

基于结构相似性感知的引导图像滤波

韩博 孙忠贵

(聊城大学 数学科学学院, 山东 聊城 252059)

摘要 借助引导图像对滤波过程进行指导,引导滤波器取得了较为理想的滤波输出,并在图像处理领域引起广泛关注.然而,现有滤波算法,如联合双边滤波,引导图像滤波等往往忽略图像间的结构差异性,从而导致其滤波输出容易产生纹理复制的缺陷.为解决这一问题,本文首先提出一个能够精确反映两图像结构关系的新指标,即结构相似性感知.继而在此基础上设计出一个新的引导滤波改进方法.相对现有滤波算法,该方法能够根据图像间的相似性自适应选择引导图像结构,从而有效避免了纹理复制的缺陷.

关键词 联合双边滤波; 引导图像滤波; 纹理复制; 结构相似性感知

中图分类号 TP391

文献标识码 A

0 引言

信息社会,数字图像的应用已渗透到交通运输,城市安防,医疗诊断,工业检测,航空航天,气象预测等人类生产生活的各个领域.然而,由于成像设备,环境和传输条件的限制,现有图像获取过程难免会受到噪声,光照,天气,遮挡等因素的影响,从而造成成像质量下降,并给后续图像分析,检测,识别等任务带来较大困难和挑战.图像滤波则是改善数字图像质量的一种重要技术手段.给定一幅待处理的目标图像,根据滤波过程中有无引导图像的参与,可以将现有滤波算法大致分成两类,即自引导滤波与(他)引导滤波.

所谓自引导滤波,即在对目标图像进行处理的过程中仅依赖其自身结构信息的一类方法.比较有代表性算法包括双边滤波(Bilateral filtering, BF)^[1],非局部均值(Non-local means, NLM)^[2]滤波,区域协方差(Region covariance, RC)滤波^[3],如全变分(Total variation, TV)^[4],加权最小二乘(Weighted least square, WLS)^[5],L₀范数梯度最小化(L₀ gradient minimization, LOGM)^[6],相对全变分(Relative total variation, RTV)^[7]等.其中,BF,NLM,RC通过加权均值的方式完成对目标图像的处理;TV,WLS,LOGM,RTV分别通过优化采用1范数,2范数,0范数和加权1范数对滤波输出的梯度进行约束的目标函数完成处理过程.尽管这些方法在图像去噪^[1,2,4],去纹理^[5-7],细节增强^[5,6]等任务中有着广泛的应用,然而,它们通常也存在着对噪声不够鲁棒,滤波输出过光滑,不易加速等缺陷^[8].此外,在现实生活中,受诸多因素的干扰,目标图像自身往往不能提供准确可靠的结构信息.这无疑给上述自引导滤波方法的应用带来了较大限制.自然地,借助一幅相对可靠的引导图像的结构信息指导对目标图像进行处理的方法,即引导滤波(或称联合滤波)引起了研究者的广泛关注.

在引导滤波方法中,一个代表性算法为 Petschnigg 等人提出的联合双边滤波(Joint bilateral filtering, JBF)^[9]和 He 等人提出的引导图像滤波(Guided image filtering, GIF)^[10].从某种意义上说,JBF 是对 BF 的直接推广,它将 BF 从目标图像自身获取权重的方式转向从引导图像获取.这一思想首先在闪光灯-非闪光

收稿日期:2020-04-13

基金项目:国家自然科学基金项目(11801249);山东省自然科学基金项目(ZR2019BA011);聊城大学实验教项目(26322170128)资助

通讯作者:孙忠贵,男,汉,博士,副教授,研方向:图像处理与机器学习,E-mail:altlp@nuaa.edu.cn.

灯图像去噪^[9]任务中获得了巨大成功,随后被广泛应用于彩色-近红外图像增强^[11],彩色-深度图像超分辨^[12]等任务.然而,由于其非线性性,JBF不仅具有较高的计算复杂度,也容易导致滤波输出边缘处产生亮暗交替现象,即梯度反转(Gradient reversal)^[5,10].与此相反,GIF假定滤波输出与引导图像成局部线性关系,确保了图像滤波前后梯度方向的一致性,克服了JBF面临的梯度反转.此外,GIF的计算复杂度与滤波窗口半径无关,这也使它成为了当前最为高效的图像滤波算法之一.最近,Li等人提出的加权引导图像滤波(Weighted guided image filtering, WGIF)^[13]对GIF进行了改进.具体来说,通过引入边缘感知权重, WGIF能够对GIF中的正则化参数进行自适应调整,在抑制光晕的同时实现锐化边缘的更好保护.

需要指出的是,上述引导滤波算法均假设引导图像与目标图像的结构一致.然而,这一假设在实际应用中并不总是成立,尤其当这两幅图像是由不同传感器或不同条件下获得时.一旦引导图像包含了未出现在目标图像中的结构,这些结构极易被错误传递到滤波输出,从而导致纹理复制(Texture copy)的缺陷^[14,15],并不可避免会对后续的图像处理任务造成干扰.

为解决这一问题,本文首先提出了结构相似性感知(Structure similarity aware, SSA),以准确刻画引导图像与目标图像结构差异,继而提出一种改进的引导滤波方法,即基于结构相似性感知的引导图像滤波(Guided image filtering based on structure similarity aware, SSA-GIF).为验证所提方法的有效性,本文在彩色-深度图像数据集^[16]进行了一系列实验.结果表明,相对现有算法,SSA-GIF有效避免了滤波输出中的纹理复制缺陷.

1 联合双边滤波与引导图像滤波

1.1 联合双边滤波(Joint bilateral filtering, JBF)

给定一对配准后的图像,包含待处理的目标图像 I 和引导图像 G ,对其中任意像素 i ,JBF^[9]与BF^[1]一样将其滤波输出表示为以 i 为中心,半径为 r 的局部窗口 ω_i 内像素灰度值的加权平均,即

$$q_i = \frac{1}{K_i} \sum_{j \in \omega_i} S_{ij} R_{ij} I_j, \quad (1)$$

其中 $K_i = \sum_{j \in \omega_i} S_{ij} R_{ij}$ 为归一化常数; S_{ij} 和 R_{ij} 分别度量像素 i 和 j 之间的空间相似性和灰度相似性,通常被称为空间核和值域核,数学表达如

$$S_{ij} = \exp\left(-\frac{(x_i - x_j)^2}{2\sigma_s^2}\right), R_{ij} = \exp\left(-\frac{(G_i - G_j)^2}{2\sigma_r^2}\right), \quad (2)$$

这里 x_i 和 x_j 分别为像素 i 和 j 的空间坐标, G_i , G_j 为引导图像 G 在像素 i 和 j 的灰度值; σ_s 和 σ_r 为两个可调整的平滑参数.

1.2 引导图像滤波(Guided image filtering, GIF)

不同于JBF^[9]的非线性模型,GIF^[10]假定目标图像 I 的滤波输出 q 与引导图像 G 在局部窗口中成局部线性关系,即

$$q_i = a_k G_i + b_k, \forall i \in \omega_k, \quad (3)$$

其中 a_k , b_k 为线性系数,在滤波窗口 ω_k 中为常数,通过最小化如下目标函数求解

$$E(a_k, b_k) = \sum_{i \in \omega_k} ((a_k G_i + b_k - I_i)^2 + \epsilon a_k^2), \quad (4)$$

这里 ϵ 是正则化参数,用于对较大的 a_k 施加惩罚.令上述目标函数对 a_k , b_k 的偏导数为零,可得

$$a_k = \frac{\text{cov}(G_k, I_k)}{\text{var}(G_k) + \epsilon}, \quad (5)$$

$$b_k = \bar{I}_k - a_k \bar{G}_k, \quad (6)$$

其中 \bar{G}_k , \bar{I}_k 分别为 G 与 I 在 ω_k 中的均值, $\text{var}(G_k)$ 是 G 在 ω_k 中的方差, $\text{cov}(G_k, I_k)$ 是 G 和 I 在 ω_k 中的协方差,其具体定义如

$$\bar{G}_k = \frac{1}{|\omega|} \sum_{i \in \omega_k} G_i, \bar{I}_k = \frac{1}{|\omega|} \sum_{i \in \omega_k} I_i, \quad (7)$$

$$\text{var}(G_k) = \frac{1}{|\omega|} \sum_{i \in \omega_k} (I_i - \bar{I}_k)^2, \quad (8)$$

$$\text{cov}(G_k, I_k) = \frac{1}{|\omega|} \sum_{i \in \omega_k} G_i I_i - \bar{G}_i \bar{I}_i, \quad (9)$$

其中 $|\omega|$ 为 ω_k 中的像素个数.

需指出,由于滤波窗口重叠,即像素 i 通常被包含在多个窗口中.故,通过公式(3)将得到多个滤波输出.为解决这一问题,GIF将 i 所有可能的滤波输出的平均值作为其最终滤波输出,即

$$q_i = \frac{1}{|\omega|} \sum_{k|i \in \omega_k} (a_k G_i + b_k). \quad (10)$$

根据窗口的对称性^[10],公式(10)可以重写为

$$q_i = \bar{a}_i G_i + \bar{b}_i, \quad (11)$$

其中 \bar{a}_i , \bar{b}_i 分别为所有包含像素 i 的重叠窗口中线性系数 a_k , b_k 的平均值,即

$$\bar{a}_i = \frac{1}{|\omega|} \sum_{k \in \omega_i} a_k, \bar{b}_i = \frac{1}{|\omega|} \sum_{k \in \omega_i} b_k. \quad (12)$$

2 基于结构相似性感知的引导图像滤波

在现实生活中,引导图像 G 和目标图像 I 通常是由不同成像设备或传感器在不同成像条件下获得,因此,这两幅图像通常存在着较大的结构差异,如图1所示的彩色图像(a)比其深度图像(b)包含更丰富的纹理信息.由于忽略了两图像间结构差异,JBF^[9]和GIF^[10]直接采用彩色图像的结构指导对深度图像进行滤波的过程,使得原本未出现在深度图像的结构出现在了其滤波输出中,即纹理复制现象,如(g),(h)中黑色矩形区域所示.本文旨在克服JBF与GIF的这一缺陷.为此,首先提出了一种能够更加精确度量引导图像与目标图像的结构差异的指标.

2.1 结构相似性感知

给定一半径为 r 中心像素为 k 的局部滤波窗口 ω_k ,现存常用度量引导图像 G 和目标图像 I 在 ω_k 的结构关系的指标为归一化交叉相关(Normalized cross correlation,NCC)^[17],即

$$\rho_k^r = \left| \frac{\text{cov}(G_k, I_k)}{\sqrt{\text{var}(G_k) \text{var}(I_k) + \eta}} \right|, \quad (13)$$

其中 $\text{var}(G_k)$, $\text{var}(I_k)$ 分别为 G 和 I 在 ω_k 中的方差, $\text{cov}(G_k, I_k)$ 为其协方差; η 为一小的非负常数,防止分母为零.显然 η 越大 ρ_k^r 越小,然而 η 过大也将导致分母中的方差项失去主导作用,从而影响图像间结构相似性的度量.因此,为使 G 和 I 在对应边缘处的相似性度量尽可能准确,本文将 η 设置为 0.005. ρ_k^r 越大表明 G 和 I 在 ω_k 中的相似性越高,越小则表明其相似性越低.

需要指出的是,NCC对图像间结构相似性的刻画极易受局部滤波窗口半径 r 的影响,如图1(d)和(e)所示.可以看出,在半径较小的情况下($r=1$),NCC对 G (a)和 I (b)边缘关系的刻画较为准确,但在平坦和纹理区域则受噪声的影响较大,不够稳定.这是因为在半径较小的情况下,平坦和纹理区域的协方差和方差受噪声干扰计算不够准确.与此相反,在半径较大的情况下($r=5$),平坦和纹理区域的协方差和方差则对噪声有较强的鲁棒性,而边缘处协方差和方差的计算则不够准确,导致NCC在边缘处变得粗而模糊.为更加精确刻画两图像间的结构关系,本文采用较小和较大窗口半径下的NCC(即 ρ_k^r , $\rho_k^{r_0}$, $r < r_0$)的乘积 λ_k 作为 G 和 I 在 ω_k 中最终的结构相似性度量,即

$$\lambda_k = \rho_k^r \rho_k^{r_0}. \quad (14)$$

为便于描述,本文将这一新指标 λ_k 称之为结构相似感知(Structure similarity aware,SSA).如图1(f)所示, λ_k 兼顾了 ρ_k^r 与 $\rho_k^{r_0}$ 的优点,不仅对噪声具有较强的鲁棒性,也更加地精确刻画了(a)与(b)的结构关系,尤其是对图像边缘而言.

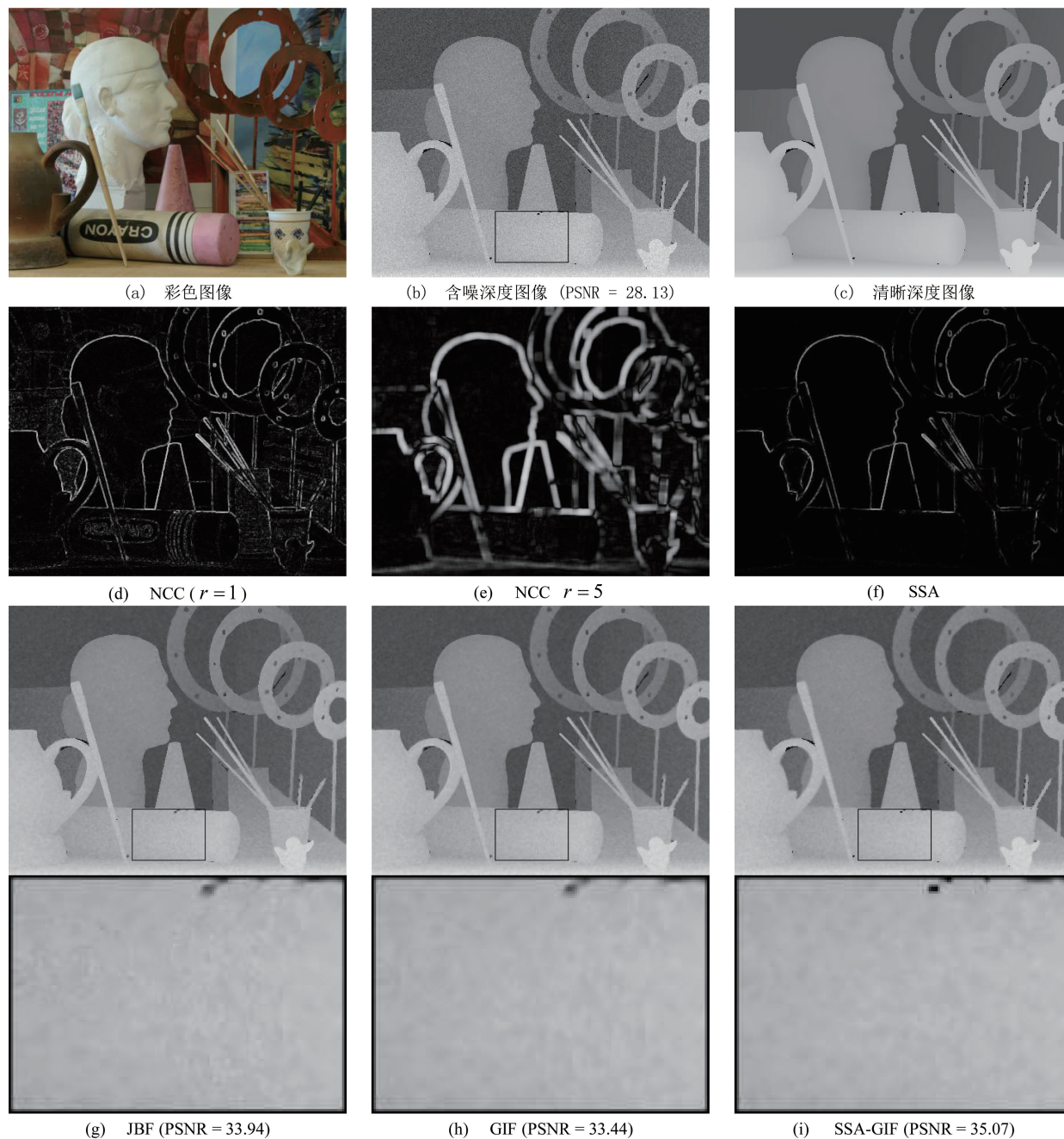


图1 彩色-深度图像恢复

2.2 目标函数

与 JBF 和 GIF 不同,本文遵循不完全依赖引导图像结构的准则,在结构相似性感知 λ 的帮助下,假设引导图像 G ,待滤波的目标图像 I 及其滤波输出 q 成如下线性关系

$$q_i = a_k(\lambda_k G_i + (1 - \lambda_k) I_i) + b_k, \forall i \in \omega_k, \quad (15)$$

其中 a_k, b_k 为 ω_k 中的线性系数,相应地,为最小化如下目标函数

$$E(a_k, b_k) = \sum_{i \in \omega_k} ((a_k(\lambda_k G_i + (1 - \lambda_k) I_i) + b_k - I_i)^2 + \epsilon a_k^2), \quad (16)$$

并分别对 a_k, b_k 求导并令其导数为零可得

$$a_k = \frac{\lambda_k \text{cov}(G_k, I_k) + (1 - \lambda_k) \text{var}(I_k)}{\lambda_k^2 \text{var}(G_k) + 2\lambda_k(1 - \lambda_k) \text{cov}(G_k, I_k) + (1 - \lambda_k)^2 \text{var}(I_k) + \epsilon}, \quad (17)$$

$$b_k = \bar{I}_k - a_k(\lambda_k \bar{G}_k + (1 - \lambda_k) \bar{I}_k). \quad (18)$$

类似于 GIF,为解决窗口重叠,最终滤波输出 q_i 有如下形式

$$q_i = \mu_i (G_i - I_i) + \bar{a}_i I_i + \bar{b}_i, \quad (19)$$

其中 μ_i , \bar{a}_i , \bar{b}_i 分别为所有包含像素 i 的窗口中 $a_k \lambda_k$, a_k , b_k 的平均值,即

$$\mu_i = \frac{1}{|\omega|} \sum_{k \in \omega_i} a_k \lambda_k, \bar{a}_i = \frac{1}{|\omega|} \sum_{k \in \omega_i} a_k, \bar{b}_i = \frac{1}{|\omega|} \sum_{k \in \omega_i} b_k. \quad (20)$$

为方便起见,本文将这种改进后的方法称之为基于结构相似性感知的引导图像滤波(Guided image filtering based on structure similarity aware, SSA-GIF).事实上,若 G 和 I 在 ω_k 中的结构不一致,即 $\lambda_k = 0$,由公式(15)(17)(18)可得

$$q_i = a_k I_i + b_k, a_k = \frac{\text{var}(I_k)}{\text{var}(I_k) + \epsilon}, b_k = (1 - a_k) \bar{I}_k, \quad (21)$$

它们均与引导图像 G 无关,此即 SSA-GIF 对目标图像 I 执行自引导滤波过程;若其结构一致,即 $\lambda_k = 1$,则

$$q_i = a_k G_i + b_k, a_k = \frac{\text{cov}(G_k, I_k)}{\text{var}(G_k) + \epsilon}, b_k = \bar{I}_k - a_k \bar{G}_k, \quad (22)$$

这时 SSA-GIF 对 I 执行传统引导滤波过程.因此,SSA-GIF 能够自适应选择引导图像中与目标图像相一致结构用于对其滤波过程的指导,从而在去除图像噪声,恢复图像边缘的过程中避免 JBF 和 GIF 面临的纹理复制,如图 1(i)所示.

算法 1 基于结构相似性感知的引导图像滤波.

(1) 输入引导图像 G , 目标图像 I , 滤波窗口半径 r , 正则化参数 ϵ ; (2) 根据公式(14), (17), (18) 分别计算结构相似性感知 λ 和线性系数 a , b ; (3) 根据公式(20)分别计算 $a\lambda$, a , b 的平均值 μ , \bar{a} , \bar{b} ; (4) 由公式(19)计算最终滤波输出 q .

算法 1 给出了本文所提改进算法 SSA-GIF 实现的伪代码.由于该过程中的每一步计算均可通过具有 $O(N)$ 复杂度的盒子滤波(Box filtering)^[10]快速实现,因此,SSA-GIF 与 GIF 一样,计算复杂度仍为 $O(N)$.在运行时间方面,对一幅大小为 370×463 的图像,JBF,GIF 和 SSA-GIF 完成其处理过程分别约需 1.78 秒,0.06 s 和 0.15 s.可见,SSA-GIF 是一个十分高效的改进方法,有利于实际推广应用.

3 实验

2.1 中图 1 呈现的滤波输出及相应放大结果已初步表明所提算法 SSA-GIF 能够有效避免纹理复制.为进一步对其有效性进行验证,本文在彩色-深度图像数据集^[16]进行了一系列实验(其中深度图像含有均值为零方差为 10 的高斯白噪声),并将其与 JBF^[9],GIF^[10]和近年提出的 WGIF^[13]的滤波输出进行比较.为保证实验的公平,分别从主观视觉效果与客观峰值信噪比(Peak Signal to Noise Ratio, PSNR)两方面对实验结果进行评价.所有算法均在 MATLAB R2017a 中实现,并在一台配置为 Intel(R) Core(TM) i5-7200U CPU @2.50GHz 2.70 GHz,内存为 8GB 的 PC 中执行,且各算法中的参数均调到最优水平,如表 1 所示.此外,在实验过程中,多通道图像被分开处理,且每个通道中的像素灰度被归整为 $[0, 1]$ 的范围内.

表 1 不同引导滤波方法中的参数设置

JBF	GIF	WGIF	SSA-GIF
$r = 2, \sigma_s = 1.5, \sigma_r = 0.02$	$r = 1, \epsilon = 0.02^2$	$r = 1, \epsilon = 0.02^2$	$r = 1, r_0 = 5, \epsilon = 0.1^2$

如图 2,图 3(d),(e),(f) 中的黑色矩形框区域所示,由于忽略了图像间的结构差异,JBF,GIF 和 WGIF 将彩色图像中未出现在深度图像中的结构传递到了滤波输出中,使其存在着纹理复制.与此相反,如图 2,图 3(g)所示,本文所提算法 SSA-GIF 在结构相似性感知的帮助下能够自适应筛选与深度图像相一致的彩色图像结构对其进行指导,从而避免了纹理复制.此外,滤波输出的 PSNR 指标也表明 SSA-GIF 在比较算法中取得了最好的去噪效果.

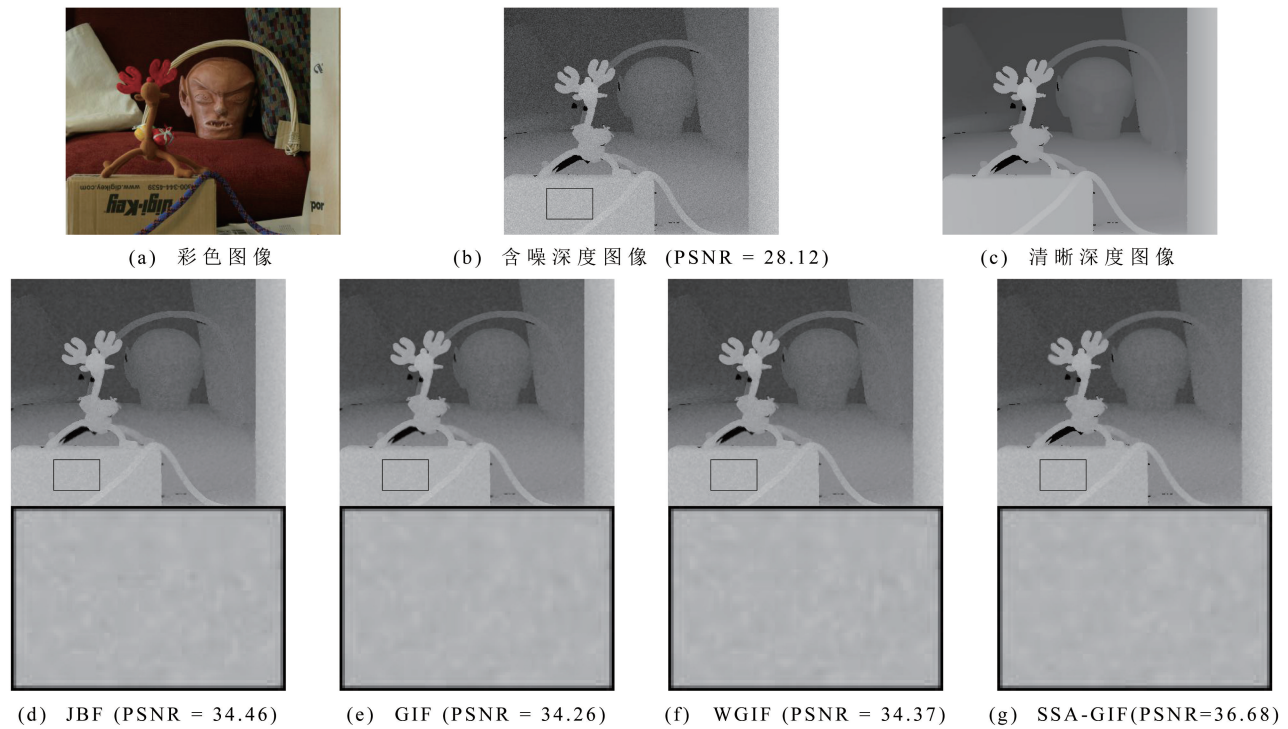


图2 彩色-深度图像恢复

4 结论

为克服联合双边滤波,引导图像滤波等现有引导滤波方法所面临的纹理复制缺陷,本文通过充分考虑两图像结构差异,提出了一个新的滤波方法,即基于结构相似性感知的引导图像滤波.相比现有算法,本文所设计的滤波器能够根据图像间的结构相似性,自适应地选择引导图像中的结构信息进行引导滤波,从而有效避免了现有引导滤波器中的纹理复制缺陷.

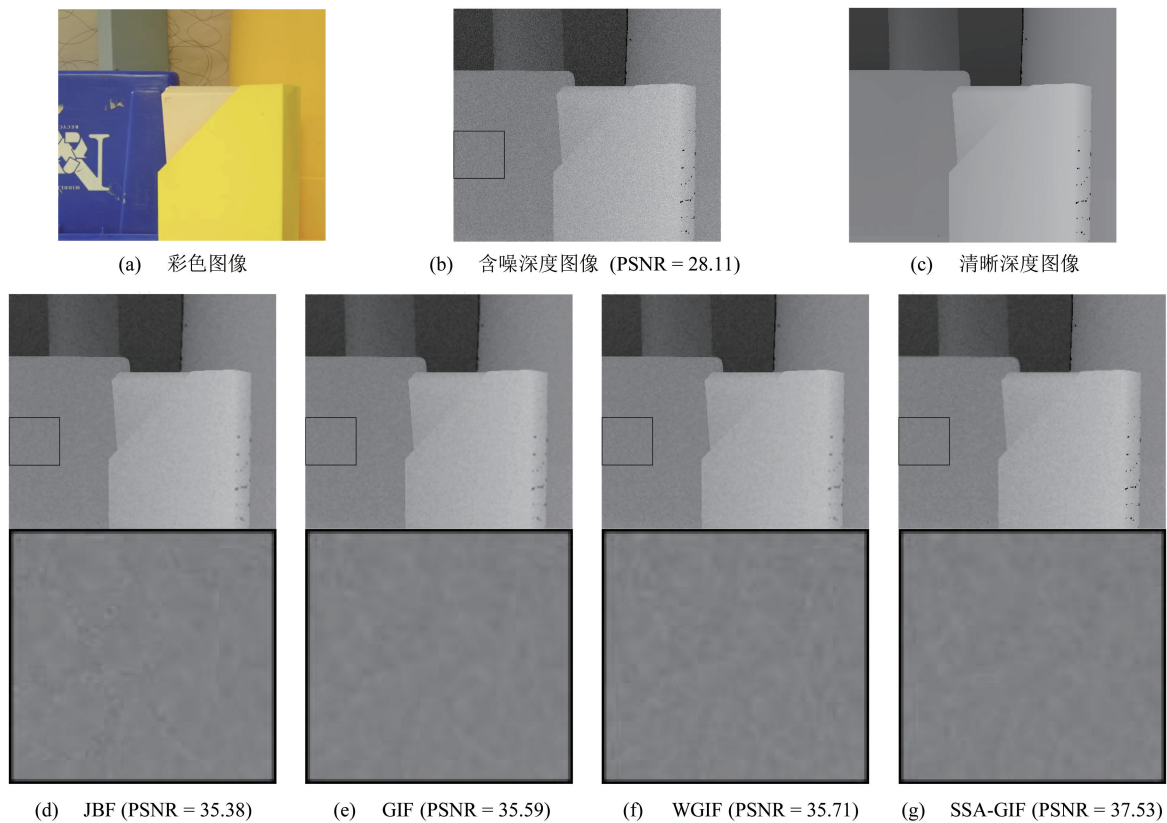


图3 彩色-深度图像恢复

参考文献

- [1] Tomasi C, Manduchi R. Bilateral Filtering for Gray and Color Images[C]. //IEEE International Conference on Computer Vision, 1998.
- [2] Buades A, Coll B, Morel J M. A Non-Local Algorithm for Image Denoising[C]. //IEEE Computer Vision and Pattern Recognition, 2005.
- [3] Karacan L, Erdem E, Erdem A. Structure-Preserving Image Smoothing via Region Covariances[J]. ACM Transactions on Graphics, 2013, 32(6): 1-11.
- [4] Rudin L I, Osher S, Fatemi E. Nonlinear Total Variation Based Noise Removal Algorithms[J]. Physica D: Nonlinear Phenomena, 1992, 60(1-4): 259-268.
- [5] Farbman Z, Fattal R, Lischinski D, et al. Edge-Preserving Decompositions for Multi-Scale Tone and Detail Manipulation[J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(3): 1-10.
- [6] Xu L, Lu C, Xu Y, et al. Image Smoothing via L₀ Gradient Minimization[J]. ACM Transactions on Graphics, 2011, 30(6): 1-12.
- [7] Xu L, Yan Q, Xia Y, et al. Structure Extraction from Texture via Relative Total Variation[J]. ACM Transactions on Graphics, 2012, 31(6): 1-10.
- [8] Cho H, Lee H, Kang H, et al. Bilateral Texture Filtering[J]. ACM Transactions on Graphics, 2014, 33(4): 1-8.
- [9] Petschnigg G, Szeliski R, Agrawala M, et al. Digital Photography with Flash and No-Flash Image Pairs[J]. ACM Transactions on Graphics, 2004, 23(3): 664-672.
- [10] He K, Sun J, Tang X. Guided Image Filtering[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2013, 35(6): 1397-1409.
- [11] Zhang X, Sim T, Miao X. Enhancing Photographs with near Infrared Images[C]. //IEEE Computer Vision and Pattern Recognition, 2008.
- [12] Kopf J, Cohen M F, Lischinski D, et al. Joint Bilateral Upsampling[J]. ACM Transactions on Graphics, 2007, 26(99): 96.
- [13] Li Z, Zheng J, Zhu Z, et al. Weighted Guided Image Filtering[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2015, 24(1): 120-129.
- [14] Chan D, Buisman H, Theobalt C, et al. A Noise-Aware Filter for Real-Time Depth Upsampling[C]. //European Conference on Computer Vision, 2008.
- [15] Liu W, Chen X, Yang J, et al. Robust Color Guided Depth Map Restoration[J]. IEEE Transaction on Image Processing, 2016, 26(1): 315-327.
- [16] Lu S, Ren X, Liu F. Depth Enhancement via Low-Rank Matrix Completion[C]. //IEEE Computer Vision and Pattern Recognition, 2014.
- [17] Shen X, Zhou C, Xu L, et al. Mutual-Structure for Joint Filtering[J]. International Journal of Computer Vision, 2017, 125(1-3): 19-33.

Guided Image Filtering Based on Structure Similarity Aware

HAN Bo SUN Zhong-gui

(School of Mathematical Sciences, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China)

Abstract With help of the guidance image to direct the filtering process, Guided filters have achieved powerful performance and attracted more and more attentions in image processing area. However, due to ignoring the structure difference between the guidance image and the target one, existing methods, such as joint bilateral filtering and guided image filtering, usually suffer from texture copy in their filtering outputs. To overcome this drawback, this paper first proposes a novel indicator to describe the structure relationship between the two images more accurately, i. e. , structure similarity aware. Go a step further, a novel guided filtering method is proposed. In a nutshell, the proposed method can adaptively select the consistent structures in the guidance to supervise the filtering operation, and thus avoid texture copy effectively.

Key words Joint bilateral filtering; guided image filtering; texture copy; structure similarity aware