

# 基于非下采样 Contourlet 变换的 自适应图像融合算法

郭 雷, 刘 坤

(西北工业大学, 陕西 西安 710072)

**摘 要:**Contourlet 变换克服了小波变换在处理高维信号时的不足,但 Contourlet 分解和重构时需要采样因此不具有平移不变性,因此根据 átrous 算法构造了非下采样 Contourlet 变换(nonsampled Contourlet transform, NSCT)。NSCT 比 Contourlet 变换具有更灵活的方向性、且具有平移不变性。因此将 NSCT 变换应用于图像融合领域,能更好地提取图像边缘特征,为融合提取更多的特征信息。基于 NSCT 的自适应图像融合算法是将图像进行 NSCT 分解后,针对在不同频率域特点选择不同的融合规则,最后通过重构得到融合图像。通过对试验结果进行的主观和客观的对比,试验结果表明 NSCT 能够为融合图像保留更全面的原始图像信息,且基于 NSCT 的自适应图像融合算法能够更加有效、准确地提取图像中的特征,是一种有效可行的图像融合算法。

**关 键 词:**图像处理, 图像融合, 非下采样 Contourlet 变换, 融合规则

**中图分类号:**TP391

**文献标识码:**A

**文章编号:**1000-2758(2009)02-0255-05

随着多尺度几何变换理论的深入研究,多尺度几何变换能越来越有效且全面表述图像中的信息,能更精确地捕获图像的边缘信息。因此将多尺度几何变换引入图像融合能更有效地提取图像中的几何特征,获得的融合图像可以为后续处理提供更加准确、可靠、全面的信息。成功应用于图像融合的小波变换有其局限性,由一维小波张成的可分离小波只具有 3 个方向,小波变换适合于描述各向同性的点状奇异性,不能“最优”表示含“线”或者“面”奇异性的高维函数,因此无法精确表达图像边缘方向信息<sup>[1]</sup>。针对小波变换的缺点, M. N. Do 和 M. Vetterli 于 2002 年提出了一种“真正的”二维图像表示方法 Contourlet 变换<sup>[2]</sup>。Contourlet 变换比小波变换具有更好的多分辨率、局部性、方向性和各向异性。但是由于其变换过程中的下采样操作,信号频谱会产生混叠现象,融合图像中则表现为较明显的吉布斯现象。Arthur L. da Cunha 等受构造非下采样小波的启发提出了一种非下采样 Contourlet 变换(nonsampled Contourlet transform,

NSCT),该变换比 Contourlet 变换具有更灵活的多分辨、多方向的图像表示能力,且以冗余度换取了平移不变性<sup>[3]</sup>。因此将 NSCT 应用于图像融合领域可以提取图像的轮廓特征,为融合图像提供更为更全面准确的特征信息。本文结合人眼对图像中灰度值越大越敏感的视觉特性,提出了一种基于 NSCT 的自适应图像融合算法。

## 1 图像的非下采样 Contourlet 变换

Contourlet 基的支撑区间具有随尺度改变而长宽比变化的“长条形”结构,这种结构可达到用最少的系数来逼近奇异曲线,而这种结构实际上是方向性的一种表征,因此 Contourlet 变换的每个尺度可以有不同数目的方向<sup>[2]</sup>。

Contourlet 变换将多尺度分析和方向分析分开进行,首先由拉普拉斯金字塔(Laplacian Pyramid, LP)变换对图像进行多尺度分解以“捕获”点奇异。随后对每一级金字塔分解的带通信号进行方向滤

波,由方向滤波器组(Directional Filter Bank,DFB)将分布在同一方向的奇异点合成为一个系数<sup>[4,5]</sup>。与Contourlet变换类似,NSCT利用一个双滤波器组结构,将多尺度分解和方向分解结合到一起。与Contourlet变换不同的是,NSCT利用非采样塔形滤波器组(Nonsubsampled Pyramid Filter Bank,NSPFB)和非采样方向滤波器组(Nonsubsampled Directional Filter Bank,NSDFB),由于在分解和重构过程中不进行采样,利用átrous算法实现并生成一种灵活的多尺度、多方向且平移不变的图像分解方法,首先利用塔形滤波器组获取图像的多尺度分解,其思想来源于átrous算法可将图像分解为与原始图像大小一致的多尺度塔形结构;随后用方向滤波器组对各尺度图像进行方向分解,其结构框架图如图1所示<sup>[3]</sup>。NSCT去除了Contourlet变换中LP和DFB分解前的下采样和重构前上采样,NSCT改对方向滤波器组进行了适当的上采样,随后进行信号的分解和重构,因此NSCT消除了Contourlet变换的频率混叠现象<sup>[3]</sup>。

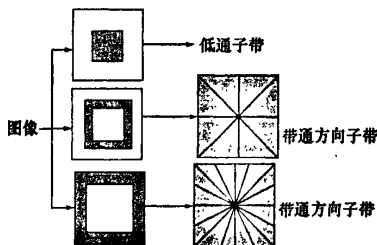


图1 NSCT对图像的多尺度多方向分解结构图

## 2 基于NSCT的自适应图像融合算法

NSCT继承了小波变换空间和频域的局部性,Contourlet基的长宽比可变,所以它是一种灵活的多分辨率多尺度分解,比小波变换具有更强的方向性;NSCT相比Contourlet变换具有更好的频域选择性和规则性。基于此,本文提出一种基于NSCT的自适应图像融合算法,融合算法的实现如下:

(1) NSCT分解 对待融合图像A和B分别进行NSCT分解,得NSCT系数 $\{H_{j,k}^A, L^A\}$ 和 $\{H_{j,k}^B, L^B\}$ 。其中,L为低频信息, $H_{j,k}$ 为尺度j下第k个方向的高频信息。

(2) 融合规则设计 NSCT分解后的低频信息和高频信息具有不同的物理意义,因此需要对图像的高频细节信息和低频近似信息加以区分,采用不

同的融合算子和融合规则。

### ① 低频信息融合规则

低频信息保留了原始图像的概貌信息。目前低频图像的融合规则多采用简单平均。简单平均的融合策略多适用于分解时对图像进行了抽取导致原始图像缩小的情况,且NSCT分解后的低频图像与原始图像大小一致;简单的加权平均融合规则将参与融合的图像源信息都进行平均计算导致信息的冗余,以致图像的灰度失真,因此目标的可分辨程度也下降,为后续处理带来诸多不便。而图像的特征不是由单一的一个像素点所表征,是由组成这一特征区域内的多个像素来表征和体现的。因此,本文将加权的融合策略和基于窗口的融合策略相结合,即保留了原始图像的大量信息又考虑了相邻领域内的信息,也增强了图像区域内像素点的相关性。其中,通过窗口选择清晰度较好的区域以及根据人类视觉对图像中灰度大的明亮部分较为敏感特性,自适应地选择加权系数w,w根据区域图像的清晰度和图像灰度自适应的改变,即融合后的低频信息为

$$L^F(m,n) = \frac{w_A}{w_A + w_B} \times L^A(m,n) + \frac{w_B}{w_A + w_B} \times L^B(m,n) \quad (1)$$

式中,大小为 $M \times N$ 区域内权重系数w的定义为

$$w = \frac{I(m,n) \times \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} \sqrt{(\Delta I_x^2 + \Delta I_y^2)/2}}{I_{\max} \times M \times N} \quad (2)$$

式中, $I_{\max}$ 表示区域中灰度最大值, $I(m,n)$ 表示为区域中心像素点的灰度值。

### ② 高频信息融合规则

高频信息中绝对值较大的系数对应着一些突变,如图像的边缘、纹理等重要特征信息。高频分量选择以空间频率为度量标准结合自适应因子w和T进行基于区域的自适应融合。图像的空间频率反映了1幅图像在空间域的总体活跃程度。图像的空间频率定义为

$$SF = \sqrt{RF^2 + CF^2} \quad (3)$$

式中,RF为图像的行频率,CF为图像的列频率,其定义分别为

$$RF = \sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} [I(i,j) - I(i,j-1)]^2}$$

$$CF = \sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} [I(i,j) - I(i-1,j)]^2} \quad (4)$$

利用相关系数判别 2 幅图像的相关程度。相关系数的定义为

$$\text{corr}(I, J) = \frac{\sum_{i,j} [(I(i,j) - \bar{I}) \times (J(i,j) - \bar{J})]}{\sqrt{\sum_{i,j} [(I(i,j) - \bar{I})^2] \sum_{i,j} [(J(i,j) - \bar{J})^2]}} \quad (5)$$

设定阈值  $T$ , 当  $\text{corr} \leq T$  时表明 2 个区域的相关性差, 空间频率较大者表示该区域内包含较多的特征, 因此选择 2 个区域中空间频率较大的区域作为融合图像的高频信息, 即

$$\begin{cases} H_{j,k}^f(m,n) = H_{j,k}^A(m,n) & SF_A > SF_B \\ H_{j,k}^f(m,n) = H_{j,k}^B(m,n) & SF_A \leq SF_B \end{cases} \quad (6)$$

若当  $\text{corr} > T$  时, 表明 2 个区域的相关程度高, 2 幅图像中都包含相当的特征, 因此根据区域的空间频率大小确定自适应因子  $w$

$$\begin{cases} w = 0.5 + 0.5 \times \frac{1 - \text{corr}}{1 - T} & SF_A > SF_B \\ w = 0.5 - 0.5 \times \frac{1 - \text{corr}}{1 - T} & SF_A \leq SF_B \end{cases} \quad (7)$$

故融合图像的高频信息为

$$H_{j,k}^f(m,n) = w \times H_{j,k}^A(m,n) + (1 - w) \times H_{j,k}^B(m,n) \quad (8)$$

(3) NSCT 重构 根据上述步骤中确定的融合图像的低频信息  $L^f$  和不同尺度下不同方向上的高频信息  $H_{j,k}^f$  进行 NSCT 重构, 可得到最终的融合图像  $F$ 。

### 3 实验结果及分析

选取多聚焦图像进行融合实验, 如图 2(a)和图 2(b)分别为聚焦不同的图像, 图 2(c)为清晰理想图像。为了方便数据的比对, 将 4 种采用传统融合规则的多尺度分解算法和基于 NSCT 自适应图像融合算法进行了对比, 获得的融合图像分别如图 2(d)~图 2(h)。其中 4 种多尺度分解方式分别为 Mallat 算法、 $\acute{a}$ trous 算法、Contourlet 算法、NSCT 算法。传统的融合规则为高频信息选择绝对值最大值, 低频信息取平均的融合规则。Mallat 算法和  $\acute{a}$ trous 算法均分解 3 层, Contourlet 算法和 NSCT 算法均多尺度分解 3 层, 尺度从粗到细的方向分解分别为 2、8、16。从图 2 中可以看出, 由于 Mallat 算法和 Contourlet 算法均由于分解和重构过程中的采样得到的融合图像在特征的边缘出现了吉布斯现象, 其中 Mallat 算法由于其方向表达能力有限, Mallat 算法获得的融合图像中在小闹钟的上边缘出现了明显的断裂感;  $\acute{a}$ trous 算法和 NSCT 算法在边缘的表述上有了改善, 但  $\acute{a}$ trous 算法由于自身限制只有 3 个方向, 因此对图像中细节信息表述效果一般, NSCT 算法相比  $\acute{a}$ trous 算法可分解更多的方向, 因此也有更好的方向表达能力, 在图像的细节信息的表述上优于  $\acute{a}$ trous 算法; NSCT 自适应算法得到的融合图像能够有效集中源图像中清晰部分特征信息, 对边缘以及图像细节信息表述的更为清晰突出, 主观目视效果好。

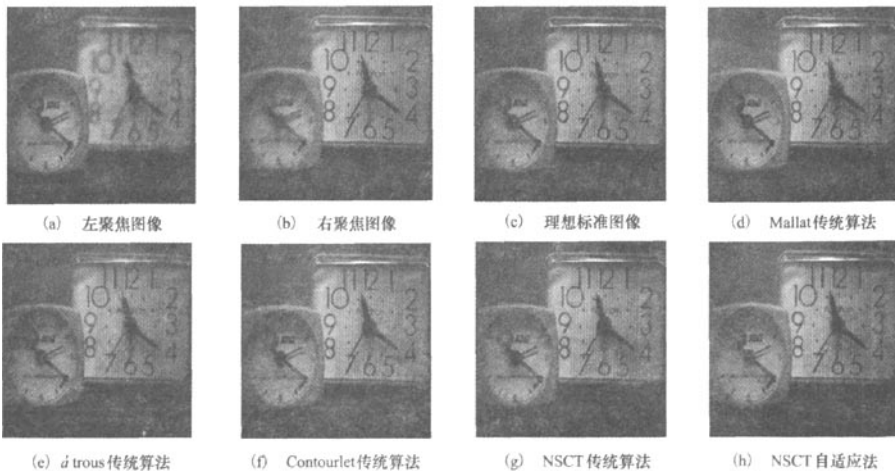


图2 多聚焦图像融合试验

除了主观的视觉评价,还需要定量地对融合效果进行评价,选用相关系数(Correlation Coefficient)、扭曲程度(Distort degree)、信噪比(SNR)以及峰值信噪比(PSNR)这 4 种客观指标对融合结果进行评价。相关系数、SNR 和 PSNR 越大表示融合图像与理想图像的差异越小,融合效果和质量相对越好;扭曲程度越小表示融合图像与理想图像的失真程度越小。表 1 对比了图 2 中 5 种算法

的融合图像的客观评价指标。与主观视觉分析一致,基于传统融合规则的 4 种算法中 NSCT 算法的指标最优,说明 NSCT 比小波变换和 Contourlet 变换具有更好的方向表述能力并能提取更多原始图像的信息;而本文算法相比于基于传统规则的 NSCT 算法的各项指标又有了提高,因此本文设定的自适应融合规则是有效的。

表 1 多聚焦融合图像性能客观评价

	相关系数	扭曲度	信噪比(SNR)	峰值信噪比(PSNR)
Mallat 传统算法	0.989	4.035 9	23.235 0	6.252 9
átrous 传统算法	0.990	3.716 2	23.945 1	6.977 2
Contourlet 传统算法	0.989	4.520 0	22.889 7	6.779 3
NSCT 传统算法	0.991	3.525 7	24.103 4	7.114 3
NSCT 自适应算法	0.991	3.496 8	24.400 6	7.475 9

## 4 结 论

本文将 NSCT 与基于窗口选择特性的融合规则相结合,图像融合算法能有效提取图像特征,NSCT 具有的位移不变性能消除由于 Contourlet 采样所产生的伪吉布斯现象。本文选择有效的融合规则更能凸现 NSCT 变换的优势,提高了融合图像的

清晰度以及人眼的分辨能力。通过实验验证,本文的融合规则能有效提取原始图像中的信息,且本文的融合算法是一种有效的、可靠的图像融合算法。但 NSCT 的数据量大,运算耗时,因此研究 NSCT 的快速实现方法,以及如何根据 NSCT 系数的特点和图像特点制定有效的融合规则都将是未来的研究重点。

## 参考文献:

- [1] 李晖晖,郭 雷,李国新. 基于脊波变换的 SAR 与可见光图像融合研究. 西北工业大学学报,2006,24(4),418~422  
Li Huihui, Guo Lei, Li Guoxin. Is Ridgelet Transform Better than Wavelet Transform in SAR and Optical Image Fusion? Journal of Northwestern Polytechnical University, 2006, 24(4), 418~422 (in Chinese)
- [2] Do M N, Vetterli M. The Contourlet Transform, An Efficient Directional Multiresolution Image Representation. IEEE Trans on Image Processing, 2005, 14 (12), 2091~2106
- [3] Do M N, Vetterli M. Pyramidal Directional Filter Banks and Curvelets. Proc IEEE International Conference on Image Processing, Thessaloniki, Greece, 2001, 3: 158~161
- [4] Do M N. Directional Multiresolution Image Representation. Ph. D. Thesis, Department of Communication Systems, Swiss Federal Institute of Technology(EPFL), Lausanne, Switzerland, 2001
- [5] da Cunha A L, Zhou Jianping, Do M N. The Nonsubsampled Contourlet Transform, Theory, Design, and Applications. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(10), 3089~3101

## Applying NSCT (Nonsubsampled Contourlet Transform) Theory to Achieving Effective Image Fusion

Guo Lei, Liu Kun

(Department of Automatic Control, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** Aim. In our opinion, traditional image fusion algorithms based on Contourlet transform are not quite effective. So we propose applying Ref. 5's NSCT theory to achieving effective image fusion. Section 2 of the full paper explains the NSCT based algorithm. It explains essentially three things; (1) the low-frequency information fusion rule uses the weighted average mean to obtain the fused low-frequency information as eq. (1); (2) the high-frequency fusion rule uses the spatial frequency of image as its measurement criterion and obtains the fused high-frequency information; (3) the final fusion image is obtained by performing the NSCT reconstruction of the low-frequency information and the high-frequency information. Section 3 analyzes the results of experiments, which are given in Fig. 2 and Table 1. The analysis shows that the NSCT based algorithm is effective for retaining the original image information and extracting the characteristics of the image to be fused.

**Key words:** image processing, image fusion, nonsubsampled Contourlet transform (NSCT), fusion rule

### 薛昌明论文居 2007 年《工程索引》(EI)年刊有关主题下世界首位

薛昌明 2007 年 EI 年刊编号为 07-074817 的论文被收录达 40 行,在 fatigue crack propagation 主题词 (Ei main heading) 下居世界首位。

2007 年起 EI 年刊字缩小,因此 2007 年的 40 行约相当于 2006 年以前的 50 行以上。2000-2006 七年间,华东理工大学有 6 篇被 EI 年刊收录在 50 行以上,6 篇作者中都有薛昌明而且多数都是薛昌明为第一作者。在 2000-2006 七年中,大陆还有 14 校有为 EI 年刊收录在 50 行以上的论文,除北京大学有 2 篇外,其余 13 校都各 1 篇。2000-2006 七年 MIT 也只有 10 篇被 EI 年刊收录在 50 行以上。

薛昌明自台湾去美国,多年在美国 Lehigh 大学工作。

胡沛泉

2009 年 3 月