

3D打印技术在骨科中的应用进展

梁嘉文¹, 王飞^{1*}, 王菁菁², 贾迎奥¹

¹延安大学附属医院骨科, 陕西 延安

²眉县中医医院医保科, 陕西 宝鸡

收稿日期: 2025年6月17日; 录用日期: 2025年7月9日; 发布日期: 2025年7月17日

摘要

在骨科领域, 存在着许多复杂手术需求, 传统的手术方式在面对一些复杂病例及急诊情况时存在一定的局限性。而3D打印技术的出现为解决这些骨科复杂手术需求提供了新的途径和可能。通过系统性综述近5年的中英文文献, 全面收集、筛选并分析相关研究资料, 以深入了解3D打印技术在骨科手术中的应用情况、优势及面临的挑战等。研究结果表明, 3D打印技术在骨科复杂手术中显著提升了手术精准度, 使得手术操作更加精细化、个性化, 能够更好地贴合患者的实际病情和解剖结构, 从而提高手术成功率和治疗效果。然而, 目前该技术在材料方面仍存在一些不足, 如材料的生物相容性、力学性能等有待进一步优化; 在监管方面, 相关标准和规范需要进一步完善和细化, 以确保技术的安全可靠的应用于临床实践; 同时, 成本问题也是限制其推广的重要因素, 包括设备采购成本、打印材料成本以及后续的维护成本等都需要进行有效的控制和突破。只有解决了这些问题, 3D打印技术才能在骨科复杂手术中发挥更大的作用, 才能更好地服务于临床实践, 造福患者。

关键词

3D打印, 骨科, 手术

Advances in 3D Printing Technology in Orthopedics

Jiawen Liang¹, Fei Wang^{1*}, Jingjing Wang², Ying'ao Jia¹

¹Department of Orthopedics, The Affiliated Hospital of Yan'an University, Yan'an Shaanxi

²Department of Medical Insurance Section, Meixian Hospital of Traditional Chinese Medicine, Baoji Shaanxi

Received: Jun. 17th, 2025; accepted: Jul. 9th, 2025; published: Jul. 17th, 2025

Abstract

In the field of orthopedics, there are many complex surgical needs, and traditional surgical methods

*通讯作者。

have certain limitations when facing some complex cases and emergency situations. And the emergence of 3D printing technology provides new ways and possibilities to solve these orthopedic complex surgical needs. By systematically reviewing the Chinese and English literature in the past 5 years, we comprehensively collected, screened and analyzed the relevant research data in order to gain a deeper understanding of the application of 3D printing technology in orthopaedic surgery, its advantages and the challenges it faces. The research results show that 3D printing technology significantly improves surgical precision in complex orthopedic surgeries, making the surgical operation more refined and personalized, and better fitting the actual condition and anatomical structure of the patient, thus improving the surgical success rate and therapeutic effect. However, there are still some deficiencies in the material aspect of this technology, such as the biocompatibility and mechanical properties of the material need to be further optimized; in terms of regulation, the relevant standards and specifications need to be further improved and refined to ensure the safe and reliable application of the technology in clinical practice; at the same time, the cost issue is also an important factor limiting its promotion, including the cost of equipment procurement, printing material costs and subsequent maintenance costs need to be effectively controlled. Costs need to be effectively controlled and breakthrough. Only by solving these problems can 3D printing technology play a greater role in complex orthopedic surgery and better serve clinical practice for the benefit of patients.

Keywords

3D Printing, Orthopedics, Surgery

Copyright © 2025 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

骨科个性化治疗需求与传统技术局限：随着科学技术的进步及骨科医学的不断发展，患者对于个性化治疗的需求日益凸显。由于每位患者的受伤机制、解剖结构及病情都存在显著差异，因此传统的骨科诊疗技术往往难以精准地满足患者的个性化需求。传统技术在面对复杂的骨骼畸形、关节置换等手术时，可能无法实现精确的术前规划和术中操作，导致手术效果不尽如人意，恢复时间较长，甚至可能引发一些并发症[1]。

3D 打印技术演进：从工业制造到 POC 床旁生产：最初主要应用于工业制造领域。随着科技的进步，其逐渐被引入到医疗行业。早期，它在骨科的应用主要是基于工业制造的模式，通过制作一些体外模型去辅助手术等。然而，3D 打印技术的不断演进使得如今能够实现 POC (Point of Care, 即时医疗)床旁生产。这意味着可以在医院现场，根据患者的具体情况，快速打印出定制化的骨科植入物、手术导板等关键模型。这种演进极大地缩短了从需求到生产的时间周期，使得医生能够在手术获急救现场能够及时获得适合患者的个性化医疗产品，进一步提高了手术的精准性和成功率，更好地满足了骨科个性化治疗的迫切需求[2]。

2. 技术核心进展

2.1 打印工艺

FDM 作为一种常见的 3D 打印工艺，通过将丝状材料加热熔融后，按照预定的路径逐层沉积，从而构建出三维模型。这种工艺的优势在于成本相对较低，设备价格亲民，材料选择丰富多样，且操作简便，

易于上手。对于一些对精度要求不是极高,但需要快速制作模型以辅助教学、术前规划或概念验证的骨科应用场景来说,FDM是一种理想的选择。例如,在简单骨折的模拟教学中,利用FDM打印的骨折部位模型可以直观地展示骨折形态,帮助学生更好地理解骨折机制和治疗方法。

SLM(选择性激光熔化)和EBM(电子束熔炼)属于金属粉末熔融类的3D打印工艺。它们利用高能量束源(激光或电子束)将金属粉末逐层熔化并凝固,精确地制造出具有复杂结构的金属部件。在骨科领域,这两种工艺主要用于制造钛合金植入物。钛合金具有良好的生物相容性、高强度和耐腐蚀性,非常适合作为人体植入材料。通过SLM/EBM技术,可以根据患者的具体解剖结构和病情,定制个性化的钛合金植入物,如定制化的关节假体、接骨板等。这些植入物能够与患者的骨骼完美匹配,提高手术的精准度和植入物的稳定性,减少术后并发症的发生,为患者提供更好的治疗效果[3]。

生物打印是一种新兴的3D打印技术,它结合了生物学和工程学原理,能够精确地将细胞、生物材料和生长因子等按照预定的图案和结构打印出来,构建具有生物活性的组织工程支架。在骨科领域,生物打印主要致力于制造细胞负载支架,用于修复骨缺损和促进骨再生。通过将具有成骨潜能的细胞接种到生物打印的支架上,支架可以为细胞提供一个适宜的微环境,促进细胞的黏附、增殖和分化,引导新骨组织的生长。这种技术有望解决传统骨修复方法中骨缺损修复效果不佳、自体骨移植供体有限等问题,为骨科再生医学带来新的突破[4]。

FDM技术成本低、操作简便且材料多样,适用于制作教学模型(如骨折展示)和术前规划原型,但其精度有限且无生物相容性,仅限非植入用途;SLM/EBM技术通过高能束熔融金属粉末,可定制高精度、高强度的钛合金植入物(如关节假体),完美匹配患者骨骼结构,显著提升手术效果,但成本高昂且技术门槛高;生物打印技术能构建含细胞/生长因子的活性支架,促进骨组织再生,有望解决复杂骨缺损修复难题,但因技术处于实验阶段、成本极高且监管严格,尚属前沿探索方向。三者分别覆盖骨科教育、个性化植入和再生医学需求,形成互补的技术链条。

2.2. 材料创新

在骨科3D打印材料的发展过程中,经历了从金属材料到可降解聚合物材料,再到生物活性复合材料的创新演变。初期阶段,金属材料凭借其良好的力学性能,在骨科植入物领域得到广泛应用,如上述提到的钛合金关节假体、接骨板等。然而,金属植入物在体内长期留存可能会引发一些潜在问题,如应力遮挡、金属离子释放等。随着研究的深入,可降解聚合物材料逐渐受到关注。可降解聚合物在植入体内后,能够在一定时间内逐渐降解并被人体吸收,避免了金属植入物的长期不良影响,同时为组织再生提供了空间。近年来,生物活性复合材料成为研究热点。这类材料将具有生物活性的成分(如生物陶瓷、生长因子等)与其他基体材料(如聚合物、金属等)相结合,能够更好地模拟天然骨组织的结构和功能,促进骨细胞的生长和分化,增强材料与周围组织的相互作用,进一步提高骨修复和再生的效果[5][6]。

3. 骨科临床应用

3.1. 创伤骨科

在面对复杂创伤骨折时,3D打印导板能够提升复位精度。复杂骨折的治疗需要精确的复位,以确保骨折部位能够顺利愈合,恢复骨骼的正常结构和功能。传统的骨折复位方法往往依赖于医生的手术经验和频繁X光透视,存在一定的盲目性和误差。3D打印技术为复杂骨折的治疗带来了革命性的变化。通过对患者骨折部位的影像学数据进行三维重建,利用3D打印技术制作出与患者骨折部位精确匹配的3D导板[7]。在手术过程中,医生可以将导板放置在骨折部位,导板上的精确开孔和定位标识能够引导手术器械准确地到达骨折部位,实现精确的复位操作。这种方法大大提高了骨折复位的精度,减少了手术创伤

和并发症的发生,缩短了患者的康复时间[8][9]。

骨缺损是创伤骨科常见的难题之一,传统的治疗方法效果往往不能取得预期的临床效果。3D 打印技术可以根据患者骨缺损的大小、形状和部位,定制个性化的多孔钛填充体[10]。多孔钛具有良好的生物相容性和骨传导性,能够促进骨细胞的长入和新骨组织的形成。通过 3D 打印技术制造的多孔钛填充体可以精确地填充骨缺损部位,与周围骨组织紧密贴合,为骨缺损的修复提供了一个可靠稳定的支撑结构。同时,多孔结构还能够增加植入体与周围组织的接触面积,有利于营养物质的交换和细胞的附着,促进骨再生,提高骨缺损修复的成功率[11]。

3.2. 关节外科

个性化髌臼杯:髌臼关节置换手术中,髌臼杯的适配程度直接影响手术效果和患者的术后生活质量。传统的髌臼杯通常是标准化的产品,难以完全贴合患者的髌臼形态。通过对患者术前的影像学资料进行分析,利用 3D 打印技术制造出与患者髌臼精确匹配的个性化髌臼杯。这种髌臼杯能够更好地填充髌臼,恢复髌臼的正常解剖结构和力学性能,提高髌臼杯与髌臼之间的稳定性,减少磨损、松动以及脱位的发生,从而延长髌臼假体的使用寿命,提高患者的术后舒适度和生活自理能力[12]。

跟骨骨折模型规划:跟骨骨折是一种常见的足部骨折,因其解剖结构及骨折形态复杂,治疗难度较大。传统的术前规划主要依靠 X 光和 CT 图像,医生难以直观地了解骨折的三维形态和细节。3D 打印技术可以将患者跟骨骨折部位的影像三维数据打印成实体模型,使医生能够更直观、准确地观察骨折的情况。在手术前,医生可以在模型上进行模拟手术操作,制定最佳的手术方案,包括确定骨折复位的顺序、选择合适的内固定器械等。这种基于 3D 打印模型的术前规划能够提高手术的精准性和成功率,减少手术时间和术中出血量,为跟骨骨折患者提供更好的治疗效果[13]。

3.3. 脊柱与肿瘤

椎弓根导板:在脊柱手术中,椎弓根螺钉的精准置入至关重要。椎弓根的解剖结构个体差异较大,传统的徒手植入椎弓根螺钉存在一定的盲目性,容易导致螺钉位置偏差,严重时可导致脊髓损伤,增加手术风险。3D 打印技术可以根据患者脊柱的三维影像数据,制作个性化的椎弓根导板。导板上精确的开孔和定位标识能够引导椎弓根螺钉准确地植入椎弓根内,提高螺钉植入的准确性和安全性。这种个性化的椎弓根导板能够有效地减少手术并发症的发生,提高脊柱手术的成功率,改善患者的神经功能恢复情况[14]。

肿瘤切除后仿生重建:脊柱肿瘤切除后往往会造成脊柱稳定性的破坏,需要进行有效的重建。传统的重建方法通常采用人工椎体或异体骨等材料,但这些材料与人体自身组织的生物学特性存在差异,可能影响重建效果。3D 打印技术可以实现肿瘤切除后脊柱的仿生重建。通过对患者脊柱肿瘤切除部位的三维数据进行分析,结合患者的生理力学需求,利用 3D 打印技术制造出具有仿生结构和功能的重建植入物。这些植入物能够更好地模拟患者脊柱结构和力学特性,与周围组织实现良好的整合,为脊柱肿瘤切除后的患者提供稳定的支撑,促进脊柱功能的恢复,提高患者的生活质量[5]。

4. 临床证据与效益

通过对大量相关临床研究进行 Meta 分析发现,在骨科手术中应用 3D 打印技术辅助手术具有显著优势。首先因为 3D 打印的手术导板、植入物模型等,为手术医生提供了更加精确的术前规划和术中引导,使得手术操作更加精准、高效,减少了不必要的试探和调整时间,从而显著减少了手术时间。其次,该技术还能显著降低术中出血量。其原理在于精准的手术操作能够更准确地避开血管、神经等重要结构,

降低术中意外损伤血管导致出血的风险，并且在植入物的放置和固定过程中也更加可靠，减少了因操作不当引起的出血情况。

这种在手术时间和出血量上的改善，对于患者的手术安全性、术后恢复以及整体治疗效果都有着积极的影响，充分体现了 3D 打印技术在骨科手术中的重要价值[12] [13] [15]。在肩胛骨畸形矫正手术中，3D 打印技术发挥了关键作用。患者因先天性发育异常或外伤等原因导致肩胛骨出现严重畸形，传统的手术方法在面对这种复杂情况时面临诸多挑战。通过对患者肩胛骨进行详细的影像学检查，获取其三维数据后，利用 3D 打印技术制作出与患者实际肩胛骨畸形情况完全匹配的实体模型。手术团队在术前基于该模型进行了深入的分析和模拟演练，精确规划了手术方案，包括确定截骨部位、角度以及植入物的选择和放置位置等。在手术过程中，3D 打印的导板引导医生准确地进行截骨操作，确保了截骨的精准度，使肩胛骨能够按照术前规划进行复位和固定。同时，定制的植入物与矫正后的肩胛骨完美适配，提供了稳定的支撑。术后，患者的肩胛骨畸形得到了明显改善，肩部功能也逐步恢复，充分展示了 3D 打印技术在复杂肩胛骨畸形矫正手术中的卓越效果和临床价值[16]。

5. 挑战与未来方向

在骨科 3D 打印技术不断发展的基础上，技术层迎来了新的突破。4D 打印智能材料的出现为骨科治疗带来了全新的可能性。4D 打印智能材料是一种能够对环境刺激(如温度、湿度、磁场等)做出响应并发生形状变化的材料。在骨科领域，这种材料可以被打印成具有特定形状记忆功能的植入物或辅助器械。例如，在骨折修复过程中，利用 4D 打印智能材料制作的植入物可以根据人体内部环境的变化，如体温引起的温度变化，自动调整自身形状，更好地贴合骨折部位，促进骨折愈合，同时减少对周围组织的损伤。

AI 优化设计在骨科 3D 打印中也发挥着重要作用。具体而言，可通过以下研究思路来实现：首先，收集大量来自不同患者的临床数据、详细的影像学资料以及解剖学信息，构建一个全面且丰富的数据库。然后，运用先进的人工智能算法对该数据库进行深入分析和学习。基于这些数据，AI 能够优化 3D 打印模型和植入物的设计。在这个过程中，要充分考虑到不同个体的骨骼结构差异，例如通过对患者骨骼的三维扫描数据进行精确分析，获取独特的骨骼形态特征；还要考量其力学性能需求，借助力学模拟软件等工具，分析不同部位骨骼在正常生理活动下的受力情况，从而为植入物设计提供合理的力学参数；同时，也不能忽视生物相容性等多方面因素，研究不同材料与人体组织相互作用的机制，确保植入物在人体内能够稳定且安全地发挥作用。例如，针对关节假体的设计，AI 可以根据患者的骨骼形状和受力情况，进行如下操作：首先，利用高精度的三维成像技术获取患者关节部位的精确骨骼模型，将其输入到 AI 优化设计系统中。接着，系统通过模拟不同的关节运动场景，分析骨骼在各个方向上的受力分布情况，以此为依据优化定制化关节假体的结构。例如，调整假体的形状、尺寸以及内部结构，使其与患者骨骼实现最佳匹配，在提供良好支撑的同时，减少应力集中现象。通过这样的设计，不仅能够延长假体使用寿命，还能进一步提高骨科手术的治疗效果，为患者带来更好的康复体验[4]。

随着 3D 打印手术导板在骨科临床应用的日益广泛，建立科学、规范的手术导板适应证指南变得尤为重要。手术导板适应证指南的建立旨在明确在哪些具体的骨科手术场景和患者条件下，使用 3D 打印手术导板能够获得最佳的临床效果。该指南将综合考虑多种因素，包括骨折的类型和严重程度、患者的年龄、身体状况、骨骼质量等。例如，对于复杂的关节内骨折、严重的粉碎性骨折以及骨质疏松患者等特定人群，手术导板能够显著提高手术的精准性和安全性，应作为优先考虑使用的适应证。同时，指南还会对不同部位骨折的手术导板应用进行详细规范，如针对股骨骨折、胫骨骨折、骨盆骨折等，明确在何种骨折特征下选择何种类型的手术导板最为合适。通过建立这样的适应证指南，临床医生能够更加准确地判断是否适合使用 3D 打印手术导板，从而合理应用该技术，提高骨科手术的质量和治療效果的可预

测性[17]。

随着定制植入物在骨科临床应用中的逐渐增多，监管层意识到制定统一的国际标准对于保障医疗质量和患者安全的重要性。定制植入物 ISO 标准的制定旨在规范定制植入物的设计、制造、质量控制、临床应用等各个环节。

在设计方面，标准将规定定制植入物应如何根据患者的个体化数据进行精准设计，确保其符合人体工程学和生物力学要求。制造过程的标准涵盖材料选择、加工工艺、质量检测等方面，以保证定制植入物的质量稳定可靠。质量控制标准将明确各项性能指标的检测方法和合格标准，如材料的生物相容性、植入物的力学性能等。临床应用标准则会对定制植入物的术前评估、植入操作规范、术后随访等提出要求，确保其在临床应用中的安全性和有效性。通过制定这一套全面的定制植入物 ISO 标准，能够加强对定制植入物的监管，促进骨科 3D 打印技术在安全、规范的轨道上发展，为患者提供更加可靠的医疗产品和服务[17]。

6. 结论

在现代骨科医疗领域，3D 打印技术正凭借其独特的优势，逐渐成为实现精准治疗的核心工具。通过对患者骨骼结构进行高精度的三维数据采集，3D 打印能够依据这些个体化信息，制造出与患者骨骼精确匹配的各类骨科器械和植入物。例如，针对复杂骨折，3D 打印的手术导板可以精确引导复位和固定操作，极大地提升了手术的精准度，减少了手术创伤和并发症的发生几率。在关节置换手术中，定制的关节假体能够完美适配患者的关节形态，恢复关节的正常功能，显著提高了患者的术后生活质量。对于骨缺损修复，3D 打印的填充体可以根据缺损部位的具体情况进行个性化设计，促进骨再生，增强修复效果。这种精准匹配的特性，使得 3D 打印技术能够充分满足骨科治疗中对个性化的严格需求，解决了传统治疗方法在面对复杂病情时的局限性，为骨科精准治疗提供了强有力的支持，当之无愧地成为了这一领域的核心工具。

骨科 3D 打印技术要实现进一步的发展和突破，医工交叉将发挥关键作用。其中，生物活性打印是一个极具潜力的研究方向。目前，虽然 3D 打印已经能够制造出各种骨科器械和植入物，但在促进植入物与周围组织的生物活性交互方面仍有提升空间。生物活性打印旨在将具有生物活性的物质，如生物陶瓷、生长因子、活细胞等，精确地整合到打印材料中，使打印出的产品不仅具有良好的力学性能，还能具备促进细胞黏附、增殖、分化以及引导组织再生的功能。

通过医工交叉，医学专业人员与工程技术人员紧密合作，深入研究生物活性物质与打印材料之间的相互作用机制，开发新的打印工艺和材料体系，有望实现生物活性打印技术的重大突破。这将为骨科治疗带来革命性的变化，例如能够加速骨缺损的修复、增强植入物与周围组织的融合，减少植入物相关并发症的发生，进一步提升骨科精准治疗的水平，为患者带来更好的治疗效果和预后。

参考文献

- [1] Alemayehu, D.G., Zhang, Z., Tahir, E., Gateau, D., Zhang, D. and Ma, X. (2021) Preoperative Planning Using 3D Printing Technology in Orthopedic Surgery. *BioMed Research International*, **2021**, Article ID: 7940242. <https://doi.org/10.1155/2021/7940242>
- [2] Calvo-Haro, J.A., Pascau, J., Mediavilla-Santos, L., Sanz-Ruiz, P., Sánchez-Pérez, C., Vaquero-Martín, J., et al. (2021) Conceptual Evolution of 3D Printing in Orthopedic Surgery and Traumatology: From “Do It Yourself” to “Point of Care Manufacturing”. *BMC Musculoskeletal Disorders*, **22**, Article No. 360. <https://doi.org/10.1186/s12891-021-04224-6>
- [3] Kelly, C. and Adams, S.B. (2024) 3D Printing Materials and Technologies for Orthopaedic Applications. *Journal of Orthopaedic Trauma*, **38**, S9-S12. <https://doi.org/10.1097/bot.0000000000002765>
- [4] Ling, K., Wang, W. and Liu, J. (2025) Current Developments in 3D Printing Technology for Orthopedic Trauma: A

- Review. *Medicine*, **104**, e41946. <https://doi.org/10.1097/md.00000000000041946>
- [5] Rodriguez Colon, R., Nayak, V.V., Parente, P.E.L., Leucht, P., Tovar, N., Lin, C.C., *et al.* (2022) The Presence of 3D Printing in Orthopedics: A Clinical and Material Review. *Journal of Orthopaedic Research*, **41**, 601-613. <https://doi.org/10.1002/jor.25388>
- [6] Li, B., Zhang, M., Lu, Q., Zhang, B., Miao, Z., Li, L., *et al.* (2022) Application and Development of Modern 3D Printing Technology in the Field of Orthopedics. *BioMed Research International*, **2022**, Article ID: 8759060. <https://doi.org/10.1155/2022/8759060>
- [7] 曹浩博, 张义宝. 骨科手术中 3D 打印骨科手术导板的应用进展[J]. 大医生, 2024, 9(9): 120-123.
- [8] Zhu, D., Zhang, Z., Zhang, J., Chen, D., Shan, Y., Xie, B., *et al.* (2020) The Efficacy of 3D Printing-Assisted Surgery in Treating Distal Radius Fractures: Systematic Review and Meta-analysis. *Journal of Comparative Effectiveness Research*, **9**, 919-931. <https://doi.org/10.2217/cer-2020-0099>
- [9] Fillat-Gomà, F., Marcano-Fernández, F.A., Coderch-Navarro, S., Martínez-Carreres, L. and Berenguer, A. (2021) 3D Printing Innovation: New Insights into Upper Extremity Surgery Planning. *Injury*, **52**, S117-S124. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2021.01.048>
- [10] 路康, 李洁, 唐翔宇, 等. 3D 打印个性化骨科内植物的临床应用与研究进展[J]. 中华骨与关节外科杂志, 2023, 16(1): 77-84.
- [11] Tao, F., Li, L., Wang, D., Dong, J., Zhou, D. and Song, W. (2023) Three-dimensional Printing versus Traditional Surgery for Inveterate Pelvic and Acetabular Fractures: A Retrospective Study of 37 Patients. *Medicine*, **102**, e36149. <https://doi.org/10.1097/md.00000000000036149>
- [12] Cao, J., Zhu, H. and Gao, C. (2021) A Systematic Review and Meta-Analysis of 3D Printing Technology for the Treatment of Acetabular Fractures. *BioMed Research International*, **2021**, Article ID: 5018791. <https://doi.org/10.1155/2021/5018791>
- [13] Shi, G., Liu, W., Shen, Y. and Cai, X. (2021) 3D Printing-Assisted Extended Lateral Approach for Displaced Intra-Articular Calcaneal Fractures: A Systematic Review and Meta-analysis. *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*, **16**, Article No. 682. <https://doi.org/10.1186/s13018-021-02832-5>
- [14] Hajnal, B., Pokorni, A.J., Turbucz, M., Bereczki, F., Bartos, M., Lazary, A., *et al.* (2025) Clinical Applications of 3D Printing in Spine Surgery: A Systematic Review. *European Spine Journal*, **34**, 454-471. <https://doi.org/10.1007/s00586-024-08594-y>
- [15] Xiao, L., Tang, P., Yang, S., Su, J., Ma, W., Tan, H., *et al.* (2025) Comparing the Efficacy of 3D-Printing-Assisted Surgery with Traditional Surgical Treatment of Fracture: An Umbrella Review. *Journal of Orthopaedics and Traumatology*, **26**, Article No. 3. <https://doi.org/10.1186/s10195-025-00819-0>
- [16] Thomas, C.N., Mavrommatis, S., Schroder, L.K. and Cole, P.A. (2022) An Overview of 3D Printing and the Orthopaedic Application of Patient-Specific Models in Malunion Surgery. *Injury*, **53**, 977-983. <https://doi.org/10.1016/j.injury.2021.11.019>
- [17] Moya, D., Gobbato, B., Valente, S. and Roca, R. (2022) Uso de planificación preoperatoria e impresión 3D en ortopedia y traumatología: Ingresando en una nueva era. *Acta Ortopédica Mexicana*, **36**, 39-47. <https://doi.org/10.35366/106758>