

与主观感知相一致的颜色校正 评估数据集建立

张海锋¹, 牛玉贞^{1,2}, 薛雨阳¹

(1. 福州大学数学与计算机科学学院, 福建福州 350108; 2. 福建省网络计算与智能信息处理重点实验室, 福建福州 350108)

摘 要: 为了获得与用户主观感知相一致的颜色校正算法和对校正结果进行客观评估, 本文首先创建了一个针对颜色校正的数据集 ICCD (Image Color Correction Database). ICCD 数据集中的颜色差异涵盖了多种类型和粒度, 其中颜色差异类型包括亮度、色相、饱和度、曝光度、对比度以及 RGB 中的 R 和 G 通道, 每类颜色差异包括 3 个修改粒度. 本文挑选了 6 种具有代表性的颜色校正算法对目标图像进行校正, 并通过用户调查获得校正结果图像的主观平均得分. 基于 ICCD 数据集, 本文对 6 种颜色校正算法的性能进行评估, 得出在大多数颜色差异和粒度上, Pitie 提出的迭代颜色分布转换算法的校正性能最好, 同时具有较好的稳定性. 最后, 本文对 14 种图像质量评估方法进行评估, 挑选出与已有的评估方法相比与主观感知一致性更好的评估方法.

关键词: 颜色校正; 主观平均得分; 迭代颜色分布转换; 颜色一致性; 全参考图像质量评估

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2017)07-1677-09

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.07.018

Image Color Correction Database for Subjective Perceptual Consistency Assessment

ZHANG Hai-feng¹, NIU Yu-zhen^{1,2}, XUE Yu-yang¹

(1. College of Mathematics and Computer Science, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China;

2. Fujian Province Key Laboratory of Network Computing and Intelligent Information Process, Fuzhou, Fujian 350108, China)

Abstract: To achieve objective image correction quality assessment results that are consistent with subjective perception, we create an Image Color Correction Database (ICCD). ICCD contains a variety of types and scales of color difference. The types of color difference include the differences in brightness, hue, saturation, exposure, contrast and R and G channels. Each type has three different scales. We select six state-of-the-art color correction algorithms to perform color correction for each target image. Then we design and conduct user study to get users' Mean Opinion Score (MOS). Based on ICCD, we evaluate the performance of six color correction algorithms. For most of the types and scales of color difference, Pitie's iterative color distribution transfer algorithm performs best. We also evaluate the 14 objective image quality assessment metrics and pick out three better assessment metrics that achieve better consistency with MOS than the existing methods.

Key words: color correction; mean opinion score; iterative color distribution transfer; color consistency; image quality assessment

1 引言

随着科技的发展, 高清显示设备的普及率在不断提升, 人们对图像和视频的质量要求也日益提高. 然而, 现实生活中却存在着大量的在颜色或亮度等方面具有

差异的图像. 导致两幅图像出现差异的因素很多, 比如采集图像时的时间差、光源位置与强度的改变、光圈大小的不同以及拍摄角度的差异等. 在许多应用领域中, 要求图像间具有较好的颜色一致性. 例如图 1 所示的图像拼接应用中, 本文采用文献[1]中拼接算法进行处

收稿日期: 2016-01-18; 修回日期: 2016-06-23; 责任编辑: 孙瑶

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61300102); 福建省自然科学基金 (No. 2014J01233); 福建省自然科学基金杰出青年科学基金 (No. 2015J06014)

理. 由于图 1(a) 和图 1(b) 的颜色一致性较差, 导致拼接后的结果图像(图 1(d)) 左侧出现了明显的拼接痕迹. 为了更加清晰地进行观察, 我们将图 1(d) 中红色矩形区域放大为图 1(e). 为了提高图像间的颜色一致性, 颜色校正算法被不断提出. 颜色校正算法的目的是校正两幅或多幅图像之间存在的颜色差异, 使其在颜色特征上尽量保持一致. 使用校正后的图像(图 1(c) 和图 1(a)) 进行拼接得到的结果图像(图 1(f)), 可以看出图 1(f) 中红色矩形区域放大后的图 1(g) 中没有明显的拼接痕迹, 因此拼接效果更好.

虽然研究者们已经提出了较多的颜色校正算法, 但是针对颜色校正结果进行系统性评估的方法却很少, 主要原因之一在于缺乏颜色一致性评估数据集. 已有的图像质量评估数据集, 如 TID2013 (Tampere Image Database)^[2]、IVC (Image and Video Communication)^[3]、LIVE (Laboratory for Image and Video Engineering)^[4] 和 CSIQ (Categorical Image Quality Database)^[5] 数据集, 是专门针对失真图像质量评估而建立, 失真类型大多为

高斯白噪声、高斯模糊、JPEG (Joint Photographic Experts Group) 压缩和 JPEG2000 压缩等. 由于这些数据集不能体现颜色差异, 因此无法作为颜色一致性评估数据集. 文献[6]中使用的数据集虽然是针对颜色一致性的, 但是该数据集未提供主观感知得分值, 无法保证客观评估结果与主观感知的一致性. 为了有效地对图像间颜色一致性进行评估, 同时对颜色校正结果进行对比分析, 本文基于 18 种颜色修改操作和 6 种颜色校正算法创建了颜色校正数据集 ICCD (Image Color Correction Database), 一共包含 2304 幅图像. 同时, 本文通过用户调查获得 ICCD 数据集的主观平均得分. ICCD 数据集主要面向图像和视频拼接应用以及三维媒体左右视图颜色校正应用, 即颜色校正算法的两幅输入图像呈现相似的场景. 最后, 本文对 6 种颜色校正算法的性能进行评估, 包括算法的总体性能和在各个颜色差异类型和粒度上的性能. 同时对 14 种图像质量评估方法进行了对比分析, 挑选出优于已有的评估方法^[6], 且与主观评估之间一致性更高的评估方法.

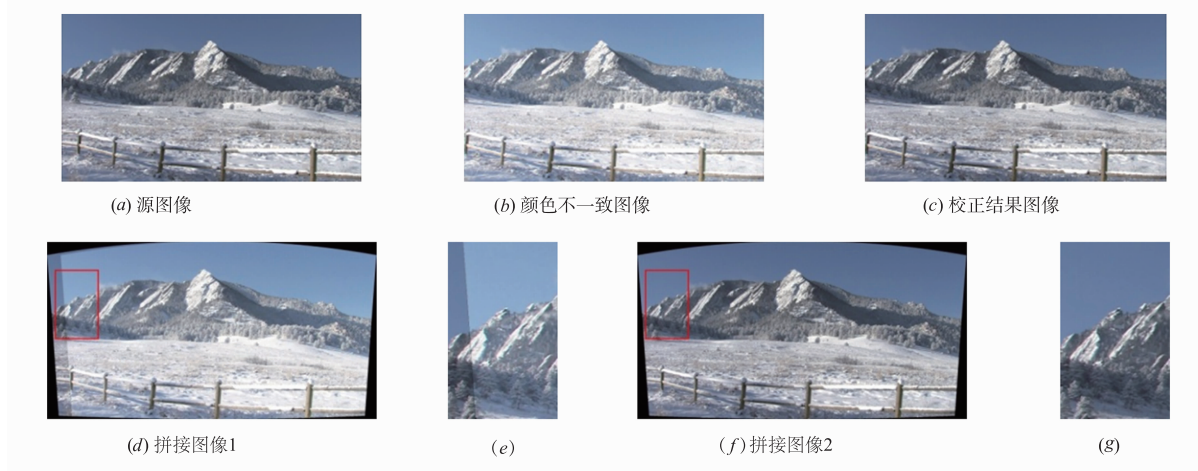


图1 图像拼接实例

2 相关工作

2.1 颜色校正算法

颜色校正算法从算法参数化模型角度可以分为参数化和非参数化颜色校正算法. 每类算法可细分为全局^[7-10]和局部校正算法^[11-13]. 较早的颜色校正算法大多是在颜色通道之间无相关性的颜色空间下分别对各个通道进行颜色校正的. 例如, 全局颜色转换算法^[7]在校正前首先将图像由 RGB 颜色空间转换到颜色通道间无相关性的颜色空间下再进行进一步的校正. 为了消除文献[7]在校正前需要进行颜色空间转换的约束, Xiao 等人提出通过引入通道间的协方差矩阵, 实现直接在具有相关性的颜色通道空间下进行计算的全局颜色校正算法^[8].

局部颜色校正算法同时考虑图像局部信息对校正的影响. Brown 等人的增益补偿算法^[11]通过图像间重叠区域的局部像素均值来求解目标图像的增益补偿参数值, 进而完成颜色校正. Zhang 等人的主区域映射算法^[12]通过颜色直方图挑选图像间重叠区域上的几个主要区域的颜色信息来构造校正模型. Pitie 等人的迭代颜色分布校正算法^[9]属于非参数化的全局校正算法. 该算法通过累积概率密度函数进行迭代校正. Fecker 等人提出的累积直方图映射算法^[13]是局部颜色校正算法. Ye 等人基于球坐标系和三角形差值, 提出了彩色颜色信号色域映射算法^[14]. 颜色校正算法的应用领域十分广泛, 目前已经在图像和视频拼接、颜色转移、三维媒体左右视图颜色校正、无缝多投影显示墙^[10]等领域中得到了广泛的应用.

2.2 图像质量评估数据集

图像质量评估数据集是图像质量评估方法进行性能对比的基础,目前已经提出许多图像质量评估数据集,如 A57^[15]、WIQ (Wireless Imaging Quality)^[16]、TID2013^[2]、LIVE^[4]和 CSIQ^[5]数据集. 这些数据集具有相似的建立方法,本文以 TID2013 数据集的建立过程为例进行说明. TID2013 数据集的建立首先挑选 25 幅原图像,然后采用 24 种失真类型对原图像进行失真处理,每种类型包括 5 个粒度. 处理完成后, TID2013 数据集中含有 3025 幅图像,其中 25 幅为原图像,3000 幅为失真图像,每幅原图像有 120 幅对应的失真图像. 最后,通过主观评估对失真图像进行评估得出数据集的 MOS (Mean Opinion Score) 值. 根据数据集中图像的类型,可以将数据集分为灰度图和彩色图数据集. 其中, A57 和 WIQ 为灰度图数据集,且数据集中包含的图像总数较少,分别为 57 和 87 幅. TID2013、LIVE 和 CSIQ 为彩色图数据集,数据集中包含的图像总数分别为 3025、808 和 896 幅,图像失真类型主要为高斯白噪声、高斯模糊、JPEG 压缩和 JPEG2000 压缩等.

3 颜色校正数据集的创建

在本节,我们将详细介绍 ICCD 数据集中图像的获取过程,主要包括三类图像:原始图像、目标图像和校正结果图像. 其中,原始图像的来源与挑选条件等将在 3.1 节详细说明. 3.2 节将阐述如何对原始图像进行修改,进而获得目标图像. 最后,3.3 节将介绍颜色校正算法如何作用于原始图像和目标图像上,进而生成校正结果图像.

3.1 场景相似的原始图像对的获取

ICCD 数据集中场景相似的原始图像对(原图像 a 和原图像 b)的获取来源于一些权威研究机构提供的高质量视频集中的帧数据,如图 2 所示. 我们首先从如下四个视频集中选择 18 段视频: VQEG HDTV 数据集 (<http://www.its.bldrdoc.gov/vqeg/downloads.aspx>), TUM 1080p50 数据集 (<http://www.ldv.ei.tum.de/en/research/videolab/data-sets-downloads/tum-1080p50-dataset/>), IRCCyNJEG264HMIX1 数据集 (<ftp://ftp.ivec.polytech.univnantes.fr/JEG264HMIX1/>) 和 4K Test-sequence 数据集 (<http://www.elementaltechnologies.com/resources/4k-test-sequences>). 为保证原始图像对的质量,要求每个数据集满足以下条件:视频的分辨率大于或等于 640p;视频集内容涵盖多种场景,例如山水、天空、室内场景、室外场景、动物和人物等,从而保证数据源具有普遍性和代表性;视频尽可能的接近无损视频集;视频的帧率不能低于 20fps. 本文从挑选的每段视频中选择两帧作为原始图像对. 为保证原始图像对满足场景相似且重叠区域颜色特征一致的要求,选取的图像对需满足以下条件:图像对间的帧数间隔必须均匀分布在 1/3、2/3、1、4/3、5/3、2 倍帧率上;图像对在内容上的差异要涵盖不同的幅度;图像对在原视频中必须属于同一个镜头;图像对的内容需要涵盖多种类型的场景. 最终,本文获得 18 对场景相似的图像,图 3 显示了 18 对原始图像中的原图像 a,其中 13 幅的图像大小为 1920 × 1080,3 幅为 1220 × 680,2 幅为 1140 × 640.

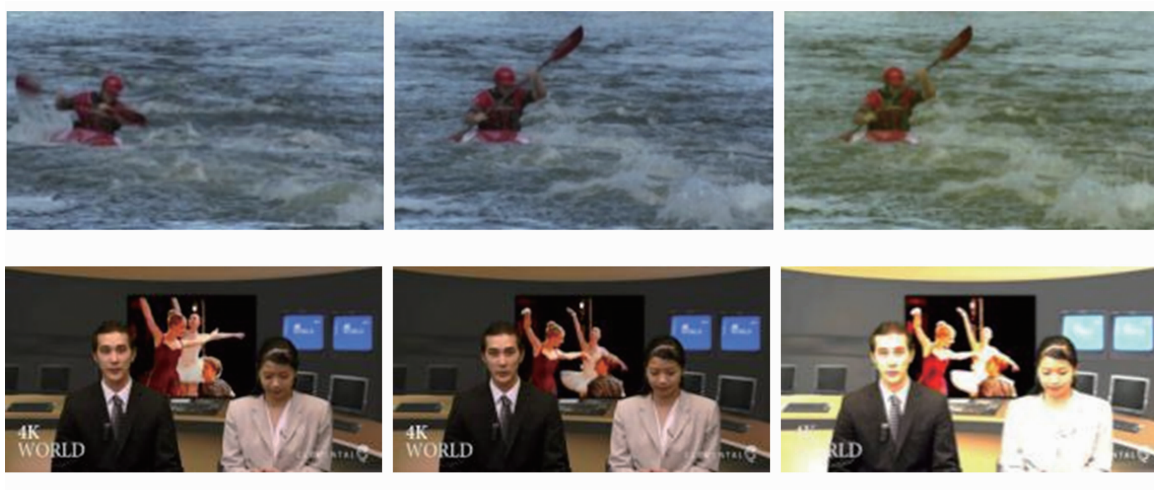


图2 原始图像对(原图像a和原图像b)和目标图像实例

(注:第1和第2列是原始图像对,其中第1列被选为颜色校正的源图像,第2列被用来修改颜色特征获得第3列所示的颜色校正的目标图像)

3.2 目标图像的创建

不失一般性的,我们选择原图像 a 作为颜色校正算

法的源图像,修改原图像 b 的颜色信息得到一幅新的图像作为颜色校正算法的目标图像,如图 2 所示. 对原

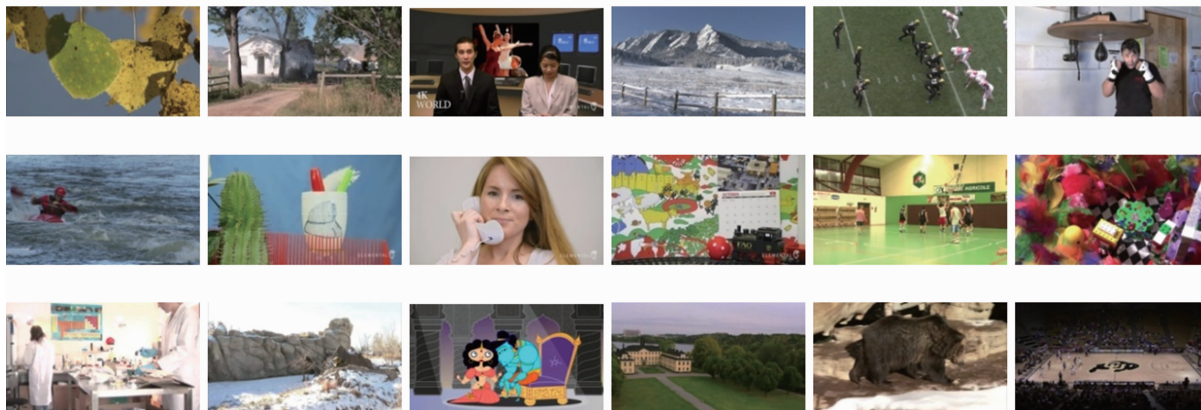


图3 18对原始图像中的原图像 a

图像 b 进行的颜色失真处理包括 6 种修改操作, 每种修改操作包含 3 个修改粒度. 本文选择的 6 种具有代表性的颜色修改操作包括: 修改 RGB 的 R 和 G 通道(3 个修改粒度分别为 +30、+60、+90)、亮度(+30、+60、+90)、色相(+20、+40、+60)、饱和度(+20、+40、+60)、曝光度(+1、+2、+3)以及对比度(+20、+40、+60). 图 4 显示饱和度在 3 个修改粒度下的修改结果. 文中对图像的修改全部在 Adobe Photoshop CS6 下完成.



图4 原始图像对中的原图像b和颜色修改操作结果

3.3 颜色校正结果图像的生成

由于在实际颜色校正应用中, 原图像 b 通常是不存在的, 存在的是原图像 a 和目标图像, 二者具有相似的场景和不一致的颜色. 我们将源图像(即原图像 a)和目标图像作为颜色校正算法的输入, 对目标图像进行校正后获得结果图像. 综合考虑了参数化和非参数化算法以及全局和局部算法, 本文选择了表 1 所示的 6 种普遍使用且具有代表性的颜色校正算法进行颜色校正操作, 得到的每幅结果图像与对应的源图像组成一对待评估的颜色校正图像. 6 种校正算法的代码均在 MATLAB 2012a 平台上运行. 图 5 是执行 6 种校正算法后得到的 6 幅对应的校正结果图像.

如表 2 所示, 最终 ICCD 数据集中包含了 18 幅源图像, 18 幅与源图像场景相似的原图像 b, 每幅原图像 b 有 18 幅修改后的目标图像, 即总共 324 幅目标图像, 每一幅目标图像执行 6 种颜色校正算法得到 6 幅结果图像, 即总共 1944 幅结果图像, 最终数据库总共包含 2304 幅图像.

表 1 6 种颜色校正算法

序号	校正算法	出自论文	参数/非参数	全局/局部
1	增益补偿算法	BROWN ^[11]	参数	局部
2	主区域映射算法	ZHANG ^[12]	参数	局部
3	全局颜色转换算法	REINHARD ^[7]	参数	全局
4	相关颜色空间下的全局颜色转换算法	XIAO ^[8]	参数	全局
5	迭代颜色分布转换算法	PITIE ^[9]	非参数	全局
6	累积直方图映射算法	FECKER ^[13]	非参数	局部

表 2 评估数据集信息

源图像/原图像 a	原图像 b	修改操作	修改粒度	目标图像	结果图像	所有图像
18 幅	18 幅	6 种	3 个	324 幅	1944 幅	2304 幅

4 主观实验

4.1 设计

为获得数据集所对应的主观平均得分值 MOS, 我们根据数据集的组成结构, 采用 Latin 方阵方法来设计调查问卷, 并对问卷中问题的显示顺序随机排序, 从而确保每套问卷中出现的图像所对应的颜色差异类型和幅度以及颜色校正方法都是均匀分布的. 最终, 我们设计出的每套问卷集包含了 18 个问卷, 每个问卷 18 页, 每页包含 7 个原子任务, 由 7 对图像和 7 个问题表示, 其中 6 对由源图像和 6 个校正结果图像组成, 剩余的 1

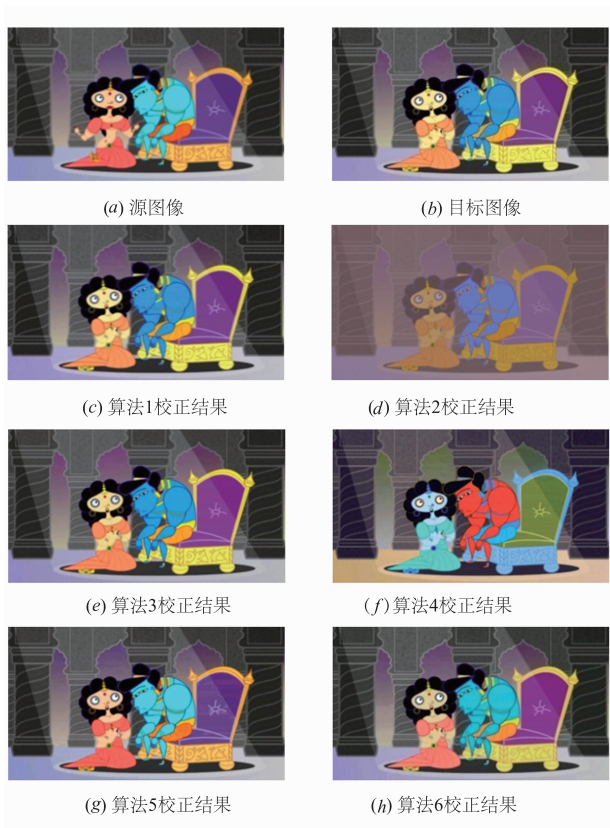


图5 颜色校正结果及相应主观和客观评估得分实例

(注: (c)~(h)是算法1~6的校正结果, 其MOS分别为2.86、1.57、2.71、2.29、4.00、3.29; 客观评估方法CS (Color Similarity)^[6]的得分值分别为24.85、15.93、24.91、22.47、34.69、27.36; 客观评估方法SS (Structural Similarity)^[6]的得分值分别为0.97、0.68、0.96、0.93、0.97、0.96; 客观评估方法MSSIM (Multi-scale Structural Similarity)^[7]的得分值分别为0.95、0.65、0.96、0.89、0.99、0.96; 客观评估方法NQM (Noise Quality Measure)^[8]的得分值分别为13.24、4.28、13.44、9.82、24.34、15.97; 客观评估方法CID (Color Image Difference)^[9]的得分值分别为0.36、0.90、0.37、0.75、0.22、0.33)

对由源图像和对应的目标图像组成, 每页呈现的目标图像的修改操作和粒度由 Latin 方阵决定, 呈现顺序则是随机的. 图 6 显示了问卷调查页面中的某个原子任务, 其中左侧图像是某源图像, 右侧图像是对应的结果图像. 用户被要求评估右侧图像与左侧图像的颜色一致性, 需要从 1 到 5 中选择一个分值, 分值越大表示颜色一致性越好, 否则越差.

4.2 参与者

本文设计的问卷是通过网页访问的形式发布的. 问卷调查过程中, 我们招募了 140 个视觉系统正常的参与者, 其中 126 人完成了问卷, 剔除了 14 套未完成的问卷. 根据参与者提供的个人信息统计得到 126 人中男性 65 人, 女性 61 人, 年龄段为 20 到 35 岁, 平均年龄为 24.5 岁.



1分(劣) 2分(差) 3分(中) 4分(良) 5分(优)
(评估右侧图像相对于左侧图像的颜色一致性)

图6 问卷调查页面中的一个原子任务

4.3 实验环境

我们将问卷调查网站发布在亚马逊所提供的服务器平台上, 具体硬件参数为: 亚马逊 Ec2 主机, CPU: Xeon E5-2670 2600MHz, 单核 1G 内存. 同时, 我们建议参与者进行问卷填写时本地机器需要满足以下条件: 显示器的分辨率不低于 1366×768 ; 显示器的亮度调节为适中; 参与者保持最佳视距进行观察; 参与者完成 50% 问卷时需要休息 3 分钟以上才可继续完成问卷. 最终, 完成一套问卷所花费的平均时间大概为 15 分钟.

4.4 评估过程

每套问卷起始于一些基本信息的填写, 如参与者的性别和年龄. 之后将给出问卷说明, 要求参与者在符合的环境下进行主观评估. 每道题都将给出一对图像, 评估过程中以左边图像作为评估标准, 若右边图像的颜色信息与左边图像的颜色信息越相近则质量越高. 我们采用 5 个等级 (优、良、中、差、劣) 来划分质量的高低, 等级越高则质量越好, 对应的得分值也越高, 如等级优对应最高得分值 5 分. 参与者在完成基本信息填写以及阅读完问卷说明后, 将依次对每道题中的图像对进行主观评估, 给出得分值. 最终, 当所有参与者都完成问卷后, 我们通过求解有效问卷中同一题目的得分均值得到对应的主观评估得分 MOS.

5 颜色校正评估

5.1 图像颜色校正算法性能分析

考虑到不同的颜色校正算法可能适用于不同的修改操作与不同的修改粒度后的图像的校正, 本文分别对 6 种颜色校正算法在 6 种不同的修改操作以及 3 个不同的修改粒度下的校正性能进行了评估. 评估标准为校正结果的 MOS 均值和标准差, 结果如图 7 所示.

通过对比分析可以得到, 整体上 Pitie 提出的迭代颜色分布转换算法^[9]的校正结果的 MOS 均值最高, 校正结果图像质量最好. 同时该算法的标准差较低, 具有较好的稳定性. 主区域映射算法^[12]最差, 其校正后的结果图像的 MOS 均值最低且标准差较高, 校正结果的质量和稳定性都比较差.

6 种修改操作下, 除曝光差异外, 迭代颜色分布转换算法^[9]具有较好的性能, 其校正结果图像的质量最好, 同时具有较好的稳定性. 而针对曝光图像的校正,

Reinhard 提出的全局颜色转换算法^[7]具有最好的校正性能. 3 个修改粒度上, 迭代颜色分布转换算法^[9]在每

个粒度上的 MOS 均值都最高, 同时保持较低的标准差, 是校正性能最好的算法.

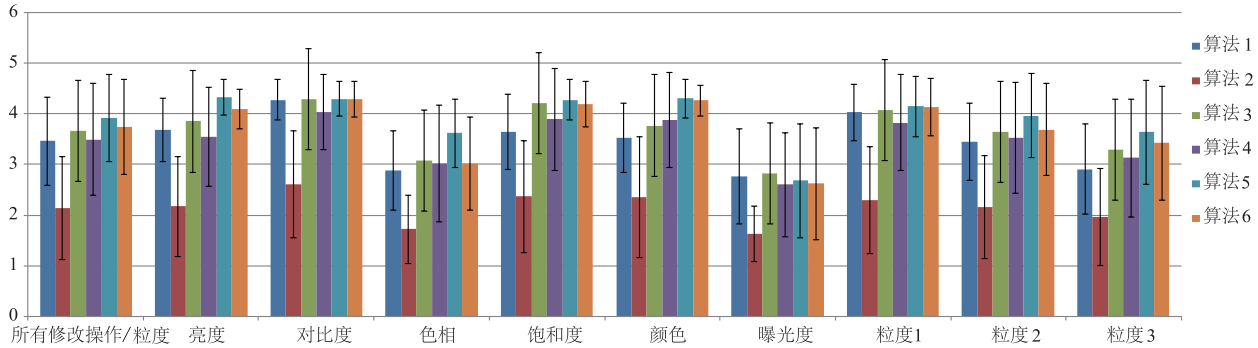


图7 6种颜色校正算法的性能对比

5.2 与主观评估相一致的客观评估方法

首先我们分别对文献[6]中提出的两种颜色校正评估方法与主观感知的一致性进行了评估. 根据视频质量专家组的建议^[20], 本文采用 PLCC (Pearson's Linear Correlation Coefficient)、SRCC (Spearman's Rank-order Correlation Coefficient)、KRCC (Kendall's Rank-order Correlation Coefficient) 和 RMSE (Root Mean Square Error) 对评估方法进行性能评估. 其中, r_{PLCC} 为皮尔斯相关系数, 用于度量评估结果与主观感知之间的相关性, 通过式(1)计算; r_{SRCC} 为斯皮尔曼等级相关系数, r_{KRCC} 为肯德尔等级相关系数, 二者均用于度量评估结果的单调性, 分别通过式(2)和(3)计算; s_{RMSE} 为均方根误差, 用来度量评估方法的准确性, 通过式(4)计算. 其中, r_{PLCC} 、 r_{SRCC} 和 r_{KRCC} 的系数值越高代表评估方法性能越好, s_{RMSE} 的值越低代表评估方法性能越好.

$$r_{\text{PLCC}} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

$$r_{\text{SRCC}} = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n(n^2 - 1)} \quad (2)$$

$$r_{\text{KRCC}} = \frac{C - D}{\frac{1}{2}n(n-1)} \quad (3)$$

$$s_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}{n}} \quad (4)$$

其中 n 为序列 x 和 y 的元素个数, t_i 和 y_i 为序列 x 和 y 中第 i 个元素的值. C 表示序列 x 和 y 中拥有一致性的元素对数, D 表示序列 x 和 y 中拥有一致性的元素对数.

为了更加公平地进行对比, 在进行求解相关性和

准确性之前, 使用拟合函数对评估方法求出的客观得分值进行拟合处理, 本文采用 Sheikh 等人^[21] 推荐的拟合函数:

$$f(x) = \beta_1 \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{1 + e^{\beta_2(x - \beta_3)}} \right) + \beta_4 x + \beta_5 \quad (5)$$

其中 ($i = 1, 2, \dots, 5$) 是拟合函数的参数值. x 为拟合前的数据集, $f(x)$ 为拟合后的数据集.

由于本文创建的数据集中包含与源图像颜色一致的原图像 b , 且原图像 b 与校正结果图像具有相同的结构信息, 因此该图像是颜色校正算法的理想校正结果. 本文中的客观评估方法均采用原图像 b 作为标准图像对校正结果图像进行质量评估. CS 和 SS 的客观评估结果与主观评估结果间的一致性如表 3 所示. 可见, 对于颜色校正来说, 颜色相似度评估 CS 比结构相似度评估 SS 更有效.

表3 CS、SS 评估结果与主观评估间的一致性

方法	PLCC	SRCC	KRCC	RMSE
CS	0.750	0.725	0.538	0.718
SS	0.624	0.683	0.504	0.850

受文献[6]启发, 结合目前已提出的许多基于结构相似性、特征相似性或者显著性等的评估方法, 如文献[22-26], 本文采用表 4 中的 14 种全参考图像质量评估方法来评估校正结果图像的质量, 并求出每种评估方法与主观评估之间的一致性, 评估结果如表 4 所示. 图 5 给出了某一场景校正结果图像对应的 MOS、CS、SS、MSSIM、NQM 和 CID 值, 其中 CID 值越小越好, 其余均越大越好. 表 4 中用粗体表示优于文献[6]提出的方法. 其中有 MSSIM^[17]、NQM^[18] 和 CID^[19] 三种评估方法在相关性、准确性和单调性三个方面都优于文献[6]提出的方法. 其中, VSI (Visual Saliency Index)^[27] 在单调性评价指标 SRCC 和 KRCC 上性能最好, CID^[19] 在相关性评价指标 PLCC 和准确性评价指标 RMSE 上性能最好.

由于图像质量评价方法的性能指标中单调性指标更重要,因此,对颜色校正结果进行评估时,建议采用 VSI^[27]方法.

6 总结

本文创建了专门用于颜色校正结果评估的数据集 ICCD,解决了当前缺少颜色校正评估数据集的问题.基于 ICCD 数据集,本文对 6 种颜色校正算法进行评估.整体上,Pitie 等人提出的迭代颜色分布转换算法具有较好的颜色校正效果,而 Reinhard 等人提出的全局颜色转换算法在曝光差异上的颜色校正效果最好.此外,本文对文献[6]提出的客观评估方法与主观评估之间的一致性进行了度量.同时,通过对其它 14 种图像质量评估方法进行度量,挑选出 3 个在相关性、准确性和单调性三方面都优于文献[6]的方法,分别是 MSSIM、NQM 和 CID.

从客观评估结果与主观评估结果之间的相关性、准确性和单调性数值可以看出,颜色校正评估方法仍有较大的提升空间,本文下一步将提出新的评估方法,重点是增加针对颜色特征分析的评估分量,从而进一步提高客观评估与主观评估之间的一致性.

表 4 14 种全参考图像质量评估方法与主观评估间的一致性

方法	PLCC	SRCC	KRCC	RMSE
SNR ^[28]	0.720	0.689	0.506	0.754
DSS ^[29]	0.635	0.572	0.443	0.934
MSSIM ^[17]	0.763	0.727	0.546	0.702
VIFP ^[30]	0.773	0.696	0.518	0.690
UQI ^[31]	0.729	0.589	0.432	0.744
IFS ^[32]	0.588	0.692	0.548	0.978
NQM ^[18]	0.764	0.728	0.545	0.702
WSNR ^[33]	0.730	0.698	0.514	0.743
GMSD ^[34]	0.605	0.563	0.433	0.963
CID ^[19]	0.799	0.767	0.573	0.654
VSI ^[27]	0.673	0.823	0.635	0.804
FSIM ^[35]	0.681	0.688	0.507	0.784
MAD ^[5]	0.750	0.723	0.536	0.719
VSNR ^[15]	0.763	0.725	0.537	0.703

参考文献

- [1] BROWN M, LOWE D G. Automatic panoramic image stitching using invariant features[J]. International Journal of Computer Vision, 2007, 74(1): 59-73.
- [2] PONOMARENKO N, IEREMEIEV O, LUKIN V, et al. Color image database TID2013: peculiarities and preliminary results[A]. European Workshop on Visual Information Processing [C]. Marco Carli: EUVIP Press, 2013. 106-111.
- [3] NINASSI A, CALLET P L, AUTRUSSEAU F. Subjective Quality Assessment IRCCyN/IVC Database [R/OL]. http://www2.irccyn.ec-nantes.fr/ivcdb/, 2016-06-23.
- [4] SHEIKH H R, WANG Z, CORMACK L, BOVIK A C. LIVE Image Quality Assessment Database Release [R/OL]. http://live.ece.utexas.edu/research/quality, 2016-06-23.
- [5] LARSON E C, CHANDLER D M. Most Apparent distortion; full-reference image quality assessment and the role of strategy[J]. Journal of Electronic Imaging, 2010, 19(1): 011006-1-011006.
- [6] XU W, MULLIGAN J. Performance evaluation of color correction approaches for automatic multi-view image and video stitching[A]. Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C]. USA: IEEE Press, 2010. 263-270.
- [7] REINHARD E, ADHIKMIN GOOCH M B, et al. Color transfer between images[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2001, 21(5): 34-41.
- [8] XIAO X, MA L. Color transfer in correlated color space [A]. Proceedings of the 2006 ACM International Conference on Virtual Reality Continuum and Its Applications [C]. USA: ACM Press, 2006. 305-309.
- [9] PITIT F, KOKARAM A C, DAHYOT R. N-dimensional probability density function transfer and its application to color transfer[A]. Proceedings of Tenth IEEE International Conference on Computer Vision [C]. USA: IEEE Press, 2005. 1434-1439.
- [10] 王修晖, 华炜, 鲍虎军. 多投影显示墙的全局颜色校正[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2007, 19(1): 96-101.
WANG Xiu-hui, HUA Wei, BAO Hu-jun. Global color correction for multi-projector tiled display wall[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2007, 19(1): 96-101. (in Chinese)
- [11] BROWN M, LOWE D G. Automatic panoramic image stitching using invariant features[J]. International Journal of Computer Vision, 2007, 74(1): 59-73.
- [12] ZHANG M, GEORGANAS N D. Fast color correction using principal regions mapping in different color spaces [J]. Real-Time Imaging, 2004, 10(1): 23-30.
- [13] FECKER U, BARKOWSKY M, KAUP A. Histogram-based prefiltering for luminance and chrominance compensation of multiview video[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2008, 18(9): 1258-1267.

- [14] 叶程,刘真,吴明光. 基于求坐标及三角形差值的颜色信号色域映射算法[J]. 电子学报,2015,43(11):2180-2186.
YE Cheng, LIU Zhen, WU Ming-guang. Gamut mapping algorithm for color signal based on spherical coordinates and triangular interpolation[J]. Acta Electronica Sinica, 2015, 43(11):2180-2186. (in Chinese)
- [15] CHANDLER D M, HEMAMI S S. VSNR: a wavelet-based visual signal-to-noise ratio for natural images[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(9): 2284-2298.
- [16] ENGELKE U, ZEPERNICK H J, KUSUMA M. Wireless Imaging Quality Database[R/OL]. <http://www.bth.se/tek/rcg.nsf/pages/wiq-db>, 2016-06-23.
- [17] WANG Z, SIMONCELLI E P, BOVIK A C. Multi-scale structural similarity for image quality assessment[A]. Proceedings of the Thirty-Seventh Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers[C]. USA: IEEE Press, 2003. 1398-1402.
- [18] DAMERA V N, KITE T, GEISLER W, et al. Image quality assessment based on a degradation model[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2000, 9(4): 636-650.
- [19] PREISS J, FERNANDES F, URBAN P. Color-image quality assessment: from prediction to optimization[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2014, 23(3): 1366-1378.
- [20] VQEG. Final VQEG Report on The Validation of Objective Quality Metrics for Video Quality Assessment[R]. Sverige: Video Quality Experts Group, 2000.
- [21] SHEIKH H R, SABIR M F, BOVIK A C. A statistical evaluation of recent full reference image quality assessment algorithms[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(11): 3440-3451.
- [22] WANG Z, BOVIK A C, SHEIKH H R, SIMONCELLI E P. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(4): 600-612.
- [23] 叶盛楠,苏开娜,肖创柏,段娟. 基于结构信息提取的图像质量评价[J]. 电子学报,2008,36(5):856-861.
YE Sheng-nan, SU Kai-na, XIAO Chuang-bai, DUAN Juan. Image quality assessment based on structural information extraction[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(5):856-861. (in Chinese)
- [24] 杨春玲,高文瑞. 基于结构相似的小波域图像质量评价方法的研究[J]. 电子学报,2009,37(4):846-849.
YANG Chun-ling, GAO Wen-rui. Research on image quality assessment in wavelet domain based on structural similarity[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(4): 845-849. (in Chinese)
- [25] 米曾真. 小波域中 CSF 频率与方向加权的图像质量评估方法[J]. 电子学报,2014,42(7):1273-1276.
MI Zeng-zhen. Image quality evaluation method based on frequency and direction weighted to CSF in wavelet domain[J]. Acta Electronica Sinica, 2014, 42(7): 1273-1276. (in Chinese)
- [26] 孙玉宝,费选,韦志辉,肖亮,吕战强. 基于 Contourlet 的图像感知质量评价[J]. 电子学报,2011,39(3):649-655.
SUN Yu-bao, FEI Xuan, WEI Zhi-hui, XIAO Liang, Lü Zhan-qiang. Image perceptual quality assessment using contourlet transform[J]. Acta Electronica Sinica, 2011, 39(3):649-655. (in Chinese)
- [27] ZHANG L, SHEN Y, LI H Y. VSI: a visual saliency induced index for perceptual image quality assessment[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2014, 23(10): 4270-4281.
- [28] MAZZETTA J, CAUDLE D, WAGENECK B. Digital camera imaging evaluation[J/OL]. Electro Optical Industries, 2005. http://foulard.ece.cornell.edu/gaubatz/metrix_mux/MSE.html.
- [29] BALANOV A, SCHWARTZ A, MOSHE Y, PELEG N. Image quality assessment based on DCT subband similarity[A]. International Conference on Information Processing[C]. USA: IEEE Press, 2015. 2105-2109.
- [30] SHEIKH H R, BOVIK A C. Image information and visual quality[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(2): 430-444.
- [31] WANG Z, BOVIK A C. A universal image quality index[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2002, 9(3): 81-84.
- [32] CHANG H W, ZHANG Q W, WU Q G. Perceptual image quality assessment by independent feature detector[J]. Neurocomputing, 2015, 151: 1142-1152.
- [33] MITSA T, VARKUR K L. Evaluation of contrast sensitivity functions for the formulation of quality measures incorporated in halftoning algorithms[A]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing[C]. USA: IEEE Press, 1993. 301-304.
- [34] XUE W F, ZHANG L, MOU X Q. Gradient magnitude similarity deviation: a highly efficient perceptual image quality index[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2014, 23(2): 684-95.
- [35] ZHANG L, et al. FSIM: a feature similarity index for image quality assessment[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2011, 20(8): 2378-2386.

作者简介



张海锋 男,1991年8月出生,福建宁德人.2014年获得福州大学工学学士学位,现为福州大学数学与计算机科学学院硕士研究生,主要研究方向为图像处理、计算机视觉.
E-mail:hf.d.zhang@gmail.com



牛玉贞 女,1982年7月出生,山东济南人,教授、福建省闽江学者特聘教授、中国电子学会会员、IEEE会员.2005年和2010年分别获得山东大学工学学士和工学博士学位,现为福州大学数学与计算机科学学院教授,主要从事计算机视觉、多媒体和计算机图形学等方面的研究工作.
E-mail:yuzhenniu@gmail.com