

文章编号:1006-2467(2019)03-0341-07

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2019.03.012

# 未知环境下水下机械手智能抓取的自适应阻抗控制

张建军, 刘卫东, 李 乐, 程瑞锋, 郑海峰

(西北工业大学 航海学院, 西安 710072)

**摘 要:** 为了满足水下机械手在未知环境下对目标抓取的多样性, 保证抓住、抓牢并最大限度地避免目标损伤, 提出了自适应阻抗控制方法. 构建了基于位置的阻抗模型的力跟踪控制系统, 采用递推最小二乘法辨识目标的阻抗参数, 根据阻抗参数与机械手的运动特征, 利用模糊推理方法在线调整抓取力的期望值, 并根据期望抓取力与实际抓取力的误差设计自适应比例-积分-微分(PID)控制器来调整期望位置, 以实现在跟踪目标位置的同时对期望抓取力信号的跟踪, 并利用 MATLAB/Simulink 软件平台进行仿真实验. 结果表明: 自适应阻抗控制方法在自由空间和约束空间均具有良好的力、位移的跟踪性能; 对期望抓取力的实时调整满足抓取目标的多样性, 期望位置的自适应调整能够实现对期望抓取力的跟踪.

**关键词:** 水下机械手; 阻抗模型; 自适应; 模糊推理; 递推最小二乘法

**中图分类号:** TP 242

**文献标志码:** A

## Adaptive Impedance Control for Underwater Manipulator Intelligent Grasping in Unknown Environment

ZHANG Jianjun, LIU Weidong, LI Le, CHENG Ruifeng, ZHENG Haifeng

(School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University,  
Xi'an 710072, China)

**Abstract:** In order to realize the diversity of the unknown environment target capture of underwater manipulator, the adaptive impedance control method is proposed to ensure grasping, holding and minimizing the damage of the target. A force tracking control system based on position impedance model is established, and the target impedance parameter is identified by recursive least square method, and the expected value of grasping force is adjusted online according to the impedance parameter and the manipulator motion characteristic with fuzzy inference. According to the expectation force and grasping force error, the adaptive PID controller adjusts the desired position, realizes the tracking of different expected force signals while tracking the target position, and realizes the simulation verification on the MATLAB/Simulink platform. The results show that the adaptive impedance control has good force and displacement tracking performance in free space and constrained space. The realtime expectation force adjustment satisfies the diversity of grasping target, and the adaptive adjustment of the desired position realizes the tracking of the desired force.

收稿日期:2017-08-03

基金项目:国家自然科学基金(61473224), 国家重点研发计划(2016YFC0301700), 高等学校学科创新引智计划(B18041)资助项目

作者简介:张建军(1983-), 男, 河南省周口市人, 博士生, 主要从事水下机械手控制及遥操作研究.

通信作者:刘卫东, 男, 教授, 博士生导师, 电话(Tel.): 029-88492193; E-mail: liuwd@nwpu.edu.cn.

**Key words:** underwater manipulator; impedance model; adaptive; fuzzy inference; recursive least square method

在水下机械手采集水下样本的过程中,会出现操作对象未知以及操作不确定所引起的目标损坏或抓取不牢的问题,而含有力控制的柔顺性抓取方法能够解决机器人操作性不强的问题,其控制核心是自由空间的位置以及抓住过程的力的控制<sup>[1]</sup>,主要控制方法包括阻抗控制、导纳控制与比例-积分-微分(PID)控制.其中,大多采用阻抗控制方法.阻抗控制是通过调节用户设定的目标阻抗模型以使机器人终端达到柔顺性目的.很多学者利用阻抗控制方法对非水下环境的力、位移控制进行了研究,主要用于果蔬抓取<sup>[2]</sup>、患肢康复<sup>[3]</sup>、工件表面打磨<sup>[4]</sup>、轴孔装配和机器人行走等方面.例如:Hogan<sup>[5]</sup>提出的阻抗控制的基本思想是调整机器人末端刚度,以使力和位置满足某种理想的动态关系;Seul 提出的阻抗控制方法能够实现自由空间的位置跟踪并将力信号控制在一定范围内,但无法保证力的精确控制<sup>[6]</sup>;王学林等<sup>[7]</sup>将阻抗控制用于果蔬抓取,实现了机械手指端的期望抓取力的跟踪,但无法满足目标抓取的多样性;Dong 等<sup>[8]</sup>建立了基于阻抗控制的模型参考神经自适应控制系统,以适应不同的环境.

为了实现机器人手的抓住、抓牢控制并避免目标损伤,本文提出了一种自适应阻抗控制算法,建立了基于位置的阻抗控制模型,对抓取目标的阻抗参数进行在线辨识,利用机械手末端的运动特征与刚度的模糊辨识来调整期望抓取力,并根据期望抓取力与实际抓取力的误差设计自适应 PID 控制器,以实时调节期望位置,从而实现机械手在跟踪目标位置的同时对期望抓取力的跟踪.

## 1 数学模型

### 1.1 水下机械手的运动模型

水下机械手主要用于水下目标的采集.考虑到水下的复杂环境,本文只对 1 根含 2 个关节的手指进行研究,2 个关节的手指可以简化为 1 个二连杆旋转机器人.与机器人的动力学模型相同,水下机械手的动力学模型可描述为

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{g}(\mathbf{q}) + \boldsymbol{\tau}_d = \boldsymbol{\tau} - \mathbf{J}^T(\mathbf{q})\mathbf{F}_e \quad (1)$$

式中: $\mathbf{M}(\mathbf{q})$ 、 $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ 、 $\mathbf{g}(\mathbf{q})$ 和 $\mathbf{J}(\mathbf{q})$ 分别为机械手的惯性量、离心力与哥氏力的和、重力项以及 Jacobian 矩阵; $\boldsymbol{\tau}_d$ 为系统干扰转矩; $\boldsymbol{\tau}$ 为控制输入量,即使机

械手关节转动的驱动力; $\mathbf{F}_e$ 为水下机械手的抓取力; $\mathbf{q}$ 、 $\dot{\mathbf{q}}$ 、 $\ddot{\mathbf{q}}$ 分别为水下机械手的位置、速度和加速度.假设系统的干扰转矩可测,令

$$\hat{\mathbf{g}}(\mathbf{q}) = \mathbf{g}(\mathbf{q}) + \boldsymbol{\tau}_d$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \hat{\mathbf{g}}(\mathbf{q})$$

则机械手操作空间与关节空间的位置、速度和加速度可换算为

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{x} &= \boldsymbol{\Omega}(\mathbf{q}) \\ \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{J}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} \\ \ddot{\mathbf{x}} &= \dot{\mathbf{J}}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{J}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{x}$ 为机械手在笛卡儿坐标系下的位置,假设机械手为非冗余,即 $\mathbf{x}$ 与 $\mathbf{q}$ 的维数相同; $\mathbf{J}(\mathbf{q}) = \frac{\partial \boldsymbol{\Omega}}{\partial \mathbf{q}^T}$ 为非奇异矩阵.

将式(2)代入式(1),所得在笛卡儿坐标系下机械手的动力学方程为

$$\mathbf{M}_x(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}_x(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{x}} + \hat{\mathbf{g}}_x(\mathbf{q}) = \boldsymbol{\tau}_x - \mathbf{F}_e \quad (3)$$

式中:下标 $x$ 表示操作空间.将式(2)代入式(1),并与式(3)对比可得

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{M}_x(\mathbf{q}) &= \mathbf{J}^{-T}\mathbf{M}(\mathbf{q})\mathbf{J}^{-1} \\ \mathbf{C}_x(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) &= \mathbf{J}^{-T}(\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - \mathbf{M}(\mathbf{q})\mathbf{J}^{-1}\dot{\mathbf{J}})\mathbf{J}^{-1} \\ \hat{\mathbf{g}}_x(\mathbf{q}) &= \mathbf{J}^{-T}\hat{\mathbf{g}}(\mathbf{q}) \\ \boldsymbol{\tau}_x &= \mathbf{J}^{-T}\boldsymbol{\tau} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

### 1.2 环境模型

将抓取目标看成线性弹簧<sup>[9]</sup>,在笛卡儿坐标系下,目标的抓取力为

$$\mathbf{F}_e = \begin{cases} \mathbf{k}_e(\mathbf{x} - \mathbf{x}_e), & \mathbf{x} \geq \mathbf{x}_e \\ \mathbf{0}, & \mathbf{x} < \mathbf{x}_e \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\mathbf{x}_e$ 为抓取目标的位置; $\mathbf{k}_e$ 为目标刚度系数.当 $\mathbf{x} < \mathbf{x}_e$ 时,水下机械手的运动处于自由空间状态;当 $\mathbf{x} \geq \mathbf{x}_e$ 时,水下机械手与环境处于接触状态.

## 2 整体控制策略

### 2.1 阻抗控制模型

在机械手末端执行器与抓取目标的相互作用力、末端位置偏差、速度偏差和加速度偏差之间建立一个 2 阶系统的控制模型,即描述阻抗控制的目标阻抗模型,其具体形式为

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_d(\ddot{\mathbf{x}}_d - \ddot{\mathbf{x}}) + \mathbf{B}_d(\dot{\mathbf{x}}_d - \dot{\mathbf{x}}) + \\ \mathbf{K}_d(\mathbf{x}_d - \mathbf{x}) = \mathbf{F}_d - \mathbf{F}_e \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{M}_d$ 、 $\mathbf{B}_d$  和  $\mathbf{K}_d$  为目标阻抗参数矩阵,分别表示机械手期望的惯性量、阻尼和刚度, $\mathbf{K}_d$  影响力跟踪的静态误差, $\mathbf{B}_d$  影响系统的响应速度及超调量; $\mathbf{x}_d$ 、 $\dot{\mathbf{x}}_d$ 、 $\ddot{\mathbf{x}}_d$  分别为期望的位置、速度和加速度; $\mathbf{F}_d$  为期望抓取力。

2.2 基于位置的阻抗控制

基于位置的阻抗控制模型由阻抗控制外环与位置控制内环组成,控制系统结构如图 1 所示.将期望抓取力  $\mathbf{F}_d$  与抓取力  $\mathbf{F}_e$  的差值输入外环阻抗控制器而得到期望位置的修正量  $\Delta \mathbf{x}$ ,由  $\Delta \mathbf{x}$  修正期望位置

而得到位置控制量  $\mathbf{x}_c$ ,再以  $\mathbf{x}_c$  作为机械手的实际跟踪位置,从而实现阻抗力控制条件下的位置跟踪以及满足机械手的动力学特性.图 1 中: $s$  为拉普拉斯变换复频域; $\mathbf{E}_f$  为期望抓取力与实际抓取力的差,即  $\mathbf{E}_f = \mathbf{F}_d - \mathbf{F}_e$ .由图 1 可见,阻抗控制系统满足基于力跟踪误差的阻抗模型方程(式(6)),并且  $\mathbf{M}^* = \mathbf{J}^{-T} \mathbf{M} \mathbf{J}^{-1}$ 、 $\mathbf{H}^* = \mathbf{J}^{-T} \mathbf{H} - \mathbf{M}^* \dot{\mathbf{J}} \mathbf{J}^{-1} \dot{\mathbf{x}}$ 、 $\mathbf{K}_p$ 、 $\mathbf{K}_d$  均为位置控制的比例-微分(PD)参数.根据式(1)描述的机械手动力学系统,引入控制量  $\mathbf{U}$ :

$$\boldsymbol{\tau}_x - \mathbf{F}_e = \mathbf{M}_x(\mathbf{q})\mathbf{U} + \mathbf{C}_x(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{x}} + \hat{\mathbf{g}}_x(\mathbf{q}) \quad (7)$$

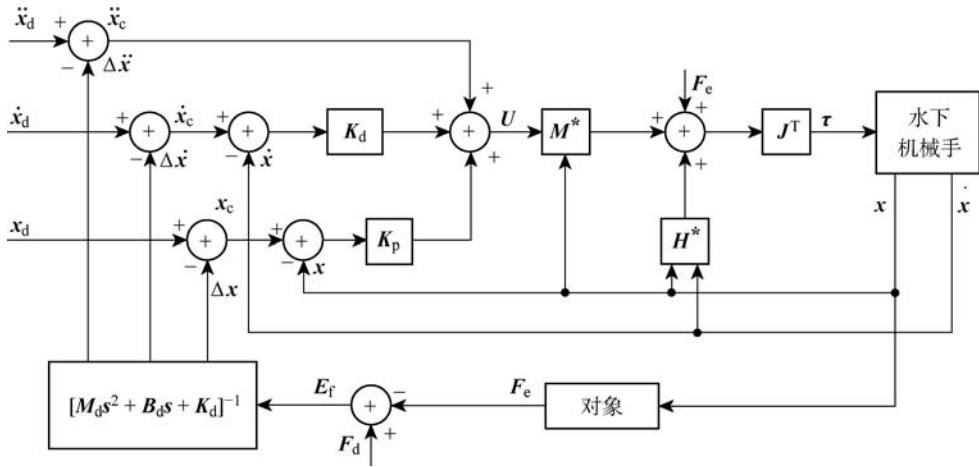


图 1 基于位置的阻抗控制系统结构

Fig. 1 The impedance control system structure diagram based on position

对比式(3)与(7)可得, $\mathbf{U} = \ddot{\mathbf{x}}$ .根据图 1,在上述定常系统中引入含偏差信号的 PD 控制,则其控制律为

$$\mathbf{U} = \ddot{\mathbf{x}}_c + \mathbf{K}_d(\dot{\mathbf{x}}_c - \dot{\mathbf{x}}) + \mathbf{K}_p(\mathbf{x}_c - \mathbf{x}) \quad (8)$$

由  $\mathbf{U} = \ddot{\mathbf{x}}$  及式(8)可得

$$\ddot{\mathbf{x}}_c - \ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}_d(\dot{\mathbf{x}}_c - \dot{\mathbf{x}}) + \mathbf{K}_p(\mathbf{x}_c - \mathbf{x}) = \mathbf{0}$$

由 2 阶系统的稳定性可知,随着时间增加, $\mathbf{x}$  收敛于  $\mathbf{x}_c$ ,以保证机械手对位置的准确跟踪.根据图 1 和式(7)及(8),所得整体的系统控制律为

$$\left. \begin{aligned} \boldsymbol{\tau} &= \mathbf{H}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{J}^T \mathbf{F}_e - \\ &\mathbf{M}(\mathbf{q}) \mathbf{J}^{-1} \dot{\mathbf{J}} \mathbf{J}^{-1} \dot{\mathbf{x}} + \mathbf{M}(\mathbf{q}) \mathbf{J}^{-1} \mathbf{U} \\ \mathbf{U} &= \ddot{\mathbf{x}}_c + \mathbf{K}_d(\dot{\mathbf{x}}_c - \dot{\mathbf{x}}) + \mathbf{K}_p(\mathbf{x}_c - \mathbf{x}) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

不失一般性,只分析一维空间的情形.采用  $f_d$  和  $f_e$  分别表示机械手在  $x$  轴方向的期望抓取力与实际抓取力.固定的力和位置的期望值会给抓取力的跟踪带来静态误差,因此,设定机械手位置的期望值  $x_d = x_e + f_e/k_e$ ,以确保力信号与位置信号的准确跟踪<sup>[10]</sup>.其中, $x_d$ 、 $x_e$  和  $k_e$  分别表示期望位置、抓取目标的实际位置及目标刚度系数的值.在实际中,无法获取  $x_e$  与  $x_d$ ,且易造成跟踪的静态误差,只有实

时调整期望位置,才能够实现对期望的抓取力与位置的跟踪.另外,采用固定的  $f_d$  值无法满足目标抓取的多样性,所以通过辨识抓取目标的性能参数和模糊控制器的控制来在线调整  $f_d$  值.

3 自适应阻抗控制的实现

3.1 递推最小二乘法的参数辨识

不失一般性,只分析一维空间的情形.为了实现期望抓取力的跟踪以及期望位置的控制,对抓取目标的参数进行在线辨识.本文采用递推最小二乘法辨识目标的刚度与阻尼.假设抓取目标具有阻抗特性,即为无源的,抓取目标为弹簧-阻尼模型,其接触时的抓取力可表示为

$$f_e = \hat{k}_e x + \hat{\xi} \quad (10)$$

式中: $\hat{k}_e$  为估计的目标刚度系数; $\hat{\xi}$  为与目标位置相关的常数.根据递推最小二乘法的原理,采集  $x$ 、 $f_e$  序列作为最小二乘计算的参数来估计  $\hat{k}_e$ 、 $\hat{\xi}$ .为了减少运算过程,采用递推最小二乘法进行固定序列的计算<sup>[11]</sup>.

### 3.2 期望抓取力的模糊调整

根据抓取目标的特征实时调整机械手末端与抓取目标之间的期望抓取力. 根据抓取过程和抓取目标的阻抗特点, 提出如下期望抓取力的在线模糊调整算法:

$$f_d(k) = f_d(k-1) + \gamma \Delta f_c \quad (11)$$

式中:  $f_d(k)$ 、 $f_d(k-1)$  分别为  $k$  时刻以及  $k-1$  时刻机械手末端与抓取目标之间期望抓取力的值;  $\gamma \in [-1, 1]$ , 为根据抓取目标阻抗参数调整的期望抓取力的调节系数;  $\Delta f_c$  为常数, 表示期望抓取力信号每次调节的最大值.

利用模糊推理控制来调整期望抓取力<sup>[12]</sup>. 输入变量选取  $\hat{k}_e$  与机械手末端位置的变化量  $\Delta x$ , 且  $\Delta x = x(k) - x(k-1)$ , 输出变量为  $\gamma$ . 其中,  $\hat{k}_e$  表征抓取目标的软硬程度,  $\Delta x$  表征机械手的运动趋势. 假设模糊控制器的设计规则:

(1) 当  $\hat{k}_e = 0$  时, 无论  $\Delta x$  如何, 机械手都没有与外界接触, 应取  $\gamma = 0$ , 以使期望抓取力保持恒定的初始值.

(2) 当  $\hat{k}_e$  比较大、 $\Delta x$  较大时, 机械手接触物体的刚度系数较大, 即机械手的运动空间较大, 应取较大的  $f_d(k)$  值, 故  $\gamma$  取正值, 以增大期望抓取力而防止抓取目标脱落.

(3) 当  $\hat{k}_e$  比较小、 $\Delta x$  较小时, 机械手接触物体的刚度系数较小, 即机械手的运动空间较小, 应取较小的  $f_d(k)$  值, 故  $\gamma$  取负值, 以减小期望抓取力而防止抓取目标损坏.

然后, 根据以上模糊控制规则建立从输入到输出的模糊规则表.

### 3.3 期望位置的自适应调整

本文设计了自适应 PID 算法以实现期望位置信号的自适应调整. 在期望抓取力的跟踪位置  $x_d$  加入调节信号<sup>[13]</sup>, 即

$$x_d = x_{d0} + \Delta x_f \quad (12)$$

式中:  $x_{d0}$  为初始设定的期望位置;  $\Delta x_f$  为期望位置的修正量, 且

$$\Delta x_f = c(t) + p(t)e_f(t) + d(t)\dot{e}_f(t)$$

其中:  $e_f(t) = f_d - f_e$ , 为抓取力的跟踪误差,  $\dot{e}_f(t)$  为  $e_f(t)$  的 1 阶导数;  $p(t)$  和  $d(t)$  分别为比例因子和微分因子;  $c(t)$  为用于补偿静态误差的辅助函数项.

式(6)中的二维空间可以解耦成 2 个一维空间, 在一维空间情形下的阻抗控制模型为

$$m_d(\ddot{x}_d - \ddot{x}) + b_d(\dot{x}_d - \dot{x}) +$$

$$k_d(x_d - x) = f_d - f_e \quad (13)$$

式中:  $m_d$ 、 $b_d$ 、 $k_d$  分别为期望惯性量、阻尼和刚度的一维表示形式.

将式(5)、(12)代入式(13)中, 期望位置  $x_d$  在非自适应调节下可视为常数, 本文将其在自适应 PID 调节过程中依然近似为常数, 令  $\ddot{x}_d = \dot{x}_d = 0$ , 所得含调节因子的系统误差方程为

$$\ddot{e}_f + \left( \frac{b_d + k_e k_d d(t)}{m_d} \right) \dot{e}_f + \left( \frac{k_d - k_e + k_d k_e p(t)}{m_d} \right) e_f = \frac{k_d(f_d + k_e x_e - k_e c(t) - k_e x_{d0})}{m_d} \quad (14)$$

采用模型参考自适应控制方法和 Lyapunov 稳定性定理设计自适应阻抗控制律, 式(14)为模型参考自适应控制中的可调系统. 调整  $d(t)$ 、 $c(t)$  和  $p(t)$ , 以缩小实际抓取力误差  $e_f(t)$  与期望抓取力误差  $e_m(t)$  的差值, 使得实际的系统响应跟随参考模型的响应.  $e_m(t)$  的轨迹取决于参考模型, 将参考模型设计为理想的 2 阶系统, 即

$$\ddot{e}_m + a_m \dot{e}_m + b_m e_m = 0 \quad (15)$$

式中:  $\dot{e}_m$ 、 $\ddot{e}_m$  分别为  $e_m(t)$  的 1 阶导数和 2 阶导数;  $a_m$ 、 $b_m$  均为理想 2 阶系统的相应系数.

利用 Lyapunov 稳定性定理求解自适应律, 令

$$\left. \begin{aligned} a_p(t) &= \frac{b_d + k_e k_d d(t)}{m_d} \\ b_p(t) &= \frac{k_d - k_e + k_d k_e p(t)}{m_d} \\ \beta_0(t) &= \frac{k_d(f_d + k_e x_e - k_e c(t) - k_e x_{d0})}{m_d} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

则式(14)可简化为

$$\ddot{e}_f + a_p(t)\dot{e}_f + b_p(t)e_f = \beta_0(t) \quad (17)$$

由式(17)减去式(15), 所得参考模型与实际模型误差方程的状态空间为

$$\dot{\mathbf{E}}_e = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -b_m & -a_m \end{bmatrix} \mathbf{E}_e + \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ b_p(t) - b_m & a_p(t) - a_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_f \\ \dot{e}_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\beta_0(t) \end{bmatrix} \quad (18)$$

式中:  $\mathbf{E}_e = \begin{bmatrix} e_m - e_f \\ \dot{e}_m - \dot{e}_f \end{bmatrix}$ , 为状态向量. 根据 Lyapunov

稳定性定理构造的二次型形式的能量函数为

$$\begin{aligned} V(\mathbf{E}_e, t) &= \frac{1}{2} \mathbf{E}_e^T \mathbf{P} \mathbf{E}_e + \frac{1}{2} \mathbf{Z}^T \mathbf{R} \mathbf{Z} = \\ &= \frac{1}{2} \mathbf{E}_e^T \mathbf{P} \mathbf{E}_e + \frac{1}{2} \omega_0 (b_p(t) - b_m)^2 + \\ &= \frac{1}{2} \omega_1 (a_p(t) - a_m)^2 + \frac{1}{2} \omega_2 \beta_0^2(t) \end{aligned} \quad (19)$$

式中:

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} b_p(t) - b_m \\ a_p(t) - a_m \\ \beta_0(t) \end{bmatrix}$$
$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \omega_0 & & \\ & \omega_1 & \\ & & \omega_2 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_1 & p_2 \\ p_2 & p_3 \end{bmatrix}$$

$\omega_0, \omega_1$  和  $\omega_2$  均为任意的正数,  $\mathbf{P}$  为任意一个非奇异正定矩阵. 显然,  $V(\mathbf{E}_e, t)$  具有正定性. 对  $V(\mathbf{E}_e, t)$  求导, 可得

$$\dot{V}(\mathbf{E}_e, t) = -\frac{1}{2} \mathbf{E}_e^T \mathbf{Q} \mathbf{E}_e + (b_p(t) - b_m) \times (\chi \dot{e}_f + \omega_0 \dot{b}_p(t)) + (a_p(t) - a_m) \times (\chi \dot{e}_f + \omega_1 \dot{a}_p(t)) + \beta_0(t) (\omega_2 \dot{\beta}_0(t) - \chi) \quad (20)$$

式中:

$$\chi(t) = p_2(e_m - e_f) + p_3(\dot{e}_m - \dot{e}_f)$$

$\mathbf{Q}$  为给定的正定矩阵, 满足 Lyapunov 稳定性条件, 即  $\mathbf{E}_e^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{E}_e = -\mathbf{Q}$ . 根据 Lyapunov 稳定性定理, 只要保证式(20)等号右边的后 3 项为 0, 就可以得到

$\dot{V}(\mathbf{E}_e, t) \leq 0$ . 由此可得

$$\left. \begin{aligned} \dot{a}_p(t) &= -\chi \dot{e}_f / \omega_1 \\ \dot{b}_p(t) &= -\chi \dot{e}_f / \omega_0 \\ \dot{\beta}_0(t) &= \chi / \omega_2 \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

系数  $\chi(t)$ 、 $d(t)$ 、 $c(t)$  和  $p(t)$  的自适应调整率为

$$\left. \begin{aligned} \chi(t) &= -(\lambda_p e_f(t) + \lambda_v \dot{e}_f(t)) \\ d(t) &= d_0 - \eta \int_0^t \chi(t) \dot{e}_f(t) dt \\ c(t) &= c_0 - \mu_1 \int_0^t \chi(t) dt \\ p(t) &= p_0 - \mu_2 \int_0^t \chi(t) e_f(t) dt \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

式中:  $\lambda_p, \lambda_v, \eta, \mu_1$  和  $\mu_2$  均为较小的正数;  $d_0, c_0$  和  $p_0$  分别为  $d(t), c(t)$  和  $p(t)$  在初始时刻的值.

分别根据期望抓取力与实际抓取力的误差对  $d(t), c(t)$  和  $p(t)$  进行实时调整, 将所得一个位置的较小修正量输入经典阻抗控制器的调整项中, 从而达到了间接调整期望位置的目的.

### 4 仿真实验

本文以 2 自由度旋转机械手模型的仿真实验为例来验证自适应阻抗控制方法的可靠性. 2 自由度机械手的数学模型如图 2 所示. 假设水下机械手的具体结构参数: 2 个关节的质量  $m_1 = m_2 = 0.1 \text{ kg}$ ; 2 个关节的长度  $l_1 = l_2 = 0.04 \text{ m}$ . 目标的阻抗参数:  $\mathbf{M}_d = \text{diag}(1, 1), \mathbf{B}_d = \text{diag}(20, 20), \mathbf{K}_d = \text{diag}(15,$

15), 抓取力调节量  $\Delta f_c = 0.01 \text{ N}$ ; 系统干扰转矩  $\tau_d = [2 \sin t \quad 2 \sin t]$  为时间的函数, 且为可测量. 本文进行了以下 2 个仿真实验.

**实验 1** 不加辨识, 设定 1 个变化的力信号进行跟踪实验. 假设在  $x$  轴方向的力的跟踪信号  $f_d = 10 + \sin t$ ,  $y$  轴方向的力为 0, 抓取目标的实际位置  $x_e = 0.05 \text{ m}$ , 期望位置  $x_d = 0.10 \text{ m}$ , 仿真结果如图 3 和 4 所示. 由仿真结果可见, 机械手的抓取满足对变

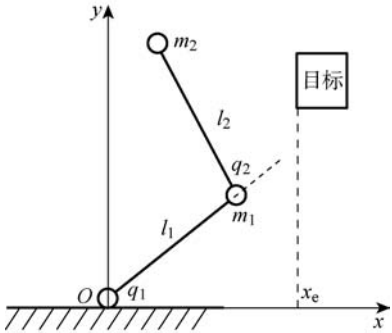


图 2 2 自由度机械手仿真模型

Fig. 2 The simulation model of two degrees of freedom manipulator

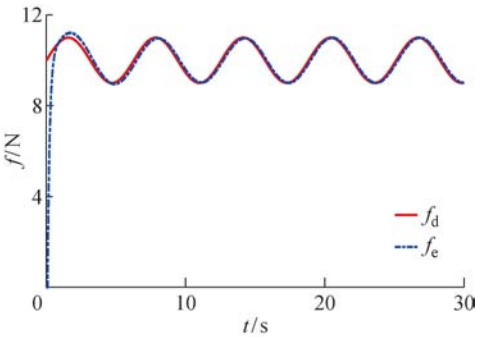


图 3 自适应控制抓取力的跟踪曲线

Fig. 3 The force tracking curves with adaptive control

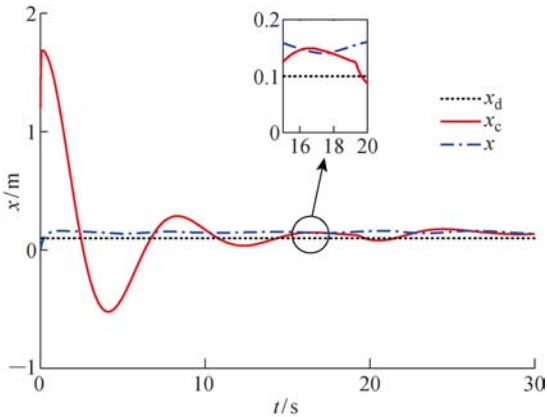


图 4 自适应控制位置的跟踪曲线

Fig. 4 The position tracking curves with adaptive control

化的力的跟踪要求,从而实现了机械手的抓取以及期望抓取力信号的控制.

**实验 2** 加入在线辨识的抓取目标阻抗,通过自适应调节期望的抓取力来实现机械手抓取力信号的跟踪.只考虑  $x$  方向的跟踪.设置  $x_d=0.10\text{ m}$ ,抓取力的初始值为  $5\text{ N}$ ,  $x_e=0.05\text{ m}$ ,  $k_e=1\text{ kN/m}$ ,仿真结果分别如图 5~7 所示.由图 5~7 可见,所设计的自适应阻抗控制系统能够很好地辨识目标阻抗,

根据阻抗参数模糊推理出需要抓取的目标的期望抓取力,并且能够实现期望的位置调整,保证了位置跟踪.另外,机械手在从自由空间到约束空间的过渡过程中,对抓取力控制的柔顺性很好,虽然在控制位置出现了一个小的抖动,但是不影响对实际位置的跟踪,从而满足了不但能够抓住而且能够控制抓取力的功能.

## 5 结语

在传统阻抗控制方法的基础上,提出了自适应阻抗控制方法.以阻抗控制外环、位置控制内环为核心,分别设定期望抓取力与期望位置,利用递推最小二乘法在线辨识抓取目标的阻抗参数,根据辨识的目标阻抗特征与运动属性,通过模糊控制在线调节期望抓取力,采用自适应 PID 控制器实时调节期望位置,以实现在机械手跟踪期望位置的同时对期望抓取力的跟踪,从而满足对目标的抓住、抓牢并防止损伤目标的智能抓取功能.同时,通过在 MATLAB/Simulink 软件平台上进行仿真实验,验证了所提自适应阻抗控制方法的有效性.结果表明,所提自适应阻抗控制方法在自由空间和约束空间均具有良好的力、位移的跟踪性能.

## 参考文献:

- [1] MEHDI H, BOUBAKER O. Robust impedance control-based Lyapunov-Hamiltonian approach for constrained robots[J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2015(12): 190-202.
- [2] 姬伟, 罗大伟, 李俊乐, 等. 果蔬采摘机器人末端执行器的柔顺抓取力控制[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(9): 19-26.  
JI Wei, LUO Dawei, LI Junle, *et al.* Compliance grasp force control for end-effector of fruit-vegetable picking robot[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(9): 19-26.
- [3] 文忠, 钱晋武, 沈林勇, 等. 基于阻抗控制的步行康复训练机器人的轨迹自适应[J]. *机器人*, 2011, 33(2): 142-149.  
WEN Zhong, QIAN Jinwu, SHEN Linyong, *et al.* Trajectory adaptation for impedance control based walking rehabilitation training robot [J]. *Robot.*, 2011, 33(2): 142-149.
- [4] ROVEDA L, IANNACCI N, VICENTINI F, *et al.* Optimal impedance force-tracking control design with impact formulation for interaction tasks[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2016, 1(1): 130-136.

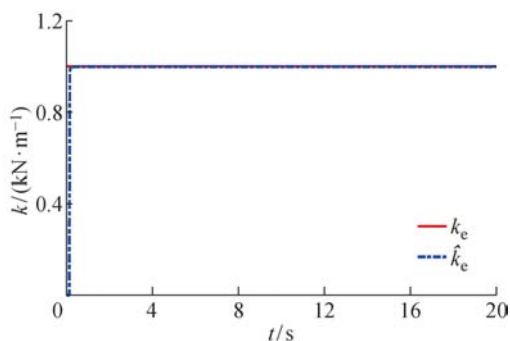


图 5 自适应控制目标阻抗的刚度辨识曲线

Fig. 5 The object impedance identification curves with adaptive control

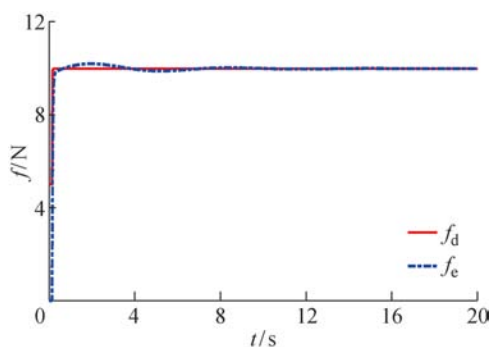


图 6 自适应控制抓取力的跟踪曲线

Fig. 6 The force tracking curves with adaptive control

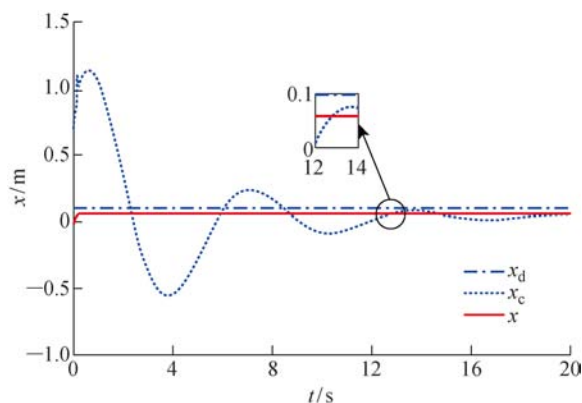


图 7 自适应控制位置的跟踪曲线

Fig. 7 The position tracking curves with adaptive control

- [5] HOGAN N. Impedance control: An approach to manipulation[C] // **American Control Conference**. San Diego, USA: IEEE, 1984: 304-313.
- [6] JUNG S, HSIA T C, BONITZ R G. Force tracking impedance control for robot manipulators with an unknown environment: Theory, simulation, and experiment[J]. **The International Journal of Robotics Research**, 2001, 20(9): 765-774.
- [7] 王学林, 肖永飞, 毕淑慧, 等. 机器人柔性抓取试验平台的设计与抓持力跟踪阻抗控制[J]. **农业工程学报**, 2015, 31(1): 58-63.
- WANG Xuelin, XIAO Yongfei, BI Shuhui, *et al.* Design of test platform for robot flexible grasping and grasping force tracking impedance control[J]. **Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering**, 2015, 31(1): 58-63.
- [8] DONG J H, SANG O S, LEE J, *et al.* High speed trot-running: Implementation of a hierarchical controller using proprioceptive impedance control on the MIT cheetah[J]. **International Journal of Robotics Research**, 2014, 33(11): 1417-1445.
- [9] 李杰, 韦庆, 常文森, 等. 基于阻抗控制的自适应力跟踪方法[J]. **机器人**, 1999, 21(1): 23-29.
- LI Jie, WEI Qing, CHANG Wensen, *et al.* Adaptive force tracking in impedance control[J]. **Robot**, 1999, 21(1): 23-29.
- [10] 朱雅光, 金波, 李伟. 基于自适应-模糊控制的六足机器人单腿柔顺控制[J]. **浙江大学学报(工学版)**, 2014, 48(8): 1419-1426.
- ZHU Yaguang, JIN Bo, LI Wei. Leg compliance control of hexapod robot based on adaptive-fuzzy control[J]. **Journal of Zhejiang University (Engineering Science)**, 2014, 48(8): 1419-1426.
- [11] 张永昌, 蔡倩, 彭玉宾, 等. 带参数辨识功能的三电平变换器高效模型预测控制方法[J]. **电气工程学报**, 2018, 13(4): 1-10.
- ZHANG Yongchang, CAI Qian, PENG Yubin, *et al.* An efficient model predictive control for three-level converters with the function of parameter identification[J]. **Journal of Electrical Engineering**, 2018, 13(4): 1-10.
- [12] 徐国政, 宋爱国, 李会军. 基于模糊推理的上肢康复机器人自适应阻抗控制[J]. **东南大学学报(自然科学版)**, 2009, 39(1): 156-160.
- XU Guozheng, SONG Aiguo, LI Huijun. Fuzzy-based adaptive impedance control for upper-limb rehabilitation robot [J]. **Journal of Southeast University (Natural Science Edition)**, 2009, 39(1): 156-160.
- [13] SERAJI H. Adaptive admittance control: An approach to explicit force control in compliant motion [C]// **IEEE International Conference on Robotics and Automation**. San Diego, USA: IEEE, 2002: 2705-2712.

(本文编辑:何雪)