

文章编号: 0253-2239(2009)02-0353-04

# 基于二代小波变换的红外图像非线性增强算法

秦翰林 周慧鑫 刘上乾 卢 泉

(西安电子科技大学技术物理学院, 陕西 西安 710071)

**摘要** 红外图像具有对比度低和信噪比低等特点,实用中必须进行增强处理。将小波分析与模糊逻辑相结合,提出了一种基于二代小波变换的红外图像非线性增强算法。该算法首先利用二代小波变换对图像进行分解,提取图像的多尺度细节特征,然后,根据目标和背景噪声信号的差异,通过模糊非线性增强算子分别对各个分解层的高频子带进行非线性增强来改变目标特征的强度,抑制背景信号,最后利用小波反变换重构图像,以实现图像的对比度增强和背景抑制。与几种常用的图像增强算法实验结果相比,此算法能有效地抑制图像中的背景噪声,增强目标内容信息,取得了较好的增强效果。

**关键词** 红外图像处理; 图像增强; 二代小波变换; 模糊逻辑

**中图分类号** TN219 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092902.0353

## Nonlinear Enhancement Algorithm for Infrared Image Based on Second Generation Wavelet Transform

Qin Hanlin Zhou Huixin Liu Shangqian Lu Quan

(School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

**Abstract** Because infrared image has the characteristics of low contrast and low signal-to-noise ratio, it is necessary to be enhanced. A second-generation wavelet transform based infrared image nonlinear enhancement algorithm is presented. The method is adopted to decompose the input infrared image, which extracts multi-scale detail features of the image. Then, according to the difference between target and background noise signal, a fuzzy nonlinear enhancement operator is used to enhance the details of target feature intensity under different scale. Finally, the inverse transform of wavelet is applied to reconstruct image. The algorithm can avoid over-enhanced noise and raise image contrast. Compared with other several image enhancement algorithms, several groups of experimental results demonstrate that the presented algorithm enhance content information the infrared images target effectively.

**Key words** infrared image processing; image enhancement; second-generation wavelet transform; fuzzy logic

## 1 引 言

红外焦平面阵列(IRFPA)成像系统具有分辨率高、结构简单、体积小以及灵敏度高等诸多优点,而在军事和民用上获得了越来越广泛的应用。由于热成像系统是对场景的温差成像,而场景中背景的温度相对较高,目标与背景的温差相对较小,这就导致了系统输出图像具有高背景、低反差的特点。为此需要对图像实施增强处理,以突出感兴趣的信息

或者更符合人眼视觉。目前,红外图像增强方法大致可分为空间域增强、频率域增强和小波域增强。空间域增强是直接对图像像素的灰度进行操作,例如直方图均衡化法<sup>[1]</sup>和形态滤波法<sup>[2]</sup>,其中灰度直方图均衡化是对图像的灰度直方图进行一种变换,使其灰度分布均匀或基本均匀,但是由于其对整个图像都采用同一变换公式,势必对细节部分增强的不够;形态学滤波法虽能有效地锐化边缘,但不能同

**收稿日期**: 2008-01-14; **收到修改稿日期**: 2008-08-15

**基金项目**: 教育部科学技术研究重点项目(108114)资助课题。

**作者简介**: 秦翰林(1982-),男,博士研究生,主要从事红外目标检测与跟踪等方面的研究。

E-mail: hlqin@mail.xidian.edu.cn

**导师简介**: 刘上乾(1937-),男,教授,博士生导师,主要从事红外图像处理和制导与跟踪等方面的研究。

E-mail: shqliu@mail.xidian.edu.cn

时去除噪声。频率域增强是对经傅立叶变换后的图像频谱成分进行操作,然后用傅立叶逆变换获得所需的结果,这包括频域高通滤波法<sup>[3]</sup>、反锐化掩模法<sup>[4]</sup>和同态滤波法<sup>[5]</sup>等,其中基于拉普拉斯锐化模板的卷积滤波,对噪声特别敏感;同态滤波法将图像亮度范围进行压缩并将图像对比度进行增强,其易去掉一些低频细节,且计算量较大。小波域增强<sup>[6]</sup>主要是对图像进行二维小波变换,再对变换后的小波系数进行处理,然后经小波逆变换得到增强后的图像,现有的小波分解重构都是基于 Mallat 算法,而其是以傅里叶变换为基础且建立在实数域上的,因此直接在时空域中设计滤波器比较困难,而且计算量较大。

二代小波是 1994 年由 Sweldens<sup>[7]</sup> 提出。二代小波与传统小波的主要区别在于小波基函数不是由某一个函数的平移和伸缩而产生,而完全是在时域进行的变换,不需要傅里叶变换;二代小波变换可以获得与传统小波变换同样的结果,即实现信号在不同频带上的分离。

本文提出了一种基于二代小波变换的红外图像非线性增强算法。该算法利用二代小波变换和模糊逻辑的数学理论以实现图像增强和噪声抑制的目的。算法首先利用二代小波变换提取图像的多尺度特征信息,并通过模糊增强算子来非线性地改变细节特征的强度,实现图像的对比度增强和背景抑制。从而有效地抑制图像中的背景噪声,突出目标内容图像信息(边缘和内部纹理信息)。

## 2 算法描述

### 2.1 二代小波变换

#### 2.1.1 小波提升框架

由于二代小波容易实现逆变换,所以在处理图像边界中具有更大的灵活性。二代小波从一个新的角度来构造小波滤波器,它的核心是确定预测算子和更新算子。对一维整数序列  $\{x(n)\}$  实施二代小波变换包含剖分、预测和更新三个步骤,如图 1(a) 所示。

1) 剖分。出于最大限度利用数据局域相关性的考虑,一般将  $j+1$  尺度下的信号  $S_{j+1}$  分成偶数抽样序列  $x_e(n)$  和奇数抽样序列  $x_o(n)$ , 即  $x_e(n) = x(2n)$ ,  $x_o(n) = x(2n+1)$ 。

2) 预测。利用  $x_e(n)$  预测  $x_o(n)$ , 其预测误差表示为

$$d(n) = x_o(n) - P[x_e(n)], \quad (1)$$

式中  $P$  为预测算子,  $d(n)$  为预测误差。预测误差  $d(n)$  也称小波系数,是原始数据的一个细节部分(对应高频分量)。显然,预测值  $P[x_e(n)]$  越接近  $x_o(n)$ , 预测误差  $d(n)$  就越小。

3) 更新。利用  $d(n)$  更新  $x_e(n)$ , 即

$$c(n) = x_e(n) + U[d(n)], \quad (2)$$

式中  $U$  为更新算子。更新的结果  $c(n)$  也称尺度系数,是原始数据的一个粗糙近似(对应低频分量)。

二代小波变换的一个很重要的优点就是它的每一步都是可逆的,而且逆变换和正变换结构成对、算子符号相反,从而可以实现精确重构。其逆变换也相应地分三个步骤:反更新、反预测、合并,如图 1(b) 所示。

反更新:用轮廓信号减去更新信号,以恢复偶数序列,即偶数序列 =  $S_{j+1}$  - 更新( $d_{j+1}$ )。

反预测:用细节信号加上预测值,以恢复奇数序列信号,即偶数序列 =  $d_{j+1}$  - 预测(偶数序列)。

合并:把奇数序列信号和偶数序列信号按下标次序合并到一起,即实现重建原始信号。

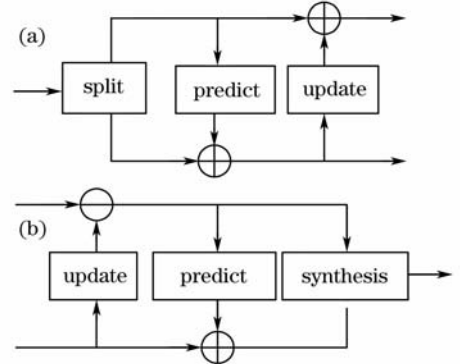


图 1 一维二代小波框架。(a)正变换,(b)反变换

Fig.1 Schematic diagram of one dimension second generation wavelet transform. (a) Signal decomposition, (b) signal reconstruction

#### 2.1.2 W5/3 小波提升格式

由二代小波变换的原理可以看出,其具有构造灵活、运算量小的优点。其核心——更新算子和预测算子不一定必须是线性的或是固定的,因此可以根据信号的局部特性构造出具有自适应性的非线性小波变换。W5/3 小波变换是一类典型的二代小波变换算法,其正变换的快速实现算法为

$$c(2n+1) = x(2n+1) - \left[ \frac{x(2n) + x(2n+2)}{2} \right], \quad (3)$$

$$d(2n) = x(2n) + \left[ \frac{c(2n-1) + c(2n+1) + 2}{2} \right], \quad (4)$$

其逆变换的快速实现算法为

$$x(2n) = d(2n) - \left[ \frac{c(2n-1) + c(2n+1) + 2}{2} \right], \quad (5)$$

$$x(2n+1) = c(2n) + \left[ \frac{x(2n) + x(2n+2)}{2} \right], \quad (6)$$

W5/3 小波变换是一种可逆的整数变换,其小波基的系数是整数且是 2 的次幂,且仅需一次预测和更新就可完成变换,易于硬件实现。因此采用 W5/3 小波变换来构造图像增强算法。

## 2.2 小波系数的模糊非线性增强

图像增强的目的在于得到视觉效果更“好”,感兴趣信息更加清晰的图像。根据人眼的视觉生理和心理学原理,同样亮度的物体在不同背景区域中给人的视觉感受是不一样的,即背景和目標物之间的绝对亮度差在高亮度区域需要较大的值才能和低亮度的值产生同样的视觉效果。基于此,采用模糊非线性增强算子来改变细节特征的强度,以凸现图像的内容信息。

由上述多尺度二代小波变换对图像分解所得到的的小波系数对应于不同尺度上的细节分量(子带系数),再利用模糊非线性增强算子来增加子带系数间的差别。这不仅能有效地提升各尺度上细节分量之间的对比度,而且能根据系数的值来控制增强的幅度,与此同时,这一增强过程也用于求尺度系数,以保证目标图像整体对比度的提升,凸现图像的内容信息。

首先利用得到的各尺度小波系数,获得相对于阈值  $T_n$  的模糊隶属度函数

$$\mu_{ij} = T(a_{ij}) = (a_{ij} - T_n) / (a_n^{\max} - T_n), \quad (7)$$

其次对模糊隶属度函数进行非线性调整<sup>[8]</sup>,所采用的非线性函数为

$$\mu'_{ij} = I(\mu_{ij}) = \begin{cases} \sqrt{1 - (1 + \mu_{ij})^2}, & -1 \leq \mu_{ij} \leq 0 \\ \mu_{ij}^2, & 0 < \mu_{ij} < r \\ \sqrt{1 - 2(1 - \mu_{ij})^2}, & r \leq \mu_{ij} \leq 1 \end{cases} \quad (8)$$

而后对  $\mu'_{ij}$  实施(7)式的反变换,即可得到非线性调整后的各尺度小波系数:

$$a'_{ij} = T^{-1}(\mu'_{ij}), \quad (9)$$

式中  $a_{ij}$  和  $a'_{ij}$  分别是调整前后的各尺度下的小波系数,  $a_n^{\max}$  为调整前第  $n$  个尺度上最大的小波系数值,  $T_n$  取值范围在  $0 \sim 255$  之间,其可由图像的直方图来确定。 $r$  是系数因子,其范围在  $0 \sim 1$  之间。它是模糊隶属度函数中的分段增益函数节点,用于控制图像增强的强度,可抑制代表噪声和背景的小系数,同时提升较大的系数,从而能更有效的抑制噪声和增

强目标内容信息。

## 2.3 算法实现流程

综上,基于二代小波变换的红外图像非线性增强算法包括以下步骤:

- 1) 对输入红外图像进行二代小波变换,即利用(3)式和(4)式对图像进行分解,得到不同尺度下的分解子带,即提取图像的多尺度细节特征。
- 2) 利用(7)式对所得到的各个高频子带进行模糊非线性增强,得到增强后的多尺度梯度子带图像。
- 3) 再采用(5)式和(6)式进行图像重建,最终就获得目标细节得到增强的红外图像。

## 3 实验结果与分析

为了验证算法的效果,利用了一组对比度较差的  $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$  的红外图像序列,采用常用的高通滤波、反锐化掩模、直方图均衡化、同态滤波增强算法以及本文提出的算法分别对原始图像中的目标图像内容进行增强。本算法中设定系数因子  $r=0.4$ 。图 2~图 7 给出了其中两组实验结果。

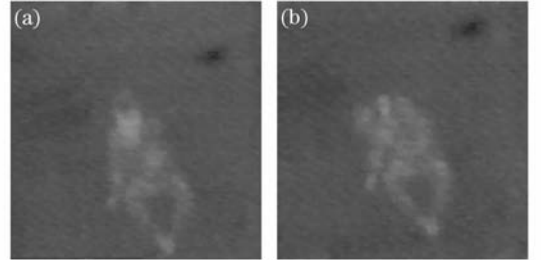


图 2 原图

Fig. 2 Raw image

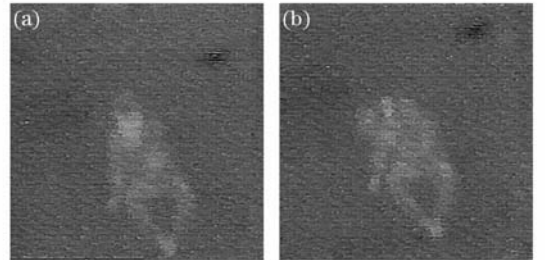


图 3 高通滤波法增强结果。(a) 图 2(a)处理结果, (b) 图 2(b)处理结果

Fig. 3 Result enhanced by the high-pass filtering. (a) processed result of Fig. 2(a), (b) processed result of Fig. 2(b)

图 2 为该组红外图像序列中的两幅原图,其明显地体现出红外图像所特有的高背景、低反差的特点,目标(人)与背景间的对比度非常差,目标图像内容信息(包括边缘和内部纹理信息)不明显,表现为目标边缘非常模糊、内部纹理灰度差异小。图 3~

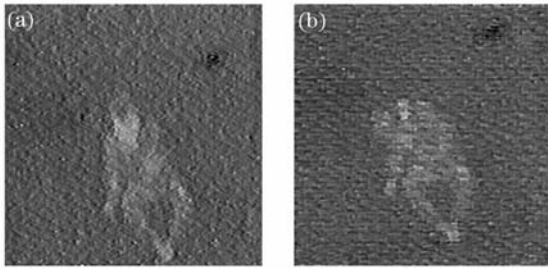


图 4 反锐化掩模法增强结果。(a) 图 2(a)处理结果,  
(b) 图 2(b)处理结果

Fig. 4 Result enhanced by the unsharp masking method.  
(a) processed result of Fig. 2(a), (b) processed  
result of Fig. 2(b)

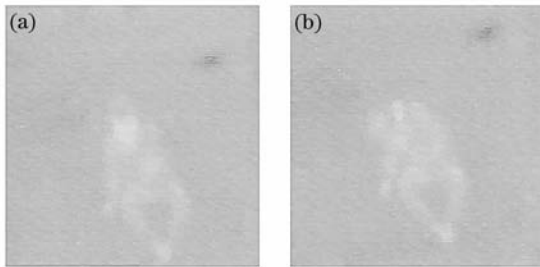


图 5 同态滤波法增强结果。(a) 图 2(a)处理结果,  
(b) 图 2(b)处理结果

Fig. 5 Result enhanced by the homomorphic filtering  
method. (a) processed result of Fig. 2(a),  
(b) processed result of Fig. 2(b)

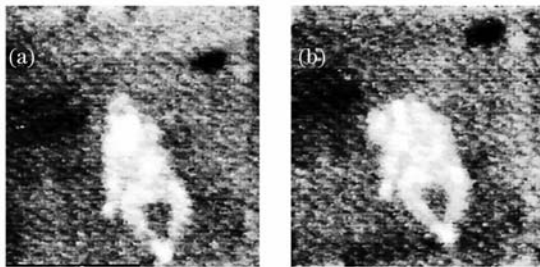


图 6 直方图均衡化法增强结果。(a) 图 2(a)处理结果,  
(b) 图 2(b)处理结果

Fig. 6 Result enhanced by the histogram equalization  
method. (a) processed result of Fig. 2(a),  
(b) processed result of Fig. 2(b)

图 6 分别是采用高通滤波、反锐化掩模、同态滤波以及直方图均衡化算法对图 2 的增强结果,它们的增强效果存在差异。高通滤波、反锐化掩模和同态滤波算法虽能增大目标与背景的对比度,但是由于目标大部分处于灰暗的区域,目标内部细节层次不清晰,增强后并没有很好地将目标背景和杂波抑制掉;而直方图均衡化算法虽然能很好的锐化图像边缘,但是对背景的抑制不是很好,而且目标图像的内部纹理细节信息几乎被淹没。图 7 给出了本文算法的

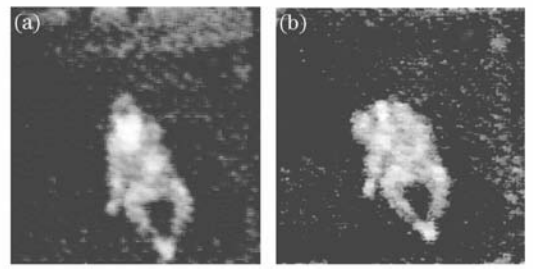


图 7 本文算法增强结果。(a) 图 2(a)处理结果,  
(b) 图 2(b)处理结果

Fig. 7 Result enhanced by the presented algorithm. (a)  
processed result of Fig. 2(a), (b) processed result  
of Fig. 2(b)

增强处理结果,其增强后图像的目标整体轮廓和背景间对比度有了一个明显的提升,目标边缘和内部纹理细节信息被很好保存并得到明显增强,增强后的目标图像与前面四种算法的结果相比更为清晰。

## 4 结 论

提出的基于二代小波变换的红外图像非线性增强算法,该算法利用二代小波多尺度分解操作提取图像的多尺度特征,并通过模糊非线性增强算子来改变图像特征的强度,实现图像的对比度增强和背景抑制。实验结果表明,算法在抑制高频噪声和背景的同时,不仅增强了图像的整体对比度,而且有效地增强了目标图像的内容信息。

## 参 考 文 献

- 1 J. Alex Stark. Adaptive image contrast enhancement using generalizations of histogram equalization[J]. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2000, **9**(5): 889~896
- 2 J. G. M. S. Chavemaker. Image sharpening by morphological filtering[J]. *Pattern Recognition*, 2000, **33**: 997~1012
- 3 Gonzalez R. C., Woods R. E.. *Digital Image Processing*[M]. Prentice Hall, 2003
- 4 Lee Y H, Park S Y. A study of convex concave edges and edge-enhancing operators based on the laplacian[J]. *IEEE Trans. on Circuits and Systems*, 1990, **37**(7): 940~946
- 5 Zheng Gang, Jia Zhenhong. Application of homomorphic technology in infrared images processing[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(9): 1401~1403  
郑 刚, 贾振红. 同态技术在红外图像处理中的应用[J]. *光子学报*, 2005, **34**(9): 1401~1403
- 6 Wang Gang, Xiao Liang, He Anzhi. Algorithm research of adaptive fuzzy image enhancement in ridgelet transform domain[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7): 1183~1190  
王 刚, 肖 亮, 贺安之. 脊小波变换域模糊自适应图像增强算法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(7): 1183~1190
- 7 Sweldens W.. The lifting scheme: A construction of second generation wavelet[J]. *SIAM J. Mathematical Analysis*, 1998, **29**(2): 511~546
- 8 Wang Hui, Zhang Jihong. An algorithm of edge detection based on fuzzy enhancement of contrast among successive regions[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2000, **28**(1): 45~47  
王 晖, 张宏宏. 图像边界检测的区域对比度模糊增强算法[J]. *电子学报*, 2000, **28**(1): 45~47