

引用格式:邓云辉,孔祥阳,彭群聂.基于色度分析与L1加权正则的镜面高光抑制算法[J].电光与控制,2018,25(8):39-42,59. DENG Y H, KONG X Y, PENG Q N. Specular highlight suppression algorithm based on chromaticity analysis and L1-weighted regularization[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(8):39-42, 59.

基于色度分析与L1加权正则的镜面高光抑制算法

邓云辉¹, 孔祥阳^{1,2}, 彭群聂³

(1. 四川工程职业技术学院基础教学部,四川 德阳 618000; 2. 西北工业大学自动化学院,西安 710129;
3. 光电控制技术重点实验室,河南 洛阳 471000)

摘要:针对成像过程中镜面高光掩盖目标表面特征,从而影响诸多视觉应用的问题,提出一种基于色度分析与L1加权正则约束的镜面高光抑制算法。该算法不依赖于聚类、分割等前期处理;结合目标图像强度分布,提出了中值无高光机制(MSF),有效分离高光分量,抑制噪声干扰;同时联合色度分析与局部色彩相关性进行L1加权正则约束,融合变量分裂法进行快速求解,高效恢复目标原有的纹理、色彩和边缘等细节信息。实验结果表明,对于不同目标场景,该算法能实现镜面高光分量的准确抑制分离,目标原有的纹理结构、色彩等特征得到极大保留,算法可靠性强,计算时效性高。

关键词: 镜面高光; MSF; 色度分析; 局部色彩相关性; L1加权正则约束

中图分类号: TP391 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2018.08.008

Specular Highlight Suppression Algorithm Based on Chromaticity Analysis and L1-weighted Regularization

DENG Yun-hui¹, KONG Xiang-yang^{1,2}, PENG Qun-nie³

(1. Department of Basic Teaching, Sichuan Engineering Technical College, Deyang 618000, China;
2. Automation School, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China;
3. Science and Technology on Electro-Optic Control Laboratory, Luoyang 471000, China)

Abstract: To solve the problem that the specular highlight covers the surface features during the imaging process and thus hinders many visual applications, this paper proposes a novel specular highlight suppression algorithm based on chromaticity analysis and L1-weighted norm regularization constraints. This method doesn't rely on such preprocessing procedures as clustering and segmentation. By using the distribution of image intensity, the Median Specular-Free (MSF) mechanism is put forward to effectively separate highlight components and suppress noise interference. Meanwhile, by combining the chromaticity analysis with local chromaticity correlation, the L1-weighted norm regularization is carried out. Then, the variables splitting strategy is introduced to realize fast optimization, and the inherent details of the targets were effectively restored, such as their texture, color and edges. Experimental results demonstrate that our method can realize accurate suppression and separation of highlight components, and preserve the original characteristics of the targets to a great extent. This algorithm is highly reliable with increased computational efficiency.

Key words: specular highlight; MSF; chromaticity analysis; local chromaticity correlation; L1-weighted regularization

0 引言

目标成像过程中,由于光源环境与目标表面材质

特性的综合影响,目标图像极易受镜面高光的干扰。镜面高光强度高、分布区域广,掩盖了目标表面原有的细节纹理、色彩特征,直接影响着检测、识别跟踪等视觉应用性能。现有的视觉处理算法^[1-2]大多假定观测目标表面为理想朗伯体面,将镜面高光视为噪声处理,其结果不可避免地出现大区域数据空洞以及边缘细节丢失等问题。因此,如何实时有效分离抑制图像镜面高光分量具有较高的研究意义与应用价值。

收稿日期:2018-04-03 修回日期:2018-05-19

基金项目:国家自然科学基金(61371152)

作者简介:邓云辉(1961—),男,四川德阳人,学士,副教授,研究方向为数论、数学模型与算法。

目前国内外针对单幅图像的镜面高光抑制分离已开展了一些探究。文献[3]基于亮度的非线性校正实现直方图均衡拉伸,该方法仅利用亮度信息提高视觉效果,不具有场景普适性;文献[4]发现在RGB色彩空间中,镜面高光像素和漫反射像素近似T形分布,进而采用主成分分析来分离镜面高光分量;文献[5-6]充分利用色度分布,提出高光-漫反射机制(Specular-Diffuse Scheme),拟估计漫反射分量强度,有效分离镜面高光;文献[7-8]则利用强度比和色度聚类来约束,逐步迭代消除镜面高光分量的干扰;文献[9]结合暗通道先验,对色度、边界联合约束优化,获取漫反射分量强度的最优估计,但算法复杂度高、实效性差。以上高光抑制方法均依赖于先验信息与假设,或聚类分割等前期操作,虽能有效实现镜面高光的分离抑制,但忽略了目标表面色彩、纹理和边界等细节信息丢失问题,视觉特性受到严重影响。

针对现有高光抑制算法存在的不足,本文提出一种基于色度分析与L1加权正则约束的镜面高光高效抑制算法。不依赖于过多先验假设和前期操作,提出了MSF机制,准确有效抑制高光分量;结合色度分析与局部色彩相关性进行L1加权正则约束,融合变量分裂法快速优化求解,高效保留了目标原有的纹理、色彩和边缘等细节信息,进一步增强了高光抑制结果的视觉效果,其算法场景适应性强、计算复杂度低、易于工程实现。

1 算法过程分析

1.1 双色反射模型

根据文献[10]的双色反射模型,对于非匀质目标,光线在经该类物体表面发生反射时,会产生镜面反射和漫反射效应,即在成像过程中,目标图像中会同时存在镜面高光分量与漫反射分量,且图像总强度为二者的线性加权和,其强度表达式为

$$I(x) = \rho_d(x) \int_{\Omega} F(\lambda, x) E(\lambda) q(\lambda) d\lambda + \rho_s(x) \int_{\Omega} E(\lambda) q(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

式中: I 为图像强度; x 为二维坐标; Ω 为光谱范围; λ 为波长; $F(\cdot)$ 为材质光谱反射率函数; $q(\cdot)$ 为相机光谱响应函数; $E(\cdot)$ 为光源功率分布函数; ρ_d, ρ_s 分别代表漫反射分量和镜面高光分量的加权因子,二者的权值分别与目标表面材质的理化特性和几何分布有关。

定义漫反射分量强度 D 和镜面高光分量强度 S 分别为

$$D(x) = \int_{\Omega} F(\lambda, x) E(\lambda) q(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

$$S(x) = \int_{\Omega} E(\lambda) q(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

则式(1)可简化为漫反射分量强度与镜面高光分量强度的线性加权模型,即

$$I(x) = \rho_d(x) D(x) + \rho_s(x) S(x) \quad (4)$$

1.2 中值无高光机制(MSF)

基于中性界面反射的假设^[5],镜面高光分量的光谱能量分布等同于光源的光谱能量分布,且可见光波段范围内光源能量密度恒定。则高光分量强度可近似等于环境光源强度(白光);而针对非均匀白光光源条件,可利用色彩恒常性算法进行归一化估计,即有 $S = [255, 255, 255]^T$ 。

定义 $I_{\min}(x) = \min\{I_r(x), I_g(x), I_b(x)\}$,且 $D_{\min}(x) = \min\{D_r(x), D_g(x), D_b(x)\}$,则对于每个像素点 x ,满足如下差分关系

$$\begin{bmatrix} \Delta I_r(x) \\ \Delta I_g(x) \\ \Delta I_b(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_r(x) \\ I_g(x) \\ I_b(x) \end{bmatrix} - I_{\min}(x) = \rho_d(x) \begin{bmatrix} D_r(x) - D_{\min}(x) \\ D_g(x) - D_{\min}(x) \\ D_b(x) - D_{\min}(x) \end{bmatrix} \quad (5)$$

由式(5)可知,最小差分图像 ΔI 与镜面高光分量强度 S 无关,而仅与目标表面的漫反射分量强度 D 有关,即可知该差分图像能有效保持原漫反射分量的理化特性。但注意到差分图像 ΔI 中必有一通道强度值为零,满足 $\Delta I \leq D$,可能导致高光抑制结果受噪声影响严重,且易出现色彩失真、边缘不连续等问题。为解决此问题,本文提出了一种快速高效的自适应中值无高光机制(MSF)来估计漫反射分量。该机制根据图像强度分布特征进行自适应补偿,解决了差分图像零值问题,进而能有效地抑制噪声的放大与色彩失真,具有较强的场景适应性。其表达式为

$$I_{\text{MSF}}(x) = \Delta I(x) + C_{\text{med}} \quad (6)$$

式中, C_{med} 为目标图像的自适应中值因子,其算式为

$$C_{\text{med}} = \text{median}\{D_{\min}(x)\}_{x=1,2,\dots,N} \quad (7)$$

式中, N 为像素总数。结合式(6)、式(7)可知,中值无高光图像 I_{MSF} 在最小差分图像基础上,根据目标图像的强度分布进行自适应中值强度补偿,一方面能有效避免某通道强度零值而导致噪声放大和色彩不连续等问题,另一方面亦能保持目标表面原有的纹理、结构等理化特征。

1.3 色度分析

色度作为图像色彩通道归一化强度比,能有效反映目标表面的色彩及纹理分布。为探究上述MSF机制的准确性,本文对上述估计的 I_{MSF} 进行色度空间转换,其对应的色度图像为

$$A(x) = \frac{I_{\text{MSF}}(x)}{I_{\text{MSF}}^r(x) + I_{\text{MSF}}^g(x) + I_{\text{MSF}}^b(x)} \quad (8)$$

式中, $\mathbf{A}(x) = [\mathbf{A}^r(x), \mathbf{A}^g(x), \mathbf{A}^b(x)]^T$ 。

针对场景一的目标图像,图1展示了本文估计的 I_{MSF} 及相应的色度图像与 Yoon 算法 I_{SF} 及其色度图像的效果对比。

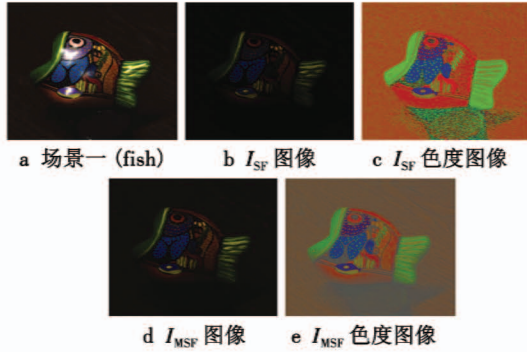


图1 场景一 $I_{\text{SF}}, I_{\text{MSFF}}$ 与色度图像

Fig. 1 $I_{\text{SF}}, I_{\text{MSFF}}$ and chromaticity images of Scene 1

从图1可以看出,场景中镜面高光的存在,直接覆盖了目标图像真实色彩信息和纹理结构分布。其中, Yoon 算法的 I_{SF} 结果存在着明显的色彩失真及边缘不连续情况,同时其色度图像受噪声影响较为严重。而本文的 I_{MSFF} 结果作为漫反射分量的初始估计,能实现快速分离镜面高光分量的同时,极大程度地保留了目标表面原本纹理结构特征及边缘信息,且对应的色度图像中噪声及边缘失真等问题也得到了有效抑制。

1.4 局部色彩相关性加权正则

由1.2节可知,本文提出的 I_{MSFF} 是针对图像全局进行逐像素处理,虽能获取漫反射分量的有效估计,但忽略了目标表面的局部空间特性。对于复杂场景,可能导致镜面高光分离后的结果中局部区域出现边缘不连续、细节模糊等问题。基于之前的工作探究^[11],目标表面普遍存在空间局部色彩相关特性。因此,本文联合色度分布与空间局部色彩相关性对估计的漫反射分量 I_{MSFF} 进行加权正则化约束,同时融合变量分裂法 (Variables Splitting) 实现 L1 正则项的快速优化求解,有效恢复高光抑制后丢失的局部细节信息,进一步提高抑制结果的视觉效应。

对于漫反射分量,结合色度信息对其进行 L1 加权正则约束,则有

$$\mathbf{W}(x, y) |D(x) - D(y)| \Leftrightarrow \|\mathbf{W} \circ (\mathbf{H} \otimes D)\|_1 \quad (9)$$

式中: \mathbf{H} 为一阶前向差分算子; \otimes 表示卷积; \circ 表示矩阵乘积; D 为漫反射分量强度; \mathbf{W} 为色度权重函数矩阵,其表达式为

$$\mathbf{W}(x, y) = e^{-\|\mathbf{A}(x) - \mathbf{A}(y)\|^2 / 2\sigma^2} \Leftrightarrow \mathbf{W} = e^{-\sum_{i=r,g,b} |D \otimes \mathbf{A}^i|^2 / 2\sigma^2} \quad (10)$$

由于目标表面局部空间色彩高度相关,由上式可知,对于同反射区域相邻的两像素 x 和 y ,色度差异小,其分配的权重函数 \mathbf{W} 较大;而两像素分别属于边界像

素时, $\mathbf{A}(x), \mathbf{A}(y)$ 差值大, $\mathbf{W} \rightarrow 0$,从而完全符合目标表面色彩局部分布特性。综上,本文利用局部色彩相关性对漫反射分量 D 进行 L1 加权正则约束,其能量方程为

$$\arg \min_D \frac{\lambda}{2} \|D - D_0\|^2 + \|\mathbf{W} \circ (\mathbf{H} \otimes D)\|_1 \quad (11)$$

式中: λ 为加权系数; D_0 为漫反射分量的初始估计,即 $D_0 = I_{\text{MSFF}}$ 。针对上式能量方程最小值问题,梯度下降法计算效率低,且易收敛于局部极小值。为提高算法实时性,本文融合变量分裂法,通过引入中间变量,将上述能量函数优化问题转化为独立求解子变量问题,且其解收敛于原能量函数的最优解。

引入 ν 临时变量,则式(11)等效为

$$\arg \min_D \frac{\lambda}{2} \|D - D_0\|^2 + \|\mathbf{W} \circ \nu\|_1 + \frac{\beta}{2} \|\nu - \mathbf{H} \otimes D\|^2 \quad (12)$$

式中, β 为变化系数,可知当 $\beta \rightarrow \infty$ 时,式(12)收敛于能量方程式(11)的最优解。对于式(12)多变量优化问题,本文采用交替迭代法进行求解,其优化的具体过程如下。

1) 固定 D , 优化 ν 。

针对式(12),固定 D ,则能量最小化方程为

$$\min \|\mathbf{W} \circ \nu\|_1 + \frac{\beta}{2} \|\nu - \mathbf{H} \otimes D\|^2 \quad (13)$$

类似一维变量的极值求解,目标函数式(13)等效为

$$\arg \min_{\nu} |w \cdot \nu| + \frac{\beta}{2} (\nu - a)^2 \quad (14)$$

式中, w, a 和 β 已知,对上式直接求导,即可得

$$\nu^* = \max(|a| - \frac{w}{\beta}, 0) \cdot \text{sign}(a) \quad (15)$$

2) 固定 ν , 优化 D 。

求解式(15)固定 ν ,则能量最小化方程为

$$\min \frac{\lambda}{2} \|D - D_0\|^2 + \frac{\beta}{2} \|\nu - \mathbf{H} \otimes D\|^2 \quad (16)$$

可知式(16)为 D 的二次函数,对其求导,则有

$$\lambda(D - D_0) + \beta \cdot \mathbf{H}^T \otimes (\mathbf{H} \otimes D - \nu) = 0 \quad (17)$$

式中, T 为转置。由于存在两次卷积 D ,为方便计算,对上式进行傅里叶变换,将时域转化为频域求取 D 的最优解,其表达式为

$$D^{\text{opt}} = F^{-1} \left(\frac{\frac{\lambda}{\beta} F(D_0) + \overline{F(\mathbf{H})} \circ F(\nu)}{\frac{\lambda}{\beta} + \overline{F(\mathbf{H})} \circ F(\mathbf{H})} \right) \quad (18)$$

式中, $\overline{(\cdot)}$ 为复共轭, $F(\cdot)$ 为二维傅里叶变换, $F^{-1}(\cdot)$ 为逆变换。将上述两步重复迭代,直至其解收敛,则可求得能量方程的最优解 D^{opt} 。

2 实验结果与分析

本文实验以 Intel i7 CPU, 4 GB 内存的处理机和

Matlab 为仿真平台,以两组不同场景的目标图像作为实验对象。该类目标由于表面光滑,具有镜面高反射性,成像过程中受到了不同程度镜面高光的影响,导致其纹理细节被掩盖。根据高光抑制效果、色彩保真度、局部纹理细节信息及算法时效性等主客观指标,对本文算法性能进行实验探究,并与 Yoon, Shen 算法结果进行定量定性的对比分析。

针对场景一 (fish), 该目标图像中存在大面积离散分布的镜面高光区域,其对应的高光抑制结果及其局部纹理细节分别如图 2、图 3 所示。

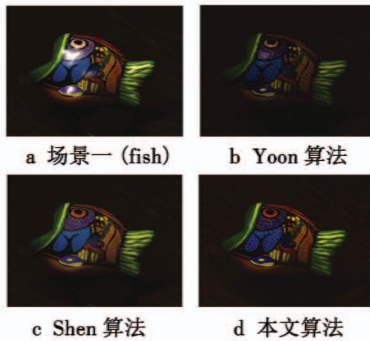


图 2 场景一—高光抑制结果

Fig. 2 Highlight suppression results of Scene 1

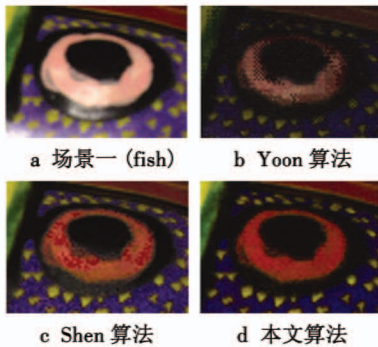


图 3 局部纹理细节

Fig. 3 Local texture details of Scene 1

由图 2 可知,针对场景一中存在的大区域镜面高光,本文算法与现有算法均能获得很好的分离抑制结果。但从图 3 的局部细节中可看出, Yoon 算法的抑制结果中出现了局部区域数据空洞,纹理细节丢失,并且色彩失真严重; Shen 算法的抑制结果中,其鱼眼部分区域出现边缘不连续,噪声效应明显;相比以上算法,本文提出的高光抑制算法有效结合中值无高光机制与 L1 正则约束,能高效地恢复目标表面原有的纹理结构特征,同时边缘、色彩信息等细节信息得到极大程度的恢复。

针对于场景二的目标图像 (wood), 不同物体的表面均受到了不同程度的镜面高光影响,高光分布离散且强度差异大。其高光抑制结果如图 4 所示。

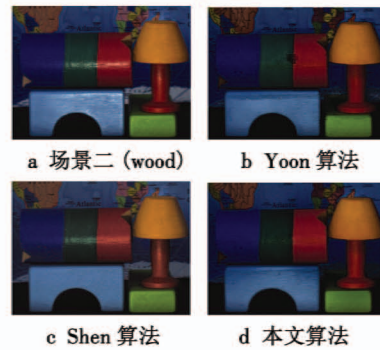


图 4 场景二—高光抑制结果

Fig. 4 Highlight suppression results of Scene 2

由图 4 可以看出, Yoon 算法的结果中,高光分离效果良好,但在边缘处出现大区域的数据空洞,色彩畸变失真; Shen 算法的结果由于聚类算法失效,其高光分离抑制效果显然不足;而本文的抑制算法基于目标表面局部色彩相关性约束,有效避免了分离过程中出现数据丢失、色彩畸变、纹理结构模糊等问题,高光分量抑制结果更为精确彻底,视觉效应更为明显。

以上两组场景目标的图像分辨率与算法运行时间对比如表 1 所示。

表 1 目标图像分辨率及算法时间

Table 1 The pixel resolution and runtime

场景	图像分辨率/像素	Yoon 算法运行时间/s	Shen 算法运行时间/s	本文算法运行时间/s
fish	640 × 480	120.531	2.047	1.955
wood	271 × 230	19.466	0.523	0.498

综合以上视觉效应和算法时效性可知,本文提出的基于 MSF 机制与 L1 正则约束的镜面高光抑制算法充分联合图像的强度分布与局部色彩相关特征,准确地实现了镜面高光分量的分离,同时目标表面的纹理结构、边缘、色彩等细节特征得到了有效恢复,噪声得到有效抑制;同时算法不依赖分割、聚类前期处理,算法可靠、场景适应性强,计算时效性优异。

3 结束语

镜面高光的分离抑制研究一直是跟踪、识别等视觉应用中的难题。本文提出了基于色度分析与 L1 加权正则约束的镜面高光抑制算法,不依赖于分割、聚类前期处理,有效抑制了噪声放大问题;提出 MSF 机制,结合色度分析和局部色彩一致性正则约束,同时融合变量分裂法进行快速优化求解,实现了镜面高光分量的精确分离抑制,极大程度保留了目标原有的边缘、纹理、色彩等细节信息。相对于现有算法,本文算法在高光抑制结果的准确性和计算时效性上更为优异。

(下转第 59 页)

- adaptive color-based particle filter[J]. *Image and Vision Computing*, 2003, 21(1):99-110.
- [2] CHENG Y Z. Mean shift, mode seeking, and clustering [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1995, 17(8):790-799.
- [3] LEI Y, DING X Q, WANG S J. Visual tracker using sequential Bayesian learning; discriminative, generative, and hybrid[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 2008, 38(6):1578-1591.
- [4] DONOHO D L. Compressed sensing [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(4):1289-1306.
- [5] ZHANG K H, ZHANG L, YANG M H. Real-time compressive tracking [C]//*Proceedings of the 12th European Conference on Computer Vision*, 2012:864-877.
- [6] 朱秋平, 颜佳, 张虎, 等. 基于压缩感知的多特征实时跟踪[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(2):437-444.
- [7] 张路平, 韩建涛, 李飏, 等. 尺度自适应特征压缩跟踪 [J]. *国防科技大学学报*, 2013, 35(5):146-151.
- [8] 沈秋, 严小乐, 刘霖枫, 等. 基于自适应特征选择的多尺度相关滤波跟踪[J]. *光学学报*, 2017(5):166-175.
- [9] DALAL N, TRIGGS B. Histograms of oriented gradients for human detection [C]//*IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2005:886-893.
- [10] DANELLJAN M, HÄGER G, KHAN F, et al. Accurate scale estimation for robust visual tracking [C]//*Proceedings of the British Machine Vision Conference (BMVC)*, 2014:1-11.
- [11] HARE S, GOLODETZ S, SAFFARI A, et al. Struck; structured output tracking with kernels [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2016, 38(10):2096-2109.

(上接第42页)

参考文献

- [1] 刘李旭, 戴鑫志, 侯振宇, 等. 基于光栅投影法的3D扫描技术研究[J]. *电光与控制*, 2017, 24(6):101-105.
- [2] 汤一平, 宗明理, 吴立娟. 基于双色反射模型的彩色结构光颜色识别的研究[J]. *计算机学报*, 2013, 36(9):1908-1916.
- [3] CHEN T B, GOESELE M, SEIDEL H P. Mesostructure from specularly [C]//*IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2006:1825-1832.
- [4] KLINKER G J, SHAFER S A, KANADE T. A physical approach to color image understanding [J]. *International Journal of Computer Vision*, 1990, 4(1):7-38.
- [5] TAN R T, IKEUCHI K. Separating reflection components of textured surfaces using a single image [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2005, 27(2):178-193.
- [6] YANG Q X, WANG S N, AHUJA N. Real-time specular highlight removal using bilateral filtering [C]//*Computer Vision ECCV*, 2010:87-100.
- [7] YOON K J, CHOI Y, KWEON I S. Fast separation of reflection components using a specularly-invariant image representation [C]//*IEEE International Conference on Image Processing*, 2006:973-976.
- [8] SHEN H L, ZHENG Z H. Real-time highlight removal using intensity ratio [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(19):4483-4493.
- [9] KIM H, JIN H, HADAP S, et al. Specular reflection separation using dark channel prior [C]//*IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2013:1460-1467.
- [10] SHAFER S A. Using color to separate reflection components [J]. *Color Research & Application*, 1985, 10(4):210-218.
- [11] ZHAO Y Q, PENG Q N, XUE J Z, et al. Specular reflection removal using local structural similarity and chromaticity consistency [C]//*IEEE International Conference on Image Processing*, 2015:3397-3401.