

低照度图像增强的自适应同态滤波算法研究

陈立锋*, 梁晓闯, 彭向前, 刘文雯

湖南科技大学机电工程学院, 湖南 湘潭

收稿日期: 2023年2月17日; 录用日期: 2023年3月17日; 发布日期: 2023年3月28日

摘要

针对传统同态滤波计算复杂、实时性差、参数多且最优参数获取困难等问题, 本文提出一种基于自适应同态滤波的低照度彩色图像增强算法。为避免增强图像颜色失真, 基于HSV色彩空间, 仅对V分量进行增强处理; 结合离散余弦变换(Discrete Cosine Transform, DCT)及指对变换实现图像空间域与频率域的相互转换; 基于sigmoid函数构造单参数同态滤波函数, 以峰值信噪比(PSNR)和结构相似性(SSIM)为指标, 建立一种图像评价模型, 并采取等步长间隔法实现最优参数的自适应选取; 选取信息熵、平均梯度和对比度对道路及建筑图像进行定量评价, 实验结果表明, 本文算法可有效校正低照度图像亮度不均问题, 提高了图像对比度, 图像细节信息得到了进一步丰富。

关键词

图像增强, 同态滤波, 低照度图像, 自适应参数

Research on Adaptive Homomorphic Filtering Algorithm for Low Illumination Image Enhancement

Lifeng Chen*, Xiaochuang Liang, Xiangqian Peng, Wenwen Liu

Mechanical and Electrical Engineering College, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan

Received: Feb. 17th, 2023; accepted: Mar. 17th, 2023; published: Mar. 28th, 2023

Abstract

Aiming at the problems of traditional homomorphic filtering, such as complex computation, poor real-time performance, many parameters and difficulty in obtaining optimal parameters, this pa-

*通讯作者。

per proposes a low illumination color image enhancement algorithm based on adaptive homomorphic filtering. In order to avoid color distortion of enhanced image, only V component is enhanced based on HSV color space. Combined with discrete cosine transform, exponential transformation and logarithmic transformation, the interconversion of image space domain and frequency domain is realized. A single parameter homomorphic filtering function was constructed based on sigmoid function. Taking peak signal to noise ratio (PSNR) and structural similarity (SSIM) as indexes, an image evaluation model was established, and the equal step interval method was adopted to realize the adaptive selection of optimal parameters. Information entropy, average gradient and contrast were selected for quantitative evaluation of road and building images. The experimental results show that the proposed algorithm can effectively correct the uneven brightness of low illumination images, improve the image contrast and enrich the image details.

Keywords

Image Enhancement, Homomorphic Filtering, Low Illumination Image, Adaptive Parameters

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

受光照环境影响,低照度图像存在亮度不均、低对比度等特点,图像整体视觉效果较差[1]。低照度环境下使得图像前景与背景混合到一起,不利于后续的图像处理,图像亮度分布不均、对比度低是低照度环境下图像信息难以提取的主要原因,利用图像增强方法处理低照度图像可以有效解决以上问题。因此,开展低照度图像增强算法研究,校正图像亮度分布、增强图像对比度对于提升图像质量具有重要意义。

同态滤波是一种基于灰度变换和频率滤波的变换域图像增强方法,其通过压缩图像亮度范围、提高图像对比度来提升图像质量[2]。同态滤波的原理最早由 Thomas Stockham [3]提出,其主要用以求解非线性滤波问题,同态滤波性能优越,广泛应用于图像去雾[4]、图像亮度校正[5]等多个领域。针对低照度图像亮度不均、对比度差等问题,前人学者提出了多种解决方案。刘佳敏[6]等人提出了一种融合同态滤波与直方图均衡化的方法,可有效提高图像对比度并增强图像细节信息,缺点是有时会增加图像噪声。刘源[7]等人采用不同的滤波函数对图像高低频分量进行滤波处理,接着对高低频分量进行重构得到亮度校正后的图像。张亚飞[8]等人从图像空间局部特性方面研究,提出了一种基于分块 DCT 的同态滤波算法,有效增强了图像质量,性能优于传统同态滤波。

传统同态滤波算法存在参数多、最优参数选取困难等问题,为此,张珂[9]等人提出了一种单参数同态滤波算法,大大降低了参数个数,但其参数仍需人工选取,无法自适应于不同场景的图像。Fan Y [10]等将不同状态下采集的激光图像进行分类,以图像平均亮度为指标实现同态滤波参数的自适应选取,但该方法只针对几种单一场景图像,算法通用性不强,具有一定的局限性。因此,如何根据不同场景采集的图像特性对同态滤波参数进行自适应控制是十分重要的。

针对传统同态滤波计算复杂、实时性差、参数多且最优参数获取困难等问题,本文提出了一种自适应同态滤波算法。本文基于 HSV 颜色空间模型[11],采用同态滤波方法对 V 分量进行亮度校正,在不影响图像色彩信息的前提下对光照进行补偿,基于 sigmoid 函数构造同态滤波传递函数,建立图像评价方

法, 形成了一种自适应同态滤波算法, 可有效地增强低照度图像质量。

2. 基于 DCT 的同态滤波算法研究

2.1. 同态滤波算法原理

同态滤波原理基于照射 - 反射[12]模型, 该模型认为一幅图像 $f(x, y)$ 由照射分量 $i(x, y)$ 和反射分量 $r(x, y)$ 共同决定, 其中 (x, y) 为像素坐标, $f(x, y)$ 代表坐标 (x, y) 处的灰度值。照射分量一般变化缓慢, 与空间位置关联性较小, 代表均匀的光照强度; 反射分量受景物材质及结构影响, 随空间位置变化较大, 反映了图像中物体的细节特征。在图像频率域空间中, 照射分量属于低频部分, 反射分量属于高频部分。因此, 将一幅图像 $f(x, y)$ 表示为照射分量 $i(x, y)$ 与反射分量 $r(x, y)$ 的乘积, 即

$$f(x, y) = i(x, y)r(x, y) \quad (1)$$

同态滤波通过压缩图像动态范围并增强对比度的方式提高图像质量, 对图像进行处理时, 应当滤除低频信息并保留高频信息, 滤波后图像层次性强, 细节信息较为丰富。同态滤波采用线性滤波方法对图像进行滤波处理, 通过对数变换操作将非线性问题转化为线性问题, 将乘性信号转化为加性信号, 便于照射分量与反射分量分离。对式(1)两端同时取对数, 可得:

$$\ln(f(x, y)) = \ln(i(x, y)) + \ln(r(x, y)) \quad (2)$$

接着, 需采用频域变换操作将空间域转换到频率域。传统同态滤波采用傅里叶变换操作, 其变换过程会引入复数, 导致数据运算量大、算法实时性差。离散余弦变换参数均为实数, 计算过程简单、数据运算量小。从算法性能方面考虑, 本文采用 DCT 将图像从空间域变换到频率域, 对于二维 $M \times N$ 图像 $f(x, y)$ 定义其 DCT 为:

$$F(u, v) = \frac{2}{N} C(u) C(v) \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \cos\left(\frac{(x+0.5)u\pi}{M}\right) \cos\left(\frac{(y+0.5)v\pi}{N}\right) \quad (3)$$

其中, $C(u) = C(v) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}}, u = v = 0 \\ 1, \text{else} \end{cases}$, (u, v) 为频率域坐标

使用式(3)对式(2)进行离散余弦变换, 可得:

$$F(u, v) = I(u, v) + R(u, v) \quad (4)$$

使用同态滤波传递函数 $H(u, v)$ 对式(4)两端进行滤波处理, 可得:

$$H(u, v)F(u, v) = H(u, v)I(u, v) + H(u, v)R(u, v) \quad (5)$$

对式(5)进行离散余弦逆变换转换到空间域, 即:

$$h_f(x, y) = h_i(x, y) + h_r(x, y) \quad (6)$$

对式(6)两端作以 e 为底的指数变换, 得到增强后的图像 $g(x, y)$, 即:

$$g(x, y) = e^{h_i(x, y)h_r(x, y)} \quad (7)$$

基于 DCT 的同态滤波算法流程图如图 1 所示, DCT 为离散余弦变换, IDCT 为离散余弦逆变换, $H(u, v)$ 为同态滤波传递函数。

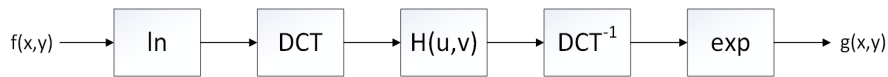


Figure 1. Flow chart of homomorphic filtering algorithm based on DCT
图 1. 基于 DCT 的同态滤波算法流程图

2.2. 单参数传递函数的构造

正确选择并设计合理的传递函数 $H(u, v)$ 对最终滤波图像效果具有重要意义, 目前常用的传递函数有 高斯型同态滤波、指数型同态滤波、巴特沃斯型同态滤波, 其对应传递函数表达式如下:

高斯型同态滤波传递函数:

$$H(u, v)_1 = (R_h - R_l) \left[1 - \exp\left(-c(D(u, v)/D_0)^{2n}\right) \right] + R_l \quad (8)$$

巴特沃斯型同态滤波传递函数:

$$H(u, v)_2 = (R_h - R_l) \left[1 / \left(1 + c * [D_0/D(u, v)]^{2n} \right) \right] + R_l \quad (9)$$

指数型同态滤波传递函数:

$$H(u, v)_3 = (R_h - R_l) \exp\left(-c[D_0/D(u, v)]^n\right) + R_l \quad (10)$$

其中, R_h 为高频增益, R_l 为低频增益, c 为锐化系数, D_0 为截止频率, $D(u, v)$ 表示频率 (u, v) 到滤波器中心 (u_0, v_0) 的距离。

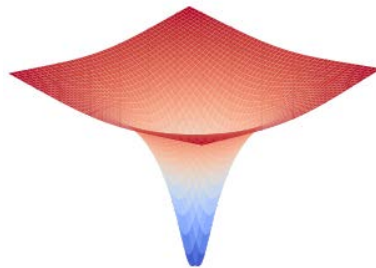


Figure 2. Homomorphic filter 3D plot
图 2. 同态滤波器三维图

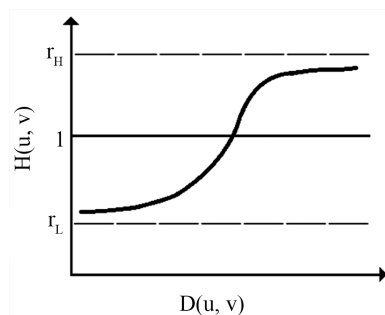


Figure 3. Homomorphic filter profile
图 3. 同态滤波器剖面图

如图 2、图 3 所示为同态滤波器三维图与同态滤波器剖面图, 通过设置不同组合的参数可得到具有不同滤波效果的滤波器, 对图像中的高低频分量起到不同的滤波效果。当 $R_h > 1$, $R_l < 1$ 时, 可起到抑制

低频分量增强高频分量的作用。

传统同态滤波传递函数参数较多，需要反复实验调整高低频增益及截止频率，调参过程较为复杂。为降低调参复杂度，本文基于 sigmoid 函数构造单参数同态滤波传递函数[13]，该函数曲线图与同态滤波剖面图结构相似，函数表达式只包含单一自变量，新的同态滤波传递函数表达式为：

$$H(u,v) = \frac{1}{1 + \exp\left(-K \frac{D_0}{D(u,v)}\right)} \quad (11)$$

传统同态滤波器截止频率 D_0 选取过程复杂，需要大量对比实验确定，本文采用取 $D(u,v)$ 均值的方法[14]可取得不错效果。

$$D_0 = \frac{1}{MN} \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} D(u,v) \quad (12)$$

此时，传递函数只包含了单个参数 K ，相比于传统同态滤波传递函数，其参数数量级大大降低。其中， K 值控制着滤波器的形状，代表着滤波器从低频到高频的坡度，即控制斜面的锐化效果。 K 值越大，滤波器坡度越陡。

3. 同态滤波参数自适应选取算法研究

同态滤波通过抑制低频增强高频的方式增强图像质量，但选取错误的参数会导致图像过度增强与失真，使得图像噪声增加与图像信息丢失。如何选取最佳的同态滤波参数，平衡图像的噪声与细节信息，决定了最终图像的质量。传统方法往往通过多次实验对图像进行主观评价以确定最佳 K 值，该方法具有一定的主观性，本文主要研究如何根据图像特性自适应选取 K 值使图像质量达到最佳。

PSNR 和 SSIM 是评价图像的两项客观指标。PSNR 计算复杂度低易于实现，但该值与图像的感知质量没有必要的联系，PSNR 是一种基于误差统计量的全参考算法。SSIM 通过对失真图像及参考图像的亮度、对比度和结构信息进行比较以衡量图像的失真程度，像素间存在较强的依赖关系，反映了视觉场景中的结构信息，SSIM 是一种基于图像特征统计量的半参考算法[15]。本文选取峰值信噪比(PSNR)和结构相似性(SSIM)为客观评价指标对图像定量分析，利用多指标综合评价方法选取最佳 K 值。

通常来说，PSNR 值越大图像质量越好，SSIM 表示图像结构相似性，SSIM 值越大表示两图像差异越小。本文比较的是低照度图像与增强后清晰图像，故取较小的 SSIM。本文采用多指标综合评价的方法对增强图像进行评价，首先通过倒数逆变换法将逆向指标 SSIM 正向化，接着对数据进行归一化的无量纲化操作，消除指标间量级不同的影响。最后，采用线性综合法对指标进行加权求和，得到关于 K 值的评价函数 $F(K)$ ：

$$F(K) = psnr'(K) + ssim'(K) \quad (13)$$

其中， $psnr'(K)$ 和 $ssim'(K)$ 分别为经正向化及归一化后的 PSNR、SSIM 值。

通过实验分析可知，不同亮度图像最佳 K 值可在一定范围内选取，设 K 取值范围为 $[a,b]$ 。通过最大化(13)式的评价函数 $F(K)$ ，此时图像质量达到最佳，图像优化模型为：

$$\begin{aligned} & \max(F(K)) \\ & \text{s.t. } K \in [a,b] \end{aligned} \quad (14)$$

为了确定图像最佳参数值，本文采用不同 K 值对图像进行增强处理并计算对应的 $F(K)$ 值，经过实验分析可得，最佳参数 K 值选取范围为 $[0,5]$ 。本文采取等步长间隔的方式选取 K 值，设步长为 $step$ ，以 0

为 K 的起始值, 以 $step$ 为步长循环增加 n 次。当 $step$ 过大时, 最佳参数值选取不够准确; 当 $step$ 过小时, 算法运行时间会增加。衡量最佳 K 值的准确性及算法运行效率, 本文 $step$ 设置为 0.1。则参数 K 起始值为 0, 步长为 0.1, 循环增加 50 次。分别计算其对应 K 值下的 PSNR 和 SSIM, 接着采用上述多指标综合评价方法可得到式(13)关于 K 值的评价函数 $F(K)$ 值, 当评价函数 $F(K)$ 取得最大值时其对应 K 值即为最佳参数值(见图 4)。

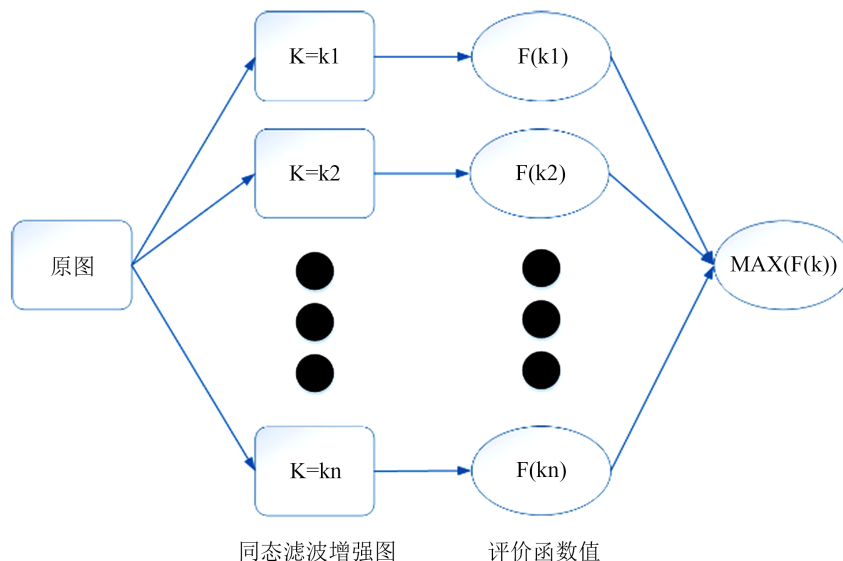


Figure 4. Parameter adaptive selection
图 4. 参数自适应选取

4. 实验结果与分析

为验证本文算法增强效果, 选择低照度环境下的道路图像及建筑图像为实验图, 基于 Visual Studio 2017 软件搭建实验平台, 将本文算法与传统同态滤波算法进行仿真实验对比。传统同态滤波实验参数如下: 滤波器阶数为二, 高频增益 $R_h = 1.2$, 低频增益 $R_l = 0.5$ 。其中, 截止频率同样采用文献[14]的均值法选取, 最终实验结果如图 5、图 6 所示。

为了客观的对增强后图像质量进行评价, 选取信息熵、平均梯度和对比度对增强图像进行定量评价。信息熵是衡量图像信息丰富程度的指标, 熵值越大代表图像拥有的信息越多。平均梯度反映了图像的清晰度, 平均梯度值越大, 代表图像清晰度越高, 图像中的边缘细节信息越丰富。对比度[16]表征了图像的整体质量, 对比度越大图像视觉效果越好。



Figure 5. Comparison of road image enhancement effect
图 5. 道路图像增强效果对比

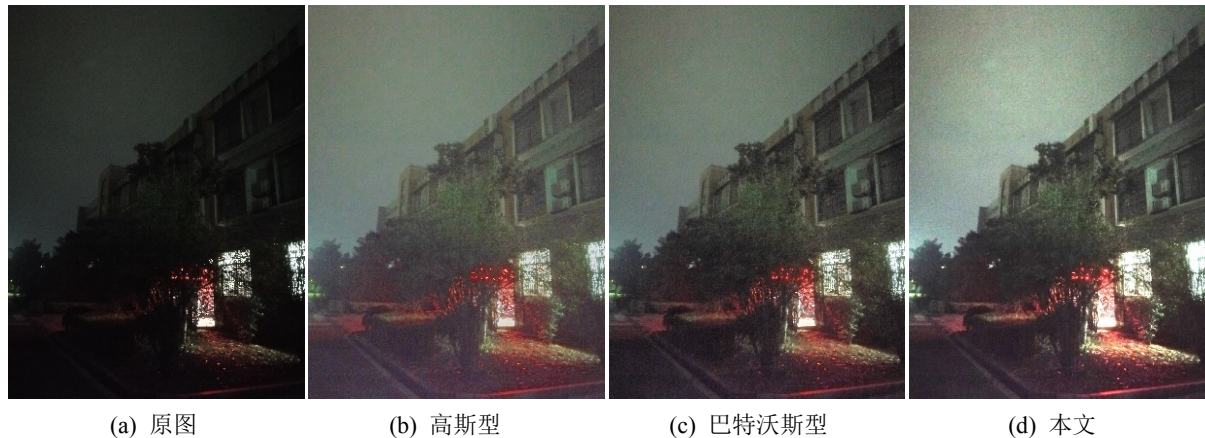


Figure 6. Comparison of architectural image enhancement effect
图 6. 建筑图像增强效果对比

选用以上三种评价指标,对图 5 和图 6 进行客观评价,不同算法增强结果对比如表 1 所示。从对比结果可以看出,经本文算法增强处理后,相比于传统同态滤波算法两幅图像的平均梯度、信息熵和对比度均得到较大提升,图像细节丰富、对比度较高,图像质量最佳。

Table 1. Comparison of objective evaluation indexes of different images
表 1. 不同图像客观评价指标对比

图像	平均梯度	信息熵	对比度	
图 5 道路	原图	3.197	6.155	771.975
	高斯	4.761	6.753	901.783
	巴特沃斯	4.719	6.820	852.337
	本文	6.365	7.314	2434.820
图 6 建筑	原图	1.509	5.633	662.268
	高斯	3.281	6.545	904.958
	巴特沃斯	2.916	6.774	1354.610
	本文	3.397	6.856	1797.680

5. 结论

本文针对传统同态滤波计算复杂、实时性差、参数多且最优参数获取困难等问题,提出了一种基于同态滤波的低照度增强算法。为避免增强图像颜色失真,基于 HSV 色彩空间,仅对亮度分量进行校正。以平均梯度、信息熵和对比度为指标对增强图像评价,得出主要结论如下:

- 1) 基于 sigmoid 函数构造单参数同态滤波函数,有效地减少了控制参数,便于最优参数选取。
- 2) 以 PSNR 及 SSIM 为指标建立评价模型,采取等步长间隔法实现了参数自适应选取。
- 3) 与传统算法相比,本文算法增强后的图像对比度高,图像细节信息丰富,视觉效果较好。

参考文献

- [1] 武亚红. 不均匀低照度低质图像增强算法研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 南京邮电大学, 2021.
- [2] 郭永坤, 朱彦陈, 刘莉萍, 黄强. 空频域图像增强方法研究综述[J]. 计算机工程与应用, 2022, 58(11): 23-32.

-
- [3] Oppenheim, A., Schafer, R. and Stockham, T. (1968) Nonlinear Filtering of Multiplied and Convolved Signals. *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, **16**, 437-466. <https://doi.org/10.1109/TAU.1968.1161990>
- [4] Wu, H. and Tan, Z. (2020) An Image Dehazing Algorithm Based on Single-Scale Retinex and Homomorphic Filtering. In: Liang, Q., Wang, W., Liu, X., Na, Z., Jia, M. and Zhang, B., Eds., *Communications, Signal Processing, and Systems. CSPS 2019. Lecture Notes in Electrical Engineering*, Vol. 571, Springer, Singapore, 1482-1493. https://doi.org/10.1007/978-981-13-9409-6_178
- [5] 杨亚绒, 李恒, 赵磊, 王海瑞. 改进的同态滤波与多尺度融合的水下图像增强[J]. 机械科学与技术, 2022, 41(8): 1231-1239.
- [6] 刘佳敏, 何宁. 基于改进同态滤波的低对比度图像增强[J]. 计算机应用与软件, 2020, 37(3): 220-224.
- [7] 刘源, 夏春蕾. 基于改进同态滤波的带钢缺陷亮度不均匀校正算法[J]. 电子测量技术, 2021, 44(8): 110-114.
- [8] 张亚飞, 谢明鸿. 基于分块 DCT 同态滤波的彩色图像增强算法[J]. 计算机工程与设计, 2013, 34(5): 1752-1756.
- [9] 张珂, 廖育荣, 罗亚伦, 程凌峰. 基于改进同态滤波的红外图像增强算法[J]. 激光与光电子学进展: 1-8. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.TN.20220713.1702.475.html>, 2022-07-15.
- [10] Fan, Y., Zhang, L., Guo, H., *et al.* (2020) Image Processing for Laser Imaging Using Adaptive Homomorphic Filtering and Total Variation. *Photonics*, **7**, Article No. 30. <https://doi.org/10.3390/photonics7020030>
- [11] 焦竹青, 徐保国. HSV 变换和同态滤波的彩色图像光照补偿[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(30): 142-144.
- [12] 李成龙. 基于照射/反射模型的视觉感知增强算法研究及应用[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- [13] 冯相辉. 一种改进的同态滤波图像增强算法[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2020, 32(1): 138-145.
- [14] 王秋云. 一种改进的照度不均图像增强方法[J]. 自动化与仪器仪表, 2017(2): 33-35.
- [15] 周景超, 戴汝为, 肖柏华. 图像质量评价研究综述[J]. 计算机科学, 2008, 35(7): 1-4, 8.
- [16] 吕绪良, 文刘强, 荣先辉, 等. 基于小波变换的红外图像模糊与同态增强[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2013, 14(2): 158-162.