

同时颜色对比机制的空间特性¹⁾

贺极苍 林仲贤

中国科学院心理研究所, 北京

摘 要

为研究同时颜色对比机制的空间特性,本实验用光学投影方法产生出不同空间频率的同时颜色对比光栅。实验结果表明,同时颜色对比机制具有低通空间频率反应特性,即随空间频率下降,颜色对比效应增强。这一结果可能为同时颜色对比机制参与图形探测的推论提供一个实验支持。实验中也测试了几种不同条件下人眼对比敏感度函数。

引 言

颜色是人眼识别物体的重要线索。但人眼所见到某一物体的颜色并不仅由该物体表面的光学特性所确定,同时还受到周围物体颜色的影响。一个白色圆表面,其周围被一个红色圆环所包围时,白色表面看上去会发绿。这一现象称为同时颜色对比或颜色诱发。它具有怎样的反应特性?在人眼感知客观物体的过程中,它究竟起着什么作用?很久以来,一直是非常引人注意的问题。

利用空间频率分析方法对视觉系统进行了大量研究。结果表明,在一个亮度均匀的背景下,人眼对黑白图形呈现带通的信息传递特性^[1-3]。人眼对空间频率(Spatial frequency, 简记为SF)为3—4周/视角度(Cycles/degree, 简记为C/deg)的光栅最敏感。而在其它SF下,无论SF较最敏感处光栅SF变得越来越高或是较之越来越低,人眼敏感度都越来越低。不过,如果刺激光栅为绿色,背景为红色,或者刺激光栅由红绿相间的颜色条纹组成,这时不出现对低SF光栅的对比敏感度衰减^[4,5]。但若背景和光栅的颜色相同时,对比敏感度的低频衰减现象又重新出现^[6,6]。另外,将背景改为白色,以红色光栅作为刺激光栅,这时对比敏感度的低频衰减消失^[7]。

从这些结果可以看出,当刺激光栅与背景颜色(包括白色)一致时,即为纯色光栅(monochromatic grating)时,人眼视觉系统表现出带通特性。而背景与刺激光栅颜色不同时,即形成彩色光栅(chromatic grating)时,人眼视觉系统对低频的敏感度增高,呈现出低通特性。对于由红绿蓝颜色形成的彩色光栅作为刺激时出现的低通特性,通常用颜色辨别机制(Color discrimination mechanism)加以解释^[4,5,8,9]即认为颜色辨别机制具有低通传递特性。但当背景为白色时,所形成的光栅显然与蓝颜色光栅不同,在这种情况下

1) 本文于1988年2月10日收到。

下,仍用颜色辨别机制解释就存在困难。Mullen^[7]认为,在此条件下,同时颜色对比机制参与了探测过程。如果Mullen推论成立,同时颜色对比机制参与了探测过程,那么,根据测得的对比敏感度函数的低通特性可以认为同时颜色对比机制具有低通的传递特性。若同时颜色对比机制不具有低通的传递特性,则参与探测过程的机制将会更为复杂。因此,研究同时颜色对比机制的空间特性便很重要了。本工作正是以研究同时颜色对比机制的空间特性为目的而设计的。

实 验 方 法

刺激与仪器

刺激由上下排列的两幅宽为 5° 视角高为 3° 视角的同时颜色对比方波光栅组成。其中一幅光栅的SF固定,实验中用 $0.4C/deg$,作为标准光栅。另一幅则为测试光栅, SF在 $0.6, 0.75, 1.5, 3, 4.5$ 和 $6 C/deg$ 变化。每幅颜色同时对比光栅由一幅黑白条纹相间的方波光栅与另一幅SF相同但为彩色(红色条纹)和黑色相间的方波光栅以 180° 位相差经光学投影迭加而成。所形成的光栅为一幅彩条与白条相间的方波光栅。由于人眼视觉系统颜色同时对比机制的作用,这时便形成了一幅互补色相间的同时颜色对比光栅。通常彩条色称为诱发色(inducing color),白条上看到的颜色为被诱发色或对比色(induced color or contrast color)。本实验中称诱发色光栅为诱发光栅,被诱发色光栅为对比光栅。另外还产生一幅与标准光栅有相同SF的彩条与黑条相间的方波光栅迭加在其上,以改变或者消除标准光栅中的对比色。

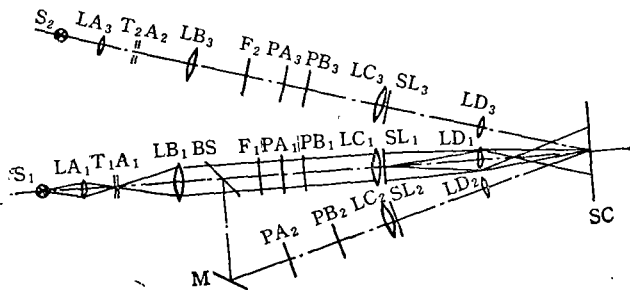


图1 实验装置光学系统简图 S_1, S_2 ,光源; LA_1, LA_3 ,聚光镜; T_1, T_2 ,刺激显时控制器; A_1, A_2 ,光阑; LB_1, LB_3 ,准直镜; BS ,分光镜; M ,反射镜; F_1, F_2 ,滤色片; $PA_1, PA_2, PA_3, PB_1, PB_2, PB_3$,读数偏光镜; LC_1, LC_2, LC_3 ,照明物镜; SL_1, SL_2, SL_3 ,光栅; LD_1, LD_2, LD_3 ,投影物镜; SC ,显示屏;

图1为实验仪器光学系统简图。卤钨灯光源 S_1 经透镜 LA_1, LB_1 和分光镜 BS 形成两路准直光分别投射到物镜 LC_1 和 LC_2 照明方波光栅 SL_1 和 SL_2 ,投影镜 LD_1 和 LD_2 分别将两光栅成像在乳色玻璃屏 SC 上以 180° 的位相差迭加。 SL_1 和 SL_2 均由两部分组成,上半部分为SF为 $0.4c/deg$ 的方波光栅,下半部分SF为可变的光栅。它们在屏上即为标准光栅和

测试光栅。 F_1 为滤色片。

光源 S_2 经相似的光路照明方波光栅 SL_3, SL_3 经投影镜 LD_3 成像在屏上形成消除光栅。 F_2 为与 F_1 同色的滤色片。 $PA_1, PB_1, PA_2, PB_2, PA_3$ 和 PB_3 均为偏光片用于调节三路光强。 A_1 和 A_2 为光阑。 T_1 和 T_2 为曝光投射器。

亮度测量和定标均用BM-2亮度光度计。实验中诱发光栅和对比光栅亮条纹的亮度均为 $18cd/m^2$,满足等亮度条件。诱发光栅为红色,CIE色度坐标为 $x, 0.735, y, 0.264$ 。

测试过程

标准光栅和测试光栅以1秒的曝光时间同时呈现给被试,要求被试找出哪幅光栅的对比色更深。下次刺激便将消除光栅加于对比更强的那幅以消弱对比色深度。通过不断调节消除光栅对比可达到一消除光栅对比值,此时标准光栅和测试光栅的对比色度正好相同。一般将标准光栅对比在阈值附近上下变化3—4次所测得的对比值平均作为一个测量值。通常每组实验要重复6次,这样6个测量值的平均便作为一个消除光栅对比阈值,记为 C_T ,它反应对比色的程度。 C_T 是随SF而变化的函数,即为同时颜色对比传递函数。

颜色对比敏感度函数的测量则采用一般调节法。由被试报告“有”或“无”。

实验是在暗室中进行。采用双眼观察,自然瞳孔,被试头部用一头夹固定以保持与显示屏0.6米的距离。2名被试,J,女,二十四岁;Y,男,二十六岁。实验前视力和色觉检查均属正常。

实验结果

在测试同时颜色对比机制的空间特性之前,本实验对几种不同刺激条件下的对比敏感度函数进行了测试。图2给出的是两种典型刺激条件下所测得的结果,即黑白光栅和红绿颜色光栅。横坐标为刺激光栅SF,纵坐标为对比敏感度即对比探测阈值的倒数。图中实心圆和实线为白光背景下黑白光栅刺激时的对比敏感度曲线,曲线在SF为3—4C/deg时出现峰值,而在更高或更低的SF下,均逐渐下降。这表明对比敏感函数的带通特性。这一结果与较早的实验结果符合得很好^[1-3]。而在红背景绿光栅刺激条件下测得的对比敏感度曲线则不出现低SF下的衰减,如图中实心方块和虚线所示。这一结果亦与早年研究的结果一致^[4,5],表明视觉系统在探测彩色图象时具有低通特性。

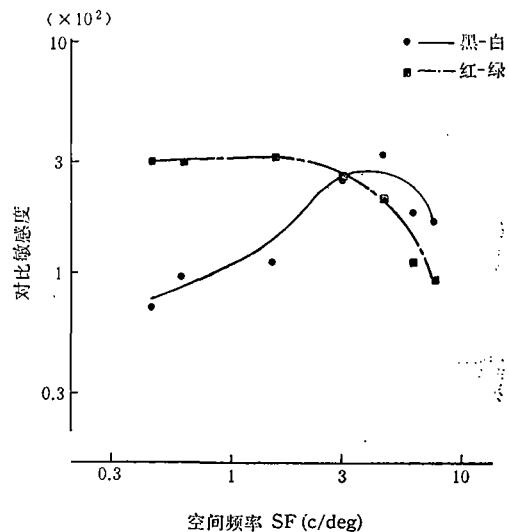


图2 黑白和颜色光栅刺激下的对比敏感度函数

将纯色光栅与彩色光栅刺激条件进行比较,其结果见图3。图中实心三角形和实线所示为红光背景红光栅刺激时的对比敏感度曲线,与黑白刺激条件相似,曲线在低频区亦有明显衰减,这表明视觉系统对纯色刺激的带通特性。图中虚线所示与前图相同。很明显视觉系统处理纯色图象和彩色图象的特性亦不相同。

图4所示为红光背景下红光栅刺激与白背景下红光栅刺激时的对比敏感度函数曲线。由图可见,在白背景刺激条件下,曲线在低SF处没有明显下降,这表明视觉系统的低通反应特性。这一结果与Mullen^[7](1987)所报道的结果完全一致。与纯色刺激下的对比敏感度曲线比较,可见到视觉系统对这两种不同刺激条件有着不同的反应特性。

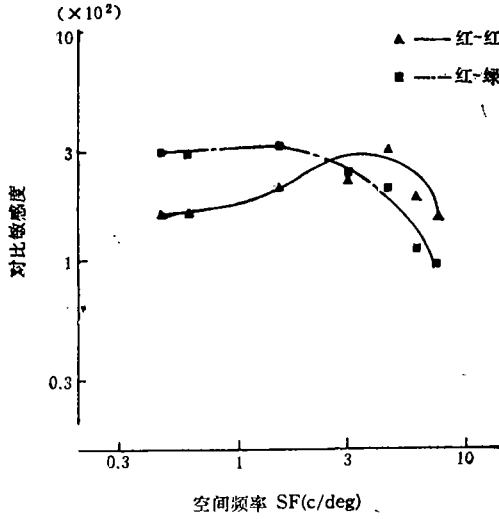


图3 纯色与彩色刺激条件下对比敏感度函数的比较

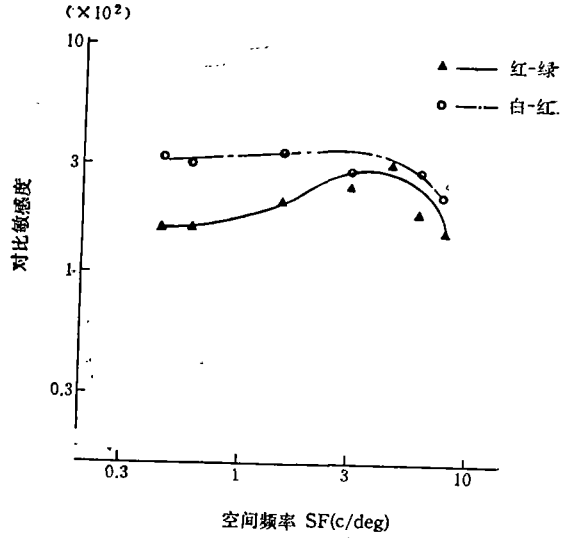


图4 纯色与红白刺激条件下对比敏感度函数的比较

图 2 至图 4 所对应的测试数据列于表 1。

表1 颜色对比敏感度函数测试值

SF \ 刺激条件	0.45	0.6	1.5	3	4.5	6	7.5
黑-白	0.7047	0.971	1.105	2.433	3.259	1.779	1.644
红-绿	2.989	2.851	3.349	2.399	2.175	1.115	0.955
红-红	1.609	1.635	2.126	2.410	3.091	1.875	1.651
白-红	3.243	2.999	3.382	2.789	3.610	2.855	2.205

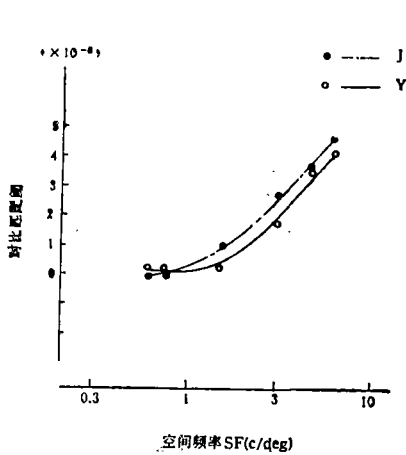


图5 同时颜色对比空间调制函数

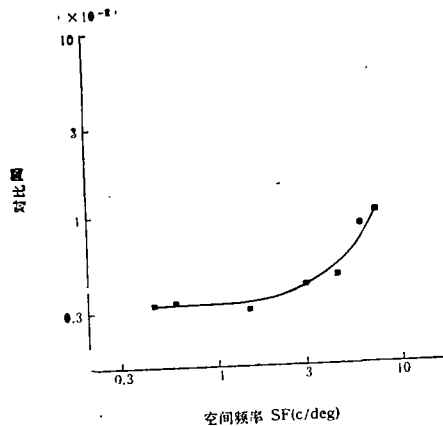


图6 颜色对比探测空间调制函数

以上为几种不同刺激条件下的对比敏感度函数。同时颜色对比空间调制函数曲线则如图 5 所示。图中纵坐标表示匹配标准光栅和测试光栅对比色色度所需消除光栅的对比匹配阈值。此处纵坐标意义与上面几图不同。前图中纵坐标表示对比敏感度, 是对比探测阈值的倒数。为便于比较, 将图 2 中红背景绿光栅刺激下测得的曲线用对比探测阈值绘于图 6。图示表明, 在低 SF 处, 对比探测阈值低, 对比敏感度高; 随 SF 上升, 对比探测阈值逐渐上升, 对比敏感度逐渐下降表现出明显的低通特性。

由图 5 和表 2 数据可见, 在测试光栅 SF 小于 2 C/deg 时, 消除光栅对比匹配阈值接近于 0, 表明在此 SF 下, 测试光栅和标准光栅对比色度基本相同。随测试光栅的 SF 上升, 消

表2 同时颜色对比空间调制函数匹配阈值

被试 \ SF	0.45	0.6	1.5	3	4.5	6
J	0.306	0.269	0.214	1.82	3.47	4.24
Y	0.071	0.106	1.10	2.83	3.72	4.70

除光栅的匹配阈也逐渐上升。这表明, 标准光栅与测试光栅相比, 对比色色度越来越强。这一结果表明, 同时颜色对比效应在低 SF 下较强, 而随 SF 上升逐渐变弱, 即具有空间低通传递特性。

讨 论

人眼视觉系统在感知不同环境下的客体时表现出不同的反应特性。在无色条件下, 其反应特性为带通, 而在彩色环境下, 视觉系统对物体的低频成分反应敏感度增高, 对高频成分则反应敏感度相对下降, 表现出低通特性。这一现象显然与我们在环境中的行为有关。我们的精细操作和细节的辨别行为通常是在白光照明条件下进行, 采用色光照明的情况却是很少的, 即使我们走进色彩缤纷的大自然中, 也很少去注意红枝绿叶的细节。

这种不同的反应特性通常认为是由不同的视觉机制产生。黑白刺激条件下主要由亮度探测机制起作用, 彩色条件下则主要由颜色辨别机制起作用。背景与物体颜色相同时, 由于颜色辨别机制不起作用, 因而视觉系统表现出亮度探测机制的反应特性。但当背景为白色, 物体为彩色时, 或是彩色背景白色物体时, 如果进一步使亮度相等 (如本实验条件), 这时亮度机制不起作用, 其低通特性又不宜用颜色辨别机制解释, 因而 Mullen 以为同时颜色对比机制发生了作用。本工作对同时颜色对比机制的研究结果 (图 5) 表明, 同时颜色对比机制具有低通反应特性。因此, 我们的工作为 Mullen 的推论提供了一个直接的实验支持。进而有理由认为同时颜色对比机制参与图形探测。

是否颜色辨别机制与同时颜色对比机制实际上是同一机制? Krauskopf^[10] 等用调零法进行的研究表明, 同时颜色对比是高水平的颜色机制之间相互作用的结果而不像一般的颜色辨别那样由初级感光细胞和次级颞颥机制完成。另外, 对同时颜色对比机制的时间特性所做的研究结果^[11] 表明, 同时颜色对比机制具有与颜色辨别机制完全不同的时

间调制反应特性,但颜色对比与颜色差别的知觉同在一个水平上。由此可知,两机制并不同一。但两机制是否存在相互作用?其方式怎样?显然是很有意义而又尚待解决的问题。

小 结

1. 本实验用光学投影方法产生的同时颜色对比光栅作为刺激,利用消除法测定同时颜色对比机制的空间反应特性。这一方法为研究同时颜色对比机制提供了一个新的有效方法。

2. 对几种不同刺激条件下对比敏感度函数所做测试的结果表明,纯色刺激条件下,人眼视觉系统具有带通反应特性,而对彩色刺激则呈现低通反应特性。

3. 用同时颜色对比光栅测试同时颜色对比机制的空间传递特性的结果表明,同时颜色对比机制具有低通的空间传递特性。这一结果为同时颜色对比机制参与白光背景下彩色图形探测这一推论提供了直接的实验支持。

参 考 文 献

- [1] Schade O.H., Optical and photoelectric analog of the eye. *J. Opt. Soc. Amer.*, 1956, 46, 721-739.
- [2] Campbell F.W. and Robson J.G., Application of Fourier analysis to the visibility of grating. *J. Physiol. (Land)* 1968, 197, 551-566.
- [3] Blakemore C.E. and Campbell F.C., On the existence of neurons in human visual system selectively sensitive to the orientation and size of retinal images. *J. physiol. (Land)* 1969, 203, 237-260.
- [4] Van der Horst G.J.C., de Weert C.M. M. and Bouman M.A. Transfer of spatial chromaticity-contrast at threshold in the human eye. *J. Opt. Soc. Amer.*, 1967, 57, 1260-1266.
- [5] Mullen K.T., The contrast sensitivity of human color vision to red-green and blue-yellow chromatic gratings. *J. Physiol.*, 1985, 359, 381-400.
- [6] De Valois K.K. and Switkes E., Simultaneous masking interactions between chromatic and luminance gratings. *J. Opt. Soc. Amer.*, 1983, 73, 11-18.
- [7] Mullen K.T. Spatial influence on color opponent contributions to detection. *Vision Res.* 1987, 27, 829-839.
- [8] De Valois R.D. and De Valois K.K., Spatial vision. *Annual Review of Psychology*, 1980, 31, 309-341
- [9] Mollon J.D., Color vision. *Annual Review of Psychology*, 1982, 33, 41-85.
- [10] Krauskopf J., Zaidi Q. and Mandler M.B., Mechanism of simultaneous color induction. *J. Opt. Soc. Amer.* 1986, A 8, 1752-1757.
- [11] Bonyton R.M., Mechanism of chromatic discrimination. In *Color Vision: Physiology and psychophysics* (Edited by Mollon J.D. and Sharpe L.T.) 1983, pp. 409-423. Academic Press, New York.

SPATIAL PROPERTIES OF THE SIMULTANEOUS COLOR CONTRAST MECHANISM

He Ji-cang Lin Zhong-xian
Institute of Psychology, Academia Sinica, Beijing

Abstract

Simultaneous color contrast gratings with different spatial frequency were optically generated to examine the spatial property of the simultaneous color contrast mechanism. Results show that the simultaneous color contrast mechanism display low pass spatial frequency characteristics, becoming relatively more effective as the spatial frequency decreases. These results may provide an experimental support for the suggestion that simultaneous color contrast mechanism takes part in pattern detection. The color contrast sensitivity functions at different stimulation conditions are also investigated in this experiment.