

文章编号 1004-924X(2008)11-2290-06

小波图像融合改善超声图像分辨率

戴光智¹, 陈铁群², 薛家祥², 刘桂雄²

(1. 深圳职业技术学院, 广东 深圳 518055; 2. 华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广东 广州 510641)

摘要: 针对超声图像分辨率较低, 尤其是横向分辨率低的特点, 采用基于插值和小波图像融合相结合的方法对相控阵超声图像进行了多种方式的对比试验。结果表明: 采用区域能量大小判定的设计思想改善超声图像的分辨率是可行的, 其中利用小波分解将经过插值放大的待融合图像分解为低频部分和高频部分, 然后对低频部分采用平均法, 高频部分采用区域能量最大的融合方式, 由此, 极大地改善了超声图像的分辨率。

关键词: 图像融合; 超声成像; 图像空间分辨率; 超分辨率; 小波变换

中图分类号: TH878; TP391.4 **文献标识码:** A

Improvement of resolution for ultrasonic image based on wavelet image fusion

DAI Guang-zhi^{1,2}, CHEN Tie-qun², XUE Jia-xiang², LIU Gui-xiong

(1. *Shenzhen Polytechnic Institute, Shenzhen 518055, China*; 2. *College of Mechanical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China*)

Abstract: Several kinds of experiments by proposed methods is carried out based on combining interpolation and wavelet image fusion to improve the resolution of ultrasonic images, especially for transverse resolution. The experimental results show that it is feasible for improving the resolution of ultrasound image to determine image by comparing the region energy. The wavelet decomposition is used to decompose the interpolated images to the low frequency part and the high frequency part, then, the low frequency part is processed with the method of average, and the high frequency part with the fusion method of the largest region energy, which obtains better effect on improving the resolution of ultrasonic images.

Key words: image fusion; ultrasonic imaging; image spatial resolution; super resolution; wavelet transformation

收稿日期: 2008-02-21; 修订日期: 2008-04-03.

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目(No. 07006479); 广东省重点攻关项目(No. 2006B12401001)

1 引 言

超声成像技术在现代无损检测技术中是一种令人瞩目的新技术。目前,超声成像存在的主要问题是分辨率较低,而超声图像的空间分辨率,包括横向和纵向分辨率,是超声图像质量评价的一项关键性指标^[1],直接决定着超声图像的应用价值。

超声图像不清晰,主要是由于横向分辨率不高,研究改善超声检测横向分辨率以提高缺陷检测精度的方法主要有两种^[2]:一是改进和更新硬件(如采用超声聚焦、电子聚焦、变孔径技术、连续焦点图像技术等方法来提高换能器的指向性),提高系统理论分辨率;二是利用数据软处理方法,提高算法精度。由于改进和更新硬件所需周期长,成本高,且受限于技术发展,因此,利用数据软处理技术提高分辨率显得尤为重要。

目前采用数据软处理改善超声检测横向分辨率的方法还比较少,文献[2-3]中和文献[4]中分别介绍了采用图像复原的方法和维纳滤波解卷的办法提高超声图像的横向分辨率。采用图像融合提高图像分辨率常见于遥感图像处理^[5-6],对于超声图像的研究目前还很少。

针对超声图像的应用特点,本文采用基于插值和小波变换的图像融合方法来改善横向分辨率,低频部分采用平均法,高频部分采用区域能量最大的融合方式,并通过多个指标对融合图像进行评价,比较优劣。实验结果表明,该方法对改善超声图像的分辨率有显著的效果。

2 提高分辨率图像融合原理解析

图像融合是以图像为研究对象的数据融合,是将同一场景的两个或多个原图像进行空间配准,然后采用一定融合算法将各图的优点或互补性有机结合起来,获得此场景更为准确、更为全面、更为可靠的图像描述。提高分辨率也是图像融合的一个重要目的^[7]。

高分辨率图像生成技术主要是将具有相似而又不同却又具有信息互补的配准图像融合到一起,得到非均匀采样的较高分辨率数据。高分辨率图像重建的基本问题是一个融合问题,通过多幅图像产生一幅融合后的图像,这一过程被认为是

静态图像重建问题。从理论上讲,如果只有一幅低分辨率的图像的信息,要精确地获得高分辨率图像是不可能的,因为人们无法恢复因低采样率而丢失的高频信息。常用的图像放大方法多采用帧内插值,传统的双线性插值、三次样条插值等方法,都因存在上述问题而不能真正地提高分辨率。如果已经得到了同一场景下的一组观测图像,并已知成像参数,如何估计出真实场景的可能分布形式一直是人们关注的问题(这里的真实场景用更高分辨率的栅阵来描述)。如果观测图像之间存在较小的、随机的相对位移,而且图像足够丰富,可以认为这一组图像从整体上记录了更高分辨率图像的信息。这些图像之间的信息是冗余的,又是互补的,如图 1 所示。因此,基于序列图像来提高图像分辨率本质上也是一种图像数据的融合问题,在数据融合的处理体系中,属于像素级融合范畴^[8]。

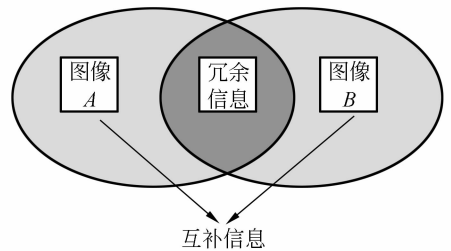


图 1 图像融合的优点

Fig. 1 Advantages of image fusion

3 基于小波变换的图像融合

3.1 融合流程

小波变换兴起于 20 世纪 80 年代中期,由于其具有良好的时域和频域局部性以及多分辨率性,目前已成为图像融合领域的一种重要的工具。基于小波变换的图像融合流程如图 2 所示。

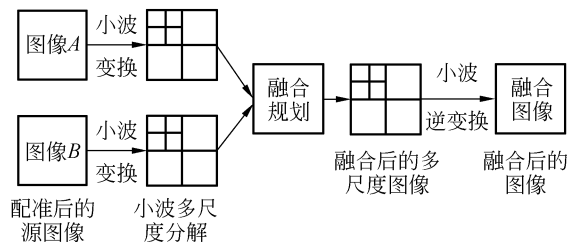


图 2 基于小波分解的图像融合流程图

Fig. 2 Flowchart of image fusion algorithm based on wavelet transform

3.2 融合规则的选择

融合规则对于融合的质量至关重要,也是图像融合中至今没有解决好的难点之一,主要包括低频子带的融合规则和高频子带的融合规则,前者比较简单,这里主要介绍后者。

通过小波分解得到的 3 个高频子带都包含了一些在零附近的变换值,在这些子带中,较大的变换值对应着亮度急剧变化的点,也就是图像中的显著特征,如边缘,亮线及区域轮廓。这些细节信息,也反映了局部的视觉细节对比度,进行特殊的选择,是融合的重点。

常用的高频子带融合规则分为两类:基于像素的融合规则和基于区域的融合规则。前者只考虑单个小波变换系数的融合,并且要求源图是经过严格对准处理的,具有一定的片面性;而后者在融合过程中还考虑附近的小波系数对该小波变换系数的影响,即邻近像素点间小波变换系数的相关性,其融合效果相对要好得多。对于基于区域能量的融合规则,其融合算子定义如下:

图像 G 中以 (n, m) 为中心的任一区域,其区域能量 E 定义为^[9]

$$E = \sum_{(m,n) \in w} G^2(n, m), \quad (1)$$

式中, w 是像素 (n, m) 的邻域窗口,窗口尺寸一般为奇数,如 3×3 或 5×5 。 $G(n, m)$ 为图像 G 在像素 (n, m) 处的灰度值。

4 提高分辨率图像融合方法

4.1 融合机理

基于小波变换和能量融合的思想是:待融合图像经小波分解后,信号的能量不变,而分布发生了比较大的变化,低频部分能量占的比例较大,而目标清晰和模糊的特征却主要体现在高频部分中。对分解后的高频成分,以计算图像相应像素邻域内的能量大小作为清晰目标和模糊目标的判断依据,选取区域能量大的像素值作为融合后的图像像素值;对于低频分量,可采用像素取小、取大、均值或以适当比例减少的方式。

4.2 融合算法设计和选择

根据小波区域能量融合的思想,设计了两种不同的融合算法,分别称为方法 1 和方法 2。假设参与融合的图像和融合后的图像分别为 A' , B' 和 F 。

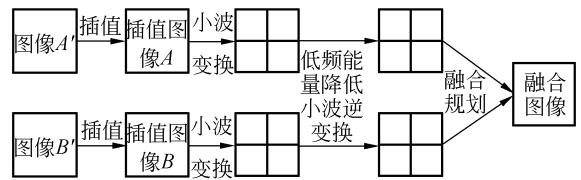


图 3 方法 1 的融合流程图

Fig. 3 Flowchart of image fusion by the first method

方法 1 是通过适当地减少低频子图像比例得到高低频比例的方法来升高图像的融合,融合流程如图 3 所示。假设将低频子图像削弱为原来的 $1/R$, 则其融合步骤如下:

(1) 将图像 A' , B' 分别进行图像插值, 得到插值图像 A, B ;

(2) 将图像 A, B 做一级小波分解, 得到低频系数 C_A, C_B 和高频系数 H_A, H_B ;

(3) 将每个分解得到的低频系数乘以 $1/R$, 然后 $C_A/R, C_B/R$ 再和高频系数 H_A, H_B 一起重构, 得到减少了低频比例的新图像 A_1, B_1 。

(4) 设图像 A_1, B_1 中像素 (x, y) 处的区域能量分别为 E_{A1} 和 E_{B1} , 对于图像中每一个像素, 逐个计算其区域能量, 则融合清晰图像 F 为:

$$F(x, y) = \begin{cases} A_1(x, y), E_{A1} \geq E_{B1} (\text{清晰目标在 } A_1 \text{ 中}) \\ B_1(x, y), E_{A1} < E_{B1} (\text{清晰目标在 } B_1 \text{ 中}) \end{cases} \quad (2)$$

方法 2 是采用高频子带区域能量最大的融合方法, 融合流程如图 4 所示。其融合步骤如下:

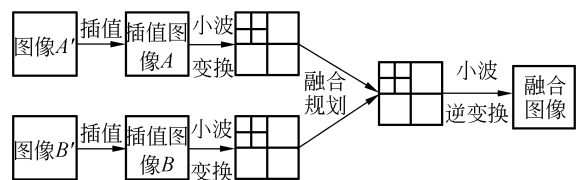


图 4 方法 2 的融合流程图

Fig. 4 Flowchart of image fusion by the second method

(1) 同方法 1 中步骤(1);

(2) 将图像 A, B 多尺度小波分解, 得到不同尺度的低频分量和高频分量;

(3) 获取低频带小波系数: 采用平均算子, 像素取大或取小的融合方式处理获得;

(4) 获取高频带小波系数: 采用区域能量取大

融合方法处理获得,该方法用 $M \times N$ 的窗口对图像进行求能量运算,计算结果作为与窗口中心像素对应的一种度量方法,中心像素的选择方法为:选择区域能量大的那幅图像的中心像素的值作为融合图像的对应像素值。具体过程如下:

(1)确定窗口尺寸,一般选择 M, N 为奇数,常有 3×3 或 5×5 ;

(2)分别计算各高频子带的区域能量;

(3)按下列准则确定融合后的高频子带数据:

$$F^K(x, y) = \begin{cases} A^K(x, y), & E(A) > E(B) \\ B^K(x, y), & \text{其他} \end{cases}, \quad (3)$$

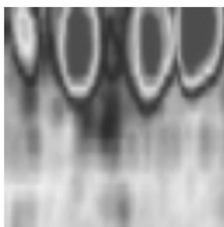
式中, $F^K(x, y)$ 表示在点 (x, y) 的融合值; A^K 表示图像 A 在第 K 个高频子带像素点 (x, y) 的值; B^K 表示图像 B 在第 K 个高频子带像素点 (x, y) 的值; $K=1, 2, 3$ 分别对应 LH, HL, HH 3 个子带; $E(A)$ 和 $E(B)$ 表示图像 A, B 中像素 (x, y) 处窗口大小为 $M \times N$ 的区域能量,计算公式如下:

$$\begin{cases} E(A) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [A^K(x+i, y+j)]^2 \\ E(B) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [B^K(x+i, y+j)]^2 \end{cases}. \quad (4)$$

(5)对得到的高频带和低频带小波系数进行小波逆变换,即可得到融合后的图像。

5 试验结果分析

试验是在 Matlab 平台上完成的,试验图像是采用加拿大 RD/TECH 公司 Omniscan 超声相控阵探伤仪对接焊缝扫描获得的超声图像,如图 5(a)所示,图中类似椭圆形部分是 C-扫描显示的未焊透缺陷。其降采样图像如图 5(b)和 5(c)所示,其中图 5(c)与图 5(b)在 x, y 方向上的相对位移都为 $+0.5$ pixel。



(a)原图像(64×64)

(a)Original image(64×64)



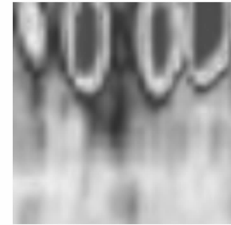
(b)降采样图像一(32×32) (c)降采样图像二(32×32)

(b)Desampling image 1 (c)Desampling image 2

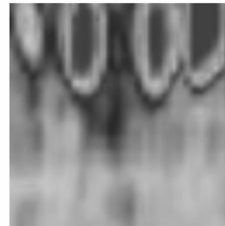
(32×32) (32×32)

图 5 原图像及其降采样图像

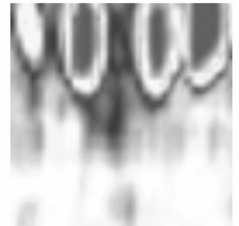
Fig. 5 Original image and its desampling images



(a) $R=1.0$



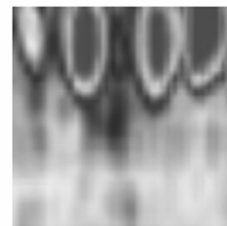
(b) $R=1.2$



(c) $R=0.8$

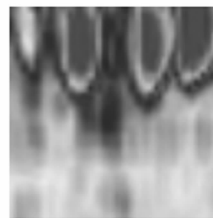
图 6 方法 1 融合后的图像(64×64)

Fig. 6 Images after fusion by the first method (64×64)



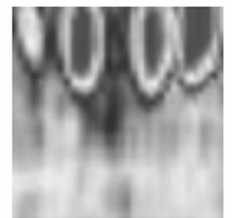
(a)低频取均值

(a)Low frequency processed with the average value



(b)低频取小

(b)Low frequency processed with the minimum value



(c)低频取大

(c)Low frequency processed with the maximum value

图 7 方法 2 融合后的图像(64×64)

Fig. 7 Images after fusion by the second method (64×64)

在试验中,对图 5(b)和图 5(c)采用双立方插值放大 2 倍,窗口大小都为 3×3 ,小波变换也采用一级小波分解。图 5(b)和图 5(c)经方法 1,2 处理后的融合结果分别如图 6 和图 7 所示。

从主观评价(目视效果)看,图 6(a),图 7(a)分别比图 6(b),图 6(c)和图 7(b),图 7(c)好,方法 2 比方法 1 好。

除了主观评价外,还可进行客观评价。融合质量用信息熵(H)、均方误差(MSE)、峰值信噪比(PSNR)和光谱扭曲度(D)度量,计算结果分别如表 1 和表 2 所示,其中 PSNR 是转化为灰度图像后的计算结果。

表 1 方法 1 融合的质量参数

Tab. 1 Quality parameters fused by the first method

R 值	信息熵 H	均方误差 MSE	光谱扭曲度 D	峰值信噪比 PSNR
0.8	0.019 7	1.137 3	41.503 9	47.572 1
1.0	0.023 3	10.767 1	11.909 9	37.809 8
1.2	0.032 3	181.135 7	20.920 7	25.550 8

表 2 方法 2 融合的质量参数

Tab. 2 Quality parameters fused by the second method

低频 子带	信息熵 H	均方误差 MSE	光谱扭曲度 D	峰值信噪比 PSNR
取小	0.090 4	78.561 4	12.566 9	29.178 7
均值	0.032 9	31.158 4	8.683 8	33.195 0
取大	$-3.330 7 \times 10^{-16}$	24.338 1	12.621 6	34.267 9

从表 1 和表 2 的客观评价测度值对比可以看出,图 7(a)的融合结果较好地保留了原始图像的数据,比方法 1 和其它情况都好。

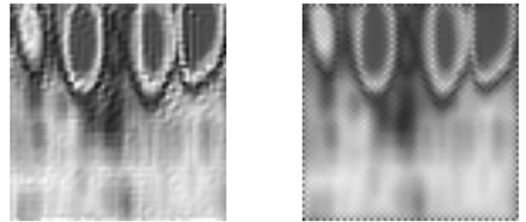
为了获得对比实验效果,对图 5(b)和图 5(c)采用了典型超分辨率图像重建算法:凸集投影(PCOS)法^[10]和迭代反投影(IBP)^[11]法处理,处理结果如图 8 所示,重建图像的各项参数如表 3 所示。

表 3 超分辨率法重建的质量参数

Tab. 3 Quality parameters reconstructed by super resolution method

超分辨 率方法	信息熵 H	均方误差 MSE	光谱扭曲度 D	峰值信噪比 PSNR
IBP	0.202 6	55.230 4	12.752 0	30.709 0
POCS	0.064 2	50.679 4	10.993 7	31.082 5

从图 7(a)和图 8(a),8(b)的对比来看,在主观评价上,图 7(a)介于图 8(c)和图 8(b)之间;在客观评价上,图 7(a)的均方误差和光谱扭曲度最小,同时峰值信噪比却最大,说明图 7(a)较好地保留了原图像的有用信息。由于采用一级小波分解,而图像第二级高频能量经常比第一级高频能量高得多,导致其信息熵比后两者小,这一点可通过多尺度小波分解得到改善。



(a)迭代反投影

(b)凸集投影

(a)IBP

(b)POCS

图 8 超分辨率重建图像(64×64)

Fig. 8 Super resolution reconstruction images (64×64)

6 结 论

(1)采用基于插值和小波图像融合的方法对改善超声图像的分辨率具有明显的效果,对现有超声成像设备的升级换代具有参考价值。

(2)对于超声图像,提取图像小波高频分量的特征信息,如像素邻域内的能量大小,来判定清晰目标或模糊目标设计融合算法具有可行性。

(3)融合图像的高低频比例直接影响融合图像的质量,随着低频比例的增大,融合图像的 H 值和 MSE 值逐渐减小,而 PSNR 值逐渐增大,也就是说融合图像的信息量和均方误差逐渐减少,而去噪效果却逐渐增加。但是比例偏大或偏小都会使 D 值增大,也就是说使融合图像与原始图像

在光谱信息上的差异增大。

(4)对待融合图像进行一维小波分解,计算待融合图像高频成分的区域能量,选取区域能量大

的图像的像素值作为融合后的图像像素值。对于图像低频分量则直接选取区域均值进行融合处理。

参考文献:

- [1] DAI G Z, CHEN T Q, XUE J X. Research on image resolution in ultrasonic imaging inspection of welding defect [C]. 8 th *International Conference on Electronic Measurement and Instruments (ICEMI)*, 2007(2):965-968.
- [2] 王丹. 超声图像的复原处理与研究[D]. 重庆:重庆大学, 2006.
WANG D. *Process and study on restoration of ultrasonic image* [D]. Chongqing:Chongqing University, 2006. (in Chinese)
- [3] 陈德军. 图像复原技术及应用研究[D]. 重庆:重庆大学, 2005.
CHEN D J. *Technology of image restoration and application* [D]. Chongqing:Chongqing University, 2005. (in Chinese)
- [4] 程建政. 超声检测图像分辨率的维纳滤波去卷积研究[J]. 无损检测, 2004, 26(5):221-224.
CHEN J ZH. Wiener filtering deconvolution for the improvement of lateral resolution of ultrasonic C-scan images [J]. *NDT*, 2004, 26(5):221-224. (in Chinese)
- [5] 林世毅, 苏广川, 陈东, 等. 基于图像融合提高图像空间分辨率技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2003, 24(4):494-495.
LIN SH Y, SU G CH, CHEN D, *et al.*. Research on improving the spatial resolution of the images based on image fusion technology [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2003, 24(4):494-495. (in Chinese)
- [6] 陈豪, 俞能海, 刘政凯, 等. 面向提高图像分辨率的遥感数据融合新算法[J]. 软件学报, 2001, 12(10):1534-1539.
CHEN H, YU N H, LIU ZH K, *et al.*. A new data fusion algorithm for improving remote sensing images resolution[J]. *Journal of Software*, 2001, 12(10):1534-1539. (in Chinese)
- [7] GANG H, YUN ZH. High resolution image fusion based on wavelet and IHS transformations[C]. *Remote Sensing and Data Fusion over Urban Areas*, 2003:99-104.
- [8] 曹聚亮. 图像超分辨率处理、成像及其相关技术研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2004.
CAO J L. *Research on image superresolution processing, superresolution graduate university of imaging and their correlative technologies* [D]. Changsha:National University of Defense Technology, 2004. (in Chinese)
- [9] 孙辉. 基于小波变换的图像数据融合方法[J]. 光学 精密工程, 2000, 8(6):551-553.
SUN H. Data fusion for image based on wavelet transforms [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 8(6):551-553. (in Chinese)
- [10] IRANI M, PELEG S. Improving resolution by image registration[C]. *Graphical Models and Image Proc.*, 1991, 53:231-239.
- [11] PATTI A J, ALTUNBASAK Y. Artifact reduction for set theoretic super resolution image reconstruction with edge adaptive constraints and higher-order interpolants[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2001, 10(1): 179-186.

作者简介:戴光智(1974—),男,博士,讲师,主要从事焊缝超声无损检测以及信号处理等方面的研究。E-mail: daizhi-1@163.com

陈铁群(1946—),男,教授、博士生导师,主要从事无损检测及仪器方面的研究。E-mail: tqchen@scut.edu.cn