

使用多尺度视觉注意提取的双波段图像融合

李 梦¹ 华玮平¹ 赵巨峰^{1,2}

¹杭州电子科技大学电子信息学院, 浙江 杭州 310018

²中国计量学院计量测试工程学院, 浙江 杭州 310018

摘要 针对可见-红外图像,结合多窗口选择下的视觉注意图的提取,实现了双波段图像的增强融合。利用局部频率调谐获取视觉注意图,以模拟人眼赋予不同区域与像素不同的注意权重的功能;设计了多窗口尺度下的视觉注意图的提取方法,以凸显提取不同尺寸的特征信息;在多窗口尺度下的视觉注意图的基础上实现双波段图像的增强融合。利用双波段图像对进行论证实验,并结合主客观评价对多种融合方法进行评估。实验结果表明,所提出的方法在满足人眼的视觉要求并有效保留细节的同时,具有较快的运算速度。

关键词 图像处理; 双波段; 图像融合; 视觉注意; 多尺度

中图分类号 TP391; O438

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.121002

Dual-Band Image Fusion Using Visual Attention Extraction with Multiple Windows

Li Meng¹ Hua Weiping¹ Zhao Jufeng^{1,2}

¹Electronics and Information College, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China

²College of Metrology and Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China

Abstract For the visible and infrared images, dual-band image fusion enhancement is achieved with visual attention extraction under multiple windows. The visual attention map is obtained using local frequency tuned idea, and this attention map simulates human visual system to give different visual weights to different areas and pixels. The method for multiple window-based visual attention maps extraction is designed, which could highlight feature information with different sizes. Based on multi-scale visual attention maps, dual-band image fusion enhancement is achieved. Using dual-band image of demonstration experiments, and combining with both subjective and objective assessment to evaluate various fusion methods. The experimental results demonstrate that the proposed method can efficiently reserving details and meet the need for human visual at the same time, and has faster operating rate.

Key words image processing; dual-band; image fusion; visual attention; multiple windows

OCIS codes 100.3008; 100.2960; 150.4232

1 引言

图像融合即将同一场景下的不同传感器所得图像进行综合,以一幅融合图像代替单独的两幅或多幅图像,在一幅图中体现出更丰富的信息并便于识读^[1]。图像融合作为现代成像技术的拓展手段,在军事探测、遥感测量^[2-4]、安全监控等多个领域都有广泛应用。红外图像中往往能够凸显有着发光发热性能的目标区域,而可见光(VI)图像则包含丰富的细节信息,对红外(IR)与可见光图像进行双波段融合,可以实现二者优势的综合。

近年来,针对图像融合算法的研究非常热门。最常见的方法是基于多分辨率,如小波、曲波变换、剪切

收稿日期: 2015-07-22; 收到修改稿日期: 2015-08-11; 网络出版日期: 2015-11-13

基金项目: 国家自然科学基金(61405052)、浙江省仪器科学与技术重中之重学科开放基金(JL150507)、浙江省流量计量技术重点实验室开放基金(JL150508)

作者简介: 李 梦(1992—),男,本科生,主要从事图像处理方面的研究。E-mail: limeng201403@126.com

导师简介: 赵巨峰(1985—),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: dabaozjf@hdu.edu.cn(通信联系人)

波等^[5-6]。基于金字塔的方法也较常见,包括对比度金字塔,比例金字塔^[7],梯度金字塔,形态学金字塔^[8]等,缺陷在于上采样与下采样会导致细节信息的平滑。使用多尺度中心-周围顶帽变换方法实现区域提取,Bai^[9]等实现了一种可见光-红外融合方法。然而,该方法的参数调节需要足够的经验,还受限于计算速度。陈磊等^[10],提出了一种基于变分法和梯度增强的红外与可见光图像融合算法,其融合以融合图像梯度特征最大为目标。徐萌兮等^[11]构造硬件光学成像系统,使用拉普拉斯金字塔变换方法对红外图与可见光图进行融合,实现了较好的视觉效果。为提高在低亮度下的红外与可见光图像融合的主观视觉效果,文献[12]提出了一种对比度增强的图像融合方法,其综合利用了双边滤波器与多尺度 Retinex 变换。实验结果证明其方法可消除光晕,并且提高融合图像清晰度。此外,显著提取与视觉权重也逐渐被运用于图像融合。有研究者利用显著性保留的思路实现了图像融合^[13]。本课题组相关人员也在这方面有着研究经验^[14-15],使用显著性与视觉注意相关的方法实现融合。从当前研究动态来看,以多分辨率为基础的算法研究是主流方向,但运行速度受限,研究者们正在寻求既能保证融合质量又能满足算法速度要求的折中方案;从研究趋势来看,如何研究符合主观观察与后续图像处理要求的算法是热门方向,比如应用视觉分析与视觉注意机制的融合策略。

人眼视觉系统(HVS)可以在未知环境中不受复杂背景影响,快速准确地搜索到场景中的显著目标,这是视觉显著的概念来源。视觉显著性反映的是视觉系统从场景中提取一系列视觉信息的能力,其能够像滤波器一样选择感兴趣信息而忽略其他信息,将生理、心理学等研究的视觉认知机制通过信息科学表现出来。近年来,随着理论的逐渐丰富饱满,视觉注意机制在图像处理智能化、目标探测与模式识别等领域受到高度关注,已成为数学领域和工程应用领域的一大研究热点,具有广泛的应用前景。

针对可见-红外图像融合,本文提出了一种利用多尺度窗口视觉注意图的双波段融合方法。利用局部频率调谐实现视觉注意图获取,以赋予不同区域与像素不同的权重;结合窗口多尺度变化,实现视觉注意图在多尺度窗口下的提取,进行增强与加权融合。从主客观分析结果推断,本文方法融合效果好、计算速度快。

2 视觉注意图在多尺度窗口下的提取

HVS对场景与图像的关注程度的权重分布,可用视觉注意图 V_{map} 来表征。 V_{map} 的数值在 0~1 之间,如果该图中某一像素处越大则表示 HVS 对该处的注意程度越高。通过频率调谐的思路^[16-17],可以得到全分辨率的 V_{map} ,并保留显著物体的丰富边缘信息。通过这类方法,可以使得图像中的最大显著目标被增强,即 V_{map} 表征的是最大显著目标的对应位置数值接近于 1。

视觉注意图的提取主要利用带通理论。对于图像 f ,利用高斯带通函数 $G_{\text{band}}(\cdot)$,其对应的视觉注意图 V_{map} 被定义为

$$V_{\text{map}} = |f * G_{\text{band}}(r, \sigma_1, \sigma_2)|, \quad (1)$$

式中 $*$ 是卷积算子。 $G_{\text{band}}(\cdot)$ 是带通函数,因此它具有低频截止 ν_{low} 与高频截止 ν_{high} 。此带通函数可以写为

$$G_{\text{band}}(r, \sigma_1, \sigma_2) = G_{\text{Gauss}}(r, \sigma_1) - G_{\text{Gauss}}(r, \sigma_2), \quad (2)$$

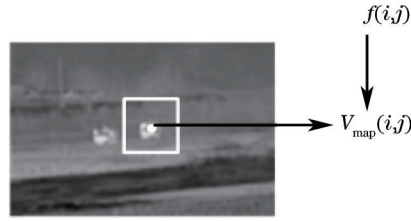
式中 $G_{\text{Gauss}}(\cdot)$ 为经典的高斯函数,其包含两个系数,即 $r(r^2 = i^2 + j^2)$, i 与 j 是像素空间坐标)与 σ (标准差,决定截止频率)。由于 $G_{\text{band}}(\cdot)$ 是带通函数,于是有 $\sigma_1 > \sigma_2$,且 σ_1 决定低频截止, σ_2 决定高频截止。因此,视觉注意图可以写为

$$V_{\text{map}} = |f * G_{\text{Gauss}}(r, \sigma_1) - f * G_{\text{Gauss}}(r, \sigma_2)|. \quad (3)$$

V_{map} 进一步被归一化到 0~1,其可以被看做是一幅视觉权重的图像,其反映的是 HVS 对图像 f 的不同区域与像素的关注程度: V_{map} 中某一处值越大则表示 HVS 对该处关注程度越高。

这种频率调谐的思路可以获取很好的视觉注意图,但是其凸显的是图像中大尺寸的目标景物^[16]。人眼所关注的图像中的特征信息不仅有最大尺寸的景物,而且需要针对不同尺寸景物都能凸显视觉权重。因此,提出局部窗口的概念。如图 1 所示,对于在 (i, j) 处的视觉注意值 $V_{\text{map}}(i, j)$,采用局部窗口计算,该窗口以 (i, j) 为中心,具有 $t \times t$ 的尺寸。具体计算的思路与全局方法一致:即将该 $t \times t$ 的窗口图像作为 f ,利用(1)式进行显著性图的计算,该显著性图中心处的值作为 V_{map} 在 (i, j) 处的值。于是,在局部窗口显著性计算的思路下,选择合适的窗口 $t \times t$,随着窗口滑动遍历整幅图像 f ,可获取对应的与原图同尺寸的视觉注意图 V_{map} 。

改变窗口的尺寸 t ,可以获得多尺度窗口下的视觉注意图,以凸显不同尺寸的特征信息。

图1 在像素 (i, j) 处,利用 $t \times t$ 的局部窗口计算 $V_{\text{map}}(i, j)$ Fig.1 A $t \times t$ local window at pixel (i, j) to calculate $V_{\text{map}}(i, j)$

3 结合视觉注意图的双波段增强融合

通过视觉注意图的计算,可以获得每个像素点的视觉注意值。在视觉注意图中,该值越大的区域与像素,通常越是表征原图像的细节区域。为了更加凸显视觉感兴趣的区域信息,引入基于视觉注意图的增强手段。由于获取了窗口 t_k 下的红外视觉注意图 V_k^{IR} 与可见光视觉注意图 V_k^{VI} ,对双波段图像进行各自的增强:

$$E_{\text{IR}}(i, j) = \omega_0 \cdot T_{\text{IR}}(i, j) + (1 - \omega_0) \cdot T_{\text{IR}}(i, j) \cdot V_k^{\text{IR}}(i, j), \quad (4)$$

$$E_{\text{VI}}(i, j) = \omega_0 \cdot T_{\text{VI}}(i, j) + (1 - \omega_0) \cdot T_{\text{VI}}(i, j) \cdot V_k^{\text{VI}}(i, j), \quad (5)$$

式中 E_{IR} 与 E_{VI} 是各自的增强结果,而 ω_0 是平衡增强效果的一个常数。

在增强基础上,进行融合。根据多窗口(窗口为 $t_k, k=1, 2, \dots, N$)的尺度分析,在每个窗口尺度上融合:

$$F_k = \frac{1}{2} \left\{ \left[T_{\text{IR}} V_k^{\text{IR}} + T_{\text{VI}} (1 - V_k^{\text{IR}}) \right] + \left[T_{\text{VI}} V_k^{\text{VI}} + T_{\text{IR}} (1 - V_k^{\text{VI}}) \right] \right\}, \quad (6)$$

式中 V_k^{IR} 为利用第 k 个窗口 t_k 计算的红外视觉注意图,同理 V_k^{VI} 为利用第 k 个窗口 t_k 计算的可见光视觉注意图, F_k 为第 k 个尺度窗口下的融合结果。引入 N 个局部窗口尺寸,分别为 $t_k \times t_k (k=1, 2, \dots, N)$ 。

对于所有的窗口尺度进行综合,获得了最终的融合结果 F ,以反映各类细节信息,定义为

$$F = \max_{k=1, 2, \dots, N} (F_k). \quad (7)$$

4 实验与分析

4.1 参数设置与实验说明

在窗口选择中,采用了 $N=6$ 。由于窗口区域需有中心像素,因此窗口尺寸 t 通常是奇数。于是,对于 N 个窗口,对应的窗口尺寸 $t_k (k=1, 2, \dots, N) = \{3, 7, 11, 15, 19, 23\}$ 。这一系列窗口基本可以涵盖不同的细节层次。其次,平衡增强效果的常数 ω_0 也是需要选择的。根据公式可知, ω_0 越大增强效果越差,相反则越好;此外, ω_0 如果太小,增强效果固然好,但除了视觉注意值大的区域,其他区域的信息保留会很少,因此需要做好权衡。并且,由于 $\omega_0 \in [0, 1]$,在实验中通常选择 ω_0 为0.7~0.8。

对比几类常用的方法以及近期较为出色的融合算法,具体包括使用多尺度中心-周围顶帽法^[7],显著性保留法^[10],拉普拉斯金字塔^[13],比例金字塔^[6],形态学金字塔^[6],直接平均融合法,基于小波的方法等。为了对比方便,将本文方法简称为 M_1 ,其他对比方法分别为:直接平均融合法简称为 M_2 ,基于小波的方法简称为 M_3 ,拉普拉斯金字塔^[13]简称为 M_4 ,比例金字塔^[7]简称为 M_5 ,形态学金字塔^[6]简称为 M_6 ,使用多尺度中心-周围顶帽法^[9]简称为 M_7 ,显著性保留法^[13]简称为 M_8 。

实验采用的图像来自国际通用数据库,两组图像如图2所示,一组为quad,其尺寸为320 pixel×250 pixel,



图2 源图像。(a)可见光quad图;(b)红外quad图;(c)可见光octec图;(d)红外octec图

Fig.2 Source image. (a) VI quad image; (b) IR quad image; (c) VI octec image; (d) IR octec image

另一组为 octec, 尺寸为 640 pixel×480 pixel。

采用的台式机配置为 1.7 GHz 双核 CPU, 以及 2 GB 的内存, 软件平台为 Matlab R2009b。

4.2 客观评价方法

除了 HVS, 这里引入三种客观评价方法评价融合图像质量, 包括熵, 联合熵, 以及标准偏差。这里用 X 、 Y 、 F 分别指两幅源图与融合结果。

通常, 融合图像应该拥有更多的信息量, 而熵值反映图像的信息含量^[9,19]。熵值越大, 代表融合质量越好。熵的定义为

$$E = - \sum_{i=0}^{L-1} p_F(i) \log_2 [P_F(i)], \quad (8)$$

式中 L 表示图像的灰阶。 $P_F(i)$ 代表 F 中灰度值 i 的概率。

联合熵表示的是从两幅源图像中继承的信息^[20]。联合熵越大, 融合图像质量越好。联合熵定义为

$$J_E = - \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} \sum_{k=0}^{L-1} p_{FXY}(i,j,k) \log_2 [p_{FXY}(i,j,k)], \quad (9)$$

式中 $P_{FXY}(i,j,k)$ 代表的是 F 、 X 、 Y 中灰度值分别为 i 、 j 、 k 的联合概率。

标准偏差 S_{TD} 通常被用来衡量图像清晰度。 S_{TD} 定义的是各像素与平均灰度之间的差异。 S_{TD} 越大, 表示融合图像越清晰。

$$S_{TD} = \sqrt{\sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=1}^{M-1} [F(x,y) - u_F]^2 / MN}, \quad (10)$$

式中 M 与 N 是图像 F 的宽度与高度, u_F 是 F 的灰度均值。

4.3 实验与分析

quad 图的融合结果如图 3 所示, 图 3(a)~(h) 分别是用方法 M_1 ~ M_8 获取的结果。从视觉效果来看, M_1 效果非常好, 不仅继承了源图像的特征信息, 而且对比效果也较好。

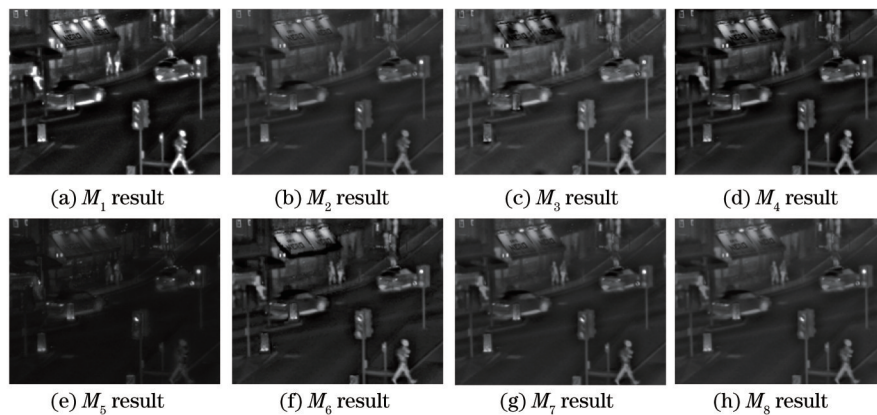


图 3 quad 图的融合结果

Fig.3 Fused results of quad image

利用 3.2 节所述的 3 种客观评价方法对图 3 进行评价, 获取评价结果如表 1 所示。根据客观评价方法的结果来看, 利用多尺度窗口视觉注意图的双波段融合方法的评价结果最好。

表 1 图 3 各方法结果的 E 、 J_E 、 S_{TD} 评价值

Table 1 E , J_E , S_{TD} evaluation results of each method in Fig. 3

| | M_1 | M_2 | M_3 | M_4 | M_5 | M_6 | M_7 | M_8 |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| E | 6.64 | 5.60 | 6.40 | 6.41 | 4.95 | 6.30 | 5.75 | 5.86 |
| J_E | 6.01 | 5.66 | 5.93 | 5.93 | 5.44 | 5.90 | 5.71 | 5.75 |
| S_{TD} | 18.19 | 10.20 | 13.46 | 14.70 | 8.95 | 14.94 | 10.37 | 9.32 |

图 4 为 octec 图的融合结果。 M_1 ~ M_8 各方法所得的结果分别对应于图 4(a)~(h) 各图。从视觉效果上来看, M_1 给出的效果最佳, 且图像对比高, 保持的细节特征也更为明显, 尤其是将中心区域的人这一主要特征信息凸显出来了。

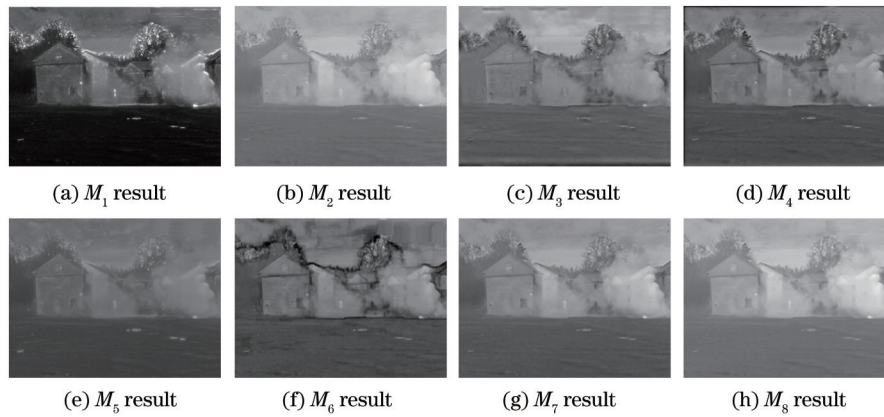


图4 octec图的融合结果

Fig.4 Fused results of octec image

此实例中也采用了3种客观评价方法进行评价,所得的结果如表2所示。从表2可以发现,利用多尺度窗口视觉注意图的双波段融合方法获得的评价结果最佳,也从侧面印证了其对于双波段融合的有效性。

表2 图4各方法结果的 E 、 J_E 、 S_{TD} 评价Table 2 E , J_E , S_{TD} evaluation results of each method in Fig.4

| | M_1 | M_2 | M_3 | M_4 | M_5 | M_6 | M_7 | M_8 |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| E | 7.14 | 6.45 | 6.76 | 6.51 | 6.04 | 6.47 | 6.53 | 6.66 |
| J_E | 6.42 | 6.19 | 6.29 | 6.21 | 6.05 | 6.20 | 6.22 | 6.26 |
| S_{TD} | 23.55 | 16.11 | 15.27 | 16.11 | 10.91 | 15.33 | 14.89 | 14.72 |

4.4 进一步的讨论

根据4.3节的实验结果,本文方法表现优异。在视觉效果与计算速度上作进一步的分析与讨论。

观察图3与图4,由于本文方法融入了HVS的特性,设计了视觉注意图 V_{map} ,从而能展现更好的视觉效果,体现在对比度高且包含丰富的细节信息。以图4为例,中心区域的人是更为明显的特征信息,在 M_1 的结果中该信息最明显,即本文方法最能凸显这个特征。 M_2 牺牲了对比度,因为其仅对源图像进行了平均。其他方法都有着低对比度且较少的细节,且图中人的特征不够明显。

对于图像处理算法,运行速度是衡量其性能的重要指标之一。在实验中,图3、图4的尺寸分别为320 pixel×250 pixel、640 pixel×480 pixel。 $M_1 \sim M_8$ 的处理时间如表3所示。由表3可知,只有 M_2 与 M_5 比 M_1 快,而 M_2 是平均法, M_5 为比例金字塔法,这两者在融合效果上较差。相比于新方法,如 M_7 、 M_8 , M_1 运行速度更快。

表3 处理时间对比(单位:秒)

Table 3 Comparison of processing time (units: s)

| | Size | M_1 | M_2 | M_3 | M_4 | M_5 | M_6 | M_7 | M_8 |
|-------|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Fig.3 | 320 pixel×250 pixel | 0.08 | 0.01 | 0.24 | 0.57 | 0.02 | 0.28 | 2.49 | 1.44 |
| Fig.4 | 640 pixel×480 pixel | 0.31 | 0.02 | 0.43 | 0.96 | 0.06 | 0.95 | 9.94 | 8.13 |

5 结论

针对可见-红外双波段图像,提出了一种利用多尺度窗口视觉注意图的融合方法。主要思路在于:1)利用局部频率调谐实现视觉注意图的获取,模拟人眼以赋予不同区域与像素不同的权重;2)结合窗口的多尺度,实现视觉注意图在多尺度窗口下的提取;3)充分利用视觉注意图实现双波段图像的增强与加权融合。根据实验与对比方法的比较数据表明,利用多尺度窗口视觉注意图的双波段融合方法能快速给出视觉效果好、客观评价高的结果。该方法将视觉注意图的提取融入到双波段增强融合中,充分考虑了主观因素,产生了较好的视觉效果;此外,从多窗口尺度的角度,提取不同尺寸的细节信息,充分体现在融合图像中。

在未来工作中,还需要进一步提升几个方面的内容:1)视觉注意图提取的细致化,这需要考虑到在细节层次提取阶段的进一步深化,初步设想可使用局部像素差异实现这个目的;2)窗口大小等相关参数的获取,可结合不同景物内容作大量的实验讨论,形成规律性的数据,以辅助自适应的获取这些参数,有效提升方法的稳健性。

参考文献

- 1 Peng Hai, Zhao Jufeng, Feng Huajun, *et al.*. Dual band image fusion method based on region saliency[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2012, 46 (11): 2109–2115.
彭海, 赵巨峰, 冯华君, 等. 基于区域显著性的双波段图像融合方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2012, 46 (11): 2109–2115.
- 2 F Chen, Z Guan, X Yang, *et al.*. A novel remote sensing image fusion method based on independent component analysis[J]. International Journal of Remote Sensing, 2011, 32 (10): 2745–2763.
- 3 Yin Wen, Li Yuanxiang, Zhou Zeming, *et al.*. Remote sensing image fusion based on sparse representation[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0428003.
尹雯, 李元祥, 周则明, 等. 基于稀疏表示的遥感图像融合方法[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0428003.
- 4 Guo Yulong, Wang Yongbo, Li Yunmei, *et al.*. Research of multi-source water remote image fusion algorithm based on bio-optical model[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(4): 0410001.
郭宇龙, 王永波, 李云梅, 等. 基于生物光学模型的水体多源遥感图像融合算法研究[J]. 光学学报, 2015, 35(4): 0410001.
- 5 Zhang Xin, Chen Weibin. Medical image fusion based on weighted contourlet transformation coefficients[J]. Journal of Image and Graphics, 2014, 19(1): 133–140.
张鑫, 陈伟斌. Contourlet变换系数加权的医学图像融合[J]. 中国图象图形学报, 2014, 19(1): 133–140.
- 6 Chen Guangqiu, Gao Yinhan, Liu Guangwen, *et al.*. Image fusion based on area objective assessment in finite discrete shearlet transform domain[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2014, 44(6): 1849–1859.
陈广秋, 高印寒, 刘广文, 等. 有限离散剪切波域结合区域客观评价的图像融合[J]. 吉林大学学报(工学版), 2014, 44(6): 1849–1859.
- 7 A Toet. Image fusion by a ratio of low-pass pyramid[J]. Pattern Recognition Letters, 1989, 9(4): 245–253.
- 8 G K Matsopoulos, S Marshall. Application of morphological pyramids: Fusion of MR and CT phantoms[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 1995, 6(2): 196–207.
- 9 X Bai, F Zhou, X Bindang. Fusion of infrared and visible images through region extraction by using multi scale center-surround top-hat transform[J]. Opt Express, 2011, 19(9): 8444–8457.
- 10 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.
- 11 Xu Mengxi, Qian Weixian, Gu Guohua, *et al.*. Image fusion and colorization of infrared and visible images using coaxial optical system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(9): 091004.
徐萌兮, 钱惟贤, 顾国华, 等. 共轴光学系统下的红外与可见光图像融合与彩色化[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(9): 091004.
- 12 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.
- 13 Hong R, 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.
- 14 J Zhao, Q Zhou, Y Chen, *et al.*. Fusion of visible and infrared images using saliency analysis and detail preserving based image decomposition[J]. Infrared Physics & Technology, 2013, 56: 93–99.
- 15 J Zhao, H Feng, Z Xu, *et al.*. Detail enhanced multi-source fusion using visual weight map extraction based on multi scale edge preserving decomposition[J]. Optics Communications, 2013, 287(15): 45–52.
- 16 J Zhao, Y Chen, H Feng, *et al.*. Infrared image enhancement through saliency feature analysis based on multi-scale decomposition[J]. Infrared Physics & Technology, 2014, 62: 86–93.
- 17 R Achanta, S Hemami, F Estrada, *et al.*. Frequency-tuned salient region detection[C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2009: 1597–1604.
- 18 P J Burt, E H Adelson. The laplacian pyramid as a compact image code[J]. IEEE Transactions on Communications, 1983, 31 (4): 532–540.
- 19 J W Roberts, A J Van, F Ahmed. Assessment of image fusion procedures using entropy, image quality, and multispectral classification[J]. J Appl Remote Sens, 2008, 2(1): 1–28.
- 20 G Qu, D Zhang, P Yan. Information measure for performance of image fusion[J]. Electronics Letters, 2002, 38(7): 313–315.

栏目编辑: 苏 岑