

文章编号: 1002-0446(2003)06-0539-05

自主轮式机器人 THMR - V 的混合模糊逻辑控制*

李兵, 何克忠, 张朋飞, 陈桂生

(清华大学智能技术与系统国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 轮式机器人的控制问题是控制研究的关键问题之一, 对高速自主导航的轮式机器人, 控制器的实时性、精确性和鲁棒性要求很高。在本文中, 根据 PID 控制和模糊逻辑控制的各自优点, 将传统的 PID 控制与模糊逻辑控制结合起来, 提出了一种混合模糊逻辑控制算法。经实验检验, 该算法具有很高的实时性、控制精度和鲁棒性, 能够满足机器人高速自主导航的需要。

关键词: 自主轮式机器人; 视觉导航; 混合模糊逻辑控制

中图分类号: TP24

文献标识码: B

HYBRID FUZZY LOGIC CONTROL FOR AUTONOMOUS WHEELED ROBOT 4/ THMR - V

LI Bing, HE Ke-zhong, ZHANG Peng-fei, CHENG Gui-sheng

(State Key Laboratory of Intelligent Technology and Systems, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Controller design is one of the key techniques for wheeled robot. For high-speed autonomous vision navigation robot, the controller should have good robustness, high control precision and rigid time limitation. In this paper, we propose a hybrid fuzzy logic control algorithm by combining the conventional PID algorithm and fuzzy logic algorithm. The algorithm has been verified by experiments, and the results show that it has good real time performance, robustness and high control precision, and can meet the needs for high-speed autonomous wheeled robot based on vision navigation.

Key words: autonomous wheeled robot; vision navigation; hybrid fuzzy logic control

1 引言 (Introduction)

轮式机器人是机器人研究领域的一个重要分支, 在智能交通系统 (ITS)、空间探测、军事、生产自动化等许多领域都有广泛的应用。

因室外轮式机器人的特殊应用价值及其广泛的应用前景, 世界各国都投入了大量的人力物力进行研究, 目前比较著名的实验系统有美国 CMU 大学开发的 Navlab 系统、德国联邦国防大学的 VaMoRs - P 系统、意大利帕尔马大学的 ARGO 系统等^[1]。

我国的轮式机器人的研究近年来也有比较长足的进展, 比较典型的系统有由南京理工大学、国防科技大学、浙江大学、清华大学和北京理工大学在“八·五”期间联合研制的“ABT - I”系统和“九·五”期间研制的 ABT - II 系统以及国防科技大学的 CITAMI - IV 系统。

THMR - V 系统是清华大学智能移动机器人课题组于“九·五”期间自主研制和开发的新一代多功能室外智能轮式机器人实验平台, 目前具备在结构化道路上的自动驾驶、非结构化道路上基于 GIS 的自动驾驶与避障、临场感遥控驾驶等功能^[2]。

控制问题是轮式机器人研究的关键问题之一, 因为高速自主导航的轮式机器人对控制器的实时性、精确性和鲁棒性要求很高, 而且轮式机器人是集各种机械装置、传感器、计算机等于一体的非线性复杂系统, 对其建立其数学模型是很困难的, 传统的基于模型的控制方法很难适用, 而基于经验知识的模糊逻辑控制器不需要一个精确的数学模型, 所以人们设法用模糊逻辑对机器人进行控制^[3]。

最早将模糊理论引入驾驶员行为研究的是 U. Kramer 和 G. Rohr, 他们应用模式识别理论研究了驾

驾驶员视点移动与转向指令之间的模糊关系^[4]. T. Hessburg 和 M. Tomizuka 从驾驶汽车的几点经验出发,设计了三个具有不同输入变量的车辆侧向运动模糊控制器,并对其控制品质进行了比较分析^[5]. J. C. Wu 和 T. S. Liu 也建立了一个摩托车驾驶员的模糊控制模型,该模型的输入变量有 7 个,输出变量有 3 个,为了便于模糊规则的建立,并尽量减少规则的数目,该文认为驾驶员同时感知的动力学变量数目习惯上不超过两个,并依此对输入变量进行了分组,模糊控制器采取了分层结构^[6]. Xiao Yan 和 Zhang Su wen 建立了一个履带车辆驾驶员的预瞄控制模型^[7]. H. Yamaguchi 等人应用模糊控制理论于自动换档^[8]. Che Wun Hong 设计了一个油门模糊控制器,以模拟汽车行驶时的纵向控制行为^[9]. 另外,日本的 Nissan、Honda、三菱等公司和美国的 Saturns、Tegai 等公司相继开发了模拟驾驶员换档的模糊自动变速控制装置及其它一些专门用于汽车上的模糊规则、软件及装置.

在本文中,为满足 THMR-V 结构化道路高速导航控制的要求,作者提出一种混合模糊逻辑控制,其基本思想是将模糊控制和传统的 PID 控制结合起来以提高系统的控制精度,因为相对于模糊控制的“有级”控制,传统的 PID 控制是“无级”控制,而且对离散系统来说,PID 控制可以综合考虑最近三个控制变量的关系,在控制精度上更占优势.

2 系统简介 (Architecture of THMR-V)

如图 1 所示.



图 1 清华大学的 THMR-V 系统

Fig.1 THMR-V system of Tsinghua university

THMR-V 是用三星 SXZ6510 七座箱式车改装的,配置了多台计算机及激光雷达测障系统,CCD 摄像机图像处理系统,磁罗盘-光码盘、DGPS 互补定位系统,方向控制、油门控制和刹车控制的车体控制

系统.各台计算机之间通过 10M ETHERNET 实现数据通讯.

3 THMR-V 视觉导航原理 (Principle of vision navigation for THMR-V)

室外移动机器人自主导航时选择何种导航方式,一直是智能移动机器人研究中的一个探索热点.人们先后研究过磁导航、光学导航、视觉导航、超声导航、红外导航等.最近几年来,视觉导航因其发展潜力巨大逐渐成为目前导航研究的主流之一,因为当驾车时,我们所接收的信息几乎全部来自于视觉,道路标线、交通信号、交通图案等均可以看作是环境向驾驶员传递的视觉通讯语言^[10].

从图 1 可以看到,THMR-V 的 CCD 摄像机安装在车辆顶部,光轴与车辆纵向平分线在同一垂直平面,约向下 45° 指向地面,CCD 焦距为 6mm,视场角约为 60°,CCD 距地面高度 2.4m,所摄取的道路图像范围从车头开始约至车辆前方 100m.

图 2 所示为图像窗口及控制参数定义,当将笛卡儿坐标系的原点定位在 CCD 处时,我们定义车辆向前行驶的方向为 Y 轴,指向车头方向为正,指向车尾方向为负.

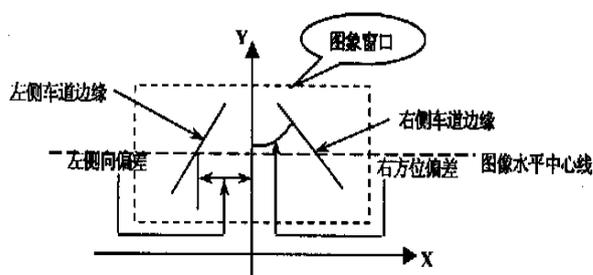


图 2 图像窗口及控制参数

Fig.2 Image window and controller parameters

垂直车辆行驶方向为 X 轴,车辆右侧为正,反之为负.当选择直线车道模型时,图中左右车道边缘为道路图像理解算法得出的车道线.为了提高实时性我们采用的道路理解算法不进行图像畸变校正,所以我们定义左右侧向偏差为图像窗口水平中心线至 Y 轴的距离,左右方位偏差为左右车道边缘与 Y 轴的夹角,定义左侧车道边缘与 Y 轴夹角为正,右侧车道边缘与 Y 轴夹角为负.根据以上定义,我们得到控制器输入参数为:

$$\begin{aligned} \text{侧向偏差} &= \text{左侧向偏差} + \text{右侧向偏差} \\ \text{方位偏差} &= \text{左方位偏差} + \text{右方位偏差} \end{aligned}$$

4 控制系统结构与工作原理 (Controller architecture and work principle)

众所周知,模糊分割的个数决定了最大可能的模糊规则的数目,所有模糊分割不能太细,否则就需要确定很多的控制规则,随之而带来的模糊关系的运算量也是相当巨大的.当然,模糊分割数太小将导致控制太粗略,难以对控制性能进行精细的调整^[1].另外,为提高控制精度,一般的双输入的模糊逻辑控制器的输入,经常采用偏差及偏差变化这两个变量.

但对于 THMR - V 来说,因为我们的输入变量是方位偏差和侧向偏差,如果再考虑偏差的变化,则输入量就太多,控制器的设计则非常困难.同样,从系统实时性及控制器设计复杂度的考虑,模糊分割的数目也不能太多.但对于高速行驶的车辆来说,高精度的控制是必要的,否则微小的控制误差,因速度高,在很短的时间内也要产生较大的转向输出偏差.所以,为了解决上述矛盾,我们从两个环节引入 PID 控制,图 3 给出了 THMR - V 的混合模糊逻辑控制方案框图.

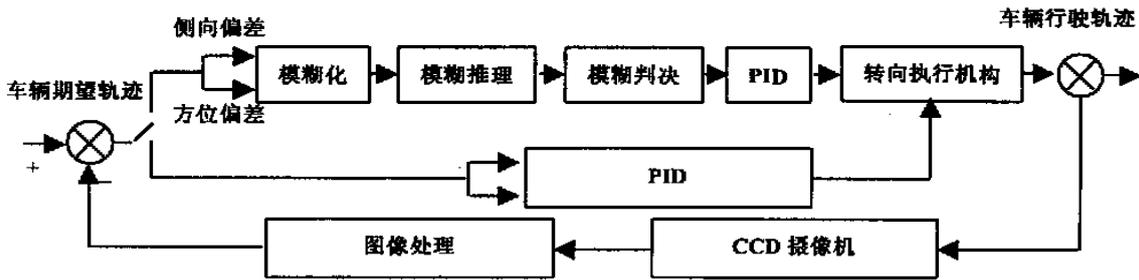


图 3 THMR-V 控制系统结构
Fig.3 Controller architecture of THMR-V

车辆的行驶轨迹经 CCD 摄像机图像处理 after 反馈,与车辆的期望轨迹进行比较,得到车辆的侧向偏差和方位偏差,当侧向偏差和方位偏差分别在一定阈值内时(偏差比较小),我们直接使用 PID 进行控制,将控制量输入到转向执行机构,驱动前轮转向,使车辆行驶轨迹趋向车辆期望轨迹,这样可以在模糊逻辑控制的最小分级内,适当地引入微分、积分等作用进行微调.当侧向偏差和方位偏差其中之一超过设定阈值时,模糊逻辑控制器开始起作用,而模糊逻辑控制器的输出,并不是直接输出给转向执行机构,而是作为和它串连的 PID 控制器的输入,这样可以综合考虑最近三个控制量的关系,有利于提高控制的稳定性和精度.

5 模糊逻辑控制器的设计 (Design of fuzzy logic controller)

选取侧向偏差和方位偏差作为模糊逻辑控制系统的输入变量,选取转向轮转角为输出变量.用 7 个语言变量,即正大(PB)、正中(PM)、正小(PS)、零(ZO)、负小(NS)、负中(NM)、负大(NB)来对输入量和输出量进行描述.侧向偏差和方位偏差都分为 7 个等级,即侧向偏差和方位偏差的论域是{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3},考虑到控制精度的要求,将转向轮转

角变化分为 13 级,即转向角的论域为{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, +1, +2, +3, +4, +5, +6}.

总结人们驾驶车辆的经验,可得到如下规则:

- if 侧向偏差为 ZO and 方位偏差为 ZO
then 转向轮转角为 ZO;
- if 侧向偏差为 PS 及方位偏差为 PS
then 转向轮转角为 NM;
- if 侧向偏差为 NS 及方位偏差为 NS
then 则转向轮转角为 PM;
-

共有 49 条这样的规则,构成表 1 所示的控制规则表.

根据这些控制规则及相应的控制变量隶属度定义,即可得到模糊关系 \tilde{R} .有了模糊关系,在本文中,对于相应的输入量,采用单点模糊化方法进行模糊化,采用隶属度最大原则去模糊化,则最后可得到相应精确的控制量.这样经过大量的计算,最终得到模糊逻辑控制表 2.控制表是系统 Fuzzy 控制算法的结果,在实际控制时可以方便地查表进行控制.当然,通过计算得到的控制表往往不能完全满足控制的要求,需要经实际控制性能的检验后进行仔细的修改,才能达到良好的控制效果^[12].

表1 控制规则表

Table 1 The control rules

转向轮转角 / 侧向偏差 \ 方位偏差	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NB
PB	NB	NB	NB	NM	NM	ZO	PS
PM	NB	NB	NM	NM	NS	PS	PM
PS	NB	NB	NM	NS	PS	PM	PB
ZO	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NS	NB	NM	NS	PS	PM	PB	PB
NM	NM	NB	PS	PM	PB	PB	PB
NB	NS	PS	PM	PB	PB	PB	PB

表2 模糊逻辑控制控制表

Table 2 Fuzzy logic control table

转向轮转角 / 侧向偏差 \ 方位偏差	-3	-2	-1	0	1	2	3
-3	6	5	5	3	2	1	-1
-2	6	5	4	2	1	-1	-2
-1	5	4	3	1	-1	-2	-3
0	4	3	2	0	-2	-3	-4
1	3	2	1	-1	-3	-4	-5
2	2	1	-1	-2	-4	-5	-6
3	1	-1	-2	-3	-5	-5	-6

6 实验验证和分析 (Experimental verification and analyse)

为检验控制算法的品质以及对控制参数表进行修改校正, THMR - V进行了大量的实际无人驾驶试验,控制算法经过一些参数调整后,控制效果非常

好,目前无人驾驶直线情况下最高车速能达到一百多公里每小时.图4(a)、(b)、(c)、(d)分别为 THMR - V实际无人驾驶时采集的侧向偏差、方位偏差、模糊逻辑控制输出、实际控制输出的曲线.

从图4(a)可以看出,侧向偏差基本围绕横轴(零)处变化(侧向偏差发生变化的原因部分是因为车辆跑偏及路面颠簸造成的,这也从另一方面说明控制器的调节是有效而准确的),最大负值 - 2.187m,最大正值 1.961m,均值 - 0.1029m,均方差 0.5452m,这说明 THMR - V能很好的被控制在车道内行驶.从图4(b)可以看到,方位偏差变化较侧向偏差大,这是因为车辆方位是随着前轮转向变化而变化的,而车辆方位的变化又带来图像摄取角度的变化,从而使两条车道线的图像畸变不同,而侧向偏差不存在这个问题,所以方位偏差变化要比侧向偏差明显.但尽管方位偏差变化较大,其均值也仅为 1.788°,进一步说明车辆在直线路况情况下大部分时间的动作是通过转向轮或左或右的微调来保持车辆直线行驶.图4(c)、图4(d)分别为模糊逻辑控制器的输出和最后实际控制器的输出,从图4(c)中能够看到,控制器输出因为只考虑当前视觉传感器检测到的道路偏差,没考虑车辆执行机构及道路一般不存在突变的情况,所以当检测有错误或颠簸造成 CCD震动等情况时,控制器输出可能有突变输出,这对控制高速行驶的车辆是不利的,因为我们观察到,高速行驶情况下驾驶员的驾驶动作都是平滑而渐进的动作.而从图4(d)可以看出,因为最后的控制器输出从两个环节引入 PID控制,可以综合考虑最近三个控制量的关系,并在模糊逻辑控制的最小分级内,适当地引入微分、积分等作用进行微调,控制器输出的突变明显地变小,而且控制量更加细致光滑.

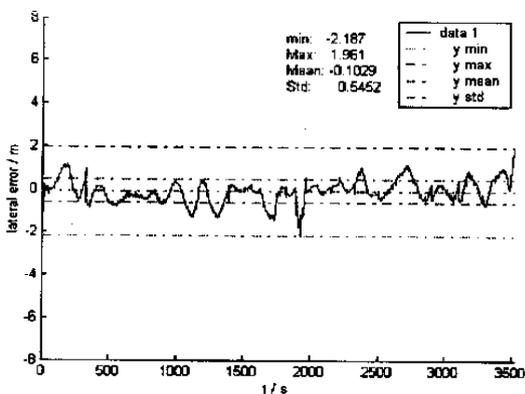


图4(a) 侧向偏差曲线
Fig.4(a) Lateral error

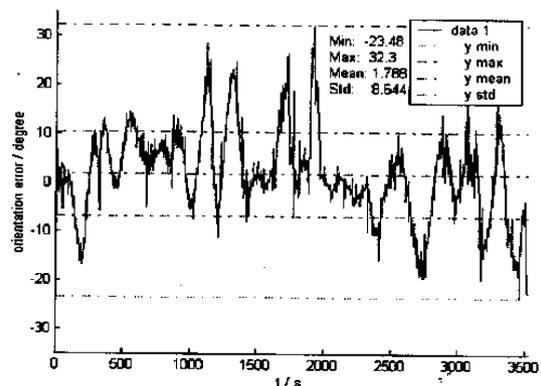


图4(b) 方位偏差曲线
Fig.4(b) Orientation error

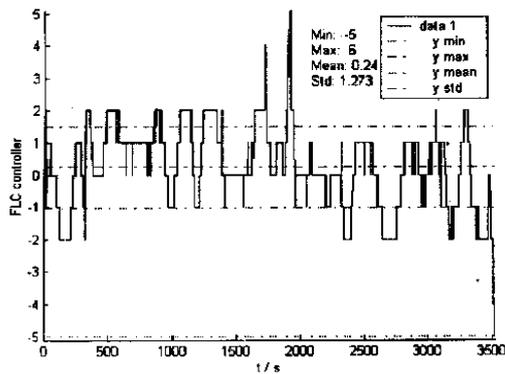


图 4(c) 模糊逻辑控制输出
Fig.4(c) FLC output

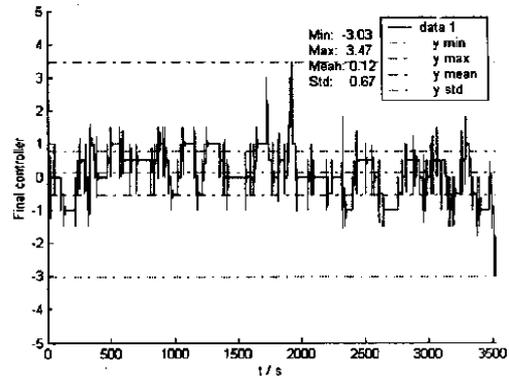


图 4(d) 实际控制器输出
Fig.4(d) Real controller output

7 结论 (Conclusion)

在本文中,我们将传统的 PID 控制与模糊逻辑控制的优点结合起来,提出了一种混合模糊逻辑控制算法,经实验检验,该算法具有很高的实时性、控制精度和鲁棒性,能充分地满足机器人高速自主导航的需要.目前,该控制算法应用在 THMR-V 的实时道路自主导航实验中,在直线情况下的 THMR-V 自主车速最高能达到一百多公里/小时,这充分体现了该算法实时性好、鲁棒性强、控制精度高的优点.

参考文献 (References)

- [1] 王宏,何克忠,张钺. 智能车辆的辅助驾驶和自主导航[J]. 机器人,1997,19(2): 155 - 160.
- [2] 张鹏飞,何克忠等. 多功能室外智能移动机器人实验平台 THMR-V[J]. 机器人,2002,22(2): 97 - 101.
- [3] 李伟,Janocha Hartmut. 一种高效能的机器人模糊控制方案[J]. 自动化学报,1995,21(4): 400 - 409.
- [4] Kramer U, RohrG. A fuzzy model driver behavior: Computer Simulation and Experimental Result[A]. IFAC Symposium, Analysis, Design and Evaluation of Man-Machine Systems, Baden-Baden[C]. Germany, 1982, 937 - 949.
- [5] Hessburg T, Tomizuka M. Fuzzy logic control for lateral vehicle guidance[J]. IEEE Control System Magazine, Aug, 1994, 300 - 313.

- [6] Wu J C, Liu T S. A fuzzy model of rider control for a motorcycle undergoing lane change[J]. International Journal of Vehicle Design, 1994, 15(1/2): 134 - 142.
- [7] Xiao Yan, Zhang Su Wen. An international model approach in the modeling of human preview control[J]. IEEE Systems, Man, and Cybernetics Conference Proceedings, 1988, II: 876 - 887.
- [8] Yamaguchi H. Automatic transmission shift schedule control using fuzzy logic[R]. SAE Paper, 1993, 93076: 455 - 463.
- [9] Che-wun Hong. A fuzzy throttle controller for dynamic driving pattern simulation[J]. International Journal of Vehicle Design, 1995, 16(2/3): 800 - 813.
- [10] Ernst Dieter Dickmanns, The development of machine vision for road vehicles in the last decade[A]. IEEE Intelligent Vehicle Symposium 2002[C]. 1221 - 1234.
- [11] 孙增圻等. 智能控制理论与技术[M]. 清华大学出版社,1997年.
- [12] 王学慧,田成方. 微机模糊控制理论及其应用[M]. 电子工业出版社,1987年.

作者简介:

- 李兵 (1971-),男,博士.研究领域:移动机器人,计算机控制,计算机视觉,智能控制理论及应用.
- 何克忠 (1936-),男,教授.研究领域:移动机器人,自动控制,汽车安全辅助驾驶,计算机应用.
- 张鹏飞 (1971-),男,博士.研究领域:移动机器人,计算机控制,计算机视觉.