

具有颜色恒常性的光谱反射率重建

姜丹阳¹, 王智峰^{1*}, 高程^{1,2}, 李长军¹

1. 辽宁科技大学计算机与软件工程学院, 辽宁 鞍山 114051

2. 辽宁科技大学电子与信息工程学院, 辽宁 鞍山 114051

摘要 给定物体三刺激值, 重建物体反射率在跨媒体颜色复制领域有着重要应用。常见的重建反射率算法包括基向量法、维纳估计法、加权伪逆方法等, 这些方法大多都是为了建立由低维度三刺激值或者 RGB 向高维度光谱反射率的映射关系, 以重建的反射率与原始反射率的接近程度为评价指标, 并且需要光谱反射率数据进行训练。但是很多工业领域在产品的设计时都需要考虑到颜色恒常性(CII)问题, 以保证产品颜色在不同光照条件下具有相近的颜色表现。光谱反射率是决定物体颜色恒常的重要属性, 为解决重建反射率进行颜色复现后产生颜色恒常性问题, Takahama 和 Nyatani 提出具有颜色恒常性的线性规划光谱反射率重建方法, 测试结果发现该方法重建的反射率呈现出类似“台阶”的形状, 与实际物体色反射率差别太大。之后, Berns 等在 Takahama 和 Nyatani 算法基础上, 增加了色相角等约束, 但重建出的反射率波动太大。Li 和 Luo 提出具有光滑约束的二次规划颜色恒常性重建反射率算法, 重建的反射率具有光滑性, 比较接近实际物体色的反射率。提出一种非线性约束优化方法重建物体反射率, 使之具有良好的颜色恒常性和光滑性。文中使用标准 Munsell 色卡中 1560 个色块测量的反射率数据集对新算法进行测试, 并与其他方法进行比较。结果表明, 该方法不仅在重建反射率的颜色恒常性指标上远比 Takahama 和 Nyatani 方法, Berns 等的方法以及 Li 和 Luo 的方法要好, 而且重建反射率与原始反射率接近程度指标: 均方根误差(RMSE)和拟合优度系数(GFC)也优于其他方法。因此该新方法对重建反射率时具有颜色恒常性要求的行业有着重要的应用价值。

关键词 光谱反射率重建; 颜色变换指数; 非线性规划; 色适应变换; 颜色恒常性

中图分类号: O433 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2022)04-1044-05

引言

人类视觉系统中对颜色的感知取决于人眼视锥细胞, 光照以及物体反射率等许多因素。但是不管场景中光照以及物体表面的反射率如何变化, 人类都有一种对特定物体本身颜色识别一致性的心理倾向, 这种心理倾向就是颜色恒常性^[1]。如何在重建物体光谱反射率时考虑到颜色恒常性问题, 使物体在不同的光源下具有相近的颜色感受, 在颜色复现领域是一个重要的研究方向, 也是纺织、印染、涂料、油漆等行业面临的难题。目前常见的光谱反射率重建方法是利用已知光源下的三刺激值或 RGB 数据进行重建, 如维纳估计方法^[2]或主成分分析方法^[3], 通过训练样本获得物体三刺激值到反射率的映射矩阵以重建反射率。或者如 Cao 等提出

的通过使用最小色差对训练样本进行选取并加权重建反射率的方法^[4]。这些方法都着重于重建精度, 没有考虑到重建出反射率的颜色恒常性。

针对如何重建出具有颜色恒常性的反射率问题, 过去的研究者提出一系列利用线性规划算法的解决方案。如 Takahama 和 Nyatani 提出了一种将不同光源下三刺激值的曼哈顿距离作为线性规划目标函数的反射率重建方法(以下称为 Takahama 方法)。之后 Berns 和 Billmeyer 等又提出了一种在重建反射率过程中通过使用色相角对颜色恒常性进行约束的方法(以下称为 Berns 方法)。此后, Li 和 Luo 对前两种方法进行改进, 使用改进的色适应变换 CAT02, 提出一种基于二次规划的重建方法, 得到更加具有颜色恒常性的光谱反射率(以下称为 Li 方法)^[5]。以上三种基于线性规划或二次规划的方法在提高光谱反射率的颜色恒常性上有一定效果, 但是

收稿日期: 2021-03-08, 修订日期: 2021-05-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(61575090, 61775169), 辽宁省自然科学基金项目(2019-ZD-0267)和辽宁省教育厅项目(2020LNCJ01)资助

作者简介: 姜丹阳, 1997年生, 辽宁科技大学计算机与软件工程学院硕士研究生 e-mail: 15265751346@163.com

* 通讯作者 e-mail: wangzhifeng_sia@126.com

测试结果发现所有方法重建的反射率所对应的颜色变换指数较原来的反射率所对应的变换指数可能要高，这不是人们所期望的。本文基于给定的在参考光源下三刺激值，提出以颜色变换指数和光滑性约束的组合作为非线性规划的目标函数，以重建的反射率在参考光源下的三刺激值作为等约束条件的非线性约束优化问题重建反射率。测试结果表明本文所提出的方法要优于 Li, Berns 和 Takahama 方法。

1 颜色变换指数

颜色变换指数用于衡量光谱反射率在不同光照条件下的稳定程度。使用 ISO 标准计算方法 CMCCON02^[6] 作为评判光谱反射率颜色恒常性的指标，并将 CMCCON02 使用的色适应变换 CAT02 替换为色适应变换 CAT16^[7]。前者提出于 2002 年，嵌入在 CIE 2002 色貌模型 CIECAM02^[8] 中，后者提出于 2016 年，在色适应变换的精确性，可用性等方面能够持平或者优于 CAT02，是近些年被提出替代 CAT02 的色适应变换方法。图 1 给出了颜色变换指数的计算步骤。第一步：计算出反射率 r (列向量) 在第 j ($j=1, \dots, n$) 个测试光源和参考光源 R 下的三刺激值，分别构成列向量 p_j 和 p_R 。第二步：通过 CAT16 计算出在参考光源 R 下与 p_j 有相同色貌的三刺激值列向量 p_C 。第三步：计算 p_R 与 p_C 的 CIELAB2000^[9] 色差 ΔE_{00} ， ΔE_{00} 即为颜色变换指数 (color inconstancy index, CII)。

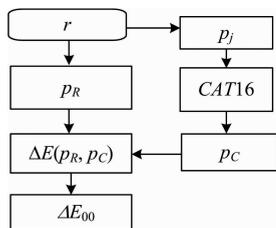


图 1 CMCCON02 计算步骤

Fig. 1 Procedure for computing the CMCCON02

2 实验部分

对于给定在参考光源下的三刺激值 p_R ，提出了一种具有颜色恒常性的光谱反射率重建方法，该方法将 CII 加入到非线性规划的目标函数中，以重建出具有颜色恒常性的光谱反射率。首先，令 M 为计算三刺激值的加权表矩阵，仅依赖于光源光谱和颜色匹配函数， M_R 和 M_j 分别作为参考光源和第 j 个光源下的加权表矩阵。那么重建后的反射率 r 需要满足

$$p_R = (M_R)^T r \tag{1}$$

式(1)中，上标 T 是矩阵或向量的转置。计算反射率 r 在测试光源 j ($j=1, \dots, n$) 下的三刺激值 p_j ($j=1, \dots, n$)，并通过 CAT16 将 p_j 转换为参考光源下对应色的三刺激值 $p_{C,j}$ ，该转换公式为

$$p_{C,j} = U_j p_j = U_j (M_j)^T r \tag{2}$$

式(2)中， U_j 是将 CAT16 计算过程简化得到的一个 3×3 矩

阵，它取决于参考光源三刺激值、测试光源三刺激值。本文使用的 CII 计算方法为

$$CII_j = \Delta E_{00}(p_R, p_{C,j}), j = 1, 2, \dots, n \tag{3}$$

式(3)中， $\Delta E_{00}(p_R, p_{C,j})$ 为物体在参考光源下三刺激值 p_R 与参考光源下的对应色 $p_{C,j}$ 的 CIELAB2000 色差。假定有 n 个测试光源，则整体颜色变换指数 CII 为

$$CII = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n CII_j = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\Delta E_{00}(p_R, p_{C,j})) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n [\Delta E_{00}((M_R)^T r, U_j (M_j)^T r)] \tag{4}$$

此外，研究发现自然颜色反射率通常趋于光滑^[10]，所以为了保证重建出的反射率具有光滑性，本文通过在非线性规划的目标函数中引入对角矩阵 G 与光滑因子 s ，确保重建反射率的光滑性。由此，可以导出以下非线性约束规划问题

$$\text{Minimise } CII + s \|Gr\|_2$$

$$\text{Subject to: } 0 \leq r \leq 1, \text{ and } p_R = (M_R)^T r \tag{5}$$

式(5)中， s 是一个权重值，它的大小决定了重建出反射率的光滑性，也影响了重建反射率的颜色变换指数 CII，并且，反射率 r 的每个分量都属于 $[0, 1]$ 区间。

3 结果与讨论

实验在 MATLAB 平台进行，非线性规划算法使用 MATLAB 内置函数 fmincon，其 options 变量设置使用默认参数。重建出反射率 r 的波长范围为 $400 \sim 700$ nm 之间，并以 10 nm 为间隔取值的 31×1 的向量。其他数据如加权表，光谱功率分布和 CIE1964 颜色匹配函数等都在此范围内取值。

除此之外，本文使用标准 Munsell 色卡中 1560 组反射率集对算法进行测试。在重建过程中选择 CIE 照明体 D50 作为参考光源，照明体 A, D75, F2, F7 和 F11 作为测试光源。同时使用式(4)中计算的 CII 作为颜色恒常性的评价指标，反射率的 CII 为非负数，且数值越小表示颜色恒常性越好。为了保证评测结果更具可靠性，在评价颜色恒常性时将照明体 D65 作为参考光源，照明体 A, D75, F2, F7 和 F11 作为测试光源。在保证其他参数不变的情况下，重建出标准 Munsell 色卡在光滑权重 s ($s=0, 1, 2, \dots, 45$) 下的反射率，并求出对应标准 Munsell 色卡 1560 组反射率的平均 CII (\overline{CII})。

如图 2 所示，随着光滑权重 s 的增大，重建后光谱反射率的 \overline{CII} 呈现出一个单调递增的过程。并且，当 $s=1$ 与 $s=2$ 时的 \overline{CII} 相差 0.102 3，当 $s=44$ 与 $s=45$ 时的 \overline{CII} 相差 0.003 6，由此可以推测随着 s 的增大， \overline{CII} 的增加速度逐渐变慢。而且通过测试发现，当 s 过大时，使用默认 option 设置的 fmincon 函数重建出的反射率 r 会出现大量 $p_R \neq (M_R)^T r$ 的情况，这是由于在默认执行次数内无法找到满足约束条件的全局最优解或者局部最优解，导致重建反射率时等约束失败，可以通过增大 fmincon 函数中 option 设置的 MaxFunEvals 数值来提高执行次数，以减少该问题发生的可能性。经测试表明，在实现本方法时，光滑权重 s 的取值范围为 $[0,$

30]之间较为合适,以下测试过程中采用 $s=6$ 。

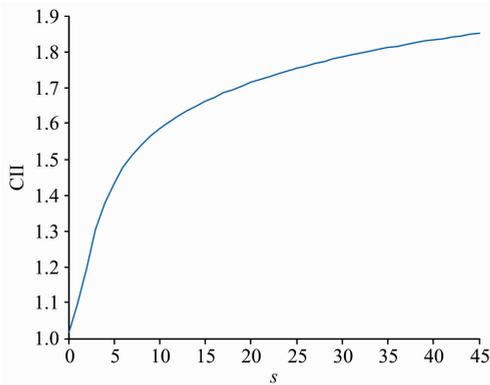


图 2 不同光滑权重对反射率重建过程中颜色恒常性的影响
Fig. 2 Influence of different smooth weights on color constancy in spectral reflectance reconstruction

图 3 中, Berns 方法产生的光谱反射率光滑性尚可,但是起伏波动过大,出现了较多的极值点。Takahama 方法产生

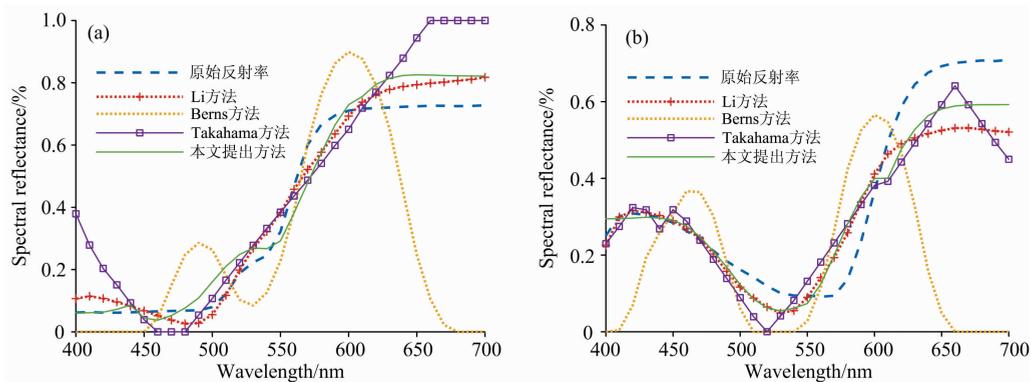


图 3 不同方法重建反射率
Fig. 3 Spectral reflectance reconstruction of different methods

表 1 不同方法重建反射率结果对比

Table 1 Comparison of reflectance reconstruction results by different methods

样本	方法	CII		RMSE		GFC	
		Mean	Max	Mean	Max	Mean	Min
Munsell	本方法($s=6$)	1.477 6	4.271 5	0.042 0	0.192 0	0.981 5	0.708 7
	Li 方法	2.254 7	7.599 6	0.030 2	0.196 9	0.983 5	0.538 5
	Berns 方法	3.900 6	7.403 0	0.247 8	0.447 4	0.682 0	0.144 6
	Takahama 方法	2.140 0	8.714 6	0.049 2	0.294 9	0.974 4	0.438 1

图 4 给出了原始反射率的颜色变换指数(横轴)和每种方法重建的反射率的颜色变换指数(纵轴)比较。图中红线是斜率为 1 的直线,每一个圆点代表一个标准 Munsell 色卡,黄线为所有圆点的线性回归方程。当重建后的反射率的 CII 与原始反射率的 CII 相同时圆点应该与红线相交,重建反射率的 CII 小于原始反射率的 CII 时圆点落在红线下,将其称为正优化,否则称为负优化。且重建反射率的 CII 越多小于

的光谱反射率曲线与原始反射率相比有着大致相同的变化趋势,但曲线呈现出阶梯状。本文方法重建反射率光滑性约束与 Li 方法相同,重建出优于其他两种方法的光滑曲线。

表 1 给出利用 Munsell 色卡数据集进行测试的平均和最大 CII,重建和原始反射率的平均和最大均方根误差(root mean squared error, RMSE),以及平均和最小拟合优度系数(goodness of fit coefficient, GFC),其中 RMSE 值越小重建精度越高,GFC 的最大值为 1,并且其越接近 1 重建反射率的拟合程度越好。表 1 中黑体数字表明,按该指标(所在列)对应的方法(所在行)表现最好。首先可以看出本文方法对应的 CII 指标,不论是按平均还是最大颜色恒常指标,都要好于其他方法;然后预测的反射率与原反射率接近程度指标 RMSE 与 GFC 一共包括平均和最大 RMSE 与平均和最小 GFC 四项。Li 方法的平均 RMSE 和平均 GFC 指标最好,而本文方法在最大 RMSE 和最小 GFC 指标最好。因此,在预测的反射率与原反射率接近程度评价指标 RMSE 与 GFC 中,本文方法和 Li 方法表现最好,其次是 Takahama 方法,最差的是 Berns 方法。

原始反射率时,黄线与 x 轴的夹角则越小。由此可见,本方法重建 1 560 组反射率得到的黄色线段斜率最小,且重建反射率的 CII 中全部好于原始反射率的 CII,而 Li 方法、Berns 方法和 Takahama 方法在重建反射率过程中会出现大量负优化情况。本方法整体优化的趋势上要远远好于其他三种方法。

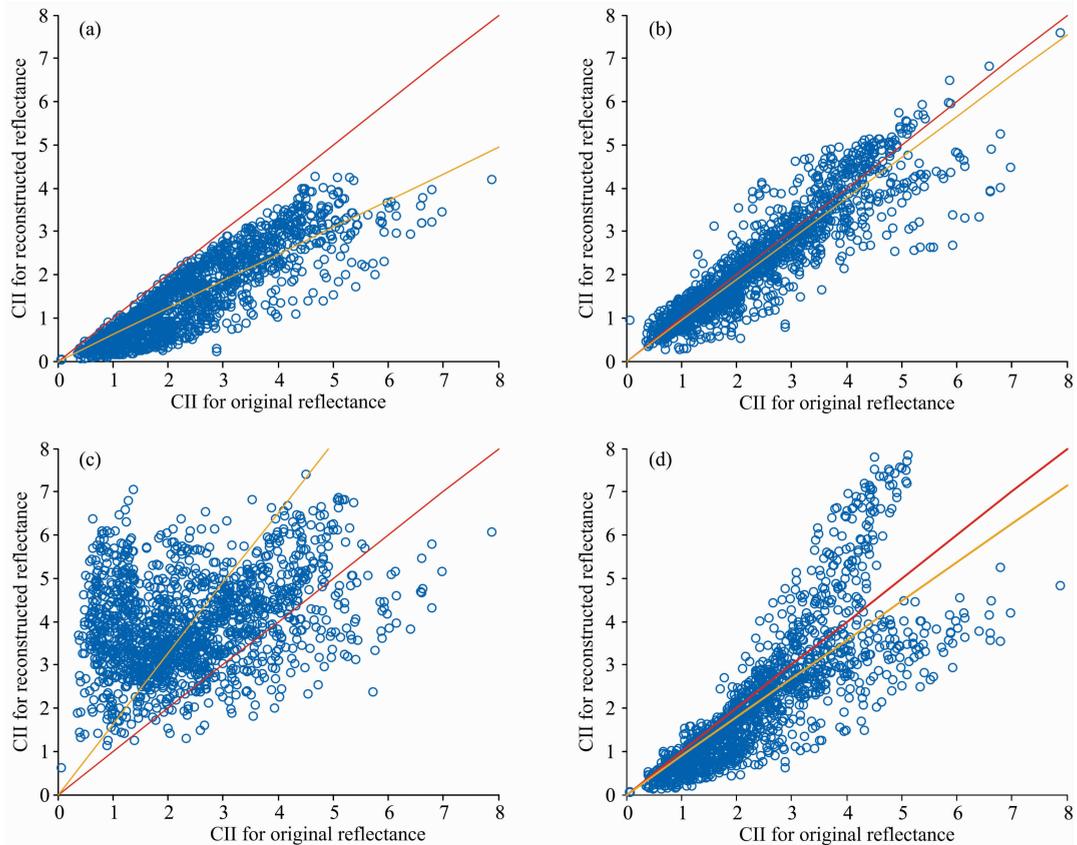


图 4 反射率的颜色变换指数(横轴)和重建反射率对应颜色变换指数(纵轴)

(a): 本文方法; (b): Li 方法; (c): Berns 方法; (d): Takahama 方法

Fig. 4 CII for original reflectance (horizontal axis) versus CII for reconstructed reflectance (vertical axis) based on Munsell dataset

(a): The proposed; (b): Li; (c): Berns; (d): Takahama

需要说明的是以上结果本文方法采用光滑权重 $s=6$, 当 $s>6$ 时, 重建的反射率要更接近原始反射率, 但可能会出现一定量的负优化, 如 $s=15$ 时, 测试结果表明有 2% 的负优化出现, 但重建的反射率与原始反射率的接近程度要明显优于 Li, Berns 和 Takahama 方法。

4 结 论

基于给定的三刺激值重建反射率在颜色复现领域有着重要应用。目前常见的重建算法, 常是以重建的反射率与测量反射率的接近程度为评价标准, 并不保证重建的反射率具有

良好的颜色恒常性。然而在纺织、印染、油漆等应用领域, 颜色恒常性是一个重要指标。本文提出非线性约束优化方法重建物体反射率, 目标函数为颜色变换指数与重建反射率具有光滑性的组合形式, 因此保证了重建的反射率在具有较好的颜色变换指数的同时又具有光滑性。比较结果表明, 本文的方法, 不仅就颜色恒常指标而言明显优于 Li, Berns 和 Takahama 方法, 同时就接近原始反射率的指标 RMSE 和 GFC 而言也优于 Berns 方法和 Takahama 方法。因此, 本文方法对颜色复现过程中具有颜色恒常性要求的行业有着重要应用价值。

References

[1] Witzel C, Gegenfurtner K R. Annual Review of Vision Science, 2018, 4: 475.
 [2] Xu Y, Zhang C, Gao C, et al. Color Research & Application, 2020, 45(4): 603.
 [3] WANG Jia-jia, LIAO Ning-fang, WU Wen-min, et al(王佳佳, 廖宁放, 吴文敏, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2017, 37(3): 704.
 [4] Cao B, Liao N, Cheng H. Color Research & Application, 2017, 42(3): 327.
 [5] Li C, Luo M R. Color and Imaging Conference, 2006.
 [6] Li C, Li Z, Wang Z, et al. Color Research & Application, 2017, 42(6): 703.
 [7] Li C, Xu Y, Wang Z, et al. Color Research & Application, 2018, 43(5): 633.

- [8] Li C, Li Z, Wang Z, et al. Color and Imaging Conference. 2016.
- [9] Gómez-Polo C, Muñoz M P, et al. Journal of Prosthetic Dentistry, 2016, 115(1): 65.
- [10] Burns S A. Color Research & Application, 2020, 45(1): 8.

Spectral Reflectance Reconstruction With Color Constancy

JIANG Dan-yang¹, WANG Zhi-feng^{1*}, GAO Cheng^{1,2}, LI Chang-jun¹

1. School of Computer and Software Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China

2. School of Electronics and Information Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China

Abstract Given the tristimulus value of an object, its reflectance reconstruction has important applications in the field of cross-media color reproduction. Common algorithms for reconstruction reflectance, including the basis vector method, Wiener estimation method, weighted pseudo-inverse method, etc., are derived based on the reconstructed reflectance and the original reflectance as the reconstruction and evaluation objective. All algorithms map low dimensional tristimulus value or RGB to high dimensional spectral reflectance. Hence most of these algorithms need to be trained using a training dataset. However, in many application areas, color constancy or color inconstancy index (CII) should be considered in product design to ensure that the object is perceived as the same color under different lighting conditions. Object's spectral reflectance determines the color constancy property of the object. Takahama and Nyatani developed a linear programming method for reconstructing reflectance based on the given tristimulus values so that the reconstructed reflectance has a better color constancy. However, test results showed that the reflectance reconstructed by this method has stair-like shape, which is much different from the real object reflectance. After that, Berns et al. further improved the Takahama and Nyatani method by introducing further constraints. It was found that the reflectance reconstructed by the improved method is smooth but heavily oscillated. Li and Luo proposed a smoothing constrained quadratic programming algorithm. The reconstructed reflectance is smooth and close to the reflectance of real object color. In this paper, a new algorithm or more exactly, a new constrained nonlinear optimization algorithm is proposed to reconstruct reflectance based on the given tristimulus values so that the reconstructed reflectance is smooth and has a better color constancy property. The proposed method is tested using the reflectance dataset measured from 1 560 Munsell chips from Munsell Color System and compared with other methods. The comparison results show that our method is not only better than Takahama and Nyatani method, Berns et al. method and Li and Luo method in terms of color constancy index, but also better or similar to other methods in terms of root mean square error (RMSE) and good fitting coefficient (GFC). Therefore, the proposed method has important application in many industries with color constancy requirements for designing products.

Keywords Spectral reflectance reconstruction; Color inconstancy index; Nonlinear programming; Chromatic adaptation transform; Color constancy

(Received Mar. 8, 2021; accepted May 17, 2021)

* Corresponding author