

文章编号: 100120920(2009)052079-03

深海采矿机器人的行走鲁棒控制

陈 勇^{1,2}, 桂卫华¹, 阳春华¹

(1. 中南大学 信息科学与工程学院, 长沙 410083; 2. 湖南商学院 计算机与电子工程学院, 长沙 410205)

摘要: 针对深海采矿机器人模型和外界环境不确定性而导致其控制问题异常复杂这一难题, 首先用 RBF 神经网络逼近系统不确定性的上界, 在状态反馈的基础上, 构造了基于虚拟输入的航向控制鲁棒自适应律; 然后给出了左右履带速度输入与虚拟输入之间的模糊控制推理规则, 提出了采矿机器人的行走控制方法. 仿真结果验证了所提出方法的可行性.

关键词: 深海采矿机器人; 行走; 状态反馈; 模糊规则; 鲁棒控制

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A

Robust control on crawling of deep seabed moving mining robot

CHEN Yong^{1,2}, GUI Wei2hua¹, YANG Chun2hua¹

(1. College of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 2. School of Computer and Electronic Engineering, Hu nan Business College, Changsha 410205, China. Correspondent: CHEN Yong, E2mail: iicechen@163.com)

Abstract: The control problem of deep seabed mining robot is very hard for model uncertainty and external environment uncertainty. Therefore, radius basis function (RBF) neural network is used to learn the unknown bounds of system uncertainties adaptively. Adaptive heading robust control algorithm is presented based on status feedback and virtual input. And control method on the crawling of deep seabed moving mining robot is described after the discussion on the fuzzy rule between virtual input and tracks velocity. Simulation results show the feasibility of this method.

Key words: Deep seabed mining robot; Crawling; Status feedback; Fuzzy rule; Robust control

1 引言

深海采矿技术的研究具有重要的战略意义, 是人类继航空航天领域之后一个新的挑战^[1]. 作为深海多金属结核采矿系统的载体, 深海采矿移动机器人工作于 6 000 m 深海底/极稀软沉积物底质, 无自然光、高压及未知复杂工作环境的不确定性和自身液压驱动、履带方式等设计而带来的系统模型非线性、大滞后、时变特性, 都导致其控制问题异常复杂.

机器人的行走控制是机器人控制中的最基本、最重要的问题之一. 已有一些文献进行了研究, 有的采用反馈线性化方法^[2], 有的在力学和滑动模型方面作一些简化^[3,4], 并得到了较好应用. 在不确定系统控制方面, 也有学者进行了深入研究, 取得了很好的研究成果^[5,6]. 但就深海采矿机器人而言, 其控制

方面的文献还很少, 并且大都没有很好地考虑不确定性因素.

本文在已有的研究基础上, 侧重研究预定路径下采矿机器人的行走控制方法, 旨在为深海采矿技术提供一些前期的理论研究和技术支持. 文中提出了采矿机器人的行走控制策略, 描述了基于神经网络的深海采矿机器人的航向鲁棒控制方法, 构造了基于虚拟输入的航向控制的鲁棒自适应律, 用 RBF 神经网络逼近系统不确定性的上界, 给出了左右履带速度输入与虚拟输入之间的模糊控制推理规则, 并进行了仿真.

2 航向控制

2.1 问题描述

考虑如下的非线性系统:

收稿日期: 200820428; **修回日期:** 2008210201.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(60634020); 国际海底区域研究开发/十五0项目(DY102020206); 国家重点基础研究发展规划项目(2002CB312203).

作者简介: 陈勇(1974), 男, 湖南吉首人, 博士生, 从事机器人技术与工业过程控制的研究; 桂卫华(1950), 男, 武汉人, 教授, 博士生导师, 从事大系统理论与应用、复杂系统建模与优化等研究.

$$\hat{x}_i = \hat{x}_{i-1}, 1 \leq i \leq n-1; \quad (1)$$

$$\hat{x}_n = f(x) + bu(t). \quad (2)$$

其中: x 表示系统的状态变量, $u(t)$ 表示系统的控制输入.

假设 b 为常数. 将 $f(x)$ 分为两部分, 用 $f_0(x)$ 表示系统函数的已知部分; $\Delta f(x, w)$ 表示系统函数的不确定部分, w 表示系统的参数不确定项, 包括系统模型不确定项和外界干扰不确定项. 则有

$$\hat{x}_n = f_0(x) + \Delta f(x, w) + bu(t). \quad (3)$$

由式(1)和(3), 可得如下状态方程:

$$\dot{\hat{x}} = Ax + B[f_0(x) + \Delta f(x, w) + b]u(t). \quad (4)$$

一般而言, 在控制器设计时, 希望对 $f(x)$ 的结构能有一定的了解. 然而在实际工程中对 $f(x)$ 的了解有限, 甚至一无所知.

以下的控制律设计则放松了对 $f(x)$ 信息了解的要求, 仅用不确定性的上界来构建控制器.

2.2 鲁棒自适应控制

引入状态反馈 Kx , $K = [k_1, k_2, \dots, k_n]$, k_i 满足方程 $s^n + k_n s^{n-1} + \dots + k_2 s + k_1 = 0$ 的特征根位于左半平面. 则有

$$\dot{\hat{x}} = (A - BK)x + B[f_0(x) + \Delta f(x, w) + Kx + b]u(t). \quad (5)$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s & s & s & w & s \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ s \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

假设 1 $(A - BK)$ 是稳定的.

假设 2 系统的不确定项 $\Delta f(x, w)$ 有界, 即

$$f = f_0 + \Delta f(X, w) + [F_0, \quad (6)$$

其中 F_0 为已知函数.

采取如下的自适应鲁棒控制律:

$$u = u_{eq} + u_N, \quad (7)$$

其中

$$u_{eq} = -\frac{1}{b}f_0(x), \quad (8)$$

主要用于消除非线性项的影响; u_N 为对不确定项 $\Delta f(x, w)$ 的补偿控制, u_N 的自适应控制律为^[7]

$$u_N = \frac{1}{1+b}F_0 \tanh\left(\frac{1-F_0 B^T P X}{R}\right), \quad (9)$$

式中 P 为如下 Riccati 方程:

$$P(A - BK) + (A - BK)^T P = -Q \quad (10)$$

的实对称正定矩阵解, Q 为选择的正定矩阵.

2.3 神经网络学习

对系统非线性结构的了解有助于控制问题的解

决, 但对系统非线性结构的描述存在不准确甚至不可知, 这便给控制问题带来了很大的困难. 上文提出的控制律是建立在不确定性上界基础上的, 下面利用 RBF 神经网络来自适应学习系统的不确定性上界. 针对式(6)和(9)的系统不确定性未知上界 F_0 , 用以下的 RBF 神经网络来自适应学习:

$$F_0 = H^T \Sigma(X). \quad (11)$$

其中: H 为 RBF 神经网络的权重估计值; $\Sigma(X)$ 用高斯类型函数描述如下:

$$\Sigma_i(X) = \exp\left(-\frac{\|X - c_i\|^2}{R^2}\right). \quad (12)$$

式中: 下标 i 表示第 i 个基函数, R 表示基函数的宽度.

假设 3 在紧集 Ω 上, 对于任意小的 $C > 0$, 均有满足式(12)的神经网络权重最优解 \hat{H} .

$$\|E(X)\| = \|\hat{H}^T \Sigma(X) - F_0\| < C \quad (13)$$

假设 4 在紧集 Ω 上, 对应假设 3 的 $C > 0$, 系统不确定性上界满足

$$F_0 - F + G > C_0 > C \quad (14)$$

假设 3 和假设 4 已被证明是合理的^[9].

网络权重的自适应规则为

$$\dot{H} = G \Sigma(X) + B^T P X. \quad (15)$$

定理 1 对于由式(1)和(2)描述的非线性系统, 在假设 1~ 假设 4 的条件下, 按式(15)自适应修正神经网络权重, 采用式(7)~(9)的鲁棒控制律, 系统状态是渐近收敛的.

可通过验证 $S \dot{S} \leq 0 (S = B^T P X)$ 来证明定理 1, 限于篇幅, 此略.

在深海多金属结核采矿系统中, 要求深海采矿机器人按预定的开采路径以预定的开采速度(0~1 m/s)直线行走, 按预定半径转弯. 因此, 航向控制是采矿机器人路径控制的基础问题. 下面根据前文所分析的方法来实现采矿机器人的航向鲁棒控制. 考虑如下的深海采矿机器人航向非线性模型:

$$\dot{U} + AU + \dot{U}^3 = bD + w. \quad (16)$$

其中: U 为航向角; A, B 为模型参数; b 为控制增益, 是常数; w 为外界干扰; D 为引入的虚拟输入, 称为控制转角. 设期望航向角为 U_d , 取状态变量

$$X = [x_1, x_2, x_3] = \int_0^t U - U_d dt, U - U_d, \dot{U}.$$

引入状态反馈 KX , $K = [k_1, k_2, k_3]$, 满足 $s^3 + k_3 s^2 + k_2 s + k_1 = 0$ 的特征根位于左半平面.

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -k_1 & -k_2 & -k_3 \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} [k_1 x_1 +$$

$$k_2x_2 + (k_3 - A)x_3 - Bx_3^3 + bD + w]. \quad (17)$$

令

$$F = k_1x_1 + k_2x_2 + (k_3 - A)x_3 - Bx_3^3 + w, \quad (18)$$

因而可直接套用式(7)~(9)的鲁棒控制律.

3 履带速度模糊规则调节

深海采矿机器人采用的是履带式行走方式,运动控制是一种非完整系统的非线性控制问题,靠左右履带的速度差来实现方向控制,因此有必要给出左履带速度 v_L 和右履带速度 v_R 的调节规则.如图1所示,大地坐标系中,机器人重心 $G(X, Y)$ 与预定路径上的点 $D(X_d, Y_d)$ 最近距离为

$$e_1 = -(X - X_d)\sin W + (Y - Y_d)\cos W. \quad (19)$$

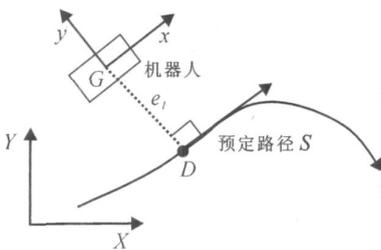


图1 采矿机器人路径控制示意图

根据试验,将 D, e_1 和输出控制量(v_L, v_R)都分为7个语言变量等级:PB, PM, PS, ZE, NS, NM, NB,分别对应:正大、正中、正小、零、负小、负中、负大.借鉴地面履带车辆的驾驶思路和决策经验, v_L 的模糊规则如表1所示. v_R 的模糊调节规则可以类似得到.

表1 深海机器人的 v_L 模糊推理规则表

D	e_1						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	ZE	ZE	PS	PB	PB	PB	PB
NM	NS	ZE	PS	PB	PB	PB	PB
NS	NM	NS	ZE	PM	PM	PB	PB
ZE	NM	NM	NS	ZE	PS	PM	PM
PS	NB	NB	NM	NM	ZE	PS	PM
PM	NB	NB	NB	NB	NS	ZE	PS
PB	NB	NB	NB	NB	NS	ZE	ZE

4 仿真研究

由于水下试验代价昂贵,本文采用采矿机器人模型进行仿真.机器人以0.5m/s的预定速度按预定路线行进.考虑外界海流干扰和模型参数干扰,海流干扰用静态一阶高斯2马尔科夫过程描述,加入10%以内的随机干扰.图2和图3分别为深海采矿机器人的航向角绝对误差值变化曲线和位置绝对误差值变化曲线,采样周期为1s.

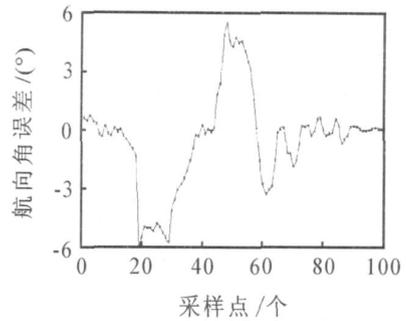


图2 机器人航向角误差变化曲线

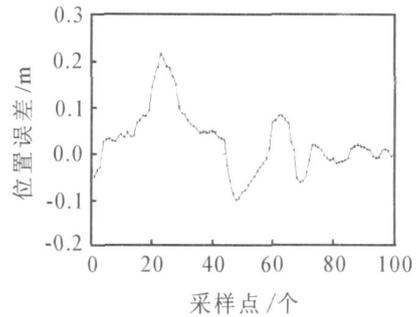


图3 机器人位置误差变化曲线

从图中可以看出,位置偏差的范围约为-0.1~+0.25m,航向角误差范围约为-6~+6,达到了深海底采矿系统的工艺精度要求.仿真结果说明了本文方法的可行性,可以为深海采矿机器人的行走控制提供一些技术支持和借鉴经验.

5 结论

本文重点研究了深海采矿机器人的行走控制问题.用RBF神经网络逼近不确定性的上界,以解决系统不确定结构未知的问题,构建了基于虚拟输入的航向控制鲁棒自适应律.在左右履带速度输入与虚拟输入之间的模糊控制推理规则基础上,给出了采矿机器人的行走控制方法.仿真结果说明了所提出方法的可行性,可以为深海采矿提供一些前期的理论研究和技术支持.

参考文献(References)

[1] 中国大洋协会办公室. 国际海底区域研究开发十五总体设计[R]. 北京:中国大洋协会, 2001.
(China Ocean Mineral Resources Research and Development Association. The integrated design of the national/ 10th five year0 research and development plan on international seabed area[R]. Beijing: China Ocean Mineral Resources Research and Development Association, 2001.)

[2] Wang G G, Wang S H, Chen C W. A quantitative feedback design for the turning control of a tracked vehicle[C]. Proc of the 28th IEEE Conf on Decision and Control. Florida, 1989: 2664-2666.

$$s. t. \frac{dx}{dt} = -\frac{1}{2}x + \frac{1}{2}u, \quad -1 \leq u \leq 1;$$

$$x(-1) = x_0 = 1;$$

$$J = \sum_{j=0}^N b_{Nj} \left[\left(\sum_{s=0}^N b_{js} x(t_s) + 1 \right)^2 + \left(\sum_{k=0}^m c_k T_k(t_j) \right)^2 \right].$$

给定 $E=10^{-7}$, 用 Matlab 编程求解可得表 1.

表 1 切比雪夫谱方法逼近最优指标

m	N = 1	N = 3	N = 5	N = 7
1	0.7716398	0.7716379	0.7716374	0.7716373
3	0.7716378	0.7716376	0.7716373	0.7716372
5	0.7716378	0.7716375	0.7716372	0.7716372

经比较可知, 运用高斯 2 切比雪夫三阶正交多项式逼近, 所得近似解与最优数值解的误差仅为 4×10^{-7} .

6 结 论

通过实例分析可以发现, 利用高斯 2 切比雪夫谱逼近方法参数化状态和控制向量, 并运用非线性规划的方法求解库存最优控制问题是可行的. 切比雪夫逼近算法虽然不能像庞特里亚金方法得到最优控制问题的解析解, 但容易得到比较接近的近似解.

参考文献 (References)

[1] Harris F. Operations and cost [C]. Factory Management Series. Chicago: A W Shaw Co, 1915.

- [2] Wagner H M, Whitin T M. A dynamic version of the economic lot size model[J]. Management Science, 1958, 5(1): 89-96.
- [3] Balkhi Z T. On a finite horizon production lot size inventory model for deteriorating items: An optimal solution[J]. European J of Operational Research, 2001, 1(7): 210-223.
- [4] Balkhi Z T. On an inventory model for deteriorating items with stock dependent and time-varying demand rates[J]. Computers and Operations Research, 2004, 2(2): 223-240.
- [5] Zhou Y W, Lau H S, Yang S L. A new variable production scheduling strategy for deteriorating items with time varying demand and partial lost sale[J]. Computers and Operations Research, 2003, 30(12): 1753-1776.
- [6] Benkherouf L, Bomenir A, Aggoun L. A diffusion inventory model for deteriorating items [J]. Applied Mathematics and Computation, 2003, 1(6): 212-39.
- [7] Worell B M, Hall M A. The analysis of inventory control model using polynomial geometric programming [J]. Int J of Production Research, 1982, 20(5): 657-667.
- [8] Maity A K, Maity K, Mondal S, et al. A Chebyshev approximation for solving the optimal production inventory problem of deteriorating multi-item [J]. Mathematical and Computer Modelling, 2007, 45(1): 149-161.

(上接第 796 页)

- [3] Wong J Y, Chiang C F. A general theory for skid steering of tracked vehicles on firm ground[J]. J of Automobile Engineering, 2001, 215(3): 343-355.
- [4] Le A, Rye D, Durran Whyte H. Estimation of track-soil interactions for autonomous tracked vehicles [C]. Int Conf on Robotics and Automation. New Mexico, 1997: 1380-1393.
- [5] De Santis R M. Modeling and path-tracking control of a mobile wheeled robot with a differential drive [J]. Robotica, 1995, 13(4): 401-410.
- [6] 杨盐生, 贾欣乐. 一类不确定非线性系统变结构自适应鲁棒控制[J]. 电子学报, 2001, 29(7): 905-908. (Yang Y S, Jia X L. Variable structure adaptive robust control algorithm for a class of uncertain nonlinear systems[J]. Acta Electronica Sinica, 2001, 29(7): 905-

908.)

- [7] 杨盐生. 船舶航向非线性系统自适应鲁棒自动舵的设计 [J]. 大连海事大学学报, 2002, 28(3): 124. (Yang Y S. Design of adaptive robust control autopilot for ship steering with uncertain nonlinear system[J]. J of Dalian Maritime University, 2002, 28(3): 124.)
- [8] Man Z H, Yu X H, Eshraghian K, et al. A robust adaptive sliding mode tracking control using a RBF neural network for robotic manipulators [C]. Proc of IEEE Int Conf on Neural Networks. San Diego, 1995: 2403-2408.
- [9] Gang F, Chak C K. Robot tracking in task space using neural networks [C]. Proc of IEEE Int Conf on Computational Intelligence. Orlando, 1994: 2854-2858.