双能透照模式下涡轮叶片 DR 图像融合方法

杨 民 吴美金 魏东波

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

李兴东

(中国计量科学研究院 电离辐射与医学工程计量科学研究所, 北京 100013)

摘 要: 为了提高单帧涡轮叶片 DR(Digital Radiography)图像的信息量,首先在 2 个不同射线能量下对涡轮叶片进行 DR 成像,以获取不同厚度区域的质量信息;然后将 2 幅 DR 图像进行多分辨率小波分解,以最大局部方差为准则对二者的低频子带图像进行融合,以局部梯度的活性因子为尺度对二者的高频子带图像进行融合;最后基于小波融合系数的逆变换获得最终的融合结果. 实验结果表明:基于此方法的涡轮叶片融合 DR 图像携带了更为丰富的细节信息,从而有利于叶片质量信息的快速、准确判读.

关 键 词: 涡轮叶片; 射线检测; DR 图像融合; 小波变换

中图分类号: TP 391.4

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2011)12-1494-04

Turbine blade DR images fusion based on bi-energy X-ray radiography

Yang Min Wu Meijin Wei Dongbo

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Li Xingdong

(Division of Metrology in Ionizing Radiation and Medicine, National Institute of Metrology, Beijing 100013, China)

Abstract: In order to increase the single frame digital radiography(DR) image information of the turbine blade, two DR images were captured at different X-ray energy so as to get the turbine blade quality information at different thickness region firstly. Secondly, the two original DR images were decomposed by wavelet transform, and the maximal local variance role was used to carry out the low sub-frequenced image fusion, and the active factors based on local gradients were calculated to carry out the high sub-frequenced image fusion. Finally, through inverse wavelet transform the output image can be obtained. The experimental results show that the single frame fused turbine blade DR image brings more detailed information, so it is useful to the fast and accurate quality judgements of the turbine blade.

Key words: turbine blade; X-ray testing; digital radiography(DR) image fusion; wavelet transform

作为航空发动机重要部件的涡轮叶片,其质量检测主要依靠射线成像. 计算机技术与射线探测技术的快速发展,有力地推动了射线照相向数字化的方向发展[1-2]. DR(Digital Radiography)技术在涡轮叶片的质量控制中发挥着越来越重要的作用,从铸造蜡模、毛坯到成品,乃至服役期间的质量检测,DR 检测均贯穿其中[3]. 涡轮叶片由叶冠、叶身、缘板和榫头组成,其厚度变化从几毫米到十几毫米,这种厚度变化导致了不可能在单一射线能量下对整个叶片实施有效的透照. 因为胶

收稿日期: 2010-07-27; **网络出版时间**: 2011-12-21 09:56; **DOI**: CNKI:11-2625/V.20111221.0956.002
网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20111221.0956.002.html
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60872080,61077011); 国家科技支撑项目(2011BAI02B02)
作者简介: 杨 民(1975 -),男,陕西蒲城人,副教授,minyang.ndt@263.net.

片或数字成像器对某种厚度的材质存在一个最佳灵敏度的成像条件. 对于叶身,需要较低射线能量以达到最佳透照效果,此时会造成穿过榫头较厚部位到达探测器的光子数过少,即所谓的“穿不透”;反之,如果利用较高能量的射线穿透榫头部位,那么贯穿叶身到达探测器的光子能量过高,图像灰度趋于饱和,从而影响该部位微细缺陷的有效检出,因此不可能在单一射线能量下保证对所有厚度区域内的缺陷全部检测出. 目前工程检测中解决此类问题的办法是分别在不同射线能量下对叶片进行透照,以获得不同厚度部位的最佳透视图像,然后对其分别进行判读,最终得到叶片质量信息评判结果. 这样不但加大了检测周期,而且不同射线能量下的图像往往携带重叠信息或干扰信息,增大了判读的难度,容易造成缺陷的漏判和误判. 射线数字成像的应用使得这一问题的解决成为可能,如何利用数字成像和图像处理技术解决此类问题成为一个新的课题.

1　方法提出

上述问题的研究可归入图像融合方面,图像融合技术是指不同源图像或不同时刻图像之间的空间匹配与叠加,以达到信息互补、增加信息量的效果. 射线数字成像的应用目前主要活跃在医学方面,如将射线 CT,MRI,PET,SPET 图像融合为一幅更优越、携带目标对象信息更为全面的图像,便于医生判断病灶位置及与周围组织的关系[4-5]. 文献[6]中采用了与本文类似的方法进行双能 DR 图像的融合,取得了一定的效果. 该文献的高频融合系数选择基于 Krisch 算子的局部梯度信息,该算子抗噪性能较差,容易造成融合结果失真. 低频融合系数的选择采用加权平均法,然而权值的选择则是依靠经验. 本文对该文献的高、低频系数的融合准则做了改进,尤其是低频融合系数的选择,并将其应用于涡轮叶片的 DR 图像融合,取得了较文献[6]更为通用和精确的效果. 本文采用基于小波变换的双能 DR 图像融合方法,其基本流程为:首先对 2 幅不同射线透照能量下的叶片 DR 图像进行小波分解,然后采用不同的准则进行 2 幅图像高频和低频信息的融合,最后利用小波逆变换生成最终的融合图像. 流程如图 1 所示.

用小波变换对图像信号进行分解,实际上就是对二维数据进行小波变换. 可以通过在水平和垂直方向上应用 $\boldsymbol{H},\boldsymbol{G}$ 滤波器进行一维滤波来实现. 将原始图像分解成低频图像和高频图像,低频图像还可以进一步分解,分解的各级子带图像都包含着原始图像的空间信息,这是小波分解的基本形式. Mallat 提出了多尺度小波分解与重构的金字塔算法,即利用 2 个一维滤波器实现对二维图像的快速分解,再利用 2 个一维重构滤波器实现图像的重构. 根据 Mallat 小波分解算法,第 j 次小波分解后生成 3 个高频分量和 1 个低频分量,其公式如下[7]:

$$\left.\begin{aligned} C_j &= H_m H_n C_{j-1} \\ D_j^{\mathrm{H}} &= H_m G_n C_{j-1} \\ D_j^{\mathrm{V}} &= G_m H_n C_{j-1} \\ C_j^{\mathrm{D}} &= G_m G_n C_{j-1} \end{aligned}\right\} \tag{1}$$

其中,C_j 为小波分解尺度 j 下的低频分量;D_j^{H},D_j^{V},D_j^{D} 分别为同尺度下的水平、垂直及对角方向上的高频分量;$\boldsymbol{H},\boldsymbol{G}$ 为 2 个一维滤波器;m 和 n 分别表示图像矩阵的第 m 行和第 n 列. 与之相应的小波重构公式为

$$\begin{aligned} C_{j-1} = {} & H_m^* H_n^* C_j + H_m^* G_n^* D_j^{\mathrm{H}} + \\ & G_m^* H_n^* D_j^{\mathrm{V}} + G_m^* G_n^* D_j^{\mathrm{D}} \end{aligned} \tag{2}$$

其中,$\boldsymbol{H}^*$ 和 $\boldsymbol{G}^*$ 分别为 $\boldsymbol{H}$ 和 $\boldsymbol{G}$ 的共轭转置矩阵.

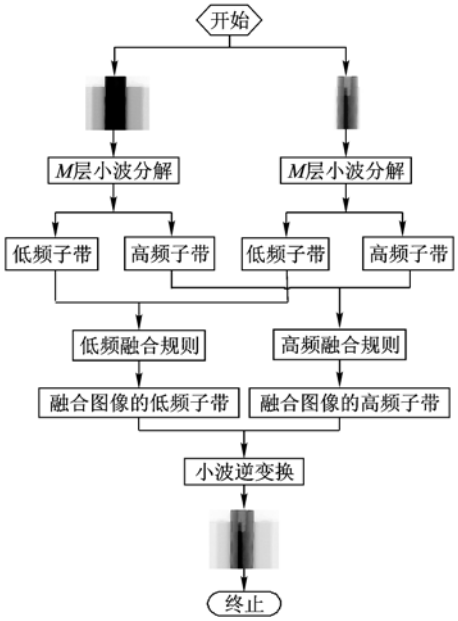


图 1　图像融合流程图

1.1　高频融合准则

以局部梯度的活性因子为尺度,确定高频子带图像的融合系数. 活性因子定义为[8]

$$\begin{aligned} & A(D_{j,k}(m,n)) = \\ & \mathrm{Gradient}(D_{j,k}(m,n)) \cdot | D_{j,k}(m,n) | \end{aligned} \tag{3}$$

其中,$D_{j,k}(m,n)$ 为原图像的各级高频小波系数,j 表示分解层数,$k=1,2,3$,表示 3 个高频子带;$\mathrm{Gradient}(D_{j,k}(m,n))$ 为高频子带图像的局部梯度. 本算法中的活性因子计算采用改进型局部梯

度方法,此处局部梯度不同于传统的仅求水平和垂直方向梯度的方法,而是用 4 个方向的掩模求取,这样得到的梯度含有 4 个方向的梯度信息,优于仅求取水平和垂直梯度的方法. 局部梯度定义为[8]

$$\text{Gradient}(D_{j,k}(m,n)) = \max\{|K_p * D_{j,k}(m,n)|, p = 1 \sim 4\} \quad (4)$$

其中,K_p 代表 4 个方向掩模,当 $p=1$ 时,代表 135°方向;当 $p=2$ 时,代表 90°方向;当 $p=3$ 时,代表 0°方向;当 $p=4$ 时,代表 45°方向. 4 个方向卷积核见式(5).

$$\left.\begin{array}{ll} \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} & p = 1 \\ \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix} & p = 2 \\ \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} & p = 3 \\ \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & 2 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{pmatrix} & p = 4 \end{array}\right\} \quad (5)$$

根据得到的活性因子,选择融合图像的高频系数,采用文献[6]提出的方法. 令 $D^{\text{F}}_{j,k}(m,n)$ 代表融合图像各级高频系数,则

$$D^{\text{F}}_{j,k}(m,n) = \begin{cases} D^{\text{A}}_{j,k}(m,n) & A^{\text{A}} > A^{\text{B}} \\ D^{\text{B}}_{j,k}(m,n) & A^{\text{A}} \leqslant A^{\text{B}} \end{cases} \quad (6)$$

其中,A^{A} 和 A^{B} 代表 A 和 B 图像高频子带图像某点的活性因子;$D^{\text{A}}_{j,k}(m,n)$ 和 $D^{\text{B}}_{j,k}(m,n)$ 代表原图像 A 和 B 的各级高频小波系数.

1.2 低频融合准则

目前基于小波变换的图像融合算法的研究重点主要集中在高频域内,这是因为图像经小波分解后,图像的细节主要集中在高频域,这也是人眼最敏感的部分. 而低频域反映待融合图像的近似特性,由于待融合图像中的物体是同一个事物,近似特征比较相近,最常用的方法是直接取平均的融合规则[9-10]. 然而,低频域仍包含轮廓、边缘等信息,采用直接平均法势必会对边缘和轮廓造成一定程度的模糊. 本文采用基于局部方差的低频系数融合准则. 此算法的主要思想是:计算低频子带图像中每一点邻域内的方差,利用局部方差作为活性测度来选择低频融合系数. 具体步骤如下:

1) 计算出每幅图像低频系数的局部方差,局部方差定义如下:

$$S_{\text{q}} = \frac{1}{M \times N}\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=1}^{N}(C_j(m,n) - \bar{C}_j)^2 \quad (7)$$

其中,$C_j(m,n)$ 是源图像的分解尺度 j 下的邻域低频系数矩阵;$\bar{C}_j$ 是 $C_j(m,n)$ 的均值;S_{q} 是局部方差;M,N 分别是局部区域的宽和高.

2) 由于变量 S_{q} 在一定程度上反映了某点邻域的细节信息,因此为了较好地保留源图像中的细节,可选择 S_{q} 较大的系数作为融合系数,具体融合规则如下:

$$C^{\text{F}}_j(m,n) = W_{\text{A}}C^{\text{A}}_j(m,n) + W_{\text{B}}C^{\text{B}}_j(m,n) \quad (8)$$

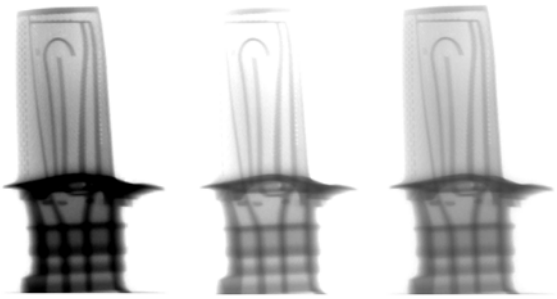
式中,$C^{\text{F}}_j(m,n)$,$C^{\text{A}}_j(m,n)$,$C^{\text{B}}_j(m,n)$ 分别表示像素 (m,n) 处分解尺度 j 下的低频融合系数、源图像 A 低频系数和源图像 B 低频系数;W_{A} 和 W_{B} 表示加权系数.

$$W_{\text{A}} = \begin{cases} 1 & S_{\text{qA}} \geqslant S_{\text{qB}} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

$$W_{\text{B}} = \begin{cases} 1 & S_{\text{qB}} \geqslant S_{\text{qA}} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

2 实验结果

为了验证本文提出方法的有效性,对某涡轮叶片 DR 图像进行融合测试,首先对叶片分别在高、低射线能量下进行 DR 成像,然后利用本文的方法进行融合,结果如图 2 所示. 2 次 DR 成像的参数如下:射线源(YXLON MG452 型);探测器(非晶硅面阵探测器 PaxScan2520 型,探元尺寸为 0.127 mm);低能 DR 成像(管电压,110 kV,管电流,2 mA;64 帧叠加);高能 DR 成像(管电压,140 kV,管电流,2 mA;64 帧叠加).



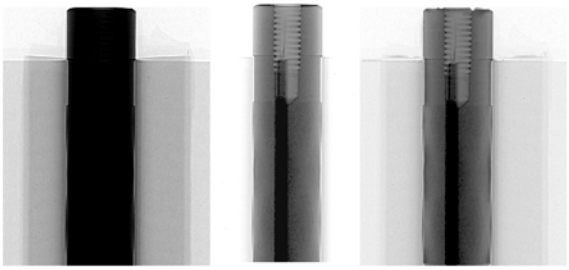
a 低能 DR 图像 b 高能 DR 图像 c 融合 DR 图像

图 2 叶片 DR 图像融合结果

图 2a 为较低射线能量下的 DR 图像,可以看出,叶身的信息清晰可见,但是榫头部位的细节信息缺失;图 2b 为较高射线能量下的 DR 图像,此时尽管榫头的细节信息增加,但是叶身部位却由于射线能量过高而饱和,因此不可能在单一能量

下实现对叶片的全信息透照. 利用本文介绍的融合方法将这 2 幅 DR 图像进行融合,图 2c 是融合后的 DR 图像,叶身和榫头部位的信息在一幅 DR 图像上得以清晰再现.

为了进一步验证本文方法的有效性,图 3 为对某金属-复合材料叶轮双能 DR 图像的融合结果,该构件叶轮部分为复合材料,芯轴为金属材料,在进行 DR 检测时,同样面临上述问题. 图 3a 和图 3b 分别为低能和高能射线能量下的 DR 图像. 可以看出,低能 DR 图像只包含丰富的复合材料透视信息,高能 DR 图像只包含丰富的金属轴透视信息,将 2 幅图像融合后,即可在一幅 DR 图像上得到 2 种材质的丰富信息,如图 3c 所示.



a　低能 DR 图像　b　高能 DR 图像　c　融合 DR 图像

图 3　叶轮 DR 图像融合结果

为了定量分析图像融合前后的信息量,本文以图 2 的叶片为例,利用熵、空间频率、方差对融合效果进行评价[11],比较见表 1. 熵用来描述图像的信息量是否提高;标准差、空间频率比较适合描述图像的细节信息和纹理特征. 从表 1 可以看出,融合后的图像细节信息、方差和空间频率均得到了有效的提高.

表 1　叶片 DR 图像融合性能参数比较

性能参数	熵	方差	空间频率
低能图像	7.230	89.121	21.911
高能图像	5.334	81.204	16.212
融合结果	9.701	93.005	25.224

3　结　论

本文结合文献[6]的图像融合方法,提出了改进的高、低频小波系数融合准则,以局部梯度的活性因子为尺度,确定高频子带图像的融合系数;以最大局部方差为准则提取低频融合系数. 将该方法运用于涡轮叶片的 DR 检测中,实验结果表明,采用双能透照模式的叶片 DR 图像融合,可以有效解决目前工程检测中多次透照和多次判读的困难,融合的 DR 图像携带了更为丰富的细节信息,从而有利于叶片质量信息的快速、准确判读. 对于低信噪比的 DR 图像,融合后的图像噪声在一定程度上会被放大,因此,融合前的图像降噪处理也是必不可少的一个环节. 本文介绍的双能 DR 图像融合方法,也同样适用于多能透照模式下的多幅 DR 图像融合.

参考文献（References）

[1] Yuan Xunhua, Drangova Maria, Pollmann Steve, et al. Comparison of a digital flat-panel x-ray image intensifier and conventional film-screen system for radiostereometric analysis (RSA)[C]// Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering. Bellingham, WA: SPIE, 2004, 5368(2): 914 - 921

[2] Samei E, Flynn M J. An experimental comparison of detector performance for computed radiography systems[J]. Med Phys, 2002, 29(4): 447 - 459

[3] 孔凡琴,路宏年. 基于 DR 的航空发动机涡轮叶片的缺陷尺寸测量[J]. 兵工学报,2005,26(3):335 - 338
Kong Fanqin, Lu Hongnian. The measuration to the defection on the turbine-vane of the aeroengine based on the digital radiography[J]. Acta Armamentarii, 2005, 26(3): 335 - 338(in Chinese)

[4] Song Yu, Li Mantian, Li Qingling, et al. A new wavelet based multi-focus image fusion scheme and its application on optical microscopy[C]//2006 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Piscataway, NJ: IEEE, 2006: 401 - 405

[5] Townsend D W, Beyer T, Blodgett T M. PET/CT scanners: A hardware approach to image fusion[J]. Semin Nucl Med, 2003, 33(3): 193 - 204

[6] 杨霈,董秋影,杨民. 基于小波变换的双能 DR 图像融合[J]. 无损检测,2008,30(7):430 - 433
Yang Pei, Dong Qiuying, Yang Min. Bi-energy DR image fusion based on wavelet transform[J]. Nondestructive Testing, 2008, 30(7): 430 - 433(in Chinese)

[7] 孙延奎. 小波分析及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,2005:77 - 89
Sun Yankui. Wavelet analysis and its applications[M]. Beijing: China Machine Press, 2005: 77 - 89(in Chinese)

[8] 董秋影. 射线数字图像融合与拼接技术研究[M]. 北京:北京航空航天大学机械工程及自动化学院,2007
Dong Qiuying. The research of X-ray digital image fusion and stitching[M]. Beijing: School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007(in Chinese)

[9] Iella G. A general framework for multi-resolution image fusion: from pixels to regions[J]. Information Fusion, 2003, 3(4): 259 - 280

[10] De I, Chanda B. A simple and efficient algorithm for multi-focus image fusion using morphological wavelets[J]. Signal Processing, 2006, 86(5): 924 - 936

[11] Pu T, Ni G. Contrast-based image fusion using the discrete wavelet transform[J]. Optical Engineer, 2000, 39(8): 2075 - 2082

（编　辑:文丽芳）