

基于视觉特性和颜色空间的多尺度彩色图像增强算法

黄凯奇, 王 桥, 吴镇扬

(东南大学无线电工程系, 江苏南京 210096)

摘要: 本文根据人眼视觉对亮度和颜色不同的敏感特性,按照视觉特性选择了 CIE $L^*a^*b^*$ 均匀彩色空间,在此空间中提出了一种基于小波变换的彩色图像增强算法.和目前存在的灰度图像增强算法相比,本文不仅给出了一种自适应动态范围调节算法,同时对图像的饱和度分量也进行处理.实验证明,增强后的彩色图像不仅更加清晰,同时更加生动,鲜艳,达到了预期的目的.

关键词: 彩色图像; 小波; 视觉特性; 彩色空间

中图分类号: TN911.73

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2004) 04-0673-04

Multi-Scale Color Image Enhancement Algorithm Based on Color Space and Human Visual System (HVS)

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

(Radio Engineering Dept., Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract: Based on the analysis of human visual system characteristics to brightness and color, we present a novel algorithm with considering about wavelet decomposition and color space for color image enhancement. The uniform color space CIE $L^*a^*b^*$ is used and a hybrid contrast enhancement algorithm for color image is proposed. Color image enhancement exists two goals: image looking naturally and looking vividly. Experimental results confirm that improved color image enhancement is achieved.

Key words: color image; wavelet transform; human visual properties; color space

1 引言

图像在获取过程中由于各种原因会使得质量下降,图像增强的目的就是通过对特定的处理得到需要的图像.常规的方法有直方图均衡、同态增强等.近年来基于小波的多尺度增强技术得到较多的重视. Lu^[1]提出了基于多尺度边缘检测的图像增强算法, Brown 在文献[2]中比较详细阐述了各种基于小波的增强方法,并且提出了一种自适应小波增强算法.但这些方法主要增强图像的边缘高频信息,同时抑制噪声的放大.在现实世界中,我们面对的多是彩色图像.对于彩色图像的增强,增强噪声环境下的图像细节是一个方面,但和灰度图像相比,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现象.因此,彩色图像必须正确处理选择合适颜色空间,以及处理好颜色分量之间的关系,在文献[3]中 Strickland 等分析了亮度信息和饱和度信息之间的关系,并且提出了在低亮度下利用饱和度信息反馈算法来增强图像的亮度信息,也就是增强图像的细节信息.本文在颜色模型基础上,通过实验比较选取合适的色度空间后,分析了彩色图像各分量包含信息的差异,基于人眼视觉特性提出了一种新的彩色图

像增强算法,实验证明,增强后的图像达到了图像细节更加清晰,色彩更加鲜艳的目的.

2 改进的小波彩色图像增强算法

2.1 基于小波的图像增强算法

由于小波变换具有良好的时域和频域局部化特性以及多尺度表示的结合,使得它非常适合人眼对图像的感知特性,非常适合人们对图像各个尺度(分辨率)下细节的分析,其应用于图像增强算法效果一般要优于传统的图像增强算法.小波变换的基本思想是用一族占据一定时频中心位置的小波函数的迭加表示信号,这一族函数称为小波函数系.它是通过一小波母函数的伸缩和平移产生一族“小波”来构成的,用其变换系数描述原来的信号.

根据 Mallat^[7]的快速分解算法,可以利用双正交小波滤波器组,实现可张量积形式的二维正交小波变换.分解后的小波图像如图 1 所示.其中, C^L 为低频图像,即原图像的平滑; D^H, D^M, D^L 为细节图像;不同分解层数 D_{j-1}, D_j 对应不同的分辨率. Lu 在文献[1]中提出了一种基于小波的图像增强算法,其基本思想是对分解图像进行数据加工,将其中代表细节的高频成分进行增强,然后再经过小波逆变换恢复图像.该

收稿日期:2002-07-08;修回日期:2003-12-17

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 60002008)和江苏高校高新技术产业发展项目(No. JH02-076)

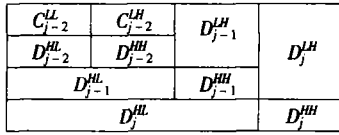


图 1 逐次对分结构图

方法是一种补偿图像轮廓的处理方法,把高频分量相对突出,可以使图像轮廓加强,看起来更清晰.

设 f 为任一图像函数,则有重构:

$$f(x, y) = \sum_n C_{j-1} \varphi_{n,j-1}(x, y) + \sum_{j=0}^{l-1} \sum_n D_{n,j} \psi_{n,j}(x, y) \quad (1)$$

如对细节图像引入权重 $K_{n,j}$,得到

$$f(x, y) = \sum_n C_{j-1} \varphi_{n,j-1}(x, y) + \sum_{j=0}^{l-1} \sum_n D_{n,j} K_{n,j} \psi_{n,j}(x, y) \quad (2)$$

则可以起到增加高频的效果.但注意到,在此算法中仅仅对高频细节做了加权的处理,对于 C_{j-1} ,即平滑图像没有变动.实际上,人眼锥状细胞对颜色的感知起主要作用,但在低亮度下,人眼的杆状细胞起作用,因此有必要在改善图像的低亮度的基础上增强细节;而 Lu 的算法的对象主要是医学图像,只对细节的改进做了较详细的说明.在太低或太高的亮度下,增强细节没有太多的意义.同时注意到,在重构的平滑图像中包含有所需调节的亮度信息,因此,本文同时对细节信息和包含亮度信息的 C_{j-1} 根据人眼的调制转移函数模型(MTF)^[4]做了一种自适应调节处理,

$$f(\tilde{C}_{j-1}, \tilde{D}_{n,j})_{j-1} = D(C_{j-1}, D_{n,j}) \quad (3)$$

式中 D 是处理算子,由下一节给出.

综合上述重构图像为

$$\tilde{f}(x, y) = \sum_n \tilde{C}_{j-1} \varphi_{n,j-1}(x, y) + \sum_{j=0}^{l-1} \sum_n \tilde{D}_{n,j} K_{n,j} \psi_{n,j}(x, y) \quad (4)$$

2.2 基于调制转移函数的调节算法

人眼视网膜上有锥状细胞和杆状细胞两种,其中锥状细胞主要对颜色敏感,杆状细胞对于强度更敏感,强度的变化是非线性的.人眼的这种对输入感受体的响应用调制转移函数(MTF-Modulation Transfer Function)来表示.一种基本 MTF 模型如下式^[4] $I_0(x, y) = K_1 \lg[K_2 + K_3 I_i(x, y)]$ (5) 式中 K_1 是常数, $I_i(x, y)$ 是输入, $I_0(x, y)$ 是输出.将线性系统的概念应用到人的视觉系统中,对 MTF 函数逆变换以获得新的函数,这样通过人眼的 MTF 后就得到近似的线性效果,称其为线性矫正函数(LRF-Linear Rectification Function),即是一节的 D 算子,如下式:

$$I_0(x, y) = \frac{K_1}{K_2 + e^{K_3(K_4 - I_i(x, y))}} \quad (6)$$

式中 K_1 是常数, $I_i(x, y)$ 是输入, $I_0(x, y)$ 是输出 K_1, K_2 称为归一化系数,通常取 1.由图 2 可以看出 K_3 和 K_4 是决定曲线形状的两个重要参数.图 2(a)可以看出, K_4 固定, K_3 决定了曲线的倾斜度. K_3 固定, K_4 决定了曲线水平方向偏移.本文用此曲线调节图像的对比度和亮度, K_3 调节对比度, K_4 调节亮度. K_3 和 K_4 的选取,也就是亮度和细节的增强并不是任意的,可以由图 2 看出,当两者中的任一决定了,另一个参数的选取是有限制的. K_3 和 K_4 可以根据实验手动调整,也可以按

照图像内容自适应地选取,例如在文献[8]中就提出了采用统计的方法如均值和方差来对图像的亮度和对比度进行度量.

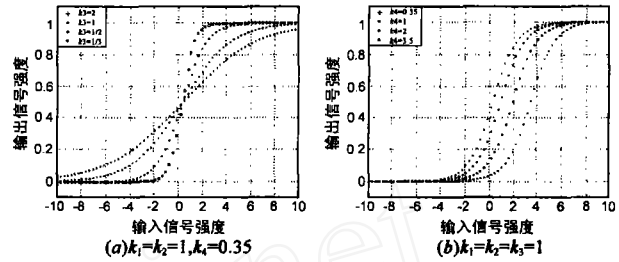


图 2 LRF 函数

3 颜色空间

在计算机中彩色图像一般采用 RGB 空间来表示. R, G, B 三种颜色称为三基色,他们之间彼此有很强的相关性,改变象素的任一个分量都会导致颜色的偏移.从心理学的角度来看颜色有三个要素:色调(Hue)、饱和度(Saturation)和亮度(Brightness).

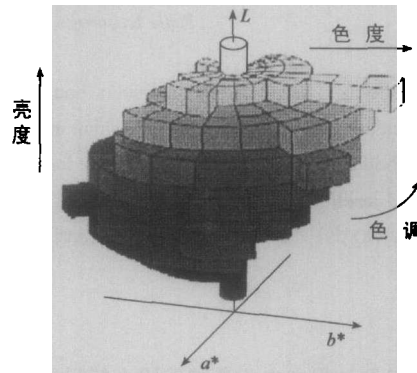


图 3 CIE Lab 颜色模型

HSB 颜色模式便是基于人对颜色的心理感受的一种颜色模式.其中 H 是色调(Hue),又称色相, S 是饱和度(Saturation), B 是亮度值.这种颜色模式比较符合人的视觉感受,让人觉得更加直观一些.其中轴向表示亮度,自上而下由白变黑;径向表示色饱和度,自内向外逐渐变高;而圆周方向,则表示色调的变化,形成色环.但是由于 HSV 空间是直接由 RGB 空间经过线性变化而来,因此和 RGB 空间一样,明显的缺点就是和设备有关,也就是不同的显示设备上显示颜色不同,而且其色调在 HSB 空间通常是不连续的,这为颜色的后续处理带来了不便.广泛的直接颜色空间是由 CIE 在 1920 年开发的第一个直接颜色空间的各种变型.三维的 CIE,如图 3,颜色空间是用三维轴上的值来描述颜色的,其中一个值描述发光密度(L——即颜色的亮度成分,本身不带色调),而另外两个值说明其实际的色度值(a^*, b^*)等.因此 CIE La^*b^* 空间对于彩色图像增强是一种较好的选择^[5,6].通常考虑直接将灰度图像增强算法应用于彩色图像的亮度分量而保持其余两个分量不变能够起到一定的效果,使得图像的细节更加清晰,但忽略了彩色图像的色彩信息使得图像显得比较单调,因此,需要一种真正的彩色图像增强算法,使得图像更加生动.在实验中,

色调分量不改变,改变亮度分量和饱和度分量.但由于两者包含的信息是不同的,因此,增强的方法也是不同的.对于亮度 L 分量而言,主要采用小波变换增强图像高频信息,同时调节其亮度动态范围,而对饱和度分量则以改变其对比度为主.

3.1 饱和度分量调节算法

对于 S 分量,由于其主要处理的是动态范围的选取,因此可以采用直方图拉伸或直方图均衡处理等方法.考虑到计算量的大小和个人对于颜色鲜艳程度的喜好不同,在实验中主要采用了指数拉伸的方法,即

$$S = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (7)$$

$$\tilde{S} = S^{\alpha} \quad (8)$$

S 是原来的饱和度分量, \tilde{S} 是变换后饱和度分量, α 为拉伸因子,决定饱和度分量的饱和程度.

最后,给出基于小波的彩色图像增强算法步骤:

- a. 将 RGB 彩色图像变换到 CIE $L^*a^*b^*$ 彩色空间.
- b. 对 L 分量做小波变换,在小波域对细节和平滑图像分别采用如上算法,达到增强图像细节,同时改善亮度分量的动态范围目的.然后做小波逆变换.
- c. 计算 S 分量,然后对 S 分量做拉伸运算
- d. 对 S, L 分量做归一化处理,然后将增强的图像从 CIE $L^*a^*b^*$ 空间转换回 RGB 空间.

4 实验结果

在这部分,本文将给出按照如上算法得出的一些实验结果.小波采用双正交三次 B 样条函数构造^[7],实验均为三级小波分解.为简单起见,各个方向的权值取为相同.亮度细节

权系数 $K_j(j=1 \cdots J)$ 根据公式(8)采样获得,实验中动态调节算法参数 $K_1 = K_2 = 1, K_3 = 3, K_4 = 0.3$. 即 LRF 函数为:

$$I_0(x, y) = \frac{1}{1 + e^{3(0.3 - I_i(x, y))}} \quad (8)$$

以下实验结果基于上式.在文献[8]中, J. Jobsen 提出一种按照图像的均值和方差来度量其亮度和对比度的方法,本文实验测试数据按文献[8]度量方法给出.即

$$C = \frac{\text{Var}(I_0(x, y)) - \text{Var}(I_i(x, y))}{\text{Var}(I_i(x, y))} \% \quad (9)$$

$$L = \frac{\text{Mean}(I_0(x, y)) - \text{Mean}(I_i(x, y))}{\text{Mean}(I_i(x, y))} \% \quad (10)$$

其中, $I_i(x, y)$ 是处理前图像, $I_0(x, y)$ 是处理后图像, Var 和 Mean 表示求其局部方差和均值, C 为对比度改变的比例, L 为亮度改变的比例.对于 S 分量,即颜色分量,本文采用的拉伸系数对于不同色调的彩色图像也不相同.图 4-6 中 A 图是原图像, B 图是增强后的彩色图像,由图可以看出,对于不同对比度和亮度的图像,调节的比例也各不相同.图 4 对比度较好,因此对比度几乎没有调节,亮度增大了 10%,其增强效果也可以从对应的直方图看出.图 5 的对比度和亮度都得到了有一定比例的调节,图 6 的质量较差,由画面可看出图像较暗,经过我们的算法,其亮度增加了一倍多,同时对对比度也得到了较好的改善.因为对于亮度分量采用了改进的小波域图像增强技术,图像的细节部分也更加清晰,同时对 S 分量的直方图拉伸也达到了增强颜色信息的目的,在较好的亮度下,颜色信息的增强达到更好的增强效果.

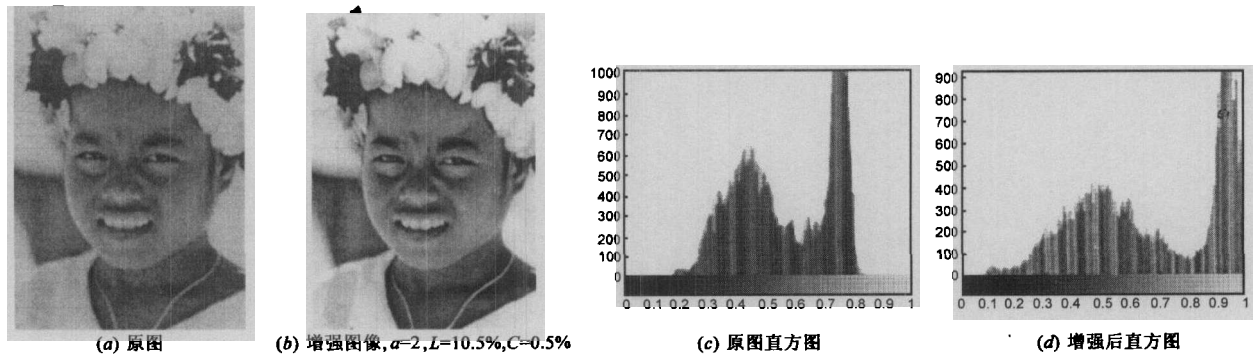


图 4



图 5

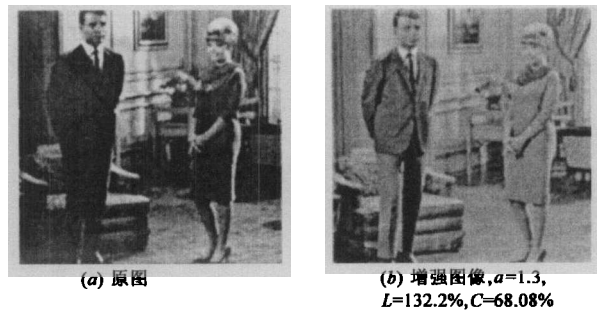


图 6

5 结束语

本文提出了一种基于视觉特性和颜色空间的多尺度彩色图像增强算法. 和以前的算法不同的是, 小波变换后亮度信息主要在第一级平滑图像中, 根据人眼视觉对亮度和颜色不同的敏感特性, 亮度对于图像的细节和色彩是非常重要的, 本文对亮度范围做了一种自适应调节同时对色度分量做了改变, 比较原图和增强后的图像, 增强后的彩色图像不仅更加清晰, 同时更加生动, 鲜艳.

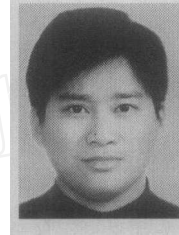
参考文献:

- [1] LU J, Hearly D M Jr. Contrast enhancement via multi-scale gradient transformation [A]. Proceeding s of SPIE: wavelet application [C]. Orlando, SPIE, 1994. 2242: 711 - 719.
- [2] Brown T J. An adaptive strategy for wavelet based image enhancement [A]. Proceedings of IMVIP 2000 [C]. Belfast, IMVIP, 2000. 67 - 81.
- [3] Strickland R N. Digital color image enhancement based on the saturation component [J]. Optical Engineering, 1987, 26(7): 609 - 616.
- [4] Levine M D. Vision in man and machine [M]. New York: McGraw-Hill, 1985.
- [5] Ledley R S, M Buas, Colab T J. Fundamentals of true-color image processing [A]. proc. IEEE intl conf. On Pattern Recognition [C]. Atlantic, IEEE, 1990, 1: 791 - 795.
- [6] Kasson J M, W Plouffe. An analysis of selected computer interchange

color space [J]. ACM Transaction on Graphics, 1992, 11(4): 373 - 405.

- [7] Mallat S, Zhong S. Characterization of signals from multiscale edges [J]. IEEE Trans. PAMI, 1992, 14(7): 710 - 732.
- [8] Jobson D J, Z Rahman, G A Woodell. The statistics of visual representation [A]. Visual Information Processing XI, Proc. SPIE [C]. Aerosense, SPIE, 2002. 4736 - 4343.

作者简介:



黄凯奇 男, 1977 年出生于江西省宜春, 东南大学无线电系博士研究生, 主要研究方向为信号分析理论、数字图像处理, 彩色图像增强算法的研究等.

王 桥 男, 1964 年出生于湖北武汉, 武汉大学理学博士, 东南大学博士后, 东南大学无无线电工程系教授、博士生导师, IEEE 信息论汇刊及信号处理汇刊的审稿专家, 欧洲数学会评论员, 主要研究方向为调和理论、信号分析与图像处理研究, 目前出国访问中.

吴镇扬 男, 1949 年出生于江苏兴化市, 东南大学无线电工程系主任、教授、信号与信息处理学科博士生导师, 中国通信学会副主任委员, 目前主要研究方向为听觉与视觉信号处理.