

# 色彩表示的宽带多光谱空间研究

孔令罔<sup>1</sup> 朱元泓<sup>1,2</sup> K. Muenger<sup>3</sup> 王培德<sup>4</sup>

(1 武汉大学印刷与包装系, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

(2 深圳职业技术学院, 深圳市西丽湖, 518055)

(3 瑞士联邦材料检测与研究实验室, 瑞士圣加伦)

(4 浙江科技学院设计与艺术系, 杭州市小和山路 1 号, 310012)

**摘要:**在主成分分析法的基础上建立了色彩表示的宽带多光谱空间,并定义了累积空间覆盖率(CSCR)来表示特定空间下光谱的重建效率。实验结果表明,该空间能以很高的精度来表示原始光谱空间。

**关键词:**同色异谱;累积空间覆盖率;宽带多光谱空间

**中图法分类号:**TS80;TP751

## 1 色彩的多光谱表示

多光谱技术当前的主要应用领域为遥感、计算机视觉和其他的一些特定技术场合。近年来,多光谱技术也成为通用图像色彩表示的研究内容之一<sup>[1~7]</sup>。传统的色彩科学及其应用技术是基于条件匹配(即同色异谱匹配)<sup>[4]</sup>实现色彩的表示与再现的,但条件匹配所导致的同色异谱现象却使色彩再现精度降低,从而成为当前跨媒体色彩通信及其他诸如基于色彩的模式识别等应用场合下高保真色彩表示与再现的主要障碍。鉴于此,便产生了光谱匹配的替代方法。按照 CIE Publication 15.2,当采用 5nm 步长的带通滤波器对原始色彩进行采样及再现时,将会消除三刺激值误差<sup>[3]</sup>。基于光谱匹配色彩表示的研究大致上有两类:①严格按照 CIE 的命题所建立起来的,称为窄带多光谱空间。这类多光谱成像系统一直致力于采用低维的多光谱空间来实现色彩的表示。②在 CIE 命题的基础上利用主成分分析法,建立了宽带低维多光谱空间(简称宽带多光谱空间)。

对一束投射到物体上的光线的反射光或透射光,或者自发发光物体的辐射光线进行测量所得的光谱都是电磁辐射波长的平滑函数<sup>[9~11]</sup>。该辐

射强度由成像系统传感器上的光敏元所探测,其数学积分表达式为:

$$I = \int f(\lambda)r(\lambda)s(\lambda)d\lambda \quad (1)$$

式中, $f(\lambda)$ 和 $r(\lambda)$ 分别表示成像系统光学滤色片的透射函数以及传感器光敏元对入射强度为 $s(\lambda)$ 的光线的信号响应函数,其中积分变量 $\lambda$ 为波长。在实际成像光学系统中,光敏元的响应函数并非线性的,所以需采用 Vora 模型对 $r(\lambda)$ 进行线性化<sup>[12]</sup>。

由式(1)的通用光谱表示形式可得:

$$I_i = \int R_i(\lambda)s(\lambda)d\lambda \quad (2)$$

式中, $R_i(\lambda)$ 是 $f_i(\lambda)$ 和 $r(\lambda)$ 的积,它表示传感器光敏元对成像光学系统及滤色片组中第 $i$ 滤色片组合的系统响应。对应于 $n$ 个选定滤色片的不同光谱分布,一个像素就存在 $n$ 个强度/灰度值。这样,当成像系统进行光谱分解所选用的滤色片组类型的不同对应着在对式(1)作定积分时积分变量 $\lambda$ 所取积分限的不同,从而形成了窄带多光谱空间(narrow-band multi-spectral space)和宽带多光谱空间(wide-band multi-spectral space)两种多光谱空间。前者所用的积分上下限在可见光谱范围内且其绝对差为 5nm,同时在实现时辅之以插值算法<sup>[3,4,6]</sup>;后者所使用的积分上下限分别为

700nm 和 400nm 左右。前者意味着在成像时要采集大量的步长为 5nm 可见光谱子带下的灰度图, 这就要求色彩数据的传输、处理及存储系统具备处理海量数据的能力。鉴于此, 研究的重点应集中在采用少量滤色片、积分限覆盖整个可见光谱段的宽带多光谱空间之上。

建立低维多光谱空间的基本问题是如何设计出张成该空间的合理且有效的特征基向量。实物的光谱是平滑的<sup>[5~9]</sup>, 由强度方程 (2) 可知, 它们是不同的分量分量的线性组合, 这些均表明光谱或强度数据之间存在相关性。上述结论恰好满足主成分分析 (PCA) 的前提条件。

主成分分析法是从多变量统计系统中提取特征属性强有力的工具。设主成分分量 (PC) 为携带有方差分布意义下特征属性的随机变量或统计变量的线性组合, 则由原始向量至主成分分量的变换等价于原始坐标系至新坐标系的旋转投影, 且固有统计特征属性不变。这样对主成分分量的求解就转变为对协方差矩阵特征向量的求解。由主成分分量导出坐标集合, 且主成分分量的伴随方差为其统计学属性。在实际应用中, 主成分分析法用于寻找最大方差条件下的线性组合<sup>[13~15]</sup>。

设有  $p$  个光谱分量的随机光谱向量的数学期望  $EX = 0$ , 其协方差为  $EXX' = \sum$ , 则存在一个正交线性变换  $U = \beta'X$ , 所以  $U$  的协方差矩阵为  $EUU' = \Lambda$ ,

$$\Lambda = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & & 0 \\ \vdots & & & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \lambda_p \end{pmatrix}$$

拉格朗日系数  $\lambda$  为特征光谱系数, 它是方程  $|\sum - \lambda I| = 0$  的根, 且  $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_p \geq 0$ ;  $\beta^{(r)}$  为  $\beta$  的  $r$  列分量, 且满足  $(\sum - \lambda I)\beta = 0$ ;  $U_r$  为  $U$  的第  $r$  个分量, 且满足  $U_r = \beta^{(r)'}X$ , 对  $U_1, U_2, \dots, U_{p-1}$  的规范化线性组合, 它有最大方差。这样,  $U$  就定义为原始光谱  $X$  的主成分光谱向量。

## 2 累积空间覆盖率

综上所述, 在求解中可以采用协方差矩阵  $\sum$  或其最大似然估计值来计算特征光谱系数 (对应着方程  $|\sum - \lambda I| = 0$  的特征根) 和特征光谱向量, 即主成分光谱分量。绝大多数主成分

析的算法着重于考虑由  $(\lambda_k / \lambda_{k-1})$  所确定的收敛速度与 PC 所要求的精度之间的均衡。由 Aitken 提出的迭代算法是实现简单但有效的算法。需要指出的是, 主成分分析的求解算法可以是对相关系数矩阵或者是协方差矩阵进行运算, 但对不同运算对象的选择会导致不尽相同的特征根和特征向量。

设对主成分光谱向量的精度要求为  $q$  位有效位数, 令  $y^{(i)}$  的分量与对应的  $y^{(i-1)}$  的分量间符合  $q$  位有效位数的要求。定义

$$Z^{(0)} = y^{(i)}, Z^{(1)} = \sum Z^{(0)}, Z^{(2)} = \sum Z^{(1)} \\ r_i^{(k)} = \frac{Z_i^{(k)}}{Z_i^{(k-1)}} \quad (3)$$

式中,  $i = 1, 2, \dots, p; i = 1, 2, 3$ 。令

$$R_i = \frac{r_i^{(1)} r_i^{(3)} - [r_i^{(2)}]^2}{r_i^{(1)} + r_i^{(3)} - 2r_i^{(2)}} \quad (4)$$

$R_i$  的结果必须满足  $q$  位有效位数的精度要求。取定  $R_i$  的值作为  $\lambda_i$  的估计值,  $\beta^{(i)}$  估计值的分量与  $Z_i$  成比例:

$$Z_i = \frac{Z_i^{(1)} Z_i^{(3)} - [Z_i^{(2)}]^2}{R_i Z_i^{(1)} + Z_i^{(3)} - 2Z_i^{(2)}} \quad (5)$$

式中,  $i = 1, 2, \dots, p$ 。

为了合理且有效地表征生成多光谱空间对原始光谱空间进行再生的效率, 笔者定义了一个称为累积空间覆盖率的值 (cumulative space covering ratio, CSCR)。

定义 设含  $p$  个分量的随机光谱向量  $X$  的样本空间的大小为  $n$  ( $n \geq p$ )。对  $X$  作 PCA 计算, 并截取其与前  $j$  个有最大协方差的光谱 PCs 相对应的拉格朗日系数  $\lambda$ 。当使用这  $j$  个特征光谱向量所张成的宽带多光谱空间来表示或再现原始光谱空间  $X$  时, 其表示的效率为:

$$CSCR = \sum_{i=1}^j \lambda_i / \sum_{i=1}^p \lambda_i$$

并称其为累积空间覆盖率 CSCR。

## 3 实验分析

实验中, 笔者选用了两个基本反射光谱数据集来生成原始光谱空间: ① 由芬兰 Kuopio 大学完成的包含 1 250 个反射光谱的“Munsell color matt”, 该光谱数据集是由声光调制滤波器 AOTF (acousto-optic tunable filter) 以 5nm 的光谱分辨率在 400 ~ 700nm 的可见光谱范围内采集得到的。② 笔者在瑞士 EMPA 研究所用 GretagMacbeth

Spectrolino(测量条件为  $D65/2^\circ$ , 10nm 的光谱分辨率, 光谱采样范围为 370 ~ 730nm)以“DIN-6164 (DIN-Farbenkarte)”为数据源测量得到的。

利用上述算法, 得到上述两个原始光谱空间的前5个特征光谱向量, 如表1、表2所示, 与之相应的特征光谱分布曲线如图1、图2所示。根据累积空间覆盖率的定义, 测算出以上述特征光谱向量所张成的宽带多光谱空间表示原始光谱空间的效率, 如表3所示(CSCR值为下划线所示数据)。由表1~表3可以得出, 当使用由3个特征光谱向量所张成的多光谱空间来表示原始光谱空间时, 其表示效率为98% CSCR左右; 以5个特征光谱向量所张成的宽带多光谱空间几乎覆盖了整个原始光谱空间。

“Munsell colors matt”原始光谱空间由1250个反射光谱分量构成, 而DIN-6164 (“DIN-Farbenkarte”)的原始光谱空间由539个反射光谱分量构成。比较表3中“Munsell”及“DIN-6164”两项对应数据的差异, 在表示相同精度(效率)的要求下, 对较小的原始光谱空间而言, 其张成的宽带多光谱空间要求特征光谱向量的数量较少。

由表1、表2和图1、图2可以看出, 它们都有两个渐进收敛趋势, 而且收敛点都是在以420nm及650nm为邻域的中心区间内。两组特征向量集中的第一条特征光谱向量曲线成近乎平坦的相对稳定状态。对数据源的分析表明, 这是因为不论是“Munsell color matt”色谱结构, 还是“DIN-6164 color chips”色谱结构, 都采用白-灰-黑作为其主轴。考察图1、图2在420nm以下的特征光谱向量曲线, 都有使曲线形成尖峰的跳跃点, 这主要是由于成像系统的光敏元在这部分区域的非线性响应而引入的蓝噪声所致。因为该区域的原始光谱数据破坏了PCA运算的光谱平滑条件, 所以该区域数据具有相对的可靠性。

在实际应用该宽带多光谱空间数学模型时, 由于利用PCA协方差计算随机变量的数学期望值为0的条件时, 引入了特征光谱向量曲线分布上的“零交叉(zero-cross)”问题, 对该问题可借助于“混色法”的机制来解决<sup>[17]</sup>; 或者采用集群算法(clustering algorithm)来剔除引入负系数的原始光谱向量<sup>[9, 18]</sup>。

## 4 结 语

在对窄带多光谱空间色彩表示理论及方法分

表1 孟塞尔 color matt 反射光谱的5个主成分分量数据

Tab. 1 5 PCs of Reflectance Spectra for Munsell Color Matt

1 <sup>st</sup> PC	2 <sup>nd</sup> PC	3 <sup>rd</sup> PC	4 <sup>th</sup> PC	5 <sup>th</sup> PC
0.134 5	0.045 7	-0.141 3	0.874 4	-0.348 2
0.125 3	0.130 3	-0.170 3	0.070 5	0.160 3
0.116 9	0.139 5	-0.174 7	0.012 1	0.155 4
0.113 0	0.146 4	-0.162 4	-0.036 2	0.116 9
0.113 0	0.155 3	-0.151 3	-0.056 9	0.099 5
0.111 9	0.161 5	-0.133 9	-0.063 1	0.078 4
0.112 8	0.164 7	-0.100 5	-0.072 1	0.025 9
0.114 0	0.168 2	-0.068 3	-0.076 1	-0.024 9
0.115 9	0.170 8	-0.005 0	-0.082 8	-0.118 0
0.117 5	0.162 9	0.055 0	-0.083 1	-0.190 6
0.119 6	0.151 8	0.085 9	-0.073 9	-0.209 5
0.123 3	0.126 3	0.135 8	-0.044 6	-0.179 3
0.125 4	0.101 0	0.180 5	-0.012 4	-0.125 8
0.127 0	0.071 9	0.209 8	0.018 9	-0.048 6
0.130 2	0.045 8	0.213 4	0.036 0	0.016 2
0.134 1	0.010 0	0.200 9	0.049 1	0.101 9
0.137 3	-0.017 5	0.192 6	0.058 0	0.156 5
0.139 5	-0.042 0	0.175 0	0.056 5	0.190 2
0.141 5	-0.073 8	0.127 7	0.044 1	0.185 9
0.142 0	-0.097 5	0.077 4	0.023 9	0.150 8
0.140 4	-0.123 7	0.019 2	0.000 0	0.079 4
0.138 4	-0.137 3	-0.019 8	-0.017 0	0.020 9
0.137 0	-0.141 7	-0.033 3	-0.024 2	-0.012 1
0.134 8	-0.143 7	-0.053 9	-0.034 6	-0.041 2
0.133 7	-0.143 2	-0.069 9	-0.040 4	-0.062 7
0.132 6	-0.141 9	-0.081 5	-0.045 2	-0.071 2
0.131 4	-0.140 1	-0.089 3	-0.049 4	-0.080 9
0.130 2	-0.138 4	-0.097 1	-0.053 2	-0.083 9
0.129 5	-0.137 3	-0.096 5	-0.053 3	-0.094 7
0.129 5	-0.136 8	-0.092 7	-0.054 2	-0.097 9
0.128 3	-0.126 7	-0.085 4	-0.055 3	-0.096 5

表2 DIN-6164 反射光谱的5个主成分分量数据

Tab. 2 5 PCs of Reflectance Spectra for DIN-6164

1 <sup>st</sup> PC	2 <sup>nd</sup> PC	3 <sup>rd</sup> PC	4 <sup>th</sup> PC	5 <sup>th</sup> PC
0.024 2	-0.031 2	0.038 3	0.018 2	-0.201 4
0.038 8	-0.054 5	0.096 7	-0.013 5	-0.280 0
0.068 5	-0.098 8	0.150 5	0.023 6	-0.243 7
0.099 2	-0.149 3	0.202 8	0.068 2	-0.170 3
0.112 3	-0.174 9	0.227 2	0.081 7	-0.133 4
0.115 9	-0.187 6	0.234 8	0.088 3	-0.118 0
0.117 3	-0.199 2	0.235 7	0.100 5	-0.093 7
0.118 4	-0.210 2	0.228 6	0.113 4	-0.058 4
0.119 8	-0.220 2	0.210 0	0.114 0	-0.008 5
0.121 5	-0.232 3	0.177 8	0.092 2	0.070 5
0.123 9	-0.244 4	0.127 4	0.042 6	0.171 3
0.127 8	-0.252 3	0.060 3	-0.024 6	0.270 6
0.133 1	-0.249 4	-0.016 7	-0.089 1	0.311 5
0.140 5	-0.235 9	-0.111 7	-0.160 2	0.260 7
0.147 2	-0.215 0	-0.195 4	-0.203 1	0.158 4
0.151 6	-0.190 7	-0.247 8	-0.207 5	0.053 3
0.155 1	-0.167 4	-0.267 8	-0.181 9	-0.039 4
0.158 5	-0.143 5	-0.271 2	-0.131 8	-0.130 2
0.161 6	-0.113 2	-0.270 7	-0.051 8	-0.217 1
0.167 1	-0.076 4	-0.267 1	0.055 7	-0.288 6
0.175 1	-0.030 6	-0.238 7	0.178 6	-0.285 1
0.185 5	0.021 7	-0.185 3	0.274 1	-0.170 5
0.194 1	0.070 2	-0.129 7	0.312 7	-0.031 9
0.200 1	0.106 1	-0.087 6	0.303 0	0.077 4
0.203 8	0.130 3	-0.058 1	0.265 6	0.153 3
0.206 5	0.146 7	-0.032 4	0.210 0	0.191 0
0.208 9	0.157 3	-0.004 5	0.147 3	0.187 1
0.211 1	0.163 6	0.024 3	0.084 3	0.158 4
0.213 2	0.166 4	0.051 1	0.022 4	0.117 7
0.214 8	0.167 5	0.073 3	-0.039 7	0.072 9
0.216 2	0.168 1	0.090 6	-0.102 1	0.029 6
0.217 1	0.167 6	0.104 3	-0.162 2	-0.011 5
0.217 3	0.167 2	0.114 9	-0.216 7	-0.050 5
0.216 8	0.166 3	0.124 5	-0.260 2	-0.087 1
0.214 2	0.160 0	0.132 5	-0.285 3	-0.117 5
0.206 9	0.141 4	0.137 1	-0.289 5	-0.132 7

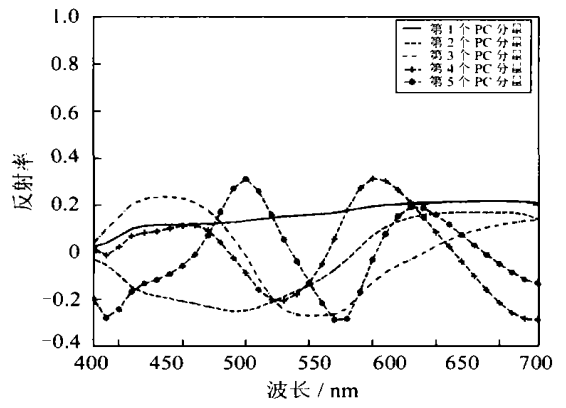
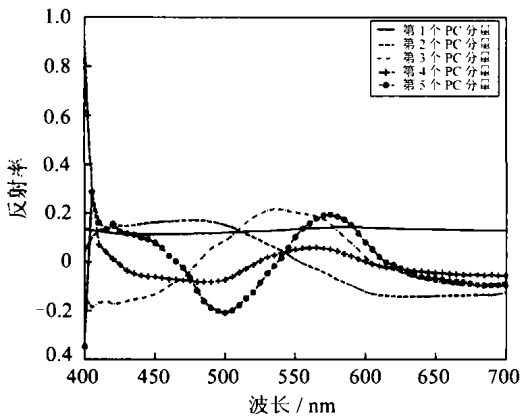


图1 构成孟塞尔 color matt 色系多光谱空间 5 个特征向量的分布曲线

Fig.1 Curves of 5 Eigenvectors of Multi-spectral Space for Munsell Color Matt

图2 构成 DIN-6164 color chips 色系多光谱空间 5 个特征向量的分布曲线

Fig.2 Curves of 5 Eigenvectors of Multi-spectral Space for DIN-6164 Color Chips

表3 孟塞尔 color matt 及 DIN-6164 多光谱空间的 CSCR 数据

Tab.3 CSCRs(%) of Multispectra Spaces for Munsell Color Matt and DIN-6164 Color Chips

	1PC	2PCs	3PCs	4PCs	5PCs
Munsell	80.37	13.13	4.68	1.19	0.58
		93.55	17.82	5.87	1.77
			98.23	19.05	6.45
				99.42	19.63
					99.99
DIN-6164	78.24	14.83	5.65	0.81	0.47
		93.07	20.48	6.46	1.28
			98.72	21.29	6.93
				99.53	21.76
					100

析的基础上,提出的宽带多光谱空间色彩表示理论在数学上是严格的。通过 PCA 迭代算法,针对国际通用的孟塞尔 color matt 色系及西欧标准色系之一的 DIN-6164 提取了它们的主成分分量,并以其为基向量构造出相应的宽带多光谱色彩表示空间。实验结果表明,它们能以很高的精度来表示原始光谱空间。

同时,研究结果还表明,蓝噪声对宽带多光谱空间下色彩表示的精度有着不可忽视的影响;同时在实际应用中,存在着零交叉问题,文中给出了两种解决方案。

参 考 文 献

1 Hauta-Kasari M, Miyazawa K, Toyooka S, et al. Spectral Vision System for Measuring Color Images. J. Opt. Soc. AM. A., 1999, 16(10): 2 352 ~ 2 362  
 2 Kawata S, Sasaki K, Minami S. Component Analysis of Spatial and Spectral Patterns in Multispectral Images. I. Basis.

J. Opt. Soc. AM. A., 1987, 4(11): 2 101 ~ 2 106  
 3 Koenig F, Praefcke W. A Multispectral Scanner. In: MacDonald L W, Luo M R, eds. Colour Imaging: Vision and Technology. England: John Wiley & Sons, Ltd., 1999  
 4 Bems R S. Challenges for Color Science in the Multimedia Imaging. In: MacDonald L W, Luo M R, eds. Colour Imaging: Vision and Technology. England: John Wiley & Sons, Ltd., 1999  
 5 Hardeberg J Y, Schmitt F, Brettel H. Multispectral Image in Multimedia. <http://www-ima.enst.fr/~hardeber>, 2003  
 6 Herzog P G. Virtual Fabrics or Multispectral Imaging in B2B. CGIV2002, Athens, 2002  
 7 Kong L W, Zhu Y H, Meunger K, et al. Wide-Band Multispectral Space for Color Representation. Geo-spatial Information Science, 2003, 6(2): 42 ~ 48  
 8 Meunger K, 朱元泓, 司连法. 用标记法压缩色域. 武汉大学学报·信息科学版, 2003, 28(2): 321 ~ 326  
 9 Wyszecki G, Stiles W S. Color Science (2nd ed.). England: John Wiley & Sons, Ltd., 1982  
 10 Hill B. Revolution of Color Imaging System, CGIV2002, Athens, 2002  
 11 Paikinen J, Jaaskelainen T. Color Vision: Machine and Human. SPIE, 1989, 1 184 ~ 1 192  
 12 Vora P L, Farrel J E, Tietz J D, et al. Linear Models for Digital Cameras. IS&T's 50th Annual Conference, Cambridge, 1997  
 13 袁志发, 周静芋. 多元统计分析. 北京: 科学出版社, 2002  
 14 Johnson R A. Applied Multivariate Statistical Analysis. USA: Prentice Hall, 1998  
 15 Moon H, Phillips P J. Computational and Performance Aspects of PCA-based Face-Recognition Algorithms. Perception, 2001, 30: 303 ~ 321  
 16 朱元泓, 王永宁. 彩色图像的层次复制函数. 武汉测

- 绘科技大学学报, 1996, 21(3): 286~291
- 17 胡成发. 印刷色彩与色度学. 北京: 印刷工业出版社, 1993
- 18 Hauta-Kasari M, Wang W, Toyooka S, et al. Unsupervised Filtering of Munsell Spectra, Proceeding of the 3th Asian Conference of Computer, ACCV' 98J Hongkong, 1998

19 Central Bureau of CIE. Colorimetry (2nd ed.). Australia, 1986

第一作者简介: 孔令罔, 博士生, 讲师。现从事色彩科学与应用、海量存储及多媒体技术的研究。

E-mail: K-lingwang@sohu.com

## Color Representation Using Wide-Band Multi-spectral Space

KONG Lingwang<sup>1</sup> ZHU Yuanhong<sup>1,2</sup> K. Muenger<sup>3</sup> WANG Peide<sup>4</sup>

(1 Dept. of Printing and Package, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(2 Shenzhen Polytech., Xili Lake, Shenzhen 518055, China)

(3 Swiss Federal Lab. for Material Testing and Research, Lerchenfeld Str. 5, CH-9014, St. Gallen, Switzerland)

(4 Dept. of Design and Art, Zhejiang Institute of Science and Technology, Xiaoheshan Road, Hangzhou 310102, China)

**Abstract:** This paper develops a model of wide-band multi-spectral space for color representation based on the PCA algorithm and defines "cumulative space covering ratio (CSCR)" to determine the efficiency for space representation and reconstruction. Experimental results show that this kind of wide band multi-spectral space can represent original spectral spaces.

**Key words:** metamerism; cumulative space covering ratio; wide-band multi-spectral space

**About the first author:** KONG Lingwang, Ph. D candidate, lecturer. His research interest includes color science and its application, and mass storage and multimedia technology.

E-mail: K-lingwang@sohu.com

(责任编辑: 晓晨)

### 下期主要内容预告

- ▶ 基于航空立体影像对的复杂房屋三维拓扑重建
- ▶ 基于 NOAA 时间序列数据分析的中国西部荒漠化监测
- ▶ 政区地图设色方案的自动实现
- ▶ 服务器技术在 WebGIS 中的应用
- ▶ 空间信息语义网络
- ▶ 关于空间数据质量标准的若干问题
- ▶ 基于多传感器观测信息抗差估计的自适应融合导航
- ▶ 多维动态 GIS 空间数据模型与方法的研究
- ▶ 基于相关分析的粗差可区分性
- ▶ 海岸带数据集中的空间坐标转换方法研究