

控制与决策

Control and Decision

基于暗通道先验的自适应超像素去雾算法

安冬, 国凌明, 邵萌, 李颂华, 石怀涛

引用本文:

安冬, 国凌明, 邵萌, 等. 基于暗通道先验的自适应超像素去雾算法[J]. *控制与决策*, 2020, 35(8): 1929–1934.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1539>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种基于改进的暗通道先验的运动模糊核估计方法

A method of motion blurry kernel estimation based on improved dark channel prior

控制与决策. 2020, 35(7): 1667–1673 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1687>

基于图正则自适应联合协同表示的高光谱图像分类

Graph regularized adaptive joint collaborative representation for hyperspectral image classification

控制与决策. 2020, 35(5): 1063–1071 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1159>

基于变分贝叶斯推断的字典学习算法

Dictionary learning algorithm based on variable Bayes inference

控制与决策. 2020, 35(2): 469–473 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0609>

用于图像分割的局部区域一致性流形约束MRF模型

Local region consistency manifold constrained MRF model for image segmentation

控制与决策. 2019, 34(5): 997–1003 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.1453>

基于改进暗通道先验的交通图像去雾新方法

Improved dehazing method for traffic images based on dark channel prior

控制与决策. 2018, 33(3): 486–490 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.0301>

基于暗通道先验的自适应超像素去雾算法

安冬^{1,2†}, 国凌明¹, 邵萌¹, 李颂华¹, 石怀涛¹

(1. 沈阳建筑大学机械工程学院, 沈阳 110168; 2. 沈阳建筑大学分析与检测技术研究中心, 沈阳 110168)

摘要: 传统基于暗通道先验的图像去雾算法不能有效去除有雾图像在景深突变处的雾点, 边界处容易引起光晕效应, 对此提出一种基于暗通道先验的自适应超像素去雾算法. 首先, 在暗通道的获取过程中引入自适应方法判断当前像素邻域内是否具有多个景深物体, 若仅存在相同景深物体, 则直接求取此像素的暗通道, 若存在多个景深物体, 则引入超像素分割算法区分不同景深物体, 减小景深变化对暗通道获取的影响, 以求取更准确的暗通道; 然后, 估计粗略的透射率, 并根据上下文约束细化透射率; 最后, 通过图像降质的逆过程求解去雾图像. 实验结果表明, 所提出的算法与暗通道先验单幅图像去雾(DCP)算法、基于边界邻域最大值滤波的快速图像去雾(EMDCP)算法、基于自适应暗原色的单幅图像去雾(ADCP)算法、带边界约束和上下文正则化的高效图像去雾(BCCR)算法相比, 可将客观质量综合评价准则提高10%, 能够抑制光晕效应, 提高有雾图像的视觉效果.

关键词: 图像去雾; 大气物理模型; 暗通道先验; 自适应方法; 超像素分割; 光晕效应

中图分类号: TP391.4

文献标志码: A

An adaptive superpixel defogging algorithm based on dark channel prior

AN Dong^{1,2†}, GUO Ling-ming¹, SHAO Meng¹, LI Song-hua¹, SHI Huai-tao¹

(1. School of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China; 2. Research Center for Analysis and Detection Technology, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

Abstract: The traditional defogging algorithm based on dark channel prior can not effectively remove the fog points in the sudden change of field depth, and it is easy to cause halo effect at the boundary. In this paper, an adaptive super-pixel defogging algorithm based on dark channel prior is proposed. Firstly, in the acquisition process of the dark channel, an adaptive method is introduced to determine whether there are multiple depth-of-field objects in the neighborhood of the current pixel. If there are only the same depth-of-field objects, the dark channel of the pixel can be obtained directly. If there are multiple depth-of-field objects, a super-pixel segmentation algorithm is introduced to distinguish different depth-of-field objects, so as to reduce the influence of depth-of-field change on dark channel acquisition and to obtain a more accurate dark channel. Then the rough transmittance is estimated, and the transmittance is refined according to the context constraints. Finally, the defogging image is solved by the inverse process of image degradation. The experimental results show that compared with dark channel prior (DCP), a fast image defogging algorithm based on edge-maximum filter (EMDCP), single image dehazing based on adaptive dark channel prior (ADCP) and efficient image dehazing with boundary constraint and contextual regularization (BCCR) algorithms, the comprehensive assessment criteria index of the proposed method is improved by 10%, which can suppress halo effect and improve the visual effect of foggy images.

Keywords: image defogging; atmospheric physical model; dark channel prior; adaptive method; super pixel segmentation; halo effect

0 引言

雾霾是一种常见的大气现象, 在雾霾天气下, 空气中会漂浮着大量悬浮颗粒, 会吸收或散射场景中物体反射的光线, 导致雾霾天气下的图像质量严重下降, 给计算机视觉带来严重的挑战, 因此针对图像去雾的研究具有重要的应用价值.

近年来, 图像去雾算法取得了很大发展, 图像去雾算法主要分为3大类: 基于图像增强的方法、基于图像复原的方法和基于深度学习的方法^[1-4]. 基于图像增强的方法主要包括直方图均衡化、小波变化以及Retinex算法等. 此类方法在一定程度上增强了视觉效果, 但会出现信息消失和噪声引入的现象. 基于

收稿日期: 2018-11-08; 修回日期: 2019-05-08.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51705340, 51705341); 辽宁省科学技术项目基金项目(20180550002); 辽宁省高等学校基本科研课题项目(LJZ2017035); 辽宁省重点研发计划项目(2017225016); 国家重点研发计划项目(2017YFC0703903).

†通讯作者. E-mail: andong@sjzu.edu.cn.

图像复原的方法通过使用更好的假设和先验,在物理模型的基础上取得了进一步的进展.例如: Tan^[5]在马尔科夫随机场构造了关于边缘强度的代价函数,并使用图割理论估计出最优光照,该方法在处理有雾图像时可以恢复图像的结构和细节,但去雾图像易出现颜色过饱和现象和光晕效应; Fattal^[6]提出了一个精确的图像去雾模型,将有雾图像分成多个具有恒定反射率的区域,利用独立成分分析估计场景透射率,去雾图像的效果自然,但在浓雾区域和低信噪比区域会失效; He等^[7]提出了一种暗通道先验 (dark channel prior, DCP) 方法,即对室外晴朗无雾图像进行统计,在绝大多数非天空的局部像素邻域内,总会存在某个像素的某个颜色通道的值很低; Meng等^[8]提出了透射率固有边界约束和基于 $L1$ 范数的加权上下文正则化来估计未知的透射率. 已有文献基于深度学习的方法试图学习输入图像与相应传输图之间的非线性映射. 例如: Cai等^[9]提出了 DehazeNet, 它是一个可训练的端到端的卷积神经网络,用于透射率估计; Li等^[10]重新设计了大气散射模型,可以直接从模糊图像中生成清晰的图像.

He等^[7]的DCP算法突破了原有图像去雾算法的局限,之后出现了许多基于DCP算法的改进方法. Fang等^[11]以像素在RGB空间的距离细化透射率分布图代替复杂度高的软抠图算法; Pei等^[12]先使用颜色迁移算法对夜间图像进行预处理,然后使用对比度修正算法对去雾夜间图像处理修正,提高了DCP算法对夜间图像去雾效果的鲁棒性; Feng等^[13]结合场景的近红外图像,使用贝叶斯方法估计了最优化的透射率分布图; Wang等^[14]优化了全局大气光照强度的获取和透射率分布图的估计,填补了DCP算法的缺点和处理速度较慢的问题; 王泽胜等^[15]改进了DCP算法去雾过程,并使用自适应色阶调整处理结果,解决了经DCP算法处理结果亮度变暗的问题; 陈露等^[16]对图像边界进行了边界邻域最大值滤波,以得到更为准确的透射率图来消除光晕现象; 刘国等^[17]引入自适应阈值,以减弱景深变化的影响,保证了DCP算法的暗通道的正确获取.

以上学者的算法提高了去雾算法的适用范围,但是在这些方法中: 针对暗通道获取过程改进 Halo 效应的改进方法^[15-16]易受噪点影响; 针对约束条件估计未知透射率的方法^[8]处理效果理想,但在处理天空等远距离景物时易出现图像偏色和大量色斑. 为此本文提出一种基于暗通道先验的自适应超像素去雾 (ASDCP) 算法,抑制景深突变处的 Halo 效应. ASDCP 算法在暗通道的获取过程中引入自适应暗通道概念

和超像素分割算法,并根据上下文约束求解细化透射率. 最后通过实验验证ASDCP算法的去雾性能.

1 暗通道先验及其实现

1.1 大气物理模型

目前在计算机视觉领域中,被广泛使用的是大气物理模型

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

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

其中: x 表示图像中的一个像素点, $I(x)$ 表示有雾图像, $J(x)$ 表示理想图像, A 表示全局大气光照强度, $d(x)$ 表示景深, β 表示大气光散射系数, $t(x)$ 表示透射率.

1.2 暗通道先验及其优化

暗通道先验是指在户外晴朗无雾图像的局部像素邻域内,总会存在某个像素的某个颜色通道的值很低,其数学定义为

$$J^{\text{dark}}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_{c \in \{r, g, b\}} J^c(y) \right). \quad (3)$$

其中: $J^{\text{dark}}(x)$ 表示暗通道图像, $J^c(y)$ 表示 $J(x)$ 的某一个颜色通道, $\Omega(x)$ 表示以 x 为中心的邻域.

根据暗通道先验,户外晴朗无雾图像的暗通道的值非常低,接近于0.

将有雾图像进行归一化处理,将式(1)两端同时除以全局大气光照强度 A . 为了提高算法的鲁棒性, A 一般取符合条件的所有点的平均值,并对两边进行2次最小值运算,可得

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

由式(3)和(4)解出

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

在户外晴朗的天空中含有一些颗粒,彻底去雾会造成图像失真. 为了增加图像的真实感,在图像清晰化处理时适当保留一定的雾,引入因子 ω , 取值为 0.95^[18]. 当透射率 $t(x)$ 取值很小时,同样会造成图像失真,因此 $t(x)$ 的取值应该在 0.1 ~ 1 之间.

$$t(x) = \min \left(1, \max \left(0.1, 1 - \omega \min_{y \in \Omega(x)} \left(\min_{c \in \{r, g, b\}} \frac{J^c(y)}{A} \right) \right) \right). \quad (6)$$

由式(6)求得透射率 $t(x)$, 通过式(1)推导出去雾后的图像 $J(x)$ 为

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{t(x)} + A. \quad (7)$$

2 ASDCP算法

本文在DCP算法和Bui等^[19]算法的基础上对透射率求取过程进行改进,提出一种基于暗通道先验的自适应去雾算法. 首先采用自适应暗通道概念和超像素分割算法,求取不受景深影响的暗通道;然后估计粗略的透射率,并根据上下文约束求解细化透射率.

暗通道先验的理论前提是在以 x 为中心的方形区域 $\Omega(x)$ 内的透射率 $t(x)$ 保持不变,但是 $t(x)$ 是关于场景深度的函数,与景物深度信息相关,景物越近,暗通道的值越低,景物越远,暗通道的值越高^[20]. 即当滤波器滑窗遍历到景深变化剧烈的区域时,景深较远的暗通道会被较近的暗通道取代,从而造成复原出的无雾图像光强增大,引起Halo效应^[17]. 因此,克服光晕的重点在于如何保证以 x 为中心的方形区域 $\Omega(x)$ 内只包含同一个景深物体. ASDCP算法首先使用一组高阶差分滤波器得到有雾图像的边缘信息,然后根据边缘信息判断邻域 $\Omega(x)$ 内是否存在多个景深物体. 若存在,则使用超像素法对有雾图像的邻域 $\Omega(x)$ 进行分割,区分不同景深物体,得到与中心像素点相同深度的像素块,即改进邻域,进而得到不受景深影响的暗通道图像;然后估计透射率,求解去雾图像,并使用限制对比度自适应直方图均衡(CLAHE)算法调整图像.

2.1 ASDCP算法过程

ASDCP算法的步骤如下:

1) 计算有雾图像 $I(x)$ 三个通道的最小值图像channel,即

$$\text{channel} = \min_{c \in \{r, g, b\}} (I^c), \quad (8)$$

其中 I^c 表示有雾图像 $I(x)$ 的一个通道.

2) 计算图像的边缘信息,然后根据边缘信息判断邻域 $\Omega(x)$ 内是否存在多个景深物体. 当邻域 $\Omega(x)$ 内边缘信息平缓时,认为邻域 $\Omega(x)$ 内全部像素点与中心点在同一景深范围,否则认为存在部分像素点与中心点不在同一景深范围.

3) 若邻域 $\Omega(x)$ 内存在唯一景深物体,则改进邻域 $\Omega'(x)$ 即为邻域 $\Omega(x)$;若邻域 $\Omega(x)$ 内存在不同景深物体,则使用超像素法对有雾图像的邻域 $\Omega(x)$ 进行分割,区分不同景深物体,得到与中心像素点相同深度的像素块,即改进邻域 $\Omega'(x)$.

4) 根据步骤3)在channel图像求出所有在改进邻域 $\Omega'(x)$ 的像素,表示为 channel_D . 暗通道的取值为 channel_D 的最小值,即

$$a = \min \text{channel}_D, \quad (9)$$

其中 a 表示所求自适应暗通道值.

5) 根据步骤1)~步骤4)得到的暗通道求解粗略透射率 $t'(x)$,并通过上下文约束函数^[8]找到一个最佳的透射率 $t(x)$.

6) 求解全局大气光照强度,并根据步骤5)得到的透射率 $t(x)$ 和式(7)求解无雾图像.

7) 由于基于暗通道的算法普遍存在亮度降低的问题,本文算法最后使用CLAHE算法调整图像.

2.2 使用边缘信息判断景深

抑制景深突变处的Halo效应必须要求透射率分布图保存正确的景物深度信息. 在ASDCP算法中根据有雾图像的边缘信息自适应判断当前像素邻域内是否具有多个景深物体并求解暗通道,边缘信息强度决定景深物体的判断情况,影响透射率分布图在该区域保存的景深信息准确性.

在ASDCP算法中通过使用一组高阶差分滤波器对图像进行边、角、点的特征提取.

$$B(x) = B \oplus I(x). \quad (10)$$

其中: $B(x)$ 表示有雾图像 $I(x)$ 的边缘信息; B 表示一组高阶差分滤波器,如图1所示; $I(x)$ 表示有雾图像.

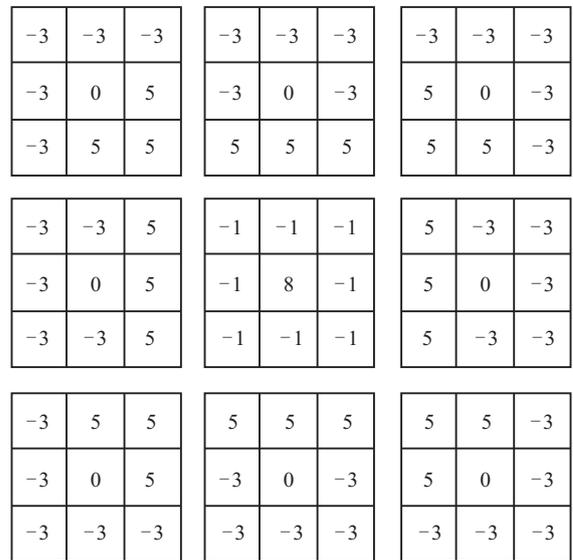


图1 高阶差分滤波器

使用滤波器 B 得到的边缘信息中绝大多数为弱特征,使用Otsu法自动将边缘信息分为强特征和弱特征,并标记所有强特征. 根据邻域 $\Omega(x)$ 内是否存在强特征判断景深物体情况:若存在强特征,则邻域 $\Omega(x)$ 内存在多个景深物体;否则,存在唯一深度. 图2(a)为实验图像,图2(b)为使用滤波器 B 得到的边缘信息,图2(c)为通过自适应法和超像素法得到的暗通道图像.

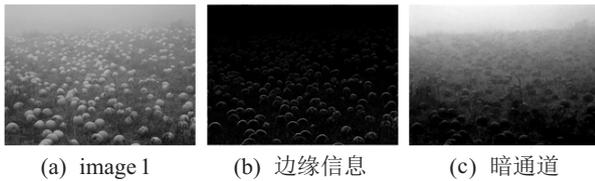


图2 边缘信息和暗通道

2.3 超像素算法

邻域 $\Omega(x)$ 内存在不同景深物体时,需要先区分不同景深物体,再计算暗通道;并且因为在 $\Omega(x)$ 内景深 $d(x)$ 相同的像素点在特征方面具有极大的相似性,所以使用超像素算法将 $\Omega(x)$ 内的多个像素聚集成有意义的视觉块,然后求取像素所在的视觉块的暗通道,去除景深变化的影响. 因此,在 ASDCP 算法中使用一种局部受限的规则聚类超像素算法^[21]对有雾图像的邻域 $\Omega(x)$ 分割,用中心像素所在的视觉块替代 $\Omega(x)$ 求取暗通道,由此获得的暗通道在景深变化剧烈的区域求取正确.

ASDCP 算法使用的局部受限的规则聚类超像素算法的分割效果如图 2(c) 所示,距离比较函数如下:

$$D_{xj} = \lg(Q \otimes C_{xj}) + \lg(d_p(x, m_j)), \quad (11)$$

$$Q = \begin{bmatrix} 0 & 0.0955 & 0 \\ 0.0955 & 0.6180 & 0.0955 \\ 0 & 0.0955 & 0 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$C_{xj} = \begin{bmatrix} d_c(x_5, m_j) & d_c(x_1, m_j) & d_c(x_7, m_j) \\ d_c(x_2, m_j) & d_c(x, m_j) & d_c(x_4, m_j) \\ d_c(x_6, m_j) & d_c(x_3, m_j) & d_c(x_8, m_j) \end{bmatrix}. \quad (13)$$

其中: Q 表示权重矩阵, C_{xj} 表示颜色距离矩阵, d_c 表示在 Lab 空间的距离, d_p 表示在欧氏空间的位置距离, x 表示图像中的某一像素, $x_j (j = 1, 2, \dots, 8)$ 表示像素 x 周围的 8 个像素, m_j 表示某一聚类中心.

2.4 细化透射率

通过自适应暗通道概念和超像素分割算法求得的暗通道可以直接得到透射率图像,但透射率图像有明显的块现象,如图 2(c) 所示,需要进行细化. ASDCP 算法通过上下文约束函数^[8]找到一个最佳的传输函数 $t(x)$, 即当 $F(x)$ 最小时, $t(x)$ 为最佳的传输函数

$$F(x) = \frac{\lambda}{2} \|t - t'\|_2^2 + \sum_{j \in i} \|W_j \circ (D_j \otimes t')\|_1. \quad (14)$$

其中: 第 1 部分为数据项,用于测量从粗略透射率 $t'(x)$ 对细化透射率 $t(x)$ 的保真度, λ 表示平衡这两个项的正则化参数; 第 2 部分为 $t'(x)$ 的上下文约束建模, i 表示指数集, \circ 表示元素乘法算子, \otimes 表示卷积算子, D_j 表示一阶微分算子, $W_j (j \in i)$ 表示加权矩阵.

图 3 为 DCP 算法和 ASDCP 算法求解透射率的效

果图,其中图 3(a) 是原图,图 3(b) 是 DCP 算法的暗通道分布图,图 3(c) 是 ASDCP 算法的暗通道分布图.

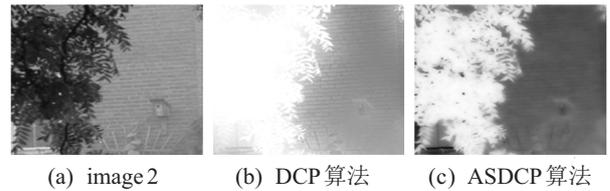


图3 image 2 的局部透射率效果图

观察图 3 可发现: 图 3(c) 在具有多个景深的交界处的景物深度信息更明显,物体边缘基本与 image 2 保持一致; 图 3(b) 中蕴含的景物深度信息在物体内部的细节良好,但在物体边缘处,透射率较小的一侧透射率明显增大. 因此,图 3(c) 的透射率求取比图 3(b) 更准确.

3 实验结果与分析

为了定量研究 ASDCP 算法对 Halo 效应的抑制性能,使用去雾图像客观质量综合评价准则^[22]评价 ASDCP 算法、DCP 算法^[7]、EMDCP 算法^[16]、ADCP 算法^[17] 和 BCCR 算法^[8], 在所有实验对比算法中,窗口大小为 15×15 , 全局大气光照强度取亮度前 0.1% 的像素均值. 其中: DCP 算法采用导向滤波^[23]修正透射率, 计算机操作系统为 win 10, CPU 为 2.6 GHz, 内存为 4 GB, 编译环境为 Matlab.

3.1 主观评价

如图 4 和图 5 所示,使用 DCP 算法、EMDCP 算法、ADCP 算法和 BCCR 算法与 ASDCP 算法进行比较, 可得如下评价:

DCP 算法: 去雾图像的去雾效果理想, 图像的颜色自然逼真, 但是在使用引导滤波细化透射率提高算法效率时, 会造成去雾不彻底, 在边界处易引起 Halo 效应.

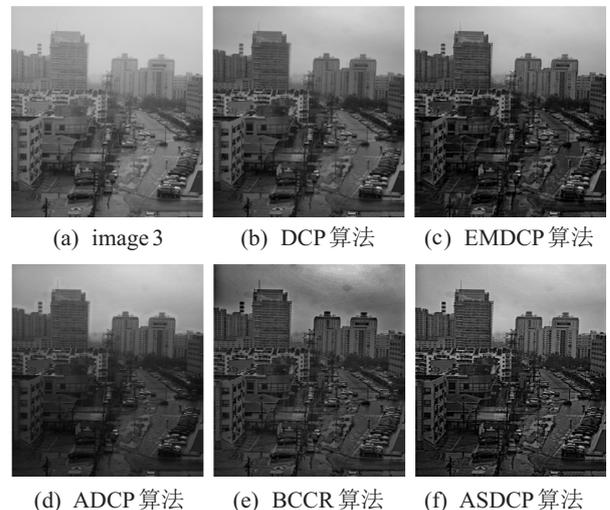


图4 去雾效果对比(image 3)

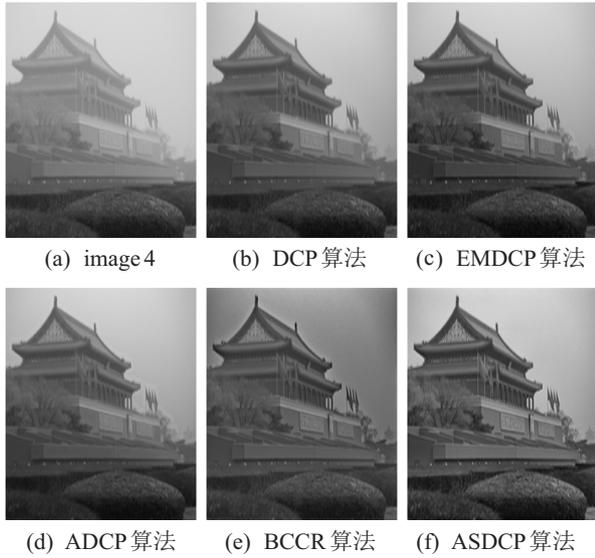


图5 去雾效果对比(image 4)

EMDCP算法: 去雾图像的去雾效果在DCP算法的基础上有了进一步的提高, 去雾更加彻底, 在边界处没有引起明显Halo效应, 解决了DCP算法的Halo效应问题; 但是在边界复杂的区域会出现明显的块现象, 如图4(c)所示, 影响去雾效果。

ADCP算法: 近景去雾图像的去雾效果十分理想, 不会引起Halo效应, 但是会造成物体内部细节模糊, 如图5(d)所示; 并且在透射率变化较大的区域还是会产生Halo效应, 影响视觉效果, 如图4(d)所示。

BCCR算法: 去雾图像的去雾效果理想, 并且对雾浓度较高的图片的效果也十分理想, 有效抑制了在边界处的Halo效应, 但是在处理天空等远距离景物时易出现图像偏色和大量色斑, 如图4(e)所示。

ASDCP算法: 去雾图像的去雾效果十分理想, 图像的颜色逼真, 视觉效果良好, 没有在边界处易引起Halo效应, 与第2节理论分析一致, 得到正确的景深信息可以抑制景深突变处的Halo效应, 并且对天空等远距离景物的处理效果也很好, 没有出现图像偏色。

3.2 客观评价

使用CAC评价ASDCP算法与现有去雾算法, 评价结果如表1和表2所示, 其中image 3和image 4的大小分别为600×400和450×600。

表1 图4的评价参数

image 3	EWSSIM	NGD	CWR	CAC	time
DCP	0.826	0.918	0.551	0.417	1.994
EMDCP	0.726	0.872	0.514	0.325	2.248
ADCP	0.759	0.927	0.497	0.349	2.994
BCCR	0.815	0.819	0.674	0.449	3.623
ASDCP	0.817	0.934	0.627	0.478	2.207

表2 图5的评价参数

image 4	EWSSIM	NGD	CWR	CAC	time
DCP	0.612	0.981	0.692	0.415	1.840
EMDCP	0.534	0.964	0.624	0.321	2.143
ADCP	0.569	0.953	0.575	0.311	2.601
BCCR	0.725	0.832	0.704	0.424	3.764
ASDCP	0.693	0.952	0.728	0.480	2.184

CAC的定义为

$$CAC = (EWSSIM)^m (NGD)^n (CWR)^p. \quad (15)$$

其中: EWSSIM、NGD和CWR分别表示边缘加权结构相似性测度、归一化灰度差和色彩加权还原度; m 、 n 和 p 用来调节EWSSIM、NGD和CWR在综合评价中的比重, $m = n = p = 1$ 且CAC取值越大说明复原图像质量越高。

由表1和表2可知, 与原图相比, ASDCP算法在CAC准则的评价最好, 并且ASDCP算法比现有算法在边缘加权结构相似性测度、归一化灰度差和色彩加权还原度上都有比较理想的效果, 评价总体提高了10%, 因此ASDCP算法抑制Halo效应的效果最好。从效率方面比较, ASDCP算法同样是效率较高的, 在实际使用中具有优势。

4 结论

ASDCP算法采用自适应暗通道概念和超像素分割算法, 减小了景深变化对暗通道获取的影响, 并根据上下文约束细化了透射率, 抑制了景深突变处的Halo效应, 与现有算法相比, CAC提高了10%。ASDCP算法使用时需要注意: 超像素分割的目的是为了使景物深度保持一致, 在此基础上保证透射率的准确性, 但无法避免Halo效应; 暗通道求取依靠超像素分割的性能, 去雾效果依靠大气物理模型, 所以超像素分割算法的性能和大气物理模型有待进一步提高, 这将是下一步的研究方向。

参考文献(References)

[1] 吴迪, 朱青松. 图像去雾的最新研究进展[J]. 自动化学报, 2015, 41(2): 221-239.
(Wu D, Zhu Q S. The latest research progress of image dehazing[J]. Acta Automatica Sinica, 2015, 41(2): 221-239.)

[2] 禹晶, 徐东彬, 廖庆敏. 图像去雾技术研究进展[J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(9): 1561-1576.
(Yu J, Xu D B, Liao Q M. Image defogging: A survey[J]. Journal of Image and Graphics, 2011, 16(9): 1561-1576.)

[3] 汪秦峰. 基于直方图均衡化和Retinex的图像去雾算法研究[D]. 西安: 西北大学信息科学与技术学院, 2016: 2-6.
(Wang Q F. Image defogging method based on

- histogram equalization and retinex[D]. Xi'an: School of Information Science & Technology, Northwest University, 2016: 2-6.)
- [4] Zhang H, Sindagi V, Patel V M. Multi-scale single image dehazing using perceptual pyramid deep network[C]. 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops. Salt Lake City: IEEE, 2018: 902-911.
- [5] Tan R T. Visibility in bad weather from a single image[C]. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Anchorage: IEEE, 2008: 1-8.
- [6] Fattal R. Single image dehazing[J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(3): 1-9.
- [7] He K M, Sun J, Tang X O. Single image haze removal using dark channel prior[C]. 2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Miami: IEEE, 2009: 1956-1963.
- [8] Meng G, Wang Y, Duan J, et al. Efficient image dehazing with boundary constraint and contextual regularization[C]. Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision. New York: IEEE Press, 2013: 617-624.
- [9] Cai B, Xu X, Jia K, et al. DehazeNet: An end-to-end system for single image haze removal[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2016, 25(11): 5187-5198.
- [10] Li B, Peng X, Wang Z, et al. AOD-Net: All-in-one dehazing network[C]. 2017 IEEE International Conference on Computer Vision. Venice: IEEE, 2017: 4780-4788.
- [11] Fang F, Li F, Yang X, et al. Single image dehazing and denoising with variational method[C]. 2010 International Conference on Image Analysis and Signal Processing. Xiamen: IEEE, 2010: 219-222.
- [12] Pei S C, Lee T Y. Nighttime haze removal using color transfer pre-processing and dark channel prior[C]. The 19th IEEE International Conference on Image Processing. Orlando: IEEE, 2013: 957-960.
- [13] Feng C, Zhuo S, Zhang X, et al. Near-infrared guided color image dehazing[C]. 2013 IEEE International Conference on Image Processing. Melbourne: IEEE, 2014: 2363-2367.
- [14] Wang J B, He N, Zhang L L, et al. Single image dehazing with a physical model and dark channel prior[J]. Neurocomputing, 2015, 149: 718-728.
- [15] 王泽胜,董宝田,赵芳璨,等.基于改进暗通道先验的交通图像去雾新方法[J].控制与决策,2018,33(3):486-490.
(Wang Z S, Dong B T, Zhao F C, et al. Improved dehazing method for traffic images based on dark channel prior[J]. Control and Decision, 2018, 33(3): 486-490.)
- [16] 陈露,和红杰,陈帆.基于边界邻域最大值滤波的快速图像去雾算法[J].光子学报,2014,43(11):114-119.
(Chen L, He H J, Chen F. A fast image defogging algorithm based on edge-maximum filter[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(11): 114-119.)
- [17] 刘国,吕群波,刘扬阳.基于自适应暗原色的单幅图像去雾算法[J].光子学报,2018,47(2):179-186.
(Liu G, Lv Q B, Liu Y Y. Single image dehazing based on adaptive dark channel prior[J]. Acta Photonica Sinica, 2018, 47(2): 179-186.)
- [18] 宋颖超,罗海波,惠斌,等.尺度自适应暗通道先验去雾方法[J].红外与激光工程,2016,45(9):286-297.
(Song Y C, Luo H B, Hui B, et al. Haze removal using scale adaptive dark channel prior[J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(9): 286-297.)
- [19] Bui T M, Tran H N, Kim W, et al. Segmenting dark prior in single image dehazing[J]. Electronics Letters, 2014, 50(7): 516-518.
- [20] 陈书贞,任占广,练秋生.基于改进暗通道和导向滤波的单幅图像去雾算法[J].自动化学报,2016,42(3):455-465.
(Chen S Z, Ren Z G, Lian Q S. Single image dehazing algorithm based on improved dark channel prior and guided filter[J]. Acta Automatica Sinica, 2016, 42(3): 455-465.)
- [21] 汪云飞,毕笃彦,刘华伟,等.一种局部受限的规则聚类超像素算法[J].西安电子科技大学学报,2016,43(3):95-100.
(Wang Y F, Bi D Y, Liu H W, et al. Locally-restricted regular clustering superpixel algorithm[J]. Journal of Xidian University, 2016, 43(3): 95-100.)
- [22] 刘海波,汤群芳,杨杰.去雾图像质量客观评价方法研究[J].量子电子学报,2016,33(1):20-28.
(Liu H B, Tang Q F, Yang J. Research of objective assessment method for defogged image quality[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2016, 33(1): 20-28.)
- [23] He K M, Sun J, Tang X O. Guided image filtering[C]. Proceedings of the 2010 European Conference on Computer vision. Berlin Heidelberg: Springer, 2010: 1-14.

作者简介

安冬(1984—),男,副教授,博士,从事精密运动控制理论与方法、电主轴早期故障预测与诊断方法等研究, E-mail: andong@sjzu.edu.cn;

国凌明(1995—),男,硕士生,从事计算机视觉的研究, E-mail: guolingming@stu.sjzu.edu.cn;

邵萌(1981—),女,副教授,从事微纳检测技术的研究, E-mail: mshao@sjzu.edu.cn;

李颂华(1984—),男,教授,博士,从事高档石材数控加工装备与技术、现代建筑工程装备与技术等研究, E-mail: rick_li2000@163.com;

石怀涛(1982—),男,副教授,博士,从事建筑工业化吊装安装自动控制、塔式起重机自动驾驶控制系统等研究, E-mail: shihuaitao_0408@126.com.

(责任编辑: 闫妍)