

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514210

面向遥操作机械臂的三维柔性触觉传感器

商 珂¹, 祝佳航², 陈大鹏¹, 宋爱国²

(1. 南京信息工程大学自动化学院 南京 210044; 2. 东南大学仪器科学与工程学院 南京 210096)

摘要:传统三维力传感器在应用中存在如剪切力与法向力耦合,柔度不足,解耦算法复杂等问题,制约了其在遥操作机器人精密作业场景中的应用。针对上述问题,提出了一种基于单层环形正弦化磁膜的三维磁性触觉传感器,旨在实现对三维力的实时解耦测量。该传感器通过单层磁膜结构实现了三维力自解耦,避免了传统三维力传感器的多维力耦合与对复杂算法的依赖。经标定实验测试,该传感器性能优秀,具备高灵敏度和高精度特性。其可在Z轴方向测量0~15 N的力,灵敏度为0.014 7 kPa⁻¹,均方根误差为0.001 5 mT。在X与Y轴方向则覆盖-5~5 N的测量范围,灵敏度分别可达0.020 3与0.020 9 kPa⁻¹,均方根误差则分别为0.002与0.001 9。同时,传感器本体由柔性结构设计,兼具了低功耗、高输出频率等特点。在滑觉控制实验中,在机械臂末端执行器上构建了滑觉控制策略。通过在增广智能夹爪上安装所设计的触觉传感器,使得该系统能够实时监测夹爪与物体接触面间的法向力与切向力,并结合增量式PID控制策略,在检测到滑动发生后迅速调整夹持力,实现对动态增重容器的稳定抓取。该实验平均响应时间为113.3 ms,验证了引入该传感器的滑觉控制策略在实际应用中的稳定性与可靠性。

关键词: 三维力传感器; 遥操作机器人; 磁性触觉传感器; 自解耦

中图分类号: TH703 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460. 40

Three-dimensional flexible tactile sensor for teleoperated robotic arms

Shang Ke¹, Zhu Jiahang², Chen Dapeng¹, Song Aiguo²

(1. School of Automation, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;
2. School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: This study addresses challenges in conventional three-axis force sensors—namely the coupling between shear and normal forces, insufficient flexibility, and complex decoupling algorithms—which limit their application in precision teleoperation of robots. To overcome these issues, we propose a three-dimensional magnetic tactile sensor based on a single-layer annular sinusoidal magnetic film that enables real-time, self-decoupled measurement of tri-axial forces. Through the single-layer magnetic film structure, the sensor achieves self-decoupling of three-dimensional force, thereby avoiding multi-dimensional force coupling and the dependence on complex algorithms. Calibration experiments demonstrate that the sensor exhibits excellent performance with high sensitivity and high accuracy. Along the Z-axis, the measurable range is 0~15 N with a sensitivity of 0.014 7 kPa⁻¹ and a root-mean-square error of 0.001 5 mT. Along the X- and Y-axes, the measurement range is -5 to 5 N, with sensitivities of 0.020 3 and 0.020 9 kPa⁻¹, and RMSEs of 0.002 and 0.001 9, respectively. The sensor body adopts a flexible structural design, featuring low power consumption and a high output frequency. In slip-control experiments, a slip-control strategy was implemented on the end effector of the robotic arm. By mounting the designed tactile sensor on an augmented-intelligence gripper, the system monitors the normal and tangential contact forces in real time and, together with an incremental PID controller, rapidly adjusts the gripping force upon slip detection to stably grasp a container with a dynamically increasing load. The average response time is 113.3 ms, demonstrating the stability and reliability of the proposed slip-control strategy in practical applications.

Keywords: 3D force sensor; teleoperated robot; magnetic haptic sensor; self-decoupling

0 引言

随着人机交互技术在微创手术器械精准操控、工业设备无损探伤检测以及核生化危险环境远程作业等复杂场景中的深度应用,具备高精度力觉反馈的遥操作机器人系统已成为智能装备领域的前沿研究方向^[1-4]。作为机器人感知环境接触力、力矩及表面纹理特征的核心单元,触觉传感器的动态力学反馈机制直接影响着操作端定位精度、人机协作安全性及力触觉临场感等关键性能指标^[5-7]。尽管现有的压阻式、电容式等接触式传感器在法向力检测方面已达到微牛级分辨率^[8-9],但其固有的维度感知局限性导致剪切力与扭矩信号存在显著耦合干扰,加之复杂封装工艺引发的空间分辨率与机械柔顺性矛盾^[10-11],严重制约着多维力实时解耦测量在精密遥操作场景中的工程化应用。

当前应用在遥操作机器人上的触觉传感器有包括压阻式、光学式和电容式等^[12-16]。压阻式传感器(如柔性压阻材料)虽成本低廉,却普遍存在机械迟滞大、长期稳定性差等缺陷。Chu 等^[14]将压阻式触觉传感器安装在机械手的手指与手掌区域,最大可负载 6.8 N,通过算法他们将操作者的自然动作直接映射到机器人的手部,实时传递了机器人手部与物体的接触力分布,增强了操作者对远端环境的感知。光学式传感器具有响应时间短、频带宽但无法直接检测恒定力、受温度影响大等特性。Gomes 等^[15]提出光学触觉传感器 GelTip,其采用类人手指结构,首次实现机器人手指全表面触觉感知。通过仿生结构设计与高分辨率触觉成像,该传感器在遥操作机械臂抓取任务中可通过触觉反馈自适应调整夹持力,避免滑移或过载,完成瓶盖开启、塑泥切割等高精度任务。电容式触觉传感器具有线性度好,适合柔性设计等特点,但其介电常数易受温湿度和电磁噪声的影响。Liu 等^[16]使用 12 个离散电容传感器分布在从端机器人指尖的 3D 曲面上,可测量低至 0.05 N 的接触力,在主端使用 Dexmo 力反馈外骨骼手套,完成了如旋转瓶盖的精细的“手内操作”,并通过触觉传感器(指尖力反馈)和关节传感器向主端传递实时数据,然而其原始触觉信号不稳定,难以直接用于驱动主端触觉设备。

近些年,基于磁感应的触觉传感器相比传统的触觉传感器,因其具备高灵敏、高精度、易于实现三维检测等优势而备受关注^[17-19]。最近开发的磁性触觉传感器主要依赖于 2 种工作特性:1)利用耦合线圈的电磁感应检测外力施加的机械变形^[20-23],该类型的传感器需要持续通电的激励线圈来生成磁场,因此往往具有较高的功耗,刚性的线圈也会使传感器整体的柔性降低,不适合用于遥操作系统的从端机械臂上;2)利用霍尔效应或者巨磁电

阻检测磁通量或磁场强度的变化^[24-28],然而现有的该类型传感器仍面临磁场耦合效应显著、三维解耦算法复杂、空间分辨率受限等挑战。尤其是在实现三维力检测时,在硬件结构层面操作往往导致复杂的传感器设计,在软件算法层面操作可能允许简化传感器结构,但会使校准过程变得复杂。

因此,针对以上存在的问题,本研究提出一种已成功应用在机器臂末端执行器上,具有自解耦特性的三维磁性触觉传感器,通过设计并制备一种由钕铁硼(NdFeB)磁粉与聚二甲基硅氧烷(polydimethylsiloxane, PDMS)复合形成的环形磁膜,并采用正弦式磁化方式对其进行充磁,使得传感器受到的法向力与剪切力可以轻松且独立的解耦。这种特殊的设计令传感器的校准时间大大减少,同时其结构简洁,无需复杂解耦算法即可直接输出三维力分量。该传感器可以通过调整弹性体的弹性模量,弹性体厚度,磁膜厚度等改变传感器的灵敏度以及量程,可以满足不同场景的需求。

1 传感器的结构及原理

1.1 磁性触觉传感器的结构

人体手指在接收触觉信号时主要通过 3 层结构协同完成:最外层的表皮组织承担机械与化学屏障功能;中间的真皮层由胶原纤维和弹性纤维构成支撑结构;分布于真皮层的各类触觉感受器(如环层小体、梅克尔细胞等)则负责将机械刺激转化为神经信号。

基于上述的人体皮肤的分层仿生学原理,提出一种圆柱形复合结构。如图 1 所示,该结构由环形磁膜、硅胶弹性体、嵌入式电路板及磁阻传感器组成,实现了单层磁膜与单一芯片对三轴力的协同感知,解决了传统磁性触觉传感器受限于体积较大或刚性较强的磁性元件,不易与柔性材料结合的弊端,简化了其制造工艺。这对穿戴式设备与遥操作机械臂末端执行器的实际应用具有显著价值。

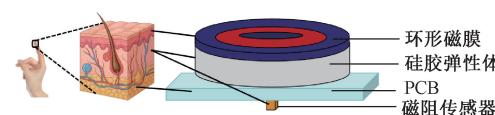


图 1 结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram

1.2 传感器力学信号感知机制

磁性触觉传感器的核心作用机制源于对外部机械激励(如法向压力、平面剪切力)与磁学信号之间的转换。当前技术路线普遍采用永磁体-柔性基体-霍尔传感单元的结构:当柔性基底受外力作用产生形变时,其内部嵌

入的永磁体将发生空间位移,进而引起邻近霍尔传感器检测区域的磁通密度分布重构。Yan 等^[24-25]于 2021 年开创性地引入 Halbach 永磁阵列结构,利用单层磁膜实现了平面(X-Z 轴)力学分量的自解耦检测;其近期研究(2024 年)进一步优化设计,提出双层磁膜模型,成功拓展至三维(X-Y-Z 轴)解耦感知。

基于上述进展,提出了一种可三维自解耦的单层环形磁膜结构。其触觉感知原理如图 2 所示。具体为:采用磁性颗粒与 PDMS 混合制备柔性磁膜。当磁膜受外力 \mathbf{F} 作用时,磁膜中的磁性颗粒发生位移,弹性层同时受力发生形变,力学信号传递至磁信号,导致下方传感器处三轴(X、Y、Z)的磁通密度发生变化;磁性传感器捕获这时的磁信号后,可通过解耦算法计算磁膜在 X、Y、Z 轴方向上的位移,再基于胡克定律推算三轴受力大小,由此实现三轴力学参量的解耦重建。

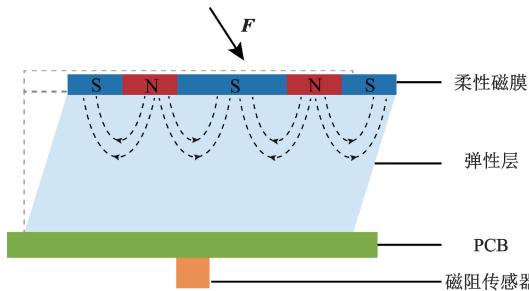


图 2 感知原理

Fig. 2 Principle of perception

1.3 传感器解耦算法

设圆柱形磁膜厚度为 d ,半径 R ,定义磁膜中某一点距圆心的径向距离为 r 。磁膜内部径向磁化强度 M_r 与法向磁化强度 M_z 相位正交,在空间中以正弦函数和余弦函数方式变化,具体如式(1)所示。

$$\begin{cases} M_r = A \sin(kr) \\ M_z = A \cos(kr) \end{cases} \quad (1)$$

其中, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, k 为波数, λ 为磁周期, A 为每个分量的最大幅值,设磁膜上表面 $z = 0$,下表面 $z = -d$,根据文献[29]中对 Halbach 磁阵列结构的理论分析可知,磁膜下方区域的磁标势 φ_{below} 可表示为:

$$\varphi_{\text{below}} = \frac{A}{k} (1 - e^{kd}) e^{kz} \cos(kr) \quad (2)$$

在磁膜外部磁化强度 \mathbf{M} 为 0 时,磁通密度 \mathbf{B} ,磁场强度 \mathbf{H} 具有的基本关系为:

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} \quad (3)$$

其中, μ_0 为真空磁导率,其值为 $4\pi \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$ 。由于在静磁场且无自由电流的区域,安培定律可表示为:

$$\mathbf{H} = -\nabla \varphi \quad (4)$$

由此,再将式(2)~(4)结合,可推导出:

$$\begin{cases} B_r = -\mu_0 \frac{\partial \varphi_{\text{below}}}{\partial r} = \mu_0 A (1 - e^{kd}) e^{kz} \sin(kr) \\ B_z = -\mu_0 \frac{\partial \varphi_{\text{below}}}{\partial z} = -\mu_0 A (1 - e^{kd}) e^{kz} \cos(kr) \end{cases} \quad (5)$$

其中, B_r 为磁膜下方径向上的磁通密度大小, B_z 为磁膜下方沿着 Z 轴的磁通密度大小。此时根据式(5),可以进一步推导出磁膜下方空间任意位置处的 $B(r, z)$ 并计算出 B_r 与 B_z 的比值 Q_B ,即:

$$\begin{cases} B(r, z) = \sqrt{B_r^2 + B_z^2} = \mu_0 A |(1 - e^{kd})| e^{kz} \\ Q_B(r, z) = \frac{B_r}{B_z} = \tan(kr) \end{cases} \quad (6)$$

其中, $B(r, z)$ 只与 z 的大小相关, Q_B 的值只与 r 的大小相关,由式(6)可推出 r 与 z 的大小,即:

$$\begin{cases} r = \frac{\arctan Q_B}{k} \\ z = \frac{1}{k} \ln \frac{B}{\mu_0 A |(1 - e^{kd})|} \end{cases} \quad (7)$$

当磁膜沿切向位移了 r 时,由 B_y 与 B_x 的比值可得出该状态下 r 在 Y 与 X 轴位移分量的夹角 θ (B_y 、 B_x 分别为磁膜下方沿 Y 、 X 轴的磁通密度),其关系如图 3 所示,结合式(7)可得出 x, y 具体为:

$$\begin{cases} \frac{B_y}{B_x} = \frac{y}{x} = \tan \theta \\ x = r \cos \theta = \frac{1}{k} \arctan Q_B \cos \theta \\ y = r \sin \theta = \frac{1}{k} \arctan Q_B \sin \theta \end{cases} \quad (8)$$

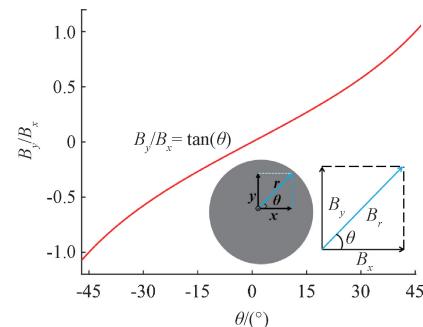


图 3 径向解耦示意图

Fig. 3 Radial decoupling diagram

当磁膜受外力 \mathbf{F} 从 (x_1, y_1, z_1) 位移至 (x_2, y_2, z_2) 时,如图 4 所示,设 X 轴方向上的位移为 dX , Y 轴方向上的位移为 dY , Z 轴方向上的位移为 dZ ,由式(7)、(8)可得:

$$dX = x_2 - x_1 =$$

$$\frac{1}{k} (\arctan Q_{B2} \cos \theta_2 - \arctan Q_{B1} \cos \theta_1)$$

$$\begin{aligned} dY &= y_2 - y_1 = \\ \frac{1}{k} (\arctan Q_{B2} \sin \theta_2 - \arctan Q_{B1} \sin \theta_1) \\ dZ &= z_2 - z_1 = \\ \frac{1}{k} \left(\ln \frac{B_2}{\mu_0 A |(1 - e^{kd})|} - \ln \frac{B_1}{\mu_0 A |(1 - e^{kd})|} \right) &= \frac{1}{k} \ln \frac{B_2}{B_1} \end{aligned} \quad (9)$$

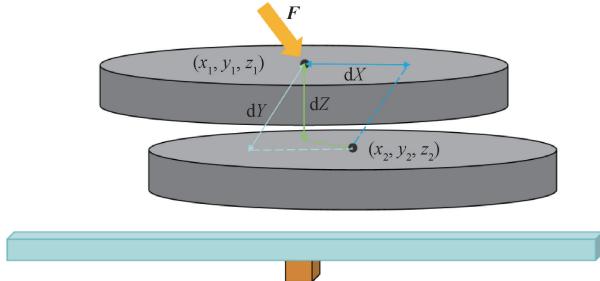


图 4 受力示意图

Fig. 4 Free-body diagram

Ecoflex 系列硅橡胶在应变程度较小时, 其应力-应变会表现出近似线性关系^[30], 可以用胡克定律表达, 由胡克定律结合式(9), 可推出 X、Y、Z 三轴所受的力 F_x 、 F_y 和 F_z 大小, 即:

$$\begin{cases} F_x = SG \frac{dX}{h} = \frac{1}{kh} SG (\arctan Q_{B2} \cos \theta_2 - \arctan Q_{B1} \cos \theta_1) \\ F_y = SG \frac{dY}{h} = \frac{1}{kh} SG (\arctan Q_{B2} \sin \theta_2 - \arctan Q_{B1} \sin \theta_1) \\ F_z = SE \frac{dZ}{h} = \frac{SE}{kh} \ln \frac{B_2}{B_1} \end{cases} \quad (10)$$

其中, S 为有效接触面积, G 为材料剪切模量, E 为法向弹性模量, h 为弹性体的厚度。

在考虑夹爪尺寸的同时, 为了使磁膜适配磁阻传感器的量程并获得更好的灵敏度, 将磁周期长度 λ 设定为 8 mm, 此时磁膜半径为 12 mm, 厚度 d 设定为 0.5 mm, 该参数设置能够使传感器在受力形变过程中有足够的磁通密度输出。磁化排列基于 Halbach 阵列原理, 经 ANSYS Maxwell 仿真, 磁膜切面的磁场如图 5(a)所示, 磁膜沿法向位移时磁通密度 B 的变化曲线以及沿切向位移时 Q_B 的变化曲线如图 5(b)和(c)所示。

1.4 磁干扰的消除

在实际运行中, 传感器将不可避免地受到外部磁场干扰: 其一是地磁、远处工作线圈等弱外场, 会引起零负载时的基线偏移并进一步影响力解耦; 其二是近

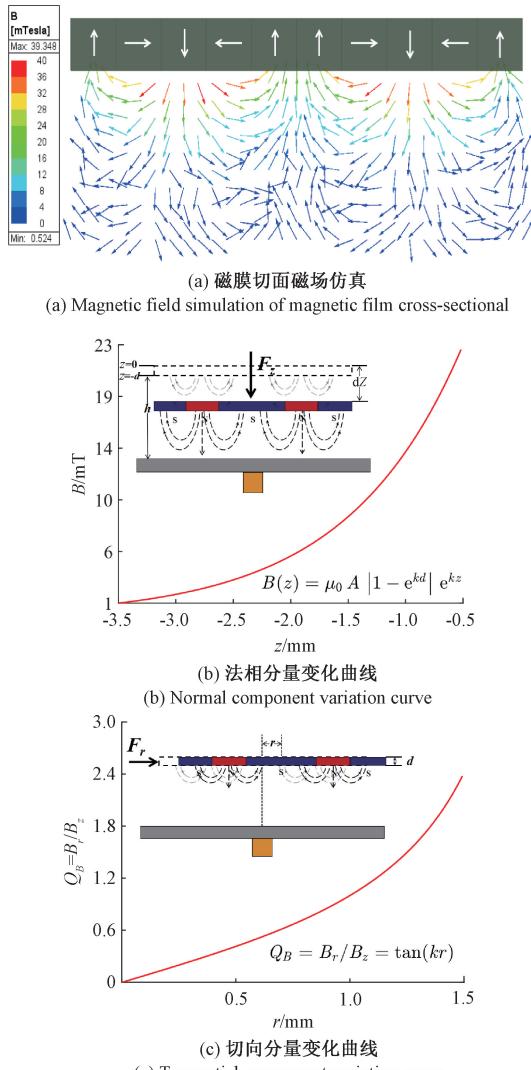


图 5 磁场仿真及解耦曲线

Fig. 5 Magnetic field simulation and decoupling curves

距离强磁源等强外场, 可能导致磁传感器饱和或产生显著失真。

为抑制地磁与远处线圈这类在小尺度内近似均匀的弱磁干扰, 本研究在使用传感器时于磁膜局部场影响范围之外增设了一只参考磁传感器。令参考通道感受与主传感器相同的环境背景场, 同时尽量不受磁膜局部场影响。具体运行流程为: 将主传感器与参考传感器设置为同步采样, 在上电后还未发生接触的短时窗口内完成零点对齐, 随后在运行中对两通道采集的数据进行差分补偿, 可将两处共同的背景场分量抵消, 突出由接触受力引起的有效磁场变化。

需说明的是, 当存在近距离强磁源导致传感器量程接近饱和时, 差分补偿对传感器的作用有限, 针对强外场的优化方案将在总结中提出。

2 磁性触觉传感器的硬件

2.1 磁膜的制备

磁膜由磁性颗粒与柔性基底材料混合制成。在选择柔性基底材料时,为了赋予磁膜良好的柔性支撑性能,选用道康宁公司(Dow Corning Corporation)生产的PDMS184型聚二甲基硅氧烷,该材料为目前柔性传感器、柔性电子等领域中广泛使用的高分子弹性体。其邵氏A硬度为43,拥有出色的弹性恢复能力、机械柔顺性以及长期化学稳定性。这些特性使其能够在承载磁性颗粒时有效维持结构完整性,同时保障磁膜在外界机械扰动下的响应灵敏性与稳定性。

在选择磁性颗粒时,本研究采用了钕铁硼(NdFeB)永磁颗粒,其筛选粒度为400目,对应粒径中值约为37 μm。相比更大粒径的磁粉,可在保持高磁性输出的同时,混合过程中更易分散于柔性基体中,提高磁膜的均匀性与充磁稳定性。

在磁性颗粒与柔性基底的配置过程中,首先按照PDMS固化体系的推荐比例,将其基材与固化剂按10:1的质量比进行混合。随后,将磁性颗粒称量并加入PDMS溶液,磁性颗粒与PDMS质量比为3.5:1。采用搅拌仪充分搅拌磁性颗粒与PDMS的混合液5 min,以确保磁粉在PDMS中分散均匀。混合后的浆料置于真空脱泡箱中10 min,以去除混合过程中引入的气泡。去泡的混合物采用四面涂膜制备器配合500 μm规格的刮刀均匀涂覆至钢化玻璃板表面。涂覆完成后,将样品置于恒温干燥箱中,在80℃条件下固化2 h。

最后,需要使用脉冲充磁机对磁膜进行磁化。根据halbach阵列原理的磁化方式,本研究使用激光切割按磁化方向将磁膜分成不同区域的圆环,使用该切割方法后再充磁能够提升磁化分布一致性与批间一致性。沿径向磁化的圆环受充磁工艺限制,需分段磁化以确保磁化方向准确。逐区磁化完成后的磁膜采用PDMS进行拼接。图6展示了磁膜的成品外观及制备流程。

2.2 传感器硬件搭建

弹性体在受力时会发生形变,在传感器中承担了力与位移转化的介质。在选择弹性层的材料时,为了获得较高的灵敏度以及在应力响应过程中拥有更大的线性工作区间,本研究选用了由POSILICONE公司研发的0度硅胶材料,该硅胶材料的邵氏A硬度为0,弹性模量E为10 kPa,泊松比ν为0.5,其剪切模量为3.3 kPa,通过模具将其加工成半径为12 mm,高度为7.5 mm的圆柱形弹性层。

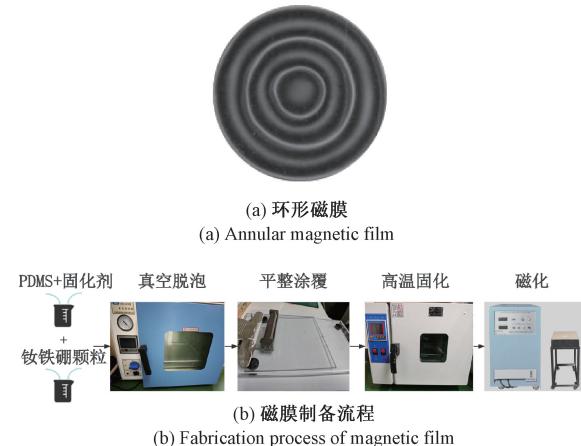


图6 磁膜的制备

Fig. 6 Preparation of magnetic films

在磁性触觉传感器中,磁性芯片是将磁信号转换为可读电信号的核心器件。本研究选取了由意法半导体(STMicroelectronics)公司生产的三轴数字磁力计LIS3MDL。该芯片具备±4~±16 Gs的量程选择功能,并支持16位数据输出以适应不同测量范围的需求。通过主控芯片STM32使用IIC协议配置其寄存器,实现了560 Hz的数据输出速率,以达到对X、Y、Z三轴磁通密度的实时监测,其连续工作时功耗也仅有5.7 mW,满足了对低功耗性能的设计要求。LIS3MDL的工作原理基于磁阻效应,与传统基于霍尔效应的磁传感器相比,其在低磁场强度环境下表现出更优异的信噪比及更高的灵敏度和分辨率。这些独特的性能优势使得本研究能够构建出一个不仅具有较好线性度,而且具有高灵敏度的磁性触觉传感器。

使用SolidWorks来对传感器底座的设计与建模。底座的尺寸被设定为长28.5 mm,宽25 mm,而芯片与弹性体底面之间的总距离被设定为2.5 mm,这时磁膜与芯片之间的总距离为10 mm。在3D打印材料的选择上,本研究最终确定使用SLA树脂(立体光造型树脂),这种材料表面光滑,具有非常强的韧性。得益于SLA树脂的光固化特性,它十分适合用于复杂几何结构的快速成型,并且由该材料打印出的结构能够达到微米级的精度。在传感器的组装过程中,LIS3MDL芯片与PCB板整体嵌入至传感器底座的下表面,这样确保了弹性层与光滑的底座上表面紧密接触。这种布局方式使得磁膜以及弹性层的结构更加平整,从而提高了磁力检测的准确性。鉴于本研究中的柔性磁膜采用了环形结构,为了能够实现三维力的精确检测,本研究必须尽可能的将芯片放置在圆心的正下方。

3 传感器标定实验

在三维力传感器的应用实践中,传感器需要通过标定来使其输出信号与真实力学量之间建立映射关系。为了验证本研究所设计的磁性触觉传感器在 X 、 Y 、 Z 这 3 个方向上的响应性能,搭建了如图 7 所示的标定装置。

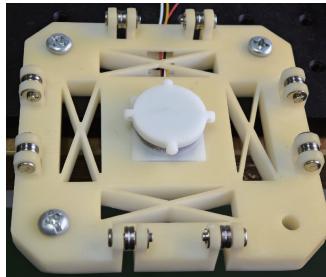


图 7 标定装置

Fig. 7 Calibration setup

在进行 Z 轴标定时,采用如图 8 所示的杠杆式加载结构。该结构通过一根与传感器表面垂直连接的探针,将砝码托盘上加载的质量,经由杠杆机构等效转化为作用于磁膜表面的法向压力。实验过程中,从初始零载荷开始,以 0.5 N 为加载步长逐步增加砝码质量,直至加载总力达到 15 N。每完成一级加载后,待传感器输出信

号稳定,采集当前稳定状态下的磁通密度值,作为该次法向力对应的标定数据点。



图 8 法向标定装置

Fig. 8 Normal force calibration device

对于 X 与 Y 轴方向的响应标定,采用在图 7 所示装置侧面悬挂砝码的方式施加水平方向恒定拉力。具体而言,通过滑轮系统将已知质量的砝码所产生的重力转化为作用于传感器切向表面的恒定拉力,从而实现对 X 和 Y 两个通道的逐步标定。加载范围设定为 $-5 \sim 5$ N, 加载增量为 0.2 N。每次加载后,待传感器输出信号趋于稳定,从所采集的数据中提取当前载荷的前 1 000 个数据点,计算其平均值作为该加载条件下的输出响应值,以此进一步减小误差并提高标定精度。图 9 中(a)~(c)展示了磁性触觉传感器在 X 、 Y 、 Z 这 3 个方向上输出响应与对应加载力值之间的关系曲线,每个方向重复加载 3 次。

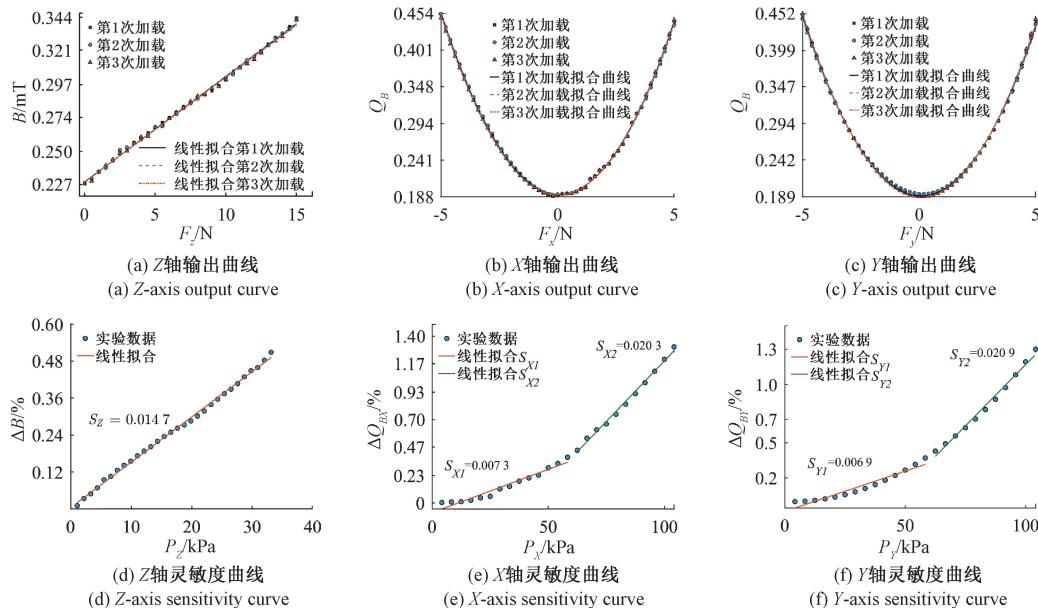


图 9 三轴标定曲线

Fig. 9 Triaxial calibration curves

本研究将 Z 轴灵敏度 S_z 表示为:

$$S_z = \frac{\Delta(\Delta B\%)}{\Delta P_z} \quad (11)$$

其中,

$$\Delta B(\%) = \left| \frac{B - B_1}{B_1} \right| \times 100\% \quad (12)$$

B_1 为 0 N 时的传感器读数, B 为受到外力时的读数, P 为压强, 则对应的 X 、 Y 轴与灵敏度 S_x 、 S_y 可表示为:

$$\begin{cases} S_x = \frac{\Delta(\Delta Q_{BX}\%)}{\Delta P_x} \\ S_y = \frac{\Delta(\Delta Q_{BY}\%)}{\Delta P_y} \end{cases} \quad (13)$$

X 、 Y 、 Z 三轴灵敏度如图 9 的(d)~(f) 所示。

从图 9 的数据可以看出, 在 Z 轴加载范围为 0~15 N 时, 传感器的输出响应具有良好的线性关系, 3 次加载平均的均方根误差为 0.0015 mT, 重复性误差为 3.59%, 该方向上的灵敏度 S_z 为 0.0147 kPa⁻¹。

X 轴方向处于 0~104.17 kPa 的压强范围内时, 其输出响应曲线展现出明显的分段特性。具体而言, 在加载压强为 0~58.33 kPa 的前半区间内, 传感器属于低灵敏度区域, 灵敏度为 0.0073 kPa⁻¹, 而在超过 58.33 kPa 后进入高灵敏度区间, 灵敏度显著提升至 0.0203 kPa⁻¹, 3 次加载平均的均方根误差为 0.002, 重复性误差为 4.08%。

Y 轴方向的测试结果与 X 轴表现出类似的响应趋势。在 0~58.33 kPa 的低压强区间灵敏度为 0.0069 kPa⁻¹, 后段灵敏度增至 0.0209 kPa⁻¹, 3 次加载平均的均方根误差为 0.0019, 重复性误差为 4.3%。

综上所述, 该传感器在 X 、 Y 、 Z 三轴测量范围内均表现出优秀的灵敏度与测量精度, 具备良好的三维力检测能力。

4 滑觉控制实验

在传统遥操作系统中, 末端执行器的控制策略多依赖于位置反馈与法向力感知, 缺乏对接触面滑动状态的有效感知。这种限制在医疗机器人、核电设施维护及危险环境远程操作等应用场景中, 尤为突出。若夹持力不足, 目标物体可能因静摩擦力不足而发生滑落; 反之, 过大的法向加载则可能对被操作对象造成不可逆的结构损伤或塑性变形。

因此, 在夹持过程中实现对滑动状态的实时识别与夹持力的动态调节, 是提升遥操作系统抓取稳定性的关键。

为实现对滑动状态的及时感知并自动调节夹持力, 本研究在机械臂末端构建了一套滑觉控制系统。该系统通过实时监测切向力的变化, 实现对夹爪法向力的自动调节, 从而提升在动态负载变化条件下的系统响应能力与操作稳定性。在滑觉控制实验中, 本研究将传感器安装在机械臂末端夹爪的一侧, 夹爪为增广智能的伺服夹爪 RM-GB, 最大夹持力可达 110 N。由于传感器对法向力与切向力拥有十分灵敏的感知能力, 本系统可有效识别夹爪与物体接触面的滑动事件。基于滑觉检测结果,

系统能够动态调整夹爪的夹持力输出。为防止调节过程中发生过度响应, 本研究在系统中设置了每一控制周期内的调节量上限, 以限制夹持力的增长幅度。该机制规避了因施力过大或过小导致的两种极端情况。实验平台如图 10 所示。



图 10 滑觉控制实验平台

Fig. 10 Slip-control experimental platform

实验流程为: 初始阶段, 机械臂夹爪输出能够稳定夹持空容器的最小夹持力。在整个过程中, 系统以 560 Hz 的频率从串口缓冲区读取力传感器数据。随后, 实验开始逐步向容器中注水, 导致容器整体质量持续增加。当滑动识别机制检测到了容器与传感器接触面发生滑动时, 系统通过增量式 PID 控制器控制夹爪输出适当位移以提升夹持力, 使对物体的抓持再次稳定。上述过程循环 3 次。

在该实验中, 为实现夹爪在抓取任务中对滑动的准确识别, 本研究设计了一套基于切向力波动特征的滑动识别机制, 并将其与增量式 PID 控制器相结合, 以实现力的动态调节。

具体而言, 滑动识别机制首先引入一个可以容纳连续 N 个数据点的滑动时间窗口, 用于存储近期采集到的切向力数据。通过对该窗口内的切向力序列进行分析, 计算其方差 σ^2 , 作为描述该时间段内接触面切向力波动程度的特征指标。该特征指标可表达为:

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x(i) - \bar{x})^2 \quad (14)$$

其中, $x(i)$ 表示滑动窗口内第 i 个点的切向力数据, \bar{x} 为该时间段内切向力的均值。当该滑动窗口内的切向力方差 σ^2 大于所设阈值 α 时, 系统认为当前正在发生滑动。此时, 系统将启动滑动响应机制。得益于本传感器高灵敏度的特性, 系统能够进一步量化滑动幅度的强弱。本研究定义了滑动幅度 n , 随后, 结合一个预设的增益因子 a , 得到:

$$n[k] = 1 + a \cdot (\sigma^2[k] - \alpha) \quad (15)$$

k 表示检测到滑动后的第 k 个控制周期编号。所求得的 n 可以作为 PID 控制中的增量输出权重, 引入该权重能够应对滑动过程中因滑动幅度不同而产生的响应需求变化。

本系统需要稳定控制夹爪法向力使其逐步逼近预设的目标力值。然而, 夹爪本身无法直接施加特定的力值, 其法向力的调节需依赖于位移的变化。针对这一特性, 系统采用了一种基于位移控制的闭环力调节策略, 作为实现力控制响应的关键机制。

具体地, 系统首先通过传感器实时获取当前夹爪法向力 F_{fdb} , 并计算与目标力 F_{ref} 之间的误差作为输入信号 e , 即:

$$e[k] = F_{\text{ref}}[k] - F_{\text{fdb}}[k] \quad (16)$$

该误差信号被传入增量式 PID 控制器, 用于输出控制增量, 即:

$$\Delta x[k] = k_p \cdot (e[k] - e[k-1]) + k_i \cdot e[k] + k_d \cdot (e[k] - 2e[k-1] + e[k-2]) \quad (17)$$

其中, Δx 表示在当前控制周期内夹爪的位移增量。该增量与滑动幅度 n 结合叠加于上一周期的目标位移控制指令, 可以得到本次控制周期的目标位移指令 x_{out} , 即:

$$x_{\text{out}}[k] = x_{\text{out}}[k-1] + n[k] \cdot \Delta x[k] \quad (18)$$

夹爪根据该目标位移指令执行动作。夹爪与目标物体的接触状态发生变化后, 传感器检测到的法向接触力 F_{fdb} 相应变化。该力值反馈回控制器, 完成一次闭环调节。

实验过程中传感器的法向力与切向力变化曲线如图 11 所示。

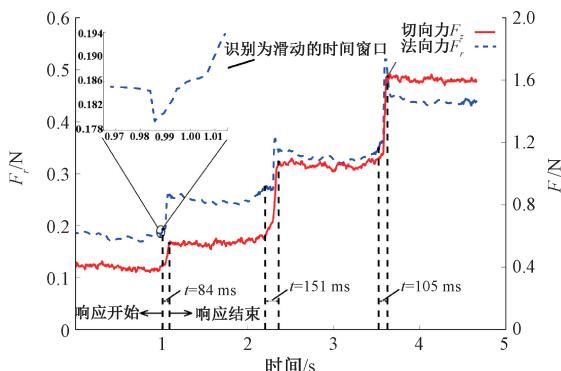


图 11 法向力与切向力变化曲线

Fig. 11 Normal and tangential force variation curves

图 11 中以系统检测到滑动事件发生的时刻作为响应起点, 以夹爪法向力重新趋于稳定的时刻作为响应终点。在发生了 3 次滑动的实验中, 系统平均响应时间为 113.3 ms。结果表明, 通过引入该传感器, 机械臂末端夹爪能够在滑动发生后迅速调整夹持力, 有助于避免物体滑落并提高抓取过程的稳定性。

5 结 论

本研究提出了一种新型的三维磁性触觉传感器, 通过设计正弦化的环形磁膜, 实现了法向力和切向力的自解耦。该传感器不仅具备对三维力灵敏的感知能力, 还能有效减少传感器的解耦复杂度和硬件成本, 避免了传统传感器在多维力解耦中存在的问题。得益于其柔性、高灵敏度、高精度等特点, 该传感器在灵巧手、柔性抓取、医疗辅助操作、遥操作人机交互等场景中具备广阔的应用潜力。

针对近距离强磁源导致的强外场与潜在饱和问题, 差分难以有效抑制。后续工作将从系统布局与结构防护两端入手: 限制强磁源靠近感知区域并引入磁屏蔽结构, 以降低强场影响。

工艺方面, 后续将引入自动涂膜机、四面涂膜器与真空吸附台, 实现恒速恒压的稳定涂布, 从而进一步提升磁膜的面内厚度均匀性与批间一致性。

参考文献

- [1] AVGOSTI S, CHRISTOFOROU E G, PANAYIDES A S, et al. Medical telerobotic systems: Current status and future trends [J]. Biomedical Engineering Online, 2016, 15(1): 96-309.
- [2] EHRAMPOOSH A, SHIRINZADEH B, PINSKIER J, et al. A force-feedback methodology for teleoperated suturing task in robotic-assisted minimally invasive surgery [J]. Sensors, 2022, 22(20): 7829.
- [3] HUANG F H, LI W W, WANG Y CH, et al. A shared control framework with constrained optimization and guiding force feedback for teleoperation of underwater electric manipulator [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2025, 50(2): 1030-1044.
- [4] HUANG F H, YANG X, MEI D Q, et al. Unified contact model and hybrid motion/force control for teleoperated manipulation in unknown environments [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2025, 30(2): 921-932.
- [5] PYO S, LEE J, BAE K, et al. Recent progress in flexible tactile sensors for human-interactive systems: From sensors to advanced applications [J]. Advanced Materials, 2021, 33(47): 2005902.
- [6] 钱煌, 陆熊, 张坤榕, 等. 面向电磁式力触觉再现的三维电磁作用力测量系统 [J]. 电子测量技术, 2019, 42(1): 45-48.

- QIAN H, LU X, ZHANG SH R, et al. Three-dimensional electromagnetic force measurement system for electromagnetic force-tactile reproduction [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2019, 42(1): 45-48.
- [7] SEE A R, TIONG T J, DE GUZMAN L B, et al. Development of localized cutaneous force feedback system for robotics assisted surgery systems [J]. *Procedia Computer Science*, 2024, 246: 1160-1169.
- [8] TAKAHASHI H. MEMS-based micro sensors for measuring the tiny forces acting on insects [J]. *Sensors*, 2022, 22(20): 8018.
- [9] GAO W D, LIU C L, LIU T, et al. An area-variant type MEMS capacitive sensor based on a novel bionic swallow structure for high sensitive nano-indentation measurement [J]. *Measurement*, 2022, 200: 111634.
- [10] DAI H ZH, ZHANG CH Q, PAN CH F, et al. Split-type magnetic soft tactile sensor with 3D force decoupling [J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(11): 2310145.
- [11] 秦冲. 新型柔性三维力触觉传感器的设计与研究 [J]. *传感器与微系统*, 2023, 42(10): 99-102.
- QIN CH. Design and research of a novel flexible three-dimensional force tactile sensor [J]. *Sensors & Microsystems*, 2023, 42(10): 99-102.
- [12] YAO N, WANG SH P. Recent progress of optical tactile sensors: A review [J]. *Optics & Laser Technology*, 2024, 176: 111040.
- [13] 张剑敏, 熊鹏文, 韦琦, 等. 面向纹理识别的便携式触觉传感器设计 [J]. *仪器仪表学报*, 2022, 43(10): 66-73.
- ZHANG J M, XIONG P W, WEI Q, et al. Design of a portable tactile sensor for texture recognition [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, 43(10): 66-73.
- [14] CHU M, CUI Z ANG, ZHANG AI L, et al. Multisensory fusion, haptic, and visual feedback teleoperation system under IoT framework [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2022, 9(20): 19717-19727.
- [15] GOMES D F, LIN ZH L, LUO SH. GelTip: A finger-shaped optical tactile sensor for robotic manipulation [C]. 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2020: 9903-9909.
- [16] LIU Y, TSAI Y Y, HUANG B D, et al. Virtual reality based tactile sensing enhancements for bilateral teleoperation system with in-hand manipulation [J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2022, 7(3): 6998-7005.
- [17] HU X CH, ZHU H, CHEN R W, et al. Design of 3D magnetic tactile sensors with high sensing accuracy guided by the theoretical model [J]. *Advanced Intelligent Systems*, 2023, 5(5): 2200291.
- [18] 谢君, 鲁妍池, 刘宇童, 等. 磁性液体触觉传感器的设计及特性研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2021, 42(1): 30-38.
- XIE J, LU Y CH, LIU Y T, et al. Design and characterization of a magnetic fluid tactile sensor [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(1): 30-38.
- [19] HOU H F, XIANG Z Y, ZHI CH N, et al. Optimized magnetization distribution in body-centered cubic lattice-structured magnetoelastomer for high-performance 3D force-tactile sensors [J]. *Sensors*, 2025, 25(7): 2312.
- [20] XU Y ZH, ZHANG SH F, LI SH Y, et al. A soft magnetoelectric finger for robots' multidirectional tactile perception in non-visual recognition environments [J]. *NPJ Flexible Electronics*, 2024, 8(1): 89-70.
- [21] XIE SH P, ZHANG Y F, JIN M H, et al. High sensitivity and wide range soft magnetic tactile sensor based on electromagnetic induction [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(3): 2757-2766.
- [22] LIU Y J, HAN H J, LIU T, et al. A novel tactile sensor with electromagnetic induction and its application on stick-slip interaction detection [J]. *Sensors*, 2016, 16(4): 430.
- [23] CHEN S, LI S, ZHENG Y T, et al. Highly sensitive and robust soft tri-axial tactile sensors enabled by dual inductive sensing mechanisms [J]. *Soft Science*, 2025, 5: 6.
- [24] YAN Y C, HU ZH, YANG ZH B, et al. Soft magnetic skin for super-resolution tactile sensing with force self-decoupling [J]. *Science Robotics*, 2021, 6(51): eabc8801.
- [25] YAN Y C, ZERMANE A, PAN J, et al. A soft skin with self-decoupled three-axis force-sensing taxels [J]. *Nature Machine Intelligence*, 2024, 6(11): 1284-1295.
- [26] BECKER C, BAO B, KARNAUSHENKO D D, et al. A new dimension for magnetosensitive e-skins: Active matrix integrated micro-origami sensor arrays [J]. *Nature*

- Communications, 2022, 13(1): 2121.
- [27] NETO M, RIBEIRO P, NUNES R, et al. A soft tactile sensor based on magnetics and hybrid flexible-rigid electronics[J]. Sensors, 2021, 21(15): 5098.
- [28] REHAN M, SALEEM M M, TIWANA M I, et al. A soft multi-axis high force range magnetic tactile sensor for force feedback in robotic surgical systems[J]. Sensors, 2022, 22(9): 3500.
- [29] MALLINSON J. One-sided fluxes-a magnetic curiosity? [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1973, 9(4): 678-682.
- [30] CRAIG J R R R, TALEFF E M. Mechanics of materials[M]. John Wiley & Sons, 2020.

作者简介



商珂,2023 年于盐城师范学院获得学士学位,现为南京信息工程大学硕士研究生,主要研究方向为力触觉交互的触觉遥操作系统。

E-mail:202312490086@nuist.edu.cn

Shang Ke received his B. Sc. degree from Yancheng Teachers University in 2023. He is currently a master student at Nanjing University of Information Science and Technology. His main research interest includes haptic teleoperation systems for force-tactile interaction.



宋爱国(通信作者),1990 年于南京航空航天大学获学士学位,1993 年于南京航空航天大学获硕士学位,1996 年于东南大学获博士学位,现为东南大学教授、博士生导师,主要研究方向为机器人传感与遥操作机器人技术、信号处理及仿生智能计算等。

E-mail:a.g.song@seu.edu.cn

Song Aiguo (Corresponding author) received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 1990 and 1993, respectively. He received his Ph. D. degree from Southeast University in 1996. He is currently a professor and a Ph. D. supervisor at Southeast University. His main research interests include robotic sensing and teleoperation robot technology, signal processing and bionic intelligent computing.