

肝脏管道供血分布及残肝体积的计算

郭晓曦^{1,2)}, 王博亮^{1)*}, 黄绍辉¹⁾, 程明¹⁾, 黄晓阳¹⁾, 宋晓³⁾

¹⁾(厦门大学信息科学与技术学院 厦门 361005)

²⁾(集美大学计算机工程学院 厦门 361021)

³⁾(南阳师范学院计算机与信息技术学院 南阳 473000)

(gxxamy@163.com)

摘要: 在肝切除、肝移植等手术计划中,精确地计算残肝体积至关重要,它能够直接影响到手术的成败.文中结合临床上肝外科手术的术式,提出了能够实时、准确地计算出基于肝脏管道供血分布的残肝体积的算法.首先基于个体化肝脏 CT 数据,通过分割和细化 2 个步骤建立肝实质三维模型及肝内管道的抽象树状模型;在此基础上,通过人机交互灵活地选定肝内管道分支数目和分支起点,并基于多背景距离变换计算肝脏供血分布和各部分所占比例,从而得到准确的残肝体积.实验结果表明,该算法计算速度快,对肝切除结果的模拟和计算精度能满足实际临床需求,可为手术计划提供指导依据.

关键词: 管道树;管道分支;肝脏管道供血分布;残肝体积
中图分类号: TP391

Hepatic Blood Flow Distribution and Remnant Liver Volume Estimation

Guo Xiaoxi^{1,2)}, Wang Boliang^{1)*}, Huang Shaohui¹⁾, Cheng Ming¹⁾, Huang Xiaoyang¹⁾, and Song Xiao³⁾

¹⁾(School of Information Science and Technology, Xiamen University, Xiamen 361005)

²⁾(Computer Engineering College, Jimei University, Xiamen 361021)

³⁾(College of Computer and Information Technology, Nanyang Normal University, Nanyang 473000)

Abstract: The precise estimation of remnant liver volume is extremely important in preoperative preparation for hepatobiliary surgeries such as hepatectomy and liver transplantation. According to the clinical liver surgical methods, an algorithm for remnant liver volume estimation based on hepatic blood flow distribution was proposed. First, a three-dimensional liver model and hepatic vessel tree were build after segmenting and thinning from individual liver CT images; then the algorithm provided flexible selections of vessel branch point and number by human-computer interaction to calculate hepatic blood flow distribution and proportion of each part based on multiple background distance transformation for remnant liver volume estimation. The experiment results indicate that this algorithm has strong real-time performance of resection simulation and accuracy to provide useful data for preoperative planning and it is acceptable for clinical applications.

Key words: vessel tree; vessel branch; hepatic blood flow distribution; remnant liver volume

在治疗肝脏良恶性肿瘤、肝脏移植等肝外科手术的术前准备中,更加精准的肝脏切除部位的选择以及残肝体积的计算对于保障病人术后肝脏功能和提高病人存活率有重要的意义.

收稿日期:2013-04-10;修回日期:2013-07-08.基金项目:国家自然科学基金(61001144,61102137,61271336).郭晓曦(1981—),女,博士研究生,讲师,主要研究方向为医学图像处理;王博亮(1945—),男,教授,博士生导师,论文通讯作者,主要研究方向为医学图像处理(blwang@xmu.edu.cn);黄绍辉(1976—),男,博士,副教授,主要研究方向为医学图像处理;程明(1977—),男,博士,副教授,主要研究方向为医学图像处理;黄晓阳(1978—),男,博士,讲师,主要研究方向为医学图像处理;宋晓(1985—),女,博士,讲师,主要研究方向为医学图像处理.

肝脏切除可分为规则性肝切除和非规则性肝切除 2 类^[1]. 规则性肝切除是以肝的解剖分叶和分段为基础的整叶或整段的肝切除,如五叶八段功能解剖至今在临床实践中都有广泛的应用^[2-4]. CT, MRI 等现代医学影像技术,为活体肝脏的肝段划分提供了越来越精确的断层图像数据. 文献^[5-6]通过手工在 CT 序列的每片二维图像上进行勾画并逐层累计,再形成三维图像,这类手动的分段算法效率很低,且在二维图像上进行分段缺乏直观性和准确度;文献^[7]提供了基于投影技术的自动肝脏分段算法,但是由于肝内管道存在很多解剖变异^[8-10],且肝脏形态个体化差异巨大,这种自动算法的通用性较差.

规则性肝切除有可能会切除大量正常肝组织而导致患者不耐受,而当肿瘤长在肝脏外围部分等情况下,医生也会采取非规则性肝切除^[1]. 非规则性肝切除的研究主要侧重于切割体模型的选择,如平面、球体和曲面等模型,未考虑到肝实质与肝内管道之间的供血关系^[11],或只考虑待切除部位的局部供血^[12],未考虑肝内供血分布的全面信息.

无论是规则性或非规则性肝切除,如果能在术前分析肝内管道分支数目和各分支的供血区域,并以此为基础精确计算术后残留肝脏的体积以用于手术指导,可以有效地避免出现肝实质缺血或淤血^[13]等不良情况,提高手术成功率.

1 肝脏手术模拟

本文采用临床肝脏 CT 图像数据,经过肝脏分割和管道提取,重建了直观的肝脏三维模型,提供准确的管道走行以及和病灶之间的毗邻关系;在此基础上,提出了能够灵活选定管道分支数目和分支起点来计算肝脏供血分布和残肝体积的算法.

从获取肝脏 CT 数据到计算供血分布的主要步骤如下:导入 CT 数据,肝脏序列自动分割和管道提取,根据分支点进行管道分支计算,根据管道分支计算肝脏供血分布,模拟肝切除后计算残肝体积. 进行肝脏分割已有许多的研究,本文采用 Fast Marching 算法^[14]进行肝脏序列自动分割,能够得到良好的分割结果;管道提取采用自动阈值计算的区域生长方法^[15].

肝脏手术模拟从 CT 序列导入到后期处理的总体过程如图 1 a 所示,本文重点介绍根据分支起点计算管道分支、肝脏供血分布和残肝体积的算法,其流程如图 1 b 所示.

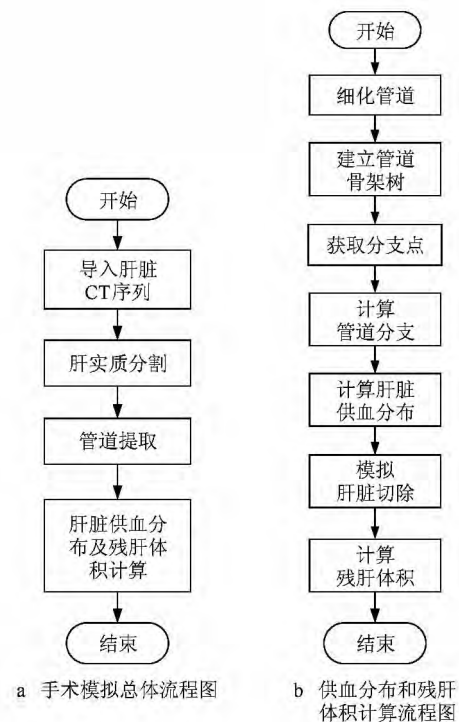


图 1 手术模拟和残肝计算的流程图

2 肝脏管道供血分布及残肝体积计算

由于活体肝脏形态的个体差异巨大,最可靠的方案是由具有丰富临床经验的医生来判断和选取肝内管道的分支起点. 在给出了分支起点后,再判断管道在该分支的下游走向,进而计算供血分布.

2.1 管道细化算法

设三维大小分别为 $X_{size}, Y_{size}, Z_{size}$ 的肝脏数据为 $L[N] = \{f(x, y, z)\}$, $V[N]$ 是对应的管道数据,其中 $N = X_{size} \times Y_{size} \times Z_{size}$.

要建立管道骨架的树状结构,首先要对管道进行细化. 管道细化算法主要有基于距离变换和基于形态学 2 种. 本文采用基于形态学的方法,细化算法 Thinning 描述如下:

Step1. 设结点 v 是管道中的一个体素,若 v 满足下列条件之一,则将 v 从管道中去掉:

- 1) 若 v 的 6 邻域中至少有一个是背景点,说明 v 在管道的表面,可以去掉;
- 2) 管道中和 v 相邻的体素是连通的,说明去除 v 不改变管道的连通性;
- 3) 根据 v 的 26 邻域中哪些属于管道、哪些属于背景来确定管道的欧拉数,即管道的拓扑性参数,去除不改变管道欧拉数的结点 v ;
- 4) 管道中与 v 相邻的体素不少于 2 个,使得三维细化的结果是一条直线而不是一个面.

Step2. 对管道中的体素重复上述步骤,直到找不出满足条件的体素,得到骨架数据 $G[N]$,算法结束.

管道经过细化之后就可对管道骨架建立树状的层次结构;然后,由医生在三维管道模型上选取分支起点;再根据分支点和管道树,采用法平面方法得到下游的供血分支.

2.2 管道骨架树的建立

要建立骨架树,首先要确定树的根.通常可以认为越靠近管道根部,半径越大,因此可以选取骨架中半径最大的结点作为树的根结点.当然也可以通过人机交互的方法手动选取根结点来确保树结构的正确性,本文建立骨架树算法选取半径最大结点作为根结点.

本文采用一个结构体数组 $T[N]$ 来保存骨架树,该结构体存放骨架中每个结点的子结点个数和子结点序号信息.在建立管道骨架树的过程中用一个栈来暂存骨架结点,栈顶指针为 P_{top} ,当前指针为 $P_{current}$,用 $F[N]$ 来标记骨架结点是否已入栈的信息.

建立管道骨架树 $Skel_Tree$ 算法描述如下:

Step1. 遍历骨架数据 $G[N]$,找到半径最大的结点 k 作为根,将 k 存入栈中,更新栈顶指针 P_{top} ,置 $F[k]=1$.

Step2. 当 $P_{current} \neq P_{top}$ 时,循环执行以下步骤:

- Step2.1. 取出 $P_{current}$ 指向的当前结点 i ;
- Step2.2. 在结点 i 的 26 邻域范围内寻找相邻结点 j ;
- Step2.3. 如相邻结点 j 满足 $G[j] \neq 0 \& F[j] = 0$,则将结点 j 写入 $T[i]$ 的子结点中,并将 $T[i]$ 的子结点个数加 1;

Step2.4. 结点 j 入栈,更新栈顶指针 $P_{top}++$,更新标志 $F[j]=1$;

Step2.5. 更新当前指针 $P_{current}++$.

Step3. 骨架树信息已保存在 $T[N]$ 中,算法结束.

2.3 管道分支计算

管道骨架的树状层次结构建立后,就能明确每个结点的子树走向.由医生在三维管道模型上选取分支起点,管道分支计算算法 $Vessel_Seg$ 根据分支起点和管道的骨架树信息、采用空间平面法向量方法计算管道分支.

根据如图 2 所示空间平面与法向量的关系,若 $M(x_m, y_m, z_m)$ 的子结点为 $S(x_s, y_s, z_s)$,则向量 $MS = \{(x_s - x_m), (y_s - y_m), (z_s - z_m)\}$.过 M 且与向量 MS 垂直的空间平面可表示为

$$A(x - x_m) + B(y - y_m) + C(z - z_m) = 0 \quad (1)$$

$$\Rightarrow Ax + By + Cz - D = 0$$

其中, $A = x_s - x_m, B = y_s - y_m, C = z_s - z_m, D =$

$$Ax_m + By_m + Cz_m.$$

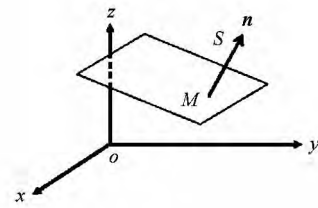


图 2 空间平面与法向量

可将选定的分支点作为 M ,通过骨架树确定 M 的子结点 S ,由此确定一个平面和法向量.与此平面的法向量同向即在 M 的下游方向的结点 $f(x, y, z)$ 满足 $Ax + By + Cz - D \geq 0$,而依法向量相反的方向的结点 $f(x, y, z)$ 则满足 $Ax + By + Cz - D < 0$.由此,可以迅速将管道的分支计算出来.

$Vessel_Seg$ 算法描述如下:

Step1. 在管道三维模型上选取分支点 P_{branch} .

Step2. 计算分支点对应的骨架结点 M .

Step3. 读取骨架树结点 M 的子结点 S ,计算法向量 MS .

Step4. 根据式(1)计算过 M 且与向量 MS 垂直的空间平面 $Ax + By + Cz - D = 0$,得到平面方程的系数 A, B, C, D .

Step5. 将管道数据 $V[N]$ 代入平面方程式(1),对管道数据进行快速分类;可得到 2 个不同的集合 $X\{p(i, j, k)\}$ 和集合 $Y\{q(r, s, t)\}$,集合 X 中的结点满足 $Ai + Bj + Ck - D \geq 0$,集合 Y 中的结点满足 $Ar + Bs + Ct - D < 0$.

Step6. 以 M 为起始,在三维空间中生长,可从集合 X 中获得以 M 为起点的管道分支.

Step7. 算法结束.

2.4 肝脏供血分布及残肝体积计算

得到管道分支 B_1, B_2, \dots, B_n 后,本文采用多背景距离变换算法计算肝脏的供血分布,本质上就是对肝实质体数据 $L[N]$ 进行分类^[16].

每个体素点 $f(x, y, z)$ 到 $B_i (i=1, \dots, n)$ 的欧氏距离为 $d_i(f) = \min_{b \in B_i} \|f - b\|$,计算出体素点 f 到各个管道分支的欧氏距离:选取其中的最小距离 d_k ,即 $d_k(f) = \min\{d_1(f), d_2(f), \dots, d_n(f)\}$,将 f 划分为分支 B_k 的供血区域.若有一个以上最小距离,说明 f 处在交界面上,将 f 划分为其中一个分支即可.由此完成对 $L[N]$ 的归类,即完成了肝脏供血分布的计算.

肝切除手术,如活体肝移植手术中最主要的是确保术后能同时保障供体和受体有足够的肝脏储备功能.正常人肝脏能耐受 70% 切除而不影响生理需求,因此切除 60%~70%,剩余 30%~40% 的肝体积就能满足供体^[17];而受体所需肝体积大约为标准肝体积的 40%^[18],或至少不小于 30%^[19].

根据患者的实际情况和对残肝体积的要求,本文方法采用个体化的肝脏 CT 数据计算肝脏管道分支、供血分布及各部分所占比例,按照实际需求进行切除部位的选择和肝切除模拟,快速模拟和计算出手术后残留肝脏的体积,为术前提提供手术指导。

3 实验结果

实验选取 2 组活体肝脏 CT 数据作为实验对象。

A 组数据的三维大小分别为 512,512,155;分辨率为 0.683×0.683×1.0,肝脏总体积为 1087 cm³。图 3 所示为 A 组数据在不同视角的肝脏与血管的三维模型。对 A 组数据的管道分为一个主干和 7 个分支,分支起点的选取如图 4 a 所示;根据分支起点,A 组数据管道的各分支如图 4 b 所示;图 4 d 所示为模拟切除一部分肝脏后的残留部分,根据图 4 c 中示的各部分比例可知,A 组数据残肝体积比例为 93%。

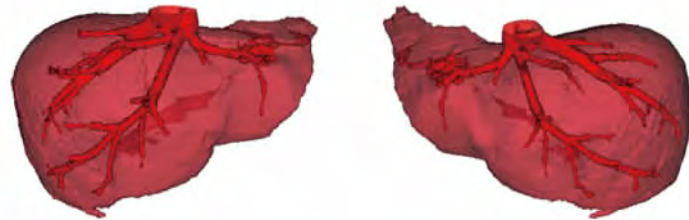


图 3 A 组数据肝脏与管道的三维模型

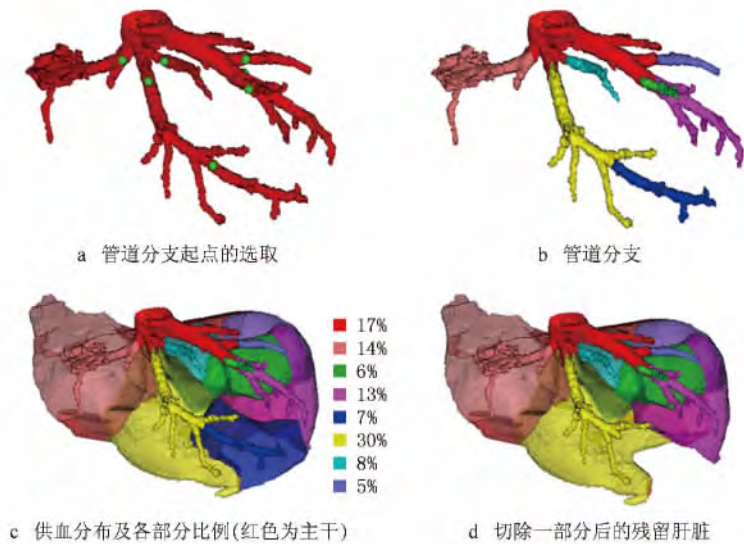


图 4 A 组数据管道分支和肝内供血分布

B 组数据的三维大小分别为 512,512,165;分辨率为 0.702×0.702×1.0,肝脏总体积为 1276 cm³。图 5 所示为 B 组数据在不同视角的肝脏与血管的三维模型。对 B 组数据的管道分为一个主干和 5 个

分支,分支起点的选取如图 6 a 所示;根据分支起点,B 组数据管道的各分支如图 6 b 所示;图 6 d 所示为模拟切除一部分肝脏后的残留部分,根据图 6 c 中显示的比例可知,B 组数据残肝体积比例为 91%。



图 5 B 组数据的三维模型

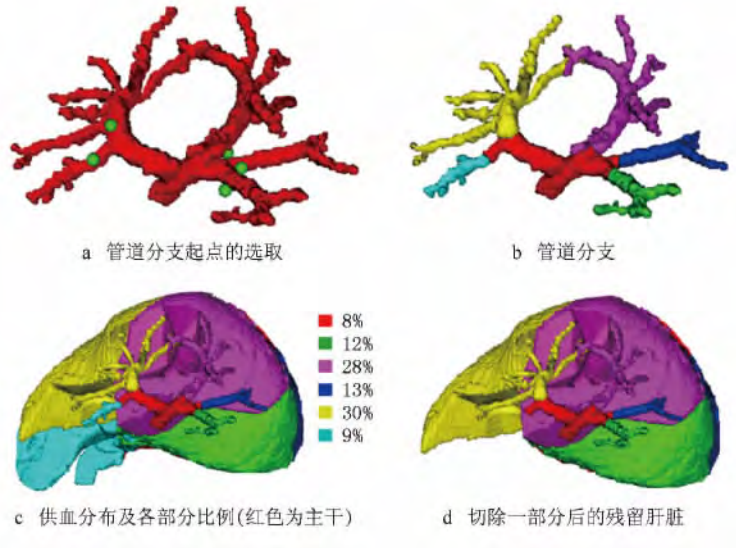


图 6 B 组数据管道分支和肝内供血分布

A 和 B 2 组数据的管道分支和肝供血分布计算时间均能在 5 s 内完成.

4 临床应用

本文选取厦门中山医院采用该系统对实际病例 GSL 所做的术前计划作为应用展示. 该病例为肝内肿瘤, CT 数据三维大小分别为 512, 512, 165; 分辨率为 0. 703×0. 703×0. 6, 肝脏总体积为 1 092 cm³.

肝脏、管道及肿瘤的三维模型如图 7 所示. 该病例中, 对肿瘤周围的管道进行分支选取和肝脏供血分布计算, 结果如图 8 所示. 根据图 8 b, 8 c 可知, 肿瘤主要由蓝色和青色 2 个管道分支的供血区域包裹, 术前计划建议切除这 2 部分肝脏及肿瘤, 术前计算切除区域体积为 1092×7%=76. 44cm³, 残肝体积约为 1016 cm³. 根据术后反馈, 实际切除区域大小为 6×4. 5×3=81cm³.



图 7 病例 GSL 肝脏、管道及肿瘤的三维模型

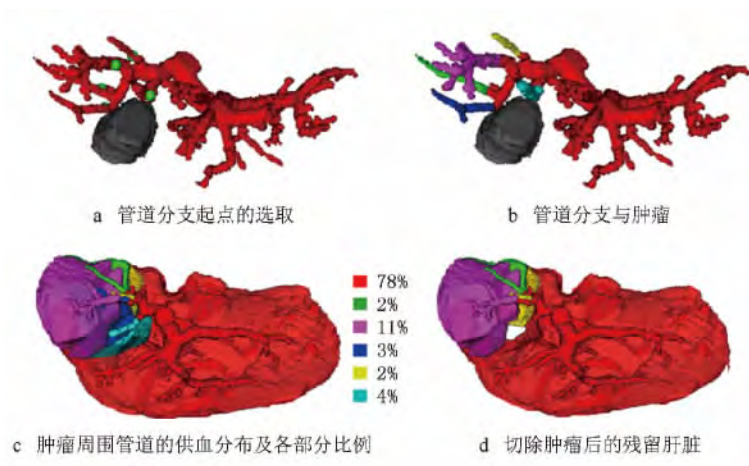


图 8 病例 GSL 管道分支和肝内供血分布

厦门强本科技有限公司以本文内容为基础研发的“肝癌手术模拟系统 XMQB Liver 2.0”已通过临床 64 套病例测试,并获得了医疗器械注册证;该系统目前已在多家医院投入使用。

5 结 语

为了提高肝移植、肝切除等手术成功率、降低手术风险,“精准肝脏外科学”被提出和倡导,其旨在通过精确术前评估、精密手术规划、精工手术作业和精良术后处理,追求以最小创伤侵袭和最大肝脏保护及最大效费比率获取最佳康复效果的理想目标。

术前模拟手术切除及计算术后残留肝脏体积是精准肝外科手术的保障。本文通过肝脏管道供血、各分支所占比例,计算残留肝脏体积,能够为手术的术前评估和手术规划提供指导依据。算法能同时满足规则性和非规则性肝切除对管道分支数目和分支层次的不同需求,且计算性能快速高效,能够满足临床的实际需求。

参考文献 (References):

- [1] Reitinger B, Bornik A, Beichel R, *et al.* Liver surgery planning using virtual reality [J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 2006, 26(6): 36-47
- [2] Filipponi F, Romagnoli P, Mosca F, *et al.* The dorsal sector of human liver: embryological, anatomical and clinical relevance [J]. *Hepato-Gastroenterology*, 2000, 47(36): 1726-1731
- [3] Strunk H, Stuckmann G, Textor J, *et al.* Limitations and pitfalls of Couinaud's segmentation of the liver in transaxial imaging [J]. *European Radiology*, 2003, 13(11): 2472-2482
- [4] Zhu Xinhua, Qiu Yudong, Wu Yafu, *et al.* Clinical study of anatomical liver resection for hepatocellular carcinoma [J]. *World Chinese Journal of Digestology*, 2007, 15(31): 3305-3309 (in Chinese)
(朱新华, 仇毓东, 吴亚夫, 等. 规则性肝切除术治疗原发性肝癌的分析 [J]. *世界华人消化杂志*, 2007, 15(31): 3305-3309)
- [5] Sakamoto S, Uemoto S, Uryuhara K, *et al.* Graft size assessment and analysis of donors for living donor liver transplantation using right lobe [J]. *Transplantation*, 2001, 71(10): 1407-1413
- [6] Fulcher A S, Szucs R A, Bassignani M J, *et al.* Right lobe living donor liver transplantation: preoperative evaluation of the donor with MR imaging [J]. *American Journal of Roentgenology*, 2001, 176(6): 1483-1491
- [7] Huang Shaohui. Research on key technology of living donor liver transplantation surgery planning system [D]. Xiamen: Xiamen University. Department of Communication Engineering, 2008 (in Chinese)
(黄绍辉. 活体肝移植手术计划系统关键技术研究 [D]. 厦门: 厦门大学通信工程系, 2008)
- [8] Kogure K, Kuwano H, Fujimaki N, *et al.* Reproposal for Hjortsjo's segmental anatomy on the anterior segment in human liver [J]. *Archives of Surgery*, 2002, 137(10): 1118-1124
- [9] Cho A, Okazumi S, Miyazawa Y, *et al.* Proposal for a reclassification of liver based anatomy on portal ramifications [J]. *The American Journal of Surgery*, 2005, 189(2): 195-199
- [10] Cho A, Okazumi S, Makino H, *et al.* Anterior fissure of the right liver—the third door of the liver [J]. *Journal of Hepato-Biliary-Pancreatic Surgery*, 2004, 11(6): 390-396
- [11] Song Xiao, Chen Ming, Wang Boliang, *et al.* Atypical and anatomical resection for virtual liver surgery [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2012, 24(3): 330-335 (in Chinese)
(宋 晓, 程 明, 王博亮, 等. 虚拟肝脏的规则和非规则手术切除技术 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2012, 24(3): 330-335)
- [12] Preim B, Selle D, Spindler W, *et al.* Interaction techniques and vessel analysis for preoperative planning in liver surgery [M] // *Lecture Notes in Computer Science*. Heidelberg: Springer, 2000, 1935: 608-617
- [13] Radtke A, Sgourakis G, Sotiropoulos G C, *et al.* Territorial belonging of the middle hepatic vein in living liver donor candidates evaluated by three-dimensional computed tomographic reconstruction and virtual liver resection [J]. *British Journal of Surgery*, 2009, 96(2): 206-213
- [14] Hou Xiaoli, Wang Boliang, Huang Shaohui, *et al.* Automatic segmentation of serial CT liver images based on Fast Marching Method [J]. *China Digital Medicine*, 2009, 4(2): 32-35 (in Chinese)
(侯晓丽, 王博亮, 黄绍辉, 等. 基于 Fast Marching Method 的肝脏 CT 图像序列自动分割 [J]. *中国数字医学*, 2009, 4(2): 32-35)
- [15] Huang S H, Wang B L, Cheng M, *et al.* The use of a projection method to simplify portal and hepatic vein segmentation in liver anatomy [J]. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 2008, 92(3): 274-278
- [16] Beichel R, Pock T, Janko C, *et al.* Liver segment approximation in CT data for surgical resection planning [C] // *Processing of SPIE*. Bellingham: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2004: 1435-1446
- [17] Kamel I R, Raptopoulos V, Pomfret E A, *et al.* Living adult right lobe liver transplantation; imaging before surgery with multidetector multiphase CT [J]. *American Journal of Roentgenology*, 2000, 175(4): 1141-1143
- [18] Schiano T D, Bodian C, Schwartz M E, *et al.* Accuracy and significance of computed tomographic scan assessment of hepatic volume in patients undergoing liver transplantation [J]. *Transplantation*, 2000, 69(4): 545-550
- [19] Hashikura Y, Kawasaki S, Terada M, *et al.* Long-term results of living-related donor liver graft transplantation: a single-center analysis of 110 transplants [J]. *Transplantation*, 2001, 72(1): 95-99