

人工智能在骨缺损骨修复中的应用

陆文锋, 唐经励*

柳州市工人医院(广西医科大学第四附属医院)骨科, 广西 柳州

收稿日期: 2025年12月27日; 录用日期: 2026年1月21日; 发布日期: 2026年1月28日

摘要

随着人工智能(AI)在医学领域的应用越来越广泛与深入,尤其在骨科领域中,AI通过深度学习后利用已有的医学数据集后再建立训练模型图像解释来提高临床诊断准确性及术前规划、术中实时评估。因此,利用人工智能对骨缺损部分进行骨修复在未来会是一种大趋势。本文就人工智能技术在骨缺损骨修复方面的应用与挑战作一综述,旨在引进国内外先进AI理念及先进技术为骨缺损患者提供精准化、个性化及小创伤治疗。

关键词

人工智能, AI影像诊断, 骨修复, C型臂2D-3D透视, 3D打印技术

The Application of Artificial Intelligence in the Repair of Bone Defects

Wenfeng Lu, Jingxun Tang*

Department of Orthopedics, Liuzhou Workers' Hospital (The Fourth Affiliated Hospital of Guangxi Medical University), Liuzhou Guangxi

Received: December 27, 2025; accepted: January 21, 2026; published: January 28, 2026

Abstract

As the application of artificial intelligence (AI) in the medical field becomes increasingly widespread and in-depth, especially in orthopedics, AI utilizes deep learning to leverage existing medical datasets and establish training models for image interpretation to enhance clinical diagnostic accuracy, pre-operative planning, and intraoperative real-time assessment. Therefore, the use of AI for bone repair in cases of bone defects is expected to become a significant trend in the future. This article reviews the application and challenges of AI technology in bone defect repair, aiming to introduce advanced AI concepts and technologies from both domestic and international sources to provide precise, personalized,

*通讯作者。

and minimally invasive treatments for patients with bone defects.

Keywords

Artificial Intelligence, AI Imaging Diagnosis, Bone Repair, C-Arm 2D-3D Imaging, 3D Printing Technology

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

人工智能(artificial intelligence, AI)技术是利用计算机技术、控制技术及数理逻辑等模拟人类智能。它集大数据于一身,再通过深度学习创建一个模型来描述数据元素之间的关联并更加精准预测未来事件,这就意味着输入相关信息后即可发现数据中的关联,为患者提供更加个性化、更加精准的治疗方案。并且 AI 通过深度学习平台关联到大数据的关系网并对其进行处理,造就了这种大数据的统计分析更加适合复杂的临床实践。与此同时,相较于传统机器学习,深度学习采用新算法,突破了传统机器学习瓶颈,使 AI 领域得到了进一步发展。随着 AI 技术的革新,医疗领域也逐步被 AI 技术渗透进来,尤其是 AI 在外科领域的应用不论是外科医生还是患者都看到了新的治疗手段以及手术安全性能的提升,降低了外科医生因做手术的心理压力和患者对外科医生技术的怀疑。而 AI 在骨科领域也是蓬勃发展,为骨科进入微创化提供了重要的技术支持。其中骨缺损后的骨修复治疗在 AI 领域也提上了日程。

2. AI 影像辅助诊断技术

2.1. AI 在骨科的应用趋势

AI 技术的广泛发展,尤其是 AI 通过深度学习后,其在医学影像应用的诊断水平丝毫不弱于高级影像医生的诊断水准[1]。深度学习通过数据库分析处理数据,尤其对于高维复杂数据分析相对于其他设备更有优势,而在医学影像方面,通过卷积神经网络(CNN)、CARNet、FARNet、Faster-RCNN、YOLO (you only look once)、SSD (single shot detection)、FCN、UNet 等算法在疾病辅助诊断[2] [3]、病灶检测[4] [5]、图像分割[6] [7]和图像配准[8] [9]已经取得显著成果。尤其是 CNN 采用了现代新架构后使得深度学习更加有效率[10];与此同时,现代架构的 CNN 也可以作为特征提取器保持原有影像像素的同时采集该影像图片中特征性[11]的因素,使得 AI 影像诊断更加准确[12]。2022, Wang [13]等为评估深度学习 CNN 模型的信息对 BA 准确性,通过不同等级的专家对 316 例 4~18 岁孩子的 X 线片的评估,结果显示 AI 辅助提高了同水平专家阅片的准确性和一致性。而根据相关研究进展,深度学习在医学图像修复与切割方面会是一个更好或者能够提供更加准确的结果。因为修复可以去除噪点,分割可以提取特定兴趣区域;经过修复和分割医学图片后提供准确诊断及治疗。而且,TLR-CNN 和 Stat-CNN 有望实现更好的 PSNR、噪声抑制、伪影抑制和提高整体图像质量。在分割过程中,LCP 网络在细胞轮廓分割中实现了 98.12%的 Dice 评分以及 98.95%的灵敏度[14],这也就表明了一种未来 AI 在医学影像更加准确诊断方面的一种趋势方向。故在骨缺损骨修复诊断方面, AI 影像诊断水准也会随着相应的 AI 医学影像诊断技术的发展得到极大提升。我们都知道,骨缺损在影像学上主要表现为缺损部位不规则骨缺损,边缘模糊,周围骨质破坏等。这对于我们高级影像医生来说难度不大,但是骨缺损修复后修复材料与机体骨本身契合度在影像资料

上的高准确性判断对于影像科医生来说是有挑战性的, 只因在早期肉眼很难分辨修复材料与局部机体骨的排异反应的变化, 同时也有很大概率是未来 AI 在骨缺损修复后影像复查技术方面所走的方向。

2.2. 宿主骨缺损修复术中 AI 辅助下的 C 型臂 2D-3D 透视

在常规手术中, 很多情况下, 术中透视采用的基本是可移动的 C 臂常规二维 X 线成像, 这限制了骨折复位和内固定位置估值的准确性。虽然可以通过反复透视获取正确的解剖投影来指导、监测和评估手术结果, 但是代价是辐射暴露和时间[15]。对于骨缺损来说, 要求的便是植入物螺钉正确位置的判断以及植入修复材料与周围解剖位置的判断。为满足上述要求以及术中透视的解剖视野更加明朗, 可以采用术中 C 型臂系统 2D-3D 成像, 使得术中宿主骨修复材料植入的螺钉位置正确牢固和植入材料的正常解剖关系。它的机制是: 在进行 3D 采集前, 将患者扫描目标居中, 通常从前后(AP)和内测(ML)视图进行低剂量的 X 线采集, 然后从非准直的 AP 和 ML 透视图像中提取 2D 患者轮廓。然后将这些 2D 轮廓组合起来以估计患者的体积模型。在最终获取的 C 臂旋转视图上向前投影模型的形状, 可在投影域中提供患者边界信息。通过这种方式, 我们可以通过强制外推的线轮廓在已知的患者边界结束, 从 3D 形状模型估计中得出, 从而大大提高图像质量[16]。在此基础上, 加入 AI 辅助下处理该 2D-3D 图像后, 同时融合 C 型臂与深度传感器结合可以通过 2D-2D 平面变换实现新的 3D-2D 投影实现端到端校准[17], 这在提高成像任务性能的同时也能更加直观辨别术中骨修复材料是否正确植入有效位置、螺钉植入位置以及对接正确的解剖关系, 而且基于 AI 数据库的识别能力, 在术中就能 AI 判别以及预测要点位置[18], 这不仅减少反复校准次数和校准带来的不必要额外钻孔创伤, 还能减少辐射暴露和时间[19]。

3. 骨缺损 AI 联合 3D 打印技术骨修复

3.1. AI 辅助下 3D 打印技术在骨缺损修复中的材料优势

临界大小的骨缺损通常由高能量损伤或病理性骨折引起, 这在临床环境中, 仍然是一个巨大的挑战, 需要骨移植。在所有临床可用的骨移植物中, 自体移植被认为是骨替代的金标准, 尽管主要限制是可用性差、供体部位发病率高和手术时间延长[20]。同种异体移植物或异体移植物的应用也是由于存在例如免疫反应并发症、疾病传播、缺乏成骨特性等并发症可能导致骨骼吸收、不愈合和失败[21][22]。而骨缺损的愈合是一个多方面的过程, 其需要几个基本要素: 骨传导支架或基质; 反应性成骨细胞; 生物活性生长因子; 充足的血液供应。骨传导材料是那些提供促进趋化性、宿主骨沉淀和宿主毛细血管与血管周围向内的生长结构和微环境的材料。骨诱导材料是那些提供生长因子的材料, 包括: 蛋白质(BMP)、成纤维细胞生长因子(FGF)、血管内皮生长因子(VEGF)和血小板衍生生长因子(PDGF) [23]。而移植物具有成骨特性, 它必须同时拥有骨传导和骨诱导功能, 并能递送间充质干细胞(MSCs)、成骨细胞和骨细胞[24]。然而随着技术与挖掘, 3D 打印技术已成为解决这些限制的潜在技术[25], 尤其是 AI 崛起后可以通过扩大其适用性来推动这些技术向前发展, 通过选择一些特性、功能的有前途的材料来增加智能材料的设计空间, 缩短生产时间。作为一种替代治疗方案, 3D 打印技术的材料, 例如钛合金材料、高分子材料、合成羟基磷灰石(HA)、 β -磷酸三钙(β -TCP)及其复合材料等与正常骨骼成分相似[26], 可促进与骨头的嵌合[27]。但是, 这些材料只能应用在一些无承重部位的临界缺损的小修补[28][29], 因为它们不仅缺少该有的韧性和机械硬度[30], 而且还无法填充或桥接一些解剖性状或结构的大尺寸缺损[31]。这就要求需要一个生物合成材料的并具有一定骨亲和性的强度性、机械性的支架。

3.2. AI 辅助下 3D 打印技术支架

3D 打印技术能够根据骨缺损的大小和形状定制支架, 并且能够创建刺激和增强修复过程的支架。在

骨组织工程中,理想的支架材料应具备以下条件:(1) 骨传导性:材料为新组织生长提供通道或介质的能力。(2) 骨诱导性:该材料能刺激骨组织的生长。(3) 良好的生物相容性:该材料能促进种子细胞的粘附、增殖和分化。(4) 生物降解性好。(5) 足够的机械性能。(6) 三维多孔结构:可为种子细胞的生长提供空间。(7) 易于加工和灭菌[32]。而对于支架的设计,应考虑以下三个方面:(1) 它可以为细胞的粘附、分化、增殖和迁移提供基础。支架的孔径和结构、孔隙率和表面化学是影响因素。(2) 具有合适的机械强度。(3) 符合替换部分的解剖形态[33][34]。此外,一般认为 3D 骨支架的孔隙率应大于 40%~60%,以促进细胞的快速扩散和细胞营养物质的流动,以及细胞的转移[35]。因此,在设计和制备支架时,应注意骨组织工程支架的要求(表 1),并选择最合适的材料。

Table 1. The relationships between scaffold properties (Porosity, Surface Area, and Elastic Modulus) and mechanical and biological factors [36]

表 1. 支架的性能(孔隙率、表面积和弹性模量)与机械和生物因素之间的关系[36]

支架	机械因素	生物因素
孔隙度	负相关。孔隙率增加导致机械性能下降。	正相关。孔隙率增加可改善生物活性,包括细胞生长以及营养物质的运输和分配。
表面积	负相关。表面积增加导致支架降解更快。	正相关。增加的表面积可以增加细胞的初始粘附。
弹性模量	正相关。增加的弹性模量使脚手架更坚固,并避免了过度变形。	弹性模量的变化会导致不同的机械刺激,进而改变组织的生长速率和类型。

Cui 等[37]开发的光聚合喷墨生物打印系统可以在打印的同时实现交联的打印效果,并成功打印了负载人类软骨细胞的光交联聚合物。乙二醇二甲基丙烯酸酯(PEGDMA)支架的压缩模量为(395.73 ± 80.40) kPa,接近天然人体软骨的性能范围。对支架进行定量 PCR,检测人 I 型胶原、II 型胶原和蛋白多糖的基因表达。结果发现,3D 打印软骨支架中 II 型胶原蛋白和蛋白多糖的表达水平显著高于注塑成型软骨支架中。这一结果表明,3D 打印的软骨支架可以促进软骨细胞外基质的分泌和软骨的形成。Xu *et al.* [38]结合静电纺丝和喷墨打印打印多层软骨结构,获得的杂交支架可以保持打印细胞的体内和体外活性,同时具有更高的机械强度。支架的体内实验结果表明,它可以促进血管膜的发育、软骨细胞的增殖和腔隙的发育,而不会失去完整性。激光辅助生物打印能够改善了喷墨和挤出生物打印的一些缺点,它消除了 3D 打印支架当中存在的剪切应力诱导细胞损伤和死亡的问题。理想状态下,临床医生可以利用患者肢体的 CT 来生成定制的 3D 打印支架,以适应所需的缺损尺寸,并用生长因子、干细胞或基因操纵子或成骨细胞的能力,以达到完全融入宿主骨,并最终允许适当骨重塑进行吸收[25]。术前 AI 的 3D 打印技术打造符合宿主生理的全真模型并初步确定植入物的大小以及准确评估描述体内条件及植入物[39]与周围软组织解剖结构,从而制作出符合患者骨修复材料的假体[40]。或者利用 AI 辅助的 3D 打印技术创建骨修复支架,尤其是一些增材制造(AM),在创伤与骨科手术中的未来相对光明[41],以促进患者骨缺损部位修补材料与宿主骨完全融合达到骨愈合的目的。与传统的 3D 打印技术相比,3D 打印在 AI 的帮助下能够自行预测、调整和控制参数,从而降低出错风险[42],尤其是对于不规则和复杂的严重骨缺损的修复极其友好[43]。

4. AI 驱动 的骨缺损修复全流程：从医学影像到个性化植入物

人工智能在骨缺损修复中的最大整合价值体现在其能够贯通从医学影像获取、损伤区域理解、三维结构重建,到定制植入物设计与制造的完整流程。本节系统阐述 AI 在各环节中的作用与信息流动逻辑。

4.1. 影像数据获取与自动分割

流程起点为 CT 或 MRI 影像。传统人工分割费时费力, 而深度学习(如 U-Net、nnU-Net)可实现对骨皮质、骨松质及缺损区域的自动精准分割。AI 模型不仅提升速度, 还能减少不同医生之间的操作差异。数据流: 影像输入→AI 自动识别骨边界与缺损→结构化三维点云/体素输出。

4.2. 三维重建与表面建模

基于自动分割结果, AI 辅助算法(如形状先验模型、Implicit surface reconstruction)可生成高精度骨三维模型, 避免传统重建中的台阶伪影和表面噪声。数据流: 分割体素→AI 连续表面拟合→高保真骨缺损模型。

4.3. 力学仿真与植入物设计优化

骨缺损修复不仅依赖填补缺损, 还需分析植入物力学性能。AI 驱动的仿真模型可快速预测植入物在不同材料、孔隙结构与力学负荷下的表现, 形成“仿真反馈-设计优化”闭环。数据流: 三维模型→应力分布预测→基于拓扑优化或生成式 AI 的支架设计→个性化优化方案。

4.4. 个性化植入物生成与 3D 打印参数优化

最终设计通过增材制造(AM)实现。AI 可自动优化打印路径、层厚、能量输入和材料分布, 提高成品质量并降低失败率。数据流: 优化设计文件(STL/AMF)→AI 打印参数推荐→个性化修复支架/植入物成形。

4.5. 术中导航与术后评估

AI 还可在术中实现模型与实际患者解剖的配准, 辅助精确放置植入物; 术后基于随访影像监测骨结合情况, 实现全生命周期管理。

综上, AI 并非仅改善单个环节, 而是构建了一个从影像到修复材料的端到端解决方案, 实现真正意义上的“智能骨修复”。

5. 总结

综上所述, 人工智能(AI)在骨缺损修复中应用的虽然也会随着技术发展越来越广泛深入, 但是就目前而言仍有诸多不足与挑战。

5.1. 趋势与前景

随着技术发展越发深快, 人工智能(AI)融入到骨缺损修复的手术中也将愈发深入。首先就是 3D 打印技术这一块。尽管 3D 打印结构成功模仿了复杂的解剖结构, 但是从拓扑学结构来看, 3D 打印的医学材料通常是静态的, 无法在身体内部环境中动态响应或转动[44], 所以在宿主骨缺损修复过程中, 因为提前的设计模型固定, 有时候可能需要术前打磨该模型才能契合宿主骨解剖关系, 而且 3D 打印通常是 STL 格式, 打印需要时间。针对此 3D 静态缺陷, Skylar Tibbitts [45]首次提出 3D 打印与转动相结合[46][47], 即 4D 的产生。4D 打印材料的动态特性对于这些骨缺损植入物来说是一条很具有吸引的道路[48]。虽然 4D 打印的动态材料仍处于发展的初步阶段, 但是 4D 打印能够制造出动态响应外部刺激的结构, 而且在 AI 的辅助下, 4D 打印能够将材料与时间结合, 可节省 80%的时间[49]。与此同时, 在人工智能(AI)的辅助下, 4D 打印允许直接在目标表面上原位打印, 实现人体微观结构的高保真度[44]。另外, 物联网、机器人和 AI 的结合, 5D 技术被认为是未来先进技术, 而且使用精确增材制造技术制备创新结构和固体物质的最革命性和最强大的制造方法之一。它抓住了人们的想象力, 具有生产灵活设计和制造创新产

品的潜力, 具有高度复杂性和速度。该技术在 AI(人工智能)的帮助下, 有助于实时传感、适应变化和预测打印状态[49]。尤其是人工智能(AI)将承担 5D 的角色, 以增强 3D 和 4D 打印在生物医学领域及其他领域开发智能系统的有效性[44]。相信未来在 AI 的辅助下, 3D、4D、5D 打印将为宿主骨缺损的修复提供更加优质、契合宿主骨本身体质的治疗。

5.2. 不足、挑战或待解问题

与传统制造方法相比, 3D 打印技术拥有显著优势, 但是要想在医疗领域广泛使用, 必须解决一些挑战, 其中材料选择就是挑战之一。增材制造所用的材料必须具有生物相容性、可消毒以及最重要的就是人类使用安全。此外, 必须确定和开发的材料能够承受人体恶劣环境的新型生物相容性、可消毒材料[50]。其次, 准确性和精密度也是 3D 打印技术在骨缺损修复中的重要因素。医疗领域对增材制造零件要求也很高, 尤其是在大规模生产中, 医疗部件, 换句话说就是骨修复材料的部件的公差必须非常严格, 任何偏离所需规格的行为都可能对患者造成重大后果, 而达到所需的要求必须在 3D 打印中解决。此外, 该技术相关成本仍然很高, 这对于很多医疗机构来说可能令人望而却步; 同时, 3D 打印部件的后处理和精加工也会增加总成本[51]-[54]。

另外, 当物联网和人工智能用于 3D 打印时要面临的挑战之一便是安全标准, 以便确保 3D 打印技术在骨缺损修复材料的安全高效使用。材料、设计、打印工艺、测试和验证、后处理和质量控制的标准化有助于克服挑战并加速 3D 打印在骨缺损修复材料的采用。遵守这些标准需要 3D 打印专家、医疗专业人员和监管机构之间的密切合作, 以确保设备满足所有要求[55]。总体而言, 虽然增材制造技术为医疗应用提供了许多好处, 但必须解决这些挑战才能在行业中广泛采用。为了应对这些挑战, 研究人员和制造商正在开发新材料, 优化打印参数, 并改进设计和后处理技术, 以确保骨缺损修复增材制造的准确性和精密度。正在进行的研究和开发, 以及工业界、政府和学术界之间的合作, 可以帮助克服这些挑战并加速增材制造技术在医疗领域的采用[56] [57]。相信在未来这些问题能够一一解决, 使骨缺损修复材料和技术能够更上一层楼, 为患者提供更加优质的治疗服务。

5.3. 研究意义

本研究的意义在于系统性地梳理了人工智能这一前沿技术在骨缺损修复这一具体临床难题中的应用, 将影像诊断与材料制造两个关键环节联系起来, 为骨科医生、生物材料研究者和 AI 工程师提供了跨学科的知识图景。

同时, 本综述进一步强调了 AI 技术在实现从医学影像数据到最终个性化植入物生成全过程中的驱动力, 包括自动分割、三维建模、力学仿真以及支架优化等模块的协同作用, 展示了 AI 在重构骨缺损解决方案中的系统整合优势。

此外, 为加强研究的临床现实意义, 本研究还讨论了 AI 在骨缺损修复中的临床转化障碍, 包括: (1) AI 算法与 3D 打印植入物的法规审批路径不明确; (2) 可解释性 AI (XAI) 的缺失限制外科医生对模型预测的信任度; (3) 个性化植入物与 AI 流程部署成本高昂; (4) AI 辅助流程落地对医疗系统提出较高要求。

基金项目

柳州市科技局项目, 课题号: 2024PA0101A010。

参考文献

- [1] Olczak, J., Fahlberg, N., Maki, A., Razavian, A.S., Jilert, A., Stark, A., *et al.* (2017) Artificial Intelligence for Analyzing Orthopedic Trauma Radiographs. *Acta Orthopaedica*, **88**, 581-586. <https://doi.org/10.1080/17453674.2017.1344459>

- [2] von Schack, C.E., Wilhelm, N.J., Schäfer, V.S., Leonhardt, Y., Gassert, F.G., Foreman, S.C., *et al.* (2021) Multitask Deep Learning for Segmentation and Classification of Primary Bone Tumors on Radiographs. *Radiology*, **301**, 398-406. <https://doi.org/10.1148/radiol.2021204531>
- [3] Choi, H., Kim, Y.K., Yoon, E.J., Lee, J. and Lee, D.S. (2019) Cognitive Signature of Brain FDG PET Based on Deep Learning: Domain Transfer from Alzheimer's Disease to Parkinson's Disease. *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*, **47**, 403-412. <https://doi.org/10.1007/s00259-019-04538-7>
- [4] Ren, S., He, K., Girshick, R. and Sun, J. (2017) Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **39**, 1137-1149. <https://doi.org/10.1109/tpami.2016.2577031>
- [5] Yan, K., Tang, Y., Peng, Y., Sandfort, V., Bagheri, M., Lu, Z., *et al.* (2019) MULAN: Multitask Universal Lesion Analysis Network for Joint Lesion Detection, Tagging, and Segmentation. In: Shen, D.G., *et al.*, Eds., *Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention—MICCAI 2019*, Springer International Publishing, 194-202. https://doi.org/10.1007/978-3-030-32226-7_22
- [6] Shelhamer, E., Long, J. and Darrell, T. (2017) Fully Convolutional Networks for Semantic Segmentation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **39**, 640-651. <https://doi.org/10.1109/tpami.2016.2572683>
- [7] Tajbakhsh, N., Jeyaseelan, L., Li, Q., Chiang, J.N., Wu, Z. and Ding, X. (2020) Embracing Imperfect Datasets: A Review of Deep Learning Solutions for Medical Image Segmentation. *Medical Image Analysis*, **63**, Article ID: 101693. <https://doi.org/10.1016/j.media.2020.101693>
- [8] Balakrishnan, G., Zhao, A., Sabuncu, M.R., *et al.* (2019) VoxelMorph: A Learning Framework for Deformable Medical Image Registration. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, **38**, 1788-1800.
- [9] Haskins, G., Kruger, U. and Yan, P. (2020) Deep Learning in Medical Image Registration: A Survey. *Machine Vision and Applications*, **31**, 1-18. <https://doi.org/10.1007/s00138-020-01060-x>
- [10] Dutta, P., Upadhyay, P., De, M. and Khalkar, R.G. (2020) Medical Image Analysis Using Deep Convolutional Neural Networks: CNN Architectures and Transfer Learning. 2020 *International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT)*, Coimbatore, 26-28 February 2020, 175-180. <https://doi.org/10.1109/icit48043.2020.9112469>
- [11] Sistaninejad, B., Rasi, H. and Nayeri, P. (2023) A Review Paper about Deep Learning for Medical Image Analysis. *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, **2023**, Article ID: 7091301. <https://doi.org/10.1155/2023/7091301>
- [12] Chalmers, B.P., Borsinger, T.M., Quevedo Gonzalez, F.J., Vigdorchik, J.M., Haas, S.B. and Ast, M.P. (2023) Referencing the Center of the Femoral Head during Robotic or Computer-Navigated Primary Total Knee Arthroplasty Results in Less Femoral Component Flexion than the Traditional Intramedullary Axis. *The Knee*, **44**, 172-179. <https://doi.org/10.1016/j.knee.2023.08.006>
- [13] Wang, X., Zhou, B., Gong, P., Zhang, T., Mo, Y., Tang, J., *et al.* (2022) Artificial Intelligence-Assisted Bone Age Assessment to Improve the Accuracy and Consistency of Physicians with Different Levels of Experience. *Frontiers in Pediatrics*, **10**, Article ID: 818061. <https://doi.org/10.3389/fped.2022.818061>
- [14] Anandharaj, H.C., Hephzibah, R., Kowsalya, G., Jayanthi, R. and Chandy, D.A. (2023) Review on Deep Learning Methodologies in Medical Image Restoration and Segmentation. *Current Medical Imaging Formerly Current Medical Imaging Reviews*, **19**, 844-854. <https://doi.org/10.2174/1573405618666220407112825>
- [15] Kausch, L., Thomas, S., Kunze, H., Norajitra, T., Klein, A., Ayala, L., *et al.* (2022) C-Arm Positioning for Standard Projections during Spinal Implant Placement. *Medical Image Analysis*, **81**, Article ID: 102557. <https://doi.org/10.1016/j.media.2022.102557>
- [16] Xia, Y., Bauer, S., Maier, A., Berger, M. and Hornegger, J. (2015) Patient-Bounded Extrapolation Using Low-Dose Priors for Volume-of-Interest Imaging in C-Arm CT. *Medical Physics*, **42**, 1787-1796. <https://doi.org/10.1118/1.4914135>
- [17] Hosseinian, S., Arefi, H. and Navab, N. (2019) Toward an End-to-End Calibration for Mobile C-Arm in Combination with a Depth Sensor for Surgical Augmented Reality Applications. *Sensors*, **20**, Article No. 36. <https://doi.org/10.3390/s20010036>
- [18] 徐松, 叶哲伟. 人工智能在骨科的应用现状及前景[J]. 中国医刊, 2019, 54(2): 117-119.
- [19] Sheth, N.M., De Silva, T., Uneri, A., Ketcha, M., Han, R., Vijayan, R., *et al.* (2020) A Mobile Isocentric C-Arm for Intraoperative Cone-Beam CT: Technical Assessment of Dose and 3D Imaging Performance. *Medical Physics*, **47**, 958-974. <https://doi.org/10.1002/mp.13983>
- [20] Keating, J.F., Simpson, A.H.R.W. and Robinson, C.M. (2005) The Management of Fractures with Bone Loss. *The Journal of Bone and Joint Surgery. British Volume*, **87**, 142-150. <https://doi.org/10.1302/0301-620x.87b2.15874>
- [21] Athanasiou, V.T., Papachristou, D.J., Panagopoulos, A., Saridis, A., Scopa, C.D. and Megas, P. (2010) Histological

- Comparison of Autograft, Allograft-DBM, Xenograft, and Synthetic Grafts in a Trabecular Bone Defect: An Experimental Study in Rabbits. *Medical Science Monitor*, **16**, BR24-31.
- [22] Dimitriou, R., Jones, E., McGonagle, D. and Giannoudis, P.V. (2011) Bone Regeneration: Current Concepts and Future Directions. *BMC Medicine*, **9**, Article No. 66. <https://doi.org/10.1186/1741-7015-9-66>
- [23] Roberts, T.T. and Rosenbaum, A.J. (2012) Bone Grafts, Bone Substitutes and Orthobiologics: The Bridge between Basic Science and Clinical Advancements in Fracture Healing. *Organogenesis*, **8**, 114-124. <https://doi.org/10.4161/org.23306>
- [24] Khan, S.N., Cammisa, F.P., Sandhu, H.S., Diwan, A.D., Girardi, F.P. and Lane, J.M. (2005) The Biology of Bone Grafting. *Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons*, **13**, 77-86. <https://doi.org/10.5435/00124635-200501000-00010>
- [25] Mayfield, C.K., Ayad, M., Lechtholz-Zey, E., Chen, Y. and Lieberman, J.R. (2022) 3D-Printing for Critical Sized Bone Defects: Current Concepts and Future Directions. *Bioengineering*, **9**, Article No. 680. <https://doi.org/10.3390/bioengineering9110680>
- [26] Zhang, L., Yang, G., Johnson, B.N. and Jia, X. (2019) Three-Dimensional (3D) Printed Scaffold and Material Selection for Bone Repair. *Acta Biomaterialia*, **84**, 16-33. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2018.11.039>
- [27] Välimäki, V.V. and Aro, H.T. (2006) Molecular Basis for Action of Bioactive Glasses as Bone Graft Substitute. *Scandinavian Journal of Surgery*, **95**, 95-102. <https://doi.org/10.1177/145749690609500204>
- [28] Sasaki, G., Watanabe, Y., Miyamoto, W., Yasui, Y., Morimoto, S. and Kawano, H. (2017) Induced Membrane Technique Using Beta-Tricalcium Phosphate for Reconstruction of Femoral and Tibial Segmental Bone Loss Due to Infection: Technical Tips and Preliminary Clinical Results. *International Orthopaedics*, **42**, 17-24. <https://doi.org/10.1007/s00264-017-3503-5>
- [29] Sumer, M., Keles, G.C., Cetinkaya, B.O., Balli, U., Pamuk, F. and Uckan, S. (2013) Autogenous Cortical Bone and Bioactive Glass Grafting for Treatment of Intraosseous Periodontal Defects. *European Journal of Dentistry*, **7**, 6-14.
- [30] Daga, D., Mehrotra, D., Mohammad, S., Chandra, S., Singh, G. and Mehrotra, D. (2018) Tentpole Technique for Bone Regeneration in Vertically Deficient Alveolar Ridges: A Prospective Study. *Journal of Oral Biology and Craniofacial Research*, **8**, 20-24. <https://doi.org/10.1016/j.jobcr.2017.11.002>
- [31] Jardini, A.L., Larosa, M.A., Filho, R.M., Zavaglia, C.A.d.C., Bernardes, L.F., Lambert, C.S., et al. (2014) Cranial Reconstruction: 3D Biomodel and Custom-Built Implant Created Using Additive Manufacturing. *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery*, **42**, 1877-1884. <https://doi.org/10.1016/j.jcms.2014.07.006>
- [32] Lee, M. and Wu, B.M. (2012) Recent Advances in 3D Printing of Tissue Engineering Scaffolds. In: *Methods in Molecular Biology*, Humana Press, 257-267. https://doi.org/10.1007/978-1-61779-764-4_15
- [33] J. Panetta, N., M. Gupta, D. and T. Longaker, M. (2010) Bone Regeneration and Repair. *Current Stem Cell Research & Therapy*, **5**, 122-128. <https://doi.org/10.2174/157488810791268618>
- [34] Brydone, A.S., Meek, D. and MacLaine, S. (2010) Bone Grafting, Orthopaedic Biomaterials, and the Clinical Need for Bone Engineering. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, **224**, 1329-1343. <https://doi.org/10.1243/09544119jeim770>
- [35] Will, J., Melcher, R., Treul, C., Travitzky, N., Kneser, U., Polykandriotis, E., et al. (2008) Porous Ceramic Bone Scaffolds for Vascularized Bone Tissue Regeneration. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, **19**, 2781-2790. <https://doi.org/10.1007/s10856-007-3346-5>
- [36] Zhang, Q., Zhou, J., Zhi, P., Liu, L., Liu, C., Fang, A., et al. (2023) 3D Printing Method for Bone Tissue Engineering Scaffold. *Medicine in Novel Technology and Devices*, **17**, Article ID: 100205. <https://doi.org/10.1016/j.medntd.2022.100205>
- [37] Cui, X., Breitenkamp, K., Finn, M.G., Lotz, M. and D'Lima, D.D. (2012) Direct Human Cartilage Repair Using Three-Dimensional Bioprinting Technology. *Tissue Engineering Part A*, **18**, 1304-1312. <https://doi.org/10.1089/ten.tea.2011.0543>
- [38] Xu, T., Binder, K.W., Albanna, M.Z., Dice, D., Zhao, W., Yoo, J.J., et al. (2012) Hybrid Printing of Mechanically and Biologically Improved Constructs for Cartilage Tissue Engineering Applications. *Biofabrication*, **5**, Article ID: 015001. <https://doi.org/10.1088/1758-5082/5/1/015001>
- [39] Xie, R., Pal, V., Yu, Y., Lu, X., Gao, M., Liang, S., et al. (2024) A Comprehensive Review on 3D Tissue Models: Biofabrication Technologies and Preclinical Applications. *Biomaterials*, **304**, Article ID: 122408. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2023.122408>
- [40] Ying, J., Cheng, L., Li, J., Wu, B., Qiu, X., Zhang, T., et al. (2023) Treatment of Acetabular Bone Defect in Revision of Total Hip Arthroplasty Using 3D Printed Tantalum Acetabular Augment. *Orthopaedic Surgery*, **15**, 1264-1271. <https://doi.org/10.1111/os.13691>
- [41] Zamborsky, R., Kilian, M., Jacko, P., Bernadic, M. and Hudak, R. (2019) Perspectives of 3D Printing Technology in

- Orthopaedic Surgery. *Bratislava Medical Journal*, **120**, 498-504. https://doi.org/10.4149/bll_2019_079
- [42] A, L., Elsen, R. and Nayak, S. (2024) Artificial Intelligence-Based 3D Printing Strategies for Bone Scaffold Fabrication and Its Application in Preclinical and Clinical Investigations. *ACS Biomaterials Science & Engineering*, **10**, 677-696. <https://doi.org/10.1021/acsbiomaterials.3c01368>
- [43] Huang, P., Yang, P., Liu, K., Tao, W., Tao, J. and Ai, F. (2022) Evaluation of “Surgery-Friendly” Bone Scaffold Characteristics: 3D Printed Ductile BG/PCL Scaffold with High Inorganic Content to Repair Critical Bone Defects. *Biomedical Materials*, **18**, Article ID: 015021. <https://doi.org/10.1088/1748-605x/ac9e34>
- [44] Pugliese, R. and Regondi, S. (2022) Artificial Intelligence-Empowered 3D and 4D Printing Technologies toward Smarter Biomedical Materials and Approaches. *Polymers*, **14**, Article No. 2794. <https://doi.org/10.3390/polym14142794>
- [45] Tibbitts, S. (2014) 4D Printing: Multi-Material Shape Change. *Architectural Design*, **84**, 116-121. <https://doi.org/10.1002/ad.1710>
- [46] González-Henríquez, C.M., Sarabia-Vallejos, M.A., Sanz-Horta, R. and Rodríguez-Hernández, J. (2022) Additive Manufacturing of Polymers: 3D and 4D Printing, Methodologies, Type of Polymeric Materials, and Applications. *Macromolecular Engineering: From Precise Synthesis to Macroscopic Materials and Applications*, **1**, 57-116.
- [47] Momeni, F., *et al.* (2017) A Review of 4D Printing. *Materials & Design*, **122**, 42-79. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.02.068>
- [48] Zhou, W., Qiao, Z., Nazarzadeh Zare, E., Huang, J., Zheng, X., Sun, X., *et al.* (2020) 4D-Printed Dynamic Materials in Biomedical Applications: Chemistry, Challenges, and Their Future Perspectives in the Clinical Sector. *Journal of Medicinal Chemistry*, **63**, 8003-8024. <https://doi.org/10.1021/acs.jmedchem.9b02115>
- [49] Sharma, K.S. (2023) Artificial Intelligence Assisted Fabrication of 3D, 4D and 5D Printed Formulations or Devices for Drug Delivery. *Current Drug Delivery*, **20**, 752-769. <https://doi.org/10.2174/1567201820666221207140956>
- [50] Ghidini, T. (2018) Regenerative Medicine and 3D Bioprinting for Human Space Exploration and Planet Colonisation. *Journal of Thoracic Disease*, **10**, S2363-S2375. <https://doi.org/10.21037/jtd.2018.03.19>
- [51] Culmone, C., Smit, G. and Breedveld, P. (2019) Additive Manufacturing of Medical Instruments: A State-of-the-Art Review. *Additive Manufacturing*, **27**, 461-473. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.03.015>
- [52] Wazeer, A., Das, A., Sinha, A., Inaba, K., Ziyi, S. and Karmakar, A. (2022) Additive Manufacturing in Biomedical Field: A Critical Review on Fabrication Method, Materials Used, Applications, Challenges, and Future Prospects. *Progress in Additive Manufacturing*, **8**, 857-889.
- [53] Muhindo, D., Elkanayati, R., Srinivasan, P., Repka, M.A. and Ashour, E.A. (2023) Recent Advances in the Applications of Additive Manufacturing (3D Printing) in Drug Delivery: A Comprehensive Review. *AAPS PharmSciTech*, **24**, 57. <https://doi.org/10.1208/s12249-023-02524-9>
- [54] Dehghan-Manshadi, A., Yu, P., Dargusch, M., StJohn, D. and Qian, M. (2020) Metal Injection Moulding of Surgical Tools, Biomaterials and Medical Devices: A Review. *Powder Technology*, **364**, 189-204. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.01.073>
- [55] Goda, I., Nachtane, M., Qureshi, Y., Benyahia, H. and Tarfaoui, M. (2022) COVID-19: Current Challenges Regarding Medical Healthcare Supplies and Their Implications on the Global Additive Manufacturing Industry. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, **236**, 613-627. <https://doi.org/10.1177/09544119211070373>
- [56] Patpatiya, P., Chaudhary, K., Shastri, A. and Sharma, S. (2022) A Review on Polyjet 3D Printing of Polymers and Multi-Material Structures. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, **236**, 7899-7926. <https://doi.org/10.1177/09544062221079506>
- [57] Rouf, S., Malik, A., Singh, N., Raina, A., Naveed, N., Siddiqui, M.I.H., *et al.* (2022) Additive Manufacturing Technologies: Industrial and Medical Applications. *Sustainable Operations and Computers*, **3**, 258-274. <https://doi.org/10.1016/j.susoc.2022.05.001>