

文章编号:1000-8055(2010)04-0857-04

航空发动机涡轮叶片工业 CT 图像降噪方法

傅 健¹, 李 斌¹, 肖迎春², 江柏红¹

(1. 北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191;

2. 中国飞机强度研究所 西安 710065)

摘 要: 在分析航空发动机涡轮叶片工业计算机层析成像(computed tomography, CT)图像自相似性特点基础上, 讨论了一种基于图像不同区域相似性的非局部平均降噪算法, 首先采用高斯加权欧式距离算子计算同一图像中不同区域间的相似性, 然后对具有较强相似性的区域进行叠加平均, 从而降低噪声, 同时保持图像边缘的对比度. 针对非局部平均算法计算复杂度高、计算量大的问题, 研究了一种基于傅里叶变换的非局部平均降噪加速算法, 以欧式距离算子替代高斯加权欧式算子提高相似性的计算效率, 减少计算时间. 实验结果表明, 在保证航空发动机涡轮叶片工业 CT 图像降噪效果的情况下, 处理速度提高了 4 倍以上.

关 键 词: 航空发动机涡轮叶片; 图像降噪; 工业 CT (computed tomography); 非局部平均; 傅里叶变换
中图分类号: TP391 **文献标识码:** A

Denoising method for aeronautical engine turbine blade X-ray industrial CT image

FU Jian¹, LI Bin¹, XIAO Ying-chun², JIANG Bai-hong¹

(1. School of Mechanical Engineering and Automation,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;

2. Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China)

Abstract: The similarity between different regions in an X-ray industrial computed tomography (CT) image of aeronautical engine turbine blade has been analyzed. A method called non-local means algorithm based on the similarity has been discussed to improve the industrial CT image contrast. This method adopts the weighted Gaussian Euclidean distance to calculate the similarity between different regions in an image. Then it averages the regions with the similarity. It can decrease the noise in industrial CT images and meanwhile reserve the edge sharpness. However this method has a high computational complexity. So an acceleration algorithm based on Fourier transform for the non-local means algorithm has been researched. The weighted Gaussian Euclidean distance is also replaced by the Euclidean distance to improve the calculation efficiency. The experiment results show that, this algorithm can improve the speed at least four times without affecting the denoising effect.

Key words: aeronautical engine turbine blades; image denoising;
industrial computed tomography; non-local means; Fourier transform

X 射线工业计算机层析成像 (computed tomography, 简称 CT) 是一种先进的非接触式测

收稿日期:2009-03-20; 修订日期:2009-11-01

基金项目:国家自然科学基金(50875013); 航空科学基金(20070951013)

作者简介:傅健(1976-), 男, 四川自贡人, 副教授, 博士, 主要从事多维信息探测、成像和可视化方法研究, 特别是工业 CT、显微 CT、相位衬度成像、中子成像等技术.

试技术,以其射线扫描、重构得到的高分辨率、高对比度图像,可无损地全息再现构件内部微细结构形态、加工缺陷、异常等,正在越来越多地应用于航空、航天等领域产品的无损检测和无损评估,是保障导弹、火箭、飞机发动机叶片等关键零、部件可靠性的重要检测手段^[1]。

航空发动机涡轮叶片实施工业CT成像时,图像质量主要受到三个方面的影响。一是射线源存在的光子起伏噪声;二是射线探测器存在的热噪声;三是由于叶片特殊材质和异型结构导致的散射噪声和射束硬化噪声。上述因素导致叶片工业CT图像存在较大噪声,对比度较低,限制其进一步应用。目前,较为常用的工业CT图像降噪方法^[2-4]有多帧叠加、中值滤波、偏移帧叠加。多帧叠加和偏移帧叠加方法可以抑制服从统计规律的白噪声,如射线源存在的光子起伏噪声和射线探测器存在的热噪声,但缺点是成像时间大幅延长,且对散射和硬化噪声无能为力。中值滤波虽具有一定的降噪保边特性,但其适用范围有限,难以满足叶片工业CT图像降噪的需要。

为此,讨论了一种基于叶片工业CT图像不同区域相似性的非局部平均降噪算法,在降低图像噪声的同时,保持了图像边缘的对比度。针对非局部平均算法计算复杂度高、计算量大的问题,研究了一种基于傅里叶变换的非局部平均加速算法。实验结果表明,在保证航空发动机涡轮叶片工业CT图像降噪效果的情况下,处理速度提高了4倍以上。

1 叶片工业CT图像特点

一幅叶片工业CT图像往往具有较强的自相似性,即图像中存在很多相似的部分,如图1所示。

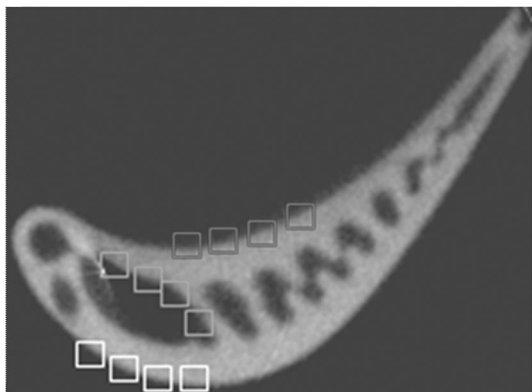


图1 叶片工业CT图像

Fig. 1 Industrial CT image of blade

在图1中,3组方块对应的3组局部图像,其组内图像间的形状和灰度值均具有较强的相似性。

2 叶片工业CT图像非局部平均算法

对具有局部相似性的图像,我们在进行平均降噪时如果考虑到局部区域的相似性,使得具有高相似性的区域之间进行平均降噪,而不相似的区域之间几乎不进行平均降噪,那么在抑制噪声的过程中就会很好的保留图像的细节纹理信息。基于上述分析,2005年Buades等开展了一种图像平均降噪算法的研究,获得了很好的降噪效果,并保留了图像的细节^[5]。

基于上述平均降噪的思想和叶片工业CT图像具有较强的局部形状和灰度值相似性的特点,我们研究了叶片工业CT图像非局部平均降噪算法。该算法可表述如下:设原始含噪叶片工业CT图像为 $v = \{v_i | i \in I\}$, 则降噪后图像的像素值 $v_{nl,i}$ 为图像中所有像素的加权平均。

$$v_{nl,i} = \sum_j w_{i,j} \cdot v_j \quad (1)$$

其中权重 $w_{i,j}$ 表示像素 i 和像素 j 的相似性,且满足 $0 \leq w_{i,j} \leq 1$, $\sum_j w_{i,j} = 1$ 。

为了计算两个像素 i 和 j 的相似性,我们将一个像素周围区域的所有像素的集合记作该像素的邻域 r , 然后通过比较邻域 r_i 和 r_j 的相似性来表示像素 i 和 j 的相似性。我们用高斯加权欧氏距离来计算邻域的相似性。

令 $v_{r_i} = \{v_j | j \in r_i\}$, 则

$$w_{i,j} = \frac{1}{z_i} e^{-\frac{\|v_{r_i} - v_{r_j}\|_{2,a}^2}{h^2}} \quad (2)$$

$$z_i = \sum_j e^{-\frac{\|v_{r_i} - v_{r_j}\|_{2,a}^2}{h^2}} \quad (3)$$

其中参数 a 是高斯核的标准差,参数 h 用来控制指数的衰减快慢程度, z_i 是归一化变量。

3 降噪算法的加速计算

上述算法虽能达到很好的降噪效果,但其计算量很大,对一幅 512 像素 × 512 像素格式图像的计算需要几分钟时间。而高分辨率叶片工业CT图像格式一般均大于 512 像素 × 512 像素。因此,为使该算法在工程中得到实际的应用,必须对其加速。

从该算法的计算公式中,我们可以看出该算法的计算量主要体现在两个像素邻域相似性的计算,即 $\|v_{r_i} - v_{r_j}\|_{2,a}^2$. 为此,我们通过加速两个像素邻域相似性的计算来提高整个算法的计算效率.

我们简化两个像素邻域的相似性计算过程,以欧拉距离 $\|v_{r_i} - v_{r_j}\|_2^2$ 取代高斯加权欧拉距离 $\|v_{r_i} - v_{r_j}\|_{2,a}^2$, 提高计算效率.

令

$$p_{i,j} = \|v_{r_i} - v_{r_j}\|_2^2 = \sum_{k=0}^{m^2-1} (v_{i,k} - v_{j,k})^2 \quad (4)$$
$$\begin{cases} \{v_{i,k}\} = \{v_{r_{i,0}}, v_{r_{i,1}}, \dots, v_{r_{i,(m^2-1)}}\} \\ \{v_{j,k}\} = \{v_{r_{j,0}}, v_{r_{j,1}}, \dots, v_{r_{j,(m^2-1)}}\} \end{cases}$$

其中 m^2 表示邻域的大小.

上述公式以二维笛卡儿坐标 (x, y) 来表示,即为

$$p_{i,j} = \sum_{x=0}^{m-1} \sum_{y=0}^{m-1} [v_{i,x,y} - v_{j,x,y}]^2 =$$
$$\sum_{x=0}^{m-1} \sum_{y=0}^{m-1} v_{i,x,y}^2 + \sum_{x=0}^{m-1} \sum_{y=0}^{m-1} v_{j,x,y}^2 -$$
$$2 \sum_{x=0}^{m-1} \sum_{y=0}^{m-1} v_{i,x,y} \cdot v_{j,x,y} =$$
$$S_{q,r_i} + S_{q,r_j} - 2S_{mul} \quad (5)$$

其中 S_q 表示区域像素的平方和, S_{mul} 表示两个区域对应像素点的乘积和.

下面,我们分别给出 S_q 和 S_{mul} 的计算方法.

3.1 S_q 的计算方法

设一幅叶片工业 CT 图像大小为 $n \times n$, 我们通过原始图像 $v_{x,y}$ 来计算得到一个区域平方和图像 $S_{q,x,y}$, 其具体计算流程为

- 1) $x = 0, y = 0$
 $S_{q,x,y} = S_{q,0,0} = v_{0,0}^2$
- 2) $1 \leq x \leq n-1, y = 0$
 $S_{q,x,y} = S_{q,x,0} = S_{q,x-1,0} + v_{x,0}^2$
- 3) $x = 0, 1 \leq y \leq n-1$
 $S_{q,x,y} = S_{q,0,y} = S_{q,0,y-1} + v_{0,y}^2$
- 4) $1 \leq x \leq n-1$ 且 $1 \leq y \leq n-1$
 $S_{q,x,y} = S_{q,x,y-1} + S_{q,x-1,y} - S_{q,x-1,y-1} + v_{x,y}^2$

如果我们要计算图 2 区域 A 中像素的平方和 $S_{q,A}$, 用 $(x_0, y_0), (x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$ 表示区域 A 的 4 个顶点的坐标, 则

$$S_{q,A} = S_{q,A} + S_{q,B} + S_{q,C} + S_{q,D} + S_{q,C} -$$
$$[S_{q,B} + S_{q,C}] - [S_{q,C} + S_{q,D}] = S_{q,x_3,y_3} +$$
$$S_{q,x_0,y_0} - S_{q,x_1,y_1} - S_{q,x_2,y_2} \quad (6)$$

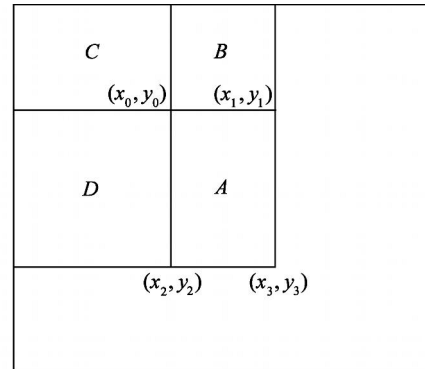


图 2 计算区域示意图

Fig. 2 Region of image for calculation

3.2 S_{mul} 的计算方法

根据傅里叶变换的性质可知, 两个信号的空域卷积等于这两个信号的频域乘积的傅里叶反变换, 我们利用该性质来计算两个区域 A 和 B 对应像素的乘积 $S_{mul,A,B}$, 其具体计算流程为

- 1) 作原始图像 $v_{x,y}$ 关于原点的对称图像 $v'_{x,y}$, 即 $v'_{x,y} = v_{n-x-1, n-y-1}$;
- 2) 作辅助图像 $v''_{x,y}$, 其大小等于原始图像, 且满足

$$v''_{x,y} = \begin{cases} v_{B,x,y} & x < m \text{ 且 } y < m \\ (v_B \text{ 表示域 B 中的像素值}) \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

分别做图像 $v'_{x,y}$ 和 $v''_{x,y}$ 的傅里叶变换, 得 $F(v')$ 和 $F(v'')$;

- 3) 计算 $F(v')$ 和 $F(v'')$ 的乘积, 并对乘积结果作傅里叶反变换得图像 $v'''_{x,y}$.

设区域 A 距图像原点最近的顶点坐标为 (x_0, y_0) , 则 $S_{mul,A,B} = v'''_{x_0,y_0}$.

4 实 验

在对叶片工业 CT 图像进行处理时, 为进一步缩短处理时间, 通常取一个搜索邻域^[1]. 这里我们设置搜索邻域大小为 7×7 , 用于像素相似性比较的邻域大小为 3×3 , 分别用原始算法和加速算法对两幅叶片工业 CT 图像进行处理. 图像处理前后结果如图 3~图 5 所示, 处理时间对比如表 1 所示.

实验结果表明, 本文研究方法显著降低图像

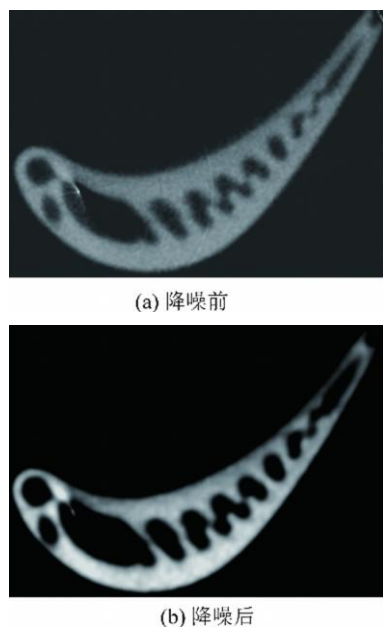


图 3 叶片工业 CT 图像降噪效果
Fig. 3 Denoising process for industrial CT image of blade

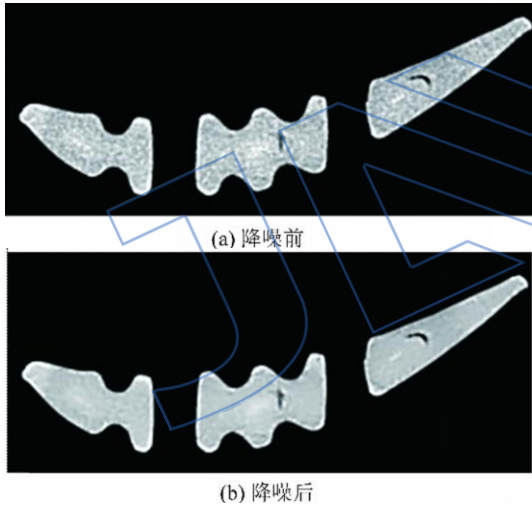


图 4 蜡模叶片工业 CT 图像降噪效果
Fig. 4 Denoising process for industrial CT image of wax blade pattern

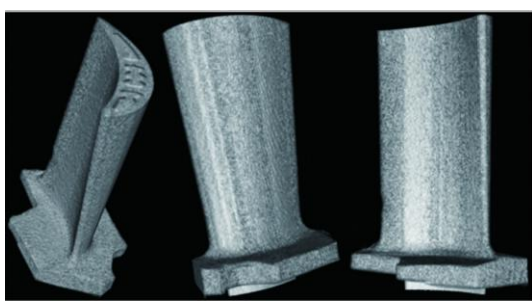


图 5 降噪后叶片工业 CT 图像三维可视化效果图
Fig. 5 Three-dimensional visualization effect of blade's industrial CT images after denoising

噪声水平,同时获得了 4 倍以上的加速比.

表 1 原算法与加速算法处理时间对比

Table 1 Comparison of processing time between original algorithm and accelerated algorithm

图像大小/ 像素 × 像素	原算法处理 时间/ s	加速后算法 处理时间/ s	加速 比/ 倍
512 × 512	2	0. 4	5
1 024 × 1 024	8	1. 7	4. 7

5 结 论

理论分析和实验结果表明,非局部平均算法能很好的降低叶片工业 CT 图像的噪声水平,提高图像对比度.同时,相对于其他加速方法^[6-7],本文研究的基于傅里叶变换的加速算法,加速比可达到 4 倍以上,且降噪效果不受影响.本文研究结果对提高叶片工业 CT 成像的性能和效率,促进其进一步应用具有重要意义.

参考文献:

[1] 魏东波,傅健,李斌,等.提高三维 ICT 成像空间分辨率的扫描方式及其重建算法[J].航空动力学报,2007,22(5):768-772.
WEI Dongbo,FU Jian,LI Bin,et al. Scan mode and its reconstruction algorithm for improving spatial resolution of 3D-ICT[J].Journal of Aerospace Power,2007,22(5):768-772. (in Chinese)

[2] Jaced M L. Robust weighted averaging[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering,2002,49(8):796-804.

[3] Lee H Y,Park D S, Lee S D. An effective image enhancement filtering for noisy image sequences[J]. Proc. SPIE,2006,6069:1-9.

[4] 李俊江.基于图像增强器的工业 X 射线成像优化研究[D].北京:北京航空航天大学,2007.
LI Junjiang. Optimization research on industrial X-ray imaging based on an image intensifier[D]. Beijing:Beijing University of Aeronautics and Astronautics,2007. (in Chinese)

[5] Buades A,Coll B,Morel B. A review of image denoising lgorithms with a new one[J]. Multiscale Modeling and Simulation,2005,4(2):490-530.

[6] Mahmoudi M. Fast image and video denoising via non-local means of similar neighborhood[J]. IEEE Signal Processing Letters,2005,12(12):839-842.

[7] Souidince W. Image denoising in the transformed domain using non local neighborhoods [C]// IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. France:IEEE,2006,s1-13:2117-2120.