基于暗通道先验的大气退化图像去雾改进方法研究

谢立[1]，熊刚[2,3]，于波[1]，朱凤华[2,3]，胡斌[2,3]
（1.浙江大学信息学部，浙江 杭州 310027；
2. 中国科学院自动化研究所，复杂系统管理与控制国家重点实验室，北京 100190；
3. 中国科学院云计算中心，广东 东莞 523808）

摘　要：在雾、霾等恶劣天气条件下采集的图像会严重降质，极大的影响图像的实用价值。本文针对雾天大气退化图像的去雾问题开展研究，首先探究了雾天成像的基本原理，接着，通过分析暗通道先验原理，提出了一种结合峰值信噪比的暗通道先验去雾改进算法，用以有效提高去雾后图像的细节清晰度，最后，通过与直方图均衡、多尺度 Retinex 等图像增强算法和传统暗通道先验算法进行仿真比较分析，来验证本文算法的有效性。

关键词：大气退化图像；去雾；暗通道先验；峰值信噪比
中图分类号：TP391　　**文献标识码：**A

A Novel Haze Removal Algorithm for Atmospheric Degraded Image with Dark Channel Prior

Li Xie[1], Gang Xiong[2,3], Bo Yu[1], Fenghua Zhu[2,3], Bin Hu[2,3]
（1. Faculty of Information Science, Zhejiang University, Hangzhou, 310027 China;
2. The State Key Laboratory of Management and Control for Complex Systems Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
3. Cloud Computing Center, Chinese Academy of Sciences, Guangdong Dongguan, 523808）

Abstract：In the fog, haze and other severe atmospheric conditions, the image will be severely degraded, the practical value of the image will be affected greatly. In this paper, the removal of haze for the degraded image is studied. Firstly, the basic principle of fog imaging is analyzed. Then, through the analysis of the dark channel prior principle, a novel dark channel prior haze removal algorithm with the peak signal-to-noise ratio is proposed to improve the dehazing image details clear degree effectively. Finally, the simulation results are compared with histogram equalization, Multi-Scale Retinex and other classical dark channel prior algorithms to verify the effectiveness of the proposed algorithm.

Key words：Atmospheric degraded image；Haze removal；Dark channel prior；Peak signal-to-noise ratio

1 引言

通常情况下，计算机视觉系统的图像采集会受到天气条件的影响，尤其是在雾、霾等恶劣天气条件下，由于大气中悬浮的大量水汽、气溶胶等微小颗粒物具有光学散射作用，导致能见度降低，使得成像传感器采集到的图像质量严重退化，导致计算机视觉系统的性能下降甚至无法正常工作。因此，为了保证计算机视觉系统在恶劣天气条件下仍旧能可靠工作，针对大气退化图像的去雾问题开展研究相当必要。目前，图像去雾技术是计算机视觉领域中一个倍受关注的研究方向，具有广阔的应用前景，其主要任务是消除雾、霾等环境因素对图像质量的影响，增强图像可见度。相关研究成果可广泛应用于航拍、室外视频监控、智能交通，以及军事侦察

收稿日期：0000－00－00；**修回日期：**0000－00－00.
基金项目：国家自然科学基金项目（61233001, 71232006, 61533019, 91520301）；芬兰 Tekes FiDiPro Project（211560）；广东省科技厅项目(2014B010118001, 2014B090902001, 2014A050503004, 2015B010103001, 2016B090910001), 浙江省科技计划项目(2016C33069), 东莞领军人才项目（熊刚).
作者简介：谢立(1974－)，男，浙江省杭州人，副教授，工学博士，从事智能自动化方面研究，E-Mail：xiehan@zju.edu.cn

等诸多领域。近年来，该领域已经成为计算机视觉与图像处理领域研究的热点问题之一，受到研究者的极大重视。同时，由于各类恶劣天气条件本身存在的多变性与不确定性，现有的研究成果和研究方法均需改进完善。因此，探究具有更好适用性与可靠性的大气退化图像去雾算法对于计算机视觉研究者而言，仍然是一个极具挑战性的课题。

从国内外现有的研究成果看，图像去雾方法主要可以分为两类：一类为基于图像处理的图像增强方法，另一类为基于物理模型的图像复原方法。图像增强方法只对图像中的感兴趣区域进行质量增强，并不考虑导致图像退化的具体原因，通过提高图像的对比度来改善图像的视觉效果[1]。这种方法优点是算法简单，适用范围较广且实现成本较低，但是会引起图像中有效信息的损失，且处理后的图像可能会出现较为严重的失真效果[2]。基于物理模型的图像复原方法则是通过建立大气退化模型[3]，分析雾天图像退化的物理过程，补偿退化过程造成的失真来获得无雾图像的最优估计，从而改善雾天图像质量[4]。第二类方法获得的去雾图像视觉效果自然，不会在图像细节上出现过多的信息损失[5]。

本文主要研究大气退化图像的去雾处理，根据雾天图像的退化机制，构建雾天成像的物理模型，并基于该物理模型开展图像复原研究，主要针对传统的暗通道先验去雾算法无法自适应地调整相关系数、难以获得最佳图像质量等缺点进行改进。论文主要结构如下：首先，阐述了该问题的研究背景，对图像去雾算法进行了简单介绍；接着，探究了雾天图像的退化原因，引入暗通道先验理论，构建雾天成像的物理模型；然后，针对传统暗通道先验去雾算法自适应度较低等缺陷，结合图像峰值信噪比，提出一种暗通道先验去雾改进算法，以获得优化的图像质量；最后，与全局直方图均衡算法、多尺度Retinex算法、传统暗通道先验算法等图像去雾算法进行了比较研究。

2 基于暗通道先验的去雾改进方法

2.1 暗通道统计规律

由于退化图像复原存在严重的病态性，想要由单幅图像复原出无雾图像，必须给出关于图像退化的某种先验信息或假设。He 等人首先提出的暗通道先验统计规律，就是一种描述清晰且十分有效的大气退化图像去雾先验信息[6]。

暗通道先验理论通过对大量室外无雾图像的观察分析后获得。经统计发现，大部分室外无雾图像，在除去天空区域后，将图像分为多个局部区域，每个局部区域至少在一个颜色通道上存在亮度值很小的像素点。

对于一幅图像J，其暗通道可以表示为：

$$J^{dark}(x)=\min_{c\in(r,g,b)}(\min_{y\in\Omega(x)}J^c(y)) \tag{1}$$

其中，J^c为图像J的一个颜色通道，$\Omega(x)$表示以x为中心的一个局部子块，子块大小一般取为15×15。由式(1)可以看出，暗通道的提取包括R、G、B三个颜色通道的最小像素值求解，以及一个局部最小值滤波处理。

对于室外无雾图像的非天空区域，暗通道图像的像素值趋近于 0，即：

$$J^{dark}\longrightarrow 0 \tag{2}$$

暗通道图像中较低像素值的产生主要有以下几类原因：物体的阴影、色彩鲜艳的物体、黑色的物体等。

由于室外图像经常出现以上几种情况，因此暗通道先验统计规律在大部分室外场景中均成立。对于室外有雾图像，其传输率较低区域的亮度较大，因而有雾图像的暗通道图像在雾气越浓区域的像素亮度值越大。从视觉效果上来看，利用有雾图像的暗通道图像亮度即可对雾气浓度进行粗略估计。

2.2 暗通道先验去雾算法

基于暗通道统计规律，He 等人提出了暗通道先验去雾算法。该算法的主要思路为：首先，求取大气退化图像I的暗通道图像，并利用该暗通道图像对大气光值A与粗略传输率$\tilde{t}$进行估计；接着，通过软抠图算法获得拉普拉斯矩阵L，结合$\tilde{t}$对稀疏线性系统求解得到精确传输率t；最后，根据大气散射模型，由I、A与t得到去雾图像。

2.2.1 大气光值的估计

对大多数图像复原去雾算法而言，大气光值A可以由输入图像的像素计算获得。He 等人提出的算法主要通过暗通道先验规律来估计出大气光值。首先，寻找暗通道图像中亮度值最高的那部分像素所对应的位置。然后，找出这些位置所对应的含雾图像区域，其灰度值最大的像素即为大气光值A。通过此方法得到的大气光值可能不是整幅图像中亮度值最大的像素值，但是这种方法具有良好的鲁棒性。

2.2.2 粗略传输率的估计

由大气散射模型$I(x)=Jt(x)+A(1-t(x))$，对每个颜色通道进行子块大小为$\Omega(x)$的局部最小值滤波，并归一化得到：

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

由 (1)-(2)可知，无雾图像存在以下条件：

$$J^{dark}(x)=\min_{c}(\min_{y\in\Omega(x)}(J^c(y)))=0 \tag{4}$$

由于各颜色通道上的大气光值 A^c 为正值，因此有：

$$\min_c(\min_{y\in\Omega(x)}(\frac{J^c(y)}{A^c}))=0 \tag{5}$$

实际上，$\min_c(\min_{y\in\Omega(x)}(\frac{I^c(y)}{A^c}))$ 就是将含雾图像归一化后的暗通道值。可得：

$$\tilde{t}(x)=1-\min_c(\min_{y\in\Omega(x)}(\frac{I^c(y)}{A^c})) \tag{6}$$

由此，可以通过(6)估计粗略传输率。

在实际情况下，即使在晴朗天气下，依然存在大气粒子，因此在无穷远处仍然存在少量的雾气。如果将其去除，会影响到景深等信息。因此，在粗略传输率估计过程中引入雾化参数 $\omega\in(0,1]$ 得：

$$\tilde{t}(x)=1-\omega\min_c(\min_{y\in\Omega(x)}(\frac{I^c(y)}{A^c})) \tag{7}$$

引入雾化参数的好处在于可以部分保留远处的雾气，使得图像视觉效果更加自然。

2.2.3 精确传输率的估计

若直接利用 $\tilde{t}(x)$ 对退化图像进行复原，会产生比较严重的块效应。因此，引入软抠图算法对传输率进行进一步优化，以满足实际场景的需求。

软抠图算法的表达式为：

$$C=F\alpha+B(1-\alpha) \tag{8}$$

其中，F 表示前景，B 表示后景，α 为合成系数。

可以发现式(8)与大气散射模型在形式上具有一致性，因此我们可以使用软抠图算法对雾天图像传输率进行优化。

定义最小化代价函数：

$$E(t)=t(x)^T Lt(x)+\lambda[t(x)-\tilde{t}(x)]^T[t(x)-\tilde{t}(x)] \tag{9}$$

式中，$t(x)$ 为优化后的传输率，L 为拉普拉斯抠图矩阵，λ 为调整系数。

通过求解稀疏线性系统，获得优化的传输率 $t(x)$：

$$(L+\lambda U)t(x)=\lambda\tilde{t}(x) \tag{10}$$

式中，U 为与 L 大小相同的单位矩阵。通过将 λ 设置一个较小的值（一般设置为 10^{-4}），令 $\tilde{t}(x)$ 对 $t(x)$ 产生一定的约束作用。

2.2.4 场景辐射度复原

根据以上求取得到的大气光值与精确传输率，利用大气散射模型可对场景辐射度进行复原。当传输率 $t(x)$ 趋近于 0 时，入射光衰减项 $J(x)t(x)$ 也趋于 0，会导致复原图像 $J(x)$ 倾向于噪声。通过限制 $t(x)$ 的最小值 t_0 (可设置为 0.1)，在原图雾气浓度较深的区域保留少量的雾气，则最终的场景辐射度 $J(x)$ 可以表示为：

$$J(x)=\frac{I(x)-A}{\max(t(x),t_0)}+A \tag{11}$$

至此，得到暗通道先验算法的基本原理与实现方法。

2.3 暗通道先验改进算法

暗通道先验算法可以对雾天图像取得较好的复原效果。但由于 He 方法中设置的雾气参数 $\omega=0.95$，对无穷远处（通常为室外图像天空区域）的雾气保存较少，因此在天空区域内出现失真，使得去雾图像视觉效果不自然。因此，我们将结合峰值信噪比信息，提出一种自适应调节雾气参数 ω 的暗通道先验去雾改进算法，以获得最佳的图像视觉质量。

2.3.1 算法原理

峰值信噪比作为一种评价图像质量的客观标准，其数学表达式为：

$$PSNR=20\log_{10}(\frac{255}{RMSE}) \tag{12}$$

$$RMSE=\sqrt{\frac{\sum[I(i,j)-J(i,j)]^2}{m\times n}} \tag{13}$$

其中，$RMSE$ 表示原图像与处理后图像之间的标准差，$I(i,j)$ 为输入图像，$J(i,j)$ 为处理后的图像，m、n 为图像的尺寸。

在退化图像的暗通道图像中寻找亮度值前 0.1%的像素，相应区域内的像素最大值即为大气光值 A 的估计值，可以表示为：

$$A=\max(\max(J^{dark}(x))) \tag{14}$$

考虑粗略传输率 $\tilde{t}(x)$ 的估计式(7)，根据大气散射模型，可以得出粗略去雾图像 $\tilde{J}(x)$ 如下：

$$\tilde{J}(x)=\frac{I(x)-A}{\tilde{t}(x)}+A \tag{15}$$

由式(12)-(13)，可以得出 $\tilde{J}(x)$ 与输入退化图像 $I(x)$ 的峰值信噪比 $PSNR_c$。峰值信噪比的值随 ω 的变化而变化。因此，为获取最佳峰值信噪比，我们首先设定 ω 的初值为 0.6，并根据一定的步长（本文中设为 0.05）增大 ω，获得 $\tilde{t}(x)$，计算得出对应的 $PSNR_c$。在增大 ω 的过程中，如果 $PSNR_c$ 的增长小于 0.01dB 或者开始下降，我们就认为 $PSNR_c$ 不再增加，此时停止增大 ω，将此时的 $\tilde{t}(x)$ 作为最佳 $PSNR_c$ 对应的粗略传输率的值，使用软抠图算法对其进行进一步优化，并结合大气光值 A 复原最终去雾图像。

此处需要注意的是，如果对精确传输率$t(x)$进行上述操作，直接获得最佳$PSNR$对应的精确传输率的值，则我们需要进行数次软抠图算法，由于拉普拉斯算子L具有较高的时空复杂度，算法的运算时间将大幅增加。然而从实际效果而言，二者在本质上是相同的。

2.3.2 算法具体步骤

改进算法的算法流程图如图 1 所示：

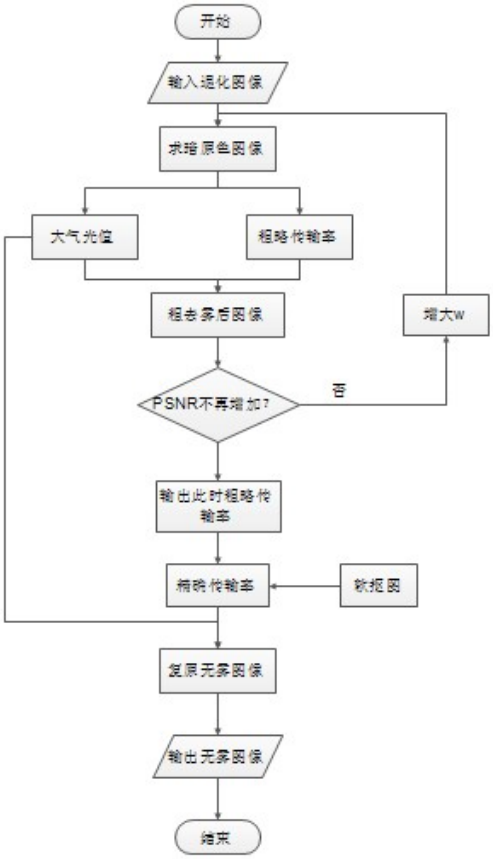

图 1. 基于暗通道先验的去雾改进算法流程图

算法的具体步骤如下：

Step 1: 输入大气退化图像，由式(1)求得其暗通道图像。

Step 2: 由式(14)得出大气光值A的估计值。

Step 3: 给定ω的初值为 0.6，由式(7)得出此时传输率的粗略估计值，并由式(12)、(13)和(15)得出此时的峰值信噪比$PSNR_c$。

Step 4: 以某一步长(本文中设为 0.05) 增大ω，重复步骤 Step 3。若峰值信噪比$PSNR_c$增幅小于 0.01dB 或开始下降，输出此时ω对应的粗略传输率，进入 Step 5。

Step 5: 对粗略传输率采用软抠图算法进行优化，得出精确传输率$t(x)$。

Step 6: 由输入图像$I(x)$、大气光值A与精确传输率$t(x)$，复原得到最终去雾结果$J(x)$。

3□算法仿真与性能评测

对天空区域较少的有雾大气退化图像，分别采用全局直方图均衡算法[7]、多尺度 Retinex 算法[8]、传统暗通道先验算法[6]及本文提出的暗通道先验改进算法进行去雾处理得到结果如下：

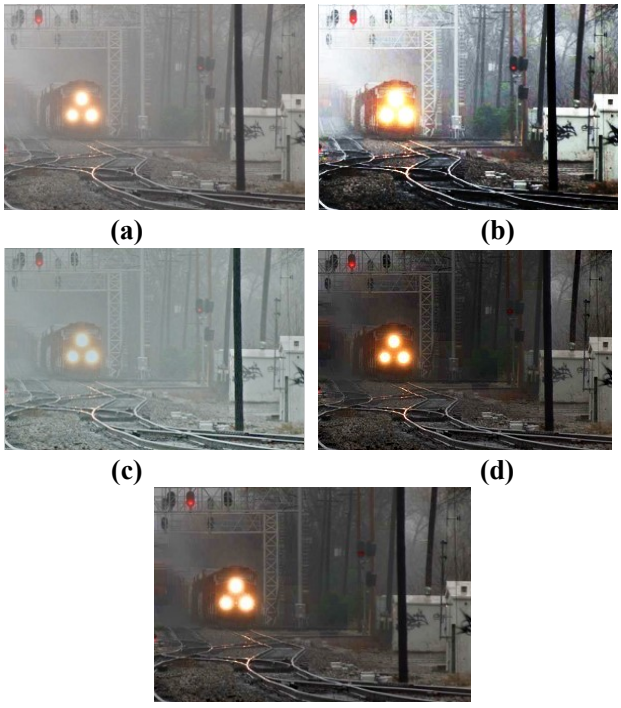

图 2. (a). 原有雾图像; (b). 直方图均衡结果; (c). 多尺度 Retinex 算法结果; (d). 暗通道先验算法结果; (e). 改进算法结果.

对图 2 进行分析，得出各类性能参数如表 1 所示（结果保留两位小数显示）：

算法类型	信息熵	平均梯度	边缘强度	方差	PSNR (dB)
原图像	11.18	5.08	51.03	91.82	
直方图均衡	14.36	12.53	126.2	116.91	14.55
多尺度 Retinex	12.28	6.49	65.52	74.10	20.45
暗通道先验	12.50	6.54	65.60	71.11	10.06
本改进算法	12.30	6.63	65.77	71.55	12.64

表 1. 去雾算法性能评测表

由图 2 与表 1 可以看出，经过直方图均衡化与多尺度 Retinex 处理后的图像，各项参数较佳，但由于它们只是片面的对图像质量进行增强，并未考虑图像降质的具体原因，因此去雾图像的失真比较严重。暗通道先验改进算法相对于 He 算法而言，

取得了最佳的 PSNR 值，图像更为清晰，由于合理选择 ω 值以平衡雾气，使得处理后图像更为自然。

对含有天空区域的有雾大气退化图像，采用多种算法进行去雾处理得到结果如下：

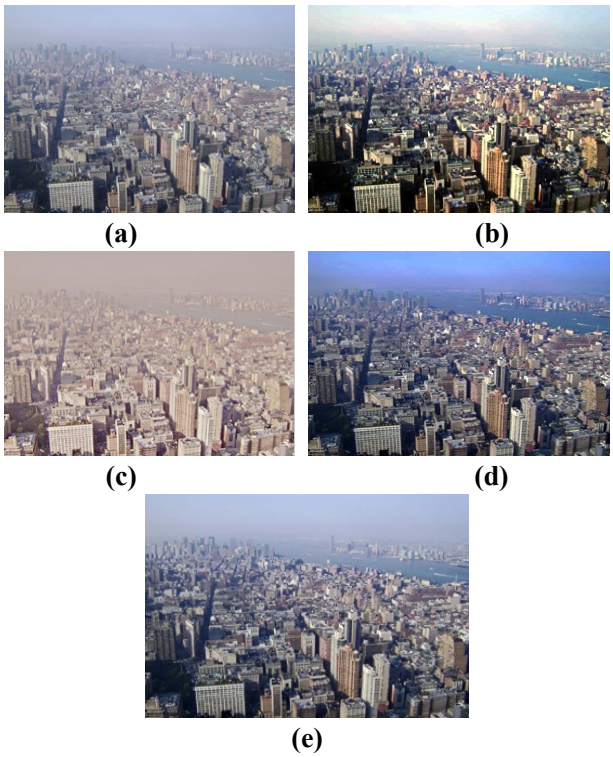

图 3. (a). 原有雾图像; (b). 直方图均衡结果; (c). 多尺度 Retinex 算法结果; (d). 暗通道先验算法结果; (e). 改进算法结果.

对图 3 进行分析，得出性能参数如表 2 所示：

算法类型	信息熵	平均梯度	边缘强度	方差	PSNR (dB)
原图像	14.24	8.79	85.82	119.69	
直方图均衡	14.86	14.45	143.0	116.99	15.33
多尺度 Retinex	13.71	8.90	88.05	113.10	16.33
暗通道先验	15.01	10.93	108.1	112.40	18.15
本改进算法	14.49	11.45	112.82	121.5	20.73

表 2. 去雾算法性能评测表

由图 3 与表 2 可以看出，相比于 He 方法，改进算法去雾图像可取得最佳 PSNR 值，各项参数都有所提升，对图像细节的改善效果较好。相比于其他算法，其保真效果最佳，与原图的契合度最好。由以上仿真分析可知，改进算法通过自动改变 ω 值以取得最大的 PSNR 值，取得了较佳的图像处理效果，图像清晰度有一定提升，其处理结果更加自然(尤其是对天空区域)。

4□结 语

本文主要从图像复原的角度出发，主要研究了大气退化图像的去雾处理。本文的主要通过探究图像复原的物理模型——大气散射模型，根据暗通道先验算法的基本原理，针对其无法对远处雾气浓度进行自适应调节的缺点，提出了一种结合峰值信噪比信息的暗通道先验改进去雾算法。仿真结果显示该改进算法复原的图像视觉效果明显优于直方图均衡化与多尺度 Retinex 算法，与原始暗通道先验算法相比，处理结果也更加自然，去雾效果有一定提高。

参考文献 (References)

[1] 冈萨雷斯，数字图像处理[M]（阮秋琦等译），北京电子工业出版社，2007.

[2] T. K. Kim, J. K. Paik, B. S.Kang, Contrast enhancement system using spatially adaptive histogram equalization with temporal filtering [J], IEEE Transactions on Consumer Electronics, 1998, 44(1): 82-86.

[3] Oakley J P,Satherlay 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] Narasimhan S G,Nayar S K,Contract restoration of weather degraded images [J], IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003 , 25(6): 713-724.

[5] Fattal R. Single image dehazing [J].ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(3): 721-729.

[6] 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.

[7] REZA. A. Contrast Limited adaptive histogram equalization for real-time image enhancement [J]. Journal of VLST Single Processing, 2004, 38(1): 35-44.

[8] Jobson D J, Rahman Z, Woodell G A. Properties and performance of a center/surround retinex [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(3): 451-462.