

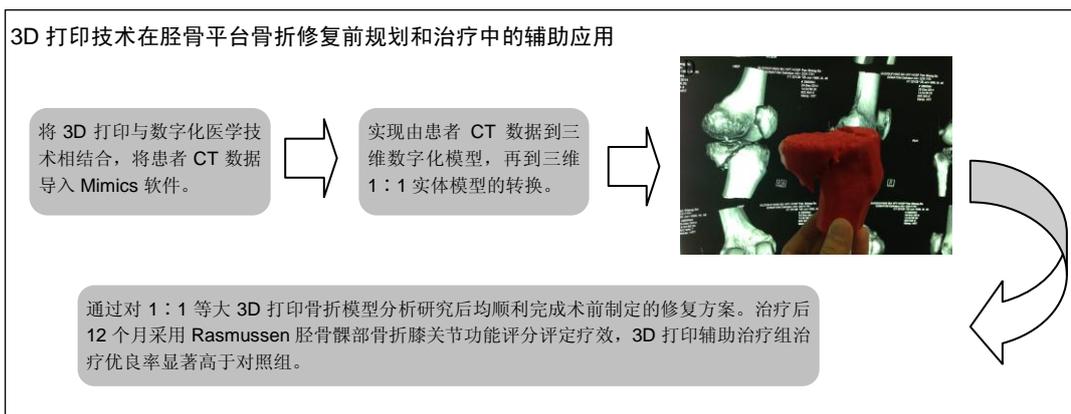
胫骨平台骨折植入物内固定修复中3D打印技术的辅助应用

杨龙¹, 王建吉¹, 孙琦¹, 李靖², 张俊标³, 马敏先³, 李江伟⁴, 叶川⁴(¹贵州医科大学, 贵州省贵阳市 550004; ²贵州省再生医学重点实验室, 贵州省贵阳市 550004; ³贵州医科大学附属医院, ³口腔科, ⁴骨科, 贵州省贵阳市 550004)

引用本文: 杨龙, 王建吉, 孙琦, 李靖, 张俊标, 马敏先, 李江伟, 叶川. 胫骨平台骨折植入物内固定修复中 3D 打印技术的辅助应用[J]. 中国组织工程研究, 2016, 20(13):1904-1910.

DOI: 10.3969/j.issn.2095-4344.2016.13.011 ORCID: 0000-0001-5670-6289(叶川)

文章快速阅读:



杨龙, 男, 1988 年生, 贵州省贵阳市人, 汉族, 2016 年贵州医科大学毕业, 硕士, 医师, 主要从事数字化骨科研究。

通讯作者: 叶川, 博士, 硕士生导师, 主任医师, 教授, 贵州医科大学附属医院骨科, 贵州省贵阳市 550004

中图分类号:R318

文献标识码:A

文章编号:2095-4344

(2016)13-01904-07

稿件接受: 2016-01-14

<http://www.crter.org>

文题释义:

3D 打印技术: 是快速成型技术的一种, 是以数字模型文件为基础, 运用粉末状金属或塑料等可黏合材料, 通过逐层打印的方式来构造物体的技术。3D 打印技术在临床上为患者定制个性化假体植入物、手术导航模板、个性化支具等方面均有报道, 为外科手术在个性化和精准化方面提供了选择。

解剖型接骨板: 由于患者个体在骨骼形态上及骨折的差异性, 即使接骨板制造商将其规格型号分得足够细, 其接骨板与骨骼表面的吻合性与螺钉的位置等并不理想, 术前必须准备足够的、可能用到的接骨板型号和规格, 即便如此仍出现解剖型接骨板“不解剖”, 术中经常需要临时性再塑形, 除非牺牲复位的正确性而迁就接骨板的形状。不仅增加了手术的操作难度, 接骨板与骨表面的吻合性、内固定的稳定性和复位的正确性都难以保证。

摘要

背景: 在胫骨平台骨折修复过程中, 由于骨折形式多样化、解剖变化复杂、X 射线片或三维 CT 平扫受到二维平面的局限, 使得医生在术前计划和修复治疗时难度增大。3D 打印技术在骨科的应用已引起重视。

目的: 探讨 3D 打印技术在胫骨平台骨折术前计划和修复过程中的辅助作用。

方法: 纳入 30 例胫骨平台粉碎性骨折患者, 采用随机数字表法分为两组, 试验组及对照组各 15 例。试验组经三维 CT 扫描, 以 DICOM 格式储存, 经 Mimics 软件处理, 转换数据为可打印 STL 格式, 通过熔融沉积型 3D 打印机, 制作出 1:1 实体大小的骨折模型, 参照 3D 骨折模型制定修复方案。对照组患者常规参照影像学资料制定修复方案。比较两组患者的手术时间和术中出血量, 并于治疗后 12 个月采用 Rasmussen 胫骨髌部骨折膝关节功能评分评定疗效。

结果与结论: 试验组患者通过对 1:1 等比例的 3D 打印模型进行分析研究, 明确骨折类型后均顺利完成术前制定的修复方案。试验组手术时间及术中出血量均少于对照组, 差异有显著性意义($P < 0.05$)。所有患者治疗后获得 12-18 个月随访, 骨折愈合时间为 3-5 个月, 平均 4.3 个月。治疗后 12 个月采用 Rasmussen 胫骨髌部骨折膝关节功能评分评定疗效, 试验组治疗优良率显著高于对照组($P < 0.05$)。提示 3D 打印骨折模型有助于精确制定内固定修复方案, 使得胫骨平台骨折的修复治疗更加精确、个性和直观。

关键词:

骨科植入物; 数字化骨科; 胫骨平台骨折; 3D 打印; 数字化建模; 计算机辅助设计; 个性化手术; 术前计划; 三维重建; 国家自然科学基金

Yang Long, Master,
Physician, Guizhou
Medical University,
Guiyang 550004, Guizhou
Province, China

主题词:

胫骨; 骨折; 内固定器; 组织工程

基金资助:

国家自然科学基金资助项目(81360232); 贵阳市科技局资助项目(GY20141001)

Corresponding author: Ye
Chuan, M.D., Master's
supervisor, Chief
physician, Professor,
Department of
Orthopedics, Affiliated
Hospital of Guizhou
Medical University,
Guiyang 550004, Guizhou
Province, China

Auxiliary application of three-dimensional printing technology of implant fixation for tibial plateau fracture

Yang Long¹, Wang Jian-ji¹, Sun Qi¹, Li Jing², Zhang Jun-biao³, Ma Min-xian³, Li Jiang-wei⁴, Ye Chuan⁴
(¹Guizhou Medical University, Guiyang 550004, Guizhou Province, China; ²Guizhou Provincial Key Laboratory of Regenerative Medicine, Guiyang 550004, Guizhou Province, China; ³Department of Stomatology, ⁴Department of Orthopedics, Affiliated Hospital of Guizhou Medical University, Guiyang 550004, Guizhou Province, China)

Abstract

BACKGROUND: In the treatment of tibial plateau fractures, because of the variety of fracture, the complexity of anatomical changes, X-ray films or three-dimensional CT scan limited by two-dimensional plane, increases the difficulty in preoperative plan and surgical treatment. The application of three-dimensional (3D) printing technology has attracted attention in the department of orthopedics.

OBJECTIVE: To explore the auxiliary role of 3D printing technique in preoperative plan and treatment for tibial plateau fractures.

METHODS: Thirty patients with tibial plateau comminuted fractures were enrolled in this study and divided into two groups: experimental and control groups, with 15 patients in each group. In the experimental group, patients underwent 3D CT scan, which was stored in DICOM format, and processed by Mimics software. Data were converted into STL format, entered 3D printer, and a 1:1 entity size of the fracture model was made, in accordance with repair plan of 3D fracture model. Operation time and intraoperative blood loss were compared between the two groups. At 12 months after treatment, their outcomes were assessed using Rasmussen evaluation criteria.

RESULTS AND CONCLUSION: The 3D printing fracture models of 1:1 ratio identified fracture type and made a repair program before surgery in the experimental group. Operation time and intraoperative blood loss were significantly less in the experimental group than in the control group ($P < 0.05$). After surgery, patients were followed up for 12 to 18 months. The healing time was 3–5 months, averagely 4.3 months. At 12 months after treatment, the Rasmussen evaluation criteria results showed that the excellent and good rate was significantly higher in the experimental group than in the control group ($P < 0.05$). These results suggest that the fracture model of 3D can help to make the operation plan. The treatment of tibial plateau fractures is more precise, personalized and visual.

Subject headings: Tibia; Fractures, Bone; Internal Fixators; Tissue Engineering

Funding: the National Natural Science Foundation of China, No. 81360232; the Project of Guiyang Science and Technology Bureau, No. GY20141001

Cite this article: Yang L, Wang JJ, Sun Q, Li J, Zhang JB, Ma MX, Li JW, Ye C. Auxiliary application of three-dimensional printing technology of implant fixation for tibial plateau fracture. *Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu*. 2016;20(13):1904-1910.

0 引言 Introduction

胫骨平台骨折是很常见的关节内骨折, 大概占全身骨折的1%。近年来由于高能量损伤日益增多, 胫骨平台骨折的发生率和骨折形式呈现逐年上升和多样化趋势, 给治疗带来了难度^[1-3]。关节内骨折的治疗关键是尽量实现关节面的解剖复位以避免创伤性关节炎所致的严重的功能障碍^[4-5], 故制定精确和完善的修复方案显得尤为是重要。

胫骨平台损伤的处理需同时兼顾骨折和软组织因

素, 修复方式的选择依赖于对骨折充分和细致的了解。X射线检查往往无法获得详细、准确的骨折信息。CT对骨折塌陷、粉碎程度和平台增宽程度可进行评估, CT三维重建能够在三维空间显示骨折各部位特征及空间位置关系, 然而, 这些三维影像的显示效果均存在二维平面的局限。

3D打印(three dimensional printing)技术是一种在三维数字模型的基础上采用逐层制造的方式将材料堆积起来构造物体的快速成型技术。无需原胚和模具, 就

能直接根据计算机图形数据, 通过增加材料的方法生成任意复杂几何形状的实体, 简化产品的制造程序, 缩短产品的研制周期, 提高效率并降低成本。随着3D打印技术在医学领域的发展^[6-8], 结合数字化骨科技术^[9-11], 实现了由患者的CT数据到数字化模型, 再到三维1:1实体模型的转换, 逐渐突破了二维平面的限制^[12]。为过去医生通过X射线、CT、MRI在大脑中形成的三维印象进行手术方案的术前设计^[13-14], 提供了新的思路。文章根据胫骨平台骨折患者的CT数据, 制作出1:1等大的3D打印实体模型, 帮助医生实现了直接在打印出来的实物模型上进行分析并行术前计划, 用于明确修复方式的选择, 指导临床修复治疗。

1 对象和方法 Subjects and methods

1.1 设计 随机对照试验。

1.2 时间及地点 于2013年1月至2015年12月在贵州医科大学附属医院骨科完成。

1.3 材料 文中所使用的内固定钢板为钛合金胫骨近端接骨板, 购自厦门大博颖精医疗器械公司, 生物相容性良好, 根据骨折的具体情况选用相应合适的接骨板。

1.4 对象 选取2013年1月至2015年12月贵州医科大学附属医院骨科收治的胫骨平台骨折患者30例, 其中男17例, 女13例; 年龄29-46岁, 平均(36±7.1)岁。致伤原因: 高处坠落伤12例, 摔伤4例, 交通事故伤13例, 重物砸伤1例; 其中合并膝关节前后交叉韧带损伤4例, 侧副韧带损伤2例, 半月板损伤5例。骨折按Schatzker分型: II型4例, III型15例, IV型11例。受伤到接受修复治疗时间1-14 d, 平均7.5 d。

30例患者采用随机数字表法分为2组, 试验组15例参照3D骨折模型制定修复方案, 均在术前进行了CT扫描并制作3D打印骨折模型; 对照组15例常规参照影像学资料制定修复方案。2组患者的平均年龄和受伤原因差异无显著性意义($P > 0.05$)。入组的所有患者均对此次研究的具体内容知情, 自愿参与试验。

诊断标准: ①病史: 外伤史。②体检有明确体征: 患侧膝关节肿胀、疼痛、活动受限。③辅助检查: 膝关节X射线片和CT显示胫骨平台粉碎性骨折。

纳入标准: 符合胫骨平台骨折的诊断标准者; 患者能够耐受手术, 对治疗均知情同意; 试验组患者均在术前进行了CT扫描并制作3D打印模型。

排除标准: 心、肺、肝、肾功能不全, 无法耐受手术者; 不愿意参加临床试验者; 病理性骨折患者。

1.5 方法

1.5.1 3D打印模型的准备 试验组的所有病例均行螺旋CT扫描, 层厚1 mm, 将断层扫描结果以DICOM格式文件保存, 将DICOM格式文件导入Mimics 10.01软件(Materialise公司, 比利时)中, 通过阈值分割, 三维区域增长, 仔细修补原始蒙版, 精确选取每层轮廓线, 计算3D模型, 以optimal质量选项进行模型运算, 获得3D模型, 通过Mimics 10.01软件的导出功能, 将计算好的骨折模型以STL格式保存, 输出至3D快速成形机(闪铸科技有限公司, Creator pro), 以聚乳酸塑料作为打印材料(三维立现科技有限公司, 直径1.75 mm), 按照一定参数对3D模型进行打印(见表1), 打印时长为6-8 h, 制作出与实体1:1等大的胫骨平台骨折模型。

表1 3D打印聚乳酸材料参数设定

Table 1 Parameters of three-dimensional printing poly lactic acid material

参数	聚乳酸工艺设定
填充率	15%
层厚	50 μm
外壳数	2
给进速度	55 mm/s
丝料直径	1.65 mm
喷嘴直径	200 μm
喷头温度	200 °C
底板温度	50 °C

1.5.2 修复前准备 完善常规术前检查。根据胫骨平台骨折模型, 进行以下分析与研究: ①验证模型确认分型、明确骨折片的数量、骨折线的走行、有无骨缺损、关节面塌陷情况、确定是否需要植骨等, 并对骨折的发生机制进行分析。②在模型上分析胫骨平台骨折的修复方式及治疗策略。体外模拟固定方案、分析最佳的复位、固定方式及必要的显露范围、骨折块与神经和血管的位置关系; 复位、矫正各种旋转和成角畸形后, 明确合适的内固定材料型号、放置位置以及主要固定螺钉的方向, 制定个性化的修复方案。③个性化的术前谈话: 根据上述的情况, 术者使用3D打印模型与患者或指定家属交待病情, 使其了解骨折的形状、特点及手术的必要性、修复方式、可能出现的并发症等^[15]。

1.5.3 修复术中操作 完成上述准备后, 根据模型所获得的信息制定个性化术前计划, 实施切开复位内固定治疗。全麻后取平卧位或俯卧位, 止血带止血。根据骨折具体情况行内侧、外侧、后侧入路或联合入路, 逐层进入显露骨折断端, 复位后置入预弯的与骨骼贴服良好的

接骨板螺钉并固定。对照组患者根据常规影像学资料行切开复位接骨板螺钉内固定治疗。

1.5.4 不良反应评价标准 患者治疗后对于出现疼痛, 骨折处愈合不佳, 且出现后遗症者视为不良反应; 反之患者未出现不良反应。

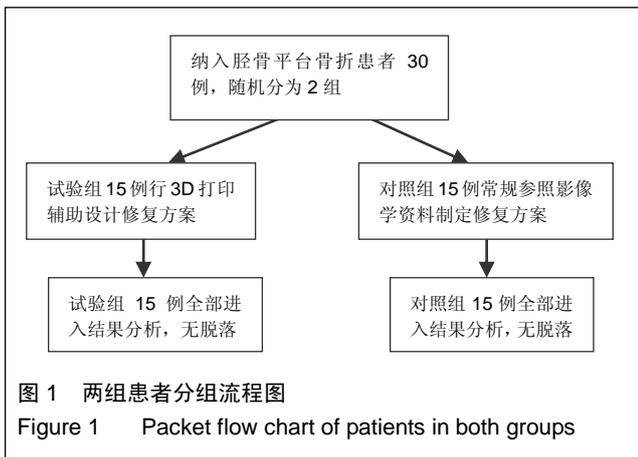
1.6 主要观察指标 应用医用Mimics软件三维重建胫骨平台骨折数字模型, 3D打印出骨折实体模型, 制定术前计划和内固定方案, 指导临床治疗。比较两组患者的手术时间及术中出血量, 修复后观察患者的膝关节功能恢复情况。

根据Rasmussen胫骨髌部骨折膝关节功能评分评估患者膝关节功能恢复情况, 包括关节活动范围、关节稳定性、疼痛以及行走能力。优: 膝关节活动 > 120°, 伸膝不受限, 伸膝稳定屈膝20°不稳定, 偶尔疼痛, 能正常行走。良: 90° < 膝关节活动 < 120°, 伸膝受限 0°-10°, 伸膝位不稳定 < 10°, 特定体位刺痛, 户外行走超过1 h。可: 60° < 膝关节活动 < 90°, 伸膝受限 > 10°, 伸膝位不稳定 > 10°, 午后疼痛, 活动后膝周广泛性、持续性疼痛, 短途户外行走15 min。差: 膝关节活动 < 60°, 伸膝受限 > 10°, 伸膝位不稳定 > 10°, 休息后夜间疼痛, 仅能户内行走或坐轮椅。

1.7 统计学分析 数据以 $\bar{x} \pm s$ 表示, 均录入SPSS 17.0软件进行统计分析。其中, 计数资料均予以卡方检验; 手术时间和术中出血量为计量资料, 经检验复合正态分布, 两组差异比较采用t 检验。P < 0.05为差异有显著性意义。

2 结果 Results

2.1 参与者数量分析 按意向性处理, 纳入胫骨平台骨折患者30例, 随机分为2组, 试验组行3D打印辅助设计修复方案, 对照组常规参照影像学资料制定修复方案, 全部进入结果分析, 无脱落。两组患者分组流程图见图1。



2.2 基线资料比较 两组患者基线资料比较见表2。两组患者全部获得随访, 随访12-18个月, 未出现脱落病例。

表 2 两组基线资料比较 (n=15)
Table 2 Comparison of baseline data of patients in both groups

项目	试验组	对照组
性别(男/女, n)	9/6	8/7
年龄($\bar{x} \pm s$, 岁)	34.0±6.5	37.0±2.1
受伤原因(n)		
高处坠落伤	6	6
交通事故伤	7	6
其他伤	2	3
随访时间(月)	12-18	12-18

2.3 临床修复效果 试验组成功打印出15例患者的骨折模型, 15例模型均能够清楚显示胫骨近端的解剖结构, 确定骨折分型, 骨折块移位方向和骨折严重程度。通过对1:1等大3D打印骨折模型分析研究后均顺利完成术前制定的修复方案, 两组患者手术时间和术中出血量结果见表3, 试验组手术时间、术中出血量均小于对照组, 差异有显著性意义(P < 0.05)。所有患者骨折愈合时间为3-5个月, 平均4.3个月。治疗后12个月采用Rasmussen评价标准评定疗效, 试验组治疗优良率显著高于对照组(P < 0.05), 见表4。

表 3 两组患者手术时间、术中出血量比较 ($\bar{x} \pm s$, n=15)
Table 3 Comparison of operation time and intraoperative blood loss of patients in both groups

组别	手术时间(min)	术中出血量(mL)
试验组	83±13	66±10
对照组	112±20	102±24
P	< 0.05	< 0.05

表 4 两组患者修复效果比较 (n=15, n)
Table 4 Comparison of treatment effect of patients in both groups

组别	优	良	可	总优良率(%)
试验组	10	4	1	93
对照组	7	4	4	73
P	< 0.05			

表注: 试验组治疗优良率显著高于对照组(P < 0.05)。

2.4 典型病例 患者, 男, 46岁, 交通事故导致胫骨平台骨折, 利用3D打印骨骼实体模型辅助骨折切开复位内固定治疗, 术后复查X射线片显示骨折复位固定满意, 钢板及螺钉在位良好, 见图2。

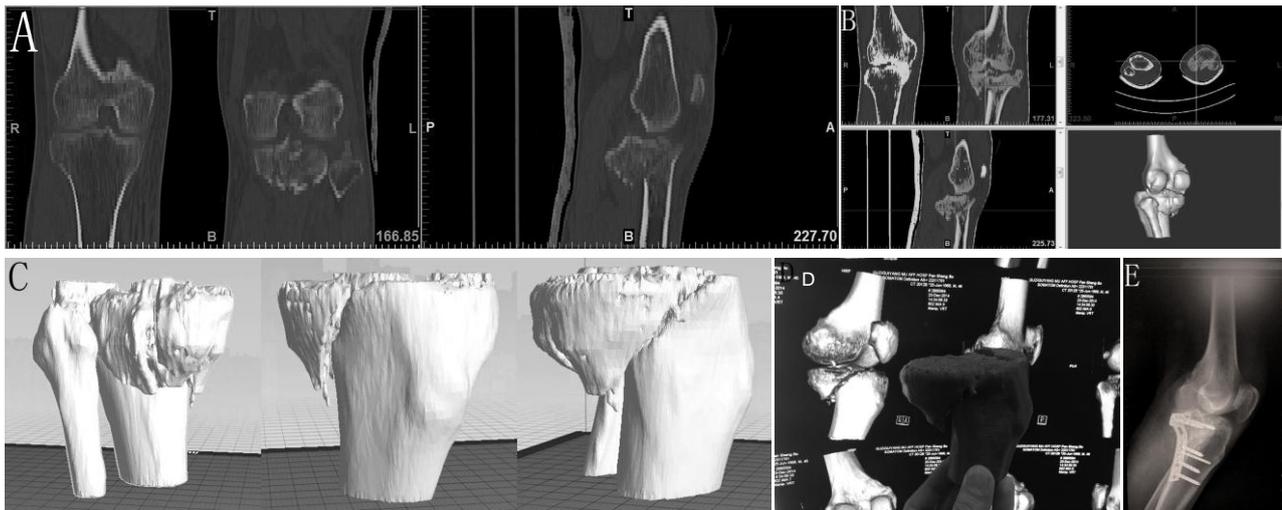


图 2 男性 46 岁胫骨平台粉碎性骨折患者内固定治疗的相关图片

Figure 2 Images of a 46-year-old male patient with comminuted fracture of tibial plateau undergoing fixation

图注: 图 A 为治疗前 CT 数据; B 为治疗前 Mimics 软件三维重建; C 为数字化骨折模型; D 为 3D 打印 1 : 1 骨折实体模型; E 为治疗后膝关节侧位 X 射线片。

2.5 不良事件 两组患者随访过程中均未出现任何与固定材料相关的不良事件。

3 讨论 Discussion

膝关节内由于其构成的复杂性和特殊性, 在受到不同的外力时, 胫骨髁与股骨髁接触区域不同, 损伤的部位和程度都存在很大的区别。胫骨平台骨折的内固定要求不仅体现在要获得良好的生物力学性能, 还必须实现关节面的解剖复位。因此, 只有在对骨折情况充分、细致的理解之后, 才能制定出个性化的最佳治疗方案。使得术前分析最佳的复位、固定方式及必要的显露范围, 选择最佳的手术方式及治疗策略显得尤为重要。

医生通常采用二维图像资料如 X 射线、CT、MRI 进行骨折的分型和手术方案的术前设计, 螺旋 CT 三维重建能够在三维空间直观、清晰地显示骨折各部位特征及空间位置关系。但在临床实践中, 由于影像专业人员并不完全了解骨科医生需要的图像角度、范围, 再加上三维影像的显示效果受到二维平面的局限, 导致所提供的图像不尽如人意。只能根据医生的经验和在大脑中形成的三维印象进行术前方案的设计。通过 3D 打印技术, 打印出 1 : 1 的实体模型, 由二维图像转换为三维的模型, 可以直观地从任意角度去观察骨折线行径及各主要骨折块移位和旋转情况, 并对移位距离进行实际测量^[16-25], 数字技术与传统骨科互相促进、互相融合、互相影响, 使得生物力学结构和解剖复杂的各种骨折的诊疗方法以及各项相关研究更加精确化、个性化、直观化^[26]。王征等^[27-28]将 3D 打印技术应用脊柱病变, 发现仅凭二维图像是无法获得数字化脊

柱模型的一些隐藏信息, 因此, 3D 打印模型可以了解大量隐藏的信息, 对制定手术计划有极大的帮助。Paeng 等^[29]对一个左侧颌骨缺损的男孩进行下颌骨 CT 分析, 进行数据建模, 通过 3D 打印技术将原下颌骨模型制备出来, 实验人员通过测量、模型优化设计出了修补方案。Vaibhav Bagaria 等^[30]对髌部骨折进行术前计划, 先分割 CT 扫描数据进行三维重建, 然后通过 4.5 mm 厚的钢板在模型上手术模拟, 发现误差再对钢板进行设计。

基于对患者 CT 数据的处理, 3D 打印模型能够真实地反映患者骨折部位的实际情况。对于胫骨平台这类骨折, 通常损伤较重, 涉及关节面的骨折往往有多块, 同时常伴有关节面的塌陷, 恢复膝关节功能是其治疗目的^[31-36]。在 Mimics 软件中, Object 为可操控的独立的三维实体, 术前对于重要的骨单元或骨折块均应建立 Object, 避免在三维重建中遗漏重要的碎小骨块, 以便建立完整的骨折模型。再通过对 3D 打印机的反复调试, 设定出适合的打印参数, 确保模型打印的精准度。在精准的模型上设计修复方案, 使手术更加精确, 提升手术质量和可靠性。

在胫骨平台骨折内固定治疗过程中, 钢板的外形匹配程度很大程度上决定了内固定的效果, 钢板与骨骼表面良好的匹配无疑能够获得更好的固定效果及生物力学性能。然而, 在临床工作中使用现有的解剖型接骨板时, 由于患者个体在骨骼形态上存在的差异性和骨折的差异性, 即个性化差异, 即使接骨板制造商将其规格型号分得足够细, 其接骨板与骨骼表面的吻合性与螺钉的位置等并不理想, 术前必须准备足够的、可能用到的接

骨板型号和规格, 即便如此仍出现解剖型接骨板“不解剖”, 手术中经常需要临时性再塑形, 除非牺牲复位的正确性而迁就接骨板的形状。不仅增加了手术的随意性和操作难度, 接骨板与骨表面的吻合性、内固定的稳定性和复位的正确性都难以保证。通过术前对 1:1 的 3D 打印模型的实际操作, 可预先选择接骨板型号、放置位置、主要固定螺钉方向和必要的显露范围, 在模型上复位骨折, 矫正各种旋转和成角畸形。通过模拟可节省手术时间、减少手术创伤、术中出血量及 C 型臂 X 射线机透视次数, 并预先发现术中可能遇到的问题, 使复杂的手术变得相对简单, 提高手术的安全性。3D 打印模型带来的真实、直观感受, 一方面, 对于年轻医生而言, 加强了操作技巧的训练, 人员之间的配合, 有效缩短学习曲线。另一方面, 对于患者来讲, 术前的模型可使患者充分了解手术治疗的必要性、治疗方案、固定方式、疾病预后以及术后的康复计划, 增加医患之间的配合, 提高了患者的治疗依从性和对医生的治疗评价^[37-38]。

近年来, 骨折治疗越来越提倡生物学固定, 强调微创与保护软组织、血供相结合。微创经皮钢板固定术联合锁定加压钢板治疗胫骨平台骨折是一种发展趋势。李翔等^[39]采用 LISS 系统治疗复杂胫骨平台骨折 15 例, 取得了较好疗效。相信 3D 打印模型对该种手术也能提供一定的帮助。同时, 目前针对复杂胫骨平台骨折的修复入路、修复方法、内固定材料的选择没有相对统一客观的治疗方法和准则^[40], 各方面仍有争议。随着 3D 打印技术在骨科领域的不断发展和进步, 针对胫骨平台骨折治疗的研究不断深入, 3D 打印技术在胫骨平台骨折的诊断和修复方案选择方面会有更为广阔的应用前景。

致谢: 感谢贵州医科大学器官打印与生物制造中心在 3D 打印技术方面的指导。

作者贡献: 第一作者构思并设计文章, 分析并解析数据, 所有作者共同起草, 第一作者审校。

利益冲突: 文章及内容不涉及相关利益冲突。

伦理问题:

知情同意: 参与试验的患者及其家属自愿参加, 对试验过程完全知情同意, 在充分了解治疗方案的前提下签署“知情同意书”; 干预及治疗方案获医院伦理委员会批准。

医生资质: 试验获得所在单位的伦理委员会批注, 参与的人员均经过正规的 Mimics 软件和 3D 打印技术培训, 具备相应骨外科执业医师所要求的资质。

文章查重: 文章出版前已经过 CNKI 反剽窃文献检测

系统进行 3 次查重。

文章外审: 本刊实行双盲外审制度, 文章经国内小同行外审专家审核, 符合本刊发稿宗旨。

作者声明: 文章第一作者对研究和撰写的论文中出现的不良行为承担责任。论文中涉及的原始图片、数据(包括计算机数据库)记录及样本已按照有关规定保存、分享和销毁, 可接受核查。

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。

4 参考文献 References

- [1] Thomas CH, Athanasiov A, Wulschlegler M, et al. Current concepts in tibial plateau fractures. Acta Chir Orthop Traumatol Cech. 2009;76(5): 363-373.
- [2] Zhang CC. Diagnosis and therapy of tibial plateau fractures and pilon fractures. Zhongguo Gu Shang. 2010;23(2): 81-83.
- [3] Gardner MJ, Schmidt AH. Tibial plateau fractures. J Knee Surg. 2014;27(1): 3-4.
- [4] Song QZ, Li T. Operative treatment for complex tibial plateau fractures. Zhongguo Gu Shang. 2012;25(3): 202-204.
- [5] Kandemir U, Maclean J. Surgical approaches for tibial plateau fractures. J Knee Surg. 2014;27(1): 21-30.
- [6] Zielinski SM, Bouwmans CA, Heetveld MJ, et al. FAITH trial investigators. The societal costs of femoral neck fracture patients treated with internal fixation. Osteoporos Int. 2014;25(3): 875-885.
- [7] 罗永祥, Akkineni AR, Anja Lode W, et al. 3-D打印:一种个性化制备复杂支架和组织工程植入物的多功能快速成型技术(英文)[J]. 中国修复重建外科杂志, 2014;28(3): 279-285.
- [8] 张伟, 张铁良. 三维重建及快速成型在骨科临床的应用研究[D]. 天津医科大学, 2010.
- [9] 黄若昆, 谢鸣, 余嘉, 等. 应用数字化技术设计胫骨远端后侧解剖钢板的研究[J]. 中华创伤骨科杂志. 2013, 10(15): 889-892.
- [10] Miller EA, West DM. Where's the revolution? digital technology and health care in the Internet age. J Health Polit Policy Law. 2009;34(2): 261-284.
- [11] Demartini TL, Beck AF, Klein MD, et al. Access to digital technology among families coming to urban pediatric primary care clinics. Pediatrics. 2013;132(1): e142-148.
- [12] von Tengg-Kobligh H, Weber TF, Rengier F, et al. Imaging modalities for the thoracic aorta. J Cardiovasc Surg. 2008;49(4): 429-447.
- [13] Hall JA, Beuerlein MJ, Mckee MD. Open reduction and internal fixation compared with circular fixator application for bicondylar tibial plateau fractures. Surgical technique. J Bone Joint Surg Am, 2009;91 Suppl 2 Pt 1: 74-88.

- [14] Zhong FH, Zhang XW, Ma GP, et al. Case-control studies on therapeutic effects for the treatments of tibial plateau fractures between arthroscopic technique in minimally invasion surgery and minimally invasive internal fixation with plates and screws. *Zhongguo Gu Shang*. 2011;24(9): 732-736.
- [15] 岳勇,阿不来提·阿不拉,杨勇,等. 在3-D打印模型基础上微创螺钉及锁定钢板置入内固定修复踝关节骨折[J]. 中国组织工程研究,2015,10(26): 4247-4252.
- [16] Dubois-Ferrière V, Assal M. Benefit of computer assisted surgery in foot and ankle surgery. *Rev Med Suisse*. 2014;10(420): 562-564.
- [17] Davidovitch RI, Weil Y, Karia R, et al. Intraoperative syndesmotic reduction: three-dimensional versus standard fluoroscopic imaging. *J Bone Joint Surg Am*. 2013;95(20): 1838-1843.
- [18] Brunner A, Heeren N, Albrecht F, et al. Effect of three-dimensional computed tomography reconstructions on reliability. *Foot Ankle Int*. 2012;33(9): 727-733.
- [19] von Recum J, Wendl K, Vock B, et al. Intraoperative 3D C-arm imaging. State of the art. *Unfallchirurg*. 2012;115(9): 196-201.
- [20] Beerekamp MS, Sulkers GS, Ubbink DT, et al. Accuracy and consequences of 3D-fluoroscopy in upper and lower extremity fracture treatment: a systematic review. *Eur J Radiol*. 2012;81(420): 4019-4028.
- [21] Beerekamp MS, Ubbink DT, Maas M, et al. Fracture surgery of the extremities with the intra-operative use of 3D-RX: a randomized multicenter trial (EF3X-trial). *BMC Musculoskelet Disord*. 2011;7(6): 151.
- [22] Ruan Z, Luo C, Shi Z, et al. Intraoperative reduction of distal tibiofibular joint aided by three-dimensional fluoroscopy. *Technol Health Care*. 2011;19(3): 161-166.
- [23] Richter M, Zech S. Intraoperative 3-dimensional imaging in foot and ankle trauma-experience with a second-generation device (ARCADIS-3D). *J Orthop Trauma*. 2009;23(3): 213-220.
- [24] Ruan Z, Luo C, Shi Z, et al. Intraoperative reduction of distal tibiofibular joint aided by three-dimensional fluoroscopy. *Technol Health Care*. 2011;19(3): 161-166.
- [25] Qiang M, Chen Y, Zhang K, et al. Measurement of three-dimensional morphological characteristics of the calcaneus using CT image post-processing. *J Foot Ankle Res*. 2014;7(1): 19.
- [26] 霍莉峰,倪衡建. 数字骨科应用与展望:更精确、个性、直观的未来前景[J]. 中国组织工程研究,2015,19(9): 1457-1462.
- [27] 王征,王岩,毛克亚. 脊柱数字化重建与3D打印技术对复杂脊柱畸形矫治的意义[J]. 中国脊柱脊髓杂志, 2006, 31(16): 212-214.
- [28] 张强,邹德威,马华松. 3D打印技术脊柱模型在脊柱外科的初步应用[J]. 颈腰痛杂志,2007,6(28): 451-454.
- [29] Paeng JY, Lee JH, Lee JH, et al. Condyle as the point of rotation for 3-D planning of distraction osteogenesis for hemifacial microsomia. *J Craniomaxillofac Surg*. 2007;35(2):91-102.
- [30] Vaibhav Bagaria V, Deshpande S, Kuthe A. Use of rapid prototyping and three-dimensional reconstruction modeling in the management of complex fractures. *Eur J Radiol*. 2011;80(3):814-820.
- [31] Foss K, da Costa RC, Moore S, et al. Three-dimensional kinematic gait analysis of Doberman Pinschers with and without cervical spondylomyelopathy. *J Vet Intern Med*. 2013;7(1): 112-119.
- [32] Ding J, Sun G, Lu Y, et al. Evaluation of anterior ethmoidal artery by 320-slice CT angiography with comparison to three-dimensional spin digital subtraction angiography: initial experiences. *Korean J Radiol*. 2012;13(6): 667-673.
- [33] Zhu QG, Fang M, Pan L. Effects of tuina manipulation on the three-dimensional space of cervical vertebral segments of cervical spondylosis patients. *Zhongguo Zhong Xi Yi Jie He Za Zhi*. 2012;32(7): 922-925.
- [34] Wade R, Yang H, McKenna C, et al. A systematic review of the clinical effectiveness of EOS 2D/3D X-ray imaging system. *Eur Spine J*. 2013;22(2): 296-304.
- [35] Abdullah KG, Bishop FS, Lubelski D, et al. Radiation exposure to the spine surgeon in lumbar and thoracolumbar fusions with the use of an intraoperative computed tomographic 3-dimensional imaging system. *Spine (Phila Pa 1976)*. 2012;37(17): E1074-1078.
- [36] Yoshihara M, Terajima M, Yanagita N, et al. Three-dimensional analysis of the pharyngeal airway morphology in growing Japanese girls with and without cleft lip and palate. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2012;141(4 Suppl): S92-101.
- [37] 张元智,陆声,赵建民,等. 数字化技术在骨科的临床应用[J]. 中华创伤骨科杂志,2011,13(12): 1161-1165.
- [38] 张元智,陆声,赵建民,等. 3D打印技术:骨科最新冲击波[J]. 中华创伤骨科杂志,2015,17(1): 8-9.
- [39] 李翔,范卫民,刘锋,等. LISS在复杂胫骨平台骨折中的应用[J]. 江苏医药. 2007,33(2): 140-142.
- [40] Cole PA, Zlowodzki M, Kregor PJ. Less Invasive Stabilization System (LISS) for fractures of the proximal tibia: indications, surgical technique and preliminary results of the UMC Clinical Trial. *Injury*. 2003;34: 16-29.