

面向打印的光谱色彩管理中间空间构造方法

王莹¹ 曾平^{1,2}

(西安电子科技大学外部设备研究所 西安 710071)¹ (西安石油大学计算机学院 西安 710065)²

摘要 针对光谱色彩管理中光谱空间维度高引起多光谱图像处理时间长、所需存储空间大的问题,提出构造中间空间的方法。首先通过分析色彩管理过程,引入中间空间,建立以中间空间为设备无关颜色空间的光谱色彩管理流程;然后针对多光谱图像的打印输出,采用主成分分析法对打印机特征化光谱样本进行降维,将降维后的特征空间作为中间空间;最后采用特征向量矩阵实现任意多光谱图像数据到中间空间的变换。实验表明,采用打印机特征化光谱样本生成的中间空间与光谱空间的变换效率高,变换的光谱和色度精度高,图像数据降维后能保持源图像光谱的主要信息。

关键词 光谱色彩管理,中间空间,主成分分析,多光谱图像

中图分类号 TN911.74, TP301.6, TG115.3+35 **文献标识码** A

Method of Constructing Intermediate Space for Print-oriented Spectral Color Management

WANG Ying¹ ZENG Ping^{1,2}

(Research Institute of Computer Peripherals, Xidian University, Xi'an 710071, China)¹

(School of Computer Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)²

Abstract High dimension of the spectral space in spectral color management results in long run time and large memory requirement in color processing of multi-spectral images. To overcome this shortcoming, a method to construct intermediate space was proposed. By analyzing the color management process, an intermediate space was introduced and the flow of spectral color management based on the intermediate space was established firstly. Then for the printing application of multi-spectral images, the principal component analysis method was employed to construct an eigenvector space based on the printer characteristic samples. The new space derived from the method was appointed as the intermediate space. Finally the eigenvector matrix was utilized to achieve the transformation between the intermediate space and the spectral space. Experiments show that the transformation efficiency is increased when the printer characteristic samples are used during dimension reduction. The colorimetric and spectral precision of the conversion is high and low-dimensional image data in the intermediate space can keep the main information of the source spectral data.

Keywords Spectral color management, Intermediate space, Principal component analysis, Multi-spectral image

1 引言

近年来传统色彩管理通过改进色彩再现过程中的各个环节,使得彩色图像的设备再现效果得到改善^[1,2]。但是,传统色彩管理中图像和设备的颜色空间通常为三维或四维,在获取颜色色度值的过程中损失了大量信息。此外,色度值已包含了场景的光照和观察者信息,无法分离出来,因此难以实现图像场景的光照和观察者变换,在对颜色再现精度要求高的场合,例如艺术品存档^[3,4]、远程医学^[5,6]、军事目标成像等高端应用领域,无法满足要求。近几年国外一些知名色彩研究机构开始进行光谱色彩管理的研究^[7],目前较多集中在多光谱图像的获取方面^[8-10],对色彩管理过程研究甚少,一般采用光谱空间与设备颜色空间的直接转换来实现多光谱图像的设备

再现^[11,12]。但光谱空间维数高,导致图像颜色处理过程耗时长,所需存储空间大。此外,在色彩管理领域,通常采用查找表进行颜色空间的转换^[13],但是查找表的输入维度与源图像的维度相关,其大小随图像维度的增加呈指数上升。实验证明,若维度上升到 9 维以上,查找表的大小将超出目前普通计算机的存储范围,从而导致基于光谱的色彩管理难以投入实际应用。

为了实现多光谱图像的彩色输出,本文提出一种在色彩管理过程中构造中间空间的方法,亦即将新空间作为光谱空间与设备颜色空间的转换桥梁,用以降低空间转换成本。同时,针对打印输出,在构造新空间时采用打印机的光谱特征化样本。新空间能与光谱空间相互转换,转换效率高,光谱误差低、色差小。由于打印机光谱特征化所需样本少,因此构造新

到稿日期:2009-06-17 返修日期:2009-08-26 本文受国家部委“十一五”预研项目(No. 51316060203),国家部委预研基金项目(No. 9140A16050109DZ01)资助。

王莹(1977-),女,博士生,主要研究方向为多光谱图像输入输出技术,E-mail:mailwangying@mail.xidian.cn;曾平(1956-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为颜色科学、图形图像输入输出技术等。

空间所需时间少、内存小。新空间维度低,可实现与打印机颜色空间转换时所需的查找表的建立。

2 构造中间空间的思想与实现

2.1 方法思想

在进行基于光谱的色彩管理时,如果直接从光谱空间向设备颜色空间转换,则光谱空间的高维数将导致查找表难以建立。设 D_i 为光谱空间维数, L_i 为在光谱空间每维上的采样数, D_o 为设备颜色空间的维数, B_o 为设备颜色空间每维所用的字节数, $Size_{LUT}$ 为查找表的大小,则:

$$Size_{LUT} = L_i^{D_i} \times D_o \times B_o \quad (1)$$

假设输出颜色空间每维的数据用 1 字节表示,则光谱空间的维度与查找表大小的关系如表 1 所列。通常多光谱图像是在可见光光谱谱段内 400nm 到 700nm 之间每隔 10nm 进行采样,因此光谱维数为 31 维。从表 1 可知,31 维空间使得查找表的大小超出了普通计算机的存储范围,导致光谱色彩管理无法投入实际应用。

表 1 查找表大小与输入维数关系

D_i	L_i	D_o	$Size_{LUT}$
3	17	4	20kB
6	17	4	97MB
9	17	4	475GB
31	17	4	6×10^{29} GB

针对这一问题,本文提出构造中间空间的方法。通过构造中间空间,在光谱空间和设备颜色空间之间形成桥梁,建立光谱空间与中间空间的转换关系,以及中间空间与设备颜色空间的转换关系。在对多光谱图像进行色彩管理时,首先将多光谱图像数据转换到中间空间,为了提高图像再现精度,可在中间空间中对图像数据进行处理,处理后数据再从中间空间转换到输出设备颜色空间,从而实现多光谱图像的输出。因此,中间空间必须具备如下两个特点:

- (1) 能与光谱空间相互转换,转换精度高且转换成本低;
- (2) 中间空间维度合理,能使查找表的大小控制在可实现范围内。

针对多光谱图像的打印输出,在建立中间空间时,引入打印机的光谱特性。首先,打印机的光谱特性能反映打印机可再现的颜色范围,即色域。在图像打印输出时,最关注的是能被打印机打印的颜色,或者说能由打印机油墨光谱合成的光谱;无法用打印机实现的图像光谱必须转换到打印机可实现的光谱范围内,才能打印输出。因此,在面向打印时,中间空间如能基于打印机的光谱特性,则打印输出精度必然能够获得提高。其次,打印机色域有限,对其进行采样时,采样样本数远小于直接对图像的光谱空间进行的采样,因此可有效降低空间转换的成本。

本文方法的思想可用图 1 表示。首先,对彩色打印机颜色空间进行采样,用色块表示出采样数据并将色块打印输出。用分光光度计对色块进行测量,获得采样数据对应的光谱数据。在该组光谱数据的基础上建立中间空间。在此过程中,可得到光谱数据与中间空间的转换关系。此过程如图 1(a) 所示。利用已得到的中间空间以及打印机颜色空间,建立多维查找表,可得到中间空间与打印机颜色空间的转换关系。在以上两个关系的基础上,对于给出的任意多光谱图像,先将

其光谱数据转换到中间空间,在中间空间内对图像进行处理,例如进行色域匹配等操作,再从中间空间转换到打印机颜色空间,实现多光谱图像的打印输出。该过程如图 1(b) 所示。

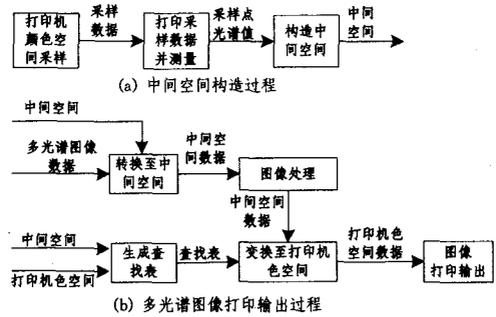


图 1 面向打印的光谱色彩管理过程

在图像处理技术中,通常如果能够通过一系列查找表或者矩阵运算进行图像转换,则转换效率高,转换成本低。因此,为了使中间空间与光谱空间相互转换容易,首选的是能用一个简单的矩阵来完成两者之间的转换。同时,中间空间的维度要利于查找表的建立,因此本文选取主成分分析法 (PCA) 来实现建立中间空间的思想。

2.2 基于主成分分析的中间空间实现方法

主成分分析法能用少数变量表示高维数据,同时保持这组数据的主要信息,即力图将高维数据投影到低维空间并尽可能地保持源数据的方差。假定有 P 个光谱反射比样本矢量,矢量维数为 N ,用 $N \times P$ 阶矩阵 S 表示这组光谱反射比样本:

$$S = [s_1 \quad s_2 \quad \dots \quad s_P] = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \dots & s_{1P} \\ s_{21} & s_{22} & \dots & s_{2P} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{N1} & s_{N2} & \dots & s_{NP} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, s_j 表示打印机色空间中第 j 个采样点的光谱测量数据, $j=1, \dots, P$ 。为了使维度能降低到 $\tilde{N} < N$,由 PCA 原理可得 \tilde{N} 个矢量 $u_i, i=1, \dots, \tilde{N}$, 其为 \tilde{N} 维矢量空间的一组正交基。将该 \tilde{N} 维空间作为中间空间, u_i 作为该空间的基,则得到新的光谱变量 z_i :

$$z_i = u_i^t s \quad (3)$$

式中, s 表示打印机色空间的一个采样样本,定义矩阵 $\tilde{U} = [u_1 \quad u_2 \quad \dots \quad u_{\tilde{N}}]$, 则可得到样本 s 在中间空间的表示 $z = [z_1 \quad z_2 \quad \dots \quad z_{\tilde{N}}]^t$:

$$z = \tilde{U}^t s \quad (4)$$

据此得到光谱空间向中间空间的转换矩阵 \tilde{U}^t , 则由 PCA 原理可知,中间空间向光谱空间的转换为:

$$\tilde{s} = \sum_{i=1}^{\tilde{N}} z_i u_i = \tilde{U} z \quad (5)$$

式中, \tilde{s} 为中间空间样本 z 在光谱空间的表示, $d = \|\tilde{s} - s\|$ 为转换误差, \tilde{U} 即为中间空间向光谱空间的转换矩阵。由此,利用矩阵 \tilde{U}^t 和 \tilde{U} 就能实现中间空间与光谱空间的相互转换。同时,降维使得查找表的建立成为可能,满足了前述中间空间应该具备的两个特点。

3 实验结果与分析

为获得打印机色空间的光谱数据,实验中选择 IT8.7/3 彩色打印机标准色靶作为打印机色空间的采样样本,该色靶

共 928 个色块;用 HP DesignJet 800PS3 四色打印机打印色靶;采用 GretagMacbeth SpectroScanT 分光光度计测量色靶光谱反射比,实验中选取 400nm 到 700nm 之间每隔 10nm 的光谱采样,因此得到 31 维光谱反射比数据。对这 928 个 31 维光谱矢量进行主成分分析,得到的主成分个数与累计方差贡献率关系如表 2 所列。由表 2 可知,当主成分个数增加到 6 个时,这 6 个主成分就能保持源光谱 99.9% 的信息。结合表 1 可知,在进行中间空间与打印机色空间转换时,采用查找表法需使查找表的大小控制在可实现范围内,因此实验中设定中间空间为 6 维空间。

表 2 主成分个数与累计方差贡献率对照

个数	1	2	3	4	5	6	7
ACR(%)	86.61	94.96	99.01	99.67	99.80	99.91	99.95

光谱色彩管理中,空间转换精度的度量目前国际上尚无统一标准^[14]。为了评价所提方法的有效性,本文从光谱精度和色度精度两方面分别进行评价。通过计算均方根误差(E_{RMS})来反映空间转换中源光谱与转换光谱的光谱差异。由于 E_{RMS} 仅能从光谱角度反映转换精度,而颜色是在光谱基础上的人眼视觉感知,均方根误差无法体现光谱所合成的颜色的精度,因此选择 CIELAB 均匀颜色空间的标准色差公式 ΔE_{ab} 来对变换的色度精度进行评价。

3.1 光谱精度评价

均方根误差公式如下:

$$E_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Delta\beta(\lambda_i))^2} \quad (6)$$

式中, N 为高维光谱空间的维度, $\Delta\beta(\lambda_i)$ 为在波长 λ_i 处由中间空间转换得到的高维近似光谱与源光谱的误差。实验选取

由分光光度计测量的 IT8.7/3 标准色靶的光谱数据以及两幅多光谱测试图进行测试。由这两幅多光谱图像合成的 RGB 图像如图 2 所示,其中图 2(a)为一幅典型的肤色图;图 2(b)为一幅具有高饱和度颜色的景物图。测试图像的光谱反射率在 400nm 到 700nm 之间每隔 10nm 进行采样,其维度为 31 维。通过计算得到 IT8.7/3 及两幅多光谱图像的 E_{RMS} 统计数据,如表 3 所列。图 3 给出产生平均 E_{RMS} 、最大 E_{RMS} 和最小 E_{RMS} 的样本点的光谱反射率曲线在空间转换前后的情况。从图 3 可以看出,转换光谱与源光谱反射率曲线差异小且交叉点多,说明中间空间能够很好地保持源光谱空间的主要信息^[15]。

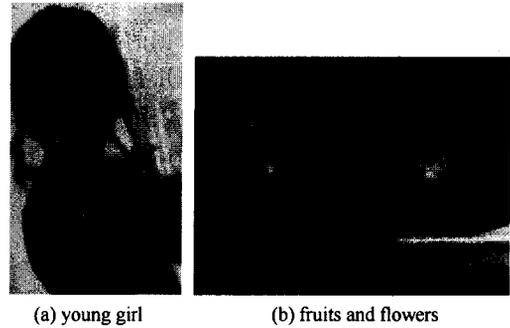


图 2 多光谱图像合成的 RGB 图像

表 3 多光谱测试图均方根误差统计

测试图	平均 E_{RMS}	最大 E_{RMS}	最小 E_{RMS}
IT8.7/3	0.0024	0.0068	0.0007
图 2 (a)	0.0104	0.0314	0.0014
图 2 (b)	0.0169	0.0612	0.0034

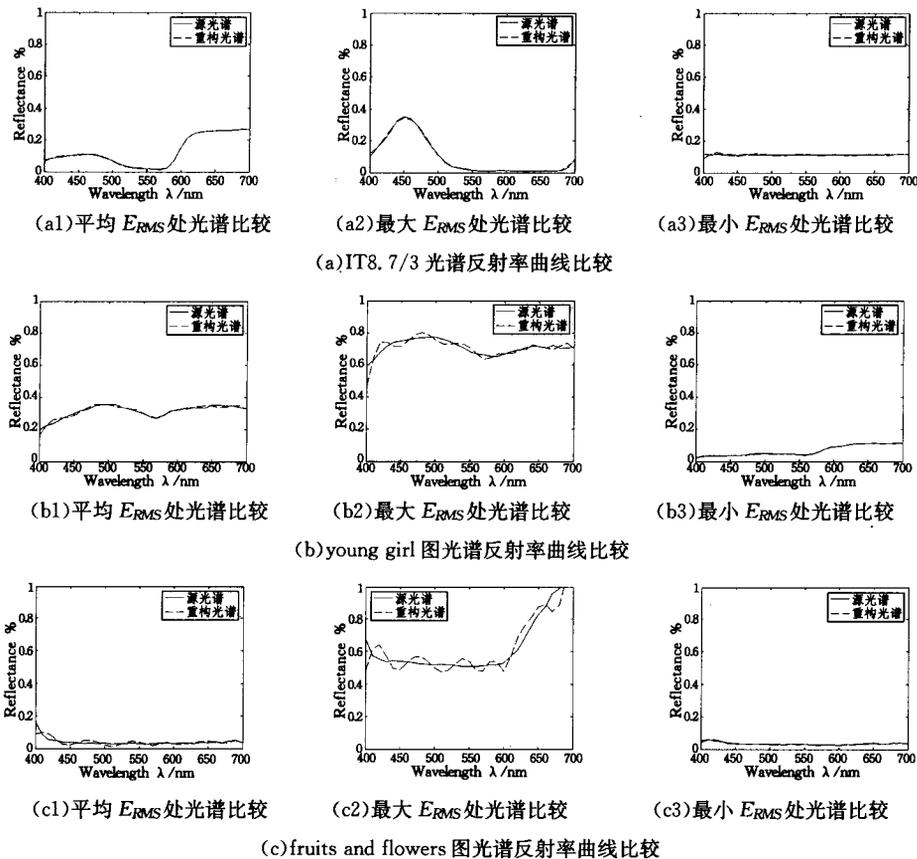


图 3 平均 E_{RMS} 、最大 E_{RMS} 、最小 E_{RMS} 处光谱反射率曲线比较

3.2 色差评价

CIELAB 为色度空间,其色差公式无法对光谱的转换精度进行评价,尤其无法给出同色异谱情况下的光谱比较^[14]。但其在色差评价过程中考虑到人眼视觉感知系统,因此可通过它对光谱转换后合成的颜色精度进行度量。实验选择 CIELAB 的标准色差公式 ΔE_{cb} ,其定义如下:

$$\Delta E_{cb} = \sqrt{((\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2)} \quad (7)$$

实验对 IT8.7/3 光谱数据、young girl 图、fruits and flowers 图的 ΔE_{cb} 统计结果如表 4 所列。通常当 ΔE_{cb} 小于 3 时,人眼几乎感知不到颜色差异;当 ΔE_{cb} 介于 3 和 6 之间时,人眼能够感知到色差,但色差可接受;当 ΔE_{cb} 大于 6 时,颜色严重失真,色差无法接受^[16]。从表 4 可以看出,3 幅图的平均 ΔE_{cb} 均小于 3,其中 IT8.7/3 和 young girl 图的平均 ΔE_{cb} 不到 1。空间转换引起的色差,young girl 图中几乎无法感知到,fruits and flowers 图中仅有极小部分的颜色差异可被感知。

表 4 多光谱测试图色差统计

测试图	平均 ΔE_{ab}	最大 ΔE_{ab}	最小 ΔE_{ab}
IT8.7/3	0.1089	0.8693	0.0013
图 2 (a)	0.1231	0.3276	0.0040
图 2 (b)	1.2733	6.9524	0.0491

结束语 为解决光谱色彩管理中多光谱图像的输出问题,本文提出一种面向打印的中间空间构造方法。该方法在光谱空间与设备颜色空间之间引入中间空间作为空间变换桥梁,有效解决了光谱空间的高维度给光谱色彩管理带来的问题。针对多光谱图像的打印输出,在建立中间空间时,采用打印机的光谱特征化样本作为基础样本,通过主成分分析法构造低维空间,使得空间变换成本低,光谱及色度精度高。低维中间空间能用于查找表的建立,可实现与打印机颜色空间的转换。在构造中间空间时,需要对光谱空间进行降维,降维方法对光谱转换精度的影响很大,采用更适合的降维方法是需要进一步研究的方向。另外,中间空间的维度直接影响着光谱转换的精度,维数确定的标准也需要深入研究。

参考文献

[1] Zolliker P, Simon K. Retaining Local Image Information in Gamut Mapping Algorithms[J]. IEEE Trans on Image Processing, 2007, 16(3):664-672

[2] Chin E M, Garcia E K, Gupta M R. Color Management of Printers by Regression over Enclosing Neighborhoods[C]// IEEE Int. Conf. on Image Processing. San Antonio, TX, USA, 2007, 2: 161-164

(上接第 167 页)

[2] Arabas J, Michalewicz Z. GAVAPS — A Genetic Algorithm with Varying Population Size[C]// Proceeding of 1st Conference On Evolutionary Computation, 1994:73-78

[3] Srinivas M, Patnaik L M. Adaptive probabilities of crossover and mutation in GAs[J]. IEEE Trans. on SMC, 1994, 24(4): 678-691

[4] 黄樟灿. 演化计算的搜索策略研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2004: 48-53

[5] Affenzeller M. A New Approach to Evolutionary Computation;

[3] Zhao Y, Berns S R, Taplin A L, et al. An investigation of multi-spectral imaging for the mapping of pigments in paintings[C]// Proc. SPIE. 2008, 6810:1-9

[4] Bochko V, Tsumura N, Miyake Y. A spectral color imaging system for estimating spectral reflectance of paint[J]. Journal of Imaging Science and Technology, 2007, 51(1):70-78

[5] Munzenmayer C, Paulus D, Wittenberg T. A spectral color correction framework for medical applications[J]. IEEE Trans on Biomedical Engineering, 2006, 53(2):254-265

[6] Tsumura N, Miyake Y, Imai H F. Medical vision; measurement of skin absolute spectral-reflectance-image and the application to component analysis[C]// Proc. Third Int. Conf. on Multispectral Color Science MCS'01. 2001:25-28

[7] Hardeberg J Y. Recent Advances in Acquisition and Reproduction of Multispectral Images[C]// 14th European Signal Processing Conference. Florence, 2006

[8] Bochko V, Tsumura N, Miyake Y. Spectral Color Imaging System for Estimating Spectral Reflectance of Paint[J]. The Journal of Imaging Science and Technology, 2007, 51(1):70-78

[9] Nieves J L, Valero E M, Nascimento S M C, et al. Multispectral Synthesis of Daylight Using a Commercial Digital CCD Camera [J]. The Journal of Optical Society of America, 2005, 44(27): 5696-5703

[10] Cheung V, Westland S, Li C, et al. Characterization of Trichromatic Color Cameras by Using a New Multispectral Imaging Technique[J]. The Journal of Optical Society of America A, 2005, 22(7):1084-7529

[11] Urban P, Rosen R M, Berns S R. Accelerating spectral-based color separation within the Neugebauer subspace[J]. Journal of Electronic Imaging, 2007, 16(4):1-11

[12] Berns S R, Taplin A L, Liang Z T. Spectral color reproduction with six color output[P]. United States Patent:6698860. 2004

[13] 丁二锐, 曾平, 罗雪梅, 等. 非均匀三维查找表的快速查找技术[J]. 计算机科学, 2007, 34(2):258-259, 276

[14] Imai F H, Rosen M R, Berns R S. Comparative Study of Metrics for Spectral Match Quality[C] //The First European Conference on Colour Graphics, Imaging, and Vision. Poitiers, France, 2002:492-496

[15] 汤顺青. 色度学[M]. 北京:北京理工大学出版社, 1990:102-113

[16] Conde J, Haneishi H, Yamaguchi M, et al. CIE-XYZ Fitting by Multispectral Images and Mean Square Error Minimization with a Linear Interpolation Function[J]. REVISTA MEXICANA DE FISICA, 2004, 50(6):601-607

Segregative Genetic Algorithms (SEGA) [C] // Connectionist Models of Neurons, Learning Processes, and Artificial Intelligence. Lecture Notes of Computer Science. 2001:594-601

[6] Affenzeller M, Wagner S. SASEGASA: An Evolutionary Algorithm for Retarding Premature Convergence by Self-adaptive Selection Pressure Steering[C]// IWANN 2003. Lecture Notes of Computer Science. 2003

[7] 林志毅. 改进的遗传算法求解 TSP 问题[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2006:17-29