

文章编号: 0255-8297(2000)03-0211-03

211-213

自适应模糊建模及其在船舶
动力定位中的应用芮世民¹, 朱继懋²

(1. 上海交通大学 机械工程学院, 上海 200030; 2. 上海交通大学 海洋工程学院, 上海 200030)

摘 要: 针对船在海上其动力学模型很难精确建立, 而且诸如风、浪、流等外部随机干扰的统计特性也在不断变化, 作者在船舶动力定位中采用自适应模糊逻辑系统实时学习船的漂移动力学关系实现对系统的建模, 并在此基础上预测为使船在下一时刻与预定位置误差最小所需的控制力, 最终达到船舶动力定位的目的。仿真结果说明了该方法在不同海况下均能达到很好的定位控制效果。

关键词: 动力定位; 模糊逻辑系统; 自适应建模; 海洋工程

中图分类号: U664.32; TP273

文献标识码: A

U661.3

Adaptive Fuzzy Modeling and Its Use in Ship Dynamic Positioning

RUI Shi-min¹, ZHU Ji-mao²

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China;

2. School of Ocean Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: Ship dynamics is always hard to model, and the statistics of stochastic environment forces (wind, waves, current flow, etc.) are changing all the time in different sea states. Therefore, the authors introduce an adaptive fuzzy logic system in ship dynamic positioning. The dynamic model is obtained by learning the ship's drift dynamic behavior through using fuzzy logic. Furthermore, the desired control force determined by minimizing the error between predicted and desired ship position at the next step. Simulations at different sea states have shown that the scheme is effective.

Key words: dynamic positioning; fuzzy logic system; adaptive modeling; ocean engineering

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, 因而使船尽可能地保持在海平面某要求的位置上。由于一方面其动力学模型很难精确建立, 再者作用在船体上的诸如风、浪、流等外部随机力的统计特性在不同海况下也将不断变化且难以预知, 从而给问题的解决带来了极大困难。

鉴于自适应模糊逻辑系统不仅具有任意的非线性映射能力^[1], 而且同时还具备良好的统计特性^[2], 当这类系统应用于随机环境时, 尽管对其统计特性

知之甚少, 但通过模糊逻辑系统所得到的结果却是统计意义上的“最佳”估计。因而本文采用自适应模糊逻辑系统实时学习船的漂移动力学关系, 实现系统的自适应模糊建模, 并以此来实施定位控制。

1 自适应模糊建模

考虑一个如方程(1)所表达的非线性动态系统

$$y(k+1) = f(y(k), \dots, y(k-p+1), u(k), \dots, u(k-q+1)) + \xi(k+1) \quad (1)$$

收稿日期: 1998-07-07; 修订日期: 1999-11-24

作者简介: 芮世民(1972-), 男, 安徽宣城人, 讲师, 博士。

其中 $\xi(k+1)$ 为系统噪声且其统计特性未知, $p+q=n$, 系统的输入输出空间分别为 $U=U_1 \times \cdots \times U_n \subset \mathbb{R}^n$ 及 $V \subset \mathbb{R}$. 设 $\mathbf{x}_k = [y(k), \dots, y(k-p+1), u(k), \dots, u(k-q+1)]^T$, 以 $\mathbf{x}_k(i)$ 表示向量 \mathbf{x}_k 的第 i 个元素.

由于方程(1)所表达的动态系统其输入输出映射关系实际上是未知的, 而且这种映射关系还可能随时间而发生缓慢变化. 为了对这种映射关系建模, 基本思想是在每一个当前时刻 k , 通过调整参数构造出一模糊逻辑系统且其所形成的输入输出映射 f_k 能够使性能指标

$$L = E[y(k+1) - f_k(\mathbf{x}_k)]^2 \quad (2)$$

为最小. 具体的实施步骤如下:

步骤 1 在输入空间 U 的每个子区间 U_i 上定义 M 个模糊集 A_i^j , 其相应的高斯型隶属函数为式(3)的形式, 这里 \bar{x}_i^j 及 σ_i^j 为自由调整参数.

$$\mu_{A_i^j}(x_i) = \exp(-(x_i - \bar{x}_i^j)^2 / (\sigma_i^j)^2) \quad (3)$$

步骤 2 考虑一组具有如下形式的 M 条语言规则

$R^{(j)}$: 如果 $\mathbf{x}_k(1)$ 是 A_1^j 且 \cdots 且 $\mathbf{x}_k(n)$ 是 A_n^j , 则 d 是 B^j (4)

式中 $\mathbf{x}_k = [\mathbf{x}_k(1), \dots, \mathbf{x}_k(n)]^T \in U, d \in V$ 分别为模糊逻辑系统的输入及输出, $j=1, \dots, M$. B^j 为定义在输出空间的模糊集, 由下列方式确定: 如果专家能提供如式(4)的语言规则, 则将之设为规则中相应的项; 否则其隶属函数设为任意值, 实际上语言规则正是以这种方式得到利用以构造初始的自适应模糊逻辑系统. 假设在点 θ^j 时其隶属函数的取值为 1.

步骤 3 根据步骤 2 的 M 条规则构造出模糊逻辑系统 $f_k^{[1]}$

$$f_k(\mathbf{x}_k) = \sum_{j=1}^M \theta^j \prod_{i=1}^n \mu_{A_i^j}(\mathbf{x}_k(i)) / \sum_{j=1}^M \prod_{i=1}^n \mu_{A_i^j}(\mathbf{x}_k(i)) \quad (5)$$

步骤 4 采用下列的最小均方算法来调整模糊逻辑系统中的参数 θ^j, \bar{x}_i^j 及 σ_i^j : 初始参数 $\theta^j(0), \bar{x}_i^j(0)$ 和 $\sigma_i^j(0)$ 按步骤 2 的方法确定, 在每一时刻作如下的计算

$$\begin{aligned} \theta^j(k) &= \theta^j(k-1) + a[y(k+1) - f_k] \cdot \\ &\quad a^j(k-1)/b(k-1) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \bar{x}_i^j(k) &= \bar{x}_i^j(k-1) + a[y(k+1) - f_k] \cdot \\ &\quad [\theta^j(k-1) - f_k] a^j(k-1) \cdot \\ &\quad [\mathbf{x}_k(i) - \bar{x}_i^j(k-1)] / \\ &\quad [b(k-1)(\sigma_i^j(k-1))^2] \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \sigma_i^j(k) &= \sigma_i^j(k-1) + a[y(k+1) - f_k] \cdot \\ &\quad [\theta^j(k-1) - f_k] a^j(k-1) \cdot \\ &\quad [\mathbf{x}_k(i) - \bar{x}_i^j(k-1)]^2 / \\ &\quad [b(k-1)(\sigma_i^j(k-1))^3] \end{aligned} \quad (8)$$

式中 $a^j(k-1) = \prod_{i=1}^n \exp(-[\mathbf{x}_k(i) - \bar{x}_i^j(k-1)]^2 / [\sigma_i^j(k-1)]^2)$, $b(k-1) = \sum_{j=1}^M a^j(k-1)$, $f_k = \sum_{j=1}^M \theta^j a^j(k-1)/b(k-1)$, a 为小的正常数, $j=1, \dots, M, i=1, \dots, n$. 表达式(6~8)的获得是由式(2)的 L (忽略了均值 E) 对相应参数求偏导, 同时利用式(3)和式(5)等表达式的结果.

容易看出, 随着时间的推移以及不断获得实际系统的输入输出信息, 模糊逻辑系统的参数不断更正、调整, 因而能够跟踪系统特性的缓慢变化而使建模具有自适应性.

2 自适应控制

控制就是改变输入使得系统按理想的方式工作. 考虑方程(1)所表达的非线性动态系统, 亦即让控制器在 k 时刻产生一控制量 $u(k)$, 使得 $y(k+1) = y_d(k+1)$, $y_d(k+1)$ 是所需要的系统输出. 在动力定位中我们采用的算法是将超前一步控制问题处理成优化问题, 用自适应模糊逻辑系统获得控制量. 假定自适应模糊逻辑系统已学到了映射关系, 则其输出为 $\hat{y}(k-1) = f_k(\mathbf{x}_k)$. 现给定性能指标

$$E = a[y_d(k+1) - \hat{y}(k+1)]^2 + \beta[u(k) - u(k-1)]^2 \quad (9)$$

超前一步控制问题即为如下的优化问题: 寻找控制作用 $u(k)$ 使位置误差平方及控制力变化平方之和为最小. 之所以要在性能指标附加上第二项, 是考虑到不应使控制力的变化过于激烈以致增加实现时的难度. α 和 β 为权系数来调整二项的相对重要性. 寻找 $u(k)$ 可以用任一优化技术来解决, 本文用梯度下降法来求 $u(k)$.

需要说明一点, 以上讨论的是单输出情形, 而对于多输出情形可以用完全相同的方法来处理.

3 仿真实验及应用结果

根据 Wimpey Sealab 实验船的实测数据^[3], 得

到一无因次化的非线性低频运动模型

$$\begin{aligned}
 \dot{x} &= u \\
 \dot{u} &= 0.088v^2 - 0.132u\sqrt{u^2+v^2} + \\
 &\quad 0.958rv + 0.958X + 0.958\xi \\
 \dot{y} &= v \\
 \dot{v} &= -1.40v\sqrt{u^2+v^2} - \\
 &\quad v^3/\sqrt{u^2+v^2} + 0.037r|r| - \\
 &\quad 0.514ru + 0.514Y + 0.514\zeta \\
 \dot{\phi} &= r \\
 \dot{r} &= -9.20uv + 3.11v\sqrt{u^2+v^2} - \\
 &\quad 1.95r|r| + 12.05N + 12.05\delta
 \end{aligned} \quad (10)$$

其中 x, y 分别为纵荡及横荡位移, ϕ 为艏摇角度, u, v, r 分别为相应的纵荡、横荡速度及艏摇角速度, X, Y 及 N 为三个方向上的推进器控制输出力或力矩, ξ, ζ 及 δ 则为三个方向作用在船体上的环境外力或力矩。

仿真时取采样时间 τ 为 0.1, 需要注意此处的时间坐标也是归一化的, 即实际时间为 0.31s。随机扰动的环境外力 ξ, ζ 及 δ 仅考虑二阶波浪漂力或力矩并且假定相互独立由水动力学方法计算获得^[4]。为了检验当外部环境因素发生很大变化时其自适应能力, 仿真首先在 Beaufort 8 级海况下进行, 在 $t=100$ 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。

仿真结果见图 1~3。实际上, 除了刚开始时自适应模糊逻辑系统有一个学习、调整之外, 结果是非常令人满意的。另外, 当海况从 Beaufort 8 级变为 Beaufort 5 级时亦有一个调整阶段, 说明自适应模糊逻辑系统的确能够跟踪因环境发生变化而引起的船舶动态特性的变化。

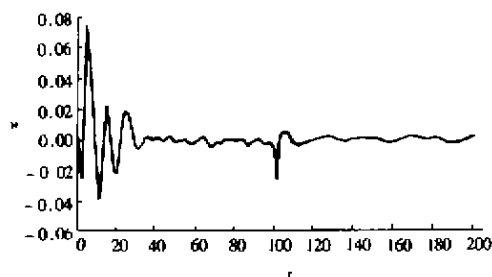


图 1 动力定位在点 $(0, 0, 0)$ 的纵荡仿真结果

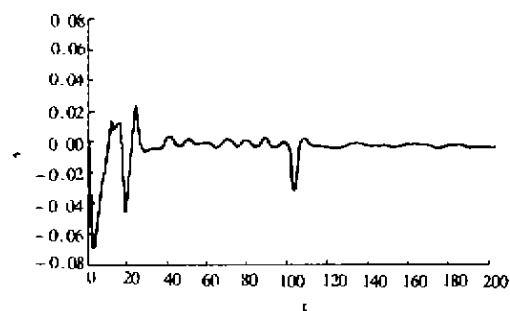


图 2 动力定位在 $(0, 0, 0)$ 点的横荡仿真结果

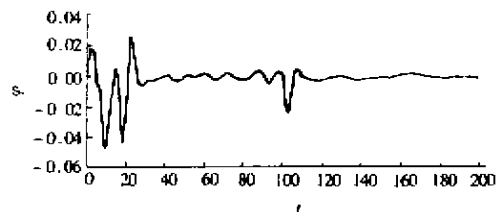


图 3 动力定位在 $(0, 0, 0)$ 点的艏摇仿真结果

4 结论

为了很好解决船舶动力定位问题, 自 60 年代以来, 各国学者投入了很大精力, 然而效果均不太理想, 其主要原因在于一方面船在海上很难建立起精确的动力学模型, 再者诸如风、浪、流等外部随机干扰的统计特性也会因不同海况而发生很大变化。本文将自适应模糊逻辑系统应用到船舶动力定位中, 不但实现系统的建模, 而且能够跟踪系统因外在因素变化而引起的变化。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。另外, 在一般的工业过程控制中, 文中提出的自适应模糊建模方法也将具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] Wang L X. Fuzzy systems are universal approximators [C]. In Pro IEEE Int Conf Fuzzy System, San Diego, CA, USA, 1992. 1163 - 1170.
- [2] 王立新. 自适应模糊系统和控制—设计和稳定性分析 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1995. 115 - 116.
- [3] Wise D A, English J W. Tank and wind tunnel tests for a drill-ship with dynamic position control [C]. In Offshore Technol Conf, vol 3, TX, USA, 1975. 103 - 119.
- [4] 倪绍毓. 波浪漂移力的数值模拟 [J]. 海洋工程, 1992, 10(2): 23 - 31.