

同色异谱在二维模拟场景下对颜色恒常性的影响

马瑞青^{1*}, 廖宁放², 强彦¹, 篠森敬三³¹太原理工大学信息与计算机学院, 山西 太原 030024;²北京理工大学光电学院光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081;³高知工科大学信息学院/综合研究所视觉·感性合并重点研究室, 日本 香美 782-8502

摘要 受同色异谱影响,在测试光源下会有多种颜色对应参考光源下的某一颜色,这给颜色恒常性的形成带来了挑战。为了研究同色异谱在二维模拟场景下对颜色恒常性的影响,对 CRT 显示器上进行的非对称颜色匹配实验所获得的数据在同色异谱背景下进行了分析。结果显示:各测试光源下 Munsell 色卡上的颜色恒常性指数与其对应的同色异谱指数之间几乎不存在相关性;观察者的匹配色度值更接近基于传统完全颜色恒常性计算的理论色度值,而不是基于同色异谱体计算的质心色度值。结果表明,观察者在测试光源下的匹配结果受色卡对应的同色异谱程度的影响较小,观察者在匹配时会寻找更接近标准色卡的光谱反射比所对应的色度值,而不是同色异谱体的质心色度值。

关键词 视觉光学; 颜色恒常性; 同色异谱; 非对称颜色匹配; 二维模拟场景

中图分类号 O432

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1833001

Effect of Metamer Mismatching on Color Constancy in Two-Dimensional Simulated Scenes

Ma Ruiqing^{1*}, Liao Ningfang², Qiang Yan¹, Shinomori Keizo³¹ College of Information and Computer, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;² Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System of Ministry of Education, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;³ School of Information/Vision and Affective Science Integrated Laboratory, Research Institute, Kochi University of Technology, Kami 782-8502, Japan

Abstract Under the influence of metamer mismatching, one color under a standard illuminant can become various colors under a test illuminant, which challenges color constancy phenomenon. In order to investigate the effect of metamer mismatching on color constancy in two-dimensional simulated scenes, we analyzed color constancy data obtained in asymmetric color matching performed on a CRT monitor in the context of metamer mismatching. The results showed that color constancy indices of Munsell surfaces had almost no correlations with metamer mismatching indices under each chromatic illuminant. The matched points of observers were close to the theoretical points based on traditional perfect color constancy rather than metamer mismatch centroid chromaticities. The results indicate that observers' matching is not affected by metamer mismatching degrees of surfaces; in asymmetric color matching, observers tried to find a chromaticity point which was produced by a spectral reflectance close to that of the standard surface under a chromatic illuminant, rather than a centroid chromaticity point of metamer mismatch volume.

Key words visual optics; color constancy; metamer mismatching; asymmetric color matching; two-dimensional simulated scene

OCIS codes 330.1720; 330.1715; 330.5510; 330.1730

收稿日期: 2021-02-03; 修回日期: 2021-03-13; 录用日期: 2021-04-07

基金项目: 国家自然科学基金(61705011,61975012)、山西省应用基础研究计划青年基金项目(201901D211068)

通信作者: *mrq153101@163.com

1 引言

同色异谱不匹配是指两个具有不同光谱反射比的物体在第一种观察条件下呈现出相同的颜色,而在第二种观察条件下呈现出不同的颜色。同色异谱不匹配可以由光源或观察者的变化引起,称为光源同色异谱或观察者同色异谱。关于观察者同色异谱的研究包括显示设备的原色光谱对观察者同色异谱的影响^[1-2],同色异谱体积与数字成像系统通道数量之间的关系^[3]。颜色恒常性是指尽管光源的强度和光谱构成发生了变化,但我们仍然感知到物体表面的颜色没有发生变化。受光源同色异谱影响,在测试光源下会有多种颜色与参考光源下的某一颜色对应,视觉系统因此不明确测试光源下的哪个颜色与参考光源下的颜色相同,这给颜色恒常性的形成带来了一定的挑战。研究同色异谱对颜色恒常性的影响可以为 LED 光源下颜色恒常性的研究^[4]和颜色恒常性算法的研究^[5]提供参考依据。

非对称颜色匹配是一种比较常用的测量颜色恒常性的心理物理学方法^[6]。观察者通过观察参考光源下色块的颜色,调整测试光源下色块的颜色使之与参考光源下的色块看起来匹配。“匹配”被定义为:“调整测试色块的颜色,使得它与参考色块像从同一张纸上剪下来的”^[7-8]。在非对称颜色匹配实验中,一般假设参考光源下的色卡为光谱反射比已知的特定色卡(下文称为参考色卡),如果此色卡在测试光源下达到完全颜色恒常性,则对应的色度值应为参考色卡在测试光源下的色度值。通过比较观察者在测试光源下匹配得到的色度值与达到完全颜色恒常性时对应的理论色度值,可确定观察者在此色卡上获得的颜色恒常性的程度。但是受光源同色异

谱影响,在测试光源下完全颜色恒常性对应的色度值不仅仅是参考色卡的色度值,而是所有在参考光源下形成同色异谱的光谱反射比在测试光源下的色度值的集合。

Logvinenko 等^[9]在同色异谱的背景下分析了此前他们利用最小相异匹配法(类似非对称颜色匹配)测量得到的颜色恒常性数据^[10],实验基于真实的光源和色卡,结果发现观察者的匹配色度值更接近参考色卡在测试光源下的色度值,而不是同色异谱体的质心色度值。Roshan 等^[11]检测了各种模型对文献^[10]中的实验数据的预测情况,结果显示同色异谱体的质心色度值不能很好地预测实验结果。Witzel 等^[12]发现同色异谱程度越重,观察者在非对称颜色匹配实验中得到的匹配色度值在观察者之间和观察者内部的差异越大,即匹配色度值的不确定程度越高。

为了研究同色异谱在二维模拟场景下对颜色恒常性的影响,本文在同色异谱背景下分析了之前阴极射线管(CRT)显示器上进行的非对称颜色匹配实验所获得的正常色觉者的颜色恒常性数据^[13]。

2 研究方法

2.1 实验过程

本实验的具体过程参见文献^[13]。以 D65 为参考光源,测试光源为红、绿、蓝和黄色 4 种彩色光源,所有光源在 CIE1976 $u'v'$ 色度图中的位置如图 1(a)所示。D65 光源模拟场景和测试光源模拟场景分别显示在 19 英寸(1 英寸=2.54 cm)的 CRT 显示器左右两边。显示器的显卡为视觉实验专用显卡(ViSaGe,剑桥研究系统),提供红绿蓝各个通道 14 bit 的分辨率。显示器的颜色校正由 ViSaGe 自

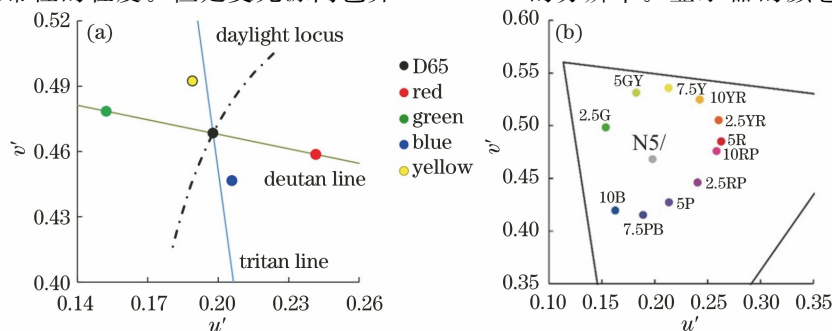


图 1 文献^[13]中非对称颜色匹配实验所用的色卡和光源在 CIE1976 $u'v'$ 色度图中的位置。

(a) D65 光源和 4 种彩色光源的位置;(b) D65 光源下 12 个 Munsell 色卡的位置

Fig. 1 Location of surfaces and illuminants in CIE1976 $u'v'$ chromaticity diagram used in asymmetric color matching experiments in the Ref. ^[13]. (a) Location of D65 and 4 chromatic illuminants; (b) location of 12 Munsell surfaces under D65 illuminant

带的软件系统控制色度仪完成。用黑色的纸板 (90 cm×60 cm) 垂直放置在显示器的中间, 将参考和测试场景分隔成左右两部分, 观察者左眼看左边参考场景, 右眼看右边测试场景。观察者的观察距离为 90 cm, 样品对观察者的视角均为 5°, 中间相隔 1° 视角的宽度, 如图 2 所示。

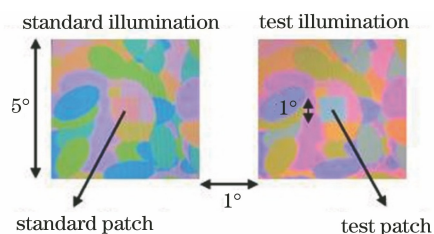


图 2 红色测试光源下的刺激物图^[13]

Fig. 2 Example of stimuli for red test illuminant condition^[13]

两个视场中心为待观察的参考样品和待调整颜色的测试样品, 12 个参考样品的光谱反射比取自 Munsell 哑光色卡 5R5/6、2.5YR5/6、10YR5/6、7.5Y5/6、5GY5/6、2.5G5/6、10B5/6、7.5PB5/6、5P5/6、2.5RP5/6、10RP5/6 和 N5/(反射比 $Y = 19.77\%$)。参考样品的色度值通过 Munsell 色卡的光谱反射比、D65 光源辐射光谱和 CIE1931 标准颜色匹配函数^[14]的乘积计算得到, 计算过程中光谱的取样间隔为 5 nm, 取样范围为 380~780 nm, 在 CIE1976 $u'v'$ 色度图中的位置如图 1(b) 所示。测试样品的初始色度值为 CIE1931(x, y) = (0.3333, 0.3333)。

12 个参考样品的色调基本均匀分布在整个 Munsell 色环上, 均匀地表示所有物体颜色色调, 4 种彩色光源的颜色分别对应红-绿和蓝-黄对立通

道, 以上刺激物的设计对于同色异谱的分析非常有用。

参考样品和测试样品背景的空间排列结构一致, 为 230 个随机取向的椭圆, 椭圆的光谱反射比取自 8 个与参考样品不同的 Munsell 色卡, 它们的色调大体均匀分布在 Munsell 色环上。参考样品背景中的椭圆颜色是通过 8 个 Munsell 色卡、D65 光源辐射光谱和 CIE 标准颜色匹配函数^[14]的乘积计算得到; 测试样品背景中的椭圆颜色是 8 个 Munsell 色卡在测试光源下计算得到的色度值。

实验在暗室中进行。在每次实验开始前, 观察者首先适应 D65 照明的白色屏幕 5 min, 亮度为 25 cd/m², 接着适应椭圆背景 5 min, 然后开始正式实验。在实验中, 观察者的任务是通过观察参考光源场景下的参考样品, 调整测试光源场景下测试样品的色度和亮度, 使得测试样品和参考样品“像从同一张纸上剪下来的”^[7-8]。观察者通过一个六按钮响应盒(CB6, 剑桥研究系统)来调整测试样品的颜色, 其中, 两个按钮控制红-绿颜色, 两个按钮控制蓝-黄颜色, 两个按钮控制亮度。针对 12 个参考样品, 在每种彩色光源条件下观察者总共需要调整 12 次测试样品, 对应 12 次实验。另外, 观察者还在 D65-D65 光源条件下完成了匹配。那么, 实验总共包括 12(色块)×5(光源) = 60 次实验, 每名观察者总共重复 6 次实验, 总共 5 名正常色觉观察者(3 名女性, 2 名男性; 年龄在 19~25 岁之间)参与了实验。表 1 为 5 名观察者匹配的 CIE1976 u' 和 v' 色度坐标平均值的标准误差。数据显示 u' 和 v' 上平均值的标准误差值均较小, 表明 5 名观察者的实验数据具有较好的一致性。

表 1 5 名观察者匹配的 CIE1976 u' 和 v' 色度坐标平均值的标准误差

Table 1 Standard error of mean value of CIE1976 u' and v' chromaticity coordinates matched by five observers

Munsell color	Illuminant							
	Red		Green		Blue		Yellow	
	u'	v'	u'	v'	u'	v'	u'	v'
5R	0.0028	0.0028	0.0081	0.0039	0.0047	0.0021	0.0014	0.0012
2.5YR	0.0021	0.0023	0.0069	0.0021	0.0033	0.0015	0.0026	0.0022
10YR	0.0050	0.0029	0.0065	0.0033	0.0029	0.0036	0.0028	0.0020
7.5Y	0.0041	0.0051	0.0031	0.0031	0.0041	0.0055	0.0012	0.0022
5GY	0.0042	0.0034	0.0031	0.0035	0.0020	0.0029	0.0020	0.0012
2.5G	0.0043	0.0089	0.0021	0.0013	0.0011	0.0030	0.0016	0.0024
10B	0.0028	0.0042	0.0018	0.0051	0.0011	0.0036	0.0030	0.0078
7.5PB	0.0040	0.0033	0.0038	0.0071	0.0014	0.0072	0.0016	0.0105
5P	0.0004	0.0107	0.0028	0.0066	0.0012	0.0110	0.0010	0.0058
2.5RP	0.0043	0.0040	0.0071	0.0045	0.0032	0.0014	0.0029	0.0039
10RP	0.0034	0.0015	0.0058	0.0015	0.0020	0.0026	0.0018	0.0033
N5/	0.0039	0.0025	0.0031	0.0026	0.0030	0.0021	0.0016	0.0038

2.2 同色异谱体的计算

假定对于某一特定的光谱反射比 $x_0(\lambda)$, 在 D65 光源下由 CIE1931 标准观察者定义的三刺激值为 $z_0 = \Phi[x_0(\lambda)] = (X_0, Y_0, Z_0)$ 。在此条件下, 所有与 z_0 相同三刺激值的光谱反射比所构成的集合 $\Phi^{-1}(z_0)$ 在第二种光源(彩色光源)下的三刺激值的集合称为同色异谱体。同色异谱体为一个凸包, 凸包的大小即为它的体积, 体积越大, 说明同色异谱现象越严重。

本文采用 Logvinenko 等^[15]提出的方法计算从 D65 光源变化到 4 种彩色光源时 12 个 Munsell 色卡对应的同色异谱体。每个 Munsell 色卡对应的同色异谱体就是与其在 D65 光源下形成同色异谱的光谱反射比在彩色光源下的三刺激值的集合。由于同色异谱体是一个凸包, Logvinenko 等^[15]的方法不是计算同色异谱体内所有的点, 而是通过最优光谱反射比计算边界上的点, 继而由边界来确定同色异谱体, 其中, 最优光谱反射比由 $m=5$ 的阶跃函数生成, 称为 5-转折点光谱反射比。该方法的具体计算过程为: 首先产生大量随机的 5-转折点光谱反射比, 然后得到大量的 D65 光源下的 XYZ 随机数据点, 最后选择那些使得 XYZ 三刺激值与 $z_0 = (X_0, Y_0, Z_0)$ 之间的差异最小的光谱反射比, 这些光谱反射比在 D65 光源下与 $x_0(\lambda)$ 构成同色异谱, 而在彩

色光源下的三刺激值位于同色异谱体的边界上。

本文针对每个 Munsell 色卡, 产生 1000 个与其在 D65 光源下形成同色异谱的 5-转折点光谱反射比, 它们对应的三刺激值 (X_r, Y_r, Z_r) 与 Munsell 色卡的三刺激值 (X_0, Y_0, Z_0) 满足下式。1000 个 5-转折点光谱反射比在彩色光源下的三刺激值形成同色异谱体的边界, 然后将其按照 $x = X/(X+Y+Z)$ 和 $y = Y/(X+Y+Z)$ 投影到 CIE1931 xy 色度图中, 形成色度不匹配区域^[15]。色度不匹配区域反映的是 D65 光源下的初始色度值由于光源变化引起的同色异谱不匹配而导致的色度分布情况。通过计算同色异谱体的质心并将其投影到 CIE1931 xy 色度图中可得到质心色度点^[15]。

$$\sqrt{(X_r - X_0)^2 + (Y_r - Y_0)^2 + (Z_r - Z_0)^2} < 1. \quad (1)$$

3 实验结果

3.1 色度不匹配区域与同色异谱指数

图 3 所示为从 D65 光源变化到 4 种彩色光源时 12 个 Munsell 色卡对应的色度不匹配区域, 其中, 圆圈表示 12 个 Munsell 色卡在彩色光源下的色度值, 闭合轮廓表示色度不匹配区域的边界。色度不匹配区域内的色度点即为在 D65 光源下与 Munsell 色卡具有相同色度值的光谱反射比在彩色

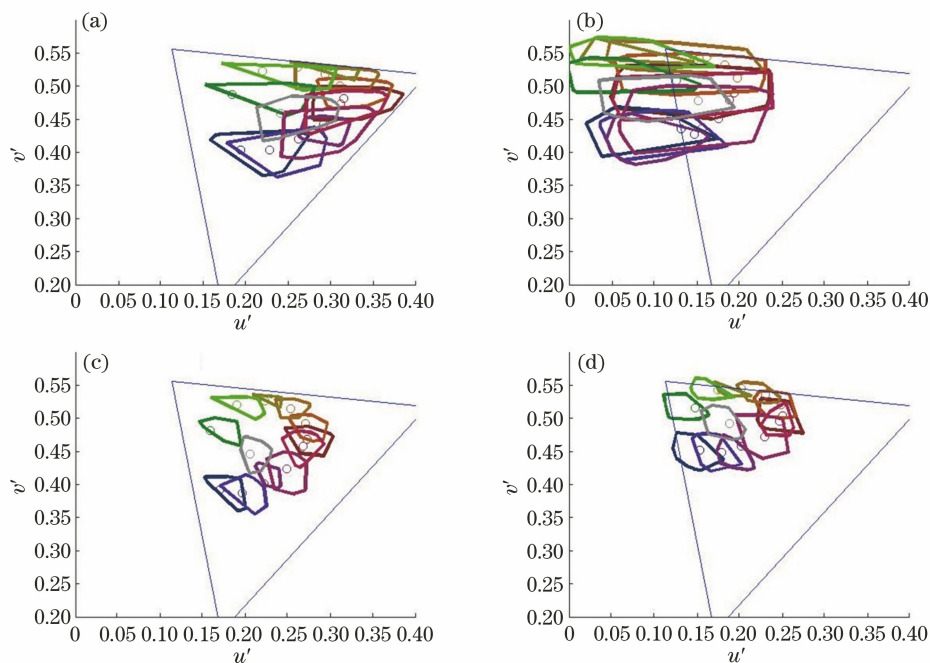


图 3 从 D65 光源变化到各彩色光源时的色度不匹配区域。(a)红色光源;(b)绿色光源;(c)蓝色光源;(d)黄色光源

Fig. 3 Chromaticity mismatch areas for a change from D65 to a chromatic illuminant. (a) Red illuminant; (b) green illuminant; (c) blue illuminant; (d) yellow illuminant

光源下的值。色度不匹配区域越大说明与 Munsell 色卡形成同色异谱的光谱反射比越多。从图 3 中可以看出,红色和绿色光源下 12 个色卡的色度不匹配区域大于蓝色和黄色光源。

为了定量地度量同色异谱程度,本文计算了同色异谱指数。同色异谱指数是指当观察条件发生变化时,原来匹配的两个样品之间的色差大小^[16]。在本文中,同色异谱指数被定义为在 CIE1976 $u'v'$ 色度图中,色度不匹配区域边界上的所有色度点与 Munsell 色卡在彩色光源下的色度点之间的色差(即欧氏距离)的均值。同色异谱指数越大表示同色异谱程度越严重。

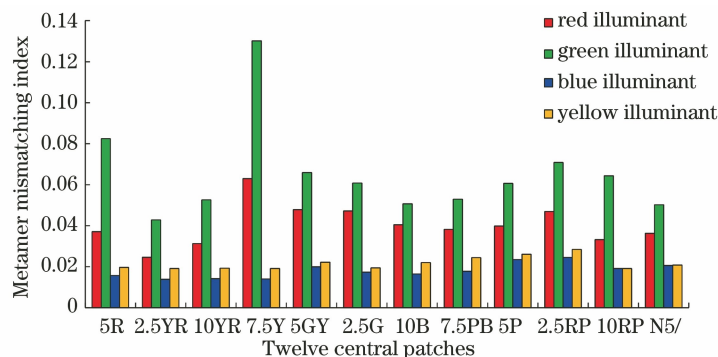


图 4 从 D65 光源变化到各彩色光源时 12 个 Munsell 色卡对应的同色异谱指数

Fig. 4 Metamer mismatching indices for 12 Munsell surfaces for the change from D65 to a chromatic illuminant

为了度量 12 个色卡对应的同色异谱程度与颜色恒常性表现之间的关系,本文还分析了各彩色光源下 12 个色卡对应的同色异谱指数与文献[13]中颜色恒常性指数之间的关系,结果表明,4 种彩色光源下二者之间几乎没有相关性,其中,红色光源下皮尔逊相关系数 $r=0.51$,绿色光源下 $r=0.23$,蓝色光源下 $r=0.08$,黄色光源下 $r=0.21$ 。图 5 所示为 12 个色卡上的颜色恒常性指数和同色异谱指数之间的比较情况。从图中也可以看出,各彩色光源下二者之间没有相关性,如蓝色和黄色光源下各色卡之间的同色异谱指数相差不大,但对应的颜色恒常性指数相差较大。

3.2 观察者的匹配色度值与理论色度值的比较

图 6 所示为观察者的匹配色度值与基于传统完全颜色恒常性计算的理论色度值(即 12 个 Munsell 色卡在彩色光源下的色度值)和基于同色异谱体计算的质心色度值的比较。图中正方形表示 5 个观察者和 6 次重复实验得到的平均匹配色度值,误差线为表 1 中观察者的均值的标准误差;空心圆圈和三角形分别表示 12 个 Munsell 色卡在 D65 光源和彩色光源下的色度值;实心圆表示 12 个 Munsell 色卡对应的同色异谱体质心色度点。如果观察者获得了

图 4 所示为从 D65 光源变化到 4 种彩色光源时 12 个 Munsell 色卡对应的同色异谱指数。从图中可以看出,红色和绿色光源下的同色异谱指数大于蓝色和黄色光源。彩色光源之间的同色异谱指数大小顺序为:绿色光源>红色光源>黄色光源>蓝色光源。

以光源(4 种彩色光源)为因素的单因素方差分析结果表明光源对同色异谱指数具有显著性的影响 [$F(3, 44)=34.637, P<0.001$]。通过 Bonferroni 校正(显著水平为 0.05)的多重比较结果得知,绿色光源下的同色异谱指数显著性地高于其他所有光源;红色光源下的指数显著性地高于蓝色和黄色光源;蓝色和黄色光源之间不具有显著性差异。

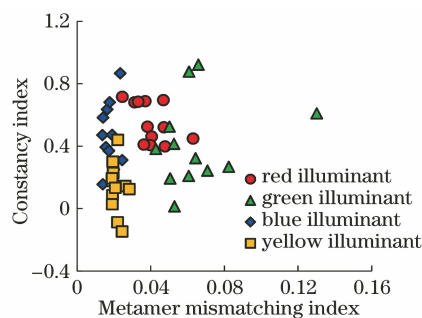


图 5 4 种彩色光源下 12 个 Munsell 色卡上的颜色恒常性指数与同色异谱指数之间的比较

Fig. 5 Comparison of color constancy indices with metamer mismatching indices of 12 Munsell surfaces under four chromatic illuminants

100% 的颜色恒常性,则匹配色度值将与 12 个色卡在彩色光源下的色度值相同,即正方形将与三角形重合;如果颜色恒常性不存在,观察者做的是色度匹配,则匹配色度值将与 12 个色卡在 D65 光源下的色度值相同,即正方形将与空心圆圈重合;如果观察者获得的匹配色度值是与 Munsell 色卡形成同色异谱的光谱反射比在彩色光源下的色度值,则正方形将与实心圆重合。

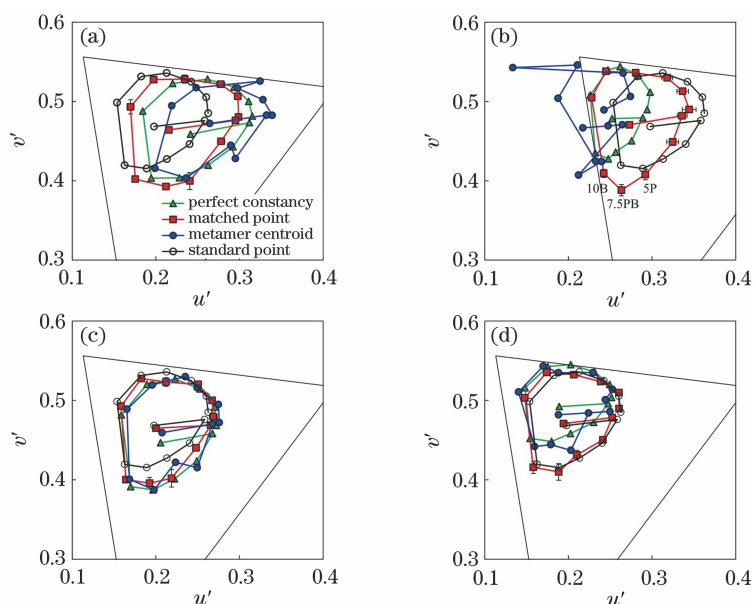


图 6 4 种彩色光源下观察者的匹配色度值与两种理论色度值在 CIE1976 $u'v'$ 色度图中的比较。

(a) 红色光源; (b) 绿色光源; (c) 蓝色光源; (d) 黄色光源

Fig. 6 Comparison of matching chromaticity value of observer under four chromatic illuminants and two theoretical chromaticity values in the CIE1976 $u'v'$ chromaticity diagram. (a) Red illuminant; (b) green illuminant; (c) blue illuminant; (d) yellow illuminant

由于在非对称颜色匹配实验中所获得的颜色恒常性通常并不会达到 100%^[6], 也就是说正方形一般不会与三角形完全重合。因此, 在图 6 中我们主要观察匹配色度值是靠近基于完全颜色恒常性计算的理论色度值还是同色异谱体质心色度值。从图中可以看出, 与质心色度值相比, 红色和绿色光源下观察者的匹配色度值更靠近基于完全颜色恒常性计算的理论色度值。在绿色光源下, 与完全颜色恒常性理论色度值相比, 图中右半部分色卡对应的匹配色度值又更靠近色卡在 D65 光源下的值, 说明这些色卡上的颜色恒常性程度不高。在蓝色和黄色光源下, 质心色度值与完全颜色恒常性理论色度值非常接近。在蓝色光源下, 匹配色度值向完全颜色恒常性理论色度值靠近, 对应一定程度的颜色恒常性; 在黄色光源下, 匹配色度值向色卡在 D65 光源下的色度值靠近, 对应较差的颜色恒常性。

此外, 图中还可注意到, 绿色光源下观察者的匹配色度值在三个色卡上 (10B、7.5PB、5P) 表现出与标准色度值 (D65 光源下) 以及两种理论色度值一定程度的偏差。这种偏差在以往研究^[17-18] 中也被发现, 原因在于这三个色卡对应的 S 锥体刺激量最大, Romero 等^[19] 的研究表明随着 S 锥体刺激量的增加, 与 S 锥体有关的颜色辨别阈值也增大。

图 7 具体显示了匹配色度值与两种理论色度值之间的欧氏距离。图 7 所示与图 6 中观察到的结果一致。在红色和绿色光源下, 基本所有色卡上匹配色度值与基于完全颜色恒常性计算的理论色度值之间的欧氏距离小于其与质心色度值之间的欧氏距离, 说明观察者的匹配值更接近于完全颜色恒常性对应的色度值。在蓝色和黄色光源下, 色卡上的匹配色度值与两种理论色度值之间的欧氏距离均较小。

4 分析与讨论

本文中所涉及的非对称颜色匹配实验是基于显示器上的模拟场景进行的, 研究表明, 基于完全颜色恒常性计算的理论色度值比同色异谱体质心色度值能更好地预测观察者的匹配结果。这个结果与 Logvinenko 等在文献[9]中分析的结果一致。文献[9]中的实验数据是 Logvinenko 等^[10] 通过最小相异匹配方法获得, 实验中的刺激物采用真实的 Munsell 色卡和真实的光源。在真实场景下, 观察者能保持颜色恒常性主要是由于色卡本身的材质不会随着光源的变化而变化, 虽然存在很多与参考色卡同色异谱的色卡, 但它们的材质并不相同, 即它们是不同的物体, 在光源发生变化时观察者可能是靠着色卡材质的不变来维持色卡的颜色恒常性。

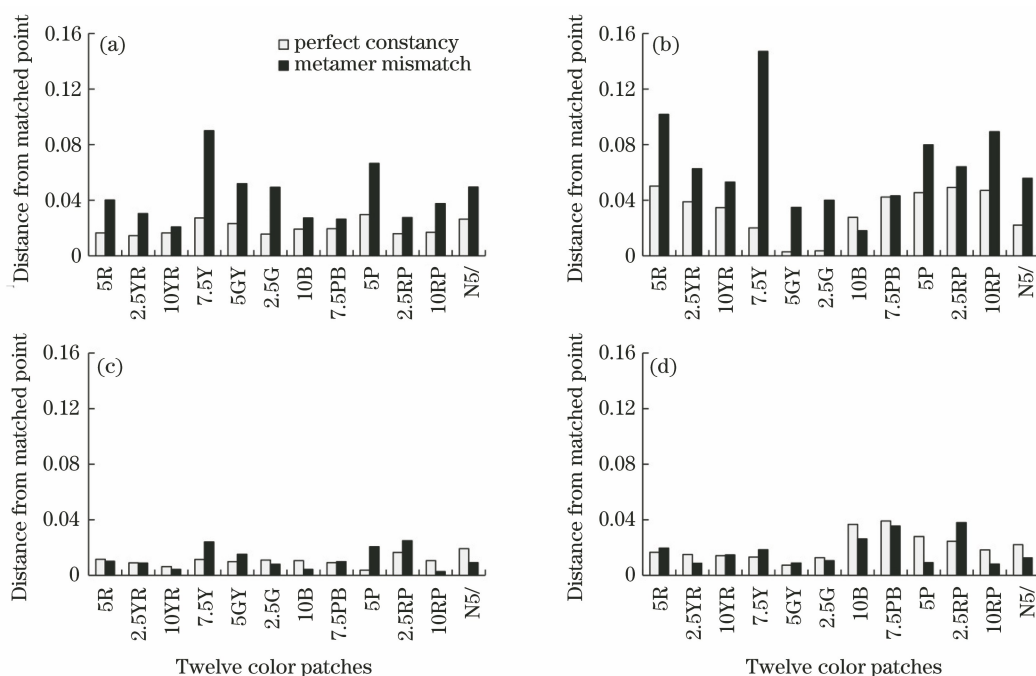


图 7 4 种彩色光源下 12 个 Munsell 色卡上匹配色度值与基于完全颜色恒常性的理论色度值和不匹配质心色度值之间的欧氏距离。(a)红色光源;(b)绿色光源;(c)蓝色光源;(d)黄色光源

Fig. 7 Euclidean distance between matched chromaticity points on 12 Munsell surfaces under four chromatic illuminants and theoretical chromaticity points based on complete color constancy and mismatch centroid chromaticity points.
(a) Red illuminant; (b) green illuminant; (c) blue illuminant; (d) yellow illuminant

但在显示器的模拟场景中,最终的色卡颜色都是通过 RGB 值显示出来,这种情况下观察者的匹配值更接近完全颜色恒常性的理论色度值而不是同色异谱体质心色度值的原因可能如下:观察者在做颜色匹配时,首先识别 D65 光源照射下参考色卡的颜色,然后在测试光源下寻找这种颜色的色卡,此时虽然有多光谱反射比在 D65 光源下可以产生与参考色卡同样的颜色,但是这些光谱反射比在测试光源下的颜色分布范围较广,而只有与参考色卡在测试光源下的颜色相近才是观察者认可的匹配颜色。例如,假定一个在 D65 光源照射下的 Munsell 色卡 5Y5/6 的三刺激值为 (X_0, Y_0, Z_0) ,存在很多光谱反射比在 D65 光源下的三刺激值也为 (X_0, Y_0, Z_0) 。在 D65 光源下,观察者识别到参考色卡的颜色为黄色,那么在彩色光源下,观察者将会寻找对应光谱反射比在彩色光源下看起来也是黄色的色卡,如果找到的色卡是 5Y5/6,那么就达到了完全颜色恒常性。当观察者在测试光源下寻找与参考色卡同样颜色的色卡时,周围背景与色卡形成的彩色对比度也对其产生了一定的影响。

此外,本文中的分析结果显示各彩色光源下色卡的颜色恒常性表现与其对应的同色异谱程度之间

几乎没有相关性,这个结果与 Witzel 等^[12]的研究结果不同。Witzel 等^[12]的研究表明色卡的颜色恒常性与其同色异谱程度紧密相关,同色异谱程度越严重,色卡的颜色恒常性表现越差。导致这种不同的原因可能是本文中涉及的实验采用的刺激物背景是由尺寸随机和位置随机的椭圆组成,而文献^[12]中的刺激物是真实感图像,本文中观察者的匹配结果可能受到了周围背景与色卡形成的彩色对比度的较大影响,而文献^[12]中观察者能从场景中得到更多的用于评估光源的线索。此外,本文中 4 种彩色光源并不位于普朗克日光轨迹上,属于非典型光源,而文献^[12]中采用的是典型的日光光源。这些因素均可能导致两个研究结果的差异。

5 结 论

颜色恒常性主要涉及的是光源变化时人类视觉系统对物体颜色的稳定识别,而光源变化又经常会引起同色异谱不匹配,作为伴随着颜色恒常性发生的现象,同色异谱一定会对颜色恒常性产生影响,且这种影响是复杂的。本文在同色异谱背景下分析了非对称颜色匹配实验中的颜色恒常性数据,分析结果表明在二维模拟场景下观察者的匹配结果受色卡

与周围背景之间的彩色对比度的影响较大,色卡对应的同色异谱程度的影响较小;此外,色卡对应的同色异体的质心不能很好地预测观察者的匹配结果。总体来说,本文的研究结果说明在二维模拟场景下同色异谱对颜色恒常性的影响较小,对颜色恒常性有较大影响的主要还是场景中的彩色信息分布。在后续的研究中,我们还将继续开展同色异谱在其他情况下对颜色恒常性的影响相关工作。

参 考 文 献

- [1] Huang M, He R L, Guo C L, et al. Discrimination of observer metamerism based on different display devices [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39 (1): 0133001.
黄敏,何瑞丽,郭春丽,等.基于不同显示设备的观察者同色异谱差异研究[J].*光学学报*,2019,39(1):0133001.
- [2] Hu Y, Wei M C, Luo M R. Observer metamerism to display white point using different primary sets[J]. *Optics Express*, 2020, 28(14): 20305-20323.
- [3] Wang M M. Study on high-fidelity color image acquisition method based on multi-channel imaging system [D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2020: 20-42.
王萌萌.基于多通道成像系统的颜色高保真图像获取方法研究[D].杭州:杭州电子科技大学,2020:20-42.
- [4] Ma R Q, Liao N F. Influence of illuminant chromaticity on color constancy under RGB-LED light source [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39 (9): 0933001.
马瑞青,廖宁放.RGB-LED光源下光源色度对颜色恒常性的影响[J].*光学学报*,2019,39(9):0933001.
- [5] Li X Y, Yang H J, Yan Z, et al. Image background blurring algorithm based on color constancy [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57 (8): 081001.
李晓颖,杨恒杰,闫铮,等.基于颜色恒常性的图像背景虚化算法[J].*激光与光电子学进展*,2020,57(8):081001.
- [6] Foster D H. Color constancy[J]. *Vision Research*, 2011, 51(7): 674-700.
- [7] Arend L E, Reeves A. Simultaneous color constancy [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1986, 3(10): 1743-1751.
- [8] Arend L E, Reeves A, Schirillo J, et al. Simultaneous color constancy: paper with diverse Munsell values[J]. *Journal of the Optical Society of America A, Optics and Image Science*, 1991, 8(4): 661-672.
- [9] Logvinenko A D, Funt B, Mirzaei H, et al. Rethinking colour constancy [J]. *PLoS One*, 2015, 10(9): e0135029.
- [10] Logvinenko A D, Tokunaga R. Colour constancy as measured by least dissimilar matching[J]. *Seeing and Perceiving*, 2011, 24(5): 407-452.
- [11] Roshan E, Funt B. Computational color prediction versus least-dissimilar matching [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2018, 35(4): B292-B298.
- [12] Witzel C, van Alphen C, Godau C, et al. Uncertainty of sensory signal explains variation of color constancy [J]. *Journal of Vision*, 2016, 16 (15): 8.
- [13] Ma R Q, Kawamoto K I, Shinomori K. Color constancy of color-deficient observers under illuminations defined by individual color discrimination ellipsoids [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2016, 33(3): A283-A299.
- [14] Wyszecki G, Stiles W S. Color science: concepts and methods, quantitative data and formulae [M]. 2nd ed. New York: John Wiley and Sons, 1982.
- [15] Logvinenko A D, Funt B, Godau C. Metamer mismatching [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2014, 23(1): 34-43.
- [16] Xu H S. Color information engineering [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2005.
徐海松.颜色信息工程[M].杭州:浙江大学出版社,2005.
- [17] Kuriki I, Uchikawa K. Limitations of surface-color and apparent-color constancy [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1996, 13(8): 1622-1636.
- [18] Nieves J L, García-Beltrán A, Romero J. Response of the human visual system to variable illuminant conditions: an analysis of opponent-colour mechanisms in colour constancy [J]. *Ophthalmic & Physiological Optics*, 2000, 20(1): 44-58.
- [19] Romero J, García J A, del Barco L J, et al. Evaluation of color-discrimination ellipsoids in two-color spaces [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1993, 10(5): 827-837.