

## 应用自适应模糊控制实施船舶动力定位

芮世民, 朱继懋, 黄根余

(上海交通大学 水下工程研究所, 上海 200030)

**摘要:**在船舶动力定位中引入自适应模糊控制方法,即采用近似的线性模型通过 Kalman 滤波得到船舶低频运动的状态估计值,模糊化后作为模糊控制器的输入实现定位控制。模糊控制器的核心为自适应模糊逻辑系统,由于它具有任意的非线性映射能力,从而使控制器的参数能够在定位过程中不断调整,以适应外部环境变化。仿真结果表明,该方法在不同海况下均能达到很好的控制效果。

**关键词:**海洋工程;动力定位;模糊控制;自适应控制

**中图分类号:**U 664.32;TP 273 **文献标识码:**A

## Adaptive Fuzzy Control for Ship Dynamic Positioning System

RUI Shi-min, ZHU Ji-mao, HUANG Gen-yu

Inst. of Underwater Eng., Shanghai Jiaotong Univ., Shanghai 200030, China

**Abstract:** A fuzzy adaptive control scheme was proposed in the dynamic positioning. The ship low frequency motion states were estimated through Kalman filtering based on an approximate linear model. After being fuzzified they were put into a fuzzy controller, the main part of which is a self-adaptive fuzzy system. Because of the universal nonlinear mapping capability of the self-adaptive fuzzy system, the parameters of the controller can be self-tuned according to the environment. The simulations at different sea states show that the scheme is effective.

**Key words:** ocean engineering; dynamic positioning; fuzzy control; adaptive control

船舶动力定位就是采用一种控制系统驱动船舶推进器来抵消风、浪、流等作用于船上的环境外力,而使船尽可能地保持在海平面某要求的位置上。随着人类对海洋的开发和探索,动力定位显得越来越重要。

目前,在动力定位中通常都是将系统模型分为高频子系统和低频子系统两部分,通过 Kalman 滤波得到低频子系统的状态估计值,用自校正滤波器处理高频运动以实时修正对低频运动的估计,仅以低频状态估计值反馈构成 Linear Quadratic Gaussian(LQG)控制律,以保证控制系统只响应船舶低频运动,而不响应高频运动,避免不必要的能量浪费和推进器的磨损<sup>[1,2]</sup>。然而,船在海上其动力学特性

很难用精确的数学模型加以描述,而风、浪、流等外部随机干扰的统计特性也随着不同的海况而发生很大变化且难以预知,这和 LQG 控制所要求的精确的线性模型及扰动为统计特性已知的 Gauss 型白噪声相去甚远。在这种情况下,非但不能达到所谓控制最优,甚至不能保证系统的稳定。鉴于此,本文提出自适应模糊控制策略以实施船舶动力定位。其基本思想是,一方面为了避免响应高频,仍采用 Kalman 滤波估计出低频系统的状态值,并将其模糊化,作为模糊控制器的输入实现定位控制。模糊控制器的核心为自适应模糊逻辑系统,由于它具有任意的非线性映射能力<sup>[3]</sup>,从而使控制器的参数能够在定位过程中通过自学习不断调整,以适应外部环境变化。这样,一方面由于基于系统模型的 Kalman 滤波器的输出在控制过程中最终要经模糊化而变换

收稿日期:1999-04-18

作者简介:芮世民(1972~),男,博士。

成模糊变量,于是可大大降低对系统建模的精度要求;再者,模糊控制器的设计并不是像LQG控制那样基于一假想的精确线性模型,而是模糊规则集,并且模糊规则亦因环境变化而变化,从而使控制具有很强的鲁棒性和自适应性。

鉴于采用Kalman滤波估计低频运动状态,以及稳定水动力、二阶波浪漂力,可认为是相对于过程噪声的缓变量最终通过最小二乘得出估计值,有关这方面的文献已很多<sup>[1,2,3]</sup>,本文着重介绍在得到这一系列估计值后自适应模糊控制的构成。

## 1 标准模糊逻辑系统

在文献[3]中,Wang等提出了一类采用单点模糊化、高斯型隶属函数、Sup-\*合成推理运算以及中心平均非模糊化的模糊逻辑系统,并证明了该类模糊系统具有任意的非线性映射能力,本文称其为标准模糊逻辑系统。当系统有 $n$ 个输入1个输出时,其模糊规则形式如下:

$$R^j: \text{如果 } x_1 \text{ 为 } A_1^j \text{ 且 } \cdots \text{ 且 } x_n \text{ 为 } A_n^j, \text{ 则 } y \text{ 为 } B^j \quad (1)$$

式中, $A_i^j$ 和 $B^j$ 分别为 $U_i \subset R$ 及 $V \subset R$ 上的模糊集,设 $M$ 为模糊规则总数,则 $j=1,2,\dots,M$ 。

结论1<sup>[3]</sup> 具有 $M$ 条形如式(1)语言规则的模糊系统,如采用单点模糊化、Sup-\*合成推理运算、高斯型隶属函数和中心平均非模糊化,则构成如下的函数映射关系:

$$y = f(x) = \sum_{j=1}^M \theta^j \left( \prod_{i=1}^n \mu_{A_i^j}(x_i) \right) / \sum_{j=1}^M \left( \prod_{i=1}^n \mu_{A_i^j}(x_i) \right) \quad (2)$$

式中, $f: U = U_1 \times \cdots \times U_n \subset R^n \rightarrow V \subset R, x = (x_1, \dots, x_n)^T \in U$ , 而

$$\mu_{A_i^j}(x_i) = \exp(-(x_i - \bar{x}_i^j)^2 / (\sigma_i^j)^2)$$

定义为高斯隶属函数; $\bar{x}_i^j$ 和 $\sigma_i^j$ 为实值参数; $\theta^j$ 为输出空间 $V$ 上使 $\mu_{B^j}(y)$ 达到最大值的点。

$$\text{令 } \xi_i(x) = \prod_{j=1}^M \mu_{A_i^j}(x_i) / \sum_{j=1}^M \left( \prod_{i=1}^n \mu_{A_i^j}(x_i) \right)$$

则

$$y = f(x) = \sum_{j=1}^M \theta^j \xi_j(x) = \theta^T \xi(x) \quad (3)$$

式中, $\theta = (\theta_1, \dots, \theta_M)^T, \xi(x) = (\xi_1(x), \dots, \xi_M(x))^T$ 。

结论2<sup>[1]</sup> 对任何定义在致密集 $U \subset R^n$ 上的连续函数 $g$ ,及任意的 $\epsilon > 0$ ,一定存在形如式(2)的模糊逻辑系统 $f$ ,使得

$$\sup_{x \in U} |f(x) - g(x)| < \epsilon$$

由此可见,标准模糊逻辑系统,一方面它是基于“如果—则”规则建立起来的模糊系统,其输入输出均为真正意义上的模糊集;另一方面,从函数逼近的角度它又能实现任意的非线性映射。

## 2 自适应模糊控制

假设模糊控制基于形如式(1)的 $M$ 条模糊规则,在控制过程中需要不断调整这些规则,即调整模糊集参数 $\bar{x}_i^j$ 、 $\sigma_i^j$ 及 $\theta^j$ 的值以达到自适应控制的目的。为了使问题简化,本文仅调整参数 $\theta^j$ ,而将 $\bar{x}_i^j$ 及 $\sigma_i^j$ 取为定值。这样虽然会使控制性能受到影响,但因为可调参数呈线性而给自适应律的设计带来极大方便。考虑如下系统:

$$\dot{y}^{(n)} = f(x) + bu \quad (4)$$

式中: $f$ 为未知函数; $b$ 为未知正常数; $u, y$ 分别为输入与输出,向量 $x = (x_1, \dots, x_n)^T \in R^n$ ,其元素可能含有 $y$ 的导数 $y^{(j)} (j=1, \dots, n-1)$ 及其他独立变量。假定在控制过程中得到的 $x$ 的量值为 $\hat{x}$ ,如前所述,控制规则为形如式(1)的 $M$ 条模糊规则,在得到状态向量 $\hat{x}$ 时,按单点模糊化、Sup-\*合成推理运算以及中心平均非模糊化,则得到如式(3)的控制量 $u_c(\hat{x}|\theta)$ 。另外,在控制中还增加一项 $u_s(\hat{x})$ ,称为监督控制,它只是在系统误差超过一定幅度后起到强迫系统恢复稳定的作用。这时总体控制为

$$u = u_c(x|\theta) + u_s(\hat{x})$$

代入到式(4)可得

$$\dot{y}^{(n)} = f(x) + b(u_c(x|\theta) + u_s(x)) \quad (5)$$

假定控制任务是要强迫 $y$ 跟踪一给定的参考信号 $y_m(t)$ ,定义误差 $e = y_m - y$ 。显然,如果函数 $f$ 和常数 $b$ 已知,则令控制

$$u^* = (-f + \dot{y}_m^{(n)} + k^1 e)/b \quad (6)$$

将会迫使 $e$ 收敛到零,其中 $e = (e, \dot{e}, \dots, e^{(n-1)})^T$ ,且 $k = (k_n, \dots, k_1)^T$ ,使 $s^n + k_n s^{n-1} + \dots + k_1 = 0$ 的所有根都位于左半开平面上。利用式(6)将式(5)变换,得

$$\dot{e} = A_e e + b_e(u^* - u_c(\hat{x}|\theta) - u_s(\hat{x})) \quad (7)$$

式中

$$A_e = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \\ -k_n & -k_{n-1} & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & -k_1 \end{bmatrix}, b_e = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ b \end{bmatrix}$$

### 2.1 监督控制

定义误差函数 $V_e = e^T P e / 2$ ,其中 $P$ 为正定对称矩阵,满足如下李雅普洛夫方程:

$$A_e^T P + P A_e = -Q \quad (8)$$

式中:  $Q$  为任意给定的正定对称矩阵. 由于  $\Lambda$  为一稳定矩阵, 由李雅普洛夫稳定性定理可知  $P$  存在. 利用式(7)及式(8), 可得

$$\dot{V}_e = -e^T Q e / 2 - e^T P b_c (u^* - u_c(\hat{x}|\theta) - u_c(\hat{x})) \leq -e^T Q e / 2 + |e^T P b_c| (|u^*| + |u_c|) - e^T P b_c u_c \quad (9)$$

假定  $|f(x)| \leq C_f$  及  $b \geq b_L$ ,  $C_f, b_L$  为已知常数. 事实上, 这种假定是合理的, 通过后面的仿真实验可见. 在动力定位中, 当  $y$  表示在某个方向上的输出位移(横荡、纵荡或艏摇)时, 则  $f + bu$  表示为该方向上的船体运动加速度. 通过对加速度的估计, 不难确定  $C_f$ ; 另外, 通过对船舶运动时附加质量与附加惯量的估算亦容易得到  $b_L$ . 这时取

$$u_c(\hat{x}) = I^* \operatorname{sgn}(e^T P b_c) (|u_c| + (C_f + |y_m^{(n)}| + |k^T e|) / b_L) \quad (10)$$

式中, 如果  $V_e > \bar{V}$  ( $\bar{V}$  为事先选定的常数) 时,  $I^* = 1$ , 否则  $I^* = 0$ . 显然当  $V_e > \bar{V}$  时, 将式(10)及式(6)代入式(9)即可得  $\dot{V}_e \leq -e^T Q e / 2 \leq 0$ . 由此可见, 使用监督控制  $u_c$ , 总能有  $V_e \leq \bar{V}$ , 将系统的误差限定在一定的幅度之内, 从而使之稳定.

## 2.2 自适应律设计

首先定义最优参数向量

$$\theta^* = \arg \min_{\theta} (\sup_t |u_c(x|\theta) - u^*|)$$

上式的意义即是在所有的参数向量  $\theta$  中,  $\theta^*$  使括号中的量达到最小. 基于此, 定义最小近似误差

$$\omega = u_c(\hat{x}|\theta^*) - u^* \quad (11)$$

利用式(11)将式(7)变换成

$$\dot{e} = \Lambda e + b_c (u_c(x|\theta^*) - u_c(\hat{x}|\theta)) - b_c u_c(x) - b_c \omega \quad (12)$$

由于  $u_c(\hat{x}|\theta)$  取式(3)的形式, 令  $\phi = \theta^* - \theta$ , 将其代入式(12), 则得

$$\dot{e} = \Lambda e + b_c \phi^T \xi(\hat{x}) - b_c u_c(x) - b_c \omega$$

定义李雅普洛夫函数

$$V = e^T P e / 2 + b \phi^T \phi / (2\gamma)$$

其中,  $\gamma$  为给定的常数,  $P$  即为式(8)所确定的正定对称矩阵. 于是可得

$$\dot{V} = -e^T Q e / 2 + b \phi^T (\gamma e^T P b_c \xi(\hat{x}) + \dot{\phi}) / \gamma - e^T P b_c u_c - e^T P b_c \omega$$

取自适应律为

$$\dot{\theta} = \gamma e^T P b_c \xi(\hat{x})$$

这时由于  $e^T P b_c u_c \geq 0$  及  $\dot{\phi} = -\dot{\theta}$ , 所以

$$\dot{V} \leq -e^T Q e / 2 - e^T P b_c \omega$$

由于  $e^T P b_c \omega$  与最小近似误差  $\omega$  有相同的阶, 而对于

$\omega$ , 由自适应模糊逻辑系统任意的非线性映射能力, 可以希望通过足够多的规则(可调参数数目增多)使之变得很小. 所以不难看出最终结果是, 一方面监督控制使系统的误差稳定在一定范围之内, 即  $V_e \leq \bar{V}$  (这时  $\bar{V}$  可以取得较大), 在此基础上, 通过自适应律又进一步使之趋于很小的量级. 尽管误差不一定能够最终趋于零, 但其精度却已完全能够满足动力定位的要求. 仿真实验也证实了这个结果.

## 3 仿真实验及应用结果

这里仅研究横荡与艏摇两个运动, 而认为纵荡运动是与之解耦的, 可以单独处理. 船舶运动的非线性低频模型如下<sup>[1]</sup>:

$$\dot{y} = -2.40v|v| + 0.037r|r| + 0.544\zeta + 0.544Y \quad (13)$$

$$\dot{\phi} = 3.11v|v| - 1.95r|r| + 12.05\delta + 12.05N \quad (14)$$

式中:  $y, \phi$  分别为横荡位移及艏摇角度;  $v = \dot{y}$  及  $r = \dot{\phi}$  为相应的速度;  $Y, N$  为两方向上推进器的输出力或力矩, 即控制量;  $\zeta, \delta$  则为环境外力或力矩. 显然, 该模型具有式(4)的标准形式, 从而可以采用自适应模糊控制. 这时  $v, r$  及  $\zeta, \delta$  为状态量. 现假定在实施定位控制时仅得到如下近似的线性模型:

$$\dot{y} = -0.649v + 0.0087r + 0.544\zeta + 0.544Y + 0.544\omega_1 \quad (15)$$

$$\dot{\phi} = 0.0075v - 0.0046r + 12.05\delta + 12.05N + 9.785\omega_2 \quad (16)$$

$$y_1 = y + v_1 \quad (17)$$

$$\phi_1 = \phi + v_2 \quad (18)$$

式中:  $\omega = (\omega_1, \omega_2)^T, v = (v_1, v_2)^T$  分别为过程及测量 Gauss 白噪声向量, 协方差矩阵为  $\operatorname{diag}\{4 \cdot 10^{-6}, 9 \cdot 10^{-5}\}$  及  $\operatorname{diag}\{10^{-5}, 1.22 \cdot 10^{-5}\}$ ;  $y_1, \phi_1$  为相应量的测量值, 其他符号的意义同上.

在仿真中, 采样时间取为 0.1, 取  $\gamma = 1, b_L = 0.1, C_f = 0.15$ , 针对  $v, r$  分别定义了 6 个模糊集, 对  $\zeta, \delta$  则分别定义了 4 个模糊集, 其隶属函数均取为  $\mu(x) = \exp(-(x - x_0)^2 / \sigma^2)$  的高斯型函数,  $x_0$  及  $\sigma$  的具体值见表 1. 以上所有数据都已经无因次化处理.

为了检验当外部环境因素发生很大变化时控制系统的自适应能力, 仿真首先在 Beaufort 8 级海况下进行, 在  $t = 120$  以后改变为 Beaufort 5 级海况. 这主要是由于 Beaufort 5 级及 Beaufort 8 级分别代表了典型的平静海面及汹涌海面的情况. 船的目标

位置定在原点即(0,0,0)处,开始时船亦处于原点。

表1 模糊隶属函数参数

Tab.1 Parameters of the membership functions

	$x_1$	$\mu_1$	$x_2$	$\mu_2$	$x_3$	$\mu_3$	$\sigma$
$y$	-0.35	0.21	-0.07	0.07	0.21	0.35	0.12
$r$	-3	1.8	-0.6	0.6	1.8	3	1.2
$\phi$	-0.45	-0.27	-0.09	0.09	0.27	0.45	0.18
$\delta \times 10^4$	-0.6	-0.36	-0.12	0.12	0.36	0.6	0.24

仿真结果见图1,其中 $y$ 为横荡位移, $\phi$ 为艏摇角度, $t$ 为时间,均为无因次量。

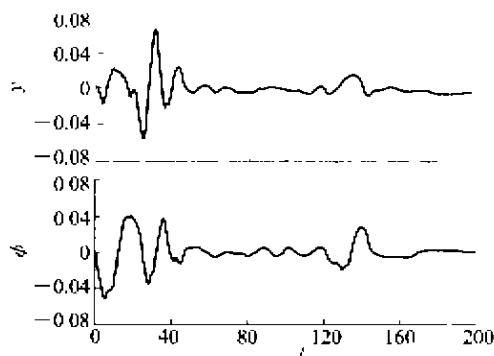


图1 动力定位在点(0,0,0)的仿真结果

Fig.1 The simulation results at (0,0,0) of the ship dynamic positioning system

不难看出,除刚开始时,自适应模糊逻辑系统需要对船舶运动的非线性模型进行学习以调整自身参数,自校正的Kalman滤波对船体运动高频参数的估计值也需有一个稳定过程之外,结果是非常令人满意的。特别是,当海况从Beaufort 8级变为Beaufort 5级时,仅有一个短暂的波动阶段又很快

趋于稳态,表现出控制系统很强的环境适应能力。

## 4 结 论

本文采用自适应模糊控制实施船舶动力定位,一方面无需建立精确的动力学模型,再者控制器可以通过自学习调整参数以适应诸如风、浪、流等外部随机扰动的统计特性因不同海况而发生的变化,使控制具有很强的鲁棒性及自适应性。在不同海况下的仿真结果表明,这种方法在动力定位中的应用是行之有效的。

## 参考文献:

- [1] Fung P T K, Grimble M J. Dynamic ship positioning using a self-tuning Kalman filter[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1983, AC-28(3): 339~349.
- [2] Fong Y M, Kubik K. Kalman filtering and optimal control strategies for dynamic positioning system [A]. In: Navigating the Earth and Beyond Proceedings of the National Technical Meeting [C]. VA, USA, 1994. 901~907.
- [3] Wang L X. Fuzzy systems are universal approximators [A]. In: Proc IEEE Int Conf Fuzzy System [C]. San Diego, CA, USA, 1992. 1163~1170.
- [4] Panuska V. A new form of the extended Kalman filter for parameter estimation in linear systems with correlated noise[J]. IEEE Trans Automat Contr, 1980, AC-25: 229~235.
- [5] Wise D A, English J W. Tank and wind tunnel tests for a drill-ship with dynamic position control [A]. In: Off-shore Technol Conf [C]. TX, 1975, 3: 103~119.

下期发表论文摘要预报

## 应用倒谱特征的带噪语音端点检测方法

韦晓东, 胡光锐, 任晓林

(上海交通大学与贝尔实验室通信和网络联合实验室, 上海交通大学 电子工程系, 上海 200030)

**摘 要:**传统的语音端点检测方法以信号的短时能量、过零率等简单特征作为判决特征参数。这些方法在实际应用中,尤其当信号信噪比较低时,无法满足系统的需要。文中利用语音信号的倒谱特征作为判决抽样信号帧是否是语音信号的依据,并提出了倒谱距离测量法和循环神经网络法。通过对宽带噪声-白噪声干扰情况和一种特殊噪声——汽车噪声情况的实验,发现倒谱特征参数的语音信号端点检测方法在噪声环境下具有传统的能量方法无法比拟的优越性,更适合于实际应用。