

基于空域图像局部多向梯度模的图像融合方法

卢振坤

(梧州学院数理系, 广西 梧州 543002)

摘要:针对传统像素级图像融合方法割裂像素间联系的问题,提出了一种基于局部多向梯度模的图像融合方法:先对源图像进行分块,然后用方向导数构造的多向梯度滤波器组对图像块进行多向梯度滤波,从而提取出不同方向的边缘特征,通过比较对应块图像总的梯度模的大小来判断属于清晰还是模糊的像素,以此达到融合图像目的。通过实验,证明了该方法简单、有效,对于多聚焦图像的融合具有很好的效果和很好的稳定性。

关键词:图像融合;空域图像;梯度;多向梯度模

中图分类号:TN391 **文献标识码:**A

Image fusion algorithm based on local multi-orientation gradient mode of spatial domain image

LU Zhen-kun

(Department of Physics and Mathematics, Wuzhou University, Wuzhou 543002, China)

Abstract: A method for image fusion based on multi-orientation gradient mode is proposed. Source image is divided into some image sub-blocks. Multi-orientation gradient filters are constructed by directional derivative. Image blocks are filtered by the multi-orientation gradient operators for extracting characters of edge on different orientations. Compared with the total value of the gradient of image block for judging the pixel is focused or not, then generate fused image. Experiments illustrate this method is simplified and availability and show that the method for multi-focus image fusion has good results and good stability.

Key words: image fusion; spatial domain image; gradient; multi-orientation gradient mode

1 引言

图像融合作为信息融合的一个重要领域已经广泛应用于遥感、计算机视觉、医学、军事目标探测和识别等方面。近年来有不少学者提出了图像融合的方法,而占主流的还是基于多分辨率的方法。这类方法一大类是基于图像的高斯金字塔分解,然后派生出拉普拉斯金字塔、灰度金字塔、梯度金字塔等^[1-5];另一大类是基于小波分解的算法,基本思想是把图像分解到不同分辨率下的一系列低频信息的模糊子图像和高频细节子图像^[6-7]。这两类方法的

共同之处都是从频域的角度出发,在不同的分辨下各自按一定的规则融合,得到一个融合后的图像序列。而融合规则的优劣直接影响最后的融合结果。也有文献提出用B样条函数构造适用于图像边缘提取的小波对待融合图像进行两个互相垂直方向的分解,然后分别用小波系数比较的融合准则

基金项目:广西自然科学基金项目(No. 0832283)资助。

作者简介:卢振坤(1979-),男,壮族,工学硕士,讲师,主要研究方向为图像处理。E-mail: lzk06@sina.com

收稿日期:2009-08-04

和边缘比较的融合准则进行融合^[8]。实验表明基于多分辨率思想的算法一般都能取得较好的效果,而相反研究基于空域的融合方法的文献相对少很多。其实从空域的角度来研究图像融合,未必就比频域的效果差,利用空域的信息直接提取清晰像素是可行的。

近来,有学者提出基于多向梯度的目标检测方法^[9]和利用邻域平均梯度进行小波图像融合^[10]等,而且效果都不错。说明用方向梯度来提取图像特征,判断像素的清晰与否是可行的。但是文献[10]对近似子图像直接用均值法,就会造成对象边沿重影,而且选取的窗口也不科学。也有越来越多的学者把局部区域能量用于图像融合^[11-12],避免孤立地处理各个像素,割裂了像素间的联系,可以充分考虑相邻像素之间的相关性,突出了区域特征,降低了噪声的敏感度。

基于此,本文充分利用方向梯度对图像微小细节的敏感性以及提取图像特征的有效性,采用以图像局部梯度模和作为该区域图像是否清晰的指标,最后再应用一致性验证对得到的清晰区域图像进行重构,得到融合图像。由于此法直接提取原始的清晰图像,实现高精度融合。通过实验,证明了该方法对于多聚焦图像的融合具有很好的效果,并且具有很好的稳定性。

2 多向梯度模的物理意义

设 $f(x, y)$ 是一幅连续图像, 设 $x(\theta)$ 为沿着 θ 方向的坐标, 定义 $\frac{\partial f(x, y)}{\partial x(\theta)}$ 是沿 θ 方向的偏导数, $\theta \in [0, 2\pi]$ 。由此, $f(x, y)$ 的梯度表示为:

$$\text{grad}f(x, y) = \left\{ \frac{\partial f(x, y)}{\partial x(\theta)} \right\}, \theta \in [0, 2\pi]$$

其梯度模为:

$$|\text{grad}f(x, y)| = \sqrt{\sum_{\theta \in [0, 2\pi]} \left(\frac{\partial f}{\partial x(\theta)} \right)^2}$$

若 $f(x, y)$ 是一幅离散图像, 则 $f(x, y)$ 的梯度可表示为:

$$\text{grad}f(x, y) = \left\{ \frac{\partial f(x, y)}{\partial x(\theta)} \right\}$$

$\theta \in \{0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4, \pi, 5\pi/4, 3\pi/2, 7\pi/4\}$, 即 8 个方向, 如图 1 所示。其中:

$$\frac{\partial f(x, y)}{\partial x(\theta)} = f(x + l_1, y + l_2) - f(x, y)$$

且 θ, l_1, l_2 之间有如表 1 所示的关系。

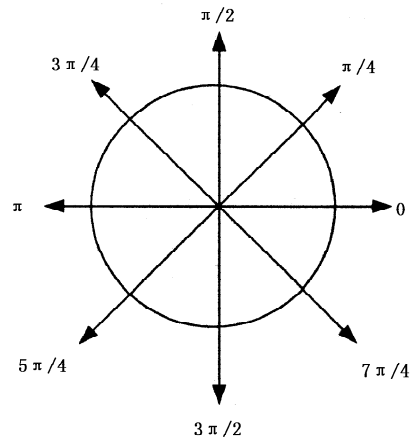


图1 方向图

表 1 θ, l_1, l_2 之间的关系

θ	0	$\pi/4$	$\pi/2$	$3\pi/4$	π	$5\pi/4$	$3\pi/2$	$7\pi/4$
l_1	1	1	0	-1	-1	-1	0	1
l_2	0	-1	-1	-1	0	1	1	1

为了分析的简单以及定量的对目标图像的多向梯度特性进行分析, 定义单向梯度模为:

$$|\text{grad}f(x, y)| = |f(x + l_1, y + l_2) - f(x, y)|$$

方向梯度值也可以采用滤波方法进行计算, 我们可以采用如下的梯度滤波算子进行方向梯度的计算:

$$\begin{aligned}
 h_1 &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, & h_2 &= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \\
 h_3 &= \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, & h_4 &= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \\
 h_5 &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, & h_6 &= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \\
 h_7 &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, & h_8 &= \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

方向梯度滤波算子与图像 $f(x, y)$ 以及方向梯度之间存在着以下关系 (* 为卷积运算):

$$\nabla_{x(\theta_i)} f = f * h_i, i = 1, \dots, 8$$

则定义 $f(x, y)$ 多向梯度模为:

$$|\text{grad}f(x, y)| = \sum_{i=1}^8 |\nabla_{x(\theta_i)} f| = \sum_{i=1}^8 |f * h_i| \quad (1)$$

多向梯度反映的是图像中各像素点与周围像素点之间的关系, 它充分表现图像微小细节的反差, 物理意义明确。

3 基于多向梯度模的图像融合

3.1 清晰度指标

利用对图像灰度梯度来反映图像中微小细节反差和纹理变换特征,从而表征图像的清晰程度,灰度梯度越大,图像越清晰,这是可行的。下面利用Lena图像来做实验。采用不同的模糊半径的高斯函数对其进行模糊化处理,结果如图2所示,从图中可以看出,随着模糊半径的增大,图像越来越模糊。这些图像的清晰度指标用多向梯度模表示,如表2和图3所示,图像越模糊,多向梯度模值越小。

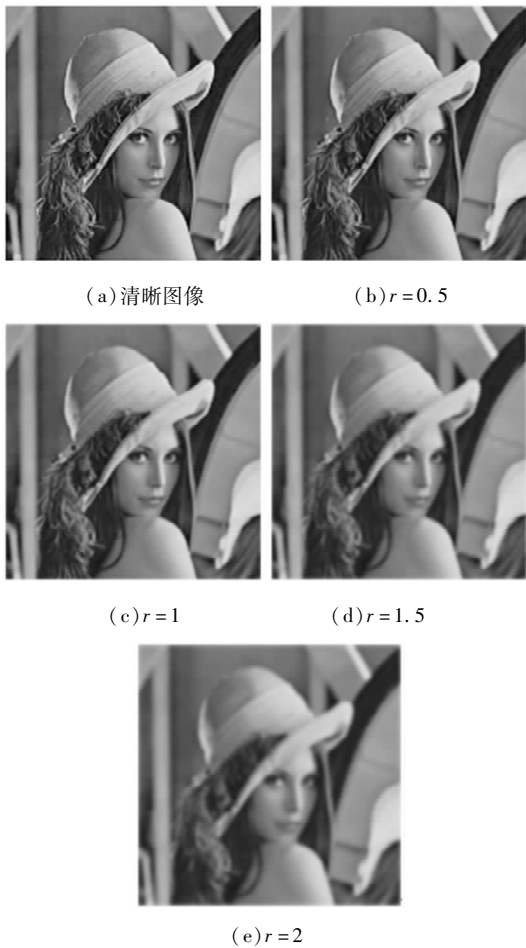


图2 清晰图像及模糊图像(r 为模糊半径)

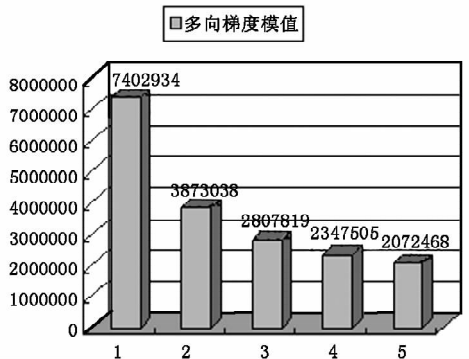


图3 清晰度指标值直方图

表2 清晰度指标值比较

图像	清晰图	$r=0.5$	$r=1$	$r=1.5$	$r=2$
模值	7402934	3873038	2807819	2347505	2072468

再从3D图的角度来考察清晰图像和模糊图像的区别,图4和图5分别是清晰图像2(a)与模糊图像2(e)的3D图,从图中可以看出清晰图像的3D图表面颗粒很多,很粗糙,说明该图像所含信息丰富,而模糊图像的3D图表面颗粒很少,很平缓,说明该图像所含信息少。这正好印证了上面用图像的总梯度模来反映图像清晰度,物理意义很明显。

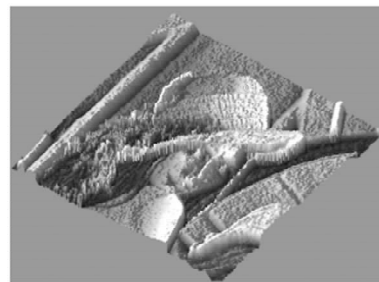


图4 清晰图像2(a)的3D图

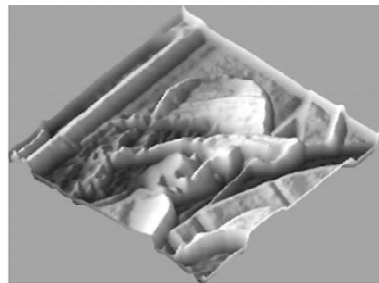


图5 模糊图像2(e)的3D图

3.2 融合规则与算法

本文利用区域分割的图像融合算法的思想,提出了一种基于多向梯度模的图像融合方法:先对待融合的图像进行分块,然后对图像块进行多向梯度滤波,比较对应图像块的总体梯度模值,以挑选出其中清晰的图像块,从而重构图像得到最终的融合图像,最后进行一致性验证。其具体过程如下:

1) 将多幅已配准的待融合图像分割成若干个 $M \times N$ 的子块,用 $f_{i,k}$ 表示图像 f_i 的第 k 个子块矩阵,其中, $i=1,2$ 。

2) 对待融合对应图像块 $f_{i,k}$ 进行多向梯度滤波。按式(1)和(2)计算该局部图像块总的多向梯度模,即得 $\text{Grad}(i,k)$ 。

$$\text{Grad}(i,k) = \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^M |\text{grad}f_{i,k}(x,y)| \quad (2)$$

3) 比较待融合图像对应局部图像块的多向梯度模, 以确定清晰图像块, 从而重构图像。融合规则如下:

- a) 设定阈值 T 。
- b) 比较多向梯度模, 确定清晰图像块。

考虑到局部图像块之间的相关性, 在此引进权重系数 μ , 避免目标图像边缘出现重影, 起到平滑作用。

如果 $\text{Grad}(i, k) < T$, 且如果 $\text{Grad}(1, k) > \text{Grad}(2, k)$ 则:

$$F_k = \mu * f_{1,k} + (1 - \mu)f_{2,k}, \text{ 否则:}$$

$$F_k = (1 - \mu) * f_{1,k} + \mu * f_{2,k}, \text{ 其中 } 0 < \mu < 1。$$

如果 $\text{Grad}(i, k) > T$, 且如果 $\text{Grad}(1, k) > \text{Grad}(2, k)$ 则:

$$F_k = f_{1,k}, \text{ 否则 } F_k = f_{2,k}。$$

- c) 重构清晰局部图像块 $F_k, k = M \times N$ 。

4) 考虑到相邻像素的相关性, 对图像中的任一像素, 若相邻的像素均选自另一输入图像, 那么该像素的选取将与相邻像素的选取相同, 对3) 的融合结果进行一致性验证。

4 融合图像实验与分析

本文除了主观评价之外, 还利用均方根误差 (RSEM)、信息熵 (ENTROPY)、信噪 (SNR)、峰值信噪比 (PSNR) 等方法进行客观评价。

实验 1: 用多聚焦图像如图 6、图 7 所示进行实验, 图 6 是前景清晰, 而图 7 是背景清晰, 图 8 是标准参考图像。由于本文是用区域分割方法, 所以图像块的大小是影响图像融合质量的一个重要因素。如果图像块太小, 局部梯度模不能充分表现图像特征, 融合结果会出现块效应, 反之融合结果出现灰度畸变。表 3 列出了不同分块大小, 对图像融合效果的影响。从表中可以看出, 分块大小为 32×32 时各评价指标最佳, 如 RSEM 最小, SNR 和 PSNR 最大, 融合效果最好, 而且计算量相对也比较小, 图 9 给出了他们的折线图, 其中 SNR 折线作了 (SNR - 14) 的数据处理, 本文选取 32×32 。



图 6 前景清晰图像图



图 7 背景清晰图像



图 8 标准图像

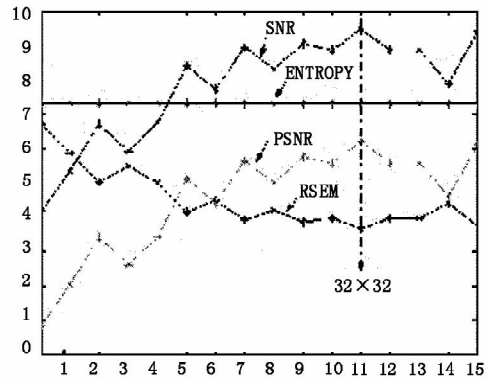


图 9 图像分块大小对融合结果的折线图

表 3 图像分块大小对融合结果的影响

块大小	RSEM	ENTROPY	SNR	PSNR
3 × 3	6.6779	7.3136	18.1619	0.8331
5 × 5	5.8422	7.3115	19.3600	2.0302
7 × 7	5.0226	7.3131	20.7121	3.3891
9 × 9	5.4885	7.3111	19.9191	2.5924
12 × 12	4.9964	7.3075	20.7580	3.4388
16 × 16	4.1408	7.3079	22.4186	5.1094
18 × 18	4.4884	7.3076	21.7205	4.4083
21 × 21	3.9105	7.3040	22.9417	5.6382
23 × 23	4.2073	7.2988	22.3085	5.0018
25 × 25	3.8648	7.3032	23.0579	5.7533
27 × 27	3.9533	7.3018	22.8543	5.5554
32 × 32	3.6793	7.3009	23.4918	6.1912
34 × 34	3.9478	7.3035	22.8725	5.5728
36 × 36	3.9614	7.2958	22.8568	5.5586
57 × 57	4.4049	7.2987	21.8929	4.5894
64 × 64	3.7237	7.2953	23.4250	6.1106

此外, 使用本文方法融合图像时, 阈值的大小对融合结果也会有一定的影响。如果阈值太小, 融合结果会出现图像边界重影效应, 反之, 使融合图像分辨率降低, 影响视觉效果。表 4 列出了不同阈值大小, 对图像融合效果的影响。从表中可以看出, 阈值 $T=5$ 时, 各项评价指标最佳, 融合效果最好。图 10 给出了他们的折线图, 其中 SNR 折线作了 (SNR -

14)的数据处理,本文选取 32×32 。

表4 阈值大小对融合结果的影响

阈值大小	RSEM	ENTROPY	SNR	PSNR
1.0	3.7665	7.2992	23.3235	6.0180
2.0	3.7498	7.2963	23.3626	6.0551
3.0	3.7309	7.2949	23.4044	6.0963
4.0	3.7236	7.2945	23.4167	6.1073
5.0	3.7132	7.2935	23.4463	6.1361
6.0	3.7362	7.2930	23.384	6.0729
7.0	3.7799	7.2947	23.2887	5.9761
8.0	3.8357	7.2957	23.1629	5.8492
9.0	3.9009	7.2978	23.0192	5.7025
10.0	4.0091	7.2978	22.7889	5.4698

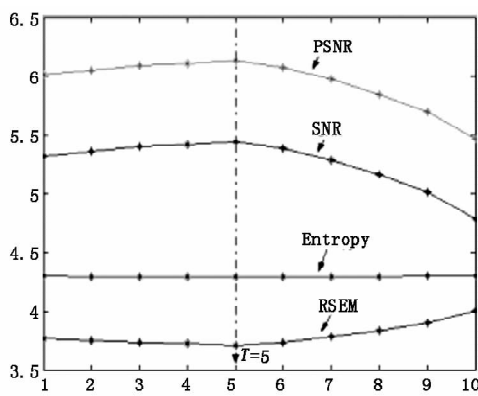


图10 阈值大小对融合结果的折线图

由本文提出的方法得到的融合图像如图11所示,图12是用db4小波变换进行四层分解,对高频层采用最大值法时的融合图像;图13是用拉普拉斯金字塔方法得到的融合图像。主观评价,图11优于图12、图13,它融合了两幅原始图像的有用的互补信息,获得了清晰的主体和背景图像,而且图像的整体灰度忠实的反映了原始图像的亮度信息。表5给出它们各项指标比较。从表中可以看出,本文方法各项指标最好。图14还给出了局部融合结果图,图14(b)有明显的失真,图14(c)中书本的边缘失真明显,图14(a)效果最佳,保留了原图的清晰图像。



图11 本文方法

表5 客观评价指标比较

指标	本文方法	db4小波分解最大值法	金字塔法
RSEM	3.6793	5.6754	6.0058
ENTROPY	7.2958	7.2754	7.2814
SNR	22.8568	21.8929	22.3085
PSNR	5.5586	4.5894	5.0018



图12 db4小波最大值法



图13 拉普拉斯金字塔

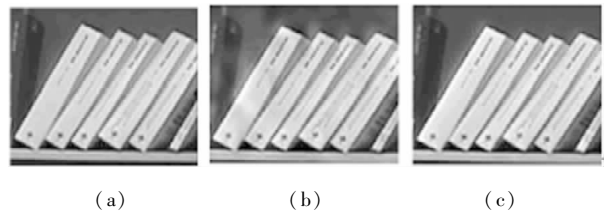


图14 (a)(b)(c)分别是图11、12、13的局部融合结果

实验2:用多聚焦图像如图15~图17进行实验,图18~图20是分别用db4小波分解最大值法,金字塔法和本文方法得到的融合图像,从图20可以看出它融合了图15和图16的清晰图像,表6给出它和其他两种方法的各项评价指标比较。从表中可以看出,本文方法的各项评价指标最好。

表6 客观评价指标比较

指标	本文方法	db4小波分解最大值法	金字塔法
RSEM	1.5898	3.4100	4.0281
ENTROPY	7.2991	7.1348	7.1302
SNR	32.5515	24.1586	26.7282
PSNR	13.9198	5.6963	8.0954



图15 左聚焦



图16 右聚焦



图17 标准图像



图18 db4 小波最大值法



图19 拉普拉斯金字塔



图20 本文方法

5 结论

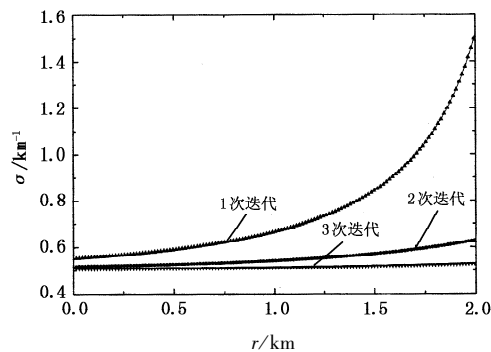
多向梯度反映的是图像中各像素点与周围像素点之间的关系,它充分表现图像微小细节的反差,物理意义明确。本文将多向梯度模应用于局部图像块的图像融合,提出一种新的融合算法,与现有的一些方法相比,具有以下几个优点:①首先基于单个像素的融合,会对噪声敏感,而且在对象边沿容易产生模糊效果。而本文是基于局部图像原则,可以消除像素对像素的模糊效应,而且也降低了计算量。②基于多向梯度模的图像融合,综合了细节图像块的像素灰度变化情况,更符合人眼对不同方向的图像细节分量具有不同分辨率的要求。③与小波融合相比,由于只以局部图像块的多向梯度模作为衡量指标,直接提取清晰像素,避免了小波融合规则的选择,实现高精度融合,并且计算量小。通过验证,本文算法能够取得较好的融合图像效果。

参考文献:

- [1] Toet A, Van Ruyven L J, Valeton J M. Merging thermal and visual image by a contrast pyramid[J]. Optical Engineering, 1989, 28: 789 - 792.
- [2] Peter J Burt, Edward H Adelson. The Laplacian pyramid as a compact image code[J]. IEEE Transaction on communications, 1983, Com - 31: 532 - 540.
- [3] Aleaander Toet Multiscale contrast enhancement with application to image fusion [J]. Optical Engineering, 1992, 31: 1027 - 1031.
- [4] 玉振明, 高飞. 基于金字塔的图像融合和性能评价[J]. 计算机应用研究, 2004, 21(10): 128 - 130.
- [5] 陈浩, 王延杰. 基于拉普拉斯金字塔变换的图像融合算法研究[J]. 激光与红外, 2009, 39(4): 399 - 442.
- [6] Dongmei Yan, Zhongming Zhao. Wavelet decomposition applied to image fusion [C]//Info-tech and Info-net, 2001. Proceedings. ICII 2001-Beijing. 2001 International Conferences on, Volume 1: 291 - 295.
- [7] Eslami R, Radha H. Wavelet based contourlet transform and its application to image coding [C]//IEEE International Conference on Image Processing. Singapore: IEEE, 2004: 3189 - 3192.
- [8] 玉振明, 毛士艺, 袁运能, 等. 基于边缘检测小波变换的图像融合研究 [J]. 电子学报, 2005, 33(8): 1446 - 1550.
- [9] 宗思光, 王江安. 基于多向梯度表决融合的双波段目标检测算法 [J]. 光电子·激光, 2005, 16(5): 610 - 613.
- [10] 李春梅, 王汝霖, 等. 基于邻域平均梯度的小波图像融合 [J]. 微计算机信息, 2006, 22(12-3): 306 - 312.
- [11] 龚昌来. 基于局部能量的小波图像融合新方法 [J]. 激光与红外, 2008, 38(12): 152 - 153.
- [12] 殷兵, 于梅, 梁栋, 等. 基于小波 - Contourlet 变换和区域能量融合规则的图像融合算法 [J]. 计算机应用研究, 2008, 25(7): 2197 - 2199.

更正

本刊 2009 年 12 期第 1286 页中的图 3 原稿有误, 现将正确的图 3 更正如右图。

图3 迭代过程($\sigma=0.5\text{km}^{-1}$)