

# 光学—彩色电视图象处理系统 中“密度值”向“色度值”的转换

周丰昆

## 一、引言

人眼对颜色差别的分辨能力远远高于对灰度等级的辨别能力。因而在处理图象时，常常将单调的黑白图象予以彩色化，采取必要的处理手段，如摄影处理、光学方法、电子学方法及计算机等适当的处理，形成假彩色图象，提高目视判读效果，充分利用图象信息。

将光学彩色合成仪和闭路彩色电视联用，组成混合图象处理系统，发挥了光学处理和电子学处理的特长，由于进行了彩色合成仪三基色特殊选配及电视系统电信号传输方式的改进，该混合图象处理系统可以方便有效地进行变 $\gamma$ 值假彩色增强及 $R$ 、 $G$ 、 $B$ 信号的模拟三角形连续分割和游动变距提取等等，在图象处理工作中获得应用。

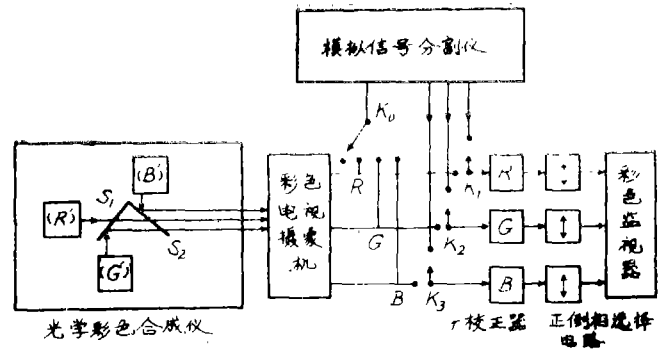
图象处理工作中的假彩色增强，实际上是多光谱段影象密度与合成影象色度之间的一种变换。如果找到这种“密度值”向“色度值”的转换表达式以及底片影象密度值与被研究对象某些参数间的对应关系，我们会建立起图象处理系统合成的假彩色影象色度值与表征被研究对象特性的某些参数的对应关系，进而使图象处理的目视判读转向定量判读或是在判读的方法上提供新的途径。

无论是光学彩色合成仪，还是闭路彩色电视系统均可改变 $R$ 、 $G$ 、 $B$ 三路信号的非线性传输而实现假彩色增强。尽管彩色合成仪和彩色电视组成的混合系统在传输上比较复杂，但我们按图象信号的传输环节和非线性传输特性，步步追踪到最后的彩色合成，并依据色度学知识，建立了多光谱段影象密度值与假彩色合成影象色度值间的转换关系。将红布、黄布、蓝布、绿布和4%、8%、16%、32%、64%、88%（反射率）六种灰布组成的布标靶群的多光谱段正负底片在本系统进行假彩色增强处理，借以验证已获得的“密度值”和“色度值”转换关系的可靠性。结果表明，按转换关系计算得到的“色度值”与用美国1980彩色亮度计实测合成影象得到的“色度值”较好地符合。本文重点介绍如何寻求“密度值”和“色度值”间的关系式。

## 二、处理系统

处理系统见方框图。

我们介绍 $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$ 横向接通时的假彩色增强。



处理系统方框简图(K<sub>0</sub>、K<sub>1</sub>、K<sub>2</sub>、K<sub>3</sub>、为开关)

### 1. 光学彩色合成仪

S<sub>1</sub>为反绿透红多层介质膜分光平板；

S<sub>2</sub>为反蓝透红绿多层介质膜分光平板。

S<sub>1</sub>和S<sub>2</sub>相互垂直放置。光源箱(R')、(G')、(B')中装有照明灯泡、漫射玻璃、滤色片及该通道被处理底片。仔细调整便可得到三路重合的彩色图象。

### 2 彩色电视摄像机

经变焦距镜头、分光棱镜、摄像管而得 R、G、B三路图象信号。

### 3. r 校正器

其传输特性可用数学表达式表明，

$$V_0 = aV_i^{1/2} + (1-a)V_i^2 \tag{2.1}$$

V<sub>i</sub>和V<sub>0</sub>分别代表γ校正器的输入和输出信号强度，a为可调电学参数，0 ≤ a ≤ 1.0，用电位器实现，γ校正器的输出可在V<sub>i</sub><sup>1/2</sup>~V<sub>i</sub><sup>2</sup>等效范围内调解。

### 4. 正相、倒相选择电路

系统处于正相电路状态时，信号正常通过，数学表达式为：

$$V_0 = V_i \tag{2.2}'$$

系统处于倒相电路状态时，信号传输的数学表达式为：

$$V_0 = 1 - V_i \quad 0 \leq V_i \leq 1.0 \tag{2.2}''$$

### 5. 彩色监视器

彩色图象最后在此合成。红、绿、蓝三路荧光粉光强度与输入电压有2.2次方的非线性响应。

## 三、假彩色合成影象色度值和底片影象密度值间关系式的获得

按CIE色度学计算方法，最后的彩色影象颜色三刺激值为：

$$\begin{cases} X = K \int_{\lambda} \varphi(\lambda) \bar{x}(\lambda) \Delta\lambda \\ Y = K \int_{\lambda} \varphi(\lambda) \bar{y}(\lambda) \Delta\lambda \\ Z = K \int_{\lambda} \varphi(\lambda) \bar{z}(\lambda) \Delta\lambda \end{cases}$$

$K$ 是归一化系数，在色度计算过程中可以消去； $\bar{x}(\lambda)$ 、 $\bar{y}(\lambda)$ 、 $\bar{z}(\lambda)$ 是CIE1931标准色度观察者光谱三刺激值； $\Delta\lambda$ 是计算波长间隔； $\varphi(\lambda)$ 是颜色刺激函数。

本系统中要求出 $\varphi(\lambda)$ 是非常困难的，因为它与彩色合成仪光源的光谱辐射通量及合成仪系统的光谱透过率（包括加在该通道中物体影象的底片透过率）有关，还与彩电系统的光谱响应特性（包括变焦距镜头透过特性，分光棱镜的分光特性，摄像管响应特性等等）和信号传输特性以及荧光粉响应特性有关。因此，采用这种方法很麻烦，甚至不能计算。

我们从颜色系统间的原色转换出发着手解决这一问题。

CIE色度系统是用一组 $(X)$ 、 $(Y)$ 、 $(Z)$ 三原色来表示颜色。在彩色电视中是用一组 $(R)$ 、 $(G)$ 、 $(B)$ 荧光粉三原色来表示颜色，两个颜色系统间的转换关系可用(3.1)式表示

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_r & X_g & X_b \\ Y_r & Y_g & Y_b \\ Z_r & Z_g & Z_b \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

转换矩阵中元素 $(X_r, Y_r, Z_r)$ 、 $(X_g, Y_g, Z_g)$ 、 $(X_b, Y_b, Z_b)$ 分别为 $(R)$ 、 $(G)$ 、 $(B)$ 三基色的CIE $(X)(Y)(Z)$ 系统的三刺激值。

$(R, G, B)$ 为荧光粉三基色光的刺激量，即红、绿、蓝三种荧光粉输出光的大小，它与显象管的输入电压直接有关，而输入电压的大小与彩色电视系统的响应和传输特性有关，步步追踪分析下去，就会找到荧光粉输出光与彩色合成仪底片影象密度的关系。为了建立这种关系，必须依信号的传递链条从头开始。

请参见方框图。

彩色合成仪三个基色分别用 $(R')$ 、 $(G')$ 、 $(B')$ 表示，设它们在彩色电视摄像机 $R$ 、 $G$ 、 $B$ 三个通道上产生的响应分别为：

$$\begin{array}{l} \begin{matrix} R & G & B \\ (R') : & V_{1r} & V_{1g} & V_{1b} \\ (G') : & V_{2r} & V_{2g} & V_{2b} \\ (B') : & V_{3r} & V_{3g} & V_{3b} \end{matrix} \end{array}$$

合成仪三个通道分别放入底片后，对于其中某一影象，红、绿、蓝通道底片透过率分别为 $\tau_1$ 、 $\tau_2$ 、 $\tau_3$ ，则该影象经过合成仪合成后的输出为：

$$\tau_1(R') + \tau_2(G') + \tau_3(B')$$

该输出在摄像机各通道上产生的响应为：

$$\begin{cases} \text{在 } R \text{ 通道上: } \tau_1 V_{1r} + \tau_2 V_{2r} + \tau_3 V_{3r} \\ \text{在 } G \text{ 通道上: } \tau_1 V_{1g} + \tau_2 V_{2g} + \tau_3 V_{3g} \\ \text{在 } B \text{ 通道上: } \tau_1 V_{1b} + \tau_2 V_{2b} + \tau_3 V_{3b} \end{cases}$$

信号传输到 $\gamma$ 校正器，根据其传输特性(2.1)式，其输出为：

$$\begin{cases} R\text{通道: } a_r(\tau_1 V_{1r} + \tau_2 V_{2r} + \tau_3 V_{3r})^{1/2} + (1 - a_r)(\tau_1 V_{1r} + \tau_2 V_{2r} + \tau_3 V_{3r})^2 \\ G\text{通道: } a_g(\tau_1 V_{1g} + \tau_2 V_{2g} + \tau_3 V_{3g})^{1/2} + (1 - a_g)(\tau_1 V_{1g} + \tau_2 V_{2g} + \tau_3 V_{3g})^2 \\ B\text{通道: } a_b(\tau_1 V_{1b} + \tau_2 V_{2b} + \tau_3 V_{3b})^{1/2} + (1 - a_b)(\tau_1 V_{1b} + \tau_2 V_{2b} + \tau_3 V_{3b})^2 \end{cases}$$

其中 $a_r$ 、 $a_g$ 、 $a_b$ 分别为红、绿、蓝通道 $\gamma$ 校正器的可调电学参数。

再经正相、倒相传输, 根据(2.2)'、(2.2)"式, 通道处于正相传输时, 输出为:  
 $a_i(\tau_1 V_{1i} + \tau_2 V_{2i} + \tau_3 V_{3i})^{1/2} + (1 - a_i)(\tau_1 V_{1i} + \tau_2 V_{2i} + \tau_3 V_{3i})^2$ ,  $i = r, g, b$ 通道处于倒相传输时, 输出为:

$$1 - a_i(\tau_1 V_{1i} + \tau_2 V_{2i} + \tau_3 V_{3i})^{1/2} - (1 - a_i)(\tau_1 V_{1i} + \tau_2 V_{2i} + \tau_3 V_{3i})^2 \quad i = r, g, b$$

最后传输到彩色监视器, 输入电压与输出光强度有2.2次方非线性关系, 因此最后给予荧光粉的刺激量(三个通道分别以 $I_r$ 、 $I_g$ 、 $I_b$ 表示)为:

系统处于正相时:

$$I_i = [a_i(\tau_1 V_{1i} + \tau_2 V_{2i} + \tau_3 V_{3i})^{1/2} + (1 - a_i)(\tau_1 V_{1i} + \tau_2 V_{2i} + \tau_3 V_{3i})^2]^{2.2} \quad i = r, g, b$$

系统处于倒相时:

$$I_i = [1 - a_i(\tau_1 V_{1i} + \tau_2 V_{2i} + \tau_3 V_{3i})^{1/2} - (1 - a_i)(\tau_1 V_{1i} + \tau_2 V_{2i} + \tau_3 V_{3i})^2]^{2.2} \quad i = r, g, b$$

根据转换方程(3.1)式, 可以写成:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_r & X_g & X_b \\ Y_r & Y_g & Y_b \\ Z_r & Z_g & Z_b \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_r \cdot R \\ I_g \cdot G \\ I_b \cdot B \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

$$\begin{pmatrix} I_r \cdot R \\ I_g \cdot G \\ I_b \cdot B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_r & X_g & X_b \\ Y_r & Y_g & Y_b \\ Z_r & Z_g & Z_b \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

其中 $a_r$ 、 $a_g$ 、 $a_b$ 、 $V_{1r}$ 、 $V_{1g}$ 、 $V_{1b}$ 、 $V_{2r}$ 、 $V_{2g}$ 、 $V_{2b}$ 、 $V_{3r}$ 、 $V_{3g}$ 、 $V_{3b}$ 共12个未知数可以这样求解:

1. 将彩色合成仪( $R'$ )基色开而( $G'$ )和( $B'$ )两基色关(相当于 $\tau_1 = 1.0, \tau_2 = \tau_3 = 0$ ), 测出( $R'$ )经整个系统在彩监器屏幕上的色度值( $X_1, Y_1, Z_1$ ), 利用(3.3)式可得三个关于 $a_r$ 、 $a_g$ 、 $a_b$ 、 $V_{1r}$ 、 $V_{1g}$ 、 $V_{1b}$ 的方程。

2. 将彩色合成仪( $G'$ )基色开而( $R'$ )和( $B'$ )两基色关(相当于 $\tau_2 = 1.0, \tau_1 = \tau_3 = 0$ ), 测出( $G'$ )经整个系统在彩监器屏幕上的色度值( $X_2, Y_2, Z_2$ ), 利用(3.3)式可得三个关于 $a_r$ 、 $a_g$ 、 $a_b$ 、 $V_{2r}$ 、 $V_{2g}$ 、 $V_{2b}$ 的方程。

3. 将彩色合成仪( $B'$ )基色开而( $R'$ )和( $G'$ )两基色关(相当于 $\tau_3 = 1.0, \tau_1 = \tau_2 = 0$ ), 测出( $B'$ )经整个系统在彩监器屏幕上的色度值( $X_3, Y_3, Z_3$ ), 利用(3.3)式可得三个关于 $a_r$ 、 $a_g$ 、 $a_b$ 、 $V_{3r}$ 、 $V_{3g}$ 、 $V_{3b}$ 的方程。

4. 将彩色合成仪( $R'$ )、( $G'$ )和( $B'$ )全开(相当于 $\tau_1 = \tau_2 = \tau_3 = 1.0$ ), 测出合成仪白场经整个系统在彩监器屏幕上的色度值( $X_0, Y_0, Z_0$ ), 利用(3.3)式可得三个关于 $a_r$ 、 $a_g$ 、 $a_b$ 、 $V_{1r}$ 、 $V_{1g}$ 、 $V_{1b}$ 、 $V_{2r}$ 、 $V_{2g}$ 、 $V_{2b}$ 、 $V_{3r}$ 、 $V_{3g}$ 、 $V_{3b}$ 的方程。

将上述12个方程分组, 可有三个分别关于 $a_r$ 、 $V_{1r}$ 、 $V_{2r}$ 、 $V_{3r}$ ;  $a_g$ 、 $V_{1g}$ 、 $V_{2g}$ 、 $V_{3g}$ ;  $a_b$ 、 $V_{1b}$ 、 $V_{2b}$ 、 $V_{3b}$ 的方程组, 均是四个未知数四个方程, 形式也相同, 求解出全部未知数, 则 $I_r$ 、 $I_g$ 、 $I_b$ 仅仅是 $\tau_1$ 、 $\tau_2$ 、 $\tau_3$ 的函数, 利用(3.2)式即可获得底片透过率(当然可知其

密度值)和色度值 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 的关系,问题即告结束。

实际上,这样求解非常困难,但我们可以进行许多简化:

(1): 合成仪每个通道选择配置适当滤色片,使每个基色的光谱分布与彩电摄像机分光棱镜分光曲线及摄像管光谱响应相匹配, ( $R'$ )基色只在电视系统 $R$ 通道有响应,在 $G$ 、 $B$ 通道无响应,即只有 $V_{1r}$ , 而 $V_{1g}=0$ ,  $V_{1b}=0$ ; 而( $G'$ )基色只有响应 $V_{2g}$ ,  $V_{2r}=0$ ,  $V_{2b}=0$ ; ( $B'$ )基色只有响应 $V_{3b}$ , 而 $V_{3r}=0$ ,  $V_{3g}=0$ , 这样未知数减少6个。

(2): 各通道 $\gamma$ 校正器的可调电学参数 $a$ 影响该通道非线性传输特性,图象处理时,我们常取 $a=1.0$  (正相状态时);  $a=0$  (倒相状态时); 或 $\gamma=1.0$  (无论正相或倒相状态均可)。这样取,不至于使通道非线性特性太强。各通道 $a$ 已知,又减少3个未知数。

经过简化以及测得合成仪( $R'$ )、( $G'$ )、( $B'$ )基色经整个系统形成的颜色的三刺激值,我们就可运用(3.2)、(3.3)两式求解出未知数 $V_{1r}$ 、 $V_{2g}$ 、 $V_{3b}$ 。将 $V_{1r}$ 、 $V_{2g}$ 、 $V_{3b}$ 代入(3.2)式,这样就确立了底片摄像透过率 $\tau_1$ 、 $\tau_2$ 、 $\tau_3$ 和合成的假彩色增强影象三刺激值( $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ )的对应关系。知道了底片影象的密度值,便知其透过率值,利用(3.2)式便可计算出该影象在彩色监视器形成的影象的三刺激值和色度坐标值。

## 四、实验验证

本系统传输环节较多,特别是彩色电视系统对于三个通道的平衡调整非常敏感,因此,必须对系统进行认真调整。为了检验获得的“色度值”和“透过率”的相关表达式的方法是否可行,我们进行了检验、测量和计算。

彩色监视器荧光粉三基色的转换矩阵为:

$$\begin{pmatrix} 1.652 & 2.278 & 0.848 \\ 0.914 & 3.782 & 0.304 \\ 0.086 & 0.404 & 4.272 \end{pmatrix}$$

实验时采用的底片是关于红布、绿布、蓝布、黄布及反射率为4%、8%、16%、32%、64%和188%的6种灰布组成的布标靶群的多光谱正片或负片。首先在彩色合成仪上合成,然后经闭路彩色电视系统做进一步假彩色增强处理。系统可为三个通道全是正相状态、倒相状态或正相倒相混用状态。一方面用美国1980彩色亮度计得到彩监视器屏上布标影象“色度值”的测量值,另一方面将布标的三个波段底片影象的透过率值代入(3.2)式,得到布标影象“色度值”的计算值。对每次实验,均将“色度值”的测量值和计算值进行比较,证明二者符合得比较好,说明上述建立“色度值”和“密度值”间关系式的方法可行。

这里例举其中三次的实验结果,将“色度值”的测量值和计算值比较。

(1). 82年2月24日,彩色合成仪三个通道均用正片;彩色电视系统三个通道均为正相状态, $\gamma$ 校正器均为 $a=1.0$  (即 $\gamma=1/2$ )。布标影象“色度值”的测量值和计算值列于表1。

(2). 82年3月4日,彩色合成仪三个通道均用负片;彩色电视系统三个通道均为倒相状态, $\gamma$ 校正器均用 $a=0$  (即 $\gamma$ 校正器 $\gamma=2$ )。布标影象“色度值”的测量值和计算值列于表2。

(3). 82年3月10日,彩色合成仪三个通道均用负片;彩色电视系统 $R$ 通道为倒相状态, $a_r=0$ ;  $G$ 和 $B$ 通道均为正相状态, $a_g=a_b=1.0$ ,布标影象“色度值”的测量值和计算值

列于表3。

表 1

手 段	布 标	红 布	绿 布	蓝 布	黄 布	8%灰布	32%灰布	88%灰布
		“色度值”的实测值	<i>x</i>	0.442	0.292	0.230	0.362	0.278
<i>y</i>	0.335		0.413	0.234	0.534	0.307	0.374	0.366
<i>z</i>	0.223		0.295	0.536	0.104	0.415	0.337	0.328
“色度值”的计算值	<i>x</i>	0.444	0.318	0.237	0.383	0.268	0.303	0.307
	<i>y</i>	0.360	0.417	0.234	0.492	0.286	0.345	0.323
	<i>z</i>	0.196	0.265	0.528	0.125	0.446	0.352	0.370

表 2

手 段	布 标	红 布	绿 布	蓝 布	黄 布	8%灰布	32%灰布	88%灰布
		“色度值”的实测值	<i>x</i>	0.488	0.351	0.221	0.414	0.326
<i>y</i>	0.364		0.432	0.216	0.457	0.328	0.342	0.350
<i>z</i>	0.148		0.217	0.563	0.129	0.346	0.324	0.315
色度值”的计算值	<i>x</i>	0.489	0.364	0.264	0.451	0.372	0.353	0.348
	<i>y</i>	0.374	0.429	0.223	0.447	0.306	0.342	0.359
	<i>z</i>	0.137	0.206	0.512	0.102	0.322	0.304	0.293

表 3

手 段	布 标	红 布	绿 布	蓝 布	黄 布	8%灰布	32%灰布	88%灰布
		“色度值”的测量值	<i>x</i>	0.342	0.351	0.418	0.335	0.385
<i>y</i>	0.278		0.236	0.382	0.224	0.326	0.362	0.355
<i>z</i>	0.380		0.413	0.200	0.441	0.289	0.157	0.136
“色度值”的计算值	<i>x</i>	0.363	0.370	0.383	0.362	0.368	0.450	0.489
	<i>y</i>	0.297	0.278	0.371	0.254	0.332	0.335	0.331
	<i>z</i>	0.340	0.353	0.245	0.384	0.299	0.215	0.180

从上述例子和其他实验结果可以看到，“色度值”的测量值和计算值较好地符合。色度值标 *x* 或 *y*，一般相差  $\pm 0.01 \sim \pm 0.02$ 。处理系统比较复杂，达到这样的结果是比较好的。也有相差  $\pm 0.03 \sim \pm 0.04$  的情况。对于存在的误差，主要是计算时使用的底片透过率数值与实际数值有偏差，另外是彩色合成仪合成图象视场的照明存在一定程度的亮度及色度不均匀性。

## 五、结 语

彩色合成仪和闭路彩色电视系统联用，信号的传输环节较多，每个环节的调整都比较严格，在这种情况下，获得了“色度值”和“密度值”间的关系式，实验结果较好。这对于图

象处理的定量判读以及寻求新的判读方法有很大用途，对于其他颜色系统寻求颜色间的转换也会有所启示。按CIE色度学颜色刺激函数方法，计算非常复杂。依据传输环节的传输特性，步步追踪，并根据三个基色的传输结果确定某些未知参数，这种方法的计算比较简单，计算和实测符合得也较好。如果将色度学知识和电子学知识更好地结合，对于提高图象处理效果和寻求信息的传递规律会有更大的益处。

#### 参 考 文 献

- [1] 荆其诚等，《色度学》，1979年，科学出版社。