

基于子带分解多尺度 Retinex 的红外图像 自适应细节增强

李 毅^{1,2} 张云峰^{1*} 李 宁¹ 方艳超¹ 吕春雷¹ 于国权¹ 陈 娟¹

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为实现高动态范围红外图像压缩和高亮区与阴影区细节增强, 提出一种基于子带分解多尺度 Retinex 自适应细节增强方法。利用子带分解多尺度 Retinex 获取三个独立光谱子带; 利用引导滤波将各子带分为细节层和基础层; 之后依据子带特性设计细节增强权值基函数, 自适应实现红外图像细节增强; 针对输出图像平滑区灰度不均匀特点, 自适应求取 Gamma 曲线实现灰度映射。实验结果表明: 经本文算法处理后图像阴影区与高亮区细节得到明显增强, 全局视觉效果良好。客观测评结果表明: 本文算法有效增强图像细节信息, 并且与经典基于双边滤波的细节增强算法比较, 本文算法耗时没有增加。

关键词 图像处理; 红外图像; 细节增强; 子带分解; 引导滤波

中图分类号 TP391 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0512001

Adaptive Detail Enhancement for Infrared Image Based on Subband- Decomposed Multi-Scale Retinex

Li Yi^{1,2} Zhang Yunfeng¹ Li Ning¹ Fang Yanchao¹ Lü Chunlei¹ Yu Guoquan¹ Chen Juan¹

¹Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun, Jilin 130033, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract An adaptive detail enhancement method based on subband-decomposed multi-scale Retinex is proposed to deal with high dynamic range compression of infrared images and detail enhancement in both high light regions and dim regions. Three independent spectrum subbands using subband-decomposed multi-scale Retinex are gained. Then guided image filter is applied to get detail layer and base layer from each subband. Later the basis weight function for detail enhancement is proposed according to characteristic of separate spectrum subband. Adaptive detail enhancement is achieved with basis weight function. In order to eliminate the nonuniformity of gray intensity in the outcome image, a new adaptive way to get Gamma curve for gray value remapping is put forward. Experimental results show that the detail of the enhanced images is upgraded greatly in both high light regions and dim regions, and have a satisfied visual effect. Objective evaluation parameters illustrate that the proposed algorithm can effectively enhance detail of infrared images. In addition, the time consuming is not lengthened compared to other algorithms in the experiment.

Key words image processing; infrared images; detail enhancement; sub-band decomposition; guided image filter

OCIS codes 100.2000; 110.3080; 100.2980; 110.1085

收稿日期: 2014-11-14; 收到修改稿日期: 2014-12-28

基金项目: 国家自然科学基金(61205143)、吉林省科技厅重点项目(20110329)

作者简介: 李 毅(1988—), 男, 博士研究生, 主要从事实时图像处理方面的研究。E-mail: leey2009@qq.com

导师简介: 陈 娟(1962—), 女, 研究员, 博士生导师, 主要从事光电测量、伺服控制等方面的研究。

E-mail: chenjuan@mail.ccit.edu.cn

*通信联系人。E-mail: zyfcjomp@sohu.com

1 引 言

红外热像仪利用热辐射成像原理,能够全天候工作,广泛应用于视频监控、空中预警和气象监测等方面。兼顾传感器灵敏度和探测场景动态范围,热像仪一般采用高动态范围(HDR)数据(14 bit/16 bit)表达图像信息。实际显示设备基本为8bit显示器,需要将图像动态范围压缩(DRC)为8位数据。DRC处理必然导致信息的丢失,所以设计DRC算法的一个期望是:处理后图像凸显原始图像细节信息并具有良好的视觉效果^[1-2]。常用的DRC算法为线性拉伸(AGC)和直方图均衡(HE)类技术^[2-3]。AGC技术将原始高动态范围数据线性压缩为8位数据,在原始图像中合适选取AGC起点和终点可获取较好的视觉效果,但是原始图像细节信息没有得到凸显和增强。HE算法利用累积直方图进行灰度重新映射。为减小累积直方图的灰度级合并,发展出多种改进算法,如局部直方图均衡算法、平台直方图均衡算法及对比度限制的直方图均衡(MCLAHE)算法^[4-6]。基于图像融合的方法也常用于红外图像细节增强^[7-10]。近年来,研究者们探索出多种红外图像细节增强算法,基本可分为以下三类:1)基于直方图类型,如修订的对比度限制直方图均衡和直方图分段均衡增强^[11-12];2)频域变换类型,将图像变换为相应的频域,分为高低频部分单独处理后再进行反变换,此类型算法计算复杂度较高但表现优于直方图类型,典型代表为:Contourlet、Shearlet、小波等^[13-14];3)空域分层处理类型,这类算法通过空域滤波将高动态范围图像分为基础层和细节层,对各层进行单独处理。频域变换得到高低频部分单独处理算法与空域分层处理算法都具有较好的红外图像细节增强效果,但第三类算法适应性更强,广受研究者关注。代表算法双边滤波与动态范围分割(BF&DRP)^[15]以及其发展出来的双边滤波与细节增强显示(BF&DDE)等^[16-18]。但是该类算法也存在一些不足:细节部分采用非锐化掩膜(UM)等技术增强,往往导致强边缘处细节部分过增强或阴影处细节信息欠增强,处理后图像强边缘处存在拼接痕迹而阴影处细节无法得到有效增强。针对上述问题,本文提出一种基于子带分解多尺度 Retinex 的红外图像细节自适应增强算法,首先采用子带分解多尺度 Retinex 获取独立的子带图像,其次利用引导滤波(GF)获取各子带图像的基础层和细节层,之后利用获取的独立子带图像特性设计权值基函数实现子带图像的细节层自适应增强,最后针对处理后图像特点设计自适应 Gamma 校正,获取良好视觉效果图像。

2 本文算法

本文算法实现框架如图1所示。

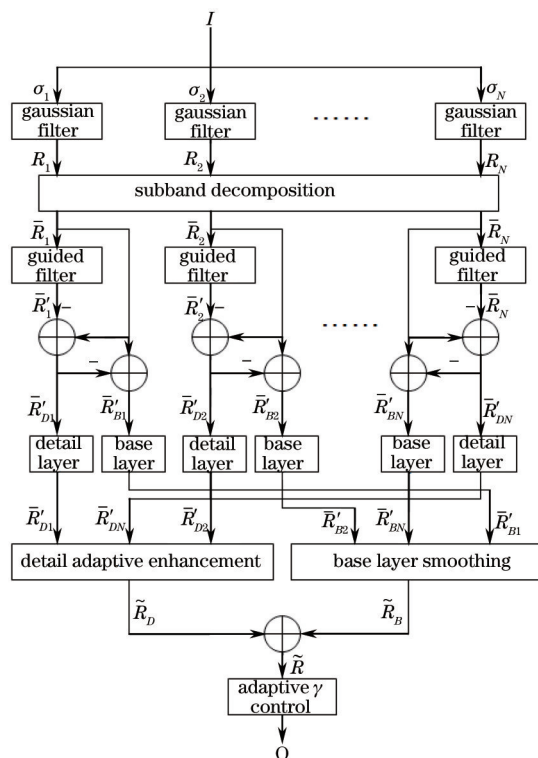


图1 本文算法结构图

Fig.1 Block diagram of the proposed algorithm

2.1 子带分解多尺度 Retinex

Retinex 理论是 Land^[19]在 1965 年基于人眼视觉色彩恒常性提出的,认为图像由两部分组成:照度部分和反射光部分。Retinex 理论是通过估计照度部分还原出反映场景本质的反射光部分。由 Retinex 发展出多种算法^[20],其中 Jang 等^[21-22]提出基于混合灰度变换函数的子带分解多尺度 Retinex(SDMSR_HITF),SDMSR_HITF 将各光谱段分解出来单独处理,兼顾高光部分和阴影部分,最后将处理后各光谱段进行融合。为获取 HDR 图像更多细节信息,参考 SDMSR_HITF 算法的子带分解部分将 HDR 红外图像分解为独立的子光谱段进行处理。SDMSR_HITF 算法中对应的 Retinex 输出形式为

$$R_n = h_log(I) - h_log(F_n \times I), \quad (1)$$

式中 $h_log(x)$ 函数为混合灰度变换函数, R_n 为第 n 个尺度 Retinex 输出结果, $F_n = k \exp[-(x^2 + y^2)/\sigma_n^2]$ 为对应第 n 个尺度的高斯函数, σ_n 为对应尺度因子, I 为原始输入图像。由(1)式计算可得到 N 尺度对应的 N 个 Retinex 输出 $R_1, R_2 \dots R_N$ 。 N 个 Retinex 输出可获取 N 个子带,

$$\bar{R}_n = \begin{cases} R_1, & n = 1 \\ R_n - R_{n-1}, & 2 \leq n \leq N \end{cases} \quad (2)$$

具体实现如图 2 所示。代表高频信息的子带分布在右侧,低频信息子带在左侧。

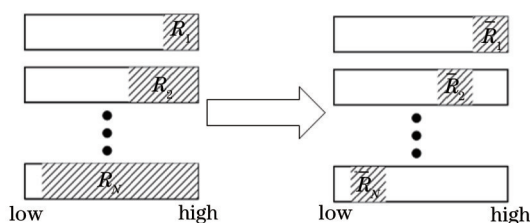


图 2 子带分解示意图

Fig.2 Sketch map of sub-band decomposition

结合红外成像特点和大气对红外波段透过率影响,选取 $N=3$,尺度因子分别为 $\sigma_1=7, \sigma_2=140, \sigma_3=274$ 。通过计算(2)式可获得 3 个独立的子带图像。

2.2 子带分层处理

细节信息提取一般是先通过具有保持边缘特性的低通滤波器获取平滑信息,再计算原图与平滑信息的差值得到。BF&DRP^[15]和 BF&DDE^[16]采用低通双边滤波器实现图像平滑。双边滤波具有较好的边缘保持特性,但双边滤波器在强边缘处灰度与边缘周边灰度差别大,受高斯核函数灰度计算影响,强边缘被平滑不能很好实现边缘保持。同时双边滤波器空间计算和灰度计算分别仅受单一固定参数(σ_s 和 σ_r)影响,无法很好适应人眼与场景相关的多尺度特性^[18]。双边滤波器表达式如为

$$W_{ij}^{BF} = \frac{1}{k_i} \exp\left[-\frac{|x_j - x_i|}{\sigma_s}\right] \exp\left[-\frac{|I_j - I_i|}{\sigma_r}\right]. \quad (3)$$

引导滤波^[23]基于局部线性模型的一种边缘保持滤波器,通过邻域像素之间的近似线性表达关系实现滤波。引导滤波器表达式为

$$W_{ij}^{GF} = \frac{1}{|\omega|^2} \sum_{k:(i,j) \in \omega_k} \left[1 + \frac{(I_i - \mu_k)(I_j - \mu_k)}{\sigma_k^2 + \xi} \right]. \quad (4)$$

为防止强边缘处细节信息计算错误,导致边缘在细节自适应增强操作中过增强,采用了引导滤波器。以第二个子带 \bar{R}_1 为例,双边滤波和引导滤波表现如图 3 所示,依据文献[15]选取双边滤波参数 $\sigma_s=2, \sigma_r=110$;引导滤波参数可以参考文献[23]: $r=5, \xi=0.04$ 。图 3(b)为 \bar{R}_1 第 240 行数据,由图 3(c)和 3(d)可以看出,引导滤波比双边滤波有更好的边缘跟随特性,图 3(e)是使用双边滤波获取的细节信息,在强边缘处仍存在大量的细节信息。图 3(f)是引导滤波获取的细节信息,在强边缘处基本没有多余的细节信息,有效避免了细节增强环节中强边缘的增强。

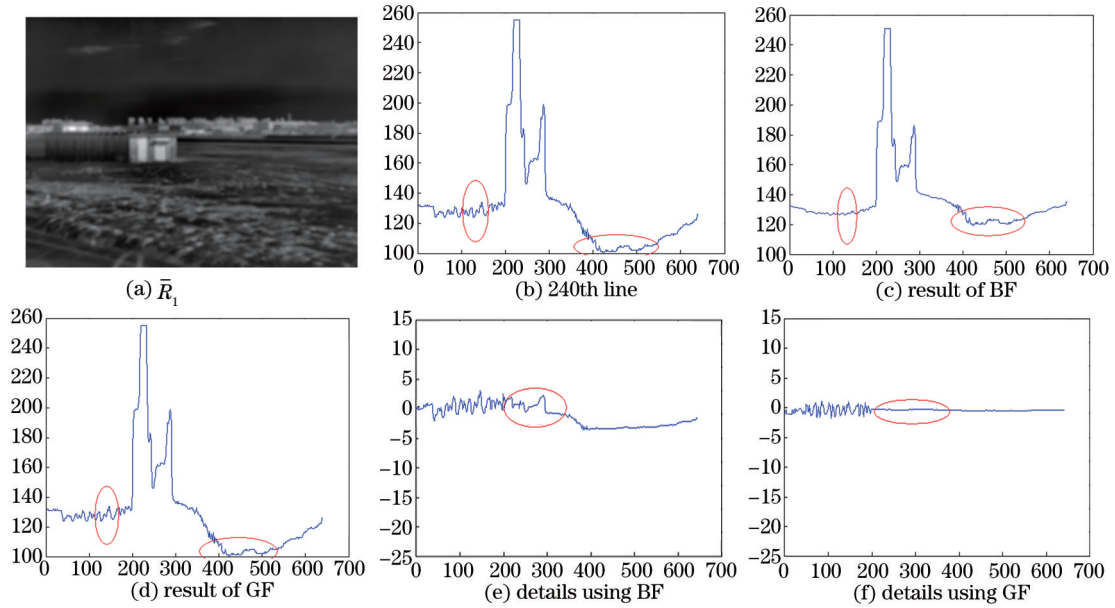


图3 双边滤波和引导滤波说明

Fig.3 Illustration for bilateral filter and guided filter

采用引导图像获取滤波结果 \bar{R}'_n 后, 细节层可计算为

$$\bar{R}'_{Dn} = \bar{R}_n - \bar{R}'_n \quad (5)$$

基础层为

$$\bar{R}'_{Bn} = \bar{R}_n - \bar{R}'_{Dn} \quad (6)$$

各层计算结果图像如图4(e)、(f)所示。

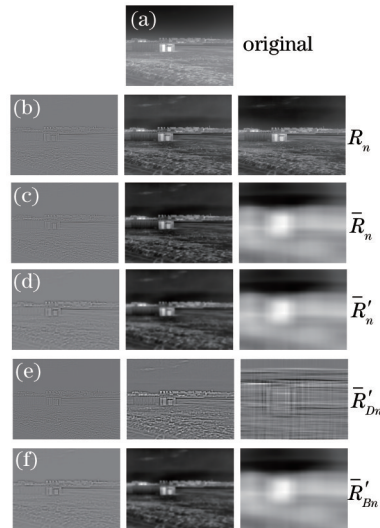


图4 算法中间结果图

Fig.4 Inter results of proposed algorithm

2.3 自适应细节增强

文献中对细节层处理采用不同方法进行增强处理, 文献[24]采用UM技术, 固定的增益值容易导致平滑区噪声放大, 强边缘处过增强; 文献[15]采用Gamma值大于1的Gamma校正, 无法兼顾增强细节和抑制强边缘; 文献[16]使用人眼屏蔽函数自适应增益控制, 当细节与强边缘在计算人眼屏蔽函数值同一窗口, 该窗口内细节信息不会被增强。因此, 提出了对各层细节部分采用自适应增强: 平滑区少增强或不增强, 细节区实现增强, 边缘区不增强或抑制。设计自适应细节增强的权值基函数为

$$f(x) = \frac{1}{\alpha + (T/|x|)^\beta}, \quad (7)$$

式中 β 为衰减速度参数,用来辅助控制细节增强范围,衰减速度大细节增强范围小,反之细节增强范围大。图 5(a)为固定增强范围限制参数 α 的不同 β 对应衰减速度, $|\beta|$ 大时,衰减过快细节区增强不足, $|\beta|$ 小时,衰减过慢边缘处得到增强。对 \tilde{R}'_{D0} 处理选取 $\alpha=7$ 采用不同的 β 值进行说明,结果如图 6 所示。图 6(a)~(d)为不同的 β 值对应的子带图像细节层增强结果,图 6(e)~(h)为对应的最终图像增强效果。 $\beta=-4$ 和 $\beta=-5$ 时权值函数衰减过快,细节增强不足,图 6(a)和图 6(b)中天空云团、地面草坪和楼群边缘模糊,导致最终增强图像与原图一样模糊。 $\beta=-2$ 时权值函数衰减慢,平滑区、细节区和强边缘区都得到增强,如图 6(d)所示,天空噪声和楼群边缘得到过增强,导致图 6(h)图像整体锐化,视觉效果较差, $\beta=-3$ 时平滑区少增强、细节区细节有效增强和强边缘区细节抑制,最终增强效果:阴影区细节得到增强,全局视觉效果良好。综合考虑选取了 $\beta=-3$ 。 α 为增强范围限制参数,依据各子带代表的光谱特征,选取合适的增强范围限制参数。高频子带细节信息丰富边缘突出,需要增强范围小,低频子带细节信息少边缘不明显,需要增强范围大。由(7)式可知,随着 $(T/|x|)^\beta$ 变化, α 越大, $f(x)$ 变化小,反之 α 越小, $f(x)$ 变化大,通过选择不同的 α 值可实现各子带合适的增强范围,如低频子带需要增强范围大,应选取大的 α 值, $f(x)$ 变化小,调节增强系数可同时增强子带图像平滑区、细节区和边缘区细节信息。针对不同子带光谱特性,选取高中低频子带 α 分别为 7,140,274,图 5(a)为 $\beta=-3$ 对应不同 α 值增强曲线。 T 为增强阈值参数,决定了细节增强最大点,参考文献[25]选取方法,选取 $T=0.325$ 。

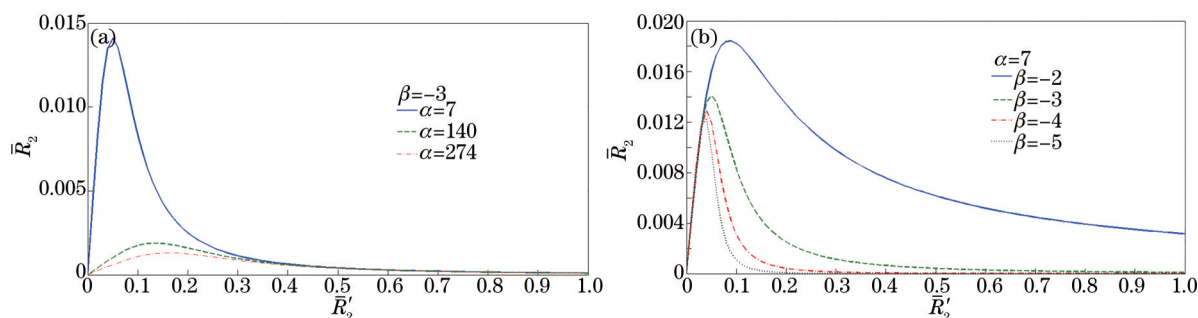


图5 不同参数对应子带细节层权值函数细节增强特性

Fig.5 Characteristics of weight functions enhanced detail layer of sub-bands for different parameters

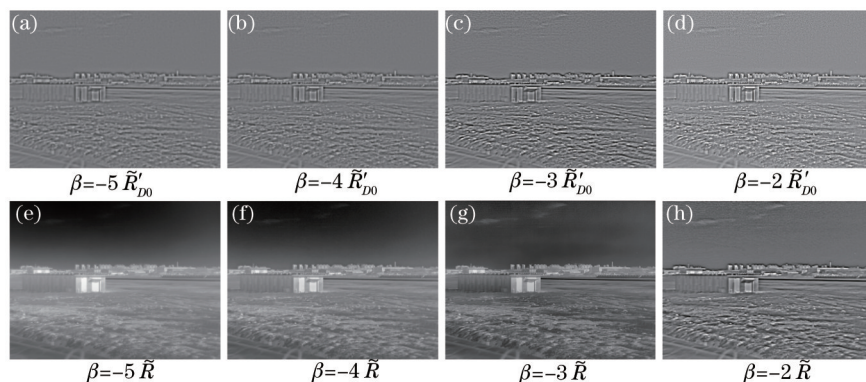


图6 不同 β 值对应细节层子带图像和输出图像增强效果

Fig.6 Enhancement results of detail layer subband image and output image for different β

实际采用自适应细节增强权值函数为

$$x \cdot f(x) = x \cdot \frac{G}{\alpha + (T/|x|)^\beta} + B, \quad (8)$$

式中 G 为细节信息最大增强倍数,不同子带选取细节层放大倍数应不同,选取高频子带细节层放大倍数 $G=10$ 。 B 为细节基值,为防止增强不足设置 $B=0.8 \times \tilde{R}'_{Dn}$ 。将各子带细节层和基础层融合叠加得到自适应细节增强结

果如图 7(c)所示,全局图像视觉效果柔和,细节在地面高光区的草坪与天空阴影区中的云团得到凸显;图 7(b)对各细节层采用 UM 技术增强结果,细节明显增强,但全局锐化严重,天空平滑区噪声放大,视觉效果较差。

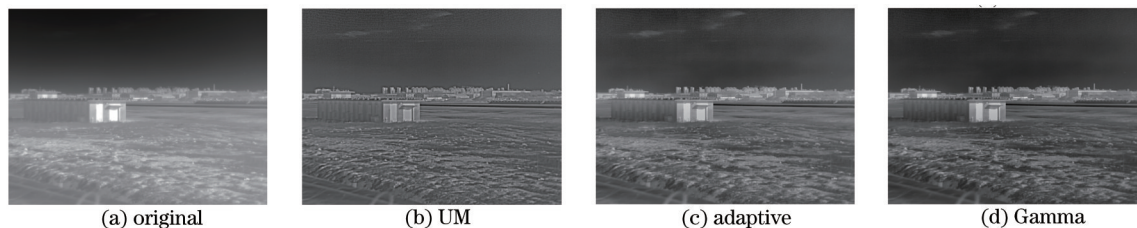


图 7 不同红外图像比较

Fig.7 Comparison of different infrared images

2.4 自适应 Gamma 校正

采用子带自适应细节增强后,受多尺度子带分层影响,图像平滑区会显示出非均匀性,如图 7(c)实验结果中天空背景处。进一步采用自适应的 Gamma 校正抑制背景非均匀性。红外图像成像特点:辐射能量强对应灰度值大,反之能量小处灰度值小。图像中灰度值大的像素点多表明图像发白,反之灰度值小的像素点多图像发暗,可通过以下方法进行校正:统计图像的直方图 $H(n)$ 和全局均值 V_{mean} ,计算 $H(n)$ 中累积个数达到总像素个数一半时对应灰度级 V_{med} 。

$$V_{\text{mean}} = \sum_{i=0}^{l-1} i \times H(i) / (W \times H), \quad (9)$$

$$V_{\text{med}} = i_M, \quad \text{when } \sum_{i=0}^{i_M} H(i) \geq (W \times H) / 2, \quad (10)$$

式中 W , H 分别为图像的宽和高。若 V_{mean} 与 V_{med} 相差不大则认为图像正常, l 是可显示的最大灰度级个数, $l = 256$ 。若 $V_{\text{mean}} > V_{\text{med}}$ 则图像过暗,反之 $V_{\text{mean}} < V_{\text{med}}$ 则图像过亮。设定有如下关系的 Gamma 值 γ :

$$\gamma = \begin{cases} \frac{V_{\text{mean}}}{V_{\text{med}}}, & |V_{\text{mean}} - V_{\text{med}}| > 5, \\ 1, & |V_{\text{mean}} - V_{\text{med}}| \leq 5 \end{cases}, \quad (11)$$

$$O = I_{\text{in}} \times \left(\frac{I_{\text{in}}}{l} \right)^{\gamma}. \quad (12)$$

输入图像 I_{in} 经 Gamma 校正后图像 O 如图 7(d)所示,图像亮度下降,平滑区非均匀性得到去除。

3 实验及分析

实验在 Windows XP 系统、Intel i7 四核 3.4 GHz 处理器、内存 4 GB 工控机上使用 Matlab R2010b 实现。选取两幅红外图像进行实验:室外军用卡车 Camion[472 pixel × 368 pixel, 图 8(a)]和室内人 Boy [640 pixel × 480 pixel, 图 9(a)]。为验证多尺度子带分解 Retinex 自适应细节增强(ADESDMSR)算法有效性,选取的对比算法有:双平台直方图均衡(DPHE)^[6]和小波变换(WT)^[26],多尺度 Retinex(MSR)^[20]以及 BF&DRP^[15]。DPHE 是 HE 技术改进,设定了上限下限平台值,减小 HE 技术带来的过增强,DPHE 对全局图像有一定的增强效果,除目标外阴影区域细节信息也得到增强,但是不能根本消除累计直方图带来的过增强现象,如图 8(b)中车身细节和图 9(b)人物衣服水杯细节均丢失。图像经小波变换获取高频部分和低频部分,随后单独处理两部分信息,最后采用系数重构得到结果图像,结果如图 8(c)和图 9(c)所示。两图中阴影区和目标细节都得到增强,但整体图像视觉效果不好,并且在图 9(c)中灰度变化剧烈处出现振铃效应。MSR 将三个单尺度 Retinex 结果相加,保留了小尺度丰富的细节信息和大尺度平滑特点,处理结果图 8(d)和图 9(d)阴影处得到细节增强,全局图像平滑细腻,视觉效果较好,但是细节信息没有实现有效的增强,如图 8(d)车尾和图 9(d)人物身体细节信息模糊,较原图细节信息减少。BF&DRP 是有效的红外图像细节增强方法,处理后结果细节突出,视觉效果较好,但是由于双边滤波对强边缘无很好的跟随特性和 BF&DRP 对细节层采用 Gamma 值大于 1 的校正,导致在强边缘处易出现拼接痕迹,在图 8(e)车尾与树林交界处及图 9(e)人与后面墙壁交界处都出现

了一些拼接痕迹。ADESDMSR 由于采用了子带分解 Retinex 获取各光谱段子带图像,充分利用到各子带光谱段特性,对各子带图像细节层采用了自适应细节增强处理,合理的增强细节信息,最后利用红外图像成像特点使用自适应 Gamma 校正,如图 8(f)和 9(f)所示:结果图像全局视觉效果良好,阴影区明显增强,细节信息得到有效挖掘。

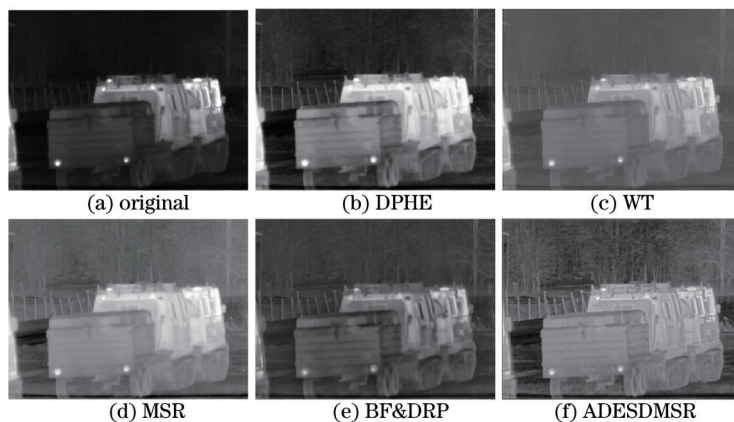


图 8 不同算法处理结果

Fig.8 Results of different algorithms

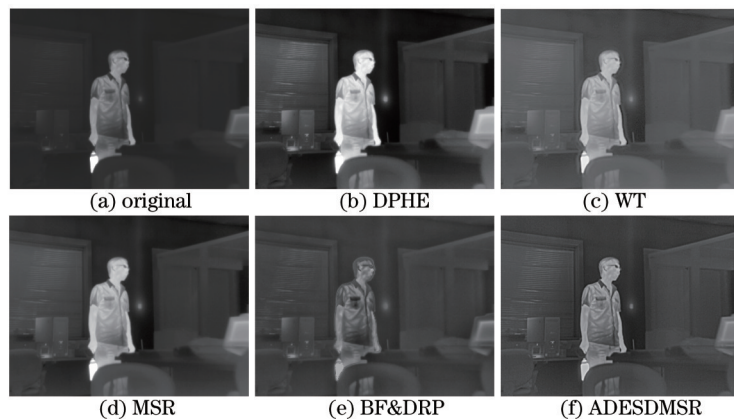


图 9 不同算法处理结果

Fig.9 Results of different algorithms

为了说明 ADESDMSR 细节增强效果和有效性,选取信息熵和计算耗时作为客观评价指标。信息熵定义如下:

$$E = - \sum_{i=0}^{L-1} p_i \log p_i, \quad (13)$$

式中 p_i 为第 i 个灰度级在图像中出现的概率。实验图像 Camion 和 Boy 经各算法处理后图像对应信息熵和计算耗时如表 1 所示。与其他算法处理结果比较,经 ADESDMSR 处理后图像获得最高的信息熵[除图 9(c)外],说明经 ADESDMSR 增强后图像信息量最大,细节信息明显增强,与主观观测结果一致。在计算耗时方面,处理同一幅图像各算法表现如表 1 所示:DPHE 耗时最少;WT 方法耗时最长;ADESDMSR 耗时适中,略低于经典 BF&DRP。

表 1 红外图像细节增强效果定量评价表

Table 1 Quantitative evaluation table of detail enhancement effects of infrared image

		DPHE	WT	MSR	BF&DRP	ADESDMSR
Camion	E	6.0347	6.3729	6.7638	6.3383	7.2442
	Time /s	0.0708	44.7007	0.1386	0.8178	0.6963
Boy	E	4.7834	6.1704	5.9559	5.3347	5.9857
	Time /s	0.0748	143.9161	0.2448	1.0908	1.0329

4 结 论

通过分析高动态范围红外图像特点,提出采用子带分解多尺度 Retinex 得到独立的光谱子带,兼顾高光区与阴影区细节获取,利用引导滤波良好的边缘保持特性实现子带分层,设计出细节层自适应增强的权值基函数,采用自适应 Gamma 校正方式消除处理后图像平滑区的灰度不均匀现象。实验主客观评测表明:ADESDMSR 有效的增强图像细节信息,并能凸显高光区和阴影区细节,经 ADESDMSR 处理后图像视觉效果良好。

参 考 文 献

- 1 Silverman J. Display and enhancement of infrared images[C]. Image Processing and its Applications, 1992., International Conference on. IET, 1992: 345-348.
- 2 Jin Weiqi, Liu Bin, Fan Yongjie, *et al.*. Review on infrared image detail enhancement techniques[J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 12(40): 2521-2527.
金伟其, 刘 斌, 范永杰, 等. 红外图像细节增强技术研究进展[J]. 红外与激光工程, 2012, 40(12): 2521-2527.
- 3 Wu Zepeng, Xuan Ming, Jia Hongguang, *et al.*. Infrared image dynamic range compression and contrast enhancement based on optimal mapping curve[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(12): 1209002.
吴泽鹏, 宣 明, 贾宏光, 等. 基于最优映射曲线的红外图像动态范围压缩和对比度增强方法[J]. 中国激光, 2013, 40(12): 1209002.
- 4 Vickers V E. Plateau equalization algorithm for real-time display of high quality infrared imagery[J]. Opt Eng, 1996, 35(7): 1921-1926.
- 5 Lai R, Yang Y T, Wang B J, *et al.*. A quantitative measure based infrared image enhancement algorithm using plateau histogram[J]. Opt Commun, 2010, 283(21): 4283-4288.
- 6 Liang K, Ma Y, Xie Y, *et al.*. A new adaptive contrast enhancement algorithm for infrared images based on double plateaus histogram equalization[J]. Infrared Physics & Technology, 2012, 55(4): 309-315.
- 7 Li Dan, Wang Hongtao. Fuzzy image enhancement based on dual chaotic quantum particle swarm algorithm[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(10): 101102.
李 丹, 王洪涛. 基于双混沌量子粒子群算法的模糊图像增强研究[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(10): 101102.
- 8 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.
- 9 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.
- 10 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.
- 11 Mohan S, Ravishankar M. Modified Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization Based on Local Contrast Enhancement for Mammogram Images[M]. Heidelberg: Springer, 2013: 397-403.
- 12 Abdullah-Al-Wadud M, Kabir M H, Dewan M A A, *et al.*. A dynamic histogram equalization for image contrast enhancement[J]. Consumer Electronics, IEEE Transactions on, 2007, 53(2): 593-600.
- 13 Karalı A O, Okman O E, Aytac T. Adaptive image enhancement based on clustering of wavelet coefficients for infrared sea surveillance systems[J]. Infrared Physics & Technology, 2011, 54(5): 382-394.
- 14 Zhan Bichao, Wu Yiquan, Ji Shouxin. Infrared image enhancement method based on stationary wavelet transformation and retinex [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(10): 2788-2793.
占必超, 吴一全, 纪守新. 基于平稳小波变换和 Retinex 的红外图像增强方法[J]. 光学学报, 2010, 30(10): 2788-2793.
- 15 Branchitta F, Diani M, Corsini G, *et al.*. Dynamic-range compression and contrast enhancement in infrared imaging systems[J]. Opt Eng, 2008, 47(7): 076401.
- 16 Zuo C, Chen Q, Liu N, Display and detail enhancement for high dynamic range infrared images[J]. Opt Eng, 2011, 50(12): 127401-127409.
- 17 Jia Hongguang, Wu Zepeng, Zhu Mingchao, *et al.*. Infrared image enhancement based on generalized linear operation and bilateral filter[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(12): 3272-3282.

- 贾宏光, 吴泽鹏, 朱明超, 等. 基于广义线性运算和双边滤波的红外图像增强[J]. 光学精密工程, 2013, 21(12): 3272-3282.
- 18 Li Mingtao, Xiang Wei, Zhao Yaohong. Dynamic range compression and detail enhancement of infrared image[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2014, 26(9): 1460-1467.
- 李明涛, 向 伟, 赵耀宏. 红外图像的动态范围压缩和细节增强[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2014, 26(9): 1460-1467.
- 19 Land E H, McCann J J. Lightness and retinex theory[J]. J Opt Soc Am, 1971, 61(1): 1-11.
- 20 Jobson D J, Rahman Z U, Woodell G A. A multiscale retinex for bridging the gap between color images and the human observation of scenes[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(7): 965-976.
- 21 Jang J H, Bae Y, Ra J B. Contrast-enhanced fusion of multisensor images using subband-decomposed multiscale retinex[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 21(8): 3479-3490.
- 22 Jang J H, Kim S D, Ra J B. Enhancement of optical remote sensing images by subband-decomposed multiscale retinex with hybrid intensity transfer function[J]. Geoscience and Remote Sensing Letters, IEEE, 2011, 8(5): 983-987.
- 23 He K, Sun J, Tang X. Guided Image Filtering[M]. Heidelberg: Springer, 2010: 1-14.
- 24 Jiang X, Yao H, Zhang S, *et al.*. Night video enhancement using improved dark channel prior[C]. Image Processing (ICIP), 2013 20th IEEE International Conference on. IEEE, 2013: 553-557.
- 25 Feng Ce, Dai Shuling. An improved unsharp masking method for depth map enhancement[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2014, 46(8): 108-112.
- 冯 策, 戴树岭. 一种改进的非锐化掩模深度图像增强算法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2014, 46(8): 108-112.
- 26 Liu X, Zhao J, Wang S. Nonlinear algorithm of image enhancement based on wavelet transform[C]. Information Engineering and Computer Science, 2009. ICIECS 2009. International Conference on. IEEE, 2009: 1-4.

栏目编辑: 苏 岑