

# 一种红外图像细节增强和动态范围压缩处理算法

刘 秀 刘 斌 金伟其 范永杰

(北京理工大学光电学院光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081)

**摘要** 研究了一种基于高斯约束滤波器的图像细节增强算法, 通过高斯约束滤波器将原始红外图像分解为基图和细节图, 并采用  $\gamma$  变换分别对其压缩, 然后将两部分图像重新合成, 从而在保留图像细节的同时有效地使红外场景得到高动态灰度显示。分析了传统非锐化掩模图像增强算法光晕现象产生的原因及新处理方法对光晕现象的抑制过程, 通过对多幅不同场景特征的红外图像测试比较, 表明算法处理效果明显。

**关键词** 图像处理; 红外图像; 数字细节增强; 高斯滤波器; 动态范围压缩

**中图分类号** TP751 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.s100504

## A New Infrared Image Detail Enhancement and Dynamic Range Compression Algorithm

Liu Xiu Liu Bin Jin Weiqi Fan Yongjie

(Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract** A new digital detail enhancement algorithm based on Gaussian and restriction filter is proposed. This algorithm adopts a base component and a detail component extracted by Gaussian and restriction filter, and the two components are compressed through gamma transform to fit the display dynamic range, and then they are recombined to obtain the output-enhancement image. The proposed algorithm is compared with traditional unsharp masking (UM) algorithm and the effectiveness of the proposed algorithm on restricting the ripple phenomenon is shown. Experimental results demonstrate that the proposed algorithm has good performance in detail enhancement.

**Key words** imaging processing; infrared image; digital detail enhancement; Gaussian filter, dynamic range compression

**OCIS codes** 100.0100; 100.2980

## 1 引 言

近年来随着红外焦平面 (IRFPA) 探测器性能的提高和非均匀性校正技术的有效应用, 热成像系统成像质量得到很大改善, 进一步解决红外图像目标与场景细节不清晰现象受到人们的广泛关注。红外图像数字细节增强 (DDE) 技术通过增强目标与背景之间细微结构 (如边缘、轮廓、纹理等) 的对比度来提高对细小目标的探测和识别能力。

常见红外图像细节增强大致可归纳为空域、频

域和基于图像直方图统计的增强算法。空域处理方法如高频增强和非锐化掩模<sup>[1]</sup> (UM) 等; 频域处理方法如基于小波的图像增强方法<sup>[2,3]</sup> 等; 基于图像直方图处理方法如全局直方图均衡化<sup>[4]</sup> (GHE)、基于局部处理的自适应直方图均衡化<sup>[5]</sup> (AHE)、平台直方图均衡化<sup>[6]</sup> (PE)、对比度受限自适应直方图均衡化<sup>[7]</sup> (CLAHE) 和局部交叠子块直方图均衡化<sup>[8,9]</sup> (POSHE) 等。目前 DDE 技术已经在 FLIR 公司实际热成像系统中得到应用<sup>[10]</sup>, 取得很好的应

**收稿日期**: 2010-08-23; **收到修改稿日期**: 2010-11-09

**基金项目**: 国家自然科学基金 (60877060) 资助课题。

**作者简介**: 刘 秀 (1981—), 男, 博士研究生, 主要从事光电成像及其信号处理技术等方面的研究。

E-mail: bit\_liuxiu@bit.edu.cn

**导师简介**: 金伟其 (1961—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事微光与红外技术、光电图像处理 and 光电检测技术等方面的研究。E-mail: jinwq@bit.edu.cn

用效果,并展现出广泛的应用前景。

本文将研究空域高动态范围(HDR, 12 bit 或 14 bit)红外图像的细节增强与压缩处理算法,对于传统 UM 算法易产生光晕、亮暗背景中的微细目标增强不明显以及传统显示设备显示灰度级较小(256 级, 8bit) 的问题,研究非线性压缩方法,将 HDR 图像映射到 8bit 并获得有利于观察、判断、识别的显示。

## 2 空域非锐化掩模红外图像细节增强方法

空域细节增强是一种直观、容易理解的处理方法,典型的 UM 处理方式

$$f_{out}(i, j) = f(i, j) + \alpha \cdot \{f(i, j) - L_p[f(i, j)]\}, \quad (1)$$

式中  $f_{out}(i, j)$  为处理结果图像,  $f(i, j)$  是原始输入图像,  $\alpha$  为细节增强的权重因子,  $L_p$  表示平滑滤波过程,常用的空间平滑(低通)滤波器如高斯低通滤波器、平板滤波器等。非锐化掩模处理方法适用于场景包含的细节信息对比度低的红外图像。

UM 方法具有处理简单、运行效率高、效果明显、可实现硬件实时处理等优势。但是 UM 算法在亮暗交替的灰度变化较大边缘处产生明显的光晕现象,产生这种现象的原因是在亮暗交替处通过低通线性滤波器,原图像中小的灰度处输出的基图灰度值较大,对应的细节图中该点灰度过度偏小,反之原图像中大的灰度处输出的基图灰度值较小,对应的细节图中该点灰度过度偏大,导致细节图像不合理的增强,最终产生光晕现象,如图 1(b)对图 1(a)的处理在亮暗交替边缘处(位置 1, 2)有明显光晕现象,灰度差别越大光晕现象越严重。

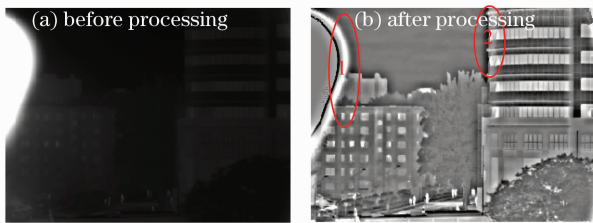


图 1 传统 UM 方法图像细节增强

Fig. 1 Image detail enhancement of traditional UM

文献[11]中采用起固定低通平滑作用的高斯滤波器和根据图像空间灰度分布生成的高斯滤波器组合成的滤波器称为双边滤波器。双边滤波器(BF)<sup>[11]</sup>具有较好的细节增强效果,合理地选择处理参数,可克服边缘光晕现象,提高细节增强的程度。

但是双边滤波器中根据图像空间灰度分布生成、起约束伪影防止过度增强作用的高斯滤波器的生成过程是指数运算,运算量较大,难以实现硬件实时处理。

## 3 一种基于高斯约束滤波器的红外细节增强及 HDR 压缩算法

假设  $f(i, j)$  为原始 HDR 红外图像,基于高斯约束滤波器的红外细节增强及 HDR 压缩算法可表示为

$$f_{out}(i, j) = (1 - \alpha) \cdot P[f_{base}(i, j)] + \alpha \cdot P[f_{detail}(i, j)], \quad (2)$$

式中  $f_{out}(i, j)$  代表处理后的结果图像,  $f_{base}(i, j)$  是  $f(i, j)$  经高斯约束滤波器滤波的基图像;  $f_{detail}(i, j) = f(i, j) - f_{base}(i, j)$  表示原图像  $f(i, j)$  与基图像  $f_{base}(i, j)$  的差,称为细节图像;函数  $P[\ ]$  表示高动态图像(12 bit 或 14 bit) 到 0~255 灰度级(8 bit)的非线性映射,  $\alpha$  为基图与细节图像合成过程中细节图像的权重。显然,算法的关键在高斯约束滤波器和 HDR 压缩算法。

### 3.1 高斯约束低通滤波器

构造的获取基图的滤波处理过程为

$$f_{base}(i, j) = \frac{\sum_{m=-(\omega-1)/2}^{(\omega-1)/2} \sum_{n=-(\omega-1)/2}^{(\omega-1)/2} s(i-m, j-n) \cdot f(i-m, j-n)}{\sum_{m=-(\omega-1)/2}^{(\omega-1)/2} \sum_{n=-(\omega-1)/2}^{(\omega-1)/2} s(i-m, j-n)}, \quad (3)$$

式中  $s(i, j)$  定义为高斯约束低通滤波器(GRLPF), 且

$$s(i-m, j-n) = g(m, n) \cdot r(i-m, j-n), \quad (4)$$

式中  $g(m, n)$  是高斯低通滤波器,  $r(i-m, j-n)$  是根据以原图像点  $(i, j)$  为中心  $\omega \times \omega$  ( $\omega$  为滤波器窗口的尺寸) 窗口内像素的灰度分布生成的约束滤波器, 分别定义为

$$g(m, n) = \exp\left(-\frac{m^2 + n^2}{2\sigma^2}\right), \quad (5)$$

$$r(i-m, j-n) = \frac{T}{[f(i-m, j-n) - f(i, j)]^2 + T}, \quad (6)$$

式中  $m = -(\omega-1)/2, \dots, -1, 0, 1, \dots, (\omega-1)/2$ ;  $n = -(\omega-1)/2, \dots, -1, 0, 1, \dots, (\omega-1)/2$ ;  $\sigma$  表示方差参数;  $\omega$  为奇数的低通滤波窗口的尺寸; 对于一

帧图像  $T$  为常数, 经过实验,  $T$  可确定为

$$T = 2 \times \{\max[f(i, j)] - \min[f(i, j)]\}, \quad (7)$$

式中  $\max[\ ]$ ,  $\min[\ ]$  函数是求取最大值和最小值。

为了说明 GRLPF 对细节增强和对光晕抑制的作用, 以图 2(a) 原始红外图像的第 156 列为例 (获取图像的探测器参数如表 1 所示), 其对应的灰度分布如图 2(b) 所示, 灰度级从 7000 ~ 8800 跨度约

1800 (整幅图像灰度级从 7000 ~ 9700 跨度约 2700)。该列图像包含了典型的细节信息和场景变化情况, 对照两图可以看出,  $a$  是天空背景中的高亮度的细目标;  $b$  和  $c$  处细线是暗背景中的低对比度细目标;  $d$  是天空和楼交界处的强边缘区域,  $e$  处窗格是亮背景中的低对比度细目标。

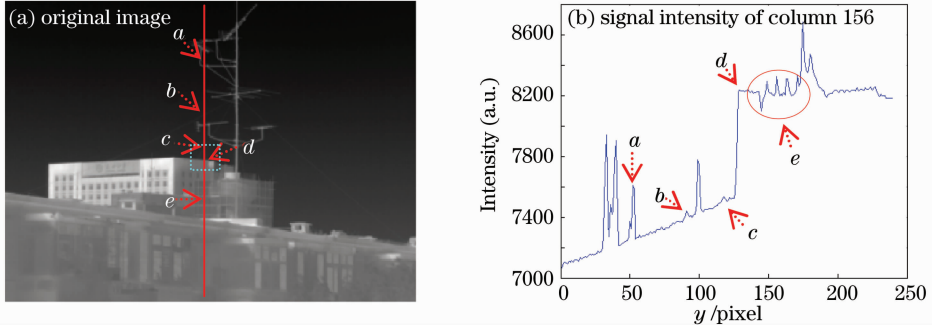


图 2 典型场景高动态范围红外图像

Fig. 2 HDR infrared image of typical scene

表 1 热像仪技术参数说明

Table 1 Technical specifications of the thermal camera

Name	D780B(LWIR)
Detector type	Uncooled
Detector materials	Polycrystalline silicon
Number of pixels	240 × 320
Spectral response / $\mu\text{m}$	8 ~ 14
Pitch / $\mu\text{m}$	35 × 35

将高斯低通滤波器(GSLPF)和 GRLPF 滤波器分别作用于图 2, 分析比较 156 列的处理结果, 处理

中  $\omega=19, \sigma=6$ 。图 3 给出了两种滤波器对图 2 第 156 列的处理结果, 可以看到, 图 3(a), (c) 和 (e) 分别给出 GSLPF 的基图、细节图像和按 (2) 式合成为 8 bit 灰度细节增强图像 ( $\alpha=0.6$ ), 从图中可以看到传统 UM 方法的两个主要缺点: 1) 图 3(e) 中  $b, c, e$  处对应暗背景或亮背景中的低对比度细节增强不够明显; 2) 图 3(e) 中  $d$  处产生明显的光晕现象 [对照图 2(a) 的 156 列和图 3(c) 中该列的灰度分布可以明显发现光晕位置]。再观察第 156 列通过 GRLPF

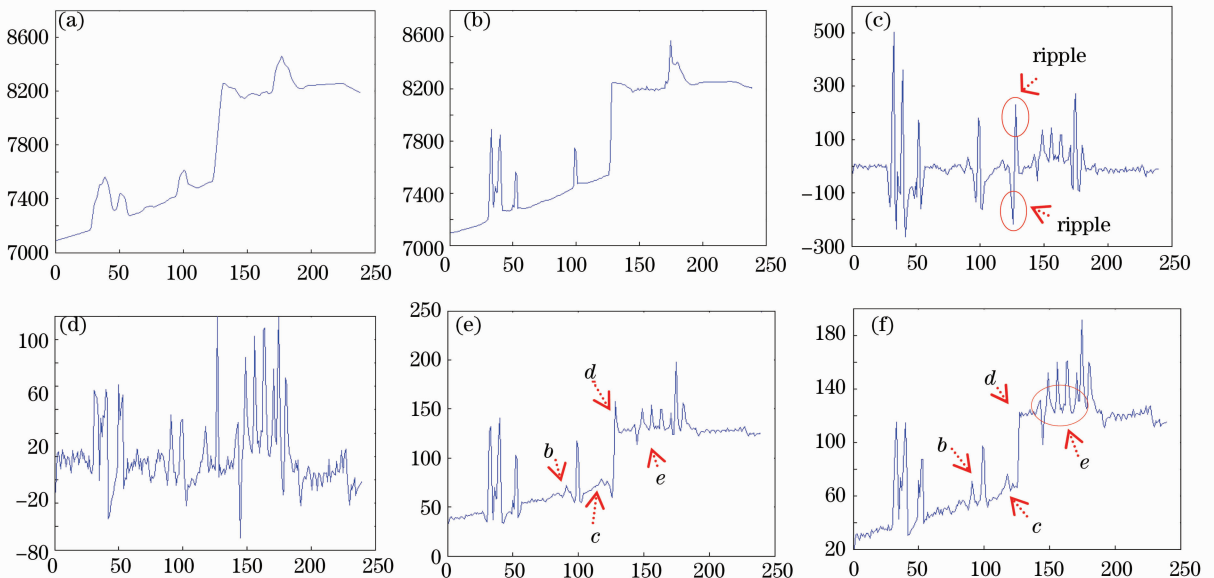


图 3 两种滤波器对图 2 第 156 列的处理结果的比较

Fig. 3 Comparison of the results of column 156 in Fig. 2 obtained from the two filters

处理的结果图 3(b), (d)和(f), 图 3(f)中 *b, c, e* 处暗背景中的细节(电线)和亮背景中的细节(窗户边缘)明显保留且显著增强, 光晕现象得到了明显抑制[图 3(f)中 *d* 处], 即 GRLPF 法有效地解决了传统 UM 方法的两个主要缺点。

### 3.2 HDR 图像非线性压缩

下面说明  $P[f_{\text{base}}(i, j)], P[f_{\text{detail}}(i, j)]$  非线性压缩处理过程, 为了便于描述, 函数  $P[\ ]$  处理的高动态范围图像用  $f(i, j)$  表示

$$P[f(i, j)] = P\{f_{\eta}(i, j) \mid f_{\eta}(i, j) = T[f(i, j)]\} = \frac{D \cdot \{f_{\eta}(i, j) - \min[f_{\eta}(i, j)]\}^{\gamma}}{\{\max[f_{\eta}(i, j)] - \min[f_{\eta}(i, j)]\}^{\gamma}}, \quad (8)$$

式中  $D$  表示输出图像的灰度级范围, 当输出为 8 bit 时  $D = 255$ 。上述处理过程分两步进行, 第一步  $f_{\eta}(i, j) = T[f(i, j)]$  表示令输入图像在高端、低端区域有一定比例  $\{\eta = [\eta_L, \eta_H], \eta_L, \eta_H$  分别代表低

端和高端区域允许饱和的比例\} 的像素饱和, 这样可以有效调节输出图像的动态显示效果。第二步进行 gamma 变换压缩, 对于基图 (gamma 值用  $\gamma_B$  表示) 取  $\gamma_B < 1$ , 便于扩展基图的低端、压缩基图中的高端, 一定程度上进一步增强基图中的细节信息; 对于细节图 (gamma 值用  $\gamma_D$  表示) 取  $\gamma_D > 1$ , 便于压缩细节图的低端、扩展细节图中的高端, 一定程度上抑制细节图中的噪声。

综上所述, 基于高斯约束滤波器的红外细节增强及 HDR 压缩算法的整体处理流程如图 4 所示。由于 GRLPF 不仅可实现与 BF 相当的处理效果, 而且滤波器生成过程是乘除运算; 实验测得在相同的处理平台下, 运算处理速度可达到双边滤波器的 2.5 倍, 可望在硬件处理平台上实现实时处理。

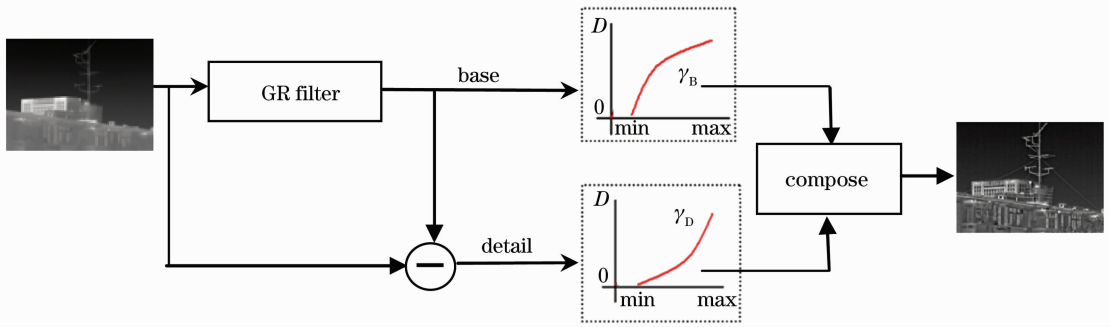


图 4 基于高斯约束滤波器的红外细节增强及 HDR 压缩算法流程

Fig. 4 Framework of infrared image detail enhancement and HDR compression based on GR filter

## 4 实际红外图像处理与评价

以图 2(a)所示的红外图像为例进行算法说明, 该图像获取自长波热像仪(技术参数如表 1 所示), 数据深度 14 bit。算法处理过程中, 通过对  $\alpha$  的选择可控制细节增强的程度, 一般选择  $0.5 < \alpha < 0.7$  都可获得较好的处理结果,  $\alpha$  越大图像细节增强越明显, 但过大容易产生图像过度锐化。  $\alpha$  越小图像细节增强程度相应减小, 图像越趋于平滑、细腻。采

用本文算法处理图 2(a)的基图、细节图和细节增强图如图 5 所示。图像灰度范围由原来的约 2700 灰度级压缩约 11 倍到 0~255 灰度级, 且图像细节得到明显保留和增强。

为进一步测试算法的适应性, 采用法国 CEDIP 制冷中波热像仪(技术参数如表 2 所示)采集了图 6~8 三组高动态范围红外目标场景图像(其中分别包括原始图像的自动增益控制 (AGC) 压缩图像、

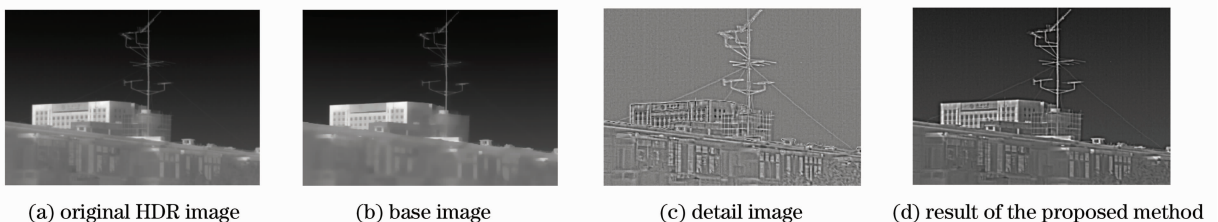


图 5 处理示例 1

Fig. 5 Image test results of demo 1



GHE 处理图像和本文方法处理图像)。三组图像均含有丰富的细节信息,经过本文方法处理的图像具有更好的细节增强效果。采用信息熵(IE)<sup>[12]</sup>对这 3

组图像进行的评价结果如表 3 所示,信息熵越大表明信息越丰富,表 3 结果也表明本文算法保留并增强了目标场景的图像细节。

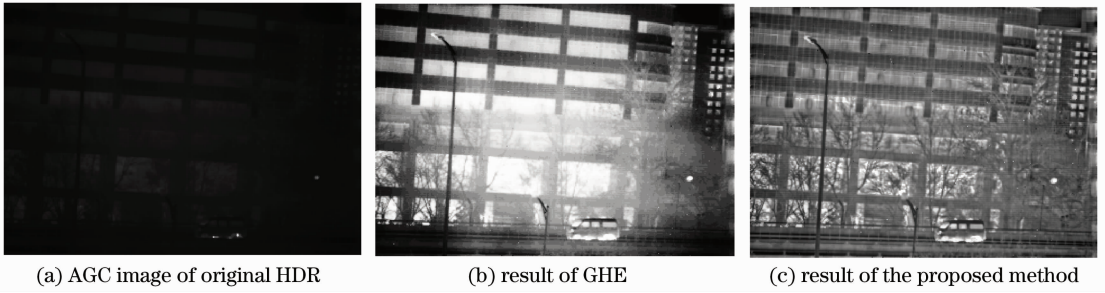


图 6 处理示例 2

Fig. 6 Image test results of demo 2

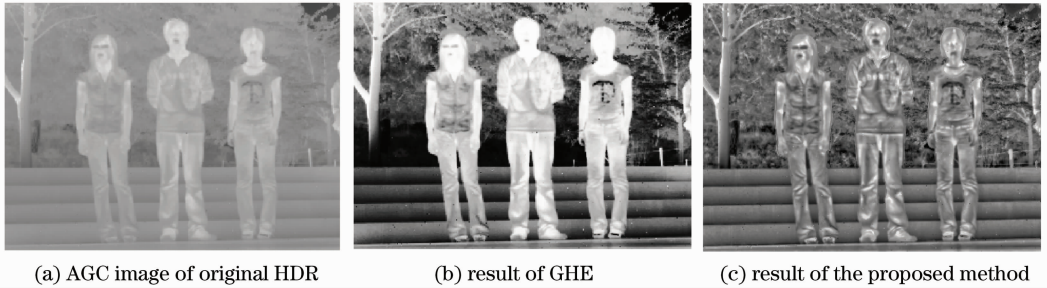


图 7 处理示例 3

Fig. 7 Image test results of demo 3

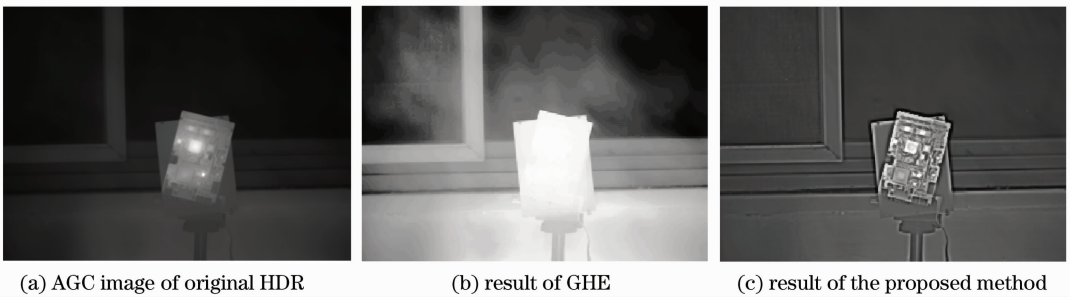


图 8 处理示例 4

Fig. 8 Image test results of demo 4

表 2 热像仪技术参数说明

Table 2 Technical specifications of the thermal camera

Name	Cedip(MWIR)
Detector type	Cooled
Detector materials	InSb
Number of pixels	240×320
Spectral response / $\mu\text{m}$	3.6~5.1
Pitch / $\mu\text{m}$	30×30

表 3 处理结果信息熵比较

Table 3 Comparison with IE of processing result

	Original images	GHE processing	Proposed method
Fig. 6	4.4778	4.3618	7.2179
Fig. 7	6.9183	5.9013	7.3028
Fig. 8	5.8700	5.5432	6.1709

## 5 结 论

对于传统 UM 算法在图像细节增强中容易产生光晕现象的问题,提出了一种基于高斯约束滤波器的红外细节增强及 HDR 压缩算法,算法对于对比度低、动态范围大、细节丰富的红外图像处理效果明显。采用的高斯约束滤波器与双边滤波器 BF 具有相当的图像细节增强效果,但处理量明显减小,并能有效抑制光晕现象;采用  $\gamma$  变换对 HDR 图像进行压缩,从而使算法在提高图像对比度的同时,更侧重于图像细节的提取和强化。

本文已开始算法的硬件实施研究,并已在某数字信号处理器(DSP)处理硬件平台上初步实现了算法简化运行,取得了一定的效果,通过算法及硬件平台的进一步优化,有望实现实时视频处理。鉴于细节增强技术对热成像系统目标探测和识别的有效作用<sup>[13]</sup>,该技术将逐步走向多种热成像技术的应用领域。

## 参 考 文 献

- 1 Andrea C. Gonzalez, Richard E. Woods. Digital Image Processing (Third Edition) [M]. Englewood Cliffs: Prentice hall, 2008
- 2 Peng Qin, Runtao Ding. New Image detail-preserving filter based on multi-threshold decomposition[C]. *SPIE*, 2003, **5286**: 803~806
- 3 Changjiang Zhang, Xiaodong Wang, Haran Zhang. Global and local contrast enhancement algorithm for image using wavelet neural network and stationary wavelet transform [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(11): 636~639
- 4 Andrea Polesel, Giovanni Ramponi, V. John Mathews. Image enhancement via adaptive un-sharp masking [J]. *IEEE Trans. Image Process.*, 2009, **9**(3): 505~510
- 5 Kentaro kokufuta, Tsutomu Maruyama. Real-time processing of local contrast enhancement on FPGA [C]. IEEE International Conference on Field Programmable Logic and Applications, 2009, 288~293
- 6 Virgil E. Vickers. Plateau equalization algorithm for real-time display of high-quality infrared imagery [J]. *Opt. Engng.*, 1996, **35**(7): 1921~1926
- 7 Ching-His Lu, Hong-Yang Hsu, Lei Wang. A new contrast enhancement technique by adaptively increasing the value of histogram[C]. IEEE International Workshop on Imaging Systems and Techniques, 2009, 407~411
- 8 Joung-Youn Kim, Lee-Sup Kim, Seung-Ho Hwang. An advanced contrast enhancement using partially overlapped sub-block histogram equalization [J]. *IEEE Trans. Circuits and Systems for Video Technology*, 2001, **11**(4): 475~484
- 9 Jin Weiqi, Li Li. A kind of image real-time enhance processing technology of visible light with low contrast [C]. *SPIE*, **7384**: 738433
- 10 Digital Image Detail Enhancement Technique Introductions [EB/OL]. www.flir.com  
数字图像细节增强(DDE)技术说明[EB/OL]. www.flir.com
- 11 Francesco Branchitta, Marco Diani, Giovanni Corsini. New technique for the visualization of high dynamic range infrared images Source[J]. *Opt. Engng.*, 2009, **48**(9): 096401
- 12 Tarik Arici, Salih Dikbas, Yucel Altunbasak. A histogram modification framework and its application for image contrast enhancement [J]. *IEEE Trans. Image Process.*, 2009, **18**(9): 1921~1935
- 13 Fan Yongjie, Jin Weiqi, Liu Bin *et al.*. An analysis of digital detail enhancement (DDE) technology developed by FLIR [J]. *Infrared Technology*, 2010, **32**(3): 161~164  
范永杰, 金伟其, 刘 斌等. FLIR 公司热成像细节增强 DDE 技术的分析[J]. *红外技术*, 2010, **32**(3): 161~164