

Lane Detection Algorithm based on Feature Constraint

Hang AN¹, Qingwen LI²

¹Chongqing Jiaotong University, 400074, Chongqing, China

²Southwest Jiaotong University, 611756, Chengdu, China

Abstract: Based on the feature constraint, a good method of lane mark detection is proposed. According to the geometric characteristics, position characteristics and physical characteristics of the lane line, the lane line candidate area is obtained by connecting the regional analysis on the binary image. Then, the Hough transform is used to detect the straight line segment in the candidate area, The Then we calculate the image disappearance point and the lane line geometric characteristics according to the camera map. These characteristics are used as a priori knowledge constraint candidate lane line, and finally the filtered straight line is clustered and fitted to get the final lane line.

Keywords: lane line detection; Hough transform

基于特征约束的车道线检测算法

安航^{1*}, 李庆雯²

¹重庆交通大学, 重庆, 中国, 400074

²西南交通大学, 成都, 中国, 611756

摘要: 基于特征约束提出了一种良好的车道线检测方法。通过详细分析车道线几何特性、位置特性、物理特性；其次在二值图像上通过连通区域分析得到车道线候选区域；然后在候选区域内选用 Hough 变换检测出区域内的直线段，作为候选车道线。接着根据相机映射计算图像消失点及车道线几何特性，这些特性作为先验知识约束候选车道线，最终将过滤后的直线聚类、拟合，得到最终的车道线。

关键词: 车道线检测；Hough 变换模板

1 引言

车道线检测已被广泛应用于多种 ADAS 系统中，为车辆提供车道线信息。绪论中已阐述目前国内外经典车道线识别方法，可大致归纳为基于车道线几何^[1]、颜色特征^[2]，基于特定模板配准，基于模式识别^[3]理论三类。各类算法意在解决复杂多变环境下算法的准确性和基于嵌入式平台下算法的实时性两个问题。

2 车道线特征分析及约束建模

对于指定安装位置和特性相似的相机，图像中的车道线具有三类特征性质：几何特性(长度、方向)、位置特性(相对方向、夹角)、物理特性(颜色、亮度)。针对中国车道线特征，本节选取车道线几何、位置两种特性作为先验知识约束车道线提取分割、聚类环节。

2.1 车道线几何特征约束建模

在特定相机外参数下，车道标记线具有一定长度、方向、高宽比特性。如图 1 所示， (x_s, y_s) 为任意车道线起始点， (x_p, y_p) 为消失点， $\angle a$ 、 $\angle b$ 、 $\angle g$ 分别为任意车道线与水平直线夹角， l 、 h 分别为车道线长度、宽度， Δw 为车道线的跨度， uov 、 $u_1o_1v_1$ 分别为相机标定后图像坐标系和原点沿 u 轴方向平移后的消失点坐标系，由此得出：

(1) 在消失点坐标系下，若某条车道线起点 (x_s, y_s) 的 $x_s < 0$ ，则该车道线与水平线夹角为锐角 $\angle a$ 、 $\angle b$ ，反之则为钝角 $\angle g$ 。

(2) 车道线轮廓可用多边形表示，其 l 、 h 、高宽比 c 均在一定范围。

据分析可知，图像坐标系中的车道线是由一系列具有特定长度与方向的连续直线段组成。则对于任意车道线满足

$$\frac{y - y_s}{x - x_s} = \frac{y_e - y_s}{x_e - x_s} \quad (1)$$

式中 (x_e, y_e) 为车道标记线终点坐标

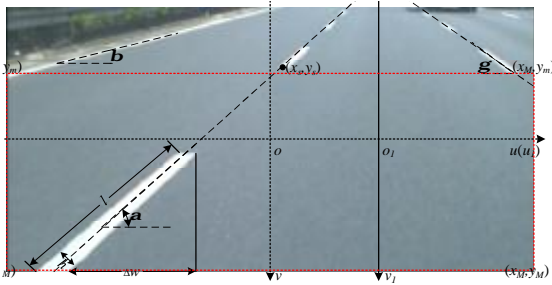


图 1. 车道线几何特征示意图

令 l_m 、 l_M 为长度阈值上下限， h_m 、 h_M 表示宽度阈值上下限， c_m 、 c_M 表示高宽比阈值上下限，则车道线形状约束可定义为

$$\frac{y_e^i - y_s^i}{x_e^i - x_s^i} \frac{y_e^j - y_s^j}{x_e^j - x_s^j} > 0 \quad (2)$$

车道线起点通常在一定范围内， x_m 、 x_M 、 y_m 、 y_M 依次表示车道线起点在 u_1 、 v_1 方向上的最小值、最大值。则在消失点坐标系下，车道线起始点约束定义为

$$\begin{cases} x_s \in [x_m, x_M] \\ y_s \in [y_m, y_M] \end{cases} \quad (3)$$

线与水平线夹角可用表示应在设定范围 $k_m \sim k_M$ 在消失点坐标系下，车道线斜率约束定义为

$$\frac{y_e - y_s}{x_e - x_s} \in [k_m, k_M] \quad (4)$$

由各式定义可以得知，式(2)主要约束车道线形状，式(3)主要约束车道线起始点位置，式(4)约束车道线趋势。为方便后续描述，这里将式(2)、(3)、(4)统一称为车道线几何特征约束模型。

2.2 车道线相对位置特征约束建模

除了 2.1 节中描述的几何特性外，车道线还具有有一定相对位置特性。即同一条车道线方向连续，斜率偏移量较小，且在消失点坐标系 $u_1o_1v_1$ 下满足如下条件：

- (1)同一条车道线方向相同、斜率相似，且起始点纵坐标 y_s 越大，车道线长度 l 越大。
- (2)同一条车道线位置偏移量在一定范围内。
- (3)车道线起始点横坐标 x_s 越接近中心点，车道线与水平线夹角越大。
- (4)非同类车道标记线函数通常在消失点附近具有交点。

(5)同类车道标记延长线到消失点距离方差较小。

车道线相对位置特性主要用于同类车道线聚类。为此，该函数可定义为布尔函数，1 表示线段 L_i 和线 L_j 属同类车道线。根据(1)中所述，车道线相对斜率应在设定阈值范围可得到

$$\begin{cases} \frac{y_e^i - y_s^i}{x_e^i - x_s^i} \frac{y_e^j - y_s^j}{x_e^j - x_s^j} > 0 \\ \left| \frac{y_e^i - y_s^i}{x_e^i - x_s^i} - \frac{y_e^j - y_s^j}{x_e^j - x_s^j} \right| \in [\Delta e_m, \Delta e_M] \end{cases} \quad (5)$$

式中， i 、 j 表示任意两条线段编号。车道线距离偏差 ΔD 可用第 j 条车道线起点到第 i 条车道线的距离表示，且应在设定阈值范围内

$$\left| \frac{\left(\frac{y_e^i - y_s^i}{x_e^i - x_s^i} \right) x_s^j - y_s^j + y_s^i - \left(\frac{y_e^j - y_s^j}{x_e^j - x_s^j} \right) x_s^i}{\sqrt{\left(\frac{y_e^i - y_s^i}{x_e^i - x_s^i} \right)^2 + 1}} \right| \in [\Delta d_m, \Delta d_M] \quad (6)$$

若 i 、 j 两直线段存在交点，则认为直线段 i 、 j 属于同一类车道线。

由以上各式定义可得，式(5)约束车道线斜率差，公式(6)约束车道线距离偏移量，为方便后续描述，这里将式(5)和(6)统称为车道线位置特征约束模型。

3 车道线识别算法

根据 2.1 节分析，针对固定位置相机建立的车道线几何特征约束模型、位置特征约束模型可作为先验知识应用于车道线检测算法中。

3.1 图像预处理

图像预处理目的在于简化图像信息、减少环境噪声干扰、为后续算法做准备。常用的预处理方法有灰度处理、二值处理、滤波处理、边缘检测处理、膨胀腐蚀处理等。由于算法实时性要求，本文在该部分舍弃耗时较多且对结果影响不明显的滤波处理、边缘检测处理环节，而选用感兴趣区域(ROI)、灰度处理、二值处理以及连通区域分析四个过程。

彩色图像 I 的感兴趣区域按照式(7)作灰度处理，得到灰度图像 G ，并采用均值二值化进行二值处理。

$$\begin{cases} G_{ij} = I_{ij}(R) \times 0.299 + I_{ij}(G) \times 0.587 + I_{ij}(B) \times 0.114, i, j \in \{ROI\} \\ G_{ij} = 0, i, j \notin \{ROI\} \end{cases} \quad (7)$$

为减少光照影响，二值化阈值可根据历史信息补

偿

$$T_{t+1} = \bar{T} + c \cdot \arctan(T_{t+1} - T_t) \quad (8)$$

式中, T_t 为 t 时刻二值化阈值, \bar{T} 表示某段时间

内阈值平均值, c 为补偿参数。选用反正切函数的目的在于平缓正负偏离值, 使预处理结果趋于稳定, 结果如图 2 所示。

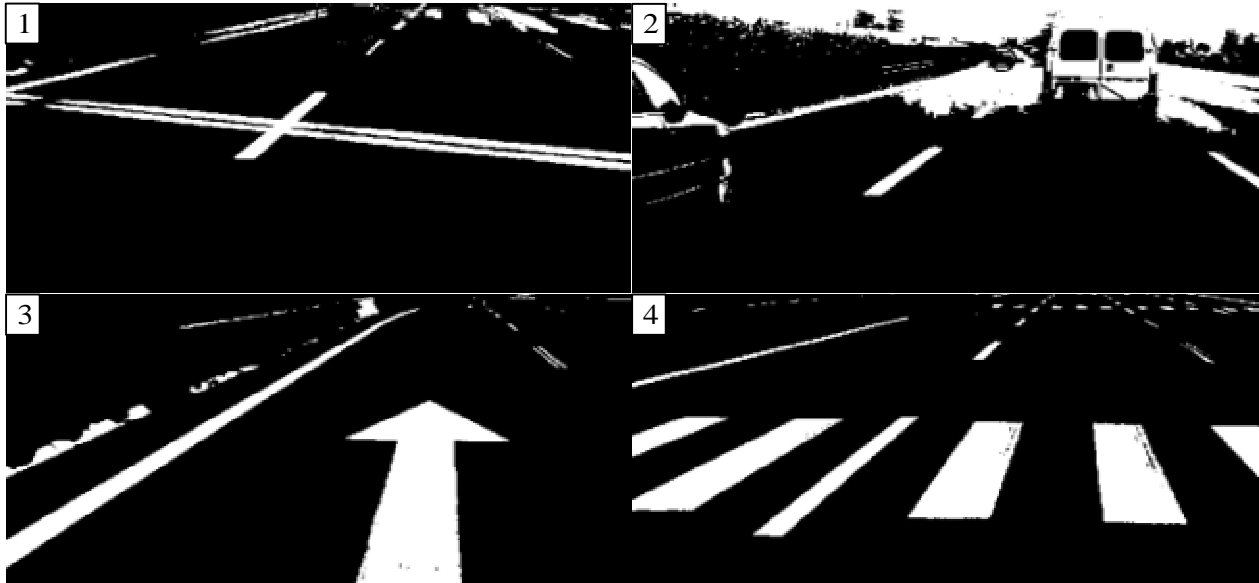


图 2. 图像预处理常见结果

经预处理后的图像中, 通常存在如下四种情况干扰信息:

1) 路面连接干扰信息, 此类信息不符合车道线几何约束, 信息容易被过滤掉。

2) 相机曝光过度或者前方车辆影响, 预处理后图像出现大面积白色区域。此类信息不符合车道线几何约束、位置约束, 也容易被过滤掉。

3) 箭头指示型路标干扰信息, 此类信息问题在于其形状符合车道线趋势, 且形变较大, 算法难以处理。

4) 人行横道干扰信息, 其形状与结构同车道标记线基本相似, 但其连通区域面积较大, 此类信息也容易被过滤掉。

结合上述内容及代码执行效率, 算法在预处理环节增加连通区域分析过程, 得到车道线候选区域, 并在此区域上进行 Hough 直线检测。

3.2 车道线区域筛选与 Hough 直线检测

3.2.1 图像连通域分析

连通区域指图像中具有相同像素值且位置相邻的像素点组成的图像区域。通过相同像素值、相邻像素这两条件即可实现在图像中寻找连通区域, 然后通过赋予标识来区别其他区域。本节应用种子填充法来实现连通区域标记。

如图 3 所示, 假设图像尺寸为 8×8 , 随机选取图像中任意白色点 1, 寻找其附近区域相同像素点并记作 2、3、4、 a 。分别以像素点 2、3、4、 a 为起点重复上步操作, 其结果记作 5、6、 b 、 c 。直到附近区域全部寻找完毕, 将其编号统一记作 1。再选取该区域外任意白色点, 其编号以 2 开始, 同样进行上述操作, 将其结果统一标记为 2, 此时获得两个连通域 1、2。

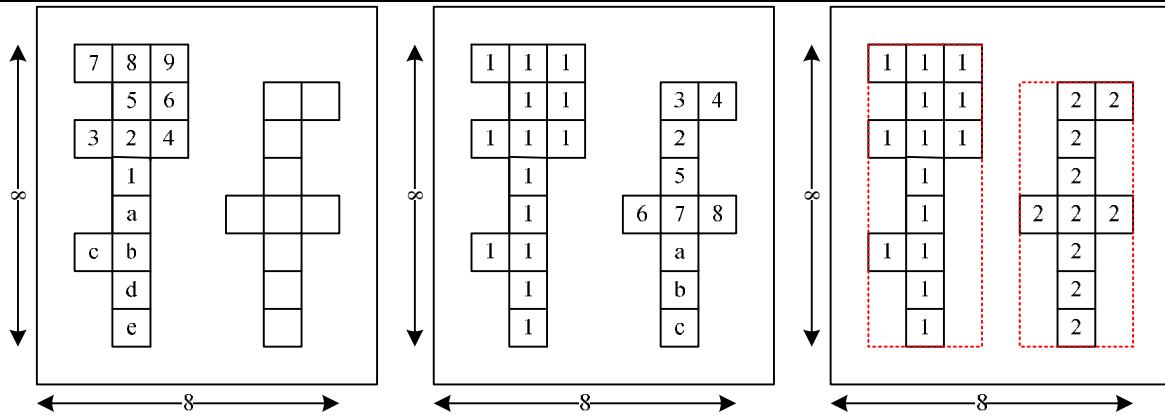


图 3. 基于种子填充法的连通区域分析过程

令 C 表示连通区域， r 表示行程段， i_r 表示 i 的行号， b_r 、 e_r 分别表示 r 的起止列号， l_r 表示其长度，那么 C 的 0 至 2 阶统计矩可计算为

$$\begin{cases} M_0(C) = \sum_{r \in C} l_r, M_x(C) = \sum_{r \in C} l_r \frac{b_r + e_r}{2}, M_y(C) = \sum_{r \in C} l_r i_r \\ M_{xx}(C) = \sum_{r \in C} l_r \left(b_r e_r + \frac{(l_r - 1)(2l_r - 1)}{6} \right) \\ M_{xy}(C) = \sum_{r \in C} l_r i_r \frac{b_r + e_r}{2} \\ M_{yy}(C) = \sum_{r \in C} l_r i_r^2 \end{cases} \quad (9)$$

其中， x 对应列坐标、 y 对应行坐标，则 C 的形心坐标 (x_0, y_0) ，连通区域拟合椭圆长轴为 a 、 b ，主轴与 x 方向夹角为 q ，连通域 C 的面积 A 为

$$\begin{cases} A = M_0(C), x_0 = \frac{M_x(C)}{A}, y_0 = \frac{M_y(C)}{A} \\ a = M_{xx}(C) - x_0 M_x(C) \\ b = M_{yy}(C) - y_0 M_y(C) \\ c = M_{xy}(C) - y_0 M_x(C) \\ q = \frac{p}{2} + \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{2c}{a-b}\right) \end{cases} \quad (10)$$

根据车道线形状约束，可筛选出车道线候选区域如图 4 所示。

3.2.2 车道线几何约束下的 Hough 直线检测算法

笛卡尔坐标系中平面上的任意直线通常用点斜式、两点式表示。在极坐标系下，平面上的任意直线用 (r, q) ， r 为该直线到原点的距离， q 为该直线与 x 轴的夹角。若空间存在 m 个点，经过每点均存在 n 个方向的直线。

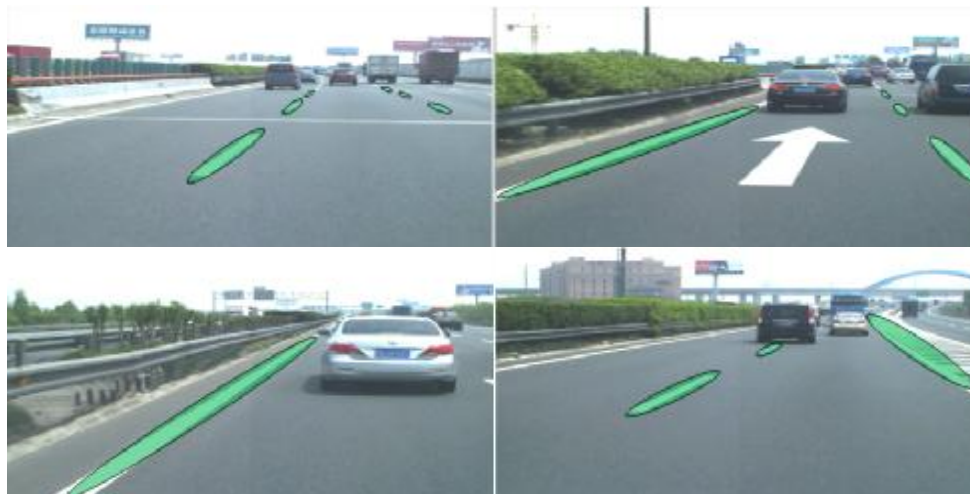


图 4. 车道线连通区域筛选结果

这些直线可依次表示为:

$$\begin{aligned} f(r_1, q_1) &= r_1 \sin(q_1) + r_1 \cos(q_1) \\ f(r_2, q_2) &= r_2 \sin(q_2) + r_2 \cos(q_2) \end{aligned} \tag{11}$$

$$\begin{aligned} f(r_{n-1}, q_{n-1}) &= r_{n-1} \sin(q_{n-1}) + r_{n-1} \cos(q_{n-1}) \\ f(r_n, q_n) &= r_n \sin(q_n) + r_n \cos(q_n) \end{aligned}$$

通过计算可获得 m 个点各自对应的 $(r_1, q_1) \sim (r_n, q_n)$ 坐标, 并将这些坐标绘制成图像(图5)。利用局部累加算法, 即可找到峰值点及其对应的直线 (r_k, q_k) 。最终, 将大于设定阈值的峰值点所对应的直线转化为直角坐标系下的直线。

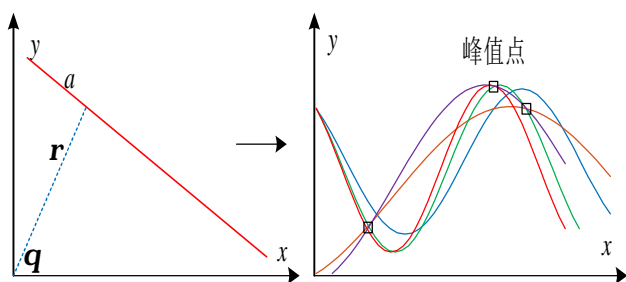
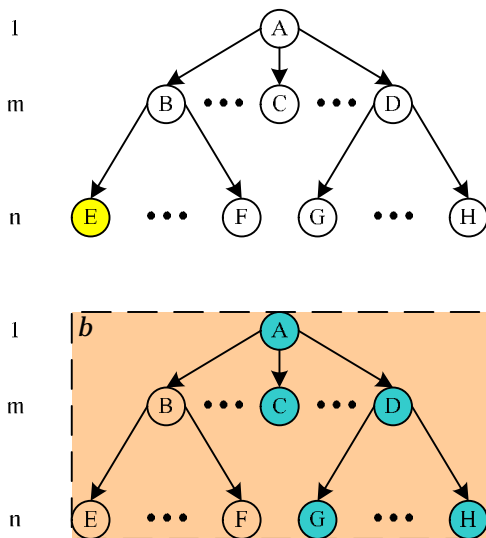


图 5. Hough 变换原理与峰值点选取

3.3 车道线 K-D 树聚类法

K-D 树(k-dimensional tree)是一种分割 k 维数据空间的方法, 主要用于多维空间关键数据的范围搜索和最近邻搜索。K-D 树算法由数据节点、域、分支、左



树、右树、父节点六部分组成。

车道线相关性由式(5)和(6)定义。令 $\Delta s \in \{0, +\infty\}$ 表示车道线同向性, 同向时 $\Delta k = 1$, 非同向时 $\Delta k = +\infty$; $\Delta k \in (1, +\infty)$ 表示车道线斜率差; $\Delta d \in (1, +\infty)$ 表示车道线偏移量大小。所以, k-d 树的 k 维节点可定义为 $p = [\Delta k, \Delta e, \Delta d]$, k-d 树的域为 $S = \{0, 1, 2\}$ 。对各个域上求取其各自最大方差 $s_i^2 (i \in S)$, 有

$$s_i^2 = \frac{(p_1^i - \bar{p}^i)^2 + (p_2^i - \bar{p}^i)^2 + (p_3^i - \bar{p}^i)^2 + \dots + (p_n^i - \bar{p}^i)^2}{n} \tag{12}$$

式中 p_n^i 表示节点 p 在第 i 个域上的第 n 个值, \bar{p}^i 为第 i 个域上的均值。将各自方差 s_i^2 按照从大小顺序排序, 并选取最大方差所在域进行超平面分割, 则超平面割线在该域上的值 p_j^i 应满足

$$p_j^i = \min p_n^i - \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n p_k^i \tag{13}$$

初次分割后, 原空间被分为左子空间和右子空间。在各子空间上重复上述步骤进行细分, 如此反复直到空间中只包含一个数据点。随后将 K-D 树可以转化为树形图的形式, 并进行回溯搜索。

回溯搜索过程如图 6 所示, 假设 K-D 树存在 1 个 1 级节点、 m 个 2 级节点、 n 个 3 级节点。算法首先随机选取其中一根节点 E , 并搜索其父节点 B , 判断二者是否符合车道线位置约束条件。如果符合, 则对 B 下的其余子节点进行进行比较, 并将其聚为一类。

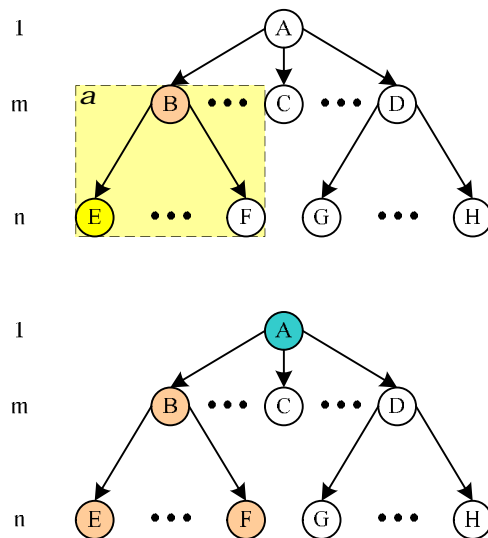


图 6. K-D 树回溯聚类法

其次，再寻找 B 的父节点 A，同样重复上述操作，判断父节点 A 的其余子节点是否同类。若符合再比较其子节点 D 的子节点 G、H，最终实现车道线聚类，聚类结果如图 7 所示。该段道路共有 4 条车道

线，Hough 直线检测结果用绿色实线画出，每条直线段的起点、终点分别用红色、黄色线表示。经上述算法，车道线聚类结果为 4。

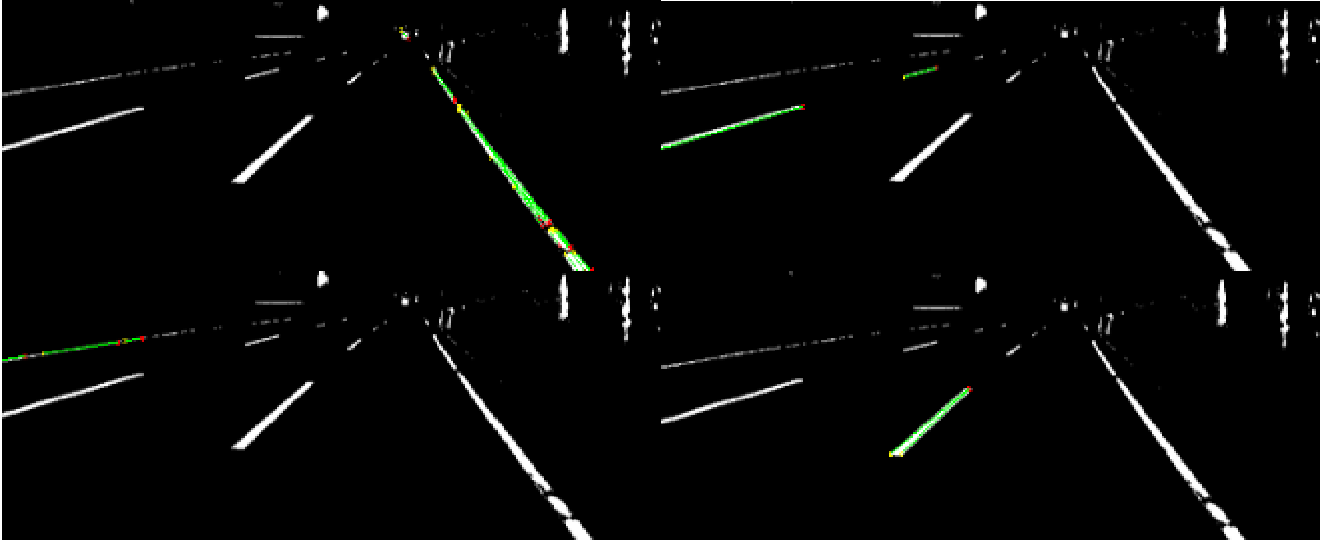


图 7. K-D 树回溯聚类法车道线聚类结果

3.4 车道线最小二乘法拟合

聚类操作过后，每条 Hough 检测得到的直线均用起点、终点、中点三个坐标表示。在每一类下，存在的 n 个点分别用 $(x_1, y_1) \sim (x_n, y_n)$ 来表示。根据最小二乘法计算公式：

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2} \quad (14)$$

$$b = \bar{y} - a\bar{x}$$

可将每一类车道线拟合成 $y = ax + b$ 的形式，并将其改写成式(1)形式。拟合后的车道线仍然受车道线几何特征约束、车道线位置特征约束的限制。其中，不符合车道线几何约束条件的结果被删除，符合车道线位置特征约束的再次进行聚类操作，直至筛选出最终直线，完整算法流程如下：

1. 每一类数据提取起点、中点和终点坐标依次记 ~。
2. 根据式(8)计算图像坐标系 ROI 区域车道线方

程，并改写成式(1)定义形式。

3. 拟合第二章计算式(2)、(3)、(4)中相关变量，进行第一次筛选。

4. 保留符合要求的车道线，删除不符合要求的车道线。

5. 计算第三章(2)、(4)、(5)中相关变量，对符合要求的车道线再次 K-D 聚类。

6. 重复步骤 1-4，直到所有车道线均完成 K-D 聚类检测，没有不符合直线为止。

7. 将 ROI 区域车道线方程转化为图像坐标系下的方程。

8. 输出最终结果。

4 单帧图像下车道线检测结果

图 9 为不同天气、不同路段下实际车辆道路实验结果，各自详细信息由表 1 列出。图中绿色、红色(车道偏离)实现表示车道线识别结果。实验结果表明，在有少量雨水、道路阴影、车辆遮挡、道路标志干扰的结构化道路下，算法均可实时识别出车道线。

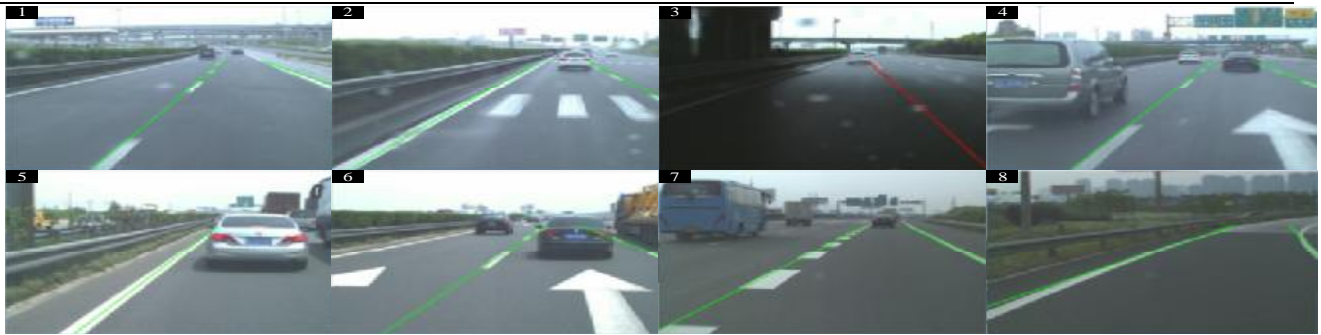


图 9. 实际车辆道路实验结果

表 1: 实际车辆道路实验结果说明

| 序号 | 天气 | 路况 |
|----|----|--------------|
| 1. | 大雨 | 雨天高速工况正常行驶状态 |
| 2. | 大雨 | 雨天人行横道干扰 |
| 3. | 大雨 | 雨天光照突变 |
| 4. | 晴朗 | 晴天导向箭头干扰 |
| 5. | 晴朗 | 晴天前方车辆干扰 |
| 6. | 晴朗 | 晴天车辆、导向箭头干扰 |
| 7. | 黄昏 | 黄昏高速工况正常行驶状态 |
| 8. | 黄昏 | 中等曲率弯道 |

5 小结

本章通过图像预处理、车道线几何约束下的 Hough 直线检测、车道线位置约束下的聚类以及最小二乘法拟合实现了单帧图像中车道线的识别。实验结果表明，在有少量雨水、道路阴影、车辆遮挡、道路标志干扰的结构化道路下，算法均可实时识别出车道线。

References (参考文献)

[1] Bertozzi M, Broggi A. Real-time lane and obstacle detection on the GOLD system[C]. Intelligent Vehicles Symposium, 1996. Proceedings of the. IEEE Xplore, 1996.213-218.

[2] Cheng H Y, Jeng B S, Tseng P T, et al. Lane Detection With Moving Vehicles in the Traffic Scenes[J]. Intelligent Transportation Systems IEEE Transactions on, 2006, 7(4):571-582.

[3] Jeong P, Nedeveschi S. Efficient and robust classification method using combined feature vector for lane detection[J]. Circuits & Systems for Video Technology IEEE Transactions on, 2005, 15(4):528-537.

[4] Gonzalez J P, Ozguner U. Lane detection using histogram-based segmentation and decision trees[C]. Intelligent Transportation Systems, 2000. Proceedings. IEEE Xplore, 2000. 346-351.

[5] Bahlmann C, Zhu Y, Ramesh V, et al. A system for traffic sign detection, tracking, and recognition using color, shape, and motion information[C]. Intelligent Vehicles Symposium, 2005. Proceedings of the. IEEE Xplore, 2005.255-260.