

DOI:10.3969/j.issn.1005-202X.2023.01.012

医学影像物理

虚拟肝脏重建与形变切割仿真

高海国, 贾世宇

青岛大学计算机科学技术学院, 山东 青岛 266071

【摘要】针对肝脏虚拟手术仿真对仿真场景逼真性、形变和切割仿真实时性的要求,提出虚拟体包络技术、基于解剖结构的边界条件设置以及双体素网格3种创新方法,根据肝脏的解剖结构重建肝脏仿真模型。对于肝脏模型外以面模型形式存在的管道模型,将其镶嵌在虚拟包络体模型中以实现形变和切割仿真。通过对肝脏表面解剖结构的分析,以及对肝脏约束形式进行合理简化,在肝脏韧带结构上设置边界限制标志。双体素网格方法在两层尺度不同的体素网格上重建肝脏仿真模型:原始模型表面在精细体素网格中重建,而切割面则在粗糙体素网格中构造,以此减少形变和切割仿真的计算量。仿真结果表明所用方法能在保持肝脏形变和切割仿真的真实感前提下提高仿真的运行速度。

【关键词】肝脏解剖;模型重建;手术仿真;软组织形变仿真;软组织切割仿真

【中图分类号】R318;TP391

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2023)01-0071-06

Reconstruction of virtual liver and its deformation and cutting simulations

GAO Haiguo, JIA Shiyu

College of Computer Science and Technology, Qingdao University, Qingdao 266071, China

Abstract: To meet the requirements of simulation scene fidelity and real-time performance of deformation and cutting for virtual liver surgery simulation, 3 novel methods are proposed, including virtual volume envelope method, boundary condition settings based on anatomical structures, and two-level linked voxel method. The liver model for simulation is reconstructed according to its actual anatomical structures. Extrahepatic vessels in the form of surface models are embedded in the virtual volume envelope model for realizing deformation and cutting simulations. Boundary conditions are set on the ligament structures of the liver according to the analysis on the anatomical structures of the liver surface and the appropriate simplifications of its boundary constraints. The two-level linked voxel method reconstructed the liver model for simulation in two linked voxel grids with different levels. The original surface mesh is reconstructed in a fine level linked voxel grid, while the cut surface mesh is constructed in a coarse level linked voxel grid for reducing the computational load of deformation and cutting simulations. Simulation results show that the proposed methods can improve the running speed of the liver deformation and cutting simulations while maintaining the realism.

Keywords: liver anatomy; model reconstruction; surgical simulation; soft tissue deformation simulation; soft tissue cutting simulation

前言

肝脏是人体内重要的一个代谢器官。肝脏切除手术是治疗肝恶性肿瘤的一种有效方式。虚拟手术仿真是在计算机生成的虚拟手术环境中模拟手术过

程的技术,包括人体器官的三维重建、虚拟手术场景的构建、虚拟软组织模型在虚拟手术设备操作下的形变与切割仿真、虚拟软组织模型与虚拟手术设备的交互碰撞检测、力反馈计算等方面内容^[1]。其中人体器官的三维重建^[2-4]、虚拟软组织模型的形变仿真^[5-6]、切割仿真^[7-11]等是虚拟手术仿真研究的重要方面。通过生成高质量的人体器官模型,以及进行准确、实时、稳定的人体软组织结构的形变与切割仿真,虚拟手术仿真在手术训练、手术方案制定、手术操作、术后评估等方面为医生提供巨大帮助,能有效提升医生手术成功率。

本文在 Jia 等^[7]对内部嵌入三角形网格的肝脏模

【收稿日期】2022-05-13

【基金项目】山东省自然科学基金(ZR2020MF043)

【作者简介】高海国,硕士研究生,研究方向:计算机图形学,E-mail: haiguo123@163.com

【通信作者】贾世宇,博士,副教授,研究方向:手术仿真与计算机图形学,E-mail: shiyujia@qdu.edu.cn

型实施切割仿真的方法基础上提出了3种创新方法,分别为:(1)虚拟体包络技术。文献[7]在进行切割仿真前,体模型外的面模型结构会被裁剪掉。该操作去除了仿真场景的部分内容,降低了仿真的真实感。针对此不足,本文提出虚拟体包络技术,将面模型嵌入到一个“虚拟”的包络体中,保证落在体模型外的面模型可以正常参与形变与切割仿真。(2)基于解剖结构的模型边界条件设置。文献[7]中肝脏边界条件的设置不符合实际的解剖结构。本文基于肝脏的解剖结构,在肝脏模型相应的区域内设置边界限制标志,从而真实地模拟肝脏形变。(3)双体素网格方法。文献[7]在同一个链接体素网格上重建软组织的表面与切割面。实际手术时切割面由若干平面构成,缺乏软组织表面的细节结构,不需要在高分辨率体素网格上重建。为此,本文提出双体素网格方法,在精细体素网格上重建软组织表面,而在粗糙体素网格上重建切割面,以此提高仿真的运行速度。

1 肝脏仿真模型重建

人体肝脏有复杂的表面与内部结构。肝脏主要由肝实质、肝静脉系统、Glisson系统、肝韧带等结构组成^[12]。本文使用自主编写的体模型生成器进行肝脏内外各结构模型的重建与组装。

1.1 肝脏内各结构模型重建

为保证在进行仿真时肝脏内各部分结构的形变较真实,需要根据它们自身力学特性的不同分开进行建模。肝脏内部结构可以大致分为肝实质与肝内脉管系统两部分。其中肝内脉管系统包括肝门静脉、肝固有动脉、胆管、肝静脉系统等^[12]。本文将肝脏分成带有韧带的肝轮廓、肝静脉、Glisson系统等3部分结构来分别进行建模。其中Glisson系统由肝门静脉、肝固有动脉、胆管等组成^[12]。肝静脉与肝门静脉尺寸较大,是肝脏内区域划分的重要依据,建模时需要保持较高的准确性。

肝轮廓建模:由于肝脏病变类型与病变程度的不同,肝脏可能有不同的外型。为了更好地根据医学资料进行韧带组织的建模,在现有肝脏表面模型基础上,依据医学图谱^[13]中的肝脏解剖图使用ZBrush软件对其进行轮廓修改。同时参考文献[12]中的肝脏韧带解剖图,在肝脏模型表面添加了韧带组织。图1所示左边一列为肝脏解剖图,右边一列为修改后肝脏的轮廓模型。

肝静脉建模:本文使用CT扫描三维重建技术^[14-15]生成的肝静脉模型。但是该重建技术生成的模型细节过于丰富、网格分布不好、数据量较大。这不仅严重影响手术仿真的实时性,而且过于微小的管道模型细节

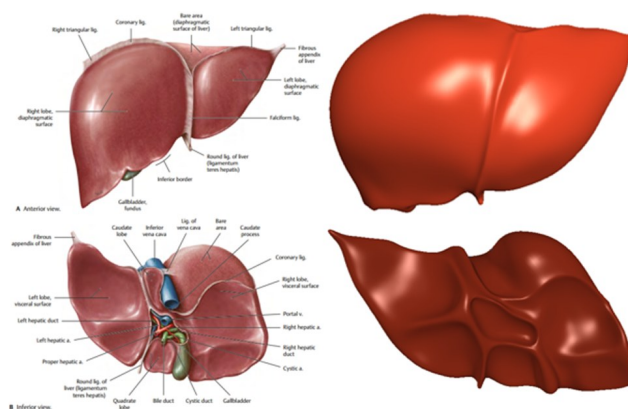


图1 肝脏解剖图与肝脏轮廓模型

Figure 1 Liver anatomical drawings and contour models

也没必要显示。为此使用ZBrush与Maya软件对模型微小细节进行修剪并重构模型整体网格。

Glisson系统建模:肝门静脉建模流程与肝静脉的一样。肝固有动脉与胆管的尺寸较小、分布复杂、结构标识度低,因此根据医学解剖图谱^[16]中的肝脏血管解剖图使用3DMax软件进行快速估计建模。

1.2 肝脏外管道建模与其虚拟包络体生成

肝脏外管道建模:为了让仿真场景更真实,提升仿真的沉浸感,在肝脏模型外增加了与其相连接的管道模型。肝脏外管道模型并不是肝脏手术仿真的主要关注点,因此可以根据医学图谱中的肠系膜上静脉解剖图进行手动建模。

肝脏外管道模型是面模型,为了能够在仿真时对其实施形变与切割,本文提出了虚拟体包络技术,将面模型镶嵌在一个粗糙的体模型当中。该技术是本文的创新点之一。当肝外管道模型建模完成后,在体模型生成器中生成这些管道模型的虚拟包络体。然后进行肝外管道模型与其虚拟包络体的组装,接着将这些管道的边界限制条件设置在包络体上。在仿真时,将肝外管道的力学特性赋予给包络体,让以面模型形式存在的肝外管道根据“虚拟”的体模型进行变形与切割,而虚拟包络体本身则设置为不可见。图2显示肝脏外管道建模参考图、肝外管道模型及其虚拟包络体。

为保证形变的准确性与减少内存消耗,体模型与面模型所包含区域应尽量保持一致。本文使用Xu等^[17]提出的方法生成包络体。该方法通过对距离场实施偏移实现模型的修复和重建,可以生成与原模型高度一致且水密的包络体。

1.3 肝脏模型组装

模型建好后,以肝脏轮廓模型为装配基准,将其它模型依次导入到体模型生成器中进行组装。为将肝脏内外各部分模型准确地组装在一起,根据解剖结构在

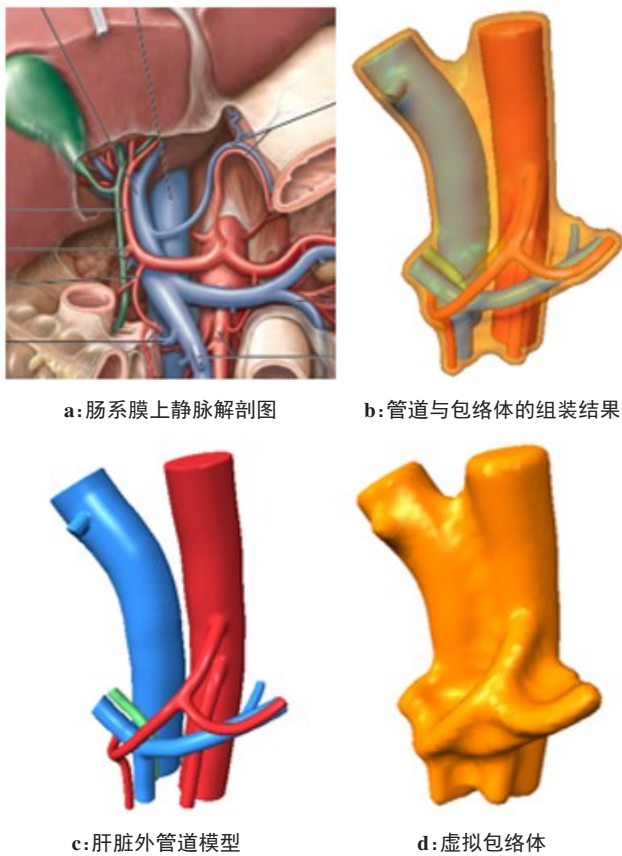


图2 肝脏外管道模型与其包络体

Figure 2 Extrahepatic duct model and its envelope body

各模型相连接部位设置装配定位点。在每次模型组装前,将模型自身的坐标原点移动到相连接的装配定位点处。组装完成后,设置各模型的颜色、透明度、边界条件标识等。图3展示组装完成后的肝脏模型。

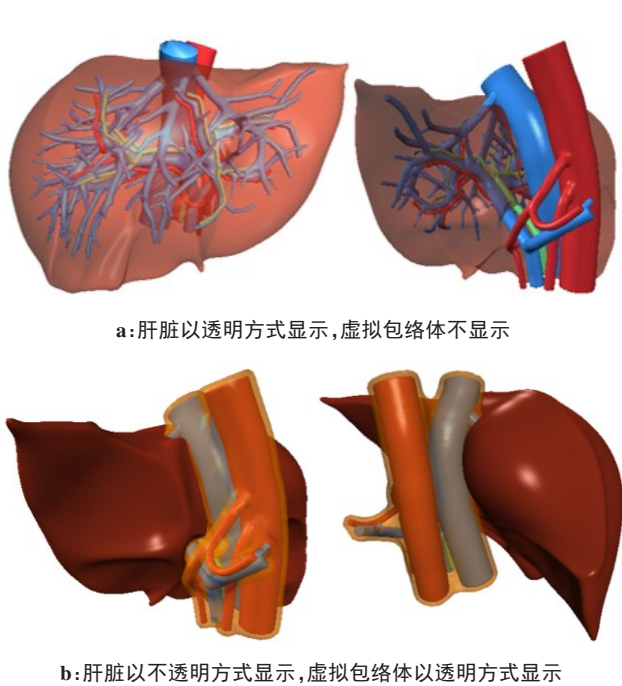


图3 肝脏模型

Figure 3 Liver models

2 肝脏形变边界条件设置

为得到更准确的肝脏模型形变,不仅要解决肝脏自身的弹性形变问题,而且要考虑肝脏边界条件对肝脏形变的影响。目前已有很多关于肝脏弹性形变的研究,但都没有考虑到肝脏的边界条件设置。本文则根据肝脏在人体内部的实际连接限制情况设置合理的边界条件,这也是本文的创新点之一。人体内肝脏通过一些韧带与腹前壁、横膈、胃等结构相连接^[18]。其中肝脏通过弹性组织与其它弹性结构相连接,同时由于这些弹性组织具有不同厚度,导致它们自身弹性性能分布不一致。这些情况使肝脏的边界限制条件非常复杂。虽然肝脏有复杂的边界连接形式与连接弹性模式,但是在手术时,肝脏位于静止的人体内,没有剧烈的运动变形。此时肝脏复杂的边界连接形式可以简化为肝脏通过韧带组织与非弹性组织相连接,因此可以在直接与肝脏相连接的韧带组织上设置固定标志。体模型生成器具有在模型表面设置固定点与固定区域的功能。本文根据文献^[18]中关于肝脏韧带的说明以及医学图谱^[16]中肝脏的解剖图示,在肝脏模型的韧带区域上设置了相应的固定点标志。由于肝脏外的管道模型位于虚拟包络体中,同时肝外管道的形变并不是关注点,所以根据医学文献^[13]中肠系膜上静脉解剖图,在包络体上设置了近似的肝外管道边界固定标志。图4显示肝脏模型上边界固定标志的分布,图中每个小球代表一个边界固定标志。

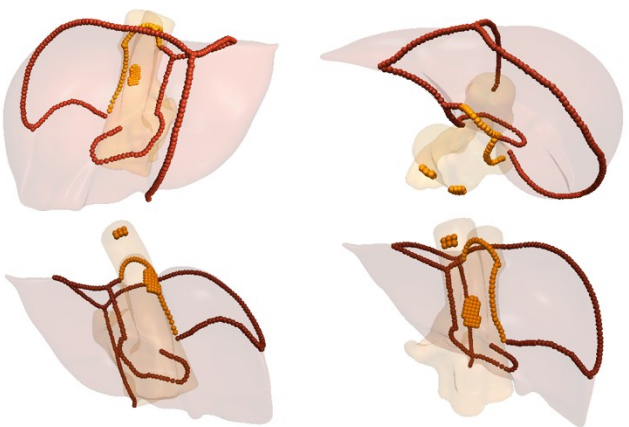


图4 带有边界限制的肝脏模型

Figure 4 Liver models with boundary constraints

3 双体素网格方法

在进行仿真时,为保持肝脏模型表面的变化细节需要在高精度的体素网格上重建模型表面。但是切割面只是由分段的切割平面组成,缺乏起伏变化

的细节,并不需要在高精度的体素网格上重建。本文提出一种创新的双体素网格方法,在不同尺度的体素网格上对模型表面与切割面分开进行重建。其中原始模型表面在一个精细体素网格中重建,而切割面则在一个粗糙体素网格中构造。相邻体素之间以“链接”相连。粗糙体素网格中的体素与精细体素网格中的体素重合,前者体素的间距是后者的整数倍。为了便于描述,将以体素为顶点、以链接为边的立方体称为“双网格立方体”。为减少仿真的计算量,体模型生成器预先对模型表面进行重建。重建使用双轮廓算法,其过程如下:首先在精细体素网格中计算模型表面与链接的交点和交点处的法线;然后对每个包含相交链接的双网格立方体计算特征点;最后对每个相交的链接将其交点与周围4个双网格立方体的特征点相连,形成4个三角形。嵌入虚拟包络体内的面模型保持原状,不需要重建。体模型生成器还在粗糙体素网格之上构造更为粗糙的八叉树网格,用于形变计算。八叉树网格立方体的尺寸是粗糙网格体素间距的 2^L 倍, L 为八叉树网格立方体的等级。图5显示双体素网格与八叉树网格的构造示意图。为了便于观看,图中的网格以二维方式展示,实际的网格是三维结构。图中粗糙网格与精细网格的体素间距之比为2,八叉树网格立方体的最小等级是1。

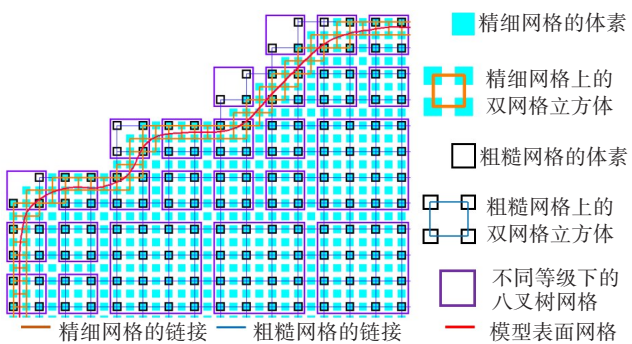


图5 双体素网格和八叉树网格的构造
Figure 5 Construction of two-level linked voxel grids and octree mesh

形变、切割和碰撞仿真在自主编写的手术仿真器中运行。体模型生成器将双体素网格模型导出到文件中。手术仿真器将该文件导入,然后进行仿真。仿真过程中形变计算在八叉树网格中实施,而切割和碰撞则在粗糙体素网格中实施。手术仿真器相关的理论和算法设计将在后续论文中详细描述。

4 仿真结果与分析

体模型生成器和手术仿真器使用C++编写,图形

渲染使用OpenGL。操作系统为Windows 10 64bit专业版。硬件环境为:Dell Precision 5820工作站(Intel Xeon W-2133 CPU,6核,主频3.6 GHz;32 GB内存;NVIDIA GeForce RTX 2080 Ti GPU),两个Phantom Desktop力反馈设备。

本文中肝脏模型的尺寸为 $227.2\text{ mm}\times142.8\text{ mm}\times118.9\text{ mm}$ 。仿真场景主要包括肝脏轮廓模型、肝脏内外管道模型、外管道的虚拟包络体等。其中肝脏内外管道模型为面模型,肝脏轮廓模型与虚拟包络体为体模型。仿真时肝脏模型与管道模型的杨氏模量分别为7 kPa和10 kPa,泊松比均为0.33,密度均为 $1\ 050\text{ kg/m}^3$ 。表1为仿真模型的网格参数信息。

表1 各仿真模型数据
Table 1 Data of simulation models

模型	表面顶点	表面三角形面片	模型类型
肝脏轮廓	402 541	459 410	体模型
静脉	168 423	205 826	面模型
门静脉	262 309	317 762	面模型
肝内胆管与动脉	136 176	172 044	面模型
肝脏外管道	183 392	186 080	面模型
虚拟包络体	155 731	177 302	体模型

为了比较双体素网格结构与文献[7]的单体素网格结构的仿真效果,本文设计了两个使用同一个肝脏模型的仿真场景。场景1采用本文提出的双体素网格结构,粗糙网格与精细网格的体素间距之比为2,模型尺寸与粗糙网格的体素间距之比为100。场景2采用文献[7]中的单体素网格结构(即粗糙网格与精细网格的体素间距之比为1),模型尺寸与体素网格的体素间距之比为170。此处使用170而不是200是因为设置成200时仿真帧率太低,不能满足力反馈连续性要求。使用170并不影响比较的结果,因为使用200时仿真帧率更低。表2显示两个场景中体素网格的具体参数。表3显示两个场景中八叉树网格的信息。

表2 不同场景中的体素网格数据
Table 2 Voxel grid data in different scenes

网格级别	体素分辨率	体素	链接	双网格立方体
场景1				
精细	$201\times135\times133$	1063 819	109 532	109 212
粗糙	$101\times68\times67$	146 719	426 053	132 895
场景2				
精细	$171\times115\times113$	663 902	78 889	78 626
粗糙	$171\times115\times113$	663 902	1951 895	624 562

表3 不同场景中的八叉树网格数据
Table 3 Octree grid data in different scenes

仿真场景	顶点	2级立方体	3级立方体
1	3 695	2 352	79
2	2 657	0	1 868

图6显示场景1中肝脏模型的各种网格结构。图7左边一列为利用双体素网格方法重建的肝脏模型表面，右边一列为原始肝脏模型表面，可以看出精细体素网格能很好地重建模型表面。图8显示在场景1中进行形变切割仿真过程的若干时刻画面截图，上面一行中肝脏以透明方式显示，可以看到其内部的结构，下面一行中肝脏以不透明方式显示。从图8中可以看出镶嵌在肝脏中的面模型和镶嵌在虚拟包络体中的面模型都可以形变和切割，并且其效果与肝脏的形变和切割始终保持一致。图9展示两个场景的仿真帧率(FPS)随时间的变化情况。从图9中可以看出：在非切割时刻，场景1的仿真帧率大约是场景2的2倍，而在切割时刻，场景1的最小仿真帧率比场景2的要高。这说明本文提出的双体素网格可以有效地提高仿真的运行速度。对于场景1而言，非切割时刻的仿真帧率从大约210 Hz下降到大约170 Hz，完全满足视觉连续性的30 Hz的要求。仿真所用的时间步长是3 ms，因此也基本上满足实时性的要求。虽然仿真帧率与力反馈连续性要求的1000 Hz还有较大的差距，但通过局部力反馈模型和反馈力插值技术仿真系统依然可以较好地满足力反馈连续性的要求。在切割时刻两个场景的仿真帧率均急剧下降。虽然此时场景1的仿真帧率高于场景2，但提高幅度较小，并且最低仿真帧率只有20~30 Hz。因此如何提高切割时刻的仿真帧率将成为我们未来研究的重点。

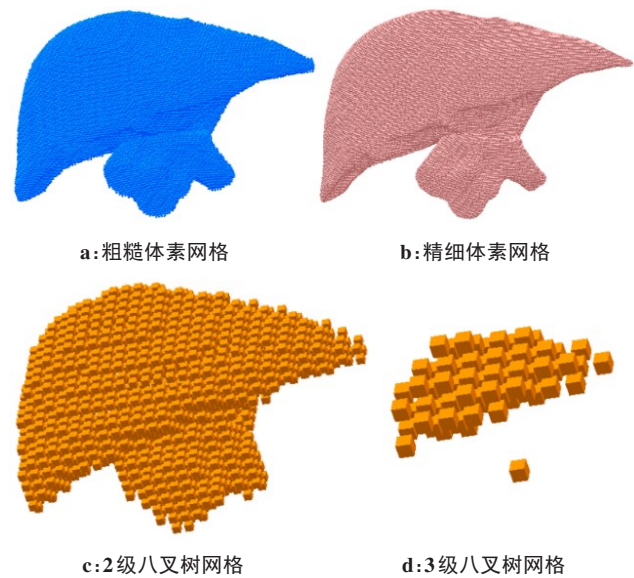


图6 肝脏模型的各种网格结构
Figure 6 Various grid structures of the liver model

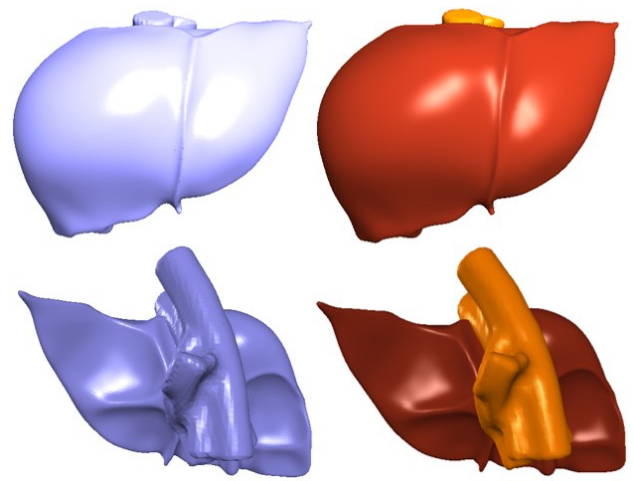


图7 肝脏模型表面网格质量比较
Figure 7 Comparison of the qualities of the liver model surface meshes

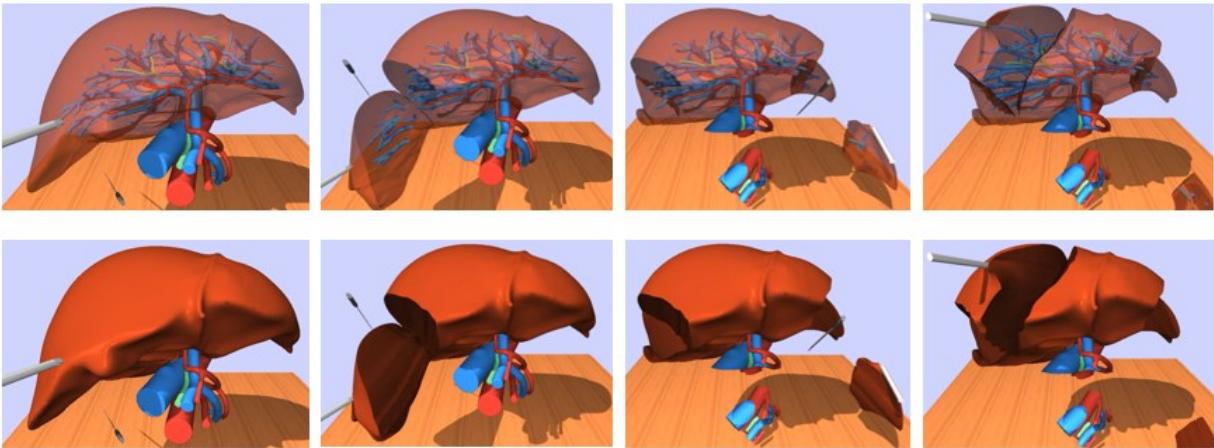


图8 肝脏模型形变切割仿真
Figure 8 Deformation and cutting simulations of the liver model

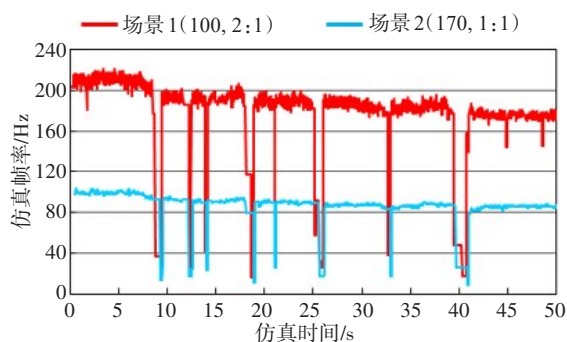


图9 形变切割仿真时帧率随时间的变化

Figure 9 Change of frame per second with time during cutting simulation

5 结语

本研究实现了虚拟肝脏模型的形变和切割仿真,肝脏模型包含了内外管道模型以提高真实感。为了使在肝脏外部的管道模型可以形变和切割,本文提出了虚拟体包络技术,将外管道模型镶嵌在形状近似的虚拟包络体中。本文还根据实际的解剖结构为肝脏模型设置在人体内部的边界限制条件。针对切割面缺乏变化细节的特点,提出了双体素网格法,在精细体素网格中重建模型表面,而在粗糙体素网格中构造切割面。仿真实验表明:虚拟体包络技术不仅能保证对外管道模型实施形变和切割仿真,而且其形变和切割效果与肝脏模型保持一致;基于解剖结构的边界限制条件使肝脏的形变表现更真实;双体素网格法能在保持仿真精度不变的前提下有效提高仿真速度。但是仿真实验也表明在切割时仿真帧率显著下降,不能满足实时性要求,未来仍需要对切割时仿真帧率的提升进行研究。

【参考文献】

- [1] 王娜,陈国栋,许少剑. 虚拟手术中肝脏形变仿真系统[J]. 计算机系统应用, 2019, 28(10): 92-97.
Wang N, Chen GD, Xu SJ. Liver deformation simulation system in virtual surgery[J]. Computer Systems & Applications, 2019, 28(10): 92-97.
- [2] 李飞,徐兆红,谷雪莲,等. 基于样条层间插值的人体肾脏三维重建[J]. 中国医学物理学杂志, 2014, 31(4): 5090-5094.
Li F, Xu ZH, Gu XL, et al. The three-dimensional reconstruction of the kidney based on the cubic spline cross-section interpolation[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2014, 31(4): 5090-5094.
- [3] 方兆山,雷其理,刘星星,等. 三维可视化技术辅助复杂性肝切除术的应用价值[J]. 中国医学物理学杂志, 2016, 33(8): 793-798.

- Fang ZS, Lei QL, Liu XX, et al. Application value of three-dimension visualization technique in complex liver resection[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2016, 33(8): 793-798.
- [4] 杨兴业,王林俊,陈曦,等. 术前三维重建在肝癌大范围肝切除中的应用[J]. 中国医学物理学杂志, 2020, 37(5): 625-628.
Yang XY, Wang LJ, Chen X, et al. Application of three-dimensional reconstruction in preoperative assessment of extensive hepatectomy for hepatocellular carcinoma[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2020, 37(5): 625-628.
- [5] 贾世宇,潘振宽. GPU加速的支持交互式切割的柔性体实时变形算法[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(9): 2188-2195.
Jia SY, Pan ZK. GPU-accelerated real-time deformation algorithm for deformable objects supporting interactive cutting[J]. Journal of System Simulation, 2013, 25(9): 2188-2195.
- [6] 张建国. 虚拟手术中软组织形变建模方法的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.
Zhang JG. Research on the soft tissue deformation modeling methods in virtual surgery[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016.
- [7] Jia SY, Pan ZZ, Wang GD, et al. Stable real-time surgical cutting simulation of deformable objects embedded with arbitrary triangular meshes[J]. J Comput Sci Technol, 2017, 32(6): 1198-1213.
- [8] Jia SY, Zhang WZ, Pan ZK, et al. Using pseudo voxel octree to accelerate collision between cutting tool and deformable objects modeled as linked voxels[J]. Visual Comput, 2020, 36(5): 1017-1028.
- [9] Wu J, Westermann R, Dick C. A survey of physically based simulation of cuts in deformable bodies[J]. Comput Graphics Forum, 2015, 34(6): 161-187.
- [10] Qi D, Milef N, De S. Divided voxels: an efficient algorithm for interactive cutting of deformable objects[J]. Visual Comput, 2021, 37(5): 1113-1127.
- [11] 张峰峰,张石,黄柯,等. 重力作用下肝脏模型变形及切割模拟仿真[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2021, 42(8): 1096-1101.
Zhang FF, Zhang S, Huang K, et al. Deformation and cutting simulation of the liver model under gravity[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2021, 42(8): 1096-1101.
- [12] 刘树伟,李瑞锡. 局部解剖学[M]. 8版. 北京: 人民卫生出版社, 2013: 115-125.
Liu SW, Li RX. Regional anatomy[M]. 8th ed. Beijing: People's Medical Publishing House, 2013: 115-125.
- [13] Anne M, Brian R, Jamie C. Atlas of anatomy[M]. 4th ed. New York: Thieme, 2020.
- [14] 韩俊翔,张学昌,郑洲,等. 基于腹部CT图像的肝脏三维建模研究[J]. 生物医学工程学进展, 2018, 39(1): 1-7.
Han JX, Zhang XC, Zheng Z, et al. Three dimensional modeling of liver based on abdominal CT images[J]. Progress in Biomedical Engineering, 2018, 39(1): 1-7.
- [15] 岳玉亮,樊庆文,王德庵,等. 辐照仿真人模型三维建模及装配原理与方法[J]. 中国医学物理学杂志, 2016, 33(5): 463-467.
Yue YL, Fan QW, Wang DH. Three-dimensional modeling of radiological anthropomorphic phantom[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2016, 33(5): 463-467.
- [16] Netter FH. 奈特人体解剖学彩色图谱[M]. 王怀经,译. 3版. 北京: 人民卫生出版社, 2005: 279-282.
Netter FH. Atlas of human anatomy[M]. Wang HJ, Translator. 3th ed. Beijing: People's Medical Publishing House, 2005: 279-282.
- [17] Xu HY, Barbič J. Signed distance fields for polygon soup meshes[C]// Kry PG, Bunt A. Proceedings graphics interface 2014. Boca Raton: CRC Press, 2020: 35-41.
- [18] 姚光弼. 临床肝脏病学[M]. 2版. 上海: 上海科学技术出版社, 2011: 3-4.
Yao GB. Clinical hepatology[M]. 2th ed. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2011: 3-4.

(编辑:黄开颜)