

归一化偏差本体反射特征的研究

刘立峰 徐光祐

(清华大学计算机科学与技术系, 北京 100084)

摘 要 使图像获得不受光照和几何条件影响的颜色特性描述是实现颜色恒常性的关键。利用双色反射模型和有限维线性模型, 提取归一化偏差本体反射特征, 被实验证明是实现颜色恒常性的一个重要途径。本文详细阐述了归一化偏差本体反射特征的特性, 其计算方法, 应用的前提条件, 以及应用限制, 并在实际图像处理中, 考虑到了这些影响的因素。

关键词 颜色, 有限维线性模型, 双色反射模型, 偏差本体反射。

Land^[1, 2] 提出视网膜皮层理论, 解释了为什么知觉到的颜色与表面的光谱反射率函数有密切的关系, 而与投射到视网膜上的光谱特性关系不大。基于物体反射率, 获取与光照和几何条件无关的颜色特性, 是一种很有发展前景的实现颜色恒常性方法。Tominaga^[3] 以双色反射模型为基础, 用分光光度计测量物体反射光的功率谱分布, 计算物体表面反射的相对功率谱分布, 并进而计算归一化偏差本体反射功率谱分布。由于归一化偏差反射率反映了物体表面的本体反射, 所以它是不受光照和几何条件影响的颜色特性, 实验已证明了这一点^[4]。

由于 Tominaga 的方法使用分光光度计, 不利于实际应用, 并且最后的特征结果是以一个高维向量的形式表示, 对后续处理带来诸多不便。作者以双色反射模型结合有限维线性模型^[5], 提出了利用摄像机获得归一化偏差本体反射特征的方法, 并且用有限维线性模型的特征向量加以表示, 使特征的表达简洁, 便于对颜色的分类和识别。在实验中, 这种方法已获得了很好的图像分割和颜色识别结果。

本文进一步研究了归一化偏差反射率的基本特性, 物理意义以及快速算法, 以便更有效地使用这种特性。研究表明使用归一化偏差反射率, 使之能在不同的光照和几何条件下获得物体表面的恒常色调特性。通过使用快速算法, 计算量与一般求取在色调, 饱和度, 亮度空间中的色调的计算量相当或更小。

1 归一化偏差本体反射特征

归一化偏差本体反射特征的计算由 Tominaga^[3] 首先提出。经归一化处理后的偏差光谱反射率中只包含了本体反射率的影响, 因此可以作为识别颜色的可靠依据。但因为它是一个 N 维向量(若波谱范围是 400 nm 到 700 nm, 每隔 10 nm 一个采样, 则 $N = 31$), 不便于使用。因此引入有限维模型。研究表明^[6, 7], 几乎任何光照的光谱功率分布和许多种表面的光谱反

射率,可相当精确地用有限维线性模型来近似。即都可用一组基函数的线性组合来表示。在作者应用中,分别选择了三组光照基函数和表面反射基函数。

假设摄像机的光谱灵敏特性曲线是 $C_k(\lambda)$,由摄像机有成像模型可知,相应于景物 X 处,摄像机的输出是

$$\rho_k^X = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda)S(\lambda)C_k(\lambda)d\lambda, \quad k = 1, 2, 3 \quad (1)$$

式中 $E(\lambda)$ 和 $S(\lambda)$ 为 X 处的光照光谱分布和表面反射率。 $E(\lambda)$, $S(\lambda)$ 都可用基函数表示:

$$S(\lambda) = \delta_1^X S_1(\lambda) + \delta_2^X S_2(\lambda) + \delta_3^X S_3(\lambda), \quad E(\lambda) = \varepsilon_1 E_1(\lambda) + \varepsilon_2 E_2(\lambda) + \varepsilon_3 E_3(\lambda) \quad (2)$$

式中 δ_i^X 是表面反射的基函数系数, ε_i 是光照基函数的系数。将(2)式代入(1)式,经整理得:

$$\rho_k^X = \sum_{j=1}^n h_{kj} \delta_j^X \quad (3)$$

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

由于光照基函数系数 ε_i 可预先计算出来^[5],所以 h_{kj} 可求。(3)式写成矩阵形式如下:

$$\begin{bmatrix} \rho_1^X \\ \rho_2^X \\ \rho_3^X \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_1^X \\ \delta_2^X \\ \delta_3^X \end{bmatrix} = H \delta^X, \quad \begin{bmatrix} \delta_1^X \\ \delta_2^X \\ \delta_3^X \end{bmatrix} = H^{-1} \begin{bmatrix} \rho_1^X \\ \rho_2^X \\ \rho_3^X \end{bmatrix} \quad (4)$$

求得 δ^X 后,便可由(2)式得到表面的光谱反射率分布。

偏差本体反射率可由 $S(\lambda) - \bar{S}(\lambda)$ 得到, $\bar{S}(\lambda)$ 是 $S(\lambda)$ 的平均值,即 $\bar{S}(\lambda) = \int S(\lambda) d\lambda$ 。然后再应用有限维线性模型,对偏差光谱反射率应用 Cohen 提出的基函数或奇异值(SVD)分解得到的基函数做降维线性变换^[5],得基函数的加权系数 ΔS 。对 ΔS 做归一化处理,即得归一化偏差本体反射特征向量 B 。

$$B = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} \Delta S_1 \\ \Delta S_2 \\ \Delta S_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中 $(1/K) = [\Delta S_1^2 + \Delta S_2^2 + \Delta S_3^2]^{1/2}$ 。该特征值可作为颜色分类和识别的依据。

2 归一化偏差本体反射率描述的颜色特性及其性质

2.1 饱和色和非饱和色在特征空间的位置关系

同种色调的饱和色和非饱和色在反射功率谱分布上的关系是,在饱和色的反射功率谱增加一定幅度的等能光谱,就变成非饱和色,而色调保持不变。

计算归一化偏差本体反射时,由于要减去平均值,则对于饱和色和同种色调的非饱和色,得到的结果是一样的(除非颜色接近完全不饱和色,计算结果有大的误差)。这表明归一化偏差本体反射率,对于同种色调饱和色和非饱和色,没有分辨能力。作者的实验也证明了这一点。如红色和粉红色两种颜色,其特征很接近,不易区分。

2.2 从 (r, g, b) 色度图的三角形分布到 (B_1, B_2, B_3) 的环状分布

归一化处理导致归一化偏差反射率与颜色的亮度因素无关,即 (R, G, B) 与其归一化的结果 (r, g, b) 有相同的归一化偏差本体反射特征。因此仅从 (r, g, b) 数据出发,就可获得对

归一化偏差本体反射特征的整体认识。在 (r, g, b) 的色度空间中，完全饱和色的分布是在一个等边三角形上。根据 2.1 中的讨论可知，计算归一化偏差本体反射特征时，同种色调的饱和色具有相同的值。所以可以仅讨论完全饱和色的归一化偏差本体反射特征的分布情况，就代表了对各种颜色的归一化偏差本体反射特征的分析。

由于在原 r, g, b 空间中，完全饱和色分布在一个等边三角形 (ΔABC) ，经过线性变换之后，特征的分布形状仍是一个三角形，设该三角形是 ΔDEF 。图 1 是该三角形的一个图案，是其三维形状的二维投影。作归一化处理，相当于将 ΔDEF 的点投射到单位球 $B_1^2 + B_2^2 + B_3^2 = 1$ 的球面上。即 ΔDEF 上的点与原点连线，与单位球的交点就是归一化的结果所对应的位置。

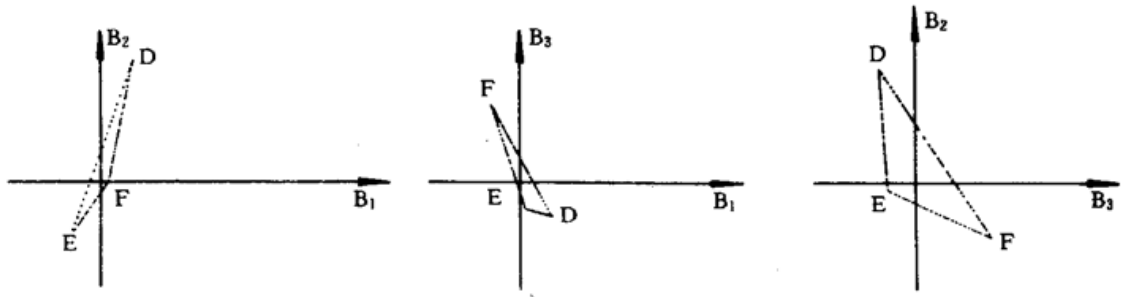


Fig. 1 Distribution of deviation body reflection feature values of saturated colors in the $B_1B_2B_3$ space)

可以证明原点在 ΔDEF 所在面上。因为在空间 $B_1B_2B_3$ 中的原点 $O(0, 0, 0)$ ，对应的是 r, g, b 空间的光源色度坐标点 E_0 。理想情况下，这一点对应的反射功率谱分布是等能功率谱，所以偏差谱应是零值，则对应 $B_1B_2B_3$ 空间中的原点 $O(0, 0, 0)$ 。因为点 E_0 在 ΔABC 所在的面上，经过的是线性变化，所以对应点 $O(0, 0, 0)$ 在 ΔDEF 所在的面上。由于 ΔDEF 所在的面过原点，所以 ΔDEF 上的点与原点连线，与单位球的交点构成一个圆环。因此在特征空间 $B_1B_2B_3$ 中，颜色特征的分布形状是一个圆环，圆心是原点。如图 2, 3 所示(图 2 的数据是从图 1 转化过来的；图 3 的数据是从一幅实际图像中采集出来的)。

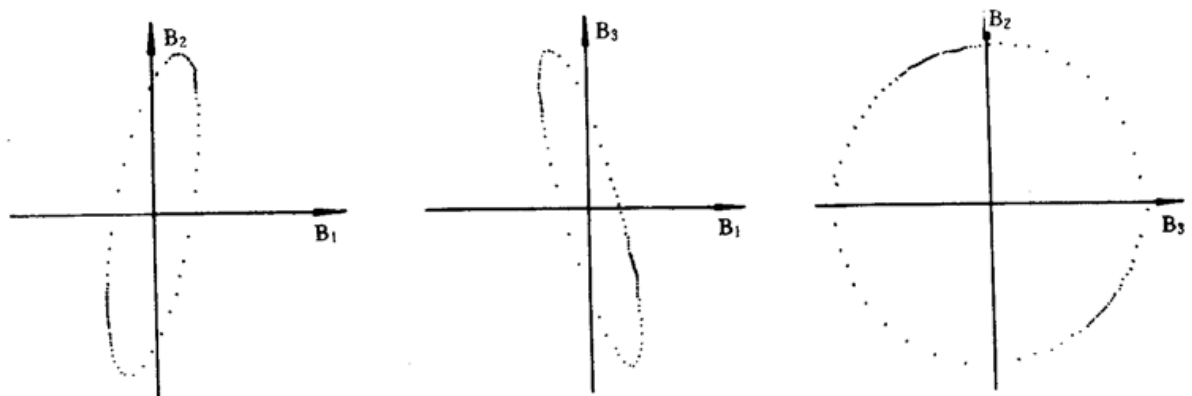


Fig. 2 Distribution of normalized deviation body reflection feature values of saturated colors in the $B_1B_2B_3$ space)

表 1 是不同光源下，计算若干颜色值(在 ΔABC 的三条边上离散采样得到的)的归一化偏差本体反射特征，然后用这些特征值拟合得到的平面方程。可见，该平面是稳定的，不受光源的影响，并且与原点的距离都很小(不精确过原点是由于误差造成的)。表明该特征是与光源无关的稳定特征。

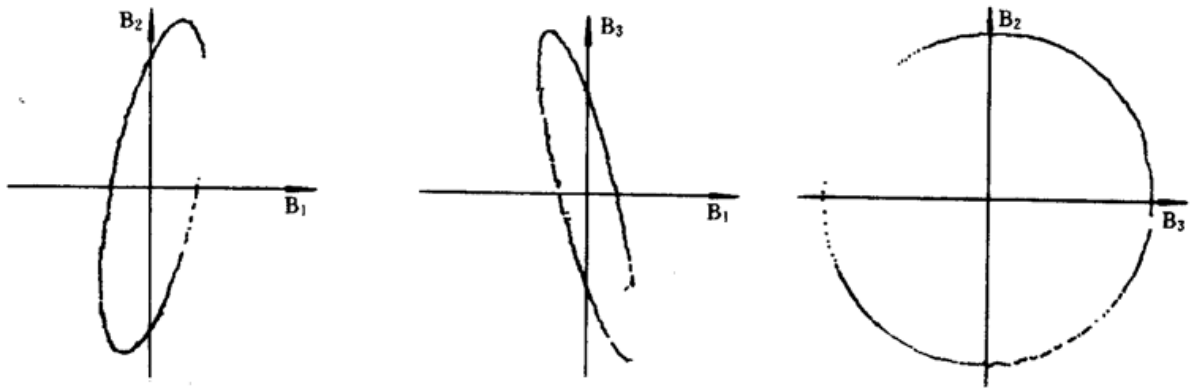


Fig. 3 Distribution of normalized deviation body reflection feature values calculated from a real images in the $B_1B_2B_3$ space)

Table 1. Equations for planes fitted by normalized deviation body reflection feature values

source (r_s, g_s, b_s)			plane equation $aB_1 + bB_2 + cB_3 + d = 0$			
r_s	g_s	b_s	a	b	c	d
0.2984	0.3552	0.8818	4.6088	-0.7415	1.0	-0.0043
0.6787	0.4862	0.5504	4.6064	-0.7408	1.0	-0.0046
0.4099	0.5553	0.7236	4.6050	-0.7409	1.0	-0.0042
0.1205	0.9630	0.2409	4.5699	-0.7387	1.0	-0.0030
0.9847	0.1233	0.1235	4.6108	-0.7416	1.0	-0.0063
0.2357	0.2357	0.9428	4.6115	-0.7421	1.0	-0.0044

3 特征的稳定性分析

3.1 特征的稳定性实验

归一化偏差本体反射特征, 不受光源的影响, 并且对同种材料的物体, 不论其表面方向如何变化, 甚至使呈现出的颜色偏离本体颜色很大, 都能取得非常接近的值。

图 4 是在两种光源下, 黄色和绿色物体的归一化偏差本体反射率的分布。一种是室内自然光照, 另一种是卤灯光光照。实线代表的是白天室内的自然光照得到的特征, 虚线代表卤灯光的光照得到的特征; A 组线表示的是绿色物体的特征, B 组线表示的是黄色物体的特征。可见, 在光源有很大差异的情况下, 尽管物体的 R , G , B 值差异很大, 归一化偏差本体反射特征仍很稳定。

在文献[5]中, 作者列出了在不同光源下, 红、黄、兰、绿等各种颜色的物体, 抽取到的归一化偏差本体反射值, 并进行了类间距离和类内距离的计算。不同光源下同种物体的特征非常接近, 不同类之间的最小类间距离都远大于各类的类内最大距离。

3.2 白色全反射情况的分析

归一化偏差本体反射率的主要特点是求偏差, 以消除界面反射的影响, 但是也将本体反射中与界面反射向量一致的成分剔除掉了。如果物体表面的界面反射相当强, 而本体反射成分很弱(例如在一些耀斑区会出现这种情况), 或者本体反射向量和界面反射向量是一致的,

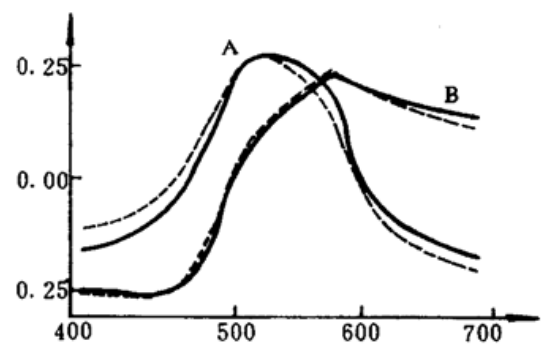


Fig. 4 Distribution of normalized deviation body reflection of green and yellow objects under two different illuminations

方向相同，如白色全反射物体，在这些情况下，求偏差反射会不准确。

因为，对于上述情况，获取的表面反射很接近等能功率谱，近似一条平直的线。则求偏差后，结果是一个很接近零值的偏差功率谱(由于用有限维模型拟合的误差，以及反射特性与全反射的差异，元素值不可能完全为零，成为理想状况)。若用这样的值作归一化(不作归一化则无法消除几何因素的影响)，则较小的误差会放大。而且用这样的归一化偏差谱计算系数，拟合误差也很大，即变形的偏差谱，不能用有限维模型准确表示。

图 5 是对一白色物体上的若干点，计算其归一化偏差反射特征，并在特征空间作二维投影的结果，理想状况下，该物体上的点应该集中于原点，由图 5 中可看出，特征值很分散，误差被放大了。

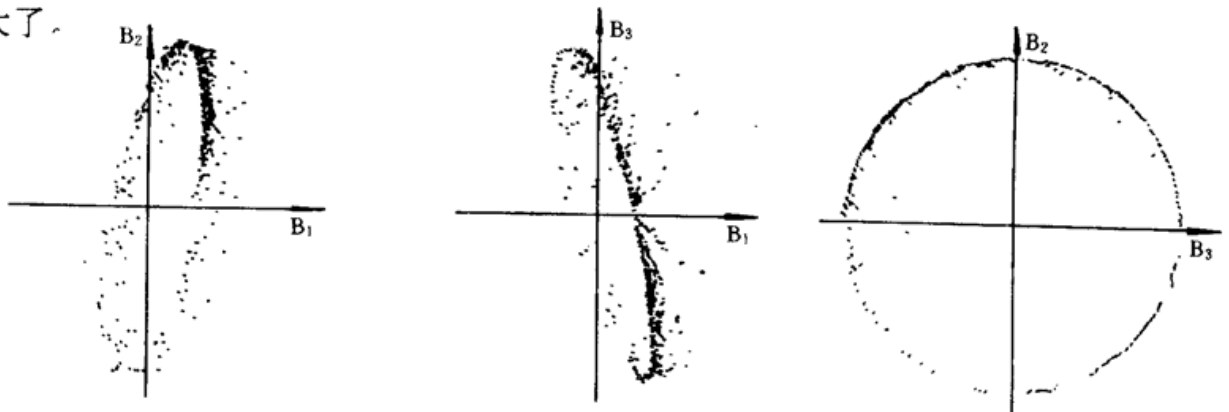


Fig. 5 Distribution of normalized deviation body reflection feature values for several points of a white object

上述情况在图像处理中是会经常遇到的，作者认为这时区分界面反射和本体反射已没有意义，如同在计算 HSI 时，如果像素点的色度坐标非常接近完全不饱和点——白点，则计算其色调会有相当大的误差。因此作者对于这样的像素点，只保留其归一化的表面反射特征，而不计算其偏差反射特征。判断依据是，用 (R, G, B) 与光源向量 (r_e, g_e, b_e) 的夹角大小来判断，即对这两个向量做点积运算，若其值大于某一阈值，则表面反射近似全反射，不计算其偏差反射特征。

4 归一化偏差本体反射率的计算分析

4.1 归一化偏差本体反射特征的快速计算方法

前述的归一化偏差本体反射率的计算方法，其步骤包括：由表面反射系数 δ^x 计算表面反射的功率谱分布 $S(\lambda)$ ；由 $S(\lambda)$ 求平均值 $\bar{S}(\lambda)$ ，然后作求差计算；采用最小二乘法得出系数向量 ΔS ，尤其是这一步的计算量大。本文改进方法，也是针对这几步，提出一种快速算法。

求偏差实质是，由表面反射的功率谱减去一个不随波长 λ 改变的等能功率谱 $\bar{S}(\lambda)$ 。

$\bar{S}(\lambda)$ 可用基函数的线性组合表示为 $\bar{S}(\lambda) = \|\bar{S}(\lambda)\| (b_1S_1(\lambda) + b_2S_2(\lambda) + b_3S_3(\lambda))$ 。其中 $b_1S_1(\lambda) + b_2S_2(\lambda) + b_3S_3(\lambda) = 1$ ，不论 λ 取何值。 b_1, b_2, b_3 可由 $S_1(\lambda), S_2(\lambda), S_3(\lambda)$ 预先求得，图 6 是用基函数拟合等能功率谱的结果。对数据做了归一化处理。图 6 中平直的线是等能谱，略有起伏的是拟合的数据。此外，

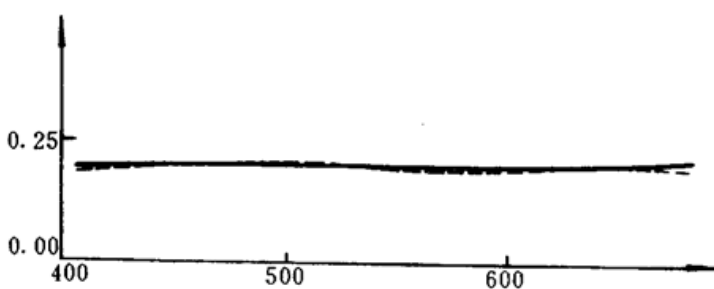


Fig. 6 Fitting the equal energy spectrum using the basis functions

对公式(2)的两边取均值, 可得

$$\begin{aligned} \|\bar{S}(\lambda)\| &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [\delta_1^x S_1(\lambda_i) + \delta_2^x S_2(\lambda_i) + \delta_3^x S_3(\lambda_i)] \\ &= \delta_1^x \sum_{i=1}^n \frac{S_1(\lambda_i)}{n} + \delta_2^x \sum_{i=1}^n \frac{S_2(\lambda_i)}{n} + \delta_3^x \sum_{i=1}^n \frac{S_3(\lambda_i)}{n} \end{aligned} \quad (6)$$

设 $R_k = \sum_{i=1}^n \frac{S_k(\lambda_i)}{n}$ $k = 1, 2, 3$, 则 R_k 可以预先计算出来, 所以仅由 δ^x , 就可计算出均值, 因而均值 $\bar{S}(\lambda)$ 的计算得到了简化. 进而可求出偏差本体反射特征向量 ΔS , 而且不用作最小二乘运算. 即

$$\Delta S = \begin{bmatrix} \Delta S_1 \\ \Delta S_2 \\ \Delta S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_1^x \\ \delta_2^x \\ \delta_3^x \end{bmatrix} - \|\bar{S}(\lambda)\| \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - R_1 b_1 & -R_2 b_1 & -R_3 b_1 \\ -R_1 b_2 & 1 - R_2 b_2 & -R_3 b_2 \\ -R_1 b_3 & -R_2 b_3 & 1 - R_3 b_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_1^x \\ \delta_2^x \\ \delta_3^x \end{bmatrix} = R_b \delta^x \quad (7)$$

再根据(4)式可得

$$\Delta S = R_b H^{-1} \rho = R_{bH} \rho \quad (8)$$

其中, $R_{bH} = R_b H^{-1}$. 然后按(5)式对 ΔS 作归一化处理, 即得归一化偏差本体反射特征向量 B .

由于光源已知, 则矩阵 H 可求, R_b 也可预先计算, 即矩阵 R_{bH} 可计算出, 并且对于光源的相对功率谱不变的点, 该矩阵是固定的. 可见, 由向量 ρ 到 B 的运算, 仅需要一个 3×3 的矩阵运算和归一化处理.

与 HSI 的计算相比较, 归一化偏差本体反射特征的计算没有角度的计算, 而只有乘法运算和归一化运算, 计算量就小得多.

4.2 准确计算归一化偏差本体反射特征的依赖条件

因为获取物体偏差本体反射特征的原始数据是图像点的 (R, G, B) , 所以特征的稳定性也是相对而言的, 并非任意变化的光源都可实现颜色的恒常性. 如果光源太单纯, 则物体反射回摄像机的光谱成分也很单纯, 加上摄像机的灵敏度及动态范围的限制, 导致 (R, G, B) 值有些为零, 则无法由这样的 (R, G, B) 值分析出正确的本体反射特征.

由于光源数值是计算每一图像点特征值的依据, 所以光源的准确分析尤为重要. 光源的误差, 会引起分析的误差. 此外, 如果光源是比较离奇的, 公式(8)中的矩阵 H 为病态的矩阵, 则不能得到正确的特征值. 如光源的色度坐标是 $(r_s = 0.815, g_s = 0.014, b_s = 0.579)$, 根据摄像机参数以及所选用的反射基函数, 得

$$H = \begin{bmatrix} 0.5787 & 0.4636 & 0.2616 \\ 0.0089 & 0.0060 & 0.0048 \\ 0.3053 & -0.4096 & -0.3474 \end{bmatrix}, \quad H^{-1} = \begin{bmatrix} -0.2000 & 88.4635 & 1.0659 \\ 7.4869 & -460.9991 & -0.7014 \\ -9.0020 & 621.2086 & -1.1149 \end{bmatrix}$$

$$\text{这时, } R_{bH} = \begin{bmatrix} 3.0664 & -201.0050 & 0.1526 \\ 7.0045 & -418.2484 & -0.5665 \\ -8.9872 & 619.9011 & -1.1190 \end{bmatrix}$$

由于第二列的元素的绝对值远大于其它两列的元素, 所以计算结果几乎只受 G 值的影响: 不管 (R, G, B) 如何变化, 计算出的归一化偏差本体反射特征基本上不变. 如表 2 所列.

H 矩阵的元素是 h_{kj} , 由(3)式可知其计算过程. 由于 $C_k(\lambda)$ 是测量得到的摄像机的灵敏度参数, $S_j(\lambda)$ 是选定的表面反射基函数的值, 因此唯一可变的是 $E(\lambda)$, 这是影响矩阵 H 的主要因素. 因此在计算特征之前, 应对获取的光源作分析, 判断其是否可用.

Table 2. A group of special normalized deviation body reflection feature values

R	G	B	B_1	B_2	B_3
20	30	40	-0.2596	-0.5411	0.7998
20	200	20	-0.2596	-0.5402	0.8005
100	20	20	-0.2596	-0.5412	0.7971
100	200	100	-0.2596	-0.5402	0.8005

判断的依据是, 矩阵 H 是否可逆。由于所用的数据都有一定的误差, 所以求逆运算一般都可完成, 但并非求得的逆矩阵都是可用的。应计算其行列式的值, 是否接近零。为了避免由于幅度的不一致, 造成的判断误差, 可将 H 的元素归一化, 即元素的平方和为 1。上面的 H 值就是作了归一化的结果。其行列式的值是 0.000609。

总 结 本文对归一化本体反射特征的特性作了详细的阐述, 并对它的计算方法作了分析, 提出了一个快速算法; 对该特征的应用前提条件, 以及应用限制, 作了详细的分析, 在实际图像处理中, 必须考虑到这些影响因素。关于在新的颜色空间, 特征点的分布形状及位置, 提供了实验数据和结果分析。这些特性, 对于进一步理解归一化偏差本体反射特征, 以及颜色恒常性的研究, 有一定的应用价值。

参 考 文 献

- [1] Edwin H. Land, John J. McCann, Lightness and Retinex Theory. *Optical Society of America.*, 1971, 61(1): 1~11
- [2] Edwin H. Land, The Retinex Theory of Color Vision. *Scient. Amer.*, 1977, 237(6): 108~129
- [3] S. Tominaga, Surface identification using the dichromatic reflection model. *IEEE Trans. PAMI*, 1991, 13(7): 658~670
- [4] Guangyou Xu, Hai Hong, Shiqiang Yang, Detecting and Analyzing of the body reflection characteristic of objects. *Opt. Engng*, 1994, 33(9): 3082~3086
- [5] 徐光佑, 贾相夷, 光源光谱功率分布估计和颜色分类. *光学学报*, 1994, 14(8): 862~866
- [6] J. B. Cohen, Dependency of the spectral reflectance curves of Munsell color chips. *Psychonomical Science*. 1964, 1: 369~370
- [7] Laurence T. Maloney, Evaluation of linear models of surface spectral reflectance with small number of parameters. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1986, 3(10): 1673~1682

Study of Normalized Deviation Body Reflection

Liu Lifeng Xu Guangyou

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

(Received 6 December 1994; revised 30 March 1995)

Abstract It is essential for realizing color constancy to acquire color descriptors that are not affected by illumination and geometry conditions. To combine dichromatic reflection model with the finite dimensional linear model to derive the normalized deviation body reflectance, has been demonstrated to be an important method to realize color constancy. In the present work, we studied the properties of the normalized deviation body reflectance, its computational method, as well as constrains of its application.

Key words color, finite dimensional linear model, dichromatic reflection model, deviation body reflectance.