

基于多尺度叠加的视觉距离模糊算法的研究

许向阳^{1,2} 陈广学¹

(¹ 华南理工大学制浆造纸国家重点实验室, 广东 广州 510006)
(² 深圳职业技术学院媒体与传播学院, 广东 深圳 518055)

摘要 为能够模拟观察距离变大时引起的颜色视觉效应,研究了人眼视觉的视锐度特性和对比敏感度特性。通过对人眼视锐度原理的分析,实现了视锐度方法模拟视觉距离增大时的视觉模糊算法;通过对对比敏感度模型测试原理的分析,结合人眼视觉空间频率的多通道特性,实现了基于对比敏感度函数模型模拟视觉距离增大时的视觉模糊算法。视锐度方法可简单模拟视觉距离增大时的模糊效果,可用于观察灰度物体情况。观察彩色物体时,通过使用反差敏感度模型算法,能够模拟视觉感知的多尺度特性、低通和带通滤波特性、局部适应性和颜色感知的叠加性。

关键词 图像处理;对比敏感度;视锐度;视觉;空间频率

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0233002

Research of Visual Distance Blur Algorithm Based on Multi-Scale Overlay

Xu Xiangyang^{1,2} Chen Guangxue¹

¹ State Key Laboratory of Pulp and Paper Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510006, China
² School of Media and Communication, Shenzhen Polytechnic, Shenzhen, Guangdong 518055, China

Abstract In order to simulate the visual effects caused by the change of visual distance, the visual acuity and contrast sensitivity function are researched. The principle of visual acuity and the test method of human contrast sensitivity model are analyzed. Considering of human vision characters, the visual acuity blur algorithm has been presented. It is able to simulate the visual blurred effect, when the visual distance is increased. This algorithm can be used to observe the gray object. Simultaneously the other algorithm is also presented based on contrast sensitivity model, it is capable of simulating the multi-scale characteristics of human visual perception, the visual characteristic of low-pass and band-pass filter, local contrast adaptability and color overlay. When the visual distance is increasing, it is able to simulate the visual blur effects to observe color objects.

Key words image processing; contrast sensitivity; visual acuity; vision; spatial frequency

OCIS codes 330.1070; 330.1800; 330.1720; 330.7310

1 引言

人眼的颜色视觉特性,一直以来是颜色科学研究的难点和热点。颜色视觉感知受到各种各样的因素影响,可概括为环境光的因素和颜色物体表面特

性因素。前者引起的颜色视觉感知以 CIECAM02 模型为代表^[1-2],该模型是建立在均匀色块测量的基础上,缺点是没有解决具有空间复杂性的颜色物体表面特性因素;后者对颜色感知的影响以 iCAM

收稿日期: 2013-08-15; **收到修改稿日期**: 2013-10-10

基金项目: 国家自然科学基金(61108087,60972134)

作者简介: 许向阳(1979—),男,博士研究生,主要从事色彩视觉与色彩管理技术方面的研究。

E-mail: xxy0906@szpt.edu.cn

导师简介: 陈广学(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事印刷包装材料与印前图文处理等方面的研究。

E-mail: chengx@scut.edu.cn

模型为主要代表^[3-4],但该模型没有明确提出视觉观察距离参数变化时所引起的视觉感知效果。对因视觉观察距离变化引起的视觉感知物体细节和颜色变化的研究,主要表现为对人眼视锐度的研究和视觉对比敏感度的研究^[5-14]。视锐度是视觉分辨最小物体能力的一个衡量标准。视觉对比敏感度是视觉系统对具有不同空间频率、且具有微小属性差异的观察对象的视觉敏感程度的特征函数。二者都能够反映视觉对物体细节的观察情况,可用于模拟视觉距离变大时视觉对物体细节模糊感觉的模拟。通过研究视觉观察距离参数变化时的颜色视觉感知情况,本文提出了视锐度滤波算法和基于对比度敏感度函数模型的多尺度叠加滤波算法,实现了视距变大时视觉模糊效果的模拟。

2 视锐度视觉模糊算法

人眼观察自然物体时,随着视觉距离的不同,视觉效果会发生相应的变化。为了能够概览物体全貌,相对而言需要较大的视距,形成能够把物体尽收眼底的小视角,这种情况下,视觉难以详知物体的细节,并且随着距离的变大,对物体自身的纹理层次、颜色信息等都会逐渐变模糊。相反情况下,为了能够细致地观察物体的局部细节,就需要靠近物体,相对物体的局部形成大视角,可以辨清物体不同部分的相对层次、颜色差异等。观察距离与观察对象的大小决定了观察窗口的大小。如果观察图像大小不变(尺寸不变、分辨率不变),随着观察距离的变大,1°视角内的采样点数就会增多,由于视锐度的降低,视觉就会将相邻的图像像素进行空间的融合,产生模糊的效果。

当观察距离一定时,人眼通过自动调节能够将物体或者物体的部分成像在视网膜上。人眼晶状体中心到视网膜中央凹的距离称为像距大约为17 mm,视网膜上两相邻锥体细胞之间的距离约为0.005 mm,因此,可计算得到人眼能把两个相邻物体区分开的最小视角约为1'。当观察距离变化时,1'视角内的相邻像素的颜色属性会被视觉进行空间融合,成为相同的颜色属性。

基于视锐度的原理分析,可以确定视觉空间融合的常数为 2.9×10^{-4} 。如果把数字图像作为空间复杂的颜色刺激对象时,视觉融合的窗口经推导可用(1)式计算:

$$H_{\text{Size}} \approx (2.9 \times 10^{-4} \times D) \times R, \quad (1)$$

式中 H_{Size} 视觉融合窗口的大小,用像素数量表示, D

观察距离,单位为inch(1 inch=2.54 cm), R 为图像分辨率,单位为 10^{-6} 。

据此理论,可以实现基于视锐度特征的观察距离变大时视觉模糊算法的设计。在观察距离 D 和观察图像已定时,取1°视角大小为操作窗口,在该窗口内1'视角内的相邻像素合并为一个像素。最简单的合并算法可采用均值的方式,与图像处理中平滑处理的均值滤波算法类似。在该窗口的像素点合并为一个点,如观察距离为120 inch、图像分辨率为72 pixel/inch时的滤波算子设计为 3×3 尺寸,滤波算子为

$$\frac{1}{9} \times \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

该算子对于处理非彩色图像相对来说比较适用,但不适用于彩色物体的观察。实际视觉的空间颜色混并非简单的均值模型。视觉具有局部适应性,会依据观察环境进行局部对比,结果保持了物体各部分间的对比度。视锐度的空间混合效应是有一定条件限制的,观察对象大小不变时,观察距离必须大于某一数值时,这种空间混合才会发生。因为在这个距离之内,组成物体的最小单元在视觉能分辨的范围内。但是视觉的这种局部对比特性不因观察距离的变化而消失,简单进行均值合并,并不能完全表现视觉距离变化时的视觉效果。视距变化时的模糊,还要模拟视觉对观察物体局部适应后的对比度变化特征,这种局部对比的特性表现为视觉颜色融合的多尺度叠加性。

3 多尺度叠加的视距模糊算法

3.1 视觉多尺度叠加模型

人眼视觉的局部对比特性,表现为视觉的对比度敏感度函数(CSF)模型的研究。综合文献[6-11]CSF的测量原理以及模型特征的分析,构建CSF模型时应至少考虑人眼的三个视觉特性:1)视觉空间频域处理的多通道特性^[13];2)视觉颜色感知的低通、带通滤波特性;3)视觉颜色感知的局部适应性、叠加性。依据此视觉特性,并结合数字图像空域颜色处理的特征,采用高斯函数对CSF实验测试数据进行逼近,建立多个高斯函数和形式的模型:

$$C_s = a_i \sum k_i \exp \frac{-(x_i - b_i)^2}{\sigma_i^2}. \quad (3)$$

以高斯函数为基础进行CSF模型构建,实现观察距离变大时视觉模糊算法的设计,如同视锐度模

糊算法一样,当观察距离一定时,需要解决两个问题:视觉采样窗口与视觉融合算子。高斯函数用于图像处理,表现为对图像的平滑处理,这与视锐度的特征吻合。视觉采样窗口即为高斯函数滤波算子中的 σ 参数,在统计学上该参数表示标准差,即是视觉窗口内的各个像素与平均值的差别程度,随着视觉距离的拉远,这种差别逐渐变小。如果该参数能够与视觉距离相关实现自适应变化,即可模拟视锐度因视觉距离变大时的模糊效果。视觉融合算子即为某一观察距离的CSF,然而文献中的对比敏感度数据是在固定观察条件下的测试实验得到的,固定了观察距离、视场的大小等。由此,还不能建立起视觉距离与对比敏感度的直接变化关系。

考虑CSF模型的测试原理与视锐度的定义,二者之间可以融合,建立视觉观察距离与视觉对比敏感度的变化关系。视觉距离的变大,视锐度降低,表现为空间相邻像素融合,同时由于视觉局部适应性,还会继续保持相邻像素之间的对比度,只有当两者之间的对比度低于视觉能够觉察的阈值时,才被视觉进行空间融合,否则继续保持相互对比关系,或者对比关系因视距的变大被削弱。能够衡量二者之间是否融合的量度就是CSF值。

3.2 多尺度叠加模糊算法

依据视觉空间频域处理的多通道性,依据文献[11]的研究表现为3个通道。因此,(3)式可用三个高斯函数和表示。依据视锐度原理的计算关系,可以得到视觉采样的空间频率,空间频率数据是CSF模型的自变量,于是就建立起视觉距离与视觉反差敏感度的对应关系。为满足观察对象或者对象的局部能够在视网膜成清晰的像,将视觉采样窗口定为 1° 。视觉距离改变,视觉窗口内包含的采样点数自适应变化,每度视角内采样点数的计算:

$$S_p = 0.001745 \times D \times R_e, \quad (4)$$

式中 S_p 表示 1° 视角内的采样点数, R_e 表示观察图像的分辨率, D 表示视觉观察距离。

视觉融合算子由CSF模型量化得到,需要有对比敏感度测试数据,Mullen^[6]、Poirson & Wandell^[8-10]、Van der Horst and Bouman等^[14]通

过实验测试建立了数据集。视觉多尺度叠加模型实验仿真中使用Poirson & Wandell数据集量化,因为该数据集是包含了对立颜色空间的数据,用于数字图像处理时计算简便。量化(3)式相应参数的值,如表1所示。

表1 Poirson & Wandell模型参数
Table 1 Parameters of Poirson & Wandell

Filter	a_i	σ_i	b_i
Achromatic	1.00327	0.0500	0
	0.11442	0.2250	
	-0.11769	7.000	
Red-green	0.61673	0.0685	0
	0.38328	0.8260	
Yellow-blue	0.56789	0.0820	0
	0.43212	0.6451	

Note: k_i is the normalization coefficient

将视锐度算法的设想与CSF模型的理论结合起来,可实现人眼视觉随观察距离变大时的视觉模糊效果的模拟。该模型兼有高斯函数旋转对称性、可分离性。多维滤波问题,可简化为一维或者二维处理。该模型可模拟人眼视觉的诸多特性,视觉颜色处理表现为对明度通道和彩色通道的分通道处理,视觉空间频率处理表现在对三个频率段分别处理,视觉颜色局部适应和叠加表现在不同频道处理后的颜色叠加。

3.3 仿真实例

使用该模型进行视距离模糊效果模拟的滤波算子设计,实际上就是在空间域用标准型二维高斯离散函数进行多尺度高斯滤波算子的计算。二维离散高斯函数滤波算子的参数主要表现为滤波窗口的大小 H_s 和平滑度参数 S_g 。滤波窗口的大小,用某一观察距离下 1° 视角视觉采样窗口大小表示。平滑度参数依据CSF模型的参数,从频域的计算转换到空域的计算,经推导可表示为

$$S_g = \frac{(\sigma_i \times H_s) - 1}{0.6}. \quad (5)$$

假设观察距离为 $D=30$ inch(1 inch=2.54 cm),图像分辨率 $R_e=72$ pixel/inch,相关参数计算如表2所示。

表2 高斯滤波算子参数
Table 2 Parameters of Gaussian filters

Hsize		Sigma				
Row	Column	Achromatic	0.53	4.49	157.9	
37	37	Red-green	0.95	18.1		
		Yellow-blue	1.48	14.0		

依据表 2 中的参数,对离散化的高斯函数进行量化,可得到高斯滤波算子。

明度通道的滤波算子如图 1 所示,图 1(a)是第一尺度滤波算子,图 1(b)是第二尺度滤波算子,图 1(c)是第三尺度滤波算子。第一尺度滤波可以保持相邻像素对比度差别较大的关系;第二尺度滤波扩

大了滤波范围,将对对比度差别低的像素进行颜色融合;第三尺度滤波进行了更大范围的扩展,将大部分对比度差别小的像素进行融合。图 2 红-绿通道滤波算子,图 3 黄-蓝通道滤波算子。彩色的两个通道都采用了两个尺度的滤波算子,表现了视觉对彩色处理时的低通特征。

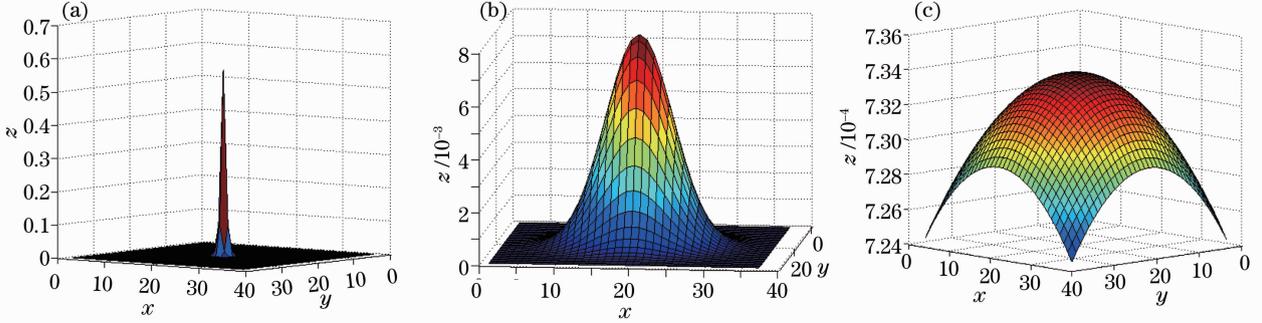


图 1 明度通道的滤波算子

Fig. 1 Gaussian operators of the lightness channel

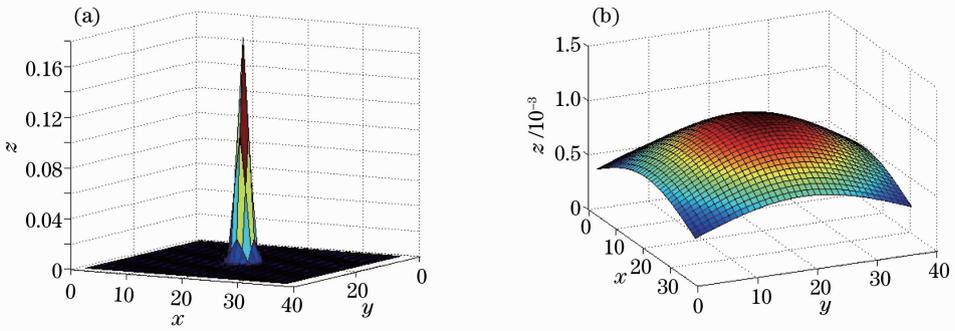


图 2 红-绿通道的滤波算子

Fig. 2 Gaussian operators of the red-green channel

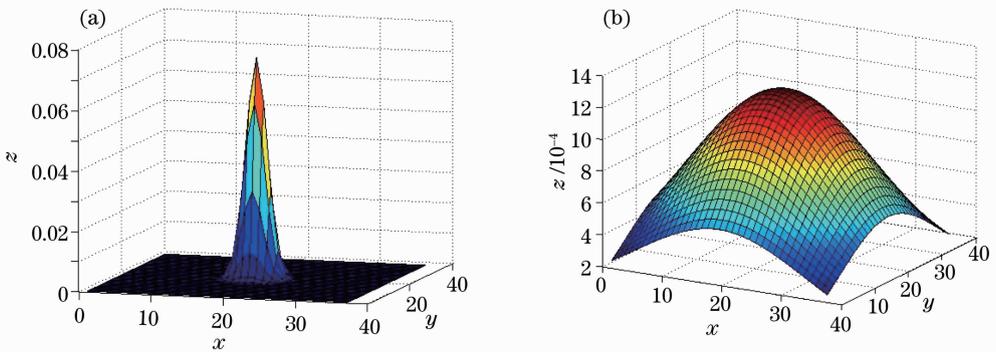


图 3 黄-蓝通道的滤波算子

Fig. 3 Gaussian operators of yellow-blue channel

若对彩色数字图像使用这些滤波算子进行视觉模糊处理的模拟时:1)确定数字图像的尺寸、分辨率等参数;2)确定观察距离,计算视觉采样频率;3)将数字图像转换到对立颜色空间,如 CIELab 颜色空间;4)依据 CSF 模型确定每个颜色通道的滤波参

数;5)对各个通道图像分别进行滤波;6)乘上 CSF 模型中相应的权重系数,再将滤波后的图像叠加起来;7)进行颜色空间的逆运算,得到 RGB 颜色模式的图像。这种多尺度的滤波算法,平滑地保持视觉差别大的像素间的反差关系,同时削弱反差低的像

素之间的差别,融合反差小的像素颜色。同理对于红-绿通道图像和黄-蓝通道图像也采用类似的处理。不同的通道,共进行7次滤波,单个通道的执行结果按照CSF模型给予的权重进行合并,再将图像转换到原始的颜色空间,即实现了视觉距离增大时,视觉对空间颜色的融合模拟。

4 结 论

对于灰度物体的观察,实现视觉距离增大时的视觉模糊效果的模拟,可使用简单的视锐度模型进行仿真,视锐度模型表达了视觉空间混合的原理。对于彩色物体的观察,视锐度模型不能解决相邻像素的彩色对比度关系,需要使用CSF模型来解决该问题。CSF模型用多个高斯函数和的形式建模,能够表达视觉观察物体时的多尺度性、低通和带通滤波特性、彩色处理的多通道性以及颜色处理的叠加性。并通过视锐度模型和CSF模型理论的结合,实现了模拟视觉距离变大时视觉模糊效果的算法,仿真滤波算子的特征证实了论证结果。然而,研究结果存在以下不足:1)文中算法只能解决由近及远的视觉模糊效果的模拟,由远及近的视觉清晰度提高效果的模拟,有待于进一步研究;2)文中CSF模型有待于完善,目前使用的CSF数据集是在固定背景亮度下的测试数据,实际上背景亮度的变化,对视锐度有较大的影响。因此,背景亮度应作为CSF模型的参数,进行相应调节。

参 考 文 献

- 1 N Moroney, M D Fairchild, R W G Hunter, *et al.*. The CIECAM02 color appearance model [C]. IS&TISD 10th Color Imaging Conference, 2002.
- 2 Lu Canglong, Xu Haisong, Gong Rui. CIECAM02 performance

- on cross-media color reproduction in different surround conditions [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(7): 0733001.
- 卢沧龙, 徐海松, 宫睿. 不同环境参数下CIECAM02的跨媒体颜色复现性能 [J]. *光学学报*, 2012, 32(7): 0733001.
- 3 Mark D Fairchild, Gerrett M Johnson. The iCAM framework for image appearance, image differences, and image quality [J]. *J Electronic Imaging*, 2004, 20(4): 377-389.
- 4 Wu Haili, Huang Qingmei, Yuan Xinfang, *et al.*. Experimental research of evaluating methods of image quality based on models of S-CIELAB and iCAM [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(12): 3447-3453.
- 武海丽, 黄庆梅, 苑馨方, 等. 基于S-CIELAB和iCAM模型的图像颜色质量评价方法的实验研究 [J]. *光学学报*, 2010, 30(12): 3447-3453.
- 5 Shaler. The relation between visual acuity and illumination [J]. *J General Psychology*, 1937, 21(2): 165-188.
- 6 K T Mullen. The contrast sensitivity of human colour vision to red-green and blue-yellow chromatic gratings [J]. *J Physiology*, 1985, 359: 381-400.
- 7 P Barten. Contrast Sensitivity of the Human Eye and Its Effects on Image Quality [M]. Bellingham: SPIE Optical Engineering Press, 1999. 232.
- 8 A B Poirson, B A Wandell. Appearance of colored patterns: pattern-color separability [J]. *Optics and Image Science*, 1993, 10(12): 2458-2470.
- 9 A B Poirson, B A Wandell. Pattern-color separable pathways predict sensitivity to simple colored patterns [J]. *Vision-Research*, 1996, 36(4): 515-526.
- 10 X M Zhang, B A Wandell. A spatial extension to CIELAB for digital color image reproduction [C]. *Symposium Proceeding of Society for Information Display*, 1996.
- 11 Wang Yang, Wang Zhaoqi, Guo Huanqing, *et al.*. Impact of higher-order wave front aberrations of human eyes on vision performance [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(11): 1519-1525.
- 王杨, 王肇圻, 郭欢庆, 等. 人眼的高级像差对视功能的影响 [J]. *光学学报*, 2005, 25(11): 1519-1525.
- 12 Sdaly. Visible differences predictor: an algorithm for the assessment of image fidelity [C]. *SPIE*, 1992, 1666: 2-15.
- 13 William A Simpson, Sharon M McFadden. Spatial frequency channels derived from individual differences [J]. *Vision Research*, 2005, 45(1): 2723-2727.
- 14 G J C Van der Horst, M A Bouman. Spatiotemporal chromaticity discrimination [J]. *J Opt Soc Am*, 1969, 59(11): 1482-1488.

栏目编辑: 李志兰