

〈图像处理与仿真〉

一种图像融合算法硬件实现

杨 锋¹, 张俊举¹, 许 辉¹, 陆刘兵², 王新明³

(1.南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094; 2.北方激光科技集团有限公司, 江苏 扬州 225000;
3.中国兵器工业第 205 研究所, 陕西 西安 710065)

摘要: 研究了 Laplace 金字塔图像融合算法, 针对红外图像和可见光图像采用传统图像融合算法融合后, 融合图像细节和目标很难同时比较突出, 提出了一种基于形态学的 Laplace 金字塔图像融合算法。该算法先将红外图像进行形态学处理, 然后将形态学处理后的图像与 Laplace 金字塔融合图像进行二次融合获得最终融合图像。在以 TI 公司 TMS320DM642 芯片为核心的融合系统中, 使用 C 语言实现此图像融合算法, 并且通过优化代码, 实现 320×240 大小的红外和可见光图像实时融合, 算法处理一帧红外和可见光图像时间约为 33 ms。通过实验证明, 本文算法得到的融合图像细节和目标都比较突出, 且能够在硬件中实现实时性。

关键词: 形态学; Laplace; 图像融合; 实时性; TMS320DM642

中图分类号: TN216 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-8891(2013)09-0541-005

Hardware Implementation of an Image Fusion Method

YANG Feng¹, ZHANG Jun-ju¹, XU Hui¹, LU Liu-bing², WANG Xin-ming³

(1.School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;
2.CNGC North Laser Technology Group Co., LTD, Yangzhou 225000, China;
3.No. 205 Research Institute of China Ordnance Industry, Xi'an 710065, China)

Abstract: Based on the study of Laplace pyramid image fusion method, a Laplace pyramid image fusion method based on morphology is proposed in order to solve the problem that details of visible light image and the target of infrared image hardly being prominent at the same time in the fusion image, which is got by the traditional image fusion method. The method first processes infrared image by morphological way, and then let the Laplace pyramid fusion image secondly fuse with the image morphologically processed to obtain the final fused image. In the fusion system based on TI's TMS320DM642 chip, this image fusion method was implemented by the C language and 320×240 infrared and visible light images real-time fusion image was got by code optimization, and the processing time per frame is about 33ms. The experiments show that the details and target are more prominent in the fusion image got by the proposed method, and which can be implemented in hardware real-time.

Key words: morphology, Laplace, image fusion, real-time, TMS320DM642

0 引言

红外和可见光图像融合研究一直是图像处理领域的一个热门课题, 红外和可见光图像融合是将红外探测器和可见光探测器采集的图像通过融合算法, 将

2 个不同探测器采集的图像特征同时显示在同一幅图像上。图像融合主要分为像素级、特征级和决策级 3 类融合方法, 而大多数的融合算法都属于像素级图像融合算法。

近年来, 许多效果好的红外和可见光图像融合算

收稿日期: 2013-05-31; 修订日期: 2013-09-03.

作者简介: 杨锋 (1988-), 男, 江苏南通人, 硕士研究生, 主要从事图像处理与嵌入式开发工作。Email: cooleryf@163.com。

通讯作者: 张俊举 (1979-), 男, 河南清丰人, 博士, 副教授, 主要从事光电成像技术方面的研究工作。Email: zj_w1231@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金, 编号: 61101195; 江苏省产学研联合创新项目, 编号 20120017。

法被陆续提出来,如基于区域分割的序列图像融合算法、基于小波分析的不同融合规则的图像融合算法和基于 NSCT 变换的图像融合算法等^[1-3],然而这些算法仍然处于理论研究阶段,并且算法复杂、运算量大、系统资源需求高,很难在现有的硬件系统上实现实时图像融合^[4]。红外和可见光实时图像融合系统为了满足实时性,大多采用比较简单的图像融合算法,如加权平均融合、取大融合等。这些算法虽然满足实时性要求,但是融合效果较差,红外目标和可见光细节都不太突出。1983 年, Burt 和 Adelson 将拉普拉斯金字塔引入图像融合^[5], Laplace 金字塔图像融合算法^[6]作为多尺度分解图像融合算法,能很好的将图像的高频信息提取出来获得图像细节和轮廓,而且在不同分解层上可以采取不同融合准则,这就增加图像融合的灵活性,能够根据实际需求来调整融合准则达到最佳的融合效果。

为此本文在传统 Laplace 金字塔图像融合算法基础上,提出了一种基于形态学的 Laplace 金字塔图像融合算法。首先将红外图像进行形态学操作将红外目标提取出来,同时对红外和可见光图像进行 Laplace 金字塔融合,最后将红外图像提取的目标与融合图像进行二次融合。实验证明,该算法能够使红外目标和可见光细节都比较突出,并且该算法在基于 DM642 图像融合系统^[7]上可实现实时图像融合。

1 融合系统中算法构架及优化

本文中算法是在基于 TI 公司的高性能定点处理器 TMS320DM642 芯片为核心的图像融合系统中实现。此图像融合系统中 DM642 工作频率为 720 MHz, 最大处理能力可达 5760 MIPS, 2 片 SDRAM 容量为 4 M \times 64 位, 主要用于图像处理数据缓存。图像融合算法在系统中的实现构架如图 1 所示, 融合系统通过 DM642 视频采集口, 同时采集一帧红外图像和一帧可见光图像缓存在 SDRAM 中, 此时将采集完成标志位置为 1 停止采集图像, 然后 DM642 通过配准算法将红外图像和可见光图像进行配准, 将配准后的图像数据缓存在 SDRAM 中等待图像融合算法的调用, 其中图像融合产生的中间数据都将缓存在 SDRAM 中。当图像融合完成后且将图像数据送入显示缓存后, 将采集完成标志位置为 0, 此时进行下一帧图像采集。

本文算法采用 C 语言实现,使用的优化方法^[8]有:采用软件流水,使循环多次迭代并行执行,减少循环运行时间;使用 `const` 关键字、`restrict` 关键字和内联函数;拆解内部循环尽量使循环层数不超过 2 层;使用与、或运算代替 `if else` 判断语句;用逻辑运算加、

减、乘和移位运算代替除法运算；将用整数运算取代浮点运算；分析算法流程合并循环减少代码量和资源消耗；使用线性汇编改写消耗时间较长的 C 语言代码。

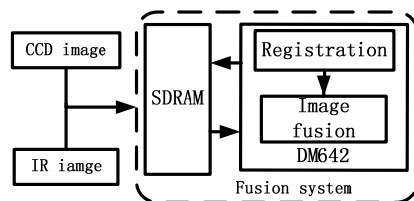


图 1 图像融合算法在系统中实现

Fig.1 Image fusion method in the system

2 基于形态学的 Laplace 金字塔图像融合算法

红外和可见光图像融合通常希望融合后的图像, 具有较多的红外图片中的目标和背景轮廓信息, 以及可见光图像中的物体细节信息。基于这点考虑本文采用基于形态学的 Laplace 金字塔图像融合算法, 在硬件上实现实时图像融合。算法流程如图 2 所示。

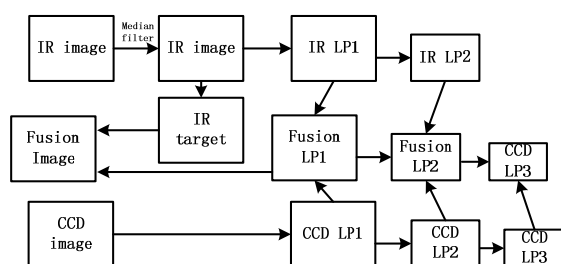


图2 融合算法框图 Fig.2 Fusion method block diagram

Fig.2 Fusion method block diagram

图中, 红外图像先经过 3×3 模版中值滤波处理, 处理后的图像进行形态学操作, 得到消除红外背景的红外目标图像。然后同时将红外图像和可见光图像进行 Laplace 分解, 分解完成后, 舍弃红外图像分解后的低频部分 (即最顶层 Laplace 图像), 并进行 Laplace 融合重构, 最后将重构后的融合图像与红外目标图像进行融合。

2.1 红外图像形态学处理

形态学滤波器能够改变图像的灰度值,与一般的线性滤波器不同,形态学滤波器能够较好的提取目标的形状、边缘等细节特征。对于红外图像,目标通常与背景有较高的灰度差异,且考虑到实际情况如果目标运动时会产生灰度突变,此时形态学提取目标的效果将更加明显。本文算法中,先采用 5×5 的结构元素 b_1 对经过中值滤波后的红外图像 f_{IR} 进行腐蚀操作记为 $f_{IR} \ominus b_1$,此过程定义为:

$$(f_{\text{IR}} \ominus b_1)(i, j) = \min \{ f_{\text{IR}}(i+x, j+y) - b_1(i, j) \} \quad (1)$$

式中: $(i+x) \in D_{f_{\text{IP}}}, (j+y) \in D_{f_{\text{IP}}}, (x, y) \in D_{b_i}$; $D_{f_{\text{IP}}}$ 和

D_{b_1} 分别是 f_{IR} 和 b_1 的定义域； \ominus 代表腐蚀运算。腐蚀操作是在用结构元确定的范围内选取 $f_{IR}-b_1$ 的最小值，所以如果结构元素的值都是正的则输出图像会比输入图像暗；如果输入图像中亮细节尺寸比结构元素小，则亮细节会被削弱。

腐蚀完成后，采用 5×5 的结构元素 b_2 对图像 $f_{IR} \ominus b_1$ 进行灰度膨胀记为 $(f_{IR} \ominus b_1) \oplus b_2$ ，此过程定义为： $((f_{IR} \ominus b_1) \oplus b_2)(i, j) = \max\{(f_{IR} \ominus b_1)(i+x, j+y) - b_2(i, j)\}$ (2) 式中： $(i+x) \in D_{f_{IR}}, (j+y) \in D_{f_{IR}}, (x, y) \in D_{b_2}$ ； \oplus 代表膨胀运算。膨胀操作是在用结构元确定的范围内选取 $(f_{IR} \ominus b_1) \oplus b_2$ 的最大值，所以如果结构元素的值都是正的则输出图像会比输入图像亮；如果输入图像中暗细节尺寸比结构元素小，则暗细节会被削弱。最后通过以下运算可以得到目标图像 T ：

$$T = f_{IR} - ((f_{IR} \ominus b_1) \oplus b_2) \quad (3)$$

式中：目标图像 T 质量可以在实际运算中改变结构单元 b_1 和 b_2 的形状和幅值来达到最佳效果。

2.2 Laplace 金字塔融合

Laplace 金字塔图像融合算法具有很强的灵活性，可以通过选择金字塔的层数来控制算法的复杂程度，而且可以对不同层采用不同的融合准则进行融合使融合图像达到最佳效果。本文中采用的了3层金字塔，然后对不同层采用不同的融合准则，对 Laplace 金字塔进行融合，实际过程中将 Laplace 金字塔与融合过程合并减少循环次数。本文算法在硬件上实现过程如下：

1) 高斯分解

将滤波后的红外图像和可见光图像分别记为 f_{IR0} , f_{CCD0} ，将2幅图像与一个具有低通特性的窗口 ω 进行高斯滤波和隔行隔列降采样得到第1层高斯金字塔 f_{IR1} 和 f_{CCD1} ；然后对第1层高斯金字塔进行高斯滤波和隔行隔列降采样得到第2层高斯金字塔 f_{IR2} 和 f_{CCD2} ；最后同样方法得到第3层高斯金字塔 f_{IR3} 和 f_{CCD3} ，具体实现过程如下：

$$\begin{cases} f_{IRl}(i, j) = \sum_{m=-2}^2 \sum_{n=-2}^2 \omega(m, n) f_{IR(l-1)}(2*i+m, 2*j+n) \\ f_{CCDl}(i, j) = \sum_{m=-2}^2 \sum_{n=-2}^2 \omega(m, n) f_{CCD(l-1)}(2*i+m, 2*j+n) \end{cases} \quad (4)$$

式中： l ($=1, 2, 3$) 代表高斯分解层数； $\omega(m, n)$ 为一个 5×5 窗口，算法中采用的窗口为：

$$\omega = \frac{1}{256} \begin{bmatrix} 1 & 4 & 6 & 4 & 1 \\ 4 & 16 & 24 & 16 & 4 \\ 6 & 24 & 36 & 24 & 6 \\ 4 & 16 & 24 & 16 & 4 \\ 1 & 4 & 6 & 4 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

2) Laplace 金字塔分解与融合

算法中 Laplace 金字塔分解和各层金字塔融合是在同一个循环中进行的，所以对原始 Laplace 金字塔分解公式改写得到适应硬件快速运算的公式：

$$\begin{cases} LP_0(i, j) = \max\{LP_{IR0}(i, j), LP_{CCD0}(i, j)\} \\ LP_1(i, j) = k_1 * LP_{IR1}(i, j) + k_2 * LP_{CCD1}(i, j) \\ LP_2(i, j) = k_1' * LP_{IR1}(i, j) + k_2' * LP_{CCD1}(i, j) \\ LP_3(i, j) = LP_{CCD3}(i, j) = f_{CCD3}(i, j) \end{cases} \quad (6)$$

式中： LP_0 、 LP_1 、 LP_2 分别表示红外图像 Laplace 金字塔 LP_{IR0} 、 LP_{IR1} 、 LP_{IR2} 和微光图像 Laplace 金字塔 LP_{CCD0} 、 LP_{CCD1} 、 LP_{CCD2} 融合后的融合图像的 Laplace 金字塔， LP_0 通过取大融合获得， LP_1 和 LP_2 通过加权融合获得； k_1 、 k_2 和 k_1' 、 k_2' 为权重系数，满足 $k_1+k_2=1$ ， $k_1'+k_2'=1$ ； LP_3 取可见光图像 Laplace 金字塔 LP_{CCD3} ，这样可以获得更多微光细节，减小红外图像对细节的影响。

红外图像和可见光图像 Laplace 金字塔可以通过如下公式获得：

$$\begin{cases} LP_{IRl}(i, j) = f_{IR(l-1)}(i, j) - 4 \times \sum_{m=-2}^2 \sum_{n=-2}^2 \omega(m, n) f_{IRl}(\frac{i+m}{2}, \frac{j+n}{2}) \\ LP_{CCDl}(i, j) = f_{CCD(l-1)}(i, j) - 4 \times \sum_{m=-2}^2 \sum_{n=-2}^2 \omega(m, n) f_{CCDl}(\frac{i+m}{2}, \frac{j+n}{2}) \end{cases} \quad (7)$$

式中：当 $\frac{i+m}{2}$ 、 $\frac{j+n}{2}$ 同时为整数时， $f_{IRl}(\frac{i+m}{2}, \frac{j+n}{2}) = f_{IRl}(\frac{i+m}{2}, \frac{j+n}{2})$ ， $f_{CCDl}(\frac{i+m}{2}, \frac{j+n}{2}) = f_{CCDl}(\frac{i+m}{2}, \frac{j+n}{2})$ ；当 $\frac{i+m}{2}$ 、 $\frac{j+n}{2}$ 不同时为整数时， $f_{IRl}(\frac{i+m}{2}, \frac{j+n}{2}) = f_{CCDl}(\frac{i+m}{2}, \frac{j+n}{2}) = 0$ ， $l=1, 2, 3$ 代表 Laplace 金字塔层数。

3) 图像重构

Laplace 金字塔图像重构，是从顶层图像内插放大得到与上一层图像大小相同的图像，然后将放大后的图像与上一层图像相加，得到最终重构图像。最后进行二次融合得到融合图像，过程如下所示：

$$\begin{cases} LP_2(i, j) = LP_2(i, j) + 4 \times \sum_{m=-2}^2 \sum_{n=-2}^2 \omega(m, n) LP_3\left(\frac{i+m}{2}, \frac{j+n}{2}\right) \\ LP_1(i, j) = LP_1(i, j) + 4 \times \sum_{m=-2}^2 \sum_{n=-2}^2 \omega(m, n) LP_2\left(\frac{i+m}{2}, \frac{j+n}{2}\right) \\ F(i, j) = LP_0(i, j) + \alpha * T(i, j) + 4 \times \sum_{m=-2}^2 \sum_{n=-2}^2 \omega(m, n) \cdot \\ LP_1\left(\frac{i+m}{2}, \frac{j+n}{2}\right) \end{cases} \quad (8)$$

式中：当 $\frac{i+m}{2}$ 、 $\frac{j+n}{2}$ 同时为整数时， $LP_l\left(\frac{i+m}{2}, \frac{j+n}{2}\right) = LP_l\left(\frac{i+m}{2}, \frac{j+n}{2}\right)$ ；当 $\frac{i+m}{2}$ 、 $\frac{j+n}{2}$ 不同时为整数时， $LP_l\left(\frac{i+m}{2}, \frac{j+n}{2}\right) = 0$ ， $l=1,2,3$ 代表 Laplace 金字塔层数， α 表示目标图像叠加比例参数， F 表示最终融合输出的图像。

3 实验结果和分析

为了验证本文算法的有效性，我们在 2 个不同场景下的对红外和可见光图像进行融合。在融合系统中运行本文算法与加权平均、传统 Laplace 金字塔图像融合算法，并且进行融合效果比较。其中传统 Laplace 金字塔图像融合算法的分解层数和每一层融合准则与本文中算法的相同，在顶层为加权平均融合。图 3 为第 1 个场景下的实验，此场景以建筑、树木和草地

为背景；图 4 为第 2 个场景下的实验，此场景在有雾天气下以草地和树木为背景。

从图 3 和图 4 可以看出，本文中的融合算法得到的融合图像中的目标比加权平均和传统 Laplace 金字塔图像融合算法更加突出，树木背景细节更加明显。为了更加客观的评价融合图像的效果，本文采用信息熵、标准差、空间频率和平均梯度 4 种^[9-11]评价指标对融合图像进行评价。

信息熵，是衡量图像信息丰富程度的一个重要指标。熵值越大，表示图像包含的信息量越大。信息熵定义如下：

$$H = \sum_{i=0}^{L-1} p(i) \log_2 p(i) \quad (9)$$

式中： i 表示图像灰度级； L 表示图像总灰度级数； $p(i)$ 表示灰度级为 i 的概率。

标准差，用来衡量图像灰度分布的离散程度。标准差越大，表明图像的对比图越高。标准差定义如下：

$$SD = \sqrt{\frac{1}{M \times N} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} (I(i, j) - \bar{I})^2} \quad (10)$$

式中： $I(i, j)$ 表示图像 I 在 (i, j) 处的灰度像素值， \bar{I} 表示图像 I 的平均灰度像素值， $M \times N$ 表示图像的大小。

空间频率，是衡量图像清晰度的一个重要指标。空间频率越大，表示图像越清晰。空间频率定义如下：

$$SD = \sqrt{\frac{1}{M \times N} \left(\sum_{i=1}^M \sum_{j=2}^N (I(i, j) - I(i, j-1))^2 + \sum_{i=2}^M \sum_{j=1}^N (I(i, j) - I(i-1, j))^2 \right)} \quad (11)$$

式中： $I(i, j)$ 表示图像 I 在 (i, j) 处的灰度像素值； $M \times N$ 表示图像大小。

平均梯度，可用来表示微小细节的变化，也可用

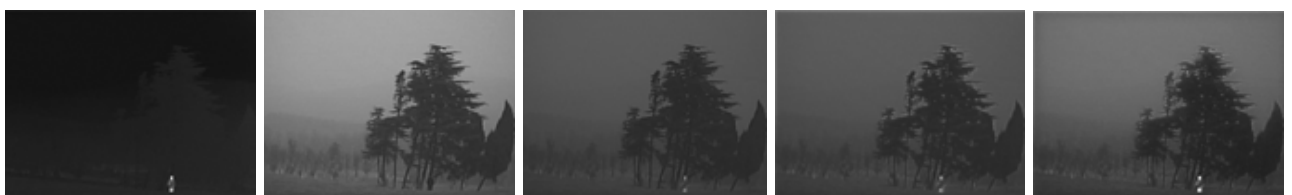
来评价图像的清晰度。平均梯度越大，表示图像的细节越清晰。平均梯度定义如下：



(a) 红外图像 (b) 可见光图像 (c) 加权融合图像 (d) 传统 Laplace 融合图像 (e) 本文算法融合图像

图 3 场景 1 实验图

Fig.3 The experimental figures of first scene



(a) 红外图像 (b) 可见光图像 (c) 加权融合图像 (d) 传统 Laplace 融合图像 (e) 本文算法融合图像

图 4 场景 2 实验图

Fig.4 The experimental figures of second scene

$$G = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} \sqrt{(\Delta I_i^2 + \Delta I_j^2)}/2} \tag{12}$$

式中： ΔI_i 和 ΔI_j 分别表示图像*i*和*j*方向上的差分； $M \times N$ 表示图像大小。

表1中分别列出了两个场景下融合图像质量的评价结果。

从表1可以看出，本文中的算法在信息熵、标准差、空间频率和平均梯度这4个评价参数上都优于加权平均和传统 Laplace 图像融合算法，进一步证明了本文算法可获得较好质量的融合图像。

表1 融合图像评价结果

Table 1 Evaluation results of the fusion images					
		信息熵	标准差	空间频率	平均梯度
场	加权平均	6.1382	24.8246	11.2082	3.3160
	传统 Laplace	6.3281	27.1282	12.9845	3.8173
	本文算法	6.7239	35.3298	13.2159	3.9474
景	加权平均	5.5647	17.7521	5.5942	1.5817
	传统 Laplace	5.7303	18.4229	6.9224	1.9752
	本文算法	6.2731	28.1696	7.2354	2.0666

对于算法的实时性测试，本文通过 TIMER_start() 在图像融合处理程序开始执行之前打开 hTimer0，当融合一帧图像完成后通过 TIMER_pause() 停止 hTimer0 计数，hTimer0 表示定时器计数值，最后通过公式获得处理一帧图像时间：

$$\text{timeval} = \frac{\text{hTimer0}}{f_{\text{CPU}}/8} \tag{13}$$

式中： $f_{\text{CPU}}=720\text{ MHz}$ 为 DM642 的工作时钟，通过 CCS3.3 的 Watch Window 可以观察到 hTimer0 和 timeval，如图5所示。

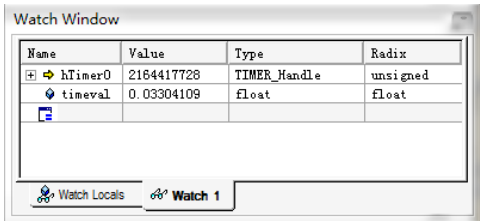


图5 融合算法实时性测试

Fig.5 The real-time test of fusion method

由图5可以看出，当系统处理一帧 320×240 大小的图像时， $\text{timeval} \approx 33.04\text{ ms} < 40\text{ ms}$ ，完全可以满足实时性。

4 结论

随着科技的进步与发展，图像融合系统中简单的融合算法，已经不能满足现代军事和民用的探测需求，而较好的图像融合算法相对复杂，在硬件系统中往往不能满足实时性。本文针对实时性和融合效果，提出了一种基于形态学的 Laplace 金字塔图像融合算法，在基于 DM642 的融合系统中实现 320×240 大小的图像实时融合。通过肉眼观察和融合效果评价可以证明，本文融合算法得到的图像目标突出且细节清晰。

参考文献：

[1] 刘坤, 郭雷, 陈敬松. 基于区域分割的序列红外图像融合算法[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(3): 553-557.
[2] 陶冰洁, 王敬儒, 许俊平. 基于小波分析的不同融合规则的图像融合研究[J]. 红外技术, 2006, 28(7): 431-434.
[3] 邢素霞, 张俊举, 常本康. 基于 NSCT 变换的图像融合及鲁棒性分析[J]. 红外技术, 2011, 33(1): 45-48.
[4] 倪国强, 王毅, 方庆喆, 等. 实时图像融合技术研究的硬件实现[J]. 红外与激光工程, 2002, 31(4): 342-345.
[5] Burt P J, Adelson E H. The Laplacian pyramid as a compact image code [J]. IEEE Transactions on Communications, 1983, 31(4): 532-540.
[6] 苗启广, 王宝树. 基于改进的拉普拉斯金字塔变换的图像融合方法[J]. 光学学报, 2007, 27(9): 1605-1610.
[7] 张俊举, 常本康, 张宝辉, 等. 远距离红外与微光/可见光融合成像系统[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(1): 20-24.
[8] TMS320C6000 Optimizing Compiler V7.0 Users Guid [EB/OL]. SPRU-187Q February 2010. [2010-2] <http://www.ti.com/lit/ug/spru187q/spru187q.pdf>.
[9] 胡良梅, 高隼, 何柯峰. 图像融合质量评价方法的研究[J]. 电子学报, 2004, 12A: 218-221.
[10] 蒋刚毅, 黄大江, 王旭, 等. 图像质量评价方法研究进展[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(1): 221-226.
[11] 徐中中, 曲仕茹. 新型可见光和红外图像融合综合评价方法[J]. 红外技术, 2011, 33(10): 568-573.