

基于自适应导航参数的智能车辆视觉导航^{*}

李进¹ 陈无畏²

(1. 安徽科技学院机电与车辆工程学院, 滁州 233100; 2. 合肥工业大学机械与汽车工程学院, 合肥 230009)

【摘要】 为提高导航路径识别的鲁棒性和实时性, 采用了分区阈值二值化、噪声点搜索及滤波等图像处理办法, 并对导航路径进行分区逐段识别; 在路径跟踪方面, 在获取的导航路径图像中选取远端路径和近端路径, 以远端路径和近端路径的方位偏差量作为确定目标路径的依据, 使提取的导航参数能适应导航路径的变化。根据四轮智能车辆模型进行路径跟踪仿真计算。在此基础上, 采用两块数字信号处理器, 对基于路径导航的视觉智能车辆进行了设计和试验验证。试验结果表明采用该方法设计的智能车辆具有较好的路径识别和跟踪控制效果。

关键词: 智能车辆 视觉导航 路径跟踪 自适应导航参数

中图分类号: TP242.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)06-0019-06

Navigation of Vision-guided Intelligent Vehicle Based on Adaptive Navigation Parameters

Li Jin¹ Chen Wuwei²

(1. School of Mechanical Electronic and Automobile Engineering, Anhui Science and Technology University, Chuzhou 233100, China

2. School of Mechanical and Automotive Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract

In order to obtain better robustness and real-time processing of path recognition, the binary segmentation image, noise searching and filtering procedures were employed. The whole path was classified into far part and near part, and the difference between the two parts was used as a threshold for selecting target road. So the navigating parameters were adapted to the changing path. Based on a model of four-wheel intelligent vehicle, a path tracking simulation was performed. Then, the navigation system based on path tracking was designed by using two digital signal processors. The experiments showed the accuracy and robustness of the system.

Key words Intelligent vehicle, Vision navigation, Path tracking, Adaptive navigation parameters

引言

基于路径跟踪的智能车辆视觉导航, 由于路径设置灵活、导航原理简单等优点而得到广泛应用^[1~3]。其关键技术是计算机视觉技术和智能控制技术^[4], 即首先利用机器视觉获取智能车辆前方的路面环境信息, 并通过智能控制技术使智能车辆自动沿规划的路径行走。

在路径识别方面, Goldbeck 等^[5]提出基于感兴趣区域(ROI)的方法。该方法提高了车道线识别效

率, 但 ROI 的选取至关重要, 选择不当将会导致算法失效; 文献[6]提出了一种基于机器学习的车道线提取方法。其主要贡献在于详细讨论了几种主流分类方法对行驶标记检测的准确性和实时性, 但是该方法对车道识别的正确率仅为 80%; 文献[7]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。

在路径跟踪方面, 文献[8]通过构造 Lyapunov 函数设计出四轮移动机器人控制规律, 但此方法设

计复杂并依赖于精确的模型;文献[9]中基于车辆道路之间运动学关系提出了道路跟踪系统。该方法直观、物理意义明确,但是其控制器的参数整定易受智能车辆行驶速度影响;文献[10]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。

为提高路径识别的鲁棒性和实时性,本文对导航路径图像进行分区逐段识别,并进行分区二值化、噪声点搜索及滤波处理;为提高路径规划和控制的智能性和鲁棒性,在获取的动态路径图像中实时确定目标路径,对该目标路径提取导航参数,使之适应实时路径的变化;最后,进行仿真和试验验证。

1 导航路径识别

导航路径识别的基本原理是:对导航路径图像进行纵向分区,通过识别各个区域内的“路径段”,得到完整导航路径。因此,根据路径纵向连续性特征,先确定并识别导航路径中的第一个区域,得到第一个路径段;再沿纵向利用该已识别路径段估计相邻待识别区域内下一个路径段的可能位置区域,从而完成各分区路径段的识别以得到完整路径。

1.1 识别第一个区域

考虑到在获取的路径图像中,距离智能车辆最近的图像区域主要为路面部分,受到障碍、光线等的干扰较小,选取该区域为第一个识别区域,依次进行图像处理(图1)。

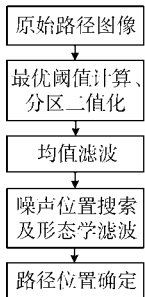


图1 导航路径识别的流程

Fig.1 Flow chart of path recognition

1.1.1 分区二值化

对各图像分区分别计算最优阈值,并二值化对应分区,具体方法见文献[11]。

1.1.2 滤波

经过二值化的路径图像包含点状噪声和碎屑状噪声。为此,首先进行均值滤波以去除较多的点状噪声;再对路径图像进行横向搜索,当搜索到白色像素点(可能的碎屑状噪声位置)时,进行形态学的腐蚀运算,从而去除碎屑状噪声以得到导航路径位置。由于均值滤波操作已经用较小的数据处理滤除了在

噪声中占较大比例的点状噪声,且在进行腐蚀运算时能够直接作用于可能的碎屑状噪声位置,无需对整个图像区域进行处理,因此图1所示流程的数据处理量较小,有利于系统的实时性。

1.2 识别后续路径各区域

由于纵向相邻的2个路径段在横向位置上的变化具有连续性,即横向位置变化不大。因此,利用已识别路径段估计相邻待识别区域内下一个路径段的可能位置区域,如图2所示。

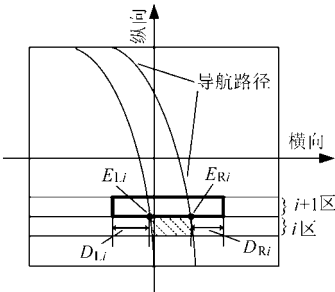


图2 估计临近区域路径段的可能位置

Fig.2 Position estimation of adjoining path segment

以路径图像中的*i*区和临近的*i+1*区为例,在完成*i*区内路径段(*i*区域内阴影区域)识别后,在识别*i+1*区时,首先确定*i+1*区内路径段的可能位置区域,即*i+1*区中由加粗直线封闭成的矩形区域。其宽度为*i+1*区的纵向宽度,其长度为

L_{i+1} = E_{Ri} - E_{Li} + D_{Li} + D_{Ri} \tag{1}

式中, E_{Li} 和 E_{Ri} 为*i*区域与*i+1*区域相邻处*i*区域路径段的左、右边缘点位置,经图像处理得到; D_{Li} 、 D_{Ri} 限定了*i+1*区路径段的可能范围,这里均取 $E_{Ri} - E_{Li}$ 。

因此,对于图1所示的图像处理流程,在识别第1个路径段时在整个图像宽度内进行;而对于后续各路径段识别,只在图2所示矩形区域内进行。这减小了需要处理的像素点个数,提高了系统实时性;同时,因为限定了待识别路径段的区域范围,也减小了误识别的可能性,提高了识别精度。

2 路径跟踪导航参数提取

在识别导航路径的基础上,根据导航参数对智能车辆进行转向和速度控制,从而实现对路径的自动跟踪。

2.1 固定导航参数提取

文献[12]对路径跟踪采用了固定导航参数提取,如图3所示。图中建立了2个图像处理区域,仅对这2个区域进行路径识别以提高实时性,并得到路径*l*₁和路径*l*₂。将*l*₁和*y*₁的交点*O*₁与*l*₂和*y*₂的交点*O*₂连接起来(*y*₁、*y*₂分别平分上、下两个图像

处理区域), 得到直线 l 作为目标路径; l 与 y'_w 的夹角 α , l 在 x'_w 轴上的截距 d 分别为智能车辆相对于目标路径的方向偏差和位置偏差, 即导航参数。

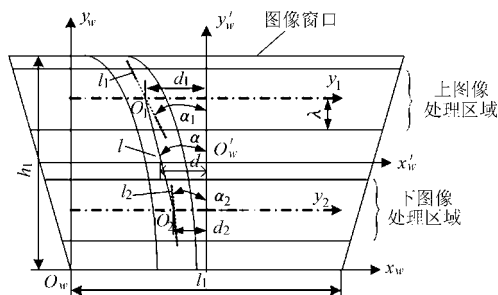


图3 固定导航参数和自适应导航参数的提取

Fig. 3 Acquisition of natural and adaptive navigation parameters

2.2 自适应导航参数提取

采用上述方法得到的路径固定为直线 l , 其提取到的导航参数相当于整个导航路径的平均值, 因此对动态变化的路径适应性较差。为此, 对上述方法进行改进: 将图3中的上、下图像处理区域内的路径分别视为远端路径和近端路径, 以远端路径和近端路径之间的“方位偏差量”作为导航路径变化程度的判定依据, 实时确定 y_1 轴的位置 (图3中 λ 值), 即 y_2 轴位置不变, y_1 轴位置随方位偏差量实时变化, 从而得到变化的目标路径 l , 并对其进行导航参数的提取。

这样, 目标路径由远端路径 l_1 和近端路径 l_2 之间的方位偏差量 E 确定。 E 值包括 l_1 与 l_2 之间的方向偏差和位置偏差, 定义为

$$E = k |\alpha_1 - \alpha_2| + |d_1 - d_2| \quad (2)$$

式中 α_1, α_2 ——路径 l_1, l_2 的方向偏差, ($^\circ$)

d_1, d_2 ——路径 l_1, l_2 的位置偏差, cm

k ——方向偏差与位置偏差的换算系数

根据 E 值确定 y_1 轴的位置 (λ 值的大小, 单位为 m), 并得到目标路径和导航参数。其原理为: E 较大时, λ 较小; E 较小时, λ 较大。该方法可以解释为: 当 E 较小时, 说明近端路径和远端路径方位变化较小, 路径变化较平缓, 这时选定目标路径及提取的导航参数较侧重于远处路径, 有利于及时预见前方可能的路况变化; 当 E 较大时, 说明近端路径和远端路径之间方位变化较大, 路径变化较剧烈, 这时选定的目标路径及提取的导航参数较侧重于近处路径, 有利于提高跟踪精度。同时, 智能车辆的速度 v 也应该随 E 值变化而变化, 当 E 较大时, v 较小; E 较小时, v 较大。这样 E 较大时, 通过降低车速以提高跟踪精度; E 较小时, 车速较高以提高车辆行驶平均速度。

2.3 λ 值和车速的确定

λ 值和车速 v 由 E 值确定。 E 值存在两个临界值 E_1, E_2 ($0 < E_1 < E_2$)。当 $E_1 \leq E \leq E_2$, λ 和 v 随 E 变化而变化, 并按照 E 越大, v 和 λ 越小的原则。为保证该变化的连续性和平稳性, 同时兼顾处理速度, 其变化关系采用二次多项式函数。当 $E < E_1$ 或 $E > E_2$, v 和 λ 保持不变。即 E_1 对应 v 和 λ 的最大值, E_2 对应 v 和 λ 的最小值。 E_1, E_2 根据摄像机获取的路径长度、上下图像处理区域位置及大小等确定。因此得到 λ 和 v 的计算公式为

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_{\max} & (E < E_1) \\ m_1 (E - E_2)^2 + n_1 & (E_1 \leq E \leq E_2) \\ \lambda_{\min} & (E > E_2) \end{cases} \quad (3)$$

$$v = \begin{cases} v_{\max} & (E < E_1) \\ m_2 (E - E_2)^2 + n_2 & (E_1 \leq E \leq E_2) \\ v_{\min} & (E > E_2) \end{cases} \quad (4)$$

式中 m_1, m_2, n_1, n_2 ——常数, 且 m_1, m_2 大于零

$v_{\max}, v_{\min}$ ——智能车辆最高车速和最低车速

$\lambda_{\max}, \lambda_{\min}$ —— λ 的最大值和最小值, $\lambda_{\max}$ 取上

图像处理区域的高度, $\lambda_{\min}$ 取零
因为 E 的两个临界值 E_1, E_2 分别对应 v 和 λ 的最大值和最小值, 可得

$$\begin{cases} \lambda_{\max} = m_1 (E_1 - E_2)^2 + n_1 \\ \lambda_{\min} = n_1 \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} v_{\max} = m_2 (E_1 - E_2)^2 + n_2 \\ v_{\min} = n_2 \end{cases} \quad (6)$$

在 $E_1, E_2, v_{\max}, v_{\min}, \lambda_{\max}, \lambda_{\min}$ 确定后, m_1, m_2, n_1, n_2 即确定。由此得到导航参数 α, d 和智能车辆速度 v , 流程如图4所示。由于 E, λ 和 v 的计算较简单, 所以确定目标路径和导航参数的计算量较小, 在得到适应路径变化的导航参数的同时, 系统实时性较好。

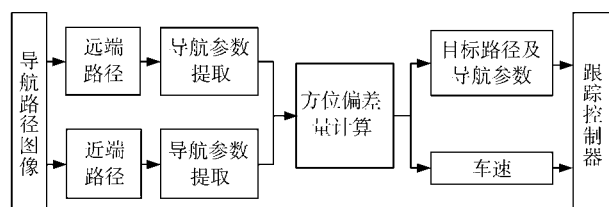


图4 自适应导航参数获取流程

Fig. 4 Process for obtaining adaptive navigation parameters

3 路径跟踪控制器的设计

3.1 智能车辆模型

建立四轮智能车辆模型, 后轮为驱动轮, 前轮为转向轮, 具体见文献[13]。

3.2 控制器设计及仿真结果

为检验实际路径跟踪效果,分别采用固定导航参数和自适应导航参数两种方法,进行路径跟踪仿真计算。

3.2.1 前轮转角

按前述方法分别提取固定导航参数法和自适应导航参数法的导航参数,并采用 PID 控制算法确定前轮转角 γ 。在 k 时刻时,其增量式 PID 算法表达式为

$$\begin{aligned} \gamma(k) = & \gamma(k-1) + K_{I\alpha}\alpha(k) + K_{P\alpha}[\alpha(k) - \\ & \alpha(k-1)] + K_{D\alpha}[\alpha(k) - 2\alpha(k-1) + \\ & \alpha(k-2)] + K_{Id}d(k) + K_{Pd}[d(k) - d(k-1)] + \\ & K_{Dd}[d(k) - 2d(k-1) + d(k-2)] \end{aligned} \quad (7)$$

式中 $\alpha(k)$ 、 $d(k)$ 、 $\gamma(k)$ —— k 时刻时的方向偏差、位置偏差、车辆前轮转角

$K_{I\alpha}$ 、 $K_{P\alpha}$ 、 $K_{D\alpha}$ 、 K_{Id} 、 K_{Pd} 、 K_{Dd} ——PID 控制器参数

3.2.2 车速计算

对于固定导航参数法,智能车辆的车速 $v(k)$ 为

$$\begin{cases} v(k) = v_0 - p|\gamma(k)| \\ v(k) \geq v_{\min} \end{cases} \quad (8)$$

式中 v_0 ——智能车辆初始速度

p ——大于零的参数

对于自适应导航参数法,按式(4)计算。

图 5 显示两种方法智能车辆跟踪平缓路径和弯曲路径的仿真结果。图 6、图 7 分别为采用自适应导航参数法跟踪弯曲路径时的方位变化量 E 变化曲线和车速 v 变化曲线。

由图 5 可见,相对于固定导航参数提取,自适应导航参数法具有较小的路径跟踪误差,在跟踪弯曲路径时其优势更加明显。相关控制参数为: $k = 1$, $v_0 = 5 \text{ m/s}$, $v_{\min} = 2 \text{ m/s}$, $p = 0.1$, $K_{I\alpha} = 5$ 、 $K_{P\alpha} = 13$, $K_{D\alpha} = 0.4$, $K_{Id} = 6$, $K_{Pd} = 13$, $K_{Dd} = 0.2$, $E_1 = 5$, $E_2 = 25$, $\lambda_{\max} = 5$, $\lambda_{\min} = 0$, 由式(5)和(6)可得 $m_1 = 10.025$, $n_1 = 0$, $m_2 = 0.0075$, $n_2 = 2$ 。

4 智能车辆系统设计

整个智能车辆系统由智能车辆车体(图 8)、路径图像识别系统、路径跟踪控制系统组成。路径图像识别系统主要由 CCD 摄像机、DSP 开发板 DEC643 及其仿真器组成,完成路径图像的实时识别^[11],如图 9 所示。路径跟踪控制系统(图 10)根据路径图像识别系统发送的导航参数,完成路径跟踪控制,包括前轮转向控制、后轮驱动和制动控制,以及车速反馈控制。

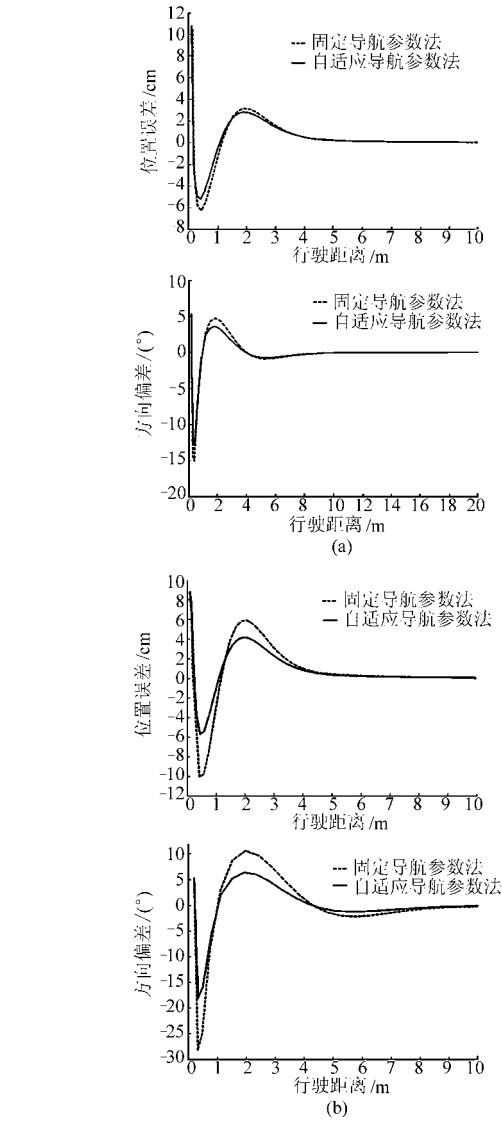


图 5 智能车辆路径跟踪误差
Fig. 5 Tracking errors of intelligent vehicle
(a) 平缓路径 (b) 弯曲路径

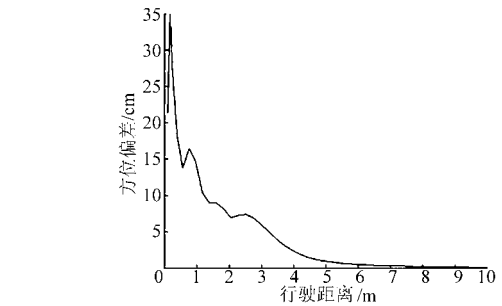


图 6 弯曲路径跟踪时方位偏差
Fig. 6 E values of path tracking

4.1 前轮转向系统

由前轮转向机构、步进电动机、步进电动机驱动器、DSP 开发板 F2812 等组成。步进电动机驱动器驱动步进电动机旋转,前轮转向机构将步进电动机的旋转运动转为智能车辆前轮的转向运动。其控制主要是步进电动机旋转方向、转角大小的控制,通过

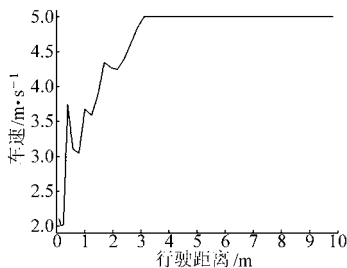


图 7 弯曲路径跟踪时车速

Fig. 7 Vehicle speed of curve path tracking



图 8 智能车辆车体

Fig. 8 Intelligent vehicle system



图 9 路径图像识别系统

Fig. 9 Image processing system for path recognition

1. 摄像头 2. 液晶显示器 3. 643 开发板

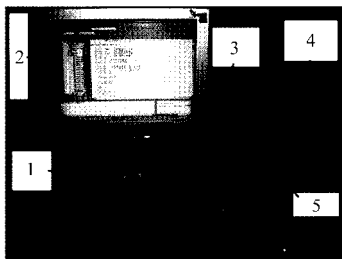


图 10 路径跟踪控制系统

Fig. 10 Control system for path tracking

1. 外围电路板 2. 液晶显示器 3. F2812 开发板 4. 工业控制计算机 5. 仿真器

F2812 的事件管理器实现。

4.2 后轮驱动和制动系统

由直流驱动电动机、车速检测装置、外围驱动电路、F2812 等组成。直流电动机的调速通过 PWM 方式实现。使用 F2812 开发板的事件管理器模块产生 PWM 方波,并与场效应管 K1、K2 及其驱动器 TLP250 组成直流电动机控制电路,如图 11 所示。

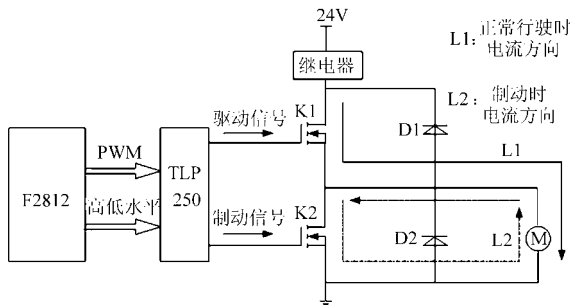


图 11 智能车辆驱动电动机的驱动/制动电路

Fig. 11 Driving and braking principles of motors controlling the intelligent vehicle

4.3 车速反馈控制系统

为检测智能车辆车速,分别在智能车辆的 2 个驱动轮处同轴安装一个铁质齿轮盘,通过检测齿轮盘的转速可以得到驱动轮的转速。将驱动轮旋转产生的脉冲信号送入 F2812 开发板的捕获引脚,并配合定时器计算出车速,实现车速反馈控制。

5 实车试验

在完成导航路径识别系统和路径跟踪控制系统的分别设计和调试后,进行路径跟踪实车试验。所有的设备实现车载,设备所需电力由直流蓄电池及逆变器提供。

5.1 路径识别

在整幅路径图像中识别出远端路径和近端路径,根据它们的方位偏差量确定目标路径和导航参数,并将导航参数通过串口发送给路径跟踪控制系统。整个路径图像大小为 576×720 (像素),近端路径和远端路径的高度各为 125 像素。将这两段路径各分成 25 个子区域,每个子区域为 5×720 像素。图 12 显示了路径图像识别结果。其中,图 12a 为原始图像;图 12b 为采用分区阈值法的识别结果,可见在上图像处理区域中不能有效识别导航路径;图 12c 为采用前述路径分区逐段识别法的结果。其在识别上、下图像处理区域的第一个区域时,对整个区域进行处理;之后仅在较小的矩形区域进行处理,且识别效果良好;图 12d 显示了对图 12a 的上图像处理区域分别采用分区二值化法和前述路径逐段识别法得到的各分区二值化阈值。由图可见,分区阈值法从第七分区开始(最下方为第一分区),计算的二值化阈值偏小,因此将较暗的路面非导航路径部分也二值化为白色,导致无法成功识别。

5.2 路径跟踪

采用固定导航参数法和自适应导航参数法,分别对平缓路径和弯曲路径进行跟踪试验。采用前述

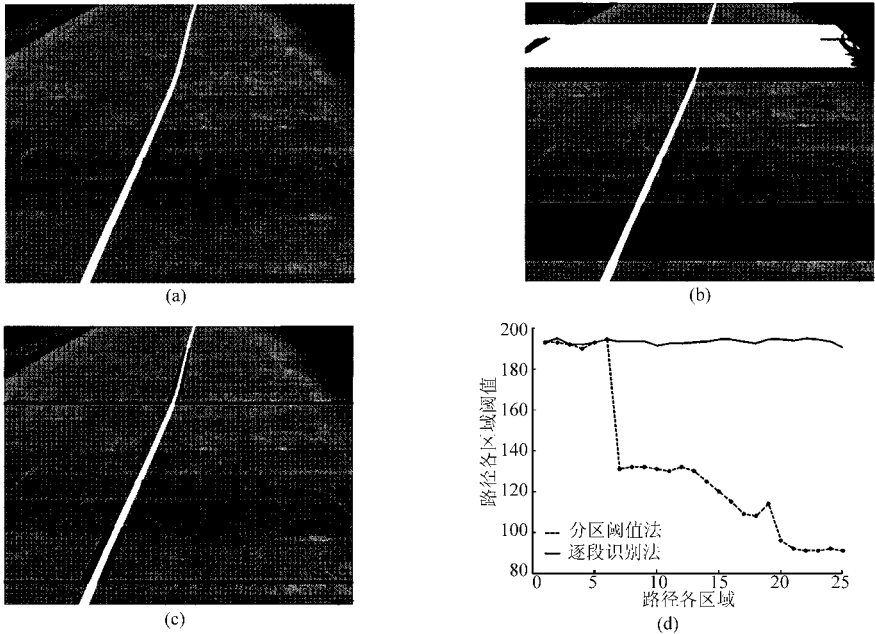


图 12 导航路径图像的识别结果

Fig. 12 Path recognition results

(a) 原图 (b) 分区二值化结果 (c) 路径分区逐段识别结果 (d) 路径逐段识别的各区域二值化阈值

相关控制参数,车速在 5 m/s 时的路径跟踪结果如表 1 所示。可见,采用自适应导航参数提取时,路径跟踪误差较小,在跟踪弯曲路径时其效果更好。

表 1 跟踪位置平均偏差 ($v_0=5\text{ m/s}$)

Tab.1 Tracking errors			m
导航路径	固定导航参数	自适应导航参数	
平缓	0.061	0.045	
弯曲	0.117	0.070	

6 结束语

为提高智能车辆路径识别和跟踪的鲁棒性和实时性,在路径图像识别上采用了分区二值化、噪声搜索及滤波、分区逐段识别方法;并在动态路径图像中实时确定目标路径,使得提取的导航参数能够适应实时路况的变化。仿真和实车试验结果表明,提出的路径识别和跟踪控制方法对导航路径的识别和跟踪具有较好的鲁棒性和实时性。

参 考 文 献

1 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 Wuwei, Sun Haitao, Li Bichun, 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. (in Chinese)

2 沈峤,李舜酩,柏方超,等. 结构化道路中车道线的单目视觉检测方法[J]. 仪器仪表学报,2010,31(2):397~403.
Shen Huan, Li Shunming, Bo Fangchao, et al. Structural road oriented lane detection approach using monocular camera[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(2): 397~403. (in Chinese)

3 赵熙俊,陈慧岩. 智能车辆路径跟踪横向控制方法的研究[J]. 汽车工程,2011,33(5):382~387.
Zhao Xijun, Chen Huiyan. A study on lateral control method for the path tracking of intelligent vehicles[J]. Automotive Engineering, 2011, 33(5): 382~387. (in Chinese)

4 李庆中,顾伟康,叶秀清,等. 移动机器人路径跟踪的智能预瞄控制方法研究[J]. 机器人,2002,24(3):252~255.
Li Qingzhong, Gu Weikang, Ye Xiuqing, et al. A study of intelligent preview control method for mobile robot road following [J]. Robot, 2002, 24(3): 252~255. (in Chinese)

5 Goldbeck J, Huertgen B, Ernst S, et al. Lane following combining vision and DGPS[J]. Image and Vision Computing, 2000, 18(5):425~433.

6 Kim Z W. Robust lane detection and tracking in challenging scenarios[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation System,2008,9(1):16~26.

- 2 Stoll A. Automatic operation planning for GPS-guided machinery[C]//Proceedings of 4th European Conference on Precision Agriculture, 2003:657~664.
- 3 Zhao Chunjiang, Meng Zhijun, Wang Xiu. Development of an object-oriented program for variable rate application performance testing[C]//2004 CIGR International Conference, Beijing, China, 2004.
- 4 Vougioukas S, Blackmore S, Nielsen J, et al. A two-stage routeplanning system for autonomous agricultural vehicles[C]//Proceedings of the 5th European Conference on Precision Agriculture, 2005: 597~604.
- 5 Timo Oksanen, Arto Visala. Coverage path planning algorithms for agricultural field machines[J]. Journal of Field Robotics, 2009, 26(8):651~668.
- 6 Blackmore S, Fountas S, Vougioukas S, et al. A method to define agricultural robot behaviours[C]//Automation Technology for Off-road Equipment, Proceedings of the 2004 Conference, 2004:155~161.
- 7 Oksanen T, Kosonen S, Visala A. Path planning algorithm for field traffic[C]//2005 ASABE Annual Meeting, Paper Number 053087, 2005.
- 8 苗玉彬, 王明军. 农业车辆导航系统中路径规划策略的研究进展[J]. 农机化研究, 2011, 33(5):12~15.
Miao Yubin, Wang Mingjun. Research on path planning strategy in agricultural vehicle guidance system[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(5):12~15. (in Chinese)
- 9 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 Jin, Chen Wuwei, Li Bichun, 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. (in Chinese)
- 10 蔡晋辉, 才辉, 张光新, 等. 复杂环境下自动导引车路径识别算法[J]. 农业机械学报, 2011, 42(10):20~24, 89.
Cai Jinhui, Cai Hui, Zhang Guangxin, et al. Guidance line identification algorithm for AGV in complex environment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(10):20~24, 89. (in Chinese)
- 11 罗锡文, 张智刚, 赵祚喜, 等. 东方红 X-804 拖拉机的 DGPS 自动导航控制系统[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11):139~145.
Luo Xiwen, Zhang Zhigang, Zhao Zuoxi, et al. Design of DGPS navigation control system for Dongfanghong X-804 tractor [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(11):139~145. (in Chinese)
- 12 Jin Jian, Tang Lie. Optimal path planning for arable farming [C]//2006 ASABE Annual Meeting, Paper Number 061158, 2006.

(上接第 24 页)

- 7 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 Luoshan. Study of precautionary assistance system of lane keeping based on monocular vision[D]. Shanghai: East China University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)
- 8 李胜, 马国梁, 胡维礼. 基于 backstepping 方法的车式移动机器人轨迹跟踪控制[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2005, 35(2):248~252.
Li Sheng, Ma Guoliang, Hu Weili. Tracking control of car-like mobile robot based on backstepping[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2005, 35(2):248~252. (in Chinese)
- 9 Urmson C, Ragusa C, Ray D, et al. A robust approach to high-speed navigation for unrehearsed desert terrain[J]. Journal of Field Robotics, 2006, 23(8):467~508.
- 10 Wu Jinbo, Xu Guohua, Yin Zhouping. Robust adaptive control for a nonholonomic mobile robot with unknown parameters[J]. Journal of Control Theory and Applications, 2009, 7(2):212~218.
- 11 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 Jin. 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. (in Chinese)
- 12 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 Jin, Chen Wuwei, Li Bichun, 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. (in Chinese)
- 13 李进, 陈无畏, 李碧春. 基于行为的智能车辆导航控制体系结构[J]. 机械工程学报, 2007, 43(7):162~167.
Li Jin, Chen Wuwei, Li Bichun. Activity-based control architecture for intelligent vehicle navigation[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(7):162~167. (in Chinese)
- 14 丁幼春, 王书茂. 联合收获机视觉导航控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(5):137~142.
Ding Youchun, Wang Shumao. Vision navigation control system for combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(5):137~142. (in Chinese)