

# 基于小波尺度相关的图像清晰度判别方法<sup>①</sup>

王敏君 熊邦书 黄丽贞 余亮

(南昌航空大学 无损检测技术教育部重点实验室 江西 南昌 330063)

**摘要:** 为提高图像清晰度判别函数的单峰性和抗噪性,提出了一种基于小波变换尺度相关的清晰度判别方法。该方法利用信号的小波系数幅值随尺度增大而增大,噪声的小波系数幅值随尺度增大而减小的特性,取相邻尺度间小波系数乘积构造清晰度判别函数,实现了增强信号抑制噪声的目的。通过 CCD 采集的图像数据对该方法与传统方法进行对比实验,结果表明提出方法具有较好的单峰性和较强的抗噪性,能够准确地评价数字图像聚焦程度。

**关键词:** 自动聚焦;图像清晰度;小波变换;尺度相关

## Image Definition Evaluation Method Based on Wavelet Scale Correlation

WANG Min-Jun, XIONG Bang-Shu, HUANG Li-Zhen, YU Liang(Key Laboratory of Nondestructive Test of Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

**Abstract:** A novel definition measurement based on correlation of the wavelet transform at adjacent scales is presented, which improves the sharpness function's performance of unimodality and noise-immunity. It takes advantage of the property that wavelet coefficients magnitude of signals increase as scale increases and wavelet coefficients magnitude of noise decrease with increasing scale and calculates the multiplication of wavelet coefficients at the adjacent scales to construct the evaluation method. It is capable to amplify signals and suppress noise. Compared with traditional algorithms using Image Data acquired by CCD, the proposed method is found to be more robust and accurate to estimate the focusing extent.

**Keywords:** autofocus; image definition; wavelet transform; scale correlation

## 1 引言

自动聚焦技术决定获取图像的清晰程度,其核心算法是清晰度判别函数的设计。现在的巡航导弹就是利用微型摄像头发回的图像,对弹头发射痕迹进行计算机图像对比判断目标是否正确,因此成像的清晰度很关键。清晰度判别函数在图像聚焦时取得极大值,曲线形似高斯函数,应满足单峰性、抗噪性和无偏性。国内外已有许多学者提出多种清晰度判别方法,可分为时域和变换域两类,时域有方差法<sup>[1]</sup>、梯度算子、Tenengrad<sup>[2]</sup>、相关法<sup>[3]</sup>和 Laplacian 算子<sup>[4]</sup>等,变

换域有 DCT 频谱法<sup>[5]</sup>和小波变换<sup>[6,7]</sup>等。小波变换法有对图像边缘进行精确定位、对图像噪声抑制能力强的优点,近年来受到重视。文献<sup>[6]</sup>提出的小波系数方差法,文献<sup>[7]</sup>的小波系数加权法等,都是对尺度内各子代系数独立进行处理构造的判别函数,因抗噪性和稳定性不能兼顾,很多情况下会出现多个伪峰值。

本文提出的基于小波尺度相关的判别函数,利用信号和噪声随尺度增大相反的变化特性,将相邻尺度的小波系数模值取乘积,所得清晰度函数曲线不单峰附近变化陡峭,而且具有较强的抗噪性。

<sup>①</sup> 基金项目:国家自然科学基金(60913096);江西省自然科学基金(2008GZS0032);江西省教育厅科技项目(GJJ09183);南昌航空大学研究生科技创新项目(YC2008019)

收稿时间:2009-11-23;收到修改稿时间:2009-12-21

## 2 小波清晰度判别函数

观察面偏离焦平面时,物点在观察面上形成圆斑,物点像相互叠加减弱边缘,导致成像模糊。衡量一幅图像是否清晰,常根据图像的边缘细节成分来判定,在时域上体现为灰度突变,在频域上表现为高频分量丰富。小波变换能够提取图像多分辨率的高频细节信息,通过选取适当的小波函数,在每个小波尺度上分别将图像信号分解为轮廓低频分量、垂直方向高频分量、水平方向高频分量和对角高频分量,如图1所示,为选取感兴趣的频率成分构造清晰度判别函数提供了可能。

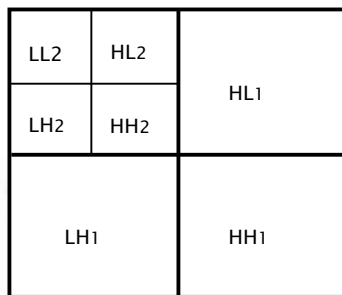


图1 小波二层分解示意图

基于小波的清晰度判别函数<sup>[6]</sup>可表示为:

$$M_{WTJ} = \sum_{n=1}^j \left[ \sum_{(x,y) \in LHn} |W_{LHn}(x,y)| + \sum_{(x,y) \in HLn} |W_{HLn}(x,y)| + \sum_{(x,y) \in HHn} |W_{HHn}(x,y)| \right] \quad (1)$$

式中,  $j$  为小波分解层数,  $W_{LHn}(x,y)$ 、 $W_{HLn}(x,y)$ 、 $W_{HHn}(x,y)$  为第  $n$  层各高频分量小波系数, 相应的分解窗口分别为  $LHn$ 、 $HLn$ 、 $HHn$ 。

CCD 图像采集产生的光学噪声和电噪声在小波变换后大量存在于高频系数中, 降低了图像的信噪比, 容易使清晰度判别函数曲线出现局部极大值。

## 3 小波尺度相关原理

信号和噪声在不同尺度空间有不同的衰减特性, 信号边缘和噪声都是奇异点, 数学上常用 Lipschitz 指数来表征函数的奇异性。假设图像信号  $f(x,y)$  在奇异点  $(x_0,y_0)$  处具有 Lipschitz 指数  $\alpha$ <sup>[8]</sup>, 若小波  $\psi(x)$  是实函数且连续可微, 且有  $n$  阶消失矩, 当且仅当存在常数  $K>0$ , 使得  $\forall(x,y)(x_0,y_0)$  邻域, 其二进制小波

变换满足:

$$|W_{2^j} f(x,y)| \leq K(2^j)^\alpha \quad (2)$$

式中,  $W_{2^j} f(x,y)$  表示尺度  $j$  上点  $(x,y)$  处含噪信号  $f(x,y)$  的离散小波变换系数。

$f(x,y)$  的小波变换在奇异点  $(x_0,y_0)$  处取模极大值。一般情况下, 信号的 Lipschitz 指数  $\alpha > 0$ , 噪声的 Lipschitz 指数  $\alpha < 0$ , 由式(2)可知信号小波系数幅值随尺度增大而增大, 噪声小波系数幅值随尺度增大而减小。因此, 可利用上述特性区分噪声和信号。噪声主要存在于小尺度小波系数上, 而在大尺度上小波系数衰减很快幅值较小; 信号的突变点无论是在小尺度还是大尺度上其小波系数幅值都较大。本文利用相邻尺度系数乘积构建清晰度判别函数, 可更好地提取有用信号, 抑制噪声, 使函数具有更好的单峰性和抗噪性。

相邻尺度系数的乘积定义为小波变换相邻尺度同一空间位置系数的相关量:

$$P_j^l(x,y) = W_{2^j}^l f(x,y) \times W_{2^{j+1}}^l f(x,y) \quad (3)$$

式中,  $(x,y)$  表示小波系数的空间位置,  $l$  为小波分解的分量方向。

## 4 算法描述

本文方法主要包括聚焦窗口选取和清晰度判别函数计算两部分。

### 4.1 聚焦窗口选取

聚焦窗口决定了对特定目标聚焦的准确性和实时性。参与计算的像素数越少, 聚焦速度越快。选取聚焦窗口的目的是采样尽可能少的像素代表整个图像的细节信息。文献[9]指出, 实际的拍摄场景通常是包含不同景深的多个物体, 只选取中央区域而忽略边缘场景会导致聚焦不准确。根据视觉及摄影习惯, 采用多区域窗口能够满足多景深聚焦的需求。因此本文取中央和其对角方向四个窗口, 使中央和偏离中央的成像目标基本都能被捕捉到。聚焦窗口为一个中央大窗口和四个分别以横向轴线和纵向轴线四分点为顶点坐标的小窗口。窗口的长和宽分别用  $m$ 、 $n$  表示, 中央窗口取  $m=\text{wid}/4$ ,  $n=\text{hei}/4$ , 其他四个小窗口取  $m=\text{wid}/8$ ,  $n=\text{hei}/8$ 。其中,  $\text{wid}$  和  $\text{hei}$  分别表示整幅图像的宽和长。窗口位置如图2所示。

### 4.2 清晰度判别函数计算

本文采用能量紧支撑的 DB4 小波基。小波函数  $\psi(t)$  具有  $n$  阶消失矩, 定义为:

$$\int t^p \psi(t) dt = 0, \quad p = 0 \sim n-1 \quad (4)$$



图 2 聚焦窗口示意图

较高的消失矩能够使尽量多的小波系数为零以利于消除噪声，但小波函数随着消失矩增加其支撑长度变宽，运算量增加。在相同的消失矩阶数的情况下，DB 小波具有最小的支撑长度。虽然在大尺度上噪声小波系数衰减更明显，但多层小波分解不利于实时操作，一般取二层小波变换。

本文利用相邻尺度小波系数构造了小波系数模值乘积的清晰度函数。由尺度相关原理可知，该乘积函数既能放大信号小波系数，又可缩小噪声小波系数，使清晰度函数曲线锐化，具有较高的灵敏度。

每帧图像计算清晰度判别函数的算法如下：

①对窗口内图像数据作二层小波变换，计算各尺度高频子代的小波系数。

②计算第一层和第二层小波高频系数相关积，即  $P^1_1(x,y)$  和  $P^2_1(x,y)$ 。

$$P^1_1(x,y) = |W^1_{2f}(2x,2y) \times W^1_{2f}(x,y)| \quad (5)$$

$$P^2_1(x,y) = |W^2_{2f}(2x,2y) \times W^2_{2f}(x,y)| \quad (6)$$

式中， $W^1_{2f}(2x,2y)$ 、 $W^2_{2f}(2x,2y)$  分别表示第一层小波变换的水平高频系数、垂直高频系数， $W^1_{2f}(x,y)$ 、 $W^2_{2f}(x,y)$  分别表示第二层小波变换的水平高频系数、垂直高频系数， $x,y$  是子代像素点的相对坐标。

③将每个小窗口内水平高频子代系数的相关积、垂直高频子代系数相关积累加求和。

$$f_{LU}(k) = \sum_{x=0}^{m/4} \sum_{y=0}^{m/4} P^1_1(x,y) + P^2_1(x,y) \quad (7)$$

式中， $f_{LU}(k)$  为左上窗口的清晰度函数， $k$  是图像序号。

④重复步骤①-③，对其他窗口内数据分别进行判别函数计算，最后求五个窗口的函数值总和即为清晰度评价函数  $f(k)$ 。

$$f(k) = f_{LU}(k) + f_{RU}(k) + f_{ML}(k) + f_{LD}(k) + f_{RD}(k) \quad (8)$$

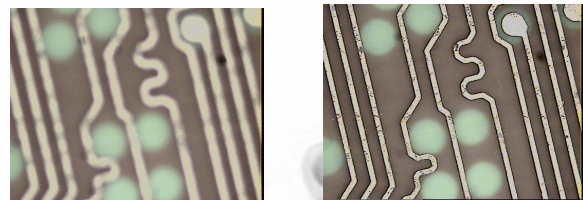
一个边缘结构在不同的尺度上，往往会以其真实位置为中心发生一定的偏移，因此可通过对相邻尺度上的小波系数进行相应的移位后再相乘(偏移量取决于小波基)，以使乘积达到最大。实验表明，对两个尺

度上的系数直接求取相关积可以满足要求。

### 5 实验结果分析

为验证本文提出方法的有效性，将本文方法 SCW(Scale-Correlation Wavelet)与经典的清晰度判别方法进行对比研究，参与对比的经典方法有：Tenengrad<sup>[2]</sup>、可变步长的 Laplacian<sup>[4]</sup>(简称为 SML, Step=7)、DCT<sup>[5]</sup>、小波清晰度函数(简称为 WT1)和小波系数方差函数(简称为 WVar)<sup>[6]</sup>。在 Windows XP 下用 C++Builder 6.0 编程实现了本文方法与上述参与对比研究的方法。为评估本文方法的函数曲线性能、抗噪性能和聚焦灵敏度，开展了以下三组实验。

实验 1 为清晰度函数曲线性能的对比研究。图像数据是通过手动调节 CCD 镜头从欠焦到聚焦再到过焦，采集一组 25 幅大小为  $768 \times 576$  的图像序列，图 3(a) 和图 3(b) 给出了其中一幅聚焦清晰和一幅离焦图像。对比实验结果如图 4 所示，纵坐标为归一化的聚焦函数值，横坐标为图像序号。从图 4 可以看出，本文方法的单峰性和无偏性相对于其它经典聚焦函数更好，其函数曲线的峰值陡峭程度更明显，较好地分辨出微小离焦量；本文方法的曲线较光滑，不易受噪声干扰。



(a) Cir1 聚焦图像 (b) Cir1 离焦图像

图 3 Cir1 图像

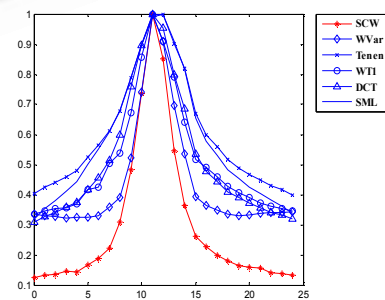


图 4 Cir1 聚焦函数曲线

实验 2 为验证本文方法的抗噪性。图像数据是模拟离焦成像原理对标准 Lena 图像分别进行  $1 \times 1 \sim 6 \times 6$  半径的高斯模糊，同时添加方差为 20 的高斯噪声，得到 6 幅图像，图 5 给出了其中一幅聚焦清晰和一幅离焦图像。实验结果如图 6 所示，从图中

可以看出，本文方法在峰值附近变化明显，受噪声影响小，其聚焦分辨率和抗噪性能明显优于其他方法。



图5 标准 Lena 清晰图像和模糊加噪图像

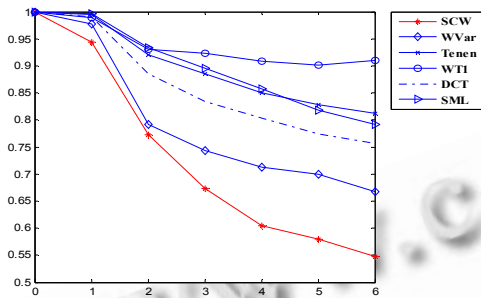


图6 Lena 图像清晰度判别函数比较

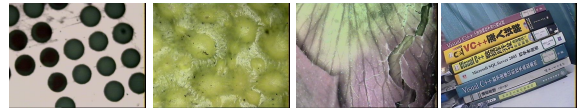
实验 3 为验证本文方法对不同内容结构图像的普遍适用性以及本文方法与其他方法的聚焦灵敏度对比研究。实验数据有 6 组图像，分别采用上文 Cir1 图像序列、Lena 加噪图像序列与采集的四组不同类型图像，待测四组图像中的清晰图像如图 7 所示。分别用灵敏度因子公式(10)式计算各方法在每组图像中的灵敏度因子  $s^{[3]}$ 。

$$s = (2 * v(t) - v(t-1) - v(t+1)) / 2 \quad (9)$$

式中， $t$  是每组图像的序号， $v(t)$  对应聚焦的图像函数值。实验结果如表 1 所示。由表 1 可看出，本文方法与其他方法相比有较高的灵敏度因子，平均灵敏度因子提高了约 0.149 ~ 0.221，说明本文方法的函数曲线在聚焦区域更为陡峭，具有较高的准确度和有效性。

表 1 灵敏度因子

Image	SML	Tenen	WT1	DCT	WVar	SCW
Cir1	0.051	0.051	0.114	0.076	0.174	0.207
Cir2	0.173	0.219	0.290	0.178	0.335	0.549
Orange	0.144	0.180	0.179	0.203	0.075	0.406
Rose	0.064	0.074	0.069	0.088	0.093	0.222
Lena	0.005	0.005	0.011	0.009	0.022	0.057
Books	0.044	0.044	0.065	0.039	0.141	0.144
Mean	0.096	0.130	0.146	0.119	0.168	0.317



(a)Cir2 (b)Orange Peel (c)Rose (d)Books

图7 待测的四组图像

## 6 结论

本文利用噪声和信号在尺度间不同的传播特性，提出了基于小波尺度相关的清晰度判别方法。该方法利用相邻尺度小波系数模值乘积构造了清晰度判别函数，实现了增强信号抑制噪声的目的，提高了判别函数的单峰性和抗噪性。多组实验结果表明本文方法的有效性，可应用于高精度自动聚焦设备中。

## 参考文献

- 1 Yap PT, Raveendran P. Image focus measure based on chebyshev moments. IEE Proc. Vision, Image and Signal Processing, 2004, 151(2): 128 - 136.
- 2 Choi KS, Lee JS. New autofocusing technique using the frequency selective weighted median filter for video cameras. IEEE Transaction on Consumer Electronics, 1999, 45(3): 820 - 826.
- 3 王倩, 宋思民, 许向阳, 刘宏. 基于加权邻域相关性的显微镜自动聚焦函数. 光学精密工程, 2008, 16(1): 166 - 171.
- 4 姜志国, 韩冬冰, 袁天云, 赵宇. 基于全自动控制显微镜的自动聚焦算法. 中国图像图形学报, 2004, 9(4): 396 - 401.
- 5 Lee SY, Kumar Y, Cho JM, Kim SW. Low-power passive focus measure operator based on the DCT for mobile phones. The Imaging Science Journal, 2008, 56(6): 301 - 306.
- 6 Yang G, Nelson BJ. Wavelet-Based autofocus and unsupervised segmentation of microscope images. Proc. of the 2003 IEEE/RSJ Int'l. Conference on Intelligence Robots and Systems, 2003, 2143 - 2148.
- 7 郭丙华, 廖启亮, 余志. 基于小波变换的快速自动聚焦算法. 中山大学学报(自然科学版), 2007, 46(2): 12 - 15.
- 8 雷运洪, 吴平东, 马木元, 陈之龙. 基于尺度相关性的小波变换边缘检测. 微计算机信息(管控一体化), 2007, 23(27): 270 - 272.
- 9 李奇, 徐之海, 冯华君, 戴顺林. 数字成像系统自动对焦区域设计. 光子学报, 2002, 31(1): 63 - 66.