

基于第二代小波变换的图像融合方法及性能评价

李伟¹ 朱学峰²

摘要 提出了一种基于小波提升方案的图像融合新算法. 与传统基于卷积的小波变换融合方法相比, 新算法具有计算简单、融合速度快、所需内存少以及有利于算法的在线快速实现等优点. 此外, 还提出了一种基于区域特征选择的新的融合策略, 针对不同类型的多源图像进行了融合仿真实验, 并采用主观视觉判断与客观评价准则相结合的方式, 对不同变换方式、不同融合规则以及不同分解层数对融合效果的影响进行了比较分析. 实验结果表明本文提出的融合算法和融合策略具有优越的融合性能, 并取得了令人满意的融合效果.

关键词 图像融合, 第二代小波变换, 提升方案, 性能评价
中图分类号 TP391

An Image Fusion Algorithm Based on Second Generation Wavelet Transform and Its Performance Evaluation

LI Wei¹ ZHU Xue-Feng²

Abstract A novel image fusion algorithm based on wavelet lifting scheme is presented. The lifting scheme is a new idea of constructing wavelets and has several unique advantages over conventional convolution-based wavelet transform. It allows for an in-place implementation of wavelet transform and reduces computation time and memory requirement greatly. So in this fusion algorithm, the lifting wavelet transform is employed to decompose and reconstruct images to realize fast image fusion. Meanwhile, a new local feature-based fusion rule is put forward to improve fusion quality and extract all significant features from multi-source images. Extensive experiments on the fusion of registered SPOT Panchromatic/multi-spectral images, multi-focus digital camera images, and medical MRI/PET images have been performed. Finally, visual judgment and several objective evaluation criterions are taken as the means of assessing fusion performance. The experimental results show that the new approach is very effective and is able to fuse multi-source images.

Key words Image fusion, second generation wavelet transform, lifting scheme, performance evaluation

1 引言

近年来, 多源图像融合技术在机器视觉、遥感、军事、交通、医学等领域得到了广泛的关注. 图像融合是指把来自不同传感器的多幅源图像综合成一幅满足特定应用需求的新图像的过程, 融合后的图像应当更适用于人眼感知或计算机后续处理. 由于每种传感器都是为了适应某些特定的环境和使用范围而设计的, 具有不同特征或不同视点的多传感器获取的图像间既存在冗余性又存在互补性, 通过对其融合, 能够有效地把不同图像传感器的优点结合起来, 从而提高系统的可靠性和图像信息的利用效率^[1].

目前, 图像融合的方法大致可分为三类: 第一类是简单的融合方法, 它是对空间配准的两幅源图像直接进行选择或加权平均等简单处理后合成一幅融合图像, 多数情况下这种简单的融合方法很难得到满意的结果^[1]; 第二类是基于塔型分解和重建 (如梯度金字塔、对比度金字塔、拉普拉斯金字塔等) 的融合方法, 这类方法首先构造输入图像的金字塔, 再按一定的规则进行选取形成融合金字塔, 通过重建最终生成融合图像, 这类方法的融合效果要远优于第一类方法, 但仍然有许多不尽如人意的地方^[1]; 第三类就是近几年兴起的基于小波变换的图像融合方法, 它通常采用多分辨率分析和 Mallat 快速算法, 利用小波分解的方向性和非冗余性, 在各层的特征域上进行有针对性的融合, 有效提取源图像中的结构和细节信息, 从而得到比第二类方法视觉效果更佳的融合图像^[2].

2 快速提升法小波变换

传统小波一般是由定义在 $L^2(R)$ 空间上的容许函数 $\psi(t)$ 经过二进伸缩和平移生成的, 这种小波通常被称为第一代小波. 多分辨率分析的引入和

收稿日期 2006-2-8 收修改稿日期 2006-6-29
Received February 8, 2006; in revised form June 29, 2006
深圳信息职业技术学院博士创新科研项目 (BC-0715) 资助
Supported by Research Fund for Doctoral Creative Program,
Shenzhen Institute of Information Technology (BC-0715)
1. 深圳信息职业技术学院软件工程系 深圳 518029 2. 华南理工大学
自动化科学与工程学院 广州 510640
1. College of Software Engineering, Shenzhen Institute of In-
formation Technology, Shenzhen 518029 2. College of Au-
tomation Science and Engineering, South China University of
Technology, Guangzhou 510640
DOI: 10.1360/aas-007-0817

Mallat 算法的提出使传统的双正交小波都可以通过滤波器组结构来实现,从而使小波变换在信号处理领域得到了广泛的应用.第一代小波有许多优点,但也存在若干局限性,如小波结构依赖于傅里叶变换、计算复杂、对内存需求量大等.在图像融合过程中,采用传统基于卷积运算的小波变换来处理大量的图像数据,也同样存在运算所需内存较多、计算复杂等缺陷,不利于图像融合算法的在线快速实现.1994年,贝尔实验室的 Sweldens 提出了一种新的基于提升方案 (Lifting scheme) 的小波构造方法,这种小波被称为第二代小波.小波变换的提升方案与传统的 Mallat 构造方法相比,提升方案不依赖于傅里叶分析,是完全基于空间域的构造方法,它克服了第一代小波由平移伸缩不变性所带来的局限,可以实现小波变换的快速简单计算^[3].

用提升方案构造小波的基本思想是建立在双正交小波和完全可恢复滤波器组理论的基础上,Sweldens 等人已证明所有第一代小波变换都能找到相应等效的提升方案^[3].基于提升方案构造小波变换的过程可分为三个步骤:分裂 (Split)/合并 (Merge)、预测 (Predict) 和更新 (Update).

1) 分裂: 分裂的目的是将信号 $x(n)$ 分成相互关联的两个部分,通常采用惰性分割方式,即将信号偶数和奇数样本分离.

$$x_e(n) = x(2n), \quad x_o(n) = x(2n + 1) \quad (1)$$

2) 预测: 就是用偶数序列来预测奇数序列,预测误差为

$$d(n) = x_o(n) - P[x_e(n)] \quad (2)$$

其中 $P[\cdot]$ 表示预测算子,这种预测过程是一个可逆的过程,可以很方便由 $x_e(n)$ 和 $d(n)$ 来恢复 $x_o(n)$,进而恢复信号 $x(n)$.

3) 更新: 更新的目的是用 $d(n)$ 来修正 $x_e(n)$,使得修正后的 $x_e(n)$ (记为 $c(n)$) 只包含信号 $x(n)$ 的低频成分,即

$$c(n) = x_e(n) + U[d(n)] \quad (3)$$

其中 $U[\cdot]$ 表示更新算子.采用基于提升方案的小波变换对信号进行分解和重构的过程如图 1 所示.

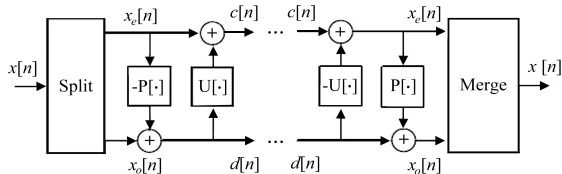


图 1 第二代小波变换的分解和重构示意图

Fig. 1 Diagram of decomposition and reconstruction based on second generation wavelet transform

第二代小波具有以下显著优点: 1) 不依赖傅里叶变换实现小波构造,易于推广到一般应用领域; 2) 只要简单地调整计算顺序和分解过程中的正负号就可以实现信号的重构; 3) 同址计算: 即不需要辅助存储器,原信号(图像)可以被小波变换的结果覆盖; 4) 使小波变换运算复杂度降低一半,从而实现小波变换的快速简单计算^[4].

3 图像融合算法

本文提出的基于第二代小波变换的图像融合方法是在像素层进行图像融合,融合的目的是产生一幅新的图像并使之包含比任意单个源图像更为丰富更为精确的信息,其融合的基本原理和基于传统小波变换的图像融合方法类似.首先采用提升方案对源图像进行多层小波分解,得到不同尺度不同频段的子图像;然后采用合适的融合规则和融合算子对具有不同特征各个频带子图像分别进行有针对性的融合处理,得到融合子图像序列;最后对处理后的子图像序列进行提升小波逆变换,从而重构得到融合图像.

3.1 图像的快速提升小波分解

对二维图像进行提升小波变换一般采用行列法逐层分解,先对图像矩阵的行做提升分解变换,再对得到的结果按列做提升分解变换,经过一层分解后可得到四个子图像分别反映源图像平滑特性的低频子图像和反映亮度突变及细节特性的三个方向(水平、垂直和斜向)的高频子图像,图 2 示意了行列法进行提升小波分解的过程.与传统的基于卷积运算的小波变换相比,采用提升方案可以将小波变换所需的计算量平均减少一半,在进行二维图像数据的处理时,可以减少约 3/4 的计算量^[5].

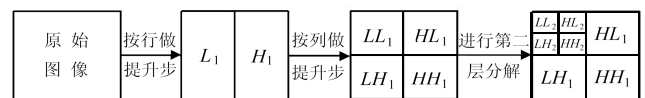


图 2 二维图像提升小波分解示意图

Fig. 2 Diagram of 2D image decomposition using lifting wavelet

3.2 基于提升小波变换的图像融合方案

以两幅图像为例,对于多幅图像的融合算法可以类推.设 A 、 B 为两幅原始图像,并假设它们已经过精确的配准,图像的大小相同, F 为融合后的图像,基于提升小波变换的图像融合方案如图 3 所示.图像融合的基本步骤如下:

1) 对待融合图像 A 、 B 分别进行 n 层提升小波分解,最终将分别得到源图像的一个低频子图像和

$3n$ 个高频子图像, 分别表示为

$$S_A = \{C_{LL_n}(A), D_{HL_n}(A), D_{LH_n}(A), D_{HH_n}(A), \dots, D_{HL_1}(A), D_{LH_1}(A), D_{HH_1}(A)\} \quad (4)$$

$$S_B = \{C_{LL_n}(B), D_{HL_n}(B), D_{LH_n}(B), D_{HH_n}(B), \dots, D_{HL_1}(B), D_{LH_1}(B), D_{HH_1}(B)\} \quad (5)$$

2) 分别对分解得到的低频和高频子图像采用相应的融合规则及融合算子进行融合处理, 得到对应于融合图像 F 的低频和高频子图像, 记为: $C_{LL_n}(F)$ 和 $D_i(F)$, 即

$$\begin{cases} C_{LL_n}(F) = \text{Rule1} \langle C_{LL_n}(A), C_{LL_n}(B) \rangle \\ D_h(F) = \text{Rule2} \langle D_h(A), D_h(B) \rangle \end{cases} \quad (6)$$

其中 $h = \{HL_n, LH_n, HH_n, \dots, HL_1, LH_1, HH_1\}$, 则

$$S_F = \{C_{LL_n}(F), D_{HL_n}(F), D_{LH_n}(F), D_{HH_n}(F), \dots, D_{HL_1}(F), D_{LH_1}(F), D_{HH_1}(F)\} \quad (7)$$

3) 对融合后的低频和高频子图像进行提升小波逆变换, 重构得到融合图像 F .

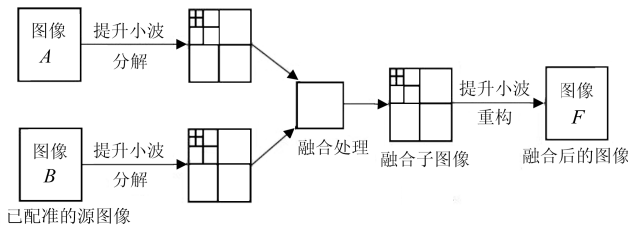


图3 基于提升小波变换的图像融合方案

Fig. 3 The scheme of image fusion based on lifting wavelet transform

3.3 图像融合规则及融合算子

为了获得更好的融合性能并突出重要的特征和细节信息, 本文提出一种新的基于区域特征选择的融合规则, 并采用加权融合算子, 对图像的低频和高频分量加以区别, 采用不同的融合规则和融合算子进行处理, 这样就能充分挖掘被融合图像的互补及冗余信息. 具体描述如下:

规则 1. 构造图像的低频分量 $C_{LL_n}(F)$. 直接利用经提升小波分解后待融合图像的低频小波系数矩阵的加权平均作为融合后图像的低频小波系数矩阵, 即

$$C_{LL_n}(F) = \alpha C_{LL_n}(A) + \beta C_{LL_n}(B) \quad (8)$$

其中 $\alpha + \beta = 1$, 这里分三种情况: 如果融合的目的是为了改善图像 A 的效果, 可选择 $\alpha > \beta$; 反之, 可

选择 $\alpha < \beta$ 来改善图像 B 的质量; 如果两幅源图像是来自对同一场景采用相同成像模式在不同时刻采集的图像, 由于它们的低频分量一般相近或相同, 可选择 $\alpha = \beta$.

规则 2. 选择融合图像的高频分量 $D_h(F)$. 图像的高频分量包含重要的特征和细节信息, 融合的关键在于能否有效地从源图像中提取这些信息. 对高频分量采用基于区域特征选择的融合规则, 其基本思想是: 图像的细节往往表现为灰度值及其变化, 而在小波域中则表现为变换系数的绝对值大小, 我们在源图像相应的高频子图像中分别选择以待融合像素点为中心的一个区域窗口, 并按如下规则进行融合处理:

If $|D_h(A)(i, j)| = |D_h(B)(i, j)|$, then $N_A = N_A + 1$ and $N_B = N_B + 1$;

else if $|D_h(A)(i, j)| > |D_h(B)(i, j)|$, then $N_A = N_A + 2$;

else $N_B = N_B + 2$.

If $N_A > N_B$, then $D_h(F)(m, n) = D_h(A)(m, n)$.

If $N_A < N_B$, then $D_h(F)(m, n) = D_h(B)(m, n)$.

If $N_A = N_B$, then

$$\begin{cases} D_h(F)(m, n) = D_h(A)(m, n), & \text{if } |D_h(A)(m, n)| \geq |D_h(B)(m, n)| \\ D_h(F)(m, n) = D_h(B)(m, n), & \text{if } |D_h(A)(m, n)| < |D_h(B)(m, n)| \end{cases} \quad (9)$$

其中 $i \in [m - r/2, m + r/2]$, $j \in [n - r/2, n + r/2]$, r 为窗宽, (m, n) 为区域中心, N_A 和 N_B 为分别对应两个窗口的计数器.

对所有高频子图像进行融合处理, 最终得到融合后的高频子图像. 为了保证融合后的各个频带数据具有一致性, 采用“多数”原则对融合后的高频子图像进行一致性检验和调整, 即对每个像素进行如下处理: 如果某像素的 3×3 邻域中至少有 6 个像素来自图像 A , 则该像素也应调整为来自图像 A 的对应像素点, 否则保持原数据不变. 最后按提升小波变换的重构算法, 将融合后的子图像经提升小波逆变换重构得到融合图像. 采用上述融合规则可以很好地突出图像的重要特征和细节信息, 并且计算简单, 实验结果也证明采用本文提出的基于区域特征选择的融合规则取得了良好的视觉效果和融合质量.

4 图像融合实验及性能评价

4.1 图像融合效果的客观评价准则

目前, 图像融合中有待进一步研究的问题还很多, 特别是图像融合效果的客观、定量评价问题尚未得到很好解决. 由于在实际应用中, 理想的融合图像往往是未知的, 因而本文采用熵 (Entropy)、互

信息 (Mutual information) 和融合均匀度 (Fusion symmetry) 三个指标, 从不同角度客观评价图像的融合效果.

1) 熵 (H): 熵值的大小表示图像所包含的平均信息量的多少, 图像的熵 H 定义为

$$H = - \sum_{i=0}^{L-1} p_i \log(p_i) \quad (10)$$

其中, L 为图像的总灰度级数, p_i 为灰度为 i 的像素的概率密度.

2) 互信息 (MI): 源图像 A 、 B 和融合图像 F 之间的互信息定义为

$$\begin{cases} I_{FA}(f, a) = \sum_{f,a} p_{FA}(f, a) \log \frac{p_{FA}(f, a)}{p_F(f)p_A(a)} \\ I_{FB}(f, b) = \sum_{f,b} p_{FB}(f, b) \log \frac{p_{FB}(f, b)}{p_F(f)p_B(b)} \end{cases} \quad (11)$$

则总的互信息量为

$$MI_F^{AB} = I_{FA}(f, a) + I_{FB}(f, b) \quad (12)$$

其中 p_{FA} 和 p_{FB} 为联合概率密度. 互信息的值越大表示融合图像从源图像中获取的信息越丰富, 融合效果越好.

3) 融合均匀度 (FS): 图像融合均匀度的值越小表明融合效果越好^[6], 其定义为

$$FS = \text{abs} \left(\frac{I_{FA}}{I_{FA} + I_{FB}} - 0.5 \right) \quad (13)$$

这些指标是从定量的角度考虑图像的融合质量, 但仍然不够全面, 所以定性分析即视觉判断仍不可少, 本文采用主观视觉分析与客观定量评价相结合的方式来评估图像的融合效果.

4.2 图像融合实验及结果分析

为了验证本文提出的基于第二代小波变换的图像融合方法的有效性, 针对三类不同性质的多源图像进行了融合实验, 包括 SPOT 遥感卫星的全色 (Panchromatic) 与多光谱图像融合、MRI 与 PET 多模医学图像融合以及数码相机多聚焦图像融合. 在融合实验中, 选择 Db4 小波作为小波基, 并用因式分解的方法求得其等效提升方案, 图像分解层数一般选为 3 层, 源图像大小均为 256×256 , 并经过相应的校正和精确配准, 部分实验的源图像以及融合结果图像如图 4~6 所示.

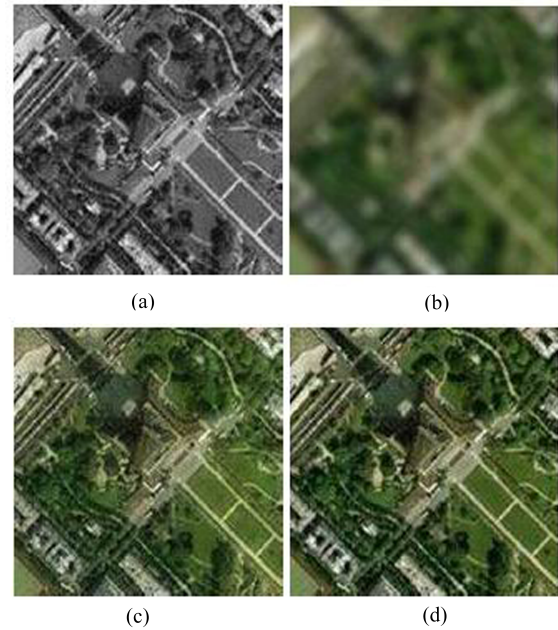


图 4 SPOT 全色与多光谱图像的融合 ((a) SPOT 全色图像; (b) 原始多光谱图像; (c) 基于传统小波变换的融合图像; (d) 基于提升小波变换的融合图像)

Fig. 4 The fusion results of SPOT panchromatic and multi-spectral images ((a) SPOT panchromatic image; (b) Original multi-spectral image; (c) Fused image of using wavelet transform; (d) Fused image of using lifting scheme)

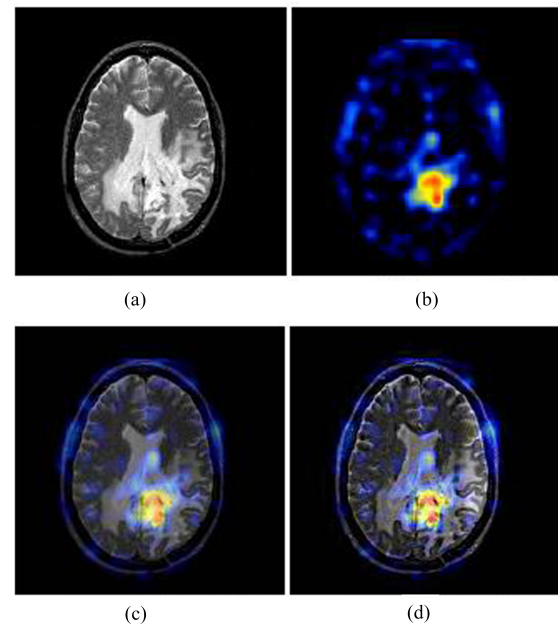


图 5 MRI 与 PET 多模医学图像的融合 ((a) 原始 MRI 图像; (b) 原始 PET 图像; (c) 提升小波+区域能量规则; (d) 提升小波+特征选择规则)

Fig. 5 The fusion results of MRI and PET images ((a) Original MRI image; (b) Original PET image; (c) Fused image based on lifting scheme and region energy rule; (d) Fused image based on lifting scheme and feature selection rule)

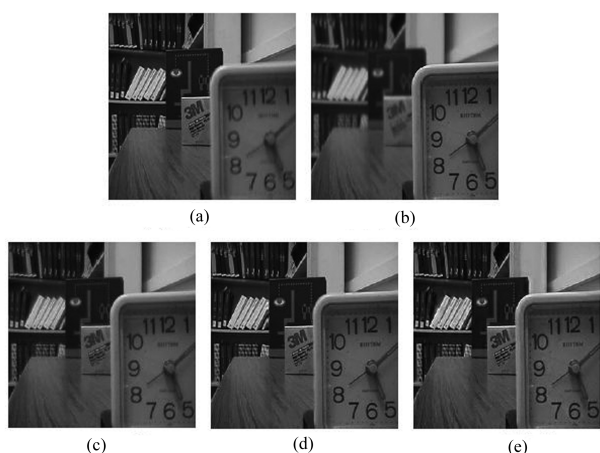


图 6 多聚焦图像的融合 ((a) 聚焦在左边; (b) 聚焦在右边; (c) 二层分解; (d) 三层分解; (e) 四层分解)

Fig. 6 The fusion results of multi-focus images ((a) Focus on left; (b) Focus on right; (c) Two levels decomposition; (d) Three levels decomposition; (e) Four levels decomposition)

在图 4 中, (a) 为原始 SPOT 全色图像, (b) 为同一场景的 1、2、3 波段多光谱合成图像. 由于全色图像具有较高的空间分辨率, 包含许多细节信息, 而多光谱图像具有较低的空间分辨率, 却包含丰富的光谱信息, 因而融合的目的是使融合图像中尽可能多地同时保留细节和光谱信息. 为了分析比较传统小波和提升小波变换对融合效果的影响, 图 (c) 和 (d) 为同一融合策略下, 分别采用传统小波变换和基于提升方案的小波变换进行图像融合的结果. 从视觉效果和评价指标的计算结果 (如表 1 所示) 来看, 采用提升小波变换的融合效果略优于传统小波变换, 而在计算复杂度和融合速度方面本文提出的基于提升小波变换的图像融合算法远优于传统基于卷积运算的小波变换图像融合算法, 计算复杂度明显降低.

在图 5 中, (a) 和 (b) 为原始 MRI 及 PET 医学图像, MRI 图像包含了人体的解剖结构信息, 而 PET 图像则反映人体的血流及代谢等功能信息, 融合的目的是将解剖结构信息和功能信息融合在一幅图像中显示出来, 以便于医生做进一步的诊断和治疗. 为了分析比较本文提出的特征选择规则对融合效果的改善程度, 本组实验在基于相同的小波变换方式下, 采用不同的融合规则进行了融合实验. 图 (c) 为基于提升小波变换并采用文献 [7] 提出的基于区域能量的融合规则得到的融合结果, 图 (d) 为基于提升小波变换并采用本文提出的特征选择规则得到的融合结果图像. 从视觉效果和评价指标的计算结果来看, 本文提出的特征选择融合规则取得了更好的融合效果.

在图 6 中, (a) 和 (b) 为原始多聚焦图像, 聚焦点分别在左侧和右侧, 融合的目的是得到一幅前景

和背景均非常清晰的融合图像. 为了分析比较在基于提升小波变换的融合方案中, 不同的分解层数对融合效果的影响, 本组实验均采用本文提出的基于提升小波变换加特征选择规则的融合方案, 提升小波分解层数分别选为 2、3、4 层, 相应的融合结果为图 (c)~(e). 从视觉效果和评价准则的计算结果看, 随着分解层数的增加, 融合效果也越来越好, 但计算量也随之变大, 因而分解层数并不是越多越好, 应当视具体的应用要求选择合适的分解层数.

表 1 图像融合结果的客观性能评价

Table 1 The performance evaluation of image fusion results

| 图像 \ 评价准则 | 熵 | 互信息 | 融合均匀度 | |
|-----------|-----|--------|--------|--------|
| 图 4 | (a) | 2.2277 | | |
| | (b) | 2.0140 | | |
| | (c) | 3.2941 | 5.7745 | 0.1431 |
| | (d) | 3.2996 | 5.8590 | 0.1295 |
| 图 5 | (a) | 1.6672 | | |
| | (b) | 1.3775 | | |
| | (c) | 2.4130 | 4.7013 | 0.1130 |
| | (d) | 2.9546 | 5.1981 | 0.9721 |
| 图 6 | (a) | 2.1635 | | |
| | (b) | 2.1416 | | |
| | (c) | 3.1959 | 5.9974 | 0.0594 |
| | (d) | 3.4181 | 6.1265 | 0.0537 |
| | (e) | 3.7452 | 6.2239 | 0.0501 |

5 结论

针对在图像融合过程中, 采用传统基于卷积运算的小波变换处理大量的图像数据时, 存在的计算复杂、运算所需内存较多、无法实现在线快速的图像处理等缺陷, 提出了基于第二代小波变换的图像融合新算法, 该方法在保持原有基于传统小波变换融合方法的融合性能的前提下, 使融合处理的计算量显著减少, 融合速度显著提高. 在此基础上, 本文还提出了一种新的基于区域特征选择的融合规则, 针对不同类型的多源图像进行了融合仿真实验, 并采用主观视觉判断与客观评价准则相结合的方式, 对采用不同变换方式、不同融合规则以及不同分解层数对融合效果的影响进行了比较分析, 实验结果表明, 本文提出的基于第二代小波变换的图像融合方法是一种非常有效的图像融合方法, 实现了多源图像的快速融合处理.

References

- 1 Zhang Z, Blum R S. A categorization of multiscale-decomposition-based image fusion scheme with a performance study for a digital camera application. *Proceedings of the IEEE*, 1999, **87**(8): 1315~1326
- 2 Wang Z J, Ziou D, Armenakis C, Li D, Li Q Q. A comparative analysis of image fusion methods. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 2005, **43**(6): 1391~1402
- 3 Daubechies I, Sweldens W. Factoring wavelet transforms into lifting steps. *Journal of Fourier Analysis and Applications*, 1998, **4**(3): 245~267
- 4 Sweldens W. The lifting scheme: a construction of second-generation wavelets. *SIAM Journal on Mathematical Analysis*, 1998, **29**(2): 511~546
- 5 Li H G, Wang Q, Wu L N. A novel design of lifting scheme from general wavelet. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2001, **49**(8): 1714~1717
- 6 Shi W Z, Zhu C Q, Tian Y, Nichol J. Wavelet-based image fusion and quality assessment. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2005, **6**(3-4): 241~251
- 7 Liu Gui-Xi, Yang Wan-Hai. A wavelet-decomposition-based image fusion scheme and its performance evaluation. *Acta Automatica Sinica*, 2002, **28**(6): 927~934
(刘贵喜, 杨万海. 基于小波分解的图像融合方法及性能评价. *自动化学报*, 2002, **28**(6): 927~934)



李 伟 深圳信息职业技术学院软件工程系讲师. 主要研究方向为智能检测与智能控制、图象处理和信息融合. 本文通信作者. E-mail: llewell@163.com

(**LI Wei** Lecturer at College of Software Engineering, Shenzhen Institute of Information Technology. Her research interest covers intelligent detection and intelligent control, image process, and information fusion. Corresponding author of this paper.)



朱学峰 华南理工大学自动化科学与工程学院教授. 主要研究方向为智能检测与智能控制、图像处理与识别和软测量技术. E-mail: xfzhu@scut.edu.cn

(**ZHU Xue-Feng** Professor at College of Automation Science and Engineering, South China University of Technology. His research interest covers intelligent control, image process and recognition, and soft technique.)