

文章编号 1004-924X(2017)08-2182-13

多尺度引导滤波及其在去雾中的应用

武 昆^{1,2*}, 韩广良¹, 杨 航¹, 王宇庆¹, 吴笑天¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:将引导滤波与提升小波相结合提出了一种多尺度引导滤波方法,以实现在平滑图像细节的同时保持图像边缘不模糊。该方法通过提升小波法对图像进行多尺度分解,即将信号分解成一个低频子带和多个高频子带。在提升小波重构过程中,利用引导滤波平滑每个尺度的低频信息并保持其边缘不模糊。最后,针对滤波后残余的细节,对提升小波重构后的平滑图像再次进行引导滤波,以便进一步平滑图像细节。将多尺度引导滤波应用于暗通道去雾先验理论并进行了主、客观评价。结果显示:多尺度引导滤波能够深层次平滑图像细节,保持边缘完整性,从整体上提高了图像的对比度和视觉效果,有效恢复了场景信息并保留场景的边缘信息。另外,该方法改善了客观评价指标,其对比度增强系数指标平均提升了 0.1 以上,场景结构相似度平均提升了 1 以上,而 LOE(Lightness Order Error)参数降低了 10 以上,满足了去雾应用的视觉需求。

关键词:引导滤波;提升小波;多尺度引导滤波;图像去雾

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172508.2182

Multi-scale guided filter and its application in image dehazing

WU Kun^{1,2*}, HAN Guang-liang¹, YANG Hang¹, WANG Yu-qing¹, WU Xiao-tian¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: wukun_ciomf@126.com

Abstract: With combining guided filter and lifting wavelet effectively, a multi-scale guided filter was proposed to smooth the details of a color image and to keep the edges of the image unambiguous. The lifting wavelet was used to decompose the color image in multi-scale. It means that the image was decomposed into a low frequency subband and a plurality of high frequency subbands. In the reconstruction process of the lifting wavelet, the low-frequency information of each scale was smoothed by the guide filter and the edges were not blurred. Finally, the reconstructed image was processed by the guided filter once more to remove the residual details as soon as possible. The proposed multi-scale guided filter method was applied to the image haze removal using dark channel prior and its processing results were evaluated in subjectivity and objectivity. The results show that the multi-scale guided filter smoothes the image's details and maintains the edge integrity. It improves the visual effect of the

收稿日期:2017-02-10;修订日期:2017-04-07.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61401425)

image in whole, enhances the image contrast and visual effect. Moreover, it recovers the scene information and preserves the edge information of the scene. At the same time, the objective evaluation indexes are improved, in which, the contrast enhancement coefficient index is improved by 0.1 or more, the restoration ability of the scene structure information is increased by more than 1 and the Light Order error (LOE) is reduced by more than 10. It satisfies the visual needs of the application in image dehazing.

Key words: guided filter; lifting wavelet; multi-scale guided filter; image dehazing

1 引言

滤波器在图像处理、模式识别、计算机视觉等相关领域的应用逐渐广泛,利用其进行图像滤波是很多图像处理算法的重要过程。其中,图像平滑保边滤波器十分受人关注,已成为一些图像处理应用的基础步骤,其在图像去噪^[1-2]、图像融合^[3]、高动态图像压缩^[4]、图像的色调映射^[5]、图像细节增强^[6-7]、图像去雾^[8-9]、图像目标检测^[10]等方面均有应用。图像平滑主要用于去除图像中的细节而保留图像边缘这样明显的结构。然而,现有的多数平滑算法仍很难在去除细节的同时很好地保护边缘,往往是能够有效地平滑图像细节但却使得图像边缘变得模糊。所以,如何在平滑细节和保持边缘之间达到平衡是图像平滑保边滤波器的难题。

图像平滑保边滤波器可以分为两种,一种是全局优化滤波器,能够同时处理整幅图像,达到全局最优的目的。它的平滑细节和保持边缘效果较为理想,但是需要较长的计算时间。这类滤波器主要有各向异性扩散^[11-12]、梯度 L_0 优化^[13]、总变分(total variation)^[14]以及加权最小二乘法^[15]等。其中,各向异性扩散法^[11]可以对图像进行选择性的平滑,在图像细节区域平滑能力较强,而在边界区域将会被抑制,因此它既可以平滑细节又可保持图像边缘的整体特征。 L_0 梯度最小化模型^[13]由徐立等人提出,它采用 L_0 范数来约束图像的梯度,对分段常数的图像有更好的平滑效果,不过该模型虽然比总变差法更有效率,但会引入严重的阶梯效应。总变分法^[14]与各向异性扩散法并无太大差别,它是一种无约束的优化模型,不仅能够很好地保持边缘又可以去除噪声,但该方法应用于图像平滑处理时,也会引入阶梯效应,而且容易将图像中的噪声误认为是边缘部分,导致处理后的图像出现虚假的边缘。基于加权最小二

乘法的边缘保持滤波器^[15]是由 Farbman 等人提出的,它主要利用了稀疏的线性系统,不过该系统的采用会限制保持边缘和平滑细节的效果。另一种保边平滑滤波器采用局部滤波方式,它将图像分成局部块进行处理,与全局优化滤波比较,局部滤波算法较简单,不过在图像边缘上容易产生光晕现象。局部滤波器中最具代表性的是双边滤波,双边滤波^[16-17]是一种典型的非线性局部滤波算法,在滤波过程中不但涉及空域信息,而且引入了灰度相似性信息,并将两种信息非线性结合在一起,这样既能够滤除图像噪声,也将会有效地保持图像边缘特征,因此可以得到效果很好的平滑图像。引导滤波^[18]是一种新颖的边缘保持平滑滤波器,既可以有效地平滑背景细节和保持图像场景的边缘特征,同时又不会产生梯度反转效应。引导滤波之所以具有边缘保持特性是由于引导图像与输出图像在局部窗口内满足线性关系,使得两者的梯度相似。最终,引导滤波后的输出图像不仅继承了原图像的整体特征,还获得了引导图像的变化细节。

本文将引导滤波和提升小波结合,提出了一种多尺度引导滤波器。该滤波器不仅继承了引导滤波的特性,可有效地平滑图像细节、保持边缘完整,而且可在提升小波重构过程中,分别对各尺度的低频信息进行引导滤波,从而能够对图像进行深层次地平滑滤波。为了彻底地平滑图像中的细节,还可对提升小波重构后的平滑图像再次进行引导滤波。文中将多尺度引导滤波应用到暗通道去雾领域,对粗略透射率进行了优化。与 He 算法相比,本文算法在去雾领域获得了明显的效果,图像细节变得突出,具有较强的视觉感官性。

2 基础知识

2.1 提升小波

Sweldens 提出了一种在时域中构造小波变

换的方法,被称之为提升小波变换^[19]。提升方法中包括如何利用新提出的计算格式对信号进行分解和重构。这种基于提升格式的小波变换与传统小波最大的不同是放弃了二进伸缩和平移思路,完全脱离了傅立叶分析。该方法不仅继承了第一代小波的多尺度分辨特性,同时也具有快速计算等特点。从某种角度来说,提升算法是对信号进行小波滤波的高效实现。

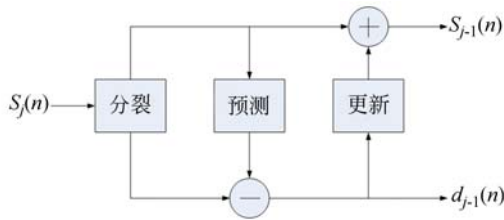


Fig. 1 Decomposition of lifting wavelet transform

提升小波变换主要由分裂、预测和更新三部分构成。图1是提升小波变换的分解过程,主要分为分裂、预测和更新,图2是提升小波变换的重构过程,即提升小波分解的逆过程,主要有更新、预测和合并。具体如下:

(1)分裂:将原始的输入信号 S_j 分解成两组互不相关的子集,即奇数抽样点集 x_o 和偶数抽样点集 x_e :

$$x_o = S_j(2n+1) \quad x_e = S_j(2n);$$

(2)预测:通过偶数序列 $x_o(n)$ 和奇数序列 $x_e(n)$ 之间的相关性,一般利用偶数序列来预测奇数序列。小波系数 $d_{j-1}(n)$ 是 $x_o(n)$ 与 $x_e(n)$ 的预测值之间的差值:

$$d_{j-1}(n) = x_o(n) - P(x_e(n));$$

(3)更新:为了使子集保持原始数据集的某些标量特性,需要构造一个更新算子 U 来产生新的子集数据,更新过程表示为:

$$S_{j-1}(n) = x_o(n) + U(d_{j-1}(n)).$$

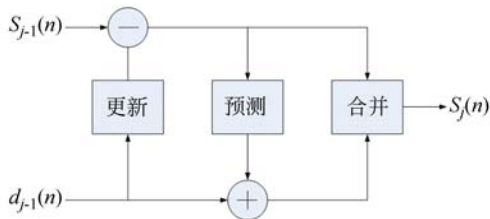


Fig. 2 Reconstruction of lifting wavelet transform

2.2 引导滤波

引导滤波能够有效地平滑背景和保持边缘特征,同时不会产生引导反转效应。引导滤波的输出图像与引导图像在局部窗口中具有线性相关。文献[18]定义了引导滤波,其滤波表达式为:

$$q = \text{guidefilter}(p, I, r, \epsilon), \quad (1)$$

其中, r 是滤波窗口的大小, ϵ 是正则化参数, I 为引导图像, p 为待滤波输入图像, q 为输出图像。式(1)中,图像 I, p 都是预先给定的。引导滤波假设的线性关系式如下:

$$q_i = a_k I_i + b_k, \quad \forall i \in \omega_k, \quad (2)$$

其中, q 是 I 在窗口中的线性变换,窗口以像素 k 为中心,其大小为 $r \times r$, (a_k, b_k) 是 ω_k 中的常系数。

引导滤波的核心在于计算出线性系数 (a_k, b_k) 的最优解,这样会尽可能地减小输入图像 p 和输出图像 q 之间的差距。在窗口 ω_k 中,通过最小化代价函数:

$$E(a_k, b_k) = \sum_{i \in \omega_k} [(a_k I_i + b_k - p_i)^2 + \epsilon a_k^2], \quad (3)$$

即可得到 (a_k, b_k) 的值。其中, $\epsilon > 0$ 是正则化参数,用于避免出现过大的 a_k ,保持数据稳定性。根据线性回归分析, a_k, b_k 的最优解表达式可以表示为:

$$a_k = \frac{\frac{1}{|\omega|} \sum_{i \in \omega_k} I_i p_i - \mu_k \bar{p}_k}{\sigma_k^2 + \epsilon}, \quad b_k = \bar{p}_k - a_k \mu_k, \quad (4)$$

其中,在引导图像的局部窗口 ω_k 中, μ_k 是像素平均值, $|\omega|$ 为像素的数量, σ_k^2 为像素的方差, \bar{p}_k 是在输入图像的相应局部窗口 ω_k 的均值。由于位置像素 i 被多个覆盖 i 的窗口所包含,在不同的窗口 ω_k 中, a_k, b_k 取值自然会不同,所以对窗口 ω_k 内所有 a_k, b_k 的可能值取平均。因此,输出图像 q 可以写成:

$$q_i = \frac{1}{|\omega|} \sum_{k \in \omega_k} (a_k I_i + b_k) = \bar{a}_k I_i + \bar{b}_k. \quad (5)$$

由于引导滤波的局部线性特性以及最小化代价函数的限制,输出图像获得了引导图像的变化细节,同时保留了原图像的整体特征。另外,引导滤波的处理时间相对较快,尤其在使用大窗口时,因为它的时间复杂度为 $O(N)$,不依赖窗口的大小。

2.3 暗通道先验理论

在计算机图形和计算机视觉领域中,有雾图

像的散射模型可以表示为:

$$I(x) = J(x)t(x) + A(1-t(x)), \quad (6)$$

式中, x 为空间坐标, $I(x)$ 为待去雾的图像, $J(x)$ 为去雾后的图像, A 为整体大气光值, $t(x)$ 为透射率值。当大气为同质状态时, $t(x)$ 可表示为:

$$t(x) = e^{-\beta d(x)}, 0 < \beta \leq 1, \quad (7)$$

其中, β 为大气散射系数, $d(x)$ 为场景深度。

在式(6)中, $J(x)t(x)$ 作为直接衰减项, 表示场景辐射照度在传送介质中的衰减程度, $A(1-t(x))$ 作为大气光, 表示在场景成像过程中引入了大气散射光, 这会使得场景中出現模糊, 颜色有些失真。

通过对大量无雾自然图像的对比研究, He 等提出了暗通道先验模型^[8,9,20], 即对于任意一幅无雾图像 J , 其暗通道可以表示为:

$$J^{\text{dark}}(x) = \min_{c \in \{r, g, b\}} (\min_{y \in \Omega(x)} (J^c(y))), \quad (8)$$

式中, $J^c(y)$ 为 $J(y)$ 的 R、G、B 某一通道, $\Omega(x)$ 是将像素点 x 作为中心的邻域。假设在邻域 $\Omega(x)$ 内, 传输值为常数, 记为 $\tilde{t}(x)$, 对式(6)整理并对等式两边进行最小化运算得到:

$$\min_{y \in \Omega(x)} (\min_{c \in \{r, g, b\}} \frac{I^c(y)}{A^c}) = \tilde{t}(x) \min_{y \in \Omega(x)} (\min_{c \in \{r, g, b\}} \frac{J^c(y)}{A^c}) + (1 - \tilde{t}(x)). \quad (9)$$

基于 HE 等提出的暗通道先验理论, 无雾自然图像中暗通道像素值逐渐接近于 0, 即:

$$J^{\text{dark}}(x) = \min_{c \in \{r, g, b\}} (\min_{y \in \Omega(x)} (J^c(y))) \rightarrow 0. \quad (10)$$

若大气光值 A 为已知常量, 将式(10)带入式(9)中, 引入修正因子 $\omega \in [0, 1]$, 最终得到图像估计的透射率值:

$$\tilde{t}(x) = 1 - \omega \min_{y \in \Omega(x)} (\min_{c \in \{r, g, b\}} \frac{I^c(y)}{A^c}), \quad (11)$$

式中, $\min_{y \in \Omega(x)} (\min_{c \in \{r, g, b\}} \frac{I^c(y)}{A^c})$ 是含雾图像暗通道归一化后的像素值, 与透射率信息有很大的关联性。

考虑到当透射率 $t(x)$ 非常小时, J 的值将会变大, 从而影响图像质量, He 等通过添加阈值 t_0 来解决此问题。当 $t(x)$ 值小于 t_0 时, 令 $t(x) = t_0$, 因此, 处理后的去雾图像 J 表示为:

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\max(t(x), t_0)} + A. \quad (12)$$

文献[9]指出, He 算法估计出的大气光值 A 偏大, 使得 J 在亮度值上通常小于 A , 因此, 去雾后的图像显得较为暗淡。

3 多尺度引导滤波

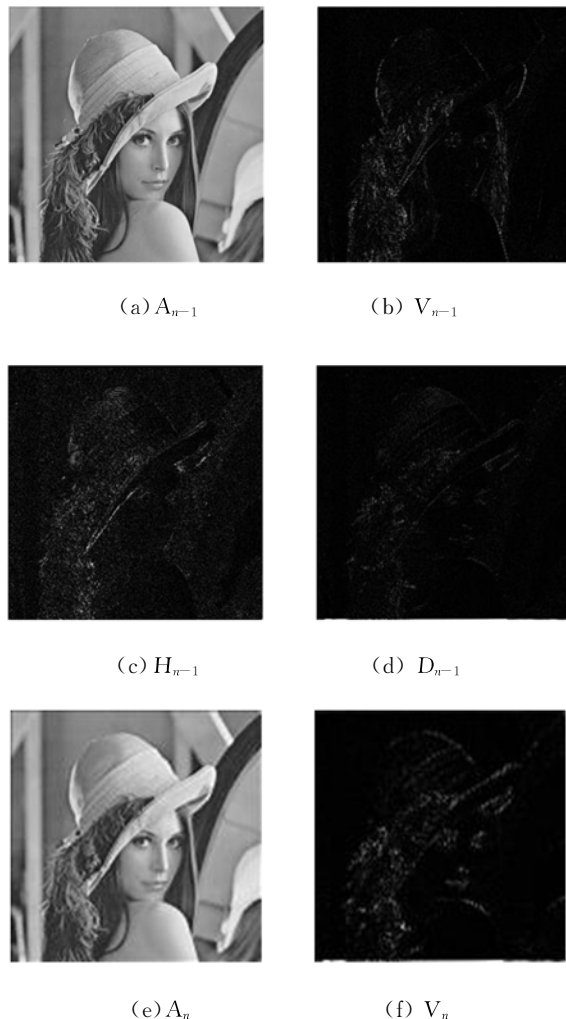
3.1 多尺度引导滤波器的设计

本文将提升小波和引导滤波相结合, 提出了多尺度引导滤波。对于一幅给定的输入图像 I 进行提升小波分解, 将信号分解到多个尺度上, 其第 n 级分解中, 低频信息 A_n 和高频信息 B_n , 可由公式(13)计算得出:

$$(A_n, B_n) = l\omega t(A_{n-1}, n), \quad (13)$$

其中, $A_0 = I$, 低频信息 A_{n-1} 表示第 $n-1$ 层的低频部分, 然后将它作为下一级分解中的“原始”图像, 得到第 n 层的低频信息 A_n 和高频信息 B_n 。

低频系数含有图像中的大尺度信息, 而高频系数只包含部分的细节信息, 它主要分为三部分, 分别为垂直高频部分 V_n 、水平高频部分 H_n 和对角线高频 D_n 部分。图 3 所示为两级多尺度分解效果图。



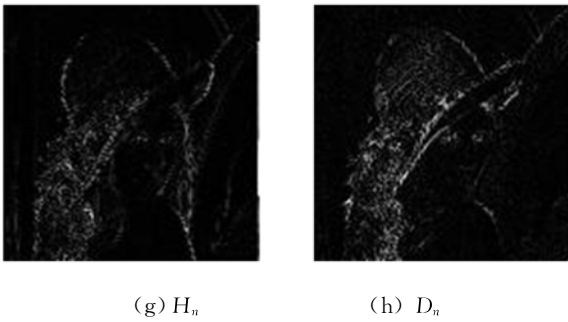
(g) H_n (h) D_n

图 3 提升小波分解图

Fig. 3 Decomposed images of lifting wavelet

通过图 3 可以看出,在提升小波分解中,相比高频信息,低频信息作为图像的主要能量,不仅含有图像的基础部分,同时含有大部分的图像细节。因此,本文的主要思想是在提升小波重构过程中,利用引导滤波对每层的低频信息 A_n 进行滤波,滤除低频图像每个尺度中的细节,缩小每层重构图像的主要能量,平滑细节,同时保持边缘,表示为:

$$A'_n = \text{guidefilter}(A_n, A_n, r, \epsilon), \quad (14)$$

其中, A' 为引导滤波后的低频信息, r 是滤波窗口的大小, ϵ 是正则化参数。

经过引导滤波的重构图像的大部分高频信息将会被滤除,但是也会存留部分高频信息,因此,为了滤除残余的细节,需要对提升小波重构后的图像再做一次引导滤波,将图像的细节平滑干净,即:

$$L' = \text{guidefilter}(L, L, r, \epsilon), \quad (15)$$

其中, L 为提升小波重构后的图像, L' 为 L 引导滤波后的图像。这样,多尺度引导滤波能够对图像进行充分滤波,有效地平滑图像细节并保持边缘的完整性。

多尺度引导滤波主要是对提升小波分解得到的不同尺度低频信息进行处理,不仅继承了引导滤波的优点,能够对图像进行边缘保持,细节平滑,同时与提升小波重构结合,对不同尺度的低频信息进行滤波,缩小图像的主要能量,深层次平滑细节和去除噪声。

在图 4 中,对引导滤波和多尺度引导滤波的效果图进行比较,可以明显地看出,经过引导滤波处理后,虽然图像 4(a) 的大部分细节被滤除,但是有些细节还很明显,例如,帽子上的褶皱。而经过多尺度引导滤波处理后,图像的滤波效果相对

(a) 引导滤波 (b) 多尺度引导滤波
(a) Guided filter (b) Multiscale guided filter

图 4 滤波效果对比

Fig. 4 Comparison between guided filter and multiscale guided filter

较好,不仅细节滤除得很干净,而且保持了图像边缘不模糊,在图 4(b) 中,人物的面部和帽子表面都变得很光滑,细节消失。

3.2 尺度选择

本文根据图像分辨率以及选用的小波基长度来选择分解尺度 n 。假设图像的尺寸分别为 M , N , 令最小值 $K = \min(M, N)$ 。由于在每个尺度图像的引导小波分解中,都需要图像尺寸对 2 的倍数进行分解,且假设小波基的长度为 L , 则一般要求: $n \leq \log_2 \frac{K}{L}$ 。因此,提升小波的尺度选择范围为:

$$1 \leq n \leq \log_2 \frac{K}{L}.$$

以图像“lena”为例,其分辨率为 512×512 , 即 $K = 512$, 另外选用“sym4”小波作为小波基,其长度 $L = 8$, 代入上述公式中,则 $n \leq 6$ 。

本文对图像进行了提升小波分解,分解得到了 6 层的低频信息,如图 5 所示。

本文在不同尺度上分别对图像进行了多尺度引导滤波,如图 6 所示。

(a) $n=1$ (b) $n=2$

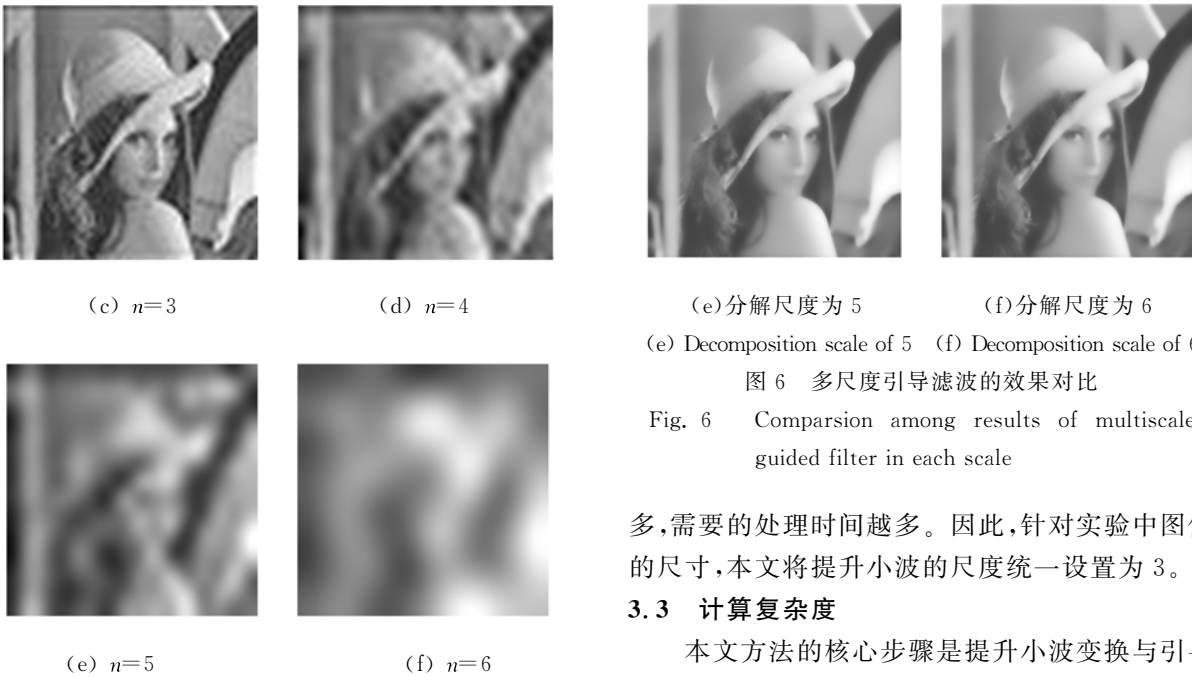


图 5 每个尺度的低频信息
Fig. 5 Low frequency information in each scale

通过图 5 和图 6 的实验结果可以看出,当图像的提升小波分解层数大于 3 层后,分解的低频部分含有的信息将会非常有限,对图像引导滤波平滑效果的影响很小,尤其在图 6(c)~6(f)中,图像的整体平滑效果变化相当小,而且分解层数越

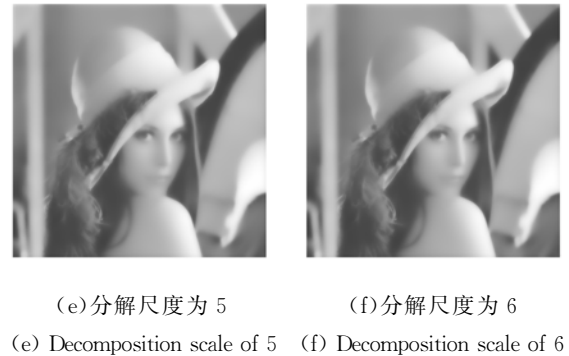
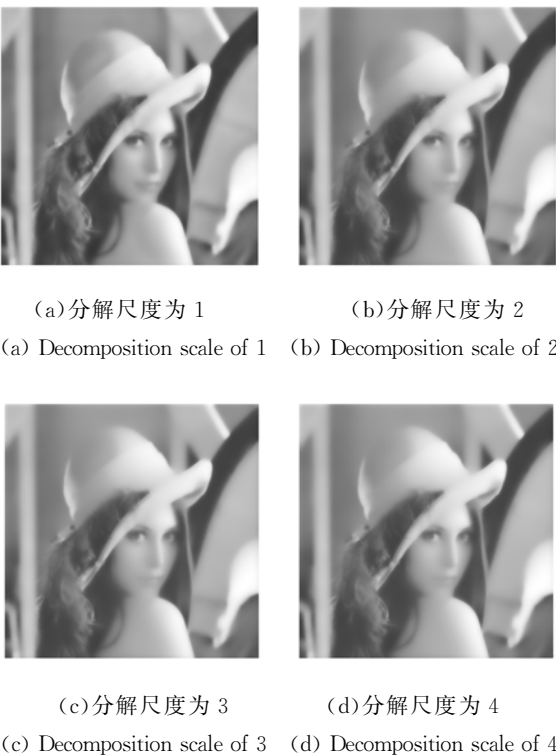


图 6 多尺度引导滤波的效果对比
Fig. 6 Comparison among results of multiscale guided filter in each scale

多,需要的处理时间越多。因此,针对实验中图像的尺寸,本文将提升小波的尺度统一设置为 3。

3.3 计算复杂度

本文方法的核心步骤是提升小波变换与引导滤波,因此,方法的计算复杂度与其相关,由文献 [18-19]分析可知,这两个步骤的计算复杂度都是线性的。假设图像的尺寸为 $M \times N$,那么提升小波和引导滤波的计算复杂度均为 $O(M \times N)$ 。由于提升小波分解后,每层低频图像尺寸都是不同的,因此,计算复杂度也会不同。以提升小波的第一层分解为例,该层分解得到的低频图像尺寸为 $\frac{M \times N}{4}$,那么提升小波变换与引导滤波的计算复杂度可以表示为 $O\left(\frac{M \times N}{4}\right)$ 。由于本文中提升小波的分解尺度设置为 3,则提升小波变换的计算复杂度为 $O(M \times N) + O\left(\frac{M \times N}{4}\right) + O\left(\frac{M \times N}{16}\right) + O\left(\frac{M \times N}{64}\right)$,同样,引导滤波的计算复杂度为 $O(M \times N) + O\left(\frac{M \times N}{4}\right) + O\left(\frac{M \times N}{16}\right) + O\left(\frac{M \times N}{64}\right)$ 。最终,多尺度引导滤波的计算复杂度可以表示为 $2 \times \left[O(M \times N) + O\left(\frac{M \times N}{4}\right) + O\left(\frac{M \times N}{16}\right) + O\left(\frac{M \times N}{64}\right) \right]$ 。

4 多尺度引导滤波的去雾应用

在 He 的暗通道去雾算法中,粗略透射率图出现了显著的块效应,这主要是由于在获取暗通

道过程中,采用了块操作,因此,需要优化粗略透射率来消除这些块效应。透射率优化的主要核心是平滑图像细节的同时能够有效地保持图像边缘不模糊。基于该思想,本文将多尺度引导滤波算法用于优化公式(11)中的粗略透射率 $\tilde{t}(x)$,从而可以明显地提高了图像去雾效果。

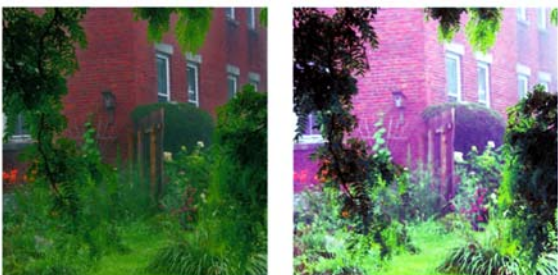
本文利用 Matlab 软件(CPU Intel Core i5-3570K 主频 3.40 GHz)对多幅有雾彩色图像进行分组实验,分别从主观视觉效果和客观质量评价两方面对提出的去雾算法进行验证,并将其与 He 算法^[9]、Tarel 算法^[21]、基于引导滤波的去雾算法^[8]、基于小波变换的去雾算法^[22]进行比较,



(a) 原始图像 (a) Original image (b) Tarel 算法结果 (b) Tarel's result



(c) He 算法结果 (c) He's result (d) 经直方图均衡化后的 He 算法结果 (d) He's result after histogram equalization



(e) 引导滤波算法 (e) Guided filtering (f) 小波变换算法 (f) Wavelet transform



(g) 本文算法结果 (g) Our result

图 7 房屋图像去雾结果

Fig. 7 Haze removal results of the house

同时利用直方图均衡化对 He 算法结果进行对比度增强处理。为了客观评价去雾图像质量,本文采用了图像的客观评价指标来衡量算法的优势。



(a) 原始图像 (a) Original image (b) Tarel 算法结果 (b) Tarel's result



(c) He 算法结果 (c) He's result (d) 经直方图均衡化后的 He 算法结果 (d) He's result after histogram equalization



(e) 引导滤波算法 (e) Guided filtering (f) 小波变换算法 (f) Wavelet transform



(g) 本文算法结果
(g) Our result

图 8 郊区远景图像去雾结果

Fig. 8 Haze removal results of suburban scenery

以上 4 组图片分别是经过 He 算法、Tarel 算法、基于引导滤波的去雾改进算法、基于小波变换的去雾算法和本文算法处理得到的去雾后图像。通过视觉对比实验得出, Tarel 算法处理过的图



(e) 引导滤波算法
(e) Guided filtering



(f) 小波变换算法
(f) Wavelet tranform



(a) 原始图像
(a) Original image



(b) Tarel 算法结果
(b) Tarel's result



(g) 本文算法结果
(g) Our result

图 9 城市远景图像去雾结果

Fig. 9 Haze removal results of urban scenery



(c) He 算法结果
(c) He's result



(d) 经直方图均衡化后的 He 算法结果
(d) He's result after histogram equalization

像去雾效果不够明显,同时影响了图像的色彩机制,使得处理后的图像色彩失真;在图 7 中,建筑物的颜色明显变得很深;在图 8 中,近处树木的颜色变得失真,远处的楼房颜色较暗,不清晰,失去了图像部分细节。在图 8 和图 10 中,去雾效果不明显,图像中还存有一层薄雾,细节不够突出。相比较,He 算法的去雾效果相对较好,但处理后的图像整体偏暗,尤其在图像的远处,很多细节没有显示出来。经过直方图均衡化后的 He 算法结果整体上有效地增强了对比度,提高了图像的亮度,很大程度上解决了 He 算法效果偏暗的问题。在结果图 7~10 中,图像中的细节更加突出,尤其在暗处中,很多细节都变得显著清晰,对比度得到了提高,然而也放大了图像中的噪声,使得图像结果偏亮,导致亮度过饱和,同时,还存在一定程度的



(a) 原始图像
(a) Original image



(e) 引导滤波算法
(e) Guided filtering



(b) Tarel 算法结果
(b) Tarel's result



(f) 小波变换算法
(f) Wavelet transform



(c) He 算法结果
(c) He's result



(g) 本文算法结果
(g) Our result



(d) 经直方图均衡化后的 He 算法结果
(d) He's result after histogram equalization

图 10 火车图像去雾结果

Fig. 10 Haze removal results of train

色彩失真的现象。基于引导滤波的图像去雾改进算法虽然有一定的去雾效果,但是不够明显,结果图中有些地方还存留着比较细微的雾气,不能清晰地突出细节。基于小波变换的图像去雾算法除了在图 7 中颜色失真外,其他的结果图颜色都能够贴近现实颜色,并且有效地增强了图像对比度,突出了细节,其缺点在于去雾效果不明显,图像中

还存有一些薄雾。在同样的参数设置情况下,本文的算法不仅继承了 He 算法去雾处理的优点,同时改善了图像远处偏暗的缺点,突出了图像中不易发现的细节,图像整体变得清晰,细节逐渐丰富。例如,在图 7 中,建筑物的颜色比较鲜艳,保持了原图的色彩,同时能够显示出建筑上的细节。在图 10 中,可以明显地看出火车头后面的物体,颜色偏亮,使得事物更加突出。在图 7 和图 8 中,本文处理的图像整体对比度相对提升,图像细节变得突出,更加符合人类的视觉要求。

视觉观察是图像质量主观的评价标准,它会因为观察人员的不同,导致评判同一幅图像质量时有差异。为了克服主观评价的不足,需要客观的图像质量评价标准。本文采用对比度增强系数^[23]、场景结构相似度^[24]和 LOE(Lightness Order Error)参数^[25]来客观评价去雾质量。对比度增强系数主要利用可见边检测方式获得对比图,然后采用相关指标来精确地评价图像的对比度提高程度,该值越大说明图像的对比度越强。场景结构相似度采用空域中非参考图像质量评价方法,该方法主要是利用对局部标准化的亮度系数进行科学统计,依此来量化由于图像失真导致的自然性损失,是一种整体的质量测量方式,评价分数越低表示图像场景结构信息还原得越好。LOE 主要是评价去雾后图像的自然度保持能力,数值越小,表明图像的亮度顺序保护得越好。

表 1 结果 1 的客观评价数据

Tab. 1 Objective evaluation data for result 1

评价指标	对比度	结构	LOE	运行 时间/s
	增强系数	相似度		
He 算法	0.65	25.21	221	1.074
Tarel 算法	0.68	23.21	742	4.693
经直方图均衡化后的 He 算法	1.49	24.64	187	1.285
引导滤波算法	0.71	23.07	264	1.267
小波变换算法	1.95	23.43	197	0.975
本文算法	0.82	23.14	183	1.371

表 2 结果 2 的客观评价数据

Tab. 2 Objective evaluation data for result 2

评价指标	对比度	结构	LOE	运行 时间/s
	增强系数	相似度		
He 算法	1.28	35.83	811	1.507
Tarel 算法	0.68	33.92	476	10.855
经直方图均衡化后的 He 算法	2.67	35.09	492	1.712
引导滤波算法	1.43	34.09	511	1.735
小波变换算法	2.48	34.71	423	1.354
本文算法	1.54	34.02	487	1.953

表 3 结果 3 的客观评价数据

Tab. 3 Objective evaluation data for result 3

评价指标	对比度	结构	LOE	运行 时间/s
	增强系数	相似度		
He 算法	0.62	33.96	1 190	1.194
Tarel 算法	0.82	31.59	1 115	8.093
经直方图均衡化后的 He 算法	1.68	33.69	1 025	1.346
引导滤波算法	0.96	32.11	965	1.363
小波变换算法	1.57	32.86	893	1.027
本文算法	0.76	32.06	907	1.502

表 4 结果 4 的客观评价数据

Tab. 4 Objective evaluation data for result 4

评价指标	对比度	结构	LOE	运行 时间/s
	增强系数	相似度		
He 算法	0.87	18.83	456	1.085
Tarel 算法	0.71	16.91	1 757	7.933
经直方图均衡化后的 He 算法	1.95	18.58	1 103	1.235
引导滤波算法	0.62	18.01	1 166	1.296
小波变换算法	1.88	17.56	459	0.998
本文算法	0.99	17.49	474	1.414

从表 1~4 可以看到,与其它两种方法相比,本文方法在对比度增强系数、结构相似度、LOE 指标上均具有很大的优势。整体分析表明,本方法的客观评价结果明显高于其他方法。针对对比度增强系数,虽然直方图均衡化算法和基于小波变换算法的数值偏高,但是它们的结果图容易出现色彩失真现象,因此,本文算法比较具有相对优势。针对场景结构相似度,Tarel 算法比 He 算法和本文算法稍微好些,但是此算法的视觉效果较

差。针对 LOE, 基于小波变换的算法的数值较高, 不过它的去雾能力相对较差, 本文算法虽然与其有些微小的差距, 但相比其他算法, 数值还是比较高的。针对结构相似度, 虽然本文算法在每个实验结果不一定是最好的, 但是仍会很接近最高值, 并且比较稳定。因此, 在对比度增强系数、LOE 和结构相似度指标比较中, 本文算法整体上都有很强的优势, 图像去雾视觉效果和客观评价指标都要优于其他算法。

在表 1~4 的运行时间一栏中, 比较了各种方法的执行时间。由于本文方法引入了提升小波的运算, 使得计算相对复杂, 所以该方法的运算时间相对于 He 算法、经直方图均衡化后的 He 算法、基于小波变换的去雾算法长一些, 但本方法运行时间低于 Tarel 算法。

5 结 论

本文根据边缘保持滤波器的特性, 结合引导

滤波和提升小波提出了多尺度引导滤波器。介绍了引导滤波和提升小波的工作原理, 对提升小波分解中不同尺度的低频信息和高频信息进行了分析。在重构过程中对每层的低频信息进行了引导滤波, 平滑了图像中的大部分细节, 同时保持了图像边缘的完整性。为了能够滤除残余的细节, 还对重构后的图像再次进行了引导滤波。最后, 将多尺度引导滤波应用到图像去雾领域, 不仅从主观视觉效果对去雾图像进行了评价, 同时采用对比度增强系数、场景结构相似度和 LOE 参数指标对去雾图像进行了客观质量评价。实验结果表明: 该算法不仅提高了去雾图像的对比度, 突出图像细节, 整体上满足了人类对图像的视觉要求, 同时也改善了客观评价指标, 其对比度增强系数指标平均提升了 0.1 以上, 场景结构相似度平均提升了 1 以上, 而 LOE 降低了 10 以上。因此, 此算法能够有效地恢复场景信息并保留场景的边缘信息。

参考文献:

- [1] 任文琦, 王元全. 基于梯度矢量卷积场的四阶各向异性扩散及图像去噪[J]. 光学 精密工程, 2013, 21(10): 2713-2719.
REN W Q, WANG Y Q. GVC-based fourth-order anisotropic diffusion for image denoising [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(10): 2713-2719. (in Chinese)
- [2] 王亚强, 陈波. 一种改进的各向异性扩散超声图像去噪算法[J]. 液晶与显示, 2015, 30(2): 310-316.
WANG Y Q, CHEN B. Improved anisotropic diffusion ultrasound image denoising algorithm [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 30(2): 310-316. (in Chinese)
- [3] YANG Y, WAN W, HUANG S, *et al.*. Remote sensing image fusion based on adaptive IHS and multi-scale guided filter[J]. *IEEE Access*, 2016, 4: 4573-4582.
- [4] ZHANG E, YANG H, XU M. A novel tone mapping method for high dynamic range image by incorporating edge-preserving filter into method based on retinex[J]. *Applied Mathematics & Information Sciences*, 2015, 9(1): 411-417.
- [5] EILERTSEN G, MANTIUK R K, UNGER J. Real-time noise-aware tone mapping[J]. *ACM Trans. Graph*, 2015, 34(6): 198-213.
- [6] KOU F, CHEN W, LI Z, *et al.*. Content adaptive image detail enhancement[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2015, 22(2): 211-215.
- [7] 范日召, 何斌, 刘燕君, 等. 基于广义线性系统和非锐化掩膜的图像增强算法[J]. 液晶与显示, 2016, 31(10): 973-982.
FAN R ZH, HE B, LIU Y J, *et al.*. Image enhancement algorithm based on generalized liner system and unsharp masking [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(10): 973-982. (in

- Chinese)
- [8] 王卫星,肖翔,陈良琴. 结合最小滤波和引导滤波的暗原色去雾[J]. 光学精密工程, 2015, 23(7): 2100-2108.
- WANG W X, XIAO X, CHEN L Q. Image dark channel prior haze removal based on minimum filtering and guided filtering[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(7): 2100-2108. (in Chinese)
- [9] HE K M, SUN J, TANG X O. Single image haze removal using dark channel prior[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2009, 33(12): 2341-2353.
- [10] 白向峰,李艾华,蔡艳平,等. 复杂场景实时目标检测方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2012, 24(1): 104-111.
- BAI X F, LI A H, CAI Y P, *et al.*. Real-time objects detection method in complex scenes [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphic*, 2012, 24(1): 104-111. (in Chinese)
- [11] XU J, JIA Y, SHI Z, *et al.*. An improved anisotropic diffusion filter with semi-adaptive threshold for edge preservation [J]. *Signal Processing*, 2016, 119: 80-91.
- [12] 吴俊,汪源源,陈悦,等. 基于同质区域自动选取的各向异性扩散超声图像去噪[J]. 光学精密工程, 2014, 22(5): 1312-1321.
- WU J, WANG Y Y, CHEN Y, *et al.*. Speckle reduction of ultrasound images with anisotropic diffusion [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(7): 2100-2108. (in Chinese)
- [13] XU L, LU C, XU Y, *et al.*. Image smoothing via L0 gradient minimization[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2011, 30(6): 174-185.
- [14] ATHAVALE P, XU R, RADAU P, *et al.*. Multiscale properties of weighted total variation flow with applications to denoising and registration[J]. *Medical image analysis*, 2015, 23(1): 28-42.
- [15] SHAO P, DING S, MA L, *et al.*. Edge-preserving image decomposition via joint weighted least squares[J]. *Computational Visual Media*, 2015, 1(1): 37-47.
- [16] TOMASI C, MANDUCHI R. Bilateral filtering for gray and color images[C]. *Proceedings of the 16th IEEE International Conference on Computer Vision 1998, Los Alamitos: IEEE Computer Society Press*, 1998: 839-846.
- [17] CARAFFA L, TAREL J P, CHARBONNIER P. The guided bilateral filter: When the joint/cross bilateral filter becomes robust[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2015, 24(4): 1199-1208.
- [18] HE K M, SUN J, TANG X O. Guided image filter[C]. *Proceedings of European Conference on Computer Vision, Berlin: Springer-Verlag Press*, 2013: 1397-1409.
- [19] SWELDENS W. The lifting scheme: a construction of second generation wavelet[J]. *SIAM Journal on Mathematical Analysis*, 1995, 9(2): 511-546.
- [20] 邓莉. 针对明亮区域的自适应全局暗原色先验去雾[J]. 光学精密工程, 2016, 24(4): 893-901.
- DENG L. Adaptive image dehazing for bright areas based on global dark channel prior[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(4): 893-901. (in Chinese)
- [21] TAREL J P, HAUTIERE N. Fast visibility restoration from a single color or gray level image[C]. *Proceedings of the IEEE 12th International Conference on Computer Vision, IEEE*, 2009: 2201-2208.
- [22] RUSSO F. An image enhancement technique combining sharpening and noise reduction[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2002, 51(4): 824-828.
- [23] HAUTIERE N, TAREL J P, AUBERT D, *et al.*. Blind contrast enhancement assessment by gradient ratioing at visible edges[J]. *Image Analysis & Stereology Journal*, 2008, 27(2): 87-95.
- [24] MITTAL A, MOORTHY A K, BOVIK A C. No-reference image quality assessment in the spatial domain[J]. *IEEE Transactions on Image Pro-*

cessing, 2012, 21(12): 4695-4708.

- [25] WANG S H, ZHENG J, HU H M, *et al.*. Naturalness preserved enhancement algorithm for non-

uniform illumination Images[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2013, 22(9): 3538-3548.

作者简介:



武 昆(1987—),男,吉林长春人,博士研究生,2010 年于长春工业大学获得学士学位,主要研究方向为图像增强。
E-mail: wukun_ciomp@126.com



韩广良(1968—),男,山东嘉祥人,博士,研究员,硕士研究生导师,1990 年于内蒙古工业大学获得学士学位,2000 年和 2003 年于中科院长春光机所分别获得硕士学位和博士学位,研究方向为图像和视频信息处理、计算机视觉、信息处理软硬件等。E-mail: hangl@ciomp.ac.cn