

# 一种面向颜色校正的拼接图像质量评价方法

齐美玲, 邵枫\*

宁波大学信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211

**摘要** 为了更好地设计和评估图像拼接算法, 提出一种面向颜色校正的拼接图像质量评价方法。该方法利用现有的颜色校正算法和拼接算法建立了含有 5 种色差的拼接图像库; 分别从拼接前图像序列和拼接图像中提取 4 个特征, 将 4 个特征进行融合后, 通过支持向量回归算法建立特征与质量之间的关系模型, 预测色差拼接图像质量。实验结果表明, 所提方法可以有效评估色差拼接图像的质量。

**关键词** 成像系统; 色差拼接图像; 质量评价; 色彩相似性; 特征相似性; 尺度不变特征变换; 视觉显著分数

中图分类号 TP391

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.031102

## A Stitched Image Quality Assessment Method for Color Correction

Qi Meiling, Shao Feng\*

Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China

**Abstract** In order to evaluate and design the stitching algorithm better, a color-corrected stitched image quality assessment method is proposed. A stitched image database with five kinds of color differences is established by using the current color correction algorithm and stitching algorithm. To evaluate color-difference stitched images quality comprehensively, four features are extracted from pre-splicing image sequence and stitched image respectively. Then four features are combined to establish a relation model between features and quality through support vector regression algorithm, so as to predict color-difference stitched image quality. Experimental result shows that the proposed method can effectively evaluate color-difference stitched images quality.

**Key words** imaging systems; color difference stitched image; quality assessment; color similarity; feature similarity; scale invariant feature transform; visual saliency-based index

**OCIS codes** 110.3000; 110.2960; 100.2000

## 1 引言

图像拼接技术是指将多幅来自同一场景具有重叠区域的窄视角图像进行拼接, 以形成单个无缝宽视角全景图像的过程。全景图像可以更有效地表达信息, 进而使观察者更好地认识和理解真实世界, 广泛应用于计算机视觉、医学图像处理、遥感技术、虚拟现实以及地质勘探等多个领域<sup>[1-3]</sup>。

生成全景图像的拼接过程中, 几何未对齐或光度误差会导致拼接图像出现鬼影、结构破损、拼接缝以及整体色度不均等问题。在大多数情况下, 快速、强大的拼接算法的开发受到重视, 鲜有定性评估这些算法所获得的拼接图像质量的研究, 这是因为不

存在标准测试数据库, 同时对定性分析的依赖性致使难以评估拼接算法和拼接图像的质量。

与近十年来拼接算法的快速发展相比, 关于拼接图像质量评价的研究显得不够充分且相对滞后<sup>[4-5]</sup>。Paalanen 等<sup>[6]</sup>提出了一种用虚拟相机参数和属性创建虚假视频图像以测试拼接性能的方法, 该方法仅适用于人工数据库, 不适合真实场景的质量评估; Xu 等<sup>[7]</sup>提出了用结构相似性指数 (SSIM) 和峰值信噪比 (PSNR) 一起评估不同颜色校正方法拼接图像的质量, 其认为任何结构变化都是由颜色传递造成的, 且在未对准重叠区域不存在几何误差, 由于 PSNR 为基于像素的度量, 当图像出现几何误差时, 无法利用 PSNR 进行计算, 进而该方法将不

收稿日期: 2018-07-27; 修回日期: 2018-08-20; 录用日期: 2018-08-28

基金项目: 国家自然科学基金 (61622109)

\* E-mail: shaofeng@nbu.edu.cn

再适用;Cheung 等<sup>[8]</sup>结合感知几何误差度和局部结构引导图像质量评价度量,提出了新的拼接图像质量评估方法,但仅考虑了拼接过程中由于几何对准所产生的误差,忽略了光度误差造成的拼接缝及图像整体色度不均等问题。

拼接图像质量评价方法中,有些关注光度误差的评估<sup>[7,9]</sup>,有些关注几何误差的评估<sup>[8]</sup>。然而,无论是光度误差所造成的晕影、曝光不均匀和颜色不均等问题,还是由于几何误差所造成的重影和结构不一致,都会给观察者造成较大的感知错误和视觉不适。因此,本文关注光度误差中的色度和亮度一致性,同时考虑拼接过程造成的几何偏移,提出一种颜色校正的拼接图像质量评价方法(CSIQA),该方法分别从拼接前图像序列和拼接图像提取特征:针对拼接前图像序列,提取基于稀疏表示和重建残差(SRRR)的色彩相似性和彩色图像特征相似性(FSIMc),以评估图像的色彩差异和结构差异;针对拼接图像,提取图像整体区域的基于尺度不变特征变换(SIFT)差值的几何误差度和局部区域的视觉显著分数(VSI),以评估拼接图像的几何误差和

拼接缝的程度;最后,将4个特征进行融合,通过支持向量回归(SVR)算法建立特征与质量之间的关系模型<sup>[10]</sup>,预测色差拼接图像质量。

本文主要贡献包括:1) 利用现有的颜色校正算法和拼接算法建立了含有5种色差的拼接图像库;2) 从拼接前图像序列和拼接图像两方面综合评估色差拼接图像的质量;3) 在提取特征时,同时考虑光度误差中的色度、亮度和拼接过程中的几何偏移;4) 探究颜色校正算法对拼接图像的影响,进而优化含有色差拼接图像的拼接算法。

## 2 色差拼接图像库的建立

### 2.1 原始拼接图像序列及颜色校正算法的选择

从网上公开的拼接图像库中选择10组近乎无色差的图片序列(10个场景),这10组图片序列中,有一部分的场景存在较大的对象偏移,全部场景如图1所示。

表1给出了拼接前颜色校正的7种颜色校正方法,其中,有些为广泛使用的基准,有些代表较新进展。

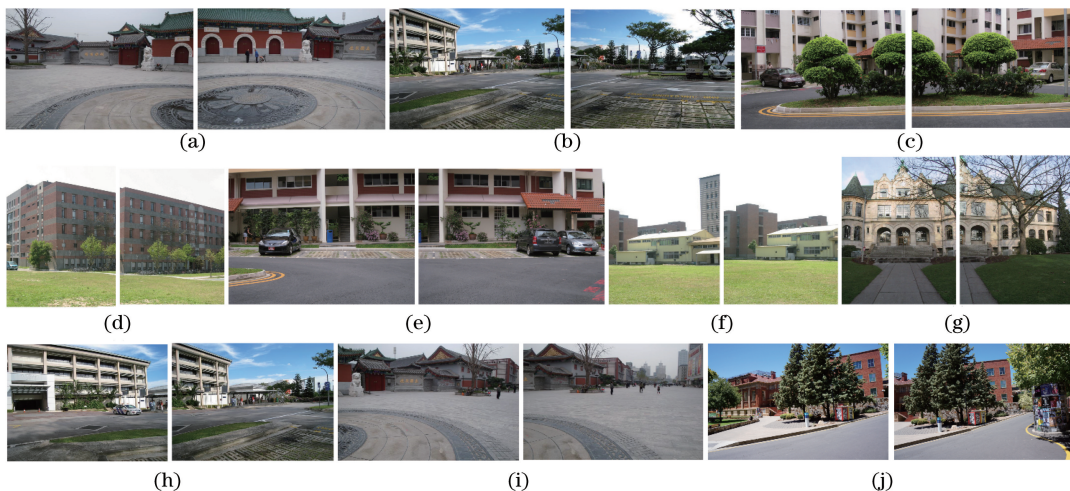


图1 原始拼接图片序列。(a)场景1;(b)场景2;(c)场景6;(d)场景4;(e)场景8;(f)场景3;(g)场景9;(h)场景5;(i)场景7;(j)场景10

Fig. 1 Original stitched image sequence. (a) Scene 1; (b) scene 2; (c) scene 6; (d) scene 4; (e) scene 8; (f) scene 3; (g) scene 9; (h) scene 5; (i) scene 7; (j) scene 10

表1 颜色校正算法

Table 1 Colorcorrection algorithms

Serial number	Algorithm	Reference
Alg #1	Brightness function	Method in Ref. [11]
Alg #2	Brightness and contrast functions	Method in Ref. [12]
Alg #3	Cumulative histogram mapping	Method in Ref. [13]
Alg #4	Different color emotion transfer function	Method in Ref. [14]
Alg #5	Single color emotion transfer function	Method in Ref. [14]
Alg #6	Global color transfer	Method in Ref. [15]
Alg #7	Global color transfer in correlated color space	Method in Ref. [16]

## 2.2 色差拼接图像的获取

库(共 400 幅图像),具体流程如图 2 所示。

对于上述图像序列,分三步构建色差拼接图像

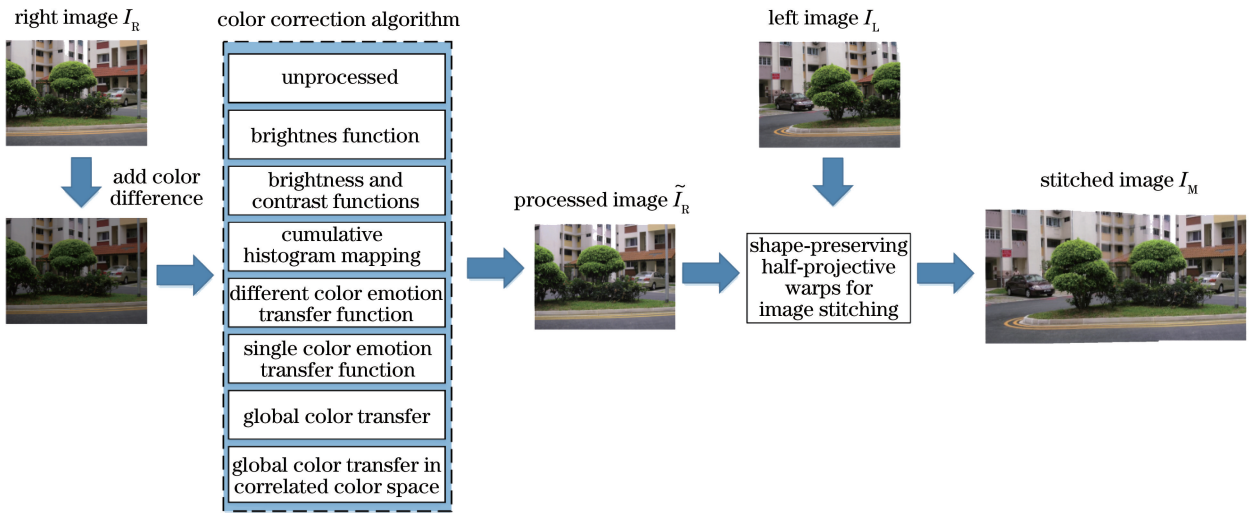


图 2 建库流程图

Fig. 2 Flow chart of building a database

1) 人工加色差,以右图像的原图像为基准,亮度为 0,对比度为 0,饱和度为 0,利用 Irfanview 软件给每组图像的右图像  $I_R$  加 5 组色差,形成 50 组色差图片序列,具体色差参数如表 2 所示。

2) 颜色校正,利用 7 种颜色校正算法对 50 组色差图片序列的右图像进行处理,得到 350 幅处理后的右图像  $\tilde{I}_R$ 。

表 2 色差参数

Table 2 Color difference parameters

Number of image	Brightness	Contrast	Saturation
01-20	-99	0	50
21-40	-50	20	-50
41-60	0	-60	50
61-80	50	0	100
81-100	-30	-30	-40

3) 图像拼接,利用保持形状半投影网格变形的图像拼接方法<sup>[17]</sup>将未处理的左图像  $I_L$  与处理后的右图像  $\tilde{I}_R$  进行拼接,得到拼接图像  $I_M$ 。场景 2 在色差 1 下的拼接结果如图 3 所示,其中基准图像为未经过颜色校正的拼接图像。

整个图像库共包含 400 幅拼接图像,存在的主要问题为颜色失真、结构失真、几何误差和拼接缝。其中颜色失真是指拼接图像的左右部分存在明显颜色差异;颜色传递不仅会改变图像颜色,还会改变图像结构,从而造成结构失真<sup>[7]</sup>;几何误差是指拼接过程中未对准所造成的几何偏移;而当拼接前左右图像序列出现严重色差时,拼接图像就会出现明显的拼接缝。上述图像库已在网上公开([https://pan.baidu.com/s/1HhO\\_e6Ns0DtMUn5enJBRiA](https://pan.baidu.com/s/1HhO_e6Ns0DtMUn5enJBRiA))。



图 3 场景 2 在色差 1 下的拼接结果。(a)左图像;(b)右图像;(c)算法 1;(d)算法 2;(e)算法 3;(f)算法 4;(g)算法 5;(h)算法 6;(i)算法 7;(j)基准图像

Fig. 3 Stitched results of scene 2 in case of color difference 1. (a) Left image; (b) right image; (c) Alg # 1; (d) Alg # 2; (e) Alg # 3; (f) Alg # 4; (g) Alg # 5; (h) Alg # 6; (i) Alg # 7; (j) standard image

## 2.3 主观测试实验与分析

### 2.3.1 观看条件

使用尺寸约为  $1.43 \text{ m} \times 0.81 \text{ m}$  的三星 UA65F9000 超高清三维发光二极管(3D-LED)显示器,该显示器具有低串扰水平,最高亮度可调整为  $50 \text{ cd/m}^2$ 。按照 ITU-R BT.500-11 标准<sup>[18]</sup>,显示屏幕和评测者之间的距离设置为屏幕高度的3倍。

### 2.3.2 评测者选定

在主观测试实验中,为了确保评测者具有代表性,要求评测者从不同年龄段、从事不同职业、不同性别的人群中选取。评测过程中,评测者应尽可能排除外界干扰,准确表达主观感受,确保实验的准确性<sup>[17]</sup>。本实验选择30名年龄为20~30岁的学生担任评测者,包括图像质量评价方面的专业和非专业人士,视觉正常,无色盲患者,其中男性、女性各15人。

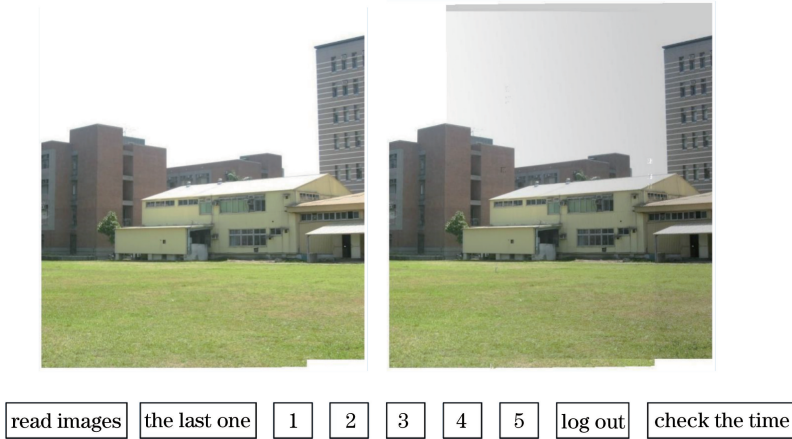


图4 打分界面

Fig. 4 Scoring interface

### 2.3.4 数据处理

在评测者对图像进行评分时,其情绪、动机和知识背景等因素均会直接或间接影响最终评分,如果直接取平均值,最终的结果会产生较大误差。因此,为了得到相对精确的结果,根据统计学知识,可计算每幅测试图像的平均值和95%置信区间,去掉区间外不合理的分数<sup>[19]</sup>。在本次实验中,剔除了区间外5名评测者的评分,利用剩余25人的主观打分计算平均主观得分差(DMOS)。

假设  $s_{mn}$  为评测者  $m$  对第  $n$  幅测试图像的评分,则参考图像和测试图像评分的差异值  $\Delta s_{mn}$  为

$$\Delta s_{mn} = 5 - s_{mn}, \quad (1)$$

式中5表示参考图像的评分。利用(1)式中的差异值可计算每幅拼接图像的Z-分数  $z_{mn}$ ,得到

### 2.3.3 评测者训练和测试

测试前,对评测者进行测试图像的训练是主观测试中必不可少的环节,目的是让评测者了解图像的好坏等级,使其能够完全领会评分目的和评测标准<sup>[19]</sup>。实验中,评测者主要从三个方面进行评定:1) 拼接图像整体颜色是否均匀,即图像左右是否存在严重色差;2) 拼接图像是否存在拼接缝;3) 拼接图像是否存在严重的几何变形。根据图像的好坏程度,评测者采取5级标度对色差拼接图像进行1~5分的评分(质量很差、差、一般、好、很好)。

测试时,各评测者单独测试,以防止测试过程中相互影响。打分界面如图4所示,评测者根据左侧参考图像直接对右侧图像进行打分,每幅测试图像的评分可参照参考图像和已评分的测试图像,且随时可以更改已评测分值。为了方便、高效地进行后期数据整理,每名评测者对整个色差拼接图像库的评分会按照打分顺序自动生成文本文件。

$$z_{mn} = \frac{\Delta s_{mn} - \mu_m}{\sigma_m} =$$

$$\left( \Delta s_{mn} - \frac{1}{25} \sum_{n=1}^{25} \Delta s_{mn} \right) / \sqrt{\frac{1}{24} \sum_{n=1}^{25} (\Delta s_{mn} - \mu_{mn})^2}, \quad (2)$$

式中  $\mu_m$  和  $\sigma_m$  分别为每名评测者全部评分的均值和标准差。将Z-分数通过线性映射重新调整到 $[0, 100]$ 的范围内<sup>[20]</sup>,可得:

$$z'_{mn} = 100(z_{mn} + 3) / 6. \quad (3)$$

最后,计算25名评测者重新调整的Z-得分平均值,进而得到每幅拼接图像的平均主观得分差为

$$Q_{\text{DMOS}} = \frac{1}{25} \sum_{n=1}^{25} z'_{mn}. \quad (4)$$

计算整个色差拼接图像库的DMOS值,其分布

情况如图 5 所示。

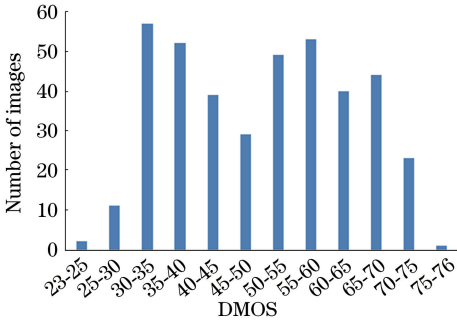


图 5 DMOS 值的分布情况

Fig. 5 Distribution of DMOS values

### 3 所提评估方法

为了综合评估色差拼接图像的质量,分别从拼接前图像序列和拼接图像提取特征:针对拼接前图像序列,提取基于 SRRR 的色彩相似性和 FSIMc,以评估图像的色彩差异和结构差异;针对拼接图像,提取图像整体区域基于 SIFT 差值的几何误差度量和局部区域 VSI,以评估拼接图像的几何误差和拼接缝的程度;最后融合 4 个特征,通过 SVR 算法建立特征与质量之间的关系模型,得到所提出的 CSIQA 方法。该方法完整流程如图 6 所示。

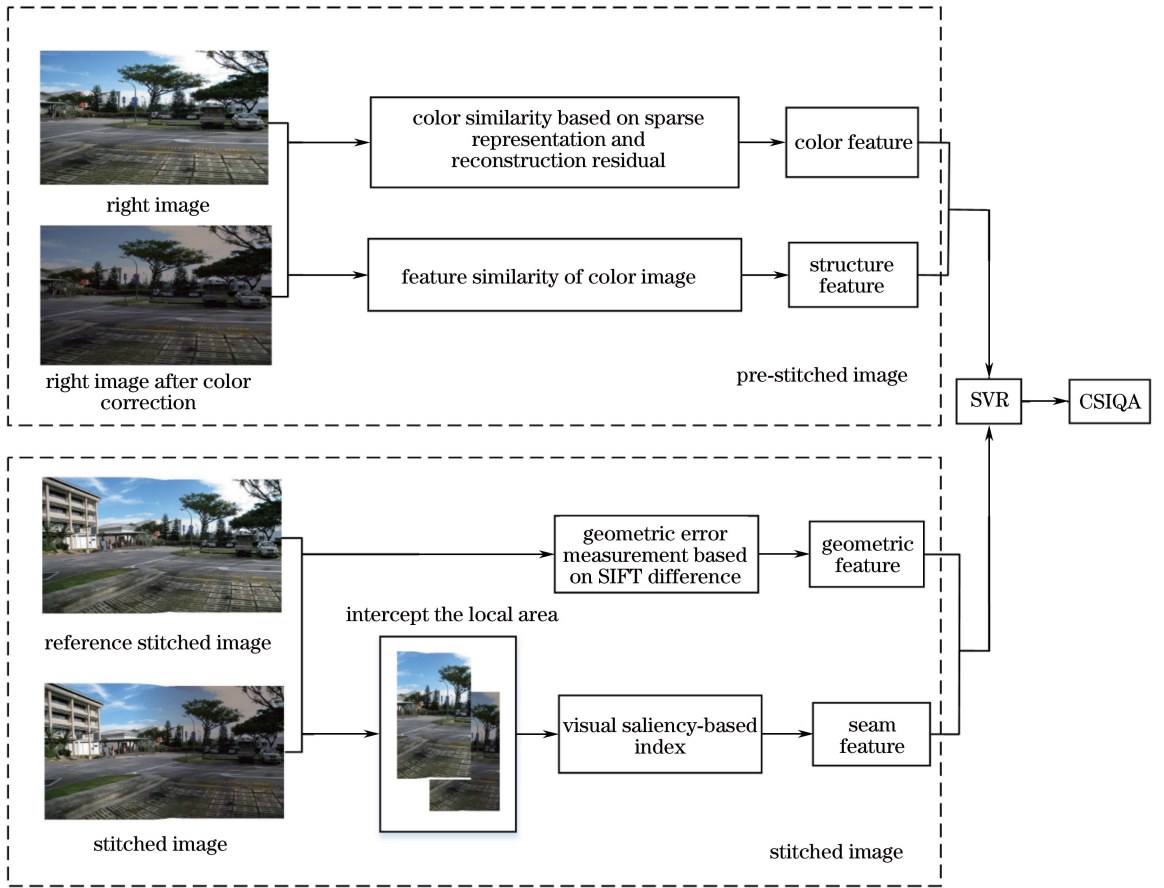


图 6 所提方法的流程图

Fig. 6 Flow chart of the proposed method

#### 3.1 色彩差异特征

色彩差异特征主要用来评估处理前后图像  $I_R$ 、 $\tilde{I}_R$  之间的色彩差异,通过基于 SRRR 的色彩图像质量特征进行衡量<sup>[21]</sup>。假设原始图像  $I_R$  特征图为  $F_o$ ,失真图像  $\tilde{I}_R$  特征图为  $F_d$ ,则  $I_R$  和  $\tilde{I}_R$  某一对应像素点  $x$  的稀疏特征相似性可定义为

$$S'_{FM}(x) = \frac{2F_o(x) \cdot F_d(x) + a_1}{[F_o(x)]^2 + [F_d(x)]^2 + a_1} \quad (5)$$

为了突出残差图像中的结构特征,使用 Scharr

梯度算子进一步计算原始图像、失真图像与其对应残差图像的梯度,分别用  $G_o$  和  $G_d$  表示,则原始图像和失真图像某一对应像素点的重建残差相似性可定义为

$$S'_{RR}(x) = \frac{2G_o(x) \cdot G_d(x) + a_2}{[G_o(x)]^2 + [G_d(x)]^2 + a_2} \quad (6)$$

式中  $a_1$  和  $a_2$  为确保数值稳定的常数,取  $a_1 = 1.27$ ,  $a_2 = 49$ 。

假设  $\omega$  为  $F_o$  和  $F_d$  之间的权重,则  $\omega$  与稀疏特

征的相似度组合分数  $S_{FM}$  可表示为

$$S_{FM} = \sum_{x \in \Omega} S'_{FM}(x) \cdot \omega(x) / \sum_{x \in \Omega} \omega(x), \quad (7)$$

$\omega$  与重建残差的相似度组合分数  $S_{RR}$  可表示为

$$S_{RR} = \sum_{x \in \Omega} S'_{RR}(x) \cdot \omega(x) / \sum_{x \in \Omega} \omega(x), \quad (8)$$

式中  $\omega(x) = \max[F_o(x), F_d(x)]$ ,  $\Omega$  为图像的整体空域。

亮度对感知质量具有较大影响,因此,在最终的特征中必须考虑亮度信息。结合  $S_{FM}$ 、 $S_{RR}$  与文献[22]中的亮度相似度  $S_{LS}$ ,即可得到基于  $S_{RR}$  的色彩相似性:

$$S_{SRRR} = \eta \cdot S_{FM} + \xi \cdot S_{RR} + \psi \cdot S_{LS}, \quad (9)$$

式中  $\eta$ 、 $\xi$  和  $\psi$  为常数,在本实验中  $\eta = 0.3$ 、 $\xi = 0.45$ 、 $\psi = 0.25$ 。

### 3.2 结构特征

结构特征主要用来评估处理前后图像  $I_R$ 、 $\tilde{I}_R$  之间的结构差异,通过  $FSIM_c$  来衡量<sup>[23]</sup>。假设  $P_o$  和  $P_d$  分别表示从  $I_R$  和  $\tilde{I}_R$  中提取的相位一致性,则图像的相似度度量可分为两部分,即:

$$S_{PC}(x) = \frac{2P_o(x) \cdot P_d(x) + b_1}{P_o^2(x) + P_d^2(x) + b_1}, \quad (10)$$

$$S_{GM}(x) = \frac{2G_o(x) \cdot G_d(x) + b_2}{G_o^2(x) + G_d^2(x) + b_2}, \quad (11)$$

式中参数  $G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}$ ,  $G_x$ 、 $G_y$  分别为水平和垂直方向上的梯度值,  $b_1$ 、 $b_2$  为常数,取  $b_1 = 0.85$ 、 $b_2 = 160$ 。

结合  $S_{PC}$  和  $S_{GM}$ ,可得到原始图像与失真图像之间的相似性  $S_{PG}$  为

$$S_{PG}(x) = S_{PC}(x) \cdot S_{GM}(x), \quad (12)$$

对于给定的像素点  $x$ ,可使用  $P_m = \max[P_o(x), P_d(x)]$  调节  $S_{PG}$  在图像质量测量中的重要性<sup>[24]</sup>。

将原始 RGB 图像转换到 YIQ 颜色空间<sup>[25]</sup>,该颜色空间可区分图像的亮度和色度。假设  $C_o^1$ 、 $C_o^2$  和

$C_d^1$ 、 $C_d^2$  分别代表原始图像和失真图像两个色度通道的色度分量,则图像色度之间的相似度可定义为

$$S_{CS}(x) = \frac{2C_o^1(x) \cdot C_d^1(x) + b_3}{[C_o^1(x)]^2 + [C_d^1(x)]^2 + b_3} \cdot \frac{2C_o^2(x) \cdot C_d^2(x) + b_3}{[C_o^2(x)]^2 + [C_d^2(x)]^2 + b_3}, \quad (13)$$

式中  $b_3$  为调节因子。

衡量结构特征的  $FSIM_c$  可定义为

$$S_{FSIM_c} = \frac{\left\{ \sum_{x \in \Omega} S_{PG}(x) \cdot [S_{CS}(x)]^\lambda \cdot P_m(x) \right\}}{\sum_{x \in \Omega} P_m(x)}, \quad (14)$$

式中  $\lambda$  为调节因子,调节色度信息在所有颜色信息中的权重,本实验中  $\lambda = 0.03$ ,  $\Omega$  为图像的整体空域。

### 3.3 几何特征

几何特征主要衡量参考图像  $I_M^{ref}$  与拼接图像  $I_M$  之间的几何误差,拼接左右图像  $I_L$ 、 $I_R$  得到参考图像  $I_M^{ref}$ ,通过计算  $I_M^{ref}$  和拼接图像  $I_M$  之间 SIFT 特征的偏移量来衡量。首先计算  $I_M^{ref}$  和  $I_M$  每个对应像素点  $x$  的 SIFT 差值<sup>[26]</sup>,得到:

$$D(x) = \Delta v_x^2 + \Delta v_y^2, \quad (15)$$

式中  $\Delta v_x$ 、 $\Delta v_y$  分别为参考图像和拼接图像的 SIFT 特征在水平和垂直方向的差值。

应用显著对象检测模型<sup>[27]</sup>生成针对每个参考图像的特征为  $F$  的注意力加权图,则第  $n$  幅拼接图像的 SIFT 差值可表示为

$$S_{SIFT}(n) = \log \left[ \sum \sum F(x) \cdot D(x) \right] + k, \quad (16)$$

式中  $k$  为常数,为了使归一化的数据相对统一,取  $k = 10$ 。

对  $S_{SIFT}(n)$  进行归一化处理,则第  $n$  幅拼接图像基于 SIFT 差值的几何误差度量可表示为

$$S_{\Delta SIFT}(n) = \frac{\max[S_{SIFT}(n), 1 \leq n \leq 400] - S_{SIFT}(n)}{\max[S_{SIFT}(n), 1 \leq n \leq 400] - \min[S_{SIFT}(n), 1 \leq n \leq 400]}, \quad (17)$$

式中 400 表示整个色差拼接图像库中图像的总数量。

### 3.4 缝特征

缝特征主要用来评估拼接图像  $I_M$  的拼接缝,通过计算  $I_M^{ref}$  和  $I_M$  之间的 VSI 来衡量。视觉显著性(VS)的作用是双重的,在计算拼接图像的局部质量图时,将 VS 用作特征;当汇集最后特征质量得分时,VS 被视为加权函数反映局部区域的重要性<sup>[28]</sup>。

参考图像与拼接图像之间的相似度度量可分为三个分量,分别用于 VS、梯度和色度。首先将 RGB 图像转换到一个对立的颜色空间<sup>[29]</sup>,转换权重为

$$\omega_{opponent} = \begin{bmatrix} 0.06 & 0.63 & 0.27 \\ 0.30 & 0.04 & -0.35 \\ 0.34 & -0.60 & 0.17 \end{bmatrix}, \quad (18)$$

该转换权重针对人类视觉系统进行优化<sup>[30]</sup>。在对立

的颜色空间亮度通道上利用(11)式计算参考图像与拼接图像的梯度相似性 $\hat{S}_{GM}$ ,其他两个通道代表色度通道,在两个颜色通道利用(13)式计算色度相似性 $\hat{S}_{CS}$ ,其可描述颜色失真所造成的图像质量劣化。

原始图像与失真图像的视觉显著性 $V_o$ 和 $V_d$ 之间的相似性可定义为

$$S_{VS}(\mathbf{x}) = \frac{2V_o(\mathbf{x}) \cdot V_d(\mathbf{x}) + c_1}{V_o^2(\mathbf{x}) + V_d^2(\mathbf{x}) + c_1}, \quad (19)$$

式中 $c_1$ 为常数。

结合梯度相似性 $\hat{S}_{GM}$ 、色度相似性 $\hat{S}_{CS}$ 和视觉显著性相似性 $S_{VS}$ ,可得衡量缝特征的度量,即:

$$S_{VSI} = \left\{ \sum_{\mathbf{x} \in \Delta\Omega} S_{VS}(\mathbf{x}) \cdot [\hat{S}_{GM}(\mathbf{x})]^\alpha \cdot \right.$$

$$\left. [\hat{S}_{CS}(\mathbf{x})]^\beta \cdot V_m(\mathbf{x}) \right\} / \sum_{\mathbf{x} \in \Delta\Omega} V_m(\mathbf{x}), \quad (20)$$

式中 $V_m(\mathbf{x}) = \max[V_o(\mathbf{x}), V_d(\mathbf{x})]$ 为调节因子, $\alpha$ 、 $\beta$ 为用于调整视觉显著性、梯度和色度三个分量相对权重的参数,取 $\alpha = 0.4$ , $\beta = 0.02$ , $\Delta\Omega$ 为包含拼接缝的局部区域。

### 3.5 特征融合

将提取的基于SRRR的色彩相似性、FSIMc、基于SIFT差值的几何误差度量以及VSI这4个特征进行融合,通过SVR算法建立特征与质量之间的关系模型<sup>[10]</sup>,可得到色差拼接图像的预测分数 $S$ 。对 $S$ 进行归一化处理,最终得到颜色校正的拼接图像的质量评估分数CSIQA,即:

$$S_{CSIQA} = \frac{\max[S(n), 1 \leq n \leq 400] - S(n)}{\max[S(n), 1 \leq n \leq 400] - \min[S(n), 1 \leq n \leq 400]}, \quad (21)$$

式中 $S(n)$ 为第 $n$ 幅拼接图像的预测分数。

## 4 实验结果与分析

### 4.1 对比评价方法

采用斯皮尔曼等级次序相关系数(SROCC)衡量评价结果的单调性,该指标只衡量数据点之间的等级次序,无需考虑数据点之间的相对距离;采用皮尔逊线性相关系数(PLCC)衡量DMOS值与非线性回归后客观观值CSIQA之间的相关性,计算PLCC指标时,首先进行回归分析,建立客观分值与主观分值DMOS的非线性映射<sup>[24]</sup>。图7为采用所提评价方法在图像库上得到的散点图,从散点图和拟合曲线看,本文评价方法的预测分数值均匀分布在拟合曲线两边,证明其可以有效评估含有色差拼接图像库的质量。

表3给出了本文方法与其他评价方法在色差拼

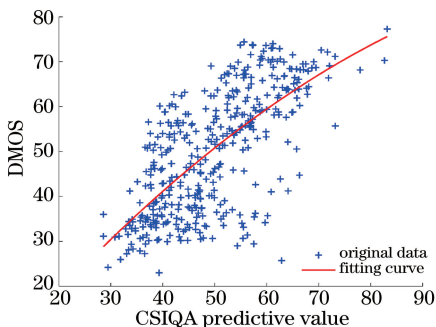


图7 本文方法的预测值与DMOS的关系曲线

Fig. 7 Relationship between predicted value of the proposed method and DMOS

接图像库上的PLCC和SROCC值,其中PLCC和SROCC的值越接近1,说明客观评价方法与主观分值DMOS相关性越好。从表3结果可以看出,本文方法的PLCC和SROCC值都高于单个特征的评价方法。

表3 本文方法的PLCC和SROCC值

Table 3 PLCC and SROCC values of the proposed method

Metric	PLCC	SROCC
SRRR	0.5547	0.6076
FSIMc	0.4361	0.4633
$\Delta$ SIFT	0.1271	0.125
VSI	0.1677	0.2595
<b>CSQIA</b>	<b>0.6676</b>	<b>0.6508</b>

### 4.2 同种色差条件下,不同场景,不同算法之间的对比

在整个拼接图像库上计算全部的CSQIA分数,测试7种颜色校正方法。色差2条件下,10种场景在不同颜色校正算法下的对比结果如表4所示,其中加粗上标“\*”标注同一场景下校正效果最好的算法;加粗上标“ $\Delta$ ”标注同一算法中适应性最好的场景;加粗标注以上两种情况的结合;Alg # 8代表没有经过颜色处理。由表4结果可知,场景1、3、8中,方法Alg # 6校正后得到的拼接效果最好,且相对于基准方法Alg # 8,其拼接效果都有所改善,例如场景3中,方法Alg # 6相对于基准方法Alg # 8,最终拼接图的CSIQA分数提高了0.16202;场景2、6、9中,方法Alg # 7得到的最终拼接图效果最好,例如场景2中,方法Alg # 7相对于基准方法

Alg # 8, 拼接图的 CSQA 分数提高了 0.13110; 其他 4 个场景中, 分别是方法 Alg # 1、Alg # 2 处理后

的拼接图像效果最好, 且相对于基准方法 Alg # 8 都有所改善。

表 4 色差 2 条件下经不同颜色校正算法处理后 10 种场景的 CSQA 分数

Table 4 CSQA scores of 10 scenes processed by different color correction algorithms under color differences condition 2

Scene	Alg # 1	Alg # 2	Alg # 3	Alg # 4	Alg # 5	Alg # 6	Alg # 7	Alg # 8
Scene 1	0.8084	0.8093	0.5909	<b>0.7839<sup>Δ</sup></b>	0.7934	<b>0.8151<sup>*</sup></b>	0.7913	0.8066
Scene 2	0.7779	0.7460	0.7157	0.5409	0.5047	0.8047	<b>0.9165<sup>°</sup></b>	0.7854
Scene 3	0.7176	0.7974	<b>0.8178<sup>Δ</sup></b>	0.2293	0.7211	<b>0.9953</b>	<b>0.9833<sup>Δ</sup></b>	0.8333
Scene 4	0.8262	<b>0.8353</b>	0.4152	0.5431	0.3020	0.7290	0.7290	0.8006
Scene 5	<b>0.8315<sup>*</sup></b>	0.6520	0.5833	0.3972	0.4801	0.7837	0.7325	0.7417
Scene 6	0.7429	0.7778	0.8017	0.5973	0.6688	0.7801	<b>0.8248<sup>°</sup></b>	0.7183
Scene 7	<b>0.8569</b>	0.8220	0.5883	0.6379	<b>0.8185<sup>Δ</sup></b>	0.8531	0.7945	0.8304
Scene 8	0.7087	0.7000	0.7376	0.6963	0.7294	<b>0.8630<sup>*</sup></b>	0.5571	0.7155
Scene 9	0.7132	0.7300	0.3512	0.5880	0.6357	0.7704	<b>0.7938<sup>°</sup></b>	0.7635
Scene 10	0.6955	<b>0.7824<sup>*</sup></b>	0.5332	0.7610	0.7542	0.7551	0.4506	0.7706

为了更清晰地观察 7 种算法对最终拼接图像的改善情况, 表 5 给出了在色差 2 条件下, 采用 7 种颜色校正算法和基准方法 Alg # 8 处理后得到的 CSQA 值的差值, 其中正数代表通过此种颜色校正算法后, 拼接图像的质量得到改善, 负数代表劣化。由表 4 结果可知, 算法 Alg # 3、Alg # 4、Alg # 5 处理后, 10 个场景的拼接图像与基准方法 Alg # 8 相

比, CSQA 分数几乎都降低, 即拼接图像质量变差。在 7 种颜色校正算法中, 方法 Alg # 6 得到的 CSQA 分数相比于基准方法 Alg # 8 都有所提高 (除场景 4 和场景 10 外), 在所有颜色校正算法中对拼接图像改善效果最好。其他三种颜色校正算法得到的 CSQA 分数在 10 个场景中, 接近一半场景的分数下降, 一半场景的分数上升。

表 5 不同场景下不同颜色校正算法与基准算法之间的 CSQA 差值

Table 5 CSQA differences between different color correction algorithms and benchmark algorithms in different scenes

Scene	Alg # 1	Alg # 2	Alg # 3	Alg # 4	Alg # 5	Alg # 6	Alg # 7	Alg # 8
Scene 1	0.0018	0.0027	-0.2157	-0.0228	-0.0132	0.0084	-0.0153	0.0000
Scene 2	-0.0075	-0.0394	-0.0696	-0.2445	-0.2807	0.0193	0.1311	0.0000
Scene 3	-0.1157	-0.0359	-0.0155	-0.6039	-0.1122	0.1620	0.1500	0.0000
Scene 4	0.0256	0.0347	-0.3854	-0.2575	-0.4986	-0.0716	-0.0716	0.0000
Scene 5	0.0898	-0.0897	-0.1584	-0.3445	-0.2616	0.0420	-0.0092	0.0000
Scene 6	0.0247	0.0595	0.0835	-0.1209	-0.0495	0.0619	0.1066	0.0000
Scene 7	0.0265	-0.0084	-0.2422	-0.1925	-0.0119	0.0227	-0.0360	0.0000
Scene 8	-0.0068	-0.0156	0.0221	-0.0192	0.0139	0.1475	-0.1585	0.0000
Scene 9	-0.0503	-0.0335	-0.4123	-0.1755	-0.1278	0.0069	0.0303	0.0000
Scene 10	-0.0751	0.0118	-0.2374	-0.0096	-0.0164	-0.0155	-0.3200	0.0000

#### 4.3 同种场景下, 不同色差之间的比较

不同色差下, 相对于 Alg # 8 分析颜色校正算法对拼接的影响。对表 6 中的数据进行处理可得表 7 结果, 即不同色差下的 CSQA 的差值。从表 7 结果可知, 颜色失真程度会影响颜色校正效果, 比如在

色差 1 下, 7 种颜色校正方法中有 4 种改善了拼接效果; 而在色差 5 下, 仅有两种颜色校正方法改善了拼接结果, 其他 5 种方法劣化了拼接效果。综上所述可知, 颜色失真程度会影响颜色校正算法改善或劣化拼接图像质量。

表 6 同种场景下不同色差的 CSQA 的值

Table 6 CSQA values with different color differences in same scene

Color difference	Alg # 1	Alg # 2	Alg # 3	Alg # 4	Alg # 5	Alg # 6	Alg # 7	Alg # 8
Color difference 1	0.4551	0.6052	0.7047	0.4082	0.4276	0.9129	0.9481	0.5635
Color difference 2	0.7779	0.7460	0.7157	0.5409	0.5047	0.8047	0.9165	0.7854
Color difference 3	0.2942	0.4081	0.7084	0.2924	0.4494	0.6628	0.6890	0.5286
Color difference 4	0.3380	0.4059	0.6979	0.4148	0.4062	0.7912	0.8587	0.8304
Color difference 5	0.4914	0.6541	0.7082	0.6226	0.6808	0.9061	0.8600	0.7213



表7 不同色差下CSIQA的差值

Table 7 CSIQA differences under different color differences

Color difference	Alg #1	Alg #2	Alg #3	Alg #4	Alg #5	Alg #6	Alg #7	Alg #8
Color difference 1	-0.1084	0.0417	0.1412	-0.1553	-0.1359	0.3494	0.3846	0.0000
Color difference 2	-0.0075	-0.0394	-0.0696	-0.2445	-0.2807	0.0193	0.1311	0.0000
Color difference 3	-0.2344	-0.1205	0.1798	-0.2362	-0.0793	0.1341	0.1604	0.0000
Color difference 4	-0.4924	-0.4245	-0.1325	-0.4156	-0.4243	-0.0392	0.0283	0.0000
Color difference 5	-0.2299	-0.0672	-0.0131	-0.0987	-0.0405	0.1847	0.1387	0.0000

## 5 结 论

为了更有效地评价各种图像拼接算法,进而设计性能更优的图像拼接算法,提出了一种基于颜色校正的拼接图像质量评价方法。从拼接前图像序列和拼接图像提取特征提取4个特征并融合后,通过SVR算法建立特征与质量之间的关系模型,完成预测色差拼接图像质量。在所建立的含有5种色差的拼接图像库(400幅图像)中进行实验,结果表明所提方法有效,可以用来优化含有色差图像的拼接算法。除此之外,本文探究了不同颜色校正算法对拼接图像的影响,分析比较了同种色差条件下,不同场景、不同算法之间性能差异;以及同种场景下,不同色差对评价结果的影响。

## 参 考 文 献

- [1] Bang S, Kim H, Kim H. UAV-based automatic generation of high-resolution panorama at a construction site with a focus on preprocessing for image stitching [J]. *Automation in Construction*, 2017, 84: 70-80.
- [2] Chen H X, Duan M J. Clinical application and value analysis of digital radiography (DR) image stitching technique in orthopedics [J]. *Journal of Imaging Research and Medical Applications*, 2018, 2(1): 46-47.  
陈红霞, 段敏俊. 数字X线摄影(DR)图像拼接技术在骨科的临床应用及价值分析[J]. *影像研究与医学应用*, 2018, 2(1): 46-47.
- [3] Gao L L, Liu J J, Ren X, *et al.* Image quality evaluation of panoramic camera stereopair based on structural similarity [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(7): 071004.  
高露露, 刘建军, 任鑫, 等. 基于结构相似度的全景相机立体像对图像质量评价[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(7): 071004.
- [4] Zhao T, Kang H L, Zhang Z P. Fast image mosaic algorithm based on area blocking and BRISK [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(3):

031005.

赵婷, 康海林, 张正平. 结合区域分块的快速BRISK图像拼接算法[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(3): 031005.

- [5] Wu W S, Feng H J, Xu Z H, *et al.* Optical image mosaic methods based on MEMS gyroscope [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(3): 0310001.  
伍文双, 冯华君, 徐之海, 等. 基于MEMS陀螺仪的光学图像拼接[J]. *光子学报*, 2018, 47(3): 0310001.
- [6] Paalanen P, Kämäräinen J K, Kälviäinen H. Image based quantitative mosaic evaluation with artificial video [C] // *Scandinavian Conference on Image Analysis (SCIA)*, 2009: 470-479.
- [7] Xu W, Mulligan J. Performance evaluation of color correction approaches for automatic multi-view image and video stitching [C] // *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2010: 263-270.
- [8] Cheung G, Yang L Y, Tan Z G, *et al.* A content-aware metric for stitched panoramic image quality assessment [C] // *IEEE International Conference on Computer Vision Workshops (ICCVW)*, 2017: 2487-2494.
- [9] Qureshi H S, Khan M M, Hafiz R, *et al.* Quantitative quality assessment of stitched panoramic images [J]. *IET Image Processing*, 2012, 6(9): 1348-1358.
- [10] Chang C C, Lin C J. LIBSVM: a library for support vector machines [J]. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*, 2011, 2(3): 1-27.
- [11] Kim S J, Pollefeys M. Robust radiometric calibration and vignetting correction [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2008, 30(4): 562-576.
- [12] Zhou M, Jin K, Wang S Z, *et al.* Color retinal image enhancement based on luminosity and contrast adjustment [J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2018, 65(3): 521-527.
- [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] He L, Qi H R, Zaretzki R. Image color transfer to evoke different emotions based on color combinations [J]. Signal, Image and Video Processing, 2015, 9(8): 1965-1973.
- [15] Reinhard E, Adhikhmin M, Gooch B, *et al.* Color transfer between images [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2001, 21(5): 34-41.
- [16] Xiao X, Ma L. Color transfer in correlated color space[C] // ACM International Conference on Virtual Reality Continuum and its Applications (VRCIA), 2006: 305-309.
- [17] Chang C H, Sato Y, Chuang Y Y. Shape-preserving half-projective warps for image stitching[C] // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2014: 3254-3261.
- [18] International Telecommunication Union. ITU-R BT. 500-11 methodology for the subjective assessment of the quality of television pictures [S]. Geneva: International Telecommunication Union, 2002.
- [19] Zhang Y J, Li S M, Wei J J, *et al.* Subjective quality evaluation method of stereo image [J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(5): 602-607.  
张英静, 李素梅, 卫津津, 等. 立体图像质量的主观评价方案[J]. 光子学报, 2012, 41(5): 602-607.
- [20] Seshadrinathan K, Soundararajan R, Bovik A C, *et al.* Study of subjective and objective quality assessment of video[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2010, 19(6): 1427-1441.
- [21] Li L D, Xia W H, Fang Y M, *et al.* Color image quality assessment based on sparse representation and reconstruction residual [J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2016, 38: 550-560.
- [22] Chang H W, Yang H, Gan Y, *et al.* Sparse feature fidelity for perceptual image quality assessment [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2013, 22(10): 4007-4018.
- [23] Zhang L, Zhang L, Mou X Q, *et al.* FSIM: a feature similarity index for image quality assessment [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2011, 20(8): 2378-2386.
- [24] Chu J, Chen Q, Yang X C. Review on full reference image quality assessment algorithms [J]. Application Research of Computers, 2014, 31(1): 13-22.  
褚江, 陈强, 杨曦晨. 全参考图像质量评价综述 [J]. 计算机应用研究, 2014, 31(1): 13-22.
- [25] Yang C C, Kwok S H. Efficient gamut clipping for color image processing using LHS and YIQ [J]. Optical Engineering, 2003, 42(3): 701-711.
- [26] Liu C, Yuen J, Torralba A. SIFT flow: dense correspondence across scenes and its applications [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 33(5): 978-994.
- [27] Schölkopf B, Platt J, Hofmann T. Graph-based visual saliency [C] // International Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS), 2006: 545-552.
- [28] 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.
- [29] Geusebroek J M, van den Boomgaard R, Smeulders A W M, *et al.* Color invariance [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2001, 23(12): 1338-1350.
- [30] Geusebroek J M, van den Boomgaard R, Smeulders A W M, *et al.* Color and scale: the spatial structure of color images [C] // European Conference on Computer Vision (ECCV), 2000: 331-341.