

文章编号: 0255 - 8297(2004) 03 - 0322 - 05

色彩恒常性在彩色图像增强中的应用

黄凯奇, 吴镇扬, 王 桥

(东南大学 无线电工程系, 江苏 南京 210096)

摘 要: 将 Retinex 算法应用于彩色图像增强中, 在分析 MSRCR 算法构成的基础上, 针对灰度假设(GW)带来的问题作出了改进. 改进的算法基于图像自身的直方图, 对参数进行自适应的选取. 实验结果表明, 改进后的算法使彩色图像在演色性(Rendering)方面有了较大的提高, 更符合人眼视觉系统的感知特性.

关键词: 彩色图像; 色彩恒定性; 图像增强

中图分类号: TN911.73 文献标识码: A

The Application of Color Constancy to Color Image Enhancement

HUANG Kai-qi, WU Zhen-yang, WANG Qiao

(Radio Engineering Department, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: As an important brightness and color visual theory, Retinex theory has received more and more attention in recent years. We apply it to color image enhancement. Basing on the analysis of MSRCR algorithm, we make use of the histogram of image itself to improve the problem by the GW assumption and choose the parameters adaptively. The experimental results confirm the effectiveness of our algorithm in color image enhancement and the images processed get better rendering by human visual systems.

Key words: color image; color constancy; image enhancement

目前图像对比度增强技术的对象主要是灰度图像, 修整给定图像的灰度是一种简单而有效的算法. 灰度变换的目的在于以统一的方法改变整个图像的灰度或者改变图像的一些区域的灰度, 以便能增加对比度. 直接将灰度图像增强算法推广到彩色图像增强中去, 如对彩色图像的 R、G、B 3 个分量分别采用直方图类算法是不恰当的, 因为彩色图像的 3 个分量信息是互相关联的. 常见的彩色图像增强算法是将彩色图像经过色度空间转换, 将密切相关的 3 个分量(RGB)的空间转变到基本不相关的色度空间, 最常见的是 HSV(H: 色相; S: 饱和度; V: 亮度)空间, 然后对 V 分量和 S 分量进行处理, 保持 H 分

量不变^[1~3]. 这一类算法基于保持色相(决定颜色值的分量)不变从而保证了没有颜色的偏移, 同时对 V 和 S 分量作相应的处理, 如边缘锐化等可以满足边缘增强的目的. 还有一类算法从生理学角度出发, 考虑了人眼视觉系统对色彩的感知特性, 这类算法在符合人眼感知前提下改变了色相^[4,5]. 本文将从人眼对物体颜色的感知特性出发, 将色彩恒常性应用于彩色图像的增强. 在分析色彩恒常性及其实现算法的基础上, 对其作出了对比度自适应的改进以符合彩色图像增强的要求. 本文的第一部分将介绍色彩恒常性及 Land 的 Retinex 理论, 第二、第三部分分析实现一种典型的 MSRCR 算法并作出改进以应用

收稿日期: 2003-04-30; 修订日期: 2003-06-19

基金项目: 973 资助项目(2002 CB312102); 江苏高校高新技术产业发展项目(JH02-076)

作者简介: 黄凯奇(1977-), 男, 江西宜春人, 博士; 吴镇扬(1949-), 男, 江苏兴化人, 教授, 博导; 王 桥(1966-), 男, 安徽安庆人, 教授, 博导.

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

在彩色图像增强中, 第四部分给出实验结果.

1 色彩恒常性与 Land 的 Retinex 理论

1.1 色彩恒常性

人眼对物体颜色的感知, 在外界照度条件变化的时候, 仍能保持相对不变, 表现出色彩常性(或色彩恒常性)(color constancy). 这种色适应性质对人类适应环境的过程具有重要意义. 究竟是什么原因使我们的视觉系统具有颜色常性的呢? 历史上有过两种主要解释: 赫尔姆霍茨(Hermann Von Helmholtz)认为这是一种“建立在无意识感觉上的理智判断”; 而黑林(Hering)不同意这种观点, 他提出“颜色记忆”的概念. 自卡茨(Katz)把颜色常性问题引入心理实验室, 并集中研究照明变化对于常性知觉的影响以来, 对颜色常性的研究前进了一步. Land 经过 20 年的研究, 已提出一套完整的计算理论来说明^[6], 他称之为 Retinex 理论(Retinex = Retina + cortex). 下面我们将介绍 Land 的 Retinex 理论.

1.2 Land 的 Retinex 理论

根据 Land 理论, 图像的形成主要由两部分构成, 分别是入射光和反射物体, 可以由式(1)表示

$$L = E \cdot R \quad (1)$$

其中, E 表示入射光, R 表示物体的反射性质, L 是反射光, 被观察者或照相机接收到构成彩色图像. 而事实上, 入射光 E 直接决定了一幅图像中像素能达到的动态范围, 反射物体 R 决定了图像的内在性质. Retinex 理论的目的就是为了从图像 L 中获得物体的反射性质 R , 即抛开入射光的性质来获得物体的本来面貌.

将式(1)放在对数域处理, 有两个好处: (1) 对数形式接近人眼亮度感知能力; (2) 可以将复杂的乘积形式变成简单的加减. 得到如下式

$$l = e + r \quad (2)$$

其中, $l = \lg(L)$, $e = \lg(E)$, $r = \lg(R)$.

直接获得物体的反射部分是不太现实的, 因此可以先估计出入射光部分 e , l 是已知的, 然后通过加减关系获得反射部分 r .

1.3 Retinex 的实现方法

虽然原理如上节所示, 但是根据具体实现方法的不同出现了多种 Retinex 算法, McCann, Marini

等从不同角度提出了对应的 Retinex 算法^[7,8]. 其中 Land 本人就提出过几个版本^[6], 其最近的一个版本就是从神经生理学出发, 提出了中心/围绕空间对立说. Jobsen 及其合作者以此版本为基础, 从算法上实现了这一理论并提出了多尺度 Retinex 彩色复原算法^[9,10]. 本文将介绍此算法并对其作出改进和应用于彩色图像增强中.

2 多尺度彩色复原算法 (MSRCR)

Land 的中心/围绕空间对立 Retinex 理论可以表示成

$$\hat{R}_i(x, y) = \lg I_i(x, y) - \lg [F(x, y) * I_i(x, y)] \quad (3)$$

其中, $\hat{R}_i(x, y)$ 表示 Retinex 算法的输出结果, $I_i(x, y)$ 表示第 i 个颜色分量的图像, 算子 “*” 表示卷积, $F(x, y)$ 是围绕函数, 即

$$F(x, y) = K e^{-(x^2 + y^2)/c^2} \quad (4)$$

c 是高斯函数的参数, K 由式(5)的归一化函数决定

$$\iint F(x, y) dx dy = 1 \quad (5)$$

多尺度 Retinex 就是不同通道的单尺度 Retinex 输出赋予权系数后的总和, 如式(6)

$$\hat{R}_{MSR_i} = \sum_{n=1}^N w_n \hat{R}_{n,i} \quad (6)$$

其中, N 是尺度数, $\hat{R}_{n,i}$ 是第 i 个通道的第 n 个尺度的 Retinex 输出, \hat{R}_{MSR_i} 是第 i 个通道的多尺度 Retinex 算法的输出结果, w_n 是对应尺度数为 n 的权系数.

多尺度彩色复原算法 (MSRCR) 是在多尺度 Retinex 的基础之上考虑色彩的结果, 如式(7)

$$\hat{R}_{MSRCR_i}(x, y) = C_i(x, y) \hat{R}_{MSR_i}(x, y) \quad (7)$$

其中

$$C_i(x, y) = \lg [\alpha I_i(x, y)] - \lg \left[\sum_{i=1}^S I_i(x, y) \right] \quad (8)$$

在这里, \hat{R}_{MSRCR_i} 是彩色图像输出的结果. $C_i(x, y)$ 被称为彩色恢复函数, 用来调节 3 个通道颜色的比例 ($i = 1, 2, 3$). 由式(8)可以看出, Jobsen 等其实已经作了一个假设, 图像满足 GW (grey-world) 假设^[11], 即图像的 R, G, B 3 个通道所占比例接近 1/3. 这种假设使得输出的图像显示有些灰暗. 为了得到更好的效果, 他们又对输出图像作了类似直方图截

取的处理, 最后的输出为

$$\hat{R}_{\text{MSRCR}_i}(x, y) = G[C_i(x, y) \sum_{n=1}^N \{\lg I_i(x, y) - \lg[I_i(x, y) * F_n(x, y)]\} + b] \quad (9)$$

G 和 b 分别为增益和偏移常数, Joben 等经过实验确定取值.

3 改进的彩色图像增强算法

通过以上分析, 我们可以看出 MSRCR 算法包括以下几个部分:

- (1) 全局的对数域处理获得全局动态范围调整, 初步调节图像的动态范围(亮度).
- (2) 多尺度的处理调节图像的局部动态范围.
- (3) 在 GW(gray world assumption) 的假设基础上实现色彩恒定性.
- (4) 利用直方图技术进一步改进图像的全局对比度.

由上一节可以看出在 MSRCR 算法中, 由于在算法中作了一定的假设, 使得经过步骤(3)获得的部分图像显得灰暗, 不能达到最佳的视觉效果, 因此式(9)也就是步骤(4)中利用直方图截取来调整图像全局对比度, 其中参数 G 和 b 都是通过实验获得. 参数的选择对于最后图像显示质量影响较大, 在原算法中参数主要依靠手动调节. 本文对步骤(4)作出改进, 利用图像的直方图信息, 给出根据显示设备动态范围和图像自身内容自适应调整截取参数的自适应对比度增强算法.

在图像增强算法中, 线性对比度拉伸是一种简单而有效的算法, 可以用式(10)表示

$$I_{\text{out}} = \begin{cases} 0 & I_{\text{in}} \leq I_{\text{low}} \\ \frac{I_{\text{in}} - I_{\text{low}}}{I_{\text{hi}} - I_{\text{low}}} d_{\text{max}} & I_{\text{low}} < I_{\text{in}} < I_{\text{hi}} \\ d_{\text{max}} & I_{\text{in}} > I_{\text{hi}} \end{cases} \quad (10)$$

其中, I_{out} 和 I_{in} 表示输出和输入(也就是以上步骤(3)获得的图像), I_{hi} 和 I_{low} 表示欲获得图像的最大最小值, d_{max} 表示显示设备的动态范围, 对于 8-bit 系统为 255. 如果 I_{hi} 和 I_{low} 分别为显示设备的最大最小值 I_{max} 和 I_{min} , 即为常见的考虑显示设备动态范围的线性对比度拉伸算法. 但如果将其直接用于 MSRCR 算法的步骤(4), 没有考虑到图像的内容, 效果仍不明显, 因此, 对于其中的 I_{hi} 和 I_{low} , 从分析图像的直方图分布出发, 给出一个自适应的选择截取点 I_{hi} 和

I_{low} 的算法.

数字图像 X 中各灰度值出现的概率 $P(I_k)$ 称为数字图像的直方图, 如图 1(a) 示, 其中低端截取点和高端截取点为如上提到的 I_{hi} 和 I_{low} , 令

$$C(I_k) = \sum_{i=1}^k P(I_i) \quad (11)$$

称为图像的累积分布函数(CDF), 如图 1(b) 示. 它表示图像的像素在某一强度或某一强度下所占的比例. 利用 CDF 表示的含义, 在实现式(10)的对比度增强算法中, 一定比例的像素会达到上饱和或下饱和, 由 I_{hi} 和 I_{low} 来表示. 通过分析 CDF 与直方图的关系来找到这两个点. 具体来说, 用 P_{hi} 和 P_{low} 来表示达到向上饱和和向下饱和的概率值, 对应的图像强度为 I_{hi} 和 I_{low} , 如图 1 所示. 当 CDF 在某一个灰度级超过其出现向下饱和的概率 P_{low} 时, 得到 I_{low}

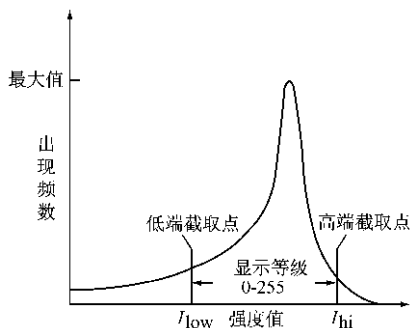
$$I_{\text{low}} = I_k \text{ where } C(I_k) = P_{\text{low}} \quad (12)$$

搜索从 $k=1$ 开始, 往上累加, 直到找到满足条件的 k 值和 I_k .

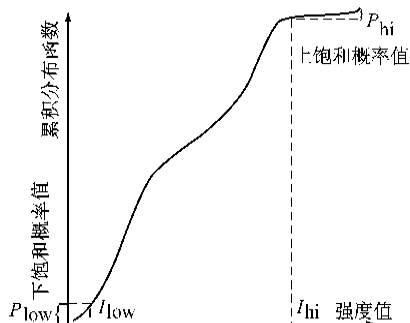
以同样的方法来获得 I_{hi} , 即

$$I_{\text{hi}} = I_k \text{ where } [1 - C(I_k)] > P_{\text{hi}} \quad (13)$$

此时的搜索从 $k = K_{\text{max}}$ (在 8-bit 系统中为 255) 开



(a) 图像的直方图



(b) 累积分布函数图

图 1 图像直方图和累积分布函数图

始, 往下递减直到找到满足条件的 k 和 I_k . 通过利用累积分布函数可以自适应地获得饱和截取点.

4 实验结果

本节我们将改进的 MSRCR 算法应用到彩色图像增强中. 在算法执行中, 为了获得最佳效果, 我们对原算法的参数作了一些调整. 尺度数仍为 3 个, 但是与原算法的 3 个尺度参数 [15, 80, 250] 不同的是, 我们选择差距更小的尺度参数 [80, 120, 250], 因为我们发现参数的改变可以获得更生动的色彩. RGB 分量的权重 w_n 和色彩恢复常数 α 保持不变, 分别为 [1/3, 1/3, 1/3] 和 125, 改进的自适应增强算法对图像的全局对比度有了较大的改善, 同时其参数不需要通过实验获取, 可以依靠图像的内容和显示设备的动态范围自动调节. 在我们的实验中, 并没有和类似直方图均衡等的灰度增强算法作比较, 因为适合灰度图像增强的算法直接扩展到彩色图像中有时能满足一定的要求, 有时根本无法达到某些要求, 比如色彩的增强(改变)等. 另外对于如何评价增强算法效果方面, 长期以来并没有一个统一的看法, 只能针对某一类具体问题提出相应的评估标准. 就本文的彩色图像增强而言, 其增强的目的是满足人眼的视觉效果, 它包括了对比度、亮度、颜色等多方面的处理过程, 暂时还无法提出一个有效的客观评价标准. 本文主要以人眼主观感受来评价算法的有效性, 如演色性(光源对于物体色彩呈现的程度)表示色彩的逼真程度. 客观标准将是下一步的工作之一. 我们以多种不同大小不同类型的彩色图像为实验图片. 选取图 2~图 4 为效果图如下, 其中, 从图 2(a) “乡村小屋”中可以看到, 整个图像偏绿, 图 2(b) 是经过处理后的图像, 看上去自然和谐, 颜色偏绿的现象得到了纠正. 这是在彩色图像算法中应用色彩恒定性的结果, 实验证明获得了更好的颜色效果. 这是直接应用灰度增强算法无法达到的. 图 3 “草地”是另一种类型的图像, 场景中由于亮度和对比度的不足, 使得部分景物无法看清. 经过增强后, 不仅细节突出, 颜色也得到更好的表现, 如草地在图 3(a) 中几乎看不出颜色, 在图 3(b) 中则得到较好的表现. 使用灰度增强算法可以改变彩色图像的亮度与对比度, 但并没有利用人眼对彩色图像的颜色感知能力, 增强的图像显得较单调. 考虑了颜色信息的增强算法, 处理后图像色彩较柔和、自然, 色彩的表现也越好. 这种

效果同样也存在于图 4 中. 图 4 “都市的早晨”整个图像显得较暗, 图像中的场景较多, 而且由于照射光线的不均匀, 使得不同场景的明亮程度不相同. 对图 4 的增强应用能提高图像的全局与部分可视性, 同时保持光线的自然柔和, 通过增强算法, 可以看到处理过的图像具有较好的演色性, 达到比较好的视觉效果. 彩色图像效果可见 <http://www.wavelet-seu.org/>.

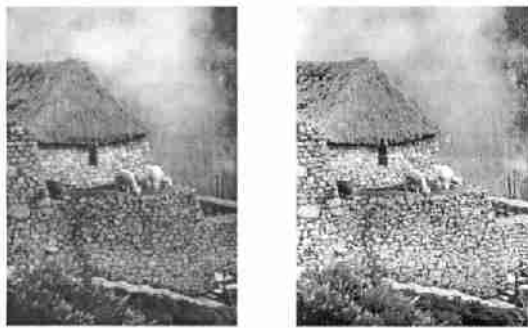


图 2 乡村小屋

Fig. 2 Cottage



图 3 草地

Fig. 3 Grass



图 4 都市的早晨

Fig. 4 Morning of city

5 结束语

色彩常性是一种重要的人眼感知特性. Retinex 理论作为能够很好解释这种特性的颜色视觉理论, 长期受到关注. 本文对一种典型的 Retinex 算法—

MSRCR 算法进行分析,在此基础上,结合图像直方图,提出了一种适合彩色图像的增强算法.由于考虑了人眼的色彩常性,算法对图像的颜色、亮度、对比度处理的结果符合人眼视觉特性.结果表明,算法具有较好的效果,对于一些图像预处理和后处理,如人脸识别等具有重要的意义.

参考文献:

- [1] Tomas B A, Strickland R N. A study of scene structure in the saturation component of color images [J]. Human Vision and Electronic Imaging, B E Rogowitz and J P Allebach, Bds, Proc of the SPIE, 1996, 2657: 32- 41.
- [2] Tomas B A, Strickland R N. Color image enhancement using spatially adaptive saturation feedback [C]. Image Processing, Proceedings, 1997. 3: 30- 33.
- [3] Kokkeong Tan, Oakley J P. Enhancement of color images in poor visibility conditions [C]. Image Processing, Proceedings, 2000. 2: 788- 791.
- [4] Faugeras O. Digital color image processing within the framework of a human visual model [J]. IEEE Trans on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1979, 27(4): 380- 393.
- [5] Wolf S, Ginosar R, Zeevi Y. Spatio-chromatic image enhancement based on a model of human visual information system [J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 1998, 9(1): 25- 37.
- [6] Land E H. Recent advances in retinex theory [J]. Vision Res, 1986, 26: 7- 22.
- [7] Brainard D H, Wandell B A. Analysis of the retinex theory of color vision [J]. J Opt Soc Am, 1986, 3: 1651- 1661.
- [8] McCann J J. Lessons learned from mondrians applied to real images and color gamuts [R]. IS&T Rep. 1999, 14: 1-8.
- [9] Daniel J Jobson, Zia-ur Rahman, Glenn A Woodell. A multiscale retinex for bridging the gap between color images and the human observation of scenes [J]. IEEE Transaction on Image Processing, 1997, 6(7): 965- 976.
- [10] Daniel J Jobson, Zia-ur Rahman, Glenn A Woodell. Properties and performance of a center/surround retinex [J]. IEEE Transaction on Image Processing, 1997, 6(3): 451- 462.
- [11] Funt B V. Color constancy in digital imagery [C]. Image Processing, ICIP 99 Proceedings, 1999. 3: 55 - 59.