

doi: 10.3788/gzxb20124107.0850

基于空频结合的图像增强的脑肿瘤分割

黄靖, 杨丰

(南方医科大学 生物医学工程学院, 广州 510515)

摘 要: 针对脑部核磁共振图像中含有噪音、对比度低及肿瘤边界不连续模糊等造成肿瘤难以准确分割的问题, 提出了一种基于空频域图像增强的脑肿瘤分割算法. 首先, 采用空频域相结合的增强方法对图像进行增强处理. 该方法利用基于邻域的方法, 结合了空间域增强算法与基于方向滤波器组的频率域增强算法, 具有它们优点的同时, 克服了前者导致的图像细节模糊的缺陷及后者带来的对比度降低的缺陷. 然后, 利用液体向量流的分割方法, 对增强后的图像进行分割, 得到脑肿瘤区域. 实验结果表明, 本文的增强方法在增强肿瘤边界特征的同时改善了图像的对比度和清晰度, 提高了脑肿瘤分割的准确性.

关键词: 磁共振图像; 空频域; 图像增强; 图像分割

中图分类号: TP391.41

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2012)07-0850-5

0 引言

脑肿瘤又称颅内肿瘤, 常见的脑肿瘤分为胶质瘤、脑膜瘤及神经鞘瘤, 脑核磁共振成像 (Magnetic Resonance Image, MRI) 越来越广泛地被应用于脑肿瘤的分析 and 诊断, 并为脑肿瘤切除手术提供了大量的信息^[1]. 在临床上, 脑肿瘤的标记和分割是比较耗时且困难的工作, 这是因为脑肿瘤形状复杂不规则而且多变, 边缘模糊, 常常伴随着水肿, 且其 MRI 图像中可能含有噪音、对比度低等, 这造成了边界的不连续和模糊, 加重了分割的困难^[1]. 为解决这些困难, 图像增强方法在脑肿瘤的分割领域被广泛地研究和应用.

图像增强是指按特定需要, 突出一幅图像的某些信息, 按作用域可将其划分为空间域增强和频率域增强两类. 空间域增强是指直接对像素灰度进行处理来增强图像. 直方图均衡法是一种常用的空间域增强算法, 但它是建立在合并相似像素灰度的基础上, 增强过程中容易模糊图像细节、放大图像的噪音; 且因其只考虑到图像各灰度级的像素数量而与图像其他信息无关, 它很难实现以增强边缘为目的灰度级动态范围的有效调整^[2-4]. 频率域增强是对图像的频谱成分进行处理来增强图像. 在频率域图像增强算法中, 基于方向滤波器组的增强算法能准确地提取图像的方向信息, 常被应用于某些具有明显

方向特征的图像增强中, 但其增强后的图像存在对比度、清晰度降低及部分特征损失等等的问题^[5-6]. 因此, 单一域的图像增强处理各自具有一定的缺陷.

为了解决上述问题, 本文提出空间域和频率域相结合的图像增强算法, 首次用基于邻域信息的算法将频率域的方向滤波器组 (Directional Filter Bank, DFB) 增强和空间域的直方图均衡化 (Histogram Equalization, HE) 增强结合起来, 对脑部 MRI 图像进行增强, 在突出感兴趣区域的同时, 克服了单一域增强所带来的缺陷. 在此基础上, 利用液体向量流 (Fluid Vector Flow, FVF)^[7] 的分割方法, 对增强后的图像进行分割, 得到脑肿瘤区域. 实验结果表明, 本文算法能克服噪音、对比度低及肿瘤边界不连续模糊的问题, 较准确地分割脑部 MRI 图像中的肿瘤组织.

1 空频域结合的图像增强

本文提出的空频域结合的图像增强算法, 将基于直方图均衡化的空间域增强算法与基于方向滤波器组的频率域增强算法结合起来, 克服单一域增强算法所带来的缺陷, 达到增强图像对比度, 突出目标边缘, 并降低噪音的目的.

1.1 单一域图像增强的缺陷

直方图均衡化^[8] (Histogram Equalization, HE) 是典型的空间域增强方法, 能快速有效地扩大

基金项目: 国家自然科学基金青年基金 (No. 81000642) 和自然科学基金 (No. 60672115) 资助

第一作者: 黄靖 (1981-), 男, 讲师, 博士, 主要研究方向为医学图像处理、模式识别. Email: jing.huang.hust@gmail.com

收稿日期: 2012-03-23; **修回日期:** 2012-05-04

图像的灰度动态范围,改善图像的整体视觉效果,尤其对于噪音较小、细节信息较少的图像具有较好的增强效果.文献[9]将直方图均衡用于遥感图像的增强中,在一定程度上改善了图像的对比度和动态范围,达到一定的增强效果.但是对于含有较大噪音、细节信息丰富的医学图像,这种增强方法会带来细节信息损失、难以有效突出感兴趣区域、图像信息熵减少等问题^[10-11].

方向性滤波器组^[12](Directional Filter Bank, DFB)作为一种有效的方向特征信息提取工具,能准确获取图像的方向信息,其被广泛应用于图像的频域增强算法中^[5-6].文献[5]将方向滤波器组用于指纹图像的增强,处理过程对指纹图像直接进行DFB分解,通过估算子带图像的方向能量信息来加权各子带系数,最后重建得到图像增强结果.此算法降低了噪音对增强脊和谷效果的影响,但是其结果存在对比度、清晰度降低及部分特征损失等情况.针对这一问题,文献[6]先对指纹图像进行小波变换提取出低频信息,只对高频信息图像进行DFB分析处理,在抑制噪音的同时提高了增强效果.但其只对高频分量进行分解处理,导致图像平滑区域灰度的动态范围被压缩,低频信息丢失及整幅图比较昏暗,使处理后图像的对比度和清晰度都有所降低.

1.2 基于邻域信息的空频域结合的图像增强

由1.1节分析可知,不论是基于DFB的图像增强方法还是基于HE的图像增强方法,都因其存在一定缺陷而不能达到好的增强效果.基于HE的增强方法能改善图像的亮度和对比度,但模糊了图像细节放大了噪音的影响;基于DFB的增强方法使图像的方向信息得到加强,但却降低了图像的对比度.因此,本文针对脑部MRI图像的特征,提出了一种新的空频域相结合的增强方法,提高脑肿瘤的对比度信息,突出脑部肿瘤的边缘特征.

1.2.1 对MR图像进行DFB分解

对MR图像 I 进行二级DFB分解,将得到四个子带图像 $Q_j(j=1,2,3,4)$.图像中的细节纹理经过方向滤波得到清晰的表达,表现为或高或低的灰度值;而图中的噪音具有随机性,在频率域中表现为不具有方向分布特性,因此在各分解子带中噪音得不到方向表达.所以,此过程在得到图像的方向信息的同时,也抑制了噪音.

1.2.2 用基于邻域信息的方法增加图像的对比度

1)判断子带中的像素点是局部亮点还是局部暗点.在各子带内以每个像素为中心,设置 $s \times s$ 大小的邻域块.邻域块内所有像素的平均灰度值 $a_j(x,y)$ 表示块内所有纹理的平均亮度.因此,当该块

中心像素点的灰度值 $Q_j(x,y)(j=1,2,3,4)$ 大于邻域平均值 $a_j(x,y)$ 时,认为它是局部亮点;反之,若小于邻域平均值则认为它是局部暗点.

2)根据1)判断结果调整像素灰度值.为了提高图像的对比度,即使得亮点更亮、暗点更暗,采取对中心像素点灰度值与邻域块内灰度均值之差 $(Q_j(x,y) - a_j(x,y))$ 进行加权的方法,具体为

$$E_j(x,y) = k \times (Q_j(x,y) - a_j(x,y)) \quad (1)$$

式中, $E_j(x,y)$ 为增强后第 j 个子带图像位于 (x,y) 处的像素值, $Q_j(x,y)$ 为增强前第 j 个子带位于 (x,y) 处的像素值($j=1,2,3,4$), $a_j(x,y)$ 为 $s \times s$ 邻域块像素灰度均值, k 为大于1的加权系数.当中心像素点为局部亮点时,该点灰度值与邻域块内灰度均值之差为正,将该正值乘以一个大于1的加权值 k 得到一个更大的正值,替换原灰度值,使局部亮点更亮;当中心像素点为局部暗点时,差值为负,负值乘以同样大于1的加权值 k 得到一个更小的负值,替换原灰度值,使局部暗点更暗.

该算法处理子带图像,能很好地提高图像的对比度,使局部亮点更亮,局部暗点更暗.因此,算法在增强图像的同时,不会遗漏任何一个像素的细节信息.

1.2.3 对增强后的各子带图像进行DFB重建,对重建后图像进行直方图均衡化处理

对增强后各子带图像 $E_j(x,y)(j=1,2,3,4)$ 进行DFB重建.重建后图像 G 的灰度级集中在较窄的中间区域,其动态范围狭窄,导致整幅图像的对比度和亮度仍然较低.本文用直方图均衡化对图像进行非线性拉伸,重新分配像素值,使灰度级均匀分布,得到最后的增强图像 H .

2 脑肿瘤分割

本文算法分为图像增强和脑肿瘤分割两部分.图像增强部分描述具体见1.2节内容.脑肿瘤分割采用FVF^[7]方法进行分割,具体步骤如下:

1)对增强后的图像进行高斯平滑滤波,然后用梯度边缘算子提取图像的边缘图像;

2)任选一条曲线,初始化其外力场及内部能量,初始的力将推动着轮廓曲线移向临近的区域;

3)通过目标边界上自动选择的控制点,产生新的外力场演化主动轮廓,这个控制点可以像液体一样在目标边界上自由流动,不断地更新外力场避免鞍点和稳定点的问题,轮廓不断演化直到完成,得到肿瘤边界.

3 实验结果及分析

分别从图像增强效果和肿瘤分割效果来验证本

文提出方法的有效性与准确性. 实验数据来自天津医科大学总医院影像科. 从图库中随机抽取来自 10 个患者的 100 张大小为 512×512 的 MR 图像参加实验. 本实验在 Matlab2010b 平台上实现.

3.1 增强效果

分别用本文的增强方法和文献[13]的增强方法对脑部 MRI 图像其进行增强实验, 并从中分析本文方法对脑部 MRI 图像的增强效果. 文献[13]是 Deepti 在 2010 年提出针对医学图像的增强算法^[13], 此算法对组织、病灶结构较简单的医学图像具有较好的增强效果.

算法中, 式(2)中 k 的取值将影响图像的灰度分布范围; 若 k 取值过大, 增强后图像灰度分布范围广, 为后续处理带来不便; 若 k 取值过小, 则无法有效提高图像对比度. 邻域块 $s \times s$ 的大小影响着中心像素点所属纹理区(亮纹理区或暗纹理区)的判断, 为了增强边缘, 提高肿瘤分割的准确性, s 一般取三个或四个纹理大小. 根据样本测试效果统计的结果与临床医生经验, 本文算法参量取值: $k=3, s=14$.

图 1 为图像增强实验的效果对比图, 其第一、二、三列分别为含肿瘤的脑部 MRI 原图、文献[13]算法和本文算法增强后的结果图像. 对比图 1 第二、三列图像可以发现, 文献[13]的算法虽然增强了图像的对比度, 但图像中细节纹理的模糊程度也随着增加了, 而本文的增强算法不仅增强了图像的对比度, 其效果明显优于文献[13]的算法, 虽然在图像的背景区域中, 由于只存在噪音, 没有纹理信息, 使得

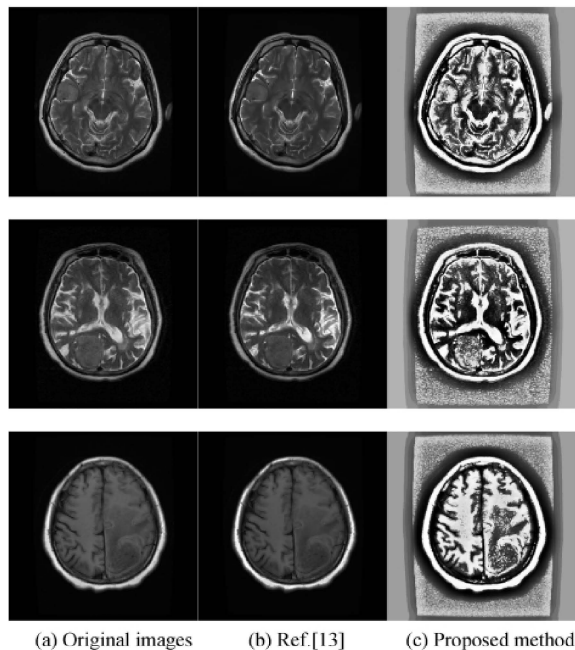


图 1 像增强对比实验结果

Fig. 1 Contrast test results of image enhancement

增强算法没能根据纹理信息对噪音进行抑制, 背景噪音被放大了; 但在图像的有效内容区域中, 即存在纹理信息, 又存在噪音, 本文算法可以根据纹理信息的强弱对噪音进行抑制, 所以不会使有效内容区域的噪音放大, 只对细节纹理增强, 使之清晰可辨, 大大提高了后续分割算法的准确度.

3.2 整体分割效果

对上述 100 张图像, 用本文算法对其进行肿瘤分割. 为验证算法分割肿瘤的准确性, 引入文献[7]的算法进行对比实验, 同时, 为了进一步验证本文增强算法的有效性, 又对上述图像先用文献[5]的算法进行增强, 再用文献[7]的算法进行分割. 文献[5]的增强算法是一种典型的图像频率域增强算法, 与之比较能验证有无空域增强对分割结果的影响, 同时能验证本文算法对频域增强方法改进的效果. 最终, 以富有临床经验的医生标定肿瘤区域, 从定性和定量两方面评价本文算法的效果.

图 2 为肿瘤分割对比实验的结果, 第一、二、三列图像分别为文献[7]的算法结果图、本文算法结果图和医生标定图. 由于文献[7]的算法没有对图像进行增强, 直接对肿瘤区域进行分割, 所以在肿瘤边界不清晰的地方, 算法不能准确地分割出肿瘤边界, 如图 2 第一列所示. 本文算法在分割肿瘤之前, 对图像进行了增强, 在增强肿瘤边界特征的同时改善了图像的对比度和清晰度, 因此, 算法能较准确地分割出肿瘤边界, 提高了肿瘤分割的准确度, 如图 2 第二列所示.

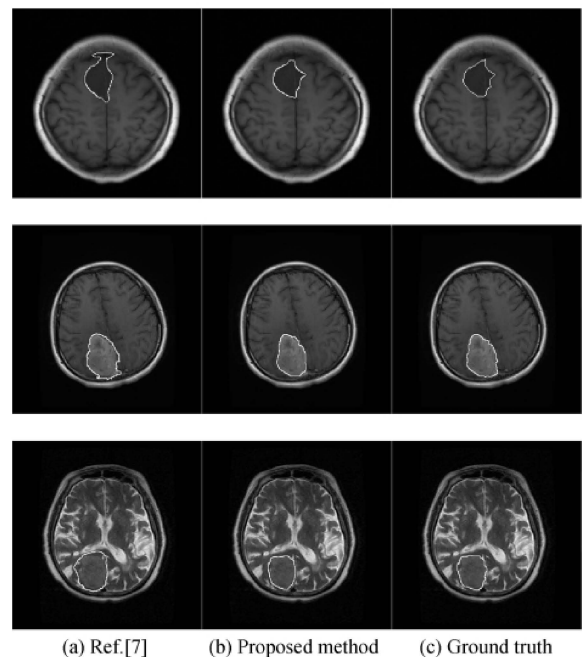


图 2 肿瘤分割对比实验结果

Fig. 2 Contrast test results of tumor segmentation

为了定量地验证算法分割肿瘤的准确性,引入了 Tanimoto 准则^[7,14] (Tanimoto Metric, TM) 对分割的结果进行分析, TM 值定义为

$$TM = \frac{\|R_x \cap R_G\|}{\|R_x \cup R_G\|} \quad (0 \leq TM \leq 1) \quad (2)$$

式中 R_x 为算法分割出的肿瘤区域, R_G 为医生标定的肿瘤区域, $\|\cdot\|$ 表示集合的元素数量. TM 值越大, 则算法分割的肿瘤区域越接近医生标定的区域.

表 1 为三种算法对实验样本分割结果平均 TM 值的统计. 从中可以看出, 文献[7]的算法没对图像进行增强, 分割肿瘤边界不精确, 导致其分割区域与真实肿瘤区域有所偏差; 而第二种方法在分割之前, 使用了文献[5]的频域增强, 提高了图像的质量, 因此, 其平均 TM 值大于文献[7]的分割算法; 本文算法在分割之前进行了空频域结合的图像增强, 其增强效果比单一的频域增强好, 提高了肿瘤分割的准确度, 因此, 其分割结果优于前面两种方法.

表 1 算法的平均 TM 值比较

Method	Average TM
Ref. [7]	0.746
Ref. [5] + Ref. [7]	0.817
Proposed	0.869

4 结论

本文提出了一种基于空频域图像增强的脑肿瘤分割算法. 该增强方法将频域的方向滤波和空间域的邻域增强、直方图增强有效地结合起来, 克服了空间域增强算法模糊图像细节、频率域增强算法降低图像对比度的缺陷, 在增强图像的同时, 不会遗漏任何一个像素的细节信息. 实验结果表明, 本文算法在增强肿瘤边界特征的同时改善了图像的对比度和清晰度, 提高了脑肿瘤分割的准确性和鲁棒性.

致谢 感谢天津医科大学总医院影像科对本文研究的支持与帮助.

参考文献

- [1] ZHANG Zhi-guo, ZHOU Yue, XIE Kai. Brain tumor segmentation based on mumford-shah model level set [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2005, **39**(12): 1955-1958.
张治国, 周越, 谢凯. 一种基于 Mumford-Shah 模型的脑肿瘤水平集分割算法[J]. *上海交通大学学报*, 2005, **39**(12): 1955-1958.
- [2] ZHU H, FRANCIS H Y C, LAM F K. Image contrast enhancement by constrained local histogram equalization [J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 1999, **73**(2): 281-290.
- [3] WANG Bing-jian, LIU Shang-qian, ZHOU Hui-xin, et al. Self-adaptive contrast enhancement algorithm for infrared images based on plateau histogram [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(02): 299-301.
王炳健, 刘上乾, 周慧鑫, 等. 基于平台直方图的红外图像自适应增强算法 [J]. *光子学报*, 2005, **34**(02): 299-301.
- [4] WU Zhi-guo, WANG Yan-jie. An image enhancement algorithm based on histogram nonlinear transform [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(04): 755-758.
武治国, 王延杰. 一种基于直方图非线性变换的图像对比度增强方法 [J]. *光子学报*, 2010, **39**(04): 755-758.
- [5] OH S K, LEE J J, PARK C H, et al. New fingerprint image enhancement using directional filter bank [C]. *International Conferences in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision*. Journal of WSCG. Plzen: Science Press, 2003, **11**(1): 1-8.
- [6] WANG Fa-niu, LIANG Dong, CHEN Jun-ning, et al. Preprocessing on fingerprint based on directional filter bank [J]. *Microelectronics & Computer*, 2007, **24**(8): 190-192.
王发牛, 梁栋, 陈军宁, 等. 基于方向滤波组的指纹图像预处理 [J]. *微电子学与计算机*, 2007, **24**(8): 190-192.
- [7] WANG T, CHENG I, BASU A. Fluid vector flow and applications in brain tumor segmentation [J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2009, **53**(3): 882-893.
- [8] RAFAEL C G, RICHARD E W. *Digital image processing* [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2003: 344-365.
- [9] ZHU Hui-ping, WEI Feng-yuan. Discussion on the application of histogram equalization in image enhancement [J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2010, **33**(1): 174-176.
朱会平, 魏峰远. 探讨图像增强中直方图均衡化的应用 [J]. *测绘与空间地理信息*, 2010, **33**(1): 174-176.
- [10] HUANG Zhan-peng. Image enhancement based on subsection histogram equalization [J]. *Computer Knowledge and Technology*, 2008, **2**(16): 1292-1294.
黄展鹏. 基于分段直方图均衡化技术的图像增强 [J]. *电脑知识与技术*, 2008, **2**(16): 1292-1294.
- [11] REN Yan-fei. Histogram equalization and its application in image processing [J]. *Computer Information and Technology*, 2007, **15**(4): 37-38.
任艳斐. 直方图均衡化在图像处理中的应用 [J]. *计算机与信息技术*, 2007, **15**(4): 37-38.
- [12] DO M N, VETTERLI M. Contourlets: a directional multiresolution image representation [C]. *Proc. Of IEEE International Conference on Image Processing*. Academic Press, 2002: 1-4.
- [13] DEEPTI M, VINOD K, SURESH C S. Enhancement of the ultrasound images by modified anisotropic diffusion method [J]. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 2010, **48**(12): 1281-1291.
- [14] THEODORIDIS S, KOUTROUMBAS K. *Pattern recognition* [M]. 4th ed. New York: Academic Press, 2008.

Brain Tumor Segmentation Based on Spatial-frequency Domain Image Enhancement

HUANG Jing, YANG Feng

(School of Biomedical Engineering, Southern Medical University, Guangzhou 510515, China)

Abstract: In view of the problems that the target border always appears too fuzzy to be detected, a novel method of brain tumor segmentation is proposed based on spatial-frequency domain image enhancement. The method is composed of the spatial and frequency domain enhancing process and the detecting process. In the enhancing process, the directional filter band, neighborhood and histogram equalization are combined to overcome the defect of contrast reduction caused by directional filter and the defect of details vagueness caused by histogram equalization. Then in the detecting process, a method of image segmentation is applied to find the area of the brain tumor. The experiment results show that the enhancing process strengthens the features of tumor greatly, and improves the contrast and definition of the image.

Key words: Magnetic resonance image; Spatial-frequency domain; Image enhancement; Image segmentation