

# 基于多尺度分解和显著性区域提取的可见光红外图像融合方法

许磊, 崔光茫, 郑晨浦, 赵巨峰

杭州电子科技大学电子信息学院, 浙江 杭州 310018

**摘要** 可见光红外图像融合技术对于提升成像区域的信息丰富程度具有重要意义。提出了一种基于多尺度分解和显著性区域提取的可见光红外图像融合算法。利用边缘保持的图像平滑算法, 构建了多尺度图像分解框架, 将图像分解为不同尺度的基础层图像和若干细节层图像, 同时结合导向滤波器, 在每个分解图层实施显著性区域提取。通过加权重建进行融合信息的视觉增强, 得到最终的融合结果。针对不同融合算法和图像库开展了主客观评价对比实验, 结果表明: 所提出的算法具有较好的主客观评价结果, 算法融合效果表现优异, 适用性较好。

**关键词** 图像处理; 图像融合; 多尺度分解; 显著性图; 图像质量评价

**中图分类号** TP391; O438 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.111003

## Fusion Method of Visible and Infrared Images Based on Multi-Scale Decomposition and Saliency Region Extraction

Xu Lei, Cui Guangmang, Zheng Chenpu, Zhao Jufeng

*Electronics and Information College, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China*

**Abstract** The fusion technique of visible and infrared images has important significance in enhancing the information richness of the imaging areas. A fusion algorithm of visible and infrared images based on the multi-scale decomposition and saliency region extraction is proposed. The edge-preserved image smoothing algorithm is introduced to build the framework of multi-scale image decomposition. The source image is decomposed into base layer image and several detail layer images with different decomposition scales. Meanwhile, the saliency region maps are extracted in each decomposition layer combined with the guided filter. The final fusion image is obtained by the reconstruction of each decomposition layer with different weighting factor values in order to enhance the visual effect of the fusion information. The contrast experiments of objective and subjective evaluation are developed on different fusion algorithms and databases. The experimental results illustrate that the proposed algorithm has a superior objective and subjective evaluation performance on the fusion results. The fusion effect of algorithm is excellent and the applicability is good.

**Key words** image processing; image fusion; multi-scale decomposition; saliency map; image quality assessment

**OCIS codes** 100.2000; 350.2660; 110.3000

## 1 引言

随着传感器技术的发展, 不同波段的图像传感器得到广泛应用, 随之发展的多波段图像融合技术也受到越来越多的关注。多波段图像融合能够将同一场景下不同图像传感器采集的图像进行信息融合, 获得更为丰富的融合图像, 在遥感探测、军事侦察、安全监控、医疗健康、工业生产等领域都有着重要的应用。红外图像能够凸显红外热目标区域特征, 但往往缺乏细节信息且对比度较低; 而可见光图像可以体现成像区域的纹

**收稿日期:** 2017-04-24; **收到修改稿日期:** 2017-06-12

**基金项目:** 国家自然科学基金(61405052)、全国高校光电专业第三批教育教学热点难点教研项目(GDZYJYXM2015025)

**作者简介:** 许磊(1996—), 男, 本科生, 主要从事图像处理方面的研究。E-mail: oespha17@126.com

**导师简介:** 崔光茫(1989—), 男, 博士, 讲师, 主要从事光学成像、图像处理等方面的研究。E-mail: cuigm@hdu.edu.cn

理和细节,能够提供更好的人眼视觉特性。可见光红外图像融合技术就是将两者的优点相结合,在融合结果中保留更为丰富的红外图像和可见光图像特征信息。

近年来,研究者们提出了很多图像融合算法。最直接的融合思路就是直接平均法<sup>[1]</sup>,但图像的边缘和细节容易被平滑,融合效果有限。多尺度分解是应用最为广泛的融合算法,常见的融合算法还包括小波分解<sup>[2]</sup>、曲波分解<sup>[3]</sup>、轮廓波分解<sup>[4]</sup>等。基于金字塔分解的思路也是较为常见的融合方法,包括拉普拉斯金字塔<sup>[5]</sup>、形态学金字塔<sup>[6]</sup>、梯度金字塔<sup>[7]</sup>等。基于主成分分析(PCA)的图像融合算法也是一种有效的融合方法<sup>[8]</sup>,通过对源图像中的主成分信息进行提取和融合,实现了融合图像的最终获取。Kong等<sup>[9]</sup>提出了一种基于非下采样剪切波(NSST)和脉冲耦合神经网络(PCNN)的可见光红外图像融合算法,融合效果较好但算法相对比较复杂。还有一些基于稀疏表征和压缩感知的融合方法<sup>[10-11]</sup>,也为可见光红外图像融合提供了新的处理思路。

针对可见光红外图像融合技术,国内研究者们也开展了大量研究工作,提出了一些融合算法。李瑞昌等<sup>[12]</sup>针对遥感相机成像需求,设计研究了一种可见光和红外一体化光学系统,满足了应用要求。王昕等<sup>[13]</sup>针对红外与可见光图像融合易受噪声干扰从而使目标信息减弱的问题,提出了一种基于目标区域提取和压缩感知的融合算法。周渝人等<sup>[14]</sup>为改善低亮度红外与可见光图像融合的视觉效果,利用双边滤波器估计光照,提出了一种基于多尺度 Retinex 变换的对比度增强图像融合方法,有效提高了融合图像的清晰度。Bai等<sup>[15]</sup>提出了基于高帽变换的融合算法,能够实现融合结果中的细节保留和目标提取,融合效果较好。但该类算法需要设置和调节多个参数,算法运行较为复杂。陈磊等<sup>[16]</sup>提出了红外与可见光图像融合的变分增强融合算法,得到的融合图像梯度特征最大、视觉效果最好。汪玉美等<sup>[17]</sup>为了在可见光图像中尽可能地突出红外目标,提高红外与可见光融合图像的质量,提出了一种基于目标提取的红外与可见光图像融合算法。近年来,还提出了其他一些用于可见光和红外图像融合的实施方法<sup>[18-19]</sup>,取得了一定的进展。

显著性图能够有效反映图像中人眼视觉重点关注的区域,在图像融合框架中得到越来越多的应用,取得了较好的融合效果<sup>[20]</sup>。本课题组在可见光红外双波段图像融合方面也做了较多的研究工作<sup>[21-23]</sup>,将显著性图和人眼视觉显著特性引入融合思路中,有效实现了可见光红外图像融合。而如何保证图像在不同尺度图层下的精细融合,同时增强显著目标区域的视觉特性,正逐步成为研究者们关注的热点。

本文提出了一种基于多尺度分解和显著性区域提取的可见光红外图像融合算法。利用边缘保持的图像分解算法开展多尺度图像分解,同时结合导向滤波器在每个分解层实施显著性区域提取,并通过加权重建进行信息的视觉增强,最终实现有效的可见光红外图像融合。开展了主客观评价对比实验,结果表明:本文算法具有较好的主客观评价结果,算法融合效果优异,适用性较好。

## 2 多尺度图像分解和显著性区域提取

### 2.1 基于边缘保持的图像平滑算法

图像平滑算法能够有效地分离图像中的高频信息和低频信息,是图像分解模型构建的常用手段。Shen等<sup>[24]</sup>提出了一种基于边缘保持的图像平滑算法,利用  $L_1$  范数保真度和  $L_0$  范数梯度约束,将输入图像分解为基础层和细节层,则基础层图像即为边缘保持的图像平滑结果。令输入图像为  $f(x, y)$ ,算法分解得到的基础层图像和细节层图像分别为  $B(x, y)$  和  $D(x, y)$ ,那么该图像平滑算法模型可以表示为

$$f(x, y) = B(x, y) + D(x, y), \quad (1)$$

式中基础层图像  $B(x, y)$  求解模型表示为

$$B(x, y) = \operatorname{argmin} \left\{ \sum_{(x, y)} \| B(x, y) - f(x, y) \| + \lambda \cdot Z [B(x, y)] \right\}, \quad (2)$$

式中  $\| \cdot \|$  为  $L_1$  范数操作符,用来约束输入图像和基础层图像的差异程度; $\lambda$  为平滑正则化参数,用来调节图像的平滑程度; $Z [B(x, y)]$  为  $B(x, y)$  中梯度非零的像素个数,即对应线性代数中  $L_0$  范数。通常,通过最小化  $L_0$  范数能够寻找最优化的稀疏特征项,而在(2)式中的  $L_0$  范数梯度约束项具体描述为

$$Z [B(x, y)] = \# \{ (x, y) \mid \|\nabla B(x, y)\| \neq 0 \}, \quad (3)$$

式中  $\#$  为像素的个数, $\nabla$  为梯度算子。(3)式用来统计  $B(x, y)$  中梯度不等于 0 的像素个数。

(2)式利用  $L1$  范数保真度和  $L0$  范数梯度约束,构建了边缘保持的图像平滑模型,其中保真度约束项和梯度正则化约束项包含了非线性的惩罚项。由于无法对非线性惩罚项直接进行求解,根据文献[24],为了对  $L1$  范数保真度约束项进行有效求解,引入辅助变量  $w(x,y)$  代替表征  $B(x,y)$  与  $f(x,y)$  之间的差异,并引入一个二次项来表示  $B(x,y) - f(x,y)$  与辅助变量  $w(x,y)$  的差异度;为了对  $L0$  范数梯度约束项进行有效求解,又引入了另外两个辅助变量  $a_x(x,y)$  和  $a_y(x,y)$  代替表征  $x$  和  $y$  方向的梯度值,随后得到重构的平滑最优求解模型为

$$(k, w, a_x, a_y) = \operatorname{argmin} \left\{ a \cdot \sum_{(x,y)} \| B(x,y) - f(x,y) - w(x,y) \|_2^2 + \sum_{(x,y)} \| w(x,y) \| + \lambda \cdot Z[a_x(x,y), a_y(x,y)] + \beta \left[ \left\| \frac{\partial B(x,y)}{\partial x} - a_x(x,y) \right\|_2^2 + \left\| \frac{\partial B(x,y)}{\partial y} - a_y(x,y) \right\|_2^2 \right] \right\}, \quad (4)$$

式中  $Z[a_x(x,y), a_y(x,y)] = \# \{(x,y) \mid |a_x(x,y) + a_y(x,y)| \neq 0\}$ ,  $a_x(x,y)$  和  $a_y(x,y)$  分别为基础图层  $B(x,y)$  的水平 and 竖直方向的梯度,即为权重因子。在引入几个辅助变量后,即可采用交替最小化方法,求解得到待求的基础层图像  $B(x,y)$ ,具体求解步骤请见文献[24]。

为了简化模型表述,对于某一平滑参数  $\gamma$  可以得到输入图像  $f(x,y)$  对应的平滑图像  $B(x,y)$ ,可以表示为

$$B(x,y) = L1L0\_Smooth[f(x,y), \gamma]. \quad (5)$$

平滑参数  $\gamma$  越大,图像平滑程度越大。通常,  $\gamma$  的取值范围为  $[0.00001, 0.0001]$ 。

通过引入该图像平滑算法,所设计的可见光红外图像融合框架实现了有效的多尺度图像分解;利用不同的平滑参数得到多个不同平滑尺度的平滑图像;还可利用相邻两个尺度图像的差,计算出各个不同尺度图层的分解图像,从而保证了融合信息由粗糙到精细的分层处理,有助于提升融合结果的信息丰富程度。

## 2.2 基于导向滤波的显著性图提取

导向滤波器是一种边缘保持的滤波器<sup>[25]</sup>,由于其具有局部线性求解的模型,广泛应用于图像抠图、信号上采样等方面。利用导向滤波器的特点,提出了一种基于导向滤波器的显著性区域提取算法。

在导向滤波设计中,输出滤波图  $G$  是导向图  $H$  在局部窗口内的线性变换结果,模型表示为

$$G_i = \alpha_k \cdot H_i + \beta_k, \forall i \in W_k, \quad (6)$$

式中  $W_k$  为局部窗口,窗口中心点像素为  $k$ ;  $\alpha_k$  和  $\beta_k$  为局部窗口  $W_k$  对应的线性系数,其数值是通过输入图像  $L$  和输出滤波图像  $G$  之间的平方差最小化方程求解得到的,其方程表示为

$$E(\alpha_k, \beta_k) = \sum_{i \in W_k} [(\alpha_k \cdot H_i + \beta_k - L_i)^2 + \mu \cdot \alpha_k^2], \quad (7)$$

式中  $\mu$  是模型正则化参数。则线性系数可以通过线性回归的方法得到结果为:

$$\begin{cases} \alpha_k = \frac{1/|W| \cdot \sum_{i \in W_k} H_i L_i - \sigma_k \bar{L}_k}{\tau_k + \mu}, \\ \beta_k = \bar{L}_k - \alpha_k \sigma_k \end{cases}, \quad (8)$$

式中  $\sigma_k$  和  $\tau_k$  分别为导向图  $H$  在局部窗口  $W_k$  内的均值和方差,  $|W|$  为局部窗口  $W_k$  的像素个数,  $\bar{L}_k$  为输入图像  $L$  在局部窗口  $W_k$  内的均值。

在导向滤波过程中,输入图像中的某个像素点  $i$ ,在不同的局部窗口中有不同的线性系数值,如图 1 所示。为了能够确定最终的滤波输出结果,将所有包含像素  $i$  的局部窗口所计算得到的系数  $\alpha_k$  和  $\beta_k$  取平均值,则滤波结果可以表示为

$$G_i = \bar{\alpha}_i H_i + \bar{\beta}_i, \quad (9)$$

式中  $\bar{\alpha}_i = 1/|W| \cdot \sum_{k \in W_i} \alpha_k$ ,  $\bar{\beta}_i = 1/|W| \cdot \sum_{k \in W_i} \beta_k$ 。为了简化表述,采用  $GF(L, H, r, \mu)$  表示导向滤波操作,其中  $L$  和  $H$  分别为输入图像和导向图像;  $r$  和  $\mu$  分别为滤波器的尺寸和模糊程度。

利用导向滤波工具,能够获得显著性区域图像。具体步骤设计如下:

1) 利用局部方差计算得到图像的局部窗口标准差分布图。设定计算标准差的局部窗口大小为  $N$ ,则输入的原始图像  $I$  的局部方差分布图表示为

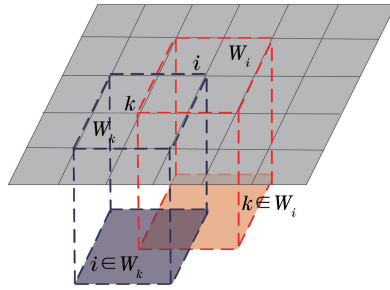


图1 导向滤波局部窗口选择示意图

Fig. 1 Diagram for the selection of the local window in guided filter

$$M_{\text{std}} = f_{\text{stdfilt}}(I, N). \quad (10)$$

2) 对于局部方差,设置合理阈值,并结合形态学中的闭操作,得到二值化的显著区域权重图,其过程表示为

$$M_{\text{weight}} = \text{imgclose}(M_{\text{std}} > T), \quad (11)$$

式中  $T$  为二值化阈值,对于局部方差图处理得到初步的显著性区域;imgclose()为图像闭操作,用以消除显著性区域中的细小未连通区域,得到更加光滑的显著性区域轮廓。

3) 结合导向滤波工具,计算得到显著性图。其中导向滤波过程中,导向图为原始图像  $I$ ,输入图像为二值化显著性区域权重图  $M_{\text{weight}}$ ,则提取的显著性图表示为

$$M_{\text{saliency}} = \text{GF}(M_{\text{weight}}, I, r, \mu). \quad (12)$$

在显著性区域提取方法中,将二值化显著性区域权重图  $M_{\text{weight}}$  作为输入图像,该图表示了原始图像中局部方差较大的边缘和细节丰富区域,这些区域正是人眼视觉最感兴趣、最关注的区域,结合导向滤波的过程,保证了滤波结果能够反映人眼视觉显著特性。导向图为原始图像  $I$ ,通过导向滤波操作,相比二值化的显著性区域权重图,能够进一步得到原始图像中 $[0, 1]$ 连续分布的边缘显著信息,同时,利用不同的导向滤波模糊参数设置,可以得到由粗糙到精细的不同尺度的显著性图结果,使得各个图层的多尺度分解图像的显著性区域信息得到更好的保留。

一组可见光和红外图像的显著性图获取的示例如图2所示,第一行图像为红外图像各步骤的处理结果,第二行为同一场景的可见光图像各步骤的处理结果。可以看到,显著性图反映了人眼视觉最感兴趣当前区域,将其引入图像融合框架,有助于得到具有更好主观视觉效果的融合结果。

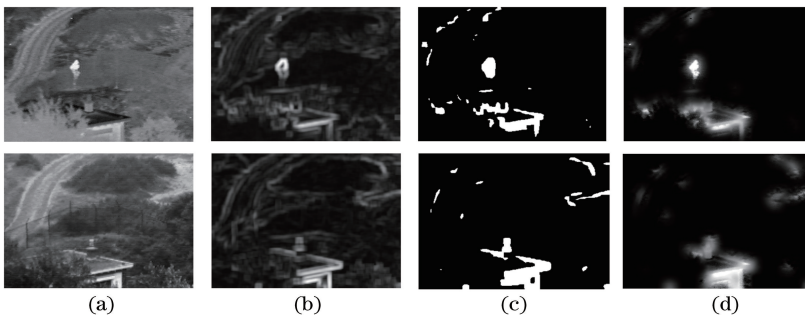


图2 显著性图提取。(a)输入图像;(b)局部标准差分布图;(c)二值化显著性区域权重图;(d)显著性图

Fig. 2 Extraction of the saliency map. (a) Input images; (b) distribution maps of local standard deviation; (c) binary saliency weighted map; (d) saliency map

### 3 图像融合算法

基于边缘保持的图像平滑算法和导向滤波的显著性图提取算法,提出了一种基于多尺度分解和显著性区域提取的可见光红外图像融合算法,其算法实施的框架流程如图3所示。对于输入的另一场景的可见光红外图像,进行不同平滑程度的边缘保持,多尺度分解就可以通过计算相邻两个平滑尺度的图像之差完成,



得到 1 个基础层图层和  $n$  个细节层图层,在此算法设计框架中,仅采用 3 个细节层分解已经能够得到较好的融合结果。因此,用  $n=3$  来进行算法说明和结果展示;随后对于每个分解尺度,借助对应的原始红外图像和可见光图像作为导向图,开展显著性图提取;结合显著性图分布,对每个尺度的红外图像和可见光图像开展融合,能够较好地保持图像的边缘和细节,突出人眼视觉显著性区域。通过各尺度融合结果图的加权创建可以得到最终的可见光红外融合结果。

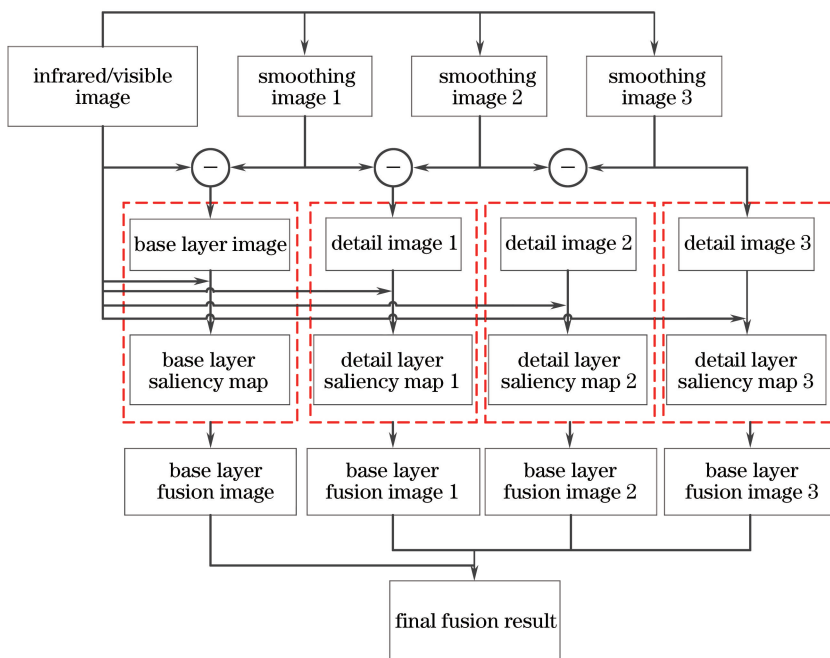


图 3 可见光红外图像融合算法实施框架图

Fig. 3 Implementation framework of the proposed infrared and visible image fusion algorithm

### 3.1 多尺度图像分解

对于输入的可见光图像和红外图像,利用 2.1 节介绍的边缘保持的图像平滑方法进行平滑操作。为了得到多尺度分解图层,采用了 3 个不同的平滑参数来获得对应平滑程度的平滑图像,其过程表示为

$$\begin{cases} B_{VI}^i = L1L0\_Smooth(I_{VI}, \gamma_i) \\ B_{IR}^i = L1L0\_Smooth(I_{IR}, \gamma_i) \end{cases}, \quad (13)$$

式中  $i=1,2,3$  为进行 3 个不同尺度的平滑参数操作;  $\gamma_i$  为对应尺度的平滑参数,且  $\gamma_3 > \gamma_2 > \gamma_1$ ,表示尺度越高,图像越平滑;  $B_{VI}^i$  和  $B_{IR}^i$  为对应尺度  $i$  的可见光和红外图像平滑结果。则图像多尺度分解操作可以表示为

$$\begin{cases} I_{Base\ VI} = I_{VI} - B_{VI}^1, I_{Detail\ VI}^n = B_{VI}^{n+1} - B_{VI}^n (n=1,2), I_{Detail\ VI}^3 = B_{VI}^3 \\ I_{Base\ IR} = I_{IR} - B_{IR}^1, I_{Detail\ IR}^n = B_{IR}^{n+1} - B_{IR}^n (n=1,2), I_{Detail\ IR}^3 = B_{IR}^3 \end{cases}, \quad (14)$$

式中  $I_{Base\ VI}$  和  $I_{Base\ IR}$  分别为可见光和红外图像的基础层图像,  $I_{Detail\ VI}^n$  和  $I_{Detail\ IR}^n$  分别为可见光和红外图像对应尺度的细节层图像。

相比于拉普拉斯金字塔和小波金字塔等其他典型的多尺度图像分解工具,本文多尺度图像分解实施框架是利用不同的平滑参数来得到对应平滑程度的图像,进而通过相邻两个平滑尺度的图像之差以实现多尺度图层图像的提取和分解。这种图像多尺度分解方法可以在没有任何图像下采样操作的情况下,使每个分解图层都能够保持图像原有的分辨率大小,同时该多尺度分解框架能够较好地保留不同尺度的图像边缘信息,结合显著性图的提取,有助于提升最终融合效果。

### 3.2 结合显著性区域提取的图像融合

可见光和红外图像的多尺度分解图层表征了图像不同尺度的特征,基础层图像包含了图像的低频轮廓信息,而细节层图像表征了图像的高频细节信息。利用 2.2 节的显著性图提取方法,结合导向滤波操作,得到某个多尺度图层对应的显著性图,其导向图为对应的原始输入的可见光和红外图像。对于基础层图像,由于其表示了图像的低频轮廓信息,因此导向滤波模糊参数较大,显著性图更为平滑,降低了融合过程中伪信息的出现概率;而对于细节层图像,其包含更精细的图像边缘和细节信息,对应的导向滤波参数也更加精细,模糊程度更小,因此得到更为锐利和精细的显著性图。

结合提取到的显著性图,则各个尺度的融合结果可以表示为

$$\begin{cases} M_{\text{base}} = \frac{[I_{\text{Base VI}} \times S_{\text{VI}}^{\text{Base}} + I_{\text{Base IR}} \times (1 - S_{\text{VI}}^{\text{Base}})] + [I_{\text{Base VI}} \times (1 - S_{\text{IR}}^{\text{Base}}) + I_{\text{Base IR}} \times S_{\text{IR}}^{\text{Base}}]}{2} \\ M_i = \frac{[I_{\text{Detail VI}}^i \times S_{\text{VI}}^i + I_{\text{Detail IR}}^i \times (1 - S_{\text{VI}}^i)] + [I_{\text{Detail VI}}^i \times (1 - S_{\text{IR}}^i) + I_{\text{Detail IR}}^i \times S_{\text{IR}}^i]}{2} \end{cases}, \quad (15)$$

式中  $S_{\text{VI}}^{\text{Base}}$  和  $S_{\text{IR}}^{\text{Base}}$  分别为基础层图像  $I_{\text{Base VI}}$  和  $I_{\text{Base IR}}$  的显著性图,  $S_{\text{VI}}^i$  和  $S_{\text{IR}}^i$  ( $i=1,2,3$ ) 分别为细节层图像  $I_{\text{Detail VI}}^i$  和  $I_{\text{Detail IR}}^i$  的显著性,  $M_{\text{base}}$  和  $M_i$  分别为基础层和细节层的融合结果。

### 3.3 融合图像重建

最终的融合结果由基础层和各细节层融合图像加权累加重建得到。为了得到较好的视觉增强效果,可将各层融合图像的权重设置为不同数值。融合图像重建过程表示为

$$M_{\text{final}} = \lambda_{\text{base}} M_{\text{base}} + \sum_{i=1}^3 \lambda_i M_i, \quad (16)$$

式中  $M_{\text{final}}$  为最终的融合结果,  $\lambda_{\text{base}}$  和  $\lambda_i$  分别表示基础层和各细节层融合结果的重建权重值。通过设置合理的权重值可以得到信息增强的融合图像结果。

## 4 实验结果和分析

### 4.1 参数设置

实验中所涉及的融合算法参数设置包括分解图层数、各图层的平滑参数  $\gamma_i$  以及融合结果重建权重值  $\lambda_i$ 。融合算法多尺度分解层数设置为 3,即利用多尺度分解方法得到 1 个基础层图像和 3 个不同尺度的细节层图像。各图层的平滑参数值选取为  $\gamma_i = \{0.00002, 0.00015, 0.001\}$ ,融合结果重建权重值选取为  $\lambda_{\text{base}} = 0.60$  和  $\lambda_i = \{0.31, 0.45, 0.75\}$ 。根据融合图像的主客观评价结果来看,在这些参数值的设置下,该算法能够取得较好的表现性能。平滑参数和重建权重值是算法调试过程中所得到的经验数值,在不同的融合图像应用需求下,可以参考经验数值适当调整,得到具有较好视觉效果的融合结果。

### 4.2 对比实验

为了展示本文算法的融合效果,选取了 3 种广泛使用的可见光和红外图像融合库开展融合算法效果测试,包括 UNcamp 图像库、Tree 图像库和 Dune 图像库。同时,选取了 5 种图像融合算法进行融合效果的比较,包括直接平均融合算法<sup>[1]</sup>、基于 PCA 的融合算法<sup>[8]</sup>、基于形态学金字塔的融合算法<sup>[5]</sup>、基于高帽变换的融合算法<sup>[15]</sup>以及文献[21]的基于显著性分析的融合算法。不同融合算法在 3 个图像库中的可见光红外图像融合结果如图 4~6 所示。

图 4 为 UNcamp 图像库示例的融合结果,通过比较可以发现,本文算法融合结果更好地保留了原始红外图和可见光图中的信息,图像具有较好的对比度和细节表现,视觉效果优于其他几种比较算法。图 5 为 Tree 图像库示例的融合结果,由于本文算法引入了边缘保持的多尺度分解框架,并结合了基于导向滤波的显著性区域提取,因此融合结果保留和增强了融合图像中的显著性区域信息,表现优于其他融合算法。图 6 为 Dune 图像库示例的融合结果,从几种算法的融合结果来看,其他算法在融合图像的同时一定程度平滑了图像细节,丢失了一些图像信息,图像的视觉效果欠佳。而本文算法更好地保持了图像边缘,增强了显著性目标区域的信息,具有更好的视觉效果。

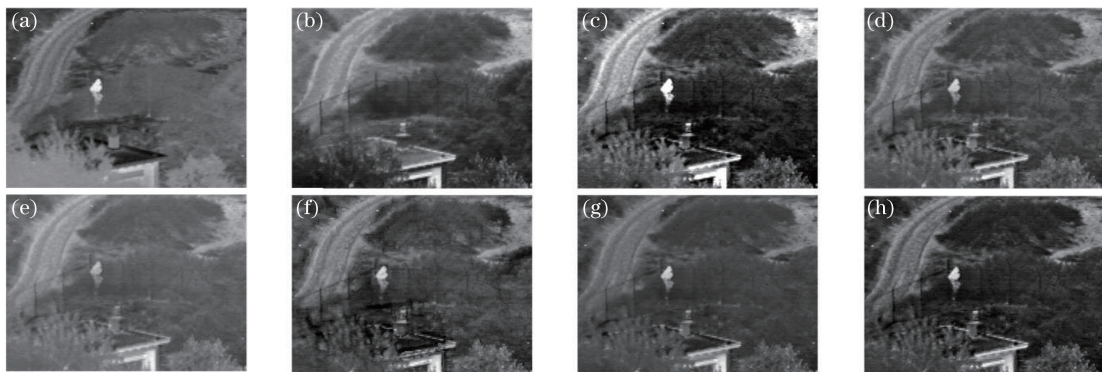


图4 UNcamp 图像库融合结果。(a)红外图像;(b)可见光图像;(c)本文融合算法;(d) PCA 融合算法;(e)直接平均融合算法;(f)基于形态学金字塔的融合算法;(g)基于高帽变换的融合算法;(h)文献[21]的融合算法

Fig. 4 Fusion results of UNcamp image database. (a) Infrared image; (b) visible image; (c) proposed fusion algorithm; (d) fusion algorithm based on PCA; (e) direct average fusion algorithm; (f) fusion algorithm based on morphology pyramid; (g) fusion algorithm based on top-hat transform; (h) fusion algorithm in Ref. [21]

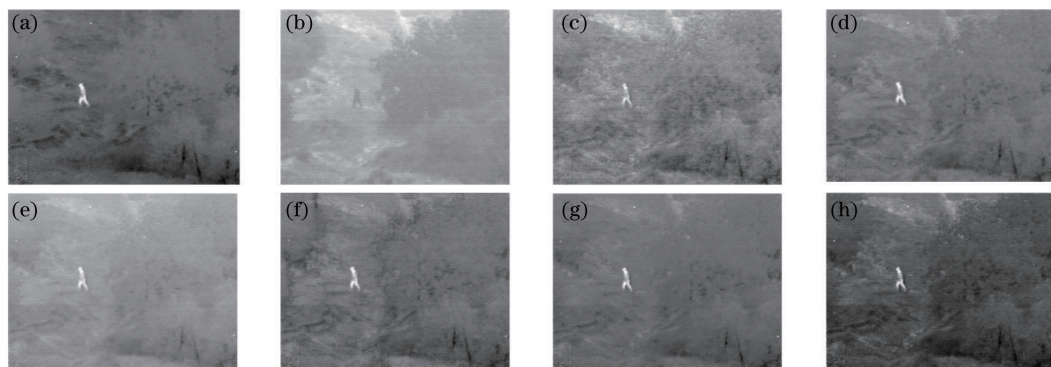


图5 Tree 图像库融合结果。(a)红外图像;(b)可见光图像;(c)本文融合算法;(d) PCA 融合算法;(e)直接平均融合算法;(f)基于形态学金字塔的融合算法;(g)基于高帽变换的融合算法;(h)文献[21]的融合算法

Fig. 5 Fusion results of Tree image database. (a) Infrared image; (b) visible image; (c) proposed fusion algorithm; (d) fusion algorithm based on PCA; (e) direct average fusion algorithm; (f) fusion algorithm based on morphology pyramid; (g) fusion algorithm based on top-hat transform; (h) fusion algorithm in Ref. [21]

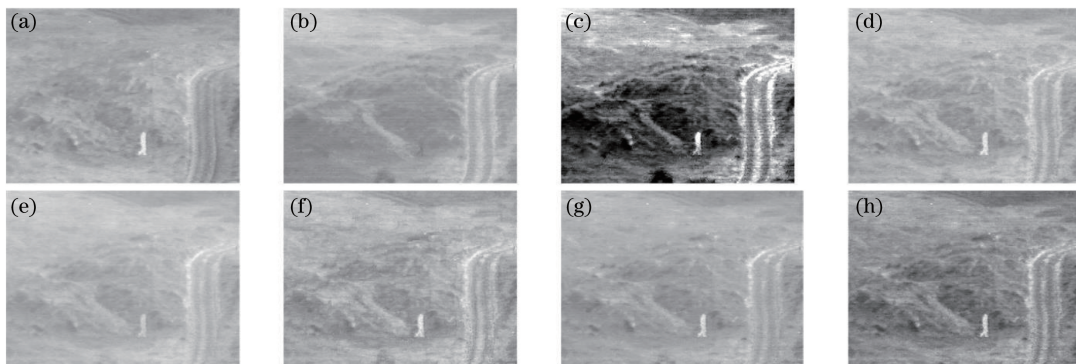


图6 Dune 图像库融合结果。(a)红外图像;(b)可见光图像;(c)本文融合算法;(d) PCA 融合算法;(e)直接平均融合算法;(f)基于形态学金字塔的融合算法;(g)基于高帽变换的融合算法;(h)文献[21]的融合算法

Fig. 6 Fusion results of Dune image database. (a) Infrared image; (b) visible image; (c) proposed fusion algorithm; (d) fusion algorithm based on PCA; (e) direct average fusion algorithm; (f) fusion algorithm based on morphology pyramid; (g) fusion algorithm based on top-hat transform; (h) fusion algorithm in Ref. [21]



### 4.3 图像质量客观评价和分析

除了主观评价外,采用了3种图像质量客观评价指标来评价和比较不同算法的融合效果,包括信息熵(IE)<sup>[26]</sup>、平均梯度(AG)<sup>[27]</sup>和空间频率(SF)<sup>[28]</sup>。IE代表了图像细节的丰富程度,其值越大,表示图像信息越丰富。AG代表了图像对于细节和纹理的表征能力,其值越大,图像质量越好。SF代表了融合图像的频率信息丰富程度,其值越大,融合效果越好。

利用这3种图像质量评价指标,对4.2节中3组可见光红外图像库和6种不同算法融合结果进行客观质量评价,评价结果分别如表1~3所示。通过分析各组对比实验图的客观质量评价结果可以发现,本文算法在IE、AG和SF指标比较中都能得到最大的评价数值,融合结果具有很好的信息增强和边缘保持能力,客观评价表现最优。

表1 UNcamp 图像库客观图像质量评价结果

Table 1 Objective image quality assessment results of UNcamp image database

Evaluation index	Direct average algorithm	PCA algorithm	Morphology pyramid algorithm	Top-hat transform algorithm	Ref. [21] algorithm	Proposed algorithm
IE	6.4174	6.6353	6.8586	6.2752	6.8473	7.5093
AG	3.3387	4.9299	5.1795	3.4876	5.4023	7.4688
SF	8.3013	12.6693	13.4289	9.5642	13.4152	19.0106

表2 Tree 图像库客观图像质量评价结果

Table 2 Objective image quality assessment results of Tree image database

Evaluation index	Direct average algorithm	PCA algorithm	Morphology pyramid algorithm	Top-hat transform algorithm	Ref. [21] algorithm	Proposed algorithm
IE	6.0903	5.9697	5.9908	5.7548	6.2821	6.5908
AG	2.3821	3.3562	2.3647	3.0035	3.5526	5.2185
SF	6.2436	8.7905	6.7742	7.3015	9.0289	13.2023

表3 Dune 图像库客观图像质量评价结果

Table 3 Objective image quality assessment results of Dune image database

Evaluation index	Direct average algorithm	PCA algorithm	Morphology pyramid algorithm	Top-hat transform algorithm	Ref. [21] algorithm	Proposed algorithm
IE	5.8440	6.1086	6.2387	5.9484	6.6508	7.8009
AG	2.1819	3.6963	3.6782	2.7762	4.8361	8.9319
SF	5.2226	9.1651	8.3831	6.9808	10.0330	10.8917

综合主观视觉对比评价和客观图像质量评价结果可知,本文融合算法具有很好的主客观评价表现,融合图像保留了源图像中的重要细节信息,对于显著性目标区域进行了有效视觉增强,对于不同图像数据都能够开展有效融合,具有良好的适用性。

融合算法的运行效率也是实际图像融合应用中重要的算法性能指标。本文融合算法引入了基于边缘保持的图像平滑方法来开展多尺度图像分解,并利用导向滤波的特点提出了各图层图像的显著性图提取方法,在融合结果中能够实现有效的显著信息保留和主观视觉图像增强效果。相比于其他融合算法,如直接平均算法、形态学金字塔融合算法等,其算法处理时间有所增加。实验中,算法运行环境为 Matlab2016b,计算机硬件配置为 Intel i5-6200U @2.30 GHz,实验图像大小为 360 pixel×270 pixel,算法运行时间为 2.56 s,满足准实时处理要求。后期的研究工作需要结合并行优化处理和程序语言平台转换,进一步提升算法的运行效率,以满足实际应用中对于更大尺寸图像的实时融合处理需求。

## 5 结 论

针对可见光和红外双波段图像,提出了一种基于多尺度分解和显著性区域提取的可见光红外图像融合算法。算法设计的主要思路在于:1)利用边缘保持的图像平滑算法,构建了多尺度图像分解框架,将图像分解为不同尺度的基础层图像和若干细节层图像;2)引入导向滤波器,设计了不同尺度图像下的显著性区域



提取;3) 在各尺度图层开展图像融合,并利用加权重建过程,实现了融合结果的信息增强。在多组图像数据库中开展了算法对比实验。主客观评价实验结果表明,本文算法具有较好的主客观评价结果,在保留源图像细节信息的同时,能够显著增强目标区域的视觉效果,其算法融合效果表现优异。

在未来的工作中,需要继续开展算法性能研究,包括进一步深化研究多尺度分解的精细程度,努力实现不同融合图像的算法参数自适应选取,采用并行处理等思路提升算法的运行效率,有效改善算法的稳定性和适用性。

### 参 考 文 献

- [1] Xydeas C S, Petrovic V. Objective image fusion performance measure[J]. *Electronics Letters*, 2000, 36(4): 308-309.
- [2] Qu G H, Zhang D, Yan P F. Medical image fusion by wavelet transform modulus maxima[J]. *Optics Express*, 2001, 9(4): 184-190.
- [3] Nencini F, Garzelli A, Baronti S, *et al.* Remote sensing image fusion using the curvelet transform[J]. *Information Fusion*, 2007, 8(2): 143-156.
- [4] Guo B L, Zhang Q, Hou Y. Region-based fusion of infrared and visible images using nonsubsampling contourlet transform[J]. *Chinese Optics Letters*, 2008, 6(5): 338-341.
- [5] Bulanon D M, Burks T F, Alchanatis V. Image fusion of visible and thermal images for fruit detection[J]. *Biosystems Engineering*, 2009, 103(1): 12-22.
- [6] Matsopoulos G K, Marshall S. Application of morphological pyramids: fusion of MR and CT phantoms[J]. *Journal of Visual Communication & Image Representation*, 1995, 6(2): 196-207.
- [7] Piella G. A general framework for multiresolution image fusion: from pixels to regions[J]. *Information Fusion*, 2003, 4(4): 259-280.
- [8] Gonzalez-Audicana M, Saleta J L, Catalan R G, *et al.* Fusion of multispectral and panchromatic images using improved IHS and PCA mergers based on wavelet decomposition[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2004, 42(6): 1291-1299.
- [9] Kong W W, Zhang L J, Lei Y. Novel fusion method for visible light and infrared images based on NSST-SF-PCNN[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2014, 65(7): 103-112.
- [10] Ding M, Wei L, Wang B. Research on fusion method for infrared and visible images via compressive sensing[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2013, 57: 56-67.
- [11] Wang R, Du L. Infrared and visible image fusion based on random projection and sparse representation[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2014, 35(5): 1640-1652.
- [12] Li Ruichang, Zou Gangyi, Wang Chenchen, *et al.* Optical design of visible and infrared integrative camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(5): 0522002.  
李瑞昌, 邹刚毅, 王臣臣, 等. 可见光与红外一体化光学系统设计[J]. *光学学报*, 2016, 36(5): 0522002.
- [13] Wang Xin, Ji Tongbo, Liu Fu. Fusion of infrared and visible images based on target segmentation and compressed sensing[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(7): 1743-1753.  
王昕, 吉桐伯, 刘富. 结合目标提取和压缩感知的红外与可见光图像融合[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(7): 1743-1753.
- [14] Zhou Yuren, Geng Aihui, Wang Ying, *et al.* Contrast enhanced fusion of infrared and visible images[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(9): 0909001.  
周渝人, 耿爱辉, 王莹, 等. 基于对比度增强的红外与可见光图像融合[J]. *中国激光*, 2014, 41(9): 0909001.
- [15] Bai X Z, Chen X W, Zhou F G, *et al.* Multiscale top-hat selection transform based infrared and visual image fusion with emphasis on extracting regions of interest[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2013, 60: 81-93.
- [16] Chen Lei, Yang Fengbao, Wang Zhishe, *et al.* Research on fusion algorithm of infrared and visible imagery based on variational enhanced model[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(4): 041003.  
陈磊, 杨风暴, 王志社, 等. 红外与可见光图像的变分增强融合算法研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(4): 041003.
- [17] Wang Yumei, Chen Daimei, Zhao Genbao. Image fusion algorithm of infrared and visible images based on target

extraction and Laplace transformation[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(1): 011002.

汪玉美, 陈代梅, 赵根保. 基于目标提取与拉普拉斯变换的红外和可见光图像融合算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(1): 011002.

- [18] Zhang Qiang, Guo Baolong. Infrared and color visible images fusion based on color transfer and information entropy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(s1): s100418.  
张强, 郭宝龙. 基于彩色传递和信息熵的红外与彩色可见光图像融合[J]. *光学学报*, 2011, 31(s1): s100418.
- [19] Chen Musheng, Cai Zhishan. Study on fusion of visual and infrared images based on NSCT [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(6): 061002.  
陈木生, 蔡植善. 基于 NSCT 的红外与可见光图像融合方法研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(6): 061002.
- [20] Hong R C, Wang C, Wang M, *et al.* Saliency preserving multifocus image fusion with dynamic range compression[J]. *International Journal of Innovative Computing Information and Control*, 2009, 5(8): 2369-2380.
- [21] Zhao J F, Feng H J, Xu Z H, *et al.* Detail enhanced multi-source fusion using visual weight map extraction based on multi scale edge preserving decomposition[J]. *Optics Communications*, 2013, 287: 45-52.
- [22] Cui G M, Feng H J, Xu Z H, *et al.* Detail preserved fusion of visible and infrared images using regional saliency extraction and multi-scale image decomposition[J]. *Optics Communications*, 2015, 341: 199-209.
- [23] Li Meng, Hua Weiping, Zhao Jufeng. Dual-band image fusion using visual attention extraction with multiple windows [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(12): 121002.  
李梦, 华玮平, 赵巨峰. 使用多尺度视觉注意提取的双波段图像融合 [J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(12): 121002.
- [24] Shen C T, Chang F J, Hung Y P, *et al.* Edge-preserving image decomposition using L1 fidelity with L0 gradient[C]. *SIGGRAPH Asia 2012 Technical Briefs*, 2012: 1-4.
- [25] Li S T, Kang X D, Hu J W. Image fusion with guided filtering[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2013, 22(7): 2864-2875.
- [26] Roberts J W, Aardt J A V, Ahmed F B. Assessment of image fusion procedures using entropy, image quality, and multispectral classification[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2008, 2(1): 023522.
- [27] Jin H Y, Wang Y Y. A fusion method for visible and infrared images based on contrast pyramid with teaching learning based optimization[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2014, 64: 134-142.
- [28] Eskicioglu A M, Fisher P S. Image quality measures and their performance [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1996, 43(12): 2959-2965.