

结合直方图均衡和模糊集理论的红外图像增强

云海蛟^{1,2)}, 吴志勇¹⁾, 王冠军^{1,2)}, 刘雪超³⁾, 梁敏华¹⁾

¹⁾ (中国科学院长春光学精密机械与物理研究所光电测控部 长春 130033)

²⁾ (中国科学院大学 北京 100049)

³⁾ (西安建筑科技大学机电工程学院 西安 710055)

(yunhaijiao2011@126.com)

摘要: 针对靶场光电测量设备采集到的红外图像存在对比度低和边缘模糊的问题, 提出结合直方图均衡化和模糊集理论图像的增强方法。首先采用对数隶属度函数将图像转换到模糊域, 再对图像进行多次非线性变换, 增强边缘信息; 其次提出改进的自适应平台直方图均衡化算法, 提高红外图像对比度; 最后将 2 幅图像按加权系数相乘后叠加融合出最终图像。实验结果证明, 该方法克服了传统增强算法易出现的过增强和局部信息被弱化等问题, 增强后的图像细节丰富, 具有更好的视觉效果, 能够满足靶场的实际要求, 具有广泛的工程应用价值。

关键词: 图像增强; 红外图像; 自适应平台直方图均衡; 模糊集理论
中图分类号: TP751.1

Enhancement of Infrared Image Combined with Histogram Equalization and Fuzzy Set Theory

Yun Haijiao^{1,2)}, Wu Zhiyong¹⁾, Wang Guanjun^{1,2)}, Liu Xuechao³⁾, and Liang Minhua¹⁾

¹⁾ (Photoelectric Measurement and Control Department, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033)

²⁾ (University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

³⁾ (Electromechanic Engineer College, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055)

Abstract: Infrared images collected by optical measure equipment are low contrast and with fuzzy image edge. In order to solve these problems, a novel method combined with platform histogram equalization and fuzzy theory is proposed. Firstly, it uses logarithm membership function to translate gray image into the fuzzy domain, then image's edges are carried out non-linear transformations in the fuzzy domain to enhance image's edges information. Next, the method combined with improving and adaptive platform histogram equalization is presented to improve the image contrast effectively. Finally, the fusion of two images multiplied by weighting coefficients is applied. Experimental results show that this algorithm has an excellent enhancement effect, which overcomes some shortcomings that traditional algorithms showed, such as the phenomenon of the excessive enhancement and weakening of the local gray information. Meanwhile there are more abundant details and more pleasing visual content in the enhanced images, which enables to satisfy the demands of shooting range and is of great and wide value for engineering application.

Key words: image enhancement; infrared image; adaptive platform histogram equalization; fuzzy set theory

收稿日期: 2014-06-20; 修回日期: 2014-11-02. 基金项目: 国家自然科学基金(61405191); 吉林省自然科学基金(201115124). 云海蛟(1987—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为图像增强、图像融合; 吴志勇(1965—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为光电测控设备总体技术、视频调光调焦、光纤通讯; 王冠军(1987—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为图像处理、机器视觉; 刘雪超(1985—), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为图像处理、机器视觉; 梁敏华(1972—), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为图像处理、视频调光调焦.

光电测量设备是靶场建设中不可替代的终端测量设备, 其图像质量的好坏将直接影响测试靶场可视化建设的质量和指挥决策. 在某些特殊观测条件下, 光电测量设备采集到的红外图像对比度较差、边缘模糊. 因此, 需对红外图像进行必要的增强预处理.

现有的红外图像增强方法包括空域法和频域法. 空域法主要有灰度变换、中值滤波、直方图均衡化、多尺度 Retinex 算法及其改进算法等. 频域法主要有傅里叶变换、小波变换、Contourlet 变换和 Curvelet 变换等. 目前, 国内外学者已经从图像特征、图像视觉效果及其各种数学理论方面提出了多种图像增强算法^[1-6]. 但针对不同的应用需求, 不同的算法也就有一定的局限性. 基于直方图变换的增强技术针对图像的空域进行, 是一种较为成熟的算法, 实现起来也比较简单; 但由于传统直方图均衡化后造成图像过度增强, 且无法保持图像的熵值和均值亮度, 因此在实际工程中很少应用. 为此, 许多学者提出了大量改进的直方图均衡化算法. 例如, 陈钱等^[7]提出直方图双向均衡技术, 王炳健等^[8]提出自适应平台直方图增强算法, 韩希珍等^[9]提出结合偏微分方程的直方图反均衡算法, 陈莹等^[10]针对微光图像提出多子动态的直方图均衡化算法等. 近几年, 模糊集理论逐渐发展起来, 在 20 世纪 80 年代中期被 Pal 等^[11]首次应用于图像增强领域, 并获得突破性成果. 基于模糊集理论也发展出多种有效的增强算法^[2,12-13], 但大部分算法会出现泛白发灰、对比度低的现象.

针对某些红外任务图像对比度差、目标细节不清晰的问题, 采用平台直方图均衡化方法对红外图像进行增强处理能够改善图像的对比度, 同时利用模糊集理论增强图像边缘、细节信息. 对此, 本文结合平台直方图均衡化与模糊集理论增强方法的各自特点对 2 种传统方法进行改进, 并选择相应的融合方法, 将 2 种方法融合叠加出新的增强方法, 有效地提高图像对比度、改善边缘模糊, 同时不会出现过增强现象. 实验结果证明, 本文方法能有效地改善红外图像质量, 具有工程应用价值.

1 本文方法

1.1 模糊集理论增强方法

1965 年, 美国加州大学伯克利分校扎德教授^[14]首次将集合论用于表述模糊性数值的集合, 以弥补仅用二值逻辑来描述事物的缺点. 在模糊逻辑中,

采用隶属度函数来反映模糊集合中元素隶属程度. 随后, Pal 等利用模糊集理论提取图像细节信息, 实现图像边缘增强; 但是由于该算法中存在硬性剪切情况致使大量的灰度信息丢失, 图像边缘增强效果不明显. 因此, 本文针对红外图像边缘模糊的问题提出结合模糊集理论的改进方法, 提高图像边缘清晰度, 便于人眼观察. 该方法包括图像模糊特征平面的提取, 模糊增强和反变换 3 步.

1) 图像模糊特征平面的提取

采用对数隶属度函数将灰度图像 I 从空间域映射到模糊域, 得到模糊特征平面 $\{\mu\}$. 定义对数隶属度函数

$$\mu(m, n) = G(I(m, n)) = \text{lb} \left(1 + \frac{I(m, n) - I_{\min}}{I_{\max}} \right).$$

其中, I_{\max} , I_{\min} 分别代表图像的最大和最小像素值.

通过对数隶属度函数的变换, 将模糊域中每一个元素 $\mu(m, n)$ 的取值范围确定为 $[0, 1]$, 克服灰度级硬性剪切的情况, 避免出现增强后图像的大量灰度信息丢失现象.

2) 模糊增强

利用

$$\mu'(m, n) = T^{(r)}(\mu(m, n)) = T(T^{(r-1)}(\mu(m, n))),$$

$$r = 1, 2, 3, \dots$$

和

$$T^{(1)}(\mu(m, n)) = \begin{cases} 2 \cdot [\mu(m, n)]^2, & 0 \leq \mu(m, n) \leq 0.5 \\ 1 - 2 \cdot [1 - \mu(m, n)]^2, & 0.5 \leq \mu(m, n) \leq 1 \end{cases}$$

对模糊域中 μ 进行变换, 得到新的模糊特征平面 $\{\mu'\}$. 其中, 变换 T 取为 S 型函数, $T^{(r)}$ 是 T 的函数 r 次迭代运算.

依据变换 T 与迭代次数 r 的关系做出曲线, 如图 1 所示. 可以看出, 随着迭代次数的增加, 曲线变化趋势增快, 也就是说对图像的灰度值影响较大. 因此, 应根据需要选择迭代次数.

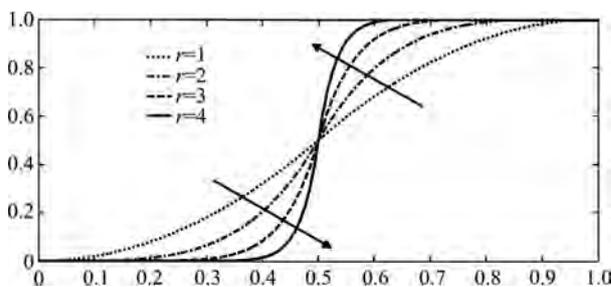


图 1 迭代函数

本文采用改进模糊增强方法确定迭代次数, 图像源为 320×256 像素大小的 8 位红外图像, 得到结果如图 2 所示. 可以看出, 随着迭代次数的增加边缘变得越来越清晰; 但当迭代次数 $r=3$ 时, 图像出现失真现象. 因此, 本文选取迭代次数为 $r=2$.

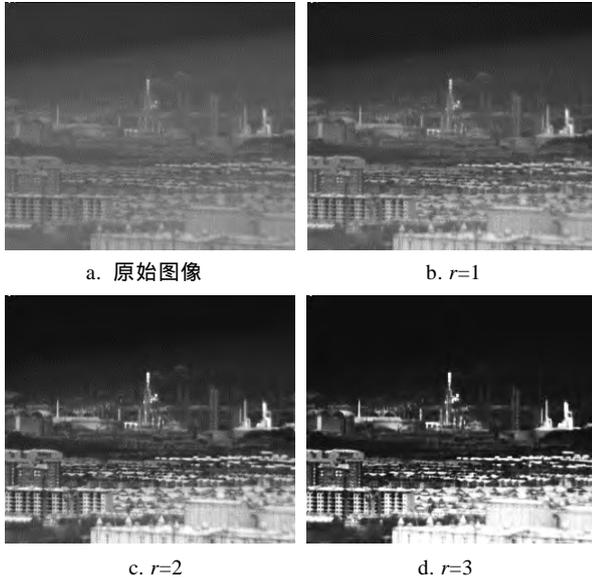


图 2 模糊增强算法处理后的图像

3) 反变换

利用

$$I'(m, n) = G^{-1}(\mu'(m, n)) = I_{\min} + I_{\max}(2^{\mu'(m, n)} - 1), 0 \leq \mu'(m, n) \leq 1$$

对新的模糊特征平面 $\{\mu'\}$ 进行反变换, 得到模糊增强后的图像 I' . 其中, G^{-1} 表示逆变换.

1.2 直方图均衡增强方法

直方图均衡(histogram equalization, HE)^[15]是一种最基本的图像增强方法, 也是应用最简单和最广泛的方法之一, 该方法能够扩展图像的灰度级分布, 从而增强图像的对比度和清晰度. 但是, 红外图像具有背景像素多、目标像素少的特点, 而一般的 HE 方法过度合并目标信息和延伸背景信息, 会出现目标信息被弱化的现象. 对此, 本文提出改进的自适应平台直方图均衡化方法, 结合新的统计方式来重新分配灰度级, 实现灰度级适当的分配, 以达到增强图像对比度的目的.

本文方法选择的平台值必须小于背景灰度对应的主峰值个数; 在保证不削弱目标的前提下, 还必须不小于目标灰度对应峰值个数. 据此, 结合王炳健等^[8]提出的平台值自适应估计方法, 具体步骤如下:

Step1. 统计原图像的直方图 $L(k)$, $0 \leq k \leq M$ 取出直方图中的非零单元, 并对其进行一维的 3 邻域中值滤

波, 构成集合 $\{G(l) | 0 \leq l \leq L\}$, L 为 $L(k)$ 中非零单元的个数.

Step2. 找出 $G(l)$ 中局部最大值和整体最大值. 对非零单元进行一阶差分运算

$$G^{(1)}(m) = G(m) - G(m-1), 1 \leq m \leq L.$$

找出 $G(l)$ 中满足

$$|G^{(1)}(m)| < \min\{|G^{(1)}(m-1)|, |G^{(1)}(m+1)|\},$$

$G^{(1)}(m-1) < 0, G^{(1)}(m+1) > 0, 0 \leq l_i \leq L, 0 \leq i \leq N$ 条件的 $G(l_i)$. 则 $G(l_i)$ 为局部最大值, N 为局部最大值的个数.

Step3. 由 $G(l_i)$ 求出整体最大值 $G(l_k)$, 并求出子集 $\{G(l_i) | k \leq i \leq N\}$ 的中值 G_{thd} , 即为估计的平台阈值.

在确定好平台阈值的基础上, 本文提出改进的统计直方图灰度分布方法, 即统计大于平台阈值 G_{thd} 的个数

$$C_{r_i} = \begin{cases} 0, & r_i < G_{\text{thd}} \\ 1, & r_i \geq G_{\text{thd}} \end{cases}$$

其中, C_{r_i} 表示第 i 级灰度值个数, r_i 为图像中第 i 级灰度值.

本文重新定义“概率密度函数”为

$$P_c(r_i) = \frac{C_{r_i}}{\sum_{j=1}^{m-1} C_{r_j}};$$

然后, 对具有 256 个灰度级的输出图像进行累积统计直方图

$$L_k = 255L(r_k) = 255 \sum_{j=1}^k P_c(r_j) =$$

$$255 \frac{\sum_{j=1}^k C_{r_j}}{\sum_{j=1}^{m-1} C_{r_j}} = G_{\text{gain}} \sum_{j=1}^k C_{r_j}.$$

其中, $G_{\text{gain}} = \frac{255}{N_c}$ 为新定义的增益变量, $N_c = \sum_{j=1}^{m-1} C_{r_j}$

表示压缩后的灰度级总个数.

若一幅 8 位图像所具有的灰度级个数占总灰度级个数的一半, 可以认为该图像视觉效果好, 定义该变量为 $G_{\text{clip}}=2$, 因此按

$$L_k = 255L(r_k) = \begin{cases} G_{\text{gain}} \sum_{j=1}^k C_{r_j}, & G_{\text{gain}} \leq G_{\text{clip}} \\ 128 + G_{\text{clip}} \left(\sum_{j=1}^k C_{r_j} - N_c \right), & G_{\text{gain}} > G_{\text{clip}} \end{cases}$$

进行修正.

1.3 叠加融合

图像融合^[16-17]的目的是综合来自不同传感器对同一个场景的多个算法的处理结果, 使其具有更好的图像视觉效果. 图像融合的方法分为像素级融合、特征级融合和决策级融合. 本文主要应用像素级融合方法, 将 2 幅图像融合形成一幅新的图像, 可以有效地增加图像中每一个像素的信息内容, 为下一步图像处理提供更多的特征信息. 该方法保留了尽可能多的信息, 精度比较高. 目前, 常用的像素级融合方法包括加权平均法、逻辑滤波法、多分辨率塔式算法等.

将 2 种方法融合在一起的主要目的在于 HE 方法主要针对图像对比度的增强问题, 而基于模糊集理论增强方法主要针对增强和细化边缘问题. 本文结合各自优势将 2 种方法融合在一起, 提出新的增强方法. 为了更加充分地发挥 2 种增强方法对红外图像的增强特点, 同时结合图像融合的思想, 本文采用加权平均的融合方式. 首先用改进的平台直方图均衡化方法和基于模糊集理论的增强方法分别对图像进行处理, 然后把处理后的图像按照一定的比例加权平均之后融合出一幅新的图像, 并在一定范围之内得到很好的增强效果.

为了进一步提高图像的清晰度, 对原始图像进行模糊域的变换处理, 改善图像的边缘信息; 再将经改进的自适应平台直方图均衡后的图像乘以一个加权系数 τ , 与增强后的边缘图像叠加, 获得新的图像. 在提高红外图像的对比度和清晰度的同时, 避免了饱和现象的发生.

设经过改进平台直方图均衡后的图像为 f_H , 再与经过模糊增强后的图像 f_F 融合叠加生成的图像为

$$f_{dj} = \tau \cdot f_H + (1 - \tau) \cdot f_F;$$

其中, τ 为加权系数, $0 < \tau < 1$, 可根据需要调节 τ 的大小. 通过对大量图像进行实验, 得到最佳的 τ 取值为 0.6~0.8, 在这个范围之内图像增强效果最佳.

2 实验结果及其分析

为验证本文方法在靶场环境中应用的有效性和可靠性, 我们进行了大量实验. 实验平台为靶场环境下的某型号经纬仪, 程序运行环境为 VC6.0, 处理的数据源为 320×256 像素大小的对比度低、细节不清晰和视觉效果差的红外图像, 并与平台直方图均衡化方法、模糊增强方法相比较. 因篇幅

有限, 文中仅列出 4 个实验的增强处理效果图.

实验 1. 图 3 所示为典型的靶场图像, 具有单一目标、单一背景等特点. 图 3a 为原始图像, 图像对比度较低, 目标边缘模糊; 图 3b 为平台直方图均衡化方法增强图像, 增强后图像目标突出, 对比度有所改善, 但轮廓不清晰, 整体泛白; 图 3c 为模糊增强方法图像, 轮廓清晰, 但图像整体泛白; 图 3d 为本文方法采用 3 种权重因子处理的结果, 对比度提高, 同时目标轮廓清晰, 适合人眼观察.

实验 2. 图 4 所示靶场图像为一类对比度极低, 几乎判别不出具体目标内容的红外图像. 图 4a 为原始红外图像; 图 4b 为平台直方图均衡方法增强图像, 图中图像严重失真, 目标被过度拉伸, 出现饱和现象; 图 4c 为模糊方法增强图像, 图中电线杆的轮廓有所体现, 但是图像对比度低, 视觉效果差; 图 4d 为本文方法采用 3 种权重因子处理的结果, 图中电线杆和远处的建筑物轮廓清晰可见, 容易分辨, 亮度也有很大的提高.

实验 3. 图 5 所示建筑图像占据一半多的画幅, 目标细节多. 图 5a 为原始红外图像; 图 5b 为平台直方图均衡方法增强图像, 图中楼宇建筑物边缘模糊, 整体泛白; 图 5c 为模糊方法增强图像, 图中楼宇建筑物的轮廓有所体现, 但建筑物的亮度过亮; 图 5d 为本文方法采用 3 种权重因子处理的结果, 图中建筑物的亮度有所改善, 适合人眼观察, 同时天空中云和烟清晰可见, 丰富了图像中的细节信息.

实验 4. 图 6 所示建筑图像填满了整个画幅, 具有细节多的特点. 图 6a 为原始红外图像; 图 6b 为平台直方图均衡方法增强图像, 图中楼宇建筑物依旧有泛白现象, 同时细节部分有些失真; 图 6c 为模糊方法增强图像, 图中楼宇建筑物突出轮廓, 但是图像对比度低; 图 6d 为本文方法采用 3 种权重因子处理的结果, 图中楼宇建筑物的窗户边缘和楼体的斑点清晰可见, 适合人眼观察, 亮度适中.

图 3e, 3f ~ 6e, 6f 为原图和本文方法的直方图分布平均统计图, 可以看出, 图像的动态范围有所拉伸, 不再是孤立的单峰; 由此可以明显看出, 本文方法选取的 3 种权重因子范围为 0.6~0.8, 处理效果好, 并有效地解决了图像过增强、细节被弱化、灰度级被硬性剪切和整体泛白的问题, 同时增强效果最好, 适应性最强. 为了给出图像增强效果的定量分析, 引用对比度测量函数和信息熵 2 种

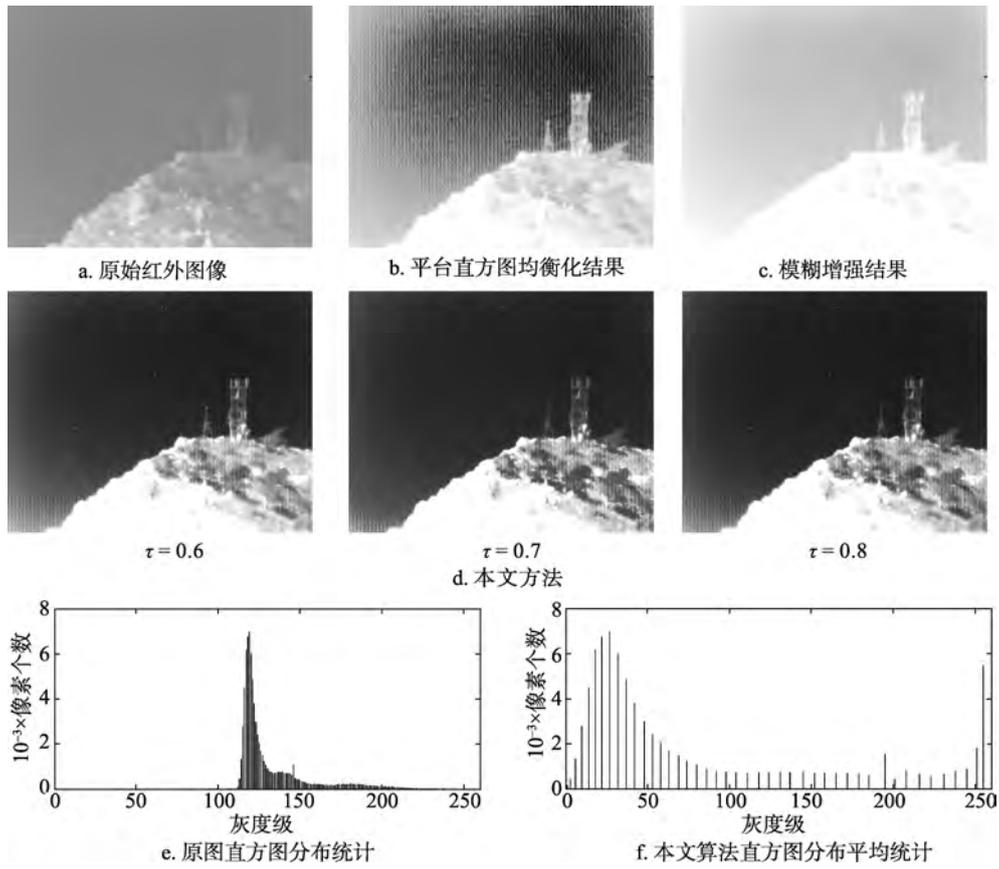


图 3 实验 1 图像的增强对比

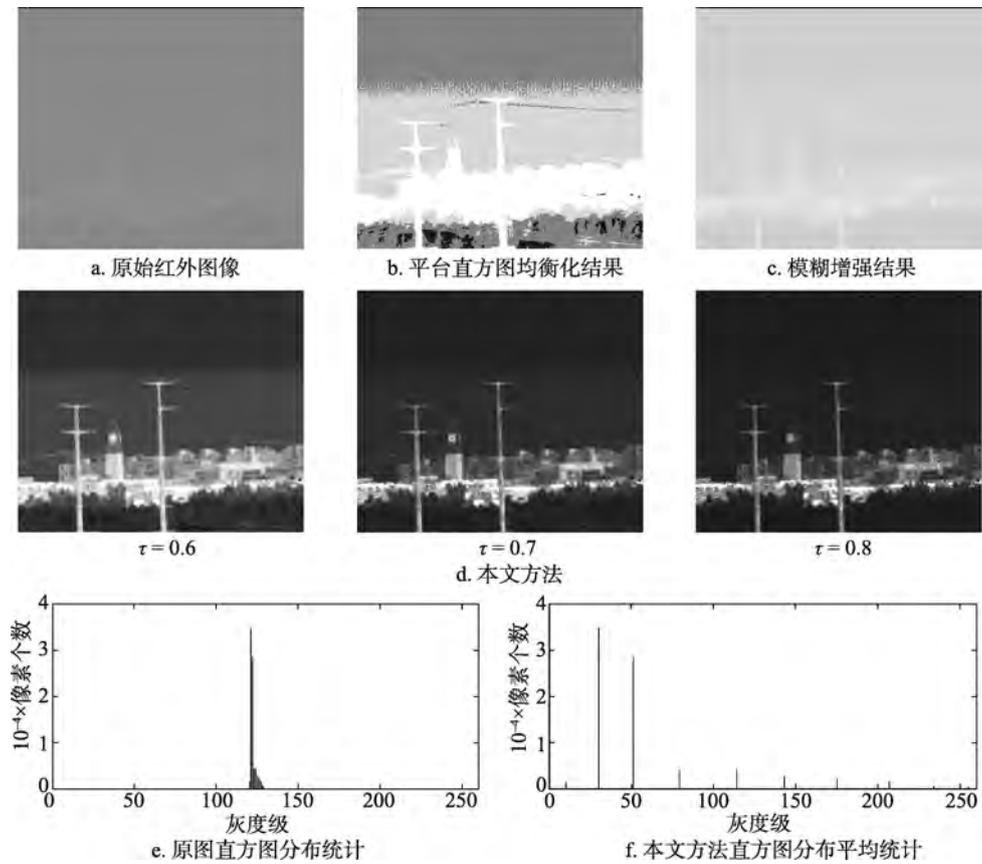


图 4 实验 2 图像的增强对比

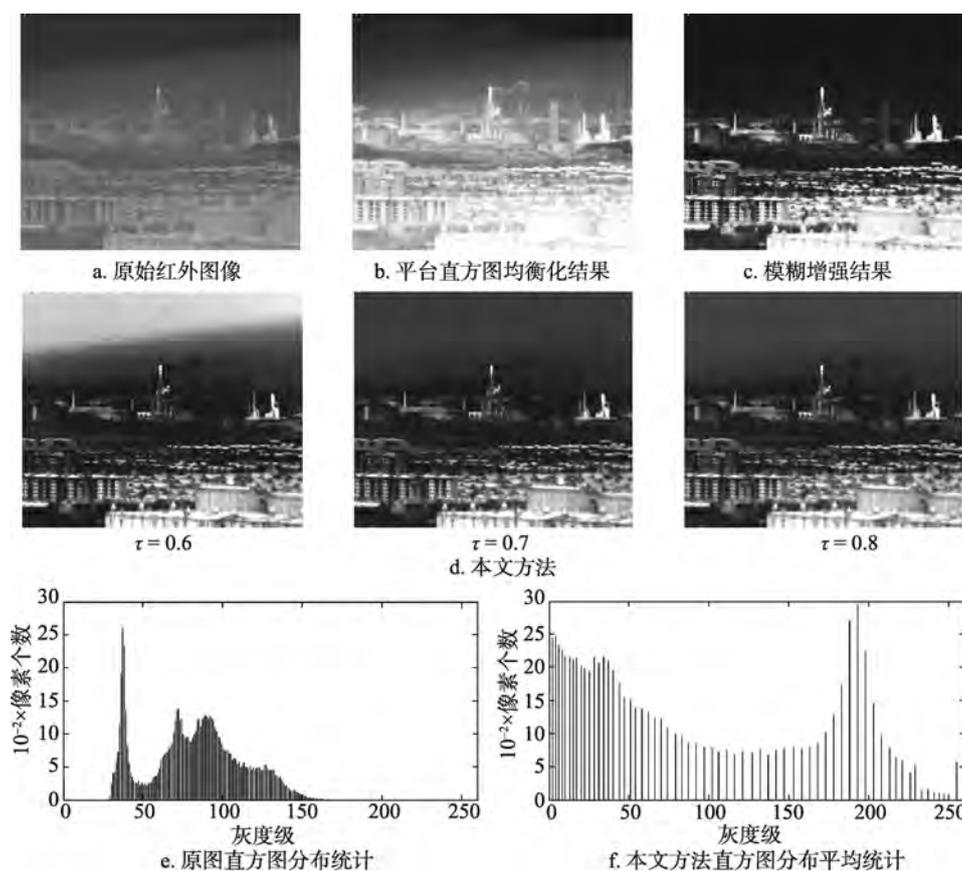


图 5 实验 3 图像的增强对比

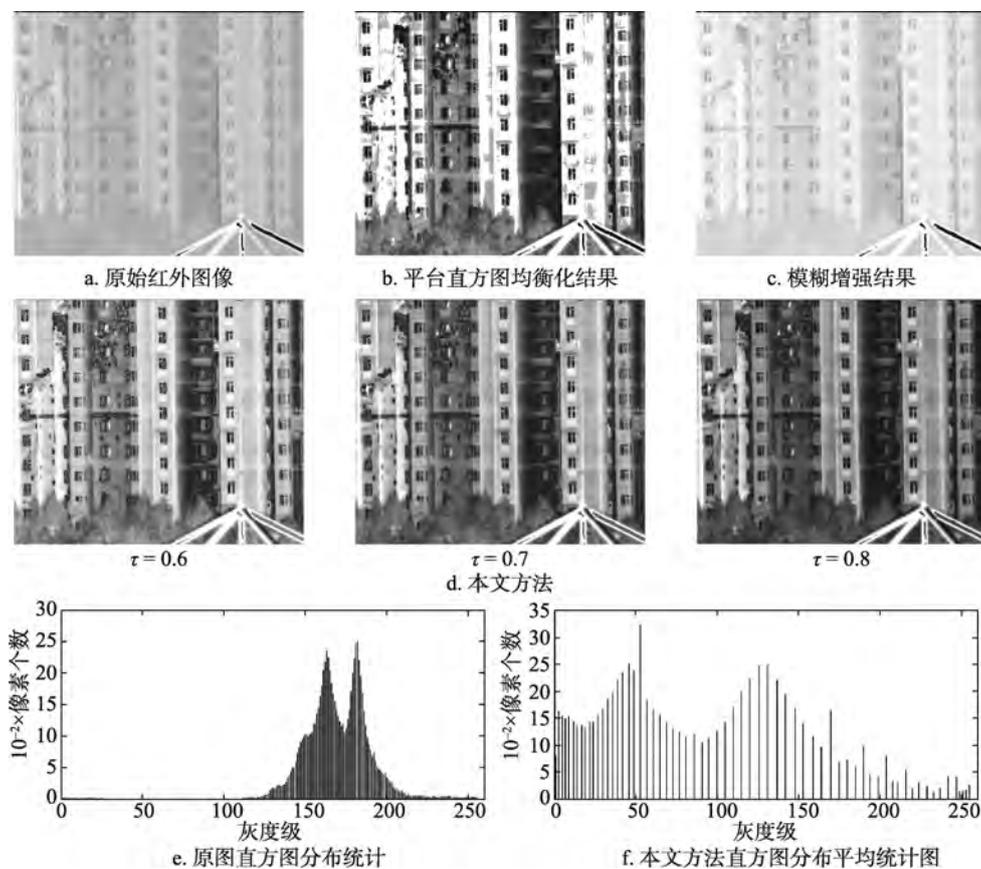


图 6 实验 4 图像的增强对比

经典指标进行客观评价。

1) 对比度测量函数 $U(x)$ ^[18].

$$U(x) = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N |u(i, j)| \cdot \lg(1 + u(i, j));$$

其中,

$$u(i, j) = 4I(i, j) - \{I(i-1, j) + I(i+1, j) + I(i, j-1)\},$$

$M \times N$ 是图像中总的像素个数, $I(i, j)$ 为图像的灰度值. $U(x)$ 表征图像经过增强处理之后对比度效果的特征量, $U(x)$ 值越大, 则说明对比度越强, 细节越清晰, 增强效果越好.

2) 信息熵 $H(x)$.

$$H(x) = -\sum_{i=0}^{L-1} p(i) \lg p(i),$$

其中, $p(i)$ 表示一幅图像中灰度值为 i 的像素个数与原图像中所有像素个数之比. $H(x)$ 反映了图像信息包含量的多少, 其值越大, 说明该图像包含信息越多; 反之, 则信息量越少. 对于同一幅图像的不同增强处理结果来说, 当 $H(x)$ 比较大时, 说明处理后的图像纹理细节表现的比较多, 细节越清楚, 视觉效果越好.

为了测试本文方法更加具有通用性和鲁棒性, 除了之前展示的 4 幅图像外, 本文又选取 7 幅质量较差的红外图像进行处理, 其中包括对比度低, 边缘模糊等图像分别进行平台直方图均衡化方法、模糊增强方法和本文方法增强处理. 实验结果证明, 加权系数为 0.6~0.8 时, 本文方法均能获得较好的视觉效果, 从图 7~8 可以看出, 本文方法处理后的图像均高于原图像和其他 2 种单一方法. 在统计对比度测量函数值时发现, 平台直方图均衡化方法比原始图像的测量值高出很多, 处理出来的效果图也是有失真现象, 因此, 本文对该方法进行改进也是有必要的. 在统计信息熵方面, 本文方法增强后图像的信息熵较原始图像提高 1.29 倍, 较平台直方图均衡化方法增强效果提高 1.16 倍, 较模糊增强方法提高 1.08 倍. 在算法运行时间方面, 采用 CPU 为 Intel Core 双核和主频为 2.83 GHz 的计算机, 运行环境为 VC6.0, 平台直方图均衡化方法处理的平均时间为 0.015 s, 模糊增强方法处理的平均时间为 0.032 s, 本文方法处理的平均时间为 0.045 s, 所用时间比前 2 种方法的时间长, 但处理效果却比前 2 种方法要好, 同时也满足了工程上的实时性要求.

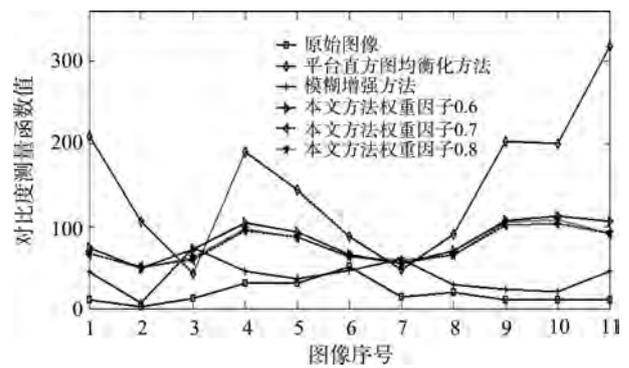


图 7 对比度测量函数值对比

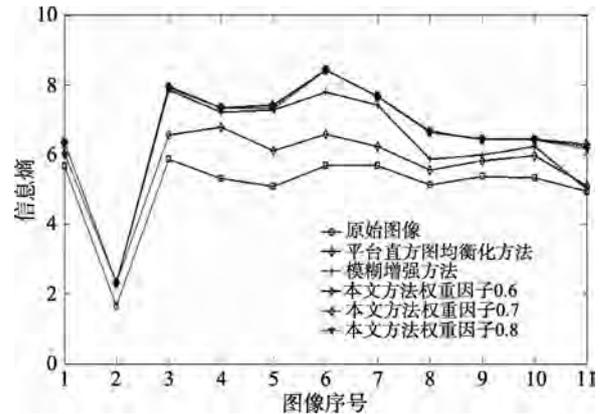


图 8 信息熵对比

3 结 语

本文提出一种结合模糊集理论和自适应平台直方图均衡化的增强方法, 有效地改善了图像的对比度低、边缘细节不清晰的问题. 针对红外图像边缘模糊的问题, 结合模糊集理论对图像进行模糊处理, 增强图像的边缘细节; 同时, 结合自适应平台直方图均衡化方法提出改进方法, 解决红外图像对比度低的问题; 最后将 2 幅图像进行叠加实现增强效果, 并采用对比度测量函数值和信息熵对图像进行客观比较. 本文实验在 VC6.0 编程软件上进行处理, 处理红外图像大小为 320×256 像素大小的 8 位红外图像, 处理的平均时间为 45 ms. 实验结果表明, 本文方法处理后的图像清晰度高、可视效果好满足实时性, 具有广泛的工程应用价值.

参考文献(References):

- [1] Qin Xujia, Wang Huiling, Du Yicheng, et al. Structured light image enhancement algorithm based on Retinex in HSV color space[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer

- Graphics, 2013, 25(4): 488-493(in Chinese)
(秦绪佳, 王慧玲, 杜轶诚, 等. HSV 色彩空间的 Retinex 结构光图像增强算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2013, 25(4): 488-493)
- [2] Hasikin K, Isa N A M. Enhancement of the low contrast image using fuzzy set theory[C] //Proceedings of the 14th International Conference on Computer Modelling and Simulation. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2012: 371-376
- [3] Yang Biwu, Guo Xiaosong, Wang Kejun, *et al.* New algorithm of infrared image enhancement based on histogram nonlinear extension[J]. Infrared and Laser Engineering, 2003, 32(1): 1-3(in Chinese)
(杨必武, 郭晓松, 王克军, 等. 基于直方图非线性拉伸的红外图像增强新算法[J]. 红外与激光工程, 2003, 32(1):1-3)
- [4] Zhang Kai, Li Xuzhi. An image fusion method based on regional correlation for high resolution remote sensing images[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2014, 26(6): 889-895(in Chinese)
(张凯, 李绪志. 基于区域相关性的高分辨率遥感图像融合算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2014, 26(6): 889-895)
- [5] Cai Tiefeng, Hao Yingming, Wu Qingxiao, *et al.* Local image enhancement under fidelity of information perceived by human eyes[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(Z1): 262-267(in Chinese)
(蔡铁峰, 郝颖明, 吴清潇, 等. 人眼感知信息保真约束下的图像局部增强方法[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(Z1): 262-267)
- [6] Yu Tianhe, Dai Jingmin. Multifractal theory based infrared image enhancement technology[J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(1): 184-188(in Chinese)
(于天河, 戴景民. 基于多重分形的红外图像增强技术[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(1): 184-188)
- [7] Chen Qian, Bai Lianfa, Zhang Baomin. Histogram double equalization in infrared image[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2003, 22(6): 428-430(in Chinese)
(陈钱, 柏连发, 张保民. 红外图像直方图双向均衡技术研究[J]. 红外与毫米波学报, 2003, 22(6): 428-430)
- [8] Wang Bingjian, Liu Shangqian, Zhou Huixin, *et al.* Self-adaptive contrast enhancement algorithm for infrared images based on plateau histogram[J]. Acta Photonica Sinica, 2005, 34(2): 299-301(in Chinese)
(王炳健, 刘上乾, 周慧鑫, 等. 基于平台直方图的红外图像自适应增强算法[J]. 光子学报, 2005, 34(2): 299-301)
- [9] Han Xizhen, Zhao Jian. Enhancement of image texture and contrast combined with partial differential equation[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(6): 1382-1388(in Chinese)
(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): 1382-1388)
- [10] Chen Ying, Zhu Ming. Multiple sub-histogram equalization low light level image enhancement and realization on FPGA[J]. Chinese Journal of Optics, 2014, 7(2): 225-233(in Chinese)
(陈莹, 朱明. 多子直方图均衡微光图像增强及 FPGA 实现[J]. 中国光学, 2014, 7(2): 225-233)
- [11] Pal S K, King R A. Image enhancement using smoothing with fuzzy sets[J]. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics, 1981, 11(7): 494-501
- [12] Zheng Dezhong, Cui Fayi. Contour extraction of image using adaptive bilinear generalized fuzzy enhancement[J]. Chinese Journal of Lasers, 2010, 37(2): 495-504(in Chinese)
(郑德忠, 崔法毅. 自适应双线性广义模糊增强的图像轮廓提取[J]. 中国激光, 2010, 37(2): 495-504)
- [13] Wang Baoping. Studies on image processing methods based on fuzzy information processing technique[D]. Xi'an: Xidian University, 2004(in Chinese)
(王保平. 基于模糊技术的图像处理方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2004)
- [14] Zhao Xiaochuan. The improvement and specification of digital image processing technology[M]. Beijing: Beihang University Press, 2012: 284-287(in Chinese)
(赵小川. 现代数字图像处理技术提高及应用案例详解 (MATLAB 版)[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2012: 284-287)
- [15] Cai Shidong, Yang Fang. Image enhancement based on histogram modification[J]. Optoelectronic Technology, 2012, 32(3): 155-159(in Chinese)
(蔡式东, 杨芳. 基于直方图修正的图像增强算法[J]. 光电子技术, 2012, 32(3): 155-159)
- [16] Liang J L, He Y, Liu D, *et al.* Image fusion using higher order singular value decomposition[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 21(5): 2898-2909
- [17] Li Jin, Wang Junping, Wan Guoting, *et al.* Novel algorithm of image enhancement with histogram equalization and MSRCR[J]. Journal of Xidian University: Natural Science, 2014, 41(3): 103-109(in Chinese)
(李锦, 王俊平, 万国挺, 等. 一种结合直方图均衡化和 MSRCR 的图像增强新方法[J]. 西安电子科技大学学报:自然科学版, 2014, 41(3): 103-109)
- [18] Peng Zhou, Zhao Baojun. Novel scheme for infrared image enhancement based on contourlet transform and fuzzy theory[J]. Laser & Infrared, 2011, 41(6): 635-640(in Chinese)
(彭洲, 赵保军. 基于 Contourlet 变换和模糊理论的红外图像增强算法[J]. 激光与红外, 2011, 41(6): 635-640)