

# 一种高效的基于平行边缘的道路识别算法

王文锋<sup>1</sup> 丁伟利<sup>2\*</sup> 李 勇<sup>2</sup> 杨树军<sup>1</sup>

<sup>1</sup>燕山大学车辆与能源学院, 河北 秦皇岛 066004

<sup>2</sup>燕山大学电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004

**摘要** 为了提高智能车辆道路识别的准确性和效率,设计了一种基于平行边缘特征的道路检测算法。提出了基于边缘连接的道路区域快速粗分割方法;对边缘点局部直线的检测和方向进行编码,利用竖直线实现了极大可能道路区域的估计;基于方向一致性判别准则,实现了极大可能道路区域内平行边缘的识别算法;提出了三个道路识别准则,综合运用平行边缘、道路的区域位置信息,实现了道路特征的准确识别。实验结果表明,本文算法能够快速并准确的提取典型的直线和弯曲道路模型中的道路区域,比以往算法在速度和准确性上都有较大的提升。

**关键词** 机器视觉; 平行边缘识别; 方向编码; 特征识别

中图分类号 TP391.9

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0715001

## An Efficient Road Detection Algorithm Based on Parallel Edges

Wang Wenfeng<sup>1</sup> Ding Weili<sup>2\*</sup> Li Yong<sup>2</sup> Yang Shujun<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Vehicles and Energy, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China*

<sup>2</sup>*College of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China*

**Abstract** In order to improve the accuracy and efficiency of intelligent vehicle road extraction, a road detection algorithm based on parallel edge features is proposed. A new fast rough segmentation algorithm for road area image based on edge connection is proposed. Edges points local linear detection and direction are coded, and the vertical lines are detected to estimate the most likely road region. The parallel edges in the most likely road region are extracted based on the similarity degree of local orientation, and three efficient criterions are presented to extract the road region. Experimental results show that the proposed algorithm is suitable for various road images, which can accurately detect the road regions of straight and curved roads at a fast time. The speed and accuracy of the proposed algorithm improves largely.

**Key words** machine vision; parallel edges detection; road detection; feature recognition;

**OCIS codes** 150.1135; 150.0155; 330.5000; 040.1880; 200.4960

## 1 引 言

在无人驾驶车辆的自主导航以及车辆的智能预警中,准确提取道路信息至关重要<sup>[1]</sup>。几十年来,各国的研究者提出了各种各样的算法以实现结构性道路与非结构性道路的自动识别,主要分为两类:1) 基于图像特征的检测方法,即特征驱动法,是基于道路图像的一些特征,如颜色特征<sup>[2-4]</sup>、线特征<sup>[4]</sup>、消失点<sup>[5]</sup>、纹理特征<sup>[6]</sup>或多特征融合<sup>[7]</sup>完成识别任务,这种机制要求道路的车道线颜色较为明显,边缘较为清晰,否则无法得到准确的检测结果;2) 基于模型的检测方法,根据提取的特征对预先定义好的车道线模型进行匹配,将车道线的提取转化为车道线模型中参数的计算问题。模型的假设主要有直线模型和曲线模型两种,其优点是对噪声不敏感,能较好地处理图像中物体局部被遮挡和覆盖等情况。如马雷等<sup>[8]</sup>提出利用抛物线模型实现对弯曲道路

收稿日期: 2015-01-21; 收到修改稿日期: 2015-03-18

基金项目: 国家自然科学基金(61005034,51175449)、河北省自然科学基金(F2012203185)

作者简介: 王文锋(1979-),男,硕士,实验师,主要从事智能交通和汽车虚拟试验方面的研究。

E-mail:wangwenfeng@ysu.edu.cn

\*通信联系人。E-mail:weiy51@ysu.edu.cn

的识别;王科等<sup>[9]</sup>提出了基于不定 Bezier 变形模板的城市道路检测算法,对于结构化道路效果较好。对于非结构化道路的提取算法较少,而且复杂度高,实时性较差。

从目前的研究现状来看,现有道路识别算法通常在高速公路上具有较好的准确性,在弯曲道路以及城区、乡镇的二级公路中准确率往往不高。针对这一问题,本文提出了一种稳定性较强的同时满足结构化道路和城乡二级公路的自动识别算法。该算法基于道路边缘的局部方向夹角一致性,构造了道路边缘检测算子,识别出了实际中具有平行关系的道路边缘,进而结合道路的区域位置信息,实现了道路的识别。

## 2 道路模型基本假设

根据公路路线设计规范<sup>[10]</sup>,公路立体线形要素,即基本的道路模型如图 1 所示,其中平面线形由直线、圆曲线或回旋线组合而成。在道路设计过程中,道路线形须保证连续舒顺、避免长直线、避免连续急弯线形,且公路中人行道/自行车道、行车道、标志线、中间带和路肩几部分的宽度一般情况下应保持等宽不变。此外,为了安全,各级公路在设计过程中通常设置隔离带、道路两边也常常包含与道路边缘呈平行关系分布的路灯、树木或护栏。



图 1 基本道路模型。(a) 纵向线性斜坡; (b) 凹线; (c) 凸线; (d) 纵向非线性斜坡; (e) 凹曲线; (f) 凸曲线  
Fig.1 Basic models of the road. (a) Longitudinal linear slope; (b) concave line; (c) convex line; (d) longitudinal non-linear slope; (e) concave curve; (f) convex curve

基于上述规范,经过透视投影变换后,道路边缘图像一般具有如下特征:1)道路边缘在整体上表现为具有一定长度且方向变化平缓的平滑曲线,在局部表现为短直线;2)道路中距离较近的相邻边缘近似平行;3)道路中包含至少一对近似平行的边缘;4)道路周围通常包含大量的垂直物体(如护栏、路灯、建筑物、树木等),在图像中形成大量的垂直边缘;5)如果定义图像中心和图像下部两个边界点组成道路三角形,则道路区域的大部分将落在此三角形内。

## 3 基于平行边缘的道路识别

如图 2 所示,首先利用边缘增长法对道路图像进行快速粗分割<sup>[11]</sup>;然后根据边缘中的竖直线提取极大可能道路区域;利用文献[12]提出的平行线识别算法提取道路区域平行线;最后,综合运用平行线对和道路图像粗分割结果实现道路的识别。

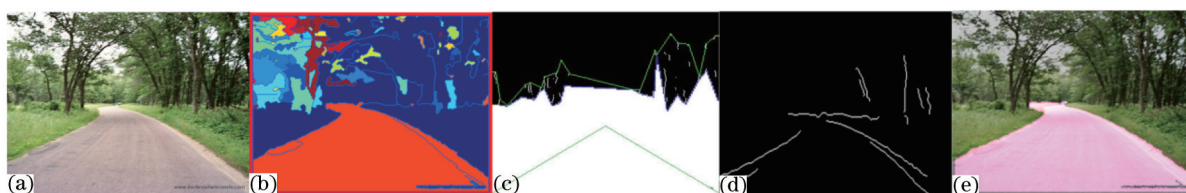


图 2 道路识别过程。(a) 原图像; (b) 图像分割为彩色图像结果; (c) 极大可能道路区域; (d) 道路区域平行线; (e) 最终识别的道路结果  
Fig.2 Process of road detection. (a) Original image; (b) rough segmentation result of the road image; (c) estimated road region; (d) the parallel line in the estimated road region; (e) road detection result

### 3.1 道路图像粗分割

如图 2(a)所示,给定的道路图像  $I$ ,基于以下流程实现道路图像区域粗分割:

1) 边缘检测:采用 EDPF 算法<sup>[13]</sup>快速识别图像边缘为  $E$ ,输出一系列连续的边缘线条  $\Psi_i, (0 < i < n)$ ,其中  $\Psi_i = \{p_j(x_j, y_j) | j = 1 \cdots m\}$ ;

2) 断点检测:对于 EDPF 算法获取的任意边缘线条  $\Psi_i$  的端点  $p_1(x_1, y_1)$  和  $p_m(x_m, y_m)$ ,如果其八邻域内的边缘像素点总数等于 2,则定义其为断点。遍历所有生成的 EDPF 边缘线条,得到断点分布图像  $B$ ;

3) 边缘连接及生长:如图3所示,给定一个断点  $P$ ,判断其  $M \times M$  邻域的断点分布情况:①如图3(a)所示,如果  $P$  的邻域内存在其他断点,如  $P_1, P_2, \dots, P_4$ ,设  $P$  与任意断点  $P_i, (i=1,2,3,4)$  之间的梯度值  $G$  为

$$G = \sum [(Gr_{i+1,j} - Gr_{i,j})^2 + (Gr_{i,j+1} - Gr_{i,j})^2]^{1/2}, \quad (1)$$

式中  $Gr_{i,j}$  表示道路图像中两个断点连接路径上像素  $(x_i, y_i)$  的灰度值。选择  $P$  与其他各断点连接路径中梯度值最大的作为最终边缘连接路径[图3(a)黑色部分],并消除对应断点。②如图3(b)所示,如果  $P$  的邻域内不存在其他断点,则以断点  $P$  为中心,将与断点相连的邻域内的部分边缘线条[图3(b)灰色部分]映射到其对称位置[图3(b)黑色部分]。同时更新断点位置为  $P'$ ,并以此点作为新的起点进行新的边缘生长,直到在边缘生长的过程中遇到其他边缘点,则停止。最终,道路图像中将被分割为  $nm$  个封闭的区域[图2(b)],即  $I = \sum_{i=1}^{nm} \Pi_i$ 。

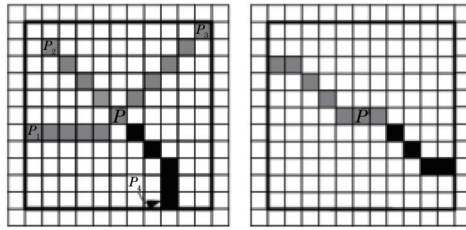


图3 边缘生长过程示意图。(a)断点连接;(b)边缘生长

Fig.3 Schematic diagram of edge growing process. (a) Breakpoint connection; (b) edge growth

### 3.2 极大可能道路边缘检测

考虑EDPF算法获取的任意一条连续边缘  $\Psi_i = \{p_j(x_j, y_j) | j=1 \dots m\}$ ,对  $\Psi_i$  中的任意一点  $p_j$ ,取其4邻域点组成  $p_j$  的局部边缘,定义如下参数<sup>[14]</sup>:

$$s = \frac{\sum_{k=j-4}^{k=j+3} \sqrt{(x_{k+1} - x_k)^2 + (y_{k+1} - y_k)^2}}{\sqrt{(x_{j+4} - x_{j-4})^2 + (y_{j+4} - y_{j-4})^2}}, \quad (2)$$

进一步,定义  $p_j$  的局部方向为

$$\theta_j = \begin{cases} \tan^{-1} \left( \frac{y_{j+4} - y_{j-4}}{x_{j+4} - x_{j-4}} \right), & |x_{j+4} - x_{j-4}| > \varepsilon \quad \text{and} \quad s > T \\ 90, & |x_{j+4} - x_{j-4}| \leq \varepsilon \quad \text{and} \quad s > T, \quad 4 < j \leq m-4, \\ 0, & s \leq T \end{cases} \quad (3)$$

式中  $T$  为决定  $p_j$  的局部边缘是否为直线的阈值,根据文献[14]其值可取0.7~0.9,  $\varepsilon$  为决定  $p_j$  的局部边缘是否为竖直线的阈值,其值可取为1~2。遍历  $\Psi_i$  上所有点,按(3)式可以得到局部方向编码集合  $\Theta_i = \{\theta_j\}_{j=1}^m$ ,并按编码值提取平滑边缘和竖直线点集,即定义  $\Psi_i$  中满足  $\theta_j > 0, \theta_j \neq 90$  的任意一段连续边缘点集为平滑边缘,记为  $e_i$ ;定义  $\Psi_i$  中所有局部方向编码为  $90^\circ$  的点组成竖直线点集  $P_v$ ,如图2(c)中白色边缘点即为竖直线点集。

通常,道路区域内的竖直线位于道路三角形[图2(c)绿色三角形]之内。因此,将  $P_v$  中位于道路三角形之外的所有点根据图像的长度  $N$  平均划分长度为  $T_d$  的若干等份<sup>[15]</sup>;然后对于等分后每一个大小为  $M \times T_d$  的矩形窗,选落在窗口中的属于  $P_v$  的所有点的最低点,记为最小值点  $p_i^{\min} = (x_i, y_i)$ ;最后定义极大可能道路区域顶点[图2(c)白色多边形区域]为<sup>[15-16]</sup>

$$R = \{(M, 1), (M, p_{N/T_d}^{\min} \cdot y), \dots, p_i^{\min}, \dots, (1, p_1^{\min} \cdot y), (1, 1)\}, \quad (4)$$

与  $R$  相交的所有主方向不为水平线的平滑边缘定义为极大可能道路边缘,即:

$$E_r = e_i \cap R = \{e_i\}_{i=1}^{n_e}, \quad (5)$$

式中  $n_e$  表示极大可能道路边缘的数目,  $e_i \cap R \neq \emptyset$ 。为保证  $e_i$  不为水平线,定义  $e_i$  中局部边缘方向编码在  $[0, 10] \cup [170, 180]$  的点不超过5%。

### 3.3 道路平行边缘识别

考虑极大可能道路边缘中任意两条边缘  $e_i = \{x_k, y_k | k = 1 \cdots m_i\}$  和  $e_j = \{x_k, y_k | k = 1 \cdots m_j\}$ , 其方向编码分别为  $\theta_i$  和  $\theta_j$ , 且  $e_i$  的长度  $m_i$  小于  $e_j$  的长度  $m_j$ 。然后, 过  $e_i$  的一个端点  $A$  利用垂直方向矩阵<sup>[12]</sup>确定与它垂直且距离最近的平滑曲线  $e_j$ , 及其交点  $B$ , 并分别以点  $A$  和点  $B$  为起点, 在  $e_i$  和  $e_j$  上截取像素个数相同且整体方向走向一致的子线段  $e_{Ax}$  和  $e_{By}$ , 两者方向编码分别为  $\theta_{Ax} = \{\theta_A \cdots \theta_x\}$  和  $\theta_{By} = \{\theta_B \cdots \theta_y\}$ , 如果两条线段中满足  $|\theta_{Ax} - \theta_{By}| < T_2$  ( $T_2$  为方向夹角阈值) 的像素个数与  $e_{Ax}$  总长之比  $k_{AB} > T_3$  ( $T_3$  为接近 1 的阈值), 则判定  $e_i // e_j$ <sup>[12,17]</sup>。对于极大可能道路边缘中所有满足上述条件的边缘, 定义其为道路平行边缘集合如图 2(d) 所示, 记为

$$R_{II} = \{e_i, i = 1, 2, \cdots, k\}, \quad (6)$$

式中  $k$  为道路平行线数目。

### 3.4 道路识别算法

给定图像封闭区域集合  $I = \sum_{i=1}^{nn} II_i$  和道路平行边缘集合  $R_{II} = \{e_i, i = 1, 2, \cdots, k\}$ , 采用多信息融合的区域投票方法进行道路边界识别。根据定义的道路模型, 对封闭区域按照面积大小排序, 并定义三个投票规则:

1) 区域底部投票规则: 对任意区域  $II_i$ , 设最低点纵坐标为  $y_i$ , 定义投票函数为

$$V_{\alpha_i} = \frac{y_i}{m}. \quad (7)$$

2) 区域相交投票规则: 对任意区域  $II_i$ , 定义区域  $II_i$  与极大可能道路区域相交的面积为  $A_i$ , 极大可能道路区域面积为  $A$ 。定义区域相交投票函数为

$$V_{\beta_i} = \frac{A_i}{A}. \quad (8)$$

3) 平行线投票规则: 对任意区域  $II_i$ , 其内的平行线数量设为  $p_{n_i}$ , 定义平行线投票函数为

$$V_{\gamma_i} = \begin{cases} 0, & p_{n_i} < 2 \\ 1, & \text{others} \end{cases}. \quad (9)$$

设置以上三类信息投票的权重分别为:  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ , 则定义道路边界线软投票函数为

$$V_{e_i} = \omega_1 \times \alpha_i + \omega_2 \times \beta_i + \omega_3 \times \gamma_i. \quad (10)$$

基于以上规则, 定义  $V_{e_i} > 0.8$  的区域为道路区域。

## 4 实验结果与分析

对 Kong 等<sup>[6]</sup>提供的道路数据库的道路图像进行分析, 选择 40 幅典型道路图像作为样本并将其标准化为 240 pixel×320 pixel 的图像, 在 2GHz PC 机的 Windows 7 环境下, 利用 Matlab2009b 进行仿真实验。分别用人工标记的道路区域、文献[6]算法和本文算法识别的道路区域进行了对比分析。

图 4、5 为部分道路检测结果对比, 其中图 4 为自然场景道路图像, 道路两侧多为植被; 图 5 为人工场景道路图像, 道路两侧多为建筑物。图 4 和图 5 中(a)表示道路原图像, (b)中白色区域为人工标记的道路区域, (c)表示文献[6]算法识别的道路区域, (d)表示本文算法识别的道路区域。由图 4 和图 5 可以看出, 除了少量植被区域被误认为属于道路, 本文算法基本能够准确的检测出道路区域。特别地, 本文算法对于弯曲道路和少量行人/车辆干扰的道路也能准确分割出道路区域, 而文献[6]算法检测的道路区域则偏多或偏少, 同时文献[6]算法很难准确检测弯曲的道路区域, 本文算法则不受此限制。

为了验证算法的效率和准确性, 对选取的典型道路图像分别用本文算法与文献[6]算法进行检测, 对所用时间、准确率和错误率进行了统计比较, 其结果分别如图 6 和图 7 所示。

由图 6 可知, 在运行效率方面, 本文算法所耗时间在 2 s 左右(平均为 2.10 s), 而文献[6]算法则在 300 s 左右(平均为 316.65 s)。因此, 本文算法效率约是文献[6]算法效率的 150 倍。由图 7 可知, 在准确性方面, 本文算法的道路识别正确率(TPR)高于文献[6]算法; 而道路识别错误率(FPR)低于文献[6]算法, 计算方法见文献[18]。如图 8 所示, 图 8(a)是含有阴影的道路图像, 由于阴影区域将道路分割成多段, 本文算法仅能识别靠近图像底



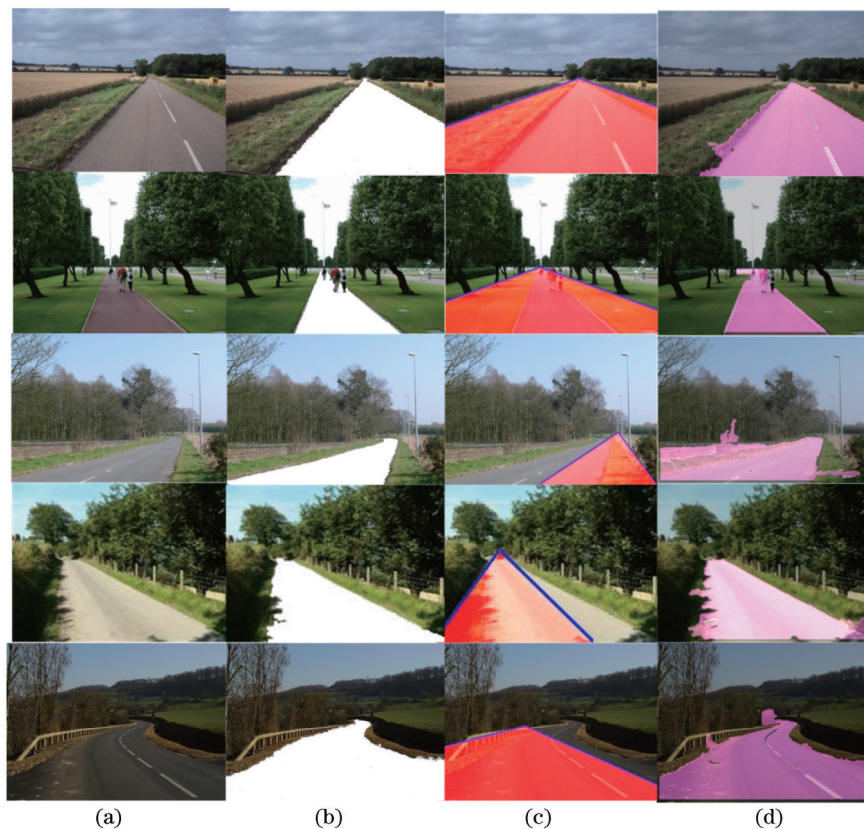


图4 自然场景道路识别结果。(a)原图像;(b)人工标记道路区域;(c)文献[6]算法的道路识别结果;(d)本文算法的道路识别结果  
 Fig.4 Road detection results of nature scene. (a) Original image; (b) manual marking road regions;  
 (c) road regions detected by Ref.[6] algorithm; (d) road regions detected by proposed algorithm

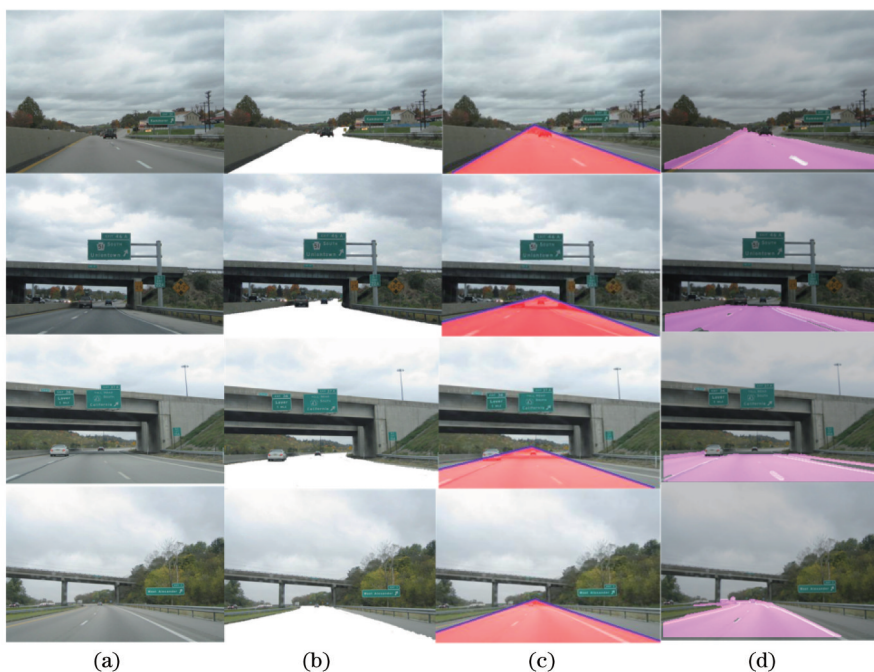


图5 城市场景道路识别结果。(a)原图像;(b)人工标记道路区域;(c)文献[6]算法道路识别结果;(d)本文算法的道路识别结果  
 Fig.5 Road detection results of urban scene. (a) Original image; (b) manual marking road regions;  
 (c) road regions detected by Ref.[6] algorithm; (d) road regions detected by proposed algorithm

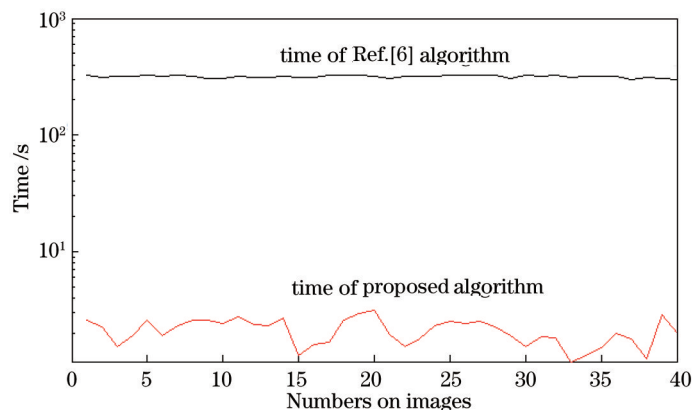


图6 道路检测时间统计对比图  
Fig. 6 Contrast of road detection time

部边缘的道路区域。图8(b)和图8(d)中的道路均为非规则道路,周围的相似区域产生很大的干扰,本文算法也仅能识别靠近图像底部边缘的道路区域,且容易把周围的相似的非道路区域识别为道路区域;图8(c)不符合预定义的道路模型,很难提取有效的平行边缘信息,本文算法仅能识别小部分道路区域。具体而言,本文算法道路识别正确率平均值为93.63%,如图8(a)红色虚线所示;道路识别错误率平均值为6.05%,如图8(b)红色虚线所示。而文献[6]算法道路识别的正确率平均值为87.74%,如图8(a)红色实线所示;道路识别错误率平均值为11.89%,如图8(b)红色实线所示。

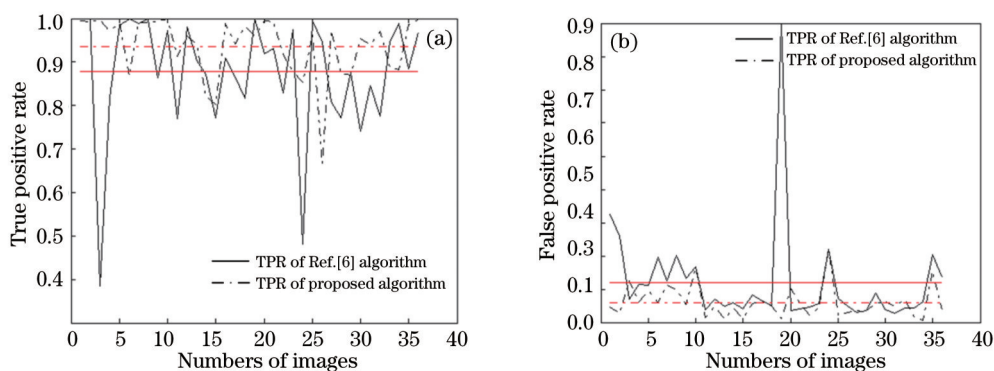


图7 道路检测准确性统计对比图。(a)道路识别正确率;(b)道路识别错误率  
Fig.7 Contrast of road detection accuracy. (a) True positive rate; (b) False positive rate



图8 失败的道路识别结果  
Fig.8 Examples of failed road detection results.

## 5 结 论

提出了一个同时适用于郊区和城市道路的道路识别算法。该方法有效地利用了道路周围的垂直线信息和道路平行边缘信息,对道路边缘图像进行局部直线方向编码,利用局部方向识别垂直边缘,再利用垂直边缘识别出极大可能道路区域,以及其中的平行边缘,结合平行边缘信息和道路区域位置信息实现了道路区域的准确识别。实验结果表明,本文算法具有较高的准确率和运行效率,可以进一步应用于智能车辆的道路信息提取和车

道偏离预警。但本文算法针对不满足预定义模型的道路场景效果还不是很理想,这也是今后需要改进的地方。

## 参 考 文 献

- 1 A B Hillel, R Lerner, D Levi, *et al.*. Recent progress in road and lane detection: A survey[J]. Machine Vision and Applications, 2014, 25(3): 727–745.
- 2 Fang Hao, Jia Rui, Lu Jiapeng. Segmentation of full vision image based on color and texture features[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2010, 30(8): 934–939.  
方 浩, 贾 睿, 卢嘉鹏. 基于颜色和纹理特征的道路图像分割[J]. 北京理工大学学报, 2010, 30(8): 934–939.
- 3 Y He, H Wang, B Zhang. Color-based road detection in urban traffic scenes[J]. Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on, 2004, 5(4): 309–318.
- 4 D Gao, W Li, J Duan, *et al.*. A practical method of road detection for intelligent vehicle[C]. Automation and Logistics, IEEE International Conference on., 2009: 980–985.
- 5 Tian Zheng, Xu Cheng, Mi Chao, *et al.*. Road segmentation based on vanishing point and principal orientation estimation[J]. Journal of Computer Research and Development, 2014, 51(4): 762–772.  
田 峥, 徐 成, 米 超, 等. 基于消失点和主方向估计的道路分割算法[J]. 计算机研究与发展, 2014, 51(4): 762–772.
- 6 H Kong, J Y Audibert, J Ponce. General road detection from a single image[J]. IEEE Transactions on Image Process, 2010, 19, (8): 2211–2220.
- 7 Wang Ke, Huang Zhi, Zhong Zhihua. Multi-featruce fusion based lane understanding algorithm[J]. China Journal of Highway and Transpor, 2013, 26(4): 176–183.  
王 科, 黄 智, 钟志华. 基于多特征融合的道路理解方法[J]. 中国公路学报, 2013, 26(4): 176–183.
- 8 Ma Lei, Wu Botao, Wang Liandong. A study on the identification of bent lane and the choice of objective function[J]. Automotive Engineering, 2008, 30(7): 561–565.  
马 雷, 武波涛, 王连东. 弯曲道路识别方法与目标函数选取的研究[J]. 汽车工程, 2008, 30(7): 561–565.
- 9 Wang Ke, Huang Zhi, Zhong Zhihua. Algorithm for urban road detection based on uncertain bezier deformable template[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(8): 143–150.  
王 科, 黄 智, 钟志华. 基于不定 Bezier 变形模板的城市道路检测算法[J]. 机械工程学报, 2013, 49(8): 143–150.
- 10 Ministry of Transport of the People's Republic of China, Design Specification for Highway Route. National Standard of The People's Republic of China JTJ011–94[S]. Beijing: China Standard Press, 1995. 01.  
中华人民共和国交通部, 公路路线设计规范, 中华人民共和国行业标准 JTJ011–94[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.01.
- 11 X Cao, W Ding, S Hu. Image segmentation based on edge growth[C]. International Conference on Information Technology and Software Engineering, 2012, 3: 541–548.
- 12 Wang Wenfeng, Zhu Shuhua, Feng Yihao, *et al.*. Parallel edges detection from remote sensing image using local orientation coding[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0315001.  
王文锋, 朱书华, 冯以浩, 等. 基于局部方向编码的遥感影像平行边缘识别[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0315001.
- 13 C Akinlar, C Topal. EDPF: A real-time parameter-free edge segment detector with a false detection control[J]. International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2012, 26(01): 1255002.
- 14 Ding Weili, Wang Wenfeng, Zhang Xuguang, *et al.*. Extracting straight lines from building image based on edge orientation image[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(10): 2904–2910.  
丁伟利, 王文锋, 张旭光, 等. 基于边缘方向图的建筑物直线特征提取[J]. 光学学报, 2010, 30(10): 2904–2910.
- 15 Ding Weili, Li Yong, Wang Wenfeng, *et al.*. Depth estimation of urban road image based on contour understanding[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(7): 0715001.  
丁伟利, 李 勇, 王文锋, 等. 基于轮廓特征理解的城市道路图像深度估计[J]. 光学学报, 2014, 34(7): 0715001.
- 16 Ding Weili, Li Yong, Wang Wenfeng, *et al.*. Vanishing point detection algorithm for urban road image based on the envelope of perpendicular and parallel lines[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(10): 1015002.  
丁伟利, 李 勇, 王文锋, 等. 基于垂直线包络和平行线对的城市道路图像消失点检测算法[J]. 光学学报, 2014, 34(10): 1015002.
- 17 Li Yong, Ding Weili. Navigation line of vision extraction algorithm based on dark channel[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(2): 0215001.  
李 勇, 丁伟利. 基于暗原色的农机具视觉导航线提取算法[J]. 光学学报, 2015, 35(2): 0215001.
- 18 J M Álvarez, A M López, T Gevers, *et al.*. Combining priors, appearance, and context for road detection[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 15(3): 1168–1178.

栏目编辑: 苏 岑