

基于移动终端的道路边缘检测方法^①

杨国青¹, 逢 伟¹, 李秀梅²

¹(浙江大学 计算机科学与技术学院, 杭州 310027)

²(杭州师范大学 信息科学与工程学院, 杭州 311121)

摘要: 面向自动驾驶技术, 研究一种实时的道路边缘检测方法—MERD(Mobile Equipment based Road-edge Detection). 该方法基于智能移动终端的 Android 系统平台, 将针对 HSV 图像的数学形态学方法和针对灰度图的 Hough 变换检测方法相结合, 针对不同路段环境进行道路边缘检测. 实验验证了该方法在处理傍晚路段、阴影较多路段等不同情况的道路环境时, 能够提供较高准确度的实时道路边缘检测, 为车辆的自动驾驶提供安全保障.

关键词: 道路边缘检测; 移动终端; Hough 变换

Mobile Equipment-Based Road-Edge Detection

YANG Guo-Qing¹, PANG Wei¹, LI Xiu-Mei²

¹(School of Computer Science and Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

²(School of Information Science and Engineering, Hangzhou Normal University, Hangzhou 311121, China)

Abstract: This paper proposed a real-time method for road-edge detection. The method is named as the mobile equipment based road-edge detection (MERD). Based on the Android platform in the intelligent mobile equipment, MERD combined the mathematical morphology based detection in HSV image with the Hough transform based detection in gray scale image. MERD can be used to provide road-edge detection for various road situations. Experiments are given to show the validity and accuracy of MERD in real-time road-edge detection for the shadowy road, road in the evening, road with snow, road with rain, road with pedestrian and shadows, thus providing the safety insurance for self-driving vehicles.

Key words: road-edge detection; mobile equipment; Hough transform

自动驾驶是汽车技术发展的重要方向. 20 世纪 80 年代, 美国在 DARPA 预研项目资助下研制了第一台自动驾驶车辆 ALV. 目前美国的主要智能车辆研究有美国军方研制的 DEMOIII、卡耐基梅隆大学研制的 Navlab 系列、以及谷歌自动驾驶汽车. DEMOIII 智能车融合了包括摄像机、激光、雷达、超声波、红外线等多传感器技术, 满足有路和无路条件下车辆的自动驾驶. NavLab 系列智能车采用 SonyDXC-151A 彩色摄像机, 用于道路和障碍物检测, 并通过控制转向实现自动驾驶. 谷歌自动驾驶汽车使用图像摄像头、雷达传感器以及激光测距器感知车辆周围交通状况, 并通过地图进行导航. 目前, 采用谷歌自动驾驶技术改装

的自动驾驶车辆已经成功行驶 30 万英里. 自从谷歌发布自动驾驶技术以来, 自动驾驶技术成为当前的研究热点.

道路环境感知是自动驾驶技术的关键. 通过道路环境感知, 获取可行驶路面的边缘和移动障碍物信息, 为自动驾驶车辆提供依据. 目前, 道路边缘检测的自动驾驶技术普遍基于高性能图像传感器数据和多种雷达传感器数据融合的道路环境感知方法实现. 这种方法复杂度较高, 尤其是采用三维激光雷达和微波雷达设备, 造价非常昂贵, 不适于大规模民用化.

随着智能手机和平板电脑等移动终端设备的快速普及, 其在汽车中的应用受到越来越多的重视. 本文研究一种基于移动终端的道路边缘混合检测方法, 能

① 基金项目: 国家自然科学基金(61102164)

收稿时间: 2014-05-06; 收到修改稿时间: 2014-06-06

够提供高准确度和鲁棒性的实时道路环境感知检测,为自动驾驶技术的普及提供基础。

本文第1部分介绍了道路边缘检测的相关工作。第2部分详细介绍了基于移动终端的道路边缘检测方法MERD,第3部分以实例说明MERD检测方法的应用及效果,第4部分是本文的总结。

1 道路边缘检测的相关工作

常见的道路边缘检测方法有多种,如:(1)Hough变换检测直线算法^[1]: Hough变换利用图像空间和Hough参数空间的点一线对偶性,把图像空间中的检测问题转换到参数空间。通过在参数空间里进行简单的累加统计,然后在Hough参数空间寻找累加器峰值的方法检测直线。该算法简单、成熟,具有很好的容错性和鲁棒性,应用领域十分广泛。但是需要占用较大内存、实时性较差、易受外界干扰,特别对于道路边缘检测时,阴影、障碍物等对Hough检测道路影响较大。(2)基于彩色空间HSV的图像分割法^[2-4]: HSV分别对应于色调(Hue)、饱和度(Saturation)和亮度(Value),通过将RGB色彩空间的图像转换为HSV空间的图像,可以对感兴趣的色彩信息(如S)进行进一步处理,方法主要有直方图阈值法、聚类法、区域增长法和边缘检测法等。该算法对去除阴影效果明显,对于有阴影、有干扰的道路,与方法(1)相比效果更好。但是色彩空间转换后需要选取合适的图像处理方法来检测道路边缘,效果好的方法往往带来实时性的降低。此外阈值较难选取。(3)道路模版匹配方法^[5]: 使用数学模型的模版对车道进行匹配,适用于边缘清晰、较为理想的城市道路、高速公路等。对与模型相近的道路匹配程度较高,且对于简单模版匹配速度较快。但存在以下不足:较复杂模版库能带来较精确的匹配程度,但是内存与实时性下降较为明显;较简单的模版库匹配速度快,但精确度不高;阴影和干扰对匹配效果影响较大。(4)基于特征参数的跟踪方法^[6-8]: 它是一种参数估计的方法,主要在建立车道标识线模型的基础上进行,多用于检测道路标线,用于道路边缘不多。最具代表性的是各种滤波方法,如卡尔曼滤波以及在其基础上发展起来粒子滤波方法等。该算法考虑到了图像的连续性,在处理非线性非高斯的系统优势明显。但是由于是用先验概率预测后期结果,一旦预测出现误差,后

期误差会逐渐增大,所以初次检验需要有较高准确率。此外该方法计算量很大,需要强大的硬件平台。

以上方法处理复杂度较高,多采用工业控制计算机作为计算平台,无法普及应用到普通的汽车上。

2 MERD: 基于移动终端的道路边缘检测方法

随着手机、平板电脑等移动终端的快速普及,移动终端在车载环境中的应用逐渐发挥出优势。通过在Android系统中实现道路边缘识别,为行车辅助、自动驾驶提供信息支持是汽车智能化发展的重要途径之一。由于道路边缘以直线为主,所以通常采用Hough变换进行直线检测,但是Hough变换处理阴影时误差较大。在图像的HSV空间,饱和度是指色彩纯度,即同一色相的色彩中掺杂白色的比例,而道路表面和阴影区域的色彩中掺杂的白色均较小,所以在S域中二者较为接近^[9]。

本文提出了基于移动终端的道路边缘检测方法—MERD (Mobile Equipment based Road-edge Detection)。该方法的核心是将图像的处理分为基于HSV空间的图像处理 and 基于灰度图空间的图像处理,在完成上述两类处理后,进行融合分析,以得到最佳道路边缘检测结果。MERD的流程如图1所示。首先利用移动终端录制YUV格式的道路视频,将提取的图像帧转换成为RGB格式。然后,将RGB图像转换为HSV格式,并通过S域选择阈值完成图像的二值化处理,再利用数学形态学中的腐蚀和膨胀对图像进行处理,以得到道路的边缘区域;同时,将RGB图像转换为灰度图,并利用Canny算子对增强图像进行边缘检测,然后利用Hough变换进行直线检测。最后,对HSV空间确定的道路边缘区域和Hough变换的检测结果进行融合分析,以得出最佳道路边缘。

在本方法中,为了提高处理效率,根据道路边缘存在于图像下半部分的特点,将首先对图像进行纵向分割,截取图像下半部分进行处理。

2.1 基于HSV空间的图像处理

为了更好地检测出道路边缘,本文将道路图像转换成为HSV空间进行处理,采用HSV空间中表示饱和度的S域信息对道路亮度信息进行去除,有效避免道路中的阴影对边缘识别的不利影响。下面详细描述

MERD 方法中基于 HSV 空间的图像处理的步骤。

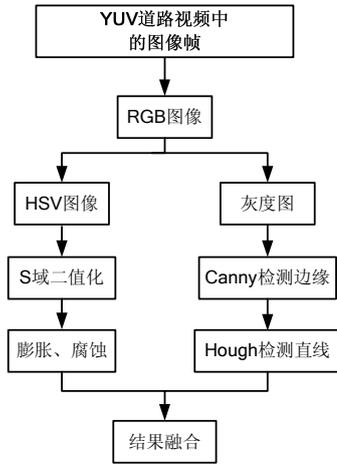


图 1 道路边缘检测流程图

1) 图像空间 RGB 到 HSV 的转换

由 RGB 格式转换为 HSV 格式的转换公式为:

$$\begin{cases}
 h = \begin{cases} 0^\circ & \max = \min \\
 60^\circ \times \frac{g-b}{\max-\min} + 0^\circ & \max = r, g \geq b \\
 60^\circ \times \frac{g-b}{\max-\min} + 360^\circ & \max = r, g < b \\
 60^\circ \times \frac{b-r}{\max-\min} + 120^\circ & \max = g \\
 60^\circ \times \frac{r-g}{\max-\min} + 240^\circ & \max = b \\
 0 & \max = 0 \\
 1 - \frac{\min}{\max} & \max \neq 0 \end{cases} \\
 s = \begin{cases} 0 \\ 1 - \frac{\min}{\max} \end{cases} \\
 v = \max
 \end{cases} \quad (1)$$

其中 (r, g, b) 分别是一个像素点的红色、绿色和蓝色的数值, 它们的值是在 0 到 1 之间的实数. max 为 r、g、b 中的最大者, min 为这些值中的最小者.

2) 不同光线强度的 S 域二值化

一般来说, 道路在摄像机采集到的图像中是一个近似梯形的结构^[10-12]. 为了对 S 域进行二值化处理, 首先需选取合适的阈值. 本文采用方法为: 选取 S 域图像中的三个区域, 如图 2 所示, 以最大可能保证所取点在道路上. 将这三个区域分别求 S 域的平均值, 考虑到这三个区域可能不完全处于道路上, 或部分区域因有障碍物遮挡使得 S 域有偏差, 我们取三个平均值的中位数作为最佳阈值 a, 以将误差值控制在一定范围内.

中位数的特点如下:

设三个平均值 x,y,z 满足: 设 $x \leq y \leq z$, 道路 S 域值为 s

- ①若 $x=s, z=s$, 则 $y=s$;
- ②若 $x \leq s, z > s$, 则 y 处于 $[x, z]$ 中, y 的误差范围 $[0, \max(s-x, s-z)]$;
- ③若 $x < s, z \leq s$, 则 $y < s$, y 的误差范围 $[s-z, s-x]$;
- ④若 $x > s, z \leq s$, 则 $y > s$, y 的误差范围 $[x-s, z-s]$.

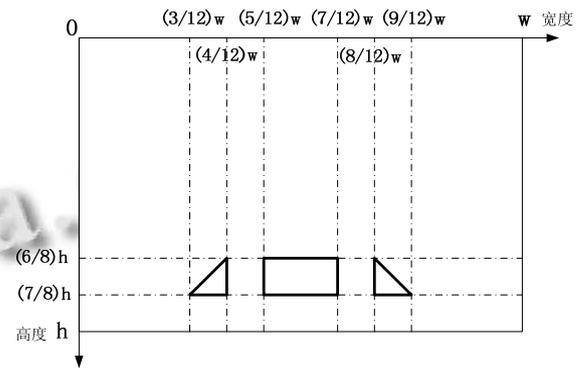


图 2 S 域图像中的阈值选择方法

由于在不同光线强度下的 S 域图像表现出不同的特点, 在对 S 域进行二值化的时候, 邻域的选取必须考虑光线对图像的影响. 在本文提出的方法中, 邻域的定义为: $b = D + \lg L$. 其中 D 为邻域基数, L 为通过光线传感器测得的光线强度. 通过阈值 a 和邻域 b 对 S 域中每个像素点的值 S_i 进行二值化处理:

$$S_i = \begin{cases} 0 & S_i < (a-b) \text{ or } S_i > (a+b) \\ 255 & (a-b) \leq S_i \leq (a+b) \end{cases} \quad (2)$$

3) 基于闭运算的膨胀、腐蚀:

灰度图像腐蚀运算的定义为^[13]:

$$\begin{aligned}
 g(x, y) &= \text{erode}[f(x, y), B] \\
 &= \min\{f(x+x', y+y') - B(x', y') \mid (x', y') \in D_b\} \quad (3)
 \end{aligned}$$

其中, $g(x, y)$ 为腐蚀后的灰度图像, $f(x, y)$ 为原灰度图像, B 为结构元素. 腐蚀运算即由结构元素确定的邻域块中选取图像值与结构元素值的差的最小值.

灰度图像的膨胀运算的定义为:

$$\begin{aligned}
 g(x, y) &= \text{dilate}[f(x, y), B] \\
 &= \min\{f(x-x', y-y') + B(x', y') \mid (x', y') \in D_b\} \quad (4)
 \end{aligned}$$

即由结构元素确定的邻域块中选取图像值与结构元素值的和的最大值.

对二值化后的道路图像中的白色区域(数值为 255

的区域)进行膨胀和腐蚀。白色区域内部或者边缘往往存在一些干扰,通过对白色区域进行膨胀可以适当放大白色区域,去除小的干扰。膨胀之后再行腐蚀,并将白色区域减到比原白色区域还要小的范围,以保证道路边缘在白色区域之外,而树影之类的直线则由于四周白色区域太多从而被排除掉。经过闭运算处理后,能够较好的得到道路轮廓。

2.2 基于灰度空间的图像处理

MERD方法中基于灰度空间的图像检测的过程为:首先对分割后的灰度图像采用Canny算法进行边缘检测处理,然后对处理后的图像进行Hough变换,检测图中的直线。处理步骤如下:

①对图像进行二次分割,将图像分割为左右两部分,在左右两部分中分别对不同斜率的直线进行检测。

②采用Canny边缘检测对左右两幅图像进行处理。Canny边缘检测法是高斯函数的一阶微分,它能在噪声抑制和边缘检测之间取得较好的平衡。

③对采用Canny算法处理后的图像进行Hough检测,去除较短线段,并对碎线段进行连接。

2.3 图像处理结果融合

在经过基于HSV空间和基于灰度空间的图像处理,分别得到两类道路边缘检测结果,接下来对上述检测结果进行分析融合。融合的方法为:

第1步:①基于线段斜率筛选:在Hough变换后的左图中选择斜率为 $0\sim 90$ 度的线段,右图中选择斜率为 $90\sim 180$ 度的线段。与文献[14]相比,之所以本文中斜率有较大的选取范围,是因为HSV提供的道路边缘区域能够很好地对斜率范围进行限制,通过这样的设定可以提高对弯道的检测结果,弥补弯道检测的不足。②选取的线段应有70%处于经过闭运算后的HSV空间中S域图的黑色区域。

第2步:选择出满足第一步条件的最靠近中线的线段,作为最靠近行驶车辆的道路边缘。

第3步:线段需要与前一帧图像检测出的线段相近,本方法采用与横坐标的截距,即前后线段截距差值不超过 $w/10$,其中 w/q_0 是根据多次实验获得的经验值。若没有检测出满足条件的线段,则沿用前一帧图像检测出的道路边缘。

第4步:对第三步得到的线段进行延长,进而得到与道路边缘相拟合的直线。

2.4 MERD 检测方法实验

本文首先以中午时分校园道路为例,对MERD道路边缘检测方法进行验证。图像录制设备采用普通的Android手机,录制速率30帧/秒,分辨率为 $640*480$ 。实验路段树影多,并且无行车线、道路边缘不明显。本方法针对于移动终端,在实验过程中使用了OpenCV的Java版,即采用JavaCV作为图像处理的基础函数库。JavaCV中包含了OpenCV的绝大部分函数,且其底层依然使用OpenCV的库函数,非常适合在Android平台上开发道路检测应用。

为了验证道路边缘检测方法的有效性,本文选取道路图像中的一帧,如图3所示,并已将RGB图像转换为灰度图。该道路上存在过多斜率处于可选择范围的树影,单纯使用Hough变换检测直线的方法无法有效获取道路边缘。



图3 道路原始图像(灰度图)

基于HSV空间的图像处理分为下三步进行:

(1)将图像转化为HSV格式,其中的S域的灰度图表示如图4所示,可见道路的阴影在很大程度上被消除了。



图4 用灰度表示的S域图像

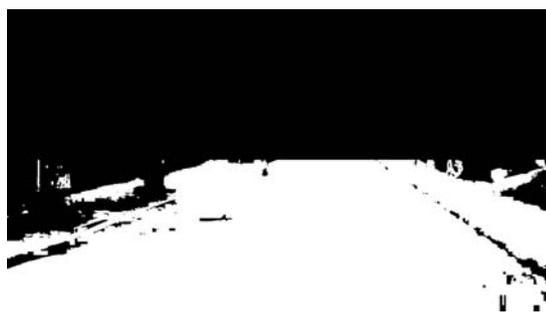
(2)对S域图像进行二值化,如图5所示。



图 5 二值化后的 S 域图像

(3)进行基于闭运算的膨胀腐蚀运算: 腐蚀程度和膨胀程度可以动态选取^[15], 例如刚开始腐蚀倍数是膨胀倍数的 10 倍, 在后来的处理过程中, 若未检测到直线则每次膨胀倍数加 1, 直到腐蚀倍数变到 20 为止. 若这期间检测到直线则腐蚀倍数减 1, 直到减到 10 为止, 所以膨胀参数范围为[10,20].

膨胀后的图像如图 6(a)所示, 腐蚀后的图像如图 6(b)所示. 可以看出道路边缘处于黑色区域.



(a)膨胀处理结果



(b)腐蚀处理结果

图 6 膨胀与腐蚀后的图像

基于灰度空间的图像处理过程如下:

(1)进行图像二次分割. 为了提高边缘检测的效率, 本方法首先对 RGB 图像进行二次分割, 将图像分为左右两部分, 之后, 将左右两幅图像分别转换为灰度图,

为后期采用 Hough 检测直线后进行斜率筛选提供依据. 以左右分割后的左半图为例进行说明, 如图 7 所示.



图 7 经过图像二次分割后的左半图

(2)采用 Canny 算法对灰度图进行边缘检测. 经过降噪、亮度梯度处理和边缘跟踪后得到的结果如图 8 所示.



图 8 Canny 边缘检测结果

(3)对采用 Canny 算法处理后图进行 Hough 检测, 将 Hough 检测到的直线进行筛选, 去除较短线段, 对碎线段进行连接, 检测到的直线如图 9 中白线标记所示.

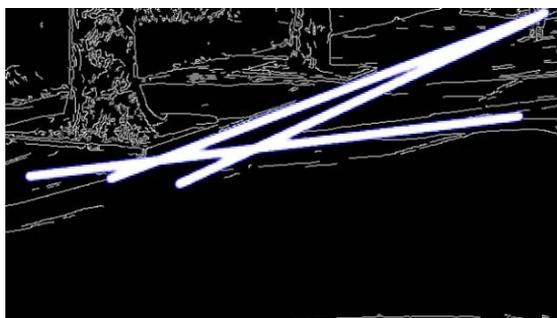


图 9 Hough 检测并筛选后的直线

根据 2.3 节中所介绍的方法, 对基于 HSV 空间的图像处理和基于灰度空间的图像处理得到的结果进行

融合, 得到合理的道路边缘检测结果, 如图 10 所示.

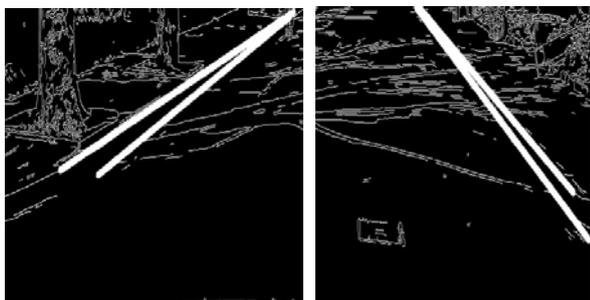


图 10 图像融合结果

最后, 选择离中线最近的边缘, 得到最终的道路边缘检测结果, 如图 11 白线标记所示. 可见, 该方法能有效去除阴影的影响, 较准确地检测出道路的边缘.



图 11 采用 MERD 算法进行道路边缘检测结果

3 MERD算法检测效果

为了进一步验证基于MERD算法的道路边缘检测性能, 我们还对傍晚、有行人和阴影的路段、下雪路段、下雨路段等情况进行了检测. 由于篇幅限制, 文中只给出各种路段的原图及检测结果图. 见图 12-16.



(a) 原图



(b)检测结果

图 12 傍晚道路边缘检测结果



(a)原图



(b)检测结果

图 13 有行人及阴影时道路边缘检测结果



(a)原图



(b)检测结果

图 14 有行人及阴影时道路边缘检测结果



(a)原图



(b)检测结果

图 15 雨天道路边缘检测结果

通过对 500 张图片进行测试, 我们得出在移动平台上每张图片处理的平均用时 170ms, 基本满足实时性要求. 其中不同测试场景下的正确率如表 1 所示.

表 1 MERD 算法对不同测试场景的测试结果

测试场景	样本数	正确率(%)
正常道路	229	94.7
傍晚	75	90.0
阴影	87	87.3
多雨	66	84.5
多雪	43	81.3

可见, 利用 MERD 算法能够实现正常道路、傍晚道路等多种不同测试场景下的较高的测试准确率. 其中针对雨、雪天路段的检测准确度稍低, 这是因为雨、雪天对路面影响较大, 特别是对于用 Canny 算子检测道路边缘时, 会出现大量干扰, 影响了检测准确度, 下一步的工作将主要针对该类特殊路况提高检测的准确率.

4 结语

本文基于移动终端的 Android 系统平台, 融合了基于 HSV 空间的图像处理和基于灰度空间的图像处理方法, 提出了面向小型智能移动交通工具的低成本道路边缘检测方法--MERD. 其中基于 HSV 空间的图

像处理和基于灰度空间的图像处理并行处理, 缩短了运算时间, 提高了检测效率. 通过对校园道路多种场景进行实验, 验证了本方法在针对傍晚道路、阴影较多环境下进行道路边缘检测的有效性, 为车辆的自动驾驶提供了依据.

参考文献

- 1 史晓鹏, 何为, 韩力群. 采用 Hough 变换的道路边界检测算法. 智能系统学报, 2012, 7(1): 81-85.
- 2 Mukherjee JMRF. Clustering for Segmentation of Color Images. Pattern Recognition Letters, 2002, 23(8): 917-929.
- 3 李大杰, 柴毅, 尹宏鹏, 徐术平. 一种基于彩色图像边缘检测的道路检测方法. 计算机工程与应用, 2008, 44(28): 177-183.
- 4 刘加海, 白洪欢, 黄微凹. 基于彩色和边缘信息融合的道路分割算法. 浙江大学学报(工学版), 2006, 40(1): 29-32.
- 5 刘媛, 宋晓琳, 张伟伟. 基于多模型结合优化的非结构化道路检测算法. 工程设计学报, 2013, 20(2): 157-162.
- 6 McCall JC, Trivedi MM. Video based lane estimation and tracking for driver assistance: Survey, system, and evaluation. IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems, 2006, 7(1): 20-37.
- 7 廖传锦, 黄席樾, 柴毅, 汪先矩, 刘卫红. 基于边缘提取和特征跟踪的道路检测算法. 重庆大学学报(自然科学版), 2002, 25(1): 61-64.
- 8 Yang M, Lu JY, Wang H. Vision-based real-time vehicle guidance on THMR-V Part I: Unstructured road detection. The 4th International Symposium on Test and Measurement (ISMT). Shanghai, China. June 2001.
- 9 高岚, 董慧颖, 兰利宝. 自适应背景下运动目标阴影检测算法研究. 现代电子技术, 2008, 31(6): 59-61.
- 10 董瑞先, 王玉林, 张鲁邹, 张亮修. 一种基于直线模型的道路识别算法. 青岛大学学报, 2010, 25(1): 18-23.
- 11 Beucher S, Bilodeau M, Yu X. Road Segmentation by Watersheds Algorithms. http://cmm.enscm.fr/~beucher/public/promet_1.pdf.
- 12 Meyer F. Topographic distance and watershed lines. Signal Processing, 1994, 38(1): 113-125.
- 13 徐国保, 王骥, 赵桂艳, 尹怡欣, 谢仕义. 基于数学形态学的自适应边缘检测新算法. 计算机应用, 2009, 29(4): 997-1002.
- 14 王荣本, 游峰, 崔高健. 基于计算机视觉高速智能车辆的道路识别. 计算机工程与应用, 2004, 40(26): 18-21.
- 15 徐友春, 王荣本, 李克强, 赵玉凡. 一种基于直线模型的道路识别算法研究. 中国图象图形学报, 2004, 9(7): 858-864.