

Real-Time and Reliable Lane Recognition and Tracking of Intelligent Vehicle

Jin LI

School of Mechanical Engineering, Anhui Science and Technology University, Chuzhou 233100, China

Abstract: The key of lane detection and tracking of intelligent vehicle is to guarantee both reliability and real time. Within two chosen local image areas, sectional binaryzation, linear filtering and lane-width based filtering are adopted to detect the lanes. And the candidate lane in the adjoining section is estimated then recognized according to the detected lane segment. The target lane is obtained based on different models according to the lane segments within the two areas, and then is tracked by an adaptive preview controller. The lane detection and tracking system is designed with LabView PXI8196 and digital signal processor F2812. The experiment results show that the system can detect and track the lanes effectively.

Key words: Intelligent vehicle; lane tracking; reliability; real time

兼顾可靠性和实时性的智能车辆车道保持

李进

安徽科技学院 机械工程学院, 安徽 滁州 233100

摘 要: 智能车辆车道保持的关键在于兼顾可靠性和实时性。为此, 在车道识别时, 利用已识别车道分区预测临近待识别分区车道候选位置, 并仅在候选位置完成后续识别以提高识别实时性; 在识别各分区时, 依次采用分区阈值二值化、线性滤波、基于车道宽度滤波的方法, 以提高识别的可靠性。同时, 在提取车道线时根据 2 个检测区内的车道识别结果拟合不同曲线模型的目标车道线, 并进行自适应预瞄控制。采用 LabView PXI8196 和数字信号处理器 F2812 对智能车辆车道保持系统进行了设计。道路试验结果表明, 提出的车道识别及跟踪控制方法同时保证车道识别及跟踪的可靠性和实时性, 且稳定性较好。

关键词: 智能车辆; 车道保持; 可靠性; 实时性

1 引言

基于视觉导航的智能车辆车道保持包括车道识别和车道跟踪两个方面, 其关键在于如何在动态、复杂的运行环境下兼顾可靠性和实时性[1-6]。

在车道识别上, 文献[7]提出了一种基于机器学习的车道路径识别方法, 但其识别的可靠性不高; 文献[8]提出一种基于车道线宽度的动态图像阈值获取方法。该方法能够对识别阈值进行适应性调整以得到适应各种环境的识别阈值, 但仅在车道线清晰且无破损时效果较好。文献[9]提出了连通区域搜索和道路边界霍夫检测相结合的方法, 然而其采用的阈值处理方法较为简单, 在复杂路面环境下难以得到理想的识别效果。

在车道跟踪方面, 文献[10]提出一种导航参数提取方法。该方法有效减小了图像数据处理量, 但提取的控制参数难以适应道路曲率的变化; 文献[11]提出一种预瞄跟踪控制器, 能够实时获取适应道路曲率变化的控制参数, 但道路曲率的计算数据处理量较大, 不利于提高实时性; 文献[12]将运动学控制器的输出作为动态控制器的输入, 但缺乏控制信息的输出和反馈。¹

从现有研究成果看, 车道保持技术的关键和难点在于兼顾实时性和可靠性。一方面, 两者具有一定的矛盾, 即获取高可靠性需要增加数据计算量, 因此可能导致实时性下降; 而获取实时性则又要严格控制计算量, 从而一定程度上不利于可靠性的提高; 另一方面, 它们也具有相辅相成的一面, 即局部区域内的高可靠性能够有效排除干

基金项目: 安徽省高校优秀青年人才支持计划重点项目 (gxyqZD2016215); 安徽科技学院校级科研项目 (ZRC2014409);
作者简介: 李进(1982-), 男, 安徽蚌埠人, 博士, 副教授, 主要从事智能车辆与汽车电子等方面的教学与科研工作;

扰，减小后续数据计算量，利于整体实时性的提高，而整体上的高实时性有效降低了数据计算量，从而为保证局部的可靠性赢得时间。

因此，在车道识别时，采用了分区域阈值二值化、线性滤波和基于车道图像宽度滤波的方法，并根据已识别分区预测临近待识别分区的车道候选位置；车道跟踪时则根据当前帧图像中两个检测区内的车道识别结果提取不同曲线模型的目标车道线，并进行自适应预瞄控制。同时，采用 LabView PXI8196 的 TI 公司的数字信号处理器 F2812 构建智能车辆车道保持系统，并进行实车道路试验。

2 车道识别

为兼顾车道识别的可靠性和实时性，采用以下方法：

① 利用车道线沿纵向的连续性特征，对车道线进行分段的跟踪识别以提高实时性，即先识别一段车道（车道段），再据此估计相邻区域内车道的候选位置，并仅在该位置完成下一车道段的识别。

② 充分、有效地融合各种特征信息以提高识别的可靠性。在识别各分区车道段时（尤其是各帧图像的第一个车道段），即使局部区域的实时性有所下降也要保证其识别的高可靠性，这样才能在全局意义上为后续各个车道段的跟踪识别打下良好基础。

③ 在不影响车道保持效果的前提下，仅对采集图像的部分区域进行车道检测，以在整体上有效减少数据处理量，为保证实时性提供有效保障。

2.1 车道识别方法

按照以上思路，在识别车道时首先沿智能车辆行驶方向（纵向）划分远近 2 个独立的局部车道检测区，仅在该区域内进行车道识别。

其原因在于：

车道识别的目的是为后续的跟踪控制提供导航控制参数，通过合理设置局部检测区域并在这些区域提取车道线，既能够有效减小数据处理量，又可以得到满足控制要求的控制参数。

在以上两个检测区内再进行纵向分区，对各分区依次进行分区域最优阈值识别、线性滤波和基于车道宽度的滤波以提高识别的可靠性，同时根据已识别分区车道预测临近待识别车道候选位置以进行跟踪识别，如图 1 所示。



Fig. 1 Lane recognition process within each image section

图 1 各分区内车道识别流程

2.2 各分区内车道识别

首先对各图像分区分别计算最优阈值并二值化[13]；再进行 3×3 线性滤波以去除二值化图像中点状噪声。此时得到的二值图像包含车道路径及若干误二值化区域。这些误二值化区域横向宽度大小不一，但其宽度一般比同像素行的车道图像宽度（车道线在采集图像中的横向宽度）小。文献[14]提出形态学滤波方法以去除这些误二值化区域，但受限于使用算子的尺寸大小，该方法仅在这些误二值化区域宽度较小时才能得到理想结果。

为去除横向宽度较大的误二值化区域，进行基于车道图像宽度的滤波，步骤如下：

① 对线性滤波后的图像从左到右按像素行进行横向搜索；② 当搜索到白色像素点时（可能的车道左边缘点），计算该像素点后一段横向宽度（单位：像素）内的白色像素点个数 Sum 。该横向宽度取车道线在获取图像中的实际横向宽度（车道图像宽度 $LaneWid$ ）时，过滤效果最佳；③ 当 Sum 大于阈值 $Widthr$ 时，说明该白色像素点是该像素行的车道左边缘点；否则，视该白色像素点为噪声点并进行滤除，继续搜索和判断下一个白色像素点，直至搜寻到车道左边缘点。 $Widthr$ 值较大时，滤除非车道线噪声点的效果更好； $Widthr$ 值较小时，在车道线污损时识别能力更强。④ 按照步骤②和③搜寻到车道右边缘点。完成各像素行的处理，得到检测区域内的车道线位置。

2.3 车道图像宽度的估计

车道图像宽度 $LaneWid$ 与车道线横向宽度、摄像机参数等有关，在完成车道线识别后才能确定。因此，为了实现前述基于车道图像宽度的滤波算法，这里根据上一帧图像中已识别车道图像宽度对当前帧图像中待识别车道的宽度进行预先估计，即用其估计值 $EstWid$ 代替 $LaneWid$ 。采用离线标定与在线估计相结合的方法获取 $EstWid$ 。考虑到纵向分区后，同一分区内各像素行的横向宽度值差别很小，故将同一分区内处于中间位置行的车道横向宽度估计值作为该分区的估计值，以在不影响算法效果的前提下提高实时性，具体见文献[14]。

2.4 车道候选区域的确定

考虑到车道线沿纵向的连续性特征，从识别各帧图像的第二分区开始，根据前一分区车道位置对待识别分区的车道候选区域进行预估，再在候选区域内按照图 1 所示方法进行识别。各分区车道候选区域预测示意图，如图 2 所示。

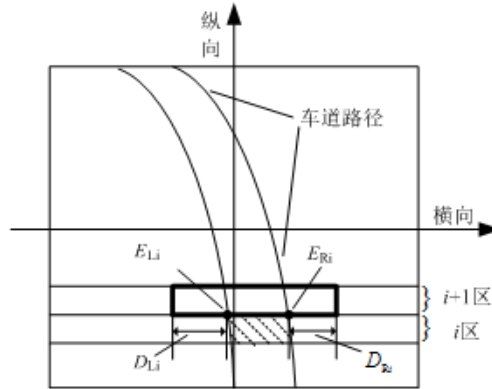


Fig. 2 Estimation of candidate lane areas of each section

图 2 各分区车道候选区域预测

图 2 中， i 图像分区中阴影区域为识别车道。为识别 $i+1$ 图像分区车道，将 $i+1$ 分区内一个矩形区域（加粗线条区域）作为该分区的车道候选区域。其纵向宽度为 $i+1$ 分区的纵向宽度，根据采集图像尺寸、摄像机安装位置等因素决定；横向宽度 L_{i+1} 为

$$L_{i+1} = E_{Ri} - E_{Li} + D_{Li} + D_{Ri} \quad (1)$$

式中， E_{Li} 和 E_{Ri} 为 i 分区与 $i+1$ 分区相交处 i 分区的车道线左右边缘点位置，在完成 i 分区识别后可以得到； D_{Li} 、 D_{Ri} 确定了 $i+1$ 分区车道线的候选区域大小，其取值应保证将 $i+1$ 分区实际车道线包含在候选区域内，但取值过大会增大数据计算量，不利于实时性，实际操作中根据采集图像尺寸、路面车道线横向宽度等确定。

3 目标车道线提取及跟踪控制

3.1 目标车道线提取

如前所述,在获取的车道图像中划分出远近两个局部车道检测区域,并根据这两个分区的识别车道结果拟合目标车道线。为降低曲线拟合时的计算量并同时兼顾拟合精度,根据车道路径的弯曲程度采用不同的拟合曲线,即当车道路径弯曲程度低于一定阈值,将其近似为直线;否则,将其拟合成三次曲线。

为衡量车道路径弯曲程度,先分别识别出远检测区和近检测区内的车道线,并将它们拟合成直线 l_1 、 l_2 。 l_1 相对于 y_w 轴的方向偏差为 α_1 , l_2 相对于 y_w 轴的方向偏差为 α_2 ,如图3所示。

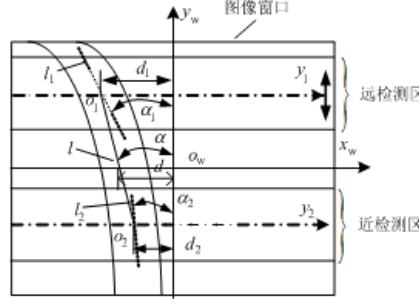


Fig. 3 Calculation of lane curve and fitting of the straight

图3 车道路径弯曲度计算及直线目标车道线拟合

计算 l_1 与 l_2 之间的方向偏差量的绝对值 $|\alpha_1 - \alpha_2|$,并以 $|\alpha_1 - \alpha_2|$ 衡量车道路径弯曲程度。当 $|\alpha_1 - \alpha_2| \leq \alpha_0$ 时,前方车道路径弯曲程度较低,采用直线模型拟合目标车道 l ,即连接 l_1 、 y_1 的交点O1和 l_2 、 y_2 交点O2(y_1 、 y_2 为两个检测区的平分线),得到目标车道 l 。当 $|\alpha_1 - \alpha_2| > \alpha_0$ 时,前方车道路径弯曲程度较高,考虑到三次曲线模型对于曲率变化明显的道路识别效果好[15],此时目标车道线采用三次多项式曲线拟合。

3.2 跟踪控制系统设计

考虑到车道保持与人工驾驶行为相类似,即根据前方道路等情况寻找出一个理想的预瞄点,以实现车道保持的自适应预瞄控制。整个控制系统由坐标系变换、预瞄模糊规则推理器、最优曲率驾驶员模型及侧向加速度跟踪控制组成,其控制原理,如图4所示。

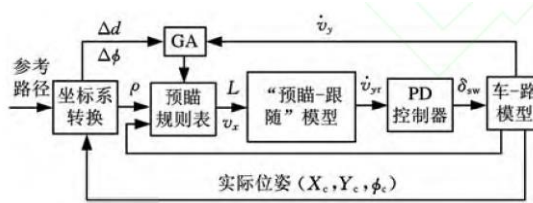


Fig. 4 Process of the lane tracking system

图4 车道保持系统控制结构图

图4中, Δd 为车辆横向偏差; $\Delta \phi$ 为车辆方向偏差; v_x 为车辆纵向速度; v_y 为车辆侧向速度; δ_{sw} 为转向盘转角输入; v_{yr} 为最优侧向速度。具体跟踪控制系统设计及仿真计算见文献[16]。

4 车道保持系统设计

整个智能车辆车道保持系统由智能车辆、车道保持上位机系统、车道保持下位机系统组成,上位机系统完成车道图像的识别、车辆运行状态信息的采集和处理等;下位机系统负责完成车辆转向、调速控制,如图5所示。

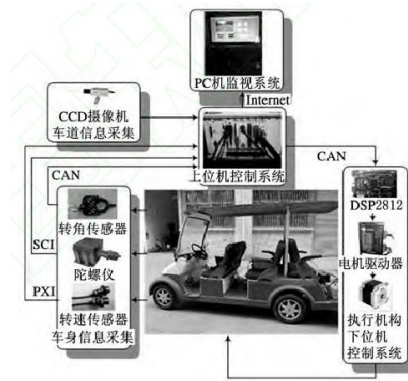


Fig. 5 Lane tracking system of the intelligent vehicle
图 5 智能车辆车道保持系统

4.1 车道保持上位机控制系统

由图像采集卡 PXI-1411 及 LabView PXI8196 组成。前者完成车道图像获取及识别，后者进行转向盘转角、侧向加速度等信号的采集和处理。

4.2 车道保持下位机控制系统

基于 TI 公司的 DSPF2812 完成前轮的转向控制、后轮的驱动和调速控制。

4.2.1 转向系统控制

车辆转向系统通过一个步进电机及步进电机驱动器进行控制。驱动器的方向电平信号控制步进电机的旋转方向，步进脉冲信号控制步进电机的转角和转速。选用 SH30822M 步进电机驱动器和 110BYG3501 永磁感应子式三相步进电机。

4.2.2 后轮驱动控制

主要由直流电动机、驱动电路、F2812 组成。车辆后轮由直流电动机驱动，其转速调节采用 PWM 方式中的定频调宽法。PWM 信号由 F2812 的 EV 模块产生，并经 MOSFET 及其驱动器与电动机构成控制回路。

4.2.3 车速反馈控制

采用磁电式轮速传感器检测车辆两个驱动轮轮速。该脉冲信号经过光电隔离器送入 F2812 的捕获引脚。采用两个定时器和两个捕获中断分别计算左右驱动轮的轮速。定时器完成对智能车辆运行时间的计算，捕获中断获取在该段时间内驱动轮转角，经计算得到智能车辆的车速，并据此进行车速反馈控制。

5 实车试验

5.1 车道识别

按照前述车道识别方法，得到远近 2 个检测区（纵向宽度均为 100 像素）的各步骤识别结果，如图 6 所示。

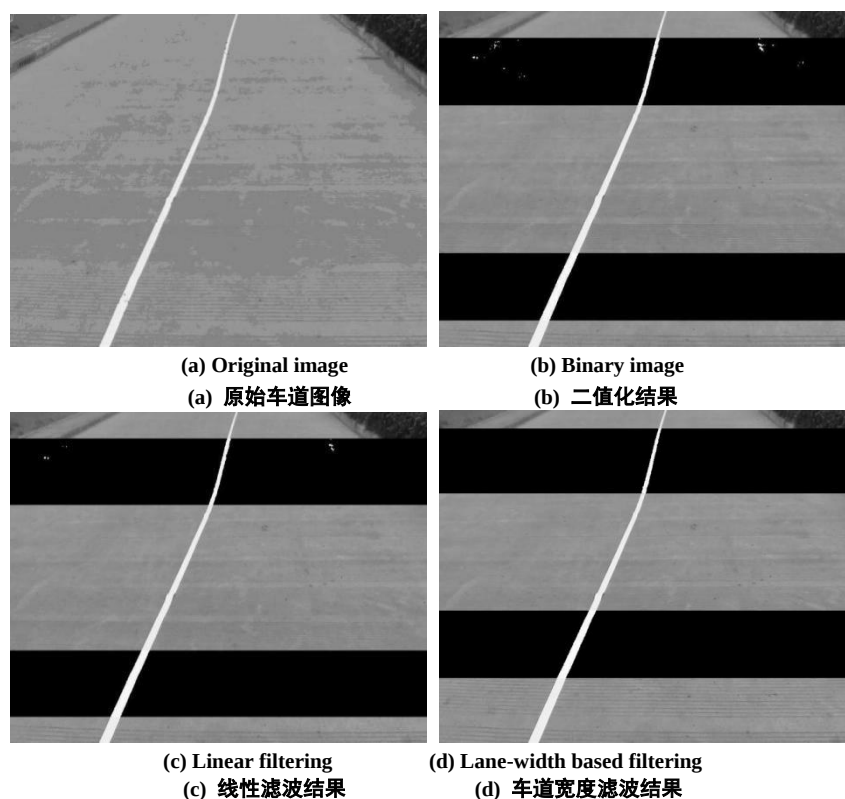


Fig. 6 Results of lane recognition

图 6 车道图像识别结果

图 6(a)为原始图像；图 6(b)为分区阈值二值化处理结果，其中检测区内的车道线被二值化为白色，但同时也将部分非车道线区域误二值化为白色；图 6(c)为线性滤波结果，消除了图 6(b)中的部分误二值化像素点；图 6(d)为基于车道图像宽度的滤波结果，此时识别效果良好。

试验中， D_{Li} 、 D_{Ri} 均取 $E_{Ri} - E_{Li}$ ， α_0 取 40° ，Widthr 取 0.75 LaneWid 较合适。此外，估计值 EstWid 与实际值 LaneWid 虽具有一定差别。但由前述车道识别算法可知，该滤波方法并不需要完全精确的 LaneWid 值，且 EstWid 和 LaneWid 差别较小，故仍然可以得到满意的识别效果。两个检测区内车道图像宽度值，如图 7 所示。

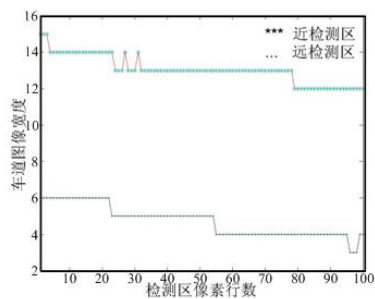


Fig. 7 Lane width of each image line

图 7 检测区车道图像宽度

5.2 候选区域内车道识别

在两个检测区内根据上一分区识别结果确定本分区车道候选区域，并在候选区域内进行识别，结果，如图 8 所示。

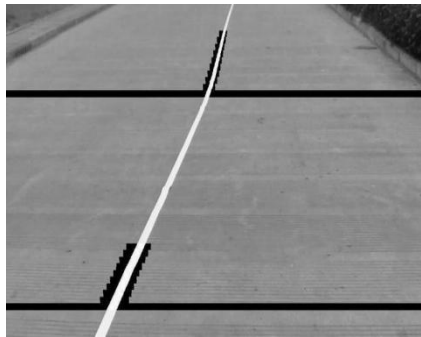


Fig. 8 Lane recognition results within candidate areas

图 8 车道候选区确定及识别结果

由车道图像尺寸、摄像机安装位置等确定远检测区与近检测区的纵向宽度均为 100 像素，各检测区纵向分为 10 个分区。在识别第一分区时对整个分区进行识别，在识别后续各分区时，仅在车道候选区域内进行。2 个检测区内的各分区车道候选区域宽度曲线（ $D_{i+1}, i=1, 2, \dots, 9$ ），如图 9 所示。

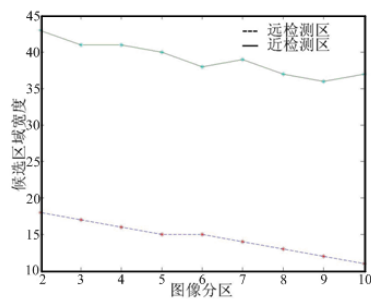


Fig. 9 Width of each candidate area in each image section

图 9 各车道候选区域横向宽度曲线

以连续采集和处理的 500 帧车道图像为例，统计了采用车道候选区预测方法前后两种滤波操作的使用情况，见表 1。

Tab. 1 Statistics of filter operation

表 1 滤波操作使用情况统计

滤波方法	未采用候选区预测		采用候选区预测	
	次数	比例/%	次数	比例/%
线性	500	100	215	43
基于车道图像宽度	447	89.4	96	19.2

由表 1 可知，在未采用车道候选区预测时，需要进行线性滤波和基于车道图像宽度滤波的比例较多，其原因在于分区阈值识别后得到的误二值化像素点较多，故后续处理工作量较大。而采用车道候选区预测后，需要进行滤波的比例大幅下降，这说明此时分区阈值计算较为准确，得到的误二值化像素大大减少。

5.3 不同滤波方法效果比较

存在较强外界干扰时，采用常规线性滤波、中值滤波及前述基于车道宽度滤波三种方法的车道图像识别结果，如图 10 所示。

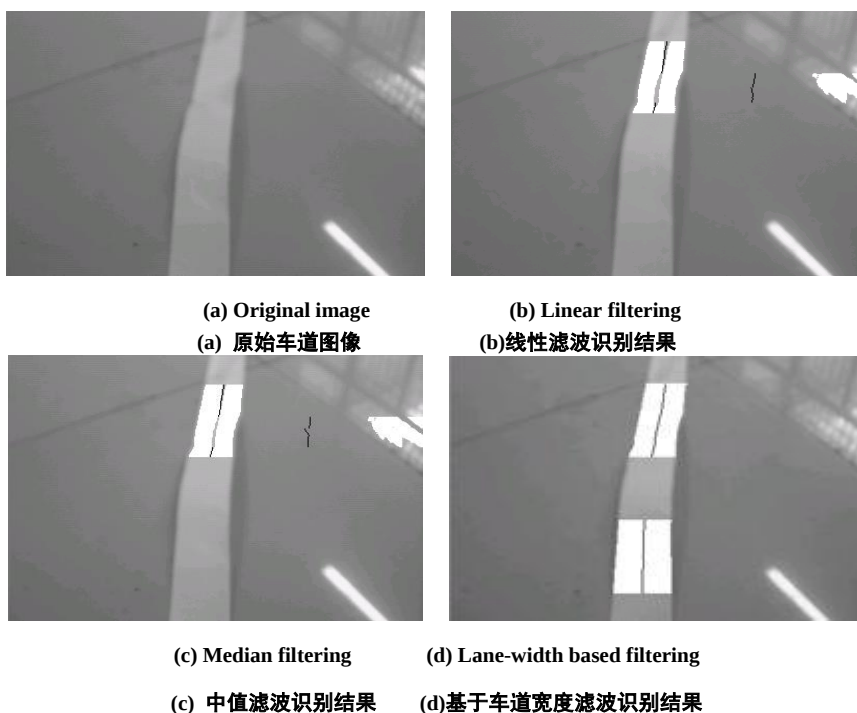


Fig. 10 Comparison of results with disturbance

图 10 外界干扰下识别结果比较

由图 10 可知，采用线性滤波、中值滤波方法时，远检测区内车道中心线提取存在较大错误，近检测区因外界干扰无法识别出来；而采用基于车道宽度滤波方法则能够得到良好的识别效果。

由此可见，前文所述在车道候选区域内进行基于车道图像宽度滤波的车道识别有以下优点：

- ① 大大减小了需要处理的图像面积，在整体上有效降低了数据处理量；
- ② 因仅在包含车道线的车道候选区域内进行处理，故排除了其它区域的各种噪声干扰，计算的二值化阈值更为准确，可靠性更好。
- ③ 分区二值化阈值计算速度更快，线性滤波后得到的误二值化像素点较少，故基于车道图像宽度的滤波方法使用次数并不多，虽然其算法较复杂（基于车道宽度滤波因要进行估计车道图像宽度、按像素行搜索、阈值判定等操作），但整体处理速度较快。
- ④ 过滤非车道噪声点效果更好，可靠性更好。

5.4 车道跟踪

为验证车道跟踪效果，采用前述自适应预瞄控制方法分别对直线和曲线车道路径进行跟踪试验。车速为 3 m/s、5 m/s、8 m/s 时的跟踪误差，见表 2。

总体来看，智能车辆跟踪误差较小，能够满足实际要求。同时，采用自适应预瞄控制方法和固定预瞄控制方法，对相同试验路段进行跟踪控制[16]。试验路径由直线段和曲线段组成。固定预瞄控制方法的预瞄距离为 10 m。试验结果，如图 11 所示。

Tab. 2 Lane tracking error

表 2 跟踪误差表

车速(m/s)	直线	曲线
	均值(μ /m)	均值(μ /m)
3	0.031	0.044
5	0.040	0.063
8	0.062	0.099

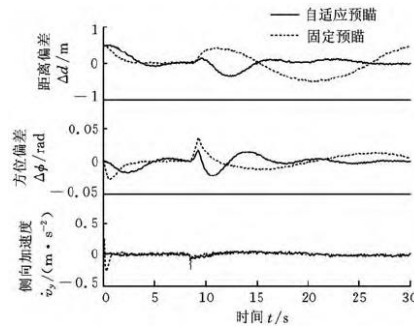


Fig. 11 Comparison of results of different control methods

图 11 车道跟踪结果比较

由图 11 可知, 采用自适应预瞄控制方法得到的方向偏差、距离偏差和侧向加速度均较小。

6 结 论

为提高车道保持的实时性和可靠性, 进行了图像分区识别、线性滤波、基于车道图像宽度的滤波等操作, 并根据已识别车道分区预测临近待识别分区的车道候选位置。同时, 根据 2 个局部检测区的车道识别结果采用不同曲线模型提取目标路径, 并设计自适应预瞄控制器进行车道跟踪控制。最后, 采用 LabView PXI8196 和 DSPF2812 对车道保持系统进行了设计和道路试验。结果表明, 所提算法能够准确识别路面车道, 车道预测方法能够有效确定待识别分区的车道候选位置, 且车道跟踪时能够适应道路曲率的快速变化, 跟踪效果和可靠性较好。

参考文献(References)

- [1] H.-C. CHOI, J.-M. PARK, W.-S. CHOI, et al. Vision-based Fusion of Robust Lane Tracking and Forward Vehicle Detection in a Real Driving Environment[J]. International Journal of Automotive Technology, 2012, 13(4): 653-669.
- [2] 高志峰, 汪渤, 周志强, 等. 一种鲁棒的非平坦路面车道线检测算法[J]. 北京理工大学学报, 2013, 33(1): 73-78.
Gao Z F, Wang B, Zhou Z Q, et al. A Robust Algorithm for Lane Detection on Unplanar Road[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2013, 33(1): 73-78.
- [3] 卢远志. 智能车测试环境中虚拟车道的快速构建方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(3): 985-991.
Lu Y Z. Rapid Method on Reconstruction of Virtual Lane Environment for Intelligent Vehicle Testing[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(3): 985-991.
- [4] S. Tangruamsub, M. Tsuboyama, A. Kawewong, et al. Mobile Robot Vision-based Navigation Using Self-organizing and Incremental Neural Networks[C]. Proceeding of International Joint Conference on Neural Networks, Atlanta, 2009: 3094-3101.
- [5] 孟文俊, 刘志强. 视觉引导 AGV 的路径跟踪控制研究[J]. 控制工程, 2014, 21(3): 321-325.
Meng W J, Liu Z Q. Research on the Path Tracking Control for Vision-guided AGV[J]. Control Engineering of China, 2014, 21(3): 321-325.
- [6] V. Kadakkal, G. Cook. Use of a Preview Control Scheme with Knowledge of Future Trajectory Information for a Lane Tracking Controller on a Wheeled Mobile Robot[C]. 34th IEEE Annual Conference on Industrial Electronics, 2008: 1692-1697.
- [7] Kim Z W. Robust Lane Detection and Tracking in Challenging Scenarios[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation System, 2008, 9(1): 16-26.
- [8] 李进, 陈杰平, 徐朝胜, 等. 基于动态图像阈值的智能车辆路径导航[J]. 农业机械学报, 2013, 44(4): 39-44.
Li J, Chen J P, Xu C S, et al. Path Tracking of Intelligent Vehicle Based on Dynamic Image Threshold[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4): 39-44.

- [9] 周罗善. 基于单目视觉的车道保持预警系统研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2011.
Zhou L S. Study of Precautionary Assistance System of Lane Keeping Based on Monocular Vision[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2011.
- [10] 李进, 陈无畏, 李碧春, 等. 自动导引车视觉导航的路径识别和跟踪控制[J]. 农业机械学报, 2008, 39(2): 20-24.
Li J, Chen W W, Li B C, et al. Road Recognition and Tracking Control of an Vision Guided AGV[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(2): 20-24.
- [11] 陈无畏, 李进, 王檀彬, 等. 视觉导航智能车辆的路径跟踪预瞄控制[J]. 机械工程学报, 2008, 44(10): 277-282.
Chen W W, Li J, Wang T B, et al. Preview Control for Road Following of Vision Guided Intelligent Vehicle[J]. Chinese Journal of Mechanical engineering, 2008, 43(10): 277-282.
- [12] Wu J B, Xu G H, Yin Z P. Robust Adaptive Control for a Nonholonomic Mobile Robot with Unknown Parameters[J]. Journal of Control Theory and Applications, 2009, 7(2): 212-218.
- [13] 李进. 基于 DSP 的视觉导航智能车辆路径识别[J]. 安徽科技学院学报, 2012, 26(1): 46-50.
Li J. Road Recognition of Vision-guided Intelligent Vehicle Based on Digital Signal Processor[J]. Journal of Anhui Science and Technology University, 2012, 26(1): 46-50.
- [14] 陈无畏, 孙海涛, 李碧春, 等. 基于标识线导航的自动车跟踪控制[J]. 机械工程学报, 2006, 42(8): 164-170.
Chen W W, Sun H T, Li B C, et al. An Automatic Guided Vehicle Based on Lane Marker Navigation and Tracking Control[J]. Chinese Journal of Mechanical engineering, 2006, 42(8): 164-170.
- [15] 周磊, 任国全, 肖浩, 等. 分段切换模型参数寻优的车道检测算法[J]. 光电工程, 2012, 39(1): 17-23.
Zhou L, Ren G Q, Xiao H, et al. Searching Optimum Solution of Multi-sectional Switch Model Parameter for Lane Detection Algorithm [J]. Opto-Electronic Engineering, 2012, 39(1): 17-23.
- [16] 陈无畏, 王家恩, 汪明磊, 等. 视觉导航智能车辆横向运动的自适应预瞄控制[J]. 中国机械工程, 2014, 25(5): 698-704.
Chen W W, Wang J E, Wang M L, et al. Adaptive Preview Control of Vision Guided Intelligent Vehicle Lateral Movement[J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(5): 698-704.