

颜色空间在图像彩色化处理中的应用分析

滕升华 沈怡平

(山东科技大学信息与电气工程学院 青岛 266510)

摘要 图像彩色化处理通常遵循颜色的局部相似性原则,选择适当的颜色空间是其重要问题。以能否实现颜色的亮度与色度分离为依据,将常用颜色空间分为颜色构成空间和颜色属性空间。考察了不同颜色空间中颜色分布的光滑程度,评估了各颜色空间在彩色化处理中的适用性。理论和实验结果表明,颜色属性空间更适用于彩色化处理。结合对彩色化本质的分析,引出了有关颜色空间选择的若干结论。

关键词 彩色化,颜色空间,应用分析

中图分类号 TP391 **文献标识码** A

Application Analysis of Color Spaces in Image Colorization

TENG Sheng-hua SHEN Yi-ping

(College of Information and Electric Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510, China)

Abstract Local color similarity is the basis of image colorization, where choosing the suitable color space is a key problem. According to the standard whether luminance and chrominance could be separated from each other, common color spaces were divided into two categories, i. e. color-component space and color-attribute space. Smoothness of color distribution differs in different color spaces. The applicability of different color spaces in colorization was evaluated. Theoretic and experimental results show that color-attribute space is more appropriate to use in colorization. Furthermore some conclusions on color space selection are drawn by analyzing the essence of colorization.

Keywords Colorization, Color space, Application analysis

颜色在人类对世界的认知过程中担当着重要角色,例如在习惯于彩色电视之后再去看黑白电视,就会明显感受到颜色缺失对画面表现力造成的影响。因此,给黑白图像、电影或电视节目加上适当的颜色有可能极大地改善视觉效果。彩色化就是一项这样的技术,早在1970年就被用于处理阿波罗登月获取的月球影像,后来在旧电影的翻新处理中又取得了很大成功^[1]。时至今日,彩色化仍然是图像处理学界一个有趣而有挑战性的研究课题。

不同于医学、遥感等领域为突出显示图像内容而采用的伪彩色化处理,这里的彩色化要求给黑白图像赋予自然的、接近于真实的色彩,以最大限度地再现其原貌,严格地讲属于假彩色处理^[2]。早期电影的彩色化可以看作是艺术家的手工作,对操作者水平要求高,而且效率较低。近年来在图像彩色化方面出现了一些半自动化的处理方法,大致可归结为两类,即颜色迁移和颜色扩展法^[3]。颜色迁移是为待处理的黑白图像寻找用作取色来源的一幅或多幅彩色参考图像,利用灰度匹配借用参考图像的颜色作为着色结果^[4];颜色扩展的常见处理方式是先在黑白图像上设置局部的引导色,再设法将局部颜色扩展到全幅范围^[5]。

各种彩色化方法尽管在具体的着色方式上有所不同,但

都基于同一个源于对实际图像的观察而得出的着色原则,即图像中相邻像素如果灰度相近,则其颜色一般也是近似的;这就是颜色的局部相似性原则。彩色化处理涉及的一个关键问题是如何选择适当的颜色表达空间,该文从考察颜色的局部相似性着手,分析不同颜色空间在彩色化处理中的适用性。

1 颜色与颜色空间

1.1 颜色三要素

牛顿认为:“准确地说,光线是没有颜色的,它所拥有的只是引起这样或那样颜色知觉的能量分布^[6]。”现代心理学研究表明,颜色是人类认知系统对物体表面光照以及视觉环境的综合反应;缺少了其中的任何一个,都不会有颜色知觉。光对人眼引起的视觉效果可以用色调、饱和度及亮度3个参量来表示,称为颜色的三要素^[7]。

色调是颜色的一种最基本的感觉属性,这种属性可以从光谱上将不同颜色区别开,即按红、橙、黄、绿、青、蓝、紫等色感觉来区分色谱段。饱和度是对有色调属性的视觉在色彩鲜艳程度上做出评判的视觉属性。亮度是区分明暗层次的非彩色觉的视觉属性,这种明暗层次决定于光刺激能量水平的高低。三要素中色调与饱和度又总称为色度,它既说明颜色的

到稿日期:2008-11-19 返修日期:2009-02-13 本文受国家自然科学基金资助项目(60805028),山东科技大学科学研究“春蕾计划”项目(2008BWZ052)资助。

滕升华(1977-),男,博士,讲师,主要研究方向为图像与视频处理技术,E-mail:tengshenghua@163.com;沈怡平(1979-),女,讲师,主要研究方向为数字信号处理。

类别,又能表示颜色的浓淡程度。

1.2 常用颜色空间

颜色空间指定颜色信息的表达方式,是以多维强度值来表示颜色的描述体系。常见颜色空间包括最基本的 RGB 空间,应用于视频系统的 YUV, YIQ 或 YCbCr 空间,彩色印刷业采用的 CMYK 空间。另外还有一类与颜色的基本要素,亦即人类视觉对颜色的感知密切相关的认知颜色空间,如 HIS, HSV 空间等^[8]。

(1) RGB 颜色空间

图像处理中最基础、最常用的颜色空间。三基色原理认为自然界中的绝大多数彩色光能分解为互相独立的红、绿、蓝三种基色光;反之用互相独立的红、绿、蓝三种基色以不同的比例混合,可模拟出自然界中绝大多数的颜色。

(2) CMYK 颜色空间

用于印刷的颜色空间标准。与 RGB 模型不同,CMYK (cyan 青, magenta 品红, yellow 黄, black 黑)用的是减色法。印刷品本身通常不能发光,而是通过反射光线来表现自身的颜色,例如红色的纸,是吸收了照明白光中的青色光线,反射红光到人的眼睛,使人产生红色的色感。这种特性决定了印刷系统采用的 CMY 基色是 RGB 系统三原色的补色,把黑色独立出来是为了提供更丰富的灰度级。

(3) YUV 类颜色空间

YUV 是欧洲 PAL 电视系统中采用的颜色空间, Y 是指颜色的亮度, UV 是色差信号,其中包含色调和饱和度。YUV 表色系统实现了亮色分离,从而实现了彩色信号的有效传输并能兼容黑白电视信号。YIQ 和 YCbCr 均可看作是 YUV 的衍生和变形,它们的动态范围有所不同。

(4) HSI 类颜色空间

HSI 颜色空间是从人的视觉系统出发,用色调(hue)、饱和度(saturation)和亮度(intensity)来描述颜色。HSI 颜色空间可以用一个圆锥空间模型来描述,此圆锥模型比较复杂,但却能把色调、亮度及饱和度的变化情形清楚地表现出来。HSV 空间与 HSI 类似,区别是亮度分量的计算不同,进而导致亮度和饱和度的分布及动态范围有所差异。

1.3 对颜色空间的宽泛分类

颜色空间的本质是对色彩的描述方式,考虑描述角度,可用一种更为宽泛的形式对颜色空间进行分类,即分为由颜色分量表示的颜色构成空间和利用颜色要素表达的颜色属性空间;前者如 RGB 和 CMYK 空间, YUV, YIQ, YCbCr 及 HSI, HSV 等空间都归为后者。颜色构成空间重在说明颜色的物理成分,如 RGB 模型明示了颜色三基色分量, CMYK 用以说明印刷一种颜色需要的颜料组成。颜色属性空间则直接与人对颜色的视觉感受有关,显著特征是亮度和色度分离。

无论是人眼直接观察现实世界,还是将其再现于彩色图像中,颜色差异实际包含了亮度差和色度差异两方面的内容。亮度受照明及物体表面光反射不均匀等因素的影响,因此色度更能反映物体“颜色”的本质,采用亮色分离的颜色表述及处理方式能够为一些图像处理问题带来便利。

2 不同颜色空间在彩色化中的应用

彩色化处理遵循颜色局部相似性原则,换言之即利用了图像中颜色分布的光滑性。因此,彩色化要寻找适当的颜色

空间,使之对颜色的描述能够最大限度地体现光滑性,以利于进行颜色扩展及在一定范围内的均匀着色。现分别选取 RGB, YCbCr 空间作为颜色构成空间和颜色属性空间的代表,分析两类空间在彩色化中的应用性能。

2.1 颜色描述的光滑性

在 YCbCr 表色系统中, Y 代表颜色的亮度分量, Cb 和 Cr 表示两个色差分量。YCbCr 与 RGB 之间的转换关系为

$$\begin{cases} Y=0.299R+0.587G+0.114B \\ Cb=-0.172R-0.339G+0.511B+128 \\ Cr=0.511R-0.428G-0.083B+128 \end{cases} \quad (1)$$

图 1 给出了一幅彩色图像及其在 RGB 空间的 R 分量和 YCbCr 空间的 Cr 分量,直观上看 Cr 分量较 R 分量在各区域内更为平坦。数值比较也验证了这一点:计算图中矩形区域内颜色分量的标准差, R 红色分量为 10.43, Cr 色差分量仅为 0.30。两类空间中其它分量的比较结果类似。



图 1 彩色图像及其在不同颜色空间的分量比较

色差分量在一定程度上去除了亮度信息,反映的内容更接近于色的本质,因此可以更好地体现出颜色光滑性;这种光滑性又反过来证实彩色化处理遵循的颜色局部相似性原则是合理的。相应地, RGB 颜色空间各分量之间高度相关,且均包含亮度和色度信息,因此对颜色表述掺杂了更多的外在干扰因素。

2.2 彩色化对比实验

依据颜色局部相似性原则,颜色空间在彩色化中适用与否首先应体现在对颜色描述的光滑性上。为检验这种分析的正确性,现通过实验比较 YCbCr 空间和 RGB 空间在彩色化处理中的表现。

2.2.1 彩色化效果比较

颜色混合法^[9]是一种高效的彩色化方法,先由人工为图像各区域粗略着色(如图 2(a),称引导色),再对未着色区域的每一像素,根据与邻近着色像素间的某种“距离”为引导色分配适当权值,最终着色取权值较大的几种引导色的归一化加权。

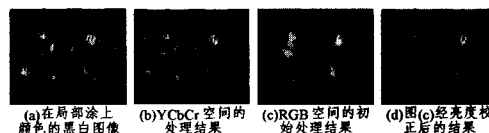


图 2 在不同颜色空间的彩色化结果

分别在 YCbCr 空间和 RGB 空间处理图 2(a)中的涂色图像。由于图像显示采用 RGB 格式,因此在 YCbCr 空间进行彩色化的处理过程包括 RGB 空间到 YCbCr 空间转换, Y 分量保持不变,在 Cb 和 Cr 通道进行颜色混合,再将 YCbCr 空间转换到 RGB 空间三个步骤。处理结果如图 2(b)所示,这是一个比较理想的彩色化结果。

利用 RGB 空间直接进行颜色混合的结果如图 2(c)所示。初始涂色在适当区域内能够实现较为合理的扩张,这是彩色化处理机制的直接反映,充分体现了颜色相似性原则。

但必须指出,图 2(c)显然不是一个令人满意的彩色化结果,其色彩过于平滑。

2.2.2 RGB 空间的亮度保持校正

图 2(c)的彩色化结果难以被人接受,究其原因其处理过程违背了彩色化的另一个约束条件,即亮度保持原则。图中各区域被强行染色,使得图像各区域的亮度被硬性修改,从而造成图像纹理严重丢失。为得到更加合理的处理结果,需要进行亮度校正,以使处理前后的图像亮度保持不变。校正公式为

$$\begin{cases} ratio = \frac{0.299R + 0.587G + 0.114B}{Y} \\ R' = \frac{R}{ratio}, G' = \frac{G}{ratio}, B' = \frac{B}{ratio} \end{cases} \quad (2)$$

式中, ratio 表示经过彩色化处理后图像的亮度变化比, Y 是初始黑白图像的灰度;要恢复图像的原始亮度, RGB 各分量都要除以 ratio。经亮度校正后的彩色化结果如图 2(d)所示。

直观上看,采用两类颜色空间的处理结果比较接近,如图 2(b)、(d)所示。同样将两类颜色空间应用在基于拉普拉斯方程的彩色化^[3]及 Levin 算法^[5]等方法中,处理大量图像的结果显示,在彩色化效果方面采用两类彩色空间区别不大,但总体趋势是采用 RGB 颜色构成空间的处理结果稍逊于采用 YCbCr 颜色属性空间。这样的结果一方面验证了前面关于“颜色属性空间可以更好地体现颜色光滑性,从而更适用于彩色化处理问题”的分析,同时又说明经过亮度保持校正之后,采用何种颜色空间对于一种彩色化算法的成败不至于造成决定性的影响。

2.2.3 计算量比较

图像彩色化过程通常需要进行大量的数据计算,因此有必要比较采用不同颜色空间进行处理的计算量。

首先,采用 RGB 颜色构成空间要分别处理红绿蓝 3 个分量的着色问题,而在 YCbCr 等颜色属性空间中只需计算两个色差分量或色调、饱和度分量。从这一点上讲,用颜色属性空间能够减少约 1/3 的计算量。

其次,彩色化处理要满足亮度保持原则。在颜色属性空间中,对亮度分量不作处理恰能维持图像在处理前后亮度一致;而如果采用 RGB 颜色构成空间,由于各分量都包含亮度信息,因此彩色化处理后还需进行亮度校正。

由于图像在处理前后通常都是在 RGB 空间表示的,因此利用颜色属性空间,在彩色化前后需要进行相应颜色空间与 RGB 空间的变换及反变换。但一般而言,至少是与当前各彩色化方法的计算过程相比,颜色空间相互变换的计算量小,可以忽略。

综合上述几点,对彩色化过程的计算量起重要影响的是需要在几个通道、对几个颜色分量进行着色计算。颜色属性空间一般为 2 个分量,而颜色构成空间通常为 3 个分量。

结束语 从某种角度上讲,彩色化处理是利用了颜色的冗余性,这一点类似于彩色图像编码;本质区别在于编码是要最大限度地去除冗余,相反彩色化是要制造冗余,将图像中各种颜色进行由点到面、由部分到全局的扩展。因此如果采用的颜色空间能够更大幅度地体现颜色的光滑性,则有利于完成彩色化。

分别利用不同的颜色空间,针对几种彩色化算法的对比实验发现,采用颜色属性空间稍好于采用颜色构成空间,但这种差别有时候并不明显,即可以说选择不同的颜色空间对最终彩色化结果的影响是比较有限的。与理论分析并不矛盾,而且据此可以进一步认识到,颜色空间的选择对彩色化结果影响较小是因为彩色化算法虽然是基于相邻像素颜色的相似性,但对颜色不连续具有一定的容忍性;恰是这种容忍性与各区域初始涂色的共同作用,使得彩色化结果中各区域边界明晰、区域内部被合理地着色。

彩色化算法对颜色不连续性的容忍程度可以看作是衡量算法本身性能的一项指标,即无论采用何种颜色空间均能较好地完成彩色化才能看作是一种稳健的算法。而且实验表明,稳健的彩色化算法对类似于图 2(a)中初始涂色的要求也可以进一步降低。

概括起来,由以上不同颜色空间的选择对图像彩色化处理的影响的分析,可得出如下基本结论:

(1) 基于颜色局部相似的事实,颜色分布的光滑性在各种颜色空间中均能得以不同程度的体现,因此都可以据此进行图像彩色化处理;

(2) 颜色属性空间实现了亮色分离,能够更真实地反映颜色本质及由此决定的光滑性分布,在彩色化处理中表现出更好的适用性;

(3) 在不同颜色空间是否均能顺利实施可以作为衡量彩色化算法稳健性的一项指标,意在说明算法本身对颜色不连续性的容忍程度;

(4) 在开发新的彩色化算法时,宜从颜色属性空间开始验证其基本性能,之后再转到颜色构成空间测试其稳健性;

(5) 一般而言,彩色化算法在颜色属性空间实施较之于颜色构成空间可以降低计算量。

参考文献

- [1] Burns G. Colorization[OL]. <http://www.museum.tv/archives/etv/C/htmlC/colorization/colorization.htm>
- [2] 阮秋琦. 数字图像处理学[M]. 北京:电子工业出版社,2001:212-214
- [3] 滕升华, 谌安军, 邹谋炎. 一种基于拉普拉斯方程的图像彩色化方法[J]. 中国图象图形学报, 2006, 11(4): 545-548
- [4] Welsh T, Ashikhmin M, Mueller K. Transferring color to grayscale images[C]// Proceedings of ACM SIGGRAPH. San Antonio, USA, 2002: 277-280
- [5] Levin A, Lischinski D, Weiss Y. Colorization using optimization [C]// Proceedings of ACM SIGGRAPH. Los Angeles, USA, 2004: 689-693
- [6] Newton I. Optics[M]. New York: Dover Publications Inc, 1952
- [7] 陶霖密, 徐光佑. 机器视觉中的颜色问题及应用[J]. 科学通报, 2001, 46(3): 178-190
- [8] Color spaces[M/OL]. www.ldv.ei.tum.de/media/files/dvi/vorlesung/z05_color_spaces.pdf
- [9] Yatziv L, Sapiro G. Fast image and video colorization using chrominance blending[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(5): 1120-1129