

文章编号: 1001-0920(2004)06-0659-04

## 基于 Sugeno 模糊模型的帆船控制方法研究

葛 艳<sup>1</sup>, 孟庆春<sup>1,2</sup>, 魏振刚<sup>1</sup>, 窦金凤<sup>1</sup>, 张 文<sup>1</sup>

(1. 中国海洋大学 计算机科学系, 山东 青岛 266071; 2. 清华大学 智能技术与系统国家重点实验室, 北京 100084)

**摘 要:** 针对非线性、时变的帆船航行系统, 提出一种基于 Sugeno 模糊模型的帆船控制新方法. 采集舵手的航行经验建立知识库, 将专家知识融合到控制系统中, 提高了控制系统的智能度; 采用 Sugeno 模糊模型, 将舵角的非线性控制局部线性化, 并设计相应的局部线性控制器, 通过模糊推理综合各局部线性控制器的输出, 得到全局控制量. 仿真结果表明, 该方法能实现对帆船航向的智能控制, 具有一定的实用价值.

**关键词:** 帆船; 模糊逻辑; Sugeno 模糊模型; 自动控制

**中图分类号:** TP273      **文献标识码:** A

## Research on sailboat control method based on Sugeno fuzzy model

GE Yan<sup>1</sup>, MENG Qing-chun<sup>1,2</sup>, WEI Zhen-gang<sup>1</sup>, DOU Jin-feng<sup>1</sup>, ZHANG Wen<sup>1</sup>

(1. Department of Computer Science, Ocean University of China, Qingdao 266071, China; 2. State Key Laboratory of Intelligent Technology and Systems, Tsinghua University, Beijing 100084, China. Correspondent: GE Yan, E-mail: geyanta@mail.ouc.edu.cn)

**Abstract:** A fuzzy control method based on Sugeno fuzzy model is proposed for the nonlinear and time-variant navigation system of sailboats. Sailing rules obtained from excellent helmsmen are included in a knowledge base to control the sailboat correctly in various conditions. The controller uses Sugeno fuzzy model to divide the nonlinear control system into several local linear models, based on which several local linear controllers are constructed. The global control output is obtained by combining all the local linear controllers output. Simulation results show that this method can efficiently implement autonomous navigation of sailboats.

**Key words:** sailboat; fuzzy logic; Sugeno fuzzy model; automatic control

### 1 引 言

帆船运动作为一种竞赛项目已正式列入奥运会的赛程. 帆船的行驶控制与普通的船舶不同, 由于没有燃气轮机和内燃机, 帆船的主要动力工具是风帆. 风帆可将风对帆面的作用力转换为使帆船前进的推进力<sup>[1]</sup>, 因此控制帆船行驶需要调整方向舵和风帆.

帆船在海上航行, 要受到海浪、海风及海流等环境的扰动作用. 因为帆船的航行控制对象具有非线性和时变性, 其所处的外部环境复杂多变, 所以其本身的数学模型和扰动模型难以精确建立<sup>[2,3]</sup>. 对此,

采用经典控制理论无法得到满意的控制效果, 甚至无法对系统进行控制, 而采用模糊逻辑控制则能达到良好的控制效果.

模糊控制器的模糊模型主要有 Mamdani 和 Sugeno 两种. Mamdani 模糊模型的结论部分是用语言值表示的模糊集合. 对于一个多输入多输出(MIMO)系统, 为了获得满意的控制精度和响应速度, 通常要在输入输出变量空间的每一维上定义多个语言变量, 因而使模糊语言规则数显著增加. 另外, 由于各规则之间的耦合作用, 对某一规则的修改对于

收稿日期: 2003-05-29; 修回日期: 2003-07-23.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60374031); 山东省自然科学基金资助项目(Y2002G18).

作者简介: 葛艳(1975—), 女, 山东泰安人, 博士生, 从事智能控制、模糊信息处理的研究; 孟庆春(1958—), 男, 山东招远人, 教授, 博士生导师, 从事智能控制、模糊识别等研究.

整个模糊控制器的影响将难以控制. 而 Sugeno 模糊模型是一种非线性模型, 适于表达复杂系统的动态特性, 可作为解决此类问题的一种可行方法. 另外, Sugeno 模糊模型的结论部分采用线性方程式描述, 因此便于采用传统的控制策略设计相关的控制器, 并对控制系统进行分析<sup>[46]</sup>.

基于以上分析, 本文提出一种基于 Sugeno 模糊模型的自动控制方向舵和调整帆转角的方法, 目的是在一定时间段内获得最佳船速, 实现对帆船的有效控制. 模拟仿真实验证明了该方法的有效性.

### 2 帆船控制变量

控制帆船应考虑的主要变量如图 1 所示. 图中各变量的定义如下:  $r$  为预期航向,  $\theta$  为有效航向,  $\psi = r - \theta$  为漂移角 (即有效航向与预期航向之间的航向差值),  $\alpha$  为相对风向角,  $\beta$  为迎风角 (即帆与相对风之间的夹角),  $\delta$  为舵角,  $\omega$  为帆的调整角或称转帆角 (即帆与航向之间的夹角).  $\theta = \theta_0 + \omega$ , 动态变量取值范围分别为:  $0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$ ,  $0^\circ \leq \psi \leq 360^\circ$ ,  $-35^\circ \leq \alpha \leq 35^\circ$ ,  $0^\circ < \beta < 90^\circ$ .

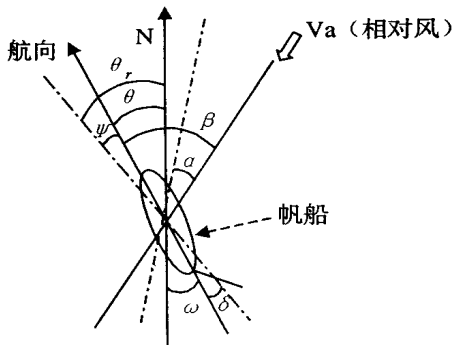


图 1 帆船状态变量

帆船前进的动力主要依靠风力, 而风向对帆推进作用的大小至关重要. 舵手必须正确掌握风向角, 才能充分利用风力来驾驶帆船. 风向角共有 6 类, 为简化控制, 可将其分为两类: 一类称为迎风角 ( $0^\circ \sim 80^\circ$ ); 另一类称为顺风角 ( $80^\circ \sim 180^\circ$ ). 这样, 就有两种驾船策略: 一种是当风向角小于  $80^\circ$  时, 顶风行驶; 另一种是当风向角大于  $80^\circ$  时, 顺风自由航行. 对于第 1 种情况, 必须强制性地保持一定的相对风向角, 以保证帆船以最佳速度行驶. 在此状态下, 航向信息仅仅用于估计当前位置, 帆船必须时时抢风航行. 对于第 2 种情况, 帆船可以最大速度按预期的航向行驶. 两种情况下都要求调整帆转角, 以保证为行船带来最大的牵引力.

通过对风帆进行空气动力学分析可知, 最佳调

整角  $\omega$  ( $\beta$ ) 应为相对风向角的一半, 即  $\omega$  ( $\beta$ ) =  $\alpha/2$ . 对于指定模式的帆船, 船速可在速度极坐标曲线中由真风角确定. 一般当相对于真风向的角度小于  $40^\circ$  时, 帆船无法航行. 顶风航行的最佳航向与真风方向大约成  $45^\circ$  角<sup>[2]</sup>.

### 3 帆船控制数学模型

帆船在海上航行所受的综合作用力为

$$F = F_1 + F_2 + F_3 \tag{1}$$

式中:  $F_1$  为风对帆产生的作用力,  $F_2$  为海水对船产生的作用力,  $F_3$  为依据海上状态由风、波浪、海流产生的随机扰动作用力. 这些作用力通常都是非线性、时变的. 这里仅考虑水平运动而忽略垂直方向上的运动, 建立一个简单的动力学模型用于设计自动导航系统. 帆船的平面运动如图 2 所示. 舵角  $\delta$  与航向偏差  $\psi$  之间的传递函数为

$$\frac{\delta(s)}{\psi(s)} = \frac{K(s_3 + 1)}{s(s_1 + 1)(s_2 + 1)} \tag{2}$$

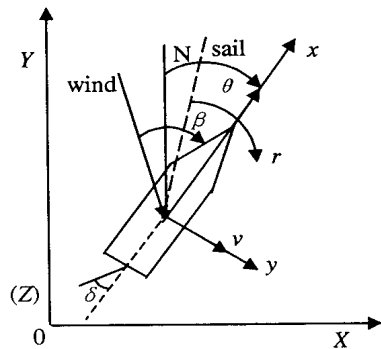


图 2 帆船平面运动示意

本文采用如下包含风、浪、流等干扰的非线性面向船舶运动仿真的数学模型<sup>[7]</sup>:

$$\begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & 0 & a_{24} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1/T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ r \\ \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1/T \end{bmatrix} r + \begin{bmatrix} [(I_{(2)})^{-1}] \begin{bmatrix} Y_{wind} & Y_{wave} & Y_{current} \\ N_{wind} & N_{wave} & N_{current} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \end{bmatrix} \tag{3}$$

式中:  $v$  为横漂速度,  $r$  为转首角速度,  $\theta$  为实际航向角,  $\psi$  为实际舵角,  $r_0$  为给定航向角.

对于小帆船的控制而言, 模型 (3) 会加重非线性和时变的影响. 因此, 建立有效的小帆船动力学模型很困难, 即使建立也是经过大量的线性化处理, 导致许多非线性因素和关键环节被忽略, 使设计和仿

真难以保证. 传统的控制技术如 PID 控制显然并不适用. 相比之下, 采用模糊逻辑控制, 将舵手的经验与传统的控制技术相结合, 则可达到满意的控制效果.

### 4 基于 Sugeno 模糊模型的帆船控制器

帆船模糊控制器采用 Sugeno 模糊模型, 首先将非线性动态控制局部线性化表示; 然后根据这些局部线性化模型, 采用线性控制的方法分别设计控制器; 最后通过模糊推理得到各控制器的加权均值, 使各控制器之间得以平滑切换. 整个模糊控制系统如图 3 所示. 控制变量包括舵角  $\delta$  和帆的调整角  $\omega$ , 受控变量则包括航向  $\beta$  和相对风向角  $\theta$ . 模糊控制器根据航向与给定参考值的差值, 调整舵角以保持航向, 调整转帆角以达到最大的船速.

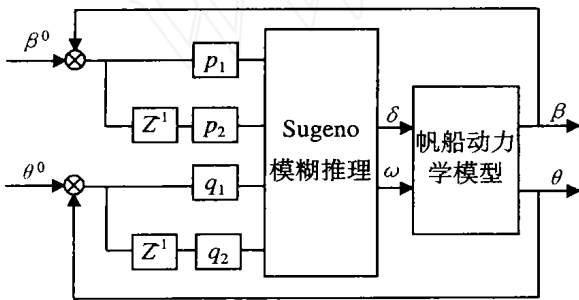


图 3 模糊控制系统

Sugeno 模糊模型的控制规则如下<sup>[4]</sup>：

If  $x_1$  is  $A_1$  and  $x_2$  is  $A_2$  and ...and  $x_n$  is  $A_n$ ,

Then  $z_0 = k_0 + k_1x_1 + \dots + k_nx_n$ .

总输出为所有结果的加权均值, 即

$$z = \frac{\sum_i w_i z_i}{\sum_i w_i}, \tag{4}$$

式中  $w_i$  为比例系数, 是确定值. 要保证无论输入为何值, 都有  $w_i > 0$ .

依据前面给定的航行策略: 顶风行驶 ( $0^\circ < \beta - \beta^0 < 80^\circ$ ) 或自由行驶 ( $80^\circ < \beta - \beta^0 < 180^\circ$ ), 制定相应的控制规则.

1) 当  $0^\circ < \beta - \beta^0 < 80^\circ$  时, 控制规则为

If  $\beta - \beta^0$  is Small and  $\beta - \beta^0$  is Negative and  $\theta - \theta^0$  is Negative,

Then  $\delta = p_0 + p_1(\beta - \beta^0) + p_2(\theta - \theta^0)$ .

(5)

2) 当  $80^\circ < \beta - \beta^0 < 180^\circ$  时, 控制规则为

If  $\beta - \beta^0$  is Large and  $\beta - \beta^0$  is Negative and  $\theta - \theta^0$  is Negative,

Then  $\delta = q_0 + q_1(\beta - \beta^0) + q_2(\theta - \theta^0)$ .

(6)

式中:  $\beta^0$  是从风帆极坐标曲线得到的最佳相对风向角<sup>[8]</sup>,  $\beta^0$  是期望航向. 导数  $(\beta - \beta^0)$  和  $(\theta - \theta^0)$  可提高控制器的实时性和稳定性.

本文的目标是开发一个完整的规则库, 同时寻找尽可能少的规则以简化规则库. 模仿一个有经验舵手的操作行为, 可得到如下 3 个基本规则, 用这 3 个规则同样能很好地驾驶帆船.

1) 顶风行驶时 ( $\beta - \beta^0$  值较小), 为尽快到达目标点, 帆船要不断地抢风行驶, 因为平均航向偏差  $\beta - \beta^0$  很小, 故可应用航位推测法按期望的航向行驶.

2) 自由航行时,  $\beta - \beta^0$  值的大小不是很重要, 因为帆转角的变化对于速度提高的影响相对较小, 重要的是保持航向, 按预定最短航程行驶.

3) 帆的调整角  $\omega$  应为相对风向角的一半, 即  $\omega = (\theta - \theta^0) / 2$ .

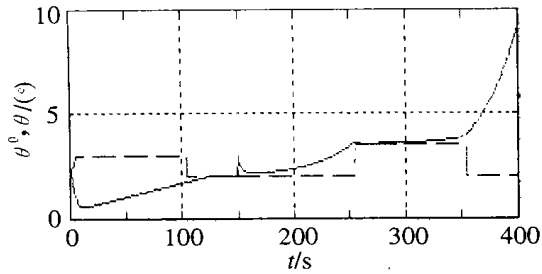
整个系统可看作两个单独控制器的组合: 一个是顶风时, 不断地抢风行驶提高船速; 另一个是顺风时, 保持航向的控制, 这比控制风向角更重要. 每个控制器的作用都取决于  $\beta - \beta^0$  值的大小. 此外, 还应建立第 3 个控制器, 用于实现两个控制器的平滑过渡和选择, 并将所有的策略输出到一个规则库. 以上方法的选择, 是为简化每个控制器的表达式, 使其仅包含一个规则. 如果控制行为受很多规则的影响, 规则库中就会出现很多不确定值, 难以精确控制. 这里所选的 Sugeno 控制器允许减少规则的数量.

### 5 仿真实验

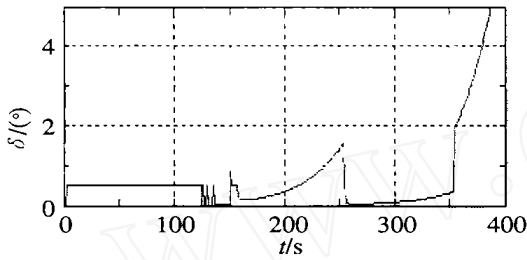
利用 Matlab 模糊逻辑工具箱中的 Fismat 进行帆船控制仿真实验. 各输入变量  $\beta - \beta^0$ ,  $(\beta - \beta^0)$ ,  $\theta - \theta^0$ ,  $(\theta - \theta^0)$  的论域分别为:  $[0, 10]$ ,  $[-10, 10]$ ,  $[-10, 10]$ ,  $[0, 10]$ ,  $[-10, 10]$ . 图 3 中的系数  $p_1$  和  $q_1$  分别取 -1 和 -2, 导数的系数  $p_2$  和  $q_2$  分别取 -0.1 和 -0.2, 语言变量取负值、零和正值, 采用三角形隶属函数表示.

前两个控制器的规则是相同的. 风向偏差或航向偏差越大, 舵角的改变幅度也越大. 图 4(a) 给出了顺风行驶时航向期望值与实际输入值的变化曲线, 其中: 实线代表实际输入值  $\beta$ , 虚线代表对应的期望值  $\beta^0$ . 相应的输出舵角变化如图 4(b) 所示. 在  $t = 150$  s 时, 对期望值加入干扰信号, 从输出舵角曲线可以看出, 干扰信号得到了抑制, 没有产生超调. 顶风行驶的实验结果与此类似, 不再详细介绍.

第 3 个控制器应使用具有两个控制规则的 Sugeno 控制器 (顶风航行和自由航行), 输入为两个



(a) 期望值与实际输入值的变化



(b) 舵角的变化

图4 仿真曲线

模糊值(小的顶风航行角和大的自由航行角),输出舵角则采用比例导数表达式.隶属函数和比例导数的系数值依据经验来选择和优化.

## 6 结论

本文介绍一种基于 Sugeno 模糊模型的帆船航行模糊控制器.首先采用模糊逻辑控制方法,将舵手的航行经验与传统的控制技术相结合,提高了控制器的智能度;然后采用 Sugeno 模糊模型,将舵角的非线性动态控制局部线性化表示,并根据这些局部线性化模型,采用线性控制的方法分别设计控制器;最后通过模糊推理得到全局控制量.仿真实验证明,该方法能有效地控制复杂的帆船航行系统,对于帆船运动员进行科学训练是一种有效的方法.

## 参考文献(References):

- [1] 宋协法,付道军.辅助风帆对船舶航行性能影响的理论研究[J].青岛海洋大学学报,2002,32(3):391-396.  
(Song X F, Fu D J. Theoretical study on sailing performance of the ship with auxiliary sails[J]. *J of Ocean University of Qingdao*, 2002,32(3):391-396.)
- [2] 缪国平.帆船运动的力学原理[J].力学与实践,1994,16(1):9-18.  
(Miao G P. Dynamics theory for steering a sailboat[J]. *Lixue Yu Shijian*, 1994,16(1):9-18.)
- [3] Hedges K L, Richards P J. Computer modeling of downwind sails[J]. *J of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1996, 63(1): 95-110.
- [4] 从爽.神经网络、模糊系统及其在运动控制中的应用[M].合肥:中国科学技术大学出版社,2002.110-134.
- [5] 李少远,王群仙,李焕芝,等. Sugeno 模糊模型的辨识与控制[J].自动化学报,1999,25(4):488-492.  
(Li S Y, Wang Q X, Li H Z, et al. Identification and control based on Sugeno's fuzzy model[J]. *Acta Automatica Sinica*, 1999,25(4):488-492.)
- [6] Takagi T, Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control[J]. *IEEE Trans on SMC*, 1985,15(1):116-132.
- [7] 郭晨,苏辉,杨国勋.基于 GA-FCMAC 算法的船舶运动智能控制器[J].中国航海,2002,(1):12-15.  
(Guo C, Su H, Yang G X. GA-FCMAC algorithm based intelligent controller of ship steering[J]. *Navigation of China*, 2002,(1):12-15.)
- [8] Flay R G J, Vuletic I J. Development of a wind tunnel test facility for yacht aerodynamic studies[J]. *J of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1995,58(3):231-258.

(上接第 658 页)

- [6] Sung-woo Kim, Jurjang Lee. Design of a fuzzy controller with fuzzy sliding surface[J]. *Fuzzy Set and System*, 1995,71(30):359-367.
- [7] Wang L X. Stable adaptive control of nonlinear systems[J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 1993,1(2):146-155.
- [8] 朴营国,张俊星,张化光.基于模糊逻辑的一类非线性系

统直接自适应控制[J].控制理论与应用,2001,18(1):45-50.

(Piao Yingguo, Zhang Junxing, Zhang Huaguang. Direct adaptive control of a class of nonlinear system based on fuzzy logic[J]. *Control Theory and Applications*, 2001,18(1):45-50.)