



北京航空航天大学
B E I H A N G U N I V E R S I T Y

第二十六届“冯如杯”学生学术科技作品竞赛
项目论文

基于暗通道先验的自适应快速图像去雾算法

摘要

图像去雾是计算机视觉领域的一个重要问题。暗通道先验作为一种可行的去雾方法,简单而有效,近几年被广泛的研究和应用。但是,算法本身基于统计学先验,并非精确的数学运算结果,其处理结果有过饱和以及亮度低的缺点,在部分区域(例如天空区域),暗通道算法甚至会失败。本文提出了一种基于暗通道先验的自适应快速图像去雾算法,首先采用自适应的透射率下限调整方法,抑制了天空区域的色彩失真和不自然的光晕,有效避免了天空区域处理失效的情况;其次,通过在下采样的原图片上计算暗通道的方式,提高了算法效率;最后,通过灰度拉伸方式提高了去雾结果的灰度值,实现了保持对比度的同时提高亮度,增强视觉效果。实验结果表明,与现有暗通道算法相比,本文所提算法能够有效提高去雾效果,能够保持原暗通道算法处理结果的对比度,而且,所提算法处理效率高。

关键字: 去雾, 图像增强, 暗通道算法

Abstract

Image haze removal has become a challenging problem in computer vision applications. As a suitable method for haze removal, the dark channel prior has been widely studied and applied as a result of its simplicity and efficiency. However, based on statistics rather than mathematical analysis, the result images usually suffer from oversaturation and have a dark-look. Thus, this study proposes three methods to resolve these problems. First, the dark channel confidence is applied to the transition map of haze image to restrict the dark channel. Secondly, an interpolation method is used to fasten the calculation of dark channel. Finally, a post enhancement that can both raise the luminance and preserve the local contrast is proposed.

Keywords: Haze Removal, Image Enhancement, Dark Channel Prior

目录

第一章 引言	1
1.1 研究背景及现状.....	1
1.2 问题分析	2
1.3 创新点	3
第二章 基于下采样的快速暗通道计算.....	4
第三章 面向高亮区域的暗通道自适应调整.....	7
第四章 基于灰度拉伸的去雾图像增强.....	8
第五章 实验结果及分析.....	10
结论	11

第一章 引言

1.1 研究背景及现状

雾是近地面空气中的水蒸气发生的凝结现象。由于大气光被吸收和散射，进入摄像机的光线被衰减，因此造成雾、霾、烟情况下图像的降质。雾天图像在对比度和颜色饱和度上都有损失^[1,2]。许多计算机视觉应用，如物体跟踪、图像分割等，经常会由于雾天图像的质量下降而失效。因此，在实际应用中，去雾算法被广泛需要。尤其是我国华北地区，冬春季节多雾霾天气，许多交通监控视频需要进行去雾处理。在无人驾驶领域，去雾也是必不可缺的一个重要环节。

绝大多数情况下，雾浓度和景深有关。但是根据单幅图像计算景深是非常困难的，因此早期的去雾算法通常需要多幅不同角度拍摄的图片，或者更多的图像信息^[3]。在实际情况中，往往不能得到同一时间、地点的多幅图片，所以单幅图像去雾算法多是基于较强的先验或者假设^[4]。



图 1 去雾前后对比

近几年，单幅图像去雾有很大进展。一些方法利用对比度增强、直方图均衡等来提高图像的可视度。这些方法通常不考虑景深，因此在很多区域会出现不自然的增强^[5]。还有一些方法从图像恢复的角度进行去雾。Fattal 提出的方法利用透视率和表面阴影局部无关的特性，其方法在理论上是可靠的，但是无法处理较

重的雾^[6]。多尺度的 Retinex 算法被用于处理雾不均匀分布的雾天图像，但其算法复杂度高且存在光晕效应。Robby T. Tan 观察到雾天图像有较低的对比度，他通过将局部对比度最大化来恢复图像，其结果在视觉上效果较好，但缺少物理意义，增强结果会偏离自然情况，得到的并不是理想的最优解。何恺明提出了暗通道先验，在对无雾图像的统计中，发现“每一个局部区域都很有可能会有阴影，或者是纯颜色的东西，又或者是黑色的东西。因此，每一个局部区域都很有可能至少有一个颜色通道会有很低的值。”^[4] 雾天图像不符合这一特征，亮度增加的部分即来自于大气光散射。通过将暗通道图亮度降为 0，可将雾天图像恢复。

1.2 问题分析

暗通道算法对单幅图像去雾简单有效。在这一算法的基础上，又有新的方法提出^[7,8,9]。然而，图像的某些区域有可能不符合暗通道先验，如高亮度区域，在这些区域暗通道算法无法处理。并且，在处理过程中，暗通道图像的计算量较大，对于一幅分辨率为 $M \times N$ 的图像，复杂度为 $O(MN)$ 。基于暗通道先验的去雾方法通常会有以下几个方面的问题：

- 1、部分区域出现不自然的增强。如天空区域、白色墙面，暗通道灰度值很高，会被算法当作浓雾处理，造成去雾过度，留下大面积的暗色光晕，严重影响去雾效果。下图右上角区域明显看出这种现象。



图 2 天空区域色彩失真

- 2、计算暗通道后需要进行保边缘的滤波，即使使用盒式滤波进行加速，这一处理仍然占据处理时间的约 36%，连同获取初步暗通道，会占整个处理

流程的 70% 。

- 3、利用暗通道算法得到的还原图像亮度较低，这是由于光在传播到摄像机位置的过程中被吸收衰减。这是由暗通道算法的数学模型决定的，是这类算法固有的缺陷。



图 3 原图和去雾图亮度对比

1.3 创新点

为了解决前面提出的三个暗通道算法的缺陷，本文提出了三个改进方法，分别解决上述三个问题。

首先采用自适应的透射率下限调整方法，抑制了天空区域过低的透射率，有效避免了天空区域处理失效的情况。其次，暗通道有细节丰富的特性，可通过下采样以及双线性插值快速求得暗通道而且不会有去雾效果上的损失，效率提高 50% 以上。另外，本文提出了能够同时提高亮度与保持图像对比度的后处理方法，大大提高了去雾图像的视觉效果。

实验结果表明，与现有暗通道算法相比，本文所提算法能够有效提高去雾效果，能够消除不自然增强，抑制色彩失真，而且，所提算法能有效提高处理效率。

第二章 基于下采样的快速暗通道计算

一幅图像的暗通道定义如下：

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

其中, J^c 是一个图像 J 的一个色彩通道, $\Omega(x)$ 是以 x 为中心的一个局部区块。一般取窗口大小为 15。统计观察得出, 户外无雾图像的暗通道强度总是很低并且趋近 0。这一经验性规律被称为暗通道先验。



(a) 雾天图像

(b) 暗通道

图 4 原图和初步暗通道图

求解暗通道的复杂度和像素个数成正比, 即 $O(N)$, N 是像素个数。图 1(b) 是一幅暗通道图像, 如果直接用它来估计透射率, 会造成去雾图像有边界白边现象 (图 5)。这是由于暗通道图中没有保留足够细致的原图像边缘信息。得到的暗通道采用引导滤波处理, 可以恢复原图像中的细节 (图 6)。



图 5 未经滤波的暗通道处理结果



图 6 引导滤波后的暗通道



图 7 利用引导滤波后的暗通道求出的透视率

引导滤波是必须要做的，否则去雾结果图像边缘部分会有白色的光晕。对暗通道使用引导滤波，使得对透射率图的估计非常精细，从上图例子可以看出，预估透射率图像的细节保留完好。这种精度的透射率图是其他去雾算法无法得到的，因此可以适当降低精度。



图 8 暗通道快速算法

我们首先对原图像进行缩放，计算出小图的滤波后的暗通道，之后在通过双线性插值的方式的获取原图的暗通道。经过实践，这种方式大大的提高了执行速度，而且效果和原始的方案基本一致。对于同一幅 1024×768 的图像，在 Pentium2117 处理器上处理速度比较如下：

表 1 处理速度比较

缩放比例	处理速度
1	98ms
1/4	36ms
1/9	21ms

第三章 面向高亮区域的暗通道自适应调整

暗通道先验基于一个统计规律，即一般图像在一个局部块内总有像素值趋近于 0。基于暗通道的去雾算法利用这一规律，对雾天图像复原，使得雾天图像的暗通道也符合这一先验。但是，在大面积的高亮度区域，如天空、白色墙面，暗通道先验本身就是失效的，在这些区域，局部块的最小值并不趋近 0，甚至远远大于 0。如果不对这些区域进行处理，去雾结果会出现严重色彩失真。为了克服暗通道算法的这一缺陷，必须对原有算法进行改进。

我们取暗通道中前 10%最亮的像素，以它们在每个颜色通道的平均值作为其色彩通道的大气光^[4]，表示为 A^r, A^b, A^g 。这样，各个通道的透射率为：

$$t^c(x, y)_{c \in \{r, g, b\}} = 1 - \frac{I_{dark}(x, y)}{A^c}$$

根据雾天图像形成的大气散射模型，得到恢复后的去雾图像为：

$$J^c(x, y) = A^c + \frac{I^c(x, y) - A^c}{1 - I_{dark}(x, y)/A^c}$$

可以分析得出，当像素值与大气光 A 接近时，透射率变小。而大气光估计就是从天空区域得到的。因此，在天空区域，透射率趋于很小的值。这类区域不满足暗通道先验，所以求出的透射率 t 是错误的。

透射率错误是由于值过小，所以我们想办法增大其在天空区域的值。这里，我们设置透射率的下限 t_0 ，当求出的透射率大于下限时，将其置为下限，这样可以有效增大天空区域的透射率。因此，问题转化为了透射率下限取值的问题。如果 t_0 过大，虽然天空区域会得到更好的改善，但去雾图像可能保留较多的雾气。如果 t_0 过小，天空区域仍然会存在颜色失真。为了使透射率下限具有良好的鲁棒性，可以对不同的暗通道自适应调整，我们将 t_0 的值设置为适应暗通道图像中像素较高的 5% 的值。做法如下：

- 1、取暗通道图像中灰度最高的前 5% 的像素，求平均值 D 。
- 2、比较大气光 A 和 D ，令 $t_0 = \rho D / A$ ，这里 A 取 A^r, A^b, A^g 的平均值。

当 D 与 A 接近时，说明天空区域较大，此时应当增大 t_0 的取值。根据实验经验， ρ 取为 0.25。

第四章 基于灰度拉伸的去雾图像增强

经过上述步骤处理后的去雾图像，其对比度明显增强，但是亮度较低。大部分像素灰度值较低，只有少数的像素有较高的灰度值。利用灰度拉伸、直方图均衡等并不适合这些图像，因为其灰度被人为处理，失去了自然特性，用简单的灰度拉伸、直方图均衡等方法往往使得部分原本就比较亮的区域过度增强。因此，必须对这类使用暗通道算法处理得到的图像设计专门的后处理方法来提高其亮度，同时要保持对比度。



图 9 原图和初步去雾图像

本文提出的后处理方法，基本思路是将暗通道算法处理后的初步去雾图像增强亮度后，恢复其对比度。首先，计算去雾图像的亮度图，直接取三通道最大值。

$$L(x, y) = \max_{c \in \{r, g, b\}} J^c(x, y)$$

然后，按照文献[10]的方法，对亮度图进行一次灰度映射，提高亮度，这里使用指数变换。映射后的图像用 $L^m(x, y)$ 表示。

$$L^m(x, y) = 255 \times \left(\frac{L(x, y)}{255} \right)^{0.8}$$

之后，我们获得背景亮度。先取局部窗口最大值得到粗糙的背景亮度图，然后用初步去雾图为引导进行一次引导滤波，得到精细的背景亮度图 $L_{bright}(x, y)$ 。

类似的，对 $L_{bright}(x, y)$ 进行一次灰度映射：

$$L_{bright}^m(x, y) = 255 \times \left(\frac{L_{bright}(x, y)}{255} \right)^{0.8}$$

这样，我们就能得到在灰度映射前后，各点相对于背景亮度的比例。

$$R(x, y) = \frac{L(x, y)}{L_{bright}(x, y)},$$

$$R^m(x, y) = \frac{L^m(x, y)}{L_{bright}^m(x, y)}.$$

进行灰度映射之后，局部对比度可能降低，而有了 $R(x, y)$ 和 $R^m(x, y)$ ，就可以恢复由于亮度提高而引起的对比度丢失。可知，恢复了对比度的提高灰度的亮度图表示为：

$$L_r = L^m(x, y) \frac{R(x, y)}{R^m(x, y)}$$

在每个像素上，需要提高的灰度值比例为：

$$S(x, y) = \frac{L_r(x, y)}{L(x, y)}.$$

最后，只需要在初步去雾图像的每个色彩通道上乘以这一比例即可。最终的去雾图像为：

$$J_{final}^c(x, y) = J^c(x, y)S(x, y).$$

第五章 实验结果及分析

我们同时利用原初的暗通道算法和本文提出的优化后的算法对图像进行处理。



图 10 原图(左一), 传统暗通道算法(左二), 本文提出的算法(左三)

可以看出, 本文的方法在细节保持、对比度上与传统暗通道方法相比基本没有差别, 但在视觉效果上更好。



图 11 原图(左一), 传统暗通道算法(左二), 本文提出的算法(左三)

图 8 的天空区域较大, 传统暗通道算法会在天空形成不自然的光晕, 我们的算法可以很好的处理这个问题。



图 12 原图(左一), 传统暗通道算法(左二), 本文提出的算法(左三)

结论

本文提出了基于暗通道先验的优化去雾算法，对传统暗通道算法进行了效果和性能上的改进。相比于传统暗通道算法，我们的算法有三个方面的提高：

- 1、解决了天空、墙面等光滑区域、高亮度区域不自然的增强。
- 2、在不牺牲去雾效果的前提下，对暗通道计算进行加速。
- 3、在保持对比度的前提下，提升了去雾图像的视觉效果。

实验结果和同其他算法的比较说明了我们算法的优越性，在效率、细节、视觉效果上均有较大提升。

参考文献

- [1] Guan, Y.-P.: ‘Spatio-temporal motion-based foreground segmentation and shadow suppression’, IET Comput. Vis., 2010, 4, (1), pp. 50–60
- [2] Xu, M., Ellis, T., Godsill, S.J., Jones, G.A.: ‘Visual tracking of partially observable targets with suboptimal filtering’, IET Comput. Vis., 2011, 5, (1), pp. 1–13
- [3] Shwartz, S., Namer, E., Schechner, Y.Y.: ‘Blind haze separation’. Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition, 2006, vol. 2, pp. 1984–1991
- [4] He, K., Sun, J., Tang, X.: ‘Single image haze removal using dark channel prior’, IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., 2011, 33, (12), pp. 2341–2353
- [5] Tan, R.: ‘Visibility in bad weather from a single image’. Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition, June 2008, pp. 1–8
- [6] Fattal, R.: ‘Single image dehazing’. Proc. ACM SIGGRAPH, NY, USA, 2008, pp. 1–9
- [7] Xie, B., Guo, F., Cai, Z.: ‘Improved single image dehazing using dark channel prior and multi-scale Retinex’. Proc. Int. Conf. Intelligent Systems and Design Engineering Application, 2010, pp. 848–851
- [8] Dongjun, K., Changwon, J., Bonghyup, K., Hanseok, K.: ‘Enhancement of image degraded by fog using cost function based on human visual model’. Proc. IEEE Int. Conf. on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, 2008, pp. 64–67
- [9] Chu, C., Lee, M.: ‘A content-adaptive method for single image dehazing’, (LNCS, 6298), PCM, 2011, pp. 350–361
- [10] Li, B., Wang, S., Geng, Y.: ‘Image enhancement based on Retinex and lightness decomposition’. Proc. IEEE Int. Conf. Image Process., 2011, pp. 3417–3420