

雾霾图像增强算法对目标检测性能影响研究

张玥¹, 张琦², 李珣¹, 张蓉蓉³, 贺霞¹, 李彦斌¹

(1. 西安工程大学 电子信息学院, 西安 710048; 2. 西安中冶新材料有限公司, 西安 710061;

3. 西安航天天绘数据技术有限公司, 西安 710061)

摘要: 针对雾霾环境下目标检测率低, 容易造成交通事故等问题, 提出了基于图像增强的动态双阈值算法; 该算法针对雾霾天气下, 传统的检测算法目标检测率低、虚警率高等问题, 利用大气散射模型及联合双边滤波算法首先对原始雾霾图像的增强处理, 然后再进行目标检测; 分别使用动态双阈值、基于均值滤波的动态双阈值、基于直方图均衡化的动态双阈值、基于拉普拉斯算子的动态双阈值目标检测算法对不同程度雾霾环境下的实拍车辆运动视频进行目标检测, 并用 11097 组图像数据对比分析改进算法的最佳检测率、最差检测率、平均检测率和虚警率; 实验结果表明, 改进算法目标检测率高、虚警率低, 有助于减少交通事故, 更加适用于雾霾环境下图像目标检测。

关键词: 雾霾环境; 目标检测; 动态阈值; 图像增强; 检测率

Impacts Analysis of Object Detection Algorithm Considering Image Enhancement in Haze Environment

Zhang Yue¹, Zhang Qi², Li Xun¹, Zhang Rongrong³, He Xia¹, Li Yanbin¹

(1. School of Electronics and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China;

2. Xi'an MCC-CISDI New Materials Corporation, Xi'an 710061, China;

3. Xi'an Aerospace Remote Sensing Data Technology Corporation, Xi'an 710061, China)

Abstract: Considering traffic accidents prone to the cause of lower object detection rate in haze condition, a dynamic dual-threshold object detection algorithm based on image enhancement was investigated in this paper. To cope with the problem of burr and discontinuity caused by the traditional edge detection operator in the severe haze days, an atmospheric scattering model based image enhancing method was put forward to improve the quality of the original image. Then object detection method of dynamic threshold, dynamic threshold based on mean-value filtering, dynamic dual threshold based on histogram equalization and dynamic dual threshold based on Laplace operator were employed to process and analyze the video of vehicle motion under variable haze conditions, and the application scopes and corresponding thresholds of these dynamic dual thresholds were determined. Finally, the best detection rate, the most poor detection rate, the average detection rate and false alarm rate of the improved algorithm are compared with 11097 images. The result illustrates that the improved algorithm is more suitable for object detection in haze condition and can help to reduce the traffic accident.

Keywords: haze environment; object detection; dynamic threshold; image enhancement; detection rate

0 引言

雾霾环境下空气中含有大量的烟尘及尘埃等颗粒物, 与水凝结浮游在空气中, 降低能见度, 使得道路交通环境以及空中目标等监控系统可视性变差, 采集到的图像受到严重影响, 不能准确区分目标与背景, 目标图像信息捕捉难度加大, 给正常的出行带来巨大困扰。对于空中的飞机来说, 雷达的定位存在盲区, 可利用图像进行视觉辅助导航, 但在雾霾等恶劣环境下难以对飞机进行准确定位, 影响机场场面监视和飞行安全。因此, 研究雾霾图像增强算法对目标检测性能影响, 能够提高

目标的检测率, 有助于减少地面交通事故, 保障空中交通安全。

目前已有的目标检测算法和图像增强算法已经很成熟, 针对雾天、雾霾天、雪天和雨天这样特殊天气的图像处理主要集中在图像复原和图像清晰化处理上。如利用大气散射模型和暗原色先验的方法^[1]、四阶偏微分方程方法^[2-3]、自适应滤波的方法^[4]、灰度阈值^[5]的方法对图像进行复原; 利用暗原色的方法^[6-7]和中值滤波的方法^[8]、图像融合的方法^[9]对图像进行去雾化处理; 利用自适应性小波系数阈值处理方法^[10]对图像进行重构等。但由于检测环境的变化、光照强度、遮挡、阴影、天气状况等的干扰, 目标的检测性能都会受到影响, 且没有通用的雾霾环境下目标检测算法。

本文主要研究雾霾环境下图像增强算法对目标检测性能影响, 并通过大量的实验数据标定不同雾霾环境下通用

收稿日期: 2018-07-10; 修回日期: 2018-08-09。

基金项目: 陕西省基础科学研究计划项目(2016JQ5106)。

作者简介: 张玥(1990-), 女, 河南三门峡人, 助理工程师, 主要从事机载防撞系统、图像处理、交通流数据建模等方向的研究。

的目标检测算法。在分析对比已有目标图像检测算法基础上得到动态双阈值算法更适用于雾霾天气下目标检测；在该算法的基础上利用大气散射模型及联合双边滤波算法首先对原始雾霾图像的增强处理，然后再进行目标检测；最后使用动态双阈值、基于均值滤波的动态双阈值、基于直方图均衡化的动态双阈值、基于拉普拉斯算子的动态双阈值算法对不同程度雾霾环境下的实拍车辆运动视频进行目标检测，实验结果表明改进算法识别率高、适用于雾霾环境下图像目标检测。

1 经典图像目标检测算法

在图像目标检测中，可先将目标与背景区域分离，然后再进行目标分析与处理。常用的算法有阈值分割算法^[11]和边缘检测分割算法^[12]。

阈值分割算法是把在阈值范围内、外的像素分成两类，像素灰度在阈值范围内的为一类，像素灰度在阈值范围外的为另一类，临界点可归为任意一类。该算法包括两个步骤：1) 确定分割阈值；2) 将像素点的灰度值与分割阈值进行比较，进行图像像素的分类。阈值 T 的选择直接影响图像分割效果，根据对 T 的不同约束可以得到不同类型的阈值分割方法：全局阈值分割法 (Otsu)^[13]和局部阈值或动态阈值分割法^[14]。

边缘检测分割算法包括提取边界点、剔除某些边界点和填补边界间断点。经典的边缘提取方法是考察图像每个像素在某个邻域内灰度的变化，可以通过微分算子对图像求导数确定。常见的微分算子有 Roberts 边缘检测算子^[15]、Sobel 边缘检测算子^[16]和 Prewitt 边缘检测算子^[17]。选用不同的微分算子，即可得到不同的边缘检测算法。

将上述两种算法用于不同程度污染的雾霾环境下的车辆目标检测，实验结果如图 1 所示。

由图 1 对比可得，雾霾环境下动态双阈值分割算法目标识别率比 Otsu 算法目标识别率高，这是由于雾霾的影响，目标的很多特征信息会被弱化，单一阈值不能满足目标图像分割需求，动态双阈值目标分割算法能根据环境变化调整分割阈值的大小，因此识别率较高。

在轻度霾天时三种边缘检测算子检测到的目标都很清晰；在中度霾天时 Sobel 和 Prewitt 算子对目标边缘的检测效果比 Roberts 要好；但由于污染程度的加深，三种算子对边缘的定位精度均受到影响，出现间断和毛刺；在重度和严重霾天时，三种边缘检测算子对边缘的检测全都出现毛刺和间断，检测结果都不如意。

通过图 1 对两种经典图像目标检测算法对比可得，动态双阈值目标分割算法检测出目标体的像素点更多，得到的目标信息更丰富。由于雾霾环境下目标的边缘及轮廓信息会被弱化，边缘检测算法提取的目标信息会少。因此，动态双阈值目标分割算法更适合用于雾霾环境下目标检测。

2 改进算法

由于雾霾环境下空气中大量的尘埃和烟屑会折射太阳

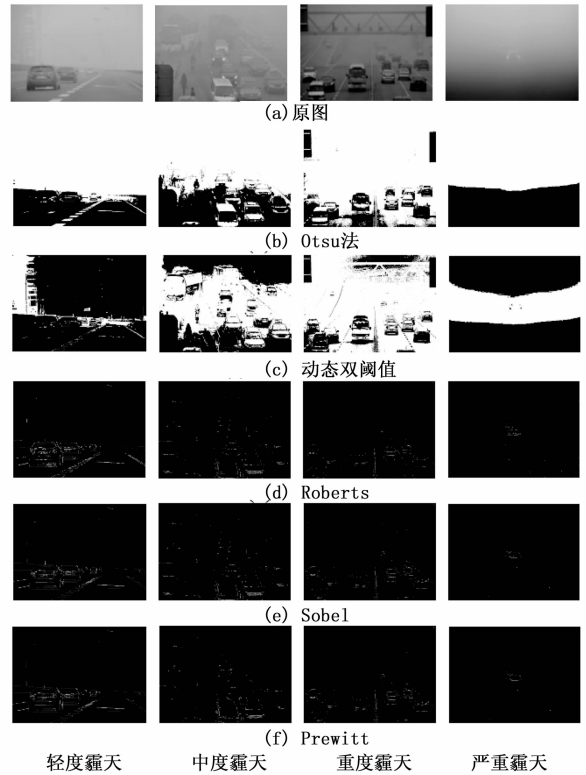


图 1 经典目标检测算法结果对比

光，使整个图像看起来色调相同，目标颜色和纹理等特征都被弱化，信息量减少。因此要想提高雾霾环境下图像目标的识别率，需对原有算法进行改进。论文利用图像增强算法对原有动态双阈值分割算法进行改进，提出了一种基于图像增强的动态双阈值算法，然后将其运用到目标检测上，提高目标检测性能。

图像增强就是为了改善图像的视觉效果、提高清晰度、突出图像中的某些信息，使图像更有利于各种特征的分析提取和计算机处理。论文选用基于大气散射模型的图像增强方法，该算法是对图像进行分块处理，图像增强效果好。常用的大气散射模型^[18-19]如下：

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

其中： I 是采集到的图像， J 是目标图像， A 为大气光， β 为散射系数， $d(x,y)$ 为场景深度， $e^{-\beta d(x,y)}$ 为透射率。大气散射模型可变形为：

$$J(x,y) = \frac{I(x,y) - A(1 - e^{-\beta d(x,y)})}{e^{-\beta d(x,y)}} \quad (2)$$

由式 (2) 可得，图像增强主要是对 A 、 β 、 d 三个参数的计算和估计。用 $L(x,y)$ 表示大气幕亮度 $A(1 - e^{-\beta d(x,y)})$ ，即： $L(x,y) = A(1 - e^{-\beta d(x,y)})$ ，则式 (2) 可简化为：

$$J(x,y) = \frac{I(x,y) - L(x,y)}{1 - \frac{L(x,y)}{A}} \quad (3)$$

大气光 A 值的推算步骤^[20]如下：1) 从暗通道图中按照亮度的大小取前 0.1% 的像素；2) 在这些位置中，在原始有雾图像 I 中寻找对应的具有最高亮度的点的值，作为 A

的值。

由于图像中雾的浓度越大, 图像的亮度就越大, 因此可用 $I(x, y)$ 的最小颜色分量来粗略预估大气幕亮度^{[6][21-22]}, 即:

$$\tilde{L}(x, y) = \min_{c \in \{R, G, B\}} I(x, y) \quad (4)$$

为了保持更多的图像边界信息, 用非线性滤波器 colfilt 对 $\tilde{L}(x, y)$ 进行滤波。colfilt 模型为 $g = \text{colfilt}(\tilde{L}(x, y), [m, n], 'silding', @fun)$ 。其中 $[m, n]$ 表示掩膜的尺寸, 选择经验值 3×3 ; 'silding' 表示逐个像素的滑动 $m \times n$ 区域; @fun 代表实现滤波的函数, 论文选用最小值滤波函数。将滤波后的结果表示为 $\tilde{L}'(x, y)$ 。

为了保持恢复图像的细节信息, 且保持恢复图像的亮度, 需要利用联合双边滤波算法来细化 $\tilde{L}'(x, y)$ 。双边滤波器的权重由空域和值域平滑函数的乘机给出, 对于图像 $\tilde{L}'(x, y)$ 中的任意一点 P , 滤波结果为:

$$\tilde{L}''(x, y) = \frac{1}{Kp} \sum_{q \in \Omega} \tilde{L}q f(\|p - q\|) g(\|\tilde{L}p - \tilde{L}q\|) \quad (5)$$

其中: f 为高斯中心在 P 点的空域滤波器, g 为中心是 P 点像素值的值域滤波器, Ω 为 f 的空域范围, Kp 为 $f \cdot g$ 滤波权重的和。

将大气光 A 值及两次滤波后的图像数据 $\tilde{L}''(x, y)$ 代入到式 (3) 中, 即可得到增强后的图像数据 $J(x, y)$, 增强后的效果如图 2 所示。

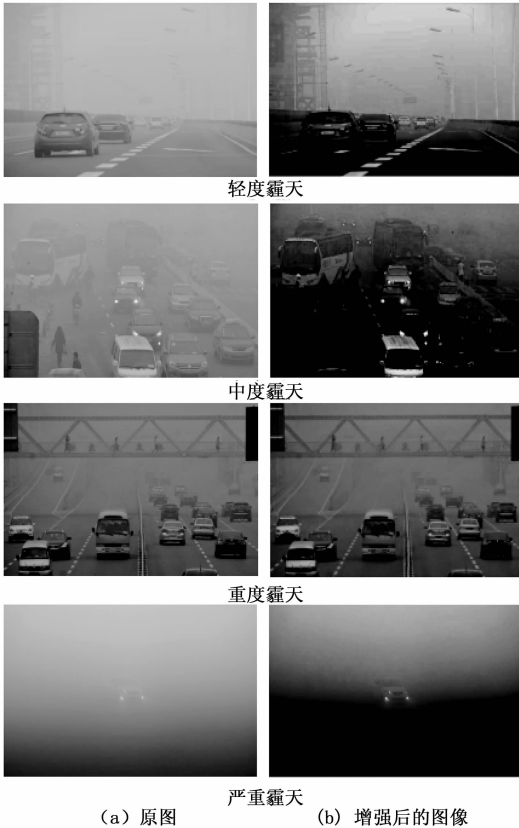


图 2 图像增强结果对比

的目标图像进行增强, 而后再进行目标分割与检测, 表达式如下所示, 其中 $J(x, y) = f(I(x, y))$:

$$g(x, y) = \begin{cases} 1, & J(x, y) \leq T_{h1} \cup J(x, y) \geq T_{h2} \\ 0, & J(x, y) > T_{h1} \cap J(x, y) < T_{h2} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} T_{h1} = Avg_gray - \alpha_gray \\ T_{h2} = Avg_gray + \alpha_gray \end{cases} \quad (7)$$

式中, $J(x, y)$ 表示经过图像增强处理后的图像, 是关于原图像 $I(x, y)$ 的函数; T_{h1} 和 T_{h2} 是动态双阈值的两个阈值; Avg_gray 是平均灰度值; α_gray 是调整因子, 依据目标图像的具体情况而定, $g(i, j)$ 是阈值分割后的二值化图像。

均值滤波采用邻域滤波技术, 把图像中的像素及其邻域像素构成一个模板, 用模板的均值代替像素值输出。为了增加图像处理速度, 论文采用 3×3 方形模板对图像进行均值滤波。对于均值滤波模板图的计算可用如下的公式得出:

$$J_1(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{(x, y) \in S} J(x, y) = \frac{1}{9} \begin{pmatrix} J(x-1, y-1) + J(x-1, y) + \\ J(x-1, y+1) + J(x, y-1) + \\ J(x, y) + J(x, y+1) + \\ J(x+1, y-1) + J(x+1, y) + \\ J(x+1, y+1) \end{pmatrix} \quad (8)$$

其中: S 为以 $J(x, y)$ 为中心的邻域的集合, N 为 S 内的像素点数, $J_1(x, y)$ 为滤波输出结果, $J(x, y)$ 为经大气散射模型增强后的图像。将 $J_2(x, y)$ 代入到式 (6) 中, 即可实现基于均值滤波的动态双阈值算法。

灰度直方图均衡化是通过某种变换把原始图像的直方图变换为均匀分布的形式, 得到一幅直方图均匀分布的新图像。设 $J(x, y)$ 和 $J_2(x, y)$ 分别表示经大气散射模型增强后的图像和经直方图修正后的图像在 (x, y) 位置的像素坐标, 且 $J(x, y) \in [0, 255]$ 和 $J_2(x, y) \in [0, 255]$ 。对于任意一个 $J(x, y)$, 都可生成一个 $J_2(x, y)$, 两者之间的转换映射关系为:

$$J_2(x, y) = 255 \sum_{l=1}^{J(x, y)} \frac{n_l}{n} \quad (9)$$

其中: n 为像素个数的总和; n_l 为第 l 个灰度级出现的次数。将 $J_2(x, y)$ 代入到式 (6) 中, 即可实现基于直方图均衡化的动态双阈值算法。

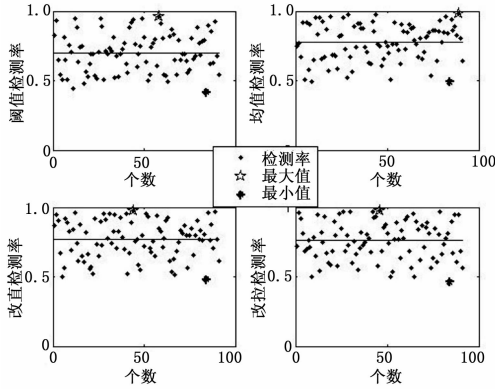
基于拉普拉斯 (Laplacian) 算子的图像增强是突出图像灰度值突变的区域并减缓这些区域灰度值的变化。Laplacian 算子是各向同性的二阶微分算子, 对离散的数字图像而言, 二阶偏导数可用二阶差分近似。因此 Laplacian 增强算子可表达为:

$$\begin{aligned} J_3(x, y) &= J(x, y) - \nabla^2 J(x, y) = \\ &= 5J(x, y) - J(x+1, y) - J(x-1, y) - \\ &\quad J(x, y+1) - J(x, y-1) \end{aligned} \quad (10)$$

将 $J_3(x, y)$ 代入到式 (6) 中, 即可实现基于拉普拉斯算子的动态双阈值算法。

3 实验结果对比分析

把基于图像增强的动态双阈值算法用于不同程度污染的雾霾环境下的车辆目标检测。为了更好的说明改进算法对目标检测性能的影响并确定污染程度不同的雾霾环境下最佳目标检测算法，针对不同程度污染的雾霾环境下，用动态双阈值、基于均值滤波的动态双阈值、基于直方图均衡化的动态双阈值和基于拉普拉斯算子的动态双阈值四种算法对 11097 张增强后的图像进行目标检测，并统计出四种算法的最佳检测率、最差检测率、平均检测率和虚警率。如图 3~6 及表 1~4 所示。



(a) 检测率

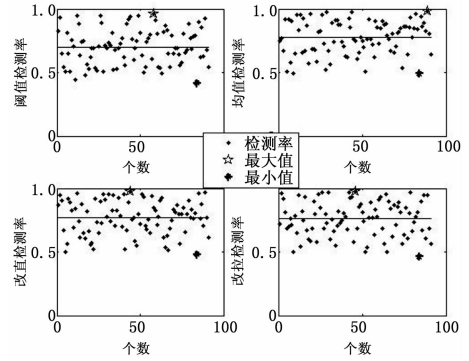
(b) 虚警率

图 3 轻度霾天检测率和虚警率

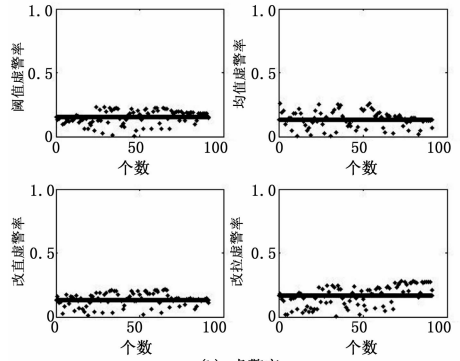
表 1 轻度霾天目标检测数据统计

算法	最佳检测率	最差检测率	平均检测率	平均虚警率
阈值检测	95.83%	45.3%	75.58%	10.16%
均值滤波	97.61%	50.28%	80.06%	8.53%
改进直方图	98.07%	48.93%	79.86%	10.05%
改进拉普	98.6%	48.93%	78.39%	9.77%

对表 1 数据分析可得，三种改进算法的最佳检测率和平均检测率均比动态双阈值算法的检测率高，且虚警率小。综合考虑目标的检测率和虚警率，在轻度霾天时首选基于均值滤波的动态双阈值算法，其次选用基于拉普拉斯算子的动态双阈值算法。



(a) 检测率



(b) 虚警率

图 4 中度霾天检测率和虚警率

表 2 中度霾天目标检测数据统计

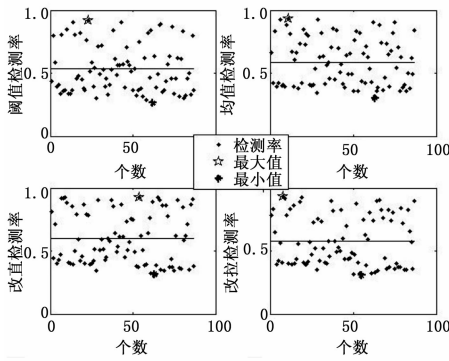
算法	最佳检测率	最差检测率	平均检测率	平均虚警率
阈值检测	95.83%	45.3%	75.58%	10.16%
均值滤波	97.61%	50.28%	80.06%	8.53%
改进直方图	98.07%	48.93%	79.86%	10.05%
改进拉普	98.6%	48.93%	78.39%	9.77%

对表 2 数据分析可得，经过均值滤波处理后的图像再进行动态阈值目标检测的效果要明显优于其他三种方法；综合考虑平均虚警率和目标检测率，在中度霾天时优先选用基于均值滤波的动态双阈值算法，其次选用基于直方图均衡化的动态双阈值算法。

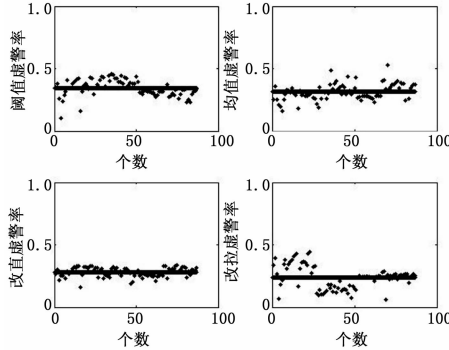
表 3 重度霾天目标检测数据统计

算法	最佳检测率	最差检测率	平均检测率	平均虚警率
阈值检测	91.81%	26.25%	53.84%	34.39%
均值滤波	93.5%	30.08%	59.18%	31.39%
改进直方图	92.7%	31.43%	60.11%	28.07%
改进拉普	93.35%	30.54%	58.19%	23.79%

对表 3 数据分析可得，相对其他三种方法来说基于拉普拉斯算子的动态双阈值算法的平均虚警率最低，但目标检测率不高；基于均值滤波的动态双阈值算法的优点是可以复原图像，检测出远且小的目标，但同时检测出的非目标点也多；虽然基于均值滤波的动态双阈值算法的最佳检

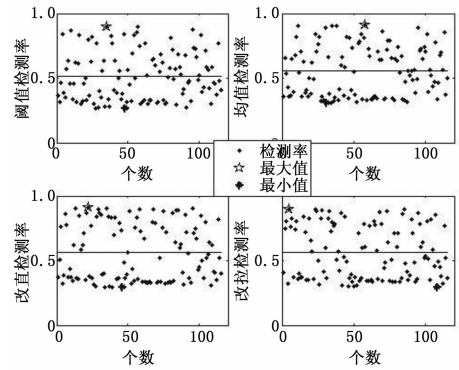


(a) 检测率

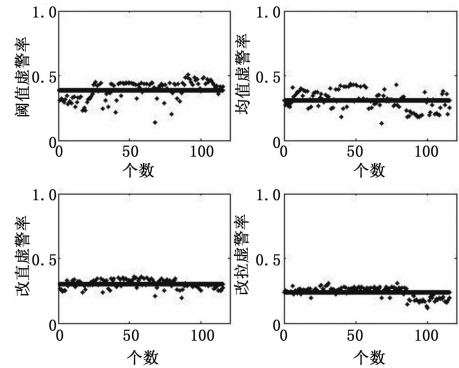


(b) 虚警率

图 5 重度霾天检测率和虚警率



(a) 检测率



(b) 虚警率

图 6 严重霾天检测率和虚警率

测率是四种方法中最高的, 但平均检测率却不如基于直方图均衡化的动态双阈值算法好。综合考虑目标的平均检测率和平均虚警率, 在重度霾天时优先选用基于直方图均衡化的动态双阈值算法, 其次选用基于拉普拉斯算子的动态双阈值算法。

表 4 严重霾天目标检测数据统计

算法	最佳检测率	最差检测率	平均检测率	平均虚警率
阈值检测	89.95%	26.64%	51.75%	38.66%
均值滤波	90.91%	30.95%	55.88%	30.76%
改进直方图	91.17%	29.58%	56.28%	30.24%
改进拉普	89.9%	29.4%	56.6%	23.83%

对比表 4 数据分析可得, 四种方法检测出的目标都差不多, 但动态双阈值检测算法检测出的非目标点最多, 而基于拉普拉斯算子的动态双阈值算法检测出的非目标点最少; 综合考虑目标的平均检测率和虚警率, 在严重霾天时优先选用基于拉普拉斯算子的动态双阈值算法, 其次选用基于直方图均衡化的动态双阈值算法。

4 结束语

论文针对雾霾环境下目标图像的检测与识别, 在分析已有算法基础上, 提出了基于图像增强的动态双阈值算法。从统计的实验数据和算法处理的效果图可看到改进后的算法相较于原算法目标平均检测率高、虚警率低, 目标检测性能有所提高。分析实验数据可得: 在轻度霾天时首选基

于均值滤波的动态双阈值算法, 其次选用基于拉普拉斯算子的动态双阈值算法; 在中度霾天时优先选用基于均值滤波的动态双阈值算法, 其次选用基于直方图均衡化的动态双阈值算法; 在重度霾天时优先选用基于直方图均衡化的动态双阈值算法, 其次选用基于拉普拉斯算子的动态双阈值算法; 在严重霾天时优先选用基于拉普拉斯算子的动态双阈值算法, 其次选用基于直方图均衡化的动态双阈值算法。通过研究雾霾图像增强算法对目标检测性能的影响, 能够使得交通道路环境以及空中目标等的监控系统可视性提高, 有助于减少地面交通事故、保障交通安全。

参考文献:

- [1] 杜宏博, 王丽会. 基于改进暗原色先验模型的快速图像去雾方法 [J]. 计算机工程与应用, 2016, 52 (1): 178-184.
- [2] 李桂林, 王创新, 万志银, 等. 基于四阶偏微分方程图像复原去雾方法 [J]. 电子科技, 2016, 29 (2): 62-65.
- [3] Tripathi A K, Mukhopadhyay S. Single image fog removal using bilateral filter [A]. Signal Processing, Computing and Control (ISPPCC), 2012 IEEE International Conference on [C]. IEEE, 2012: 1-6.
- [4] Gibson K B, Nguyen T Q. Fast single image fog removal using the adaptive Wiener filter [A]. IEEE International Conference on Image Processing [C]. IEEE, 2014: 714-718.
- [5] Sun W. A new single-image fog removal algorithm based on physical model [J]. Optik-International Journal for Light and

