文章编号:1001-5078(2011)06-0635-06

・红外技术・

# 基于 Contourlet 变换和模糊理论的红外图像增强算法

# 彭 洲,赵保军 (北京理工大学信息与电子学院,北京 100081)

摘 要:红外图像具有噪声大、对比度低等特点,针对该特点,提出了一种基于 Contourlet 变换 与模糊理论的红外图像增强算法。首先对图像进行 Contourlet 变换,得到多尺度多方向的低通 子带和带通子带。对低通子带,进行基于子带系数最大最小值的线性变换,提高图像的整体对 比度;对于带通子带,先估计噪声阈值,对子带系数进行抑制噪声处理,然后通过模糊增强算 法,对高频系数进行非线性增强,增强目标边缘纹理的特征,抑制背景信号。最后经过 Contourlet 逆变换得到对比度增强,噪声被抑制的图像。经过算法仿真,与几种现有的图像增强算 法相比,该算法更能有效地抑制噪声,增强图像的对比度,突出图像的边缘与细节纹理信息。 关键词:图像处理;红外图像;图像增强;Contourlet 变换;模糊增强

中图分类号:TN219 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2011.06.008

# Novel scheme for infrared image enhancement based on contourlet transform and fuzzy theory

#### PENG Zhou, ZHAO Bao-jun

(School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Low contrast and large noise are two main characteristics of infrared image. Considering this characteristics, a novel scheme for infrared image enhancement based on Contourlet transform and fuzzy operator is proposed. Firstly, Contourlet transform is performed on the original infrared image, we can obtain low-pass subband and band-pass subband at different scales and directions. At low-pass subband, the linear transformation based on the maximal and minimal coefficient of subband is applied to enhance the global contrast. At band-pass subband, the noise threshold is estimated and denoising is carried out, then the fuzzy nonlinear enhancement operator is used to enhance the high frequency subband coefficient, the objective characteristics of the edge texture is enhanced, but the background is suppressed. Finally, the inverse transform of Contourlet is applied to produce enhanced infrared image. Through computer simulation and compareing with other common image enhancement scheme, the proposed scheme can suppress noise, enhance contrast and highlight the edge of the image texture information and details effectively.

Key words: image processing; infrared image; image enhancement; Contourlet transform; fuzzy enhancement

1 引 言

由于红外探测器的自身特性,红外图像具有对 比度低、信噪比低、立体感差、目标边缘模糊平滑、纹 理信息少等缺点<sup>[1-2]</sup>。在实际应用红外图像时,必 须先对红外图像进行增强处理。目前,经典的增强 算法有基于全局信息的直方图修正、直接灰度变换 以及基于小波变换的增强等多种方法。这些算法都 有其各自的缺点,比如基于小波的增强,由于二维小 波表示的方向有限,其对图像微小细节的增强明显 不足,它能很好地分辨出不连续的边缘点,但是不能 分辨出连续光滑的边缘点<sup>[3]</sup>。Contourlet 变换是一

作者简介:彭洲(1985-),男,博士,主要从事图像压缩及图 像增强等方面的研究。E-mail:pengzhou85@163.com 收稿日期:2010-12-06;修订日期:2011-02-19

种具有多方向性、多尺度性的多维函数表示方法,将 它应用于图像增强,能更好地保留图像边缘和纹理 信息,经讨 Contourlet 变换,代表噪声的 Contourlet 系 数将迅速衰减,代表图像轮廓和纹理信息的系数则 会相对稳定<sup>[1]</sup>,这些 Contourlet 变换的良好特性,能 解决上述那些经典增强算法丢失细节,不能很好抑 制噪声的缺点,在增强对比度的同时,能很好地保留 细节信息,抑制噪声。模糊理论能增强图像纹理两 侧像素的对比度,尽量地保持或者较少地改变纹理 处的像素值,而改变其两侧的像素值,这样既能增大 对比度又能很好地减少目标物的失真。将模糊理论 引入图像增强并结合 Contourlet 的特性,本文提出了 一种基于 Contourlet 变换与模糊理论的红外图像增 强算法,对Contourlet 变换后的各个子带进行独立地 增强,与现有的对 Contourlet 变换后子带的增强算法 相比,本文中的算法计算更加简单,更加便干硬件实 时实现,且增强后的效果优于已有的算法。

### 2 Contourlet 变换

Contourlet 变换是由 Do 和 Vetterli 提出的一种 新的多维函数的表示方法,它的基的支撑区间具有 随尺度而长宽比变化的"长条形结构",该变换将多 尺度分析和方向分析分开进行,用它对二维图像进 行描述时,有着能很好地表示细小的有方向的轮廓 和线段的独特优势<sup>[1]</sup>。它具有多分辨率、局部性、 方向性、近邻界采样和各向异性等性质<sup>[3]</sup>。与经 典的二维小波变换相比,它能用更少的系数来表 示图像,而且能更好地描述图像轮廓和方向性纹 理信息。

Contourlet 变换也可称为塔形方向滤波器组。 该变换的实现分为两个基本步骤:拉普拉斯金字塔 分解(LP)和方向滤波器组滤波(DFB)。LP 主要是 对图像进行多尺度分解,以捕获奇异点,DFB 主要 是将带通子带中分布在同方向上的奇异点合成为一 个系数<sup>[3]</sup>。

2.1 拉普拉斯金字塔分解

图1给出了拉普拉斯金字塔分解的一级分解 图。其中,*H*为分解滤波器,*G*为合成滤波器,*M*为 采样矩阵。



图 1 拉普拉斯金字塔一级分解 Fig. 1 one-level LP pyramidal transform

原始图像 x 先通过分解滤波器 H,然后进行 M 选1下采样,得到一个最简单的下采样缩略图 a。 再对 a 进行 M 插1上采样,然后经过合成滤波器 G, 能得到一个预测图像,将原始图像与预测图像相减, 得到一个差值图像 b。对缩略图 a 可以如此重复地 分解,进而得到多分辨率的图像。a 为低通图像,b 为带通图像。

2.2 方向滤波器组滤波

带通图像 b 经过方向滤波器组 DFB, DFB 将分 布在同方向上的奇异点合成为一个系数, 从而能得 到图像的轮廓。

图 2 展示了一个四方向滤波器组的结构,图中  $Q_0$ 为第一级的五株采样矩阵, $Q_1$ 为第二级的五株 采样矩阵,对于整个系统而言,其下采样矩阵就是  $Q_0Q_1 = 2E$ ,即各个方向上都进行了二抽取下采样。 带通子带 b 经过 DFB 后,形成了四个不同方向的 子带。



图 2 四方向滤波器组结构

Fig. 2 the structure of four direction filter bank

图 3 给出了将拉普拉斯金字塔分解和方向滤波 器组滤波融合在一起后的离散 Contourlet 两级变换 滤波器组结构图。原始图像经过滤波器组后,得到 了多尺度多方向的子带图像。



国5 两限 contouriet 两级支沃珀构图

### Fig. 3 the structure of two-level discrete Contourlet transform

# 3 对比度模糊增强函数

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,即背景和目标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<sup>[4]</sup>。模糊增强函数可以增强图像边缘两侧像 素灰度的对比度,减少图像的灰度层次<sup>[5]</sup>,在高亮 度区域时,能提升背景和目标物之间的绝对亮度差, 在低亮度区域时,绝对亮度差的提升程度没有高亮 度区域时高,这个特点正好符合了人眼的视觉特性。

首先构造模糊隶属度函数 *P<sub>ij</sub>*<sup>[5]</sup>,采用一种升半 梯形模糊分布求 *P<sub>ii</sub>*,即:

$$P_{ii} = T(x_{ii}) = (x_{ii} - D) / (x_{ii}^{\max} - D)$$
(1)

其中,D为可调参数,范围为 $D \le (x_{ij}^{max} - x_{ij}^{min})/2, D$ 的取值直接影响到图像增强的效果,在众多文献中 没有具体地给出该值的取法,后面本文将给出该值 的具体取法。

然后利用下面的广义模糊算子 GFO 对模糊隶 属度函数 *P<sub>ij</sub>进*行非线性调整<sup>[5]</sup>。

$$P'_{ij} = \text{GFO}(P_{ij})$$

$$= \begin{cases} \sqrt{1 - (1 + P_{ij})^2} & -1 \leq P_{ij} \leq 0 \\ P_{ij}^2 & 0 < P_{ij} < r \\ \sqrt{1 - 2(1 - P_{ij})^2} & r \leq P_{ij} \leq 1 \end{cases}$$
(2)

其中,r为可调参数,GFO 算子的作用是降低广义模 糊集  $P_{ij}$ 的模糊度,即通过增加  $-1 \le P_{ij} \le 0$  与  $r \le P_{ij} \le 1$  区域中  $P_{ij}$ 的值和降低  $0 < P_{ij} < r$  区域中  $P_{ij}$ 的 值,来增强这两个区域之间的对比度。它能抑制代 表噪声和背景的小系数,同时提升较大的系数。

最后对普通隶属度函数 P'<sub>ij</sub>进行逆变换,最终 得到经过增强处理后的 x'<sub>ij</sub>。

 $x'_{ij} = T^{-1}(P'_{ij}) = P'_{ij}(x_{ij}^{\max} - D) + D$ (3) 4 算法实现

- 并心天坑

4.1 低通子带的线性增强

经 Contourlet 变换产生的低通子带,包含了大量 的图像基本信息<sup>[6]</sup>,它就像原图像的缩略图。低通 子带中基本滤除了噪声,不包含噪声信息。它对原 始图像的最大影响是影响对比度,为了有效提高原 始图像的对比度,需要对低通子带系数进行拉升。 用线性拉升扩大图像的整体对比度,可以有效地增 加图像的层次感,同时线性拉升更易于实现,方便在 后续的实际应用中实现。

首先统计得到图像灰度值的最小值 x<sub>min</sub>和最大值 x<sub>max</sub>。然后用线性映射把灰度范围从[x<sub>min</sub>,x<sub>max</sub>] 映射到[0,255],映射函数为:

$$y = f(x) = 255(x - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min})$$
(4)

图 4 中实线所示的映射图即是 y = f(x) 的函数图。



#### 4.2 带通子带的模糊增强

经 Contourlet 变换产生的带通子带包含了大量 的多个分辨率下,多个方向的图像轮廓和纹理信息。 分解的级数越多,尺度也会越来越精细,随着尺度越 来越精细,代表噪声的 Contourlet 系数将迅速衰减, 代表图像轮廓和纹理信息的系数则会相对稳定。图 像信号的 Contourlet 系数强相关,而噪声的系数弱相 关或者不相关<sup>[1]</sup>。基于这个特点,在 Contourlet 带 通系数中进行抑制噪声处理会非常方便。首先对带 通系数进行抑制噪声处理,然后对抑制噪声后的系 数进行模糊增强,增强图像的轮廓和纹理信息。这 样在增强轮廓和纹理信息的同时可以有效地避免放 大噪声。

4.2.1 抑制噪声阈值的选取

对图像进行对比度提升时,噪声同时也会受到 提升,所以在提升之前需要对原始噪声进行抑制。 采用阈值抑噪对带通系数进行抑噪处理,阈值抑噪 中,阈值的选取对降噪后图像的质量非常关键,它直 接影响去噪的效果。阈值*T*取为<sup>[7]</sup>:

$$T = K \hat{\sigma} \tag{5}$$

其中, *ô* 为子带的噪声方差, 取带通系数最小尺度的 各个方向的带通子带噪声方差的最小值:

$$\hat{\boldsymbol{\sigma}} = \min(\hat{\boldsymbol{\sigma}}_{i,j}) \tag{6}$$

采用经典的中值估计公式对噪声方差进行 估值:

 $\hat{\sigma}_{i,j} = \text{Median}(|x_{i,j}|)/0.6745$  (7)

其中,x<sub>i,j</sub>为各个带通子带的系数。

*K*值的选择对阈值也有很大的影响,在最小尺度时*K*取4,其他尺度时*K*取3。

4.2.2 带通子带的系数调整

首先用以上所求的阈值 T,对系数进行抑噪处

理,采用硬阈值法:

$$x''_{i,j} = \begin{cases} x_{i,j} & |x_{i,j}| > T \\ 0 & |x_{i,j}| \le T \end{cases}$$
(8)

然后利用式(3)对抑制噪声后的系数 x"<sub>i,j</sub>进行 增强处理,即能得到增强后的带通子带系数,式(3) 中的 D 为可调参数,为了让图像的增强具有自适应 性,D 必须能根据子带的特性自动地进行调整,经过 大量试验,这里 D 取值为:

$$D = \text{Median}[x_{i,i}^{\min}, (x_{i,i}^{\max} + x_{i,i}^{\min})/2]$$
(9)

其中, $x_{i,j}^{\min}$ 与 $x_{i,j}^{\max}$ 分别为子带系数的最小值与最大值。D取区间[ $x_{i,j}^{\min}$ , ( $x_{i,j}^{\max} + x_{i,j}^{\min}$ )/2]的中值能使图像边缘纹理区域周围的背景信息得到更柔和的抑制与模糊,以免背景像素值在计算时出现溢出或者严重失真。

通过模糊增强,能增强图像纹理两侧像素的对 比度,尽量地保持或者较少地改变纹理处的像素值, 而改变其两侧的像素值,这样既能增大对比度又能 很好地减少目标物的失真。

4.3 算法的实现步骤

综合以上提到的原理和给出的算法,实现增强的步骤如下,算法流程图如图5所示。



图5 算法流程图

Fig. 5 block diagram of the proposed scheme

(1)对图像进行 Contourlet 变换,得到低通子带 和带通子带。

(2)对低通子带进行线性增强。采用第4.1节 中所提到的方法。

(3)对带通子带进行模糊增强。首先求取阈 值,进行抑噪处理,然后采用第4.2.2节中的方法对 抑噪后的带通子带进行模糊增强。 (4) 对处理后的低通子带和带通子带进行 Contourlet 逆变换,得到图像,即为进行了对比度提升的 图像。

#### 5 实验分析

为了验证算法的效果,以三幅中波探测器所成 的图像作为实验对象,图像的分辨率为256×256, 实验对象对比度低,灰度范围小,边缘和纹理信息比 较模糊。分别采用直方图均衡、小波变换、文献 [4]、文献[6]以及本算法对图像进行增强处理。

为了更好地说明图像经过对比度增强后的效 果,引入对比度测量函数<sup>[8]</sup>:

$$C_{\omega}(I) = \frac{1}{m} \sum_{\omega} |c(x,y)| \cdot \log(1 + |c(x,y)|)$$
(10)

其中:

$$c(x,y) = 4I(x,y) - \{I(x-1,y) + I(x,y-1) + I(x,y+1) + I(x,y-1)\}$$
 (11)  
式中,m 为整幅图像的像素个数,对于实验图像,  
 $m = 256 \times 256 = 65536; \omega$  代表整幅图像; $I(x,y)$  为图  
像中各个位置的像素值。对于图像四周的边界,即  
 $x = 0$  或者  $y = 0$  时,人为地定义  $c(x,y) = 0$ 。对比度  
测量函数  $C_{\omega}(I)$  值越大,则说明图像经过对比度增  
强后的效果越好。实验数据如表 1 所示。为了更加  
直观地表明对比度增强后图像细节纹理信息的增  
加,用 Sobel 算子边缘检测法统计出了增强后图像  
的纹理细节数目<sup>[9]</sup>。

表1 图像增强效果

Tab. 1 image contrast values

| 测试图像    | 对比度测量函数 |       |       | 纹理细节数目 |      |      |
|---------|---------|-------|-------|--------|------|------|
|         | 图 6     | 图 7   | 图 8   | 图 6    | 图 7  | 图 8  |
| 原始图像    | 1.06    | 0.86  | 0.76  | 866    | 1385 | 1263 |
| 直方图均衡   | 3.11    | 2.45  | 3.52  | 1015   | 1523 | 1447 |
| 小波变换    | 11.56   | 7.58  | 6.13  | 1311   | 1652 | 1724 |
| 文献[4]方法 | 13.09   | 7.97  | 8.38  | 1389   | 1846 | 1918 |
| 文献[6]方法 | 15.28   | 6.75  | 8.59  | 1581   | 1768 | 2092 |
| 本文算法    | 19.21   | 10.68 | 11.62 | 1658   | 2321 | 2217 |

对"源"字图像进行具体分析,图 6(a)为原始 图像,原图中,整幅图像偏暗,灰度范围偏窄。图像 下方建筑物的棱角、右上方窗户以及"源"字的边缘 不突出,比较模糊。建筑物和"源"字等目标物的亮 度接近于背景,对比度很弱。图 6(b)为直方图均衡 后的图像,对比度得到了提高,图像右下方部分原来 湮没在背景中的信息也表现了出来,但是同时底纹 背景噪声也显现了出来。图6(c)为小波变换后的 图像,对比度虽然得到了明显的提高,但是目标物内 部的层次细节没有能表现出来,底纹噪声等也没有 得到很好的抑制。图 6(d) 为文献[4] 算法增强后 的图像,对比度也得到了明显的提高,底纹噪声也得 到了很好地抑制,但是目标内部的层次信息还是没 有能凸显出来。图 6(e) 为文献 [6] 算法增强后的 图像,底纹噪声以及背景得到了很好地抑制,目标内 部的层次也显现了出来,但是部分细小的细节信息 被湮没了,比如右下角建筑物边缘信息。图6(f)为 经过本算法增强后的图像,对比度得到了显著的提 高,提高对比度的同时也很好地抑制了背景和底纹 噪声,目标内部的细节层次也表现了出来,对于细小 的细节信息也得到了很好地保留增强。其他两幅图 像实验结果如图7、图8所示。



(a)原图 (a) original image



(c)小波变换 (c) wavelet transform



(e)文献[6]方法 (e) literature [6]





(b)直方图均衡 (b) histogram equalization



(d)文献[4]方法 (d) literature [4]



(f)本文算法 (f) the proposed scheme





(c)小波变换 (c) wavelet transform





(b) histogram equalization



(d)文献[4]方法 (d) literature [4]



(f)本文算法

(f) the proposed scheme

(e)文献[6]方法 (e) literature [6] 图 7 仿真结果图



(a)原图 (a) original image



(c)小波变换 (c) wavelet transform



(b) 直方图均衡 (b) histogram equalization



(d)文献[4]方法 (d) literature [4]





(f)本文算法

(f) the proposed scheme

(e)文献[6]方法 (e)literature [6] (f) 图 8 仿真结果图

Fig. 8 the result of simulation

由表1可以看出,无论从对比度测量函数还是 从纹理细节数目上进行比较,本文提出的算法都优 于其他四种算法,与原始图像相比,纹理细节数目提 高了将近一倍。

#### 6 结 论

提出了一种基于 Contourlet 变换与模糊增强理 论的红外图像增强算法,对变换后得到的各个子带 系数依据其各自的特点进行独立的抑噪和对比度增 强处理,对低通子带进行了基于最大最小值的线性 变换,有效地扩大了图像的整体对比度,该线性变换 运算简单,实现方便。为了在增加对比度的同时防 止噪声也被放大,首先对带通子带进行抑噪处理,然 后引入模糊理论,给出了重要参数 D 的取法,对图 像进行模糊增强,提升对比度。经过仿真实验,证明 该算法能有效地提高图像的对比度,抑制噪声,突出 图像的边缘、细节纹理信息,比直方图均衡、小波变 换、文献[4]以及文献[6]中的常用算法更加有效。

### 参考文献:

- [1] Lin Liyu, Zhang Youyan, Sun Tao. Contourlet transform
  [M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese)
  林立宇,张友焱,孙涛. Contourlet [M]. 北京:科学出版 社,2008.
- [2] Guan Zhiqiang, Chen Qian, Gao Yang. A filter for infrared image edge enhancement Based on local balance[J]. Laser & Infrared, 2008, 38(3):285-288. (in Chinese)
   管志强,陈钱,高洋. 一种基于局部平衡的红外图像锐

化算法[J]. 激光与红外,2008,38(3):285-288.

- [3] Minh N, Martin Vetterli. The contourlet transform: an efficient directional multiresolution image representation [J].
   IEEE Transaction On Image Processing, 2005, 14 (12): 2091 2106.
- [4] Qin Hanlin, Zhou Huixin, Liu Shangqian, et al. Nonlinear enhancement algorithm for infrared image based on second generation wavelet transform [J]. Acta Optica Sinica, 2009,29(2):353-356. (in Chinese) 秦翰林,周慧鑫,刘上乾,等. 基于二代小波变换的红 外图像非线性增强算法[J]. 光学学报,2009,29(2): 353-356.
- [5] Wang Hui, Zhang Jihong. An algorithm of edge detection based on fuzzy enhancement of contrast among successive regions [J]. Acta Electronic Sinica, 2000, 28 (1): 45-47. (in Chinese)
  王晖,张基宏. 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.
- [6] Shi Dan, Li Qingwu, Ni Xue, et al. Infrared image nonlinear enhancement algorithm based on contourlet transform
  [J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(2): 342 346. (in Chinese)
  石丹,李庆虎, 倪雪,等. 基于 Contourlet 变换的红外图
  像非线性增强算法[J]. 光学学报, 2009, 29(2): 342 346.
- [7] Ren Hong-e, Wang Haifeng, Zhao Peng. Wavelet-based Contourlet transform for image de-noising using cycle spinning[J]. Optical Technique, 2008, 34(6):854 -861.(in Chinese)
  任洪娥,王海丰,赵鹏.基于小波-Contourlet 变换的 Cyecle spinning 硬阈值去噪方法[J]. 光学技术, 2008, 34(6):854 - 861.
- [8] Jinshan Tang, Xiaoming Liu, Qingling Sun. A direct contrast enhancement algorithm in the wavelet domain for screening mammograms [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2009, 3(1):74 - 80.
- [9] Sara Hashemi, Soheila Kiani, Navid Noroozi, et al. An image contrast enhancement method based on genetic algorithm [J]. Pattern Recognition Letters, 2010, 31: 1816-1824.