

doi: 10.3969/j.issn.1674-1242.2023.03.003

基于雾密度智能感知的腹腔镜图像去烟雾算法研究

尹梓名¹, 张震宇¹, 束翌俊², 张向新³

- (1. 上海理工大学健康科学与工程学院, 上海 200093;
2. 上海交通大学医学院附属新华医院普外科, 上海 200092;
3. 无锡艾视益医疗科技有限公司, 江苏无锡 214142)

【摘要】目的 在腹腔镜手术过程中, 术野内会产生影响医生观察的烟和雾。相比特殊去烟或去雾装置, 图像处理算法可同时实现腹腔镜图像的去烟雾操作, 成本低、操作简单、易于使用。但是, 目前腹腔镜去烟雾算法还存在处理后易发生色偏、细节不突出、亮度过低等问题。**方法** 针对腹腔镜图像去雾存在的问题, 该文提出了一种基于雾密度智能感知的腹腔镜图像去烟雾算法, 包含透射率智能感知的图像增强模块和光照分量感知的图像增强模块。透射率智能感知的图像增强模块通过感知图像的具体像素雾含量进行去雾, 可优化去雾效果。光照分量感知的图像增强模块根据图像不同像素区域的光照进行图像亮度增强, 使图像在避免过增强的情况下更好地提升图像亮度。**结果** 分别选取 4K 分辨率和 1080P 分辨率不同场景下的 100 张图像进行验证, 无参考雾密度评价指标显示, 提出的智能感知算法相比 3 种对照算法, 雾密度分别下降了 67.3%、68.1% 和 14.2%。**结论** 智能感知算法有效改善了腹腔镜图像去烟雾增强效果。

【关键词】 腹腔镜; 智能感知; 去烟雾; 图像增强

【中图分类号】 TP312

【文献标志码】 A

文章编号: 1674-1242 (2023) 03-0235-09

Research on Laparoscopic Image Defogging Method Based on Intelligent Perception of Fog Density

YIN Ziming¹, ZHANG Zhenyu¹, SHU Yijun², ZHANG Xiangxin³

- (1. School of Health Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. Department of General Surgery, Xinhua Hospital Affiliated to Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, Shanghai 200092, China; 3. Isee Medical Technology Co., Ltd, Wuxi, Jiangsu 214142, China)

【Abstract】Objective During laparoscopic surgery, smoke and fog can affect the doctor's observation in the operative field. Compared to special smoke or fog removal devices, image processing algorithms can simultaneously achieve desmoking and defogging for laparoscopic images, with low cost, simple operation, and ease of use. However, the current laparoscopic defogging algorithm still has problems such as color cast, lack of details, and low brightness after processing. **Method** In response to the

收稿日期: 2023-04-17

作者简介: 尹梓名 (1986—), 男, 博士研究生, 讲师, 研究方向为医学人工智能;

张震宇 (1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为医学图像处理;

束翌俊 (1988—), 男, 博士研究生, 副主任医师, 研究方向为消化系统恶性肿瘤的诊治;

张向新 (1984—), 男, 硕士研究生, 研究方向为腹腔镜图像处理。

problems of laparoscopic image de-fogging, this paper proposes a laparoscopic image de-fogging algorithm based on intelligent perception of fog density, which includes an image enhancement module based on intelligent perception of transmittance and an image enhancement module based on perception of illumination components. The image enhancement module with intelligent transmittance sensing can optimize the defogging effect by sensing the specific pixel fog content of the image. The image enhancement module with light component perception enhances the brightness of the image based on the light in different pixel regions of the image, allowing the image to improve its brightness without over-enhancing. **Results** 100 images with different scenes at 4K resolution and 1080P resolution were selected for verification. The non-reference fog density evaluation index showed that the proposed intelligent perception algorithm reduced the fog density by 67.3%, 68.1%, and 14.2% compared to the three control algorithms, respectively. **Conclusion** The intelligent perception algorithm effectively improves the enhancement effect of laparoscopic image defogging.

【Key words】Laparoscopic; Intelligent Perception; Defogging; Image Enhancement

0 引言

腹腔镜系统是一种集检查、检测、治疗和手术等操作于一体的医疗设备系统。在腹腔镜手术中, 通常使用高频电刀等高温切割器械进行手术, 会在腹腔镜视野中产生较多的烟。同时, 手术切割时, 患者体内温度升高, 遇到温度较低的腹腔镜镜头时, 腹腔镜的镜头前会起雾。这些烟和雾都会严重干扰医生在腹腔镜手术时的操作视野, 对术野清晰度产生不良影响, 严重影响手术进程, 因此腹腔镜的去烟雾操作对手术来说至关重要。

腹腔镜去烟雾问题可通过特殊装置或物理系统缓解。例如, 陈东等^[1]、王丽丽等^[2]、赵磊等^[3]分别使用特殊设计的排烟或加热装置来解决腹腔镜的去烟或去雾问题。一般来说, 更具普适性且不依赖任何装置的方法是通过计算机图像处理算法来实现腹腔镜的去烟雾效果。因烟和雾对图像的影响类似, 腹腔镜图像去烟雾问题的实质为图像去雾问题。目前针对图像去雾的研究主要从大气散射模型算法和深度学习算法两方面展开。①在大气散射模型算法中, 基于暗通道先验^[4]的去雾模型是目前的主流方法。为了改进模型中的大气光和透射率, Kim 等^[5]创新性地提出对图像进行分区块的大气光值估计和基于代价函数的透射率计算, 相比经典模型, 鲁棒性更强。王诗毅等^[6]通过高斯卷积提取大气光, 通过奇异值分解去噪改进了暗通道去雾算法, 提高了算法的有效性和优越性。陈玮等^[7]通过引入条件生成对抗网络对透射率进行估计, 结合天空区域的分割取得了更准确的结果。Luo 等^[8]通过提升图像对比度, 均衡化图像亮度, 达到了修正色彩偏离

的作用。通过梯度融合增强和去雾的图像, 并使用频域泊松方程重构图像, 可更好地解决去雾颜色失真问题^[9]。此外, 由郭志飞等^[10]提出的自适应直方图均衡提升亮度和观感的模型也取得了不错的效果。②深度学习算法主要有以下几种。马悦等^[11]将生成对抗网络用于医学手术图像去烟, 在峰值信噪比和结构相似度上优于同类的 4 种算法; 李云红等^[12]通过合并迁移学习子网络和残差注意力子网络优化了去雾的效果; 李鹏泽等^[13]通过引入先验信息, 提出高频信息对齐的多尺度融合去雾网络, 在使用更少内存的同时得到了更优的性能; 林森等^[14]提出了一种基于全局补偿注意力机制的战场图像去雾算法, 通过密集残差模块实现战场图像的去雾效果, 与其他算法相比, 在均方误差、峰值信噪比和结构相似度上都有明显提升, 在主观视觉上也有较大改善。

由于物理模型去雾的限制, 图像在去雾后整体亮度较原始图像亮度更低, 且整体颜色较原始图像颜色更深, 不利于医生进行手术操作。根据 Wang 等^[15]的结论, 在低照度图像增强方面, 主要的技术方法有基于灰度变换的方法、直方图均衡化方法、基于 Retinex 理论的 MSRCR 算法、基于频域的方法、图像融合方法、基于去雾模型的方法和机器学习方法。其中, 直方图均衡化方法易造成图像颜色的失真。基于 Retinex 理论的 MSRCR 算法^[16]考虑了图像光照的不均匀性, 在彩色图像的增强方面具有较好的效果。最简单、稳定、速度快的方法为基于灰度变换的方法, 但此方法未考虑图像的灰度分布图, 整体适应性较差。基于频域的方法存在计算量较大的问题。图像融合方法需要

多张不同曝光度的图像。基于去雾模型的方法则在物理解释上相对欠缺。

虽然使用深度学习等相关理论进行图像去雾研究取得了很多不错的成果,但目前将机器学习方法和深度学习算法部署在腹腔镜系统的 FPGA 芯片上的方案还不成熟,难以形成商业应用,所以本文使用改进的暗通道去雾模型及 Retinex 理论和灰度变换结合的方法进行腹腔镜图像去烟雾增强。本文以暗通道去雾模型为基础,提出了一种针对腹腔镜图像的雾密度智能感知去烟雾算法。所谓的智能感知,即对不同图像像素区域的指标值(如不同像素区域的含雾程度、光照条件和强度),依照图像具体像素区域的不同含雾程度和明暗程度进行优化与调整,进行不同的处理操作,以达到更好的处理效果。通过比较分析,本文的方法在得到较好的去烟雾效果的同时,改善了图像质量和观感,并在无参考的去雾效果评价指标中得到了更高的分数。

1 数据与方法

1.1 相关理论

1.1.1 经典暗通道去雾理论

当前基于退化模型的去雾,最有效的模型之一是基于一对大量有雾图像和无雾图像进行观察总结得到的图像映射关系,即文献[4]提出的暗通道去雾模型。该模型依照大气散射模型提出,大气散射模型如下。

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

式中, $I(x)$ 代表含雾图像; $J(x)$ 代表无雾图像; A 是全局大气光值; $t(x)$ 是传输函数,也称为透射率。该公式表示一幅含雾图像的形成过程。

暗通道先验知识如式(2)所示。式中, $J^{\text{dark}}(x)$ 表示图像的暗通道值; $\Omega(x)$ 是以 x 为中心的图像区块; c 表示图像的各个通道; $J^c(y)$ 表示当前区域各通道的像素值。

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

基于此先验知识,结合上述物理模型,需要计算出图像的透射率分布图和大气光值,即可将无雾图像从原始有雾图像中还原出来,透射率分布如式(3)所示,最终图像还原如式(4)所示。

$$\tilde{t}(x) = 1 - \omega \min_c \left(\min_{y \in \Omega(x)} \left(\frac{I^c(y)}{A^c} \right) \right) \quad (3)$$

$$J(x) = \frac{I(x) - A}{\max(t(x), t_0)} \quad (4)$$

1.1.2 基于像素智能感知权重的大气光值

在经典暗通道去雾理论中,大气光值计算的是基于图像整体暗通道对应的最高亮度值,该方法具有原理简单、计算速度快的优点。但在腹腔镜图像中存在两个主要问题:(1)在腹腔镜图像视野中,不存在天空区域,且由于腹腔封闭空间和镜头光源的限制,腹腔内的光照具有很强的非均匀性;(2)不同于一般的含雾图像,腹腔镜视野中的内容仅有腹腔内各器官、组织、血管和黏膜,这使腹腔镜图像的红色通道分量值比一般图像高。因此,采用上述大气光值计算腹腔镜图像的大气光会出现较为严重的颜色偏离,R、G、B 3个通道采用相同的大气光,也会降低图像的去雾效果。

本文根据文献[10]提出一种针对内窥镜智能感知大气光的计算方法,对内窥镜图像每个通道的每个像素定义像素智能感知权重,再根据权重计算智能感知大气光。其中,定义像素智能感知权重如式(5)所示。

$$\text{Paw}_c(x) = \frac{1}{1 + e^{\frac{f_{\text{mean}} - x}{f_{\text{std}}}}} \quad (5)$$

式中, $\text{Paw}_c(x)$ 为第 c 个通道对应的各个像素智能感知权重; f_{mean} 为图像整体像素的均值; f_{std} 为图像整体的方差。通过该权重,大气光随像素区域的变化而得到的智能感知大气光如式(6)所示。

$$A_c(x) = 255 \cdot \text{Paw}_c(x) + (1 - \text{Paw}_c(x)) \cdot I(x) \quad (6)$$

式中, $A_c(x)$ 为计算得出的智能感知大气光; $I(x)$ 为原始含雾图像的各像素值。

通过上述计算,各像素自适应权重由当前像素值和图像整体均值方差决定。在腹腔镜图像中,上述方法只能感知到存在过高的红色通道值,通过计算得出的大气光值就会得到相应的纠正,减少由大气光造成的图像偏色问题。

1.2 基于雾密度智能感知的腹腔镜图像去烟雾方法

本文将腹腔镜图像去烟雾划分为两个步骤。首先,使用去雾算法对不同雾密度区域进行准确的感知和识别,从而对不同图像区域进行不同程度的去雾操作,以保证图像的质量。其次,保证去雾后的图像具有更加易于观察的视觉效果。故将去烟雾方法划分为基于透射率智能感知的图像增强和基于光照分量智能感知的图像增强两部分。

1.2.1 基于透射率智能感知的图像增强

在大气散射模型中,透射率描述了光在传播过程中尚未被吸收或尚未衰减的辐射亮度比例,可以认为,在去雾模型中,透射率是衡量雾密度的重要部分。因此,对雾密度的感知可以通过更加准确的透射率感知模型实现。

去雾的过程实际上是增强对比度的过程,但对彩色图像来说,现有的模型增强对比度会造成部分像素值的丢失和截断,使色彩饱和度升高。对于图像的物理去雾模型,决定图像去雾程度和对比度增强的变量是透射率值 $t(x)$ 。

计算图像对比度的有效方法之一是使用均方误差

对比度公式,如式(7)所示。

$$C_{\text{MSE}} = \sum_{p=1}^N \frac{(J_c(p) - \overline{J_c})^2}{N} \quad (7)$$

式中, $c \in \{r, g, b\}$ 为 3 个通道之一; $\overline{J_c}$ 为图像像素块 $J_c(p)$ 的均值; N 为像素块的像素数量。均方误差对比度较好地衡量了去雾后图像颜色对比度的高低。

增强对比度会造成图像颜色的溢出。如图 1 所示,图 1(b) ~ (f) 分别将式(3)中的参数 ω 调整为 0.6 ~ 1.0。可以看到,随着图像饱和度的升高,缺失颜色的区域逐渐增大。

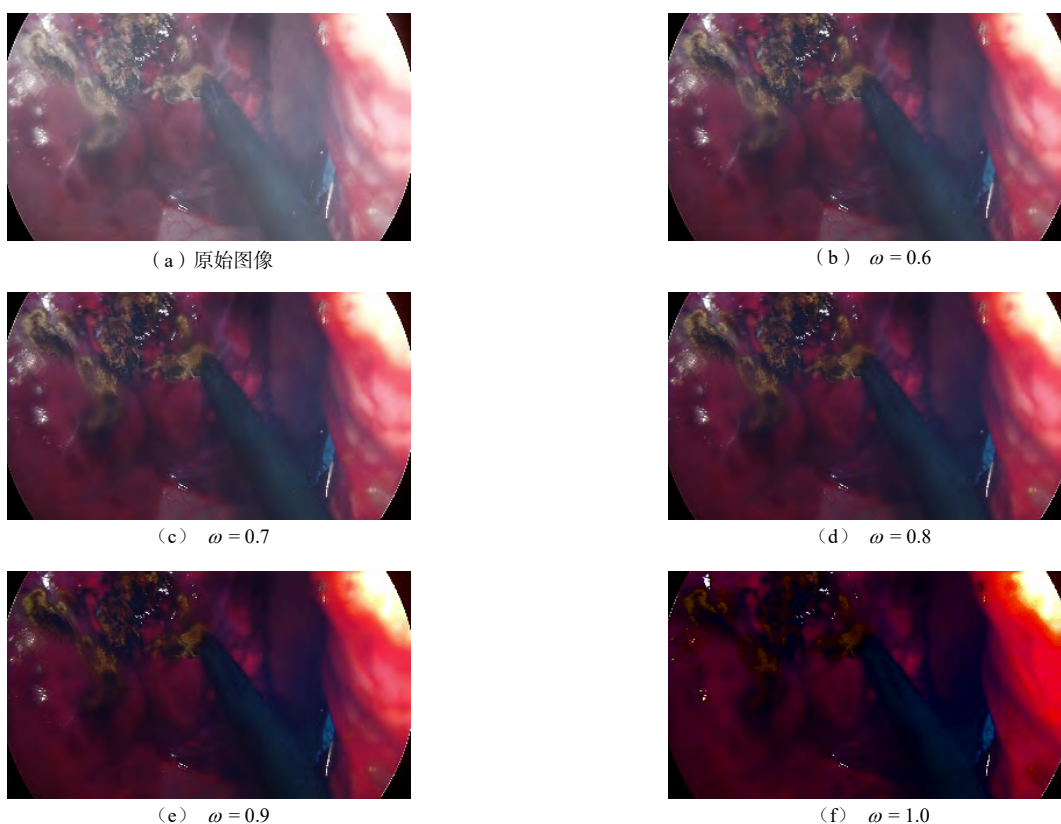


图 1 不同透射率的去雾效果

Fig.1 Defogging result of different $t(x)$

文献[5]定义了一种去雾总体损失函数 E 。首先,定义由于去雾造成颜色缺失的损失函数,如式(8)所示。

$$E_{\text{loss}} = \sum_{C \in \{r, g, b\}} \sum_{p \in B} \left\{ \left(\min\{0, J_c(p)\} \right)^2 + \left(\max\{0, J_c(p) - 255\} \right)^2 \right\} \quad (8)$$

式中, B 为对应的目标像素块,该公式可以进一步改

写为式(9)。

$$E_{\text{loss}} = \sum_{C \in \{r, g, b\}} \left\{ \sum_{i=0}^{\alpha_c} \left(\frac{i - A_c}{t} + A_c \right)^2 h_c(i) + \sum_{i=\beta_c}^{255} \left(\frac{i - A_c}{t} + A_c - 255 \right)^2 h_c(i) \right\} \quad (9)$$

式中, $h_c(i)$ 代表第 c 个通道的直方图; α_c 和 β_c 代表像素值发生截断的地方。该损失函数衡量了图像因对比度增强而造成的颜色丢失程度。

其次, 由均方误差对比度可定义因去雾不彻底导致的对比度损失函数, 如式 (10) 所示。

$$E_{\text{contrast}} = - \sum_{c \in \{r, g, b\}} \sum_{p \in B} \frac{(J_c(p) - \bar{J}_c)^2}{N_B} = - \sum_{c \in \{r, g, b\}} \sum_{p \in B} \frac{(I_c(p) - \bar{I}_c)^2}{t^2 N_B} \quad (10)$$

式中, t 为针对当前像素块 B 计算的透射率值; N_B 为像素块数量。

定义去雾总体损失函数如式 (11) 所示, 表示两种损失的加权和, 其中 λ_L 为平衡两种损失的系数, 本文取 0.5。

$$E = E_{\text{contrast}} + \lambda_L E_{\text{loss}} \quad (11)$$

得到上述去雾总体损失函数后, 本文提出了一种智能感知透射率预测模型, 通过感知像素块及图像各区域的雾密度, 对各区域采取不同程度的去雾增强效果。通过智能感知方法得到图像各区域的含雾程度, 迭代所有可能的去雾比例系数, 寻找最适合当前像素块的透射率。具体做法为: 将图像划分为 10×10 的像素块, 根据其智能感知权重大气光值与式 (3), 对像素块进行透射率智能感知计算。迭代增加式 (3) 中的去雾比例系数 ω , 当前像素块去雾系数 ω_b 满足式 (12) 时, 将对应的 ω 记为当前像素块的比例系数, 并计算相应的透射率值, 其中每次迭代都将 ω_0 增加 0.05, 最大迭代次数为 16 次。

$$\omega_b = \operatorname{argmin}(E_{\text{contrast}} + \lambda_L E_{\text{loss}}) \quad (12)$$

得到相应的大气光矩阵和透射率矩阵后, 依据引导滤波^[17]算法对透射率三通道矩阵进行细化, 使用式 (4) 得到去雾后的图像。

1.2.2 基于光照分量智能感知的图像增强

去雾后的图像经过亮度增强后可显著改善观感。为兼顾算法的简便性, 本文提高了算法的自适应程度和效果。在亮度图指导的彩色图像增强方法^[18]的基础上, 本文提出了一种基于光照分量智能感知的图像增强方法。首先将图像转移至 HSV 空间, 使用其亮度分量 V , 依据 Retinex 理论提取光照分量作为图像增强的基础。提取方法使用的高斯函数 $G(x, y)$ 如式 (13) 所示。

$$G(x, y) = q \cdot e^{-\frac{(x^2 + y^2)}{c^2}} \quad (13)$$

式中, c 为高斯函数的尺度因子; q 为归一化常数。

利用式 (13) 选取不同尺度的高斯函数对亮度分量图进行高斯滤波, 并取均值作为图像光照分布图。

依据图像光照分布图, 本文提出了一种智能感知伽马函数自适应增强方法, 如式 (14) 所示。

$$R(x, y) = 255 \cdot \left(\frac{F(x, y)}{255} \right)^\gamma, \quad \gamma = 0.5 \frac{I(x, y) - h}{h} \quad (14)$$

式中, $R(x, y)$ 为输出图像; $F(x, y)$ 为输入图像; $I(x, y)$ 为提取的光照分量; h 为自适应感知因子, 如式 (15) 所示。

$$h = 0.8 (\max(I(x, y)) - \min(I(x, y))) \quad (15)$$

通过上述增强, 去雾后图像亮度得到增强, 整体观感得到较大改善, 优化了去雾效果。

1.2.3 算法实现

根据上述内容, 提出基于智能感知的腹腔镜图像去烟雾算法流程, 如图 2 所示。首先将图像进行自适应大气光提取, 并基于智能感雾密度估计模型计算和细化图像透射率, 再进行去雾处理, 之后对图像进行光照分量提取和亮度增强操作, 得到输出图像。

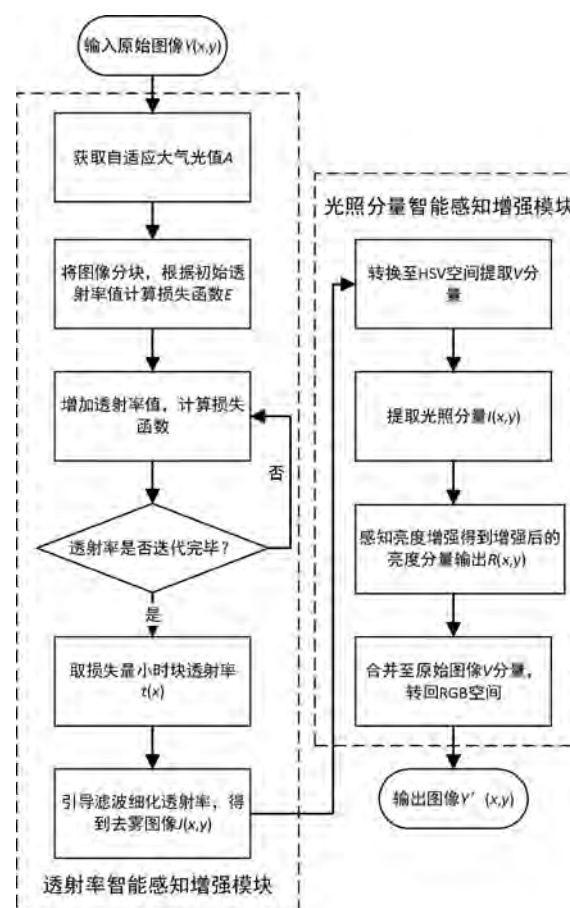


图 2 算法流程

Fig.2 Flow chart

2 结果与评价

2.1 图像数据

本文使用的腹腔镜图像数据来自某国产品牌的 4K 分辨率高清腹腔镜系统保存的手术视频和某国外品牌的 1080P 分辨率腹腔镜系统保存的手术视频。两段视频包含了不同光照和烟雾条件下的腹腔镜手术过程。本文将这两段视频中有烟雾的视频段分别每间隔 5 帧提取视频帧,保存成静态图像。每段视频保存 100 帧,共 200 帧图像,作为算法评估数据集。

2.2 结果

图 3 和图 4 分别展示了 1 张 1080P 含雾腹腔镜图像和 1 张 4K 分辨率含雾图像对应的去雾结果,其中

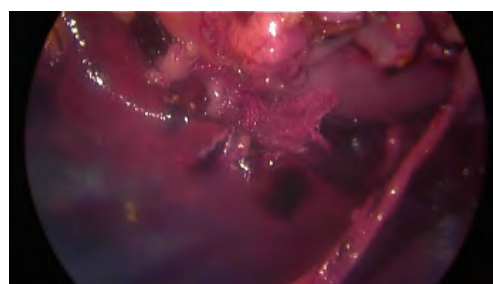
(a) 为原始图像, (b) ~ (e) 分别为文献[4]、[5]、[10]及本文的去雾效果展示。

2.3 主观评价

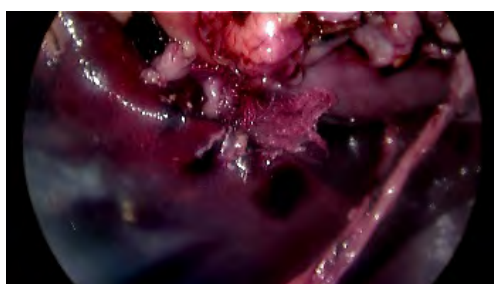
通过观察图 3 和图 4 可知,文献[4]的方法结果不够理想,且视野内边缘保持较差。文献[5]相比其他方法,对比度过增强导致图像颜色较深,不易观察。文献[10]在色彩还原、细节保持和去雾效果上较上述两种方法有一定改善。本文方法保留了文献[10]的优点,在两种分辨率图像上进一步减少了雾含量,并通过智能感知图像增强较为明显地改善了图像颜色 and 对比度,使去雾后的图像更加利于观察。



(a) 原始图像



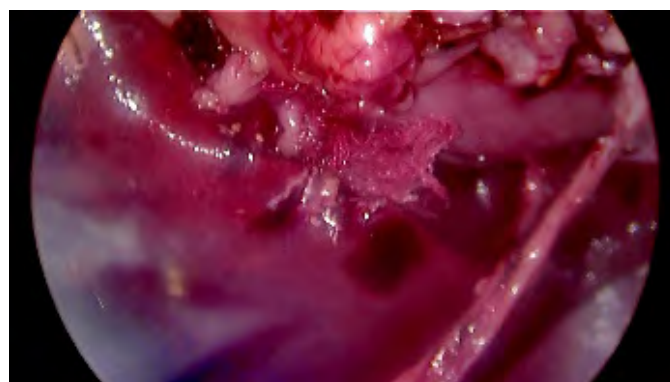
(b) 文献[4]的结果



(c) 文献[5]的结果



(d) 文献[10]的结果



(e) 本文的结果

图 3 1080P 结果展示

Fig.3 1080P result display

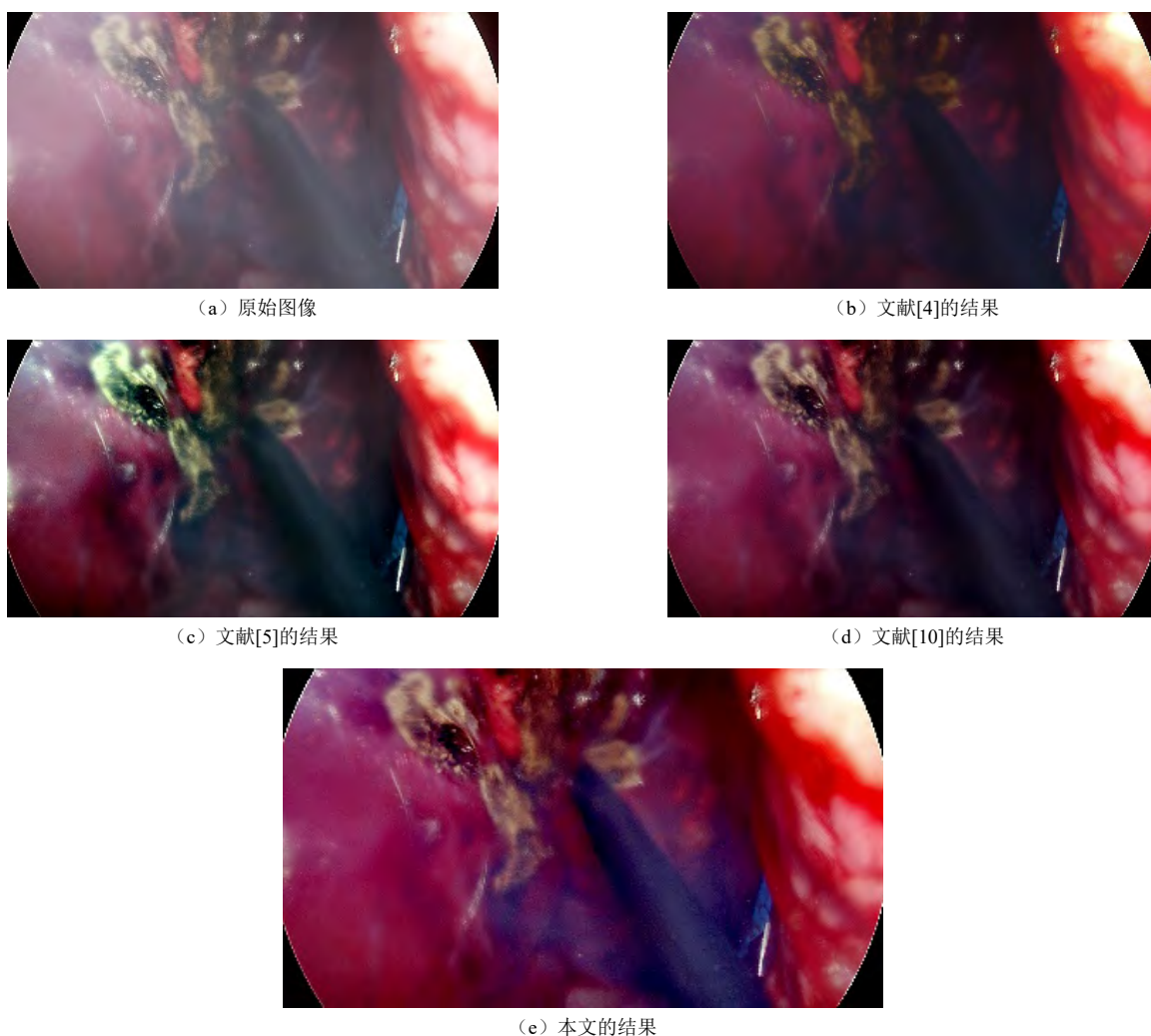


图 4 4K 结果展示

Fig.4 4K result display

2.4 客观评价

为了更加客观地说明图像的去雾效果,本文采用了一种无参考感知雾密度客观评价指标对各方法结果进行评估。该指标由 Lark 等^[19]于 2015 年提出,通过不同类型的图像统计特征来确定图像的雾密度,无须依赖透射率图、原始无雾参考图像和人类评级辅助训练,是一种较为全面和客观的图像去雾评价方法。

通过衡量自然含雾图像和无雾图像的上述图像统计特征的代表值,针对当前待评测图像建立感知雾密度指标 D ,如式(16)所示。

$$D = \frac{D_f}{D_{ff} + 1} \quad (16)$$

式中, D_f 为根据上述 12 个指标计算的无雾图像统计

量代表值与当前图像统计量的距离; D_{ff} 为含雾图像代表值与统计量的距离。图像含雾程度越高,其与含雾图像代表值的距离越近,图像感知雾密度越大。

上述 12 个图像评价特征描述符如表 1 所示,其中序号 1 为图像 MSCN 系数的方差;序号 2 和 3 为目标像素垂直方向像素 MSCN 乘积的方差;序号 4 为局部标准偏差衡量的图像锐度;序号 5 为对应锐度的变化系数;序号 6~8 分别为灰度颜色、黄蓝通道和红绿通道的对比度能量;序号 9 为图像熵;序号 10 为文献[4]提出的暗通道先验理论所代表的暗通道值;序号 11 为 HSV 空间下的饱和度指标;序号 12 为计算均值和方差的色彩描述指标。这 12 个指标分别从不同的方面对图像的雾密度特征进行了表达,覆盖较为全面。

表 1 评价特征描述符
Tab.1 Evaluation feature descriptor

序号	特征描述符
1	MSCN 系数方差
2,3	MSCN 系数垂直乘积方差
4	图像锐度
5	锐度变化系数
6,7,8	对比度能量
9	图像熵
10	逐像素暗通道值
11	HSV 空间图像饱和度指标
12	图像色彩描述指标

本文基于 3.1 中的评估数据集,将各方法对应的感知雾密度评价结果绘制在统计折线图中,如图 5 所示。其中,(a)为 1080P 分辨率光照场景图像的统计

规律,(b)为 4K 分辨率光照场景图像的统计规律。

由图 5 可知,在两种分辨率的雾密度统计中,文献[5]所提算法表现出的稳定性不够理想,在 1080P 图像的实验中较为明显,个别图片雾密度下降幅度较大,低于本文提出的算法。文献[4]所提算法作为经典的暗通道先验算法,对图像进行处理后,整体雾密度值依然较高。文献[10]所提算法的整体效果与本文的算法较为接近,但仍然普遍高于本文的算法。因此,本文采取的图像增强方法相较于其他 3 种算法有更理想和稳定的雾密度值,对整体雾密度的降低有较好的效果。综合两种分辨率图像的结果,文献[4]、[5]、[10]所提算法和本文算法得到的指标平均值分别为 1.191、1.197、0.813 和 0.712,本文的算法相较于文献[4]、[5]和[10],指标分别降低了 67.3%、68.1%和 14.2%。

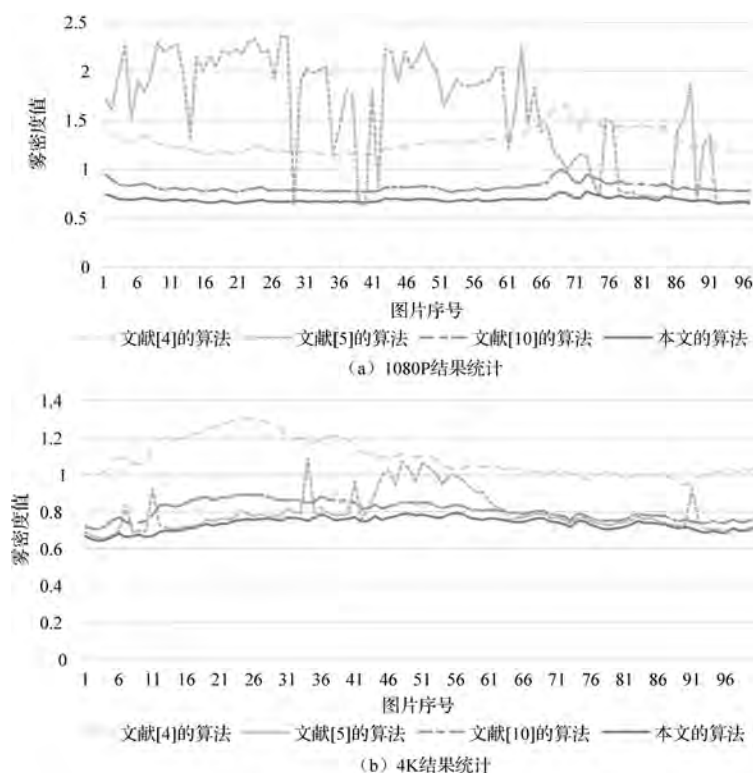


图 5 感知雾密度统计结果

Fig.5 Statistical results of perception fog density

3 结论

本文提出了一种基于智能感知的腹腔镜图像去雾算法,其中对大气光值采用智能感知像素权重的计算方法。本文提出了一种雾密度智能感知透射率计算模型和基于智能感知的图像增强方法,更加准确地计

算了去雾模型中的大气光和透射率值,改善了去雾后图像的观感。在一种综合感知雾密度评价模型中,本文的算法相较其他对照模型,取得了最低的分。

通过实验,本文的算法还存在以下不足。①在烟雾较浓的情况下,由于图像细节纹理和颜色的缺失导

致最终的去雾结果不够理想,针对此问题,将进一步对大气光计算进行智能感知优化,提高去雾效果。②在对单幅图像的计算中,本文显示了较好的还原程度,但在应用于视频的连续帧时,连续帧之间出现了不稳定的闪烁现象,这是因为智能感知的阈值只考虑了单幅图像的情况,没有考虑连续帧之间的特点。后续工作会将上述智能感知算法扩展到帧之间的运算中,增强算法对视频处理的稳定性,以提高本文算法在视频处理中的可用性。

参考文献

- [1] 陈东, 赵建, 曹锐. 一种具有加热去雾功能的内窥镜: CN214906599U[P]. 2021[2023-01-06].
CHEN Dong, ZHAO Jian, CAO Rui. Endoscope with heating and defogging function: CN214906599U[P]. 2021[2023-01-06].
- [2] 王丽丽, 王芳, 孙梅林, 等. 一次性内窥镜球囊外套管: CN216090438U[P]. 2021[2023-01-06].
WANG Lili, WANG Fang, SUN Meilin, *et al.* Disposable endoscopic balloon outer sleeve tube: CN216090438U[P]. 2021[2023-01-06].
- [3] 赵磊, 韦巍, 姜鹏, 等. 冲洗吸引管及手术装置: CN217187392U[P]. 2022[2023-01-06].
ZHAO Lei, WEI Wei, JIANG Peng, *et al.* Flushing suction tubing and surgical devices: CN217187392U[P]. 2022[2023-01-06].
- [4] HE K, SUN J, TANG X O. Single image haze removal using dark channel prior[C]// 2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. IEEE: 2009, 1956-1963.
- [5] 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.
- [6] 王诗毅, 姚信威, 姚远. G-SVD: 一种基于高斯卷积和 SVD 的暗通道去雾算法[J]. **小型微型计算机系统**, 2021, 42 (4): 810-815.
WANG Shiyi, YAO Xinwei, YAO Yuan. G-SVD: a dark channel dehazing algorithm based on gaussian convolution and SVD[J]. **Journal of Chinese Computer Systems**, 2021, 42(4): 810-815.
- [7] 陈玮, 陈永顺, 尹钟. 结合天空分割和条件生成对抗网络的单幅图像去雾[J]. **小型微型计算机系统**, 2021, 42 (7): 1435-1440.
CHEN Wei, CHEN Yongshun, YIN Zhong. Image dehazing by sky segmentation and conditional generative adversarial network[J]. **Journal of Chinese Computer Systems**, 2021, 42(7): 1435-1440.
- [8] LUO X B, YANG F, ZENG H Q, *et al.* Endoscopic video defogging using luminance blending[J]. **Healthcare Technology Letters**, 2019, 6(6): 280-285.
- [9] SAJEEVU S, ANISH B. Visibility driven contrast enhanced surgical defogging[C]//2019 2nd International Conference on Signal Processing and Communication. Coimbatore. IEEE:2019, 143-147.
- [10] 郭志飞, 张仲亮, 梁江荣, 等. 4K 内窥镜图像去雾方法、装置、电子设备及存储介质: CN114066780A[P]. 2022[2023-01-06].
GUO Zhifei, ZHANG Zhongliang, LIANG Jiangrong, *et al.* 4K endoscopic image defogging method, apparatus, electronics and storage media: CN114066780A[P]. 2022[2023-01-06].
- [11] 马悦. 基于条件生成对抗网络的医学手术图像去烟算法[J]. **计算机与现代化**, 2021, 2021 (1): 50-55.
MA Yue. Smoke removal algorithm of medical operation image based on conditional generative adversarial network[J]. **Computer And Modernization**, 2021, 2021(1): 50-55.
- [12] 李云红, 于惠康, 马登飞, 等. 改进迁移学习的双分支卷积神经网络图像去雾[J]. **北京航空航天大学学报**, 2022, 1-11.
LI Yunhong, YU Huikang, MA Dengfei, *et al.* Improved transfer learning two-branch convolutional neural network image dehazing[J]. **Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics**, 2022, 1-11.
- [13] 李鹏泽, 李婉, 张选德. 高频信息对齐的多尺度融合去雾网络[J]. **液晶与显示**, 2023, 38 (2): 216-224.
LI Pengze, LI Wan, ZHANG Xuande. Multi-scale fusion dehazing network for high-frequency information alignment[J]. **Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays**, 2023, 38(2): 216-224.
- [14] 林森, 王金刚, 高宏伟. 基于全局补偿注意力机制的战场图像去雾[J/OL]. **兵工学报**: 1-10[2023-02-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2176.TJ.20221229.1137.003.html>.
LIN Sen, WANG Jingang, GAO Hongwei. Battlefield image dehazing based on global compensation attention mechanism[J/OL]. **Acta Armamentarii**: 1-10[2023-01-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2176.TJ.20221229.1137.003.html>.
- [15] WANG W H, WU X J, YUAN X H, *et al.* An experiment-based review of low-light image enhancement methods[EB/OL]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9088214>, 2020.
- [16] RAHMAN Z U, JOBSON D J, WOODILL G A. Retinex processing for automatic image enhancement[C]//Human Vision and Electronic Imaging VII. International Society for Optics and Photonics, 2004: 100-110.
- [17] JIA Y X, RONG C Z, CHENG W, *et al.* Research on the decomposition and fusion method for the infrared and visible images based on the guided image filtering and Gaussian filter[C]// 2017 3rd IEEE International Conference on Computer and Communications (ICCC). IEEE, 2017.
- [18] LEE S, KWON H, *et al.* A space-variant luminance map based color image enhancement[J]. **IEEE Transactions on Consumer Electronics**, 2010, 56(4): 2636-2643.
- [19] LARK K C, JAEHEE Y, ALAN C B. Referenceless prediction of perceptual fog density and perceptual image defogging[J]. **IEEE Transactions on Image Processing**, 2015, 24(11): 3888-3901.