

# 个性化植入体在正颌外科的临床应用研究

周文艺, 王 涛\*

口腔疾病与生物医学重庆市重点实验室, 重庆市高校市级口腔生物医学工程重点实验室, 重庆医科大学附属口腔医院颌面外一科, 重庆

收稿日期: 2025年3月3日; 录用日期: 2025年3月26日; 发布日期: 2025年4月7日

## 摘 要

近年来, 通过截骨后按照术前设计进行牙-颌骨复合体的复位与固定的正颌外科手术已经成为治疗颅颌面畸形的重要办法。要实现正颌手术通常需要进行术前设计、术中转移、术后评估等一系列步骤。传统的术中转移依赖于咬合导板的使用, 但此种方法存在误差较大、耗时耗力等缺陷。随着计算机辅助下(CAD/CAM)的3D打印技术、激光切割塑形技术以及各种虚拟手术规划软件(VSP)的迅猛发展, 目前已有研究表明使用个性化植入体(PSI)有望实现从术前虚拟设计到术中的精准转移。本文就个性化植入体(PSI)在正颌外科临床应用的研究进展做一综述, 以为临床实践提供相应参考。

## 关键词

正颌外科, 3D打印, 个性化植入体, 数字化

# Research on Clinical Application of Patient-Specific Implants in Orthognathic Surgery

Wenyi Zhou, Tao Wang\*

Chongqing Key Laboratory of Oral Diseases and Biomedical Sciences, Chongqing Municipal Key Laboratory of Oral Biomedical Engineering of Higher Education, Department I of Oral and Maxillofacial Surgery, Stomatological Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing

Received: Mar. 3<sup>rd</sup>, 2025; accepted: Mar. 26<sup>th</sup>, 2025; published: Apr. 7<sup>th</sup>, 2025

\*通讯作者。

文章引用: 周文艺, 王涛. 个性化植入体在正颌外科的临床应用研究[J]. 临床个性化医学, 2025, 4(2): 644-650.  
DOI: 10.12677/jcpm.2025.42226

## Abstract

In recent years, orthognathic surgery by osteotomy followed by repositioning and fixation of the tooth-mandibular complex according to the preoperative design has become an important approach to the treatment of craniomaxillofacial deformities. A series of steps such as preoperative design, intraoperative transfer, and postoperative evaluation are usually required to realize orthognathic surgery. Traditional intraoperative transfer relies on the use of occlusal plates, but this method suffers from large errors, time-consuming and labor-intensive drawbacks. With the rapid development of computer-aided 3D printing technology (CAD/CAM), laser cutting & shaping technology and various virtual surgical planning software (VSP), it has been shown that the use of Patient-Specific Implants (PSIs) is expected to achieve accurate transfer from preoperative virtual design to intraoperative transfer. In this paper, we present a review of the research progress on the application of PSI in orthognathic surgery, with a view to providing corresponding references for clinical practice.

## Keywords

Orthognathic Surgery, 3D Printing, Patient-Specific Implant, Digitalization

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

在过去几十年里, CAD/CAM 技术在正颌外科应用中展示出其强大的引领能力, 尤其是层出不穷的虚拟数字化设计软件在诊断颅颌面畸形、治疗方案设计以及术后效果评估中均体现出其准确、可视化等优点。如何将准确的术前设计精准转移到术中就成为值得思考的问题, 过去的传统模型外科利用面弓转移、石膏模型截断拼接等方法设计治疗方案, 但由于其步骤繁琐容易造成较大误差, 很快便被数字化设计逐步取代[1]。尽管数字化设计软件能够充分利用 CBCT、CT、口扫等影像资料获取较为准确的术前截骨方案以及移动的方向与距离, 但术中转移却仍依赖于咬合导板的使用[2]。咬合导板需要利用上下颌牙列的咬合关系来确定上下颌骨间的相对位置, 那么对于缺失牙甚至无牙颌患者就无法取得有利于固定上下颌骨位置的咬合关系。同时咬合导板的安放受颞下颌关节运动、患者术中体位等关系的影响, 易导致误差的形成。基于牙-骨复合体解剖参考点设计的截骨导板与 PSI 的联合使用能有效克服咬合导板带来的缺陷[3]。本文主要就正颌手术中 PSI 的设计与制作、PSI 的临床应用与结果评估、PSI 存在的问题及可能解决方法等方面展开讨论。

## 2. 传统模型外科

模型外科是根据临床查体和头影测量分析及预测效果所得出的结论, 将转移架上的牙颌石膏模型截断拼对, 最后取得良好上下颌位置关系和上下颌牙列咬合关系并制备出咬合导板的过程[4]。不可否认传统模型外科在正颌外科中有其重要意义, 通过模型外科可以获得三维空间的立体概念, 能够比较直观地明确上下颌骨间的相对关系并指导上下颌骨的移动。但随着社会与科技的发展, 传统模型外科的弊端也显露无遗。首先, 由于其纷繁复杂的操作步骤, 不仅造成对人力时间的耗费, 同时在设计及操作过程中必然存在误差: 1) 灌制硬石膏模型不准确, 咬合面不光滑所产生的误差; 2) 转移面弓过程中的操作误差; 3) 合蜡制作过程中的咬合误差; 4) 参考线标定后测量垂直及水平距离过程中所产生的测量误差; 5)

模型截断后手动拼对所产生的定位误差。其次, 模型外科相对于二维的 X 线头影测量与面型预测, 实现了三维立体的构象, 但同时中断了头影测量与模型外科之间的联系, 脱离了患者的面型轮廓, 无法给予患者术后软组织面型的预测效果, 无法使患者直观感受到面型的变化, 对医生与患者之间的沟通往往造成一定的阻碍[4] [5]。

### 3. 数字化虚拟设计新纪元

随着 CAD/CAM 和虚拟手术计划(VSP)的迅猛发展, 同时也碍于传统模型外科的诸多缺陷, 正颌外科也进入数字化虚拟设计的新纪元。基于 VSP 的数字化治疗是使用 PROPLAN CMF by Materialize (Leuven, Belgium)、IPS CaseDesigner V.2.4 等专用虚拟手术设计软件执行的, 该类软件是一种基于个体患者数据集的手术计划设计和模拟软件。虚拟手术设计与模拟中应包括以下数据: 1) 颅颌面高分辨率 CT (DICOM 数据集); 2) 自然头部位置(NHP); 3) 口腔内牙列扫描数据(STL 格式); 4) 最终理想咬合的数字模型(STL 格式) [6]。以上数据被导入专用虚拟手术设计软件后进行骨 - 牙列的重叠配准以模拟基于自然头位的正颌手术。有的学者主张使用 3D 打印机利用树脂材料先将颅骨模型打印出来, 以便直接在模型上进行直观的手术设计; 也有学者主张继续使用计算机虚拟软件进行截骨及骨块移动的手术设计, 以保持数据记录的连续性同时节省时间与材料[2] [6] [7]。目前在数字化虚拟设计中使用的主要术中转移办法大体可分为两类: (1) 基于理想咬合关系的 3D 打印双骀板技术; (2) 由自身形态储存手术信息的截骨板和 PSI 无骀板技术[8]。

#### 3.1. 3D 打印双骀板技术

通常基于咬合关系的 3D 打印咬合导板包括中间导板和终末导板, 其原理为在术中先应用中间导板, 以未移动的下颌骨指导下颌骨在预测方位上的移动并固定于新的位置上; 再以移动后并已固定的上颌骨为基准, 使用终末导板来指导下颌骨移动至设计位置并予以固定。尽管使用 3D 打印技术制作的数字化咬合导板比传统自凝塑料制作的咬合导板精确许多, 但在多年的临床实践中发现其存在许多不可避免的弊端[3]。

首先是咬合板在临床使用的局限性, 由于其基于咬合关系制作的特性, 在缺失牙甚至无牙骀患者的正颌手术中, 咬合导板便失去其使用意义。

其次在于咬合导板带来的不精确性: 1) 3D 打印咬合导板通常使用的树脂材料在进行术前消毒或转移过程中容易造成导板的变形, 使术中可能出现最终咬合导板无法就位的情况。同时由于咬合导板具有的一定厚度势必造成颌骨垂直方向上的位移不能精确。2) 在术中使用数字化咬合导板不能避免由于下颌骨髁突关节囊的不稳定性带来的上颌骨截骨骨块在固定时的位置改变, 例如由于患者仰卧体位造成的下颌骨轻微后缩, 从而使精心设计的骨块移动不能完全准确地得到体现[9] [10]。

最后, 在术后维持终末导板固定在位的过程中, 无法张口常常给患者的日常生活带来极大的困扰。同时由于维持过程中的无法开口, 患者不能进行早期的开口度训练, 可能出现少量患者有轻微颞下颌关节症状的情况。

#### 3.2. PSI 无骀板技术

##### 3.2.1. 术前设计与制作

虚拟手术模拟后, 截骨和重新定位的虚拟复合头骨模型会以 STL 文件形式输出, 以便在三维建模软件(如比利时鲁汶的 Materialize 公司的 3-matic)中进行 PSI 的计算机辅助设计。首先设计 PSI: 在骨骼表面绘制圆柱形螺钉孔, 这些螺钉孔可以预先设计并保存为模板。然后, 通过连接螺钉孔来绘制 PSI [11]。其中 Yoana Malenova、Leung YiuYan 等主张使用一体式 PSI, 而 Reinald Kuehle、Ho-Hyun (Brian) Sun 等主

张使用分块式 PSI。Dion Tik Shun Li 认为就上颌骨而言, 虽然两侧分别使用不同的 PSI 可以在术中更容易地贴合骨面, 但横跨两侧的一体式 PSI 可以提供更好的下颌运动精度[8]。

关于 PSI 的厚度与钉孔直径, 现仍未有统一标准。Thomas Gander 认为使用 PSI 的板厚必须取得平衡, 既要使 PSI 尽量做薄, 又要提供足够的机械强度, 所以板厚应为 1~1.2 mm, 其中前鼻骨脊柱上的中央连接部分应稍厚, 以提供更大的机械强度, 从而将制造和运输过程中发生变形的几率降至最低[2]。B. Philippe 认为钉的长度与位置以及 PSI 的板厚必须进行谨慎的确认, 而这取决于骨的厚度、密度以及骨块的移动[12]。PSI 板厚及螺钉长度的选择不仅要考虑术后稳定性, 同时也应考虑术中重要的解剖结构。

设计好 PSI 后, 采用逆向工程技术设计截骨导板。为避免不必要的打孔伤害, 利用共用钉孔理念将固定用螺钉孔和截骨段一起重新定位到骨的原始位置。此时固定用螺钉孔和截骨段上的螺钉孔也就代表截骨导板上的钻孔。

正颌手术虚拟化设计(VSP)和 PSI 的制作通常需要与商业供应商进行合作。外科医生只需将患者的 CT 扫描图像、牙科模型或通过 3D 扫描的牙齿和临床照片发送给工程师, 工程师即可通过 CT 数据分割和头颅测量分析对颅面部骨骼进行虚拟重建。外科医生和工程师可通过视频会议完成手术移动和咬合的治疗规划, 随后工程师便可将成品 PSI 邮寄给外科医生。当然, 正颌手术虚拟化设计(VSP)和 PSI 的制造也可以选择面向外科医生的方法。Yiu Yan Leung 及其团队认为选择这种方法的主要优点是外科医生可以完全控制整个过程, 并且从手术规划到 PSI 制作完成的时间只需 5~7 天。Alvin Tsz Choi Li 等人的研究结果表明外科医师自行设计并制作的 PSI 既准确又安全, 其临床应用的结果和准确性可与商用的 PSI 相媲美[13][14]。但这势必增加外科医生的工作量, 且个人制作难以对 PSI 的质量进行规范的把控与测试。

目前已有的 PSI 制作方式包括但不限于 3D 打印、激光切割塑形、术前成品内固定板预制, 其中以 3D 打印使用最为广泛。将设计好的截骨板和 PSI 导出为 STL 格式, 以便进行 3D 打印。其中截骨板通常选择生物相容性材料如 MED610 树脂(Stratasys 有限公司, 美国)并采用熔融沉积建模技术进行 3D 打印, 可耐高温高压灭菌。PSI 可使用选择性激光熔化(SLM)技术, 使用特定的 SLM 打印机将 Ti6AlV4 钛粉熔化成固体实体。Ma L, Cheng S 认为钽镁合金在正颌外科术中有望取代钛的使用, 另外 MacLeod A. Esmaeili S 认为原则上可降解生物材料也可被 3D 打印, 并在其中加入生长因子, 以诱导骨形成, 最后用于骨固定[15]-[17]。其他非金属材料也可用于骨块的固定, 但仍需要进行生物相容性和生物力学的研究, 以证明其可行性[18]。无论使用何种材料, 都应当满足以下条件: 1) 拥有优异的机械和力学性能, 能够抵抗术后肌肉牵拉作用; 2) 拥有良好的抗腐蚀性能; 3) 具有良好的生物相容性; 4) 有较低的重量。

### 3.2.2. 术中使用方法

3D 打印 PSI 完成后, 拆除支撑单元, 对钛板进行抛光、清洁和灭菌, 然后送入手术室。Paris Liokatis 认为在正颌手术中同时使用 PSI 和 VSP 生成的终末导板进行上颌定位可能具有互补作用, 但相应的需同时制作 PSI 与咬合导板的时间耗材等大大增加。Simona Mazzoni 主张利用导航系统在术中进行精确的定位后再进一步使用 PSI 固定。Marcel Ebeling 认为在进行截骨手术时, 机器人辅助正颌外科手术可作为传统钻头、毛刺和压电手术器械的有效辅助工具[19][20]。虽然 PSI 在正颌术中得到国外学者的广泛使用, 但仍未有系统规范的使用方法, 且没有相关数据表明辅助工具的使用是否对 PSI 的术中定位精准度有所影响, 而更多是依靠医师的个人经验。

### 3.2.3. 术后精准度分析

PSI 临床应用的准确性评估方法为正颌术后、正畸精调前通过计算机断层扫描的上颌骨最终位置与虚拟设计位置进行全局几何偏差分析。首先, 使用 Mimics 软件(Materialise, 比利时鲁汶)对术后 CT 扫描进行分割, 区分软组织(HU < 300)、骨组织(HU 300~1500)和钛(HU > 2000)。数据以 STL 文件形式导出到

专用 CAD 分析软件 3-matic (Materialise, 比利时鲁汶)中, 虚拟设计的相应 STL 文件同样导入 3-matic 并采用半自动叠加算法对术前和术后数据集的非骨切除面进行对齐。通过三点对齐程序和半自动叠加算法(10 次迭代), 两个数据集的匹配精度达到约  $30\ \mu\text{m}$  (最终对齐)。随后, 在虚拟计划位置和实际术后位置为每位患者标记五个测量点。通过评估代表主要结果变量的空间平面中相应五个选定参考点之间的整个骨面和直接距离的差异, 比较虚拟计划位置和最终结果位置之间的几何偏差。最后, 生成彩色编码热图, 以显示偏差大或偏差小的区域, 从而显示几何偏差的分布情况[19]。

#### 4. PSI 的利弊及可能解决办法

目前学者们一致认为正颌手术中使用 PSI 的主要优势在于其高精度。在 Le Fort I 型截骨术中, PSI 避免了对咬合和颞下颌关节旋转的依赖, 而这些都可能成为上颌骨定位误差的来源。此外, 在使用中间咬合导板定位上颌部分时, 垂直高度的恢复是一个可在术中随意调整的变量。相比之下, PSI 可根据虚拟规划通过预先存在的螺钉孔确定精确的垂直恢复高度。Kuehle 将 28 例使用 PSI 无骀板技术治疗的偏差数据与 22 例使用数字化双骀板技术治疗的偏差数据进行对比, 结果显示 PSI 组的前后( $-0.63 \pm 1.62\ \text{mm}$  vs  $-1.30 \pm 2.54\ \text{mm}$ )和横向( $-1.39 \pm 1.59\ \text{mm}$  vs  $-2.70 \pm 3.10\ \text{mm}$ )偏离术前计划位置的程度明显较低; 在旋转偏差方面, 俯仰( $0.64^\circ \pm 2.59^\circ$  vs  $2.91^\circ \pm 4.08^\circ$ )在 PSI 组的偏差更小。进而得出结论 PSI 能够使上颌骨节段截骨的横向扩张与垂直定位得到更好的解决[6]。同时 Demes 的研究数据表明 PSI 可以安全、准确地用于下颌骨前方根尖下截骨术, 甚至 Franco 的病例报告中因 PSI 的出现成功通过口内切口做下颌骨倒 L 形截骨术与人工植骨以完成下颌骨的前徙[21][22]。除上下颌骨外, PSI 还有助于进行颧成形术。传统的颧成形术大多用预制钛板和螺钉自由定位及固定颧部, 这有赖于医师的个人经验, 可能还需要外科医生的艺术感觉, 以达到对称性良好的美学效果。使用 PSI 后, 颧成形术的移动和对称性都会按照术前设计进行, 手术时间也大大缩短[23][24]。尽管 PSI 有上述优势, 但仍存在不可忽视的缺陷: 1) 成本较高; 2) 周转时间长; 3) 无法进行术中调整。

目前各种市售 PSI 的价格远高于同一家公司的预制固定材料。PSI 的费用通常包括工程师的咨询、截骨板和 PSI 的设计和制造以及产品的交付, 正颌外科手术的额外费用可能会影响术中转移办法的选择, 这也是一个实际的考虑因素[25]。针对成本较高这一问题, 有学者认为可以采取面向外科医生的办法, 即由外科医生全权参与整个治疗过程, 包括 PSI 的设计及制作。尽管可能增加临床医师的负担, 但能够有效的降低费用甚至缩短治疗时间。无论如何新方法的提出不仅给患者以选择的权利, 同时为无牙颌患者提供其做正颌手术的可能。就周转时间而言, 据报道从计划到产品交付大约需要 15~42 天, 这取决于商业公司的支持和手术所在地。无骀板理念与 PSI 尚处于发展阶段导致开展此项技术的医院与公司较少, 尽管在术前准备耗时较多, 但 PSI 可以有效地减少术中应用及术后恢复的耗时。在手术过程中, 可能会发生 PSI 与骨面不贴合的情况。这可能是由于生产误差或打印的钛框架变形, 但更常见的情况是上颌骨表面的薄骨或牙根不规则, 导致 PSI 的适应性受到干扰。如果需要在术中进行调整, PSI 的精确度优势反而成为劣势。这就需要术前更多地考虑骨块移动导致的软组织变化, 以确保 PSI 的高精度无需在术中进行调整。目前对于术中出现 PSI 与骨面无法完全贴合的问题, 为保证 PSI 的高精度, 更多的解决办法是反向改变骨面(打磨修整尖锐骨刺)以适应 PSI。由于 PSI 无骀板技术在国内仍不成熟, 许多外科医师通常会将双骀板技术作为备选方案, 当术中出现 PSI 无法贴合的情况, 那么仍会选择使用预制成型钛板。

#### 5. 未来发展及结语

在骨科手术中, 应用于髋关节和膝关节置换以及骨折固定的 PSI 被证明具有良好的稳定性和对齐性[26][27]。在颅颌面领域, PSI 用于颅骨成形术、眶底骨折、颌骨重建和正颌外科手术的精确度也得到广

泛研究[28]-[30]。在国内仍缺少 PSI 的相关研究, 同时国内外都缺乏对 PSI 术后稳定性的研究。随着各种测量分析技术的提高, 为 PSI 的各方面性能测试提供了许多办法, 例如: ICP 型算法、有限元分析等。目前, 高昂的费用是外科医生和患者的最大障碍, 但随着开源计算机规划和 PSI 设计软件程序的开发, 外科医生可以在自己的办公室规划和设计 PSI, 然后将其输出以供生产[25]。近十年来, VSP 和 CAD/CAM 的快速发展推动了 PSI 在正颌外科手术中的普及。可以预见在不久的将来, PSI 作为常规办法用于包括正颌外科手术在内的各种外科病症也许能够成为现实。

## 利益冲突

作者声明本文无利益冲突。

## 基金项目

国家自然科学基金(82071088)。

## 参考文献

- [1] 王旭东, 魏弘朴, 李彪. 从“经验外科”到“精准外科”——精准正颌外科体系的建立与临床应用[J]. 华西口腔医学杂志, 2023, 41(5): 491-501.
- [2] Gander, T., Bredell, M., Eliades, T., Rücker, M. and Essig, H. (2015) Splintless Orthognathic Surgery: A Novel Technique Using Patient-Specific Implants (PSI). *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery*, **43**, 319-322. <https://doi.org/10.1016/j.jcms.2014.12.003>
- [3] 屈振宇, 王茜, 赵岩, 等. 骨支持式 3D 打印导板在上颌骨 Le Fort I 型截骨术中的应用[J]. 华西口腔医学杂志, 2018, 36(1): 60-65.
- [4] 宋大立. 模型外科技术在正颌外科中的应用[J]. 实用口腔医学杂志, 2016, 32(5): 741-744.
- [5] Posnick, J.C., Ricalde, P. and Ng, P. (2006) A Modified Approach to “Model Planning” in Orthognathic Surgery for Patients without a Reliable Centric Relation. *Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, **64**, 347-356. <https://doi.org/10.1016/j.joms.2005.10.022>
- [6] Kuehle, R., Scheurer, M., Bouffleur, F., Fuchs, J., Engel, M., Hoffmann, J., et al. (2023) Accuracy of Patient-Specific Implants in Virtually Planned Segmental Le Fort I Osteotomies. *Journal of Clinical Medicine*, **12**, Article 6038. <https://doi.org/10.3390/jcm12186038>
- [7] Dadhich, A., Nilesch, K., Shah, S. and Saluja, H. (2022) Three-Dimensional Printing in Maxillofacial Surgery: A Quantum Leap in Future. *National Journal of Maxillofacial Surgery*, **13**, S203-S211. [https://doi.org/10.4103/njms.njms\\_65\\_20](https://doi.org/10.4103/njms.njms_65_20)
- [8] Li, D.T.S. and Leung, Y.Y. (2023) Patient-Specific Implants in Orthognathic Surgery. *Oral and Maxillofacial Surgery Clinics of North America*, **35**, 61-69. <https://doi.org/10.1016/j.coms.2022.06.004>
- [9] Song, K. and Baek, S. (2009) Comparison of the Accuracy of the Three-Dimensional Virtual Method and the Conventional Manual Method for Model Surgery and Intermediate Wafer Fabrication. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology*, **107**, 13-21. <https://doi.org/10.1016/j.tripleo.2008.06.002>
- [10] Zinser, M.J., Mischkowski, R.A., Sailer, H.F. and Zöller, J.E. (2012) Computer-Assisted Orthognathic Surgery: Feasibility Study Using Multiple CAD/CAM Surgical Splints. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology and Oral Radiology*, **113**, 673-687. <https://doi.org/10.1016/j.oooo.2011.11.009>
- [11] Kim, S., Lee, S., Park, J., Yang, S. and Kim, J. (2023) Effectiveness of Individualized 3D Titanium-Printed Orthognathic Osteotomy Guides and Custom Plates. *BMC Oral Health*, **23**, Article No. 255. <https://doi.org/10.1186/s12903-023-03000-3>
- [12] Philippe, B. (2013) Custom-Made Prefabricated Titanium Miniplates in Le Fort I Osteotomies: Principles, Procedure and Clinical Insights. *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, **42**, 1001-1006. <https://doi.org/10.1016/j.ijom.2012.12.013>
- [13] Yang, W.-F., Zhang, C.-Y., Choi, W.S., Zhu, W.-Y., Li, D.T.S., Chen, X.-S., et al. (2020) A Novel ‘Surgeon-Dominated’ Approach to the Design of 3D-Printed Patient-Specific Surgical Plates in Mandibular Reconstruction: A Proof-of-Concept Study. *International Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, **49**, 13-21. <https://doi.org/10.1016/j.ijom.2019.05.005>

- [14] Leung, Y.Y., Leung, J.K.C., Li, A.T.C., Teo, N.E.Z., Leung, K.P.Y., Au, S.W., *et al.* (2022) Accuracy and Safety of In-House Surgeon-Designed Three-Dimensional-Printed Patient-Specific Implants for Wafer-Less Le Fort I Osteotomy. *Clinical Oral Investigations*, **27**, 705-713. <https://doi.org/10.1007/s00784-022-04798-y>
- [15] Esmaeili, S., Aghdam, H.A., Motifard, M., Saber-Samandari, S., Montazeran, A.H., Bigonah, M., *et al.* (2020) A Porous Polymeric-Hydroxyapatite Scaffold Used for Femur Fractures Treatment: Fabrication, Analysis, and Simulation. *European Journal of Orthopaedic Surgery & Traumatology*, **30**, 123-131. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31420732/>  
<https://doi.org/10.1007/s00590-019-02530-3>
- [16] Ma, L., Cheng, S., Ji, X., Zhou, Y., Zhang, Y., Li, Q., *et al.* (2020) Immobilizing Magnesium Ions on 3D Printed Porous Tantalum Scaffolds with Polydopamine for Improved Vascularization and Osteogenesis. *Materials Science and Engineering: C*, **117**, Article 111303. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2020.111303>
- [17] MacLeod, A., Patterson, M., MacTear, K. and Gill, H.S. (2020) 3D Printed Locking Osteosynthesis Screw Threads Have Comparable Strength to Machined or Hand-Tapped Screw Threads. *Journal of Orthopaedic Research*, **38**, 1559-1565. <https://doi.org/10.1002/jor.24712>
- [18] Kabiri, A., Liaghat, G., Alavi, F., Ansari, M. and Hedayati, S.K. (2021) A Comparative Study of 3D Printing and Heat-Compressing Methods for Manufacturing the Thermoplastic Composite Bone Fixation Plate: Design, Characterization, and *in vitro* Biomechanical Experimentation. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, **235**, 1439-1452. <https://doi.org/10.1177/09544119211034353>
- [19] Malenova, Y., Ortner, F., Liokatis, P., Haidari, S., Tröltzsch, M., Fegg, F., *et al.* (2023) Accuracy of Maxillary Positioning Using Computer-Designed and Manufactured Occlusal Splints or Patient-Specific Implants in Orthognathic Surgery. *Clinical Oral Investigations*, **27**, 5063-5072. <https://doi.org/10.1007/s00784-023-05125-9>
- [20] Ebeling, M., Scheurer, M., Sakkas, A., Wilde, F. and Schramm, A. (2023) First-Hand Experience and Result with New Robot-Assisted Laser LeFort-I Osteotomy in Orthognathic Surgery: A Case Report. *Journal of Personalized Medicine*, **13**, Article 287. <https://doi.org/10.3390/jpm13020287>
- [21] Demes, E., Rios, O., Chamorey, E., Lerhe, B., D'Andréa, G. and Savoldelli, C. (2023) Accuracy of Mandibular Anterior Subapical Osteotomy by Virtual Planning in Orthognathic Surgery Using Patient-Specific Implants. *Journal of Stomatology, Oral and Maxillofacial Surgery*, **124**, Article 101299. <https://doi.org/10.1016/j.jormas.2022.09.020>
- [22] Franco, P.B. and Farrell, B.B. (2016) Inverted L Osteotomy: A New Approach via Intraoral Access through the Advances of Virtual Surgical Planning and Custom Fixation. *Oral and Maxillofacial Surgery Cases*, **2**, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.omsc.2016.01.001>
- [23] Sneha, A., Krishnan, M., Satheesh, T., Dhasarathan, P. and Muralidoss, H. (2023) Patient-Specific Plates for Genioplasty: A Case Report. *Cureus*, **15**, e38746. <https://doi.org/10.7759/cureus.38746>
- [24] Au, S.W., Li, D.T.S., Su, Y.X., *et al.* (2022) Accuracy of Self-Designed 3D-Printed Patient-Specific Surgical Guides and Fixation Plates for Advancement Genioplasty. *International Journal of Computerized Dentistry*, **25**, 369-376. <https://doi.org/10.3290/j.ijcd.b2599791>
- [25] Goodson, A.M.C., Parmar, S., Ganesh, S., Zakai, D., Shafi, A., Wicks, C., *et al.* (2021) Printed Titanium Implants in UK Craniomaxillofacial Surgery. Part II: Perceived Performance (Outcomes, Logistics, and Costs). *British Journal of Oral and Maxillofacial Surgery*, **59**, 320-328. <https://doi.org/10.1016/j.bjoms.2020.08.088>
- [26] Schemitsch, E.H. and Richards, R.R. (1992) The Effect of Malunion on Functional Outcome after Plate Fixation of Fractures of Both Bones of the Forearm in Adults. *The Journal of Bone & Joint Surgery*, **74**, 1068-1078. <https://doi.org/10.2106/00004623-199274070-00014>
- [27] Small, T., Krebs, V., Molloy, R., Bryan, J., Klika, A.K. and Barsoum, W.K. (2014) Comparison of Acetabular Shell Position Using Patient Specific Instruments vs. Standard Surgical Instruments: A Randomized Clinical Trial. *The Journal of Arthroplasty*, **29**, 1030-1037. <https://doi.org/10.1016/j.arth.2013.10.006>
- [28] van de Vijfeijken, S.E.C.M., Schreurs, R., Dubois, L., Becking, A.G., Becking, A.G., Dubois, L., *et al.* (2019) The Use of Cranial Resection Templates with 3D Virtual Planning and PEEK Patient-Specific Implants: A 3 Year Follow-up. *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery*, **47**, 542-547. <https://doi.org/10.1016/j.jcms.2018.07.012>
- [29] Gander, T., Essig, H., Metzler, P., Lindhorst, D., Dubois, L., Rücker, M., *et al.* (2015) Patient Specific Implants (PSI) in Reconstruction of Orbital Floor and Wall Fractures. *Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery*, **43**, 126-130. <https://doi.org/10.1016/j.jcms.2014.10.024>
- [30] Yang, W., Choi, W.S., Leung, Y.Y., Curtin, J.P., Du, R., Zhang, C., *et al.* (2018) Three-Dimensional Printing of Patient-Specific Surgical Plates in Head and Neck Reconstruction: A Prospective Pilot Study. *Oral Oncology*, **78**, 31-36. <https://doi.org/10.1016/j.oraloncology.2018.01.005>