

# 基于启发式搜索的车道线识别算法研究

陈 军<sup>1</sup>, 赵玉凡<sup>2</sup>, 徐友春<sup>2</sup>, 彭永胜<sup>2</sup>, 袁 一<sup>2</sup>

CHEN Jun<sup>1</sup>, ZHAO Yu-fan<sup>2</sup>, XU You-chun<sup>2</sup>, PENG Yong-sheng<sup>2</sup>, YUAN Yi<sup>2</sup>

1. 天津大学 机械工程学院, 天津 300072

2. 军事交通学院 汽车工程系, 天津 300161

1. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

2. Department of Automobile, Military Transportation Institute, Tianjin 300161, China

E-mail: chenjun59114@126.com

**CHEN Jun, ZHAO Yu-fan, XU You-chun, et al. Study on lane mark identification algorithm based on heuristic search. Computer Engineering and Applications, 2007, 43(31): 206-209.**

**Abstract:** Extracting the lane edge point is the key technology for lane marks identification. The method in common use often produces many noise points for lacking of restraint ability to noise. In that way it will bring departure during the lane boundary matching process and the identification result is bad. In this paper the tracking algorithm based on heuristic search is proposed. The starting point is positioned according to the trapezia matching model, gray change property of lane markings and the restraint of real lane width. Then we search the lane edge point from the start point with the tolerance cost rule function. The lane boundary is matched by Hough transform with linear model. Experimental results prove that the algorithm is robust and can fulfill the real time requirement of road identification.

**Key words:** heuristic search; intelligent vehicle; machine vision; lane mark identification

**摘 要:** 在车道边界识别中, 边界点的提取是关键, 常用的边界点提取方法因对噪声的抑制能力不强产生较多噪声点, 从而影响识别效果。提出一种边界点启发式搜索算法, 根据梯形匹配模型、车道线灰度变化特征和实际车道宽度约束, 确定搜索的起始点, 从起始点根据度量代价准则函数搜索车道边界点。采用直线道路模型结合 Hough 变换来拟合车道边界。实验表明, 该算法实时性好、可靠性强、鲁棒性高。

**关键词:** 启发式搜索; 智能车辆; 机器视觉; 车道线识别

**文章编号:** 1002-8331(2007)31-0206-04 **文献标识码:** A **中图分类号:** U495

## 1 介绍

车道偏离报警系统是汽车主动安全技术的重要组成部分。该系统利用安装在车上的摄像机采集车道前方图像, 通过处理获得车辆在当前车道中的位置。一旦检测到距离当前车道线过近而司机没有打转向灯时, 系统将发出警告信息提醒司机纠正这种无意识的车道偏离, 避免车道偏离事故的发生。

利用机器视觉对车道线进行识别和跟踪是系统的重点和难点。目前世界上已经发展了多种基于视觉的车道识别算法。这些算法采用了不同的车道模型, 如直线或曲线模型, 不同的识别技术, 如模块匹配法、模糊识别法及神经网络法等。

文献[1-3]提出了一种基于车道线灰度变化特征的边界点检测算法, 该算法利用车道线两侧灰度值产生突变的特征提取边界点, 该算法在良好的车道条件下可以准确地识别出车道边界。但由于约束条件过于简单, 容易将路前方车辆的边界点误判为车道边界点。

文献[4]采用了白色标志线和道路表面(road area)识别相结合的方法, 采用曲线道路模型车道线进行识别, 道路表面识别采用阈值分割的方法。根据白色标志线和道路表面相交于同一点(消失点)来检验和校正所识别的标志线及道路表面。该算法有较高的鲁棒性, 但实时性差。

本文提出边界点启发式搜索算法, 利用该算法搜索道路边界点并进行 Hough 变换, 得出边界直线方程。

## 2 车道边界识别算法

本文车道边界识别算法分为初始车道识别算法和跟踪识别算法两个阶段。

### 2.1 图像预处理

在进行车道识别之前, 要对获取的路面图像进行预处理, 主要包括滤波、边缘增强和二值化。本文采用如式(1)所示的中值滤波器对图像进行滤波。

**基金项目:** 天津自然科学基金(the Natural Science Foundation of Tianjin of China under Grant No.05YFJMJC119900)。

**作者简介:** 陈军, 男, 博士生, 主要研究方向: 智能车辆机器视觉, 车身控制; 赵玉凡, 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 军车机动性研究, 智能车辆车身控制等。

$$f(x,y)=median\{S_{f(x,y)}\} \quad (1)$$

式中  $S_{f(x,y)}$ ——像素点  $f(x,y)$  附近的一个小区域。

对经过中值滤波的图像采用 Sobel 算子进行边缘增强。车道图像经过 Sobel 算子增强后,仍然包括大量无用信息,为了减小这些无用信息的影响和便于计算机运算,需要二值化图像。在图像二值化处理中,阈值的选择是关键,阈值选取的合理与否,直接影响到车道识别的效果。本文采用迭代阈值选取算法,先取一个初始阈值,将经过 Sobel 算子处理后图像的全部像素分成前景和背景两大类,然后分别对其进行积分并将结果取平均以获得一个新阈值,再按此阈值将图像分成前景和背景,用同样的方法获得一个新阈值,如此反复迭代下去,当迭代收敛于某个稳定的阈值时,此刻的阈值即为最终的结果,可以用于对图像的分割。迭代公式如式(2)所示。图 1 为图像预处理后的效果。



图 1 图像预处理效果

$$T_{i+1} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\sum_{k=0}^{T_i} h_k \cdot k}{\sum_{k=0}^{T_i} h_k} + \frac{\sum_{k=T_i+1}^{L-1} h_k \cdot k}{\sum_{k=T_i+1}^{L-1} h_k} \right] \quad (2)$$

式中  $L$ ——灰度级的个数;

$h_k$ ——灰度值为  $k$  的像素点的个数;

$T_i$ ——迭代  $i$  次后的阈值。

## 2.2 车道边界识别

对图像进行预处理后,就可以进行车道识别。车道识别主要包括确定候选边界点,以及根据这些点结合边界约束条件来拟合车道边界。

本文采用启发式搜索算法确定候选边界点。Martellit 最早使用了启发式搜索技术来提取边界点<sup>[9]</sup>。启发式搜索的核心思想是通过上下文信息来搜索下一个最有可能的边界点,其过程主要包括:起始点的选择、边界点的搜索以及终止点的确定。

### 2.2.1 起始点的选择

起始点的确定非常重要,这直接关系到搜索的成败。本文确定起始点的方法是从图像下方沿中心线分别向左、右两个方向搜索,以下列 3 个约束条件寻找起始点:

#### (1) 车道线灰度变化特征

在结构化道路上,车道标志线灰度值较高,而标志线附近的路面灰度值较低,因此在车道线的两侧的灰度值会产生突变,如图 2 所示。

#### (2) 梯形模型匹配

当搜索到符合上述条件(1)的两边车道起始点  $P_{L1}$ 、 $P_{R1}$  后,在搜索方向间隔 10 行搜索两个边界点  $P_{L2}$ 、 $P_{R2}$ ,这 4 个点应构成一个梯形,如图 3 所示。此匹配可以进一步判断起始点选择的正确性。

#### (3) 车道宽度

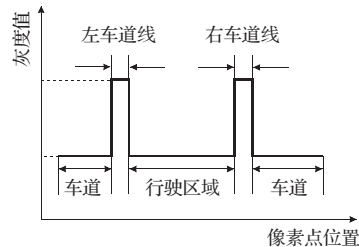


图 2 车道线灰度变化特征

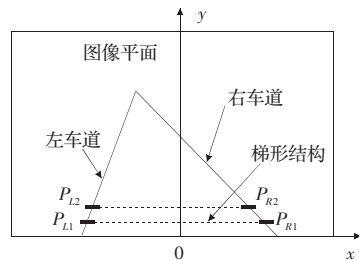


图 3 梯形模板匹配示意图

当一侧或两侧车道线为虚线时,此时有可能将相邻车道线上的点误认为起始点。为了避免这种情况的发生,本文加上车道宽度限制。

在标准的结构化车道上,车道宽度是一定的。当摄像头的参数标定以后,根据图像坐标和路面坐标的映射关系公式<sup>[12]</sup>(式(3)),计算两边起始点之间的实际路面距离是否在车道宽度允许的范围之内。

$$\begin{cases} y = h \cdot \left( \frac{H \cdot \text{tg}(\gamma_0 + \alpha_0) - (H - 2Y) \cdot \text{tg}\alpha_0}{H + \text{tg}(\gamma_0 + \alpha_0) \cdot \text{tg}\alpha_0 \cdot (H - 2Y)} \right) \\ x = \sqrt{h^2 + y^2} \cdot \frac{2 \cdot X \cdot \text{tg}(\beta_0)}{W} \end{cases} \quad (3)$$

式中  $h$ ——摄像机镜头中心的安装高度;

$\gamma_0$ ——在地平面上的最近视点与摄像机镜头中心连线与地平面垂线的夹角;

$\alpha_0$ ——摄像机镜头垂直视场角之半;

$\beta_0$ ——摄像机镜头水平视场角之半;

$H$ ——图像高;

$W$ ——图像宽;

$(X, Y)$ ——图像坐标;

$(x, y)$ ——路面坐标。

在图像平面的下方,即离车辆较近的路面,一般视野较好,路面干扰小,所以根据上述 3 个约束条件就可以准确地确定起始点。图 4 为两种车道情况边界起始点搜索的结果。“+”标注的点为起始点,构成梯形的虚线为后加入。

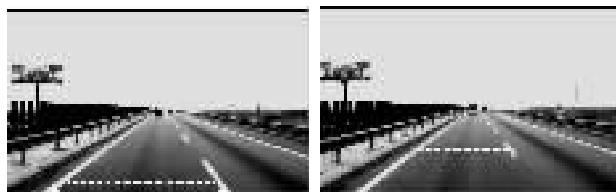


图 4 车道边界起始点搜索结果

### 2.2.2 边界点搜索

确定起始点后,就可以根据一定的搜索准则进行候选边界点的搜索。对搜索轨迹上第  $i$  个像素点  $t_i$  在搜索方向下一行  $L_{i+1}$

的  $1 \times 5$  的邻域内根据引导度量来确定下一可能边界点(图 5)。

用  $m_{i+1}^k$  表示从  $t_i$  搜索到邻域中像素点  $t_{i+1}^k$  的度量代价, 定义为:

$$m_{i+1}^k = |G_x| + \frac{1}{1 + |\theta_i - \theta_{i+1}^k|} \quad k=1, 2, \dots, 5$$

式中  $G_x$  ——点  $t_{i+1}^k$  在  $x$  方向的灰度梯度;

$\theta_i$  ——第  $t_i$  点的相位角, 即点  $t_i$  与点  $t_{i-1}$  两点定义方向与  $x$  轴的夹角。

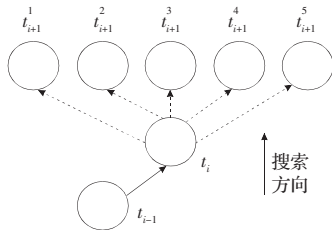


图 5 车道边界点搜索原理图

利用上式计算邻域中每个白点(灰度值为 255)的度量代价, 取度量代价最大的点为边界点。

在确定起始点后的第一个边界点  $t_2$  时, 对于左车道,  $\theta_1$  给定初始值  $\pi/4$ , 右车道  $\theta_1 = 3\pi/4$ 。

在确定点  $t_2$  后, 也就获得了轨迹的最初搜索方向。根据车道线方向不可能发生突变的原则, 在确定起始点和开始搜索方向以后, 就可以进行边界点搜索, 这样既可以减小搜索范围, 也能排除噪声点。

### 2.2.3 终止点的确定

终止点的确定遵循以下原则: 如果某点  $t_i$  下一行  $L_{i+1}$  的  $1 \times 5$  邻域内没有白点或者所有白点的度量代价都小于某一阈值, 则  $P$  点为终止点。如果从起始点到  $P$  点的搜索路径长度达到某个值, 则说明车道边界点搜索完毕, 否则按照上述的步骤继续搜索边界点, 直至搜索完毕。

从以上的分析可以看出, 本文边界点的搜索算法将边界点的搜索范围缩小到整个图像的 10% 以内, 这样可以减小 90% 以上的运算量, 并且排除了大量无用信息的干扰, 提高了抗干扰能力。图 6(a) 为直线车道边界点的搜索结果, 图 6(b) 为曲线车道边界点搜索结果, 黑点表示搜索到的候选边界点。



(a) 直线车道

(b) 曲线车道

图 6 车道边界点搜索结果

## 2.3 车道边界拟合

运用搜索算法得到边界点集合后, 就可以将这些边界点合理地组织起来, 形成一条有意义的边界直线。

本文假定道路边界是直线, 这样就可以采用直线模型对图像中的道路边界进行约束。实际上, 大部分道路并不是直线, 但通常曲率很小。采用直线道路模型并不影响模型的使用(见文献[6])。所以, 本文采用直线道路模型来代替曲线道路模型, 以减少计算量, 提高算法的实时性。

在车道图像中, 车道的左右边界直线模型用方程(4)和方程(5)进行描述。

$$\text{左车道: } y = k_1 \cdot x + b_1 \quad (4)$$

$$\text{右车道: } y = k_2 \cdot x + b_2 \quad (5)$$

这两个边界受到如下约束:

- (1) 视野内的车道区域位于同一平面内;
- (2) 车道边界不发生突变。

在建立道路边界的直线模型后, 对于道路边界的识别就变成了直线边界模式的特征匹配问题。本文采用 Hough 变换(HT)来识别直线道路边界。HT 是 1962 年由 Hough 提出的一种形状匹配技术, 用来检测平面内的直线或曲线。HT 的原理如图 7 所示, 设直线  $L$  在图像空间直角坐标系下的方程为:

$$r = x \cdot \cos\theta + y \cdot \sin\theta$$

式中  $r$  ——直角坐标系原点到直线  $L$  的距离;

$\theta$  ——直线  $L$  与  $y$  轴的夹角。

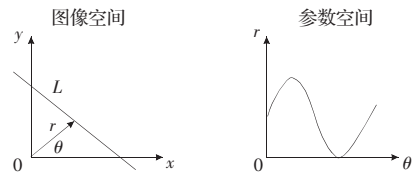


图 7 Hough 变换示意图

因为图像空间的一条直线  $L$  对应一组参数  $(r, \theta)$ , 所以图像空间中一条直线经过 HT 后就成为参数空间的一个点。经过图像空间中一点的直线可以有很多, 每一条都对应着参数空间的一个点, 因此在参数空间中与图像空间所有这些直线对应的点的轨迹是一条正弦曲线。如果在参数空间的  $(r, \theta)$  处相交的正弦曲线最多, 就可以确定  $(r, \theta)$  所对应的图像空间中的直线为所求的直线。

HT 是根据局部度量来计算全面描述函数, 对局部信息缺损不敏感, 对随机噪声具有较好的鲁棒性。HT 的具体步骤参考文献[7]。

对 HT 作如下说明:

(1) 当有两个以上的基元参数累加器都出现最大值的时候, 此时对由这些基元参数确定的直线进行拟合可信度计算, 将拟合可信度最高的直线作为道路边界直线。

(2) 为在保证可靠性的前提下提高运算速度, 当候选边界点大于 150, 隔两行取一个边界点进行 HT。当候选边界点大于 100, 隔一行取一个候选边界点进行 Hough 变换。当候选边界点小于 100 时, 必须对所有点进行 HT。

(3) 当候选边界点很少时(一般小于 10), 此时应转入初始道路识别阶段。

图 8 中的左右车道, 根据上面的边界点搜索方法, 左边界有 127 个有效边界点, 右边界有 44 个有效边界点, 对左右车道进行 HT, 得到在  $(r, \theta)$  平面内最大值邻域数据(见表 1 和表 2)。由于篇幅所限, 表 1 和表 2 只列举了部分实验数据。

$$\begin{cases} k = \frac{-1}{\tan\theta} \\ b = \frac{r}{\sin\theta} \end{cases} \quad (6)$$

根据公式(6)可以算出图 8 中左右边界在图像空间中的直线方程(坐标系同图 3):



表1 左车道线 HT 最大值的邻域

r	θ						
	122°	123°	124°	125°	126°	127°	128°
111	4	4	10	1	0	0	1
112	5	5	7	1	0	1	3
113	3	5	9	9	2	1	4
114	4	7	9	25	10	8	8
115	9	5	3	3	17	9	5
116	3	0	0	2	11	7	2
117	1	0	4	3	2	9	6

表2 右车道线 HT 最大值的邻域

r	θ						
	36°	37°	38°	39°	40°	41°	42°
92	3	1	0	1	2	1	0
93	3	5	6	6	4	6	6
94	4	3	5	5	5	7	8
95	13	15	20	22	16	14	12
96	0	10	6	4	4	2	1
97	2	5	7	4	4	3	3
98	1	1	1	4	3	4	2

$$\begin{cases} y=0.700 \cdot x+139.168 \\ y=-1.235 \cdot x+150.956 \end{cases}$$

图8 为用 Hough 变换拟合出的车道边界直线。



图8 直线车道拟合结果

### 2.4 车道边界拟合可信度分析

为检验车道边界识别的有效性,要对识别出的车道边界进行拟合可信度的分析。拟合可信度由式(7)来计算。

$$S = \frac{E_0}{E} \tag{7}$$

式中  $E_0$ ——到直线  $L$  距离不大于 1 的边界点数;

$E$ ——边界点的总数。

### 2.5 车道跟踪算法

当相邻两次或多次初始化识别过程得到的车道边界位置变化不大时,表明车辆进入稳定跟踪阶段,此时就可以启动车道跟踪算法。本文研究的车道跟踪算法本质上也是车道检测算法,其特点是根据上次识别结果建立动态的目标搜索区域。

根据车道边界不能突变的约束,本文提出了目标搜索区域 OSA 的概念,只在 OSA 范围内搜索候选边界点,这样不仅可以去除对于车道边界识别无用的干扰信息,提高识别的准确性,并且可以减少运算量,提高识别速度。

本文建立 OSA 的原理是:根据实际车道边界的连续性,不可能出现突变的性质,对上次识别出的车道边界进行扩展而形成,如图9所示。上次识别的车道边界直线  $L$  方程为: $y=kx+b$ ,以直线  $L$  为中心,可以设定 ROI 的上下边界的直线方程为:

$$\begin{cases} y=k \cdot x+b+m \\ y=k \cdot x+b-m \end{cases}$$

式中  $m$ ——直线  $L$  在  $y$  轴上的截距平移量。

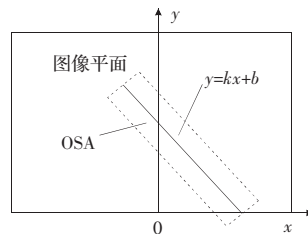


图9 目标搜索区域(OSA)的建立

动态改变 OSA 的宽度,当上次识别的拟合可信度较高时,可以减小 OSA 的宽度。本文定义了目标搜索区域宽度与上次车道边界识别拟合可信度之间变化关系的函数:

$$\frac{m_j}{m_{j-1}} = \frac{S_0}{S_{j-1}}$$

式中  $m_j$ ——第  $j$  次目标搜索区域宽度,单位像素;

$m_{j-1}$ ——第  $j-1$  次目标搜索区域宽度,单位像素;

$S_0$ ——车道边界识别有效的最低拟合可信度,由实验确定,本文为 0.5;

$S_{j-1}$ ——第  $j-1$  次车道边界识别的拟合可信度。

## 3 实验

为了检验算法的效果,在 JJUV-I 无人驾驶车上进行道路实验,采用普通台式计算机,其 CPU 为 P2.4 GHz 的 Intel 处理器,视觉传感器采用德国 BASLER 的 A601fc 型 CCD 摄像机,采集 576×312×8 bits 的灰度图像。实验道路为一段高速公路。图 10 为实验所用的软件界面。



图10 实验软件界面

图 11 为道路边界识别可信度,从图中可以看到,道路左右边界的识别率相差较大。刚开始在初始识别阶段,可信度较低,当进入到道路跟踪阶段,可信度达到 0.5 以上,最高可达到 0.9。

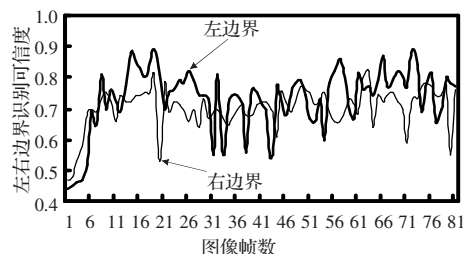


图11 道路边界识别的可信度

图 12 为左右直线边界的斜率,左边界斜率的抖动大一些。

图 13 表示 1 个运行周期所用的时间,开始几次的识别时间为 80 ms~110 ms,到稳定道路跟踪阶段,识别时间明显下降到