

·综述 General review·

肝肿瘤消融穿刺路径规划数字化研究进展

张天奇, 王穆荣, 江艺泉, 黄金华

【摘要】 影像引导下经皮消融是肝脏肿瘤的重要局部治疗方式之一。为实现精准、安全的消融治疗, 基于影像的术前穿刺路径规划尤为重要。然而不同医生的穿刺路径规划经验不同, 导致消融的疗效与并发症参差不齐, 限制了消融的推广应用。通过数字化技术量化专家经验、制定穿刺路径规划是近年来研究的热点, 有望制定自动化、规范化、标准化的穿刺路径规划。本文从数字化技术方法角度综述近年来消融穿刺路径规划研究进展。

【关键词】 肝肿瘤; 消融; 穿刺路径规划; 数字化

中图分类号: R735.7 文献标志码: A 文章编号: 1008-794X(2023)-04-0400-04

Research progress in the digitalization formulation of puncture path planning in ablation treatment of liver tumors ZHANG Tianqi, WANG Murong, JIANG Yiquan, HUANG Jinhua. Department of Minimally-Invasive Interventional Therapy, Cancer Prevention and Control Center of Sun Yat-sen University, State Key Laboratory of Oncology in South China, Collaborative Innovation Center for Cancer Medicine, Guangzhou, Guangdong Province 510060, China

Corresponding author: HUANG Jinhua, E-mail: huangjh@sysucc.org.cn

【Abstract】 Image-guided percutaneous ablation has been one of the most important local treatment methods for liver tumors. In order to achieve an accurate and safe ablation treatment, the preoperative puncture path planning based on imaging is particularly important. However, the experience in planning puncture path is different from physician to physician, resulting in quite different degrees of curative efficacy and complications, which limits the clinical promotion and application of ablation treatment. Using digital technology to quantify expert experience and formulate the puncture path planning is a hot topic of research in recent years, and it is expected that digitalization formulation of automated, normalized and standardized puncture path planning can be realized in near future. This paper reviews the recent progress in the planning of the ablation puncture path from the perspective of digital technology. (J Intervent Radiol, 2023, 32: 400-403)

【Key words】 liver tumor; ablation; puncture path planning; digitalization

影像引导下经皮消融治疗是在影像设备引导下, 将消融针穿刺入肿瘤内, 通过物理或化学能量毁损肿瘤组织的一种局部治疗技术, 对于直径 <3 cm 的肝肿瘤疗效确切、安全性好、重复性高^[1-3]。消融治疗包括术前规划、术中实施以及术后评估三个阶段, 其中基于影像的术前穿刺路径规划尤为重要。为实现精准、规范的消融布针穿刺路径术前规划, 医生需要充分掌握不同消融技术的消融灶热场与消融条件的量效关系、器官组织的影像断层图像识

别与重建, 并对可能引起的并发症有充分的预判, 在保证肿瘤彻底消融的前提下, 尽可能减少对周围组织的损伤。当前消融穿刺路径规划依赖医生个人经验, 主观性较强; 而具备丰富消融规划经验的医生资源高度集中, 有限的优质医疗资源难以满足日益增长的消融治疗需求。

当前世界逐步迈入数字时代, 大数据、人工智能、云计算等数字技术日新月异, 数字化正改变着社会发展方式。在医疗卫生领域, 数字化技术带来

DOI: 10.3969/j.issn.1008-794X.2023.04.020

作者单位: 510060 广东广州 中山大学肿瘤防治中心、华南肿瘤学国家重点实验室、肿瘤医学协同创新中心, 微创介入治疗科

通信作者: 黄金华 E-mail: huangjh@sysucc.org.cn

翻天覆地的改变^[4]。从数字化的角度来看,消融治疗以标准化的影像图像为基础,是最有可能实现诊疗场景数字化的技术之一,有望实现全闭环工作流程数字化技术覆盖。

目前针对消融穿刺路径规划的研究,根据研究技术路线及方法可分为四类,分别是基于三维重建的规划、热场模拟规划、机器人穿刺规划、实际穿刺路径规划。本文概述穿刺路径规划的数字化研究进展。

1 基于三维重建的规划

穿刺路径自动规划通常建立在腹部脏器三维重建的基础上,根据直观显示的各关键结构的相对位置和法线距离,确定穿刺路径走向。早期研究者将阈值法、区域生长等方法用于肝脏和肝肿瘤的分割及三维重建,但由于所提取图像特征简单,重建效果不理想^[5-6]。后来又有研究者基于随机特征子空间集合的极限学习(ELM)、支持向量机(SVM)等机器学习方法对肝脏分割并优化^[7-8]。还有以 U-Net 为代表的深度卷积神经网络针对肝内肿瘤不规则、边缘模糊的特点,对于肝脏及肿瘤分割可获得较满意结果^[9]。Liu 等^[10]进一步通过残差模块、DICE 损失函数和基于形态学的加权方式提升网络模型的分割效果。尽管三维重建包含穿刺路径规划,但通常是在分割后的三维模型中避开不能穿刺的脏器及组织,寻找一条由肝肿瘤至体表的连线,即视为穿刺路径规划^[11-12]。这种规划方法存在的主要问题是未充分考虑穿刺路径需避开的关键结构,导致关键结构没有被充分重建,或非关键结构的过度重建。部分研究的三维重建规划重视显示效果,忽视消融治疗的实际需求,导致临床难以操作^[13-14]。

2 热场模拟规划

热场模拟规划是通过计算机仿真消融热场分布,模拟消融灶覆盖肿瘤的最佳位置,从而形成穿刺路径规划。有学者于 2003 年使用 RF-Sim 肿瘤规划平台,在三维空间内模拟消融灶覆盖肿瘤的情形,并通过手工拖拽穿刺针避开危险结构,形成消融穿刺路径规划;于 2005 年又借助虚拟现实以及力反馈设计,增强了规划软件模拟的真实性,实现了多个消融球灶覆盖一个大肿瘤区域的计算机模拟效果,可进行多针消融规划^[15-16]。另有学者通过模拟单针与多针微波消融热场范围覆盖肿瘤的情况形成穿刺路径规划,在腹部 CT 三维重建空间中将消融热场范围覆盖肿瘤设计消融穿刺路径规划^[17-19]。

以热场覆盖肿瘤的方式模拟穿刺路径规划,有助于实现肿瘤彻底消融。然而利用消融球灶覆盖肿瘤的规划与消融针穿刺路径规划不同,多数热场研究团队都聚焦于如何用单个或多个消融热场覆盖肿瘤的问题,没有考虑腹腔解剖结构对于穿刺路径规划的影响,难以满足临床实际穿刺路径规划的需求。

3 机器人穿刺规划

如今,肿瘤穿刺机器人的研究如火如荼,研究者针对如何改进、提升机器人的运动位姿、穿刺速度、穿刺精度等目标开展了深入研究,以实现数字化、自动化消融治疗。穿刺路径规划是穿刺机器人研究中不可缺少的步骤,主要是为机器人设计的运动轨迹,以验证机器人穿刺的精度与速度。Liu 等^[20]在考虑肋骨及血管等结构避障的情况下,针对肝内多针消融机器人穿刺进行规划,在离体实验中取得较满意结果。Won 等^[21]设计了一套主-从装置机械臂,用以在 CT 引导下进行活检和消融穿刺,并在体模型上验证肿瘤直径 $>10\text{ mm}$ 时,可实现较为精准的穿刺。然而,穿刺机器人的路径规划通常是研究机械臂穿刺运动轨迹,检测机器人的穿刺准确度、运动时间等性能而设置^[22-23]。在规划运动轨迹时,未能充分考虑穿刺路径规划的关键解剖结构,难以满足穿刺路径规划的需求。未来使用穿刺机器人操作时,还需制定符合临床要求的穿刺路径规划,在机器人位姿运动精准、速度适宜的前提下,准确、安全地穿刺肝肿瘤病灶,实现智能化、自动化消融治疗。

4 实际穿刺路径规划

实际穿刺路径规划是结合三维重建、热场模拟等消融必须考虑因素后,根据临床实际需求,制定真正满足临床实际要求的穿刺路径规划研究。根据所用技术路线的不同,分为投影法与智能法。

4.1 投影法穿刺路径规划

投影法是指以投影思路设计研究技术路线并开展穿刺路径的研究工作,将肿瘤质心视为光源,将临床设计穿刺路径需避开的关键结构,即约束条件,设定为不透光的遮挡物,在充分考虑约束条件的情况下,即可获得潜在可进针穿刺的区域。针对 2003 年使用 Nelder-Mead 单纯形算法进行改进,将肿瘤视为光源,并将不能损伤的关键结构视为遮光区,形成初步的投影法方案^[24-25]。该算法对 5 例患者的测试结果表明,可使规划的穿刺路径远离关键结

构。Baegert 等^[26]扩展了穿刺路径规划中约束条件,并考虑实际穿刺深度、穿刺路径到关键结构的距离等条件构造评估函数,其规划结果不差于专家手动规划的结果^[27]。有学者将 Pareto 最优概念引入伞形射频电极穿刺路径规划,根据适用插入区域的许可条件构造对 Pareto 边界,该算法对检验穿刺路径规划是否违反必要条件有较好的作用^[28-29]。随着影像图像分割的稳健性和准确性提升,一项基于透视投影的布针规划方法用于消融热场模型替代传统椭圆模型,结果显示不差于临床医生手动规划^[30-31]。但该穿刺路径规划算法的准确性是基于圆柱投影法,为得到可能的穿刺路径规划,在建模过程中会进行水平和垂直偏转角度离散重采样,而偏转角度离散程度会影响穿刺路径规划的精度。Liu 等^[32]使用球形坐标,通过对消融针、关键结构和患者皮肤离散采样进行消融场景构建,采用牛顿法优化目标函数获得最佳穿刺路径。一些研究团队进一步扩充了临床约束条件并融入算法中^[33-34],有望得到更为可靠的穿刺路径模型,但该模型还未经过临床验证。

4.2 智能法穿刺路径规划

智能法是指基于人工智能算法,通过大量真实病例收集医生消融穿刺经验,构建智能化穿刺路径规划模型。已有学者采用人工智能深度学习等方法应用于机器人避障、汽车无人驾驶等应用方向的路径规划^[35-36],然而采用人工智能方法规划穿刺路径的研究较少。Tan 等^[37]通过 UDQL 强化学习模型,在计算机模拟与体模实验结果都显示该布针规划模型具有较好的准确性与稳健性。但该模型针对的是一种临床不常用的特殊软针,同时建模时纳入的关键结构有限,不足以模拟人体腹部的复杂情况,该模型应用于人体消融穿刺布针规划还有待进一步改进。智能法相比于投影法的弊端在于所有关键结构不能完全有效的分割重建,造成穿刺路径规划算法误差累计,导致最终规划结果有效率不高;此外人工智能模型的不可解释性对于模型后续调整、优化构成挑战。

综上所述,目前已有不同研究者采用多种方法规划肝肿瘤消融穿刺路径,然而规划结果与实际应用仍有距离,未在临床广泛应用。未来还需建立数字化、标准化、规范化的肝肿瘤穿刺路径规划模型,为临床提供标准手术方案,降低肝肿瘤消融的技术难度,提高肝肿瘤消融治疗的有效性和安全性,并继续加强肝肿瘤消融治疗的推广和普及,造福广大肝肿瘤患者。

[参考文献]

- [1] Van Cutsem E, Cervantes A, Adam R, et al. ESMO consensus guidelines for the management of patients with metastatic colorectal cancer[J]. Ann Oncol, 2016, 27: 1386-1422.
- [2] Reig M, Forner A, Rimola J, et al. BCLC strategy for prognosis prediction and treatment recommendation: the 2022 update[J]. J Hepatol, 2022, 76: 681-693.
- [3] Wang Z, Liu M, Zhang DZ, et al. Microwave ablation versus laparoscopic resection as first-line therapy for solitary 3-5 cm HCC[J]. Hepatology, 2022, 76: 66-77.
- [4] Elsayes KM, Kamel S, Wang MX. Turning radiology educational challenges into opportunities: the digital frontier[J]. Radiographics, 2022, 42: E6-E8.
- [5] Moltz JH, Bornemann L, Dicken V, et al. Segmentation of liver metastases in CT scans by adaptive thresholding and morphological processing[J]. MICCAI workshop, 2008, 41: 15.
- [6] Jimenez-Carretero D, Fernandez-de-Manuel L, Pascau J, et al. Optimal multiresolution 3D level-set method for liver segmentation incorporating local curvature constraints[J]. Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc, 2011, 2011: 3419-3422.
- [7] Huang W, Yang Y, Lin Z, et al. Random feature subspace ensemble based Extreme Learning Machine for liver tumor detection and segmentation[J]. Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc, 2014, 2014: 4675-4678.
- [8] Vorontsov E, Abi-Jaoudeh N, Kadoury S. Metastatic liver tumor segmentation using texture-based omni-directional deformable surface models[EB/OL]. https://www.researchgate.net/publication/280837430_Metastatic_Liver_Tumor_Segmentation_Using_Texture-Based_Omni-Directional_Deformable_Surface_Models, 2014-11.
- [9] Seo H, Huang C, Bassenne M, et al. Modified U-Net (mU-Net) with incorporation of object-dependent high level features for improved liver and liver-tumor segmentation in CT images[J]. IEEE Trans Med Imaging, 2020, 39: 1316-1325.
- [10] Liu B, Zhang M, Guo TY, et al. Classification of gastric slices based on deep learning and sparse representation[A]; 第30届中国控制与决策会议论文集[C]. 2018.
- [11] 刘琪. 面向实体肿瘤的微波消融手术计划研究[D]. 天津大学, 2018.
- [12] 苏冬雪. 基于CT图像的肝肿瘤图像分割及三维重建算法研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2020: 41-43.
- [13] 杨得富. 微波热疗计划系统研究[D]. 长春理工大学, 2020: 44-59.
- [14] Xu L, Cai K, Yang R, et al. Simulation of multi-probe radiofrequency ablation guided by optical surgery navigation system under different active modes[J]. Comput Assist Surg (Abingdon), 2016, 21: 107-116.
- [15] Villard C, Soler L, Gangi A. Radiofrequency ablation of hepatic tumors: simulation, planning, and contribution of virtual reality and haptics[J]. Comput Methods Biomech Biomed Engin, 2005, 8: 215-227.
- [16] Villard C, Soler L, Papier N, et al. RF-Sim: a treatment planning tool for radiofrequency ablation of hepatic tumors[A]; Seventh international conference on information visualization[C]. 2003: 08.

- [17] Liu S, Dalal S, Kruecker J. Automated microwave ablation therapy planning with single and multiple entry points[A]; Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering[C]. 2012.
- [18] Chen R, Jiang TA, Lu F, et al. Semi-automatic radiofrequency ablation planning based on constrained clustering process for hepatic tumors[J]. IEEE Trans Biomed Eng, 2018, 65: 645-657.
- [19] Liu P, Qin J, Duan B, et al. Overlapping radiofrequency ablation planning and robot - assisted needle insertion for large liver tumors [EB/OL]. <https://doi.org/10.1002/rcs.1952>, 2018-08-16.
- [20] Liu S, Xia Z, Liu J, et al. Automatic multiple-needle surgical planning of robotic-assisted microwave coagulation in large liver tumor therapy[J]. PLoS One, 2016, 11: e0149482.
- [21] Won HJ, Kim N, Kim GB, et al. Validation of a CT-guided intervention robot for biopsy and radiofrequency ablation: experimental study with an abdominal phantom[J]. Diagn Interv Radiol, 2017, 23: 233-237.
- [22] 寿佳瀛, 付庄, 梅琼风, 等. MRI 兼容的乳腺穿刺介入辅助机器人设计与路径规划研究[J]. 机械与电子, 2021, 39: 55-59.
- [23] 李冬瑞. 穿刺机器人精准微波消融的实验研究[D]. 北京: 中国人民解放军医学院, 2018.
- [24] Nelder J, Mead R. A simplex method for functions minimizations [J]. Comput J, 1965, 7: 308-313.
- [25] Villard C, Baegert C, Schreck P, et al. Optimal trajectories computation within regions of interest for hepatic RFA planning[J]. Med Image Comput Comput Assist Interv, 2005, 8(Pt 2): 49-56.
- [26] Baegert C, Villard C, Schreck P, et al. Precise determination of regions of interest for hepatic RFA planning[J]. Stud Health Technol Inform, 2007, 125: 31-36.
- [27] Baegert C, Villard C, Schreck P, et al. Multi - criteria trajectory planning for hepatic radiofrequency ablation[J]. Med Image Comput Comput Assist Interv, 2007, 10(Pt 2): 676-684.
- [28] Castillo O, Trujillo L, Melin P. Multiple objective genetic algorithms for path-planning optimization in autonomous mobile robots[J]. Soft Comput, 2007, 11: 269-279.
- [29] Seitel A, Engel M, Sommer CM, et al. Computer-assisted trajectory planning for percutaneous needle insertions[J]. Med Phys, 2011, 38: 3246-3259.
- [30] Schumann C, Bieberstein J, Trumm C, et al. Fast automatic path proposal computation for hepatic needle placement[A]; SPIE Medical Imaging[C]. 2010.
- [31] Helck A, Schumann C, Aumann J, et al. Automatic path proposal computation for CT-guided percutaneous liver biopsy[J]. Int J Comput Assist Radiol Surg, 2016, 11: 2199-2205.
- [32] Liu SL, Liu JH, Xu J, et al. Preoperative surgical planning for robot-assisted liver tumour ablation therapy based on collision-free reachableworkspaces[EB/OL]. https://www.researchgate.net/publication/320052754_Preoperative_surgical_planning_for_robot-assisted_liver_tumour_ablation_therapy_based_on_collision-free_reachableworkspaces, 2017-11.
- [33] 张睿, 周著黄, 吴薇薇, 等. 肝肿瘤热消融治疗穿刺路径规划算法研究综述[J]. 北京工业大学学报, 2020, 46: 1300-1314.
- [34] Zhang R, Wu SC, Wu WW, et al. Computer - assisted needle trajectory planning and mathematical modeling for liver tumor thermal ablation: a review[J]. Math Biosci Eng, 2019, 16: 4846-4872.
- [35] Mohanty P, Sah A, Kumar V, et al. Application of deep Q-Learning for wheel mobile robot navigation[A]; 2017 3rd International Conference on Computational Intelligence and Networks(CINE)[C]. 2017.
- [36] Sugihara K, Smith J. Genetic algorithms for adaptive motion planning of an autonomous mobile robot[A]; Proceedings of the 1997 IEEE international symposium on computational intelligence in robotics and Automation[C]. 1997.
- [37] Tan XY, Lee YG, Chng CB, et al. Robot-assisted flexible needle insertion using Universal distributional deep reinforcement learning [J]. Int J Comput Assist Radiol Surg, 2020, 15: 341-349.

(收稿日期: 2022-02-14)

(本文编辑: 新宇)