

基于RBF神经网络的双臂手术机器人自适应导纳控制

张岩, 胡陟

上海工程技术大学电子电气工程学院, 上海 201620

【摘要】针对双臂机器人在辅助头颈部手术拉开软组织过程中环境刚度变化而导致的力跟踪误差较大问题,提出一种基于径向基函数(RBF)神经网络的自适应导纳控制策略,减小力跟踪误差,提升系统的响应速度。通过在手术过程中利用RBF神经网络在线调整导纳参数,提高机械臂对不同接触条件和操作要求的适应性,实现快速精确的力跟踪。仿真实验将基于RBF神经网络的自适应导纳控制策略引入双臂力同步导纳控制系统并与传统定参数导纳控制对比,证明其在接触环境参数变化情况下的接触力控制效果。结果表明,基于RBF神经网络的自适应导纳控制策略可以有效提升双臂手术机器人力跟踪精度、响应速度以及抗干扰能力。

【关键词】自适应导纳控制;径向基函数;神经网络;双臂手术机器人;力跟踪

【中图分类号】R318;TP242

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2024)02-0198-07

Adaptive admittance control for dual-arm surgical robot using radial basis function neural network

ZHANG Yan, HU Zhi

School of Electronic and Electrical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China

Abstract: Aiming at the problem of large force tracking errors caused by environmental stiffness changes when dual-arm robot is assisting in opening soft tissues in head and neck surgery, an adaptive admittance control strategy based on radial basis function (RBF) neural network is proposed for reducing force tracking error and improving system response speed. By using RBF neural network to adjust admittance parameters online during surgery, the adaptability of the robotic arm to different contact conditions and operation requirements is improved, thereby realizing fast and accurate force tracking. The simulation experiment introduces the adaptive admittance control strategy based on RBF neural network into the dual-arm force synchronous admittance control system and compares it with the traditional fixed-parameter admittance control to prove its contact force control effect under the condition of variable contact environment parameters. The results demonstrate that the adaptive admittance control strategy based on RBF neural network can effectively improve the force tracking accuracy, response speed and anti-interference capability of dual-arm surgical robot.

Keywords: adaptive admittance control; radial basis function; neural network; dual-arm surgical robot; force tracking

前言

随着医疗技术的不断进步和机器人技术的发展,机器人辅助技术已经被逐步应用于微创外科手术中^[1-3]。在微创外科手术中,双臂机器人得到广泛

的应用^[2-6]。在涉及颅颌面的手术中,为了扩大患者病灶处的视野,医生需要对患者口腔组织或手术切口进行一定程度的拉伸扩张。由于医生长时间手术操作出现的生理疲劳和手部抖动,人为操作下拉伸力的安全性难以保证^[7]。双臂辅助机器人可以代替医生进行软组织拉伸操作,并且具有更高的控制精度^[8],提高软组织拉伸的安全性。手术过程中双臂机器人的两条机械臂需要执行不同的操作,为了保证双臂中力与位置的协调性,需要引入双臂协调控制策略^[9-11]。

在拉开软组织时,双臂手术机器人需要保持紧密协调,以确保病灶能够充分暴露,同时避免用力过大造成面部组织损伤。提高接触力控制精度和动态

【收稿日期】2023-10-08

【基金项目】国家自然科学基金(62003207);国家重点研发计划(2019YFC0119303);中国博士后基金面上资助项目(2021M690629)

【作者简介】张岩,硕士研究生,研究方向:机器人技术,E-mail: 1799024307@qq.com

【通信作者】胡陟,副教授,研究方向:力触觉反馈、力控制,E-mail: hu-zhi26@126.com

响应速度成为主要目标。力同步导纳控制策略是一种常用的双臂协调控制策略^[12-14]。通过映射函数计算出相对力跟随误差的补偿量,利用导纳控制器将其转换为相对位置误差的补偿量,能够解决由于位置误差累积导致的双臂相对位置无法确定的问题。然而,由于手术过程中接触环境参数不确定性(手术涉及颅骨和拉伸过程中刚度出现局部变化的口腔组织)以及手术过程中可能出现的外部力扰动,传统的定参数导纳控制难以满足手术过程中对力跟踪的要求^[15-17]。

为了在接触环境参数不确定情况下提高接触力控制的效果,文献[18]提出一种实时的可变形接触感知模型预测控制方法,用于实现机器人与软环境之间的力调节。该方法综合考虑滑动摩擦力和法向接触力,将机器人和软环境的动力学模型同时纳入轨迹优化器中,生成期望的运动和力轮廓。然而,该方法的计算复杂度较高,实时性较差,且需要对模型预测控制的参数进行精细的调节。文献[19]提出一种基于逆强化学习的可变阻抗控制方法,通过从专家演示中恢复可变阻抗策略和激励函数,以实现专家可变阻抗技能的更一般性表示。然而,这种方法需要大量的专家演示数据,而机器人辅助头颈部手术操作的专家数据难以大量获取,将该方法应用到双臂手术机器人上难以实现良好的控制效果。文献[20]提出一种基于模糊变导纳的机器人力控制方法,在传统导纳控制的基础上,将机器人末端与环境接触力的误差及其变化率作为控制器的输入,通过设定相应的模糊规则来实时调整导纳参数。然而,该方法的稳定性和收敛性分析较为复杂,且需要人为设定模糊规则和隶属度函数,这会增加设计难度和不确定性。

本文提出一种基于径向基函数(Radial Basis Function, RBF)神经网络的自适应导纳控制策略。利用RBF神经网络的最佳逼近特性,结构简单和计算速度快等特点^[21-22],提升系统力跟踪的精确性和实时性。该策略利用RBF神经网络作为非线性函数逼近器,结合参考模型和反馈误差,通过在线更新权值来实现对接触力的跟踪控制。与传统的固定导纳控制和模糊变导纳控制相比,基于RBF神经网络的自适应导纳控制具有更强的环境适应性、系统稳定性、跟踪精度和响应速度等优势。

本文首先介绍双臂手术机器人系统在头颈部手术的应用及其力控制问题,并对国内外相关研究进行文献综述。然后分析传统定导纳控制在环境参数变化时的力跟踪误差,并分析力跟踪误差对双臂力同步导纳控制系统的影响。接着提出一种基于RBF

神经网络的自适应导纳控制策略。最后通过仿真实验验证了所提方法的可行性和有效性,并与传统定导纳控制方法进行对比分析。

1 双臂机器人协调控制系统的构建

本文以两个 UR5 机器人的双臂机器人协调控制系统为主体,以人体头颈部模型为操作对象,研究双臂机器人辅助拉开口腔的控制策略,如图1所示。UR5 机器人是一种六自由度的工业机器人,具有灵活、轻型、柔性的特点,由底座、主臂、副臂、腰部、手腕头、手腕尾、末端法兰等7个部件组成。两个机械臂分别有自己的系统、控制器和软硬件,通过以太网接口实现双臂之间的信息交互和协调控制。本文利用上位机控制软件来读取双臂的运动信息并发送控制指令,建立双臂之间的TCP/IP通信网络。



图1 双臂机器人组织牵拉系统

Figure 1 Dual-arm robot system for tissue traction

双臂手术机器人进行辅助牵拉口腔中软组织时,需要进行柔顺控制,以保证手术安全性。双臂机器人辅助拉开口腔分为3个阶段,第一个阶段为未接触阶段,通过位置控制的方式控制双臂末端拉钩靠近任务区域;第二阶段为接触阶段,拉钩开始接触到口腔软组织;第三阶段为力跟踪阶段,双臂沿Z轴反方向拉动软组织达到期望接触力。力跟踪阶段口腔组织被逐渐拉开,操作视野逐渐扩大,医生可以通过调节期望力的方式获得适当的视野。

2 双臂机器人导纳控制模型

2.1 机械臂柔顺控制系统模型分析

双臂机器人在辅助头颈部手术过程中需要与口腔软组织进行接触操作,可以采用柔顺控制算法保证接触过程的安全性。在涉及到与柔性物体接触时一般采用导纳控制作为柔顺控制策略^[23-24]。导纳控制是一种基于力的柔顺控制方法,通过建立与位置的关系达到柔顺控制的目的。

$$F_a - F_d = M(\ddot{X}_c - \ddot{X}_d) + D(\dot{X}_c - \dot{X}_d) + K(X_c - X_d) \quad (1)$$

其中, M 、 D 、 K 分别为质量参数、阻尼参数以及刚度参数。 F_d 、 F_a 分别为拉钩与环境的期望接触力和实际接触力, X_d 为末端拉钩的期望轨迹, X_c 是导纳控制器输出的轨迹控制量。

导纳控制模型 $G(s)$:

$$G(s) = \frac{1}{Ms^2 + Ds + K} \quad (2)$$

接触力误差为 ΔF :

$$\Delta F = F_a - F_d \quad (3)$$

由接触力误差引起的位置误差 ΔX :

$$\Delta X = \Delta F \cdot G(s) \quad (4)$$

则位置控制量 X_c :

$$X_c = X_d + \Delta X \quad (5)$$

将 X_c 作为控制命令发送给机械臂进行位置跟踪可以得到末端拉钩实际位置 X :

$$X = X_c + E_x \quad (6)$$

其中, E_x 为机械臂位置控制误差, 在机械臂位置控制精度较高的情况下一般可以忽略。

可以得到拉钩末端实际位置 X 与力跟踪误差 ΔF 的关系为:

$$X = X_d + \Delta F \cdot G(s) \quad (7)$$

2.2 接触环境不确定情况下导纳控制误差分析

为了简化分析, 只考虑空间中 X 方向上的力, 可以将接触环境等效为线性弹簧, 则末端拉钩与软组织接触后, 实际接触力 F_a :

$$F_a = K_e(X_p - X) \quad (8)$$

其中, K_e 为接触环境刚度参数, X 为末端拉钩实际位置, X_p 为环境位置, 则有:

$$\Delta F = K_e(X_p - X) - F_d \quad (9)$$

由式(6)、式(9)得:

$$\Delta F = \frac{(Ms^2 + Ds + K)[K_e(X_d - X_p) - F_d]}{Ms^2 + Ds + K + K_e} \quad (10)$$

则可以得到稳态力跟踪误差 ΔF_{ss} :

$$\Delta F_{ss} = \frac{K[K_e(X_d - X_p) - F_d]}{K + K_e} \quad (11)$$

为了使 $\Delta F_{ss} = 0$, 则必须满足:

$$X_d = X_p + \frac{F_d}{K_e} \text{ 或者 } K = 0 \quad (12)$$

若采用传统导纳控制策略, 忽略软组织刚度变化, 令 $K_e = k_e$, 环境位置 $X_p = X_0$, 则有:

$$X_d = X_0 + \frac{F_d}{k_e} \quad (13)$$

然而在实际手术过程中, 单侧软组织形变量和整体软组织形变量的增大都会使得接触环境刚度 K_e 增大。则实际接触环境刚度满足以下关系:

$$K_e = k_e + \delta \quad (14)$$

$$\delta = f(X - X_p) + g(L_x) \quad (15)$$

其中, f 、 g 分别为单侧软组织形变和整体软组织形变对接触环境刚度的补偿函数, δ 为接触环境刚度变化量。

由式(11)~式(14)可以得到此时系统稳定状态下的接触力误差 ΔF_{ss} :

$$\Delta F_{ss} = \delta \frac{F_d}{k_e} \quad (16)$$

在接触环境刚度变化的条件下, 传统导纳控制策略存在力跟踪误差, 为了消除力跟踪误差需要对导纳控制策略做出改进。

2.3 双臂力同步自适应导纳控制

2.3.1 双臂力同步导纳控制 基于力同步的双臂机器人自适应导纳控制拉钩拉开物体的控制结构如图2所示。

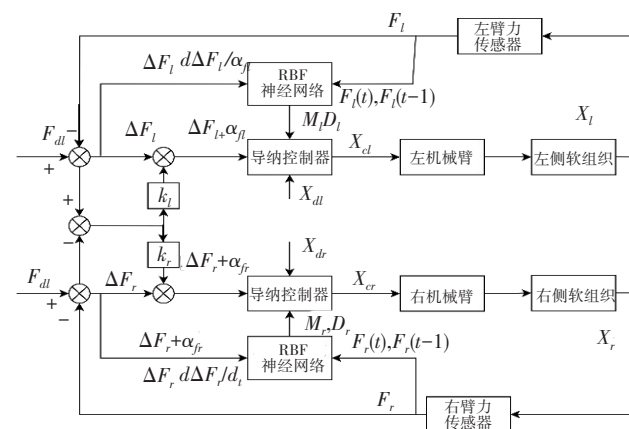


图2 双臂力同步导纳控制结构

Figure 2 Dual-arm force synchronous admittance control structure

将软组织运动轨迹分别定义为 X_l 和 X_r , 由于实验对象是水平放置的静止人体模型, 重力和摩擦力可以忽略不计, 只考虑机械臂末端拉钩的拉力。

为了防止左右臂力变化不一致导致目标位置偏移以及两条机械臂的碰撞, 需要对两条机械臂相对位置进行控制。通过控制左右机械臂相对力跟踪误差来间接对相对位置进行控制, 如图3所示。

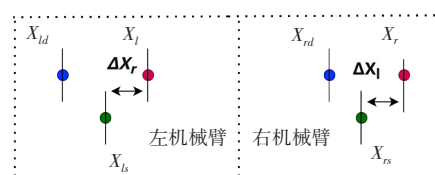


图3 两条机械臂的位置关系

Figure 3 Position relationship between two robotic arms

X_{ld}, X_{rd}, X_l, X_r 分别是两个末端拉钩的期望位置 and 实际位置, 左右两条机械臂的力跟随误差 ΔF_l 和 ΔF_r 分别为:

$$\Delta F_l = F_{al} - F_{dl}, \Delta F_r = F_{ar} - F_{dr} \quad (17)$$

其中, F_{al} 和 F_{ar} 分别为左右机械臂的实际接触力, F_{dl} 和 F_{dr} 分别为左右机械臂的期望接触力。

双臂相对力跟随误差 ε 为:

$$\varepsilon = \Delta F_l - \Delta F_r \quad (18)$$

左右臂相对力跟随误差补偿量 α_{fl}, α_{fr} 分别为:

$$\alpha_{fl} = K_l \varepsilon, \alpha_{fr} = K_r \varepsilon \quad (19)$$

其中, K_l, K_r 分别为同步误差补偿系数, 取值范围为 $[0, 1]$ 。力跟随误差补偿量 α_{fl}, α_{fr} 通过自适应导纳控制器转换成位置补偿量分别补偿给两个机械臂, 相对位置误差补偿量 $\Delta X_l, \Delta X_r$ 分别为:

$$\Delta X_l = \alpha_{fl} G_l(S), \Delta X_r = \alpha_{fr} G_r(S) \quad (20)$$

其中, $G_l(S), G_r(S)$ 分别为两条机械臂的导纳控制模型, 左右两条机械臂的修正位置分别为:

$$X_{ls} = X_{ls} + \Delta X_l, X_{rs} = X_{rs} + \Delta X_r \quad (21)$$

2.3.2 双臂力同步导纳控制误差分析 在双臂协助辅助手术机器人进行口腔软组织拉伸的过程中, 拉钩对软组织施加拉伸力, 软组织随着形变而发生刚度变化。口腔左右两侧受到的拉伸形变会相互影响。如图4所示。

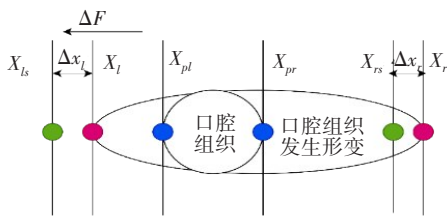


图4 口腔软组织形变

Figure 4 Deformation of the oral soft tissues

左侧机械臂受到外部力冲击 F , 若稳定状态下力跟踪误差为 0, 则右侧软组织接触力 F_r 为:

$$F_r = (K_{er} + \delta_0)(X_r - X_{pr}) \quad (22)$$

其中, X_{pl}, X_{pr} 分别为左右侧口腔组织初始位置, X_l, X_r 为左右侧软组织稳定位置。当左侧机械臂受到外部力冲击 F 时, 其位置偏移至 X_{ls} , 产生力跟随误差大小为 ΔF , 引入力同步控制, 则右侧软组织补偿位置量为:

$$\Delta X_r = FK_r G(S) \quad (23)$$

右侧软组织修正位置:

$$X_{rs} = X_r + \Delta X_r \quad (24)$$

加入位置补偿时右侧软组织接触力:

$$F_{rs} = (K_{er} + \delta_1)(X_r - X_{pr} + \Delta X_r) \quad (25)$$

其中, $\delta_1 < \delta_0, \Delta X_r < 0$ 。可以得到:

$$F_{rs} < F_r \quad (26)$$

由式(26)可得, 加入力同步控制降低了外部力干扰出现时带来的接触力突变, 提升双臂机器人的抗干扰能力, 增强系统的鲁棒性。

然而, 传统定导纳控制在系统稳定时存在接触力误差, 此时系统稳定时右侧软组织接触力误差为:

$$\Delta F_{ssr} = \delta \frac{F_{dr}}{K_{er}} \quad (27)$$

系统稳定状态下的位置:

$$X_{rs^*} = X_r + K_r \Delta F_{ssr} G_r(S) \quad (28)$$

当左侧机械臂受到外部力冲击 F , 右侧软组织接触力:

$$F_{rs^*} = (K_{er} + \delta_2)(X_{rs^*} - X_{pr} + \Delta X_r) \quad (29)$$

其中, $\delta_1 < \delta_2, X_r < X_{rs^*}$, 则有:

$$F_{rs^*} > F_{rs} \quad (30)$$

由式(30)得到, 当系统存在接触力误差时, 双臂力同步控制系统鲁棒性降低, 手术的安全性难以保证。

2.3.3 基于RBF神经网络的双臂自适应导纳控制器设计 由于手术过程中接触环境刚度处于变化状态, 期望位置 X_d 作为导纳控制器的输入无法通过提前计算获得, 需要对导纳控制器做出改进。

令 $X_d = X_p$, 位置误差 $e_x = X - X_d$, 则有:

$$F_a - F_d = M\ddot{e}_x + D\dot{e}_x + Ke_x \quad (31)$$

当所需期望力 $F_d = 0$ 时, 意味着刚刚接触环境, 系统稳定状态下的实际接触力 $F_a = 0, \Delta F_{ss} = 0$ 。

当所需期望力 $F_d \neq 0$ 时, 则期望力 F_d 作为驱动力, 使机器人能够对环境施加力, 此时 $X \neq X_d$, 系统稳定时 $\Delta F_{ss} \neq 0$, 为了消除力跟踪误差, 在力跟踪阶段令导纳控制器刚度参数 $K = 0$, 得到:

$$F_a - F_d = M\ddot{e}_x + D\dot{e}_x \quad (32)$$

此时系统稳定时的力跟随误差 $\Delta F_{ss} = 0$, 将式(8)代入式(32), 得到接触导纳定律:

$$F_d = -(M\ddot{e}_x + D\dot{e}_x + Ke_x) \quad (33)$$

将式(33)进行拉氏变换:

$$e_x(S) = \frac{F_d}{Ms^2 + Ds + K_e} \quad (34)$$

此时系统的位置响应为二阶系统的阶跃响应, 系统的阻尼比 δ 为:

$$\delta = \frac{2D}{\sqrt{MK_e}} \quad (35)$$

由于系统动态响应过程中 K_e 处于变化状态, 系统的动态响应性能难以保证。为了提高系统的动态

响应能力,需要实时调整导纳控制参数 M 、 D 。

基于以上分析,本文提出一种基于RBF神经网络的导纳控制器参数自适应策略,在系统运行过程中通过RBF神经网络的最佳逼近特性对导纳控制器质量参数 M 和阻尼参数 D 动态调整以提高系统的动态性能。

2.3.4 RBF神经网络参数自适应 在双臂机器人辅助拉开口腔组织的过程中,由于口腔组织刚度不确定,需要在操作过程中实时调整导纳控制器参数 M 、 D 。本文采用RBF神经网络算法实现导纳控制器参数的实时调整。

RBF神经网络是一种基于径向基函数的神经网络,它由输入层、隐含层和输出层3层构成。本文采用的神经网络结构为2-5-2的网络结构如图5所示,输入层接收系统状态和误差信号,隐含层使用高斯基函数作为激活函数,输出层使用线性函数输出导纳控制器的参数。

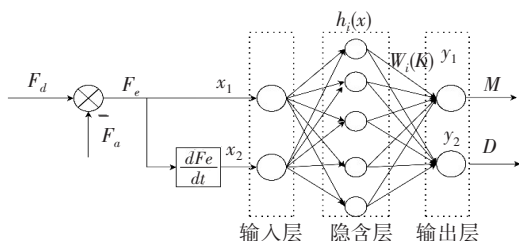


图5 RBF神经网络导纳结构图

Figure 5 Admittance structure of RBF neural network

第一层为输入层,包括两个输入变量,分别为力跟踪误差 $F_e(k)$ 和力跟踪误差的变化率 $F_{ec}(k)$ 。

隐含层输出 $h_i(x)$:

$$h_i(x) = \exp\left(-\frac{\|x - c_i\|^2}{2b_i^2}\right) \quad (36)$$

其中,输入向量:

$$x = [F_e(k), F_{ec}(k)] \quad (37)$$

其中, c_i 是第 i 个隐含神经元的中心向量, b_i 是第 i 个隐含神经元的宽度参数。

RBF神经网络通过梯度下降法来更新权值向量,使得系统的接触力误差最小化。梯度下降法根据误差信号和学习率来调整权值向量:

$$w_i(k+1) = w_i(k) + \mu e(k) h_i(x(k)) \quad (38)$$

其中, μ 是学习率, $e(k)$ 是误差信号, k 是离散时间步。

RBF神经网络通过以下公式计算输出:

$$y = \sum_{i=1}^m w_i h_i(x) \quad (39)$$

其中,输出向量:

$$y = [M, D] \quad (40)$$

M 、 D 分别为导纳控制器的质量参数和阻尼参数, w_i 为权值向量, $h_i(x)$ 是高斯基函数。

RBF神经网络具有最佳逼近性和全局最优特性,其结构简单,计算速度快。使用RBF神经网络自适应调整导纳控制器参数可以提升系统的响应速度,提高手术的安全性

3 仿真实验结果与分析

为了验证基于RBF神经网络的自适应导纳控制算法的有效性,本文以口腔组织拉伸为例,在Matlab/Simulink平台上进行仿真验证。

3.1 RBF神经网络的自适应导纳控制力跟踪仿真

根据2.3.2,传统定导纳控制忽略刚度变化,求得 $X_{dl}^* = -0.05$, $X_{dr}^* = 0.05$ 。导纳参数 $K_s = 200$, $M_s = 1$, $D = 5$ 。自适应导纳控制令环境位置 $X_{pl} = 0$, $X_{pr} = 0$,期望位置 $X_{dl} = 0$, $X_{dr} = 0$ 。在口腔组织拉伸的过程中,机器人施加在口腔组织上的力一般不能超过10 N。为了验证本文方法力跟踪的效果,令期望力 $F_d = 10$ N。RBF神经网络的学习率 $\mu = 0.8$,高斯基函数宽度 $b = 5$ 。导纳控制器刚度参数 $K = 0$,质量参数初始值 $M = 1$,阻尼参数初始值 $D = 5$;令双臂力同步误差补偿系数 $X_l, X_r = 0.6$ 。两条机械臂使用相同自适应导纳控制器参数。左侧软组织环境刚度 $K_{el} = 200 + f(X_l - X_{pl}) + g(X_r - X_l)$,右侧软组织环境刚度 $K_{er} = 200 + f(X_r - X_{pr}) + g(X_l - X_r)$ 。仿真结果如图6所示。

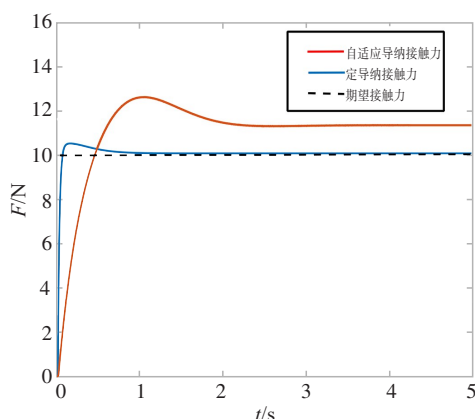


图6 单臂自适应导纳控制仿真效果对比

Figure 6 Comparison of simulation effects of single-arm adaptive admittance control

由图6可知,定参数导纳控制下系统经过1.2 s达到峰值,峰值为12.4 N,超调量达到24%,稳态时间为

2.2 s, 系统动态性能较差。稳态误差为 1.2 N, 超出系统要求。RBF 自适应导纳控制下系统经过 0.18 s 达到峰值, 峰值为 10.54 N, 超调量为 5.4%, 满足系统要求, 稳态时间为 1.03 s, 系统动态性能较好。稳态误差为 0, 满足系统要求。

由图 7a 可得, 在双臂力同步控制系统中, 传统的定导纳控制在辅助拉开口腔组织过程中无法快速准确地跟随期望力。而相同情况下, 本文提出的自适应导纳控制方法(图 7b), 力跟踪精度和响应速度都得到提升, 提升手术的安全性。

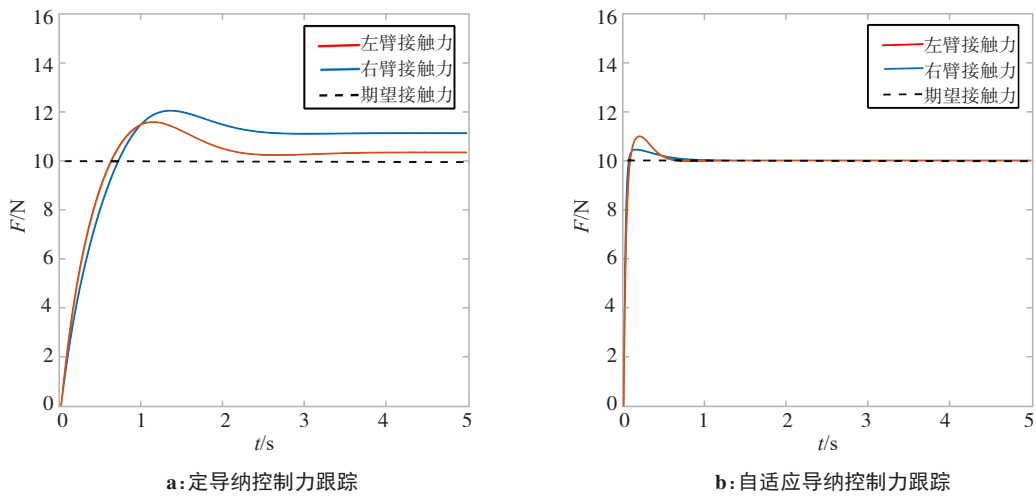


图 7 双臂适应导纳控制仿真效果对比
Figure 7 Comparison of simulation effects of dual-arm adaptive admittance control

3.2 外力冲击下的双臂力跟踪仿真

为了验证基于 RBF 神经网络的自适应导纳控制

方法在外力干扰情况下的稳定性, 第 5 秒时开始对左侧机械臂施加 3 N 的外力。仿真结果如图 8 所示。

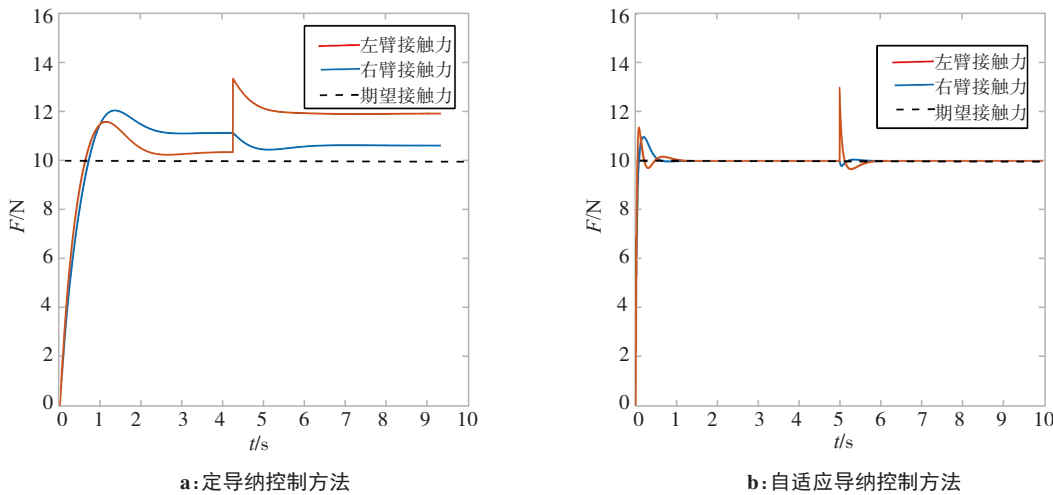


图 8 双臂适应导纳控制力干扰仿真效果对比
Figure 8 Comparison of simulation effects of dual-arm adaptation to admittance control force interference

左侧机械臂受到外力干扰后, 左侧软组织形变量增大, 受到左侧软组织形变量增大的影响, 右侧软组织牵拉刚度增大。通过力同步控制下的位置补偿, 右侧软组织拉伸程度降低, 实际接触力降低。由

图 8 可知, 定导纳控制接触力收敛速度较慢, 且左侧机械臂受到干扰后稳态误差增大至 2.1 N, 增加了手术中软组织损伤的风险。而本文提出的双臂自适应导纳控制通过自适应调整导纳参数, 使得左侧接触

力可以更快地收敛到期望值,右侧实际接触力先减小后快速收敛到期望值。基于RBF神经网络的自适应导纳控制方法降低了手术过程中接触力突变导致的软组织破裂风险,具有较高的鲁棒性。

4 结 论

本文对于双臂手术机器人在接触环境刚度发生变化时出现的力跟踪误差较大问题做出分析,并对导纳控制策略做出相应的调整。同时引入双臂力同步控制,分析相对力跟踪误差对双臂位置控制的影响。并根据口腔组织的整体性分析双臂力同步控制对于提升双臂手术机器人系统鲁棒性的作用,提出一种基于RBF神经网络的自适应导纳控制方法,随着环境刚度的变化自适应调整导纳控制器的参数。仿真结果表明,在接触环境刚度发生变化时,基于RBF神经网络的自适应导纳控制方法相较于传统导纳控制,可以提升力跟踪的精确性和动态响应速度,并且在受到外部力干扰的情况下更快收敛于期望力,降低接触力峰值,提升系统的鲁棒性和手术的安全性。

【参考文献】

- [1] 付宜利,潘博.微创外科手术机器人技术研究进展[J].哈尔滨工业大学学报,2019,51(1): 1-15.
Fu YL, Pan B. Research progress of surgical robot for minimally invasive surgery[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(1): 1-15.
- [2] Kuo CH, Dai JS. Robotics for Minimally invasive surgery: a historical review from the perspective of kinematics [C]// International Symposium on History of Machines and Mechanisms. 2009.
- [3] Bector EM, Fischer G, Choti MA, et al. A dual-armed robotic system for intraoperative ultrasound guided hepatic ablative therapy: a prospective study[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2004.
- [4] Lum MJ, Trimble D, Rosen J, et al. Multidisciplinary approach for developing a new minimally invasive surgical robotic system[C]// The First IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics. IEEE, 2006.
- [5] Omisore OM, Han S, Ong J, et al. A review on flexible robotic systems for minimally invasive surgery[J]. IEEE Trans Syst Man Cy-S, 2020, 52(1): 631-644.
- [6] 徐兆红,宋成利,闫士举.机器人在微创外科手术中的应用[J].中国组织工程研究与临床康复,2011,15(35): 6598-6601.
Xu ZH, Song CL, Yan SJ. Research on minimally invasive robotic surgery [J]. Chinese Journal of Tissue Engineering Research and Clinical Rehabilitation, 2011, 15(35): 6598-6601.
- [7] 白克强.双臂机器人拟人化动作实现与协调控制方法研究[D].合肥:中国科学技术大学,2017.
Bai KQ. Research on anthropomorphic action realization and coordination control method of dual-arm robot[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017.
- [8] 周朝政.颅颌面整形外科手术机器人关键技术研究[D].上海:上海交通大学,2019.
Zhou CZ. Research on key technologies of craniomaxillofacial plastic surgery robot[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2019.
- [9] Yamano M, Kim JS, Konno A, et al. Cooperative control of a 3D dual-flexible-arm robot[J]. J Intell Robot Syst, 2004, 39: 1-15.
- [10] Caccavale F, Chiacchio P, Marino A, et al. Six-DOF impedance control of dual-arm cooperative manipulators[J]. IEEE-ASME Trans Mech, 2008, 13(5): 576-586.
- [11] 段晋军,甘亚辉,戴先中.双臂协调搬运过程中基于变阻抗模型的位置/力混合控制[J].机器人,2019,41(6): 795-802.
Duan JJ, Gan YH, Dai XZ. The Hybrid position/force control based on variable impedance model in the dual-arm coordinated transport[J]. Robot, 2019, 41(6): 795-802.
- [12] 张子建.双臂机器人控制系统及同步阻抗控制方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
Zhang ZJ. Research on dual-arm robot control system and synchronous impedance control method [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [13] Zhang Y, Jia Y. Position-based contact force synchronous control for dual-arm cooperative manipulators [J]. Journal of Robotics, Networking and Artificial Life, 2023, 10(1): 1-5.
- [14] 刘晓飞,姚建涛,赵永生.冗余驱动并联机构的驱动力同步协调控制[J].计算机集成制造系统,2018,24(9): 2140-2149.
Liu XF, Yao JT, Zhao YS. Driving force synchronous control of redundantly actuated parallel manipulator[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2018, 24(9): 2140-2149.
- [15] Duan J, Gan Y, Chen M, et al. Adaptive variable impedance control for dynamic contact force tracking in uncertain environment[J]. Rob Auton Syst, 2018, 102: 54-65.
- [16] Zhan H, Huang DY, Yang CG. Adaptive dynamic programming enhanced admittance control for robots with environment interaction and actuator saturation[J]. International Journal of Intelligent Robotics and Applications, 2021, 5(5). Doi:10.1007/s41315-020-00159-8.
- [17] Yu XY, Wu JX, Xu CJ, et al. Adaptive human-robot collaboration control based on optimal admittance parameters [J]. Journal of Shanghai University (Science), 2022, 27(5): 589-601.
- [18] Wijayarathne L, Sima Q, Zhou Z, et al. Simultaneous trajectory optimization and force control with soft contact mechanics[C]//2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2020.
- [19] 李孜,黄华,宋鑫,等.一种不确定接触环境下力跟踪的模糊自适应导纳控制器[J].IET控制理论与应用,2021,15(17): 2158-2170.
Li Z, Huang H, Song X, et al. A fuzzy adaptive admittance controller for force tracking in uncertain contact environment[J]. IET Control Theory & Applications, 2021, 15(17): 2158-2170.
- [20] Zhang X, Sun L, Kuang Z, et al. Learning variable impedance control via inverse reinforcement learning for force-related tasks[J]. IEEE Robot Autom Lett, 2021, 6(2): 2225-2232.
- [21] Zeng SW, Hu HG, Xu LH, et al. Nonlinear adaptive PID control for greenhouse environment based on RBF network[J]. Sensors, 2012, 12(5): 5328-5348.
- [22] Yang Z, Peng J, Liu Y. Adaptive neural network force tracking impedance control for uncertain robotic manipulator based on nonlinear velocity observer[J]. Neurocomputing, 2019, 331: 263-280.
- [23] Zhong YC, Wang T, Pu YF, et al. An adaptive bilateral impedance control based on nonlinear disturbance observer for different flexible targets grasping[J]. Comput Electr Eng, 2022, 103: 108388-108400.
- [24] Xu WK. Robotic time-varying force tracking in position-based impedance control[J]. J Dyn Syst-T Asme, 2016, 138(9): 091008.

(编辑:薛泽玲)