

图像去雾过程中的噪声抑制方法

葛广一, 魏振忠

(北京航空航天大学 精密光机电一体化技术教育部重点实验室, 北京 100191)

摘要: 大气中微小颗粒(如雾、霾等)的散射作用会使户外场景拍摄的图像发生退化,造成图像质量下降。图像去雾可以提升图像对比度,增加场景能见度,校正颜色失真,改善视觉效果。但是图像去雾经常会出现明显的噪声放大现象,尤其是无穷远处的天空区域最为严重。针对这一问题,提出了一种去雾过程中的噪声抑制方法。以传输率图像为指导,采用滤波半径变化的双边滤波对雾天图像进行模糊。再计算新的传输率图像,代入雾天成像模型,得到去噪后复原图像。结合噪声评价方法,实验结果验证了该方法的噪声抑制效果。

关键词: 图像去雾; 图像去噪; 噪声估计; 双边滤波

中图分类号: TP391.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)08-2765-07

Noise inhibition method during image dehazing process

Ge Guangyi, Wei Zhenzhong

(Key Laboratory of Precision Opto-mechatronics Technology, Ministry of Education, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: The scattering of particles (e.g. haze particles and fog droplets) in the atmosphere degrades images of outdoor scenes and further harms image quality. Image dehazing can significantly gain contrast, increase scene visibility, correct color shift introduced by the airlight and improve visual effect. Nonetheless, image dehazing is prone to noise amplification. Noise of the dehazed image is obvious in regions with low transmission, especially for distant sky region. A noise inhibition method during image dehazing was proposed to solve this problem. The hazy image was smoothed by the bilateral filter with varying radius which was adapted to the transmission map. The new transmission map was calculated again corresponding to the smoothed hazy image, and then used to estimate the denoised recovery image. Combining the noise estimation method for single color image, experimental results demonstrate our method's performance with noise inhibition.

Key words: image dehazing; image denoising; noise estimation; bilateral filtering

收稿日期: 2013-12-11; 修订日期: 2014-01-14

基金项目: 国家自然科学基金(61340054); 国家重大科学仪器设备开发专项基金(2012YQ140032)

作者简介: 葛广一(1989-), 男, 硕士生, 主要从事图像处理和模式识别方面的研究。Email: ge_gy@126.com

导师简介: 魏振忠(1972-), 男, 教授, 主要从事机器视觉和人工智能方面的研究。Email: zhenzhongwei@buaa.edu.cn

0 引言

雾天拍摄的户外图像,会因为大气中微小颗粒(如雾、霾等)的散射作用,发生严重的退化,如图 1(a)所示。导致图像对比度降低,动态范围缩小,模糊不清,清晰度不够,图像细节信息不明显,许多特征被覆盖或模糊,信息的可辨识度大大降低,色彩保真度下降,出现严重的颜色偏移与失真。图像去雾采用一定方法对雾天图像进行处理,恢复损失的有效信息,去除错误的大气光信息。通过对雾天图像进行去雾,可以提升图像对比度,校正由于大气光造成的颜色失真,增加场景能见度,改善视觉效果。

近年来图像去雾算法层出不穷,Fattal^[1]根据传输率图像与表面反照率局部不相关的假设,建立优化方程,估计场景反照率和传输率图像。He 等人^[2]提出了一种简单有效的暗通道先验条件,并结合软抠图算法,计算传输率图像和去雾后图像。王森等人^[3]将暗通道方法应用于激光主动成像图像,取得了较好的去雾效果。黄黎红^[4]提出了一种根据大气退化模型估计场景深度,并结合亮度变换,实现单幅图像去雾。

但是在去雾的过程中,经常会出现去雾后图像噪声放大的现象,如图 1(b)所示。某些情况下噪声放大造成的消极影响,远远超过图像去雾本身带来的视觉改善效果。噪声放大在图像去雾中普遍存在,这是由其产生的原因所决定的。在估计出大气光源和传输率之后,代入雾天成像模型计算无雾图像时,除以传输率的步骤会使得噪声得到放大。传输率越小,噪声放大越严重。通常情况下,无穷远处的天空区域是受到噪声放大影响最为严重的区域。

然而去雾过程中的噪声抑制方法还比较少。He 等人对计算得到的传输率进行阈值截断处理,将小于阈值的传输率提高,可以有效降低天空区域的噪声。虽然这种提高传输率的方法看似最直接有效,但是仍然不能完全解决噪声放大的问题,而且过分提高传输率容易造成去雾不彻底等其他问题。Schechner 等人^[5]在多幅偏振图像去雾的基础上,以传输率图像为指导,建立优化方程,对去雾后图像进行去噪。Tarel 等人^[6]以传输率图像为指导,使用滤波半径变化的中值滤波对去雾后图像进行去噪。但是中值滤波对于椒盐噪声的去噪效果最为明显,而对于更加

普遍的高斯噪声效果不佳。Matlin 等人^[7]在去雾前对雾天图像进行去噪,但是需要已知雾天图像的噪声水平;另外前者在此基础上进行了改进,采用图像噪声水平评价和迭代的方法进行同步去雾和去噪。但是没有考虑传输率与噪声放大之间的关系,其方法更适用于雾天图像本身噪声非常明显的情况。

在文中,笔者从雾天成像模型出发,讨论噪声放大的原因,选取适合的彩色图像去噪方法,成功实现了去雾过程中的噪声抑制,如图 1(c)所示。去雾前后实验对比和噪声水平评价结果都表明该方法能较好地实现噪声抑制。



(a) 雾天图像
(b) 直接复原图像
(a) Hazy image (b) Direct recovery image



(c) 去噪后复原图像
(c) Denoised recovery image

图 1 图像去雾过程中噪声抑制举例

Fig.1 Example of noise inhibition during image dehazing

1 去雾过程中噪声放大的原因

参考文献[8]对入射光衰减和大气光叠加进行详

细描述, 参考文献[1-7]中都广泛使用了如下模型:

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

公式(1)假设雾天图像所处场景的大气情况是同质的, 微小颗粒在大气中均匀分布。 $I(x)$ 为雾天图像; x 表示图像中二维坐标。 $J(x)t(x)$ 表示入射光衰减; $J(x)$ 为入射光, 即待求解的去雾后图像; $t(x)$ 为传输率, 表示 $J(x)$ 的衰减程度。第二项表示大气光叠加; A 为大气光源, 是一个全图像适用的常向量, 定义为图像中无穷远处雾的颜色。通过需要寻找相关先验信息或约束条件, 估计大气光源 A 和传输率 $t(x)$, 最后代入公式(1), 可以得到去雾后图像 $J(x)$:

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{t(x)} + A \quad (2)$$

式中: 大气光源 A 是常向量。根据方差的基本性质, 去雾后图像 $J(x)$ 的噪声标准差 $\sigma_j(x)$ 可以由雾天图像 $I(x)$ 的噪声标准差 $\sigma_i(x)$ 和传输率 $t(x)$ 得到:

$$\sigma_j(x) = \frac{1}{t(x)} \sigma_i(x) \quad (3)$$

雾天图像的噪声标准差 $\sigma_i(x)$ 越大, 去雾后图像的噪声标准差 $\sigma_j(x)$ 越大; 传输率 $t(x)$ 越小, $\sigma_j(x)$ 越大。图 2 具体说明了传输率与噪声放大的关系。其中, 图(a)是无雾图像, 图(b)是模拟的传输率图像, 传输率自上而下从 0~1 递增。假设大气光源已知, 雾天图像可以由公式(1)得到。图(c)是添加了均匀的高斯噪声后的雾天图像, 噪声标准差 σ 为 0.03。图(d)是使用公式(2), 由传输率图像、大气光

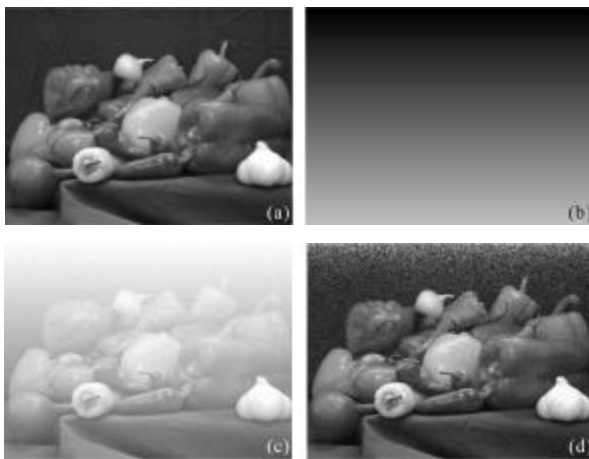


图 2 传输率与噪声放大的关系

Fig.2 Relationship between transmission and noise amplification

源和添加噪声后的雾天图像计算得到的去雾后图像。由图(d)可知, 传输率小的区域在去雾后出现了

明显的噪声放大现象。相反, 传输率大的区域在去雾前后的噪声相差不大。

除了上述两个显而易见的因素以外, 传输率 $t(x)$ 的噪声标准差 $\sigma_t(x)$ 对去雾后图像的噪声也有着重要影响。虽然公式(3)是从单个像素的角度进行分析的, 但是传输率 $t(x)$ 也包含邻域信息, 不能完全孤立的讨论。如果某个图像区域的传输率 $t(x)$ 不够平滑, 噪声标准差 $\sigma_t(x)$ 较大, 也会造成去雾后的噪声过大不均匀。

2 去雾过程中的噪声抑制

根据之前对噪声放大原因的讨论, 降低去雾后图像噪声的方法大体包括以下 3 种: (1) 降低雾天图像的噪声标准差 $\sigma_i(x)$; (2) 提高传输率 $t(x)$; (3) 降低传输率图像的噪声标准差 $\sigma_t(x)$ 。

在以上 3 种方法中, 由于提高传输率可能带来去雾不彻底的问题, 因此选择降低雾天图像噪声的方法, 重点考虑传输率与噪声放大的关系, 实现去雾后图像的噪声抑制。另外, 如果得到参与去雾计算的传输率图像, 该噪声抑制方法可以与任意去雾方法相结合。具体实现时, 结合 He 等人^[2]的暗通道去雾方法进行说明, 下面将结合暗通道方法进行详细讨论。由于该方法重点在于噪声抑制, 因此对去雾方法不做展开。

He 等人根据雾天图像的统计特点提出了暗通道先验约束, 对于一幅图像 J , 暗通道图像 J_{dark} 的定义如下:

$$J_{dark}(x) = \min_{c \in \{r, g, b\}} (\min_{y \in \Omega(x)} (J_c(y))) \quad (4)$$

式中: J_c 为图像 J 的某个颜色通道; $\Omega(x)$ 为像素 x 的邻域。通过观察发现, 除了天空区域, 无雾图像的 J_{dark} 在大部分区域的亮度非常低, 趋近于零。大气光源 A 的估计是通过先计算 J_{dark} 中亮度值在前 0.1% 的像素, 再从雾天图像对应像素中选取亮度最大的像素而确定的。

结合暗通道先验约束, 对雾天成像模型进行变型和近似, 得到粗略传输率图像 \tilde{t} :

$$\tilde{t}(x) = 1 - \omega \min_c \left(\min_{y \in \Omega(x)} \left(\frac{J_c(y)}{A_c} \right) \right) \quad (5)$$

式中: A_c 为大气光源 A 的某个颜色通道的值; ω 是为了避免无穷远处的天空区域的传输率等于零而进行

的调节参数,默认为 0.95。粗略传输率图像与实际的边缘细节并不匹配,去雾后块效应比较明显。因此需要对其进行优化,文中采用 He 等人^[9]提出的导向滤波方法。

导向滤波的输入为需要优化的图像 p (即粗略传输率图像 \tilde{t})和起着指导作用的图像 I (雾天图像的灰度图像 I_{gray}),输出为优化后图像 q (精炼传输率图像 t)。首先在像素 k 的局部邻域 ω_k 中,计算线性系数 a_k 和 b_k :

$$a_k = \frac{\text{cov}_k(I, p)}{\text{var}_k(I) + \varepsilon} = \frac{\frac{1}{|\omega|} \sum_{i \in \omega_k} I_i p_i - \bar{I}_k \bar{p}_k}{\sigma_k^2 + \varepsilon}$$

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

式中: \bar{I}_k 和 σ_k^2 为图像 I 在局部邻域 ω_k 中的均值和方差; $|\omega|$ 为 ω_k 中的像素个数; \bar{p}_k 为图像 p 在局部邻域 ω_k 中的均值; ε 为防止 a_k 过大的调节系数。然后计算局部邻域 ω_k 中 a 和 b 的均值 $\bar{a}_k = \frac{1}{|\omega|} \sum_{i \in \omega_k} a_i$ 和 $\bar{b}_k = \frac{1}{|\omega|} \sum_{i \in \omega_k} b_i$,最后通过线性变化计算输出优化后图像 q_k :

$$q_k = \bar{a}_k I_k + \bar{b}_k \quad (7)$$

已知大气光源 A 和精炼传输率图像 t 之后,可以直接得到去雾后图像 J 。但是为了去雾过程中的噪声抑制,笔者需要对雾天图像 I 进行模糊。考虑到雾天图像是彩色图像,而传统的滤波处理是针对灰度图像的,因此首先进行色彩空间变换,从 RGB 空间变换为 Lab 空间。RGB 空间的 3 个颜色通道之间没有必然的联系,如果对 3 个颜色通道单独处理,再合成彩色图像,模糊效果不明显。相反 Lab 空间更加符合人眼视觉特性,它的 L 分量近似符合人眼对亮度的感知, a 和 b 分量共同表示颜色组成。下面对 Lab 空间的 3 个分量使用双边滤波进行模糊,对于灰度图像 p 来说,双边滤波定义如下:

$$q_i = \sum_{j \in \omega_i} W_{ij} p_j$$

$$W_{ij} = \frac{1}{K_i} \exp\left(-\frac{|x_i - x_j|^2}{\sigma_s^2}\right) \exp\left(-\frac{|p_i - p_j|^2}{\sigma_r^2}\right) \quad (8)$$

式中: q_i 为双边滤波输出图像,它是由输入图像 p_i 的邻域 ω_i 内像素的加权平均所得。 W_{ij} 是滤波核,它是由空间高斯核和值域高斯核相乘得到; σ_s 和 σ_r 分别是调整空间和值域相似度的参数; K_i 是归一化参数

以确保 $\sum_j W_{ij} = 1$ 。

在前面对噪声放大原因的分析中,笔者知道传输率越小,去雾后噪声放大越严重。因此在进行滤波处理时,采取的策略是对传输率较小的像素设置较大的滤波半径,对传输率较大的像素设置较小的滤波半径。在 Lab 空间中, L 分量的滤波半径定义如下:

$$r_L(x) = 1/t(x) - 1 \quad (9)$$

如果传输率较小,滤波半径较大,噪声放大较明显的像素模糊效果更为明显;如果传输率较大,滤波半径较小,噪声放大不明显的像素模糊效果较弱。极端情况下传输率等于 1 时,滤波半径等于 0,即没有进行模糊处理,保证了去雾前后没有噪声放大的像素不受模糊的影响。同时为了避免由于传输率接近 0 导致的滤波半径过大,对滤波半径设置截断上限为图像的长和宽中较小值的 1/10。

在实际计算时,设置 a 和 b 分量的滤波半径是 L 分量的 3 倍,这样的处理可以使得颜色分量更加模糊,而亮度分量仍然保持一定细节。再从 Lab 空间还原会 RGB 空间时,会使得模糊后图像的亮度变化不明显,但是颜色分量更加平均。在滤波核标准差的选择上, Lab 空间 3 个分量的空间高斯核的标准差均遵循 3σ 准则。值域滤波核的标准差则根据 Lab 3 个分量的取值范围特点,设置成固定值, L 分量的 $\sigma_r = 2$,而 a 和 b 分量的 $\sigma_r = 1$ 。

双边滤波后,从 Lab 空间变换回 RGB 空间,可以得到模糊后雾天图像,然后再次使用暗通道方法和导向滤波计算新的传输率图像,并代入雾天成像模型计算新的去雾后图像,实现去雾过程中的噪声抑制。文中噪声抑制方法可以概括为以下步骤:(1) 估计大气光源;(2) 暗通道方法和导向滤波计算传输率图像;(3) 以传输率图像为指导,对雾天图像采用半径变化的双边滤波进行模糊;(4) 使用模糊后雾天图像重新计算传输率图像;(5) 将大气光源、模糊后的雾天图像、重新计算的传输率图像代入雾天成像模型,得到新的去雾后图像。

对雾天图像进行模糊,除了可以直接降低雾天图像的噪声标准差外,还可以降低传输率图像的噪声标准差。这主要是因为在使用导向滤波进行优化时,输入是粗略传输率图像 \tilde{t} 和雾天图像的灰度图像 I_{gray} 。雾天图像模糊前后,由于暗通道准则的邻域取最小的计算特点,变化不大;但是 I_{gray} 会更加平滑,

因此优化后的传输率图像也更加平滑。传输率图像噪声更小,也会降低去雾后图像的噪声。

3 噪声水平评价

在实现去雾后图像的噪声抑制后,还需要合适的准则对去噪效果进行评价。文中噪声评价对象包括噪声抑制前后的去雾后图像,由于真实的无雾图像不存在,因此不能采用一般去噪算法采用的去噪前后峰值信噪比的评价方法,需要寻找针对单幅图像的噪声评价方法。Liu 等人^[10]使用聚类分割实现了单幅图像的噪声评价,但是均值聚类分割方法在噪声过大时分割结果不准确。结合文中实际情况,选择 Achanta 等人^[11]提出的 SLIC 超像素分割方法对单幅图像进行分割,并针对单幅图像提出一个总的噪声评价指标。

相比较传统的聚类分割方法,SLIC 分割方法在每个聚类中心计算距离时,并不是对整幅图像的所有像素进行搜索,而是在一定尺寸的邻域范围进行搜索,大大减少了计算量,提高了计算时间。分割后的局部区域可以近似认为不包含图像内容(即边缘细节),根据噪声方差的定义,计算每个区域的局部标准差 σ_k :

$$\sigma_k = \sqrt{\frac{1}{n_k - 1} \sum_{i \in \omega_k} (p_i - u_k)^2} \quad (10)$$

式中: σ_k 为第 k 个区域 ω_k 的标准差; n_k 为 ω_k 的像素数量; p_i 为待评价的噪声图像; u_k 为 ω_k 的图像均值。接下来计算所有分割后区域的标准差平均值 $\bar{\sigma}$ 作为总的噪声水平:

$$\bar{\sigma} = \frac{\sum_i n_i \times \sigma_i}{\sum_i n_i} \quad (11)$$

在计算彩色图像时,使用彩色图像对应的灰度图像代入公式(10)和(11)进行计算。总的来说,文中噪声水平评价方法可以概括为:(1) 使用 SLIC 超像素分割方法对图像进行过分割。(2) 计算每个区域的局部标准差。(3) 计算标准差平均值作为总的噪声水平。

图 3 说明了基于分割的单幅图像噪声水平评价方法。图(a)是包含均匀高斯噪声的待评价图像,噪声标准差为 0.05。图(b)是使用 SLIC 方法得到的过

分割结果,总分割数量为 950,原始图像尺寸为 756×500 。图(c)是对分割后的每个区域适用平均颜色替换之后的结果,图(d)是图(a)和图(c)对应的灰度图像相减之后的绝对值图像。如果分割结果完全正确,残差图像的灰度值应该全部接近零。而在实际分割过程中,常常会在边缘细节出现错误,如图(d)中亮度较大的白色区域。该例的噪声标准差估计值为 0.059 672,较真实值存在一定偏差。

由此可知,这种基于分割的噪声评价方法的准确与否,很大程度上取决于分解结果的好坏。尤其是噪声过大的情况下,大部分方法的分割结果均存在一定错误。一般来说,在保证每个区域计算标准差的像素数量足够的情况下,可以通过增加分割数量来提高噪声评价的准确性。另外,选取边缘细节较少局部分区域进行评价时,分割结果也会更加准确。

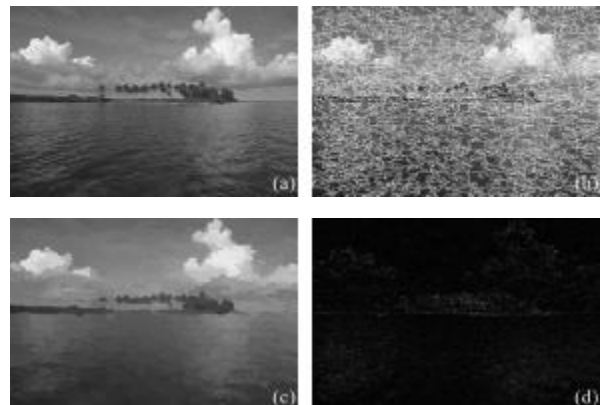


图 3 噪声评价方法举例

Fig.3 Example of noise estimation

4 实验比较

文中提出的去雾过程中的噪声抑制方法可以广泛应用于雾天图像的去雾过程中,图 4 展示了文中方法的效果。仔细观察图像的上半部分,图(b)中噪声较为明显的区域,在进行去噪处理后,图(c)中对应区域的噪声显著降低。对于噪声放大不明显的下半部分,图(c)与图(b)保持了较高的一致性,而且图(c)的中间区域过渡较为平滑。图 5 是其他几幅图像的例子,通过图(b)和图(c)的比较,可以说明该方法对于去雾后图像噪声的抑制效果是非常有效的。图 6 是局部区域放大的噪声抑制效果比较,可以更加清楚地观察去噪前后的噪声差异。

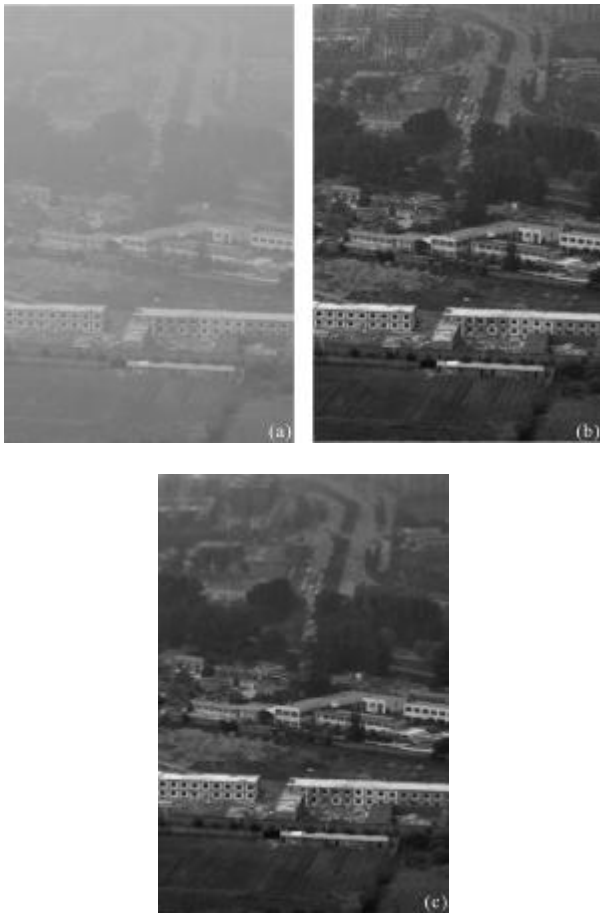


图 4 图像去雾过程中噪声抑制举例
Fig.4 Example of noise inhibition during image dehazing



图 5 图像去雾过程中噪声抑制举例
Fig.5 Examples of noise inhibition during image dehazing

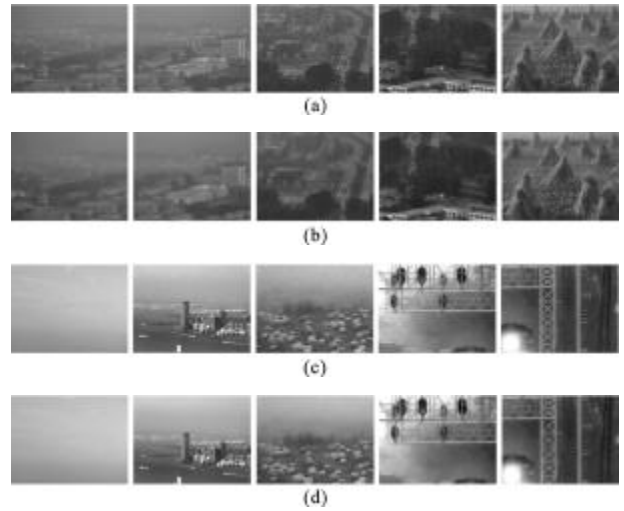


图 6 局部区域的噪声抑制效果比较
Fig.6 Noise inhibition comparisons of local areas

除了直接观察,还可以使用上文提到的基于分割的噪声水平评价方法更加客观地说明去噪效果,如表1所示。图像序号按照从左到右,从上到下的顺序进行确定。为了降低由于错误分割造成的评价误差,对直接去雾得到的去噪前图像和进行噪声抑制后的去噪后图像,使用相同的过分割结果,通过图像平均标准差降低的比例来说明噪声抑制的效果。从表1中可以看出,去噪后图像的噪声水平较去噪前均有不同程度的下降,表明该方法噪声抑制效果明显。

表 1 局部区域的噪声水平评价
Tab.1 Noise estimation of local areas

Image index	Score of image without denoise	Score of denoised image	Declined proportion after denoising
1	0.023 472	0.012 680	45.98%
2	0.028 972	0.014 697	49.27%
3	0.031 302	0.017 900	42.82%
4	0.035 086	0.028 956	17.47%
5	0.043 620	0.035 906	17.68%
6	0.016 637	0.009 395	43.53%
7	0.040 324	0.032 973	18.23%
8	0.045 758	0.036 729	19.73%
9	0.050 987	0.041 333	18.93%
10	0.038 965	0.031 012	20.41%

5 结论

文中提出了一种去雾过程中的噪声抑制方法。从去雾后图像的噪声放大现象入手,分析了去雾过程中噪声放大的原因,以传输率图像为指导,通过对雾天图像采用滤波半径变化的双边滤波进行模糊,然后重新计算传输率图像,代入雾天成像模型,成功实现了去雾后图像的噪声抑制。该方法可以广泛应用于其他去雾方法,可移植性好。与其他噪声抑制方法比较,简单直接,不需要先验信息和复杂的参数调节,易于实现。

与此同时,该方法仍然存在一些问题。主要集中在对雾天图像进行双边滤波时,在传输率小的区域对应的滤波半径通常较大,比较容易造成图像细节的丢失。如何实现在雾天图像模糊的同时保证去雾后图像包含足够的细节信息,是笔者下一阶段要做的工作。

参考文献:

- [1] Fattal R. Single image dehazing [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2008, 27(3): 72-80.
- [2] He K, Sun J, Tang X. Single image haze removal using dark channel Prior [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2011, 33(12): 2341-2353.
- [3] Wang Sen, Pan Yuzhai, Liu Yi, et al. Image quality improvement of laser active imaging in fog[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(9): 2392-2396. (in Chinese)
- [4] Huang Lihong. Defogging method for degraded image [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(5): 985-988. (in Chinese).
- [5] Schechner Y, Averbuch Y. Regularized image recovery in scattering media [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2007, 29(9): 1655-1660.
- [6] Tarel J, Hautière N. Fast visibility restoration from a single color or gray level image [C]//*IEEE 12th International Conference on Computer Vision*, 2009: 2201-2208.
- [7] Matlin E, Milanfar P. Removal of haze and noise from a single image[C]//*SPIE*, 2012, 8296: 82960T.
- [8] McCartney E. *Optics of the Atmosphere: Scattering by Molecules and Particles* [M]. New York: John Wiley and Sons Inc, 1976.
- [9] He K, Sun J, Tang X. Guided image filtering [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2013, 35(6): 1397-1409.
- [10] Liu C, Szeliski R, Kang S, Lawrence C, et al. Automatic estimation and removal of noise from a single image [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2008, 30(2): 299-314.
- [11] Achanta R, Shaji A, Smith K, et al. SLIC superpixels compared to state-of-the-art superpixel methods [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2012, 34(11): 2274-2282.