

文章编号:1006-2475(2011)01-0113-04

基于 Hessian 矩阵和区域生长的肝血管树的分割算法研究

刘晏丽^{1,2}, 赵卫东^{1,2}, 陈宇飞^{1,2}, 王志成^{1,2}, 孟齐文^{1,2}

(1. 同济大学企业数字化技术教育部工程研究中心, 上海 200092; 2. 同济大学 CAD 研究中心, 上海 201804)

摘要:由于血管成像设备的限制和血管本身形态结构的复杂性,使得血管分割成为一个难题。针对 CT 肝脏血管图像的特征,设计一种将 Hessian 矩阵多尺度滤波、形态学和三维区域生长相结合的方法,实现血管分割。首先,使用灰度变换突出目标区域,利用基于 Hessian 矩阵的多尺度滤波方法对血管进行增强;其次,对增强后的血管图像进行闭运算,并进行三维区域生长;最后,利用膨胀运算将血管的弱连接进行连接。实验表明该方法具有一定的可行性和有效性,能够很好地实现血管的分割,所产生的血管连续光滑,很适合作为三维重建的数据集。

关键词:血管分割; Hessian 矩阵; 闭运算; 三维区域生长

中图分类号:TP391.41

文献标识码:A

doi: 10.3969/j.issn.1006-2475.2011.01.033

Research on Liver Vessel Tree Segmentation Algorithm
Using Hessian Matrix and Region GrowingLIU Yan-li^{1,2}, ZHAO Wei-dong^{1,2}, CHEN Yu-fei^{1,2}, WANG Zhi-cheng^{1,2}, MENG Qi-wen^{1,2}

(1. Engineering Research Center for Enterprise Digital Technology, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Research Center of CAD, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Due to the limitation of vascular imaging equipment and complexity of vascular morphology, vessel segmentation has been challenging. A method is proposed to realize 3D vessel segmentation in view of the character of CT liver vasculature, which combines Hessian-matrix-based multi-scale filter, morphological method and 3D region growing. Firstly, gray transformation is used to enhance region of interest, and the vasculature is enhanced using Hessian-matrix-based multi-scale filter. Secondly closing operation and 3D region growing algorithm are utilized on the enhanced images. Finally, the disconnection is connected via dilation operation. Experimental results show that the method can effectively extract vasculature that is suitable for 3D reconstruction owing to their continuity and smoothing.

Key words: vessel segmentation; Hessian matrix; closing operation; 3D region growing

0 引 言

肝肿瘤作为肝癌死亡率较高的一种癌瘤,已经成为影响身体健康、导致死亡的最主要的疾病之一^[1]。肝癌的早期诊断和治疗对降低肝癌患者的死亡率至关重要,是提高肝癌病人生存率的主要方法。而目前治疗肝癌的主要方式依然是肝切除手术。肝切除手术成功则依赖于外科医生对肝内血管树和肿瘤 3D 空间关系的把握。在以往的肝外科手术中,血管在全肝内的空间位置和肝内大血管的空间关系只能由肝脏外科医生在大脑中构建,不免产生误差,影响手术的成功率。所以,在 CT 扫描的基础上对肝脏血管进行准确地提取并进行 3D 重建,使肝脏血管能直观、

清晰地显示,提高术者对肝脏解剖的熟悉程度,精确肝脏切除范围,以立体的图像为依据来制定肝切除术前计划,提高手术的安全性,降低手术并发症^[2,3]。

准确地对肝脏血管图像进行分割是三维可视化的先决条件。尽管血管造影剂的注入使得血管能较肝脏内其它组织和器官亮,但由于造影剂的分散和采样的时间以及噪声的影响,使得图像灰度不一致,再加上血管分支众多、形态细小以及位置特殊和形态复杂。目前,针对医学图像血管的分割一直是个热点而又难点的问题^[4]。

然而,血管总体上呈现树状结构,血管壁呈现线状。血管的这些特点决定了它的分割方法的特殊性。日前基于管状物体检测的方法,就是紧紧抓住了血管

收稿日期:2010-09-01

作者简介:刘晏丽(1987-),女,河南潢川人,同济大学硕士研究生,研究方向:医学图像分割,三维重建;赵卫东(1965-),男,山东文登人,研究员,博士生导师,研究方向:CAD,智能 CAD;陈宇飞(1982-),女,吉林长春人,博士,研究方向:医学图像处理。

管状结构这一特性,利用 Hessian 矩阵特征值之间的关系来提取出图像中的管状结构^[5,8],并已证实了是一种有效的血管增强方法,所以本文采取该方法进行血管增强。由于 Hessian 矩阵多尺度滤波仅根据图像的几何结构进行的增强,提取出来的血管并不连续,而且不能区分出真实血管和伪血管,针对这一问题,笔者后续采用形态学的闭运算和三维区域生长对增强后的图像进行连接分割提取。

本文主要研究 CT 成像图像中肝脏血管的提取算法,针对肝脏血管图像的特征,采用将 Hessian 矩阵多尺度滤波对比度增强技术、形态学和三维区域生长相结合的方法来提取出血管图像。该方法首先用灰度值线性变换将目标区域有选择地突出;其次利用 Hessian 矩阵多尺度滤波算法对图像中管状结构进行增强;然后,使用闭运算将增强后的血管进行连接,再次,用二十六邻域的结构元素的三维空间区域生长对图像进行分割;最后使用形态学中的膨胀算子进行图像的后处理。

1 肝脏血管分割原理

1.1 图像预处理

本文首先利用灰度变换增强血管和背景之间的对比度,同时消除了图像边界对后续 Hessian 矩阵滤波血管增强的影响,提高血管分割的精确度。假设源图像为 F ,体素点 v 的灰度值为 $F(v)$,参数 F_{\max} 和 F_{\min} 为源图像 F 中血管灰度的最大值和最小值,也即目标区域的范围, I 为转化后的图像,则有:

$$I(v) = \begin{cases} 255 & F(v) > F_{\max} \\ \frac{255}{F_{\max} - F_{\min}} (F(v) - F_{\min}) & F_{\min} \leq F(v) \leq F_{\max} \\ 0 & F(v) < F_{\min} \end{cases} \quad (1)$$

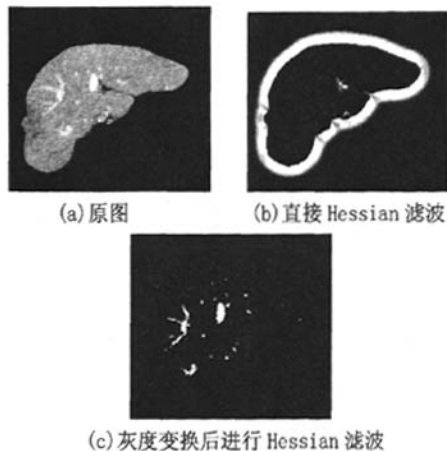


图 1 灰度变换前后 Hessian 滤波的结果比较

图 1(b) 和图 1(c) 显示了直接进行 Hessian 矩阵滤波和经过灰度变换后进行滤波的差异,可以看到进行此变换后,有效地增强了血管的对比度,同时增强了内部血管避免了边界的干扰。

1.2 基于 Hessian 矩阵特征值的血管增强算法

尽管灰度变换可以突显出大量血管,然而由于血管直径的差别,血管中的造影剂厚度不同,在图像中表现为较粗的血管灰度值较高,而远端越是细小的血管灰度值越低,与周围的组织很难区分开来,影响分割的效果。分割过程中,主要的难点是如何将灰度值低且和周围组织灰度相近的血管分割出来。本文利用 Hessian 矩阵特征值算法来进一步增强血管。

该算法的原理是利用血管的管状结构来提取血管^[2],将血管增强视为一个滤波的过程,寻找三维数据集中类似管状的图形结构。

泰勒级数展开是分析图像局部特征的一个常用方法^[9]。以本实验三维图像为例,判断三维空间某体素点是否属于血管,需分析该点的周围的局部亮度变化的二阶排列结构,并分析这一体素是否属于管状结构。通常分析图像 I 某点 v 的局部特性是采用该点的某个领域内的 Taylor 展开式:

$$I(v + \Delta v) \approx I(v) + \Delta v^T \nabla I(v) + \frac{1}{2} \Delta v^T H(v) \Delta v \quad (2)$$

其中, $\nabla I(v)$ 代表是点 v 处的梯度向量, $H(v)$ 表示点 v 处的 Hessian 矩阵,由图像 I 的二阶偏导数构成。

$$H = \begin{pmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{yx} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{pmatrix} \quad (3)$$

计算 Hessian 矩阵需要二阶偏微分的近似值。通常,为了计算 Hessian 矩阵的这些微分操作符将会使用到线性度量空间理论^[5]。在这一框架下,微分常常被定义为原始数据与高斯滤波器的导数卷积。所以在标准差为 σ 下,则有

$$G(v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{\|v\|^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4)$$

$$I_{xx}(v) = \frac{\partial^2}{\partial x^2} G(v) * I(v) \quad (5)$$

其它的以此类推。

分析此 Hessian 矩阵的特征向量和特征值,可对血管的探测起到判断作用。用 λ_k 表示第 k 个幅度最小的特征值, Hessian 矩阵的 3 个特征值 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ ($|\lambda_1| \leq |\lambda_2| \leq |\lambda_3|$) 中,幅值最大的特征值对应的特征向量代表着 v 点曲率最大的方向,而幅值最小的特征值对应的特征向量代表着 v 点曲率最小的方向。表 1 总结了在三维体数据中 Hessian 矩阵特征值和探测结构之间的对应关系^[5]。

表 1 三维情况下各种可能结构同 Hessian 矩阵特征值的关系表

三维			方向模式
λ_1	λ_2	λ_3	
N	N	N	噪声图像,无特定方向
L	L	H-	盘状结构(亮)
L	L	H+	盘状结构(暗)
L	H-	H-	管状结构(亮)
L	H+	H+	管状结构(暗)
H-	H-	H-	球状结构(亮)
H+	H+	H+	球状结构(暗)

注:H=高,L=低,N=噪声情况,+/-表示特征值的正/负

由此可见,在 CT 图像中,血管总是亮的,所以,肝脏 CT 图像血管所在的三维体素点的特征值应该是 λ_1 的值较小,几乎为零, λ_2 和 λ_3 均为负数。

为了将管状结构和其它结构,像盘状结构和球状结构区分开,在本文中,使用了文献[2]中定义的血管相似函数:

$$I(v, \sigma) = \begin{cases} 0 & \lambda_2 \geq 0 \text{ 或 } \lambda_3 \geq 0 \\ \left[1 - \exp\left(-\frac{R_v^2}{2\sigma^2}\right) \right] \exp\left(-\frac{R_h^2}{2\sigma^2}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{S^2}{2\sigma^2}\right) \right] & \text{其它情况} \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{其中, } R_v = \left| \frac{\lambda_2}{\lambda_3} \right|, R_h = \frac{|\lambda_1|}{\sqrt{|\lambda_2 \lambda_3|}}, S = \sqrt{\sum_i \lambda_i^2}.$$

对经过灰度变换后的图像,利用(3)式计算每个体素点的 Hessian 矩阵,并计算其特征值,利用(6)式来判断是否为血管体素的概率。非管状结构的滤波响应值为 0,而管状结构滤波响应值非 0,从而增大血管图像和肝脏内其它组织和器官的对比度,实现了血管的增强。

1.3 数学形态学的处理

通过对原始三维的肝脏 CT 图像实施以上步骤后,增强后的血管结构已经比较清晰地表现了出来,但是由于血管内部的灰度不一致,以及血管分支造成的血管漏检,或其它局部噪声等原因,使得提取出来的血管存在不连续的现象,不仅表现在血管末梢,甚至主干部分都存在这种现象,如果直接进行三维区域生长,会造成血管的漏检。本文使用闭运算,该运算是先对图像以结构元素进行膨胀,然后再对该结果用结构元素进行腐蚀。它具有填充物体的小洞,连接相近的物体、平滑物体的边界而不明显改变它们面积的效果^[10]。

1.4 三维空间区域生长算法

以上操作能将主干血管提取出来,但同时显示了一些非肝脏血管管状结构,且这些管状结构远离血管区域。为了解决这些问题并提取出血管,使用三维区域生长的方法来进行血管的分割,从而提取出血管并舍弃这些远离主干血管的非血管结构。

区域生长的基本思想是选定初始种子,将种子周围具有相似性质的点归并到种子所在的区域^[11-13]。此方法的优点在于计算简单,对于均匀连续的目标有很好的分割效果^[14]。本文采用的分割方法是自适应的三维空间区域生长法。所谓三维区域生长,就是将区域生长法扩展至三维,由原来二维的结构元素 4 邻域或 8 邻域扩展至三维的 6 邻域,18 邻域或 26 邻域。

影响区域生长结果的主要有 3 个因素:种子点的选择、区域生长的准则以及终止条件。

首先,种子决策,由于种子点的选取影响到最终分割的成功与否。因此,本文的种子点选取是手动做出的种子选取。

其次,增长准则,选择合适的阈值作为区域增长的准则,凡是大于等于此阈值的体素点归并到种子区域。

本文中作为区域生长的标准定义如下:

$$|I(x, y, z) - \text{mean}(x, y, z)| > \delta$$

$I(x, y, z)$ 为进行闭运算后的图像体素 (x, y, z) 的灰度值, $\text{mean}(x, y, z)$ 为选定的种子点上下左右前后 6 邻域的包括种子点在外的 7 个体素点的灰度的均值。 δ 为可修改阈值,计算种子点上下左右前后 6 邻域包括种子点在外的 7 个体素点的方差 δ 作为阈值。

最后,开始进行三维区域生长,直到没有新的点可归并为止。

1.5 图像后处理

由于灰度的差异性,区域生长算法提取出来的区域不连续(有空洞),用膨胀进行血管的空洞填充。

2 实验结果与分析

应用本文提出的血管分割方案,对 6 组肝脏 CT 图像分别进行血管分割。实验数据均存储为 DICOM 格式图像的 CT 切片数据,16 位的灰度级,切片间距为 2.5mm。实验计算机配置如下:AMD Athlon(tm) × 2 DualCore QL-64(2.10GHz), 2GB 的 RAM, 32bit 的操作系统。其中典型的图片大小为 512 * 512 * 121。

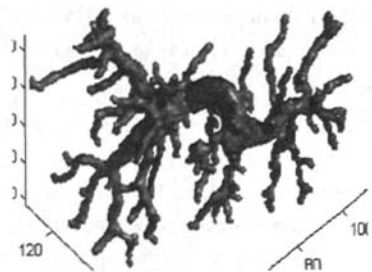


图 2 本文算法的结果

实验中,6 组图片集的参数设置如下:血管相似函数中参数 α, β, c 取值应该满足血管结构滤波响应达到最大,分析(6)式,比较后选定参数为 $\alpha = 0.3, \beta$

$=0.7, c = I_{\max}/2$; 设置 F_{\max}, F_{\min} 根据原始图片中血管的灰度值范围, 图2为用本文的方案提取出的最终结果。该结果显示本文的算法确实能够生成可靠而满意的血管图, 具有一定的有效性和可行性。

3 结束语

本文充分考虑肝脏CT血管的灰度和结构特点, 提出了一种基于局部特征结构和区域生长相结合的肝脏CT血管三维分割的方法。通过对6组肝脏CT图像进行重建, 结果表明本文中提出的算法具有一定的可行性和有效性, 对CT血管造影医学影像具有较好的分割效果, 为后续的血管重建奠定了坚实的基础。

参考文献:

- [1] 陈建国, 陆建华. 国内外癌症防治现状[J]. 肿瘤, 2007, 27(9): 755-759.
- [2] 孙俊旗, 孟志华, 陈振松, 等. 磁共振虚拟肝血管三维重建在肝切除术中的应用[J]. 中国医学影像技术, 2010, 26(5): 910-913.
- [3] 王义, 张友磊, Peitgen Heinz-Otto, 等. 肝内血管的三维重建及肝癌局部解剖性切除[J]. 中国普通外科杂志, 2008, 23(12): 914-917.
- [4] 主海文, 刘有军, 曾衍钧, 等. 血管图像分割技术的研究进展[J]. 北京生物医学工程, 2005, 24(2): 155-158.
- [5] Alejandro F Frangi, Wiro J Niessen, Koen L Vincken, et al. Multiscale vessel enhancement filtering[C]//Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention, MICCAI. 1998: 130-137.
- [6] Sato Y, Nakajima S. Three-dimensional multi-scale line filter for segmentation and visualization of curvilinear structures in medical images[J]. Medical Image Analysis, 1998, 2(2): 143-167.
- [7] Sato Y, Westin C F, Bhalerao A, et al. Tissue classification based on 3D local intensity structure for volume rendering[J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2000, 6(2): 160-180.
- [8] Koller T M, Gerig G, Szekely G, et al. Multiscale detection of curvilinear structure in 2-D and 3-D image data[C]//Proceedings of the 5th International Conference on Computer Vision. 1995: 864-869.
- [9] Jiri Hladuvka, Andreas Konig, Eduard Groller. Exploiting eigenvalues of the Hessian matrix for volume decimation[C]//Proceedings of the 9th International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization, and Computer Vision(WSCG 2001). 2001: 124-129.
- [10] 王树文, 闫成新, 张天序, 等. 数学形态学在图像处理中的应用[J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(32): 89-92.
- [11] Mancas M, Gosselin B, Macq B. Segmentation using a region growing thresholding[C]//Proceedings of the SPIE, Image Processing: Algorithms and Systems I. 2005, 5672: 388-398.
- [12] Chen Y, Han C. A modified region growing algorithm for multi-colored image object segmentation[J]. Chinese Optics Letters, 2007, 1(5): 25-27.
- [13] Andrew M, Paul J. An improved seeded region growing algorithm[J]. Pattern Recognition Letters, 1997, 10(18): 1065-1071.
- [14] Adams R, Bischof L. Seeded region growing[J]. IEEE Trans. Pattern Anal. Mach Intelligence, 1994, 6(16): 641-647.
- [15] 段先华, 王元全, 王平安, 等. 利用 Gabor 滤波的相位图像进行光流估计[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 17(10): 2157-2161.
- [16] Timo Ojala, Matti Pietikainen, David Harwood. A comparative study of texture measures with classification based on feature distributions[J]. Pattern Recognition, 1996, 29: 51-59.
- [17] Timo Ojala, Matti Pietikainen, Topi Mäenpää. Multiresolution gray-scale and rotation invariant texture classification with local binary patterns[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24: 971-987.
- [18] Xu Qing, Yang Jie, Ding Siyi. Texture segmentation using LBP embedded region competition[J]. Electronic Letters on CVIA, 2005, 5: 41-47.
- [19] Homen T, Hadid A, Pintikaine M. Face recognition with local binary patterns[C]//Proceedings of ECCV 2004, Lecture Notes in Computer Science 3021. Springer, 2004: 469-481.
- [20] Alessandro Leone, Cosimo Distanto, Francesco Buccolieri. A shadow elimination approach in video-surveillance context[J]. Pattern Recognition Letters. 2006, 27: 345-355.
- [21] 李全民, 张运楚. 自适应混合高斯背景模型的改进[J]. 计算机应用, 2007, 27(8): 102-109.
- [22] Andrea Prati, Ivana Mikic, Mohann Trivedi, et al. Detecting moving shadows: Formulation, algorithms and evaluation[J]. IEEE. Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(7): 152-164.
- [23] 陈远, 陈锻生. 一种融合 LBP 纹理特征的多姿态人脸跟踪方法[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2010, 31(3): 285-289.

(上接第112页)