

文章编号: 1002-0446(2003)02-0178-04

腿轮式机器人的自适应模糊控制

李金良 吕恬生

(上海交通大学 机械工程学院 上海 200030)

摘要: 提出了一种基于模糊神经网络(FNN)的腿轮式机器人轨迹跟踪控制方法. 在利用常规 PD 控制器提取初始模糊规则的基础上, 利用专家经验对初始规则进行补充, 最后再利用误差的反向传播算法对参数进行在线的自适应调整. 仿真计算证明该方法具有良好的轨迹跟踪精度和抗干扰能力.

关键词: 腿轮式机器人; 自适应控制; 模糊规则提取; 轨迹跟踪

中图分类号: TP24

文献标识码: B

ADAPTIVE FUZZY CONTROLLER FOR LEG-WHEELED MOBILE ROBOT

LI Jin-liang LÜ Tian-sheng

(College of Mechanical Engineering, Shanghai Jiaotong University Shanghai 200030)

Abstract: We propose a fuzzy adaptive controller for trajectory following of leg-wheeled robot. The initial fuzzy rules are extracted by using a traditional PD controller. Then expert experiences are used to complement the rules. Finally the error back-propagation algorithm is used for on-line adaptive parameter tuning. Simulation results verify that this method has better trajectory following precision and better rejection of disturbance.

Keywords: leg-wheeled robot, adaptive control, fuzzy rule extraction, trajectory following

1 引言(Introduction)

腿轮式机器人是一种混合结构机器人, 它综合了腿式和轮式机器人的优点, 具有较强的地形适应能力、较大的稳定性和较高的能量效率^[1~3]. 图 1 是一种腿轮式机器人的原理图. 机器人的腿部机构由连杆和从动轮组成.

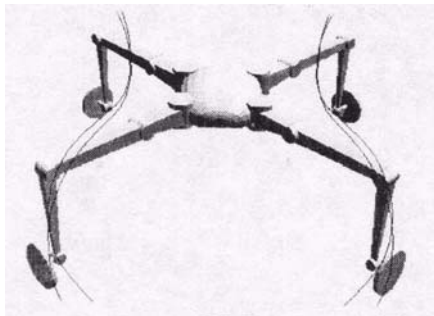


图 1 腿轮式机器人原理图

Fig. 1 Leg-wheeled mobile robot

机器人的运动类似于人的溜冰运动, 即靠连杆的摆动带动滚轮运动, 利用滚轮上受到的摩擦合力来驱动机器人前进. 与采用主动轮结构的混合结构机器人相比, 这种机器人简化了滚轮部分的机构, 因此大大减轻了机器人的重量, 增强了机器人的灵活性, 提高了机器人的运行速度. 当控制从动滚轮按一定的轨迹运动时, 可实现机器人直线滑行和转弯滑行.

腿轮式结构的机器人是一多自由度、非线性和强耦合的系统, 常规的控制难以实现从动滚轮(即机器人的腿部末端)精确的轨迹跟踪控制^[4,5]. 针对这样一个被控对象, 围绕其腿部末端的轨迹跟踪问题, 本文提出了一种基于模糊神经网络(FNN)的自适应控制方法. 该方法利用模糊神经网络来辨识机器人的逆动力学模型, 并以此模型作为控制器提供给机器人主要的广义控制驱动力, 加上一个常规 PD

控制器,从而构成整个控制系统.如果 FNN 给出的驱动力合适,系统误差小,常规控制器 PD 的控制作用就很弱;反之,PD 控制器将起主要的作用.此方法的优点在于被控系统受到各种干扰时,可以利用常规控制器进行补偿和闭环控制.在文中的仿真计算中,给出了这一控制方法的仿真结果,证明了自适应控制方法的优越性.

2 逆运动学分析 (Analysis of inverse kinematics)

为将机器人腿部末端工作空间中的运动轨迹转化到关节空间中,需分析机器人的逆运动学^[6].图 2 所示为机器人腿部的机构简图.

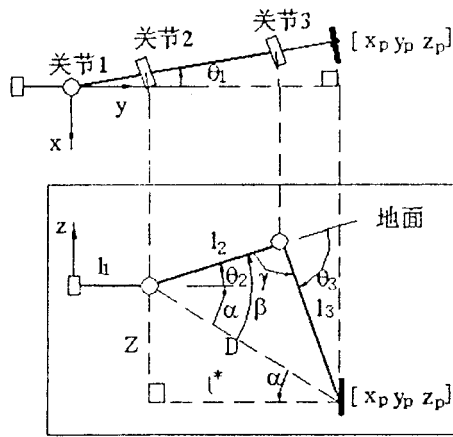


图 2 腿部机构简图

Fig. 2 Schematic view of the robot's leg

图中的 $l_1=20\text{mm}$, $l_2=50\text{mm}$, $l_3=55\text{mm}$. 由三角几何关系,已知腿部末端位置 $[x_p, y_p, z_p]$,可计算各关节角 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 的封闭解如下:

$$\theta_1 = \arctg\left(\frac{X}{Y}\right) = \arctg\left(-\frac{x_p}{y_p}\right)$$

$$(-\pi/2 < \theta_1 < \pi/2) \quad (1)$$

$$\theta_2 = \beta - \alpha, \quad (-\pi/2 < \theta_2 < \pi/2) \quad (2)$$

$$\theta_3 = \gamma - \pi, \quad (-\pi < \theta_3 < 0) \quad (3)$$

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{Z}{D}\right) = \arcsin\left(-\frac{z_p}{D}\right)$$

$$(-\pi/2 < \alpha < \pi/2) \quad (4)$$

$$\beta = \arccos\left(\frac{l_2^2 + D^2 - l_3^2}{2l_2D}\right)$$

$$(0 < \beta < \pi) \quad (5)$$

$$\gamma = \arccos\left(\frac{l_2^2 + l_3^2 - D^2}{2l_2l_3}\right)$$

$$(0 < \gamma < \pi) \quad (6)$$

式中: $D = |\sqrt{L^{*2} + Z^2}| = |\sqrt{L^{*2} + z_p^2}|$, $L^* =$

$$|\sqrt{X^2 + Y^2}| - l_1 = |\sqrt{x_p^2 + y_p^2}| - l_1.$$

由(1)~(6)并经过关节空间的插补,可将机器人工作空间的运动轨迹转化到关节空间中.

3 自适应模糊控制 (Adaptive fuzzy control)

在机器人的滑行过程中,由于前进方向平面的运动比侧平面内的运动更为重要,故假设侧平面内运动不影响前进方向平面内的运动,在动力学建模中也不再加以考虑,将系统的动能和势能表达式代入 Lagrange 方程,得到系统动力学方程为

$$M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta}) + F(\theta) + G(\theta) + T_d = T \quad (7)$$

其中: $T = [T_1, \dots, T_n]^T$ 为驱动关节输入力矩向量; $\theta = [\theta_1, \dots, \theta_n]^T$, 为关节转角向量; $M(\theta)$ 为 $n \times n$ 机器人惯量矩阵; $C(\theta, \dot{\theta})$ 为 $n \times 1$ 向心力和哥氏力矩阵; $F(\theta)$ 为 $n \times 1$ 摩擦力矩阵; $G(\theta)$ 为 $n \times 1$ 重力矩阵; T_d 表示未建模的动力学项和外部干扰.

机器人的动力学模型(7)中由于存在非线性项和 T_d 项,难以用常规控制实现精确的轨迹跟踪. 模

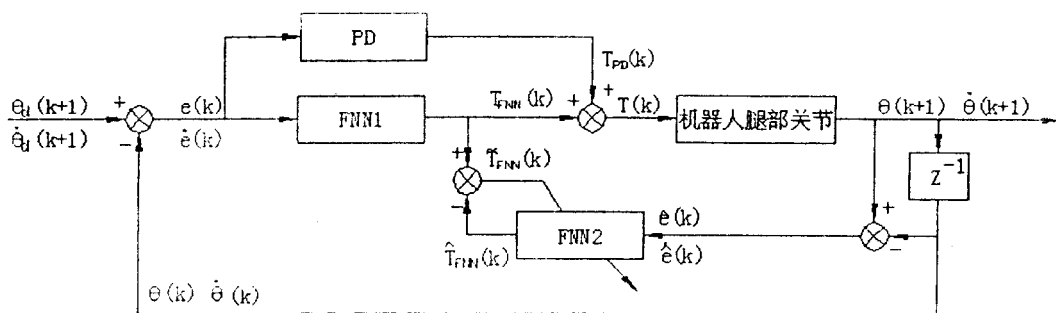


图 3 自适应模糊控制器

Fig. 3 Adaptive fuzzy controller

糊神经网络(FNN)是模糊逻辑系统与神经网络

相结合的网络模型,它既具有神经网络的并行计算、

分部式信息存储、容错能力强和自适应学习的优点, 又具有模糊逻辑系统的善于利用专家的知识 and 经验、结构简单和收敛速度快的特长, 适合机器人实时控制^[7].

实现 FNN 控制的关键是有效的提取模糊规则并建立合适的网络结构以加快收敛速度, 为此我们设计了 FNN 和 PD 反馈控制相结合并利用 PD 控制器帮助提取模糊规则的机器人自适应器如图 3 所示. 图中的两个 FNN 均为模糊神经网络, 它们具有相同的结构和参数. FNN2 用误差反向传播算法来实时学习机器人的逆动力学, FNN1 则用作模糊控制器, 为机器人系统提供驱动力矩 T_{FNN} . PD 控制器用来帮助提取模糊规则以建立初始的网络结构并且补偿 FNN2 对机器人逆动力学辨识的偏差. 机器人的动态控制模型可表示为

$$T(k) = T_{FNN}(k) + T_{PD}(k) \quad (8)$$

式中: T_{FNN} 表示由模糊神经网络提供给机器人的控制力矩; T_{PD} 表示为弥补由于逆动力学辨识模型偏差和外部干扰因素的影响, 由 PD 反馈控制器提供给机器人的补偿控制驱动力矩.

4 模糊规则的自动提取 (Automatic fuzzy rule extraction)

FNN1 和 FNN2 的结构如图 4 所示.

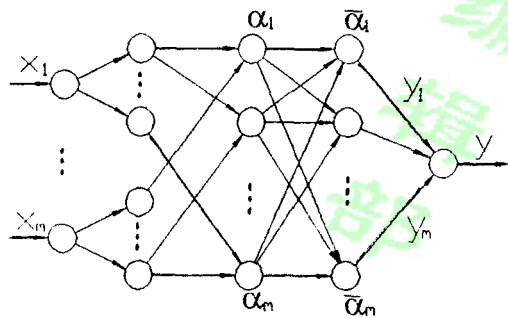


图 4 模糊神经网络结构

Fig. 4 Structure of fuzzy neural network

图中第 1 层为输入层; 第 2 层用来计算隶属度函数; 第 3 层用来匹配模糊规则前件, 计算每条规则的适用度, 即

$$\alpha_j = \prod_{i=1}^n \exp\left[-\left(\frac{x_i - \bar{x}_i^j}{\sigma_i^j}\right)^2\right] \quad (9)$$

第 4 层进行归一化计算

$$\bar{\alpha}_j = \frac{\alpha_j}{\sum_{j=1}^n \alpha_j} \quad (10)$$

第 5 层实现的是清晰化计算

$$y = f(x) = \sum_{j=1}^m \bar{y}^j \bar{\alpha}_j \quad (11)$$

图 4 所示的模糊神经网络用于机器人轨迹跟踪控制, 对于任一关节, 模糊神经网络的输入为关节位置误差 e 及关节速度误差 \dot{e} , 输出为控制量 u . 设将 e, \dot{e} 和 u 分别划分为 J, K, L 模糊子集, 分别用 $A_j (j=1, 2, \dots, J), B_k (k=1, 2, \dots, K)$ 和 $C_l (l=1, 2, \dots, L)$ 来表示, 相应的隶属度函数采用高斯函数, 并分别表示为 $\mu_{A_j}(e), \mu_{B_k}(\dot{e})$ 和 $\mu_{C_l}(u)$, 并设每个隶属度函数的中心值和宽度均已事先确定. 剩下的问题便是如何提取模糊规则, 它相当于是如何在图 4 的模糊神经网络中如何确定最后一层的连接权.

我们用 PD 控制器来帮助提取初始的模糊规则. 给定腿部关节的期望轨迹, 用 PD 控制器对腿轮式机器人进行控制, 记录 PD 控制器的实际输入 e, \dot{e} 和输出 u , 称它们为样本数据. 对于每一组样本数据进行如下的操作

$$\max_j \mu_{A_j}(e) = \mu_{A_{\bar{j}}}(e), 1 \leq \bar{j} \leq J \quad (12)$$

$$\max_k \mu_{B_k}(\dot{e}) = \mu_{B_{\bar{k}}}(\dot{e}), 1 \leq \bar{k} \leq J \quad (13)$$

$$\max_l \mu_{C_l}(u) = \mu_{C_{\bar{l}}}(u), 1 \leq \bar{l} \leq J \quad (14)$$

得到如下的一条规则: 如果 e 为 $A_{\bar{j}}$, 且 \dot{e} 为 $B_{\bar{k}}$, 则 u 为 $C_{\bar{l}}$. 定义该条规则的置信度为 $\delta = \mu_{A_{\bar{j}}}(e) \mu_{B_{\bar{k}}}(\dot{e}) \mu_{C_{\bar{l}}}(u)$. 这样, 有多少组样本数据就可产生多少条规则. 若出现多条规则前件相同而后件不同的矛盾情况时, 则只选用置信度 δ 最大的那条规则.

用上述方法提取模糊规则往往不能覆盖整个状态空间. 这时可利用专家的经验来补充一些空缺的规则. 如根据专家的经验有: “如果位置误差正大, 且速度误差正大, 则控制力矩应正大” 及 “如果位置误差为零, 且速度误差为零, 则控制力矩应为零” 等, 可将其补充到模糊控制规则库中.

上述方法确定了用于控制的模糊神经网络的初始结构和参数, 它是向 PD 控制器学习的结果. 必须在系统运行过程中不断地调整模糊神经网络的参数, 逐渐改善系统的控制性能. 图 4 中 FNN1 在 k 时刻的输入量为 $k+1$ 时刻的期望值 $\theta_d(k+1)$ 和 $\dot{\theta}_d(k+1)$ 与 k 时刻的实际值 $\theta(k)$ 和 $\dot{\theta}(k)$ 之间的误差 $e(k)$ 和 $\dot{e}(k)$, 其输出量为 k 时刻的控制量 $T_{FNN}(k)$. FNN2 是专门用来调整模糊神经网络的参数. 理想情况下, 系统 $k+1$ 时刻的实际值 $\theta(k+1)$ 和 $\dot{\theta}(k+1)$ 应等于 $\theta_d(k+1)$ 和 $\dot{\theta}_d(k+1)$, 因而可将 $\hat{e}(k) = \theta(k+1) - \theta(k)$ 和 $\hat{\dot{e}}(k) = \dot{\theta}(k+1) - \dot{\theta}(k)$ 作为 FNN2 的输入量, FNN2 的输出为 $\hat{T}_{FNN}(k)$, 这时 $T_{FNN}(k)$ 可作为

FNN2 的期望输出, 从而可根据 FNN2 的输出误差 $\tilde{T}_{FNN}(k) = T_{FNN}(k) - \hat{T}_{FNN}(k)$ 来调整 FNN2 的参数. 参数调整算法采用误差反向传播算法可参考文献 [8].

5 仿真实验(Simulation)

机器人腿部机构的参数为: $l_1 = 20\text{mm}$, $l_2 = 50\text{mm}$, $l_3 = 55\text{mm}$, $m_1 = 2.3\text{kg}$, $m_2 = 3\text{kg}$, $m_3 = 6.5\text{kg}$, $g = 9.8\text{m/s}^2$. 关节角 1、2 的变化范围为 $0 \sim \pi/4$, 关节角 3 的变化范围是 $\pi/3 \sim 2\pi/3$, 不失一般性, 设控制力矩的变化范围为 $-2 \sim 2\text{KN} \cdot \text{m}$. 给定跟踪的理想轨迹为

$$\begin{cases} x = 0.62 + 0.1\sin t \\ y = 0.1\cos t \end{cases} \quad (0 \leq t \leq 2\pi) \quad (15)$$

初始状态 $x_0 = 0.72$, $y_0 = 0$, 仿真结果如图 5 所示. 图中虚线表示期望轨迹, 实线表示实际轨迹. 实际轨迹和期望轨迹十分接近, 说明自适应控制方法具有良好的轨迹跟踪能力. 若在控制中, 直接由常规 PD 进行控制所得的实际轨迹与期望轨迹所产生的轨迹偏差较大.

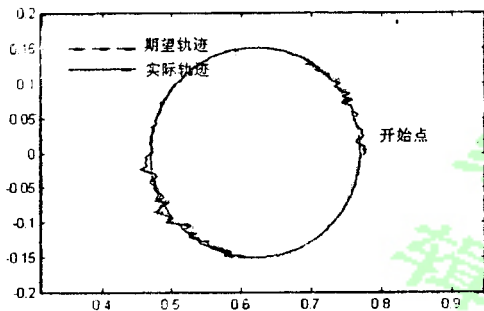


图 5 轨迹跟踪曲线

Fig. 5 Curve of track following

6 结论(Conclusion)

本文针对腿轮式机器人这一多自由度、非线性和强耦合的系统, 围绕机器人腿部末端的轨迹跟踪

控制问题, 提出一种基于模糊神经网络(FNN)的轨迹跟踪控制方法. 由于模糊神经网络能利用网络的学习能力容易地对模糊系统的参数进行在线的学习调整, 同时根据常规控制器及专家的经验可以帮助提取初始的模糊规则, 使得基于模糊神经网络的自适应控制器既具有较好的初始设置, 又具有较好的自适应调整的能力, 从而容易获得较好的控制效果. 实验和仿真结果表明, 本文提出的控制算法结构简单, 具有实时性好、精度高、鲁棒性强等特点.

参考文献 (References)

- [1] Gen Endo, Shigeo Hirose. Study on roller-walker; system integration and basic experiments [A]. Proc ICRA [C] Detroit, Michigan; IEEE, 1999. 2032-2037
- [2] Yu-jie Dai, Eiji Nakano. Motion control of leg-wheel robot for an unexplored outdoor environment [A]. Proc IROS [C] Tokyo Japan; IEEE, 1996. 402-409
- [3] Hironori Adachi, Noriho Koyachi. Development of a leg-wheel hybrid mobile robot and its step-passing algorithm [A]. Proc IROS [C] Maui Hawaii; IEEE, 2001. 728-733
- [4] Gen Endo, Shigeo Hirose. Study on roller-walker; multi-mode steering control and self-contained locomotion [A]. Proc ICRA [C]. San Francisco, CA; IEEE, 2000. 2808-2814
- [5] Shigeo Hirose, Hiroki Takeuchi. Study on roller-walk; basic characteristics and its control [A]. Proc ICRA [C]. Minneapolis, Minnesota; IEEE, 1996. 3265-3270
- [6] Craig J J. Introduction to robotics-mechanics and control [M]. Reading, Massachusetts; Addison-Wesley Publishing Company, Inc, 1986
- [7] 陆文娟, 戴民. 基于模糊神经网络的机械手自适应控制 [J]. 清华大学学报, 1999, (5): 24-27
- [8] 孙增圻. 智能控制理论与技术 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1997

作者简介:

李金良 (1975-), 男, 博士研究生, 研究领域: 机器人智能控制, 特种机器人.

吕恬生 (1945-), 男, 教授, 博士生导师, 研究领域: 特种机器人、仿生机器人、多移动机器人系统及智能控制.