

# 基于阈值法和数学形态学的 HIFU 治疗区域确定

刘畅<sup>1</sup>, 钱盛友<sup>1</sup>, 邹孝<sup>1</sup>, 孙福成<sup>2</sup>, 张激<sup>3</sup>

LIU Chang<sup>1</sup>, QIAN Sheng-you<sup>1</sup>, ZOU Xiao<sup>1</sup>, SUN Fu-cheng<sup>2</sup>, ZHANG Ji<sup>3</sup>

1. 湖南师范大学 物理与信息科学学院, 长沙 410081

2. 上海交通大学 生物医学工程系, 上海 200030

3. 深圳普罗惠仁医学科技有限公司, 广东 深圳 518067

1. College of Physics and Information Science, Hunan Normal University, Changsha 410081, China

2. Department of Biomedical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China

3. Shenzhen Pro-hifu Medical Tech. Co. Ltd., Shenzhen, Guangdong 518067, China

E-mail: shyqian@hunnu.edu.cn

LIU Chang, QIAN Sheng-you, ZOU Xiao, et al. Determination of HIFU treatment regions based on threshold algorithm and mathematical morphology. *Computer Engineering and Applications*, 2009, 45(23): 224-226.

**Abstract:** In order to determine effective treatment region more accurately and objectively during the process of HIFU treatment, different image segmentation algorithms are compared based on the characteristics of HIFU treatment. Then the method of combining threshold based on arithmetic mean of gray value with iterative mathematical morphology is used to detect the size of the HIFU treatment regions. Experiments show that the results of this method are consistent with the actual injury, which proves the feasibility and effectiveness of this method.

**Key words:** High Intensity Focused Ultrasound(HIFU); digital subtraction; threshold; denoising

**摘要:** 为了在 HIFU 治疗过程中更客观有效地判定有效治疗区域, 根据 HIFU 治疗的特点, 在比较各种图像分割算法的基础上采用基于灰度期望值的阈值法, 并与迭代数学形态学方法结合, 从图像处理角度检测出了 HIFU 焦域的大小。实验表明该方法所获得的结果与实际损伤情形基本吻合, 从而证明了该方法的可行性和有效性。

**关键词:** 高强度聚焦超声; 数字减影; 阈值; 去噪

DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2009.23.064 文章编号: 1002-8331(2009)23-0224-03 文献标识码: A 中图分类号: TP391

## 1 引言

高强度聚焦超声(HIFU)治疗是近年来发展起来的一种局部高温治疗新技术。其原理是利用超声波的穿透性和聚焦性等物理学特征, 将超声波从体外聚焦到治疗靶区内形成局部高能量使其温度在短时间内(0.5~5 s)上升到 65℃以上, 从而使治疗区组织发生凝固性坏死<sup>[1]</sup>, 同时最大限度地不伤及周围正常组织。由于此方法无副作用, 且可一次获得成功, 因此受到了广泛关注。近年来 HIFU 治疗技术发展迅速, 并已在临床中得到应用<sup>[2]</sup>。

HIFU 治疗过程监控包括治疗中测温、疗效评价等方面。此领域的研究仍是热点和难点, 也是 HIFU 技术发展中亟待解决的关键问题。HIFU 治疗中疗效评价的研究尚处于初级阶段<sup>[3]</sup>。目前利用 B 超监控治疗过程时, 主要由医生凭经验依据 B 超图像来判定有效治疗区域及治疗程度, 缺乏客观性和准确性。将在现有 B 超监控设备的基础上, 通过提取 B 超图像, 利用图像处理技术, 提供一种切实可行的 HIFU 治疗区域确定方法。

此研究有良好的应用背景, 研究成果对方便医生实施治疗、提高疗效有重要价值。

## 2 基本理论

### 2.1 图像减影原理

HIFU 照射后, 在组织损伤处的 B 超图像上通常可看到回声增强的现象, 但若成像区域内存在其他高回声组织时, 损伤则较难识别。利用数字减影法可得到两幅图之间的差异, 从而消除其他高回声组织的影响。常用的图像减影法有绝对差值法(AD)、绝对差值求和法(SAD)以及平方差值求和法(SSD)。最简单的减影法是绝对差值法, 即将两幅图像相减取绝对值, 计算公式为:

$$E(z, x) = |S'(z, x) - S(z, x)| \quad (1)$$

其中,  $S(z, x)$  为治疗前图像,  $z$  是深度,  $x$  是扫描方向,  $S'(z, x)$  为治疗后  $t$  时刻的图像,  $E(z, x)$  为减影图像。

### 2.2 LoG 算子

考虑高斯函数:

**作者简介:** 刘畅(1984-), 男, 硕士研究生, 研究方向为数字图像处理; 钱盛友(1965-), 男, 通讯作者, 教授, 博导, 主要研究方向为信号检测与处理及智能仪器等。

收稿日期: 2008-04-28 修回日期: 2008-07-29

$$h(r) = e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

其中,  $r^2 = x^2 + y^2$ ,  $\sigma$  是标准偏差。这是一个平滑函数,若和一幅图像卷积,则会使图像变模糊。模糊的程度由  $\sigma$  的值决定。该函数的拉普拉斯算子(关于  $r$  的二阶导数)为:

$$\nabla^2 h(r) = -\left[ \frac{r^2 - \sigma^2}{\sigma^4} \right] e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

该函数称为 Laplacian of a Gaussian (LoG) 有一些显而易见的原因。因为求二阶导数是线性运算,所以用  $\nabla^2 h(r)$  对图像进行卷积与先用平滑函数对图像卷积再计算结果的拉普拉斯算子是一样的。用  $\nabla^2 h(r)$  对图像卷积会产生两个效果:使图像变平滑(从而减少噪声);计算拉普拉斯算子,以便产生双边缘图像。然后,定位边缘就是找到两个边缘之间的交叉。

### 2.3 基于灰度期望值的阈值确定方法

在数字图像中每一个像素的值均属于一个有限集,该集即为可能的灰度等级。像素的取值情况不同,也就形成了不同的图像。可以用离散随机变量来描述任意一幅图像数据。设图像的尺寸为  $M \times N$ , 其灰度的可取值为  $L_1, L_2, \dots, L_N$  用离散随机变量  $X$  来表示图像中任一像素  $\mu_{xy}$  ( $x \in 1, 2, \dots, M, y \in 1, 2, \dots, N$ )。  $L_1, L_2, \dots, L_N$  即为  $X$  的  $N$  个可能取值。图像的灰度分布情况可以用概率分布来描述。设各灰度级的出现概率分别为:

$$p_1 = P(L_1), p_2 = P(L_2), \dots, p_N = P(L_N)$$

且有

$$\sum_{n=1}^N p_n = 1 \quad (4)$$

对于这种随机变量,可以用下述密度矩阵来加以描述:

$$\begin{bmatrix} X \\ P(X) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_1 L_2 \dots L_N \\ p_1 p_2 \dots p_N \end{bmatrix} \quad (5)$$

可以看出,对于不同的图像,其密度矩阵是各不相同的。在对随机变量的统计过程中,期望值<sup>[4]</sup>是一个十分重要的统计特征,它反映了随机变量的平均取值。从力学观点来看它代表了物体的质量中心,是随机变量取值较为集中的地方。既然灰度值在图像当中是一个随机变量,则从灰度“中心”进行分割应当是最佳的平衡点,它使取黑像素的灰度值和白像素的灰度值均等,设  $\mu_{threshold}$  来表示阈值,则有:

$$\mu_{threshold} = \sum_{n=1}^N L_n P(L_n) \quad (6)$$

令  $h(L_n)$  代表图像中灰度  $L_n$  出现的次数。则由式(3)可以推出:

$$\mu_{threshold} = \sum_{n=1}^N L_n P(L_n) = \frac{\sum_{n=1}^N L_n h(L_n)}{\sum_{n=1}^N h(L_n)} \quad (7)$$

式(7)是一种基于全局的阈值分割法,对于具有不同灰度的图像均可应用,摆脱了传统的基于直方图的阈值分割法对图像模型的假定。

### 2.4 数学形态学基本原理

数学形态学为图像处理和分析提供了有效的工具,已用于提取描述和表征图像形状的边缘、轮廓、凸壳等有用因素。数学形态学是用集合论语言描述的,集合在数学形态学中代表图像

目标。形态学运算包括二种图像:一是待处理图像,也叫活动图像;二是核,也叫结构元素。下面先定义二个基本的形态学算子——膨胀和腐蚀:

**定义 1** 设  $A$  和  $B$  是  $N$  维欧几里德空间  $E^N$  的子集,  $A$  被  $B$  的膨胀与腐蚀分别定义为:

$$A \oplus B = \{c \in E^N | c = a + b \text{ for some } a \in A \text{ and } b \in B\} \quad (8)$$

$$A \ominus B = \{c \in E^N | c + b \in A \text{ for every } b \in B\} \quad (9)$$

**定义 2** 设  $A$  是  $N$  维欧几里德空间  $E^N$  的子集,  $x \in E^N$ , 对  $A$  平移  $x$  定义为:

$$(A)_x = \{c | c = a + x \text{ for some } a \in A\} \quad (10)$$

膨胀和腐蚀是基本的形态学运算,许多其他的运算如开、闭、击中击不中变换、细化、剪枝等就是这两种运算的复合运算。

**定义 3** 设  $A$  和  $B$  是  $N$  维欧几里德空间  $E^N$  的子集,  $A$  被  $B$  的开与闭运算分别定义为:

$$A \circ B = (A \ominus B) \oplus B \quad (11)$$

$$A \cdot B = (A \oplus B) \ominus B \quad (12)$$

将形态学开运算和闭运算结合运用,可以非常有效地去除图像中的杂散点(一般由噪声引起)。

## 3 实验方法

### 3.1 B 超图像采集

实验系统如图 1 所示。实验所用的 HIFU 探头为深圳普罗公司生产的 PRO2008 系列,其中心频率为 1.18 MHz,几何焦距为 13 cm,焦点声强大于  $3 \text{ kW/cm}^2$ 。组织样品置于 HIFU 探头的正下方。B 超图像由 PHILIPS 公司生产的 EnVisor 型超声诊断系统获取并经 PCI8001 图像采集卡送入计算机。每次测试时均分别采集了 HIFU 辐照前后的 B 超图像,在辐照时会产生很强烈的空化效应<sup>[5]</sup>,使 B 超图像灰度值远远大于实际值,因而不宜在辐照停止后立即采集图像,然而损伤区域的亮度会随时间逐渐减弱<sup>[6]</sup>。为了既减少空化效应对 B 超图像的影响,又不至于使 B 超图像亮度随时间减弱太多,所采集的 B 超图像均为辐照停止 1 s 后获得。

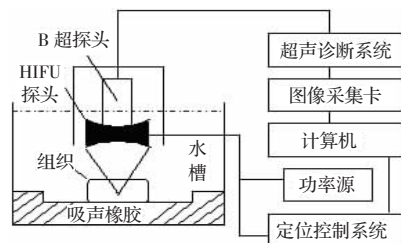


图 1 实验系统

### 3.2 图像处理流程

采用差异实验法来判定所述方法的性能,即首先对辐照前后所获取的 B 超图像  $S(z, x)$ 、 $S'(z, x)$  依次按照图 2 流程进行处理,再将最终获得的结果  $E(z, x)$  与实际新鲜离体猪肉组织切片的数码相片对照,以此评价该方法的有效性。具体步骤所采用的算法及原因如下所述。

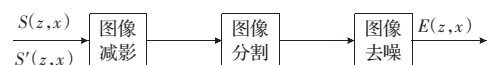


图 2 B 超图像处理流程

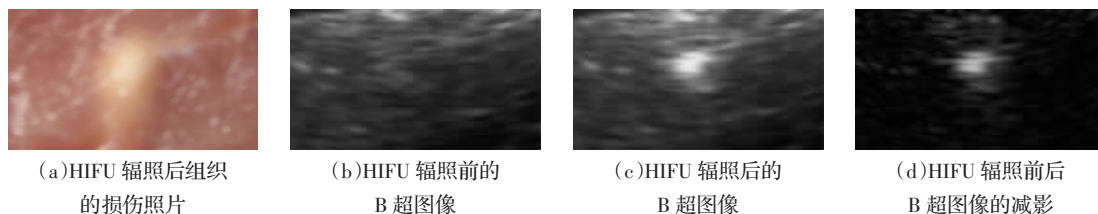


图3 HIFU 辐照新鲜离体猪肉前后获取的 B 超图像及组织损伤照片

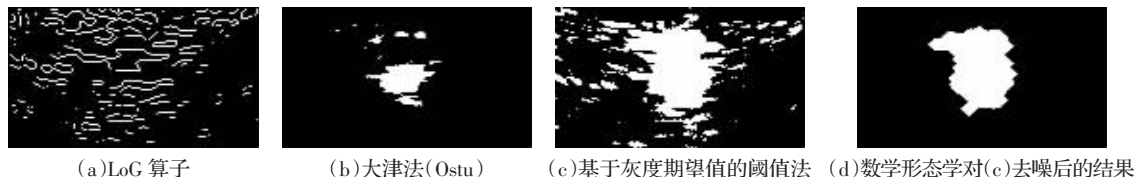


图4 不同边缘检测方法对减影图像的检测结果

## 4 结果与分析

### 4.1 图像减影处理

经 HIFU 辐照新鲜离体猪肉后的解剖照片如图 3(a)所示,图中呈现乳白色的部分就是损伤区域,测得该区域大小约为  $8.5 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 。图 3(b)、图 3(c)分别为 HIFU 打击前后新鲜离体猪肉的 B 型超声图像。为了消除干扰的影响并突出组织损伤区,采用绝对差值法(AD)对 HIFU 打击前后的 B 超图像进行减影处理。图 3(d)即为图 3(b)和图 3(c)的绝对差值法减影效果。

### 4.2 减影图像分割

为了进一步从图像角度观察损伤区域的大小,接着对减影后的图像进行分割。图像分割就是指把图像分成各具特性的区域并提取出感兴趣目标的技术和过程。边缘检测即是基于边界的分割算法,而阈值法是基于区域的算法。

经典边缘提取算子有 Roberts、Sobel、Prewitt、LoG、Canny 等,其优点是计算简单、速度较快,缺点是对噪声的干扰比较敏感。由于超声图像本身固有的斑纹噪声、HIFU 治疗系统中 B 超图像的雾状伪像以及空化效应的影响,使 HIFU 治疗系统中 B 超图像噪声成因很复杂,因而想找一种相应的有效的去噪方法非常困难。采用计算时间相对较长、对医学 B 超图像边缘检测效果相对较好的 LoG 算子对减影图像进行边缘提取,结果如图 4(a)所示。改用直方图变换、迭代法和天津法(Ostu)等具有一定抗噪能力的阈值法分析发现:以上几种算法得到的阈值过大,丧失了许多边缘细节。图 4(b)为用天津法(Ostu)进行边缘检测的效果。该文采用基于灰度期望值的阈值确定方法,其检测结果如图 4(c)所示,效果明显优于 LoG 算子和天津法。

### 4.3 对分割后的图像去噪

用灰度期望值法从图像角度有效获取了损伤区域,但是图像受噪声污染很严重。通过仔细观察可以看到:损伤区域是一

整块连续的白色区域,而噪声在图像上表现为散布在损伤区域周围的小白斑。为了既能很好保留损伤区域,又能有效去除噪声,采用了迭代数学形态学去噪方法。即从小到大变化结构元素,反复利用数学形态学中的开运算和闭运算去除焦域周围的小白斑,直到在去除噪声的同时又很好地保留焦域为止。采用此方法获得的最终结果如图 4(d)所示,与图 3(a)所示解剖照片相比较可以看到:该文方法获得的焦域大小为  $8 \text{ mm} \times 11.2 \text{ mm}$ ,与实际焦域大小基本吻合。

## 5 结论

高强度聚焦超声治疗已成为国际超声治疗学领域的一个研究热点。通过分析 HIFU 治疗焦域的特点,采用差异实验法,巧妙地将阈值法和数学形态学结合起来,从图像角度有效地检测出了 HIFU 治疗焦域,使医生能直观地观察到治疗过程中焦域大小,具有一定的实用价值和参考价值。

## 参考文献:

- [1] Cheng S Q, Qian D C. High intensity focused ultrasound in the treatment of experimental liver tumour[J]. *Cancer Res Clin Oncol*, 1997, 123(4): 219-223.
- [2] Haar T. Acoustic surgery[J]. *Physics Today*, 2001, 54(12): 29-34.
- [3] Zhong Hui, Wang Ming-xi. Current research of monitoring imaging and evaluation for HIFU therapy-A review[J]. *International Medical Devices*, 2004, 10(11): 22-24.
- [4] 高永英, 张利, 吴国威. 一种基于灰度期望值的图像二值化算法[J]. *中国图象图形学报*, 1999, 4(6): 524-527.
- [5] 冯若. 超声空化与超声治疗[J]. *自然杂志*, 2003, 25(6): 311-314.
- [6] 钟徽, 万习明, 江一峰, 等. 高强度聚焦超声软组织损伤超声监控成像与评价方法[J]. *声学学报*, 2006, 31(3): 247-254.
- [7] ... USA, 1997: 309-314.
- [8] Camelia-Mihaela P, Dumitrescu D. Improving ant systems using a local updating rule[C]// *Symbolic and Numeric Algorithms for Scientific Computing*, SYNASC, 2005.
- [9] Ou-yang Jun, Yan Gui-rong. A multi-group ant colony system algorithm for TSP[J]. *Machine Learning and Cybernetics*, 2004, 3: 117-121.
- [10] Stutzl T, Hoos H H. The MAX-MIN ant system and local search for the traveling salesman problem[C]// *Proc IEEE International Conference on Evolutionary Computation (ICEC'97)*, Indianapolis, USA, 1997: 309-314.
- [11] Dorigo M, Gambardella L M. Ant colony system: A cooperative learning approach to the traveling salesman problem[J]. *IEEE Trans Evolutionary Computation*, 1997, 1(1): 53-66.
- [12] 覃刚力, 杨家本. 自适应调整信息素的蚁群算法[J]. *信息与控制*, 2002, 31(3): 198-201.
- [13] Cao Lang-cai, Luo Jian. An improved intelligence algorithm over ACS for TSP[C]// *Proc of CCC*, 2008: 65-69.
- [14] 吴斌, 史忠植. 一种基于蚁群算法的 TSP 问题分段求解算法[J]. *计算机学报*, 2001, 24(12): 1328-1333.

(上接 195 页)