

色觉的译码模型及其验证

鲁晨光
(长沙大学计算机中心)

提 要

文中简要介绍了色觉机制的译码模型,提出了一个基于译码模型的 $\theta-r-s$ 色坐标制。这一色坐标制既具有孟塞尔色坐标制的特点,又具有 xyz 色坐标制的特点。同时,文中给出了一个通过对 B, G, R 作非线性变换得出 $\theta^*-r^*-s^*$ 色坐标制,并通过 s 和 s^* 对明度的反映孟塞尔色样品在 $\theta^*-r^*-s^*$ 制中的分布,验证了模型的合理性。

关键词: 颜色视觉;色坐标制;互补色处理;明度;模糊逻辑;模糊译码。

一、引 言

色觉机制的译码模型建立在模糊开关准布尔代数和模糊译码的基础上。这些数学方法在另文讨论^[1];相应的物理模型也已制成,其运行如理论所预示^[2]。本文先简要介绍译码模型,然后着重介绍基于译码模型的 $\theta-r-s$ 色坐标制和一个由非线性变换得到的 $\theta^*-r^*-s^*$ 色坐标制,并联系明度和孟塞尔色样品来验证模型。

二、色觉的译码模型

设 $B, G, R \in [0, 1]$ 分别是三视维细胞的光电响应,则一种颜色可以写成 (B, G, R) 。

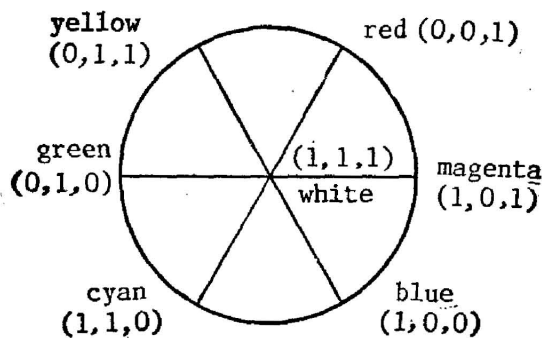


Fig. 1 The resolution pattern of a color vector

对于任意给出 (B, G, R) , 总有

$$\begin{aligned}
 (B, G, R) = & [\bar{B}\bar{G}\bar{R}](0, 0, 1) \\
 & + [\bar{B}G\bar{R}](0, 1, 1) \\
 & + [\bar{B}\bar{G}R](0, 1, 0) \\
 & + [B\bar{G}\bar{R}](1, 1, 0) \\
 & + [B\bar{G}R](1, 0, 0) \\
 & + [B\bar{G}R](1, 0, 1) \\
 & + [BGR](1, 1, 1). \quad (1)
 \end{aligned}$$

其中“[]”是逻辑表达式符号, $[\bar{B}\bar{G}\bar{R}]$ 等七个系数是把 B, G, R 当作模糊原码译码得到的

七个目的码(如果考虑到 $[\bar{B}\bar{G}\bar{R}]$ 反映颜色黑的程度,式(1)右端还可加上 $[\bar{B}\bar{G}\bar{R}](0, 0, 0)$,这样,目的码一共是 $2^3=8$ 个)。 $[\bar{B}\bar{G}\bar{R}]$ 表示 R 大于 B 且大于 G 的部分; $[\bar{B}G\bar{R}]$ 表示 G 和 R 共有且大于 B 的部分;其他类推。

对于给定的 (B, G, R) , 式(1)右端仅有基矢。在图 1 中, 某一扇形三顶点上的三项不为 0, 因而式(1)也可以写成

$$(B, G, R) = m_1 e_1 + m_2 e_2 + m_3 e_3 \quad (2)$$

其中 $m_3 e_3 = [BGR](1, 1, 1)$; e_1, e_2 是两项不为 0 的基矢, m_1, m_2 是相应的系数。设 θ_1, θ_2 是 e_1, e_2 在图 1 中的位置的角度, 利用求数学期望或质量合成方法可以求得。

$$\theta = \frac{m_1 \theta_1 + m_2 \theta_2}{m_1 + m_2} \quad (3)$$

$$r = \frac{m_1 + m_2}{m_1 + m_2 + m_3} \quad (4)$$

$$z = m_1 + m_2 + m_3 \quad (5)$$

其本质是一个由三刺激值颜色空间到心理颜色空间的一一对应。其中 θ, r, z 分别反映色调、色纯度和明度。令

$$r_0 = rz = m_1 + m_2 \quad (6)$$

r_0 便和孟塞尔色坐标制中的彩度 c 相当(后面将说明之)。用类似的方法, 我们也可以建立一个四元色色觉空间, 其中反映色调的是球面上的一点 (θ, φ) , 该空间同样具有牛顿色盘所具有的各种性质^[3]。

笔者认为, 人眼色觉机制在本质上是模糊开关 3/8 译码器, 8 种译码输出信号分别激励脑视皮层中 8 种色觉细胞, 这些色觉细胞按质量合成的方式产生色调, 色纯度(或彩度), 及明度。据此, 要说明为什么颜色信号在视神经上以颞颞对形式存在, 也是十分方便的。

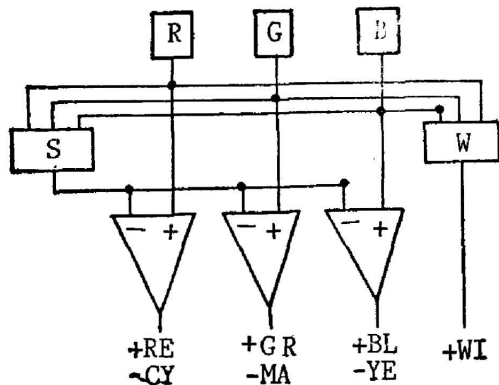


Fig. 2 The mathematical model of color vision mechanism of retina

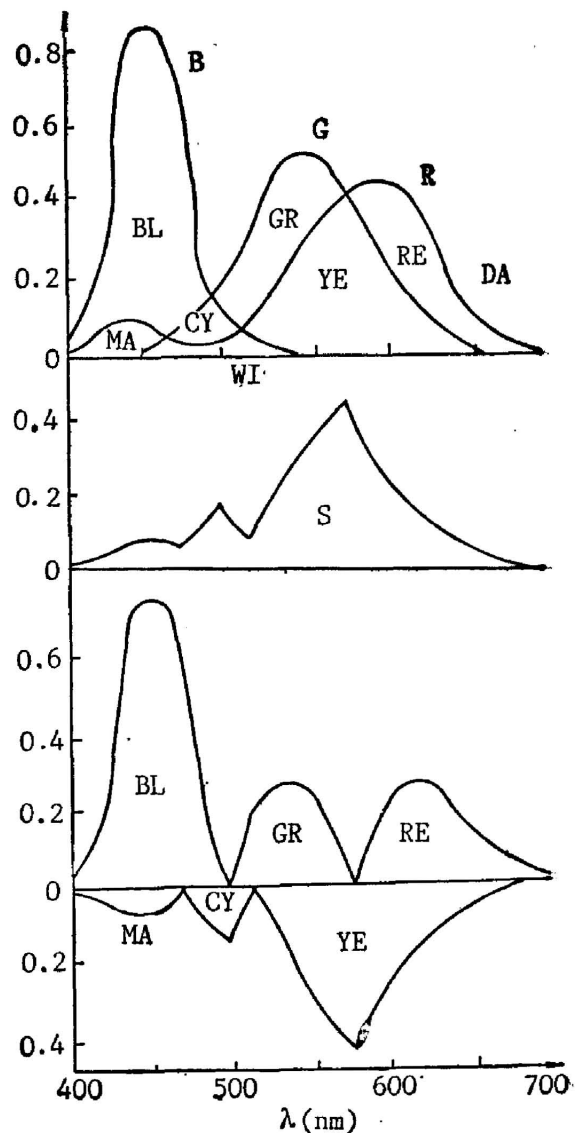


Fig. 3 Color signals being processed in retina

我们可以设想视网膜首先由 B, G, R 求出三者中非唯一最大亦非唯一最小者:

$$S = [BG \vee BG \vee GR] \text{ (“}\vee\text{”表示逻辑和符号或取最大),}$$

然后分别用 B, G, R 减去 S 得蓝黄、绿绛、红青三颧颧对信号。比如,

$$B - S = \begin{cases} + [BS] = + [B\bar{G}\bar{R}] \text{ (推导从略), 当 } B \geq S \text{ 时,} \\ - [\bar{B}S] = - [\bar{B}GR], \text{ 当 } B < S \text{ 时.} \end{cases}$$

白色信号为 B, G, R 中最小者, 可以直接求出。黑色信号可以认为隐含在其他七个信号之中, 因为 $[\bar{B}\bar{G}\bar{R}]$ 等于 1 减去其他七个值之和。视网膜色信号机制数学模型如图 2 所示 ($RE, CY, GR, MA, BL, YE, WI$ 分别表示红、青、绿、绛、蓝、黄、白)。

假设三视维敏感曲线如赖佛 (Fr. Ladd Fra-Klin) 理论得出的^(41, 602), 由等能量单色光刺激产生的颜色信号在视网膜中的处理如图 3 所示 (DA 表示黑)。

三、 $\theta-r-z$ 色 坐 标 制

考虑到使孟塞尔色样品在 $\theta-r-z$ 制中分布大致均匀, 以及其他的因素, 假设 480, 555, 700 nm 的单色光色调分别是典型的黄、绿、红, 从而得出下面由 X, Y, Z 到 R, G, B 的变换式:

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.8239 & -0.0096 & 0.1857 \\ -0.4423 & 1.3378 & 0.1046 \\ -0.1313 & 0.4768 & 0.6545 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}, \quad (7)$$

它使得当 $X=Y=Z=1$ 时, $R=G=B=1$; 这里假设等能量光为白色。虽然这一变换使得 B 曲线或 $b(\lambda)$ 在 540 nm 处有一个小的波峰, 但考虑到一种视维细胞未必不能同时含有两种视色素, 因此还是选用了它。利用 CIE 1931 年标准色度观察者的数据和译码模型, 所求

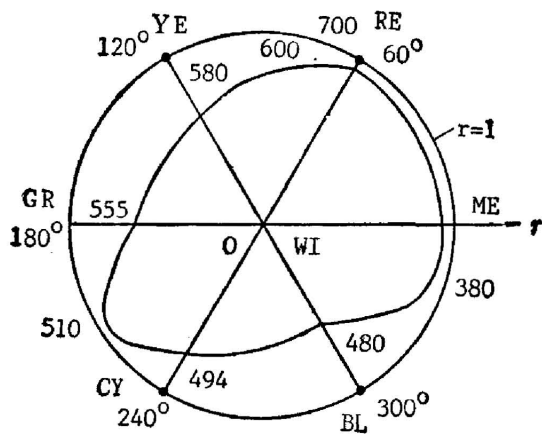


Fig. 4 $\theta-r$ chromaticity chart

出的单色光在 $\theta-r$ 平面上的轨迹如图 4 所示。

这样的 $\theta-r-z$ 色坐标制既在一定程度上象孟塞尔色坐标制那样, 同心理感觉之间的联系简单明了, 又象 $X-Y-Z$ 制那样, 便于求色光合成。

在 $\theta-r-z$ 制中, 六种理想颜色之间的加法公式是:

$$1 \text{ 份红} + 1 \text{ 份绿} = 1 \text{ 份黄,}$$

$$\text{即 } (0, 0, 1) + (0, 1, 0) = (0, 1, 1);$$

$$1 \text{ 份黄} + 1 \text{ 份蓝} = 1 \text{ 份白,}$$

$$\text{即 } (0, 1, 1) + (1, 0, 0) = (1, 1, 1);$$

$$1 \text{ 份黄} + 1 \text{ 份青} = 1 \text{ 份绿} + 1 \text{ 份白,}$$

$$\text{即 } (0, 1, 1) + (1, 1, 0) = (0, 1, 0) + (1, 1, 1);$$

其他类推。这里把 z 当作颜色的份量。已知一种颜色的 θ, r, z 值, 求它在六种理想彩色的白色上的分量, 即反求式 (3)~(5) 右边各变量, 其方法是:

$$\theta_1 = 60 \times \text{INT} \left(\frac{\theta}{60} \right) \quad (\text{INT 表示取整}), \quad (8)$$

$$\theta_2 = \theta_1 + 60; \quad (9)$$

$$m_1 = \frac{(\theta_2 - \theta_1) rz}{60}; \quad (10)$$

$$m_2 = rz - m_1; \quad (11)$$

$$m_3 = (1-r)z_0. \quad (12)$$

在 $\theta-r$ 色品图上求两种色光合成的方法是, 先按式(8)~(12)把它们分解为各自在扇形三顶点上颜色的分量, 然后用六种彩色之间的加法公式把六项合成三项, 再按式(3)~(5)求出总的 θ, r, z_0 .

四、译码模型的验证

心理实验表明, 光度 Y (或光值 V) 和心理上的明度是很不一致的, 明度一定的情况下, 蓝紫区域 Y 值小, 黄绿区域 Y 值大。 z 和明度一样, 同 Y 之间也有这种关系。 计算了等 z 值时一些色样品的 Y 值在 $x-y$ 色品图上的分布 (即 $Y_s = 55Y/z$, 见图 5), 它和麦克亚当 (MacAdam) 等明度实验结果^(141, 344) 有着非常巧妙的吻合。

看来, 假定视细胞对颜色信号传递的非线性, 可以通过对 B, G, R 作适当的非线性变换, 得出相应的 $\theta^*-r_c^*-z^*$ 色坐标制, 并由孟塞尔色样品在该坐标制中的分布来验证模型的合理性。

首先, 用孟塞尔中性色代替等能量白色得 B', G', R' ; 然后对 B', G', R' 作非线性变换 (这一变换参考了 1964 年 CIE 采用的 V 和 Y 之间关系的立方根公式^(141, 310);

$$R'' = 0.25 \times 5^{\frac{1}{3}} \times (20R')^{0.330} - 0.17; \quad (13)$$

$$G'' = 0.25 \times 5^{\frac{1}{3}} \times (20G')^{0.326} - 0.17; \quad (14)$$

$$B'' = 0.25 \times 5^{\frac{1}{3}} \times (20B')^{0.334} - 0.17. \quad (15)$$

再对 R'', G'', B'' 译码得 $\theta^*-r_c^*-z^*$ 。 式(13)~(15)各变量大致在 0~1 之间变化, 指数的不同是基于这样的假设: 随着刺激值增大, 三种视细胞灵敏度衰减快慢不同。 计算结果表明, 采用不同指数可使 $\theta^*-r_c^*-z^*$ 制中不同光度下的等色调线重合得较好; 这也说明, 色调不变点未必是敏感线曲交点。

计算了部分孟塞尔色样品的 θ^*, r_c^*, z^* , 其中 $V=5$ 时的等色调、等彩度线在 $\theta^*-r_c^*$ 平面上的投影如图 6 所示; $H=GY$ 和 $H=P$ 时的不同光度下的等彩度线在 r_c^*-V 平面上的投

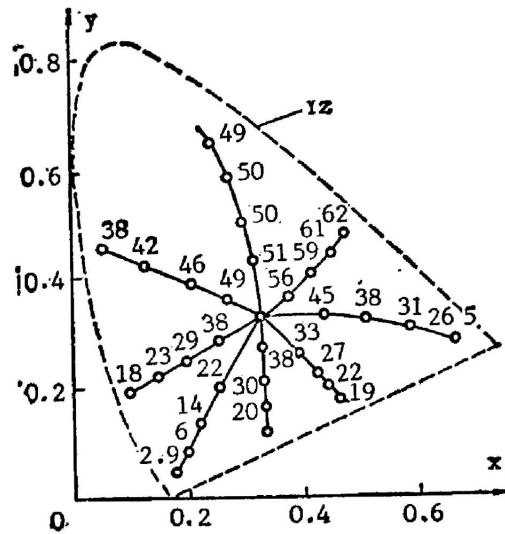


Fig. 5 The relative distribution of $Y, Y_s = 55Y/z$, when z is constant

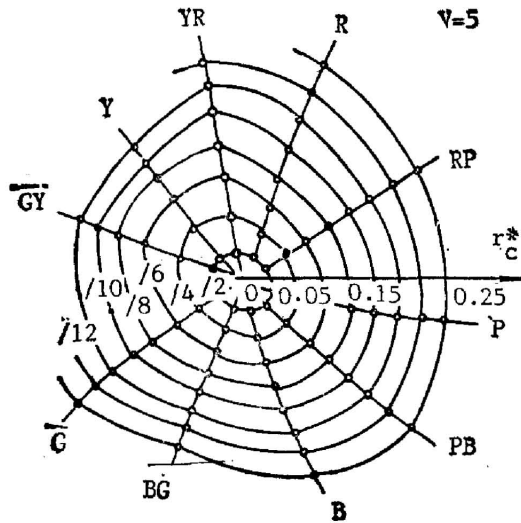


Fig. 6 The projections of equal-hue curves and equal-chroma curves on $\theta^*-r_c^*$ plane

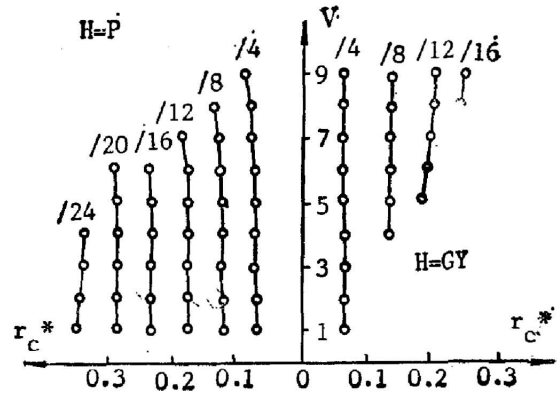


Fig. 7 The projections of equal-chroma curves on $V-r_c^*$ plane

影如图7所示。它们可以使我们对 θ^* 和 r_c^* 分别同色调和色度的吻合程度有一个大致的了解。

因为对于不同颜色, z 相等时, z^* 也基本相等,如果 z 和明度大致有一一对应的关系(前面已有验证),则 z^* 和明度也大致有一一对应的关系;又因为对于中性色和黄绿区域, V 和明度大致成正比,且 z^* 和 V 大致相同;故我们可以期望 z^* 在各个区域和明度大致成正比。

五、小 结

色觉机制译码模型的合理性在于:

1. 可以使我们对颜色信号在感官中,处理色盲和色觉机制时,有一个更为直观的理解^[2];
2. 和生理光学的结论——颜色信号在视细胞上以三元色的形式存在,而在视神经上以颞颞对形式存在^[5]——吻合得较为自然;
3. 计算结果和心理实验大致吻合,尤其是关于明度的结果,若采用其他方法是难以得到的。

参 考 文 献

- [1] Lu Chenguang; "Fuzzy switching quasi-Boolean algebra and vision simulation color discernment", *Proceedings of Inter-national Symposium on Fuzzy System and Knowledge Engineering*, (Guangzhou University, Guangzhou Higher Education Publishing House, 1987), 436~459.
- [2] 鲁晨光;《心理学动态》,1986, No. 14, 36~45.
- [3] 鲁晨光;《机器人》,1987, 1, No. 6, 39~41.
- [4] 束越新;《颜色光学基础理论》, (山东科技出版社, 济南, 1981), 310~603.
- [5] de Monasterio F. M. and Gouras P.; *J. Physiol.*, 1975, 251, No. 1, 167~195.

Decoding model of color vision and its verifications

LU CHENGUANG

(Computer Center, Changsha University)

(Received 25 April 1985; revised 3 May 1988)

Abstract

In this paper, the decoding model of color vision is briefly introduced. The $\theta-r-z$ color system, which is based on the decoding model and has both the features of the Munsell color system and those of the XYZ system, is proposed. The $\theta^*-r_c^*-z^*$ color system obtained from nonlinear transformation of B, G, R , is provided. The decoding model is verified by both the reflection of z and z^* to lightness and the distribution of the color samples of the Munsell system in $\theta^*-r_c^*-z^*$ system.

Key words: color vision; color system; opponent processing; lightness; Fuzzy logic; fuzzy decoding.