

文章编号: 2095-2163(2023)04-0117-05

中图分类号: TP391.4

文献标志码: A

基于 SCKF-BM3D 算法的超声相控阵图像优化模型

王狄颀, 邹宸玮

(上海工程技术大学 航空运输学院, 上海 201620)

摘要: 为实现现代工业大数据化和自动化,应该先解决超声相控阵图像信息缺失和散斑噪声问题。对此本文提出一种基于 SCKF-BM3D 算法的超声相控阵图像优化模型。该优化模型通过自定义的异型卷积核滤波器解决了传统滤波卷积核应用在超声相控阵图像上效果不显著的问题,同时面对由于滤波而放大的散斑噪声采用 BM3D 算法进行去噪。结合二者优点建立了适用于分辨率低、像素颗粒大、存在信息缺失的超声相控阵图像的优化模型。当缺少超声相控阵图像的标准数据时,一系列无参考评价指标(图像熵、Vollaths 函数)也证明模型具有良好的性能。实验表明,与传统的去噪方法相比,本文提出的优化模型不仅在去噪效果上有一定提升,更补全了图像由于各种硬件问题和环境引起的缺失信息。

关键词: 超声相控阵; 异型卷积核滤波; BM3D; 无参考评价

Ultrasonic phased array image optimization model based on SCKF-BM3D algorithm

WANG Diyang, ZOU Chenwei

(School of Air Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

[Abstract] In order to realize the big data and automation of modern industry, the problems of lack of information and speckle noise in ultrasonic phased array images should be emphatically solved. This paper proposes an ultrasonic phased array image optimization model based on SCKF-BM3D algorithm. The optimization model solves the problem that the traditional filtering convolution kernel is not effective in ultrasonic phased array images through the customized special-shaped convolution kernel filter. At the same time, the BM3D algorithm is used to remove the speckle noise amplified by filtering. Combining the advantages of the two, an optimized model for ultrasonic phased array images with low resolution, large pixel particles and lack of information is established. A series of unreferenced evaluation metrics (image entropy, Vollaths function) also demonstrate the good performance of the model when the standard data of ultrasound phased array images are lacking. Experiments show that, compared with the traditional denoising method, the optimization model proposed in this paper not only improves the denoising effect to a certain extent, but also completes the missing information of the image due to various hardware problems and environments.

[Key words] ultrasonic phased array; special-shaped convolution kernel filter; BM3D; no reference evaluation

0 引言

医学超声成像技术具有无损性、价格低、安全性高和实时成像等优点,而在工业领域,与其他检测方法相比,超声检测的这些优势同样得到了充分体现^[1-2]。超声相控阵因其灵活的声束形成以及快速成像性能,近年来得到了越来越多的关注。为了能在无损的条件下,对工件进行检测并且对损伤特征进行准确的判断,获得一张轮廓清晰的超声相控阵图像就显得尤为重要,与此同时,也为后续有关超声图像大

数据集建立、人工智能识别损伤提供数据支持。

传统图像优化关注度最高的点就是去噪,超声图像也不例外。研究可知,超声图像的噪声多为散斑噪声,也是乘性噪声。最近几年,已然陆续推出许多算法用于各种图像降噪,其中大多数应对散斑噪声的降噪算法可分为基于变换域和基于空间域降噪方法^[3]。空间域降噪算法直接用于图像,文献^[4]结合各向异性扩散和斑点噪声的特点提出了散斑减少各向异性扩散滤波器(SRAD),该方法虽然能够有效地去除图像中的散斑噪声,但是会破坏超声图

基金项目: 国家自然科学基金(62171271)。

作者简介: 王狄颀(1998-),男,硕士研究生,主要研究方向:图像处理、图像识别; 邹宸玮(1996-),男,硕士研究生,主要研究方向:图像处理、图像识别。

收稿日期: 2022-05-17

像的一些重要边缘信息。文献[5]在去除图像噪点的同时,为了保护人们所感兴趣的区域,提出了一种对像素周围点求和平均后替换中心像素值的算法,但是该算法只适用于人像等分辨率高、画质细腻的对象,与超声图像的特征不符合。文献[6]提出了一种基于旋转块的BM3D图像去噪研究,该算法在均匀图像区域具有良好的去噪效果,但是还是存在相似块匹配误差大而导致的细节模糊问题。空间域的算法虽然时间短、复杂度低,但是会造成图像丢失较小的信号。而基于变换域的算法利用图像在变换域的特性来降低噪声,文献[7]结合自适应阈值和小波变换,提出了基于小波变换的自适应阈值图像去噪技术,该方法得到的图像信噪比和峰值信噪比较大,但是对超声图像这类边缘像素颗粒较大的特例,还是会有缺失信息的情况。变换域能够有效提取大部分图像边缘信息,但是会在平滑处以及背景中留下较多噪声。

以上均是对噪声优化问题的一些研究,但是一些精度低,分辨率不高的超声设备,还会遇到信息缺失的情况。前述的这类问题,国内外探讨较少,在成本有限的情况下,如何利用技术手段弥补信息缺失将成为一个热点话题。

因为本文实验得到的超声相控阵图像多为像素颗粒较大、分辨率不高、内部存在像素缺失的图像,故本文只针对超声相控阵图像提出一种能保留特征重要信息、又可以减少背景噪声的SCKF-BM3D算法。先在空间域中通过异型卷积核滤波操作得到想要的特征信息,减少粗像素颗粒的干扰,再采用BM3D算法过滤背景噪声加强细节信息,为后续的深度数据集制作建立基础。

1 超声相控阵检测实验

1.1 超声相控阵换能器

超声相控阵探头是将数个单独的能产生压电效应的晶片按照一定的排列方式组合成一个阵列,如图1所示。通过控制能产生压电效应晶片的激励顺序及延时,来实现声束的偏转以及聚焦^[8]。

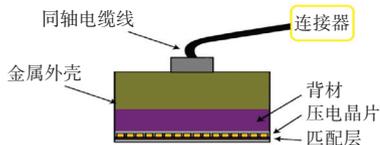


图1 相控阵探头的基本结构

Fig. 1 The basic structure of the phased array probe

工业相控阵探头有很多种类,其分类的主要依

据是换能器(晶片)阵列结构。其中可分为线阵、圆阵和异型阵等,如图2所示。常用的频率可选范围:0.5~20 MHz,阵元数可选范围:4~1024阵元。随着晶片数量的增多,超声波聚焦能力会增强,线扫检测覆盖区域也会扩大,对仪器硬件通道数要求更高,探头和仪器的成本也会增加。

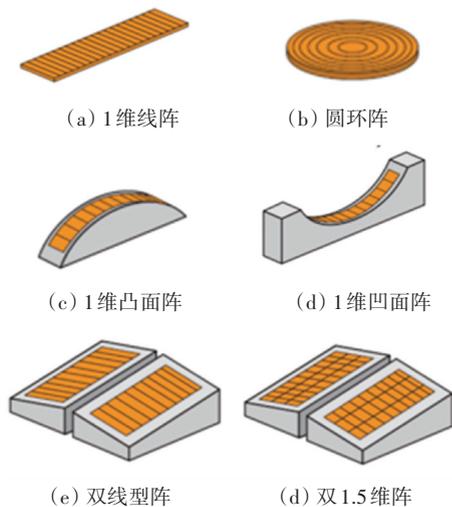


图2 各种相控阵换能器

Fig. 2 A variety of phased array transducer

1.2 超声相控阵检测特点

超声相控阵是基于惠更斯-菲涅耳原理,由各个独立阵元发出的超声波经过干涉形成预期的声束。用固定频率的脉冲激发每一个阵元工作,并对各个阵元按照设定的时序激发,于是各阵元的发射声波产生了相位差,从而影响干涉结果,即可以形成偏转及聚焦声束,如图3所示。各阵元的激发延时一般被称为聚焦法则或延时法则^[9]。

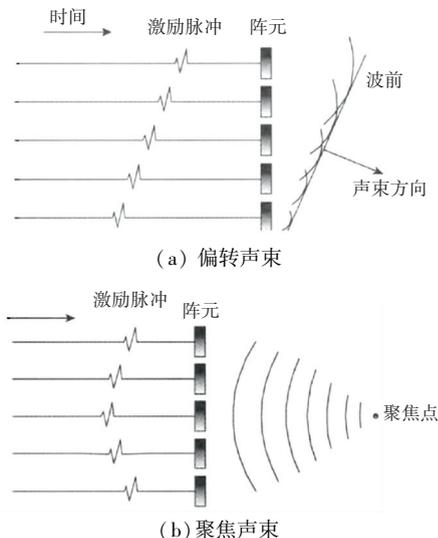


图3 超声相控阵偏转及聚焦声束的形成

Fig. 3 The formations of steering and focusing beams by ultrasonic phased array

1.3 实验硬件和方法介绍

本文实验环境为 Python3.7, 选用 CPU 为 AMD 5800X 处理器, 内存为 32 GB, Windows 10 操作系统。本文实验所使用的超声相控阵仪器为 GE(通用电气)的 Phasor XS。所用探头的相关参数见表 1。

表 1 115-500-043 型相控阵探头参数列表
Tab. 1 115-500-043 probe parameters list

指标	参数
晶振频率/MHz	1.0
阵元数/个	64
阵列宽度/mm	16
晶片间距/mm	2.0
阵元结构	线阵
扫查模式	A 扫描、B 扫描、扇扫描
接收信号模式	单发单收(无法同时接收)

由于需要采集的是图像样本, 所以本文实验均采用超声相控阵扫查方式中的 B 扫描模式。扫描对象为 3D 打印的塑料件, 如图 4(a) 所示, 因为其体积较小且表面并非平面, 无法直接对其进行接触式扫描, 故本文实验采取水浸法扫描, 如图 4(b) 所示。

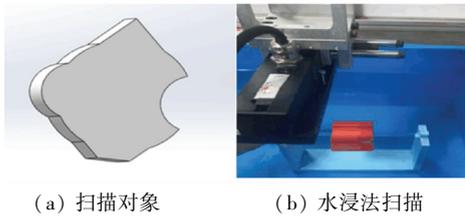


图 4 扫描对象与方法

Fig. 4 The object and the method of scanning

1.4 超声相控阵图像噪声和退化分析

由于超声成像是一种相干成像的过程, 利用水浸法扫查时可以把整个环境(水和扫描对象)看作是散射体的集合, 多个散射体占据一个分辨率, 这些散射体会以随机相位和振幅散射小波, 引发回波信号的随机波动, 从而形成散斑噪声^[10], 如图 5 红色圆圈部分所示。另一方面, 因为超声成像同样满足投影原理, 上表面的信息远比下表面多, 这就会导致尽管对象为一个实心物件, 在扫查时, 还是会出现内部的信息不足和像素的丢失, 如图 5 黑色方框部分所示。

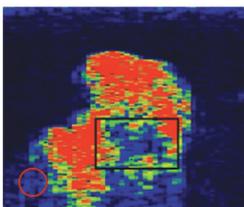


图 5 凹槽部分超声图像

Fig. 5 Ultrasound images of groove part

2 算法总体设计

根据上述超声相控阵图像的问题, 提出一种改进的图像降噪模型, 模型流程如 6 所示。首先, 对原始超声相控阵图像进行通道提取, 由于其是标准的 RGB 图像, 并且红色代表能量最大部分、即有效区域, 所以先提取 R 通道。然后, 图像会由于较弱的能量部分被提出, 在原有的基础上还会增加一部分信息缺失, 故在此采用本文中自行设计的异型卷积核(Shaped Convolution Kernel Filtering, SCKF)对图像进行平滑、掩膜操作, 如此处理的主要目的并不是为了降噪, 而是为了补全原来实心的区域、或者使开放区域变小, 让其与特征区分明显。随后的 BM3D 是为了去除剩余的散斑噪声和背景噪声。由于缺失部分得到了一定程度的修补, 同时原来的噪声也得到放大, 此时采用 BM3D 对图像进行降噪, 就得到了优化降噪后的图像。

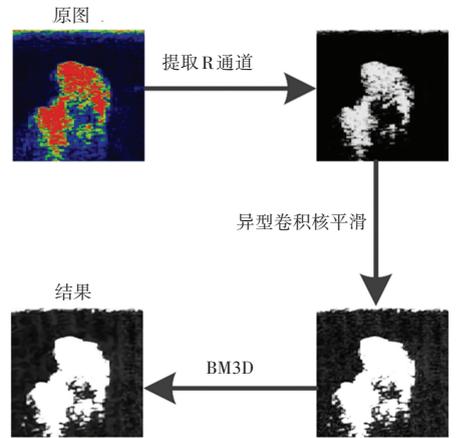


图 6 算法模型流程图

Fig. 6 Flow chart of the algorithm model

2.1 BM3D

BM3D 是基于块匹配的 3D 协同滤波, 算法的中心思想是充分利用自然图像中丰富的自相似结构来进行图像降噪。可分为 2 个阶段, 分别是基础估计和最终估计。每一个阶段又拆分为三小步, 分别是块匹配、协同滤波和聚集。

块匹配是寻找与给定参考块相似部分的过程。两者的相似性通常用块间距离表示, 数学公式具体如下:

$$d^{noise}(Z_{xR}, Z_x) = \frac{Z_{xR} - Z_x^2}{(N_1^{ht})^2} \quad (1)$$

其中, xR 和 x 分别表示 2 个图像块左上角的坐标, N_1^{ht} 是图像块的大小。

因为噪声会影响匹配结果,要先对图像进行粗去噪,此时的相似度、也就是块间距离,数学计算公式见下式:

$$d(X_{xR}, Z_x) = \frac{\| \gamma'(T_{2D}^{ht}(Z_{xR})) - \gamma'(T_{2D}^{ht}(Z_x)) \|_2^2}{(N_1^{ht})^2} \quad (2)$$

经过了粗去噪,也就是二维线性变换和硬阈值滤波操作之后,所有相似图像块集合由公式(3)求得:

$$S_{xR}^{ht} = \{x \in \Omega; d(Z_{xR}, Z_x) \leq \tau_{match}^{ht}\} \quad (3)$$

其中, τ_{match}^{ht} 是之前求得的相似块最大相似度。这些相似块与参照块组合成为一个三维矩阵,记作 S_{xR}^{ht} 。对三维矩阵进行硬阈值滤波操作,然后进行逆三维变换。由于相似块中的像素点也会由于硬阈值滤波产生多个估计值,为了解决这种情况,需要赋予一个权重,由式(4)来计算:

$$w_{xR}^{ht} = \begin{cases} \frac{1}{\sigma^2 N_{har}^{xR}} & N_{har}^{xR} \geq 1 \\ 1 & \text{else} \end{cases} \quad (4)$$

其中, σ^2 是噪声方差, N_{har}^{xR} 是非空的元素个数。

到这里,基础估计阶段的估计图像就可以用式(5)聚集,也就是加权平均计算得到:

$$\hat{y}^{basic}(x) = \frac{\sum_{xR \in \Omega_{x_m} \in S_{xR}^{ht}} w_{xR}^{ht} \hat{Y}_{x_m}^{ht, xR}(x)}{\sum_{xR \in \Omega_{x_m} \in S_{xR}^{ht}} w_{xR}^{ht} x_{x_m}(x)} \quad (5)$$

经过这一阶段处理后,大部分的噪声已经去除完毕,此时不再需要硬阈值滤波,而采用维纳滤波,如式(6)所示:

$$\hat{Y}_{xR}^{wie} = T_{3D}^{wie-1}(W_{xR} T_{3D}^{wie}(F_{xR}^{wie})) \quad (6)$$

再一次使用加权平均,求得最终估计的结果为:

$$\hat{y}^{final}(x) = \frac{\sum_{xR \in \Omega_{x_m} \in S_{xR}^{wie}} w_{xR}^{wie} \hat{Y}_{x_m}^{wie, xR}(x)}{\sum_{xR \in \Omega_{x_m} \in S_{xR}^{wie}} w_{xR}^{wie} x_{x_m}(x)} \quad (7)$$

2.2 异型卷积核

异型卷积核实际上就是采用非常规卷积核形状来对数字图像进行平滑滤波,其本质上也属于一种在空间域进行低频增强的空间技术。由于测试工件的材料和超声信号在水中的传播的影响,会造成信号不连续和缺失的情况。

其基本设计思路与普通卷积核思路相同,在本文中采用窗口大小为 5×5 的有效数字区域为十字型的卷积核,区别如图7所示。图7中, a 为0到1之间的随机数。

1	1	1	1	1
1	2	2	2	1
1	2	3	2	1
1	2	2	2	1
1	1	1	1	1

0	0	a	0	0
0	a	a	a	0
a	a	a	a	a
0	a	a	a	0
0	0	a	0	0

(a) 常规卷积核

(b) 异型卷积核

图7 卷积核之间的区别

Fig. 7 The difference between convolution kernels

超声相控阵图像平滑滤波后的效果图,如图8所示。



(a) 原始图像

(b) 5×5 卷积平滑后

(c) 本文卷积核平

滑后的图像

滑后的图像

图8 原图与滤波后的效果图

Fig. 8 The original image and filtered image

这里,图8(a)为原始图像,图8(b)为普通 5×5 卷积平滑后的图像,图8(c)为本文卷积核平滑后的图像。

3 实验与分析

3.1 无参考图像质量评价指标

由于超声相控阵的标准图像较少,并且各个机器的参数与精度不同也会导致图像之间有明显差异,所以用参考图像质量评价指标难以衡量该算法处理之后的超声图像。而超声相控阵图像的评价也并不只是简单地只针对清晰度的判断,还应该包括信息完整度。本文选取了现在较为流行的2种无参考图像质量评价指标,即:图像熵与 Vollaths 函数。

(1) 图像熵。是指图像的平均信息量,是从信息论的角度衡量图像中信息的多少,图像中的信息熵越大,说明图像包含的信息越多。假设图像中各个像素点的灰度值之间是相互独立的,图像的灰度分布为 $p = \{p_1, p_2, \dots, p_i, \dots, p_n\}$, 其中 p_i 表示灰度值为 i 的像素个数与图像总像素个数之比,而 n 为灰度级总数^[11],其计算公式为:

$$E = - \sum_{i=0}^n P(i) \log_2 P(i) \quad (8)$$

其中, $P(i)$ 表示某个像素值 i 在图像中出现的概率, n 表示灰度值范围(一般为 $0 \sim 255$)。图像的信息熵 E 值越大,则图像中偏离图像直方图高峰灰度区的大小越大,所有灰度值出现的机率趋于相等,

图像携带的信息量越大,信息越丰富。

(2) Vollahts 函数,又称自相关函数。反映空间两点的相似性。正焦图像边缘清晰锐利,像素点之间相关程度低;离焦图像像素点相关程度高^[12]。清晰度评价函数的数学定义公式为:

$$F = \sum_{x=1}^{M-2} \sum_{y=1}^N f(x,y) |f(x+1,y) - f(x+2,y)| \quad (9)$$

3.2 实验数据结果分析

本文分别采取了 5×5 均值滤波(MF)、离散小波变换(DWT)、异型卷积核滤波(SCKF)以及 SCKF-BM3D 算法对原图进行优化,得到的图像熵和 Vollahts 函数值见表 2。

表 2 优化数据指标对比

Tab. 2 Optimization data index contrast

对象	图像熵	Vollaht 函数/10 ⁸
未处理	5.221 38	7.773 4
5×5 MF	5.067 80	7.530 8
DWT	5.165 20	7.143 9
SCK	5.305 30	12.798 0
SCKF-BM3D	5.578 50	16.245 0

由表 2 可以得出,原始超声相控阵图像经过均值滤波和离散小波变换后图像熵数值减少,表面信息丢失,同时噪声被放大。而原图经过了本文设计的卷积核滤波后,信息恢复,并且散斑噪声得到明显抑制,清晰度变高;再一次经过 BM3D 算法处理后,各项指标得到明显提升。

4 结束语

本文针对超声相控阵图像的特点,提出了一种能在补全大部分信息的前提下也能降低散斑噪声的优化模型。先通过提取图像中最显著反映能量信号

的 R 通道图像,再通过自定义的异型卷积核对图像进行平滑,补全信息。以后通过 BM3D 算法对图像进行一次完整的降噪去除散斑噪声以及其他背景噪声。实验结果表明该优化模型应用在超声相控阵图像上具有良好的性能,并且有一定的提升。这项工作对后期的超声相控阵大数据的建立和清洗图像工作有一定的实用价值。

参考文献

- [1] DEEPTHY M A, CHRISTINAL A H, CHANDY D A, et al. Speckle noise suppression in 2D ultrasound kidney images using local pattern based topological derivative[J]. Pattern Recognition Letters, 2020, 131(C): 49-55.
- [2] KAZUYUKI D, BRETT B. A robust method for ultrasound beamforming in the presence of off-axis clutter and sound speed variation[J]. Ultrasonics, 2018, 89.
- [3] 蒲久亮,高小明. 基于 NSST 变换的超声图像降噪算法[J]. 西南科技大学学报, 2022, 37(01): 73-79.
- [4] YU Yongjian, ACTON S T. Speckle reducing anisotropic diffusion [J]. IEEE transactions on image processing: A publication of the IEEE Signal Processing Society, 2002, 11(11): 1260-1270.
- [5] 石炜,全朝. 基于图像去噪的最大均匀平滑法的改进[J]. 计算机技术与发展, 2020, 30(11): 100-103.
- [6] 杨良健,周先春,崔程程,等. 基于旋转块的 BM3D 图像去噪改进算法[J]. 电子测量技术, 2021, 44(22): 108-113.
- [7] 刘光宇,曹禹,冯伟,等. 基于小波变换的自适应阈值图像去噪技术研究[J]. 安徽电子信息职业技术学院学报, 2022, 21(01): 1-5.
- [8] 孙芳. 超声相控阵技术若干关键问题的研究[D]. 天津:天津大学, 2012.
- [9] 靳世久,杨晓霞,陈世利,等. 超声相控阵检测技术的发展及应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(09): 925-934.
- [10] 廖丽丽,张东. 基于卷积神经网络的超声图像散斑去噪算法[J]. 中国医学物理学杂志, 2022, 39(01): 32-37.
- [11] 窦致夏. 双通道快速超声 C 扫描系统的研制及成像增强算法研究[D]. 北京:北京工业大学, 2019.
- [12] 李亚飞. 图像质量评价及其应用研究[D]. 济南:山东师范大学, 2020.
- [12] REN Shaoqing, HE Kaiming, GIRSHICK R, et al. Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2017, 39(6): 1137-1149.
- [13] YI Fangqiu, WEN Hongyu, JIANG Tingting. Asformer: Transformer for action segmentation [J]. arXiv preprint arXiv: 2110.08568, 2021.
- [14] KIM J, CHI S. Action recognition of earthmoving excavators based on sequential pattern analysis of visual features and operation cycles[J]. Automation in Construction, 2019, 104: 255-264.

(上接第 116 页)

- [9] LANGROODI A K, VAHDATIKHAKI F, DOREE A. Activity recognition of construction equipment using fractional random forest[J]. Automation in Construction, 2021, 122: 103465.
- [10] KIM J, CHI S, SEO J. Interaction analysis for vision-based activity identification of earthmoving excavators and dump trucks [J]. Automation in Construction, 2018, 87: 297-308.
- [11] KIM H, AHN C R, ENGELHAUPT D, et al. Application of dynamic time warping to the recognition of mixed equipment activities in cycle time measurement [J]. Automation in Construction, 2018, 87: 225-234.