

## 高强度聚焦超声图像斑点解相关特性分析

吴金凤,张东

武汉大学物理科学与技术学院,湖北 武汉 430072

**【摘要】**斑点解相关原理广泛应用于超声导航和超声图像三维重建等领域。高强度聚焦超声系统中超声图像的斑点解相关特性是本文研究重点,通过对高强度聚焦超声图像中纹理方向不同的斑点区域在横向和层间的解相关规律分析,针对纹理方向对解相关特性造成干扰的问题,基于傅里叶变换的方向检测和方向矫正算法被提出。首先根据斑点区域的频谱亮度分布计算纹理的主控方向,然后对矫正后的频谱进行傅里叶反变换,得到新的斑点区域。实验结果显示,提出的方法取得良好的效果,新斑点区域在横向和层间的解相关曲线呈现一致的规律,提出的方法可用于斑点检测、纹理特征提取、超声图像层间定位和三维重建。

**【关键词】**斑点解相关;超声图像;纹理方向;傅里叶变换;高强度聚焦超声

**【中图分类号】**TP391.41

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2017)06-0590-04

## Speckle decorrelation analysis of high-intensity focused ultrasound image

WU Jinfeng, ZHANG Dong

School of Physics and Technology, Wuhan University, Wuhan 430072, China

**Abstract:** Speckle decorrelation principle is widely used in ultrasound navigation and three-dimensional reconstruction of ultrasound images, etc. In this study, we discussed the speckle decorrelation characteristics in the ultrasound images from high-intensity focused ultrasound system, and analyzed the decorrelation rules of speckle area with different texture orientations at elevational direction and lateral direction, and finally proposed a novel Fourier transform-based algorithm to detect and correct the texture orientation. We calculated the main orientation of speckle texture according to the distribution of Fourier spectrum in speckle area, and obtained a new speckle area after Fourier inverse transform for the corrected spectrum. The experimental results show that the novel Fourier transform-based algorithm performs well, and that the decorrelation curves of new speckle area in lateral direction and elevational direction exhibit a consistent rule, which indicate that the novel algorithm can be used for speckle detection, texture feature extraction, distance estimation between successive images, and three-dimensional reconstruction of ultrasound images.

**Keywords:** speckle decorrelation; ultrasound image; texture orientation; Fourier transform; high intensity focused ultrasound

### 前言

高强度聚焦超声(High Intensity Focused Ultrasound, HIFU)是一种新型的无创性肿瘤治疗方法,通过在靶区汇聚高能量的超声波,利用超声波所产生的高温来消融靶区之内的生物组织<sup>[1]</sup>。斑点是超声

图像中一种常见的噪声纹理,虽然影响了图像的清晰度和质量,但是斑点同时也反映成像介质的结构信息。斑点作为一种有效的纹理特征,应用于图像分割<sup>[2]</sup>和三维重建<sup>[3]</sup>等。在超声成像系统中,由于分辨单元的交叠,使得相邻两帧图像斑点之间具有一定回波统计相关性。斑点解相关是基于斑点信息的超声图像层间定位算法的核心,一直是超声系统导航和超声图像三维重建领域的研究热点<sup>[4]</sup>。

本文主要研究HIFU超声图像的解相关规律。在超声图像中,随着位置的变化,斑点纹理呈现不同方向,本文分析纹理方向对斑点区域在层间和横向的解相关特性的影响,并提出基于傅里叶变换的方向检测及方向矫正算法。

**【收稿日期】**2017-01-08

**【基金项目】**国家重点研发计划973项目(2011CB707900)

**【作者简介】**吴金凤,硕士,研究方向:图像处理,E-mail:jfeng\_wu@whu.edu.cn

**【通信作者】**张东,博士,副教授,研究方向:信号处理,E-mail:whxd-sp@163.com

## 1 斑点解相关理论

### 1.1 超声斑点形成原理

超声成像主要是依赖生物组织对入射声波的散射和反射,以下统称散射,生物组织环境称为散射环境。超声图像中的像素主要由体内散射体对超声回波的散射而形成<sup>[5]</sup>。超声斑点源自分辨单元内的随机散射体回波的相干积累,这种积累可以被描述成各个成分相量的随机游走<sup>[6-7]</sup>。超声斑点的形成环境条件大致可以分为两种:第一种是超声波入射到极为粗糙的声学平面上,对此声学平面的高度进行统计,其分布可以认为是服从高斯分布,具有不同相位和强度的散射回波在空间上叠加,形成超声斑点;第二种是空间中存在大量的微小散射粒子,超声波在入射到这些微小散射粒子之后,发生多次过程复杂的散射过程,使得具有不同强度和不同相位的散射回波在空间中叠加起来,也就形成了超声斑点。一般认为,在B超图像中的超声斑点即是源于第二种情况<sup>[6,8]</sup>。形成斑点最理想的散射环境是散射体密度足够大,并且散射体是随机分布的。这种散射环境被称为瑞利散射环境,形成的是完全发育的斑点。在人体真实的组织环境内,完全理想的散射环境很少,所以实际的超声图像中鲜有完全发育的超声斑点区域<sup>[9-11]</sup>。

### 1.2 斑点解相关原理

由于超声波束有几个毫米的宽度不能完全聚焦,图像中每个像素点对应于体内一个分辨单元所含有散射体的散射回波。由于超声束的有限宽度,两个分辨单元相互重叠使得在一定间距内的相邻两帧图像斑点区域的回波信息有一定的统计相关性,相关性随着间距增大而减小的现象,叫做斑点解相关<sup>[12]</sup>。根据超声波束的宽度,这种统计上的相关性往往存在于几毫米的范围内。相关性通常用Pearson相关系数来计算,其表达式为:

$$\rho(P_1, P_2) = \frac{N \sum_{i=1}^N P_1(i) P_2(i) - \sum_{i=1}^N P_1(i) \sum_{i=1}^N P_2(i)}{\sqrt{[N \sum_{i=1}^N P_1^2(i) - (\sum_{i=1}^N P_1(i))^2][N \sum_{i=1}^N P_2^2(i) - (\sum_{i=1}^N P_2(i))^2]}} \quad (1)$$

其中,  $P_1$  和  $P_2$  表示对应的两个斑点区域,两个区域均含有  $N$  个像素点。 $P_j(i)$  表示第  $j$  个斑点区域中第  $i$  个像素点对应的回波强度值。斑点相关性与距离之间的关系可以用函数曲线来表示,即解相关曲线<sup>[13]</sup>。解相关曲线是衡量斑点解相关性最常用的方式。

## 2 纹理方向与解相关

### 2.1 超声图像纹理方向

如图1所示,在超声系统中,与超声波束平行的方向,称为轴向。轴向上的分辨单元大小与超声脉冲的宽度有关。与超声波束垂直的方向有两个:扫描平面内的方向,称为横向;与扫描平面垂直的方向,称为层向、层间方向。由于横向和层向均与声束方向垂直,可认为在这两个方向上的分辨单元大小是取决于超声束宽度。根据声波散射方向的随机性,帧内平面中分辨单元的交叠,使得斑点区域在横向也具有相关性。由于声波散射各向同性,斑点区域在横向和层间方向应该具有一致或近似的解相关规律,对此本文进行相关实验。由于超声系统的点扩散函数,斑点区域的方向不是随机分布的,而是体现出一些共同的属性<sup>[2]</sup>。如图2所示,A、B、C 3个区域纹理呈现不同方向性,但都与扇形的径向近似垂直。A、B区域的斑点解相关曲线如图3和图4所示,实验发现,大部分如同B的斑点区域,即纹理方向为水平时,在0~3 mm内,层间解相关曲线与在相同间距尺度下的层内横向解相关曲线具有非常接近的下降速率;而如同A、C的区域,即纹理方向偏离水平时,层间和横向的解相关曲线呈现较大的差别。

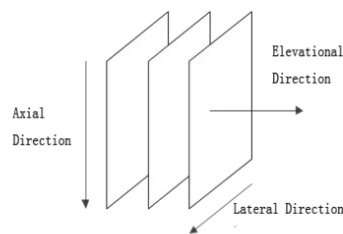


图1 超声系统的3个方向

Fig.1 Three directions of ultrasound system

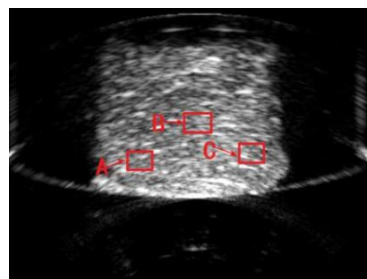


图2 纹理方向不同的斑点区域

Fig.2 Speckle areas at different texture orientations

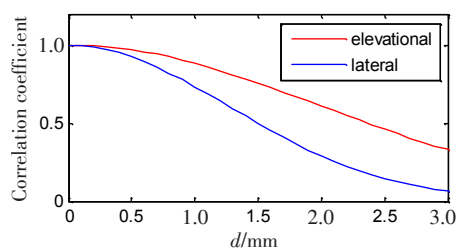


图3 A区域的解相关曲线

Fig.3 Decorrelation curves of area A

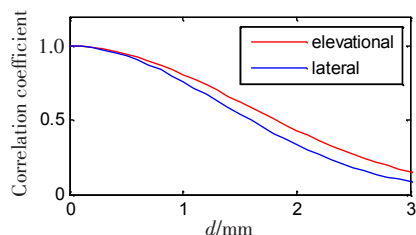


图4 B区域的解相关曲线

Fig.4 Decorrelation curves of area B

## 2.2 基于傅里叶变换的方向矫正

为了消除纹理的方向性对横向和层间解相关特性的干扰,提出基于傅里叶变换的方向矫正算法,算法流程如图5所示,算法分布结果如图6所示。

对一个具有方向性的亮度场而言,它在Fourier频域的能量聚集在过原点的直线上,并且该直线的方向与亮度排列方向(对纹理图像而言即是纹理朝向)垂直<sup>[14]</sup>。对于不规则或没有较强方向性的纹理,其Fourier谱不在任何方向上聚集。在超声图像中,方向性纹理的频域能量不是严格地集中在直线上,而是在直线两侧近似呈现椭圆形的分布,如图6b所示。可认为椭圆长轴的方向与纹理的主控方向垂直,因此纹理方向的计算转化为计算椭圆长轴的方向。根据所得椭圆长轴

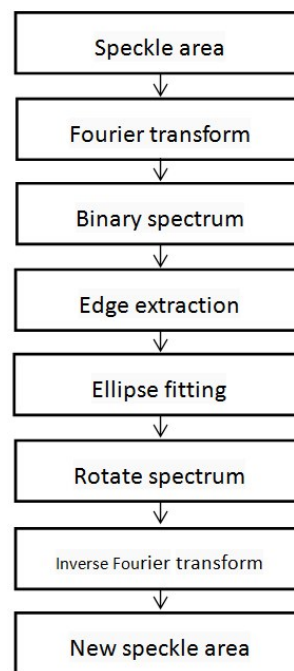


图5 算法流程图

Fig.5 Flowchart of the novel Fourier transform-based algorithm to detect and correct the texture orientation

与纵轴的偏离角旋转频谱,然后进行傅里叶反变换,得到方向矫正后的图像。方法步骤如图5所示。

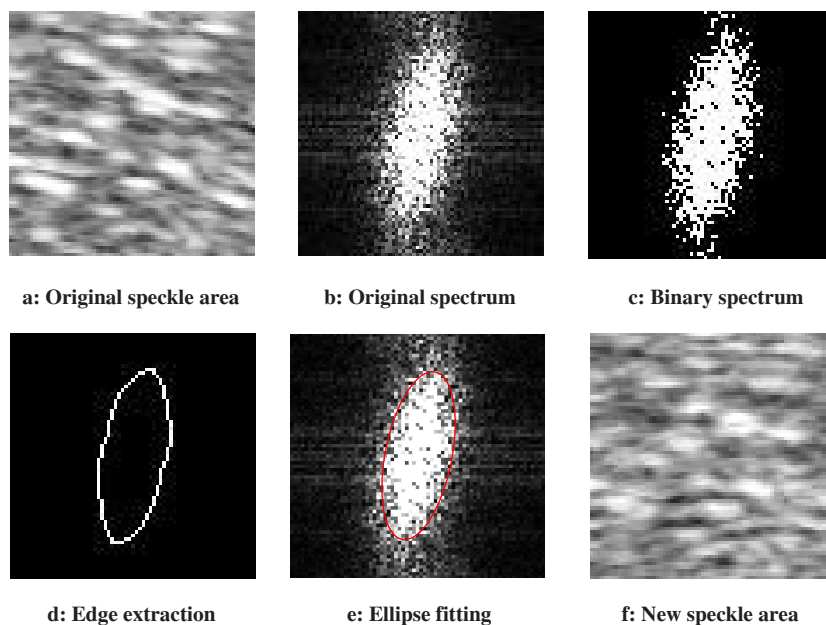


图6 算法分步结果图

Fig.6 Results after each step of the novel algorithm

## 3 实验结果分析

本文实验图像均来自于HIFU治疗仪,实验材料为猪肉组织、牛肉组织和牛肝组织各1块,通过HIFU仪器对样本组织进行序列扫描,获得3组序列超声图

像,每组80帧图像,在每帧图像中选取两个纹理方向不同的斑点区域。

图7和图8给出实验前后斑点区域横向和层间解相关曲线的对比图,可以看出经过方向矫正后,斑

点区域在横向和层间两个方向呈现更好的一致性的解相关规律。

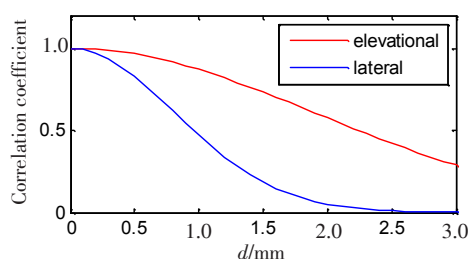


图7 原斑点区域解相关曲线

Fig.7 Decorrelation curves of original speckle area

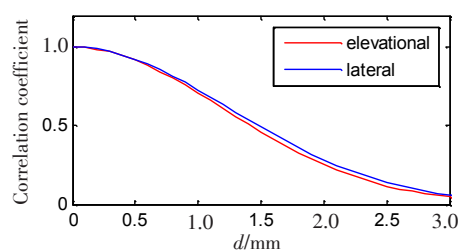


图8 新斑点区域解相关曲线

Fig.8 Decorrelation curves of new speckle area

## 4 讨论

斑点解相关是基于斑点信息的超声层间定位的核心,对于完全发育的斑点,参照其解相关曲线,根据斑点的相关性计算图像间距<sup>[15]</sup>。Gee等<sup>[12]</sup>提出利用非完全发育斑点的解相关算法,也称为自适应的斑点解相关算法。Laporte等<sup>[16]</sup>利用机器学习的方法对解相关曲线进行校准。本文主要分析纹理方向性对斑点解相关特性的影响,并提出一种基于傅里叶变换的方向检测和矫正方法,在纹理特征提取和斑点检测方面有很好的应用价值。

由于生物组织的复杂性与多样性,超声波在生物内部的散射过程也是极为复杂的。实验结果显示,在所选斑点区域中只有80%的斑点区域通过方向矫正后在横向和层间呈现一致的解相关规律。本文主要研究纹理的方向性对斑点解相关特性的影响,但是解相关特性反映的是生物组织结构与超声波散射的综合信息,影响斑点解相关规律的因素还有很多,对此本文没有做更加深入分析。在以后研究中,可以对影响斑点解

相关规律的因素和斑点解相关的应用做进一步的探究。

## 【参考文献】

- [1] WANG Z B, BAI J, LI F Q, et al. Study of a "biological focal region" of high-intensity focused ultrasound[J]. *Ultrasound Med Biol*, 2003, 29(5): 749-754.
- [2] WANG P F, LIU Y G, LI Y Z, et al. Robust prostate segmentation using intrinsic properties of TRUS images[J]. *IEEE Trans Med Imaging*, 2015, 34(6): 1321-1335.
- [3] TUTHILL T A, KRUCKER J F, FOWLKES J B, et al. Automated three-dimensional US frame positioning computed from elevational speckle decorrelation[J]. *Radiology*, 1998, 209(2): 575-582.
- [4] CHEN J F, FOWLKES J B, CARSON P L, et al. Determination of scan-plane motion using speckle decorrelation: theoretical considerations and initial test[J]. *Int J Imaging Syst Technol*, 1997, 8(1): 38-44.
- [5] RASMUSSEN S N. Liver volume determination by ultrasonic scanning [J]. *Br J Radiol*, 1972, 45(536): 579-585.
- [6] BURCKHARDT C B. Speckle in ultrasound B-mode scans[J]. *IEEE Trans Sonics Ultrason*, 1978, 25(1): 1-6.
- [7] GOODMAN J W. Statistical properties of laser speckle patterns[M]. Berlin: Springer, 2007: 9-75.
- [8] WAGNER R F, SMITH S W, SANDRICK J M, et al. Statistics of speckle in ultrasound B-scans[J]. *IEEE Trans Sonics Ultrason*, 1983, 30(3): 156-163.
- [9] GEIRGIOU G, COHEN F S. Statistical characterization of diffuse scattering in ultrasound images[J]. *IEEE Trans Ultrason Ferroelect Freq Contr*, 1998, 45(1): 57-64.
- [10] MARTI R, MARTI J, FREIXENET J, et al. Optimally discriminant moments for speckle detection in real B-scan images[J]. *Ultrasonics*, 2008, 48(3): 169-181.
- [11] SHANKAR P M, REID J M, ORTEGA H, et al. Use of non-Rayleigh statistics for the identification of tumors in ultrasonic B-scans of the breast[J]. *IEEE Trans Med Imaging*, 1993, 12(4): 687-692.
- [12] GEE A H, HOUSDEN R J, HASSENPLUG P, et al. Sensorless Freehand 3D ultrasound in real tissue: speckle decorrelation without fully developed speckle[J]. *Med Image Anal*, 2006, 10(2): 137-149.
- [13] HASSENPLUG P, PRAGER R W, TREECE G M, et al. Speckle classification for sensorless Freehand 3-ultrasound[J]. *Ultrasound Med Biol*, 2005, 31(11): 1499-1508.
- [14] 刘辉, 谈正. 各向异性纹理的图形参数化表征与综合[J]. *计算机学报*, 1998, 21(6): 566-571.
- [15] LIU H, TAN Z. Anisotropic texture graphic's parameterized representation and synthesis [J]. *Chinese Journal of Computers*, 1998, 21(6): 566-571.
- [16] PRAGER R W, GEE A H, TREECE G M, et al. Sensorless Freehand 3-D ultrasound using regression of the echo intensity[J]. *Ultrasound Med Biol*, 2003, 29(3): 437-446.
- [16] LAPORTE C, ARBEL T. Learning to estimate out-of-plane motion in ultrasound imagery of real tissue [J]. *Med Image Anal*, 2011, 15(2): 202-213.

(编辑:陈丽霞)