

基于随机 Hough 变换的道路边界识别算法研究

陈 军¹⁾ 徐友春²⁾ 赵 明²⁾ 彭永胜²⁾

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)

摘 要 道路边界识别是基于机器视觉的智能车辆关键技术之一,提出了一种基于直线道路模型的道路边界识别和跟踪算法,该算法包括道路边界初始识别算法和跟踪算法两部分。在初始道路边界识别阶段,对预处理后的图像进行逐行搜索道路边界候选点,并结合相关的道路约束条件,采用 Hough 变换对候选边界点进行拟合,以提高鲁棒性。该方法的创新点是在道路跟踪算法中,建立目标搜索区域(OSA),OSA 的宽度根据道路边界识别的拟合可信度的变换进行动态调整,并采用随机 Hough 变换的算法对 OSA 中的边界点进行拟合,这样显著减少了运算时间和存储空间。试验结果表明,该方法不仅满足道路边界识别的实时性要求,还具有较好的鲁棒性。

关键词 智能车辆 道路边界识别 目标搜索区域 随机 Hough 变换

中图法分类号: TP242.62 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2009)05-905-07

A Randomized Hough Transform Based on Road Edge Identification Algorithm

CHEN Jun¹⁾, XU You-chun²⁾, ZHAO Ming²⁾, PENG Yong-sheng²⁾

¹⁾ (School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072)

²⁾ (Automobile Department of Military Transportation Institute, Tianjin 300161)

Abstract The road edge identification is one of the key technology of the intelligent vehicle based on machine vision. A road edge identification and tracking algorithm based on linear road model is developed in this paper. This algorithm includes two stages, one is initial road identification algorithm and the other is road tracking algorithm. Pretreat the image at first at initial road edge identification stages, and then scan the image per-line in order to search the possible road edge points of every row. The method of Hough transform (HT) is used to match these points according to some road constrains. The new idea of this method is to set up the object search area (OSA) firstly at the road tracking stage, and the width of OSA is changing according to the change of the road edge identification reliability. And the possible road edge points are matched by Randomized Hough transform(RHT) method, This algorithm can decrease the algorithm running time and storage space evidently. Experiments prove that the algorithm is robust and fulfills the requirement real time of road edge identification.

Keywords intelligent vehicle, road edge identification, OSA(object search area), randomized Hough transform

1 引言

智能车辆是一个集环境感知、规划决策、多等级辅助驾驶等功能于一体的综合系统^[1]。它集中地

运用了计算机、现代传感、信息融合、通讯、人工智能及自动控制等技术。智能车辆能够综合对周围环境的感知和自身内部的先验知识,识别出欲行驶路径并规划出驾驶决策,实现车辆的自动或辅助驾驶。

对智能车辆而言,机器视觉是关键技术之一,其

基金项目:天津市自然科学基金项目(05YFJMJ119900)

收稿日期:2006-11-20;改回日期:2008-09-23

第一作者简介:陈 军(1976 ~),男,讲师。天津大学机械制造及自动化专业博士研究生。主要研究方向为智能汽车机器视觉及车身控制。E-mail:chenjun59114@126.com

主要任务是完成道路的识别与跟踪。近年来,国内外学者做了大量的研究工作并取得不少成果,但在道路识别的鲁棒性和实时性方面仍然需做大量研究,本文以军事交通学院 JJUV-I 无人驾驶车辆为研究对象,进行了相关道路边界识别和跟踪算法的研究,着重对提高道路边界识别的实时性和鲁棒性进行了研究。

到目前为止,世界上已经发展了多种基于视觉的道路识别算法。这些算法采用了不同的道路模型,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[2]提出一种基于长序列立体图像处理的 3 维运动参数估计算法,算法的核心是采用能有效抑制噪声的边缘检测模板,建立车辆行驶过程中的道路曲率动态模型、车自身的运动模型和摄像机的透视投影模型。并通过卡尔曼滤波器进行 3 维运动参数的估计。算法具有较好的鲁棒性,但需要建立车辆的运动学和动力学方程,算法比较复杂,很难保证识别的准确性。

文献[3]中提出了一种道路边缘识别算法。该算法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。该算法是采用像素级特征和帧图像特征来识别道路边缘。在模型中采用了有关的道路约束条件,使得算法具有较好的抗干扰能力。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。此算法具有较好的鲁棒性和实时性。

文献[4]采用了白色标志线和路面表面识别相结合的方法。通过采用曲线道路模型,对白色标志线进行识别,道路表面识别采用阈值分割的方法。然后根据白色标志线和道路表面相交于同一点(即消失点)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,但算法比较复杂,没有较好的实时性。

本文提出了一个基于直线模型的道路边界识别算法。由初始道路边界识别和跟踪两部分组成,在初始道路边界识别阶段采用 Hough 变换,在跟踪阶段采用随机 Hough 变换以提高算法的运算速度,并采用动态的目标搜索区域来提高识别的准确率和识别速度。

2 道路边界识别算法

本文道路边界识别算法分为初始道路边界识别和道路边界跟踪两个阶段。

2.1 图像预处理

在进行道路边界识别之前,要对获取的前方道路图像进行预处理,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。

$$f(x, y) = \text{median} \{ \mathbf{S}_{f(x, y)} \} \quad (1)$$

式中, $\mathbf{S}_{f(x, y)}$ 是像素点 $f(x, y)$ 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。经过 Sobel 算子增强后,道路图像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,要对图像进行二值化处理。在图像二值化处理中,阈值的选择是关键,其直接影响着识别的效果。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,然后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,当开关函数不再发生变化,即迭代已经收敛于某个稳定的阈值时,此阈值即为最终结果,可以用于对图像的分割。迭代公式如式(2)所示。

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

式中, n 为灰度级的个数, h_k 是灰度值为 k 的像素点个数。 T_i 是迭代 i 次后的阈值。图 1 为对图像进行预处理后的结果。

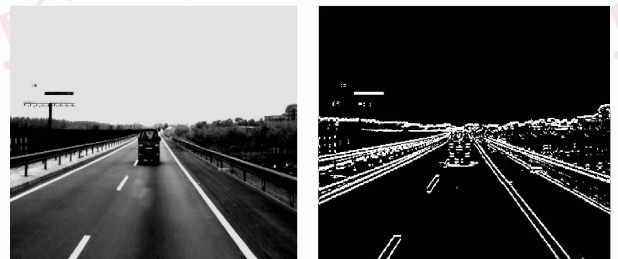


图 1 图像预处理效果

Fig. 1 Result of image pretreatment

2.2 道路边界识别

对图像进行预处理后,就可以进行道路边界识别。在识别之前要确定候选边界点,根据这些点结合道路边界约束条件来确定道路边界。

2.2.1 候选边界点的确定

本算法只识别车辆行驶的当前车道,确定道路候选边界点的方法是:在每一行扫描线上,以图像中心线为起始位置,分别向左和向右进行搜索,当搜索到第一个白点(像素值为 255)时,即停止在本行当前方向的搜索,并将此点作为该行的候选边界点。

2.2.2 道路边界约束

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^[1]。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。

在道路图像中,道路的左右边界直线用式(3)和式(4)进行描述。

$$\text{左边界: } y = k_1x + b_1 \quad (3)$$

$$\text{右边界: } y = k_2x + b_2 \quad (4)$$

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) 道路边界不发生突变。

2.2.3 初始道路边界识别算法

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直线边界模型的特征匹配问题。本文采用 Hough 变换来识别直线道路边界。Hough 变换是 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和曲线。Hough 变换的原理如图 2 所示,设直线 L 在图像空间直角坐标系下的方程为

$$r = x\cos\theta + y\sin\theta \quad (5)$$

式中, r 为直角坐标系原点到直线 L 的距离; θ 为直线 L 与 y 轴的夹角。

Hough 变换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。Hough 变换的主要瓶颈是它要求较大的存储空间和较长的计算时间,这很难满足道路识别的实时性要求。1993 年由 Xu Lei 等人提出的随机 Hough 变换^[5],这是受 Kokonen 的自组织映射神经网络的启发一种概率 Hough 变换。由于它采用了随机抽样、收敛映射(即由最小点集来计算对应基

元的参数组)和动态联接列表,所以这 3 种新机制分别取代了穷举和一对多映射,从而使得随机 Hough 变换克服了标准 Hough 变换所面临的一些主要困难,使得存储空间和运算时间大大地缩减。所以本文为了在跟踪阶段提高道路边界识别的速度,采用随机 Hough 变换来进行道路边界识别。

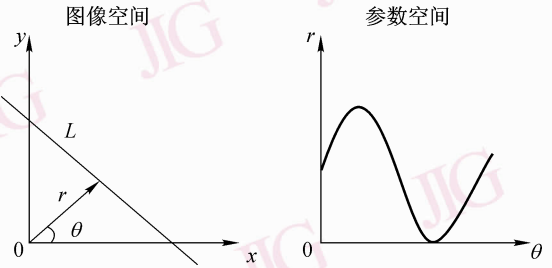


图 2 Hough 变换原理示意图
Fig. 2 Theory sketch of Hough transform

对 Hough 变换的具体步骤做如下说明:

(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) 为了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(Hough transform)。当候选边界点大于 100,隔一行取一个候选边界点进行 HT。当候选边界点小于 100 时,必须对所有点进行 HT。

对于图 3 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, θ) 平面内最大值邻域数据(如表 1 和表 2 所示)。由于篇幅所限,表 1 和表 2 只列举了部分试验数据。

表 1 左车道线 HT 最大值的邻域
Tab. 1 The adjacent region of HT max value for left lane

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

Tab. 2 The adjacent region of HT max value for right lane

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

$$k = \frac{-1}{\tan\theta} \tag{6}$$

$$b = \frac{r}{\sin\theta}$$

根据式(6)可以算出图 3 中左右边界在图像空间中的直线方程。坐标系同图 5 的坐标系。

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



图 3 Hough 变换结果
Fig. 3 HT result

图 4 为应用 Hough 变换的识别结果。从这些图中可以看出,应用 Hough 变换识别道路边界具有较好的准确性和鲁棒性。

2.2.4 道路边界拟合可信度分析

为检验道路识别的有效性,要对识别出的道路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 为到直线 L 距离不大于 1 的候选边界点数; E 为候选边界点的总数。



(a) 良好路况



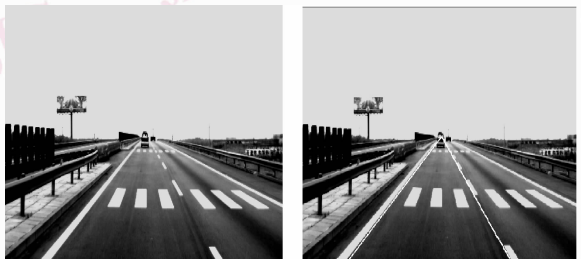
(b) 阳光较强路面



(c) 路标残缺路面



(d) 前方障碍较多路况



(e) 有路标干扰路况

图 4 路况原图(左)及识别效果(右)

Fig. 4 Original image(left) and identify result(right)

2.3 道路跟踪算法

当相邻两次或多次初始化识别过程得到的道路边界位置变化不大时,表明车辆进入稳定跟踪阶段,此时就可以启动道路跟踪算法。本文研究的道路跟踪算法本质上也是道路识别算法,其特点是根据上次识别结果建立动态目标搜索区域,用随机 Hough 变换来确定直线道路边界,以提高算法的实时性和鲁棒性。

2.3.1 目标搜索区域

根据道路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道路边界识别无用的大量干扰信息,提高识别的准确性,并且可以大大减少运算量,提高识别速度。

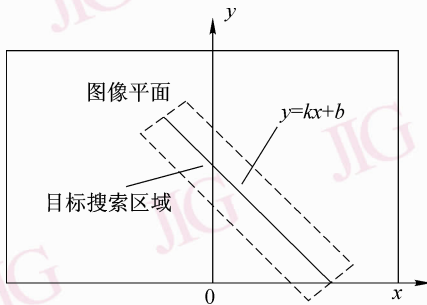


图5 目标搜索区域的建立

Fig. 5 Set up of OSA

本文建立 OSA 的原理是根据实际道路边界的连续性,不可能出现突变的性质,对上次识别出的道路边界进行扩展而形成,如图 5 所示。上次识别的道路边界直线 L 方程为: $y = kx + b$, 以直线 L 为中心,可以设定 OSA 的上下边界的直线方程为

$$\begin{cases} y = kx + b + m \\ y = kx + b - m \end{cases}$$

式中, m 为直线在 y 轴上的截距平移量。

2.3.2 提高算法处理速度的方法

道路边界识别算法的处理速度非常重要,因为智能车辆视觉系统是一个动态图像处理系统,它必须实时处理道路图像,提供准确的道路信息。

本文采取以下 3 项措施提高图像处理速度:

第 1 项 建立目标搜索区域,使得在正常道路跟踪时,对道路边界候选点的搜索只在 OSA 区域内进行,可以大大提高算法的处理速度。

第 2 项 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道路边界识别拟合可信度之间变化关系的函数:

$$\frac{m_j}{m_{j-1}} = \frac{S_0}{S_{j-1}} \quad (8)$$

式中, m_j 为第 j 次目标搜索区域宽度,单位为像素; m_{j+1} 为第 $j-1$ 次目标搜索区域宽度,单位为像素; S_0 为道路边界识别有效的最低拟合可信度,由试验确定,本文为 0.5; S_{j-1} 为第 $j-1$ 次道路边界识别的拟合可信度。

对动态改变 OSA 宽度,式(8)的含义是,当道路拟合可信度高时,应减小 OSA 宽度,以减小计算量而提高算法的实时性;当道路拟合可信度低时,应当通过适当的增加 OSA 宽度来增大搜索区域。当然 OSA 宽度有一个选取范围,不能无限变化。

第 3 项 在跟踪阶段采用随机 Hough 变换来进行道路边界识别,可以进一步提高算法的速度,具体步骤为

- (1) 建立并初始化一个累加器 $A(r, \theta)$;
- (2) 从图像空间的 OSA 所有候选边界点中随机抽取两点,计算由这两点确定的直线 (k, b) ,从而得到相应的基元参数 (r, θ) ;
- (3) 对相应的基元参数累加器数组进行累加;
- (4) 从候选边界点中随机抽取与上一次所抽取的不同两点,重复步骤(2), (3), 直至所有候选边界点抽取完毕;
- (5) 找到累加器 $A(r, \theta)$ 上的最大值,由这个极值点处的参数来确定图像空间上的直线。

对随机 Hough 变换进行如下讨论:

- (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) 当候选边界点较少时(一般小于 30),此时为提高识别的可靠性,计算这些点中两两之间所确定的直线,再根据累加器 $A(r, \theta)$ 上的最大值确定道路边界直线;
- (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。

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试验,采用普通台式计算机,其 CPU 为 P2.4 GHz 的 Intel 处理器,采用德国 BASLER 公司的 A601fc 型 CCD 摄像机,采集 $576 \times 312 \times 8$ bits 的灰度图像。试验道路为天津至塘沽的一段高速公路,一共采集了 528 帧图像。图 6 为试验所用的软件界面。

图 7 列举了在道路边界识别试验中的一些典型路况。图 7(a)中虚线车道因阳光照射反光时,本算法可以不受干扰,正确的识别出车道线。图 7(b)中,



图 6 试验软件界面

Fig. 6 Experiment software interface



(a) 有光斑干扰 (第5帧)



(b) 有横向白线干扰 (第17帧)



(c) 有车辆干扰 (第321帧)



(d) 侧面有大车干扰 (第446帧)



(e) 较为良好路面 (第47帧)



(f) 较为良好路面 (第517帧)

图 7 道路识别试验的典型路况

Fig. 7 Typical road conditions in road identify experiments

当前方出现横向白线干扰时,也不会影响算法的识别效果。图 7(c)中前车距离很近时,对前方道路形成较大的遮挡,此时,该算法也可以准确地识别出车道线。从这些典型路况中可以看出,本算法能准确地识别出道路边界,具有较好的鲁棒性。

图 8 为道路边界识别过程中,左右边界直线斜率的变化情况,在第 190 帧图像之前,左车道线是虚线,右车道线是实线,所以,左边界识别的直线斜率有一些波动,换道之后,左车道线为实线,而右车道线为虚线,则左边界识别的直线斜率波动减小。

图 9 为边界识别所用的时间变化图,刚开始时为初始道路识别,所用时间较长,很快就进入道路跟踪阶段,识别时间明显降低。从第 190 帧图像开始,车辆进入换道阶段,此时道路跟踪识别算法失效,进入初始道路识别算法阶段,运算时间变长,到第 210 帧图像时,车辆换道结束,进入稳定的道路跟踪阶段,运算时间明显变短。从第 490 帧到 510 帧图像也是一个换道过程,运算时间的变化规律和上述一样。

从道路试验可以看出,当车辆在车道内正常行

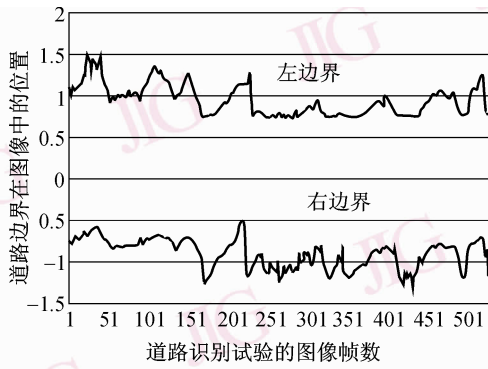


图8 左右直线边界斜率变化

fig. 8 The slope change of left and right line edge

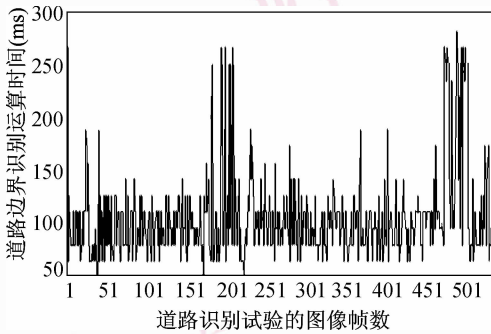


图9 道路边界识别运算时间

Fig.9 Operation time of road edge identification

驶时,本算法具有很高的边界识别率。但在车辆换道时,本算法出现道路边界识别的准确率降低的现象,并产生一些波动,这是本算法的不足之处。如何提高车辆在换道时的道路边界识别的准确率是下一步的主要研究方向。

4 结 论

本文提出一种基于直线模型的道路边界识别和跟踪算法。将 Hough 变换应用于初始道路边界识别,在道路跟踪阶段,通过建立目标搜索区域,根据道路识别的可信度动态的改变目标搜索区域的宽度,提高了道路的识别率。并且采用随机 Hough 变换来识别直线道路边界,进一步提高了道路识别算法的运算速度。道路试验结果表明,本文的道路边界识别算法具有较好的鲁棒性和实时性。

参考文献 (References)

- 1 Xu You-chun. Study on Integrative Navigation Method of Intelligent Vehicle Based on Machine Vision and GPS [D]. Jilin, China: Jilin University, 2001. [徐友春. 智能车辆视觉与 GPS 综合导航方法的研究[D]. 吉林大学博士学位论文, 2001.]
- 2 Su Kai-na, Ren Wen-jun, Yi Xiao-lin, *et al.* A kinematic model-based road recognition and tracking [J]. Journal of Image and Graphics, 2003, 5(3): 227-231. [苏开娜, 任文君, 易小琳等. 基于运动模型的道路识别与跟踪算法的研究[J]. 中国图象图形学报, 2003, 5(3): 227-231.]
- 3 Xu You-chun, Wang Rong-ben, Li Ke-qiang, *et al.* A linear model based road identification algorithm [J]. Journal of Image and Graphics, 2004, 9(7): 858-864. [徐友春, 王荣本, 李克强等. 一种基于直线模型的道路识别算法研究[J]. 中国图象图形学报, 2004, 9(7): 858-864.]
- 4 Sakurai Kazuyuki, Kyo Sholin. A Lane Recognition Method Based on White Line Detection and Road Area Detection [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Intelligent Vehicle [C], Stuttgart, Germany, 1998: 58-61.
- 5 Xu L, Oja E. Randomized Hough Transform (RHT): Basic Mechanism, Algorithms, and Computational Complexities [J]. CVGIP: Image Understanding, 1993, 57(2): 131-154.