

基于区域分割和 Counterlet 变换的图像融合算法

叶传奇^{1,2} 苗启广¹ 王宝树¹

(¹ 西安电子科技大学计算机学院, 陕西 西安 710071; ² 河南科技大学电子信息工程学院, 河南 洛阳 471003)

摘要 提出了一种基于区域分割和 Contourlet 变换的图像融合算法。首先,对各源图像做区域分割,并利用区域能量比和区域清晰比的概念来度量和提取区域信息;然后,对各源图像进行多尺度非子采样 Contourlet 分解,分解后的高频部分采用绝对值取大算子进行融合,低频部分则采用基于区域的融合规则和算子进行融合;最后进行重构得到融合图像。对红外与可见光图像进行了融合实验,并与基于像素的 \hat{a} trous 小波变换和 Contourlet 变换的融合效果进行了比较。结果表明,采用本文算法的融合图像既保留了可见光图像的光谱信息,又继承了红外图像的目标信息,其熵值高于基于像素的融合方法约 10%,交叉熵仅为基于像素的融合方法的 1% 左右。

关键词 图像处理; 图像融合; 区域分割; Contourlet 变换; 多分辨分析

中图分类号 TP391 文献标识码 A

An Image Fusion Algorithm Using Region Segmentation and Contourlet Transform

Ye Chuanqi^{1,2} Miao Qiguang¹ Wang Baoshu¹

¹ School of Computer Science, Xidian University, Xian, Shaanxi 710071, China
² School of Electronic Information Engineer, Henan University of Science & Technology, Luoyang, Henan 471003, China

Abstract An image fusion algorithm using region segmentation and contourlet transform is proposed. Firstly, region segmentation is done for source images, and ratio of region energy (RRE) and ratio of region sharpness (RRS) are presented to measure and extract region information. Then multiscale decomposition of the source images is carried out with the nonsubsampling contourlet transform. The high-frequency coefficients are fused with larger absolute value operator, and the low-frequency coefficients are fused with the region-based fusion rules and operators proposed. Finally the fused coefficients are reconstructed to obtain the fusion image. The fusion experiment for infrared and visible images is taken, and comparison between pixel-based \hat{a} trous wavelet transform and contourlet transform is given. The results show that the fused image obtained by the presented algorithm can not only hold spectrum information of the visible image, but also inherit object information of the infrared image. The entropy of the fused image is about 10% greater than that of pixel-based fusion methods, and the cross entropy of the fused image is only 1% of that of pixel-based fusion methods.

Key words image processing; image fusion; region segmentation; contourlet transform; multiresolution analysis

1 引 言

近年来,多分辨(Multiresolution, MR)分析理论在图像融合中得到广泛应用^[1~5],目前基于多分

辨技术的融合方法大多属于像素级融合,主要基于单个像素或者像素窗口邻域进行融合处理,比如像素的 3×3 或者 5×5 窗口。但在图像融合的大多数

收稿日期: 2007-08-27; 收到修改稿日期: 2007-10-15

基金项目: 国家自然科学基金(60702063)、总装预研项目和广西壮族自治区青年科学基金(0640067)资助课题。

作者简介: 叶传奇(1969—),男,湖北武汉人,博士研究生,主要从事智能信息处理与模式识别、多传感器图像融合等方面的研究。E-mail: ycq1588@126.com

导师简介: 王宝树(1940—),男,河南周口人,教授,博士生导师,主要从事智能信息处理与模式识别、信息与图像融合等方面的研究。E-mail: bshwang@xidian.edu.cn

应用领域,并不是对单个的像素,而是对其所代表的目标和区域感兴趣,因此有必要将目标和区域信息加入到融合过程中。而且基于区域的融合方法还具有较好的稳健性,可在一定程度上克服像素级融合存在的问题,比如融合图像易产生模糊效应、对噪声敏感以及要求源图像严格配准等^[6,7]。

小波变换是目前最为流行的多分辨分析工具,具有良好的空域和频域的局域性。小波变换在分析点状瞬态特征的奇异性时是最优的,但是在表示图像结构的直线/曲线奇异性时却不是最优的。为了解决这一局限性,新的多分辨分析理论不断发展。Minh N. Do 等提出一种多方向、多分辨的图像表示方法,即 Contourlet 变换理论^[8]。Contourlet 变换正是为解决二维或更高维奇异性而产生的一种新的多分辨分析工具,这种变换的主要特征是有很好的方向敏感性和各向异性,能够准确地将图像中的边缘信息“捕获”到不同尺度、不同频率的子带中,因此 Contourlet 变换更适合于二维图像的处理。

本文提出了一种基于区域分割和 Contourlet 变换的图像融合算法,该算法把像素级融合和特征级融合结合在一起。首先对各源图像做区域分割,获取区域特征信息;然后对各源图像进行 Contourlet 变换;最后利用分割的区域信息来指导融合过程得到融合图像。

2 Contourlet 变换相关理论

Contourlet 变换将多尺度分析和方向分析分开进行,首先利用拉普拉斯金字塔(Laplacian pyramid, LP)变换^[9,10]对图像进行多尺度分解,原始图像经一级 LP 分解可产生一个低通子带图像(低频分量)和一个带通子带图像(高频分量),然后每级 LP 分解都可在低通子带图像上迭代进行,通过 LP 分解可有效“捕获”图像中的点奇异;接着对每一级 LP 分解所获得的高频分量采用文献[11]中所设计的方向滤波器组(Directional filter bank, DFB)进行方向分解,最后将分布在同方向上的奇异点连接成轮廓段(Contour segment)。Contourlet 变换最终以类似于轮廓段的基结构来逼近原图像。其框架结构如图 1 所示,该结构将二维频域切分成如图 2 所示的楔形方向子带。

Contourlet 变换在图像增强、去噪等方面取得了比小波变换更好的效果,Miao Qiguang 等^[12]将 Contourlet 变换应用于图像融合,但由于需要进行

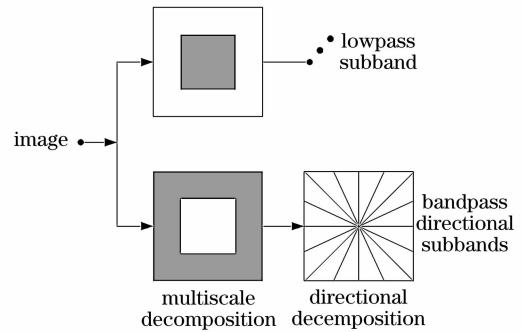


图 1 Contourlet 变换结构图

Fig. 1 Structure of the Contourlet

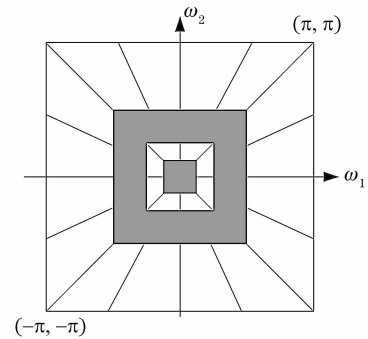


图 2 Contourlet 变换得到的理想频域切分图

Fig. 2 Idealized frequency partitioning obtained with the Contourlet transform

上采样和下采样,Contourlet 变换缺乏平移不变性,导致在进行图像处理时会产生吉布斯(Gibbs)效应^[13]。Arthur L. Cunha 等^[14]提出了一种具有平移不变性的 Contourlet 变换,即非子采样 Contourlet 变换(Nonsubsampled contourlet transform, NSCT)。该变换是通过使用迭代非子采样滤波器组来获得平移不变、多分辨、多方向的图像表示能力。

NSCT 与 Contourlet 变换的区别在于 NSCT 采用的是非子采样金字塔和非子采样方向滤波器组,NSCT 利用 Z 变换的等效移位性质,去掉了 LP 分解和 DFB 分解中信号经分析滤波后的下采样(抽取)以及综合滤波前的上采样(插值),而改为对相应的滤波器进行上采样,再对信号进行分析滤波和综合滤波。这种算法类似平移不变小波变换中的多孔算法(à trous algorithm)。由于没有上采样和下采样,所有的分解子图都和原图像的尺寸大小相同,从而使 NSCT 获得平移不变性。NSCT 所采用的二通道非子采样滤波器组结构如图 3 所示。图 3(a)为非子采样金字塔滤波器组结构;图 3(b)为非子采样方向(扇形)滤波器组结构^[14]。

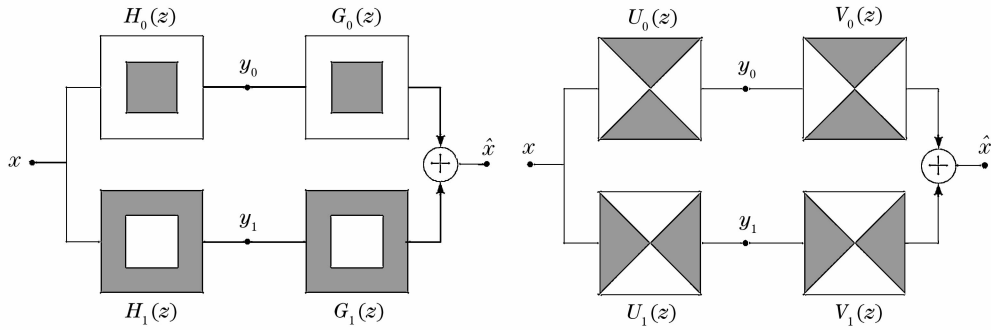


图 3 NSCT 所采用的二通道非子采样滤波器组结构。(a)非子采样金字塔, (b)非子采样方向滤波器组

Fig. 3 Two-channel nonsubsampled filter banks used in the NSCT. (a) Nonsubsampled pyramid, (b) nonsubsampled DFB

3 基于区域分割和 NSCT 的图像融合算法

本文通过区域分割获取源图像中的目标及区域信息,使这些目标和区域作为整体参与融合过程,不会出现单个像素参与融合导致其代表的物理意义割裂的情况。图像的多分辨率分解与重构则采用 NSCT,主要基于两方面的考虑:首先,NSCT 比小波对图像几何特征的表达能力更强,因为小波变换只具有有限的方向性(水平、垂直、对角),而 NSCT 具有任意角度的方向性,更能“捕捉”图像中“沿”边缘信息;其次,NSCT 是平移不变的,分解得到的所有子图具有与源图像相同的像素空间,可以充分利用源图像分割的区域信息指导融合过程。

3.1 区域分割与分析

本文采用基于灰度阈值的方法来分割源图像,该方法通过设置阈值,把像素点按灰度级分成若干类,从而实现图像分割。该方法分割的效果取决于阈值的选择,可考虑采用阈值选择法来确定阈值,该算法是一种使类间方差最大的自动确定阈值的方法。从速度方面考虑,对源图像进行单阈值分割,得到一幅相应的二值图像。其分割方法为

$$R(x,y) = \begin{cases} 1, & \text{if } f(x,y) \geq T \\ 0, & \text{if } f(x,y) < T \end{cases} \quad (1)$$

式中 $f(x,y)$ 为源图像在点 (x,y) 处的像素值, $R(x,y)$ 为二值分割图, T 为采用阈值选择法所得到的阈值。

该分割方法得到的是各源图像的二值分割图,由于异类源图像相应位置的像素所包含的物理意义是有差异,因此所得到的区域分割图是不同的,不同分割图中的各区域所包含的目标及目标轮廓形状也必然存在差异。因此必须对各分割图进行关联处理,将所有分割得到的区域信息加入到关联分割图,用于指导后面的融合决策。可按照如下的关联规则来产生关联分割图:

- 1) 若区域 $R^{(1)}$ 与区域 $R^{(2)}$ 无重叠,则在关联分割图中映射为两个区域, $R_1^{(j)} = R^{(1)}, R_2^{(j)} = R^{(2)}$;
- 2) 若区域 $R^{(1)}$ 与区域 $R^{(2)}$ 部分重叠,则在关联分割图中映射为 3 个区域, $R_0^{(j)} = R^{(1)} \cap R^{(2)}, R_1^{(j)} = R^{(1)} - R_0^{(j)}, R_2^{(j)} = R^{(2)} - R_0^{(j)}$;
- 3) 若区域 $R^{(1)}$ 与区域 $R^{(2)}$ 完全重叠,则在关联分割图中映射为 3 个区域, $R^{(j)} = R^{(1)} = R^{(2)}$;
- 4) 若一个区域完全包含另一区域,如 $R^{(1)} \subset R^{(2)}$,则在关联分割图中映射为 2 个区域, $R^{(j)} = R^{(1)}$,

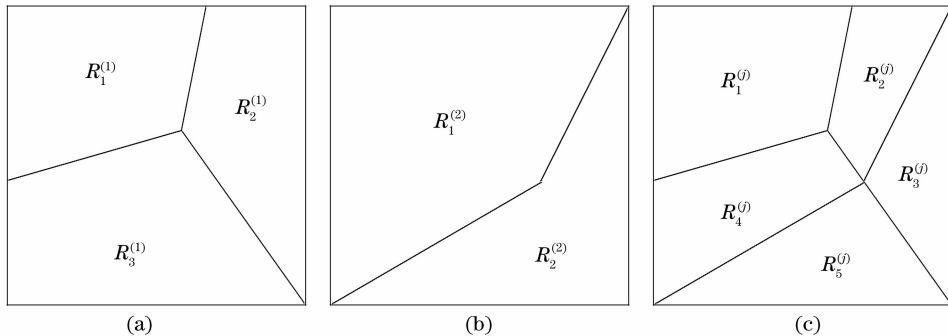


图 4 区域关联映射图示例。(a) 区域映射图 1, (b) 区域映射图 2, (c) 区域关联映射图

Fig. 4 Joint region maps for the fused image. (a) Region map 1, (b) Region map 2, (c) joint region map

$$R_i^{(j)} = R^{(2)} - R^{(1)}.$$

这里, $R^{(1)}$ 表示源图像 1 的某一区域, $R^{(2)}$ 表示源图像 2 的某一区域, $R^{(j)}$ 为关联分割图的某一区域。图 4 为采用上述规则所得到的区域关联映射图示例。

关联分割图中会有一些过小的区域, 它们不包含足够有效的区域信息, 易在融合图像产生虚假影像, 可在区域特征提取前, 用形态学算子对这些小区域进行平滑和合并处理。

在一些基于区域分割的图像融合算法里, 提出了一些区域特征度量算子来表征区域特征^[6,7]所提出的区域活跃度、匹配度、相似度等算子, 都对提高融合效果具有一定作用, 但异类源图像之间对应像素点所包含的物理意义是完全不同的, 这些算子尚未能解决上述问题。为更好指导融合过程, 本文提出区域能量比(Ratio of region energy, RRE)和区域清晰比(Ratio of region sharpness, RRS), 分别定义为

$$R_{RE}[R_i^{(AB)}] = \frac{E[R_i^{(A)}]/E_A}{E[R_i^{(B)}]/E_B}, \quad (2)$$

式中

$$E[R_i^{(j)}] = \frac{1}{N_i} \sum_{(x,y) \in R_i^{(j)}} f_{(j)}^2(x,y),$$

$$E_j = \frac{1}{n \times m} \sum_{x=0}^{n-1} \sum_{y=0}^{m-1} f_{(j)}^2(x,y),$$

式中 N_i 为区域 i 的像素个数, $j = A, B$; n, m 分别为图像的高度和宽度。 $E[R_i^{(j)}]$ 表示源图像 j 在区域 i 的能量均值, E_j 表示源图像 j 的能量均值。 $R_{RE}[R_i^{(AB)}]$ 表征了各源图像在区域 i 的相对能量高低, 若 $R_{RE}[R_i^{(AB)}] > 1$, 表明图像 A 在该区域的能量集中程度比图像 B 高; 反之, 则图像 B 在该区域的能量集中程度比图像 A 高。

$$R_{RS}[R_i^{(AB)}] = \frac{\sigma[R_i^{(A)}]/[\overline{R_i^{(A)}}]}{\sigma[R_i^{(B)}]/[\overline{R_i^{(B)}}]}, \quad (3)$$

式中

$$[\overline{R_i^{(j)}}] = \frac{1}{N_i} \sum_{(x,y) \in R_i^{(j)}} f_{(j)}(x,y),$$

$$\sigma[R_i^{(j)}] = \sqrt{\frac{1}{N_i} \{f_{(j)}(x,y) - [\overline{R_i^{(j)}}]\}^2},$$

$[\overline{R_i^{(j)}}]$ 表示源图像 j 在区域 i 的像素均值, $\sigma[R_i^{(j)}]$ 表示源图像 j 在区域 i 的像素方差。 $R_{RS}[R_i^{(AB)}]$ 表征了各源图像在区域 i 的相对清晰程度, 若 $R_{RS}[R_i^{(AB)}] > 1$,

表明图像 A 在该区域比图像 B 清晰; 反之, 则图像 B 在该区域比图像 A 清晰。

R_{RE} 和 R_{RS} 结合在一起可以很好地表征各源图像在与关联分割图相对应的某一区域的特征信息, 利用这些特征信息可以在融合过程中进行决策指导。

3.2 融合算法

图像经多分辨(如小波、Counterlet、NSCT)分解后所得到的低频部分代表图像的近似分量, 包含源图像的光谱信息; 高频部分代表图像的细节分量, 包含源图像的边缘细节信息。因此, 各源图像分解后的融合算法, 即融合规则及融合算子的选择对于融合质量至关重要, 也是图像融合研究中的热点。目前广为采用的融合规则可概括为基于像素和基于窗口邻域的融合规则, 但由于图像的目标或区域特征并不是由单个像素或者某个窗口像素所能表征的, 它是由该区域的像素集合来表征和体现的; 同时, 图像中某一局部区域内的各像素间往往有较强的相关性, 因此, 基于像素和基于像素窗口邻域的融合规则存在一定的局限性。目前较为常用的融合算子一般为低频部分采取平均或加权平均算子, 高频部分采取绝对值最大算子。但一般情况下, 在参与融合的异类源图像中, 其中一幅图像的光谱信息远比另一幅更为丰富, 比如可见光图像的光谱信息远比同一场景的红外图像丰富。对低频部分采用平均或者加权平均算子的策略必将损失一部分可见光图像的光谱信息, 使融合图像的光谱信息逊色于可见光图像。所以, 为了获得视觉特性更佳, 细节更丰富突出的融合效果, 提出了一种基于区域的融合规则及融合算子:

1) 对于图像的低频部分, 利用前一节所得到的分割区域信息来指导低频系数的选择。先按照 R_{RE} 值来进行选择, 若在某一区域 R_{RE} 值大于某一阈值 T_1 , 表明该区域是图像 A 的能量集中区, 应选择图像 A 在该区域的低频系数作为融合图像的低频系数; 反之, 若 R_{RE} 值小于另一阈值 T_2 , 则应该选择图像 B 在该区域的低频系数作为融合图像的低频系数。若 R_{RE} 值介于阈值 T_1, T_2 之间, 则应该按照 R_{RS} 值来选择低频系数, 若 $R_{RS} \geq 1$, 表明图像 A 在该区域比图像 B 清晰, 应该选择图像 A 在该区域的低频系数作为融合图像的低频系数; 反之, 选择图像 B 该区域的低频系数作为融合图像的低频系数。

$$c_F(i) = \begin{cases} c_A(i) & R_{RE}[R_i^{(AB)}] \geq T_1, T_2 \leq R_{RE}[R_i^{(AB)}] < T_1 \text{ and } R_{RC}[R_i^{(AB)}] \geq 1 \\ c_B(i) & \text{others} \end{cases} \quad (4)$$

式中 $c_l(i), l = A, B, F$ 为图像在分割区域 i 的低频系数。 T_1, T_2 为区域能量比阈值, 根据源图像类型, 一般可取 $T_1 = 3 \sim 5, T_2 = 1/T_1$ 。

2) 对于图像的高频部分, 仍采用绝对值最大算子, 以最大限度获取源图像的细节信息。

$$d_F(x, y, k) = \begin{cases} d_A(x, y, k), & |d_A(x, y, k)| \geq |d_B(x, y, k)| \\ d_B(x, y, k), & |d_A(x, y, k)| < |d_B(x, y, k)| \end{cases} \quad (5)$$

式中 $d_l(x, y, k), l = A, B, F$ 为图像在第 k 分解层点 (x, y) 处的高频方向系数。

以两幅已配准好的源图像 A, B 的融合为例, 基于区域分割和 NSCT 的图像融合基本步骤为:

步骤 1. 对两幅源图像 A, B 分别进行区域分割得到分割图 R_A, R_B , 对其进行关联处理得到关联分割图 R_J , 计算关联分割图中每个区域的 RRE 值和 RRC 值;

步骤 2. 对源图像 A, B 分别进行多级 NSCT 变换, 得到不同尺度层的 NSCT 系数, 包括低频系数和各尺度层的高频方向系数;

步骤 3. 按照上述融合规则和融合算子分别对低频部分和高频部分进行融合处理, 最终得到融合后的低频系数和各尺度层的高频方向系数;

步骤 4. 对融合后的低频系数和各尺度层的高

频方向系数进行 NSCT 逆变换(即进行图像重构), 所得到的重构图像即为融合图像。

4 实验结果与分析

为验证所提出融合算法的融合效果, 选取同一场景的红外和可见光图像进行融合, 并用以下两种方法进行对比实验: 1) 基于像素的 \hat{a} trous 小波变换^[15]; 2) 基于像素的 NSCT。

图 5(a) 是某一场景的红外图像, 能够清晰看到一个走动的人, 但其它景物比较模糊; 而在可见光图像中[图 5(b)], 由于光线较暗, 很难辨识图 5(a) 中的人, 但道路、灌木、方桌、水壶、栅栏等景物都清晰可辨。图 5(c)、图 5(d) 分别为红外与可见光图像的分割图, 图 5(e) 则为其关联分割图, 图 5(f) 为基于方法 1 的融合结果, 图 5(g) 为基于方法 2 的融合结

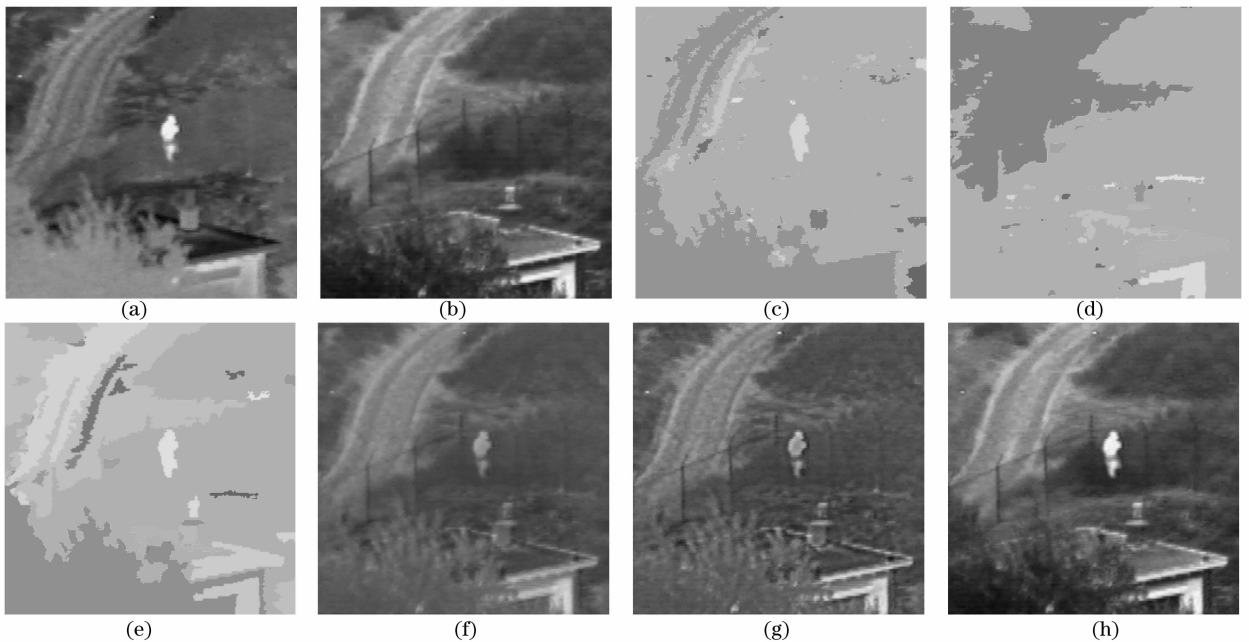


图 5 源图像及不同方法的融合结果。(a) 红外图像, (b) 可见光图像, (c) 红外图像分割图, (d) 可见光图像分割图, (e) 红外/可见光关联分割图, (f) 基于方法 1 的融合图像, (g) 基于方法 2 的融合图像, (h) 基于本文方法的融合图像
Fig. 5 Source images and fused results with different methods. (a) Infrared image, (b) visible light image, (c) region map of infrared image, (d) region map of visible light image, (e) joint region map of infrared/visible, (f) fused image with method 1, (g) fused image with method 2, (h) fused image with our method

果,如图 5(h)为基于本文算法的融合结果。

从视觉效果来看,本文方法的融合图像具有较理想的融合效果,不仅继承了可见光图像中景物的光谱信息,而且也完全保留了红外图像中的热目标(人物)特征信息,且边缘细节信息突出,这即反映了区域分割对目标特征的提取作用,也反映了 NSCT 捕捉图像中沿边缘信息的能力。相比之下,方法 1 和方法 2 的融合图像虽然也保留了两幅源图像中的主要景物特征信息,但方法 1 的融合图像边缘细节信息较模糊,整体对比度较低;方法 2 的融合图像虽然整体衬比度有所改善,但仍然损失了一部分可见光图像的光谱信息,例如灌木的光谱信息相比可见光图像损失不小,且人物特征信息不如本文方法突出。

对融合结果的评价,除了目视效果这种简单有效的定性分析法外,还可以采用相关的评价指标做定量的分析。从基于互补信息特征的角度考虑,好的融合效果应该充分保留原始图像各自的目标波谱特性以及边缘细节信息。前者可以通过信息熵、交叉熵和相关系数等指标进行评价,后者可以通过平均梯度、空间频率等指标进行评价。本文采用文献[16]中定义的信息熵(Entropy)、交叉熵(Cross entropy)及平均梯度(Average gradient)三个指标来进行客观评价。其中,信息熵反映图像的信息丰富程度,熵值的大小表示图像所包含的平均信息量的多少;交叉熵反映两幅图像对应像素灰度值的差异,交叉熵越小,表示图像间的差异越小;而平均梯度反映图像对边缘细节信息的表达能力,平均梯度越大,边缘细节信息保留越多,图像越清晰。表 1 给出了上述两种融合方法的评价指标。可以看出,本方法的熵值高于方法 1 和方法 2 约 10%以上,而交叉熵则仅为方法一和方法二的 1%左右,表明本文方法的融合图像对两幅源图像的重要信息均保持得非常好,满足了信息互补的融合要求;而且平均梯度显著高于方法 1、略高于方法 2,表明其融合图像较好保留了源图像的边缘细节信息,图像清晰度高,这与视觉观察结果完全一致,也证实了 NSCT 捕捉图像中沿边缘信息的能力。综合所有评价指标表明本文方法的融合效果明显优于方法 1 和方法 2。

以上对比实验表明,基于区域分割的图像融合方法(如本文方法)可有效获取源图像的目标特征信息,从而可在融合过程中针对目标信息及背景信息采用不同的融合策略,使融合图像既突出了红外图像的目标特征,又能有效保留可见光图像的光谱信息。而基于像素的图像融合方法(如方法 1 和方法 2)由于是单

个像素参与融合,无法区分目标信息与背景信息,只能在融合过程中采取单一的融合策略,使其融合效果远逊于基于区域分割的图像融合方法。

本方法不仅适用于可见光与红外图像的融合,同样也适用于其它类型图像(如多聚焦图像)的融合,实验同样取得了非常理想的融合效果,限于篇幅关系不作过多介绍。

表 1 融合结果客观评价指标

	Entropy	Cross entropy	Average gradient
Method 1	6.3248	3.91×10^{-2}	6.2274
Method 2	6.4873	3.65×10^{-2}	9.3791
This method	7.2183	3.45×10^{-4}	9.5977

5 结 论

本文提出了一种基于区域分割和 NSCT 的图像融合算法。该算法利用本文提出的区域能量比和区域清晰比两个度量算子有效提取经区域分割后的源图像目标和区域信息,并引入 NSCT 对源图像进行多分辨分解,能够比小波变换更有效地提取源图像的边缘特征,为融合图像提供更多的细节信息,最后根据本文提出的基于区域的融合规则和融合算子进行融合重构。实验结果表明,本文所提出融合算法既能够保留源图像的光谱信息,又能够有效获取源图像的细节信息,融合效果远优于基于像素的图像融合方法。

参 考 文 献

- Liu Bin, Peng Jiaxiang. Multi-spectral image fusion based on two-channel non-separable additive wavelets [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(8): 1419~1424
刘 斌,彭嘉雄. 基于二通道不可分加性小波的多光谱图像融合[J]. *光学学报*, 2007, **27**(8): 1419~1424
- Zhao Peng, Pu Zhaobang. Image fusion based on morphological 4-subband decomposition pyramid [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1): 40~44
赵 鹏,浦昭邦. 基于形态学 4 子带分解金字塔的图像融合[J]. *光学学报*, 2007, **27**(1): 40~44
- Li Huihui, Guo Lei, Liu Hang. Research on image fusion based on the second generation curvelet transform [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(5): 657~662
李晖晖,郭 雷,刘 航. 基于二代 Curvelet 变换的图像融合研究[J]. *光学学报*, 2006, **26**(5): 657~662
- Zhao Chunhui, Liu Chunhong, Wang Kecheng. Research on fusion of hyperspectral remote sensing image based on second generation wavelet [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(7): 891~896
赵春晖,刘春红,王克成. 基于第二代小波的超谱遥感图像融合算法研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(7): 891~896
- Liu Bin, Peng Jiaxiang. Image fusion based on non-separable

- hogonal compact supported wavelet [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(9): 1214~1218
- 刘 斌, 彭嘉雄. 具有紧支撑正交非张量积小波的图像融合[J]. *光学学报*, 2004, **24**(9): 1214~1218
- 6 Gemma Piella. A region-based multiresolution image fusion algorithm[C]. *Proc. ISIF Fusion 2002 Conference*, 2002. 1557~1564
- 7 Rong Wang, Li-Qun Gao, Shu Yang *et al.*. An image fusion approach based on segmentation region [J]. *International J. Information Technol.*, 2005, **11**(7): 92~100
- 8 Minh N. Do, Martin Vetterli. The contourlet transform: An efficient directional multiresolution image representation [J]. *IEEE Trans. Image Proc.*, 2005, **14**(12): 2091~2106
- 9 Peter J. Burt, Edward H. Adelson. The Laplacian pyramid as a compact image code[J]. *IEEE Trans. Commun.*, 1983, **31**(4): 532~540
- 10 Minh N. Do, Mark Vetterli. Framing pyramids [J]. *IEEE Trans. Signal Proc.*, 2003, **51**(9): 2329~2342
- 11 Robert H. Bamberger, Mark J. T. Smith. A filter bank for the directional decomposition of images: Theory and design [J]. *IEEE Trans. Signal Proc.*, 1992, **40**(4): 882~893
- 12 Miao Qiguang, Wang Baoshu. A novel image fusion method using contourlet transform [C]. *Proc. 2006 International Conference on Communications, Circuits and Systems Processing*, 2006. 548~552
- 13 R. R. Coifman, D. L. Donoho. Translation invariant de-noising [C]. <http://www-stat.stanford.edu/~donoho/Reports/1995/TIDeNoise.ps.Z>
- 14 Arthur L. Cunha, Jianping Zhou, Minh N. Do. The nonsubsampling contourlet transform: Theory, design, and applications [J]. *IEEE Trans. Image Proc.*, 2006, **15**(10): 3089~3101
- 15 Wu Yan, Li Ming, Liao Guisheng. Image fusion by means of a trous discrete wavelet decomposition [C]. *Proc. 2006 International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision*, 2004. 1538~1542
- 16 Miao Qiguang. Research on multi-sensor image fusion methods [D]. Xi'an: Xidian University, 2005
- 苗启广. 多传感器图像融合方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2005