

智能自校正多模态轨迹跟踪控制

李力争¹, 何清华²

(1. 中南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410083;

2. 中南大学 机电工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 对于类似于机械手的运动轨迹跟踪和定位控制, 为了获得良好的跟踪性能和定位精度, 针对复杂多变的被控对象, 运用智能控制理论, 引入对象过程特征和行为特征的概念, 以对象的过程特征状态和行为特征状态为条件元素, 构造了1个分层递阶高阶产生式跟踪控制系统结构. 系统在运行过程中通过对对象的过程特征和行为特征辨识, 实现控制器参数的自动调节和多模态控制. 为了具体实现该系统结构的应用, 建立用于过程特征辨识、参数校正和控制决策的特征模型, 以及从过程特征状态集、行为特征状态集到参数校正模态集和控制决策模态集的映射关系. 针对机械手的运动特性进行了仿真研究, 仿真结果表明, 该系统结构具有较强的鲁棒性, 是一种行之有效的方法.

关键词: 智能控制; 跟踪系统; 特征模型; 多模态控制

中图分类号: TP273+.2; TP273+.22

文献标识码: A

文章编号: 1005-9792(2001)04-0405-05

基于数学模型各类控制方法日趋成熟, 但在工程实际应用中却受到了很大的限制, 其原因是复杂多变的实际工程对象及其所处环境常常具有非线性、时变性和不确定性, 用理论建模和系统辨识往往得不到实用、有效的对象模型, 不能获得实现有效控制的基本条件. 而操作者或控制专家凭其丰富的实践经验, 通过观察系统的运行状态, 运用启发式控制规则与直觉推理, 能对这类复杂的对象进行有效控制^[1-4]. 近年来, 越来越多的学者已意识到在传统控制中加入逻辑、推理和启发式知识的重要性, 这类系统称为智能控制系统^[5]. 操作者或控制专家在控制过程中通过学习, 随着经验的不断积累, 其控制行为越来越符合实际要求. 基于模式识别的学习控制是智能控制的形式之一^[6], 它与操作者或控制专家相类似, 系统在运行过程中随着学习的不断进行, 将使系统的控制品质不断提高. 李祖枢等通过对人的宏观控制结构和控制行为功能的模拟, 提出了1种仿人智能控制理论^[7]. 其研究的主要目标不是被控对象, 而是基于系统动态特征的多模态自学习和控制策略. 仿人智能控制要求建立系统的特征模型, 在运行过程中, 通过特征辨识来识别系统的特征状态. 特征状态是对系统运行状态的定性描述, 由特征状态决策进行定量控制的控制模态. 可见, 仿人智能控制

是1种定性决策与定量控制相结合的多模态控制方式^[8]. 对于复杂多变的被控对象的控制, 为了提高系统的自适应能力, 要求根据特征状态提供参数自学习策略和多模态参数自校正模式. 对于轨迹跟踪和定位控制, 还需建立系统的过程特征模型, 其实质是在时间上对给定运行轨迹进行阶段划分, 如将给定轨迹划分为起始加速段、轨迹跟踪段和减速定位段. 在起始加速段和轨迹跟踪段, 通常更强调系统的跟踪性能; 而在减速定位段, 则更强调系统的定位精度. 系统的行为特征主要反映了系统的偏差及其变化, 而过程特征反映了系统运行的阶段性, 由两者的综合结果来作出自学习和控制决策, 从而构成分层递阶的控制系统结构. 可见, 特征辨识和过程辨识是实现参数自学习、自校正的基础, 是实现多模态控制的前提.

1 控制系统结构

设系统的输入输出序列分别为 $r(k)$ 和 $y(k)$,

令

$$q = r(k-1) - y(k), \quad (1)$$

$$\Delta q = q(k) - q(k-1). \quad (2)$$

收稿日期: 2000-12-27

基金项目: 国家“863”高技术计划项目(863-512-9806-01)

作者简介: 李力争(1959-), 男, 湖南资兴人, 中南大学副教授, 博士研究生, 从事机器人计算控制等研究.

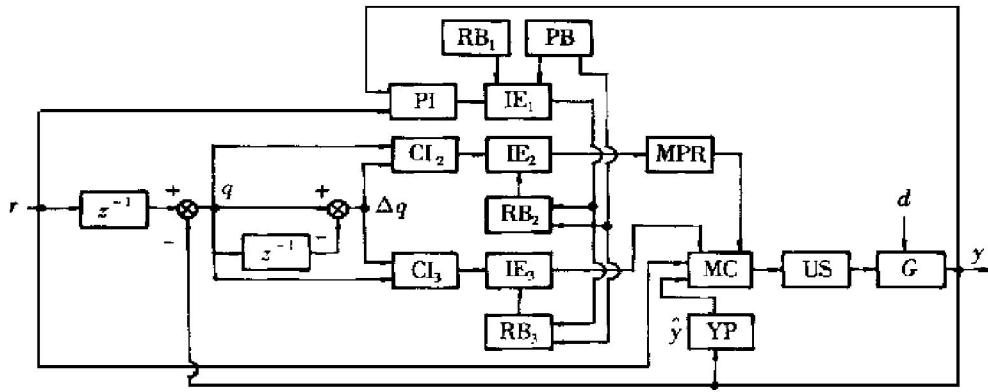


图 1 控制系统结构图

对于轨迹跟踪和定位控制, 选取 q 和 Δq 作为状态变量来建立系统的特征模型, 其物理意义是允许对给定运行轨迹的跟踪有 1 个采样节拍的延时。

对于具有惯性的动态系统, 在输入和扰动波动不大的情况下, 其输出信号通常是连续光滑的。令 T 为采样周期; k 为采样序数, $\Delta y(k) = y(k) - y(k-1)$ 。若 $\dot{y}(t) = \dot{y}(k)$, $t \in [kT, (k+1)T]$, 则输出增量预测值 $\Delta y(k+1) = \Delta y(k)$ 。但在通常情况下, $\dot{y}(t) \neq \dot{y}(k)$, 为此, 加修正项 $\Delta y(k)' = \Delta y(k) - \Delta y(k-1)$, 从而得到输出的近似预估公式:

$$y(k+1) = y(k) + \Delta y(k) + \Delta y(k)' \quad (3)$$

其中: r 为给定输入; d 为扰动信号。据式(3)可构成图 1 所示的分层递阶高阶产生式系统结构。产生式系统通常由数据库、规则库和推理机组成。系统的高、中、低级依次为过程决策级、参数校正级和运行控制级。

过程决策级由过程特征规则集 RB_1 、控制性能指标库和数据库 PB 、过程辨识器 PI 和过程特征推理机 IE_1 组成, 过程决策级根据过程特征对参数校正和运行控制作出高层决策。

参数校正级由参数校正规则集 RB_2 、特征辨识器 CI_2 、参数校正推理机 IE_2 和多模态校正器 MPR 组成。参数校正级通过特征辨识器和过程决策的双重作用, 由推理机决策出参数校正模态, 对相应控制模态的控制参数进行校正, 体现了系统的自学习功能, 提高了系统的自适应能力。

运行控制级直接面向被控对象, 控制规则集 RB_3 、特征辨识器 CI_3 和控制推理机 IE_3 的作用类相应组件与参数校正级和过程决策级的相同。控制模态由过程特征和控制特征双重决策, 由多模态控制器 MC 实现精确的定量控制。输出信号由输出预测

器 YP 进行预测, 预测值 \hat{y} 作为控制器的输入, 用以改善控制性能。当出现异常扰动或输入给定突变而导致控制信号异常时, 由控制作用监督器 US 监督处理。

2 控制器及其参数校正模型

2.1 过程决策级的模型

若给定运动轨迹为 r , 定位目标为 r_d , 选取过程基元如下:

$$\begin{aligned} q_{11}: & \quad r < r_d - \varepsilon \\ q_{12}: & \quad |r_d - y| < \delta \end{aligned}$$

其中: $\varepsilon > \delta > 0$; q_{11} 体现了轨迹跟踪过程特征, 若给定轨迹当前值至定位目标的距离大于设定的 ε , 则系统运行过程为轨迹跟踪过程; q_{12} 体现了定位到目标点特征; δ 为允许定位误差。

建立如下过程特征模型:

$$\Phi_1 = \begin{bmatrix} \varphi_{11} \\ \varphi_{12} \\ \varphi_{13} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} +1 & 0 \\ -1 & -1 \\ -1 & +1 \end{bmatrix} \wedge \begin{bmatrix} q_{11} \\ q_{12} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中符号“ \wedge ”表示一种“与”的矩阵相乘关系, 关系矩阵中的元素 $-1, 0, +1$ 分别表示取反、取 0、取正。

对于式(4), 当 $\varphi_{11} = 1$ 时表示系统运行过程为轨迹跟踪过程; $\varphi_{12} = 1$ 时表示减速定位过程; $\varphi_{13} = 1$ 时表示定位到目标点特征。

2.2 参数校正级的模型

选取如下参数校正级的特征基元:

$$\begin{aligned} q_{21}: & \quad q > q_1; \\ q_{22}: & \quad q < -q_2; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 q_{23}: & \quad \Delta q > -q_3; \\
 q_{24}: & \quad \Delta q \geq 0; \\
 q_{25}: & \quad \Delta q \leq 0; \\
 q_{26}: & \quad c = [\text{sgn}(|K_{p0}(t)|) \vee c] \cdot \\
 & \quad [1(t - mT) - 1(t - (m + n)T)] = 1, \\
 & \quad mT \in \{kT | K_{p0}(kT) \neq 0\}.
 \end{aligned}$$

其中: $\text{sgn}(\cdot)$ 为符号函数; K_{p0} 为初始比例系数; $1(\cdot)$ 为单位阶跃函数; 符号“ \vee ”表示“或”的关系; $q_1 > 0$, $q_2 > 0$, $q_3 > 0$; q_{21} , q_{22} 分别表示输出偏小和偏大状态, 且偏离给定轨迹已分别超出规定的阈值 q_1 和 q_2 ; q_{23} 表示输出偏小时, 输出上升太慢或在继续减小的运行状态; q_{24} , q_{25} 分别表示偏差的变化大于等于零和小于等于零的运行状态; 特征基元 q_{26} 具有下列意义: 在参数 K_{p0} 校正之前, $c = 0$; 在校正之后, $c = 1$, 经过 n 个采样周期之后, c 复位为 0. 引入特征基元 c 的目的是强调校正后参数的作用时间, 由于参数校正后所引起的控制效果需要经过一定的时间才能显露出来, 因而不能频繁地改变控制器参数; 特征基元 q_{26} 的设置体现了系统的记忆功能; n 的选取取决于对象的惯性大小和采样周期.

建立如下参数校正的特征模型:

$$\Phi_2 = \begin{bmatrix} \varphi_{21} \\ \varphi_{22} \\ \varphi_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} +1 & 0 & 0 & +1 & 0 & -1 \\ 0 & +1 & 0 & 0 & +1 & -1 \\ 0 & 0 & +1 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \wedge \begin{bmatrix} q_{21} \\ q_{22} \\ q_{23} \\ q_{24} \\ q_{25} \\ q_{26} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

上述 6 个特征基元按式(5)所构成的逻辑关系决定了特征变量 φ_{21} , φ_{22} , φ_{23} 的取值, 从而识别系统处于何种运行状态. $\varphi_{21} = 1$ 表示输出偏小, 其偏差已超出规定的阈值 q_1 , 且在继续增加, 参数在近 n 个采样周期内没有校正的状态; $\varphi_{22} = 1$ 表示输出偏大, 其偏差已超出规定的阈值 q_2 , 且在继续增加, 参数在近 n 个采样周期内没有校正的状态; $\varphi_{23} = 1$ 表示输出上升太慢或在减小, 参数在近 n 个采样周期内没有校正的状态.

将原参数乘以某个系数得新的参数, 按这一方

式进行校正, 选取如下参数校正模态基元:

$$\begin{aligned}
 m_{21}: & \quad K_{p0} = \lambda_1 K_{p0}; \\
 m_{22}: & \quad K_{p0} = \lambda_2 K_{p0}; \\
 m_{23}: & \quad K_{p0} = \lambda_3 K_{p0}.
 \end{aligned}$$

根据经验, λ_1 , λ_2 , λ_3 的取值范围为: $\lambda_1 \approx 0.80 \sim 0.95$, $\lambda_2 \approx 0.80 \sim 0.95$, $\lambda_3 \approx 1.05 \sim 1.20$.

建立如下参数校正模态集:

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{21} \\ m_{22} \\ m_{23} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

其中: p_1, p_2 为参数减小模态; p_3 为参数增加模态.

将获取的先令知识表示为产生式规则, 由产生式规则可得到从过程状态集和参数校正特征状态集到参数校正模态集的映射:

$$p = [\varphi_{11} \wedge \varphi_{21} \quad \varphi_{12} \wedge \varphi_{23} \quad \varphi_{11} \wedge \varphi_{22}] \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

其映射结果 $p \in \{p_1, p_2, p_3\}$, 控制参数按 p 所对应的模态进行参数校正.

2.3 运行控制级的模型

选取控制级的特征基元如下:

$$\begin{aligned}
 q_{31}: & \quad 0 < q < q_4; \\
 q_{32}: & \quad -q_5 < q < 0; \\
 q_{33}: & \quad |q| \geq q_6; \\
 q_{34}: & \quad \Delta q > 0; \\
 q_{35}: & \quad \Delta q < 0.
 \end{aligned}$$

其中: $q_4 > 0$, $q_5 > 0$, $q_6 > 0$; q_{31} , q_{32} 分别表示正偏差和负偏差在规定的阈值 q_4 , q_5 范围内的运行状态; q_{33} 表示偏差大于规定的阈值的运行状态; q_{34} , q_{35} 分别表示偏差的变化大于 0 和小于 0 的运行状态.

建立控制级的特征模型:

$$\Phi_3 = \begin{bmatrix} \varphi_{31} \\ \varphi_{32} \\ \varphi_{33} \\ \varphi_{34} \\ \varphi_{35} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} +1 & 0 & 0 & +1 & 0 \\ 0 & +1 & 0 & 0 & +1 \\ +1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & +1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & +1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \wedge \begin{bmatrix} q_{31} \\ q_{32} \\ q_{33} \\ q_{34} \\ q_{35} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

上述 5 个特征基元按(8)式所构成的逻辑关系决定特征变量 $\varphi_i (i = 31, \dots, 35)$ 的取值, 从而识别系统处于何种运行状态. $\varphi_{31} = 1$ 表示正偏差在规定的阈值 q_4

范围内, 但输出在偏离设定轨迹的运行状态; $\varphi_{32} = 1$ 表示负偏差在规定阈值 q_5 范围内, 但输出在偏离设定轨迹的运行状态; $\varphi_{33} = 1$ 表示正偏差在规定的阈值 q_4 范围内, 且输出在靠近轨迹的运行状态; $\varphi_{34} = 1$ 表示负偏差在规定的阈值 q_5 范围内, 且输出在靠近设定轨迹的运行状态; $\varphi_{35} = 1$ 表示偏差大于规定的阈值 q_6 的运行状态。

令 $e(k) = r(k) - \hat{y}(k+1)$, 选取控制模态基元:

$$m_{31}: \quad u = u \text{ (即保持);}$$

$$m_{32}: \quad u = K_p e \text{ (即比例控制).}$$

其中: K_p 为比例系数, $K_p = K_{p0} \times \text{fix}(|\lambda| + 1)$; $\text{fix}(\cdot)$ 为取整函数。

建立控制模态集:

$$U = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{31} \\ m_{32} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

u_1, u_2, u_3 分别表示积分、保持和比例 3 种控制模态。

同理, 由先令知识和产生式规则可得到从过程状态集和控制特征状态集到控制模态集的映射:

$$u = \begin{bmatrix} \varphi_{11} \wedge (\varphi_{31} \vee \varphi_{32}) \vee \varphi_{12} \\ \varphi_{11} \wedge (\varphi_{33} \vee \varphi_{34}) \\ \varphi_{11} \wedge \varphi_{35} \\ \varphi_{13} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

其映射结果 $u \in \{u_1, u_2, u_3, 0\}$, 控制器按 u 所对应的控制模态进行控制。

3 仿 真

对于机械手的运动, 为了运行平稳, 减小冲击, 可将机械手的运行分为起始加速、轨迹跟踪和减速定位 3 个阶段。将机械手的运动分解为各关节的运动分量。现只考虑 1 个关节的运动, 设给定运行轨迹为

$$r(t) = \begin{cases} \frac{1}{2}t^2, & 0 \leq t < 2; \\ 2t - 2, & 2 \leq t < 5; \\ 10 - \frac{1}{2}(t - 7)^2, & 5 \leq t < 7. \end{cases}$$

目标定位点为 $r_d = 10$ 。过程决策级的参数取 $r_d = 10$,

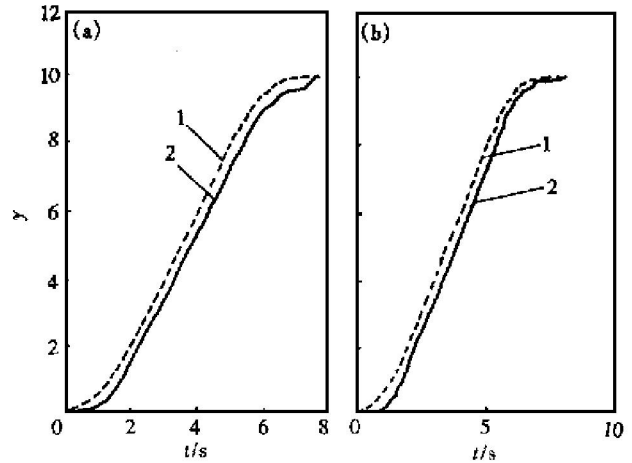
$\varepsilon = 2, \delta = 0.2$; 参数校正级参数取 $q_1 = q_2 = 0.2, q_3 = 0.1, \lambda_1 = \lambda_2 = 1.1, \lambda_3 = 0.8$; 运行控制级的参数取 $q_4 = q_5 = q_6 = 0.2, \lambda = 5$; 取初始比例系数 $K_{p0} = 3$, 采样周期 $T = 0.1$ s。当对象分别为

$$G(s) = \frac{2}{(s+1)(2s+1)}$$

和

$$G(s) = \frac{4}{(2s+1)(3s+1)}$$

时, 其运行轨迹如图 2(a) 和 2(b) 所示。仿真结果表明, 该系统具有很好的跟踪性能和定位精度。



(a) $-G(s) = \frac{2}{(s+1)(2s+1)}$; (b) $-G(s) = \frac{4}{(2s+1)(3s+1)}$
1—设定轨迹; 2—跟踪轨迹

图 2 仿真运行轨迹图

4 结 论

a. 系统结构中各级特征模型、参数校正模态和控制模态的建立来源于控制专家的经验。从特征模态到参数校正模态和控制模态的映射是对人的控制行为的模仿。各级参数的选取主要取决于系统的控制精度。

b. 各种控制模态的建立可以充分利用传统的控制理论和方法, 本控制器利用了单步预测控制的思想, 给出的预测模型简单实用, 特别适合于单调的非线性动态系统。这种控制方式具有比例和微分控制作用, 但能产生更优的控制效果。

c. 对于 $u = K_p e$ 这一控制模态, 比例系数 $K_p = K_{p0} \text{fix}(|\lambda| + 1)$, 它随 $|\lambda|$ 的变化而阶梯性地变化, 而 K_{p0} 由参数校正级进行校正。比例系数的这种参数校正级和运行控制级的 2 级校正方式可以大大改善系统的跟踪性能。事实上, 这一控制模态又包含众多的比例系数相异的子模态, 它们对应着 $|\lambda|$ 的不同范

围. 当偏差较小而 $\text{fix}(|\lambda| + 1) = 1$ 时, $K_p = K_{p0}$. 可见, K_{p0} 的值对系统的稳态偏差、定位速度和精度有较大的影响.

d. 参数的自校正和多模态控制方式说明系统具有很强的自适应能力, 仿真结果表明该系统具有较强的鲁棒性.

参考文献:

- [1] 蔡自兴. 智能过程控制的应用[J]. 中南工业大学学报(自然科学版), 1995, 26(6): 797-800.
- [2] 孙增圻, 张再兴. 智能控制的理论与技术[J]. 控制与决策, 1996,

11(1): 1-7.

- [3] 蔡自兴. 智能控制——基础与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [4] 周其鉴. 仿人智能控制器[J]. 中国仪器仪表, 1993, (2): 5-9.
- [5] 李少远, 席裕庚, 陈增强, 等. 智能控制的新进展[J]. 控制与决策, 2000, 15(1): 1-5.
- [6] 邓志东, 张再兴, 孙增圻. 学习控制系统[J]. 信息与控制, 1996, 25(2): 94-103.
- [7] 李祖枢, 徐鸣, 周其鉴. 一种新型的仿人智能控制器(SHIC)[J]. 自动化学报, 1990, 16(6): 503-509.
- [8] Kumpati S N, Jeyendran B. Adaptive control using multiple models[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1997, 42(2): 171-187.

Intelligent self-tuning and multi-mode control of trajectory tracking

LI Lizheng¹, HE Qinghua²

(1. College of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: On the basis of intelligent control theory, a structure of high-order production hierarchical tracking control system is proposed. A manipulator may obtain excellent trajectory tracking behavior and high accurate location control by use of the structure. Two motions of procedure characteristics and action characteristics for controlled object are introduced, and the two characteristic states are used as premise factors in the structure. The system implements controller parameter self-tuning and multi-mode control with the identification of the two characteristics. Specific characteristic models used for procedure characteristics identification, controller parameter self-tuning and control decision are presented for practical application of the system. The mapping from procedure characteristic state set and action characteristic state set to controller parameter tuning mode set and control decision mode set is also set up. A simulation example concerning the motion of manipulators is given. Simulation result conforms the effectiveness of the system.

Key words: intelligent control; tracking system; characteristic model; multi-mode control