

南京航空航天大学
论文集

(二〇一〇年) 第10册

能源与动力学院

(第5分册)

南京航空航天大学科技部编

二〇一一年五月



NUAA2011039767

Z427
1033 (2010) - (10)

能源与动力学院

205



2011039767

目录

序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物、会议名称	年、卷、期
1	凌锐 毛建国 沈崐 张延召 顾筠	硕士生 副高 中级 硕士生 副教授	022 022 022 022 江苏电大	基于视觉的车道保持控制稳定性分析	重庆理工大学学报 (自然科学版)	2010年24卷11期
2	李忠 毛建国 吴学旺 卢文玉 张俊秀 陆广敏	硕士生 副高 本科生 硕士生 硕士生 硕士生	022 022 022 022 022 022	基于DSP Builder的视觉目标跟踪实现	重庆理工大学学报 (自然科学版)	2010年24卷8期
3	李忠 毛建国 吴学旺 卢文玉 陆广敏	硕士生 副高 本科生 硕士生 硕士生	022 022 022 022 022	Real-time target tracking based on S0PC	International Conference Electrical Engineering and Automatic Conference(ICEEAC2010) 会议	2010年淄博
4	毛建国 武超	副高 硕士生	022 022	Pedestrian detection via wavelet fractal signature and support vector machine	Review Form of International Conference on Computer Application and System Modeling(ICCASM2010) 会议	2010年太原
5	毛建国 柏方超 沈崐 周华鹏 李芳培 卢文玉	副高 硕士生 中级 硕士生 硕士生 硕士生	022 022 022 022 022 022	复杂场景下动态目标视觉跟踪方法	传感器与微系统	2010年29卷3期
6	毛建国 李芳培 沈崐 周华鹏 柏方超 李忠	副高 硕士生 中级 硕士生 硕士生 硕士生	022 022 022 022 022 022	基于CAN网络的超声波测距模块设计	压电与声光	2010年32卷5期
7	张延召 毛建国 沈崐 顾筠 凌锐 张慧豫	硕士生 副高 中级 副教授 硕士生 硕士生	022 022 022 江苏电大 022 022	基于自适应滑膜控制的智能车车道保持分析	重庆理工大学学报 (自然科学版)	2010年24卷8期
8	卢文玉 毛建国 李忠 武超 张延召 凌锐	硕士生 副高 硕士生 硕士生 硕士生 硕士生	022 022 022 022 022 022	车辆高速驾驶临界安全距离	重庆理工大学学报 (自然科学版)	2010年24卷9期
9	周华鹏 毛建国 顾筠 李芳培 柏方超 卢文玉	硕士生 副高 副教授 硕士生 硕士生 硕士生	022 022 江苏电大 022 022 022	高精度电容式压力传感器测量方法	传感器与微系统	2010年29卷2期
10	林棻	中级	022	A new method for estimating road friction coefficient	2010 International Conference on Manufacturing Engineering and Automation 会议	2010年广州
11	朱帆 赵义群	硕士生 正高	022 022	Hypermesh和GAMBIT在CFD应用中的优势对比研究	机械科学与技术	2010年29卷9期
12	赵义群	正高	022	汽车动力学中若干关键状态和参数估计研究的现状与发展	中国机械工程	2010年21卷10期
13	牛礼民 赵义群 杨攀 李佳	博士后 正高 硕士生 硕士生	022 022 022 022	单轴并联式混合动力客车动力总成匹配	山东大学学报(工学版)	2010年40卷4期
14	杨国权 赵义群 郝鹏飞	博士生 正高 硕士生	022 022 022	车辆虚拟试验场的路面建模方法研究	系统仿真技术	2010年6卷3期

目录

序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物、会议名称	年、卷、期
15	杨国权 赵又群	博士生 正高	022 022	Motion stability analysis of vehicle with four wheel steering system considering tire nonlinearity	The 3rd International Congress on Image and Signal Processing 会议	2010年烟台
16	宋崇智 赵又群	博士生 正高	022 022	Multi-objective optimization design of vehicle suspension based on stackelberg	The 6th International Conference on Natural Computation 会议	2010年烟台
17	杨国权 赵又群	博士生 正高	022 022	Fuzzy control of vehicle suspension system	International Conference on Electrical Engineering and Automatic Control 会议	2010年淄博
18	黄建兴 赵又群	硕士生 正高	022 022	人-车闭环操纵稳定性综合评价及其虚拟样机实现	机械工程学报	2010年46卷10期
19	崔金一 赵又群 阮米庆 黄杉	硕士生 正高 副高 硕士生	022 022 022 上海交大	钢板弹簧柔性体建模及整车性能仿真	农业装备与车辆工程	2010年3期
20	赵又群 林莹	正高 中级	022 022	基于UKF算法的汽车状态估计	中国机械工程	2010年21卷5期
21	宋崇智 赵又群 谢能纲 王璐	博士生 正高 教授 副教授	022 022 安徽工大 安徽工大	Multiobjective optimization of eight-dof vehicle suspension based on game theory	Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics	2010年27卷2期
22	陶运正 赵又群	硕士生 正高	022 022	汽车零部件储备优化模型与分析系统研究	现代交通技术	2010年7卷3期
23	邱长俊 阮米庆 郝鹏飞	硕士生 副高 硕士生	022 022 022	标准路面谱重构及其应用	机械工程师	2010年1期
24	刘某某 阮米庆 王晨	硕士生 副高 硕士生	022 022 022	基于MATLAB电动汽车仿真研究	轻型汽车技术	2010年3期
25	安木金 李舜酩 张袁元 刘建娅	硕士生 正高 博士生 硕士生	022 022 022 022	多相关子系统输入中输入的相干性分析	中国机械工程	2010年21卷21期
26	鲍庆勇 李舜酩 沈岺 尚伟燕	硕士生 正高 中级 博士生	022 022 022 022	基于行为融合的移动机器人自主避障算法	传感器与微系统	2010年29卷5期
27	雷衍斌 李舜酩 郝青青	硕士生 正高 硕士生	022 022 022	一种基于累积量的盲源分离新方法及其应用	中国机械工程	2010年21卷7期
28	李爱娟 李舜酩 魏民祥 郭新民 鲍晓峰 张坤	博士生 正高 正高 教授 研究员 教授	022 022 022 山东农大 中科院 山东农大	车用柴油机冷EGR系统的设计与试验	南京航空航天大学学报	2010年42卷5期
29	李舜酩 沈岺 鲍庆勇	正高 中级 硕士生	022 022 022	未知环境下基于行为控制的智能车辆路径规划研究	传感器与微系统	2010年29卷4期
30	李舜酩 吴铁鹰	正高 副高	022 021	大学生卓越人才培养模式探索——“飞行器动力工程专业培优班”建设	南京航空航天大学学报（社会科学版）	2010年12卷3期
31	李舜酩 王亚彤	正高 副高	022 院机关	抓好创新基地建设促进大学生创新能力提高	实验室研究与探索	2010年21卷7期
32	缪小冬 李舜酩 沈岺 刘建娅 安木金	博士生 正高 中级 硕士生 硕士生	022 022 022 022 022	路面车辆的视觉检测方法	传感器与微系统	2010年29卷2期
33	张德满 李舜酩 李凯 鲍晓峰 王猛 秦宏宇	博士生 正高 副研员 研究员 工程师 工程师	022 022 中国环 境科学 研究院	DOC辅助DPF再生方法研究	机械工程学报	2010年46卷24期
34	张德满 李舜酩 门秀花	博士生 正高 博士生	022 022 022	单缸发动机消声器压力损失CFD研究	华南理工大学学报（自然科学版）	2010年38卷3期
35	张德满 李舜酩 李凯 鲍晓峰 王猛 秦宏宇	博士生 正高 副研员 研究员 工程师 工程师	022 022 中国环 境科学 研究院	冷却水温度对柴油机污染物排放的影响	内燃机学报	2010年28卷6期

目录

序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物、会议名称	年、卷、期
36	李舜酩 辛江慧 安木金 张袁元	正高 博士生 硕士生 硕士生	022 022 022 022	Application of fuzzy logic and support vector machine to the control of exploration vehicle	The 6th International Conference on Natural Computation 会议	2010年烟台
37	杜建建 李舜酩	硕士生 正高	022 022	Effects of structural damping on vibration response of compressor blade	The 3rd International Symposium on Jet Propulsion and Power Engineering 会议	2010年南京
38	安木金 李舜酩 辛江慧 陈茉莉 张德满 孟浩东	硕士生 正高 博士生 中级 博士生 博士生	022 022 022 022 022 022	Research of cab vibratory response using multi correlated subsystem-excitations system modeling	International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering 会议	2010年长春
39	张袁元 李舜酩 刘建姬 安木金 刘晓伟 辛江慧	博士生 正高 硕士生 硕士生 硕士生 硕士生	022 022 022 022 022 022	The testing and improving of the heavy truck vibration	International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering 会议	2010年长春
40	汪东坪 李舜酩	博士生 正高	022 022	Design of power system for hybrid electric urban light commercial vehicle	International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering 会议	2010年长春
41	沈 垲 李舜酩 柏方超 缪小冬 李芳培 卢文玉	中级 正高 硕士生 硕士生 硕士生 硕士生	022 022 022 022 022 022	融合多种特征的路面车辆检测方法	光电子·激光	2010年21卷1期
42	沈 垲 李舜酩 柏方超 李芳培 缪小冬	中级 正高 硕士生 硕士生 硕士生	022 022 022 022 022	结构化道路中车道线的单目视觉检测方法	仪器仪表学报	2010年31卷2期
43	沈 垲 李舜酩 周华鹏 李芳培 柏方超 李忠	中级 正高 硕士生 硕士生 硕士生 硕士生	022 022 022 022 022 022	高精度铂电阻温度测量新方法	压电与声光	2010年32卷5期
44	沈 垲 李舜酩 柏方超 缪小冬 李芳培	中级 正高 硕士生 硕士生 硕士生	022 022 022 022 022	路面车辆实时检测与跟踪的视觉方法	光学学报	2010年30卷4期
45	赵国柱 魏民祥 杨正林	博士生 正高 副高	022 022 022	城市电动客车再生ABS系统的建模与仿真	南京航空航天大学学报	2010年42卷2期
46	荆友录 魏民祥 温卫东 石志伟	博士生 正高 正高 高工	022 022 021 山东大学	Multi-objective optimisation of steel frame of solid garage based on genetic algorithm	International Journal of Modeling, Identification and Control	2010年9卷
47	李冰林 魏民祥	博士生 正高	022 022	一种新的变步长自适应陷波器算法及应用	机械科学与技术	2010年29卷12期
48	李 军 魏民祥	硕士生 正高	022 022	基于“蝇眼”传感网络的大型车辆防撞系统研究	农业装备与车辆工程	2010年3期
49	徐 哲 魏民祥 汪洋 魏建伟	博士生 正高 硕士生 博士生	022 022 022 022	Deesign of direct yaw moment control system to enhance vehicle stability basedon fuzzy logic	International Conference on Electrical Engineering and Automatic Control 会议	2010年淄博
50	魏建伟 魏民祥	博士生 正高	022 022	基于LMI的EPS干扰抑制控制器的设计	机械科学与技术	2010年29卷2期
51	汪洋 魏民祥	硕士生 正高	022 022	基于联合仿真的EHB系统缸压力模糊PID控制研究	公路与汽运	2010年6期
52	金智林 郭立书 赵又群 施瑞康	中级 高工 正高 高工	022 浙江亚太 022 浙江亚太	踏板感觉可控的汽车制动踏板模拟器研究	系统仿真学报	2010年22卷12期
53	何小明 陆建康	中级 硕士生	022 022	Pulse detonation engine test system	IEEE计算机应用与系统建模国际会议	2010年太原

基于视觉的车道保持控制稳定性分析

凌 锐, 毛建国, 沈 垺, 张延召, 顾 筠

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 基于预瞄跟随理论和二自由度车辆模型, 提出了一种自适应模糊 PID 的车道保持控制方法。将经典 PID 控制与专家模糊逻辑有效地结合, 通过对反馈状态加入调整因子, 有效并实时地为误差和误差导数合理地分配权重系数, 从而实现对反馈状态的优化。用 Matlab 对所提出的车道保持控制方法进行了仿真, 取得了较好的控制效果。与传统 PID 算法进行了比较, 结果表明, 所提出方法较传统 PID 控制器具有更优的动态响应性能和更佳的鲁棒性。

关 键 词: 智能车辆; 车道保持; 机器视觉; 模糊控制

中图分类号: U461

文献标识码: A

文章编号: 1674- 8425(2010) 11- 0012- 07

Research on Stability of Vision-based Lane Keeping Controller

LING Rui MAO Jian-guo SHEN Huan ZHANG Yan-zhao GU Jun

(College of Energy & Power Engineering Nanjing University of Aeronautics & Astronautics Nanjing 210016 China)

Abstract This paper proposes a self-adjusting fuzzy PD algorithm by taking into account of 2-DOF vehicle lateral dynamic model and preview following theory. This algorithm combines classic PID control algorithm with expert fuzzy logic together. Meanwhile an adjustment factor is added to the feedback state. The factor allocates weight coefficients for error and error's derivatives in real time to keep the feedback state optimum. At last, the control method of the lane keeping is verified by the MATLAB simulation. The comparison results with the classic PD algorithm show that the proposed self-adjusting fuzzy PID controller is of great superiority, not only has better dynamic response, but also has better robustness.

Key words intelligent vehicle; lane keeping; machine vision; fuzzy logical control

近年来交通安全和交通效率已成为人们日益关注的焦点, 业内人士对智能交通系统 (ITS) 进行

了大量研究, 以期能够缓解交通压力, 降低交通事故发生率^[1]。自主高速公路是智能交通系统的一

收稿日期: 2010- 08- 05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50776044); 南京航空航天大学引进人才科研启动项目 (70205845)

作者简介: 凌锐 (1987-), 男, 江苏泰州人, 硕士研究生, 主要从事智能车辆控制方面研究。

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

个重要组成部分,而车道保持则是自主高速公路系统中车辆纵向与横向控制的关键技术之一。

对车道保持控制的研究主要有几种:PID控制器及基于PD进行改进的控制器、最优控制器、鲁棒控制器、基于李雅普诺夫稳定性的Backstepping控制方法等。文献[2]将道路曲率作为前馈,结合PID来控制侧偏位移和航偏角,由于PD控制器需要对控制对象建立精确的数学模型,且抗干扰能力不足,因此对无法建立精确模型的控制系统适用性不强;文献[3]通过最优控制方法来设计智能车自主导航控制,然而实现最优控制需要知道车辆在每一时刻的具体状态,在实际应用中难以满足。此外,这类方法随着维数的增大,计算复杂度会大增,因此实时性不佳,在实际应用中使用较少。文献[4]设计了一个 H_∞ 控制器来减小车辆和跟踪车道线的侧偏位移和航偏角。文献[5]提出了一种基于车辆位姿误差模型的积分误差Backstepping控制方法,但没有考虑车辆的动力学特性,也无法满足实际要求。对于复杂程度较高的被控对象,难以建立其精确的数学模型,控制过程中会存在大的延迟环节,导致简单的控制器无法满足要求,而复杂的控制器又不利于硬件实现。

模糊控制方法不依赖于被控对象的数学模型,只要求掌握现场操作人员和相关专家的经验、知识或者操作数据,在一定程度上模仿了人的控制,它不需要有准确地控制对象模型,根据实际系统的输入输出的结果数据,参考现场操作人员的运行经验,就可对系统进行实时控制,因此解决这类问题更具有优势。另外,与其他复杂的算法相比,模糊控制算法的硬件实现对微处理器的要求相对较低,便于硬件实现,目前模糊控制的硬件实现已经成功应用到智能车横向控制中^[6]。

基于如下事实:①车辆本身的质量及机械结构的偏差导致很难建立其精确的数学模型;②车道本身是未知的,无法用清晰的控制算法将其所有的状态都考虑进去。本文提出一种基于模糊PID的自适应控制器,不仅能根据车辆的实时状态在线调整 k_p 、 k_i 和 k_d 三个参数,并且针对不同车辆

行驶状态实时分配侧偏位移和航向角偏差的反馈权重系数,将反馈信息融合,得到更加合理的反馈状态量,从而提高控制器的响应速度。

1 车道线识别

要实现汽车自动驾驶,首要解决的问题就是获得当前车辆在车道中的位置信息。利用安装在车头的CCD传感器获得当前车道线的信息,结合图像处理相关算法可以提取出车道线,通过车辆坐标系和图像坐标系的坐标变换可获得车辆在现实车道中的位置及方位角。文献[7]提出了一种基于像素的车道线识别方法,实时提取沪宁高速白色车道线,获得道路的深度信息,为汽车实现车道保持提供了必要的前提条件。表1简要列出了车道线识别及图像处理得到的信息和实现车道保持控制需要的控制参数信息。

表1 车道保持控制参数和图像处理信息对照

视觉系统输出	控制输入参数
车道线表达式 $y = kx + b$	道路曲率 ρ
前向预瞄距离 L 处车道 中心线 $x = 0$ 的位置	侧偏位移 y_L 航偏角 ε_L

2 车辆动力学模型

由文献[8]可知,假设模型车和真实车辆都用二自由度简化模型表示,则模型车的动力学特性可以代替真实车辆的动力学特性。为了得到仿真需要的车辆动力学模型,假设^[9]:

- 1) 车辆只作平行于地面的平面运动,即车辆沿 z 轴的位移,绕 y 轴的俯仰角与绕 x 轴的侧倾角均为零;
- 2) 车辆沿 x 轴的方向速度 u_x 视为定值;
- 3) 车辆的横向加速度值在 $0.4g$ 以下,轮胎的侧偏特性处于线性范围内;
- 4) 忽略空气和侧风的影响;
- 5) 忽略左右车轮轮胎由于载荷变化而引起

的轮胎特性的变化。

这样实际的汽车便简化成一个二自由度的模型(图1)。该模型是由前后2个有侧向力的轮胎支承于地面、具有侧向及横摆运动的二自由度汽车模型。

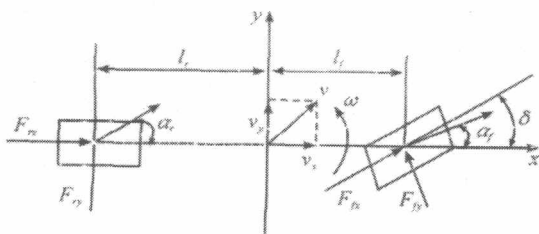


图1 简化车辆模型

在较小的纵向加速度和转向角的前提下,汽车的纵向动力学和横向动力学可以解耦^[10]。将车辆的前面2个车轮和后面2个车轮分别固结在一起看作一个车轮,在固结在车辆重心的笛卡尔坐标系下进行受力分析,得到简化的车辆模型的状态方程:

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_y \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{c_f + c_r}{m v_x} & \frac{l_r c_r - l_f c_f}{m v_x} - v_x \\ \frac{l_r c_r - l_f c_f}{I_\phi v_x} & -\frac{l_f^2 c_f + l_r^2 c_r}{I_\phi v_x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_y \\ \phi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{c_f}{m} \\ \frac{l_f c_f}{I_\phi} \end{bmatrix} \delta \quad (1)$$

式中: \$\delta\$ 表示前轮转角; \$v_x\$ 表示车辆沿 \$x\$ 轴方向的速度; 状态量 \$v_y\$ 和 \$\phi\$ 分别表示车辆的横向速度和横摆角速度; 其余参数的含义及取值见表2。

表2 模型车参数^[8]

模型车参数	参数含义	参数取值
\$m\$	模型车总重	6 52 kg
\$l_f\$	前轴距	0 155 m
\$l_r\$	后轴距	0 235 m
\$c_f\$	前轮侧向刚度	96 N/rad
\$c_r\$	后轮侧向刚度	65 N/rad
\$I_\phi\$	绕 \$z\$ 轴转动惯量	0 183 0 kg·m ²

视觉导航中当车辆前向预瞄距离为 \$L\$ 时,车辆和车道中心线的几何位置关系可以由图2得出。车辆的预瞄运动学模型为

$$\begin{cases} y_L = v_y (\epsilon_L - v_y) - \phi L \\ \epsilon_L = v_x \rho - \phi \end{cases} \quad (2)$$

式中: \$\rho\$ 表示预瞄点处的车道中心线曲率; \$y_L\$ 和 \$\epsilon_L\$ 分别表示预瞄点到车道中心线的横向位移偏差和预瞄点处车头方向与道路切线夹角的正切值。可以看到车道保持的控制实际上转化成了控制 \$y_L\$ 和 \$\epsilon_L\$ 使得 \$y_L\$ 和 \$\epsilon_L\$ 都不断趋于零。

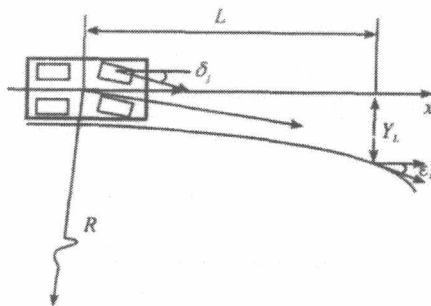


图2 车辆预瞄模型

结合车辆横向动力学方程和预瞄模型方程,可以得到一个线性状态空间方程:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases} \quad (3)$$

式中: 状态变量 \$x = [v_y \ \phi \ y_L \ \epsilon_L]^T\$, 系统矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{c_f + c_r}{m v_x} & \frac{l_r c_r - l_f c_f}{m v_x} - v_x & 0 & 0 \\ \frac{l_r c_r - l_f c_f}{I_\phi v_x} & -\frac{l_f^2 c_f + l_r^2 c_r}{I_\phi v_x} & 0 & 0 \\ 1 & L & 0 & v_x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{c_f}{m} \\ \frac{l_f c_f}{I_\phi} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

3 车道保持控制器设计

3.1 模糊 PD 控制器

模糊控制是利用反馈的状态量与控制的目标量进行比较,得出误差和误差的导数,再经过模糊推理得到控制器输出的一种控制方法。模糊 PID 本质上是一种 PD 控制,一般意义上的 PD 控制只有 1 组 PD 参数,因此对于时变系统控制效果不尽如人意,而自适应模糊 PID 控制器则是用反馈的状态量和给定量的误差 e 和误差的导数 ec 作为输入,经过模糊推理产生 k_p , k_i 和 k_d 参数,可以满足不同时刻的误差 e 和误差变化 ec 对 PID 参数自整定的要求,即利用模糊控制规则在线调整 PID 参数^[11-12]。

3.2 加入修正因子的模糊 PID 控制器

由于模糊控制器一般只适用于单变量系统,而本文的仿真有 2 个状态反馈量 y_L 和 ε_L ,因此在反馈状态中引入一个调整因子 α ,使得实际状态反馈量 $y \triangleq \alpha y_L + (1 - \alpha) \varepsilon_L$, α 根据车辆的实时状态合理分配 y_L 和 ε_L 权重系数。例如,当 y_L 偏差较大而 ε_L 较小时,则 α 取接近于 1 的较大值,这样便可以根据车辆实时运动的状态来控制车辆,达到更加优越的控制效果。加入调整因子的模糊 PID 控制器结构如图 3 所示。

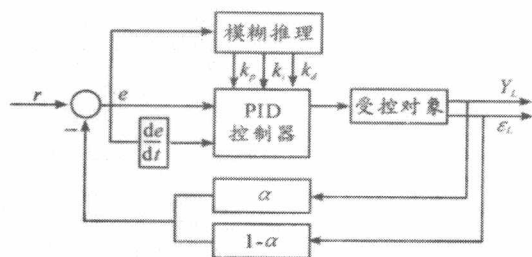


图 3 带调整因子的模糊 PID 控制结构

3.3 模糊控制器设计

1) 输入输出变量模糊化。本文设计的模糊控制器是两输入三输出,输入误差及误差的导数分别为 e 和 ec ,论域分别是 $[-0.3 \ 0.3]$ 和 $[-2.5 \ 2.5]$,输出的是 PID 控制器的 3 个参数

k_p , k_i 和 k_d , 其论域分别为 $[1 \ 3]$, $[0 \ 0.15]$ 和 $[0 \ 2]$ 。误差 e 和误差的导数 ec 的语言变量值分别取为 $\{NBE, NME, NSE, ZE, PSE, PME, PBE\}$ 和 $\{NBde, NMde, NSde, Zde, PSde, PMde, PBde\}$, k_p , k_i 和 k_d 的语言变量值分别取为 $\{Nk_p, Zk_p, Pk_p\}$, $\{Nk_i, Zk_i, Pk_i\}$ 和 $\{Nk_d, Zk_d, Pk_d\}$ 。隶属度函数见图 4。

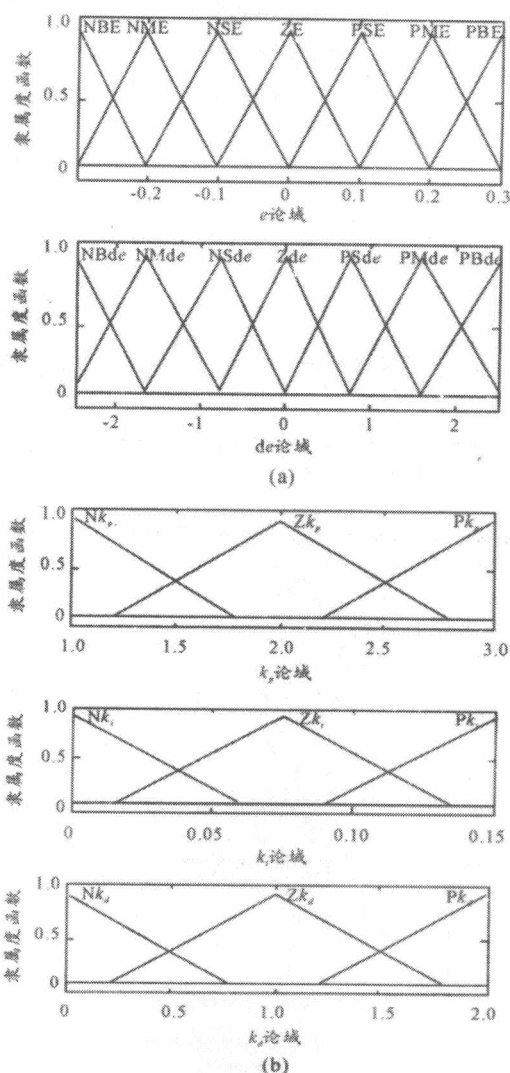


图 4 输出变量的隶属度函数

2) 模糊控制规则。模糊控制规则是基于手动控制策略,而手动控制策略是人们长期经验累积逐渐形成的一种知识集合。手动控制就是对被控对象的一些观察分析,操作者根据自己的经验做出控制决策,从而达到控制目的。利用语

言变量和模糊集合论的概念可以把手动控制转化为数值计算,由计算机来完成推理决策过程。利用语言归纳手动控制的过程,实际上就是建立模糊控制规则的过程。表3是输出量 k_p 的模糊控制规则,当误差较大时,选择较大的 k_p ,以获得更快的响应速度,限于篇幅; k_i 和 k_d 就不再赘述。

3) 模糊推理和去模糊化。模糊推理采用Mamdani直接推理法,直接求出由输入语言变量的论语元素对前件的强度,然后映射到后件,得到输出量的模糊集合。最后用重心法求出输出量的清晰值。

重心法的公式为

$$C = \frac{\sum_i [\mu_U(c_i) \times c_i]}{\sum_i \mu_U(c_i)} \quad (4)$$

式中: $\mu_U(a)$ 是对应元素 a 的隶属度; C 为输出的精确量值。

表3 k_p 模糊控制规则

ec	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	P	P	P	P	Z	Z	Z
NM	P	P	P	Z	Z	Z	Z
NS	P	P	Z	Z	Z	Z	N
Z	P	Z	Z	Z	Z	N	N
PS	Z	Z	Z	Z	N	N	N
PM	Z	Z	Z	N	N	N	N
PB	Z	Z	N	N	N	N	N

4 仿真结果与分析

本文的仿真对象为1:8的模型车,由表1的具体车体参数建立起系统的状态空间方程和输出方程。为了验证本文提出方法的优越性,在Matlab R2008a下建立仿真环境,与文献[13]中设计的PID控制器进行对比。为使仿真结果具有可比性,将文献[13]中车辆的有关参数替换成本文模型车参数,车道中心线设为 $x=0$ 的直线,模型车的初始位置为车道线上边0.2m处,航向角为0.2rad,左偏为负,即小车初始状态

$$x_0 = [0 \ 0 \ 0 \ 2 \ -0.2]^T$$

本文主要从3个方面来验证所提出方法的有效性:①直线行驶工况下,纵向速度分别为5m/s和10m/s时,比较设计的自适应模糊PID控制器和传统PID控制器的阶跃响应性能;②进入弯道后2种控制器的鲁棒性分析;③调整因子 α 对车道保持控制器的性能影响。仿真分4个步骤完成。

1) 直道行驶工况下,本文设计的控制器和PID控制器的性能比较。

仿真结果如图5所示,粗实线是本文设计控制器的跟踪效果。可以看出,本文设计的控制器超调量很小,且响应速度快。原因是在误差较大时采用较大的 k_p ,增加系统的响应速度,而在接近稳定时减小 k_p ,适当增大 k_d 防止超调量加大,因此能够获得较好的阶跃响应曲线,而传统PID控制器只有一组增益参数,无法给出不同误差条件下的最优控制输出。图6为航偏角的变化趋势曲线。

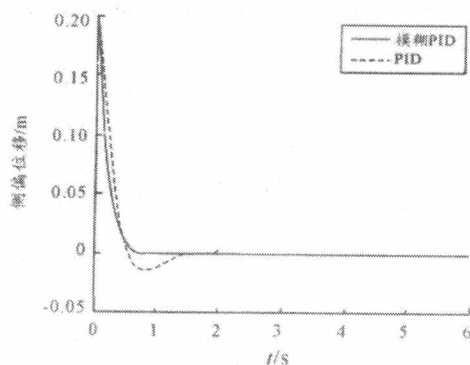


图5 模糊PID控制器和PID控制器阶跃响应对比

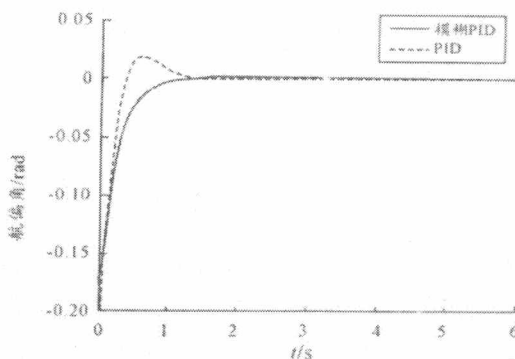


图6 模糊PID控制器和PID控制器阶跃航偏角

2) 进入弯道(加入干扰)后 2 种控制器的性能比较。

在同样的仿真环境下, 将道路曲率作为系统的干扰, 对应到实际情况就是小车进入弯道, 考虑到高速公路弯道半径在 600 m 左右, 假设道路曲率 1/600, 在系统稳定后 4 s 的时候加入干扰, 仿真结果如图 7 所示。粗实线代表模糊 PD 控制器的仿真结果, 放大图表示的是从 4 s 到 5 s 的放大曲线。可以看出, 侧偏位移从 4 s 开始时是逐渐增大再减小的过程, 4 s 时刻侧偏位移较小, 模糊 PD 输出较小的 k_p , 因而侧偏位移增大的趋势比 PID 明显, 侧偏位移在 4.3 s 左右时达到最大, 此时模糊 PD 控制器响应速度明显加快, 最终系统先达到稳态。

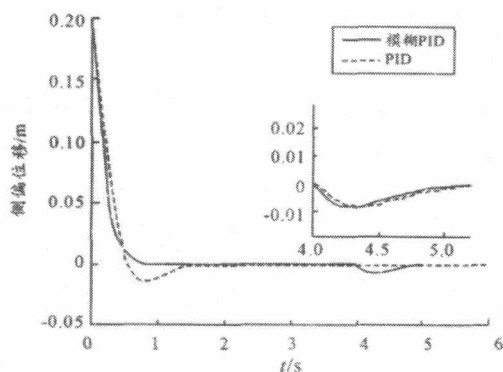


图 7 模糊 PD 控制器和 PID 控制器鲁棒性分析

3) 调整因子 α 对控制器性能的影响分析。

在同样的仿真条件下, 将本文设计控制器中的调整因子 α 去掉之后的仿真结果和去掉之前得出的仿真结果进行比较。为增加结果可比性, 将仿真时间设为 2 s, 由图 8 可见, 粗实线代表的带调整因子的控制器相比不带调整因子的控制器响应速度更快。这是因为调整因子 α 能够充分利用系统的实时状态, 将侧偏位移和航偏角进行信息融合, 得到比单一反馈更加合理的反馈状态。

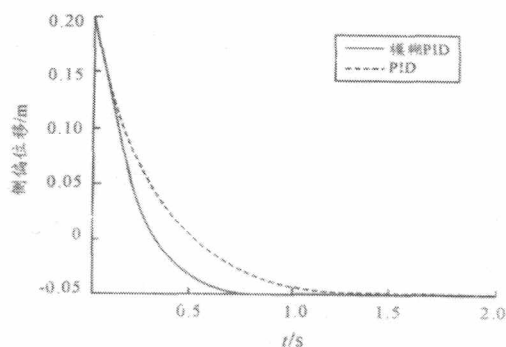


图 8 调整因子 α 对于控制器性能的影响

4) 车速提高到 10 m/s 后, 2 种控制器性能的比较。

随车速的提高, 系统的极点会不断向虚轴右侧移动, 因此对提高车速后的控制效果的分析十分必要。将车速提高到 10 m/s 后仿真结果见图 9。由于纵向速度的提高, 系统响应速度加快, 出现不同程度的震荡, 粗实线显示模糊 PD 控制器在 2 s 左右达到稳定, 超调量为 0.06 m, 而 PID 控制器则到 3.5 s 左右才基本达到稳定, 超调量为 0.09 m。可见自适应模糊 PD 控制器对速度提升后的适应能力强于传统 PID 控制器。

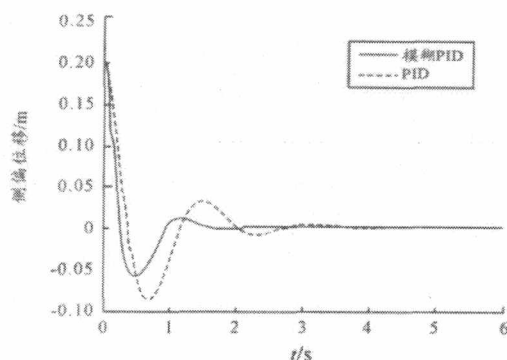


图 9 速度为 10 m/s 时的阶跃响应曲线

5 结束语

1) 所设计的控制器的响应速度和鲁棒性均优于传统的 PID 控制器。

2) 车速提高对系统的稳定性影响很大, 将车速提高到 10 m/s 后, 控制难度增加, 即使是一个小的干扰信号也会对系统整体的控制带来非常大的困难。

3) 自适应模糊 PID 控制系统将专家经验加入 PID 控制中, 结合信息融合的思想, 取得良好控制效果, 对智能车车道保持控制具有一定启发作用。

参考文献:

- [1] 李舜铭, 沈垺, 毛建国, 等. 智能车辆发展及其关键技术研究现状 [J]. 传感器与微系统, 2009, 28(1): 1-3
- [2] T. B. Foote, L. B. Cremer, J. H. Gilkey et al. A large information rich autonomous vehicle for high speed desert navigation [J]. Journal of Field Robotics, 2006, 23(9): 777-810
- [3] 王荣本, 李兵, 徐友春, 等. 基于视觉的智能车辆自主导航最优控制器设计 [J]. 汽车工程, 2001, 2(4): 98-101
- [4] Kang I, Hindi R Y, Moon S, et al. Design and Testing of a Controller for Autonomous Vehicle Path Tracking Using GPS/INS Sensor [C] // Proceedings of the 17th IFAC World Congress Seoul [S n], 2008, 2093-2098
- [5] 游峰, 王荣本, 张荣辉, 等. 智能车辆换道与超车轨迹跟踪控制 [J]. 农业机械学报, 2008, 6(11): 42-45
- [6] 陈果, 徐家品, 严华. 基于模糊控制的快速循迹智能车的设计与实现 [J]. 成都信息工程学院学报, 2008, 23(6): 601-604
- [7] 沈垺, 毛建国, 李舜铭. 单目视觉车道线识别算法及其 ARM 实现 [J]. 南京航空航天大学学报, 2008, 2(16): 209-213
- [8] Brennan S, Alleyne A. Using a scale tested Controller design and evaluation [J]. IEEE Control Systems Magazine, 2001, 21(3): 15-26
- [9] 余志生. 汽车理论 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006, 144-146
- [10] Chiang H H, Ma L S, Peng J W, et al. Longitudinal and Lateral Fuzzy Control Systems for Intelligent Vehicles [C] // IEEE, Networking Sensing and Control [S n], 2006, 6, 544-549
- [11] 栾军山, 陈华. Smith-模糊 PID 在过程控制中的应用 [J]. 重庆理工大学学报: 自然科学版, 2010, 24(7): 106-109
- [12] 邓安生, 万中. 基于模糊规划的公路线配车方案优化 [J]. 重庆工学院学报: 自然科学版, 2009, 23(7): 111-115
- [13] 周华鹏. 视觉导航中局部路径规划方法研究及嵌入式实现 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009, 43-54

(责任编辑 陈松)

基于 DSP Builder 的视觉目标跟踪实现

李 忠, 毛建国, 吴学旺, 卢文玉, 张俊秀, 陆广敏

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 提出了一种基于 FPGA 的 DSP Builder 目标跟踪设计方法, 通过对 Mean Shift 目标跟踪算法进行并行设计, 在兼顾系统模型复杂性和 FPGA 硬件资源成本的基础上, 提高了目标跟踪的实时性。实验结果证明, 目标跟踪的实时性与系统模型设计的并行程度成正比, 所设计的系统基本能够满足高速视觉目标跟踪的实时性要求。

关 键 词: 均值平移算法; DSP Builder; FPGA; 目标跟踪; 实时性

中图分类号: U469 TH12 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-8425(2010)08-0006-06

DSP Builder-based Visual Target Tracking Implementation

LIZhong MAO Jian-guo WU Xue-wang LU Wen-yu ZHANG Jun-xiu LU Guang-min

(College of Energy & Power Engineering Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract This paper presents a target tracking method which is designed based on FPGA in DSP Builder. Through designing the parallel algorithm of the object tracking at the help of the mean shift and taking into account the cost of FPGA hardware and complexity of the model, the real time of the target tracking is improved. The results show that the real time of the target tracking is proportional to the degree of the parallel design, and the system can meet with the requirements of the real time high-speed visual tracking.

Key words mean shift DSP Builder; FPGA; target tracking real time

视觉目标跟踪在安全监控、汽车辅助驾驶、人体运动分析以及视频压缩等领域有着广泛应用^[1]。均值平移算法 (Mean Shift) 是 Fukunaga 等^[2]人提出的一种非参数概率密度梯度估计算法, 具有计算简单、鲁棒性较强的特点, 被广泛应

用到运动目标跟踪中。目标跟踪是计算任务最密集的图像处理^[3], 其硬件实现^[4]是一个极其复杂的过程, 包含数字信号处理等多个子系统。现场可编程门阵列 (FPGA) 于 20 世纪 80 年代末被提出, 近年来, 已经成为图像信号处理应用的一个有

收稿日期: 2010-06-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (90916014)

作者简介: 李忠 (1985-), 男, 浙江衢州人, 硕士研究生, 主要从事智能车辆视觉嵌入式系统开发方面的研究。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

效开发平台^[5]。最初,为了获得 FPGA 的硬件网表,有关人员在硬件描述语言(HDL)方面作了大量研究。近几年,由于相关设计算法的复杂性以及 FPGA 器件密度的增加,对一种能够直接采用模型来模拟硬件^[6]的系统的需求已经越来越迫切。DSP Builder^[7]是一种可以提高设计效率的非编程式数字信号处理开发工具,以 Matlab 数学分析工具形式存在于 Simulink 模块中,在 Simulink 环境中可以将目标模型转换成 FPGA 硬件描述语言代码,使得使用 DSP Builder 建模方式实现复杂系统所花的时间大大短于用 Verilog 或 VHDL 语言手工编写代码所花的时间^[8]。

本文提出了一种基于 FPGA 硬件系统的 Mean Shift 目标实时跟踪方法,通过对系统模型的并行设计,使系统能够同步并行处理多个图像目标,在高速视频信号输入的状态下,实现视觉目标的实时性跟踪。同时,通过 DSP Builder 建模方式代替编写 FPGA 硬件描述语言代码,降低了系统设计的复杂性,提高了电子系统的设计效率。

1 Mean Shift 跟踪算法

Mean Shift 算法是一种有效的统计迭代算法,即先算出当前点的偏移均值,移动该点到其偏移均值,然后以此为新的起始点,继续移动,直到满足一定的条件结束。下面对 Mean Shift 目标跟踪算法的基本实现方法进行阐述,详尽的理论分析及证明可见参考文献[9-11]。

1.1 目标模型的描述

假设 $\{x_{ij}\}_{i=1, \dots, n}$ 为目标所在区域归一化的 n 个像素点集,目标区域以 x_0 为中心,则目标模型的特征值 $u=1, \dots, m$ 出现的概率密度为

$$q_u = C \sum_{i=1}^n k \left(\left\| \frac{x_0 - x_i}{h} \right\|^2 \right) \mathbb{I} [b(x_i) - u] \quad (1)$$

其中: $k(x)$ 为核函数的轮廓函数; $\left\| \frac{x_0 - x_i}{h} \right\|^2$ 的作用是用消除计算不同大小目标时的影响,将目标区

域归一化; $\delta(x)$ 是 Delta 函数, $\mathbb{I} [b(x_i) - u]$ 的作用是判断目标区域中像素 x_i 在特征空间量化的对应值是否为 u ,若是则为 1,否则为 0; C 为标准归一化量系数,使得 $\sum_{u=1}^m q_u = 1$,因此

$$C = \frac{1}{\sum_{i=1}^n k \left(\left\| \frac{x_0 - x_i}{h} \right\|^2 \right)} \quad (2)$$

1.2 候选模型的描述

运动目标在第 2 帧及以后的每帧中可能包含目标的区域称为候选区域,中心坐标为 y 。该区域中的像素用 $\{x_{ij}\}_{i=1, \dots, n_h}$ 表示,则候选模型的特征值 $u=1, \dots, m$ 出现的概率密度为

$$p_u(y) = C_h \sum_{i=1}^{n_h} k \left(\left\| \frac{y - x_i}{h} \right\|^2 \right) \mathbb{I} [b(x_i) - u] \quad (3)$$

其中

$$C_h = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n_h} k \left(\left\| \frac{y - x_i}{h} \right\|^2 \right)} \quad (4)$$

是归一化因子。

1.3 目标定位

目标定位可以简化为寻找最优的 y , 使得 $p_u(y)$ 与 q_u 最相似。文献[11]已说明了 Mean Shift 算法中 Bhattacharyya 系数是优于其他相似性函数的一种选择,故本文选择 Bhattacharyya 系数作为相似性函数,其定义为

$$\bar{\rho}(y) = \rho(p(y), q) = \sum_{u=1}^m \sqrt{p_u(y) q_u} \quad (5)$$

在 $p(y_0)$ 处进行泰勒展开, Bhattacharyya 系数可近似为

$$\rho(p(y), q) = \frac{1}{2} \sum_{u=1}^m \sqrt{p_u(y_0) q_u} + \frac{C_h}{2} \sum_{i=1}^{n_h} w_i k \left(\left\| \frac{y - x_i}{h} \right\|^2 \right) \quad (6)$$

其中

$$w_i = \sum_{u=1}^m \frac{\sqrt{q_u}}{\sqrt{p_u(y_0)}} \mathbb{I} [b(x_i) - u] \quad (7)$$

式中只有第 2 项随 y 变化,为使 $\bar{\rho}(y)$ 最大,对

$$f_{n,k} = \sum_{i=1}^{n_k} \frac{C_h}{2} w_i k \left[\left\| \frac{y - x_i}{h} \right\|^2 \right] \quad (8)$$

取最大值,即可计算出目标偏移后的新位置:

$$y_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n_k} x_i w_i g \left[\left\| \frac{y - x_i}{h} \right\|^2 \right]}{\sum_{i=1}^{n_k} w_i g \left[\left\| \frac{y - x_i}{h} \right\|^2 \right]} \quad (9)$$

2 基于 FPGA 的 DSP Builder 目标跟踪系统设计

DSP Builder 是 Altera 公司开发的基于 Simulink 的 DSP 设计工具。Altera DSP Builder 将 MathWorks Matlab 和 Simulink 系统级设计工具的算法开发、仿真和验证功能与 Altera 开发工具整合在一起,跨越了软件仿真到硬件实现的鸿沟。通过调用 DSP Builder 工具箱模块,使得用 FPGA 设计 DSP 系统可以通过 Simulink 的图形化界面进行,最终使一个复杂的电子系统设计变得容易且直观。DSP Builder 在算法友好的开发环境中可以帮助设计人员快速生成 DSP 设计硬件表征,从而加速了 FPGA 实现数字信号处理的开发流程。

2.1 基于 FPGA 的 DSP Builder 设计流程

基于 FPGA 的 DSP Builder 设计流程:

- 1) 使用 DSP Builder 模块构建 Mean Shift 目标跟踪系统模型。
- 2) 利用 Simulink 软件测试环境对目标跟踪系统模型进行系统功能仿真。
- 3) 利用系统模型界面中的 Signal Compiler 将模型文件转化成 RTL 级的 VHDL 代码和 Tcl 脚本。
- 4) 利用 ModelSim 软件对目标跟踪系统的 VHDL 文件 (RTL 级) 进行功能仿真,进一步分析模型设计的可行性。
- 5) 调用 QuartusII 软件对 VHDL 文件进行编译适配,生成编程文件 pof 和 sof 以供 FPGA 硬件环境调试。

具体设计流程如图 1 所示。

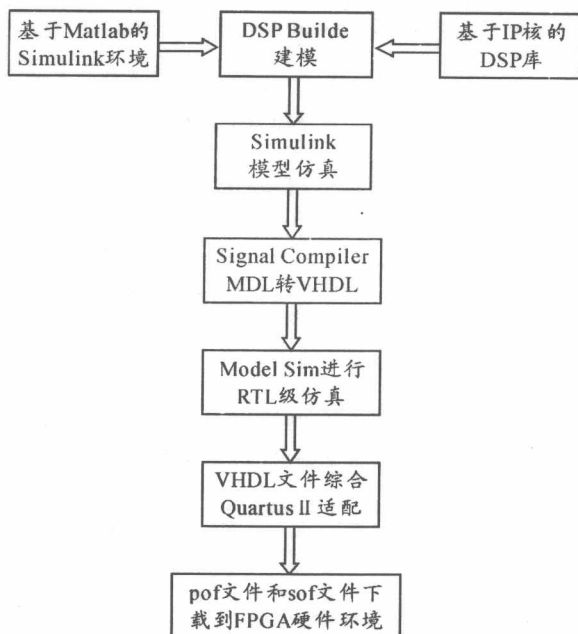


图 1 DSP Builder 设计流程

2.2 目标跟踪系统的模型设计

Mean Shift 目标跟踪算法指一个迭代统计的过程,利用相似性函数度量初始帧目标模型和当前帧候选模型的相似性,通过求相似性函数的最大值达到算法的收敛性。经上述对算法的实现进行分析,现将模型设计分成目标模型描述设计、候选模型描述设计以及目标定位设计。

在高速视频信号输入的状态下,为了实现视觉目标的实时性跟踪,对系统模型进行并行设计,使系统能够同步并行处理多个图像目标,提高目标跟踪的实时性。本系统所涉及的并行设计主要包含:首先,由于目标模型描述和候选模型描述是互相独立的,故可对 2 类模块作并行设计;其次,由于运动目标在第 2 帧及以后的每帧图像候选区域描述是互相独立的,故可对各候选模型描述作并行设计;最后,各候选模型与目标模型相似程度迭代运算是互相独立的,故可对各模型迭代过程作并行设计。图 2 所示为目标模型描述和候选模型描述并行设计模块。

一般而言,用每秒能产生 60 帧图片的视频信号源就足以获得流畅的视频效果,为了获得更好的目标跟踪效果,本文采用每秒能产生 100 帧图片的高速视频信号源作为视频输入信号来源。通

常情况下,系统模型设计的并行度越高,模型的复杂性越高,同时所需要的 FPGA 硬件成本也越高。为了简化系统模型设计的复杂性、降低 FPGA 硬件系统设计成本,在满足目标跟踪实时性的条件

下,对上述系统模块的并行结构部分分为 4 个并行模块进行设计,各帧图像可通过此 4 个并行模块作同步并行跟踪处理。在 DSP Builder 中设计的目标跟踪系统如图 3 所示。

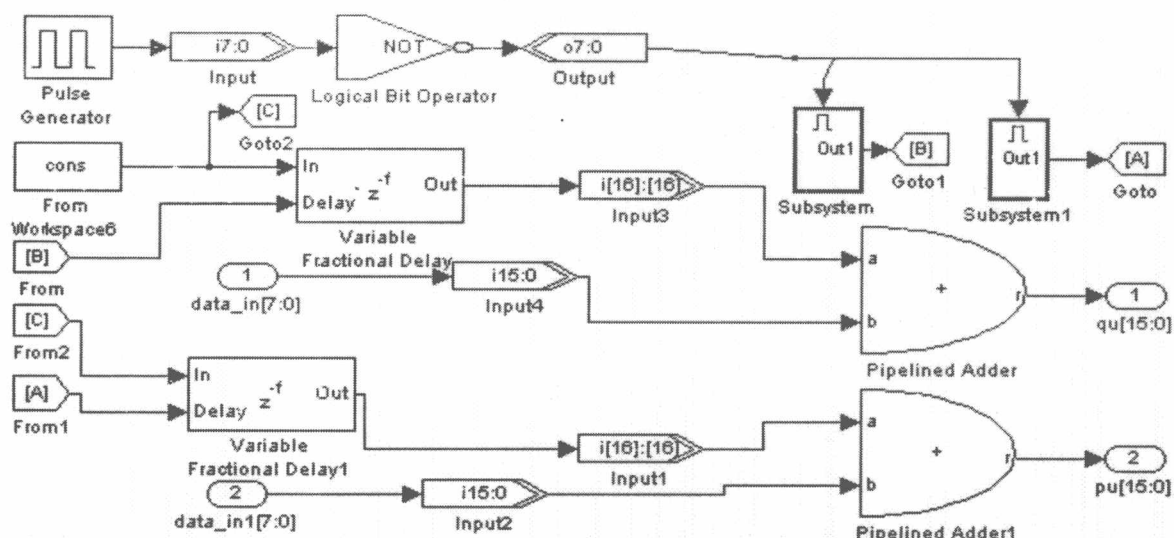


图 2 目标模型描述和候选模型描述并行设计

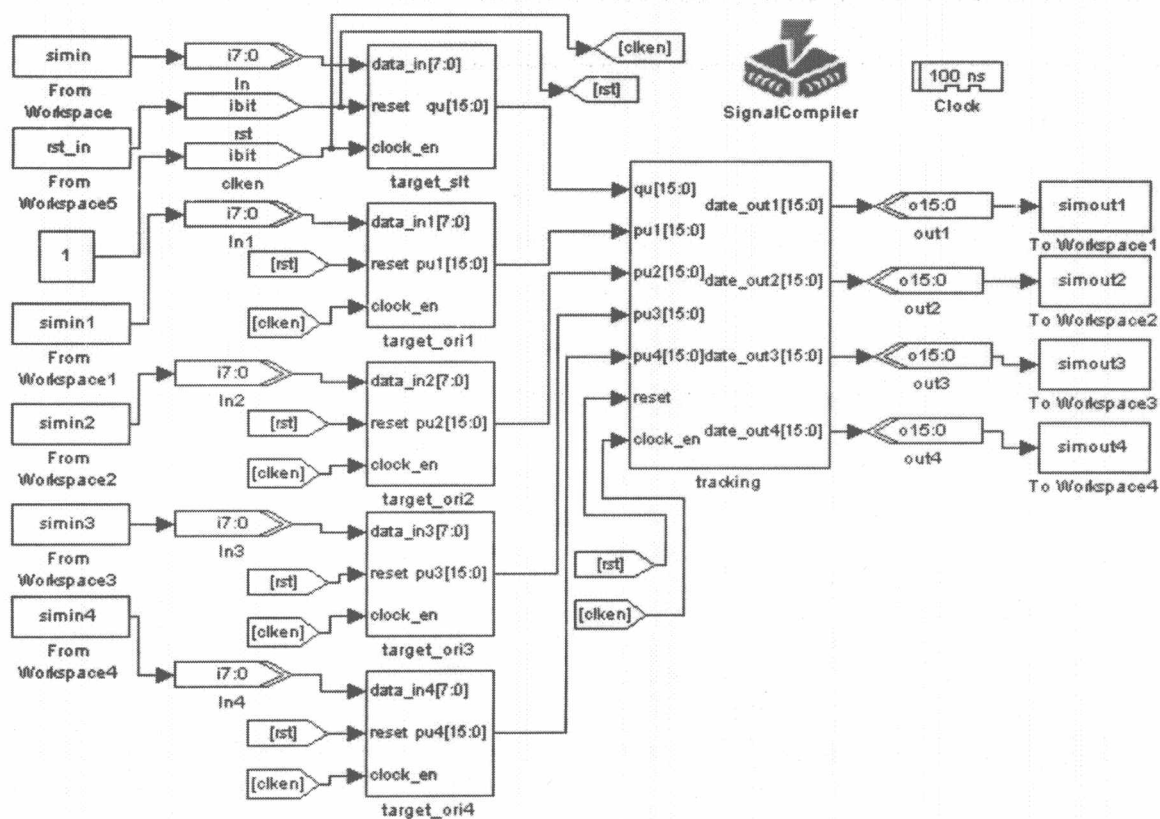


图 3 目标跟踪系统模型

3 实验结果

为了验证本系统设计的有效性,本实验采用数码相机在南京某高速公路上拍了一段视频,图 4 序列图像是从视频中截取的几帧,图中跟踪目标已被标出,可以看出,本系统可以实现目标的准确跟踪。

为了对本文所采用的方法作实时性检验,本文采用 CPU 主频为 1.8G、内存为 1G 的 PC 机处理器作验证实验。在相同条件下,对 DSP Builder 建模与 Matlab 软件编程 2 种方法实现的目标跟踪进行实时性对比,对比结果如表 1 所示。从数据中可以看出,本文所采用方法在目标跟踪速度上是 Matlab 软件编程方法的 4 倍左右,实时性有了极大提高。由于本文采用每秒能产生 100 帧图片的高速视频信号源作为视频输入信号来源,即要求系统图像处理到达每帧 10 ms 的速度,实验证

明,本系统图像处理速度能够到达每帧 8.45 ms,完全能够满足系统的实时性要求。

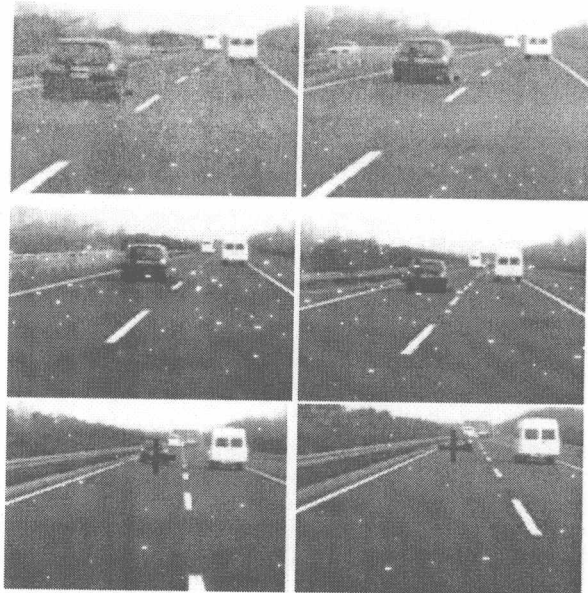


图 4 高速公路上对车的跟踪结果

表 1 目标跟踪实时性对比

目标跟踪实现方法	帧数	图片大小	处理时间/(ms/帧)
Matlab 软件编程法	530	350×240	33.02
DSP Builder 建模法	530	350×240	8.45

另外,为了验证系统模型并行程度与目标跟踪实时性的关系,对系统模型分 4 种并行程度进行实时性测试,即将所采集的图像分别通过一个并行模块到 4 个并行模块等 4 个不同并行程度系统进行目标跟踪实验。实验结果如表 2 所示,从实验数据可以看出,目标跟踪实时性与系统模型并行程度成正比关系。

根据 DSP Builder 的设计流程,在完成 Simulink 的算法级仿真以后,进入 ModelSim 软件功能仿真阶段,仿真结果如图 5 所示。仿真结果和系统级仿真结果一致。最后利用 QuartusII 软件编译

生成 pof 文件,即可下载到 FPGA 目标芯片,继而进行 FPGA 硬件环境调试。

表 2 模型各并行程度系统的跟踪实时性对比

模型并行程度	帧数	图片大小	处理时间/(ms/帧)
1 个并行程度系统	530	350×240	33.36
2 个并行程度系统	530	350×240	16.72
3 个并行程度系统	530	350×240	11.32
4 个并行程度系统	530	350×240	8.45