

基于 Gabor 滤波器的车道线快速检测方法

杜恩宇, 张 宁, 李艳获

(长春理工大学 光电工程学院 光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室, 吉林 长春 130022)

摘 要: 针对在全景相机获取到的高交通信息量的复杂场景下传统 Canny 算子很难实时且鲁棒地提取车道线特征的问题, 提出一种基于 Gabor 滤波器的最优方向区间快速检测算法。首先利用同心圆环近似展开法将全景图像展开成矩形图像, 然后对展开图像进行不同相位角的 Gabor 滤波处理, 快速得到使车道线边缘清晰度达到最高的方向区间。在 Canny 算子检测边缘过程中, 只对处于该区间内的边缘点进行非极大值抑制及进一步处理, 实现车道线的快速检测。最后算法在实拍的 500 帧视频样本上进行测试, 识别率优于 94.2%。结果表明所提算法不易受复杂环境影响, 可用性强, 有效地提高了车道偏离预警系统的实时性与稳定性。

关键词: 车道线检测; Gabor 滤波器; Canny 算子; 非极大值抑制

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0817008

Lane line quick detection method based on Gabor filter

Du Enyu, Zhang Ning, Li Yandi

(Key Laboratory of Optoelectric Measurement and Optical Information Transmission Technology of Ministry of Education, School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: Aiming at the problem that it's difficult for traditional Canny edge detection operator to extract the lane line features robust in real-time in complex scenes of a large amount of traffic information, an improved method for the optimal direction interval quick detection based on Gabor filter was proposed. First, the panoramic image was expanded into a rectangular image by the concentric circle approximation expansion method. Then the expanded image was processed by Gabor filter with different phases, thus obtaining the direction interval which had the highest clarity of the lane line quickly. In the process of edge detection with Canny operator, only the edge points in the optimal interval were used for non-maximum suppression and further processing. Finally, the algorithm was tested on 500 real images for videos, and the recognition rate could be better than 94.2%. The results show that the proposed method is robust for complex environment and has strong feasibility, which can effectively improve the real-time performance and stability of lane departure warning system.

Key words: lane line detection; Gabor filter; Canny operator; non-maximum suppression

收稿日期: 2018-03-05; 修订日期: 2018-04-10

基金项目: 吉林省科技发展计划(20170204048GX)

作者简介: 杜恩宇(1992-), 男, 硕士生, 主要从事图像处理、计算机视觉、模式识别等方面的研究。Email: 810130931@qq.com

导师简介: 张宁(1979-), 女, 副教授, 博士, 主要从事图像处理、光电检测技术及质量控制等方面的研究。Email: custzn@126.com

0 引言

据交通部统计,每年约有 50% 的汽车交通事故是因为汽车偏离正常的行驶车道引起的,车道偏离预警系统作为智能车自动驾驶系统核心技术之一,能够辅助驾驶者安全驾驶,降低事故发生率。

伴随着机器视觉技术日益成熟,摄像头在车辆上的应用越来越广,和传统的电子导航、激光雷达等多传感器通过信息融合来感知并预警的模式相比,成本低廉,安装便捷,因此基于机器视觉的车道线检测方法备受关注。其主要可以分为特征点法和模型法。特征点法是利用了车道线边缘与周围环境间的差异提取出车道线特征点进行后续检测;Heechul Jung 等^[1]通过提取车道线的 Harr 特征与基于车道线的高灰度值及固定宽度提取的特征点进行匹配;吴彦文等^[2]采用水平方向的扫描线检测出车道线边缘点;李亚娣等^[3]在传统 Canny 算子的基础上提出了一种带有斜率约束的边缘检测算法提取道路内测车道线的特征点;王鑫等^[4]根据图像透视变换原理设置了上密下疏的变间距扫描线并结合车道线宽度扫描得到车道线边缘特征点。模型法是针对结构化道路的几何特征建立相应的车道线模型进行后续检测;张翀等^[5]经误差分析将高速公路上的弯道近似看作直线,建立车道线的直线模型,提高了检测过程的实时性;隋靛等^[6]对车道线的直线和曲线部分采用两种不同模型分段切换的方式进行识别。不论是特征法还是模型法,边缘检测在车道线检测中都是十分重要的技术手段,但是单一的边缘检测受环境噪声影响大,当场景复杂时往往检测出不必要的边缘,降低了系统效率和检测结果的准确性,通常需要结合宽度滤波,扫描线等方式来对车道线边缘进行提取,降低了边缘检测的效率。目前,对于 Canny 算子抑制噪声的改进主要集中在通过阈值选取和图像平滑两方面实现,Zuraini Othman 等^[7-8]以不同分辨率级别将一幅图像等分成 $m \times m$ 份,对一个级别内的所有分割图像采用 Otsu 算法计算阈值,并分别选取所有阈值中的最小值和所有阈值的平均值作为 Canny 算子双阈值连接中的高阈值,结果证明两种方法都能随着 m 的提高减小噪声对边缘检测的影响,强化了图像中对比度高的细节,但易受道路上白色车辆的影响,检测

时不能将其边缘排除;参考文献[9-10]对基于小波变换的多尺度边缘检测方法分别在梯度和阈值两方面进行了改进,这些方法兼顾了平滑噪声和保护边缘,但是对于复杂环境下的道路图像易出现过保护,导致检测过程中提取出非车道线边缘产生误检。

不同于已有方法,文中针对 Canny 算子的非极大值抑制过程,提出一种利用 Gabor 滤波器最佳梯度方向区间的快速搜索方法,利用同心圆环近似法对全景环形图像进行展开,通过预处理获得梯度图像后,利用 Gabor 滤波器对其进行多角度滤波处理,得到最优方向区间,有效剔除复杂环境中的噪声干扰,实现车道线的快速粗定位。然后对区间内的像素进行非极大值抑制,针对梯度方向上的亚像素值,采用线性插值的方法确定其像素值并与边缘点进行极大值比较,检测出边缘,通过 Hough 变换检测边缘图像中的直线,最后通过实验测试表明,所提算法对复杂环境的鲁棒性较强,能够显著提高车道线系统的识别精度及检测效率。

1 环视全景图像展开

全景相机的视场可以达到 360° 全覆盖,能实现单个传感器对于车辆四周的情况同时监控,采集图像如图 1 所示。



图 1 全景相机采集到的图像

Fig.1 Image acquired by the panoramic camera

从图 1 中可以看出,全景相机的超大视角可以一次性获取车辆四周的环境信息,但同时也引入了严重的径向畸变。为了提取有效的车道线特征,需要展开成符合人眼视觉效果矩形图像。采用同心圆环近似展开法对图像进行展开,图 2 为展开原理图。

同心圆环近似展开法的基本思想是将图 2(a)中半径 $r \in [R_1, R_2]$ 的每一个圆环展开成直线,公式(1)为展开得到的矩形图像长宽,通过公式(2)将 Q 点经

缩放处理映射到图 2(b)的 Q' :

$$\begin{cases} \text{height} = R - r \\ \text{width} = 2\pi \times (R - r) \times \gamma / 2 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} x = x_0 + (R_1 + y') \times \sin \left[\frac{x'}{\gamma \times \frac{(R_1 + R_2)}{2}} \right] \\ y = y_0 + (R_1 + y') \times \cos \left[\frac{x'}{\gamma \times \frac{(R_1 + R_2)}{2}} \right] \end{cases} \quad (2)$$

式中: (x_0, y_0) 为环形图像的圆心坐标; γ 为图像的长宽校正因子。

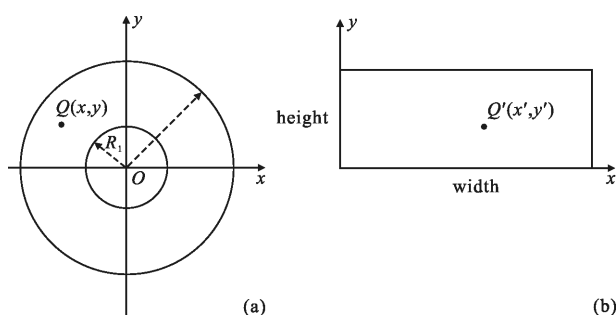


图 2 同心圆环近似展开法原理

Fig.2 Principle of the concentric circle approximation expansion method

由于只需要取除全景相机本身以外的景物,因此 R_1 取定为全景相机的半径,展开后的图像如图 3 所示。



图 3 展开后图像
Fig.3 Expanded image

2 基于 Gabor 滤波的最佳梯度区间快速搜索

首先对展开后的图像进行预处理,得到梯度图像。然后在非极大值抑制过程中,对梯度图像采用 Gabor 滤波器对最佳梯度区间进行快速搜索,并将梯度图像中梯度方向不在最佳角度区间内的边缘点将其像素置为 0,只对属于最佳角度区间内的点应用非极大值抑制检测边缘,最终得到车道线检测结果。先针对最佳梯度区间的选择策略进行介绍。

2.1 图像预处理

展开后的全景图像提供了车辆周围的全部环境信息导致视野内干扰因素增加,道路老化导致的车

道线颜色变浅,都可能影响后续检测的准确性,因此需要对图像进行预处理,以提高后续检测的有效性及鲁棒性。

由于车道偏离预警系统主要对车辆所在车道前方的车道线进行检测,因此只需要提取车辆前方的不含车顶的图像作为有效区域进行车道线检测,展开后的图像中,车前方部分处于图像右半部分,车顶占据图像下侧 1/3 部分,因此取展开后图像的 1/2 宽度、2/3 高度作为图像的有效区域,获得的有效区域如图 4 所示。



图 4 有效区域
Fig.4 Valid area

利用 Gamma 变换增强算法对道路图像进行增强^[11],提高车道线与道路的对比度以保证后续识别的准确性。如公式(3)所示,当 γ 小于 1 时, $\text{gray}_{\text{input}}$ 越小,增强效果越明显;当 γ 大于 1 时, $\text{gray}_{\text{input}}$ 越大,增强效果越明显。

$$\text{gray}_{\text{output}} = (\text{gray}_{\text{input}})^\gamma \quad \text{gray}_{\text{input}} \in [0, 1] \quad (3)$$

由于车道线呈白色,在图像中属于灰度值较高的像素,因此选择大于 1 的 γ 值对有效区域进行增强,将 γ 值置为 3,然后将图像像素灰度值归一化到 $[0, 1]$ 区间内,利用公式(3)进行像素值计算,得到的 Gamma 增强图像如图 5 所示。



图 5 增强图像
Fig.5 Enhanced image

为了抑制图像噪声干扰,文中选用具有平滑噪声特性的 3×3 形式的 Sobel 边缘检测算子模板进行计算,求取梯度幅值及方向以便于后续计算。获得的梯度图像如图 6 所示。



图 6 梯度图像
Fig.6 Gradient image

2.2 Gabor 滤波器

Gabor 滤波器的频率和方向表达与人类视觉系统中简单细胞的视觉刺激响应非常相似,它对于图像的边缘敏感,能够提供良好的方向选择和尺度选择特性,Gabor 滤波器可以抽取空间局部频度特征,在提取目标的局部空间和频率域信息方面具有良好的特性,有利于纹理分离。由于全景展开图像与正常矩形图像相比仍然存在微小的径向畸变,因此快速搜索的结果是一个角度区间以保证车道线被完整检测。

二维 Gabor 滤波器是由正弦信号调制的高斯核函数,Gabor 滤波器的奇函数部分可以进行边缘提取, θ 方向上的二维 Gabor 滤波器的奇函数由一个高斯函数和一个正弦函数相乘得到,由公式(4)表示:

$$g(x, y, \sigma, \lambda, \theta) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x^2+y^2}{\sigma^2}\right)\right] \cdot \sin\left[\frac{2\pi}{\lambda}(x\cos\theta+y\sin\theta)\right] \quad (4)$$

式中: x, y 代表像素坐标; σ 代表高斯函数的标准差; λ 代表 Gabor 滤波器的波长,是 Gabor 滤波器并行条纹的数量; θ 代表 Gabor 滤波器方向角,是 Gabor 滤波器并行条纹的方向。

波长 λ 的值以像素为单位指定,通常大于等于 2,文中取 $\lambda=5$,改变 Gabor 滤波器的方向角,以步长 $\pi/6$ 将 $\lambda=5$ 的 Gabor 滤波器划分为六个角度区间,在不同方向角下的 Gabor 核函数效果图如图 7 所示。



图 7 $\lambda=5$, Gabor 滤波器的方向角步长为 $\pi/6$ 时核函数效果图
Fig.7 Effect pictures of Gabor filter's kernel function when $\lambda=5$, step of orientation angle is $\pi/6$

当 Gabor 滤波器的方向角改变时,边缘响应也随之变化,用这六个不同方向角的滤波器分别对有效区域图像进行滤波,得到六种不同边缘响应的边缘图像,如图 8 所示。

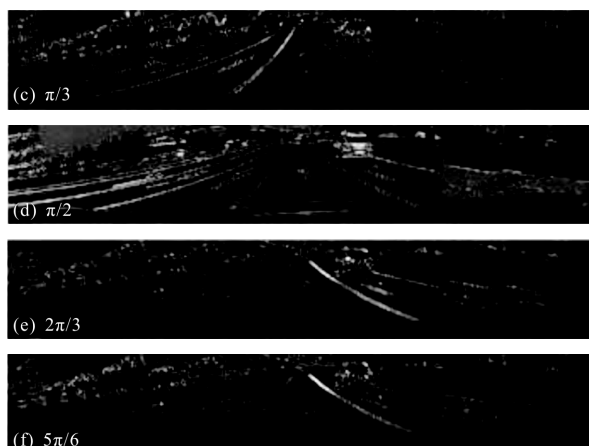
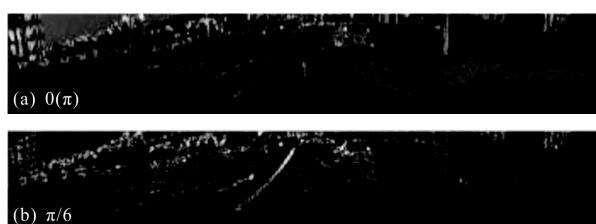


图 8 六种不同边缘响应的边缘图像
Fig.8 Edge images of six different kinds of edge responses

滤波器方向角变化产生的边缘响应不同,使得图 8 中各边缘图像的强边缘差异较大。

2.3 最佳梯度方向区间提取

提取最佳梯度方向区间,通过求取不同边缘响应图像车道线区域像素的平均灰度值,选择最大值所对应的滤波器方向角确定。由于边缘方向与梯度方向垂直,通过方向角即可得到最佳梯度方向区间。提取出有效区域图像中期望检测到的车道线中心线的起始坐标和终点坐标,分别沿 x 轴向左右各移动 30 个像素构成一个包含全部车道线像素的四边形区域,如图 9 所示。

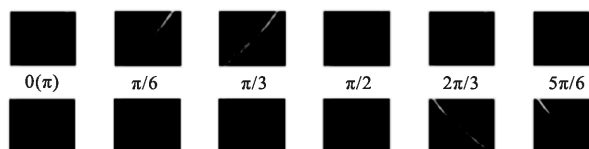


图 9 计算区域
Fig.9 Computing area

将这个四边形区域对应的顶点坐标放置在边缘图像中构成相同的四边形,计算每幅边缘图像中该四边形内所有像素值不为 0 的点的平均灰度值 \bar{m} :

$$\bar{m} = \frac{\sum_{i=1}^{\text{sum}} m_i}{\text{sum}} \quad (5)$$

式中: sum 为像素值不为 0 的像素点总数; m_i 为每一个不为 0 点的灰度值。在车道线所在区域内的像素平均灰度值 \bar{m} 越大,说明车道线边缘在相应的 Gabor 滤波器下的响应越好。利用公式(5)对两侧车

道线区域的灰度均值计算并四舍五入取整，结果如表 1 所示。

表 1 车道线区域灰度均值计算结果

Tab.1 Results of lane line area's mean value of grayscale

Phase angle of Gabor filter	Mean value of left lane line pixels	Mean value of right lane line pixels
$0(\pi)$	28	28
$\pi/6$	101	29
$\pi/3$	102	28
$\pi/2$	22	29
$2\pi/3$	22	102
$5\pi/6$	22	104

由表 1 得出，在 Gabor 滤波器取方向角为 $\pi/6$ 、 $\pi/3$ 、 $2\pi/3$ 、 $5\pi/6$ 时，对于车道线边缘的响应较好。由于边缘方向与梯度方向垂直，将 $[\pi/6, \pi/3]$ 、 $[2\pi/3, 5\pi/6]$ 两个角度区间作为最佳梯度方向区间。

3 非极大值抑制算法改进

非极大值抑制指寻找某一区域内像素点的局部最大值，并将非极大值点所对应的灰度值置为 0，从而剔除一大部分非边缘的点并细化边缘。边缘点 A 及其 8 邻域像素如图 10 所示，直线为梯度方向，要确定 A 为边缘点，就要确定 A 的梯度幅值大于 A 点梯度方向与其 8 邻域内交点的梯度幅值 Tmp1 和 Tmp2。那么对于 360° 范围内每个梯度方向上的每一个边缘点都要进行一次交点处幅值的求取与比较，计算量大，且易产生漏检误检。

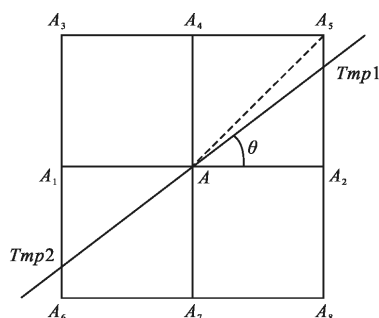


图 10 边缘点 A 的梯度方向及其 8 邻域

Fig.10 Gradient direction of edge point A and its 8 neighborhoods

针对非极大值抑制过程中效率低、准确率不高的问题，文中对算法做出了如下改进：将非极大值抑制过程中图 10 所示的梯度方向直线限制在最佳梯度方向区间内，当待判断边缘点的梯度方向不在这个区间内，直接将该点像素置为 0，只有在该区间内，才进行非极大值抑制的比较过程。算法流程图如图 11 所示。

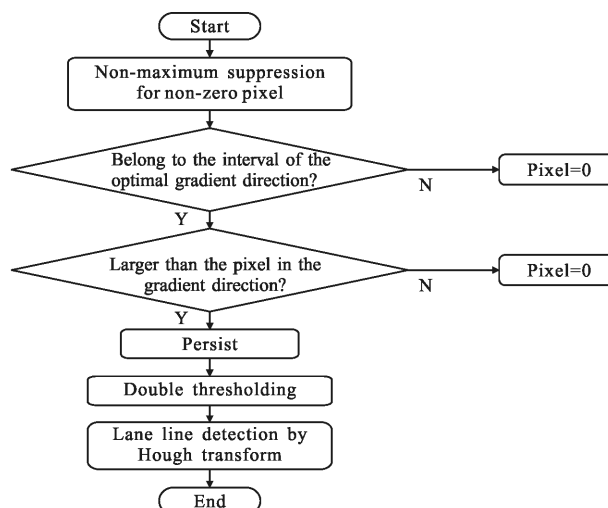


图 11 改进算法流程图

Fig.11 Flow chart of improved algorithm

如图 12 所示，经过改进算法处理后，梯度方向被限定在最佳区间内，只有当梯度方向直线在 1、2、3、4 四个区域内，才将 A 点与直线上前后两点进行大小比较。

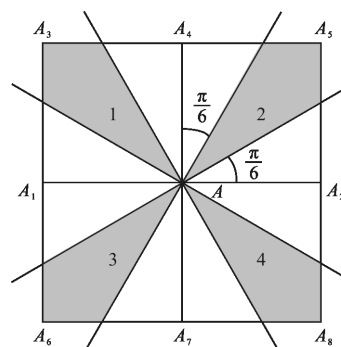


图 12 最佳梯度方向区间

Fig.12 Interval of the optimal gradient direction

由于在实际图像中只能得到 A 点 8 邻域八个像素的梯度幅值，直线交点 Tmp 为亚像素值，为求得这个值，对亚像素点的相邻两点采用了线性插值，

以图 10、梯度方向在 1 区下边界为例,当梯度方向直线交点为 $Tmp1$,梯度方向为 $\theta(\theta \in [\pi/6, \pi/4])$,对与 $Tmp1$ 相邻的两点 A_2 、 A_5 进行线性插值,将 A_2 、 A_5 处梯度幅值之比转化为梯度方向之比,插值公式如下:

近似看作

$$\frac{GrabA_2}{GrabA_5} = \frac{\tan\theta}{\tan(45^\circ - \theta)} \quad (6)$$

若 $GrabA_2 + GrabA_5 = 1$,联合公式(6)得到:

$$\begin{cases} GrabA_2 = \frac{1}{\left(1 + \frac{\tan\theta}{\tan(45^\circ - \theta)}\right)} \cdot \frac{\tan\theta}{\tan(45^\circ - \theta)} \\ GrabA_5 = \frac{1}{\left(1 + \frac{\tan\theta}{\tan(45^\circ - \theta)}\right)} \end{cases} \quad (7)$$

由此得到插值公式(8):

$$GrabTmp1 = \frac{1}{\left(1 + \frac{\tan\theta}{\tan(45^\circ - \theta)}\right)} \cdot \frac{\tan\theta}{\tan(45^\circ - \theta)} \cdot GrabA_5 + \frac{1}{\left(1 + \frac{\tan\theta}{\tan(45^\circ - \theta)}\right)} \cdot GrabA_2 \quad (8)$$

同理根据公式(8)对 A_1 、 A_6 插值求得 $Tmp2$ 。将 A 点梯度幅值与线性插值求得的 $Tmp1$ 、 $Tmp2$ 进行比较,只有 A 大于这两个值时保留边缘点 A ,否则将 A 点像素置为 0。从图 13 可以看出,梯度图像经过基于最佳梯度方向区间的非极大值抑制处理后,边缘图像较完整地保留了车前方车道线,同时滤除了周边干扰景物的边缘。



图 13 非极大值抑制

Fig.13 Non-maximum suppression

经非极大值抑制后提取到的边缘明显得到了优化,但是仍然有部分噪点,利用 Canny 算子中的双阈值法对边缘点进行连接,去除孤立边缘点。传统 Canny 算子中双阈值一般通过手动选取,通常取高阈值为整体灰度级分布的 70%,低阈值为高阈值的 1/2,文中采用 OTSU 算法对阈值进行自动选取,由 OTSU 算法计算得到的阈值作为高阈值 T_h ,并将高阈值的 1/2 作为低阈值 T_l ,则有:

$$g = \begin{cases} 255 & g > T_h \\ g_1 & T_l < g \leq T_h \\ 0 & g \leq T_l \end{cases} \quad (9)$$

式中: g_1 的取值定义为若该点 8 邻域内有灰度值为 255 的像素, g_1 取值 255,否则 g_1 取值为 0。

经双阈值处理后的图像如图 14 所示,文中 $T_h = 140$, $T_l = 70$ 。



图 14 双阈值处理

Fig.14 Double threshold method for processing

双阈值法进行边缘检测和连接后排除掉了非极大值抑制中没有过滤掉的孤立点,增强了车道线边缘,对该图像进行 Hough 变换,即可准确查找到车道线所在直线,不易受周围环境干扰。

4 实验结果及分析

文中算法的实现基于 Visual Studio 2012 编译环境,实验测试平台为电脑,操作系统为 Windows 10 64 bits,CPU 主频为 3.20 GHz,8 GB 内存,2 GB 显存。采集设备为 XN-DR01 型号的折反射式全景相机,帧频为 25 帧/s,图像分辨率为 1 600×1 200。实验分别对车道线的识别能力与识别速度进行测试。

首先,从采集得到的城市道路视频中随机抽取 500 帧图像,将其实时展开为矩形图像用于车道线识别实验,以评价算法的准确性与实时性。图 15 为该算法对随机选取的两帧图像进行车道线识别,图 15(a)、(c)、(e)为原始图像,图 15(b)、(d)、(f)为车道线检测结果。可以看出该算法能够准确地识别出车道线。





图 15 识别结果

Fig.15 Results of recognition

文中选取了参考文献[1]、[4]与[5]中的算法与文中提出的算法在车道线的识别率和识别速度上进行对比。为保证实验的公平性,实验环境和测试图像均保持一致,以帧数为单位进行统计,从漏检率(missing detection rate)和误检率(false detection rate)两方面对算法的识别准确率进行定量评价。漏检率 M 与误检率 F 的定义如下:

$$M = \frac{MP}{TP+MP}, F = \frac{FP}{TP+FP} \quad (10)$$

式中:TP 表示的是车道线被正确识别的图像帧数;MP 表示车道线被漏检的图像帧数;FP 表示场景内容被误判成车道线的图像帧数。两种算法的识别速率(frame rate)和准确率(accuracy rate)如表 2 所示。

表 2 算法评估结果

Tab.2 Results of algorithm evaluation

	Total frame	Success frame	False rate	Missing rate	Accuracy rate	Frame rate/frame · s ⁻¹
Method [1]	500	453	1.8%	7.6%	90.6%	11
Method [4]	500	442	4.0%	5.6%	90.4%	21
Method [5]	500	462	8.9%	2.7%	88.4%	13
Proposed	500	471	4.6%	1.2%	94.2%	29

从表中可以看出,文中提出的算法对于城市道路车道线识别准确率更高,速度更快。参考文献[1]通过计算积分图提取 Harr 特征能够准确提取车道线特征,但计算量大,而且对摄像头放置位置要求较高,在处理全景相机获取的道路图像时计算速度慢,由于周围景物干扰导致误检和漏检;参考文献[4]中的扫描线逐点扫描的算法实时性较好,但是当正前方有车辆时可能会将白色车辆误判为特征点,导致

识别不准确;参考文献[5]中所采用的改进 Hough 变换算法检测最长的直线,可能会误检其他车道的车道线且运行效率较低。

上述几种算法产生漏检误检的主要原因在于当周围环境较为复杂时不能准确识别车道线,在处理图像时数据量较大导致运行效率较慢,文中算法经过 Gabor 滤波器预处理在非极大值抑制抑制过程中相比于上述算法需要计算的数据量更少,处理速度更快,提高算法运行效率,边缘检测处理后只保留了车道线边缘,对于复杂环境下的车道线检测避免了特征点提取时可能出现拟合错误车道线,优化了检测过程,提高了算法准确率。经过分析,文中算法产生误检和漏检的原因主要来源于车辆变道时车头方向变化导致车道线在短时间内不在 Gabor 滤波器选择的最佳角度区间内,导致后续处理出现偏差。

5 结论

文中首先对全景相机获取到的环形道路图像采用同心圆环近似展开法进行展开得到矩形图像,在实现了单个车载摄像头获取更多交通信息量的同时消除了径向畸变,符合人眼视觉。其次在车道线检测过程中实现了基于 Gabor 滤波器选择 Canny 算子非极大值抑制过程中的最佳梯度方向区间,从而利用改进后的 Canny 算子进行复杂道路环境的边缘检测。在全景相机获取到的道路图像中,该算法排除了环境中非车道线边缘的干扰,经验证算法检测精度优于 94.2%,有效提升了车道线检测的实时性与准确性。

在该算法中,非极大值抑制过程中亚像素值的求取采用了线性插值的方式,计算方式不够精确,Gabor 滤波器只针对于当前图像帧中车辆前方的车道线进行最佳梯度方向区间的获取,存在车辆变道时的车道线无法实时检测的问题。在接下来的研究中可以针对亚像素值求取的插值方法以及车辆变道时的车道线跟踪等问题进行深入研究,优化该系统对于车道线的识别能力。

参考文献:

[1] Jung H, Min J, Kim J. An efficient lane detection algorithm for lane departure detection [C]//IEEE Intelligent Vehicles

- Symposium, 2013: 976-981.
- [2] Wu Yanwen, Zhang Nan, Zhou Tao, et al. Research of lane detection and tracking methods based on multi-sensor fusion [J/OL]. Application Research of Computers, 2018 (2): 1-2 [2017-12-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1196.TP.20170315.1037.098.html>. (in Chinese)
吴彦文, 张楠, 周涛, 等. 基于多传感融合的车道线检测与跟踪方法的研究 [J/OL]. 计算机应用研究, 2018(2): 1-2. [2017-12-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1196.TP.20170315.1037.098.html>.
- [3] Li Yadi, Huang Haibo, Li Xiangpeng, et al. Nighttime lane markings detection based on Canny operator and Hough transform [J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(31): 234-237, 242. (in Chinese)
李亚娣, 黄海波, 李相鹏, 等. 基于 Canny 算子和 Hough 变换的夜间车道线检测 [J]. 科学技术与工程, 2016, 16(31): 234-237, 242.
- [4] Wang Xin, Liu Yuchao, Hai Dan. Lane detection method based on double ROI and varied-line-spacing scanning [J]. Journal of Command and Control, 2017, 3 (2): 154-159. (in Chinese)
王鑫, 刘玉超, 海丹. 基于双重 ROI 和变间距扫描的车道线检测 [J]. 指挥与控制学报, 2017, 3(2): 154-159.
- [5] Zhang Chong, Fan Xinnan. Approach for real-time lane detection based on linear model [J]. Computer Engineering and Design, 2017, 34(8): 201-205. (in Chinese)
张翀, 范新南. 基于直线模型的车道线实时检测方法 [J]. 计算机工程与设计, 2017, 34(8): 201-205.
- [6] Sui Jing, Dang Jianwu, Wang Yangping. Fast lane line detection based on piecewise switching model [J]. Computer Applications and Software, 2017, 34 (8): 201-205. (in Chinese)
隋靓, 党建武, 王阳萍. 基于分段切换模型的快速车道线检测 [J]. 计算机应用与软件, 2017, 34(8): 201-205.
- [7] Othman Z, Abdullah A, Prabuwno A S. A statistical approach of multiple resolution levels for Canny edge detection [C]//IEEE Intelligent Systems Design and Applications (ISDA), 2012: 837-841.
- [8] Othman Z, Abdullah A. An adaptive threshold based on multiple resolution levels for Canny edge detection [C]// International Conference of Reliable Information and Communication Technology, 2017: 316-323.
- [9] Zhang Hongqun, Zhang Xue, Xiao Wangxin. Adaptive thresholds edge detection for image based on wavelet transform [J]. Infrared and Laser Engineering, 2003, 32(1): 32-36, 41. (in Chinese)
张宏群, 张雪, 肖旺新. 小波变换的自适应阈值图像边缘检测方法 [J]. 红外与激光工程, 2003, 32(1): 32-36, 41.
- [10] Dong Hongyan, Zhang Zhilong, Li Jicheng, et al. Multi-scale edge detection based on standard gradient [J]. Infrared and Laser Engineering, 2006, 35(S4): 280-285. (in Chinese)
董鸿燕, 张志龙, 李吉成, 等. 基于标准化梯度的多尺度边缘检测方法 [J]. 红外与激光工程, 2006, 35(S4): 280-285.
- [11] Shin Y, Jeong S, Lee S. Content awareness-based color image enhancement [C]//IEEE International Symposium on Consumer Electronics, 2014: 1-2.