

双目色调消除现象的实验研究

代梦诗^{1,2}, 黄小乔^{1,2*}, 陈载清^{2,3}, 邵永航^{1,2}, 石俊生^{1,2}¹云南师范大学物理与电子信息学院, 云南 昆明 650504;²云南省光电信息技术重点实验室, 云南 昆明 650504;³云南师范大学信息学院, 云南 昆明 650504

摘要 立体显示、虚拟现实及头戴设备的应用研究需要对人眼视觉双目特性做更深入的研究。阈值测量是研究视觉感知特性的方法之一,人的左右眼分别观看不同的颜色,且双眼观看的颜色色差不超过双目颜色融合的阈值时,可能会感知到灰色,也就是发生了双目色调消除现象。为了研究这种特殊现象,本文设计了视觉心理物理学实验,在 CIELAB 颜色空间中研究双目融合范围内能够感知到灰色现象的对立颜色方向和色差阈值,并将实验结果分别在 LMS、MacLeod-Boynton、DKL 等颜色空间中表示,为进一步研究人眼特性及双目颜色机理提供实验数据。

关键词 视觉,颜色与视觉光学;颜色感知;双目视觉;色调消除;CIELAB 颜色空间

中图分类号 O432.3

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS222149

1 引言

随着人工智能(AI)的发展,一直受到科学家重视的脑科学研究成为当今的研究热点^[1],与此同时,人类对一些人眼视觉系统的视觉现象还无法解释,立体显示及虚拟现实(VR)的应用激发了对双目立体视觉系统的研究热度。其中有一种现象称为色调消除(hue cancellation)^[2],在双目视觉中也会发生。当人的左右眼分别观看不同颜色,且双目观看颜色色差较小时,只会感知到一种颜色,色差接近双目融合阈值时,会感知到这种颜色略微带有光泽感,都属于双目颜色融合现象。随着双目色差不断增大且超过双目融合阈值时,会感觉到两种颜色交替出现,这就是双目颜色竞争现象。其中在双目颜色融合范围内有一种特殊的现象发生,观察者会感知到灰色,即所谓的双目色调消除现象。最早关于这种现象的描述是在 1951 年, Hurvich 等^[3]探究了双眼分别观察纯绿光谱色和纯红光谱色的双目融合,发现结果要么是红色,要么是绿色,且在适当的混合比例下,产生的感觉是中性,无色调的,绝对不是黄色的感觉。并提出“这种中央‘消除’发生的机制构成了一个真正的问题”。1951 年, Gille 等^[4]在双目融合中研究了红色和绿色的色调消除,观察者感知为黄色、橙色或黄绿色,并未强调中性灰色的感知出现。上述针对双目融合中的色调消除现象的描述互相矛盾,且只局限于光谱色中的红色和绿色,并未探讨其他

颜色组合是否也能发生色调消除现象。

显示器便于视觉实验中颜色的精准调控,视觉双目实验在双目融合中做了大量研究,在定量测量阈值方面,2011 年, Jung 等^[5]在 CIE1976 色度图定量测量了 8 个色调的双目颜色融合极限阈值,并将阈值结果拟合成 8 个椭圆。2012 年, Malkoc 等^[6]利用显示器在 MacLeod-Boynton 颜色空间测定了能够感知到光泽感的最小双目色差。2019 年, Chen 等^[7-8]测量了不同视差下的颜色融合阈值,结果表明,当视差从 -120' 增加到 +120' 时,颜色融合阈值相应增加,也证明了双眼视差会影响人的颜色感知。其中,对立的颜色具有最显著的竞争倾向,因为这些刺激在色调上有最大的差异, Chen 等^[9]于 2021 年采用 CIELAB 色空间中的等亮度颜色平面,定量测量了 4 个对立方向上的双目颜色融合阈值,发现红绿方向的融合阈值大于黄蓝方向的。Wang 等^[10]于 2020 年,通过开发 3 个不同的神经网络模型,在计算模型中实现了双目竞争和融合这两个概念机制的表达。目前,大多数的双目视觉研究都聚焦于如何从客观上将双目融合与竞争感知区分,有关双目融合中的色调消除现象还没有出现详细报道。

综上,本文目的是研究双目色调消除现象,实验是在显示器上设计完成的。由于研究视觉机理与色空间的选择有很大关系,首先实验在均匀感知色空间 CIELAB 进行,然后将实验结果在与人类生理相关的其他色空间中展开讨论。旨在探索:1)左右眼分别观

收稿日期: 2022-12-16; 修回日期: 2023-02-16; 录用日期: 2023-02-26; 网络首发日期: 2023-03-09

基金项目: 国家自然科学基金(61875171, 62165019)

通信作者: *hxq-km@foxmail.com

看什么颜色时能够使观察者感知到灰色,从而产生色调消除现象;2)在能够产生双目色调消除现象的颜色方向上,双目色差又应该保持在什么范围内;3)将实验得到的阈值结果分别在 CIELAB 颜色空间,以及与生理相关的 LMS、Macleod-Boynton 和 DKL 颜色空间表示,为进一步探索视网膜视锥细胞输入到视皮层输出的人眼视觉机制提供实验数据。

2 视觉实验颜色空间

视觉心理物理学实验首先需要选择一个合适的色空间来描述颜色,目前研究视觉机理的相关色空间通常有 CIELAB、LMS、Macleod-Boynton、DKL 颜色空间。其中,第一个颜色空间 CIELAB 是国际照明委员会(CIE)于 1976 年推出的一个均匀颜色空间^[11],理论上包括了人眼所能够感知到的任何颜色。所谓均匀是当数值均匀变化时,人的感知也是均匀变化的,也就是用数字化的方法等间距地描述人的视觉感知变化量,另外,使用 CIELAB 空间便于准确控制显示色度,因此适用于双目颜色视觉实验。

第二个视觉实验颜色空间是 LMS 色空间,也称作“锥激励空间”。在 Young-Helmholtz 三色理论中^[12-13],认为可见的所有色彩均可由红、绿、蓝(RGB)三原色组合而成,这与视网膜上存在三种感光锥细胞是相吻合的,并且测出三种锥细胞的光谱吸收峰分别在 564~580 nm、534~545 nm 和 420~440 nm 范围。现在普遍认为视锥细胞应被称为长波、中波和短波敏感(L-、M-和 S-),而不是红色、绿色和蓝色,因为颜色描述既不对应于视锥细胞灵敏度峰值的波长,也不对应于单个视锥细胞激发引起的颜色感觉。尽管人眼的晶状体和黄斑色素的吸收会导致个体差异,但吸收曲线很好地对应于正常视力的人^[14]。近 30 年来,人类视锥光谱灵敏度的测量变得越来越精确,可以明确地用 L-、M-和 S-锥体坐标来表示颜色空间,并且将数据非常直观地连接到三种视锥的响应机理,这种表示方法就是 LMS 空间^[15]。在进行色适应实验,估计样本在不同光源下的外观时,通常使用 LMS 色空间^[16]。当一个或多个锥体有缺陷时,也可用于色盲的研究。其中,CIEXYZ 到 LMS 色空间转换的常用矩阵^[17]为

$$\begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.3897 & 0.6890 & -0.0787 \\ -0.2298 & 1.1834 & 0.0464 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (1)$$

第三个颜色空间是 Macleod-Boynton 色空间。当假设人眼视网膜上的 L-锥和 M-锥细胞数量比为 2:1 时,可用二者的视锥总和拟合出明视觉亮度效率函数曲线^[18],因此可以认为亮度只与 L-和 M-锥相关,与 S-锥无关,这与为了描述等亮度刺激下的视锥激发而提出的 Macleod-Boynton 空间是相吻合的^[19]。具有相等亮度的颜色刺激被置于一个平面中表示,该平面是平行于 S-视锥轴的一个 LMS 空间的切面,称为

MacLeod-Boynton 色品图,如图 1 所示,舌形曲线上表达了各种单色光的最大饱和度,自然界中的各种颜色都位于舌形闭合曲线内部,实现了颜色在生理颜色空间的标定,能够简化对两个刺激叠加所得结果的计算。

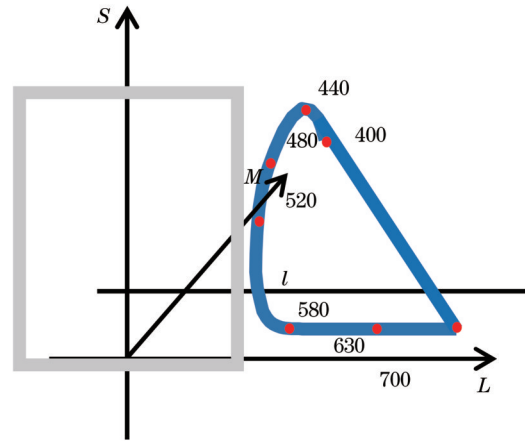


图 1 MacLeod-Boynton 色品图

Fig. 1 MacLeod-Boynton chromaticity diagram

MacLeod-Boynton 色品图是一个基于视锥基础响应的色品图,是在 LMS 视锥敏感函数的基础上推导出来的。根据 Stockman 等^[14]所测的人眼的 L-、M-、S-锥敏感度,对于 2° 视野大小的色度坐标采用合适的比例因子,色品坐标 l 、 m 、 s 比值的定义如下:

$$v(\lambda) = 0.689903 \bar{l}(\lambda) + 0.348322 \bar{m}(\lambda), \quad (2)$$

$$\begin{cases} l = \frac{0.689903 \bar{l}(\lambda)}{v(\lambda)} \\ m = \frac{0.348322 \bar{m}(\lambda)}{v(\lambda)} \\ s = \frac{0.0371597 \bar{s}(\lambda)}{v(\lambda)} \end{cases}, \quad (3)$$

式中: $\bar{l}(\lambda)$ 、 $\bar{m}(\lambda)$ 、 $\bar{s}(\lambda)$ 是适当归一化的视锥激发; $v(\lambda)$ 是光谱光效率函数。

最后是描述对立机制的 DKL 颜色空间。在 Hering^[20]的对立色理论中,早期的尝试是为了解释一些颜色外观的现象,他认为任何色调都可以用红色、绿色、黄色或蓝色来描述。红色和绿色是相反的色调,因为它们不能被单一的颜色刺激同时激发出来,也就是对于任何色调,都不会同时用红色和绿色来描述它;蓝色和黄色也是如此。这一观察使 Hering 假设存在两个分别编码红-绿、黄-蓝感觉的对立通道,对立的感受对是排斥的,因为它们不能同时被编码。对立的颜色现象表明,可能在三种视锥机制输出之后,存在颜色处理的感受后阶段,在测量了猕猴外侧膝状体核(LGN)细胞对颜色的反应后,认为这种颜色处理的感受后阶段应该是基于 LGN 神经元对三种视锥输出的拮抗机

制^[21],其中 LGN 的大细胞(magnocellular cell)、小细胞(parvocellular cell)、粒状细胞(koniocellular cell)分别对 $L+M$ 、 $L-M$ 、 $S-(L+M)$ 信息敏感, Derrington、Krauskopf、Lennie 三人^[22]以这三种机制为主轴定义了一个描述对立机制的颜色空间,以他们名字的首字母命名为 DKL 空间。

如图 2 所示,在 DKL 色空间,坐标分别代表三种视锥对立的颜色辨别机制 $L+M(0^\circ\sim 90^\circ)$ 、 $L-M(0^\circ\sim 180^\circ)$ 和 $S-(L+M)(90^\circ\sim 270^\circ)$,其中,垂直轴是消彩色的, $L-M$ 轴和 $S-(L+M)$ 轴构成了 DKL 空间的颜色等亮度平面。平面内,色彩到白点的距离代表颜色的饱和度,沿 $L-M$ 轴方向改变颜色,在 L -与 M -视锥中能产生恒定兴奋,取 L -视锥兴奋增加方向为 0° ,减少方向为 180° ,颜色从偏红变为偏蓝绿;沿着 $S-(L+M)$ 轴方向改变颜色,只有 S -锥的兴奋变化, L -和 M -锥的总兴奋不变,取 S -视锥兴奋增加方向为 90° ,减少方向为 270° ,颜色从偏紫变为偏黄绿。DKL 色空间中彩色通道坐标轴上的颜色被称为主轴颜色(cardinal color)。DKL 颜色空间的核心思想是 LGN 对 L -、 M -、 S -锥的某些线性加权有固定反应^[16]。使用 DKL 空间描述的颜色具有清晰的生理特性,并且能够准确地指明 LGN 阶段的神经信号,因此它能够更多地被应用于颜色认知的研究中,便于结合视锥的激活情况进行分析。

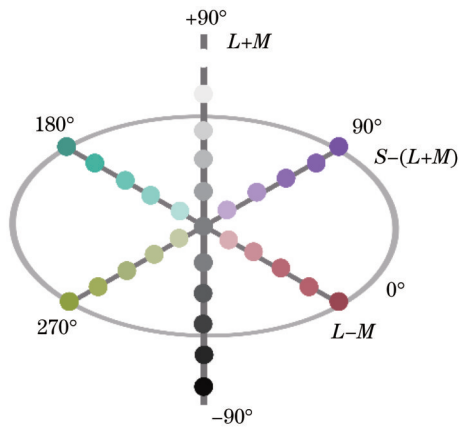


图 2 DKL 颜色空间
Fig. 2 DKL color space

3 实验

3.1 方法

实验采用调整法来判断能够发生双目色调消除现象的对立颜色方向和双目色调消除阈值的初值,采用极限法来精确双目色调消除阈值。具体如下:

1) 调整法。观察者需要调整刺激的颜色值,直到刺激恰好能够感知到灰色;

2) 极限法,也称最小变量法。刺激量呈递减或递增的方式出现,观察者逐一确认是否感觉到灰色刺激,最终以两种方式得到的阈值取均值来降低误差。由于

阈值的出现来源于信息的“转折点”是否能感知到,所以先由调整法得到一个“转折点”的初值,给极限法做参考。

3.2 实验设置和观察条件

实验的颜色刺激是由具有 2D/3D 切换功能的三星 3D 显示器(S23A950D)提供的,需要观察者佩戴特定的 3D 开关眼镜来实现左右眼分时观看不同的颜色刺激,从而实现双目视觉,如图 3(a)所示,通过一种同步信号来控制左右镜片的交替和显示屏上左右画面的交替保持一致,使左眼一直看左图,右眼一直看右图,从而实现左右眼的隔离。显示器的屏幕尺寸为 $511.8\text{ mm} \times 288.3\text{ mm}$,分辨率为 $1920\text{ pixel} \times 1080\text{ pixel}$,帧率为 120 Hz 。显示器连接到计算机(Intel CoreTM2 Duo CPU, 3 GHz 处理速度, 4 GB 内存, Microsoft Windows 7),显卡为 NVIDIA Ge Force GTX 1080,显示数字化位数为 8 位。为了能够准确地控制刺激颜色,使用 PR-715 光谱辐射计校准光谱发射函数^[23],通过查找表获得数字输入的亮度,还对 RGB 值和 CIEXYZ 值之间的转换考虑到了黑点的影响^[24]。实验在等亮度情况下进行,设置显示器的亮度参数为 80 cd/m^2 ,对比度为 100,RGB 通道的亮度参数为 100 cd/m^2 ,对比度分别为 100、54、60。测量得到该参数显示屏黑点的 CIEXYZ 为 $0.2474/0.2409/0.4669$,白点的 CIE1931 色度坐标 (x, y) 为 $(0.274, 0.279)$,红色、绿色和蓝色通道的色度坐标 (x, y) 分别为 $(0.679, 0.346)$ 、 $(0.333, 0.647)$ 和 $(0.152, 0.309)$ 。

为了最大限度地提高实验数据的准确性,排除外界光线的影响,选择在暗室中进行实验。为避免观看距离对实验结果造成影响,根据国际电信联盟标准规范^[25],要求观察者坐在距离屏幕约 860 mm 的合适距离,如图 3(b)所示。

3.3 观察者

选出 5 名年龄在 22 岁至 25 岁之间的大学生参加实验。他们都通过了视力和色觉测试,均表现为视力正常、色觉正常、立体视觉正常。实验符合赫尔辛基宣言规定的标准^[26]。他们阅读并签署了知情同意书,可以随时退出实验。

3.4 刺激

如图 4 所示,在 CIELAB 色空间选择的颜色刺激,其他色空间都可以通过 CIELAB 色空间变换得到^[27-28]。其中, L^* 代表黑/白, a^* 代表红/绿, b^* 代表黄/蓝。在实验固定亮度 L^* 为 30 的平面上选择所有刺激颜色,如图 4(b)所示,以 $L^*a^*b^*(30, 0, 0)$ 为刺激点的中心、 22.5° 为间隔,选择 8 个对立颜色方向,每个方向上等间隔选择刺激样本颜色对。以颜色对 a^* (红-绿) 方向为例,若左眼观看的是 a^* 为 2 的红色刺激,右眼则观看 a^* 为 -2 以及周围以 0.1 步长在 4 个方向改变的共 33 个绿色刺激,这 4 个方向分别是以 -2 为原点的

0°、45°、90°和 135°方向。

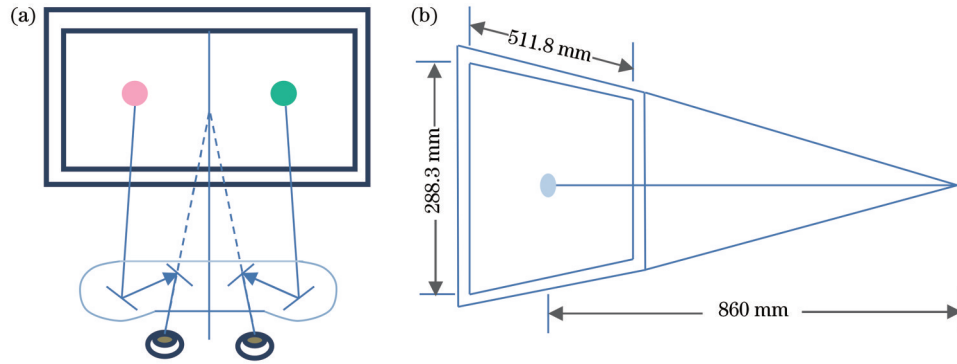


图 3 实验设备和观察距离。(a) 3D 显示器;(b)观察距离

Fig. 3 Experimental equipment and observation distance. (a) 3D display; (b) observation distance

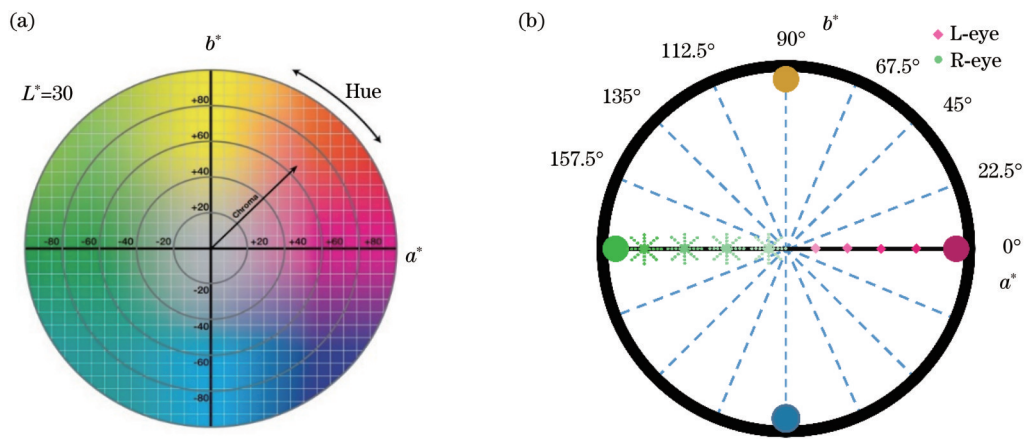


图 4 颜色刺激对的选择。(a)等亮度平面($L^* = 30$);(b) a^* (红-绿)方向上的采样点

Fig. 4 Selection of color stimulation pairs. (a) Equal luminance plane ($L^* = 30$); (b) sampling points of a^* (R-G) direction

如图 5 所示,颜色刺激由黑色背景上的一对实心圆环构成,为了符合人眼视网膜中央凹的大小,中心彩色圆斑的大小为 2° ,中心彩色圆斑周围的圆环为 $L^*a^*b^*(30, 0, 0)$ 的灰色,大小为 4° ,这与色调消除现象发生时,观察者感知到的灰色一致,左上角的矩形框用来与观察者交互,整个实验过程中一直是双目可见的,用来询问观察者的感知。由于 Chen 等^[8]发现视差能够影响双目颜色融合阈值,因此设计了灰色矩形框作为零视差参考平面,并将圆环刺激的视差设置为零,以避免深度感知对实验结果造成影响。

3.5 步骤

按照图 4(b)确定的消色调实验刺激数目和“极限法”实验方案,需要每位观察者耗费大量时间进行数量巨大的实验。为了避免在无法发生色调消除现象的颜色方向上进行无效的阈值测量,实验首先确定消色调方向,然后进行消色调阈值测量,具体步骤如下:

1) 确定双目色调消除方向

采用调整法来判断是否在 8 个颜色方向上都能够感知到双目色调消除现象。在每个颜色方向上固定观察者观看的左眼颜色刺激,观察者调整右眼刺激直到

能够感知到灰色为止。

2) 确定双目色调消除阈值的初值

采用调整法来确定双目色调消除阈值的初值。根据步骤 1) 中得到的结果,在能够发生双目色调消除现象的颜色方向上,固定观察者左眼观看的颜色刺激,调整右眼刺激,若能够感知到灰色,则增大左眼观看的颜色刺激并固定,调整右眼刺激,直到观察者无论如何调整右眼刺激,都无法感知到灰色为止,记录数据,并重复 10 次,取平均值,当作双目色调消除阈值的初值。

3) 确定双目色调消除阈值精确值

采用极限法来确定双目色调消除阈值的精确值。根据步骤 2) 中得到的初值,选取初值前后的颜色刺激量呈“递增”和“递减”的两个序列交替变化出现,变化方式按照“递增-递减-递减-递增”重复,且每次变化的数量是相等的。起点随机选择,观察者逐一确认是否感觉到刺激,最终两种方式得到的阈值取均值来降低误差。

观察者作出反应前,屏幕上的颜色刺激将一直存在。观察者的任务是当他感知不到彩色,只能感知到一个灰色圆斑,且无法看清中心圆斑和环形边界时,按

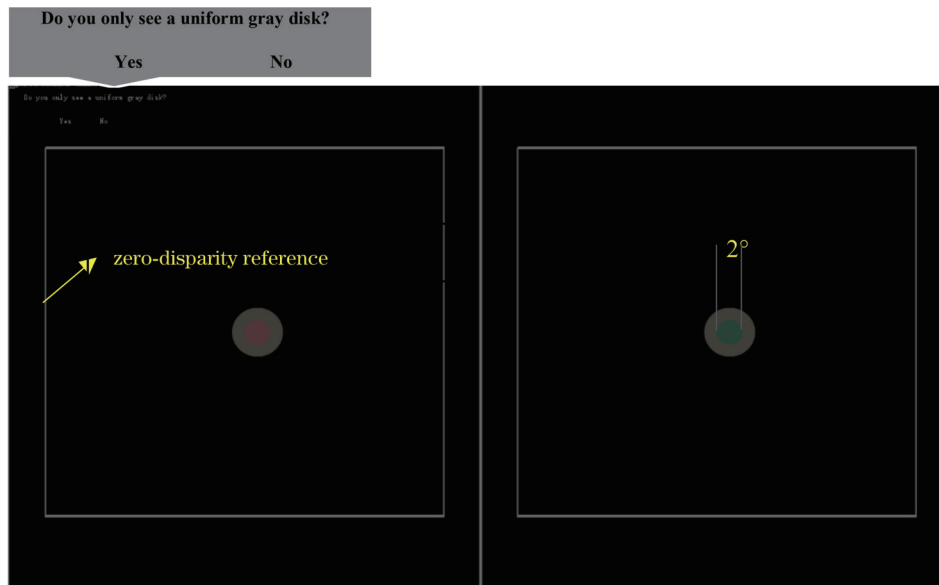


图 5 实验中使用的颜色刺激的例子
Fig. 5 An example of color stimulation used in experiments

下“Y”键,否则按“N”键。

4 实验结果

4.1 双目色调消除方向

使用调整法得到的 3 个色调消除颜色方向如图 6 所示。判断观察者是否在图 4(b)中的 8 个方向上都能够感知到色调消除现象时,实验发现,在 0°、90°、135°这

3 个颜色方向上,当固定左眼观看的颜色刺激时,5 位观察者调整右眼刺激能够感知到灰色,而在 22.5°、45°、67.5°、112.5°、157.5°这 5 个颜色方向上,5 位观察者无论怎么调整右眼刺激都不能具有灰色感知。多次重复后,可以得出,只有红-绿(R-G)、黄-蓝(Y-B)、黄绿-紫(YG-P)三种颜色对组合时,才能够发生双目色调消除现象,这三种特殊的色调消除颜色对如图 6(b)所示。

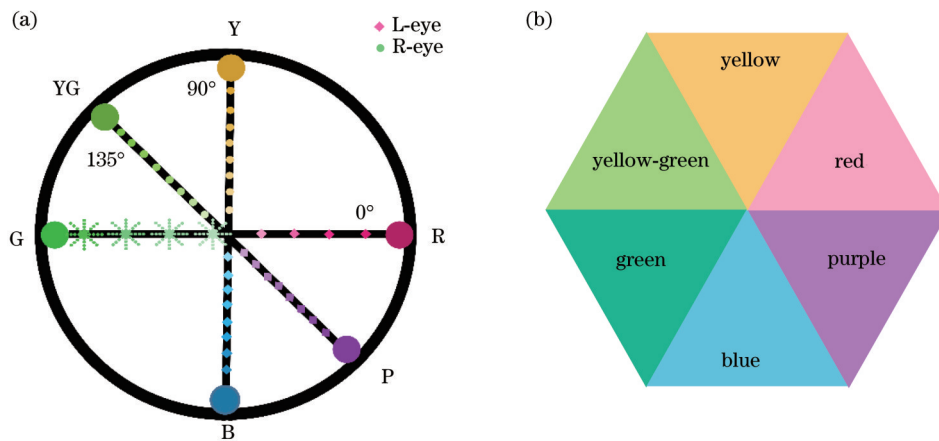


图 6 双目色调消除现象的 3 个颜色方向。(a)色调消除方向;(b)3 个色调消除颜色对
Fig. 6 Three color direction of binocular hue cancellation phenomena. (a) Hue cancellation direction; (b) three hue cancellation color pairs

4.2 双目色调消除阈值

使用调整法确定 5 位观察者在 3 个能够感知到双目色调消除现象的阈值初值如表 1 所示,其中 5 位观察者分别记为 DMS、ZYC、LZN、CDD、YT,阈值结果均小于文献[8]中定量测量的双目融合阈值。以观察者 ZYC 为例,当左眼观看固定的红色刺激 a^* 为 6 时,调整右眼观看的绿色刺激时,能够感知到灰色,当左眼固定红色刺激 a^* 值为 7 时,无论如何调整右眼刺激,都不能

够感知到灰色,记录下平均值 a^* 为 6.5,这样的红-绿实验重复 10 次,将 10 次得到的平均值进行平均,所得就是左眼观看红色时的双目色调消除阈值的初值,以同样的方法可得到左眼观看绿色、黄色、蓝色、黄绿色、紫色的双目色调消除阈值的初值。

使用极限法确定双目色调消除阈值的精确值如表 2 所示。根据表 1 中的阈值初值,以观察者 ZYC 左眼看红色、右眼看绿色以及该绿色周围共 33 个颜色刺激

表 1 5 位观察者双目色调消除阈值的初值

Table 1 Initial values of binocular hue cancellation thresholds for 5 observers

Observer	Hue cancellation threshold (ΔE_{ab}^*) in each color direction					
	R	G	Y	B	YG	P
DMS	6.6	6.4	5.1	4.9	5.5	5.6
ZYC	6.4	6.7	4.8	4.2	7.6	7.5
LZN	5.3	5.9	4.9	4.9	5.6	5.7
CDD	6.8	6.8	4.9	4.8	7.7	7.6
YT	6.6	6.5	4.7	4.6	5.7	5.5

表 2 5 位观察者的双目色调消除阈值的精确值

Table 2 Accurate values of binocular hue cancellation thresholds for 5 observers

Observer	Hue cancellation threshold (ΔE_{ab}^*) in each color									
	R	G	R-G	Y	B	Y-B	YG	P	YG-P	
DMS	6.76	6.67	13.34	4.43	4.66	9.09	5.67	5.65	11.32	
ZYC	6.80	6.64	13.44	4.64	4.64	9.28	7.68	7.87	15.55	
LZN	5.61	5.75	11.36	4.01	4.13	8.14	5.64	5.62	11.26	
CDD	6.64	6.70	13.34	4.92	5.15	10.07	7.74	7.79	15.53	
YT	6.84	6.74	13.58	4.81	4.86	9.67	5.56	5.86	11.42	
Average	6.53	6.50	13.03	4.56	4.69	9.25	6.46	6.56	13.02	

从表 2 可知, R-G 颜色方向上的双目色调消除阈值范围是 $11.36\Delta E_{ab}^* \sim 13.58\Delta E_{ab}^*$, 平均值是 $13.03\Delta E_{ab}^*$, Y-B 方向上的阈值范围是 $8.14\Delta E_{ab}^* \sim 10.07\Delta E_{ab}^*$, 平均值是 $9.25\Delta E_{ab}^*$, YG-P 方向上的阈值范围是 $11.26\Delta E_{ab}^* \sim 15.55\Delta E_{ab}^*$, 平均值是 $13.02\Delta E_{ab}^*$ 。其中, 黄-蓝(Y-B)组合的阈值最小, 红-绿(R-G)与黄绿-紫(YG-P)组合的平均阈值几乎相等。交换左右眼观看的颜色, 得到的双目色调阈值相似。5 位观察者中, LZN 观看红-绿、黄-蓝组合阈值均小于其他人, ZYC 和 CDD 观看黄绿色-紫组合时, 得到的色调消除阈值大于其他人。

表 2 中的双目色调消除阈值在 CIELAB 色空间中的表达如图 7 所示。图 7(a) 中较小的彩色圆斑代表 5 位观察者对 R、G、Y、B、YG、P 这 6 种色调的双目

为例, 已知他左眼观看红色的阈值初值为 $6.4\Delta E_{ab}^*$, 因此, 将左眼观看的 a^* 值区间设定 6.4 附近, 若从 6.2 开始(起点随机), 则以 0.1 为步长递增到 7.1 共 10 个值, 再以 7.4 开始(可随机), 以 0.1 为步长递减到 6.5 共 10 个值, 右眼始终观看与左眼对应的一个合适范围内的绿色刺激(33 个刺激), 这样的递增和递减共为 1 组刺激, 重复 5 组。每个观察者在此部分共经历了 19800 次实验(6 种颜色 \times 10 对颜色方向取值 \times 33 组对立刺激 \times 2 组交替 \times 5 次重复)。

色调消除阈值, 灰色实线连接了 R-G、Y-B、YG-P 这 3 个对立颜色方向上的色调消除平均阈值(较大的彩色圆斑), 长度代表该方向上能够发生色调消除现象的取值范围, 上述的所有阈值点和灰色实线均不可平移, 也就是, 双目色调消除现象只会在这三条实线内对称取值时发生。5 位观察者在 R-G、Y-B、YG-P 这 3 个方向上的双目色调消除阈值如图 7(b) 所示, 线段分别代表阈值的最大、最小值, 稍长一点的线段代表阈值的中位数, 在 R-G 方向, 稍长的线段靠近上方线段(最大值), 说明 5 位观察者中阈值较大的居多, “+”号表示数值异常, 也就是 LZN 在 R-G 方向上的阈值远小于其他人, 另外, Y-B 方向上阈值最小, YG-P 方向上的阈值变动最大, 说明双目色调消除现象存在个体差异。

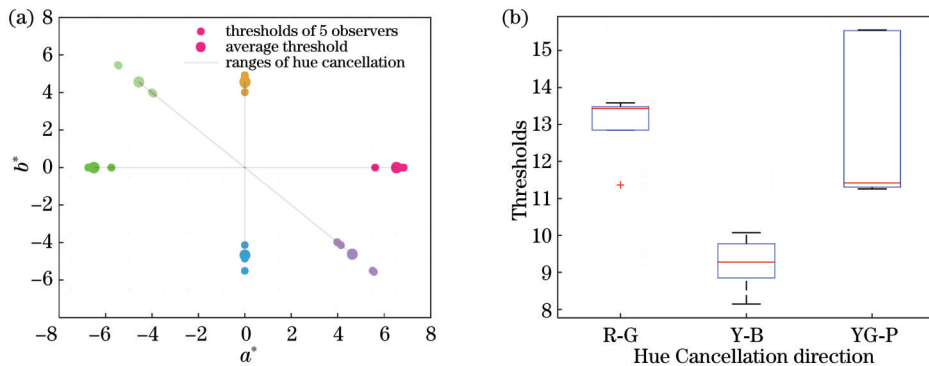


图 7 CIELAB 颜色空间中的双目色调消除范围。(a) 色调消除阈值; (b) 色调消除范围

Fig. 7 Binocular hue cancellation ranges in CIELAB color space. (a) Hue cancellation thresholds; (b) hue cancellation ranges

4.3 其他颜色空间

4.3.1 LMS 颜色空间

将在 CIELAB 空间中得到的双目色调消除阈值变换到 LMS 色空间,结果如图 8 所示。图中的彩色圆斑代表 5 位观察者对 R、G、Y、B、YG、P 这 6 种色调的

双目色调消除阈值,6 种彩色圆斑在 LMS 空间中分布比较均匀,几乎六等分 $L-M$ 平面。其中 $L-M$ 平面上的颜色方向和 $L-S$ 平面关于 S 轴对称,在 $L-M$ 平面中的阈值显示为一条直线,平行于 S 轴。

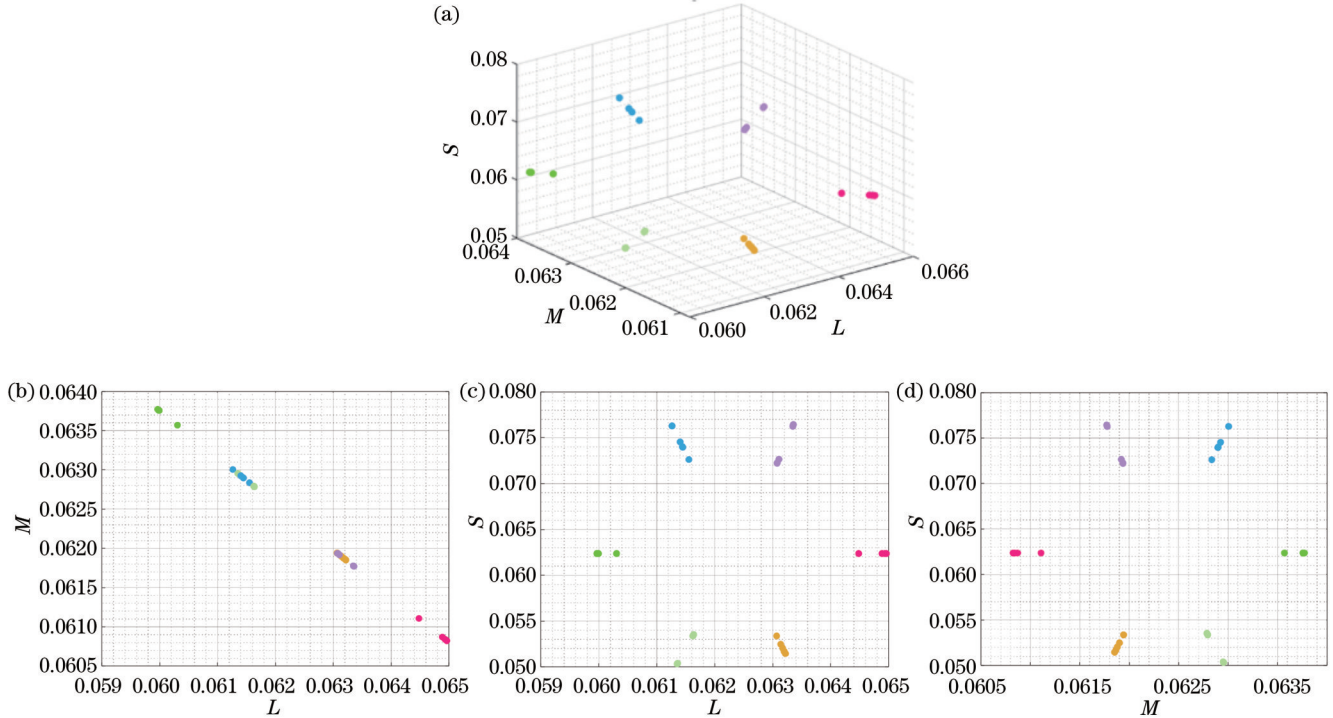


图 8 LMS 颜色空间中的双目色调消除阈值。(a) LMS 三维空间;(b) $L-M$ 平面;(c) $L-S$ 平面;(d) $M-S$ 平面

Fig. 8 Binocular hue cancellation thresholds in LMS color space. (a) LMS 3D space; (b) $L-M$ plane; (c) $L-S$ plane; (d) $M-S$ plane

4.3.2 MacLeod-Boynton 色品图

将在 CIELAB 空间中实验得到的双目色调消除阈值分别变换到 CIE1931 色品图和 Macleod-Boynton 色品图,结果如图 9 所示。舌形曲线上表达了 400~700 nm 的单色光,间隔为 10 nm,曲线旁边的数字表示单色光的波长值,彩色圆斑表示 5 位观察者对 R、G、Y、B、YG、P 这 6 种色调的双目色调消除阈值。图

9(a)中的“+”表示白点,彩色圆斑与白点很靠近,说明能够产生色调消除现象的颜色饱和度很低。彩色圆斑在两个色品图中占据的范围都很小,但在图 9(b)中更小。彩色圆斑在图 9(a)中分布比图 9(b)中更均匀。说明双目色调消除现象不仅只能在 3 个颜色方向上发生,而且只占据人眼能够感知的颜色范围内很小的范围。

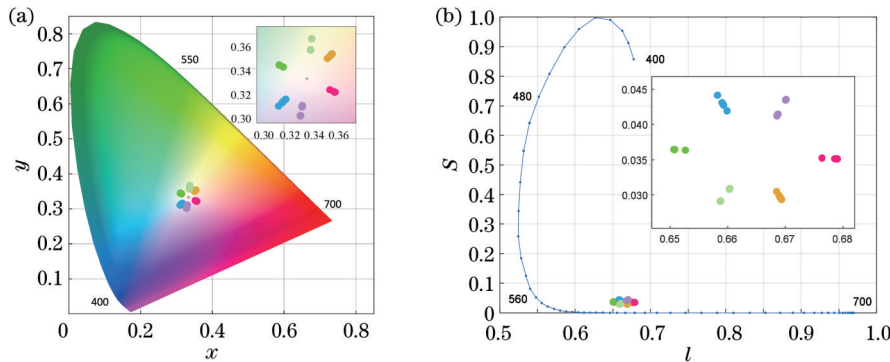


图 9 色品图中的双目色调消除阈值。(a) CIE1931 色品图;(b) MacLeod-Boynton 色品图

Fig. 9 Binocular hue cancellation thresholds in chromaticity diagram. (a) CIE1931 chromaticity diagram; (b) MacLeod-Boynton chromaticity diagram

4.3.3 DKL 颜色空间

将在 CIELAB 空间中实验得到的双目色调消除阈值变换到 DKL 颜色空间,结果如图 10 所示,图中的 6 种彩色圆斑分别对应 5 位观察者对 R、G、Y、B、YG、P 这 6 种色调的双目色调消除阈值,灰色实线代表 R-G、

Y-B、YG-P 这 3 个色调消除颜色方向,灰色虚线在平面内分布均匀。图 10(b)中,灰色虚线代表 DKL 空间的两个主轴方向,其中 YG-P 的方向与主轴方向 $S-(L+M)$ 重合,而 R-G、Y-B 的方向和另一个主轴方向 $L-M$ 并不靠近。

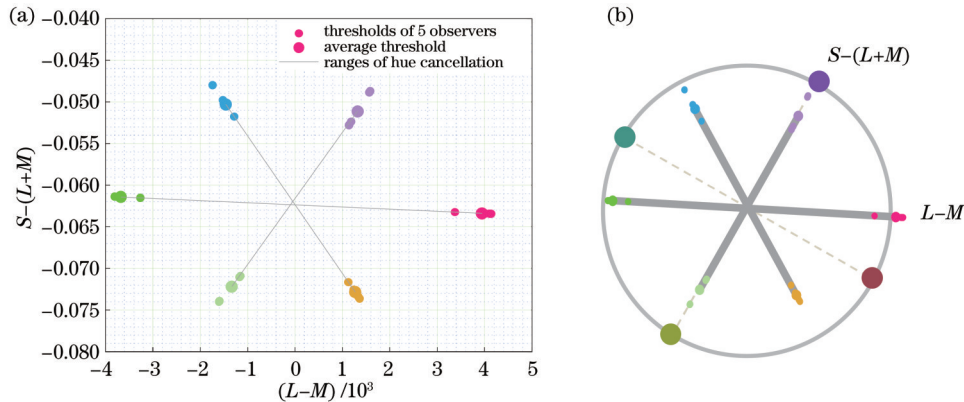


图 10 DKL 颜色空间中的双目色调消除范围。(a)色调消除范围;(b)色调消除颜色方向与主轴颜色方向

Fig. 10 Binocular hue cancellation ranges in DKL color space. (a) Hue cancellation ranges; (b) color direction of hue cancellation and cardinal color direction

5 结 论

为了研究双目融合范围内特殊的色调消除现象,在 CIELAB 颜色空间中设计心理物理学实验,测量了双目融合范围内能够感知到色调消除现象的对立颜色方向和色差阈值。实验发现,该现象并不是在每个对立颜色方向上都能够发生,观察者只能在红-绿、黄-蓝、黄绿-紫 3 个方向上才能够感知到灰色,发生色调消除现象。双目色调消除阈值在 5 位观察者之间存在个体差异,但在黄-蓝方向上的阈值都是最小的,且小于 Chen 等^[8]测定的双目融合阈值,符合逻辑。

由于研究视觉机理与色空间的选择有很大关系,将 5 位观察者的双目色调消除阈值分别在 CIELAB、LMS、Macleod-Boynton、DKL 等与生理有关的颜色空间中表达,发现双目色调消除方向在 LMS、Macleod-Boynton 和 DKL 空间中的分布更均匀,近似六等分,更加暗示了这 6 种色调的特殊性。双目色调消除阈值只在 Macleod-Boynton 空间中占据很小的范围,说明双目色调消除现象不仅只能在 3 个颜色方向上发生,而且只占据人眼能够感知的颜色范围内很小的范围。下一步工作将进一步开展双目色调消除及人眼视觉特性机理的研究。

参 考 文 献

- [1] Jung Y J, Kim H G, Ro Y M. Critical binocular asymmetry measure for the perceptual quality assessment of synthesized stereo 3D images in view synthesis[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2016, 26(7): 1201-1214.
- [2] Hurvich L M, Jameson D. Some quantitative aspects of an opponent-colors theory. II. Brightness, saturation, and hue in

normal and dichromatic vision[J]. Journal of the Optical Society of America, 1955, 45(8): 602-616.

- [3] Hurvich L M, Jameson D. The binocular fusion of yellow in relation to color theories[J]. Science, 1951, 114(2956): 199-202.
- [4] Gille J, Larimer J, Piantanida T, et al. Hue cancellation on binocularly fused adapting fields[J]. Investigative Ophthalmology and Visual Science, 1991, 32(4): 12-13.
- [5] Jung Y J, Sohn H, Lee S I, et al. Quantitative measurement of binocular color fusion limit for non-spectral colors[J]. Optics Express, 2011, 19(8): 7325-7338.
- [6] Malkoc G, Kingdom F A A. Dichoptic difference thresholds for chromatic stimuli[J]. Vision Research, 2012, 62: 75-83.
- [7] Chen Z Q, Tai Y H, Shi J S, et al. Changes in binocular color fusion limit caused by different disparities[J]. IEEE Access, 2019, 7: 70088-70101.
- [8] Xiong Q, Liu H, Chen Z Q, et al. Detection of binocular chromatic fusion limit for opposite colors[J]. Optics Express, 2021, 29(22): 35022-35037.
- [9] Chen Z Q, Shi J S, Huang X Q, et al. Visual comfort modeling for disparity in 3D contents based on weber - Fechner's law[J]. Journal of Display Technology, 2014, 10(12): 1001-1009.
- [10] Wang Z Q, Dai W, McLaughlin D W. Ring models of binocular rivalry and fusion[J]. Journal of Computational Neuroscience, 2020, 48(2): 193-211.
- [11] Robertson A R. Historical development of CIE recommended color difference equations[J]. Color Research & Application, 1990, 15(3): 167-170.
- [12] Gegenfurtner K R, Kiper D C. Color vision[J]. Annual Review of Neuroscience, 2003, 26: 181-206.
- [13] Lennie P, Movshon J A. Coding of color and form in the geniculostriate visual pathway (invited review)[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2005, 22(10): 2013-2033.
- [14] Stockman A, MacLeod D I, Johnson N E. Spectral sensitivities of the human cones[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1993, 10(12): 2491-2521.
- [15] CIE. Fundamental chromaticity diagram with physiological axes-part 2: spectral luminous efficiency functions and chromaticity diagrams: CIE 170-2[S]. Vienna: Central Bureau of the CIE, 2015.
- [16] 董晓文, 徐杨, 高程, 等. 基于视锥感光空间的光源相关色温

- 计算[J]. 光学学报, 2022, 42(2): 0233001.
- Dong X W, Xu Y, Gao C, et al. Calculation of light source corrected color temperature based on cone fundamental space[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(2): 0233001.
- [17] 蒋心蕊. 猕猴早期视觉皮层的 DKL 颜色空间表征[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- Jiang X R. Representation of DKL color space in macaque early visual cortex[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.
- [18] De Valois R L, De Valois K K. A multi-stage color model[J]. Vision Research, 1993, 33(8): 1053-1065.
- [19] MacLeod D I, Boynton R M. Chromaticity diagram showing cone excitation by stimuli of equal luminance[J]. Journal of the Optical Society of America, 1979, 69(8): 1183-1186.
- [20] Hering E. Outlines of a theory of the light sense[M]. Cambridge: Harvard University Press, 1964.
- [21] Kandel E R, Schwartz J H, Jessell T M. Principles of neural science[M]. 5th ed. New York: McGraw-Hill Professional, 2013.
- [22] Derrington A M, Krauskopf J, Lennie P. Chromatic mechanisms in lateral geniculate nucleus of macaque[J]. The Journal of Physiology, 1984, 357: 241-265.
- [23] 陈载清, 陈凯, 黄小乔, 等. 光栅式自由立体显示器的颜色特性实验[J]. 光学学报, 2019, 39(5): 0533002.
- Chen Z Q, Chen K, Huang X Q, et al. Color characterization of barrier-type autostereoscopic displays[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(5): 0533002.
- [24] 石俊生, 云利军, 杨健, 等. 阴极射线管显示器特性化精度及黑点的影响[J]. 光学学报, 2007, 27(2): 371-376.
- Shi J S, Yun L J, Yang J, et al. Accuracy of colorimetric characterization and effect of black point for CRT monitor[J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(2): 371-376.
- [25] Methodology for the subjective assessment of the quality of television pictures: ITU-R BT. 500 SPANISH[S]. New York: International Telecommunication Union (ITU), 2009.
- [26] WMA. Ethical principles for medical research involving human subjects[EB/OL]. [2022-10-08]. <http://www.wma.net/en/30publications/10policies/b3/>.
- [27] 杜方家, 徐杨, 李长军. 改进的 CIELAB 均匀颜色空间[J]. 光学学报, 2022, 42(1): 0133001.
- Du F J, Xu Y, Li C J. Modified CIELAB uniform color space [J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(1): 0133001.
- [28] 潘洁, 黄敏, 李钰, 等. 三维打印球体的色差计算方法研究[J]. 光学学报, 2021, 41(23): 2333001.
- Pan J, Huang M, Li Y, et al. Color difference calculation method for three-dimensional printed spheres[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(23): 2333001.

Experimental Research on Binocular Hue Cancellation Phenomenon

Dai Mengshi^{1,2}, Huang Xiaoqiao^{1,2*}, Chen Zaiqing^{2,3}, Tai Yonghang^{1,2}, Shi Junsheng^{1,2}

¹School of Physics and Electronic Information, Yunnan Normal University, Kunming 650504, Yunnan, China;

²Yunnan Key Laboratory of Optoelectronic Information Technology, Kunming 650504, Yunnan, China;

³School of Information Science and Technology, Yunnan Normal University, Kunming 650504, Yunnan, China

Abstract

Objective The application of stereoscopic display, virtual reality, and head-mounted devices requires research on binocular properties of the human vision system (HVS). Threshold measurement is one method to investigate the characteristics of visual perception. At the same time, there are some color vision phenomena related to binocular vision systems that cannot be explained. One of the phenomena is called hue cancellation, which can also occur in binocular vision. Thus, it is called binocular hue cancellation and is a special phenomenon in binocular color fusion. Currently, most studies on binocular color fusion focus on the reproduction of glossiness in binocular color fusion, quantitative measurement of the thresholds of binocular color fusion, and the distinction between binocular color fusion and rivalry. However, as far as we know, no particular studies on binocular hue cancellation have been reported. To investigate the color vision mechanism of this particular phenomenon, we design a psychophysical experiment. We also investigate the opposite color directions and hue cancellation thresholds within the binocular color fusion that can perceive gray in the CIELAB color space and represent the experimental results in the LMS, Macleod-Boynton, and DKL color spaces respectively to provide experimental data for exploring the visual properties of HVS and the mechanism of binocular color.

Methods We research a Samsung 3D display (S23A950D) with 2D/3D switching capability, requiring the observer to wear specific 3D switching glasses to obtain binocular vision. Eight opposite color directions are selected at 22.5° intervals in the isoluminance plane of CIELAB color space, and color stimulus sample pairs are selected at equal intervals in each direction (Fig. 4). The experiment is conducted among five college students between the ages of 22 and 25 with normal vision, and each of them experiences at least 19800 color stimuli. We carry out the experiment in a dark room and first employ the adjustment method to determine the opposite color directions in which the binocular hue cancellation phenomenon could occur and the initial values of the binocular hue cancellation thresholds. Then the limit method is adopted to accurately determine the binocular hue cancellation thresholds.

Results and Discussions The experimental results show that binocular hue cancellation phenomenon could occur only

when red-green (R-G), yellow-blue (Y-B), and yellow green-purple (YG-P) color pairs are combined (Fig. 6). The binocular hue cancellation thresholds of the five observers are expressed in the CIELAB, LMS, Macleod-Boynton, and DKL color spaces respectively. In the CIELAB color space, the range of binocular hue cancellation thresholds in the R-G color direction is 11.36–13.58, with a mean value of 13.03, and the range of thresholds in the Y-B direction is 8.14–10.07, with a mean value of 9.25. The range of thresholds in the YG-P direction is 11.26–15.55, with a mean value of 13.02. Among them, the Y-B combination has the smallest threshold, and the average thresholds of the R-G and YG-P combinations are almost equal (Table 2). After exchanging the colors viewed by the left and right eyes, the obtained binocular hue cancellation thresholds are similar, which indicates that the dominant eye does not affect the binocular hue cancellation phenomenon. Five observers are largely different in thresholds of the YG-P direction, and one of them has much smaller thresholds in the R-G direction than the others, showing individual differences in the binocular hue cancellation phenomenon (Fig. 7). In the LMS color space, the six color directions are uniformly distributed and almost divide the L - M plane into six equal parts. The color directions in the L - M plane and the L - S plane are symmetric about the S axis, and the thresholds in the L - M plane are shown as a straight line parallel to the S axis (Fig. 8). In the Macleod-Boynton chromaticity diagram, the binocular hue cancellation thresholds of six colors are close to the white point, indicating the saturation of the colors which can produce the binocular hue cancellation phenomenon is low (Fig. 9). In DKL space, the direction of YG-P overlaps with the cardinal direction S - $(L+M)$, while the directions of R-G, Y-B, and the cardinal direction L - M are not close to each other (Fig. 10).

Conclusions The binocular hue cancellation phenomenon is investigated through a visual psychophysics experimental method. The results show that the particular phenomenon can only occur in three color directions of red-green, yellow-blue, and yellow green-purple, which means observers can only perceive gray in the three directions. There are individual differences in binocular hue cancellation thresholds of the five observers, but the thresholds in the yellow-blue direction are all minimal. Because the study on visual mechanisms is strongly related to the choice of color space, the binocular hue cancellation thresholds of the five observers are expressed in the color spaces of CIELAB, LMS, Macleod-Boynton, and DKL respectively. The binocular hue cancellation directions are more uniformly distributed in LMS, Macleod-Boynton, and DKL color space approximately in six equal parts, implying the specificity of these six hues. The binocular hue cancellation threshold occupies only a small range in Macleod-Boynton color space, thus indicating that the binocular hue cancellation phenomenon not only occurs in the three color directions but also occupies only a small range within the color range that can be perceived by the human visual system.

Key words vision, color, and visual optics; color perception; binocular vision; hue cancellation; CIELAB color space