

文章编号 1004-924X(2016)07-1789-10

改进的基于雾气理论的视频去雾

刘海波^{1*}, 杨杰², 吴正平², 张庆年³, 邓勇²

(1. 湖南工学院 电气与信息工程学院, 湖南 衡阳 421002;

2. 武汉理工大学 光纤传感与信号处理教育部重点实验室, 湖北 武汉 430070;

3. 武汉理工大学 交通学院, 湖北 武汉 430070)

摘要: 为了进一步提高有雾视频的可用性, 提出了一种改进的基于雾气理论的视频去雾方法。该方法以雾气理论为基础, 利用暗原色先验知识以及 Retinex 方法和图像融合的方式, 将从视频背景图像求取的大气光值和介质传播图应用于视频的所有帧以便去除雾气。从主观定性评价、客观定量评价和运算速度 3 个方面对视频去雾效果进行了评价。结果表明, 对分辨率为 480×640 的视频, 本文方法的运算速度为 5.45 frame/s, 不仅获得了较快的处理速度且能有效避免复原视频中出现颜色跳变的现象。由于本文采用区间估计的方式对大气光值进行估计, 同时利用图像复原和图像增强的方法求取介质传播图, 因此, 复原视频的清晰度和对比度比典型的视频去雾方法有所提高, 颜色效果也比较好。

关键词: 视频去雾; 大气散射模型; 暗原色先验知识; Retinex 方法; 图像融合

中图分类号: TP391.9; TN941.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162407.1789

Improved video defogging based on fog theory

LIU Hai-bo^{1*}, YANG Jie², WU Zheng-ping², ZHANG Qing-nian³, DENG Yong²

(1. School of Electrical and Information Engineering,

Hunan Institute of Technology, Hengyang 421002, China;

2. Key Laboratory of Fiber Optic Sensing Technology and Information Processing of the Ministry of Education, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

3. School of Transportation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

* Corresponding author, E-mail: seainlost81@126.com

Abstract: To improve the usability of a foggy video, an improved video defogging method based on fog theory was proposed. By using dark channel prior knowledge, Retinex method and image fusion, the method applies the values of global atmospheric light and a medium transmission map estimated from the video background image to defogging of all the video frames. The effects of the defogging for the video image were evaluated by three methods in subjective qualitative evaluation, objective quantitative evaluation and operation speeds. Experimental results demonstrate that the proposed method runs at 5.45 frame/s for a video image of 480×640 , and it not only obtains a fast processing speed but also effectively avoids color jump during the process of restoring image. As the modified

收稿日期: 2015-11-20; 修订日期: 2016-01-11.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51479159); 交通运输部软科学项目(No. 2013-322-811-470); 湖南省教育厅科学研究重点项目(No. 15A046); 湖南工学院大学生创新训练计划项目(No. H1519)

method uses the interval estimation to estimate the value of global atmospheric light, and combines image restoration and image enhancement to obtain the value of medium transmission map, it improves the visibility and contrast of restored video image effectively as well as color effect as compared with the traditional video defogging methods.

Key words: video defogging; atmospheric scattering model; dark channel prior knowledge; retinex method; image fusion

1 引言

近年来,雾霾天气频繁出现。雾霾天气条件下,悬浮于大气中的大量微小颗粒对光线的散射和吸收作用,会导致视频图像中目标物体的对比度、饱和度和色调等特征被覆盖或模糊,严重影响了户外视觉系统的效用。因此,有雾视频的清晰化处理已成为计算机视觉领域中的一个重要问题,而实时改善雾天视频的清晰度和能见度则具有重要的研究意义,可广泛应用于交通监控、自动驾驶和地形勘测等领域。

目前的去雾方法主要针对单幅图像,已产生大量研究成果^[1-6],例如 Ma 等^[2]提出了一种有效的单幅海雾图像融合去雾方法,Zhu 等^[4]提出了一种基于色彩衰减先验的单幅图像快速去雾方法,然而对于视频去雾方面的研究则刚刚兴起。一般来说,雾天视频的去雾方法主要建立在前、背景分割的基础上,具体来说可以分为两类^[7]:第一类方法是先计算传播图,再利用该传播图对视频中的每一帧图像进行处理。如 Chen 等^[8]采用参考图像估计出传播图,再利用无迹卡尔曼滤波的背景保持算法进行去雾。郭璠等^[7]将雾气视为光路传播图,将由背景图像得到的视频“通用”传播图应用于视频的所有帧以消除雾气。第二类方法是先将视频图像的背景与前景分离,再分别采用相关去雾方法分别进行处理,最后将两者的处理结果相融合以实现去雾。如 Jone 等^[9]提出了一种基于小波融合的雾天视频增强方法。Xu 等^[10]采用对比度约束的自适应直方图均衡化方法对视频图像的背景与前景分别进行去雾处理。

总之,视频去雾的研究还处于理论阶段,现有方法在计算效率、处理效果等方面都还有待提高。本文通过深入分析郭璠等^[7]提出的雾气理论,利用平均值法求取视频背景图像,将 He 等^[11]提出的暗原色先验知识和 Retinex 方法^[12]相结合,采

用图像融合的方式,将背景图像求取的大气光值和介质传播图应用于视频的每一帧以去除雾气。

2 背景

McCartney 于 1975 年提出了大气散射模型^[13],该模型用公式可表示为:

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

式中: $I(x)$ 为观测点接收到的有雾图像, $J(x)$ 为清晰无雾的图像, A 为大气光值, $\rho(x)$ 为场景反照率, $t(x)$ 为介质传播图。当大气同质时,介质传播图 $t(x)$ 可表示为:

$$t(x) = e^{-\beta d(x)} \quad 0 \leq t(x) \leq 1. \quad (2)$$

式中: β 为大气散射系数, $d(x)$ 为场景深度。 $A\rho(x)t(x)$ 称为衰减模型,它描述了光从场景点传播到观测点的过程中的衰减程度; $A(1-t(x))$ 称为大气光模型,它描述了周围环境光对场景成像光强的影响。去雾的本质就是利用大气散射模型,通过估计 A 和 $t(x)$,进而从 $I(x)$ 中求解 $\rho(x)$,则 $A\rho(x)$ 即为求取的清晰无雾图像。

在实际的视频监控应用中,摄像机通常固定架设在较高的位置,且相机视角范围内的背景图像变化不大。考虑到前景物体与对应背景在景深上的差异不大,本文以雾气理论为基础,采用图像复原和图像增强的方法,利用当前背景图像估计大气光值和介质传播图,并应用于整个视频序列,以在保证视频去雾效果的同时提高视频的去雾速度。

由式(1)可知,大气散射模型可变换为:

$$1 - I(x)/A = t(x)(1 - \rho(x)). \quad (3)$$

式中: $1 - \rho(x)$ 定义为逆反照率。进一步,定义 $M(x) = 1 - I(x)/A$, $N(x) = 1 - \rho(x)$,则式(3)可变换为:

$$M(x) = t(x)N(x). \quad (4)$$

视频去雾中,利用当前背景图像求取大气光

值 A 和介质传播图 $t(x)$ 后,根据输入的每一帧视频图像 $I(x)$ 计算出 $M(x)$,从而得到 $N(x)$,进而获得清晰无雾的视频图像 $A\rho(x)$ 。

3 本文方法

本文提出的改进的基于雾气理论的视频去雾方法流程图如图 1 所示。首先,根据视频序列获取视频背景图像,利用 He 等^[11]提出的暗原色先验知识得到介质传播图的初始估计,同时采用区间估计的方式得到大气光值 A ,进而通过运算得到 $M(x)$;然后,利用 Retinex 方法得到介质传播图的粗略估计,采用图像融合的方式,通过联合双边滤波和值域调整得到介质传播图的最终估计;

$\rho(x)$,将反照率 $\rho(x)$ 与大气光值 A 相乘的结果经过色调调整后得到去雾视频。

为了便于说明,定义场景中的静止部分为背景,移动目标为前景^[7]。为了实现对大气光值 A 和介质传播图 $t(x)$ 的估计,首先采用平均值法求取视频背景图像 $I_{bc}(x)$,并对式(1)两边取最小值操作,可得:

$$I^{\text{dark}} = \min_{C \in \{R, G, B\}} I_{bc}^C(x) = \min_{C \in \{R, G, B\}} A\rho^C(x)t(x) + A(1-t(x)) = \rho^{\text{dark}}(x)At(x) + A(1-t(x)). \quad (5)$$

式中: $I_{bc}^C(x)$ 和 $\rho^C(x)$ 为 $I_{bc}(x)$ 和 $\rho(x)$ 中的一个彩色通道, $\min_{C \in \{R, G, B\}}$ 表示对 (R, G, B) 通道对应的像素点取最小值, I^{dark} 和 ρ^{dark} 定义为 $I_{bc}(x)$ 和 $\rho(x)$ 的暗通道。

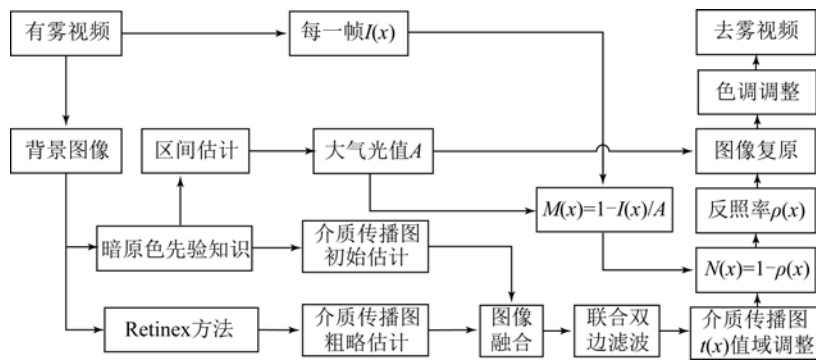


图 1 改进的基于雾气理论的视频去雾方法流程图

Fig. 1 Flowchart of improved video defogging method based on fog theory

3.1 大气光值的估计

郭璠等^[7]采用 He 等^[11]提出的大气光值估计方法,以暗原色先验统计规律为基础,选取暗原色图像中亮度值大小为前 0.1% 的像素点,然后取这些像素点在原有雾图像中相应的最大值作为大气光值,该方法适用于大多数雾天场景。本文以暗原色先验理论为基础,采用区间估计的方式对大气光值进行估计,从而可以提高估计的效率和精确度。

首先,考虑到暗通道 I^{dark} 中白色物体对大气光值估计的影响,对式(5)两边取灰度开运算,可得:

$$\hat{I}^{\text{dark}} = \hat{\rho}^{\text{dark}} At'(x) + A(1-t'(x)), \quad (6)$$

式中: \hat{I}^{dark} 、 $\hat{\rho}^{\text{dark}}$ 和 $t'(x)$ 为灰度开运算处理的结果。根据暗原色先验知识知,若暗通道 I^{dark} 中白色物体的尺寸小于灰度开运算中结构元素的尺

寸, $\hat{\rho}^{\text{dark}}$ 的取值趋于 0^[1], 则式(6)可改写为:

$$\hat{I}^{\text{dark}} = A(1-t'(x)). \quad (7)$$

由式(7)可知,介质传播图 $t'(x)$ 可表示为:

$$t'(x) = 1 - \hat{I}^{\text{dark}} / A. \quad (8)$$

式中: $t'(x)$ 定义为介质传播图的初始估计,且取值不大于 $t(x)$ 中对应像素点的取值。因此, $\hat{I}^{\text{dark}} / A$ 中像素点的取值不大于 1,故 \hat{I}^{dark} 中像素点的最大值不大于 A ,则 A 可表示为:

$$A \geq \max(\hat{I}^{\text{dark}}). \quad (9)$$

一般情况下, A 的取值不大于原图像中像素点的最大值,则 A 的取值范围可表示为:

$$\max(\max_{C \in \{R, G, B\}} I_{bc}^C(x)) \geq A \geq \max(\hat{I}^{\text{dark}}). \quad (10)$$

因此, A 的区间估计可表示为:

$$A = (1 - \alpha) \cdot \max(\hat{I}^{\text{dark}}) + \alpha \cdot \max(\max_{C \in \{R, G, B\}} I_{bc}^C(x)), 0 \leq \alpha \leq 1. \quad (11)$$

式中: α 称为调节参数, 并定义 α 为 \hat{I}^{dark} 中所有像素点的灰度均值。因此, α 的取值与 \hat{I}^{dark} 中像素点的灰度分布有关, 具有自动调节大气光值的功能。

3.2 介质传播图的估计

根据 Land 提出的理论, 式(3)中图像 $1 - I(x)/A$ 可分解为入射光图像 $t(x)$ 和反射物体图像 $1 - \rho(x)$ ^[14]。利用 Retinex 方法, 忽略入射光图像 $t(x)$ 的性质, 获得物体的反射性质 $1 - \rho(x)$, 实现图像增强的效果^[15]。其中, 入射光图像 $t(x)$ 可通过 $1 - I(x)/A$ 与中心环绕函数 $F(x)$ 进行卷积运算获得, 其表达式为:

$$t(x) = (1 - I(x)/A) \otimes F(x). \quad (12)$$

式中: \otimes 表示卷积操作。一般情况下, $F(x)$ 采用高斯函数, 其标准差为 0.5, 窗口尺寸取 $I(x)$ 中尺寸最小值的 1/50。

首先, 将获得的背景图像 $I_{\text{bc}}(x)$ 和 3.1 节求取的大气光值 A 代入式(3), 并对式(3)两边取最小值操作, 可得:

$$I'(x) = \min_{C \in \{R, G, B\}} (1 - I_{\text{bc}}^C(x)/A) = \min_{C \in \{R, G, B\}} t(x) (1 - \rho^C(x)) = t(x) (1 - \rho^{\text{dark}}(x)). \quad (13)$$

根据式(12)和式(13), 定义介质传播图的粗略估计 $t''(x)$ 为:

$$t''(x) = I'(x) \otimes F(x). \quad (14)$$

由于 $t''(x)$ 中像素点的取值范围为 $[0, 1]$, 则式(14)可改写为:

$$t''(x) = \min(\max(I'(x) \otimes F(x), 0), 1). \quad (15)$$

其次, 由式(15)得到的 $t''(x)$ 整体偏暗, 而 $t'(x)$ 满足暗原色先验理论, 故以 $t'(x)$ 为参考, 对 $t''(x)$ 中灰度值进行线性搬移, 其表达式为:

$$t'(x) = \text{imadjust}(t''(x), [\min(t''(x)), \max(t''(x))], [t_d \cdot \min(t'(x)), \min(t_u \cdot \max(t'(x)), 1)]), \quad (16)$$

式中: $\text{imadjust}(\cdot)$ 表示对 $t''(x)$ 中灰度值进行线性映射, t_d 和 t_u 用来调节映射区间范围。根据实验统计结果, t_d 和 t_u 分别设置为 0.95 和 1.05。

由于 $t'(x)$ 和 $t''(x)$ 分别从图像复原和图像增强的角度对介质传播图进行估计, 两者具有较高的相似性和互补性。因此, 本文利用图像亮度相关系数对 $t'(x)$ 和 $t''(x)$ 的相似性进行度量, 并采用像素级融合中加权平均算法对 $t'(x)$ 和 $t''(x)$ 进行柔性处理^[16], 其表达式为:

$$t'''(x) = \omega_1 \cdot t'(x) + \omega_2 \cdot t''(x). \quad (17)$$

式中: ω_1 和 ω_2 为加权系数, 且满足 $\omega_1 + \omega_2 = 1$ 。

根据实验统计结果, ω_1 和 ω_2 分别设置为 0.55 和 0.45。

然后, 考虑到 $1 - I^{\text{dark}}/A$ 中具有大量的边缘特征和纹理细节, 采用 Paris 等^[17]提出的快速联合双边滤波方法, 利用 $1 - I^{\text{dark}}/A$ 对 $t'''(x)$ 进行滤波处理, 其表达式为:

$$t^{\text{jb}}(x) = \frac{1}{W_x^{\text{jb}}} \sum_{y \in S} G_{\sigma_r}(\|t'''(x) - (1 - I^{\text{dark}}(y)/A)\|) \cdot G_{\sigma_s}(\|x - y\|) (1 - I^{\text{dark}}(y)/A). \quad (18)$$

式中: G_{σ_r} 和 G_{σ_s} 为高斯函数, σ_r 为值域高斯模板的尺寸, σ_s 为空域高斯模板的尺寸。 W_x^{jb} 为归一化系数, 其表达式为:

$$W_x^{\text{jb}} = \sum_{y \in S} G_{\sigma_s}(\|x - y\|) \cdot$$

$$G_{\sigma_r}(\|t'''(x) - (1 - I^{\text{dark}}(y)/A)\|). \quad (19)$$

最后, 考虑到 $t^{\text{jb}}(x)$ 中天空区域的介质传播图可能被低估, 采用文献[18]中自适应参数调整的方法对天空区域的介质传播图进行修正, 实现介质传播图的值域调整。在这里, 定义 t_0 为天空区域介质传播图的修正值, 即 $t^{\text{jb}}(x)$ 中像素点灰度值小于 t_0 的统一修正为 t_0 , t_0 的表达式为:

$$t_0 = \min(\max(n/N, L_d), L_u). \quad (20)$$

式中: N 为 $t^{\text{jb}}(x)$ 中像素点总数, n 为 $t^{\text{jb}}(x)$ 中灰度值小于 V 的像素点的个数, 固定值 L_d 和 L_u 用来限定 t_0 的上下限。一般情况下, V , L_d 和 L_u 分别设置为 0.15、0.15 和 0.3。当有雾图像中存在大面积天空区域时, 例如长江或海面上拍摄的雾天视频, V , L_d 和 L_u 分别设置为 0.3、0.3 和 0.5。因此, 介质传播图的最终估计 $t(x)$ 可表示为:

$$t(x) = \min(\max(t^{\text{jb}}(x), t_0), 1). \quad (21)$$

3.3 视频去雾

将输入的视频帧图像 $I(x)$ 、3.1 节求取的大气光值 A 和 3.2 节求取的介质传播图 $t(x)$ 代入式(4), 可得:

$$N(x) = \frac{M(x)}{t(x)} = \frac{1 - I(x)/A}{t(x)}. \quad (22)$$

进而, 场景反照率 $\rho(x)$ 可表示为:

$$\rho(x) = 1 - N(x) = 1 - \frac{1 - I(x)/A}{t(x)}. \quad (23)$$

因此, 清晰无雾的视频帧图像 $J(x)$ 可表示为:

$$J(x) = A\rho(x) = A \left[1 - \frac{1 - I(x)/A}{t(x)} \right]. \quad (24)$$

由于 $J(x)$ 中像素点的取值范围为 $[0, 1]$, 则式(24)可改写为:

$$J(x) = \min \left[\max \left[A \left(1 - \frac{1 - I(x)/A}{t(x)} \right), 0 \right], 1 \right]. \quad (25)$$

针对雾天条件下,复原视频帧图像 $J(x)$ 通常会偏暗的情况,采用 Drago 等^[19]提出的自适应对数映射算子对复原视频帧图像进行色调调整,其表达示为:

$$J_{op}(x) = \frac{O_{dmax} \cdot 0.01}{\lg(J_{max}^c(x) + 1)} \cdot \frac{\ln(J^c(x) + 1)}{\ln \left[2 + \left(\left[\frac{J^c(x)}{J_{max}^c(x)} \right]^{\frac{\ln(b)}{\ln(0.5)}} \right) \cdot 8 \right]}, \quad (26)$$

式中: $J^c(x)$ 为复原视频帧图像 $J(x)$ 中的一个彩色通道, $J_{op}(x)$ 为 $J^c(x)$ 色调调整后输出结果, $J_{max}^c(x)$ 为 $J^c(x)$ 中像素点的最大值。 O_{dmax} 和 b 分别为显示设备可以显示的最大亮度值和偏置参数,其值通常设置为 100 和 0.85^[19]。

4 实验结果与分析

4.1 算法评价指标

视频去雾中有很多问题需要进一步研究,特别是对于各帧图像,尚未形成统一的去雾效果客观评价标准^[20]。本文从主观定性评价、客观定量评价和运算速度 3 个方面对视频去雾效果进行评价,其中客观定量评价采用 Hautière 等^[21]提出的对比度和 Jobson 等^[22]提出的色调保真度作为评价指标。对比度评价指标为新增可见边比 e 和图像复原前后可见边梯度比 \bar{r} ,其表达式为:

$$e = \frac{n_r - n_0}{n_0}, \bar{r} = \frac{\bar{g}_r}{\bar{g}_0}, \quad (27)$$

式中: n_0 和 n_r 为去雾前后图像中可见边的数目, \bar{g}_0 和 \bar{g}_r 为去雾前后图像的平均梯度。一般情况下, e 和 \bar{r} 取值越大,说明相对于原有雾图像,处理后的图像具有更多的可见边和更高的能见度,去雾效果越好^[7]。色调保真度指标为 r 列基于图像统计特征的度量参数 H ,其表达式为:

$$H = \frac{\text{mean}(H_{out}(x)) - \text{mean}(H_{in}(x))}{\text{mean}(H_{in}(x))}, \quad (28)$$

式中: $\text{mean}(\cdot)$ 表示对所有像素点取灰度均值, $H_{in}(x)$ 和 $H_{out}(x)$ 为去雾前后图像在 HSV 空间中的色调分量。一般情况下, H 的取值越小说明复原图像的色调保真度越高^[23]。

4.2 算法比较与分析

首先,选择拍摄视频“ship”和“person”作为

实验对象,分别采用郭璠等^[7]和本文方法进行主观定性比较,实验结果如图 2(彩图见期刊电子版)和图 3 所示。

从图 2 可以看出,视频“ship”图像中存在大面积天空和水面区域,且两者颜色相近,郭璠等^[7]和本文方法都能获得较好的去雾效果,但本文方法结果具有更好的清晰度和对比度。从图 3(彩图见期刊电子版)中视频“person”的去雾效果来看,本文方法的去雾结果在整体上优于郭璠等^[7]方法的去雾结果。从图 3(d)和(e)可以看出,对于人和车方框内容,本文方法能够获得更好的清晰度、对比度和图像颜色,然而对于屋顶方框内容,郭璠等^[7]和本文方法结果存在一定程度的颜色失真,其中郭璠等^[7]方法结果颜色偏黄,而本文方法结果颜色偏白。本文方法结果中屋顶方框内容出现颜色失真,可能与灰度开运算中结构元素的尺寸偏大,导致估计的大气光值偏小有关。另外,图像中屋顶的颜色为蓝白相间,并且处于强烈太阳光的照射下,导致图像中屋顶的像素值整体偏大,大于估计的大气光值,从而出现颜色失真。

其次,选择具有代表性的视频“intersection”作为对象,分别采用 He 等^[11]、Shin 等^[24]和本文方法进行主观定性比较,实验结果如图 4(彩图见期刊电子版)所示。图 4 中 He 等^[11]和 Shin 等^[24]方法结果来自文献^[24]。

从图 4 可以看出,He 等^[11]方法结果在相邻帧或整个视频序列中存在明显的颜色跳变,其原因在于 He 等^[11]方法将视频序列中每一帧作为一个独立的对象进行处理,当视频中大气光值存在较大波动时,复原图像颜色就会出现明显的跳变。相比而言,Shin 等^[24]和本文方法可以获得较好的视觉效果,但两种方法获得的复原图像色彩相差较大,究其原因主要在于两种方法对于大气光值的估计采取了不同的方法。其中,Shin 等^[24]方法采用暗原色先验知识对视频序列中的每一帧图像分别进行大气光值估计,然后将相邻帧间大气光值所在区域 S 值(S 值为区域内均值与标准差的差值)与给定阈值进行比较,判断估计的大气光值是否需要修正,从而减小大气光值的波动或使其基本保持不变。本文将 3.1 节中估计的大气光值应用于整个视频序列,并在整个视频去雾过程中保持不变。从图 4(c)和(d)可以看出,本文方法获得了更好的清晰度和图像颜色。



(a) 原图

(a) Original images



(b) 郭璠等^[7]方法结果

(b) Results of ref. [7]



(c) 本文方法结果

(c) Results of proposed method

图 2 视频“ship”第 30、31、100 和 101 帧图像采用不同方法去雾效果对比结果

Fig. 2 Comparison results of video frames 30,31,100,101 of “ship” by different defogging methods



(a) 原图

(a) Original images



(b) 郭璠等^[7]方法结果

(b) Results of ref. [7]



(c) 本文方法结果

(c) Results of proposed method



(d)图 3(b)方框中内容
(d)Contents in boxes of Fig. 3(b)

(e)图 3(c)方框中内容
(e)Contents in boxes of Fig. 3(c)

图 3 视频“person”第 320、321 和 500 帧图像采用不同去雾方法的效果对比结果

Fig. 3 Comparison results of video frames 320, 321, 500 of “person” by different defogging methods



(a)原图

(a) Original images



(b) He 等^[11]方法结果
(b) Results of ref. [11]



(c) Shin 等^[24]方法结果
(c) Results of ref. [24]



(d)本文方法结果

(d) Results of proposed method

图 4 视频“intersection”第 87、88、215、216、454 和 455 帧图像采用不同去雾方法的效果对比结果

Fig. 4 Comparison results of video frames 87, 88, 215, 216, 454, 455 of “intersection” by different defogging methods

然后,采用郭璠等^[7]、Zhang 等^[25]、Kim 等^[26]和本文方法对视频“intersection”进行去雾处理,并选取第 7、8 和 14 帧图像中的一个固定场景进行主观定性和客观定量比较。图 5(彩图见期刊电子版)给出了 3 帧图像去雾前后的实验结果,表 1 给出了 3 帧图像对应的定量评价指标值。图 5 中

Zhang 等^[25]和 Kim 等^[26]方法结果来自文献[26]。

从图 5 可以看出,郭璠等^[7]方法的去雾效果不明显,Zhang 等^[25]、Kim 等^[26]和本文方法能够获得较好的去雾效果,并且不同程度地提高了复原图像的清晰度、对比度和图像颜色。从表 1 中 e 、 r 和 H 的取值来看,本文方法结果获得了最大

的 \bar{r} 值, e 的取值仅次于本文方法未色调调整结果, 而 H 的取值仅大于郭璠等^[7]方法的结果, 说明本文方法能够有效提高复原图像的清晰度和对比度, 并获得较好的图像颜色。

从图 1 中视频去雾方法的流程图来看, 本文方法是将视频背景图像中估计的大气光值和介质传播图应用于视频的所有帧, 因此具有较快的运算速度。对于大小为 480 pixel × 640 pixel × 657 frame 的视频“intersection”, 本文方法运算速度为 5.45 frame/s(硬件为 Intel 酷睿 i5 CPU,

8GB 内存, 软件为 MATLAB R2012a), 郭璠等^[7]方法运算速度为 9.15 frame/s。从文献^[7]可知, 若本文方法不进行色调调整, 其运算速度也可达到 9.15 frame/s。另外, 从图 5 和表 1 可以看出, 本文方法未色调调整结果和本文方法结果在复原视频图像清晰度和对比度等方面均优于郭璠等^[7]方法结果, 在色调保真度方面与郭璠等^[7]方法结果相近。相比而言, Zhang 等^[25]方法对计算机内存要求较高并具有很高的计算复杂度, Kim 等^[26]方法的运算速度为 7.6 frame/s。

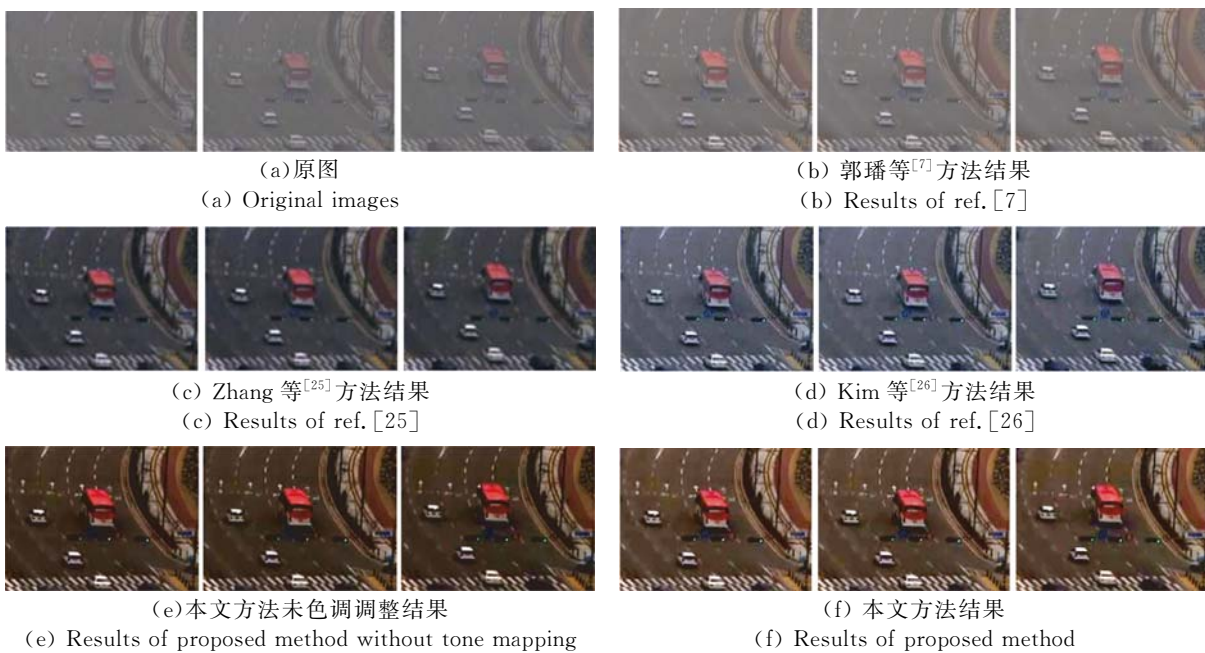


图 5 视频“intersection”第 7、8 和 14 帧图像中同一场景采用不同去雾的方法效果对比结果

Fig. 5 Comparison results of same scene in video frames 7, 8, 14 of “intersection” by different defogging methods

表 1 图 5 视频图像采用不同方法去雾后定量评价指标值

Tab. 1 Quantitative evaluation indicators by different defogging algorithms in Fig. 5

名称	郭璠等 ^[7] 方法结果			Zhang 等 ^[25] 方法结果			Kim 等 ^[26] 方法结果			本文方法未色调调整结果			本文方法结果		
	e	\bar{r}	H	e	\bar{r}	H	e	\bar{r}	H	e	\bar{r}	H	e	\bar{r}	H
第 7 帧	0.840	3.352	0.481	2.352	3.527	2.229	2.919	5.692	1.937	3.348	4.639	0.543	3.113	5.753	0.521
第 8 帧	0.921	2.736	0.487	2.271	3.619	2.225	2.932	5.347	1.987	3.399	4.299	0.543	3.199	5.391	0.522
第 14 帧	1.043	3.688	0.487	2.572	3.451	1.570	3.319	5.115	1.477	3.977	4.573	0.553	3.657	5.981	0.538

5 结 论

本文提出了一种改进的基于雾气理论的视频

去雾方法。该方法利用暗原色先验知识和 Retinex 方法, 采用图像融合的方式, 结合图像复原和图像增强的思想, 将背景图像中求取的大气光值和介质传播图应用于视频的每一帧以消除雾气。实验结

果表明,本文方法在获得较快处理速度的同时能有效避免复原视频中颜色跳变的现象。另外,本文方法能有效提高复原视频的清晰度和对比度,并

获得较好的图像颜色。下一步的研究工作可通过并行程序设计的方法和基于图形硬件的加速算法,进一步提高算法的执行效率,以实现实时处理。

参考文献:

- [1] 孙伟,李大健康,刘宏娟,等. 基于大气散射模型的单幅图像快速去雾[J]. 光学精密工程, 2013, 21(4): 1040-1046.
SUN W, LI D J, LIU H J, *et al.*. Fast single image fog removal based on atmospheric scattering model [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(4): 1040-1046. (in Chinese)
- [2] MA Z L, WEN J, ZHANG C, *et al.*. An effective fusion defogging approach for single sea fog image [J]. *Neurocomputing*, 2016, 173(1):1257-1267.
- [3] CHOI L K, YOU J, BOVIK A C. Referenceless prediction of perceptual fog density and perceptual image defogging[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2015, 24(11):3888-3901.
- [4] ZHU Q S, MAI J M, SHAO L. A fast single image haze removal algorithm using color attenuation prior[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2015, 24(11): 3522-3533.
- [5] 肖创柏,赵宏宇,禹晶,等. 基于WLS的雾天交通图像恢复方法[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(3): 1080-1084.
XIAO CH B, ZHAO H Y, YU J, *et al.*. Traffic image defogging method based on WLS[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(3): 1080-1084. (in Chinese)
- [6] 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.
GE G Y, WEI ZH ZH. Noise inhibition method during image dehazing process[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(8): 2765-2771. (in Chinese)
- [7] 郭璠,蔡自兴,谢斌. 基于雾气理论的视频去雾算法[J]. 电子学报, 2011, 39(9):2019-2025.
GUO F, CAI Z X, XIE B. Video defogging algorithm based on fog theory[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(9): 2019-2025. (in Chinese)
- [8] CHEN G, ZHOU H Q, YAN J F. A novel method for moving object detection in foggy day[C]. *Proceedings of the 8th ACIS International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking, and Parallel/Distributed Computing*. Qingdao, China: IEEE Computer Society, 2007:53-58.
- [9] JONE J, WILSCY M. Enhancement of weather degraded video sequences using wavelet fusion[C]. *Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Cybernetic Intelligent System, London, UK: IEEE Computer Society*, 2008:1-6.
- [10] XU Z Y, LIU X M, CHEN X N. Fog removal from video sequences using contrast limited adaptive histogram equalization[C]. *Proceedings of International Conference on Computational Intelligence and Software Engineering, Wuhan, China: IEEE Computer Society*, 2009:1-4.
- [11] HE K M, SUN J, TANG X O. Single image haze removal using dark channel prior[C]. *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), New York, USA: IEEE Computer Society*, 2009:1956-1963.
- [12] LIU H B, YANG J, WU Z P, *et al.*. Fast single image dehazing based on image fusion[J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2015, 24(1), 013020.
- [13] MCCARTNEY E J. *Optics of Atmosphere: Scattering by Molecules and Particles* [M]. New York: John Wiley and Sons, 1976:23-32.
- [14] 罗会兰,林家彪. 一种基于多尺度Retinex算法的图像去雾方法[J]. 计算机应用与软件, 2013, 30(4):58-60,127.
LUO H L, LIN J B. An image defogging method based on multi-scale Retinex[J]. *Computer Applications and Software*, 2013, 30(4):58-60,127. (in Chinese)
- [15] 刘海波,汤群芳,杨杰. 改进直方图均衡和Retinex算法在灰度图像增强中的应用[J]. 量子电子学报, 2014, 31(5): 525-532.
LIU H B, TANG Q F, YANG J. Application of improved histogram equalization and Retinex algorithm in gray image enhancement [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2014, 31(5): 525-532. (in Chinese)
- [16] 张小刚,唐美玲,陈华,等. 一种结合双区域滤波和图像融合的单幅图像去雾算法[J]. 自动化学报, 2014, 40(8):1733-1739.
ZHANG X G, TANG M L, CHEN H, *et al.*. A dehazing method in single image based on double-

- area filter and image fusion[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2014, 40(8):1733-1739. (in Chinese)
- [17] PARIS M, FREDO D. A fast approximation of the bilateral filter using a signal processing approach [C]. *Proceedings of the 9th European Conference on Computer Vision, Graz, GER: Springer*, 2006:568-580.
- [18] 吴笑天, 鲁剑锋, 贺柏根, 等. 雾天降质图像的快速复原[J]. *中国光学*, 2013, 6(6):892-899.
WU X T, LU J F, HE B G, *et al.*. Fast restoration of haze-degraded image[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(6):892-899. (in Chinese)
- [19] DRAGO F, MYZKOWSKI K, ANNEN T, *et al.*. Adaptive logarithmic mapping for displaying high contrast scenes[J]. *Computer Graphics Forum*, 2003, 22(3):419-426.
- [20] 范媛媛, 沈湘衡, 桑英军. 基于对比度敏感度的无参考图像清晰度评价[J]. *光学 精密工程*, 2011, 19(10):2485-2493.
FAN Y Y, SHEN X H, SANG Y J. No reference image sharpness assessment based on contrast sensitivity[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(10):2485-2493. (in Chinese)
- [21] HAUTIERE N, TAREL J P, AUBERT D, *et al.*. Blind contrast restoration assessment by gradient ratioing at visible edges[J]. *Image Analysis and Stereology*, 2008, 27(2):87-95.
- [22] JOBSON D J, RAHMAN Z, WOODSELL G A. Statistics of visual representation [C]. *Proceedings of the Visual Information Processing XI, Orlando, USA: SPIE*, 2002:25-35.
- [23] 李菊霞, 余雪丽. 雾天条件下的多尺度 Retinex 图像增强算法 [J]. *计算机科学*, 2013, 40(3):299-301.
LI J X, YU X L. Enhance algorithm for fog images based on improved multi-scale Retinex[J]. *Computer Science*, 2013, 40(3):299-301. (in Chinese)
- [24] SHIN D K, KIM Y M, PARK K T, *et al.*. Video dehazing without flicker artifacts using adaptive temporal average [C]. *Proceedings of the International Symposium on Consumer Electronics 2014 (ISCE 2014), Jeju, Korea, 2014: Article number 6884454.*
- [25] ZHANG J, LI L, ZHANG Y, YANG G, *et al.*. Video dehazing with spatial and temporal coherence [J]. *Visual Computer*, 2011, 27(6):749-757.
- [26] KIM J H, JANG W D, SIM J Y, *et al.*. Optimized contrast enhancement for real-time image and video dehazing [J]. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2013, 24(3):410-425.

作者简介:



刘海波 (1981—), 男, 湖北武汉人, 博士, 副教授, 2011 年于湖南大学获得硕士学位, 2015 年于武汉理工大学获得博士学位, 主要从事图像处理及模式识别方面的研究。E-mail: seainlost81@126.com



杨杰 (1960—), 女, 湖北武汉人, 博士, 教授, 1988 年于武汉交通科技大学获得硕士学位, 1999 年于上海交通大学获得博士学位, 2002 年于韩国全北大学完成博士后学习, 主要从事信息处理、图像处理和人工智能等方面的研究。E-mail: jieyang509@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)