



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102540887 A

(43) 申请公布日 2012. 07. 04

(21) 申请号 201110444603. 7

(22) 申请日 2011. 12. 27

(71) 申请人 浙江大学

地址 310027 浙江省杭州市西湖区浙大路
38 号

(72) 发明人 吕帅 苏宏业 蔡建平 柳向斌
刘之涛

(74) 专利代理机构 杭州中成专利事务所有限公
司 33212

代理人 唐银益

(51) Int. Cl.

G05B 13/04 (2006. 01)

权利要求书 1 页 说明书 6 页

(54) 发明名称

一种非线性参数化系统的控制方法

(57) 摘要

本发明属于自适应控制领域,公开了一种对于下三角型非线性参数化系统的动态面控制办法。本发明提供了一种融合了动态面控制和浸入与不变自适应估计率的新型算法,该方法利用动态面控制中加入的鲁棒作用来抑制系统各类外部扰动和未建模动态,防止了反步法所造的计算膨胀问题;并利用在线学习模块的浸入与不变自适应估计率,区分了系统当中参数不确定性和未知非线性函数,并将参数不确定性的影响降到最小,最大程度的减小了不确定性对于控制性能的影响;最后利用协调模块将自适应估计率作用和鲁棒控制的作用有机地结合在一起。同时保障了系统具有良好的动态性能和稳态性能。

1. 一种针对下三角型的非线性参数化系统的基于浸入与不变流型的动态面控制方法, 其特征在于, 利用浸入与不变自适应估计率估计系统的非线性参数化的未知参数, 减小参数不确定性给系统带来的不利影响, 利用动态面控制的鲁棒作用来抑制系统各类外部扰动和未建模动态, 运用动态面控制的方法反推系统, 为系统设计一个相对简单的控制器, 使用浸入与不变自适应律来消除不确定性对系统控制性能的影响, 动态面控制以一阶低通滤波器对虚拟控制量进行估计, 系统的自适应估计率部分引入了浸入与不变自适应律的作用, 在积分型估计器中加入调节函数的作用, 实现了未知参数的精确估计。

2. 如权利要求 1 中所述的下三角型非线性参数化系统的基于浸入与不变流型的动态面控制方法, 其特征在于: 用如下数学表达式来描述:

$$\begin{aligned}\dot{x}_i(t) &= x_{i+1}(t) + f_i(\bar{x}_i(t), \theta, t) + \Delta_i(x(t), t), 1 \leq i \leq n-1 \\ \dot{x}_n(t) &= u(t) + f_n(x(t), \theta, t) + \Delta_n(x(t), t),\end{aligned}$$

$$y = x_1$$

其中, $\bar{x}_i(t) = [x_1(t), \dots, x_i(t)]^T \in R^i, i=1, \dots, n$ 为系统的状态, $u(t) \in R$ 为系统的控制输入, $f_i(\bar{x}_i(t), \theta, t), i=1, \dots, n$ 为结构已知但 θ 值未知的光滑非线性函数, 并且对 θ 满足 Lipschitz 条件; $\theta \in R^p$ 是函数 $f_i(\bar{x}_i(t), \theta, t)$ 的未知参数; $\Delta_i(x(t), t), i=1, \dots, n$ 是系统所有的未建模动态及干扰项等构成的集总未知的非线性函数项。

3. 如权利要求 1 中所述的下三角型非线性参数化系统的基于浸入与不变流型的动态面控制方法, 其特征在于, 其参数不确定性和非线性不确定性项的特征在于: 不确定性是在一定的范围之内, 并且这个范围的边界是已知的:

$$\begin{aligned}\theta &\in \Omega_\theta = \{ \theta : \theta_{j\min} \leq \theta_j \leq \theta_{j\max}, j=1, \dots, p \} \\ |\Delta_i(x, t)| &\leq d_i, i=1, \dots, n\end{aligned}$$

一种非线性参数化系统的控制方法

技术领域

[0001] 本发明属于自适应控制领域,具体得说,是一种涉及浸入与不变自适应控制的思想,结合自适应控制和动态面控制(dynamic surface control)的优点实现控制性能的提升的非线性参数化系统的控制方法。

背景技术

[0002] 非线性参数化系统的控制是当今控制界研究的热点和难点问题。对于非线性参数化的研究不仅在理论方面有重大的意义,在工程应用上也能创造巨大的价值。实际系统中大量的不确定性项表现为非线性参数化形式,如化工过程、机器人视觉伺服、摩擦补偿等系统模型。因此,有必要对于非线性参数化系统进行深入的研究。

[0003] 自适应控制在处理不确定性问题上有很多优点,主要体现在可以通过在线的参数估计减小可线性参数化的不确定性对于系统的影响,从而在不使用高增益的情况下获得可观的控制性能。但是自适应控制的缺点也是显而易见的:在受到扰动的环境下难以保持良好的控制效果,在不满足持续激励的条件下,很小的扰动都有可能系统的不稳定,也就是说自适应控制的鲁棒性难以保证;另外,自适应控制的虽然稳态性能优秀,但是其暂态性能不佳。

[0004] 动态面控制是基本反步式方法所提出来的改进方法,它抛弃了反步法中每一步都对李雅普诺夫函数求导的过程,转而以一阶低通滤波器对虚拟控制量进行估计,解决了反步法的计算膨胀问题,使控制器变得更加简单高效。但是传统的动态面控制多使用 RBF 神经网络对系统未知项进行逼近,这种做法能够对任意的非线性项进行估计,但是其最大的问题在于没有充分利用系统的先验知识,造成信息的丢失。

[0005] 中国专利公开号 CN101846975A 发明了一种自适应鲁棒控制算法来处理非线性参数化问题,该方法通过构造摩擦模型逼近器,并对其参数进行自适应调整,实现对摩擦力值的在线估计,然后通过鲁棒控制器的作用使系统具有足够的抗干扰能力。该发明能够保证系统有良好的鲁棒性,但是该发明使用传统的积分型估计器,不能很好地发挥自适应模块的降低参数不确定性影响的功能。

发明内容

[0006] 本发明正是针对现有技术的不足之处所作的改进,为下三角型的非线性参数化系统这一大类系统提供一种基于浸入与不变流型的动态面控制方法。

[0007] 本发明的具体技术方案如下:

[0008] 本发明利用浸入与不变自适应估计率估计系统的非线性参数化的未知参数,减小参数不确定性给系统带来的不利影响,利用动态面控制中加入的鲁棒作用来抑制系统各类外部扰动和未建模动态。

[0009] 本发明是用动态面控制的方法反推系统,为系统设计一个相对简单的控制器,使用浸入与不变自适应律最大程度地消除不确定性对系统控制性能的影响。其中:

[0010] 动态面控制抛弃了反步法中每一步都对李雅普诺夫函数求导的过程,转而以一阶低通滤波器对虚拟控制量进行估计,解决了反步法的计算膨胀问题,使控制器变得更加简单高效。

[0011] 系统的自适应估计率部分引入了浸入与不变自适应律的作用,放弃使用传统自适应作用中的确定等价原则,改为在积分型估计器中加入调节函数的作用,实现了未知参数的精确估计。

[0012] 本发明中提出的下三角型非线性参数化系统,其特征在于:可以用如下数学表达式来描述:

[0013]

$$\dot{x}_i(t) = x_{i+1}(t) + f_i(\bar{x}_i(t), \theta, t) + \Delta_i(x(t), t), 1 \leq i \leq n-1$$

[0014] (1)

[0015]

$$\dot{x}_n(t) = u(t) + f_n(x(t), \theta, t) + \Delta_n(x(t), t),$$

[0016] $y = x_1$

[0017] 其中, $\bar{x}_i(t) = [x_1(t), \dots, x_i(t)]^T \in R^i, i=1, \dots, n$ 为系统的状态, $u(t) \in R$ 为系统的控制输入, $f_i(\bar{x}_i(t), \theta, t), i=1, \dots, n$ 为结构已知但 θ 值未知的光滑非线性函数,并且对 θ 满足 Lipschitz 条件; $\theta \in R^p$ 是函数 $f_i(\bar{x}_i(t), \theta, t)$ 的未知参数; $\Delta_i(x(t), t), i=1, \dots, n$ 是系统所有的未建模动态及干扰项等构成的集总未知的非线性函数项。

[0018] 本发明中提出的下三角型非线性参数化系统,其参数不确定性和非线性不确定性项的特征在于:不确定性是在一定的范围之内,并且这个范围的边界是已知的:

[0019] $\theta \in \Omega_\theta = \{\theta : \theta_{j\min} \leq \theta_j \leq \theta_{j\max}, j=1, \dots, p\}$

[0020] $|\Delta_i(x, t)| \leq d_i, i=1, \dots, n$

[0021] 本发明方案有如下有益效果:

[0022] 本发明采用的动态面控制方法结合了自适应控制和鲁棒控制的优点,既克服了自适应控制暂态性能差、抗干扰能力弱的缺点;同时又在控制器设计过程中大量使用鲁棒控制的方法使得系统保持了暂态性能好的优点,并克服了其保守性强的不足。

[0023] 本发明在动态面控制的基础上加入了浸入与不变自适应律的作用,考虑参数的估计值和真实值之间的误差所形成的流型,我们可以加入调节函数的作用使得估计率的设计更为灵活,并且使得整个参数估计率由传统自适应律的积分作用转变为比例积分作用,还避免了使用传统的依赖于确定等价原则的参数估计器,提高了参数估计的有效性。这样就可以在不影响控制器对系统的作用的基础上,实现参数的精确估计。降低了系统参数不确定性对于控制性能的影响。

具体实施方式

[0024] 下面结合系统 (1) 对发明的技术方案做进一步详细说明。

[0025] 本发明的协调模块的作用在于调和鲁棒作用和自适应估计的矛盾,而矛盾在于自适应估计器产生的估计值有可能是无界的,而鲁棒作用不能处理无界的控制问题。所以本发明的协调模块采用一种连续投影的方式对自适应估计器的参数估计值进行投影,使其值

保持在一个有界的范围内,投影算法如下:

$$[0026] \quad \Pi_i(r_i) = \begin{cases} e^{\frac{1}{\varepsilon_{\theta_i}} r_i - \frac{\theta_{i\min} + \varepsilon_{\theta_i}}{\varepsilon_{\theta_i}} + \ln \varepsilon_{\theta_i}} + \theta_{i\min}, & r_i < \theta_{i\min} + \varepsilon_{\theta_i}, \\ r_i, & r_i \in [\theta_{i\min} + \varepsilon_{\theta_i}, \theta_{i\max} - \varepsilon_{\theta_i}] \\ -e^{-\frac{1}{\varepsilon_{\theta_i}} r_i + \frac{\theta_{i\max} - \varepsilon_{\theta_i}}{\varepsilon_{\theta_i}} + \ln \varepsilon_{\theta_i}} + \theta_{i\max}, & r_i > \theta_{i\max} - \varepsilon_{\theta_i} \end{cases} \quad (2)$$

[0027] 本发明在线学习模块采用浸入与不变自适应估计率,其特点在于放弃使用传统自适应作用中的确定等价原则,改为在积分型估计器中加入调节函数的作用,以 $\hat{\theta} + \beta(x)$ 作为对未知参数的估计值,实现了未知参数的精确估计。具体表达形式如下:

[0028]

$$\dot{\theta} = -\left[\frac{\partial \beta}{\partial x}\right]^T \begin{bmatrix} x_2 + f_1(\bar{x}_1, \hat{\theta} + \beta(x), t) \\ M \\ u + f_n(x, \hat{\theta} + \beta(x), t) \end{bmatrix}$$

[0029] 选取调节函数 $\beta(x)$ 使得函数

$$[0030] \quad \psi(\theta) = \left[\frac{\partial \beta}{\partial x}\right]^T \begin{bmatrix} x_2 + f_1(\bar{x}_1, \theta, t) \\ M \\ u + f_n(x, \theta, t) \end{bmatrix}$$

[0031] 在集合 $x \in \Omega_f \subset R^n$ 内满足严格 P 单调条件,即,

$$[0032] \quad (a-b)^T P \{ \psi(a) - \psi(b) \} > 0$$

[0033] 其中 $a, b \in R^p$, $P \in R^{p \times p}$, $P = P^T > 0$ 。则对于任意 $(x(0), \hat{\theta}(0)) \in \Omega_f \times R^p$ 和能够使 $x(t) \in \Omega_f$ 的 $u(t)$, $\psi(\theta)$ 有界并且使得参数估计误差,即 $\hat{\theta} + \beta(x) - \theta$ 单调收敛到原点附近。当系统中未知非线性项为零时,可实现估计误差单调收敛到零。

[0034] 本发明的控制器部分使用动态面控制的设计方法为框架,通过设计子系统的虚拟控制器逐渐扩展到整个系统的控制器来跟踪期望信号 y_d 。对于一阶子系统而言,令 $S_1 = y - y_d$, 对其求导,得:

[0035]

$$\dot{S}_1 = x_2 + f_1(\bar{x}_1, \theta, t) + \Delta_1 - \dot{y}_d$$

[0036]

$$= x_2 + f_1(\bar{x}_1, \hat{\theta}_\Pi, t) + \delta_1 + \Delta_1 - \dot{y}_d$$

[0037]

$$= x_2 + f_1(\bar{x}_1, \hat{\theta}_\Pi, t) - \dot{y}_d + \delta_1^0$$

[0038] 其中 $\hat{\theta}_\Pi$ 为采用自适应律得到的数值在经过投影算法 (2) 处理后而得到的对未知参数 θ 的估计值, $f_1(\bar{x}_1, \theta, t) = f_1(\bar{x}_1, \hat{\theta}_\Pi, t) + \delta_1$, $\delta_1^0 = \delta_1 + \Delta_1$, 由于满足 Lipschitz 条件, 所以有 $\delta_1 \leq L_1 \| \theta_{\max} - \theta_{\min} \|$, δ_1^0 也是有界的。

[0039] 设计 a_1 为一阶子系统的虚拟控制器,形式如下:

[0040]

$$a_1 = \dot{x}_1 - f_1(\bar{x}_1, \hat{\theta}_1, t) - K_1 S_1$$

[0041] 并在此控制器上加入一阶滤波器如下,

$$\varepsilon_1 \dot{z}_1 + z_1 = a_1, z_1(0) = a_1(0)$$

[0042] 令 $y_1 = z_1 - a_1$, 则有 $\dot{y}_1 = -\frac{y_1}{\varepsilon_1}$, 再令 $S_i = x_i - z_i$, $i = 2, \dots, n-1$, 有:

[0043]

$$\dot{S}_1 = -K_1 S_1 + S_2 + y_1 + \dot{d}_1$$

[0044] 再对 $S_i = x_i - z_i$, $i = 2, \dots, n-1$ 求导, 得:

[0045]

$$\dot{S}_i = f_i(\bar{x}_i, \theta, t) + x_{i+1} + \Delta_i - \dot{x}_i$$

[0046]

$$= f_i(\bar{x}_i, \hat{\theta}_i, t) + \delta_i + x_{i+1} + \Delta_i - \dot{x}_i$$

[0047] 其中 $f_i(\bar{x}_i, \theta, t) = f_i(\bar{x}_i, \hat{\theta}_i, t) + \delta_i$, $\dot{d}_i = \delta_i + \Delta_i$, 设计 a_i 为此子系统的虚拟控制器, 形式如下:

[0048]

$$a_i = \dot{x}_i - f_i(\bar{x}_i, \hat{\theta}_i, t) - K_i S_i$$

[0049] 在此虚拟控制器上加入滤波器形式如下:

[0050]

$$\varepsilon_{i+1} \dot{z}_{i+1} + z_{i+1} = a_i, z_{i+1}(0) = a_i(0)$$

[0051] 令 $y_{i+1} = z_{i+1} - a_i$, 有 $\dot{y}_{i+1} = -\frac{y_{i+1}}{\varepsilon_{i+1}}$, 则可以得到:

[0052]

$$\dot{S}_i = -K_i S_i + S_{i+1} + y_{i+1} + \dot{d}_i$$

[0053] 在此基础上再对 $S_n = x_n - z_n$ 求导, 得:

[0054]

$$\dot{S}_n = f_n(\bar{x}_n, \theta, t) + u + \Delta_n - \dot{x}_n$$

[0055]

$$= f_n(\bar{x}_n, \hat{\theta}_n, t) + \delta_n + u + \Delta_n - \dot{x}_n$$

[0056] 设计控制器 $u = -f_n(\bar{x}_n, \hat{\theta}_n, t) + \dot{x}_n - K_n S_n$, 代入上式, 有:

[0057]

$$\dot{S}_n = -K_n S_n + \dot{d}_n$$

[0058] 选定系统的 Lyapunov 函数为

$$V = V_n + V_\theta$$

[0059]

$$V_n = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} S_i^2 + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{1}{2} y_{i+1}^2$$

[0062]

$$V_{\theta} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \theta_i^2 P \theta_i$$

[0063] 对其求导,得:

[0064]

$$V'_{\theta} = \sum_{i=1}^n S_i \theta_i + \sum_{i=1}^{n-1} y_{i+1} \theta_{i+1} - \sum_{i=1}^n \theta_i^2 P \theta_i$$

[0065]

$$= \sum_{i=1}^{n-1} (-K_i S_i^2 + S_i S_{i+1} + S_i d_i + S_i y_{i+1}) - K_n S_n^2 + S_n \theta_n^2$$

[0066]

$$+ \sum_{i=1}^{n-1} y_{i+1} \left(-\frac{y_{i+1}}{\varepsilon_{i+1}} - \theta_{i+1} \right) - \sum_{i=1}^n \theta_i^2 P \theta_i$$

[0067]

$$= \sum_{i=1}^{n-1} \left(S_i S_{i+1} - \frac{y_{i+1}^2}{\varepsilon_{i+1}} + |y_{i+1} \theta_{i+1}| + S_i y_{i+1} \right)$$

[0068]

$$+ \sum_{i=1}^n (-K_i S_i^2 + S_i \theta_i^2) - \sum_{i=1}^n \theta_i^2 P \theta_i$$

[0069]

$$\leq \sum_{i=1}^n (-K_i S_i^2 + S_i^2 + \frac{1}{4} \theta_i^2) + \sum_{i=1}^{n-1} (2S_i^2 + \frac{1}{4} S_{i+1}^2)$$

[0070]

$$+ \sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{1}{4} y_{i+1}^2 - \frac{y_{i+1}^2}{\varepsilon_{i+1}} \right) + \sum_{i=1}^{n-1} |y_{i+1} \theta_{i+1}| - \sum_{i=1}^n \theta_i^2 P \theta_i$$

[0071] 选取

[0072] $K_1 = 3+K$ [0073] $K_i = \frac{13}{4} + K, i = 2, L, n-1$ [0074] $K_n = \frac{5}{4} + K$ [0075] 由于 θ_i 是连续函数,所以在定义域内有最大值,设为 λ_i ,所以上式可变为:

[0076]

$$V'_{\theta} \leq -\sum_{i=1}^n K S_i^2 - \sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{1}{\varepsilon_{i+1}} - \frac{1}{4} - \frac{\lambda_i^2}{2} \right) y_{i+1}^2 + \sum_{i=1}^n \frac{1}{4} \theta_i^2 + \frac{n-1}{2} - \sum_{i=1}^n \theta_i^2 P \theta_i$$

[0077] 取 $\frac{1}{\varepsilon_{i+1}} \geq \frac{1}{4} + \frac{\lambda_i^2}{2} + K, \phi \geq \sum_{i=1}^n \frac{1}{4} \theta_i^2 + \frac{n-1}{2}$, 且由于本发明采用浸入与不变自适应估计率,所以使得 V'_{θ} 负定,从而保证 V_{θ} 单调收敛到零,即当时间趋于无穷时, θ 信号收敛到零。此时, $V = V_n$,其动态就变为

[0078]

$$V_n \leq -\sum_{i=1}^n K S_i^2 - \sum_{i=1}^{n-1} K y_{i+1}^2 + \phi$$

[0079]

$$= -2KV_n + \phi$$

[0080] 不等式两边同时乘以 e^{2Kt} , 得:

[0081]

$$(V_n + 2KV_n)e^{2Kt} \leq \phi e^{2Kt} - V_n e^{2Kt}$$

[0082] 对上式两边求积分, 得:

[0083]

$$\int_0^t (V_n + 2KV_n)e^{2K\omega} d\omega \leq \int_0^t (\phi e^{2K\omega} - V_n e^{2K\omega}) d\omega$$

[0084] 由于 V_n 是有界函数, 假设 $|V_n| \leq \gamma$, 求解上式可得:

$$[0085] \quad 0 \leq V_n(t) \leq (V_n(0) - \frac{\phi + \gamma}{2K})e^{-2Kt} + \frac{\phi + \gamma}{2K}$$

[0086] 所以, 系统是有界的, 并且通过提高 K 的取值可以使系统的跟踪误差减小。