

# 基于暗原色先验与 MTV 模型的单幅彩色图像去雾

赵胜楠 魏伟波 潘振宽 李 帅

(青岛大学计算机科学技术学院 山东 青岛 266071)

**摘 要** 鉴于利用大气信息或景深信息复原雾天图像的方法不能局部修正恢复结果,文中融合大气散射模型与变分偏微分方程,提出了暗原色先验与 MTV (Multi-channel Total Variation)模型相结合的单幅彩色图像去雾算法(H-MTV 模型)。利用 Dual Bregman 算法,通过引入辅助变量和 Bregman 迭代参数将问题转化为利用对偶变量的半隐式迭代计算和主变量的精确计算公式来求解该模型。最后,将 H-MTV 模型与 He, Kimmel Retinex 等经典算法的实验结果进行分析和比较,验证了所提算法的有效性和优越性。

**关键词** 彩色图像去雾,暗原色先验,MTV 模型,Dual Bregman 算法

**中图分类号** TP391 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.03.044

## Single Color Image Dehazing Based on Dark Channel Prior and MTV Model

ZHAO Sheng-nan WEI Wei-bo PAN Zhen-kuan LI Shuai

(School of Computer Science and Technology, Qingdao University, Qingdao, Shandong 266071, China)

**Abstract** Combining variational partial differential equation with the atmospheric attenuation model, a single color image dehazing algorithm on the basis of dark channel prior and MTV model called H-MTV model was proposed. Then, using auxiliary variables and Bregman iterative parameters to calculate the model, this paper designed dual Bregman algorithm. Finally, H-MTV model was compared with He algorithm and Kimmel Retinex algorithm. Experimental results show that H-MTV model is superior to the traditional methods qualitatively and quantitatively.

**Keywords** Color image dehazing, Dark channel prior, MTV model, Dual Bregman algorithm

## 1 引言

雾是一种常见的自然现象,它会使大气的能见度降低,导致拍摄的景物图像发生退化,这将严重影响户外图像的采集与处理。因此,研究如何在有雾天气下获得清晰图像对复原大气退化图像和增强景物细节信息有着非常重要的现实意义。

当前对于雾天图像的处理方法主要分为两类<sup>[1-2]</sup>:雾天图像增强和雾天图像复原。雾天图像增强方法不考虑图像退化原因,虽然能够提高雾天图像的对比度,增强图像的细节,但对于突出部分的信息可能会存在一定的损失,代表算法有直方图均衡算法和 Retinex 算法。雾天图像复原方法是基于大气退化物理模型的方法,该方法建立退化模型,反演退化过程,补偿退化过程造成的失真,以获得未经干扰退化的无雾图像或无雾图像的最优估计值,从而改善雾天图像的质量。雾天图像复原方法主要分为以下 3 类。

1) 基于景物深度信息的雾天图像复原。该类算法需要预先测得图像中的深度信息,求解出图像退化模型的参数,将参数代入模型中,从而估算出无雾图像。Oakley 等<sup>[3]</sup>针对飞机

上传感器拍摄的灰度图像,利用雷达和飞机飞行参数来估计场景深度和地形模型。Tan 等<sup>[4]</sup>结合对比度降质和波长关系,把该方法扩展到彩色图像。这类方法能有效地得到深度信息,但针对性强,对硬件要求高,严重地限制了这类算法的应用领域。

2) 基于先验信息的雾天图像复原。He 等<sup>[5]</sup>通过对大量无雾图像统计特征的分析,发现暗原色先验统计规律,即在无雾的非天空区域,将图像分为多个子块,每个子块至少在一个颜色通道上有亮度很小的像素点,其暗原色图像各像素点的值接近 0。运用这一先验,找出图像局部子块的暗原色,并粗略估算大气透射率。Levin 等<sup>[6]</sup>提出了软抠图(Soft Matting)算法来细化和平滑透射率图,但求解拉普拉斯矩阵方程的计算量庞大。He 等<sup>[7]</sup>提出利用导向滤波算法来细化透射率,该方法运算速度快,实用性强。

3) 基于偏微分方程的雾天图像复原。对雾天图像的处理,可借助大气散射模型(Monochromatic Atmospheric Scattering Model, MASM)<sup>[8]</sup>,建立户外图像全局去雾和局部去雾<sup>[9]</sup>的能量优化模型,推导相应的包含图像梯度和场景景深的偏微分方程。该类算法通过对降质图像进行规范化预处理,来

到稿日期:2016-12-23 返修日期:2017-03-03 本文受国家自然科学基金项目(61170106),山东省高等学校科技计划项目(J14LN39)资助。

赵胜楠(1993-),女,硕士生,主要研究方向为数字图像处理,E-mail:741296025@qq.com;魏伟波(1981-),男,博士,副教授,主要研究方向为图像处理、目标识别,E-mail:njustwwb@163.com(通信作者);潘振宽(1966-),男,博士,教授,主要研究方向为图像处理、计算机仿真;李帅(1992-),男,硕士生,主要研究方向为图像处理。

降低不同雾况对灰度级分布范围的影响,根据大气散射对对比度散射的影响规律,在模糊域内实现对规范化后的图像的对比度增强处理。

以上方法在图像去雾的思路有着根本区别,各有优缺点。在对上述方法进行对比研究的基础上,本文结合暗原色先验信息和偏微分方程的优点,提出了暗原色先验与 MTV 模型相结合的 H-MTV 模型,最大程度地实现了图像清晰化。

本文第 2 节首先介绍暗原色先验和 MTV 模型的相关知识;第 3 节建立大气光强度和大气传输函数相关的新能量泛函(H-MTV),并利用 Dual Bregman 算法求解该能量泛函;第 4 节进行了实验仿真,并对实验结果进行了分析;最后总结全文。

### 2 暗原色先验模型和 MTV 模型

#### 2.1 暗原色先验模型

Narasimhan 和 Nayar<sup>[10-11]</sup>基于 McCarteny 的散射模型和环境光模型,提出了单色大气散射模型来建模雾天条件下的图像退化过程,其数学表达式为:

$$I = J \cdot t + A(1-t) \tag{1}$$

其中,  $I$  是输入图像,即待去雾的图像;  $J$  是输出图像,即待恢复的无雾的图像;  $A$  是大气光强度,其值可以通过暗原色先验知识来获取;  $t$  为大气传输函数,即透射率。式(1)中,  $J \cdot t$  为直接散射项,  $A(1-t)$  为大气散射项。显然,这是一类典型的病态反问题,因此需要一些先验知识。暗原色先验统计规律<sup>[5]</sup>表明,在无雾的非天空区域,若把图像分为多个子块,则每个子块至少在一个颜色通道上有亮度很小的像素点,其暗原色图像各像素点的值接近 0。

$$J^{dark}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} (\min_{c \in (r,g,b)} J^c(y)) \approx 0 \tag{2}$$

其中,  $J^c(y)$  表示彩色图像  $J$  的每个通道,  $\Omega(x)$  表示以像素  $X$  为中心的一个窗口。根据文献<sup>[5]</sup>,暗原色分量与传输分量  $\tilde{t}(x)$  存在如下关系:

$$\tilde{t}(x) = 1 - \omega \min_{y \in \Omega(x)} (\min_c \frac{I^c(y)}{A^c}) \tag{3}$$

其中,  $\omega$  是一个常数 ( $0 < \omega \leq 1$ ), 引入因子  $\omega$  的目的是保留一定程度的雾,使结果图像更加自然。通过式(3)可粗略求得透射率图,但所求得的透射率图是不精确的,因为在计算最小暗原色通道值时是基于一个区域的,而实际上,图像中每个像素点的透射率值都不尽相同,所以这种粗略的透射率图可能会带来方块效应,需要进一步进行细化处理。软抠图算法实质上是采取更高精度的差值算法来细化和平滑透射率图,其作用是从整个图像中分离出输入图像的前景部分。

He<sup>[5]</sup>算法中大气光强度  $A$  的值需根据输入的图像  $I$  来求解。初略估计暗原色图的雾浓度,在暗原色图中按亮度的大小取前 0.1% 的像素点,对照这些位置,找出原始带雾图像  $I$  中对应位置的像素点,满足条件的所有像素点的最大像素点值即为  $A$  的值。最终,暗原色模型复原图像公式如式(4)所示:

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\max(t(x), t_0)} + A \tag{4}$$

其中,  $t_0$  是为了避免除数为 0 而设置的一个常数。

#### 2.2 MTV 模型

彩色图像可以看作多层灰度图像,因此可以将灰度图像去雾的变分模型用于各层图像,但是由于各层图像边缘处的扩散强度不一致会造成边缘模糊,因此 Yang 等<sup>[12]</sup>提出了考虑各层图像耦合的 MTV 规则<sup>[13-15]</sup>项。

$$E(u) = \lambda \int_{\Omega} \sqrt{\sum_{i=1}^m |\nabla u_i|^2} dx + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \int_{\Omega} |u_i - f_i|^2 dx \tag{5}$$

其中,  $\lambda \int_{\Omega} \sqrt{\sum_{i=1}^m |\nabla u_i|^2} dx$  是规则项,表示恢复后图像光滑程度的先验知识,  $\lambda$  是调节参数;  $\frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \int_{\Omega} |u_i - f_i|^2 dx$  是数据项,表示观测图像与恢复后图像的接近程度。

### 3 彩色图像去雾的 H-MTV 模型

本文结合暗原色先验和 MTV 模型,推导出包含大气光强度  $A$  和大气传输函数  $t$  的偏微分方程,这建立新的去雾模型(H-MTV model)。

$$E(J) = \lambda \int_{\Omega} \sqrt{\sum_{i=1}^3 |\nabla J_i|^2} dx + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \int_{\Omega} |J_i - \frac{I_i - A \cdot (1-t)}{t}|^2 dx \tag{6}$$

利用软抠图算法来细化  $t$ ,需要求解大型拉普拉斯矩阵方程,这给整个过程带来了庞大的计算量,因此本文采用导向滤波算法<sup>[7]</sup>取代软抠图来细化透射率  $t$ ,该方法主要依靠简单的方框模糊效应,运算速度较快,实用性强。本文中大气光强度  $A$  的值并不是取满足条件的所有像素点的最高像素点值,而是取它们的平均值。

为了将式(6)中的  $E(J)$  能量最小化,本文参考文献<sup>[16-17]</sup>,为其设计了 Dual Bregman 迭代方法,通过引进对偶矢量  $p$  来构造 Dual Bregman 迭代优化格式,并令  $u_i = J_i, f_i = \frac{I_i - A \cdot (1-t)}{t}$ ,从而简化计算过程。

$$\text{Arg Min}_u \text{Max}_{p_i: |p_i| \leq 1} \{E(u, p) = \lambda \sqrt{\sum_{i=1}^3 (\int_{\Omega} u_i \nabla \cdot p_i dx)^2} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \int_{\Omega} (u_i - f_i)^2 dx\} \tag{7}$$

根据式(7)求得关于  $u_i$  的 Euler-Lagrange 方程:

$$u_i - f_i + \lambda \nabla \cdot p_i = 0 \tag{8}$$

即  $u_i$  的方程为:

$$u_i = f_i - \lambda \nabla \cdot p_i \tag{9}$$

对式(7)采用对偶方法,得:

$$p_i^{n+1} = \frac{p_i^n + \tau \nabla \cdot (\nabla \cdot p_i^n - \frac{f_i}{\lambda})}{1 + \tau \sqrt{\sum_{j=1}^3 (\nabla \cdot (\nabla \cdot p_j^n - \frac{f_j}{\lambda}))^2}}, p_i^0 = 0 \tag{10}$$

其中,  $n$  为迭代次数,  $\tau$  为时间步长。将式(10)求得的  $P$  值代入到式(9)中,即可求得  $u_i$  的值。

本文算法首先输入原始图像  $I$ ,通过暗原色先验模型求解出大气光强度和大气传输函数;然后建立与大气光强度和大气传输函数相关的新能量泛函(H-MTV);最后利用 Dual

Bregman 算法来求解该能量泛函。算法的流程如图 1 所示。

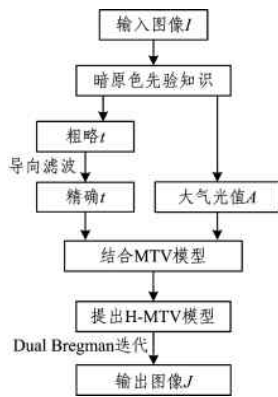


图 1 本文算法的流程

Fig. 1 Flow chart of the proposed algorithm

### 4 实验仿真与分析

本文实验在 Intel(R) Core(TM) i5-4590 CPU3.30GHz, 4.00GB 内存的 PC 机上进行, 采用的编程环境为 Matlab R2010b。

本文算法中的参数  $t_0 = 0.1, \omega = 0.95, \tau = 0.125$ , 由于惩罚参数  $\lambda$  的值越大, 图像越模糊, 因此选取的  $\lambda$  值为 0.001。为了比较 H-MTV 算法与 He 算法、Kimmel Retinex 算法的实现效果, 本文选取了 3 组典型实验。

图 2 是像素为  $297 \times 257$  的航拍图像及各算法的去雾效果图。图 2(a) 是原始图, 其特点是图像以薄雾为主, 景深变化平缓, 景物纹理复杂, 存在大量深度相等的物块; 图 2(b) 中, 处理后的图像的颜色偏暗, 尤其是远景部分的细节没有得到增强; 图 2(c) 中, 颜色对比度增强明显, 但前景颜色出现明显失真; 图 2(d) 的处理效果最好。



图 2 航拍图像和各算法的去雾效果图

Fig. 2 Original aerial image and results of each algorithm

图 3 是像素为  $450 \times 315$  的山岭图及各算法的去雾效果图。图 3(a) 的特点是雾的浓度随景深而变化, 浓雾占了较大一部分; 图 3(b) 中远景部分的去雾效果不理想; 图 3(c) 中近景处树木的颜色过于饱和, 去雾效果不理想; 图 3(d) 在视觉效果上优于图 3(b) 和图 3(c)。



图 3 山岭图像和各算法的去雾效果图

Fig. 3 Original mountain image and results of each algorithm

图 4 是像素为  $437 \times 307$  的天安门近景图像及各算法的

去雾效果图。图 4(a) 是原始图, 其特点是景深变化幅度不大, 但图像包含天空区域, 给图像去雾带来了难度; 图 4(b) 和图 4(c) 中屋顶的边沿都出现了光晕; 图 4(b) 和图 4(d) 对天空部分的处理效果都不好, 出现了颜色失真; 图 4(d) 中的边缘保持效果最好。



图 4 天安门图像和各算法的去雾效果图

Fig. 4 Original Tian an men image and results of each algorithm

上述 3 组实验结果表明, He 算法对图像的视觉效果有明显提升, 但对比度增强不足, 处理效果普遍偏暗; Kimmel Retinex 算法处理的图像颜色过于饱和, 颜色出现失真; 本文利用暗原色先验估计出透射率分布和大气光值, 能够复原不同场景深度的图像部分, 再通过规则项与数据项的约束, 使图像去雾效果更加自然。

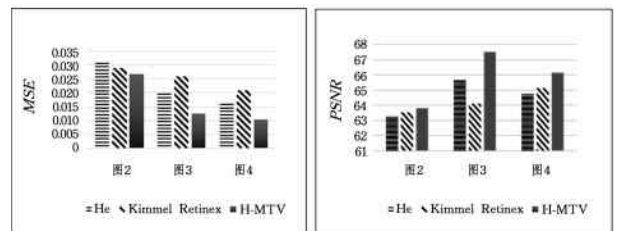
为了客观说明本文所提算法的去雾性能, 采用误差均方差 (MSE) 和峰值信噪比 (PSNR) 作为图像质量的客观评价指标。针对每个像素, 对比原图像和去雾后的图像, 评估两者在像素上的差异。其中, 误差均方差计算公式如式 (11) 所示:

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} \| I(i, j) - I_0(i, j) \|^2 \tag{11}$$

其中,  $I(i, j)$  为求得的图像像素值,  $I_0(i, j)$  为原始输入图像的像素值, 峰值信噪比的计算公式如式 (12) 所示:

$$PSNR = 10 \cdot \log \frac{255^2}{MSE} \tag{12}$$

各算法的 MSE 和 PSNR 值的计算结果如图 5 所示。



(a) MSE 评价各算法效果的柱状图 (b) PSNR 评价各算法效果的柱状图

图 5 图像去雾算法质量评价柱状图

Fig. 5 Quality-evaluation histograms of image dehazing algorithms

MSE 越小, PSNR 越大, 图像失真越小。实验数据分析表明, 本文提出的 H-MTV 模型的 MSE 值都最小, PSNR 都最大。综上, 本文提出的算法失真最小, 且能有效提高图像的对比度以及改善图像的视觉效果。

**结束语** 根据带雾图像的物理特性, 本文将暗原色先验与 MTV 模型相结合, 提出了一种针对单幅彩色图像的去雾算法, 可以较好地恢复彩色带雾图像。本文提出的算法对薄雾图像的处理效果较好, 但对浓雾图像的处理效果不佳, 并且该算法对某些区域的处理效果也不理想, 会导致色彩失真 (比如天空区域), 该问题将是下一步研究的主要方向。

(下转第 282 页)

- Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2004, 26(8): 1007-1019.
- [3] EBERLY D, GARDNER R, MORSE B, et al. Ridges for Image Analysis[J]. Journal of Mathematical Imaging and Vision, 1994, 4(4): 353-373.
- [4] AGGARWAL N, KARL W C. Line Detection in Images through Regularized Hough Transform [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2006, 15(3): 582-591.
- [5] LI S X, CHANG H X, ZHU C F. Fast Curvilinear Structure Extraction and Delineation Using Density Estimation [J]. Computer Vision and Image Understanding, 2009, 113(6): 763-775.
- [6] LIU L, ZHANG D, YOU J. Detecting Wide Lines Using Isotropic Nonlinear Filtering[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(6): 1584-1595.
- [7] LIU L, NGADI M O, PRASHER S O, et al. Objective determination of pork marbling scores using the wide line detector [J]. Journal of Food Engineering, 2012, 110(3): 497-504.
- [8] SMITH S M, BRADY J M. Susan—a New Approach to Low Level Image Processing [J]. International Journal of Computer Vision, 1997, 23(1): 45-78.
- [9] KNUTH D E, MORRIS J H, PRATT V R. Fast Pattern Matching in Strings[J]. SIAM Journal of Computing, 1977, 6(2): 323-350.
- [10] BOYER R S, MOORE J S. A fast string searching algorithm [J]. Communications of the ACM, 1977, 20(10): 762-772.
- [11] ABDOU I E, PRATT W K. Quantitative Design and Evaluation of Enhancement/Thresholding Edge Detectors [J]. Proceedings of the IEEE, 1979, 67(5): 753-763.

(上接第 276 页)

### 参 考 文 献

- [1] HAUTIERE N, TAREL J P, HALMAOUI H, et al. Enhanced fog detection and free-space segmentation for car navigation[J]. Machine Vision and Applications, 2014, 25(3): 667-679.
- [2] TANG Z X. Image Dehazing Based on Haziness Analysis[J]. International Journal of Automation and Computing, 2014, 11(1): 78-86.
- [3] OAKLEY J P, SATHERLEY B L. Improving image quality in poor visibility conditions using a physical model for contrast degradation[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1998, 7(2): 167-179.
- [4] TAN R. Visibility in bad weather from a single image [C]// Proceeding of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2008: 2347-2354.
- [5] HE K, SUN J, TANG X. Single image haze removal using dark channel prior[C]// IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2009 (CVPR 2009). IEEE, 2011: 1956-1963.
- [6] LEVIN A, LISCHINSKI D, WEISS Y. A Closed Form Solution to Natural Image Matting[C]// IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. IEEE Computer Society, 2006: 61-68.
- [7] HE K, SUN J, TANG X. Guided Image Filtering [M]// Computer Vision — ECCV 2010. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2010: 1397-1409.
- [8] NARASIMHAN S G, NAYAR S K. Contrast Restoration of Weather Degraded Images[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2003, 25(6): 713-724.
- [9] ZHOU L, BI D Y, HE L Y. Single color image dehazing using variational partial differential equation [J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(5): 1465-1472. (in Chinese)
- 周理, 毕笃彦, 何林远. 融合变分偏微分方程的单幅彩色图像去雾[J]. 光学精密工程, 2015, 23(5): 1465-1472.
- [10] SCHECHNER Y Y, NARASIMHAN S G, NAYAR S K. Instant dehazing of images using polarization[C]// Proceedings of the 2001 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2001 (CVPR 2001). IEEE, 2001: 325-332.
- [11] SCHECHNER Y Y, NARASIMHAN S G, NAYAR S K. Polarization-based vision through haze [J]. Applied Optics, 2003, 42(3): 511-525.
- [12] YANG J, YIN W, ZHANG Y, et al. A fast algorithm for edge-preserving variation multichannel image restoration [J]. SIAM Journal on Imaging Science, 2009, 2(2): 569-592.
- [13] BRESSON X, CHAN T F. Fast minimization of the vectorial total variation norm and application to color image processing [J]. Inverse Problems and Imaging, 2008, 2(4): 455-484.
- [14] AUJOL J F, KANG S H. Color image decomposition and restoration [J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2006, 17(4): 916-928.
- [15] DUVAL V, AUJOL J F, VESE L. A projected gradient algorithm for color image decomposition [J/OL]. <https://www.math.u-bordeaux.fr/~jaujol/PAPERS/CMLA2008-21.pdf>.
- [16] ZACH C, POCK T, BISCHOF H. A Duality Based Approach for Realtime TV-L1 Optical Flow[C]// Proceedings of DAGM'07. Berlin, Germany: Springer, 2007.
- [17] POCK T, URSCHLER M, ZACH C, et al. A Duality Based Algorithm for TV-L1-Optical-Flow Image Registration [M]// Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention—MICCAI 2007. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2007: 511-518.