

文章编号 1004-924X(2013)12-3272-11

# 基于广义线性运算和双边滤波的红外图像增强

贾宏光<sup>1</sup>, 吴泽鹏<sup>1,2\*</sup>, 朱明超<sup>1</sup>, 宣 明<sup>1</sup>, 刘 慧<sup>1</sup>

(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:**针对传统的基于反锐化掩模法的红外图像增强方法噪声干扰较高且有光晕现象,提出了基于广义线性运算和双边滤波(BF)的红外图像增强方法。首先,通过双边滤波得到图像的基础层部分。接着,设计了广义线性运算模型,并在这个运算模型下对图像细节进行了非线性分割、去噪和自适应放大。最后,将经过动态范围压缩的图像基础层和自适应增强的图像细节层非线性叠加,得到最后的增强图像。另外,针对传统评价增强图像质量的平均对比度指标的缺点,提出了由局部到整体的改进平均对比度评估方法。3组对比实验观察和定量分析表明,本文提出的方法在对红外图像有效动态范围压缩和细节放大的同时,很好地抑制了红外图像的干扰噪声和光晕现象,得到的结果非常适用于实际红外热像仪的后端图像处理。

**关 键 词:** 红外图像; 图像增强; 广义线性运算; 双边滤波

**中图分类号:** TP391.4; TP751 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132112.3272

## Infrared image enhancement based on generalized linear operation and bilateral filter

JIA Hong-guang<sup>1</sup>, WU Ze-peng<sup>1,2</sup>, ZHU Ming-chao<sup>1</sup>, XUAN Ming<sup>1</sup>, LIU Hui<sup>1</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

\* Corresponding author, E-mail: wuzepeng@mail.ustc.edu.cn

**Abstract:** As classical infrared image enhancement methods based on Unsharp Masking(UM) suffer from terrible noise interference and halo effect, a new approach based on generalized linear operation and Bilateral Filtering (BF) was proposed here. Firstly, the elemental part of the image was extracted by using the BF and then operation models based on generalized linear operation were designed for the following enhancement. In the new operation scheme, the image details were nonlinearly segmented, denoised and amplified and the dynamic range of the elemental part was compressed while the detailed part was enhanced adaptively. Finally, the enhanced image was obtained by adding the processed elemental and detailed parts together nonlinearly. Furthermore, an assessment method for image quality was presented. Unlike the classical metric which only considers the average contrast enhancement, the modified one involves both local and general average contrast enhancements. Both the comparison ex-

收稿日期: 2013-05-06; 修订日期: 2013-07-27.

基金项目: 中国科学院知识创新工程国防科技创新重要项目(No. YYYJ-1122)

periments and measurement index indicate that the proposed method can compress the dynamic range of infrared images, amplify their details, and suppress the noise interference and halo effect. This technique has a significant contribution to the posterior image processing of thermal infrared cameras.

**Key words:** infrared image; image enhancement; generalized linear operation; Bilateral filter

## 1 引言

随着红外成像技术的成熟<sup>[1-3]</sup>,当今红外热像仪都具有极高的动态范围(High Dynamic Range, HDR),最高能达到 14 bit,甚至更高(本文中均以 14 bit 为例)。较高的动态范围能够保证热像仪在温度变化极大的场景中,仍然能够清晰地分辨场景内温度变化较小的细节。但是高动态范围会导致原始采集图像与后端设备间存在不匹配问题。由于传统的后端显示和处理设备都是基于 8 bit 灰度级图像,因此,红外图像的动态范围压缩(Dynamic Range Compression, DRC)是红外热像仪后端图像处理极其重要的一环。这样的压缩过程必须遵守 3 个原则:(1)原始图像的所有细节都要尽可能得到保留,甚至放大;(2)对灰度级上梯度变化较大区域的灰度适当地进行压缩;(3)处理后的图像要有较好的视觉效果。

DRC 处理技术近年来得到了很大的发展<sup>[4-6]</sup>,其中,线性映射(Automatic Gain Control, AGC)和直方图均衡(Histogram Equalization, HE)的方法应用最为广泛。AGC 方法是在移除干扰噪声后,将 14 bit 的原始数据线性地映射到 8 bit 的像素值上。HE 则是将原始图像的概率密度函数值(Probability Density Function, PDF)较大的灰度级分散到更多的输出灰度级上,对 PDF 较小的灰度进行合并或压缩,从而增强图像的 DRC 和对比度;但是 HE 方法也存在一些显而易见的缺点,例如细节容易丢失,图像局部对比度过大,视觉效果差,噪声过度增强等。为了克服这些缺点,S. M. Pizer<sup>[7]</sup>等人提出了自适应直方图均衡算法(Adaptive Histogram Equalization, AHE),其利用滑动窗口对局部区域进行 HE 处理,从而避免了图像其它区域的影响;另外,在细节信息的保留上,AHE 算法相对 HE 处理有了非常大的改进,但这种方法依然会带来较大的噪声。后来,K. Zuiderveld<sup>[8]</sup>等人在总结 AHE 的基础上,提出了对比度受限的自适应直方图均衡<sup>[9]</sup>

(Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization, CLAHE)处理方法,该方法通过设定一个 PDF 阈值来抑制一些不希望得到的噪声。总体上讲,基于直方图的方法在对比度的增强方面相对 AGC 有更好的效果。但是无论是 AGC,还是基于直方图的方法都没有对细节进行单独处理,故缺少了必要的细节控制方法。

针对 AGC 和 HE 处理方式对细节控制的不足,一些更为复杂的算法也得到了发展。例如 Branchitta<sup>[10-11]</sup>等人在 CLAHE 的基础上发展出来了平衡型 CLAHE 处理方法(BCCE),该算法可以实现动态范围压缩,同时,很好地考虑了图像的细节信息。在文献[9]中,Branchitta 结合双边滤波<sup>[12-16]</sup>(Bilateral Filtering, BF)提出了 BF&DRP 算法,该算法先通过双边滤波将图像细节部分很好地从原始图像中分离出来,再对细节层部分进行单独处理。实验结论表明,BF&DRP 算法相对传统方法(包括 BCCE 处理方式)效果更好。Zuo<sup>[17]</sup>等人在 Branchitta 工作的基础上,在细节控制和动态范围压缩上又进行了进一步优化。

总体来说,BF&DRP 和 Zuo 的方法都具有较好的红外图像增强处理效果,但是它们仍存在一些不足:(1)正如其他反锐化掩模法(Unsharp Mask, UM)一样,这种算法由于对基层部分和细节部分的处理方式不一致,使得算法的参数控制稍不合适,就会使增强后的图像产生光晕现象;(2)从原始图像和双边滤波得到的基础层图像分离出细节部分图像时,容易引入噪声,甚至放大噪声;(3)细节图像和基层图像分别处理完后需重新叠加,由于叠加过程中会出现数据溢出的情况(2 个 8-bit 的数据相加不再是 8 bit),因此,图像必须进行重新映射,这就增加了算法复杂度。另外,在(2)处引入的噪声对这个过程有很大的影响,往往会导致图像的对比度过低,或者过高。

针对上文提出的 3 个不足,笔者提出了一种基于广义线性运算和双边滤波的红外图像增强算法。首先定义了一个广义线性运算模型,在这个

运算框架下可以定义输入和输出的灰度级,例如对于两个 N-bit 数据,无论进行相加、相减还是放大操作,其结果仍然可以是 N-bit 灰度级。在分析此运算的特性后,利用这种运算实现了图像的分割和细节自适应放大以及基础层部分的动态范围压缩,在此过程中很好地消除了光晕现象,并抑制了图像细节的干扰噪声。最后,对实现动态范围压缩的基础层图像和自适应放大的细节图像进行非线性叠加,得到了增强后的图像。实验结果表明,本文的算法成功地避免了上文 UM 算法的 3 个缺点,处理后的图像质量有了极大的提高。

## 2 双边滤波及 UM 理论

### 2.1 双边滤波原理

BF 是 C. Tomasi 等人提出的一种在保持图像边缘的基础上去除高斯类噪声的图像处理技术。Michael Elad 在其文章[13]中深入分析了 BF 的本质以及它和贝叶斯估计准则之间的关系。得出如下结论:BF 巧妙地结合了图像像素在空间上的位置信息和像素值信息的相似度,它具有简单、非迭代、局域的特点。与一般的非线性滤波器相比,具有很好的边缘保持效果。双边滤波可以用如下形式定义:

$$f^{\text{BF}}(x, y) = \frac{1}{k(x, y)} \sum_{x', y'} s(x - x', y - y') \cdot g[f^{\text{In}}(x', y') - f^{\text{In}}(x, y)] \cdot f^{\text{In}}(x', y'), \quad (1)$$

$$k(x, y) = \sum_{x', y'} s(x - x', y - y') \cdot g[f^{\text{In}}(x', y') - f^{\text{In}}(x, y)], \quad (2)$$

其中:  $k(x, y)$  是一个归一化因子;  $f^{\text{In}}(x, y)$  为输入的原始图像;  $f^{\text{BF}}(x, y)$  表示原始图像经过双边滤波之后的结果; 符号  $(x', y')$  表示位置  $(x, y)$  的邻域像素点; 函数  $s(x, y)$  和  $g(\alpha)$  是一个低通的滤波器。通常情况下,  $s(x, y)$  和  $g(\alpha)$  选择为高斯函数:

$$s(x, y) = e^{-\frac{(x^2 + y^2)}{2\sigma_s^2}}, \quad (3)$$

$$g(\alpha) = e^{-\frac{\alpha^2}{2\sigma_g^2}}. \quad (4)$$

将式(3)、式(4)代入式(1)、式(2)可得:

$$f^{\text{BF}}(x, y) = \frac{1}{k(x, y)} \sum_{x', y'} e^{-\frac{[(x-x')^2 + (y-y')^2]}{2\sigma_s^2}} e^{-\frac{[f^{\text{In}}(x', y') - f^{\text{In}}(x, y)]^2}{2\sigma_g^2}} f^{\text{In}}(x', y'), \quad (5)$$

$$k(x, y) = \sum_{x', y'} e^{-\frac{[(x-x')^2 + (y-y')^2]}{2\sigma_s^2}} e^{-\frac{[f^{\text{In}}(x', y') - f^{\text{In}}(x, y)]^2}{2\sigma_g^2}}. \quad (6)$$

式(3)、式(4)的  $\sigma_s$  和  $\sigma_g$  是 2 个高斯函数高斯核的标准差,他们的选择尤为重要。 $\sigma_s$  决定此 BF 函数作用的空间区域范围,  $\sigma_g$  的选择相对  $\sigma_s$  来说更为关键,因为其设置值影响着对后续细节图像的判断。当图像区域内细节变化小于  $\sigma_g$  时, BF 将对这个区域进行平滑模糊化; 当图像区域内细节变化值大于  $\sigma_g$  时,区域内的细节将会得到保留。

### 2.2 反锐化掩模法(UM)

UM 方法是针对图像灰度空间分布实现细节增强的一种直观有效的处理方法。由于在场景内物体轮廓,边缘和细微结构处都会发生灰度值的空间变化,而且这种变化具有非常的高频表现,因此,可以通过特定滤波器将图像高频部分分割出来以实现图像的细节增强处理。UM 算法可以通过下式表示(不失一般性,仅以一维向量表示,高维情况同理类推):

$$\begin{aligned} f_{\text{out}} &= f_{\text{lpf}} + \gamma(f_{\text{In}} - f_{\text{lpf}}), \\ d &= f_{\text{In}} - f_{\text{lpf}} \end{aligned} \quad (7)$$

其中:  $f_{\text{In}}$  表示输入的原始图像,  $f_{\text{lpf}}$  表示输入图像经过线性低通滤波器(LPF)后的输出图像,  $d$  表示图像的细节部分,增益变量  $\gamma$  ( $\gamma > 1$ ) 表示细节图像  $d$  的放大倍数。事实上,图像细节部分  $d$  包含了 3 个方面的信息:①图像的细节信息;②图像的噪声;③图像减去低频信号带来的光晕现象。理想中的  $d$  应该尽可能地包含①中信息,而抑制②和③的干扰。为了实现这个目的,必须寻找一个既对噪声不敏感,又能够保持边缘的滤波器。2.1 小节中的 BF 就是一种简单、效果明显的边缘保持滤波器, BF 对于解决问题③具有很好的效果。在后面的叙述中,本文将会利用 BF 实现边缘保持滤波,对于②中噪声问题,将通过广义线性运算来抑制细节层噪声。

## 3 广义线性运算

### 3.1 广义线性运算设计

从 2.2 小节得知, UM 法会引入较大的噪声和图像的光晕效应。通过实验分析可以发现,这些现象一定程度是在图像分割和叠加时引入的,

为解决这个问题,需要对两幅图像分割和叠加过程进行必要的改进。Deng<sup>[18-19]</sup>等人提出在图像实际处理过程中没有必要遵循固有的加法和减法操作,可以根据实际图像的噪声水平,以及掩模本身的一些特性,根据实际需要设计一些非线性运算。另外,在同态滤波器的设计中,其先将图像进行 log 变换,即将图像数据变换到对数域后,再进行图像的后处理(如低通滤波等)。实验显示,这样的处理效果相对于传统的设计方法有很大的改进。受其启发,在此重新设计了处理过程中的图像运算,基本思想如图 1 所示:

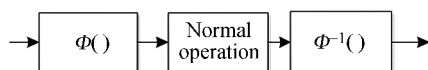


图 1 广义线性运算框图

Fig. 1 Block diagram of generalized linear operation

图 1 中,  $\Phi()$  是一个可自定义的函数,若  $\Phi()$  定义为  $y=x$ ,则上述系统与正常运算无异,即为正常的线性运算。而在实际设计中,  $\Phi()$  一般定义为非线性函数,此时,整个运算框图将不再保持正常的线性运算性质,故而可以称之为广义的线性运算。为此重新定义运算,设定  $\boxed{add}$ ,  $\boxed{sub}$ ,  $\boxed{mult}$  分别表示广义运算的加操作,减操作和乘运算,分别如下式所示:

$$x_1 \boxed{add} x_2 = \Phi^{-1}[\Phi(x_1) + \Phi(x_2)], \quad (8)$$

$$x_1 \boxed{sub} x_2 = \Phi^{-1}[\Phi(x_1) - \Phi(x_2)], \quad (9)$$

$$\alpha \boxed{mult} x_1 = \Phi^{-1}[\alpha \times \Phi(x_1)]. \quad (10)$$

上面 3 式中,  $x_1, x_2$  分别表示 2 路输入信号,其信号可以是一维的,也可以是多维数组;  $\alpha$  是一个实数,  $\Phi()$  根据实际需要定义的一个非线性函数。从文献[19]可以知道,在图像复原中采用 log-Ratio 接近的方法可以系统地解决图像运算后结果超出范围这一问题。受其提示,针对图像增强的不同要求,分别设计了如下的  $\Phi()$  函数:

$$\Phi(x) = \frac{R_{\text{after}}}{2} \times \left( \sqrt{\frac{x}{R_{\text{before}} - x}} - \sqrt{\frac{R_{\text{before}} - x}{x}} \right), \quad (11)$$

$$\Phi^{-1}(x) = \frac{R_{\text{before}}}{2} \times \left[ \frac{x}{\sqrt{R_{\text{after}}^2 + x^2}} + 1 \right], \quad (12)$$

其中:  $R_{\text{before}}$  表示输入图像的灰度等级,  $R_{\text{after}}$  表示完成运算后的灰度等级。在大部分情况下,  $R_{\text{before}}$  和  $R_{\text{after}}$  都是相等,但是,其中的部分计算中涉及

图像的动态范围压缩时,  $R_{\text{before}}$  不等于  $R_{\text{after}}$ 。另外,为了理解方便,本文将  $R_{\text{before}}$  和  $R_{\text{after}}$  2 个变量提取到运算外,并将原来的广义线性运算进行归一化,如图 2 所示。

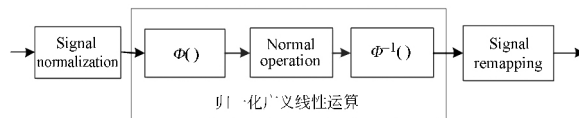


图 2 归一化的广义线性运算

Fig. 2 Generalized linear operation after normalizing

进行广义线性运算的归一化之后,式(11)、式(12)式可转化为:

$$\Phi(x) = \frac{1}{2} \times \left( \sqrt{\frac{x}{1-x}} - \sqrt{\frac{1-x}{x}} \right), \quad (13)$$

$$\Phi^{-1}(x) = \frac{1}{2} \times \left( \frac{x}{\sqrt{1+x^2}} + 1 \right). \quad (14)$$

把式(13)、式(14)代入式(8)、式(9)、式(10),整理后可以得到:

$$x_1 \boxed{add} x_2 = \frac{1}{2} \times \left( \frac{\Phi(x_1) + \Phi(x_2)}{\sqrt{1 + (\Phi(x_1) + \Phi(x_2))^2}} + 1 \right), \quad (15)$$

$$x_1 \boxed{sub} x_2 = \frac{1}{2} \times \left( \frac{\Phi(x_1) - \Phi(x_2)}{\sqrt{1 + (\Phi(x_1) - \Phi(x_2))^2}} + 1 \right), \quad (16)$$

$$\alpha \boxed{mult} x_1 = \frac{1}{2} \times \left( \frac{\alpha \times \Phi(x_1)}{\sqrt{1 + (\alpha \times \Phi(x_1))^2}} + 1 \right). \quad (17)$$

### 3.2 广义线性运算的特性

在 3.1 小节中设计了广义线性运算定义下的一个特殊算法(下文中,称之为 GL- $\Phi$  运算),可以在这个运算中定义一个零值,用  $Z$  表示:

$$Z \boxed{add} x_1 = x_1. \quad (18)$$

将其代入式(15)可得:  $Z = 1/2$  (在后面的叙述中,将  $1/2$  称之为 GL- $\Phi$  的运算零值)。因而,可以定义  $(0, 1/2)$  和  $(1/2, 1)$  分别为 GL- $\Phi$  运算的正数域和负数域,进而,就可以得到此运算下的绝对值:

$$\boxed{abs}(x) = \begin{cases} x & 1/2 \leq x < 1 \\ 1-x & 0 < x < 1/2 \end{cases}, \quad (19)$$

在上面的结论下,不难验证:

$$x_1 \boxed{add} (1-x_1) = 1/2, \quad (20)$$

$$x_1 \boxed{sub} x_2 = x_1 \boxed{add} (1-x_2). \quad (21)$$

接下来,再分析一个信号变量  $x$  和一个常量

$a (0 < a < 1)$  运算的结果, 结果如图 3 所示。

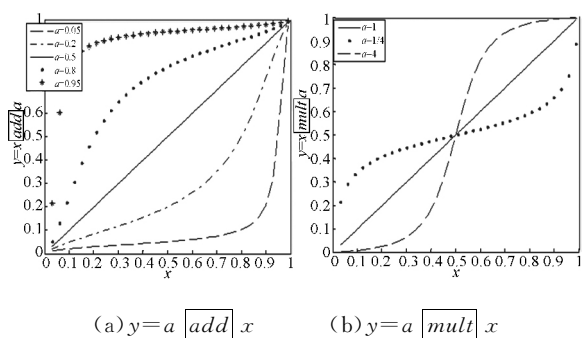


图 3 GL- $\Phi$  运算效果图

Fig. 3 Effect of computing operation for GL- $\Phi$

从图 3 不难看出: 对于 GL- $\Phi$  加法操作, 当  $a < 1/2$  时, 运算结果将灰度较大的区域进行了拉伸, 同时对灰度较小的区域进行了压缩; 当  $a > 1/2$  时, 结果刚好相反。对于 2 个信号的减法操作, 可以通过式 (21) 推出, 其变化情况基本和图 3 类似。对于 GL- $\Phi$  的乘法操作, 从图 3 可以看出: 当  $0 < a < 1$  时, 图像灰度接近于 0 和 1 的部分 (即远离 GL- $\Phi$  零值部分) 实现了拉伸, 而灰度范围在  $1/2$  左右的区域 (GL- $\Phi$  零值附近) 实现了压缩; 当  $a > 1$  时, 刚好相反。另外, 一些详细的 GL- $\Phi$  运算性质将会在后文中进行分析。

#### 4 基于 GL- $\Phi$ 运算和 BF 的红外图像增强算法设计及实验

在第 2、第 3 节的分析上, 提出了一种新的红外图像增强算法, 其具体的流程设计如图 4 所示。

此系统先通过双边滤波法提取图像的基础层图像, 再利用第 3 小节提出的 GL- $\Phi$  减法运算将图像的细节部分从原始图像中分割出来, 然后对基础层进行动态范围压缩, 并对细节层进行增强放大, 其中, 基础层可利用 GL- $\Phi$  的乘法运算实现 DRC, 而细节层则主要采用自适应增量控制来放大细节信息。最后, 通过 GL- $\Phi$  加法运算将细节层和基础层图像相加, 得到增强后的图像。各个模块的详细设计和注意要点将在下文介绍。

##### 4.1 图像归一化和重映射

由于输入图像的像素数据均用 14 bit 表示, 因此, 实际图像像素灰度的可能分布为  $0 \sim 16383$ , 所以对图 4 中图像归一化处理时, 只需简单

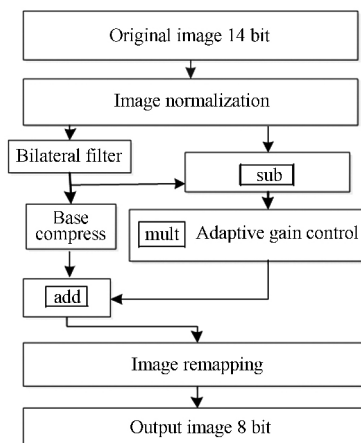


图 4 红外处理系统框图

Fig. 4 Block diagram of infrared processing

地将图像除以  $R_{\text{before}}$  ( $R_{\text{before}} = 16383$ ) 即可。但是, 从红外图像的成像特点可以看出, 由红外探测器采集的图像, 往往分布在  $0 \sim 16383$  中的某一个区域段, 而不是分布在整个灰度空间中。为了使后续处理获得更好的效果, 在进行图像归一化的过程中,  $R_{\text{before}}$  的选择不必拘泥于图像的理论灰度分布, 而是可以在剔除噪声的影响后, 重新确定一个理想的图像灰度分布。另外, 为了保证上文提出的算法可以得到最有效的应用, 本文将图像灰度直方图上概率密度 (PDF) 最大的灰度映射为 GL- $\Phi$  的零值 (即  $1/2$ )。  $R_{\text{before}}$  可以利用图像灰度的概率密度函数 (PDF) 和累计概率分布函数 (CDF) 来确定, 公式如下:

$$\begin{aligned} r_{\min} &= \min\{r | CDF(r) > P_{\text{noise}}/2\} \\ r_{\max} &= \max\{r | CDF(r) < 1 - P_{\text{noise}}/2\} \\ r_{1/2} &= r | PDF(r) > PDF(r + \delta) \\ R_{\text{before}} &= 2 \times \max\{r_{\max} - r_{1/2}, r_{1/2} - r_{\min}\} \end{aligned} \quad (22)$$

其中:  $P_{\text{noise}}$  为相机的噪声水平, 探测器中均有说明, 也可以通过实验测得;  $R_{\text{after}}$  的选择相对简单, 可根据后续显示设备的需要来决定, 一般选择  $R_{\text{after}} = 255$ 。

##### 4.2 图像基础层的动态范围压缩

原始图像经过 BF 滤波后得到图像的基础层, 通过 2.1 小节分析, 可以知道: 滤波器中  $\sigma_s$  和  $\sigma_g$  的设置非常关键。通过分析参考文献 [9, 14-15] 后, 设定  $\sigma_s = \max(\text{Width}, \text{Height})/16$ , 而将  $\sigma_g$  设置为图像动态范围的 10% 左右。这 2 个参数设置内在的含义是: 若图像区域内像素变换小于总灰度范围的 10% ( $\sigma_g$ ), 则可以将其看做图

像的细节变化;所设置的  $\sigma_s$  则是表示 BF 的滤波范围为图像宽度的  $1/16$ ,超出这个范围的像素对滤波结果的影响非常小,几乎趋于零,可忽略不计。

获取基础层图像后,需要对其进行动态范围压缩。从图 3(b)可以知道,在 GL- $\Phi$  运算中,如果将信号乘上一个小于 1 的数,信号 GL- $\Phi$  零值附近的值将实现压缩。根据此原理,本文将基础层图像乘以  $\alpha$  使其实现动态范围压缩。本实验中  $\alpha=0.2$ ,结果如图 5 所示。从图 5 可知,经过 GL- $\Phi$  乘法处理后,基础层图像的动态范围实现了压缩,但是由于图像的基础层只概括了图像的大致灰度分布,图像的细节信息相对缺失,这就需要通过图像细节层进行补充。



(a)原始输入图像 (b)提取的基础层 (c)处理后图像  
(a) Original image (b) Base layer (3) Processed image

图 5 图像的基础层处理

Fig. 5 Processing of base image

### 4.3 图像细节层的获取

用原始图像减去 4.2 获取的基础层图像即可得到图像的细节层。图像的减法操作可以使用传统的减法,也可以采用第 3 小节提出的 GL- $\Phi$  减法操作。

GL- $\Phi$  减法效果图可由公式 (21) 和图 2 获得,结果如图 6 所示:

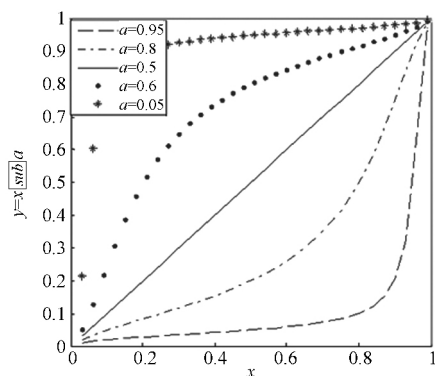


图 6 GL- $\Phi$  减法

Fig. 6 GL- $\Phi$  subtraction

根据图 6 分析公式  $y(\delta) = (x + \delta) \text{sub} x$ ,视

$x$  为常量,  $\delta$  为变量,可得到如下结论:

$$\frac{dy}{d\delta} \rightarrow 0 \mid_{\delta \rightarrow 1, x \rightarrow 0}; \frac{dy}{d\delta} \rightarrow \infty \mid_{\delta \rightarrow 0, x \rightarrow 0}. \quad (23)$$

由式 (23) 并结合图 6 可知,当相减的 2 个数非常接近(即  $\delta \rightarrow 0$ )时, GL- $\Phi$  减法操作对两数的差具有一定的放大作用,此时对于  $\delta$  的变化非常敏感;而当相减的 2 个数相差非常大(即  $\delta \rightarrow 1$ )时, GL- $\Phi$  减法对 2 数的差具有压缩效果,对于  $\delta$  的变化将比较迟钝。综合分析可知, GL- $\Phi$  减法能够拉伸小的差值,而压缩大的差值。

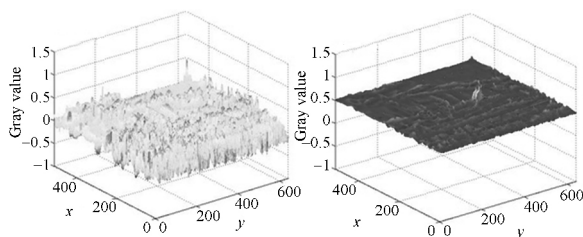
在实验中可以知道,细节层是通过原始图像和基础层图像做减法得到的,实际中往往存在一些较大的差值和非常小的差值,这会导致两个问题:(1)差值过大会造成图像的光晕效应和噪声干扰,光晕现象就是因为部分区域的差值与临近部分差值相差过大引起的;(2)差值过小又会导致细节丢失。而采用 GL- $\Phi$  减法可避免上述两个问题。

为了验证 GL- $\Phi$  减法对抑制图像光晕和噪声的优越性,分别利用传统减法和 GL- $\Phi$  减法对图 5 中的原始图像(a)和基础层图像(b)做减法操作,结果如图 7 所示。

对比图 7(a)、图 7(b)可知, GL- $\Phi$  减法后得到的图像整体灰度较低,但是各部分的细节依然保留完好,根据图 7(c)、图 7(d)两幅三维图像可以清晰地得知, GL- $\Phi$  分割得到的细节图像上的细节更加平稳,即在不影响细节的同时,去除了大量由滤波带来的噪声和光晕现象。通过图 7(e)、图 7(f)对比也可以得到上面的结论。图 7(e)、图 7(f)是分别从图 7(a)、图 7(b)抽取第 300 行的一维数组,图中的两条直线表示的是 2 个细节层的零值位置(传统零值和 GL- $\Phi$  零值)。从图 7(e)可以看出:A 处的灰度值与其他区域有着明显差距,这样的结果必然导致图像接近 A 处的区域会



(a)传统方法获取的细节层 (b) GL- $\Phi$  获取的细节层  
(a) Detail layer acquired by traditional method (b) Detail layer acquired by GL- $\Phi$  method

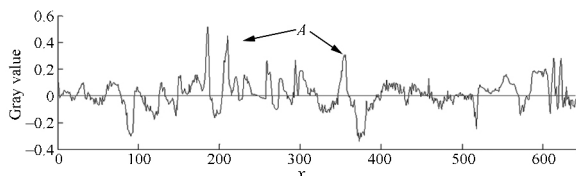


(c) 图 7(a) 的三维表示

(d) 图 7(b) 的三维表示

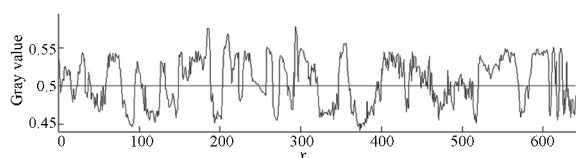
(c) 3-D display of Fig. 7(a)

(d) 3-D display of Fig. 7(b)



(e) 图 7(a) 中第 300 行像素的一维表示

(e) 1-D representation of the 300th line pixels for Fig. 7(a)



(f) 图 7(b) 中第 300 行像素的一维表示

(f) 1-D representation of the 300th line pixels for Fig. 7(b)

图 7 细节图像获取结果对比

Fig. 7 Comparison of acquired detail layers

有较明显的光晕现象,而图 7(f)中,各处的细节变化平稳,不存在突变的大细节,这意味着 GL- $\Phi$ 分割有效地避免了光晕现象,抑制了噪声。

#### 4.4 图像细节的自适应放大

图像细节增强的主要目的是相对基础层而言,将细节层的像素值放大,在能够保留细节层中较大细节的同时,放大较小的细节。一个简单的方法就是将细节层的灰度值乘上一个常数  $\gamma$  ( $\gamma > 1$ ),若采用传统的乘法,全局都采用同一个  $\gamma$  值,这显然得不到放大小细节的效果。然而,采用 GL- $\Phi$ 乘法,从图 3(b)可以看出,若  $\gamma > 1$  时, GL- $\Phi$ 乘法对 GL- $\Phi$ 零值附近的细节(即图像的微小细节)实现了局部放大,而对远离 GL- $\Phi$ 零值区域的灰度进行了压缩,也就是在放大小细节的同时压缩了大的图像细节,从而达到了细节放大的目的。

在对细节进行放大时,若不是全局都采用同一个固定的  $\gamma$ ,而是根据图像本身的灰度值自适

应地确定放大倍数,那么,细节增强效果将更加明显。例如:对于灰度值较小的像素,  $\gamma$  选择较大,反之,  $\gamma$  较小。对于本文的 GL- $\Phi$ 运算,灰度值数据距离 GL- $\Phi$ 零值(1/2)越近,则  $\gamma$  取值越大,反之,则  $\gamma$  取值较小,因此,局部自适应放大倍数可简单地设置为:

$$\gamma(i, j) = \begin{cases} \alpha + \beta \times (d(i, j) - 1/2) & d(i, j) > 1/2 \\ \alpha + \beta \times (1/2 - d(i, j)) & d(i, j) \leq 1/2 \end{cases}, \quad (24)$$

其中:  $d(i, j)$  用来表示图像细节层的像素值,而  $\alpha$  和  $\beta$  则用来调节细节的放大倍数。约定:

$$\gamma(i, j) = \begin{cases} \gamma_{\min} & d(i, j) = 0 \text{ or } 1 \\ \gamma_{\max} & d(i, j) = 1/2 \end{cases}, \quad (25)$$

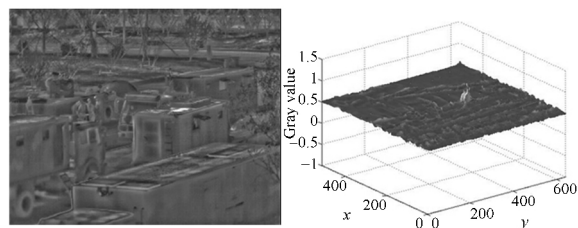
其中:  $\gamma_{\max}$ ,  $\gamma_{\min}$  分别为对图像最小细节和最大细节部分的放大倍数,  $\gamma_{\max}$  和  $\gamma_{\min}$  均大于 1,其大小可以根据实际情况来设置。事实上,从图 4 可以看出,  $\gamma_{\max}$ ,  $\gamma_{\min}$  对于那些灰度远离 GL- $\Phi$ 零值(1/2)的区域的值影响较小,而对 GL- $\Phi$ 零值附近的值影响较大。一般设置  $\gamma_{\min} = 1$ ;  $\gamma_{\max}$  则可以根据图像对比度等来确定,本文设置  $\gamma_{\max} = 2.5$ 。将式(25)代入式(24)可得:

$$\alpha = \gamma_{\min}; \beta = 2(\gamma_{\max} - \gamma_{\min}), \quad (26)$$

因而,最后的细节增强过程可表示为:

$$D_{\text{Enhance}}(i, j) = \gamma(i, j) \boxed{\text{mult}} d(i, j). \quad (27)$$

利用式(27)对图 7(b)处理后的结果如图 8 所示,图 8(b)表示细节图各处的放大倍数。分析图 8

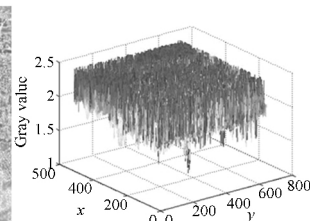


(a) 图 7 的细节图像

(b) 图 8(a) 的三维表示

(a) Original detail layers of Fig. 7

(b) 3-D display of Fig. 8(a)

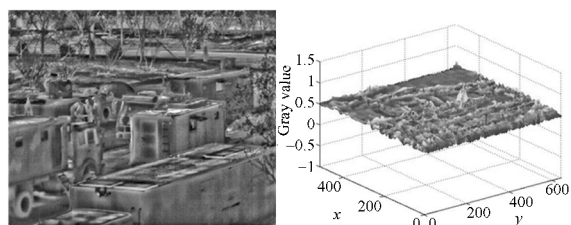


(c) 针对细节图像的放大倍数

(d) 图 8(c) 的三维表示

(c) Magnification for detail image

(d) 3-D display of Fig. 8(c)



(e)自适应增强后的细节图 (f)图 8(e)的三维表示  
(e)Detail image after adaptive enhancement (f)3-D display of Fig. 8(e)

图 8 图像细节的自适应增强

Fig. 8 Adaptive enhanced image details

的图像增强结果,并结合几个三维图可以得知,本处理算法很好地放大了图像的细节。

#### 4.5 增强图像的生成

由 3.2 小节广义线性运算性质可知,在完成图像的基础层动态范围压缩和细节层放大后只需要将两幅图像进行  $GL-\Phi$  叠加,即可得到灰度为  $0\sim 255$  的增强图像,不会发生正常加法中的灰度值溢出的情形,避免了噪声的影响以及图像进行线性拉伸后带来的对比度变化。其结果如图 9 所示:



(a)基础层图像 (b)细节层图像 (c)增强后的图像  
(a)Base layer after DRC (b)Detail layer (c)Image after enhancement

图 9 增强图像的生成

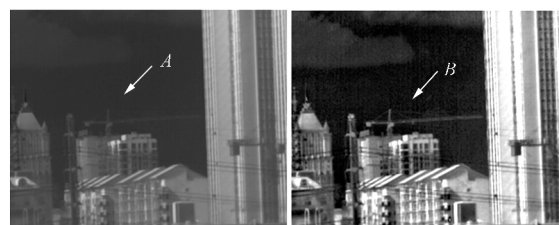
Fig. 9 Generation of enhanced images

## 5 实验与结果

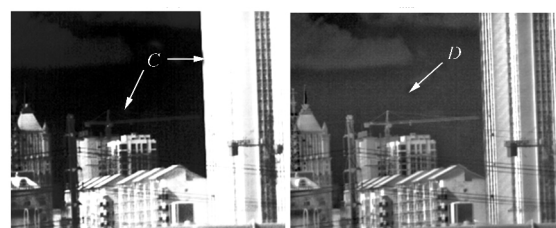
### 5.1 实验对比

为了验证所提算法模型的实验效果,分别将提出的算法,和常用的 AGC 算法、直方图均衡 (HE),以及文献[11]提出的 BF&DRP 算法进行了比较。选择 AGC 和 HE 是因为它们是实现图像增强的常用且有效的方法;而选择 BF&DRP 则是因为它和本文算法一样,也是采用 BF 作为边缘保持滤波器,BF&DRP 算法的参数设置根据

文献中给定的默认值。另外,选择的场景也是极具代表性的 3 个场景:(1)室外距离较远的场景(约 2 km 外);(2)室外距离较近(100 m 内)的场景;(3)室内的实验者。三组实验的结果分别如图 10,图 11,图 12 所示:



(a) AGC 算法结果 (b) BF&DRP 算法结果  
(a)Results of AGC (b)Results of BF&DRP



(c)HE 算法结果 (d)本文算法结果  
(c)Results of HE (d)Results of proposed method

图 10 室外远距离场景的算法比较

Fig. 10 Comparison of outdoor distant scene by using several methods

从图 10 可以看出,AGC 方法图像表面较为平滑,对比度低,图像较为模糊;HE 和 BF&DRP 在处理室外远处场景时,虽然图像的局部得到了较好的增强,但是同时也导致了某些局部区域(箭头 B 和箭头 C)出现模糊化;而本文算法在局部增强的同时,依然能够较好地显示 2 km 外的细节(2 km 外的吊车钢筋线,即箭头 D 处)。其中:BF&DRP 的处理结果对比度较高,但是整幅图像过于锐化,图像的整体效果有所欠缺。笔者认为,可能是在 BF&DRP 算法编程时,本次采用的均是原文献的默认值,参数的选择仍需要优化,若能调整到最优参数,应该会有更好的效果。

图 11 是一幅距离观察者较近的外场图像,从图像效果直观上看,AGC 算法和 HE 算法在图中箭头 A 和箭头 C 处明显已经模糊不堪;而 BF&DRP 算法在箭头 B 处有很明显的过度锐化的光晕现象,尤其居民楼上的窗子的光晕现象非



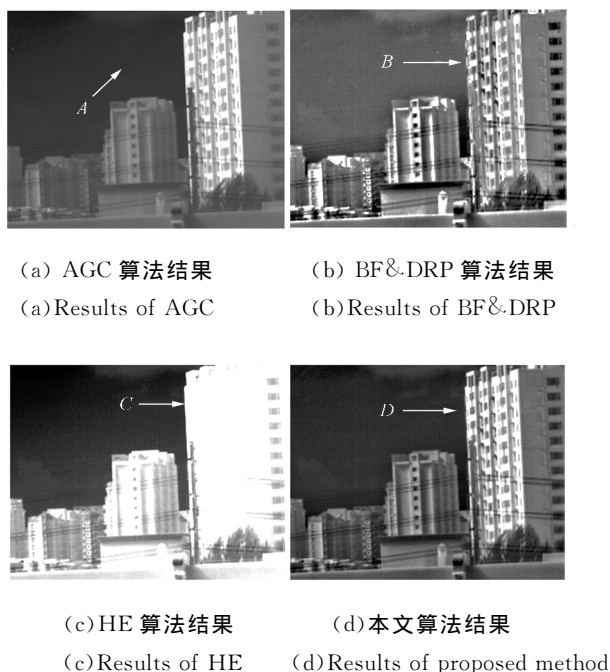


图 11 几种算法对室外近距离场景处理结果比较  
Fig. 11 Comparison of outdoor close scene by using several algorithms

常严重;本文算法处理的结果则整体效果较好,如箭头 D 处的房屋结构条纹依然清晰可见。

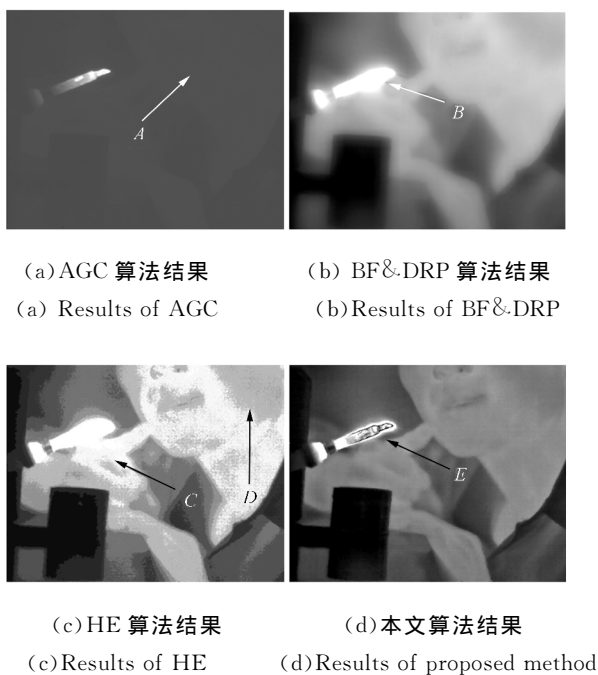


图 12 几种算法对室内场景的处理结果比较  
Fig. 12 Comparison of indoor scene by using several alorithms

图 12 所示的场景非常特殊:电烙铁的温度(几百度以上)和周围环境温度(几十度)的温差非常大,是一个极为恶劣的环境。从图 12 的处理结果可以看出,传统的 AGC 算法已经很难看到实验者的信息,只能看到高温的电烙铁;而 HE 算法虽然能看到人,但是图像模糊化很严重;BF&DRP 相对 AGC 和 HE 算法结果较好,但是依然是非常模糊;而本文算法的处理效果则非常理想,在较为清晰地看到低温物体(人)的同时,依然能够很好地观察到高温电烙铁上的温度变化(箭头 E 所示的电烙铁上的铁锈)。

## 5.2 实验结果的定量分析

在红外成像系统中,对图像成像质量的评价很难用一个定量标准来衡量,因为人类的视觉系统是一种非常主观的评价,各种指标也只是反映部分性能,因此对图像进行定量分析将是一个非常困难的工作,也是一个值得探索的课题。图像的平均对比度是衡量图像增强效果优劣的一个比较好的参考指标,图像的平均对比度大的图像,往往细节信息表述的更为明显,其计算方法如式(28)所示:

$$C_{aver} = \left[ \frac{1}{M \times N} \sum_{i,j} (I(i,j) - \bar{I})^2 \right]^{1/2}, \quad (28)$$

式中:  $I(i,j)$  是将输入图像归一化到 0~1 后的结果,表示整幅图像上的灰度平均值;  $M, N$  分别表示图像的行数和列数,文献[15]中即采用了这种评价指标。但是笔者发现,在实验过程中,对于图像灰度集中在值域两端的图像,这种评价指标全局平均对比度值往往非常大,实际上这种图像的视觉效果往往不够理想。为此,本文对图像平均对比度的求解算法进行了改进,将原先计算的全局图像对比度,改进为先求局部图像平均对比度,再利用局部对比度的结果得到全局的平均对比度。这样,在求解图像整体对比度的同时也考虑了图像局部的灰度分布。其方法如图 13 所示。

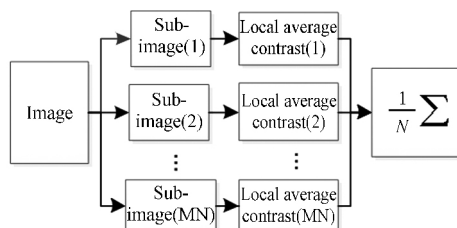


图 13 改进的平均对比度求解法

Fig. 13 Modified average contrast enhancement

本文将  $640 \times 512$  的图像分为  $16 \times 16$  个子图像,再各根据图 13 所示方法求解平均对比度  $C$ ,其计算结果如表 1 所示。从表 1 可以看出,AGC 算法在图像的对比度计算上,其数值非常小,这意味着图像的对比度非常低;HE 算法的平均对比度在 3 组测量图像上都较大,但是从图像的内容上看,其信息丢失比较严重;BF&DRP 和本文提出的算法在对比度上均有较好的效果,但 BF&DRP 处理后的图像有较大的噪声干扰和光晕现象。综上所述,从图像的平均对比度这一指标上分析,本文算法相较前面 3 种算法更优。

表 1 图像的改进平均对比度  
Tab. 1 Modified average contrast of images

Method	Scene		
	Scene1	Scene2	Scene3
AGC	0.031 3	0.030 1	0.005 9
HE	0.079 0	0.104 6	0.084 1
BF&DRP	0.101 0	0.114 0	0.037 4
Proposed	0.117 5	0.129 3	0.069 6

#### 参考文献:

- [1] 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,2011,40(12):2521-2527.  
JIN W Q, LIU B, FAN Y J, *et al.*. Review on infrared image detail enhancement techniques [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011,40(12):2521-2527. (in Chinese)
- [2] 吴家伟,武春风,虞文波. 红外图像实时显示增强系统设计[J]. 光学 精密工程,2009,17(10):2612-2619.  
WU J W, WU CH F, TUO W B. Design of real-time infrared image enhancing system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009,17(10): 2612-2619. (in Chinese)
- [3] 张晓龙,刘英,孙强. 高精度非致冷长波红外热像仪的辐射标定[J]. 中国光学,2012,5(3):235-241.  
ZHANG X L, LIU Y, SUN Q. New method for eliminating non-uniformity background of IR image [J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(3): 235-241. (in Chinese)
- [4] 刘火平,孟维平,宋立维,等. 红外图像序列中不均

## 6 结 论

本文通过分析红外图像的成像特点,设计了一种全新的基于 GL- $\Phi$  运算和 BF 的红外图像增强技术。首先通过 BF 分割出图像的基础层部分,再利用 GL- $\Phi$  运算来分割基础层,并放大细节图像以实现基础层的动态压缩。在 GL- $\Phi$  运算定义中,有效地解决了数据溢出问题,较好地消除了图像的光晕现象并抑制了图像的噪声。对比实验表明:本文提出的方法在图像的综合性能,细节表现以及图像的平均对比度增强上均有很大的提高,对于实际的红外热像仪后端图像处理有着非常重要的参考价值。

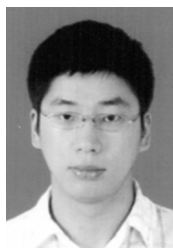
本文算法思路清晰,适合硬件设计,笔者已在 DE2-115 的 FPGA 开发板中成功地实现了本文算法,限于篇幅原因没有叙述。但是在本文设计中,因为涉及的参数较多,而这些参数的设定合适与否,往往会对结果产生较大的影响。在后续的工作中,如何自适应地调节这些参数,将会是课题内的一大研究方向。

匀背景消除新方法[J]. 液晶与显示,2012,27(4): 539-544.

- LIU H P, MENG W P, SONG L W, *et al.*. New method for eliminating non-uniformity background of IR image [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2012,27(4): 539-544. (in Chinese)
- [5] 孙海江,王延杰,刘伟宁. 基于自适应平台阈值和拉普拉斯变换的红外图像增强[J]. 中国光学,2011,4(5):474-479.  
SUN H J, WANG Y J, LIU W N. Enhancement of infrared images based on adaptive platform threshold and Laplace transformation[J]. *Chinese Optics*, 2011,4(5):474-479. (in Chinese)
- [6] 黄梅,吴志勇,梁敏华,等. 暗背景下低灰度图像的实时增强[J]. 液晶与显示,2011,26(3):374-378.  
HUANG M, WU ZH Y, LIANG M H, *et al.*. Real-time enhancement method of low gray image under dark background [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2012, 26(3): 374-378. (in Chinese)
- [7] PIZER S M, AMBURN E P, AUSTIN J D, *et al.*. Adaptive histogram equalization and its variations

- [J]. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 1987, 39(3):355-368.
- [8] ZUIDERVELD K. Contrast limited adaptive histogram equalization [J]. *Graphics Gems IV*, 1994, 474-485.
- [9] REZA A M. Realization of Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE) for real-time image enhancement [J]. *Journal of VLST Signal Processing Systems for Signal, Image and Video Technology*, 2004, 38(1):35-44.
- [10] 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.
- [11] BRANCHITTA F, DIANI M, CORSINI G, *et al.*. New technique for the visualization of high dynamic range infrared images [J]. *Opt. Eng.* 2009, 48(9): 096401.
- [12] TOMASI C, MANDUCHI R. Bilateral filtering for gray and color images [C]. *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Computer Vision, New Delhi, India*, 1998, 839-846.
- [13] ELAD M. On the origin of the bilateral filter and ways to improve it [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2002, 11(10):1141-1151.
- [14] DURAND F, DORSEY J. Fast bilateral filtering for the display of high-dynamic-range images [J]. *ACM Trans. Graphics*, 2002, 213:257-266.
- [15] PARIS S, DURAND F. A fast approximation of the bilateral filter using a signal processing approach [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2009, 81(1):24-526.
- [16] WEISS B. Fast median and bilateral filtering [J]. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2006, 25(3):518-526.
- [17] ZUO CH, CHEN Q, *et al.*. Display and detail enhancement for high-dynamic-range infrared images [J]. *Opt. Eng.* 2011, 50(12):127401.
- [18] DENG G. A Generalized Unsharp Masking Algorithm [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2011, 20(5): 675 - 684.
- [19] SHVAYTSEV H, PELEG S. Inversion of picture operators [J]. *Pattern Recognition Letters*, 1987, 5(1):49-61.

## 作者简介:



吴泽鹏(1988—),男,浙江丽水人,硕士研究生,2011年于中国科学技术大学获得学士学位,主要从事红外图像增强和跟踪技术的研究。E-mail: wuzepeng@mail.ustc.edu.cn



朱明超(1980—),男,吉林长春人,博士,副研究员,主要从事导引头运动学、控制方面及非制冷红外相机等方面的研究。E-mail: zhumingchao1980@yahoo.com



刘慧(1983—),男,山西朔州人,博士,助理研究员,2006年于吉林大学获得学士学位,2011年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光电平台精密伺服控制等方面的研究。E-mail: liuh6009@163.com

## 导师简介:



贾宏光(1971—),男,黑龙江五常人,研究员,博士生导师,1994年于哈尔滨工业大学获得学士学位,1997年、2000年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所分别获得硕士、博士学位,主要从事复合制导及目标识别技术的研究。E-mail: jiahg@ciomp.ac.cn



宣明(1956—),男,江苏常州人,研究员,博士生导师,1985年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事MEMS技术、精密机械方面的研究。E-mail: xuanm@ciomp.ac.cn