

文章编号 1004-924X(2014)04-1064-07

应用参数化对数模型增强图像细节及对比度

朱瑞飞^{1,2}, 贾宏光^{1*}, 王超¹, 魏群¹, 张天翼¹, 虞林瑶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 100039)

摘要:传统红外图像增强方法由于未考虑人眼视觉特性而存在“超区间值”,故极易丢失图像细节。本文结合对数图像处理(LIP)理论,提出了基于参数化对数模型(PLIP)的平台直方图均衡图像增强方法。该方法首先将图像变换为灰度色调函数;然后应用 PLIP 模型对变换后的图像进行重建,结合平台直方图均衡化来增强图像的对比度和细节信息,并利用图像评价函数(EMEE)与信息熵(En)确定模型参数值。最后,研制了算法硬件平台,分别用中波和长波红外成像系统对算法进行了实验验证。实验结果显示:该方法对不同场景的图像均可取得很好的增强效果,图像的 EMEE 值比传统的平台直方图均衡算法提高至少 5 倍以上,对改善图像质量和视觉效果具有实用价值。

关键词:成像系统;红外图像;图像增强;图像评价;对数图像处理模型;直方图均衡

中图分类号:TN219;TP391 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20142204.1064

Enhancement of image detail and contrast by parameterized logarithmic framework

ZHU Rei-fei^{1,2}, JIA Hong-guang^{1*}, WANG Chao¹, WEI Qun¹,
ZHANG Tian-yi¹, YU Lin-yao¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

* Corresponding author, E-mail: jiahg@ciomp.ac.cn

Abstract: The traditional infrared image enhancing has “over range value” caused by not taking vision characters of human eye into consideration, therefore, image details are lost. In this paper, an enhanced algorithm based on Parameterized Logarithmic Image Processing(PLIP) model was proposed for histogram equalization image processing. First, the image was converted to a gray tone function. Then, the image was reconstructed by the PLIP model and its contrast and details were enhanced by combined plateau histogram equalization. The model parameters were determined by evaluation of function (Measurement of Enhancement by Entropy, EMEE) and information entropy (En). Finally, the hardware platform of the algorithm was developed, and the algorithm was verified respectively by the medium-wave and long-wave infrared image systems. Experimental results show that the method can obtain better enhanced effect for different images. The EMEE of the enhanced image is more than

收稿日期:2013-04-24;修订日期:2013-06-12.

基金项目:中国科学院三期创新工程装备预研基金资助项目(No. 51301060207)

5 times than traditional plateau histogram equalization algorithm. The results show that this method has an application value to improve the image quality and visual effect.

Key words: imaging system; infrared image; image enhancement; image evaluation; logarithmic image processing model; histogram equalization

1 引言

目前,红外成像已被广泛应用于搜索预警、精确制导等军事领域和气象预报、森林防火、夜间民航等国民经济领域^[1-2]。由于受目标辐射特性、红外传输特性、红外探测特性和环境因素的影响,红外图像通常对比度差、信噪比低、视觉效果模糊,从而大大增加了目标检测、跟踪和识别的难度。因此,需要对红外图像进行预处理,以增强对比度,提高信噪比^[3-5]。

现有的图像增强方法主要包括时域处理、空域处理和变换域处理。时域处理包括时间延迟积分、帧间比较等;空域处理直接以图像中的像素作为基础,其算法主要有灰度变换、空间滤波^[6]、直方图均衡^[7]和多尺度 Retinex 算法^[8]等;变换域处理主要包括傅里叶变换、小波变换^[9]、梯度域变换^[10]等。以往的红外图像增强方法大多停留在对比度增强处理上,未考虑人眼的视觉特性,故视觉效果不够好。Jourlin 和 Pinoli 认为在数字图像处理中,如果将图像的灰度值直接相加(或相乘),灰度值有可能超出区间值,产生“超区间值”问题,使人眼视觉系统不能感知,另外,“超区间值”问题还会导致大量细节信息丢失^[11]。为了解决传统意义上的“+”“×”运算不能完全适应数字图像处理的问题,Jourlin 和 Pinoli 提出了对数图像处理的模型(Logarithmic Image Processing, LIP)。该模型定义了自己的加法、乘法、减法、微分、积分等运算,具有良好的数学结构和性质,而且不会产生“超区间值”问题,能够在指定的区间范围内更精确地处理图像的灰度值。近年来,LIP 模型已经被成功应用于边缘检测^[12]、图像滤波^[13]、复原以及分割^[14]等领域。为了克服 LIP 模型容易丢失细节的缺点,2007 年 Panetta 首先提出了参数化的对数图像处理模型(Parameterized Logarithmic Image Processing, PLIP),并将该模型运用到图像融合中,取得了很好的视觉效果^[15]。由于 PLIP 模型参数众多,实际应用中某

一个参数选择不合理就有可能导致相反的处理效果,因而如何合理选择模型参数是应用 PLIP 模型的关键。

本文针对传统的图像处理存在“超区间值”的问题,创新性地提出了基于参数化对数模型的平台直方图均衡图像增强方法,用以增强图像的细节信息和对比度,并利用图像评价函数(Measurement of Enhancement by Entropy, EMEE)和信息熵(Entropy, En),通过计算机仿真确定了 PLIP 模型的参数值。搭建了硬件实验平台,分别用中波和长波红外成像系统对不同场景进行了成像实验。

2 PLIP 模型

2.1 LIP 模型

LIP 模型用灰度色调函数表示图像的强度,设 $f(x, y)$ 是原始的灰度图像, $g(x, y)$ 、 g_1 、 g_2 分别表示定义在非空区域 D 的灰度色调函数,函数区间为 $[0, M)$, M 为图像的最大灰度值。LIP 模型的运算定义如下:

$$g(x, y) = M - f(x, y), \quad (1)$$

$$g_1 \oplus g_2 = g_1 + g_2 - \frac{g_1 g_2}{M}, \quad (2)$$

$$g_1 \ominus g_2 = M \frac{g_1 - g_2}{M - g_2}, \quad (3)$$

$$\alpha \otimes g = M - M \left[1 - \frac{g}{M} \right]^\alpha, \quad (4)$$

其中: \oplus 、 \ominus 、 \otimes 分别代表 LIP 模型的加、减、数乘运算, α 是大于零的数乘系数,用来进行放大或缩小操作。由式(2)可得:

$$M - (g_1 \oplus g_2) = M - g_1 - g_2 + \frac{g_1 g_2}{M} = \left[\sqrt{M} - \frac{g_1}{\sqrt{M}} \right] \left[\sqrt{M} - \frac{g_2}{\sqrt{M}} \right], \quad (5)$$

$\forall g_1 \in [0, M), \forall g_2 \in [0, M)$, 易知:

$$0 \leq \left[\sqrt{M} - \frac{g_1}{\sqrt{M}} \right] \left[\sqrt{M} - \frac{g_2}{\sqrt{M}} \right] < M. \quad (6)$$

所以,LIP 模型的 \oplus 运算具有封闭性,即图像

的灰度值不会越界。同理可以证明, LIP 模型的其他运算在区间 $[0, M]$ 也具有封闭性。

2.2 PLIP 模型的建立

2006 年 Wharton 等人通过实验证明, 改变 LIP 模型中的参数 M 可以获得更好的图像处理效果^[16]。为了获得 M 的最优值, 用 $\mu(M)$ 、 $\gamma(M)$ 、 $k(M)$ 分别代替 LIP 模型中的参数 M 。PLIP 模型定义为式(7)~式(10), 其中: $\tilde{\oplus}$ 、 $\tilde{\ominus}$ 、 $\tilde{\otimes}$ 分别代表 PLIP 模型的加、减、数乘运算。公式中参数 $\mu(M)$ 、 $\gamma(M)$ 、 $k(M) \in [M, \infty)$, 它们由具体的图像处理过程决定, 可以是任意的表达式, 例如 $\gamma(M) = M$, 或者 $\gamma(M) = aM + b$, 其中: a 、 b 为常数, 由实验获得。公式(8)和公式(10)中参数相同, 都是 $\gamma(M)$, 这是因为数乘是由加法衍生而来。

$$g(x, y) = \mu(M) - f(x, y), \quad (7)$$

$$g_1 \tilde{\oplus} g_2 = g_1 + g_2 - \frac{g_1 g_2}{\gamma(M)}, \quad (8)$$

$$g_1 \tilde{\ominus} g_2 = k(M) \frac{g_1 - g_2}{k(M) - g_2}, \quad (9)$$

$$\alpha \tilde{\otimes} g = \gamma(M) - \gamma(M) \left[1 - \frac{g}{\gamma(M)} \right]^\alpha. \quad (10)$$

当 $\mu(M) = \gamma(M) = k(M) = M$ 时, PLIP 模型等同于 LIP 模型; 当 $\gamma(M)$ 、 $k(M)$ 趋于无限时, PLIP 模型等同于线性操作。因而, 通过改变 $\mu(M)$ 、 $\gamma(M)$ 、 $k(M)$ 的值就可以得到理想的图像处理模型, 获得较好的图像增强效果。

3 基于 PLIP 模型与平台直方图的红外图像增强算法

3.1 平台直方图均衡

直方图均衡的实质是使图像中灰度概率密度较大的像素向附近灰度级扩展, 从而使灰度层次拉开, 而概率密度较小的像素的灰度级收缩, 使其

$$f(x) = \begin{cases} \gamma(M) - (\gamma(M) - X_{\min}) \times \left[1 - \frac{k(M)}{\gamma(M)} \cdot \frac{X_T - X_{\min}}{k(M) - X_{\min}} \right]^{C_L(x)} & x \leq X_T \\ \gamma(M) - (\gamma(M) - X_T) \times \left[1 - \frac{k(M)}{\gamma(M)} \cdot \frac{X_{\max} - X_T}{k(M) - X_T} \right]^{C_H(x)} & x > X_T \end{cases}. \quad (14)$$

3.3 算法硬件平台

平台选用 DSP 作为核心处理器, FPGA 为协处理器, 并配有相关接口芯片。硬件原理框图如

图 1 所示。DSP 采用 TI 公司的 TMS320DM642, 主频为 720 MHz, 运算速度可达到 5 760 MI/s。FPGA 采用 XILINX 公司的 XC4VFX25, 让出原来占有的部分灰度级。这样的处理使图像可以充分有效地利用各个灰度级, 因而增强了图像对比度。由于红外图像的灰度大多集中在灰度值较高或灰度值较低的部分, 致使图像灰度级很少, 层次感很差。因此, 这种方法对红外图像的增强效果较为明显。然而, 采用这种方法对红外图像进行增强, 会使得占有大多数像素的背景和噪声过度放大, 占有像素数较少的目标和细节受到抑制而变得模糊甚至丢失。为了克服直方图均衡的不足, 通常采用平台直方图均衡的方法对其加以修正。进行平台直方图均衡首先要选择一个合适的平台阈值 T , 如果某灰度级的直方图值大于平台阈值 T , 即将其直方图值设置为 T ; 如果其直方图值小于平台阈值 T , 则该值保持不变, 表达式为:

$$H_T(k) = \begin{cases} H(k) & H(k) \leq T \\ T & H(k) > T \end{cases}. \quad (11)$$

3.2 应用 PLIP 模型的平台直方图均衡算法

1997 年 Kim 提出了一种改进的平台直方图均衡方法^[17], 该方法能够更好地控制图像的增强效果, 表达式为:

$$f(x) = \begin{cases} X_{\min} + (X_T - X_{\min}) C_L(x) & x \leq X_T \\ X_T + (X_{\max} - X_T) C_H(x) & x > X_T \end{cases}, \quad (12)$$

式中: $f(x)$ 是输出图像的灰度色调函数; X_{\min} 、 X_{\max} 表示期望输出图像灰度的最小值和最大值; X_T 是平台阈值; $C_L(x)$ 是区间 $[X_{\min}, X_T]$ 的累积分布函数, $C_H(x)$ 是区间 $[X_T, X_{\max}]$ 的累积分布函数。

为了获得更符合人眼视觉效果的图像, 本文在 Kim 算法的基础上, 提出了一种基于 PLIP 模型的平台直方图均衡算法, 定义如下:

$$f(x) = \begin{cases} X_{\min} \tilde{\oplus} C_L(x) \tilde{\otimes} (X_T \tilde{\ominus} X_{\min}) & x \leq X_T \\ X_T \tilde{\oplus} C_H(x) \tilde{\otimes} (X_{\max} \tilde{\ominus} X_T) & x > X_T \end{cases}. \quad (13)$$

公式(13)经过 PLIP 模型处理后转换成公式(14):

图 1 所示。DSP 采用 TI 公司的 TMS320DM642, 主频为 720 MHz, 运算速度可达到 5 760 MI/s。FPGA 采用 XILINX 公司的 XC4VFX25,

整合了 200 000 个逻辑单元,系统时钟为 500 MHz。算法由 DSP 实现,红外图像的传输是由 FPGA 来完成的。

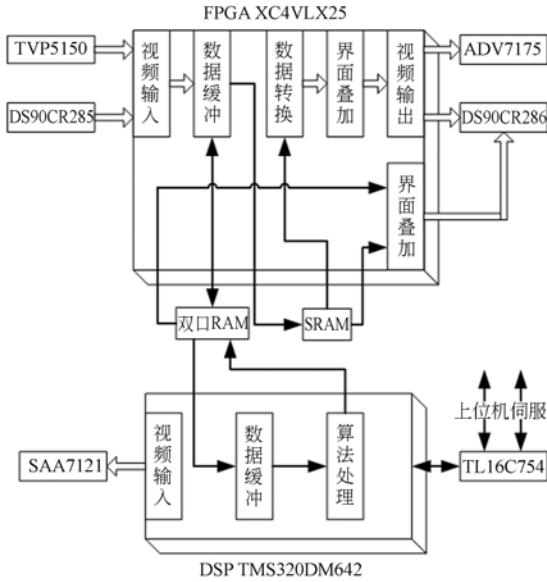


图 1 硬件平台原理框图

Fig. 1 Schematic diagram of hardware platform

4 实验结果与分析

4.1 实验平台

实验平台如图 2 所示,探测器相关技术参数如表 1 所示。

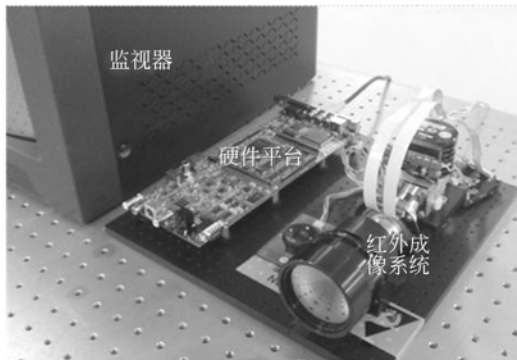


图 2 实验平台

Fig. 2 Experimental platform

表 1 探测器技术参数

Tab. 1 Technical indicators of detector

探测器	波长/ μm	阵列规格	帧频/Hz	NETD/mK
K508	3.7~4.8	320×256	25	≤15
Tau640	7.5~13.5	640×480	25	≤50

4.2 PLIP 模型参数选取

4.2.1 图像评价方法

图像质量是比较各种图像处理算法性能优劣以及优化系统参数的重要指标^[18]。图像质量的客观评价方法是指通过设计数学模型,对图像进行智能分析的评价方法。S. Agaian 等人在研究图像增强的过程中,提出了基于图像增强的图像评价方法^[19]。这种方法是将一幅图像 $I(i, j)$ 分解成 $k_1 \times k_2$ 个子块,然后查找子块内的局部最大值 $I_{\max k, l}$ 和最小值 $I_{\min k, l}$,将它们代入公式(15)求解。EMEE 值越大,表明图像的对比度越明显。为了方便计算,本文算法评价中选择的子块大小为 $4 \times 4, \alpha = 1$ 。

$$EMEE_{\alpha, k_1, k_2} = \frac{1}{k_1 k_2} \sum_{l=1}^{k_1} \sum_{k=1}^{k_2} \left[\alpha \left(\frac{I_{\max k, l}}{I_{\min k, l}} \right)^\alpha \ln \left(\frac{I_{\max k, l}}{I_{\min k, l}} \right) \right]. \quad (15)$$

信息熵表示图像中含有的信息量的多少,信息熵越大说明该图像中含有的信息越多,细节越清晰,视觉效果越好^[20]。信息熵定义公式为:

$$En = - \sum_{i=0}^{l-1} p(i) \log_2 p(i), \quad (16)$$

其中: $p(i)$ 表示一幅图像中灰度值为 i 的像素个数与图像中所有像素之比, l 为图像的灰度等级,本文取 $l = 256$ 。

4.2.2 PLIP 模型参数的选取

本文算法令 $\mu(M) = 256$, 利用图像评价函数 EMEE 和 En 来选取 $\gamma(M)$ 和 $k(M)$ 的最优参数。图 3 是 EMEE 和 En 随 $\gamma(M)$ 和 $k(M)$ 的变化曲线以及不同参数下的图像增强效果对比。图 3(a) 是坦克的原始图像,图 3(b) 是 EMEE 和 En 随 $\gamma(M)$ 的变化曲线 ($k(M) = 256$),图 3(c) 是 EMEE 和 En 随 $k(M)$ 的变化曲线 ($\gamma(M) = 256$)。从变化曲线可以看出, $\gamma(M)$ 对 EMEE 的影响较大, $k(M)$ 对 EMEE 的影响较小; $\gamma(M)$ 和 $k(M)$ 对 En 的影响较小,但随着 EMEE 的增大, En 会有稍微下降。图 3(d)~图 3(g) 是分别选择不同参数值的增强图像,可以看出, $\gamma(M)$ 越大,图像对比度越强, $k(M)$ 越大,图像细节越明显。计算图 3 各图的 EMEE 和 En , 如表 2 所示。通过这样的方法,可以获得 PLIP 模型的最优参数。

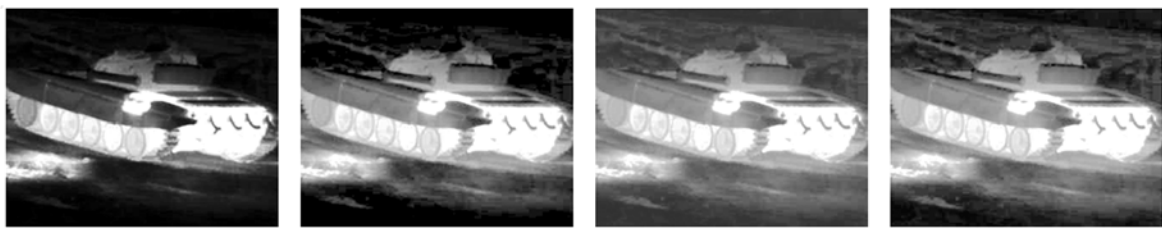
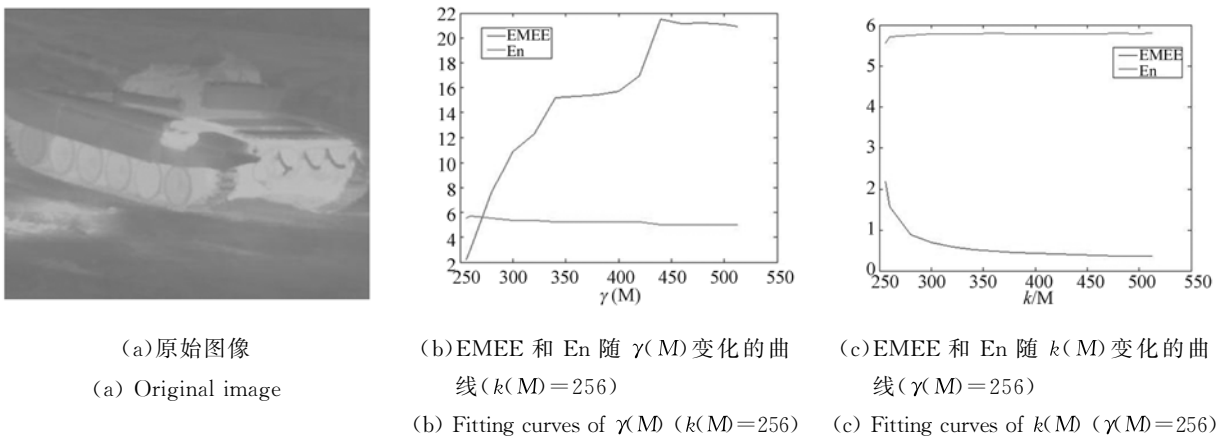


图 3 $\gamma(M)$ 和 $k(M)$ 拟合曲线及图像增强效果对比

Fig. 3 Fitting curves of $\gamma(M)$ and $k(M)$ and comparison of enhanced images

表 2 图 3 中各图的 EMEE 和 E_n 的值

Tab. 2 EMEEs and E_n s for Fig. 3

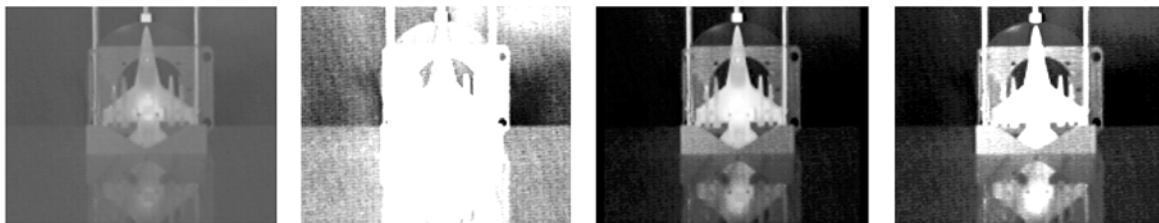
	图 3(a)	图 3(d)	图 3(e)	图 3(f)	图 3(g)
EMEE	0.047 5	2.187 6	21.219 0	3.058 4	16.258 0
E_n	5.703 9	5.030 6	5.550 9	5.775 5	5.797 0

4.3 实验结果与分析

实验 1 用中波红外成像系统对飞机模型进行成像实验,实验结果如图 4 所示,图 4(d)中 $\mu(M)=256, \gamma(M)=345, k(M)=330$,可以明显看到,本文算法在增强飞机模型对比度的同时没有丢失

细节信息,视觉效果更好。

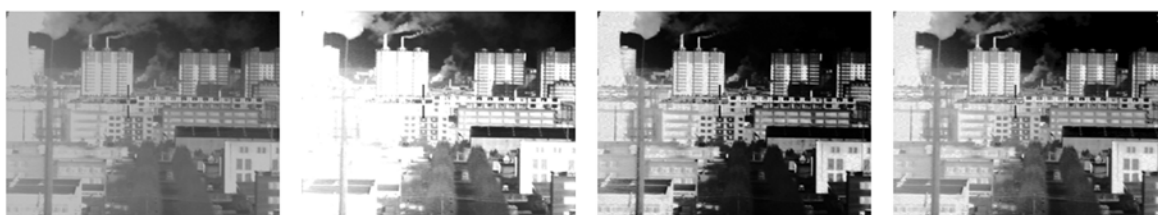
实验 2 用长波红外成像系统对城市郊区进行远景拍摄。实验结果如图 5 所示,图 5(d)中 $\mu(M)=256, \gamma(M)=512, k(M)=350$,图 5 的场景比较复杂,通过平台直方图变换后,图像整体变亮,视觉效果差。传统的 LIP 算法虽然增强了图像对比度,但是部分细节信息丢失,而本文算法很好地兼顾了图像对比度、图像细节以及视觉效果。对图 4 和图 5 的红外图像进行客观评价,利用公式(15)和公式(16)计算图像的 EMEE 和 E_n ,结果如表 3 和表 4 所示。



(a) Original image of K508 (b) Plateau histogram equalization (c) Traditional LIP model (d) The proposed algorithm

图 4 K508 图像的不同算法增强效果对比

Fig. 4 Comparison of enhanced images for K508 by different algorithms



(a) Tau640 原始图像 (b) 平台直方图均衡化 (c) LIP 模型 (d) 本文算法
 (a) Original image of Tau640 (b) Plateau histogram equalization (c) Traditional LIP model (d) The proposed algorithm

图5 Tau640 图像的不同算法增强效果对比

Fig. 5 Comparison of enhanced images for Tau640 of different algorithms

表3 图4中各图的EMEE和En的值

Tab. 3 EMEEs and Ens for images of Fig. 4

	图4(a)	图4(b)	图4(c)	图4(d)
EMEE	0.096 8	9.808 3	9.817 2	12.412 0
En	5.073 3	4.694 3	4.984 3	5.117 4

表4 图5中各图的EMEE和En的值

Tab. 4 EMEEs and Ens for images of Fig. 5

	图5(a)	图5(b)	图5(c)	图5(d)
EMEE	1.013 8	1.495 1	6.481 4	7.835 8
En	7.200 3	6.696 5	6.544 2	7.246 5

5 结 论

本文针对以往的红外图像增强方法大多未考虑人眼的视觉特性,存在“超区间值”的问题,创新性地提出了基于参数化对数图像模型的平台直方图均衡增强算法,详细分析了模型参数的选取,并进行了参数优化。自行研制了算法硬件平台,并成功将本文算法移植到该平台中。在该平台上分别用中波红外成像系统和长波红外成像系统对算法进行了实验验证。实验结果表明:本文算法能够在不丢失图像细节的情况下,增强图像对比度,提高图像的视觉效果;增强后图像的EMEE值比传统的平台直方图均衡算法提高了至少5倍以上,能够有效地改善图像质量和提高图像的视觉效果。

参考文献:

- [1] 李一芒,何昕,魏仲慧. 红外预警实时图像处理系统设计与实现[J]. 液晶与显示, 2013, 28(1): 110-114.
 LI Y M, HE X, WEI ZH H. Design and implement of real-time image processing system for IR warning system based on multi-passage[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2013, 28(1): 110-114. (in Chinese)
- [2] 王田,刘伟宁,孙海江,等. 基于复杂度和方向梯度的红外弱小目标检测方法[J]. 液晶与显示, 2012, 27(5): 692-696.
 WANG T, LIU W N, SUN H J, et al.. Detecting algorithm of infrared small dim targets based on complexity and orientation gradient [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2012, 27(5): 692-696. (in Chinese)
- [3] 邢素霞. 红外热成像与信号处理[M]. 北京:国防工业出版社, 2011, 61-65.
 XING S X. *Infrared Imaging and Signal Processing*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011, 61-65. (in Chinese)
- [4] 刘火平,孟维平,宋立维,等. 红外图像序列中不均匀背景消除新方法[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 images [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2012, 27(4): 539-544. (in Chinese)
- [5] 曹扬,金伟其,刘崇亮,等. 红外焦平面阵列的自适应非均匀性校正及硬件实现[J]. 光学精密工程, 2011, 19(12): 2985-2991.
 CAO Y, JIN W Q, LIU CH L, et al.. Adaptive nonuniformity correction and hardware implementa-

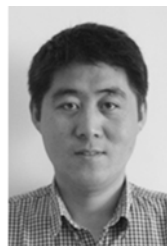
- tion of IRFPA[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(12): 2985-2991. (in Chinese)
- [6] 刘涛,张炜,何付军,等. 红外热波检测方法图像增强环节研究[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(7): 1923-1927.
LIU T, ZHANG W, HE F J, *et al.*. Research on image enhancement in infrared thermal waves NDT [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(7): 1923-1927. (in Chinese)
- [7] 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*, 2011, 26(3): 374-378. (in Chinese)
- [8] 耿鑫,胡晓光. 基于模糊同组划分的多尺度彩色图像增强算法[J]. *仪器仪表学报*, 2012, 33(3):602-608.
GENG X, HU X G. Multi-scale color image enhancement algorithm based on fuzzy peer groups [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(3):602-608. (in Chinese)
- [9] 孙玉胜,白克. 基于小波变换与加权滤波的电机红外图像增强[J]. *液晶与显示*, 2010, 25(3): 439-443.
SUN Y SH, BAI K. Enhancement of motor infrared image based on wavelet transform and weighted filtering [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2010, 25(3): 439-443. (in Chinese)
- [10] 韩希珍,赵建. 结合偏微分方程增强图像纹理及对比度[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(6): 1382-1387.
HAN X ZH, ZHAO J. Enhancement of image texture and contrast combined with partial differential equation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(6): 1382-1387. (in Chinese)
- [11] JOURLIN M, PINOLI J C. A model for logarithmic image processing [J]. *Microsc.*, 1989, 156: 33-40.
- [12] VERTAN C, OPREA A, FLOREA C, *et al.*. A pseudo-logarithmic image processing framework for edge detection [J]. *in Proc. Adv. Concepts Intell. Vis. Syst.*, 2008, 5259:637-644.
- [13] DEBAYLE J, PINOLI J C. General adaptive neighborhood choquet image filtering[J]. *J. Math. Imaging Vis.*, 2009, 35(3):173-185.
- [14] DEBAYLE J, PINOLI J C. General adaptive neighborhood image processing: Part I: Introduction and theoretical aspects[J]. *J. Math. Imaging Vis.*, 2006, 25(2): 245-266.
- [15] PANETTA K, WHARTON E, AGAINAN S. Parameterization of logarithmic image processing models [J]. *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. A, Syst., Humans*, 2007.
- [16] WHARTON E, AGAINAN S, PANETTA K. A logarithmic measure of image enhancement [J]. *Proc. SPIE 2006 Defense and Security Symp., Orlando, FL*, 2006, 6250: 62500P.
- [17] KIM Y T. Contrast enhancement using brightness preserving bi-histogram equalization [J]. *IEEE Trans. Consum. Electron.*, 1997, 43(1):1-8.
- [18] 蒋刚毅,黄大江,王旭,等. 图像质量评价方法研究进展[J]. *电子与信息学报*, 2010, 32(1): 220-224.
JIANG G Y, HUANG D J, WANG X, *et al.*. Overview on image quality assessment methods[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, 32(1):220-224. (in Chinese)
- [19] AGAIAN S, PANETTA K, GRIGORYAN A. A new measure of image enhancement [J]. *in Proc. Int. Conf. Signal Process. Commun.*, 2000, 19-22.
- [20] 周欣. 红外图像视觉效果增强技术的研究[D]. 天津: 天津大学, 2008.
ZHOU X. *Research on the Visual Effect Enhancement Technology for Infrared Images*[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008. (in Chinese)

作者简介:



朱瑞飞(1986—),男,山西朔州人,博士研究生,2009年于吉林大学获得学士学位,主要从事红外图像处理方面的研究。E-mail: zhuiruifei1105@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,2000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,主要从事光机电系统微小化与精确制导技术研究。E-mail: jiahg@ciomp.ac.cn