

· 综 述 ·

基于数字医学的眼眶疾病辅助诊疗技术应用现状及展望

桑泽曦 综述 王耀华 廖洪斐 审校

南昌大学附属眼科医院 江西省眼科疾病临床医学研究中心 江西省眼科学重点实验室,
南昌 330006

通信作者:廖洪斐,Email:lhzf@126.com

【摘要】 自 21 世纪以来,随着计算机技术和人工智能的飞速发展,医学技术也随之迎来质变,数字医学逐渐被广大医学科研人员接受并应用于临床。这些创新不仅更新了各种临床诊疗设备,而且为医疗领域带来了全新的理念,为我国眼科学发展带来了蓬勃生机。借助数字化手段,眼科学被推向更加精准、个性化、微创的方向发展。本文综合了国内外有关的文献资料,对数字化医疗的智能诊断技术进行了回顾,如 3D 打印、手术导航、有限元分析以及扩展现实等技术就应用这些数字创新来辅助眼眶骨折、眼眶肿瘤、甲状腺相关性眼病、外伤性视神经病变以及眶内异物等眼眶疾病的诊疗以及临床教学现状及前景予以综述。

【关键词】 眼眶疾病; 数字医学; 三维重建; 虚拟现实**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (82060181); 江西省教育厅科学技术研究项目 (GJJ210201)

DOI:10.3760/cma.j.cn115989-20220718-00329

Application status and prospect of auxiliary diagnosis and treatment technology for orbital diseases based on digital medicine

Sang Zexi, Wang Yaohua, Liao Hongfei

Affiliated Eye Hospital of Nanchang University, Jiangxi Clinical Research Center for Ophthalmic Disease, Jiangxi Provincial Key Laboratory for Ophthalmology, Nanchang 330006, China

Corresponding author: Liao Hongfei, Email: lhzf@126.com

【Abstract】 Since the beginning of the 21st century, the rapid development of computer technology and artificial intelligence has brought a qualitative change in medical technology, with digital medicine gradually being accepted by the majority of medical researchers and applied in clinical practice. These innovations have not only updated various diagnostic and treatment equipment, but also introduced new concepts to the medical field and invigorated to the development of ophthalmology in China. With the help of digital technology, ophthalmology has been pushed to a more precise, personalized and minimally invasive direction. This article reviews relevant domestic and foreign literature, and the intelligent diagnostic technologies in digital medical care, such as 3D printing, surgical navigation, finite element analysis and extended reality, are reviewed. This article also reviews the current status and prospects of applying these digital innovations to assist with the treatment and clinical teaching of orbital diseases, including orbital fractures, orbital tumors, thyroid-related ophthalmopathy, traumatic optic neuropathy and orbital foreign bodies.

【Key words】 Orbital diseases; Digital medicine; Three-dimensional reconstruction; Virtual reality**Fund program:** National Natural Science Foundation of China (82060181); Scientific Research Foundation of the Education Office Jiangxi Province (GJJ210201)

DOI:10.3760/cma.j.cn115989-20220718-00329

数字医学是信息科学与医学的前沿交叉学科,起源于 20 世纪 90 年代美国的“可视人计划”^[1]。近年来,随着科技的不断进步,数字医学在基础研究和临床实践中被推向一个新高度。其中,以结合计算机的三维重建、手术导航系统及虚拟现实等技术,在疾病诊疗、手术模拟及规划、改善预后等方面表现

出了其独特的优势。数字医学已成功应用于在颌面外科^[2]、神经外科^[3]、骨科^[4]等其他学科,并逐渐应用于眼眶疾病的诊疗及教学当中。本文就数字医学在 3D 打印、手术导航、有限元分析 (finite element analysis, FEA) 以及扩展现实 (extended reality, XR) 技术在眼眶疾病中的应用现状及前景进行综述。

1 数字医学在眼眶疾病中的应用现状

1.1 3D 打印技术

3D 打印模型已在眼科领域得到了广泛应用。作为三维重建最直观的表现,3D 打印技术通过精确构建眼眶解剖结构模型,有效满足了眼眶手术的精确性及个性化需求。

在眼眶骨折的应用中, Kim 等^[5]的回顾性研究发现,使用 3D 打印模型在术中对植入物进行塑形可以减小植入物与骨折缘之间的间隙,并使植入物与眶骨轮廓的过渡更为平滑。Fan 等^[6]进一步证实,相较于术中对植入物进行徒手塑形,利用 3D 打印模型在体外对植入物进行塑形可以避免对重要结构的损害,节约手术时间,减少因手术导致的二次损伤,提高手术的准确性和安全性。廖洪斐等^[7]利用镜像叠加技术,将健侧眼眶的虚拟图像与患侧眼眶图像进行叠加,从而得到骨折缺损部位的三维模型即导板,以导板为模板对植入物进行 1:1 的修剪与塑形,结果显示可以进一步提高眼眶骨折整复手术的效率,提高补片的适配度,降低术后出血水肿、组织嵌顿及再次手术的概率。Tel 等^[8]在手术导板辅助下利用自体骨移植修补眶底,不仅简化了术中的操作,还提高了重建的准确性。

在植入物材料的选择中,金属钛已被证明是一种耐受性良好,术后并发症少,美观和功能效果令人满意的重建材料^[9]。钛网具有良好的可塑性,有研究指出在术前利用 3D 打印模型对钛网进行预成型可以节省 37% 以上手术时间,并缩小健侧与患侧眼眶的体积差^[10-11]。但作为不可降解的材料,金属钛仍需长期随访评估其生物相容性及化学稳定性。

随着组织工程学的蓬勃发展,可吸收材料现已广泛应用于眼眶骨折治疗。Young 等^[12]对 94 名患者的回顾性研究发现,在单壁及双壁的中小型眼眶爆裂性骨折的重建中可吸收材料——聚乳酸和聚己内酯 (polycaprolactone, PCL) 安全、有效,避免了不可吸收材料可能引发的感染、出血、移位、暴露和排斥反应等远期并发症。结合 3D 打印技术,可直接使用 PCL 为原料进行打印,从而对材料内部结构进行编辑。通过这种方法所开发出具有三维微孔结构的 PCL 网不仅有良好的生物相容性,能够让细胞组织向内生长,促进周围组织的再生,而且在眼球运动功能的恢复和外观的美化方面也具有出色效果,但可吸收网片适用于单壁或双壁的中小型单纯性眼眶骨折,在复合性眼眶骨折中稳定性较差^[12-13]。Jeong 等^[14]将 PCL 与 β -磷酸三钙 (beta-tricalcium phosphate, β -TCP) 以 8:2 比例混合,利用 3D 打印对 PCL/ β -TCP 复合物进行三维重建,并通过 PCL/ β -TCP 支架修补眶周缺损。 β -TCP 作为一种生物陶瓷材料,具有类似骨矿物的化学性质和良好的骨传导性,能够诱导骨质的再生。尽管可吸收材料生物相容性优于钛网等不可吸收材料,但仍存在导致严重排斥反应的可能性。

此外,新型材料聚醚醚酮联合计算机辅助设计与计算机辅助制造及 3D 打印技术已成功应用于眼眶缺损的修补^[15-16]。但聚醚醚酮作为一种不可吸收植入物,仍需长期观察其在体内环境的生物相容性、化学稳定性及力学特性。对于眼眶下壁及内侧壁累及筛骨-上颌骨支撑结构骨折的治疗,由于缺乏稳定

的支撑结构,补片的放置及固定存在技术上的难题。Kim 等^[17]利用 3D 打印在下壁及内壁补片之间打印了拼图扣锁结构,这种巧妙的个体化重建技术为眼眶底部和内侧壁联合骨折提供了准确的修复。在复合性眼眶骨折治疗中,由于骨折范围较大,利用联合计算机辅助设计与计算机辅助制造和三维模型进行手术预演及规划可以使术中眼眶的重建更加流畅,带来更短的手术时间、更少的失血以及更好的颅面美容效果^[18]。

同样,在儿童 trapdoor 眼眶骨折中, Chai 等^[19]根据计算机断层扫描 (computed tomography, CT) 成像数据在手术前 3D 打印了定制的植入物,不仅提高了植入物的结构精度,还减少了约一半的手术时间。通过磁共振成像 (magnetic resonance imaging, MRI) 成像所得到的二维图像不仅可以对眼眶骨性结构进行显像,还可以对软组织进行精确的分解及显影^[20]。Mourits 等^[21]对先天性小眼球合并眶内囊肿的囊肿 MRI 图像进行 3D 打印,来确切囊肿的位置及几何形状,并设计了个性化的手术入路。此外,在 3D 打印的帮助下,眼眶肿瘤的放疗及化疗更加个性化、精准化^[22-23]。

随着 3D 打印技术的普及,针对眼眶解剖的 3D 模型也被应用于眼科医师和医学生的培训中。相较于传统的人体标本,3D 打印模型的生产更快,并避免了相关的文化和伦理问题,还不受时空限制^[24]。Lichtenstein 等^[25]利用复合硅胶打印出针对眼眶结构的软组织,对相关解剖结构进行触觉层面的正确模拟,使眼眶手术的培训流程更为真实,并节省了相关的开支、提高了手术的安全性。

3D 打印将二维图像信息直观、立体地呈现给研究人员,使构思与规划可以实践于真实的物体,而非天马行空的想象。借助这种技术,眼眶疾病的治疗更加精准、安全、专业,为疾病的个性化诊疗提供了有力的技术保障。然而,3D 打印的精度高度依赖二维图像的质量,CT 及 MRI 技术上的突破同样会为 3D 打印技术带来极大的进步。目前,国内 3D 打印技术普及不广,仍面临产业滞后、审批流程复杂、认识不足等挑战^[26]。3D 打印的时间成本和费用成本也需进一步降低,相对应支持的软件及硬件目前都处于一个商业级的消费水平^[27]。Dvoracek 等^[28]提出使用低成本的 3D 打印方案,但硬件的维护及对模型打印所需要的通风及污物处理系统问题仍有待解决。

1.2 计算机辅助手术导航系统

计算机辅助手术导航系统 (computer-assisted surgical navigation system, CASNS) 通过处理患者 CT 或 MRI 数据,将可视化数据实时传输至显示器,并对手术器械的位置进行实时导航。借助该技术,眼科医师可对眼眶骨折、占位病变及畸形矫正进行术前计划、手术模拟和术后预测,提升眼眶手术的精准性与安全性^[29]。对于眼眶骨折的治疗, Bly 等^[30]采用 CASNS 虚拟骨骼镜像技术进行 3D 重新定位,并在导航系统的实时引导下为 56 例患者实施手术。术后患者的复视症状及眼眶容积较对照组显著改善,随访观察发现二次手术概率降低。同样, Zong 等^[31]的一项回顾性研究表明,应用 CASNS 可在提升手术精度的同时,有效改善患者眼球突出度,并减小了双眼眼眶之间的容积差。在复合性眼眶骨折手术中,导航系统可辅助将补

片放置于最佳位置,利于眼眶畸形矫正^[32]。在累及颧骨的眼眶骨折中,CASNS 能有效引导颧骨骨折的切开复位内固定,改善双侧的对称性^[33-34]。Zavattero 等^[35]研究发现,借助 CASNS 让低年资医师可以在创建的模型下进行虚拟手术,缩短眼眶骨折整复术的学习曲线。在甲状腺相关性眼病的治疗中,可以利用 CASNS 对眼眶减压术进行优化。Heisel 等^[36]发现 CASNS 可以提高主刀医生的空间感,使手术过程更加流畅,减少了医源性损伤,同时也减少了后续斜视手术的需要。对于极重度甲状腺相关性眼病患者,CASNS 辅助下的眼眶减压术可以更加微创,切口更小,美容效果更佳^[37]。由于眼眶解剖结构复杂且致密,手术操作不当易致永久性医源性损伤。针对眼眶占位性病变,准确定位肿物及评估其三维结构对肿物切除至关重要,通过 CASNS 对图像数据进行融合,能够以毫米精度进行三维重建。Tel 等^[38]通过 CASNS 在术中准确定位肿物的,对肿物进行了完整的切除,并使内窥镜的入路更加微创,为内窥镜的进入提供精确的方向和深度。对于特殊部位的肿物,如眶尖部的海绵状血管瘤,CASNS 可以识别重要的组织结构,避免医源性损伤,使手术更加精准、微创,提高患者的治疗效果^[39]。此外,CASNS 还可用于急诊眶内异物取出。Zhao 等^[40]对 30 例眶内金属异物进行回顾性研究,发现通过对异物的实时定位有助于确定合适的手术路径、减少附带损伤,从而提高异物取出的成功率。

利用 CASNS 可以开展更多可行的微创手术,其操作流程较传统手术更流畅、精准、安全。然而,CASNS 亦存在局限:首先,尽管可能节省手术操作时间,但术前系统的装配与调试依然会增加总手术时长,并且依赖于操作者的熟练度;其次,术者需要频繁在术野和显示屏之间切换视角,可能增加手术风险;再者,若导航定位成功后或术中出现移位需重新定位,可能导致导航失败或误差过大,进而引发严重手术并发症;最后,CASNS 虽然可以缩短手术操作的学习曲线,但其系统本身操作学习曲线较长,而且设备成本较高,所以 CASNS 的大范围普及仍面临诸多挑战。

1.3 FEA 在眼眶疾病中的应用

FEA 在医学领域中常用于研究骨科手术相关结构的力学特性,协助指导骨折固定。随着技术发展及精确度的提升,FEA 现已广泛应用于指导眼眶骨折的诊疗。FEA 以微积分原理,通过对三维模型进行网格微分化后,对每个简单且相互作用的网格单元进行数据整理,进而来分析有限数量的整体模型。应用 FEA 对眼眶三维模型进行生物力学分析,可以清晰阐释眼眶骨折的发生机制,通过其结果可以用于优化骨折治疗并改善其结果^[41]。Zmuda 等^[42]通过有限元模型进行眼眶应力的瞬态分析后,发现眶内软组织是影响抗冲击能力的重要因素,其形变可有效缓解眼眶骨质部分的形变。基于此,Moura 等^[43]利用撞击器来动态模拟眼眶有限元模型的结构变化,结合 MRI 获取的软组织影像,构建脂肪组织和眼外肌的有限元模型,进一步证实二者在吸收应力中起到了重要作用。FEA 还可以解析细微结构的受力情况。在累及视神经管的骨折中,会出现 CT 或 MRI 无法识别的微小损伤,此类损伤可能会对昏迷或

无法表述的患者造成不可逆的视力损伤。Huempfer-Hierl 等^[44]利用 FEA 模拟不同等级前额旁正中冲击力对视神经管的影响,发现即使相对较低的应力和振荡也可能造成微小损伤,以至于 CT 或 MRI 难以识别。Nagasao 等^[45]在此基础上,对有限元模型施加不同方位的应力,发现眶上切迹与内眦区受到撞击时,更易发生视神经管骨折,为累及视神经损伤的早期诊断提供了理论依据。在眶颧颌骨折治疗中,FEA 可模拟不同内固定方法下骨折部位的受力情况及稳定性^[46]。此外,Li 等^[47]利用 FEA 研究发现,在眶颧复合体骨折中,相较于三点固定法,两点固定法在保证手术效果大致相同的情况下,不仅能减少手术切口、缩短手术时间,还可降低患者医疗费用。同样,借助 FEA 技术可优化 LeFort I 型和 LeFort III 型截骨术方案,降低因手术导致视神经损伤的概率^[48-49]。此外,FEA 还可用于植入物分析。针对直接打印的个性化补片,利用 FEA 可研究植入物不同厚度和孔洞设计参数,实现最大应力承载能力并预测其耐久性,从而获得眼眶的最佳修复效果^[16]。

通过 FEA 能够在虚拟模型中进行重复、可控的模拟,对骨组织及软组织结构进行精确的量化分析,并避免了相关伦理问题。然而,其应用也存在局限:一方面,由于眼眶骨壁极薄,受图像精度所限,虚拟模型常需二次手动编辑,可能影响 FEA 的真实性,所以其并不能当作疾病诊疗的金标准;另一方面,由于微分结构复杂且大多缺乏实物模型的验证,分析结果存在一定的误导可能。随着 FEA 的普及和更多严谨、可信数据模型的建立,其精确性与适用性有望持续提升,进而推动相关技术的发展。

1.4 XR 技术

XR 即虚拟现实(virtual reality,VR)、增强现实(augmented reality,AR)、混合现实(mixed reality,MR)的统称。虽然 VR、AR 和 MR 三者是不同的概念,但又存在着紧密联系。VR 是通过构造一个完全虚拟的空间来模拟特定环境,提升操作者的沉浸感与互动感。VR 技术可以用来模拟虚拟眼眶解剖模型,作为一种解剖教学和手术培训的工具^[50]。Bououd 等^[51]在颅面部复杂的解剖结构教学中,将 VR 技术作为一种传统教学方法的补充,取得了较高的满意度和耐受度,有利于医学生更好地了解颅面部的三维结构。但由于缺乏与现实世界互动,所以现阶段 VR 更多地被用于教育培训和模拟操作方面。AR 技术则是通过借助移动设备,将数字信息整合到现实空间中,使虚拟模型呈现在现实物体表面。Davis 等^[52]在 2013 年首次将 AR 技术用于眼整形手术中。此后,随着虚拟重建的精度提高,神经及脉管系统等虚拟解剖结构能够在现实场景中实时集成。在一项病例报告中,Scolozzi 等^[53]利用 AR 技术完整地切除了眶内的复发性肿瘤,并在此过程中得以持续专注于术区,避免了频繁切换视角。此外,AR 作为一种辅助手段,在眼眶肿物的手术中可以协助内窥镜与 CASNS 最大限度地提高手术的准确性并降低侵袭性^[54]。通过导航笔进行皮肤表面配准,将器械连接到手术导航工作站,使用 AR 护目镜进入应用程序界面,医生使用无线遥控器在身体面部标记的预定解剖点上进行全息图的初步自动对齐,然后使用遥控器进行额外的微调以调整

微小的偏差,进而完成 AR 和手术导航的同步^[55]。Lin 等^[56]设计了一项随机对照试验,用于比对 AR 导航系统和传统导航下眼眶骨折的术中及预后结果,发现 AR 导航系统可以提高手术的安全性和成功率。MR 则是在 AR 的基础上,加入了与虚拟物体互动的功能,在相应软件及硬件的帮助下,MR 正在逐渐与医学领域融合。通过与 CASNS 及 3D 打印技术的功能互补,MR 已经成功应用于外科手术的术前规划,并提高了手术的精准性与安全性^[57-58]。此外,利用 MR 进行远程教学可以较快地提升诊疗水平,并且不受时空限制,进而有望提高世界各地的医学教育水平^[59]。

XR 技术在短短几年内便取得了巨大的发展,其虚拟与现实的巧妙结合在眼眶疾病的诊疗中还存在巨大的潜能。然而 XR 技术的精度仍需进一步提高以适应眼眶精密的结构。此外,XR 相关设备也会因为视觉与前庭感受的差异导致类似晕车的晕屏症状^[60]。但伴随科技的进步,XR 技术也将更加精简真实,通过技术的革新,在提升便携性的同时减轻使用者的晕屏反应。

2 数字医学在眼眶疾病中的应用前景

近年来,大量的科技创新为数字医学领域的蓬勃发展注入了新的活力。以组织工程学创新为代表的 3D 生物打印机处于快速发展阶段,其中针对脉管系统的高分辨率打印和组织工程骨的研究已取得诸多进展,但仍处于实验室阶段^[61-62]。利用 3D 生物打印机可以对各种细胞的打印参数进行定量控制,并人为改造其细胞学特征。将此项技术应用于组织结构重建,可进一步降低排斥反应风险,并提高器官修复和组织再生的能力^[63]。

在微创外科、精准医学不断发展的背景下,过去的十年中,手术机器人平台在外科手术中的应用呈指数级增长^[64]。眼科手术需要在极高精度下进行操作,在眼科手术机器人辅助下可以对运动进行控制、消除震颤、增强可视化以及感应距离,但目前仍处于初始阶段^[65]。Wang 等^[66]在开展了第 1 例达芬奇机器人辅助下的眼眶脂肪减压术,达到了预期的效果,在眶减压手术中表现出了良好的稳定性,但由于手术操作均由机械臂完成所以缺乏力量控制和触觉反馈,限制了操作的准确性,增加了医源性损伤的可能性。由于手术机器人较长的学习曲线以及高昂的设备成本,其使用还很难普及。但随着手术机器人结构的不断改进,精度的不断提升以及成本的不断优化,手术机器人在外眼手术中有着广阔的发展前景。

新型冠状病毒肺炎疫情发生以后,传统的医疗手段受到了影响,导致远程医疗的需求激增。在眼科远程医疗和 AI 的不断融合发展下,患者可通过远程医疗筛查和自动诊断对眼部疾病进行精准检测和及时治疗,从而克服时空限制,获得更优质的护理和视力改善^[67]。随着 5G 网络的全面覆盖,数字技术迎来巨大变革,AI、大数据、物联网等技术能够在医学领域作出关键贡献,为更多患者提供高质量、可持续的眼科医疗服务^[68-69]。

3 结语

数字医学在眼眶疾病的认识及诊疗方面提供了巨大帮助,并推动眼眶手术向精准化、个性化、微创化、智能化方向发展。然而,数字医学的未来发展需要培养更多兼具医学与计算机科学背景的复合型人才,以突破现有瓶颈并引领技术创新。在“医工结合”理念不断深化的背景之下,数字医学技术进步获得了源源不断的动力。眼科医师需要积极适应不断变化的医疗模式,并与相关技术专家形成更广泛的合作,以实现可持续、高质量眼科医疗服务的普及。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] Höhne KH, Pflesser B, Pommert A, et al. A realistic model of human structure from the visible human data [J]. *Methods Inf Med*, 2001, 40(2): 83-89.
- [2] Sang Z, Ren Z, Yu J, et al. Biomechanical analysis of fixation methods for bone flap repositioning after lateral orbitotomy approach: a finite element analysis [J]. *J Stomatol Oral Maxillofac Surg*, 2024, 125(12 Suppl 2): 101938. DOI:10.1016/j.jormas.2024.101938.
- [3] He S, Zhou W, Hu T, et al. Biomechanical stiffness of gliomas, meningiomas, and Schwannomas assessed by MR elastography and virtual MR elastography: correlation with clinicopathological features [J]. *J Magn Reson Imaging*, 2025. DOI:10.1002/jmri.70024. [Online ahead of print.]
- [4] Wang KY, Farid AR, Comtesse S, et al. Segmentation and finite element analysis in orthopaedic trauma [J]. *3D Print Med*, 2025, 11(1): 39. DOI:10.1186/s41205-025-00284-9.
- [5] Kim YC, Jeong WS, Park TK, et al. The accuracy of patient specific implant prebent with 3D-printed rapid prototype model for orbital wall reconstruction [J]. *J Craniomaxillofac Surg*, 2017, 45(6): 928-936. DOI:10.1016/j.jcms.2017.03.010.
- [6] Fan B, Chen H, Sun YJ, et al. Clinical effects of 3-D printing-assisted personalized reconstructive surgery for blowout orbital fractures [J]. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol*, 2017, 255(10): 2051-2057. DOI: 10.1007/s00417-017-3766-y.
- [7] 廖洪斐,余进海,胡长青,等. 三维打印联合手术导航及内镜在眼眶骨折复位术中的应用 [J]. *中华眼科杂志*, 2019, 55(9): 658-664. DOI:10.3760/cma.j.issn.0412-4081.2019.09.006.
- [7] Liao HF, Yu JH, Hu CQ, et al. Application of three-dimensional printing combined with surgical navigation and endoscopy in orbital fracture reconstruction [J]. *Chin J Ophthalmol*, 2019, 55(9): 658-664. DOI:10.3760/cma.j.issn.0412-4081.2019.09.006.
- [8] Tel A, Sembroni S, Costa F, et al. Endoscopically assisted computer-guided repair of internal orbital floor fractures: an updated protocol for minimally invasive management [J]. *J Craniomaxillofac Surg*, 2019, 47(12): 1943-1951. DOI:10.1016/j.jcms.2019.11.005.
- [9] Consorti G, Monarchi G, Catarzi L. Presurgical virtual planning and intraoperative navigation with 3D-preformed mesh: a new protocol for primary orbital fracture reconstruction [J]. *Life (Basel)*, 2024, 14(4): 482. DOI:10.3390/life14040482.
- [10] Sigron GR, Barba M, Chammartin F, et al. Functional and cosmetic outcome after reconstruction of isolated, unilateral orbital floor fractures (blow-out fractures) with and without the support of 3D-printed orbital anatomical models [J]. *J Clin Med*, 2021, 10(16): 3509. DOI:10.3390/jcm10163509.
- [11] Sigron GR, Rüedi N, Chammartin F, et al. Three-dimensional analysis of isolated orbital floor fractures pre- and post-reconstruction with standard titanium meshes and "hybrid" patient-specific implants [J]. *J Clin Med*, 2020, 9(5): 1579. DOI:10.3390/jcm9051579.



- [12] Young SM, Sundar G, Lim TC, et al. Use of bioresorbable implants for orbital fracture reconstruction [J]. *Br J Ophthalmol*, 2017, 101 (8) : 1080–1085. DOI:10.1136/bjophthalmol-2016-309330.
- [13] Yang MK, Ha SJ, Kim GJ, et al. Efficacy of 3D-printed patient specific implant for orbital wall fracture repair in a series of 40 patients [J]. *Sci Rep*, 2025, 15 (1) : 4087. DOI:10.1038/s41598-024-84166-w.
- [14] Jeong WS, Kim YC, Min JC, et al. Clinical application of 3D-printed patient-specific polycaprolactone/beta tricalcium phosphate scaffold for complex zygomatico-maxillary defects [J]. *Polymers (Basel)*, 2022, 14 (4) : 740. DOI:10.3390/polym14040740.
- [15] Yang M, Wu Z, Yu H, et al. Reconstruction for diverse fronto-orbital defects with computer-assisted designed and computer-assisted manufactured PEEK implants in one-stage operation: case reports [J/OL]. *Medicine (Baltimore)*, 2021, 100 (40) : e27452 [2024-11-14]. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/34622866>. DOI:10.1097/MD.00000000000027452.
- [16] Wu Y, Liu C, Liu J, et al. Osteogenic function of BMP2-modified PEEK scaffolds for orbital fracture repair [J/OL]. *Biomed Mater*, 2025, 20 (3) [2025-08-09]. <http://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/40101367>. DOI:10.1088/1748-605X/adc220.
- [17] Kim YC, Min KH, Choi JW, et al. Patient-specific puzzle implant performed with 3D-printed rapid prototype model for combined orbital floor and medial wall fracture [J]. *J Plast Reconstr Aesthet Surg*, 2018, 71 (4) : 496–503. DOI:10.1016/j.bjps.2017.11.016.
- [18] Xue R, Lai Q, Sun S, et al. Application of three-dimensional printing technology for improved orbital-maxillary-zygomatic reconstruction [J/OL]. *J Craniofac Surg*, 2019, 30 (2) : e127–e131 [2025-08-09]. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/30531282>. DOI:10.1097/SCS.00000000000005031.
- [19] Chai G, Zhang D, Hua W, et al. Theoretical model of pediatric orbital floor fractures and provisional personalized 3D printing-assisted surgical solution [J]. *Bioact Mater*, 2021, 6 (2) : 559–567. DOI:10.1016/j.bioactmat.2020.08.029.
- [20] Cooper T, Schmutz B, Hsu E, et al. Magnetic resonance imaging for three-dimensional printing of the bony orbit: is clinical use imminent? [J]. *Int J Oral Maxillofac Surg*, 2020, 49 (4) : 483–490. DOI:10.1016/j.ijom.2019.07.011.
- [21] Mourits DL, Wolff J, Forouzanfar T, et al. 3D orbital reconstruction in a patient with microphthalmos and a large orbital cyst—a case report [J]. *Ophthalmic Genet*, 2016, 37 (2) : 233–237. DOI:10.3109/13816810.2015.1033558.
- [22] Furdová A, Sramka M, Thurzo A, et al. Early experiences of planning stereotactic radiosurgery using 3D printed models of eyes with uveal melanomas [J]. *Clin Ophthalmol*, 2017, 11 : 267–271. DOI:10.2147/OPHT. S123640.
- [23] Mobit P, Yang CC, Nittala MR, et al. Eye plaque brachytherapy for choroidal malignant melanoma: a case report on the use of innovative technology to expand access, improve practice, and enhance outcomes [J/OL]. *Cureus*, 2024, 16 (2) : e54572 [2025-08-09]. <http://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38524010>. DOI:10.7759/cureus.54572.
- [24] Adams JW, Paxton L, Dawes K, et al. 3D printed reproductions of orbital dissections: a novel mode of visualising anatomy for trainees in ophthalmology or optometry [J]. *Br J Ophthalmol*, 2015, 99 (9) : 1162–1167. DOI:10.1136/bjophthalmol-2014-306189.
- [25] Lichtenstein JT, Zeller AN, Lemound J, et al. 3D-printed simulation device for orbital surgery [J]. *J Surg Educ*, 2017, 74 (1) : 2–8. DOI:10.1016/j.jsurg.2016.07.005.
- [26] 董谢平,裴国献. 3D 打印技术在骨科临床的应用与展望 [J]. *陆军军医大学学报*, 2022, 44 (15) : 1501–1507. DOI:10.16016/j.2097-0927.202203200.
Dong XP, Pei GX. Clinical application and prospect of 3D printing technology in orthopedics [J]. *J Army Med Univ*, 2022, 44 (15) : 1501–1507. DOI:10.16016/j.2097-0927.202203200.
- [27] 赵峰,任彦新. 3D 打印技术在眼科的应用 [J]. *中华实验眼科杂志*, 2019, 37 (12) : 1034–1036. DOI:10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2019.12.017.
Zhao F, Ren YX. The application of 3D printing in ophthalmology [J]. *Chin J Exp Ophthalmol*, 2019, 37 (12) : 1034–1036. DOI:10.3760/cma.j.issn.2095-0160.2019.12.017.
- [28] Dvoracek LA, Lee JY, Unadkat JV, et al. Low-cost, Three-dimensionally printed, anatomical models for optimization of orbital wall reconstruction [J]. *Plast Reconstr Surg*, 2021, 147 (1) : 162–166. DOI:10.1097/PRS.0000000000007495.
- [29] Raveggi E, Gerbino G, Autorino U, et al. Accuracy of intraoperative navigation for orbital fracture repair: a retrospective morphometric analysis [J]. *J Craniomaxillofac Surg*, 2023, 51 (2) : 107–116. DOI:10.1016/j.jcms.2023.01.016.
- [30] Bly RA, Chang SH, Cudejkova M, et al. Computer-guided orbital reconstruction to improve outcomes [J]. *JAMA Facial Plast Surg*, 2013, 15 (2) : 113–120. DOI:10.1001/jamafacial.2013.316.
- [31] Zong CL, Shi YL, Jia JQ, et al. A retrospective study to compare the treatment outcomes with and without surgical navigation for fracture of the orbital wall [J]. *Chin J Traumatol*, 2021, 24 (1) : 11–17. DOI:10.1016/j.cjtee.2020.10.002.
- [32] Baumann A, Sinko K, Dörner G. Late reconstruction of the orbit with patient-specific implants using computer-aided planning and navigation [J]. *J Oral Maxillofac Surg*, 2015, 73 (12 Suppl) : S101–106. DOI:10.1016/j.joms.2015.06.149.
- [33] Bao T, Yu D, Luo Q, et al. Quantitative assessment of symmetry recovery in navigation-assisted surgical reduction of zygomaticomaxillary complex fractures [J]. *J Craniomaxillofac Surg*, 2019, 47 (2) : 311–319. DOI:10.1016/j.jcms.2018.12.003.
- [34] Chu YY, Yang JR, Pek CH, et al. Application of real-time surgical navigation for zygomatic fracture reduction and fixation [J]. *J Plast Reconstr Aesthet Surg*, 2022, 75 (1) : 424–432. DOI:10.1016/j.bjps.2021.05.052.
- [35] Zavattero E, Ramieri G, Roccia F, et al. Comparison of the outcomes of complex orbital fracture repair with and without a surgical navigation system: a prospective cohort study with historical controls [J]. *Plast Reconstr Surg*, 2017, 139 (4) : 957–965. DOI:10.1097/PRS.0000000000003229.
- [36] Heisel CJ, Tuohy MM, Riddering AL, et al. Stereotactic navigation improves outcomes of orbital decompression surgery for thyroid associated orbitopathy [J]. *Ophthalmic Plast Reconstr Surg*, 2020, 36 (6) : 553–556. DOI:10.1097/IOP.0000000000001630.
- [37] Spalthoff S, Jehn P, Zimmerer R, et al. Modified lateral orbital wall decompression in Graves' orbitopathy using computer-assisted planning [J]. *Int J Oral Maxillofac Surg*, 2018, 47 (2) : 167–174. DOI:10.1016/j.ijom.2017.10.009.
- [38] Tel A, Murta F, Sembrino S, et al. Virtual planning and navigation for targeted excision of intraorbital space-occupying lesions: proposal of a computer-guided protocol [J]. *Int J Oral Maxillofac Surg*, 2022, 51 (2) : 269–278. DOI:10.1016/j.ijom.2021.07.013.
- [39] 王耀华,余进海,胡军华,等. 导航引导下鼻内镜经蝶筛入路眶尖部海绵状血管瘤摘除术的临床疗效观察 [J]. *中华眼科杂志*, 2021, 57 (11) : 837–843. DOI:10.3760/cma.j.cn112142-20210207-00081.
Wang YH, Yu JH, Hu JH, et al. Navigation-guided nasal endoscopy for removal of the cavernous hemangioma of the orbital apex through the sphenoid approach [J]. *Chin J Ophthalmol*, 2021, 57 (11) : 837–843. DOI:10.3760/cma.j.cn112142-20210207-00081.
- [40] Zhao Y, Li Y, Li Z, et al. Removal of orbital metallic foreign bodies with image-guided surgical navigation [J]. *Ophthalmic Plast Reconstr Surg*, 2020, 36 (3) : 305–310. DOI:10.1097/IOP.0000000000001580.
- [41] Refahee SM, Khalifa ME, Askar MG, et al. Role of finite element analysis for selection of single point fixation in zygomaticomaxillary complex fracture [J]. *BMC Oral Health*, 2024, 24 (1) : 15. DOI:10.1186/s12903-023-03822-1.
- [42] Zmuda Trzebiatowski MA, Kłosowski P, Skorek A, et al. Nonlinear dynamic analysis of the pure " buckling " mechanism during blow-out trauma of the human orbit [J]. *Sci Rep*, 2020, 10 (1) : 15275. DOI:10.



- 1038/s41598-020-72186-1.
- [43] Moura LB, Jürgens PC, Gabrielli M, et al. Dynamic three-dimensional finite element analysis of orbital trauma[J]. Br J Oral Maxillofac Surg, 2021, 59(8): 905-911. DOI: 10. 1016/j. bjoms. 2020. 09. 021.
- [44] Huempfer-Hierl H, Bohne A, Wollny G, et al. Blunt forehead trauma and optic canal involvement: finite element analysis of anterior skull base and orbit on causes of vision impairment[J]. Br J Ophthalmol, 2015, 99(10): 1430-1434. DOI: 10. 1136/bjophthalmol-2015-306646.
- [45] Nagasao T, Morotomi T, Kuriyama M, et al. Biomechanical analysis of likelihood of optic canal damage in peri-orbital fracture[J]. Comput Assist Surg (Abingdon), 2018, 23(1): 1-7. DOI: 10. 1080/24699322. 2018. 1460401.
- [46] 李岩, 吴鹏森, 马越, 等. 有限元生物力学分析对眶颧额骨折不同内固定方式稳定性的评价[J]. 中华实验眼科杂志, 2020, 38(11): 916-922. DOI: 10. 3760/cma. j. cn115989-20200727-00529.
- Li Y, Wu PS, Ma Y, et al. Stability evaluation of different internal fixation methods for zygomaticomaxillary complex fractures by finite element biomechanical analysis[J]. Chin J Exp Ophthalmol, 2020, 38(11): 916-922. DOI: 10. 3760/cma. j. cn115989-20200727-00529.
- [47] Li Y, Wu P, Liu S, et al. Finite element analysis of 2- and 3-point internal fixation methods for the treatment of zygomaticomaxillary complex fracture[J]. J Craniofac Surg, 2020, 31(8): 2208-2212. DOI: 10. 1097/SCS. 00000000000006811.
- [48] Aizezi N, Nagasao T, Morotomi T, et al. Separation patterns of orbital wall and risk of optic canal injury in Le Fort 3 osteotomy[J]. J Craniofac Surg, 2018, 46(5): 795-801. DOI: 10. 1016/j. jcms. 2018. 03. 011.
- [49] Juliet M, Parameswaran A, Pedamally M, et al. Does angulation of osteotome during pterygomaxillary dysjunction for a Le Fort I osteotomy influence stress transmission to the orbit? A finite element simulation in normal and cleft maxillae[J]. Br J Oral Maxillofac Surg, 2021, 59(4): 407-412. DOI: 10. 1016/j. bjoms. 2020. 08. 031.
- [50] Khelemsky R, Hill B, Buchbinder D. Validation of a novel cognitive simulator for orbital floor reconstruction[J]. J Oral Maxillofac Surg, 2017, 75(4): 775-785. DOI: 10. 1016/j. joms. 2016. 11. 027.
- [51] Bouaoud J, El Beheiry M, Jablon E, et al. DIVA, a 3D virtual reality platform, improves undergraduate craniofacial trauma education[J]. J Stomatol Oral Maxillofac Surg, 2021, 122(4): 367-371. DOI: 10. 1016/j. jormas. 2020. 09. 009.
- [52] Davis CR, Rosenfield LK. Looking at plastic surgery through Google Glass: part I. Systematic review of Google Glass evidence and the first plastic surgical procedures[J]. Plast Reconstr Surg, 2015, 135(3): 918-928. DOI: 10. 1097/PRS. 0000000000001056.
- [53] Scolozzi P, Bijlenga P. Removal of recurrent intraorbital tumour using a system of augmented reality[J]. Br J Oral Maxillofac Surg, 2017, 55(9): 962-964. DOI: 10. 1016/j. bjoms. 2017. 08. 360.
- [54] Tel A, Arboit L, Sembrionio S, et al. The transantral endoscopic approach: a portal for masses of the inferior orbit-improving surgeons' experience through virtual endoscopy and augmented reality[J]. Front Surg, 2021, 8: 715262. DOI: 10. 3389/fsurg. 2021. 715262.
- [55] Neves CA, Vaisbuch Y, Leuze C, et al. Application of holographic augmented reality for external approaches to the frontal sinus[J]. Int Forum Allergy Rhinol, 2020, 10(7): 920-925. DOI: 10. 1002/alr. 22546.
- [56] Lin L, Liu X, Gao Y, et al. The application of augmented reality in craniofacial bone fracture reduction: study protocol for a randomized controlled trial[J]. Trials, 2022, 23(1): 241. DOI: 10. 1186/s13063-022-06174-3.
- [57] Tang ZN, Hu LH, Soh HY, et al. Accuracy of mixed reality combined with surgical navigation assisted oral and maxillofacial tumor resection[J]. Front Oncol, 2021, 11: 715484. DOI: 10. 3389/fonc. 2021. 715484.
- [58] Cho KH, Papay FA, Yanof J, et al. Mixed reality and 3D printed models for planning and execution of face transplantation[J/OL]. Ann Surg, 2021, 274(6): e1238-e1246[2024-12-12]. http://www. ncbi..nlm.nih.gov/pubmed/32224738. DOI: 10. 1097/SLA. 0000000000003794.
- [59] Tokuno J, Fried GM, Kaneva P, et al. Mixed reality for remote procedural training and assessment: a feasibility study[J]. J Surg Educ, 2025, 82(6): 103504. DOI: 10. 1016/j. jsurg. 2025. 103504.
- [60] Weech S, Kenny S, Barnett-Cowan M. Presence and cybersickness in virtual reality are negatively related: a review[J]. Front Psychol, 2019, 10: 158. DOI: 10. 3389/fpsyg. 2019. 00158.
- [61] Zeng X, Meng Z, He J, et al. Embedded bioprinting for designer 3D tissue constructs with complex structural organization[J]. Acta Biomater, 2022, 140: 1-22. DOI: 10. 1016/j. actbio. 2021. 11. 048.
- [62] Zha Y, Li Y, Lin T, et al. Progenitor cell-derived exosomes endowed with VEGF plasmids enhance osteogenic induction and vascular remodeling in large segmental bone defects[J]. Theranostics, 2021, 11(1): 397-409. DOI: 10. 7150/thno. 50741.
- [63] Davoodi E, Sarikhani E, Montazerian H, et al. Extrusion and microfluidic-based bioprinting to fabricate biomimetic tissues and organs[J]. Adv Mater Technol, 2020, 5(8): 1901044. DOI: 10. 1002/admt. 201901044.
- [64] Olavarria OA, Bernardi K, Shah SK, et al. Robotic versus laparoscopic ventral hernia repair: multicenter, blinded randomized controlled trial[J]. BMJ, 2020, 370: m2457. DOI: 10. 1136/bmj. m2457.
- [65] Pandey SK, Sharma V. Robotics and ophthalmology: are we there yet? [J]. Indian J Ophthalmol, 2019, 67(7): 988-994. DOI: 10. 4103/ijo. IJO_1131_18.
- [66] Wang Y, Sun J, Liu X, et al. Robot-assisted orbital fat decompression surgery: first in human[J]. Transl Vis Sci Technol, 2022, 11(5): 8. DOI: 10. 1167/tvst. 11. 5. 8.
- [67] Parikh D, Armstrong G, Liou V, et al. Advances in telemedicine in ophthalmology[J]. Semin Ophthalmol, 2020, 35(4): 210-215. DOI: 10. 1080/08820538. 2020. 1789675.
- [68] Li JO, Liu H, Ting D, et al. Digital technology, tele-medicine and artificial intelligence in ophthalmology: a global perspective[J]. Prog Retin Eye Res, 2021, 82: 100900. DOI: 10. 1016/j. preteyeres. 2020. 100900.
- [69] Phipps B, Hadoux X, Sheng B, et al. AI image generation technology in ophthalmology: use, misuse and future applications[J]. Prog Retin Eye Res, 2025, 106: 101353. DOI: 10. 1016/j. preteyeres. 2025. 101353.

(收稿日期: 2025-01-14 修回日期: 2025-08-08)

(本文编辑: 张宇 骆世平)

广告目次

瑞秀复(眼科用生物羊膜) 广州瑞泰生物科技有限公司……封二

沃丽汀(卵磷脂络合碘片) 广东泰恩康医药股份有限公司……封三

中华医学期刊全文数据库 《中华医学杂志》社有限责任公司……封底



中华医学杂志社
Chinese Medical Association Publishing House

版权所有 违者必究