

基于目标 HSV（色调-饱和度-亮度）空间图像 自适应分割的直线检测算法

尉金强, 杜文正, 孙晓艳*, 聂 婷, 唐圣金

(火箭军工程大学, 陕西 西安 710025)

摘 要: 针对现阶段利用数字图像进行半挂车倒车辅助过程中, 存在辅助地标线检测效果鲁棒性差和实时性不高等问题, 提出了一种基于目标色调-饱和度-亮度 (Hue-Saturation-Value, HSV) 空间图像自适应分割的直线检测算法。首先, 对不同场景下的直线目标进行分割提取, 通过统计不同场景下目标 HSV 空间图像直方图确定图像分割的初始阈值, 并基于初始阈值提出一种基于目标 HSV 空间的图像自适应分割算法。然后, 对图像进行预处理及边缘检测, 提取目标边缘点。最后, 采用基于中位数绝对偏差的最小二乘直线检测方法剔除边缘点中的离群值以提高地标直线目标的检测精度。实验结果表明: 该算法能够在不同背景、不同光照条件下对目标进行准确检测, 具有良好的鲁棒性; 与 Hough 变换算法相比, 该算法的运算速度更快, 直线检测的准确率更高, 并且对不同颜色地标线的检测也具有良好的适用性。

关键词: 数字图像处理; 目标自适应分割; HSV 颜色空间; 最小二乘法; 中位数绝对偏差

中图分类号: TP391.41

文献标志码: A

文章编号: 2097-2741(2024)05-059-10

Straight Line Detection Algorithm Based on Adaptive Segmentation of Target HSV Space Images

WEI Jinqiang, DU Wenzheng, SUN Xiaoyan*,

NIE Ting, TANG Shengjin

(Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, Shaanxi)

ABSTRACT: To solve problems in existing digital images processing-based semi-trailer reversing assistant system development, such as poor robustness and low real-time of landmark line detection, a straight line detection algorithm based on adaptive segmentation of target Hue-Saturation-Value (HSV) space images was proposed. First, line targets in various scenes were segmented and extracted. Simultaneously, histograms of target images in the HSV space across different scenes were used to determine the initial threshold for image segmentation, based on which an image adaptive segmentation algorithm according to target HSV space images was proposed. Subsequently, the preprocessing and edge detection of images were conducted to extract edge points of targets. Finally, outliers of edge points were eliminated by using a median absolute de-

收稿日期: 2024-05-06

第一作者: 尉金强 (1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事数字图像处理与目标识别研究。E-mail: 1920622948@qq.com

* **通信作者:** 孙晓艳 (1987—), 女, 硕士, 讲师, 主要从事数字图像处理研究。E-mail: sunxiaoyantsj@126.com

引用格式: 尉金强, 杜文正, 孙晓艳, 等. 基于目标 HSV (色调-饱和度-亮度) 空间图像自适应分割的直线检测算法[J]. 火箭军工程大学学报, 2024, 38 (5): 59-68.

viation-based least squares straight line detection method to improve the detection accuracy of landmark line targets. Experimental results showed that the proposed algorithm is able to accurately detect targets under different backgrounds and lighting conditions with good robustness. Compared to the Hough transform algorithm, the algorithm has faster operation speed, higher accuracy of straight line detection, and good applicability to the detection of landmark lines of different colors.

KEYWORDS: digital image processing; target adaptive segmentation; HSV color space; least square method; median absolute deviation

随着工业化进程的发展, 重型机械的路面运输需求持续增长。基于半挂车的运输模式具有载重量大、运输成本低以及运输效率高等优势, 是货物运输领域的一个重要选择。美国运输研究所在 2016 年发布的“智能无人驾驶汽车技术对运输业的影响”报告^[1]中亦强调了半挂车在货物运输系统中的核心作用, 同时指出当前半挂运输系统面临司机短缺的挑战。此问题的一个重要根源在于半挂车倒车难度大, 对驾驶员操作要求高。因此, 辅助倒车入位成为特种半挂车辆辅助驾驶的一个热点研究问题。在实践中, 为了便于车辆精确入位, 停车点常设有明显的红色地标辅助线以协助驾驶员停车入位。因此, 有效精确检测具有显著颜色特征的直线地标线成为开发倒车辅助系统的关键基础问题。

图像分割是直线检测的基础, 对彩色目标利用颜色空间进行分割时, 通常设定颜色空间的固定阈值范围, 实现目标在不同光照、不同背景条件下的分割。刘佳等^[2]通过设定色调-饱和度-亮度 (Hue-Saturation-Value, HSV) 空间中色调 (H) 分量的固定阈值来分割锈层, 但该算法还需要借助设定的锈斑固定形状特征去除干扰。刘双喜等^[3]首先设置 HSV 颜色空间各分量的固定阈值进行目标初步提取, 然后计算不同种类害虫的 HSV 阈值区间, 并取其平均值为分割阈值, 但在分割过程中并不能利用阈值区间将某一类害虫完全区分。赵庆杭等^[4]先利用饱和度 (S) 阈值和亮度 (V) 阈值将图像分为黑白与彩色, 再利用色调 (H) 阈值提取目标, 但该方法只能分割出目标的大致范围, 容易丢失细节信息。在实际应用中, 红色地标线作为一种主观标记具有显著特征, 使用固定阈值检测效果不佳, 易受环境噪声干扰, 为此, 需要研究一种适应主观标记个体特征的彩色图像目标分割方法。

直线是地标线的另一显著特征, 对直线的检

测已有多种方法。Hough 变换就是直线检测的一种常用方法, 它通过将图像空间中的点映射至参数空间中的曲线, 实现了对直线的有效检测。然而, 传统的 Hough 直线检测算法性能依赖于边缘检测结果, 在边缘密集的图片中直线段并不能完全识别, 同时在直线段端点定位方面也存在端点定位不准确、直线段检测不完全等不足。为解决这些问题, 许多学者对 Hough 变换进行了改进。例如, 朱鸿宇等^[5]采用了双重映射策略, 通过从原图到 Hough 参数空间的两次映射, 实现了车道线消失点的快速提取, 但在低光照条件下检测效果不佳。在提高 Hough 变换直线检测准确率方面, 王宇瑞等^[6]结合 Hough 变换和 HSV 色彩空间, 针对车道线的黄色像素进行提取, 尽管提高了检测精度, 但在应用范围上较为有限, 只能检测完整且无遮挡情况下的黄色车道线。在直线检测新方法的探索上, Gioi 等^[7]提出了快速直线段检测 (Line Segment Detector, LSD) 算法, 虽然在参数自适应和检测效率上取得了进步, 但容易出现过度分割和直线段冗余。Akinlar 等^[8]基于 LSD 算法提出了 EDLines (Edge Drawing Lines) 算法, 实现了快速准确的直线检测, 但可能会丢失部分细节信息。Almazan 等^[9]则提出了基于马可夫链的 MCMLSD (Markov Chain Model Line Segment Detector) 算法, 该算法虽然能够检测出更完整的直线段, 但算法耗时较长。最小二乘法^[10]在直线拟合中具有准确性高、处理能力快和直线段检测完全等优点, 在检测少量直线段时效果好。在本研究中, 主要关注图像中红色地标线的左右 2 条线段, 因此, 需要选择一种对直线段检测数量要求不高, 但实时性较好的检测方法。

针对在 HSV 颜色空间中使用固定阈值进行目标分割时效果不佳的问题, 考虑最小二乘法在直线拟合中的优点, 本文提出一种基于目标 HSV 颜色空间的图像自适应分割直线检测算法。该方法

通过对红色地标线的 HSV 颜色直方图进行统计分析, 进行初步分割; 随后, 通过提取分割目标的 HSV 直方图, 更新下一帧的目标图像分割阈值, 实现图像自适应分割; 然后, 对分割后的图像进行二值化处理, 应用形态学闭运算 (先膨胀后腐蚀) 技术减少噪声影响, 并均匀选取边缘点, 剔除离群值, 实现目标直线的可视化检测。

1 数值分析模型

本文提出了一种基于目标 HSV 空间图像自适应分割的直线检测算法, 具体流程如图 1 所示。

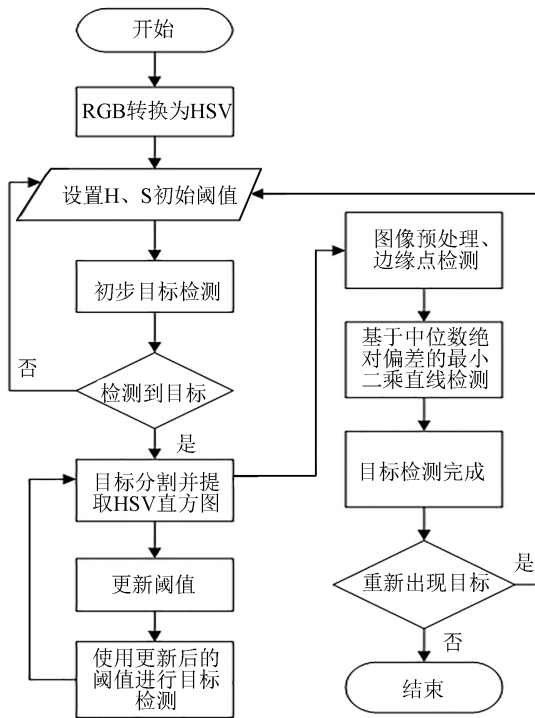


图 1 基于目标 HSV 空间图像自适应分割的直线检测算法流程

Fig. 1 Flow of adaptive segmentation of target HSV space images-based straight line detection algorithm

该算法首先将彩色图像从 RGB 颜色空间转换至 HSV 空间。通过对不同背景与照明条件下红色地标线的 HSV 直方图进行分析, 选取适宜的色调阈值 (0 至 0.04, 0.98 至 1) 和饱和度阈值 (0.65 至 0.95), 用于初始目标的精确分割。然后, 实时更新初始目标的 HSV 直方图, 根据像素数选取适应该目标特征的分割阈值, 该方法可以连续跟踪当前图像目标的具体特征, 从而提高彩色图像的分割效果。接着, 对分割得到的目标进行二值化处理, 并使用先膨胀后腐蚀算法进行噪声移除处

理。在此基础上, 对目标的边缘点进行提取, 并采用基于中位数绝对偏差的最小二乘直线检测方法剔除离群值以实现目标直线的检测。

2 基于目标 HSV 空间的图像自适应分割

2.1 彩色目标颜色空间选取

选择合适的颜色空间是彩色目标识别的基础, 当前主流的颜色空间包括 RGB、Lab 和 HSV。RGB 颜色空间便于获取彩色目标的颜色信息, 从而取得了广泛应用。然而, RGB 颜色空间各分量具有较高的相关性, 易受光照的影响^[11], 这一点限制了其在不同照明条件下的图像分割效果。Lab 颜色空间^[12]是一种基于人类视觉感知设计且不受光照变化影响的颜色模型, 但其计算复杂度相对较高。相比之下, HSV 颜色空间由色调 (H)、饱和度 (S) 和亮度 (V) 3 个分量组成, 更接近人类对颜色的感知模式。HSV 空间的优势在于对饱和度和亮度的调整不会影响色调分量, 有效避免了 RGB 空间^[13]可能出现的颜色失真问题。

综合考虑这 3 种颜色空间的特性, 本文采用 HSV 颜色空间进行目标提取。首先, 利用式 (1) ~ (3) 将原始图像由 RGB 空间转换为 HSV 空间, 颜色空间模型如图 2 所示。

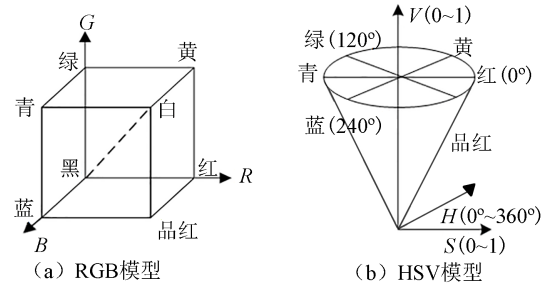


图 2 颜色空间模型

Fig. 2 Color Space Model

$$H = \begin{cases} 0^\circ, & \max = \min \\ 60^\circ \left(\frac{G - B}{\max - \min} + 0 \right), & \max = R \\ 60^\circ \left(\frac{B - R}{\max - \min} + 2 \right), & \max = G \\ 60^\circ \left(\frac{R - G}{\max - \min} + 4 \right), & \max = B \end{cases} \quad (1)$$

$$S = \begin{cases} 0, & V = 0 \\ \frac{V - \min}{V}, & V \neq 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$V = \max \quad (3)$$

式中： H 、 S 、 V 分别代表同一像素点在色调、饱和度和亮度上的分量数值； $\max$ 和 $\min$ 分别为集合 $\{R, G, B\}$ 中的最大值和最小值； R 、 G 、 B 分别对应该像素点的红色、绿色和蓝色分量。

2.2 基于目标 HSV 空间的图像自适应分割

利用 HSV 颜色空间进行目标分割时，通常采用固定的 H 阈值^[2, 4]进行分割。本文通过提取水泥和沥青路面在不同光照条件下的红色地标线目标的 HSV 直方图，统计直方图中目标像素的区间分布，以便设定初始阈值。由于目标地标线呈现鲜明的红色特征，根据统计结果，色调初始阈值被设定为 0 到 0.04 以及 0.98 到 1 的区间（选取过程见 4.1 节）。然而，在某些情况下，例如红色地标线周围存在颜色相近的干扰物时，单一的色调阈值可能不能准确分割目标。例如，在篮球场这样的环境中，不同饱和度的红色干扰因素影响了目标检测的效果，如图 3 所示，引入饱和度阈值可以实现目标与干扰的分割。根据统计确定饱和度初始阈值为 0.65 至 0.95，以优化目标分割结果。

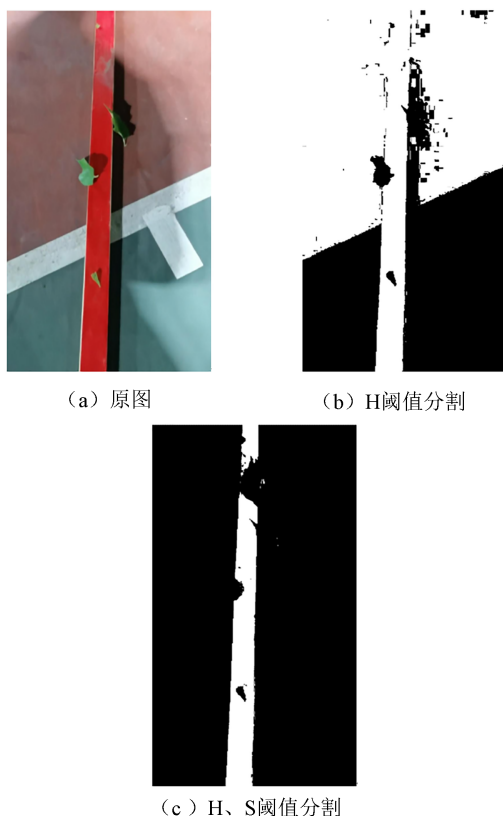


图 3 篮球场环境的图像分割效果

Fig. 3 Image segmentation results of basketball court environment

然而这种固定阈值分割方法对某一特定场景

图像存在分割目标不完全、干扰剔除不完全等问题，因此，本文提出了一种基于目标 HSV 空间的图像自适应分割算法，算法流程如图 4 所示。

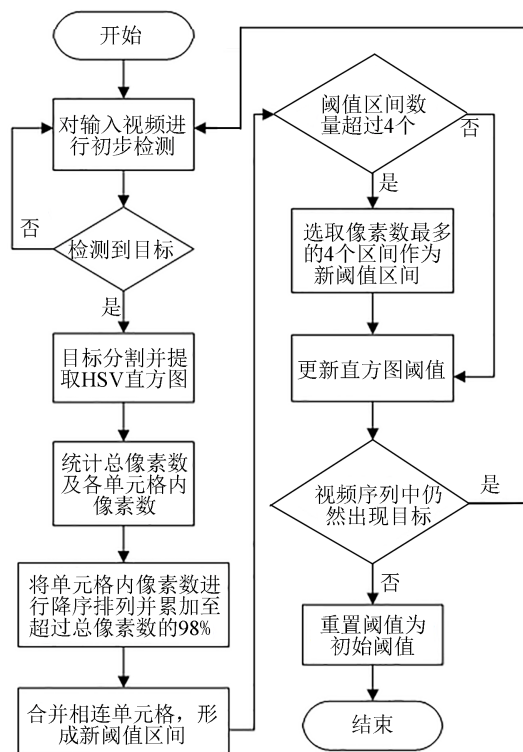


图 4 目标 HSV 空间图像自适应分割流程

Fig. 4 Flow of adaptive segmentation of target HSV space images

该算法具体步骤如下：

Step1 基于初始阈值对输入视频进行初步检测。若视频帧中未检测到目标，则保持阈值不变。

Step2 若检测到目标视频帧，执行目标分割并提取该帧内目标的 HSV 直方图，统计目标总像素数以及直方图中各个单元格内像素数。

Step3 将每个单元格内的像素数值进行降序排列，并依次相加，直至像素数和超过总像素数的 98%。

Step4 将参与相加的单元格进行标记，合并相连的单元格，形成新的阈值区间，合并后的阈值区间若相隔不超过 2 个单元格则将阈值区间合并为一个阈值区间。阈值区间的数量不超过 4 个，若超过 4 则选取像素数最多的 4 个区间为阈值区间。

Step5 更新适应目标特征的新阈值，直至视频序列中不再出现目标，此时将阈值重置为初始阈值。

Step6 若视频序列中重新出现了目标，则重

复 Step5~Step6。

3 基于最小二乘法的直线目标检测

3.1 图像预处理

在目标跟踪的过程中, 阴影和遮挡等因素可能导致在进行 HSV 直方图自适应跟踪时, 目标的二值化图像出现空洞, 从而对边缘检测的准确性造成不利影响。为了解决这一问题, 本文采用先膨胀后腐蚀的闭运算, 来有效填充图像中的空洞点, 以减小对目标检测的影响, 结果如图 5 所示。

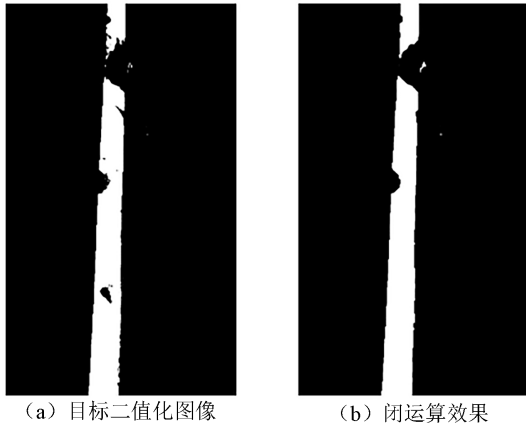


图 5 图像闭运算处理

Fig. 5 Image closure operation processing

膨胀与腐蚀是图像形态学处理中的基本方法。膨胀通过在空洞的边缘添加像素点来扩展目标区域, 而腐蚀则是一个相反的过程, 即通过移除对象边界的像素点来减小目标区域。从图 5 可以看出, 目标的二值化图像中空洞点已被填充, 且边缘更为平滑, 有助于边缘点的提取。

3.2 基于中位数绝对偏差的最小二乘直线检测

图像预处理完成以后, 需要进行边缘点检测。本文对闭运算处理后的二值化图中的每一行进行检测, 当像素值发生突变时, 则认为该处非零像素点为目标边缘点。在本文中, 图像坐标系以左上角为原点, 纵轴为 x 轴方向, 横轴为 y 轴方向, 沿 x 轴均匀选取 n 行提取边缘点用于直线检测。在本研究中, 将参数 n 设定为 60, 以平衡数据处理的准确性和系统响应的实时性。将识别到的每行边缘点进行提取和分类, 将每行像素点坐标中 y 值最小和最大的点进行提取, 分别代表左边缘点与右边缘点, 所有提取到的左边缘点和右边缘点构成左边缘点集和右边缘点集。

当提取到的边缘点总数不超过 4 时, 则认为目

标与图像 y 轴近似平行。由于本文主要关注纵向直线检测, 这种近似平行情况则认为没有检测到直线。当提取到的边缘点总数超过 4 时, 本文采用最小二乘法对左右边缘点分别进行直线初步线性拟合。最小二乘法操作简便, 计算效率高, 能有效地寻找一条直线, 使得数据点到该直线的垂直距离之平方和达到最小。通过最小化均方误差, 可以确定最匹配数据分布的直线方程, 从而为数据点提供一种最优的直线拟合结果。算法具体步骤为: 对于给定的数据集 $\{(x_i, y_i) | 1 \leq i \leq n\}$, 寻找满足直线方程 $y = ax + b$ 的参数, 使得误差参数 $S = \sum_{i=1}^n (y_i - (ax_i + b))^2$ 最小, 可得 a 和 b 的最小二乘计算结果分别为

$$a = \frac{n \sum_{i=1}^n (x_i y_i) - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n y_i - a \sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

利用公式求出参数 a 与 b 的值, 可以得到所拟合的直线方程。

将左右边缘直线初步拟合后, 分别计算左右原始边缘点到拟合直线的水平距离 $L_i = y_i - (ax_i - b)$, 构成左边缘偏差数据集与右边缘偏差数据集。本文采用基于中位数绝对偏差 (Median Absolute Deviation, MAD)^[14] 的最小二乘直线检测方法剔除离群值, 以提高直线拟合精度。

MAD 是一种衡量一组数据离散程度的统计量, 尤其在数据包含异常值或不遵循正态分布时, MAD 比传统的标准差更具有鲁棒性。算法首先计算数据集的中位数 $\text{Median}(X)$, 接着计算数据点与中位数的绝对差:

$$\text{Deviation}_i = |X_i - \text{Median}(X)|$$

式中: $\text{Median}(\cdot)$ 表示取数据的中位数。

计算绝对差的中位数:

$$D_{\text{MAD}} = \text{Median}(|X_1 - \text{Median}(X)|, |X_2 - \text{Median}(X)|, \dots, |X_n - \text{Median}(X)|)$$

为使 D_{MAD} 与标准差在正态分布下相一致, 将 D_{MAD} 乘以常数因子 1.482 6, 调整后的 D_{MAD} 为

$$D_{\text{MAD}} = 1.4826 \times \text{Median}(|X_1 - \text{Median}(X)|, |X_2 - \text{Median}(X)|, \dots, |X_n - \text{Median}(X)|)$$

在拟合完成后，通过计算数据集中数据点与数据集中位数之间的绝对差异来确定误差，并设置一个阈值，该阈值为误差中位数的2倍，以此为标准剔除离群值。保留下来的边缘点，即内点，将再次进行最小二乘直线拟合。该过程迭代进行，直至内点集不再发生变化。最终拟合的直线将在图像上进行可视化，算法具体流程如图6所示。是否剔除离群值图像分割结果如图7所示。

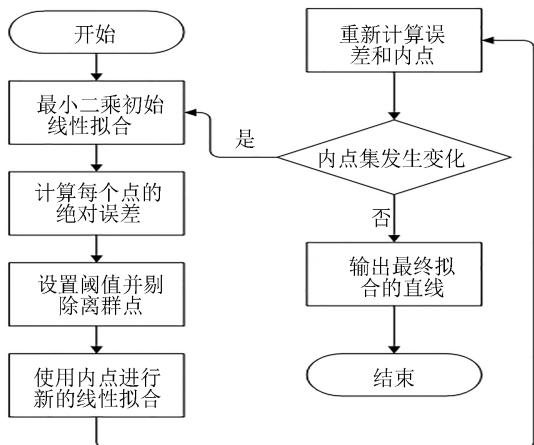


图 6 基于中位数绝对偏差的最小二乘直线检测流程
Fig. 6 Flow of median absolute deviation-based least square line detection

可以看出：未剔除离群值时，直线拟合受到离群值干扰，出现左边检测直线偏右的情况；采用基于中位数绝对偏差方法剔除离群值后，直线拟合精度得到提高。

4 实验与分析

4.1 初始阈值选取

在自适应目标跟踪过程中，恰当选择初始阈

值对于提高目标检测的准确性和鲁棒性至关重要。对常见的地面类型（沥青和水泥地面）以及不同光照条件（白天无阴影、白天有阴影和夜间光照）下的目标提取HSV直方图，如图8所示。

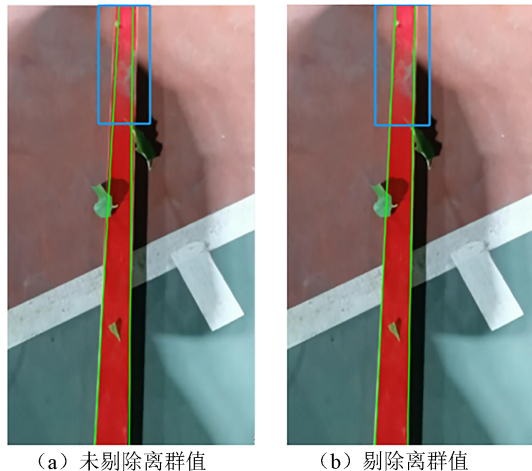
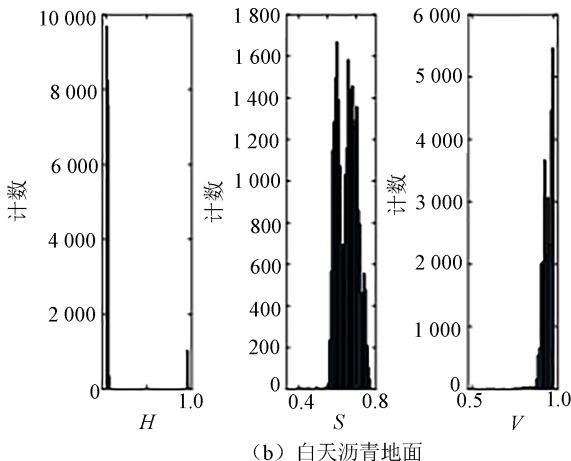
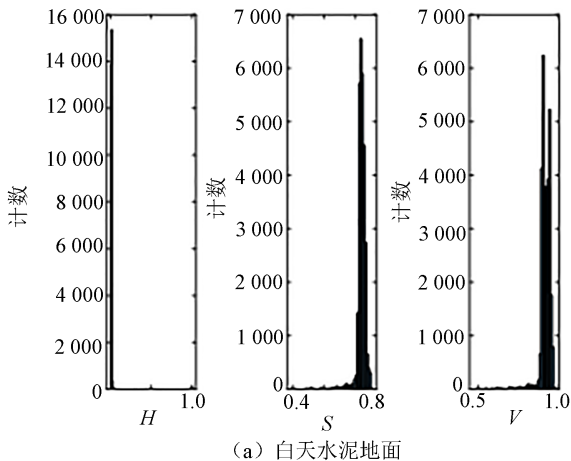


图 7 基于中位数绝对偏差直线拟合效果
Fig. 7 Line fitting results based on median absolute deviation

选取目标像素数占目标总像素数比重超过90%的阈值区间，如表1所示，其中，像素占比是指目标在阈值区间内的像素占总像素的百分比。由于亮度（V）分量在不同光照条件下变化范围大，阈值范围不稳定，本文主要选取色调（H）和饱和度（S）进行分析。通过对各种场景下分割阈值的合并，选取初始阈值，色调（H）阈值区间为[0, 0.04]和[0.98, 1]，饱和度（S）阈值区间为[0.65, 0.95]。

4.2 算法性能分析

试验采用的硬件平台为 AMD Ryzen 75800H with Radeon Graphics 3.20 GHz 处理器，16 GB 内



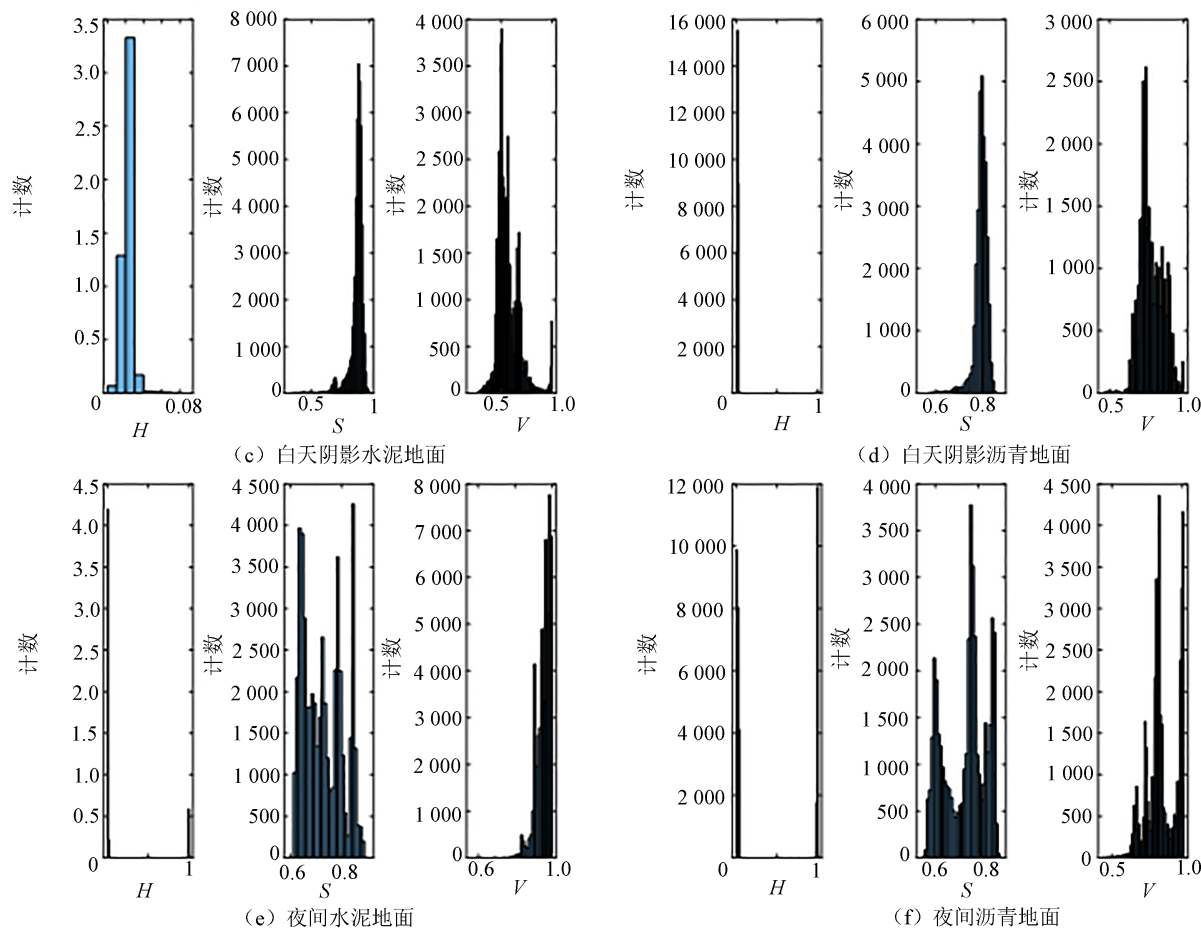


图 8 各场景下图像目标的 HSV 直方图

Fig. 8 HSV histograms of image targets in various scenes

表 1 直方图阈值统计表

Tab. 1 Statistics table of histogram threshold

光照情况	背景地面	H 分量		S 分量		V 分量	
		阈值	像素占比/%	阈值	像素占比/%	阈值	像素占比/%
白天无遮挡	水泥	0~0.03, 0.99~1	100.0	0.78~0.90	98.6	0.87~0.98	98.1
	沥青	0~0.03, 0.99~1	95.8	0.63~0.85	95.4	0.91~1	95.2
白天有阴影	水泥	0~0.03	96.6	0.80~0.97	94.1	0.47~0.70	85.9
	沥青	0~0.03, 0.99~1	99.6	0.79~0.90	90.6	0.67~0.95	90.3
夜间有灯照	水泥	0~0.02, 0.99~1	99.9	0.65~0.90	98.6	0.83~1	99.5
	沥青	0~0.04, 0.98~1	99.4	0.58~0.95	95.9	0.76~1	88.7

存、64 位 Windows11 操作系统的 PC。使用 MATLAB 编程语言, 利用 MATLAB R2021b 进行了程序调试。

为了验证本文所提算法的有效性, 将其与传统的 Hough 直线检测算法及 Hough 改进算法进行比较分析, 结果如图 9 所示。

由图 9 可以看出: 传统 Hough 变换直线检测

算法对直线段检测不完全, 需要调整最小直线段的长度; 文献[6]与文献[15]虽然对 Hough 算法进行了改进, 但是对直线检测仍然存在检测不完全的情况, 从而导致对直线检测的完整度较差, 不利于后续对车辆位置的定位与检测; 本文算法的稳定性强、直线拟合效果好, 便于后续利用地标线中心线进行车辆位置定位。

从实时性与准确性的角度来看，本文算法也优于现有算法。本文对地标线在常见的地面类型（沥青和水泥地面）以及不同光照条件（白天无阴影、白天有阴影和夜间光照）下采集 6 段视频共 930 帧图像进行对比实验，结果如表 2 所示。

由表 2 可以看出：本文算法的检测准确率高于另外 3 种方法；同时，本文算法平均耗时为 30 ms/帧，较其他 3 种算法的检测速度均有提高。

为了验证本文算法的鲁棒性，采集了 15 段地标线在不同背景及不同光照条件下的视频，共

2 247 帧图像进行直线检测，结果如图 10 所示。

表 2 不同算法处理结果对比

Tab. 2 Comparison of results from different algorithms

算法	准确识别数/帧	准确率/%	平均每帧处理时间/ms
传统 Hough	882	94.84	45
文献[6]	887	95.38	39
文献[15]	895	96.23	35
本文算法	928	99.78	30

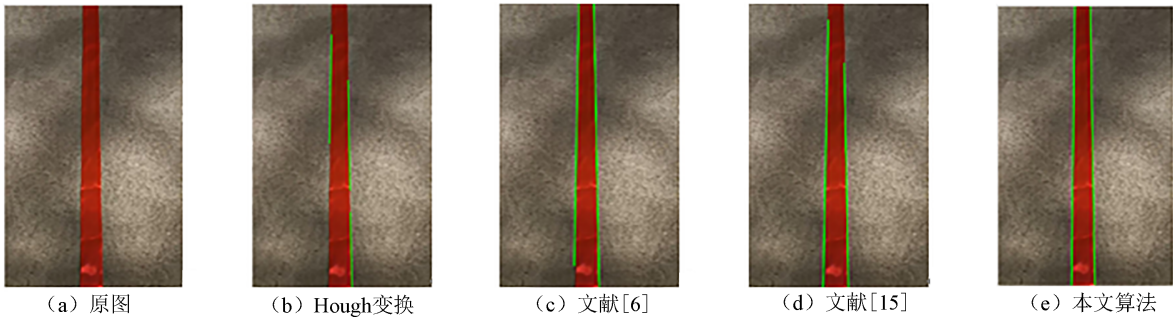


图 9 不同算法检测效果对比

Fig. 9 Comparison of detection effects of different algorithms

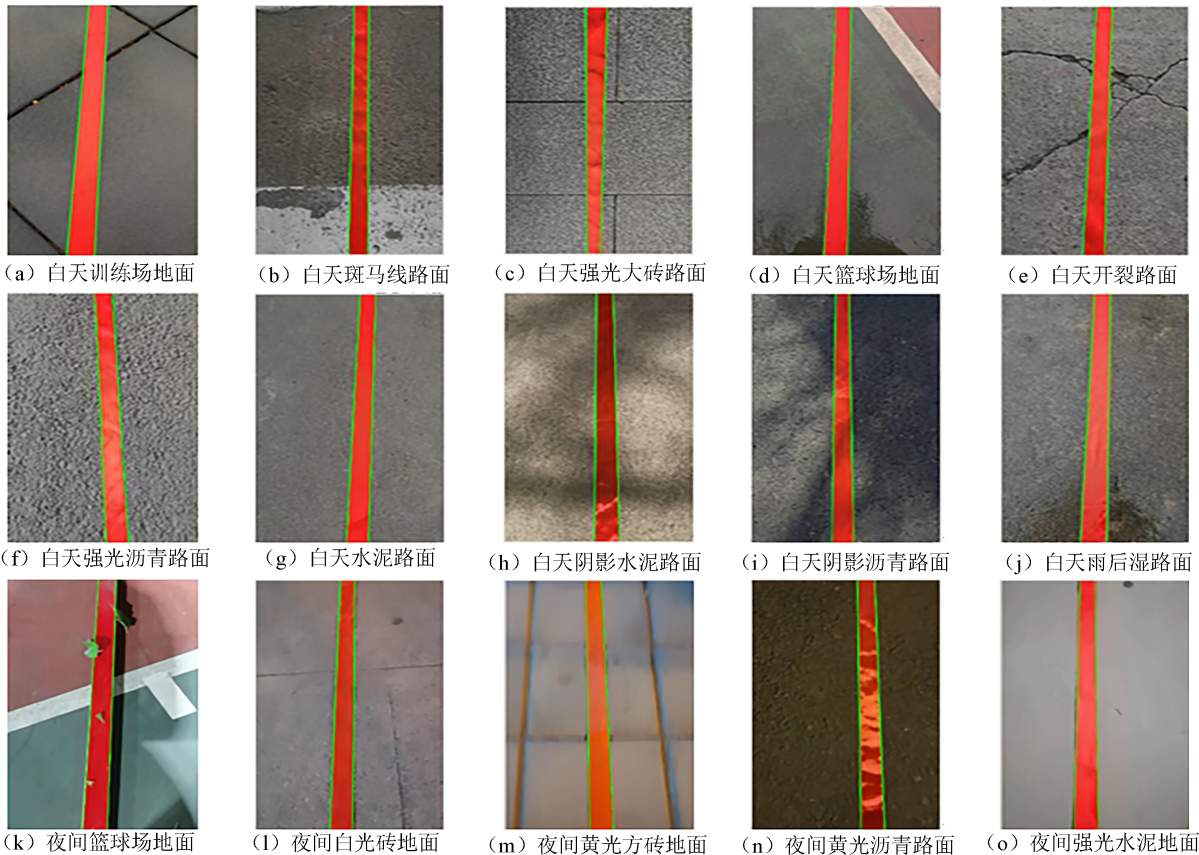


图 10 本文算法在不同背景及光照条件下的检测效果

Fig. 10 Detection results of the proposed algorithm under different backgrounds and lighting conditions

可以看出，本文提出的算法对多样化背景和不同光照条件都具有较好的适应性。在阴影覆盖的地面以及颜色干扰强烈的篮球场背景，均能够准确地识别出地标线。此外，本算法在夜间环境中，面对不同类型的光源和多种光照强度时，依然保持了较好的鲁棒性，具有较强的可靠性。

为验证所提算法的适用性，对不同颜色的地

标线在常见的地面类型（沥青和水泥地面）以及不同光照条件（白天自然光和夜间光照）下进行检测，根据 4.1 节的方法选择合理的初始阈值，检测效果如图 11 所示。可以看出，本文提出的算法对不同颜色的地标线仍然能够实现准确识别，说明该算法对有颜色特征的目标进行检测时具有良好的适用性。

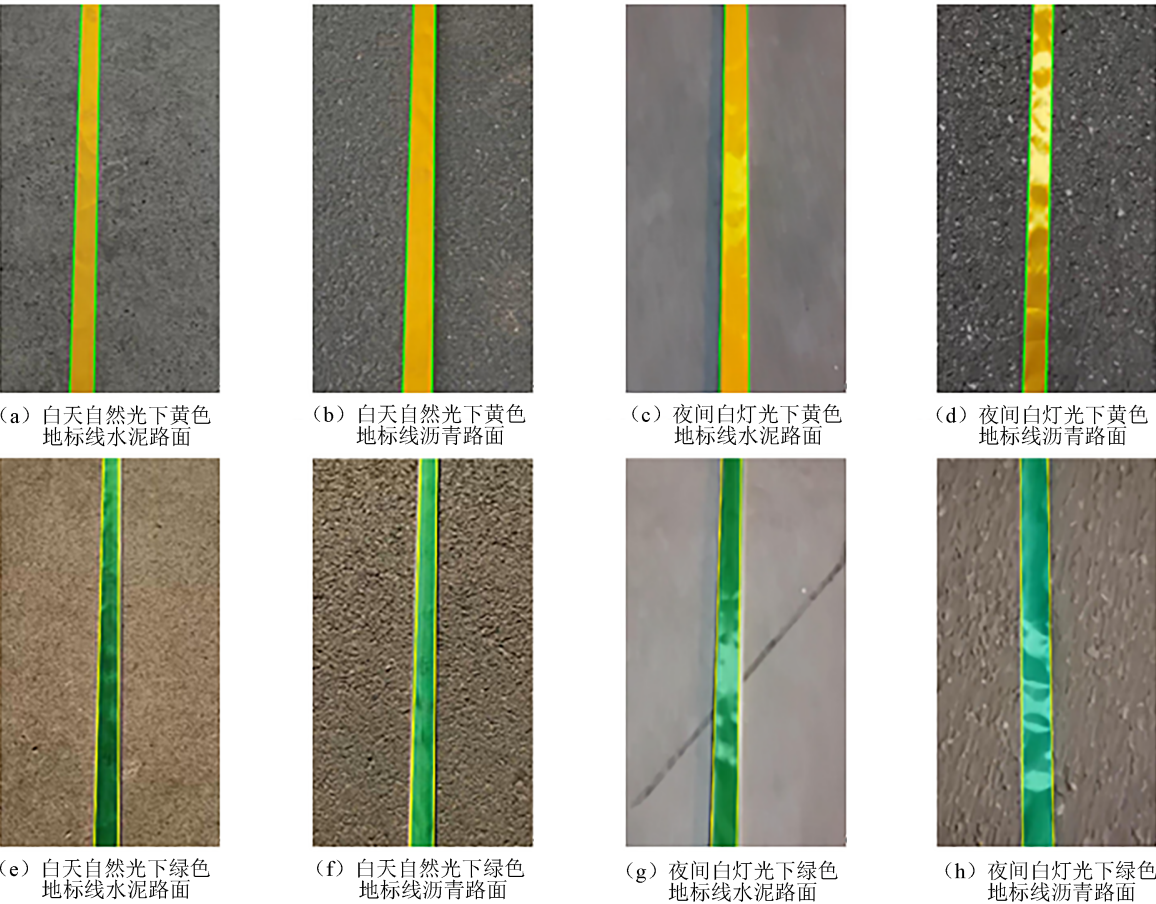


图 11 本文算法对不同颜色地标线检测效果

Fig. 11 Detection results of landmark lines of different colors obtained by the proposed algorithm

5 结论

本文首先通过统计分析主观标记直线目标 HSV 空间的像素分布确定图像分割的初始阈值，提出了基于目标 HSV 空间的图像自适应分割算法，实现了直线目标的初步分割。接着，通过图像闭运算减小空洞点对目标检测的影响，进一步提取目标边缘点，并采用基于中位数绝对偏差的最小二乘直线检测方法剔除边缘点离群值以进一步提高直线检测精度。实验证明，本算法在不同背景和不同光照条件下具有良好的鲁棒性。同时，

本文提出的算法在运算速度及直线检测准确性上相较于 Hough 变换方法均有提高，且适用于不同颜色地标线的检测，具有较好的适用性。

参考文献：

[1] 赵名卓. 半挂汽车列车倒车安全与诱导控制研究[D]. 合肥：合肥工业大学，2021：1-2.
ZHAO M Z. Research on reversing safety and guidance control of semi-trailer train[D]. Hefei：Hefei University of Technology，2021：1-2.

[2] 刘佳，唐鋆磊，林冰，等. 基于 HSV(色相-饱和度-明度)与形状特征的涂层锈点图像识别[J]. 中国表面工程，2023，36(4)：217-228.

- LIU J, TANG J L, LIN B, et al. Rust spot image recognition of coating based on HSV and shape features[J]. China Surface Engineering, 2023, 36(4): 217-228.
- [3] 刘双喜, 王云飞, 张宏建, 等. 基于形色筛选的苹果园羽化害虫粘连图像分割方法[J]. 农业机械学报, 2024, 55(3): 263-274.
- LIU S X, WANG Y F, ZHANG H J, et al. Image segmentation of apple orchard feathering pest adhesion based on shape-color screening[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55 (3): 263-274.
- [4] 赵庆杭, 王昕, 郑益慧, 等. 基于特征融合与随机森林的吊车碰线预警算法[J]. 高电压技术, 2020, 46 (2): 471-479.
- ZHAO Q H, WANG X, ZHENG Y H, et al. Forewarning algorithm of crane collision with transmission lines based on feature fusion and random forest[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46 (2): 471-479.
- [5] 朱鸿宇, 杨帆, 高晓倩, 等. 基于级联霍夫变换的车道线快速检测算法[J]. 计算机技术与发展, 2021, 31(1): 88-93.
- ZHU H Y, YANG F, GAO X Q, et al. A fast lane detection algorithm based on cascaded Hough transform[J]. Computer Technology and Development, 2021, 31 (1): 88-93.
- [6] 王宇瑞, 李炎亮, 郭雨婷, 等. 基于改进霍夫变换的车道线检测算法实现[J]. 农业装备与车辆工程, 2022, 60(5): 95-98.
- WANG Y R, LI Y L, GUO Y T, et al. Lane detection algorithm based on improved Hough transform[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2022, 60(5): 95-98.
- [7] GROMPONE VON GIOI R, JAKUBOWICZ J, MOREL J M. et al. LSD: A fast line segment detector with a false detection control[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2010, 32(4): 722-732.
- [8] AKINLAR C, TOPAL C. Edlines: A real-time line segment detection by Edge Drawing(ED)[C]//18th IEEE International Conference on Image Processing. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 2837-2840.
- [9] ALMAZÀN E J, TAL R, QIAN Y M, et al. MCMLSD: A dynamic programming approach to line segment detection[C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2017: 5854-5862.
- [10] 范兴明, 封浩, 张鑫. 最小二乘算法优化及其在锂离子电池参数辨识中的应用[J]. 电工技术学报, 2024, 39(5): 1577-1588.
- FAN X M, FENG H, ZHANG X. Optimization of least squares method and its application in parameter identification of lithium-ion battery model [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(5): 1577-1588.
- [11] WEI X G, WU L L, GE D, et al. Prediction of the maturity of greenhouse grapes based on imaging technology[J]. Plant Phenomics, 2022, 2022 (7): 1-14.
- [12] 李金朋, 冯帅, 杨鑫, 等. 融合 CLAHE-SV 增强 Lab 颜色特征的水稻覆盖度提取[J]. 农业工程学报, 2023, 39(24): 195-206.
- LI J P, FENG S, YANG X, et al. Unsupervised extraction of rice coverage with incorporating CLAHE-SV enhance Lab color features[J]. Transactions of the Chinese Society Agricultural Engineering, 2023, 39(24): 195-206.
- [13] HUANG L S, LI T K, DING C L, et al. Diagnosis of the severity of fusarium head blight of wheat ears on the basis of image and spectral feature fusion[J]. Sensors, 2020, 20(10): 2887.
- [14] 黄博华, 杨勃航, 李明贵, 等. 一种改进的 MAD 钟差粗差探测方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2022, 47(5): 747-752, 761.
- HUANG B H, YANG B H, LI M G, et al. An improved method for MAD gross error detection of clock error[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2022, 47(5): 747-752, 761.
- [15] 周发华, 陈继清, 杨蓉. 基于改进 Hough 变换和斜率特征的车道线识别[J]. 现代电子技术, 2023, 46 (7): 180-186.
- ZHOU F H, CHEN J Q, YANG R. Lane line recognition based on improved Hough transformation and slope feature[J]. Modern Electronics Technique, 2023, 46(7): 180-186.