

# 光照光谱功率分布的估计和颜色分割

徐光祐 贾相夷

(清华大学计算机系, 北京 100084)

**摘 要** 提出了应用有限维线性模型和双色反射模型抽取表示而物体颜色的本征特性的方法. 首先估计出光照的光谱功率分布, 再获取物体的表面光谱反射率, 从而得到和光照与几何条件无关的归一化偏差光谱反射率. 它仅反映物体的表面反射特性, 可作为颜色分割和识别的可靠特征.  
**关键词** 光谱功率分布, 表面反射.

## 1 引 言

物体表面反射过程分为两种, 即界面反射 (Interface Reflection) 和本体反射 (Body Reflection). 界面反射分量一般与入射光有相同光谱分布, 本体反射分量的光谱则是由光照的光谱功率分布和物体表面反射特性共同决定的. 本体反射率代表物体表面颜色特性, 可作为物体表面颜色的本征特性. 为了获取该特性, 首先必须分离出界面反射分量, 再对本体反射分量作进一步处理, 从而得到和光照与几何条件完全无关的本体反射率. 本文采用了光照和表面反射的有限维线性模型和双色反射模型来抽取该本征颜色特性.

## 2 光照和表面反射的有限维线性模型

颜色视觉的研究表明, 物体表面的光谱反射率可以由一组特定基函数的有限维线性模型表示<sup>[1,4]</sup>, 因而景物中  $x$  位置处的表面光谱反射率为:

$$S^x(\lambda) = \sum_{j=1}^n \delta_j^x S_j(\lambda) \quad (1)$$

式中  $\delta_j^x$  为加权系数,  $S_j(\lambda)$  ( $1 \leq j \leq n$ ) 为基函数. 同样, 光照也可以由有限维模型来描述<sup>[3]</sup>. 设光照的光谱分布为  $E^r(\lambda)$ , 用基函数则可表示为:

$$E^r(\lambda) = \sum_{i=1}^m e_i^r E_i(\lambda) \quad (2)$$

式中  $e_i^r$  为加权系数. 假设有  $s$  个传感器,  $\rho_k$  是第  $k$  个传感器关于景物中  $x$  位置颜色刺激而产生的输出信号. 根据有限维模型,  $\rho_k$  可表示为:

$$\rho_k = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{\lambda}^{(r)} S^x(\lambda) C_k(\lambda) d\lambda = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n e_i^r \delta_j^x g_{jk} \quad (3)$$

$$g_{jk} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_i(\lambda) S_j(\lambda) C_k(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

式中  $C_k(\lambda)$  为第  $k$  个传感器的光谱敏感曲线. 设景物中所关心区域的光照是均匀的, 那么有  $\varepsilon_i^x = \varepsilon_i$ , 而同时  $x$  位置处的颜色信号输出  $\rho_i^x (k = 1 \sim s)$  为已知量. 这时对于每个位置  $x$  来说, 未知变量  $\varepsilon_i$  和  $\delta_j^x$  的个数为  $m + n$ , 根据(3)式, 对于  $s$  个传感器, 仅可列出  $s$  个等式.

为求得  $\varepsilon_i$  和  $\delta_j^x$  并保证足够的精确度, 一般  $m$  和  $n$  都必须大于 3, 这就要求  $s > \sigma$ , 但是目前的彩色摄像机只有  $R, G, B$  三个传感器, 无法求解这个问题. 本文采用一种完全不同的新方法来解决这一问题. 首先估计了光照的光谱功率分布, 进而得到了物体的表面反射率. 这样用这种方法, (3) 式中的  $\varepsilon_i$  就变为已知量, 而只剩下  $\delta_j^x$  是未知变量, 因此(3)式可改写为:

$$\rho_i^x = \sum_{j=1}^n h_{kj} \delta_j^x, \quad k = 1 \sim s \quad (5)$$

$$h_{kj} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \sum_{i=1}^m \varepsilon_i E_i(\lambda) S_j(\lambda) C_k(\lambda) d\lambda \quad (6)$$

或用矩阵表示

$$\rho_i^x = \Lambda_i \delta^x \quad (7)$$

$$\rho^x = [\rho_1^x, \dots, \rho_s^x]^T, \quad \delta^x = [\delta_1^x, \dots, \delta_n^x]^T$$

其中  $\Lambda_i$  是  $s \times n$  维矩阵, 第  $k$  行第  $j$  列的元素为  $\Lambda_i(kj) = h_{kj}$ .

### 3 双色反射模型

双色反射模型认为物体表面的反射是界面反射分量和本体反射分量之和, 因而总的光谱反射率  $S(\lambda, \theta)$  可表示为:

$$S(\lambda, \theta) = m_i(\theta) S_i(\lambda) + m_b(\theta) S_b(\lambda) \quad (8)$$

式中  $S_i(\lambda)$  和  $S_b(\lambda)$  分别表示界面反射分量和本体反射分量的光谱反射率.  $m_i(\theta)$  和  $m_b(\theta)$  是几何比例因子. 双色模型假定界面反射分量  $S_i(\lambda)$  是独立于波长  $\lambda$  的. 即在可见光范围内是常数, 因而在同一光照下, 由两个单色物体反射光构成的平面必定相交于光源颜色向量上.

### 4 光照光谱功率分布的估计

设已摄取到了同一光照下两个不同单色物体的彩色图像, 首先在颜色空间选取与这两个单色物体对应的区域, 分别拟合其平面, 可以获得两个双色平面  $L_1$  和  $L_2$ . 设  $L_i: Z = \alpha_i + \beta_i x + \gamma_i y$ , ( $i = 1, 2$ ), 求解  $L_1$  和  $L_2$  的交线就可得到光照的颜色矢量  $[R_e, G_e, B_e]^T$ , 由颜色矢量, 进而可求得光源的色度坐标  $[r_e, g_e, b_e]$

$$r_e = R_e / (R_e + G_e + B_e), \quad g_e = G_e / (R_e + G_e + B_e), \quad b_e = B_e / (R_e + G_e + B_e) \quad (9)$$

为了求得光照的光谱功率分布, 作者运用了光照的有限维线性模型. 假设物体表面反射率为 1, 由(3)式可得到摄像机的三刺激值

$$R = \sum_{i=1}^3 \varepsilon_i \int E_i(\lambda) C_R(\lambda) d\lambda, \quad G = \sum_{i=1}^3 \varepsilon_i \int E_i(\lambda) C_G(\lambda) d\lambda, \quad B = \sum_{i=1}^3 \varepsilon_i \int E_i(\lambda) C_B(\lambda) d\lambda, \quad (i = 1, 2, 3) \quad (10)$$

式中  $C_R(\lambda)$ ,  $C_G(\lambda)$  和  $C_B(\lambda)$  分别为摄像机红, 绿, 蓝三通道的光源敏感特性曲线. 由(9)式和

(10) 式可得到 $(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3)$

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \left| \begin{array}{cc} R_3 - r_e S_3 & r_e S_2 - R_2 \\ G_3 - g_e S_3 & g_e S_2 - G_2 \end{array} \right| / \left| \begin{array}{cc} r_e S_1 - R_1 & r_e S_2 - R_2 \\ g_e S_1 - G_1 & g_e S_2 - G_2 \end{array} \right| \\ \varepsilon_2 &= \left| \begin{array}{cc} r_e S_1 - R_1 & R_3 - r_e S_3 \\ g_e S_1 - G_1 & G_3 - g_e S_3 \end{array} \right| / \left| \begin{array}{cc} r_e S_1 - R_1 & r_e S_2 - R_2 \\ g_e S_1 - G_1 & g_e S_2 - G_2 \end{array} \right| \\ \varepsilon_3 &= 1 \end{aligned} \quad (11)$$

$$P_i = \int E_i(\lambda) C_i(\lambda) d\lambda, \quad P = R, G, B, \quad i = 1, 2, 3 \quad (12)$$

在 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ 中仅有两项独立, 因此在这里设 $\varepsilon_3 = 1$ , 令 $\varepsilon_i = \frac{\varepsilon_i}{\sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2}}$ , 这样就得到归一化的加权系数 $(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3)$ , 从而最终得到了光源光照的相对光谱功率分布

$$E(\lambda) = \varepsilon_1 E_1(\lambda) + \varepsilon_2 E_2(\lambda) + \varepsilon_3 E_3(\lambda) \quad (13)$$

## 5 本体反射率的估计

在求得光谱分布 $E(\lambda)$ 后,  $h_i$ 就成为已知量, 而且也很容易从(7)式中求得 $\delta_i$ , 如果用彩色摄像机做传感器, 那么输出的颜色信号为 $\rho^r = (R^r, G^r, B^r)^T$ , 可得

$$\delta^r = A_r^{-1} \rho^r = A_r^{-1} [R_r, G_r, B_r]^T \quad (14)$$

根据有限维模型, 由(1)式可恢复表面光谱反射率.

光谱反射率 $S^r(\lambda, \theta)$ 与光照和观察的几何条件有关, 由(8)式知, 为了获得与光照和几何条件无关的本体反射率, 必须消除 $S_2(\lambda)$ 和 $\theta$ 的影响. 采用Tominaga<sup>[2]</sup>提出的归一化偏差光谱反射率 $\tilde{S}(\lambda, \theta)$ 作为本体反射率的度量的描述. 由于 $S_1(\lambda)$ 在可见光范围内是恒定的, 所以它的影响可通过求偏差光谱反射率 $S(\lambda, \theta) - \bar{S}(\lambda, \theta)$ 来消除, 其中 $\bar{S}(\lambda, \theta)$ 是可见光范围内 $S(\lambda, \theta)$ 的均值. 进一步通过定义归一化的偏差光谱反射率 $\tilde{S}(\lambda, \theta)$ , 可消除几何因子 $m_B(\theta)$ 的影响.

$$\tilde{S}(\lambda, \theta) = \frac{S(\lambda, \theta) - \bar{S}(\lambda, \theta)}{\|S(\lambda, \theta) - \bar{S}(\lambda, \theta)\|} = \frac{S_B(\lambda, \theta) - \bar{S}_B(\lambda, \theta)}{\|S_B(\lambda, \theta) - \bar{S}_B(\lambda, \theta)\|} \quad (15)$$

式中 $\|S\|^2 = S^T \delta$ ,  $\bar{S}_B(\lambda, \theta) = \int S_B(\lambda, \theta) d\lambda$ . 归一化的偏差光谱反射率 $\tilde{S}(\lambda, \theta)$ 只反映了本体反射率 $S_B(\lambda, \theta)$ 的作用, 不受光照和几何位置的影响, 代表了物体表面固有的颜色特性, 因此可作为颜色分割的依据. 若直接应用 $\tilde{S}(\lambda, \theta)$ 进行聚类分析和颜色分割是极其困难的, 因为它是高维向量. 若 $\lambda_1 = 400 \text{ nm}$ ,  $\lambda_2 = 700 \text{ nm}$ , 间隔为 $10 \text{ nm}$ , 则 $n = 31$ 维. 作者用有限维线性模型来考虑, 即用关于表面反射基函数的前三次加权系数作为颜色分类和识别的依据, 即有

$$\tilde{S}(\lambda, \theta) = A \delta_B \quad (16)$$

式中 $\tilde{S}(\lambda, \theta)$ 为 $N$ 维列向量,  $A$ 为 $N \times 3$ 矩阵, 其个3列向量分别为前三次表面反射基函数向量.

## 6 实验结果和结论

作者通过实验实现和证实了所提出的方法. 图1给出了实验的景物图像, 图中有六个具

有不同颜色的塑料小桶.

### 6.1 实验条件和基础数据

作者用 XC711 彩色 CCD 摄像机作为传感器, 将  $\gamma$  校正设为 off, 以消除摄像机对光照的非线性补偿. 为了检验算法的有效性, 作者对实验的光照条件作了严格的控制. 可采用光谱仪对两种光照的光谱功率分布进行了测量, 然后用它们作参考值来检验估计值的准确度. 此外分别采用了 Cohen 和 Judd 提供的基函数作为表面反射和光照的基函数.

### 6.2 幻灯机光照下的实验结果

为了检验对幻灯机光照的光谱功率分布的估计的精确度, 用直接测量和估计值进行比较, 图 2 表明这两条曲线吻合得很好.

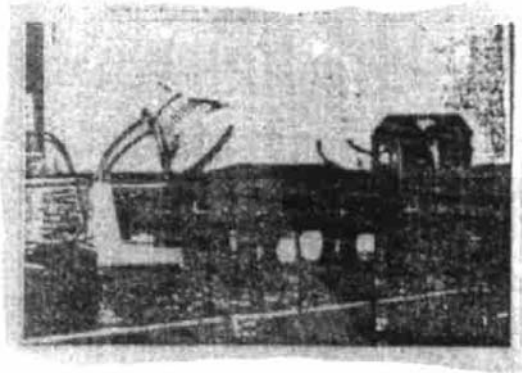


Fig. 1

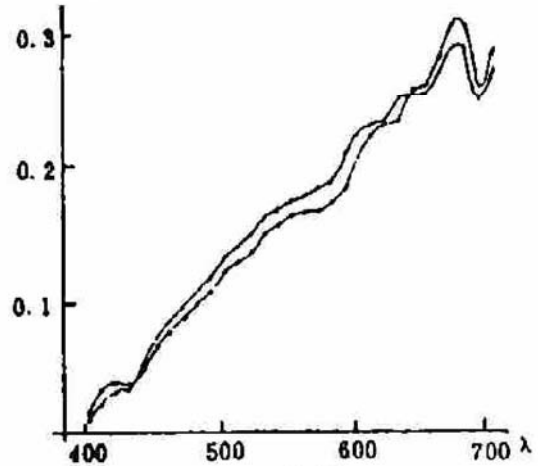


Fig. 2

图 3 给出了 6 个位置的恢复归一化偏差光谱反射率, 6 个位置中 3 个在红区域, 3 个在绿区域, 同一颜色的反射率曲线形成紧密曲线集合, 并且不同颜色的曲线在形状和峰值上有很大的差异如图 4 所示. 因而由偏差光谱反射率曲线就可以进行很好的颜色分割.

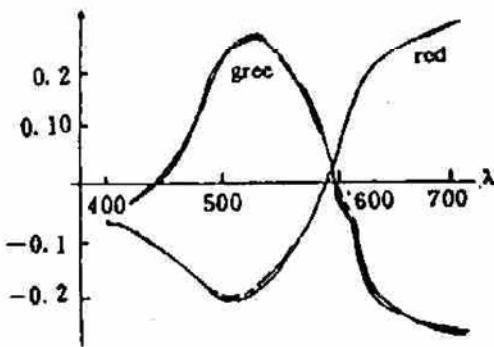


Fig. 3

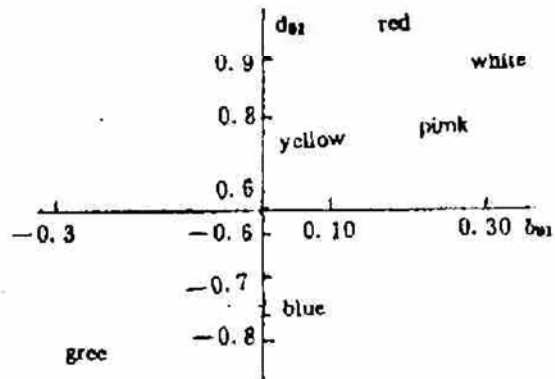


Fig. 4

由 (15) 式可得到归一化偏差光谱反射率关于 Cohen 基函数的前三个加权系数 ( $\delta_{b1}$ ,  $\delta_{b2}$ ,  $\delta_{b3}$ ). 为便于观察, 图 3 给出了多个实验点归一化偏差光谱反射率在  $[\delta_{b1}, \delta_{b2}]$  空间的投影值.

从表 1 可以看出, 除了红粉两区域的类间距离较小外(因为红粉两种颜色很相近, 这一结果是合理的); 既使类间最小也比类内距离大得多, 至少大一个数量级.

作者用白炽灯代替幻灯机重新进行实验, 同样获得了满意的结果, 可见,  $\delta_b$  可作为颜色分割的良好特征. 作者进一步发现, 在不同的光照下加权系数  $\delta_b$  具有很高的稳定性. 这也给颜色的识别提供可靠的依据. 表 2 给出了幻灯机和白炽灯光照下相同颜色区域的  $\delta_b$  的平均值的差值, 其中  $\Delta\bar{\delta}$  定义如下:

$$\Delta\bar{S} = |\bar{\delta}_{Bi}(\text{幻灯机}) - \bar{\delta}_{Bi}(\text{白炽灯})| \quad i = 1, 2, 3$$

Table 1.

	red	green	pink	blue	yellow	
red	—	(1.86, 0.50)	(0.07, 0.41)	(1.62, 0.58)	(0.26, 0.80)	(0.00, 0.00)
green		—	(1.63, 0.86)	(0.14, 1.05)	(1.49, 0.18)	(0.08, 0.14)
pink			—	(1.42, 0.05)	(0.06, 1.24)	(0.14, 0.13)
blue				—	(1.32, 1.36)	(0.08, 0.08)
yellow					—	(0.06, 0.09)

Table 2.

	red	green				
$D\delta_{B1}$	0.01	0.00	0.01	0.02	0.08	0.02
$\Delta\delta_{B2}$	0.01	0.42	0.06	0.06	0.18	0.04
$\Delta\delta_{B3}$	0.04	0.32	0.12	0.12	0.18	0.10

其中  $\bar{\delta}_{Bi}(I)$  表示在  $I$  种光照下某颜色区各实验点  $\delta_{Bi}$  的平均值. 人们已经知道, 加权系数对拟合程度的影响是  $\delta_{B1} > \delta_{B2} > \delta_{B3}$ . 由表 2 知, 两种光照下除蓝色区个,  $\delta_{B1}$  几乎相同, 故而加权系数  $\delta_b$  可作为颜色识

别的稳定特征.

### 参 考 文 献

- [1] T. Maloney, B. A. Wandell, Color constancy; a method for recovering surface spectral reflection. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1986, 3(1): 29~33
- [2] Shoji Tominaga, Surface identification using the dichromatic reflection model. *IEEE Trans. PAMI*, 1991, 13(7): 658~670
- [3] D. B. Judd, D. L. Macadam, G. Wyszecki, Spectral distribution of typical daylight as a function of correlated color temperature. *J. Opt. Soc. Am.*, 1964, 54(8): 1031~1040
- [4] Cohen, Dependency of the spectral reflection curves of munsell color chips. *Psychonomical Science*, 1964, 1: 369~370

## Estimation of Spectral Power Distribution of Illumination and Color Classification

Xu Guangyou      Jia Xiangyi

(Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084)

(Received 9 March 1993; revised 16 May 1994)

**Abstract** This paper presents a solution to recover intrinsic color features of objects for classification by using dichromatic reflection model and finite dimensional linear model for illumination and reflectance. At first the spectral power distribution of illumination is estimated. Subsequently, the surface spectral reflectance is derived with the help of the two models mentioned above. The normalized deviation spectral reflectance preserves only the contribution of body reflectance of the surface which is independent of illumination and geometric condition. Therefore, it can be used as the reliable feature for classifying color of the object. The experimental results and analysis about classification are shown in the paper.

**Key words** spectral power distribution, surface reflectance.