

6-PRRS 并联机器人的小脑模型神经网络控制 *

杨永刚¹,任淑艳²,刘玉斌³

(1.中国民航大学,天津 300300;

2.天津工程师范学院,天津 300222;

3.哈尔滨工业大学 机器人研究所,黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 设计了小脑神经网络控制器。采用分散控制策略利用小脑神经网络来消除并联机器人控制系统非线性、耦合的影响及学习系统的不确定信息,作为前馈补偿使系统跟踪误差快速收敛;并采用 PID 作为反馈控制,保证系统的稳定性,从而实现 6-PRRS 并联机器人的快速、稳定轨迹跟踪。

关键词: 并联机器人;小脑模型神经网络;轨迹跟踪控制

中图分类号: TP242

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2010)19-0070-03

Cerebellar model articulation controller on 6-PRRS parallel robot

YANG Yong Gang¹, REN Shu Yan², LIU Yu Bin³

(1.Civil Aviation University of China,Tianjin 300300,China;

2.Tianjin University of Technology and Education,Tianjin 300222,China;

3.Robotics Institute of HIT,Harbin 150080,China)

Abstract: This controller uses distributed control strategy and employs cerebellar model articulation controller (CMAC), which used as feedforward controller to assure to converge of tracking error as quickly as possible, to clear the affection of nonlinear and coupling and learn the uncertain information of parallel robot plan. The stability of system is achieved by a proportional-integrate-derivative (PID) controller in the feedback path. So implement the trajectory tracking of 6-PRRS parallel robot fast and steadily.

Key words: parallel robot; CMAC; trajectory tracking control

由于并联机器人的结构特点,6 自由度并联机器人控制系统是一个非线性、强耦合、变参数的多变量系统。在运动过程中,机器人处于不同位置或以不同的加速度运动时,作用在各个分支上的负载将在一定的范围内作非线性变化。此外,由于并联结构由多个连杆连接末端平台组成,各通道的输出相互影响,导致相互耦合。对于高精度控制系统来说,未建模的非线性摩擦对系统的性能影响十分不利,通常都采用基于模型的方法实现非线性摩擦的补偿以达到较高的系统控制性能。甚至在一些自适应控制系统中,也需要一个精确的初始非线性摩擦模型来保证良好的控制品质和参数的快速收敛。但在实际的工程条件下,获得并联机器人近似精确的非线性摩擦模型并不容易。研究解决非线性、变负载、交联耦合和摩擦干扰的控制策略是高精度 6 自由度并联机器人应

用中的一个重要环节。目前,国内对 6 自由度并联机器人控制采用的策略主要有:PID 控制^[1]、神经网络控制^[2]、自适应鲁棒控制^[3]等,并取得了一定的成果。与国内相比,国外对 6 自由度并联机器人的研究较早,成果也较多。Park 等采用带有干扰观测器的滑模控制器对 6 自由度的并联机器人进行了控制^[4],Honegger 等采用非线性自适应控制器对 6 自由度的并联机器人进行控制^[5],此外基于模型的动力学控制、预测控制等也都在并联机器人控制上得到了应用。本文采用分散控制策略,即在关节空间中,应用小脑模型神经网络(CMAC)结合 PID 的控制方式,对并联机器人每个支链单独控制,将各支链之间的相互耦合,视作干扰进行补偿,实现 6-PRRS 并联机器人高精度轨迹跟踪,并进行了仿真验证。

1 6-PRRS 并联机器人运动学分析

1.1 6-PRRS 并联机器人的机械结构

6-PRRS 并联机器人沿导轨方向具有较大的工作空

《微型机与应用》2010 年第 29 卷第 19 期

* 基金项目:中国民航大学科研启动基金(09QD09S)

技术与方法 Technique and Method

间,部分地解决了并联机器人工作空间较小的矛盾,其结构如图1所示。由运动平台通过6根固定长度的杆件分别连接到沿3根导轨运动的滑块上,滑块通过丝杠传递由伺服电机驱动,电机固定在丝杠的一侧,通过柔性联轴器与丝杠相联接,滑块与杆件之间采用虎克铰连接方式,杆件通过一旋转副加虎克铰方式与动平台相连接。为增大工作空间,减少运动干涉,设计时中间丝杠在位置上略低于两边丝杠。动平台的空间期望轨迹通过改变滑块的位置来实现。

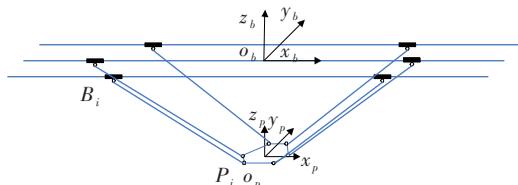


图1 6-PRRS结构简图

1.2 6-PRRS 并联机器人的运动学逆解

在基座和动平台上分别建立固定坐标系 $\{O_b - x_b, y_b, z_b\}$ 和可动坐标系 $\{O_p - x_p, y_p, z_p\}$, 其坐标原点分别位于两者的中心 B 和 P 。根据并联机器人位置与姿态的描述与空间变换理论,可以得到:

$$P_i = TP'_i \quad (i=1, 2, \dots, 6) \quad (1)$$

式中 P_i 表示连杆与动平台连接点在坐标系 $\{O_b - x_b, y_b, z_b\}$ 中的坐标矢量, 记为:

$$P_i = [P_{ix} \quad P_{iy} \quad P_{iz} \quad 1]^T \quad (2)$$

P'_i 点表示 P_i 在坐标系 $\{O_p - x_p, y_p, z_p\}$ 中的坐标矢量, 记为:

$$P'_i = [P'_{ix} \quad P'_{iy} \quad P'_{iz} \quad 1]^T \quad (3)$$

矩阵 T 为可动坐标系对固定坐标系平移和旋转后的齐次坐标变换矩阵。值为:

$$T = T(x_0, y_0, z_0)R_x(\alpha)R_y(\beta)R_z(\gamma) = \begin{bmatrix} c_\beta c_\gamma & s_\alpha s_\beta c_\gamma - c_\alpha s_\gamma & c_\alpha s_\beta c_\gamma + s_\alpha s_\gamma & x_0 \\ c_\beta c_\gamma & s_\alpha s_\beta s_\gamma + c_\alpha s_\gamma & c_\alpha s_\beta s_\gamma - s_\alpha s_\gamma & y_0 \\ -s_\beta & s_\alpha s_\beta & c_\alpha s_\beta & z_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(4)表示在固定坐标系下,可动坐标系先绕 z 轴旋转 γ 角,再绕 y 轴旋转 β 角,再绕 x 轴旋转 α 角,最后沿 x, y, z 轴平移 x_0, y_0, z_0 所得到的相对于固定坐标系的齐次变换矩阵。

P'_i 可由机构尺寸直接求得, 当给出动平台相对于固定坐标系的位置 (x_0, y_0, z_0) 和姿态 (α, β, γ) 后, P_i 由式(1)可求。

设滑块在固定坐标系下中心点 B_i 的坐标为:

$$B_i = [B_{ix} \quad B_{iy} \quad B_{iz} \quad 1]^T \quad i=1, 2, \dots, 6 \quad (5)$$

因为滑块只能沿丝杠方向运动, 所以 B_{iy}, B_{iz} 为常量, 由并联机器人的结构确定。根据矢量关系可得:

$$P_i B_i = BB_i - BP - PP_i = \bar{l} \quad i=1, 2, \dots, 6 \quad (6)$$

式中 l 为杆长, 整理得:

$$B_{ix} = \begin{cases} P_{ix} - \sqrt{l^2 - (B_{iy} - P_{iy})^2 - (B_{iz} - P_{iz})^2} & i=1, 3, 5 \\ P_{ix} + \sqrt{l^2 - (B_{iy} - P_{iy})^2 - (B_{iz} - P_{iz})^2} & i=2, 4, 6 \end{cases} \quad (7)$$

式(7)即为并联机器人的位置逆解。当给定动平台的位置, 可由上式求出6个滑块的位置逆解。上式也可表示为:

$$B_{ix} = f_i(x_0, y_0, z_0, \alpha, \beta, \gamma) \quad i=1, 2, \dots, 6 \quad (8)$$

对上式两端进行时间微分, 可得:

$$\begin{bmatrix} \dot{B}_{1x} \\ \dot{B}_{2x} \\ \vdots \\ \dot{B}_{6x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial B_{1x}}{\partial x_0} & \frac{\partial B_{1x}}{\partial y_0} & \frac{\partial B_{1x}}{\partial z_0} & \frac{\partial B_{1x}}{\partial \alpha} & \frac{\partial B_{1x}}{\partial \beta} & \frac{\partial B_{1x}}{\partial \gamma} \\ \frac{\partial B_{2x}}{\partial x_0} & \frac{\partial B_{2x}}{\partial y_0} & \frac{\partial B_{2x}}{\partial z_0} & \frac{\partial B_{2x}}{\partial \alpha} & \frac{\partial B_{2x}}{\partial \beta} & \frac{\partial B_{2x}}{\partial \gamma} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial B_{6x}}{\partial x_0} & \frac{\partial B_{6x}}{\partial y_0} & \frac{\partial B_{6x}}{\partial z_0} & \frac{\partial B_{6x}}{\partial \alpha} & \frac{\partial B_{6x}}{\partial \beta} & \frac{\partial B_{6x}}{\partial \gamma} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_0 \\ \dot{y}_0 \\ \dot{z}_0 \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} \quad (9)$$

简记为:

$$\dot{Y} = [J]_{6 \times 6} \dot{X} \quad (10)$$

式中 $[J]_{6 \times 6}$ 即为并联机器人的运动学雅可比矩阵, 也称为运动影响系数, 是与并联机器人几何位置有关的量。

2 控制器的设计

生理学的研究表明:小脑在人体运动中,起到维持躯体平衡、调节肌肉紧张程度、协调随意运动等功能。因此,模拟人的小脑结构与功能无疑是脑的宏观结构功能模拟的重要组成部分。1975年 Albus 根据神经生理学小脑皮层结构特点,提出了一种小脑模型关联控制器 CMAC 网络^[6](Cerebellum Model Articulation Controller)。小脑模型神经网络 CMAC(Cerebellar Model Articulation Controller)是一种表达复杂非线性函数的表格查询型自适应神经网络,该网络可通过学习算法改变表格的内容,具有信息分类存储的能力。本文采用 CMAC 和 PD 的复合控制实现前馈反馈控制,利用 CMAC 实现前馈控制,实现被控对象的逆动态模型与 PID 控制器实现反馈控制,保证系统的稳定性,且抑制扰动,结构如图2所示。

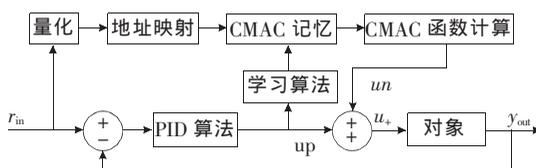


图2 CMAC与PD复合控制结构图

技术与方法 Technique and Method

CMAC 采用有导师的学习算法。每一控制周期结束时,计算出相应的 CMAC 输出 $un(k)$, 并与总控制输入 $u(k)$ 相比较,修正权重,进入学习进程。学习的目的是使总控制输入与 CMAC 的输出之差最小。经过 CMAC 的学习,使系统的总控制输出由 CMAC 产生。而常规控制器采用传统的 PD 算法而不用 PID 控制算法,使 CMAC 的学习仅仅依赖于误差的当时测量值及变化值。该系统的控制算法为:

$$un(k) = \sum_{j=1}^c w_j a_j \quad (11)$$

$$u(k) = un(k) + up(k) \quad (12)$$

式中, a_j 为二进制选择向量; c 为 CMAC 网络的泛化参数; $un(k)$ 为 CMAC 产生相应的输出; $up(k)$ 为常规控制器 PID 产生的输出。CMAC 的调整指标为:

$$E = \frac{1}{2} (un(k) - u(k))^2 \cdot \frac{1}{c} \quad (13)$$

$$\Delta w(k) = -\eta \frac{\partial E(k)}{\partial w} = \eta \frac{u(k) - un(k)}{c} a_i = \eta \frac{up(k)}{c} a_i \quad (14)$$

$$w(k) = w(k-1) + \Delta w(k) + \alpha_0 (w(k-1) - w(k-2)) \quad (15)$$

式中, η 为网络学习速率, $\eta \in (0, 1)$; α_0 为惯性量, $\alpha_0 \in (0, 1)$ 。

3 仿真实验结果及分析

6-PRRS 并联机器人的单轴传递函数可简化为二阶传递函数:

$$G(s) = \frac{0.953 \ 3 \times 10 / 2\pi}{s(0.000 \ 616s + 0.005)} \quad (16)$$

CMAC 神经网络参数取 $N=50$, $c=8$, $\eta=0.03$, $\alpha_0=0.04$ 。PID 控制参数取 $K_p=3.7$, $K_i=0$, $K_d=0.0567$, 对 6-PRRS 并联机器人进行仿真实验分析, 当系统输入为 $r(t) = \sin(t)$, 并施加扰动 $d=0.5 \operatorname{sgn}(\cos(0.5t))$ 时, 仿真结果如图 3 所示。

对比传统 PD 作用下的正弦波响应, 在施加同样负载扰动的情况下, 6-PRRS 并联机器人系统的输出与误差如图 4 所示。

在加入干扰的情况下, 会发现由于 CMAC 的加入使得干扰作用下的控制误差明显减小, 显示了较好的控制效果。CMAC 与 PD 控制器并行控制在一定程度上克服了常规控制器所不能避免的一些弊端, 使控制效果得到提高。

本文采用采用小脑模型神经网络与 PID 相结合的神经网络控制器利用分散控制策略对 6-PRRS 并联机

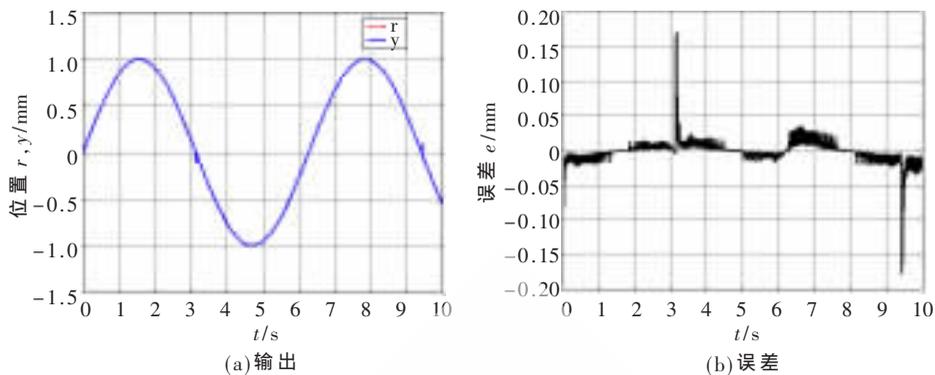


图3 施加扰动时的正弦波响应

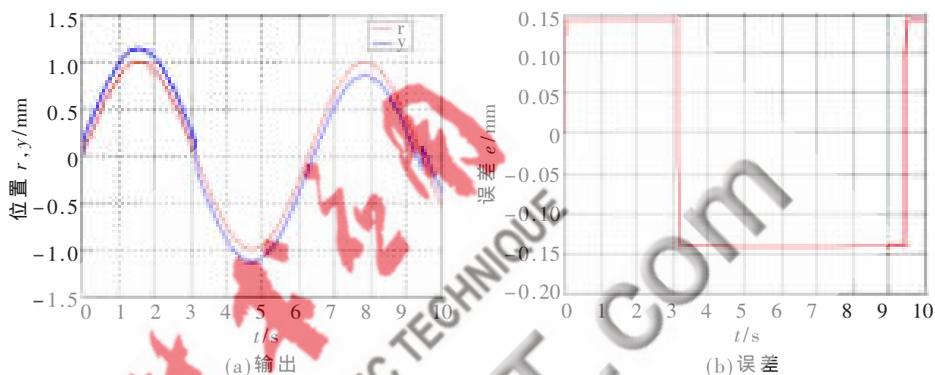


图4 PID 控制系统输出和误差图

器人进行了轨迹跟踪控制。仿真实验结果表明该控制器可以实现动力学耦合及其他未知外扰的补偿, 具有强鲁棒性和良好的轨迹跟踪性能。该控制器结构简单, 执行速度快, 易于工程实现。

参考文献

- [1] 苏玉鑫, 段宝岩, 等. 并联机器人的非线性 PID 控制[J]. 控制与决策, 2003, 18(4):490-493.
- [2] 万亚民, 王孙安, 杜海峰. 液压并联机器人的动态神经网络控制研究 [J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(9): 955-958.
- [3] 焦晓红, 耿秋实, 等. 液压伺服并联机器人的自适应鲁棒跟踪控制[J]. 系统仿真学报, 2003, 15(3):401-403.
- [4] PARK M K, LEE M C, et al. The design of sliding mode controller with perturbation observer for a 6-DOF parallel manipulator[A]. Korea, 2001.
- [5] HONEGGER M, BREGA R, SCHWEITZER G. Application of a nonlinear adaptive controller to a 6 DOF parallel manipulator [A]. International Conf. on Robotics & Automation [C], San Francisco, 2000.
- [6] ALBUS J S. A new approach to manipulator control: The Cerebellar Model Articulation Controller (CMAC)[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 1975, 97(3):220-227.

(收稿日期: 2010-03-04)

作者简介:

杨永刚, 1978 年生, 博士, 讲师, 主要研究方向: 机器人技术。

《微型机与应用》2010 年第 29 卷第 19 期