

踝关节三维有限元生物力学研究的临床转化

郭鹏超, 王成伟(新疆医科大学第六附属医院骨病矫形科, 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市 830002)

文章亮点:

- 1 此问题的已知信息: 近年来, 骨科生物力学领域的研究不断成熟和发展, 研究方法多采用有限元分析软件。
- 2 文章增加的新信息: 为了使模拟更加接近于真实, 并充分考虑到活体组织中各种因素的影响, 尽量减少简化和假设, 从而使建立的三维有限元模型及在其基础上进行分析的结果更加可靠, 并将误差降低到最低程度, 并从静态的生物力学转向动态的方向研究, 踝关节的有限元模型正在逐步完善中。
- 3 临床应用的意义: 踝关节三维有限元模型具有实验时间短、费用低、可模拟复杂边界条件、力学性能测试全面和可重复性好等优点; 重建的数字化模型可准确反映解剖学结构特点和虚拟仿真可以再现手术方式及过程。

关键词:

植入物; 数字化骨科; 踝关节; 三维有限元; 生物力学; 临床研究

主题词:

踝关节; 解剖; 有限元分析; 生物力学

基金资助:

自治区科技支撑项目计划(指令性)项目(201491190), 项目名称: 踝关节骨折手术方法选择的生物力学基础研究

摘要

背景: 踝关节是人体的负重、足部压力的缓冲和人体与地面接触的枢纽, 极易受到损伤; 骨科生物力学领域的研究不断成熟和发展, 利用三维有限元软件建模分析踝关节生物力学并研究临床疾病逐渐成为研究热点。

目的: 探讨踝关节三维有限元生物力学的研究现状, 并对其临床研究进展作一综述。

方法: 应用计算机检索 CNKI 期刊全文数据库和 PubMed 数据库中 1986 年 1 月至 2014 年 3 月关于踝关节有限元的文章, 以“踝关节、有限元、生物力学、力学研究”或“ankle, finite element, biomechanics, mechanics research”为检索词进行检索; 排除与研究目的无关和内容重复的文献; 保留 47 篇文献进行综述。

结果与结论: 踝关节生物力学机制复杂, 各种损伤后都可能打破其周围结构的力学平衡而导致不稳定, 诱发创伤性关节炎。踝关节三维有限元模型可准确反映解剖学结构特点、虚拟仿真可以再现手术方式及过程逼真的模拟, 模拟压缩、拉伸、弯曲、扭转、抗疲劳等力学实验, 并从静态的生物力学转向动态的方向研究, 为分析临床疾病进而找到更合适的诊治方案。

郭鹏超, 王成伟. 踝关节三维有限元生物力学研究的临床转化[J]. 中国组织工程研究, 2014, 18(31): 5056-5061.

Clinical transformation of ankle joint biomechanics analyzed by three-dimensional finite element

Guo Peng-chao, Wang Cheng-wei (Department of Bone Disease Orthopedics, the Sixth Affiliated Hospital of Xinjiang Medical University, Urumqi 830002, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China)

Abstract

BACKGROUND: Ankle joint is a center of body weight, foot pressure buffering and human contact with the ground and easily gets injury. The study of orthopedic biomechanics continues to mature and develop. Models were established with three-dimensional finite element software to analyze ankle biomechanics and to study clinical diseases, which gradually become a hot research topic.

OBJECTIVE: To investigate the current status of three-dimensional finite element analysis of biomechanics in the ankle and to review the clinical research progress.

METHODS: China National Knowledge Infrastructure and PubMed (from January 1986 to March 2014) were used to search the related finite element articles about ankle. The retrieval words included ankle, finite element, biomechanics and mechanics research. After excluding objective-independent papers or repeated articles, 47 papers were included for further analysis.

RESULTS AND CONCLUSION: Ankle joint complex biomechanics mechanism and variety of injury could break mechanics balance of its surrounding structure and lead to instability and traumatic arthritis. Ankle's three-dimensional finite element model can accurately reflect anatomical structure and virtual simulation can reappear the operation method in the simulation biomechanics experiment, such as compression, tension, bending, torsion and anti-fatigue mechanics. It makes the direction of the research from biomechanics of static to dynamic, which finds a more suitable solution to diagnose and treat clinical diseases.

郭鹏超, 男, 1987 年生, 山东省威海市人, 汉族, 新疆医科大学第六附属医院在读硕士, 主要从事足踝关节、骨病矫形和创伤骨科等疾病的研究。

通讯作者: 王成伟, 博士, 主任医师, 副教授, 新疆医科大学第六附属医院骨病矫形科, 新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市 830002

doi:10.3969/j.issn.2095-4344.2014.31.023
[http://www.crter.org]

中图分类号:R318
文献标识码:A
文章编号:2095-4344
(2014)31-05056-06
稿件接受: 2014-06-27

Guo Peng-chao, Studying for master's degree, Department of Bone Disease Orthopedics, the Sixth Affiliated Hospital of Xinjiang Medical University, Urumqi 830002, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China

Corresponding author: Wang Cheng-wei, M.D., Chief physician, Associate professor, Department of Bone Disease Orthopedics, the Sixth Affiliated Hospital of Xinjiang Medical University, Urumqi 830002, Xinjiang Uygur Autonomous Region, China

Accepted: 2014-06-27

Subject headings: ankle joint; dissection; finite element analysis; biomechanics

Funding: the Science and Technology Support for Xinjiang Uygur Autonomous Region (Instruction), No. 201491190

Guo PC, Wang CW. Clinical transformation of ankle joint biomechanics analyzed by three-dimensional finite element. Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu. 2014;18(31):5056-5061.

0 引言 Introduction

在日常生活中, 人体的负重、足部压力的缓冲、承重和步行都依赖于足部的正常生物力学特征。踝关节是人体与地面接触的枢纽, 行走、跳跃、跑步和登高都需要踝关节的参与, 因此踝关节是最容易受到损伤的关节之一^[1]。足踝部结构异常除导致疼痛、畸形及活动障碍外, 还可进一步影响下肢、骨盆、脊柱等力学功能的正常发挥, 故对其研究具有重要临床意义^[2]。踝关节特定的解剖结构和复杂的运动机制, 造成了该关节是运动损伤的常见部位^[3]。踝关节损伤后的组织学重建和生物力学功能的恢复一直受到极大的关注^[4]; 由于不规范或突然性的应力所致的踝关节损伤, 若不及时和正确的得到临床诊治, 可导致局部损伤的组织愈合不好, 如关节囊和韧带松弛, 严重影响踝关节的稳定性, 对站立、行走、下蹲等动作将带来一定影响; 患者会感觉踝关节在一般工作的强度下肿胀疼痛, 当行走在崎岖道路甚至在平地上时, 会感到踝关节不稳, 会再次发生踝关节损伤, 如此长期反复的损伤容易导致慢性踝关节不稳的发生, 使得患者会对踝关节有不信任感, 不愿意在不平路面行走, 并且在开始和结束行走时感到踝关节不适, 久而久之还会既发粘连性关节囊炎和创伤性骨关节炎, 以致长期或永久性的功能障碍^[5]; 由于踝关节特殊的解剖结构和生理功能, 使得其在治疗上要求较其他部位更高^[6]。

随着学者们对足踝部的研究发展, 生物力学因素在探求足踝部疾病的病因机制、治疗和预防等方面起到重要的作用; 研究方法不再是对足踝部研究多采用传统实验生物力学测试的手段, 而是可以利用有限元分析法模拟踝关节生物力学发生和改变的机制, 由于近年来随着计算机和软件的飞速发展和有限元分析法在骨科生物力学中的应用, 人们也通过各种软件对足踝部的受力进行三维仿真, 为足部疾病的病因、病理以及治疗的临床研究提供了有力的帮助。人体足踝生物力学中有限元模型仿真的最大作用在于它能够量化内部组织的受力信息, 利用三维有限元分析软件对踝关节的生物力学求解, 而这些信息在活体中不容易测出, 但又对足踝临床医学和康复医学有重要的意义^[7-8]。三维有限元法已成为人体生物力学研究不可缺少的工具, 有限元模拟技术的不断改进, 目的是为了模拟更加接近于真实, 并充分考虑到活体组织中各种因素的影响, 尽量减少简化和假设, 从而使建立的三维有限元模型及其基础上进行分析的结果更加可靠, 并将误差降低到最低程度^[9], 并获

得在不同实验条件下模型的踝关节任意部位变形、应力位移分布、内部能量变化、极限破坏分析等变化情况^[3]。文章探讨踝关节三维有限元生物力学的研究现状, 并对其临床研究进展作一综述。

1 资料和方法 Data and methods

1.1 资料来源

检索人相关内容: 第一作者。

检索时间范围: 1986年1月至2014年3月。

检索词: 英文检索词“ankle, finite element, biomechanics, mechanics research”; 中文检索词“踝关节, 有限元, 生物力学, 力学研究”。

检索数据库: PubMed 数据库, 网址: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/PubMed/>; CNKI数据库, 网址: <http://www.cnki.net>。

1.2 入选标准

纳入标准: ①有关踝关节三维有限元生物力学临床研究的文章。②具有原创性, 论点论据可靠的文章。③对同一领域的文献选择近期发表或权威杂志的文献。

排除标准: 较陈旧的理论观点以及一些重复性研究。

1.3 质量评估 计算机初检得到164篇文献, 包括中文86篇, 英文78篇。阅读标题和摘要进行初筛, 排除研究目的与本文无关及内容重复的文献, 最后保留其中47篇归纳总结, 见图1。

2 结果 Results

2.1 踝关节生物力学的有限元分析原理及方法

2.1.1 有限元分析的定义 有限元方法于20世纪60年代通过斯图加特大学的John Argyris和柏克莱加州大学的Clough在土木工程中的应用工作中积累经验形成的。它是一种用于求解微分方程组或积分方程组数值解的数值技术。利用数学近似的方法对真实物理系统(踝关节)进行模拟, 从数字化的实验中相对真实体现踝关节的生物力学情况^[10]。

2.1.2 有限元分析踝关节生物力学的方法 有限元力学实验通过Mimics和Geomagic两款软件, 先建立了踝关节有限元数字模型, 并对其进行生物力学研究, 为踝关节有限元力学分析搭建了一个数字平台。建立足踝部骨、韧带与周围软组织的完整解剖结构的三维有限元模型, 为足踝生物力学研究提供数字化平台^[11]。通常应用的方法是选择一正常人的单足进行螺旋CT扫描, 获取其CT图像, 通过Mimics软件重建其足踝部骨骼及外围软

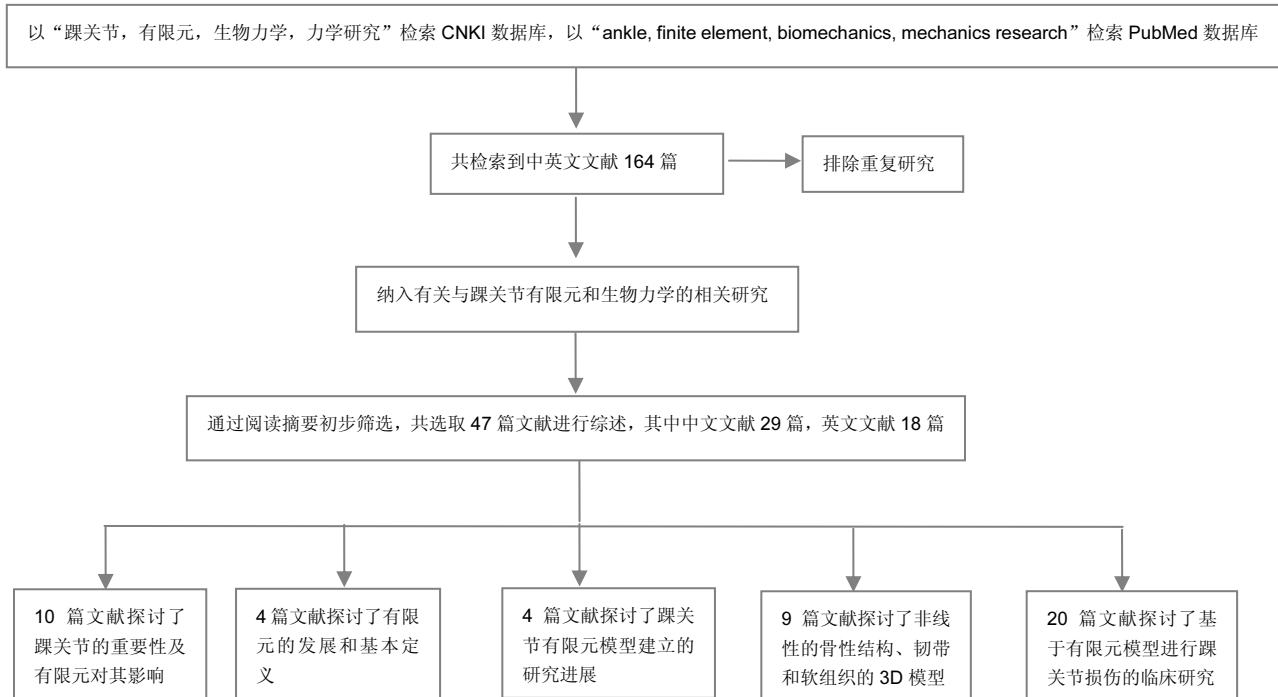


图 1 踝关节三维有限元生物力学临床研究的综述文献检索流程图

组织的三维结构, 利用FreeForm处理后导入ANSYS软件, 建立足踝部三维有限元模型, 并对其进行有限元网格划分。根据不同的部位组织, 选择的材料属性不同, 从而模拟建立踝关节软骨、韧带、小腿骨间膜与软组织等解剖结构完整的踝关节三维有限元模型^[12-13]。不但可以踝关节正常状态下的各个部位应力情况及不同的位置受到应力相应的改变情况, 还可以研究踝关节病变时的应力改变, 进而提出相应的治疗措施。

2.2 有限元分析法进行踝关节生物力学的研究进展

2.2.1 踝关节有限元模型建立的研究进展

目前, 有限元法在国内外骨科生物力学领域的研究, 较成熟的是针对脊柱和髋关节脊柱和髋关节的研究^[14-15]; 随着高科技技术的发展, 踝关节有限元模型也经历了从简化模型到解剖学模型、二维到三维以及线性问题到非线性问题的发展过程。

2.2.2 简单的骨性结构模型

徐菲^[16]建立了包括下1/3段胫腓骨和除趾骨外所有足骨的足部有限元模型; 并在不影响受力分析情况下, 对韧带及肌肉组织适当简化。葛黎等^[17]建立了跟骨有限元模型, 分析跟距关节面的生物力学特性; 此模型包含了跟距关节表面的软骨, 但没涉及周围的韧带和肌腱。

2.2.3 非线性的骨性结构、韧带和软组织的3D模型

Niu等^[18]建立了包括关节、骨、软骨、韧带和足底软组织在内的正常人体足骨骼及韧带结构的三维有限元模型, 采用杆单元来模拟足部软骨。卢昌怀等^[19]建立了包括胫骨和腓骨下端、距骨、跟骨、舟骨和关节间软骨的有限元模型, 并用此模型静态地分析人体不同步态时距骨的生物力学特性, 量化距骨的应力-应变状况; 此

模型的韧带建立相对全面。郭国新等^[20]通过CT图像数据建立人体足踝部三维有限元模型, 包括足踝部骨骼、胫腓骨下段和距骨, 该模型是几何相似度高, 可以多角度观察模型, 基于该模型探讨了踝关节各组成骨的应力分布规律, 及其发生变形和位移的情况。王一民等^[21]建立了一个基于健康人体的跟骨三维有限元模型, 静态分析双足站立时跟骨内部的生物力学特性, 探讨跟骨骨折疼痛的内外侧应力不均衡因素。吴恺等^[22]建立了一个包含骨、软骨及韧带的足踝部有限元模型, 相对客观地反映了人体足踝部的基本解剖结构和力学特性, 踝关节周围4条主要韧带的位移(拉伸长度): 胫跟韧带>胫舟韧带>跟腓韧带>下胫腓联合前韧带, 可进一步用于足踝部生物力学研究。刘清华等^[23]构建了包含踝关节各骨与韧带等包括软组织的完整解剖结构的三维有限元模型, 模拟建立踝关节软骨、韧带、跖筋膜、小腿骨间膜。Wei等^[24]介绍了人体骨肌系统总体有限元集成建模和模态分析方法在人体生物力学中的应用, 根据所建立的人体骨肌系统总体坐标系统, 对人体骨肌系统各肢体分部有限元模型进行了系统集成建模。Liang等^[25]通过CT图像数据建立了人体足踝部三维有限元模型, 包括足踝部骨骼、主要关节、关键韧带结构及足底软组织, 在模型上模拟跖腱膜和其他跖侧韧带松解, 分析计算足部骨骼、韧带的力学变化情况。模型较完善的发展客观地反映了踝关节的解剖结构和力学特性, 可进一步用于足踝部的损伤研究, 为进一步的人体运动过程中全身骨肌系统的有限元仿真分析奠定了基础。Parr等^[26]采用新的3D有限元方法对人类脚踝的骨有限元微模型揭示小梁的网络机械性能进行对比, 他们的研究表明, 有孔小

梁模型比无孔模型坚硬, 进一步提出新方法重建和分析3 d模型: ①多性能重建, 无孔模型在皮质层厚度内是可以操纵的。②有负荷加载和约束情况下, 保护骨皮质外表面的相同三角形网络; 利用3D有限元模型之间的直接比较, 创建了一个新的里程碑。

2.3 基于有限元模型进行踝关节损伤的临床研究进展 近几年, 国内外学者通过有限元分析法对人体骨骼关节的进行生物力学的研究, 考虑到人体不同组织的有非线性、各向异性的、不均匀的属性, 对不同的部位有限元分析更加具体透彻, 踝关节的模型也逐步完善; 最重要的是在此基础上, 对踝关节的损伤进行临床探究, 并在诊断和治疗踝关节损伤中体现了巨大的临床价值。

2.3.1 包含胫腓骨损伤的研究 霍永鑫等^[27]建立胫腓骨及距骨的三维有限元模型, 根据骨折发生特点设定情况, 在中立位, 背伸, 跖屈, 内翻, 外翻种不同情况下从距骨远端向近端进行静力加载, 并将模型与地面进行碰撞, 得出结论: 腓骨是胫骨pilon骨折发生中最早受累且较重的部位, 胫腓骨远端关节面在骨折发生中存在4个主要应力分布区, 向近端延伸为内、外、前、后4个柱。余华等^[28]模拟建立踝关节的三维有限元模型, 制作胫骨远端关节面不同面积的缺损, 并模拟在不同位相下胫骨远端关节面发生形变、位移情况, 预测胫骨远端关节面缺损的最大允许程度和探讨踝关节创伤性关节炎的力学发病机制; 胫骨远端关节面的最大缺损直径可认为是11-13 mm; 关节功能将受到影响。

2.3.2 包含跟骨损伤的有限元研究 黄诸侯等^[29-30]建立跟骨三维有限元模型, 探讨跟骨骨折发生机制, 并得出结论: 高处坠落踝关节中立位时跟骨骨折的发生将从跟距关节面的外侧向内后方向行走; 坠落时踝关节处于背伸位时除产生上述骨折线外, 跟骨体部走向后距关节面方向也将发生骨折, 同时跟腱附着点附近也会形成撕脱性骨折。张伟等^[31]利用有限元分析法探讨了足支撑时相跟腱不同拉力负荷过程中足底前、后部压力分布的变化。得到相应结论是在跟腱不同提拉力下, 前足底的压力值不断增加, 后足底的压力值不断的降低, 前足底和后足底压力值占整个足底压力值的百分比与跟腱拉力呈线性关系。Gu等^[32]建立了踝关节包括关节间的软骨、足跟周围的软组织、脂肪垫和外边的皮肤有限元模型; 根据FEA模型和生物力学测试, 后足跟皮肤的生物力学行为潜在的皮肤变化硬度非线性参数, 皮肤属性的敏感性测试清楚的表明, 跟皮肤的硬度会有直接影响后足的生物力学和足跟皮肤的病态僵硬可以增加足跟压力, 这可能导致皮肤破裂或溃疡。

2.3.3 包含距骨损伤的有限元研究 田文等^[33]通过三维有限元法对距骨颈骨折不同螺钉内固定方式进行对比评价, 比较不同内固定方式生物力学稳定性, 利用双螺钉由前向后固定距骨颈骨折, 可以取得较好的生物力

学稳定性。戴海飞等^[34]有限元法分析踝关节周围韧带损伤对距骨生物力学稳定性的影响, 在外旋作用下距后韧带对踝关节的稳定性具有重要作用, 而在内旋作用下跟腓韧带对踝关节的稳定性具有重要作用。Lu等^[35]运用有限元软件分析距骨滑车关节内外侧面应力分布显示变化不大, 高风险的足踝关节创伤性关节炎引起的距骨坏死建议应考虑手术治疗。

2.3.4 踝关节骨折的有限元研究 郭国新等^[36]对已建立的踝关节数字模型进行有限元力学分析实验模拟了踝关节内翻10种不同角度的各组成骨在不同空间维度上发生的位移、剪切力和应力分布情况, 得出结论是: 发现其所发生位移、所受应力及剪切力均随着内翻角度的增加不断增加, 最大应力分布区即外踝、距骨滑车踝间线外侧部, 为临床上最常见发生骨折的部位。赵宏谋等^[37]通过标本生物力学和有限元分析的方法, 比较分析不同的手术方法对踝关节旋前外旋IV度损伤后踝关节稳定性恢复的影响, 其研究验证了踝关节3D有限元模型的有效性, 基于模型得出结论: 单纯的1枚螺钉固定下胫腓联合韧带仍不能完全恢复踝关节的旋转稳定性; 2枚螺钉固定SL与固定后踝骨折都可恢复踝关节的旋转稳定性, 且效果相似; 同时固定后踝骨折和下胫腓联合韧带可能导致踝关节旋转时出现僵硬, 不提倡在此类损伤中同时固定后踝骨折和下胫腓联合韧带。Ahmet等^[38]应用3D有限元模型模拟分析踝关节外固定架治疗Pilon骨折类型III, 对选择材料钛合金和不锈钢进行比较, 观察冯米斯应力集中在针骨界面与观察到的钛固定的最高值得出研究结果表明为不锈钢变形少相比于钛。张禹等^[39]和赵继阳等^[40]采用有限元方法对Lauge-Hanson分型4种不同程度的旋后外旋型踝关节损伤进行分析, 得到踝关节应力及胫距关节面的压力分布并计算出的踝关节应力及胫距关节面的压力分布符合临床中Lauge-Hanson分型的描述。

2.3.5 踝关节不稳的有限元研究 Shin等^[41]通过有限元模型模拟在交通事故造成的和损伤急救中出现的足踝关节损伤情况, 进一步提出更好的治疗踝关节损伤的治疗方案; 通过模拟实验得出韧带损伤时踝关节发生病变的最主要原因和内旋位是最易造成踝关节损伤的体位。Pekedis等^[42]建立胫腓骨、跟骨、距骨和关节间的韧带以及软组织的3D有限元模型, 来模拟研究踝关节前抽屉实验并进行非均匀、各向非同性、非线性和弹性的生物力学分析, 该有限元法更进一步验证前抽屉试验对踝关节疾病诊治的重要性。刘清华等^[43]基于踝关节三维有限元模型, 进行下胫腓联合损伤后踝上2.5 cm、5.0 cm螺钉固定, 测试模型中设置相应的边界条件分别模拟踝关节在中立位站立、内旋、外旋时所受外力, 进行加载计算, 结论是两种位置的螺钉固定后均可致踝关节应力分布发生改变, 但两者差异不明显。Xu等^[44]运用有限元

分析法评估踝关节内侧三角韧带重建的生物力学, 通过有限元模型对比研究Wiltberger、Deland、Kitaoka和Hintermann术式对生物力学运动学、韧带和移植方面, 然后预测韧带和移植和距骨、跟骨的运动学的外翻或外部扭矩通过脚踝弯曲的范围, kitaoka术式最大限度的恢复了踝关节的外旋稳定性, 而Deland术式则完全恢复踝关节的外翻稳定性, 迪兰手术恢复距骨倾斜比其他3个重建效果好。Courvoisier等^[45]利用三维有限元模型技术研究脚踝包括七骨性结构、软骨及周围踝关节复合体主韧带, 将沃森·琼斯、埃文斯和克里斯曼·斯努克3种重建模型进行生物力学特性的比较, 得出沃森·琼斯比其他非解剖重建肌腱固定方法在重建前部和旋转稳定性以及韧带和移植物的应力方面更有优势。

2.3.6 踝关节融合的有限元研究 欧阳汉斌等^[46]通过建立腓骨支撑固定融合踝关节三维有限元模型, 模拟踝关节4种活动模式(中立位、背屈位、内旋位和外旋位)时的受力状况, 进行静力学有限元分析: 踝关节行腓骨支撑固定融合时, 应注意合理放置2枚交叉螺钉, 避免应力过分集中, 而内固定后应加强抗背屈方向的制动; 在处理外侧支撑腓骨时, 螺钉钉孔应避免靠近腓骨边缘且上下钉距不宜过大, 可有效降低内固定失效的风险。Lee等^[47]建立了4种距下关节双螺钉融合的有限元模型, 比较治疗创伤性距下关节炎使用螺丝固定的距下关节融合, 2枚螺丝形成的扩张角度和螺杆和骨头之间的接触长度与其转动的稳定性成正比例的关系, 结合颈螺钉的后中圆形螺钉是最好的手术选择, 距下关节融合的愈合率提高并具有更好的机械稳定性。

2.3.7 踝关节假体置换的有限元研究 有学者根据CT扫描数据建立踝关节有限元置换模型, 测试和验证踝关节假体的生物力学情况, 分析得出植入假体的前和后两侧承受的力量最大。

2.3.8 改变踝关节生物力学的足部损伤的有限元研究 有研究用二维有限元模型计算结果和临床随访结果进行比较来探究60° V形截骨和改良后的90° V形截骨治疗足跖趾外翻畸形, 得出采用改良后的90° V形截骨效果更佳。有学者通过有限元方法在足踝矫正术中设计跨阈步态的优化足底模型; 在这项研究中, 通过三维有限元模型在软组织和骨骼紧张步态计算跨阈步态运动学数据, 人体步态足踝矫正法提出了优化足踝矫形器通过患者足底的最小化压力, 该矫正法的作用在骨骼和肌肉张力生成动态模型, 不断模仿足踝矫形器和足底的关联, 通过使用优化的足底改变了应力分布, 得出的结论是根据每个患者的动力学数据可以设计每个矫正足底元素, 足底张力减少可以改善异常步态。有研究用有限元评估方法对第五跖骨近端骨折中, 踝关节骨折3个不同阶段的过程进行了研究, 包括: 第一阶段, 其中材料断裂边缘之间的插入是最初的结缔组织; 第二阶段, 在结缔组

织软愈伤组织所取代; 第三阶段, 在软愈伤组织被成熟的骨骼所取代保持不同的脚姿势对其治疗效果的影响, 不同的脚姿势没有统计上显著影响压力裂缝站点, 在琼斯骨折中避免只治疗第五跖骨骨折, 因为结节撕脱骨折和琼斯撕裂骨折属于骨折生物力学稳定骨折。

3 讨论 Discussion

3.1 踝关节三维有限元模型的应用前景 近年来, 骨科生物力学领域的研究不断成熟和发展, 研究方法多采用有限元分析软件, 为了使模拟更加接近于真实, 并充分考虑到活体组织中各种因素的影响, 尽量减少简化和假设, 从而使建立的三维有限元模型及在其基础上进行分析的结果更加可靠, 并将误差降低到最低程度, 并从静态的生物力学转向动态的方向研究, 正逐步完善踝关节的有限元模型。

3.2 踝关节三维有限元模型的特点和意义 踝关节三维有限元模型具有实验时间短、费用低、可模拟复杂边界条件、力学性能测试全面和可重复性好等优点; 重建的数字化模型可准确反映解剖学结构特点和虚拟仿真可以再现手术方式及过程。有限元生物力学分析法不但可以提供骨关节正常三维动态解剖, 为“数字骨科学”概念的建立奠定了良好的基础, 还可以通过人体骨骼组织模型的有限元生物力学分析临床疾病进而找到更合适的诊治方案。

作者贡献: 郭鹏超和王成伟构思并设计本综述, 郭鹏超分析并解析数据, 经王成伟修改审校, 所有作者共同起草, 郭鹏超、王成伟对文章负责。

利益冲突: 文章及内容不涉及相关利益冲突。

伦理要求: 无涉及伦理冲突的内容。

学术术语: 有限元分析法是一种用于求解微分方程组或积分方程组数值解的数值技术。利用数学近似的方法对真实物理系统(踝关节)进行模拟, 从数字化的实验中相对真实体现骨骼组织的生物力学的情况。

作者声明: 文章为原创作品, 无抄袭剽窃, 无泄密及署名和专利争议, 内容及数据真实, 文责自负。

4 参考文献 References

- [1] Chevalier TL, Hodgins H, Chockalingam N. Plantar pressure measurements using an in-shoe system and a pressure platform: a comparison. *Gait Posture*. 2010;31(3):397-399.
- [2] Keijsers NL, Stolwijk NM, Pataky TC. Linear dependence of peak, mean, and pressure time integral values in plantar pressure images. *Gait Posture*. 2010;31(1):140-142.
- [3] Sowrnianarayanan S, Chandrasekaran A, Krishna R, Kumar; Finite element analysis of a subtrochanteric fractured femur with dynamic hip screw, dynamic condylar screw, and proximal femur nail implants a comparative study. *Proe Inst Meeh Eng H*. 2008;222(1):117-127.

- [4] 李光宪,季永东,郭延章.踝关节损伤后不稳定的手术重建[J].中国修复重建外科杂志,2003,17(6):459-460.
- [5] 王旭,马昕,陶凯,等.足踝有限元模型的建立与初步临床应用[J].中国生物医学工程学报,2008,27(2):287-292.
- [6] 赵俊奇,邱莉.踝关节骨折伴下胫腓关节分离的治疗[J].中国实用医药,2009,4(10):70-71.
- [7] 李立,谭瑞昌,聂伟志.正常踝关节模型的建立及后踝骨折对踝关节稳定性影响的有限元分析[J].中国中医骨伤科杂志,2014, 2(5): 65-66.
- [8] 刘清华,余斌,金丹.解剖结构完整的踝关节有限元模型构建及意义[J].山东医药,2010,50(14):1-3.
- [9] 王智,张建新.足踝部有限元分析的临床应用综述[J].医用生物力学杂志,2009,24(2):148-151
- [10] 黄若昆,谢鸣,勘武生,等.数字骨科学研究进展[J].中国矫形外科杂志,2010,18(12): 1003.
- [11] 许灿,张明彦,雷光华,等.踝关节内侧韧带损伤肌腱重建的三维有限元分析[J].中国组织工程研究与临床康复,2012,15(22): 131-132.
- [12] 刘清华,余斌,金丹,等.解剖结构完整的踝关节有限元模型构建及意义[J].山东医药,2010,50(14):1-3.
- [13] 刘清华,余斌,庄岩.足踝部数字化研究的现状及浅析[J].中国骨与关节损伤杂志, 2013, 28(10):998-998.
- [14] Wong C, Gehrchen PM, Darvann T, et al. Nonlinear finite element analysis and biomechanical evaluation of the lumbar spine. IEEE Trans Med Imaging. 2003;22(6):742-746.
- [15] Polgar K, Gill HS, Viceconti M, et al. Development and numerical validation of a finite element model of the muscle standardized femur. Proc Inst Mech Eng. 2003;217(3): 165-172.
- [16] 徐菲.踝足数值模型的建立及踝关节外侧失稳的距骨有限元分析[D].天津医科大学,2009.
- [17] 葛黎,戴翼斌.Mimics及ANSYS在跟距关节面静压力的有限元分析中的初步应用四[J].数理医药学杂志,2010,23(2):231-233.
- [18] Niu W, Yang Y, Yu G, et al. Valid constructing method of three-dimensional finite element human foot model and experimental analysis on its rationality. Sheng Wu Yi Xue Gong Cheng Xue Za Zhi. 2009;26(1):80-84.
- [19] 卢昌怀,余斌,陈辉强,等.正常步态下距骨三维有限元模型的建立及应力分析[J].南方医科大学学报,2010,30(10):2273-2276.
- [20] 郭国新,郭继涛,李伟,等.基于有限元的踝关节生物力学分析[J].中国组织工程研究,2012,16(17):3056-3060.
- [21] 王一民,余斌.跟骨骨折的有限元分析[D].南方医科大学,2013.
- [22] 吴恺,杨茂伟,都承斐,等.人体足踝部有限元模型的建立及有效性分析[J].中国骨与关节外科,2012,5(4):352-358.
- [23] 刘清华,余斌,张堃,等.不同载荷对正常踝关节影响的有限元研究[J].中华创伤骨科杂志,2013,12(8):705-708.
- [24] Wei GF, Zhang X, Tang G, et al. A Method of Human Biodynamic Measurement Based on Virtual Marker Technology and Wavelet Algorithm. Instr Sci Technol. 2010;38(1):83-95.
- [25] Liang J, Yang Y, Yu G, et al. Deformation and stress distribution of the human foot after plantar ligaments release: A cadaveric study and finite element analysis. Sci China Life Sci. 2011; 54(3):267-271.
- [26] Parr WCH, Chamoli U, Jones A, et al. Finite element micro-modelling of a human ankle bone reveals the importance of the trabecular network to mechanical performance: New methods for the generation and comparison of 3D models. J Biomech. 2013;46(1):200-205.
- [27] 霍永鑫,汤欣,罗珊,等.胫骨pilon骨折受伤机制的有限元分析[J].中华创伤骨科杂志,2011, 13(3):256-260.
- [28] 余华,李少星,赵长义,等.胫骨远端关节面缺损有限元模型的生物力学分析[J].中国组织工程研究,2013,11(43):7571-7580.
- [29] 黄诸侯,李俊,陈日齐,等.跟骨三维有限元模型的建立及其骨折发生机制[J].中国骨伤, 2012,5(2):97-101.
- [30] 黄诸侯,李俊,杜景文,等.三维有限元分析钢板内固定治疗跟骨骨折[J].中国组织工程研究,2013,17(17):3094-3099.
- [31] 张伟,苟福兴,谭为,等.足支撑时相跟腱不同拉力负荷时足底压力的分布[J].医用生物力学,2012,27(3):157-160.
- [32] Gu Y, Li J, Ren X, et al. Heel skin stiffness effect on the hind foot biomechanics during heel strike. Skin Res Technol. 2010; 16(3): 291-296.
- [33] 田文,王富明,黄俭.距骨颈骨折螺钉固定的三维有限元分析[J].临床骨科杂志,2013,16(1):82-84.
- [34] 戴海飞,余斌,张凯瑞.踝关节周围韧带损伤对距骨稳定性影响的有限元分析[J].中国骨与关节损伤杂志,2012,27(2):121-124.
- [35] Lu CH, Yu B, Chen HQ, et al. Establishment of a three-dimensional finite element model and stress analysis of the talus during normal gait. Nan Fang Yi Ke Da Xue Xue Bao. 2010;30(10):2273-2276.
- [36] 郭国新,赵长义,曹雷,等.踝关节内翻的有限元力学分析[J].中国组织工程研究,2012,16(26): 4801-4806.
- [37] 赵宏谋,俞光荣,梁晓军,等.三种内固定方法治疗外侧Pilon骨折的临床与生物力学分析[J].中国修复重建外科杂志,2013,11(5): 21-30.
- [38] Ahmet F, Osman T, Cetin I. Ilizarov external fixator in the management of tibial pilon fractures: ankle hinged vs ankle fixed frame. Eklem Hastalik Cerrahisi. 2013;24(3):133-138.
- [39] 张禹,刘志成,成永忠,等.旋后外旋型踝关节损伤有限元模型的建立与力学分析[J].医用生物力学,2012,27(3):282-288.
- [40] 赵继阳,成永忠,温建民,等.基于筋束骨理论的旋前-外旋型三踝骨折有限元分析[J].中国中医基础医学杂志,2012,18(3): 328-329.
- [41] Shin J, Yue N, Untaroiu CD. A Finite Element Model of the Foot and Ankle for Automotive Impact Applications, Ann Biomed Eng. 2012;40(12):2519-2531.
- [42] Pekedis M, Ozan F, Yildiz H. Developing of a three-dimensional foot ankle model based on CT images and non-linear analysis of anterior drawer test by using the finite element method. J Biomech. 2011;44(1):14.
- [43] 刘清华,余斌,李忠,等.下胫腓联合螺钉位置对踝关节应力分布影响的有限元分析[J].中华创伤骨科杂志,2013,15(9):778-785.
- [44] Xu C, Zhang MY, Lei GH, et al. Biomechanical evaluation of tenodesis reconstruction in ankle with deltoid ligament deficiency: a finite element analysis. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc. 2012;20(9):1854-1862.
- [45] Courvoisier A, Vialle R. Element F. Analysis of Nonanatomic Tenodesis Reconstruction Methods of Combined Anterior Talofibular Ligament and Calcaneofibular Ligament Deficiency. Foot Ankle Int. 2011;32(10):1000-1008.
- [46] 欧阳汉斌,熊军,项鹏,等.腓骨支撑踝关节融合的三维有限元分析[J].中国组织工程研究,2012,16(13):2296-2299.
- [47] Lee JY, Lee YS. Optimal double screw configuration for subtalar arthrodesis: a finite element analysis. Knee Surg Sports Traumatol Arthroscopy. 2011;19(5):842-849.