

基于改进 Stribeck 摩擦模型的力反馈手柄力估计策略

赵泽仁¹ 倪涛¹ 杨凯强¹ 冀雯晶¹ 梁靖新¹ 赵亚辉¹ 张红彦²

(1. 燕山大学车辆与能源学院, 秦皇岛 066000; 2. 吉林大学机械与航空航天工程学院, 长春 130022)

摘要: 传统力反馈手柄在实现与人交互过程中, 依赖于力传感器测量操作力。而力传感器安装会大大增加操纵负担, 造成力反馈手柄制造成本上升。为减轻使用者操纵负担并降低制造成本, 本文基于二自由度力反馈手柄, 提出了一种基于改进 Stribeck 摩擦模型的力反馈手柄力估计策略。通过建立的模型描述手柄动力学, 采用改进 Stribeck 模型表征手柄动力学模型中非线性摩擦, 并对传统 Stribeck 摩擦模型进行分析, 对摩擦力在速度正负切换过零点时产生突变的问题进行改进, 进而分析改进 Stribeck 摩擦模型。针对手柄系统特性, 设计实验以辨识模型方程参数, 通过最小二乘法对系统重力、摩擦参数进行曲线拟合, 以确定相应参数。基于辨识得到的参数对手柄末端力进行估计。实验结果表明, 估计的力与实际数据基本一致, 验证了所提出的操纵力估计策略的准确性。

关键词: 改进 Stribeck 摩擦模型; 参数辨识; 力估计

中图分类号: TP182

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2026)10-0420-07

OSID:



Force Estimation Strategy for Force Feedback Joystick Based on Improved Stribeck Friction Model

ZHAO Zeren¹ NI Tao¹ YANG Kaiqiang¹ JI Wenjing¹ LIANG Jingxin¹ ZHAO Yahui¹ ZHANG Hongyan²

(1. School of Vehicle and Energy, Yanshan University, Qinhuangdao 066000, China

2. School of Mechanical and Aerospace Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: In the process of traditional force feedback joystick interacting with people, force sensors are relied on to measure the operating force. However, installing force sensors significantly increases the user's operational burden and raises the manufacturing cost of the force feedback handle. To alleviate the user's operational burden and reduce manufacturing costs, a force estimation strategy was proposed for a two-degree-of-freedom force feedback joystick based on an improved Stribeck friction model. A model was established to describe the handle's dynamics. The improved Stribeck model was used to characterize the nonlinear friction in the joystick's dynamics model. The traditional Stribeck friction model was analyzed, and improvements were made to address the problem of abrupt changes in frictional force when the velocity switched between positive and negative zero points. Experiments were designed to identify the parameters in the model equations, considering the characteristics of the joystick system. The least squares method was used to fit curves of the system's gravity and friction parameters to determine the corresponding parameters. Based on the identified parameters, the force at the joystick's end was estimated. Experimental results showed that the estimated force was basically consistent with the actual data, verifying the accuracy of the proposed force estimation strategy.

Key words: improved Stribeck friction model; parameters identification; force estimation

0 引言

力反馈手柄不仅在游戏中广泛应用, 还在模拟

训练、医疗教育、农业机械操纵等多个人机交互领域展现出独特的价值^[1-3]。通过将虚拟或者远端环境中交互转化为可感知信息, 使用户能够在远程操纵

收稿日期: 2024-12-20 修回日期: 2025-01-13

基金项目: 河北省重点研发计划项目(21351802D)和创新研究群体延续项目(E2024203257)

作者简介: 赵泽仁(1998—), 男, 博士生, 主要从事特种底盘控制和遥操纵研究, E-mail: zhaozeren@stumail.ysu.edu.cn

通信作者: 张红彦(1973—), 女, 副教授, 主要从事环境感知和智能机器人研究, E-mail: zhanghy@ysu.edu.cn

中获得更真实的体验,进而提升用户沉浸感和操纵准确性^[4]。

传统力反馈手柄作为操纵人和远端被操纵设备中转站,具有信息双向传递的重要作用。而在远程信息通过手柄反馈到操纵人的环节中,需在手柄末端安装力传感器,从而精准反馈触觉力反馈信息^[5],增强操纵真实感受,使得操纵者可“身临其境”地操纵远程设备。TAKAYASU 等^[6]开发了一种带有小型传感器的 VUA 台架模型,用于在机器人手术期间测量尿道所承受的牵引力以评估外科医生手术熟练程度。LEI 等^[7]为提高远程手术模式中复位骨折操作精度,使用六维力传感器采集作用力数据,并利用虚拟夹具技术对主机器人六维约束进行研究,采用基于电流回路的电机失速控制方法,以提供实时复位力反馈,增强外科医生手术临场感。黄玲涛等^[8]针对传统机器人交互依赖预定义三维模型、视觉定位易受硬件精度限制且力觉单独应用效率不足的问题,提出一种面向无模型物体的机器人视觉-力觉协同交互方法,仍依赖于力传感器。韩明兴等^[9]设计植物茎秆柔性夹持装置,布置有力传感器,实现夹持稳定,避免损伤植物茎秆。然而,上述装置均通过安装力传感器测量受力,以此实现操纵精度,不仅增加了开发成本和装置质量,还降低了操纵舒适度^[10]。

为了克服力传感器带来的不良影响,需对操纵力进行精准估计,目前,已有研究基于深度学习的视觉辅助方法估计操纵力,但视觉遮挡等问题对操纵过程力估计的影响仍不可避免^[11]。倪涛等^[12]提出了基于库仑摩擦模型和黏性摩擦模型对伺服电动缸的摩擦力进行辨识估计,代入动力学模型对外力进行估计,由于静摩擦力作用,在速度正负变化时会发生摩擦力突变,这种突变会影响操纵力在变换方向时的估计精度。在操作过程中,难免会频繁变换方向进行操纵控制,由于摩擦力在此过程难以测量,因此难以确定准确操纵力。目前,已有学者提出多种摩擦力模型:库仑摩擦模型、Stribeck 摩擦模型以及 LuGre 摩擦模型等^[13],其中,Stribeck 摩擦模型应用最为广泛^[14]。SONG 等^[15]提出了一种考虑 Stribeck 摩擦模型的三环物理参数辨识方法;WANG 等^[16]研究了一种应用于提升基于静态 Stribeck 模型结合模糊低通滤波器的永磁同步电机伺服系统摩擦补偿新方法。然而,上述对 Stribeck 摩擦模型的应用研究并未充分考虑到摩擦突变对系统控制的影响。本文提出一种基于改进 Stribeck 摩擦模型的力反馈手柄的力估计策略。

1 力反馈手柄动力学分析

所提操纵力估计策略需要建立力反馈手柄动力学数学模型。力反馈手柄直角坐标系如图 1 所示。

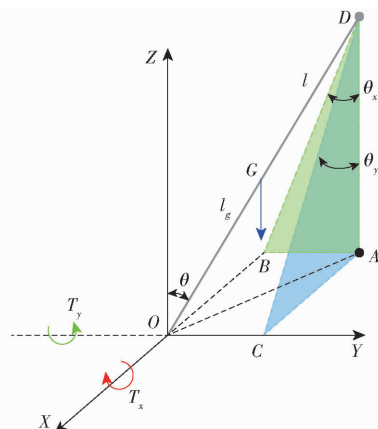


图 1 操纵手柄直角坐标系

Fig. 1 Force feedback joystick rectangular coordinate system

手柄各自由度角度关系为

$$\dot{\theta}^2 = \dot{\theta}_x^2 + \dot{\theta}_y^2 \quad (1)$$

式中 θ ——手柄与 Z 轴夹角

θ_x, θ_y ——X、Y 输出轴角度,即手柄在 ZOY 平面与 Z 轴的夹角与在 ZOX 平面与 Z 轴的夹角

由图 1 可知, θ 与线段 AD、AC 与 AB 长度关系为

$$\cos \theta = \frac{l_{AD}}{l_{OD}} = \frac{l_{AD}}{\sqrt{l_{AO}^2 + l_{AD}^2}} = \frac{l_{AD}}{\sqrt{l_{AC}^2 + l_{AB}^2 + l_{AD}^2}} \quad (2)$$

根据图 1 可知

$$\tan \theta_x = \frac{l_{AB}}{l_{AD}} \quad (3)$$

$$\tan \theta_y = \frac{l_{AC}}{l_{AD}} \quad (4)$$

根据式(2)~(4)可得

$$\cos \theta = \frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta_x + \tan^2 \theta_y}} \quad (5)$$

基于拉格朗日法对手柄进行动力学分析,可得

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K}{\partial \dot{\theta}_j} \right) - \frac{\partial K}{\partial \theta_j} + \frac{\partial P}{\partial \theta_j} = T_j \quad (j = x, y) \quad (6)$$

$$\text{其中 } K = \frac{1}{2} (J_\alpha + J_\gamma) \dot{\theta}_x^2 + \frac{1}{2} (J_\beta + J_\gamma) \dot{\theta}_y^2 \quad (7)$$

式中 K ——总动能 P ——总势能

T_j ——系统外部力矩

J_α ——X 轴所有传动机构转动惯量

J_β ——Y 轴所有传动机构转动惯量

J_γ ——手柄操纵末端与安装零件转动惯量

为了便于表示与计算,式(7)可简写为

$$K=\frac{1}{2}J_x\dot{\theta}_x^2+\frac{1}{2}J_y\dot{\theta}_y^2$$

(8)

其中 $J_x=J_\alpha+J_\gamma$ $J_y=J_\beta+J_\gamma$

外部力矩 T_j 表示为

$$T_j=\tau_j+\tau_{aj}-\tau_{fj} \quad (j=x,y)$$

(9)

式中 τ_x,τ_y ——人手操纵力传动到 $X、Y$ 轴电机减速器输出轴的转矩,即所估计的人手力矩

$\tau_{ax}、\tau_{ay}$ —— $X、Y$ 轴电机经减速器输出的力矩

$\tau_{fx}、\tau_{fy}$ —— $X、Y$ 轴摩擦力矩

系统势能 P 表示为

$$P=T_g\cos\theta$$

(10)

其中 $T_g=mgl_g$

式中 T_g ——手柄手持部分零件重力矩

m ——手柄手持部分零件质量

l_g ——手柄长度

根据图 1 将式(7)~(11)代入方程(6),可得 $X、Y$ 轴动力学方程为

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial K}{\partial \dot{\theta}_x}\right)-\frac{\partial K}{\partial \theta_x}+\frac{\partial P}{\partial \theta_x}=T_x \\ \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial K}{\partial \dot{\theta}_y}\right)-\frac{\partial K}{\partial \theta_y}+\frac{\partial P}{\partial \theta_y}=T_y \end{cases}$$

(12)

即

$$\begin{cases} J_x\ddot{\theta}_x-\frac{T_g\tan\theta_x\sec^2\theta_x}{(1+\tan^2\theta_x+\tan^2\theta_y)^{3/2}}=\tau_x+\tau_{ax}-\tau_{fx} \\ J_y\ddot{\theta}_y-\frac{T_g\tan\theta_y\sec^2\theta_y}{(1+\tan^2\theta_x+\tan^2\theta_y)^{3/2}}=\tau_y+\tau_{ay}-\tau_{fy} \end{cases}$$

(13)

根据式(13)进一步简化动力学方程为

$$\begin{cases} \tau_x=\tau_{fx}-\tau_{gx}-\tau_{ax}+J_x\ddot{\theta}_x \\ \tau_y=\tau_{fy}-\tau_{gy}-\tau_{ay}+J_y\ddot{\theta}_y \end{cases}$$

(14)

其中

$$\begin{cases} \tau_{gj}=\frac{T_g\tan\theta_j\sec\theta_j}{(1+\tan^2\theta_x+\tan^2\theta_y)^{\frac{3}{2}}} \\ \tau_{aj}=i_jK_tI_{qj} \quad (j=x,y) \end{cases}$$

(15)

2 摩擦模型

2.1 Stribeck 摩擦模型

目前,Stribeck 摩擦模型是最接近真实使用情况的摩擦模型,广泛应用于机械工程、汽车工程及材料科学等领域^[17-19]。Stribeck 摩擦模型表示^[20]为

$$\tau_f=[F_c+(F_s-F_c)e^{-\left(\frac{\dot{\omega}_s}{\omega_s}\right)^2}]\operatorname{sgn}(\dot{\theta})+\sigma_2\dot{\theta}$$

(16)

式中 F_c ——库仑摩擦力

F_s ——最大静摩擦力

ω_s ——Stribeck 角速度

σ_2 ——黏滞摩擦系数

τ_f ——设备运动时摩擦力

Stribeck 摩擦模型描述了在润滑条件变化时摩擦特性的变化,摩擦力矩随滑动速度和润滑条件的变化曲线如图 2 所示。

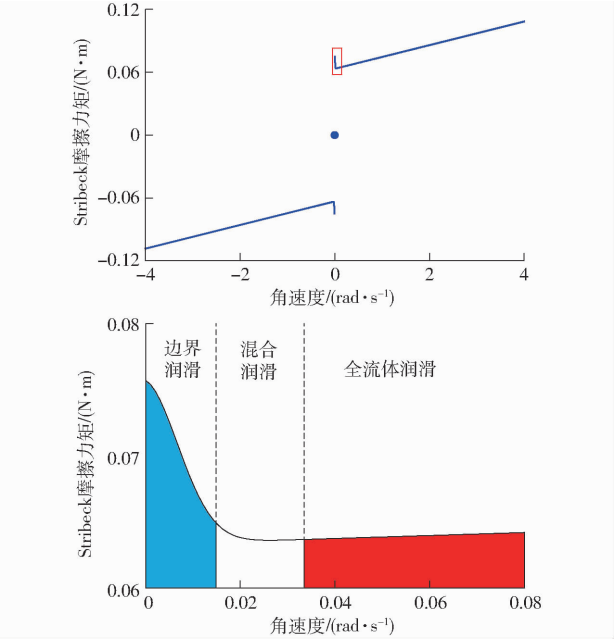


图 2 传统 Stribeck 摩擦模型

Fig.2 Traditional Stribeck friction model

由图 2 可知,在低速时,摩擦系数通常较高,随着速度增加,摩擦系数逐渐降低,最终达到一个稳定值,对应于其 4 种摩擦状态:静摩擦(静止)、边界润滑(低速)、混合润滑(中等速度)、全流体润滑(高速)。静摩擦阶段,接触面还未发生相对运动,驱动力小于最大静摩擦力;蓝色区域是边界润滑状态,即低速状态,由于接触面的黏着作用^[20],受粘性摩擦与库伦摩擦的影响,摩擦力矩开始呈下降趋势;随速度增加,进入白色区域,此时接触面处已进行部分润滑,但仍有部分接触面未润滑,此时状态是混合润滑状态;速度继续增加,受粘性摩擦的影响远大于库伦摩擦,此时摩擦力矩与转速近似成正比,此时被称为全流体润滑状态。因此,受边界润滑摩擦和全流体润滑的共同影响,Stribeck 曲线表现为随速度增大先下降后上升趋势。

2.2 改进 Stribeck 摩擦模型

由前文可知,使用不连续的 signal 函数描述在速度方向切换时摩擦力,会导致摩擦力在速度正负切换过零点时产生突变,从物理角度分析,因为在系统达到运动摩擦阶段前需先进入静摩擦阶段。这种摩擦力突变会影响操纵力估计策略和后续控制性能

等。针对 Stribeck 摩擦模型不连续情况,采用 KAMALUDIN 等^[21]提出的连续摩擦模型进行改进,计算式为

$$F(\dot{\theta}) = l_1 (\tanh(d_1 \dot{\theta}) - \tanh(d_2 \dot{\theta})) + l_2 \tanh(d_3 \dot{\theta}) + l_3 \dot{\theta} \quad (17)$$

式中, l_1 、 l_2 、 l_3 、 d_1 、 d_2 、 d_3 表示正参数, d_1 、 d_2 、 d_3 为各种形状系数,以近似各种摩擦效应。 $\tanh(d_1 \dot{\theta}) - \tanh(d_2 \dot{\theta})$ 表示 Stribeck 效应对应于式(16)中的高斯模型 $e^{-(\dot{\theta}/\omega_s)^2}$; $l_2 \tanh(d_3 \dot{\theta})$ 表示库伦摩擦力; $l_3 \dot{\theta}$ 表示粘性摩擦力。因此式(17)可转换为

$$F(\dot{\theta}) = (F_s - F_c) (\tanh(d_1 \dot{\theta}) - \tanh(d_2 \dot{\theta})) + F_c \tanh(d_3 \dot{\theta}) + \sigma_2 \dot{\theta} \quad (18)$$

其中

$$\begin{cases} l_1 = F_s - F_c \\ l_2 = F_c \\ l_3 = \sigma_2 \end{cases} \quad (19)$$

由式(18)和图 3 可得,用连续的 $\tanh$ 函数代替不连续的 signum 函数,可有效解决手柄操纵过程摩擦力突变问题,且仍能很好地反映 Stribeck 效应。

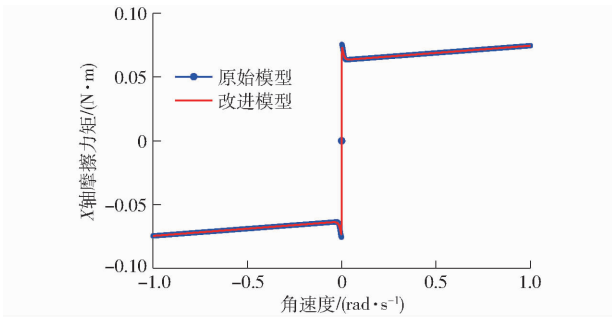


图 3 改进 Stribeck 模型拟合效果

Fig. 3 Improved Stribeck friction model

3 辨识过程

手柄各自由度特性相似,只分析 1 个自由度。假设:在实验过程,手柄 2 自由度之间不会相互影响。

3.1 重力参数辨识

在 YOZ 平面内对 X 轴自由度进行研究,辨识手柄重力参数 T_g 。设定不同的 x 轴电机位置 θ_x ,使手柄 X 轴处于不同角度静止状态。此时, x 轴电机角速度 $\dot{\theta}_x$ 为 0,加速度 $\ddot{\theta}_x$ 为 0,且人力 $\tau_x = 0$ 。因此由式(14)可知,手柄 X 轴动力学方程可简化为

$$T_g \sin \theta_x = -i_x K_t I_{qx} \quad (20)$$

整理式(20)可得

$$\frac{\sin \theta_x}{I_{qx}} = -\frac{i_x K_t}{T_g} \quad (21)$$

由式(21)可得,此时 $\sin \theta_x$ 与 I_{qx} 是线性关系,即

$$y = ax \quad (22)$$

其中

$$a = -\frac{i_x K_t}{T_g} \quad (23)$$

进一步可确定辨识参数 T_g 为

$$T_g = -\frac{i_x K_t}{a} \quad (24)$$

将图 1 的手柄投影至 YOZ 平面进行分析,重力分析示意图如图 4 所示,根据前文所述,采集数据得 $\sin \theta_x$ 与 I_{qx} 拟合关系如图 5 所示,可分步骤辨识到参数 T_g 。

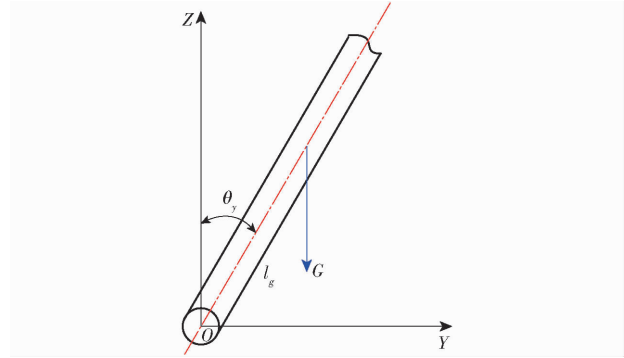


图 4 重力分析示意图

Fig. 4 Diagram of gravity

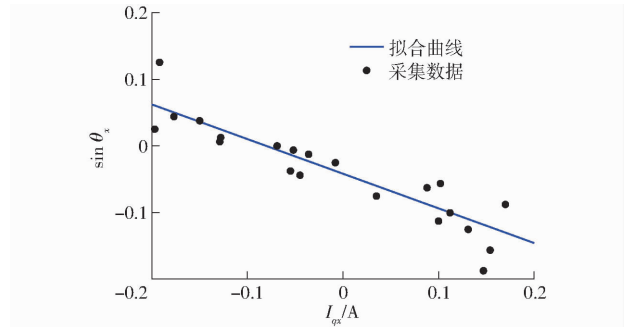


图 5 $\sin \theta_x$ 与 I_{qx} 拟合曲线

Fig. 5 $\sin \theta_x$ and I_{qx} fit curve

3.2 静态摩擦参数辨识

考虑到辨识参数以及手柄的力估计策略准确性,基于式(16)对 Stribeck 模型 F_c 、 F_s 、 $\dot{\theta}_s$ 、 σ_2 4 个参数进行辨识。以固定速度运行电机卸载负载实验。 T_g 、 $\ddot{\theta}$ 和人力 τ_x 都为 0。根据式(16)可得

$$i_x K_t I_{qx} = [F_c + (F_s - F_c) e^{-\frac{\dot{\theta}_x}{\dot{\theta}_s}}] \text{sgn}(\dot{\theta}_x) + \sigma_2 \dot{\theta}_x \quad (25)$$

根据电机电流 I_{qx} 和转速 $\dot{\theta}_x$ 采集数据,基于最小二乘法对其进行拟合辨识,得到拟合摩擦力矩与角速曲线如图 6 所示,进而确定 F_c 、 F_s 、 $\dot{\theta}_s$ 、 σ_2 4 个参数。

3.3 改进模型参数辨识

考虑到传统 Stribeck 摩擦模型在速度正负切换时摩擦力会发生突变,对摩擦力模型改进以确保其

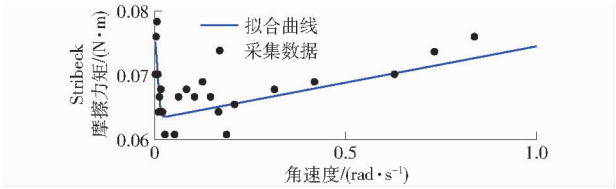


图 6 静态摩擦力矩拟合曲线

Fig. 6 Stribeck friction model fit curve

具有连续性。基于式(18)以及所辨识的 Stribeck 模型参数 F_c 、 F_s 、 $\dot{\theta}_s$ 、 σ_2 ,进而对形状系数 d_1 、 d_2 、 d_3 进行辨识。

将 Stribeck 摩擦模型离散化,取角速度区间 $(-1 \sim 1 \text{ rad/s})$,以 0.001 rad/s 为间隔取 Stribeck 摩擦,采用最小二乘法将改进 Stribeck 模型与原始 Stribeck 摩擦模型进行数据拟合,可得到相应的形状系数 d_1 、 d_2 、 d_3 ,如图 7 所示,改进模型和原始模型基本相符,可反映 Stribeck 效应,且解决了零点突变问题。

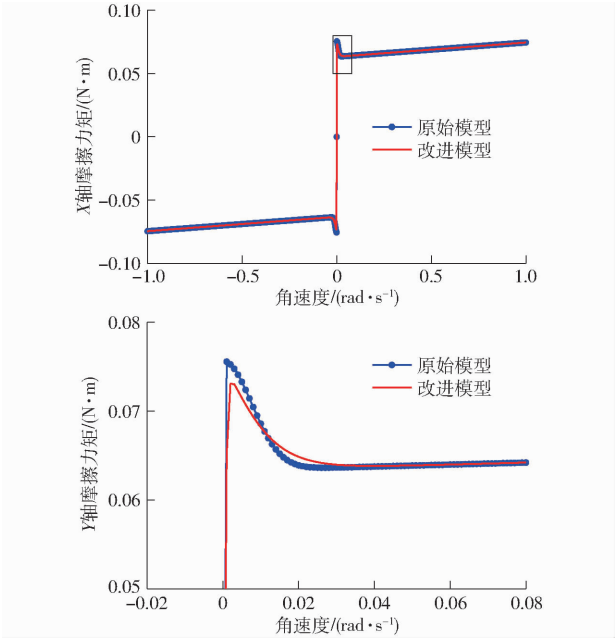


图 7 改进 Stribeck 摩擦模型拟合曲线

Fig. 7 Improved Stribeck friction model fit curves

4 实验验证

4.1 实验平台

利用所搭建的力反馈手柄实验台架验证人手力估计准确度,如图 8 所示,且加装的力传感器是测量实际人手力,实际使用中可将力传感器移除。

力反馈手柄伺服电机选用加装 50:1 行星齿轮减速器的 maxon 直流电机,尾部加装编码器,采用 EPOS2 24/5 型电机驱动器,与控制系统通过 CAN 总线进行信息传递;上位机控制器系统包括 dSPACE 和用于 dSPACE 数据交互的计算机;人手力测量模块包括 T3B46 三分量力传感器以及采集处理

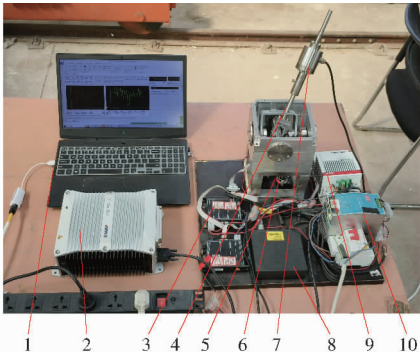


图 8 力反馈手柄实验台

Fig. 8 Force feedback joystick experimental bench

- 1. dSPACE 上位机 2. dSPACE 控制器 3. 驱动器 4. 操纵手柄
- 5. 编码器 6. 伺服电机 7. 力传感器 8. 数字放大器 9. 倍福 PLC 10. 24 V 开关直流电源

信号的数字放大器,受限于实验室条件,加入倍福 PLC 做网关将 EtherCAT 信号转为 CAN 信号传至 dSPACE 控制器;以上所有模块都采用 24 V 直流电源供电,通过 Matlab Simulink 完成参数辨识和力估计。

4.2 参数辨识实验

手控器重力参数辨识采集手控器角度 θ 与相应电机电流,使用最小二乘法对 2 组数据进行拟合,拟合曲线如图 9 所示,根据式(22)~(24)可得, $T_{gx} = 2.251 \text{ N}\cdot\text{m}$, $T_{gy} = 2.259 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。

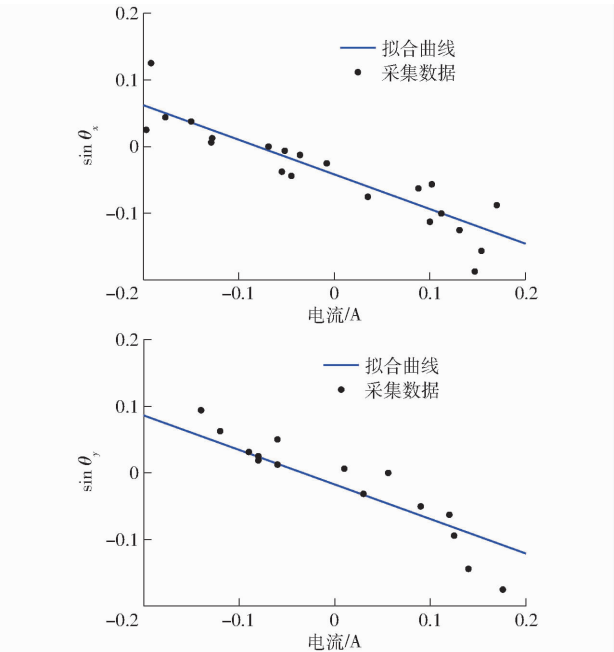


图 9 重力参数 T_g 拟合曲线

Fig. 9 Gravity parameter T_g fit curve

如图 9 所示,由于实验设备精度原因,采集数据未完全符合拟合曲线,但重力实际测量数值均布拟合曲线上下,基本符合所测量参数 T_g Stribeck 摩擦参数拟合。根据式(25)采集电机电流 I_{qx} 和角速度

θ , 基于最小二乘法对其进行拟合, 如图 10 所示, 确定 X 轴参数为 $F_c = 0.006\ 3\ \text{N}\cdot\text{m}$, $F_s = 0.076\ \text{N}\cdot\text{m}$, $\omega_s = 0.011\ \text{rad/s}$, $\sigma_2 = 0.011\ \text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s/rad}$; Y 轴参数 $F_c = 0.006\ 0\ \text{N}\cdot\text{m}$, $F_s = 0.074\ \text{N}\cdot\text{m}$, $\omega_s = 0.045\ \text{rad/s}$, $\sigma_2 = 0.017\ \text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s/rad}$ 。

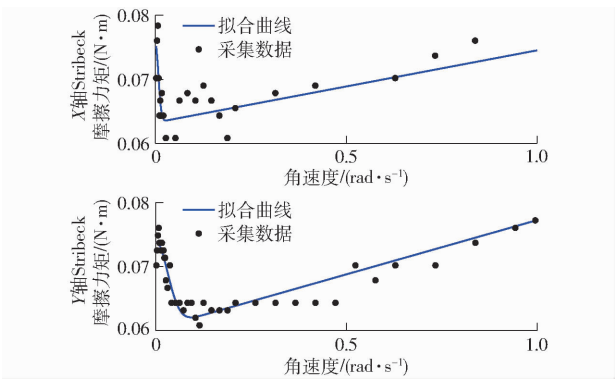


图 10 静态摩擦参数拟合曲线

Fig. 10 Static friction parameter fit curve

如图 10 所示, 拟合曲线基本符合测量的实际 Stribeck 摩擦力, 且拟合曲线表现出良好的 Stribeck 特性。基于式 (18) 和 3.3 节的改进模型参数辨识过程, 对传统的 Stribeck 摩擦模型进行改进并分别对 X 轴、 Y 轴形状参数 d_1 、 d_2 、 d_3 进行辨识, 拟合曲线如图 11 所示。其中, X 轴形状参数为: $d_1 = 431\ 1$, $d_2 = 71.82$, $d_3 = 1\ 240$; Y 轴形状参数为: $d_1 = 5\ 120$, $d_2 = 17.06$, $d_3 = 1\ 699$ 。

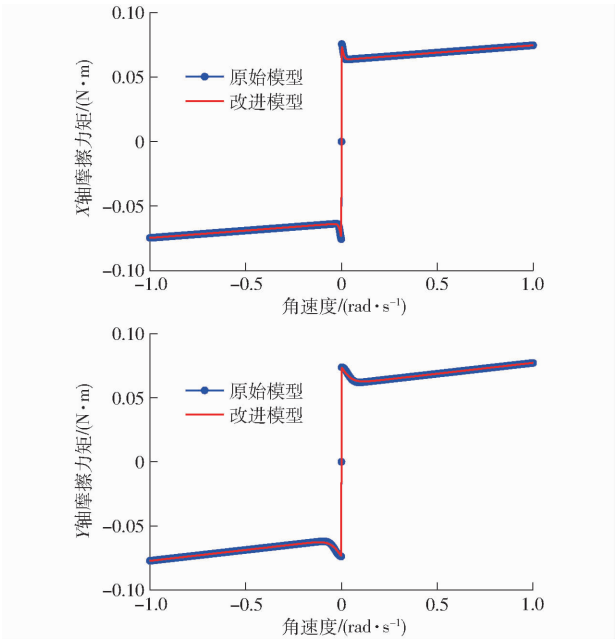


图 11 改进 Stribeck 摩擦模型拟合曲线

Fig. 11 Improved Stribeck friction model fit curves

如图 11 所示, 改进 Stribeck 摩擦模型符合 Stribeck 摩擦模型的变化趋势, 且连续, 避免传统 Stribeck 摩擦模型数据突变, 实现了摩擦力正负切换连续。

4.3 力估计实验

将 4.2 节辨识的参数代入动力学模型式 (14) 进行手柄操纵力估计验证实验。人手分别对手柄 2 自由度进行往复周期随机运动, 传感器采集实际人力和基于改进 Stribeck 摩擦模型估计操纵力进行对比, 如图 12 所示。

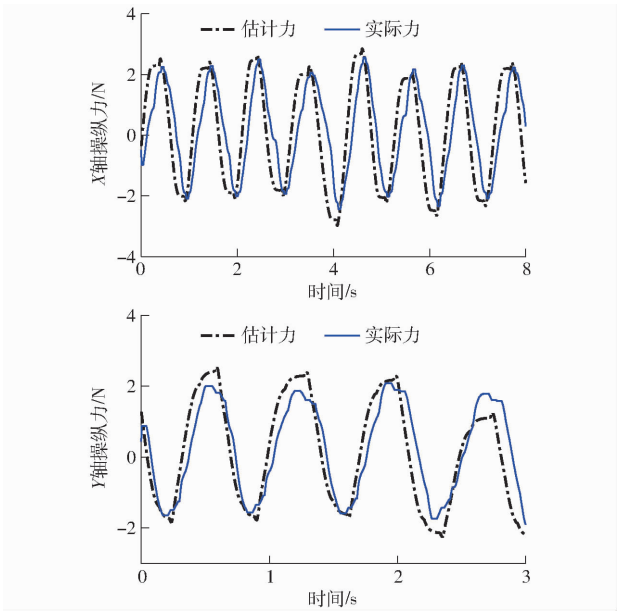


图 12 操纵力实验结果

Fig. 12 Experimental comparison of operating force

由图 12 可知, 所提出的手柄的力估计值基本符合实际测量值变化趋势, 但传感器测量值相对估计值有一定延时, 可能由于信号滤波、处理等过程产生延时, 因此造成误差, 进一步说明了所提估计策略的必要性。

5 结束语

针对所设计的 2 自由度力反馈手柄, 提出一种基于改进 Stribeck 摩擦模型的力估计策略。基于拉格朗日理论对手柄建立动力学模型, 采用改进的 Stribeck 摩擦模型描述摩擦力特性; 通过最小二乘法分别对手控器的重力参数和改进 Stribeck 摩擦模型的参数进行辨识; 依据辨识得到的参数对手柄进行操纵力估计, 并通过实验验证所提出策略的准确性。

参 考 文 献

[1] 张渐奎. 直升机模拟器的操纵力感控制系统研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2020.
ZHANG Jianyao. Research on force-feel control system of helicopter simulator[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2020.

(in Chinese)

- [2] 林子鹭, 肖聚亮, 赵炜, 等. 基于视觉定位与虚拟现实技术的机器人遥操作研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2025, 58(1): 36–46.
LIN Ziao, XIAO Juliang, ZHAO Wei, et al. Research on robot teleoperation systems based on visual positioning and virtual reality technology[J]. Journal of Tianjin University(Science and Technology), 2025, 58(1): 36–46. (in Chinese)
- [3] 李盛贵. 基于力反馈的太空机械臂在轨装配仿真系统[D]. 北京: 北京邮电大学, 2017.
LI Shenggui. Space manipulator in-orbit assembly simulation system based on force feedback[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2017. (in Chinese)
- [4] 张泮虹. 基于新型操纵装置的无人车人机协同遥操纵技术研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2024.
ZHANG Panhong. Research on human-machine collaborative teleoperation technology for unmanned vehicles based on new control device[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2024. (in Chinese)
- [5] NI T, ZHANG P H, ZHAO Z R. Adaptive backstepping control for sensor-less haptic joysticks with uncertainty parameters[J]. Journal of Engineering Mathematics, 2024, 145(1): 6.
- [6] TAKAYASU K, YOSHIDA K, MATSUZAKI T. Development and evaluation of vesicourethral anastomosis bench-top model for measurement of traction force on urethra in robotic surgery[J]. Surgical Endoscopy and Other Interventional Techniques, 2024, 38(9): 5220–5227.
- [7] LEI J, SONG G. Six-dimensional constraints and force feedback for robot-assisted teleoperated fracture reduction[J]. Robotica, 2024, 42(7): 2328–2344.
- [8] 黄玲涛, 王琳轩, 孔紫静, 等. 面向无模型物体的机器人视觉-力觉协同交互方法[J]. 农业机械学报, 2025, 56(10): 770–779.
HUANG Lingtao, WANG Linxuan, KONG Zijing, et al. Vision-force collaborative interaction method for model-free objects in robotic systems[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(10): 770–779. (in Chinese)
- [9] 韩明兴, 李淼, 段宏兵, 等. 植物茎秆柔性夹持装置刚柔耦合仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(2): 109–118.
HAN Mingxing, LI Miao, DUAN Hongbing, et al. Rigid-flexible coupling simulation and experiment of plant stem clamping device based on ADAMS[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(2): 109–118. (in Chinese)
- [10] 倪涛, 张泮虹, 赵泽仁. 无力传感器的操纵手柄自适应变阻抗控制[J]. 中国机械工程, 2024, 35(6): 1034–1043, 1051.
NI Tao, ZHANG Panhong, ZHAO Zeren. Adaptive variable impedance control for force sensor-less joystick[J]. China Mechanical Engineering, 2024, 35(6): 1034–1043, 1051. (in Chinese)
- [11] MASUI K, KUME N, NAKAO M. Vision-based estimation of manipulation forces by deep learning of laparoscopic surgical images obtained in a porcine excised kidney experiment[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 9686.
- [12] 倪涛, 徐海远, 李东, 等. 六自由度平台动力学前馈柔顺控制研究[J]. 中国机械工程, 2022, 33(6): 683–689.
NI Tao, XU Haiyuan, LI Dong, et al. Research on dynamics feedforward compliance control of 6-DOF platforms[J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(6): 683–689. (in Chinese)
- [13] 张聪聪. 面向无刷直流电机伺服系统的摩擦力补偿仿真研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2020.
ZHANG Congcong. Friction compensation simulation research for brushless DC motor servo system[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2020. (in Chinese)
- [14] 向红标, 王收军, 张春秋, 等. Stribeck 模型自适应滑模摩擦补偿控制[J]. 中国测试, 2015, 41(9): 92–95.
XIANG Hongbiao, WANG Shoujun, ZHANG Chunqiu, et al. Adaptive sliding friction compensation based on Stribeck model[J]. China Measurement & Test, 2015, 41(9): 92–95. (in Chinese)
- [15] SONG T, FANG L, LIU G. A three-loop physical parameter identification method of robot manipulators considering physical feasibility and nonlinear friction model[J]. Nonlinear Dynamics, 2024, 112(15): 13115–13129.
- [16] WANG C, PENG J, PAN J. A novel friction compensation method based on Stribeck model with fuzzy filter for PMSM servo systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(12): 12124–12133.
- [17] ARMSTRONG H B, DUPONT P, WIT C D. A survey of models, analysis tools and compensation methods for the control of machines with friction[J]. Automatica, 1994, 30(7): 1083–1138.
- [18] PAN Q, LI Y B, HUANG M H. Control-oriented friction modeling of hydraulic actuators based on hysteretic nonlinearity of lubricant film[J]. Mechatronics, 2018, 53: 72–84.
- [19] HUANG Q, XIA J, LIU H. Friction-induced vibration of marine propeller shaft based on the LuGre friction model[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2023, 37(8): 3867–3876.
- [20] 周璇. 超声电机摩擦副表面微沟槽阵列制备及其摩擦性能研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
ZHOU Xuan. Generating microgroove arrays on ultrasonic motor's friction surfaces and research on the tribological properties[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018. (in Chinese)
- [21] KAMALUDIN K N, ABDULLAH L, SALIM S N S. Performance evaluation of an adaptive sigmoid friction compensation for pneumatic trajectory[C]//2023 8th International Conference on Control and Robotics Engineering (ICCRE). IEEE, 2023: 165–171.