

# 结合 $K$ 均值聚类的暗通道去雾改进算法

陈 勇, 郝裕斌, 张开碧

(重庆邮电大学 智能仪器仪表及工业自动化与测试技术创新团队, 重庆 400065)

**摘 要:** 针对暗通道先验去雾算法在处理单幅图像去雾时计算复杂度高且对于天空等高亮区域有局限性而易产生失真的问题,从暗通道模型出发,提出首先利用双暗通道拟合进行透射图估计,然后采用  $K$  均值聚类算法对有雾图像进行区域分类之后再针对天空区域估计出大气光强度的算法。该算法增强了图像的细节信息,并大大降低了计算复杂度,且提升了大气光强度估计值的准确性,有效抑制了高亮区域的失真。主观和客观评价表明,该算法能够取得比传统算法更好的去雾效果。

**关键词:** 暗原色先验去雾;透射率;大气光强度; $K$  均值聚类

**中图分类号:** TP391.41 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-5868(2016)06-0876-06

## Improvement of Haze Removal Method Combining Dark Channel Priority with $K$ -means Clustering Algorithm

CHEN Yong, HAO Yubin, ZHANG Kaibi

(Intelligence Instrument & Industry Autoimmunization and Test Technology Innovation Fellowship,  
Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, CHN)

**Abstract:** The traditional single image dehazing algorithm based on dark channel prior has high computational complexity, and is prone to distortion with the sky and other highlighted areas. Based on a prior theory of dark channel, in this paper, first multi-dark-channel fitting was used to get the transmission map, then the  $K$ -means clustering algorithm was used to obtain a non-sky area. And then, the atmospheric light intensity in the sky area was estimated, which enhances the image detail and greatly reduces the computational complexity, and the accuracy of the atmospheric light value is more accurate, and also the distortion in the highlighted area is effectively suppressed. Through the subjective observation and objective evaluation, this algorithm can obtain good defogging effect compared with the classic dark channel algorithm.

**Key words:** dark channel prior; transmittance; atmospheric light intensity;  $K$ -means clustering

## 0 引言

当前雾霾已经成为一种常见的自然现象,它会导致图像中目标的对比度降低、饱和度下降和色调偏移,极大地影响了各种户外视觉系统的发挥,因此,围绕如何有效去雾人们提出了各种方法<sup>[1]</sup>。近

年来,利用单幅图像去雾的研究取得了很大进展。

Tan<sup>[2]</sup>利用最大化局部对比度的方法来恢复图像的色彩对比,在某些场景图像上取得了较好效果,但是该方法并不符合真实的物理模型,得到的结果容易失真。Fattal<sup>[3]</sup>假定透射率和表面投影在局部不相关,从而估算出景物反射率,以此推断光在空气中传播的透射率,最终达到去雾的目的。但该方法的性能很大程度上取决于输入图像的统计特性,在

收稿日期:2016-02-02.

基金项目:重庆市教委科学技术研究项目(KJ1400434).

独立成分变化不显著的区域去雾效果不佳。近年来,通过对图像数据做各种假设或者依据统计规律来进行单幅图像去雾的方法取得了显著的进展。2009年He等人<sup>[4]</sup>通过对大量户外自然图像的统计实验得出:在户外无雾图像中,除天空区域外,绝大多数图像块中都有一些在某个色彩通道亮度值很小的像素。基于该实验结论,He等<sup>[5]</sup>提出了暗通道先验模型,通过暗通道假设直接恢复出无雾图像。该方法是目前最实用和有效的单幅雾天图像复原方法之一。但是,He算法仍然存在一些局限性。第一:利用软抠图算法来对透射率进行优化,导致算法的时间复杂度大大增加;第二:选取暗通道图像中0.1%亮的像素点,对应有雾图像中的最大像素值作为大气光值,然而,当输入图像中含有大面积的白色非天空区域时,诸如白色建筑等,该算法估计的大气光强度不够精确,会造成去雾图像颜色失真。2013年He<sup>[6]</sup>又提出了用引导滤波代替软抠图的算法,虽然大大降低了计算复杂度,但是估计透射率的效率仍较低。目前,自适应滤波<sup>[7-10]</sup>被广泛运用到去雾算法中,其中Gibson等人<sup>[7-8]</sup>在文献<sup>[6]</sup>的基础上利用中值滤波得到了较好的去雾效果,但是去雾不充分且色度失真的问题依然存在。Furukawa等人<sup>[9-10]</sup>在文献<sup>[6]</sup>的基础上利用双边滤波替代He算法中的软抠图取得了不错的效果,但是对比度不佳,去雾效果仍不充分。

综上所述,本文在文献<sup>[6]</sup>的基础上通过对有雾图像的两个暗通道进行拟合,利用图像自身的信息对透射率进行估计和优化,较好地抑制了图像的失真,并省去了He算法中用软抠图对透射率优化的步骤从而大大降低了计算复杂度。对于大气光强度的估计,采用K均值聚类的方法将有雾图像分割为天空类(包括雾最浓区域)和非天空类,并在求得天空区域或者雾最浓区域中求取原图的最大像素值作为大气光A值,最后基于散射模型恢复出无雾图像。

## 1 暗原色去雾概述

### 1.1 F 大气散射模型

在计算机视觉中,大气散射模型认为户外景物图像通常因受大气中浑浊介质影响而降质。物体反射光线在到达相机之前,都会或多或少地被空气散射,这主要是由于介质(如尘埃、小水滴等)改变了光原本传播的路线,尤其在雾天场景条件下,这种影响

不可忽视。由McCartney<sup>[1-3]</sup>提出的大气散射模型被广泛用于描述有雾图像的形成过程:

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

式中, $x$ 为像素点的坐标, $I(x)$ 是观测图像的强度,即有雾图像; $J(x)$ 是目标辐射强度,即无雾图像; $A$ 是大气光成分, $t(x)$ 称为透射率,用来描述光通过介质投射到视觉系统没有被散射的部分。本文也是依据此模型来描述雾天图像的退化过程。

### 1.2 暗原色先验理论

He等<sup>[4]</sup>经过对大量户外无雾图像统计观察发现,在晴天,清晰无雾的户外图像,除了大面积水域或天空部分,其他部分的某一局部区域,总存在一些像素,这些像素的某一个颜色通道上具有很低的像素值,接近于0。表示为

$$J^{\text{dark}}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} \left\{ \min_{c \in \{r, g, b\}} (J^c(x)) \right\} \rightarrow 0 \quad (2)$$

式中, $J^c$ 代表 $J$ 的某一颜色通道强度, $\Omega(x)$ 为选取的局部领域, $J^{\text{dark}}(x)$ 称为暗原色。这种观察得出的经验性规律就叫做暗原色先验。

### 1.3 暗原色去雾

根据暗原色先验原理<sup>[5]</sup>,在有雾图像中,雾的存在会使像素的强度值变高,从而使具有很低的像素值的像素升高。也就是说在有雾图像中,像素的暗原色升高的值也就相当于雾的浓度,那么根据暗原色先验原理以及有雾图像的有关信息就可以估计雾的浓度评估光线穿过雾的投射信息,进而得到高质量的去雾图像,称其为暗原色去雾原理<sup>[12-13]</sup>。为估计透射率,假设大气光强度 $A$ 已知, $A^c$ 是 $A$ 的 $c$ 颜色通道, $t(x)$ 表示局部透射率。对式(1)做最小值滤波并在RGB三个颜色通道上取最小值,可得下式:

$$\min_{y \in \Omega(x)} \left( \min_{c \in \{r, g, b\}} \left( \frac{I^c(x)}{A^c} \right) \right) = t(x) \min_{y \in \Omega(x)} \left( \min_{c \in \{r, g, b\}} \left( \frac{J^c(x)}{A^c} \right) \right) + (1 - t(x)) \quad (3)$$

由暗通道先验理论,将式(2)代入式(3)可得

$$t(x) = 1 - \min_{y \in \Omega(x)} \left( \min_{c \in \{r, g, b\}} \frac{J^c(x)}{A^c} \right) \quad (4)$$

实际应用中,为了确保图像真实<sup>[11]</sup>,保存距离感,引入缓冲因子 $\omega$ ( $0 < \omega < 1$ ),得到透射率的最终估计式:

$$t(x) = 1 - \omega \min_{y \in \Omega(x)} \left( \min_{c \in \{r, g, b\}} \frac{J^c(x)}{A^c} \right) \quad (5)$$

在得到透射率后,最终由式(1)复原出无雾图像:

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{t(x)} + A \quad (6)$$

式(6)中,大气光强度 $A$ 的估计方法为:先取 $J^{\text{dark}}$ 中

亮度最大的 0.1% 像素, 然后取这些像素对应应在原图像中的最大值作为  $A$  的值。当  $t(x)$  接近于 0 时, 式(1)中  $J(x)t(x)$  也会接近于 0, 因此把透射率  $t(x)$  设定一个下限值, 取 0.1<sup>[12]</sup>。

## 2 结合 $K$ 均值聚类的暗通道去雾改进

本文利用双暗通道拟合和  $K$  均值聚类算法对

暗通道先验去雾算法进行了改进, 在单通道去雾的基础上得到两个暗通道图  $J_3^{\text{dark}}(x)$  和  $J_{15}^{\text{dark}}(x)$ , 并相应估计出透射率  $t_3(x)$  和  $t_{15}(x)$ , 然后经过线性拟合得到最终的透射率  $t_f(x)$ 。而大气光强度  $A$  的估计是先通过  $K$  均值聚类方法将有雾图像进行聚类, 在求得天空区域或者雾最浓区域中求取原图的最大像素值作为大气光  $A$  值, 最后根据去雾模型并依据式(6)复原出最终图像。具体流程图如图 1 所示。

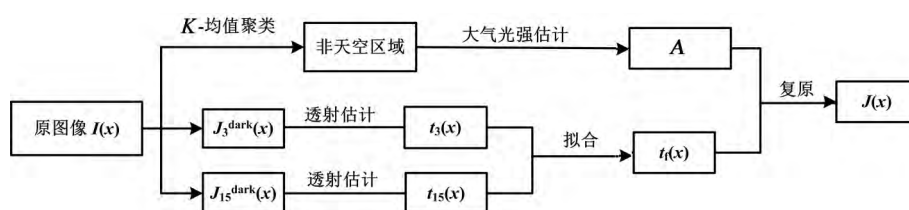


图 1 算法流程图

### 2.1 双暗通道拟合透射率估计

He 提出用引导滤波代替软抠图的算法在优化透射率抑制轮廓效应的同时降低了软图带来的计算复杂度高的问题, 但是估计透射率的效率仍较低, 且并没有从原理上解决失真的问题<sup>[11]</sup>。

分析可知, He 算法中选取领域为  $15 \times 15$  的  $\Omega(x)$ , 虽然模板越大, 暗通道趋近于 0 的程度越大, 会造成边界等细节信息的不精确, 导致失真。为了增强复原图中的细节信息, 而又避免增大透射率优化的计算复杂度, 本文采用双暗通道拟合的方法, 利用图像自身的细节信息对透射率进行优化, 同时又避免了采用软抠图、采用引导滤波等计算复杂度高的算法。在选取领域为  $15 \times 15$  的  $\Omega(x)$  的同时, 选取小领域的  $\Omega(x)$  对原图进行最小值滤波, 由实验验证可知, 选取小领域为  $3 \times 3$  时的效果最佳。然后针对得到的两个暗通道进行透射率估计, 再经线性拟合得到最终的透射率估计。算法流程如下:

步骤 1: 以  $15 \times 15$  的  $\Omega(x)$  为领域, 得到暗通道  $J_{15}^{\text{dark}}(x)$ :

$$J_{15}^{\text{dark}}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} \{ \min_{c \in \{r, g, b\}} (J^c(x)) \} \quad (7)$$

并以此  $J_{15}^{\text{dark}}(x)$  估算出  $t_{15}(x)$ :

$$t_{15}(x) = 1 - \omega_{15} \times J_{15}^{\text{dark}}(x) \quad (8)$$

步骤 2: 以  $3 \times 3$  的  $\Omega(x)$  为领域, 得到暗通道:

$$J_3^{\text{dark}}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} \{ \min_{c \in \{r, g, b\}} (J^c(x)) \} \quad (9)$$

并以此估算出

$$t_3(x) = 1 - \omega_3 \times J_3^{\text{dark}}(x) \quad (10)$$

步骤 3: 得到最终的透射率估计:

$$t(x) = \alpha t_3(x) + (1 - \alpha) t_{15}(x) \quad (11)$$

式中,  $\alpha$  是调节因子, 满足  $0 \leq \alpha \leq 1$ 。

通过上述方法用图像自身信息优化了透射率, 丰富了透射图的细节信息, 较好地抑制了图像的轮廓效应失真, 并且避免采用计算复杂度高的算法。如图 2 示, 本文选取  $\alpha$  值为 0.85, 得到图 2(e) 所示的优化后的透射图, 相比于未优化的透射图细节信息明显增强。

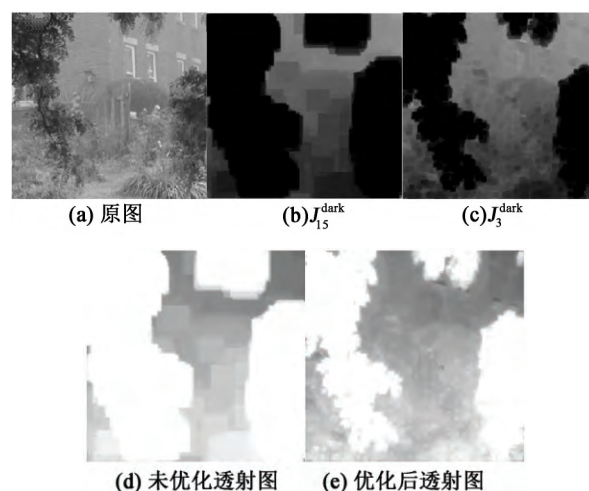


图 2 原图及各算法处理后的图像

### 2.2 基于 $K$ 均值聚类的大气光强度估计

He 方法选取暗通道图像中 0.1% 亮的像素点, 对应有雾图像中的最大像素值作为大气光值。对于

含有白色物较小的有雾图像该算法能得到较准确的估计。但是,当图像中含有高亮度区域时会导致大气光强度  $A$  估计不准确以及复原图像颜色失真的问题,影响图像去雾的效果。

分析可知,天空区域不符合暗通道先验理论<sup>[5]</sup>,但是这部分区域的像素值与大气光的光照强度接近,即大气光  $A$  的计算近似等于阴天天空的像素最大值,也可以将雾最浓处的像素最大值作为大气光值,那么怎样判断雾最浓区域或者天空区域才是求解大气光强度的关键。本文提出用  $K$  均值聚类<sup>[14-16]</sup>的方法将有雾图像分为天空区域(或雾最浓区域)和非天空区域,再在求得天空区域或者雾最浓区域中求取原图的最大像素值作为大气光  $A$  值。算法流程如下:

步骤 1:聚类特征量的选取。

由于天空区域有亮度高、平滑、纹理特征少的特点,本文选取的像素点的特征包括 HSV 空间的三个颜色特征,色调( $H$ )、饱和度( $S$ )、明度( $V$ )以及对比度( $F$ )和能量( $E$ )两个纹理特征。则图像中像素点的特征向量为

$$\mathbf{X} = (H, S, V, F, E)^T \quad (12)$$

步骤 2:计算像素的特征向量。

HSV 空间由 RGB 空间转换得到如式(13)、(14)与(15):

$$H = \begin{cases} \text{undefined} & \text{if } \max = \min \\ 60^\circ \times \frac{g-b}{\max-\min} + 0^\circ, & \text{if } \max = r \text{ and } g \geq b \\ 60^\circ \times \frac{g-b}{\max-\min} + 360^\circ, & \text{if } \max = r \text{ and } g < b \\ 60^\circ \times \frac{b-r}{\max-\min} + 120^\circ, & \text{if } \max = g \\ 60^\circ \times \frac{r-g}{\max-\min} + 240^\circ, & \text{if } \max = b \end{cases} \quad (13)$$

$$S = \begin{cases} 0, & \text{if } \max = 0 \\ \frac{\max-\min}{\max} = 1 - \frac{\min}{\max}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

$$V = \max \quad (15)$$

对比度和能量由灰度共生矩阵得到<sup>[17]</sup>,如式(16)与(17):

$$F = \sum_{n=0}^{L-1} n^2 \left\{ \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} p_d(i, j) \right\} \quad (16)$$

$$E = \sum_{i=0}^{L-1} \sum_{j=0}^{L-1} p_d^2(i, j) \quad (17)$$

步骤 3:任意选取  $2(K$  值)个子特征向量作为初始的聚类中心。

步骤 4:依据每个对象与每个中心的距离的最小值,将每个对象赋给最相似的类。其中距离  $M$  计算度量如式(18)所示,式中  $\tilde{x}_i$  为一个聚类中心的均值,  $C_i$  表示一个类。

$$M = \sum_{i=1}^k \sum_{x \in C_i} |x - \tilde{x}_i|^2 \quad (18)$$

步骤 5:更新类的中心,即计算每个类中对象的平均值作为新的中心,其中均值计算式为

$$\tilde{x}_i = \sum_{x \in C_i} x / |C_i| \quad (19)$$

步骤 6:循环第 4 步到第 5 步直到每个聚类不再明显地变化,输出结果。

步骤 7:根据分类结果估计大气光强度值。

如图 3 所示,对于有雾图像 3(a),进行  $K$  均值聚类之后进行二值化处理得到了划分为天空区域(黑色部分)和非天空类区域的图 3(b)。由于本文旨在分割出有雾图像中的大面积高亮度区域,对于分割精度要求不高,则如图所示  $K$  均值聚类方法已经达到了本文目的,且计算简单。在得到天空区域和非天空区域之后,在求得天空区域或者雾最浓区域中取原图的最大像素值作为大气光  $A$  值。在准确划分出非天空区域的基础上得到的大气光强度值更加精确。



(a) 原图

(b) 分割图

图 3 有雾图像和  $K$  均值聚类后经二值化处理所得的分割图

### 3 实验结果与分析

在得到透射率和大气光强度的估计之后通过式(6)复原出无雾图像。本文在操作系统为 Windows7、CPU 为 Intel(R) core(TM) 2Duo、3.0 GHz 处理器的 PC 机上利用 Matlab2008 软件实现了原方法与改进算法。下面给出本文算法和 He 算法以及文献的双边滤波算法实验效果的对比图,如图 4~6 所示。



由于暗通道先验理论对天空区域的局限性,文献[5]中 He 算法对于含有天空区域的有雾图像得到的效果图存在一定的失真,而且由于算法选择领域过大导致细节信息不够丰富。文献[8]中利用中值滤波得到的去雾曝光有曝光过度的问题,且对有大片天空部分的图像会产生色度失真。文献[9]中利用双边滤波复原得到的图像色彩整体比较暗沉,图像对比度较低,图像质量不高,部分区域不能有效去雾。而本文算法利用双暗通道拟合优化透射率,不仅增强了细节信息也大大降低了算法复杂度,减少了计算时间,并且将天空区域分割出来之后,再对非天空类区域利用暗通道先验理论进行大气光强度估计,复原图像的天空区域更加真实,图像在细节信息明显增强,得到了较好的整体效果。

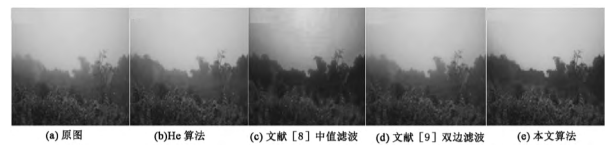


图 4 原图及各算法实验效果对比图(场景一)



图 5 原图及各算法实验效果对比图(场景二)

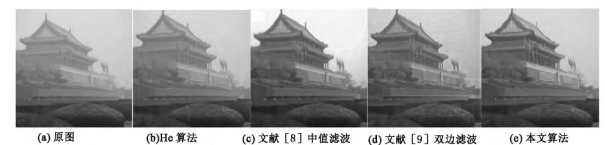


图 6 原图及各算法实验效果的对比图(场景三)

为了更好地分析对比各种算法得到的去雾图像的质量,本文选取了对比度、信息熵、峰值信噪比以及时间四个评价指标<sup>[18-19]</sup>。对比度的高低反映了图像的清晰度、细节表现及灰度层次的表现,值越高,说明图像越清晰。信息熵是从整个图像的统计特性来考虑,描述了图像的平均信息量,反映了图像携带信息量的大小,信息熵越大,则图像携带信息越多。峰值信噪比<sup>[20]</sup>是最广泛的评价图像质量的客观标准,值越大表示失真越小。时间反映了执行的耗时,也体现了算法的复杂度高低,时间越短则算法执行效率越高。如表 1 所示,文献[5]中 He 算法所得去雾图像虽然含有较高的信息熵,但对比度与信噪比较低,并且由于采用较为耗时的透射率优化算法导致计算复杂度高,去雾处理非常耗时。相比于 He

算法,文献[8]和[9]中算法的耗时明显降低,但是二者的对比度仍然不理想,特别是文献[8],信噪比较低,尤其对于有大片天空区域的有雾图像失真明显。本文算法去雾后图像具有较高的对比度、失真小且运算速度有进一步的提高。

表 1 客观评价指标

	算法	对比度	熵	PSNR/dB	耗时/s
图 4	He 算法	64.439 9	11.103 4	15.904 4	20
	文献[8]	64.395 7	12.436 9	13.603 5	4.07
	文献[9]	63.151 9	12.327 9	19.344 1	4.14
	本文算法	68.353 6	12.975 6	19.873 2	3.89
图 5	He 算法	31.301 1	13.465 8	17.475 5	17
	文献[8]	35.476 3	13.337 8	17.984 0	3.78
	文献[9]	34.420 1	13.676 1	17.825 2	3.58
	本文算法	38.136 9	13.861 7	19.258 5	3.43
图 6	He 算法	54.537 4	13.334 3	16.410 1	18
	文献[8]	55.143 5	13.573 0	14.367 4	2.68
	文献[9]	56.025 9	12.334 7	18.669 5	3.61
	本文算法	56.858 2	14.362 2	20.713 9	2.47

4 结论

本文提出了一种基于双暗通道拟合和  $K$  均值聚类的去雾算法。先通过对有雾图像两个暗通道的拟合得到透射率替代了 He 算法中用软抠图对透射率优化的步骤。然后采用  $K$  均值聚类的方法将有雾图像分割为天空类和非天空类,并在求得的天空区域或者雾最浓区域中求取原图的最大像素值作为大气光  $A$  值,提升了大气光强度估计值的精确性。最后复原出去雾图像。实验结果表明,该算法增加了图像的细节信息,有效抑制了失真,降低了算法复杂度,明显提升了去雾的执行速度,并且对于含有天空等高亮度区域时可以有效避免光晕效应和天空区域的失真等问题。

参考文献:

[1] Wu D,Zhu Q, Wang J, et al. Image haze removal: Status, challenges and prospects [C]// 4th IEEE International Conference on Information Science and Technology(ICIST), 2014: 492-497.  
[2] Tan R T. Visibility in bad weather from a single image[C]// IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, 2008: 1-8.  
[3] Fattal R. Single image dehazing[J]. Proc. of SIG-GRAPH, 2008, 27(3): 1-9 .  
[4] He K M,Sun J, Tang X O. Single image haze removal using dark channel prior [C]// Proc. of the IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, 2009: 1956-1963.  
[5] He K M,Sun J, Tang X O. Single image haze removal using

- dark channel prior[J]. IEEE Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 33(12): 2341-2353.
- [6] He K M, Sun J, Tang X O. Guided image filtering[J]. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2013, 35(6): 1397-1409.
- [7] Gibson K B, Vo D T, Nguyen T Q. An investigation of dehazing effects on image and video coding[J]. IEEE Trans. on Image Processing, 2012, 21(2): 662-673.
- [8] 黄素霞. 单幅图像中值暗通道先验去雾的改进算法[J]. 光电子·激光, 2015, 35(5): 1611-1617.
- Huang Suxia. Improvement algorithm for single image haze removing by median dark channel prior [J]. J. of Optoelectronics · Laser, 2015, 35(5): 1611-1617.
- [9] 王一帆, 尹传历, 黄义明, 等. 基于双边滤波的图像去雾[J]. 中国图象图形学报, 2014, 19(3): 386-392.
- Wang Yifan, Yin Chuanli, Huang Yiming, et al. Image haze removal using a bilateral filter[J]. J. of Image and Graphics, 2014, 19(3): 386-392.
- [10] Furukawa S, Fukuda T, Koga T, et al. High-speed min-max bilateral filter-based image dehazing by using GPGPU[C]// Conference on IEEE Adv. Mechatronic Systems (ICAMEchS), 2014 International, 2014: 459-462.
- [11] 嵇晓强, 戴 明, 孙丽娜, 等. 暗原色先验图像去雾算法研究[J]. 光电子·激光, 2011, 22(6): 926-929.
- Ji Xiaoqiang, Dai Ming, Sun Lina, et al. Research on the image haze-removal algorithm based on the prior dark-channel[J]. J. of Optoelectronics · Laser, 2011, 22(6): 926-929.
- [12] 高 银, 云利军, 石俊生, 等. 基于 TV 模型的暗原色理论雾天图像复原算法[J]. 中国激光, 2015, 42(8): 0113004.
- Gao Yin, Yun Lijun, Shi Junsheng, et al. Enhancement dark channel algorithm of fog image based on the TV model[J]. Chinese J. Lasers, 2015, 42(8): 0113004.
- [13] 曾 浩, 尚媛园, 丁 辉, 等. 基于暗原色先验的图像快速去雾[J]. 中国图象图形学报, 2015, 20(7): 914-921.
- Zeng Hao, Shang Yuanyuan, Ding Hui, et al. Fast image haze removal base on dark channel prior [J]. J. of Image and Graphics, 2015, 20(7): 914-921.
- [14] Kalam R, Manikandan K. Enhancing K-means algorithm for image segmentation [C]// 2011 IEEE International Conference on Process Automation, Control and Computing, 2011: 1-4.
- [15] 王易循, 赵勋杰. 基于  $K$  均值聚类分割彩色图像算法的改进[J]. 计算机应用与软件, 2010, 27(8): 127-130.
- Wang Yixun, Zhao Xunjie. Improving algorithm of  $K$ -means-based clustering segmentation of colour image[J]. Computer Applications and Software, 2010, 27(8): 127-130.
- [16] Liu J, Guo L. A new brain MRI image segmentation strategy based on  $K$ -means clustering and SVM [C]// IEEE 7th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics, 2015, 2: 270-273.
- [17] 李 光, 王朝英, 侯志强. 基于  $K$  均值聚类与区域合并的彩色图像分割算法[J]. 计算机应用, 2010, 30(2): 354-358.
- Li Guang, Wang Zhaoying, Hou Zhiqiang. Colour image segmentation algorithm based on  $K$ -means clustering and region merging[J]. J. of Computer Applications, 2010, 30(2): 354-358.
- [18] 李大鹏, 禹 晶, 肖创柏. 图像去雾的无参考客观质量评测方法[J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(9): 1753-1757.
- Li Dapeng, Yu Jing, Xiao Chuangbai. No-reference quality assessment method for defogged images[J]. J. of Image and Graphics, 2011, 16(9): 1753-1757.
- [19] Paek J, Ko J G. K-Means clustering-based data compression scheme for wireless imaging sensor networks [J]. IEEE Systems J., 2015, PP(99): 1-11.
- [20] 郭 璠, 蔡自兴. 图像去雾算法清晰化效果客观评价方法[J]. 自动化学报, 2012, 38(9): 1410-1419.
- Guo Fan, Cai Zixing. Objective assessment method for the clearness effect of image defogging algorithm [J]. Acta Automatica Sinica, 2012, 38(9): 1410-1419.
- 作者简介:**  
陈 勇(1963—), 男, 博士, 教授, 主要从事图像处理方面的研究。  
**E-mail:** chen Yong@cqupt.edu.cn
- =====
- (上接第 857 页)
- [9] Nguyen T, Hong C H, Le N T, et al. High-speed asynchronous optical camera communication using LED and rolling shutter camera [C]// 2015 Seventh Inter. Conf. Ubiquitous and Future Networks, 2015: 214-219.
- [10] Corbellini G, Aksit K, Schmid S, et al. Connecting networks of toys and smartphones with visible light communication[J]. IEEE Communi. Magazine, 2014, 52(7): 72-78.
- [11] Chow C W, Chen C Y, Chen S H. Visible light communication using mobile-phone camera with data rate higher than frame rate[J]. Opt. Express, 2015, 23(20): 26080-5.
- [12] Do T H, Yoo M. Performance analysis of visible light communication using CMOS sensors[J]. Sensors, 2016, 16(3): 309.
- [13] 刘 洋, 章国安. 可见光通信调制方式及其性能研究[J]. 激光与光电子学进展, 2014(9): 61-67.
- Liu Yang, Zhang Guoan. Study on modulation scheme of visible light communications and its performance [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014(9): 61-67.
- 作者简介:**  
陈泉润(1992—), 男, 博士研究生, 主要从事可见光通信与图像处理方面的研究。  
**E-mail:** qrchen@mail.ustc.edu.cn