·机电工程·

基于时延控制的机器人自适应混合位置/力控制

王　露，刘　霞*
（西华大学电气与电子信息学院，四川 成都 610039）

摘　要：提出一种基于时延控制的自适应混合位置/力控制算法，以提高机器人与不确定环境交互时位置和力的精度。在位置控制子系统中，采用不需要依赖系统模型的时延控制以抵消机器人系统的所有非线性项，并引入自适应增益来减小由于不确定环境而引起的时延估计误差。在力控制子系统中，通过递推最小二乘法在线辨识未知环境参数，得到机器人末端执行器与环境的接触力。运用李雅普诺夫函数法分析系统的稳定性，仿真结果验证了所提算法的有效性。该算法对未知环境具有适应性，可以使机器人末端执行器同时保证位置和力轨迹跟踪的精确性，位置误差约为 0.016 m，力误差约为 0.034 N。

关键词：时延控制；混合位置/力控制；机器人；自适应控制；不确定环境；末端执行器

中图分类号：TP273+.2　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1673–159X(2023)04 − 0066 − 09

doi:10.12198/j.issn.1673 − 159X.4620

Adaptive Hybrid Position/Force Control for Robot Based on Time Delay Control

WANG Lu, LIU Xia*
（*School of Electrical Engineering* & *Electronic Information*, *Xihua University*, *Chengdu* 610039 *China*）

Abstract: This paper proposes an adaptive hybrid position/force control algorithm based on time delay control. The purpose is to improve the accuracy of position and force in uncertain environments. In position control subsystem, time delay control which does not depend on the system model is employed to cancel all the nonlinear terms in the robotic system. An adaptive gain is introduced to reduce the time delay estimation error in uncertain environments. In force control subsystem, the unknown environmental parameters were identified online by the recursive least squares algorithm, and the contact force between the end-effector and environments was obtained. The stability of the system is analyzed via Lyapunov function, and the effectiveness of the proposed control algorithm is verified by simulations. The proposed control algorithm is adaptable to uncertain environments and can ensure the accuracy of simultaneous position and force tracking of the end-effector. The position error is about 0.016 m and the force error is about 0.034 N.

收稿日期：2022 − 07 − 06
基金项目：国家自然科学基金资助项目（61973257）。
* **通信作者：**刘霞（1980—），女，教授，博士，主要研究方向为非线性系统和机器人控制技术。
ORCID：0000 − 0001 − 7043 − 8495　　E-mail：xliucd@163.com

引用格式：王露，刘霞. 基于时延控制的机器人自适应混合位置/力控制[J]. 西华大学学报（自然科学版），2023，42(4)：66 − 74.
WANG Lu, LIU Xia. Adaptive Hybrid Position/Force Control for Robot Based on Time Delay Control[J]. Journal of Xihua University（Natural Science Edition），2023, 42(4): 66 − 74.

Keywords: time delay control；hybrid position/force control；robot；adaptive control；uncertain environments；end-effector

在机器人的很多应用领域中, 机器人都需要完成与环境进行交互的任务, 如打磨、装配等任务[1−4]。这些任务不仅要求对机器人末端执行器的位置进行控制, 还要求末端执行器对未知的约束环境接触面具有适应性。要实现这个目的, 一种方法是可以引入一些机械元件, 如电缆驱动机械手等, 然而这些元件可能会降低控制性能[5−6]。另一种方法是采用有效的控制策略, 目前主要使用的是阻抗控制和混合位置/力控制 (hybrid position/force control, HPFC)[7−8]。但是阻抗控制容易受到环境动力学和期望阻抗模型参数的影响。而混合位置/力控制的原理是利用所有驱动关节来控制自由运动方向上的位置, 同时控制机器人位置受约束方向上的力, 因此混合位置/力控制更适合处理环境不确定的实际问题[9]。

就机器人本身来讲, 它是一个高耦合、高时变和多输入输出的非线性系统, 为了提高非线性机器人系统的混合位置/力控制的性能, 学者们进行了大量研究[10−26]。文献 [10] 提出了基于神经网络的混合位置/力跟踪控制方案, 以控制基于神经网络的速度观测器的机器人系统,但是在神经网络结构中难以确定隐藏层和神经元的数量。文献 [11] 提出了一种模糊混合位置/力控制方法, 位置控制采用传统 PID, 力控制采用模糊 PI。然而该方法并不能实时更新模糊规则中的权重, 很难精确补偿控制误差。此外, 神经网络和模糊控制算法都是通过学习来逼近机器人的非线性未知模型, 计算复杂。

与复杂的神经网络和模糊控制相比, 时延控制 (time delay control, TDC) 可以抵消机器人系统中的所有非线性未知模型, 是一种更为简单实用的方法。文献 [12] 首次提出 TDC, TDC 采用了时延估计 (time delay estimate, TDE) 技术, 利用前一个采样时刻的时滞信息来估计和补偿机器人复杂的未建模动力学和外部干扰, 从而抵消机器人系统中的所有非线性项。由于 TDC 在具有简单、高效、不需要依赖模型等优点的同时具有强鲁棒性, 它已被应用于各个领域[13−15]。然而, 传统的 TDC 并不完善, 主要是由于 TDE 和真实信息之间存在误差, 该误差被称为 TDE 误差。近年来, 许多研究将 TDC 与其他辅助控制方法如梯度估计器[16]、终端滑模控制[17]、自适应滑模控制[18] 等结合, 这些方法相比于传统的 TDC更好地抑制了 TDE 误差。但是, 这些方法中通常都是采用一个恒定的控制增益, 且通常是通过调试和试错的方法得到的, 所以该过程非常耗时[19]。

此外, 当机器人与未知环境交互时, 使用恒定增益的 TDC 并不能很好地适应未知的外界条件, 性能不够理想, 甚至可能导致系统不稳定。文献 [20] 首次提出了一种 TDC 的自适应规则, 将 Nussbaum 函数改进并引入。然而其中的自适应律是基于角加速度, 使用数值微分, 可能会产生噪声, 并且自适应增益的范围十分有限; 因此该方法不容易获得精确的控制性能。文献 [21] 中设计的自适应控制增益是基于滑动变量, 其中阻尼项结合了滑模控制, 实现了比文献 [20] 更稳定的控制效果。然而由于阻尼项的存在, 自适应律可能要很长时间才能收敛到平衡点。为了解决以上问题, 文献 [22] 提出了一种新的自适应 TDC, 该自适应律基于不含阻尼项的滑动变量, 该滑动变量与阻尼项的大小成正比。这种方法虽然有效, 但是因为包含一个连续函数, 在控制增益抖动时可能会使得系统的跟踪性能和鲁棒性降低。文献 [23] 在文献 [22] 的基础上进行改进, 将控制增益构造为具有快速自适应能力的连续函数, 可以补偿自适应时延控制中的抖振。但是该方法只适用于单输入单输出系统。文献 [24] 结合分数阶终端滑模对控制增益设计了一种非线性自适应律来提高系统性能, 控制增益由两部分组成, 一部分是常量部分, 一部分是可变部分。由于自适应仅对可变部分进行调整, 而可变部分占控制增益的比例很小, 因此增益变化受到明显的限制, 并且, 两部分所占的比例必须通过试错调整, 否则闭环系统可能不稳定。文献 [25] 结合非线性期望误差动力学和一个新的滑动变量, 实现稳定的自适

应增益。文献 [26] 针对有效负载变化的问题,提出了一种自适应增益动态系统,且相比于其他自适应方法需要调节的参数更少。然而,以上文献中都只考虑了机器人的位置跟踪控制,并没有考虑到机器人的力跟踪控制。

本文设计了一种基于时延控制的自适应混合位置/力控制算法,同时对机器人的位置和力进行控制。该算法采用 TDC 来获得不需要依赖模型的特性和良好的位置跟踪性能,并通过控制增益的自适应律来减小由于不确定环境而引起的 TDE 误差。进一步,采用递推最小二乘法来实现对环境接触力的估计。所提方法对未知环境具有适应性,可以使机器人末端执行器沿着期望轨迹运动,且与接触面保持期望的接触力,保证位置和力轨迹的精确性。

1 机器人模型

一个n自由度 ($n-$DOF) 机器人系统在m维度的空间运动时,其动力学模型[27] 为

$$\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}}+\boldsymbol{C}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{q}}+\boldsymbol{G}(\boldsymbol{q})+\boldsymbol{F}(\dot{\boldsymbol{q}})+\boldsymbol{\zeta}(t)+\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{q})\boldsymbol{\lambda}=\boldsymbol{\tau} \quad (1)$$

其中: $\boldsymbol{q}$、$\dot{\boldsymbol{q}}$、$\ddot{\boldsymbol{q}}\in\mathbf{R}^{n\times1}$分别为机器人的关节位置、速度和加速度; $\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\in\mathbf{R}^{\mathbf{n}\times\mathbf{n}}$为对称的正定惯性矩阵; $\boldsymbol{C}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\in\mathbf{R}^{n\times n}$为离心力和哥氏力项; $\boldsymbol{G}(\boldsymbol{q})\in\mathbf{R}^{\mathbf{n}\times1}$为重力项; $\boldsymbol{F}(\dot{\boldsymbol{q}})\in\mathbf{R}^{n\times1}$为关节摩擦力项; $\boldsymbol{\zeta}(t)$为其他干扰项; $\boldsymbol{J}(\boldsymbol{q})\in\mathbf{R}^{\mathbf{m}\times\mathbf{n}}$为雅克比矩阵; $\boldsymbol{\lambda}\in\mathbf{R}^{\mathbf{m}\times1}$为机器人与环境的接触力; $\boldsymbol{\tau}\in\mathbf{R}^{\mathbf{n}\times1}$为机器人的输入控制力矩。

为了达到控制目的,将 (1) 改写为

$$\begin{cases}\boldsymbol{F}_p+\boldsymbol{F}_f=\boldsymbol{\tau}\\ \boldsymbol{F}_p=\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}}+\boldsymbol{C}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{q}}+\boldsymbol{G}(\boldsymbol{q})+\boldsymbol{F}(\dot{\boldsymbol{q}})+\boldsymbol{\zeta}(t)\\ \boldsymbol{F}_f=\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{q})\boldsymbol{\lambda}\end{cases} \quad (2)$$

式中: $\boldsymbol{F}_p$为位置控制子系统的输入力矩; $\boldsymbol{F}_f$为力控制子系统的输入力矩。

2 控制器设计

基于 TDC 的自适应混合位置/力控制的思路框图如图 1 所示。将位置和力控制分解到 2 个正交的子系统。在位置控制子系统中,采用 TDC 以抵消机器人系统的非线性项,并对控制增益$\bar{\boldsymbol{M}}$设计自适应律来减小由于接触环境的不确定性而引起的 TDE 误差,再计算得到位置控制力矩$\boldsymbol{F}_p$。在力控制子系统中,通过递推最小二乘算法在线辨识未知环境参数,并计算得到与环境的接触力$\boldsymbol{\lambda}$,经过空间转换得到力控制力矩$\boldsymbol{F}_f$。所提出的控制算法能够实现机器人移动到期望位置$\boldsymbol{q}_d$的同时,使得实际接触力达到期望的接触力$\boldsymbol{\lambda}_d$。

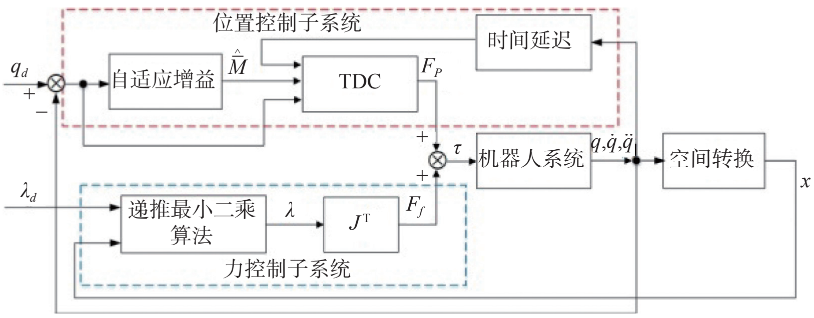


图 1 基于 TDC 的自适应混合位置/力控制框图

Fig. 1 Control block diagram of adaptive hybrid position/force control based on TDC

2.1 位置控制子系统设计

2.1.1 传统 TDC

传统的 TDC 利用 TDE 收集延时信息来抵消未知动力学和其他干扰,使用系统响应和控制输入来直接修改控制器[10]。

在式 (2) 的$\boldsymbol{F}_p$中引入一个正定对角常数增益矩阵$\bar{\boldsymbol{M}}$写成

$$\boldsymbol{F}_p=\bar{\boldsymbol{M}}\ddot{\boldsymbol{q}}+\boldsymbol{S}_n \quad (3)$$

其中,

$$\boldsymbol{S}_n=[\boldsymbol{M}(\boldsymbol{q})-\bar{\boldsymbol{M}}]\ddot{\boldsymbol{q}}+\boldsymbol{C}(\boldsymbol{q},\dot{\boldsymbol{q}})\dot{\boldsymbol{q}}+\boldsymbol{G}(\boldsymbol{q})+\boldsymbol{F}(\dot{\boldsymbol{q}})+\boldsymbol{\zeta}(t) \quad (4)$$

但是在现实中$\boldsymbol{S}_n$很复杂且难以计算,因此采用时延估计 (TDE) 来获取它的估计值

$$\boldsymbol{S}_n\approx\hat{\boldsymbol{S}}_n=\boldsymbol{S}_{n(t-L)}=\boldsymbol{F}_{p(t-L)}-\bar{\boldsymbol{M}}\ddot{\boldsymbol{q}}_{(t-L)} \quad (5)$$

其中,L表示延时时间,当L足够小时 TDE(5) 可以较为准确地估计S_n,一般情况下L选择为一段采样时间,下标$(t-L)$表示为延时之后的值。

然而,在实际情况中会产生如下 TDE 误差

$$\boldsymbol{\varepsilon}=\boldsymbol{S}_n-\hat{\boldsymbol{S}}_n=\boldsymbol{S}_n-\boldsymbol{S}_{n(t-L)} \tag{6}$$

将式 (5)、式 (6) 代入式 (3) 可以得到 TDC 系统如下

$$\boldsymbol{F}_p=\boldsymbol{F}_{p(t-L)}-\bar{\boldsymbol{M}}\ddot{\boldsymbol{q}}_{(t-L)}+\bar{\boldsymbol{M}}(\ddot{\boldsymbol{q}}_d+\boldsymbol{K}_D\dot{\boldsymbol{e}}+\boldsymbol{K}_P\boldsymbol{e}) \tag{7}$$

其中: $\boldsymbol{e}=\boldsymbol{q}_d-\boldsymbol{q}$、$\dot{\boldsymbol{e}}=\dot{\boldsymbol{q}}_d-\dot{\boldsymbol{q}}$、$\ddot{\boldsymbol{e}}=\ddot{\boldsymbol{q}}_d-\ddot{\boldsymbol{q}}$; $\boldsymbol{q}_d$、$\dot{\boldsymbol{q}}_d$、$\ddot{\boldsymbol{q}}_d$分别表示机器人期望的关节位置、速度、加速度; $\boldsymbol{K}_D$和$\boldsymbol{K}_P$是正定的反馈增益矩阵。

结合式 (3)—式 (7), 闭环动力学为

$$\ddot{\boldsymbol{e}}+\boldsymbol{K}_D\dot{\boldsymbol{e}}+\boldsymbol{K}_p\boldsymbol{e}=\bar{\boldsymbol{M}}^{-1}\boldsymbol{\varepsilon} \tag{8}$$

TDC 的稳定性条件[28−29] 为

$$\left\|\boldsymbol{I}-\boldsymbol{M}^{-1}(\boldsymbol{q})\bar{\boldsymbol{M}}\right\|<1 \tag{9}$$

当满足条件式 (9) 时, TDE 误差式 (6) 有界。

2.1.2　自适应增益 TDC 设计

传统的 TDC 一般采用恒定增益$\bar{\boldsymbol{M}}$, 这个增益通常采用试错法来进行选择。然而在未知环境参数不确定的情况下, 采用恒定增益可能会影响跟踪性能, 甚至导致系统不稳定: 太小的恒定增益会导致跟踪精度较差; 过大的恒定增益可能会导致振荡响应。因此设计了一个自适应增益 TDC(adaptive TDC, ATDC) 来提高控制性能。

首先定义一个滑动变量[30] 如下

$$\boldsymbol{s}\overset{\Delta}{=}\dot{\boldsymbol{e}}+\alpha\boldsymbol{e} \tag{10}$$

其中$\alpha\in\mathbf{R}^{n\times n}$为斜率增益。

则闭环动力学式 (8) 可以重写为如下形式

$$\dot{\boldsymbol{s}}+\alpha\boldsymbol{s}=\bar{\boldsymbol{M}}^{-1}\boldsymbol{\varepsilon} \tag{11}$$

由式 (10) 和式 (11) 可得

$$\ddot{\boldsymbol{e}}+2\alpha\dot{\boldsymbol{e}}+\alpha^2\boldsymbol{e}=\bar{\boldsymbol{M}}^{-1}\boldsymbol{\varepsilon} \tag{12}$$

将式 (8)、式 (12) 对比可得$\boldsymbol{K}_D=2\alpha$, $\boldsymbol{K}_P=\alpha^2$。

所以, 式 (7) 可以可改写成如下形式

$$\boldsymbol{F}_p=\boldsymbol{F}_{p(t-L)}-\bar{\boldsymbol{M}}\ddot{\boldsymbol{q}}_{(t-L)}+\bar{\boldsymbol{M}}(\ddot{\boldsymbol{q}}_d+2\alpha\dot{\boldsymbol{e}}+\alpha^2\boldsymbol{e}) \tag{13}$$

为了减小机器人与环境接触时的 TDE 误差, 采用滑动变量提出增益$\bar{M}$的自适应律

$$\begin{cases}\dot{\widehat{\bar{\boldsymbol{M}}}}_{ii}=-\beta_{ii}\left(\dot{\boldsymbol{H}}_i(\boldsymbol{s}_i)+\delta{\boldsymbol{s}_i}^2\right),\widehat{\bar{\boldsymbol{M}}}_{ii}>\widehat{\bar{\boldsymbol{M}}}_{\bar{i}\bar{i}}\\ \widehat{\bar{\boldsymbol{M}}}_{ii}=\widehat{\bar{\boldsymbol{M}}}_{\bar{i}\bar{i}},\text{其他}\end{cases} \tag{14}$$

其中: $\boldsymbol{H}_i(\boldsymbol{s}_i)=\dfrac{1}{2}\boldsymbol{s}_i^2$, 下标$i$表示第$i$个元素; 下标$ii$表示对应的对角矩阵的第$i$个对角元素, β_{ii}为决定$\widehat{\bar{M}}_{ii}$调节速率的正增益; δ为一个任意小的正常数; $\widehat{\bar{M}}_{\bar{i}\bar{i}}$为$\widehat{\bar{\boldsymbol{M}}}_{ii}$的下界和初始值, 是一个任意小的正常数, $\widehat{\bar{M}}_{ii}$为实时更新的控制增益。

当 TDE 误差式 (6) 增大时, 由式 (10) 知滑动变量增大, 从而引起式 (14) 中$\boldsymbol{H}_i$增大, $\dot{\boldsymbol{H}}_i$为正, 所以$\dot{\widehat{\bar{\boldsymbol{M}}}}_{ii}$为负, 使得$\widehat{\bar{\boldsymbol{M}}}_{ii}$减小直到最小值$\widehat{\bar{\boldsymbol{M}}}_{\bar{i}\bar{i}}$。当增益保持在最小值时, s_i会减小, 导致$\dot{\boldsymbol{H}}_i$迅速减小, 从而使得$\widehat{\bar{\boldsymbol{M}}}_{ii}$迅速增加, 达到自适应的目的。

由式 (14) 可以得出, 式 (13) 中的$\bar{\boldsymbol{M}}$经过自适应律式 (14) 得到的$\hat{\bar{\boldsymbol{M}}}$可以看作是一个关于滑动面$\boldsymbol{s}$的函数$\widehat{\bar{\boldsymbol{M}}}(\boldsymbol{s})$, 所以式 (13) 可以改写为如下形式:

$$\boldsymbol{F}_p=\boldsymbol{F}_{p(t-L)}-\widehat{\bar{\boldsymbol{M}}}(\boldsymbol{s})\ddot{\boldsymbol{q}}_{(t-L)}+\widehat{\bar{\boldsymbol{M}}}(\boldsymbol{s})(\ddot{\boldsymbol{q}}_d+2\alpha\dot{\boldsymbol{e}}+\alpha^2\boldsymbol{e}) \tag{15}$$

2.2　力控制子系统设计

工作空间中的运动学表示如下

$$\boldsymbol{x}=\boldsymbol{k}(\boldsymbol{q}) \tag{16}$$

式中: $\boldsymbol{x}\in\mathbf{R}^{m\times1}$表示机器人操作器的末端执行器在工作空间的位置向量; $\boldsymbol{k}$表示机器人操作关节空间和工作空间之间的映射关系。

工作空间中的速度表示如下

$$\dot{\boldsymbol{x}}=\boldsymbol{J}\dot{\boldsymbol{q}} \tag{17}$$

其中雅克比矩阵$\boldsymbol{J}$表示为

$$\boldsymbol{J}=\frac{\partial\boldsymbol{x}}{\partial\boldsymbol{q}}=\frac{\partial\boldsymbol{k}(\boldsymbol{q})}{\partial\boldsymbol{q}} \tag{18}$$

工作空间中的加速度表示如下

$$\ddot{\boldsymbol{x}}=\boldsymbol{J}\ddot{\boldsymbol{q}}+\dot{\boldsymbol{J}}\dot{\boldsymbol{q}} \tag{19}$$

现将工作空间分成两个子空间: 与机器人末端执行器和环境接触面垂直的法向v维空间和与环境接触面相切的切向$(m-v)$维空间。因此, 位置向量$\boldsymbol{x}$在工作空间中可以写成

$$\boldsymbol{x}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{x}_\tau\\ \boldsymbol{x}_n\end{bmatrix} \tag{20}$$

式中: $\boldsymbol{x}_\tau\in\mathbf{R}^{m-v}$为位置向量的切向分量; $\boldsymbol{x}_n\in\mathbf{R}^{v\times1}$为位置向量的法向分量。假设接触的环境是弹性的, 则机器人末端执行器与环境的接触力可以表示为

$$\boldsymbol{\lambda}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{\lambda}_\tau\\ \boldsymbol{\lambda}_n\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\omega\boldsymbol{\lambda}_n\,\mathrm{sign}(\dot{\boldsymbol{x}}_\tau)\\ \boldsymbol{K}_e(\boldsymbol{x}_n-\boldsymbol{x}_e)\end{bmatrix} \tag{21}$$

式中: λ_τ为相切于环境接触面的接触力; λ_n为垂直于环境接触面的接触力; $\boldsymbol{K}_e$为环境的刚度; ω为接触面的摩擦系数; $\dot{\boldsymbol{x}}_\tau$为末端执行器的切向速度向量; $\boldsymbol{x}_e$为环境平衡位置。

由于环境的刚度$\boldsymbol{K}_e$和平衡位置$\boldsymbol{x}_e$通常是未知的, 该部分采用递推最小二乘算法来在线辨识。递推最小二乘算法不需要任何先验知识, 就可以实现

参数的估计和更新,且收敛速度快。

设

$$\boldsymbol{\varphi} = \boldsymbol{x}_n - \hat{\boldsymbol{x}}_e \tag{22}$$

其中$\hat{\boldsymbol{x}}_e$为对环境平衡位置$\boldsymbol{x}_e$的估计。

选择递推最小二乘算法准则如下

$$U(t, \boldsymbol{K}_e) = \int_0^t \left[\lambda_n - \hat{\boldsymbol{K}}_e \boldsymbol{\varphi}\right]^2 \mathrm{d}\boldsymbol{\tau} \tag{23}$$

其中,$\hat{\boldsymbol{K}}_e$为对$\boldsymbol{K}_e$的估计。

为了选择使准则式 (23) 最小的最佳估计值,递推最小二乘算法的参数更新率设计如下

$$\begin{cases} \dot{\hat{\boldsymbol{K}}}_e = \eta \boldsymbol{R}(t)\boldsymbol{\varphi}(t)\gamma(t) \\ \dot{\boldsymbol{R}}(t) = \mu_1(\boldsymbol{t})\boldsymbol{R}(t) - \mu_2(t)\boldsymbol{R}^2(t)\boldsymbol{\varphi}^2(t) \end{cases} \tag{24}$$

式中:$\boldsymbol{R}(t)$的初始值定义为$\boldsymbol{R}(0) > 0$;$\boldsymbol{\gamma}(t) = \boldsymbol{\lambda}_n - \hat{\boldsymbol{K}}_e(\boldsymbol{x}_n - \hat{\boldsymbol{x}}_e)$为垂直于接触面方向上力的估计误差;$\eta$为正常数;$0 < \mu_1(t) \leqslant 1$和$0 < \mu_2(t) \leqslant 2$为权重。

将式 (15) 和式 (24) 代入式 (2),控制器最终可以写为如下形式

$$\begin{gathered} \boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{F}_{p(t-L)} - \hat{\bar{\boldsymbol{M}}}\ddot{\boldsymbol{q}}_{(t-L)} + \hat{\bar{\boldsymbol{M}}}(\boldsymbol{s})\left(\ddot{\boldsymbol{q}}_d + 2\alpha\dot{\boldsymbol{e}} + \alpha^2\boldsymbol{e}\right) + \\ \boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{q})\begin{bmatrix} \omega\boldsymbol{\lambda}_n \operatorname{sign}(\dot{x}_\tau) \\ \hat{\boldsymbol{K}}_e(\boldsymbol{x}_n - \hat{\boldsymbol{x}}_e) \end{bmatrix} \end{gathered} \tag{25}$$

3 稳定性分析

定理 1 与未知环境交互的机器人系统 (1) 受自适应增益 TDC(15)、递推最小二乘算法 (24) 组成的基于 TDC 的自适应混合位置/力控制器 (25) 的作用,则系统是稳定的。

证明 选取李雅普诺夫函数:

$$\boldsymbol{V} = \frac{1}{2}\boldsymbol{s}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{s} + \frac{1}{\boldsymbol{\beta}}\left(\hat{\bar{\boldsymbol{M}}} - \hat{\bar{\boldsymbol{M}}}_-\right) + \hat{\boldsymbol{K}}_e^2(t)\boldsymbol{R}(t) \tag{26}$$

其中,$\hat{\bar{\boldsymbol{M}}}_-$为$\hat{\bar{\boldsymbol{M}}}$的下界,所以$\hat{\bar{\boldsymbol{M}}} - \hat{\bar{\boldsymbol{M}}}_- \geqslant 0$,$\boldsymbol{\beta}$为正定的对角矩阵,所以$\boldsymbol{V}$是正定的。

令:

$$\boldsymbol{V}_1 = \frac{1}{2}\boldsymbol{s}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{s} + \frac{1}{\boldsymbol{\beta}}\left(\hat{\bar{\boldsymbol{M}}} - \hat{\bar{\boldsymbol{M}}}_-\right) \tag{27}$$

$$\boldsymbol{V}_2 = \hat{\boldsymbol{K}}_e^2(t)\boldsymbol{R}(t) \tag{28}$$

对$\boldsymbol{V}$求导可得

$$\dot{\boldsymbol{V}} = \dot{\boldsymbol{V}}_1 + \dot{\boldsymbol{V}}_2 \tag{29}$$

其中对$\boldsymbol{V}_1$求导得

$$\dot{\boldsymbol{V}}_1 = \boldsymbol{s}^{\mathrm{T}}\dot{\boldsymbol{s}} + \frac{1}{\boldsymbol{\beta}}\dot{\hat{\bar{\boldsymbol{M}}}} \tag{30}$$

将式 (11) 和式 (14) 代入式 (30) 可得

$$\begin{gathered} \dot{\boldsymbol{V}}_1 = -\boldsymbol{\beta}\boldsymbol{s}^2 + \boldsymbol{s}\hat{\bar{\boldsymbol{M}}}^{-1}\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{s}\dot{\boldsymbol{s}} + \boldsymbol{\delta}\boldsymbol{s}^2 = \\ -\boldsymbol{\beta}\boldsymbol{s}^2 + \boldsymbol{s}\hat{\bar{\boldsymbol{M}}}^{-1}\boldsymbol{\varepsilon} - \left(-\boldsymbol{\beta}\boldsymbol{s}^2 + \boldsymbol{s}\hat{\bar{\boldsymbol{M}}}^{-1}\boldsymbol{\varepsilon} + \boldsymbol{\delta}\boldsymbol{s}^2\right) = \\ -\boldsymbol{\delta}\boldsymbol{s}^2 \leqslant 0 \end{gathered} \tag{31}$$

对$\boldsymbol{V}_2$求导得

$$\dot{\boldsymbol{V}}_2 = 2\hat{\boldsymbol{K}}_e(t)\dot{\hat{\boldsymbol{K}}}_e(t)\boldsymbol{R}(t) + \hat{\boldsymbol{K}}_e^2(t)\dot{\boldsymbol{R}}(t) \tag{32}$$

将式 (22) 和式 (24) 代入式 (32),可得

$$\begin{gathered} \dot{\boldsymbol{V}}_2 = 2\hat{\boldsymbol{K}}_e(t)\boldsymbol{R}(t)\dot{\hat{\boldsymbol{K}}}_e(t) + \hat{\boldsymbol{K}}_e^2(t)\left[\mu_1(t)\boldsymbol{R}(t) - \mu_2(t)\boldsymbol{R}(t)\boldsymbol{\varphi}^2(t)\right] = \\ -2\boldsymbol{\gamma}^2(t)\boldsymbol{R}(t) - \mu_1(t)\hat{\boldsymbol{K}}_e^2(t)\boldsymbol{R}(t) + \mu_2(t)\boldsymbol{\gamma}^2(t)\boldsymbol{R}(t) \end{gathered} \tag{33}$$

由于在式 (24) 中已经有$0 < \mu_2(t) \leqslant 2$,且$\mu_1(t)\hat{\boldsymbol{K}}_e^2(t)\boldsymbol{R}(t) > 0$,所以可以得到$\dot{\boldsymbol{V}}_2 \leqslant 0$。从而$\dot{\boldsymbol{V}} = \dot{\boldsymbol{V}}_1 + \dot{\boldsymbol{V}}_2 \leqslant 0$,定理 1 得证。

4 仿真验证

采用如图 2 所示的 2-DOF 机器人进行仿真,仿真参数见表 1,其动力学模型如下所述。

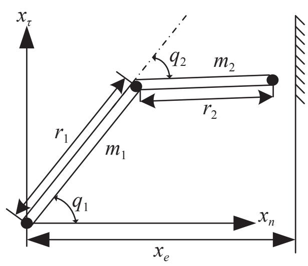


图 2 两连杆机器人

Fig. 2 Two-link robot model

$$\boldsymbol{M} = \begin{bmatrix} m_2 r_2^2 + (m_1 + m_2) r_1^2 + 2 r_l r_2 \cos(q_2) & m_2 r_2^2 + m_2 r_1 r_2 \cos(q_2) \\ m_2 r_2^2 + m_2 r_1 r_2 \cos(q_2) & m_2 r_2^2 \end{bmatrix} \tag{34}$$

$$\boldsymbol{C} = \begin{bmatrix} -m_2 r_1 r_2 \dot{q}_2 \cos(q_2) & -m_2 r_1 r_2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \sin(q_2) \\ m_2 r_1 r_2 \dot{q}_1 \sin(q_2) & 0 \end{bmatrix} \tag{35}$$

$$\boldsymbol{G} = \begin{bmatrix} (m_1 + m_2) r_1 g \cos(q_1 + q_2) \\ m_2 r_2 g \cos(q_1 + q_2) \end{bmatrix} \tag{36}$$

$$\boldsymbol{F} = 0.02 \sin(\dot{q}) \tag{37}$$

$$J=\begin{bmatrix} -r_1\sin(q_1)-r_2\sin(q_1-q_2) & r_2\sin(q_1-q_2) \\ -r_1\cos(q_1)+r_2\cos(q_1-q_2) & -r_2\cos(q_1-q_2) \end{bmatrix} \tag{38}$$

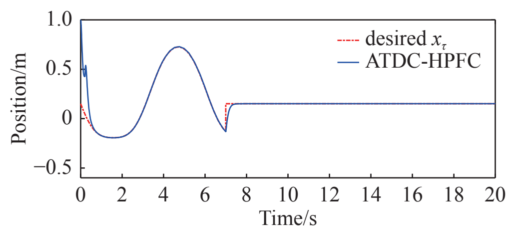
$$\zeta(t)=\begin{bmatrix} 0.2\sin(t)+0.5\sin(200\pi t),\cos(2t)+0.5\sin(200\pi t) \end{bmatrix} \tag{39}$$

表 1　两连杆机器人的仿真参数

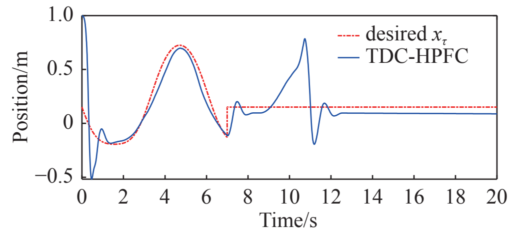
Tab. 1　Simulation parameters of two-link robot

表示符号	定义	数值
r_1	关节1的长度	0.4 m
r_2	关节2的长度	0.4 m
m_1	关节1的质量	0.5 kg
m_2	关节2 的质量	0.5 kg
g	重力加速度	9.8 m/s^2

仿真过程中，$\boldsymbol{q}_1$、$\boldsymbol{q}_2$分别为两个关节的位置，期望值设为$\begin{cases} q_{d1}=q_{d2}=\sin(t)+2, 0\text{s}\leqslant t<7\text{s} \\ q_{d1}=q_{d2}=2, 7\text{s}\leqslant t\leqslant 20\text{s} \end{cases}$，经过一次空间转化可以得到机器人末端执行器在工作空间的期望位置。时延L设为一个样本采样时间，即$L=0.001$ s。垂直于接触面上的力期望值设置为：$\lambda_{dn}=35$ N，平衡位置的初始值$x_e(0)=0.002$ m，递推最小二乘中的$R(0)=0.2$，初始环境刚度$K_e(0)=20$ N/m，摩擦系数$\omega=0.02$。所涉及到的控制器参数取值为：$\alpha=[10,0;0,10]$，$\delta=0.00001$，$\beta_{ii}=0.02$，$\bar{\boldsymbol{M}}_{\bar{i}i}=0.1$，$\mu_1=0.9$，$\mu_2=1.9$，$\eta=2000$。将所提方法 (ATDC-HPFC) 与基于传统 TDC 的混合位置/力控制 (TDC-HPFC) 进行了比较，仿真结果如图 3—图 9 所示。



(a) ADTC-HPFC

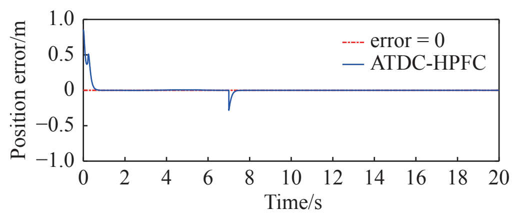


(b) TDC-HPFC

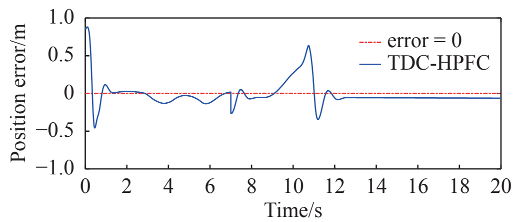
图 3　相切于接触面方向的位置

Fig. 3　Position along x_τ-direction

图 3(a) 为所提方法在未知环境下相切于接触面方向的位置轨迹跟踪图，可以看出机器人末端执行器沿着相切于接触面的方向的实际位置轨迹可以迅速地跟踪期望的位置轨迹，且在第 7 秒期望位置发生改变时能够进行自适应，再次跟踪上改变后的期望位置。图 3(b) 为基于传统 TDC 混合位置/力控制的方法，可以看出跟踪效果明显更差，且在期望位置发生改变后，无法跟踪上改变的期望位置。图 5 为未知环境下垂直于接触面的方向上的力，从图 5(a) 中可以看到机器人末端执行器在垂直于接触面的方向的力能够达到期望的接触力$\lambda_{dn}=35\ N$，当期望位置发生改变后，该力仍然稳定在期望值。而传统 TDC 方法图 5(b) 当期望位置改变时，垂直于接触面的方向的力发生波动，且超调量较大。此外，未知环境下机器人末端执行器的位置误差和力误差如图 4、图 6 所示，可以看出所提方法的位置误差和力误差相比于传统 TDC 方法都更小，且收敛速度更快。图 7 为对未知环境刚度的估计结果，所提方法图 7(a) 可以实现对未知环境刚度的良好估计，且估计值收敛，而传统 TDC 方法图 7(b) 的估计值波动明显较多。图 8 为未知环境平衡位置的估计，所提方法图 8(a) 的估计值收敛，且收敛速度比传统 TDC 方法图 8(b) 更快。所提方法对控



(a) ADTC-HPFC



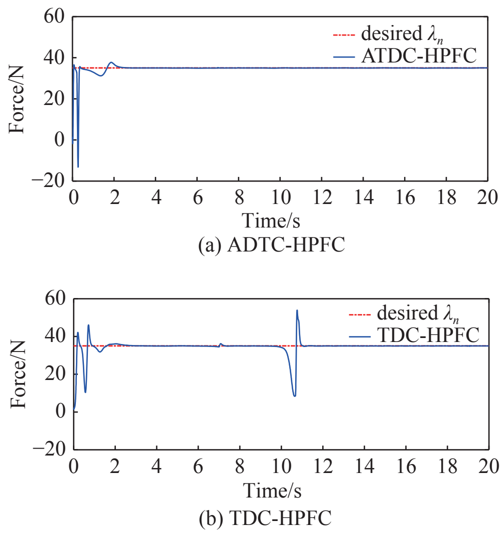
(b) TDC-HPFC

图 4　相切于接触面方向的位置误差

Fig. 4　Position errors along x_τ-direction

制增益$\widehat{M}$的自适应调节如图 9 所示，可以看出系统经过短暂的一段时间就可以得出一个适应于当前环境的增益值，而在第 7 秒期望轨迹发生变化时，也能够迅速进行调整选择一个新的控制增益来保持系统良好的控制性能。

为了定量比较所提方法与传统 TDC 方法的位置和力跟踪性能，计算了位置跟踪的均方误差$E_{x\mathrm{MSE}}$和力跟踪的均方误差$E_{\lambda\mathrm{MSE}}$。计算结果如表 2 所示，可以看出所提方法的综合性能优于基于传统 TDC 混合位置/力控制的方法，所提方法的位置误差约为 0.016 m，力误差约为 0.034 N。

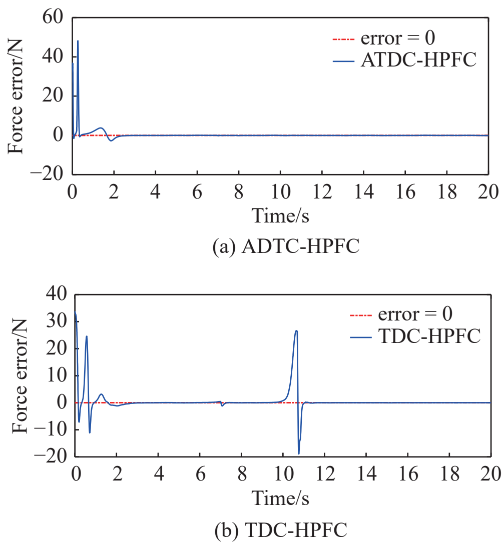


(a) ADTC-HPFC

(b) TDC-HPFC

图 5　垂直于接触面方向上的力

Fig. 5　Force along x_n-direction

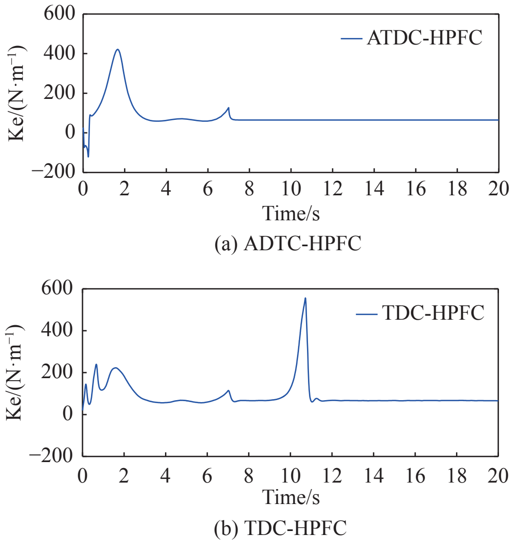


(a) ADTC-HPFC

(b) TDC-HPFC

图 6　垂直于接触面方向上的力误差

Fig. 6　Force errors along x_n-direction

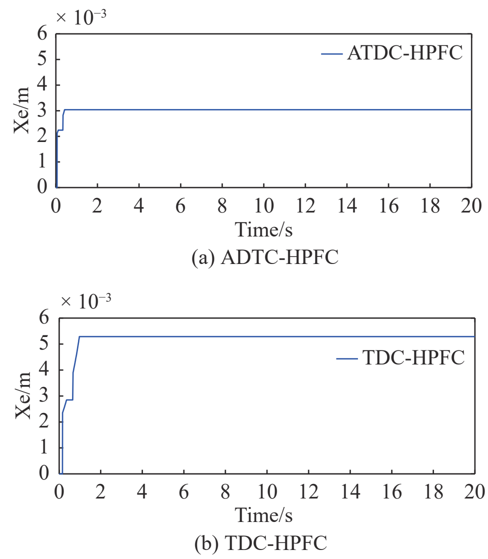


(a) ADTC-HPFC

(b) TDC-HPFC

图 7　环境刚度估计

Fig. 7　Environment stiffness estimations results



(a) ADTC-HPFC

(b) TDC-HPFC

图 8　环境平衡位置估计

Fig. 8　Position of equilibrium estimations results

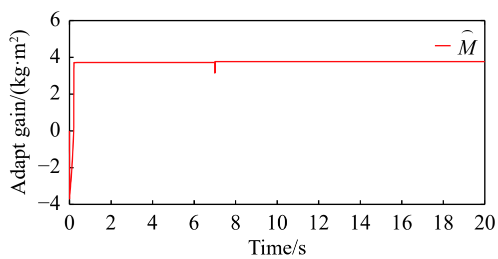


图 9　自适应增益

Fig. 9　Values of adaptive gain

综上，采用所提控制方法能够在不确定环境下实现机器人末端执行器更好的位置和力跟踪效果。

表 2　位置和力跟踪误差定量比较

Tab. 2　Quantitative comparison of position and force tracking errors

误差	所提方法	传统TDC方法
$E_{x\text{MSE}}$	0.01595 m	0.03345 m
$E_{\lambda\text{MSE}}$	0.03420 N	0.31474 N

5　结 论

为了提高机器人与不确定环境交互时的位置和力跟踪精度,提出了一种基于 TDC 的自适应混合位置/力控制。在位置控制子系统中采用时延控制以抵消机器人系统的所有非线性项,并引入了一个自适应增益以适应未知的机器人接触环境。在力控制子系统中将力分解为垂直于接触面的力和相切于接触面方向的力,在垂直方向通过递推最小二乘算法在线辨识未知环境。该方法对未知环境具有较好的适应性,且可以同时保证机器人位置和力跟踪的精确性。如何对本文的 TDC 自适应混合位置/力控制方法进行扩展,并将其应用到受执行器故障影响的机器人系统的混合位置/力控制是下一步我们需要解决的问题。

参 考 文 献

[1] 谢同雨, 李清, 丁煜文, 等. 多模块蛇形管道打磨机器人的设计与分析[J]. 机器人, 2020, 42(6): 672 − 685.

XIE T Y, LI Q, DING Y W, et al. Design and analysis of a multi-module snake shaped pipeline grinding robot[J]. Robot, 2020, 42(6): 672 − 685.

[2] 刘哲, 邹涛, 孙威, 等. 结合实时优化遗传算法的磨削机器人阻抗控制[J]. 控制理论与应用, 2018, 35(12): 1788 − 1795.

LIU Z, ZOU T, SUN W, et al. Impedance control of grinding robot based on real-time optimization genetic algorithm[J]. Control Theory & Applications, 2018, 35(12): 1788 − 1795.

[3] 孟少华, 胡瑞钦, 张立建, 等. 一种基于机器人的航天器大型部件自主装配方法[J]. 机器人, 2018, 40(1): 81 − 88.

MENG S H, HU R Q, ZHANG L J, et al. A method of autonomous assembly of large spacecraft components using robot[J]. ROBOT, 2018, 40(1): 81 − 88.

[4] 李军强, 吕瑞武, 杨冬, 等. 基于柔性人机接口的人机协调运动控制方法[J]. 信息与控制, 2022, 51(2): 237 − 246.

LI J Q, LV R W, YANG D, et al. Control Method of Human-robot Coordinated Motion Based on Flexible Human-robot Interface[J]. Information and control, 2022, 51(2): 237 − 246.

[5] WANG Y Y, FEI Y, CHEN J W, et al. A new adaptive time-delay control scheme for cable-driven manipulators[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 5(6): 3469 − 3481.

[6] CALANCE A, MURADORE R, FIORINI P. A review of algorithms for compliant control of stiff and fixed-compliance robots[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2016, 21(2): 613 − 624.

[7] 王洪艳, 刘春洁, 黄智. 基于自适应边界能量法的柔顺力控制研究[J]. 电子科技大学学报, 2017, 46(6): 949 − 954.

WANG H Y, LIU C J, HUANG Z. Compliant Control Research Based on Adaptive Energy Bounding Method[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2017, 46(6): 949 − 954.

[8] RAIBERT M, CRAIG J. Hybrid position/force control of manipulators[J]. ASME Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, 1981, 102(2): 126 − 133.

[9] ORTENZI V, STOLKIN R, KUO J, et al. Hybrid motion/force control: a review[J]. Advanced Robotics, 2017, 31(19/20): 1102 − 1113.

[10] PENG J, DING S, YANG Z, et al. Neural network-based hybrid position/force tracking control for robotic systems without velocity measurement[J]. Neural Processing Letters, 2019, 51(2): 1125 − 1144.

[11] WEN S, ZHENG W, JIA S, et al. Unactuated force control of 5-DOF parallel robot based on fuzzy PI[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2020, 18: 1629 − 1641.

[12] KAMAL Y T, OSAMU I. A time delay controller for systems with unknown dynamics[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1990, 112(1): 133 − 142.

[13] ROY S, NANDY S, RAY R, et al. Robust path tracking control of nonholonomic wheeled mobile robot: experimental validation[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2015, 13(4): 897 − 905.

[14] KIM J, JOE H, YU S C, et al. Time delay control-

ler design for position control of autonomous underwater vehicle under disturbances[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(2): 1052 − 1061.

[15] PI M, KANG Y, XU C, et al. Adaptive time-delay balance control of biped robots[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(4): 2936 − 2944.

[16] CHEN S N, LIU X. Velocity-Free adaptive time delay control of robotic system[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020: 1 − 14.

[17] AHMED S, WANG H, TIAN Y. Adaptive high-order terminal sliding mode control based on time delay estimation for the robotic manipulators with backlash hysteresis[J]. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics-Systems, 2019, 51(2): 1128 − 1137.

[18] BAEK J, JIN M, HAN S. A new adaptive sliding-mode control scheme for application to robot manipulators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(6): 3628 − 3637.

[19] LEE J Y, JIN M, CHANG P. Variable PID gain tuning method using backstepping control with time-delay estimation and nonlinear damping[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(12): 6975 − 6985.

[20] CHO S, JIN M, KUC T Y, et al. Stability guaranteed auto-tuning algorithm of a time-delay controller using a modified Nussbaum function[J]. International Journal of Control, 2014, 87(9): 1926 − 1935.

[21] JIN M, LEE J, TSAGARAKIS N G. Model-free robust adaptive control of humanoid robots with flexible joints[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(2): 1706 − 1715.

[22] BAEK J, CHO S, HAN S. Practical time-delay control with adaptive gains for trajectory tracking of robot manipulators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(7): 5682 − 5692.

[23] BAEK J, BAEK H. A time-delayed control scheme using adaptive law with time-varying boundedness for robot manipulators[J]. Applied Sciences, 2019, 10(1): 44.

[24] WANG Y, LIU L, WANG D, et al. Time-delay control using a novel nonlinear adaptive law for accurate trajectory tracking of cable-driven robots[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(8): 5234 − 5243.

[25] JIN M, KANG S H, CHANG P H, et al. Robust control of robot manipulators using inclusive and enhanced time delay control[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2017, 22(5): 2141 − 2152.

[26] LEE J, CHANG P H, JIN M. An adaptive gain dynamics for time delay control improves accuracy and robustness to significant payload changes for robots[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(4): 3076 − 3085.

[27] WANG Z, ZOU L, SU X, et al. Hybrid force/position control in workspace of robotic manipulator in uncertain environments based on adaptive fuzzy control[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2021, 145: 1 − 23.

[28] ROY S, BALDI S, LI P, et al. Artificial-delay adaptive control for under-actuated Euler-Lagrange robotics [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2021, 26(6): 3064 − 3075.

[29] SONG T, FANG L, WANG H. Model-free finite-time terminal sliding mode control with a novel adaptive sliding mode observer of uncertain robot systems[J]. Asian Journal of Control, 2021: 1 − 15.

[30] WU Y, YAO L. Fault diagnosis and fault tolerant control for manipulator with actuator multiplicative fault [J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2020, 19(2): 980 − 987.

(编校:叶超)