

# 自动倒车简易模糊插值控制\*

杨文光<sup>1</sup>, 赵海良<sup>2</sup>

(1. 华北科技学院基础部, 北京 101601;  
2. 西南交通大学数学学院, 四川 成都 610031)

**摘要:** 针对倒车问题, 该文提出了简易模糊插值控制方法。在未对规则进行优化的情况下, 以简便快捷的方式实现了自动倒车。仿真结果表明: 简易模糊插值控制响应快, 控制精度高, 具有很强的普适性, 在相同条件下明显优于常规模糊控制。

**关键词:** 插值; 模糊控制; 倒车; 仿真

中图分类号: TP273 文献标志码: A 文章编号: 0529-6579 (2012) 01-0035-04

## An Easy Method on Fuzzy Interpolative Control for Automatic Truck Backer-upper

YANG Wenguang<sup>1</sup>, ZHAO Hailiang<sup>2</sup>

(1. Department of Basic Course, North China Institute of Science and Technology, Beijing 101601, China;  
2. School of Mathematics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** An easy method on fuzzy interpolative control is introduced to solve the problem of truck backer-upper. Without the effect of optimal control rules, a simple and efficient automatic truck backer-upper is achieved. The simulations show that the control performance has many advantages, such as rapid response and high control precision. The method is strongly universal. Under the same conditions, it is significantly better than conventional fuzzy control.

**Key words:** interpolative; fuzzy control; truck backer-upper; simulation

1989 年, Nguyen 和 Widrow 首次提出卡车倒车问题后<sup>[1-2]</sup>, 国内外大批学者开始着手该课题的研究, 从而为实现汽车的自动驾驶, 并为使人提前从劳累的驾驶中解放出来取得了很多成果。纵观相关研究文献, 关于汽车倒车控制问题的解决都无不受益于智能控制方法, 最值得推荐的就是模糊控制, 它的问世为模型未知, 但却具有丰富人工经验和专家知识的前提下, 以期完成很好的控制带来了解决的办法。对于汽车的倒车控制问题, 熟练的驾驶员可以为我们提供所有的倒车规则, 对于各种复杂倒车环境都具有相应的解决方案, 于是不同的模糊控

制方法都可以完成控制<sup>[3-5]</sup>, 但控制效果却各有不同。分析已有文献 [3, 5], 变论域自适应模糊控制方法在未对规则优化的前提下, 完成了很好的倒车控制, 较之常规模糊控制有了非常大的改进, 但伸缩因子的选择不易确定, 计算量较大, 在硬件实现上也不一定是一种好的选择。

现在应用最为广泛和成功的常规模糊控制当属 Mamdani 型模糊控制, 它因建立在 Mamdani 型模糊推理基础上而得名, 从推理角度来讲该算法满足算法的还原性, 因此是一种合理的模糊控制方法。但同时它因没有避开常规模糊控制的推理过程, 而使

\* 收稿日期: 2011-05-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60873108); 中央高校基本科研业务费基金资助项目 (2011B018); 华北科技学院学生科技创新计划资助项目

作者简介: 杨文光 (1981 年生), 男, 助教; E-mail: wenguang6662003@yahoo.com.cn

得计算繁琐,在实际应用中无法克服响应较慢,调整时间较长的缺陷。本文直接避开常规模糊控制的推理过程,而把控制函数的建立回归到系统控制过程所蕴含的输入与输出之间的插值对应函数关系上来。本文用于汽车自动倒车控制的简易模糊插值控制方法就是满足算法还原性的二元分片双线性插值模糊控制方法。该方法源于常规模糊控制,是常规模糊控制的特殊形式,但又不同于常规模糊控制,它避免了隶属函数图形调整问题,压缩了信息量,在实际控制过程中在线实现了插值,还原并丰富了原有的控制信息。此外该方法计算简便,运算快捷,因此不失为一种好的控制方法。

### 1 简易模糊插值控制方法

对于双输入单输出系统而言,设输入变量  $x$  和  $y$  的论域分别为  $X$  和  $Y$ , 输出变量为  $z$ , 论域为  $Z$ 。完成输入输出变量论域的模糊划分:  $A = \{X_i\}$ ,  $B = \{Y_j\}$ ,  $C = \{Z_k\}$ , 其中  $A, B$  为输入变量论域上的语言变量,  $C$  为输出变量论域上的语言变量, 假设形成含  $\alpha$  条规则的模糊规则库

$$\text{if } x \text{ is } X_i \text{ and } y \text{ is } Y_j, \text{ then } z \text{ is } Z_{ij}. \quad (1)$$

其中论域  $X, Y, Z$  均为实数闭区间,  $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, p; x_i, y_j, z_{ij}$  分别为模糊集  $X_i, Y_j, Z_{ij}$  的峰点 ( $\forall Z_{ij}, \exists k \in \{1, \dots, p\}$ , s. t.  $Z_{ij} = Z_k$ ), 并且要求满足序关系:  $x_1 < x_2 < \dots < x_m, y_1 < y_2 < \dots < y_n$ , 输出变量论域内的峰点  $z_{ij}$  不做序的规定; 此外, 输入变量论域上的模糊集全部选择为正规、全交叠的三角形模糊集, 输出变量论域上的模糊集则选择为单点模糊集。故通常情况下,  $\alpha = m \times n$ , 有时在满足控制性能指标时, 实际的控制规则数目  $\alpha$  可能小于  $m \times n$ 。

根据文 [6] 的插值机理, 基于 (1) 式的模糊控制系统可以表示成为一个二元分片插值函数<sup>[7-9]</sup>

$$z = f(x, y) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n X_i(x)Y_j(y)z_{ij} \quad (2)$$

其中  $X_i(x) = \frac{x - x_{i+1}}{x_i - x_{i+1}}, Y_j(y) = \frac{y - y_{j+1}}{y_j - y_{j+1}}$  分别表示输入变量  $x$  和  $y$  相对于模糊集  $X_i$  与  $Y_j$  的隶属度。

对于任意输入  $(x, y)$ , 有且至多有四条规则同时被激活; 不妨设  $(x, y)$  落在矩形邻域  $V_{ij}$  内,  $V_{ij}$  的顶点分别对应输入变量模糊集的峰点数据对  $(x_i, y_j), (x_i, y_{j+1}), (x_{i+1}, y_j), (x_{i+1}, y_{j+1})$ , 则只有模糊集  $X_i(x), X_{i+1}(x), Y_j(y), Y_{j+1}(y)$  的隶属度不为 0 ( $i = 1, 2, \dots, m - 1; j = 1, 2, \dots, n -$

1)。

故 (2) 式可以记为二元分片双线性插值函数

$$z = f(x, y) = \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=1}^{n-1} (X_i(x)Y_j(y)z_{ij} + X_i(x)Y_{j+1}(y)z_{ij+1} + X_{i+1}(x)Y_j(y)z_{i+1j} + X_{i+1}(x)Y_{j+1}(y)z_{i+1j+1})\chi_{ij} \quad (3)$$

其中  $\chi_{ij} = \begin{cases} 1, & (x, y) \in V_{ij}, i = 1, 2, \dots, m - 1; j = 1, 2, \dots, n - 1. \\ 0, & (x, y) \notin V_{ij} \end{cases}$

## 2 基于简易模糊插值控制的自动倒车

### 2.1 倒车模型

选择后轮驱动汽车作为研究对象, 汽车的实时位置由三个状态变量确定: 横坐标  $x$  (不加约束) 和纵坐标  $y$  (限制范围为  $-50 \leq y \leq 50$ ), 以及水平线正向 (横坐标轴正方向) 与汽车中轴线正向 (车头  $A$  指向车尾  $B$ ) 间的位置夹角  $\theta$  ( $-\pi \leq \theta \leq \pi$ ); 为了简便起见, 只考虑倒车速度  $v$  恒定的情况, 唯一的控制量是方向盘转角  $\eta$  ( $-\pi/9 \leq \eta \leq \pi/9$ ) (前轮正向到汽车中轴线正向的夹角) 如图 1 (给出了 2 种倒车状态和方向盘转角控制输出情形), 其中前轮正向指的是前轮前方  $C$  沿前轮指向后方  $D$  的方向, 并且约定位置夹角  $\theta$  与方向盘转角  $\eta$  均取顺时针时为正, 逆时针时为负。

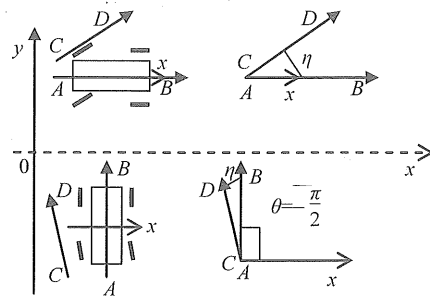


图 1 倒车模型示意图

Fig. 1 Truck backer-upper diagram

根据汽车倒车运动模型, 综合考虑位置与位置夹角、方向盘转角间的关系可以建立其微分方程组

$$x' = v \cos \theta, y' = -v \sin \theta, \theta' = (v/l) \tan \eta \quad (4)$$

其中  $l = 4 \text{ m}$ , 表示汽车车身长度;  $v = -1 \text{ m/s}$ , 负号表示倒车, 在上述微分方程组中,  $v$  只取数值 1, 倒车因素已经考虑在建模中。

### 2.2 自动倒车控制

熟练的驾驶员在判断好汽车初始位置和倒车位置后, 可以轻而易举的完成倒车任务。作为自动倒

车模糊控制核心的规则库自然来源于驾驶员的经验，在对输入变量完成完备划分后，经验就以有限条规则形式被嵌入到简易模糊插值控制器中。

对于任意初始位置的汽车，约定以车头朝左车尾朝右且车身平行于水平线时，倒车进入纵坐标参考位置  $y=0$  的为完成任务，用数学语言简要描述就是位置夹角  $\theta=0$ ，汽车纵坐标位置与参考位置之间的误差  $ey=0$  时为宜。

参考文献 [2-3]，经过验证做出微调，对输入变量  $y$  的实际物理论域  $[-10, 10]$  划分为 5 个三角形模糊集，对输入变量  $\theta$  的实际物理论域  $[-\pi, \pi]$  划分为 7 个三角形模糊集，而对于输出变量（即控制量） $\eta$  的实际物理论域  $[-\pi/9, \pi/9]$  划分为 7 个单点模糊集，具体隶属函数见图 2。

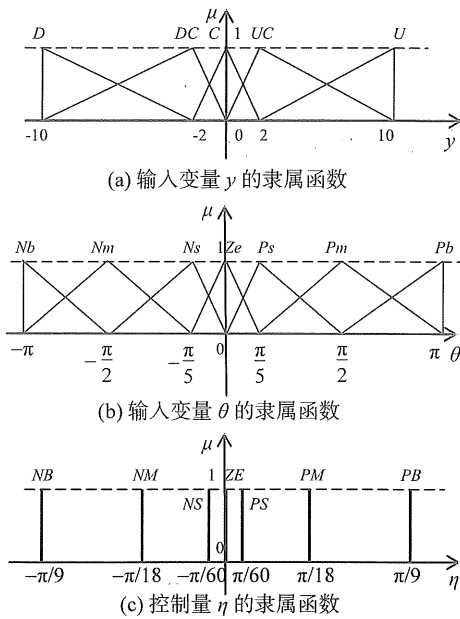


图 2  $y, \theta, \eta$  物理论域模糊集隶属函数示意图

Fig. 2 The membership function of  $y, \theta, \eta$  in physical universe

由此可以形成  $5 \times 7 = 35$  条控制规则，见表 1。

其中各个模糊集对应的模糊语言值分别为： $y$  的模糊语言值  $D, DC, C, UC, U$  分别对应于“下”，“下中”，“中”，“上中”，“上”； $\theta$  的模糊语言值  $Nb, Nm, Ns, Ze, Ps, Pm, Pb$  分别对应“负大”，“负中”，“负小”，“零”，“正小”，“正中”，“正大”； $\eta$  的模糊语言值  $NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB$  分别对应“负大”，“负中”，“负小”，“零”，“正小”，“正中”，“正大”。

按照插值思想，每条规则都可以视为一组由控制输入到控制输出的模糊数据对，整个规则库就可以视作控制规则数据集；依据插值方法得到的控制

表 1 自动倒车控制规则库  $\eta$  值  
Table 1 The control rule base of automatic truck backer-upper  $\eta$  values

$\theta$	$y$				
	$D$	$DC$	$C$	$UC$	$U$
$Pb$	$NB$	$NB$	$NM$	$NM$	$NS$
$Pm$	$NB$	$NB$	$NM$	$NS$	$PS$
$Ps$	$NB$	$NM$	$NS$	$PS$	$PM$
$Ze$	$NM$	$NM$	$ZE$	$PM$	$PB$
$Ns$	$NM$	$NS$	$PS$	$PM$	$PB$
$Nm$	$PS$	$PS$	$PM$	$PB$	$PB$
$Nb$	$PS$	$PM$	$PM$	$PB$	$PB$

函数将会还原每条规则，并在线丰富插值介于任意两条规则之间的输入数据的控制输出量。在具体操作时，只需要从表 1 中，提取所有的输入到输出的控制规则数据集即可。在遵循自动倒车实际物理论域的划分的情况下，表 1 可以简化为类似于查表法的模糊插值控制规则表<sup>[10]</sup>（见表 2）。

表 2 自动倒车模糊插值控制规则库  $\eta$  值  
Table 2 The fuzzy interpolative control rule base of automatic truck backer-upper  $\eta$  values

$\theta$	$y$				
	-10	-2	0	2	10
$\pi$	$-\frac{\pi}{9}$	$-\frac{\pi}{9}$	$-\frac{\pi}{18}$	$-\frac{\pi}{18}$	$-\frac{\pi}{60}$
$\frac{\pi}{2}$	$-\frac{\pi}{9}$	$-\frac{\pi}{9}$	$-\frac{\pi}{18}$	$-\frac{\pi}{60}$	$\frac{\pi}{60}$
$\frac{\pi}{5}$	$-\frac{\pi}{9}$	$-\frac{\pi}{18}$	$-\frac{\pi}{60}$	$\frac{\pi}{60}$	$\frac{\pi}{18}$
0	$-\frac{\pi}{18}$	$-\frac{\pi}{18}$	0	$\frac{\pi}{18}$	$\frac{\pi}{9}$
$-\frac{\pi}{5}$	$-\frac{\pi}{18}$	$-\frac{\pi}{60}$	$\frac{\pi}{60}$	$\frac{\pi}{18}$	$\frac{\pi}{9}$
$-\frac{\pi}{2}$	$\frac{\pi}{60}$	$\frac{\pi}{60}$	$\frac{\pi}{18}$	$\frac{\pi}{9}$	$\frac{\pi}{9}$
$-\pi$	$\frac{\pi}{60}$	$\frac{\pi}{18}$	$\frac{\pi}{18}$	$\frac{\pi}{9}$	$\frac{\pi}{9}$

在完成自动倒车的模型建立和规则数据集的提取工作后，根据式 (3) 的结论可得基于简易模糊插值控制的自动倒车的核心控制函数

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^4 (X_i(x) Y_j(y) z_{ij} + X_{i+1}(x) Y_{j+1}(y) z_{i+1,j+1} + X_{i+1}(x) Y_{j+1}(y) z_{i+1,j} + X_{i+1}(x) Y_{j+1}(y) z_{i,j+1}) \chi_{ij} \quad (5)$$

其中  $X_i, X_{i+1}, Y_j, Y_{j+1}$  分别对应输入变量  $y$  和  $\theta$  物理论域内的某个模糊集， $z_{ij}, z_{i+1,j}, z_{i,j+1}, z_{i+1,j+1}$  分别对应于控制量  $\eta$  物理论域内某个单点模糊集的峰点，

$$\text{另外 } \chi_{ij} = \begin{cases} 1, & (x, y) \in V_{ij}, i = 1, 2, \dots, 6; j = 1, \\ 0, & (x, y) \notin V_{ij} \end{cases}$$

2, ..., 4。

### 3 自动倒车仿真实验

在公式 (5) 作用下, 运用 MATLAB 软件编程不难实现倒车模型在各种倒车环境下的仿真曲线, 自动倒车的具体位置差分方程函数可以表示为

$$x(t+1) = x(t) + hv\cos(\theta(t)),$$

$$y(t+1) = y(t) - hv\sin(\theta(t)),$$

$$\theta(t+1) = \theta(t) + (v/l)h \tan(\eta(t))$$

其中,  $h$  表示采样步长, 在本文仿真中,  $h = 0.05$  s,  $t$  表示第  $t$  步。

选择 10 种初始状态进行倒车仿真实验, 均取得了理想的倒车效果。与常规模糊控制比较, 具有计算简便, 响应迅速, 几乎无超调, 很快的就进入到预定轨道  $y=0$ , 见图 3 中的 (a) - (j)。

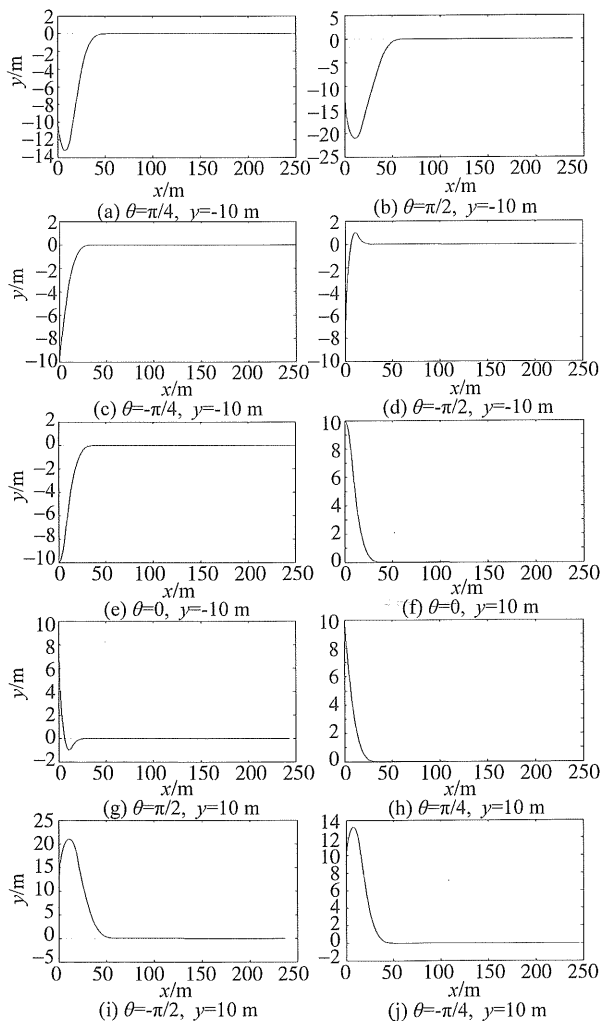


图 3 各种倒车环境下的仿真轨迹

Fig. 3 The various simulation of truck backer-upper in different initial condition

在没有对控制规则进行优化的情况下, 本文以较之变论域模糊控制更简便的方式实现了又快又好的倒车控制, 因此在硬件实现上具有很好的推广意义。对于一些具体参数补充如下: 仿真中汽车位置纵坐标  $y$  的量化因子  $k_y = 0.4$ , 输入量  $\theta$  的量化因子  $k_\theta = 2$ , 控制量  $\eta$  的比例因子  $k_\eta = 20$ 。在 10 种倒车实验中, 均采用相同的量化因子和比例因子, 显示出各种参数具有很好的普适性。

#### 参考文献:

- [1] NGUYEN D, WIDROW B. The truck backer-upper: an example of self-learning in neural networks [C]. Neural Networks for Control, 1989, 10: 357 - 363.
- [2] JAMES A. Fuzzy systems for control applications: the truck backer-upper [J]. The Mathematica Journal, 1994, 4(1): 64 - 69.
- [3] 杨昔阳, 尤晴曦, 李洪兴. 基于变论域理论的自动倒车控制[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2005, 41(4): 348 - 350.
- [4] 尤飞, 杨昔阳. 具有函数的泛逼近性能的模糊控制器的设计[J]. 数学的实践与认识, 2010, 40(23): 95 - 100.
- [5] 杨昔阳, 尤飞. 基于分层变论域模糊控制方法的倒车控制[J]. 模糊系统与数学, 2010, 24(2): 152 - 156.
- [6] 李洪兴. 模糊控制的插值机理[J]. 中国科学: E 辑, 1998, 28(3): 259 - 267.
- [7] 修智宏, 王伟. Type-II 型模糊控制器的结构分析与设计[J]. 微计算机信息, 2007, 23(1): 41 - 63.
- [8] 杨文光. 基于稀疏规则库下的模糊插值控制及其应用研究[D]. 西南交通大学硕士论文, 2009.
- [9] 李洪兴. Fuzzy 控制的本质与一类高精度 Fuzzy 控制器的设计[J]. 控制理论与应用, 1997, 14(6): 868 - 872.
- [10] 王立新. 模糊系统与模糊控制教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.