

基于改进暗通道先验的交通图像去雾新方法

王泽胜¹, 董宝田^{1†}, 赵芳璨¹, 要悦稳²

(1. 北京交通大学 交通运输学院, 北京 100044; 2. 中国冶金地质总局 地球物理勘查院, 河北 保定 071052)

摘 要: 针对交通场景图像中由于雾霾导致的图像目标主体不清晰, 影响监控效果的问题, 提出一种基于导向滤波与自适应色阶调整的改进暗通道图像去雾新方法. 首先, 基于暗通道原理对原始图像进行映射处理, 从而得到大气光成分与透射率的估计值, 并利用多维导向滤波方法对大气透射率估计值进行优化处理; 然后, 根据图像降质过程的逆过程, 求解雾霾图像清晰化处理初始结果; 最后, 利用多通道自适应色阶调整方法进一步优化初始结果, 解决初始结果整体亮度较暗、不利于监控系统后期处理的问题. 实验结果表明, 清晰化处理后的图像具有较高的亮度和对比度值, 较好地保留并增强了图像的边缘和细节信息, 算法去雾霾效果显著, 针对交通场景图像处理的自适应性较高.

关键词: 智能交通; 图像去雾; 暗原色; 自适应色阶调整; 雾霾

中图分类号: TP298.2

文献标志码: A

Improved dehazing method for traffic images based on dark channel prior

WANG Ze-sheng¹, DONG Bao-tian^{1†}, ZHAO Fang-can¹, YAO Yue-wen²

(1. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Geophysical Exploration Academy of China Metallurgical Geology Bureau, Baoding 071052, China)

Abstract: The monitoring effect is influenced by haze which can make targets in images blurred. To resolve this problem, an improved image dehazing method based on dark channel prior by using the guided filter and adaptive color levels adjustment is proposed. Firstly, mapping operations are executed to estimate the atmospheric composition and transmissivity according to dark channel prior. The estimated value of transmissivity is optimized by using the multi-dimensional guided filter. Then, an initial dehazed result is generated according to the inverse process of image degradation. The light intensity of the initial result is usually low, which makes monitoring equipment hard to perform further actions. Thus multi-channel adaptive color levels adjustment is finally used to optimize the initial result. Experimental results show that the haze removal images have higher light intensity, contrast and better sharpness. The edge and detail features are enhanced significantly. The dehazing effect is remarkable, and the adaptability of the proposed method is high aiming at traffic images collected in hazy weather.

Keywords: intelligent transportation; image dehazing; dark channel prior; adaptive color levels adjustment; haze

0 引 言

交通信息智能检测设备是现代交通管理系统的基础, 而基于计算机视觉技术的检测方法已经成为智能交通信息采集的发展方向^[1]. 然而, 由于空气污染, 导致雾霾天气频繁出现. 在雾霾天, 光学传感器捕获到的图像严重降质, 影响计算机视觉算法的正确执行, 因此深入研究去雾霾算法对计算机视觉在交通领域的应用具有极大的现实意义和实用价值.

图像去雾主要分为两类: 基于非模型的图像增

强算法和基于模型的图像复原算法. 典型的图像增强方法有空域直方图均衡化方法^[2]和各种频域滤波方法^[3]. 图像增强算法可以排除图像中的部分干扰信息, 但有时会出现过增强现象甚至引起色彩失真. 图像复原算法用图像降质过程的逆过程进行图像处理. He 等^[4]首次提出了经典的暗通道先验图像去雾算法, 取得了良好的效果. 该方法去雾效果显著, 但色彩区域边缘多存在色彩失真现象, 而且容易丢失部分亮度信息和图像细节. 因此, 很多学者对其进行了优

收稿日期: 2017-03-21; 修回日期: 2017-06-22.

基金项目: 国家 863 计划项目 (2009 AA11Z207); 高等学校博士学科点专项科研项目 (20110009110011).

责任编辑: 魏秀琨.

作者简介: 王泽胜 (1987—), 男, 博士生, 从事智能交通与计算机视觉的研究; 董宝田 (1956—), 男, 教授, 从事智能交通与铁路信息化等研究.

†通讯作者. E-mail: btdong@bjtu.edu.cn

化. Deng等^[5]应用模糊逻辑控制对图像灰度特性进行统计分析,将不同的图像划分映射等级,从而针对不同的图像制定相应的去雾策略. Song等^[6]将图像的灰度特性与图像增强方法相结合,对暗通道先验去雾方法进行优化处理. Yu等^[7]采用Otsu方法对图片的不同区块进行标记,并对标记区块进行差异化处理. 这些方法带来了新的思路,但处理结果仍然有噪声的存在,细节信息需要进一步改善.

本文在前人研究基础上,提出一种基于改进暗通道先验与自适应色阶调整的交通图像去雾新方法. 采用混合色彩通道引导滤波优化映射图像的边缘细节信息,并进一步基于图像RGB色彩空间特征与图像色彩饱和度特征,对初始结果进行自适应色阶调整得到最终结果.

1 模型建立与求解

本文算法流程如图1所示.

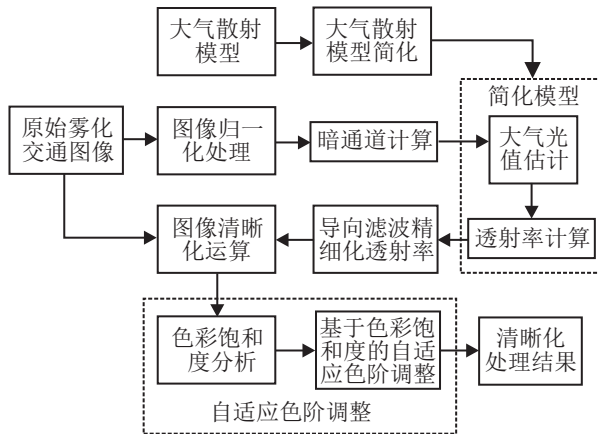


图1 算法流程

首先,将获得的原始雾霾图像进行归一化处理,将以整型数据组成的图像矩阵转换为[0,1]区间内的浮点型矩阵;计算暗通道并进行标记;在传统定义的基础上,通过取区域均值的方法计算大气光成分;根据暗通道先验得到介质传输率的初始估计值,并利用引导滤波对其进行精细化处理;根据大气散射模型,计算图像去雾初始结果;最后,在对初始去雾结果的色彩饱和度进行统计分析的基础上,进行自适应色阶调整,获得最终的去雾图像.

1.1 暗原色模型及其优化

绝大多数非天空局部区域中,一些像素总是至少有一个颜色通道具有很低的灰度值,这些像素被称为暗原色^[8],也被称为暗通道先验. 在计算机视觉中,方程

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

所描述的有雾图像形成模型被广泛使用. 其中: $I(x)$ 为降质图像, $J(x)$ 为清晰化处理结果, A 为大气光成分, $t(x)$ 为透射率. 传统方法中 A 多取最高灰度值,过于强调单个特定像素点的作用,容易受高亮斑点噪声的干扰. 为了强调区域特征的作用,提高算法鲁棒性,对 A 作如下调整:

$$\begin{cases} \text{imgsize} = m \times n, \\ \text{numpx} = \lfloor \text{imgsize} \setminus 1000 \rfloor, \\ [\text{JDarkVec}, \text{indices}] = \text{sort}(\text{JDarkVec}), \\ \text{indices} = \text{indices}[(\text{indices.length} - \text{numpx}) : \text{end}], \\ \text{atmSum} = \sum_{\text{ind}=1}^{\text{numpx}} \text{ImVec}(\text{indices}(\text{ind}), :), \\ A = \frac{\text{atmSum}}{\text{numpx}}. \end{cases} \quad (2)$$

其中: m 和 n 为图像的高度和宽度(均以像素为单位). $\lfloor \cdot \rfloor$ 为向下取整符号; numpx 用来记录整幅图像0.1%像素的个数; JDarkVec 为列向量,其元素值为暗通道图像按列读取的结果; sort 为排序操作,将 JDarkVec 的元素按升序排列; indices 初始化为一个与 JDarkVec 同维的列向量,用来记录排序后的各个元素在排序前列向量中的位置索引,对其进行截取,只保留最下部分 numpx 个位置的值,即暗通道中灰度值最大的前0.1%个像素的灰度值; ImVec 为 imgsize 行3列的矩阵,各列分别用来存储输入图像 R 、 G 、 B 三个通道按列读取的结果; atmSum 是一个1行3列的矩阵,用来存储矩阵 ImVec 各列对应索引位置的元素值的和. 将暗通道图像中像素按灰度值由低到高排序,获得前0.1%个像素的位置索引,取原始图像中对应位置上各个像素的灰度值的平均值作为 A 的值.

在现实生活中,即使是空气质量非常好的天气,空气中也必然存在着一些颗粒,所以眺望远方还是能感觉到“雾霾”的影响,也给人以景深的存在感. 因此,在图像清晰化处理时适当保留一定的雾霾,从而增加图像的真实感. 这里引入一个[0,1]之间的因子 ω ,取常用值0.95.

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

当透射图 t 值非常小时, J 的值会偏大,从而导致处理结果整体白场过度. 为避免该问题的出现,本文为 t 设置阈值 t_0 ,取值为0.1^[9],即与输入图像同维的全0.1矩阵. 最终的图像清晰化处理式如下式所示:

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\max[t(x), t_0]} + A. \quad (4)$$

1.2 透射率导向滤波优化

应用传统的暗通道去雾算法,在处理结果暗通道区域边缘常出现明显的失真块.导向滤波可以平滑图像细节和保持图像的边缘信息^[10].本文分别以RGB真彩图像的3个色彩通道为导向图,以初始透射率结果为滤波图进行导向滤波处理,以R通道为例.

$$f_{\text{mean}}(R) = \frac{1}{N(k,l)} \sum \sum R(k,l). \quad (5)$$

其中: f_{mean} 是以 d 为半径的滑动窗口的均值滤波函数, $N(k,l)$ 为对应区域内加和项数.RGB图像的每一个颜色通道和透射率所对应的二维矩阵被划分为如图2所示的9个区域.

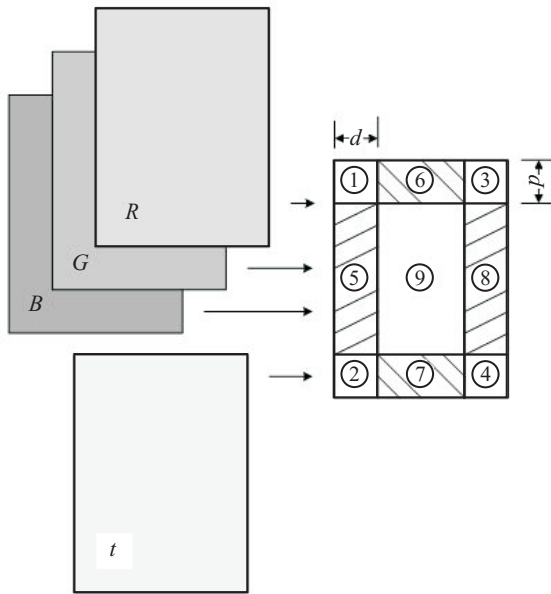


图2 滤波区块划分图

滑动窗口 d 值设置的太大会影响优化效果,而设置的太小,会降低算法效率,通常多取经验值60,并在此基础上进行多次调整,取效果较优时的值作为最终的 d 值.为增强算法的自适应性,本文中 d 的确定规则设置如下:

$$\begin{cases} \lfloor m \setminus 10 \rfloor, m \leq n, \\ \lfloor n \setminus 10 \rfloor, m > n, \\ \text{thBox}, (\lfloor m \setminus 10 \rfloor > 90, \lfloor n \setminus 10 \rfloor > 90). \end{cases} \quad (6)$$

当图像较大时,为窗口半径设置向上截断阈值 thBox ,取值1.5倍的常用经验值(60像素),即90像素,从而避免由于窗口半径太大导致的暗通道周围颜色失真、清晰化结果不够理想的情况发生.

1.3 自适应色阶调整

经过1.2节的优化,暗通道边缘失真块得到明显改善,但透射率值通常仍偏小,使得去雾处理后图像仍会出现色彩过饱和、失真和亮度偏暗的现象.为

解决该问题,本文对初始去雾结果进行自适应色阶调整.基于常用的单通道直方图均衡化方法,本文引入针对RGB真彩图像的混合通道色彩映射,实现多通道映射处理.对于单通道灰度图,空间域处理方法表示如下:

$$S(x,y) = T[F(x,y)]. \quad (7)$$

其中: $F(x,y)$ 为输入图像, $S(x,y)$ 为输出图像, T 为针对输入图像 $F(x,y)$ 的算子,作用于点 (x,y) 定义的邻域,将 $F(x,y)$ 中 $[\text{low_in}, \text{high_in}]$ 区间内的值映射到 $S(x,y)$ 中 $[\text{low_out}, \text{high_out}]$ 之间.为保证图像经过空间变换后的平滑性,本文采用线性映射,映射关系如下所示:

$$s(x,y) = \begin{cases} 255 \times \text{low_in}, & f(x,y) < \text{low_in}; \\ \frac{\text{high_out} - \text{low_out}}{\text{high_in} - \text{low_in}} (f(x,y) - \text{low_in}) + \text{low_out}, & \text{low_in} < f(x,y) < \text{high_in}; \\ 255 \times \text{high_in}, & f(x,y) > \text{high_in}. \end{cases} \quad (8)$$

其中: $s(x,y)$ 表示图像 $S(x,y)$ 中的某通道色彩值, $f(x,y)$ 表示 $F(x,y)$ 中对应通道的色彩值.

映射关系中阈值向量 $[\text{low_in}, \text{high_in}]$ 和 $[\text{low_out}, \text{high_out}]$ 的确定,直接影响色阶调整的效果,是决定映射函数是否成功的关键.文中输出阈值向量 $[\text{low_out}, \text{high_out}]$ 取 $[0, 1]$,从而保证最终融合的结果,色彩保留的更完整、逼真,更符合人眼视觉特性.本文对待处理图像中所有色彩值底部与顶部饱和度和,以一定比例的像素为基础来计算输入阈值向量 $[\text{low_in}, \text{high_in}]$,步骤如下.

1) 色彩值统计.

$$N = \text{imhist}(F_{R/G/B}, 255), \quad (9)$$

计算输入图像各通道的色彩值级数,其中 N 为 3×255 的矩阵.

2) 色彩值截断分布率计算,即

$$\text{cdt} = \frac{\text{cumsum}(N)}{\text{sum}(N)}. \quad (10)$$

这里取小于或等于某色彩值的像素点个数与像素点总数之比作为该色彩值的截断分布概率.

3) 阈值向量计算

$$\begin{cases} \text{low_in} = \text{find}(\text{cdt} > c_{\text{sat_1}}, '1', 'first'), \\ \text{high_in} = \text{find}(\text{cdt} > c_{\text{sat_2}}, '1', 'first'). \end{cases} \quad (11)$$

low_in 取值为分布率大于 $c_{\text{sat_1}}$ 处最接近的色彩值. high_in 取值为分布率大于 $c_{\text{sat_2}}$ 处最接近

的色彩值. 其中 c_{sat_1} 和 c_{sat_2} 分别为色彩底部和顶部饱和度. 雾霾指数和背景的复杂性对处理结果影响较大, 为寻找合适的底部和顶部饱和度值, 对 2000 幅选自不同地理位置、环境和雾霾指数的交通图像进行测试. 结果显示, 当饱和度值为 1% 时, 算法的适应性较高, 处理结果较为理想.

2 实验结果与分析

2.1 直观效果图

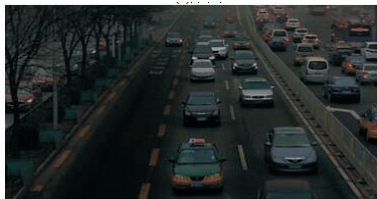
为验证方法的有效性, 随机抽取北京市海淀区西直门交通枢纽附近雾霾天图像, 如图 3(a) 所示进行测试. 图像拍摄时间为 2015-12-01 下午, 当日 AQI 为 500, 由北京市环境保护检测中心公布. 图 3(c) 所示为多维导向滤波优化色彩区域边缘消除了传统方法部分区域存在的明显失真. 图 3(d) 中自适应色阶调整使图像清晰, 色彩更亮丽自然.



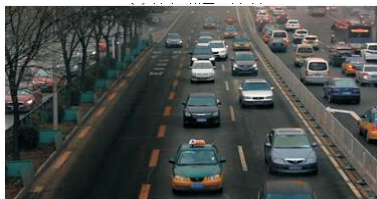
(a) 原图



(b) 传统暗通道方法



(c) 多维导向滤波优化



(d) 自适应色阶调整

图 3 分步处理结果

目前, 图像清晰化处理方法在计算机视觉中的应用大多针对遥感图像. 虽然遥感图像中整幅图像的各个像素点的景深绝对差值较大, 但相对差值很小. 而常用的交通图像, 特别是架设于公路上方的摄像机获取的图像景深差值较大. 单幅图像中各像素点间的

景深差值越大, 代表可观测的范围越广, 掌握的路况信息越多. 图 4 为频域巴特沃斯高通滤波去雾方法和空间域直方图均衡化图像去雾方法以及本文方法的处理结果. 图 4(a) 和图 4(b) 中得到的去雾图像在景深较远处色彩还原较好, 但随着景深的增加, 清晰化效果变得不够理想, 如图像虚线标记区域所示. 而且图 4(a) 中整体色彩较暗, 图像的纹理细节有丢失现象, 如图像实线标记区域所示. 可以看出, 本文方法通过对参数的自适应调整, 使得清晰化处理的结果色彩更鲜明, 纹理更清晰, 即使是存在较大景深差的单幅图像, 整体品质仍较好, 也更加逼真.



(a) 频域巴特沃斯高通滤波去雾



(b) 空间域直方图均衡化去雾



(c) 本文方法

图 4 多方法直观效果对比

2.2 客观评价参数对比

为了更加客观地评价方法的有效性, 应用传统暗通道方法、频率域巴特沃斯高通滤波方法和空间域直方图方法对随机抽取的样本图片进行处理, 并参照文献 [11] 中去雾霾方法评价指标, 比较其图像信息熵和全局对比度. 指标计算方法分别如下所示:

$$H = - \sum_{\tau=0}^{255} p(\tau) \log_2 p(\tau), \quad (12)$$

$$\text{Contr} = \sum \delta(\gamma, \gamma')^2 P_{\delta}(\gamma, \gamma'). \quad (13)$$

其中: $p(\tau)$ 是灰度值为 τ 的像素在整幅图像中所占的比例; H 为图像的信息熵; $\delta(\gamma, \gamma')$ 为任意相邻两个像素的灰度差值; P_{δ} 为相邻像素间的灰度差值为 δ 的像素的分布概率; Contr 为全局对比度.

如表 1 和表 2 所示, 与传统方法和频域巴特沃斯

表1 信息熵

方法	样本图像1	样本图像2	样本图像3	样本图像4
频域巴特沃斯滤波方法	4.9070	5.0381	5.1929	4.7362
空间域直方图均衡化方法	7.9839	7.9902	7.9891	7.9925
传统暗通道方法	6.9941	6.0300	6.4410	5.4695
本文方法	7.4932	7.0091	7.4644	6.4391

表2 全局对比度

方法	样本图像1	样本图像2	样本图像3	样本图像4
频域巴特沃斯滤波方法	0.7245	0.6756	1.2267	0.4152
空间域直方图均衡化方法	1.4035	1.2224	2.3596	1.1836
传统暗通道方法	0.8081	0.1865	0.4358	0.1096
本文方法	1.7424	0.7060	1.9077	0.6994

高通滤波方法相比,本文方法处理结果表明各个评价指标均有明显的提升.而两个表中基于空间域直方图均衡化方法的处理结果的客观评价指标与本文方法互有高低,且前者大多高于后者.虽然从数字上该方法高出其他方法很多,甚至差值非常大,但是结合2.1节中结果可以看出,该方法使颜色过饱和,导致实际中的处理结果有明显的失真,并不适于人眼观察,且损失了部分细节,效果并不十分理想.综合分析,本文所提出方法的效果较佳.

3 结论

本文从暗通道原理出发,应用计算机视觉技术对雾霾天气造成的交通场景降质监控图像进行清晰化处理.引入多通道导向滤波,改善了传统暗通道边缘的细节信息.利用空间域色彩信息特征,在统计方法的基础上,提出一种自适应色阶调整方法,从而进一步提升图像清晰化处理的整体效果.实验结果表明,本文方法处理结果图像色彩自然,细节更加鲜明,细节强度、色调还原效果均表现得更为突出.处理后的图像对比度良好,颜色饱和度和真实性得到有效保持,更好地恢复了图像记录的场景信息,能够为现有视频监控系统全天候工作方案供理论依据和实践指导.然而,该算法处理速度较慢,特别是当图片较大时,这也是当前常用图像复原方法的通病.针对该问题,在今后的工作中将作进一步的完善.

参考文献(References)

- [1] 周兴潮. 视频监控在疏导交通方面的应用研究[J]. 电子技术与软件工程, 2016(3): 96-99.
(Zhou X C. Applied research of video monitoring in traffic dispersion [J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2016(3): 96-99.)
- [2] Wong C Y, Jiang G N, Rahman M A, et al. Histogram equalization and optimal profile compression based approach for colour image enhancement[J]. J of Visual Communication and Image Representation, 2016, 38:

802-813.

- [3] Wang L P, Zhou X, Wang C Y, et al. The effects of image dehazing methods using dehazing contrast-enhancement filters on image compression[J]. KSII Trans on Internet and Information Systems, 2016, 10(7): 3245-3271.
- [4] He K, Sun J, Tang X. Single image haze removal using dark channel prior[J]. IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 33(12): 2341-2353.
- [5] Deng L, Li O X, Zhao S W. An improved image defogging algorithm based on global dark channel prior and fuzzy logic control[C]. The 12th Int Computer Conf on Wavelet Active Media Technology and Information Processing. Chengdu, 2015: 188-191.
- [6] Song Y C, Luo H B, Hui B, et al. An improved image dehazing and enhancing method using dark channel prior[C]. Proc of the 27th Chinese Control and Decision Conf. Qingdao, 2015: 5840-5845.
- [7] Yu H, Cai C T. An adaptive factor-based method for improving dark channel prior dehazing[C]. 2016 IEEE Int Conf on Computer-Supported Cooperative Work in Design(CSCWD). Piscataway, 2016: 417-420.
- [8] He K M, Sun J, Tang X O. Single image haze removal using dark channel prior[C]. Proc of the 2009 IEEE Conf on Computer Vision and Pattern Recognition. Miami: IEEE, 2009: 1956-1963.
- [9] 赵小川. MATLAB图像处理——程序实现与模块化仿真[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2014: 299-301.
(Zhao X C. Matlab image processing—Program implementation and modularized simulation[M]. Beijing: Beihang University Press, 2014: 299-301.)
- [10] 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.
- [11] 李长领, 宋裕庆, 刘晓峰. 基于MSR理论的交通图像去雾新方法[J]. 计算机应用, 2015, 35(增2): 234-237.
(Li C L, Song Y Q, Liu X F. Haze removal method for traffic images based on multi-scale retinex theory[J]. J of Computer Applications, 2015, 35(S2): 234-237.)

(责任编辑: 孙艺红)