

## 基于干扰观测器的双臂手术机器人自适应阻抗控制

李国琪, 胡陟, 陈籽聿, 孙丽岩

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颅颌面软组织手术中由于环境参数变化而无法有效跟踪目标速度和目标位置的问题,以及机械臂系统模型本身存在的未知扰动,提出基于干扰观测器的双臂手术机器人自适应阻抗控制的方法。该方法针对环境参数变化对机械臂产生的干扰进行补偿,自适应地调整阻抗控制模型,提高手术过程中双机械臂的速度及位置跟踪性能,以保证双臂手术机器人在真实的医疗手术场景中能够达到安全性要求。实验结果表明,在变参数的颅颌面手术环境中,该控制策略可较好地克服机械臂本身不确定性和环境参数变化的干扰,位置跟踪优化9.5%,速度跟踪优化13%,双臂位置误差峰值改善60%,双臂位置误差振荡次数减少50%,使得双机械臂更快收敛于期望轨迹,验证该改进控制方法的可靠性。

**【关键词】**手术机器人; 双臂协作; 阻抗控制; 运动跟踪

**【中图分类号】**R318; TP242

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2023)06-0714-06

### Adaptive impedance control of dual-arm surgical robot based on disturbance observer

LI Guoqi, HU Zhi, CHEN Ziyu, SUN Liyan

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

**Abstract:** To overcome the problem that the dual-arm robot cannot effectively track the target speed and target position due to changes in environmental parameters in robot-assisted craniomaxillofacial surgery, and to address the issue of the unknown disturbance in the robotic arm system model itself, a dual-arm surgical robot based on disturbance observer is proposed for adaptive impedance control. The method compensates for the disturbance of the robotic arm caused by changes in environmental parameters, adaptively adjusts the impedance control model, and improves the speed and position tracking performance of the dual-arm robot during the surgery, so as to ensure that the dual-arm robot can meet the safety requirements in the actual surgical scenarios. The experimental results show that in the craniomaxillofacial surgery environment with variable parameters, the control strategy can better overcome the uncertainties of the robotic arm itself and the disturbance of changes in environmental parameters. The optimizations of position tracking and speed tracking reach 9.5% and 13%; the peak position error is reduced by 60%; and the number of oscillations of the position error of the dual arms is decreased by 50%, which makes the dual arms converge to the desired trajectory faster, verifying the reliability of the improved control strategy.

**Keywords:** surgical robot; dual-arm collaboration; impedance control; motion tracking

### 前言

近年来,随着机器人技术快速发展,机器人在医疗领域的应用受到越来越多学者的关注,同时机器人辅

助医疗技术被逐步应用于神经、泌尿、头颈部等领域的临床治疗中。当机械臂与外界环境直接交互时,就需要考虑到机械臂的末端接触力,防止因末端接触力过大对工作环境以及机械臂本身造成伤害。因此机械臂工作时,需要一定的柔顺性。最早由Hogan<sup>[1]</sup>提出的阻抗控制是重要的柔顺控制方法之一,其思想是机器人和外界的交互力与期望的轨迹跟踪误差建立弹簧-阻尼的一种动态系统。人体颅颌面手术过程中会涉及到口腔内部甚至喉部。在具体操作时,首先需要用双臂医疗辅助机器人拉开病人患处软组织,使得病灶更好地暴露在医生的视野里,方便医生执行手术操作。但由

**【收稿日期】**2022-12-05

**【基金项目】**国家重点研发计划(2019YFC0119303);中国博士后基金面上项目(2021M690629)

**【作者简介】**李国琪,硕士在读,研究方向:机器人控制技术, E-mail: 386179976@qq.com

**【通信作者】**胡陟,讲师,硕士生导师,研究方向:虚拟力反馈控制, E-mail: huzhi26@126.com

于人体颅颌面构造复杂,手术过程会涉及到病人软组织、骨组织。如果控制不好,就可能会对手术对象造成损伤。同时由于每个病人在个体上存在差异,机械臂工作的环境参数通常不是一个固定值。由于机械臂作为一类高度非线性系统,具有强耦合、时变等特点,具有较强的不确定性,这些都导致其轨迹控制精度与稳定性较差。因此在医疗手术辅助环境中,机械臂对控制系统的鲁棒性和抗干扰性提出了更高的要求。针对该问题,张子建<sup>[2]</sup>提出双臂机器人同步阻抗控制的方法,利用双臂机器人阻抗控制器实现双臂末端的同步位姿误差、力误差,这样保证了双臂末端位置的同步性和力同步性,但同步补偿误差系数是通过手动来调节,缺乏通用性。李德昀等<sup>[3]</sup>针对双机械臂协作搬运目标物体任务,提出基于时间延时结合自适应模糊滑模控制的算法,实现搬运目标物体时双臂的末端轨迹控制以及接触力控制,但双臂动力学模型不够完善,没有考虑到机械臂自身的影响。Hu等<sup>[4]</sup>对石板安装机器人采用基于力/位置控制的自适应阻抗跟踪控制器,能够以高精度的方式完成任务,但未考虑阻抗模型刚度和阻尼系数同步变化的情况。张刚等<sup>[5]</sup>为了使机器人适应外界环境,对机器人末端阻抗模型参数进行在线调整,实现了对柔性机器人的柔顺控制。Bai等<sup>[6]</sup>针对非线性不确定系统,基于非线性扰动观测器,提出一种自适应反步滑模控制算法,减少控制器的输出,削弱机器人在闭环路径上的抖动,提高机器人系统的控制性能。Wang等<sup>[7]</sup>设计一种多边滑模阻抗控制器,将其应用于微创手术中,保证机械手高精度运动的稳定性,但没有考虑到环境参数变化对机械臂的影响。Song等<sup>[8]</sup>针对双臂协同磨削抛光机器人采用基于动态自适应阻抗控制器,对内外里进行控制,通过力跟踪误差补偿阻抗模型,实现了不确定环境中双臂协作机器人能有良好的力跟踪。

对于具有变刚度自适应律的目标,改善不同环境作用下的轨迹跟踪性能,在现有的文献中,具有可变刚度的控制在单机械臂中得到广泛应用,而在双臂手术协作机器人的应用中却鲜有研究<sup>[9-10]</sup>。本文提出一种基于干扰观测器的双机械臂自适应阻抗控制器,由干扰观测器、阻抗控制器、自适应律的控制策略组成,运用于双臂颅颌面辅助手术机器人,利用Matlab/Simulink工具,进行仿真实验,仿真结果验证了所提控制方法的有效性。

## 1 干扰观测器的设计与分析

### 1.1 机械臂动力学模型

对于 $n$ 关节串联型刚性机械臂,根据拉格朗日方程得到其动力学表达式:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) = \mathbf{u} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}} \in R^n$ 为机械臂关节角度、角速度以及角加速度; $\mathbf{M}(\mathbf{q}) \in R^{n \times n}$ 为正定惯性矩阵; $\mathbf{C}(\dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} \in R^{n \times n}$ 为离心力和哥氏力相关矩阵; $\mathbf{G}(\mathbf{q}) \in R^n$ 为机械臂的重力矩阵; $\mathbf{u} \in R^n$ 为关节控制输入力矩。

在实际应用中,由于机械臂的参数仅部分已知,且未建模动态以及人体颅颌面环境参数不确定性的影响,完整的机械臂动力学模型可以表示为<sup>[11-12]</sup>:

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}(\dot{\mathbf{q}})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{G}(\mathbf{q}) = \mathbf{u} + \mathbf{F} + \mathbf{d}(t) \quad (2)$$

其中, $\mathbf{F}$ 表示模型误差,其中包含参数的不确定性和机械臂模型的误差; $\mathbf{d}(t)$ 表示人体颅颌面手术环境参数的不确定性扰动。其中 $\mathbf{F}$ 和 $\mathbf{d}(t)$ 连续有界且缓慢变化,即有 $\mathbf{F} \approx 0, \mathbf{d}(t) \approx 0$ 。令 $x_1 = \mathbf{q}, x_2 = \dot{\mathbf{q}}$ ,则系统模型的状态空间表达式为:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \mathbf{M}^{-1}(x_1) \left[ \mathbf{u} + \mathbf{F} + \mathbf{d}(t) - \mathbf{C}(x_1, x_2)x_2 - \mathbf{G} \right] \\ y &= x_1 \end{aligned} \quad (3)$$

式中, $y$ 为系统输出。期望的目标阻抗关系,可以用下列方程表示:

$$\mathbf{M}_d(\ddot{q} - \ddot{q}_d) + \mathbf{B}_d(\dot{q} - \dot{q}_d) + \mathbf{K}_d(q - q_d) = \tau_e \quad (4)$$

其中, $\mathbf{M}_d, \mathbf{B}_d, \mathbf{K}_d$ 分别表示目标阻抗模型中的期望惯性矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵, $q_d, \dot{q}_d, \ddot{q}_d$ 分别表示机械臂的期望角度、期望角速度以及期望角加速度。

### 1.2 干扰观测器的设计

根据机械臂系统的模型,采用以下形式的干扰观测器:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{d}}(t) &= \boldsymbol{\zeta} + \mathbf{p}(x) \\ \dot{\boldsymbol{\zeta}} &= -\mathbf{L}(x)\boldsymbol{\zeta} - \mathbf{L}(x) \left[ \mathbf{p}(x) + \overline{\mathbf{M}}^{-1}(\mathbf{u} - \mathbf{C}\mathbf{x}_2 - \overline{\mathbf{G}}) + \mathbf{F} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $\hat{\mathbf{d}}(t)$ 为干扰观测量, $\boldsymbol{\zeta}$ 为观测器内部变量, $\mathbf{p}(x)$ 为待定非线性函数, $\mathbf{L}(x)$ 为待定观测增益,同时满足:假设(1):

$$\mathbf{p}(x) = \mathbf{L}(x)x_2 \quad (6)$$

设干扰观测器的观测误差为 $\tilde{\mathbf{d}}(t)$ ,则

$$\tilde{\mathbf{d}}(t) = \mathbf{d}(t) - \hat{\mathbf{d}}(t) \quad (7)$$

根据假设(1),由式(3)~式(5),可得观测器的动态方程为:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{\mathbf{d}}}(t) &= \dot{\mathbf{d}}(t) - \dot{\hat{\mathbf{d}}}(t) = \dot{\mathbf{d}}(t) - \left[ \dot{\boldsymbol{\zeta}} + \mathbf{L}(x)\dot{x}_2 \right] \\ &= \mathbf{L}(x)\dot{\mathbf{d}}(t) - \mathbf{L}(x)\mathbf{d}(t) = -\mathbf{L}(x)\tilde{\mathbf{d}}(t) \end{aligned} \quad (8)$$

定义 Lyapunov 函数:  $V_d = \frac{1}{2} \tilde{d}^T \tilde{d}$ , 则有:

$$\dot{V}_d = \tilde{d}^T \dot{\tilde{d}} = -\tilde{d}^T L(x) \tilde{d} \quad (9)$$

由该式可知,选择合适的  $L(x)$ ,观测器的误差可以按照指数收敛<sup>[13-14]</sup>。

引入干扰观测器后,干扰的观测量可以当作输

入通道的控制量,则系统的干扰相由原本的  $d(t)$  转化为  $d(t) - \hat{d}(t)$ , 即  $\tilde{d}(t)$ 。由此可得,系统总干扰减小,原系统可表示为:

$$\ddot{x}_2 = M^{-1}(x_1) \left[ u + F + \tilde{d}(t) - C(x_1, x_2) x_2 - G \right] \quad (10)$$

整个自适应阻抗控制器设计如图1所示。

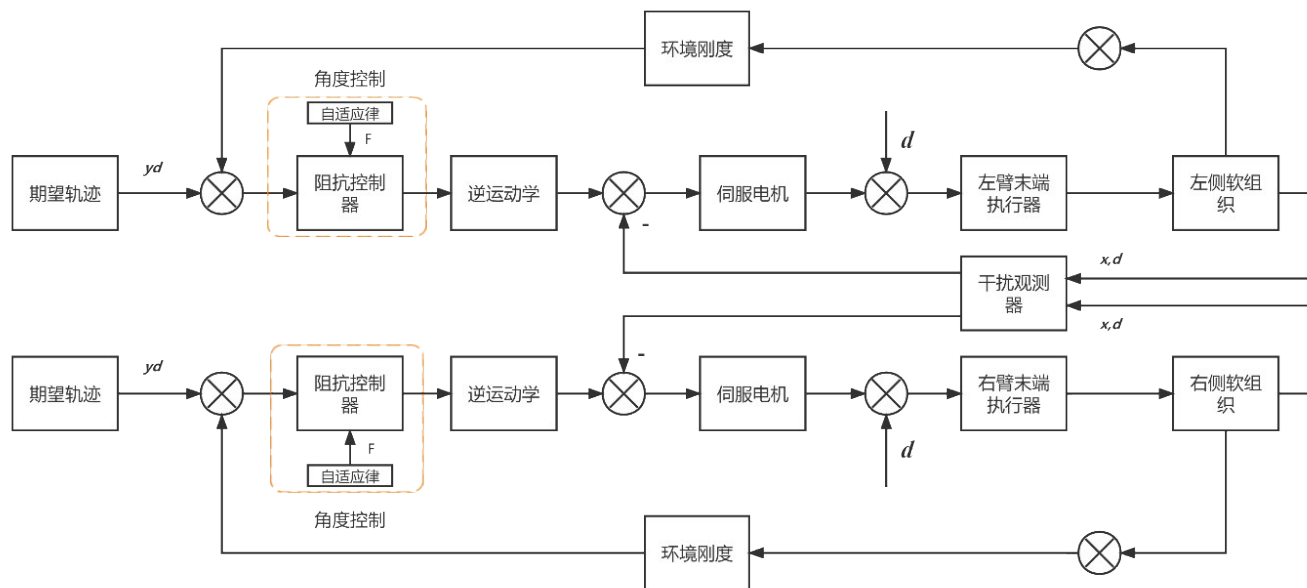


图1 控制系统结构图

Figure 1 Control system structure

## 2 基于干扰观测器的自适应阻抗控制器设计

### 2.1 控制器的设计

定义机械臂的关节角度跟踪误差:

$$e_1 = q - q_d \quad (11)$$

辅助信号  $v$  满足以下关系:

$$v = M_d \dot{e}_1 + B_d \dot{e}_1 + K_d e_1 - \tau_c \quad (12)$$

当辅助变量信号  $v$  趋近于0时,目标阻抗关系式成立。定义阻抗误差:

$$\omega = M_d^{-1} v = \dot{e}_1 + M_d^{-1} B_d \dot{e}_1 + M_d^{-1} K_d e_1 - M_d^{-1} \tau_c \quad (13)$$

假设(2):其中期望惯性矩阵  $M_d$ , 阻尼矩阵  $B_d$ , 刚度矩阵  $K_d$  满足条件:  $K_d + M_d^{-1} = M_d^{-1} B_d$ 。且上述3个矩阵是正定对角矩阵,由于人体颅颌面软组织参数不定,即接触面不恒定,机械臂拉钩与环境的接触力  $\tau_c$  不为0但有界<sup>[15-16]</sup>。

对关节角度跟踪误差式求导,可得:

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_1 \\ \dot{e}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M_d^{-1} K_d & -M_d^{-1} B_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ \dot{e}_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -M_d^{-1} \tau_c \end{bmatrix} \quad (14)$$

定义辅助变量  $z, z = \dot{e}_1 + K_d e_1 - \tau_c$ , 则阻抗误差

可以写作:

$$\omega = z + M_d^{-1} \quad (15)$$

由假设(2)可知:  $e_1, \dot{e}_1$  是有界的,故当  $z$  趋近于0,则  $\omega$  也趋近于0,即有  $\omega$  趋近于0,由此可知阻抗关系式成立<sup>[17-18]</sup>。

### 2.2 设计基于干扰观测器的自适应控制器

针对本文双臂手术机器人实验,设计了基于干扰观测器的自适应控制器:

$$\begin{aligned} \tau &= D(q) \left( \ddot{q}_d - K_d \dot{e}_1 \right) + C(q, \dot{q}) \\ &\quad \left( \dot{q}_d - K_d e_1 + \tau_c \right) + \tau_c + \tilde{d} + G(q) - \mu_1 - \\ &\quad \mu_2 \|q\| - \mu_3 \left\| \dot{q} \right\|^2 \end{aligned} \quad (16)$$

定理:当  $\|F\| \leq \mu_1 + \mu_2 \|q\| + \mu_3 \left\| \dot{q} \right\|^2$  和  $\mu_1, \mu_2, \mu_3$  时,该控制器有效<sup>[19-20]</sup>。

证明:选取李雅普诺夫函数:

$$V = \frac{1}{2} z^T D(q) z + \frac{1}{2} e^T e \quad (17)$$

对该函数求导可得:

$$\dot{V} = z^T \left( D(q) \dot{z} + C(q, \dot{q}) z \right) + e^T \dot{e} \quad (18)$$

联合式(16)~式(18)可得:

$$\dot{V} \leq -z^T \left( e + \mu_1 + \mu_2 \|q\| + \mu_3 \left\| \dot{q} \right\|^2 - \|\rho(t)\| \right) z - k_0 e^T e \quad (19)$$

由杨氏不等式可得<sup>[21-22]</sup>:

$$z^T e \leq \frac{1}{2} z^T z + \frac{1}{2} e^T e \quad (20)$$

将上式代入得:

$$\dot{V} \leq -\frac{1}{2} z^T z - \left( \frac{1}{2} + k_0 \right) e^T e - \quad (21)$$

$$\frac{1}{2} z^T \left( \mu_1 + \mu_2 \|q\| + \mu_3 \left\| \dot{q} \right\|^2 - \|\rho(t)\| \right) z$$

由式(21)可得,  $\mu_1 + \mu_2 \|q\| + \mu_3 \left\| \dot{q} \right\|^2 - \|F\|$ , 因此

$\dot{V} \leq 0$ , 系统稳定, 该基于干扰观测器的自适应控制器有效。

### 3 实验设计与结果

#### 3.1 参数设置

为验证本文控制方法的效果, 以人体颅颌面手术的拉伸实验为例, 在 Matlab/Simlink 上进行仿真实验。整个操作流程是医生通过操作电脑来控制机械臂, 机械臂利用拉钩拉伸体颅颌面口腔, 使病灶暴露在医生的视野里, 再进行后续的手术操作<sup>[23-24]</sup>。如图2所示, 搭建由 UR5 机械臂、robotiqFT300 六维力传感器、手术拉钩以及计算机组成的实验平台<sup>[25-26]</sup>。通过人体口腔模型模拟人体颅颌面的拉伸手术场景, 得到力信号数据。

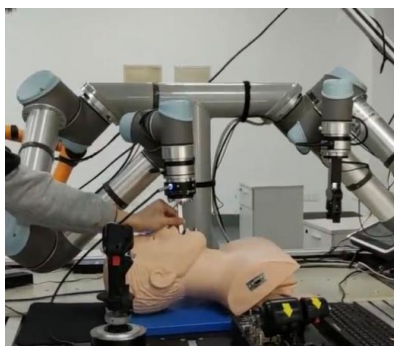


图2 颅颌面手术机器人实验平台  
Figure 2 Robotic experimental platform for craniomaxillofacial surgery

为了避免接触力过大而导致患者颅颌面软组织损伤, 首先进行颅颌面软组织最大承受力阈值实验。由于在整个实验过程中手术的方向只涉及到机械臂的Z轴, 故只需测Z轴方向上力的大小。通过实验测得仿真人体颅颌面软组织随时间变化的受力情况如图3所示。

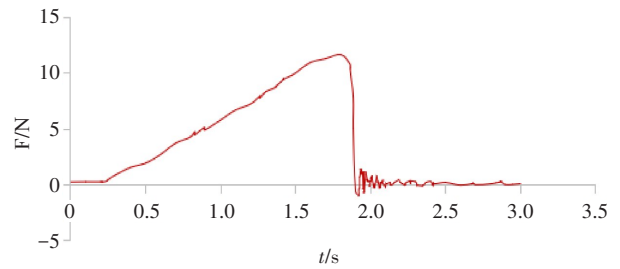


图3 颅颌面软组织拉伸阈值实验图

Figure 3 Experimental measurement of the craniomaxillofacial soft tissue stretching threshold

当 1.8 s 时, 人体颅颌面软组织受力已达顶峰 11.7 N。在 1.86 s 之后, 可以发现人体颅颌面软组织由于拉力过大导致形变已经破裂, 受力骤减。故通过该实验环节得到人体颅颌面软组织受力阈值为 11.7 N。在力轨迹跟踪实验中, 将期望接触力设为  $F=10$  N。

机械臂在拉伸颅颌面软组织时, 只有前两个关节产生运动。故以二关节机械臂为例进行仿真, 计算二关节机械臂与口腔软组织接触产生的末端环境力。与式(1)相对应的机械臂动力学参数设为:

$$D(q) = \begin{bmatrix} 2.5 + m_1 \cos q_2 & 0.93 + l_2 \sin q_2 \\ 0.42 + 0.5 m_1 \cos q_2 & 1.62 \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} m_2 \dot{q}_2 \sin q_2 & (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \sin q_2 \\ m_2 \dot{q}_1 \sin q_2 & 0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$G(q) = \begin{bmatrix} m_1 \cos q_1 + m_2 g \cos(q_1 + q_2) \\ m_1 g \cos(q_1 + q_2) \end{bmatrix} \quad (24)$$

动力学建模不确定项  $D(q)$ 、 $C(q, \dot{q})$ 、 $G(q)$  取动力学模型参数的 0.1 倍, 取重力加速度  $g=9.8 \text{ m/s}^2$ , 机械臂长度为  $L_1=1.5 \text{ m}$ ,  $L_2=1.5 \text{ m}$ , 机械臂自身重量为  $m_1=2.5 \text{ kg}$ ,  $m_2=0.8 \text{ kg}$ , 取扰动观测器参数  $k_0=10$ 。设由力传感器测得的机械臂与环境的真实接触力为  $\tau_e = [\sin t, \sin t]^T \text{ N}$ 。系统的不确定性边界参数设置为  $\mu_1=0.6$ ,  $\mu_2=0.3$ ,  $\mu_3=0.2$ , 取扰动值为  $d = 0.3 [\sin(\pi t), \cos(\pi t)]^T$ , 令机械臂关节的期望运动轨迹为  $q_d = [\sin(\pi t), \sin(\pi t)]^T$ , 最后目标阻抗模型的惯性矩阵  $M_d = I$ , 阻尼矩阵  $B_d = 11I$ , 刚度矩阵为  $K_d = 8I$ , 其中刚度矩阵的变化即模拟人体颅颌面软组织参数不齐的变化, 用来验证自适应阻抗控制在环境刚度变化情况下的轨迹跟踪效果。

#### 3.2 仿真结果

根据仿真结果, 图4为阻抗误差示意图, 在 5.18 s 时阻抗误差趋近于稳定, 表示在此时刻之后系统模型受阻抗控制器误差的影响可以忽略。图5为该控制律下



机械双臂拉伸颅颌面的力跟踪效果,且在1.25 s时趋于期望力达到稳定。图6~图7为双臂在无干扰观测器和有干扰观测器两种情况下的位置跟踪,根据图像可得在有干扰观测器情况下的自适应阻抗控制能使机械臂更快收敛到期望位置。图8~图9为双臂在无干扰观测器和有干扰观测器两种情况下的速度跟踪,根据图像可得在优化后的自适应阻抗控制能使机械臂更快收敛到期望速度。图10~图11为优化前后双机械臂的位置误差示意图,根据图像可见优化后的算法使双臂的位置误差更快趋近于零,且在位置误差变成零之后的双臂位置误差更加稳定。由上述实验可知,在环境复杂且参数不定的颅颌面软组织手术环境中,基于干扰观测器的自适应阻抗控制比传统的阻抗控制有着更大的优势以及更好的控制效果。

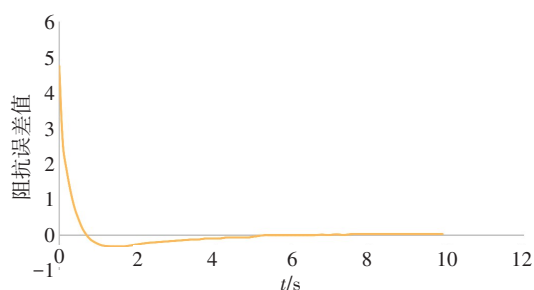


图4 阻抗误差示意图  
Figure 4 Impedance error

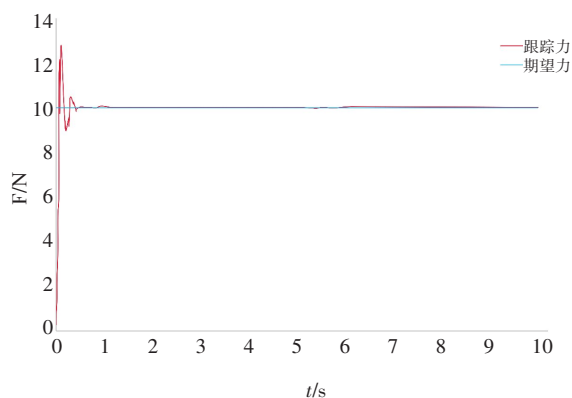


图5 跟踪力与期望力  
Figure 5 Tracking force and desired force

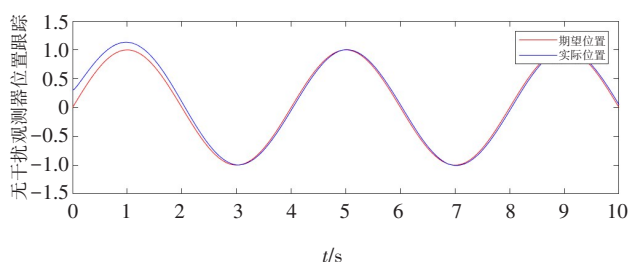


图6 无干扰观测器的位置跟踪图  
Figure 6 Position tracking without disturbance observer

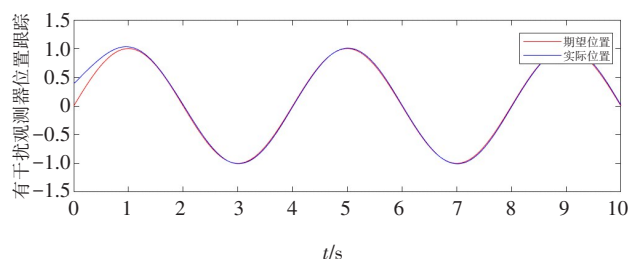


图7 有干扰观测器的位置跟踪图  
Figure 7 Position tracking with disturbance observer

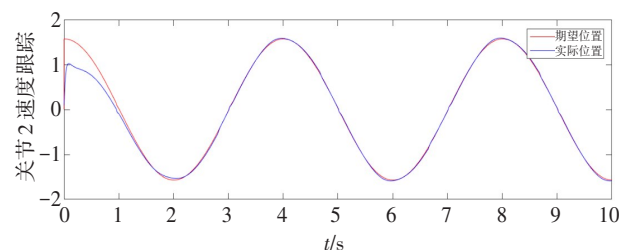


图8 无干扰观测器的速度跟踪图  
Figure 8 Speed tracking without disturbance observer

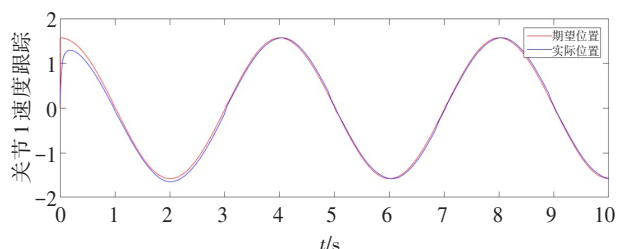


图9 有干扰观测器的速度跟踪图  
Figure 9 Speed tracking with disturbance observer

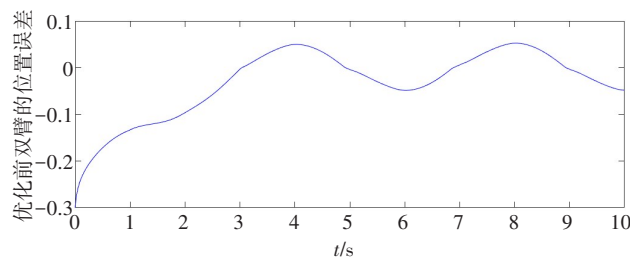


图10 优化前双臂的位置误差示意图  
Figure 10 Position errors of the dual arms before optimization

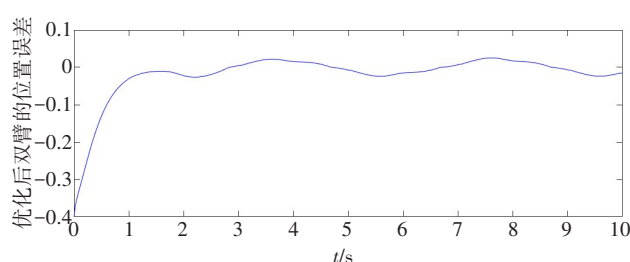


图11 优化后双臂的位置误差示意图  
Figure 11 Position errors of the dual arms after optimization

由表1可知,加入本文设计的控制器后,面向颌面软组织手术的双臂手术机器人在位置跟踪、速度跟踪都有良好的优化效果。其中位置跟踪优化9.5%,机械臂在手术环境中能够更加准确地到达目标位置。速度跟踪优化13%,双臂位置误差峰值优化60%,双臂位置误差振荡次数改善50%,提高双机械臂系统运行的稳定性和安全性。

表1 优化前后效果对比

Table 1 Comparison of performances before and after optimization

优化前/后	位置跟踪	速度跟踪	双臂位置误差峰值	双臂位置误差振荡次数
优化前	3.13 s	1.65 s	0.05°	4
优化后	2.83 s	1.43 s	0.02°	2
改善效果	9.5%	13%	60%	50%

4 结 论

本文针对双臂机器人在辅助颌面软组织手术中由于环境参数变化而无法有效跟踪目标速度和目标位置的问题,提出一种基于干扰观测器的自适应阻抗控制方法。该方法在阻抗控制的基础上加入干扰观测器以及自适应律。首先使用干扰观测器对机械臂的系统不确定和外界干扰进行观测,然后对未观测到的部分进行补偿,从而达到手术过程中机械双臂对期望轨迹地跟踪控制目的,同时保证整个闭环系统的稳定性。仿真结果表明,机械臂在拉伸颌面过程中位置跟踪的改善效果为9.5%,速度跟踪改善效果为13%,双臂误差峰值改善效果为60%,双臂位置误差振荡次数明显减少,改善50%。与传统的阻抗控制对比,本文方法可以比较理想地干扰观测,提高机械臂的运动跟踪性能,控制双臂之间的位置误差,在一定程度上提高整个系统的控制效果以及手术过程中的安全性。本文提出的控制方法是基于机器人与环境的单一方向建立的,针对真实颌面手术的目标点多受力方向问题,还需要进一步的研究。

【参考文献】

[1] Hogan N. Impedance control: an approach to manipulation: part II-implementation[J]. *Dyn Sys Meas Control*, 1985, 107(1): 8-16.

[2] 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.

[3] 李德昀, 徐德刚, 桂卫华, 等. 基于时间延时估计和自适应模糊滑模控制器的双机械臂协同阻抗控制[J]. *控制与决策*, 2021, 36(6): 13-15.

Li DY, Xu DG, Gui WH, et al. Synergistic impedance control of dual manipulators based on time delay estimation and adaptive fuzzy sliding mode controller[J]. *Control and Decision*, 2021, 36(6): 13-15.

[4] Hu H, Cao J. Adaptive variable impedance control of dual-arm robots for slabstone installation[J]. *ISA Trans*, 2021, 23(4): 55-56.

[5] 张刚, 布挺, 焦文涛, 等. 柔性机器人动力学跟踪变阻抗控制[J]. *实验室研究与探索*, 2020, 39(3): 5-8.

Zhang G, Bu T, Jiao WT, et al. Dynamic tracking variable impedance

control of flexible robots[J]. *Laboratory Research and Exploration*, 2020, 39(3): 5-8.

[6] Bai KQ, Gong XT, Chen SH, et al. Sliding mode nonlinear disturbance observer-based adaptive back-stepping control of a humanoid robotic dual manipulator[J]. *Robotica*, 2018, 35(6): 33-38.

[7] Wang T, Sun Z, Song A, et al. Sliding mode impedance control for dual hand master single slave teleoperation systems[J]. *IEEE Trans Intell Transp*, 2021, 65(5): 66-67.

[8] Song X, Mao H, Huang H, et al. A dynamic adaptive impedance controller for force tracking of dual-arm manipulators in uncertain contact environment[C]//2021 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). IEEE, 2021: 1674-1681.

[9] 王琪, 闵华松. 双臂机器人的协调控制算法综述[J]. *计算机工程与应用*, 2021, 57(1): 16-24.

Wang Q, Min HS. Review of coordinated control algorithms for dual-arm robots[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2021, 57(1): 16-24.

[10] Lee KH, Newman WS. Natural admittance control of an electro-hydraulic humanoid robot[C]//IEEE International Conference on Robotics & Biomimetics. IEEE, 2014.

[11] Jin M, Jin Y, Hun P, et al. High-accuracy tracking control of robot manipulators using time delay estimation and terminal sliding mode[J]. *Int J Adv Robot Syst*, 2011, 8(4): 65-78.

[12] 邹思凡, 吴国庆, 茅靖峰, 等. 改进非线性干扰观测器的机械臂自适应反演滑模控制[J]. *计算机应用*, 2018, 38(10): 6-10.

Zou SF, Wu GQ, Mao JF, et al. Adaptive inversion sliding mode control of manipulator with improved nonlinear disturbance observer[J]. *Computer Applications*, 2018, 38(10): 6-10.

[13] 徐国政, 宋爱国, 李会军, 等. 基于模糊逻辑的上肢康复机器人阻抗控制实验研究[J]. *机器人*, 2010, 32(6): 7-14.

Xu GZ, Song AG, Li HJ, et al. Experimental research on impedance control of upper limb rehabilitation robot based on fuzzy logic[J]. *Robotics*, 2010, 32(6): 7-14.

[14] Huang B, Li Z, Wu X, et al. Coordination control of a dual-arm exoskeleton robot using human impedance transfer skills[J]. *IEEE Trans Syst Man Cy-S*, 2017, 49(5): 954-963.

[15] Jiao C, Wei X, Zhao H, et al. Adaptive hybrid impedance control for a dual-arm robot manipulating an unknown object[C]//IECON 2020 -46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. IEEE, 2020.

[16] Li Z, Xu C, Wei Q, et al. Human-inspired control of dual-arm exoskeleton robots with force and impedance adaptation[J]. *IEEE Trans Syst Man Cy-S*, 2018, 50(12): 5296-5305.

[17] Bayram A, Duru AS. Design and control of a rehabilitation robot manipulator for head-neck orthopaedic disorders[J]. *Int J Robot Autom*, 2022, 37(6): 131-138.

[18] 闫飞, 王树波. 基于扰动观测器的机械臂自适应复合控制[J]. *控制工程*, 2022, 56(4): 763-768.

Yan F, Wang SB. Adaptive compound control of robotic manipulator based on disturbance observer[J]. *Control Engineering of China*, 2022, 47(4): 763-768.

[19] 江一鸣. 双臂机器人系统模型辨识及协同控制理论研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.

Jiang YM. Study on model identification and cooperative control of dual-arm robot systems[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.

[20] Gutierrez-Giles A, Evangelista-Hernandez LU, Arteaga MA, et al. A force/motion control approach based on trajectory planning for industrial robots with closed control architecture[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 80728-80740.

[21] Lin L, Sun M, Gao Y, et al. Modeling and clinical application of incision space in facial contour surgery[J]. *J Craniofac Surg*, 2020, 31(2): 377-380.

[22] Wang T, Wang Z, Wu G, et al. Design and analysis of a snake-like surgical robot with continuum joints[C]//2020 5th International Conference on Advanced Robotics and Mechatronics (ICARM). IEEE, 2020: 178-183.

[23] Xu C, Wang Y, Zhou C, et al. Application research of master-slave cranio-maxillofacial surgical robot based on force feedback[J]. *P I Mech Eng H*, 2021, 235(5): 583-596.

[24] Ma Q, Kobayashi E, Suenaga H, et al. Autonomous surgical robot with camera-based markerless navigation for oral and maxillofacial surgery[J]. *IEEE-ASME T Mech*, 2020, 25(2): 1084-1094.

[25] 张海涛, 唐立才, 张敬鹏, 等. 空间机械臂双臂协调操作路径规划算法[J]. *控制工程*, 2015, 22(6): 1028-1033.

Zhang HT, Tang LC, Zhang JP, et al. Research on dual-arm coordinated path planning for space manipulator[J]. *Control Engineering of China*, 2015, 22(6): 1028-1033.

[26] Qu J, Zhang F, Wang Y, et al. Human-like coordination motion learning for a redundant dual-arm robot[J]. *Robot Cim-Int Manuf*, 2019, 57(3): 379-390.

(编辑:陈丽霞)