

本文引用: 杨旭平, 李兴勇. 数字骨科技术在临床工作中的开展[J]. 医学研究与教育, 2022, 39(4): 22-29. DOI: 10.3969/j.issn.1674-490X.2022.04.004.

· 临床医学 ·

数字骨科技术在临床工作中的开展

杨旭平¹, 李兴勇²

(1. 甘肃中医药大学第一临床医学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 甘肃省人民医院骨科, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 数字医学是一门将科学信息学与医学技术相结合的新兴学科, 包括 3D 打印、有限元分析、计算机辅助骨科技术等, 其在骨科领域应用十分广泛。基于数字骨科技术在临床工作中的多项优势, 有助于解决临床工作中遇到的难题, 具有可观的应用前景, 将其有效地应用于临床, 可造福广大患者。

关键词: 数字骨科; 生物力学; 3D 打印; 有限元分析; 计算机辅助设计; 人工智能

DOI: 10.3969/j.issn.1674-490X.2022.04.004

中图分类号: R68

文献标志码: A

文章编号: 1674-490X(2022)04-0022-08

Development on digital orthopedic technology in clinical work

YANG Xuping¹, LI Xingyong²

(1. The First College of Clinical Medicine, Gansu University of Chinese Medicine, Lanzhou 730000, China; 2. Orthopedics Department of Gansu Provincial Hospital, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Digital medicine is an emerging discipline that combines scientific informatics with medical technology, including 3D printing, finite element analysis and computer-aided orthopedic technology, and its application in the field of orthopedics is very extensive. Based on the many advantages of digital orthopedic technology in clinical work, it helps to solve the difficulties encountered in clinical work and has considerable application prospects, and its effective application in the clinic can benefit the majority of patients.

Key words: digital orthopedics; biomechanics; 3D printing; finite element analysis; computer-aided design; artificial intelligence

数字化技术取得的卓越成果已经改变了传统医疗的诊治模式^[1], 该技术通过计算机辅助实现了疾病诊疗的个性化、精准化和微创化^[2]。2006 年中国首先提出“数字骨科学”这一概念, 并在 2011 年经中华医学会批准成立了“中华医学会医学工程学分会数字骨科学组”, 这标志着外科技术领域的重大革新^[3]。目前, 数字骨科技术应用在临床解剖以及疾病表征等方面, 它所涉及的范围十分广泛, 包括有限元分析、立体几何学、生物力学、人工智能、3D 打印技术、机械工程学、机器人辅助导航、机器人关节置换术及其他多种数字骨科技术等^[4-5], 极大地推动了临床骨科疾病诊疗工作^[6-7]。根据国内外相关文献对临床应用广泛且前景良好的数字骨科技术做一综述, 以为临床工作提供一定参考。

收稿日期: 2022-04-18

基金项目: 甘肃省科技计划项目 (20YF8FA092)

第一作者: 杨旭平 (1986—), 男, 甘肃平凉人, 主治医师, 在读硕士, 主要从事骨关节疾病研究。

通信作者: 李兴勇 (1963—), 男, 甘肃兰州人, 主任医师, 硕士, 硕士生导师, 主要从事骨关节炎及骨感染相关疾病研究。E-mail: 632900122@qq.com

1 3D 打印技术

1.1 3D 打印技术的起源与发展

3D 打印技术起源于美国, 又称为“快速成型技术”“增材制造技术”, 最初应用于加工制作工艺行业^[8]。经过 30 多年的发展, 现已广泛应用于兵工、教育、航天、医学等多个行业领域。为了满足临床工作需要, 将 3D 打印技术应用于医学影像技术领域, 使得其作用发挥更加广泛^[9]。基于放射科 CT 成像技术在 3D 打印技术的应用研究中, 为了保证图像具有较高质量, 在采集数据时, 需选用螺距较小、多排螺旋 CT 机, 扫描间距一般 $<1\text{ mm}$, 像素 $0.1\sim0.5\text{ mm}$, 像素矩阵为 512×512 ^[10]。此外, 除了常规 CT 扫描可用作 3D 打印的数据之外, 一些特殊 CT 扫描, 如低剂量 CT 扫描、血管造影或薄层 CT 扫描成像也可作为数据源应用于 3D 打印模型中^[11-13]。

1.2 3D 打印技术在骨科领域的应用

3D 打印技术现被广泛应用于骨科及其他学科术前诊断分型和术中参考方面, 它能更精确地演示疾病相关的异常解剖, 能够对分析某些骨创伤性疾病的损伤机制起到辅助指导作用, 进而通过立体直观的视觉效应, 提高诊疗水平, 缩短手术时间, 也成为临床医生和患者进行有效沟通的重要方式^[14-16]。在骨科领域, 3D 打印手术导板尤其被广泛应用于骨骼畸形截骨矫形、脊柱螺钉置入及术中精确定位等方面。严斌等^[17]应用 CT 数据设计 3D 打印导板, 以制定合适的手术方案, 在腰椎椎弓根置钉术中有良好效果, 置入率 100%, 提高了手术成功率, 减少了并发症。

1.3 3D 打印技术的个体化发展

将 3D 打印技术与组织工程相结合形成了生物打印技术, 它是以 3D 打印技术为基础, 结合计算机三维重建、生物材料研究成果等形成的新兴学科技术, 近年来已广泛应用于临床工作中^[18], 为解决医学领域器官供体数量不足相关问题提供新方法^[19]。石磊等^[20]对符合纳入研究标准的 15 例脊柱肿瘤患者进行研究, 在对其进行传统手术方式切除病损椎体后, 于术后采用 3D 打印技术进行个体化人工椎体重建, 结果显示, 术后应用 3D 打印个体化椎体能够达到更合适的匹配度及满意的远期稳定特性。

1.4 3D 打印技术在 CT 设备系统中的应用

在 CT 设备管理方面, 3D 打印技术可替代既往传统管理模式。临床工作中, 常因操作人员的技术水平、设备运行情况等影响 CT 图像结果, 会造成医生误诊漏诊。通过加强 CT 图像质量控制管理, 为临床诊断治疗提供可靠依据^[21]。Jahnke 等^[22]采用 3D 打印技术打印出具有辐射衰减性能和高度精细化的解剖模板, 在优化 CT 扫描方案、CT 仪器校准、剂量学计算、员工教学演示等方面效果可观, 提高了 CT 图像显像的灵活性和精准性。最新建立的人工体模能够模拟脊柱手术过程, 也能够很好地反映患者的病理生理结构, 兼容了触觉效果和 X 线透视特征, 从而能够更真实地提供患者信息^[23]。

1.5 3D 打印技术在构建颅脑血管模型中的应用

数字减影血管造影技术在颅脑血管成像中应用广泛, 被称作是显示脑动脉瘤、脑血管畸形等脑血管成像的金标准^[24]。由于颅脑血管解剖结构复杂, 对于临床医生而言, 熟练掌握颅内解剖空间结构对于诊疗及预后至关重要, 3D 打印技术构建颅脑血管模型能够在立体空间上清晰地显示病变相关内容, 缩减临床诊断难度, 提高手术治疗的精准程度。有研究显示, 3D 打印模型与数字减影血管造影图形在显示病变方面具有高度一致性^[25]。金国良等^[26]对颅内动脉瘤患者进行了数字减影血管造影检查, 将其进行 3D 打印, 取得模型, 结果清楚显示动脉瘤瘤体大小及其与周围组织毗邻的情况, 为瘤夹的选择和手术方案的制定提供合理有效的帮助。

1.6 3D打印技术在骨科与软组织肿瘤相关疾病中的应用

在放射治疗方面,刘志勇等^[27]对7例8~14岁的股骨下端骨肉瘤患儿应用3D打印导板辅助行瘤段骨截骨、术中离体放疗灭活再植重建术进行研究,术后对肢体功能恢复及长度变化、并发症、肿瘤复发情况等指标进行随访,随访12~24个月,结果显示,患肢功能恢复良好,股骨干愈合时间为6.3~11.6个月,平均9.5个月,可见应用3D打印导板辅助截骨保髓联合离体放疗灭活再植重建术安全可行,可作为儿童四肢骨肉瘤的保肢治疗选择方案。放射性粒子组织间植入是近距离肿瘤放疗的有效治疗方式之一,通常在离子植入时需借助影像学辅助以实现粒子能够精确分布于靶区。3D打印技术的辅助模板以其个性化特点可助于粒子植入时的高适形分布。根据其针道是否平行,将3D打印辅助模板划分为3D打印共面模板和非共面模板两类,前者适用于平行插植部位,后者适用于非平行等不规则及活动器官部位^[28-29]。近年来,3D打印模板已被广泛应用于放射治疗领域,包括宫颈癌、肺癌、直肠癌等肿瘤的治疗^[30-33],提高放射针植入的精确度,缩短住院时间,改善患者预后。

2 人工智能、计算机导航技术

2.1 人工智能、计算机导航技术在全髋关节置换术中的应用

全髋关节置换术在治疗股骨头坏死、先天性髋关节发育不良、高龄股骨转子间骨折等疾病方面具有重要地位^[34]。骨科机器人的出现极大地促进手术微创化、精准化及智能化发展,逐渐成为医疗行业的热门研究方向^[35]。但是基于目前在中国手术用机器人只有少数医院拥有^[7],因此,大多数医师凭借个人经验及大致测量等方法完成手术,导致全髋关节置换术操作没有统一操作标准,增加了髋关节置换术的变异幅度。吴东等^[36]基于人工智能深度学习技术的全髋关节置换术髋臼假体型号计算进行初步验证,结果显示人工智能全髋关节置换术髋臼杯放置算法较传统术前方案设计具有较高的精准性。刘峰等^[37]对11例已施行全髋关节置换术患者围绕数字骨科技术在股骨近端畸形全髋关节置换术中应用的临床价值进行探讨,通过计算机辅助设计进行三维建模、模拟截骨、选择假体及安装组配等术前规划,随访时间平均14个月,结果7例患者截骨矫形效果满意,最终得出数字骨科技术可应用于股骨近端畸形截骨矫形的结论,使得术前规划更为合理,降低术中矫形难度,提高矫形准确性,下肢力线重建及选择安装假体更规范。

2.2 人工智能、计算机导航技术在膝关节置换术中的应用

随着人口老龄化程度的加剧,膝关节骨关节炎发病率逐年上升^[38-39]。膝关节单髁置换术和全膝关节置换被常规应用于创伤性骨关节炎的治疗^[40-41]。但由于对上述术式的适应证掌握不够充分、假体设计技术缺陷等问题,导致术后效果欠佳^[42]。微创手术具有手术创伤小、住院时间短、术后康复快等优点,近年来在骨性关节炎治疗方面备受关注。计算机导航技术通过精确计算截骨量、准确放置假体以达到手术精准化及高效率的目的,与传统术式相比具有更准确地恢复下肢力线、减少术后假体松动发生及骨溶解率,延长假体使用期限,术后关节功能恢复良好等优势^[43-46]。有学者认为,在严格掌握其适应证的前提下,计算机导航技术结合传统手术治疗能更好地恢复患者步态^[47]。

3 有限元分析

3.1 有限元分析的概念

如果将一个弹性物体看作是由无限个质点组成的连续结构,即这个弹性物体具有无限个自由度,

则不可能进行计算分析,基于这一观点,就引出了有限元分析法的概念:有限元法又称有限元素法,其意思是将弹性物体根据计算需要,离散为有限个单元组成的集合,从数学角度来说,就是把微分方程的连续形式转化为数个方程组进行求解^[48]。

3.2 有限元分析在骨科领域的应用

随着当今计算机技术、软件处理等高科技技术的不断发展,有限元分析已被广泛应用于医学领域。Belytschko等^[49]于1974年首先将有限元分析方法应用于脊柱进行力学研究,最初建立了二维椎间盘模型,该研究技术的应用标志着有限元分析法在骨科生物力学分析应用的开始。此后,在20世纪90年代晚期有学者将其应用于颈椎模型的建立和力学分析^[50],随着科学技术的不断进步,有限元分析法的不断完善使分析结果更具可信度^[51-54],成为骨科诊疗领域有力的工具之一。

在骨科学领域,创伤、肿瘤、骨质疏松等因素所致骨折多见,骨折愈合过程复杂,受到多种因素的影响,如患者内分泌状况、年龄因素、骨折端血运及应力等^[55]。其中,应力刺激是影响骨折愈合的最重要影响因素之一^[56-57]。通过有限元分析方法可测出促进骨折愈合的应力参数大小。陈志达等^[58]利用有限元分析方法分别对山羊胫骨横行骨折模型进行内固定和应用外固定支架外固定后,于胫骨远端施加轴向应力,分别设定不同载荷和不同频率,结果得出200 N、1 Hz的轴向应力是促进骨折愈合的最佳应力。近年来,脊柱损伤的发生率逐渐增加,胸腰椎骨折更为常见,在脊柱创伤疾病中占35%~55%^[59]。其致伤因素多为高能量损伤,多导致不稳定性胸腰椎骨折,常伴随重要脏器受损^[60],需要手术治疗,其常规术式有很多种,包括单纯后前路减压融合术、前后路联合术等,但在手术方法选择上仍有争议^[61-62]。术前评估不合理、手术方案选择不当均会导致术后脊柱功能恢复不佳、内固定物疲劳、原生理曲线继发丢失等严重并发症^[60,63-64]。因此,正确的术前评估和选择正确的手术方案对患者的康复预后至关重要。林斌等^[65]通过建立腰椎L4-L5节段经腰椎间孔椎间融合术单侧固定加融合器三种不同放置位置模型进行有限元分析,测试在不同腰椎活动方向的腰椎活动范围、融合器及健侧小关节应力分布特征,结果显示,单枚腰椎融合器斜行置入可有效改善应力分布,并有助于减少对健侧小关节的应力载荷。因此,有限元分析应用于骨科领域,有助于分析发病机制、畸形位移程度、制定术前计划、模拟手术过程,有助于为三维矫形提供参数指标,为医疗器械研发和改进提供数字化模型^[66]。

4 数字骨科技术存在的问题及研究热点

综上,数字骨科为临床诊断治疗帮助甚大,被广泛应用于临床疾病诊断、治疗及教学等领域,但是,在中国,数字骨科技术处在发展的初级阶段^[67-68],大多数医生对该技术的掌握程度不够深,由于该技术涉及学科范围广,包括计算机技术、工学、力学等多学科,因此学习难度较大,且部分所用器材要求特殊,无法有效地进行普遍推广;除3D打印技术中所需模型无毒外,在某些骨科相关疾病诊疗护理过程中需要可溶性强及可降解的高分子生物材料同样要求具有无毒性,且其降解产物要具备易于排出体外等特点^[69],因此,可吸收高分子材料成为近年来研究的热点之一。在计算机导航及机器人技术替代膝关节单髁置换术方面,手术时间较长、假体相容性不良、费用高昂是其缺点^[42,47]。随着理论水平的不断提高和其技术的不断创新,数字骨科技术也将不断规范和完善,为中国临床骨科相关疾病诊疗技术增添动力!

参考文献:

- [1] 裴国献. 开展数字骨科技术提升骨科诊治水平[J]. 中华创伤骨科杂志, 2017, 19(4): 277-278. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1671-7600.2017.04.001.

- [2] ZHENG G Y, NOLTE L P. Computer-aided orthopaedic surgery: state-of-the-art and future perspectives[J]. *Adv Exp Med Biol*, 2018, 1093: 1-20. DOI: 10.1007/978-981-13-1396-7_1.
- [3] 裴国献. 数字化技术与骨科学的融汇: 数字骨科学: 写在中华医学会医学工程学会数字骨科学组成立之际[J]. *中华创伤骨科杂志*, 2011(12): 1101-1102. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1671-7600.2011.12.001.
- [4] 张先龙, 王坤正. 关节外科的未来: 数字骨科技术在关节外科的应用[J]. *中华骨科杂志*, 2021, 41(8): 525-531. DOI: 10.3760/cma.j.cn121113-20210303-00214.
- [5] 秦泗河. 欣读《数字骨科学》[J]. *中华创伤骨科杂志*, 2010, 12(3): 300. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1671-7600.2010.03.028.
- [6] 李锋. 数字骨科: 引领未来智能医学的发展方向[J]. *骨科*, 2019, 10(5): 369-371. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8573.2019.05.001.
- [7] 龙安华, 王嘉龙, 韩大成, 等. 数字骨科技术在创伤骨科临床教学中的应用和优势[J]. *中国继续医学教育*, 2021, 13(2): 70-73. DOI: 10.3969/j.issn.1674-9308.2021.02.019.
- [8] 黄建华, 王伟. 3D 打印技术在腔内血管外科中的应用前景[J]. *临床外科杂志*, 2015, 23(8): 577-579. DOI: 10.3969/j.issn.1005-6483.2015.08.005.
- [9] 杜雪婷, 杨洋, 黄文华, 等. 基于医学影像技术的 3D 打印临床应用与突破[J]. *中国组织工程研究*, 2021, 25(18): 2887-2894.
- [10] 陆声, 郭征, 裴国献, 等. 3D 打印骨科手术导板技术标准专家共识[J]. *中华创伤骨科杂志*, 2019, 21(1): 6-9. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7600.2019.01.001.
- [11] 陈亮, 高大伟, 吴宇峰, 等. 基于三维逆向设计的 U 形经皮手术导航器在股骨颈骨折空心钉内固定术中的应用[J]. *中华创伤骨科杂志*, 2017, 19(11): 966-972. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7600.2017.11.008.
- [12] 李冠, 王金宝, 陈欣桐, 等. 低辐射剂量 CT 扫描技术在脑动脉 3D 打印中的应用研究[J]. *重庆医科大学学报*, 2019, 44(10): 1268-1271. DOI: 10.13406/j.cnki.cyx.002009.
- [13] 高水超, 田岷, 喻建军, 等. CT 血管造影血管定位联合精细化三维打印指导复杂口腔癌切除与修复的效果[J]. *中华肿瘤杂志*, 2019, 41(7): 496-500. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0253-3766.2019.07.003.
- [14] URTULA A B, MALTA BARBOSA J, BÁRTOLO CARAMÊS G, et al. 3D-printed cone-beam computed tomography scans: a tool for patient education[J]. *J Prosthet Dent*, 2017, 118(6): 796-798. DOI: 10.1016/j.prosdent.2017.06.006.
- [15] WANG Z Q, WAN L, SHAO Y, et al. Three-dimensional printing technology combined with postmortem computed tomography angiography as new form of forensic evidence: a case report[J]. *Am J Forensic Med Pathol*, 2019, 40(1): 61-64. DOI: 10.1097/PAF.0000000000000443.
- [16] 吴颜延, 古兆琦, 潘周娴, 等. 3D 打印颅骨在颅底解剖教学中的应用[J]. *基础医学与临床*, 2017, 37(10): 1486-1490. DOI: 10.16352/j.issn.1001-6325.2017.10.029.
- [17] 严斌, 孙永建, 欧阳汉斌, 等. 3D 打印导航模块辅助腰椎弓根螺钉精确植入的应用研究[J]. *中国临床解剖学杂志*, 2017, 35(2): 156-159. DOI: 10.13418/j.issn.1001-165x.2017.02.008.
- [18] 刘广涛, 马会力, 齐岩, 等. 3D 生物打印技术在骨创伤中的应用进展[J]. *医学综述*, 2017, 23(7): 1291-1295. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2084.2017.07.010.
- [19] 凡庆涛, 杜赞, 周雷. 全球 3D 生物打印技术基于专利信息的发展态势分析[J]. *中国组织工程研究*, 2021, 25(12): 1891-1897.
- [20] 石磊, 栗向东, 王玲, 等. 3D 打印个体化人工椎体在多节段脊柱肿瘤切除后脊柱稳定性重建中的应用[J]. *中国脊柱脊髓杂志*, 2020, 30(9): 782-790. DOI: 10.3969/j.issn.1004-406X.2020.09.03.
- [21] 房坤, 陈玉俊. CT 设备质量控制管理探讨[J]. *中国医疗器械信息*, 2021, 27(13): 169-171. DOI: 10.15971/j.cnki.cmdi.2021.13.077.
- [22] JAHNKE P, LIMBERG F R P, GERBL A, et al. Radiopaque three-dimensional printing: a method to create realistic CT phantoms[J]. *Radiology*, 2017, 282(2): 569-575. DOI: 10.1148/radiol.2016152710.

- [23] STEFAN P, PFANDLER M, LAZAROVICI M, et al. Three-dimensional-printed computed tomography-based bone models for spine surgery simulation[J]. *Simul Healthc*, 2020, 15(1): 61-66. DOI: 10.1097/SIH.0000000000000417.
- [24] 谢名洋, 杜端明. 数字减影血管造影在脑血管病临床诊断中的应用研究进展[J]. *医学综述*, 2015, 21(5): 868-870. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2084.2015.05.037.
- [25] ANDERSON J R, THOMPSON W L, ALKATTAN A K, et al. Three-dimensional printing of anatomically accurate, patient specific intracranial aneurysm models[J]. *J Neurointerv Surg*, 2016, 8(5): 517-520. DOI: 10.1136/neurintsurg-2015-011686.
- [26] 金国良, 王建莉, 袁紫刚, 等. 3D 打印颅内动脉瘤模型及其临床应用[J]. *中华神经医学杂志*, 2017, 16(1): 77-77. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1671-8925.2017.01.015.
- [27] 刘志勇, 蔡启卿, 姚伟涛, 等. 3D 打印导板联合离体放疗在儿童股骨骨肉瘤保留骨骺中的初步应用[J]. *中华小儿外科杂志*, 2019, 40(2): 103-108. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0253-3006.2019.02.002.
- [28] 中华医学会放射肿瘤治疗学分会, 中国医师学会放射治疗专业委员会, 中国研究型医院放射治疗专业委员会, 等. 3D 打印非共面模板辅助 CT 引导放射性¹²⁵I 粒子植入治疗技术流程与 QC 的专家共识[J]. *中华放射肿瘤学杂志*, 2017, 26(5): 495-500. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1004-4221.2017.05.003.
- [29] WANG P F, SHEN L Q, ZHANG H L, et al. Quality of life after I-125 seed implantation using computed tomography and three-dimensional-printed template guidance in patients with advanced malignant tumor[J]. *J Cancer Res Ther*, 2018, 14(7): 1492-1496. DOI: 10.4103/jcrt.JCRT_77_18.
- [30] 王皓, 王俊杰, 姜玉良, 等. 3D 打印模板联合 CT 引导¹²⁵I 粒子治疗盆腔复发直肠癌的剂量学分析[J]. *中华医学杂志*, 2016, 96(47): 3782-3786. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0376-2491.2016.47.003.
- [31] LINDEGAARD J C, MADSEN M L, TRABERG A, et al. Individualised 3D printed vaginal template for MRI guided brachytherapy in locally advanced cervical cancer[J]. *Radiother Oncol*, 2016, 118(1): 173-175. DOI: 10.1016/j.radonc.2015.12.012.
- [32] JIANG Y L, JI Z, GUO F X, et al. Side effects of CT-guided implantation of ¹²⁵I seeds for recurrent malignant tumors of the head and neck assisted by 3D printing non co-planar template[J]. *Radiat Oncol*, 2018, 13: 18. DOI: 10.1186/s13014-018-0959-4.
- [33] JI Z, SUN H T, JIANG Y L, et al Comparative study for ct-guided I-125 seed implantation assisted by 3D printing coplanar and non-coplanar template in peripheral lung cancer[J]. *J Contemp Brachyther*, 2019, 11(2): 169-173. DOI: 10.5114/jcb.2019.84503.
- [34] MEERMANS G, KONAN S, DAS R, et al. The direct anterior approach in total hip arthroplasty: a systematic review of the literature[J]. *Bone Joint J*, 2017, 99-B(6): 732-740. DOI: 10.1302/0301-620X.99B6.38053.
- [35] 蔡尚欢, 宋永伟, 曹向阳, 等. 骨科机器人应用现状与研究进展[J]. *山东医药*, 2018, 58(44): 90-93. DOI: 10.3969/j.issn.1002-266X.2018.44.027.
- [36] 吴东, 柴伟, 刘星宇, 等. 人工智能全髋关节置换术髌臼杯放置算法的实验研究[J]. *中华骨科杂志*, 2021, 41(3): 176-185. DOI: 10.3760/cma.j.cn121113-20201110-00653.
- [37] 刘峰, 张勇, 朱庭标, 等. 数字骨科技术在股骨近端畸形全髋关节置换术中的应用[J]. *中国骨与关节损伤杂志*, 2020, 35(4): 364-366. DOI: 10.7531/j.issn.1672-9935.2020.04.009.
- [38] VAN EGMOND N, JANSSEN D, HANNINK G, et al. Biomechanical comparison of two different locking plates for open wedge high tibial osteotomy[J]. *J Orthop Sci*, 2018, 23(1): 105-111. DOI: 10.1016/j.jos.2017.09.014.
- [39] WEBB M, DEWAN V, ELSON D. Functional results following high tibial osteotomy: a review of the literature[J]. *Eur J Orthop Surg Traumatol*, 2018, 28(4): 555-563. DOI: 10.1007/s00590-017-2112-8.
- [40] 赵中溢, 李勇阵, 陈峰, 等. 同期双侧全膝关节置换和单髁置换治疗创伤性关节炎的比较[J]. *中国组织工程研究*, 2021, 25(6): 854-859.
- [41] 雷堃, 张文, 高磊, 等. 膝关节单髁置换术治疗膝关节内侧间室骨关节炎的近期疗效评价[J]. *中华骨与关节外*

- 科杂志, 2019, 12(3): 201-205. DOI: 10.3969/j.issn.2095-9958.2019.03.09.
- [42] 陶可, 林剑浩, 李虎. 单髁关节置换术治疗膝骨关节炎的研究进展[J]. 中华骨与关节外科杂志, 2019, 12(2): 150-155. DOI: 10.3969/j.issn.2095-9958.2019.02-15.
- [43] 姚坚, 丁海. 计算机导航及机器人技术辅助膝关节单髁置换术的研究进展[J]. 中国修复重建外科杂志, 2017, 31(1): 110-115. DOI: 10.7507/1002-1892.201609028.
- [44] SONG E K, N M, LEE S H, et al. Comparison of outcome and survival after unicompartmental knee arthroplasty between navigation and conventional techniques with an average 9-year follow-up[J]. J Arthroplasty, 2016, 31(2): 395-400. DOI: 10.1016/j.arth.2015.09.012.
- [45] BURN E, SANCHEZ-SANTOS M T, PANDIT H G, et al. Ten-year patient-reported outcomes following total and minimally invasive unicompartmental knee arthroplasty: a propensity score-matched cohort analysis[J]. Knee Surg Sports Traumatol Arthrosc, 2018, 26(5): 1455-1464. DOI: 10.1007/s00167-016-4404-7.
- [46] BELL S W, ANTHONY I, JONES B, et al. Improved accuracy of component positioning with robotic-assisted unicompartmental knee arthroplasty: data from a prospective, randomized controlled study[J]. J Bone Joint Surg Am, 2016, 98(8): 627-635. DOI: 10.2106/JBJS.15.00664.
- [47] 江正, 尹宗生, 陆鸣, 等. 计算机导航在全膝关节置换中的应用[J]. 中国组织工程研究, 2020, 24(15): 2317-2322. DOI: 10.3969/j.issn.2095-4344.2593.
- [48] 胡勇, 谢辉, 杨述华. 三维有限元分析在脊柱生物力学中应用研究[J]. 医用生物力学, 2006, 21(3): 246-250. DOI: 10.19435/j.1672-1721.2017.08.066.
- [49] BELYTSCHKO T, KULAK R F, SCHULTZ A B, et al. Finite element stress analysis of an intervertebral disc[J]. J Biomech, 1974, 7(3): 277-285. DOI: 10.1016/0021-9290(74)90019-0.
- [50] YOGANANDAN N, KUMARESAN S, VOO L, et al. Finite element applications in human cervical spine modeling[J]. Spine, 1996, 21(15): 1824-1834. DOI: 10.1097/00007632-199608010-00022.
- [51] PUTTLITZ C M, GOEL V K, CLARK C R, et al. Pathomechanisms of failures of the odontoid[J]. Spine, 2000, 25(22): 2868-2876. DOI: 10.1097/00007632-200011150-00006.
- [52] GRAHAM R S, OBERLANDER E K, STEWART J E, et al. Validation and use of a finite element model of C-2 for determination of stress and fracture patterns of anterior odontoid loads[J]. J Neurosurg, 2000, 93(1 Suppl): 117-125. DOI: 10.3171/spi.2000.93.1.0117.
- [53] TEO E C, NG H W. First cervical vertebra (atlas) fracture mechanism studies using finite element method[J]. J Biomech, 2001, 34(1): 13-21. DOI: 10.1016/S0021-9290(00)00169-X.
- [54] BOZKUS H, KARAKAS A, HANCI M, et al. Finite element model of the Jefferson fracture: comparison with a cadaver model[J]. Eur Spine J, 2001, 10(3): 257-263. DOI: 10.1007/s005860100256.
- [55] LAIGLE M, RONY L, PINET R, et al. Intramedullary nailing for adult open tibial shaft fracture. An 85-case series[J]. Orthop Traumatol Surg Res, 2019, 105(5): 1021-1024. DOI: 10.1016/j.otsr.2019.04.020.
- [56] 黄连水, 成伟科, 吴进, 等. 体外轴向应力刺激促进兔胫骨骨折愈合研究[J]. 中华实验外科杂志, 2019, 36(1): 38-40. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1001-9030.2019.01.012.
- [57] 郝宝辉, 李英超, 乔伟松, 等. 应力刺激促进骨质疏松性骨折愈合研究进展[J]. 中国老年学杂志, 2018, 38(6): 1519-1521. DOI: 10.3969/j.issn.1005-9202.2018.06.097.
- [58] 陈志达, 肖棋, 姚小涛, 等. 轴向叩击应力对内固定和外固定治疗胫骨骨折影响的有限元分析[J]. 骨科, 2019, 10(5): 395-401. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8573.2019.05.006.
- [59] WARREN A, PRASAD V, THOMAS M. Pre-operative planning when using the Wiltse approach to the lumbar spine[J]. Ann R Coll Surg Engl, 2010, 92(1): 74-75. DOI: 10.1308/resann.2010.92.1.74.
- [60] 何志江, 黄揆, 孙明林. 胸腰椎爆裂骨折后路手术治疗的研究进展[J]. 广西医学, 2018, 40(9): 1083-1085. DOI: 10.11675/j.issn.0253-4304.2018.09.22.

- [61] 陈志达, 吴进, 林斌, 等. 后路伤椎短节段固定治疗严重不稳的胸腰椎爆裂性骨折[J]. 中国修复重建外科杂志, 2018, 32(1): 59-63. DOI: 10.7507/1002-1892.201708082.
- [62] 张国保. 椎弓根钉治疗胸腰椎骨折临床分析[J]. 中国医药, 2009, 4(3): 204-205. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1673-4777.2009.03.023.
- [63] 邱林, 牟双林, 王勇, 等. 前后路联合手术对不稳定性胸腰椎骨折患者脊髓功能、椎体高度维持的临床效果[J]. 中国临床医生杂志, 2020, 48(11): 1331-1334. DOI: 10.3969/j.issn.2095-8552.2020.11.022.
- [64] 韩雷, 全仁夫, 胡云根, 等. 胸腰椎骨折前路内固定研究进展[J]. 中国骨伤, 2018, 31(7): 679-683. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0034.2018.07.018.
- [65] 林斌, 陈志达, 姚小涛, 等. 融合器放置位置对脊柱单侧固定应力分布影响的有限元分析[J]. 中华生物医学工程杂志, 2017, 23(5): 374-379. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1674-1927.2017.05.004.
- [66] 邬超, 高明杰, 王建忠, 等. 有限元法分析 Lenke 3 型青少年特发性脊柱侧凸胸-腰椎的应力及位移变化[J]. 中国组织工程研究, 2021, 25(33): 5273-5280. DOI: 10.12307/2021.313.
- [67] 赵猛, 江勇, 徐圣康. 数字骨科技术在创伤骨科的应用及前景[J]. 临床外科杂志, 2020, 28(4): 307-309. DOI: 10.3969/j.issn.1005-6483.2020.04.003.
- [68] 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. DOI: 10.3877/cma.j.issn.1674-134X.2018.02.021.
- [69] 秦立宁, 许娜, 董静, 等. 基于骨科护理应用发展的新型材料研究[J]. 合成材料老化与应用, 2021, 50(3): 152-154. DOI: 10.16584/j.cnki.issn1671-5381.2021.03.047.

(责任编辑: 高艳华)