

基于主动红外滤光环视成像的车道线检测算法

成春阳¹, 黄渊博¹, 卢鑫¹, 徐灵丽¹, 李敏¹, 范新南^{1,2}, 张学武^{1,2*}

¹ 河海大学物联网工程学院, 江苏 常州 213022;

² “世界水谷”与水世界生态文明协同创新中心, 江苏 南京 211100

摘要 针对传统的车道线检测系统采用单路前视摄像头在夜晚场景下易受强光照干扰和在复杂场景下易出现误检漏检的问题,提出一种基于主动红外滤光环视成像的车道线检测算法。在成像阶段,利用4路基于主动红外滤光成像的车载摄像头采集车辆四周的场景信息,再基于透视变换和图像融合得到具有360°俯视效果的环视图像。在车道线的检测阶段,提出一种基于凝聚型层次聚类的车道线检测算法:1)基于车道线的形状特征设计一种具有较强针对性的匹配模板用来提取车道线边缘点;2)以凝聚型层次聚类对边缘点聚类,并以随机抽样一致性算法对车道线进行直线拟合;3)结合先验信息和卡尔曼滤波器进一步提高检测准确性。结果表明,本文算法能够较好地消除车道线检测过程中的强光照影响,并在一定程度上有效地降低了误检漏检率。

关键词 图像处理; 车道线检测; 红外滤光; 环视成像; 凝聚型层次聚类

中图分类号 TP391.4 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP55.121014

Lane Detection Based on Active Infrared Filter and Around-View Imaging

Cheng Chunyang¹, Huang Yuanbo¹, Lu Xin¹, Xu Lingli¹, Li Min¹,

Fan Xinnan^{1,2}, Zhang Xuewu^{1,2*}

¹ College of Internet of Things Engineering, Hohai University, Changzhou, Jiangsu 213022, China;

² Collaborative Innovation Center of World Water Valley and Water Ecological Civilization, Nanjing, Jiangsu 211100, China

Abstract Aiming at the problem that the conventional lane detection system uses a single-channel forward-looking camera under night scenes, which is susceptible to strong light interference and is prone to false detection and misdetection in complex scenes, we propose a lane detection method based on active infrared filter and around-view imaging. In the imaging stage, four-way vehicle-borne cameras based on active infrared filter are used to collect scene information around the vehicle, and then a look-around image with 360° overlooking effect is obtained based on perspective transformation and image fusion. In the detection phase of lane, a lane detection algorithm is proposed based on agglomerative hierarchical clustering. Firstly, based on the shape features of lane lines, a more pertinent template matching is designed to extract the edge points of the lane line. Then the edge points are clustered by agglomerative hierarchical clustering, and the lane is fitted by the random sample consensus algorithm. Finally, a priori information and Kalman filter are combined to further improve detection accuracy. The results show that the proposed algorithm can effectively eliminate the strong light effects during the detection of lanes and effectively reduce the false detection and missed detection rate to a certain extent.

Key words image processing; lane detection; active infrared filter; around-view imaging; hierarchical cluster

OCIS codes 100.4994; 110.4155; 110.3080

1 引言

车道线检测系统是车道偏离预警、车道保持等智能辅助驾驶系统的基础,开发适用场景广泛、实时

性强、稳健性高的车道线检测系统一直是智能驾驶领域的热点研究问题。围绕车道线检测这一难题,研究者们已经提出了诸多方法和技术^[1]。利用霍夫变换检测车道线是目前最普遍的方法之一。该方法

收稿日期: 2018-06-26; 修回日期: 2018-07-03; 录用日期: 2018-07-12

基金项目: 国家自然科学基金(61671202,61573128)、国家重点研发计划(2016YFC0401606)

* E-mail: lab_112@126.com

首先使用 Canny 边缘检测器或可控滤波器^[2]提取车道线边缘,然后在边缘提取的基础上利用经典霍夫变换或随机霍夫变换^[3]检测直线。由于基于霍夫变换的方法很难确定所检测到的直线是否与实际车道线相对应,因此其检测准确性还有待进一步提高。另一类方法是基于车道线的颜色特征,通常是 RGB 图像转换为 YCbCr、HSI 或其他自定义色彩空间,这种转换能够增强黄色车道标记等有色物体的显著性^[4-5],但容易受到环境光源变化的影响。三维立体成像也被用于车道线检测,如文献^[6-7]所述,在每个视图中检测车道标记,然后使用极线几何和相机校准信息将结果进行融合,可以获得较准确的检测结果。然而,该方法需要假设车辆始终位于车道中心,在固定的搜索区域内检测车道线,当车辆换道时检测将会失效。神经网络^[8]和支持向量机^[9]等基于监督学习的方法也被用于车道检测,但需要大量的训练样本集进行学习。

综上所述,单一、理想环境下的车道线检测算法已经较为成熟,但是,在多种复杂场景下实现稳健的车道线提取仍然是需要解决的难题。基于单路摄像头的车道线检测算法在特定工作场景下能达到较为理想的效果,但难以胜任较为复杂的场景,在夜晚、雨天、大雾等环境下效果较差,甚至完全失效。因此,越来越多的研究者转向研究传感器的选择^[10-17]。主动式红外滤光成像技术采用红外光源主动照射目标,再通过 CCD 或 CMOS 传感器接收目标反射的红外光线进行成像。基于主动红外成像技术的摄像头能够适应不同的光照环境,为解决阴影、光照突变和夜晚等环境下车道线检测算法性能下降问题提供了有力的支持^[18-21]。另外,车道线检测算法的应用场景具有高度的复杂性。不仅路面的箭头、斑马线和文字标记等类车道线目标会导致车道线误检的情况频繁发生,而且车道线模糊、残缺、被其他车辆或道路设施遮挡等不确定因素也会导致大量漏检。基

于四路车载摄像头的环视成像系统能够将车辆周围的场景拼接为具有 360° 俯视效果的环视图像。不同于单路前视摄像头采集到的图像,环视图像中车道线信息丰富,能够感知车辆两侧甚至后侧的车道线。基于环视图像的车道线检测为提高车道线检测的准确度、降低误检率和漏检率提供了有力的保障。因此,本文综合考虑红外滤光技术和环视成像系统的优势,提出基于主动红外滤光环视成像的车道线检测算法,以期稳健地实现复杂场景下的车道线提取。

2 主动红外滤光环视成像系统

由于 CCD 传感器具有高分辨率、高质量、图像畸变小等特性,车载摄像头广泛采用 CCD 传感器。然而,传统 CCD 传感器对于可见光的干扰十分敏感,当基于 CCD 传感器的车载摄像头在夜晚场景中工作时,车辆车灯的频繁照射、夜晚路灯等环境光源都给摄像头采集图像带来极大的干扰,甚至,当有强光照射时,摄像头采集得到的图像会被大片的光斑覆盖,有效的道路场景信息被淹没,从而导致后续检测模块失效。因此,消除夜晚环境下的强可见光对于提高道路图像的成像效果至关重要。

2.1 主动红外滤光成像硬件设计

红外成像系统可以分为被动红外成像和主动红外成像。被动红外成像基于不同发热物体的红外辐射成像,但无法探测到路面车道线这类冷目标,因而无法应用于车道线检测系统。主动红外成像以红外光源照射目标,再由视觉传感器感知目标反射的红外光线并成像,借助辅助光源探测到无红外辐射的冷目标。因此,本文采用主动红外滤光成像系统,如图 1 所示。黑白 CCD 传感器的感光光谱不仅涵盖可见光区域,还能辐射至近红外区域,可以作为成像系统的视觉传感器。红外激光光源作为辅助照明设备,具有光谱宽度窄、光束发散角小、体积小、易安装等优点。

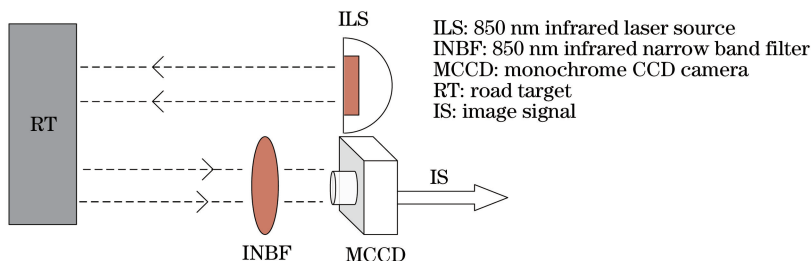


图 1 主动红外滤光成像系统示意图

Fig. 1 Active infrared filter imaging system

2.2 红外光源和滤光片的选择

为了避免红外激光对人眼造成伤害,并兼顾成像效果,需要合理地选取激光波长。图2为黑白CCD传感器的光谱响应特性曲线。由图2可知,在760~1000 nm的近红外波段,CCD传感器的响应会逐渐减

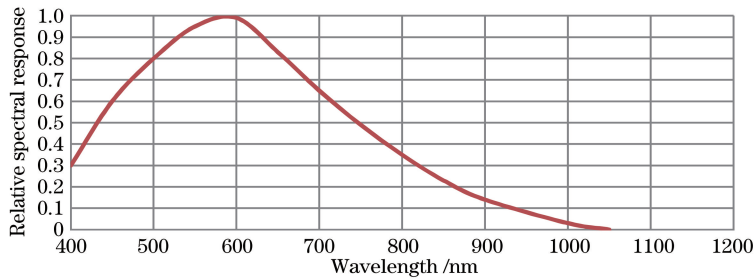


图2 CCD传感器的光谱响应特性曲线

Fig. 2 Spectral response curve of CCD camera

滤光片能够利用光的干涉原理改变光的强度和光谱组成,而带通红外滤光片能够仅保留红外光而滤除其他波长的光波。为了消除强可见光对于成像质量的影响,同时使目标反射回来的红外光被感知,需要在CCD传感器前加装红外滤光片。本文选用850 nm的近红外光源,红外滤光片也相应地选用850 nm的窄带带通滤光片,其中心波长为850 nm,带宽为10 nm。该滤光片能够有效地滤除强可见光,很好地解决了夜晚环境下强光照对于车道线检测模块的影响。

2.3 基于透视变换和图像融合实现环视成像

环视成像是利用安装于车辆前、后、左、右的4个广角摄像头采集车辆四周的场景信息,拼接为一幅具有360°俯视效果的环视图像。本文所述的环视成像的形成主要包括两个步骤:基于透视变换得到俯视图和基于图像融合拼接重叠区域^[22]。

透视变换是指基于维度为 3×3 的单应性矩阵将图像投影到一个新的视平面。其变换过程可描述为

$$[x \quad y \quad 1] = [u \quad v \quad 1] \times \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\begin{cases} x = \frac{a_{11}u + a_{12}v + a_{13}}{a_{31}u + a_{32}v + a_{33}} \\ y = \frac{a_{21}u + a_{22}v + a_{23}}{a_{31}u + a_{32}v + a_{33}} \end{cases}, \quad (2)$$

式中 $\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}$ 为能够表征映射关系的单应

性矩阵 \mathbf{H} , (u, v) 为原始图像中像素点 P_i 坐标, (x, y) 为经过透视变换后的图像像素点 P_j 坐标。因此,为求矩阵 \mathbf{H} ,需要已知原始图像和目标图像中的4组位置对应的像素点坐标。

采用事先标定的方法获取所需的4组像素点坐标。首先,安装主动红外滤光摄像头,并按照如图3(a)所示布置标定场景,其中黑色标定模板中心对准车载摄像头,白色标定模板紧贴车身,且保持其中心线与黑色模板中心线在同一直线上。然后,从摄像头采集的原始图像中手动标记特征点(如图3所示,以前向摄像头为例),即可获得特征点在图像坐标系中的坐标 $P_i, i \in [0, 3]$ 。同时,依据标定模板的相对车辆距离和车辆的规格信息,可以获得特征点在世界坐标系中的坐标 $P_j, j \in [0, 3]$ 。由(1)式即可得到单应性矩阵 \mathbf{H} ,再对原始图像中的每一像素依据(2)式计算得到经过透视变换后该像素点的坐标。

将4路摄像头采集得到的原始图像分别经过透视变换得到4幅具有俯视效果的鸟瞰图像。为实现环视成像,需要对4幅鸟瞰图像中的重叠区域进行融合,图3(b)中的绿色矩形框区域为重叠区域。权衡算法效率和融合效果,采用简单高效的线性融合方法。则融合后的像素值为

$$I_{\text{fusion}} = 0.5 \times I_1 + 0.5 \times I_2, \quad (3)$$

式中 I_1, I_2 分别为两幅图像在重叠区域的像素。由此可得主动红外滤光环视图像。可以看到,环视图像能够完整地呈现车辆四周的场景,在实际道路场景下包含大量的车道线信息,为后续的车道线检测提供了可靠的保障。

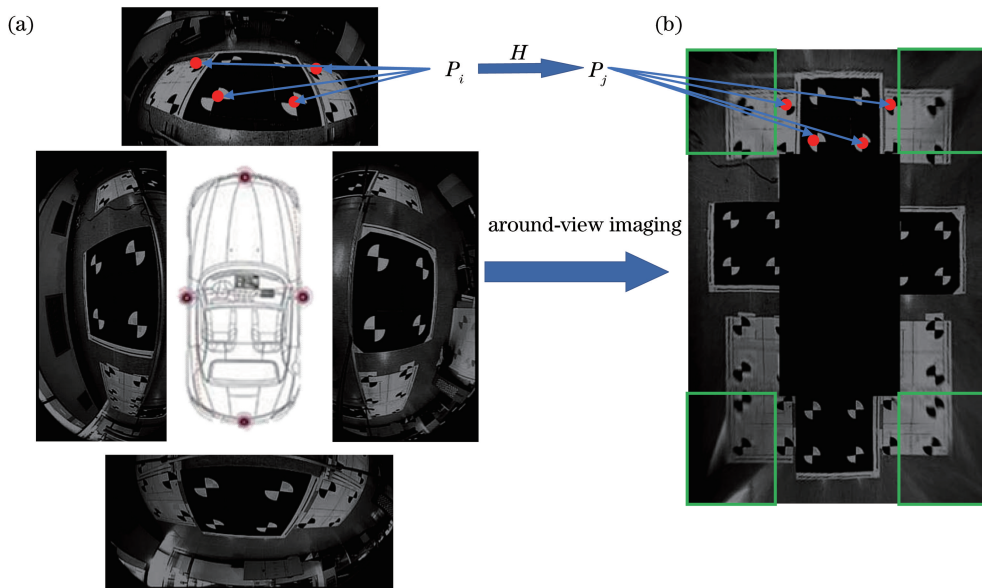


图 3 环视成像过程。(a)标定模板;(b)环视图像

Fig. 3 Setup for around-view imaging. (a) Calibration model; (b) around-view image

3 基于凝聚型层次聚类的车道线检测

凝聚型层次聚类是一种自底向上的聚类方式,即先将每个数据点作为一个单独的类,然后计算类间距离,合并距离最小的两个类形成一个新类,再反复迭代这一过程,直到遍历完所有类或满足终止条件。凝聚型层次聚类的优点在于,能够得到不同粒度的多层次聚类结果,而且对样本输入顺序没有要

求,可适用于任意形状的聚类^[23-24]。

现有的车道线检测算法大多是基于单路彩色 CCD 传感器,并不适用于基于红外滤光环视成像系统所得到的环视图像。因此,针对环视图像的特殊性,本文提出一种基于凝聚型层次聚类的车道线检测算法,以期能够很好地适用于环视图像,并可应对高度复杂的应用环境,其算法流程及原理如图 4 所示。

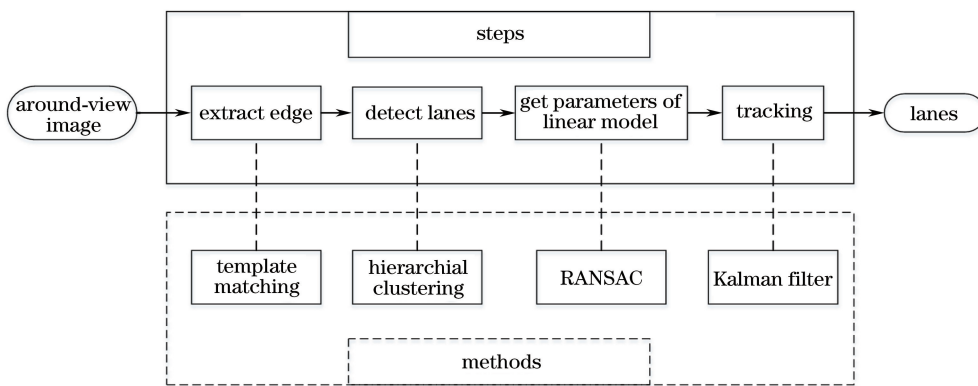


图 4 车道线检测算法流程

Fig. 4 Process of lane detection

3.1 提取车道线边缘

观察环视图像可以发现,作为前景的车道线占图像像素的小部分,作为背景的路面占图像的大部分,而且在红外滤光图像中,道路背景灰度值基本一致。因此,基于灰度直方图确定全局阈值,对道路背景进行分割,经过背景分割后的环视图像如图 5(a)所示。

在环视图像中,车道线呈矩形或条形,且横向宽度近乎一致,即车道线具有类矩形的形状特征,而且经过上述的背景分割后,车道线的形状特征更为显著。基于这一特性,设计了一种针对车道线形状特征的匹配模板,如图 6 所示,图中 W 为单条车道线的宽度。采用该模板遍历环视图像中的每行,判断是否存在边缘型的特征。经过模板匹配后,可以得

到候选车道线左右边缘点如图 5(b)所示。另外,对于不同的结构化道路, W 值的变化总在一定范围

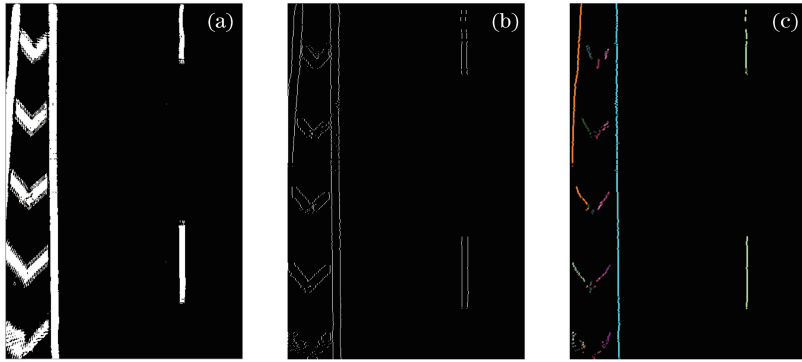


图 5 车道线检测步骤。(a)分割道路背景结果;(b)提取左右边缘点;(c)聚类结果

Fig. 5 Procedure for lane detection. (a) Segmentation of road background; (b) left and right edge point; (c) clustering result

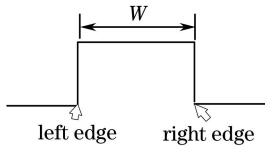


图 6 车道线匹配模板

Fig. 6 Template of lane marking

3.2 构建分类平面进行聚类

经过模板匹配,可得到一系列的左右边缘点。为减少后续计算量,取左右边缘点的中点作为候选车道线上的点。虽然车道线存在实线和虚线,经过透视变换后,单条车道线上的点应近似位于同一条直线上。同时,对于同一段连续直线上的点而言,相邻行候选点横坐标之差应小于一个较小的阈值。因此,采用凝聚型层次聚类算法,对边缘点进行聚类,聚类得到的每一个类视为同一条车道线上的点。

所用类间距离度量方式定义为

$$D(i, j) = |x_i - x_n|, x_n \in c_j, \quad (4)$$

式中 x_i 为候选点 i 的横坐标, c_j 为某一已知类, x_n 为类 c_j 中最后一个点的横坐标, $D(i, j)$ 即为候选点 i 与类 c_j 之间的相似度。图 5(c)为聚类得到的候选车道线上的点,以不同颜色表示不同的类,一个类对应于一条可能的车道线。

3.3 基于随机抽样一致性算法的车道线拟合及跟踪

通过上述聚类可以得到候选车道线上的一系列离散点。为了得到车道线的实际参数,需要对车道线上的离散点进行拟合。随机抽样一致性算法是采用迭代的方式估算出高精度的数学模型参数,在已知模型的条件能够下能够从包含离群点的数据集中求取模型参数。在透视变换图像中,车道线可以近似视

为直线,直线模型易于拟合,且能够在一定程度上提高算法效率。因此,在实际操作时,应将 W 设置在一定区间内,本文设定 $W \in [8, 20]$ 。

为直线,直线模型易于拟合,且能够在一定程度上提高算法效率。因此,选取直线模型作为车道线模型进行拟合。

考虑到可能出现斜率无穷大的情况,以及车道线的实际物理意义,将直线模型参数转换为车道线与车辆行驶方向的夹角,以及车道线与原点(图像左上角)的距离,表示为

$$y = \frac{L - x}{\tan \theta}, L \in [0, W_{\text{image}}], \theta \in [0, \pi], \quad (5)$$

式中 W_{image} 为图像宽度, θ 为车道线与车辆行驶方向的夹角, L 为车道线与原点(图像左上角)的距离。车道线的位置连续且平缓变化,相邻帧之间不会发生突变。同时,在环视图像中,左右两条车道线近似平行,两条车道线倾斜角之差的绝对值应在一定范围内。基于上述先验知识,即可筛选出实际车道线。

由于车辆在行驶过程中受光照明暗的变化、车道线破损,以及道路设施、树木阴影等因素影响,在连续检测车道线的过程中,会出现某一帧跳动或连续几帧检测不到的情况。针对这一情况,采用卡尔曼滤波器对车道线进行跟踪。经过直线拟合后,得到车道线与车辆行驶方向的夹角 θ 以及横向距离 L ,将这两个参数作为卡尔曼滤波器的输入,将卡尔曼滤波器输出的最优估计值作为实际车道线,以进一步降低误检率和漏检率^[25-26]。

4 结果与讨论

为验证所提方法的可行性,以江苏常州通江路为路测场景,分别以 4 路普通彩色 CCD 摄像头和 4 路主动红外滤光摄像头在白天(13:00~14:00)和夜晚(20:00~21:00)环境下采集实验素材。实验素材的帧率为 29 frame/s,视频时长为 5 min,全部帧数

为 8700。实验采用 Intel i5-3210M 处理器, Visual Studio 2012 配置 OpenCV2.4.9。

为验证本文方法在成像效果上的优越性, 采用文献[25]算法作为对比。图 7 为采用本文主动红外滤光环视成像与文献[25]所用的普通彩色 CCD 传感器的成像效果对比。由图 7 可知, 主动滤光环视成像技术能够将车辆四周的道路拼接为具有俯视效果, 且无视野盲区的环视图像, 并可使车道线等路面上无红外辐射的目标也能完整地成像。图像虽然无色彩信息, 且整体略有模糊, 目标的边缘特征被弱化, 但是并不会影响后续的检测。另外, 由图 7(a) 和(c)可知, 采用文献[25]所用的普通彩色 CCD 传

感器成像, 在城市夜晚场景中, 由于车辆周围存在的强光照, 尤其是后方两侧车辆的车灯照射, 图像的大片区域被不规则的光斑和阴影覆盖, 严重影响后续对车道线的检测。由图 7(b)和(d)可知, 采用本文主动红外滤光成像, 即使存在强光照, 白天和夜晚的成像效果的差异并不显著, 车道线特征被保留, 且由于不均匀光照形成的光斑和阴影被有效地过滤, 更有利于提升后续的车道线检测模块的性能。

其次, 从车道线的检测效果进行比较。图 8 为白天和夜晚场景下的成像结果, 绿色实线为基于本文算法所检测出的车道线, 充分考虑了车辆行驶过程会遇到的不同场景。图8(a)和(b)为路面存在箭

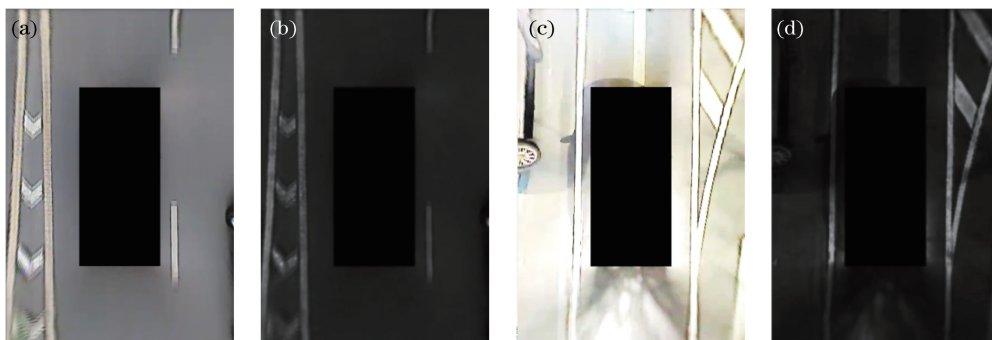


图 7 成像效果对比。(a)白天场景下彩色 CCD 成像效果;(b)白天场景下红外滤光成像效果;
(c)夜晚场景下彩色 CCD 成像效果;(d)夜晚场景下红外滤光成像效果

Fig. 7 Contrast of imaging effect. (a) Imaging effect of color CCD in daytime; (b) imaging effect of infrared filter in daytime; (c) imaging effect of color CCD in night; (d) imaging effect of infrared filter in night

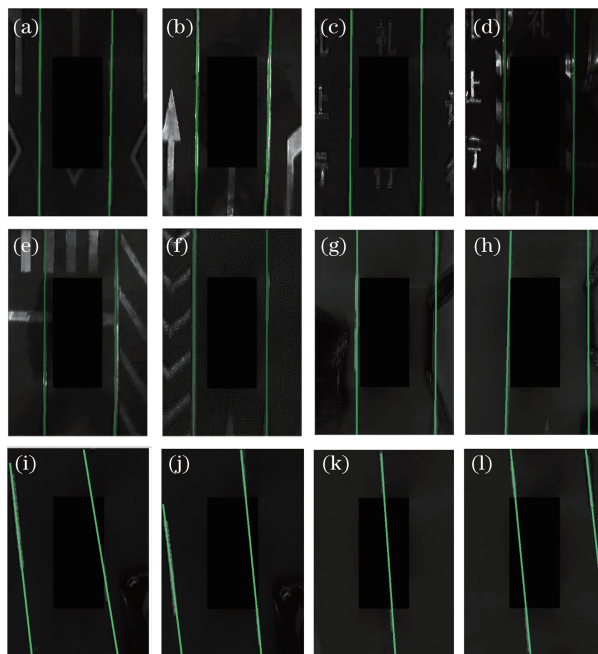


图 8 车道线检测结果。(a)(b)箭头干扰;(c)(d)文字干扰;(e)(f)导流线干扰;(g)(h)车辆遮挡;(i)~(l)变道

Fig. 8 Results of lane detection. (a)(b) Arrows; (c)(d) words; (e)(f) guide lines;
(g)(h) covered by cars; (i)-(l) changing lanes

头标记时的检测结果;图 8(c)和(d)为路面存在字迹时的检测结果;图 8(e)和(f)为路面存在斑马线和斜向导流线时的检测结果;图 8(g)和(h)为车道线被路边停放车辆部分遮挡时的检测结果;图 8(i)~(l)为车辆在变道过程中的车道线检测结果。图 9 为从视频序列中随机截取连续 1000 帧的车道线检测结果。

为验证本文方法在车道线检测系统性能方面的优越性,与文献[25-26]提出的车道线检测算法结果进行对比。其中,文献[25]是以 4 路彩色 CCD 传感器采集图像并生成环视图像,在环视图像的基础上进行车道线的检测,而文献[26]提出的车道检测系统是较为先进成熟的车道线检测系统。以正确检测率、漏检率和误检率作为评价指标,分别在白天

表 1 车道线检测系统性能对比

Table 1 Performance comparison of lane detection system

Algorithm	Correct		Miss		Incorrect		%
	Day	Night	Day	Night	Day	Night	
Algorithm in Ref. [25]	97.23	—	2.77	—	—	—	
Algorithm in Ref. [26]	98.05	97.23	1.64	2.22	0.31	0.55	
Proposed algorithm	97.97	97.45	1.58	2.12	0.45	0.43	

文献[25]与本文算法都采用基于环视图像的车道线检测算法,但文献中并未在夜晚场景下对其进行验证,且未考虑白天和夜晚场景下不同光照强度对车道线检测算法的影响。文献[26]算法采用基于传统的单路彩色 CCD 车载摄像头实现的车道线检测系统,该算法较为先进,在白天场景下的检测性能优于本文算法。但本文算法针对夜晚场景强光照下的图像性能并未有较大幅度的降低,而文献[26]算法的性能降低较明显。因此,本文算法对于不同场景的适应性更好。

5 结 论

针对传统的车道线检测系统采用单路前视摄像头在夜晚场景下易受强光照干扰等问题,提出一种基于主动红外滤光环视成像的车道线检测算法,所涉及的主要方法包括模板匹配、凝聚型层次聚类 and 基于随机抽样一致性算法的直线拟合。仿真实验结果表明,本文算法具有以下优点:1) 主动红外滤光环视成像技术能够生成红外滤光环视图像,既解决了单路摄像头易被遮挡的问题,又能有效地消除夜晚场景下强光照的影响;2) 针对车道线的形状特征,设计了一种匹配模板用来提取车道线边缘,针对性强且能够很好地消除多种干扰;3) 采用凝聚型层次聚类结合直线拟合的方法生成车道线,再基于误

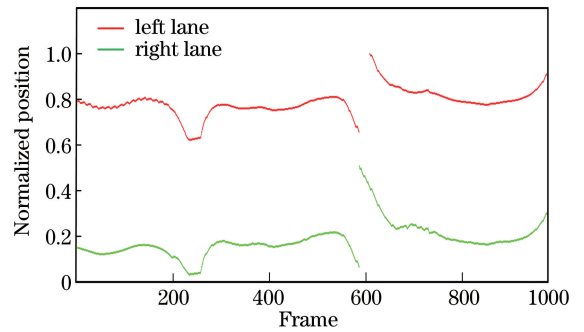


图 9 连续 1000 帧的车道线检测结果

Fig. 9 Lane detection results for 1000 consecutive frames and night high light scene, using different lane detection algorithms for testing, results as shown in Table 1.

差评价筛选车道线,能够准确地获取基于直线模型的车道线。实际路测结果表明,本文车道线检测方法具有很好的普适性,无论是白天还是夜晚场景下均能够达到较高的检测准确率。进一步优化算法,提高检测准确率和实时性,以及将本文算法应用于车道偏离预警、车道保持等智能驾驶系统将是下一步研究的重点。

参 考 文 献

- [1] Hillel A B, Lerner R, Dan L, *et al.* Recent progress in road and lane detection: a survey [J]. *Machine Vision & Applications*, 2014, 25(3): 727-745.
- [2] McCall J C, Wipf D P, Trivedi M M, *et al.* Lane change intent analysis using robust operators and sparse bayesian learning [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2007, 8(3): 431-440.
- [3] Xu L, Oja E, Kultanen P. A new curve detection method: randomized Hough transform (RHT) [J]. *Pattern Recognition Letters*, 1990, 11(5): 331-338.
- [4] Sun T Y, Tsai S J, Chan V. HSI color model based lane-marking detection [C]. *IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*, 2006: 1168-1172.
- [5] Cheng H Y, Jeng B S, Tseng P T, *et al.* Lane detection with moving vehicles in the traffic scenes

- [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2006, 7(4): 571-582.
- [6] Benmansour N, Labayrade R, Aubert D, *et al.* Stereovision-based 3D lane detection system: a model driven approach [C]. International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, 2008: 182-188.
- [7] Nedeveschi S, Schmidt R, Graf T, *et al.* 3D lane detection system based on stereovision [C]. International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, 2004: 161-166.
- [8] Pomerleau D A. ALVINN: an autonomous land vehicle in a neural network [M]. Advances in Neural Information Processing Systems 1. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1989: 305-313.
- [9] Kim Z. Robust lane detection and tracking in challenging scenarios [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2008, 9(1): 16-26.
- [10] Satzoda R K, Trivedi M M. Vision-based lane analysis: exploration of issues and approaches for embedded realization [C]. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, 2013: 604-609.
- [11] Lee C, Moon J H. Robust lane detection and tracking for real-time applications [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018: 1-6.
- [12] Cheng C Y, Li M, Zhang X W, *et al.* A lane detection algorithm under complex scenes [C]. International Conference on Computer, Mechatronics and Electronic Engineering, 2017: 386-390.
- [13] Cui G T, Wang J Z, Li J. Robust multilane detection and tracking in urban scenarios based on LIDAR and mono-vision [J]. IET Image Processing, 2014, 8(5): 269-279.
- [14] Fox A, Kumar B V K V, Chen J Z, *et al.* Multi-lane pothole detection from crowdsourced undersampled vehicle sensor data [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2017, 16(12): 3417-3430.
- [15] Li Q Q, Chen L, Li M, *et al.* A sensor-fusion drivable-region and lane-detection system for autonomous vehicle navigation in challenging road scenarios [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 63(2): 540-555.
- [16] Felguera-Martin D, Gonzalez-Partida J T, Almorox-Gonzalez P, *et al.* Vehicular traffic surveillance and road lane detection using radar interferometry [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2012, 61(3): 959-970.
- [17] Zhang S Y, Xie F, Wang J H. Design of medium and long distance automotive lens for target recognition of vehicles [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(10): 102201.
张思远, 谢飞, 王建华. 用于车辆目标识别的中远距离车载镜头设计 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(10): 102201.
- [18] Zhang W Z. Research on issue in vehicle active safety technology based on machine visual perception [D]. Jinan: Shandong University, 2015: 15-28.
张万枝. 机器视觉感知下的车辆主动安全技术若干问题研究 [D]. 济南: 山东大学, 2015: 15-28.
- [19] Zhuo N, Sun H Y, Zhang H J. A new approach for improvement of CCD imaging resolution [J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(6): 777-780.
卓宁, 孙华燕, 张海江. 一种新的提高 CCD 成像分辨率的方法 [J]. 光学学报, 2005, 25(6): 777-780.
- [20] He Y J, Li M, Zhang J L, *et al.* Infrared small target detection method based on correlation filter [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(5): 0512001.
何玉杰, 李敏, 张金利, 等. 基于相关滤波器的红外弱小目标检测算法 [J]. 光学学报, 2016, 36(5): 0512001.
- [21] Zhang X W, Ding Y Q, Yan P. Vision inspection of metal surface defects based on infrared imaging [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(3): 0312004.
张学武, 丁燕琼, 闫萍. 一种基于红外成像的强反射金属表面缺陷视觉检测方法 [J]. 光学学报, 2011, 31(3): 0312004.
- [22] Zhao T, Kang H L, Zhang Z P. Fast image mosaic algorithm based on area blocking and BRISK [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(3): 031005.
赵婷, 康海林, 张正平. 结合区域分块的快速 BRISK 图像拼接算法 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(3): 031005.
- [23] Gan W Y, Li D Y, Wang J M. An hierarchical clustering method based on data fields [J]. Acta Electronica Sinica, 2006, 34(2): 258-262.
涂文燕, 李德毅, 王建民. 一种基于数据场的层次聚类方法 [J]. 电子学报, 2006, 34(2): 258-262.
- [24] Zeng T Y, Du F. Image super-resolution reconstruction based on hierarchical clustering [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(4): 0410004.
曾台英, 杜菲. 基于层次聚类的图像超分辨率重建 [J]. 光学学报, 2018, 38(4): 0410004.
- [25] Gu X L, Yang M, Wang B, *et al.* Lane detection and

recognition based on around-view system[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition), 2013(z1): 233-236.

顾霄琳, 杨明, 王冰, 等. 基于环视的道路标线检测与识别[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2013

(z1): 233-236.

[26] Borkar A, Hayes M, Smith M T. A novel lane detection system with efficient ground truth generation [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2012, 13(1): 365-374.