

彩色成像系统最小可分辨色差测量方法研究

于 洵¹, 田冰心¹, 姜 旭², 聂 亮¹, 陈 靖¹

(1. 西安工业大学 光电学院, 陕西 西安 710032; 2. 西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065)

摘 要: 最小可分辨色差通常使用基于人眼观测的主观方法测量, 精度不高。为了提高测量精度, 利用人眼敏感度函数 Barten 模型建立起来一种客观测量模型。即彩色四杆靶图案被成像系统接收, 经色彩空间变换、傅里叶变换、人眼敏感函数处理, 当测试图案敏感度值与由人眼敏感度函数决定的人眼敏感度阈值相匹配时, 将此时的图片转换到 CIELAB 颜色空间并计算色差, 记录不同空间频率四杆靶的测试结果并与主观测量结果相比较。结果表明: 基于人眼视觉模型的客观测量方法与主观测量方法所得结果相一致, 即所提出的客观测量方法是可行的。

关键词: MRED; Barten 模型; 空间频率; 敏感度函数; 敏感度阈值

中图分类号: TP306+.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)05-1633-05

Measurement method of MRED of color imaging system

Yu Xun¹, Tian Bingxin¹, Jiang Xu², Nie Liang¹, Chen Jing¹

(1. School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China;

2. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China)

Abstract: MRED with a low precision usually can be detected by a subjective way which is based on the human eye observation before. In order to improve the measurement accuracy, a new objective way based on the theory of Barten module was built, which was one model of Contrast Sensitivity Functions (CSF). Four-bar target pattern was received by color imaging system. After a series of processing such as color space conversion, Fourier transform and CSF processing, the chromatic aberration on the CIELAB color space was calculated when the chromatic aberration of the test pattern reached the threshold value determined by CSF. Both of the two results tested by the subjective and objective way on different spatial frequencies of the four-bar target were recorded and compared. The results show that the value got by the subjective measurement method is consistent with that of the objective. That means the subjective measurement method based on human visual model in this paper is desirable.

Key words: MRED; Barten model; spatial frequency; CSF; sensitivity threshold value

收稿日期: 2014-09-12; 修订日期: 2014-10-17

基金项目: 陕西省科技厅项目(2014KW05, 2014JM8333); 陕西省教育厅项目(12JK0980)

作者简介: 于洵(1964-), 男, 教授, 主要从事光电测试技术和光电信息系统与技术的研究与教学工作。Email: 64906086@qq.com

通讯作者: 田冰心(1989-), 女, 硕士生, 主要从事光电测试技术和光电信息系统与技术方面的研究。Email: t.bingxin@gmail.com

0 引言

目前国内外关于彩色分辨力的研究中,评价彩色成像系统空间分辨力的主要指标有最小可分辨色差(MRED),最小可探测色差(MTED)和噪声等效色差(NED)。其中 MRED 是综合性能最高的参数,它综合了系统各个环节的误差影响,同时考虑了人眼的视觉适应能力,能较全面地评估彩色成像系统空间分辨力的大小。此文主要就 MRED 的主观和客观测量方法进行研究分析。

美国军用检测规范把 MRED 定义为“在一个可为观察人员分辨的标准周期测试图案中,目标和背景可分辨的最小色差,观察时间不受限制”。在以往的研究中,MRED 是由人眼观察监视器上的四杆靶的主观方法进行测试完成,测试过程中很容易受到观察者主观因素以及周围环境的影响,必须由经过专业训练的多名观察人员,在严格相同的测试环境中进行实验,因而所测得的 MRED 作为空间分辨力的主要评价参数存在很大的误差。为了消除主观误差,此文在前人对人眼视觉特性的研究基础上,提出了一种基于人眼视觉特性的客观测量方法。虽然国内外对人眼视觉的研究已经相对成熟,但运用人眼视觉模型测量最小可分辨色差并没有涉及。

1 测量原理

目前,国内外已有利用人眼敏感度函数对彩色图像质量进行评价的方法^[1],此文经过深入的拓展研究,提出对图片最小可分辨色差的主观和客观测量方法。

1.1 测试图案

四杆靶标通常被广泛用于对热成像系统最小可分辨温差的测试中^[2],规定实验室所用四杆靶条纹目标是由七个条纹组成的(四个白条纹,三个黑条纹),这七个条纹具有相同的尺寸,且高宽比为 7:1。测试过程中采用的是不同空间频率的标准四杆靶标的灰度测试图。在实验中采用的标准四杆靶图案不再是灰度图像,而是背景和目标条纹具有一定色差的彩色图像。用于最小可分辨色差测量时,不断调节四杆靶图像背景与目标条纹颜色,当其达到实验要求时,记录数据。

文中实验所用标准四杆靶是一种亮暗相间的等宽条纹图案,四个目标条纹间距相同,且每个条纹的长宽比为 7:1。定义正四杆靶为四个目标条纹可透光,背景不透光,负四杆靶则相反。

观测同一幅四杆靶成像图时发现,随着观测距离的增加,条纹的分辨难度也要增加,观测角也随之改变,如图1所示。

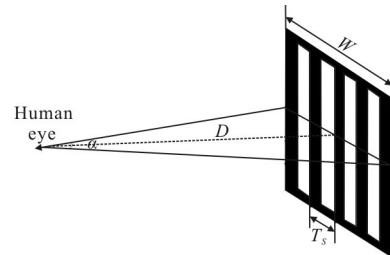


图1 四杆靶图案观测视角示意图

Fig.1 Diagram of observation angle on 4-bar target image

观测角与观测距离的关系如下:

$$\alpha = 2 \arctan \frac{W}{2D} \frac{180}{\pi} \quad (1)$$

式中: W 为图像宽度; D 为观测距离; α 为观察者视角。图像的空间频率为:

$$f = 180 / (T_s \alpha) \quad (2)$$

式中: f 为图像的空间频率,单位为周每度(cycle per degree, cycle/°); T_s 为四杆靶空间周期,即相邻两黑白条纹的宽度。

图2表示频率不断增加的四杆靶图案,将背景和目标条纹设置为不同颜色时,形成彩色四杆靶图案。

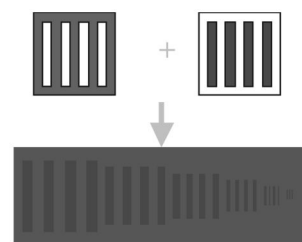


图2 不同空间频率的彩色四杆靶图案

Fig.2 4-bar target color images of different spatial frequencies

1.2 人眼的视觉特性

人眼类似于一个光学系统,但它不是普通意义上的光学系统,还受到神经系统的调节,从而在观察图像时会表现出不同的反应及特性。其中与图像处理 and 感知有关的视觉特性有视觉的非线性、对比度

敏感特性、掩盖特性及多通道处理机制^[3]。目前,应用较多的是人眼视觉对比度敏感特性。

1.2.1 人眼视觉对比度敏感函数

人眼对比度敏感函数(CSF)是描述视觉系统空间特性的主要指标,是不同条件下的对比度敏感程度与空间频率之间的关系。通常把对比度阈值的倒数随空间频率变化的曲线称为 CSF^[4-5]。

从 50 年代对亮度 CSF 的研究,到 1985 年对色度 CSF 的研究,为后来的研究者提供了较为完整的测量方法和测量数据。但是,随着人眼敏感度函数在图像处理与感知中的应用,一些离散型的数据已远远不能满足其需要,迫切需要建立一个 CSF 的数学模型。其中最具有权威性的有 Movshon 模型, Barten 模型和 Daly 模型。Movshon 模型涉及到的影响参数太少,不能充分反应人眼的视觉特性;Daly 模型是一种目前为止最能全面反应人眼视觉特性的模型,但其计算量太大,在图像处理中不实用。综合考虑, Barten 模型参数简单、计算方便,是最常用也是最能满足当前需要的一种 CSF 模型。

Barten 模型是 1999 年 Barten 提出的具有带通特性的对比度敏感函数模型,它能够灵活地反应出随着亮度和图像大小变化的 CSF 的变化情况,具体函数表示如下:

$$CSF = \frac{1}{M_i(f)} = a \cdot f \cdot \exp(-b \cdot f) [1 + c \cdot \exp(-b \cdot f)]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

式中: $a = \frac{540 \cdot (1 + 0.7/L)^{-0.2}}{1 + \frac{12}{w \cdot (1 + 3f)^2}}$; $b = 0.3 \cdot (1 + 100/L)^{0.15}$; $c = 0.06$ 。

式中: w 为每度显示的大小; L 为平均显示亮度。当亮度不同,对比度敏感函数的曲线也会不同。

根据 Barten 模型的人眼敏感度函数,利用 MATLAB 仿真模型如图 3 所示。

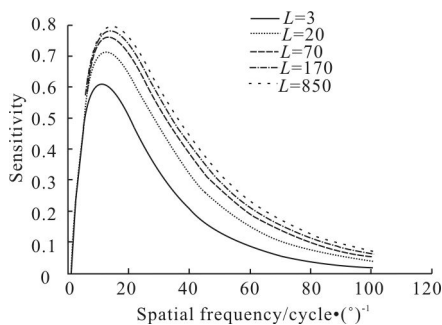


图 3 Barten 模型

Fig.3 Barten model

由图 3 可以看出,当亮度 L 不同时,对比度敏感函数曲线也会不同,但总体趋势不会改变。

1.2.2 人眼可分辨对比度阈值

由于视觉的适应性,在大约 $2 \sim 1096 \text{ cd/m}^2$ 的亮度范围内,人眼刚能分辨的亮度差异所对应的对比度阈值为—常数,也就是最低的亮度分辨阈值。同样,通常把人眼主观上刚刚可辨别的色度差别所需的最小色差值称为人眼可分辨阈值。由 CSF 所得出的颜色敏感度表示为人眼可分辨阈值 C 的倒数:

$$S = 1/C \quad (4)$$

对于彩色 CSF,将可分辨阈值定义如下^[6]:

$$C = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\left(\frac{\Delta L}{L_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta M}{M_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta S}{S_1}\right)^2} \quad (5)$$

其中, $\Delta L = L_1 - L_2$, $\Delta M = M_1 - M_2$, $\Delta S = S_1 - S_2$ 。

式中: $L_1, M_1, S_1, L_2, M_2, S_2$ 分别为图片背景与目标条纹在 LMS 彩色空间的三个分量; $\Delta L, \Delta M, \Delta S$ 是目标与背景的三个分量差值。

Smith 等人提出了 LMS 颜色空间及其转换模型^[7],实现了从 CIE1931XYZ 标准颜色空间到 LMS 颜色空间的转换。

转换公式为:

$$\begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.15514 & 0.54312 & -0.03286 \\ -0.15514 & 0.45684 & 0.03286 \\ 0 & 0 & 0.00801 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (6)$$

2 实验及结果分析

分别运用主观测试方法和客观测试方法进行实验,并对比分析两种方法的测量数据。

2.1 主观测量

MRED 主观测量主要依靠人眼观察,并通过反馈控制系统调节相关变量。测量原理如图 4 所示。

观察者:由于测试者的内在和外在因素,两个观察者之间最大误差可达到 50%,确定人数为六人,则

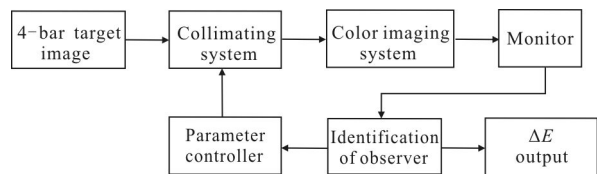


图 4 MRED 测量原理

Fig.4 Schematic diagram of MRED test

误差降低到 1.5%，满足实验要求。其中男女各三名，具备正常或矫正后正常的视力和颜色视觉并在颜色分辨方面受过训练。

实验条件：观察者采用双目观察，测试在微暗的环境下进行，监视器要保证较最高的分辨率(选用索尼 LMD-2450W 液晶监视器)，首先进行校正。规定观察距离为 0.5 m，观察视角没有特定要求。

实验过程：将被测系统置于测量平行光路中，并选择 10~50 lx 的亮度环境，使得四杆靶图案在监视器上清晰可见。试验中，观察者在距离显示器 0.5 m 距离坐定，保持同一位置，六位观察者依次进行观察实验。测试图案保持背景不变，调节前景色的亮度和色度信息，由观察者观察。当观察者眼睛刚好能分辨出四杆靶图案中的四个完整的目标条纹时，此时测试图案背景与前景的色差即为此观察者的主观最小可分辨色差。按照公式(7)：

$$MRED = \left(\frac{\Delta E_1 + \Delta E_2 + \Delta E_3 + \dots + \Delta E_6}{6} \right) \times \phi \quad (7)$$

计算 MRDE。ΔE_n 为第 n 个观察者所测得的最小可分辨色差。φ 为测试仪器校正正常数，在实验室条件下，φ=1。逐步更换四杆靶空间频率，分别测量当空间频率为 10、20、30、40、50、60 时的最小可分辨色差并记录数据。

以上过程进行两轮，最终结果求平均值。

2.2 客观测量

最小可分辨色差的客观测试方法是在主观测量方法的基础上，利用人眼视觉特性确定测量阈值的一种测试方法，数据处理过程如图 5 所示。

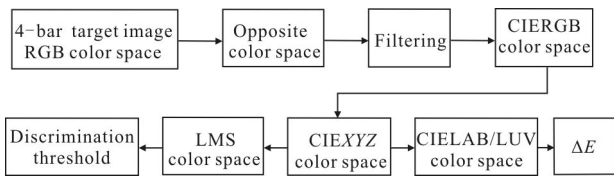


图 5 数据处理原理

Fig.5 Schematic diagram of data processing

其中，RGB 的对立色空间选为 YC_bC_r 色空间，Y 代表亮度，C_b、C_r 代表色差。视觉敏感函数在一定的亮度范围内存在人眼对比度可分辨阈值，由以上公式(1)~(4)可求出。将通过彩色成像系统的四杆靶测试图案从 RGB 色空间变换到 YC_bC_r 彩色空间，经三

通道傅里叶变换、CSF 处理、反傅里叶变换后反转换到 RGB 色空间，后经 CIEXYZ 色空间转换到 CIELAB 色空间并在此空间计算色差。同时，由 CIEXYZ 色空间经另一路径转换到 LMS 彩色空间，并在此空间根据公式(5)、(6)计算图片对比度值，当其值与人眼对比度阈值可匹配时，由 CIEXYZ 色空间转换到 CIELAB 色空间，并计算此时图像色差，即为最小可分辨色差。

CIELAB 空间色差公式：

$$\Delta E = \sqrt{(L_2 - L_1)^2 + (a_2 - a_1)^2 + (b_2 - b_1)^2} \quad (7)$$

其中，L₁，a₁，b₁，L₂，a₂，b₂ 分别为目标与背景颜色空间的各个分量。客观方法所测得数据见表 1 和表 2。

表 1 MRED 数据分析表(f=10 cycle·(°)⁻¹)

Tab.1 MRED analysis at f=10 cycle·(°)⁻¹

No.	Objective	Subjective
1	3.488	3.791
2	3.510	3.810
3	3.532	3.901
4	3.481	3.825
5	3.520	4.018
6	3.531	4.059
Mean	3.510	3.901
Standard deviation	σ _r =0.0212	σ _s =0.0706

表 2 不同空间频率下的 MRED 值

Tab.2 MRED of various spatial frequency

Special frequency/ cycle·(°) ⁻¹	Objective		Subjective	
	MERD ₀	Special frequency/ cycle·(°) ⁻¹	MERD _s	Special frequency/ cycle·(°) ⁻¹
10	3.510	10	3.901	
20	4.228	20	4.573	
30	5.101	30	5.307	
40	5.730	40	5.927	
50	6.702	50	6.839	
60	6.962	60	7.103	

表 1 为分别用主观、客观测量方法在四杆靶空间频率为 10 cycle·(°)⁻¹ 时测得的实验数据。分析表

明:客观测量方法标准差^[8]远远小于主观测量方法标准差,这说明此测量法的各个数据间的离散程度更小,即测试系统稳定性更高,从而置信度也较高。

主观测量方法测量误差主要来源于四杆靶图案的均匀性、准直系统的准直性、外界环境、监视器分辨率及其色彩还原能力和人眼观察所带来的误差。相对于主观测量,客观测量方法不仅消除了监视器所引入的误差还大大降低了人眼误差,从而实现高稳定性和高置信度。按照以上方法分析在空间频率为 20、30、40、50、60 的情况下,结论相同。

运用 MATLAB 将数据整合,并经过二次曲线拟合得到如图 6 所示两条拟合曲线,从两条拟合曲线中可以看出色差随空间频率的变化趋势,以及两种方法测量结果的对比。

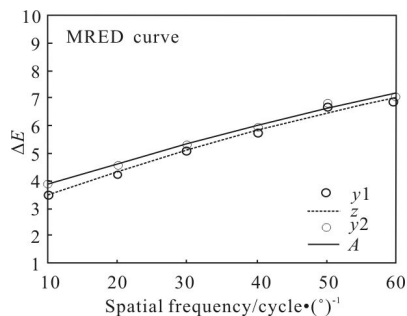


图 6 拟合曲线

Fig.6 Fitting curve

其中, y_1, y_2 分别为基于人眼敏感函数特性和基于人眼观察后所测得的实验数据。 A 为 y_2 的二次拟合曲线; z 为 y_1 的二次拟合曲线。由数据对比可以看出,两组数据总体趋势相同即最小可分辨色差随着空间频率的增大而增大。但从图中也可以看出两条拟合曲线存在一定程度的偏差。偏差主要由于在主观测量中人眼透过监视器观察四杆靶图像时,一方面受到监视器性能的影响,另一方面受到周围环境,观察者自身心理条件等诸多因素的影响。

3 结论

通过以上试验结果及数据分析表明,所提出的

基于人眼视觉敏感函数的客观测量方法所测得的结果与人眼观察结果相一致。四杆靶图案经 CSF 处理后,消除了人眼在观察图片时外界环境、监视器以及观察者自身不可避免的误差,所以将 CSF 作为色差客观测量的一个判据依据具有一定的可行性。这种方法为客观评价彩色空间分辨力这一难题提供了一个有效的途径,同时也为将来在图像处理方面的应用提出了一个新的方向。

参考文献:

- [1] Sreelekha G, Sathidevi P S. An HVS based adaptive quantization scheme for the compression of color images [J]. *Digital Signal Processing*, 2010, 20(4): 1129–1149.
- [2] Jiang Guibin, Lan Tian, Ni Guoqiang. Important parameters and testing methods of performance evaluation of thermal infrared imaging system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37: 470–473. (in Chinese)
- [3] Hu Nanzhong. Dynamic visual function analysis of human eyes [J]. *Journal of Shanghai University*, 1995, 1(2): 212–217. (in Chinese)
- [4] Yao Juncai, Shi Junsheng, Yang Weipung, et al. Research of contrast sensitivity characteristics and model of human vision system [J]. *Optical Technical*, 2009, 35 (3): 334–337. (in Chinese)
- [5] Huang Xiaoqiao. Study on the application of contrast sensitivity function to image perception [D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2007. (in Chinese)
- [6] Kil Joong Kim, Rafal Mantiuk. Measurements of achromatic and chromatic contrast sensitivity functions for an extended range of adaptation luminance. [2014–05–03]. <http://pages.bangor.ac.uk/~eesa0c/pdfs/kim13mcsf.pdf>.
- [7] Wang Hao, Zeng Chaoyang, Lan Yongjie. Stability of LMS color space on camouflage evaluation [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2007, 22(5): 10–12. (in Chinese)
- [8] Li Yingwen, Yang Changcheng, Hong Tao. Automatic MRTD test and acquisition performance evaluation of infrared thermal imager [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(S): 287–290. (in Chinese)