

文章编号: 1004-4353(2020)02-0150-06

# 基于双容差机制的快速暗原色理论 雾天图像增强算法

孙美卫

(泉州经贸职业技术学院 信息技术系, 福建 泉州 362000)

**摘要:** 针对经典暗原色理论算法在处理雾天图像时出现的色调和亮度失真问题, 提出了一种基于双容差机制的快速暗原色理论雾天图像增强算法. 该算法首先通过容差机制分割图像, 并根据阈值判断图像的明亮和非明亮区; 然后引入改进的高斯平滑滤波对透射率图像进行平滑处理, 以此优化透射率图像; 最后通过引入容差机制对透射率图像进行修正, 以此得到更加清晰的图像. 将本文方法与经典的暗原色算法进行对比表明, 本文方法在亮度、颜色保真度和时间效率上均优于暗原色算法, 因此本文方法可为雾天图像的处理提供参考.

**关键词:** 暗原色理论; 图像增强; 双容差机制; 明亮区域分割

**中图分类号:** TP751

**文献标识码:** A

## Enhancement dark channel algorithm of fog image based on the double-tolerance mechanisms

SUN Meiwei

(Department of Information Technology, Quanzhou College of Economical and Trade,  
Quanzhou 362000, China)

**Abstract:** To deal with the image hue and brightness distortion problems in the classic dark channel theory algorithm, enhancement dark channel algorithm of color fog image based double-tolerance mechanisms is proposed. Firstly, the image is segmented by the tolerance mechanism and distinguishes between bright areas and dark channel areas according to the threshold. Then, the modified Gaussian filtering is introduced, and proposes the transmission image. At last, the transmission image is modified by introducing tolerance mechanism to get a clear image. The comparison between this algorithm and the classical dark primary color algorithm shows that this algorithm is better than dark primary color algorithm in brightness, color fidelity and time efficiency. Therefore, our algorithm can provide a reference for the image dehazing.

**Keywords:** dark channel theory; image enhancement; double-tolerance mechanisms; brightness region segmentation

## 0 引言

在雾天状况下拍摄图像时, 图像的对比度和颜色会发生较大改变, 这给智能交通系统、视觉监控系统中的目标识别带来较大干扰<sup>[1]</sup>. 目前, 处理雾中拍摄的图像所使用的方法主要有直方图均衡化方法<sup>[2]</sup>、Retinex 方法<sup>[3]</sup>和暗通道先验方法<sup>[4]</sup>. 这些方法中, 因暗通道先验方法简化了模型的复杂度, 不需要深度的图像信息和复杂设备, 因此更受到学者们的关注; 但使用该方法处理后的图像中常会出现光晕

收稿日期: 2019-11-25

作者简介: 孙美卫(1975—), 女, 讲师, 研究方向为数字图像处理.

和亮度损失等问题,不仅影响图像的视觉效果,而且干扰图像中有效信息的获取.为了改善暗通道先验方法的处理效果,一些学者对其进行了研究.例如:G.Meng 等<sup>[5]</sup>运用散射立方的方法替代先验估计求出初始的暗通道图像,该方法虽然可增加算法的鲁棒性,但对透射率图像的优化方面仍存在不足,即复原后图像在天空区域会出现光晕现象.文献[6-7]分别运用 TV 模型和四阶 PDE 模型对图像的透射率进行了处理,但这两种方法未能考虑天空区域对图像亮度的影响.Y.Gao 等<sup>[8]</sup>通过引入天空区域的分割来求取全局大气背景光,但因处理过程中引入了拉普拉斯滤波,使得算法复杂度较高.另外,上述研究针对的只是特定浓度条件下的雾天图像,而对自然环境下的雾天图像效果仍不理想.基于上述研究,本文从机器视觉角度出发,提出一种基于双容差机制的快速暗原色理论雾天图像增强算法,并通过实验验证本文方法的有效性.

## 1 暗通道先验理论

在计算机视觉和计算图形领域,雾天图像的形成可用以下数学模型描述<sup>[9]</sup>:

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

其中: $I(x)$  表示被观察或相机接收到的图像; $J(x)$  为在无雾情况下的图像; $t(x)$  为介质的透射率; $A$  为图像中无限远处的某个像素值,并将其定义为全局大气背景光,其值通常根据经验公式求取; $J(x)t(x)$  为直接衰减项,即反射光在介质中因散射等作用而出现的衰减; $A(1 - t(x))$  为大气光成分,大气散射会使场景的颜色发生偏移.

暗原色先验理论<sup>[4]</sup>认为,在大多无雾图像的某些局部区域中总存在趋近于 0 的像素点,即

$$J^{\text{dark}}(x) = \min_{c \in \{r, g, b\}} (\min_{y \in \Omega(x)} J_c(y)). \quad (2)$$

式中: $J_c$  为图像的某一个通道; $\Omega(x)$  为图像中以像素  $x$  为几何中心的某一区域; $J^{\text{dark}}(x)$  为图像在  $\Omega(x)$  区域中的暗原色.

有雾图像的初始透射率图像可表示为

$$t(x) = 1 - \min_{c \in \{r, g, b\}} (\min_{y \in \Omega(x)} I(x)), \quad (3)$$

式中  $t(x)$  是以  $x$  为中心邻域的透射率.为了优化透射率图像,传统方法通常采用的是 Guided image filtering 方法<sup>[9]</sup>,即采用导向滤波对初步获取的透射率图像进行保持边缘的平滑处理.细化后的透射率图像可表示为

$$t(x) = 1 - \omega \min_{c \in \{r, g, b\}} (\min_{y \in \Omega(x)} I(x)), \quad (4)$$

式中  $\omega$  为调节参数,  $\omega \in (0, 1)$ .当  $\omega$  越接近于 1,说明处理后图像中雾的残留量越少,但雾太少会造成图像深度的不协调.本文通过大量实验发现,当  $\omega = 0.95$  时,复原后的图像其深度感和视觉效果均较好.

全局大气背景光  $A$  的获取方法<sup>[4]</sup>为:首先通过最小值方法获取暗通道图像,然后对该图像内的像素进行从大到小的排序,并取前 0.1% 的像素进行均值处理,所得的值即为全局大气背景光  $A$ .通过得到的全局大气背景光  $A$  和细化后的透射率  $t(x)$  后即可得到如下的无雾图像的表达式:

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\max(t, t_0)} + A, \quad (5)$$

式中  $t_0 = 0.1$ .

## 2 基于双容差机制的快速暗原色理论雾天图像增强算法

经典的暗原色理论在处理梯度变化缓慢的图像时具有较好的效果,但是当图像中存在颜色陡变的区域时,就会出现明显的色彩失真和光晕现象<sup>[8]</sup>.造成这种现象的主要原因是,经典暗原色理论采用的是导向滤波处理方法,该方法虽然能够使暗原色图像得到一定的平滑,但平滑度仍然有所欠缺.另外,导向滤波处理方法的速度也较慢.基于上述问题,本文在经典的暗原色理论的基础上,提出一种基于双容

差机制的快速暗原色理论雾天图像增强算法,其具体步骤如下:

1) 判定明亮区域. 暗原色理论在处理图像时,因未把天空和其他的景物分开,因此在估计图像的透射率时会将透射率估计得偏小,进而使得处理后的图像出现明显的颜色失真<sup>[10]</sup>. 基于此,本文借鉴容差机制,将图像中的天空和其他区域进行分割,以此来判断雾天图像中是否有明亮的区域存在.

为了降低处理时间,本文根据容差机制引入一个容差系数  $K$ ,以此来判断暗通道像素与大气光  $A$  之间的差值. 若差值的绝对值大于等于  $K$ ,则判定该区域为非明亮区;若差值的绝对值小于  $K$ ,则判定该区域为明亮区. 判断明亮区域的计算公式为

$$\tilde{t}(x) = \begin{cases} 1 - \omega \min_{c \in \{r, g, b\}} \left( \min_{y \in \Omega(x)} \frac{I^c(x)}{A^c} \right) & |A - J^{\text{dark}}(x)| \geq K, \\ \frac{K}{|A - J^{\text{dark}}(x)|} \left( 1 - \omega \min_{c \in \{r, g, b\}} \left( \min_{y \in \Omega(x)} \frac{I^c(x)}{A^c} \right) \right) & |A - J^{\text{dark}}(x)| < K. \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $I^c(x)$  为图像的一个通道值,  $J^{\text{dark}}(x)$  为图像的暗通道像素.

2) 改进平滑处理方法. 本文通过大量实验发现,在对边缘特性影响不大的情况下,可以用复杂度较低的平滑算法代替复杂度较高的暗原色算法. 对各平滑处理算法进行复杂度和效果方面的综合比较后,本文采用经过改进的高斯平滑滤波<sup>[11]</sup>对图像进行平滑处理.

考虑到算法的复杂度,本文选用  $10 \times 10$  的滤波窗口. 经检验,采用改进的高斯滤波器处理透射率图像时,当宽度  $\sigma$  取 3 时图像的边缘可得到有效保持,非边缘则可得到较好的平滑处理,故本文选取高斯滤波器的宽度为 3. 实验中发现,采用改进的高斯滤波器处理透射率图像后,图像中的亮度仍有一定的损失,但对处理后的每个图像的像素值加上 30 时,图像的效果可以得到明显的改善,且对算法的复杂度和处理时间基本无影响.

图 1 为暗通道图像经不同高斯滤波方法处理的效果. 由图 1 可以看出,经高斯平滑处理的图像亮度明显低于暗通道图像的亮度,而应用改进的高斯平滑处理的图像其亮度基本和暗通道图像的亮度一致,这表明本文方法可较好地弥补图像经滤波处理后所导致的图像亮度损失的现象.



(a) 暗通道图像

(b) 高斯滤波方法处理的效果

(c) 改进的高斯滤波方法处理的效果

图 1 不同高斯滤波方法处理暗通道图像的效果

3) 模型修正. 对图像进行保边平滑处理后,透射率图像的清晰度会有所下降,并使得图像中的某些部分出现色彩失真. 为此,本文再次对透射率图像进行修正,修正公式为

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\min \left( \max \left( \frac{S}{A - J^{\text{dark}}}, 1 \right), \max(\tilde{t}(x), t_0), 1 \right)} + A. \quad (7)$$

式中:  $S$  为修正过程中引入的容差系数,  $\tilde{t}(x)$  为经过改进的高斯平滑滤波处理后的透射率图像. 根据公式(6)进行大量实验得,当  $K=35$  时处理后图像的保边平滑效果最好,因此本文将  $K$  取值为 35. 根据公式(7)进行大量实验发现,经保边平滑处理后  $S$  的取值为  $35/255(0.13725)$  时去雾效果较好.

图 2(a)为暗通道图像,图 2(b)和图 2(c)分别是经暗通道先验方法中的导向滤波和本文方法对暗通道图像进行滤波处理后的图像. 对比图 2(b)和图 2(c)可知,图 2(c)在对比度、图像边缘锐度和图像某些区域的亮度方面均优于图 2(b). 另外,在图 2(b)中的一些区域出现了透射率图像的估计错误,如图 2

(b)中左下角的车. 由此可知, 本文方法在处理透射率图像时其效果优于暗通道先验方法.

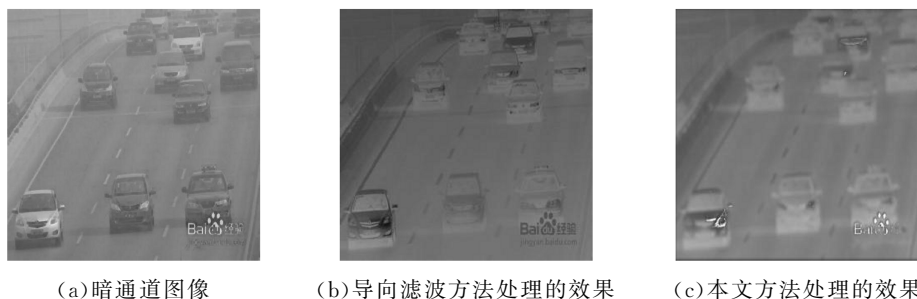


图2 不同滤波方法处理的暗通道图像效果

### 3 实验结果与分析

为验证本文方法的有效性, 将本文方法处理后的图像分别与原图、暗通道先验方法处理后的图像进行对比. 实验平台为: 双核 3.2 GHz CPU 计算机(1 024 MB), Windows XP 操作系统, Matlab R2010a 软件. 考虑监控设备的多样化, 在 200 张不同背景的雾天图像中随机抽取 5 幅图像作为实验图像, 各图像的像素尺寸分别为  $500 \times 375$ 、 $1024 \times 739$ 、 $800 \times 600$ 、 $600 \times 400$ 、 $512 \times 384$ . 实验结果如图 3—图 7 所示. 实验时, 高斯平滑滤波半径取 10, 容差系数  $S$  取 0.137 25.

由图 3—图 7 可以看出: 在图像的亮度方面, 经暗通道先验方法处理的图像的亮度明显低于原图, 而经本文方法处理的图像其亮度虽然低于原图, 但在视觉效果上较暗通道先验方法有明显改善. 在颜色保真度方面, 暗通道先验方法处理后的图像中存在明显的光晕现象, 且如图 4(b)、图 5(b)、图 6(b)和图 7(b)中的天空区域; 而本文方法处理后的图像未出现“光晕”现象, 且复原后的图像其颜色、亮度和清晰度都较好, 如图 3(c)、图 4(c)、图 5(c)、图 6(c)和图 7(c)所示. 另外, 暗通道先验方法处理的图像中有“雾气”出现(物体边缘), 而本文方法处理的图像未出现“雾气”.

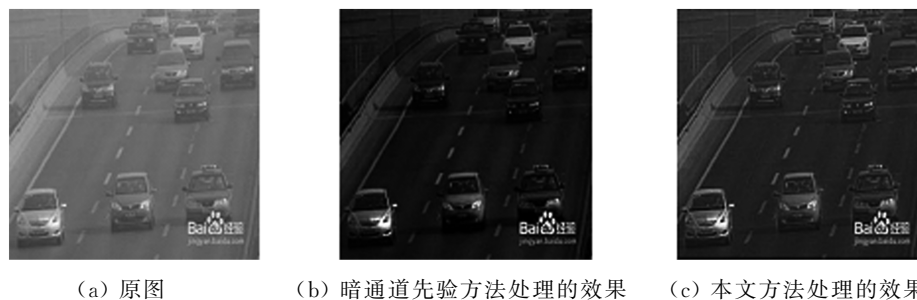


图3 交通监控图像经不同方法处理的效果

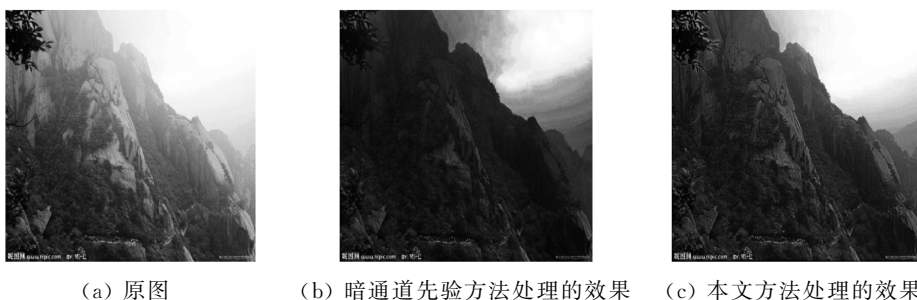


图4 高山景物图像经不同方法处理的效果





图 5 建筑景物图像经不同方法处理的效果



图 6 居民小区图像经不同方法处理的效果

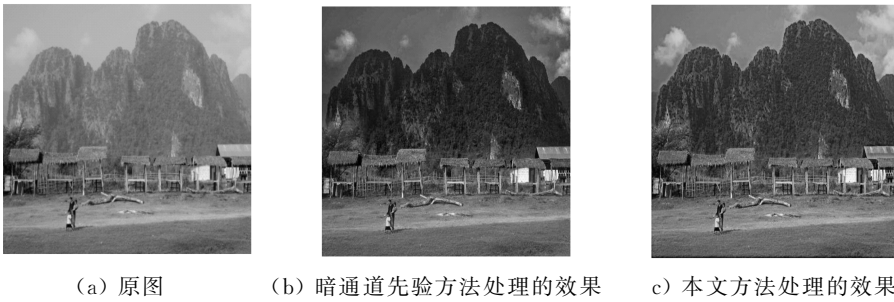


图 7 景区图像经不同方法处理的效果

本文方法和暗通道先验方法处理图像时所用的时间如表 1 所示. 由表 1 可看出, 本文方法在处理时间上显著低于暗通道先验方法, 且随着图像像素的增加其优势更加明显.

#### 4 结论

研究表明, 本文提出的基于双容差机制的快速暗原色理论图像增强算法在天空区域的图像视觉感和细节保真方面比暗通道算法有较大的提高, 即有效地解决了复原后图像的亮度损失和光晕现象等问题, 且其处理图像的速度显著优于暗通道算法; 因此, 本文方法在处理雾天图像方面具有较好的应用价值. 在今后的研究中, 我们将通过统计实验和模型修正等方法来提高算法的鲁棒性, 以进一步提高本文方法的适用性.

#### 参考文献:

- [1] WANG W, LI Z, WU S, et al. Hazy image decolorization with color contrast[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2019, 29: 1776-1787.
- [2] PIZER S M, AMBURN E P, AUSTIN J D, et al. Adaptive histogram equalization and its variations[J]. Computer Vision Graphics and Image Processing, 1987, 39(3): 355-368.

表 1 2 种方法处理图像的时间  $s$

图像	暗通道先验方法	本文方法
图 3	0.848 1	0.637 6
图 4	3.227 2	2.469 4
图 5	2.146 3	1.577 4
图 6	0.750 2	0.691 6
图 7	0.690 7	0.581 5

- [3] BNARNARD J J, FUNT B V. Analysis and improvement of multi-scale retinex[C]//5th Color and Imaging Conference Final Program and Proceedings. Scottsdale: Soc Imaging Sci Technol, 1997:221-226.
- [4] HE K, SUN J, TANG X. Single image haze removal using dark channel prior[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2010,33(12):2341-2353.
- [5] MENG G, WANG Y, DUAN J, et al. Efficient image dehazing with boundary constraint and contextual regularization[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. Sydney: IEEE, 2013:617-624.
- [6] 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(8):273-278.
- [7] 高银,云利军,石俊生,等. 基于四阶 PDE 模型的暗原色理论雾天图像增强算法[J]. 南京理工大学学报(自然科学版),2015(5):544-549.
- [8] GAO Y, SU Y, LI Q, et al. Single fog image restoration with multi-focus image fusion[J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2018,55:586-595.
- [9] HE K, SUN J, TANG X. Guided image filtering[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2012,35(6):1397-1409.
- [10] WU Q, ZHANG J, REN W, et al. Accurate transmission estimation for removing haze and noise from a single image[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2019,29:2583-2597.
- [11] GEUSEBROEK J M, SMEULDERS A W M, VAN DE WEIJER J. Fast anisotropic gauss filtering[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2003,12(8):938-943.

~~~~~

(上接第 105 页)

- [7] NAGAEV S V, VAKHTEL V I. On the local limit theorem for a critical Galton-Watson process[J]. Theory of Probability and Its Applications, 2006,50(3):400-419.
- [8] OOMMEN B J, KIM S W, HORN G. On the estimation of independent binomial random variables using occurrence and sequential information[J]. Pattern Recognition, 2007,40(11):3263-3276.
- [9] ATHREYA K B, VIDYASHANKAR A N. Large deviation rates for branching processes. II. The multitype case [J]. Annals of Applied Probability, 1995,5(2):566-576.
- [10] CROYDON D, KUMAGAI T. Random walks on Galton-Watson trees with infinite variance offspring distribution conditioned to survive[J]. Electronic Journal of Probability, 2012,13(19):1419-1441.
- [11] RUDZKIS R, SAULIS L, STATULEVI V. Large deviations of sums of independent random variables[J]. Lithuanian Mathematical Journal, 1979,19(1):118-125.
- [12] 潘生,王月娇,谷玉. Galton-Watson 过程收敛速率的一个充要条件[J]. 数学理论与应用,2015(4):35-40.
- [13] 赵丽华,雷恩林,卢准炜,等. 独立同分布随机环境中两性 Galton-Watson 分支过程灭绝概率的渐近行为[J]. 应用概率统计,2011,27(3):289-296.