

# 计算机模拟手术结合3D打印技术在复杂骨折手术中的应用进展

杨立宇<sup>1</sup>, 郭文娟<sup>2</sup>, 叶飞<sup>2</sup>, 张一奇<sup>1</sup>, 巴根<sup>1</sup>

(1. 中国医科大学附属盛京医院骨科, 沈阳 110004; 2. 塔城地区人民医院骨科, 新疆 塔城 834700)

**摘要** 以计算机辅助设计为基础的3D打印技术能够快速制作三维立体模型, 清晰显示骨折部位的解剖结构、类型和破裂程度, 为了解骨折情况提供全方位的视觉化手段。该技术还能帮助医生设计个性化的植入物, 选择定制的手术导向板和固定螺丝。手术医生通过术前模拟操作, 对手术方案进行优化, 提高手术的准确性和效果。本文总结了计算机模拟手术结合3D打印技术在多种骨科手术中的应用情况, 并广泛阐述了3D打印技术在临床骨科领域的巨大应用潜力。

**关键词** 计算机辅助设计; 3D打印; 复杂骨折

中图分类号 R687.3 文献标志码 B 文章编号 0258-4646(2025)02-0167-05

网络出版地址 <https://link.cnki.net/urlid/21.1227.R.20250115.1143.024>

DOI: 10.12007/j.issn.0258-4646.2025.02.013

## Application progress of computer simulation surgery combined with 3D printing technology in complex fracture surgery

YANG Liyu<sup>1</sup>, GUO Wenjuan<sup>2</sup>, YE Fei<sup>2</sup>, ZHANG Yiqi<sup>1</sup>, BA Gen<sup>1</sup>

(1. Department of Orthopedics, Shengjing Hospital of China Medical University, Shenyang 110004, China; 2. Department of Orthopedics, People's Hospital of Tacheng Prefecture, Tacheng 834700, China)

**Abstract** Three-dimensional (3D) printing technology, which is based on computer aided design, presents innovative solutions for clinical surgical treatments and is increasingly being utilized in clinical settings. By integrating medical-image processing software and a 3D printer with customized materials, physicians can efficiently fabricate a 3D model layer by layer, thus realizing the reconstruction of human-body models with specific objectives. These models vividly showcase the anatomical structures, fracture types, and rupture severity, thereby facilitating doctors in understanding the fracture being examined. Beyond serving as a mere demonstration tool, the physical model assists doctors in designing personalized implants and selecting customized surgical guide plates and fixation screws. Surgeons can improve the surgical accuracy and efficacy by refining the surgical plan via preoperative simulation operations. This article presents a summary of the application of computer-simulation surgery in conjunction with 3D printing technology in various complex surgeries. Additionally, the significant potential applications of 3D printing technology in the clinical orthopedics field are discussed.

**Keywords** computer aided design; three-dimensional printing; complex fracture

3D打印技术是一种增材制造技术, 最早于20世纪80年代中期提出并首先应用于工业领域。随着精确度、数字化和个体化医学观念的深入以及计算机辅助外科的发展, 基于计算机辅助设计(computer aided design, CAD)的3D打印技术为手术治疗提供了新思路, 并在医学临床领域日益广泛应用<sup>[1]</sup>。

3D打印技术利用医学图像处理软件重新构建

人体数据模型, 对模型进行有目的的重构和改建<sup>[2]</sup>, 并使用3D打印机结合特殊材料逐层打印, 快速制造出三维立体物体<sup>[3-5]</sup>。该技术可制造具有立体感和可触摸感的骨折部位实体模型, 清晰展示骨折部位的解剖结构、类型和碎裂程度, 为了解骨折情况提供全面视觉化手段, 并辅助设计个性化植入物, 选择定制化的手术导板和固定螺钉。通过术前模拟操作, 优化手术方案, 提高手术精确性和效果<sup>[6]</sup>。此外, 术前3D打印模型可直观展示给患者和家属, 有助其更好地理解疾病和治疗方案, 增进对手术治疗效果的认知<sup>[7]</sup>。本文总结了计算机模拟手术结合3D打印技术在各种复杂手术中的应用情况, 并广泛阐述了3D打印技术在临床骨科领域的巨大应用潜力。

**基金项目:** 国家自然科学基金(82100939); 辽宁省自然科学基金援疆专项(2020-MS-04)

**作者简介:** 杨立宇(1987-), 男, 主治医师, 博士。

**通信作者:** 巴根, E-mail: bagen1983@163.com

**收稿日期:** 2024-03-29

**网络出版时间:** 2025-01-15 17:41:32

## 1 复杂脊柱及骨盆骨折

### 1.1 颈椎骨折

颈椎骨折和脱位是脊柱常见的损伤,可能导致脊髓受损,甚至危及生命<sup>[8]</sup>。椎弓根螺钉植入术是临床常用的治疗颈椎骨折和脱位的方法,通过将螺钉植入脊椎维持脊柱的稳定性。由于颈椎椎弓根通道狭小,置钉外展角度大,毗邻脊髓、神经、血管等脆弱且功能极其重要的结构,因此,螺钉的准确性对手术成功至关重要<sup>[9-10]</sup>。

利用模型模拟椎弓根螺钉手术操作可提高术中置钉的准确性,减少血管和神经损伤;术前对患者进行个体化配置,设计单独的模板,还可减少术中透视次数、降低辐射剂量。俞海亮等<sup>[11]</sup>将70例颈椎骨折或脱位患者分为研究组和对照组,分别采用CAD联合3D打印技术和常规CT辅助手术治疗。结果显示,研究组在术中出血量、手术时间和排气时间方面优于对照组,螺钉植入成功率较对照组高17%,术后日本骨科协会治疗功能评分高于对照组,视觉模拟量表(visual analog scale, VAS)评分低于对照组,且发生不良反应的概率远低于对照组。PEI等<sup>[12]</sup>借助CAD联合3D打印技术成功治疗了1例颈椎多处骨折患者,根据患者颈椎3D-CT影像,设计了带螺钉孔的3D打印金属植入物、人工椎体、颈椎前路钢板一体化模型,并通过计算机模拟规划了螺钉的固定位置和深度。术后CT扫描结果显示植入物位置准确,未发生与植入物相关的并发症。术后6个月,患者双上肢肌力由3级提高至5级,颈部VAS评分由5分降至0分。表明CAD联合3D打印定制椎体植入手术可为解决特殊病例提供重要的解决方案。

### 1.2 胸腰椎骨折

目前,椎弓根螺钉植入术是治疗胸腰椎骨折的主要方法,螺钉植入的准确性对该手术非常重要<sup>[13]</sup>。王雅辉等<sup>[10]</sup>对胸腰椎骨折患者采用CAD联合3D打印技术辅助手术,结果显示,研究组螺钉植入准确率(94.5%)高于对照组(74.6%)近20%。经皮微创椎弓根螺钉内固定术是用于治疗部分移位较少、后凸成角较小的胸腰椎骨折的一种新术式,相比传统开放手术,该术式切口小,出血少,保留肌肉韧带完整,患者可早期下床活动并快速康复<sup>[14-15]</sup>。但该手术属于复杂的微创手术,对术者的技巧和空

间立体感要求较高。章飞翔等<sup>[16]</sup>研究了经皮微创椎弓根螺钉内固定术结合CAD联合3D打印技术对胸腰椎骨折患者螺钉植入效果和预后的影响,结果发现,研究组一次植入螺钉的准确率(89.17%)和总体植入螺钉的准确率(98.33%)均高于对照组(分别为78.85%和90.38%);术后1年,研究组的椎体滑脱率和Cobb角均低于对照组,椎体前缘高度高于对照组,预后良好率(96.67%)也显著高于对照组(86.54%)。

### 1.3 骨盆骨折

近年来,3D打印技术已经成为个性化骨折,特别是在复杂的不稳定骨盆骨折的治疗方案中必不可少的一部分<sup>[17-18]</sup>。使用该技术可缩短稳定骨盆骨折患者平均手术时间和平均术中透视时间,术后骨盆骨折复位优良率更高。髌关节脱位合并髌臼骨折是骨折处理中最具挑战性的情况之一,且患者个体形态差异大,通用解剖轮廓固定钢板无法适用于每个患者。计算机辅助模拟手术与3D打印技术的结合可提供个体化的内固定钢板,实现更全面的解剖复位,减少内固定时间,为髌关节脱位合并髌臼骨折的内固定术提供一种更为高效的方法<sup>[19]</sup>。

## 2 四肢骨折

### 2.1 长骨骨干骨折

在以往的股骨骨折切开复位内固定手术中,常发现股骨锁定钢板与股骨近端轮廓匹配度不高,不仅增加了术中钢板调整的次数,还会改变生物力学行为,降低受损骨的力学稳定性,导致术中骨折固定出现较大间隙,引发充血、感染等并发症<sup>[20]</sup>。在充分利用股骨解剖参数大样本的基础上,结合计算机辅助成像技术和3D打印技术,可制造出与股骨近端准确匹配的解剖型锁定钢板<sup>[21]</sup>。

近年来,空心加压螺钉微创内固定已被广泛应用于股骨颈骨折的治疗,可减少股骨颈骨折不愈合和股骨头缺血性坏死的发生<sup>[22]</sup>。研究<sup>[23]</sup>表明,CAD和3D打印技术联合应用可实现个性化、精准化植入空心加压螺钉治疗股骨颈骨折。此外,该技术还可缩短手术时间,减少对股骨颈皮质的损伤及术中出血,还可保护患者和医护人员,减少受辐射剂量以及暴露次数。

### 2.2 胫骨平台骨折

切开复位内固定术是治疗复杂胫骨平台骨折的基本方法。虽然这种方法可以实现解剖复位的要求,但存在一定的问题,如内固定物的匹配性不好,关节面的高度恢复不理想等。在复杂胫骨平台骨折的手术治疗中,计算机辅助结合3D打印技术能降低手术难度和风险,缩短手术时间,提高手术治疗效果,有助于患者的术后康复<sup>[24]</sup>。通过使用3D打印技术生成个体化骨折实体模型,医生可准确观察和分析骨折碎片的形态和位移,并进行术前规划。同时,通过对3D打印模型进行术前模拟,术者能够准确确定和规划碎片的复位步骤、钢板的放置位置和骨块的术中形态调整,术中可准确预判使用的螺钉长度<sup>[25]</sup>。1项meta分析研究<sup>[26]</sup>显示,在手术时间、术中出血量和骨愈合时间方面,使用3D打印技术辅助的切开复位内固定治疗胫骨平台骨折的效果明显优于传统方法,并发症和随访功能恢复无显著差异。因此,3D打印技术辅助的切开复位内固定是一种更优越的手术辅助治疗方案,相比传统方法能够更加精准地复位,促进患者术后康复。

### 2.3 跟骨骨折

由于跟骨外形不规则,损伤可导致严重的骨缺损和关节面下陷等。因此,将跟骨恢复至受伤前的解剖形态是使用CAD联合3D打印技术建立立体模型的另一个难题。目前,临床上常采用健侧跟骨成型镜像技术还原患侧跟骨骨折的形态。杨晶<sup>[27]</sup>对5例Sanders III、IV型跟骨骨折患者双侧跟骨在术前进行CT扫描,并应用计算机辅助镜面成像技术对健侧跟骨进行镜像处理,以获取患侧跟骨受伤前的形状。通过比较受伤前后患侧跟骨的形态变化,3D打印受伤前后患侧跟骨模型,在受伤前的跟骨模型上预先塑造适当大小的接骨板,并在骨折模型上模拟手术复位操作。结果显示,预塑形钢板与术中复位的跟骨匹配程度良好,有效缩短了手术时间,并减少了周围软组织损伤,患者术后恢复良好。应用CAD联合3D打印技术可提高复杂跟骨骨折的治疗效果,具有重要的临床应用价值和发展潜力<sup>[28]</sup>。

## 3 颌面部骨折

### 3.1 颧骨骨折和颧弓骨折

颧骨颧弓的解剖结构比较特殊。在骨折复位固定修复中,至少要保证颧牙槽嵴、眶外缘、眶下

缘、颧弓这4个部位中的3个达到解剖复位,才能恢复口腔咬合关系和咀嚼等基本功能。而要恢复颌面形态,则需要更高精确度的骨折复位<sup>[29]</sup>。赵琼等<sup>[30]</sup>将82例颧骨颧弓骨折患者随机分为对照组和研究组,对照组行常规的3D打印颧骨颧弓骨折复位钛板固定修复,而研究组在对照组的基础上使用计算机导航辅助技术。结果发现,研究组患者术后血清中骨愈合相关因子骨形态生成蛋白2和转化生长因子- $\beta$ 1值均高于对照组,术后1个月和3个月时,研究组骨痂骨密度高于对照组,双侧颧弓宽度差和颧骨突度差均小于对照组。因此,3D打印结合计算机导航辅助技术运用于颧骨及颧弓骨折复位钛板固定修复,既提高了骨折复位的精确度,又有效地促进了骨折愈合。

### 3.2 眶骨骨折

眼眶骨折手术中常采用微创手术保持术后良好的眼周外观,但该手术方式视野较狭窄,术中难以完整观察骨折区域的形态。为了更好地适应眼眶的三维形态,术者需要在手术中多次修剪和塑形平面的钛网植入物,这会增加手术时间和风险。赵峰等<sup>[31]</sup>对20例眼眶骨折患者通过螺旋CT扫描进行三维重建,利用CAD方法进行镜像修复,设计出高精度的修复体模型,并将其与眶壁骨折区域完美匹配,作为术中钛网修剪和成形的导板,用于眶壁修复成形术。结果显示,术后半年患者的眼球突出度差值均 $\leq 2$  mm,且无视力下降。因此,采用修复体模型作为导板可使钛网与缺损区域更精确地吻合,显著缩短了钛网成形时间。

### 3.3 颌骨骨折

颌骨具有独特的三维解剖形态,当遭受破坏时可能引起多种移位,导致重建手术解剖复位困难。常规颌骨修复重建手术中,术者需要根据患者的个体差异选择或调整固定规格的植入物,耗时且增加了手术风险和感染概率。采用虚拟手术进行术前设计,可对颌骨创伤患者的颌骨进行三维重建,并利用计算机模拟手术操作确定最佳手术方案,充分地判断截骨部位、固定钛板的长短和数量,以及钉道具体部位等手术细节,不仅可有效缩短手术时间,降低手术风险,还可减小手术创伤<sup>[32]</sup>。此外,通过个性化的3D打印术前模型分析和设计,术者可充分地评估术中可能存在的风险,并对骨缺失范围

和植骨量有更充分的认识,显著提高手术成功率,并降低术后并发症的发生率。

全面部骨折是一种同时影响面中1/3和面下1/3的骨折,常导致患者面部畸形、咬合紊乱和张口受限。因骨折的位置和严重程度多样,手术过程中的精准性难以保证。通过术前CT三维重建、计算机辅助对全面部骨折部位进行分割重建,利用3D打印和个性化钛网及骨折复位导板等进行术前规划,并根据规划进行手术操作,能全面、直观、准确地显示骨折的三维形态,帮助医生了解不同部位解剖结构的空

#### 4 总结

将3D打印技术与计算机模拟手术相结合,应用于脊柱、骨盆、四肢和颌面部骨折以及脊柱畸形固定复位手术,不仅可以满足个体化设计和制造的需求,还有助于制定个性化的手术方案。此外,通过精确测量,选择合适的进钉点、螺钉直径和长度,有利于减少组织的过度分离以及术中出血,节省手术时间,提高手术的准确性和安全性。随着科学技术的不断发展和医学临床的进步,相信CAD与3D打印技术在骨科修复手术中将具有更广阔的应用前景。

#### 参考文献:

- [1] 王宏浩.3D打印技术联合计算机辅助导航在颌面部多发骨折中的应用[D].合肥:安徽医科大学,2023. DOI:10.26921/d.cnki.ganyu.2023.000450.
- [2] 赵波,刘颖,邱晓文,等.3D打印技术在脊柱外科手术教学和训练中的应用[J].中国医学教育技术,2015,29(5):547-549. DOI:10.13566/j.cnki.cmet.cn61-1317/g4.201505021.
- [3] VANKOEVERING KK,ZOPF DA,HOLLISTER SJ. Tissue engineering and 3-dimensional modeling for facial reconstruction [J]. Facial Plast Surg Clin North Am,2019,27(1):151-161. DOI:10.1016/j.fsc.2018.08.012.
- [4] HOANG D,PERRAULT D,STEVANOVIC M,et al. Surgical applications of three-dimensional printing:a review of the current literature & how to get started [J]. Ann Transl Med,2016,4(23):456. DOI:10.21037/atm.2016.12.18.
- [5] KIM GB,LEE S,KIM H,et al. Three-dimensional printing:basic principles and applications in medicine and radiology [J]. Korean J Radiol,2016,17(2):182-197. DOI:10.3348/kjr.2016.17.2.182.
- [6] 张擎柱,张义,付世杰,等.3D打印技术在复杂胫骨平台骨折手术中的应用[J].临床骨科杂志,2019,22(2):229-231. DOI:10.3969/j.issn.1008-0287.2019.02.034.
- [7] WU AM,LIN JL,KWAN KYH,et al. 3D-printing techniques in spine surgery:the future prospects and current challenges [J]. Expert Rev Med Devices,2018,15(6):399-401. DOI:10.1080/17434440.2018.1483234.
- [8] 周全,赵加力,张少先,等.个体化3D打印导板在寰枢椎椎弓根置钉中的初步应用[J].临床外科杂志,2017,25(8):586-588. DOI:10.3969/j.issn.1005-6483.2017.08.008.
- [9] 马超,李坚.颈椎椎弓根置钉技术的研究进展[J].临床外科杂志,2015,23(2):145-147. DOI:10.3969/j.issn.1005-6483.2015.02.023.
- [10] 王雅辉,刘正蓬,褚立,等.计算机辅助设计联合3D打印技术在胸腰椎骨折椎弓根螺钉置入术中的应用[J].山东医药,2018,58(16):64-66. DOI:10.3969/j.issn.1002-266X.2018.16.019.
- [11] 俞海亮,韩莹松,曾凯斌.计算机辅助设计联合3D打印技术在颈椎骨折脱位的临床运用分析[J].临床外科杂志,2019,27(12):1053-1055. DOI:10.3969/j.issn.1005-6483.2019.12.013.
- [12] PEI L,YUAN W,LIU XC,et al. Robot-assisted anterior transpedicular screw fixation with 3D printed implant for multiple cervical fractures:a case report [J]. Medicine,2022,101(49):e31876. DOI:10.1097/MD.00000000000031876.
- [13] AOUDE AA,FORTIN M,FIGUEIREDO R,et al. Methods to determine pedicle screw placement accuracy in spine surgery:a systematic review [J]. Eur Spine J,2015,24(5):990-1004. DOI:10.1007/s00586-015-3853-x.
- [14] ZHANG CH,LIU Y. Combined pedicle screw fixation at the fracture vertebrae versus conventional method for thoracolumbar fractures:a meta-analysis [J]. Int J Surg,2018,53:38-47. DOI:10.1016/j.ijisu.2018.03.002.
- [15] LIAO JC,CHEN WP,WANG H. Treatment of thoracolumbar burst fractures by short-segment pedicle screw fixation using a combination of two additional pedicle screws and vertebroplasty at the level of the fracture:a finite element analysis [J]. BMC Musculoskelet Disord,2017,18(1):262. DOI:10.1186/s12891-017-1623-0.
- [16] 章飞翔,崔海东,吕书军,等.胸腰椎骨折PSF手术联合计算机辅助设计3D打印技术对置入螺钉效果及预后的影响[J].中国医学装备,2020,17(12):96-100. DOI:10.3969/J.ISSN.1672-8270.2020.12.024.
- [17] 王鑫众,张利恒,罗浩,等.不稳定骨盆骨折合并髋臼骨折手术治疗及临床预后分析[J].系统医学,2019,4(9):44-46. DOI:10.19368/j.cnki.2096-1782.2019.09.044.
- [18] CAI LY,ZHANG YY,CHEN CH,et al. 3D printing-based minimally invasive cannulated screw treatment of unstable pelvic fracture [J]. J Orthop Surg Res,2018,13(1):71. DOI:10.1186/s13018-018-0778-1.
- [19] LI YT,HUNG CC,CHOU YC,et al. Surgical treatment for posterior dislocation of hip combined with acetabular fractures using preoperative virtual simulation and three-dimensional printing model-assisted precontoured plate fixation techniques [J]. Biomed Res Int,2019,2019:3971571. DOI:10.1155/2019/3971571.
- [20] THIESEN DM,NTALOS D,KORTHAUS A,et al. A comparison between Asians and Caucasians in the dimensions of the femoral isthmus based on a 3D-CT analysis of 1189 adult femurs [J]. Eur J Trauma Emerg Surg,2022,48(3):2379-2386. DOI:10.1007/s00068-021-01740-x.
- [21] JIA XY,ZHANG K,QIANG MF,et al. Design of well-matched end-structure of anatomical proximal femoral locking plate based on computer-assisted imaging combined with 3D printing technology:a quality improvement study [J]. Int J Surg,2023,109(5):1169-1179. DOI:10.1097/JS9.0000000000000300.
- [22] AUGAT P,BLIVEN E,HACKL S. Biomechanics of femoral neck