

· 影像专栏 ·

基于磁共振成像的三维可视化重建技术在肛瘘诊治中的应用进展

王瑜¹,谷超^{2*}(综述),王玉³,严力维²(审校)

(1.山东中医药大学第一临床医学院,山东 济南 250013;2.山东中医药大学附属医院肛肠科,山东 济南 250013;3.山东中医药大学附属医院放射科,山东 济南 250013)

[摘要] 肛瘘是结直肠肛门外科专业领域中最常见的疾病之一,发病率在肛周疾病中位居前三。其瘘管一旦形成,药物治疗往往收效甚微,目前最有效的方式为手术切除,故术前获取可靠的影像学诊断尤为必要。磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)被临床认定为诊断肛瘘的最佳选择,同时,在医工一体化的大趋势下,三维重建技术辅助诊疗成为可能。现将基于MRI的肛瘘三维可视化重建的应用现状作一总结,归纳其研究进展并探讨临床应用价值。

[关键词] 直肠瘘;三维建模;磁共振;医工结合

[中图分类号] R657.1 **[文献标志码]** A

doi:10.3969/j.issn.1007-3205.2025.03.007

[文章编号] 1007-3205(2025)03-0286-05

肛瘘是由肛门直肠周围脓肿反复感染、破溃及上皮化生而形成的慢性窦道^[1]。肛瘘术后复发可能与术前未明确内口及瘘管与周围组织结构的位置关系有关^[2],故尽可能完善术前检查对于减少肛瘘术后并发症、降低复发风险有重要指导作用。磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)以较高的准确性得到了肛肠科医师的广泛推崇,同时,随着人工智能在医学领域的应用,已有国内外学者将磁共振与三维重建技术相结合并应用于肛瘘的诊疗中。现试对基于MRI的肛瘘三维模型重建的研究现状作一总结,归纳其研究进展并探讨应用价值,期望给予临床医生参考。

1 MRI用于肛瘘术前诊断

1.1 MRI技术的优点 肛瘘术前诊断的影像学方式包括多层螺旋CT(multi-slice spiral computed tomography, MSCT)、体表及直肠腔内彩色超声、X线、瘘管造影等,但上述方法单独应用于临床时均存

在一定弊端^[3]。MRI无辐射性损害的同时具有优异的软组织对比分辨率,被认定为是诊断肛瘘的金标准^[4]。其中脂肪抑制序列对液体具有较高敏感性^[5],尤其是T2加权抑脂(T1 weighted image fatsaturation, T2WI FS)序列对内口和瘘管的诊断效能更优异^[6],可联合多序列成像确定瘘管走行、脓肿形成的空间范围与肛周结构的关系,大大提高临床诊断准确率。

1.2 磁共振普通二维成像的不足 常规的二维图像无法直观展示出瘘管的空间走行,手术医生大多未接受过系统的影像学培训,阅片能力有限,对不同组织信号的辨识能力不足,无法在脑中迅速构建病灶的立体形态。此外, MRI图像各序列参数复杂,手术者对二维图像的认知存在差异,易造成诊断偏差,导致MRI图像的优势不能在实际临床工作中得到最大化发挥。

2 医学三维可视化重建技术概述

三维重建概念起源于计算机科学领域,后被引入医学学科。医学三维可视化重建技术基于二维数据重建人体组织三维模型,进行相应的定量分析等操作。该项技术涵盖计算机图形学、数字图像处理技术、生物医学工程等学科,利用人类视觉特性,对二维电子计算机断层扫描(computed tomography, CT)、单光子发射计算机断层成像术(single-photon emission computed tomography, SPE-CT)、正电子发射断层成像术(positron emission tomography,

[收稿日期]2023-12-13

[基金项目]山东省医药卫生科技发展计划项目(2019WS579);山东省医药卫生科技项目(202304011527);山东省中医药重点学科(YYP2023-21);济南市科技计划(202019158);齐鲁中医药优势专科集群(YWC2022ZKJQ0003)

[作者简介]王瑜(1997-),女,山东青岛人,山东中医药大学医学硕士研究生,从事肛肠疾病的中西医结合诊治研究。

* 通信作者。E-mail: guchao1983812@163.com

PET-CT)、MRI、超声(ultrasound, US)等数字成像技术的二维数字断层图像形成的三维体数据进行处理,转化为立体的三维可视化图像。现已被应用于整形外科、骨科、肝胆外科、乳腺科、心胸外科、神经外科等多个专业学科中^[7-11],并被证实在制定术前计划、识别病变位置、确定神经保留程度等方面具有较高临床价值^[12],是医工结合的研究热点。构建三维模型后,医生可通过旋转、移动等方式从不同角度观察,也可进行距离、角度、面积、体积等测量。三维重建目的是提取二维影像数据中隐含的信息,并显示复杂的数据,直观清晰地展现出病灶与周围组织结构的关系^[13]。由此可见,这项技术可以进一步应用于肛门及直肠疾病诊疗领域,包括但不限于复杂性肛瘘、直肠肿瘤等。

3 基于MRI的三维重建技术在肛瘘诊断和治疗中的应用

盆腔脏器及组织的三维重建起始于US影像^[14]。由于盆底解剖结构复杂,US对软组织分辨率有限,故逐步被MRI广泛取代。基于MRI扫描原始数据所构建的盆腔解剖结构三维图像的广泛应用,不仅为国内的相关研究提供了基础,也丰富了肛周疾病术前诊治的影像学方法。国外学者对直肠癌患者术前联合使用CT和MRI检查,从MRI中提取骨盆神经图像,从CT中提取动脉、直肠及骨盆图像,经三维重建后展现骨盆器官的可视化图像,用于确认盆腔器官的位置,以此预防直肠癌手术期间的意外损伤。Hong等^[15]对1例原发性7处外口的复杂性肛瘘患者术前应用三维MRI(3D MRI)模型辅助完整切除瘘管,证实了在复杂肛瘘的治疗中,联合应用3D MRI模型将有助于获得更好的手术效果。郑霞等^[16]经临床研究证实3D MRI对指导手术方式选择及术中准确找到和清除病灶,减少术后复发及对肛门括约肌的损伤方面均具有较高临床应用价值。此外,三维可视化技术使得3D打印模型成为现实,医生可基于真实物体进行评估分析,进一步展现出三维可视化模型有改进手术方案、提高与患者沟通效率和加强医学教育培训的潜力^[17]。

常规三维重建过程需手动分割,耗时久、缺乏可重复性,为提升建模效率、保证模型精确度,JerimcFarlane等^[18]利用数学人工智能(artificial intelligence, AI)算法软件重建肛瘘的三维模型,无需额外MRI序列、延长扫描时间或提高对比度,仅从MRI扫描中获取的客观变量进行AI重建,减少

人为主观干预,降低建模误差。或在后处理软件中开发专用插件,例如将肛提肌、括约肌表现为管状结构、瘘管和脓肿表现为条状曲线,合并各部分解剖结构描述生成参数模型插件用于后续批量操作^[19],缩短单个病例建模时间,展现了三维可视化技术具有更高效生成三维模型的潜力。

4 三维重建后处理软件及重建方法概述

现有CT和MRI设备均自带配套的图像后处理工作站,如GE AW工作站等,但只能在特定设备下使用,仅能由放射科医生操作。如今第三方独立开发的三维可视化软件迅速发展,手术医生也可在个人计算机上完成对人体图像数据的三维模型重建,如OsiriX、3D Slicer、Horos、Aeskulap ImageJ、ITK-SNAP、Visualization Toolkit(VTK)、RadiAnt DICOM Viewer、U-VIEWER、MicroDicom、Myrian、Mimics、Simpleware、3D-Doctor、Amira、Myrian Studio、Freesurfer、FMRIB Software Library(FSL)、Dolphin 3-dimensional(3D) software、Invesalius、Seg3D、Magics、3D Med、Vitre Workstation version等,此类软件支持多种医学成像模态、可读取多种格式的医学图像数据。其中如3D Slicer、Myrian Studio、Freesurfer、FSL、Mimics等软件配备心脏、肝脏、肺部等实质性器官特异性分割工具,但尚未发现盆腔肛周组织结构分割的快捷工具。

现对目前临床中针对肛瘘患者MRI图像建模使用率较高的Mimics、3D-Slicer、3D-doctor软件进行介绍。

4.1 Mimics Mimics软件是由比利时公司Materialise开发的商业医疗建模软件^[20],主要应用于医学影像诊断、研究和教学等领域。它是一款标准的基于扫描数据的三维图像处理 and 编辑软件,在保证与三维可视化工作站具备计算机辅助解剖分析功能、效率及准确性的前提下,具备更优半自动分割效果。其图像处理过程大致为:将医学数字成像和通信(digital imaging and communications in medicine, DICOM)格式的断层图像数据导入Mimics软件,采用阈值分割(thresholding)提取轮廓,界定合适阈值,形成蒙面(mask),利用区域增长(region growing)工具逐层边缘分割,后经calculate 3D将二维图像转化为三维模型,手动逐层光滑打磨处理,以立体光刻(STereo Lithography, STL)格式输出保存,即可得到重建的三维可视化模型。

Mimics 软件功能强大,原始数据转化速度快,可有效缩短建模时间。除了用于医学诊断,还可模拟外科手术、进行植入体模型的设计、生物力学分析及医学教学等。但 Mimics 非开源软件,使用人群相对受限。

4.2 3D-Slicer 3D-Slicer 软件是一款美国国立卫生研究院资助开发和维护的医学可视化图像分析和重建的免费开放源代码平台^[21]。其图像处理过程大致为:将 DICOM 格式的影像图像资料导入软件,利用 Segment Editor 模块重建数据,选用 3D show 子菜单内的 surface smoothing 平滑重建图像。使用 Add 和 Paint 选择颜色并为各个层面和结构上色以区分不同组织。选用 Volume Rendering 将模型显像,对所建模型进行旋转、测量、修整等操作,最终 3D 模型支持导出多种三维文件格式。3D-Slicer 针对肛门括约肌解剖结构分析方面可显示出清晰的效果,并精确检测到瘘管的位置和病变程度^[17]。杨来华等^[22]使用 3D-Slicer 软件将 20 例复杂性肛瘘患者的 MRI 图像进行三维重建,以三维建模图像为参考标准设计手术方案及切口位置,缩短了手术时间,佐证了经该软件重建的 3D 图像可为复杂性肛瘘提供客观准确的病理定位这一结论。

在众多三维建模软件中,3D-Slicer 是自动化程度最高、提供分割工具及不同的图像配准工具最多的软件之一。它操作逻辑简单,易于理解,免费且无需注册,可作为基于 MRI 的三维数字模型重建的首选应用^[23]。此外,在软件的应用细节方面,3D-Slicer 和 Mimics 在三维重建中均具有较好的尺寸精度和几何精度^[24],但其建模的精度稍差于 Mimics 等软件,尤其在手动分割时对于细节的编辑修改比较粗糙^[20],多数复杂的渲染工具无法直接用于基于 MRI 的三维数字模型。

4.3 3D-Doctor 3D-Doctor 由 Able Software 公司开发,是一款先进的三维建模、图像处理和测量软件,主要应用于 MRI、CT、PET、显微镜技术图像、科学研究和工业领域的图像处理。其常规建模步骤为:使用 New stack 命令将 DICOM 图像切片导入 3D 堆栈并打开,交互式分段命令跟踪对象边界同时调整阈值以适应图像,在 3D Rendering/Auto Segment 中定义要分割的对象数量以实现快速自动分割,利用 Surface Rendering 命令创建 3D 表面模型后在 Volume Rendering 中进行 3D 体积渲染,对三维重建结构的表面光滑处理完成后以 STL 格式导出。Boles 等^[25]使用此软件在术前为肛瘘患者建

立 MRI 三维模型,并制定出详细术前和术中路线图,有效提高术者的定位能力和观察复杂肛瘘及其预后的能力,减少因术前对病变组织定位不清晰、瘘管切除不彻底等导致术后复发的危险因素。

该软件操作简便,对计算机硬件要求不高,占用内存小,完成图像分割后可选择多种重建方法满足建模需求,计算机可自动完成重建并最终生成三维图像。

4.4 多软件联合应用 上述后处理软件在三维建模过程中各有优势,为减小因不同的半自动分割算法产生的准确性误差、增强相对客观性,可考虑多软件联合应用^[26]。如 Navkar 等^[19]在进行建立肛瘘的三维可视化参数模型时,使用 OsiriX 软件描绘解剖结构,ITK-Snap 软件生成 3D 模型,最后将得出的参数模型置于 3D-Slicer 软件中实现。

因此,不论是应用何种三维可视化后处理软件,基于 MRI 的三维数字模型重建的核心方法可概括为体绘制,其大致操作方法为通过设定阈值来识别组织轮廓,自动生成初始三维模型后人工逐层手动光滑,均存在因原始图像数据质量参差或三维重建过程中主观因素导致的建模精确性误差问题。

5 建立肛瘘的磁共振三维可视化模型的积极意义

实际工作中三维可视化重建技术对影像科医师诊断帮助不大,但对临床科室的手术指导有显著意义。综合国内外现有的相关临床研究实践,与常规的二维影像学检查相比,术前构建肛瘘的三维可视化模型有以下优点:

①准确识别瘘管及支管的走行路径,克服普通二维 MRI 图像仅在某一截面、某一序列上显示而引起的认定困难,可促进放射科医生与手术者有效地沟通,传达准确的解剖参考。②三维可视化图像能够量化分析瘘管的粗细、长短、走行、角度以及与周围肌组织的关系,并可实现实时三维测量和多重显示等功能,有助于制定手术计划、指导手术路径、充分做好多种应急预案、评估手术风险及预后,尤其在患者及家属沟通方面大有裨益。③虽然目前该项技术价格高、较常规检查耗时久,但相比较术后复发、多次手术及术后并发症而言,其成本性价比高^[25]。④相比较传统的放射科工作站,使用开源软件进行三维建模,可实现费用、时间和人力成本最小化。随着 MRI 和三维建模技术的普及,相应成本有望降低。⑤基于 MRI 的肛瘘三维模型可为进一步研究提供基础技术支持。如肛周肌力学有限元分

析、3D打印、手术动画演示视频的制作等。

6 该项技术目前面临的局限

①盆底肌交叉融合、走行复杂,测量三维参数涉及更多数据,如长度、体积、走行位置、与周边肌间的关系等,基于不同序列、不同截面MRI重建后的三维模型存在边缘形态差异^[27],且模型光滑程度、方法、参数等评估标准尚未统一^[28-29],未来需建立完善的模型评价指标及评估标准。②时间及金钱成本增加,技术普及程度受限。模型最终呈现质量受层厚和间隙影响,但层厚减小的同时信噪比也随之降低,扫描时间延长,患者配合度难以保证。MRI三维建模费用较昂贵,普通肛瘘行彩色超声及常规二维MRI检查基本可以达到有效诊断,普通医院往往不具备符合建模数据要求的磁共振设备或高场强磁共振设备,制约了此项技术的广泛应用。③建模效率待提升。图像分割需后期手动勾画,模型最终呈现效果一定程度上受限于原始二维图像的质量及建模人员的技术水平,难免存在人为误差,此过程耗时长,一对一建模可重复率低^[30]。目前尚未建立大型公开肛瘘MRI数据库,无法进行标准化研究,不利于建立三维参数模型。④除成像分辨率的限制外,肌组织由于肌节结构而具有收缩性和舒张性,其外形渲染、受力形变、精细化程度会对建模的真实性有所影响^[31]。因此,需要进一步改进扫描和成像技术。

总之,肛瘘的三维可视化技术仍在发展之中,目前临床应用仅局限于作为常规MRI检查的补充和辅助手段,其最终展示效果与真实的人体结构仍有一定差距,相关技术还需进一步完善。

7 总结与展望

基于MRI的肛瘘瘘管及周围肌组织的三维模型重建,可多角度立体展示瘘管走行、体积、与周围组织间的位置关系及病变程度,在复杂性解剖理解方面,三维建模模型展现出远超理论的优势。除了用于术前诊疗,亦可指导手术及预后,对于学科建设及学生教学有着值得肯定的意义。但目前仍存在技术短板亟待解决,如建模效率低、层厚要求高、成本昂贵等。尽管我国在此方面的研究尚处于起步阶段,但我国肛瘘患者人群基数大,可供学习病例丰富,未来极有望深入探索,创新优化诊疗方案,提高肛瘘诊疗效果。相信随着医学的数字化、精准化演变,基于MRI的肛瘘三维模型重建技术会得到更有

力的创新和发展。

[参考文献]

- [1] Gaertner WB, Burgess PL, Davids JS, et al. The american society of colon and rectal surgeons clinical practice guidelines for the management of anorectal abscess, fistula-in-ano, and rectovaginal fistula[J]. Dis Colon Rectum, 2022, 65(8): 964-985.
- [2] 吴紫薇, 孙薛亮, 付志辉, 等. MRI检查在复杂性肛瘘诊断中的应用价值[J]. 结直肠肛门外科, 2023, 29(5): 508-512.
- [3] 陈孝生, 赵林芬, 王江, 等. 肛瘘磁共振术前评估的临床价值[J]. 中国CT和MRI杂志, 2023, 21(7): 142-144.
- [4] Iqbal N, Tozer PJ, Fletcher J, et al. Getting the most out of MRI in perianal fistula: update on surgical techniques and radiological features that define surgical options[J]. Clin Radiol, 2021, 76(10): 784.e17-784.e25.
- [5] 杨燕, 魏焕焕, 付芳芳, 等. 多模态MRI影像组学联合临床危险因素术前预测无淋巴结转移的直肠癌脉管浸润[J]. 磁共振成像, 2023, 14(1): 94-99, 110.
- [6] 王玉, 李传亭, 谷超. 磁共振多序列对肛瘘形态学评估效果比较[J]. 山东医药, 2023, 63(19): 64-66.
- [7] 丁向民, 柏斗胜, 蒋国庆, 等. 三维重建技术在肝脏外科的应用进展[J]. 中国现代普通外科进展, 2022, 25(6): 461-464.
- [8] 郭释琦, 于涛, 崔明明, 等. CT三维重建导航下行中间入路“六步法”腹腔镜右半结肠切除术近期疗效研究[J]. 中国实用外科杂志, 2023, 43(2): 184-192.
- [9] 胡坚, 刘伦旭, 张毅, 等. 人工智能一体化三维重建应用于胸外科的中国专家共识[J]. 中国胸心血管外科临床杂志, 2023, 30(5): 641-646.
- [10] 刘璐, 王春琳, 刘家传, 等. 3D Slicer三维重建技术联合LSR监测在面肌痉挛微血管减压术中的应用[J]. 中国临床神经外科杂志, 2023, 28(3): 160-163.
- [11] 中国抗癌协会乳腺癌专业委员会, 中国医师协会外科医师分会乳腺外科医师委员会, 上海市抗癌协会乳腺癌专业委员会. 乳腺肿瘤整形与乳房重建专家共识(2022年版)[J]. 中国癌症杂志, 2022, 32(9): 836-924.
- [12] Saba P, Melnyk R, Holler T, et al. Comparison of multi-parametric MRI of the prostate to 3D prostate computer aided designs and 3D-printed prostate models for pre-operative planning of radical prostatectomies: a pilot study [J]. Urology, 2021, 158: 150-155.
- [13] To G, Hawke JA, Larkins K, et al. A systematic review of the application of 3D-printed models to colorectal surgical training [J]. Tech Coloproctol, 2023, 27(4): 257-270.
- [14] 崔陶, 王平, 牛晓宇. 基于MRI的盆底肌三维重建在盆腔器官脱垂精准评估中的价值和意义[J]. 实用妇产科杂志, 2023, 39(4): 244-248.
- [15] Hong Y, Qiu Y, Li G. A case report of primary complex anal fistula with 7 external openings treated with combined preoperative 3D MRI model[J]. Medicine (Baltimore), 2023, 102(11): e33264.

- [16] 郑霞,黄小波,程静,等.MRI 三维可视化重建技术评估复杂性肛瘘的临床应用[J].昆明医科大学学报,2023,44(5):90-94.
- [17] Guz W, Ožóg L, Aebisher D, et al. The use of magnetic resonance imaging technique and 3D printing in order to develop a three-dimensional fistula model for patients with Crohn's disease;personalised medicine[J]. Prz Gastroenterol, 2021,16(1):83-88.
- [18] Jeri-McFarlane S, García-Granero Á, Ochogavía-Seguí A, et al. Three-dimensional modelling as a novel interactive tool for preoperative planning for complex perianal fistulas in Crohn's disease[J]. Colorectal Dis, 2023,25(6):1279-1284.
- [19] Navkar NV, Balakrishnan S, Kharbech S, et al. 3D visualization of perianal fistulas using parametric models[J]. Tech Coloproctol, 2022,26(4):291-300.
- [20] 方威扬,林东鑫,寇万福,等.医学图像三维重建系统的研究进展[J].中国医学物理学杂志,2022,39(7):823-827.
- [21] 王文举,蔡强,李知阳,等.3D-slicer 辅助在高血压性基底节区脑出血手术中应用的研究进展[J].中国医药,2021,16(11):1740-1743.
- [22] 杨来华,祖大报,尹利飞,等.3D-slicer 软件在复杂性肛瘘中的应用[J].现代医用影像学,2021,30(12):2191-2195.
- [23] 陈立奇,薛卓维,吴氢凯.基于磁共振成像的女性盆底器官三维数字模型重建的研究进展[J].上海交通大学学报(医学版),2022,42(3):381-386.
- [24] Mandolini M, Brunzini A, Facco G, et al. Comparison of three 3D segmentation software tools for hip surgical planning[J]. Sensors (Basel), 2022,22(14):5242.
- [25] Boles MSR, El-Sayed RF, Shawali HAS, et al. Introducing 3D modelling of MRI in the preoperative mapping of perianal fistula;How it could help the surgeons? [J]. Egypt J Radiol Nucl Med, 2023,54(1):1-12.
- [26] Lo Giudice A, Ronsivalle V, Gastaldi G, et al. Assessment of the accuracy of imaging software for 3D rendering of the upper airway, usable in orthodontic and craniofacial clinical settings[J]. Prog Orthod, 2022,23(1):22.
- [27] 钱敏,吴梦婕.基于磁共振影像的颞下颌关节三维模型重建的研究现状[J].口腔医学,2023,43(10):930-934.
- [28] Talanki VR, Peng Q, Shamir SB, et al. Three-dimensional printed anatomic models derived from magnetic resonance imaging data: current state and image acquisition recommendations for appropriate clinical scenarios [J]. J Magn Reson Imaging, 2022,55(4):1060-1081.
- [29] 马旭涛,华诚,卢鸣飞,等.健康青年男性和女性盆底肌群的MRI 三维重建与有限元分析[J].复旦学报(自然科学版), 2023,62(3):370-380.
- [30] 徐京瑶,刘晓民,张新峰,等.基于MRI 增强的乳腺癌肿瘤三维体积人工智能测量技术的研究进展[J].磁共振成像,2023,14(9):148-153.
- [31] 吕珊珊,张伟,梁富娥,等.虚拟手术软组织建模研究[J].生物医学工程学进展,2022,43(3):153-156.

(本文编辑:何祯)