

文章编号:1001-9081(2009)02-0440-04

基于形态学结构元素建模的车道线检测算法

雷 涛^{1,2}, 樊养余¹, 王小鹏², 王履程²

(1. 西北工业大学 电子信息学院, 西安 710072; 2. 兰州交通大学 电子与信息工程学院, 兰州 730070)

(leitaoly@163.com)

摘 要:针对智能车辆辅助导航系统中车道线检测算法复杂、鲁棒性差的问题,提出了一种基于形态学结构元素建模的车道线检测算法。算法首先通过交变序列滤波器对原始图像进行滤波,然后利用具有车道模型特征的结构元素对预处理后的图像进行特定目标提取,再对提取出的车道左、右标识线进行外线判断运算以去除双边缘,将所得结果进行整合得到车道左右内侧边缘线,最后进行 Hough 变换标记车道线。实验表明,该算法简单、鲁棒性强,能准确地检测到车道标识线。

关键词:车道线检测;交变序列滤波器;结构元素;Hough 变换;鲁棒性

中图分类号: TP391.4 **文献标志码:** A

Lane detection algorithm based on morphological structure-elements model

LEI Tao^{1,2}, FAN Yang-yu¹, WANG Xiao-peng², WANG Lü-cheng²

(1. School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an Shaanxi 710072, China;

2. School of Electronic and Information Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou Gansu 730070, China)

Abstract: This lane detection algorithm based on structure-elements model of morphological simplified the complex processes of lane detection and improved robustness in intelligent vehicle vision assisted. In the algorithm, original image was filtered by alter sequence filter and special objects were extracted by the structure elements, which had similar characteristics to that of lane model. After that, the outside line of left and right lane was removed by a given means of estimation outside line. Finally, the resulted image was amalgamated and the lane mask was detected by means of Hough transformation. The experiments show that this algorithm is simple, of better robustness, and at the same time, it can efficiently detect the lane mask accurately.

Key words: traffic lane detection; Alter Sequence Filter (ASF); structure elements; Hough transformation; robustness

0 引言

作为智能交通系统(Intelligent Transportation System, ITS)最基本的部分,智能车辆对道路信息的获取和识别在 ITS 中占有十分重要的地位,而车道检测问题^[1-7]是实现智能车辆视觉辅助导航技术的关键。近年来,针对车道检测问题已经提出了很多不同的算法,其中很多算法都将车道标识线作为直线处理,使得对车道标识线的检测问题转换成对具有一定特征的直线检测问题。而图像处理中对于直线的检测大多采用 Hough 变换,该变换通过先对原图像进行边缘提取,再把边缘点集映射到参数空间进行投票,由于将图像空间映射到参数空间时采用一对多的映射和穷尽搜索,因而计算和空间的复杂性都很高,从而降低了算法的实时性。因此,为了提高算法的实时性,在应用 Hough 变换之前将图像大大进行简化就显得尤为重要,本文的重点就在于在 Hough 变换之前如何将待处理图像最大限度简化。

1 相关算法

通过分析已提出的一些车道线检测算法^[1-7],基本可归纳为两类:1)利用车道线固定而明显的颜色特征提取出具有某种特殊颜色的目标,然后通过车道建模,根据其特殊的几

何特征、尺寸特征、形状特征进行第二次提取,最后利用 Hough 变换得到车道线;2)先将原图像转化为灰度图像,然后进行图像预处理(即亮度补偿、直方图拉伸、滤波等),接着进行边缘检测(Canny、Sobel 等),再对车道标识线建模,利用 Hough 变换检测到车道标识线。通过对这两类算法的研究发现,第一类算法直接对彩色图像进行处理,算法复杂性高,实时性差,并且容易受光照、环境、背景的影响因而鲁棒性差。第二类算法直接对灰度图像处理,在边缘检测时,车道线的特征明显被弱化,特别当路面上的车道线残缺受损且不明显时,使得再进行车道建模提取车道线时难度加大,从而增加了算法的复杂性。这两种算法或者因为计算量大而引发实时性问题;或者因为前期处理算法不佳,使得检测到的车道标识线或含有伪车道线,或丢失要检测的车道线。为解决上述算法存在的问题,文中提出了一种基于数学形态学^[8-10]结构元素建模的车道线检测算法,该算法灵活构造具有车道模型特征的结构元素,利用形态学滤波原理分别提取具有车道模型特征的左右车道线,有效解决了车道线检测的准确性与鲁棒性矛盾的问题。算法利用去除双边缘运算进一步简化和精确车道标识线,使得到的结果图像最大限度简化,从而方便了后续的 Hough 变换。结果表明,该算法简单、鲁棒性强,对不同环境下的不同质量路面进行检测,都成功地检测到了车道线。

收稿日期:2008-05-26;修回日期:2008-07-24。 基金项目:甘肃省自然科学基金资助(0710RJZA046)。

作者简介:雷涛(1981-),男,陕西大荔人,讲师,博士研究生,主要研究方向:模式识别、图像处理;樊养余(1960-),男,陕西蓝田人,教授,博士生导师,博士,主要研究方向:数字信号处理、数字图像处理、人工智能;王小鹏(1969-),男,甘肃庆阳人,教授,博士,主要研究方向:图像处理、模式识别、计算机视觉等;王履程(1978-),男,甘肃皋兰人,讲师,硕士,主要研究方向:数字图像处理、信息安全。

2 车道线检测

2.1 感兴趣区域

在道路图像中,大部分图像信息对于车道线检测是无用的,通过寻找对车道线检测有用的感兴趣区域不但可以降低算法的运算量,而且能简化车道线的识别。如图1所示,图中黑线内区域代表感兴趣区域标识。

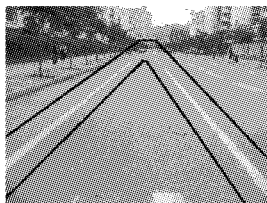


图1 感兴趣区域

对车道线的检测算法仅对感兴趣区域进行,为了提高算法的实时性,算法还可以采用动态改变感兴趣区域大小的方法^[11]。如果算法识别出的道路边界可信度较高时,可进一步缩小感兴趣区域;而当前一次算法识别出的道路边界可信度较低时,则需要对感兴趣区域进行扩大,以提高识别的可靠性。

2.2 图像预处理

从摄像机拍摄的视频片段中提取单帧图像,即为最原始的图像,对该图像先进行感兴趣区域提取,然后做预处理,这样就可以大大提高算法的实时性。对图像的变换、增强等可以采用很多种方法,由于采用方法的步骤越多,算法就越复杂,实时性也就越差。因此,本文对原始图像的预处理仅限于滤波。滤波的算法已经有很多种,由于形态学独特的优势,本文选用了形态学滤波器。基本的形态学滤波器有开、闭两种滤波器,对开、闭组合可得到组合形态滤波器^[12],包括串行滤波器和并行滤波器。

由于开闭运算具有各自的滤波效果又不同程度地影响到图像的目标信息,所以实际中一般采用形态开、闭的级联形式,组成形态学组合滤波器。常用的有开闭、闭开滤波器。

设 F 为输入图像,则经滤波器后的输出图像为:

$$OC(F) = F \circ B \cdot B \quad (1)$$

$$CO(F) = F \cdot B \circ B \quad (2)$$

将两个 OC 和 CO 滤波器不分次序地进行串联,其滤波效果要好于基本的 OC 和 CO 滤波器,这就构成了 OCCO 或 COOC 滤波器,由于已知两个开或两个闭的组合对于形态学滤波器而言是没有意义的,则可将上面两个顺序滤波器改为 OCO 和 COC(称其为交变顺序滤波器 ASF)。在实际选用滤波器^[13]时由于:

$$\text{MAX}\{OCO(F), COC(F)\} = COC(F) \quad (3)$$

$$\text{MIN}\{OCO(F), COC(F)\} = OCO(F) \quad (4)$$

结合道路图像的特征,如果车道标识线不清楚时,选用 COC 滤波器较好。因此,本文选用 COC 滤波器对车道图像进行滤波,结构元素选用直径为 3 的圆盘型结构元素。

2.3 车道左右标识线提取

分析车道左右标识线的特点,由于视觉原因,原本平行的车道线在视觉效应下成为带有一定斜率的直线。通过大量的实际车道图片分析可知,车道标识线的斜率是可以固定在一定的范围之内的。实际中,由于摄像头位置以及车身左右移动而导致车道线的斜率发生变化,根据统计,大致可控制在 $1/\sqrt{3} \sim \sqrt{3}$ 。这样,对车道线的检测问题就变成了对斜率变化

在 $1/\sqrt{3} \sim \sqrt{3}$ 的直线的检测。在数字图像中,直线是一些像素点的集合,由此可以联系到形态学中的结构元素,对于斜率在 $1/\sqrt{3} \sim \sqrt{3}$ 的直线,都可看成是方向为 $\pm \pi/4$ 的小尺寸结构元素的集合。这一点是通过分析实际的直线段像素点分布特征得到证明的。由于形态学算法的性能取决于结构元素的选择,因此,选取怎样的结构元素是设计算法的关键。要检测到左右车道的标识线,构造多种结构元素都能达到目的,但要同时去除掉车道线以外的所有边缘成为主要难题,这里可以借用形态学滤波原理。形态学滤波是仅仅保留适合结构元素的像素点,去除不符合结构元素的像素点,这里考虑用方向为 $\pm \pi/4$ 的直线段结构元素去除车道线以外的所有背景区域。由于尺寸为 3 的线结构元素难以约束直线的斜率,在实验中发现,它几乎可以检测出所有直线,甚至可以检测到曲线;如果采用尺寸为 7 的结构元素,其对直线方向的约束过于严格,几乎只能检测出方向 $\pm \pi/4$ 及其附近很小范围内的直线段。则最终的结构元素被定义为:方向为 $\pm \pi/4$ 、尺寸为 5 的线结构元素。通过实验发现,该结构元素对道路标识线的提取具有极大的适应性。

车道线的模型特征如图2所示。

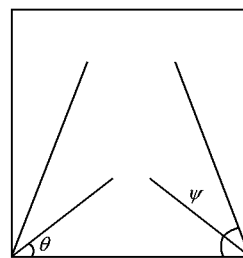


图2 车道线的模型

$$y = ax + b \quad (5)$$

它在极坐标系中可表示为:

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta \quad (6)$$

$$\text{tg } \theta \leq |a| \leq \text{tg } \psi, \text{ 定义 } \theta = 30^\circ, \psi = 60^\circ.$$

结构元素为, $B_1 = [(2,2), (1,1), (0,0), (-1,-1), (-2,-2)]$, $B_2 = [(-2,2), (-1,1), (0,0), (1,-1), (2,-2)]$,如图3所示。



图3 两个尺寸为5的 $\pm 45^\circ$ 方向的结构元素

其中 $+\pi/4$ 方向的线结构元素用于提取车道左标识线,根据形态学梯度公式:

$$\text{GRAD}(F_i) = F \oplus B_i - F \ominus B_i \quad (7)$$

其中, $i = 1, 2$ 。得到两条左标识线,原因是由于车道标识线具有一定的宽度,同样, $-\pi/4$ 方向结构元素能提取出右标识线。至此,左右车道标识线均被检测出来。

2.4 双边缘去除

由于车道标识线均有固定的宽度,所以检测到的标识线是双边缘的,这样就使得 Hough 变换也会得到四条直线,本文针对此问题给出了一种去除车道线双边缘的方法。根据实际智能车辆需要,要求提取出车道的内侧标识线,有利于智能车辆的准确驾驶,只需要去除外标识线即可,根据所采用的结构元素可以知道边缘宽度,求出该宽度下的像素灰度平均值记为 TH_1 ,以 TH_1 作为阈值进行双边缘判断,如果是外边缘,则置零;否则,继续对下一个点处理。对于检测到非本车道标识

线,除去这类车道线可以在 Hough 变换中进行去除,根据直线的斜率进行限制即可。

左车道线的双边边缘去除程序代码:

```
for i = 70: 240
    for j = 1: 160 - t
        if  $\sum_{k=0}^2 f_l(i, j+k) \geq 3 * TH_1$ 
            for m = j+3: j+t
                if  $\sum_{m=j+3}^{j+t} f_l(i, m) \geq 3 * TH_1$ 
                     $f_l(i, j) = 0;$ 
                     $f_l(i, j+1) = 0;$ 
                     $f_l(i, j+2) = 0;$ 
                    //因为滤波时选用的是直径为 3 的圆盘型结构元素,
                    //所以取 3 个像素点即可.
                end
            end
        end
    end
end
```

右车道线双边边缘去除程序代码:

```
for i = 70: 240
    for j = 320: -1: 160 - t
        if  $\sum_{k=0}^2 f_r(i, j-k) \geq 3 * TH_1$ 
            for m = j-3: j-t
                if  $\sum_{m=j-3}^{j-t} f_r(i, m) \geq 3 * TH_1$ 
                     $f_r(i, j) = 0;$ 
                     $f_r(i, j+1) = 0;$ 
                     $f_r(i, j+2) = 0;$ 
                end
            end
        end
    end
end
```

$TH_1 = \min\{f(p, q), f(p, q+1), f(p, q+2)\}$, (p, q) 为车道外边缘起始点, t 为车道线宽度像素个数。

2.5 Hough 变换

Hough 变换算法思想: 设有直线 $y = ax + b$, 它在极坐标系中可表示为 $\rho = x \cos \theta + y \sin \theta$, 式中 $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$ 代表直线到原点的法线距离, θ 是该法线与 x 轴的夹角。可见图像空间中一条直线经 Hough 变换映射到参数空间中是一个点, 而参数空间的一个点在图像空间中就表示一条直线。编程时将参数 r 和 θ 在预先估计的变化区间内量化成许多小格, 对每一个 (x, y) 点代入 θ 的量化值, 算出各个 r , 所得值(经量化)落在某个小格内, 便使该小格的计数累加器加 1。当全部点 (x, y) 经过变换后, 对小格进行检验, 最大计数值的小格对应的 (r, θ) 就可以认为是要检测的一条直线。可见, 直接对图像进行 Hough 变换以检测图像中的直线时, 计算量很大。本文算法在 Hough 变换之前已经进行了滤波、车道线提取、双边边缘去除等一系列操作, 使得 Hough 变换之前图像已经大为简化, 这样就使得 Hough 变换可以简化计算, 从而提高了算法的实时性。在 Hough 变换过程中, 针对本车道线以外的车道线或非车道线但具有明显的边缘(如道路的自然边缘)被检测到时, 可以限制直线的斜率, 使得 $|k_i| \in [1/\sqrt{3}, \sqrt{3}]$ 。最后还要验证检测到的车道线的准确性, 设置约束条件 $k_1 k_2 < 0$, ($k_1 = \min\{|k_i|\}, k_2 = \max\{|k_i|\}$) 分别为左标识线和右标识线。

2.6 算法描述

1) 采集灰度图像 F 。

2) 形态学滤波得到 F_1 。

3) 利用形态学梯度分别对两幅图像进行边缘检测, B 是结构元素选用直径为 3 的圆盘型结构元素。

$$GRAD(F_2) = F_1 \oplus B - F_1 \ominus B \quad (8)$$

4) 在边缘图像中分别提取左、右车道标识线。左车道线为 $F_{21} = (F_2 \cdot B_1) \circ B_1$, 右车道线为 $F_{22} = (F_2 \cdot B_2) \circ B_2$, 结构元素 B_1, B_2 分别为 $\pm \pi/4$ 方向、尺寸为 5×5 的线段结构元素。

5) 双边边缘去除。利用双边边缘去除算法得到去除后的图像 F_{31}, F_{32} 。

6) 车道线整合, $F_4 = F_{31} \cup F_{32}$ 。

7) 对检测到的边缘进行 Hough 变换得到 F_5 , 利用约束条件检验检测到的车道标识线是否正确, 若正确转入 8), 否则, 增加 Hough 变换峰值检测点, 转入 7)。

8) 标识原图像得到 F_6 。

3 仿真实验结果与分析

仿真实验中处理的视频图像均是 CCD 摄像头捕获的图像, 大小为 320×240 , 经灰度化后灰度级为 256 的市内道路图像, 视频图像取自于不同环境下多条市内道路图像, 具有背景复杂、空气质量差、路面干净程度差等特点。按照上文算法流程逐步运行, 实验结果如图 4 所示。

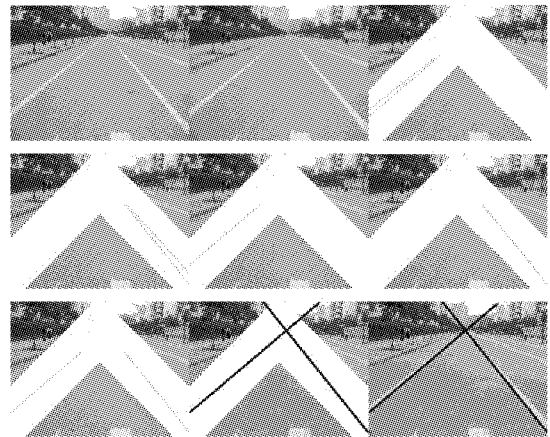


图 4 算法逐步运行结果

由于实际的城市道路具有路面质量差、天气多变(雨天、雪天、雾天等)、背景复杂、存在夜间行车等情况, 因此, 算法必须具有较强的鲁棒性。针对多种路面、多种环境下的市内道路情况, 算法亦取得了较好的检测结果, 如图 5 所示。算法分别对晴天、雨天、夜晚三种情况的不同路面进行车道线检测, 左侧为原图像, 右侧为检测结果。

为验证本文算法的强鲁棒性, 对 3 段长度为 50 帧的视频序列进行了车道线检测。3 段序列通过车载摄像机拍摄, 分别为正常天气、雨天、夜晚, 路段各不相同, 但均为普通市内道路, 结果如表 1 所示。

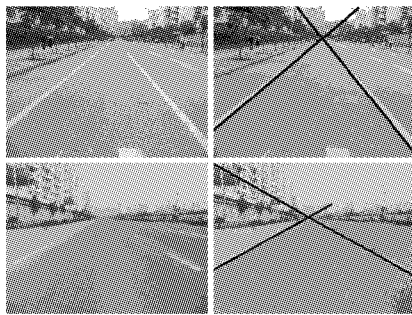
表 1 不同方法对车道线检测的正确率比较 帧

检测方法	正常天气	下雨天	夜晚
Sobel 算子	20	5	0
对车道线进行锐化后	35	8	2
本文方法	50	46	44

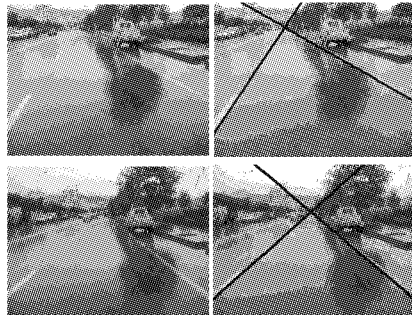
通过表 1 的实验数据可以看出, 针对雨天、夜里、路面较

差的多种情况进行检测,均取得了较好的仿真结果,相比传统

车道检测算法明显提高了车道线检测的正确率。



(a) 正常天气原图像与检测结果



(b) 雨天原图像与检测结果



(c) 夜晚原图像与检测结果

图5 多种环境下车道标识线识别实验结果

4 结语

本文提出了一种基于形态学结构元素建模的车道标识线检测算法,该算法主要针对城市内路面复杂,受环境影响大的实际情况,重点解决了传统算法约束条件多、鲁棒性差的问题。实验表明,在多种天气情况下,该算法均能正确地检测出车道标识线,去除了双边缘,其得到的单线条车道左右标识线清晰且准确,表明了算法较高的鲁棒性。

参考文献:

- [1] GREGOR R, LUTZELER M, PELLKOFER M, *et al.* EMS-vision: A perceptual system for autonomous vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2002, 3(1): 49-59.
- [2] MORIZET-MAHOUEAUX P. On-board and real-time expert control [J]. IEEE Expert: Intelligent Systems and Their Applications, 1996, 11(4): 71-81.
- [3] LAI A H S, YUNG N H C. Lane detection by orientation and length discrimination[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics: Part-B, 2000, 30(4): 539-548.
- [4] JEONG P, NEDEVSKI S. Efficient and robust classification method using combined feature vector for lane detection[J]. IEEE Transaction on Circuits and Systems for Video Technology, 2005, 15(4): 528-537.
- [5] KIM Z. Realtime road detection by learning from one example[C]// Proceedings of the 7th IEEE Workshops on Application of Computer Vision: WACV/MOTION'05. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2005, 20(3): 455-460.
- [6] LI QING, ZHENG NAN-NING, CHENG HONG. Springrobot: A prototype autonomous vehicle and its algorithms for lane detection[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2004, 5(4): 300-308.
- [7] 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.
- [8] SERRA J. Introduction to mathematical morphology[M]. New York: Academic Press, 1982.
- [9] 章毓晋. 图像工程(中册)图像分析[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [10] ROBERT M H, LINDA G S. Morphologic edge detection[J]. Journal of Robotics and Automation, 1987, 3(2): 142-156.
- [11] 徐友春, 王荣本, 李志强, 等. 一种基于直线模型的道路识别算法研究[J]. 中国图形图像学报, 2004, 9(7): 858-864.
- [12] HEIJMANS H J A M. Composing morphological filters[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1997, 6(5): 713-723.
- [13] RAY N, ACTON S T. Inclusion filters: A class of self-dual connected operators[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2005, 14(11): 1736-1746.
- [14] CHAN C H, GRANTHAM K H. Fabric defect detection by fourier analysis[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2000, 36(5): 1267-1276.
- [15] 俞鸿波, 赵荣椿, 王兵. 基于阴影的三维表面重构技术的概述[J]. 计算机工程与应用, 2004, 40(10): 30-33.
- [16] PENTLAND A. Finding the illuminant direction[J]. Journal of the Optical Society of America, 1982, 72(4): 448-455.
- [17] PENTLAND A. Shape information from shading: a theory about human perception[J]. Spat Vis, 1989, 4(2-3): 165-182.
- [18] LEE C H, ROSENFELD A. Improved methods of estimating shape from shading using the light source coordinate system[J]. Artificial Intelligence, 1985, 26(2): 125-143.
- [19] ZHENG QINFEN, CHELLAPPA R. Estimation of illuminant direction, albedo, and shape from shading[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1991, 13(7): 680-702.
- [20] 宋丽梅, 周兴林, 徐可欣, 等. 基于单幅测量图像的三位缺陷检测技术[J]. 光学学报, 2005, 25(9): 1195-1120.

(上接第435页)

算物体表面方向和表面高度的恢复三个大方面。本算法融合了多种计算方法,避开了约束条件和迭代,整个算法流程清晰,从重构的实例看,满意度较高。同时,本方法摄取条件简单,重构速度快,有很好的应用前景。

参考文献:

- [1] HORN B K P. Shape from shading: a method for obtaining the shape of smooth opaque object from one view[R]. Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology, 1970.
- [2] HORN B K P. Obtaining shape from shading information[EB/OL]. [2008-06-17]. http://people.csail.mit.edu/bkph/articles/Shape_from_Shading.pdf
- [3] HORN B K P, BROOKS M J. The variational approach to shape from shading[EB/OL]. [2008-06-17]. http://people.csail.mit.edu/bkph/papers/Variational_SFS.pdf.
- [4] IIVARINEN J. Surface defect detection with histogram-based texture features[EB/OL]. [2008-06-17]. <http://www.cis.hut.fi/research/IA/paper/publications/spie00.ps>.