高速公路弯道边界的识别与重建*

黄晓慧，郭　烈，李　兵，刘宝印
（大连理工大学 运载工程与力学学部 汽车工程学院，辽宁 大连 116024）

摘　要：分析了智能车辆安全辅助驾驶系统中弯道分道线的检测提取方法，提出一种基于道路区域分割的弯道检测新算法，包含道路区域分割和弯道边界检测。在分割出道路区域和天空区域并划定弯道检测的感兴趣区域后，提取分道线候选点，并对候选点进行校正，最终拟合并重建出弯道分道线，且准确判断了车道线弯曲方向。实验证明，该算法的实时性和准确性均高于在整幅图像中提取车道线的传统方法。

关键词：弯道检测；道路区域分割；感兴趣区域；弯曲方向
中图分类号：TP391　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1001-3695(2012)07-2787-03
doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.07.106

Recognition and reconstruction for expressway bent lane line

HUANG Xiao-hui, GUO Lie, LI Bing, LIU Bao-yin
(*School of Automotive Engineering, Faculty of Vehicle Engineering & Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian Liaoning* 116024, *China*)

Abstract: This paper described methods of bent lane line detection and extraction of intelligent vehicle safety assistant driving system. It introduced a new bent lane detection algorithm based on road segmentation, which was divided into road segmentation and bent lane detection. After dividing the road region and the sky region and determining the ROI for bent lane detection, extracted the candidate points, then correcting them, and finally fitted and reconstructed the bent lane lines. In addition, it judged out the curve direction of the bent lanes accurately. Experiments show that both the real-time performance and accuracy are improved comparing with the conventional method of extracting lane lines in the whole road image.

Key words: bent lane detection; road segmentation; region of interest (ROI); curve direction

据美国官方调查，在高速公路交通事故中，发生在弯道处的交通事故是其他道路条件下的 8 倍[1]，这是因为车辆在弯道路段易发生侧滑甚至侧翻。而基于机器视觉的车道线检测是实现车道偏离报警、车道保持等主动安全功能的一项关键技术[2]。因此，准确识别弯道边界并判断车道线的弯曲方向是保证车辆在弯道处安全行驶的重要前提。

目前弯道检测的方法有多种：一类是基于道路特征的方法，如模板检测法[3]、自适应随机 Hough 变换法[4]和区域生长法[3]等，这种方法要求车道线足够粗壮、清晰，且受周围环境的噪声影响较大[5]；还有一类是基于道路模型的方法，常见的道路模型有抛物线[6]、双曲线[7]、直线—抛物线[8]和线性双曲线模型[9]等，该方法只对特定的结构化道路或者标准等级的高速公路有较好的检测效果，但一种车道模型很难普遍适用于多种不同的道路，其鲁棒性较差。本文提出了一种基于道路区域分割的弯道检测方法，该方法通过动态确定二值化阈值来减少光照变化带来的影响，对不同的光照条件具有很好的适应性；另外还采用了区别于传统道路模型的二项式模型，该模型既简单又普遍适用于一般等级的高速公路弯道路段。其次，该方法能够准确定位感兴趣区域[10]，有效排除非道路区域的像素干扰，具有较强的鲁棒性；同时大大缩小了车道线特征点的搜索范围，进一步提高了算法的实时性。

1　图像预处理

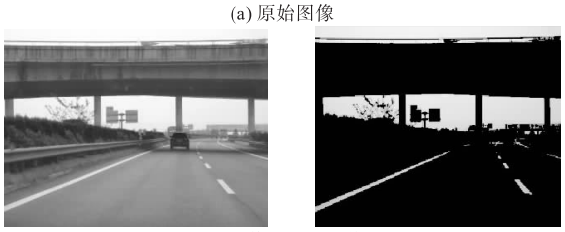
实验用 VC ++ 驱动彩色光学 CCD 图像传感器获取图像，并对获取的道路图像进行灰度处理、二值化、边缘检测和细化边缘等一系列预处理。其中二值化阈值的确定是重点也是难点，因为最佳阈值不仅能分割天空区域和路面区域，还应该能提取出车道线。实验中首先采用最大类间方差法确定初始阈值，该阈值仅对光线较亮的道路图像取得较好的二值化效果；然后计算这部分光线较亮的图像的平均灰度值，根据当前图像的灰度值与平均灰度值的比值动态确定阈值，该自适应的阈值对光线较暗的实验图像也有较好的二值化效果。实验结果如图 1 所示，(a)为正常光照情况下的原始图像，(b)是在光线较暗条件下的二值化后的图像。

在对二值化图像进行边缘检测时，由于实验图像的噪声较小，边缘检测的难度不大，故直接采用 Sobel 算子进行检测。对整幅图像进行模板运算，当 $\mathrm{abs}(Gx) + \mathrm{abs}(Gy)$ 大于指定阈值时，则认为该点为边缘点。由实验可知，Sobel 边缘检测器不但产生较好的边缘检测效果，而且受噪声的影响也比较小，但是得出的边缘较粗，影响下一步的处理。为减小后面寻找最佳直线斜率 k 时的误差，故需减小边缘像素的宽度，细化边缘。

收稿日期：2011-10-27；**修回日期**：2011-11-30　　**基金项目**：国家自然科学基金资助项目(61104165)

作者简介：黄晓慧(1988-)，女，山东日照人，硕士研究生，主要研究方向为汽车安全辅助驾驶(huangxiaohui910911@163.com)；郭烈(1978-)，男，副教授，博士，主要研究方向为智能车辆技术、汽车安全辅助驾驶技术；李兵(1988-)，男，硕士研究生，主要研究方向为汽车安全辅助驾驶；刘宝印(1986-)，男，硕士研究生，主要研究方向为先进控制方法与应用.

(a) 原始图像



(b) 二值化后的图像

图1　图像二值化结果

2　分割道路区域

2.1　确定道路分割线

车道线位于道路区域,在弯道检测之前先进行道路区域分割,可以有效排除图像背景的影响。在预处理得到的图像中,实验自该图像每一列的第一个像素开始向下逐行扫描,直至搜索到该列第一个像素值不是 255 的像素点,即停止扫描,并记下该行数值。取所有列中的最大行数值,并在该值上加一个增量,将最后得到的行数值作为道路区域的上界。实际上,上述所确定的数值最大行就是天空区域的最低点。但从图 1 中观察可知,该点距离实际检测的道路区域还有一定的距离,故在该最大行数上加一个增量,就可得到一个较好的道路区域上界。为使分割效果清晰可见,实验另在原始道路图像中显示上述所求的分割线,结果如图 2(a)所示。由于车道线位于道路区域,因此在进行弯道边界检测前可用黑色掩去图像中的天空区域。

2.2　确定感兴趣区域

为进一步缩小搜索区域,提高算法的实时性和准确性,应准确定位感兴趣区域,故需确定最佳道路边界。所谓最佳道路边界即包含整个道路区域的两车道线的直线边界。要确定一条直线,至少应知道该直线上一点和直线斜率 k。因考虑到弯道偏离预警,鉴于车道标志线有一定宽度,实验最好能识别出左右分道线的内边界。以左分道线为例,从图像 1/2 宽度处向左自下而上逐行扫描,直至搜索到第一个像素值为 255 的像素点,扫描即停止,则该点即为左车道线内边界上的第一个点。确定该点后,则可将直线段的斜率 k 作为参数,构建直线方程。

根据近百帧不同道路环境下图像的实验结果,并进行统计分析确定 k 值的搜索范围。

$$\begin{cases} k_l \in [0.2, 6] & \text{左分道线} \\ k_r \in [-6, -0.5] & \text{右分道线} \end{cases} \tag{1}$$

其中:k_l、k_r 分别为左右分道线直线段的斜率。

实验中,k_l 按 0.1 的步长来构建直线方程簇,其中包含白色像素点数量最多的直线方程所对应的 k_l 即为左分道线内边界的最佳斜率。同理可确定右分道线直线段的最佳斜率。

左右两车道线的直线段方程确定后,对各 y 值分别加上一个增量,将两直线抬高,该双直线与上述分割线所确定的区域就是感兴趣区域。实验分割结果举例如图 2 所示,(a)为道路区域与天空区域的分割,(b)为感兴趣区域的确定,图中水平直线为道路区域和天空区域的分割线。

(a) 道路区域与天空区域的分割　　(b) 感兴趣区域的确定

图 2　道路区域分割结果

3　弯道边界检测

3.1　确定车道线特征点

实验中需建立 line 类型的链表 listLine、listLeftLine 和 listRightLine,用来存储结构类型为 line 的数据,并建立结构类型为 point 的链表 listLeftPoint 和 listRightPoint,存储车道线特征点。

在上述确定的感兴趣区域内,自下而上逐行扫描,将搜索到的白色线段存储于链表 listLine 中,并记下该线段的长度 nLength。

if 线段终止点的横坐标 nEnd ≤ 0.6 * width
　线段存储于链表 listLeftLine 中
if 线段起始点的横坐标 nStart > 0.4 * width
　线段存储于链表 listRightLine 中

从上述线段集合中确定车道线上的线段,即各自在 listLeftLine 和 listRightLine 链表里每行所对应的线段簇中搜索长度最大的线段,其分别为相应分道线上的线段。此时,左分道线上线段的终止坐标点和右分道线上线段的起始坐标点均为有效坐标点,即相应分道线的内边界点,将其分别存储于链表 listLeftPoint 和 listRightPoint 中。

但即使在已经缩小范围的感兴趣区域中,仍然存在很多细小的噪声,为避免将噪声点误判成边界点,需对上述车道线候选点进行校正。实验通过判断该候选点与上一行边界点间的距离 s 是否在规定范围内来确定该候选点是否为该行上的准确边界点。一般情况下,距离 s 的设定准则如下:

$$\begin{cases} s \leqslant 100(\text{像素}) & 0 < i \leqslant 1/2\ \text{height} \\ s \leqslant 30(\text{像素}) & 1/2\ \text{height} < i \leqslant \text{height} \end{cases} \tag{2}$$

为保证实验的准确性,程序设计中采用了图像坐标系 ioj 与中心坐标系 xoy 的相互转换,如图 3 所示。其转换公式如下:

$$\begin{cases} x = j - 1/2\ \text{width} \\ y = 1/2\ \text{height} - i \end{cases} \tag{3}$$

其中:width、height 分别为图像宽度和图像高度。

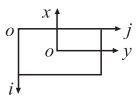


图3　坐标系转换

3.2　车道线拟合及重建

在左右车道线的内边界点确定后,需用一定的曲线模型对其进行拟合,并将拟合后的车道线重建在道路图像中。常用的拟合方法有分段归类拟合法[5]、最小二乘法[11]、Catmull-Rom 样条函数法[12]和 B-样条函数法[13]等。实验采用最小二乘法对左、右两车道线上的离散特征点分别进行拟合,其曲线模型均为 $x = a_0 + a_1 y + a_2 y^2$。由方程组 $\sum_{k=0}^{n} (\varphi_k, \varphi_j) a_k = (f, \varphi_j)$ $(j =$

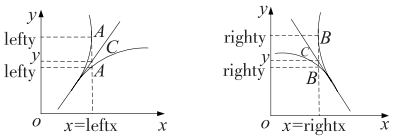
$0,1,\cdots,n$),其中令 $n=2$ 即可求得 a_0^*,a_1^*,a_2^*。

最小二乘法的优点就是拟合速度非常快,且只要遍历一次就可计算出拟合曲线的参数。虽然它对噪声非常敏感,但实验中对已搜索到的车道线候选点逐一校正,降低了将噪声点误判为边界点的概率,同时也提高了算法的准确性。

3.3　判断弯曲方向

在拟合得到的左、右车道线的二次曲线上,自下而上逐行搜索相应曲线每行上的坐标点,分别记为 A(leftx,lefty)和 B(rightx,righty)。确定车道线直线方程上横坐标与对应拟合曲线上横坐标相等的坐标点 $C(x,y)$,即令 $x=$ leftx 或 $x=$ rightx。判断 y-lefty 或 y-righty 的正负。

车道线弯曲方向的判断依据如图 4 所示。



(a) 左分道线　　(b) 右分道线

图 4　弯道方向判断依据

对于左分道线边界:

```
if y-lefty < 0
   L_leftcount ++
else
   L_rightcount ++
```

对于右分道线边界:

```
if y-righty > 0
   R_leftcount ++
else
   R_rightcount ++
```

其中,L_leftcount、L_rightcount、R_leftcount 和 R_rightcount 均为计数器。

其弯曲方向的判断准则如下:

$$\begin{cases} \text{左弯}, L_\text{leftcount} > L_\text{rightcount} \ \&\& \\ R_\text{leftcount} > R_\text{rightcount} \\ \text{右弯}, L_\text{rightcount} > L_\text{leftcount} \ \&\& \\ R_\text{rightcount} > R_\text{leftcount} \\ \text{直道,其他} \end{cases} \tag{4}$$

4　实验结果

实验采用 C ++ 编程实现,所处理的道路图像大小为320 × 240(像素)。为验证上述算法的实时性和准确性,实验分别采用在整幅图像中提取车道线的传统方法和本文方法对 200 帧弯道图像进行了测试。表 1 是上述实验的统计结果。

表 1　两种方法的实验比较

方法	车道线形状	实验图像帧数	正确检测帧数	平均算法时间/ms	识别率/%
传统方法	左弯道	85	62	31	72.9
	右弯道	115	86	29	74.8
本文方法	左弯道	85	74	17	87.1
	右弯道	115	102	19	88.7

由表 1 可知,本文方法比传统方法提升了约 14.1% 的识别准确率,且平均算法执行时间提高了约12 ms。结果表明,该算法具有较好的识别效果,实时性和准确性均能满足实际需要。

另外,不同形状的车道线识别结果如图 5、6 所示,图中中间结果显示为待拟合的车道线特征点。实验证明,该方法不仅能准确识别连续型分道线,而且对虚线型分道线的识别也具有较高的鲁棒性。

图5　左弯道图像处理结果

图6　右弯道图像处理结果

5　结束语

实验表明,本文方法在快速定位感兴趣区域的同时,还能有效去除图像中车道线区域外的像素干扰。另外,通过对大量弯道图像进行的验证测试可知,在多数情况下,真实车道线的位置、形状、弯曲方向等信息能够较准确地反映在图像识别结果中。虽然由于机器视觉透视投影的原因,远处不能完全沿车道弯曲方向延伸,但是该方法在车辆行驶需注意的安全距离内能够有效检测弯道边界并准确判断弯曲方向,满足了车辆安全行驶的需要。

目前该算法还存在一些不足,如在有大面积阴影、雨天积水、存在路面标志线干扰或车道线遮挡的复杂情况下,其检测效果不是很理想,故需进一步改进和完善。下一步工作准备将该算法移植到车载微处理器上,当车辆以一定速度行驶时,测试该算法对高速公路弯道路段车道线的实时检测效果。

参考文献:

[1] 黄勇,蒋工亮,孙联,等. 基于图像处理技术的高速公路弯道车速预警系统的研究[J]. 山东交通学院学报,2009,17(4):23-27.

[2] 鲁曼,蔡自兴,李仪. 道路区域分割的车道线检测方法[J]. 智能系统学报,2010,5(6):505-509.

[3] 陈勇,黄席樾,唐高友,等. 基于机器视觉的车道检测与二维重建方法[J]. 仪器仪表学报,2007,28(7):1205-1210.

[4] LI Qing, ZHENG Nan-ning, CHENG Hong. SpringRobot: a prototype autonomous vehicle and its algorithms for lane detection[J]. IEEE Trans on Transportation System, 2004, 5(4): 300-308.

[5] 许波文,张建明,刘志强. 基于分段归类拟合算法的车道检测系统[J]. 计算机工程与设计,2009,30(20):4766-4769.

[6] KLUGE K. Extracting road curvature and orientation from image edge points without perceptual grouping into features[C] //Proc of IEEE Symposium on Intelligent Vehicles. Washington DC: IEEE Computer Society, 1994: 109-114.

[7] KHALIFA O O, KHAN I M, ASSIDIQ A A M, *et al*. A hyperbola-pair based lane detection system for vehicle guidance[C] //Proc of World Congress on Engineering and Computer Science. San Francisco: IAENG, 2010: 585-588.

[8] JUNG C R, KELBER C R. An improved linear-parabolic model for lane following and curve detection[C] //Proc of the 18th Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing. 2005: 131-138.

[9] 王晓云,王永忠. 基于线性双曲线模型的车道线检测算法[J]. 杭州电子科技大学学报,2010,30(6):64-67.

[10] 沈瑜,罗维薇,王小鹏,等. 一种新的车道快速识别算法[J]. 计算机应用研究,2011,28(4):1544-1546.

[11] 刘涛,黄席樾,周欣,等. 高速公路弯道识别算法[J]. 重庆大学学报:自然科学版,2003,26(7):24-27.

[12] 张伟,黄席樾,杨尚罡. 汽车导航系统中的道路检测[J]. 重庆大学学报:自然科学版,2006,29(8):87-90.

[13] WANG Xiao-dong, XU Cheng, LIU Yan. Real-time and robust method for unstructured roads detection[J]. Application Research of Computers, 2010, 27(7): 2763-2765.