

基于 LS-SVM 非线性内模控制在焊缝跟踪中的运用

姜一达¹, 王书军²

(1. 洛阳师范学院 物理与电子信息学院, 河南 洛阳 471022;

2. 河南华润电力首阳山有限公司, 河南 洛阳 471000)

摘要: 针对单纯的模糊控制器在焊接机器人的焊缝跟踪中的控制精度欠佳、自适应性不强等问题, 设计了一种新的用于焊缝跟踪的 LS-SVM 非线性内模控制器。通过样本数据建立系统固定的 LS-SVM 逆模型, 与系统串联成精确的伪线性系统, 对伪线性系统采用鲁棒性强的内模控制。仿真结果表明该方法具有很好的跟踪结果。

关键词: 非线性不确定系统; 最小二乘支持向量机; 逆系统方法; 内模控制

中图分类号: TP271

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2011)09-0079-03

Non-linear uncertain systems based on dynamic compensation inverse of LS-SVM internal model control

Jiang Yida¹, Wang Shujun²

(1. College of Physics and Electronic Information, Luoyang Normal University, Luoyang 471022, China;

2. Resources Power Henan Shouyangshan Co. Ltd, Luoyang 471000, China)

Abstract: For the non-linear uncertain systems and the traditional non-linear internal model control in the control deficiencies, this paper presents a Least Squares Support Vector Machines (LS-SVM) internal model control based on dynamic compensation inverse for nonlinear uncertain systems method. At the same time, in the introduction of LS-SVM to establish the inverse model, there will be Model Free Adaptive Control (MFAC) method as an additional controller. Both forward and backward models will be automatically modified online when they deviate from the plant. The simulation results show that the method proposed in this paper has good robustness of time-varying uncertainties remain better tracking results, with better real-time performance, robustness, and online calibration.

Key words: non-linear uncertain systems; least squares support vector machines; inverse system method; internal model control

焊接过程中, 由于工件的加工误差、热变形、定位误差等各种因素的影响, 经常使焊枪偏离焊缝中心, 导致焊接质量下降。为保证焊接的可靠性, 必须实时检测焊缝的位置, 使焊枪始终对准焊缝中心, 进行焊缝的自动跟踪。由于焊接是一个非常复杂的过程, 各种时变、非线性、多耦合的影响因素很多, 很难甚至不可能建立跟踪过程的精确数学模型。即使采用经典控制理论和现代控制理论方法, 系统的性能也不能令人满意。

内模控制具有调节性能好、鲁棒性强以及能消除不可测干扰的影响等特点, 但内模控制的稳定性与控制效果取决于模型与被控过程的匹配情况^[1-2]。通过样本数

据建立系统固定的逆模型, 与系统串联成精确的伪线性系统, 对伪线性系统采用鲁棒性强的内模控制, 对非线性系统具有较好的控制效果。

LS-SVM 是基于 SVM 的一种改进算法^[3-5], 它是 SVM 在二次损失函数下的一种形式, 用二次损失函数取代 SVM 中的不敏感损失函数, 通过构造损失函数将原 SVM 中算法的二次寻优变为求解线性方程, 简化了计算的复杂性。

本文将 LS-SVM 用于系统的逆建模, 提出了一种新的用于水下机器人焊接焊缝跟踪的基于 LS-SVM 非线性内模控制算法, 实现了快速响应和平滑过渡。

技术与方法

Technique and Method

1 基于 LS-SVM 非线性内模控制

1.1 最小二乘支持向量机简介

对于给定的样本集 $\{x_k, y_k\}_{k=1}^N$, $x_k \in R^p$ 为 p 维输入向量, $y_k \in R^p, k=1, 2, \dots, N, N$ 为样本个数。

首先用非线性映射 $\varphi(x)$ 将输入向量映射到高维特征空间。在这个特征空间构造最优化决策函数。

$$y=f(x)=w^T \cdot \varphi(x)+\beta \quad (1)$$

其中 w 为权向量, β 为偏移量。

在 LS-SVM 中, 目标函数描述为:

$$\min_{\alpha, \beta, e} J(w, e) = \frac{1}{2} \|w\|^2 + \frac{C}{2} \sum_{k=1}^N e_k^2 \quad (2)$$

$$\text{约束条件 } y_k = w^T \cdot \varphi(x_k) + \beta + e_k, k=1, 2, \dots, N \quad (3)$$

式中, J 为优化目标函数, C 为正则化参数, e_k 为不敏感损失函数的松弛因子。

定义拉格朗日函数:

$$L(w, \beta, e, \alpha) = J(w, e) - \sum_{k=1}^N \alpha_k [w^T \varphi(x_k) + \beta + e_k - y_k] \quad (4)$$

式中, α_k 为拉格朗日乘子, 根据 Karush-Kuhn-Tucker (KKT) 最优条件^[7], 得:

$$\frac{\partial L}{\partial w} = 0 \Rightarrow w = \sum_{k=1}^N \alpha_k \varphi(x_k) \quad (5)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \beta} = 0 \Rightarrow \sum_{k=1}^N \alpha_k = 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial e_k} = 0 \Rightarrow \alpha_k = C e_k \quad (5)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \alpha_k} = 0 \Rightarrow y_k = \alpha^T \cdot \varphi(x_k) + \beta + e_k$$

从而求解的优化问题转化为求解线性方程组问题。

$$\begin{bmatrix} 0 & I^T \\ I & \Omega + C^{-1}I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ y \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, $\alpha = [\alpha_1, \dots, \alpha_N]^T, I = [I_1, \dots, I_N]^T, y = [y_1, \dots, y_N]^T$ 选择满足 Mercer 条件的核函数。

$$\Omega = \{\Omega_{ij}\}_{N \times N} = \{\varphi(x_i) \cdot \varphi(x_j)\}_{N \times N}, i, j=1, \dots, N$$

$$\Omega_{ij} = K(x_i, x_j) = \varphi(x_i) \cdot \varphi(x_j), i, j=1, \dots, N \quad (7)$$

$$K(x_k, x) = \exp(-|x_k - x|^2 / 2\sigma^2) \quad (8)$$

式中的 σ 是一正的实常数, 表示核宽度。

非线性回归函数就可以表示为:

$$y=f(x) = \sum_{k=1}^N \alpha_k \cdot K(x_k, x) + \beta \quad (9)$$

1.2 LS-SVM 非线性内模控制

考虑一类可逆 MIMO 非线性离散系统:

$$y(k+1) = f(y(k), \dots, y(k-n), u(k), \dots, u(k-m)) \quad (10)$$

其中 $u(k), y(k)$ 分别为输入输出量, 则式(10) $u(k)$ 的显示表达式为:

$$u(k) = If[y(k+1), y(k), \dots, y(k-n), u(k-1), \dots, u(k-m)] \quad (11)$$

令: 参考输入 $\varphi(k) = y(k+1)$, 则式(11)可以表示为:

$$u(k) = If[\varphi(k), y(k), \dots, y(k-n), u(k-1), \dots, u(k-m)] \quad (12)$$

由于式(11)在工程实际中难以确切描述, 本文拟采用 LS-SVM 逼近系统式(10)的逆模型, 即式(11)的逼近式。可以表示为:

$$u(k) = If[x_I(k)] = \sum_{k=1}^N \alpha_{I_k} \cdot K(x_{I_k}, x_I(k)) + \beta_I \quad (13)$$

这里 $\{x_{I_k}, u_k\} (k=1, \dots, N)$ 为建模的训练样本集, $u_k = u(k), x_I(k)$ 是输入向量, 表示为:

$$x_I(k) = [u_-, y_-, y_+]$$

其中 $u_- = [u(k-1), u(k-2), \dots, u(k-m)]$

$$y_- = [y(k-1), y(k-2), \dots, y(k-n)]$$

$$y_+ = [y(k+1), y(k)]$$

通过 LS-SVM 学习, 利用已知数据对系统建立系统的逆模型。采用内模控制, 以复合伪线性系统为对象, 将训练后的 LS-SVM 与被控对象复合成伪线性系统。

焊缝跟踪控制系统结构方框图如图 1 所示。机器人焊缝跟踪系统的数学模型是一组非线性的微分方程, 其中电机伺服系统、焊接电源等电气参数是可变的, 相当复杂。

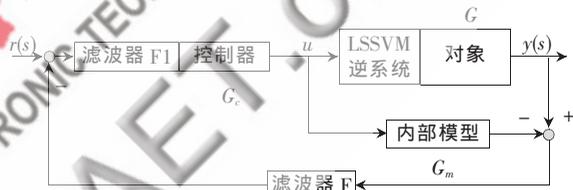


图 1 焊缝跟踪控制系统结构方框图

2 仿真分析

根据相关资料, 可将机器人作为一个二阶环节处理, 不失一般性, 选用如下的传递函数作为仿真对象。即:

$$G(s) = \frac{I(s)}{H(s)} = \frac{2500}{s(s+25)} \quad (14)$$

式中, $I(s)$ 为控制系统的输入拉普拉斯变换函数, $H(s)$ 为系统输出的拉普拉斯变换函数。取采样时间 $t_s = 0.01$, $G(s)$ 离散化后表示为

$$G(z) = \frac{0.1152z + 0.106}{z^2 - 1.779z + 0.7788} \quad (15)$$

2.1 逆系统模型的建立

在系统仿真中, 根据机器人焊接试验采集到的数据, 采用 LS-SVM 逆系统建模方法对被控对象建立其对应的逆模型, 图 2 给出了 LS-SVM 逆模型辨识仿真曲线。从图中可以看出, LS-SVM 能很好地逼近逆系统。

2.2 内模控制器的设计

逆系统和原系统串联后的伪线性系统输入输出已呈标准的带有一阶时延的线性解耦系统。

根据机器人焊接试验采集到的数据, 对系统建立 LS-SVM 逆模型, 并将其与被控对象串联形成具有一拍时延的单位伪线性系统, 取内部模型 $G_m(z)$ 为 z^{-1} , 取滤波器 $F_1(z^{-1}) = \frac{0.2}{1 - 0.8z^{-1}}$, 内模控制器 $G_c(z^{-1}) = F_1(z^{-1})G_m^{-1}(z^{-1}) =$

技术与方法 Technique and Method

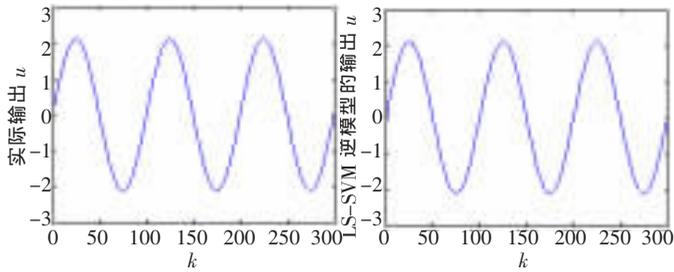


图2 实际逆系统的输出和LS-SVM逆模型的输出

$zF_1(z^{-1})$, 确保内模控制器 $G_c(z^{-1})$ 正则。 $F(z^{-1})$ 被选为常矩阵, $F(z^{-1})=1$ 。

仿真结果如图3所示, 基于LS-SVM非线性内模控制器对噪声的抗干扰能力较好。

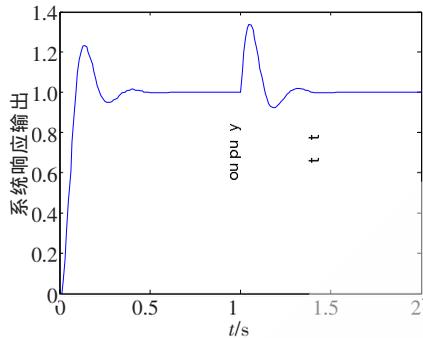


图3 基于LS-SVM非线性内模控制效果

由仿真结果可以看出本文所提出的方法发生常值扰动和受到常值的强干扰的情况下, 均有很好的跟踪效果。

针对机器人焊缝跟踪系统的典型非线性系统, 提出了一种新的控制基于LS-SVM非线性内模控制算法。仿真结果表明, 该方法控制精度高、速度快、鲁棒性好, 控制器能很好地实现焊缝跟踪。本文所提方法针对一般的非线性系统, 且物理概念清晰, 适用面广, 便于工程应用。

参考文献

- [1] 周涌, 陈庆伟, 胡维礼, 内模控制研究的新发展[J]. 控制理论与应用, 2004, 21(3): 475-482.
- [2] 赵暖. 论两种改进内模控制系统的等价性[J]. 控制与决策, 2007, 22(10): 1170-1176.
- [3] SUYKENS J A K, VANDEWALLE J. Least squares support vector machine classifiers [J]. Neural Processing letters. 1999, 9(3): 293-300.
- [4] SUYKENS J A K, VANDEWALLE J. Multiclass least squares support vector machines[C]. IJCNN'99 International Joint Conference on Neural Networks. Washington DC. 1999.
- [5] CORTES C, VAPNIK V. Support vector networks [J]. Machine Learning, 1995, 20: 273-297.

(收稿日期: 2010-12-09)

作者简介:

姜一达, 男, 1983年生, 硕士, 主要研究方向: 电力自动化控制技术。

王书军, 男, 1978年生, 本科, 主要研究方向: 发电厂集控运行。