

基于灰度变换与两尺度分解的夜视图像融合

朱浩然^① 刘云清^{*①} 张文颖^{②③}

^①(长春理工大学电子信息工程学院 长春 130022)

^②(长春理工大学光电工程学院 长春 130022)

^③(中国科学院光电研究院 北京 100094)

摘要: 为了获得更适合人感知的夜视融合图像, 该文提出一种基于灰度变换与两尺度分解的夜视图像融合算法。首先, 利用红外像素值作为指数因子对可见光图像进行灰度转换, 在达到可见光图像增强的同时还使可见光与红外图像融合任务转换为同类图像融合。其次, 通过均值滤波对增强结果与原始可见光图像进行两尺度分解。再次, 运用基于视觉权重图的方法融合细节层。最后, 综合这些结果重构出融合图像。由于该文方法在可见光波段显示结果, 因此融合图像更适合视觉感知。实验结果表明, 所提方法在视觉质量和客观评价方面优于其它5种对比方法, 融合时间小于0.2 s, 满足实时性要求。融合后图像背景细节信息清晰, 热目标突出, 同时降低处理时间。

关键词: 图像融合; 灰度变换; 两尺度分解; 视觉显著性检测

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2019)03-0640-09

DOI: 10.11999/JEIT180407

Night-vision Image Fusion Based on Intensity Transformation and Two-scale Decomposition

ZHU Haoran^① LIU Yunqing^① ZHANG Wenying^{②③}

^①(School of Electronics and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

^②(Photoelectric Engineering College, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

^③(Academy of Opto-electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

Abstract: In order to achieve more suitable night vision fusion images for human perception, a novel night-vision image fusion algorithm is proposed based on intensity transformation and two-scale decomposition. Firstly, the pixel value from the infrared image is used as the exponential factor to achieve intensity transformation of the visible image, so that the task of infrared-visible image fusion can be transformed into the merging of homogeneous images. Secondly, the enhanced result and the original visible image are decomposed into base and detail layers through a simple average filter. Thirdly, the detail layers are fused by the visual weight maps. Finally, the fused image is reconstructed by synthesizing these results. The fused image is more suitable for the visual perception, because the proposed method presents the result in the visual spectrum band. Experimental results show that the proposed method outperforms obviously the other five methods. In addition, the computation time of the proposed method is less than 0.2 s, which meet the real-time requirements. In the fused result, the details of the background are clear while the objects with high temperature variance are highlighted as well.

Key words: Image fusion; Intensity transformation; Two-scale decomposition; Visual saliency detection

1 引言

夜视成像技术在军事与执法领域, 如监控, 侦

查, 情报搜集和安保等方面有着重要应用。不同类型的夜视成像传感器在记录同一场景时, 在其提供的信息中有部分是冗余的或互补的, 并且可能会被噪声所污染^[1]。图像融合技术可以将可见光图像与红外图像融合为一幅图像, 并在此过程中消除噪

收稿日期: 2017-05-02; 改回日期: 2018-10-18; 网络出版: 2018-10-31

*通信作者: 刘云清 mzluiyunqing@163.com

声, 该新图像相比每个单独的源图像融合图像可以提供更多信息^[2]。因此, 为获得更适合人感知和计算机处理的夜视图像, 有必要对更有效的融合算法展开研究。

在过去的几十年里, 像素级融合方法在图像融合中广泛应用。一种有效的像素级融合方法具有以下特性: 算法转移大量源图像的有用信息到融合图像; 融合过程中几乎无信息丢失; 融合结果无伪影。为了满足上述要求, 已有大量基于多尺度分解的方法被提出。早期, 国内外提出了多种基于金字塔分解的方法, 如拉普拉斯金字塔、对比度金字塔和梯度金字塔等^[3-5]。此类方法会在边缘附近产生光晕。随后学者们发现, 与金字塔类方法相比, 小波变换提供较好的时域-频域表现。因此, Lewis等人^[6]成功地将离散小波变换应用于图像融合。由于离散小波具有移变性, 因此可能会将伪影引入到融合图像中。近年来, 边缘保持技术成功地应用在图像融合中^[7]。此类方法通过边缘保持滤波器, 如各项异性扩散、导向滤波和双边滤波器等^[8,9], 将源图像分解为基础层和一系列细节层, 同时保持边缘信息。因此, 此类滤波器可以为融合提供理想的分解。然而, 边缘保持多尺度分解实施复杂且耗费时间。

大多数基于多尺度分解的融合方法需要分解层数多于2以获得满意的结果。这些方法计算复杂度高。因此, 它们需要更多的内存以及计算时间, 无法满足高实时性系统要求。另一方面, 夜间的照明条件较差, 导致可见图像中部分细节可视性较差, 人眼无法识别, 故在融合之前有必要对可见光图像作适当增强处理, 目前已有多种方法被提出, 如直方图均衡化、Retinex算法和基于同态滤波的增强方法等^[10,11]。以上算法虽性能良好, 但运算量大。此外, 可见光波段中显示的特征最适合人类感知。在低热对比度环境中, 背景细节如植物或土地在可见光波段中显示较为清晰, 当红外图像提供冗余信息时, 两幅图像融合会降低可见光图像(即便已增强)的原始信息, 导致融合图像不利于人眼感知。

为解决以上算法存在的问题, 本文提出一种基于灰度变换和两尺度分解的夜视图像融合方法。在融合之前, 利用红外图像像素值对可见光图像进行自适应增强处理, 突出热目标, 该过程使红外与可见光图像融合任务转变为同类图像融合。此后增强结果再与原始可见光图像融合, 进一步突出在可见光波段中获得的特征。首先, 采用均值滤波对增强和原始可见光图像进行两尺度分解, 与多尺度方法不同, 该分解方法更加快速。然后, 分别对基础层与细节层设计融合规则。其中细节层包含大量适合

人眼观察的纹理信息, 文中提出一种新的基于显著图的权重系数构建方法, 其能高效地将源图像的重要信息整合到融合图像中。最后, 通过重构得到一幅适合人感知的图像。实验结果证明了算法可以更好地保留可见光图像信息。

2 可见光图像对比度增强

可见光图像受夜晚照明条件的影响, 通常像质较差, 不利于视觉感知。利用图像增强算法能够使可见光图像清晰化。在图像增强中, 直方图均衡化(HE)是最广为应用的基本工具之一^[12], 其通过增加原始图像像素的动态范围, 实现增强图像整体对比度的效果。

如果一幅数字图像 $f(x, y)$ 具有 L 个灰度级, 其像素总数为 n , 设第 k 个灰度级 f_k 出现的次数为 n_k , 则第 k 级灰度级出现的概率为

$$P_f(f_k) = \frac{n_k}{n}, \quad 0 \leq f_k \leq L-1, k = 0, 1, \dots, L-1 \quad (1)$$

通过此变化后, 可获得图像的直方图均衡化计算公式为

$$g_k = T(f_k) = \frac{255}{n} \sum_{i=0}^k n_i \quad (2)$$

可见, 图像经过HE变换后, 其灰度级具有了均匀的密度分布, 从而实现增强。因此, 图像从整体上得到了增强。然而, 该均衡方法通常会使图像过亮且热目标不突出。针对此问题, 本文将红外图像中的像素值作为指数因子对可见光图像进行增强, 具体过程如下。设可见光和红外图像为 $I_v(x, y)$ 与 $I_r(x, y)$, 且均已作归一化处理, 得到增强图像为

$$I_v^{\text{en}}(x, y) = 255 \times I_v(x, y)^{I_r(x, y)} \quad (3)$$

通过式(3)能够快速有效对可见光图像自适应增强, 在保留背景细节信息的同时突出人物。

为验证方法的有效性, 以可见光图像“Quad”作为输入图像, 经过HE与本文方法增强的图像如图1所示。可见原始图像(图1(a))对比度较差, 这也可通过观察其直方图(图1(b))发现, 强度值主要集中在低灰度级范围内。经HE方法增强的图像见图1(c), 可见图像的整体亮度获得了增强, 但是对比度仍然很低, 部分暗区细节仍然无法看清, 高光区过亮。其直方图(图1(d))灰度值分布较为分散, 说明HE算法自适应性较差。而利用红外图像相关像素值增强的可见光图整体自然(图1(e)), 对比度得到了提升, 热目标突出。其直方图灰度值分布均匀, 几乎覆盖了全范围, 说明本方法具有较强自适应性。

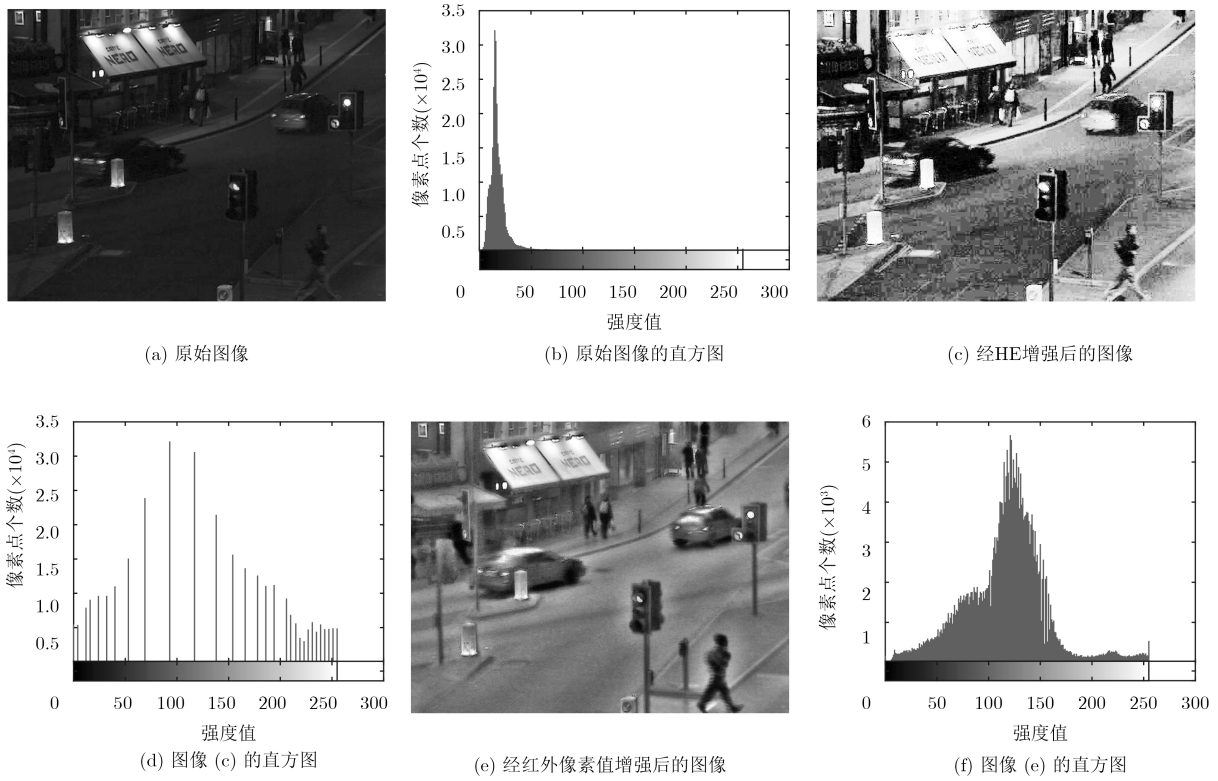


图1 HE与本文方法结果比较

3 本文融合框架

原始可见光图像的高温变目标以及暗处细节利用红外像素得到了增强,下面通过与原始可见光图像融合进一步提高增强图像中的感知信息。本文的融合方法由3个步骤组成:利用均值滤波将源图像分解为基础层和细节层;对基础层和细节层分别采用不同的规则融合;通过对最终的基础层和细节层进行组合重构出融合图像。本文提出的融合框架如图2所示。

3.1 两尺度图像分解

增强与原始可见光图像分别设为 I_{en} 与 I_v ,两幅源图像大小相同且已配准。均值滤波能够有效滤除噪声和高频信息。基于此特性,可应用均值滤波将两幅图像分解为基础层(包含大尺度信息)和细节层(包含小尺度细节)。基础层由式(4)获得

$$\left. \begin{aligned} I_v^B(x, y) &= \frac{1}{M} \sum_{(x, y) \in S} I_v(x, y) \\ I_{\text{en}}^B(x, y) &= \frac{1}{M} \sum_{(x, y) \in S} I_{\text{en}}(x, y) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中, $I_v^B(x, y)$ 和 $I_{\text{en}}^B(x, y)$ 分别为源图像 I_{en} 与 I_v 的基础层, S 为点 (x, y) 的邻域, M 为邻域中的总点数。

细节层通过源图像与基础层相减得到:

$$\left. \begin{aligned} I_v^D(x, y) &= I_v(x, y) - I_v^B(x, y) \\ I_{\text{en}}^D(x, y) &= I_{\text{en}}(x, y) - I_{\text{en}}^B(x, y) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中, $I_v^D(x, y)$ 和 $I_{\text{en}}^D(x, y)$ 为细节层。

3.2 视觉显著性检测

视觉显著性检测是识别或检测显著性区域(如人,车辆和房屋等)的过程^[13]。这些显著性区域与场景中的其它区域相比更能引起视觉注意。显著性

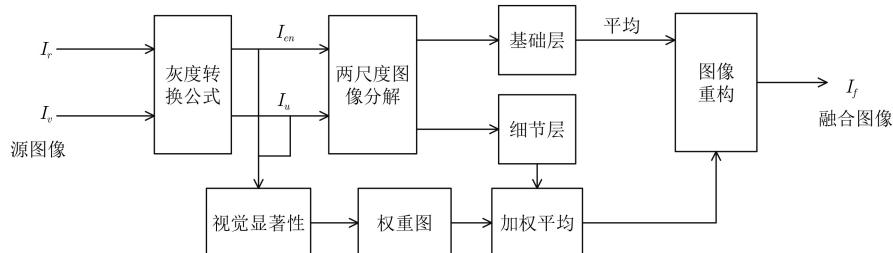


图2 提出的图像融合方法的框架

检测的结果是一幅灰度图像，图中每个像素的灰度值代表该像素在原图像中的显著度^[14]。因此，可以利用显著特征确定各子信息的融合权重。为了更好地融合图像，本文提出了一种简单、有效的显著图检测方法，用于提取源图像的视觉显著性。图3为

视觉显著性检测的工作原理。首先，对每幅源图像应用均值滤波以减少像素与其邻域间的灰度变化。然后，对每幅源图像应用中值滤波以减少噪声或伪影。最后，显著图通过均值与中值滤波输出之差得到。对于一幅灰度图像，显著图计算公式为：

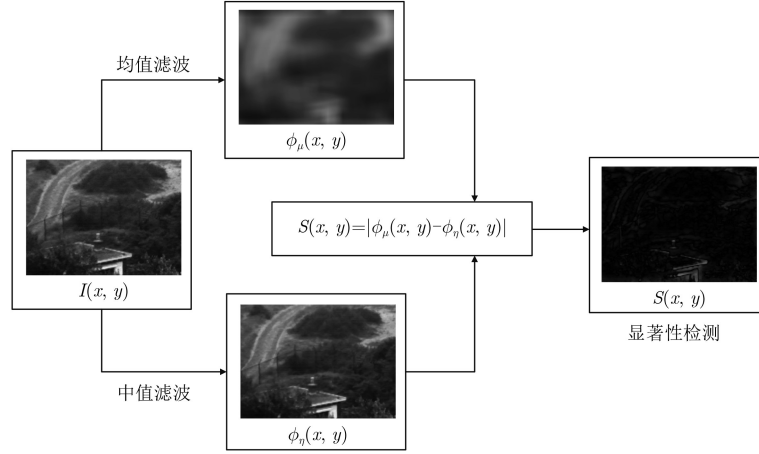


图3 视觉显著性检测的原理图

$$S(x, y) = |\varphi_\mu(x, y) - \varphi_\eta(x, y)| \quad (6)$$

式中， $|\cdot|$ 为绝对值， $\varphi_\mu(x, y)$ 为窗口大小为 w_μ 的均值滤波输出， $\varphi_\eta(x, y)$ 为窗口大小为 w_η 的中值滤波输出。从图3可见，检测结果突出显示了线和边缘等显著特征。这些特征在吸引视觉注意时起着至关重要的作用。

3.3 构造权重图

与基础层信息相比，图像的细节层信息更能引起人类视觉系统注意^[15]。细节层提供不同的视觉上重要信息，如何对源图像细节层分配适当的权重(对具有不重要信息的像素分配低权重和对具有重要信息的像素分配高权重)成为融合效果好坏的关键。为此，本文提出一种新的基于显著图的权重图构造方法融合细节层。权重图通过归一化显著图得到，具体计算方法如式(7)：

$$\left. \begin{aligned} W_v^D(x, y) &= \frac{S_v(x, y)}{S_v(x, y) + S_{en}(x, y)} \\ W_{en}^D(x, y) &= \frac{S_{en}(x, y)}{S_v(x, y) + S_{en}(x, y)} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中， W_v^D 和 W_{en}^D 分别为 I_v^D 和 I_{en}^D 对应的权重图，权重图的范围为 $[0, 1]$ 。

由图4可知，权重图 W_v^D 和 W_{en}^D 彼此互补($W_v^D + W_{en}^D = 1$)。因此，如果权重图 W_v^D 给可见光细节图像中某个像素分配了较高权重(表示该像素具有重要信息)，那么权重图 W_{en}^D 会给增强可见光细节图像中处于相同位置的像素分配较低权重(代表此像素信息不重要)，反之亦然。该权重图构造方法能够有效保留重要细节信息。

3.4 重构融合图像

首先，对细节层进行融合。来自各细节层的重要信息通过权重图 W_v^D 和 W_r^D 分别与细节层 I_v^D 和 I_r^D 相乘整合为最终细节图像 I_f^D ：

$$I_f^D = W_v^D I_v^D + W_r^D I_r^D \quad (8)$$

然后，应用平均融合规则结合基础层：

$$I_f^B = \frac{1}{2} (I_v^B + I_r^B) \quad (9)$$

式中， I_f^B 为最终基础层，该方法能够快速和有效

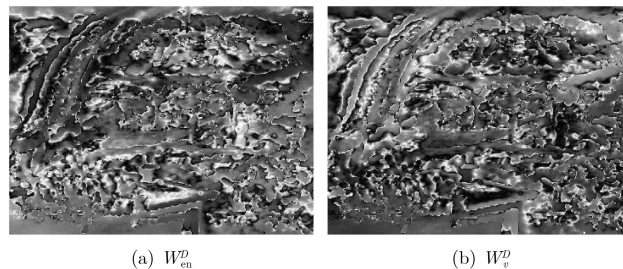


图4 权重图

地融合基础层信息。

最后,融合图像通过基础层与细节层相加得到

$$I_f = I_f^B + I_f^D \quad (10)$$

4 实验结果及分析

4.1 实验准备

实验所用的可见光与红外图像(已配准)均从网站www.imagefusion.org选取。运算平台的指标如下:计算机型号为联想笔记本Y430p, CPU为第4代IntelCorei7, 主频2.5 GHz, 内存4G, 显卡为NVIDIA GeForce GTX 850M, 操作系统为Windows7, 编程语言为Matlab 2015b。

为了验证算法的有效性,选择拉普拉斯金字塔(LAP)、对比度金字塔(ROLP)、Curvelet变换(CVT)、双树复小波变换(DTCWT)和基于各项异性扩散与KL变换的融合算法(ADF)作为对比实验^[6,17]。LAP和ROLP为基于金字塔的方法,CVT和DTCWT为基于变换域的方法,ADF是基于边缘保持分解的方法。本文的融合算法参数设置如下:均值滤波窗口大小 w_μ 为35,中值滤波窗口大小 w_η 为5。

本文先从主观上通过人眼观察比较融合结果的视觉效果,再采用客观评价指标对融合图像进行评价。由于本文算法的输入图像在融合之前已改变,因此,选择不取决于输入图像的评价指标对融合质量进行客观评价:均值、标准差和熵^[18-20]。

(1)均值。图像的像素平均值能够反映图像的平均亮度,其计算公式为

$$\hat{\mu} = \frac{1}{M_0 \times N_0} \sum_{x=1}^{M_0} \sum_{y=1}^{N_0} F(x, y) \quad (11)$$

式中, $F(x, y)$ 表示融合图像在点 (x, y) 处的灰度

值, $M_0 \times N_0$ 表示图像大小,其值越大越好。

(2)标准差。标准差用来反映灰度相对于灰度均值的离散程度。

$$\sigma = \left\{ \frac{1}{M_0 \times N_0} \sum_{x=1}^{M_0} \sum_{y=1}^{N_0} [F(x, y) - \hat{\mu}]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

标准差越大,表示融合结果灰度级分布越分散,则融合算法的性能越好。

(3)熵。熵的大小能够反映融合图像包含信息量的多少,其公式为

$$E_f = - \sum_{i=0}^{L-1} P_f(i) \lg P_f(i) \quad (13)$$

式中, $P_f(i)$ 表示融合图像中灰度值为 i 的像素数与总数的比值,其值越大算法性能越好。

4.2 图像融合实验

本文方法与其它5种融合算法的比较结果如图5—图8所示。图5为源图像“Quad”的结果,图5(c)为LAP方法的结果,其行人的亮度较低;ROLP(图5(d))得到的图像存在视觉失真现象;CVT算法结果(图5(e))在人与车周围存在小暗影;DTCWT(图5(f))与ADF(图5(g))提供较少的视觉信息;图5(h)为本文方法的结果,由于其在可见光波段中显示,因此更适合人眼观察,并且融合图像热目标突出和几乎无伪影。在图6中,LAP方法融入了过多暗红外光谱信息,导致部分细节不清晰;ROLP, CVT和DTCWT存在边缘模糊现象。ADF方法虽然消除了边缘伪影,但是不能提供关于场景的完整信息。本文算法不仅能够保持背景的细节信息,而且可以使热目标突出显示。图7与图8具有类似结果。通过以上分析可知,本文方法获得

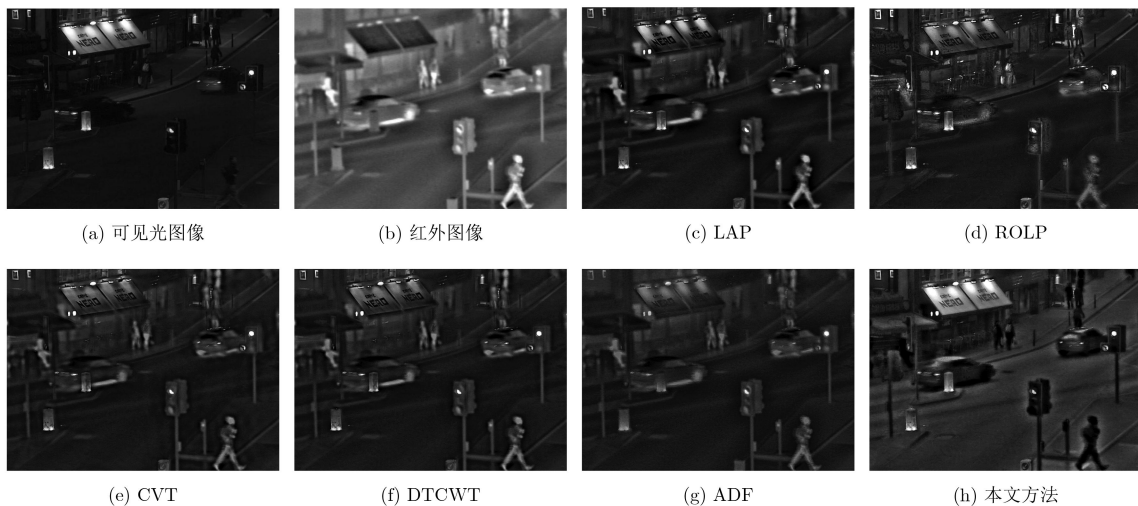


图5 不同方法对源图像“Quad”的融合结果比较

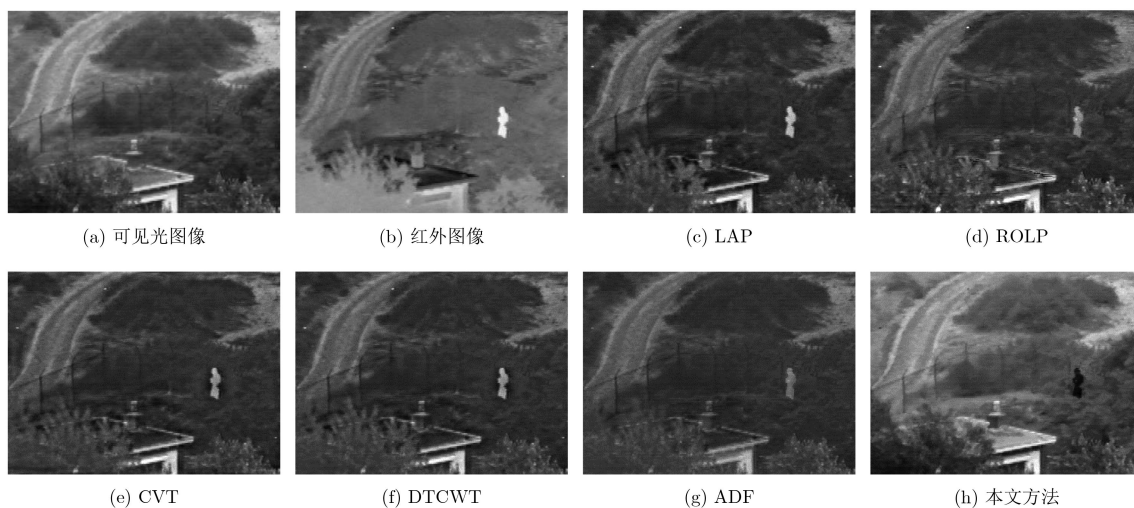


图6 不同方法对源图像“UNcamp”的融合结果比较

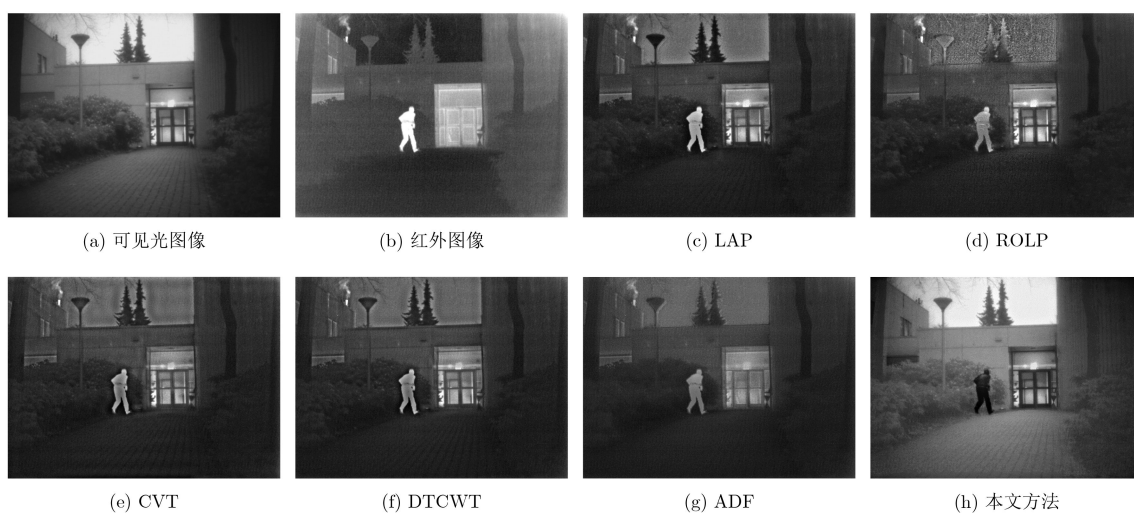


图7 不同方法对源图像“Kaptein”的融合结果比较

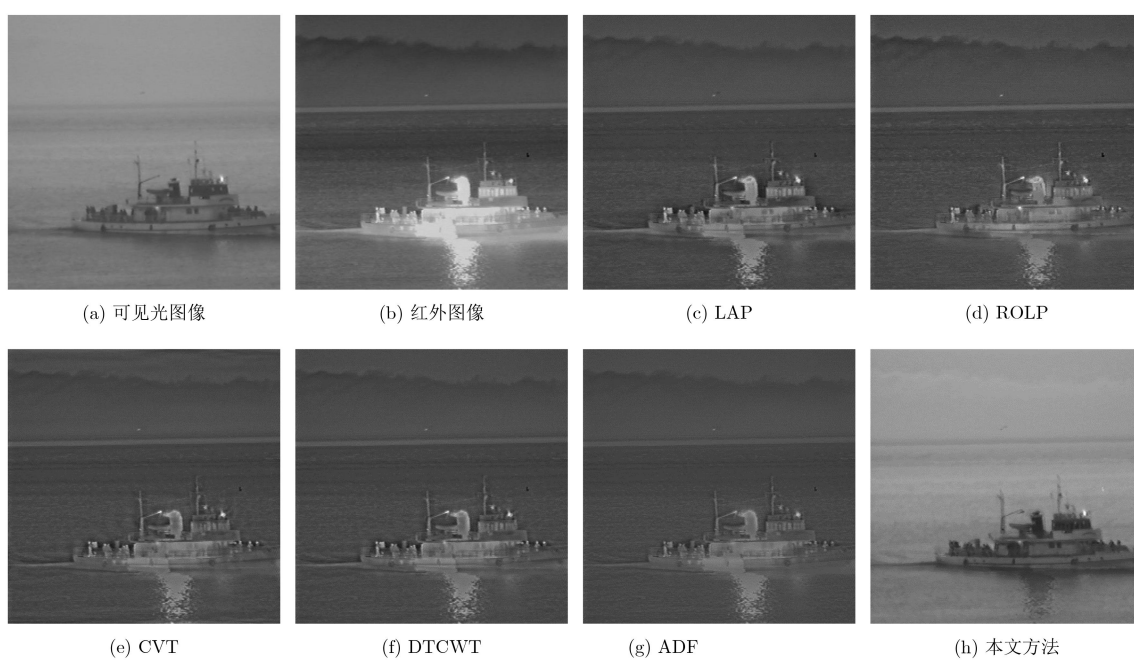


图8 不同方法对源图像“Steamboat”的融合结果比较

的融合图像更适合视觉感知。

下面通过客观评价指标对本文算法的有效性进行验证。上述4组源图像融合结果的客观性能指标如表1所示。从表1的客观评价数据可见,本文算法在均值、标准差和信息熵上都高于其它5种方法,说明该融合规则性能更好。为了更好的评价,图9给出了评价指标平均值的柱状图,从图中可以发现本文方法在3种指标上较其它方法均有较大幅度提升。

此外,算法耗时情况是评价图像融合方法优劣的关键问题,表2给出了不同方法的运行时间对

比。通过表2数据可知,LAP处理时间相对较少,但是其融合效果较差。本文方法运行时间优于ROLP,CVT,DTCWT和ADF方法,并且处理时间在0.2 s以内,可满足实时处理需求。

5 结论

常规多尺度融合方法无法显示最优视觉信息且计算复杂度高,为此,本文将灰度变换与两尺度相结合,提出一种改进的夜视图像融合方法。该方法在融合之前,先利用红外图像像素值作为指数因子对可见光图像进行对比度增强,突出暗处隐藏信

表 1 不同融合方法的客观性能指标

图像	评价指标	LAP	ROLP	CVT	DTCWT	ADF	本文方法
Quad	$\hat{\mu}$	52.5067	55.5025	51.9005	51.8983	51.7756	70.1690
	σ	31.5616	28.2624	25.1804	25.2682	21.9894	34.3756
	E_f	6.4729	6.1093	6.1692	6.1586	6.0398	6.7689
UNcamp	$\hat{\mu}$	90.8149	96.3052	91.0868	91.0788	91.1387	124.2739
	σ	29.1292	27.7301	26.9391	26.2760	23.2265	38.3262
	E_f	6.6550	6.5508	6.5310	6.4847	6.2865	7.2638
Kaptein	$\hat{\mu}$	82.1788	86.1979	82.1010	82.0766	82.0353	122.6444
	σ	36.2649	35.7918	34.1582	33.6152	31.6902	51.6181
	E_f	6.7763	6.7911	6.7779	6.7054	6.6047	7.4176
Steamboat	$\hat{\mu}$	110.9204	113.3709	110.9161	110.9148	110.9183	163.6281
	σ	14.0743	13.8319	12.4700	12.3160	11.0786	26.4028
	E_f	5.3071	5.3595	5.2087	5.1377	5.0049	5.9645

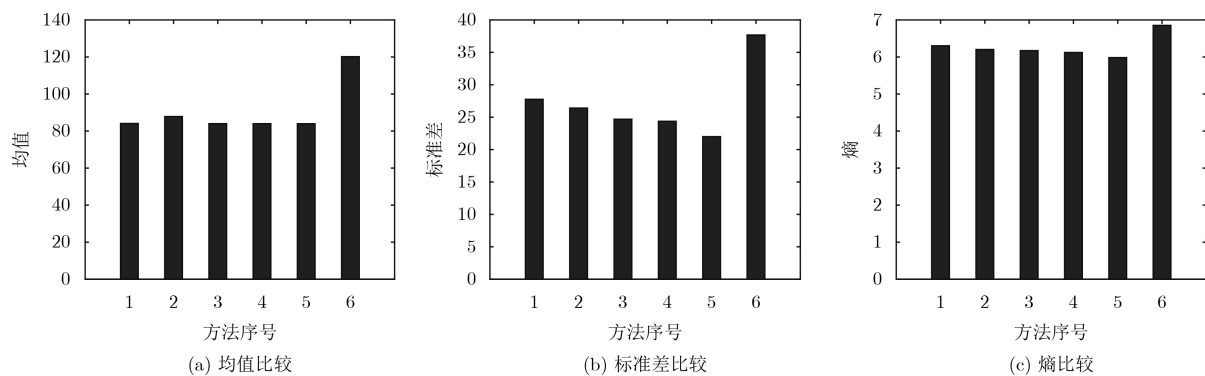


图 9 不同方法的客观性能指标平均值比较

表 2 处理时间对比(s)

图像	大小	LAP	ROLP	CVT	DTCWT	ADF	本文方法
Quad	496×632	0.0193	0.1931	1.9994	0.5288	0.9267	0.1681
UNcamp	270×360	0.0094	0.1076	1.2281	0.2480	0.3225	0.1021
Kaptein	450×620	0.0203	0.1919	1.8308	0.4891	0.8570	0.1341
Steamboat	510×505	0.0127	0.1771	1.7049	0.4434	0.8472	0.1192
平均		0.0247	0.1674	1.6908	0.4273	0.7384	0.1309

息。增强之后, 再与原始可见光图像融合, 进一步突出在可见光波段中获得的特征。与传统多层分解方法不同, 本文应用均值滤波对源图像进行两尺度分解, 得到基础层和细节层。对于细节层, 采用基于视觉权重图的方法进行融合, 可以有效保留源图像视觉上重要信息。实验结果表明, 该方法在视觉质量和客观评价方面均优于其他融合方法。

参 考 文 献

- [1] 冯鑫, 张建华, 胡开群, 等. 基于变分多尺度的红外与可见光图像融合[J]. 电子学报, 2018, 46(3): 680–687. doi: [10.3969/j.issn.0372-2112.2018.03.025](#).
FENG Xin, ZHANG Jianhua, HU Kaiqun, *et al.* The infrared and visible image fusion method based on variational multiscale[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2018, 46(3): 680–687. doi: [10.3969/j.issn.0372-2112.2018.03.025](#).
- [2] 江泽涛, 吴辉, 周晓玲. 基于改进引导滤波和双通道脉冲发放皮层模型的红外与可见光图像融合算法[J]. 光学学报, 2018, 38(2): 112–120. doi: [10.3788/aos201838.0210002](#).
JIANG Zetao, WU Hui, and ZHOU Xiaoling. Infrared and visible image fusion algorithm based on improved guided filtering and dual-channel spiking cortical model[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(2): 112–120. doi: [10.3788/aos201838.0210002](#).
- [3] LI Jinxi, ZHOU Dingfu, YUAN Sheng, *et al.* Modified image fusion technique to remove defocus noise in optical scanning holography[J]. *Optics Communications*, 2018, 407(15): 234–238. doi: [10.1016/j.optcom.2017.08.057](#).
- [4] YIN Xiang and MA Jun. Image fusion method based on entropy rate segmentation and multi-scale decomposition[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(1): 1–8. doi: [10.3788/LOP55.011011](#).
- [5] LI Shutao, KANG Xudong, and HU Jianwen. Image fusion with guided filtering[J]. *IEEE Transactions on Image Processing: A Publication of the IEEE Signal Processing Society*, 2013, 22(7): 2864–2875. doi: [10.1109/TIP.2013.2244222](#).
- [6] LEWIS J J, O'CALLAGHAN R J, NIKOLOV S G, *et al.* Pixel- and region-based image fusion with complex wavelets[J]. *Information Fusion*, 2007, 8(2): 119–130. doi: [10.1016/j.inffus.2005.09.006](#).
- [7] KUMAR B K S. Image fusion based on pixel significance using cross bilateral filter[J]. *Signal, Image and Video Processing*, 2015, 9(5): 1193–1204. doi: [10.1007/s11760-013-0556-9](#).
- [8] 谢伟, 周玉钦, 游敏. 融合梯度信息的改进引导滤波[J]. 中国图象图形学报, 2016, 21(9): 1119–1126. doi: [10.11834/jig.20160901](#).
XIE Wei, ZHOU Yuchin, and YOU Min. Improved guided image filtering integrated with gradient information[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2016, 21(9): 1119–1126. doi: [10.11834/jig.20160901](#).
- [9] ZUO Yujia, LIU Jinghong, BAI Guanbing, *et al.* Airborne infrared and visible image fusion combined with region segmentation[J]. *Sensors*, 2017, 17(5): 1–15. doi: [10.3390/s17051127](#).
- [10] TAO Li, NGO Hau, ZHANG Ming, *et al.* A multisensory image fusion and enhancement system for assisting drivers in poor lighting conditions[C]. Proceedings of the 34th Applied Imagery and Pattern Recognition Workshop, Washington, USA, 2005: 106–113. doi: [10.1109/AIPR.2005.9](#).
- [11] CHANDRASHEKAR L and SREEDEVI A. Advances in biomedical imaging and image fusion[J]. *International Journal of Computer Applications*, 2018, 179(24): 1–9. doi: [10.5120/ijca2018912307](#).
- [12] LIU Yu, CHEN Xun, PENG Hu, *et al.* Multi-focus image fusion with a deep convolutional neural network[J]. *Information Fusion*, 2017, 36(7): 191–207. doi: [10.1016/j.inffus.2016.12.001](#).
- [13] 刘峰, 沈同圣, 马新星. 交叉双边滤波和视觉权重信息的图像融合[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(4): 1005–1013. doi: [10.3969/j.issn.0254-3087.2017.04.027](#).
LIU Feng, SHEN Tongsheng, and MA Xinxing. Image fusion via cross bilateral filter and visual weight information[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(4): 1005–1013. doi: [10.3969/j.issn.0254-3087.2017.04.027](#).
- [14] ZHAO Jufeng, FENG Huajun, XU Zhihai, *et al.* Detail enhanced multi-source fusion using visual weight map extraction based on multi scale edge preserving decomposition[J]. *Optics Communications*, 2013, 287(2): 45–52. doi: [10.1016/j.optcom.2012.08.070](#).
- [15] LIU Zhaodong, CHAI Yi, YIN Hongpeng, *et al.* A novel multi-focus image fusion approach based on image decomposition[J]. *Information Fusion*, 2017, 35(5): 102–116. doi: [10.1016/j.inffus.2016.09.007](#).
- [16] 孙彦景, 杨玉芬, 刘东林, 等. 基于内在生成机制的多尺度结构相似性图像质量评价[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(1): 127–134. doi: [10.11999/JEIT150616](#).
SUN Yanjing, YANG Yufen, LIU Donglin, *et al.* Multiple-scale structural similarity image quality assessment based on internal generative mechanism[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(1): 127–134. doi: [10.11999/JEIT150616](#).
- [17] LI Jun, SONG Minghui, and PENG Yuanxi. Infrared and visible image fusion based on robust principal component

- analysis and compressed sensing[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2018, 89(3): 129–139. doi: [10.1016/j.infrared.2018.01.003](https://doi.org/10.1016/j.infrared.2018.01.003).
- [18] 刘国军, 高丽霞, 陈丽奇. 广义平均的全参考型图像质量评价池化策略[J]. 光学精密工程, 2017, 25(3): 742–748. doi: [10.3788/OPE.20172503.0742](https://doi.org/10.3788/OPE.20172503.0742).
- LIU Guojun, GAO Lixia, and CHEN Liqi. Pool strategy for full-reference IQA via general means[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(3): 742–748. doi: [10.3788/OPE.20172503.0742](https://doi.org/10.3788/OPE.20172503.0742).
- [19] 曲怀敬, 李健. 基于混合统计建模的图像融合[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2017, 29(5): 838–845. doi: [10.3969/j.issn.1003-9775.2017.05.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-9775.2017.05.007).
- QU Huaijing and LI Jian. Image fusion based on statistical mixture modeling[J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2017, 29(5): 838–845. doi: [10.3969/j.issn.1003-9775.2017.05.007](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-9775.2017.05.007).
- [20] 朱攀, 刘泽阳, 黄战华. 基于DTCWT和稀疏表示的红外偏振与光强图像融合[J]. 光子学报, 2017, 46(12): 213–221. doi: [10.3788/gzxb20174612.1210002](https://doi.org/10.3788/gzxb20174612.1210002).
- ZHU Pan, LIU Zeyang, and HUANG Zhanhua. Infrared polarization and intensity image fusion based on dual-tree complex wavelet transform and sparse representation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(12): 213–221. doi: [10.3788/gzxb20174612.1210002](https://doi.org/10.3788/gzxb20174612.1210002).
- 朱浩然: 男, 1987年生, 博士生, 研究方向为图像融合、图像增强等.
- 刘云清: 男, 1970年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为自动控制与测试技术等.
- 张文颖: 女, 1988年生, 博士生, 研究方向为光电测量与精密仪器等.