

一种基于直线模型的道路识别算法研究

徐友春^{1),3)} 王荣本²⁾ 李克强¹⁾ 赵玉凡³⁾

¹⁾(清华大学汽车系,北京 100084) ²⁾(吉林大学交通学院,长春 130025) ³⁾(军事交通学院汽车系,天津 300161)

摘要 为了提高道路识别的鲁棒性和抗干扰能力,提出了一种道路边缘识别算法。该算法的创新点在于采用自然边界作为道路识别的依据,同时算法也可以将白色路标作为识别道路边缘的标志。由于道路的自然边界不像车道标志线那样容易受到污染,因而使该算法具有了较高的鲁棒性。该算法是采用像素级特征和帧图像特征来识别道路边缘,可称为全局道路边界模型。在模型中由于采用了有关的道路约束条件,因而使得算法具有较好的抗干扰能力。该算法包括初始检测算法和跟踪算法两个部分,其中在跟踪算法中采用感兴趣区域算法(ROI)来限制检测区域,以提高实时性。最后,还提出了一个道路边界可信度检测函数,该函数可以用于计算道路边缘检测结果的可信程度。

关键词 智能车辆 道路边界检测 感兴趣区域

中图分类号: TP242.62 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2004)07-0858-07

A Linear Model Based Road Identification Algorithm

XU You-chun^{1),2)}, WANG Rong-ben²⁾, LI Ke-qiang¹⁾, ZHAO Yu-fan³⁾

¹⁾(Automobile Department of Tsinghua University, Beijing 100084)

²⁾(Transportation College of Jilin University, Changchun 130025)

³⁾(Military Transportation Institute, Tianjin 300161)

Abstract In the paper, a road edge identification algorithm is developed. The new idea of this method is to use natural road edge, as well as the white strip for road information acquisition. The natural road edge will not be easily polluted like the white lane maker do, so it indicates better adaptability. In the algorithm, we use both the pixel feature and the frame feature to identify the road edge, which is referred to as the global road model. Because several road constrains is used to ensure the road edge detection, the algorithm is immune to the influence of the image disturbance. The algorithm of the road edge identification includes two stages: initialization detection and tracing detection. The initialization stage detects the road edge from the global road image. The trace algorithm uses the region of interest (ROI) to limit detecting area, which can save much time. In order to give a measure of the reliability of the road detecting result, this paper presents a road edge identification estimation function, which can estimate the reliability of the road edge.

Keywords intelligent vehicle, road edge identification, region of interesting

1 引言

对智能车辆而言,自动驾驶最关键的技术就是机器视觉。机器视觉的主要任务是完成道路的识别和跟踪。到目前为止,大部分车载机器视觉系统只能用于高速公路或其他有道路标志线的道路环境,然而由于在一些应用领域中,智能车辆需要在没有车道线的道路上行驶,因此,本文提出一种机器视觉算

法,它既可适用于具有车道线的道路,也可以应用在没有车道线的道路环境中。

2 相关工作

到目前为止,世界上已经发展了多种基于视觉的适用于不同车道线的检测算法。这些算法采用了不同的道路模型(如直线或曲线模型)和不同的识别技术(如霍夫(Hough)变换法、模块匹配法、神经网络

络法等)。文献[1]采用了一种基于 Morphological 滤波的识别方法,这种方法只采用“分水岭”转变法来定位图像中像素值的灰度等级变化点(即道路边界)。这种方法的优点在于不需要考虑图像的灰度阈值,缺点是没有采用全局道路边界约束条件^[1]。

文献[2]中采用了曲线道路边界模型,该模型认为道路边界可以假定为地平面上的抛物线形状。尽管它可以近似符合大部分道路情况,但它在许多情况下并不适用,如道路“T”字形转弯处。这个模型在似然估计时采用了一个可变形的模板,但是,在无法满足其巨大的计算能力要求情况下,算法将无法保证其全局的优化性和识别的精确性^[2]。

文献[3]描述了采用毫米波雷达来定位人行道的方方法。采用了可变模板的方法,并通过雷达数据来定位满足直线模型的道路边界,它可以适用于未知宽度和方向的道路。在考虑到道路模型的几何约束情况下,这个算法采用似然函数来评估给定模板与所得的雷达数据的匹配程度,并用 Metropolis 算法来确定模板变形的最佳参数。此方法的局限性在于只能用来检测直线道路^[3]。

3 道路边界检测算法

本文所述的道路边界检测算法可以分为以下两个阶段(两部分):第 1 阶段是基于像素的灰度处理阶段;第 2 阶段是道路识别与跟踪阶段。

3.1 像素的灰度处理

在算法的第 1 阶段,可采用一个中值滤波器来平滑图像,然后采用一个 Sobel 算子来增强道路图像边缘。为了更好地突出道路的边界,还需将图像二值化,因为二值化不仅可增强道路边界,而且二值化后对于减少图像信息量和增强算法的实时性有较好作用。

中值滤波器如式(1)所示:

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

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

Sobel 算子是一个差分算子,它能够对图像中非边缘信息进行弱化,同时能对边缘信息进行增强。离散的 Sobel 算子定义如下:

$$\begin{cases} \nabla_x f(x, y) = [f(x-1, y+1) + 2f(x, y+1) + f(x+1, y+1)] - \\ \quad [f(x-1, y-1) + 2f(x, y-1) + f(x+1, y-1)] \\ \nabla_y f(x, y) = [f(x-1, y-1) + 2f(x-1, y) + f(x-1, y+1)] - \\ \quad [f(x+1, y-1) + 2f(x+1, y) + f(x+1, y+1)] \end{cases}$$

(2)

其中梯度

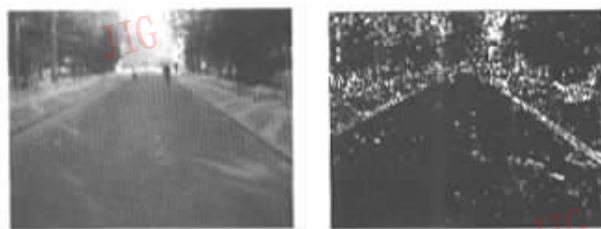
$$G(x, y) = \sqrt{\nabla_x f^2 + \nabla_y f^2} \quad (3)$$

其最大灰度梯度变化方向如式(4)所示,它包含了道路边界信息。

$$\tan \alpha = \frac{\nabla_y f(x, y)}{\nabla_x f(x, y)} \quad (4)$$

Sobel 算子本质是用于求取相邻或相距一定距离的像素点的灰度差异特征。对于道路而言,正常的路面由于物理性质接近,且光照一般均匀,这种情况下,邻近的像素点的灰度值往往比较接近。这样经过 Sobel 操作后,就把这种接近程度转化成一定值,该值通常接近于 0。图 1 示例了 Sobel 算子的边缘增强作用。

道路图像经过 Sobel 算子处理后,仍然包含了大量无用信息。为了减小无用信息的影响,本文对图像进行了二值化处理,而二值化后的图像不但更适于计算机处理,而且利于提高计算速度。在进行图像二值化处理时,阈值的选择是一个关键问题,因为阈值选取得合理与否,直接影响着道路识别的结果。这里采用了一个基于全局图像的自动阈值选择算法。



(a) 原始图像 (b) Sobel 算子检测的边界图

图 1 Sobel 算子增强道路边缘

$$\mu_r = \sum_{i=0}^{255} i \times h(i) \quad (5)$$

$$\delta(k) = \frac{[\mu_r \omega(k) - \mu(k)]^2}{\omega(k)[1 - \omega(k)]} \quad (6)$$

$$\mu(k) = \sum_{i=0}^k i \times h(i)$$

$$\omega(k) = \sum_{i=0}^k h(i)$$

式中, $h(i)$ 是经过 Sobel 算子处理以后的图像像素灰度值。将阈值参数 k 从 1 到 m 之间变化,同时计算 k 变化时的方差 $\sigma(k)$,而使得 $\sigma(k)$ 达到最大值时的 k 值就是所需要的图像阈值。 i 代表第 i 个像素, μ 表示灰度平均值, $\omega(k)$ 表示灰度值不大于 k 的像素的比例。

3.2 道路边界识别

经过上述处理,道路图像中的边缘即得到增强。从图1可以看到,不仅道路边缘信息,其他信息,如树木、行人、建筑物等轮廓线也都被增强了。这些轮廓在图像中也形成了许多边界,统称之为假边界。可以说,由于道路边界信息是淹没在大量的假边界信息当中的,因此算法的任务就是从这些假边界信息中识别出真正的道路边界。

从实际经验可知,当视野局限在很小范围内时,即使人眼也难以识别道路。另外,由于有些道路边缘从近处难以区分,但从远处进行观察,却会发现清晰的道路边界,因此,模拟人眼这种从全局上进行道路识别的方法可以实现对道路的更有效识别。本文提出的道路图像边界约束就是从道路的宏观特征出发,利用直线道路模型来对整个图像进行宏观分析,通过克服图像局部细节,即像素“点”的影响,以达到提高道路识别可靠性的目的。

3.2.1 直线道路模型

本文假定道路边界是直线,这样就可以采用直线道路边界来对道路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。在本文所研究的智能模型车JUTIV-II视野很小的情况下,(一般预瞄距离不超过20m),由于采用直线道路模型并不影响模型的使用(见文献[4]),所以,本文可以使用直线道路模型(见图2)来拟合曲线道路,这对于节省计算量有很大作用。

在道路图像中,道路的两个边界可用式(7)和式(8)进行描述:

左边界为

$$\hat{y} = a_1 \cdot \hat{x}_1 + b_1 \quad (7)$$

右边界为

$$\hat{y} = a_2 \cdot \hat{x}_2 + b_2 \quad (8)$$

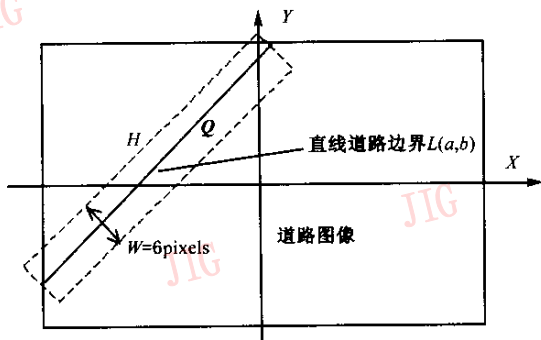


图2 边界L和感兴趣区域Q

这两个边界所受到约束如下:

- (1)视野内的道路区域位于同一平面内;
- (2)道路的左右边界相互平行,即道路的宽度不变;

利用上述约束,本文提出下述算法来计算道路边界:首先,算法假定图像中有道路边界,然后设定这条边界存在的可信度。

其算法原理是:在经过预处理的道路图像上,通过识别出的道路边界直线所在的一定区域范围来计算所有可能的道路边界点属于该直线的概率之和,并将其归一化后的值作为道路边界的可信度。

定义 如图2所示,在面积为S的感兴趣区图像Q上,任一点属于给定一条直线的概率为

$$P_{p(i,j)} = \eta \frac{1}{d^2} \quad (9)$$

其中

$$d^2 = \left(i - \frac{i - a \cdot j - a \cdot b}{a^2 + 1} \right)^2 + \left(j - \frac{a \cdot i - a^2 \cdot j - a^2 \cdot b}{a^2 + 1} \right)^2 \quad (10)$$

式中, $p(i,j)$ 为感兴趣区域图像Q上的任意一点,该点是经过图像预处理后的可能边界点; d^2 为该点到给定直线 $L(a,b)$ 的距离平方; η 为系数。为简化计算,本文中 η 取1。这样,式(9)变为

$$P_{p(i,j)} = \frac{1}{d^2} \quad (11)$$

则对于任意给定一条直线 $L(a,b)$,感兴趣区图像上所有点属于该直线的概率为

$$P_{L(a,b)} = \sum_{i=0}^W \sum_{j=0}^H P_{p(i,j)} \quad (12)$$

式中,W为感兴趣区图像的宽度,H为感兴趣区图像的高度。

计算中,所有参数采用无量纲形式。

然后,对所得结果进行归一化处理,其处理方法是,认为给定感兴趣区图像Q上的所有点都属于可能的道路边界点,然后应用式(12)即可得到边界点的最大概率值 P_{max} ,这样,得到的道路图像上存在直线 $L(a,b)$ 的可信度 γ 为

$$\gamma = P_{L(a,b)} / P_{max} \quad (13)$$

最后采用式(12)计算道路图像中所有可能的直线点的概率,并选择使得式(13)值最大时的直线 $L(a,b)$,即代表道路边界。图3到图7是用本算法提取的不同道路边界。为了清晰表示道路边界提取的结果,图中画出了所识别出来的道路边界。



(a) 原始图像 (b) 本文算法提取的道路边界

图 3 一般道路边界提取



(a) 缺口较小道路原始图像 (b) 本文算法提取的道路边界

图 4 缺口较小道路边界提取



(a) 缺口较大道路原始图像 (b) 本文算法提取的道路边界

图 5 缺口较大道路边界提取



(a) 较好的路况原始图像 (b) 本文算法提取的道路边界

图 6 较好道路边界提取



(a) 弯曲道路原始图像 (b) 本文算法提取的道路边界

图 7 弯曲道路边界提取

3.2.2 讨论

(1) 如果点 $p(i, j)$ 正好在给定直线上, 则取其距离值为 1; 如果该点到给定直线距离小于 1, 也以 1 计算。

(2) 从式(12)可以看出, 在计算给定直线的可信

度中, 理论上说, 整幅图像的所有可能边界点都对直线的可信度产生影响, 如果全部计算, 则运算量将会很大。分析式(11)可以发现, 由于本文中定义了点属于给定直线的概率与其到直线的距离平方是呈反比关系, 因此当图像上像素点远离给定直线后, 属于该直线的概率急剧变小。实际上, 这些像素点到该直线距离超过 3 之后, 该点对于该直线的可信度影响就可以忽略, 因此实际计算过程中, 可以将按指定直线的可信度计算的感兴趣区面积 S 限制在一个合理的范围内, 本文又对直线附近距离在 3 以内的点进行计算(如图 8 所示)。这样做不仅可大大减少了计算量, 同时也保证了对直线可信度计算结果的有效性。

(3) 在识别出的道路边界具有较高的可信度时, 即可从道路边界直线计算出道路中心线(如图 8 所示)。本文定义道路中心线为两个车道直线夹角的平分线, 据此可得到车辆与道路的相对位置, 如距离偏差、方向偏差等。

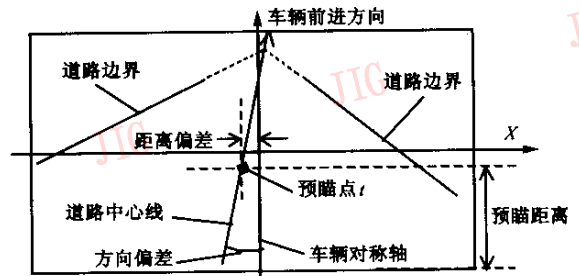


图 8 车辆在道路图像中的位置

3.3 感兴趣区域

在道路图像中, 大部分图像信息对于道路边界识别是无用的, 由于实际上, 在整个道路图像中, 道路边界部分只占了很小的一部分(如图 9 所示), 这一小部分区域称为感兴趣区域(ROI), 因此本文中, 跟踪算法只对这一小部分区域进行处理。



图 9 感兴趣区域

在算法的第 1 个阶段(初始化阶段), 算法首先将对整个道路图像进行处理, 以确定道路边界在整

个道路图像中的位置;然后在进行正常道路跟踪时,对道路边界的识别仅针对感兴趣区域进行,为了提高算法的实时性,算法采用了动态改变感兴趣区域大小的方法(如式(14)所示)。考虑到前面所述的道路约束条件,在摄像机前后两次采集的道路图像中,由于道路边界位置几乎没有变化,因此在这种情况下,算法可以利用上一次道路图像的道路边界识别结果来定位当前图像的兴趣区域;如果上次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;而当上次计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。跟踪算法定义如下

$$W_j = W_{j-1} \cdot \frac{\gamma_{\min}}{\gamma_{j-1}} \quad (14)$$

式中, W_j 为第 j 次算法运算提取出的感兴趣区域宽度(单位为像素); W_{j-1} 为第 $j-1$ 次算法运算提取出的感兴趣区域宽度(单位为像素); γ_{\min} 为道路边界

别有效的最低可信度,其一般根据试验确定; γ_{j-1} 为第 $j-1$ 次提取运算道路边界识别的可信度。

式(14)的物理含义是,当道路边界识别可信度高时,应减小感兴趣区域宽度,以减小计算量和提高道路边界提取的实时性;当道路边界识别的可信度降低时,应该通过适当增加感兴趣区域宽度来增大搜索区域,以便更为准确地识别道路边界。当然,感兴趣区域的宽度有一个选取范围,不能无限变化。图10(a)表示道路左边界的可信度变化情况,图10(b)表示感兴趣区域宽度变化情况,图10(c)表示算法完成时间变化情况。从图10(a),图10(b),图10(c)可以看出,(道路边界识别有效的最低可信度 $\gamma_{\min} = 0.65$),随着道路识别的进行,由于道路边界识别的可信度大于 γ_{\min} ,根据式(14),其道路图像的兴趣区域宽度逐渐减小,因此其完成一次提取运算所需要的时间也逐渐减少。由于受感兴趣区域最小范围的限制,因此经过一定时间后,算法每次道路边界提取运算时间就保持基本稳定。

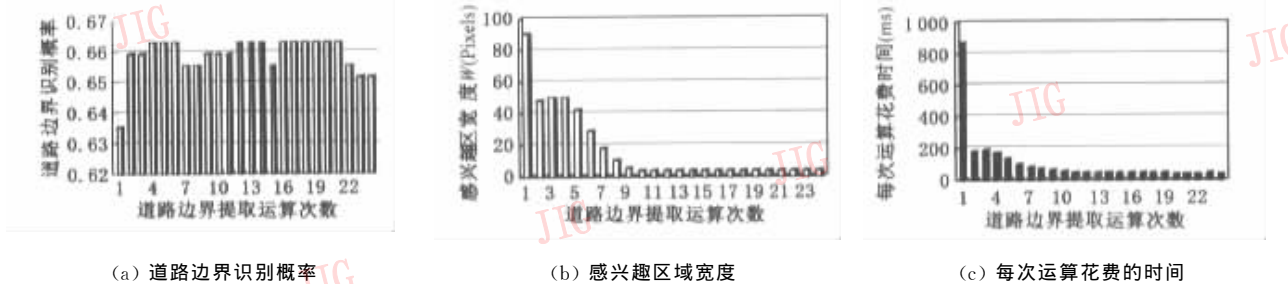


图10 一次试验的数据

4 实验

为验证本文算法效果,选取了一段校园道路进行试验。试验在智能车模型JUTIV-Ⅱ上完成,该车由本研究小组自行设计完成。JUTIV-Ⅱ是基于计算机视觉导航的智能车模型,其视觉传感器采用了1/2吋的CCD摄像机,安装于车辆的前方。采集的图像为 $580 \times 312 \times 8\text{bits}$ 灰度图像。图11是试验时系统



图11 软件界面

的运动界面。

本文试验在校园道路上进行,算法成功地识别出道路的边界。图12是试验时的典型工况。由该图可见,道路上有许多车辆行人,在试验中有时会有人出现在JUTIV-Ⅱ的摄像机前,有时有人骑自行车突然拐到车辆前方,但JUTIV-Ⅱ行驶情况并没有受干扰。在试验进行的过程中,这种情况常常出现,但JUTIV-Ⅱ均能保持稳定的导航工作,这反映了所研究的道路边界识别算法具有较高的鲁棒性。

另一个试验也较好地反映了本文算法的可靠性(见图13)。

图14到图16是试验参数变化情况。图14为道路边界识别率(可信度)曲线,从图14可以看到,道路左右边界的识别率相差较大。对于左边界,由于开始时干扰较多,因而系统在开始时边界识别可信度较低。但从出发点开始,行驶距离达到 $2 \sim 6\text{m}$ 时,道路识别率突然升至90%左右,这是因为道路跟踪算法

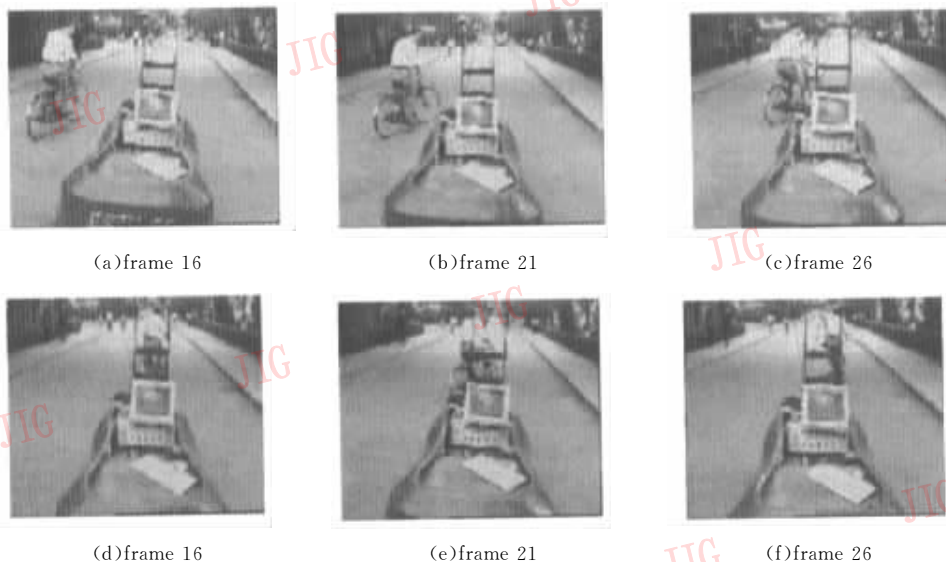


图 12 道路边界提取试验的典型工况



图 13 测试道路环境

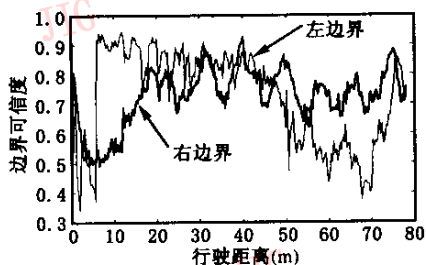


图 14 道路边界识别率曲线

在多次失效后,启动了恢复识别检测算法,从而使道路左边界识别可信度有一个较大变化所致。从图上还可以看到,道路右边界的识别可信度较高,且结果比较稳定,这是由于行人车辆都从试验车的左侧经过,对道路右边界的识别影响较小的缘故。

试验中,为了分析动态感兴趣区域对算法计算时间的影响,通过记录试验数据得到的算法每 10 次运算时间曲线图如图 15 所示。

从图 15 曲线可以看到,算法的第 1 次 10 个运行周期所用的时间超过 1200ms,这表明第 1 次算法

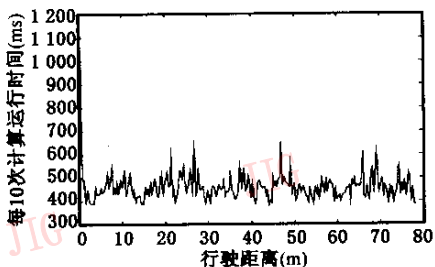


图 15 边界识别算法每 10 次运行的时间曲线

执行时进行了整个图像的处理。从第 2 次 10 个运行周期开始,算法所用的时间降到 400ms 到 700ms,算法平均每完成 10 次运算需要花费时间 480ms。

图 16 表示了试验中算法识别出来的两个道路边界直线模型的斜率变化情况。从图上可以看出,经过较短时间,直线模型的斜率便趋于稳定,说明算法具有较快的收敛性。

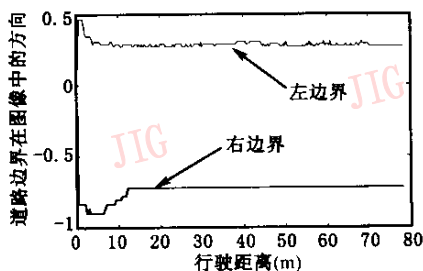


图 16 道路边界斜率变化

5 结论

本文提出了一种可以用在画线或非画线道路上

的道路边界识别算法,该算法在具有较多干扰(如车辆、行人等)的道路环境试验中,该算法表现出了较好的鲁棒性。本文算法的主要贡献在于较好地解决了计算道路边界识别的可信度问题。另外,本文算法采用动态感兴趣区域来提高识别率,这对于减少计算量、提高实时性和增强系统的环境适用能力起到了很好的作用。道路试验结果表明,本文算法在道路边界识别中具有很好的鲁棒性。

参 考 文 献

- 1 Serge B, Michel B. Road segmentation and obstacle detection by a fast watershed transform [A]. In: Proceedings of the Intelligent Vehicles '94 Symposium[C], Paris, France, 1994: 296~301.
- 2 Kluge K, Lakshmanan S. A deformable template approach to lane detection [A]. In: Proceedings of IEEE Intelligent Vehicle'95[C], Detroit, MI, USA, 1995:54~59.
- 3 Grimmer D, Lakshmanan S A. deformable template approach to detecting straight edges in radar images[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence[J]. 1996,18(4): 438~443.
- 4 徐友春,王荣本,智能车辆视野及其图像变形矫正的研究[J].公路交通科技,2000,17(5):76~80.

徐友春 1973年生,2001年获吉林大学博士学位,2002~2004年在清华大学汽车系从事博士后研究工作。主要研究方向包括:车用机器视觉技术;路径识别、障碍识别与跟踪及车辆主动安全控制技术;车辆横向控制、车辆纵向控制、智能巡航控制技术。

E-mail:xuyouchun@tsinghua.edu.cn



王荣本 1946年生,吉林大学交通学院教授,博士生导师。主要从事汽车自主导航、车辆安全与辅助驾驶、物流自动引导车(AGV)方面的研究。



李克强 1963年生,教授,1995年获重庆大学博士学位,本科和研究生分别毕业于清华大学及重庆大学汽车工程系,现在清华大学汽车系主要从事车辆系统动力学与汽车主动安全控制方面的研究工作。



赵玉凡 1944年生,1986年获吉林工业大学博士学位,现为天津市军事交通学院汽车教研室教授。主要从事与军用越野汽车机动性方面和汽车主动控制方面的研究。

