

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2016.02.011

颜色空间的感知均匀性评价及其在图像处理中的应用

范彩霞, 陈亚军

(西安理工大学 印刷包装与数字媒体学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 针对以感知为基础的彩色图像处理中涉及的小色差图像数据的处理, 本文选择 6 幅常用的不同类型和不同色彩的图像并对它们实施明度、彩度、色相角等变换, 针对变换后的图像色差进行了心理物理学视觉评价实验。根据视觉实验数据, 用对小色差数据具有较好评价能力的基于 CIELAB 颜色空间的 CIEDE2000 色差公式、基于 CIECAM02 色貌模型的 CAM02-SCD 方法、基于图像的 S-CIELAB 模型、基于 IPT 颜色空间的色差计算方法和基于 LAB2000_{HL} 的颜色空间进行了性能测试和分析评价。最后分析了不同的感知均匀颜色空间在不同图像处理中的应用特点。

关键词: 颜色空间; 感知均匀; 图像色差; 图像处理

中图分类号: TP391.4

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2016)02-0191-08

Evaluation of perceptual uniform color spaces and application in image processing

FAN Caixia, CHEN Yajun

(School of Printing, Packaging Engineering and Digital Media Technology,
Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: With an aim at the small color difference image data processing involved in the color image processing based on human visual system, this paper selects six different frequently-used types and the different color images to alternate their implementation brightness, color chromaticity and hue angle, etc. Aiming at the alternated image color difference, the psychophysical visual evaluation experiment is conducted. In terms of visual experimental data, the performance test and analysis evaluation are made of the CIELAB color spaces with better evaluation ability to small color difference data based on CIEDE2000 color difference formula, CIECAM02 color model CAM02-SCD, image S-CIELAB model, IPT color space difference method and LAB2000_{HL} color space. Finally, the application of different perceptual uniform color space in image processing is analyzed.

Key words: color space; perceptual uniform; image color difference; image processing

随着彩色图像处理技术的发展和应用范围的不断扩大,符合人眼视觉特性的彩色图像处理技术越来越受到行业的重视^[1]。这些基于感知的图像处理算法需要在具有特定属性的颜色空间才能有效地运作,因此,需要对颜色空间的感知特性以及特定应用的要求有所了解。在理想情况下,应使用符合人眼视觉特性的均匀颜色空间来表征颜色。理论上在这类颜色空间中,相同的视觉间隔应该能够用相同的颜色差来表示。感知均匀颜色空间在计算机视觉中已逐渐得到应用,如图像检索^[2]、边缘检测^[3]、目标识别与跟踪^[4-5]、特征匹配^[6]等。

目前基于感知的均匀颜色空间主要有 CIELAB^[1,7]、CIELUV^[1,7]、S-CIELAB^[8]、IPT^[9]、LAB2000_{HL}^[1]和基于 CIECAM02 色貌模型的 $J'a'b'$ 颜色空间^[10]。在这些颜色空间中,都有相应的色差计算公式^[1,7-10]。目前对于均匀颜色空间和色差评价的分析多数是基于简单色块的,而图像由大量的不同颜色和固定位置的像素点构成,其具有复杂的空间结构。基于图像的均匀颜色空间的评价一般通过设计对图像色差进行视觉评价的等级实验进行,以寻求与人眼的视觉感知评价相一致的均匀颜色空间及其相应的色彩差异评价公式^[11-13]。文

收稿日期: 2015-06-15

基金项目: 陕西省教育厅科学研究计划资助项目(14JK1526, 13JK1155);陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2014JM2-6111);校科学研究计划资助项目(2015CX021);校科研启动基金资助项目(108-451115001)

作者简介: 范彩霞,女,讲师,博士,主要研究方向为色彩管理、多摄像机视频监控。E-mail:fcx1981@xaut.edu.cn

献[11]仅对 S-CIELAB 颜色空间和 IPT 颜色空间进行了评价且实验图像较单一,文献[12]、[13]主要对依托颜色空间的色差公式进行评价且实验图像均为印刷标准图像,未考虑到基于感知的图像处理中的主要问题以及标准图像的特点。而且,目前所有的文献均未对基于 CIELAB 颜色空间改进的 LAB2000_{HL} 颜色空间的感知均匀性进行评价。

综上,由于基于视觉特性的图像处理技术大多数关注的是小色差图像数据之间的处理方法,如图像质量评价、图像分割和目标识别等,因此,本文采用彩色图像处理中常用的各类标准图像,选择对小色差数据具有较好评价能力的基于 CIELAB 颜色空间的 CIEDE2000 色差公式^[7]、基于 CIECAM02 色貌模型对小色差评价的 CAM02-SCD 方法^[10]、基于图像的 S-CIELAB 模型^[8]、基于 IPT 颜色空间的

色差计算方法^[9]和基于 LAB2000_{HL} 的颜色空间^[11]来测试和评价它们对于小色差图像的评价和预测能力。

1 感知均匀颜色空间性能评价

1.1 视觉评价实验方案与实验过程

针对基于小色差图像数据的处理,文中设计并实施了对图像色差进行视觉评价的等级实验。为了测试不同颜色空间的感知均匀性,进行视觉评价实验时选用的图像应具有代表性。本文从用于图像质量评价的数据库选择了不同类型和色彩的 6 幅图像(见图 1),涵盖了静物、动物、人物和风景,包含了高光和暗调、高彩度和低彩度、复杂纹理变化、记忆色等典型颜色,具有一定的代表性。这 6 幅图像也常用于对其他图像处理算法的评价。

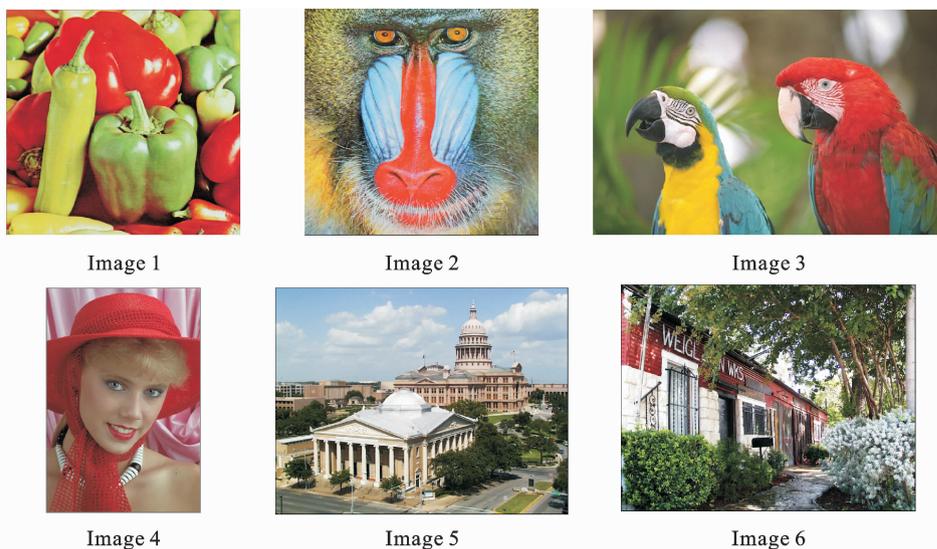


图 1 颜色空间感知均匀性测试用图像

Fig. 1 Test images for uniform color space

根据基于感知的图像处理算法中各类图像以及图像内部在亮度变化、颜色变化和分辨率变化方面的特点,参考文献[12]和[13]的实验过程,本文设计了对上述 6 幅图像的明度和彩度的线性变换、Gamma 曲线变换、对明度和彩度的联合变换、对色相角的线性变换、对直方图均衡和分辨率的变换。每幅图像有 36 个变换等级,总共获得 216 幅用于视觉评价测试的小色差图像数据。具体的变换参数如表 1 所示。

将得到的具有不同色差等级变化和颜色变化的图像和原图像进行组对制作成幻灯片,原图和变换后图像的左右位置随机排放,图像对的背景为 70% 的灰色。

视觉实验在室内自然照明环境下进行,采用三星 LCD 显示器,调整显示器的白点为 D65 光源,色温为 6 500 K(开尔文),显示器亮度为 80 cd/m², $\gamma = 2.2$ 。每次实验前显示器预热 30 min。要求观察者垂直屏幕进行观察,观察距离为 460 mm 左右,随机播放幻灯片进行视觉实验。根据给定的色差评判等级给出每一对图像的 0~5 级的主观目视色差等级^[11-13]。

图像差别视觉评价等级的规则如表 2 所示。

共有 30 名观察者参与主观视觉评价实验,男女比例为 1:2,平均年龄为 25.3 岁。其中,20 名观察者进行了 1 次视觉实验,10 名观察者在不同时间进行了 2 次视觉实验,共获得 8 640 个视觉评价数据。

表 1 图像处理函数和相应的参数
Tab. 1 Image manipulation functions and their corresponding parameters

属性	变换函数	参数设置
L^*	线性变换: $L^{*'} = k \times L^*$ Gamma 变换: $L^{*'} = L_{\max}^* \times (L^* / L_{\max}^*)^{1/\gamma}$	$k=0.85, 0.9, 0.95, 1.05, 1.1, 1.2$ $\gamma=0.8, 0.9, 1.1, 1.2$ L_{\max}^* 为 L^* 的最大值
C	线性变换: $C' = k \times C$ Gamma 变换: $C' = C_{\max} \times (C / C_{\max})^{1/\gamma}$	$k=0.85, 0.9, 0.95, 1.05, 1.1, 1.2$ $\gamma=0.8, 0.9, 1.1, 1.2$ C_{\max} 为 C 的最大值
h	$h' = h \pm k$	$k=2.5^\circ, 5^\circ, 10^\circ$
$L^* C$	线性变换: $L^{*'} = k \times L^*, C' = k \times C$ Gamma 变换: $L^{*'} = L_{\max}^* \times (L^* / L_{\max}^*)^{1/\gamma_1}$ $C' = C_{\max} \times (C / C_{\max})^{1/\gamma_2}$	$k=0.9, 1.1$ $\gamma_1=0.9, 1.1$ $\gamma_2=0.8, 0.9, 1.1$
R	使用 Photoshop 对图像进行降采样	$2 \times 2, 4 \times 4$
$hist_equal$	对图像进行直方图均衡处理	

表 2 目视色差判断等级
Tab. 2 Visual color judgment level

颜色视觉感受	评分等级
与原图相比没有能够感受到的差别	0
与原图相比有轻微差别,这种差别感受似有似无,不明显或者不确定	1
与原图相比有微弱的差别,但可以确定这种差别的存在	2
与原图相比有差别,但是差别可接受	3
与原图相比有差别,差别勉强可接受	4
与原图相比感觉差别极其强烈,差别不可接受	5

说明:如果认为图像差别介于两个等级之间,打分可以为小数,如 2.4。

为了验证 30 名观察者所获得的 8 640 个视觉实验数据的有效性,本文采用 STRESS 公式对得到的实验数据进行重复精度分析和准确性分析,从而对观察者精度进行统计分析。重复精度用来验证 10 名观察者 2 次观察数据的一致程度。准确性用来验证 20 名观察者实验得到的数据与所有观察者的实验数据平均值之间的差异^[14]。通过数据分析,对实验中的 10 名观察者 STRESS 计算的重复性从 8.3 变化到 18.6,平均值为 14.3,说明 10 名观察者的重复性精度较好。实验中的 20 名观察者 STRESS 计算的准确性的值从 10.85 变化到 20.56,平均值为 17.35。对视觉评价数据重复性和准确性的检验与经典数据相比较,STRESS 计算结果说明视觉数据的可信度在可以接受的范围内,也验证了本文进行视觉评价实验得到的数据是有效的^[15]。

1.2 感知均匀颜色空间性能评价

每幅图像的视觉色差评价数据为所有观察者视觉评价数据得分的平均值,计算色差为基于均匀颜色空间的色差计算公式逐个像素计算结果的平均值。

6 幅图像的视觉色差和基于 CIELAB 均匀颜色空间的 CIEDE2000 色差公式、基于图像的 S-CIELAB 模型、基于 CAM02-SCD 色差公式、基于 IPT 颜色空间和基于 LAB2000_{HL} 的颜色空间得到的计算色差的相关图如图 2 所示,横坐标为计算色差 ΔE ,纵坐标为视觉色差 ΔV ,每幅图像不同颜色空间下的实验结果用不同的点线表示。图中的直线为计算色差与视觉色差的线性拟合,6 幅图像的拟合直线的相关参数如表 3 所示。表中的斜率表示图像的视觉色差感觉随着计算色差改变的规律,截距表示视觉色差和计算色差偏离原点的程度,所有的截距均不为 0,说明观察者给出的图像的视觉色差普遍较高,即使测试图像无色差,观察者也判断两幅图像颜色有差别,这可能是由于观察者心理预期所致。相关系数表示获得的数据点围绕拟合直线的分布情况,相关系数越高说明计算色差越接近视觉色差,即色差公式与人眼视觉的一致性越高,亦即色差计算效果好。

从图 2 和表 3 可以得出如下结论:计算色差和视觉色差数据点的分布较统一,二者可以建立起一定的关系。不同图像的拟合直线的相关参数具有一定的差别,说明图像的内容对视觉色差和计算色差都有一定的影响。Image 1 图像存在色相、饱和度的变化以及高光的影响,用色差公式计算的色差值与图像色差感觉之间具有一定的线性相关性,随着计算色差值的改变,色差感觉也相应变化。基于 CIEDE2000 的计

算色差明显大于视觉色差, S-CIELAB 计算结果更差, 基于 CAM02-SCD 的结果有了明显的改善, 但是其相关系数较低, 基于 LAB2000_{HL} 的相关系数更低, 说明计算色差和视觉色差相差较大, 基于 IPT 颜色空间的计算色差和视觉色差相差较小, 相关系数较高。基于 5 个颜色空间的实验数据都比较分散, 说明人眼对较小的亮度和彩度的变化引起的小色差比较敏感。Image 2 属于纹理比较丰富的图像, 这类图像较小的色差变化会引起感知的较大变化, 从图中可以看出计算色差和视觉色差数据比较集中, 对于该类图像, IPT 颜色空间色差计算效果最好, CIEDE2000 和 S-CIELAB 次之, CAM02-SCD 效果较差, LAB2000_{HL} 效果最差。Image 3 和 Image 4 两幅图像属于色彩比较

丰富且饱和度较高的图像, 实验的数据点都比较分散, 在所有颜色空间下的相关系数都比较小, 说明该类图像的计算色差与人眼的视觉色差一致性较低, 视觉色差判断普遍低于计算色差, 导致在所有颜色空间下截距普遍较大。5 个颜色空间下 Image 3 图像的斜率几乎都为零, 说明视觉色差随计算色差而改变, 该幅图像的实验结果最差, 相比较而言对于该类图像, IPT 颜色空间计算效果最好。Image 5 和 Image 6 属于自然风景类图像, 图像的色彩和亮度都属于中间调变化, 计算色差普遍大于视觉色差, 说明人眼的视觉感知不敏感, 对于该类图像 5 个颜色空间表现都比较优秀, 所有的实验数据较集中, 相关系数普遍较高。

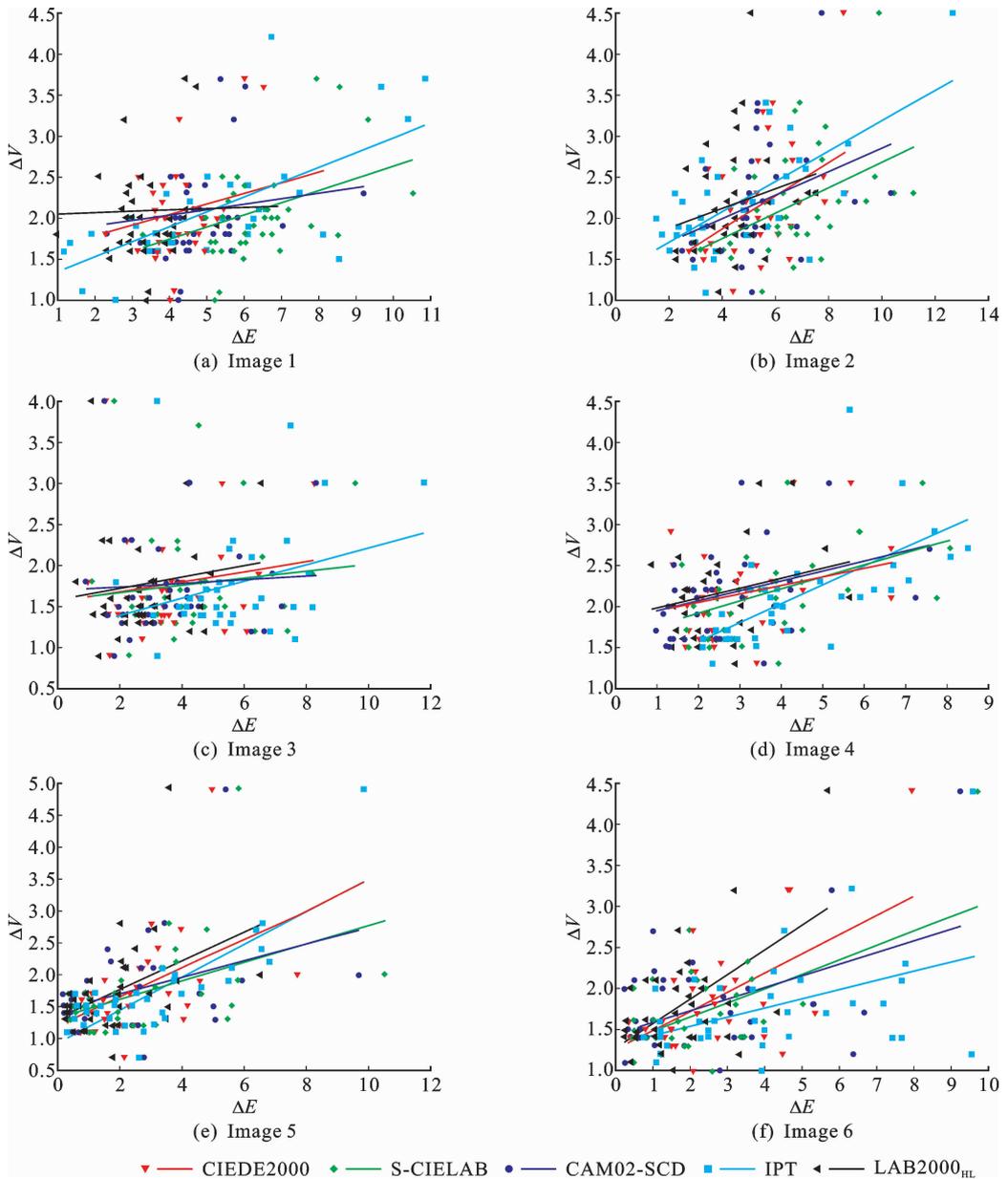


图 2 6 幅图像的主客观评价结果

Fig. 2 Subjective and objective results of six images

表3 计算色差和视觉色差数据拟合直线的参数
Tab.3 Data fitting parameters of calculation and visual color different

图像	对应各颜色空间的拟合参数														
	CIEDE2000			S-CIELAB			CAM02-SCD			IPT			LAB2000 _{HL}		
	斜率	截距	相关系数	斜率	截距	相关系数	斜率	截距	相关系数	斜率	截距	相关系数	斜率	截距	相关系数
Image 1	0.13	1.52	0.21	0.15	1.16	0.31	0.07	1.77	0.12	0.18	1.17	0.66	0.02	2.03	0.03
Image 2	0.20	1.06	0.46	0.16	1.13	0.43	0.14	1.42	0.35	0.18	1.34	0.67	0.12	1.64	0.23
Image 3	0.06	1.55	0.14	0.04	1.58	0.11	0.02	1.69	0.06	0.10	1.19	0.28	0.07	1.58	0.12
Image 4	0.11	1.83	0.21	0.15	1.62	0.36	0.12	1.82	0.30	0.30	1.11	0.66	0.12	1.85	0.19
Image 5	0.22	1.22	0.50	0.15	1.32	0.44	0.13	1.44	0.39	0.26	0.93	0.81	0.22	1.31	0.42
Image 6	0.23	1.26	0.60	0.17	1.30	0.56	0.14	1.45	0.48	0.11	1.31	0.44	0.30	1.28	0.56

综上所述,不同图像在不同颜色空间下的拟合直线的斜率和截距都具有一定的差别,说明图像内容对计算色差和色差感觉有一定的影响。实验点的离散性说明计算色差与实际色差感觉有一定的差别。

基于 IPT 颜色空间的色差公式计算结果使实验结果数据点的离散性减小,提高了相关系数的值,所有图像的直线斜率趋于一致,说明其计算结果受图像内容的影响相对较小,该计算公式的计算结果

更符合实际色差感觉,可以应用于各类图像的处理。

为了对不同感知均匀颜色空间的预测性能进行定量地评价,本文采用不同计算色差和视觉色差的 STRESS 值进行色差公式的统计显著性评价^[14]。分别计算 5 个颜色空间下 6 幅图像的明度(L^*)变换、彩度(C)变换、色相角(h)变换、明度和彩度(L^*C)的联合变换、分辨率(R)变换以及所有(Overall)变换的图像对间的 STRESS 平均值和方差,结果如表 4 所示。

表4 STRESS 评价结果
Tab.4 STRESS results

STRESS	对应各颜色空间的评价结果									
	CIEDE2000		S-CIELAB		CAM02-SCD		IPT		LAB2000 _{HL}	
	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
L^*	34.9	11.1	34.8	12.7	42.0	12.8	35.2	7.3	36.1	10.4
C	33.9	7.3	28.4	9.1	28.8	9.4	28.4	6.9	33.9	10.8
h	26.1	16.5	25.4	14.4	23.0	9.2	27.4	11.2	27.3	15.6
L^*C	28.1	9.6	27.2	10.9	39.0	22.3	33.8	8.2	30.0	8.5
R	10.2	6.9	9.9	7.4	9.6	6.9	6.9	4.9	5.7	5.5
Overall	41.7	8.9	42.1	10.8	49.0	13.1	36.4	6.5	44.7	7.4

STRESS 值越小说明计算色差和视觉色差的相关性越高,颜色空间更加符合人眼的视觉特性即具有更好的感知均匀性,预测性能越好。方差越小说明颜色空间和相应的色差公式受图像内容的影响越小。

6 幅图像的所有测试图像对的 STRESS 的均值和变化范围如图 3 所示。

从图 3 可以看出,对于图像明度和彩度以及明度和彩度的联合变换,S-CIELAB 颜色空间得到的 STRESS 值均值相对较小;对于色相角变换,基于 CAM02-SCD 的均值较小;对于分辨率的变换,LAB2000_{HL}的均值较小。而对于 6 幅不同类型图像的基于感知的所有变换(Overall),IPT 颜色空间下的均值最小,方差也最小。

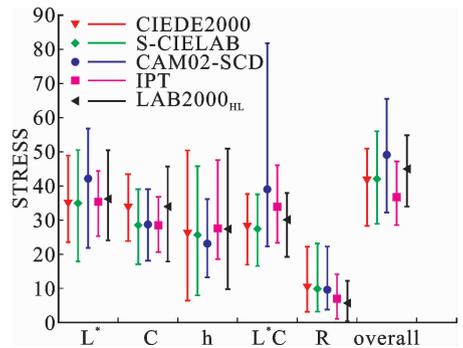


图3 不同颜色空间性能比较图
Fig.3 Comparison of different color space

总之,基于 IPT 均匀颜色空间的色差公式的预测性能最好,其次是基于图像的 S-CIELAB 模

型、基于 $LAB2000_{HL}$ 的颜色空间、基于 CIELAB 颜色空间的 CIEDE2000 色差公式, 基于 CIECAM02 色貌模型的颜色空间的预测性能最差。这是由于 IPT 颜色空间和 S-CIELAB 模型都对图像进行了基于人眼视觉特性的 CSF 滤波预处理, 而 IPT 颜色空间还对图像进行了色适应变换, 将图像色适应变换到 D65 光源下。IPT 颜色空间及其色差公式相对稳定, 对于图像的明度、彩度、色相角以及明度和彩度变换其性能都表现较好, STRESS 值变化范围较小。CAM02-SCD 色差公式稳定性较差, 其 STRESS 值变化范围较大。

综上分析可知, 对于小色差的图像数据, 由于增加了对图像色适应变换和 CSF 滤波, IPT 颜色空间更加均匀, 基于 IPT 颜色空间的色差公式更加接近人眼的视觉评价结果。

2 均匀颜色空间在图像处理中的应用

本文通过两个基于感知的图像处理的例子(图像边缘检测和行人目标识别)来说明不同的感知均匀颜色空间在图像处理中的应用特点。

2.1 边缘检测

本文基于感知均匀颜色空间对彩色图像进行边缘检测的流程图如图 4 所示。首先将 RGB 彩色图像根据转换步骤和转换公式分别转换到文中提到的 5 个不同的均匀颜色空间, 之后根据不同颜色空间

下的色差计算公式计算图像的梯度, 最后将色差梯度图进行归一化处理, 并根据人眼的恰可察觉色差提取目标边缘得到最终的边缘图^[3]。不同均匀颜色空间得到的边缘检测结果如图 5 所示。

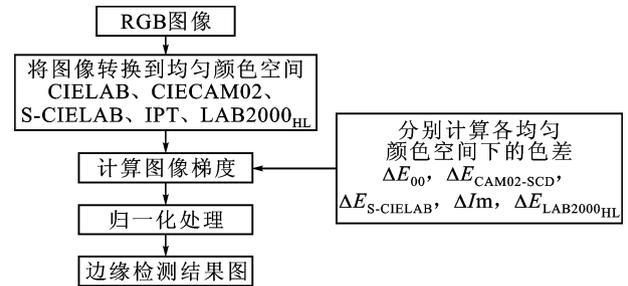


图 4 边缘检测流程图

Fig. 4 Block diagrams for edge detection

从图 5 Lena 图像中的镜框以及帽沿部分在不同颜色空间中检测的结果可以看出, 基于 CIELAB 颜色空间的 CIEDE2000 色差公式、基于图像的 S-CIELAB 模型和基于 CAM02-SCD 方法都把一些视觉感知不敏感的细小边缘检测出来了, 这些细小边缘对后续的图像分析和理解带来许多不必要的信息, 而且上述 3 种检测结果都有明显的块效应, 表明它们对人眼视觉的空间混合效果模拟得不好; 基于 $LAB2000_{HL}$ 颜色空间边缘检测的效果有所改善, 但仍然检测出部分细小边缘。基于 IPT 颜色空间的边缘检测结果较好地避免了上述现象, 能够有效地检测出视觉感知敏感的边缘且消除了干扰信息。

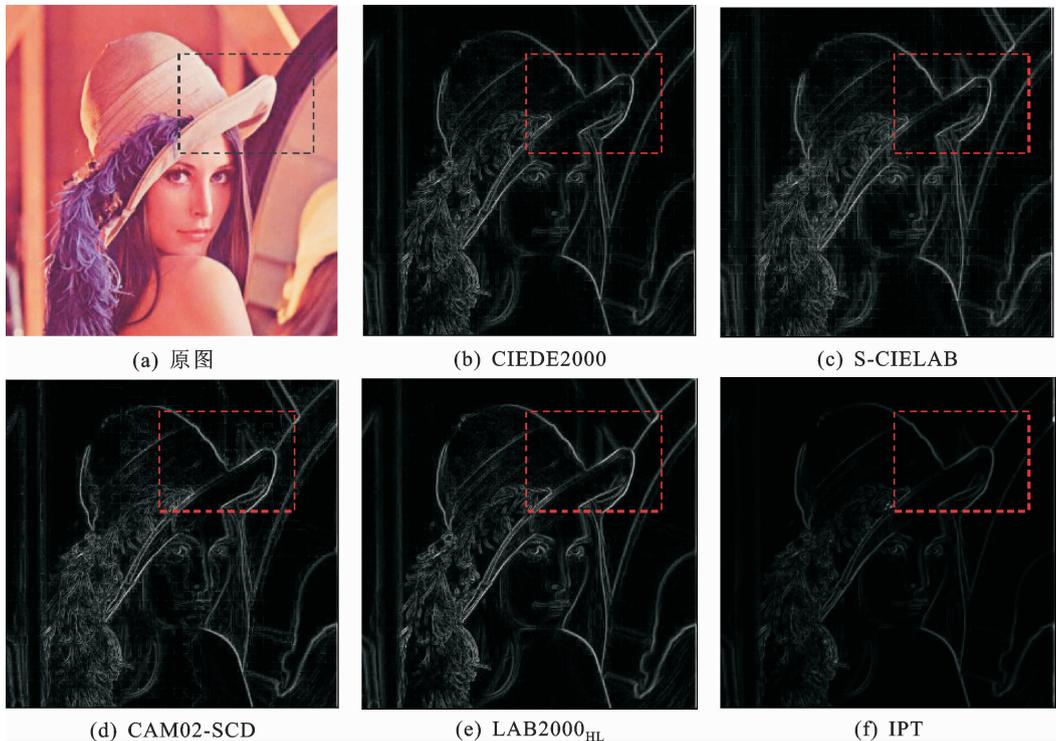


图 5 不同颜色空间边缘检测结果

Fig. 5 Edge detection results on different color space

2.2 行人目标识别

行人目标识别是目前多摄像机视频监控中需要解决的关键问题之一。尤其当不同摄像机视域中存在相似穿着的行人目标(即存在小色差图像)时,基于 RGB 颜色或 HSV 颜色的算法识别率会受到很大的影响。而人类视觉系统能够根据这些相似的颜色特征分辨这些目标,在与人类视觉感知具有一致性的感知均匀颜色空间(如 CIELAB 颜色空间)中提取目标外观特征,能够更有效地区分具有相似颜色的目标(表 5 所示)。表 5 中包括两组视觉相似的行人目标,其中第 1 列和第 3 列中的两个行人为同一目标,第 2 列和第 4 列中的两个行人为相似目标。

表 5 不同颜色空间中目标相似度计算
Tab. 5 Target similarity on different color space

各颜色空间中行人目标对的相似度/%				
颜色空间	图 1	图 2	图 3	图 4
RGB	70.0	71.7	57.6	63.3
HSV	89.1	94.8	89.0	93.1
CIELAB	97.4	92.1	97.6	93.4

本文通过基于 CAMPUS-Human 数据库的实验来说明不同均匀颜色空间的感知特性。CAMPUS-Human 数据库中包括来自 214 组镜头的 74 个行人目标,每个目标有 5 幅参考图像,1 519 幅图像序列用于行人目标识别^[17]。本文通过将行人目标图像分别转换到 CIELAB 颜色空间、基于 CIECAM02 色貌模型的颜色空间、基于 S-CIELAB 模型的颜色空间、IPT 颜色空间和基于 LAB2000_{HL} 的颜色空间,并分别在这 5 个颜色空间中提取行人目标的颜色直方图,采用直方图间的巴氏距离计算相似度,得到行人目标识别结果。实验结果通过累计匹配特征(Cumulative Matching Characteristic, CMC)曲线进行评价,CMC 曲线反映的是在前 n 个最相似的候选目标内找到正确匹配结果的概率。本文测试的 5 个颜色空间下的 CAMPUS-Human 数据库的实验结果如图 6 所示。

从图 6 可看出,针对行人目标图像的小色差数据的识别,CIEDE2000 色差公式和 S-CIELAB 模型表现较差,在排名等级较小时,CAM02-SCD 和 LAB2000_{HL} 识别率较高,IPT 颜色空间识别率次之,

本文分别在 RGB 颜色空间、HSV 颜色空间和 CIELAB 颜色空间中采用颜色直方图来计算各列中两个行人目标对之间的相似度^[16]。从表中可以看出,虽然人眼可以有效地分辨出第 1 列和第 3 列为同一行人,但是在 RGB 颜色空间和 HSV 颜色空间中的计算结果确是第 2 列和第 4 列相似的行人具有较大的相似度,可见在这两个颜色空间中进行行人识别会造成误识别,而在 CIELAB 颜色空间中同一目标行人对的相似度最大,可以得到正确的识别结果。由上述分析可知,研究不同感知均匀颜色空间对行人目标识别的性能可以为相似行人目标的识别提供依据和方法,从而提高算法的识别率。

但是随着排名等级的增大,基于 IPT 颜色空间的行人识别率上升较快,说明 IPT 颜色空间稳定性较强,受环境影响较小。如何合理有效地利用各个颜色空间的特性和色差计算方法达到更高的识别率是后续需要研究的一个问题。

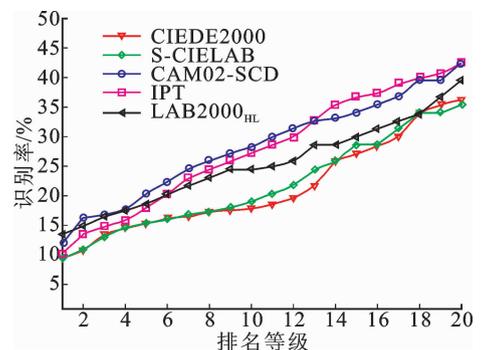


图 6 不同颜色空间行人识别结果
Fig. 6 Person identification result based on different color space

3 结论

本文针对以感知为基础的小色差图像处理问

题,通过对6幅标准图像进行明度、彩度和色相角等的变换得到216幅测试图像。由不同观察者和不同时间下的图像色差视觉评价实验得到的数据与图像色差的计算数据的实验结果表明,实验数据具有很好的 consistency,图像的内容和色彩对图像色差的计算有一定的影响,而IPT颜色空间受这种影响最小。最后,通过边缘检测和行人识别两个基于感知的图像处理例子说明了不同颜色空间的应用特点。

参考文献:

- [1] LISSNER I, URBAN P. Toward a unified color space for perception-based image processing [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2012, 21(3): 1153-1168.
- [2] LIU G H, YANG J Y. Content-based image retrieval using color difference histogram [J]. *Pattern Recognition*, 2013, 46(1): 188-198.
- [3] KIM A, KIM H, PARK S. Human vision based color edge detection: proceedings of IS&T/SPIE Electronic Imaging[C]. 2011, 1. 23-27, San Francisco, California, United States. SPIE.
- [4] ALAVI A, YANG Y, HARANDI M, et al. Multi-shot person re-identification via relational stein divergence: proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing[C]. 2013, 9. 15-18, Melbourne, Australia.
- [5] FRINTROP S, KÖNIGS A, HOELLER F, et al. A component-based approach to visual person tracking from a mobile platform [J]. *International Journal of Social Robotics*, 2010, 2(1): 53-62.
- [6] CUI Y, PAGANI A, STRICKER D. Sift in perception-based color space: proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing[C], 2010, 9. 26-29, Hong Kong, China.
- [7] LUO M R, CUI G, RIGG B. The development of the CIE 2000 colour-difference formula: CIEDE2000 [J]. *Color Research & Application*, 2001, 26(5): 340-350.
- [8] ZHANG X, WANDELL B A. A spatial extension of CIELAB for digital color-image reproduction [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 1997, 5(1): 61-63.
- [9] EBNER F, FAIRCHILD M D. Development and testing of a color space (IPT) with improved hue uniformity: proceedings of the 6th Color Imaging Conference [C]. 1998, 11. 17-20, Scottsdale, Arizona, USA, IS&T-The Society for Imaging Science and Technology.
- [10] LUO M R, CUI G, LI C. Uniform colour spaces based on CIECAM02 colour appearance model [J]. *Color Research & Application*, 2006, 31(4): 320-330.
- [11] 武海丽, 黄庆梅, 苑馨方, 等. 基于 S-CIELAB 和 iCAM 模型的图像颜色质量评价方法的实验研究 [J]. *光学学报*, 2010, 30(12): 3447-3452.
WU Haili, HUANG Qingmei, Yuan Xinfang, et al. Experimental research of evaluating methods of image quality based on models of S-CIELAB and iCAM [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(12): 3447-3452.
- [12] TONG Qingfen, XU Haisong, GONG Rui. Testing color difference evaluation methods for color digital images [J]. *Chinese Optics Letters*, 2013, (7): 79-82.
- [13] 刘浩学, 黄敏, 武兵, 等. 彩色数字图像色差计算方法的研究 [J]. *光学学报*, 2012, 32(9): 324-333.
LIU Haoxue, HUANG Min, WU Bing, et al. study of color difference evaluation in color digital images [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(9): 324-333.
- [14] GARCÍA P A, HUERTAS R, MELGOSA M, et al. Measurement of the relationship between perceived and computed color differences [J]. *JOSA A*, 2007, 24 (7): 1823-1829.
- [15] GIBSON J E, FAIRCHILD M D, WRIGHT S L. Colorimetric tolerances of various digital image displays: proceedings of the Eighth Color Imaging Conference [C]. 2000, 11. 7-10, Scottsdale, Arizona, USA, IS&T - The Society for Imaging Science and Technology.
- [16] BIRCHFIELD S T, RANGARAJAN S. Spatiograms versus histograms for region-based tracking: proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C]. 2005, 6. 20-26, San Diego, CA, USA, IEEE Computer Society .
- [17] XU Y, LIN L, ZHENG W S, et al. Human re-identification by matching compositional template with cluster sampling: proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision [C]. 2013, 12. 1-8, Sydney, Australia, IEEE Computer Society.

(责任编辑 王卫勋)