

## 立体显示下的双目颜色融合研究现状与展望

陈载清<sup>1,2\*</sup>, 刘惠<sup>1,2</sup>, 熊琦<sup>1,2</sup>, 云利军<sup>1</sup>, 黄小乔<sup>2\*\*</sup>, 邵永航<sup>2\*\*\*</sup>, 石俊生<sup>2</sup><sup>1</sup>云南师范大学信息学院, 云南 昆明 650500;<sup>2</sup>云南省光电信息技术重点实验室, 云南 昆明 650500

**摘要** 立体显示是未来显示技术发展的重要方向,而左右眼视图颜色不一致是立体显示中常见的现象,会导致人眼观看时视觉不舒适。在立体显示条件下,不一致颜色的双目融合研究在传统颜色视觉研究的扩展和补充,不仅对了解人眼视觉系统视信息处理过程及机理有一定的科学意义,而且对解决现有立体显示技术视觉不舒适难题也有应用价值。本文对人眼双目颜色融合的相关研究文献进行了整理,从双目颜色融合、颜色融合与立体融合的交互作用及双目颜色融合对立体显示视觉舒适度的影响三个方面展开分析,总结了双目颜色融合的研究现状,指出目前对视觉系统的双目颜色融合与立体融合的交互机制仍然不完全清楚,研究结果多停留在现象描述上,缺乏定量的实验数据来建立双目颜色融合模型。并提出双目颜色不一致会影响立体显示视觉舒适度,而基于立体显示技术的图像增强方法将成为未来的研究热点。

**关键词** 颜色; 立体显示; 双目颜色融合; 立体视觉; 视觉模型

中图分类号 O432

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1600002

## Research Status and Prospect of Binocular Color Fusion in Stereoscopic Displays

Chen Zaiqing<sup>1,2\*</sup>, Liu Hui<sup>1,2</sup>, Xiong Qi<sup>1,2</sup>, Yun Lijun<sup>1</sup>, Huang Xiaoqiao<sup>2\*\*</sup>,  
Tai Yonghang<sup>2\*\*\*</sup>, Shi Junsheng<sup>2</sup><sup>1</sup>School of Information Science and Technology, Yunnan Normal University, Kunming 650500, Yunnan, China;<sup>2</sup>Yunnan Key Laboratory of Optoelectronic Information Technology, Kunming 650500, Yunnan, China

**Abstract** Three-dimensional (3D) stereoscopic display is a promising direction of display technology development, and color asymmetry of left and right eye views is a common phenomenon in stereoscopic 3D displays, which can cause visual discomfort. Under the 3D display, the study of binocular fusion of asymmetric colors is an extension and supplement of traditional color vision research, which has a certain scientific significance to understanding the process and mechanism of visual information processing in the human visual system as well as has application value to solve the problem of visual discomfort in existing stereoscopic display technology. In this study, the relevant literature on binocular color fusion was sorted, and the research status of binocular color fusion was summarized from three aspects: binocular color fusion, the interaction between color and stereo fusions, and the influence of binocular color fusion on the visual comfort of 3D displays. We highlight that the interaction mechanism of binocular color fusion and stereo fusion is still unclear, and the research results stay on the phenomenon description, lacking quantitative experimental data to establish a color fusion model. We infer that binocular color asymmetry affects the visual comfort of 3D displays. In addition, 3D display-based image enhancement may become a research hotspot in the future.

**Key words** color; stereoscopic display; binocular color fusion; stereo vision; vision modeling

## 1 引言

随着显示器件的飞速发展,三维(3D)立体显示已

在电视、视频游戏娱乐、视觉研究、远程设备操作、医学成像、职业训练、虚拟现实(VR)和增强现实(AR)等领域得到广泛应用<sup>[1-3]</sup>。立体显示有多种技术让观看者

收稿日期: 2021-06-15; 修回日期: 2021-07-12; 录用日期: 2021-08-03

基金项目: 国家自然科学基金(61865015, 61875171, 61741516)、云南省科技厅重点项目(2018FA033)、云南师范大学研究生科研创新基金(ysdyjs2020153)

通信作者: \*zaiqingchen@ynnu.edu.cn; \*\*hxq-km@foxmail.com; \*\*\*taiyonghang@126.com

感受到立体深度,其中,借助辅助设备的立体眼镜或头盔(HMD)显示技术比较成熟,包括不需要辅助设备的光栅式自由立体显示技术已经有了部分商业产品,具有前景的全息显示和体三维显示则多处于研究发展阶段。立体显示技术是以人眼立体视觉为基础的,人眼视觉系统产生立体感包括了双目和单目或生理和心理学诸多立体线索,生理学方面的会聚、调焦、双目视差是立体线索中最主要的线索,但双目视差在深度感知中则发挥着主要作用<sup>[4]</sup>。目前的立体显示技术主要是利用分像技术提供左右眼视差图像产生立体感,其中,通过时间复用把左右视差图像交替送入双眼而产生立体感的分像技术是主要的立体显示方式之一,被广泛应用于电影、电视、桌面显示和高端的VR/AR显示领域中。在时间复用显示方式下,左右眼的颜色总是处于不一致状态,在同一时刻,只有一只眼睛能接收到颜色信息,而另一只眼则完全为黑色,出现了左右眼颜色信息不一致的情况。另外,颜色作为重要的视觉信息,在立体显示的几个阶段,包括图像采集、编码、传输、渲染和显示过程中,都易受自然光照、硬件设备、软件算法等各种因素的影响,从而导致左右图像的颜色失真或不一致<sup>[5]</sup>,立体显示中所呈现的颜色信息不再是可靠的原始立体匹配线索,真实场景里的颜色一致性假设在立体图像对中也就不再有效<sup>[6]</sup>。左右眼颜色不一致是立体显示中常见的现象,可加剧观看立体显示时的视觉不舒适<sup>[7]</sup>,而视觉不舒适一直是制约立体显示应用与发展的主要障碍<sup>[1,8]</sup>。

在立体显示中,当双目出现颜色信息不一致时,立体融合和颜色融合将共同发生,增加了视觉系统信息处理的负担,是造成视觉疲劳的主要因素<sup>[5]</sup>。为了保证立体显示的视觉舒适度,左右眼图像的颜色差异不应该超过一定的界限,称为双目颜色融合界限(BCFL)<sup>[9]</sup>。超出界限的颜色差异会导致双目颜色竞争的产生,在此情况下,左右两种颜色会周期性交替出现在脑海中<sup>[10]</sup>。当两眼接收到的颜色在融合界限范围内时,视中枢将两种颜色融合成稳定的单一感知颜色,这种现象称为双目颜色融合<sup>[11]</sup>。目前,双目颜色融合与立体融合的交互作用尚不完全清楚,颜色不一致如何影响立体显示视觉舒适度,还缺乏应用所需要的定量实验数据。在研究三维立体显示技术的同时,有必要研究立体显示下的双目颜色融合现象与理论机制,这不仅对理解视觉系统信息处理过程具有科学意义,而且对解决现有立体显示技术视觉不舒适难题也有应用价值。

## 2 双目颜色融合

### 2.1 双目颜色混合

大多数人都有两个正常运作的眼睛,但是我们仍然以某种方式将视觉世界视为一个单一的实体,大部分时间我们的大脑都正在接收和处理来自外部世界两

组不同的且基本独立的视觉信号。但如何将两组世界视为一个世界,几个世纪以来一直吸引着科学家们<sup>[12]</sup>。颜色在这种现象中可能起到一定的作用,当用一只眼睛观看某个物体时,由于与用另一只眼睛观看时具有相同的光谱反射特性,因此看起来可能是相同的颜色,这是视觉世界中的一个特征。因此,眼间颜色相似可能是融合的一个很好的视觉线索。然而,当两只眼睛呈现的颜色不同时会发生什么,是一直存在争议的双色混合问题。当每只眼睛分别呈现两种不同颜色的色光时,色光的组合方式是否与它们叠加在同一只眼睛上时的结果相似?对这一现象的第一次研究似乎是在18世纪早期,使用不同颜色的丝绸通过一个孔进行观察<sup>[13]</sup>。后来,在19世纪,鉴于Helmholtz与Hering的色觉理论的不同预测,双目颜色混合色的存在与否是Helmholtz和Hering之间争议的来源。最具争议的一个问题是,当一只眼睛输入红光,另一只眼睛输入绿光时,是否可以获得“双目黄色”。

已有研究表明,只要满足一定的条件,真正的双色混合确实会发生:小而带纹理的光斑比大而均匀的光斑融合得更稳定;闪烁的刺激比稳定的刺激混合得更稳定;亮度和色度接近的低亮度和低饱和度的光斑比亮度和色度差异较大的高亮度和高饱和度的光斑融合得更稳定<sup>[12,14]</sup>。de Weert和Wade<sup>[15]</sup>验证了其中一些规则的正确性,如图1所示,研究证明上面的纯色圆盘的融合产生了不稳定的双眼竞争,下面的两个纹理盘的融合产生稳定的双色混合,说明纹理可促进双目两色混合。

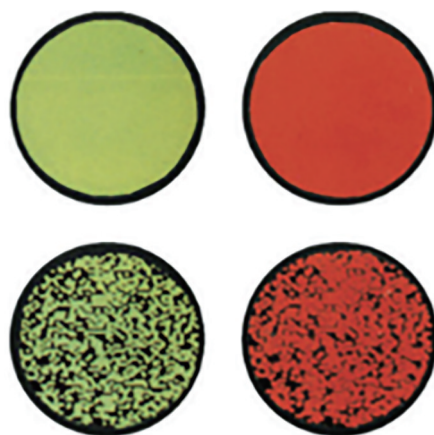
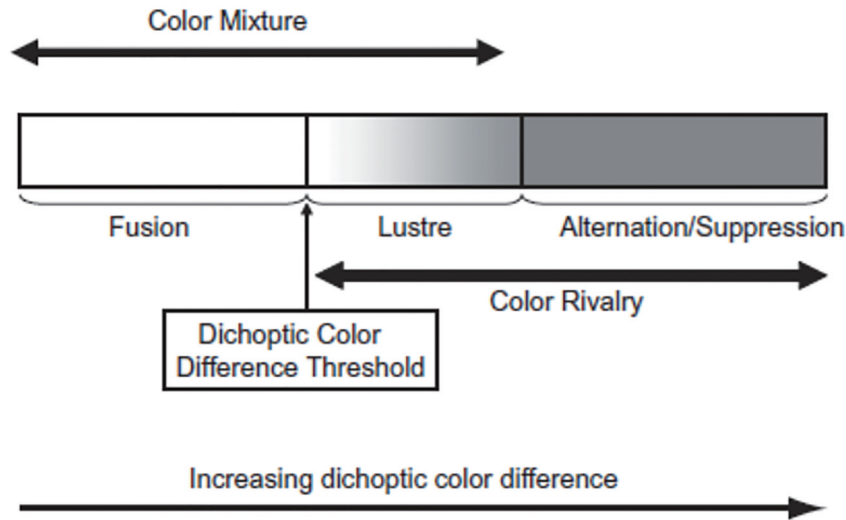


图1 双目颜色混合<sup>[15]</sup>

Fig. 1 Binocular color mixing<sup>[15]</sup>

普遍认为,当双目颜色差异小于双目颜色融合界限时,人眼视觉系统可把双目不同颜色融合成一种颜色,被色度学家称作“颜色混合”,反之,将发生左右眼颜色交替感知的颜色竞争现象<sup>[5,16-18]</sup>。如图2所示,在可进行“颜色混合”的双目颜色融合界限内,有一个可感知到双眼颜色不同的最小双目色差阈值(DCDT),小于该阈值,大脑将感受不到双目颜色存在差异,大于该阈值,大脑在对颜色进行混合的同时将出现光泽感<sup>[19]</sup>。

图 2 左右颜色(色度)不一致时双眼融合的不同阶段<sup>[19]</sup>Fig. 2 Different phases of binocular interaction as applied to binocular differences in color (chromaticity)<sup>[19]</sup>

## 2.2 双目颜色竞争

当一只眼睛观看一个图像,另一只眼睛观看另一个不同的图像时,大脑对双目图像的感知结果有两种:在某些条件下,大脑将感知到一个重叠的中间图像,这被称为“双目融合”;在其他情况下,两幅图像会被交替看到,这被称为“双目竞争”<sup>[5, 20-21]</sup>。一直以来,“双目竞争”都是研究热点,因为其与人类大脑解释双眼视觉的方式有关<sup>[20]</sup>。

由于竞争在一定程度上是融合的对立面,因此与这个主题相关的大多数问题也在融合探讨中出现。例如,一只眼睛出现饱和红色刺激,另一只眼睛出现饱和绿色刺激,这在旨在引发双眼竞争的研究中几乎是典型的案例<sup>[15, 22]</sup>。O'Shea和Williams<sup>[23]</sup>证明了分离视锥刺激可以诱发双眼竞争,这表明竞争不仅仅局限于亮度或红绿色的彩色通道。Sagawa<sup>[24]</sup>对双眼竞争的波长敏感性进行了详细研究,证明短暂呈现的刺激不会发生竞争。在这种情况下,双目色差刺激倾向于叠加,尽管仍然可以与单眼叠加刺激区分开来<sup>[14]</sup>。有证据表明,与消色差系统相比,彩色系统受双眼竞争抑制的影响更大<sup>[25]</sup>。Mullen等<sup>[26]</sup>发现,呈现给一只眼睛的彩色光栅刺激的可见性受另一只眼睛中亮度刺激的存在的影响,这表明,当两只眼睛之间的刺激不同时,另一只眼睛对一只眼睛的抑制与刺激是否包含颜色或亮度对比度无关。而对于单眼视觉来说不是这样,当两只眼睛中的刺激相同时,或者当一个刺激对另一个刺激的抑制是掩蔽时,刺激更具选择性。

Livingstone等<sup>[27]</sup>研究颜色的双目融合时发现:在左右眼各观看红绿色块时产生颜色竞争,只有当两种颜色的亮度相同时,可融合成黄色;当两种颜色的亮度对比在一个小范围内,也可融合成黄色;在使用随机点和简单图形时可产生立体感觉,但不同图形的颜色融合结果有所不同。目前的共识是,只有两眼间的颜色

差异明显小的情况下,颜色的融合才会发生<sup>[14]</sup>。

在立体显示条件下,人眼最主要的功能是把两幅空间位置上稍有不同图像“立体融合”成单幅具有深度感的图像,由于立体融合主要依靠亮度信息<sup>[28]</sup>,这时居于次要地位的双目颜色融合将受“立体融合”的影响。人眼作为一部设计精巧的光学信息传输处理系统,将会舍弃无关紧要的信息,而保留下主要特征。作为低级别的单眼视觉信息,颜色在到达高级的双眼级别时会被过滤和处理,而立体视觉作为双眼层级的高级视觉恰在此处产生<sup>[28]</sup>,所以当左右两眼目标的亮度相同而颜色不同时,会发生立体感知和颜色竞争同时共存的现象,而当两眼的颜色互为对立色时,颜色信息直接消失了<sup>[29]</sup>。双眼颜色不一致和颜色竞争大大增加了人眼视觉处理系统的负荷,是导致视觉不舒适的重要原因<sup>[7]</sup>。

## 2.3 双目光泽

人们很早就知道双目亮度差异会导致深度感知异常而出现双目光泽感,但由于双目光泽被认为是双目竞争的一种简单的副作用或补充效应<sup>[17, 30]</sup>,关于双目亮度差异产生光泽感的实验很少。最近:Wendt等<sup>[30]</sup>的研究证明双目亮度差异伴随双目视差能显著增强表面外观光泽知觉,但由于立体显示中的双目视差线索需要靠等亮度信息来获取,两者之间相互冲突,因此,双目颜色差异被视为再现双目图像光泽感的重要线索;Jung等<sup>[31]</sup>证明不需要镜面反射模式,双目颜色差异就可在3D显示设备上实时表达物体表面光泽感,从而提出使用简单的双目颜色差异图像来表达表面光泽效果的设想。

双目颜色差异只有在一定的取值范围内才可激发起双眼对物体表面的光泽感知,这个范围处于双目色差阈值与双目颜色融合界限之间<sup>[19]</sup>。光泽感是仅次于颜色和形状之外最显著的视觉属性,已有的大量数据表明,只要对表面三维形状和光照进行微小简单的改变,光泽感就出现了根本性的变化,比如添加一个小小



的高亮点,大脑即可解读其对整个表面产生了全局影响<sup>[32-36]</sup>。例如,图 3(a)中的苹果看起来不如图 3(b)中的光滑,有人可能会认为图 3(a)中的漫反射比图 3(b)强,可事实是图 3(a)在拍照时窗帘被拉上,而图 3(b)在拍照时窗帘被拉开,因此在苹果上创建了一个清晰可见的高光<sup>[37]</sup>。图 3(a)和图 3(b)的物理表面是相同的,可大多数人认为图 3(b)中的苹果比图 3(a)中的更有光泽,另外,Marlow 等<sup>[38]</sup>发现,通过改变高光区域的一些简单属性,如尺寸、对比度和锐度,即可预测图像整个外观的变化。但到目前为止,对于这些不同的效果在什么时候以及为什么会发生,人们还没有达成共

识。有时,形状的改变会使表面看起来更有光泽,有时会使表面看起来更不稳定。为什么会发生这种情况?是否有统一的原则可以解释形状和光照对光泽度感知的影响?这都需要建立相关的数学模型来进行光泽感知的客观预测,可是目前缺乏相应的光泽感效应评价数据。随着立体显示技术的发展和成熟,近来掀起利用双目颜色差异或颜色对比来增强图像局部细节、全局对比度、内容分布和双目融合度等图像外观的研究<sup>[31, 39-42]</sup>,目前这些研究也缺乏定量的光泽感效应评价数据,无法进行相关变量因素的光泽感预测,并且都指出需要进一步研究双目颜色视觉的大脑处理机制。

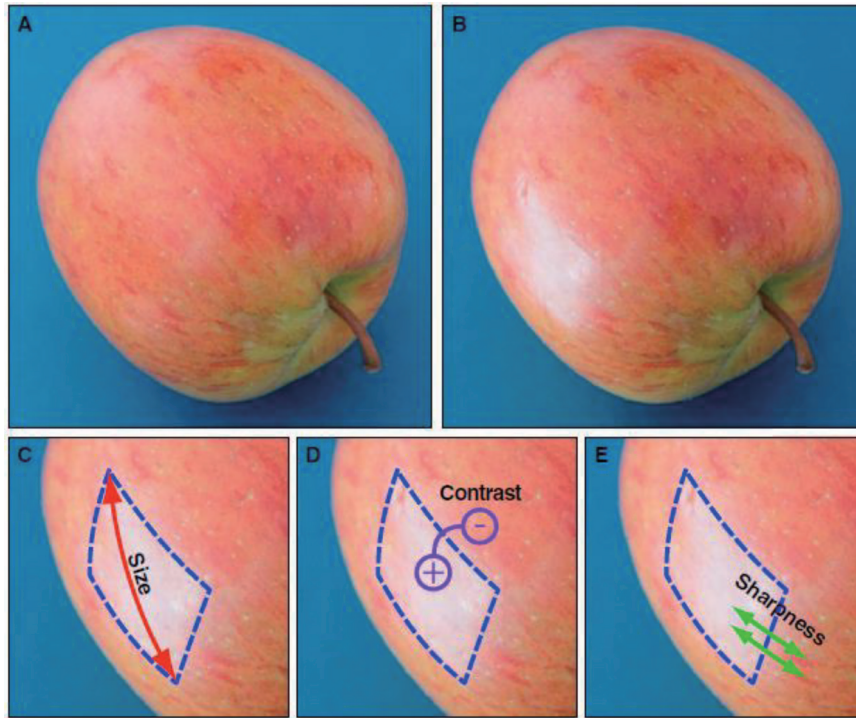


图 3 光照对苹果表面光泽感的影响<sup>[37]</sup>

Fig. 3 Effects of illumination on the apparent glossiness of an apple<sup>[37]</sup>

#### 2.4 双目颜色融合模型

左右眼颜色不一致时,如果差异过大,将产生颜色竞争、颜色抑制或颜色重叠等现象,这时人眼会感到非常不舒适,反之,人眼可将两种颜色融合为一种颜色,感知到的颜色通常介于两种颜色之间。这里关注的是双目可稳定融合两种颜色为单一颜色的情况下,融合结果的预测模型。在 Anstis 和 Rogers<sup>[29]</sup>的研究中,一个大胆的说法是“两只眼睛比一只更糟”,根据数据显示,当两色融合时,不同颜色的单眼可见特征会有效消失。然而,在 Simmons 的早期研究中,短暂呈现给眼睛间的等亮度红绿光栅的检测阈值高于单眼显示的阈值,但它们并没有高到来自每只眼睛的信号有效地相互抵消的程度,正如 Anstis 和 Rogers<sup>[29, 43]</sup>所建议的那样。

针对眼间的相互抑制作用,Erkelens 等<sup>[44]</sup>提出一种基于颜色的双目诱导模型。如图 4 所示,模型包含两个阶段:在第一阶段,双目颜色感应是通过一种反馈

机制来诱导的,这种反馈机制可以减少两种单目图像之间的颜色差异,它影响双目中的单目物体的颜色外观;在第二阶段,双目融合再将两种单目诱导颜色转换成最终的融合颜色。

Kingdom 和 Libenson<sup>[45]</sup>专门研究了针对于饱和度的眼间差异的处理机制,他们发现混合颜色的外观主要取决于相对亮度和饱和度对比度。由于两眼之间的纯彩色差异(即具有相同色相但不同饱和度的色光),更饱和的刺激主导了感知,但亮度基础的存在迫使颜色混合,从而降低了融合的饱和度。Kingdom 和 Libenson<sup>[45]</sup>认为两色混合的出现取决于大脑是否将来自两个眼睛的信息解释为来自同一个物体的信息,他们称之为“物体共性假设”。

在模拟双眼融合的互动模型中,最简单的是由 Willem 提出的加权平均模型。当左眼显示一个亮度为  $L_L$  的均匀色块,右眼显示一个亮度为  $L_R$  的色块时,

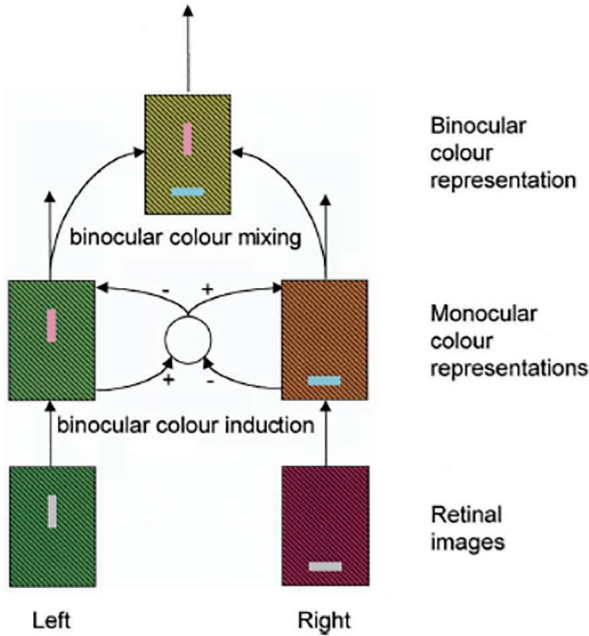


图 4 双目颜色处理模型<sup>[44]</sup>

Fig. 4 Schematic model of binocular color processing<sup>[44]</sup>

融合后的色块亮度可以匹配为加权平均,

$$L_{\text{fused}} = aL_L + (1 - a)L_R, \quad (1)$$

式中:  $L_{\text{fused}}$  是匹配的亮度(呈现给两眼);  $a$  是对主视眼的补偿( $a \approx 0.5$ ).

目前有很多双目融合模型的静态感知处理方法<sup>[46-49]</sup>, 也有些结合了动态成分, 以模拟表征双眼竞争的知觉变化<sup>[50]</sup>. 大多数静态模型是基于 Legge 和 Foley<sup>[51]</sup> 提出的对比度转导模型发展而来的: 设  $R$  是对比度  $C$  的内部响应, 而  $z, p, q$  是常数, 且指数  $p$  和  $q$  为正, 范围在 2 和 5 之间,  $p > q$ , 将对比度转换建模为阈值附近的加速函数, 然后在高对比度下减速,  $p$  确定加速度,  $q$  确定减速,  $z$  确定两者之间转换的对比度,

$$R = \frac{C^p}{z + C^q}. \quad (2)$$

考虑到双眼的相互抑制作用, 在式(2)的基础上进行双目颜色的区分, 可用  $C_L$  和  $C_R$  来表示左眼和右眼的对比度, 那么获得的双目模型为

$$R(C_L, C_R) = \frac{C_L^p + C_R^p}{z + C_L^q + C_R^q}. \quad (3)$$

式(3)被 Meese 和 Hess<sup>[52]</sup> 称为“后期求和”模型。一些模型省略了指数  $q$  或在输出双目响应项上强加了额外的非线性<sup>[49]</sup>. Kindom 和 Libenson<sup>[45]</sup> 的模型是对式(3)的修正: 如果在眼间抑制成分上引入加权函数  $w$ , 且该函数不是常数, 而是取决于刺激中匹配亮度对比度的量, 把  $w$  作为来自“另一只”眼睛的对比度输入的前缀, 则双目响应模型<sup>[53]</sup> 变为

$$R(C_L, C_R) = \frac{C_L^p}{z + wC_L^q + C_R^q} + \frac{C_R^p}{z + C_L^q + wC_R^q}. \quad (4)$$

在 Ding 和 Sperling<sup>[54]</sup> 的实验中, 他们发现呈现高

对比度刺激的眼睛对于融合图像的影响比通过简单线性求和所预测的更大, 所以对于左眼图像  $C_L$  和右眼图像  $C_R$ , 提出每只眼睛对另一只眼睛施加增益控制,

$$R(C_L, C_R) = \frac{1}{1 + \epsilon_R(C_R)} C_L + \frac{1}{1 + \epsilon_L(C_L)} C_R, \quad (5)$$

式中:  $\epsilon_R(C_R)$  和  $\epsilon_L(C_L)$  是两个输入图像的增益控制的总视觉加权对比能量(TCE)。随后 Ding 等进一步提出更准确的模型。在每个空间邻域中, 每只眼睛根据其本身输入的对比度能量对另一只眼睛的信号施加增益控制, 并且对另一只眼睛的增益控制又施加增益控制:

$$R(C_L, C_R) = \frac{1}{1 + \frac{1}{1 + \epsilon_L(C_L)} \epsilon_R(C_R)} C_L + \frac{1}{1 + \frac{1}{1 + \epsilon_R(C_R)} \epsilon_L(C_L)} C_R. \quad (6)$$

可写作

$$R(C_L, C_R) = \frac{1 + \epsilon_L(C_L)}{1 + \epsilon_L(C_L) + \epsilon_R(C_R)} C_L + \frac{1 + \epsilon_R(C_R)}{1 + \epsilon_L(C_L) + \epsilon_R(C_R)} C_R. \quad (7)$$

式(7)是一个可精确描述双目融合早期阶段的可靠心理生理学模型, 理论上应可用来对双目颜色融合结果进行预测, 为了拟合该模型, 需要开展相应的视觉心理物理学实验来进行验证, 但目前未检索到更多相关文献。

### 3 颜色融合与立体融合的交互作用

#### 3.1 颜色融合对立体融合的影响

早期对人眼视觉系统中“颜色视觉”与“立体视觉”的研究是处于分离状态的<sup>[55]</sup>. 颜色对立体深度感知的贡献一直是个有争议的问题, 这里颜色是指色度。对颜色视觉与立体视觉交互作用的研究始于 1972 年, Lu 和 Fender<sup>[28]</sup> 使用随机点立体图(RDS)研究了颜色在深度感知中的作用, 实验结果是: 颜色信息虽然对简单或单目轮廓识别有作用, 但无助于立体轮廓检测。得出的结论是: 1) 视觉系统对颜色和亮度是独立编码的; 2) 颜色有助于确定物体, 但亮度信息被单独用来作为物体深度感知的主体信号; 3) 只要对应点双眼刺激是等亮度的, 无论颜色有什么不同都会产生深度感。他们的研究引发了大量“等亮度”刺激下颜色对深度感贡献的研究。

之后开展的研究, 一部分结果支持 Lu 等的结论, 认为颜色信息并没有影响立体深度感, 深度感知处理与颜色信息处理无关, 处理流通道是互相独立的<sup>[27, 56]</sup>. 与此相反, 更多研究对 Lu 等的结论持有怀疑, 他们的实验结果建议: 1) 彩色信息有助于提高双目视差的识



别<sup>[57]</sup>; 2) 处理颜色与深度信息的细胞流间存在广泛交叉通信<sup>[58]</sup>; 3) 颜色与深度处理是相互交互的, 且在双目匹配之后<sup>[59]</sup>; 4) 颜色有助于提高立体感知匹配<sup>[60]</sup>; 5) V2 皮层神经元可对颜色和双目视差信息进行调谐<sup>[61]</sup>; 6) 颜色信息在立体感知中的贡献不可否认<sup>[17, 62]</sup>。Simmons 和 Kingdom<sup>[63-65]</sup> 研究小组从 1997 年到 2002 年研究发现, 视觉深度依赖于亮度与色度对比度的结合, 并在实验结果基础上提出立体视觉处理过程中亮度与颜色“交互”可能的四种模型。Medina 等<sup>[66]</sup> 分析了亮度与颜色对比度的探测实验结果, 亮度与色度的交互是在高的空间频率上, 视觉系统处理色度和亮度信息具有相同或相似的立体机制<sup>[67]</sup>。Domini 等<sup>[59]</sup> 提出一种研究颜色与深度感知关系的实验图像, 实验结果建议: 存在独立的颜色和深度机制, 视觉系统对颜色和深度的交互存在于视觉感知过程中的更高层次。

对于以上两种对立的结果, 有人认为是视觉实验采用的刺激图导致的。研究颜色对深度感的贡献大多采用“等亮度”和“随机点”刺激图像, 采用“等亮度”图像是为了去除亮度影响, “随机点”是为了去除非视差立体线索。用包含视差的“等亮度随机点”图像结果不产生立体感<sup>[27]</sup>, 但是用“等亮度”的简单刺激如棒或条纹图像产生立体感<sup>[67-68]</sup>。Simmons 研究小组提出一种假设, 等亮度随机点图像不产生立体感有可能是由于在集成局部颜色深度信息时产生表面的缺陷<sup>[65, 69]</sup>。2005 年 den Ouden 等<sup>[62]</sup> 的研究认为, 用“等亮度随机点”在实验方法上有问题, 一是随机点的变化导致落在视网膜上像的位置不同, 而不同类型锥细胞的密度不同; 二是色度像差可提供亮度信息。

抛开前述这些因素, 而从时间维度上来看, 双眼颜色融合对深度感知无疑产生了影响。在上文所述的时间复用立体显示方式下, 左右眼的颜色在同一时间是不一致的, 但前后帧间存在颜色匹配(图 1), 视觉系统可以将两眼视图之间的时间延迟解释为空间视差, 所以即使没有视差, 也会感知到深度, 这个现象被称为 Mach-Dvorak 效应<sup>[70]</sup>。当颜色融合产生的深度感和真实视差产生的深度相互矛盾时, 就会产生深度感的扭曲, 如遮挡现象。基于此, Kim 等<sup>[71]</sup> 提出了一种新颖的颜色交错立体显示方法, 即在视频奇帧中让一眼只看到绿色成分, 另一眼只看到红蓝成分, 在偶帧中把这种颜色呈现顺序进行翻转, 以保证两眼接收到的亮度分布均匀, 如图 5 所示。该方法号称可以纠正深度感的扭曲, 因此应该也可以改进立体显示的视觉舒适度, 但目前还没有相关的数据和讨论。

Tyler 和 Cavanagh<sup>[72]</sup> 研究发现尽管刺激在物理上处于相同的深度平面内, 也会出现立体视觉现象, 具体表现为饱和的红色目标出现在饱和的蓝色目标的前面(当用两只眼睛观察时)。如图 6 所示, 如果在全屏上观看, 尤其是在投影仪上和黑暗的房间里观看时, 大多

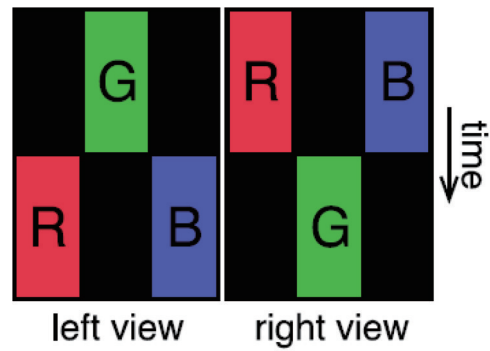


图 5 颜色交错立体显示方法可用于改善深度感知<sup>[71]</sup>  
Fig. 5 Stereoscopic display with color interlacing can improve perceived depth<sup>[71]</sup>

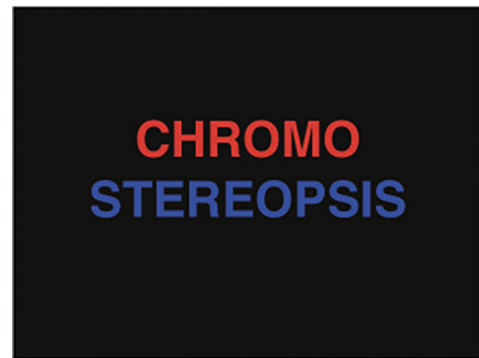


图 6 彩色立体视刺激<sup>[72]</sup>  
Fig. 6 Stimulus for chromostereopsis<sup>[72]</sup>

数人都会觉得红色的“CHROMO”好像在蓝色的“STEREOPSIS”前面。这被认为是由于眼睛中的色差导致每只眼睛中红色和蓝色物体的视网膜位置的相对差异(即视差), 从而引起这种虚幻的强烈的深度感觉<sup>[73-74]</sup>。

### 3.2 立体融合对颜色融合的影响

在立体显示条件下, 人眼最主要的功能是把两幅空间位置上稍有不同图像“立体融合”成单幅具有深度感的图像, 由于立体融合主要依靠亮度信息<sup>[28]</sup>, 这时基于次要地位的双目颜色融合将受“立体融合”的影响。以往的研究主要集中于颜色对立体融合的影响上, 很少有文献反过来研究立体融合(视差融合)对颜色融合的影响。相比于传统的平面显示, 立体显示所带来的最重要的信息是视差信息, 其能让观看者产生自然深度感, 但立体显示在带来视差信息的同时, 也容易导致左右图像对颜色的不一致。在左右图像对的亮度相同而颜色不同时, 可能会发生既有颜色竞争又可以进行视差融合产生立体感的情形; 换言之, 等亮度信息允许立体视融合<sup>[28, 75]</sup>, 但颜色不一致又可导致颜色竞争。因此, 在具有不同深度感知情况下, 双目颜色融合也会发生改变。我们先前的实验测量了不同视差条件下双目颜色融合界限的变化情况, 结果表明, 每个颜色采样点的颜色融合界限随视差大小和颜色方向的变

化而变化,当视差从 $-120' \sim +120'$ 变化时,颜色融合界限范围在 $0.036 \sim 0.064$ 个 $\Delta E_{uv}$ 色差单位之间<sup>[76]</sup>。

Yang等<sup>[77]</sup>研究了视差是否影响表面颜色感知,在对镜面高光的几何形状进行详细的研究中发现高光在没有双眼视差的情况下是扭曲的,并将颜色恒性与镜面反射进行比较,结果显示在具有立体视差时镜面反射是正常的,单眼视图的镜面反射却是扭曲的。由于在没有立体视差的情况下发生了镜面高光的几何失真,未发现颜色恒性的显著变化,这表明颜色恒性依赖于受视差影响的知觉的其他特征,从而得出双眼视差可以改善颜色恒性的结论。Werner<sup>[78]</sup>也通过引入立体视差来测试深度信息对颜色恒性的影响,即在相同或五个不同深度平面(1.9~57 arcmin)中的一个平面上感知测试色块和背景。测试中没有额外的如阴影或高光的深度提示,为了获得一致的光照变化,当测试块和背景深度分离时,颜色的稳定性降低,表明上下文影响减少。研究发现了立体深度和空间频率与颜色恒性间的交互作用,在光照变化不一致的情况下:1)如果测试色块和背景在同一深度平面(二维条件下),则颜色恒性降低;2)如果测试色块和背景在同一深度平面(三维条件下),则颜色恒性不降低。此外,三维不一致条件下的颜色恒性略好于二维不一致条件下。因此,Werner得出结论,在光照变化不一致的场景中,深度信息分割支持颜色恒性,深度分割的过程是在颜色恒性的早期感官阶段实现的,它们

定义了视觉区域,在这些区域内,光照变化的影响被单独考虑,他的这些结果支持了最近提出的基于颜色恒性的场景分割方法。

### 3.3 颜色融合与立体融合的交互模型

颜色在人眼立体感知中的作用一直处于争论状态,虽然普遍接受的观点是“深度感主要来源于亮度信息”<sup>[28]</sup>,可是人类对涉及到大脑的高层次颜色与深度信息的处理过程与机制并未全部清楚<sup>[12]</sup>。人眼视觉系统涉及大脑复杂的处理系统,对颜色视觉与立体视觉高层次处理机制的研究,通常采用“视觉心理物理学”方法,根据实验数据提出视觉系统处理过程模型或假说。目前公认视觉系统对信息的处理是分级的,图7(a)给出了颜色与深度信息分别沿着各自线路处理的“独立层级模型”<sup>[79]</sup>。例如,颜色处理是从视网膜锥细胞吸收光开始,通过外丘脑的侧膝状体(LGN)传递到了视觉皮层的初级视皮层(V1),然后进入视觉皮层V2和V4的一系列阶段处理。三种锥细胞类型是颜色“三色学说”的理论基础,LGN的对立处理是“对立学说”的理论基础,“阶段学说”将两种古老的颜色学说统一了起来。V1和V2非线性交互处理是颜色对比度增强和色调感知的基础,V4处理照明光源的颜色恒常<sup>[80]</sup>。这些单纯描述颜色视觉机理的文献,没有提及任何立体视觉的问题。但在立体显示条件下,颜色的融合感知必然受到空间视差的影响,Jung等及本课题组的结果已证实了这一点<sup>[5,81]</sup>。另外,Anstis等<sup>[29]</sup>认为,两眼融合

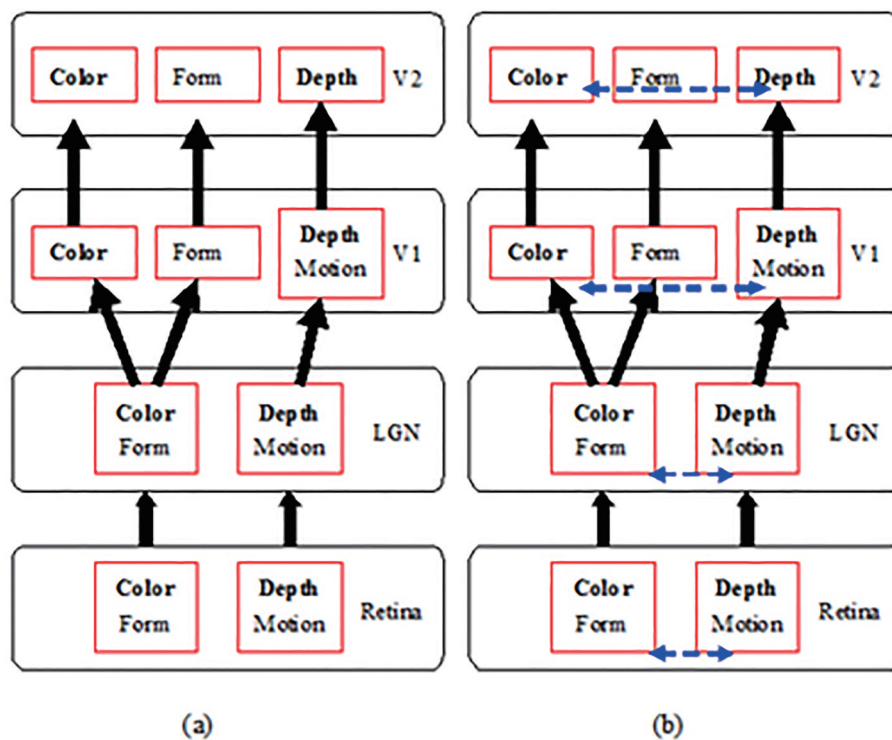


图7 视觉信息处理流程。(a)颜色与深度信息处理线路独立模型<sup>[79]</sup>; (b)本文假设的颜色与深度信息可能在分层节点处交互的模型  
 Fig. 7 Visual information processing flow. (a) Independent model of color and depth information processing<sup>[79]</sup>; (b) proposed model of color and depth information may interact at hierarchical nodes



对立色时要比单眼感知时更差,除非两种颜色具有相关性。在时间交错的立体显示方式下,由于双眼视图之间存在时间延迟,容易造成感知深度的扭曲,但如果采用一种颜色交错的立体显示方式,则可改善这个现象<sup>[71]</sup>。因此,我们认为颜色与深度信息可能在视觉处理分层节点处存在“交互”,并提出如图 7(b)所示的“交互”假设模型。

## 4 双目颜色融合对立体显示视觉舒适度的影响

随着各种立体技术的发展,立体显示视觉舒适度是近年研究的热点,内容包括影响舒适度因素、舒适度主观与客观评价等。影响立体显示视觉舒适度的因素主要有:立体内容采集、制作、编码、传输及显示等过程中产生的双目图像不一致或不匹配<sup>[82]</sup>、双目不融合或竞争,以及为了提高立体效果而使用过大双目视差和不完美的分像技术产生的串扰等<sup>[83]</sup>。由于显示及硬件技术的改进、发展及应用需要一段或更长时间,不能满足当前降低视觉舒适度的应用需求,夏振平等<sup>[84]</sup>提出从图像处理的角度来消除串扰,将平均串扰减少率的理论值提高到 75%,说明利用 3D 图像内容来提升显示技术的不足,不失为一个有效的解决途径。基于立体显示技术的图像增强方法逐步成为研究热点:邱森森等<sup>[85]</sup>针对立体全景图像显著性检测进行了研究,提出了一种立体全景图像显著性检测模型,既能充分利用图像信息,又能有效地抑制复杂的背景区域,从而得到更加符合视觉感知的显著图;牟海维等<sup>[86]</sup>的综述认为,适当引入图像深度感知信息,可让图像显著性检测性能得到改善;季渊等<sup>[87]</sup>对立体图像下的 JND 进行研究,提出一种 FD-JND 多重色阶压缩算法,结果表明,在保证图像质量较高的同时,可较大程度地降低 VR 立体图像的数据量,为超高清近眼显示设备面临的传输数据量过大问题提供了一种良好的解决方案。立体图像增强可有效改善立体显示视觉舒适度,但关于立体显示视觉舒适度主观评价方面,目前还没有评价标准,通常参照国际电信同盟 (ITU) 图像质量主观评价标准进行评价<sup>[2-88]</sup>。根据主观评价结果,可建立可靠的客观评价模型,但鉴于目前主观评价的研究现状,导致客观评价参数选择非常困难,目前主要依靠视差信息建立客观评价模型,我们和荷兰的一个研究小组都曾提出过相应的客观舒适度计算公式<sup>[89-90]</sup>。

在立体显示中,颜色是重要的视觉信息,虽然颜色相对于亮度对立体感知的作用处于次要地位,但颜色影响感知深度、双目对称、时间空间视差分布,对提高立体显示视觉舒适度的作用是不可忽视的<sup>[5]</sup>。近来,北京理工大学的 Shen 等<sup>[3]</sup>成功利用颜色信息对立体显示的串扰进行了预测,从已完成的关于不同色调产生不同深度的研究中发现,不同色调最大融合视差不同,且个人差距较大,从 25~96 arcmin<sup>[75]</sup>。本课题组还

初步研究了颜色不一致导致的立体显示视觉不舒适情况<sup>[7]</sup>,并初步测量了不同视差条件下的双目颜色融合界限<sup>[81]</sup>,研究了不同色调下立体图像的立体图像的视觉舒适度,发现随着色调差异增大,立体图像的视觉舒适度在逐渐降低,在左右视图的平均色调差异达到 76°左右时,观看者将感知到视觉不舒适<sup>[91]</sup>。

目前看来,影响舒适度的因素很多,但主要使用视差信息进行舒适度的评价。由于颜色影响立体融合是肯定的,所以颜色对立体显示视觉舒适度的影响不容忽视,可当下还缺乏建立相关模型和关系的大量实验数据。

## 5 结束语

本文以立体显示下的双目颜色融合为研究对象,通过查阅国内外文献,从双目颜色融合、颜色融合与立体融合的交互作用及双目颜色融合对立体显示视觉舒适度的影响三个方面对文献进行梳理,结果表明,目前的双目颜色融合研究现状可总结为:1)有很多颜色对立体融合的影响研究,但很少有视差信息对颜色融合的影响研究;2)立体显示条件下双目进行颜色融合后,颜色感知会发生改变,但视觉系统处理颜色与立体感知的交互机制仍然不完全清楚,研究结果仅仅停留在现象描述上;3)立体显示条件下和颜色有关的视觉舒适度问题研究刚刚开始,颜色融合影响深度感、视差融合范围、立体匹配是肯定的,但还缺乏大量的“定量”实验数据。

由于立体显示方式可为双眼提供更为丰富的图像外观信息,基于立体显示技术的图像增强方法或将成为一个未来的研究热点,其中,使用双目颜色差异再现目标表面光泽感可能是一个突破口。无论对视觉系统处理颜色融合与立体融合交互作用的研究,还是对利用双目颜色差异再现表面光泽感的方法研究及颜色影响立体显示舒适度的应用研究,都需要定量的视觉心理物理学实验数据,实验需要精心设计刺激图像和各种参数,并进行大量探索。

## 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] Tam W J, Speranza F, Yano S, et al. Stereoscopic 3D-TV: visual comfort[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2011, 57(2): 335-346.
- [3] Shen J B, Zhang Y, Liang Z Y, et al. Robust stereoscopic crosstalk prediction[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2018, 28(5): 1158-1168.
- [4] Holliman N. 3D display systems[J]. Science, 2010, 38(8): 31-36.



- [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] Heo Y S, Lee K M, Lee S U. Illumination and camera invariant stereo matching[C]//2008 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, June 23-28, 2008, Anchorage, AK, USA. New York: IEEE Press, 2008: 10140002.
- [7] Chen Z Q, Huang X Q, Tai Y H, et al. Visual discomfort caused by color asymmetry in 3D displays[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 10022: 100220T.
- [8] Lambouij M, Fortuin M, Heynderickx I, et al. Visual discomfort and visual fatigue of stereoscopic displays: a review[J]. *Journal of Imaging Science and Technology*, 2009, 53(3): 030201.
- [9] Ikeda M, Sagawa K. Binocular color fusion limit[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1979, 69(2): 316-321.
- [10] Wade N J, Wenderoth P. The influence of colour and contour rivalry on the magnitude of the tilt after-effect[J]. *Vision Research*, 1978, 18(7): 827-835.
- [11] Hecht S. On the binocular fusion of colors and its relation to theories of color vision[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1928, 14(3): 237-241.
- [12] Howard I, Rogers B. Seeing in depth: vol. 2: depth perception[J]. Toronto: University of Toronto Press, 2002.
- [13] Desaguliers J T. A plain and easy experiment to confirm Sir Isaac Newton's doctrine of the different refrangibility of the rays of light. By the same[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 2006, 29(348): 448-452.
- [14] Hovis J K. Review of dichoptic color mixing[J]. *Optometry and Vision Science*, 1989, 66(3): 181-190.
- [15] de Weert C M M, Wade N J. Compound binocular rivalry[J]. *Vision Research*, 1988, 28(9): 1031-1040.
- [16] Wilson H R, Blake R, Pokorny J. Limits of binocular fusion in the short wave sensitive ("blue") cones[J]. *Vision Research*, 1988, 28(4): 555-562.
- [17] Qin X L, Takamatsu M, Nakashima Y. Effects of luminance and size of stimuli upon binocular color fusion limit[J]. *Optical Review*, 2009, 16(3): 404-408.
- [18] Burt P, Julesz B. A disparity gradient limit for binocular fusion[J]. *Science*, 1980, 208(4444): 615-617.
- [19] Malkoc G, Kingdom F A A. Dichoptic difference thresholds for chromatic stimuli[J]. *Vision Research*, 2012, 62: 75-83.
- [20] Loxley P N, Robinson P A. Soliton model of competitive neural dynamics during binocular rivalry[J]. *Physical Review Letters*, 2009, 102(25): 258701.
- [21] Pieper W, Ludwig I. Binocular vision: rivalry, stereoscopic lustre, and sieve effect[J]. *Perception*, 2001, 30: 75-76..
- [22] Bhardwaj R, O'Shea R P. Temporal analysis of image-rivalry suppression[J]. *PLoS One*, 2012, 7(9): e45407.
- [23] O'Shea R P, Williams D R. Binocular rivalry with isoluminant stimuli visible only via short-wavelength-sensitive cones[J]. *Vision Research*, 1996, 36(11): 1561-1571.
- [24] Sagawa K. Minimum light intensity required for color rivalry[J]. *Vision Research*, 1981, 21(10): 1467-1474.
- [25] Leng O T, Loop M S. Visual suppression and its effect upon color and luminance sensitivity[J]. *Vision Research*, 1994, 34(22): 2997-3003.
- [26] Mullen K T, Kim Y J, Gheiratmand M. Contrast normalization in colour vision: the effect of luminance contrast on colour contrast detection[J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 7350.
- [27] Livingstone M S, Hubel D H. Psychophysical evidence for separate channels for the perception of form, color, movement, and depth[J]. *The Journal of Neuroscience: the Official Journal of the Society for Neuroscience*, 1987, 7(11): 3416-3468.
- [28] Lu C, Fender D H. The interaction of color and luminance in stereoscopic vision[J]. *Investigative Ophthalmology*, 1972, 11(6): 482-490.
- [29] Anstis S, Rogers B. Binocular fusion of luminance, color, motion and flicker-two eyes are worse than one[J]. *Vision Research*, 2012, 53(1): 47-53.
- [30] Wendt G, Faul F, Mausfeld R. Highlight disparity contributes to the authenticity and strength of perceived glossiness[J]. *Journal of Vision*, 2008, 8(1): 1-10.
- [31] Jung W S, Moon Y G, Park J H, et al. Glossiness representation using binocular color difference[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(14): 2584-2587.
- [32] Ho Y X, Landy M S, Maloney L T. Conjoint measurement of gloss and surface texture[J]. *Psychological Science*, 2008, 19(2): 196-204.
- [33] Olkkonen M, Brainard D H. Joint effects of illumination geometry and object shape in the perception of surface reflectance[J]. *i-Perception*, 2011, 2(9): 1014-1034.
- [34] Wijntjes M W A, Pont S C. Illusory gloss on Lambertian surfaces[J]. *Journal of Vision*, 2010, 10(9): 13.
- [35] Doerschner K, Boyaci H, Maloney L T. Estimating the glossiness transfer function induced by illumination change and testing its transitivity[J]. *Journal of Vision*, 2010, 10(4): 1-9.
- [36] Motoyoshi I, Matoba H. Variability in constancy of the perceived surface reflectance across different illumination statistics[J]. *Vision Research*, 2012, 53(1): 30-39.
- [37] Fleming R W. Human perception: visual heuristics in the perception of glossiness[J]. *Current Biology*, 2012, 22(20): R865-R866.
- [38] Marlow P J, Kim J, Anderson B L. The perception and misperception of specular surface reflectance[J]. *Current Biology*, 2012, 22(20): 1909-1913.
- [39] Georgeson M A, Wallis S A, Meese T S, et al. Contrast and lustre: a model that accounts for eleven different forms of contrast discrimination in binocular vision[J]. *Vision Research*, 2016, 129: 98-118.
- [40] Zhang Z M, Hu X H, Liu X T, et al. Binocular tone mapping with improved overall contrast and local details

- [J]. *Computer Graphics Forum*, 2018, 37(7): 433-442.
- [41] Zhong F, Koulieris G A, Drettakis G, et al. DiCE: dichoptic contrast enhancement for binocular displays [C]//SIGGRAPH '19: ACM SIGGRAPH 2019 Posters, July 28-August 1, 2019, Posters. New York: ACM Press, 2019: 1-2.
- [42] Zhang Z M, Han C, He S F, et al. Deep binocular tone mapping[J]. *The Visual Computer*, 2019, 35(6/7/8): 997-1011.
- [43] Simmons D R. The binocular combination of chromatic contrast[J]. *Perception*, 2005, 34(8): 1035-1042.
- [44] Erkelens C J, van Ee R. Multi-coloured stereograms unveil two binocular colour mechanisms in human vision [J]. *Vision Research*, 2002, 42(9): 1103-1112.
- [45] Kingdom F A A, Libenson L. Dichoptic color saturation mixture: binocular luminance contrast promotes perceptual averaging[J]. *Journal of Vision*, 2015, 15(5): 1-15.
- [46] Baker D H, Wallis S A, Georgeson M A, et al. Nonlinearities in the binocular combination of luminance and contrast[J]. *Vision Research*, 2012, 56: 1-9.
- [47] Kim Y J, Gheiratmand M, Mullen K T. Cross-orientation masking in human color vision: application of a two-stage model to assess dichoptic and monocular sources of suppression[J]. *Journal of Vision*, 2013, 13(6): 1-14.
- [48] Maehara G, BinocularGoryo K., monocular and dichoptic pattern masking[J]. *Optical Review*, 2005, 12 (2): 76-82.
- [49] Meese T S, Georgeson M A, Baker D H. Binocular contrast vision at and above threshold[J]. *Journal of Vision*, 2006, 6(11): 1224-1243.
- [50] Wilson H R, Blake R, Lee S H. Dynamics of travelling waves in visual perception[J]. *Nature*, 2001, 412(6850): 907-910.
- [51] Legge G E, Foley J M. Contrast masking in human vision[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1980, 70(12): 1458-1471.
- [52] Meese T S, Hess R F. Low spatial frequencies are suppressively masked across spatial scale, orientation, field position, and eye of origin[J]. *Journal of Vision*, 2004, 4(10): 843-859.
- [53] Zhou J W, Georgeson M A, Hess R F. Linear binocular combination of responses to contrast modulation: contrast-weighted summation in first- and second-order vision[J]. *Journal of Vision*, 2014, 14(13): 1-19.
- [54] Ding J, Sperling G. A gain-control theory of binocular combination[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2006, 103(4): 1141-1146.
- [55] Komatsu H. Mechanisms of central color vision[J]. *Current Opinion in Neurobiology*, 1998, 8(4): 503-508.
- [56] Krauskopf J, Forte J D. Influence of chromaticity on vernier and stereo acuity[J]. *Journal of Vision*, 2002, 2 (9): 645-652.
- [57] Jordan J R, Bovik A C. Using chromatic information in dense stereo correspondence[J]. *Pattern Recognition*, 1992, 25(4): 367-383.
- [58] Gegenfurtner K R, Kiper D C, Levitt J B. Functional properties of neurons in macaque area V3[J]. *Journal of Neurophysiology*, 1997, 77(4): 1906-1923.
- [59] Domini F, Blaser E, Cicerone C M. Color-specific depth mechanisms revealed by a color-contingent depth aftereffect[J]. *Vision Research*, 2000, 40(4): 359-364.
- [60] van Ee R, Anderson B L. Motion direction, speed and orientation in binocular matching[J]. *Nature*, 2001, 410 (6829): 690-694.
- [61] Peirce J W, Solomon S G, Forte J D, et al. Cortical representation of color is binocular[J]. *Journal of Vision*, 2008, 8(3): 1-10.
- [62] den Ouden H E M, van Ee R, de Haan E H F. Colour helps to solve the binocular matching problem[J]. *The Journal of Physiology*, 2005, 567(2): 665-671.
- [63] Simmons D R, Kingdom F A A. On the independence of chromatic and achromatic stereopsis mechanisms[J]. *Vision Research*, 1997, 37(10): 1271-1280.
- [64] Simmons D R, Kingdom F A A. Interactions between chromatic-and luminance-contrast-sensitive stereopsis mechanisms[J]. *Vision Research*, 2002, 42(12): 1535-1545.
- [65] Kingdom F A A, Simmons D R, Rainville S. On the apparent collapse of stereopsis in random-dot-stereograms at isoluminance[J]. *Vision Research*, 1999, 39(12): 2127-2141.
- [66] Medina J M, Mullen K T. Colour-luminance interactions in binocular summation[J]. *Vision Research*, 2007, 47 (8): 1120-1128.
- [67] Scharff L V, Geisler W S. Stereopsis at isoluminance in the absence of chromatic aberrations[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1992, 9(6): 868-876.
- [68] Weert C D. Colour contours and stereopsis[J]. *Vision Research*, 1979, 19(5):555-564.
- [69] Shevell S K, Kingdom F A A. Color in complex scenes [J]. *Annual Review of Psychology*, 2008, 59: 143-166.
- [70] Mach E, Dvořák V. Über analoge der persönlichen differenz zwischen beiden augen und den netzhautstellen desselben auges[J]. *Sitzungsberichte der Königlichen Böhmisches Gesellschaft der Wissenschaft Prague*, 1872: 65-74.
- [71] Kim J, Johnson P V, Banks M S. Stereoscopic 3D display with color interlacing improves perceived depth [J]. *Optics Express*, 2014, 22(26): 31924-31934.
- [72] Tyler C W, Cavanagh P. Purely chromatic perception of motion in depth: two eyes as sensitive as one[J]. *Perception & Psychophysics*, 1991, 49(1): 53-61.
- [73] Howard I P, Rogers B J. *Perceiving in depth, volume 2: stereoscopic vision*[M]. Oxford: Oxford Scholarship Online, 2012.
- [74] Ozolinsh M, Muizniece K. Color difference threshold of chromostereopsis induced by flat display emission[J]. *Frontiers in Psychology*, 2015, 6: 337.
- [75] Chen Z Q, Shi J S, Tai Y H, et al. Stereoscopic depth perception varies with hues[J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(9): 097401.
- [76] 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.
- [77] Yang J N, Shevell S K. Stereo disparity improves color constancy[J]. Vision Research, 2002, 42(16): 1979-1989.
- [78] Werner A. The influence of depth segmentation on colour constancy[J]. Perception, 2006, 35(9): 1171-1184.
- [79] Palmer S E. Vision science: from photons to phenomenology[M]. Cambridge: The MIT Press, 1999.
- [80] Conway B R. Color vision, cones, and color-coding in the cortex[J]. The Neuroscientist, 2009, 15(3): 274-290.
- [81] Chen Z Q, Shi J S, Tai Y H, et al. A quantitative measurement of binocular color fusion limit for different disparities[J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10616: 1061604.
- [82] Kooi F L, Toet A. Visual comfort of binocular and 3D displays[J]. Displays, 2004, 25(2/3): 99-108.
- [83] Yano S, Emoto M, Mitsuhashi T. Two factors in visual fatigue caused by stereoscopic HDTV images[J]. Displays, 2004, 25(4): 141-150.
- [84] 夏振平, 李晓华, 崔渊, 等. 眼镜式立体显示中的串扰分析及消除方法研究[J]. 光学学报, 2012, 32(10): 1012002.
- Xia Z P, Li X H, Cui Y, et al. Crosstalk analysis and cancellation method study in stereoscopic displays[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 1012002.
- [85] 邱淼淼, 柴雄力, 邵枫. 一种立体全景图像显著性检测模型[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(8): 0810002.
- Qiu M M, Chai X L, Shao F. Saliency detection model for stereoscopic panoramic images[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(8): 0810002.
- [86] 牟海维, 王妙妙, 韩建, 等. 立体视觉感知中的深度敏感信息提取综述[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(12): 120003.
- Mu H W, Wang M M, Han J, et al. Survey of depth sensitive information extraction in stereo vision perception[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(12): 120003.
- [87] 季渊, 郑志杰, 吴浩, 等. 立体视觉中心凹 JND 模型及其图像压缩硬件实现[J]. 光学学报, 2021, 41(12): 1210001.
- Ji Y, Zheng Z J, Wu H, et al. Foveated JND model based on stereo vision and its application in image compression with hardware implementation[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(12): 1210001.
- [88] ITU-R. Methodology for the subjective assessment of the quality of television pictures[EB/OL]. [2021-03-02]. [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.500-9-199811-S!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.500-9-199811-S!!PDF-E.pdf).
- [89] 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.
- [90] Lambooi M, IJsselsteijn W A, Heynderickx I. Visual discomfort of 3D TV: assessment methods and modeling[J]. Displays, 2011, 32(4): 209-218.
- [91] Chen K, Chen Z Q, Zhou D M, et al. Visual comfort evaluated by hue asymmetries in stereoscopic images[J]. Journal of the Society for Information Display, 2020, 28(11): 843-853.