

文章编号: 0253-2239(2010)s100416

不同视场下基于色差定义的对比灵敏度函数

吕玮阁¹ 徐海松¹ 汪哲弘² M. Ronnier Luo³

¹ 浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027

² 杭州电子科技大学新闻出版学院印刷工程系, 浙江 杭州 310037

³ Department of Color Science, University of Leeds, Leeds LS2 9JT, UK

摘要 为了研究人眼视觉系统的空间特性,采用交叉阶梯法在阴极射线管(CRT)显示器上对正弦条纹的亮度及彩色对比灵敏度函数进行测量。基于 CIELAB 空间,采用色差 ΔE_{ab}^* 和平均亮度 L^* 之比定义对比度,从而能够在统一量度下对亮度及彩色对比灵敏度函数进行比较。测量了 $10^\circ, 6^\circ$ 和 2.44° 三个不同视场下, $0.4 \sim 23.4$ cycle / ($^\circ$) 的空间频率范围内,人眼对平均颜色为中性灰 ($L^* = 76, a^* = b^* = 0$) 的正弦条纹的亮度及彩色对比灵敏度函数。采用不同的指数模型拟合测试数据,发现亮度对比灵敏度函数的峰值灵敏度和不同颜色方向上彩色对比灵敏度函数曲线的相交点均随视场大小而变化,并得到反映人眼在不同视场下不同空间频率上对亮度和彩色对比度感知差异的比例曲线。

关键词 视觉与色彩;对比灵敏度函数;色差;交叉阶梯法

中图分类号 O432.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201030.s100416

Contrast Sensitivity Function Based on Color Difference under Different Fields

Lü Weige¹ Xu Haisong¹ Wang Zhehong² M. Ronnier Luo³

¹ State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

² School of Printing Engineering, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou, Zhejiang 310037, China

³ Department of Color Science, University of Leeds, Leeds LS2 9JT, UK

Abstract In order to research the spatial characteristics of human vision system, the luminance and chromatic contrast sensitivity function (CSF) is measured for sinusoid wave patterns on a CRT displayer using the psychophysical method of interleaved staircase. Based on the CIELAB space, the contrast is defined as the ratio between color difference ΔE_{ab}^* and the average luminance L^* , so that the luminance and chromatic CSF can be compared in the uniform scale. The luminance and chromatic CSF for the sinusoid wave patterns whose average color is neutral gray ($L^* = 76, a^* = b^* = 0$) are measured under three field sizes of $10^\circ, 6^\circ$ and 2.44° , respectively, for spatial frequencies from 0.5 to 23.4 cycle / ($^\circ$). The test data are fitted using different exponent functions. It is found that the peak luminance CSF values and the cross points of chromatic CSF curves of different color directions change with the field sizes. The ratio curves between the luminance CSF and the chromatic CSF under different fields are also obtained, which reflect the difference of human's sensitivity to the luminance and chromatic contrast.

Key words vision and color; contrast sensitivity function; color difference; interleaved staircase method

OCIS codes 330.1710; 330.1720; 330.1800; 330.5510

收稿日期: 2010-08-17; 收到修改稿日期: 2010-10-19

基金项目: 浙江大学现代光学仪器国家重点开放实验室资助课题。

作者简介: 吕玮阁(1981—),女,博士研究生,主要从事颜色科学及图像技术等方面的研究。E-mail: lvweige@163.com

导师简介: 徐海松(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事颜色科学与影像技术、光度学与色度学以及光辐射测量等方面的研究。E-mail: chsxu@zju.edu.cn。(中国光学学会会员号:50401112125)

1 引 言

图像质量评价应该同人眼视觉系统的特性相结合,而对比灵敏度函数(CSF)描述了人眼视觉系统的空间特性,并被应用到图像及显示技术中。基于CSF对图像及显示技术的贡献,目前从图像和颜色的角度对CSF展开的研究日益增多^[1~8]。然而,亮度和彩色CSF通常具有不同的定义,除了做归一化处理,很少在统一的量度下进行直接比较。

由于亮度和彩度的变化都产生色差,本文基于CIELAB空间,采用色差 ΔE_{ab}^* 和平均亮度 L^* 之比定义对比度,即符合亮度对比度的一般定义形式,又将色差与对比度联系在一起;其中彩色对比度定义为等亮度彩色条纹沿不同颜色方向的色差与平均亮度之比,亮度对比度定义为非彩色亮度条纹沿 L^* 轴方向的色差与平均亮度之比,对比度视觉阈值的倒数即为对比灵敏度;从而能够在统一量度下对亮度及彩色对比灵敏度函数进行比较。本文测量了 $10^\circ, 6^\circ, 2.44^\circ$ 三个不同视场下人眼观察正弦明暗条

纹和对抗色条纹的亮度及彩色CSF,采用指数模型拟合测试数据,并进行了比较和分析。

2 实验方案

根据CSF测试的一般条件,实验在暗室中进行,只有显示器屏幕产生的亮度。测试图样为明暗相间或对抗色正弦竖直条纹,其水平方向上的颜色在CIELAB空间沿 L^* 轴或 a^*b^* 平面上选定的颜色方向(与 a^* 轴夹角分别为 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 的 $r-g, o-c, y-b$ 和 $l-p$ 方向)变化,且与选定的颜色中心的色差沿水平轴 x 方向呈正弦变化,如图1所示,其中选定的颜色中心为CIE推荐的用于辨色阈值测量的中性灰^[9]($L^* = 76, a^* = b^* = 0$),也是条纹的平均颜色。具体而言,对亮度条纹,平均颜色为具有亮度条纹平均亮度的中性色;对彩色条纹,平均颜色为彩色条纹颜色变化所围绕的颜色中心,在本文中为与彩色条纹等亮度的中性色。背景采用与平均颜色一致的均匀灰色。

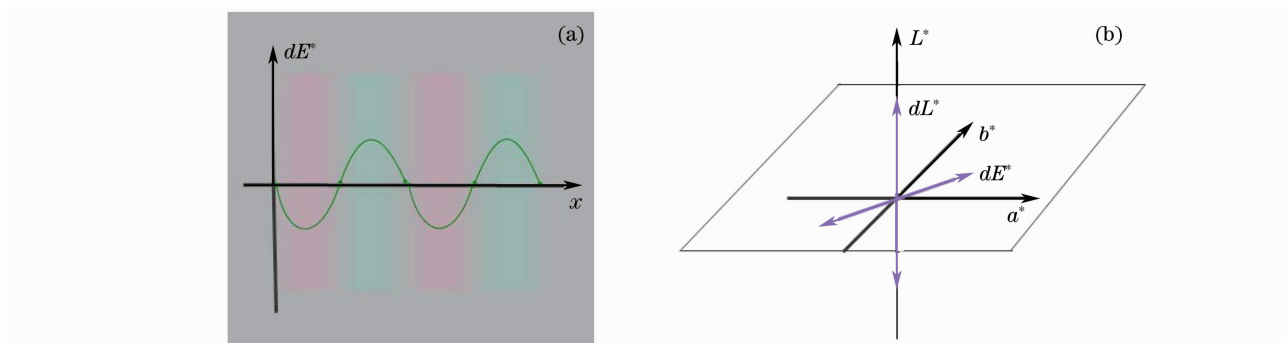


图1 测试图样及其对比度调制(a)和CIELAB空间(b)

Fig. 1 Test pattern and its contrast modulation (a) and CIELAB space (b)

实验在 $10^\circ, 6^\circ$ 和 2.44° 三个视场下进行,对亮度CSF测量的空间频率分别为 10° 视场下的 $0.4, 0.5, 0.9, 1.0, 1.3, 1.7, 2.6, 7.8$ cycle / ($^\circ$)以及 6° 和 2.44° 视场下的 $0.5, 1.0, 2.0, 2.6, 3.1, 3.9, 5.2, 7.8, 11.7, 15.6, 23.4$ cycle / ($^\circ$);彩色CSF测量的空间频率分别为 10° 视场下的 $0.5, 1.0, 1.7, 2.6, 7.8$ cycle / ($^\circ$)以及 6° 和 2.44° 视场下的 $0.5, 1.0, 2.6, 5.2, 7.8, 11.7$ cycle / ($^\circ$)。共有4名观察者参与视觉评估,均为浙江大学在读研究生,男2人、女2人,年龄在23~30岁之间,色觉正常,视力正常或经过校正后都在1.2以上,并在实验前均经过2 min暗适应和1 min亮适应过程,其中亮适应条件为与条纹的平均颜色一致的均匀背景色。实验采用2AFC心理物理学交叉阶梯法^[10]。

实验设备包括阴极射线管(CRT)显示器 Neso

FD570A,分辨率在85 Hz设为 $1024 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel}$,白场色温接近D65(实测CIE1931色品坐标 $X = 0.3122, Y = 0.3292$),白点亮度 104.53 cd/m^2 ,黑点亮度 0.75 cd/m^2 。本实验采用抖动技术^[11]提高显示器的幅度分辨率,通过色品坐标可变的线性分段插值(PLVC)模型^[12]进行CRT的色度特征化标定,实测特征化精度的平均值为 $0.48 \Delta E_{ab}^*$ 。

3 实验结果与讨论

3.1 亮度及彩色对比灵敏度函数的拟合

本文基于CIELAB空间,采用色差 ΔE_{ab}^* 和平均亮度 L^* 之比定义条纹对比度如下

$$f_{\text{CSF}}(u) = \frac{1}{C_T} = \frac{1}{\Delta E_{ab}^* / L^*}, \quad (1)$$

4名观察者同时参与了 $10^\circ, 6^\circ$ 和 2.44° 视场下的视

觉实验,其测试结果如图 2,3 所示。对于亮度 CSF,本文采用 Barten 模型^[5,7]及其他指数模型对其视觉实验数据进行拟合,发现 Barten 模型与指数模型的拟合精度相当,故这里采用 Barten 模型,即

$$f_{\text{CSF}}(u) = 1000au \exp(-bu) [1 + c \exp(bu)]^{0.5}, \quad (2)$$

式中 a, b, c 均为拟合参数 ($R^2 \approx 0.9$), 其值与平均亮度和视场角有关。不同视场下的亮度对比灵敏度函数拟合曲线如图 2 所示, 即视场减小导致低频段 CSF 降低, 而高频部分变化不大, 从而引起峰值对比灵敏度向高频方向移动。10° 视场下的峰值对比灵敏度约为 850, 处于 1~2 cycle / (°) 之间; 6° 视场的最大对比灵敏度约为 700, 接近 2 cycle / (°);

2.44° 视场下的最大值约为 520, 其对应频率为 3~4 cycle / (°)。

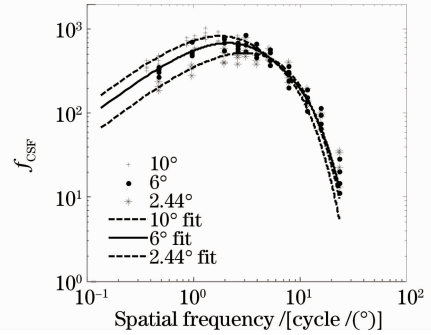


图 2 L^* 轴上不同视场下的亮度对比灵敏度函数拟合曲线

Fig. 2 Fitted curves of luminance contrast sensitivity function under different field sizes on L^* direction

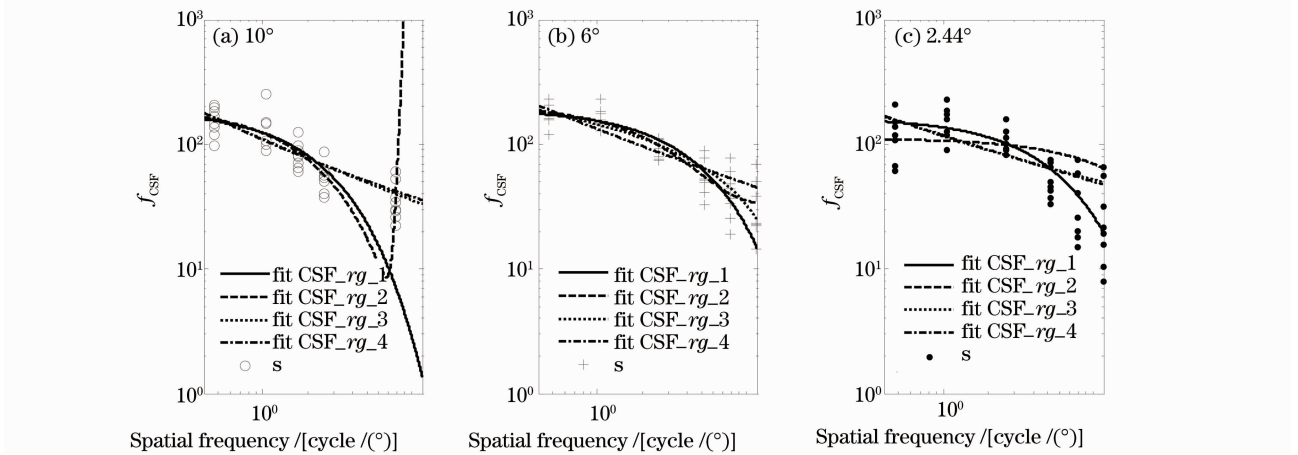


图 3 不同视场下的彩色 CSF 拟合曲线(以 $r-g$ 方向为例)

Fig. 3 Fitted curves of chromatic contrast sensitivity function under different field sizes with $r-g$ direction as an example

对于彩色 CSF 的拟合,带通形式的 Barten 模型并不适用,选用 4 个指数模型进行拟合:

$$f_{\text{CSF}_1}(u) = a \exp(bu), \quad (3)$$

$$f_{\text{CSF}_2}(u) = a \exp(bu) + c \exp(du), \quad (4)$$

$$f_{\text{CSF}_3}(u) = 10a \exp(10bu^{c_1}) + c \exp(10du^{c_2}), \quad (5)$$

$$f_{\text{CSF}_4}(u) = 100a \exp(bu^f). \quad (6)$$

对三个视场下 $r-g$ 颜色方向上 CSF 的拟合如图 3 所示,其拟合方差如表 1 所示。可见,(3)式对 2.44° 和 6° 的拟合情况较好,对 10° 下的拟合在高频段有所偏离;(4)式在高频段的拟合结果表现不同,其曲线在 10° 下高频段的上翘与此处测量频率较少有关系;经验(5)式和(6)式的拟合结果接近,并且趋于线性,对 6° 视场的拟合表现较好,对 2.44° 视场的拟合并不理想。综上所述,以下采用(3)式进行彩色 CSF 数据的拟合和比较。

表 1 $r-g$ 方向彩色 CSF 拟合的 R^2

Table 1 R^2 for chromatic CSF fittings of $r-g$ direction

Field size	10°	6°	2.44°
f_{CSF_1}	0.602	0.815	0.656
f_{CSF_2}	0.667	0.842	0.343
f_{CSF_3}	0.625	0.818	0.509
f_{CSF_4}	0.630	0.768	0.520

3.2 视场的影响

在统一的 CSF 定义下,将不同视场角下测得到亮度及彩色 CSF 进行直接比较,如图 4 所示,从而研究和分析视场对亮度和彩色 CSF 的影响,以及两者之间的对应关系。

由图 4 可知,彩色 CSF 随视场的增大,并不像亮度 CSF 一样有明显下降的趋势,但是不同颜色方向之间会产生相对变化。在 10° 视场下,如图 4(a) 所示,4 个颜色方向上测得的彩色 CSF 曲线变化趋

势基本一致,只有 $l-p$ 颜色方向的 CSF 随空间频率增加而衰减更多;在数值上 $r-g$ 颜色方向与 $o-c$ 颜色方向的 CSF 高于 $y-b$ 和 $l-p$ 颜色方向。在 6° 视场下,如图 4(b)所示, $l-p$ 颜色方向的 CSF 曲线在低频段超过 $y-b$ 方向,在高频段则低于其他颜色方向。在 2.44° 视场下,如图 4(c)所示, $y-b$ 颜色方向的

CSF 曲线在低频段接近于 $l-p$ 方向,高频段则与 $r-g, o-c$ 方向的 CSF 曲线相交。图 4 中还用箭头标出了亮度 CSF 的峰值灵敏度以及彩色 CSF 曲线相交的位置,两者都随视场减小而向高频段移动。用 (5) 式重新拟合,也能得到类似的结果。

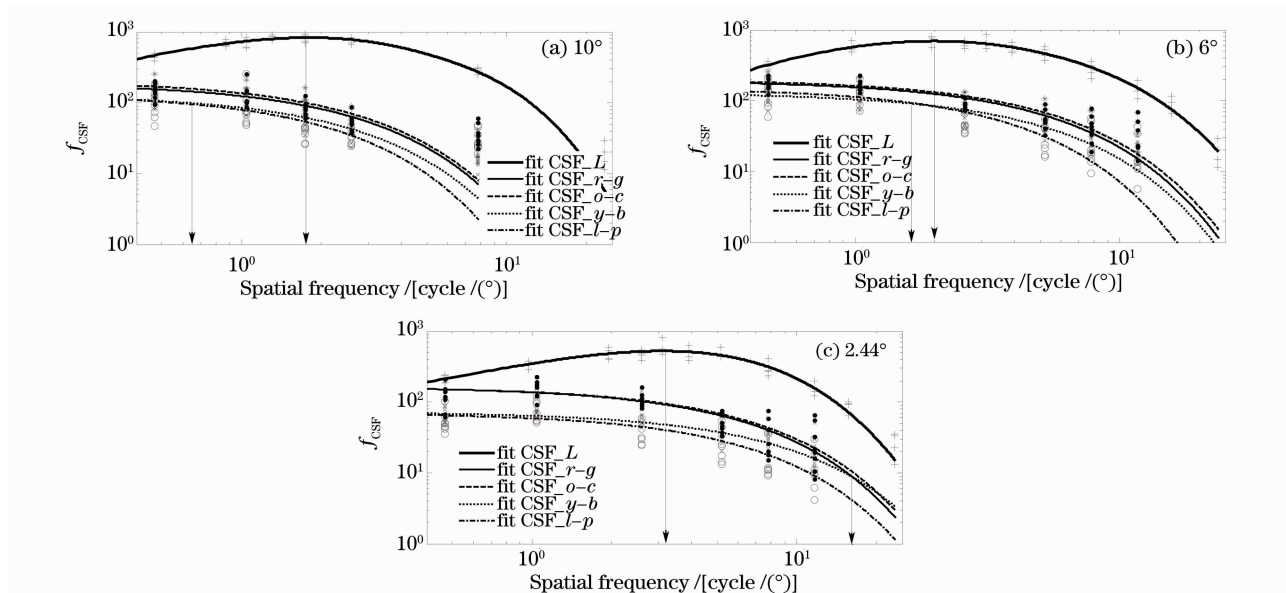


图 4 亮度与彩色 CSF 的比较

Fig. 4 Comparison between luminance CSF and chromatic CSF

亮度和彩色 CSF 在低频段的值接近,其后随空间频率增大,亮度 CSF 均高于彩色 CSF,亮度 CSF 与 $r-g$ 方向彩色 CSF 之比如图 5 所示。由图可知,大视场下其比值大于小视场的比值;并且随空间频率的增大而增大,在高频区域,又随着视场的降低而趋于平缓。这反映了人眼在不同空间频率上对亮度和彩色对比度的感知差异。

具有重要意义,因为实际图像的观察视场随观察距离而改变,所以在图像压缩等相关技术中应用 CSF 时必须考虑视场改变带来的影响。实验采用交叉阶梯法及抖动显示技术测量了不同视场 ($10^\circ, 6^\circ, 2.44^\circ$) 下人眼对正弦条纹的亮度及彩色对比灵敏度函数。基于 Barten 模型及其他指数模型对实验的测试数据进行拟合,发现亮度 CSF 的峰值灵敏度和彩色 CSF 曲线的相交点均随视场大小而变化。由于通过色差对亮度 CSF 和彩色 CSF 进行了统一的定义,从而对两者进行直接比较,得到反映人眼在不同空间频率上对亮度和彩色对比度感知差异的比例曲线。

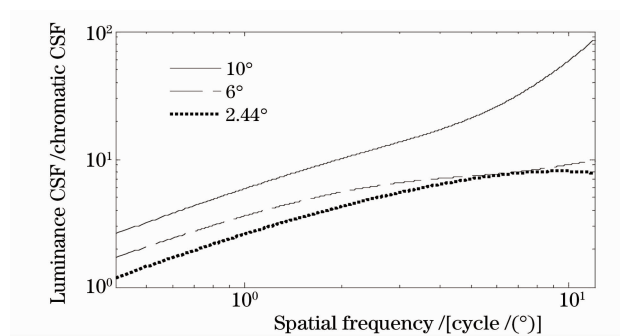


图 5 亮度 CSF 与 $r-g$ 方向彩色 CSF 之比

Fig. 5 Ratio between luminance CSF and chromatic CSF of $r-g$ direction

4 结 论

关于不同视场对 CSF 影响的研究对图像技术

参 考 文 献

- 1 X. M. Zhang, B. A. Wandell. A spatial extension to CIELAB for digital color image reproduction[C]. Proceedings of the SID Symposiums, 1996, 27: 731~734
- 2 M. Nadenau. Integration of Human Colour Vision Models into High Quality Image Compression[D]. Switzerland: école Poly technique Fédérale de Lausanne, 2000: 49~86
- 3 G. M. Johnson, M. D. Fairchild. On contrast sensitivity in an image difference model[C]. IS&T PICS 2002, Portland, 2002. 18~23
- 4 H. C. Owens, S. Westland, K. Van de Velde *et al.*. Contrast sensitivity for lime-purple and cyan-orange gratings[C]. IS&T/

- SID Tenth Color Imaging Conference, 2002, 145~148
- 5 P. G. J. Barten. Formula for the contrast sensitivity of the human eye[C]. *SPIE*, 2004, **5294**: 231~238
- 6 Shi Junsheng, Yu Hongfei, Jiang Shaoquan *et al.*. Color difference sensitivity of human vision system for red-green and yellow-blue directions[C]. *SPIE*, 2005, **6033**: 60330M-1
- 7 S. Westland. Model of luminance contrast sensitivity function for application to image assessment[J]. *Col. Res. Appl.*, 2006, **31**(4): 315~319
- 8 Shi Junsheng, Yao Juncai, Yu Hongfei *et al.*. Measurement of luminance contrast sensitivity function of human vision system on cathode ray tube display[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4): 744~748
- 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
- 9 A. R. Robertson. CIE guidelines for coordinated research on colour-difference evaluation[J]. *Color Res. Appl.*, 1978, **3**(3): 149~151
- 10 Wang Zhehong, Xu Haisong. Study on color discrimination threshold using CRT display Part I: analysis of experimental data and human color vision characteristics [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(6): 1139~1144
- 汪哲弘, 徐海松. 用阴极射线管显示器研究辨色阈值 I: 实验数据及人眼颜色视觉特性分析[J]. *光学学报*, 2007, **27**(6): 1139~1144
- 11 Seung-Woo Lee, Hyoungsik Nam. A new dithering algorithm for higher image quality of liquid crystal displays [C]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2009, **55** (4): 2134~2138
- 12 J. B. Thomas, J. Y. Hardeberg, I. Foucherot *et al.*. The PLVC display color characterization model revisited [J]. *Col. Res. Appl.*, 2008, **33**(6): 449~460