

一种基于形态学与边缘点投票统计的 车道线快速检测算法

凤鹏飞¹, 金会庆¹, 蒋玉亭²

(1. 安徽三联学院 交通工程学院, 合肥 230601; 2. 广州汽车集团股份有限公司, 广州 511458)

摘要:提出了一种基于形态学与边缘点投票统计的车道线快速检测算法,在道路图像感兴趣区域内进行数学形态学颗粒分析和骨架化,获取车道中心线,再进行车道边缘点筛选与投票,通过统计搜索的方式检测出车道线。实验采用数字信号处理芯片 DSP 为图像处理硬件开发平台,在软件系统 CCS 下调试程序。实验结果表明,该算法在车道偏离预警系统中运行具有较好的车道线检测效果,在复杂行驶环境下能正常运行,鲁棒性能较好。

关键词:形态学;边缘点投票统计;车道线检测算法

中图分类号:TP391.41;U467.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-349X(2017)06-0001-07

DOI:10.16160/j.cnki.tsxyxb.2017.06.001

A Fast Lane Detection Algorithm Based on Morphology and Edge Point Voting Statistics

FENG Peng-fei¹, JIN Hui-qing¹, JIANG Yu-ting²

(1. College of Traffic Engineering, Anhui Sanlian University, Hefei 230601, China; 2. Guangzhou Automobile Group Co., Ltd., Guangzhou 511458, China)

Abstract: In this paper, a fast lane detection algorithm based on morphology and edge point voting statistics is presented, which can detect lane lines by conducting a mathematical morphological particle analysis of and skeletonizing the areas of interest of road images, obtaining the lane center line, and screening and voting on the lane edges. In the experiment, digital signal processing chip DSP is used as the hardware of development platform of the image processing, and the system is debugged with the software of CCS. The experimental results show that the algorithm can effectively detect lane lines in the lane departure warning system and the robust performance is good, even in the complex driving environment.

Key Words: morphology; edge points voting statistics; lane detection algorithm

0 引言

随着我国道路的改善以及汽车工业的快速发展,汽车数量急剧增加,交通事故也随之增加。其中,车辆在高速公路上行驶时,由于驾驶

员的疲劳驾驶或者误操作导致了很多交通事故的发生。为避免此类事故,目前越来越多的车道偏离预警系统被应用在车辆中。为保证车道偏离预警系统的可靠性,车道线识别算法必须

基金项目:国家自然科学基金项目(51375131,51675151);安徽省教育厅自然科学基金项目(KJ2016A890)

作者简介:凤鹏飞(1979—),男,安徽宿州人,讲师,硕士,主要从事道路交通安全研究。

具备良好的实时性和鲁棒性。

近年来,许多学者对车道识别进行了深入的研究。在道路模型研究方面,用于拟合车道的模型主要有直线模型^[1-2]、样条曲线模型^[3-5]、双曲线模型^[6-7]等。文献[8]采用改进的 Hough 变换,基于现场可编辑门阵列(FPGA)和数字信号处理器(DSP)实现了实时车道线的检测,但是该文中的算法具有一定的局限性,只适用于直线道路且光照强的环境。文献[9]采用 HSV 色彩空间进行彩色图像的处理,可识别黄色和白色的标识线,此方法对光源敏感,难以实现道路检测的鲁棒性。文献[10]提出了一种自适应车道线识别算法,可识别各种复杂道路状况下的车道线,但算法识别的实时性有待进一步提高。

针对上述问题,本文提出一种基于形态学与边缘点投票统计的车道线快速检测算法,以满足检测的实时性与准确性要求。

1 车道线检测流程

本文所设计的车道线检测算法流程如图 1 所示。

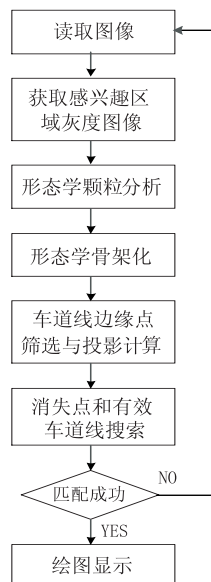


图 1 车道线检测算法流程

2 图像预处理

通过对摄像机传入的灰度图像进行二值化处理,然后采用数学形态学的颗粒分析以减少噪声点和道路中车辆的干扰,再通过形态学骨架化方法获得车道中心线,以提高车道线检测

的精度^[11-12]。在车道线检测的基础上划分感兴趣区域,通过缩减检测区域的范围来减少冗余的数据,提高运算速度。

2.1 图像二值化

图像的二值化就是使用阈值化方法将图像像素变为只有两级(0 或 1)的图像,这样就得到了具有明显黑白效果的图像。二值化后的图像非常简单,并且含有的数据量也比较少,容易突显感兴趣目标的轮廓,因此它在数字图像处理中占据着非常重要的地位。

图像二值化公式如下:

$$g(x, y) = \begin{cases} 1 & f(x, y) > T \\ 0 & f(x, y) \leq T \end{cases} \quad (1)$$

式中, T 为二值化的阈值,取 0.3; $f(x, y)$ 为灰度图像; $g(x, y)$ 为二值化后的图像。

2.2 基于投影法的感兴趣区域(ROI)的划分

从几何光学的角度来考虑摄像机模型,并利用针孔模型完成中心投影,其几何关系如图 2 所示。

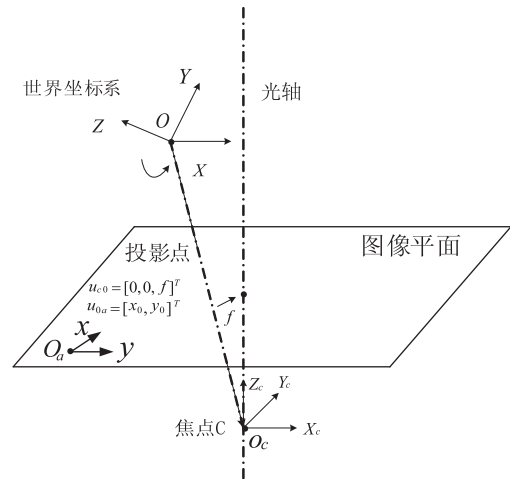


图 2 线性透视摄像机的几何关系

根据摄像机内部标定,由式(2)表示出摄像机坐标系中的点 (X_c, Y_c, Z_c) 和像素坐标中的像点 (x, y) 之间的关系。

$$\lambda \begin{bmatrix} y \\ x \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{K} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & y_0 \\ 0 & f & x_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中: $f = f_e$; λ 为常数因子; $\mathbf{K}$ 为摄像机内标定矩阵; f 为摄像机焦距; (x_0, y_0) 为图像物

理坐标原点在像素坐标系下的坐标; f_e 为摄像机等效焦距。

摄像机安装在车辆前挡风玻璃后方, 向下倾斜, 光轴位于车辆的纵向对称面内, 滚动角为 0。摄像机标定过程中已获得摄像机的倾斜角 ϕ 和摄像机高度 H ^[13], 由式(3) 表示世界坐标系与摄像机坐标系的关系。

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y+H \\ Z \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(2) 和式(3) 联立, 并消去 X_c, Y_c 和 Z_c , 得到:

$$\begin{cases} x = f_e \frac{H \cos \phi - Z \sin \phi}{(H+Y) \sin \phi + Z \cos \phi} + x_0 \\ x = f_e \frac{X}{(H+Y) \sin \phi + Z \cos \phi} + y_0 \end{cases} \quad (4)$$

当 $Z \rightarrow \infty$ 时, x 的值为 x_d , 即为路面的消失线方程:

$$x_d = \lim_{Z \rightarrow \infty} f_e \frac{H \cos \phi - Z \sin \phi}{(H+Y) \sin \phi + Z \cos \phi} + x_0 = -f_e \tan \phi + x_0 \quad (5)$$

这里设公路的路面亮度比较均匀, 与天空、高山或建筑物等背景有显著差异。因此, 可以利用亮度特征动态寻找每帧图像中路面与背景的分界线, 即道路消失线。为了提高运算速度, 采用隔行均值运算方法。一幅 $M \times N$ 的图像投影法可表示如下:

$$x_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N f(i, j), (i = 2, 4, 6, \dots, M) \quad (6)$$

式中, x_i 是第 i 行按水平方向列投影的灰度均值, $f(i, j)$ 则表示图像中像素点 (i, j) 的灰度值。

按上述处理方法获得的路面与背景的分界线如图 3 所示。

2.3 形态学颗粒分析

主要考虑将左右的车道线斜率化。由于人的视觉因素, 在看待直线车道角度时会被视作具有一定斜率的直线。根据相关数据分析, 摄像头的位置与自身车辆的移动会在某种程度上导致斜率变化区间为 $30^\circ \sim 60^\circ$ 。因此, 对于行驶车

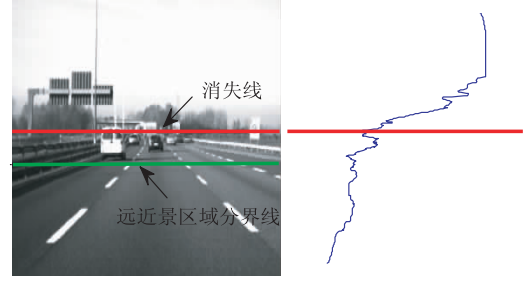


图3 路面与背景的分界线

辆的轨迹检测问题, 可取车道线的等同斜率变化的 $30^\circ \sim 60^\circ$ 的直线。本文确定的方向线结构元素为: 方向为 $\pm 45^\circ$, 大小为 5, 如图 4 所示。方向线结构 B1 用于提取左车道线, 方向线结构 B2 用于提取右车道线^[14]。

$$B1 = [(2, 2), (1, 1), (0, 0), (-1, -1), (-2, -2)],$$

$$B2 = [(-2, 2), (-1, 1), (0, 0), (1, -1), (2, -2)].$$

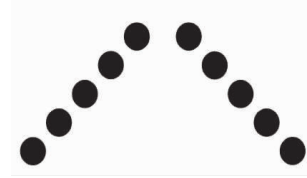


图4 方向线结构元素

具体提取左右车道线过程(假设 f 为道路图像) 如下:

左右车道线可表示为:

$$L = f \oplus B1 \oplus B2, \quad (7)$$

$$R = f \oplus B2 \oplus B1. \quad (8)$$

车道线特征:

$$C = f - L \cup R. \quad (9)$$

图 5 为经颗粒分析处理后的车道线图像。



图5 颗粒分析处理后的车道线图像

2.4 形态学骨架化

骨架是图像几何形态的一种重要拓扑特征,用骨架来表示一幅图像,既保持了图像的重要拓扑特征,又减少了图像中的冗余信息。这里假设骨架可以用中轴来定义:在 $t = 0$ 时,将图像 A 边界上的所有点同时点燃,火焰的前沿将以相同的速度向图像内部蔓延,当前沿相交时,火焰熄灭,火焰熄灭处所有点的集合就构成了中轴,即骨架 $S(A)$ ^[15]。

图像 A 的骨架 $S(A)$ 可以用腐蚀和开运算来表达,即骨架 $S(A)$ 的表达式为:

$$S(A) = \bigcup_{k=0}^K S_k(A), \quad (10)$$

其中, $S_k(A) = (A \ominus kB) - (A \ominus kB) \ominus B$ 。式中, B 是一个结构元,而 $(A \ominus kB)$ 表示对 A 的连续 k 次腐蚀:

$$(A \ominus kB) = (((A \ominus B) \ominus B) \ominus B)。 \quad (11)$$

D 是 A 被腐蚀为空集前的最后一次迭代步骤,可表示为:

$$D = \max\{k \mid (A \ominus kB) \neq \emptyset\}。 \quad (12)$$

对经颗粒分析处理后的车道线图像(见图 5)进行骨架化,得到的结果如图 6 所示。

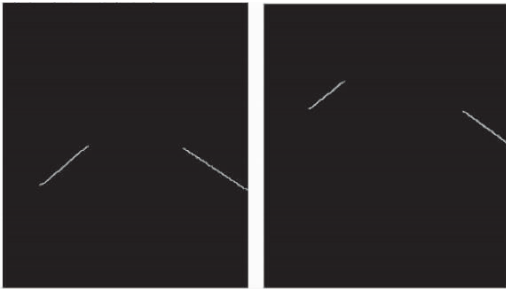


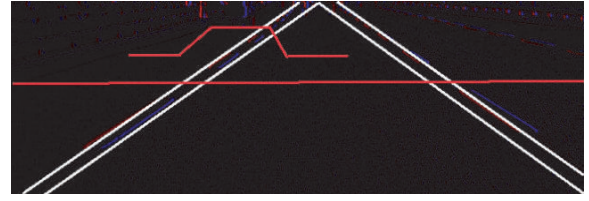
图 6 骨架化处理后的车道线图像

3 车道线检测

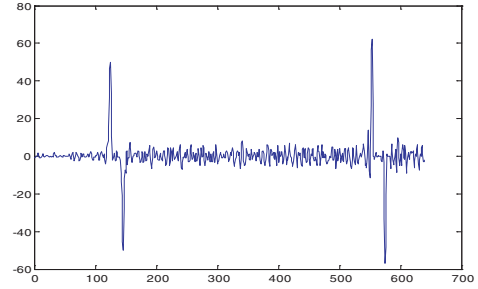
3.1 车道模型匹配

为提高检测算法的实时性,本文提出了一种车道边缘点筛选方法,此方法需要对图像逐行扫描,对于左侧车道,按行搜索满足设定阈值的最大图像梯度上升沿,若满足,则继续寻找与其相邻的最大图像梯度下降沿;同理,寻找右侧车道线与其相邻的最大图像梯度下降沿。整个搜索过程只遍历图像一次,便能够在有效排除干扰点的同时保持较小的计算时间损耗。筛选

结果如图 7 所示。



(a) 图像扫描



(b) 边缘点特征显示

图 7 车道边缘点筛选结果

根据筛选出的车道边缘点位置以及其梯度方向可以确定一条直线。求解该直线在图像上下两条横线上的截距 I_{up} , I_{down} (如图 8 所示),以截距作为索引进行计数统计,从而进行消失点搜索及左右侧车道线搜索。对于图像每个边缘点进行上下截距的计算,截距的统计结果见图 9。单列的表格左右车道线统计截距的数据点最多的即为消失点的位置 (x_v, y_v) ,再求取对应列截距 I_{up} , I_{down} 统计点的最大值,最后进行左右车道线的匹配。

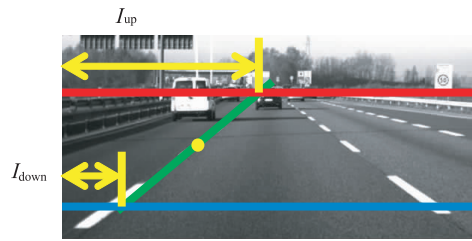


图 8 车道线截距选取

根据高速公路的设计准则,当车道由大地坐标系经过多重坐标系转换投影到像素坐标系下时,车道线方程可近似表达为^[16]:

$$y - y_v = E(x - x_v) + \frac{Q}{(x - x_v)}。 \quad (13)$$

式中 E 和 Q 可通过摄像机参数及安装位置计算获得。

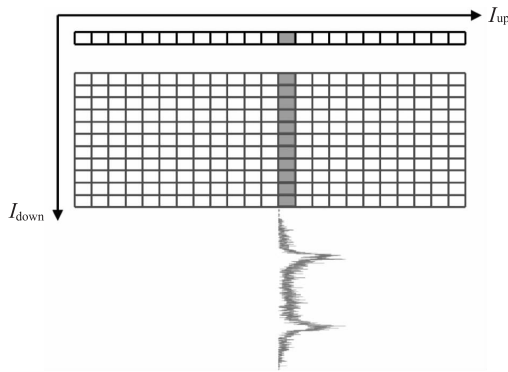


图 9 截距统计结果

若车道线匹配成功则对车道线进行参数寻优。考虑到大部分结构化道路在视野内的车道线可近似为直线,即在道路图像中的近端车道线趋近于直线;当前方车道为曲线型车道时,需在直线型车道的基础上对车道的曲率等参数进行寻优,以获得更加准确的车道信息^[17]。最终获得的车道线识别结果如图 10 所示。



图 10 曲线型车道线的识别结果

3.2 划分跟踪感兴趣区域

为进一步提高算法的实时性和准确性,在车道线被检测到之后,可以划分跟踪区域。以左车道为例,设其直线方程为 $y_1 l = k(x) + b$,则左车道线的感兴趣区域(ROI)可表示为:

$$\begin{cases} y_1 l = k(x+10) + b \\ y_2 l = k(x-10) + b \end{cases}, \quad (14)$$

式中的数字 10 是我们假定的车道线宽度,这是实验分析实际车道线的结果^[18]。

这里假定车道线在相邻的几帧中斜率变化不大,后期车道线检测只需在 ROI 中进行。若在 ROI 内检测不到车道线,说明车辆发生了较大的偏移,此时应该把检测范围扩大到整个区域。ROI 如图 11 中虚线框所示。

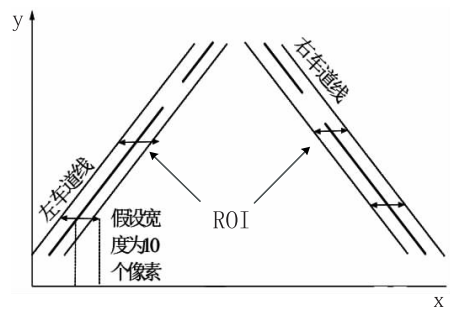


图 11 跟踪 ROI 划分示意图

4 实车实验验证

为验证算法的可靠性和实时性,本项目进行了道路实车实验。实验选用高速数字多媒体处理器 TMS320DM6437 为开发平台的主处理器,在集成开发环境 CCS 下实时仿真调试程序。实验系统布置如图 12 所示。把摄像头按要求安装在车内挡风玻璃正中央,安装高度必须在雨刮器的运动范围以内,且摄像头的光轴与水平面平行并朝向外面。在该处理器进行车道线检测后,通过显示器观测车道线检测结果。相关的实验部分参数如表 1 所示。

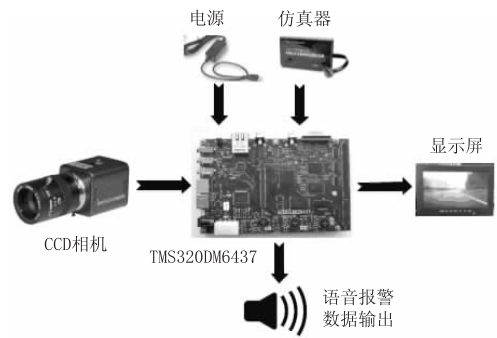


图 12 实验系统布置示意图

表 1 实验所涉及到的部分参数

参数	数值
等效焦距 f_e /mm	260
相机安装高度 H /m	1.2
相机安装俯仰角 f /($^\circ$)	8
帧率 F /fps	60
近视野直线角度调节范围 K_f /($^\circ$)	4
像素宽 V	576
像素长 U	720
车道宽度匹配阈值 W /pixel	400
标准车道宽度 d /m	3.75
最大曲率范围 $r_{\max}$ /m ⁻¹	± 0.2

实车实验结果表明,车辆行驶在高速公路的情况下,该算法受车辆颠簸和道路线模糊等复杂情况的影响极小,在强光、雨雾天气下都能较好检测并跟踪车道线,其结果如图 13 所示。该系统以 60 fps 的速度采集并处理像素为 720×576 的图像,在不同状况下的结构化道路的平均识别率能达到 93% 以上,如表 2 所示。



(a) 不同道路状况下的检测图像



(b) 检测仪器在车内布置

图 13 不同道路状况下的车道线检测结果

本文算法与文献[19]利用 Hough 变换、文献[20]利用边缘点信息识别车道线的算法进行对比,比较结果如表 3 所示,从中可以看出,本文算法识别速度与识别率均达到了较好效果。

表 2 不同状况下的车道线识别率

道路状况	总帧数	识别率(%)
晴天结构化道路	12 000	98.43
雨雾天气	12 000	87.50
遮挡干扰车道	8 000	94.22
大曲率道路	5 000	93.20

表 3 不同算法的识别速度与识别率

算法	识别速度/(ms/frame)	识别率(%)
本文算法	15	93.34
文献[19]	33	92
文献[20]	100 以内	93

5 结论

(1)通过形态学的方法,包括形态学颗粒分析、形态学骨架化,获取车道中心线,提高了算法的有效性。

(2)为提高检测算法的实时性,本文提出一种车道边缘点筛选的方法,整个搜索过程只遍历图像一次,便能够有效排除干扰点,而且保持较小的计算时间损耗。由于加入了算法失效判别,能及时处理突发状况,更适合实际应用。

(3)基于车道宽度的模板匹配方法,能够有效识别在模糊、阴影或车辆遮挡等情况下的车道线;并利用相邻帧连续变化的特点,划分跟踪的感兴趣区域进行车道线跟踪,提高了算法的运算速度。

(4)实车实验结果表明,本文提出的车道检测适合在 DSP 平台上运行,以 60 fps 的速度采集并处理图像,在不同状况下的结构化道路的平均识别率能达到 93% 以上。

参考文献:

- [1] Liu G, Worgotter F, Markeli I. Combining statistical hough transform and particle filter for robust lane detection and tracking[J]. Intelligent Vehicles Symposium IV, 2010, 44(1): 993 - 997.
- [2] Kuk J G, An J H, Ki H, et al. Fast lane detection & tracking based on Hough transform with reduced memory requirement[C]// International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems.

- IEEE, 2010: 1344 - 1349.
- [3] Lim K H, Seng K P, Ang L M. River flow lane detection and kalman filtering-based b-spline lane tracking[J]. International Journal of Vehicular Technology, 2012: 1687 - 5702
- [4] 王科, 黄智, 钟志华. 基于不定 Bezier 变形模板的城市道路检测算法[J]. 机械工程学报, 2013, 49(8): 143 - 150.
- [5] Wang Yue, Shen Dinggang, Teoh Eam Khwang. Lane detection using spline model[J]. Pattern Recognition Letters (S0167-8655), 2000, 21(8): 677 - 689.
- [6] Chen Q, Wang H. A real-time lane detection algorithm based on a hyperbola-pair model[C]//Intelligent Vehicles Symposium, IEEE, 2006: 510 - 515.
- [7] Zhou Yong, Xu Rong, Hu Xiaofeng et al. A robust lane detection and tracking method based on computer vision[J]. Measurement Science and Technology, 2006, 17(4): 736 - 745
- [8] Xiao J, Li S, Sun B. A real-time system for lane detection based on FPGA and DSP[J]. Sensing and Imaging, 2016, 17(1): 1 - 13
- [9] 邢征北, 郑南宁, 刘铁, 等. 道路检测算法及其 DSP 实时实现[J]. 微电子学与计算机, 2004, 21(5): 114 - 117.
- [10] Wu B F, Chen C J, Hsu Y P, et al. A DSP-based lane departure warning system [C]// International Conference on Mathematical Methods and Computational Techniques in Electrical Engineering. World Scientific and Engineering Academy and Society(WSEAS), 2006: 240 - 245.
- [11] 潘建平, 李治. 数学形态学多结构元素的道路提取[J]. 计算机工程及应用, 2010, 46(11): 233 - 234.
- [12] 陈功醇, 马玉贤, 贾志绚. 结合形态学的结构化车道线快速识别算法[J]. 计算机系统应用, 2014, 23(6): 187 - 190.
- [13] Wu Q, Zhang W, Chen T, et al. Prior-based vanishing point estimation through global perspective structure matching[C]//Acoustics Speech and Signal Processing (ICASSP), 010 IEEE International Conference on. IEEE, 2010: 2110 - 2113.
- [14] Shapira L, Shamir A, Cohen-Or D. Consistent mesh partitioning and skeletonization using the shape diameter function [J]. The Visual Computer, 2008, 24(4): 249 - 259.
- [15] Bencsik K, Ujj A, Stingli A, et al. An improved morphology connective criterion based on complete lattice for lane detection[J]. Medical Social Work, 2008, 2(1): 1 - 13.
- [16] Zhou Y, Xu R, Hu X, et al. A robust lane detection and tracking method based on computer vision [J]. Measurement Science & Technology, 2006, 17(4): 736 - 745.
- [17] 王家恩, 陈无畏, 汪明磊, 等. 车辆辅助驾驶系统中的三车道检测算法[J]. 汽车工程, 2014(11): 1378 - 1385.
- [18] Ding D, Lee C, Lee K Y. An adaptive road ROI determination algorithm for lane detection[C]//Tencon 2013 - 2013 IEEE Region 10 Conference. IEEE, 2013: 1 - 4.
- [19] Lin Q, Han Y, Hahn H. Real-time lane departure detection based on extended edge-linking algorithm[C]//Second International Conference on Computer Research and Development. IEEE, 2010: 725 - 730.
- [20] 初雪梅, 王珂娜, 张维刚. 基于分段直线模型的弯道识别算法的研究[J]. 汽车工程, 2012, 34(12): 1141 - 1149.

(责任编辑: 李秀荣)