

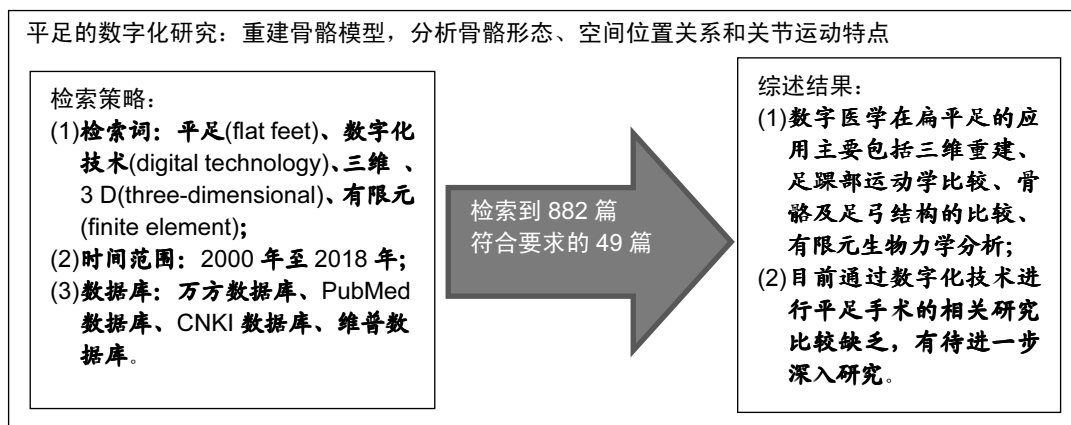
# 数字化技术在平足研究中的应用：三维模型构建与生物力学分析

张兴飞, 王文成, 许亚军(苏州大学附属无锡九院足踝外科, 江苏省无锡市 214000)

DOI:10.3969/j.issn.2095-4344.1146

ORCID: 0000-0003-4437-5843(许亚军)

文章快速阅读:



张兴飞, 男, 1992年生, 河南省洛阳市人, 汉族, 苏州大学附属无锡九院2016级骨科在读硕士。

通讯作者: 许亚军, 副教授。苏州大学附属无锡九院足踝外科, 江苏省无锡市 214000

文献标识码:A  
稿件接受: 2018-12-22



## 文题释义:

**扁平足:** 扁平足的特征性表现为后足外翻、前足外展及内侧足弓塌陷, 当扁平足出现疼痛、行走受限等症状时即为平足症, 保守治疗无效时需手术治疗。

**数字化技术:** 是指运用二进制 0 和 1 两位数字进行编码, 通过计算机等设备来传播信息的技术, 在医学领域的应用即为数字医学, 它主要包括三维重建可视化技术、虚拟仿真技术和 3D 打印技术, 在颌面部、脊柱及髌膝关节等领域应用广泛。

## 摘要

**背景:** 平足症的手术目的在于矫正畸形、恢复足弓形态、改善足部功能, 目前主要根据专科检查以及 X 射线平片来确定手术方案, 但通过二维的平片和术者的经验难以满足个体化治疗的需要, 常存在矫枉过正或者矫正不足的现象。数字化技术在医学领域的发展极大地促进了骨科的进步, 近年广泛应用于肩、肘、髋、膝、脊柱等领域, 包括三维重建、3D 打印、手术模拟及手术导航等, 但是在平足研究中的应用还比较缺乏。

**目的:** 探讨数字化技术在平足中的应用现状。

**方法:** 第一作者以中文检索词“平足、三维、3D、有限元、数字化”和英文检索词“flat feet, digital technology, three-dimensional, finite element”分别检索万方数据库、CNKI 数据库、维普数据库和 PubMed 数据库, 检索时间: 2000 年 1 月至 2018 年 9 月。共检索到 882 篇相关文献, 其中纳入符合标准的文献 49 篇。

**结果与结论:** ①目前数字化技术在平足中的应用主要包括重建骨骼模型, 分析骨骼形态、空间位置关系和关节运动特点, 建立有限元模型以及应力分析; ②三维平足模型清晰度高, 在生物力学研究方面具有明显优势; ③利用数字化技术指导平足截骨手术的研究比较缺乏, 参照骨科其他领域的研究成果, 有望提高平足症手术的治疗效果。

## 关键词:

平足; 三维模型; 解剖学; 生物力学; 有限元分析; 数字化技术; 数字化骨科; 模拟手术; 个体化治疗  
中图分类号: R459.9; R615

## Application of digital technology in the study on flat feet: three-dimensional model reconstruction and biomechanical analysis

Zhang Xingfei, Wang Wencheng, Xu Yajun (Department of Foot and Ankle Surgery, Wuxi Ninth People's Hospital Affiliated to Soochow University, Wuxi 214000, Jiangsu Province, China)

Zhang Xingfei, Master candidate, Department of Foot and Ankle Surgery, Wuxi Ninth People's Hospital Affiliated to Soochow University, Wuxi 214000, Jiangsu Province, China

## Abstract

**BACKGROUND:** The purpose of the surgery for flat feet is to correct the deformity, to restore the medial longitudinal arch and to improve the foot and ankle function. However, it is not sufficient to satisfy the need of individualized treatment, only referring to two-dimensional data and the surgeon's experience, so over-correction or under-correction usually occurs. The development of digital technology in medicine has greatly promoted the progress in orthopedics, including three-dimensional reconstruction, three-dimensional printing, surgical simulation and surgical navigation. This technologies have been widely used in shoulder joint, elbow joint, hip joint, knee joint and spine in recent years, but studies on flat feet are relatively rare.

Corresponding author: Xu Yajun, Associate professor, Department of Foot and Ankle Surgery, Wuxi Ninth People's Hospital Affiliated to Soochow University, Wuxi 214000, Jiangsu Province, China

**OBJECTIVE:** To review the application status of digital technology in flat feet.

**METHODS:** Databases of WanFang, CNKI, VIP and PubMed databases between January 2000 and September 2018 were searched. The keywords were “flat feet, digital technology, three-dimensional, finite element” in Chinese and English, respectively. Totally 882 articles were retrieved, and finally 49 eligible articles were included.

**RESULTS AND CONCLUSIONS:** (1) The application of digital technology in flat feet mainly includes three-dimensional reconstruction, analyzing bone morphology, spatial position relationship and joint movement characteristics, establishing finite element model and stress analysis. (2) The three-dimensional flat feet model with high definition possesses obvious advantages in biomechanical research. (3) Digital guidance in flat feet osteotomy surgery is still rare and it is expected to improve the effect of flat feet surgery by referring to the research in some other orthopedic fields.

**Key words:** flat feet; three-dimensional model; anatomy; biomechanics; finite element analysis; digital technology; digital orthopedics; simulation surgery; individualized treatment

## 0 引言 Introduction

平足的特征性表现为后足外翻、前足外展和内侧足弓塌陷,是一种复杂的足踝部三维结构及功能异常,解剖学改变包括距骨头下沉、跟骨外翻、足弓降低以及前足旋后,当出现疼痛等不适症状时即为平足症,先天性原因包括先天性垂直距骨、跗骨联合、副舟骨等,后天性原因以胫后肌失能最为常见<sup>[1]</sup>。关于平足的研究包括解剖学研究、生物力学研究、临床研究等,研究的目的在于了解其发病特点及生物力学异常,提高平足症的治疗效果。

传统的研究手段主要是通过体格检查及足印法对平足做出初步诊断<sup>[2-3]</sup>。通过X射线平片、CT及MRI检查研究平足的异常指标,发现平足患者的结构异常,对平足进行客观的诊断<sup>[4-5]</sup>。三维研究主要是在尸体上建立平足模型,进行解剖学研究、手术方式的对比研究以及生物力学研究<sup>[6]</sup>。临床上通过对病例资料的回顾性研究,分析治疗效果<sup>[7-8]</sup>。传统的研究手段存在诸多弊端,二维层面的研究难以充分反映平足的三维空间结构异常,体格检查的阳性体征是内部结构异常的外在体现,平足尸体模型失去了正常组织的血流灌注和神经肌肉组织活性,与生理状态相差较大。另外,在尸体标本上建立平足模型时切断了距舟关节囊、弹簧韧带等软组织结构,对足部进行了短时间内的过度加压,但是平足患者的软组织异常是相互影响、逐步发展的,临床上的平足患者也并不出现这些结构的同时破坏<sup>[9]</sup>。目前有关平足的临床研究多数为回顾性研究或者病例对照研究,单个研究的病例数目通常比较少,缺乏长期随访。以上这些传统研究手段的不利因素难以满足平足患者个体化治疗的需要和深入研究的需要。

近些年来,数字化技术在医学领域飞速发展,极大地促进了骨科的发展进步,尤其是肩肘腕膝和脊柱等领域,利用数字化技术进行骨组织的等比例三维建模、设计手术导航模板、制定个体化手术方案等操作,使得治疗更加微创化、精准化、安全化<sup>[10-13]</sup>。根据当前数字化技术在骨科其他领域取得的应用及在平足研究中取得的初步成效,该技术有助于深入研究平足的生物力学机制,提高平足手术的个体化治疗效果。

## 1 资料和方法 Data and methods

**1.1 资料来源** 第一、二作者于2018年5月开始进行检

索,并持续检索至2018年9月,检索万方数据库(<http://med.wanfangdata.com.cn/>)、CNKI数据库(<http://www.cnki.net/>)、维普数据库(<http://qikan.cqvip.com/>)和PubMed数据库(<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/>)自2000年1月发表的相关文章。中文检索词“平足、三维、3D、有限元、数字化”;英文检索词“flat feet, digital technology, three-dimensional, finite element”。检索文献类型包括研究原著、会议论文、病例报道、综述及学位论文等。

### 1.2 纳入和排除标准

**1.2.1 纳入标准** 文章内容为与平足相关的数字化研究,包括三维重建、有限元分析、手术导航、生物力学分析等。

**1.2.2 排除标准** 重复性研究。

**1.3 质量评估** 共检索到882篇相关文献,中文681篇,英文201篇,阅读标题和摘要进行筛选,排除重复性研究和无关研究,最后49篇文献符合纳入标准。在成文阶段借鉴了数字化技术在其他领域的研究和平足相关的其他研究。

## 2 结果 Results

**2.1 数字医学介绍** 数字医学是以0和1为基础来加工处理医学相关问题的一门新兴的交叉学科,可广泛应用于骨科、心血管外科、肝胆外科和显微外科等领域,在骨科领域的发展最为迅速<sup>[14]</sup>。美国、韩国先后于1994年和2000年完成了“可视人计划”<sup>[15-17]</sup>,使得实体解剖向数字解剖方向发展,为后来数字化技术的骨科应用提供了基础。中国紧跟世界潮流,于2002年完成了第一例中国可视人模型,成为世界上第3个拥有本国虚拟人数据库的国家<sup>[18-19]</sup>。2007年,裴国献教授提出了数字骨科学的概念,它包含数字骨科解剖、数字骨科手术和骨科虚拟手术仿真系统3个领域<sup>[20]</sup>,它紧密结合了临床骨科与计算机技术,为骨科的基础研究和临床研究提供了新的研究手段。目前数字化技术在医学领域用途非常广泛,展示出了良好的应用前景:通过三维模型的建立既可以得到直观的三维图像,方便医生的观察学习和医患之间的沟通,也可以在三维软件中进行任意角度旋转、剖切、测量及分析等操作,重复了解病情。在解剖结构复杂的

脊柱及髌膝关节, 通过建立三维模型, 能够清晰地显示这些部位的解剖及毗邻关系。在软件中或3D打印模型上模拟手术操作, 设计导航模板, 进行术前术后有限元分析, 有助于提高手术的精确性和安全性, 可以缩短手术时间, 减少手术相关不良反应, 实现个体化治疗。骨科虚拟现实技术可以在虚拟场景内, 通过感官体验学习实际手术操作, 缩短年轻医生的学习曲线, 有利于外科手术训练的规范化、程序化和标准化<sup>[20]</sup>。

## 2.2 数字化技术在平足研究中的应用现状

### 2.2.1 解剖学研究

利用数字化技术可以进行组织活性状态下的解剖学研究, 将CT或者MR的二维图像转化为三维立体的结构, 进行整体或局部的观察, 弥补了传统尸体解剖研究中标本缺乏、无组织活性的不足, 对于同一标本可以反复利用, 使观察者能够更加直观立体地观察解剖毗邻关系。在医学教育工作中, 3D打印模型有助于提高教学质量, 在医患沟通中便于患者及家属的理解。应用医学处理软件对平足患者的CT或者MR数据加工, 可以得到组织活性状态下的平足模型, 还可以根据需要进行足踝部不同体位、不同运动状态的扫描设置, 得到相应运动状态的三维模型。在三维模型上可以进行骨骼、血管、肌腱等组织结构的三维可视化研究, 相较于尸体模型可以更加真实地反映平足的异常情况。Peeters等<sup>[21]</sup>对平足患者的距舟关节进行了重建研究, 发现距骨舟骨关节面的形态改变与平足的足弓塌陷和前足外展密切相关。Ledoux等<sup>[22]</sup>对足部施加20%体质量的负荷, 进行三维骨骼重建, 分析了距骨第一跖骨间角、第一跖骨间角等骨骼的三维空间位置关系在弓形足、正常足、无症状平足和症状性平足4种足型中的差异, 希望将这几种差异作为一种新的客观的方式来区分足型。Louie等<sup>[23]</sup>研究了平足、弓形足与正常足的三维结构, 通过分析踝关节、距舟关节在足踝部骨骼及关节面的形态差异, 发现不同足型的距舟关节在矢状面和横断面的相对运动差异最为显著, 弓形足更倾向于背伸和内收, 平足更倾向于外展, 并且弓形足的距骨舟骨的关节面覆盖比例较平足和正常足是明显减少的。蔡宇辉等<sup>[24]</sup>利用MRI和3D重建技术研究了扁平足的外翻特性, 发现外翻指标与扁平足相关系数较高, 认为后足角度不能体现正常足与扁平足在骨结构上的差异, 只能说明跟骨与胫骨之间的相对位置关系, 单纯的测量足外翻指标不能充分评价平足。这些研究从三维角度出发, 分析了平足患者内在骨关节的形态、空间位置关系异常, 加深了对平足发病机制的理解, 为研究平足的病理生理机制提供了新的研究方法。Canavese等<sup>[25]</sup>对跟骨的距下关节面进行三维重建研究, 分析了足外侧柱延长术对于跟骨前中关节面的损害情况, 认为对于跟骨距下关节面为Barnett分型B1或者B2型时, 即跟骨前中关节面部分或者全部连为一体时需要行Hintermann术式, 将截骨线向

后方移动, 以避免造成关节面的破坏, 从数字解剖学角度证实了该术式在平足中的应用优势。综上所述, 通过对平足患者进行三维建模可以观察足踝部整体的骨关节形态、分析病变部位特点, 了解平足患者骨骼的形态学异常和空间位置改变, 对疾病的观察和测量具有直观、准确、可反复利用等优势。目前平足的数字化解剖学研究具体见表1。

表1 平足的数字化解剖学研究

平足的数字化解剖学研究	文献引证 <sup>[21-22, 24-25]</sup>
骨骼形态	Peeters等 <sup>[21]</sup> 通过三维重建发现, 距骨舟骨关节面的形态改变与平足的足弓塌陷和前足外展密切相关。 蔡宇辉 <sup>[24]</sup> 等研究了扁平足的外翻特性, 发现外翻指标与扁平足相关系数较高。 Canavese等 <sup>[25]</sup> 分析了足外侧柱延长术对于跟骨前中关节面的损害情况。
足踝部骨骼的空间位置关系	Ledoux等 <sup>[22]</sup> 分析了骨骼的三维空间位置关系在弓形足、正常足、无症状平足和症状性平足4种足型中的差异。 Louie等 <sup>[23]</sup> 研究发现不同足型的距舟关节在矢状面和横断面的相对运动差异最为显著。

### 2.2.2 生物力学研究

足踝部的生物力学研究对于了解平足的发生发展机制、制定手术决策至关重要, 从某种意义上来说, 平足手术效果取决于生物力学的改善情况。传统的生物力学研究多为建立平足尸体模型, 在力学加载仪器上进行足底压力测试、手术效果分析等研究<sup>[26-27]</sup>。但是尸体平足模型切断了距舟关节周围的软组织结构, 是一种过度损伤状态, 在施加负荷时关节之间过度活动, 会影响分析结果。有学者在体表安放传感器等装置, 结合图像捕捉系统进行骨骼间的运动学分析, 在一定程度上克服了尸体生物力学研究的不足之处, 但是足踝部骨骼小而不规则, 在体表准确安放这些装置存在困难, 并且皮肤的弹性运动也会影响到分析结果<sup>[2, 28]</sup>。有限元法的出现为研究平足的生物力学特征提供了新思路, 有限元法最先应用于飞机结构的研究, 自1972有限元技术应用到骨科生物力学研究以来, 生物力学的数字化研究日趋广泛。可以通过设置骨骼、肌肉组织的力学参数, 模拟多种传统生物力学试验无法实现的工况, 进行生物力学分析, 建立的有限元模型可以设置多种条件, 反复应用<sup>[29]</sup>。利用有限元分析法建立的足踝部骨骼、关节及韧带构成的三维模型, 可操作性强, 在模型上可进行术前和术后的应力分析, 在临床手术之前就可以评估手术效果, 有助于制定最佳手术方案<sup>[30]</sup>。Spratley等<sup>[31]</sup>对于平足的有限元分析进行了初步探索, 对其中的韧带肌腱等组织施加负荷, 发现有限元模型与患者的畸形方向及内侧柱畸形是一致的, 这为无创手段测量关节接触力量及软组织张力提供了参考, 见图1。

Spratley EM, J Orthop Res 2013

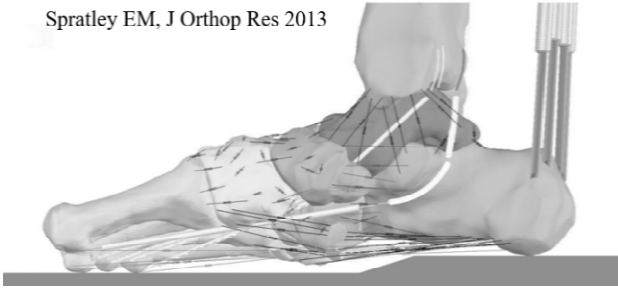


图1 某平足的有限元模型<sup>[31]</sup>

但是关于平足的有限元分析非常少见,借鉴于骨科其他领域的应用,作者认为有限元在平足的应用中可以从术前应力分析、手术模拟后应力分布等方面深入,以期提高平足症的诊断及治疗效果。由于平足是一种三维立体的结构及功能异常,尤其对于柔性平足,需要在负重状态下才能良好地显示其异常,但是目前已知的负重CT扫描仪器非常少见,国内仅北京同仁医院有一台,因此学者们借助于特定的辅助工具来研究平足的负重状态。日本学者Kido等<sup>[32]</sup>设计了膝关节屈曲位的足踝部负重CT扫描辅助支架,利用Mimics软件第一次研究了活体完全负重状态下跗骨的运动情况,通过对比分析负重前后的骨关节位置,证实了健康足与扁平足之间在跗骨的运动方面有差异,见图2。

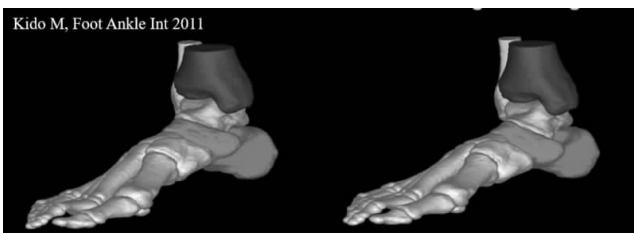


图2 平足非负重(左)与负重状态的三维骨骼模型<sup>[32]</sup>

他们分别于2011年、2013年、2016年对平足患者负重前后足踝部骨骼间的运动变化特点进行了研究,发现平足较正常足的骨骼变化趋势为距骨跖屈、舟骨外翻、跟骨背伸和外翻。另外,平足患者的第五跖骨相对于第一跖骨是更加跖屈的。在负重状态,平足的跖楔关节背伸增大,第一跖楔关节处最大,距舟关节和距下关节更倾向于外翻<sup>[33]</sup>,这为平足负重状态的在体测量提供了新的研究思路。有研究设计了膝关节伸直位的足踝部负重CT扫描支架<sup>[34-35]</sup>,利用Mimics软件获得完全负重状态的足踝部骨骼模型,在Geomagic studio软件中对比分析平足患者与健康人在负重前后的关节位置,证实了平足患者在负重状态时,距下关节背伸和外翻是增加的,距舟关节外翻角度也是增加的。该团队还通过足踝部不同体位支具,模拟踝关节跖屈、内翻等不同体位,分析正常足与平足之间的差异,发现柔性平足患者距下关节在不同终末体位存在过度活动,在最大内翻位时更加显著<sup>[35]</sup>,这为距下关节制动术治疗平足提供了新的参

考依据。Imai等<sup>[36]</sup>通过对踝关节最大背伸及跖屈位的三维重建研究发现,中立位至背伸时,三期平足与二期或正常足相比,距骨相对于胫骨更加外展和外翻;中立位至跖屈时,随着病程的进展,距骨相对于胫骨跖屈逐渐减少。建议无论在二期平足的什么状态下,跟骨内移截骨术和外侧柱延长术均应实施,以维持正常关节的稳定性,减少踝关节相关不良反应。有研究通过激光扫描建立负重状态足踝部表面的三维模型,发现柔性平足是动态发展的,逐渐增加的前足内翻角度也会影响中足后足的结构<sup>[37]</sup>。此外,通过足底压力测试,3D打印个性化的矫形鞋垫也是该领域的研究方向<sup>[38-39]</sup>。数字化技术在平足生物力学研究中的应用,实现了平足异常指标的在体测量,可以更加真实地反映平足的异常,使得对于平足的了解更加深入全面。

2.2.3 手术模拟 目前主要根据X射线片、CT、MRI和术者经验判断畸形严重程度,制定平足手术方案,手术效果很大程度上依赖于术者的经验,术中需要根据后足力线情况决定矫正程度,但是术中无法达到负重状态评估,容易造成矫正不足或者矫正过正<sup>[40-41]</sup>。影像技术与数字化技术的结合,使得研究者可以在术前进行三维建模、3D打印,直观、准确地了解病变。在打印的实体模型上或者软件中模拟手术操作,选择合适的手术方案,通过有限元法分析手术效果,这样可以减少不必要的软组织损伤及手术过程,优化治疗效果<sup>[42]</sup>。研究报道计算机导航模拟截骨的误差在1°和1 mm,这为实现个体化治疗提供了可靠保障<sup>[10]</sup>。理论上讲,对于需要截骨的平足患者,可以参照数字化技术在膝关节置换<sup>[13]</sup>、脊柱手术<sup>[11]</sup>、拇外翻矫形等领域的应用<sup>[43-44]</sup>,利用数字化技术反复术前模拟,通过有限元的应力分析评估手术效果,选择最佳手术方案。通过平足矫形导航模板的设计,确保术中操作的准确性,减少手术时间、麻醉药物用量和辐射危害,为患者提供个体化治疗方案,但是数字化手术模拟在平足中的应用鲜有报道。Spratley等<sup>[45]</sup>基于MRI数据,利用逆向工程软件Solid Works建立有限元模型,分析了平足患者拇长屈肌腱转位联合跟骨内移截骨术后的生物力学现象,并且与手术后的生物力学测试对比,证实了有限元模拟与术后实体测量是具有一致性的。该研究还发现平足矫形术后足内侧组织应力增加,外侧负荷减少,与实体测试结果也是一致的,这为研究平足的手术治疗及生物力学研究提供了新方法。高斌等<sup>[46]</sup>制作出与复杂平足等比例的3D打印实体模型,在复杂扁平足的手术治疗中取得了较好的效果。个体化的三维模型不仅可以用于术前模拟、选择最佳手术方案,还可以利用模型与患者及其家属进行良好的沟通,使他们充分了解病情、治疗方案以及手术相关问题,有利于减少医患矛盾。另外,3D打印模型也是年轻医师重要的学习工具,有助于缩短年轻医师的学习曲线<sup>[47]</sup>。目前还

未见到通过数字化技术对平足进行术前截骨模拟、分析截骨角度、建立导航模板等方面的研究。

**2.3 数字化技术的不足** 数字化技术的优点在于能直观、立体地展示病变特点, 可以模拟手术过程, 进行个体化手术设计, 减少手术相关不良反应。然而在实际应用中还存在着诸多问题, 首先, 三维模型制作周期长, 3D打印及导航模板价格昂贵, 相对于平片检查增加了辐射剂量及经济成本等。其次, 多数临床医生对于这种新的计算机技术比较陌生, 造成该技术在临床的应用受到限制。另外, 数字化技术在平足中的应用虽然可以弥补尸体解剖研究及临床病例研究的一些不足, 减少了研究中混杂因素的影响, 但是由于当前缺乏自动化程度高的算法和软件, 在建模过程中需要部分手动操作分割各部分结构, 尤其是在负重状态下关节间隙更为狭窄, 增加了分割难度, 在分割过程中存在一定程度的主观性差异<sup>[48]</sup>。并且对于骨质密度低的患者以及肌肉、血管等软组织的分割及显示效果欠佳, 在进行影像数据采集及模型建立过程中还存在部分数据丢失的现象, 会降低模型的真实度<sup>[43]</sup>。由于当前科学技术的限制, 在进行数字化研究时通常将一些条件简化, 比如将运动过程简化为最大跖屈、背伸、内翻、外翻等初始和终末体位<sup>[34, 36]</sup>; 在有限元分析中将骨骼、肌肉等组织的力学特性进行统一化, 因此, 建立的模型并不是真正意义上的生理状态模型, 只能对生物力学过程进行一定程度的解释。平足的三维数字化研究在一开始为非负重状态的数据采集及模型建立, 但是这对于平足这种需要在负重状态才能充分显示结构及功能改变的疾病来讲存在明显弊端。有研究对足部施加部分负荷, 分析后足关节的变化情况, 但是这种部分负荷对于关节变化的评估会产生较大的误差<sup>[22, 49]</sup>。日本学者Kido等<sup>[32]</sup>设计膝关节屈曲位装置可以达到完全负重, 但由于膝关节处于屈曲状态, 降低了腓肠肌的力学作用。有研究设计的膝关节伸直位辅助支架, 比较符合生理负重状态<sup>[35]</sup>。但是平足患者多数伴有腓肠肌或跟腱的挛缩, 伸直位扫描时患者难免存在不适, 导致非生理性的肌肉代偿, 也可能会造成数据测量的准确性。因此, 未来的研究还需要进一步优化扫描仪器(比如设计站立位CT扫描仪、足底压力分布图与模拟负重装置的结合)、改进实验设计(如扫描参数的优化及辅助支架的改进)等方法得到更为符合生理状态的平足模型, 进行深入研究。需要注意的是, 软组织松解及肌腱转位等软组织手术也是获得良好手术效果的重要组成部分, 但是由于技术条件限制, 目前还无法做到将CT数据与MRI数据结合起来显示平足畸形与软组织的关系, 在手术模拟过程中也无法体现软组织在矫形中的作用<sup>[47]</sup>。

### 3 小结与展望 Conclusions and prospects

保守治疗无效的症状性平足需要手术治疗, 手术治

疗的首要目的在于消除疼痛、改善功能, 其次是纠正畸形、恢复足弓形态。但是怎样在纠正足部畸形的同时尽可能多地保留足踝部功能, 避免矫正不足或者矫枉过正的发生是足踝外科医生面临的难题, 这就需要对患者进行充分评估, 进行个体化手术设计。当前医学影像技术、计算机辅助技术、数字骨科等领域的发展, 以及数字化技术在膝关节、髋关节等领域的应用, 为平足的个体化治疗提供了参考。通过三维建模、模拟手术、制定导航模板等手段优化治疗效果, 使得现代医学精确化、个性化、微创化、智能化的理念深入到平足的基础研究及临床应用方面, 可以更好地解决患者的痛苦。鉴于当前数字化技术在平足研究应用方面取得的初步成效, 相信利用计算机辅助手段对平足症进行术前模拟及个体化治疗是未来一段时间的努力方向, 这也将促进足踝外科的进步。

**致谢:** 感谢苏州大学附属无锡九院及足踝外科同仁对文章的支持。

**作者贡献:** 课题设计为第一作者和通讯作者, 文献检索及整理为第一作者和第二作者, 文章书写为第一作者, 文章审校为通讯作者。

**经费支持:** 该文章接受了“苏州大学附属无锡九院研究生科研经费”的支持。所有作者声明, 经费支持没有影响文章观点和对研究数据客观结果的统计分析及其报道。

**利益冲突:** 文章全部作者声明, 在课题研究和文章撰写过程中, 没有因其岗位角色影响文章观点和对数据结果的报道, 不存在利益冲突。

**伦理问题:** 文章的撰写与编辑修改后文章遵守了《系统综述和荟萃分析报告规范》(PRISMA 指南)。

**文章查重:** 文章出版前已经过专业反剽窃文献检测系统进行3次查重。

**文章外审:** 文章经小同行外审专家双盲外审, 同行评议认为文章符合期刊发稿宗旨。

**文章版权:** 文章出版前杂志已与全体作者授权人签署了版权相关协议。

**开放获取声明:** 这是一篇开放获取文章, 根据《知识共享许可协议》“署名-非商业性使用-相同方式共享4.0”条款, 在合理引用的情况下, 允许他人以非商业性目的基于原文内容编辑、调整和扩展, 同时允许任何用户阅读、下载、拷贝、传递、打印、检索、超级链接该文献, 并为之建立索引, 用作软件的输入数据或其它任何合法用途。

### 4 参考文献 References

- [1] 王正义. 足踝外科学[M]. 2版北京: 人民卫生出版社, 2014: 278.
- [2] Chimenti RL, Tome J, Hillin CD, et al. Adult-acquired flatfoot deformity and age-related differences in foot and ankle kinematics during the single-limb heel-rise test. J Orthop Sports Phys Ther. 2014;44(4):283-290.
- [3] 包贝西, 张建中. 足印角及C-S指数与扁平足的相关性研究[J]. 中国骨与关节杂志, 2017, 6(6): 439-444.
- [4] Koç A, Karabiyik Ö. MRI evaluation of ligaments and tendons of foot arch in talar dome osteochondral lesions. Acta Radiol. 2018; 59(7): 869-875.
- [5] 施涛. 应力位后足冠状位X线片评价儿童柔韧性扁平足的应用研究[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2017.
- [6] Blackman AJ, Blevins JJ, Sangeorzan BJ, et al. Cadaver flatfoot model: ligament attenuation and Achilles tendon overpull. J Orthop Res. 2009;27(12):1547-1554.

- [7] Saunders SM, Ellis SJ, Demetracopoulos CA, et al. Comparative outcomes between step-cut lengthening calcaneal osteotomy vs traditional evans osteotomy for stage iib adult-acquired flatfoot deformity. *Foot Ankle Int*. 2018;39(1):18-27.
- [8] 徐阳,李星辰,彭志杰,等.跟骨Z形截骨治疗柔韧性扁平足[J].中国骨与关节杂志,2016,5(7):530-533.
- [9] Guha AR, Perera AM. Calcaneal osteotomy in the treatment of adult acquired flatfoot deformity. *Foot Ankle Clin*. 2012;(2): 247-258.
- [10] Oka K, Murase T, Moritomo H, et al. Accuracy of corrective osteotomy using a custom-designed device based on a novel computer simulation system. *J Orthop Sci*. 2011;16(1):85-92.
- [11] 刘潇,刘耀升,刘蜀彬.有限元法分析腰椎融合与非融合后的应力分布[J].中国组织工程研究,2018,22(3):409-414.
- [12] 陈亮,桑莉莉,高大伟,等.基于3D打印个性化手术导航模块的微创锥形截骨治疗桡骨上段旋转畸形[J].中华肩肘外科电子杂志,2018,6(2): 151-153.
- [13] 杜明昌,柳柳,翟良全,等.定制3D打印截骨导板辅助双膝关节同期置换的临床疗效观察[J].中华关节外科杂志(电子版),2018,12(1): 18-23.
- [14] 钟世镇.数字医学在不同学科中的探索应用[J].中华整形外科杂志, 2018,34(6):前插2.
- [15] Höhne KH, Pflesser B, Pommert A, et al. A realistic model of human structure from the visible human data. *Methods Inf Med*. 2001;40(2):83-89.
- [16] Chung MS, Kim SY. Three-dimensional image and virtual dissection program of the brain made of Korean cadaver. *Yonsei Med J*. 2000;41(3):299-303.
- [17] Spitzer VM, Whitlock DG. The visible human dataset: the anatomical platform for human simulation. *Anat Rec*. 1998;253(2): 49-57.
- [18] 张绍祥,刘正津,谭立文,等.首例中国数字化可视人体完成[J].第三军医大学学报,2002,24(10):1231-1232.
- [19] 龚翼星,毛晓芬,杨波,等.数字医学在骨科中的应用进展[J].中华关节外科杂志(电子版),2018,12(2):266-270.
- [20] 裴国献,张元智.数字骨科学:一门骨科学新分支的萌生[J].中华创伤骨科杂志,2007,9(7):601-604.
- [21] Peeters K, Schreuer J, Burg F, et al. Altered talar and navicular bone morphology is associated with pes planus deformity: a CT-scan study. *J Orthop Res*. 2013;31(2):282-287.
- [22] Ledoux WR, Rohr ES, Ching RP, et al. Effect of foot shape on the three-dimensional position of foot bones. *J Orthop Res*. 2006; 24(12):2176-2186.
- [23] Louie PK, Sangeorzan BJ, Fassbind MJ, et al. Talonavicular joint coverage and bone morphology between different foot types. *J Orthop Res*. 2014;32(7):958-966.
- [24] 蔡宇辉,侯曼,郑秀瑗,等.用3维重构技术分析足部骨组织的外翻特性[J].北京师范大学学报(自然科学版),2005,41(5):541-543.
- [25] Canavese F, Dimeglio A, Bonnel F. Postoperative CT-scan 3D reconstruction of the calcaneus following lateral calcaneal lengthening osteotomy for flatfoot deformity in children. Is the surgical procedure potentially associated with subtalar joint damage. *Foot Ankle Surg*. 2018;24(5):453-459.
- [26] Baxter JR, Demetracopoulos CA, Prado MP, et al. Lateral column lengthening corrects hindfoot valgus in a cadaveric flatfoot model. *Foot Ankle Int*. 2015;36(6):705-709.
- [27] Niki H, Ching RP, Kiser P, et al. The effect of posterior tibial tendon dysfunction on hindfoot kinematics. *Foot Ankle Int*. 2001; 22(4):292-300.
- [28] Prachgosin T, Chong DY, Leelasamran W, et al. Medial longitudinal arch biomechanics evaluation during gait in subjects with flexible flatfoot. *Acta Bioeng Biomech*. 2015;17(4):121-130.
- [29] 谢强,王智慧,刘文一,等.三维有限元分析钢板踝关节融合后的力学稳定性[J].中国组织工程研究,2018,22(3):392-397.
- [30] 张占阅,董乐乐,左强,等.有限元分析法在拇外翻生物力学研究中的应用:可靠性与提升空间[J].中国组织工程研究,2018,22(11): 1762-1767.
- [31] Spratley EM, Matheis EA, Hayes CW, et al. Validation of a population of patient-specific adult acquired flatfoot deformity models. *J Orthop Res*. 2013;31(12):1861-1868.
- [32] Kido M, Ikoma K, Imai K, et al. Load response of the tarsal bones in patients with flatfoot deformity: in vivo 3D study. *Foot Ankle Int*. 2011;32(11):1017-1022.
- [33] Yoshioka N, Ikoma K, Kido M, et al. Weight-bearing three-dimensional computed tomography analysis of the forefoot in patients with flatfoot deformity. *J Orthop Sci*. 2016;21(2):154-158.
- [34] Xu J, Zhang Y, Muhammad H, et al. In vivo three-dimensional analysis of hindfoot kinematics in stage II PTTD flatfoot. *J Orthop Sci*. 2015;20(3):488-497.
- [35] 哈山,许鉴,马昕,等.二期成人获得性平足与正常成人足距下关节运动三维测量对比研究[J].国际骨科学杂志,2014,35(4):261-264.
- [36] Imai K, Ikoma K, Maki M, et al. Features of hindfoot 3D kinetics in flat foot in ankle-joint maximal dorsiflexion and plantarflexion. *J Orthop Sci*. 2011;16(5):638-643.
- [37] Chen MJ, Chen CP, Lew HL, et al. Measurement of forefoot varus angle by laser technology in people with flexible flatfoot. *Am J Phys Med Rehabil*. 2003;82(11):842-846.
- [38] 苏宏伦,郭俊超,莫中军,等.个性化扁平足矫形鞋垫的生物力学研究[J].医用生物力学,2016,31(6):490-494.
- [39] Kido M, Ikoma K, Hara Y, et al. Effect of therapeutic insoles on the medial longitudinal arch in patients with flatfoot deformity: a three-dimensional loading computed tomography study. *Clin Biomech (Bristol, Avon)*. 2014;29(10):1095-1098.
- [40] Bishay SN. Minimally invasive single-session double-level rotational osteotomy of the forearm bones to correct fixed pronation deformity in congenital proximal radioulnar synostosis. *J Child Orthop*. 2016;10(4):295-300.
- [41] 徐阳,徐向阳.非胫后肌腱失能性平足诊治进展[J].国际骨科学杂志, 2016,37(2):70-74.
- [42] 艾福志,李克维.数字骨科技术在寰枢椎手术中的应用寰枢椎脱位系列讲座(七)[J].中国骨科临床与基础研究杂志,2016,8(2):120-127.
- [43] 张宇航,毕大卫,陈亿民,等.3D打印技术制定个体化截骨角在拇外翻 Chevron截骨矫形术中的应用[J].中国骨伤,2018,31(3):203-207.
- [44] 孙卫东,温建民,胡海威,等.拇外翻第1跖骨颈部不同截骨角度截骨端稳定性有限元分析[J].中华损伤与修复杂志(电子版),2012,7(5): 492-496.
- [45] Spratley EM, Matheis EA, Hayes CW, et al. A population of patient-specific adult acquired flatfoot deformity models before and after surgery. *Ann Biomed Eng*. 2014;42(9):1913-1922.
- [46] 高斌,孙巧巧,杨明,等.3D打印技术辅助儿童复杂性扁平足手术临床应用[J].中国数字医学,2015,10(5):20-22.
- [47] 南国新.儿童足踝畸形诊治中3D打印技术的应用[J].临床小儿外科杂志,2018,17(4):245-247.
- [48] 黄志勇,杭飞,靳立军,等.3D打印技术辅助诊断和指导室间隔缺损手术[J].中国医学影像技术,2018,34(7):1099-1103.
- [49] Ferri M, Scharfenberger AV, Goplen G, et al. Weightbearing CT scan of severe flexible pes planus deformities. *Foot Ankle Int*. 2008;29(2):199-204.