

## 基于双重域的图像去雾新算法

陈剑鹏, 毕笃彦, 熊磊, 王坤, 郭永强

(空军工程大学航空航天工程学院, 西安 710038)

**摘要:** 户外场景的图像经常会由于恶劣的天气而降质退化, 从而形成雾霾图像。目前为止, 大部分基于单幅图像的去雾算法忽略了噪声的影响, 因此本文考虑噪声污染建立新的去雾模型, 提出一种三阶段去雾新算法。第一阶段, 对降质图像进行预处理, 消除噪声对图像的干扰; 第二阶段, 运用中值暗通道优先(MDCP)算法在空域复原预处理图像, 增强其全局对比度; 第三阶段, 在变换域增强图像的局部对比度, 进一步恢复图像的细节信息。与仅仅运用空域和没有考虑噪声的算法相比, 所提算法显著改善了图像的质量, 增加了图像的清晰度。

**关键词:** 图像处理; 降质图像; 去雾; 降质模型; MDCP

**中图分类号:** TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)06-0017-04

## A Novel Image Dehazing Algorithm Based on Dual Domains

CHEN Jian-peng, BI Du-yan, XIONG Lei, WANG Kun, GUO Yong-qiang

(Aeronautics and Astronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

**Abstract:** Image of the outdoor scene is usually degraded due to poor weather conditions, thus forming a hazy image. So far, most single image dehazing algorithms ignore the effect of noise. Therefore, in consideration of the noise pollution, a new dehazing model is established, and a three-stage dehazing algorithm is proposed. In the first stage, the degraded image is preprocessed, to eliminate the interference of noise with image. In the second stage, a Median Dark Channel Prior (MDCP) algorithm is used for restoring the preprocessed image in spatial domain, enhancing the global contrast of the image. In the third stage, the local contrast of the image is enhanced in transform domain, for further restoring the details of image. Compared with those methods using the spatial domain only or without taking into consideration of the noise effect, the proposed algorithm can significantly improve the image quality and definition.

**Key words:** image processing; degraded image; dehazing; degraded model; MDCP

### 0 引言

户外图像的采集主要依赖于天气状况, 然而, 在恶劣天气(雾霾或雨雪)环境下, 大气散射会导致图像可见度降低, 影响人们对图像的进一步判读。因此, 有效的去雾算法对于提高图像质量的可靠性和鲁棒性有着重要的意义。

改善雾天或霾条件下的图像质量算法可以归结为两大类: 1) 调整全局对比度提高图像的可见度; 2) 增强局部对比度凸显图像的细节信息。提高雾霾图像可

见度的去雾算法<sup>[1]</sup>在空域对图像进行对比度增强处理, 然而这类算法通常对图像的全局对比度变量进行调整, 而没有考虑图像的局部对比度信息, 所以往往会导致图像细节信息的丢失。为了减少细节信息的损失, 提出一种结合空域和变换域的图像去雾算法, 首先在空域对图像进行复原, 然后在变换域增强图像的局部对比度。

空域处理的去雾算法基于大气散射模型<sup>[2]</sup>复原原始场景图像。模型中有3个未知变量: 大气光 $A$ , 传输函数 $t$ 和原始场景图 $J$ 。退化图像中雾的多少可以用传输函数 $t$ 来表示, 变量 $t$ 是关于辐照物体距离远近以及散射颗粒大小的函数。在获得传输函数 $t$ 的计算过程中需要结合大气光 $A$ 的估计。大气光 $A$ 可以通过多种不同的方法求得, 在文献[3-5]中均有阐述。

收稿日期: 2014-05-29

修回日期: 2014-08-12

基金项目: 国家自然科学基金(61175029, 61203268, 61202339)

作者简介: 陈剑鹏(1991—), 男, 浙江金华人, 硕士生, 研究方向为计算机视觉与图像处理研究。

为了计算  $t$ , 通常需要结合先验知识估算粗略大气传输值, 然后通过各种方法对其进行细化, 但是细化过程往往复杂度较高而耗费大量时间。文献[3]运用高斯马尔可夫随机场(GMRF)进行细化操作, 而文献[4]在细化过程中使用谱抠图的方法, 这些细化方法本身均是大型稀疏算法, 复杂度高、运算时间长, 不适用于用户的实时操作。相比而言, 文献[5-6]在计算  $t$  时则不需要太多的运算时间。中值暗通道优先(MDCP)算法<sup>[6]</sup>使用中值滤波器, 简化了运算过程, 易于工程实现, 所以本文在空域计算中采用此方法对雾霾图像做去雾处理。

为了在去雾过程中进一步恢复退化图像的细节信息, 对空域处理后的图像进行变换域局部对比度增强。与传统的变换域对比度增强算法<sup>[7]</sup>相比, 本文算法考虑人眼视觉系统(HVS)调整图像整体频率分量, 避免了图像的块状效应。同时, 沿着边缘方向增强局部对比度极大地减少了振铃效应的发生。

以上所有方法在去雾过程中均忽略了噪声的影响, 而噪声是一个普遍存在的现象<sup>[8]</sup>, 很多算法在图像复原中考虑了噪声的影响<sup>[9]</sup>。同样, 本文根据噪声建立新的去雾模型, 首先对降质图像进行去噪预处理, 而后采用双重域(空域和变换域)方法先后对预处理图像进行复原增强。实验表明, 本文去雾算法显著提升了降质图像的质量(纹理、细节和颜色), 具有很好的鲁棒性和实用性。

## 1 降质模型

在过去的研究工作中, 大部分学者仅考虑雾霾图像退化模型<sup>[3-5]</sup>, 很少有学者考虑雾霾图像的噪声。本文考虑图像中可能存在的噪声, 因此图像降质退化模型可以描述为

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

式中,  $n$  为噪声分布函数。本文考虑均值为零、标准差为  $\sigma$  的高斯白噪声。

## 2 本文算法

### 2.1 预处理方法

非局部均值滤波器<sup>[10]</sup>是一种简单高效的图像去噪滤波器, 因此, 考虑到含雾图像的噪声影响, 首先使用非局部均值滤波器对退化图像进行去噪预处理。

非局部均值滤波器的关键思想是基于相似块的方法, 利用与当前相邻像素相似的像素值来恢复当前像素的强度, 表示为

$$I'(x) = \frac{1}{C(x)} \int_{\varphi} \omega(x, y) I(y) dy \quad (2)$$

式中:  $I$  为当前待处理图像;  $\varphi$  为中心在  $x$  点的搜索窗

口, 通常大小设定为  $21 \times 21$ ; 权函数  $\omega(x, y)$  的计算采用基于区域比较的相似强度方法;  $C(x)$  为正则化因子。具体表示为

$$\begin{cases} \omega(x, y) = \exp\left(-\frac{\int_{\Omega} G(\varepsilon) |I(x + \varepsilon) - I(y + \varepsilon)|^2 d\varepsilon}{a^2}\right) \\ C(x) = \int_{\Omega} \omega(x, y) dy \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $G$  为高斯核函数;  $a$  为控制指数函数衰减的滤波参数, 实验中将其设为标准差的  $\sqrt{2}$  倍。标准差通过使用小波系数的内侧绝对偏差来估计<sup>[11]</sup>。

通过预处理消除噪声对降质图像的影响, 对后续的图像清晰度增强作用很大。

### 2.2 MDCP

文献[4]中的 DCP 方法产生了  $\theta_D(x)$ , 即

$$\theta_D(x) = \min_{x \in \Omega} \left( \min_{c \in \{r, g, b\}} \frac{I^c(x)}{A} \right) \quad (4)$$

式中,  $\Omega$  为  $5 \times 5$  或  $11 \times 11$  的方形区块。然而, 由于最小化求解交叠了图像边缘区域导致去雾图像光晕效应的出现, 因此, 类似于文献[5]的思想, 使用中值滤波器替代最小化操作产生相应的中值 DCP(MDCP)

$$\theta_M(x) = \text{med}_{x \in \Omega} \left( \min_{c \in \{r, g, b\}} \frac{I^c(x)}{A} \right) \quad (5)$$

中值滤波器能保持图像原有边缘并且光滑平坦区域, 同时, 中值滤波操作的另一个优势在于其运算快速高效。与文献[5]中应用两次中值滤波操作估计大气光幕  $A(1-t(x))$  相比, 本文的 MDCP 仅使用一次中值滤波器, 在估计大气传输函数  $t(x)$  上减少了运算时间。

类似于文献[4]的方法, 代入大气散射方程中估计大气传输函数

$$t_M(x) = 1 - \rho \theta_M(x) \quad (6)$$

式中,  $\rho$  在实验中的取值为 0.95。

文献[4]采用光谱消光方法光滑  $t_D(x)$ , 从而恢复原始图像的边缘, 获得去雾效果图, 但该方法需要消耗很长的运算时间。相反, 运用本文的 MDCP 进行图像去雾几乎不需要对  $t_M(x)$  进行光滑处理。

MDCP 去雾图像可以表示为

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\max(t_M(x), \xi)} + A \quad (7)$$

式中,  $\xi$  取值较小, 本文根据实验取值为 0.1。

图1中, 将本文空域增强算法与文献[4]和文献[5]的方法进行了对比。其中,  $I$  表示输入的原始退化图,  $J_{\text{Dark}}$  和  $J_{\text{Taref}}$  分别为采用文献[4]和文献[5]的方法获得的复原图,  $J_{\text{Median}}$  为本文 MDCP 处理效果。

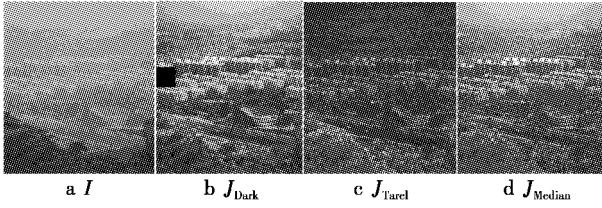


图1 3种去雾算法结果对比图

Fig.1 Comparison of three kinds of haze removal algorithms

### 2.3 局部对比度增强

通过在变换域的局部对比度增强进一步恢复退化图像的细节信息。

#### 2.3.1 DCT 域的块梯度

令  $F$  为大小是  $N \times N$  图像块  $f$  的 DCT 块;  $F(u, v)$  为位于  $(u, v)$  的 DCT 系数;  $f(i, j)$  为点  $(i, j)$  的图像像素值。局部图像梯度可采用块梯度来表示, 定义为

$$\mathbf{G} = G_{\text{ver}} \cdot \hat{i} + G_{\text{hor}} \cdot \hat{j} \quad (8)$$

式中,  $G_{\text{hor}}$  和  $G_{\text{ver}}$  分别是水平块梯度和垂直块梯度, 为

$$\begin{cases} G_{\text{hor}} = \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{\frac{N}{2}-1} (f(i, j) - f(i, N-j)) \\ G_{\text{ver}} = \sum_{i=0}^{\frac{N}{2}-1} \sum_{j=0}^{N-1} (f(i, j) - f(N-i, j)) \end{cases} \quad (9)$$

块梯度可以从第一行和第一列的 DCT 奇系数中获得。从 DCT 系数的公式中<sup>[12]</sup>可以得到第一列的 DCT 奇系数表达式, 为

$$F(2l+1, 0) = \frac{\sqrt{2}}{N} \sum_{i=0}^{\frac{N}{2}-1} \sum_{j=0}^{N-1} (f(i, j) - f(N-i, j)) \cdot \cos \frac{(2i+1)(2l+1)\pi}{2N} \quad (10)$$

式中,  $l=0, \dots, N/2-1$ 。

结合式(10), 每一个块梯度可以通过 DCT 奇系数的加权和获得<sup>[12]</sup>, 即

$$\begin{cases} G_{\text{hor}} = F(0, 1) + \frac{1}{2}F(0, 3) - \frac{1}{4}F(0, 5) - \frac{1}{4}F(0, 7) \\ G_{\text{ver}} = F(1, 0) + \frac{1}{2}F(3, 0) - \frac{1}{4}F(5, 0) - \frac{1}{4}F(7, 0) \end{cases} \quad (11)$$

#### 2.3.2 梯度方向局部对比度增强

第  $n$  个频带在水平和垂直方向上组成了各自方向的 DCT 系数。因此, 第  $n$  个频带在水平和垂直方向上可以表示为

$$\begin{cases} \Omega_n^{\text{hor}} = [F(n, 0), F(n, 1), \dots, F(n, N-1)] \\ \Omega_n^{\text{ver}} = [F(0, n), F(1, n), \dots, F(N-1, n)] \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $n=0, \dots, N-1$ 。

基于 HVS 的第  $n$  个频带对比度<sup>[13]</sup>在水平和垂直方向上通过局部能量变化比计算, 为

$$c_n^\alpha = (n+1) \cdot \frac{\|\Omega_n^\alpha\|}{\sum_{l=0}^{n-1} \|\Omega_l^\alpha\|} \quad (13)$$

式中:  $\|\cdot\|$  表示  $L_2$  范数;  $\alpha$  为 hor, ver。因此, 可以定义变换域中位于  $(u, v)$  的局部对比度为

$$c_{u,v} = (c_u^{\text{hor}}, c_v^{\text{ver}}) \quad (14)$$

由此, 定义  $\bar{c}_n^\alpha$  为第  $n$  个频带的方向增强对比度, 那么在  $(u, v)$  点的局部增强对比度可表示为

$$\bar{c}_{u,v} = (\lambda_u^{\text{hor}} \cdot c_u^{\text{hor}}, \lambda_v^{\text{ver}} \cdot c_v^{\text{ver}}) = (\bar{c}_u^{\text{hor}}, \bar{c}_v^{\text{ver}}) \quad (15)$$

式中,  $\lambda_\alpha^\alpha$  为  $\alpha$  方向上的增强因子。

同理, 方向增强对比度也可以从能量变化比得出。令  $\bar{\Omega}_n^\alpha$  为第  $n$  个方向增强频带, 结合式(13)和式(15), 可以用方向增强频带表示方向增强对比度, 即

$$\bar{c}_n^\alpha = (n+1) \cdot \frac{\|\bar{\Omega}_n^\alpha\|}{\sum_{l=0}^{n-1} \|\bar{\Omega}_l^\alpha\|} = \lambda_n^\alpha \cdot (n+1) \cdot \frac{\|\Omega_n^\alpha\|}{\sum_{l=0}^{n-1} \|\Omega_l^\alpha\|} \quad (16)$$

另外, 通过引入局部能量变化比来建立增强频带和原先频带之间的关系, 即

$$\|\bar{\Omega}_n^\alpha\| = \lambda_n^\alpha \cdot R_n^\alpha \cdot \|\Omega_n^\alpha\| \quad (17)$$

式中, 局部能量变化比  $R_n^\alpha$  可表示为

$$R_n^\alpha = \frac{\sum_{l=0}^{n-1} \|\bar{\Omega}_l^\alpha\|}{\sum_{l=0}^{n-1} \|\Omega_l^\alpha\|} \quad (18)$$

式中,  $\alpha$  为 hor, ver。从式(17)可以看出, 增强频带通过更新较低频带使用局部能量变化比递归计算求得。根据式(12)和(17), 各自方向上的增强 DCT 系数与原先 DCT 系数的关系式可表示为

$$\bar{F}^\alpha(u, v) = \begin{cases} F(u, v) & 0 \leq u \text{ or } v \leq \lfloor \frac{N}{3} \rfloor \\ \sqrt{\lambda_c^{\text{hor}}} \sqrt{R_v^{\text{hor}}} \cdot F(u, v) & \alpha \text{ 为 hor} \\ \sqrt{\lambda_c^{\text{ver}}} \sqrt{R_u^{\text{ver}}} \cdot F(u, v) & \alpha \text{ 为 ver} \end{cases} \quad (19)$$

因此, DCT 系数的局部增强对比度为

$$\tilde{F}(u, v) = \bar{F}^{\text{hor}}(u, v) + \bar{F}^{\text{ver}}(u, v) \quad (20)$$

为了避免块状效应, 对频率低于前 3 个最低频带的分量不进行调整, 则增强参数可设定为

$$\lambda_n^\alpha = \begin{cases} 1 & 0 \leq n \leq \lfloor N/3 \rfloor \\ \lambda_c^\alpha & \text{otherwise} \end{cases} \quad (21)$$

同时, 为了避免振铃效应, 局部对比度应该沿着边界梯度的垂直方向进行增强, 也就是边界所在的方向。对水平和垂直的块梯度设定各自权重系数, 根据边界方向调整对比度, 从而得到沿着边界方向的增强 DCT 系数为

$$\bar{F}(u,v) = \frac{G_{ver}}{G_{hor} + G_{ver}} \cdot \bar{F}^{hor}(u,v) + \frac{G_{hor}}{G_{hor} + G_{ver}} \cdot \bar{F}^{ver}(u,v) \quad (22)$$

对多幅不同图像进行去雾实验,最终设定增强参数λ的值,其水平方向和垂直方向的增强参数值λ<sub>c</sub> = 3。

图2展示了本文局部对比度增强算法和传统的其他两种方法的效果。文献[13]的方法由于对低频带的修正导致块状效应的出现,效果图多处区域不同程度存在块状现象,见图2a和图2d显现的块状效应;对比文献[7]的方法,尽管减少了块状效应,但沿着尖角边缘附近产生振铃效应,从图2b的放大图图2e中可见一斑;而本文算法既减少了块状效应又避免了振铃现象的出现,展现了较好的局部增强效果,图2c和图2f较好地展示了本文的局部细节增强效果。

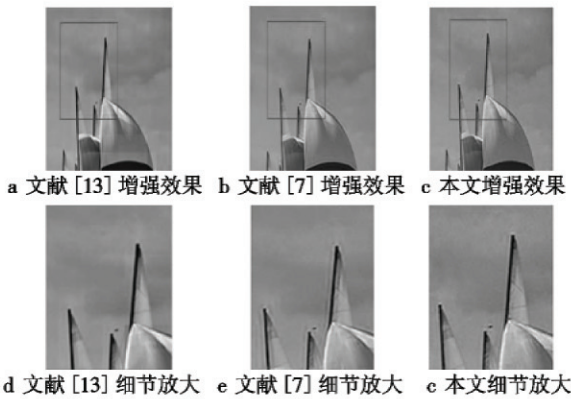


图2 局部增强效果图与相应细节放大对比图

Fig.2 Local enhancement images and the corresponding detailed ones

### 3 实验结果

#### 3.1 自然场景图像

图3展示了两幅自然降质场景图像的去雾效果。其中,图3b和图3e为文献[4]的暗通道算法得到的结果,图3c和图3f为去雾结果。由图3c和图3f可以看出,采用本文算法得到的图像无块状效应和振铃效应的出现,且在图像颜色恢复上更接近于人眼观察的舒适度。

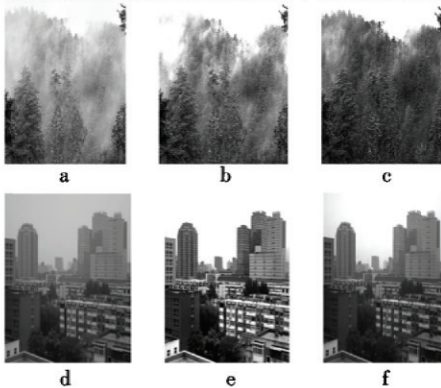


图3 结果对比图

Fig.3 Comparison results

本文通过运算时间与文献[4]的方法做比较。观察表1中的数据可得,随着图片大小的增加,文献[4]的算法时间显著增多,而本文算法时间缓慢增加,且运算时间较文献[4]的算法明显减少。

表1 算法时间比较

Table 1 Comparison of operation time

图序	算法	图片大小		
		304 × 195	450 × 338	600 × 450
a	文献[4]	12.511 7	31.657	65.134 9
	本文	3.459 7	7.884 6	13.393 2
b	文献[4]	13.311 7	31.741 8	66.198 3
	本文	3.964 6	8.287 3	15.227 9

#### 3.2 实验模拟加噪图像

为了进一步验证去雾算法对噪声的去除作用,在实验中对降质图像加入均值为0、标准差为10的高斯白噪声。图4b为图4a加噪后的图像,图4c和图4e分别为忽略噪声干扰得到的对应于图4b的传输图和去雾结果图,可以明显看出图中噪声的存在。而图4d和图4f中很好地去除了噪声对图像的影响,验证了本文算法考虑噪声模型对图像去雾的可行性和有效性。

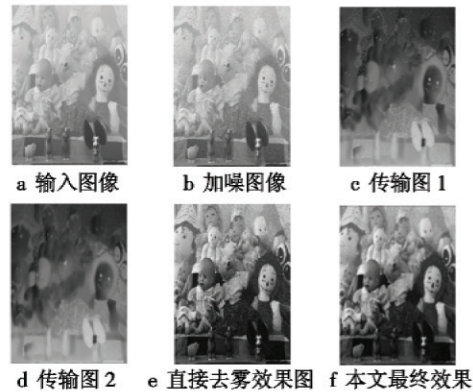


图4 噪声图像去雾结果

Fig.4 Haze removal results of the noise image

### 4 结论

本文提出一种基于空域和变换域的双重域方法来提高雾天图像的可见度。首先基于加噪模型对降质图像进行去噪预处理,在空域采用MDCP对图像去雾操作,而后在变换域提高图像的细节信息(局部对比度)。本文算法在去除雾霾作用的同时增强了图像的细节信息,较以往传统算法复杂度更低,且复原效果较符合人眼观察的舒适度,具有相当的可行性和实用性。

#### 参考文献

[1] 方帅,王勇,曹洋,等.单幅雾天图像复原[J].电子学报,2010,38(10):2279-2284. (FANG S, WANG Y, CAO Y, et al. Restoration of image degraded by haze[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(10):2279-2284.)

- (4):673-680.)
- [4] 刘珊中,孙隆和,车宏.  $H_\infty$  控制在机载光电跟瞄系统中的应用[J]. 火力与指挥控制, 2007, 32(12): 114-117. (LIU S Z, SUN L H, CHE H. Application of  $H_\infty$  control to airborne electro-optical tracking & pointing system[J]. Fire Control and Command Control, 2007, 32(12): 114-117.)
- [5] 王新屏,张显库,张丽坤.  $H_\infty$  鲁棒滤波器与 Kalman 滤波器的对比[J]. 系统工程与电子技术, 2003, 25(10): 1267-1269. (WANG X P, ZHANG X K, ZHANG L K. Comparison of  $H_\infty$  robust filter and Kalman filter[J]. Systems Engineering and Electronics, 2003, 25(10): 1267-1269.)
- [6] 林岳松,薛安克,钱积新. 基于 LMI 方法的鲁棒  $H_\infty$  滤波器设计[J]. 电路与系统学报, 2004, 9(5): 81-85. (LIN Y S, XUE A K, QIAN J X. Design of robust  $H_\infty$  filter based on LMI approach[J]. Journal of Circuits and Systems, 2004, 9(5): 81-85.)
- [7] 王振华,沈毅,张筱磊,等. 不确定线性描述系统的鲁棒  $H_\infty$  滤波器[J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(9): 1878-1883. (WANG Z H, SHEN Y, ZHANG X L, et al. Robust  $H_\infty$  filter for uncertain linear descriptor systems [J]. Systems Engineering and Electronics, 2012, 34(9): 1878-1883.)
- [8] 周佳加,刘站奇,侯恕萍,等. 基于 LMI 的  $H_\infty$  滤波器在 UUV 纵倾控制中的应用[J]. 中国造船, 2013, 54(4): 137-145. (ZHOU J J, LIU Z Q, HOU S P, et al. Numerical simulation for the pitch control of UUV based on  $H_\infty$  filter and LMI method [J]. Shipbuilding of China, 2013, 54(4): 137-145.)
- [9] GERSHON E, SHAKED U, YAESH I.  $H_\infty$  control and filtering of discrete-time stochastic systems with multiplicative noise[J]. Automatica, 2001, 37(3): 409-417.
- [10] 王军. 基于 LMI 的参数不确定线性系统鲁棒  $H_\infty$  滤波方法研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2007. (WANG J. Robust  $H_\infty$  filtering method study based on LMI of linear systems with parameters uncertain [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2007.)
- [11] GUO Y F, LI S Y. Improved  $H_\infty$  filtering for Markov jumping linear systems with non-accessible mode information[J]. Science in China Series F: Information Sciences, 2009(11): 2180-2189.
- [12] 俞立. 鲁棒控制——线性矩阵不等式处理方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 214-218. (YU L. Approach of linear matrix inequality[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 214-218.)
- 
- (上接第 20 页)
- [2] 方雯,刘秉瀚. 反馈调节机制的暗通道去雾算法[J]. 计算机应用, 2013, 33(7): 1998-2001. (FANG W, LIU B H. Dehazing algorithm based on dark channel with feedback regulation mechanism [J]. Journal of Computer Applications, 2013, 33(7): 1998-2001.)
- [3] FATTAL R. Single image dehazing [C]//ACM Transactions on Graphics, 2008. doi: 10.1145/1360612.1360671.
- [4] HE K M, SUN J, TANG X O. Single image haze removal using dark channel prior [C]//Proceedings of the 27th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, CVPR, 2009: 1956-1963.
- [5] TAREL J P, HAUTIERE N. Fast visibility restoration from a single color or gray level image [C]//Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Kyoto, Japan, 2009: 2201-2208.
- [6] GIBSON K, VO D, NGUYEN T. An investigation in dehazing compressed images and video [C]//Proceedings of IEEE Conference, 2010. doi: 10.1109/OCEANS. 2010. 5664479.
- [7] CHAUDHRY A, IQBAL K, KHAN A, et al. Enhancing contrast of compressed images: Reducing block artifacts adaptively [C]//Multitopic Conference, INMIC '06, IEEE, 2006: 140-145.
- [8] MATLIN E, MILANFAR P. Removal of haze and noise from a single image [C]//SPIE Conference on Computational Imaging, 2012. doi: 10.1117/12.906773.
- [9] SCHECHNER Y Y, AVERBUCH Y. Regularized image recovery in scattering media [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2007, 29(9): 1655-1660.
- [10] BUADES A, COLL B, MOREL J M. A non-local algorithm for image denoising [C]//IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, San Diego, 2005: 60-65.
- [11] LOU Y, ZHANG X, OSHER S, et al. Image recovery via nonlocal operators [J]. Journal of Scientific Computing, 2010, 42(2): 185-197.
- [12] WU C B, YAO C Y, LIU B D, et al. DCT-based adaptive thresholding algorithm for binary motion estimation [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2005, 15(5): 694-703.
- [13] TANG J S, PELI E, ACTON S. Image enhancement using a contrast measure in the compressed domain [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2003, 10(10): 289-292.