

文章编号:1004-4213(2010)08-1388-6

基于区域分维和非采样 Contourlet 变换的 图像融合算法*

刘少鹏,郝群,宋勇,胡摇

(北京理工大学 光电学院,北京 100081)

摘 要:针对源图像有用信息的提取,提出了基于区域分维和非下采样 Contourlet 变换相结合的红外与可见光图像融合算法.将图像的区域属性、区域大小、边缘强度以及纹理显著程度等特点用图像不同尺度上的区域分维进行描述,对于非下采样 Contourlet 变换低频系数,根据源图像不同尺度上的区域分维进行基于系数选择的融合.针对带通子带系数设计了系数局部匹配度算子,依据匹配度不同采用加权和系数选取相结合的融合规则.与其他常规融合方法进行比较,该算法可有效实现红外与可见光图像的融合.

关键词:图像融合;区域分维;Contourlet 变换;匹配算子

中图分类号:TP391

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20103908.1388

0 引言

在图像融合技术中,基于多分辨率分析的图像融合算法是一种应用十分广泛的算法^[1-3].对于作为人眼观测对象的红外与可见光融合图像来说,在多分辨率分析算法的基础上设计满足人眼视觉感知特性,同时兼顾红外与可见光图像融合固有特点的融合规则具有重要意义.生理学研究证明,一幅图像由具有不同感知重要程度的三个部分构成^[4]:平滑区域、边缘区域和纹理区域.除此之外,在红外与可见光图像融合中,区域的大小也对区域重要程度产生影响,小区域和小边缘通常具有比大区域和大边缘的重要程度^[3].然而,现有的区域活跃度^[1-3]、区域熵^[5]、梯度^[6]、局部可视度^[7]以及局部能量^[8]等算子及在此基础上设计的融合规则或者不能很好地满足人眼的视觉感知特性,或者没有考虑红外与可见光图像融合的固有特点.因此,在红外与可见光图像融合过程中将区域属性、区域大小、边缘强度以及纹理显著程度等影响视觉效果的因素进行综合考虑,用一种理论来描述这种复杂而模糊的关系,以得到最符合视觉习惯的图像,是一项必要的工作.

本文结合分形几何和非下采样 Contourlet 变换(Nonsampled Contourlet Transform, NSCT)理论提出一种红外与可见光图像融合新方法.算法

引入区域分维理论对以上复杂而模糊的关系进行了描述,并根据分形分维理论设计了合理的低频系数融合规则.针对 NSCT 的带通子带系数,仿照信息论中的散度公式设计了匹配度公式,并根据区域匹配度对带通子带系数采用两种不同融合规则进行融合.

1 非下采样 Contourlet 变换基本理论

2002 年 M. N. Do 等人提出了 Contourlet 变换^[9-10].相对于小波变换,Contourlet 变换能用不同尺度、不同频率的子带更准确地捕获图像中的分段二次连续曲线,从而使图像的代表系数更加稀疏.但是 Contourlet 变换的两个主要步骤拉普拉斯变换和 DFB 分解均有下采样过程,因此 Contourlet 变换是不具有平移不变性的,这在图像处理中会导致 pseudo-Gibbs 现象,在图像处理时会影响视觉效果,基于此种原因,Arthur L. Cunha 等人在 2006 年提出了一种具有平移不变性的 Contourlet 变换,即 NSCT.相对于 Contourlet 变换,NSCT 采用非下采样塔式滤波器组(Nonsampled Pyramid FilterBank, NSP)和非下采样方向滤波器组(Nonsampled Directional FilterBank, NSFDB)对图像进行迭代分解,与 NSP 相结合,对 NSP 的带通图像采用 NSFDB 非下采样二通道方向滤波器组进行方向滤波即可得到图像具有完全平移不变特性的多尺度、多方向的稀疏表示.NSCT 中采用的 NSFDB 结构如图 1^[11].

* 国家自然科学基金(60578053)资助

Tel:010-81619703

Email:digilshp@gmail.com

收稿日期:2009-08-26

修回日期:2009-10-26

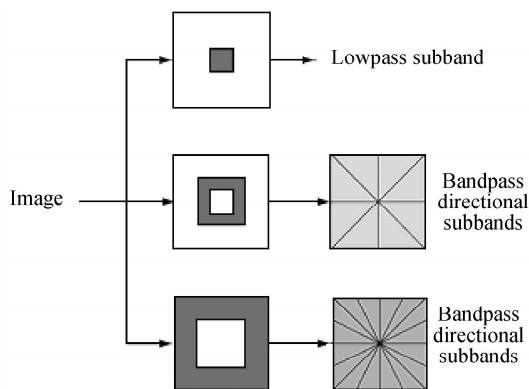


图 1 NSCT 结构
Fig. 1 Frame of NSCT

实验证明,将 NSCT 引入图像融合可以更加有效地提取源图像的轮廓特征,使融合过程中特征的提取和处理更加方便,从而可以在融合图像中保留更多有效的原始特征,得到更优的融合效果.本文在对带通子带系数的融合过程中也利用了 NSCT 的这一良好特性,取得了很好的效果.

2 基于区域分维的图像融合算法

2.1 算法概述

红外与可见光图像融合总是希望融合结果保留最清晰的背景和完整的目标信息.算法采用源图像不同尺度上的区域分维指导图像低频系数融合,首先依据源图像小尺度上的区域分维判断源图像对应像素所属区域是否具有相同属性,对于根据小尺度上区域分维判断为具有不同区域属性的像素,认为源图像之一对应像素处于边缘区域,而另一幅源图像对应像素处于平滑或纹理区域,因此选择具有边缘属性的系数作为融合图像低频系数;对于小尺度上判断为具有相同属性的像素,则根据大尺度上的区域分维来指导融合,以实现突出小区域、小边缘或者强边缘、强纹理区域的目的.具体实施方法将在 2.3 节中介绍.对于带通子带系数,则设计了局部匹配度算子,对匹配度高的区域进行基于系数选取的融合,对匹配度低的区域进行基于局部能量的加权融合,这样既可得到清晰的背景,又不会遗漏红外图像中的细节信息.

2.2 分形与分维

分形指的是对象具有自相似性和标度不变性.几何对象的一个局部放大以后与其整体相似,这种特性称为自相似性;当观测标度变化时,几何体(或集合)的许多性质保持不变,称为标度不变性.具有标度不变性和自相似性的对象,称它们为分形的.

分维用于具有分形特征对象的定量描述,如果将一个自相似图形缩小 S 倍,原来的图形包括了 a

个缩小的图形,则其分维 $D^{[12]}$ 由式(1)给出

$$D = \frac{\lg a}{\lg (1/S)} \quad (1)$$

文献[13]通过研究证明了分维同人类视觉具有一致性,对象形状越复杂则其分维数越高,对象越光滑则其对应的分维数就越小.

2.3 基于分维的低频图像融合

实验证明,图像的纹理区域通常具有统计分形特性.但如图 2(a)、(b),在红外与可见光图像融合中,显然可见源图像整体上并不具有分形特性,本文中引入分形分维技术不研究图像的分形特性,而是将灰阶图像视为三维表面.研究证明,三维表面的复杂程度越高,则其分维值越大,三维表面越平滑,其分维值也越小.本文利用分维与对象粗糙程度或说三维表面复杂程度间的关系,采用不同尺度上的区域分维作为区域特征来对源图像像素所属的区域特征进行判断,指导图像融合的过程.

Pentland 指出满足式(2)的三维表面为三维分形布朗运动表面.

$$E(|\Delta I_{\Delta x}|) \|\Delta x\|^{-H} = E(|\Delta I_{\Delta x=1}|) \quad (2)$$

式中 $E(|\Delta I_{\Delta x}|)$ 表示在 Δx 的距离上像素灰度变化的数学期望, I 表示灰阶图像的像素灰度值,并且有分维 $D = 3 - H$, D 表示图像分维.本文采用式(2)所示的布朗模型来计算不同区域内像素灰度的分维,然后根据区域分维指导图像融合.

灰度图像的布朗运动模型分维^[13]计算公式为

$$\frac{1}{N_{i+k,j+l \in S_r}} \sum |I(i,j) - I(i+k,j+l)| = Cr^H \quad (3)$$

式中 S_r 表示以 i, j 为中心的一个小区域, N 表示区域内像素数, C 为常量.对式(3)两边取对数可得

$$\ln \left(\frac{1}{N_{i+k,j+l \in S_r}} \sum |I(i,j) - I(i+k,j+l)| \right) - H \times \ln r = C \quad (4)$$

在一个 $R \times R$ 的窗口内,改变 r 计算式(4)得到一组坐标值,用最小二乘法拟合得到一条直线,直线斜率即为 H ,然后可得到 $R \times R$ 窗口区域内的分维 D .为了提高区域分维对边缘方向的敏感度,本文对式(4)计算方法进行优化,分别计算通过窗口 S_r 内部中心像素并与水平方向角度为 $0, 45, 90, 135$ 度的四个方向上的分维,并取四个分维的最大值作为中心像素的区域分维 D .

计算源图像 R 为 7 和 R 为 21 的窗口内像素的分维 D_7 和 D_{21} ,将区域分维值赋予区域中心像素,结果如图 2(c)~(f)所示(I_v, I_w 分别表示可见光与红外源图像).

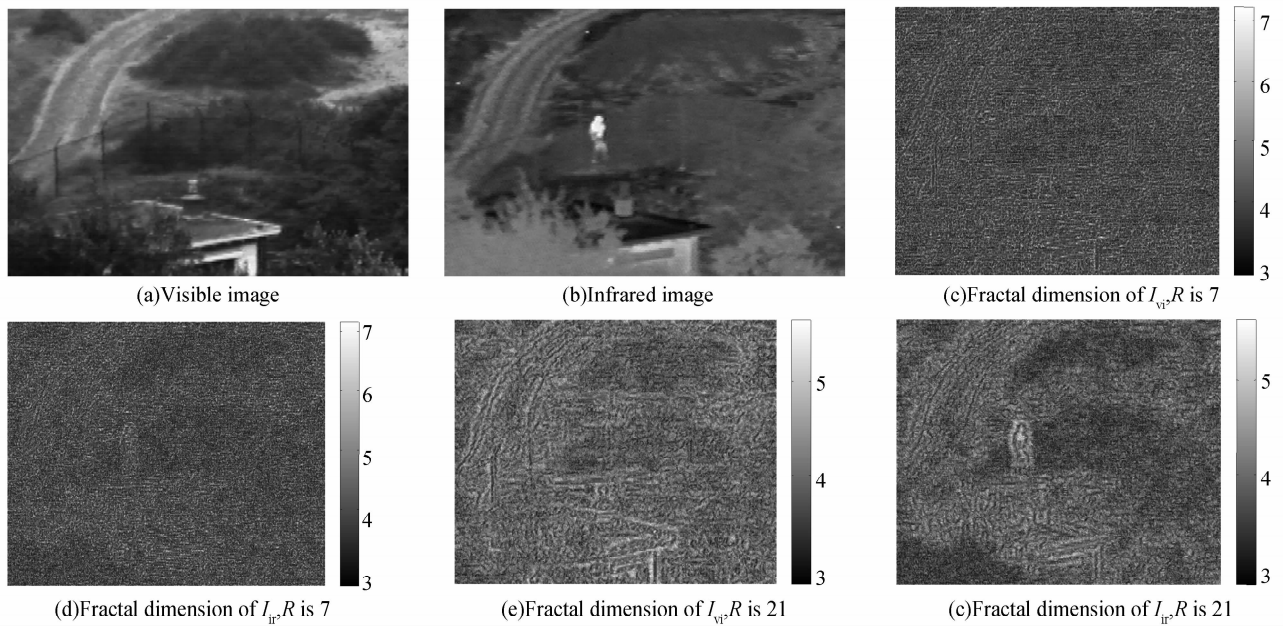


图2 源图像及其不同尺度上的分维
Fig. 2 Source images and its fractal dimension in different scales

从分维计算公式可知, D_7 中的极大值多对应图像的边缘像素, D_{21} 中的极大值多对应窗口宽度为 21 的区域内像素灰度变化剧烈的区域, 通常对应边缘像素或者显著程度较高的小区域中的像素. 观察图 2 所示结果并分析分维计算公式可以得到:

1) R 为 7 时分维结果更多反映图像的细节信息, 体现在本文中, 即更多反映了物体细微的边缘信息;

2) R 为 21 时分维结果反映的是图像大尺度上的结构信息, 除边缘外还突出了小区域, 忽略了一些区域内小的纹理信息.

根据以上结论, 制定出低频图像融合规则

$$\begin{cases} C^f(i, j) = C^i(i, j) & \text{if } D_7^i(i, j) - D_7^v(i, j) > \alpha \\ & \text{else if } \{ |D_7^i(i, j) - D_7^v(i, j)| < \alpha \\ & \text{and } D_{21}^i(i, j) - D_{21}^v(i, j) > \beta \} \\ C^f(i, j) = C^v(i, j) & \text{if } D_7^v(i, j) - D_7^i(i, j) \geq \alpha \\ & \text{else if } \{ |D_7^i(i, j) - D_7^v(i, j)| < \alpha \\ & \text{and } D_{21}^v(i, j) - D_{21}^i(i, j) \geq \beta \} \end{cases} \quad (5)$$

式中, C^f , C^i 和 C^v 分别表示融合图像、红外图像、以及可见光图像的低频系数, α, β 为两个阈值 (α 取值为 1~3, β 为 0.5 左右). 认为当 $D_7^i(i, j) - D_7^v(i, j) > \alpha$ 时红外图像 i, j 坐标对应边缘点, 而可见光图像对应点为纹理或者平滑区, 所以取边缘像素对应的低频系数作为融合图像低频系数, 以突出红外图像中的边缘; 当 $|D_7^i(i, j) - D_7^v(i, j)| < \alpha$ 时, 认为红外与可见光图像中 i, j 坐标点均为边缘, 或均为非边缘区域, 则系数选取需要进一步采用源图像大尺度上的区域分维判断像素点所处区域的特性,

如果 $D_{21}^i(i, j) - D_{21}^v(i, j) > \beta$, 则分两种情况, 1) 可见光图像 i, j 坐标对应大区域的边缘、纹理或平滑区, 红外图像对应像素点处在小区域的边缘、纹理或平滑区; 2) 红外图像 i, j 坐标点的边缘或纹理强度明显高于可见光对应区域. 这两种情况均取红外图像对应的低频系数作为融合图像低频系数. 第一种情况算法优先保证了小区域、小边缘的一致性和显著性, 而第二种情况保证了强边缘或强纹理区域的一致性和显著性. 对于取可见光低频系数作为融合图像低频系数的情况也是同样的道理.

2.4 带通方向子带融合规则

图像的带通子带系数包含了丰富的细节信息, 而对于图像来说, 信息由区域内多个像素联合体现, 在一个小区域内的带通子带系数之间有着很强的相关性, 因此对所有带通子带系数均采用绝对值或者能量取大法则进行融合会破坏这种相关性, 从而造成边缘模糊. 本文设计了局部匹配算子, 首先通过局部匹配算子判断局部 (3×3 或 5×5 窗口内) 带通系数的匹配程度, 依据局部匹配度采用加权和系数选择相结合的融合规则. 如果匹配程度较高则证明源图像对应局部窗口内包含的内容相似, 这时窗口中心像素采用绝对值取大法则进行融合, 因为源图像局部区域内容的相似程度较高, 因此进行基于绝对值取大的系数选择不会对区域一致性造成明显破坏; 如果匹配度很低, 则说明源图像对应局部窗口内包含不同的内容, 这时窗口中心像素采用基于能量加权的融合规则, 保证源图像细节信息的完整性. 局部匹配算子定义如下:

$$M(i, j) = \left\{ \left[\sum_{i, j \in S_m} ((d^i(i, j))^2 - (d^v(i, j))^2) \times \log \frac{(d^i(i, j))^2}{(d^v(i, j))^2 + \text{eps}} \right] + \text{eps} \right\}^{-1} \quad (6)$$

式中 S_m 表示窗口邻域, d^i 表示红外图像带通系数, d^v 表示可见光图像带通系数, eps 表示计算机可表示的最小实数. 图 3 所示结果为对应高频系数第一层和第三层某方向子带对 $M(i, j)$ 进行了归一化操作后得到的归一化的匹配度 $M'(i, j)$, 灰度级越高,

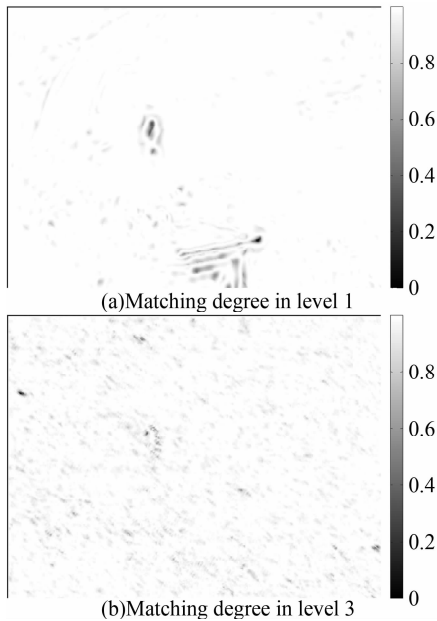


图 3 不同分解层上的区域匹配度示例
Fig. 3 Regional matching degree of subband coefficients in different levels.

表明匹配度越高. 从图中可以看出, 所设计算子在不同分解层的方向子带上有效提取了红外与可见光系数间的差异, 突出了红外目标信息, 更有利于带通系数的融合操作.

融合过程依据 $M'(i, j)$ 采用不同的融合规则. 如匹配算子 $M'(i, j) > \tau$ (τ 为局部匹配度阈值, 通常取 0.5), 则采用式 (7) 进行基于系数绝对值取大的融合, 如 $M'(i, j) \leq \tau$, 则采用式 (8) 进行基于局部能量的系数加权.

$$\begin{cases} d^f(i, j) = d^v(i, j) & |d^v(i, j)| \geq |d^i(i, j)| \\ d^f(i, j) = d^i(i, j) & |d^v(i, j)| < |d^i(i, j)| \end{cases} \quad (7)$$

$$d^f(i, j) = d^v(i, j) \times \frac{E_{S_m}^v(i, j)}{E_{S_m}^v(i, j) + E_{S_m}^i(i, j)} + d^i(i, j) \times \frac{E_{S_m}^i(i, j)}{E_{S_m}^v(i, j) + E_{S_m}^i(i, j)} \quad (8)$$

式中, E_{S_m} 表示 S_m 邻域内 (本文取 3×3 邻域) 系数能量和. 高低频系数分别融合得到融合图像 NSCT 变换域系数以后进行 NSCT 逆变换, 即可得到融合图像.

3 融合结果与分析

本文基于多孔小波、NSCT 以及标准非负矩阵分解算法 (Non-negative Matrix Factorization, NMF) 做了图像融合实验, 对比结果如图 4. 图 4 (a)、(b) 分别为基于多孔小波和 NSCT 采用低频加权, 高频绝对值取大规则得到的融合结果, 图 4 (c) 是采用标准非负矩阵分解算法得到的图像融合结果, 图 4 (d) 是本文算法得到的融合结果.

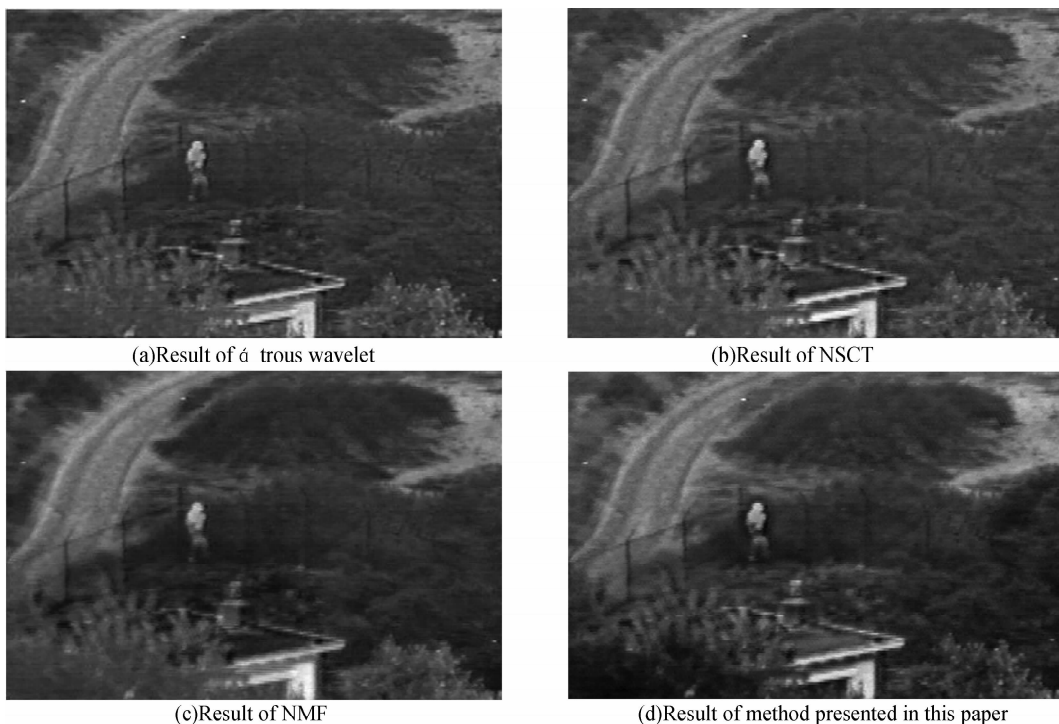


图 4 融合结果
Fig. 4 Results of image fusion

从视觉效果来看,图 4(a)和(b)均取得了较好的融合效果,边缘保持都比较好,但是图像的对比度较低,整体视觉效果较差.图 4(c)的整体对比度有所提高,视觉效果有改善,但是背景部分细节信息损失较多.整体来看,本文算法得到的结果,目标对比度高,过渡自然,同时背景信息保持的最好,纹理清楚,视觉效果最好.这说明本文所提算法在低频部分对目标和背景区域进行了有效区分和合理的选择,因此保留了目标区域最多的能量,在高频部分有效提取了红外与可见光图像的有效信息,保留了完整的目标和清晰的背景信息,取得了最好的效果.

表 1 图像融合指标分析

Fusion algorithm	\hat{a} trous wavelet	NSCT	NMF	This paper's algorithm
Entropy	6.421 4	6.517 3	6.802 0	7.085 8
Mutual information	1.306 9	1.385 6	1.421 3	2.329 1
Standard deviation	24.847 5	26.425 3	35.364 5	37.565 6
Average gradient	10.495 7	10.649 3	9.577 3	11.291 4

除去视觉效果,采用最常用的客观评价指标,包括信息熵、互信息、标准差和平均梯度,来对融合图像进行评价.信息熵和互信息是两个信息论的概念,信息熵表示图像包含信息量的多少,值越大说明包含信息量越多,图像提供的信息越多,互信息体现了从源图像提取的信息量的多少,值越大说明提取了越多的信息量,相应的也说明融合算法越有效.而标准差和平均梯度一个反映了图像整体灰度的离散程度,一个体现了图像对边缘细节的表达能力,标准差越大说明灰度级分布越分散,目标的显著程度越高,平均梯度越大,反映图像细节信息丰富,图像的清晰度越高.表 1 中可以看出,使用本文所提算法得到的融合结果,各项指标相比其余三种算法均有比较明显的提高,说明本文所提算法在综合性能上取得了最优的效果,信息量增加明显,细节信息保持较好,目标显著程度最高,目视效果与客观评价指标完全一致.

4 结论

本文提出了一种基于区域分维和 NSCT 的红外与可见光图像融合算法,利用红外与可见光图像的特点结合分形分维理论设计了低频融合规则,通过对源图像局部区域的处理有效实现了红外图像有效信息的提取,保留了红外目标最多的能量,保证了融合过程中目标显著程度没有降低,同时获得了清

晰的背景.针对带通方向子带系数则设计了新的区域匹配度算子,并根据区域匹配度对子带系数采用了两种不同融合规则,保证了算法既能获取清晰的背景又不会遗漏红外目标细节信息.实验证明所提方法有效实现了红外和可见光图像的融合,取得了较好的效果.

参考文献

- [1] PIELLA G. A general framework for multiresolution image fusion; from pixels to regions[J]. *Information Fusion*, 2003, **4**(4): 259-280.
- [2] PIELLA G. A region-based multiresolution image fusion algorithm [C]. *Proceedings of the Fifth International Conference on Information Fusion. Sunnyvale: Int Soc Inf Fusion*, 2002, 168-173.
- [3] LEWIS J J, O'CALLAGHAN R J, NIKOLOV S G, et al. Pixel- and region-based image fusion with complex wavelets [J]. *Information Fusion*, 2007, **8**(2): 119-130.
- [4] YU Tian-he, LI Qiu-ming, DAI Jing-min. New enhancement of infrared image based on human visual system [J]. *Chinese Optics Letters*, 2009, **7**(3): 206-209.
- [5] ZHAO Yong-qiang, PAN Quan, ZHANG Hong-cai. Study of adaptive multi-band polarization image fusion [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(7): 1356-1359.
赵永强, 潘泉, 张洪才. 自适应多波段偏振图像融合研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(7): 1356-1359.
- [6] YAN Wen-hao, MA Cai-wen, ZHANG Ming, et al. A New Way for Image Fusion Based on Wavelet Transform [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(4): 638-640.
燕文浩, 马彩文, 张鸣, 等. 基于小波变换的图像融合新算法 [J]. *光子学报*, 2006, **35**(4): 638-640.
- [7] ZHANG Qiang, GUO Bao-long. Fusion of multifocus images based on the nonsubsampling contourlet transform [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(4): 476-480.
- [8] YE Chuan-qi, WANG Bao-shu, MIAO Qi-guang. Fusion algorithm of infrared and visible images based on region feature [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(6): 1498-1503.
叶传奇, 王宝树, 苗启广. 一种基于区域特性的红外与可见光图像融合算法 [J]. *光子学报*, 2009, **38**(6): 1498-1503.
- [9] DO M N, VETTERLI M. Contourlets: a directional multiresolution image representation [C]. *Proceedings of 2002 International Conference on Image Processing. Piscataway: IEEE*, 2002; 357-360.
- [10] DO M N, VETTERLI M. The contourlet transform: an efficient directional multiresolution image representation [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2005, **14**(12): 2091-2106.
- [11] da CUNHA A L, ZHOU Jian-ping, DO M N. The Nonsubsampling Contourlet Transform: Theory, Design, and Applications [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2006, **15**(10): 3089-3101.
- [12] CHEN Yong, CHEN Ling. Fractal Geometry [M]. Beijing: Earthquake Publishing House, 2005; 59-61.
陈颢, 陈凌. 分形几何学 [M]. 北京: 地震出版社, 2005; 59-61.
- [13] QIN Qi-ming, LU Rong-jian. Satellite image classification based on fractal dimension and neural networks [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2000, **36**(6): 858-864.
秦其明, 陆荣建. 分形与神经网络方法在卫星数字图像分类中的应用 [J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2000, **36**(6): 858-864.

Image Fusion Algorithm Based on Nonsubsampled Contourlet Transform and Regional Fractal Dimension

LIU Shao-peng, HAO Qun, SONG Yong, HU Yao

(School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing, 100081, China)

Abstract: As an important problem in the course of image fusion, the extraction of useful information from source images affects the fusion result directly, and it is all along one of the research focuses and difficult points of image fusion. A novel image fusion method for infrared and visible images based on nonsubsampled contourlet transform and fractal dimension is proposed. The regional properties, size of regions, intensity of edges and the strength of texture are all described by the regional fractal dimensions in different scales. Through selecting coefficients from two source images based on regional fractal dimension, the low frequency subband coefficients of the source images are fused. The bandpass directional coefficients are fused using different strategies based on the matching operator proposed. Compared with other methods, experimental results show that the proposed algorithm is effective and feasible.

Key words: Image fusion; Regional fractal dimension; Contourlet transform; Matching operator



LIU Shao-peng was born in 1983. He is a Ph. D. degree candidate at Beijing Institute of Technology, and his research interest focuses on multi-source image fusion.



HAO Qun was born in 1968. She received her Ph. D. degree from Tsinghua University in 1998. Now she is a professor, and her research is mainly about the acquisition and processing of optoelectronic information and precise optical measurement.