

一种新的仿生彩色图像增强方法

王守觉^{1,2}, 丁兴号¹, 廖英豪¹, 郭东辉¹

(1. 厦门大学信息科学与技术学院, 福建厦门 361005; 2. 中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

摘 要: 基于人类视觉系统的全局和局部自适应特性, 本文提出一种仿生彩色图像增强方法, 用于增强不均匀光照或低照度情况下的图像. 该方法主要包括全局自适应亮度调节、局部对比度增强和颜色恢复三个部分. 即全局亮度调节主要用来增强暗区域的亮度和压缩图像的动态范围; 局部对比度增强利用当前点与其邻域像素的双边滤波输出之间的关系, 调节当前点的亮度, 以增强图像局部对比度; 再通过一种简单的线性颜色恢复算法恢复图像色彩. 与文献[7,8]所提彩色图像增强算法相比, 实验结果表明本文所提方法的效果更好.

关键词: 彩色图像增强; 人类视觉系统; Retinex; 双边滤波器

中图分类号: TN911.73 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2008) 10-1970-04

A Novel Bio-inspired Algorithm for Color Image Enhancement

WANG Shou-jue^{1,2}, DING Xing-hao¹, LIAO Ying-hao¹, GUO Dong-hui¹

(1. School of Information Science and Technology, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China;

2. Institute of Semiconductors, CAS, Beijing 100083, China)

Abstract: We propose a novel bio-inspired algorithm to enhance the color image under low or non-uniform lighting conditions that models global and local adaptation of the human visual system. The proposed method consists of three parts: a preliminary global luminance adjustment followed by local contrast enhancement and color restoration. The global luminance adjustment increases the luminance of darker pixels and compresses the dynamic range as well. The local contrast enhancement adjusts the intensity of each pixel based on its relative magnitude with respect to the bilateral filter output of its neighboring pixels. Then a linear color restoration process is applied to convert the enhanced intensity image back to a color image. Experimental results of the proposed method and reference [7,8] are compared and analyzed to illustrate the effectiveness of the proposed method.

Key words: color image enhancement; human visual system; Retinex; bilateral filter

1 引言

图像在获取过程中由于各种原因会导致质量下降, 利用图像增强技术, 可以使图像具有最佳的视觉效果, 提高人眼对信息的辨别能力. 常规的增强方法有 Gamma 校正、直方图均衡、同态增析以及近年来基于小波的多尺度增强^[1]等. 这些方法主要增强图像的边缘等高频信息, 同时抑制噪声的放大. 但在自然界和我们的日常生活中, 接触的大多是彩色图像, 和灰度图像相比, 彩色图像还存在色彩信息, 彩色图像增强的目的在于能够增强图像细节同时使得图像更加生动, 色彩鲜艳但不能带来失真或色偏等现象.

对于彩色图像增强, 如果将灰度图像增强方法对三元色分别进行, 由于对三元色增强幅度不一致, 容易导致颜色失真. 为此, 研究者从人眼视觉感知特性的基础

上提出许多新的彩色图像增强方法^[2~8], 其中基于 Retinex 理论的增强方法受到广泛关注. 如文献[4]提出用一条或多条路径上像素的平均值作为光照图像的 Retinex 增强方法, 文献[5]提出使用原始图像的高斯低通滤波输出作为光照图像的多尺度 Retinex 增强方法. 文献[6]则在变分框架下研究 Retinex 增强方法. 2006 年 Laurence Meylan 等人受 Retinex 方法的启发, 通过对 RGB 图像进行 PCA 分析获得亮度分量图像, 再利用他们构造的自适应滤波器对亮度图像进行滤波获得图像的光照分量, 依据类似 Retinex 原理增强彩色图像获得了比较好的增强效果^[7]. 同样受 Retinex 方法启发, Li Tao 等人, 利用人眼的局部感知特性, 通过自适应指数方法获得较好的增强结果^[8]. 近年来国内王守觉院士提出用高维形象几何学方法研究信息处理中的问题, 并在彩色图像盲增强邻域取得很好的效果^[9,10].

收稿日期: 2007-07-16; 修回日期: 2008-06-25

基金项目: 国家自然科学基金主任基金 (No. 60753001); 福建省自然科学基金 (No. 2008J0032); 厦门大学 985 二期信息创新平台 (No. 0000-X07204)

一般来说基于 Retinex 的方法能够获得较好的彩色图像增强效果,但也还存在一些不足。如:当图像和“灰度世界”假设(Gray World Assumption,指当一幅图像中有足够多的颜色变化时,R、G、B 各个分量的平均值趋向于相等)冲突时,处理的图像会变得非常“灰”,即失去很多颜色信息,需要其他一些措施来恢复颜色信息;Retinex 方法一般需要对 R、G、B 三个分量分别进行处理,容易使得三元色的比例失衡,导致颜色失真,且也需要更多的处理时间;Retinex 方法将局部对比度增强和动态范围压缩同时完成,这样使得整个图像增强过程难以控制缺乏一定的柔性。

然而,依据人眼视觉感知系统的全局和局部自适应调节原理^[2],可以知道人眼在获取场景图像时是依据光线的强弱来调整瞳孔大小,从而自适应调节图像整体亮度水平(全局自适应调节过程)。因此,本文首先通过设定一个非线性映射模型,按图像的统计特性自适应调整图像的整体亮度水平;再依据人眼对于局部对比度敏感的特性,(人眼看到的某个区域的颜色由这个区域和它周围区域的不同波段(即不同颜色)间的相互关系决定的,而不依赖于光强的绝对值),通过双边滤波获得当前点的邻域平均亮度,依据当前点的亮度与其邻域平均亮度之间的关系,通过指数方式实现亮度图像的局部对比度增强;最后通过一定的颜色恢复算法恢复图像的彩色信息。本文在第二节中将具体介绍这种仿生彩色图像增强方法,最后用实际实验证明本文所提方法能够使得增强后的图像细节更加清晰,色彩更加生动、鲜艳,特别是对于暗区域的增强更明显。

2 仿生彩色图像增强方法

本文所提方法主要包括如下三个步骤:(1)自适应全局亮度调节;(2)自适应局部对比度增强;(3)颜色恢复。下面我们分别阐述上述 3 个步骤。

2.1 自适应全局亮度调节

自适应全局亮度调节,主要是依据亮度图像的明暗程度,通过非线性映射,完成暗区域增强和动态范围的压缩功能。

首先我们定义彩色图像的亮度分量 $I(x, y)$ 为 R、G、B 三元色中的最大值,如式(1):

$$I(x, y) = \max\{I_R(x, y), I_G(x, y), I_B(x, y)\} \quad (1)$$

其中 $I_R(x, y)$, $I_G(x, y)$, $I_B(x, y)$ 分别代表 RGB 空间中点 (x, y) 处像素的 R、G、B 三个分量的值。

依据所得到的亮度图像的累积分布函数定义亮度图像明暗程度系数如式(2):

$$L = \begin{cases} 0, & L \leq 50 \\ (L - 50)/120, & 50 < L < 170 \\ 1, & L > 170 \end{cases} \quad (2)$$

其中 L 是亮度图像灰度累积分布函数等于 0.1 时对应的灰阶,也就是说当图像中 10% 或更多的象素灰度低于 50 时,认为图像很暗,此时令 L 等于 0;当 90% 或更多的象素灰度大于 170 时,我们认为图像比较亮,此时令 L 等于 1;对于其他情况 L 则在 0~1 之间线性变化。

定义自适应亮度调节的非线性映射方式如式(3):

$$I_g(x, y) = [I_n(x, y)]^{L^{\frac{1}{3}} + \frac{1}{3}} \quad (3)$$

其中 $I_g(x, y)$ 是亮度调节后的图像, $I_n(x, y) = I(x, y)/255$ 为归一化后的原图像的亮度信息, L 是原图像的明暗系数。

式(3)的目的是依据原始图像的明暗程度,对图像的整体亮度进行非线性调整,以达到压缩图像动态范围的目的。同时对图像过暗或过亮部分进行调节,以便于人眼观察。

2.2 自适应局部对比度增强

经过亮度调节,图像的暗区域变亮,同时图像的动态范围也被压缩,图像对比度变差,为此需要对亮度调节后的图像进行对比度增强处理。由人眼视觉系统的研究知道,人眼对于局部对比度更为敏感,为此我们可以利用当前点亮度与其邻域平均亮度的关系,增强图像的局部对比度。当前点的亮度高于邻域平均亮度时则增强该点亮度,反之则降低该点的亮度。局部对比度增强采用式(4)所示方法。

$$I_L(x, y) = I_g(x, y)^{E(x, y)} \quad (4)$$

其中 $I_g(x, y)$ 是亮度调节后图像, $E(x, y)$ 为点 (x, y) 处的增强系数,由式(5)确定。

$$E(x, y) = \left[\frac{I_n(x, y)}{I_b(x, y)} \right] \quad (5)$$

其中 $I_b(x, y)$ 为当前点邻域平均亮度,其反映的是当前点所在位置的光照情况。一般 $I_b(x, y)$ 可以通过对 $I_n(x, y)$ 高斯低通滤波获得,也就是通过高斯核与周边邻域像素加权平均获得,如文献[8]中的方法。由于这种加权平均对于邻域像素是各向同性的,邻域像素的权重仅与该像素与当前点的距离有关而与数值无关,这样在对比强烈的物体边界附近,通过该方法获得的邻域平均亮度与当前点偏差较大,从而使得物体边界处出现过增强现象。为克服边界处的过增强现象,必须充分考虑物体边界处的光照突变情况,为此我们选择双边滤波来获得邻域平均亮度。

双边滤波是利用两个高斯平滑函数分别考察邻域像素在数值和位置上与当前点之间的相似性,获得邻域像素的权重。双边滤波本质上是一种改进的高斯加权平均算子,由于同时考虑了像素在数值和位置上性质,使得双边滤波在做加权平均时能够充分考虑到物体边界处光照的突变情况。双边滤波通过对与当前点位置相近

且数值上相差不大的点赋以较大的权重,而对于数值上相差较大即使位置很相近的点也赋以较小的权重,从而有效克服边界处光照突变对邻域的平均亮度的影响.利用双边滤波获得当前点邻域平均亮度 $I_b(x, y)$ 的方法如下:

$$I_b(x, y) = \frac{\sum_{i,j=-w}^w G_R G_V I_n(x_i, y_j)}{\sum_{i,j=-w}^w G_R G_V} \quad (6)$$

其中 G_R 和 G_V 分别是空间邻近度高斯核函数和数值相似性高斯核函数,定义如式(7)和(8):

$$G_R(x, y, x_i, y_j) = \exp\left[-\frac{(x-x_i)^2 + (y-y_j)^2}{2 \cdot R^2}\right] \quad (7)$$

$$G_V(I(x, y), I(x_i, y_j)) = \exp\left[-\frac{(I(x, y) - I(x_i, y_j))^2}{2 \cdot V^2}\right] \quad (8)$$

其中 R 和 V 是对应的尺度参数,用于调整空间邻近度和数值相似性函数的衰减速度.

2.3 颜色恢复

通过上述亮度调节和局部对比度增强后,获得了增强后的亮度图像.利用原始图像中的色彩信息,通过简单的线性操作即可以恢复增强后图像的彩色信息,由于是线性操作,恢复后的图像各象素点的 R、G、B 三分量的比例关系保持不变,因而能够较好地保留原始图像中的颜色信息.增强后图像彩色信息恢复方法如下:

$$I_j(x, y) = (x, y) I_j(x, y), j = r, g, b \quad (9)$$

其中 $(x, y) = \frac{I_l(x, y)}{I(x, y)}$ 为点 (x, y) 处的比例增强因子, $I_j(x, y), j = r, g, b$ 表示的是原始图像的 R、G、B 三元分量, $I_j(x, y), j = r, g, b$ 是增强后彩色图像的三元分量.

3 实验结果与分析

实验选择文献[7]中两幅对比度比较差的图像, Tree 图像和 Coupole 图像.图1显示用本文所提方法和文献[7,8]中方法对两幅图像增强后的效果(由于本文采用与文献[7]一样的原始待增强的图像,因而与其他增强方法的比较,读者可以参考文献[7]).由图1中可以看出,本文所提方法颜色恢复的较好,视觉感知更鲜艳、生动,这与颜色线性恢复算法有关.另外,文献[7]所提方法整体感觉有些发白,且细节对比度不如本文所提方法,如 Tree 图像中的树干、天空中的云彩以及 Coupole 图像中的地砖等.文献[8]所提方法也存在整体发白效果,且产生一些错误增强信息,如 Tree 图像树干左侧出现较宽的黑色条带.虽然本文所提方法具有一定优势,但也存在一些不足,如对于对比强烈的线条状边界还存在一定过增强现象(如 Coupole 图像中的遮阳篷上的白条),还需要对增强点邻域平均亮度计算方法进行改进.

目前彩色图像对比度提升性能的客观评价标准还不成熟,主要研究其对应的灰度图像,而对于色彩信息的评价主要依赖主观视觉.对于处理前后灰度图像对比度的性能,我们采用均值(反映图像的整体亮度)和对比度提升指数作为判别标准.对比度提升指数定义为:

$$CI = C_{\text{processed}} / C_{\text{original}} \quad (10)$$

将图像分为 3×3 的小块, C 为所有 3×3 小块图像对比度的均值,小块对比度定义为 $(\max - \min) / (\max + \min)$,其中 \max 为小块图像灰度值的最大值, \min 为小块图像灰度值的最小值.下标 original 和 processed 分别表示增强前后的图像.表1和表2分别列出了对 Tree 图像和 Coupole 图像增强结果的性能指标比较.从表1、2中的结果可以看出,三种方法均能有效提高图像的整体亮度,且文献8方法亮度相对较高,而本文所提方法对于图像的对比度改善则更优,这与图像的主观视觉感观是一致的.

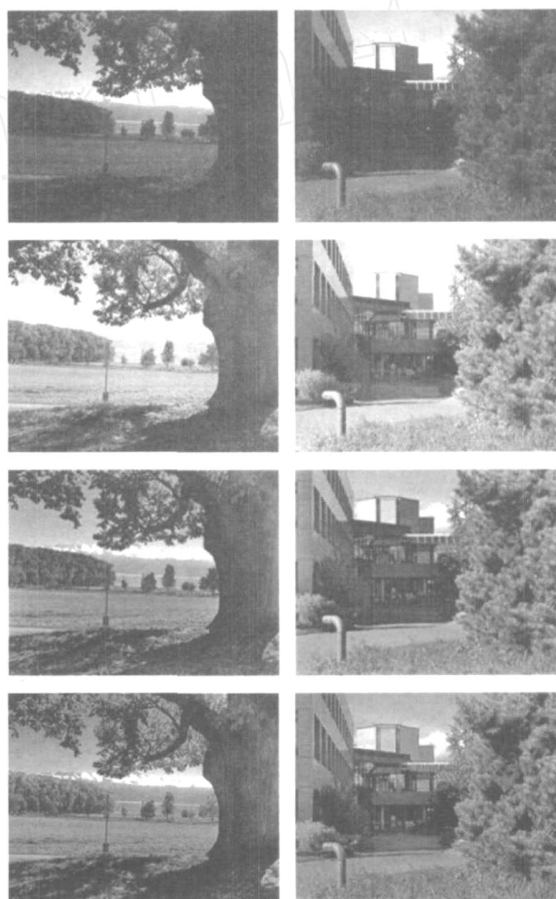


图1 本文方法与文献[7]方法增强结果比较(从上到下分别是原图、文献[7]、[8]增强结果、本文结果)

表1 Tree 图像增强结果性能评价

指标	原始图像	文献7	文献8	本文
均值	34.1	111.2	80.2	87.8
CI	1	0.794	1.305	1.485

表 2 Coupole 图像增强结果性能评价

指标	原始图像	文献 7	文献 8	本文
均值	45.2	126.9	94.8	100.2
CI	1	1.165	1.123	1.797

4 结论

本文依据人眼视觉感知的全局和局部自适应特点,提出一种新的彩色图像增强方法,该方法通过全局亮度调节、局部对比度提升以及颜色恢复三个步骤实现彩色图像增强.实际的对比度增强实验表明,该方法能够有效增强彩色图像,增强后的图像细节更突出特别是暗区域的细节特征,且增强后的图像色彩较其他方法更加生动、逼真.

致谢:感谢 Laurence Meylan 博士提供的增强用的源图像以及用于与本文比较的图像增强程序.

参考文献:

- [1] 刘国军,唐降龙,黄剑华,刘家峰.基于模糊小波的图像对比度增强算法[J].电子学报,2005,33(4):643-646.
Liu Guo-jun, Tang Xiang-long, Huang Jian-hua, Liu Jia-feng. An image contrast enhancement approach based on fuzzy wavelet[J]. Acta Electronic Sinica, 2005, 33(4): 643-646. (in Chinese)
- [2] M A Webster. Human colour perception and its adaptation[J]. Network: Computation in Neural Systems, 1996, 17(4): 587-634.
- [3] 黄凯奇,王桥,吴镇扬.基于视觉特性和颜色空间的多尺度彩色图像增强算法[J].电子学报,2004,32(4):673-676.
Huang Kai-qi, Wang Qiao, Wu Zhen-yang. Multi-scale color image enhancement algorithm based on color space and human visual system(HVS)[J]. Acta Electronic Sinica, 2004, 32(4): 673-676. (in Chinese)
- [4] Funt B, Ciurea F, Mccann J. Retinex in MATLAB[J]. Journal of Electronic Imaging, 2004, 13(1): 48-57.
- [5] Jobson DJ, Rahman Z, Woodell GA. A multiscale 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.

- [6] Kimmel R, Elad M, Shaked D. A variational framework for Retinex[J]. International Journal of Computer Vision, 2003, 52(1): 7-23.
- [7] Laurence Meylan, Sabine Susstrunk. High dynamic range image rendering with a retinex-based adaptive filter[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(9): 2820-2830.
- [8] Li Tao, Vijayan K. Asari. A Robust Image Enhancement Technique for Improving Image Visual Quality in Shadowed Scenes [A]. Proceedings of the 4th International Conference on Image and Video Retrieval [C]. Springer, Berlin, ALLEMAGNE, 2005, vol. 3568, 395-404.
- [9] 王守觉. 仿生模式识别(拓扑模式识别)——一种模式识别新模型的理论与应用[J]. 电子学报, 2002, 30(10): 1417-1420.
Wang Shou-jue. Bionic (topological) pattern recognition - a new model of pattern recognition theory and its applications [J]. Acta Electronic Sinica, 2002, 30(10): 1417-1420. (in Chinese)
- [10] Wang Shoujue, Cao Yu, Huang Yi. A novel image restoration approach based on point location in high-dimension space geometry [A]. Proceedings of International Conference on Neural Networks and Brain (ICNN&B '05) [C]. IEEE Press, 2005, vol. 1, 301-305.

作者简介:

王守觉 男, 1925 年生于上海, 早年就读于西南联大和同济大学, 毕业后在北平研究院镭学研究所从事氧化亚铜研究, 解放后改为中国科学院应用物理所结晶学室, 1960 年成立半导体所后历任器件室主任、副所长、所长等职务, 1980 年当选为学部委员(院士), 现为中国电子学会副理事长, 《电子学报》主编, 中国半导体学科奠基人之一, 现从事半导体超高速电路与神经网络算法、模型、硬件和应用的研究.



丁兴号 男, 副教授、硕士生导师. 1977 年 3 月出生于安徽肥东. 1998 年和 2003 年在合肥工业大学分别获得工学学士和工学博士学位. 主要从事图像稀疏表示理论及应用、图像处理、高维形象几何仿生信息学等方面的研究工作. (论文通讯作者)

E-mail: dxh@xmu.edu.cn