

LCH 色空间视觉彩色频率响应特性研究

金杨^{1,2}, 刘真¹, 王鹏飞², 欧阳玉洁²

(1. 南京林业大学, 南京 210037; 2. 北京印刷学院, 北京 102600)

摘要: 在回顾视觉频率响应研究状况的基础上, 以对比敏感度函数 CSF 为基础, 在 LCH 色彩空间中, 经过视觉观察实验, 获取了人眼视觉系统对明度、彩度和色调角的频率响应 (CSF 函数)。研究结果对彩色视觉相关的图像处理、传播、压缩、图像质量评估等具有重要意义。

关键词: 彩色视觉系统; 频率响应; 对比敏感度函数

中图分类号: TS801.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2012)21-0125-05

Research on Frequency Response Characteristic of Color Vision in LCH Color Space

JIN Yang^{1,2}, LIU Zhen¹, WANG Peng-fei², OUYANG Yu-jie²

(1. Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2. Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing 102600, China)

Abstract: Previous researches of visual frequency response were reviewed. Contrast Sensitivity Function (CSF) of human visual system to lightness, chroma, and hue in LCH color space were obtained through visual tests based on the concept of CSF. The purpose was to provide reference for color image processing, communicating, compression and image quality evaluation etc.

Key words: color visual system; frequency response; contrast sensitivity function

作为成像系统, 人眼视觉系统承担着感知外界信息的重要任务。视觉系统对彩色的感知大大扩展了其信息获取能力。除去对大面积色彩的辨别特性外, 视觉系统的频率响应也是十分重要的特性之一, 它反映了视觉对不同空间频率信息的分辨能力, 视觉系统对图像的细节分辨发挥着至关重要的作用。同时, 视觉系统的频率响应特性对图像压缩^[1]、像质评价、图像处理、医学等具有重要意义。

1 对比敏感度函数及其相关研究概况

1.1 对比敏感度函数

成像系统对不同空间频率的影像具有不同的响应能力。为衡量这种能力, 人们提出了影像对比度的概念。其中, 常用的 Michelson 对比度定义为: 影像信号最大/最小强度之差与其最大/最小强度之和的比值。对比敏感度 (CS: Contrast Sensitivity) 描述为: 视

觉系统恰可分辨之最小对比度的倒数。由此, 将对比敏感度 CS 随空间频率变化的函数定义为对比敏感度函数 (CSF: Contrast Sensitivity Function)。CSF 是描述视觉成像系统频率响应特性的函数。

1.2 CSF 研究概况

对视觉敏感度的研究萌芽于 18 世纪 60 年代, 主要在眼科医学领域内进行。20 世纪 50 年代, 以 Otto Schade 为代表的研究人员用光学及光电系统对视觉系统进行仿真^[2], 奠定了视觉对比敏感度的理论基础。此后的几十年中, 科学家们进行了白光/单色光的亮度对比敏感度 (CSF_{LUM}) 的较多测试, 获取了人眼视觉系统频率响应的基本特性^[2-6]。从 20 世纪 60 年代末至 70 年代初, 国外科技人员开始研究彩色对比敏感度。研究者一般采用对立色空间的测试图进行视觉实验, 即: 分别用红/绿和黄/蓝波纹图像进行测试。所获彩色对比敏感度函数是基于对立色空间的 CSF_L, CSF_{R/G}, CSF_{Y/B}, 见图 1^[3]。此类彩色视觉频率

收稿日期: 2012-08-04

作者简介: 金杨 (1961-), 男, 浙江温岭人, 南京林业大学教授, 主要研究方向为图像处理及复制。

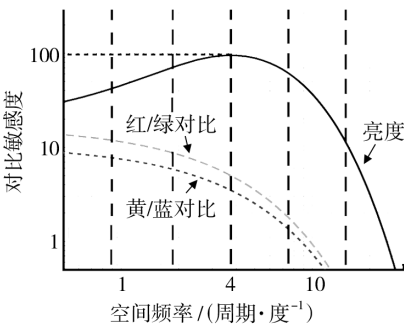


图1 亮度、红/绿、黄/蓝对比敏感度函数
Fig. 1 CSFs of luminance, red/green and yellow/blue

响应特性在彩色图像压缩等领域得到较多应用。2000年,Nadenau^[3]测试获取了YCC、CIELAB和Poirson/Wandell等3种颜色空间下的彩色CSF,并对其在彩色图像压缩中的应用进行了详尽研究。

我国开展视觉频率响应研究开始于20世纪70年代末。1979年,心理科学家俞文钊^[9]测定了2°视角红、绿、蓝等3种单色光正弦波光栅的CSF。自20世纪80年代至21世纪初,眼科医学领域的研究人员^[10-12]研制了测试系统,测试了黑白亮度及红/绿/蓝的人眼CSF曲线。21世纪初以来,颜色科学技术研究人员^[13-18]对彩色对比敏感度模型、彩色对比度定义的进行了深入研究,并用CRT显示测试图像,进行了CSF测试,给出了模型。2011年,吕玮阁、徐海松、汪哲弘、罗宁^[19]测量了6°和10°视场下CIELAB颜色空间等亮度面灰色中心和6°视场下红色中心在多个颜色方向上不同空间频率下的人眼彩色对比度阈值。获得了不同颜色方向上的CSF曲线,并拟合得到不同空间频率下的彩色对比度阈值椭圆。

2 LCH 空间下对比敏感度函数研究

2.1 彩色 L/C/H 对比敏感度

LCH 颜色空间是以 CIE1976 $L^*a^*b^*$ 均匀颜色空间为基础,以明度 L^* 、彩度 Ch 和色调角 H 对颜色进行描述的颜色体系。这一颜色体系能够较好地与人眼视觉对颜色的知觉相吻合。

依据前述的对比敏感度定义,可将明度对比度 C_L 及彩度对比度 C_{Ch} 分别表述为:

$$C_L = \frac{L_{max} - L_{min}}{L_{max} + L_{min}}$$

$$C_{Ch} = \frac{Ch_{max} - Ch_{min}}{Ch_{max} + Ch_{min}} \tag{1}$$

其中, L_{max} , L_{min} 分别为明度最大/最小值; Ch_{max} , Ch_{min} 分别为彩度最大/最小值。

色调角对比度定义为:

$$C_{hue} = \frac{H_{end} - H_{start}}{\Delta H_{max}} \tag{2}$$

其中, H_{end} 和 H_{start} 分别是偏移色调角中心的色调角终止值和起始值, ΔH_{max} 为偏离色调角中心的最大值。例如:色调角中心为 45°,色调角起始及终止值分别为 44°和 46°,而色调角最大/最小值分别为 30°和 60°,即色调角最大偏离值 ΔH_{max} 为 30°,则色调角对比度 C_{hue} 为 1/15。

基于上述二式和前述的概念,即可相应地给出 LCH 对比敏感度、对比敏感度函数定义。

2.2 LCH 彩色对比敏感度函数的视觉测试

为获取 LCH 空间下人眼视觉对比敏感度函数,即: CSF_L , CSF_{Ch} 和 CSF_H , 需进行大量视觉实验。首先,在 LCH 颜色空间内,选择一些点作为“颜色中心”,以其作为基准,通过视觉观察实验,分别得到不同空间频率变化的明度、彩度、色调角 3 个颜色分量的视觉恰可辨别对比度,再计算获得视觉系统对 LCH 空间频率的响应。视觉实验的明度、彩度、色调角及测试范围如表 1。测试的空间频率范围是:0.24 ~ 20.0 周期/度 (CPD)。

表 1 CSF 视觉测试的色度范围			
Tab. 1 Colorimetric range of the CSF visual tests			
	明度 L	彩度 Ch	色调角 $H/(^\circ)$
CSF_L	50 (明度中心)	50	30, 90, 150, 210, 270, 330
CSF_{Ch}	50	50 (彩度中心)	30, 90, 150, 210, 270, 330
CSF_H	50	50	15, 45, 75, 105, 135, 165, 195, 225, 255, 285, 315, 345 (色调角中心)

CSF 视觉测试过程为:生成多个图像序列,每个序列中包含多幅图像。用经过色彩校准及特性化的 CRT 显示器显示图像序列。图像内容为横向延伸的正弦波波纹。在 LCH 三个变量中,两个色彩变量恒定,而另一个变量按正弦波变化。在一个图像序列内,各幅图像对比度相同,而其空间频率各不相同。受试观察者观察序列中的多幅图像,直至从中找出视

觉恰可分辨对比度差异的一幅,由此获得空间频率和对比度数值。用多个图像序列进行测试,最终可获一系列空间频率对比度数值,最终可获得对比敏感度函数。

所需的图像序列用 VC 编制软件生成。图像为 48 位 LAB 模式 TIFF 文件,像素数 1280×1024 ,测试区像素数 256×256 ,测试区外的背景为中性灰色(明度 = 50)。测试用显示系统参数为:19 英寸 CRT 显示器,分辨率 1280×1024 ,显卡是具有 10 位/通道的 DAC,可显示 2^{30} 种色彩,显示器白场亮度为 174.4 cd/m^2 。

实验观察过程在暗室中进行。观察者对序列中的多幅图像,分别按频率增加及降低顺序各显示/判断一遍,以保证辨识可靠性。参照美国光学会标准空间观察者(SSO)建议^[19],按显示器参数,受试者观察距离为 2.02 m,图像测试区对眼睛的张角为 2.1° 。共有 10 名色觉正常的受试者参与了视觉观察实验。年龄在 21 ~ 23 岁之间,裸眼视力在 4.9 ~ 5.1 之间(0.8 ~ 1.2 之间),双裸眼观察。

2.3 彩色 CSF 测试结果及分析

经视觉观察实验,所获得的 6 种不同色调角下的明度 CSF、6 种不同色调角下的彩度 CSF、12 种不同色调角下的色调角 CSF 见图 2。

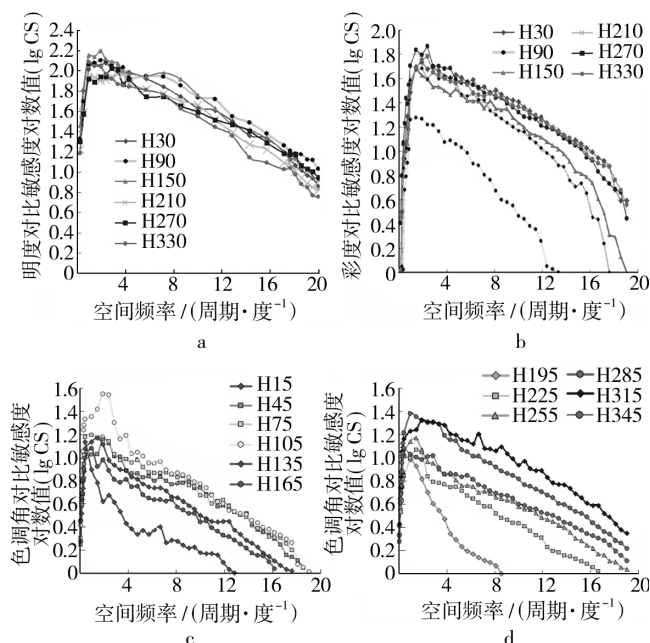


图 2 明度、彩度、色调角对比敏感度函数

Fig. 2 CSFs of lightness (a), chroma(b) and hue(c)

由测试结果看出:视觉对不同空间频率下明度、

彩度和色调角对比敏感特性存在差异;在中等彩度($Ch = 50$)条件下,对不同色调角,明度对比敏感度函数(CSFL)差异不大;在中等明度($L = 50$)条件下,对不同色调角,彩度对比敏感度函数(CSFCh)存在差异,其中,色调角为 105° 的黄色,其对比敏感度函数明显低于其他色调角,且覆盖的空间频率范围窄;在中等明度($L = 50$)和中等彩度($Ch = 50$)条件下,不同色调角中心下,色调角对比敏感度函数(CSF_H)存在较多差异。红色(15°)和蓝绿色(195°)的敏感度函数值明显低于其他色调角中心的函数曲线。

分析 LCH 对比敏感度函数差异的原因,须从视觉系统对微小阈值色差的辨识特性上入手。如果视觉对较大面积色块(空间频率为零)的颜色差异难以辨识,则其对以某种空间频率变化的色彩的辨识也是困难的。

汪哲弘和徐海松^[21]对 CIE1976L*a*b* 颜色空间下的明度、彩度和色调等视觉容差与色调角之间的相关性进行了研究。其中,取不同明度水平、彩度水平的色调环,采用不同的视觉尺度(DV),所获明度、彩度、色调角容差曲线如图 3a-c 所示。容差越大,视觉辨色能力越低,反之则越高。

从图 3a 中可知:明度辨色容差与颜色色调角的关系不密切,曲线趋于平坦。结合图 2a 所示的明度对比敏感度函数曲线,可知:在不同色调角下,明度对比敏感度函数曲线差异不大的特性,其根基在于图 3 所示的视觉明度阈值辨别力特性。

图 3b 所示的彩度容差表现出较明显的色调角依赖性。其中,色调角 90° 和 300° 的彩度容差高,表明在这两个色调角处,人眼的彩度差异辨别敏感性低;而在 240° 和 0° 下,彩度容差明显较低,表现出视觉系统其辨别敏感度较高。与 6 种不同色调角下彩度对比敏感度函数(图 2b)对照,所表现的关联性是明确的,即:就彩度对比敏感度函数而言, 90° 的彩度 CSF 曲线处于最低水平上; 30° , 270° 和 330° 的曲线(红/蓝/品),因彩度辨别容差处于最低和较低的水平,故 CSF 曲线处于高水平; 150° (绿)彩度 CSF 曲线处于略低水平,反观其对应色调角的彩度容差,确实处于较高的水平。具有一定偏差的是 210° 彩度 CSF 曲线,其整体处于较低水平,而视觉彩度容差却较低,但总体上,此曲线与其他水平较高的曲线差异不大。

在图 2c 所示的两组色调角对比敏感度函数中,最弱的两条曲线为 15° (红)和 195° (蓝绿),对应地观

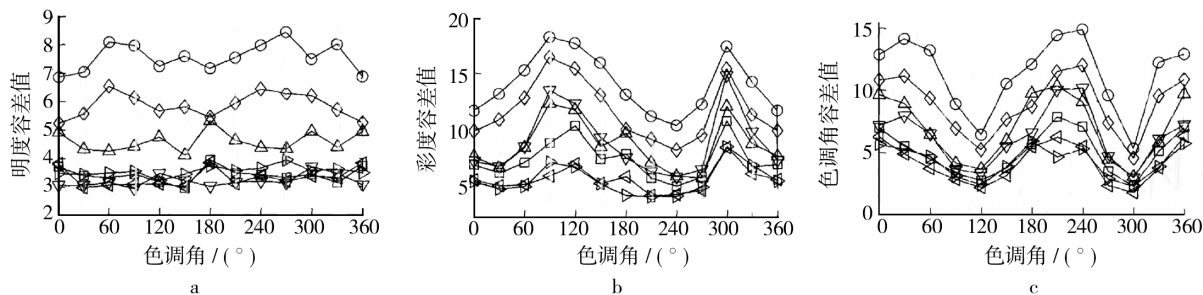


图3 各色调环上的明度/彩度/色调角视觉容差曲线

Fig. 3 The visual tolerances of lightness/chroma/hue for individual hue circles

察图3c的对应色调角处,其色调角容差处于最高水平。处于最高敏感水平的两个对比敏感度函数(105° 和 315°),所对应的色调角容差处于最低的两个“谷底”附近。 225° (青)曲线较低,其色调角容差也处于高水平。其余的CSF曲线与色调角辨别容差的关系也有类似的关联性。

3 结论

随空间分辨率上升,明度、彩度和色调角对比敏感度呈现出的共同规律是:由低值迅速升高到最大值,再缓慢下降至0;在到达最高值之前,对比敏感度值的对数值的上升极迅速;在达到最高值之后,其下降的规律有所不同。明度对比敏感度对数值的下降基本呈线性,彩度对比敏感度对数值的下降呈很弱的抛物线型,色调角对比敏感度对数值的变化呈现出下降速度由高至低再到高的变化规律;在不同色调角下,明度对比敏感度函数的差异不显著;在不同的色调角下,彩度对比敏感度函数存在差异,其中,黄色调(90°)的对比敏感度显著低于其他色调;在不同的色调角下,色调角对比敏感度函数存在差异,其中,红色调(15°)和蓝绿色调(195°)的对比敏感度显著低于其他色调;明度、彩度、色调角对比敏感度函数与色调角之间的相关性与人眼视觉辨色特征的明度、彩度、色调角容差密切相关。

参考文献:

- [1] 姚军财. 基于人眼视觉特性的印刷图像压缩技术研究[J]. 包装工程, 2011, 32(5): 69-72.
YAO Jun-cai. Compression Technology of Printed Image Based on Human Vision Characteristics[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(5): 69-72.
- [2] SCHADE Otto. Optical and Photoelectric Analog of the Eye [J]. Journal of the Optical Society of America, 1956, 46: 721-739.
- [3] NADENAU M J. Integration of Human Color Visual Models into High Quality Image Compression[D]. Lausanne: Swiss Federal Institute of Technology (EPFL), 2000: 74-77.
- [4] CAMPBELL F, ROBSON J. Application of Fourier Analysis to the Visibility of Gratings [J]. Journal of Physiology, 1968, 197(3): 551-566.
- [5] VIRSU V, ROVAMO J. Visual Resolution, Contrast Sensitivity and the Cortical Magnification Factor[J]. Experimental Brain Research, 1979, 37: 475-494.
- [6] ROVAMO J, FRANSSILA R, NÄSÄNEN R. Contrast Sensitivity as a Function of Spatial Frequency, Viewing Distance and Eccentricity with and without Spatial Noise[J]. Vision Research, 1992, 32: 631-637.
- [7] ROVAMO J, KUKKONEN H, TIIPANA K, et al. Effects of Luminance and Exposure Time on Contrast Sensitivity in Spatial Noise [J]. Vision Research, 1993, 33: 1123-1129.
- [8] ROVAMO J, O LUTINEN, R NÄSÄNEN. Modeling the Dependence of Contrast Sensitivity on Grating Area and Spatial Frequency[J]. Vision Research, 1993, 33: 2773-2788.
- [9] 俞文钊. 人眼对彩色正弦光栅的对比敏感性及其适应后效[J]. 心理学报, 1981(3): 327-332.
YU Wen-zhao. Contrast Sensitivity of Human Eye to Chromatic Sinusoidal Gratings and Adaptation Aftereffects[J]. Acta Psychologica Sinica, 1981(3): 327-332.
- [10] 陈式苏, 诸绍林, 方仲生. 用MTF数据确定视网膜-大脑系统的信息加工特性[J]. 温州医学院学报, 1987, 17(1): 58-60.
CHEN Shi-su, ZHU Shao-lin, FANG Zhong-sheng. The Determination of the Information Processing Properties of Human Retina-Brain System with MTF Data[J]. Journal of Wenzhou Medical College, 1987, 17(1): 58-60.

- [11] 曾碧新,陈式苏. 人眼时空调制传递函数测试系统[J]. 中华医学物理杂志,1996,1(13):60-62.
Zeng Bi-xin, Chen Shi-su. Apparatus for Measuring Temporal-spatial MTF of Human Eye[J]. Chinese Journal of Medical Physics, 1996, 13(1): 60-62.
- [12] 曾碧新,陈式苏. 全视系统空间 MTF 测试系统设计[J]. 眼视光学杂志,2002,4(3):167-169.
ZENG Bi-xin, CHEN Shi-su. Design of a Pattern for Measuring Spatial MTF in the Human Visual System[J]. Chinese Journal of Optometry & Ophthalmology, 2002, 4(3): 167-169.
- [13] 周燕,金伟其. 人眼视觉的传递特性及模型[J]. 光学技术,2002,28(1):57-61.
ZHOU Yan, JIN Wei-qi. The Transfer Characteristic of Human Visual System and Models[J]. Optical Technique, 2002, 28(1): 57-61.
- [14] 张建勇,金伟其,周燕. 人眼的彩色和亮度传递特性及模型化[J]. 应用光学,2003,24(4):1-5.
ZHANG Jian-yong, JIN Wei-qi, ZHOU Yan. The Color and Luminance Transfer Characteristic and Modeling of Human Visual System [J]. Journal of Applied Optics, 2003, 24(4): 1-5.
- [15] 姚军财,石俊生. 彩色图像对比度定义的探讨[J]. 云南师范大学学报,2006,26(4):49-51.
YAO Jun-cai, SHI Jun-sheng. Discussing the Definition of Color Image Contrast[J]. Journal of Yunnan Normal University, 2006, 26(4): 49-51.
- [16] 石俊生,姚军财,余鸿飞,等. 用显示器测量人眼衬比度敏感函数[J]. 光学学报,2007,27(4):744-748.
SHI Jun-sheng, YAO Jun-cai, YU Hong-fei, et al. Measurement of Luminance Contrast Sensitivity Function of Human Visual System on Cathode Ray Tube Display[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(4): 744-748.
- [17] 姚军财,申静,何军峰,等. 不同视力的人眼对比度敏感视觉特性实验研究[J]. 科学通报,2008,53(22):2730-2734.
YAO Jun-cai, SHEN Jing, HE Jun-feng, et al. Experimental Research on Characteristics of Contrast Sensitivity of Different Visual Acuity[J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(22): 2730-2734.
- [18] 姚军财,石俊生. 人眼对比度敏感视觉特性及模型研究[J]. 光学技术,2009,35(3):334-337.
YAO Jun-cai, SHI Jun-sheng. Research of Contrast Sensitivity Characteristics and Model of Human Vision System[J]. Optical Technique, 2009, 35(3): 334-337.
- [19] 吕玮阁,徐海松,汪哲弘,等. 基于不同颜色方向和空间频率的彩色对比灵敏度特性研究[J]. 光学学报,2011,31(1):1-6.
LYU Wei-ge, XU Hai-song, WANG Zhe-hong, et al. Investigation of Chromatic Contrast Sensitivity Based on Different Color Directions and Spatial Frequencies[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(1): 1-6.
- [20] MODELTEST Methods[EB/OL]. (1999-11-01)[2006-06-06]. <http://vision.arc.nasa.gov/modeltest/methods.html>.
- [21] 汪哲弘,徐海松. 基于视觉容差与色调角相关性的色差公式评价[J]. 光学学报,2009,29(7):1838-1841.
WANG Zhe-hong, XU Hai-song. Evaluation of Color Difference Formulae Based on the Correlation Between Visual Tolerances and Hue Angles[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(7): 1838-1841.

~~~~~  
(上接第 99 页)

- [5] 樊勇,杨桂喜,李振亮,等. SOT 型半导体元器件自动编带机的编带装置设计[J]. 微机计算机信息,2006,22(6):47-49.  
FAN Yong, YANG Gui-xi, LI Zhen-liang, et al. Development on the Taping Unit for SOT Semiconductor Component Taping Machine[J]. Micro Computer Information, 2006, 22(6): 47-49.
- [6] 陈晓艳,李振亮,李亚,等. 贴片二极管编带机自动控制技术的研究[J]. 自动化仪表,2006,27(11):36-38.  
CHEN Xiao-yan, LI Zhen-liang, LI Ya, et al. Study on Automatic Control Technology for Plastic Leading Packaging Machine of Small Outline Diodes[J]. Process Automation Instrumentation, 2006, 27(11): 36-38.
- [7] 李振亮,门武斌,李亚,等. SOT123 编带机的方案设计与研究[J]. 轻工机械,2006,24(1):133-135.  
LI Zhen-liang, MEN Wu-bin, LI Ya, et al. The Scheme Design and the Study on the Fully Automatic SOT123 Diode Taping-machine[J]. Light Industry Machinery, 2006, 24(1): 133-135.
- [8] 肖玮,孙智慧,晏祖根. 粉针剂连续振动充填装置的仿真设计[J]. 包装工程,2012,33(3):63-66.  
XIAO Wei, SUN Zhi-hui, YAN Zu-gen. Simulation Design of Continuous Vibration Filling Machine of Injectable Powder[J]. Packaging Engineering, 2012, 33(3): 63-66.