

基于数学形态学的 CT 腹部器官提取*

夏国清, 鲍苏苏, 陈华珍, 李盛文

(华南师范大学 计算机学院, 广州 510631)

摘要: 通过多种数学形态学算法的综合利用, 实现对腹部器官及相应血管的提取。首先, 利用复合型数学形态学梯度算法和条件膨胀算法实现器官提取; 其次, 利用多尺度结构元素的 Top-Hat 变换算法和阈值实现血管提取; 最后利用迭代腐蚀算法和测地影响实现粘连组织器官的分离。实验结果表明, 采用这种方法实现的提取速度快, 提取的器官与血管效果好。

关键词: 数学形态学; 腹部器官; 提取; CT 数据; 虚拟手术

中图分类号: TP319 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2009)08-3172-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2009.08.110

CT abdominal organ extraction using mathematical morphology

XIA Guo-qing, BAO Su-su, CHEN Hua-zhen, LI Sheng-wen

(School of Computer, South China Normal University, Guangzhou 510631, China)

Abstract: This paper introduced a combination utilization of multi-mathematical morphology algorithms to realize the extraction of abdominal organ and its relative blood vessels. This paper first combined compound mathematical morphological gradient algorithm with conditional dilation algorithm to extract organs. Then, it applied multi-dimension structure Top-Hat algorithm and Threshold Value for the extraction of relative blood vessels. At last, used recursive erosion algorithm and geodesic influence for separating touched organs. Those methods above are quick for extracting, and the organs and blood vessels' extraction effects are good.

Key words: mathematical morphology; abdominal organ; extraction; CT data; virtual surgery

0 引言

人体腹部器官极为复杂的管道系统及其生理和病理变异, 决定了腹部器官外科手术方案的制定非常困难。它对重病病人手术成功率的影响, 导致医患关系长期没能得到很好的改善。

以往人体腹部器官影像提供的多为二维平面图像, 医生只能依据多年积累的经验来粗略地判断病灶的部位、大小和形状, 无法准确勾画出器官组织的三维模型, 缺乏诊断的客观性和准确性。随着虚拟现实技术的日趋成熟, 虚拟手术已经成为医学领域中一个新的研究方向^[1]。虚拟手术实现是通过二维腹部器官影像中病灶器官进行分割提取, 建立病灶器官三维模型, 然后构造出虚拟操作平台进行手术术前仿真模拟。通过虚拟手术可以很好地实现术前手术方案的制定和手术成功率的评估, 以及实现医生和患者的及时沟通, 从而解决长久以来得不到改善的医患关系。

本文研究的人体腹部器官提取方法, 正是虚拟手术中的重要环节, 它决定了虚拟器官三维重建后与患者活体器官的最大相似性程度。本文提取的腹部器官如肝、肾、脾、胰腺等都来自活体 64 排高清晰 CT 图片。过去大多数器官的提取方法如区域生长^[2]、活动轮廓^[3], 不仅涉及到许多手工操作, 而且因相

邻组织灰度值相近及血管等因素, 这些方法在器官提取时会产生过分割现象。因为, 本文提出了一种基于数学形态学^[4,5]的腹部器官提取方法, 此方法能够在人工极少干预下, 自动快速地对 CT 图像中腹部器官的精确提取, 解决过分割现象。

腹部器官提取过程分成两大部分, 即器官的提取和相应血管的提取。针对这两部分, 分别采取了不同的提取方法。

本文将分别介绍复合型形态学梯度、迭代条件膨胀、多尺度结构元素的 Top-Hat 变换和迭代腐蚀等算法, 并具体描述了器官提取与实验。

1 数学形态学算法研究

数学形态学是研究数字影像形态结构特征与快速并行处理方法的理论, 其目的是通过对目标影像的形态变换来实现结构分析和特征提取^[4,5]。基本思想是:



数学形态学的初等形态运算由腐蚀与膨胀构成, 设函数 $f(x, y)$ 为灰度图像的灰度函数, $b(i, j)$ 为结构元素, $f(x, y) \in R$, $x, y \in Z^2$, $D[f]$ 和 $D[b]$ 分别为 $f(x, y)$ 和 $b(i, j)$ 的定义域, 则 $f(x, y)$ 关于 $b(i, j)$ 的主要灰度形态变换定义如下:

灰度形态学膨胀、腐蚀为

$$f \oplus b(x, y) = \max \{f(x-i, y-j) + b(i, j)\} \quad (1)$$

收稿日期: 2008-10-23; 修回日期: 2008-11-28 基金项目: 国家“863”计划资助项目(2006AA02Z346); 广东省自然科学基金团队项目(粤科基办字[2006]5号)

作者简介: 夏国清(1983-), 男, 安徽潜山人, 硕士, 主要研究方向为医学图像分割、模式识别等(33407397@qq.com); 鲍苏苏(1951-), 男, 湖南长沙人, 教授, 硕导, 博士后, 主要研究方向为信号处理和数字图像处理、模式识别等; 陈华珍(1982-), 女, 江西樟树人, 硕士, 主要研究方向为网络计算; 李盛文(1982-), 男, 广东揭阳人, 硕士, 主要研究方向为图形图像与模式识别。

$$f \ominus b(x, y) = \min \{ f(x+i, y+j) - b(i, j) \} \quad (2)$$

将式(1) (2) 所确定的膨胀、腐蚀运算进行组合,可以实现对图像的开运算和闭运算操作,其定义为

$$\text{开运算: } (f \circ B)(x, y) = [(f \ominus B) \oplus B](x, y) \quad (3)$$

$$\text{闭运算: } (f \bullet B)(x, y) = [(f \oplus B) \ominus B](x, y) \quad (4)$$

形态学开、闭运算由膨胀和腐蚀运算按不同的顺序级联而成,且以不同的方式对灰度图像进行平滑去噪。开运算可以滤去灰度图像中比结构元素小的高亮点,对二值图像进行开运算使对象的轮廓变得光滑,断开狭窄的间断和消除细的突出物。相应地,闭运算可以滤去灰度图像中比结构元素小的低亮点,对二值图像进行闭运算同样使对象的轮廓变得光滑,弥补了狭窄的间断和细长的鸿沟,消除了小的孔洞,并填补轮廓线中的断裂。

本文根据以上形态学的基本运算,针对 CT 腹部器官的提取,提出了以下几种形态学算法。

1.1 复合型数学形态学梯度算法

数学形态学梯度算法有以下三种^[6]:

a) 按照形态学膨胀构造的图像梯度算法

$$G_d(x, y) = f \oplus b(x, y) - f(x, y) \quad (5)$$

b) 按照形态学腐蚀构造的图像梯度算法

$$G_e(x, y) = f(x, y) - f \ominus b(x, y) \quad (6)$$

c) 按照形态学膨胀和腐蚀构造的图像梯度算法

$$g(x, y) = f \oplus b(x, y) - f \ominus b(x, y) \quad (7)$$

基于膨胀运算的梯度算法会使图像边缘变模糊;基于腐蚀运算的梯度算法会使图像边缘丢失一些细节;而基于膨胀和腐蚀的梯度算法又会出现宽边缘。为了减小图像边缘的模糊性并保留更多的边缘细节及抑制宽边缘现象,以得到理想的图像边缘,本文提出一种复合型形态学梯度算法。

$$G_{\max}(x, y) = \max \{ G_d(x, y), G_e(x, y), G(x, y) \} \quad (8)$$

$$G_{\min}(x, y) = \min \{ G_d(x, y), G_e(x, y), G(x, y) \} \quad (9)$$

$$G_{\text{dec}}(x, y) = G_{\max}(x, y) - G_{\min}(x, y) \quad (10)$$

则复合型形态学梯度算法为

$$G_{\text{comp}}(x, y) = G_d(x, y) + rG_{\text{dec}}(x, y) \quad (11)$$

其中: r 表示取 $G_{\text{dec}}(x, y)$ 图像梯度的大小,范围为(0,1),针对不同的腹部器官,对 r 值进行逐步微调以取得边缘最佳效果。

1.2 迭代条件膨胀算法

如图 1 所示,条件膨胀是将选定的种子区域 S 用结构元素 B 对其进行形态学二值膨胀,膨胀的结果再与已知条件区域 C 取交集,在这里 $S \subseteq C$ 。本文条件膨胀操作定义为

$$D_i(S, C) = (S \oplus B)^i \cap C \quad (12)$$

这里的 i 是指结构元素 B 对种子点 S 膨胀的次数,其取值为满足如下条件的最小正整数:

$$D_i(S, C) = D_{i-1}(S, C) \quad (13)$$

1.3 多尺度结构元素的 Top-Hat 变换算法

从一幅原始图像中减去对其作开运算后得到的图像,可以得到一些重要的标记点,如高曲率点。本文正是利用此变换这一特性,通过渐进递增结构元素大小来提取 CT 图像中相应器官的血管。因增强的 CT 图像中的血管信息是由高亮度的像素点组成,像素值趋近 200 以上。此变换操作定义如下:

$$T_i = f - f \circ B_i \quad (14)$$

其中: f 是原始的灰度图像; $B_i = B \oplus B \oplus \dots \oplus B$ (i 次, $i \in 1, 2, 3, \dots$)。

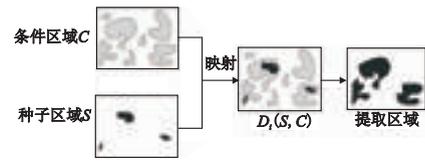


图 1 二值迭代条件膨胀

1.4 迭代腐蚀算法

如图 2 所示,迭代腐蚀操作可分离相粘连的器官组织,其定义为

$$F \ominus B = \begin{cases} F & \text{if } i = 0 \\ (F \ominus B) \ominus B & \text{if } i \geq 1 \end{cases} \quad (15)$$

对图像 F 用结构元素 B 进行腐蚀,使图像 F 中粘连区域分离,得到多个独立的子区域,腐蚀操作迭代次数为 i 次 ($i \in 0, 1, 2, \dots$),直到任一独立区域种子点 ($S_1 - S_n$) 消失前。

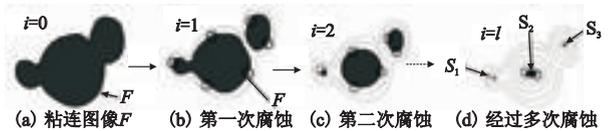


图 2 迭代腐蚀

2 提取与实验

本文的实验数据来源于广州珠江医院,采用 64 排 CT 扫描仪对某一女性患者进行腹部扫描,分别获取静脉期、门静脉期、动脉期三期肝脏 CT 图片,每期图片 320 张。本文实验只针对肝脏器官,而对其他腹部器官提取方法类同。因 CT 是对人体整个腹部进行扫描的,将肝脏从整个 CT 切片中分割提取出来进行三维重建,是实现如有病灶的肝脏虚拟手术的重要环节。在设定适合的窗宽和窗位后,用软件将 CT 图片转换为 BMP 图片,为提取作好准备。

2.1 器官提取与实验

器官提取操作步骤如下:

a) 通过复合型数学形态学梯度为器官的提取获得条件区域。本文选取半径为 1 的圆形结构元素 $b = \{(-1, 0), (0, 1), (0, 0), (1, 0), (0, -1)\}$, 式(11)中 $r = 0.5$ 。

b) 利用阈值进行二值处理。设 $g(x, y)$ 为阈值处理后的图像函数,则阈值定义为

$$g(x, y) = \begin{cases} 1 & f(x, y) > T \\ 0 & f(x, y) \leq T \end{cases} \quad (16)$$

这里通过实验测得阈值 T 的取值为 100。

c) 对要提取的组织器官在条件区域的约束下选取种子点,这里根据医学知识在肝脏轮廓内选取一个 3×3 的种子区域,进行条件膨胀得到预取器官组织——肝脏。

运用本文上述器官提取方法分割出肝脏轮廓(图 3(a) 图 3(c)),再进行三维重建^[7],如图 3(d) 所示。

2.2 血管提取与实验

血管提取操作步骤如下:

a) 通过采用多尺度结构元素的 Top-Hat 变换,得到血管标记区域。本文多尺度结构元素 B_i 的基元结构元素 B 为 3×3 的方形结构。

b) 利用阈值式(16)二值化图像。这里通过实验得到的阈

值 T 取值为 200。

c) 最后用开运算对图像进行平滑处理。这里采用半径为 1 的圆形结构元素。

本文血管数据是 2.1 节中肝脏器官的血管, 运用上述血管提取方法获得血管轮廓如图 4(a) 所示, 再进行三维重建^[8], 如图 4(b) 所示。

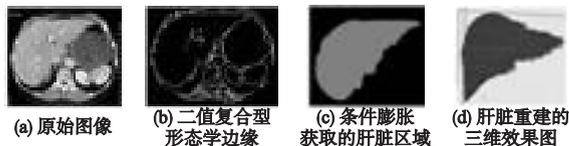


图 3 肝脏的提取



图 4 血管的提取

2.3 分离粘连器官

腹部相邻的器官组织之间常会出现粘连, 这就需要对它们进行分离处理。本文通过迭代腐蚀与测地影响的这两种形态学方法相结合, 取得了有效的效果。在图 5(a) 中显示了三个粘连的器官; (b) 中通过迭代腐蚀操作获取了三个器官的种子区域, 然后利用测地影响进行反变换, 得到从 (c) 到最终的结果 (d)。在这里, 三个器官的分离边界是通过测地影响得到的骨架线, 即根据到达三个种子区域 (图 5(b)) 的等距离线。一般情况下, 如果粘连的器官是向外凸起的, 这种分离方法是有效的。

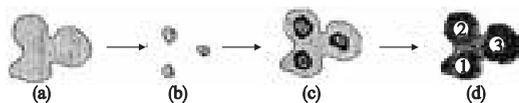


图 5 分离粘连的器官

2.4 实验结果分析

从实验结果可以看出, 通过二值复合形态学方法处理后的 CT 图像中各器官边缘清晰可见, 但也存在了少许边缘不平滑, 造成了三维效果图出现毛边现象。经分析, 其主要原因是由于

相邻组织产生粘连引起的, 可以采用平滑算法消除毛边, 使三维效果变得更好, 这也是本文今后需要完善的。在对血管的提取、从三维重建的效果中可以看出, 血管的第三分支及少许的第四分支清晰可见, 本文下一步目标希望能够得到更加精细的血管三维图, 为虚拟仿真手术提供更加逼真的模拟。

3 结束语

从上述实验中可以看出, 相应肝脏器官及其血管提取的效果是不错的, 三维重建后的效果图的真实性程度得到了外科医生的肯定。由于数学形态学方法对图像的处理是并行的, 其提取速度比传统的区域生长和活动轮廓的方法要快。其不足之处为: 在处理过程中, 仍然涉及到部分人工的干预, 如条件膨胀种子点的选取、血管在 Top-Hat 变换获取的正确性等, 均需要实验人员具有一定的医学先验知识。本文下一阶段的主要任务是努力实现组织器官及相应血管的自动识别, 将人工干预进一步减少。

参考文献:

[1] 方驰华, 周五一, 黄立伟, 等. 虚拟中国人女性一号肝脏图像三维重建和虚拟手术的切割[J]. 中华外科杂志, 2005, 43(11): 748-752.

[2] GONZALEZ R C. 数字图像处理[M]. 阮秋琦, 等译. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2003.

[3] KASS M, WITKIN A, TERZOPOULOS D. Snakes: active contour models[J]. International Journal of Computer Vision, 1988, 2(3): 321-331.

[4] 崔屹. 图像处理与分析——数学形态学方法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000.

[5] SERRA J. Image analysis and mathematical morphology [M]. London: Academic Press, 1988.

[6] 张立东, 毕笃彦. 一种改进的形态学梯度边缘检测算法[J]. 计算机工程, 2005, 31(21): 14-50.

[7] 李现民, 李桂清, 李华. 基于等值面肝脏纤维组织的三维重建[J]. 计算机应用, 2000, 20(增刊): 6-8.

[8] 彭丰平, 鲍苏苏. 基于 CT 序列图像肝脏及其管道的分割研究[J]. 计算机科学, 2008, 35(4): 38-42.

(上接第 3171 页)

参考文献:

[1] CORDIER F, MAGENAT-THALMANN N. Real-time animation of dressed virtual humans[J]. EUROGRAPHICS, 2002, 21(3): 327-335.

[2] DOUROS I, DEKKER L, BUXTON B F. An improved algorithm for reconstruction of the surface of the human body from 3D scanner data using local B-spline patches[C]// Proc of IEEE-ICCV'99. Washington DC: IEEE Computer Society, 1999: 29-36.

[3] TERZOPOULOS D, PLATT J, BARR A, et al. Elastically deformable models[J]. Computer Graphics, 1987, 21(4): 205-214.

[4] 李艳, 王兆其, 毛天露. 三维虚拟人皮肤变形技术分类及方法研究[J]. 计算机研究与发展, 2005, 42(5): 888-896.

[5] 刘卉, 许端清, 陈纯. 服装 CAD 综述[J]. 计算机辅助设计与图形学报, 2000, 12(6): 473-480.

[6] 秦可, 庄越挺, 吴飞. 服装 CAD 中三维人体模型的参数化研究

[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2004, 16(7): 918-922.

[7] WANG C C L. Parameterization and parametric design of mannequins[J]. Computer-Aided Design, 2005, 37(1): 83-98.

[8] VAN WEST B P, PIPES R B, KEEFE M. A simulation of the draping of bi-directional fabrics over arbitrary surfaces[J]. Journal of the Textile Institute, 1990, 81(4): 448-460.

[9] 王媚. 三维人体建模与变形技术在服装 CAD 中的研究及应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.

[10] ROBERTSON R E, HSIUE H S, SICKAFUS E N, et al. Continuous fiber rearrangements during the modeling of fiber composites part II: flat cloth to a round cone[J]. Polymer Composites, 1984, 5(3): 191-197.

[11] 朱心雄. 自由曲线曲面造型技术[M]. 北京: 科学出版社, 2000, 271-376.

[12] 毛维明. 个性化扫描人体变形与拼接建模研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.