

用改进的基向量法重建光谱反射比

王 葛^{1,2}, 李长军³, 朱云龙¹, M Ronnier Luo³

(1. 中国科学院 沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳, 110016; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039;

3. Department of Colour Chemistry, University of Leeds, Leeds LS2 9JT, UK)

摘 要: 如何从已知物体表面颜色的三刺激值及其照明条件和观察条件准确地重建其光谱反射比, 是彩色图像研究领域尚待解决的一个重要课题. 本文首先介绍了两种前人提出的方法, 即“伪逆矩阵法”和“Wiener 方法”, 然后, 分析了这两种方法的优缺点, 指出了共同存在的问题, 即所重建的光谱反射系数有可能超出实际可能的范围(0, 1), 进而提出了一种新的改进的基向量法. 最后, 文中还给出此改进的算法和上述两种算法的特性模拟仿真. 从仿真的结果中可以看出, 改进的算法不仅在精度上较上述两种算法更精确, 而且能够保证所重建的光谱反射比能够满足其实际可能的范围(0, 1). 因而, 用本文中所给出的改进的基向量法重建物体表面的光谱反射比, 较上述两种前人提出的算法更能满足工业实际需要.

关键词: 光谱反射比; 奇异值分解; 基向量法; 伪逆矩阵法; Wiener 法

文章编号: 1000-3231(2005)05-0340-11 中图分类号: O64 文献标识码: A

物体表面的光谱反射比^[1, 2]是物体表面属性的一种表现形式, 它是入射到物体表面的光线被反射的量与入射的总量之比. 物体表面的光谱反射比在工业实际中有着非常广泛的应用, 如计算机视觉、计算机彩色图像识别和色彩复制等.

物体表面的颜色通常是由 3 个量决定的, 即: 光源的光谱功率分布, 物体表面的光谱反射比和观察者的视觉特性. 而颜色通常是用三刺激值来表示, 例如在数码照相机、数码摄像机、CRT 显示器以及彩色电视中颜色通常是用 R 、 G 、 B 3 个值来表示的, 而这 3 个值又可以转换成其他三刺激值^[3-5], 如 CIE 三刺激值 X 、 Y 、 Z 等. 物体表面的颜色通常会随着照明条件和观察条件的变化而改变, 虽然人眼对颜色视觉具有一定的恒常性^[6, 7], 但数码相机、数码摄像机等影像器材却没有这种颜色视觉的恒常性. 例如, 用数码相机等影像器材对同一物体表面进行拍照时, 由于照明光源的不同, 所拍摄出来的物体颜色通常会有很大差别. 但是, 这些用数码相机等影像器材拍摄下来的产品广告图像, 传输到计算

收稿日期: 2005-04-01; 修回日期: 2005-06-01. 通讯联系人: 李长军, E-mail: C. Li@leeds.ac.uk.

作者简介: 王 葛(1975-)男, 在读博士生, 目前研究领域: 三刺激值加权表的计算及物体表面光谱反射比的重建.

机等图形图像设备中后,其颜色将不再能够随着照明条件的变换而改变,这些图像中表现出来的颜色就显得过于“呆滞”。

近年来,光谱图像^[8]引起了国内外众多研究者的极大兴趣。因为光谱图像中记录的是物体表面的光谱反射比信息,这就使得这些图像的颜色能够随着照明光源的改变而改变,并且能够更为真实地反映物体表面的实际颜色。而普通图像要转换为光谱图像,则需要知道每个像素的光谱反射比信息。

工业上还有很多种情况会遇到在已知物体表面颜色的三刺激值、照明光源的光谱功率分布以及标准色度观察者的情况下求物体表面光谱反射比的问题,即物体表面光谱反射比的重建问题。

人们对光谱反射比的重建问题的研究已经很久,然而研究的结果一直不很理想。重建物体光谱反射比的问题可以描述成为:已知光源的光谱能量分布函数 $E(\lambda)$ 、标准色度观察者光谱三刺激值 $p(\lambda)$ ^[9]和物体表面颜色的三刺激值 p ,求物体的光谱反射比函数 $R(\lambda)$;或者已知对应的三刺激值加权表 W_p 和物体表面颜色的三刺激值 p ,求物体的光谱反射比 $R(\lambda)$ 。其中,采用矩阵相乘形式,则满足下式,即:

$$p = W^T \cdot r \quad (1)$$

式中, p 是三刺激值列向量,通常为 3 维, W 是三刺激值加权表矩阵,通常为 $n \times 3$ 的矩阵, n 为每个像素点的光谱反射比个数,即 $n = (b - a) / \Delta\lambda$, $\Delta\lambda$ 为光谱反射比数据的间隔, a, b 是可见光光谱范围,本文中光谱反射比范围为 $a = 400 \text{ nm}$, $b = 700 \text{ nm}$; r 是光谱反射比列向量,通常为 n 维。

因为式(1)所描述的方程只有 3 个,而要求的光谱反射比向量 r 的未知数个数是 n ,并且通常有 $n \gg 3$,因此重建光谱反射比问题的解是不唯一的。不过,人们研究发现,物体表面的光谱反射比通常是光滑的,这样就可以给上述方程(1)加上一些光滑条件^[10-13],或者可以认为方程组的解是某些基向量的线性组合^[14-16]。

1 研究方法

本文的研究方法是基于基向量的。采用基向量的方法求解方程组(1),最主要的步骤就是求解组成光谱反射比的基向量的组合系数,见式(12),从而确定光谱反射比。通常最常用的方法是伪逆矩阵法和 Wiener 方法^[13-16]。

本文的研究目的有两个:第一,检验上述两个方法的求解精度是否随着基向量个数的增加而改善;第二,这两个方法都有一个共同的缺陷,那就是求出的反射比可能会超出实际可能的范围(0, 1)。因此,本文提出了一个新的改进的基向量法,使其求出的反射比不会超出这个实际可能的范围。这种改进的新方法对采集的光谱反射比数据应用奇异值分解法(SVD)求出的奇异值,或者应用主成份分析法(PCA)求出特征值,然后再加权边界约束来优化组合系数,从而导出了约束最小二乘问题。最后,本文还给出了这种改进的新方法与伪逆矩阵法和 Wiener 方法的特性仿真比较。

1.1 奇异值分解

伪逆矩阵法和 Wiener 方法都是基于基向量的重建方法. 而用基于基向量的方法重建物体表面光谱反射比时, 首先必须要收集一些相关领域的光谱反射比数据, 作者用 $n \times m$ 的矩阵 R 来表示, 其中有 $m > n$, 并且每一列都代表一种物体表面的光谱反射比, 因此就有 m 列光谱反射比数据. 然后就可以采用 SVD 方法或者 PCA 方法来求基向量. 例如, 用 SVD 方法求解时, 矩阵 R 可以分解成下式所示, 即:

$$R = U\Sigma V^T \quad (2)$$

式中, U 是一个 $n \times n$ 的正交矩阵, V 是一个 $m \times m$ 的正交矩阵, Σ 有如下形式, 即:

$$\Sigma = (D \ O) \quad (3)$$

式中, D 是一个对角阵, O 是一个 $n \times (m - n)$ 的零阵. 如果我们令:

$$U = (u^{(1)}, u^{(2)}, \dots, u^{(n)}), \quad D = \text{diag}(d_1, d_2, \dots, d_n) \quad (4)$$

于是, $u^{(1)}, u^{(2)}, \dots, u^{(n)}$ 就是待求的基向量, 而 d_1, d_2, \dots, d_n 就是待求的奇异值, 并且有 $d_1 \geq d_2 \geq \dots \geq d_n \geq 0$ (5)

通常, 奇异值中前面的数值要远远大于后面的数值, 如表(1)所示. 若假设前 k 个奇异值非常大, 而后边的 $n - k$ 个奇异值与前面的相比接近于零, 则可以有如下近似, 即:

$$R = U\Sigma V^T \approx U \begin{pmatrix} d_1 & & & \\ & d_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & d_k \\ & & & & O \\ & & & & & O \end{pmatrix} V^T \quad (6)$$

$$= (u^{(1)}, u^{(2)}, \dots, u^{(k)}) C_k = U_k C_k$$

式中, C_k 是一个 $k \times m$ 的矩阵, O 代表着一个适当大小的零阵, 如: 最后一行的第一个 O 代表一个 $(n - k) \times k$ 的零阵, 而最后一行的第二个 O 代表一个 $k \times (k - m)$ 的零阵. 这样任何一个反射比向量 r 都可以用前 k 个基向量的某种组合来表示, 如式(12)所示.

实际上, 若是令:

$$R = (r^{(1)}, r^{(2)}, \dots, r^{(m)}) \quad (7)$$

$$R_k = U_k C_k = (r^{(1,k)}, r^{(2,k)}, \dots, r^{(m,k)})$$

则, 若用前 k 个基向量来表示 R 的话, 那么 R_k 是矩阵 R 的一个最好的近似, 其误差可以用其各个反射比向量的欧氏距离平方和的平方根来表示, 即:

$$e(k) = \sqrt{\sum_{j=1}^m \|r^{(j)} - r^{(j,k)}\|^2} = \sqrt{\sum_{j=k+1}^m d_j^2} \quad (8)$$

这里, $\|x - y\|$ 是两个向量的欧氏距离. 因此, 若是用 R_k 来近似矩阵 R , 则相对误差为:

$$er(k) = \sqrt{\sum_{j=k+1}^m d_j^2} \left/ \sqrt{\sum_{j=1}^m d_j^2} \right. \quad (9)$$

从另外一个角度来讲就是, 用 R_k 来近似矩阵 R 时, 保存下来的特性的比例, 即特性生存比为:

$$en(k) = 1 - er(k) \quad (10)$$

本文中所采用的用于求基向量和奇异值的反射比数据来自于对 1250 个 Munsell 彩

色卡的测量结果,其测量间隔为 5 nm, 光谱范围为 400 nm 到 700 nm 之间. 有了这 1250 个光谱反射比数据, 作者就可以对其进行奇异值分解, 从而得到其奇异值和基向量. 表 1 中给出了前 10 个奇异值和分别用前 $k=1, 2, \dots, 10$ 个基向量来表示反射比矩阵 R 时的相对误差以及特性生存比, 即:

表 1 $d_k, er(k),$ and $en(k)$ 的前 10 个系数
The first 10 coefficients of the $d_k, er(k),$ and $en(k)$

k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
d_k	114.74	24.615	14.641	6.1478	4.5733	3.2472	1.8394	1.4497	0.9582	0.8000
$er(k)$	0.2526	0.1440	0.0741	0.0530	0.0363	0.0238	0.0181	0.0134	0.0106	0.0082
$en(k)$	0.7474	0.8560	0.9259	0.9470	0.9637	0.9762	0.9819	0.9866	0.9894	0.9918

由表 1 可以看出, 只用 3 个基向量就可以保存原有光谱反射比矩阵的大约 93% 的特性, 而用 10 个基向量代表 1250 个反射比矩阵的误差还不足 1%.

实际上, 用基向量表示反射比矩阵时的组合系数, 即“最优系数”通过下式求得, 即:

$$c_k = \langle r, u^{(k)} \rangle = r^T u^{(k)}, \quad k = 1, \dots, n \quad (11)$$

式中, $\langle x, y \rangle$ 表示两个向量 x 和 y 的内积.

例如, 图 1 中给出了一个实际的反射比函数 r (用粗实线表示), 和 3 个分别用 3 个 (用点线表示)、6 个 (用点划线表示) 和 10 个 (用划线表示) 基向量和与其对应的最优系数 (见表 2) 组合的近似函数曲线图.

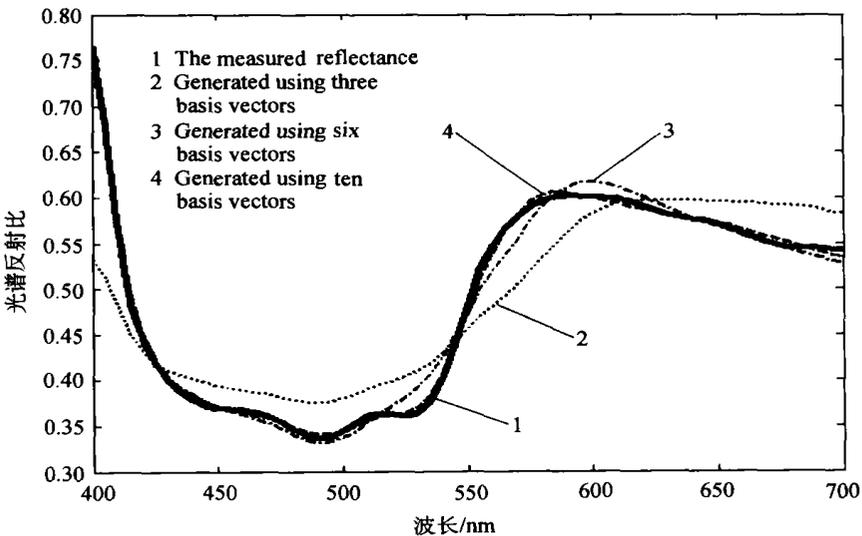


图 1 实际的反射比函数 r (粗实线) 与分别用 3 个 (点线)、6 个 (点划线) 和 10 个 (划线) 基向量来近似的反射比函数
The measured reflectance function (bold solid curve) and the approximated reflectance functions generated using the three (dotted curve), six (dashdot curve), and ten (dashed curve) basis vectors

从图 1 中可以看出, 随着基向量个数的增加, 近似的反射比函数越来越接近真实的反射比函数, 实际上当基向量的个数为 10 的时候, 近似函数与实际的反射比函数已经相

差无几了.

表 2 图 1 中实际反射比函数的前 10 个最优系数

The first 10 optimum coefficients of the thick solid reflectance function in Figure (1)

k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
c_k	- 3. 8517	0. 5081	- 0. 1832	0. 3799	- 0. 0325	0. 1068	- 0. 0718	- 0. 0193	- 0. 0435	0. 0190

1.2 伪逆矩阵法

基于上述分析, 作者假定待求反射比可以看作是 k 个基向量的组合, 即:

$$r = c_1 u^{(1)} + c_2 u^{(2)} + \dots + c_k u^{(k)} = U_k c \quad (12)$$

故此, 由式(1)可知, 系数向量应该满足下式, 即:

$$p = W^T U_k c \quad (13)$$

通常, 理论上认为, 随着基向量个数的增加, 求出的反射比函数应该越接近真实的反射比函数, 即认为存在满足方程(12)的一组系数接近满足最优系数(11). 但实际上很难得到这样的一组系数, 如表 4 所示, 因为式(11)中的反射比是未知的.

而求解方程组(13)的方法的一种途径就是伪逆矩阵法, 即:

$$c = (W^T U_k)^+ p \quad (14)$$

式中, $(W^T U_k)^+$ 是矩阵 $W^T U_k$ 的伪逆矩阵, 当 $k = 3$ 时, $(W^T U_k)^+$ 变成矩阵 $W^T U_k$ 的逆矩阵 $(W^T U_k)^{-1}$. 用式(14)作为方程组(13)的解, 并由式(12)求得待求的反射比函数的方法就是“伪逆矩阵法”.

用伪逆矩阵法求光谱反射比的方法存在两个问题: 第一, 用式(14)求得的系数与式(11)中的最优系数不一致; 第二, 用式(12)求出的反射比数据可能会超出实际可能的范围, 表 3 给出了用伪逆矩阵法重建上述 1250 个反射比函数时超出边界条件的反射比函数数量. 由表 3 可以看出, 当基向量的个数超过 7 个以后, 所重建的反射比函数均超出了实际可能的范围(0, 1).

表 3 用伪逆矩阵法重建 1250 个 Munsell 光谱反射比函数时超出边界条件的个数

Number of the reflectance functions violated the boundary conditions when the generalised inverse method was used to reconstruct the 1250 Munsell reflectances

k	3	4	5	6	7	8	9	10
No.	38	147	1250	1244	1250	1250	1250	1250

同时, 本文也给出了图 1 中的实际光谱反射比函数曲线图和用伪逆矩阵法重建出的 3 个反射比函数的曲线图, 这 3 个求出的反射比函数分别是用 3 个、6 个和 10 个基向量求出的, 如图 2 所示.

从图 2 中可以看出, 只有采用 3 个基向量时求出的反射比函数与实际的反射比函数曲线近似, 其余的都在实际反射比函数图像上下有较大波动, 并且部分已经超出实际可能的范围(0, 1).

表 4 中还给出了采用上述伪逆矩阵法求解光谱反射比函数时得到的组合系数, 从中可以看出, 只有采用 3 个基向量求反射比时得出的系数与表 2 中的最优系数接近, 这也是只有它的曲线最接近实际反射比函数曲线的原因.

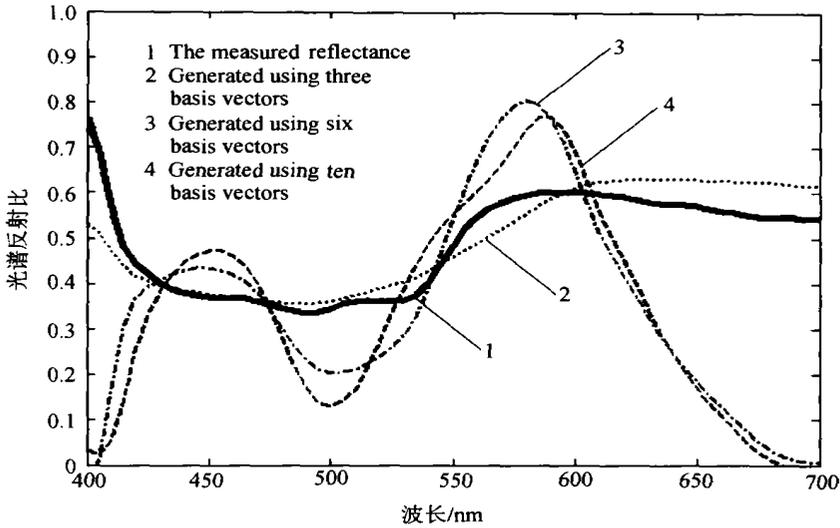


图 2 实际的反射比函数 r (粗实线) 与采用伪逆矩阵法时分别用 3 个 (点线)、6 个 (点划线) 和 10 个 (划线) 基向量来重建的反射比函数

Thick solid curve is the measured reflectance function, dotted, dashdot, and dashed curves are reflectance functions generated by generalised inverse method using three, six, and ten basis vectors respectively

表 4 用伪逆矩阵法得到的组合系数

Combination coefficients found by using generalised inverse method

k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
c_k	- 3. 9162	0. 6761	- 0. 1957							
c_k	- 2. 7102	- 0. 0920	0. 7834	0. 2300	- 1. 5117	0. 3042				
c_k	- 2. 6560	- 0. 0572	0. 8275	0. 2398	- 1. 4569	0. 3010	0. 2557	- 0. 2978	0. 1807	- 0. 0348

1.3 Wiener 法

如前所述, 用伪逆矩阵法重建光谱反射比函数时很难找到最优系数. 为了求出更好的满足方程(12)的组合系数, Wiener 给出了基于统计信息的估计方法^[9-12], 即 Wiener 方法:

$$c = (C_k C_k^T) (W^T U_k)^T (W^T U_k (C_k C_k^T) (W^T U_k)^T)^{-1} \quad (15)$$

式中, 矩阵 C_k 与式(6)中的一致.

Wiener 方法就是用式(15)来计算组合系数向量 c , 进而再利用式(12)计算待求光谱反射比的.

同样, 用 Wiener 方法重建光谱反射比时, 作者希望随着采用基向量个数的增加, 重建的反射比与实际反射比能有更好的近似. 为此, 作者用前面“伪逆矩阵法”一节中同样的例子验证了 Wiener 方法. 研究发现, 用 Wiener 方法重建光谱反射比时, 当基向量个数由 3 个增加到 5 个的时候, 重建的结果稍微有些改善, 然而当基向量个数超过 5 个以后, 重建的结果就基本上没有什么改善了; 并且同样, 用此方法重建的反射比结果仍然有部分会超出实际可能的范围(0, 1). 表 5 给出了重建前述 1250 个反射比函数中超出边界的

反射比个数.

表 5 用 Wiener 方法重建 1250 个 Munsell 反射比函数时超出边界的个数
Number of the reflectance functions violated the boundary conditions when the Wiener method was used to reconstruct the 1250 Munsell reflectances

k	3	4	5	6	7	8	9	10
No.	38	38	32	32	33	33	33	33

同时,本文也给出了图 1 和图 2 中的实际光谱反射比函数曲线图和用 Wiener 方法重建出的 3 个反射比函数的曲线图,这 3 个反射比函数分别是用 3 个、6 个和 10 个基向量求出的,如图 3 所示.

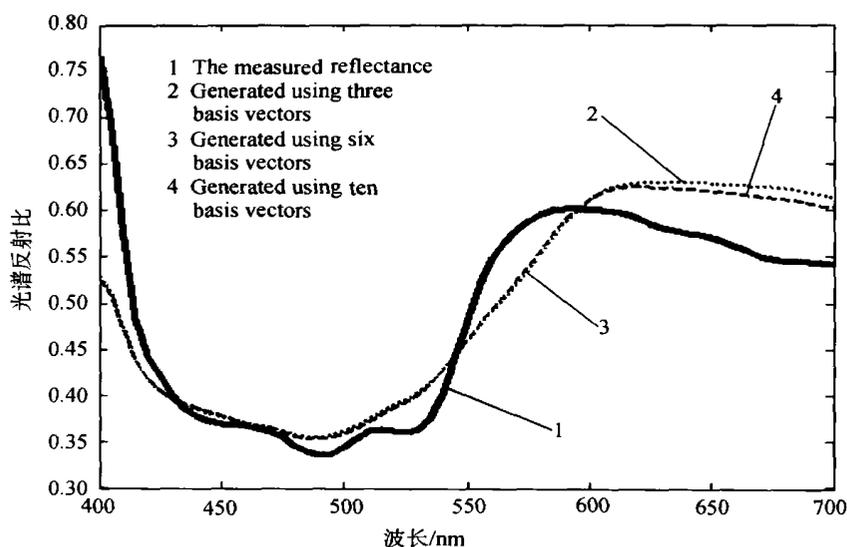


图 3 实际的反射比函数(粗实线)与采用 Wiener 方法时分别用 3 个(点线)、6 个(点划线)和 10 个(划线)基向量来重建的反射比函数

Thick solid curve is the measured reflectance function, dotted, dashdot, and dashed curves are reflectance functions generated by Wiener method using three, six, and ten basis vectors respectively

从图 3 中可以看出,当基向量为 6 个和 10 个时,所重建出的反射比函数曲线几乎重合,而用 3 个基向量重建出的反射比函数曲线与它们相比只是在长波端稍有不同.

用 Wiener 方法重建光谱反射比函数时,所得到的组合系数如表 6 所示.

表 6 用 Wiener 方法重建光谱反射比时得到的组合系数
Combination coefficients found by using Wiener method

k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
c_k	- 3.9162	0.6761	- 0.1957							
c_k	- 3.8959	0.6602	- 0.1803	0.0125	- 0.0242	0.0065				
c_k	- 3.8958	0.6602	- 0.1802	0.0125	- 0.0242	0.0065	0.0005	- 0.0001	0.0002	- 0.0000

从表6中可以看出,当用10个基向量求解时,最后的4个组合系数几乎为零,这也是用6个基向量和用10个基向量所重建的反射比函数曲线几乎重合的原因.另一方面,比较表6中的组合系数与表2中的最优系数可以看出,只有前三个系数相近,也就是说用Wiener方法所得的系数,除了前3个组合系数之外,其余组合系数对重建的结果贡献并不大,这也是用3个基向量和用6个与10个基向量重建的反射比函数曲线相近的原因.

1.4 改进的方法

如前所述,无论是用伪逆矩阵法还是用Wiener方法重建物体表面光谱反射比函数时,所重建的结果都可能会超出实际可能的范围(0, 1).为了使重建的光谱反射比函数不超出实际可能的范围(0, 1),必须给出如下边界条件,即:

$$0 \leq r_i \leq 1, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (16)$$

而且,为了使重建出的光谱反射比函数满足方程(12)、(13)和不等式(16),基向量的个数必须大于3.然而,当 $k > 3$ 时,用伪逆矩阵法不能求出适当的组合系数,而用Wiener方法又不能保证所求出的反射比函数满足边界条件(16).

为了解决上述问题,作者重新利用前人研究的统计信息,通过上两节可以发现如下两个基本事实.

1) 每个基向量对所求反射比函数的贡献是不同的,第一个基向量是最重要的,也是贡献最大的,与此对应,第一个组合系数在数值上也是最大的,而最后的组合系数应该接近于零.

2) 基向量对所求反射比函数贡献的大小与对应的奇异值有关.

基于以上两点,作者给出新的重建光谱反射比的方法,如下式所示,即:

$$\text{Min} \sum_{j=1}^k (a_j / d_j)^2 \quad (17)$$

约束条件是式(12)、(13)和(16).

这种新方法的特性同样可以用前述的反射比数据进行检验.结果发现,当基向量个数由4个变成5个时,所求的结果精度有所改善,但是当 $k > 5$ 后,与用5个基向量求解的结果没有多少差别.

同样,本文也给出了重建前述实际物体的光谱反射比的验证.研究发现,用此新方法重建前述实际物体的光谱反射比,当采用6个基向量和10个基向量时,得出的组合系数与用Wiener方法得出的组合系数基本相同,也就是说重建出来的结果,用这两种方法是一样的.但是用此新方法重建出的光谱反射比是肯定会满足边界条件(16)的,然而Wiener方法则不能保证.

1.5 3种重建方法的特性比较

分别用伪逆矩阵法、Wiener方法和本文中提出的新方法重建前述1250个实际测量的反射比函数时,可以用“光谱精度”来比较,即:

$$r_e = \| r - r \| \quad (18)$$

也可以用“色度学精度”来比较,即:求实际光谱反射比和重建的光谱反射比,分别在D65、A、F11、F2、F7和D50光源以及CIE1964标准色度观察下产生的CIELab色差^[14].

表 7 给出了基向量个数分别为 $k = 3, 4, 5, 6$ 的 4 种情况时, 用前述 3 种方法重建光谱反射比的光谱精度的结果比较. 其中, 给出了平均值 (Ave)、最大值 (Max) 和中间值 (Med) 3 个统计结果.

表 7 重建前述 1250 个光谱反射比的光谱精度 ($k = 3, 4, 5, 6$)

Spectral accuracy for each method with $k = 3, 4, 5, 6$, tested using 1250 reflectance functions

k	伪逆矩阵法			Wiener 方法			新方法		
	Ave	Max	Med	Ave	Max	Med	Ave	Max	Med
3	0.0313	0.1583	0.0270	0.0313	0.1583	0.0270	-	-	-
4	0.0427	0.1970	0.0323	0.0312	0.1597	0.0273	0.0312	0.1431	0.0273
5	0.1878	0.4808	0.1685	0.0306	0.1675	0.0262	0.0304	0.1400	0.0261
6	0.1896	0.4822	0.1700	0.0305	0.1683	0.0262	0.0304	0.1488	0.0261

从表 7 中可以看出, 伪逆矩阵法是 3 种方法中最差的, 它随着基向量的个数的增加, 重建的结果有很大的波动. 这种方法当 $k > 5$ 时, 重建出的结果很差. Wiener 方法和本文提出的新方法具有相似的特性, 它们都在当基向量的个数 $k > 5$ 时, 精度不再改善, 但是当 $k > 5$ 时用这两种方法的重建精度都不波动. 但是, 本文中提出的新方法能够准确地满足边界条件(16), 而 Wiener 方法不能保证重建的反射比能够满足此边界条件.

表 8 中给出了用本文中提出的新方法、基向量个数为 $k = 5$ 时, 重建的光谱反射比的色度学精度结果. 其中, 给出了平均值 (Ave)、最大值 (Max) 和中间值 (Med) 3 个统计结果.

表 8 用文中的新方法、5 个基向量重建前述 1250 个光谱反射比的色度学精度

Colorimetric accuracy of the new method with , tested using 1250 reflectance functions

	Ave	Max	Med
D65	0.00	0.00	0.00
A	1.43	9.92	0.98
F11	1.84	11.00	1.20
F2	1.06	6.99	0.71
F7	0.30	2.03	0.24
D50	0.45	2.82	0.31

从表 8 中可以看出, 用文中提出的新方法重建前述 1250 个反射比, 在 A 光源下色度学精度的平均色差为 1.4 个 CIELab 单位, 其最大色差可达将近 10 个 CIELab 单位; 而在 F11 光源下, 色度学精度最差, 其平均色差约为 1.8 个 CIELab 单位, 而最大色差可达 11 个 CIELab 单位.

2 结论

本文首先分析了基于基向量的重建光谱反射比函数的已有方法, 即伪逆矩阵法和 Wiener 方法, 然后给出了一种重建光谱反射比函数的新方法. 并且, 文中还给出了这种新方法同已有的伪逆矩阵法和 Wiener 方法相比较, 结果如下.

用伪逆矩阵法重建物体表面光谱反射比函数时, 重建的结果会超出实际可能的范围

(0, 1), 即有可能不满足边界条件(16); 其重建的精度并不随着基向量个数的增加而改善, 并且, 随着基向量个数的增加, 重建的结果波动很大, 如文中图 2 所示.

用 Wiener 方法重建物体表面光谱反射比函数时, 重建的结果要比用伪逆矩阵法重建的结果无论是光谱精度还是色度学精度都要好; 但是它的重建精度也不随着基向量的个数的增加而改善; 并且, 它也不能保证重建的光谱反射比满足边界条件式(16).

用本文中提出的新方法重建物体表面光谱反射比函数时, 其重建的精度和 Wiener 方法精度相当, 而且, 其重建的光谱反射比会准确地满足边界条件(16), 因此与其他两种方法相比要好.

总之, 用基于基向量的方法重建物体表面光谱反射比函数的时候, 基向量的个数应该选择 5, 最多可为 6 个. 当 $k > 5$ 时, 重建的精度都不随着基向量的个数增加而有所改善, 除非有额外的信息可以利用, 如重建光谱反射比时所用的彩色图像为多传感器拍摄的光谱图像. 而为了使重建出的物体表面的光谱反射比函数符合实际, 应该选择本文中所采用的方法.

参考文献:

- [1] Dupont D. Study of the reconstruction of reflectance functions based on tristimulus values: Comparison of methods of optimization[J]. *Color Research and Application*, 2002, **27**: 88-99.
- [2] Hawkyard C J. Synthetic reflectance curves by additive mixing[J]. *JSDC*, 1993, **109**: 323-329.
- [3] Hong G W, Luo M R. A study of digital camera colorimetric characterization based on polynomial modelling[J]. *Color Research and Application*, 2001, **26**: 76-84.
- [4] Finlayson G D, Morovic P M. Metamer constrained colour correction[C]. In: *The Seventh Color Imaging Conference: Color Science, Systems, and Applications*. Scottsdale: Arizona. 1999. 26-35.
- [5] Finlayson G D, Drew S D. Constrained least squares regression in colour spaces[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 1997, **6**: 484-493.
- [6] David H B, Willian T F. Bayesian color constancy[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1997, **14**(7): 1393-1411.
- [7] Braind D H., Brunt W A, Speigle J M. Color constancy in the nearly natural image: 1. Asymmetric matches[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1997, **14**: 2091-2110.
- [8] Jussi P, Timo J. Spectral imaging[C]. In: *Proc. of International Congress of Imaging Science' 2002*. Japan: Tokyo. 2002. 383-384.
- [9] CIE. Colorimetry[S]. second edition. *Publication CIE No. 15.2*. 1986.
- [10] Van T C. Smoothest reflectance functions I: definition and main results[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1990, **7**: 1891-1904.
- [11] Van T C. Smoothest reflectance functions II: complete results[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1990, **7**: 2208-2222.
- [12] Li C J, Luo M R. The estimation of spectral reflectances using smoothness constraint condition[C]. In: *The Proceedings of TS & T/SID Colour Imaging Conference' 2001*. Arizona. 2001. 62-67.
- [13] Pratt W K, Mancill C E. Spectral estimation techniques for the spectral calibration of a color image scanner[J]. *Applied Optics*, 1976, **15**: 73-75.
- [14] Vrhel M J, Gershon R, Iwan L S. Measurement and analysis of object reflectance spectra[J]. *Color Research and Application*, 1994, **19**: 4-9.

- [15] Murakami Y, Obi T, Ymaguchi M, *et al.* Spectral reflectance estimation from multi-band imaging using color chart [J]. *Optics Communications*, 2001, **188**: 47-54.
- [16] Marimont D H, Wandell B A. Linear Models of surface and illuminant spectra[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1992, **9**: 1905-1913.

Improvement in the Estimation of Reflectance Functions Generated using the Basis Vectors

WANG Ge^{1,2}, LI Chang-jun³, ZHU Yun-long¹, M Ronnier Luo³

(1. *Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 100016, Liaoning P. R. China*; 2. *Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 10039*; 3. *Department of Colour Chemistry, University of Leeds, Leeds LS2 9JT, UK*)

Abstract: Various techniques based upon basis vectors have been developed to generate reflectance functions from a given set of tristimulus values or an input devices' RGB responses. At first two widely used methods, the Generalised Inverse and the Wiener, were introduced. A drawback of these methods was addressed, which is that the generated reflectance functions are sometimes out of the range between 0 and 1. A new method was developed to overcome this problem. This method was tested together with the other two methods. The new method not only gave more accurate predictions to the test data but also satisfied the boundary conditions. Furthermore, it was found that using more than 5 basis vectors does not perform better than those using 5 basis vectors.

Key words: reflectance function; tristimulus values; singular value decomposition; basis vectors; Generalised Inverse method; Wiener method