

DOI:10.3969/j.issn.1005-202X.2023.07.007

医学影像物理

基于计算机断层扫描和磁共振胰胆管造影的扩张胆道及其毗邻结构的数字化精确建模研究

逯娅雯¹, 孟文勃^{1,2}

1. 兰州大学第一临床医学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 兰州大学第一医院普外科/甘肃省生物治疗与再生医学重点实验室/甘肃省肝胆胰外科研究所, 甘肃 兰州 730000

【摘要】目的:利用Mimics医学影像控制软件完整重建扩张胆道及其毗邻结构的三维模型,为磁感应热疗等医工学科交叉研究提供真实模型基础。**方法:**采集胆道下段梗阻患者的计算机断层扫描(CT)和磁共振胰胆管造影(MRCP)扫描数据,在Mimics软件中进行图像分割、断面充填、蒙版编辑,构建胆道及其毗邻结构的精确数字化模型并将其输入COMSOL软件进行有限元离散,验证模型的仿真运算潜能。**结果:**完整构建了扩张胆道,肝脏,肝脏静脉系统,胆囊,胰管及胆胰管交汇处的部分十二指肠,整个模型的分辨率为1 mm,并且为STL格式,可以方便地应用于多种CAD软件中(比如COMSOL、AUTO-CAD等)。**结论:**利用Mimics软件可以精确建立高精度的扩张胆道及其毗邻结构三维重建模型,为后续该模型在胆道疾病如胆道肿瘤的磁感应热疗多学科临床应用创建了良好的铺垫。

【关键词】胆道疾病; 三维重建; Mimics软件; 磁共振胰胆管造影; 计算机断层扫描

【中图分类号】R318; R657.4

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2023)07-0833-08

Digital modeling of dilated biliary tract and its adjacent structures using computed tomography and magnetic resonance cholangiopancreatography

LU Yawen¹, MENG Wenbo^{1,2}

1. First Clinical Medical College, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. Gansu Institute of Hepatobiliary and Pancreatic Surgery/Key Laboratory of Biological Therapy and Regenerative Medicine Transformation of Gansu Province/Department of General Surgery, The First Hospital of Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

Abstract: Objective To reconstruct a three-dimensional model of biliary tract and its adjacent structure using Mimics software for providing a real model basis for medical and engineering integration application such as magnetic induction hyperthermia. **Methods** The computed tomography (CT) and magnetic resonance cholangiopancreatography (MRCP) scan data were collected from patients with lower biliary obstruction. Image segmentation, section filling and mask editing were carried out in Mimics software. The digital model of biliary tract and its adjacent structure was constructed and then input into COMSOL software for finite element discretization to verify the potential of the model for simulation operation. **Results** The dilated biliary tract, liver, hepatic venous system, gallbladder, pancreatic duct, and part of duodenum at the junction of biliopancreatic duct were completely constructed. The resolution of the whole model was 1 mm, and it was in stereolithography (STL) format of digital model file, which enabled the model be applied to various computer-aided design software such as COMSOL and AUTO-CAD. **Conclusion** A high-precision three-dimensional reconstruction model of the biliary tract and its adjacent structures can be accurately established using Mimics software, which creates a foundation for the subsequent multidisciplinary application of the model in biliary tract diseases, such as magnetic induction hyperthermia for biliary tract tumors.

Keywords: biliary tract disease; three-dimensional reconstruction; Mimics software; magnetic resonance cholangiopancreatography; computed tomography

【收稿日期】2023-02-16

【基金项目】国家自然科学基金(32160255); 甘肃省科技重大专项计划(1602FKDA001); 甘肃省自然科学基金(20JR10RA676); 甘肃省级国际合作资助项目(20YF8WA085); 兰州市城关区科技计划(2019RCCX0038, 2020JSCX0043)

【作者简介】逯娅雯, 在读博士, E-mail: luyw20@lzu.edu.cn

【通信作者】孟文勃, 博士, 博士生导师, 教授, 研究方向: 肝胆胰外科疾病、消化道肿瘤、内镜微创外科疾病、器官移植, E-mail: mengwb@lzu.edu.cn

前言

胆道疾病是消化系统疾病中的常见病,多发病,由于胆道系统构造复杂并与多个重要腹腔脏器和组织联结与毗邻,故胆道系统疾病不仅可影响其周围的肝脏、肝脏大血管、十二指肠等重要组织器官的结构与功能,其病变更增加了整体病情的复杂性与治疗难度^[1]。

随着数字医学时代的到来,基于医学影像学的医工交叉研究已成为破解胆道疾病诊疗难题的新兴力量^[2]。Zhang等^[3]利用人工智能机器学习方法对经内镜逆行性胰胆管造影术后胆囊炎的发生构建了临床预测模型,对疾病预防有重要意义。而同样作为胆道疾病诊治的重要辅助手段,计算机三维重建技术可以直观反映体内病变组织和周围器官的结构形态与位置关系,在胆道疾病如肝内胆管结石、肝门部胆管癌的诊断与外科治疗中都扮演着越来越重要的角色^[4]。相对于以经验性手术为主要方式的传统胆道疾病诊治手段,计算机三维重建技术不仅可以帮助术者精准个体化地进行术前评估、手术方案设计与术中操作模拟,在新兴技术如3D打印技术与虚拟现实技术的共同配合下,肝胆疾病外科手术的根治力与安全性也已得到极大提升^[5]。然而完整、精细的真实人体胆道及其毗邻结构的三维模型建立尚未完成,重建手段也未统一。在大多数影像系统工作站呈封闭模式,三维模型无法输出且难以用于更多交互的二次研究限制下^[6],如何拓展三维重建技术的应用价值仍值得深究。

本研究使用交互性能强大且可用于多元开发的医学影像控制系统Mimics三维重建软件,首次采用计算机断层扫描(Computed Tomography, CT)和磁共振胰胆管造影(Magnetic Resonance Cholangiopancreatography, MRCP)融合建模的方法对胆道下段梗阻的患者进行肝内外胆管及其重要毗邻结构数字化三维模型的重建,

在准确显示各组织结构的解剖特征和真实位置关系的基础上,弥补了CT和MRCP在三维重建技术上应用相对单一的缺陷,并通过CAD软件的验证,为医工结合研究者提供了精准的肝胆基础模型。期待该模型在精准真实的生物热力学与生物力学模型场仿真计算研究中发挥作用,为后续扩展其在胆道疾病中的应用,如需要进行仿真计算的胆道肿瘤磁感应热疗等医工结合的交叉研究进行铺垫,开辟肝胆系统三维重建技术发展与转化的新思路。

1 材料与方法

1.1 材料与设备

Dicom格式的断层腹部CT扫描图像数据来自SOMATOM Definition AS+64排螺旋CT机(德国Siemens公司),管电压:120 kV;管电流:自动管电流调节;螺距:1.2;层厚:1 mm;视野:326 mm;图像矩阵:512×521。MRCP扫描图像数据来自Hde 1.5T磁共振扫描仪(美国GE公司),SS-FSE3D重T2序列冠状位扫描,重复时间(TR)1 600 ms,回波时间(TE)622 ms,磁共振视野(FOV)380 mm,层厚1 mm,图像矩阵256×256。

医学影像编辑处理软件:Mimics(比利时Materialise公司)。Mimics有限元多物理场仿真软件:COMSOL Multiphysics(瑞典COMSOL公司)。

1.2 原始图像数据采集

收集2020~2021年间,在兰州大学第一医院普外科就诊的胆管炎患者影像资料,包括64排螺旋CT腹部动脉期、门脉期扫描图像和MRCP的扫描结果。图1显示CT动脉期图像中肝脏轮廓清晰,与周围组织对比明显;门脉期图像中门静脉与肝静脉走行清晰,易于进行图像分割;MRCP图像中,胆囊显影清晰,断面扩张胆道充填良好,分支解剖形态展示清楚,胆总管与胰管在十二指肠大乳头处汇合明显。

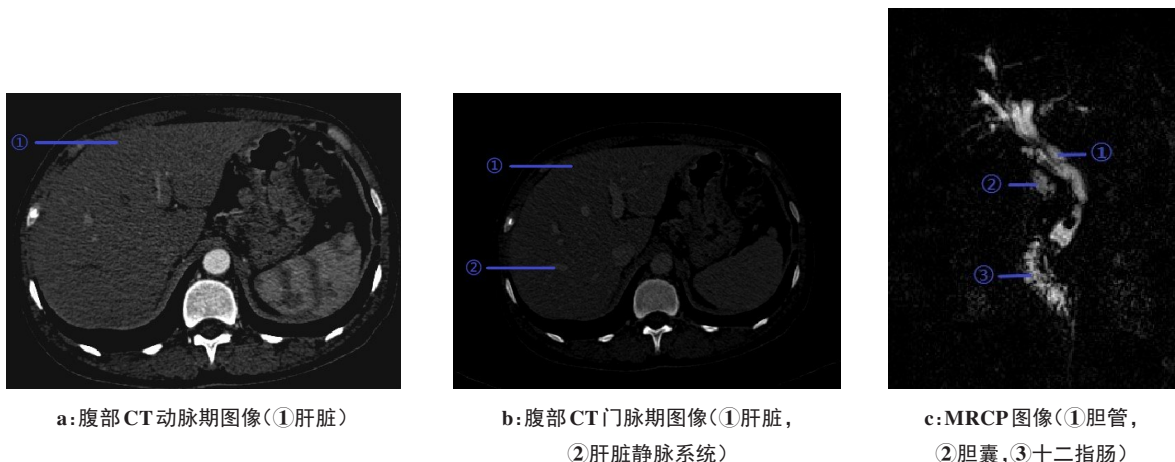


图1 64排螺旋CT与MRCP扫描后的原始图像
Figure 1 Original images after 64-slice spiral CT and MRCP scans

1.3 三维模型构建

将采集后的图像数据导入 Mimics 软件,该软件基于灰度值的阈值分割建立遮罩,使靶区域与非靶区域组织界限清晰^[7],用以综合建立胆道系统及其毗邻结构的模型。

此次模型构造人为划分为两部分,第一部分,以肝脏的 CT 平扫加动态增强扫描图像为基础的肝脏及门静脉系统构建;第二部分,以 MRCP 采集的图像进行胆道系统(包括肝内胆管,肝外胆管,胆囊管与胆囊),胰管和胆胰管交汇处的部分十二指肠降部的构建;最后整合第一,二部分建模结果,用以清晰显示各组织结构的三维立体关系。

图像分割是整个三维重建过程中的重点与难点,采用阈值分割法对各图像的图层进行阈值调整,使阈值维持在既能清晰识别目标组织结构,又不会因肠道、骨骼等高密度组织结构显影过度而增加后续操作难度的范围内,随后排除软组织并逐层编辑蒙版,去除由相似的腹腔脏器灰度值产生的非目标区域后进行三维重建。

Mimics 软件中各器官组织蒙版遮罩,分割提取过程如图 2 所示,图像显示利用阈值分割法可准确提取并分离肝脏实质,扩张胆道及其毗邻结构。由于 CT 静脉期部分图像层面中肝脏血管与周围肝实质轮廓分界不清,难以利用灰度区别进行阈值设定,笔者利用 Mimics 软件 Pseudo-color-Triangle 功能来增强血管显影,便于对血管进行图像分割(图 2b)。

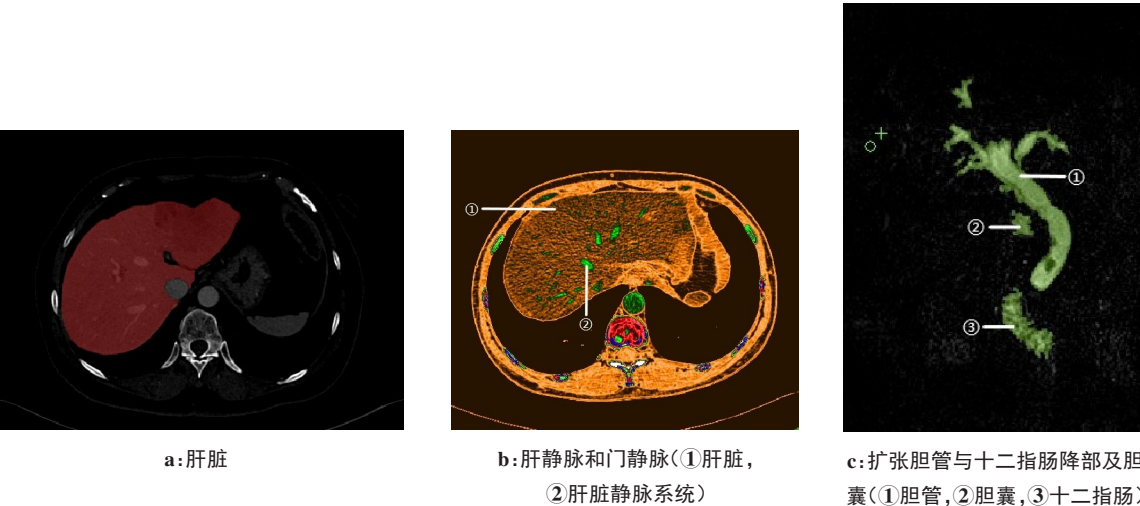


图2 各器官结构在Mimics软件中的蒙版提取过程
Figure 2 Mask extraction of each organ structure in Mimics software

1.4 三维模型后处理(有限元离散)

将重建模型通过基础几何修饰后,以 STL 格式导入 COMSOL 软件,该软件可以赋予模型材质,并根据需要进行物理场演算。模型导入后进行有限元离散,网格剖分等操作,验证该模型在多物理场耦合下的计算潜能。

22.8 cm×13.2 cm×4.8 cm,符合真实人体正常肝脏体积^[8],左右叶轮廓清晰,分隔明显;脏面观可见胆囊窝及十二指肠,肾脏和胃压迹等解剖标志。

2 结果

2.1 肝脏及其静脉血管系统重建结果

重建的肝脏模型真实反映了肝脏的外形,体积和解剖标志。图 3 显示肝脏呈表面光滑的不规则楔形,软件内测量肝脏体积为

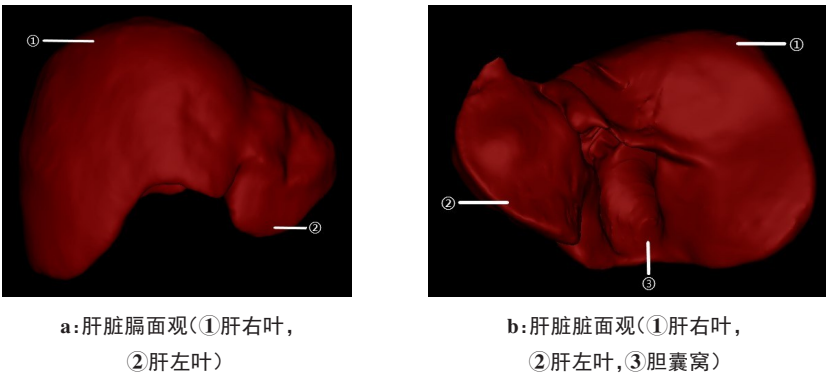


图3 肝脏三维重建结果
Figure 3 Results of liver 3D reconstruction

肝脏血管三维重建结果如图4所示。肝脏的两套静脉系统,门静脉系统及肝静脉系统均显示良好,血管主干与二、三级分支走行自然,连续完整,参考对比原发性肝癌三维可视化技术操作及诊疗规范(2020版)中相关质量评分表的前9条评价标准(关于

肝脏血管重建部分)^[9],评价肝脏血管重建的质量级别(表1),换算后如评分≥8.3分则为肝脏血管的优质建模,本研究建立的血管模型病例资料没有行CT腹腔动脉造影检查,故整体得分为8.8分,为优质模型。

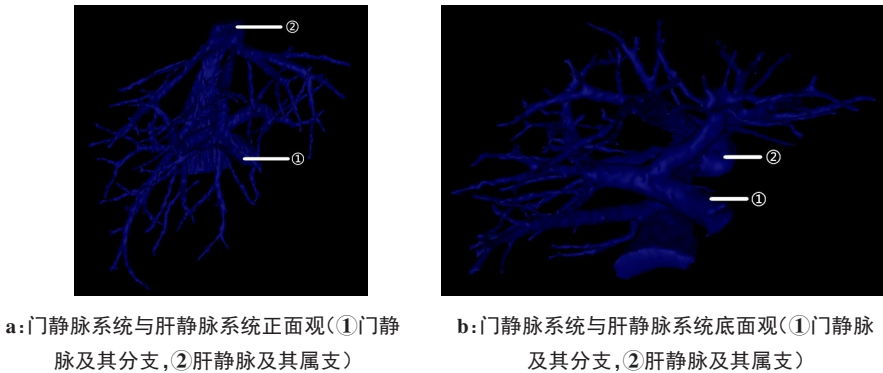


图4 肝脏静脉系统三维重建结果

Figure 4 Results of three-dimensional reconstruction of hepatic venous system

表1 三维可视化诊断与治疗流程质量控制步骤和质量评分表(肝脏血管部分)

Table 1 Three-dimensional visualization diagnosis and treatment process quality control procedures and quality rating scale (liver blood vessels)

序号	标准	评分/分
1	病人通过影像学检查(超声,非薄层CT或MRI检查)确定原发性肝癌的诊断	+1
2	病人CT检查前禁食≥4 h,检查前20~30 min口服清水0.5~1.0 L,扫描开始前再口服清水500 mL 以充盈胃肠道,以作为阴性对比剂	+1
3	扫描前训练病人屏住呼吸,嘱咐病人扫描时屏住呼吸,最大程度控制呼吸运动产生的伪影	+1
4	扫描设备64或256排螺旋CT检查扫描,层厚为0.625~1.000 mm	+1
5	CT检查扫描范围由膈顶至双肾下极,平扫后注射增强造影剂后进行上腹部动态扫描,同时行CT腹腔动脉造影检查	+1
6	三维重建人员应具有扎实的解剖学基础、肝脏外科相关疾病知识和丰富的阅片经验	+1
7	评价三维重建的肝动脉走行、形态和连续性,是否需要人工修改,需要人工修改 如果能重建出动脉主干、二级和三级分支,则不需要人工修改	-1 +1
8	评价三维重建的肝静脉走行、形态和连续性,是否需要人工修改,需要人工修改 如果能重建出肝静脉主干、二级和三级分支,则不需要人工修改	-1 +1
9	评价三维重建的门静脉走行、形态和连续性,门静脉系统血管末梢管径≥5 mm的分支应重建出来, 是否需要人工修改,需要人工修改	-1

2.2 扩张胆道系统及其毗邻结构重建结果

重建的扩张胆道系统如图5所示,可见肝内各级胆管及肝总管与胆总管均有不同程度的扩张,呈圆柱状,其中软件内测量胆总管直径为2.4 cm,远大于正常人体胆管直径(0.4~0.8 cm)^[10],同时重建的模型清晰显示胆道系统周围重要解剖结构胆囊、胆囊管、胰管与部分十二指肠降部之间的空间位置关系与解剖学特点,可见胆囊管汇入肝总管,且胆总管与胰管

于十二指肠降部的大乳头处汇合。

2.3 模型整合

将重建完成的器官组织模型按照空间解剖位置进行整合并观察,最终模型如图6所示,可见第1肝门处,有肝左、右管和门静脉出入;在腔静脉沟的上部,有肝左静脉、肝中静脉、肝右静脉注入肝静脉;在肝内胆管与门静脉及其分支伴行时,可见肝内胆管直径远超同一位置门静脉,符合胆道扩张病人的影像学特点。

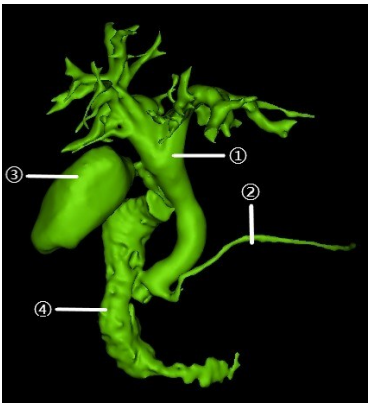


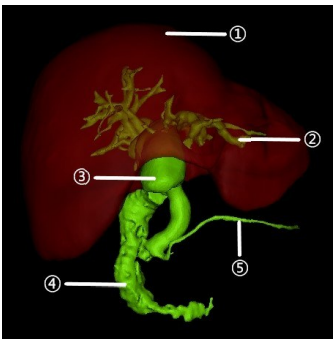
图5 胆道系统及其周围重要解剖结构三维重建模型(①胆管系统,②胰管,③胆囊,④十二指肠)
Figure 5 Three-dimensional reconstruction model of biliary system and its surrounding structures (①biliary system, ②pancreatic duct, ③gallbladder, ④duodenum)

2.4 胆道及其毗邻结构的有限元离散

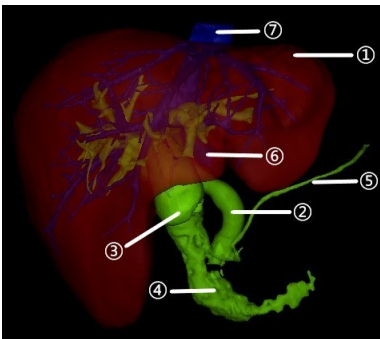
将上述基于 STL 的胆道及其毗邻结构的三维数字化模型输入 COMSOL 有限元软件,如图 7 所示,可见所有几何模型均能成功输入并形成“域”后被离散和网格剖分,证明该模型可以用于胆道疾病多学科综合治疗的相关仿真模型运算工作。

3 讨论

三维可视化技术在医学中的应用日益加深,同时推动着肝胆领域医学研究的发展,其已成为显示、描述和解释肝胆疾病解剖与特征的一把利器^[11]。胆道周围存在肝脏,胰腺等重要器官及其脉管系统,且不同脉管相互交错缠绕,解剖极为复杂,加之肝胆疾病的临床病种复杂多变,影像学检查手段丰富多样



a: 肝脏与胆道系统整合模型(①肝脏,②胆管系统,③胆囊,④十二指肠,⑤胰管)



b: 肝脏及其血管系统与胆道系统整合模型(①肝脏,②胆管系统,③胆囊,④十二指肠,⑤胰管,⑥门静脉及其分支,⑦肝静脉及其属支)

图6 胆道系统及其周围重要解剖结构三维重建模型

Figure 6 Three-dimensional reconstruction model of biliary system and its surrounding structures

以及不同层次研究的需求差异较大,这些因素导致胆道系统及其毗邻结构的三维重建从影像资料来源到建立方法与应用方向尚有很大的研究空间^[4, 12]。

通过正常人体胆道影像资料的三维重建是最理想的模型重建方式之一,然而由于正常胆道直径较小,存在识别困难,重建耗时过多等问题导致难以直接用于完整的胆道模型构建,故现有研究大多通过对尸体标本及动物模型的胆道及血管特殊材料灌注来实现完整的显像^[13-14],此方法虽可建立完整的胆道三维重建模型,但尸体标本价格昂贵,来源匮乏,且在精准个体化的医学时代,基于尸体及动物标本所构建出的三维重建模型在活人体上推广价值有限,因此,完整胆道模型重建的资料来源尚需斟酌。胆道疾病多伴随胆道梗阻的存在,由于胆汁排出路径中存在结石,肿瘤等病变使胆道发生梗阻,胆汁无法顺利排出,进而造成胆汁淤积与胆道扩张。在影像阅片中,扩张

的胆道形态虽较正常人体胆道更为宽大,但其走行显示良好,与周围组织密度(信号)差别明显,适合胆道三维模型的构建,2017年,曾宁等^[15]利用肝门部胆管癌患者的影像学资料对肿瘤的形态部位和其与肝内管道的解剖关系制作出 3D 模型,然而基于胆道肿瘤患者影像资料的三维重建,虽对个体化的手术治疗有一定的辅助作用^[16],但常因肿瘤周围组织如邻近脉管受到压闭,导致个别结构在影像图片中显像不清,致使难以建立全面可视的胆道及其毗邻结构三维模型,使得模型用途大为受限。又如胆道结石存在时,三维重建技术可辅助设计取石途径,提高胆管结石的清除率^[17],但在模型重建的过程中,由于结石堵塞,胆道的连续性中断,常需人为修补与后期处理,导致对应的模型缺乏完整性,不利于其他学科人士使用。由此可见,以伴随胆道梗阻的某一特定胆道疾病影像资料作为模型重建来源时,虽可以加深对某一胆道疾病的了

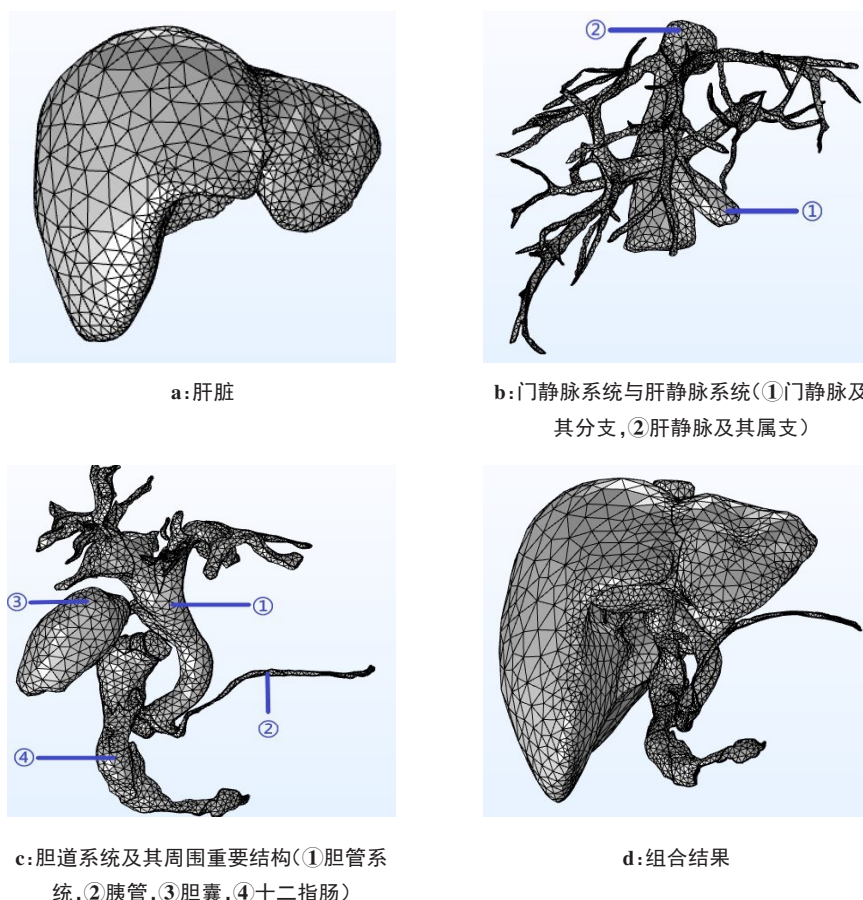


图7 胆道及其毗邻结构在COMASOL软件中的有限元离散

Figure 7 Finite element discretization of biliary tract and its adjacent structures in COMASOL software

解来帮助指导个体化的临床治疗,但梗阻部位因人而异,病变本身和病灶对周围组织结构的影响,三维重建过程往往受到干扰,使建立出的模型缺乏完整性,难以满足更广泛的研究要求,故本研究不以特定病种的影像资料为参考,而是直接选择梗阻点在胆道下段终末处的患者影像资料作为模型重建来源,不仅因梗阻点靠下时,全胆道充分扩张,影像资料显示清晰直观,使有需求的研究者可快速建立完整的全胆道模型,同时避免了胆道周围重要器官组织受到病变影响而难以建模的问题,实现了全胆道及其毗邻结构的三维重建模型在解剖形态与位置关系上的精确展示。

既往胆道系统及其毗邻结构三维重建模型的影像资料多来源于单一影像学检查手段,尤其以CT为主。基于CT进行的三维重建模型,可大致展现肝胆系统的结构与特点,并在肝胆细小分支血管的呈现中具有独特的优势^[18]。然而,在CT显示对胆管缺乏连续感,显示胆总管下段时常有盲点存在且易受肠气干扰等问题还未解决现状下,胆道的三维模型重建同样面临挑战。用于显示胆管胰管的MRCP在以往被认为空间分辨率低下,不能显示胆管外组织,

不能准确地描述肝脏、肝内胆管与血管系统之间的三维立体关系,不适合用于建立胆道系统及其毗邻结构的三维可视化模型^[19],然而近期,国外有学者利用MRCP成功进行了胆道的模型构建并实现了术前规划^[20],这体现出MRCP在胆道系统模型建立中的优势,MRCP由于其较高的空间对比分辨率,可完整显示肝内外胆道树影像,不仅如此,其在胆道病变中展现胆管和胰管扩张程度、梗阻平面、梗阻端形态变化等方面的优秀特性,使其具备模型建立的潜能^[21]。为了弥补MRCP不能使胆道模型与周围组织器官模型同时呈现的缺陷,本研究采用CT/MRCP融合建模方法:CT提供重要血管与肝脏信息,MRCP勾画出清晰的胆管树、胰管、胆囊和十二指肠降部的形态与边界,最大程度还原了融合后的胆道系统及其毗邻结构的真实人体三维可视化模型,为完整并具有良好的肝胆系统模型重建方法提供新思路。

目前应用于三维可视化研究的软件工具中,除利用CT/MRI机器系统自带的工作站进行模型建立外,自主研发的软件系统也已用于三维重建,南方医科大学方驰华团队利用其自主知识产权的腹部医学图像三维可视化(MI-3DVS)软件系统,进行了多项

肝胆外科领域的三维重建模型研究工作^[22-24],积极推动了我 国三维重建技术在肝胆外科手术中的应用发展;李建生团队通过美国 EDDA 公司的 IQQA-Liver 三维术前规划软件重构的模型对肝门部胆管癌实行术前规划^[25];温志坚等^[26]利用旭东数字医学影像软件三维可视化功能进行了肝门部胆管癌的精准确术前评估,肝胆系统相关的三维重建技术目前较多直接服务于外科手术研究,在数字医学兴起的大背景下,三维重建的应用或许会有更多发展方向,2020 年,昆明医科大学吴敏等^[27]利用比利时 Materialise 公司研发的 Mimics 软件进行了肝门静脉的三维重建后,附加有限元分析,给定边界条件,计算门静脉压力,实现了无创性门静脉压力的测定;国外曾有研究者通过建立小鼠肝小叶胆道流体力学的 3D 模型,用于预测药物引起的胆汁流量变化^[28];范立新等^[29]利用 Mimics 软件通过尸肝标本重建胆道系统三维模型后拟附加有限元软件进行胆管的生物力学和胆汁流体力学分析来探究胆道结石可能的病因学,由此可见,三维可视化重建在肝胆外科领域的应用远不止直接为外科手术服务,诸如 Mimics 三维重建软件不仅可以基于断层图像实现三维重建功能,更为重要的是,该软件提供了多种有限元软件的接口,成为三维模型的建立到后续有限元分析的重要桥梁。除此之外,Mimics 软件在众多建模软件中可以直接基于复杂的解剖组织进行内部的结构构造,为模型赋予精准的材料,实现了许多高端的 CAD 软件与其他三维重建软件无法做到的参数给予与输出转化,增益了医学与其他学科交叉解决生命问题的成果^[7]。本研究使用 Mimics 三维重建软件首次对胆道下段梗阻的患者进行了全胆道及其重要毗邻结构的三维可视化模型重建,重建出的模型在外形结构与模型精度上实现了全新突破。在医工交叉研究兴起之时,该模型为其他学科研究提供了精准的肝胆模型基础,期待本研究能进一步扩展学科交叉的研究成果在胆道疾病中的应用,如胆管癌磁感应热疗的真实人体内组织热场研究,服务于临床治疗的同时,拓展肝胆系统三维重建技术全新的发展方向与转化应用。

【参考文献】

- [1] 张雷达,刘丹青.内镜技术助力精准胆胰外科的发展[J].中华消化外科杂志,2022,21(1): 66-68.
Zhang LD, Liu DQ. Endoscopic technology boosts the development of precision biliary and pancreatic surgery[J]. Chinese Journal of Digestive Surgery, 2022, 21(1): 66-68.
- [2] 梁晶,周旭,张爱桃,等.医工融合背景下医学院校工科专业课程的创新研究[J].电子元件与信息技术,2022,6(2): 121-122.
Liang J, Zhou X, Zhang AT, et al. Research on innovation of engineering courses in medical colleges and universities under the background of medical and engineering integration[J]. Electronic

- Components and Information Technology, 2022, 6(2): 121-122.
- [3] Zhang X, Yue P, Zhang JD, et al. A novel machine learning model and a public online prediction platform for prediction of post-ERCP-cholecystitis (PEC)[J]. E Clinical Medicine, 2022, 48, 101431.
- [4] 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.
Ding XM, Bai DS, Jiang GQ, et al. Advances in the application of three-dimensional reconstruction in liver surgery[J]. Advances in Modern General Surgery in China, 2022, 25(6): 461-464.
- [5] Fang C, Zhang P, Qi X. Digital and intelligent liver surgery in the new era: prospects and dilemmas[J]. E Bio Medicine, 2019, 41: 693-701.
- [6] 张书新.胸部三维数字化建模的基础与临床初步应用研究[D].北京:中国人民解放军医学院,2016.
Zhang SX. Basic and preliminary clinical application of chest 3D digital modeling[D]. Beijing: Chinese People's Liberation Army Medical College, 2016.
- [7] 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.
Fang WY, Lin DX, Kou WF, et al. Advances in medical image three-dimensional reconstruction system[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2022, 39(7): 823-827.
- [8] 丁文龙,刘学政.系统解剖学[M].9版.北京:人民卫生出版社,2018.
Ding WL, Liu XZ. Systematic anatomy[M]. 9th ed. Beijing: People's Medical Publishing House, 2018.
- [9] 刘允怡,樊嘉,方驰华,等.原发性肝癌三维可视化技术操作及诊疗规范(2020版)[J].中国实用外科杂志,2020,40(9): 991-1011.
Liu YY, Fan J, Fang CH, et al. Specification for technical operation and clinical application of three-dimensional visualization technology for primary liver cancer (2020 edition)[J]. Chinese Journal of Practical Surgery, 2020, 40(9): 991-1011.
- [10] 陈孝平,汪建平,赵继宗,等.外科学[M].9版.北京:人民卫生出版社,2018.
Chen XP, Wang JP, Zhao JZ, et al. Chirurgery[M]. 9th ed. Beijing: People's Medical Publishing House, 2018.
- [11] 方驰华,卢绮萍,蔡伟.肝胆管结石三维可视化精准诊治专家共识(2019版)[J].中国实用外科杂志,2019,39(10): 1001-1009.
Fang CH, Lu QP, Cai W. Expert consensus on three-dimensional visualization for accurate diagnosis and treatment of hepatolithiasis (2019 edition)[J]. Chinese Journal of Practical Surgery, 2019, 39(10): 1001-1009.
- [12] Clipet F, Rebibo L, Dembinski J, et al. Portal vein variants associated with right hepatectomy: an analysis of abdominal CT angiography with 3D reconstruction[J]. Clin Anat, 2019, 32(3): 328-336.
- [13] 张立力,肖菊姣,许广威,等.五指山小型猪肝脏的三维数字化建模[J].南方医科大学学报,2015,35(9): 1362-1365.
Zhang LL, Xiao JJ, Xu GW, et al. Construction of a three-dimensional digital model of the liver of Wuzhishan mini-pig[J]. Journal of Southern Medical University, 2015, 35(9): 1362-1365.
- [14] 杨剑,方驰华,范应方,等.基于亚毫米 CT 扫描数据的肝外胆管供血动脉三维可视化模型构建[J].南方医科大学学报,2014,34(7): 945-949.
Yang J, Fang CH, Fan YF, et al. Construction of a three-dimensional visualization model of arteries supplying the extrahepatic bile duct based on submillimeter CT data[J]. Journal of Southern Medical University, 2014, 34(7): 945-949.
- [15] 曾宁,方驰华,范应方,等.肝门部胆管癌三维可视化精准诊疗平台构建及临床应用[J].中华外科杂志,2016,54(9): 680-685.
Zeng N, Fang CH, Fan YF, et al. The construction of three-dimensional visualization platform and its application in diagnosis and treatment for hilar cholangiocarcinoma[J]. Chinese Journal of Surgery, 2016, 54(9): 680-685.
- [16] Yang Y, Zhou ZY, Liu R, et al. Application of 3D visualization and 3D printing technology on ERCP for patients with hilar cholangiocarcinoma[J]. Exp Ther Med, 2018, 15(4): 3259-3264.
- [17] 张化玉.三维可视化技术指导肝段切除联合胆道硬镜在复杂肝胆管结石治疗中的应用[J].中国普通外科杂志,2018,27(6): 796-800.
Zhang HY. Application of three-dimensional visualization technology in the treatment of complex hepatolithiasis with segmental resection combined with hard choledochoscopy[J]. Chinese Journal of General Surgery, 2018, 27(6): 796-800.
- [18] 胡浩宇.三维可视化联合吲哚菁绿荧光成像技术在胆道损伤及肝癌诊疗的应用研究[D].广州:南方医科大学,2018.

- Hu HY. Application of three-dimensional visualization combined with indocyanine green fluorescence imaging in the diagnosis and treatment of biliary tract injury and liver cancer [D]. Guangzhou: Southern Medical University, 2018.
- [19] Hyodo T, Kumano S, Kushihata F, et al. CT and MR cholangiography: advantages and pitfalls in perioperative evaluation of biliary tree[J]. Br J Radiol, 2012, 85(1015): 887-896.
- [20] Pereira da Silva N, Abreu I, Seródio M, et al. Advanced hepatic vasculobiliary imaging segmentation and 3D reconstruction as an aid in the surgical management of high biliary stenosis[J]. BMC Med Imaging, 2020, 20(1): 120.
- [21] 季必勇. MRCP及不同MRI序列联合应用对胆管癌诊断价值的评价[D]. 合肥: 安徽医科大学, 2013.
- Ji BY. Diagnostic value of combined application of MRCP and different MRI sequences in cholangiocarcinoma[D]. Hefei: Anhui Medical University, 2013.
- [22] Yang J, Tao HS, Luo W, et al. A novel method of fluorescent imaging can guide hepatectomy for intrahepatic cholangiocarcinoma with intrahepatic biliary obstruction. Journal of surgical oncology[J]. J Surg Oncol, 2020, 122(8): 1580-1586.
- [23] Fang CH, An JY, Bruno A, et al. Consensus recommendations of three-dimensional visualization for diagnosis and management of liver diseases[J]. Hepatol Int, 2020, 14(4): 437-453.
- [24] 祝文, 曾小军, 胡浩宇, 等. 应用增强现实与混合现实导航预防腹腔镜肝切除术中出血价值研究[J]. 中国实用外科杂志, 2022, 42(3): 298-302.
- Zhu W, Zeng XJ, Hu HY, et al. The research and practice of augmented reality and mixed reality navigation in the prevention of hemorrhage for 3D laparoscopic hepatectomy[J]. Chinese Journal of Practical Surgery, 2022, 42(3): 298-302.
- [25] 朱云峰. 三维重建技术在肝门部胆管癌诊治中的应用价值[D]. 合肥: 安徽医科大学, 2016.
- Zhu YF. Application value of three-dimensional reconstruction in diagnosis and treatment of hilar cholangiocarcinoma[D]. Hefei: Anhui Medical University, 2016.
- [26] 温志坚, 陈战, 闫兴洲, 等. 三维可视化技术在Bismuth-Corlette III、IV型肝门部胆管癌计划性肝切除中的应用[J]. 武警医学, 2021, 32(3): 218-223.
- Wen ZJ, Chen Z, Yan XZ, et al. Application of 3D visualization technique in planned hepatectomy for Bismuth-Corlette type III、IV hilar cholangiocarcinoma[J]. Medical Journal of the Chinese People Armed Police Forces, 2021, 32(3): 218-223.
- [27] 吴敏, 许丁伟, 孙敏, 等. 三维重建结合有限元分析测定门静脉高压症患者门静脉压力的临床价值[J]. 中华肝胆外科杂志, 2020, 26(1): 15-18.
- Wu M, Xu DW, Sun M, et al. Clinical value of portal venous pressure based on three dimensional reconstruction model of portal vein combined with finite element analysis in patients with portal hypertension[J]. Chinese Journal of Hepatobiliary Surgery, 2020, 26(1): 15-18.
- [28] Meyer K, Ostrenko O, Bourantas G, et al. A predictive 3D multi-scale model of biliary fluid dynamics in the liver lobule[J]. Cell Syst, 2017, 4(3): 277-290.
- [29] 范立新, 刘建滨, 任家武. 胆道系统CT扫描的三维重建研究[J]. 中国临床解剖学杂志, 2009, 27(4): 426-429.
- Fan LX, Liu JB, Ren JW, et al. Human biliary system three-dimensional model on perfused cadaveric liver by Computed Tomography[J]. Chinese Journal of Clinical Anatomy, 2009, 27(4): 426-429.

(编辑: 薛泽玲)