属性测试技术与方法 _87

- 一、骨力学测试的影响因素 _88
- 二、拉压测试法 _89
- 三、弯曲测试法 _96
- 四、扭转、纯剪切测试法 _99
- 五、超声测试技术 _102
- 六、微观力学特性测试技术 _104

第五节 有限元分析方法及常用软件介绍 _107

- 一、骨肌生物力学常用有限元软件简介 _108
- 二、HyperMesh 软件简介 _109
- 三、ANSYS 软件简介 _127
- 四、ABAQUS 软件简介 _133
- 五、AnyBody 软件简介 _141

第三章 头部生物力学建模与仿真 _153

第一节 头颈动力学模型 _154

一、头部冲击碰撞损伤的生物力学建模仿真 _154

- 视频 3-1-1 颅内组织几何模型的建立 _157
- 视频 3-1-2 前处理——模型的导入和几何清理 _159
- 视频 3-1-3 前处理——划分二维网格 _162
- 视频 3-1-4 前处理——生成三维网格 _164
- 视频 3-1-5 前处理——设置约束 _165
- 视频 3-1-6 前处理——建立材料模型和单元属性 _168
- 视频 3-1-7 前处理——初始条件设定和接触设定 _171
- 视频 3-1-8 前处理——求解和计算输出设定及 K 文件的导出 _172
- 视频 3-1-9 求解准备——求解器设定 _173
- 视频 3-1-10 后处理 _175

二、头 - 全颈椎骨肌系统建模仿真 _177

- 视频 3-1-11 网格划分拓扑结构 _193
- 视频 3-1-12 多刚体建模 _197

第二节 眼球损伤生物力学模型 _199

一、有限元显式动力学介绍 _199

- 视频 3-2-1 ANSYS 基本操作 _202

二、眼球损伤的生物力学仿真 _206

- 视频 3-2-2 几何建模 _206
- 视频 3-2-3 材料属性 A _211
- 视频 3-2-4 材料属性 B _212
- 视频 3-2-5 材料添加 _212
- 视频 3-2-6 ANSYS 网格划分 _215
- 视频 3-2-7 载荷约束 _217
- 视频 3-2-8 结果查看 _223

第三节 口腔生物力学建模仿真 _230

一、口腔生物力学简介 _230

二、口腔组织的基本形态和力学特性 _231

三、正畸矫治算例 _235

- 视频 3-3-1 口腔正畸算例 _241

第四节 基于 Micro-CT 的骨微观力学模型 _242

一、基于 Micro-CT 影像的骨微观模型 _243

二、网格划分方法 _244

三、材料赋予方法 _244



第四章 脊柱生物力学建模与仿真 _249

第一节 颈椎生物力学模型 _250

一、人工椎间盘置换术建模与仿真 _250

二、动态颈椎假体建模与仿真 _266

- 视频 4-1-1 椎体的处理 _268
- 视频 4-1-2 间盘的处理 _268
- 视频 4-1-3 韧带的处理 _268
- 视频 4-1-4 小关节软骨的处理 _268
- 视频 4-1-5 对照模型的组装加载及后处理 _270
- 视频 4-1-6 人工椎间盘置换模型及后处理 _271

第二节 腰椎生物力学模型 _275

一、椎弓根钉拔出过程建模与仿真 _275

- 视频 4-2-1 CATIA 椎弓根钉模型 _276
- 视频 4-2-2 装配 _277
- 视频 4-2-3 布尔运算 _279
- 视频 4-2-4 网格划分 _279
- 视频 4-2-5 导入求解器及加载运算 _279

二、腰椎运动康复过程建模与仿真 _285

- 视频 4-2-6 MIMICS 功能介绍 _285
- 视频 4-2-7 Mask 编辑 _285
- 视频 4-2-8 接触部分处理和 3D 计算生成 _287
- 视频 4-2-9 L_2 编辑 3D 修改 _287
- 视频 4-2-10 导出模型 stl 格式 _287
- 视频 4-2-11 多边形阶段曲面优化 _288
- 视频 4-2-12 曲面造型 _288
- 视频 4-2-13 椎间盘网格 _290
- 视频 4-2-14 绘制纤维环 _290
- 视频 4-2-15 材料属性分配和导出 inp 文件 _291
- 视频 4-2-16 韧带绘制 _291
- 视频 4-2-17 韧带材料 _291
- 视频 4-2-18 模态分析算例 _297

视频



第五章 下肢生物力学建模与仿真 _307

第一节 髌关节建模与仿真 _308

- 一、髌关节生物力学 _309
- 二、髌关节模型建立 _311
- 三、骨盆髌臼横断骨折不同内固定方法的生物力学评价 _316

视频 5-1-1 骨折线绘制 _316
视频 5-1-2 骨折缺损模拟 _316
视频 5-1-3 钢板提取 _316
视频 5-1-4 螺钉模型建立 _316
视频 5-1-5 模型装配 _317

- 四、股骨粗隆间骨折的生物力学仿真 _326

第二节 膝关节损伤建模与仿真 _348

- 一、膝关节生物力学 _348
- 二、正常膝关节的有限元建模 _349
- 三、膝关节有限元建模在前交叉韧带重建中的应用 _356
- 四、特殊工况下的膝关节建模与仿真 _359

视频 5-2-1 膝关节建模算例 _359

第三节 足踝损伤建模与仿真 _379

- 一、足踝生物力学 _380
- 二、足踝损伤的机制及临床分类 _381
- 三、有限元建模仿真在足踝损伤生物力学分析中的应用 _383

视频 5-3-1 图像导入 _384
视频 5-3-2 3D 模型建立 _385
视频 5-3-3 导出 stl 文件 _385
视频 5-3-4 模型表面处理 _386
视频 5-3-5 构造曲面片 _387
视频 5-3-6 软骨层绘制 _388
视频 5-3-7 韧带模型建立 _388
视频 5-3-8 材料属性 _389
视频 5-3-9 网格划分 _390
视频 5-3-10 模型装配 _391
视频 5-3-11 约束设置 _391
视频 5-3-12 分析步定义 _392
视频 5-3-13 载荷设置 _392
视频 5-3-14 边界条件 _392
视频 5-3-15 提交分析 _393
视频 5-3-16 结果查看 _393



第六章 骨重建过程的建模与仿真 _397

- 一、骨的力学调控理论 _398
- 二、骨重建调控方程及算法 _400
- 三、ANSYS 参数化设计语言 (APDL) 简介 _407
- 四、骨重建算例 _409

视频 6-0-1 经典二位方板模型的骨重建算例 _410

视频 6-0-2 带有过载损伤吸收机制的骨重建调控模型的骨重建算例 _412

第七章 多刚体动力学建模与仿真 _425

第一节 多刚体系统假人建模与仿真 _426

- 一、多刚体系统动力学介绍 _426
- 二、人体骨肌系统结构分析 _427
- 三、人体骨肌系统多刚体系统建模 _431
- 四、ADAMS 多刚体动力学仿真 _439
- 五、ADAMS 人体动力学仿真实例 _445

视频 7-1-1 约束系统 _447

视频 7-1-2 假人关节 _448

第二节 胸腰段脊柱冲击响应动力学研究 _450

- 一、胸腰段脊柱面临的问题 _450
- 二、胸腰段脊柱动力学模型及仿真 _451

视频 7-2-1 重力预载荷 _458

视频 7-2-2 后处理 _461

