

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2016.02.008

基于 GIF 滤波分解的低照度图像增强算法

陈宇航, 朱时良

(武汉大学印刷与包装系, 湖北武汉 430079)

摘要: 针对常见的对比度增强方法在处理低照度图像时不能兼顾提升图像亮度、对比度, 和增强细节的问题, 提出基于引导滤波器 (guided image filter, GIF) 的低照度图像增强算法。首先将输入图像从 RGB 颜色空间转换到 HSV 颜色空间; 再利用 GIF 滤波器对图像进行图像分解, 得到一个基本层和一个细节层; 然后对基本层进行自适应 Gamma 校正, 提高图像的整体亮度和对比度; 再对细节层进行 S 型曲线增强, 突出图像的局部细节; 最后合成并恢复颜色, 得到增强图像。将本文算法、全局 Gamma 校正、MSRCR 3 种算法分别对低照度 Bridge 和 Street 图像进行处理, 实验结果表明: 本文算法能够在有效提升对比度的同时增强图像细节, 提升了低照度图像的视觉效果。

关键词: GIF 滤波器; 图像分解; 自适应对比度增强; 细节增强

中图分类号: TP391.41

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2016)02-0043-05

A Low Illumination Image Enhancement Algorithm Based on GIF Filtering Decomposition

CHEN Yuhang, ZHU Shiliang

(School of Printing and Packaging, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: The ordinary contrast enhancement methods in the low illumination images processing exist problems of not be able to improve the brightness, the contrast and details of images simultaneously, proposes a low illumination image enhancement algorithm based on guided image filter (GIF). The algorithm converts the input image from RGB color space to HSV color space, then decomposes the image into a base layer and a detail layer by a guided image filter, after that, conducts an adaptive Gamma correction on the base layer to improve the overall brightness and contrast of the image; enhances S-shape curve on the detail layer to highlight the local details of the image; finally reconstructs and restores the colors and obtains the enhanced image. A control experiment is conducted on 2 low illumination images (Bridge and Street) by the proposed method, global Gamma correction and MSRCR, respectively. The results indicate that the proposed method is able to improve the image contrast and details simultaneously, and enhances the visual quality of low illumination images.

Keywords: guided image filter; image decomposition; adaptive contrast enhancement; detail enhancement

0 引言

低照度图像是在光照不足的情况下采集的图像, 该图像的细节和背景包含在较窄的灰度范围内, 且图像的灰度值和对比度较低。其中, 低对比度是影响

低照度图像质量的一个主要因素, 因此, 可通过增强图像对比度, 以提升图像质量, 展现图像场景信息, 改善视觉效果。传统的图像对比度增强方法^[1]主要有对数变换、Gamma 校正、直方图均衡化等。

收稿日期: 2016-01-16

作者简介: 陈宇航 (1990-), 男, 浙江嘉兴人, 武汉大学硕士生, 主要研究方向为图文信息处理及印刷企业管理,

E-mail: cyh706510441@sina.com

上述方法是通过一对一的灰度映射来调整图像的整体亮度、增强图像的全局对比度,算法实现简单,但没有具体考虑邻域像素间的相关性,因此,在图像的局部细节增强方面表现不足。为了突出图像局部细节特征,基于多尺度 Retinex 的增强方法^[2]得到了广泛的应用,主要有多尺度 Retinex 方法 (multi-scale retinex, MSR)、带颜色恢复的多尺度 Retinex 方法 (multi-scale retinex with color restoration, MSRRCR)。通过这些方法增强后,图像的对比度和细节都有很大提升,但前者处理后的图像色彩偏灰,后者会使图像过亮,部分亮区细节丢失,且仍有灰化现象^[3]。

近年来,基于边缘保持的图像分解技术在图像增强中得到了快速发展。所谓图像分解就是将图像分解成一个基本层和一个细节层^[4]。图像分解能够更加灵活地处理分解后的各层子图像,满足不同应用需求。基本层的计算就是图像平滑滤波的过程。在图像平滑过程中,模糊边缘会在细节层中产生震荡,从而导致图像在重组后出现光晕现象和梯度反转现象。因此,滤波器的选择尤为关键。C. Tomasi 等^[5]提出了双边滤波器 (bilateral filter, BF),该算法考虑了像素的空间邻近关系和灰度值的相似关系,在平滑图像的同时较好地保留了图像边缘,但其求解效率低,同

时会出现光晕和梯度反转现象;He Kaiming 等^[6]基于图像局部线性模型,提出了引导滤波器 (guided image filter, GIF),该算法能较好地保留图像边缘,有效地避免梯度反转,且算法复杂度低。

针对上述图像增强算法很难提升低照度图像全局亮度、对比度的同时,增强局部细节特征的缺陷,本文提出了基于 GIF 滤波分解的低照度图像增强算法。该算法先使用边缘保持的 GIF 滤波器对图像进行图像分解,再对得到的基本层和细节层分别进行对比度增强和细节增强。

1 算法介绍

本文在图像分解的基础上,将对比度增强和细节增强相结合,提出了基于 GIF 滤波分解的低照度图像增强算法。该算法思想如下:将输入图像从 RGB 颜色空间转换到 HSV 颜色空间^[7];保证 2 个颜色分量不变的前提下,用边缘保持的 GIF 滤波器对亮度分量进行图像分解,得到基本层和细节层;再对基本层和细节层分别进行增强,使得处理后的图像增强对比度的同时突出细节信息;最后,将增强后的图像转换回 RGB 颜色空间,得到最终的增强图像。算法流程如图 1 所示。

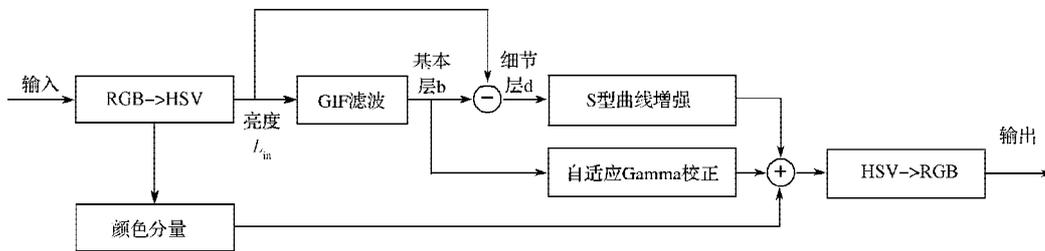


图 1 算法流程图

Fig. 1 Flowchart of the proposed algorithm

1.1 GIF滤波器

He Kaiming 等^[6]假设引导图像 I 和输出图像 q 之间存在局部线性关系,即

$$q_i = a_k I_i + b_k, \forall i \in \omega_k \quad (1)$$

式中: a_k, b_k 为以半径为 r 的方形局部窗口 ω_k 中的常数;

i 为 ω_k 中的像素位置。

用核函数表示引导图像 I 、输入图像 p 和输出图像 q 之间的关系,即

$$q_i = \sum_j W_{ij}(I) p_j, \quad (2)$$

式中: i, j 为空间像素位置;

W_{ij} 为滤波器的核函数,即

$$W_{ij}(I) = \frac{1}{|\omega|^2} \sum_{k:(i,j) \in \omega_k} \left(1 + \frac{(I_i - \mu_k)(I_j - \mu_k)}{\sigma_k^2 + \varepsilon} \right), \quad (3)$$

其中, ω_k 为第 k 个核函数窗口, $|\omega|$ 为局部窗口 ω_k 内的像素数, μ_k 和 σ_k^2 分别为引导图像 I 在局部窗口 ω_k 内的均值和方差, ε 为正则化参数,用于控制平滑程度。

由式(1)可推出 $\nabla q = a \nabla I$ (∇ 表示图像梯度),即输出图像 q 和引导图像 I 的梯度之间存在线性关系。若引导图像 I 有边缘,其经 GIF 滤波器后,输出图像 q 也有边缘。因此, GIF 滤波器是一种具有边缘保持特性的滤波器,且能利用邻域内的图像均值和方差自适应分配滤波权重。与双边滤波相比, GIF 滤波器具有更好的边缘保持特性,不会出现梯度反转现象。

本文利用 GIF 滤波器 ($r=3, \varepsilon=0.01$) 对图像进行平滑滤波处理, 得到基本层 b , 再将原图 p 与基本层 b 做差运算, 得到细节层 d 。通过 GIF 滤波操作, 实现了图像高频、低频成分的分离。基本层保留了图像大尺度变化和局部突出边缘, 细节层包含了 0 周围的震荡, 即细节信息。

$$\begin{cases} b = GIF(I, p), \\ d = p - b. \end{cases} \quad (4)$$

式中 $GIF(I, p)$ 为 GIF 滤波操作, 本文选取 $I=p$ 。

1.2 增强算法

图像分解后, 为了使图像的对比度和细节同时得到有效增强, 本文设计了如下增强函数:

$$L_{out} = 255(b/255)^\gamma + S(a, d). \quad (5)$$

式中: 第一项为自适应 Gamma 校正, 用于调整图像亮度、增强对比度, 其中 γ 为自适应系数; 后一项为 S 型曲线函数, 可对细节进行增强, 其中 a 用于调节细节层的增强程度。下面将详细阐述增强函数式 (5) 的构造。

1) 传统 Gamma 校正是一种简单的图像灰度变换, 是全局增强。当 $\gamma < 1$ 时, 可以有效提升图像亮度、对比度。若 γ 值为一预设的固定值, 即 γ 不能根据图像内容自适应改变, 则会出现图像的亮调区域丢失细节的问题, 且由于没有考虑邻域像素间的亮度差异, 导致局部细节的增强能力也不足。因此, 本文提出了基于梯度信息的自适应 γ 值, 该方法不是直接使用梯度幅值, 而是利用 x, y 方向的梯度矢量 (由中心差分法计算获得), 根据梯度信息自适应地计算出图像对比度增强幅度。 γ 的定义如下:

$$\gamma(i, j) = 255 - \frac{b(i+1, j) - b(i-1, j)}{2} - \frac{b(i, j+1) - b(i, j-1)}{2}. \quad (6)$$

通过式 (6) 计算出所有像素的 γ 值后, 再将 γ 归一化到 $[0, 1]$ 。当梯度值较大时, 则 γ 值较小, 对图像对比度的提升程度大。为了进一步提升图像对比度, 用一指数因子 c 对 γ 进行控制, 即 $\gamma = \gamma^c$ 。可知, c 值越大, γ 值越大, 本文 c 取 1.2。

2) 自适应 Gamma 校正只能提升图像的对比度, 并不能有效增强图像的细节特征, 因此, 本文还对图像的细节进行了处理。由前面分析可知, 细节层包含了 0 周围的震荡。在细节增强过程中, S 型增强函数需满足如下条件。

①它能压缩远离 0 偏差, 防止细节重组后, 整个亮度通道发生大幅度越界, 同时尽量增强小偏差。

②它是凸函数, 以防止梯度反转。

③它关于原点对称, 以使得正负震荡的增强/压缩比例相同。

综上所述, 本文采用如下细节增强函数^[8]:

$$S(a, x) = \frac{1}{1 + e^{-ax}} - 0.5, \quad (7)$$

式中参数 a 用于控制细节增强的程度。细节增强函数随参数 a 变化的曲线图如图 2 所示。由图可知, 随着参数 a 的减小, 细节增强程度和压缩大偏差的能力减弱。因此, 本文取 $a=8$, 该参数设置对于其他图像也能取得良好的效果。

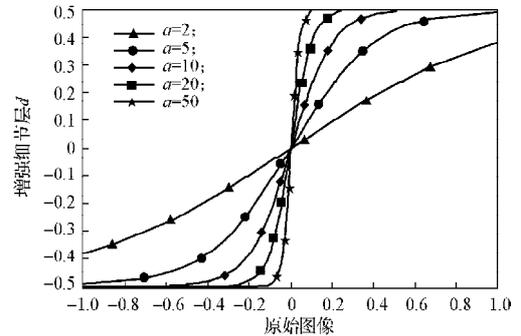


图2 细节增强函数随参数 a 的变化曲线图

Fig. 2 The variation curve of the detail enhancement function with parameter a

2 实验分析

本文在 AMD N830 2.10 GHz CPU, 4G 内存的硬件环境和 Windows 7 64 位操作系统, 利用 Matlab 2012b 软件对 3 种算法进行分析。选取 2 张低照度图像 (Bridge 图像和 Street 图像) 作为实验对象, 先将待处理图像转换到 HSV 颜色空间, 再处理 V 分量, 最后再转换回 RGB 颜色空间。本文采用主客观评价方式分析本文算法与全局 Gamma 校正、MSRCR^[2] 的优劣。其中, Gamma 校正的 γ 值设置为 0.45, MSRCR 的 3 个尺度参数为 15, 80, 250。

3 种算法对低照度 Bridge 和 Street 图像的处理结果分别见图 3 和图 4。



a) 原图



b) Gamma 校正



c) MSRCR 方法



d) 本文方法

图3 Bridge图像增强效果比较

Fig. 3 Comparison of different methods applied on image Bridge



a) 原图



b) Gamma 校正



c) MSRCR 方法



d) 本文方法

图4 Street图像增强效果比较

Fig. 4 Comparison of different methods applied on image Street

由图3~4可以得出如下结论。

1) Gamma校正和本文算法得到的图像颜色更自然,图3c(采用MSRCR方法)中,桥塔颜色偏暗,且树林颜色有些发灰白,图4b的云层对比度较原图有些下降。

2) Gamma校正和本文算法得到的增强效果差不多,但本文方法在细节处理上表现更好,如图3d的钢缆较图3b更清晰,图4d比图4b和图4c的云层细节更清晰,对比度更高。

除了进行主观评价外,本文还使用了2个指标均值(mean)、对比度增益(contrast gain, CG)^[8-9]来评价图像质量。均值反映了图像全局亮度增强程度,值越大,表示图像越亮。对比度增益用来衡量图像的局部对比度增强程度,其定义为

$$CG = C_{en} / C_{ini}, \quad (8)$$

式中: C_{en} 为将增强图像分割为互不重叠的 3×3 子块后,所有 3×3 子块的图像对比度均值;

C_{ini} 为将原始图像分割为互不重叠的 3×3 子块后,所有 3×3 子块的图像对比度均值。

子块图像的对比度用 Michelson 公式求得,即

$$C = (I_{max} - I_{min}) / (I_{max} + I_{min}), \quad (9)$$

式中 I_{max} , I_{min} 分别为子块中的最大、最小灰度值。

表1为Bridge和Street的原始图像及其经3种增强算法处理后的均值和对比度增益。

表 1 各算法处理 Bridge 图像和 Street 图像的客观评价结果

图名	指标	原图	算 法		
			Gamma 校正	MSRCR	本文算法
Bridge 图像	mean	82.72	132.59	136.61	147.59
	CG	1	0.53	0.73	0.71
Street 图像	mean	65.87	100.02	118.88	105.81
	CG	1	0.59	0.55	0.69

由表 1 可知: 1) 3 种图像增强方法都能提高图像的整体亮度, 光照不足的缺陷得到改善, 视觉效果得到提升; 2) 对于对比度的改善, 本文方法的结果更优, 这与图像主观视觉感受是一致的。

3 结语

本文提出了一种基于 GIF 滤波分解的低照度图像增强算法, 通过对基本层的自适应 Gamma 校正和细节层的 S 型曲线增强, 实现了提升图像整体亮度、对比度的同时, 增强了图像细节, 克服了传统增强方法两者不可兼得的缺陷。

在低照度条件下, 图像往往受噪声影响较大, 因此, 以后的研究工作考虑将图像去噪融入增强算法中, 实现低照度图像去噪、对比度增强和细节增强的有机结合。

参考文献:

- [1] HUANG S C, CHENG F C, CHIU Y S. Efficient Contrast Enhancement Using Adaptive Gamma Correction with Weighting Distribution[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2013, 22(3): 1032-1041.
- [2] RAHMAN Z, JOBSON D J, WOODSELL G A. Retinex Processing for Automatic Image Enhancement[J]. Processing of SPIE, 2004, 13(1): 100-110.
- [3] 张菲菲, 谢伟, 石强, 等. 人眼视觉感知驱动的梯

度域低照度图像对比度增强[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2014, 26(11): 1981-1988.

ZHANG Feifei, XIE Wei, SHI Qiang, et al. A Perception-Inspired Contrast Enhancement Method for Low-Light Images in Gradient Domain[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2014, 26(11): 1981-1988.

- [4] 凌云, 严彩萍, 刘春晓, 等. 色调保持的自适应图像视频细节增强算法[J]. 计算机学报, 2014, 37(3): 632-641.

LING Yun, YAN Caiping, LIU Chunxiao, et al. Tone-Preserving Adaptive Detail Enhancement for Images and Videos[J]. Chinese Journal of Computers, 2014, 37(3): 632-641.

- [5] TOMASI C, MANDUCHI R. Bilateral Filtering for Gray and Color Images[C]//Proceedings of the 6th International Conference on Computer Vision. Washington: IEEE Computer Society, 1998: 839-846.

- [6] HE Kaiming, SUN Jian, TANG Xiaoou. Guided Image Filtering[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2013, 35(6): 1397-1409.

- [7] 谢勇, 谭海湖, 王凯丽. 抗印刷/扫描彩色图像零水印方案[J]. 包装学报, 2016, 8(1): 1-7.

XIE Yong, TAN Haihu, WANG Kaili. A Zero-Watermark Scheme Robustness Against Printing-Scanning Color Image [J]. Packaging Journal, 2016, 8(1): 1-7.

- [8] FARBMAN Z, FATTAL R, LISCHINSKI D, et al. Edge-Preserving Decompositions for Multi-Scale Tone and Detail Manipulation[J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(3): 15-19.

- [9] 王守觉, 丁兴号, 廖英豪, 等. 一种新的仿生彩色图像增强方法[J]. 电子学报, 2008, 36(10): 1970-1973.

WANG Shoujue, DING Xinghao, LIAO Yinghao, et al. A Novel Bio-Inspired Algorithm for Color Image Enhancement[J]. ACTA Electronica Sinica, 2008, 36(10): 1970-1973.

(责任编辑: 邓彬)