

文章编号:1007-2780(2016)01-0104-08

尺度变化的 Retinex 红外图像增强

李 毅^{1,2}, 张云峰¹, 年 轮¹, 崔 爽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:经典 Retinex 模型增强算法采用固定尺度高斯核平滑滤波, 导致单一尺度 Retinex 无法进行全局有效增强, 而多尺度 Retinex 权重系数选取困难, 二者均不能满足视觉要求。针对以上问题, 基于人眼视觉掩盖效应提出一种尺度变化高斯核平滑滤波的 Retinex 算法。首先利用人眼视觉掩盖效应的屏蔽函数检测像素邻域空间细节, 依据像素区域细节信息丰富程度设计出尺度变化的高斯平滑滤波器, 实现照度估计, 最后对尺度变化高斯平滑滤波器实现提出实用方法。实验证明本文算法有效提高红外图像对比度, 增强细节信息, 在主观视觉效果和客观评价指标上整体优于修正对比度限制直方图均衡算法、单尺度 Retinex、多尺度 Retinex 及平稳小波和 Retinex 增强算法。

关 键 词:图像处理; 图像增强; Retinex 模型; 人眼视觉系

中图分类号:TP391 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20163101.0104

Infrared image enhancement method based on scale varies Retinex theory

LI Yi^{1,2}, ZHANG Yun-feng¹, NIAN Lun¹, CUI Shuang¹, CHEN Juan¹

(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;*)

Abstract: Classic Retinex algorithm, applied in image enhancement with fixed Gaussian filter, couldn't meet demand of human vision. The result of Single Scale Retinex algorithm was unable to satisfy effective enhancement of the whole image, and it was difficult to use Multi-scale Retinex algorithm estimating illumination correctly without suitable coefficient. As a result, a novel scale varies algorithm of Retinex theory based on human visual masking effects was proposed. The results of human visual masking function, which can estimate how much details exist in the pixel neighborhood efficiently, was used to design the scale of Gaussian filter. The new algorithm was designed to get the correct illumination of a infrared image. At last, a practical solution was presented to cut down time consuming. Experimental results show that the proposed algorithm improves the contrast and enhance

收稿日期:2014-12-29; **修订日期:**2015-03-25.

基金项目:国家自然科学基金(No. 61205143); 吉林省科技厅重点项目(No. 20110329)

Supported by National Nature Science Foundation of China(No. 61205143); Science and Technology Department of JiLin Province Research Funding(No. 20110329)

* 通信联系人, E-mail: zyfcicomp@sohu.com

the details of infrared images. Moreover, the proposed algorithm is better than histogram equalization, Modified Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization, single scale Retinex, Multi-scale Retinex and Stationary Wavelet and Retinex in subjective visual effects and objective evaluation parameters.

Key words: image processing; image enhancement; Retinex method; human visual system

1 引 言

红外成像系统广泛应用于军事对抗、民用检测和医疗诊断等领域。但红外成像系统易受外界环境的随机干扰和热成像系统内部响应非线性等特点导致红外图像一般较暗,且目标与背景对比度低,边缘模糊,视觉效果差。为获得更好的视觉效果和更多有用细节,往往需要对红外图像进行增强处理^[1-3]。

常用的红外图像增强算法有:空域的直方图均衡算法和灰度变换等;直方图均衡类算法不能够产生新的灰度级,只能对原有灰度级进行合理的重新分配,增强效果有限^[3-5];灰度变换一般需要人为调整参数才能达到较好的视觉效果^[1]。频域算法,包括傅立叶变换、小波变换、Culvelet 变换^[6]和 Contourlet 变换^[7]等也用于红外图像增强研究,但是这些算法计算复杂度较高,不利于实时处理。Retinex 增强模型能有效增强图像的视觉效果,获取阴影区或暗背景下的细节信息,近年来广泛应用于图像增强研究中^[7-9]。目前已有众多学者将 Retinex 模型应用于红外图像增强处理^[3,6]。红外图像看作是目标和背景辐射特性成像结果,背景辐射强度代表图像的照度分量,目标辐射代表目标物体的反射系数,Retinex 算法应用在红外图像增强即去掉背景辐射强度获取目标本身特性。传统 Retinex 算法中,照度的估计采用固定尺度高斯平滑滤波器实现。高斯滤波器的尺度较大时,全局平滑效果好,局部细节信息保持较差;尺度较小时,局部细节信息清晰但全局处理不好。单尺度 Retinex 依赖单一固定尺度的高斯平滑滤波,估计照度来增强图像,效果势必有缺陷。多尺度 Retinex 将多个固定尺度的高斯滤波器平滑结果分别加权估计照度,增强的图像有效地弥补单尺度 Retinex 算法缺点,合适的加权系数才能获取好的视觉增强效果。近期文献

[3]提出采用平稳小波将图像分解高低频两部分,对低频部分采用单尺度 Retinex 算法,增强图像视觉效果较好,但采用小波处理较为耗时。文献[10-12]对成像光谱进行子带分解,得到各光谱段采用多尺度 Retinex,最后将处理后光谱段进行融合,有效地增强各光谱段细节,增强效果良好。针对传统 Retinex 算法的缺陷和 Retinex 发展新算法的耗时多特点,本文依据人眼视觉掩盖效应来评测邻域空间细节信息^[12-14],提出参照评测结果设计一种尺度变化的高斯滤波器,有效地估计图像照度信息,获取良好的视觉增强效果。

2 理论基础

2.1 Retinex 理论

Land 基于色彩恒常理论提出的 Retinex 作为人眼感知亮度和色度的视觉模型,实质是图像 $s(x,y)[(x,y) \in \Omega = (0,N-1) \times (0,M-1)]$ 由照度分量 l 和反射分量 r 两部分组成:

$$s = l \cdot r \quad (1)$$

其中: l 表示入射光,代表着物体获取光照能量总和, r 表示物体本身反射性质的反射系数, s 是通过相机或人眼获得的图像。Retinex 理论模型算法目的是通过去除图像的照度分量获取物体的本来面貌的反射性质,采用对数域计算,符合人眼非线性的视觉特性。

单尺度 Retinex(SSR)算法是通过单一高斯函数来估计图像的照度分量 L ,表达式如下:

$$R(x,y) = \log s(x,y) - \log \{F(x,y) * s(x,y)\} \quad (2)$$

式中: $*$ 表示卷积, $F(x,y)$ 是高斯核函数, $F(x,y) = k * \exp(-\frac{r^2}{c^2})$, c 为平滑尺度; k 是归一化

常数,满足 $\iint \frac{1}{k \cdot F(x,y)} dx dy = 1$ 。

相应多尺度的 Retinex(MSR)通过多个 σ 组

合的高斯平滑函数的照度估计获得:

$$R_M(x, y) = \sum_{n=1}^N \omega_n \{ \log S(x, y) - \log [F_n(x, y) * S(x, y)] \}, \quad (3)$$

2.2 视觉掩盖效应

人眼视觉系统中的视觉掩盖效应来源于人眼对噪声敏感性实验研究。心理物理实验表明:人眼对于物体亮度强弱变化的主观感受依赖于背景亮度与结构。平滑区域内,目标物体与背景亮度差距不大,较小的变化都能被人眼识别出来,因此区域内噪声就容易察觉,噪声可见度高;复杂区域内边缘较多背景结构复杂,尽管有较大亮度变化,人眼也是无法觉察到,所以该区域噪声较平滑区更难觉察,这就是人眼的视觉掩盖效应。Aggelos K 和 Jan Biemond 等^[12-14]建立评测空间细节的屏蔽函数 $M(x, y)$ 和噪声可见度函数 $f(x, y)$ 来解释人眼掩盖效应。屏蔽函数 $M(x, y)$ 由区域局部方差来表示,局部方差不分垂直、水平和任何方向的斜率就可以评价区域细节复杂度,作为广义屏蔽函数是一个很好的选择。定义屏蔽函数为:

$$M(x, y) = \sigma_n(x, y) = \frac{1}{(2P+1)(2Q+1)} \sum_{m=x-P}^{m=x+P} \sum_{n=y-Q}^{n=y+Q} [s(m, n) - m_n(x, y)]^2, \quad (4)$$

其中: $\sigma_n(x, y)$ 为局部方差表达式, n 表示以 (x, y) 为中心点的 $(2P+1)(2Q+1)$ 窗口区域, $m_n(x, y)$ 为区域均值,可表示为:

$$m_n(x, y) = \frac{1}{(2P+1)(2Q+1)} \sum_{m=x-P}^{m=x+P} \sum_{n=y-Q}^{n=y+Q} s(m, n), \quad (5)$$

噪声可见度函数被定义为:

$$f(x, y) = \frac{1}{\theta \cdot M + 1}, \quad (6)$$

θ 为实验测得常数项。噪声可见度函数值被归一化,由式(6)可知平滑区域 $M(x, y)$ 值小, $f(x, y)$ 接近 1,噪声可见度高;复杂区域 $M(x, y)$ 值大, $f(x, y)$ 接近 0,噪声可见度低。本文参照屏蔽函数来评测像素空间细节信息,并参考可见度函数表达式来获取尺度变换和空间细节信息联系,设计实现一种依据区域细节复杂度自适应选择尺度的高斯平滑滤波器。

3 尺度变化 Retinex 算法

经典 Retinex 增强模型照度估计基于尺度固定

的高斯低通滤波器平滑滤波实现。大尺度平滑全局平滑效果好,局部细节信息保持较差,小尺度局部细节信息清晰但全局处理较差。SSR 算法采用固定单个尺度高斯滤波器实现照度估计,无法较好的兼顾局部细节和全局处理;MSR 算法将几个大小固定尺度高平滑滤波器平滑结果进行加权相加作为照度估计,一般采用小、中、大 3 个尺度,相等的加权系数 1/3,MSR 有效避免 SSR 的问题。Retinex 模型中,照度估计在边缘和区域细节复杂处应该采用小尺度,避免受到近平滑区影响而使处理结果丢失一定的细节信息;平滑区域或阴影区照度均匀,应该采用大尺度,能有效降低噪声可见度。MSR 中不区分区域类型,而是简单的将 3 个尺度高斯滤波平滑结果相加,边缘细节和平滑区必然受到影响;平滑区有噪声出现,细节复杂区域增强不明显,边缘模糊。通过可变化的加权系数实现平滑区和复杂边缘区照度的准确估计,计算和实现较为复杂,并且可变加权系数变化关系可能依据图像不同而失效。视觉掩盖效应能反映区域细节度,可以用来提供区域类型判断,因此本文提出通过评价区域空间细节度来设计一种尺度变化的高斯平滑滤波器。

3.1 尺度变化高斯平滑滤波器设计

人眼视觉系统屏蔽函数 $M(x, y)$ 越大,区域局部方差大,细节信息丰富,需要小尺度高斯平滑滤波器实现照度估计;反之区域局部方差小,细节信息少,像素之间相似度高,需要大尺度高斯平滑滤波器。通过研究人眼视觉屏蔽函数与尺度大小关系,得到高斯滤波器尺度函数表达式:

$$\sigma_N = \alpha \cdot \frac{1}{aM' + 1} + \beta, \quad (7)$$

其中: a 是拟合参数, α 幅度大小调节参数, β 是幅度偏移参数, a 、 α 、 β 由实验确定。由于噪声和开方计算影响,局部邻域方差一般较大,为了体现屏蔽函数在同一图像中的细节度差别,对屏蔽函数 $M(x, y)$ 归一化处理:

$$M'(x, y) = \sin\left(\frac{M - M_{\min}}{M_{\max} - M_{\min}} \cdot \frac{\pi}{2}\right), \quad (8)$$

M' 在 $[0, 1]$ 之间, $M_{\max}$ 、 $M_{\min}$ 为屏蔽函数值最大最小值。尺度变化高斯滤波器可表示为:

$$F_N(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_N^2} \exp\left(-\frac{(x^2 + y^2)}{2\sigma_N^2}\right) = \frac{1}{2\pi\left(\alpha \cdot \frac{1}{aM' + 1} + \beta\right)^2} \exp\left(-\frac{(x^2 + y^2)}{2\left(\alpha \cdot \frac{1}{aM' + 1} + \beta\right)^2}\right), \quad (9)$$

3.2 子块尺度变化滤波实现

照度估计实现:图像每个像素点对应的屏蔽函数值由以其为中心的 $(2P+1)(2Q+1)$ 窗口邻域获得,并可通过式(7)计算出该点照度估计所需高斯平滑滤波器尺度值。各像素点对应的尺度值得到相应的高斯平滑滤波器,在邻域窗口采用各自对应平滑滤波器获取照度估计。由于需要对图像每个像素点进行屏蔽函数值计算、尺度计算,每个像素点的照度估计依据各自的平滑滤波器平滑实现,像素点的照度能有效地被估计但是计算繁琐冗余,耗时多,易受孤立噪声影响而明显出现人工痕迹。考虑到红外图像的特点:相邻像素的亮度值相似度高,所以无论平滑区还是复杂细节区都会有一定量的相似像素存在。并且通过实验发现,尺度相近的高斯平滑滤波器差别不大,对平滑结果影响较小。

为了减少计算复杂度,减低运算所需时间,避免噪声影响,照度估计在人眼视觉可接受的误差范围内对尺度变化平滑滤波提出简化方案:

(1)采用 $N \times N$ 子块替代像素点,在中心像素

点邻域计算出的尺度值为子块中所有像素点尺度值;以 $t(1 < t < N)$ 为步长在图像上滑动获取各子块的尺度值,消除因子块之间尺度值差别过大产生的块状效应,使灰度级过渡平滑。本文选取 $N=80, t=60$ 。

(2)相近的屏蔽函数值对应高斯滤波器差异不大,可通过对归一化屏蔽函数值 M' 进行 K 均值模糊聚类来确定固定数量的高斯滤波器。本文对各区域 M' 值 K 均值聚类求取参考文献[15]方法。滤波器尺度个数固定为 c ,对应 c 个屏蔽函数值 $M'_{z_i} (i=1 \cdots c)$, z_i 为聚类方法得到的聚类中心。将屏蔽函数值组成向量,分为 c 组 $c_i (i=1 \cdots c)$ 通过迭代计算求取非相似性指标目标函数最小可获得分类。非相似性指标目标函数为:

$$J = \sum_{i=1}^c J_i = \sum_{i=1}^c \sum_{k, x_k \in C_i} \|x_k - z_i\|^2, \quad (10)$$

J_i 表示第 i 个组内距离和函数,由组内各向量与聚类中心的欧式距离决定,选取 c 为 10,聚类中心初始值为 $z_i = (i-0.5)/10$ 。迭代次数选为 5,平方误差和 0.01。

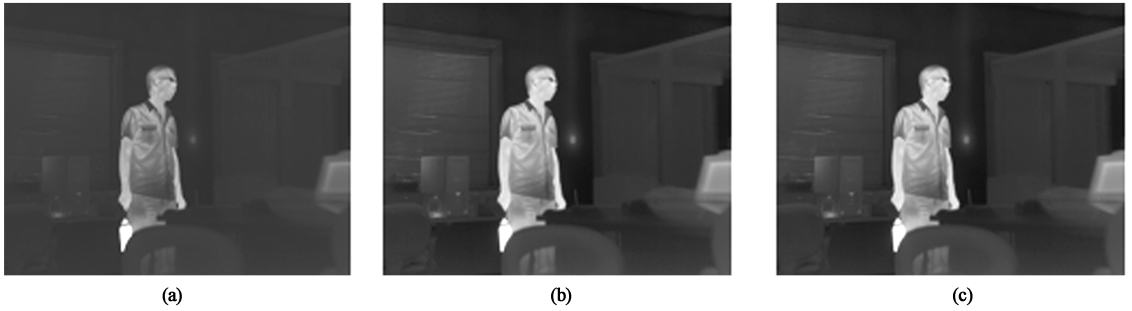


图1 红外图像实验结果

Fig.1 Experiment results of infrared image

K 均值聚类计算时间复杂度为 $O(ctmn)$, c 为簇个数, t 为迭代次数, m 是分类个数, n 是数据维数。本文迭代次数和平方误差其中之一满足停止计算。以图(1a) (640×480 pixels)为例 $m = (640/60) \cdot (480/60) \approx 88$, $n = 1$, $t = 5$, $c = 10$ 。I7 四核 3.4 GHz 处理器,vc++6.0 开发环境 K 均值聚类计算耗时约为 35 ms,2.2 节分块方案尺度变化 Retinex 算法耗时 103 ms,2.1 节单像素点尺度变化 Retinex 算法耗时 451 ms。分块方案尺度变化 Retinex 算法中 K 均值聚类计算增加了额外耗时,但降低整体算法计算时间,同时采用分块替代单个像素点消除了孤立噪声点影

响,具有一定的抗噪声能力,2.2 节视觉效果(图 1(b))与 2.1 节结果(图 1(c))无明显差别。

3.3 子块尺度变化 Retinex 算法

通过设计尺度变化的高斯平滑滤波器,提出子块尺度变化的 Retinex 算法。该算法首先计算子块的人眼视觉屏蔽函数值,并将所有子块的屏蔽函数值进行 K 均值模糊分类得到固定数量的屏蔽函数值,依据求得的屏蔽函数值来设计相应尺度的高斯滤波器,不同尺度高斯滤波器设计有利于获取不同区域准确的照度估计,采用设计的高斯滤波器对相应的子块进行照度估计,在对数域由原图与照度图获取反射分量,最后对反射分

量拉伸处理得到红外图像增强结果。算法流程实现如图 2 所示。

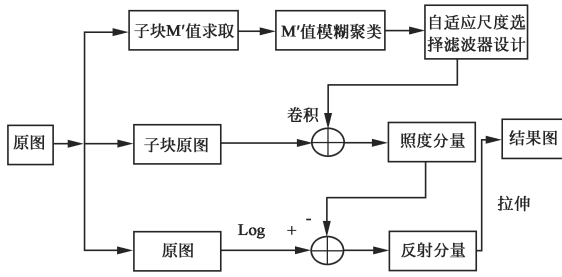


图 2 算法结构框图

Fig. 2 Framework of proposed algorithm

具体实现步骤:

(1) 计算 $N \times N$ 子块图像以该子块为中心 $(2P+1+N)(2Q+1+N)$ 窗口邻域的屏蔽函数值, 以步长为 t 在原图像上滑动, 将得到数值按式 (8) 归一化处理;

(2) 将 1 处理的屏蔽函数值按非相似性指标目标函数分为 10 类, 获取类中心 $M'_1, M'_2 \dots M'_{10}$, 由式 (7) 得出 $\sigma_1, \sigma_2 \dots \sigma_{10}$ 和 (10) 得出 $F_1(x, y), F_2(x, y) \dots F_{10}(x, y)$;

(3) 依据子块的屏蔽函数值自适应选择对应尺度的高斯滤波器, 对子块进行照度估计:

$$I_N = F_N(x, y) * s(x, y), \quad (11)$$

(4) 反射分量获得 $R_N = S - \log I_N$, 其中 $S = \log s$ 。最后对反射分量拉伸处理得到可观增强图像。

4 实验及分析

通过多组实验观测选定拟合参数 a 为 0.5, α 和 β 分别为 650、-420。针对不同的红外图像采用上文提出的尺度自适应选择的 Retinex 红外图像增强算法进行了实验, 并将结果与修正对比度限制直方图均衡算法 (Modified Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization, MCLAHE)^[16]、单尺度 Retinex 增强算法^[7]、多尺度 Retinex 增强算法^[8]、平稳小波和 Retinex 增强算法 (Stationary Wavelet and Retinex, SWR)^[3] 等进行对比, 对比结果表明本文算法取得了良好的增强效果, 在主观视觉效果上优于上述算法。现以图 3(a) 室内人物目标红外图像

(640 pixels $\times$ 480 pixels) 和图 4(a) 室外车目标红外图像 (484 pixels $\times$ 356 pixels) 为代表说明。两幅红外图像表现为背景阴影区较大, 目标较突出, 照度不均匀。图 3, 图 4 是原图与不同算法增强处理后结果。图 3(b) 和图 4(b) 为 MCLAHE 处理后图像, 图像目标区域对比度有很大提升, 模糊现象得到一定程度的消除, 但图像整体细节增强不明显; SSR 增强算法采用尺度为 30 的高斯平滑滤波器实现照度估计, SSR 有效地增强目标细节信息, 但是阴影区对比度增强较弱, 全局效果不好, 由于对边缘处采用固定单一尺度的高斯滤波器, 不可避免的引入照度估计误差, 在目标与背景交界处产生伪影如图 3(c) 和图 4(c) 所示; MSR 采用 30, 130, 220 三个尺度, 加权系数均为 1/3, 结果图像亮度有所提高, 整体效果较好, 避免了 SSR 出现的伪影问题, 但目标细节信息受加权照度影响变模糊, 目标细节特征减弱, 图 3(d) 和图 4(d) 为 MSR 增强结果; 图 6d 和图 7d 为 SWR 增强后图像: 细节信息增强明显, 图像中纹理突出, 但未能有效的背景区域细节信息。本文算法依据区域细节信息的自适应选取高斯平滑滤波进行照度估计, 有效地增强阴影区对比度, 显示了阴影区细节信息, 同时保持目标细节特征, 如图 3(f) 中人的面部、手部和衣服, 图 4(f) 车的窗户、车体、轮胎等, 亮度中等, 符合人眼视觉特性, 有利于突出背景与目标细节信息, 整体视觉增强效果良好。为了更好地评价本文算法增强效果, 采用信息熵和对比度两个指标进行客观定量说明, 评测指数见表 1。信息熵定义式为:

$$E_{En} = - \sum_{i=0}^{L-1} p(i) \lg p(i), \quad (12)$$

$p(i)$ 是第 i 个灰度级在图像出现的概率, L 为最大灰度级。图像信息熵值越大, 说明图像能提供越多的信息图像的的细节信息丰富。本文算法信息熵在 5 种算法中数值最大, 细节信息最为丰富。清晰度可作为图像对比度评价, 由图像梯度决定, 定义式为:

$$T = \sum_{i=1}^{\text{width}-1} \sum_{j=1}^{\text{height}-1} \sqrt{(I(i, j) - I(i-1, j))^2 + (I(i, j) - I(i, j-1))^2}, \quad (13)$$

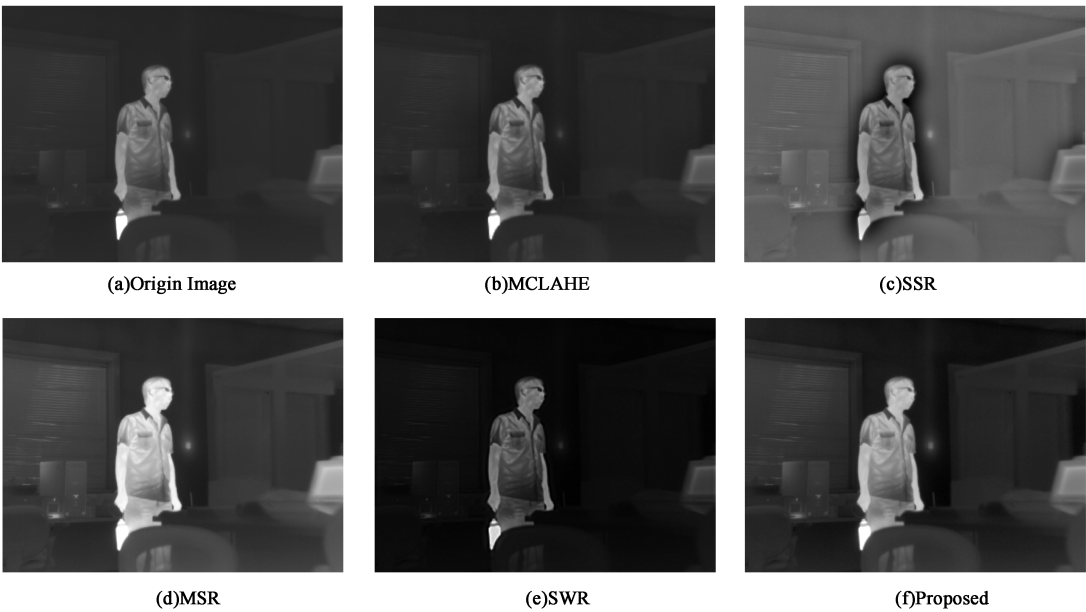


图 3 室内人物红外图像实验结果

Fig. 3 Experiment results of Man in room infrared image

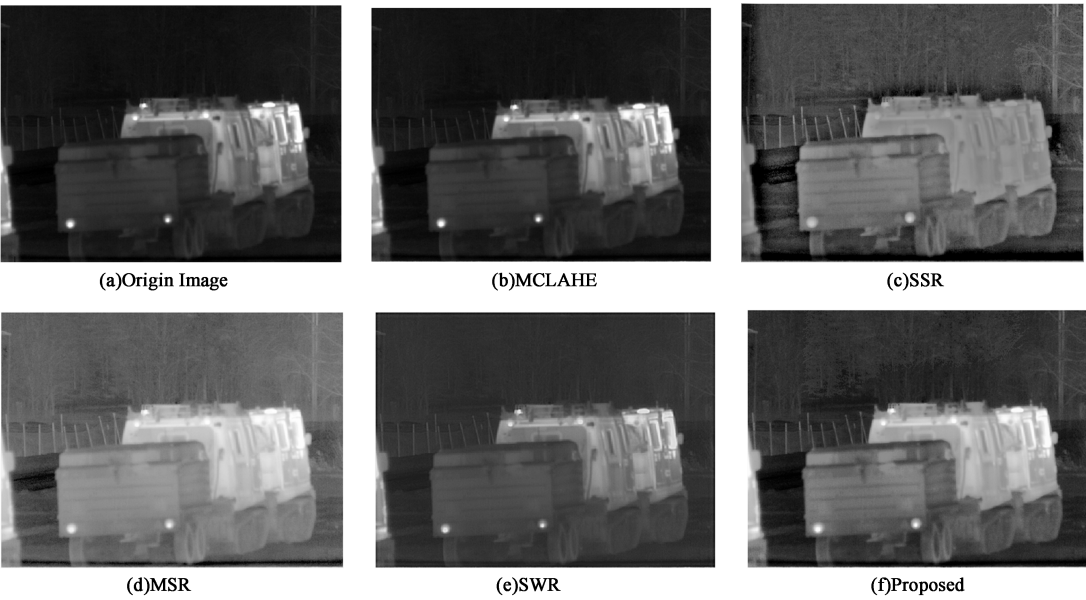


图 4 室外车红外图像实验结果

Fig. 4 Experiment results of outdoor infrared image

表 1 红外图像增强指标评价

Tab. 1 Quantitative evaluation of infrared image enhancement

Image source	Evaluation	MCLAHE	SSR	MSR	SWR	Proposed
Fig2	En	5.123	5.425	5.920	5.001	5.975
	T	1.458	1.717	1.677	1.722	1.770
Fig3	En	6.338	6.038	6.472	6.289	6.505
	T	4.848	5.376	4.073	4.923	5.691

width 和 height 分别代表图像的宽高。直方图均衡类算法将全局噪声放大使得梯度值大,不参与比较,与其他 3 种算法相比本文算法清晰度最大,对比度高,边缘丰富。

5 结 论

提出一种基于区域细节复杂度评测的尺度变化 Retinex 红外图像增强算法,通过计算人眼视觉屏蔽函数值获取像素点邻域空间的细节复杂度,计算合适的尺度值设计高斯平滑滤波器。考虑到红外图像像素点空间相似性和尺度相近高斯滤波器

差异较小,提出采用子块替代像素点并以小于子块宽度的步长在原图滑动求取屏蔽函数值,对屏蔽函数值进行 K 均值聚类处理产生固定数量的高斯滤波器,降低运算时间。实验表明提出算法在整体视觉效果和客观评价指标上优于直方图均衡类算法、单尺度 Retinex 和多尺度 Retinex。本文算法有良好的整体视觉效果,也存在一定的缺陷:子块滑动步长和子块大小选择不适当会产生人工痕迹,如图 4 车顶与阴影区过渡处存在阴影块,增强效果弱于其他阴影区,灰度级过渡不平滑,细节信息增强弱于其他区域。下一步的研究方向是如何依据图像选取合适的子块大小和子块滑动步长。

参 考 文 献:

- [1] 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.
YU T H, DAI J M. Multifractal theory based infrared image enhancement technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(1): 184-188. (in Chinese)
- [2] 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.
WANG B J, LIU S Q, ZHOU H X, *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)
- [3] 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.
ZHAN B C, WU Y Q, JI S X. Infrared image enhancement method based on stationary wavelet transformation and retinex[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(10): 2788-2793. (in Chinese)
- [4] 曹军峰,史家成,罗海波,等. 采用聚类分割和直方图均衡的图像增强算法[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(12): 3436-3441.
CAO J F, SHI J C, LUO H B, *et al.* Image enhancement using clustering and histogram equalization[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(12): 3436-3441. (in Chinese)
- [5] STARCK J L, MURTAGH F, CANDÈS E J, *et al.* Gray and color image contrast enhancement by the cuelet transform[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2003, 12(6): 706-717.
- [6] 石丹,李庆武,倪雪,等. 基于 Contourlet 变换的红外图像非线性增强算法[J]. 光学学报, 2009, 29(2): 342-346.
SHI D, LI Q W, NI X, *et al.* Infrared image nonlinear enhancement algorithm based on contourlet transform[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(2): 342-346. (in Chinese)
- [7] LAND E H. The Retinex theory of color vision[J]. *Scientific American*, 1977, 237(6): 108-129.
- [8] JOBSON D J, RAHMAN Z U, WOODILL G A. A multi scale 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.
- [9] 汪荣贵,傅剑峰,杨志学,等. 基于暗原色先验模型的 Retinex 算法[J]. 电子学报, 2013, 41(6): 1188-1192.
WANG R G, FU J F, YANG Z X, *et al.* A novel Retinex algorithm based on dark channel prior model[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2013, 41(6): 1188-1192. (in Chinese)
- [10] 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.
- [11] 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]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2011, 8(5): 983-987.
- [12] ANDERSON G L, NETRAVALI A N. Image restoration based on a subjective criterion[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1976, SMC-6(12): 845-853.

[13] KATSAGGELOS A K, BIEMOND J, SCHAFER R W, *et al.* A regularized iterative image restoration algorithm [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1991, 39(4): 914-929.

[14] 余庆军,谢胜利. 基于人类视觉系统的各向异性扩散图像平滑方法[J]. 电子学报, 2004, 32(1): 17-20.
YU Q J, XIE S L. An anisotropic diffusion image smoothing method based on human visual system[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2004, 32(1): 17-20. (in Chinese)

[15] 邱望仁,刘晓东. 基于 FCM 的广义模糊时间序列模型[J]. 模糊系统与数学, 2013, 27(6): 111-117.
QIU W R, LIU X D. A novel generalized fuzzy time series forecasting model based on FCM[J]. *Fuzzy Systems and Mathematics*, 2013, 27(6): 111-117. (in Chinese)

[16] MOHAN S, RAVISHANKAR M. Modified contrast limited adaptive histogram equalization based on local contrast enhancement for mammogram images[C]. *Proceedings of the 2nd International Joint Conference*, Berlin Heidelberg, Germany: Springer, 2013, 296: 397-403.

作者简介:李毅(1988—),男,博士研究生,主要从事实时图像处理的研究。E-mail:leey2009@qq.com
陈娟(1962—),女,研究员,博士生导师,主要研究光电测量、伺服控制,E-mail:chenjuan@mail.ccit.edu.cn