

单幅 Bayer 格式图像的快速去雾方法*

娄静涛, 王 炜, 李永乐, 张茂军

(国防科技大学 信息系统与管理学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:为了降低雾天对成像的影响,获得实时的去雾效果,对彩色图像处理流程进行改进,提出一种新颖快速的基于 Bayer 图像和暗原色先验模型的单幅图像去雾方法。针对 Bayer 图像像素排列特点,对原有暗原色先验去雾算法进行了优化和改进。运用四叉树细分算法估算大气光,根据 Bayer 图像特点修正了引导滤波器(Guided Filter),并利用修正的滤波器优化大气透射图,恢复出无雾 Bayer 图像,采用去马赛克及系列后处理算法获得清晰的显示图像。实验结果表明,新方法在一定程度上改善了原算法去雾效果,并显著提高了运算速度。

关键词: Bayer 图像; 暗原色先验; 去雾; 引导滤波器

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2013)06-0109-07

A fast approach to remove the haze from a single bayer image

LOU Jingtao, WANG Wei, LI Yongle, ZHANG Maojun

(College of Information Systems and Management, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In order to reduce the bad effect in the outdoor visibility system in foggy days and achieve the real-time dehazing effect, a fast and effective method, which is based on Bayer pattern image and dark channel prior, was developed to remove the haze from single image. The color image processing pipeline was improved through this method. Bayer pattern image is the raw data captured by digital camera and costs low memory. According to the characteristics of Bayer pattern image, the original dark channel prior algorithm was optimized and improved. The atmospheric light was estimated based on the quad-tree subdivision. In the optimization process of the transmission map, the coarser estimation was refined using the Guided Filter, which was modified with the property of Bayer pattern image. Finally, the RGB image, which is displayed by the device, was recovered from the haze removal Bayer image using the demosaic algorithm. The experimental results show our new single image haze removal method improves the image quality by reducing the haze effect, and enhances the calculation speed.

Key words: Bayer pattern image; dark channel prior; dehazing; guided filter

大多数室外视觉系统,如视频监控、目标识别和卫星遥感监测等,都需要获取清晰的图像特征。但是在有雾天气条件下,由于场景的能见度较低,导致图像对比度下降,目标模糊不清,使成像系统无法正常工作。因此,如何对雾天图像进行有效处理,降低天气条件对成像系统的影响具有重要研究价值^[1-2]。

单幅图像去雾不需要景深和大气条件等辅助信息,应用场合广泛,成为计算机视觉领域研究热点^[3-6]。虽然当前去雾算法取得了较为理想的视觉效果,但算法都单纯利用软件的方法对图像进行处理,普遍存在处理数据量大,硬件资源消耗严重,算法复杂,运算效率低,获得实时去雾效果困难等问题。

Tan^[3]通过最大化局部对比度的方法进行去

雾,极大地增强了图像对比度。该方法只关注提高能见度,导致处理结果通常趋于最大饱和度。另外,这种方法在景深不连续的区域容易产生 Halo 效应。Fattal^[4]运用独立成分分析的方法(Independent Component Analysis, ICA),利用雾天图像退化模型,基于马尔可夫随机场(Markov Random Field, MRF),实现单幅图像的去雾,但该方法基于局部块的统计独立假设,不能很好地处理浓雾图像。Tarel 等^[5]采用中值滤波估计大气耗散函数,提出了一种快速图像去雾算法,但是中值滤波边缘保持性较差,容易产生 Halo 效应。

He 等^[6]提出了一种暗原色先验模型,用于单幅图像去雾。该模型认为清晰的户外自然图像(天空区域除外),在 RGB 颜色通道中至少有一个通道存在很低的强度值,在雾天图像上,暗原色

* 收稿日期:2013-03-31

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61175006, 61175015, 61275016, 61271438)

作者简介:娄静涛(1984—),男,河北保定人,博士研究生,E-mail:loujt_1984@126.com;

张茂军(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:maojun.z@gmail.com

的强度值主要由大气光组成。该方法直接使用暗原色来估计透射图,并采用软抠图(Soft Matting)算法优化透射图,进一步恢复出清晰的图像。该方法具有物理有效性,能够对浓雾图像进行处理,结果图像具有较少的 Halo 效应。

虽然暗原色先验模型在单幅图像去雾方面取得重大突破,获得了很好的去雾效果,但由于软抠图算法本质上是一个大规模稀疏线性方程组的求解问题,具有很高的时间复杂度和空间复杂度,使得算法计算量大、耗时高,严重限制了其实际应用。为了改善这一问题,嵇晓强^[1]和杨靖宇^[8]等针对航拍图像景深变化不大、雾分布均匀的特点,通过阈值加密快速计算透射图。方帅等^[2]提出一种单幅雾天图像分割复原的方法。通过对去雾图像进行分割,然后通过置信传播算法对透射图进行推断优化。胡伟等^[7]基于暗原色先验模型,提出一种梯度优先法则,并结合多分辨率分析,提高了去雾效率。

上述改进算法虽然在一定程度上提高了 He 算法的运行效率,但都是基于数码相机最终生成的 RGB 图像进行。由于处理的数据总量没有变化,运算效率提升有限,且硬件资源消耗大,难以进行嵌入式开发。目前数码相机采用的图像传感器几乎都是由光敏二极管构成,这些光敏二极管能够对不同的颜色通道感光,它们相互之间有规律地重复排列,构成二维颜色滤波矩阵。大多数数码相机都采用 Bayer 模式的颜色滤波矩阵,交替记录不同颜色通道。通过 Bayer 模式传感器得到的图像即为 Bayer 图像,该图像没经过任何处理,包含了最大信息量的原始信息,对后续的图像处理也提供了最大的灵活性^[9]。一般的光照图像生成模型(如朗伯特反射模型)是基于线性图像的模型^[10],而雾化图像的光学模型也是线性模型^[11-12]。去马赛克(生成 RGB 图像)、颜色校正、伽马校正等非线性变换改变了原始图像的线性特性,在此基础上进行去雾可能会带来许多意想不到的问题。因此,对于数码相机,去雾算法应该在这些非线性操作之前进行。

本文提出了一种新的去雾思想,基于图像传感器得到的原始数据——Bayer 图像进行去雾,对整个数字图像处理流程(Imgae Processing Pipeline, IPP)进行了改进。针对 Bayer 图像的颜色通道分布特点,对暗原色先验去雾算法进行改进,采用四叉树搜索算法估算大气光,将暗原色先验模型扩展到 Bayer 格式图像,定义了 Bayer 图像暗原色先验模型,并求取图像暗原色。采用

Guided Filter^[13]对透射图进行优化时,根据 Bayer 图像像素排列特点,对滤波器进行了相应修正,显著减少了去雾算法的计算量,提高了算法效率。同时,由于 Bayer 图像是线性图像,且对比度较强,本文算法在一定程度上改善了去雾效果。

1 相关工作

1.1 数码相机工作原理

不同于传统相机,数码相机使用固体图像传感器和半导体存储器,代替了传统意义上的胶卷。其中,图像传感器完成物理图像的分割采样功能。同时,相机内部集成了图像信号处理器(Image Signal Processor, ISP),对从传感器输出的原始图像进行后处理,得到所拍摄的真实场景,整个流程^[14]如图 1 所示。

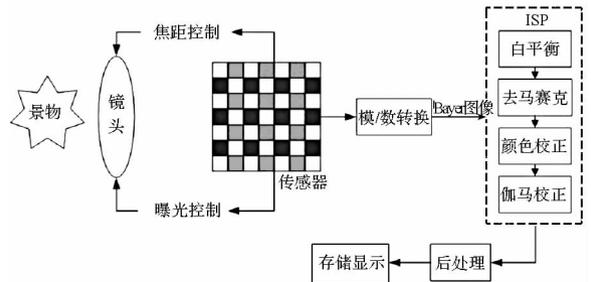


图 1 数码相机图像处理流程

Fig. 1 Image processing pipeline of digital camera

为了能够真实再现拍摄场景,在每个像素位置需采集三个颜色通道的颜色值,需要多个传感器,极大地增加了相机制造工艺难度和硬件花费。因此,当前相机采用在 CCD 或 CMOS 传感器前放置颜色滤波阵列(Color Filter Array, CFA)实现 R、G 和 B 三个分量的交替记录,通过去马赛克(又称颜色插值)算法^[15-16],恢复出每个像素位置另外两个颜色通道的颜色值。其中,Bayer^[17]格式是当前流行的交替记录模式,其排列方式如图 2 所示。

G	R	G	R
B	G	B	G
G	R	G	R
B	G	B	G

图 2 Bayer 模式颜色滤波阵列

Fig. 2 Bayer pattern color filter array

通过 CCD 或 CMOS 传感器将光信号转换为电信号,就得到了拍摄景物的电子图像,但此时图像是模拟图像,需通过模/数转换转化为数字信

号,才能送往 ISP 进行处理。ISP 主要是利用硬件实现图像的增强、去噪、复原等操作,它相对于纯软件处理算法而言有着无可比拟的速度优势,尤其是在目前千万像素以上的处理中。在诸如实时监控、机器人导航等实时性要求较高的领域,利用软件对图像操作已经不再现实,但 ISP 以其出色性能在这些领域得到很好应用。

1.2 暗原色先验模型

根据光在雾天传输的物理特性,在计算机视觉和图形学领域中,雾化图像的光学模型可以描述如下^[11-12]:

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

其中, $I(x)$ 为含雾图像(即输入图像); $J(x)$ 为场景辐射率(Scene Radiance,即恢复出的无雾图像); $t(x)$ 是场景色彩在各个区域通过程度的描述(Transmission Map,后文称透射图),描述光线透射率; A 为大气光,通常假设为全局常量,因此大气光和局部位置 x 无关。去雾的目的在于从 $I(x)$ 中恢复出 $t(x)$, A ,进而恢复出无雾图像 $J(x)$ 。

He 等^[6]通过对大量图像进行统计得知晴天或无雾户外图像大多数符合暗原色先验模型。模型认为:在大多数室外无雾图像的局部区域里,至少在一个颜色通道上有亮度值很小的像素点^[1,2,6-7]。一般地,对于图像 J ,其暗原色 J^{dark} 定义为

$$J^{dark}(x) = \min_{c \in \{R, G, B\}} (\min_{y \in \Omega(x)} (J^c(y))) \quad (2)$$

式(2),中 J^c 为图像 J 的一个颜色通道, $\Omega(x)$ 是以像素点 x 为中心的正方形区域。在晴天或无雾图像中, J^{dark} 的亮度值趋近0;而有雾图像中, J^{dark} 的亮度值较高,并且决定着透射率的大小,因此通过 J^{dark} 可以计算出透射图 t ,进而恢复出无雾图像。

2 Bayer 格式图像去雾算法

本文对彩色图像处理流程进行了改进,在暗原色先验模型的基础上,提出了一种用于单幅 Bayer 格式图像去雾的快速算法。算法主要分为三个步骤:①采用四叉树细分法估算大气光;②定义 Bayer 格式图像下的暗原色先验模型,并对 Guided Filter 进行修正,通过修正的滤波器得到透射图 t ;③根据步骤①和②的结果,恢复出无雾的 Bayer 格式图像,并利用现有的去马赛克算法以及系列后处理算法,将 Bayer 格式图像转换成适合人眼观察的无雾 RGB 图像。

2.1 估计大气光

Tan^[3]直接采用图像中最大亮度值作为大气

光,但该方法容易受到白色物体影响,如白色汽车、白色房屋等。He^[6]基于暗原色图像计算大气光,选取暗原色图像中0.1%亮度值最大的像素,选择对应原图中亮度最大值作为大气光。但是,该方法在估计大气光时,易受求解暗原色过程中分块 $\Omega(x)$ 大小的影响,同时,在 Bayer 格式图像中,由于每个像素位置只有一个颜色通道,He 的方法已不再适用。因此,本文采用四叉树细分法来搜大气光 A ,该方法不仅适用于 Bayer 格式图像,同时适用于 RGB 图像。

带雾图像首先被分为四个子块,如图3所示,计算四个子块的平均亮度,选择平均亮度值最大的子块重复划分过程,当子块大小小于自定义阈值时停止搜索。为了适应不同的图像大小,本文选择最小图像块的阈值为原始图像大小的1%,由于该方法采用逐步求优,从全局到局部的思想,因此可以避免局部高亮物体的影响(如图3中火车前大灯)。图3为同一场景在 Bayer 格式图像和 RGB 图像时的搜索结果(黑色实心方框内的像素为最终结果),图3(a)为 Bayer 图像搜索结果,图3(b)为 RGB 图像搜索结果。对于 Bayer 格式图像,在选中图像块,根据 Bayer 格式图像像素排列方式,分别计算 R 、 G 和 B 的均值 \bar{R} 、 \bar{G} 和 \bar{B} ,最终得到大气光 $A = [A_r, A_g, A_b] = [\bar{R}, \bar{G}, \bar{B}]$ 。

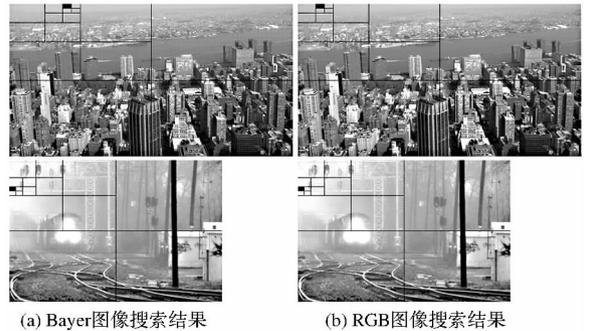


图3 四叉树搜索计算大气光

Fig. 3 Airlight estimation based on quad-tree subdivision

2.2 快速求取透射图

图像传感器最终输出的 RGB 图像是 Bayer 格式图像经过去马赛克及系列后处理得到,在晴天或无雾的 RGB 图像局部区域里,至少在一个颜色通道上有亮度值很小的像素点;而对于 Bayer 格式图像,该先验模型可以描述为:在晴天或无雾的 Bayer 格式图像局部区域里,至少存在一个像素位置,其亮度值很小。对于 Bayer 图像 K ,其暗原色 K^{dark} 定义为

$$K^{dark}(x) = \min_{y \in \Omega(x)} (K(y)) \quad (3)$$

其中, $\Omega(x)$ 是以像素点 x 为中心的正方形邻域。

在晴天或无雾图像中, K^{dark} 的亮度值趋近 0; 为避免用固定的分块方式去雾对不同大小的图像造成去雾效果的影响, 本文采用文献[1]的方法自适应地确定邻域 $\Omega(x)$ 的大小。

根据雾天图像成像模型, 通过暗原色 K^{dark} 可以估计透射图 t 。对于 Bayer 图像, 式(1)可重定义为

$$L(x) = K(x)t(x) + A(1 - t(x)) \quad (4)$$

其中, $L(x)$ 为雾化的 Bayer 图像, $K(x)$ 为晴天或无雾的 Bayer 图像。对式(4)两端进行最小化操作:

$$\min_{y \in \Omega(x)} \left(\frac{L(y)}{A} \right) = t(x) \min_{y \in \Omega(x)} \left(\frac{K(y)}{A} \right) + (1 - t(x)) \quad (5)$$

根据暗原色先验, 无雾图像的暗原色趋近 0, 因此得到

$$\tilde{t}(x) = 1 - \omega \min_{y \in \Omega(x)} \left(\frac{L(y)}{A} \right) \quad (6)$$

式(6)中, 加入 $\omega (0 < \omega \leq 1)$ 是为了保持去雾图像的真实性。图 4(c) 为 He 得到的暗原色图像, 图 4(d) 为本文基于 Bayer 格式图像得到的暗原色图

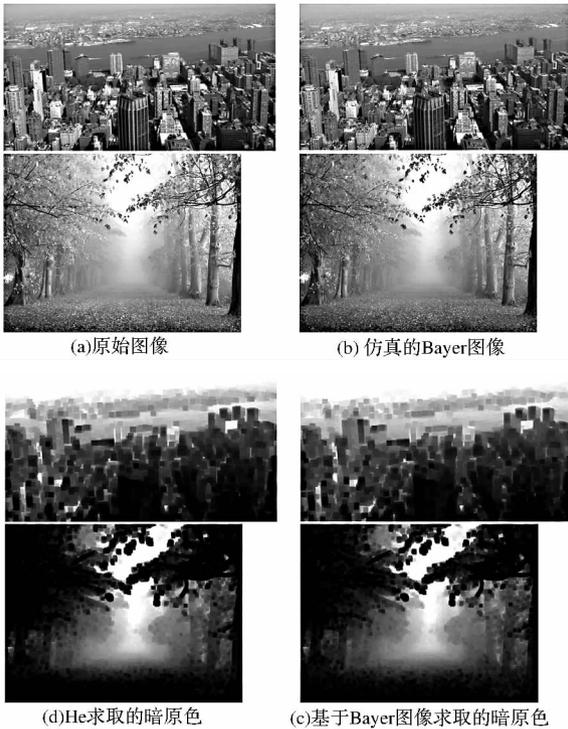


图 4 暗原色对比

Fig. 4 Comparison of dark channel

像, 通过对比表明基于 Bayer 图像计算暗原色的有效性。此时得到的透射图存在明显的分块现象(下文称为粗透射图), 由此恢复出的无雾图像边缘带有 Halo 效应。文献[6]采用软抠图算法对粗透射图进行优化, 得到细节明显的透射图。但是

软抠图算法计算量大, 耗用空间、时间较大, 无法集成到 ISP 进行硬件实现。

Guided Filter^[11] 同双边滤波器类似, 是一种保边缘的平滑滤波器, 但是在边缘附近效果优于双边滤波器。本文根据 Bayer 图像像素排列特点, 对 Guided Filter 进行修正, 使其能够适用于基于 Bayer 图像对透射图进行优化。Bayer 图像中, R/B 颜色通道的像素数为 RGB 图像的 1/4, G 通道的像素数为 RGB 图像的 1/2, 如图 5 所示。因此, 利用 Bayer 图像优化粗透射图, 硬件资源消耗可以减少为前者的 1/3, 可以极大地提高算法运行速度。

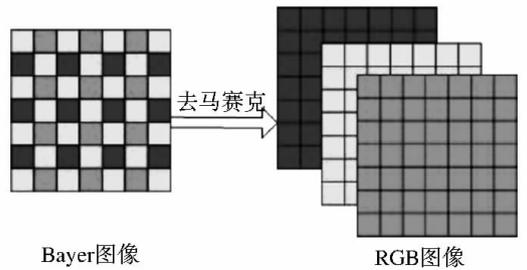


图 5 Bayer 图像转 RGB 图像

Fig. 5 Conversion from Bayer to RGB

根据 Guided Filter 原理, 在以像素点 x 为中心的邻域 $\Omega(x)$ 内, 优化透射图 $t(x)$ 为雾化图像 $L(x)$ 的线性组合:

$$t_i = a_x L_i + b_x, \quad \forall i \in \Omega(x) \quad (7)$$

其中, 线性系数 (a_x, b_x) 在邻域 $\Omega(x)$ 为常量。但在 Bayer 图像中, 数据记录采用交替记录方式, 每个像素位置仅记录一个颜色通道的颜色值。对于 G 分量, 它的四邻域内没有 G 颜色通道存在, 而对于 R 分量和 B 分量, 在它们的八邻域内都没有相同颜色通道的像素点存在。因此, 基于 Bayer 图像采用 Guided Filter 优化透射图, 需要根据像素点 x 所属的颜色通道对其进行修正。

以像素点 x 属于颜色通道 B 为例, 说明对 Guided Filter 的修正情况。在 Bayer 图像中, 式(7)可表述为

$$t_i = a_x L_i + b_x, \quad \forall i \in \Omega(x) \ \& \ color(i) \ is \ B \quad (8)$$

为了缩小透射图 t 和粗透射图 \tilde{t} 之间的差别, 通过最小二乘法求解式(9)得到 (a_x, b_x) 如式(10)所示。

$$F(a_x, b_x) = \sum_{\substack{i \in \Omega(x) \ \& \\ color(i) = B}} ((a_x^T L(i) + b_x - \tilde{t}(i))^2 + \varepsilon a_i^2) \quad (9)$$

$$a_x = \frac{\frac{1}{|\Omega|} \sum_{\substack{i \in \Omega(x) \& \\ color(i)=B}} L(i)\bar{t}(i) - \mu_x \bar{t}_x}{\sigma_x^2 + \varepsilon}, \quad (10)$$

$$b_x = \bar{t}_x - a_x \mu_x$$

其中, μ_x 和 σ_x^2 是 L 在邻域 $\Omega(x)$ 内颜色通道 B 位置像素的均值和方差, $|\Omega|$ 为邻域内属于颜色通道 B 的像素个数, \bar{t}_x 是 \bar{t} 在邻域 $\Omega(x)$ 的均值。

通过式(8)和式(10)可以得到优化透射图 t , 图 6 为本文方法和 He 方法估计的透射图的最终结果,对比显示表明了本文算法的准确性。

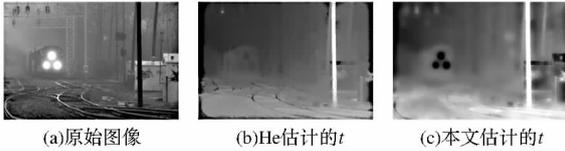


图 6 含雾图像及估计的透射图 t

Fig. 6 Input image and it's estimated transmission map

利用求得的大气光 A 、估计的透射图 t , 可以计算出无雾的 Bayer 图像, 为了避免图像失真和结果图像包含噪声^[1,6], 设定透射率的阈值为 t_0 , 通过式(11)求得无雾 Bayer 图像。最后通过去马赛克算法及系列后处理算法得到最终的无雾 RGB 图像。

$$K(x) = \frac{L(x) - A}{\max(t(x), t_0)} + A \quad (11)$$

3 实验结果与分析

为验证算法的有效性, 在操作系统为 Windows XP 的惠普 8200 计算机上基于 Matlab 7.8 进行了实验, 并从视觉效果和运算速度两方面, 对 He 方法和本文算法进行了比较。

3.1 视觉效果

利用本文算法对网上下载的大量有雾图像进行处理, 为了展示算法处理效果, 列举部分图像处理结果如图 7~图 9 所示。图 7(a)~图 9(a) 为原始有雾图像, 为了与 He 算法进行对比, 图 7(b)~图 9(b) 通过 Matlab 对有雾图像进行处理, 模拟数字成像设备采集的原始 Bayer 格式图像。图 7~图 8 的 (c) 和 (d) 分别给出了 He 算法和本文算法在处理浓雾图像时的对比效果, 本文算法在处理浓雾区域的处理上优于 He 算法。He 算法在优化粗透射图时, 为了保证透射图与原始图像的有效对应, 采用了全局平滑操作, 导致算法在处理浓雾区域时效果不理想。Bayer 格式图像为 CCD/CMOS 采集的原始数据, 相比 RGB 图像而言, 图像对比度较强, 本文基于 Bayer 格式图像进行去

雾, 改善了浓雾区域的去雾效果。

在处理其他场景时, 与以往去雾算法不同, 本文算法处理的 Bayer 图像是线性图像, 能够取得较优的去雾效果, 如图 9 所示。

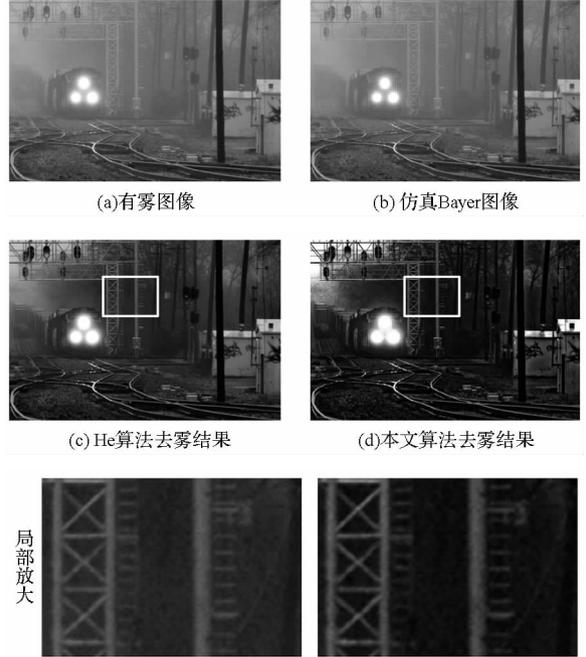


图 7 火车去雾效果对比

Fig. 7 Dehazing results of a train

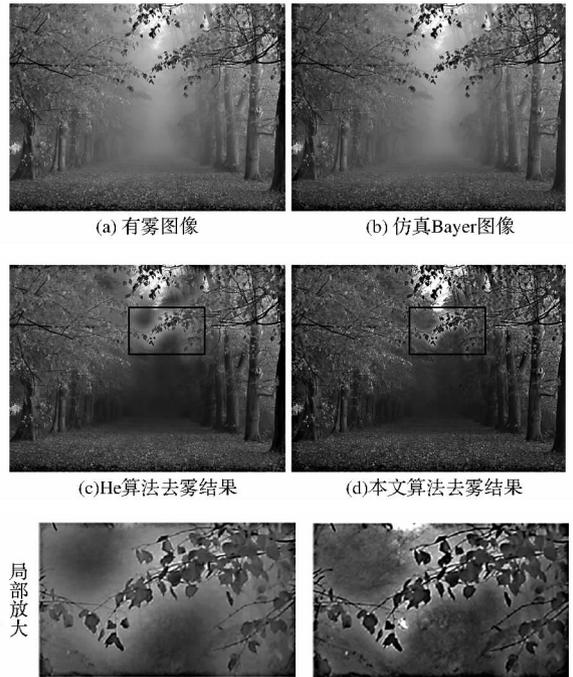


图 8 森林去雾效果对比

Fig. 8 Dehazing results of forest

为了说明算法的有效性, 下面对实验结果进行定量的客观评价。由于雾天成像会造成图像边缘信息和细节信息的损失, 图像去雾的主要目的就是恢复图像的边缘和细节信息, 提高图像的清



图 9 纽约去雾效果对比

Fig. 9 Dehazing results of New York

晰度和对比度。本文采用平均梯度对实验结果进行客观定量评价。平均梯度是指图像边界附近灰度的差异,这种差异的大小可用于表示图像清晰度。平均梯度越大,边缘信息越丰富,图像越清晰。其计算公式为

$$\bar{G} = \frac{1}{(M-1)(N-1)} \sum_{i=1}^{M-1} \sum_{j=1}^{N-1} \sqrt{\frac{[I(i+1,j) - I(i,j)]^2 + [I(i,j+1) - I(i,j)]^2}{2}} \quad (12)$$

其中, \bar{G} 为图像的平均梯度, $I(i, j)$ 表示图像在 (i, j) 位置的灰度值, M, N 分别为图像的总行数和总列数。分别对图 7 ~ 图 9 的实验图像求取平均梯度,对比结果如表 1 所示。

表 1 实验结果的平均梯度对比

图像	原始图像	He 结果 ^[6]	本文结果
图 7	4.4097	7.1634	10.9231
图 8	11.4303	12.6253	14.6900
图 9	9.3223	13.1548	17.9696

3.2 运算速度

本文算法较 He 算法及目前所有去雾算法的最大改进在于通过改变数字图像的获取流程极大地提升了运算速度,突破了现有“先采集,后处理”的图像处理流程,将去雾工作前移。基于 ISP 进行去雾研究,对原始数据进行去雾处理,一方面减少了去雾处理的数据量,另一方面由于算法基于 CMOS 采集的原始数据进行处理,通过将去雾算法集成到 ISP 中,比单纯依靠软件方法进行去雾在运算速度方面有着本质提升。图 10 为传统去雾算法与本文去雾算法处理流程对比示意图。对于大小为 $M \times N$ 的图像传感器,其采集到的数据量为 $M \times N$ (即 Bayer 图像),最终显示设备显

示给用户的 RGB 图像是通过系列处理得到的图像,其数据量为 $M \times N \times 3$,从图中可以看出传统去雾算法所处理的数据量是本文算法的 3 倍。

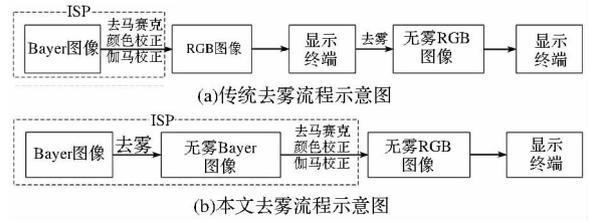


图 10 去雾流程对比示意图

Fig. 10 Comparison of dehazing pipeline between our method and original method

He 算法运算时间消耗主要集中在两个方面:①求取暗原色;②优化透射图。其中优化透射图的计算时间占 90% 以上。采用 Guided Filter 代替 Soft Matting 优化透射图,虽然很大程度上减少了算法运行时间,但由于处理的数据量较大,实现实时去雾比较困难。而基于 Bayer 图像进行去雾,求取暗原色时的数据量和 Guided Filter 滤波时引导图像的数据量减少了 2/3,显著提高了算法运行速度。表 2 给出了图 7 ~ 图 9 中本文算法与 He 算法的具体时间比较,可以看出新算法相对 He 算法在计算速度上有显著的提高。

表 2 运算时间对比 (单位:s)

Tab. 2 Computing performance comparison (s)

图像	大小	He 算法 ^[6]		Guided filter 改进 He 算法 ^[13]		本文算法	
		t_1	t_2	t_1	t_2	t_1	t_2
图 7	600 × 400	2.29	60	2.29	5.36	1.67	1.73
图 8	1024 × 768	7.55	185	7.55	18	5.78	6.05
图 9	800 × 430	3.17	89	3.17	7.8	2.41	2.55

注: t_1 为计算暗原色所消耗时间; t_2 为总消耗时间。

4 结论

本文提出了一种基于 Bayer 格式图像的快速去雾算法,对 He 的算法进行了改进,在处理效果不弱于 He 算法的前提下,大大提高了算法运行效率。最后,在大量有雾图像上进行了实验,结果验证了本文算法的有效性。同时,本文基于 Bayer 图像进行处理的思想可以运用到图像去噪、目标监测等领域。研究如何将本文算法基于 FPGA 并行实现,并基于 ISP 进行嵌入式开发,获得实时的去雾图像或视频,研制拍摄无雾场景的相机,将是我们下一步的研究重点。

参考文献 (References)

- [1] 嵇晓强,戴明,孙丽娜,等. 暗原色先验图像去雾算法研究[J]. 光电子·激光, 2011, 22(6): 926-930.
JI Xiaoqiang, DAI Ming, SUN Lina, et al. Research on the image haze removal algorithm based on the prior dark channel [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2011, 22(6): 926-930. (in Chinese)
- [2] 方帅,王勇,曹洋,等. 单幅雾天图像复原[J]. 电子学报, 2010, 38(10): 2279-2284.
FANG Shuai, WANG Yong, CAO Yang, et al. Restoration of image degraded by haze[J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(10): 2279-2284. (in Chinese)
- [3] Tan R T. Visibility in bad weather from a single image[C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Washington, USA, 2008: 2347-2354.
- [4] Fattal R. Single image dehazing[J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(3): 721-729.
- [5] Tarel J P, Hautiere N. Fast visibility restoration from a single color or gray level image[C]//Proceedings of the 12th IEEE International Conference on Computer Vision, Japan, 2009: 2201-2208.
- [6] He K M, S J, Tang X O. Single image haze removal using dark channel prior [C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Washington, USA, 2009: 1956-1963.
- [7] 胡伟,袁国栋,董朝,等. 基于暗通道优先的单幅图像去雾新方法[J]. 计算机研究与发展, 2010, 47(12): 2132-2140.
HU Wei, YUAN Guodong, DONG Chao, et al. Improved single image dehazing using dark channel prior[J]. Journal of Computer Research and Development, 2010, 47(12): 2132-2140. (in Chinese)
- [8] 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.
YANG Jingyu, ZHANG Yongsheng, ZOU Xiaoliang, et al. Using dark channel prior to quickly remove haze from a single image [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2010, 35(11): 1292-1295. (in Chinese)
- [9] Verhoeven G J. It's all about the format-unleashing the power of RAW aerial photography [J]. International Journal of Remote Sensing, 2010, 31(8): 2009-2042.
- [10] Gijssenij A, Gevers T, et al. Computational color constancy: survey and experiments [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2011, 20(9): 2475-2489.
- [11] Narasimhan S G, Nayar S K. Chromatic framework for vision in bad weather [C]//Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2000: 598-605.
- [12] Narasimhan S G, Nayar S K. Vision and the atmosphere[J]. International Journal of Computer Vision, 2002, 48: 233-254.
- [13] He K M, Sun J, Tang X O. Guided image filtering [C]//Proceedings of European Conference on Computer Vision, 2010.
- [14] Weerasinghe C, Li W, Kharitonenko I, et al. Novel color processing architecture for digital cameras with COMS image sensors [J]. IEEE Transactions Consumer Electron, 2005, 51: 1092-1098.
- [15] 周国瑞,孙世新,王文江. 结合 Bayer 模式与局部相关模型的 Demosaicing 算法[J]. 计算机学报, 2007, 30(7): 1179-1185.
ZHOU Guorui, SUN Shixin, WANG Wenjiang. A demosaicing algorithm based on bayer pattern and local correlation model [J]. Chinese Journal of Computers, 2007, 30(7): 1179-1185. (in Chinese)
- [16] Menon D, Calvagno G. Color image demosaicing: an overview [J]. Signal Processing: Image Communication, 2011, 26(8): 518-533.
- [17] Bayer B E. Color imaging array. U. S. Patent 3971065 [P]. 1976.