

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210634

基于阻抗模型的不确定环境下微纳操作力跟踪控制策略研究*

俞子牛, 刘跃跃, 巫亦浩, 樊启高
(江南大学物联网工程学院 无锡 214122)

摘要:微机电系统在生物医学领域具有巨大的应用潜力,以压电陶瓷为基础设计的压电驱动系统在微纳操作高精度控制领域发挥着重要作用。在各领域的实际应用中,微操系统与环境交互一直是研究的热门方向。由于微尺度下跟踪力误差相比宏观尺度下更不可忽略,因此微操作臂与环境接触力的精准控制是提高微操作准确度的关键。为此本文提出一种力跟踪阻抗控制策略,能够在操作过程中实现对接触力的精确跟踪。考虑到阻抗模型对环境参数要求较高,本文提出了扩展卡尔曼滤波器对外部环境参数进行在线估计的方法。实验结果表明,所提控制方法能够成功实现微操作臂-环境交互模型的力跟踪控制并且有良好的跟踪精度,力跟踪平均绝对误差为 7.82 mN,均方根误差为 10.16 mN,因此该方法对不确定性环境下接触力的精确跟踪具有可行性。

关键词:微纳操作;力跟踪;扩展卡尔曼滤波器;阻抗控制

中图分类号: TP273 TH113 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.80

Research on control strategy of micro and nano operating force tracking in uncertain environment based on impedance mode

Yu Ziniu, Liu Yueyue, Wu Yihao, Fan Qigao

(School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: Micro-electro-mechanical system (MEMS) has great potential application in biomedical field. The piezoelectric drive system based on piezoelectric ceramics plays an important role in the field of high-precision control of micro-nano operation. In the practical application of various fields, the interaction between micro system and environment is always a hot research direction. Since the tracking force error at the micro scale is more non-negligible than that at the macro scale, the precise control of the contact force between the micromanipulator and the environment is the key to improve the accuracy of the micro operation. Therefore, a force tracking impedance control strategy is proposed in this article, which can accurately track the contact force during operation. Because the impedance model requires high environmental parameters, an extended Kalman filter is proposed to estimate the external environmental parameters online. Experimental results show that the proposed control method can successfully realize the force tracking control of the micro-manipulator environment interaction model and has good tracking accuracy. The average absolute error of force tracking is 7.82 mN, and the root mean square error is 10.16 mN. Therefore, the method is feasible to accurately track the contact force in uncertain environment.

Keywords: micromanipulator; force tracking; extended Kalman observer; impedance control

0 引言

近年来,生物医学工程与微机电系统在高速发展

中相辅相成^[1],其中微机电系统可实现纳米级别精度的操作,因此在生物医学领域广泛应用^[2]。微纳操作主要应用场景有生物活体注射^[3-4]、细胞注射^[5]、心脏^[6]和耳膜^[7]等软组织切割以及微元件装配等。为

收稿日期:2022-10-27 Received Date: 2022-10-27

* 基金项目:江苏省科研合作项目(2018-178)、111计划(B12018)、江苏省“六大人才高峰”高层次人才项目(GDZB-138)、国家自然科学基金(62203186)项目资助

了完成上述操作,微机电系统与被操作对象灵活、柔顺、安全的交互是研究重点,其中对于接触力的精确跟踪控制是实现微纳操作,以及降低微操中额外损伤的必要条件^[8]。

在微尺度下,难以获取操作者和操作对象之间相互作用力反馈^[9-11]。操作对象更多呈现不规则的形状^[12-14]。应用带有位置反馈和力反馈的控制策略不仅有助于降低操作对象的形变程度、额外损害,也能防止微操作器末端产生偏转,提供了更精确、柔顺、安全的控制。以力反馈为核心的主动型控制成为当下的研究热点之一^[15-16]。常规混合力位控制中^[17-19]需要切换位置和力控制律,因此自由空间运动和受限空间运动频繁的转变会对系统造成影响。文献[20]提出使用传感器融合解耦自由和受限空间运动,文献[21]提出分散自适应混合控制方法。但是微尺度下的微纳操作系统对未知接触环境的顺应性要求更高,力位混合控制忽略了微操作臂与环境之间的动态耦合,而阻抗控制为微操作臂与被操作对象之间提供了一种柔顺交互的方法^[22-23]。

文献[24]提出了一种阻抗导纳结合的控制方案,以在阻抗和导纳控制之间连续切换,但对环境模型要求较高。为解决该问题,文献[25]加入神经网络算法来应对未知环境,文献[26]又在前者基础上结合递推最小二乘环境估计,然而,这些工作虽然提出了创新的方法,却没有包括力跟踪控制并且缺乏验证性实验。文献[27]提出了一种在线调整阻抗和前馈力的方法,通过收集人类示教任务中的运动信息,调整阻抗模型参数,但这个方法不能保证精确轨迹跟踪,特别针对精度要求很高的微操作任务。文献[28]提出了一种无传感条件下最优交互阻抗控制,但更适用于工业机械臂粗放环境。

为实现微操作臂与复杂环境接触交互时力的灵活、柔顺、安全的控制,考虑复杂环境下测量的误差和其他扰动,本文提出了一种基于扩展卡尔曼滤波器的接触力阻抗控制方法,将外部环境与微操作臂交互过程视为阻抗模型,考虑了微操作臂与接触环境的动态耦合。由于阻抗模型对环境参数精度要求较高,通过扩展卡尔曼滤波器获得环境参数和形变轨迹,仿真表明,所使用的EKF滤波器能对未知环境刚度进行估计,实现对期望力的精准跟踪,降低轨迹跟踪误差。最后在Sensapex微纳操作机械臂上验证所用方法的可行性,实验结果表明本文使用的控制方法能够对期望力进行精确跟踪,力误差范围为-12.70~36.97 mN,平均绝对误差为7.82 mN,均方根误差为10.16 mN。轨迹跟踪误差范围在-0.03~0.81 μm 之间,平均绝对误差为0.18 μm ,均方根误差为0.30 μm 。

1 控制模型提出

受控微操作臂与环境的接触运动,总共可分为3个阶段:

1) 自由空间中,机械臂匀速向目标环境移动,此时可看作空载运动。

2) 与环境发生接触后,向期望环境形变目标位置的运动,此时刚发生碰撞,运动呈现非线性。

3) 与环境碰撞后运动至期望形变目标位置后,在目标位置维持较稳定的力,上述第2阶段与第3阶段运动过程是本文研究重点,为了使机械臂与环境接触表现出柔顺性,需要对系统加入力反馈,来跟踪期望接触力。

微操作臂与环境的刚度相匹配是其模型中关键的因素。因此,受控微操作臂只要表现出被动行为,同时由于任务在低频下进行,于是保留了末端执行器刚体属性,在这样的情况下,交互端口耦合的未知环境是相当普遍的。

在未知环境的模型中引入阻尼项,约束其为最坏情况下的柔化模型。考虑到在这种假设下相互作用力在交互端口上摆脱了端口的约束: $f_e = f_r = f$ 。线性 Kelvin-Voigt 接触模型^[29]是最简单的阻抗端口 ($M_E - K_E - D_E$ 模型):

$$\Delta f = K_E \Delta X + D_E \Delta \dot{X} + M_E \Delta \ddot{X} \quad (1)$$

采用对角占优的固有频率 $\omega_e = \sqrt{M_E^{-1} K_E}$ 在柔性交互环境下,在线性解耦阻抗控制的工作频带内工作可能会产生共振。为避免出现不必要的振荡,影响任务的稳定性。在有阻尼的情况下,环境模型的质量可以忽略。据此,环境纯阻抗模型表示为:

$$\sum_{i=1}^n (D_E^i \dot{X}_E^i + K_E^i \Delta X_E^i) = f_e, \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (2)$$

在考虑柔顺接触的情况下,将机械臂与环境均视为弹簧-阻尼模型,一阶弹簧阻尼交互模型如图1所示。

该交互模型具有以下主要优点:

- 1) 模型简单,便于设计观测器进行环境刚度估计。
- 2) 考虑了微操作臂与环境的动态耦合。

但也对环境阻抗模型参数要求较高,因此有必要设计一种在线估计参数的策略。

2 力跟踪控制策略

本文所设计的力跟踪阻抗控制器主要应用在微操作臂与未知环境交互场景中。通过阻抗模型生成微操作臂的参考轨迹,间接控制操作对象的形变。为解决环境模型的不确定性,提出基于阻抗模型的扩展卡尔曼滤波器方法,在不提供持续激励的情况下在线估计环境动态参数。

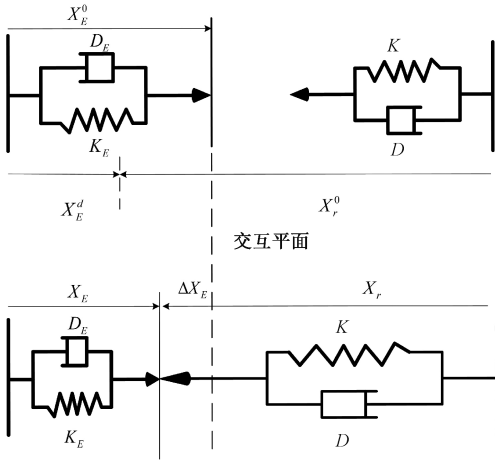


图1 一阶弹簧阻尼机械臂-环境交互模型

Fig. 1 Unidimensional model of spring-damping manipulator-environment interaction model

2.1 力跟踪阻抗控制策略

力跟踪阻抗控制框图如图2所示。参考轨迹 X_{ref} 是阻抗模型的输出,作为控制微操作臂运动的输入, X_r 为机械臂实际运动轨迹,所以两者之间的轨迹误差:

$$\Delta X = X_{ref} - X_r \quad (3)$$

根据第1节的模型所述,环境被建立为一阶阻尼—刚度模型,则环境受力可以表示为:

$$f_e = \hat{K}_E \Delta X_E + \hat{D}_E \dot{\Delta X}_E \quad (4)$$

期望力与实际力的误差可以表示为:

$$\Delta f = f_d - f_e \quad (5)$$

Δf 作为阻抗模型输入, ΔX 作为阻抗模型输出,一阶微分方程表示如下:

$$\Delta f = K \Delta X + D \dot{\Delta X} \quad (6)$$

结合拉氏变换则其一阶传递函数定义为:

$$K(s) = 1/(Ds + K) \quad (7)$$

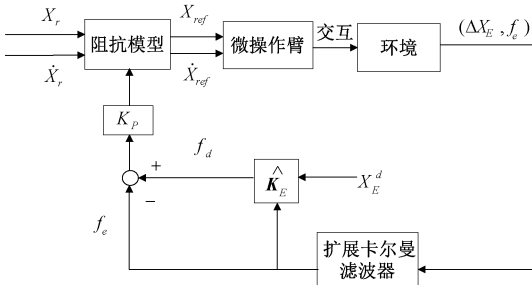


图2 力跟踪阻抗控制

Fig. 2 Deformation-tracking with impedance control

该控制器采用扩展卡尔曼观测器估计环境刚度以估算期望跟踪力。

$$f_d = \hat{K}_E \Delta X_E^d \quad (8)$$

$$X_{ref} = X_E + K_p K^{-1}(f_d - f_e) \quad (9)$$

$$\hat{K}_E = f(\Delta X_E) \quad (10)$$

其中, K_p 为力跟踪误差的比例增益, K 为受控机器人的对角刚度矩阵, f 为作用于环境的力矢量, ΔX_E 为环境的实际形变。结合拉式变换,上述假设,跟踪力误差可表示为:

$$\Delta f = f_d - f_e = f_d - (\hat{K}_E \Delta X_E + \hat{D}_E \dot{\Delta X}_E) = f_d - \hat{K}_E (X_{ref} - K_p K(s)^{-1} \Delta f) - \hat{D}_E \dot{\Delta X}_E \quad (11)$$

将式(6)代入式(10)可得:

$$\Delta f = \frac{Ds + K}{Ds + K - K_e K_p} (f_d - K_e X_{ref} - D_e \dot{X}_e) \quad (12)$$

因此系统稳定时力跟踪误差为:

$$\Delta f_{stab} = \frac{K}{K - K_e K_p} (f_d - K_e X_{ref} - D_e \dot{X}_e) \quad (13)$$

当参考轨迹满足 $X_{ref} = \frac{f_d}{K_e} - \frac{D_e}{K_e} \dot{X}_e$ 时,力跟踪误差将

趋于0,而当 $\frac{D_e}{K_e}$ 比值足够小甚至趋于0时,满足 $X_{ref} = \frac{f_d}{K_e}$ 即可。

基于所设计的模型控制,主要任务空间的阻抗环由机械臂在中/快速率 1~5 ms 下执行,与环境估计同步。事实上,为了通过环境刚度 $\hat{K}_E$ 来定义式(8)中的期望跟踪力,需要使用建立的微操作臂-环境交互模型,而环境刚度 $\hat{K}_E$ 又通过环境的变形和机器人运动学和相互作用力的完整状态来估计。

2.2 EKF 环境观测器

考虑到在一般的交互环境的几何形状未知或部分已知的情况,式(1)中采用的 N 个相互作用点的模型可行性较低。如第1.1节所述,将实验中未知环境简化为具有对角线 $\hat{K}_E$ 和 $\hat{D}_E$ 矩阵的平移集总阻抗模型,以用于EKF动力学。

在接触过程中简化假设: $(x, \dot{x})_d = (x, \dot{x})_e$, 机器人-环境交互由滤波器状态定义,并增加环境属性:

$$\alpha = [\Delta X_E, K_E] \quad (14)$$

将式(14)代入式(4)得到滤波器动力学:

$$f(\alpha, v) = \begin{bmatrix} \dot{\Delta X}_E \\ \dot{K}_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_E^{-1}(-K_E \Delta X_E + f_e + v_{X_E}) \\ v_{K_E} \end{bmatrix} \quad (15)$$

其中, $v = [v_{X_E}, v_{K_E}]^T$ 考虑了模型和参数中的噪声。

因此得到滤波器状态方程如下:

$$\begin{cases} \dot{\hat{\alpha}} = f(\alpha, v) + K_{EKF}(z - H \hat{\alpha}) \\ \dot{\hat{z}} = h(\alpha, w) \end{cases} \quad (16)$$

其中, $\hat{\alpha}$ 是后验估计, K_{EKF} 是增益矩阵:

$$K_{EKF} = P H^T R^{-1} \quad (17)$$

其中, H 为位置和力的观测矩阵, R 为测量噪声矩

阵,协方差矩阵 P 由下式所定义:

$$\dot{P} = AP - PH^T R^{-1} HP + VQV^T + PA^T \quad (18)$$

其中,矩阵 A 和 V 由状态方程和噪声的偏微分方程所确定:

$$A = \left. \frac{\partial h}{\partial \alpha} \right|_{\hat{\alpha}} \quad (19)$$

$$V = \left. \frac{\partial h}{\partial v} \right|_{\hat{\alpha}} \quad (20)$$

用于参数估计的矩阵 Q 定义为:

$$Q = VE \{ v \cdot v^T \} V^T \quad (21)$$

其中, v 是系统噪声。

3 数值仿真

本文先采用数据仿真对算法进行验证,假设接触的是一个刚性较大,不易产生塑性形变的未知环境,通讯周期设定 1 ms,在接触过程中简化假设: $X_r = \Delta X_E$, 认为机器人实际到达轨迹便是环境形变轨迹。设定环境刚度为 $K_e = 30 \text{ mN}/\mu\text{m}$, $D_e = 0.03$,期望形变轨迹为 $X_E^d = 50 \mu\text{m}$,因此期望跟踪力应为 $f^d = 1500 \text{ mN}$ 。阻抗模型刚度和阻尼分别是 $K = 50, D = 0.05$,比例增益 $K_p = 0.1$ 。

首先进行定阻抗下力跟踪仿真,设定恒定刚度 $K_e = 35$,其他条件相同情况下,不使用 EKF 滤波器对刚度进行在线估计,实验结果如图 3(其中 f_e 是实际受力, f_d 是期望跟踪力)和图 4(其中 x_d 是期望轨迹, x_m 是实际轨迹, x_r 是参考轨迹)所示。在跟踪到期望力的情况下,由于设定的恒定刚度与环境实际刚度相差较大,故生成的参考轨迹和期望轨迹误差较大。

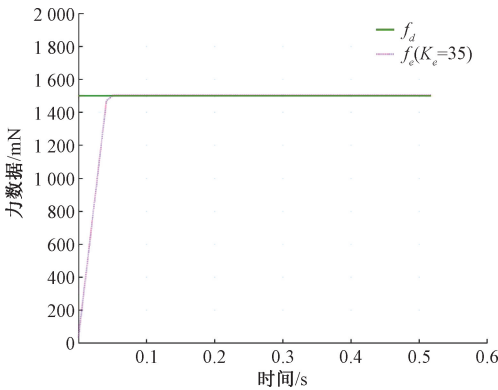


图3 定刚度力跟踪仿真结果

Fig. 3 Simulation results of force tracking with constant stiffness

接下来进行在线估计刚度方式的力跟踪仿真。设定初始刚度 $K_e = 35$,其他条件相同情况下,使用 EKF 进行滤波,力跟踪误差如图 5 所示,其中 f_e 是实际受力, f_d 是期望跟踪力,力跟踪误差会跟随刚度估计和参考轨迹的变化而变化,但是收敛在 1500 mN 左右。

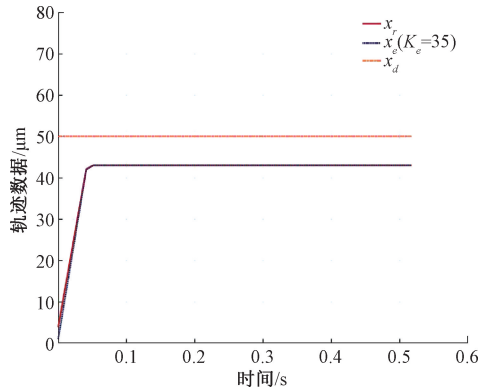


图4 定刚度轨迹误差仿真结果

Fig. 4 Simulation results of trajectory error with fixed stiffness

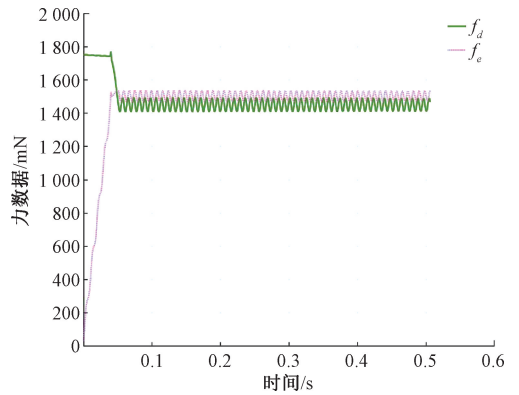


图5 力跟踪仿真结果

Fig. 5 Force tracking simulation results

图 6 展示了轨迹误差仿真结果,其中 x_d 是期望轨迹, x_m 是实际轨迹, x_r 是参考轨迹,参考轨迹经过控制器计算会同步于实际轨迹。

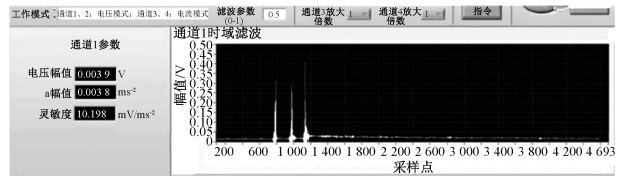


图6 轨迹误差仿真结果

Fig. 6 Trajectory error simulation results

图 7 展示了刚度估计仿真结果,由于假设的环境刚度为 30 mN/um,环境刚度由阻抗关系经过 EKF 滤波器计算收敛在 28~30 mN/um 之间,也因此使得参考轨迹会略微大于期望轨迹。

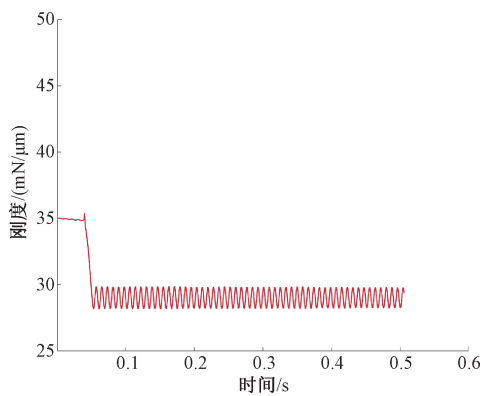


图 7 刚度估计仿真结果

Fig. 7 Stiffness estimation simulation results

由上面的仿真结果可以得出,控制器能对期望力进行跟踪,EKF 滤波器能对未知环境的刚度进行估计,并且降低参考轨迹相对于期望轨迹的误差,计算出的刚度越准确,误差越小。

4 实验分析

在以压电陶瓷为驱动的微纳操作实验平台进行力跟踪控制策略的验证实验,实验平台如图 8 所示。微纳操作平台由 Sensapex 三轴平移型微操作臂,力传感器,上位机组成。Sensapex 微操作臂工作空间大小为 20 mm×20 mm×20 mm,与上位机的通讯方式是 TCP 通讯,通过上位机发送指令,可分别在 X,Y,Z 轴平移运动,并且为定步长型运动方式,最小步长为 0.1 μm,可完成微米级别位置运动速度在 1~4 000 μm/s 之间可调。传感器与上位机之间通过 RS485 通信总线进行通讯,传感器的最小测量精度为 10 mN。将传感器与探针连接作为 Sensapex 三轴平移型微操作臂的末端执行器进行力测量。

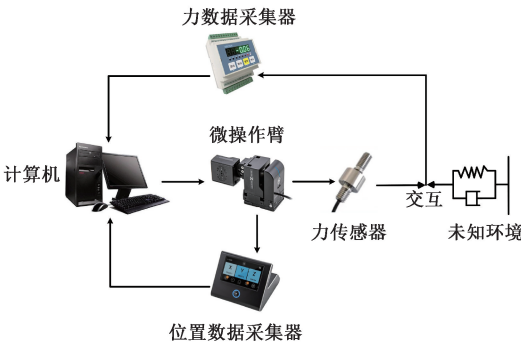


图 8 微纳操作实验平台

Fig. 8 Micro-nano operation experimental platform

机械臂力跟踪控制的步骤一般为:在平移的方向上设置一个期望终点运动位置,也就是期望的环境阻抗模型形变。运动过程分为 3 部分自由空间中机械臂匀速向目标环境移动,此时可看作空载运动。与环境发生接触后,向期望环境形变目标位置的运动,与环境碰撞后运动至期望形变目标位置后,在目标位置维持较稳定的力。目标是在形变过程中实现力跟踪。

实验 1 如图 9 所示,选用聚丙烯材料作为参考环境。机械臂沿 X 轴方向水平移动,在自由空间中,以 3 μm 的步长,1 000 μm/s 的速度运动,接收到力信号数据后,以 1 μm 的步长,0~1 000 μm/s 近似为一个连续的变速运动。在系统稳定时期,步长根据轨迹误差确定,速度维持 -1 000~1 000 μm/s 之间。阻抗模型初始参数设计: $K = 50, D = 0.05, K_p = 0.1$, 环境初始参数 v 基量是 $[100, 0.005]^T, R = [1\ 000], X_E^d = 30$ 。

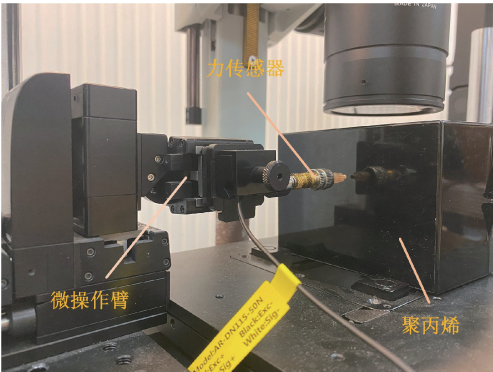


图 9 力跟踪控制实验(聚丙烯材料)

Fig. 9 Force tracking control experiment (polypropylene material)

图 10 展示了轨迹误差跟踪效果。图 11 为期望力与测量力之间的误差跟踪效果,误差范围、平均绝对误差及均方根误差如表 1 所示。

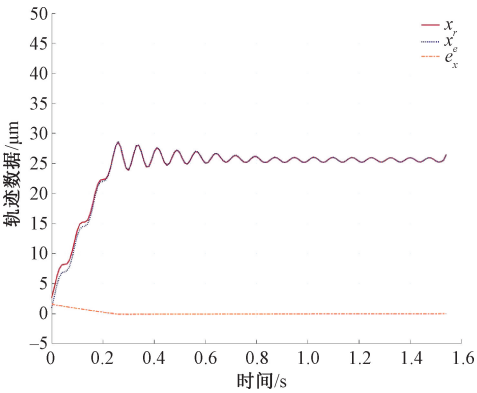


图 10 实验 1 轨迹跟踪误差

Fig. 10 Experiment 1 of path tracking error

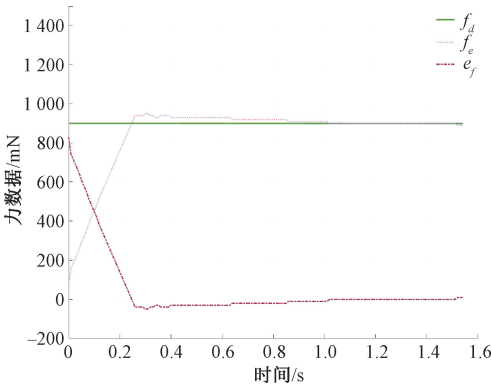


图 11 实验 1 力跟踪误差

Fig. 11 Experiment 1 of force tracking error

表 1 实验 1 力跟踪误差数据

Table 1 Experiment 1 error data of tracking

实验 1	误差参数	期望力跟踪 误差/mN	轨迹跟踪 误差/ μm
第 1 组	稳定误差范围	-50.07~9.19	-0.14~1.66
	稳定平均绝对误差	15.16	0.14
	稳定均方根误差	20.75	0.27
第 2 组	稳定误差范围	-35.12~20.36	-0.13~1.64
	稳定平均绝对误差	14.11	0.13
	稳定均方根误差	18.52	0.25
第 3 组	稳定误差范围	-48.27~10.06	-0.14~1.65
	稳定平均绝对误差	14.98	0.14
	稳定均方根误差	20.01	0.26
平均值	稳定误差范围	-44.49~13.20	-0.14~1.65
	稳定平均绝对误差	14.75	0.14
	稳定均方根误差	19.76	0.26

根据图 10 可得,参考轨迹跟踪期望轨迹接触但未到达稳定时有轻微波动,跟踪效果良好,稳定时有一个明显的收敛过程,为了使实验更具有统计意义,进行了多组实验,实验一结果陈列在表 1,实验组平均轨迹跟踪误差范围在-0.14~1.65 μm 之间,平均绝对误差为 0.14 μm ,均方根误差为 0.26 μm ,实现了 μm 级别的跟踪精度,轨迹跟踪在稳态时出现上下波动的原因,主要是因为力跟踪误差趋于 0 时,并且 $\frac{D_e}{K_e}$ 比值足够小趋于 0 时,参考轨迹 $X_r = \frac{f_d}{K_e}$, X_r 的值将由刚度估计值 K_e 确定,由于系统固有误差和测量误差,上位机发出的指令在执行器上实现的延迟性,在滤波过程中都会对结果产生影响,无法得到环境的刚度真值,通过滤波器得到的估计值 K_e 是范围内收

敛的,则参考轨迹 X_r 会产生上下波动。由图 11 可得,微操作臂施加力 f_r 能较好的跟踪环境期望力 f_d ,说明计算出的参考环境刚度能较好的优化模型,由表 1 可得实验组平均误差范围在-44.49~13.20 mN 之间,平均绝对误差为 14.75 mN,均方根误差为 19.76 mN,力跟踪误差相对于期望力的百分比为-4.94%~1.47%。

实验 2 如图 12 所示,选用相对聚丙烯刚度较小的聚氯乙烯复合材料作为参考环境,由于刚性较低的缘故易发生形变,机械臂沿 X 轴方向水平移动,在自由空间中,以 60 μm 的步长,3 000 $\mu\text{m}/\text{s}$ 的速度运动,接收到力信号数据后,以 10 μm 的步长,0~3 000 $\mu\text{m}/\text{s}$ 近似为一个连续的变速运动。在系统稳定时期,步长根据轨迹误差确定,速度维持-3 000~3 000 $\mu\text{m}/\text{s}$ 之间。阻抗模型初始参数设计: $K = 50, D = 0.05, K_p = 0.1$,环境初始参数: v 基标量是 $[30, 0.000\ 5]^T, R = [10\ 000]$,期望轨迹 $X_E^d = 900$ 。

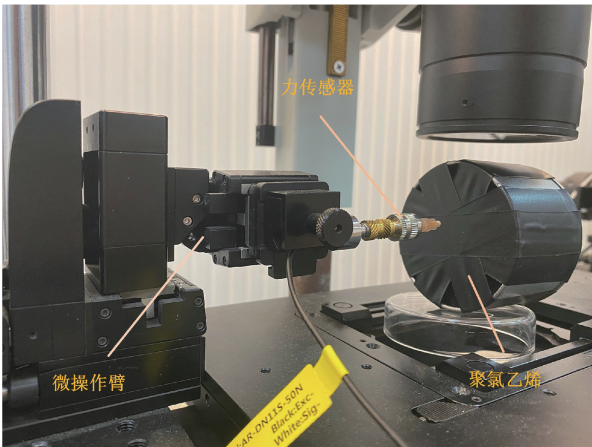


图 12 力跟踪控制实验(聚氯乙烯复合材料)

Fig. 12 Force tracking control experiment (PVC composite)

根据图 13 可得,参考轨迹跟踪期望轨迹在接触但未到达稳定时有轻微波动,跟踪效果良好,稳定时有一个明显的收敛过程,但是相对于实验 1,收敛过程更长。为了使实验具有统计意义,也进行了多组实验结果如表 2 所示,实验 2 平均轨迹跟踪误差范围在-0.03~0.81 μm 之间,平均绝对误差为 0.18 μm ,均方根误差为 0.30 μm ,实现了 μm 级别的跟踪精度,稳态时出现波动的原因和实验 1 相同,且因为步程大的原因,稳定误差范围小于实验 1,由图 14 可得,机械臂施加力 f_r 能较好的跟踪环境期望力 f_d ,说明计算出的参考环境刚度能较好的优化模型,由表 2 可知误差范围在-12.70~36.97 mN 之间,平均绝对误差为 7.82 mN,均方根误差为 10.16 mN,力跟踪误差相对于期望力的百分比为-2.80%~8.22%。相较于实验一跟踪误差略大,控制效果良好。

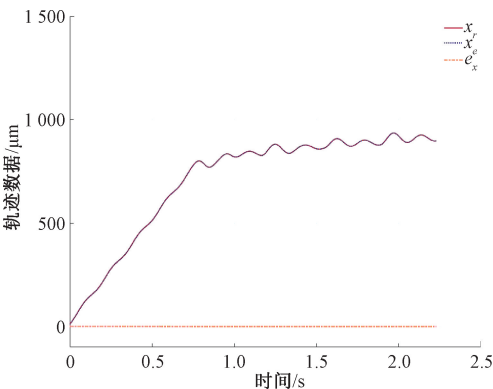


图 13 实验 2 轨迹跟踪误差

Fig. 13 Experiment 2 of path tracking error

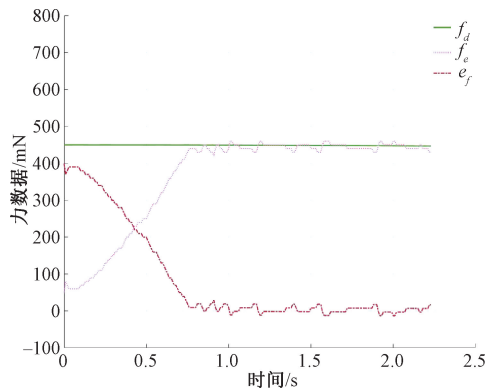


图 14 实验 2 力跟踪误差

Fig. 14 Experiment 2 of force tracking error

表 2 实验 2 力跟踪误差数据

Table 2 Experiment 2 error data of tracking

实验 2	误差参数	期望力跟踪 误差/mN	轨迹跟踪 误差/μm
第 1 组	稳定误差范围	-12.63~36.92	-0.03~0.80
	稳定平均绝对误差	7.85	0.18
	稳定均方根误差	10.17	0.31
第 2 组	稳定误差范围	-13.12~36.16	-0.03~0.80
	稳定平均绝对误差	7.62	0.18
	稳定均方根误差	10.02	0.30
第 3 组	稳定误差范围	-12.37~37.83	-0.04~0.82
	稳定平均绝对误差	7.99	0.19
	稳定均方根误差	10.29	0.30
平均值	稳定误差范围	-12.70~36.97	-0.03~0.81
	稳定平均绝对误差	7.82	0.18
	稳定均方根误差	10.16	0.30

综上所述,在具有不同参数的复杂环境下,本文所提出基于 EKF 的阻抗控制方法能够成功实现微机械臂-环境交互的力跟踪控制。

5 结 论

本文提出了一种基于阻抗模型的不确定环境下微纳操作力跟踪控制策略。首先建立微纳操作机械臂与外部环境交互模型,考虑到模型对环境参数要求较高,因此使用扩展卡尔曼滤波器对环境参数进行在线估计。通过仿真验证了控制策略的可行性。同时设计了环境刚度不同的两种实验,结果表明,本文所提控制方法能够实现机械臂-环境交互模型的力跟踪控制并且具有良好的跟踪精度,为未知环境下的微纳操作力跟踪控制提供了一种可靠的解决方案。后续工作中,将改进定阻抗模型,能更准确反应接触时的动态物理特性,并且将考虑在约束空间中的运动控制。

参考文献

[1] 冯 朝. 压电驱动系统的位置/接触力精密跟踪控制方法研究[D]. 武汉:武汉大学, 2020.
FENG ZH. Research on position/contact force precision tracking control method of piezoelectric drive system[D]. Wuhan: Wuhan University, 2020.

[2] ZHANG W, LI H, CUI L, et al. Research progress and development trend of surgical robot and surgical instrument arm[J]. The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery, 2021, 17(5): e2309.

[3] CHI Z, XU Q, AI N, et al. Design and development of an automatic microinjection system for high-throughput injection of zebrafish larvae[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2021, 19(4): 3409-3418.

[4] 樊启高, 赵然, 时帅, 等. 面向显微操作的生物自动化捕捉系统研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(2): 264-272.
FAN Q G, ZHAO R, SHI SH, et al. Research on biological automatic capture system for micromanipulation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(2): 264-272.

[5] CHI Z, XU Q, ZHU L. A review of recent advances in robotic cell microinjection[J]. IEEE Access, 2020, 8: 8520-8532.

[6] ARJUN B S, PAL U, PANDYA H J. Design and analysis of MEMS-based sensors toward measuring

- catheter contact forces[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(13): 13451-13461.
- [7] FENG Z, LIANG W, LING J, et al. Precision force tracking control of a surgical device interacting with a deformable membrane[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2022, 27(6): 5327-5338.
- [8] ZHOU M, YU Q, HUANG K, et al. Towards robotic-assisted subretinal injection: A hybrid parallel-serial robot system design and preliminary evaluation[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 67(8): 6617-6628.
- [9] 贾林,王耀南,何静,等. 自由曲面打磨机器人非奇异终端滑模阻抗控制[J]. *电子测量与仪器学报*, 2020, 34(5): 89-96.
- JIA L, WANG Y N, HE J, et al. Non-singular terminal sliding mode impedance control of free-form surf grinding robot [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2020, 34(5): 89-96.
- [10] LAU J Y, LIANG W, TAN K K. Motion control for piezoelectric-actuator-based surgical device using neural network and extended state observer [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 67(1): 402-412.
- [11] VO C P, AHN K K. An adaptive finite-time force-sensorless tracking control scheme for pneumatic muscle actuators by an optimal force estimation[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2021, 7(2): 1542-1549.
- [12] WIJAYARATHNE L, HAMMOND F L. Identification of compliant contact parameters and admittance force modulation on a non-stationary compliant surface[C]. 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), IEEE, 2020: 6826-6832.
- [13] SHI W, WANG K, ZHAO C, et al. Compliant control of dual-arm robot in an unknown environment[C]. 2022 7th International Conference on Control and Robotics Engineering (ICCRE), IEEE, 2022: 5-9.
- [14] COEVOET E, ADAGOLODJO Y, LIN M, et al. Planning of soft-rigid hybrid arms in contact with compliant environment: Application to the transrectal biopsy of the prostate [J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2022, 7(2): 4853-4860.
- [15] KERMANI M R, PATEL R V, MOALLEM M. Friction identification and compensation in robotic manipulators[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2007(56): 2346-2353.
- [16] ZENG G, HEMAMI A. An overview of robot force control[J]. *Robotica*, 1997(15): 473-482.
- [17] WEBER M, PATEL K, MA O, et al. Identification of contact dynamics model parameters from constrained robotic operations [J]. *Proceedings of the ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, Montreal, Canada, ASME, 2002, 128(2): 307-318.
- [18] RAIBERT M H, CRAIG J J. Hybrid position/force control of manipulators [J]. *ASME J. Dyn. Syst. Meas. Control*, 1981, 2(103): 126-133.
- [19] KHATIB O. A unified approach for motion and force control of robot manipulators: The operational space formulation[J]. *IEEE J. Robot. Autom.*, 1987, 1(3): 43-53.
- [20] XIAO D, GHOSH B K, XI N, et al. Sensor-based hybrid position/force control of a robot manipulator in an uncalibrated environment [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2000, 4(8): 635-645.
- [21] GUEAIEB W, KARRAY F, AL-SHARHAN S. A robust hybrid intelligent position/force control scheme for cooperative manipulators[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2007, 2(12): 109-125.
- [22] PICCIN O, BARBÉ L, BAYLE B, et al. A force feedback teleoperated needle insertion device for percutaneous procedures[J]. *The International Journal of Robotics Research*, 2009(28): 1154-1168.
- [23] 周杰,荣伟彬,许金鹏,等. 基于 SEM 的微纳遥操作系统控制策略研究[J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(11): 2448-2457.
- ZHOU J, RONG W B, XU J P, et al. Research on the control strategy of SEM based micro/nano tele-operation system [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(11): 2448-2457.
- [24] OTT C, MUKHERJEE R, NAKAMURA Y. Unified impedance and admittance control [J]. 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE, 2010: 554-561.
- [25] CAVENAGO F, VOLI L, MASSARI M. Adaptive hybrid system framework for unified impedance and admittance

- control[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2018, 91: 569-581.
- [26] MEI C, YUAN J, GUAN R. Adaptive unified impedance and admittance control using online environment estimation[C]. 2018 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), IEEE, 2018: 1864-1869.
- [27] ZENG C, LI Y, GUO J, et al. A unified parametric representation for robotic compliant skills with adaptation of impedance and force[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2021, 27(2): 623-633.
- [28] ROVEDA L, SHAHID A A, IANNACCI N, et al. Sensorless optimal interaction control exploiting environment stiffness estimation[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2021, 30(1): 218-233.
- [29] TECSE A, ROMERO S E, ROMERO C, et al. Mechanical validation of viscoelastic parameters for different interface pressures using the Kelvin-Voigt fractional derivative model [C]. 2022 44th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC), IEEE, 2022: 1512-1515.

作者简介



俞子牛, 2019 年于湖南大学获得学士学位, 现为江南大学硕士研究生, 主要研究方向为机器人技术、生物医疗技术。

E-mail: 6201920014@stu.jiangnan.edu.cn

Yu Ziniu received his B.Sc. degree from Hunan University in 2019. He is currently a master student at Jiangnan University. His main research interests include robotics and biomedical technology.



樊启高(通信作者), 2008 年于中国矿业大学获得学士学位, 2013 年于中国矿业大学获得博士学位, 现为江南大学教授, 主要研究方向为机器人技术、智能传感器和物联网技术。

E-mail: qgf@jiangnan.edu.cn

Fan Qigao (Corresponding author) received his B.Sc. degree and Ph.D. degree both from China University of Mining and Technology in 2008 and 2013, respectively. He is currently an associate professor at Jiangnan University. His main research interests include robotics, intelligent sensors and IoT technology.