

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209397

基于电磁力控制的非接触式二维力触觉再现系统*

陆熊, 孙东, 鄢昱星, 陈晓丽, 黄晓梅
(南京航空航天大学自动化学院 南京 211106)

摘要:力触觉再现提供了操作者与虚拟物体间的双向信息和能量交互,有效提高了虚拟现实等应用系统的真实感、沉浸感和操作效率,成为人机交互的新兴技术和研究热点。本文实现了一种新型的基于电磁力控制的二维力触觉再现系统,该系统由二维背景电磁场产生和控制模块、指尖穿戴式永磁铁、人手位置检测模块和中央控制模块组成。基于 ANSYS 有限元分析,确定了系统中背景电磁铁线圈和指尖永磁铁的最优参数,获得指尖永磁铁所受电磁力与二维可控背景电磁铁驱动电流、指尖电磁铁位置的映射关系,形成离线仿真数据。提出了基于离线仿真数据实时插值的二维力触觉再现中电磁力控制方法。在实现系统原型的基础上,开展了作用力阈值感知基础实验和三维虚拟物体识别实验。实验结果表明,两种三维虚拟物体的识别实验成功率分别为 85.7% 和 71.4%,有效验证了本文所设计力触觉再现方法的有效性。

关键词:力触觉再现;二维可控磁场;非接触式;电磁力控制;有限元仿真分析

中图分类号: TP246.2 TH132 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.60

Non-contact two-dimensional haptic rendering system based on electromagnetic force control

Lu Xiong, Sun Dong, Yan Yuxing, Chen Xiaoli, Huang Xiaomei

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: Being a cutting-edge technique and hot topic in human-computer interaction, the haptic rendering provides bidirectional information and energy communication between human operators and the virtual environment (VE), which effectively enhances the level of reality and immersion and operating efficiency of virtual reality applications. This article proposes a novel two-dimensional (2D) haptic interface through electromagnetic force control, which consists of the two-dimensional background electromagnetic field generation and control module, fingertip-mounted permanent magnet, position tracking module, and central control module. The optimized parameter configuration for the electromagnetic coils and fingertip magnet is obtained with the ANSYS-based finite element analysis, which further reveals the relationship between the electromagnetic force, the driving currents for the 2D background magnetic field, and the position of the fingertip magnet. With the offline data for this relationship, a real-time interpolation-based force generation method is proposed for this 2D haptic rendering. Based on the proposed haptic interface prototype system, several experiments are carried out, including the force perception threshold experiment, and virtual object recognition experiment. Experimental results verify the efficacy of the proposed 2D haptic interface with the success rates for the two virtual object recognition experiments being 85.7% and 71.4%, respectively.

Keywords: haptic rendering; two-dimensional controllable magnetic field; non-contact interaction; electromagnetic force control; finite element analysis

收稿日期: 2022-03-08 Received Date: 2022-03-08

* 基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助(南京航空航天大学 NS2022040)、江苏省基础研究计划(自然科学基金)(BK20211186)、国家自然科学基金(61773205)、南京航空航天大学研究生科研与实践创新计划(xcxjh20210306)项目资助

0 引言

随着计算机技术、信息技术和人工智能技术等的发展,虚拟现实技术(virtual reality, VR)得到快速发展。虚拟现实技术借助计算机系统模拟产生三维的虚拟世界,同时向操作者传递视觉、听觉以及力触觉等信息,能够让操作者随心所欲地观察虚拟世界中的事物,并给操作者提供身临其境的感受。作为新兴的人机交互技术,力触觉再现成为虚拟现实系统的又一重要组成部分,其通过产生力触觉刺激以同时刺激人类触觉通道的皮肤感受器和动觉感受器^[1],使操作者触摸、感知到虚拟物体,大大增强了虚拟现实的真实感、沉浸感和交互效率,对促进虚拟现实技术以及人机交互技术的发展具有重要意义^[2]。

近年来,力触觉人机交互技术快速发展,越来越广泛地应用在机器人操作、遥操作、医学训练^[3]、机械制造和电子游戏等领域^[4]。比如西安交通大学 Li 等^[5]开发设计具有双向反馈的遥操作机械手;具有力反馈的微创神经内窥镜机器人手术工具^[6];南开大学王景港等^[7]利用振动触觉反馈提高机器人铣削骨曲面的精确度。

操作者通过力触觉再现接口设备实现与虚拟环境的交互。在力触觉再现技术的发展过程中,出现了以穿戴式^[8-9]、力反馈操纵杆式^[10-11]等为代表的传统的力触觉再现设备。在表面力触觉再现系统中通常通过振动^[7,12]、气动驱动^[13]、基于电刺激原理^[14]或电致振动原理^[15]等方法来进行反馈。

随着虚拟现实技术与人机交互技术的高速发展,为了降低因机械结构而产生的对操作者力触觉感知的影响,同时为实现操作者与虚拟世界之间真实、自然的交互,一些基于超声波^[16-17]、空气涡流^[18]、以及基于电磁力控制原理^[19-20]等非接触式的力触觉再现方法^[21]相继被提出。其中基于电磁作用力原理的力触觉再现装置的实现主要是通过调节空间中的磁感应强度来控制空间中磁性物体或导电材料^[22]所受到作用力的大小,由于其相对于接触式装置能够更好地再现低摩擦场景且能够适应内部惯性小的情况,成为国内外的研究热点。

例如 Langerak 等^[23]通过集成到单个球体中的3个正交电磁线圈产生的径向力和切向力实现3D的磁致动。Abler 等^[24]提出了一种基于被动移动磁铁和单个中心电磁致动器的手持球形触觉显示器来给用户的手掌提供皮肤触觉。Adel 等^[25-26]分别基于9个和25个平面电磁线圈阵列开发了基于位置的电磁触觉反馈系统。该系统的工作空间为150 mm×150 mm×20 mm,可产生50 mN的电磁力,可供受试者辨别4种三维虚拟物体的大致轮廓,但由于触觉反馈算法依赖于单个磁力,该系统的物体形状识别成功率受到限制。武汉大学 Tong 等^[27]设计了一种基于

电磁原理的新型磁悬浮触觉装置。通过该装置实验者可以清楚地、沉浸式地感知不同的组织刚度,在医疗培训领域拥有广泛的应用前景。本课题组设计了基于6个层叠式线圈的一维磁力式力触觉再现系统^[28],并开展了物体识别、纹理识别和用户评分等实验验证了系统有效性。

面向自然多模态人机交互,本文设计了基于电磁力控制的非接触式二维力触觉再现系统,给出了组成该力触觉再现系统的整体框架设计和各个模块的构成和作用,提出了基于有限元仿真的电磁力控制策略方法,最后基于该系统开展电磁力阈值感知基础实验和三维虚拟物体识别实验,验证该系统的有效性和可行性。

1 基于电磁力控制的二维力触觉再现系统

1.1 基于电磁力控制的二维力触觉再现的实现原理

根据电磁场的基本理论,当电磁铁线圈施加电流时,其会在周围空间内产生一定强度的电磁场。通过调节电磁铁的驱动电流,可以调节电磁场强度,实现对于空间中永磁体所受电磁力的调控。在如图1所示的电磁铁和永磁体模型中,佩戴于操作者指尖末端的永磁体可以等效为载流环形电流。

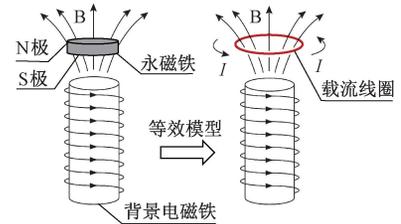


图1 电磁铁线圈和永磁体模型

Fig. 1 Electromagnet coil and permanent magnet models

对于给定的指尖永磁体,其等效磁矩可以表示为:

$$\mathbf{m} = m_x + m_y + m_z \quad (1)$$

其中, x 、 y 、 z 分别表示磁矩在坐标系3个正交方向的分量(设电磁铁轴线向上为 x 轴正向)。将本文中的指尖永磁体视为理想永磁体模型,则该永磁体磁矩在 y 和 z 方向上的分量为0。如图1中等效模型所示,指尖永磁体(设磁矩为 \mathbf{m})在电磁铁产生的背景磁场中所受的力矩 \mathbf{T} 和作用力 \mathbf{F} 分别为:

$$\mathbf{T} = \mathbf{m} \times \mathbf{B} \quad (2)$$

$$\mathbf{F} = (\mathbf{m} \cdot \nabla) \mathbf{B} \quad (3)$$

其中, \mathbf{B} 为背景电磁铁在指尖磁铁所处位置产生的磁感应强度, ∇ 为梯度算子。对于背景电磁铁而言,指尖永磁体内部并无电流流过,根据麦克斯韦尔方程,有 $\nabla \times \mathbf{B} = 0$,因此磁作用力变为:

$$\mathbf{F} = \left[\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial x} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial y} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial z} \right]^T \mathbf{m} \quad (4)$$

即对于理想的永磁铁,其在外磁场中受力由所处位置的磁感应强度梯度和磁矩确定。在图1所示模型中,由于永磁铁仅存在 x 正方向磁矩,因此其受到向下的电磁作用力。

根据上述基础理论,本文采用两对正交的类赫姆霍兹线圈来产生可控背景磁场和两对正交的永磁体作为指尖电磁铁模块,以便于产生 x 和 y 两方向上可控的反馈电磁力,形成基于磁力控制的二维力触觉再现。

1.2 基于电磁力控制的二维力触觉再现系统方案设计

如图2所示,本文所设计的整个基于电磁力控制的二维力触觉再现系统主要由二维背景电磁场的产生和控制模块、人手指尖穿戴式永磁铁、人手位置检测模块和中央控制模块组成。

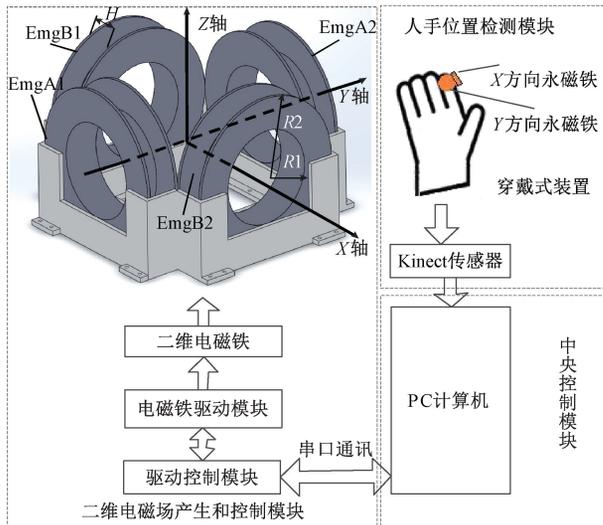


图2 基于电磁力控制的二维力触觉再现系统结构框图

Fig. 2 Block diagram of the two-dimensional haptic rendering system based on electromagnetic force control

1) 二维背景电磁场产生和控制模块

二维背景电磁场产生和控制模块作为二维力触觉再现系统中的关键模块,由二维电磁铁模块、电磁铁驱动模块以及驱动控制模块组成,如图2所示。二维电磁铁模块为操作空间中的指尖永磁铁提供背景磁场;电磁铁驱动和控制模块用来控制和驱动电磁铁,它们分别基于SA306AHR芯片和TM4C1294微控制器实现,通过调节PWM驱动信号的占空比以产生大小和方向可调的背景磁场。

2) 指尖穿戴式永磁铁

如图3所示,指尖穿戴式永磁铁是操作者与虚拟环境进行交互的工具,向操作者反馈力触觉信息。为与电磁模块相匹配,向操作者提供两个正交方向的力,通过在 x 和 y 方向各安装一块钕铁硼永磁铁来构建指尖永磁铁。

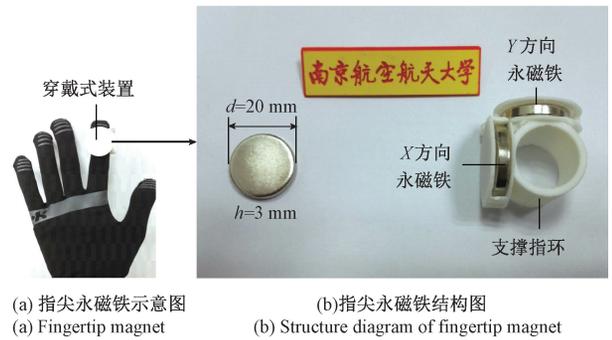


图3 指尖永磁铁

Fig. 3 Fingertip-mountable permanent magnet

3) 人手位置检测模块

力触觉交互中所需的指尖永磁铁位置,由Kinect 2.0以及NUC微型计算机构成的人手位置检测模块实时检测。其中Kinect 2.0获取操作空间中人手图像的的深度信息,并通过USB 3.0将深度信息交由NUC微型计算机进行人手位置检测算法。

4) 中央控制模块

中央控制模块采用Intel公司的NUC微型主机NUC6i7KYK(主频2.6 GHz的Intel酷睿i7 6770HQ型CPU,32 GB内存)实现,主要负责虚拟场景生成、位置检测算法实现和力触觉再现算法实现。中央控制模块首先通过运行人手位置检测算法,获得基于深度图像信息的人手三维位置坐标并将此坐标映射到虚拟空间的代理点;当虚拟环境中的虚拟物体与代理点发生碰撞时,计算出碰撞产生的作用力大小;根据电磁力与电流大小、位置的映射关系,将PWM占空比信息传递给二维背景电磁场的产生和控制模块,最终形成力触觉再现的作用力反馈。

1.3 基于有限元仿真数据的电磁力控制策略研究

三维空间中电磁场的分布以及方向、大小的改变都会对指尖永磁铁所受作用力产生的影响。为产生有效且可控的空间背景磁场,提供稳定且真实的力触觉反馈,本文基于电磁场中指尖永磁铁受力情况的有限元仿真数据分析结果,提出了一种基于二维电磁铁模组的电流激励模式。

首先借助有限元仿真工具,对二维电磁铁模组的电磁场进行仿真,分析其电磁场在三维空间中的分布情况;在电磁场在三维空间中分布的有限元仿真的分析结果的基础上,对指尖永磁铁在电磁场不同位置处所受电磁力进行仿真分析,以及对当电磁铁施加不同电流组合情况下指尖永磁铁的受力情况进行分析,分析电磁场中指尖永磁铁的受力区间以及电磁力调节的规律性;分析研究在操作空间中指尖永磁铁所受电磁力与位置、电流之间存在的映射关系。以 Y 方向受力为例通过建立表达式(5),分析指尖永磁铁的受力与电流、位置的关系,获得真实的基于电磁的力触觉反馈。

$$F_y = f(x, y, z, I_1, I_2) = g(x, y, z) \times (D_1 I_m + D_2 I_m) \quad (5)$$

其中, F_y 为指尖永磁铁在 y 轴方向上所受电磁力的大小; I_1, I_2 分别为电磁铁 EmgA1, EmgA2(图 2)所施加的电流大小, I_m 为驱动电压满载时电磁铁上的最大电流值, D_1, D_2 分别为 I_1, I_2 相对应的 PWM 信号占空比; $g(x, y, z)$ 表示在三维空间 (x, y, z) 处指尖永磁铁受力与电磁铁所施加电流大小的对应关系。

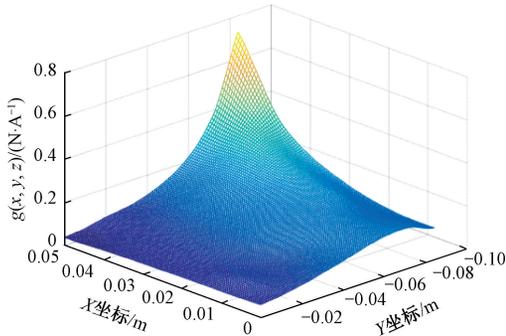
当单个电磁铁工作时,只考虑电磁铁 EmgA2 工作情况,此时 I_1 为 0,则指尖永磁铁的受力与位置、电流的映射关系变为:

$$F_y = f(x, y, z, 0, I_2) = g(x, y, z) \times D_2 \times I_m \quad (6)$$

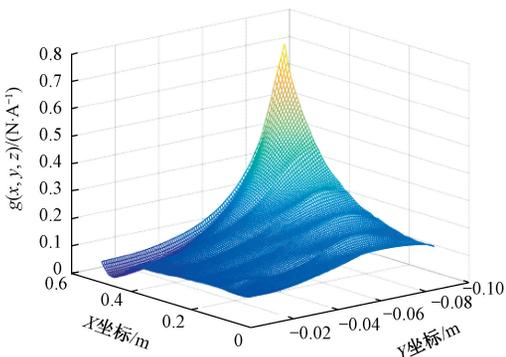
当两个电磁铁同时工作时,其目的是增大操作空间中指尖永磁铁所受的作用力,所以固定 I_2 为满载工作时的最大电流,即 I_m ,而 I_1 的大小从 0~ I_m 范围内可调,则指尖永磁铁受力与位置、电流的映射关系变为:

$$F_y = f(x, y, z, I_1, I_2) = g(x, y, z) \times (D_1 I_m + I_m) \quad (7)$$

最终指尖永磁铁所受电磁力与位置、电流之间存在的映射关系如图 4 所示,得到单个电磁铁工作和两个电磁铁同时工作情况下的映射关系曲线。根据二维电磁铁模組结构的对称性,可以获取整个操作空间中 $g(x, y, z)$ 的关系曲线。根据该映射关系确定施加在线圈上的电流大小,来提供作用力反馈。



(a) 单个电磁铁工作时 $g(x, y, z)$ 与坐标映射关系曲线
(a) $g(x, y, z)$ and coordinate mapping relationship curve under the working condition of a single electromagnet



(b) 两个电磁铁工作时 $g(x, y, z)$ 与坐标映射关系曲线
(b) $g(x, y, z)$ and coordinate mapping relationship curve under the working condition of two electromagnets

图 4 指尖永磁铁所受电磁力与位置、电流之间映射关系曲线
Fig. 4 The mapping relationship curve between the electromagnetic force received by the permanent magnet and the position and current

1.4 反馈电磁力的精度和响应时间分析

为了验证本系统中所使用的 ANSYS 有限元仿真方法获得的永磁铁受力的精度,使用基于中航电测 1 A 微型力传感器(量程 1 kg,精度 2%)自制的磁力测量设备对自制的电磁铁线圈轴线上的永磁铁所受电磁力进行测量和验证。整个标定实验平台固定在 RCP2-SA5C 电动平移台上(位移精度为 ± 0.02 mm),验证实验环境如图 5 所示。

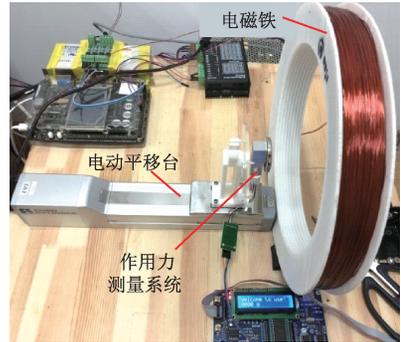


图 5 电磁力验证实验场景

Fig. 5 Electromagnetic force verification experiment scene diagram

在实验中,对电磁铁线圈(1 500 匝、骨架采用 0.67 mm 的 QZ-2 漆包铜线绕制、内半径 115 mm、外半径 145 mm、厚度 30 mm、总电阻 15.46 Ω)施加 1.6 A 的激励电流;永磁铁直径为 40 mm,厚度 4 mm;设坐标原点为电磁线圈的中心点,线圈轴线方向为 Z 轴方向。选取线圈轴线上的多点进行作用力测量,得到永磁铁处于不同位置时所受电磁力,并与 ANSYS 有限元仿真结果进行比较,如图 6 所示。

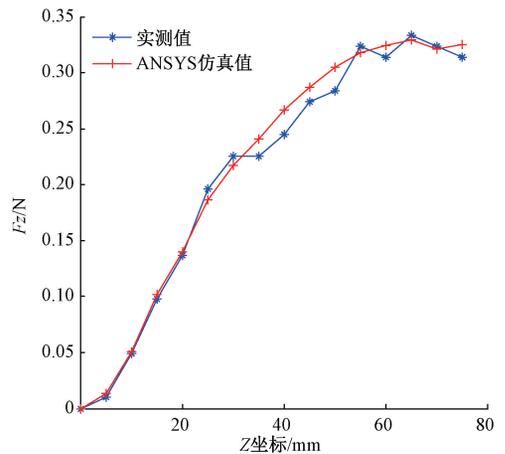


图 6 电磁力实测值与仿真值对比

Fig. 6 Comparison of measured and simulated electromagnetic force values

实验结果表明永磁铁所受电磁力仿真值平均误差为 3.84%,最大误差为 7.90%。考虑到一般的力触觉反馈设备采用开环控制策略,该精度满足力触觉再现接口设备的要求。

综合考虑所需的反馈电磁力、工作空间等因素,根据有限元仿真的结果确定本系统中产生背景磁场的线圈参数分别为外径 85 mm,内径 55 mm,厚度 30 mm,铜线线径 0.67 mm,匝数 2 000 匝;永磁铁尺寸为半径 20 mm,厚度为 3 mm。根据该参数,本文自行绕制的电磁铁线圈平均电感为 343.65 mH,平均电阻为 31.80 Ω 。单个电磁铁的驱动电流从 0 A 变化到 1.6 A 的最大响应时间约为 30 ms。虽然对于力触觉再现,500 Hz 或更高的作用力刷新率能够获得更好的体验和性能(尤其是仿真刚性物体时),但本系统 33 Hz 左右的刷新率,能够满足虚拟环境中对于一般物体的力触觉再现刷新率要求。

2 实验验证

基于电磁力控制的二维力触觉再现系统实验环境如图 7 所示。为了验证本文所设计的磁力式二维力触觉再现系统的有效性,开展操作者作用力感知阈值实验和虚拟物体识别实验。

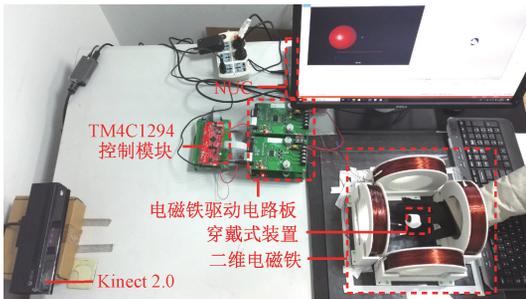


图 7 实验环境

Fig. 7 Experimental environment

2.1 操作者作用力感知阈值实验

操作者作用力感知阈值实验邀请了 5 名实验对象参与实验。在本实验中,仅给电磁线圈 EmgA1 施加激励电流,大小为 0.05 A,操作者需要佩戴指尖电磁铁模块,将手指放置在距离电磁线圈 EmgA1 正前方 3 cm 处感受电磁力。操作者未感知到电磁力时,逐步增大激励电流,直至操作者感受到电磁力,测量并记录此时力的大小。实验结果如表 1 所示。

由表 1 可知,1)男女的电磁作用力感知阈值分别为 0.055 N 和 0.040 N,女性对电磁作用力的感知较为敏感;2)本次的实验结果可以作为后续基于电磁力控制的力触觉再现设备的作用力参考,只有当反馈作用力大于感知阈值时,该力触觉再现才是可被感知的。

表 1 电磁作用力阈值感知实验结果

Table 1 Experimental results of electromagnetic force perception threshold

实验对象	性别	感知阈值	男/女感知平均阈值	平均感知阈值
S1	男	0.081		
S2	男	0.039	0.055	
S3	男	0.045		0.049
S4	女	0.041		
S5	女	0.038	0.040	

2.2 虚拟物体识别实验

虚拟物体识别实验邀请了 7 名实验对象参与实验,他们均身体健康,年龄在 23~26 岁之间,惯用右手。实验开始之前先对实验对象进行训练使其熟悉力触觉再现系统的操作方法和流程,然后通过基于电磁力控制的二维力触觉再现系统,开展虚拟三维物体识别实验。

本次实验准备两种虚拟三维物体,如图 8 所示圆柱体和立方体的中心点都设为 X 方向与 Y 方向上的轴线相交处。虚拟物体识别实验的实验结果如表 2 所示。

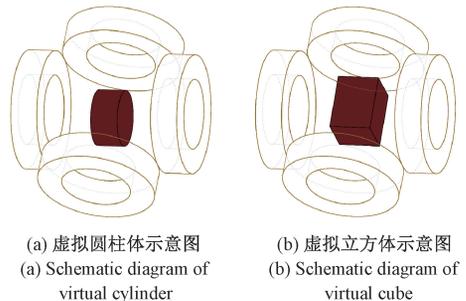


图 8 虚拟三维物体识别实验模型

Fig. 8 Three-dimensional virtual object recognition experiment

表 2 立体图案识别实验结果

Table 2 Experimental results of three-dimensional object recognition

实验对象	圆柱体	立方体
S1	成功	失败
S2	成功	成功
S3	成功	成功
S4	失败	成功
S5	成功	成功
S6	成功	失败
S7	成功	成功
成功率	85.7%	71.4%

由表2可知,1)实验对象对于轮廓与电磁铁形状接近的虚拟物体,如圆柱体,识别率要高于轮廓与电磁铁形状差距较明显的虚拟物体;2)实验对象对于虚拟物体感知成功率较高,表明基于电磁力控制的二维触觉再现系统能有效用于感知虚拟物体,验证了本系统的有效性。

3 结 论

本文提出了基于电磁力控制的二维力触觉再现系统。整个系统设计包括两对正交的线圈组构成的二维背景电磁铁、电磁铁产生和控制模块、用于与用户交互的指尖穿戴式永磁铁模块、基于 Kinect 的人手位置检测模块和主要用来运行力触觉算法、运行人手位置检测算法以及实现信息通讯功能 NUC 中央控制模块。

在电磁场控制策略方面,给出了二维电磁铁产生的磁场分布以及操作空间中的指尖永磁铁受力的有限元仿真分析研究;其次,基于有限元仿真数据,研究电磁力与电流、位置的映射关系,给出了电磁力的控制方法。最后通过电磁作用力阈值感知实验获取人的感知阈值,为以后基于电磁力控制的力触觉再现设备提供了参考;并通过三维虚拟物体力触觉感知实验验证了本系统的有效性。

本文所研制的基于电磁力控制的二维力触觉再现系统,消除了传统力触觉再现设备需要机械连杆的约束,提高了操作的可移动性和直观性。这种适用于人手灵巧操作的、自然人机交互的模式将进一步促进力触觉再现技术的发展和更广泛的应用。

参考文献

- [1] WANG D X, OHNISHI K, XU W. Multimodal haptic display for virtual reality: A survey [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 67(1): 610-623.
- [2] 陆熊,陈晓丽,孙浩浩,等. 面向自然人机交互的力触觉再现方法综述 [J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(10): 2391-2399.
LU X, CHEN X L, SUN H H, et al. Haptic rendering methods for natural human-computer interaction: A review [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(10): 2391-2399.
- [3] 欧阳云霞,李会军,宋爱国. 交互式自解耦桌面康复训练机器人系统 [J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(2): 171-179.
OUYANG Y X, LI H J, SONG AI G. Interactive self-decoupling desktop rehabilitation training robot system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(2): 171-179.
- [4] 吴一川,孟欢欢,黄启洋,等. 面向触觉力反馈的可穿戴柔性执行器研究现状 [J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(9): 244-252.
- [5] LI M, ZHUO Y, CHEN J, et al. Design and performance characterization of a soft robot hand with fingertip haptic feedback for teleoperation [J]. Advanced Robotics, 2020, 34(23): 1491-1505.
- [6] CHEN T H, SAADATNIA Z, KIM J, et al. Novel, flexible, and ultrathin pressure feedback sensor for miniaturized intraventricular neurosurgery robotic tools [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(5): 4415-4425.
- [7] 王景港,夏光明,代煜,等. 基于振动触觉反馈的机器人辅助骨曲面铣削 [J]. 机器人, 2021, 43(4): 484-492.
WANG J G, XIA G M, DAI Y, et al. Robot-assisted milling on the bone curved surface based on vibrotactile feedback [J]. Robot, 2021, 43(4): 484-492.
- [8] MACGAVIN B, EDWARDS T, GORLEWICZ J L. A protactile-inspired wearable haptic device for capturing the core functions of communication [J]. IEEE Transactions on Haptics, 2021, 14(2): 279-284.
- [9] GUO Y, YANG X, WANG H, et al. Five-fingered passive force feedback glove using a variable ratio lever mechanism [C]. Proceedings of the Actuators, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2021, 10(5): 96.
- [10] FERREIRA A, MAVROIDIS C. Virtual reality and haptics for nanorobotics [J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2006, 13(3): 78-92.
- [11] 莫依婷,宋爱国,秦欢欢. 指端可穿戴式力触觉交互装置设计与评估 [J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(5): 161-168.
MO Y T, SONG AI G, QIN H H. Design and evaluation of a wearable fingertip haptic interaction device [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(5): 161-168.
- [12] 陆熊,林闽旭,高永强,等. 面向多点交互的多模态振动反馈触觉再现系统 [J]. 国防科技大学学报, 2021, 43(3): 52-57.
LU X, LIN M X, GAO Y Q, et al. Vibration feedback based multi-modal haptic rendering system for multi-contact interaction [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2021, 43(3): 52-57.
- [13] ZHENG Y, WANG D, WANG Z, et al. Design of a lightweight force-feedback glove with a large

- workspace [J]. *Engineering*, 2018, 4(6): 869-880.
- [14] 胡旭晖, 石珂, 祝佳航, 等. 基于力触觉感知与电刺激反馈的灵巧假手 [J]. *机械工程学报*, 2019, 55(11): 10-18.
HU X H, SHI K, ZHU J H, et al. Dexterous prosthetic hand with force perception and electrical [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(11): 10-18.
- [15] 王婷婷, 陈建, 孙晓颖. 图像局部纹理特性的静电力触觉渲染 [J]. *中国图象图形学报*, 2016, 21(10): 1383-1391.
WANG T T, CHEN J, SUN X Y. Electrostatic haptic rendering of local texture properties of images [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2016, 21(10): 1383-1391.
- [16] LONG B, SEAH S A, CARTER T, et al. Rendering volumetric haptic shapes in mid-air using ultrasound [J]. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 2014, 33(6): 1-10.
- [17] HOSHI T, TAKAHASHI M, IWAMOTO T, et al. Noncontact tactile display based on radiation pressure of airborne ultrasound [J]. *IEEE Transactions on Haptics*, 2010, 3(3): 155-165.
- [18] GUPTA S, MORRIS D, PATEL S N, et al. Airwave: Non-contact haptic feedback using air vortex rings [C]. *Proceedings of the Proceedings of the 2013 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, 2013: 419-428.
- [19] 赵俭辉, 林远轩, 袁志勇. 面向虚拟介入手术的电磁力反馈模型的设计与仿真 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2021, 33(8): 1254-1263.
ZHAO J H, LIN Y X, YUAN ZH Y. Designing and simulation of electromagnetic force feedback model focusing on virtual interventional surgery [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2021, 33(8): 1254-1263.
- [20] 朱炜煦, 袁志勇, 童倩倩. 电磁力反馈中磁场特性分析与线圈姿态计算 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2016, 30(4): 590-597.
ZHU W X, YUAN ZH Y, TONG Q Q. Coil magnetic field characteristics analysis and coil spatial pose calculation in magnetic haptic feedback [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2016, 30(4): 590-597.
- [21] BERMEJO C, HUI P. A survey on haptic technologies for mobile augmented reality [J]. *ArXiv Preprint*, 2017, ArXiv: 1709.00698.
- [22] PHAM L N, TABOR G F, POURKAND A, et al. Dexterous magnetic manipulation of conductive non-magnetic objects [J]. *Nature*, 2021, 598(7881): 439-443.
- [23] LANGERAK T, ZÁRATE J J, LINDLBAUER D, et al. Omni: Volumetric sensing and actuation of passive magnetic tools for dynamic haptic feedback [C]. *Proceedings of the Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, 2020: 594-606.
- [24] ABLER A, ZÁRATE J, LANGERAK T, et al. Hedgehog: Handheld spherical pin array based on a central electromagnetic actuator [C]. *Proceedings of the 2021 IEEE World Haptics Conference (WHC)*, IEEE, 2021: 133-138.
- [25] ADEL A, MICHEAL M M, ABOU S M, et al. Rendering of virtual volumetric shapes using an electromagnetic-based haptic interface [C]. *Proceedings of the 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, IEEE, 2018: 1-9.
- [26] ADEL A, ABOU S M, HÖLZL G, et al. Rendering 3D virtual objects in mid-air using controlled magnetic fields [C]. *Proceedings of the 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, IEEE, 2017: 349-356.
- [27] TONG Q, YUAN Z, LIAO X, et al. Magnetic levitation haptic augmentation for virtual tissue stiffness perception [J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2017, 24(12): 3123-3136.
- [28] LU X, YAN Y, QI B, et al. Contactless haptic display through magnetic field control [J]. *IEEE Transactions on Haptics*, 2022, 15(2): 328-338.

作者简介



陆熊(通信作者), 分别在 2000 年、2003 年和 2008 年于东南大学获得学士学位、硕士学位和博士学位, 现为南京航空航天大学自动化学院副教授。2019~2020 年于英国圣安德鲁斯大学计算机学院访学一年。主要研究方向为力触觉再现和人机交互。

E-mail: luxiong@nuaa.edu.cn

Lu Xiong (Corresponding author) received his B. Sc., M. Sc. and Ph. D. degrees all from Southeast University in 2000, 2003 and 2008, respectively. He is currently an associate professor in the College of Automation Engineering at Nanjing University of Aeronautics and Astronautics. He has been a visiting scholar (2019~2020) at Computer Human Interaction (SACHI) Group, School of Computer Science, University of St Andrews, Scotland, United Kingdom. His main research interests include haptic rendering, tactile rendering and human computer interaction.