

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

汪玉美, 陈代梅, 赵根保

陆军军官学院六系, 安徽 合肥 230031

摘要 为了在可见光图像中尽可能的突出红外目标,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。对红外图像分别进行边缘提取和阈值分割,将提取的两幅二值图像进行融合,获得目标图像。然后将红外图像、红外目标图像和进行色度、饱和度、亮度(HSV)空间转换后的可见光的亮度分量进行拉普拉斯变换,高频系数采用基于区域互信息、匹配度以及区域能量的融合规则,低频系数的融合则在红外目标图像低频系数的指导下,结合基于区域的融合规则进行。最终融合图像重构是通过拉普拉斯变换及反变换实现的。实验结果表明,该融合算法能较好地突出红外目标信息,提供丰富的背景细节,在图像的清晰度和人眼的视觉效果方面优于其他传统算法。

关键词 图像处理; 图像融合; 目标提取; 边缘提取; 阈值分割; 拉普拉斯变换

中图分类号 TP391 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.011002

Image Fusion Algorithm of Infrared and Visible Images Based on Target Extraction and Laplace Transformation

Wang Yumei, Chen Daimei, Zhao Genbao

The Sixth Department, Army Officer Academy, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract For highlighting the infrared targets in the visible image and advancing the quality of infrared and visible fusion images, an image fusion algorithm of infrared and visible images is presented by target extraction. The two binary images are fused to obtain the target image by edge extraction and threshold segmentation on the infrared images. The infrared image, the infrared target image and the value component of visible image turned to hue, saturation, value (HSV) color space are decomposed multi-resolution by Laplace transformation. The high-frequency decomposition coefficients are fused by rules based on calculating the mutual information, matching degree and energy of corresponding region, and the low-frequency coefficients are fused by region information rules combining with the rules based on regional fusing. Lastly the fusion image reconfiguration is realized through Laplace transformation and inverse transformation. Experimental results show that the image fusion algorithm presented highlights the targets of the infrared image as much as possible, and injects details information of the visible image. Fusion image definition and visual effects are better than the traditional algorithms.

Key words image processing; image fusion; target extraction; edge extraction; threshold segmentation; Laplace transformation

OCIS codes 100.2000; 100.4994; 100.7410

1 引言

图像融合技术将多个传感器对同一场景的图像信息进行综合,充分利用源图像间的互补信息合成新图像,提供更丰富的信息。红外与可见光传感器是最常用的两种图像传感器,在自动目标识别、目标跟踪、军事

收稿日期: 2016-08-31; 收到修改稿日期: 2016-09-28; 网络出版日期: 2016-12-30

基金项目: 国家自然科学基金(61170252)、安徽省自然科学基金(1408085QF129)

作者简介: 汪玉美(1980—),女,硕士,讲师,主要从事图像处理方面的研究。E-mail: emeidiana@163.com

侦察以及安全监控等领域有着广泛的应用^[1-3]。红外图像对热目标敏感,能够识别隐藏目标;可见光图像符合人眼视觉特性,能够反映目标场景的细节信息。因此,有效地综合和发掘红外和可见光图像的特征信息,突出红外目标,增强场景理解,是红外和可见光图像融合技术研究的焦点^[4-5]。

为了适应人类的视觉系统,Piella^[6]提出了多尺度图像融合的一般框架。目前,多尺度图像融合方法主要有两类^[7-8]:1) 基于取最大值的方法;2) 基于加权平均的融合方法。由于红外与可见光图像对于同一事物的描述差异较大,如果只是进行简单的平均或只保留其中某一幅的低频信息,则既无法突出红外目标又不能充分表达场景信息。

基于上述问题,本文提出了一种基于目标提取的多尺度图像融合算法。利用 Canny 在拉普拉斯边缘检测法的基础上完善而提出的 Canny 边缘检测算子提取红外图像的目标边缘,形成二值图像,经形态膨胀后,边缘连续;再利用 Otsu 提出的最大类间方差阈值分割法,对红外图像进行分割;最后将目标边缘特征与分割所得的图像进行融合,获得红外目标特征图像。将其与红外、可见光图像一起进行多尺度分解,以红外目标特征图像的分解系数为指导,结合不同尺度下系数的区域能量、匹配度以及互信息的不同,设定不同的融合规则,使得最终的融合图像中既能突出红外目标又能增强对场景的理解。

2 红外目标提取算法

对红外目标的提取,仅采用边缘检测算法,能获取整个目标的边缘,但不能突出目标的整体信息,较难制定相关的融合规则;若仅利用阈值分割算法提取目标,虽能突出目标的整体,但受阈值个数和大小影响,所得的分割图像中往往包含较多不感兴趣的目标。将边缘检测获得的图像与阈值分割获得的图像进行融合,互补二者信息,从而提取完整的红外目标。图 1 和图 2 展示了红外图像在 Canny 边缘提取算法下的边缘图像、在 Otsu 阈值分割算法下的分割图像以及二者的融合图像,从图像中可以看出,边缘图像与分割图像相融合的图像较好地提取了红外目标。

2.1 Canny 边缘提取

Canny 边缘检测算子具有较好的边缘检测和定位能力,它采用高斯滤波器平滑滤除噪声,简单易实现,最重要的一个特点是其试图将独立边的候选像素拼装成轮廓,使所提取的边缘较为连续。Canny 算子检测分为 4 步^[9-12]:

- 1) 图像平滑。利用范函求导方法推导出高斯函数的一阶倒数即为最优边缘检测算子的最佳近似;
- 2) 计算梯度幅值和方向。Canny 算法利用一阶微分算子来计算平滑后的图像 I 各点处的梯度幅值和梯度方向,获得相应的梯度幅值图像 G 和梯度方向图像 θ ;
- 3) 抑制非极大值。为了精确定位边缘,必须细化梯度幅值图像 G 中的屋脊带,只保留幅值的局部极大值;
- 4) 检测和连接边缘。Canny 算法采用双阈值法从候选边缘点中检测和连接出最终的边缘。

将得到的 Canny 边缘图像进行形态膨胀^[13],对边缘勾勒出的小区域进行填充,效果如图 1(b)、(c)所示。

2.2 Otsu 阈值分割

Otsu 阈值分割也称为最大类间方差阈值分割,是在分析最小二乘法原理的基础上推导得出的,算法简单,分割效果好。Otsu 阈值分割以目标和背景类间方差最大为阈值选取准则,选取的最佳阈值能使图像得到两类目标,这两类目标具有最好的分离性^[14]。

按灰度级用阈值 t 划分为两类: $C_0 = (0, 1, 2, \dots, t)$ 和 $C_1 = (t+1, t+2, \dots, L-1)$ 。

C_0 和 C_1 类的类内方差为

$$\sigma_w^2 = \omega_0 \sigma_0^2 + \omega_1 \sigma_1^2, \quad (1)$$

类间方差为

$$\sigma_B^2 = \omega_0 (\mu_0 - \mu_T)^2 + \omega_1 (\mu_1 - \mu_T)^2 = \omega_0 \omega_1 (\mu_1 - \mu_0)^2, \quad (2)$$

总体方差为

$$\sigma_T^2 = \sigma_B^2 + \sigma_w^2. \quad (3)$$

设关于 t 的等价判决准则为

$$\eta(t) = \sigma_B^2 / \sigma_T^2, \quad (4)$$

获得最佳阈值 t^* 为

$$t^* = \arg \max_{0 \leq t \leq L-1} \eta(t). \quad (5)$$

其分割效果如图 1(d) 所示。

2.3 红外目标提取

在红外源图像[图 1(a)]中,所感兴趣的是被遮挡的隐藏目标,如图 1(a)中三个被烟雾遮挡的热目标和图 2(a)中隐藏在树林中的热目标。利用 Canny 算子进行边缘提取[图 1(b)、2(b)],再利用形态膨胀填充边缘勾勒出的小区域[图 1(c)、2(c)],但所得的区域的大小较源图像有些失真,当对比度不高时,提取的小目标较多;图 1(d)和图 2(d)是利用 Otsu 类间方差阈值分割所得的图像,所得的图像中除了感兴趣的目标外也包含较多其他目标。为了使目标图像尽可能只包含感兴趣的热目标,将膨胀后的 Canny 边缘提取图像与 Otsu 阈值分割图像进行融合,如图 1(e)与图 2(e)所示,融合规则为

$$F_{TE} = \begin{cases} F_{TE}(i, j) = 255, & \text{if } C(i, j) = 255 \text{ and } T(i, j) = 0 \\ F_{TE}(i, j) = 0, & \text{if } C(i, j) = 255 \text{ and } T(i, j) = 255. \\ F_{TE}(i, j) = 0, & \text{if } C(i, j) = 0 \text{ or } T(i, j) = 255 \end{cases} \quad (6)$$

从图中可看出,融合后的图像除了包含感兴趣的目标外,只有少量高亮度目标,其大小形态没有失真畸变,轮廓清晰,用其指导低频系数融合能较好地突出红外目标。



图 1 红外目标提取图像 1。(a)红外源图像;(b) Canny 算子提取的边缘图像;(c)形态膨胀后的 Canny 边缘;(d) Otsu 阈值分割图像;(e)图(c)和图(d)的融合图像

Fig. 1 Infrared target extraction image 1. (a) Infrared source image; (b) edge image extracted by the Canny operator; (c) Canny edge after morphological dilation; (d) Otsu threshold segmentation image; (e) fusion image of Fig. (c) and (d)



图 2 红外目标提取图像 2。(a)红外源图像;(b) Canny 算子提取的边缘图像;(c)形态膨胀后的 Canny 边缘;(d) Otsu 阈值分割图像;(e)图(c)和图(d)的融合图像

Fig. 2 Infrared target extraction image 2. (a) Infrared source image; (b) edge image extracted by the Canny operator; (c) Canny edge after morphological dilation; (d) Otsu threshold segmentation image; (e) fusion image of Fig. (c) and (d)

3 融合算法

3.1 融合思想

所提出的融合算法是在多尺度融合一般框架的基础上进行了一定的扩展,参与多尺度融合的不仅有红外与可见光源图像,还包括红外目标提取后的目标图像。首先根据第 2 节所论述的目标提取算法对红外目标进行提取,将可见光图像进行颜色空间转换,即由 RGB 转换到 $HSV^{[15-16]}$,提取 V 分量;然后将红外图像、红外目标图像和可见光的 V 分量分别进行拉普拉斯变换,再对高、低频系数采取不同的融合规则;最后将重构的图像作为可见光的 V 分量,颜色空间转换后得到最终的融合图像。图 3 为所提融合算法的框图。

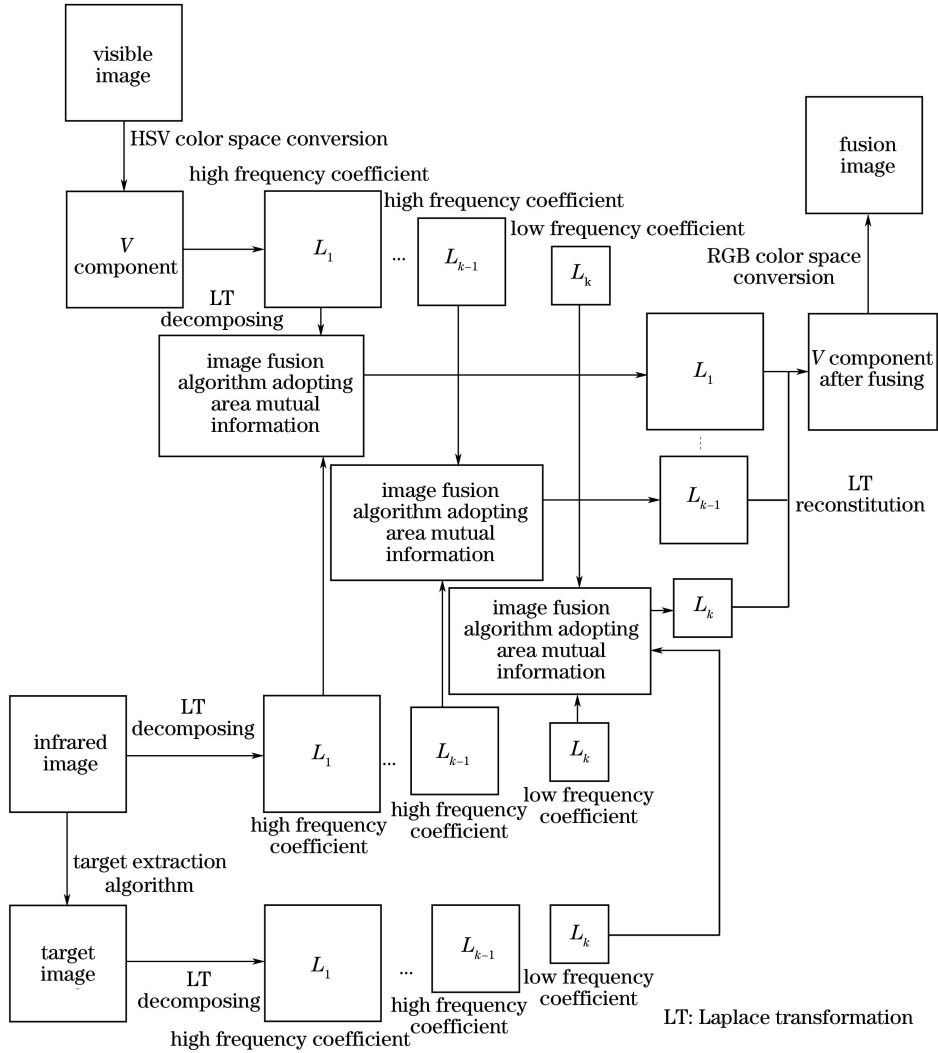


图3 所提融合算法框图

Fig. 3 Diagram of the proposed fusion algorithm

3.2 拉普拉斯变换

拉普拉斯变换是在高斯金字塔变换的基础上演变而来的^[17-18]。高斯金字塔首先将底层图像与窗口函数 $w(m, n)$ 卷积,高斯金字塔第 k 层图像 G_k 构造方法为

$$G_k(i, j) = \sum_{m=-2}^2 \sum_{n=-2}^2 w(m, n) G_{k-1}(2i+m, 2j+n), 1 \leq k \leq N, 0 \leq i \leq R_k, 0 \leq j \leq C_k. \quad (7)$$

拉普拉斯变换是通过求取高斯金字塔中每两层图像之间的差异得到的。通过对第 k 层图像 G_k 进行插值放大,表达式为

$$G_k^*(i, j) = 4 \sum_{m=-2}^2 \sum_{n=-2}^2 w(m, n) G'_k\left(\frac{i-m}{2}, \frac{j-n}{2}\right), 1 \leq k \leq N, 0 \leq i \leq R_{k-1}, 0 \leq j \leq C_{k-1}, \quad (8)$$

$$\text{式中 } G'_k\left(\frac{i-m}{2}, \frac{j-n}{2}\right) = \begin{cases} G'_k\left(\frac{i-m}{2}, \frac{j-n}{2}\right), & \text{if } \frac{i-m}{2}, \frac{j-n}{2} \text{ are int.} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

拉普拉斯变换的第 $k-1$ 层是由金字塔第 k 层被扩充图像 G_k^* 与第 $k-1$ 层图像 G_{k-1} 之间的差异获得的,表达式为

$$L_{k-1} = G_{k-1} - G_k^*. \quad (9)$$

拉普拉斯变换在不同尺度上突出了图像的特征,针对不同尺度上的特征采取不同的融合规则,使源图像中的特征信息有效地融合在一起。

3.3 高频系数融合

高频系数表征了图像中空间细节信息和边缘特征,其系数融合规则大致分为两种:基于像素级与基于区域级。基于像素级的融合规则仅仅以单个像素作为融合对象,并不考虑图像相邻像素间的相关性,该方法虽然通用性很强,但融合效果不理想。基于区域级的融合规则考虑到图像局部区域内的各个像素之间有较强的相关性,图像的特征往往由某一局部区域的多个像素来表征,能降低融合像素错误选取的概率,获得视觉更佳、细节更丰富的融合效果^[19-20]。

红外、红外目标以及可见光的 V 分量经过拉普拉斯变换后,得到各级高频与低频系数。由于红外目标图像的高频系数并未包含较多的红外细节信息,因此在制定高频融合规则时,未做较多考虑。本文采用基于红外与可见光 V 分量的高频系数的区域互信息量、能量和匹配度来制定高频系数融合规则。

1) 区域互信息量

根据信息论中互信息量的概念,区域互信息量表达式为

$$I_{RM} [L_{l,VI}(R), L_{l,IR}(R)] = I [L_{l,VI}(R)] + I [L_{l,IR}(R)] - I [L_{l,VI}(R), L_{l,IR}(R)], \quad (10)$$

式中 $I_{RM} [L_{l,VI}(R), L_{l,IR}(R)]$ 为可见光图像 V 分量与红外图像在区域 R 内拉普拉斯金字塔第 l 层上高频子带系数的区域互信息量。 $I [L_{l,VI}(R)]$ 表示可见光图像的信息熵,表达式为

$$I [L_{l,VI}(R)] = - \sum_{(x,y) \in R} p [L_{l,VI}(x,y)] \lg p [L_{l,VI}(x,y)], \quad (11)$$

式中 $I [L_{l,IR}(R)]$ 表示红外图像的信息熵,表达式为

$$I [L_{l,IR}(R)] = - \sum_{(x,y) \in R} p [L_{l,IR}(x,y)] \lg p [L_{l,IR}(x,y)], \quad (12)$$

式中 $I [L_{l,VI}(R), L_{l,IR}(R)]$ 为可见光与红外图像在区域 R 内的联合信息熵,表达式为

$$I [L_{l,VI}(R), L_{l,IR}(R)] = - \sum_{(x,y) \in R} p [L_{l,VI}(x,y), L_{l,IR}(x,y)] \times \lg p [L_{l,VI}(x,y), L_{l,IR}(x,y)], \quad (13)$$

选取的 R 为 5×5 。

区域互信息量表征了可见光和红外图像在区域 R 内的信息相关程度,值越大表明区域内图像相关性越大,即空间细节相似性越大。

2) 区域能量

取区域 R 内灰度平方的加权累加和来表示区域能量,能量值大说明该区域的灰度值大、亮度值高、所包含的信息量大。能量的计算公式为

$$E_l(n,m) = \sum_{(x,y) \in R} w(x,y) [L_l(n+x, m+y)]^2, \quad (14)$$

式中 $E_l(n,m)$ 表示拉普拉斯金字塔第 l 层上以 (n,m) 为中心位置的区域能量; L_l 表示拉普拉斯金字塔的第 l 层图像; $w(x,y)$ 为与 L_l 对应的权系数; R 定义了局部区域的大小(选为 5×5)。

3) 区域匹配度

计算红外与可见光图像对应区域的匹配度 M 为

$$M_l(n,m) = \frac{2 \sum_{(x,y) \in R} w(x,y) L_{l,VI}(n+x, m+y) L_{l,IR}(n+x, m+y)}{E_{l,VI}(n,m) + E_{l,IR}(n,m)}, \quad (15)$$

式中 $M_l(n,m)$ 表示拉普拉斯金字塔第 l 层的匹配度, $E_{l,VI}(n,m)$ 和 $E_{l,IR}(n,m)$ 按(14)式计算。

当区域互信息量大于某一阈值时,为了能充分保留可见光图像的光谱特征,融合图像的高频子带系数等于该区域的可见光图像高频子带系数。反之,说明可见光与红外图像在该区域的空间细节相差较大,这时比较二者的匹配度,若匹配度小于设定的阈值,取能量值较大的图像对应的系数作为融合系数,反之,则取加权平均值作为融合系数。

综上所述,高频子带系数融合规则表达式为

$$L_{l,F}(n,m) = \begin{cases} L_{l,VI}(n,m), & \text{if } I_{RM} [L_{l,VI}(R), L_{l,IR}(R)] \geq T_{RMI} \\ L_{l,VI}(n,m), & \text{if } I_{RM} [L_{l,VI}(R), L_{l,IR}(R)] < T_{RMI} \text{ and} \\ & M_l \geq T_M \text{ and } E_{l,VI}(n,m) > E_{l,IR}(n,m) \\ L_{l,IR}(n,m), & \text{if } I_{RM} [L_{l,VI}(R), L_{l,IR}(R)] < T_{RMI} \text{ and} \\ & M_l \geq T_M \text{ and } E_{l,VI}(n,m) < E_{l,IR}(n,m)。 \\ \omega_{\max} L_{l,VI}(n,m) + \omega_{\min} L_{l,IR}(n,m), & \text{if } I_{RM} [L_{l,VI}(R), L_{l,IR}(R)] < T_{RMI} \text{ and} \\ & M_l < T_M \text{ and } E_{l,VI}(n,m) > E_{l,IR}(n,m) \\ \omega_{\min} L_{l,VI}(n,m) + \omega_{\max} L_{l,IR}(n,m), & \text{if } I_{RM} [L_{l,VI}(R), L_{l,IR}(R)] < T_{RMI} \text{ and} \\ & M_l < T_M \text{ and } E_{l,VI}(n,m) \leq E_{l,IR}(n,m) \end{cases} \quad (16)$$

3.4 低频系数融合

红外与可见光的 V 分量进行拉普拉斯变换后,低频系数包含了图像主要能量,低频融合规则的优劣对最终融合图像的质量影响很大。将融合得到的红外目标图像在拉普拉斯变换下的低频系数作为制定红外与可见光低频系数融合的主要规则,同时结合基于区域的融合策略。当红外目标图像的低频系数值为 255 时,为了突出红外目标,选择红外低频系数作为最后的融合系数;当红外目标图像的低频系数不为 255 时,比较二者在区域 R 上的互信息量是否大于设定阈值,若大于,取二者系数的平均值,反之则取区域 R 上能量大者为融合系数。具体的融合规则为

$$L_F(n,m) = \begin{cases} L_{IR}(n,m), & \text{if } L_{OB}(n,m) = 255 \\ 0.5 \times [L_{VI}(n,m) + L_{IR}(n,m)], & \text{if } L_{OB}(n,m) \neq 255 \text{ and } I_{RM} [L_{VI}(R), L_{IR}(R)] \geq T_{RMI} \\ L_{VI}(n,m), & \text{if } L_{OB}(n,m) \neq 255 \text{ and } I_{RM} [L_{VI}(R), L_{IR}(R)] < T_{RMI} \text{ and } E_{VI}(r) \geq E_{IR}(r) \\ L_{IR}(n,m), & \text{if } L_{OB}(n,m) \neq 255 \text{ and } I_{RM} [L_{VI}(R), L_{IR}(R)] < T_{RMI} \text{ and } E_{VI}(r) < E_{IR}(r) \end{cases} \quad (17)$$

4 实验结果与分析

为了验证所提出的基于目标提取与拉普拉斯变换的红外与可见光图像融合算法(LPT_OB)的融合质量,利用 VC++ 开发了图像融合实验系统,进行了大量的实验,现选取其中两组进行说明。为了比较算法在突出红外目标方面的优势,同时实现了在拉普拉斯变换下,仅采用基于区域互信息量、匹配度以及区域能量的图像融合算法(LPT_Region)和仅采用基于像素的融合算法(LPT_Pixel,即高频采用取最大值方法,低频采用取平均值方法)。采用平均梯度(G)、空间频率(SF)、标准差(SD)、相关系数(CC)和图像通用指标(UIQI)作为这三种算法的客观评价指标。G 与 SF,所能反映的细节越丰富,图像越清晰;SD 越大,越能突出目标,有利于侦查小的目标;CC 与 UIQI 主要评价融合图像与源图像的相似程度,值越大表明与源图像在光谱与结构上相似程度越高。

红外与可见光两组实验源图像及各融合算法的融合图像如图 4 和图 5 所示,算法的客观评价指标如表 1 和表 2 所示。分别比较图 4(d)~(f)和图 5(d)~(f)融合图像中的红外目标,从视觉的角度来看,LPT_OB 较好地突出了红外热目标;从表 1 和表 2 的客观评价指标来看,LPT_OB 在 SF、SD、CC 以及 UIQI 上都高于其他两种算法,说明该算法无论是在突出红外目标方面还是在保持边缘细节、图像清晰度以及与源图像相似度等方面都表现较好。

表 1 第一组实验图像客观评价指标

Table 1 Objective evaluation indexes of the first experimental images

	LPT_OB	LPT_Region	LPT_Pixel
G	11.0178	10.9644	10.5551
SF	19.4794	19.3160	16.9216
SD	55.3567	50.8499	35.8990
CC	0.9326	0.8706	0.8867
UIQI	0.9080	0.3887	0.7244

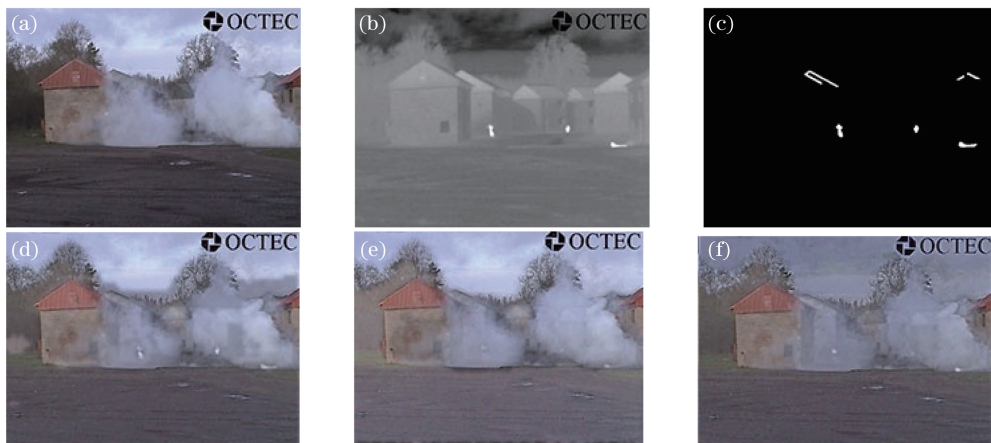


图 4 第一组红外与可见光融合实验图像。(a)原始可见光图像;(b)原始红外图像;(c)红外目标提取图像;
(d) LPT_OB 融合图像;(e) LPT_Region 融合图像;(f) LPT_Pixel 融合图像

Fig. 4 First fusion image experiment of the infrared and visible images. (a) Original visible image; (b) original infrared image; (c) infrared target extraction image; (d) fusion image of the LPT_OB; (e) fusion image of the LPT_Region; (f) fusion image of the LPT_Pixel

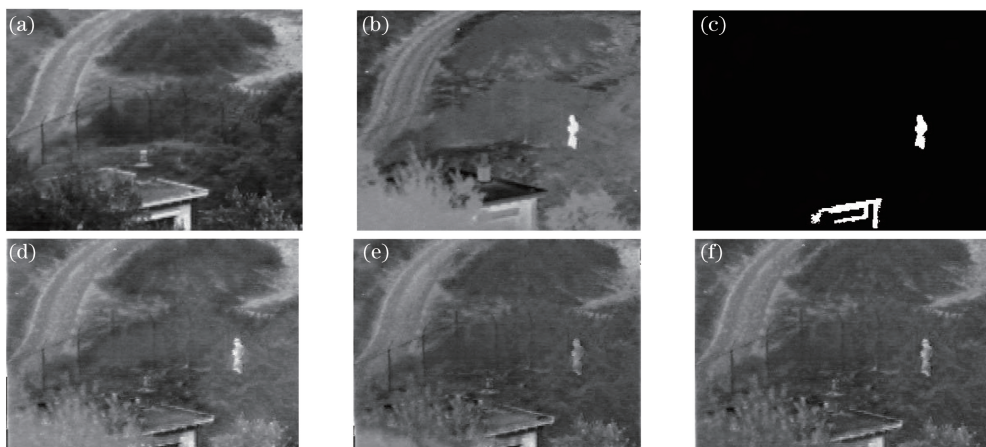


图 5 第二组红外与可见光融合实验图像。(a)原始可见光图像;(b)原始红外图像;(c)红外目标提取图像;
(d) LPT_OB 融合图像;(e) LPT_Region 融合图像;(f) LPT_Pixel 融合图像

Fig. 5 Second fusion image experiment of infrared and visible images. (a) Original visible image; (b) original infrared image; (c) infrared target extraction image; (d) fusion image of the LPT_OB; (e) fusion image of the LPT_Region; (f) fusion image of the LPT_Pixel

表 2 第二组实验图像客观评价指标

Table 2 Objective evaluation indexes of the second experimental images

	LPT_OB	LPT_Region	LPT_Pixel
G	11.6354	10.0616	10.8966
SF	19.6284	18.2587	17.6915
SD	32.5138	28.1491	27.0971
CC	0.6078	0.5485	0.4705
UIQI	0.6079	0.5534	0.4662

5 结 论

为了在可见光图像中尽可能多的注入红外图像的目标信息,提出了一种基于目标提取与拉普拉斯变换的红外与可见光融合算法。在红外目标提取算法中,融合 Canny 边缘提取与 Otsu 阈值分割图像的互补信

息,较完整地提取了红外目标,以此来指导源图像在拉普拉斯分解下低频系数融合规则的制定。实验结果表明,将红外目标图像和基于区域互信息量、匹配度以及区域能量相结合的融合规则能较好地突出红外目标信息,提供丰富的背景细节,图像的清晰度和人眼的视觉效果均优于其他传统算法。

参 考 文 献

- [1] Chen Tianming, Wang Junqi, Zhang Xingxiang, *et al.* Fusion of infrared and visible images based on feature extraction [J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46(3): 357-362.
陈天明, 王俊琦, 张星祥, 等. 基于特征提取的红外与可见光图像融合[J]. *激光与红外*, 2016, 46(3): 357-362.
- [2] Yang Guang, Tong Tao, Lu Songyan, *et al.* Fusion of infrared and visible images based on multi-features[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(2): 489-496.
杨 桃, 童 涛, 陆松岩, 等. 基于多特征的红外与可见光图像融合[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(2): 489-496.
- [3] Bilodeau G A, Torabi A, Morin F. Visible and infrared image registration using trajectories and composite foreground images[J]. *Image and Vision Computing*, 2011, 29(1): 41-50.
- [4] 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.
- [5] Wang Weipeng, Dai Shengkui. Fast haze removal method based on image fusion and segmentation[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2014, 19(8): 1155-1161.
王伟鹏, 戴声奎. 结合图像融合与分割的快速去雾[J]. *中国图象图形学报*, 2014, 19(8): 1155-1161.
- [6] Piella G. A general framework for Multiresolution image fusion: from pixels to regions[J]. *Information Fusion*, 2003, 4(4): 259-280.
- [7] Song Qingkun, Xu Mengmeng, Yu Shanyu. IHS Image Fusion Algorithm based on target extraction and wavelet transform[J]. *Journal of Henan University (Natural Science)*, 2014, 44(2): 232-235.
宋清昆, 徐萌萌, 余杉钰. 基于目标提取和小波变换 IHS 图像融合算法[J]. *河南大学学报(自然科学版)*, 2014, 44(2): 232-235.
- [8] Xu Qiang, Cheng Yinglei, Liu Jian. A fast fusion approach for remote sensing images with enhanced edge feature[J]. *Electronics Optics & Control*, 2013, 20(9): 43-47.
徐 强, 程英蕾, 刘 健. 一种突出边缘特征的遥感图像快速融合方法[J]. *电光与控制*, 2013, 20(9): 43-47.
- [9] Xu Liang, Wei Rui. An optimal algorithm of image edgy detection based on Canny [J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2013, 29(7): 127-131.
徐 亮, 魏 锐. 基于 Canny 算子的图像边缘检测优化算法[J]. *科技通报*, 2013, 29(7): 127-131.
- [10] Lü Zhe, Wang Fuli, Chang Yuqing. An improved Canny algorithm for edge detection [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2007, 28(12): 1681-1684.
吕 哲, 王福利, 常玉清. 一种改进的 Canny 边缘检测算法[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2007, 28(12): 1681-1684.
- [11] Yu Hao, Lin Chuan, Tan Guangxing, *et al.* A computational model of visual attention mechanism and edge extraction algorithm of Canny in contour detection [J]. *Journal of Guangxi University of Science and Technology*, 2016, 27(2): 87-92.
俞 昊, 林 川, 谭光兴, 等. 视觉注意机制与 Canny 算子结合的目标轮廓检测方法[J]. *广西科技大学学报*, 2016, 27(2): 87-92.
- [12] Xu Guangbao, Jiang Donghuan. Adaptive multi-scale Canny edge detection [J]. *Journal of Shandong Jianzhu University*, 2006, 21(4): 360-363.
徐光宝, 姜东焕. 自适应多尺度 Canny 边缘检测[J]. *山东建筑大学学报*, 2006, 21(4): 360-363.
- [13] Wang Zhishe, Yang Fengbao, Chen Lei, *et al.* SAR and visible image enhanced fusion based on texture segmentation and top-hat transformation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(10): 1010002.
王志社, 杨风暴, 陈 磊, 等. 基于纹理分割和 Top-hat 变换的合成孔径雷达与可见光图像增强融合[J]. *光学学报*, 2014, 34(10): 1010002.
- [14] Wei Weiyi. New Otsu image segmentation based on intensity stretching on DWT fields [J]. *Journal of Northwest*

Normal University (Natural Science), 2009, 45(6): 46-48.

魏伟一. 基于小波域灰度拉伸的 Otsu 图像分割[J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 2009, 45(6): 46-48.

- [15] Li Guangxin, Wang Ke, Zhang Libao. Computationally efficient algorithm of multiresolution image fusion with weighted average fusion rule[J]. Journal of Image and Graphics, 2005, 10(12): 1529-1536.
李光鑫, 王珂, 张立保. 加权多分辨率图像融合的快速算法[J]. 中国图象图形学报, 2005, 10(12): 1529-1536.
- [16] Hu Y, Zhang X. An improved IHS fusion for high resolution remote sensing images[C]. SPIE, 2010, 7546: 754635.
- [17] Ye Yinfang, Nie Jianying. Fusion of IR/PMMW image based on Laplacian pyramid transform [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2014, 34(2): 165-167.
叶银芳, 聂建英. 基于拉普拉斯金字塔变换的红外/被动毫米波图像融合[J]. 弹箭与制导学报, 2014, 34(2): 165-167.
- [18] Xiao Jinsheng, Rao Tianyu, Jia Qian, *et al.* An image fusion algorithm of Laplacian pyramid based on graph cutting [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2014, 25(7): 1416-1424.
肖进胜, 饶天宇, 贾茜, 等. 基于图切割的拉普拉斯金字塔图像融合算法[J]. 光电子·激光, 2014, 25(7): 1416-1424.
- [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] Zhang Libao, Zhang Jue. A new adaptive fusion method based on saliency analysis for remote sensing images [J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(1): 0114001.
张立保, 章珏. 基于显著性分析的自适应遥感图像融合[J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0114001.