

基于暗原色的单一图像去雾算法的研究

和晓军, 乔寅

(沈阳理工大学信息科学与工程学院, 沈阳 110159)

摘要: 暗通道优先算法在处理单幅户外图像去雾方面有较好的效果,但是该算法处理的时间过长,算法速度较慢。在暗原色优先算法的基础上,提出了改进的方案,即使用指导性滤波代替暗原色优先中的软抠图算法,并增加盒子滤波以提高指导性滤波的处理速度。同时为提高图像的输出质量,采用了分块处理方法,使用 3×3 模板求解图像的暗原色,得到了更好的透过率 t 值。实验表明,该算法在提高速度的同时优化了图像输出效果,图像更加自然、真实。

关键词: 暗原色; 分块处理; 透过率 t 值; 指导性滤波; 盒子滤波

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2014)01-0304-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2014.01.072

Research on single image defogging algorithm based on dark primary colors

HE Xiao-jun, QIAO Yin

(School of Information Science & Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China)

Abstract: Dark channel prior can achieve better results when dealing with single image, but this algorithm which is slow takes a long time. This paper brought out a better method that replaced the soft matting algorithm in dark channel prior with guiding filter. Furthermore, it also employed box filter to get high speed. At the same time, in order to improve the output quality of images, it used block processing and 3×3 template to solve the dark color of the image, and obtained the better transmittance t values. According to the experiments, the above algorithm achieves not only high speed processing but also better image quality. The processed images are much natural and realistic.

Key words: dark primary colors; block processing; transmittance t values; guiding filter; box filter

恶劣的天气条件对各行各业均有不同程度影响,其中高速公路和航空飞行受天气条件影响最为严重,常造成交通事故的发生和运输速度的降低,同时也影响了户外场景观测系统的正常工作。所以,为减少天气对图像的影响,研究复原场景信息的方法具有十分重要的意义^[1]。

国内外对去雾算法的研究已取得了一些成效,这些方法大多是利用多幅图像实现对比度增强。目前,由于单幅图像的去雾不需要景深和大气条件等辅助信息,应用场合不受限制等优势,使得研究成为热门。但是单幅图像由于雾所依赖的深度信息未知,一般需要借助先验或假设来达到去雾的目的。Grewe 等人^[2]采用将多幅模糊图像进行小波融合清晰化方法。Oakley 等人^[3]在多种假设的情况下,构造了一个多参数的退化模型,并通过统计模型估计退化模型参数,但该算法只适用于灰度图像。Nayar 等人^[4]利用简化大气传播原理,总结出两个主要传输模型。基于该模型,Narasimhan 等人^[5,6]通过两幅不同气象条件下拍摄的两幅雾化图像,计算出场景的深度变化边缘,然后根据退化模型计算出场景中每一点的相对辐射度,从而实现清晰化。Fattal^[7]提出了部分符合物理规律的简单去雾模型,利用复杂的优化计算得到去雾结果。但是该方法的物理模型有所局限,不能很好地处理浓雾图像。He 等人^[8]提出了暗通道优先法则(统计结果表明绝大部分户外照片符合该法则),利用该法则得到了比较好的去雾图像,并能

得到相应的深度图像,这也是目前最实用有效的去雾方法,但是在处理的时候会消耗大量的时间和计算机资源。

本文在暗原色优先的基础上,提出了改进方案。

1 大气散射模型

在解决问题之前,需要对所研究的问题建立数学模型。本文采用的物理模型被称做 McCarney 的大气散射模型,其广泛用于计算机视觉和图形学领域中。大气散射模型描述了雾化图像的退化过程^[9-12]:

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

式(1)中: $I(x)$ 是指观测到的图像强度; $J(x)$ 是景物光线的强度; A 是全球大气光成分; $t(x)$ 称为透射率;方程右边的第一项 $J(x)t(x)$ 为直接衰减项^[12];第二项 $A(1 - t(x))$ 则是大气光成分^[12,13]。去雾的目标就是从 $I(x)$ 中复原 $J(x)$ 、 A 、 $t(x)$ 。

2 雾天图像复原

2.1 理论背景

暗原色先验是通过对户外无雾图像的观察得出的:在绝大多数非天空的局部区域里,某一些像素总会有至少一个颜色通道具有很低的值。该区域光强度的最小值是个很小的数。用公式描述,对于一幅图像 J ,定义

收稿日期: 2013-03-05; 修回日期: 2013-04-27

作者简介:和晓军(1968-),女,辽宁沈阳人,副教授,硕士,主要研究方向为图形图像处理(hexiaojun_000@163.com);乔寅(1986-),男,硕士研究生,主要研究方向为图像处理。

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

式中: J^c 为 J 的某一个通道,而 $\Omega(x)$ 是以 x 为中心的一块区域。观察得出,除了天空方位, J^{dark} 的强度总是很低并且趋近于0。如果 J 是户外的无雾图像,把 J^{dark} 称为 J 的暗原色,并且把以上观察得出的经验性规律称为暗原色先验。

2.2 图像的处理分块

在文献[13]中,分块的大小选取为固定值 15×15 。但是,对于尺寸不同的带雾图像,去雾的效果比较单调,不能针对不同图像有自适应的处理。有论文提出在对图像分块处理时,选取图像的行或列的最大值的3%作为块的大小。如果一幅图像尺寸为 $m \times n$,则块大小为 $\text{block} \times \text{block}$,其中 $\text{block} = \max(m, n) \times 3\%$ 。例如一个图像的大小为 600×400 ,其 $\text{block} = \max(600, 400) \times 3\%$,即 $\text{block} = 18$ 。但是这种分块的方法大大降低了程序的处理速度。在本文求解暗原色的过程中,对带雾的图像分四块,对每一块分别进行处理。在处理的时候,采用的是 3×3 的模板,即在 3×3 的矩阵中选择出最小值,得到了红色、绿色和蓝色三个通道中的最小值,从而提高了程序的运行速度。

2.3 求取透射率

利用暗原色和雾天图像退化模型可以估计出成像时刻的雾浓度和透射率 t 。假设大气光 A 已知并且在局部区域 $\Omega(x)$ 内,在透射率保持一致的条件下,对式(1)两端进行最小化操作,可求得带雾图像的暗原色为

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

已知无雾图像的暗原色的值趋近零,则

$$\tilde{t}(x) = 1 - \min_c (\min_{y \in \Omega(x)} (\frac{F^c(y)}{A^c})) \quad (4)$$

其中,等式右侧最小值项即带雾图像在局部区域的暗原色值可以求取的,故可以求得 t 。

现实中,即使是很晴朗的天气,空气中总会不可避免地包含一些杂质分子。所以当人们看远处的物体时雾依然是存在的。而且,雾的存在是人们感知深度的一个基本线索,这一现象被称为空间透视。如果彻底地移除雾的存在,图像会看起来不真实,并且深度感会丢失。所以可以通过在式(4)中引进一个常数 ω ($0 < \omega \leq 1$),有针对性地保留一部分覆盖遥远景物的雾,则

$$\tilde{t}(x) = 1 - \omega \min_c (\min_{y \in \Omega(x)} (\frac{F^c(y)}{A^c})) \quad (5)$$

这一修正具有更好的效果,对于远处的物体,它能相应地保留更多的雾。 ω 的值由具体情况而定,在本文中 ω 选取为0.95。

2.4 指导性滤波

在一个块内,透射率 t 的值并不总是相同的,同时相邻子块之间存在着差异,会使 t 的估测图存在一些小方块,在视觉上不能达到满意的效果。在He的文献中为解决这个问题选取了软抠图来细化透射率 t ,耗费了大量的运算时间和计算机资源。为了减少计算时间,本文采用的是指导性滤波^[14]的方法,同时为了提高指导性滤波的处理速度,使用了盒子滤波。

指导性滤波比双边滤波器的优势在于时间复杂度是 $O(N)$,这意味着时间复杂度只依赖于窗口半径 r ,所以在程序中可以任意使用任意大小的内核,本文采用的内核半径 r 值为20。指导性滤波可以很方便地用于图像的RGB颜色空间中,特别是当图像的边缘和细节不能分辨的时候,使用指导性滤波是必

要的。本文采用的局部线性模型是

$$q_i = \mathbf{a}_i^T l_i + b_k, \forall i \in \omega_k \quad (6)$$

这里 l_i 是一个 3×1 的颜色矢量, \mathbf{a}_i^T 是一个 3×1 的系数向量, q_i 和 b_k 是标量。这样在He的文献中提到的软抠图的计算方法可以用下面的公式替代:

$$\mathbf{a}_k = (\Sigma_k + \varepsilon \mathbf{U})^{-1} (\frac{1}{|w|} \sum_{i \in w_k} l_i p_i - u_k \bar{p}_k) \quad (7)$$

$$b_k = \bar{p}_k - \mathbf{a}_k^T u_k \quad (8)$$

$$q_i = \frac{1}{|w|} (\sum_{i \in w_k} \mathbf{a}_k l_i + b_k) = \bar{\mathbf{a}}_i^T l_i + \bar{b}_i \quad (9)$$

其中: Σ_k 是窗口 w 中色彩矩阵的方差; ε 为修正参数,本文的取值为0.001; \mathbf{U} 是 3×3 的单位矩阵; $|w|$ 是窗口 w 中像素的数目; l_i 是输入图像 I 的像素值; p_i 是过滤输入图像的像素值,是灰度图像或者是单通道图像; u_k 是窗口 w 中色彩矩阵的平均值; \bar{p}_k 为过滤输入图像的像素平均值; q_i 为优化后的 t 的值。

2.5 盒子滤波

盒子滤波是一种优化方法,它可以使复杂度为 $O(MN)$ 的求和(例如图像的局部矩形内像素的和、平方和、均值、方差等)运算降低到 $O(1)$ 或近似于 $O(1)$ 的复杂度。盒子滤波的原理有点类似积分影像(integral image),但是比它还要快,但是实现步骤比较复杂。在计算矩形特征之前,与积分影像一样,都需要对图像进行初始化。不同于积分影像的是,盒子滤波中的每个元素的值是该像素邻域内的像素和(或像素平方和),在需要求某个矩形内像素和的时候,直接访问数组中对应的位置就可以。因此可以看出它的复杂度是 $O(1)$ 。

盒子滤波的初始化过程非常快,每个矩形的计算基本上只需要一加一减两次运算。从初始化的计算速度上来说,盒子滤波比积分影像要快一些,大约25%。在具体求某个矩形特征时,盒子滤波比积分影像快4倍,所谓的4倍其实就是从4次加减运算降低到1次。虽然这个优化看似渺小,但是将其置于几层大循环里面,仍能节省一些时间。

2.6 复原无雾图像

得到优化的透过滤值后,式(1)中还有参数大气光 A 未得到。对于大气光 A 的估计,采用文献[15]的方法,从而能快速、准确、自适应地估测 A 的值。首先提取暗原色通道中最亮的0.1%像素,并将它们在输入图像 I 中对应的最大亮度值作为 A 值。在得到参数 A 和优化的 t 值之后,代入到式(1)中,即可还原去雾图像 J 。 J 的公式为

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\max(t(x), t_0)} + A \quad (10)$$

为避免去雾后的图像包含噪声,设定一个透射率的下限值 t_0 。本文中, t_0 的取值为0.3。

3 实验结果与分析

本文的结果图是在操作系统为Windows 7, CPU为Intel酷睿i5,系统内存为4GB的普通计算机上实现的。使用MATLAB2012实现了Jean-Philippe Tarel^[16],将He的方法与本文的方法进行了比较,比较的算法处理时间如表1所示。本章将从视觉效果、程序的运行速度等方面进行比较。图1是 600×400 的JPEG图像,图2是 600×450 的BMP图像,图3是 600×400 的JPEG图像,图4是 243×160 的JPEG图像,图5是 500×450 的PNG图像,图6是 400×300 的PNG图像。图1~6为不同算法的结果对比。



图 1 雾天图像的复原结果对比



图 2 雾天图像的复原结果对比



图 3 雾天图像的复原结果对比



图 4 雾天图像的复原结果对比



图 5 雾天图像的复原结果对比



图 6 雾天图像的复原结果对比

表 1 不同算法运算时间的对比

序号	运行时间		
	Tarel 的结果/s	He 的结果/s	本文的结果/s
图 1	7.57	53.19	7.67
图 2	9.27	55.64	8.12
图 3	8.08	51.56	6.78
图 4	0.34	8.29	1.56
图 5	7.23	48.93	7.19
图 6	3.17	26.05	4.37

在图 1 中, Tarel 的算法使得去雾后的图像亮度过高; He 算法的去雾效果并不明显, 特别是森林和岩石上的雾没有被除去; 本文的结果除去了图像中大部分雾。图 2 中, Tarel 的算法处理后的图像的天空变成了红色, 造成了颜色的失真; He 的结果与 Tarel 的算法相比, 虽然得到的图像质量好, 但是天空的区域的颜色也不真实; 本文结果在除雾的同时保留了天空的真实色彩。图 3 中, Tarel 的算法在处理树枝和地面的雾的时候不彻底, 与去雾前的图像比较, 只有地面上的雾有少量被去掉; He 的算法中, 地面的雾的去除效果比 Tarel 好, 但是在图像中间还有大量的雾没有去掉; 而图像经过本文的处理之后, 只在远景部分有少量的雾。图 4 中, 经过 Tarel 的算法处理, 图像中间区域出现了颜色失真; He 的算法在图像的中间区域同样有大部分的雾存在。在本文的算法处理之后, 只有树枝和远景有部分雾没有被除掉。图 5 中, Tarel 的算法在除掉雾的同时使得建筑物的颜色加深; He 的算法在处理过后, 图像上还有少量的雾气存在, 去雾的效果不彻底; 本文的算法与 Tarel 的算法比较之后可以看出, 本文在除掉雾的同时, 尽可能地保留了图像

的本来颜色。图 6 中, Tarel 的算法得到的图像不清晰, 对有雾的图像没有产生效果; He 的结果比 Tarel 的方法有了明显的提高, 但是依旧有雾存在; 而本文的算法使得雾已经基本消失了。

表 1 为不同算法运算时间的对比。在算法的运行时间上, 本文算法的运算速度比 He 的快 7 倍。在和 Tarel 的结果的对比中, 图 1、4 和 6 的运算时间与 Tarel 的相比, 最多慢了 1.2 s, 但是 Tarel 算法在图 1、4 的处理中使图像失去了本来的色彩, 而图 6 中 Tarel 的算法对图像没有明显的效果。

4 结束语

本文对 He 等人提出的暗原色先验理论进行了深入的分析, 针对该算法在软抠图的过程中存在着计算时间过慢的问题进行了优化, 提高了算法的速度。使用分块处理和 3×3 模板处理图像, 优化了透射率 t 值和大气光 A 的估计值, 算法效果明显。

由于暗原色先验是一种统计规律, 对某些极为特殊的图像可能会效果不佳。在今后的研究中将尝试采用新的模型进行去雾的研究, 并将去雾算法用于视频的处理中。

参考文献:

- [1] 刘锦锋, 黄峰. 天气影响的场景影像复原方法[J]. 光电工程, 2005, 32(1): 71-73.
- [2] GREWE L L, BROOKS R R. Atmospheric attenuation reduction through multisensor fusion[J]. *Sensor Fusion: Architectures, Algorithms, and Applications II*, 1998, 3376(10): 102-109.
- [3] OAKLEY J P, SATHERLEY B L. Improving image quality in poor visibility conditions using a physical model for degradation[J]. *IEEE Trans on Image Processing*, 1998, 7(2): 167-179.
- [4] NAYAR S K, NARASIMHAN S G. Vision in bad weather[C]//Proc of the 7th Int'l Conference on Computer Vision. 1999: 820-827.
- [5] NARASIMHAN S G, NAYAR S K. Removing weather effects from monochrome images[C]//Proc of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2001: 186-193.
- [6] NARASIMHAN S G, NAYAR S K. Contrast restoration of weather degraded images[J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2003, 25(6): 713-723.
- [7] FATTAL R. Single image dehazing [J]. *ACM Trans on Graphics*, 2008, 27(3): 1-9.
- [8] HE Kai-ming, SUN Jian, TANG Xiao-ou. Single image haze removal using dark channel prior[J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2011, 33(12): 2341-2353.
- [9] SHWARTZ S, NAMER E, YSCHECHNER Y. Blind haze separation [C]//Proc of CVPR. New York: IEEE Computer Society, 2006: 1984-1991.
- [10] NARASIMHAN S G, NAYAR S K. Chromatic frame work for vision in bad weather[C]//Proc of CVPR. [S. l.]: IEEE Computer Society, 2000: 598-605.
- [11] NAYAR S K, NARASIMHAN S G. Vision in bad weather[C]//Proc of ICCV. [S. l.]: IEEE Computer Society, 1999: 820-827.
- [12] TAN R. Visibility in bad weather from a single image[C]//Proc of CVPR. 2008.
- [13] KOSCHMIEDER H. Theorie der horizontalen sichtweite [J]. *Beitr Phys Frei Atmos*, 1924, 12: 171-181.
- [14] HE Kai-ming, SUN Jian, TANG Xiao-ou. Guided image filtering [C]//Proc of ICCV. 2010.
- [15] 杨靖宇, 张永生, 邹晓亮, 等. 利用暗原色先验知识实现航空影像快速去雾[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2010, 35(11): 1292-1295.
- [16] TAREL J P. Fast visibility restoration from a single color or gray level image[C]//Proc of IEEE International Conference on Computer Vision. 2009: 20-28.