

基于 Lab 色彩空间和色调映射的彩色图像增强算法

赵军辉¹ 吴玉峰² 胡坤融³ 蒲 斌⁴

(临沂大学(沂水校区)计算机系 山东 沂水 276400)¹ (北京理工大学软件学院 北京 100081)²
(西南林业大学计算机与信息学院 昆明 650224)³ (西华师范大学计算机学院 四川 南充 637009)⁴

摘 要 针对低照度图像对比度增强处理中的细节保留和色彩恒常问题,提出一种新颖的基于 Lab 色彩空间和色调映射的 Retinex 图像对比增强算法。首先,在 Lab 色彩空间中将一个低对比度的输入图像分解成亮度和色度分量,并使用自适应双边滤波估计照明的强度,以便根据亮度和颜色值来考虑合适的相邻像素。然后利用基于抛物线的色调映射函数来提高估计光照图像的对比度。最后,将加强的亮度和原始的色度结合在一起以产生一个增强的彩色输出图像。实验结果表明,所提算法通过减弱图像伪影增强了图像的细节和边缘结构,同时通过避免色彩偏移较好地保留了图像的自然度。

关键词 低照度,彩色图像增强,Lab 色彩空间,色调映射,Retinex,色彩偏移

中图分类号 TP391 文献标识码 A DOI 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.02.051

Color Image Enhancement Algorithm Based on Lab Color Space and Tone Mapping

ZHAO Jun-hui¹ WU Yu-feng² HU Kun-rong³ PU Bin⁴

(Department of Computer Science, Linyi University(Yishui Campus), Yishui, Shandong 276400, China)¹

(School of Software, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)²

(School of Computer and Information, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)³

(School of Computer, China West Normal University, Nanchong, Sichuan 637009, China)⁴

Abstract According to the detail preserving and color constancy problems in the low illumination image enhancement processing, this paper proposed a novel Retinex enhancement algorithm based on Lab color space and color mapping image contrast. Firstly, the input image of Lab color space with a low contrast is decomposed into luminance and chrominance components, and adaptive bilateral filtering is used for estimation of illumination intensity, so that appropriate adjacent pixels can be considered according to the brightness and color values. Then the tone mapping function based on the parabola is used to improve the contrast of the estimation of illumination image. Finally, the enhanced brightness and the original chroma are combined together to produce an enhanced color output image. Experimental results show that the proposed algorithm can enhance the image details and edge structure by reducing the image artifacts, and can preserve the image's nature by avoiding the color shift.

Keywords Low illumination, Color image enhancement, Lab color space, Tone mapping, Retinex, Color shift

1 前言

增强图像的对比度是图像处理的传统研究课题之一,目的是增加输入图像(如低光度图像、高动态范围图像以及朦胧或模糊的图像)的对比度。经典的 Retinex 理论已经广泛用于增强对比度^[1-2]。在 Retinex 理论中,感知的图像强度被认为是场景反射率和照度的产物。乔布森等人提出单一尺度 Retinex (Single Scale Retinex, SSR) 算法^[3],其中输入图像的照度被估算为高斯过滤后的图像。然而,由于高斯滤波的平滑特性,增强的图像在边缘附近往往会产生色彩偏移以及光晕伪影^[4]。

为了在单一尺度 Retinex 算法中缓解伪影的影响,文献[5]提出了改进的 Retinex 算法。文献[6]通过使用 HSV 色彩空间解决了色彩偏移的问题。具体来说,它只提高了 V 通道并保留了 H 和 S 通道。文献[7]采用双边滤波器来代替高斯滤波器,以估计照度,避免产生光晕伪影。这些基于 Retinex 的算法有效地提高了低对比度输入图像的细节,但经常产生不自然的图像,改变了整体的色彩温度或产生了额外的光源。文献[8-9]增加了输入图像的对比度,同时保留了色彩的自然度。文献[10]运用亮通滤波器和双对数转换来同时处理反射率和照度,平衡了产生的图像细节和自然度。

到稿日期:2017-01-19 返修日期:2017-03-15 本文受国家教育部博士点基金(20121101110037),教育部产学研合作协同育人项目(201602026060),四川省教育厅项目(16ZB0174)资助。

赵军辉(1977-),男,硕士,讲师,主要研究方向为软件工程、图像处理,E-mail:yssoft@126.com(通信作者);吴玉峰(1988-),男,博士,主要研究方向为智能数字表演、图像处理;胡坤融(1972-),男,硕士,副教授,硕士生导师,主要研究方向为林业物联网、大数据处理、信息安全、图像处理;蒲斌(1972-),男,硕士,副教授,主要研究方向为计算机网络与数据通信、图像处理。

为了提高低光度图像的对比度并保留色彩的恒常性,本文提出一种基于 Lab 色彩空间和色调映射的 Retinex 图像对比增强算法。该算法首先运用 Lab 色彩空间,通过亮度和色度分量来表示输入图像。然后只提取高低对比度的亮度,保留原始的色度;通过使用自适应双边滤波来估计照明,根据亮度和颜色值来考虑合适的相邻像素;利用基于抛物线的色调映射曲线来提高估计照明的强度。最后,将加强的 L 通道图像与原始的 a 和 b 通道图像结合在一起,并将其转换为 RGB 色彩空间。实验结果表明,提出的算法保留了图像的细节并保持了色彩恒常性,同时提高了低光度图像的对比度。

2 基于 Retinex 的对比度增强的原理

Retinex 理论假定图像***I*** 由场景反射率 ***R*** 和照度 ***L*** 的产物来表示,公式如下:

$$I(x, y) = R(x, y) \cdot L(x, y) \quad (1)$$

在单一尺度的 Retinex 算法中,通过高斯滤波器对输入图像进行卷积并估计,由此产生的场景反射率 R_{SSR} 以对数尺度表示:

$$R_{SSR}(x, y) = \log I(x, y) - \log \{F(x, y) * I(x, y)\} \quad (2)$$

其中, $F(x, y)$ 表示一个归一化的高斯函数^[2]:

$$F(x, y) = K \cdot \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{c^2}\right) \quad (3)$$

其中, K 表示归一化参数,满足 $\sum_x \sum_y F(x, y) = 1$ 。当 c 变大时,光晕伪影在高强度的像素周围变得严重。

为了减少单一尺度的 Retinex 算法的伪影,提出了多尺度的 Retinex (Multi-Scale Retinex, MSR) 算法^[3], 由此产生的场景反射率 R_{MSR} 在多个图像尺度中的加权和为:

$$R_{MSR}(x, y) = \sum_{n=1}^N \omega_n \cdot R_{SSR,n}(x, y) \quad (4)$$

其中, N 表示图像尺度的数量, ω_n 和 $R_{SSR,n}$ 分别表示通过单一尺度的 Retinex 获得的第 n 个尺度的权重参数和场景反射率。

此外,为了缓解 MSR 算法的色彩偏移,产生了 MSR 色彩还原算法 (MSR Color Restoration, MSRRCR)^[11]。通过色彩还原函数产生 MSR 反射率,获得了输出反射率 R_{MSRRCR} , 其可表示为:

$$R_{MSRRCR}(x, y) = H(x, y) \cdot R_{MSR}(x, y) \quad (5)$$

其中, $H(x, y)$ 是色彩还原函数。

3 提出的算法

3.1 Lab 色彩空间

基于 Retinex 的传统图像增强算法将 RGB 颜色转换成其他空间,如 HSV 或 YCbCr, 并使用 Retinex 处理亮度通道。然而,在 YCbCr 和 HSV 的色彩空间中,当亮度改变时,相关的色度值也相应地改变了。此外,色差的数量与人类视觉系统 (HVS) 感知的差异数量并不完全相同。相反, Lab 色彩空间单独地改变亮度和色度值,可以更真实地反映人类视觉系统^[12]。因此,本文使用 Lab 色彩空间,并且仅对亮度通道执行基于 Retinex 的增强算法。在色度通道,本文仍然保留原来的颜色信息,以避免颜色偏移。

3.2 照度估计

根据 Retinex 理论^[1], 将观察到的 L 通道图像强度视为

相关反射率和照度的产物。

$$I_{lum}(x, y) = R_{lum}(x, y) \cdot L_{lum}(x, y) \quad (6)$$

其中, $I_{lum}(x, y)$, $R_{lum}(x, y)$ 和 $L_{lum}(x, y)$ 分别表示在 L 通道图像中像素位置 (x, y) 处的强度、反射率和照度。注意,由于反射率归一化到 $[0, 1]$, 因此 $I_{lum}(x, y) \leq L_{lum}(x, y)$ 。

基于 Retinex 的传统算法通过平滑滤波器(如高斯、双边过滤器以及引导过滤器)对输入图像进行卷积以估计照度^[14]。高斯滤波器计算平均像素值,因此常产生光晕伪影。相反,双边滤波器可以在输入图像中保留边缘,并有效地减少光晕伪影的产生。

传统的双边过滤为邻近的像素分配更高的权重,以便在几何上更接近与给定目标像素更相似的像素值。然而,在一些目标像素中,由于双边滤波器的平滑特性,估计的光照值小于观测到的强度值,导致无效的反射率值大于 1。在这种情况下,需要额外规范化或调整反射率值的范围,这在增强的图像中可能会产生平滑像素值。

因此,本文采用自适应双边滤波,以此保证反射的可用范围。具体而言,在给定目标像素的相邻像素中,本文仅考虑具备如下条件的像素:与目标像素具有相似的颜色,而且比目标像素具备更大的亮度值。假设 $P(x, y)$ 表示一组与像素 (x, y) 相邻的像素。通过从 $P(x, y)$ 中选择出像素 (u, v) , 可以得到一组像素 $S(x, y)$, 其与像素 (x, y) 的颜色类似,而且比像素 (x, y) 具备更大的亮度值。

$$S(x, y) = \{(u, v) \mid (u, v) \in P(x, y), I_{lum}(u, v) > I_{lum}(x, y), d_{(x,y)}(u, v) < T\} \quad (7)$$

其中, (x, y) 和 (u, v) 之间的色度距离 $d_{(x,y)}(u, v)$ 的计算公式为:

$$d_{(x,y)}(u, v) = \sqrt{(I_a(x, y) - I_a(u, v))^2 + (I_b(x, y) - I_b(u, v))^2} \quad (8)$$

其中, I_a 和 I_b 分别表示 Lab 色彩空间中的 a 和 b 通道图像; T 表示给定的临界值,根据经验设置 $T=10$ 。

然后,估算像素 (x, y) 处的光照值:

$$L_{lum}(x, y) = \frac{\sum_{(u,v) \in S(x,y)} F_{geo}(u, v) \cdot F_{int}(u, v) \cdot I_{lum}(u, v)}{\sum_{(u,v) \in S(x,y)} F_{geo}(u, v) \cdot F_{int}(u, v)} \quad (9)$$

其中, $F_{geo}(u, v)$ 和 $F_{int}(u, v)$ 分别表示双边滤波中的几何相似度和强度相似度。

$$F_{geo}(u, v) = \frac{1}{2\pi\sigma_1^2} \exp\left(-\frac{(x-u)^2 + (y-v)^2}{2\sigma_1^2}\right) \quad (10)$$

$$F_{int}(u, v) = \frac{1}{2\pi\sigma_2^2} \exp\left(-\frac{(I_{lum}(x, y) - I_{lum}(u, v))^2}{2\sigma_2^2}\right) \quad (11)$$

其中,分别设置 $\sigma_1=3, \sigma_2=5$ 。

在式(9)中用 $P(x, y)$ 替换 $S(x, y)$ 来实现原始的双边滤波。因为本文只考虑亮度值大于目标像素的相邻像素,所以根据式(6),可以保证产生的估计反射率值在 $[0, 1]$ 可用的范围内。图像的细节和边缘结构是由相似颜色的相邻像素构成,因此可以进一步保留输入图像的细节和边缘结构。

从式(6)中获得的反射率公式为:

$$R_{lum}(x, y) = \frac{I_{lum}(x, y)}{L_{lum}(x, y)} \quad (12)$$

3.3 基于抛物线的色调映射曲线

通过提高估计光照图像强度 \hat{L}_{lum} 的直方图的动态范围,可以提高输入图像的对比度。为此可以使用传统的直方图均衡化或累积分布函数(CDF)进行匹配^[13],然而,这些方法往往会产生不自然的图像。

本文采用基于抛物线的色调映射曲线。如图 1 中的传递函数区域,我们在直线上定义了一条抛物线曲线,斜率为 45° ,抛物线的顶点偏离了虚线,达到 $|\lambda|$ 。因此,该抛物线曲线的低强度值具备相当陡峭的斜坡,而且高强度值的变化缓慢。通过式(13)可以为输入图像自适应地找到一条合适的抛物线曲线。

$$\lambda = \int_0^{100} T_{ill}(z) - T_{unif}(z) dz \quad (13)$$

其中, $T_{ill}(z)$ 表示 $\hat{L}_{lum}(x, y)$ 数值的累积分布函数, $T_{unif}(z)$ 表示均匀分布的累积分布函数。本文在 Lab 色彩空间中考虑了 L 通道,因此 L(亮度)的取值范围为 $[0, 100]$,表示从纯黑到纯白。

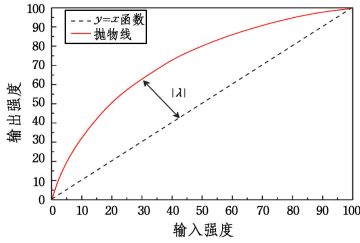


图 1 基于抛物线的强度转换函数

Fig. 1 Strength conversion function based on parabola

根据计算的基于抛物线的色调映射曲线,将 $\hat{L}_{lum}(x, y)$ 的最初估计光照值转变为新的数值 $\tilde{L}_{lum}(x, y)$ 。如果 λ 是正数,则意味着输入图像是低光度的图像,因此增加基于抛物线的传递函数的强度值,反之亦然。此外, $|\lambda|$ 控制着提高的水平,即 $|\lambda|$ 越大,强度的变化越大。为了保留生成图像的像素值顺序,使 $|\lambda|$ 不超过临界值 μ ,根据经验将其设置为 35.3。图 2 给出了(色调映射之前) $\hat{L}_{lum}(x, y)$ 的累积分布函数和(色调映射之后) $\tilde{L}_{lum}(x, y)$ 的累积分布函数对比结果。可以看出,色调映射之后产生的照度变得更明亮,而且强度值的动态范围比最初估计的强度值范围更广。

最后,通过运用式(12)计算的反射率 R_{lum} 和增强的照度 \tilde{L}_{lum} ,获得一个增强亮度图像 \tilde{I}_{lum} 。

$$\tilde{I}_{lum}(x, y) = R_{lum}(x, y) \cdot \tilde{L}_{lum}(x, y) \quad (14)$$

我们将增强亮度 \tilde{I}_{lum} 与 I_a 和 I_b 的原始色度分量结合在一起,然后将其转换为 RGB 色彩空间。

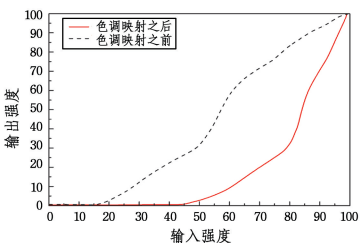


图 2 强度值的累积分布函数

Fig. 2 Cumulative distribution function of intensity value

4 实验与结果分析

为了验证提出的算法的性能,将本文算法与文献[12]和文献[13]的方法进行了对比实验。实验平台为 Windows 7 操作系统,CPU 为 Pentium Dual-Core E5200 处理器,2GB 内存,仿真环境为 Matlab7.8。测试比较的对象为两个低光度图像,原始图像分别如图 3(a)、图 4(a)所示。

4.1 增强效果的评价指标

采用亮度、标准差、熵和对比度增量这 4 个指标来评估图像增强算法的客观效果^[14]。亮度值表示图像的明暗程度,其公式如下:

$$\bar{I} = \frac{1}{3 \times M \times N} \sum_{i=1}^3 \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N I(m, n, i) \quad (15)$$

其中, M, N 表示图像的长和宽, i 表示通道数。

标准差表示图像黑白反差的程度,标准差越大则图像对比度越大,更利于人眼观察,其计算公式为:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (16)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

熵表示图像中信息量的大小,即图像细节的丰富程度,熵越大说明图像的细节越多,公式如下:

$$entrop = - \sum_{i=0}^{255} P_i \log P_i \quad (17)$$

其中, P_i 表示第 i 个灰度级的概率。

对比度增量表示增强后的图像的对比度与原图对比度的关系,即对比度的变化大小。如果对比度增量大于 1,则表明增强处理后的图像的对比度有所增强,计算公式如下:

$$K = C_{\text{处理后}} / C_{\text{原始}} \quad (18)$$

其中, C 是用 3×3 大小的滑动窗口计算局部对比度得到的平均值。

4.2 增强效果的主观指标

在图 3 中,树林草丛区域与低强度值的紧凑分布有关,因此其通过文献[13-14]提出的算法处理后变得模糊和不自然,如图 3(b)和图 3(c)所示。然而,如图 3(d)所示,所提算法通过自适应地选择双边滤波的邻近像素,使颜色更自然丰富,保留了树林区域的细节和图片的自然度。



图 3 图像的对比度增强效果(1)

Fig. 3 Contrast enhancement effect of image (1)

同样,如图 4(b)和图 4(c)所示,文献[12-13]提出的算法使山脉的色彩偏移;然而所提算法在山脉区域缓解了伪影,保持了色彩恒常性,并且产生了自然的人类视觉效果,保留了阴

影区域的自然性,如图4(d)所示。

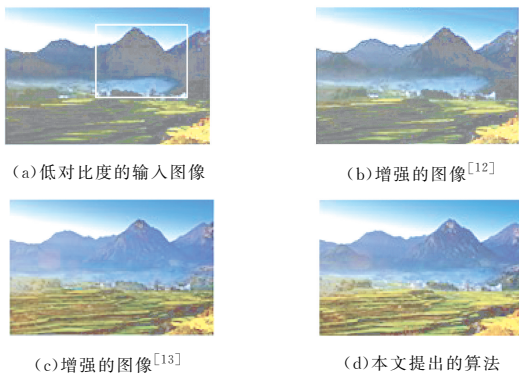


图4 图像的对比度增强效果(2)

Fig. 4 Contrast enhancement effect of image (2)

4.3 增强效果的客观指标

采用本文提出的算法对10幅图像进行增强实验,通过亮度、熵、标准差和对比度增量这4个客观指标对增强效果进行评估,结果如表1所列。

表1 10幅图片的平均增强指标

Table 1 Average enhancement index of 10 pictures

增强方法	亮度	标准差	熵	对比度增量
文献[13]算法	465.19	10.35	6.77	1.25
文献[14]算法	474.19	10.42	6.94	1.28
本文算法	494.27	10.48	7.27	1.30

从表1可以看出,3种增强方法都提高了图像的亮度、熵和标准差,本文所提算法的熵和标准差都略高于其他几种方法,说明通过本文方法增强后的图像比原图含有更多的细节信息,特别是对比度增量提高明显。3种方法的对比度增量都大于1,提高了图像的对比度。由于本文算法可以自适应地应用双边滤波,并且可以根据最优选择的基于抛物线的色调映射曲线改变像素值,因此提出的对比度增强算法可以在输出的图像中保持色彩恒常性和自然度。

结束语 本文提出了一种基于Retinex的图像对比度增强算法,以增强彩色图像而不引起色彩失真。首先运用Lab色彩空间将一个输入图像分解成亮度和色度分量。然后根据邻近像素的颜色相似度和亮度分布,通过自适应地应用双边滤波来估计照度。此外,还使用基于抛物线的色调映射来估计光照图像,以提高亮度图像的对比度。最后,将加强的亮度和原始的色度结合在一起,产生增强的彩色图像。实验结果表明,提出的算法提高了低对比度输入图像的对比度,同时较好地保留了图像的细节和自然色。然而,当输入图像的光照水平非常低时,该算法往往会产生过度增强的结果,我们将在未来的研究中解决这一问题。

参考文献

[1] SHIN K Y, PARK Y H, NGUYEN D T, et al. Finger-vein image enhancement using a fuzzy-based fusion method with Gabor and Retinex filtering [J]. *Sensors*, 2014, 14(2): 3095.

[2] PRABHU M, RAJARAJAN S, KARTHIKEYAN M P. Implementing histogram equalization and retinex algorithms for image contrast enhancement [J]. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2014, 9(20): 7311-7318.

[3] JOBSON D J, RAHMAN Z, WOODDELL G A. Properties and

performance of a center/surround retinex [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1997, 6(3): 451-462.

[4] WANG Y, WANG H, YIN C, et al. Biologically inspired image enhancement based on Retinex [J]. *Neurocomputing*, 2016, 177: 373-384.

[5] DU M, ZHAO X J. Improved Retinex algorithm for illumination change face image enhancement [J]. *Computer Science*, 2016, 43(2): 105-108. (in Chinese)

杜明, 赵向军. 改进 Retinex 的光照变化人脸图像增强算法 [J]. *计算机科学*, 2016, 43(2): 105-108.

[6] QIN X J, WANG H L, DU Y C, et al. The Retinex structured light image enhancement algorithm for 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.

[7] LIU Y L, FAN J B, DUAN N X. Variable infrared image enhancement based on bilateral filtering [J]. *Laser Journal*, 2016, 37(8): 86-88. (in Chinese)

刘雅莉, 樊慧博, 段乃侠. 基于双边滤波的变分红外图像增强 [J]. *激光杂志*, 2016, 37(8): 86-88.

[8] QIN X J, CHENG Y F, FAN Y L, et al. HSV color space Retinex image enhancement algorithm based on three edge filter [J]. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2016, 37(1): 168-172. (in Chinese)

秦绪佳, 程燕飞, 范颖琳, 等. 基于三边滤波的 HSV 色彩空间 Retinex 图像增强算法 [J]. *小型微型计算机系统*, 2016, 37(1): 168-172.

[9] WANG S, ZHENG J, HU H M, et al. Naturalness Preserved Enhancement Algorithm for Non-Uniform Illumination Images [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2013, 22(9): 3538-3548.

[10] AHN H, KEUM B, KIM D, et al. Adaptive local tone mapping based on retinex for high dynamic range images [C]// *IEEE International Conference on Consumer Electronics*. 2013: 153-156.

[11] JIANG B, WOODDELL G A, JOBSON D J. Novel multi-scale retinex with color restoration on graphics processing unit [J]. *Journal of Real-Time Image Processing*, 2015, 10(2): 239-253.

[12] XIE X M, WANG C M, ZHANG A J. Color Image Enhancement Methods Based on Matlab [J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2013, 300-301: 1664-1668.

[13] TSAI C M. Adaptive Local Power-Law Transformation for Color Image Enhancement [J]. *Applied Mathematics & Information Sciences*, 2013, 7(5): 2019-2026.

[14] NNOLIM U A. Log-hybrid architecture for tonal correction combined with modified un-sharp masking filter algorithm for colour image enhancement [J]. *Integration the Vlsi Journal*, 2014, 48(1): 221-229.

[15] LI H B, YU C B, ZHANG D M, et al. Study on finger vein image enhancement based on ridgelet transformation [J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunication (Natural Science Edition)*, 2011, 23(2): 224-230. (in Chinese)

李洪兵, 余成波, 张冬梅, 等. 基于脊波变换的手指静脉图像增强研究 [J]. *重庆邮电大学学报(自然科学版)*, 2011, 23(2): 224-230.