

文章编号: 2095-2163(2021)08-0067-04

中图分类号: TP751.1

文献标志码: A

# 大气散射模型下衰减系数对图像去雾的影响

田智源, 王修文, 孙雨晴, 李志伟

(上海工程技术大学 电子电气工程学院, 上海 201600)

**摘要:** 本文针对当前在大气散射模型下的去雾算法存在图像质量较差问题,从模型原理上分析衰减系数的变化对于去雾后图像质量的影响。通过大气光成像的物理建模和数学分析,逐步推导出衰减系数,分析了其物理意义。结合颜色衰减先验去雾算法,并改变衰减系数,得到不同的效果图,根据图像的评价参数,对比分析衰减系数会带来的影响。实验显示,衰减系数的变化能在一定程度上影响图像的色彩、对比度,进而影响去雾的实际效果,可以通过适当的改变衰减系数优化图像去雾的效果。

**关键词:** 图像去雾; 大气散射; 衰减系数; 颜色衰减先验

## The influence of attenuation coefficient on image defogging under atmospheric scattering model

TIAN Zhiyuan, WANG Xiuwen, SUN Yuqing, LI Zhiwei

(School of Electronic and Electrical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201600, China)

**[Abstract]** In view of the poor image quality of the current defogging algorithm under the atmospheric scattering model, we analyzed the influence of the change of the attenuation coefficient on the image quality after defogging from the principle of the model. Through the physical modeling and mathematical analysis of atmospheric light imaging, the attenuation coefficient was gradually derived and its physical significance was analyzed. Combining the color attenuation priori defogging algorithm and changing the attenuation coefficient can obtain different renderings. According to the evaluation parameters of the image, we compared and analyzed the impact of the attenuation coefficient. Experiments showed that the change of the attenuation coefficient can affect the color and contrast of the image to a certain extent, and then affected the actual effect of defogging. In actual situations, the attenuation coefficient can be changed appropriately to optimize the effect of image defogging.

**[Key words]** image dehazing; atmospheric scattering; attenuation coefficient; color attenuation prior

## 0 引言

恶劣的环境下,拍摄的户外图像通常会有一定程度的失真,这是由于光在有杂质的大气中传播时,会发生散射和吸收,所获得的图像会很大程度影响后期的使用。因此,改进对此类图像的处理技术,会很有益于计算机视觉和图像处理的应用,例如图像增强、图像分类、航空图像以及复杂环境下的自动驾驶<sup>[1]</sup>。

早期的图像处理,为了解决复杂环境下图像失真的问题,对大量的图像进行分析和统计,利用光在无杂质空气和有杂质空气中传播的特性,对图像进行物理建模和数学推导。1976年,McCartney提出了大气光散射模型,为后面的去雾图像的研究做了

可靠的铺垫<sup>[2]</sup>。近几年,基于这个模型的单图像去雾的研究有很大的进展。基于马尔可夫随机场理论;Tan提出一种最大化图像对比度的方法,除去图像的雾,但是该方法很容易产生过饱和图像<sup>[3]</sup>;Fattal提出独立单元分析的方法处理彩色图像的去雾问题,对薄雾彩色图像有很好去雾效果<sup>[4]</sup>;何凯明等人通过对大量无雾图像的分析,发现了暗通道先验理论,在大多数的非天空图像中,至少有一个颜色通道的像素非常低,接近于零,通过这个特性,可以分析出图像雾的厚度,通过大气散射模型恢复出无雾的图像,是非常高效的去雾方法,唯一的缺点就是对天空区域的去雾处理会导致失真<sup>[5]</sup>。针对暗通道先验的去雾问题,之后也提出很多改进算法,如谢斌等人结合暗通道先验和多尺度视网膜知识改进

**基金项目:** 教育部产学研合作协同育人项目(201701014003,201802046057);上海工程技术大学检测技术与自动化装置学科学位点建设项目(19XXK003)。

**作者简介:** 田智源(1996-),男,硕士研究生,主要研究方向:图像去雾、图像增强;李志伟(1982-),男,博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向:光电子、图像处理、机器视觉等。

**通讯作者:** 李志伟 Email: zhiwei.li@sues.edu.cn

**收稿日期:** 2021-01-04

了去雾算法<sup>[6]</sup>;朱庆松等人提出自适应的暗通道去雾优化算法,都有效地改善了天空区域的去雾效果<sup>[7]</sup>。

随着时间的推移,基于大气散射模型下的传统去雾算法有很多的改进,但绝大多数是在透射率上做改进,透射率隐含有衰减系数,本文通过对衰减系数的理论分析,结合颜色衰减先验的去雾算法进行实验,进一步优化去雾图像的品质。首先介绍了大气散射模型,对透射率的物理建模和数学推导,得到衰减系数,最后应用到去雾算法中。实验结果表明,在一定范围内,衰减系数的改变会有有效的提升去雾效果。

## 1 基本原理

### 1.1 大气散射模型

早期针对模糊图像建立的大气散射模型,广泛地应用在计算机视觉和图像处理中,式(1):

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

其中:  $I(x)$  为初始有雾图像;  $J(x)$  为场景辐射度,即去雾后图像;  $A$  是大气光照强度;  $t(x)$  是介质传递系数,也称透射率,表示未被吸收和散射并到达相机的大气光比值;  $x$  表示图像像素点的位置。

去雾的目的就是为了还原  $J$ ,  $I$  是已知的,实现图像复原,就需要想办法计算  $t$  和  $A$  的值。式(1)中,  $J(x)t(x)$  被称为直接衰减项,描述无雾图像的辐射度在介质中的衰减,这也是导致图像模糊的主要原因;  $A(1 - t(x))$  为大气光补偿项,是太阳光在介质中散射之后产生的,会导致图像颜色的偏差,这一项的作用就是补充图像的色彩和对比度。

假设空气中的介质是均匀分布,那么透射率  $t$  可以表示为式(2):

$$t = e^{-\beta d(x)}. \quad (2)$$

其中:  $\beta$  是大气光的衰减系数,  $d(x)$  是深度图。

在均匀空气介质环境下,  $\beta$  值一般为常数<sup>[8]</sup>,其值域一般在 1 左右,部分方法为了省去其影响,一般取值为 1,可以达到所需要的实验效果。关于深度图的计算,通过对深度图的数学建模和理论分析,得出深度图在 HSV 色彩空间内是呈线性的<sup>[9]</sup>。通过对大量图像进行机器学习,能够在 HSV 色彩空间内对深度图建立线性函数,这一方法也普遍得到认同,是目前很不错的深度图计算方法。

### 1.2 衰减系数

考虑到入射光的散射现象与空气介质的材质、

形状和大小有着密切关系<sup>[10]</sup>。其中介质的大小能很明显地影响散射的变化,如图 1 所示。

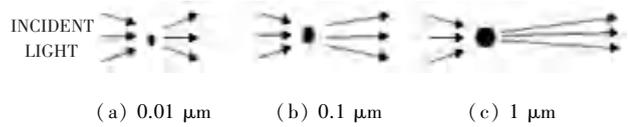


图 1 介质大小对散射现象的影响

Fig. 1 The influence of medium size on scattering phenomenon

入射光经过一颗很小的粒子大约 ( $0.01 \mu\text{m}$ ,  $1/10 \lambda$ ,  $\lambda$  是光的波长), 散射光几乎与入射光相等; 经过中等粒子 ( $0.1 \mu\text{m}$ , 大约  $1/4 \lambda$ ), 会产生较多的散射; 经过更大的粒子 ( $1 \mu\text{m}$ , 超过  $\lambda$ ), 入射光几乎全部散射。

考虑某一方向入射光对单个介质的照射, 如图 2 所示。入射光通过介质发生散射后的光照强度可以表示为式(3):

$$I(\theta, \lambda) = \beta(\theta, \lambda) E(\lambda), \quad (3)$$

其中:  $I(\theta, \lambda)$  表示单个粒子散射后的光照强度;  $\beta(\theta, \lambda)$  表示衰减系数;  $E(\lambda)$  代表入射光光照强度;  $\theta$  表示散射后的光与水平坐标轴的夹角;  $\lambda$  表示光的波长。

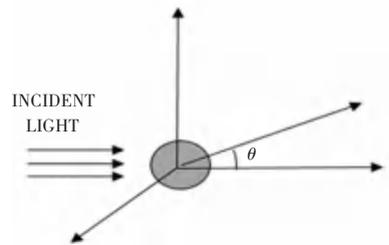


图 2 入射光对单个介质的散射示意图

Fig. 2 Schematic diagram of incident light scattering to a single medium

实际情况下, 太阳光对单个粒子照射是辐射整个角度范围的<sup>[11]</sup>, 相当于对单个介质在角度上做积分, 通过积分可以得到接收到的总散射光强度  $\varphi(\lambda)$ , 式(4):

$$\varphi(\lambda) = \beta(\lambda) E(\lambda), \quad (4)$$

其中,  $\beta(\lambda)$  表示最终总的衰减系数。这一步消除了角度  $\theta$  的影响, 那么要得到式(2)的衰减系数模型, 就需要对该透射系数细化, 在图 2 的基础上, 入射光对单个介质照射, 相当于通过一个薄片。现在考虑入射光穿过厚度为  $d$  的薄片, 如图 3 所示。

入射光强度随着位置  $x$  的辐射值百分比变化量, 式(5):

$$\frac{dE(x, \lambda)}{E(x, \lambda)} = -\beta(\lambda) dx, \quad (5)$$

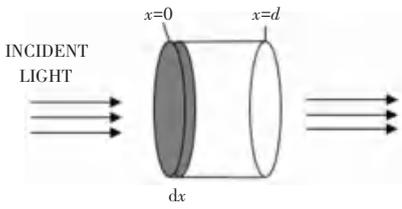


图 3 图像深度为  $d$  的入射光的通量示意图

Fig. 3 Schematic diagram of incident light flux with image depth  $d$

根据场景的深度, 再对微分方程(5) 在区间  $[0, d]$  上, 两边同时对  $x$  进行积分, 就可以得到式(6):

$$E(d, \lambda) = E_0(\lambda) e^{-\beta(\lambda) d}, \quad (6)$$

其中,  $E_0(\lambda)$  是当  $x = 0$  时的初始值,  $E(d, \lambda)$  是入射光的光照强度, 是到达图像的最终光照强度。透射率  $t$  就是  $E_0(\lambda)$  与  $E(d, \lambda)$  的比值, 式(7):

$$t(x) = \frac{E(d, \lambda)}{E_0(\lambda)} = e^{-\beta(\lambda) d}. \quad (7)$$

## 2 颜色衰减先验算法

为了计算透射率, 由式(7)可知, 除去衰减系数  $\beta$  的影响之外, 深度图  $d(x)$  的计算是另一个关键。通过对大量模糊图像在不同浓度的像素点值, 发现在 HSV 色彩空间中, 模糊图像中的  $v$  值与  $s$  值的差值与雾的浓度大小近似呈线性关系, 而雾的浓度与图像深度密切相关, 即式(8):

$$d(x) \propto v(x) - s(x), \quad (8)$$

其中:  $d(x)$  是图像深度;  $v(x)$  图像的亮度;  $s(x)$  是图像的饱和度。

基于这一先验知识, 进一步构造一个线性模型, 式(9):

$$d(x) = \theta_0 + \theta_1 v(x) + \theta_2 s(x) + \varepsilon(x), \quad (9)$$

其中:  $\theta_0, \theta_1, \theta_2$  是待定系数;  $\varepsilon(x)$  是随机误差补偿项, 相当于一幅随机误差图像, 且满足  $\varepsilon(x) \sim N(0, \sigma^2)$ ;  $\sigma$  是正则化参数, 也是待确定的。

颜色衰减先验知识在模糊图像中是普遍适用的, 为了解决式(9)中的 4 个参数, 这里采用机器学习, 对几百张图像进行学习拟合, 得到最终可靠的深度图估算模型, 式(10):

$$d(x) = 0.121\ 779 + 0.959\ 710v(x) - 0.780\ 245s(x) + \varepsilon(x). \quad (10)$$

其中,  $\sigma = 0.041\ 337$ 。

该模型一旦确定, 普遍适用于传统方法下的单图像去雾的深度图估算, 本文也采用了这个模型。

## 3 实验结果与分析

本文所采用的实验条件为: 笔记本电脑, Window10(64 位), inter(R)Core(TM)i5-5200U @ 2.20 GHz, 运行内存 4 GB, 运行环境为 Matlab 2015a 版本。为了验证衰减系数的改变后去雾图像的效果, 结合改进后的颜色衰减先验的去雾方法, 针对 5 种不同的衰减系数, 对图 4 的两幅不同的有雾图像进行对比实验分析。图 4 中(b)~(f), 分别设置  $\beta$  值为 0.5, 0.7, 1, 1.3, 1.5, 通过图像观察可见,  $\beta$  值的增加, 会使去雾图像的色彩更加清晰, 以往大多数的方法, 都默认  $\beta$  的值为 1。事实证明, 当  $\beta$  超过 1 后, 如  $\beta$  为 1.3 时, 去雾图像的效果有明显的改善, 特别是色彩和清晰度有一定的提升, 但是随着  $\beta$  值的继续增加, 如  $\beta$  为 1.5 时, (f) 图的色彩就变得更深, 逐渐变暗。将  $\beta$  值继续增加到 2 后, 图像变得更加暗, 失去需要的细节, 所以衰减系数  $\beta$  值影响, 是局限在一定的区间内的。

为了定性分析图像的色彩, 引入对比度参数, 计算公式(11):



(a) original image (b)  $\beta = 0.5$  (c)  $\beta = 0.7$  (d)  $\beta = 1$  (e)  $\beta = 1.3$  (f)  $\beta = 1.5$

图 4 不同  $\beta$  值对两幅图的去雾影响

Fig. 4 Influence of different  $\beta$  values on the dehazing of the two images

$$\sum_{\delta} \delta(i,j)^2 P_{\delta}(i,j). \quad (11)$$

其中,  $\delta(i,j) = |i - j|$  即相邻像素的灰度差值,  $P_{\delta}(i,j)$  是相邻像素间的灰度差为  $\delta$  的像素分布概率, 该参数是图像黑与白的比值, 就是从黑到白的渐变层次, 比值越大, 渐变层次越多, 说明色彩越丰富。

实验将衰减系数  $\beta$  在区间  $[0, 2]$  内, 间隔 0.1 取一次值, 获得 40 张图, 分为两组, 并计算出相应的对比度。两幅图的对比度在不同  $\beta$  值下, 变化差异较大, 如图 5 所示。A 组图在  $\beta$  值为 1.3 左右时, B 组图在  $\beta$  值为 1 ~ 1.1 时, 达到最低对比度, 去雾的效果主观上能达到最高。根据观察, 往往在对比度为极值时, 该处的  $\beta$  值对算法的去雾效果是最好的。

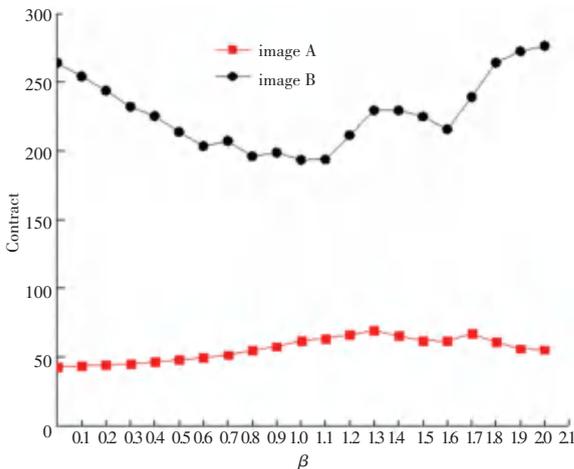


图 5 两幅图的对比度

Fig. 5 Contrast of two image

## 4 结束语

本文针对在大气散射模型下的颜色衰减先验去雾算法中未考虑衰减系数对去雾图像的影响, 做了分析和优化。根据图像的特征, 进行  $\beta$  调参, 可以得

到最优的效果图。同时, 该方法同样适用同样模型下其它场景, 如图像对比度调节、细节优化等。有望在后续的研究中, 研究可靠的自适应参数, 修正衰减系数  $\beta$  值, 实现图像自适应的对比度增强。

## 参考文献

- [1] 李光磊. 图像处理在自动驾驶系统中的应用 [J]. 山东工业技术, 2017(22): 113-114.
- [2] MCCARTNEY E J. Optics of the Atmosphere: Scattering by Molecules and Particles [J]. Physics Bulletin, 1977, 14(9): 521.
- [3] TAN R T. Visibility in bad weather from a single image. [C] // IEEE Conf. Computer Vis. Pattern Recognition. (CVPR), 2008: 1-8.
- [4] Fattal R. Single image dehazing. [J] ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(2): 1-9.
- [5] 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.
- [6] XIE B, GUO F, CAI Z. Improved single image dehazing using dark channel prior and multi-scale retinex [C] // 2010 international conference on intelligent system design and engineering application., 2010: 848-851.
- [7] ZHU Q, YANG S, HENG P A, et al. An adaptive and effective single image dehazing algorithm based on dark channel prior [C] // IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2013: 1796-1800.
- [8] LIU P J, SHI-JINN H, LIN J S, et al. Contrast in Haze Removal: Configurable Contrast Enhancement Model Based on Dark Channel Prior [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2018, 28: 2212-2227.
- [9] ZHU Q, MAI J, SHAO L. Single image dehazing using color attenuation prior [C] // Brit. Mach. Vis. Conf. (BMVC), 2014: 1-10.
- [10] NAYAR S, NARASIMHAN S. Vision and the atmosphere [J]. International journal of computer vision, 2002, 48(3): 233-254.
- [11] NAYAR S K, NARASIMHAN S G. Vision in bad weather [C] // In Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision, 1999: 820-827.
- [9] 常宏岗. 气体脱硫装置胺溶液发泡原因及认识 [J]. 石油与天然气化工, 1995(01): 60-63.
- [10] 王开岳. 天然气净化工艺 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2005.
- [11] 戴学海. 胺液的发泡原因及处理措施 [J]. 石油与天然气化工, 2002, 031(6): 304-305.
- [12] 吴新民, 康宵瑜. 甲基二乙醇胺 (MDEA) 脱硫溶液发泡影响因素和机理研究 [J]. 天然气化工, 2008, 33(6): 31-36.
- [13] 代娟, 曾思逊, 黄俊莉, 等. 基于人工智能技术的天然气净化厂脱硫溶液系统“发泡”预警模型研究 [J]. 第 31 届全国天然气学术年会 (2019) 论文集 (06 储运安全环保及综合), 2019.

(上接第 66 页)

- [4] 张建广, 邱彤, 赵劲松, 等. 智能安全屏障-非正常工况管理系统简述 [J]. 计算机与应用化学, 2008, 25(4): 385-389.
- [5] 邹蕾, 张先锋. 人工智能及其发展应用 [J]. 信息安全, 2012(2): 11-13.
- [6] 阎红巧, 易文斌, 冒亚明, 等. 基于多工况融合的化工装置异常状态预警研究 [J]. 安全与环境工程, 2017, 24(4): 144-147.
- [7] 柯振雄. 天然气净化厂预警管理系统研究 [D]. 北京: 中国石油大学, 2017.
- [8] 胡天友, 熊钢, 何金龙, 等. 胺法脱硫装置溶液发泡预防及控制措施 [J]. 天然气工业, 2009, 29(03): 101-103+144.