

DOI:10.19651/j.cnki.emt.1801976

面向电磁式力触觉再现的三维电磁作用力测量系统^{*}

钱 煌 陆 熊 张坤榕 何 敏 黄晓梅

(南京航空航天大学 自动化学院 南京 211106)

摘 要: 基于电磁式的力触觉再现系统中,磁性单元所受电磁力的大小和精度直接决定了力触觉再现的真实感和性能。本文构建了基于微型传感器的三维电磁作用力测量系统,用以验证通过有限元仿真方法得出的磁性单元受力的正确性。以实际绕制的线圈为实验对象研究了磁性单元受力和其与线圈之间的距离关系,实验数据表明,力测量系统测得的磁性单元受力与有限元仿真结果基本一致。本文研制的三维电磁力测量系统能够验证电磁力有限元仿真模型的正确性,对于促进电磁式力触觉再现的发展具有重要的意义。

关键词: 力触觉再现;电磁力;有限元仿真;三维力测量

中图分类号: TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8040

Three-dimensional electromagnetic force measurement system for electromagnetic haptic rendering

Qian Huang Lu Xiong Zhang Shenrong He Min Huang Xiaomei

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

Abstract: In electromagnetic haptic rendering system, the magnitude and accuracy of the electromagnetic force directly determine the performance and reality of the system. In order to verify the correctness of the magnetic element obtained by finite element simulation, a three-dimension electromagnetic force measurement system based on micro-sensor is constructed. The relationship between the force of the magnetic element and the distance is studied by the actual coil. The experimental data show that the force of the magnetic element measured by the force measurement system is in agreement with the simulation result of the finite element analysis method. The three-dimensional electromagnetic force measurement system proposed by this paper can verify the correctness of the model used by finite element analysis method, which is of great significance for promoting the development of electromagnetic haptic rendering.

Keywords: haptic rendering; electromagnetic force; finite element analysis; three-dimension force measurement

0 引 言

力触觉人机交互是目前比较前沿的新兴技术之一^[1-2],其改变了传统的人机交互方式,用户可以不局限于视觉和听觉,主动实现对虚拟场景的感知、触摸和操作,从而实现人与虚拟世界的交互^[3]。借助机械结构^[4-5]的力触觉感知设备能够很好地实现人体对虚拟物体的感知,但是由于机械结构中摩擦力的存在,对于人体的感知存在着一定的影响^[6]。因此,非接触式^[7]、自然交互的力触觉再现方法被提出,操作者可以在不直接接触接口装置的情况下感知虚拟物体,其中电磁式^[8]力触觉再现系统便是重要代表之一,其能够避免摩擦力对人体感知的影响,营造一个理想的交互环境,并且在电磁式力触觉再现系统中,操作者可以通过改

变线圈电流来改变磁性单元所受到的电磁力。正由于电磁式力触觉再现系统的种种优越性,正受到越来越多的关注^[9-12]。电磁式力触觉再现系统通过穿戴式手套上附着的磁性单元,利用磁性单元在磁场中所受到的电磁力实现对人手的力触觉反馈。

在电磁式力触觉再现系统中,通过有限元仿真方法得到磁性单元所受到的电磁力,通过离线的仿真数据建立磁性单元所受电磁力和其在磁场中所处的空间位置、线圈电流之间的对应关系。因此,如何验证通过有限元仿真方法得到的磁性单元受力的正确性以及确保仿真数据的精度,是影响电磁式力触觉再现系统性能的一个重要问题。

在力触觉再现系统中,对于各种力反馈装置中力的大小测量有着较多的研究。如 Giovinazzo 等^[13]研制了一种

收稿日期:2018-08-09

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(61773205)项目资助

电容式六维力传感器,通过装置内的电极片受力形变后电容改变的特性来实现对力的感知和测量。Marchuk 等^[14]通过两个微型力传感器,获得一定振动频率下玻璃表面空气层与手指之间摩擦力的切向力和法向力。吉林大学的孙晓颖等^[15]设计了一种力触觉的测量装置,通过固定在弹簧底座上的 4 个六自由度力传感器,准确测量手指在触觉再现屏幕上的触觉力。

在电磁式力触觉再现系统的应用中,对于磁性单元所受电磁力的测量具有较高的要求。针对现有测力方法中未有较系统测量电磁力的装置这一背景,本文基于微型力传感器自行研制了一套面向电磁式力触觉再现的三维电磁力测量系统。

1 力测量装置系统方案设计

本文设计的向电磁式力触觉再现的三维电磁作用力测量系统,其系统框图如图 1 所示。

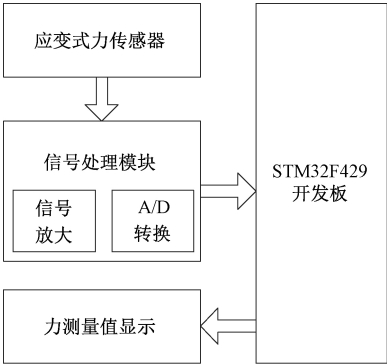


图 1 三维电磁作用力测量系统框图

整个系统包括应变式力传感器模块、信号处理模块、STM32F429 开发板模块 3 个部分,各个模块的具体组成以及作用如下:

1)应变式力传感器模块:此模块包含 3 个中航电测仪器股份有限公司的 1A 型力传感器,分别测量磁性单元在 X、Y 和 Z 方向上所受到的电磁力。

2)信号处理模块:本模块包含基于 AD623AN 的信号放大模块和基于 STM32F429 的 A/D 采集模块,用于将从力传感器采集到的模拟力测量信号进行放大并将其转换成数字信号。

3)STM32F429 开发板:此模块用于力测量值的显示。系统实物如图 2 所示。

2 应变式力传感器模块设计

中航电测仪器股份有限公司的微型力传感器 1A 为铝制非磁性材料,适用使用需求。利用 3 个传感器构建基于三维直角坐标系的测力装置,如图 3 所示。在进行测量时,将磁性单元固定在磁性单元夹持装置上,放置在电磁场中,通

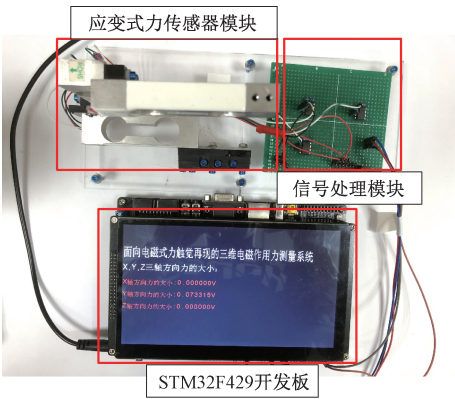


图 2 系统实物

过力传感器分别测量磁性单元在 3 个轴向上所受的电磁力。

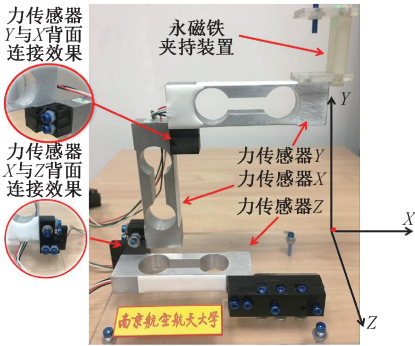


图 3 三维力测量装置

3 实验及数据分析

3.1 系统标定实验

为了减小装置在安装过程中以及传感器信号测量过程中对实验结果产生的影响,系统在搭建完成之后进行标定实验。通过不同砝码对应的电压信号测量,得到力与电压信号之间的关系,实验数据如表 1 所示。

表 1 标定实验数据

砝码质量/ g	传感器 x / V	传感器 y / V	传感器 z / V
0	0	0	0
50	0.254	0.294	0.298
100	0.697	0.627	0.622
150	0.96	0.941	0.939
200	1.313	1.255	1.258
250	1.607	1.568	1.571
300	1.901	1.882	1.877
350	2.254	2.196	2.201
400	2.685	2.631	2.633
450	3.017	2.981	2.979
500	3.311	3.255	3.245

通过数据分析可知,力与电压信号之间可以认为呈线性关系,且关系如式(2)所示。

$$y = 1.876x - 0.528 \tag{2}$$

3.2 实物测量实验

使用如图 4(a)所示本课题组自行设计绕制的线圈为此测力系统提供背景磁场,以此来测量如图 4(b)所示的磁性单元所受到的电磁力。磁性单元所受电磁力的理论值将通过 ANSYS 有限元仿真的方法得到。

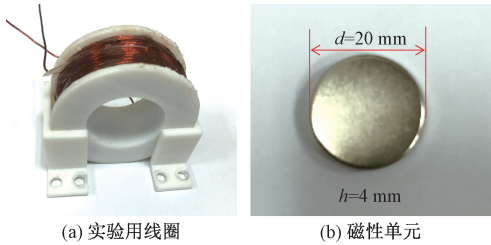


图 4 实验用线圈和永磁铁

自行绕制的线圈参数:内径为 1.5 cm,外径为 2.5 cm,厚度 h 为 1.5 cm,匝数为 210 匝,电流为 1.6 A。通过有限元仿真分析得到磁性单元轴向中心与线圈轴向中心不同距离时力的仿真结果,如图 5 所示,数据如表 2 所示。

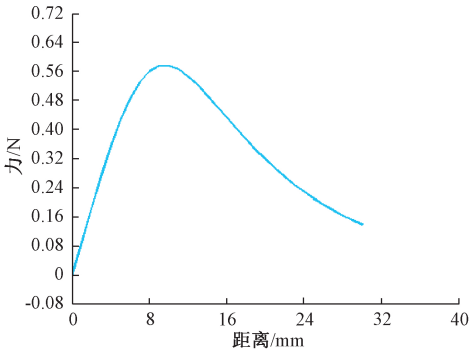


图 5 ANSYS 仿真结果

表 2 磁性单元受力 ANSYS 有限元仿真结果

距离/ mm	X 方向 受力/N	Y 方向 受力/N	Z 方向 受力/N
9.5	0	0	0.577 2
14.5	0	0	0.478 9
19.5	0	0	0.331 3
24.5	0	0	0.219 0
29.5	0	0	0.144 5

为了测量的方便性以及准确性,测量起始点为线圈端面与永磁铁端面重合的地方,力测量系统实际测量得到 3 个传感器所受力的大小,如表 3 所示。

由表 2 和 3 中的数据可以分析得出,本文设计的力测

表 3 实验实测数据

距离/ mm	X 方向 受力/N	Y 方向 受力/N	Z 方向 受力/N
9.5	0.026	0.003 5	0.595 5
14.5	0.009	0	0.465 0
19.5	0.003	0.001 0	0.294 8
24.5	0.002	0	0.238 9
29.5	0	0.006	0.122 5

量系统在 X,Y 轴方向的力与理论结果基本一致,存在微小的误差,Z 轴所测结果如图 6 所示。

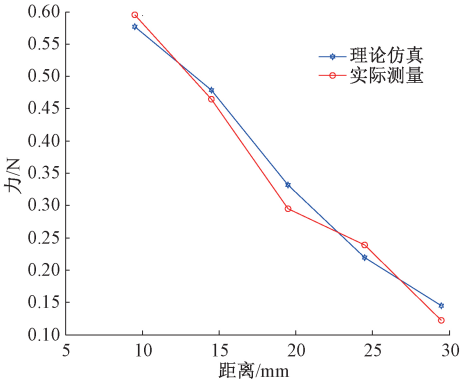


图 6 Z 方向仿真结果与实测结果比较

由图 6 可知,通过本文设计的三维力测量装置所测得的磁性单元受力与通过 ANSYS 有限元仿真方法得出的力比较接近,存在着一定的误差,分析原因是由传感器结构间的微小晃动以及传感器本身的误差所引起的,基本达到预期效果。

4 结 论

本文利用微型力传感器设计制作了面向电磁式力触觉再现的三维电磁力测量系统,通过 3 个两两垂直的传感器分别测量磁性单元在 X、Y、Z 轴方向上所受的电磁力。这一电磁力测量系统克服了传统电磁式力触觉再现系统中磁性单元所受电磁力大小、精度难以测量的弊端,为精确的电磁力触觉再现提供了基本的数据保证,同时本套测力系统将为通过仿真分析得出的磁性单元受力大小提供基本的数据验证。

参考文献

[1] 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.

[2] 陆熊,宋爱国.力/触觉再现设备的研究现状与应用[J].测控技术,2008,27(8):6-10.

[3] 宋爱国,田磊,倪得晶,等.多模态力触觉交互技术及应用[J].中国科学:信息科学,2017,47(9):1183-1197.

- [4] DAI J Q, SONG A G, WANG A M. Novel magneto-rheological fluid damper for passive force/torque feedback[J]. 东南大学学报(英文版), 2007, 23(1): 70-74.
- [5] GUINAN A L, MONTANDON M N, DOXON A J, et al. Discrimination thresholds for communicating rotational inertia and torque using differential skin stretch feedback in virtual environments[C]. Haptics Symposium, IEEE, 2015.
- [6] 王爱民, 戴金桥. 人机交互中的力/触觉设备进展综述[J]. 工业仪表与自动化装置, 2007(2): 14-18, 25.
- [7] SUZUKI Y, KOBAYASHI M. Air jet driven force feedback in virtual reality [J]. IEEE Computer Graphics & Applications, 2005, 25(1): 44.
- [8] ZHANG Q, DONG H, SADDIK A E. Magnetic field control for haptic display: system design and simulation[J]. IEEE Access, 2016, 4: 299-311.
- [9] HU J, CHANG C Y, TARDELLA N, et al. Effectiveness of haptic feedback in open surgery simulation and training systems[J]. Studies in Health Technology & Informatics, 2006, 119: 213.
- [10] KARUNANAYAKA K, SIRIWARDANA S, EDIRISINGHE C, et al. Haptic mouse-enabling near surface haptics in pointing interfaces [J]. Achi, 2013, 336-341.
- [11] TONG Q, YUAN Z, ZHENG M, et al. A novel magnetic levitation haptic device for augmentation of tissue stiffness perception [C]. Proceedings of the ACM Conference on Virtual Reality Software and Technology, 2016: 143-152.
- [12] 赵丽萍. 基于电磁场控制的力触觉再现方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2017.
- [13] GIOVINAZZO G, VARRONE P. Transducer with six degrees of freedom [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 1982.
- [14] MARCHUK N D, COLGATE J E, PESHKIN M A. Friction measurements on a large area TPd [C]. Proceedings of the Haptics Symposium, 2010: 317-320.
- [15] 孙晓颖, 王庆龙, 王婷婷, 等. 一种力触觉的测量装置: 中国, CN204158402U[P]. 2015-02-18.

作者简介

钱煌, 1993 年出生, 硕士研究生, 主要研究方向为力触觉人机交互。

E-mail: qh@nuaa.edu.cn

陆熊, 1980 年出生, 博士、副教授、硕士生导师, 主要研究方向为力触觉人机交互与虚拟现实。

E-mail: luxiong@nuaa.edu