

# 基于 B 样条曲线模型的结构化道路检测算法

许华荣<sup>1</sup> 王晓栋<sup>1</sup> 方遒<sup>2</sup>

**摘要** 提出一种新的基于均匀非周期 B 样条曲线模型的结构化道路检测算法. 算法首先利用 Canny 边缘检测算法提取道路边缘, 然后使用最小二乘法拟合道路标识线, 最后利用所提取的道路标识线求取道路中央线, 进而完成道路拟合. 为了准确定位道路弯道位置, 算法运用最大转向偏差定位 (Maximum deviation of position shift, MDPS) 方法求解道路模型控制点. 实验证明该算法快速、稳定、灵活, 可以满足智能导航的要求.

**关键词** 道路检测, Canny 边缘检测, 最小二乘法, 最大转向偏差, 均匀非周期 B 样条曲线

**DOI** 10.3724/SP.J.1004.2011.00270

## Structure Road Detection Algorithm Based on B-spline Curve Model

XU Hua-Rong<sup>1</sup> WANG Xiao-Dong<sup>1</sup> FANG Qiu<sup>2</sup>

**Abstract** A new structure road detection algorithm based on open uniform B-spline curve model is proposed. The algorithm is composed of the following steps: First, Canny edge detection is used to extract road edges, then road marking lines are detected from the edge map by the least squares method, finally, the road model is fitted after the central points of the road are gotten from the lane markings. In order to accurately locate the position of road bend, the algorithm introduces the maximum deviation of position shift (MDPS) method to search control points. A large number of experiments show that the algorithm is fast, stable, flexible, and could meet the requirements of intelligent navigation.

**Key words** Road detection, Canny edge detection, least square method, maximum deviation of position shift (MDPS), open uniform B-spline

基于视觉的智能导航系统是计算机视觉的一个重要应用领域, 道路检测算法是基于视觉导航系统的关键技术之一. 目前基于视觉的道路检测算法主要分为基于特征的方法和基于模型的方法. 基于特征的方法<sup>[1-2]</sup> 主要利用道路路面的特征, 如梯度、颜色、纹理等, 运用区域增长、边缘梯度变化检测等方法提取道路信息. 这类方法的主要特点是对道路形状不敏感, 算法具有较高的鲁棒性, 但对阴影和水迹较为敏感, 处理的计算量比较大. 基于模型的方法<sup>[3-7]</sup> 首先假设出道路模型, 将道路的检测转换为道路模型的求解. 这类方法检测出的道路较为完整, 由于只需要较少的参数就可以表示整个道路, 所以基于模型的方法对阴影、水迹等外界影响有较强的抗干扰性.

在过去的几年中, 有不少基于模型的结构化道路检测算法<sup>[8-12]</sup>, 其中, 文献 [8] 提出了基于 B-snake 的道路识别算法, 首先假设道路边界为两条平

行的直线, 从而将道路检测抽象为道路中央线的检测, 然后使用 B 样条曲线拟合道路. 但该算法多次引用 Hough 空间变换算法, 增加了算法的计算量. 文献 [11] 提出了一种基于双曲线的快速结构化道路检测算法, 利用 Mid-to-side 方法提取道路两条平行标识线. 该算法简单且对噪声有较强的抗干扰性, 但算法最后使用双曲线拟合道路, 使得当道路出现较多干扰点时, 拟合的道路曲线出现较大波动.

本文针对文献 [8] 中计算量较大的问题, 提出一种基于均匀非周期 B 样条曲线模型的快速结构化道路检测方法. 首先利用 Canny 边缘检测算法提取道路边缘, 然后使用最小二乘法拟合道路标识线, 最后利用所提取的道路标识线求取道路中央线, 进而完成道路拟合. 为了准确定位道路弯道位置, 算法运用最大转向偏差定位 (Maximum deviation of position shift, MDPS) 方法求解道路模型控制点.

## 1 结构化道路检测算法

### 1.1 算法流程

本文算法总体上可分为 3 个部分: 第 1 部分的主要功能是边缘像素的提取, 使用 Canny 算子对输入图像进行边缘像素的提取, 得到边缘像素图, 然后结合多区域双阈值分割算法<sup>[12]</sup>, 对得到的边缘像素图进行去噪处理; 第 2 部分是对道路标识线的提取, 利用 Mid-to-side 方法<sup>[11]</sup> 提取道路标识线的边缘像

收稿日期 2010-06-09 录用日期 2010-08-09  
Manuscript received June 9, 2010; accepted August 9, 2010  
厦门市科技计划 (3502Z20103035) 资助  
Supported by Xiamen Science and Technology Planning Project (3502Z20103035)  
1. 厦门理工学院计算机科学与技术系 厦门 361024 2. 厦门理工学院机械工程系 厦门 361024  
1. Department of Computer Science and Technology, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024 2. Department of Mechanical Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024

素, 得到道路标识线的左右边缘像素点集合, 再利用最小二乘法拟合出左右道路标识线; 第 3 部分完成对整个道路的拟合, 使用三次均匀非周期 B 样条曲线来拟合道路中央线. 整个算法流程如图 1 所示.

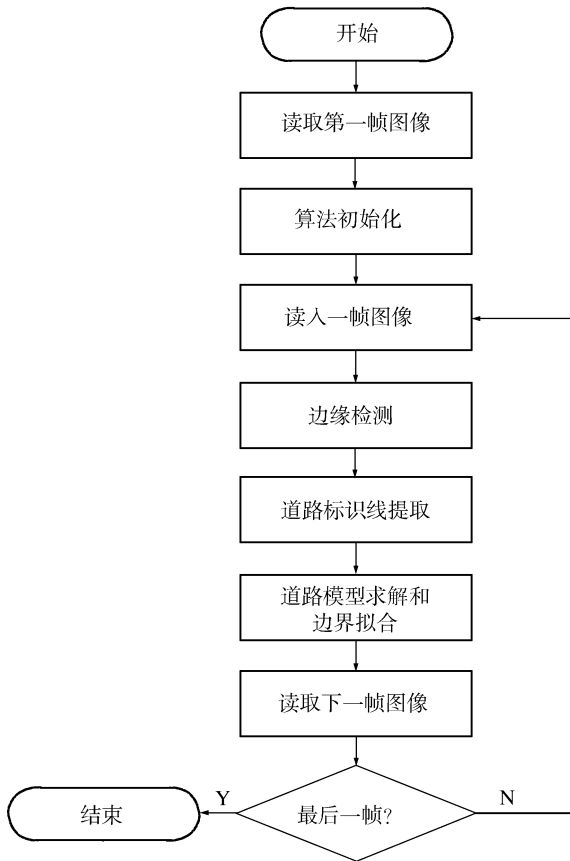


图 1 算法流程

Fig.1 Algorithm flow chart

### 1.2 道路边缘像素的提取

道路边缘提取是道路检测算法的前提, 现有的边缘检测算子主要有 Canny, Sobel, Laplacian, Prewitt 等, 其中 Canny 边缘检测算子具有不漏检真实边缘、好的定位性能并且对于单个边缘点仅有一个响应等优点, 综合考虑算子的性能与速度特性, 本文算法采用 Canny 算法进行边缘提取. 从摄像头采集到的道路图像经过 Canny 算子处理后, 得到道路边缘图. 但现实环境中道路标识往往受到树荫、水迹、光照等影响, 使得图像中还可能有很多杂点. 为此本文引入多区域双阈值算法<sup>[12]</sup>来解决这个问题. 该算法采用原图像灰度阈值和 Canny 算子处理后图像相结合的方法进行去噪处理, 分割的标准是:

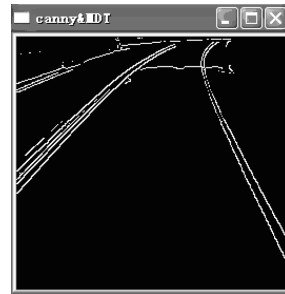
$$color_{origin} < threshold_{origin} \ \& \ color_{canny} < threshold_{canny} \tag{1}$$

其中,  $color_{origin}$  和  $color_{canny}$  是原图像和经过 Canny 算子处理后图像中的像素值.  $threshold_{origin}$  为对原图像中车体前方特定区域进行采样后得到的阈值.  $threshold_{canny}$  为常数, 通常为 254. 算法将待处理的图像及原图像按照纵坐标方向进行区域分割, 并分别对每个区域采取不同的阈值进行处理. 图 2(a) 为原图像, 图 2(b) 为去噪处理之前的 Canny 边缘图像, 图 2(c) 为去噪处理之后的边缘图像. 显然很多噪声已经被排除了.



(a) 原图像  
(a) Original image

(b) 去噪处理之前的 Canny 的边缘图像  
(b) The edges before denoising



(c) 去噪处理之后的 Canny 的边缘图像

(c) The edges after denoising

图 2 边缘提取效果图

Fig.2 Edge extraction

### 1.3 道路标识线的提取

#### 1.3.1 道路标识线提取方法

常用的道路标识线提取的方法有基于 Hough 变换的方法和基于最小二乘法的方法. Hough 变换的特点是精度高, 提取准确, 但它的实时性比较差. 而最小二乘法的特点是速度快, 但当外界干扰较大时, 它的精度就会降低. 本算法采用最小二乘法的方法提取直线. 为了降低提取直线时的干扰因素, 采用 Mid-to-side 算法提取道路边界像素. 该方法利用扫描线(水平线)扫描得到道路两个边界点集合. 算法的主要思想是:

1) 从待处理边缘图像底部开始, 以上一帧图像中扫描起始点为起点, 如果当前图像为第一帧则以

最底部的道路中央为起点进行边界扫描,找到一对道路边界像素;

2) 以道路宽度为限制判断该对像素是否为道路边界像素,如果是则存入边界集合点;

3) 更新当前扫描点起始位置为当前所提取边界像素点的中点;

4) 将扫描线向上移动到下一扫描位置,进行下一轮扫描;

5) 重复 1), 直至到达消失线, 结束扫描过程.

为了降低噪声的干扰, 将经过 Canny 边缘检测后得到的边缘图像, 沿图像高度方向按照一定的大小进行区域分割. 最后根据所提取的边界点集合, 利用最小二乘法拟合出每个分块区域的边界直线. 同时, 为了描述所提取直线的效果, 本文提出一种基于像素点集合的平均线性特性计算方法:

$$linearity = \frac{\sum_{i=0}^N (y_i - y_i')^2}{N}, \quad y_i' = Ax_i + B \quad (2)$$

其中,  $(x_i, y_i)$  为提取出的边界像素点,  $A, B$  为由最小二乘拟合出的直线参数.  $N$  为集合中的像素个数. 为了完成上面算法, 必须有以下前提条件:

1) 如何利用道路宽度限制扫描线的搜索, 即道路宽度与扫描线函数关系, 这是因为图像中道路宽度会随着扫描线高度的变化而变化;

2) 消失线的确定. 这些问题将在算法的初始化过程中给予解决.

### 1.3.2 算法初始化

从以上介绍可知, 本文算法是否能够顺利完成需要解决两个前提条件, 即道路宽度与扫描线的函数关系和消失线的确定.

道路宽度与扫描线的函数关系: 假定道路检测使用的摄像头为针孔摄像头, 且实际道路两条边界线是平行的, 则图像中边界线在小范围内可视为直线. 根据透视变换的原理, 很容易证明这些道路边界在图像中会交于一个点, 即为消失点 (或灭点), 而如果道路存在弯道以及多边界线的情况, 则采用在前小节中提取的多个分块区域的边界直线会交于多个消失点. 当道路平面水平时, 这些消失点会落于一条水平的消失线上, 如图 3 所示. 当道路宽度均匀变化时, 容易证明道路的宽度与当前扫描线与消失线的距离是一个线性的关系, 即  $W_i = K(C_i - H)$ , 其中,  $W_i$  代表第  $i$  条扫描线所在道路宽度,  $C_i$  代表第  $i$  条扫描线在图像中的纵坐标,  $H$  代表消失线的纵坐标,  $K$  是一个常数因子.

从图 3 可以看出  $W_1/r_1 = W_2/r_2 = W_3/r_3$ , 其中,  $W_1, W_2, W_3$  分别代表三条扫描线所在道路宽度,  $r_1, r_2, r_3$  分别代表三条扫描线与消失线的距离,

即  $r_i = (C_i - H)$ . 由于  $K = W_i/r_i = W_i/(C_i - H) = 2 \times \tan \theta$ , 则当角度  $\theta$  一定时,  $K$  为常数. 得到道路宽度与扫描线的函数关系后, 本文利用当前道路宽度预测下一扫描线的道路宽度, 并根据预测的道路宽度限制扫描点搜索, 从而提高算法的准确率. 假设当前扫描线扫描出的两个边界像素点分别为  $(C_{lx0}, C_{ly0}), (C_{rx0}, C_{ry0})$ . 当前道路宽度  $W_0$  可以表示为  $(C_{rx0} - C_{lx0})$ , 那么,  $K = W_0/(C_0 - H) = (C_{rx0} - C_{lx0})/(C_0 - H)$  因此, 可预测下一扫描线所在道路宽度为:  $W_1 = K \times (C_1 - H) = (C_{rx0} - C_{lx0})/(C_0 - H) \times (C_1 - H)$ . 消失线的确定: 本文采用 Liu 等<sup>[10]</sup> 提出的消失点估计算法进行消失点的检测, 该算法是一种简单、准确的消失点估计算法. 算法首先使用 Sobel 算子提取图像边缘, 然后将边缘图像转换到 Hough 空间, 最后使用高斯预测模型估计消失点的位置. 为了减少计算量, 该方法只在初始化的时候使用, 在后续的处理中, 使用当前图像中所提取的直线集合中线性度最好的直线重新计算消失线.

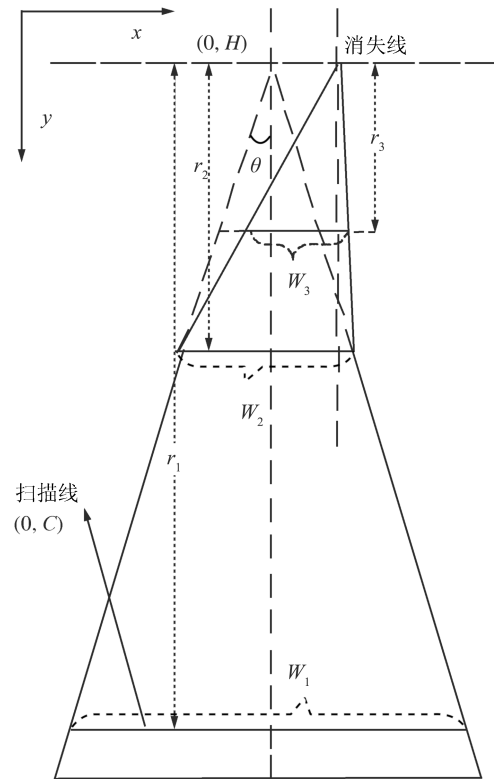


图 3 道路宽度与扫描线关系图

Fig. 3 Relationship between road width and the scan line

### 1.4 道路建模与求解

道路模型在道路检测算法中占有很重要的地位, 常用的基于模型方法有基于直线道路模型、抛物线

道路模型、双曲线道路模型、样条曲线道路模型等. 其中均匀非周期 B 样条曲线模型相对其他类型的模型具有曲线构造局部性、灵活性等特点.

1) B 样条曲线的定义

$n + 1$  个控制点  $P_i (i = 0, 1, \dots, n)$ ,  $K$  阶 ( $K - 1$  次) B 样条曲线的表达式为

$$C(u) = \sum_{i=0}^n P_i N_{i,k}(u) \quad (3)$$

其中,  $N_{i,k}(u)$  是调和函数, 也称之为基函数, 按照递归公式可定义为

$$N_{i,k}(u) = \frac{u - t_i}{t_{i+k-1} - t_i} N_{i,k-1}(u) + \frac{t_{i+k} - u}{t_{i+k} - t_{i+1}} N_{i+1,k-1}(u) \quad (4)$$

当  $u \in [t_i, t_{i+1})$  时,  $N_{i,1} = 1$ ; 其他情况时,  $N_{i,1} = 0$ . 其中  $t_i$  是节点值, 构成了  $K$  阶 B 样条函数的节点矢量, 其中的节点是非减序列. 考虑到现实中的道路形状一般不会很复杂, 本文采用三次 B 样条曲线来进行道路的模拟. 三次 B 样条曲线是个光滑的曲线而且具有连续的二阶导数. 三次 B 样条曲线的矩阵表示为

$$C(u) = \frac{1}{6} [u^3, u^2, u, 1] \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 0 & 3 & 0 \\ 0 & 4 & 1 & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} P_{i-1} \\ P_i \\ P_{i+1} \\ P_{i+2} \end{bmatrix}, u \in [0, 1] \quad (5)$$

2) 道路模型的求解

本文假定道路两条边界线平行, 所以对于两条边界线的求解, 可以抽象为道路中央线的提取, 而两条边界线则是道路中央线的简单平移. 在获得道路两个边界直线集合之后, 求取各个边界直线与分割区域上下底边的交点, 进而求得各个底边交点的中点. 为了让道路中央线尽量平滑, 对两个分割区域的公共底边的中央点求取平均值. 如果当前分割区域某一底边没有中央点, 则利用相邻分割区域的中央点计算当前分割区域的中央点. 计算方法为: 以相邻两个中央点所在的直线与当前分割区域的底边交点作为中央点. 为了求解道路模型, 本文利用 3 个控制点来求取 B 样条曲线模型, 这点与 Wang 等提出的 CHEVP 算法<sup>[8]</sup> 相似. 该算法以图像最顶端中央点和最底端中央点作为道路模型的第 1、第 3 控

制点. 同时, 为了让曲线通过这两个控制点, 将这两个控制点设置为三重节点, 即控制点序列为  $Q_0, Q_0, Q_0, Q_1, Q_2, Q_2, Q_2$ , 其中,  $Q_0, Q_1, Q_2$  分别代表 3 个控制点. 但该算法在求取第 2 控制点的方法, 利用了经验计算: 在第 2 个分割区域和第 3 个分割区域搜索第 2 控制点, 导致该方法无法灵活查找道路弯道位置. 为此本文提出一种基于最大转向偏差控制点搜索方法. 该方法利用当前两个中央点的位置预测下一中央点位置, 计算并记录预测值与真实值之间的误差. 然后更新当前预测中央点为下一中央点, 继续预测再下一中央点, 以此类推, 直到搜索完所有中央点, 得到一个误差集. 最后求出误差最大的中央点, 作为当前道路模型的第 2 个控制点. 算法流程如下:

**步骤 1.** 从图像最底部取两个中央点  $C_1, C_2, S = \{ \}$ .

**步骤 2.** 计算出过这两个点的直线方程, 计算下一分割区域的相邻底边与直线的交点. 计算并记录该交点横坐标与该底边中央点横坐标的误差  $d, S = S_i \cup d$ .

**步骤 3.** 更新当前预测中央点  $C_1 = C_2, C_2 = C_3$  ( $C_3$  表示下一相邻中央点), 直到遍历完所有中央点, 转到步骤 4.

**步骤 4.** 计算  $S$  中的最大值, 并以相应的控制点作为第 2 控制点, 算法结束.

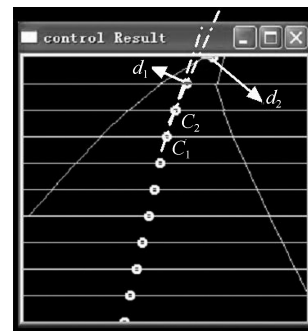


图 4 道路模型求解

Fig.4 Algorithm flow chart

1.5 道路跟踪

考虑到实际道路变化不是很大, 所以相邻图像帧之间很大一部分数据是相似的, 为此本文引入以下几个方法完成道路跟踪:

1) 使用当前帧检测到的线段集合中最好的一对线段求解消失线. 如果当前帧没有计算出消失线, 则使用上一帧的消失线;

2) Mid-to-side 方法中扫描线的起始扫描位置设置为上一帧图像中的起始扫描点;

3) 如果当前帧没有检测到道路中央点, 无法求解出道路模型, 则使用上一帧中的结果进行拟合.

## 2 实验结果分析

本文算法的仿真平台是 Intel Core™2 Duo CPU 2.26 GHz, 内存 1 G. 为了对比本算法的有效性, 本文实现了 CHEVP 算法, 程序借助 VS2005 和 OpenCV 开发工具实现. 算法针对的 657 张图像进行处理, 图像的大小为 256 像素 × 240 像素, 实验结果对比如表 1 所示. 本算法平均处理时间为 9 ms, 成功检测率为 82%, 其中包括 13% 误检率, 5% 的失败率. 而 CHEVP 算法平均处理时间为 40 ms, 尽管 Wang 等<sup>[8]</sup> 最后使用 Snake 算法对检测效果进行了提高, 但 CHEVP 算法的成功率仅有 58%, 其中包括 31% 的误检测率和 11% 的失败率. 图 5 是部分仿真效果, 图像左边一列为输入原图像, 中间一列为本文算法检测效果, 右边一列为 CHEVP 算法检测效果.

图 5(a) 左边为一幅道路弯道图像, 虽然所提取道路边缘图有一些杂点, 但算法还是准确地定位了左右边界以及弯道位置. 图 5(b) 中道路边界线被汽车挡住一部分, 但算法还是有效地拟合出被遮挡的部分. 图 5(c) 中光照发生了较大的变化, 致使前方道路很难分辨出道路边界, 但算法还是利用车前方较好的部分道路边界, 预测未检测的部分. 图 5(d) 中图像受到树荫的干扰, 道路中央出现了很多杂点, 边缘图像很难分辨得出道路边界, 但根据路宽限制, 算法还是很好地拟合出了道路边界. 图 5(e) 为 CHEVP 算法失败而本算法成功的示例, 这是因为 CHEVP 中没有办法排除多道路边界线干扰的原因. 可以看出本检测算法在道路顶端部分有一些失真, 这是由于道路顶端部分虚线变得很小, 导致很难提取出直线对的原因. 但在车前较近的地方算法还是较为准确地拟合出了道路边界, 这对于导航来说已经足够了.

表 1 算法性能对比

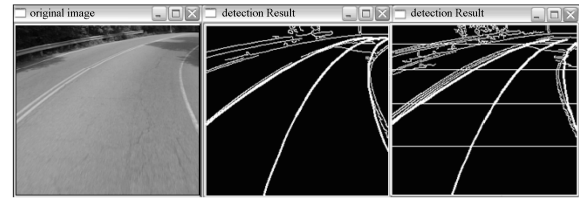
Table 1 Comparison of algorithm performances

算法	成功检测率 (%)	误检率 (%)	失败率 (%)	算法平均时间 (ms)
CHEVP	58	31	11	40
本文算法	82	13	5	9

## 3 结论

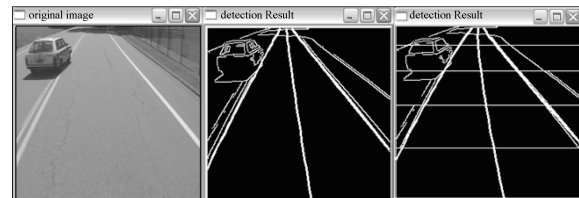
基于模型的道路检测算法中, 道路模型的选择及求解方法是算法是否高效的关键问题之一, 需要解决复杂性和实时性之间的矛盾. 本文提出了一种基于 B 样条曲线道路模型的快速稳定的道路检测

方法, 该算法通过 Canny 检测道路边缘, 然后通过 Mid-to-side 方法求解 B 样条模型, 并使用最大转向偏差方法定位弯道位置. 实验结果证明该算法简单、高效, 对噪声具有较强的抗干扰性.



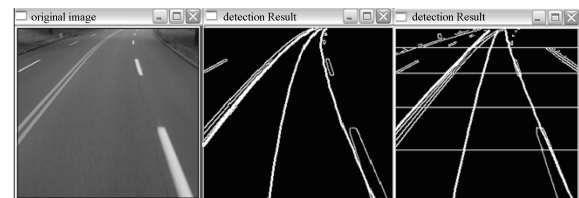
(a) 有弯道的道路图像

(a) The image with the curved lane marking



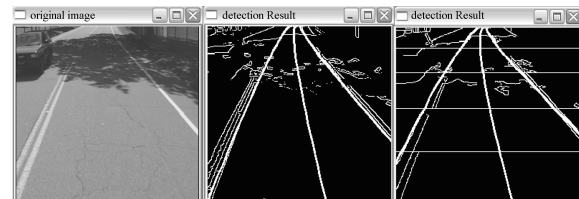
(b) 车道标识线被车辆部分覆盖的道路图像

(b) The image with the lane marking partially covered by a car



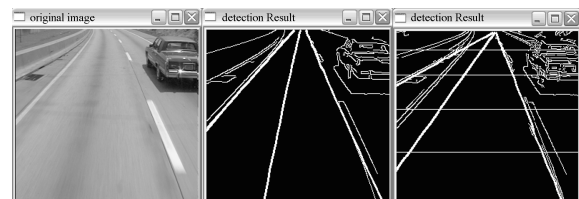
(c) 道路标识线下半部分被树荫覆盖的道路图像

(c) The image with the bottom of the lane marking covered by the shadows



(d) 道路标识线上半部分被树荫覆盖的道路图像

(d) The image with the top of the lane marking covered by the shadows



(e) 有多条道路标识线的道路图像

(e) The image with more than one lane marking

图 5 实验结果

Fig. 5 Experimental results

虽然本文算法能够取得较好的效果, 但也还存在一些问题, 例如当道路路面不是水平时, 算法就会出现较大偏差。在今后的研究中, 将进一步结合道路的多特征, 进一步提高算法的鲁棒性, 并将该算法应用到非结构化道路的识别上。

## References

- 1 Chiu K Y, Lin S F. Lane detection using color-based segmentation. In: Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Washington D. C., USA: IEEE, 2005. 706–711
- 2 Azali S, Jason T, Hijazi M H A, Jumat S. Fast lane detection with randomized hough transform. In: Proceedings of the Information Symposium on Information Technology. Kuala Lumpur, Malaysia: IEEE, 2008. 1–5
- 3 Meuter M, Muller-Schneiders S, Mika A, Hold S, Nunn C, Kummert A. A novel approach to lane detection and tracking. In: Proceedings of the 12th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. St. Louis, USA: IEEE, 2009. 1–6
- 4 Banggui Z, Bingxiang T, Jianmin D, Dezhi G. Automatic detection technique of preceding lane and vehicle. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Automation and Logistics. Qingdao, China: IEEE, 2008. 1370–1375
- 5 Xu Jie, Li Xiao-Hu, Wang Rong-Ben, Shi Peng-Fei. Road edge detection technique for auto-navigation of vehicle. *Journal of Image and Graphics*. 2003, **8**(6): 674–678 (徐杰, 李晓虎, 王荣本, 施鹏飞. 车辆自主导航中的道路边界识别算法. *中国图象图形学报*, 2003, **8**(6): 674–678)
- 6 Watanabe A, Naito T, Ninomiya Y. Lane detection with roadside structure using on-board monocular camera. In: Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Xi'an, China: IEEE, 2009. 191–196
- 7 Liu Fu-Qiang, Tian Min, Hu Zhen-Cheng. Research on vision-based lane detection and tracking for intelligent vehicles. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2007, **35**(11): 1535–1541 (刘富强, 田敏, 胡振程. 智能汽车中基于视觉的道路检测与跟踪算法. *同济大学学报 (自然科学版)*, 2007, **35**(11): 1535–1541)
- 8 Wang Y, Teoh E K, Shen D G. Lane detection and tracking using B-Snake. *Image and Vision Computing*, 2004, **22**(4): 269–280
- 9 Truong Q B, Lee B R. New lane detection algorithm for autonomous vehicles using computer vision. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Control, Automation and Systems. Seoul, Korea: IEEE, 2008. 1208–1213

- 10 Liu H J, Guo Z B, Lu J F, Yang J Y. A fast method for vanishing point estimation and tracking and its application in road images. In: Proceedings of the 6th International Conference on ITS Telecommunications Proceedings. Chengdu, China: IEEE, 2006. 106–109
- 11 Chen Q, Wang H. A real-time lane detection algorithm based on a hyperbola-pair model. In: Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Tokyo, Japan: IEEE, 2006. 510–515
- 12 Ni K, He K Z. THMR-V: an effective and robust high-speed system in structured road. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Washington D. C., USA: IEEE, 2003. 4370–4374



**许华荣** 厦门理工学院副教授。主要研究方向为摄像机标定、三维重建、视觉机器人导航和嵌入式系统。本文通信作者。  
E-mail: hrxu@xmut.edu.cn

(**XU Hua-Rong** Associate professor at Xiamen University of Technology. His research interest covers camera calibration, 3D reconstruction, and vision

guided robot navigation. Corresponding author of this paper.)

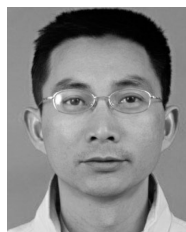


**王晓栋** 厦门理工学院计算机科学与技术系助教, 硕士。主要研究方向为模式识别和嵌入式系统结构。

E-mail: xdwang@xmut.edu.cn

(**WANG Xiao-Dong** Master student, assistant at the Department of Computer Science and Technology, Xiamen University of Technology. His research interest covers pattern recognition and embedded

system structure.)



**方 迺** 厦门理工学院高级工程师, 硕士。主要研究方向为汽车电子技术和机电一体化。E-mail: fangq@xmut.edu.cn

(**FANG Qiu** Master student, senior engineer at Xiamen University of Technology. His research interest covers auto electronic system and mechatronic.)