

雾霾天气下光源目标检测算法

谢艳丽^{1,4}, 姜志³, 王军^{1,2,4}, 吴云鹏¹

¹苏州科技大学电子与信息工程学院, 江苏 苏州 215009;

²中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033;

³中国白城兵器试验中心, 吉林 白城 137001;

⁴近地面探测技术重点实验室, 江苏 无锡 214035

摘要:针对雾霾天气下的光源运动目标清晰度低、轮廓模糊的问题,以火炮射击空中光源目标测量火炮跳角为研究背景,提出基于边窗均值滤波的雾霾天气下目标检测算法。首先在雾天退化模型基础上,使用边窗均值滤波算法对初始透射率进行改进,保留图像的轮廓边缘,然后通过平均修补块方法求出大气光值并复原出原始图像。最后通过奇异值分解的方法,判断光源运动目标和天空背景的相近程度,动态改变高斯混合模型的判别阈值。通过不同去雾算法的主观和客观分析以及光源微小运动目标的检测分析,所设计算法的目标检测清晰度更好。实验结果表明,该算法耗时较少,平均检测精度可达90%,能够准确、高效地检测出光源运动目标。

关键词:图像去雾;边窗均值滤波;透射率优化;平均修补块;奇异值分解;光源目标检测

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A **doi:** 10.14016/j.cnki.jgzz.2021.11.046

Algorithm for detecting drone light source target in foggy weather

XIE Yanli^{1,4}, JIANG Zhi³, WANG Jun^{1,2,4}, WU Yunpeng¹

¹Suzhou University of Science and Technology, Suzhou Jiangsu 215009, China;

²Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

³Center of Arms Experiment of Baicheng, Baicheng Jilin 137001, China;

⁴Science and Technology on Near-Surface Detection Laboratory, Wuxi Jiangsu 214035, China

Abstract: In order to solve the problems of low definition and fuzzy contour of moving target in haze weather, a target detection algorithm based on edge window mean filter is proposed in this paper. Firstly, the edge window means filtering algorithm based on the fog degradation model is used to improve the initial transmittance and preserve the contour edge of the image. Then, the atmospheric light value is calculated by the average patch and the original image is restored. Finally, singular value decomposition is used to judge the similarity between moving object and sky background, and the threshold of GMM is changed dynamically. Through the subjective and objective analysis of different defogging algorithms and the detection analysis of light source micro moving target, the target detection clarity of the designed algorithm is better. The experimental results show that the algorithm consumes less time, and the average detection accuracy can reach 90%. It can detect the moving object of light source accurately and efficiently.

Key words: image dehazing; side window mean filter; transmittance optimization; average patch; SVD; light source target detection

收稿日期: 2021-04-28

基金项目: “十三五”江苏省重点学科项目(No. 20168765)、江苏省研究生科研创新项目(No. KYCX17_2060)、江苏省研究生工作站项目、近地面探测技术重点实验室基金(No. TCGZ2018A005)

作者简介: 谢艳丽(1996-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 数字图像处理和光电信息检测。E-mail: 630004463@qq.com

通信作者: 王军(1979-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 图像处理技术和光电测控技术。E-mail: wjyh@126.com

1 引言

近年来的环境污染导致很多城市雾霾天气频发,雾霾天气不仅对人体健康有一定的危害,对人们的出行造成不便,还会干扰图像后续的目标检测。因此,消除雾霾并恢复较为清晰的原始图像,对提高运动目

标的检测精度具有重要的意义。

图像去雾算法主要分为三大类^[2]。第一种是图像增强去雾算法,通过增强对比度,突出图像细节,以此从视觉上消除雾霾。第二种是图像复原去雾算法,通过雾天退化模型估算参数,实现场景复原,去除雾霾。第三种是基于深度学习的图像去雾算法,通过大量样本训练,训练出图像去雾网络,恢复无雾图像。Fattal 通过物体表面的反射率和透射率的局部不相关性估计出透射率,但在浓雾天气下处理效果不明显^[3]。He 通过统计总结提出暗通道先验去雾算法,但会造成图像边缘细节丢失^[4]。Wang 对不同频率的图像块作不同的图像增强以此去除雾霾^[5]。Meng 通过限制透射率来获得去雾效果,但会导致边缘细节模糊^[6]。Zhu 采用了较小的散射系数避免了图像过增强问题,但去雾不彻底^[7]。Li 提出了基于深度学习的去雾算法,利用一种端到端的去雾网络模型,直接得到去雾图像,但训练样本数多,训练时间较长。

以火炮射击空中光源目标从而测量火炮跳角为研究背景,针对雾霾天气下光源目标不清晰、轮廓模糊的问题,提出一种基于边窗均值滤波的暗通道去雾算法和基于奇异值分解的改进高斯混合模型微小运动目标检法相结合的算法。提出的雾霾天气下的空中光源目标检测算法的检测精度高,对光源目标的检测可以取得良好的效果。

2 暗通道先验去雾算法

2.1 大气散射模型

随着空气污染的加剧,大气中悬浮颗粒越来越多,在雾霾天气条件下,散射效应现象加剧,从而导致视觉模糊等现象。

经典的大气散射模型分为两部分:目标反射光能量衰减后的光强和环境光。可用公式(1)表示如下:

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

其中, $I(x)$ 表示雾天图像, $J(x)$ 表示要恢复出的无雾清晰图像, A 表示全局大气光值, $t(x)$ 表示透射率。通过公式转换,可以得出要恢复的图像 $J(x)$ 如公式(2)所示:

$$J(x) = \frac{I(x) - A(1-t(x))}{t(x)} \quad (2)$$

2.2 暗通道先验理论

He 等人的暗通道先验规律表明,在局部区域,至少有一个颜色通道的值很小,可用公式(3)表示:

$$J^{\text{dark}}(x) = \min_{c \in \{r, g, b\}} \{ \min_{y \in \Omega(x)} J^c(y) \} \quad (3)$$

其中, J^{dark} 表示 $J(x)$ 的暗原色, c 表示 R 、 G 、 B 这3个

颜色通道, $\Omega(x)$ 表示以 x 为中心的局部区域, y 表示 $\Omega(x)$ 区域上点的坐标。由暗通道先验理论可知:

$$J^{\text{dark}} \rightarrow 0 \quad (4)$$

根据大气散射模型,对(1)式进行变形,可得如下公式(5):

$$\frac{I^c(x)}{A^c} = \frac{t(x)J^c(x)}{A^c} + 1 - t(x) \quad (5)$$

已知全局大气光值 A ,假设透射率恒定不变,设为 $\tilde{t}(x)$,对公式(5)进行 $\Omega(x)$ 内的最小值滤波:

$$\min_{y \in \Omega(x)} \frac{I^c(y)}{A^c} = \tilde{t}(x) \min_{y \in \Omega(x)} \frac{J^c(y)}{A^c} + 1 - \tilde{t}(x) \quad (6)$$

再对公式(6)进行三个通道上的最小值滤波:

$$\min_c \left[\min_{y \in \Omega(x)} \frac{I^c(y)}{A^c} \right] = \tilde{t}(x) \min_c \left[\min_{y \in \Omega(x)} \frac{J^c(y)}{A^c} \right] + 1 - \tilde{t}(x) \quad (7)$$

根据公式(3)和公式(4),可得:

$$J^{\text{dark}}(x) = \min_{c \in \{r, g, b\}} \left[\left(\frac{I^c(y)}{A^c} \right) \right] \approx 0 \quad (8)$$

将上式代入公式(7),可得透射率 $\tilde{t}(x)$ 的预估值,如公式(9)所示:

$$\tilde{t}(x) = 1 - \min_c \left[\min_{y \in \Omega(x)} \frac{I^c(y)}{A^c} \right] \quad (9)$$

通过引入一个参数 ω ($\omega \in [0, 1]$),可对所得透射率进行调整,使得图像更自然,如公式(10)所示:

$$\tilde{t}(x) = 1 - \omega \min_c \left[\min_{y \in \Omega(x)} \frac{I^c(y)}{A^c} \right] \quad (10)$$

选取暗通道图中前0.1%的最亮像素,这些像素在有雾图像 $I(x)$ 中的对应位置上最大亮度像素点的值作为该图像的全局大气光值 A 。

由公式(2)可知,透射率 $t(x)$ 偏小, $J(x)$ 偏大,因此需要设置一个下限透射率值 t_0 ,避免透射率 $t(x)$ 过小而导致恢复的图像向白场过度,一般取值0.1,所以恢复出的无雾图像公式如式(11)所示:

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

3 改进算法

3.1 算法流程

首先通过边窗均值滤波优化初始透射率,初步解决轮廓模糊问题,获得更准确的透射率,再采用平均修补块方法估算大气光值,并根据大气散射模型恢复出无雾图像。然后通过奇异值分解的方法判断光源目标与天空背景之间的相似程度,根据相似程度实时改变高斯混合模型的判别阈值,提高微小运动光源目标的检测准确度。算法流程图如图1所示。

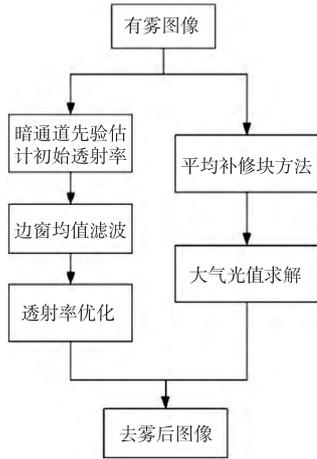


图1 算法流程图

3.2 基于边窗均值滤波的透射率优化

传统滤波使用全窗口回归,即把窗口中心位置放在待处理像素的位置,这种情况下像素还会沿着图像边缘扩散。边窗滤波(SWF, Side Window Filter)作为一种局部线性滤波,既可以去除图像噪声,又能保护边缘信息^[8]。将边窗滤波子窗口的边缘放在预处理像素的位置,每个像素看成一个潜在的边缘,并在此像素周围生成多个局部窗口,每个窗口用窗口的一条边或一个角来标记目标像素,避免像素沿图像的法线方向扩散,以此保护图像的边沿细节^[9]。

滤波时将像素点与滤波器的边沿对齐,共有8个不同方向的滤波窗口,分别为上(U)、下(D)、左(L)、右(R)、西北(NW)、西南(SW)、东北(NE)和东南(SE)。

假设像素*i*为预处理像素,像素*j*为其相邻像素,像素*j*基于边窗函数*F*给出的对应权重定义为 ω_{ij} 。

将预处理像素通过不同边窗*n*加权滤波之后的结果定义为 I_n ,有:

$$I_n = \frac{1}{N_n} \sum_{j \in \omega_n^i} \omega_{ij} q_j \quad (12)$$

其中, N_n 为单个边窗的权重之和,即:

$$N_n = \sum_{j \in \omega_n^i} \omega_{ij} \quad n \in S \quad (13)$$

从8个不同方向的结果中找出一个边窗类型,使得边窗滤波结果更接近输入,这样可以保证输出图像能保留原图像信息。求取两者之间的二范数,即将原始图像与滤波器输出图像的差异可公式化为代价函数 E_i :

$$E_i = \|q_i - I_n\|_2^2 \quad (14)$$

所以最佳边窗可表示为:

$$I_m = \operatorname{argmin}_{n \in S} E_i = \operatorname{argmin}_{n \in S} \|q_i - I_n\|_2^2 \quad (15)$$

这样可将滤波结果作为最终的边窗滤波结果,达到保边效果。

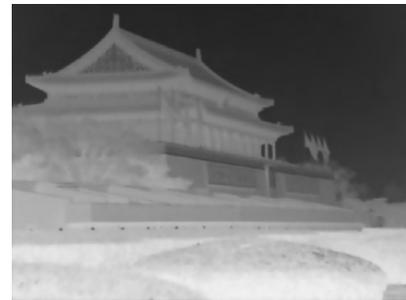
为了说明边窗均值滤波的保边效果,分别求取文献^[4]和本算法的透射率图,本算法的透射率细节更加丰富,边缘轮廓更清晰,如图2(c)所示。



(a) 有雾图像



(b) 文献[4]透射率



(c) 本算法透射率

图2 透射率对比

3.3 大气光值估计

如果有雾图像中有光源或者白色物体,那么暗通道先验去雾原理会过高估计大气光值,恢复出的图像也会相应变暗^[10]。为了更准确地估计大气光值,提出一种新方法:

1) 从三个颜色通道获得最小通道图 C_m ,如式(16)所示:

$$C_m = \min_{c \in \{r, g, b\}} (I^c(y)) \quad (16)$$

2) 对最小通道图 C_m 执行了最大的修补操作,如式(17)所示:

$$A_\Omega^c = \max_{y \in \psi(z)} (C_m) \quad (17)$$

3) 采用平均值思想来选择修补块 $\psi(z)$ 的大小。

首先,选择一个有雾图像的15%大小的色块以适应大范围的各种可见光。即使是大色块也容易受到多个光源的影响,这会导致估算结果不准确且颜色变化。其次,选择一个有雾图像的5%大小的邻域,以防止由于不完全使用先验知识而导致的错误估计。最后,可以根据不同大小的 Ω 修补块获得最佳的局部大气光值,如式(18)所示:

$$A^c = \sum_{i=1}^k A_{\Omega_i}^c / k \quad (18)$$

其中, $A_{\Omega_i}^c$ 是不同的大气值估算值, k 是估算的最大操作次数。与暗通道先验相比,改进的方法鲁棒性更强,更方便。

4 光源运动目标检测算法

目标检测除了在智慧城市与交通以及视频监控等领域有不少应用场景,在军事侦察领域也不断发展,高效准确的算法对军事侦察任务的完成有极大意义。常用的动态目标检测算法有帧差法、背景差分法、光流法等,但其具有误差大、精准度低、实用性小的缺点,并且检测速度慢^[11]。

空中光源运动目标微小,占整个图像的像素比例少。当图像背景复杂时,很难准确提取光源目标,因此使用高斯混合背景建模的目标检测算法来进行光源运动目标检测,但高斯混合建模算法没有考虑背景与目标之间相似程度,用来区分目标和背景的判别阈值没有改变,当出现光源目标与天空背景难以区分的情况时,对目标的检测存在较大误差。对高斯混合建模算法加以改进,提出一种基于奇异值分解的高斯混合模型动态阈值更新算法。通过奇异值分解的方法判断光源目标与天空背景之间的近似度,根据不同近似度动态调整高斯混合模型的判别阈值,实现对微弱运动光源目标的准确检测。

4.1 基于奇异值分解的高斯混合模型动态阈值更新

选取一个参量来表示运动目标与参考背景的相近程度,通过求解参量的取值范围改变高斯混合模型中的判别阈值,提高光源目标检测的准确率。在实际图像中,由于多种因素的影响,光照并不是均匀分布的,同样因为目标的运动,图像中目标的位置也在不停变化。所以,物体颜色特征可由一个参量体现,这个参量可反映目标与背景相似程度,且几乎不受光照的影响。

参照兰伯特光照模型理论,图像中某一点的像素值 $I(x,y)$ 可由下式表示:

$$I(x,y) = R(x,y)L(x,y) \quad (19)$$

其中, $L(x,y)$ 为光照分量, $R(x,y)$ 为 $L(x,y)$ 对应的反

射分量。 $L(x,y)$ 函数由物体表面的法线方向和光照的照射方向形成的夹角 θ 决定,表达式如下所示:

$$L(x,y) = \begin{cases} c_a + c_p \times \cos\theta & \text{照亮区域} \\ c_a + t \times c_p \times \cos\theta & \text{半影区域} \\ c_a & \text{本影区域} \end{cases} \quad (20)$$

上式中 c_a 为环境的光强度, c_p 为光源强度, t 为半影区域强度, t 由光源以及实际场景中的几何关系确定。用上式(20)中三种光照条件照射图像中的同一个区域,结果用 B_1 、 B_2 和 B_3 来表示。因为照射的是同一个区域,所以 B_1 、 B_2 和 B_3 图像区域的反射函数 $R(x,y)$ 相同。根据公式(20),能够得到:

$$B_2 = K_2 \times B_1 \quad (21)$$

$$K_2 = (c_a + t \times c_p \times \cos\theta) / (c_a + c_p \times \cos\theta) \quad (22)$$

$$B_3 = K_3 \times B_1 \quad (23)$$

$$K_3 = c_a / (c_a + c_p \times \cos\theta) \quad (24)$$

使用奇异值分解实现正交分解,先将整个图像分成 $N \times N$ 的更小图像块 B ,然后对每一个更小图像块 B 进行奇异值分解,则图像块上每个点的像素值表示为:

$$B(x,y) = USV^T \quad (25)$$

其中, B 的正交基底由正交矩阵 U 和 V 的列向量组成, S 对角矩阵是由奇异值(S_1, \dots, S_N)按降序排列组成。奇异值越大,表示列向量在 B 中所占的权重越大,比例越大^[12]。

因为上述 S_1, \dots, S_N 是按降序排列,所以奇异值 S_1 最大, S_N 最小。 S_1 表示光照强度, (S_2, \dots, S_N)表示图像各个空间像素的相对位置关系。所以,可以通过求解奇异值(S_2, \dots, S_N)和最大值 S_1 之间的比值,来获得图像单位亮度的水平特征值,如下式:

$$f^i(x,y) = S_i / S_1, i=2, \dots, N \quad (26)$$

分别对 B_1 、 B_2 和 B_3 进行奇异值分解,得: $\bar{B}_k = U_k S_k V_k$,由上式(25)、式(26)可得:

$$S_2 = K_2 \times S_1 \quad (27)$$

$$S_3 = K_3 \times S_1 \quad (28)$$

将式(27)、式(28)代入式(26)得:

$$f_2^i(x,y) = (K_2 \times S_1^i) / (K_2 \times S_1^1) = f_1^i(x,y) \quad (29)$$

$$f_3^i(x,y) = (K_3 \times S_1^i) / (K_3 \times S_1^1) = f_1^i(x,y) \quad (30)$$

根据上述公式推导可知: B_1 、 B_2 和 B_3 具有一样的单位水平特征值,并没有受到光照条件的影响。所以,只需先计算出单位亮度水平特征值,然后得出光照不变特征向量。通过比较目标与背景两个特征向量 f 的距离,得出目标与背景之间的相似程度^[13]。

因为光源目标跟随运动,而图像中目标和背景的差异较大,所以奇异值差异较大。用马氏距离对特征向量相似性进行衡量^[14],计算公式如式(31)所示:

$$d(x,y) = \sqrt{(x-y)^T \Sigma^{-1}(x-y)} \quad (31)$$

通过上式得出的马氏距离可以反映出运动目标和背景的相近程度,由 d 的取值范围不同,对高斯混合模型设置不同的判别阈值^[15]。通过改变判别阈值中参数的值来实现高斯混合模型判别阈值的动态调整。其中关于马氏距离的函数关系如下式(32)所示:

$$D = \begin{cases} 1.25 & d \leq 2 \\ 1.5 + \log_{2.5}(d-1) & 2 < d \leq 10 \\ 3.75 & d > 10 \end{cases} \quad (32)$$

当目标与背景明显容易区分时 ($d > 10$), 将判别阈值设置为高斯混合模型的 1.5 倍。当目标与背景相似程度很高时 ($d \leq 2$), 将判别阈值缩小到高斯混合

模型的一半(上文中高斯混合模型的判别阈值为 2.5σ)。其他处于上面两者之间的情况,由公式计算动态调整判别阈值。

5 实验结果及分析

在 Windows10 操作系统下,利用 Matlab(R2016a) 进行实验。先将本去雾算法与文献[4]、文献[7]两种去雾算法进行对比,分别从主、客观两方面对去雾效果进行分析,再将本去雾算法后的光源图像进行目标检测,客观分析结果。

5.1 主观分析

挑选 3 幅经典的有雾图像“天安门”、“道路”和“建筑”,使用三种不同的去雾算法进行去雾,效果如图 3 所示。



图 3 各算法去雾效果图

主观分析上,3 种去雾算法对雾霾图像都有一定的去雾效果。从图 3 可以看出,文献[4]的算法在处理天空区域时,有光晕和失真现象,且图像的明亮部分色彩偏暗,如文献[4]去雾的“道路”图像。文献[7]复原出的图像有轻微的薄雾现象,如文献[7]去雾的“天安门”图像。综合对比三种去雾算法,本去雾算法在天空区域不易产生光晕,且颜色正常,不过于饱和,细节较多,效果较好。

5.2 客观分析

由于主观分析不具完全的代表性,选取信息熵、

峰值信噪比(Peak Signal to Noise Ratio, PSNR)、平均梯度、结构相似性(Structural Similarity, SSIM)四项指标,对三种算法去雾后的图像定量分析,说明所提方法的有效性^[16]。三种算法对不同图像的去雾能力比较见表 1 所示。

信息熵可以直接反映图像信息的丰富程度,公式如(33)所示:

$$H = - \sum_{i=1}^{256} P_i \log_2 P_i \quad (33)$$

i 表示图像中的某一像素, P_i 表示像素 i 在图像中出

现的概率。信息熵越大,图像的质量越好,细节保留更多。

峰值信噪比(PSNR)提供了一个客观评价标准,值越大,表明图像失真越小,公式如式(34)所示:

$$PSNR = 10 \cdot \ln \frac{255^2}{3 \frac{1}{WH} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N \sum_{c=1}^3 (J^c(x,y) - GT^c(x,y))^2} \quad (34)$$

上式中, J 表示有雾图像, GT 表示同样的无雾场景, W,H 表示图像的宽和高, (x,y) 表示图像的像素坐标, c 表示3个颜色通道。

平均梯度表示图像细节的清晰程度,值越大,表示图像恢复更好^[17]。计算公式如式(35)所示:

$$G = \frac{1}{(W-1)(H-1)} \sqrt{\left(\frac{\partial J(x,y)}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial J(x,y)}{\partial y}\right)^2} \quad (35)$$

其中, $\frac{\partial J(x,y)}{\partial x}$ 、 $\frac{\partial J(x,y)}{\partial y}$ 表示图像的水平梯度和垂直梯度。

结构相似性(SSIM)表示图像结构信息的保留程度,一般值越大,结构保留越细致。计算式如式(36)所示:

$$SSIM = \frac{(2u_x u_y + c_1)(2\sigma_x \sigma_y + c_2)}{(u_x^2 + u_y^2 + c_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c_2)} \quad (36)$$

u_x, u_y 分别表示图像 J 和 GT 的亮度均值, σ_x, σ_y 表示图像 J 和 GT 的标准差, c_1 和 c_2 表示常量。

表1 三种算法对不同图像的去雾能力比较

有雾图像	去雾算法	信息熵	峰值信噪比	平均梯度	结构相似性
天安门	文献[4]算法	7.61	20.36	11.54	0.71
	文献[7]算法	7.60	27.51	14.75	0.82
	本算法	7.62	27.73	15.19	0.87
道路	文献[4]算法	7.41	21.27	15.37	0.82
	文献[7]算法	7.48	26.33	15.83	0.91
	本算法	7.59	28.25	15.52	0.93
建筑	文献[4]算法	7.60	21.65	14.86	0.88
	文献[7]算法	7.72	28.02	15.73	0.94
	本算法	7.76	28.57	16.46	0.98

表1可以看出(粗体表示指标最优项),文献[7]在“道路”图像上的平均梯度比本算法略高。除此之外,本算法处理的三幅图像的其他三种指标都比另外两种算法略高,边缘细节更多,保边效果较好,对天空区域的去雾恢复更好,符合主观分析。

将传统的高斯算法与目标检测算法在时间和检

测准确率两个方面分别对比,结果见表2所示。由表2可知:在运行时间上,本算法耗时较少;在检测精确度上,本算法的平均准确率可达90%。

将本去雾算法运用到有雾光源图像中,得到的效果图如图4(b)所示,天空区域去雾效果明显,对比度高,较好地保留光源的边缘信息。再通过目标检测算法得到定性结果如图4(c)所示,光源目标的边缘被完整提取出来,轮廓清晰。

表2 两种目标检测算法结果对比分析

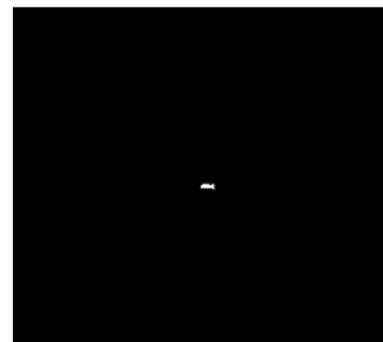
性能指标	目标检测算法	第52帧	第226帧	第400帧
运算时间/ms	传统高斯算法	6.25	28.25	50.02
	本算法	6.11	27.47	48.74
检测精度/%	传统高斯算法	82.76	86.35	86.12
	本算法	90.80	91.34	90.44



(a) 有雾光源图像



(b) 本文去雾结果



(c) 本文目标检测结果

图4 各算法去雾效果图

实验结果显示,当天空区域和目标较为相似时,微小光源运动目标的轮廓能被较快地完整检测。

6 结论

从实验结果得出,使用边窗均值滤波算法对透射率进行改进,保留目标的边缘细节,再用平均修补块方法求出大气光值,去雾图像清晰度得到提高。通过基于奇异值分解的改进高斯混合模型运动目标检测算法,所得光源目标更清晰。应用到雾霾天气下光源目标检测中,本算法的运动目标检测质量更高,更利于检测微小目标,对后续的火炮跳角试验提供更有利的条件。

参考文献

- [1] 王锋,李培灵,梁义涛,等. 基于暗通道先验的图像去雾改进算法[J]. 科学技术与工程,2019,19(33):308-313.
- [2] 郭翰,徐晓婷,李博. 基于暗原色先验的图像去雾方法研究[J]. 光学学报,2018,38(4):113-1222.
- [3] Fattal R. Single image dehazing[J]. Association for Computing Machinery Transactions on Graphics, 2008, 27(3): 721-729.
- [4] He K M. Sun J. Tang X O. Single image haze removal using dark channel prior[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2011, 33 (12): 2341-2353.
- [5] Wang X B. Image enhancement based on lifting wavelet transform[C]//Proceedings of the 4th International Conference on Computer Science & Education. 2009: 739-741.
- [6] Meng G F, Wang Y, Duan J Y, et al. Efficient image dehazing with boundary constraint and contextual regularization[C]//Proceeding of IEEE International Conference on Computer Vision. Sydney, Australia, 2013: 617-624.
- [7] Zhu Qs, 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.
- [8] Yin H, Gong Y, Qiu G. Side window filtering[C]// IEEE CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Long Beach, CA, USA, 2019.
- [9] 吴绪玲. 基于分数阶非线性各向异性扩散的图像去雾算法[J]. 计算机应用与软件,2021,38(02):239-243+298.
- [10] 陈广锋,王军舟. 基于边窗盒子滤波和透射率修正的图像去雾[J]. 应用光学,2020,41(05):947-955.
- [11] 张宁. 基于平台的动态目标检测系统开发[D]. 浙江:浙江大学,2018.
- [12] 李搏轩. 基于图像处理的移动目标测量方法的研究[D]. 黑龙江:黑龙江大学,2016.
- [13] 卢辉斌,赵燕芳,赵永杰等,基于亮通道和暗通道结合的图像去雾[J]. 光学学报,2018,38(11):1115004.
- [14] 陈莹,朱明,刘剑,等. 高斯混合模型自适应微光图像增强[J]. 液晶与显示,2015,30(02):300-309.
- [15] 王军,李云伟,王恺睿. 基于SVD的改进混合高斯模型弱小运动目标检测算法[J]. 实验技术与管理,2019,(06): 182-185.