

## 基于WLS的雾天交通图像恢复方法

肖创柏, 赵宏宇, 禹晶, 杨普

(北京工业大学 计算机学院, 北京 100124)

**摘要:** 在尘雾等恶劣天气条件下, 由于大气粒子的散射作用, 致使获取的道路图像严重退化, 给交通运输带来很大的困难。为了提高道路环境的可视性, 文中提出了一种基于 WLS 的雾天交通图像恢复算法。该算法从大气散射模型出发, 首先进行大气光照的估计与白平衡处理, 然后结合道路环境的约束, 构建 WLS 框架对大气耗散函数进行估计, 从而恢复场景反照率。通过实验分析可知, 文中算法能够有效去除图像中雾霾, 消除了 Halo 效应的影响, 较好地凸显图像远景的细节信息, 实现了交通图像的视见度的提高。

**关键词:** WLS; 图像去雾; 大气散射模型; 白平衡

**中图分类号:** TP394.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)03-1080-05

## Traffic image defogging method based on WLS

Xiao Chuangbai, Zhao Hongyu, Yu Jing, Yang Pu

(College of Computer Science and Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** Images of roads captured by visual surveillance system are usually degraded by scattering due to atmospheric particles such as haze, fog and mist, which could frequently bring great difficulties to the transportation. In this paper, a novel method was proposed based on weighted least squares (WLS) to remove fog from a single input image. The proposed algorithm begins with estimation of atmospheric light and white balance. Then, through the constraint from the road environment, the weighted least squares (WLS) framework was constructed to estimate atmospheric veil, and restore the fog image by inverting the atmospheric scattering model. The experimental results demonstrates that, compared with the existing algorithm, the proposed method can remove the fog effectively, eliminate the Halo effects, obtain good restoration of distant scene details, and thus realize the improvement of traffic image visibility.

**Key words:** WLS; image defog; atmospheric scattering model; white balance

收稿日期: 2014-07-20; 修订日期: 2014-08-21

基金项目: 北京市教委科技发展重点项目(KZ01210005007); 北京市教育委员会科技发展计划(KM201310005020)

作者简介: 肖创柏(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事模式识别与图像处理等方面的研究。Email: cbxiao@bjut.edu.cn

通讯作者: 赵宏宇(1984-), 男, 博士生, 主要从事计算机视觉与图像处理方面的研究。Email: asas.014@163.com

## 0 引言

在雾霾天气条件下,由于场景的能见度降低,采集图像的动态范围、对比度和颜色等特征被衰减。其中,高速公路受雾霾天气条件影响最为严重,给公路监测、导航跟踪、自动驾驶等带来很大的困难,同时也影响了户外场景观测系统的正常工作。因此,对雾天图像恢复的实现是一个极具现实意义的问题。

雾天图像恢复是一个跨学科的课题,已经成为计算机视觉和图像处理领域的研究热点。目前,基于大气散射模型<sup>[1]</sup>的单帧去雾方法发展最为迅速。该类方法一般通过构造满足假设条件的代价函数和约束方程,使用最优化方法求解大气散射模型相关参数来恢复雾天图像。Fattal<sup>[2]</sup>假设图像局部区域的反照率为一个常向量,根据物体表面反射与介质传输函数(transmission map)的局部统计不相关性的约束,利用独立成分分析(ICA)来估计常数反照率,最后采用MRF模型推断整幅图像的颜色。该方法基于局部统计独立的假设,当浓雾缺少颜色信息且含有大量噪声时,统计结果不可靠。He等<sup>[3]</sup>利用暗原色(dark channel)先验的方法估计介质传输函数,并使用soft matting算法对介质传输函数进行细化处理,从而恢复出无雾场景图像和景深图像。该方法具备物理有效性,但算法复杂度高、处理速度慢,鉴于此,He等<sup>[4]</sup>提出一种基于引导滤波的快速图像去雾方法。Tarel等<sup>[5]</sup>假设大气耗散函数(atmospheric veil)在可行域中逼近最大值,且局部变化平缓,提出一种快速图像去雾算法。该方法采用中值滤波方法估计大气耗散函数,边缘保持能力较差。Caraffa等<sup>[6]</sup>提出了基于MRF模型的图像去雾方法,并应用到交通图像的恢复中。

针对雾天交通场景采集的图像,文中提出了一种新的基于WLS(weighted least squares)的去雾算法。该算法首先对大气光照进行估计,通过白平衡(white balance)消除偏色影响;然后利用交通场景信息形成约束条件,构造WLS框架来估计大气耗散函数,最后通过大气散射模型求解出场景反照率,进而完成去雾处理。文中算法能够有效地改善图像质量,消除景深突变的边界引起的Halo效应,较好地恢复远景细节信息,使得增强后的图像整体更加协调自然,更加符合人们观察需求。

## 1 大气散射模型和大气耗散函数

在雾霾天气条件下,大气粒子粒径和密度较大,对光线具有较强的散射作用<sup>[7-8]</sup>。McCartney<sup>[1]</sup>于1975年提出了大气散射模型,该模型由衰减模型和大气光模型组成,可以用于描述光在雾天场景传输的物理特性:

$$I(x, y) = A\rho(x, y)e^{-\beta d(x, y)} + A(1 - e^{-\beta d(x, y)}) \quad (1)$$

式中: $(x, y)$ 为像素对应的二维坐标; $I$ 为有雾图像; $A$ 为大气光照,用于表示天空亮度; $\rho$ 为反照率; $\beta$ 为大气散射系数; $d$ 为场景深度。该模型假设大气是均匀的,且不考虑波长对大气散射系数的影响,该模型可以直接扩展到彩色图像的应用中。基于大气散射模型的去雾算法目标是利用已知信息求解模型相关参数,最终得到无雾清晰图像,该清晰图像可以表示为:

$$R(x, y) = A\rho(x, y) \quad (2)$$

在大气散射模型中, $d$ 和 $\beta$ 两个参数的求解通常取决于图像场景中无穷远平面上的消失点信息。然而多数情况下消失点难以准确估计,导致去雾效果不够理想。文中通过求解大气耗散函数避免直接求解 $d$ 和 $\beta$ 两个参数,大气耗散函数可表示为:

$$V(x, y) = A(1 - e^{-\beta d(x, y)}) \quad (3)$$

该函数表示环境光对场景成像的附加部分,具有局部平滑性质,其本身包含场景深度信息,是关于景深 $d$ 的增函数。

## 2 文中去雾算法

### 2.1 大气光照的求解与白平衡

大气光照 $A$ 通常假设为全局常量,文中采用基于暗原色先验的方法来估计大气光照。方法如下:首先求得暗原色图像,挑选暗原色图像中最亮像素的前0.1%像素集合;然后,设这些像素对应输入图像中相同位置的像素集合为 $I_{0.1\%}$ ,求解该集合在三个颜色通道下的平均值作为大气光照的初始值,即 $A_{\text{mean}} = \text{mean}(I_{0.1\%})$ 。

由于雾霾天气常伴随着阴天情况,因此图像中的雾气往往不是理想中的纯白色,而大气光照又是从雾气特性出发进行估计,所以需要进行白平衡处理。首先将 $A_{\text{mean}}$ 校正为近白色,求解过程如下:

$$A_{\text{white}} = A_{\text{mean}} / \max_{c \in R, G, B} (A_{\text{mean}}^c) \quad (4)$$

由于在现实中天空光照一般接近图像的最高亮度,因此将上式得到的  $A_{\text{white}}$  作为文中要求解的大气光照值。对原图像的白平衡处理可以表示为:

$$I'(x, y) = I(x, y) / A_{\text{white}} \quad (5)$$

式中:  $I'$  表示白平衡处理后的雾天图像。

## 2.2 大气耗散函数的约束

由大气散射模型和公式(3)可知,要想得到清晰图像  $R$ , 大气耗散函数  $V$  的计算十分重要。对于道路交通图像, 大气耗散函数满足以下两个约束:

### (1) 光度约束

首先大气耗散函数要满足两个条件:(i)  $0 \leq V(x, y) \leq 1$ ; (ii)  $V(x, y)$  不大于原图像的最小颜色分量。对于彩色图像, 可将白平衡后的雾天图像每个像素在 RGB 三个通道的最小颜色分量定义为大气耗散函数的粗估计结果, 即:

$$\tilde{V}(x, y) = \min_{c \in \{R, G, B\}} (I'(x, y)) \quad (6)$$

式中:  $c$  表示颜色通道。对于一幅灰度图, 则有  $\tilde{V}(x, y) = I'(x, y)$ 。大气耗散函数的粗估计等效于对图像进行最小值滤波处理, 但是大气耗散函数粗估计结果不具有局部平滑性质, 因此需要进一步的细化。

### (2) 路平面约束

在交通图像中, 道路一般可以假设为一个平面, 如果路面水平线的位置  $j_h$  已知, 同时, 已知摄像机的内部参数, 则路面场景目标与观察者的距离可以表示为:

$$D_{\text{road}}(x, y) = \frac{\delta}{j - j_h} \quad (7)$$

式中:  $j > j_h$ ,  $j$  为路面场景目标位于图像中的水平线索引值,  $\delta$  通过摄像机标定获得<sup>[9]</sup>。由此, 大气耗散函数在路面上的上限可以表示为:

$$V_{\text{road}}(x, y) = I_s \left( 1 - e^{-\frac{\beta \delta}{(j - j_h)}} \right) \quad (8)$$

则大气耗散函数需要满足如下约束:

$$V(x, y) \leq V_{\text{road}}(x, y) \quad (9)$$

文中没有将路平面约束直接应用在大气耗散函数的细化上, 而是将公式(7)组成指数衰减函数构建 WLS 框架, 详细过程将在下一小节中介绍。

## 2.3 WLS 框架下的大气耗散函数的细化估计

大气耗散函数的细化可以看成是一个平滑问题, 该函数仅与景深有关, 与反照率无关。因此, 为了使

输入图像与输出图像尽可能一致并达到去雾的目的, 平滑处理时应尽量保持景深突变的边缘细节。为达到上述效果, 需要采用具有边缘保持能力的平滑滤波进行处理, 如双边滤波、引导滤波<sup>[4]</sup>、局部极值平滑等。由于雾天图像的对比度随场景深度增加呈指数性衰减的规律, 而直接采用滤波进行平滑处理没有考虑这种规律, 造成图像恢复效果十分有限。鉴于上述问题, 文中根据雾天场景的指数衰减性质构建 WLS 框架对大气耗散函数的粗估计结果进行平滑处理, 从而完成细化操作。WLS 框架可表示为最小化下面公式:

$$\sum_{x, y} [(V(x, y) - \tilde{V}(x, y))^2 + \lambda(x, y) (g_x(\tilde{V}(x, y)) \left( \frac{\partial V(x, y)}{\partial x} \right)^2 + g_y(\tilde{V}(x, y)) \left( \frac{\partial V(x, y)}{\partial y} \right)^2)] \quad (10)$$

式中:  $V$  为细化后的大气耗散函数;  $\tilde{V}$  为经过光度约束处理后的大气耗散函数的粗估计结果。公式(10)左边第一项为数据项, 用于最小化  $V$  和  $\tilde{V}$  的差异; 后面一项是调整项, 用于最小化  $V$  的局部梯度变化来达到平滑目的;  $g$  为平滑权值, 定义为:

$$g_x(\tilde{V}(x, y)) = \left( \left| \frac{\partial(\ln(\tilde{V}(x, y)))}{\partial x} \right|^\gamma + \varepsilon \right)^{-1}$$

$$g_y(\tilde{V}(x, y)) = \left( \left| \frac{\partial(\ln(\tilde{V}(x, y)))}{\partial y} \right|^\gamma + \varepsilon \right)^{-1} \quad (11)$$

式中:  $\varepsilon$  表示值为很小的常量, 防止除数为零;  $\gamma$  用来表示  $\tilde{V}$  梯度方向上的敏感程度, 一般在 1.2~2.0 之间。  $\lambda(x, y) = ke^{-D_{\text{road}}(x, y)}$  为指数衰减函数,  $k$  为常数, 该函数保证平滑程度与场景深度同步调整, 在远景使权重侧重于数据项, 平滑过程中较好地保留了远景的边缘细节。对公式(10)的求解可转化成矩阵向量形式<sup>[10]</sup>, 通过解线性方程组求出最优  $V$  的解。

文中的 WLS 框架能够在平滑图像的同时, 较好地保持图像的边缘和纹理。同时, 求解 WLS 框架的时间复杂度为  $O(N)$ ,  $N$  表示图像像素数量, 因此, 也保证了文中算法整体的高效性。

## 2.4 雾天图像的恢复

在得到大气光照及大气耗散函数的基础上, 根据公式 (1) 可直接恢复出场景在理想气象条件下的清晰图像:

$$R(x, y) = \left( \frac{I(x, y) - qV(x, y)}{1 - V(x, y)} \right) * A_{\text{white}} \quad (12)$$

式中:  $q(0 < q < 1)$  为恢复调节参数, 用于控制去雾的程度, 文中设置  $q=0.95$ , 表示 95% 的雾气将要被除去, 保留一定雾气的目的是使恢复后图像的层次更加分明。

### 2.5 亮度校正

去雾后图像有时整体亮度会偏暗, 须进行亮度的调节以提高图像质量, 文中采用 Gamma 校正方法进行亮度调整。亮度校正程度也与景深程度保持一致, 即:

$$R_{\text{final}}(x, y) = R(x, y) \frac{1}{\max(n^{\frac{1}{D_{\text{max}}(x, y)}}, m)} \quad (13)$$

式中:  $m, n$  为常数;  $n$  用于调节近景亮度;  $m$  表示校正参数的下限, 保证了整幅图像的亮度调节效果;  $R_{\text{final}}$  为调节后的清晰图像。

### 3 实验仿真与分析

为验证文中算法有效性, 在 Matlab 平台上对雾天降质图像进行分组实验, 分别采用多尺度 Retinex 算法 (MSR)、对比度约束的自适应直方图均衡化算法 (CLAHE)、He 的基于暗原色先验的算法 (DCP)、自由空间分割算法 (FFS)、Tarel 的两个最新算法 (NBPC、NBPC+PA)<sup>[9]</sup> 与文中算法进行比较。为更好进行分析, 主要对较低分辨率的图像进行处理, 这样可以更好地观察比较去雾后细节与颜色的恢复情况。图 1 为大小为  $600 \times 400$  的彩色图像, 图 2 为大小为  $380 \times 280$  的黑白图像。图 1 和图 2 中 (a) 表示原图, 图 (b)~(h) 分别为采用 MSR、CLAHE、DCP、FFS、NBPC、NBPC+PA 及文中算法处理后的结果。

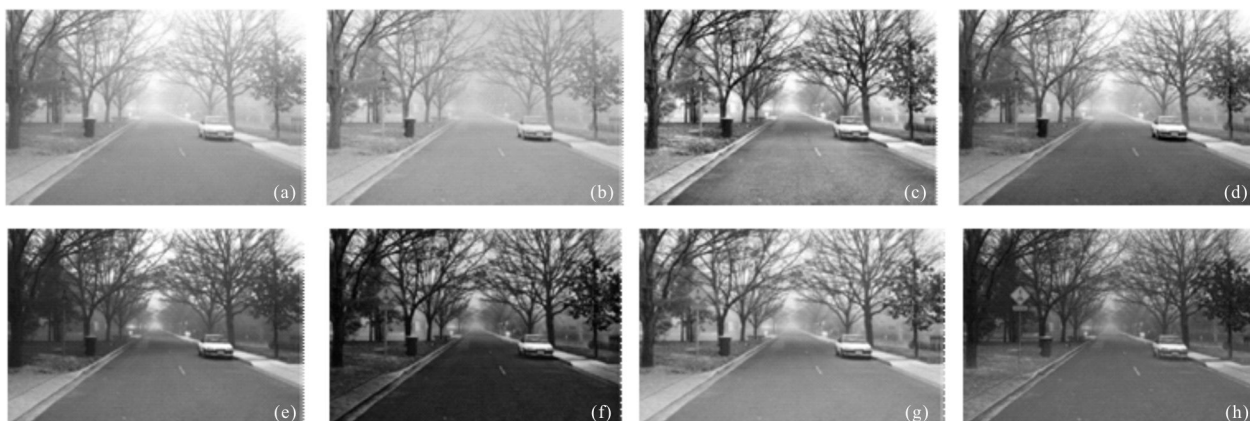


图 1 彩色图像去雾实验

Fig.1 Defogging experiment of color image



图 2 黑白图像去雾实验

Fig.2 Defogging experiment of black-and-white image

由图 1,2 可知,通过去雾算法处理后的图像对比度均明显增强,一些模糊的物体变得清晰。比较几种算法的去雾效果,MSR 和 CLAHE 的雾气残留的较多,DCP 的去雾效果不如 NBPC 等后面几种算法,FFS 去雾后的场景局部偏暗,NBPC 校正地过于严重,NBPC+PA 的远景恢复效果较好,近景细节损失严重。文中算法处理后的图像无论在远景还是近景,细节方面均得到了较好的增强,并有效地去除了图像中的雾气。如图 1(h)中近景的石阶与树林很好地去除了雾气,消除了 Halo 效应的影响,整体细节和颜色更接近晴天下的实际场景图像;图 2(h)中场景细节清晰,由近到远的衔接效果自然,符合人们观察习惯。

#### 4 结 论

针对目前去雾算法容易产生 Halo 效应,保留细节信息较差等问题,文中提出了一种基于 WLS 的图像去雾方法,并应用到交通图像的恢复处理中。该算法首先求解大气光照,并进行白平衡处理避免偏色现象的发生;然后通过交通场景等附加信息构建 WLS 框架估计大气耗散函数,根据大气散射模型求解无雾图像。通过实验证明,与 6 种图像处理算法进行比较,文中的算法能够有效地去除图像中雾霾的影响,处理后的图像边缘细节更加清晰、自然,避免了 Halo 效应的发生,较好地提高了交通图像的可视度。

文中的算法虽然能够得到较好的去雾效果,但是需要基于路面平坦和雾气均匀条件假设成立、摄像机内部参数已知的前提下实行,未来将针对非均匀大雾等更加复杂环境的应用方面做进一步研究

#### 参考文献:

[1] Huang Lihong. Defogging method for degraded image [J].

*Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(5): 985-988. (in Chinese)

黄黎红. 退化图像的去雾方法[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(5): 985-988.

[2] Fattal R. Single image dehazing [J]. *ACM Transactions on Graphics(TOG)*, 2008, 27(3): 1-9.

[3] He K, Sun J, Tang X. Single image haze removal using dark channel prior[C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR), 2009: 1956-1963.

[4] He K, Sun J, Tang X. Guided image filtering[C]//European Conference on Computer Vision(ECCV), 2010: 1-14.

[5] Tarel J, Hauti N. Fast visibility restoration from a single color or gray level image[C]//IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), 2009: 2201-2208.

[6] Caraffa L, Tarel J. Markov random field model for single image defogging [C]//Intelligent Vehicles Symposium, 2013: 994-999.

[7] Chen Shuhang, Li Zile, Chen Mengzhu, et al. Influence of atmospheric multiple scattering effects on the range bias for satellite laser altimeter [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(9): 114-117. (in Chinese)

陈舒杭, 李子乐, 陈梦竹, 等. 大气多次散射效应对星载激光测高仪测距偏差值的影响 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(9): 114-117.

[8] Ge Guangyi, Wei Zhenzhong. Noise inhibition method during image dehazing process[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(8): 2765-2771. (in Chinese)

葛广一, 魏振忠. 图像去雾过程中的噪声抑制方法 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(8): 2765-2771.

[9] Tarel J, Hauti N. Vision enhancement in homogeneous and heterogeneous fog [J]. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 2012, 4(2): 6-20.

[10] Krishnan D, Fattal R, Szeliski R. Efficient preconditioning of laplacian matrices for computer graphics [J]. *ACM Transaction on Graphics*, 2013, 32(4): 1-15.