基于小波的非线性模型的孔探图像压缩

丁 鹏 马齐爽 李长有 姚红宇

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100083) (中国民用航空总局航空安全技术研究所, 北京 100028)

摘 要: 针对涡轮发动机内部图像细节丰富的特点,为了实现在高压缩比下对细节信息的保留,以不影响发动机内部故障检测,采用小波域的非线性表示和建模方法,利用多尺度边缘检测对边缘进行定位,通过轮廓加剖面模型在定位的边缘进行边缘影响区域划分;之后通过阈值将边缘影响区域进一步划分为较重影响系数区域与较轻影响系数区域,在不同区域应用不同的编码质量控制,从而实现了一种基于小波着重于边缘的图像编码系统. 实验结果表明,与一般的小波图像压缩方法相比较,在不同的压缩率下,峰值信噪比均得到小幅度的提高,并且从视觉感官上也得到较好的效果.

关 键 词: 涡轮发动机;小波变换;边缘检测;图像压缩

中图分类号: TP 391.41

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)02-0214-04

Wavelet and nonlinear model based borescope image compression

Ding Peng Ma Qishuang Li Changyou

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Yao Hongyu

(Center of Aviation Safety Technology of China, General Administration of Civil Aviation of China, Beijing 100028, China)

Abstract: The borescope image quality around edges is very important to the fault diagnostic of aeronautic engine. And inside the turbofan engine, the borescope image often has complex edges and textures. To achieve high compression ratio without losing of the edge and texture information, a kind of image compression method with emphasis on edges and textures was presented. First, it used wavelet transform in order to obtain a set of biorthogonal subclasses of images. Second, multiscale Canny edge detector was used to locate the edge. Third, the AOI(area of influence) was set by contour plus profile model, witch was an edge nonlinear represent and modeling method. Finally, by rate control, different image quality was obtained in different areas of the image, like ROI(region-of-interest) coding of JPEG2000. Test result shows, comparing with general image compression method, at different compression ratio, PSNR(peak signal to noise ratio) has all gotten lightweight raise, and the visual perception around edges is also better than the general method.

Key words: turbofan engine; wavelet transforms; edge detection; image compression

发动机是飞机的动力部分也就是整个飞机的心脏,发动机性能的好坏直接关系整架飞机的命运. 针对发动机内部故障检测的发动机孔探技术是发动机维护的一种重要手段.

随着电子技术的不断提高,孔探成像设备的成像分辨率越来越高,从而使成像数据量急剧增加. 这就对图像数据压缩处理提出了要求,以便图像数据能够高效的存储和传输. 因此,图像的高效压缩是一个亟待解决的问题. 但对高分辨率的孔探图像,应用一般的压缩方法,在不丢失纹理信息

收稿日期: 2005-10-14

基金项目: 中国民航总局航空安全技术分析和鉴定实验室开放研究基金资助课题(200603)

作者简介: 丁 鹏(1979-),男,山东即墨人,博士生,dingpeng516@163.com.

的情况下,难以实现高压缩比.

小波变换特有的时频局部化特性,使得可以用较少的小波系数描述一个数据集的特征,从而达到数据压缩的目的. 基于小波变换的图像编码在取得较高峰值信噪比的同时可以获得较高的重建图像质量,而且可以避免其他压缩编码方法中由于数据分块造成的"方块效应"和"蚊式噪声". 基于小波的着重于边缘信息的图像编解码系统正是利用了小波的这种特点而建立起来的.

1　发动机孔探故障检测

飞机发动机孔探故障检测系统,如图 1 所示,是通过图像的模式识别方法,完成发动机内部零件损伤的识别及损伤的分类工作. 在应用孔探设备进行发动机内部故障检测并实现零件损伤的识别时,孔探图像是唯一的依据所在.

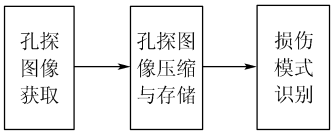


图 1　飞机发动机孔探故障检测系统

而在进行图像获取时,为了加快图像的存储,节省存储空间(存储空间有限),并且保持图像的质量,不丢失损伤识别所需的信息,需要一种特别的图像编码方法. 基于小波的非线性建模的孔探图像压缩系统就是针对这种要求而进行研究的.

2　小波系数的非线性模型

2.1　基于小波的非线性逼近

线性逼近将信号投影到 M 个固定的向量上,而非线性逼近则是依据每个信号来选择这 M 个向量[1,2].

信号 $f\in H$(H 为希尔伯特空间),在 H 的标准正交基 $\beta=\{g_m\}_{m\in\mathbf{N}}$ 中自适应地选择 M 个向量来逼近信号 f,令 f_M 为 f 到这 M 个向量的投影表示,其中这 M 个向量的索引组成集合 I_M

$$f_M=\sum_{m\in I_M}<f,g_m>g_m \tag{1}$$

逼近误差为

$$\varepsilon_M=\|f-f_M\|^2=\sum_{m\notin I_M}|<f,g_m>|^2 \tag{2}$$

对于小波变换,设

$$\beta=[\{\phi_{J,n}\}_{0\leqslant n<2^{-J}},\{\psi_{j,n}\}_{-\infty<j\leqslant J,0\leqslant n<2^{-j}}]$$

为 $L^2[0,1]$ 上的小波基,则对于 $f\in L^2[0,1]$,其最优的非线性逼近为

$$f_M=\sum_{(j,n)\in I_M}<f,\psi_{j,n}>\psi_{j,n} \tag{3}$$

逼近误差为

$$\varepsilon_{n,M}=\|f-f_M\|^2=\sum_{(j,n)\notin I_M}|<f,\psi_{j,n}>|^2 \tag{4}$$

非线性估计是一种自适应的方法,对基于小波变换的图像压缩,应用非线性估计,可以在相同压缩比率下获得更好的图像质量.

2.2　基于边缘的系数分类

对于图像,其组成可以分为两部分:平滑区域和边缘. 应用某种边缘模型在小波系数中寻找那些影响到图像边缘的系数,标记为影响边缘区域系数,通过阈值 T 将这些系数分为两级:较重影响系数区域与较轻影响系数区域. 阈值 T 的计算是由下面式(7)所得的 $\|f(u,2^j)\|$ 得到的,取其值的 1/2. 在进行图像压缩时,这些系数均分配以较高的码率,从而保证了图像边缘信息在压缩过程中不受损失. 这正可以解决纹理通常比较复杂的孔探图像压缩问题.

这种编码方法与 JPEG2000 编码技术中的感兴趣区域(ROI)编码有着相同的思想. 在 JPEG2000 中,允许感兴趣区域(ROI)比图像的其他区域有更高的编码质量;同样,在本编码方法中,AOI 区域就如同 ROI 区域,在 AOI 区域将会得到更高的编码质量.

2.2.1　多尺度边缘检测

多尺度边缘检测是将图像曲面用一个核函数 $\theta(x)$ 的伸缩做卷积平滑,然后用 Canny 边缘检测算法. 它通过两个小波来计算,这两个小波为 θ 的偏导数

$$\left.\begin{aligned}\psi^1&=-\frac{\partial\theta}{\partial x_1}\\ \psi^2&=-\frac{\partial\theta}{\partial x_2}\end{aligned}\right\} \tag{5}$$

对于 $1\leqslant k\leqslant 2$,$x=(x_1,x_2)$,令

$$\psi^k_{2^j}(x_1,x_2)=\frac{1}{2^j}\psi^k\left(\frac{x_1}{2^j},\frac{x_2}{2^j}\right)$$

$$\bar{\psi}^k_{2^j}(x)=\psi^k_{2^j}(-x)$$

在以 $1\leqslant k\leqslant 2$ 为索引的两个方向上,对于 $f\in L^2(\mathbf{R}^2)$ 在 $u=(u_1,u_2)$ 上的二进小波变换为

$$W^kf(u,2^j)=<f(x),\psi^k_{2^j}(x-u)>=f\otimes\bar{\psi}^k_{2^j}(u) \tag{6}$$

则小波变换的模为

$$\|f(u,2^j)\|=\sqrt{|W^1f(u,2^j)|^2+|W^2f(u,2^j)|^2} \tag{7}$$

在 2^j 尺度下的边缘点,就是 $\|f(u,2^j)\|$ 取到局部极大值的点,这样的点也称为小波变换模极大点.

2.2.2 轮廓+剖面模型

引用文献[3]所建立的轮廓+剖面模型,在多尺度边缘检测的基础上实现对系数分类,以达到控制码率的目的.

轮廓+剖面模型是将图像从两个方向作剖面:平行于图像平面的方向和垂直于图像平面的方向. 对于平行于图像平面的方向得到的剖面,载有的是图像的轮廓信息,用函数 $g(x,y)=K, K\in \mathbf{R}$ 表示;对于垂直于图像平面的方向得到的剖面,载有的是图像轮廓的剖面信息,用剖面函数 $f(x,y)=Q(g(x,y))$ 表示,其中 $f(x,y)$ 代表坐标 (x,y) 处的像素值. 以下介绍的就是基于此方法而建立的"轮廓+剖面的模型".

可以将一幅图像看作是一个定义在有限区域 I 内的有界函数 f,则可以用分段平滑函数作为图像的模型,将 I 分成有限数量的区域 Ω_i

$$f=\sum_{i=1}^{K} f_i \cdot \chi_{\Lambda_j(E)} \tag{8}$$

其中,$I=\bigcup_{i=1}^{K}\Omega_i$;$f_i$ 是 C^{α_i},$\alpha_i>1$.

假设边界分为两部分:Ω_m、Ω_n,定义有限长度轮廓(contour)E_{mn},其参数为两个平滑一维函数 $h_1^{mn}(t)$ 和 $h_2^{mn}(t)$,

$$X\in E_{mn}\Leftrightarrow \exists t\in[0,T], X=(h_1^{mn}(t),h_2^{mn}(t)) \tag{9}$$

则竖直方向的小波变换为

$$C_j^v(x)=2^{-j}\int_I f(z)\Psi^v(2^{-j}(z-x))\,dz \tag{10}$$

其中,$\Psi^v(z)=\psi(z_1)\phi(z_2)$ 为张量积;ψ 为一维小波滤波器;ϕ 为一维尺度函数,在 $j=0$ 时的紧支持为 $[-l_\psi/2, l_\psi/2]$,$l_\psi>0$.

对每一尺度 j,只有当 X 在 AOI 范围 $\Lambda_j(X_0)$ 之内时,其中 X_0 在尺度 j 上,式(10)的 $C_j^v(x)$ 才会包含点 $f(X_0)$,$X_0\in E_{mn}$,通过下式

$$X\in\Lambda_j(X_0)\Leftrightarrow -2^{j-1}l_\psi\leqslant(x_{0,i}-x_i)\leqslant 2^{j-1}l_\psi \quad i=1,2 \tag{11}$$

来定量的定义 AOI 范围 $\Lambda_j(X_0)$,如图2的虚线部分所示.

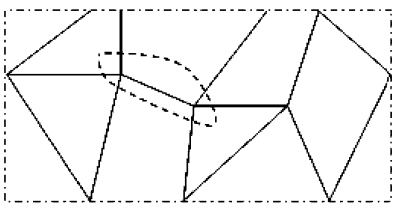


图2 AOI区域

令

$$\bar{f}_m^E=\frac{1}{A(\Lambda_j(E_{mn})\cap\Omega_m)}\int_{\Lambda_j(E_{mn})\cap\Omega_m} f_m(x)\,dx \tag{12}$$

$\bar{f}_m^E$ 为平滑变化的 f_m 在 E_{mn} 的 AOI 区域内的平均密度,其中 A 表示区域的面积.

定义在 E_{mn} 周围对 f 的分段常值逼近如下:

$$F_{mn}(x)=\bar{f}_{mX_{\Omega m}}^E(x)+\bar{f}_{nX_{\Omega n}}^E(x) \tag{13}$$

其中 f_m 与 f_n 均是平滑且缓慢变化的.

对 F_{mn} 的小波变换,可写为

$$C_j^{F,v}(x)=(\bar{f}_m^E-\bar{f}_n^E)\cdot\int_{\Omega_m}\hat{\Psi}_j^v(x-z)\,dz \tag{14}$$

对于 $t\in[0,T]$,$s\in[-2^{j-1}l_\psi, 2^{j-1}l_\psi]$ 令

$$q_s^F(t)=C_j^{F,v}(h_1^{mn}(t)+s, h_2^{mn}(t)) \tag{15}$$

显而易见,对于直的边缘线,忽略边缘的端点,$q_s^F(t)$ 是一个常数.

通过下式来观察 $q_s^F(t)$ 的均值问题:

$$p_{mn}(s)=\frac{1}{T}\int_{[0,T]} q_s^F(t)\,dt \tag{16}$$

称 $p_{mn}(s)$ 为关于边缘 E_{mn} 的"剖面函数"(profile function). 此函数与轮廓信息提供了对基本的小波值的逼近,$\forall x=(x_1,x_2)\in\Lambda_j(E_{mn})$,如果 $\exists t\in[0,T]$,$x_2=h_2^{mn}(t)$ 那么,

$$C_j^v(x)=p_{mn}(x_1-h_1^{mn}(t))+\varepsilon(x) \tag{17}$$

其中,$\varepsilon(x)$ 给出在点 X 处的逼近误差.

对于离散小波系数,以步长 2^j 来降分辩采样连续小波变换,从而产生离散小波系数,写为

$$c_j^v(K)=C_j^v(2^jK), \quad K\in Z^2 \tag{18}$$

这样,通过 AOI 区域就可以实现对边缘区域的离散小波系数的划分.

2.3 编码算法的实现

孔探图像压缩系统算法流程如下:

1) 进行小波变换;

2) 利用多尺度边缘检测对边缘进行定位,在定位之后,通过轮廓+剖面模型在定位的边缘区域进行 AOI 区域的划分,然后以阈值将 AOI 进一步划分为较重影响系数区域与较轻影响系数区域(这样细分的目的是加大码率的可调范围,即在一定的压缩比下,针对某一区域的编码质量,获得更大的取舍自由);

3) 对不用的区域,应用不同的码率分配进行熵编码.

应用本算法对例图进行压缩试验,实验结果如图 3、图 4 所示. 表 1 给出了不同码率下 PSNR 值的比较.

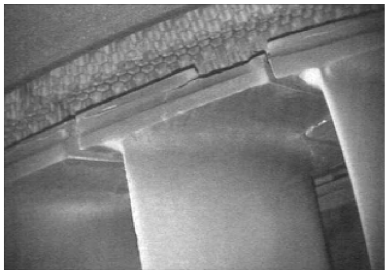


图 3　0.5 bit/像素未用非线性的结果

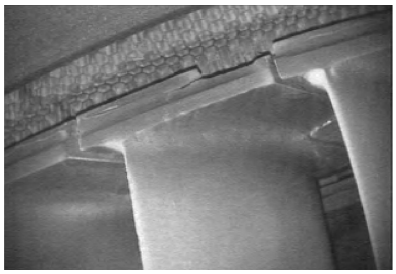


图 4　0.5 bit/像素应用非线性的结果

表 1　不同码率下 PSNR 值的比较

码率/(bit·像素$^{-1}$)	一般方法	本方法
0.5	34.9	36.7
1.5	39.7	42.7
3.0	45.5	50.9

3　结 束 语

针对孔探图像边缘及纹理丰富的特点,以非线性小波理论为基础,通过小波域的图像多尺度边缘检测及针对边缘的 AOI 区域建模,依据小波系数所含图像信息的性质及重要性对小波系数进行评价和分类,运用熵编码理论,提出并实现了一种基于非线性小波的着重于图像边缘信息的新的孔探图像压缩算法.

由实验结果可见,进行图像压缩时,应用此算法可在一定程度上提高被压缩图像的纹理清晰度,并且提高了图像的 PSNR,在相同的压缩比情况下会得到更好的图像质量.

参考文献 (**References**)

[1] Cohen A, Daubechies I, Guleryuz O G, *et al*. On the importance of combining wavelet-based nonlinear approximation with coding strategies[J]. IEEE Transaction on Information Theory, 2002,48(7): 1895~1921

[2] Stephane Mallat. A wavelet tour of signal processing[M]. 2nd ed. 北京:机械工业出版社,2003

[3] Hasan F Ates. Nonlinear modeling of wavelet coefficients around edges [D]. Electrical Engineering Department, Princeton University,2004

[4] Calderbank R C, Daubechies I, Sweldens W, *et al*. Wavelet transforms that map integers to integers[J]. Applied and Computational Harmonic Analysis (ACHA), 1998,5(3): 332~369

[5] Said A, Pearlman W A. A new fast and efficient image codec based on set partitioning in hierarchical trees[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 1996, 6(3): 243~250