

# 基于 3D 打印技术骨科康复学的发展前景

<https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-4344.2333>

彭坤<sup>1</sup>, 林一民<sup>2</sup>, 甘晓玲<sup>1</sup>, 吴治勇<sup>3</sup>

2095-4344.2333

投稿日期: 2019-12-18

送审日期: 2020-01-04

采用日期: 2020-02-26

在线日期: 2020-05-13

中图分类号:

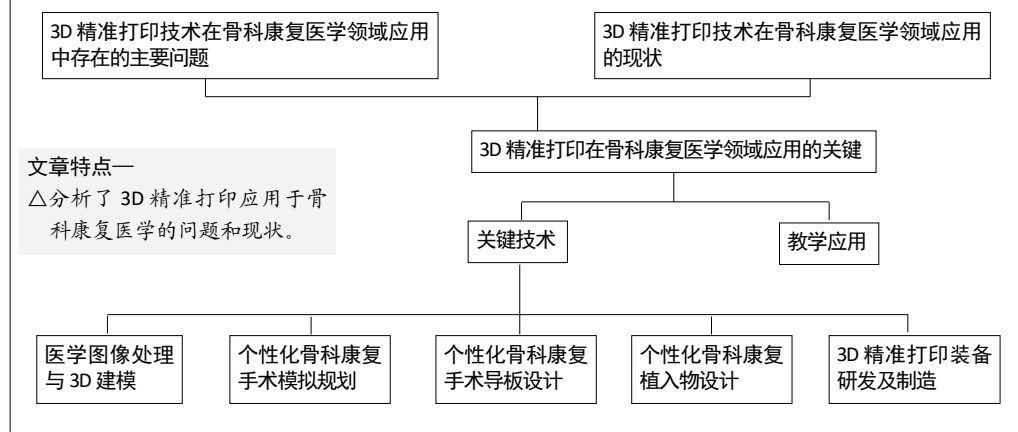
R459.9; R318.08; R-1

文章编号:

2095-4344(2021)04-00632-06

文献标识码: A

## 文章快速阅读:



## 文章特点:

**3D打印技术:** 又称增材制造技术、激光堆积型技术或激光快速成型技术, 是一种以数字模型文件为基础, 运用粉末状金属或塑料的可黏合材料, 通过逐层打印的方式来构造物体的技术。它是集机械工程、CAD、逆向工程技术、分层制造技术、数控技术、材料科学、激光技术于一身, 可以自动、直接、快速、精确地将设计思想转变为具有一定功能的原型或直接制造零件, 从而为零件原型制作、新设计思想的校验等方面提供一种高效低成本的实现手段。主流3D打印技术有: 激光粉末烧结成型、三维打印、激光固化和熔融沉积成型。

**骨科康复学:** 主要研究骨与关节、肌肉及神经系统和软组织的损伤、畸形和疾病所致的功能障碍及康复处理, 是骨科学的一个分支。现代骨科康复学把功能训练、假肢和矫形器辅助、手术治疗作为它的3个基本组成部分, 上述3大手段都是围绕着康复的目标进行的, 包括手术性治疗和非手术性治疗。

## 摘要

**背景:** 3D精准打印在骨科康复医学中的应用正受到临床医生、工程师和科研人员的重视。

**目的:** 综述3D打印技术在骨科康复学方面的发展情况。

**方法:** 应用计算机检索CNKI数据库、万方数据库、PubMed数据库及Elsevier数据库中2011至2019年收录的相关文献, 中文检索词为“3D精准打印、骨科康复医学、人工智能”, 英文检索词为“3D Precision Printing, Orthopedic rehabilitation medicine, Artificial Intelligence”。

**结果与结论:** 目前, 3D精准打印在骨科康复医学应用中的关键技术, 包括医学图像处理与3D建模、手术模拟规划系统、手术导板设计、植入物设计与3D精准打印装备等。其中通过多层次重组、容积再现技术、最大密度投影、最小密度投影和表面阴影显示等3D重建技术读取医学数字数据, 实现可视化医学图像处理与3D建模, 可提升医患沟通效率; 通过计算机来模拟医生的康复手术思维过程和智能行为, 制造类似于医生人脑智能的云服务中心, 辅助医生开展康复手术规划; 利用个性化康复手术导板设计软件辅助, 可实现移植骨截骨导板为医生规划截骨线和截骨范围, 缩短手术时间, 提高手术安全性; 利用聚合材料、金属材料、陶瓷材料等作为3D打印材料还存在力学适配、生理适配不理想等问题; 常见生物3D设计软件的自动化程度偏低, 易出现骨科医疗器械性能与缺损部位的匹配度不理想、植入物内部孔隙结构单一等问题; 然而, 3D精准打印技术应用于浸入式康复医学教学系统对于跨学科医工结合的康复医学人才培养有益处。

**关键词:** 骨; 材料; 3D; 康复; 人工智能; 医学图像; 现代化; 综述

## Development prospect of orthopedic rehabilitation medicine based on three-dimensional printing technology

Peng Kun<sup>1</sup>, Lin Yimin<sup>2</sup>, Gan Xiaoling<sup>1</sup>, Wu Zhiyong<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Chongqing Medical and Pharmaceutical College, Chongqing 401331, China; <sup>2</sup>Chongqing Key Laboratory of Translational Research for Cancer Metastasis and Individualized Treatment, Chongqing University Cancer Hospital, Chongqing 400030, China; <sup>3</sup>Chongqing Gonggang Zhihui Additive Manufacturing Technology Service Co., Ltd., Chongqing 400030, China

Peng Kun, MD, Associate professor, Chongqing Medical and Pharmaceutical College, Chongqing 401331, China

**Corresponding author:** Lin Yimin, Chief technician, Chongqing Key Laboratory of Translational Research for Cancer Metastasis and Individualized Treatment, Chongqing University Cancer Hospital, Chongqing 400030, China

<sup>1</sup>重庆医药高等专科学校, 重庆市 401331; <sup>2</sup>重庆大学附属肿瘤医院, 肿瘤转移与个体化诊治转化研究重庆市重点实验室, 重庆市 400030; <sup>3</sup>重庆工港致慧增材制造技术服务有限公司, 重庆市 400030

**第一作者:** 彭坤, 男, 1982年生, 重庆市人, 汉族, 博士, 副教授, 主要从事生物医学、智能医学的研究。

**通讯作者:** 林一民, 主任技师, 重庆大学附属肿瘤医院, 肿瘤转移与个体化诊治转化研究重庆市重点实验室, 重庆市 400030

<https://orcid.org/0000-0002-4703-7893> (彭坤)

**基金资助:** 重庆市自然科学基金(cstc2018jcyjAX0828), 项目负责人: 彭坤; 重庆市高等学校青年骨干教师资助计划(2016), 项目负责人: 彭坤

**引用本文:** 彭坤, 林一民, 甘晓玲, 吴治勇. 基于3D打印技术骨科康复学的发展前景[J]. 中国组织工程研究, 2021, 25(4):

632-637.



## Abstract

**BACKGROUND:** The application of three-dimensional (3D) precision printing in orthopedic rehabilitation medicine is attracting more and more attention from clinicians, engineers and researchers.

**OBJECTIVE:** To review the development of 3D printing in orthopedic rehabilitation.

**METHODS:** Relevant documents published from 2011 to 2019 were retrieved from CNKI database, Wanfang database, PubMed database and Elsevier database by computer. The search terms were "3D Precision Printing, Orthopedic rehabilitation medicine, Artificial Intelligence" in English and Chinese.

**RESULTS AND CONCLUSION:** At present, 3D precision printing is the key technology in the application of orthopedic rehabilitation medicine, including medical image processing and 3D modeling, surgical simulation planning system, surgical guide board design, implant design and 3D precision printing equipment. Among them, 3D reconstruction technologies such as multiplanar reconstructions, volume rendering technique, maximum intensity projection, minimum intensity projection and surface shaded display are used to read medical digital data and realize visual medical image processing and 3D modeling, which can improve doctor-patient communication efficiency. The thinking process and intelligent behavior of doctors in rehabilitation surgery can be simulated by computer, and a cloud service center with function similar to the brain intelligence of doctors is created to assist doctors in the planning of rehabilitation surgery. With the aid of personalized rehabilitation surgery guide board design software, the bone graft osteotomy guide board can be used to plan the osteotomy line and osteotomy range for the doctor, which can shorten the operation time and improve the operation safety. Using polymer materials, metal materials, ceramic materials and other materials as 3D printing materials, there are still problems such as poor mechanical adaptation and physiological adaptation. The automation degree of common biological 3D design software is relatively low, which is prone to problems such as unsatisfactory matching between the performance of orthopedic medical devices and the defect site, and single internal pore structure of implants. However, the application of 3D precision printing technology in the immersion rehabilitation medicine teaching system is beneficial to the cultivation of rehabilitation medicine talents combining with interdisciplinary medical workers.

**Key words:** bone; material; 3D; rehabilitation; artificial intelligence; medical image; modernization; review

**Funding:** the Natural Science Foundation of Chongqing, No. cstc2018jcyjAX0828 (to PK); the Backbone Teachers Foundation Youth Fund of Chongqing Colleges and Universities, No. 2016 (to PK)

**How to cite this article:** PENG K, LIN YM, GAN XL, WU ZY. Development prospect of orthopedic rehabilitation medicine based on three-dimensional printing technology. *Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu*. 2021;25(4):632-637.

## 0 引言 Introduction

近年来在国家《增材制造产业发展推进计划(2015至2016年)》落地实施的推动下,国内增材制造产业增长迅速。最新出台的《增材制造产业发展行动计划(2017至2020年)》明确提出,到2020年增材制造产业年销售收入将超过200亿元,年均增速在30%以上,产业发展潜力巨大。3D打印<sup>[1-3]</sup>,又称增材制造、积层制造技术,包括选择性激光烧结技术、直接金属激光烧结成型技术、光固化成型技术、熔融沉积成型技术及多喷头打印技术。3D打印是把经过计算机辅助设计软件设计好的模型文件输入到3D打印机中,选用不同的打印材料,通过熔融成型、激光烧结熔融、光固化立体成型等方式打印出实体模型,从而完成模型的实体构建<sup>[4-7]</sup>。

面向骨科康复学的3D打印技术主要涉及医学图像处理与3D建模、个性化骨科康复手术模拟规划、个性化骨科康复手术导航设计、个性化骨科康复植入物设计、3D精准打印装备研发及制造等技术。随着增材制造产业的快速发展,国内同行经过一定阶段的研究、重视和临床经验已取得了显著进展,能够初步满足临床骨科康复学的需要,对于改善个性化骨科康复效果有积极意义。

## 1 资料和方法 Data and methods

**1.1 资料来源** 应用计算机检索CNKI数据库、万方数据库、PubMed数据库及Elsevier数据库中2011至2019年收录的相关文献,中文检索词为“3D精准打印、骨科康复医学、人工智能”,英文检索词为“3D Precision Printing, Orthopedic rehabilitation medicine, Artificial Intelligence”,并将关键词限定在摘要。查阅3D打印技术在骨科康复学方面发展情况的相关文章,包括综述、基础研究及临床研究等。

### 1.2 入选标准

**纳入标准:** 有关3D打印技术在骨科康复学方面的实验性或基础研究;同一领域中论点、论据可靠的文献。

**排除标准:** 重复性研究且研究目的无相关性的文献;资料无法提取的部分文献。

**1.3 数据的提取** 研究内容由团队成员独立提取并通过讨论,重点记录侧重于3D打印技术在骨科康复学方面的应用。

**1.4 文献证据提炼** 计算机检索初检得到491篇文献,通过阅读文题和摘要进行初步筛选,排除与文章主题不相关的文献,根据纳入标准和排除标准最后纳入54篇文献进行综述,见图1。

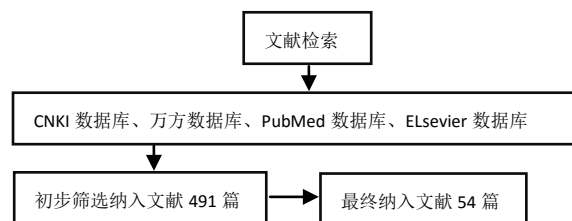


图1 | 文献检索流程图

## 2 结果 Results

**2.1 3D精准打印技术在骨科康复医学领域应用的现状** 数字化精准医疗在骨科康复医学领域受到关注,3D打印技术的成熟为其发展提供了更大的空间。在临床治疗上,骨科康复治疗手术可凭借3D打印的医疗模型进行术前规划、术中导航等<sup>[8-10]</sup>。临床医学辅助人员可利用患者术前CT或MRI数据完成三维建模,生成可被识别的打印数据,利用医学3D打印机生成可辅助临床治疗的医学3D模型<sup>[11-13]</sup>。生成的医学3D模型可以协助医生开展手术训练、术前规划和术中指导,帮助医生或者患者更好地理解病患位置的医学治疗机制,设计符合手术需要的导航,帮助医生顺利实施手术,提高手术精准度,改善手术效果,提高患者满意度。

3D精准打印技术在骨科康复医学领域应用的第一阶段是图像三维建模,但目前医疗行业提供具有专业针对医疗应用3D重构软件开发及3D打印的技术创新平台尚属比较空白的领域<sup>[14-17]</sup>。建模软件个性化诊疗3D打印数字设计技术

能够依据患者的一组医学 CT 或 MRI 图像重建出患处的三维数学模型, 建模数据能与商业 3D 打印机无缝对接, 是国际领先的专门针对医学领域应用的图像三维重建建模软件, 市场上仅有比利时公司 Materialise 的 Mimics 软件拥有类似功能, 但其主要为科研人员所设计, 操作复杂、医生适用性差, 无法满足实际临床的现实需求。

**2.2 3D 精准打印在骨科康复医学领域应用的关键** 3D 精准打印在骨科康复医学领域应用的关键是基于患者的 CT 或 MRI 医学图像<sup>[18-19]</sup>, 利用医学图像处理、个性化手术规划及植入物设计软件系统重建出与患者骨破损部位一致的 3D 模型; 在此基础上设计术前模型、手术导板、个性化植入物、康复支具等个性化医疗器械; 利用医学 3D 打印机对设计的产品进行增材制造, 从而提高患者的治疗效果, 其关键技术路径如图 2 所示。

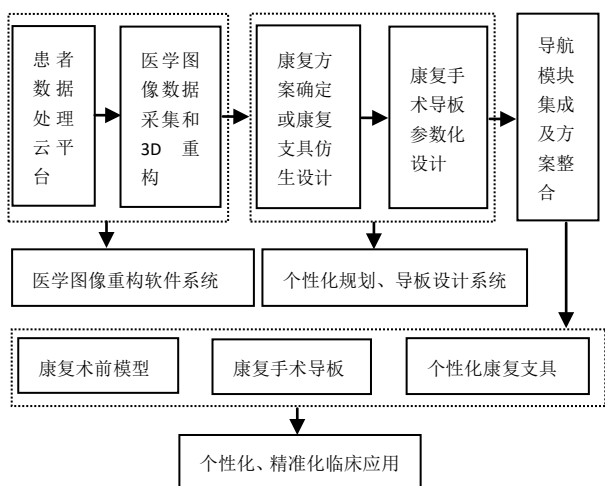


图 2 | 3D 精准打印在骨科康复医学应用中的关键技术路线

**2.2.1 3D 精准打印在骨科康复医学应用中的关键技术**

**医学图像处理与 3D 建模:** 医学影像开发可以实现 2D 切片和 3D 重建技术, 如 MRI 和 CT, 提供了 5 种不同的 3D 重建技术: 多层面重组、容积再现技术、最大密度投影、最小密度投影和表面阴影显示。全面支持裁剪、缩放、变焦、视角控制、透明度、灰度、投影、测量、标注。获取的 MRI 扫描图像可通过医学成像工具包 (medical imaging tool kit, MITK) 软件处理, 直接读取 MRI 采集的医学数字成像及通信 (digital imaging and communication of medicine, DICOM) 数据, 分割提取影像数据内的兴趣区域进行可视化, 再计算生成并导出 STL 格式的三维网格模型<sup>[20-23]</sup>。利用曹桂平等<sup>[24]</sup>提及的 Arigin3D Pro 软件三维重建获得医学 3D 重构效果, 见图 3 所示。

医生在与患者沟通的过程中, 用个性化康复治疗 3D 打印数字设计技术软件重构的三维模型可视化地展示给患者观看, 可显著提升医患沟通效率<sup>[25-28]</sup>。在此基础上, 利用个性化康复治疗 3D 打印数字设计技术软件的移动客户端应用, 将图像处理、模型重构等过程进行整合, 可进一步简化医生的阅片过程<sup>[29-30]</sup>。

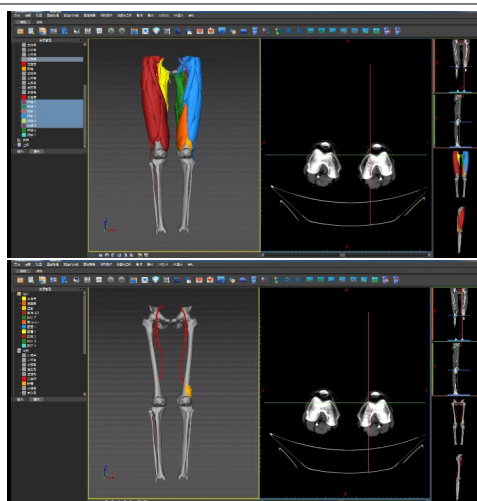


图 3 | 医学 3D 重构软件系统 (来自 Arigin3D Pro V2.0)

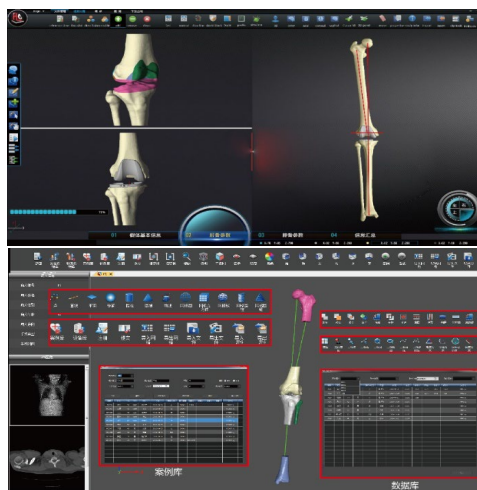


图 4 | 智能手术决策规划

**个性化骨科康复手术模拟规划:** 基于患者三维模型的康复手术规划可用于指导医生制定骨科康复手术方案, 软件系统应具有可视化、高精度的特点, 可提供多种常规手术的手术规划流程<sup>[31-32]</sup>。同时, 利用人工智能赋能 3D 精准打印可通过计算机来模拟医生的康复手术思维过程和智能行为, 制造类似于医生人脑智能的云服务中心, 辅助其他医生开展康复手术规划<sup>[33-35]</sup>。骨科康复术前规划与模拟涉及到复杂手术截骨、修复重建、骨穿刺的骨科手术中, 医生往往面临确定截骨面以便于重建、修复, 寻找穿刺入口, 避免损伤周围神经、血管及精准穿刺肿瘤, 确定截骨量和截骨部位等问题。实际操作中通过计算机辅助设计软件与 3D 打印技术<sup>[36-37]</sup>, 医生以 DICOM 格式将 CT 扫描数据导入 3D 辅助设计软件可获得骨折患处的精准三维模型, 比起传统的 X 射线片、CT 片、MRI 图像更能辅助其了解患者立体解剖结构、准确诊断病情, 确定手术方案。医生可从不同角度和方向观察骨折情况, 再参照骨折 AO 治疗原则模拟选择合适手术入路, 形成复位骨折模型, 利用模型进行术前操作训练, 也可用于向患者及其家属解释病情与手术方案, 有利于医患沟通, 减轻患者心理负担, 实现个性化骨科康复手术模拟规划。利用曹桂平等<sup>[24]</sup>提及的 Arigin3D Pro 软件三维重建获得智能手术规划效果, 如图 4 所示。

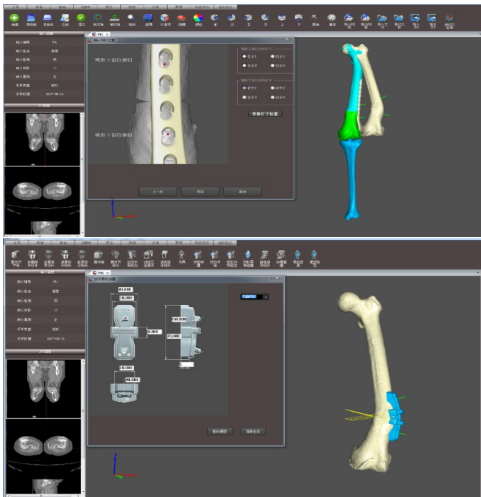


图5 | 模拟  
康复手术矫  
形与导板设  
计

**个性化骨科康复手术导板设计:** 手术导板基于三维重建和手术模拟, 通过数字化设计并 3D 打印而成, 帮助医生在术中实施精准手术, 是精准外科手术的有力工具。在使用自体骨重建缺损的手术中, 将自体骨截取成合适重建的长度具有较大困难, 过程繁琐且耗时<sup>[38]</sup>。利用个性化康复手术导板设计软件辅助可实现移植骨截骨导板为医生规划截骨线和截骨范围, 辅助医生精准截取成多段骨块, 减少磨骨操作, 缩短手术时间, 提高手术安全性。

在个性化骨科康复手术模拟规划中, 骨科康复手术导板被认为是关键之一。由于人体解剖结构的复杂性, 在传统的截骨、假体和螺钉植入手术中医生需要有多年临床经验, 术中需反复进行透视以决定假体螺钉植入通道, 容易造成手术时间过长和误操作等问题, 同时大量 X 射线照射对于患者与医生均会产生伤害<sup>[39]</sup>。结合数字化设计和 3D 打印技术制作的个性化肩关节经皮导板, 克服了传统肩关节穿刺过程中易出现的反复多次穿刺、无法穿刺到病变甚至引起肿瘤病变播散等弊端, 基本实现了肩关节病变手术诊断与手术中的精准定位与穿刺。通过个性化骨科康复手术模拟规划, 对患者行颈椎椎弓根螺钉内固定术前利用其 CT 数据三维建模, 设计并模拟螺钉的最佳进钉通道, 设计并 3D 打印定位导向孔的导向模板辅助手术, 通过对术后效果的评估, 肯定了数字导向模板在椎弓根螺钉固定的实用性和安全性<sup>[40]</sup>。利用曹桂平等<sup>[24]</sup>提及的 Arigin3D Pro 软件三维重建获得模拟康复手术矫形与导板设计效果, 如图 5 所示。

那么, 基于人工智能赋能的康复手术规划设定方案, 利用软件自动参数化设计, 使得个性化康复手术导板与人体骨骼实现高度匹配, 生成个性化康复手术导板, 可极大提高康复手术精度。

**个性化骨科康复植入物设计:** 在现有临床案例中, 考虑假体几何特征的个性化适配仅依靠医生个人的经验而进行, 对于植入体本身的力学属性、生物学表现、植入假体与人体组织之间的关系和作用机制等并不明确, 宿主与植入体之间的契合程度较差。个性化植入假体的个性适配不仅仅是几何尺寸或形态的简单适配, 更多的是力学适配、生理适配, 只

有进一步考虑植入体与宿主组织相互作用的生物力学与生物学适配, 才能达到真正的生理功能适配<sup>[41]</sup>。另外, 用于 3D 打印的材料包括聚合材料、金属材料、陶瓷材料等。常用的聚合物材料主要包括光敏树脂、热塑性塑料及水凝胶等。其中光敏树脂主要有自由基聚合的丙烯酸酯体系; 热塑性塑料有聚丙烯-丁二烯-苯乙烯塑料、聚乳酸、尼龙、聚碳酸酯、聚苯乙烯、聚己内酯、聚苯砜、热塑性聚氨酯、聚醚醚酮等<sup>[42-43]</sup>; 水凝胶主要有天然水凝胶与合成水凝胶。常用的金属材料包括钛、铝、钢、钴、镍、铜等。常用的陶瓷材料包括氧化铝陶瓷、磷酸三钙陶瓷、多孔氮化硅陶瓷等。

通过结合智能水凝胶技术及三维打印技术, 快速设计并制备具有梯度结构的软骨修复植入物, 从而实现骨缺损部位的自动识别与金属植入物三维模型的高效智能设计<sup>[44]</sup>; 构建由智能水凝胶、生物陶瓷、可降解聚合物组成的与软骨缺损部位性能匹配的一系列软骨修复植入物; 明确影响三维结构孔隙尺寸及成型质量的关键工艺参数; 实现 3D 打印植入物的生物修复效果。

**3D 精准打印装备研发及制造:** 根据用于康复医学骨修复材料的设计及性能要求<sup>[45]</sup>, 研发用于医学领域的 3D 打印装备, 包括软骨修复材料的生物 3D 打印机喷头、个性化骨科手术中使用的手术器械及具有梯度结构的骨修复植入物, 解决目前生物 3D 设计软件的自动化程度低、骨科医疗器械性能与缺损部位的匹配度低、植入物内部孔隙结构单一、细胞装载效果不理想等问题。3D 精准打印在骨科康复医学应用中的技术关系链如图 6 所示。

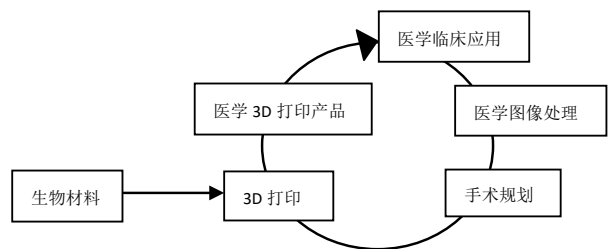


图6 | 3D 精准打印在骨科康复医学应用中的技术关系链

**常用 3D 打印机包括:** 熔融型 3D 打印机, 采用丝状热塑性成形材料, 连续地送入喷头后在其中加热熔融并挤出喷嘴, 逐步堆积成形; 光固化型 3D 打印机, 采用激光一点点照射光固化液态树脂使之固化的方法成型; 激光烧结型 3D 打印机, 采用激光逐点烧结粉末材料, 使包覆于粉末材料外的固体粘接剂或粉末材料本身熔融实现材料的粘接; 激光熔化型 3D 打印机, 利用金属粉末在激光束的热作用下完全熔化、经冷却凝固而成型。

**2.2.2 3D 精准打印技术浸入式骨科康复医学教学** 基于医学 3D 建模数据建立 3D 精准打印技术浸入式骨科康复医学教学系统, 在 3D 系统基础上升级 VR 交互显示系统, 生成模拟手术场景, 将各种模型数据添加到场景中, 用户可通过佩戴 VR 头盔、借助 VR 手柄实现对模型的平移、旋转、缩放、复位等功能, 进行实时交互操作和观察。通过 3D 精准打印技

术浸入式康复医学教学系统，帮助用户可以掌握软件进行图像分割与重构操作、康复术前规划与个性化康复手术导板/康复植入物设计，实现系统软件与3D打印机的无缝对接，培养跨学科医工结合的人才，解决目前医疗器械研发速度慢、产品与患者实际不匹配等缺点。

### 3 小结 Conclusions

3D精准打印技术在骨科康复医学领域的应用是未来康复医学微创、精准、个性化的发展方向<sup>[46-49]</sup>。但是目前的医学3D软件不能满足3D打印的个性化医疗器械的大规模应用要求。例如，传统全膝关节置换可矫正畸形和改善短期的关节功能，但其长期治疗效果的持久性常常不能令人满意。据统计，目前人工膝关节植入物10-15年的生存率只有85%-90%，患者术后不满意比例高达19%<sup>[50-53]</sup>。其原因主要有2点：第一，医生的诊断过程主要凭借肉眼和经验，缺乏实体三维辅助手段；第二，传统的手术实施过程中手术创伤面积大，医生凭借经验进行操作，缺乏辅助治疗的手术规划和个性化医疗器械设计软件。以上基于医生主观经验及观察完成的病情诊断和手术实施过程，直接影响了器械定位的可靠性和手术的精确性，甚至导致手术的失败<sup>[54]</sup>。

文章分析了3D精准打印应用于骨科康复医学的问题和现状，提出了3D精准打印在骨科康复医学领域应用的关键之处；提出了利用医疗3D软件快速精准进行康复医学三维建模、人工智能赋能数字化骨科康复手术规划及自动个性化给骨科康复医疗器械设计，再利用3D打印技术实现个性化骨科康复医疗器械的快速制造，有望提高康复诊疗效率，有效提升个性化康复医疗水平，并带动医学图像处理技术、智能化建模技术、个性化康复医疗器械设计技术、新材料技术、生物3D打印技术、多材质3D打印技术的升级，增强3D精准打印在医学领域和智能制造领域的发展及应用潜力。

**作者贡献：**彭坤进行综述设计，资料收集为彭坤、林一民、甘晓玲、吴治勇，彭坤成文，林一民审核。

**经费支持：**该文章接受了“重庆市自然科学基金(cstc2018jcyjAX0828)、重庆市高等学校青年骨干教师资助计划(2016)”的资助。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：**文章的全部作者声明，在课题研究和文章撰写过程不存在利益冲突。

**写作指南：**该研究遵守《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] 李东阳,郝萱语.3D打印技术在临床医学中的应用进展[J].山东医药,2015(9):100-102.
- [2] NYBERG EL, FARRIS AL, HUNG BP, et al. 3D-Printing technologies for craniofacial rehabilitation, Reconstruction, and regeneration. *Ann Biomed Eng.* 2017;45(1):45-57.
- [3] WEI YC, LIU J. 3D-printed transparent face-masks in the treatment of facial hypertrophic scars of young children with burns. *Burns.* 2017;43(3):19-26.
- [4] 王忠宏,李扬帆,张曼茵.中国3D打印产业的现状及发展思路[J].经济纵横,2013(1):90-93.
- [5] TEN KJ, SMIT G, BREEDVELD P. 3D-printed upper limb prostheses: a review. *Disabil Rehabil Assist Technol.* 2017;12(3):300-314.
- [6] OLSZEWSKI R. Three-dimensional rapid prototyping models in cranio-maxillofacial surgery: systematic review and new clinical applications. *Belg Roy Acad Med.* 2013;11(2):43-77.
- [7] 王燎,戴克戎.骨科个体化治疗与3D打印技术[J].医用生物力学,2014,29(3):193-199.
- [8] WANG XJ, XU SQ, ZHOU S, et al. Topological design and additive manufacturing of porous metals for bone scaffolds and orthopaedic implants: A review. *Biomaterials.* 2016;83:127-141.
- [9] 钟世镇.医用3D打印技术的探索[J].中华创伤骨科杂志,2017,19(2):138-139.
- [10] WIEDING J, WOLF A, BADER R. Numerical optimization of open-porous bone scaffold structures to match the elastic properties of human cortical bone. *J Mech Behav Biomed.* 2014;37(37):56-68.
- [11] LUO Y, ZHAI D, HUAN Z, et al. Three-dimensional printing of hollow-struts-packed bioceramic scaffolds for bone regeneration. *ACS Appl Mater Interact.* 2015;7(43):24377-24383.
- [12] XU N, YE X, WEI D, et al. 3D artificial bones for bone repair prepared by computed tomography-guided fused deposition modeling for bone repair. *ACS Appl Mater Interact.* 2014;6(17):14952-14963.
- [13] COMPTON BG, LEWIS JA. 3D-printing of light weight cellular composites. *Adv Mater.* 2014;26(34):5930-5935.
- [14] FARZADI A, WARAN V, SOLATI-HASHJIN M, et al. Effect of layer printing delay on mechanical properties and dimensional accuracy of 3D printed porous prototypes in bone tissue engineering. *Ceram Int.* 2015;41(7):8320-8330.
- [15] FERLIN KM, PRENDERGST ME, MILLER ML, et al. Influence of 3D printed porous architecture on mesenchymal stem cell enrichment and differentiation. *Acta Mater.* 2016;32:161-169.
- [16] WU C, FAN W, ZHOU Y, et al. 3D-printing of highly uniform CaSiO3 ceramic scaffolds: preparation, characterization and in vivo osteogenesis. *J Mater Chem.* 2012;22(24):12288-12295.
- [17] ZHANG Y, XIA L, ZHAI D, et al. Mesoporous bioactive glass nanolayer-functionalized 3D-printed scaffolds for accelerating osteogenesis and angiogenesis. *Nanoscale.* 2015;7(45):19207-19221.
- [18] HWANG TJ, KIANG C, PAUL M. Surgical applications of 3-dimensional printing and precision medicine. *JAMA Otolaryngol Head Neck Surg.* 2015;141(4):305-306.
- [19] EBERT LC, THALI MJ, ROSS S. Getting in touch-3D printing in forensic imaging. *Forensic Sci Int.* 2011;211(3):1-6.
- [20] AIALI AB, GRIFFIN MF, BUTLER PE. Three-dimensional printing surgical applications. *Eplasty.* 2015;15:e37.
- [21] IGAMI T, NAKAMURA Y, HIROSE T, et al. Application of a three-dimensional print of a liver in hepatectomy for small tumors invisible by intraoperative ultrasonography: preliminary experience. *World J Surg.* 2014;38(12):3163-31666.
- [22] SCHMAUSS D, HAEBERLE S, HAGL C, et al. Three-dimensional printing in cardiac surgery and interventional cardiology: a single-center experience. *Eur J Cardiothorac Surg.* 2015;47(6):1044-1052.
- [23] BAGARIA V, DESHPANDE S, RASALKAR DD, et al. Use of rapid prototyping and three-dimensional reconstruction modeling in the management of complex fractures. *Eur J Radiol.* 2011;80(3):814-820.

- [24] 曹桂平, 张明娇, 刘非, 等. Arigin 3D Pro 软件与 Mimics 软件三维重建模型的精度研究 [J]. 中国组织工程研究, 2018, 22(15): 2384-2389.
- [25] PARTRIDGE R, CONHNSK N, DAVIES JA. In-lab three-dimensional printing: an inexpensive tool for experimentation and visualization for the field of organogenesis. *Organogenesis*. 2012; 8(1): 22-27.
- [26] MULFORD JS, BABAZADEH S, MACKAY N. Three dimensional printing in orthopaedic surgery: A review of current and future applications. *ANZ J Surg*. 2016; 86(9): 648-653.
- [27] JANG J, PARK JY, GAO G, et al. Biomaterials-based 3D cell printing for next-generation therapeutics and diagnostics. *Biomaterials*. 2017; 156: 88-106.
- [28] ELTORAI AE, NGUYEN E, DANIELS AH. Three-dimensional printing in orthopedic surgery. *Orthopedics*. 2015; 38(11): 684-687.
- [29] XIAO J, HUANG W, YANG X, et al. En bloc resection of primary malignant bone tumor in the cervical spine based on 3-dimensional printing technology. *Orthop Surg*. 2016; 8(2): 171-178.
- [30] MOBBS RJ, COUGHLAN M, THOMPSON R, et al. The utility of 3D printing for surgical planning and patient-specific implant design for complex spinal pathologies: case report. *J Neurosurg Spine*. 2017; 26(4): 513-518.
- [31] NYBERG EL, FARRIS AL, HUNG BP, et al. 3D-Printing Technologies for Craniofacial Rehabilitation, Reconstruction, and Regeneration. *Ann Biomed Eng*. 2017; 45(1): 45-57.
- [32] TEN KATE J, SMIT G, BREEDVELD P. 3D-printed upper limb prostheses: a review. *Disabil Rehabil Assist Technol*. 2017; 12(3): 300-314.
- [33] CHA YH, LEE KH, RYU HJ, et al. Ankle-Foot Orthosis Made by 3D Printing Technique and Automated Design Software. *Appl Bionics Biomech*. 2017; 2017: 9610468.
- [34] LI C, YANG M, XIE Y, et al. Application of the polystyrene model made by 3D printing rapid prototyping technology for operation planning in revision lumbar discectomy. *J Orthop Sci*. 2015; 20(3): 475-480.
- [35] ACKLAND DC, ROBINSON D, REDHEAD M, et al. A personalized 3D-printed prosthetic joint replacement for the human temporomandibular joint: from implant design to implantation. *J Mech Behav Biomed Mater*. 2017; 69: 404-411.
- [36] ZERR J, CHATZINOFF Y, CHOPRA R, et al. Three-dimensional printing for preoperative planning of total hip arthroplasty revision: case report. *Skeletal Radiol*. 2016; 45(10): 1431-1435.
- [37] HAMID KS, PAREKH SG, ADAMS SB. Salvage of severe foot and ankle trauma with a 3D printed scaffold. *Foot Ankle Int*. 2016; 37(4): 433-439.
- [38] GALL M, XING LI, XIAOJUN CHEN, et al. Computer-aided planning and reconstruction of cranial 3D implants. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*. 2016: 1179-1183.
- [39] HUANG YH, SEELAUS R, ZHAO L, et al. Virtual surgical planning and 3D printing in prosthetic orbital reconstruction with percutaneous implants: a technical case report. *Int Med Case Rep J*. 2016; 9: 341-345.
- [40] DEKKER TJ, STEELE JR, FEDERER AE, et al. Use of patient-specific 3D-printed titanium implants for complex foot and ankle limb salvage, deformity correction and arthrodesis procedures. *Foot Ankle Int*. 2018; 8: 916-921.
- [41] WANG B, HAO Y, PU F, et al. Computer-aided designed, three dimensional-printed hemipelvic prosthesis for periacetabular malignant bone tumour. *Int Orthop*. 2018; 3: 687-694.
- [42] 何岷洪, 宋坤, 莫宏斌, 等. 3D 打印光敏树脂的研究进展 [J]. 功能高分子学报, 2015, 28(1): 102-108.
- [43] 罗文峰, 杨雪香, 敖宁建. 生物医用材料的 3D 打印技术与发展 [J]. 材料导报, 2016, 30(13): 81-86.
- [44] 张常贵, 杨柳, 段小军. 3D 打印技术在关节外科的临床应用进展 [J]. 中国矫形外科杂志, 2019, 27(16): 1497-1501.
- [45] 史建峰, 王涵, 王迎, 等. 3D 生物打印技术的发展与应用 [J]. 医疗装备, 2017, 30(17): 202-204.
- [46] SUMMIT S. "Additive manufacturing of a prosthetic limb", rapid prototyping of biomaterials, principles and applications. Series: Wood Head Publishing Series on Biomaterials. 2014: 285-296.
- [47] MA H, LUO J, SUN Z, et al. 3D printing of biomaterials with mussel-inspired nanostructures for tumor therapy and tissue regeneration. *Biomaterials*. 2016; 111: 138-148.
- [48] BILLIET T, VANDENHAUTE M, SCHELFHOUT J, et al. A review of trends and limitations in hydrogel-rapid prototyping for tissue engineering. *Biomaterials*. 2012; 33(26): 6020-6041.
- [49] GERMANY EI, PINO EJ, AQUEVEQUE PE. Myoelectric intuitive control and transcutaneous electrical stimulation of the forearm for vibrotactile sensation feedback applied to a 3D printed prosthetic hand. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*. 2016; 2016: 5046-5050.
- [50] 刘非, 邱冰, 薛向东, 等. 基于 3D 打印技术的个性化外固定支具设计 [J]. 中国矫形外科杂志, 2016, 24(24): 2260-2263.
- [51] SING SL, AN J, YEONG WY, et al. Laser and electron-beam powder-bed additive manufacturing of metallic implants: A review on processes, materials and designs. *J Orthop Res*. 2016; 34(3): 369-385.
- [52] VENTOLA CL. Medical applications for 3d printing: current and projected uses. *Phys Ther*. 2014; 39(10): 704-711.
- [53] WON SH, LEE YK, HA YC, et al. Improving pre-operative planning for complex total hip replacement with a Rapid Prototype model enabling surgical simulation. *Bone Joint J*. 2013; 95B(11): 1458-1463.
- [54] 苏宏伦, 李剑, 莫中军, 等. 个性化植入假体 — 骨修复、骨置换的未来趋势 [J]. 中国医疗器械信息, 2017, 23(7): 19-22.