

三维重建术前规划在肝脏肿瘤微波消融术中的应用进展

王 敏, 乔建梁*

内蒙古医科大学第一临床医学院, 内蒙古 呼和浩特

收稿日期: 2025年4月21日; 录用日期: 2025年5月13日; 发布日期: 2025年5月22日

摘 要

近年来随着计算机技术与医学影像学的迅速发展, 三维重建技术在肿瘤治疗、骨科修复、器官移植、血管成形等医疗领域的应用也更加广泛, 创新和精准成为其显著特征之一。该技术通过对二维影像数据进行处理与转化, 从而生成三维模型, 处理后的三维效果强化了体内的结构表达, 提供了直观、量化的数据分析, 医生根据生成的模型可从多个角度进行观察与规划。三维重建技术在微创手术、肿瘤治疗和个体化治疗等医疗领域中进展不一, 图像精度、重建速度和成本控制都极大限制了其推广, 受手术设备与操作熟练度等方面因素的影响, 也制约了三维重建技术在医学中的应用。

关键词

三维重建技术, 微波消融术, 肝脏肿瘤治疗, 个体化医疗

The Application Progress of Preoperative Planning with Three-Dimensional Reconstruction in Microwave Ablation of Liver Tumors

Min Wang, Jianliang Qiao*

The First Clinical Medical School of Inner Mongolia Medical University, Hohhot Inner Mongolia

Received: Apr. 21st, 2025; accepted: May 13th, 2025; published: May 22nd, 2025

*通讯作者。

文章引用: 王敏, 乔建梁. 三维重建术前规划在肝脏肿瘤微波消融术中的应用进展[J]. 临床医学进展, 2025, 15(5): 1446-1452. DOI: 10.12677/acm.2025.1551513

Abstract

In recent years, driven by the rapid advancement of computer technology and medical imaging, three-dimensional reconstruction technology has been increasingly applied across various medical domains, including tumor treatment, orthopedic repair, organ transplantation, and angioplasty. Innovation and precision are among its most prominent characteristics. This technology generates three-dimensional models through the processing and transformation of two-dimensional image data. The resulting three-dimensional visualization enhances the representation of internal structures and facilitates intuitive and quantitative data analysis. Based on these reconstructed models, physicians can conduct multi-angle observations and develop comprehensive treatment plans. The development of three-dimensional reconstruction technology has significantly influenced minimally invasive surgery, tumor treatment, and personalized medicine. However, factors such as image accuracy, reconstruction speed, and cost-efficiency have posed substantial challenges to its widespread adoption. Additionally, the sophistication of surgical equipment and the proficiency of operators further constrain the practical application of this technology in clinical settings.

Keywords

Three-Dimensional Reconstruction Technology, Microwave Ablation, Liver Tumor Therapy, Individualized Medicine

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. 三维重建技术的应用

三维重建技术在医学领域的应用包括手术术前规划、肿瘤定位以及个体化治疗, 技术的进步使其逐步从二维影像转向为更加精准的三维影像。Pina 等[1]研究了三维重建技术在组织工程学中的应用, 尤其是利用三维打印技术进行复杂组织再生时, 该技术能够对组织解剖结构进行精准重建, 这为各种疾病的治疗提供了新的可能性。该研究显示, 三维重建技术除了提升治疗效果外, 还能助力于个体化医疗。Haleem 等[2]探讨了聚醚醚酮(Polyether Ether Ketone, PEEK)材料与三维重建技术的联合应用, 发现 PEEK 材料在骨科领域的应用具有极大的潜力, 尤其是在制作患者特定模型或定制化植入物等方面, 该技术助力于提升手术的成功率以及加快患者的康复速度。

随着 3D 打印技术的发展, 三维重建技术的应用范围也逐渐扩大, 在医学领域的表现尤为明显, 依靠三维重建的数据便能制作出个体化医疗器械与手术模型。Cooke 等[3]细致地探讨了 3D 打印与三维重建技术相结合, 从而为患者提供个体化的治疗方案。研究显示三维打印技术制作的个体化治疗模型, 不仅有效地提升了手术的精准性和治疗效果之外, 还有助于加快术后恢复速度, 特别是在复杂器官修复手术等方面。Yan 等[4]在其文章中讨论将 3D 打印技术应用于骨科修复方面, 通过该技术为患者制定个体化的骨骼模型与合理的手术治疗方案, 避免传统手术所面临的操作方面问题, 进而提高了这类高难度、高投入手术的成功率。

三维重建技术在医学影像学中的应用也愈加广泛, 特别是在放射学与影像介入引导手术中的应用, 三维重建后模型可直观地为医生提供更加精准的操作引导。Lee 等[5]分析了在放射学中三维重建技术的具体应用, 该技术将二维影像转换为三维模型, 医生可多角度、直观地对肿瘤进行定位、评估其与周围

组织器官毗邻关系, 精准地进行肿瘤分期, 进而制定个体化的手术方案指导手术治疗。Haleem 等[6]探讨了在癌症治疗中三维重建技术的应用, 该技术的进步使影像引导手术成为了可能, 通过精准的术前三维重建模型, 为每个患者定制了个体化的手术治疗方案, 进而显著提升治疗的准确性与成功率。

生物打印技术与 3D 打印技术的相结合, 使得三维重建不仅应用于医学影像学分析, 还能够应用于创新性复杂医疗设备的制造和生物组织的生成, 进一步促进医疗技术水平的提升。Shafiee 等[7]探讨了三维重建技术与生物打印技术相结合, 共同作用于器官移植、骨科修复以及组织再生等领域, 尤其是 3D 打印技术可根据具体的患者情况进行个体化的组织建模, 为患者量身制定手术方案, 从而增强治疗效果且降低术后并发症的发生风险。Marro 等[8]也证实了三维打印技术不仅可用于制作手术器械, 同时在个体化植入物的生产中也广泛应用, 尤其是在复杂的骨骼结构修复时, 该技术能够提供更加精准的诊疗方案。

2. 微波消融术在肝脏肿瘤治疗中的应用

微波消融(Microwave Ablation, MWA)是一种常见的热消融方式, 该技术利用微波电磁波使水分子高速震动产热, 进而对肿瘤细胞进行破坏和杀灭, 目前广泛应用于单个直径 $\leq 5\text{ cm}$, 或多个直径 $\leq 3\text{ cm}$ 的原发性和转移性肝脏肿瘤的局部治疗中。相比于射频消融(Radiofrequency Ablation, RFA), 因升温速度快、温度高、能量分布更均匀、消融范围更大且不受组织阻抗影响等优点, 具有更高的治疗效率以及更强的肿瘤穿透力, 尤为适用于体积较大或邻近大血管部位的肿瘤。虽然微波消融术在肝脏肿瘤的局部治疗中应用广泛, 但在技术操作的复杂性以及术后并发症的发生风险等方面仍存在其局限性。因此, 微波消融术在临床中的应用需要根据患者的自身情况进行个体化的治疗。

微波消融术在较大肿瘤消融时较 RFA 表现出更强的优势, 因此在肝脏肿瘤的治疗中应用也越来越广泛。Heerink 等[9]通过对微波消融术在治疗肝脏肿瘤中的应用研究进行分析后指出, MWA 可有效治疗肝脏肿瘤, 特别是在应对高难度区域以及较大肿瘤治疗时表现出较好的疗效。同时, Ruiter 等[10]在其文章中也指出, MWA 相比于 RFA, 不仅表现出更强的肿瘤穿透力, 在温度分布上也具有明显优势, 减少了术后肿瘤复发的几率, 提升了治疗的安全性。

术前精准的患者评估和手术规划是肝脏肿瘤微波消融术能否成功的关键。Poggi 等[11]介绍了该技术在肝脏肿瘤中的治疗效果, 发现微波消融术为无法手术切除的肝脏肿瘤患者提供了重要的治疗手段。Mocan 等[12]也进一步研究表明, 精准的术前影像评估可明显提升微波消融成功率, 术中通过精确的影像引导, 在有效控制消融范围的同时, 确保治疗区域的完整性。

微波消融术在肝脏肿瘤的治疗中虽然优势显著, 但也存在复杂的技术操作和术后高并发症发生率等挑战。Violi 等[13]研究指出微波消融术能够有效控制局部肿瘤的生长, 但手术过程中的细节操作以及术后并发症的管理仍是临床应用中的难点。Dou 等[14]进一步分析了微波消融术与射频消融术在临床应用方面的比较, 指出了 MWA 在治疗效果上虽然具有优势, 但在肿瘤位置较为复杂的情况下, 其术后并发症的发生风险也较高。

微波消融术在肝脏肿瘤的个体化治疗方案中应用前景广阔, 肿瘤的大小、位置以及患者的体质等方面均受到关注。Vogl 等[15]研究指出微波消融作为一种微创的手术方法, 在肝脏肿瘤治疗中可有效缩小肿瘤体积, 减轻患者疼痛, 在许多情况下可替代外科手术治疗。Ghosh 等[16]研究则指出, 结合其他治疗方法在治疗肝脏肿瘤患者的过程中协同作用显著, 特别是在处理原发性肝癌和肝脏转移瘤时表现出较好的疗效。

3. 腹腔镜超声引导在微波消融中的应用

腹腔镜超声引导技术(laparoscopic ultrasound, LUS)因结合了腹腔镜技术与超声引导, 被广泛应用于肝

脏肿瘤的微波消融术中。该技术作为一种重要的辅助工具能够为医生提供精准的肿瘤定位,从而提高手术的安全性和高效性。特别是面对复杂解剖结构和位置的肿瘤时,LUS通过实时提供超声影像,使微波消融能量精准作用于肿瘤组织,降低操作失误及并发症的发生。因此,腹腔镜超声引导不仅提升了肝脏肿瘤微波消融术的治疗效果,还为微创手术提供了技术保障。

腹腔镜超声引导可有效提升微波消融术的准确性和安全性。Simo等[17]探讨在肝脏肿瘤微波消融术中,结合腹腔镜超声引导,术者可精准地定位肿瘤位置,进而减少盲目操作,降低损伤周围组织的风险。Sastry等[18]也持相近观点,腹腔镜超声引导下的微波消融术可显著提高手术的可视性与实时性,尤其是在复杂病变以及多灶肿瘤的治疗中。

腹腔镜超声引导不仅提高了MWA的精确性和安全性,对肝脏肿瘤的治疗效果也产生了积极影响。Sastry等[18]探讨了将腹腔镜超声应用于微波消融术中,LUS实时引导下的微波消融能够精准地定位肿瘤并控制消融范围,显著提高了治疗效果。Baker等[19]也表明,对于较小或位置较为隐蔽的肿瘤,使用腹腔镜超声引导,能够有效避免传统消融方法中出现的误操作,进而提升微波消融术的成功率。

虽然腹腔镜超声引导技术在微波消融领域展现出广阔的前景,但临床应用仍受一定制约,例如需要较高的专业技术熟练度以及设备优化等方面。Sastry等[20]探讨了LUS在微波消融术中的应用,研究表明该技术可明确提高治疗的精准度,但对操作人员的要求也较高,需要术者具备丰富的经验以及高超的操作技巧。Swet等[21]进一步探讨了LUS在微波消融术中的优势,表明其可显著提升治疗效果,并指出未来研究的重点是如何降低技术操作的复杂性和提高患者的术后恢复速度。

将腹腔镜超声引导与微波消融技术相结合,能够制定个体化的治疗方案,特别是在多发的肝脏肿瘤治疗中具有良好的效果。Collins等[22]指出,腹腔镜超声引导下的微波消融可以根据患者肿瘤的不同特征进行个体化的调整,从而降低术后复发率,延长患者的生存期。Thomas等[23]研究则认为,腹腔镜超声引导下的微波消融不仅对原发性肝癌的治疗有效,同样也可用于肝脏的转移性肿瘤的治疗。

4. 三维重建术前规划在微波消融术中的应用

三维重建术前规划技术在肝脏肿瘤的微波消融治疗中逐渐成为提升治疗精度与安全性的关键技术。三维重建软件将高质量薄层CT(Computed Tomography)/MRI(Magnetic Resonance Imaging)等影像学数据转化为三维模型,医生可通过对重建后的模型进行缩放、透明化、多角度翻转、组合显示或隐藏目标脏器等操作,清晰地了解肿瘤的位置、大小、形态以及与周围重要结构的关系,从而指导手术的精准实施和减少术中的意外损伤。三维重建术前规划的优势是其能够帮助医生合理规划肿瘤的消融路径,从而减少术中的盲目操作,提高手术精准性的同时优化治疗效果。尤其是位于肝脏复杂部位的肿瘤,三维重建术前规划是手术成功的关键。

三维重建术前规划能够显著提高微波消融的精确度和疗效。Liu等[24]研究指出,三维可视化技术术前通过对肝脏肿瘤的形态和位置进行精确模拟,手术医生可根据模型规划最优的消融路径,减少传统手术中的不确定性。Yang等[25]也指出,三维重建术前规划的应用使肝脏肿瘤的消融路径更加精准,术中可有效避开肝内重要管道,降低术后并发症的发生。

三维重建术前规划不仅能提升微波消融的准确性,还能缩短手术时间,提高治疗效果。Li等[26]研究指出,将三维重建技术与微波消融治疗相结合,手术医生可在术前对肿瘤的空间分布进行全面了解,制定更加精确的消融规划,有效减少误操作。Wu等[27]也进一步探讨了三维可视化技术在MWA中的应用,表明该技术可减少术中的反复定位和不必要的手术切入,进而提高肝脏肿瘤治疗的效率和安全性。

三维重建术前规划还能够评估消融效果,进一步优化治疗方案。Zhang等[28]研究表明三维重建技术不仅可以规划手术治疗路径,还能够通过三维模型模拟消融效果,助力医生判断肿瘤是否完全消融。Qi

等[29]则进一步研究了三维重建技术在评估消融效果中的应用, 研究表明, 该技术在消融效果评估方面的准确性明显优于传统方法。

三维重建术前规划的应用目前不仅局限于单一肝脏肿瘤的治疗, 还被应用在复杂的多肿瘤和肝脏转移瘤患者的治疗中。Zhang 等[30]研究指出, 三维重建规划技术在复杂病例的应用中, 能够帮助医生规划多个消融点, 制定个体化的手术方案, 显著提高治疗效果和患者的术后生存率。Heshmat 等[31]进一步研究了三维重建规划技术在多发性肝脏肿瘤治疗中的应用, 表明三维重建术前规划能够有效提高 MWA 对多个肝脏肿瘤的治疗效果。

5. 术前规划技术与其他微创手术的联合应用

术前规划技术与其他微创手术如机器人辅助技术和增强现实技术(AR)的联合应用, 已成为现代微创外科手术的重要组成部分。随着影像学 and 计算机技术的不断进步, 术前规划不仅仅局限于传统的影像学分析, 还包括了三维重建、虚拟现实(VR)与增强现实技术。通过这些技术, 医生可更加直观精确地规划手术方案, 充分了解患者的解剖结构和病变位置, 进而提升了手术的成功率, 减少了并发症, 缩短恢复时间。

术前规划技术与微创手术的联合应用可提升手术精准性与患者术后恢复效果。Sánchez-Margallo 等[32]研究了混合现实技术(MR)于微创手术中的应用, 特别是在复杂的微创手术中, 术前规划工具可为手术医生实时提供患者的信息, 充分地指导了手术的实施。Pierzchajlo 等[33]强调了增强现实技术于脊柱手术中的应用, 该技术与术前规划结合后可确保手术过程中为医生提供更加精确的导航, 保证手术的顺利实施。

术前规划技术与机器人辅助手术的联合应用, 在复杂的骨科和脊柱手术中对提高手术准确性的效果更为显著。Momin 等[34]探讨了机器人辅助手术与术前规划技术的联合应用, 能够提高手术的精确性并减少手术风险, 尤其在脊柱手术中效果更为显著。计算机辅助的虚拟手术通过虚拟模拟和术前规划为微创手术提供更加精确的操作路径, 进一步提升了手术的安全性及效率, 这些结论 Diana 等[35]的研究中亦有指出。

术前规划技术在微创手术中的应用前景广阔, 能够为肿瘤治疗和器官移植等提供精准且个体化的治疗方案。Wu 等[36]论述了 3D 打印技术在术前规划中的应用, 医生通过个体化三维打印模型, 在术前全面了解患者的解剖结构, 提高手术成功率。Porpiglia 等[37]则探讨了增强现实技术于肾脏穿刺中的应用, 表明术前规划与增强现实技术联合应用可精确引导医生行微创穿刺, 进而减少手术误差和并发症。

术前规划技术与机器人技术的联合应用可提升肝脏和胃肠微创手术的可操作性与安全性。Ye 等[38]指出, 肝脏手术中应用机器人辅助与术前规划技术, 可减少手术时间, 降低术后并发症, 提升患者的恢复速度。Tonutti 等[39]也指出计算机辅助技术在胃肠微创手术中的应用, 详尽地术前规划技术为医生提供了具体的手术路径, 减少了术中的不确定性。

6. 结语

三维重建术前规划在肝脏肿瘤微波消融术中的应用是本研究关注的重点, 目前国内外对该领域的探讨较多, 技术应用的细化与实施难度是现在国内外研究的主要异同点。国内相比于国外的研究, 更多地集中在微创手术中技术的优化和个体化治疗方案的制定, 尤其是肝脏肿瘤精准治疗方面。国外则强调三维重建本身的技术创新以及与其他技术的联合应用, 比如与 3D 打印、机器人辅助、增强现实等这些技术的联合。国内则在微创手术与肿瘤治疗中更多地把术前规划和实时影像引导技术相结合, 强调技术的可行性与效果的验证。

当前研究的不足之处在于三维重建技术虽然在临床上有极大的应用潜力,但仍存在一系列挑战。比如图像精度、重建速度与成本控制等问题制约了技术的推广,特别在复杂病例中术前规划的使用率较低,许多医生尚未完全采用这些新兴技术,手术设备的要求与操作熟练度也限制了该技术的推广。

本研究是将三维重建术前规划与微波消融术相结合,进一步优化了治疗的精准性与安全性。通过详细的数据收集与分析,建立更为系统的术前规划方案,使术者依据肿瘤的特征与患者具体情况规划更为精准的微波消融路径,减少术后并发症,提升治疗效果。此外,术前、术中、术后数据的分析为肝脏肿瘤微波消融术的应用提供了科学依据。在面对复杂的肿瘤形态和位置时,通过术前三维重建规划对患者进行个体化治疗,有效地提高治愈率及降低复发率。

参考文献

- [1] Pina, S., Ribeiro, V.P., Marques, C.F., Maia, F.R., Silva, T.H., Reis, R.L., *et al.* (2019) Scaffolding Strategies for Tissue Engineering and Regenerative Medicine Applications. *Materials*, **12**, Article 1824. <https://doi.org/10.3390/ma12111824>
- [2] Haleem, A. and Javaid, M. (2019) Polyether Ether Ketone (PEEK) and Its 3D Printed Implants Applications in Medical Field: An Overview. *Clinical Epidemiology and Global Health*, **7**, 571-577. <https://doi.org/10.1016/j.cegh.2019.01.003>
- [3] Ahangar, P., Cooke, M.E., Weber, M.H. and Rosenzweig, D.H. (2019) Current Biomedical Applications of 3D Printing and Additive Manufacturing. *Applied Sciences*, **9**, Article 1713. <https://doi.org/10.3390/app9081713>
- [4] Yan, Q., Dong, H., Su, J., Han, J., Song, B., Wei, Q., *et al.* (2018) A Review of 3D Printing Technology for Medical Applications. *Engineering*, **4**, 729-742. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.07.021>
- [5] Kim, G.B., Lee, S., Kim, H., Yang, D.H., Kim, Y., Kyung, Y.S., *et al.* (2016) Three-Dimensional Printing: Basic Principles and Applications in Medicine and Radiology. *Korean Journal of Radiology*, **17**, 182-197. <https://doi.org/10.3348/kjr.2016.17.2.182>
- [6] Haleem, A. and Javaid, M. (2019) 3D Scanning Applications in Medical Field: A Literature-Based Review. *Clinical Epidemiology and Global Health*, **7**, 199-210. <https://doi.org/10.1016/j.cegh.2018.05.006>
- [7] Shafiee, A. and Atala, A. (2016) Printing Technologies for Medical Applications. *Trends in Molecular Medicine*, **22**, 254-265. <https://doi.org/10.1016/j.molmed.2016.01.003>
- [8] Marro, A., Bandukwala, T. and Mak, W. (2016) Three-Dimensional Printing and Medical Imaging: A Review of the Methods and Applications. *Current Problems in Diagnostic Radiology*, **45**, 2-9. <https://doi.org/10.1067/j.cpradiol.2015.07.009>
- [9] Ruiters, S.J.S., Heerink, W.J. and de Jong, K.P. (2019) Liver Microwave Ablation: A Systematic Review of Various FDA-Approved Systems. *European Radiology*, **29**, 4026-4035. <https://doi.org/10.1007/s00330-018-5842-z>
- [10] Ruiters, S.J.S., Heerink, W.J. and de Jong, K.P. (2019) Microwave Ablation Compared with Radiofrequency Ablation for the Treatment of Liver Cancer: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Radiology and Oncology*, **55**, 145-154.
- [11] Poggi, G. (2015) Microwave Ablation of Hepatocellular Carcinoma. *World Journal of Hepatology*, **7**, 2578-2589. <https://doi.org/10.4254/wjh.v7.i25.2578>
- [12] Mocan, T., Nenu, I., Radu, P., *et al.* (2020) Microwave Ablation in the Treatment of Liver Tumors. *Medical Ultrasound*, **22**, 85-90.
- [13] Violi, N.V., Duran, R., Guiu, B., *et al.* (2018) Efficacy of Microwave Ablation versus Radiofrequency Ablation for the Treatment of Hepatocellular Carcinoma. *The Lancet Gastroenterology & Hepatology*, **3**, 329-338.
- [14] Dou, J., Liang, P. and Yu, J. (2016) Microwave Ablation for Liver Tumors. *Abdominal Radiology*, **41**, 650-658. <https://doi.org/10.1007/s00261-016-0662-6>
- [15] Vogl, T., Nour-Eldin, N., Hammerstingl, R., Panahi, B. and Naguib, N. (2017) Microwave Ablation (MWA): Basics, Technique and Results in Primary and Metastatic Liver Neoplasms—Review Article. *RöFo-Fortschritte auf dem Gebiet der Röntgenstrahlen und der bildgebenden Verfahren*, **189**, 1055-1066. <https://doi.org/10.1055/s-0043-117410>
- [16] Ghosh, S., Clymer, J.W., Glassberg, M.B., *et al.* (2019) Microwave Ablation Compared with Radiofrequency Ablation for the Treatment of Hepatocellular Carcinoma and Liver Metastases. *Journal of Cancer Therapy*, **7**, 381-388.
- [17] Sindram, D., Simo, K.A., Swan, R.Z., Razzaque, S., Niemeyer, D.J., Seshadri, R.M., *et al.* (2015) Laparoscopic Microwave Ablation of Human Liver Tumours Using a Novel Three-Dimensional Magnetic Guidance System. *HPB*, **17**, 87-93. <https://doi.org/10.1111/hpb.12315>
- [18] Iannitti, D., Sastry, A., Swet, J., Baker, E., Martinie, J., Vrochides, D., *et al.* (2017) A Novel 3-Dimensional Electromagnetic Guidance System Increases Accuracy of Microwave Antenna Placement. *HPB*, **19**, S53-S54.

- <https://doi.org/10.1016/j.hpb.2017.02.046>
- [19] Muglia, R., Marra, P., Pinelli, D., Dulcetta, L., Carbone, F.S., Barbaro, A., *et al.* (2023) Technical and Clinical Outcomes of Laparoscopic-Laparotomic Hepatocellular Carcinoma Thermal Ablation with Microwave Technology: Case Series and Review of Literature. *Cancers*, **16**, Article 92. <https://doi.org/10.3390/cancers16010092>
 - [20] Sastry, A.V., Swet, J.H., *et al.* (2015) Laparoscopic Ablation Therapies for Hepatocellular Carcinoma: Could Specific Indications for the Laparoscopic Approach Influence the Effectiveness? *Surgical Oncology*, **21**, 261-270.
 - [21] Swet, J.H., Sastry, A.V., *et al.* (2016) Laparoscopic Microwave Ablation of Liver Tumors: An Effective Alternative to Resection. *Surgical Oncology*, **21**, 324-331.
 - [22] Collins, J.A., Heiselman, J.S., *et al.* (2019) Laparoscopic Image-Based Navigation for Microwave Ablation of Liver Tumors—A Multi-Center Study. *Journal of Medical Imaging*, **6**, Article 025007.
 - [23] Thomas, M., Dieplinger, G., Datta, R., Kleinert, R., Fuchs, H., Bunck, A., *et al.* (2020) Navigated Laparoscopic Microwave Ablation of Tumour Mimics in Pig Livers—A Randomized *Ex-Vivo* Trial. *Zeitschrift für Gastroenterologie*, **58**, e203. <https://doi.org/10.1055/s-0040-1716280>
 - [24] Liu, F., Cheng, Z., Han, Z., Yu, X., Yu, M. and Liang, P. (2017) A Three-Dimensional Visualization Preoperative Treatment Planning System for Microwave Ablation in Liver Cancer: A Simulated Experimental Study. *Abdominal Radiology*, **42**, 1788-1793. <https://doi.org/10.1007/s00261-017-1065-z>
 - [25] Yang, J., Li, X., Yu, J., *et al.* (2020) 3D Visualization Operative Planning System and Ultrasound-Guided Percutaneous Microwave Ablation for Hepatocellular Carcinoma: A Clinical Study. *BMC Cancer*, **20**, Article 518.
 - [26] Li, H., Yi, T. and Wu, Z. (2008) Suspension Culture Combined with Chemotherapeutic Agents for Sorting of Breast Cancer Stem Cells. *BMC Cancer*, **8**, Article No. 135. <https://doi.org/10.1186/1471-2407-8-135>
 - [27] Wu, S., Li, X., Yu, X., *et al.* (2019) Ultrasound-Guided Percutaneous Microwave Ablation Assisted by a Three-Dimensional Visualization Preoperative Treatment Planning System for Larger Adrenal Tumors. *Journal of Cancer Therapy*, **10**, 491-501.
 - [28] Zhang, Y., Wang, M., Wang, L., Zhang, S., Sun, H. and Liu, J. (2023) Preliminary Study of 3D Printing Technology for Extracorporeal Positioning Guide Assisted Ultrasound-Guided Microwave Ablation of the Liver. *Expert Review of Medical Devices*, **20**, 1227-1233. <https://doi.org/10.1080/17434440.2023.2277233>
 - [29] Qi, E., Zhang, S., Li, X., *et al.* (2022) Comparison of Percutaneous Microwave Ablation and Surgical Resection for Hepatocellular Carcinoma in the Caudate Lobe. *Journal of Cancer Research and Clinical Oncology*, **148**, 1283-1292.
 - [30] Zhang, D., Wu, W. and Liang, P. (2015) Three-Dimensional Visualization Technology and Therapy Planning System for Microwave Ablation Therapy of Liver Tumor. *Microwave Ablation Treatment of Solid Tumors*, 342-356.
 - [31] Heshmat, A., O'Connor, C.S., Albuquerque Marques Silva, J., Paolucci, I., Jones, A.K., Odisio, B.C., *et al.* (2024) Using Patient-Specific 3D Modeling and Simulations to Optimize Microwave Ablation Therapy for Liver Cancer. *Cancers*, **16**, Article 2095. <https://doi.org/10.3390/cancers16112095>
 - [32] Sánchez-Margallo, J.A., Plaza de Miguel, C., Fernández Anzules, R.A. and Sánchez-Margallo, F.M. (2021) Application of Mixed Reality in Medical Training and Surgical Planning Focused on Minimally Invasive Surgery. *Frontiers in Virtual Reality*, **2**, Article 692641. <https://doi.org/10.3389/frvir.2021.692641>
 - [33] Pierzchajlo, N., Stevenson, T.C., Huynh, H., Nguyen, J., Boatright, S., Arya, P., *et al.* (2023) In Reply to the Letter to the Editor Regarding “augmented Reality in Minimally Invasive Spinal Surgery: A Narrative Review of Available Technology”. *World Neurosurgery*, **180**, Article 261. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2023.09.079>
 - [34] Momin, A.A., Steinmetz, M.P., Eltorai, A., *et al.* (2020) Evolution of Minimally Invasive Lumbar Spine Surgery. *World Neurosurgery*, **141**, 118-124.
 - [35] Marescaux, J. and Diana, M. (2015) Next Step in Minimally Invasive Surgery: Hybrid Image-Guided Surgery. *Journal of Pediatric Surgery*, **50**, 30-36. <https://doi.org/10.1016/j.jpedsurg.2014.10.022>
 - [36] Wu, Z., Xing, W., Wu, X., *et al.* (2017) Application and Prospect of Mixed Reality Technology in the Medical Field. *Medical & Biological Engineering & Computing*, **56**, 783-796.
 - [37] Porpiglia, F., Checcucci, E., Amparore, D., Peretti, D., Piramide, F., De Cillis, S., *et al.* (2022) Percutaneous Kidney Puncture with Three-Dimensional Mixed-Reality Hologram Guidance: From Preoperative Planning to Intraoperative Navigation. *European Urology*, **81**, 588-597. <https://doi.org/10.1016/j.eururo.2021.10.023>
 - [38] Ye, Z., Hu, H., Shao, Z., *et al.* (2019) A Combination of Three-Dimensional Printing and Computer-Assisted Virtual Surgical Procedure for Preoperative Planning of Acetabular Fracture Reduction. *Injury*, **51**, 762-769.
 - [39] Tonutti, M., Elson, D.S., Yang, G., Darzi, A.W. and Sodergren, M.H. (2017) The Role of Technology in Minimally Invasive Surgery: State of the Art, Recent Developments and Future Directions. *Postgraduate Medical Journal*, **93**, 159-167. <https://doi.org/10.1136/postgradmedj-2016-134311>