

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210058

面向纹理识别的便携式触觉传感器设计*

张剑敏¹,熊鹏文^{2,3},韦琦¹,刘国平²,刘继忠²

(1.南昌大学信息工程学院 南昌 330031; 2.南昌大学先进制造学院 南昌 330031;
3.中国科学技术大学自动化系 合肥 230026)

摘要:本文设计了一种面向纹理识别的便携式触觉传感器,该传感器利用光纤光栅(FBG)识别检测不同的纹理和滑动接触速度,且便于机器人系统集成,同时对硬件和软件配置要求低,受环境影响小。在三维建模基础上对传感器结构进行静力学分析并优化,提高FBG对力觉信息的灵敏度;专门设计并搭建了实验平台,对传感器进行静力标定实验和复杂多纹理表面检测实验。通过实验数据的时频分析,验证了该传感器可以识别不同的滑动接触速度和不同的纹理。在该传感器中,FBG3的灵敏度最高,加载时,平均灵敏度约为51.1 pm/N,线性度为0.998;卸载时,平均灵敏度约为50.8 pm/N,线性度为0.998。FBG2的重复性误差和迟滞性误差最大,分别为2.35%和2.23%。

关键词: 光纤布拉格光栅;假手;触觉传感器;纹理识别

中图分类号: TH823 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4020

Design of the portable tactile sensor for texture recognition

Zhang Jianmin¹, Xiong Pengwen^{2,3}, Wei Qi¹, Liu Guoping², Liu Jizhong²

(1. School of Information Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 2. School of Advanced Manufacturing, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 3. Department of Automation, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: In this article, a portable tactile sensor for texture recognition is designed. The sensor uses fiber Bragg grating (FBG) to recognize and detect different textures and sliding contact speed, which is convenient for robot system integration. Meanwhile, it has low requirement on hardware and software configuration, which is less affected by the environment. Based on the three-dimensional modeling, the sensor structure is statically analyzed and optimized to improve the sensitivity of FBG to force sensing information. A special experimental platform is designed and established to carry out static calibration experiments and complex multi-texture surface detection experiments on the sensor. Through time-frequency analysis of experimental data, it shows that the sensor can recognize different sliding contact speed and different texture. Among the sensors, FBG3 has the highest sensitivity, with an average sensitivity of about 51.1 pm/N and a linearity of 0.998 under loading. When it is unloaded, the average sensitivity is about 50.8 pm/N, and the linearity is 0.998. The repeatability error and hysteresis error of FBG2 are the largest, which are 2.35% and 2.23%, respectively.

Keywords: fiber Bragg grating; prosthetic hand; tactile sensor; texture recognition

0 引言

力触觉传感器是一种用途非常广泛的传感器,可以通过力触觉传感器测量需要的信息,例如将力触觉传感器集成在假手中,就能实时获取假手抓取物体时

的状态,从而及时调节控制假手的方式。触觉传感器的广泛应用对智能假手的发展有着很大的促进作用。现如今,市面上主流的触觉传感器有:压阻式^[1-3]、磁敏式^[4]、电容式^[5-6]、压电式^[7-8]、光电式^[9-10]等。上述力触觉传感器由于其体积较大,所以难以集成于假手指尖上。同时传统的力触觉传感器也具有容易受到外界环

收稿日期:2022-07-03 Received Date: 2022-07-03

* 基金项目:国家自然科学基金(61903175,62163024)、江西省主要学科学术和技术带头人项目(20204BCJ23006)、江西省学位与研究生教育教学改革研究项目(JXYJG-2019-019)资助

境的干扰、迟滞性高、对硬件和软件配置要求高和无法拆卸等问题。

光纤布拉格光栅传感器(fiber Bragg grating, FBG)^[11]相比于现如今市面上主流的力触觉传感器有很强的抗电磁干扰、耐腐蚀能力,同时因为它具有成本低、结构简单、响应快和灵敏度高等优点,而被广泛应用。目前,对于 FBG 的研究主要集中在将 FBG 结合不同的材料以及将光纤以不同形式来放置等方面。Abbraccio 等^[12]设计了一种用于机器人前臂的新型力触觉传感器系统,该系统可以识别和定位大范围力觉信息。Massari 等^[13]设计了一种用于刚性机械手上的力触觉传感器,将光纤布拉格光栅传感器集成在机械手上的柔性材料中。王雅纯等^[14]设计了一种用于假手指尖的力触觉传感器,通过一种传感单元的微小化结构设计,使得光纤布拉格光栅可以测量假手指尖所受的力,但只能测量力触觉信息,并不能对纹理进行检测识别。Xiong 等^[15]设计了一种基于 FBG 的足力传感器,该传感器具有较高的灵敏度,但其使用的 FBG 数量较多,因此整体结构复杂,维间耦合干扰较大。以上的实验和研究都初步实现了力觉信号的识别与测量,但这些传感器存在一些普遍的缺陷,如制作流程繁琐,难以拆卸,容易受到外界因素干扰等。

本文设计了一种面向纹理识别的便携式触觉传感器。首先,利用三维建模软件 solid works 进行模型的结构设计;进而,使用有限元分析软件 ANSYS 对传感器结构进行静力学分析优化,确定光纤布拉格光栅最佳固定方位,提高了光纤光栅对于力信号的灵敏度;然后,利用 3D 打印技术,制作了这种指尖传感器;最后,搭建了实验平台,对传感器进行了静力标定实验和复杂多纹理表面检测实验,并利用快速傅里叶变换对实验数据进行了时频分析,得到了对应时频图。该传感器主要通过光纤布拉格光栅传感器进行检测识别,相比于传统的 FBG 传感器,该传感器具备力触觉信息测量功能的同时,也具备纹理检测功能;相比于其他可用于纹理检测的传感器,该传感器成本低廉,结构简单,易于制作,对硬件配置要求低,应用范围广,能在恶劣的环境中使用,且该传感器能进行拆卸更换,便于携带,也能根据实际需求灵活改变模型外体尺寸。

1 光纤光栅传感原理

根据耦合模理论可知,宽带光在 FBG 中传播时,会因模式耦合反射满足条件的光^[14]。反射光遵守布拉格反射条件,数学表达式为:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (1)$$

其中, λ_B 为 FBG 中心波长; n_{eff} 为光纤光栅的有效折射率; Λ 是光栅常数。

FBG 中心波长会随着光栅有效折射率和光栅常数的

变化而变化。这就表明,当传感器所接触的力信号或者是温度信号改变时,光栅的有效折射率也会发生变化。公式如下:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \left(\frac{1}{n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{\partial \varepsilon} + \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial \varepsilon} \right) \Delta\varepsilon + \left(\frac{1}{n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{\partial T} + \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \Delta T \quad (2)$$

其中, $\Delta\lambda_B$ 是 FBG 中心波长的偏移量, $\Delta\varepsilon$ 为光纤光栅受到外力所发生应变的变化量, ∂n_{eff} , $\partial \Lambda$, $\partial \varepsilon$, ∂T 是光纤光栅的有效折射率,固有周期,应变,温度的偏导。由式(2)可以清楚的了解,应变和外界温度都会影响 FBG 的中心波长。

所以,当需要借助光纤光栅来测量力触觉信息时,首先要排除外界温度对 FBG 中心波长的影响。排除温度干扰后:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B \left(\frac{1}{n_{eff}} \frac{\partial n_{eff}}{\partial \varepsilon} + \frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial \varepsilon} \right) \Delta\varepsilon \quad (3)$$

当 FBG 受轴向应变作用时,其中心波长会发生相应的偏移,上式可简化为^[14];

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B (1 - P_e) \varepsilon_z \quad (4)$$

其中, P_e 为有效弹光系数; ε_z 为光纤所受轴向应变。

2 结构设计和仿真优化

2.1 传感器结构设计

本文中的传感器模型设计参考了人手指尖形状,经过了力学结构分析后,使用 Solid Works 设计了指尖传感器模型的结构。指尖传感器整体构型分为上、下两部分,上、下两部分之间用胶水粘贴固定。用来检测力触觉信息的 FBG 传感器粘贴在传感器上半部分的形变处。将 FBG 光栅顶端固定在粘贴处 1,FBG 光纤部分在粘贴处 2 进行固定,如图 1(a)所示。传感器上半部分受力发生形变,同时会带动 FBG 光栅部分发生应变,在传感器的底部设计有一个凹槽,用来放置参考光纤。图 1 为指尖传感器构型图。

为了使传感器更灵敏,使用 ANSYS 确定了 FBG 的固定位置。为了使传感器在应用过程中具有良好的力学性能,传感器上半部分的材料需要具有较高的弹性,传感器受力表面选用了类似于人体皮肤的柔性材料(50° TPU),其邵氏硬度为 60HA~85HD。传感器下半部分需要一定的硬度,因此采用了 ABS 材料。由于 FBG 可以同时感知温度和应力的变化,因此在传感器模型设计时,在传感器下半部分底部设计的凹槽内放置了一根参考光纤,该参考光纤只受温度而不受外力作用。参考光纤封装处如图 2 所示。

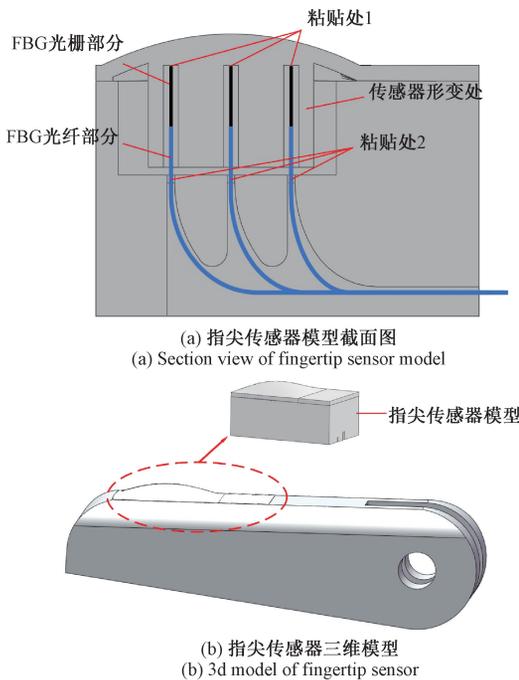


图1 指尖传感器构型图

Fig. 1 Fingertip sensor configuration diagram

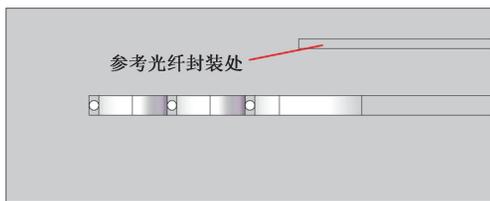


图2 参考光纤封装处

Fig. 2 The optical fiber packaging reference

2.2 仿真分析

本文采用了新型结构,将光纤布拉格光栅传感器集成在假手指尖,设计了面向纹理识别的便携式触觉传感器设计。为了验证所设计的传感器是否具有合理性,是否对力信号具有较高的灵敏度,将所设计的传感器结构导入 ANSYS 进行受力分析,通过观察该指尖传感器在受到力信号时是否会产生形变,产生的形变量是否能够被检测到,FBG 的粘贴位置是否妥当,进而推断出该指尖传感器的设计是否合理。

在指尖传感器检测过程中,先在指尖传感器模型的底部平面上施加一个固定约束,再对指尖传感器的受力表面施加 10 N 的力,最后进行仿真求解^[16]。传感器结构仿真结果如图 3 所示,在受到 10 N 大小的压力时,所设计的指尖传感器模型的最大形变量为 6.48×10^{-4} mm,且 3 根 FBG 都固定在形变量较大处。由此可得,此次研究设计的指尖传感器在受到力触觉信号时会产生显著的形

变量,且用作测量的 FBG 粘贴位置合理,因此该指尖传感器的设计是合理的。

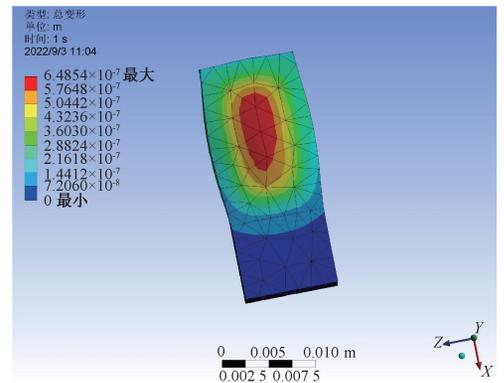


图3 传感器结构的有限元仿真

Fig. 3 Finite element simulation of sensor structure

3 实验分析

3.1 指尖传感器制作

在确认该传感器的设计具有合理性后,进行了传感器的制作。在制作过程中,所用光纤的中心波长分别为 1 554、1 555、1 550 和 1 544 nm,栅区长度均为 2 mm,反射率都大于 70%。指尖传感器的上半部分使用 50° 的热塑性聚氨酯(TPU),下半部分使用 ABS 树脂材料。

本文选取了 3 根 FBG 作为力感应元件。3 根 FBG 使用光纤切割刀将光栅远离接口端的光纤切除,切割后的光纤布拉格光栅传感器如图 4 所示。再将 3 根 FBG 分别从预先设计好的路径,从传感器下半部分底部预留的 3 个洞口穿过,将 FBG 光栅顶端固定在粘帖处 1,再将指尖传感器上半部分和下半部分贴合并固定,在将另一端进行预拉紧后,将 FBG 光纤部分在粘帖处 2 进行固定,这样,用作测量部份的两端都已固定好。最后,将 FBG 光纤部分沿设计好的路径封装。

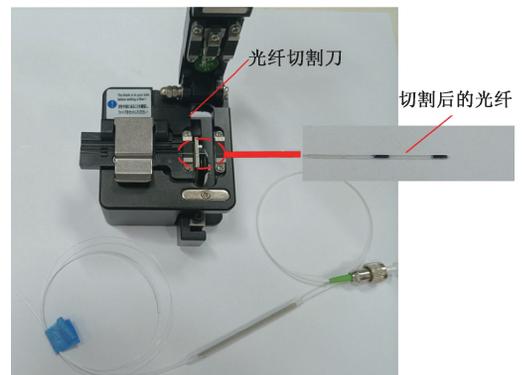


图4 光纤切割图

Fig. 4 Fiber cutting diagram

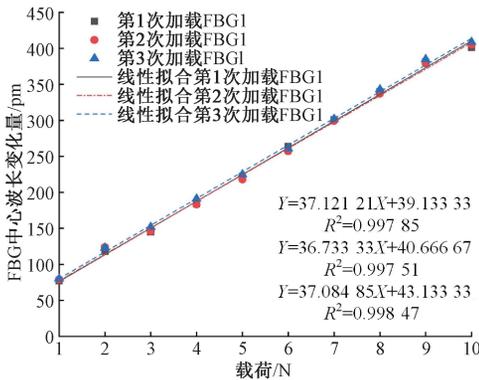
3.2 静力标定实验分析

本文的第 1 个目标是使用该传感器检测力触觉信息。传感器的制作完成后,进行了静力标定实验,实验平台如图 5 所示。使用数显压力试验机对指尖传感器施加垂直方向的压力,压力范围为 1~10 N。实验期间,对 FBG 中心波长进行记录,并计算出对应点的中心波长变化量。重复进行 3 次加载卸载实验。图 6 为传感器加载卸载实验结果。

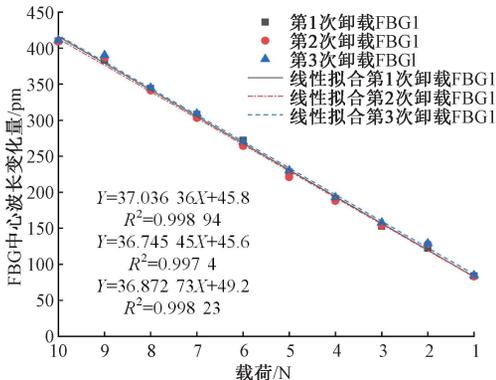


图 5 静力标定实验平台

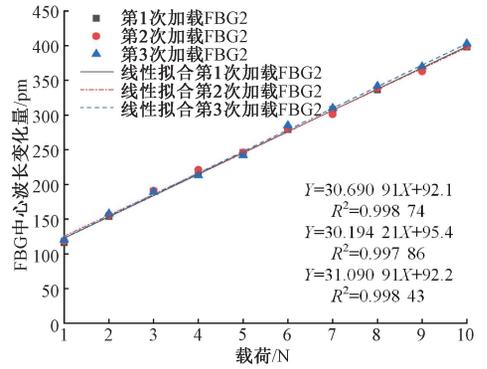
Fig. 5 Static calibration experiment platform



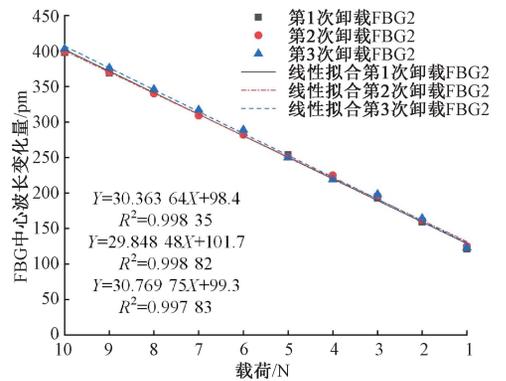
(a) FBG1 加载图



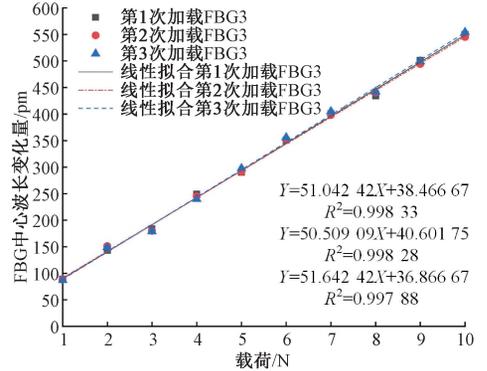
(b) FBG1 卸载图



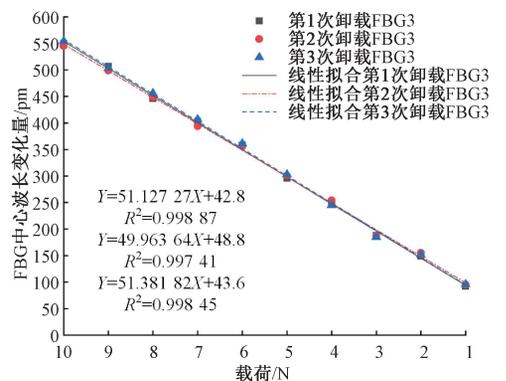
(c) FBG2 加载图



(d) FBG2 卸载图



(e) FBG3 加载图



(f) FBG3 卸载图

图 6 传感器加载卸载实验

Fig. 6 Sensor loading and unloading experiments

如图6所示,经分析可知,在指尖传感器中,FBG3的灵敏度最高,加载实验的平均灵敏度为 51.1 pm/N ,线性度为 0.998 ;卸载实验的平均灵敏度为 50.8 pm/N ,线性度为 0.998 。FBG2的重复性误差和迟滞性误差最大,分别为 2.35% 和 2.23% 。根据如上结果,该传感器具有较好的线性度、较高的灵敏度以及较好的重复性。其中最大重复性误差和迟滞性误差存在于FBG2。传感器误差的主要原因是该指尖传感器的上半部分为TPU软胶,在受到外部作用力时会有一定的缓冲。

3.3 复杂多纹理表面检测实验分析

在该实验中,设计了一个具有3种不同纹理的平板^[17],平板厚度为 3 mm ,在平板上有3种不同的纹理(纹理1、纹理2、纹理3),3种纹理都是由宽度、高度为 1 mm 的方条组成。3种纹理的不同之处在于相邻两根方条的距离不同。在纹理1上 $d=4 \text{ mm}$,在纹理2上 $d=3 \text{ mm}$,在纹理3上 $d=2 \text{ mm}$ 。将这3种纹理组合在同一个平板上,使用solid works对平板进行设计,并使用3D打印技术,采用ABS材料打印出该平板。平板三维结构图如图7所示。

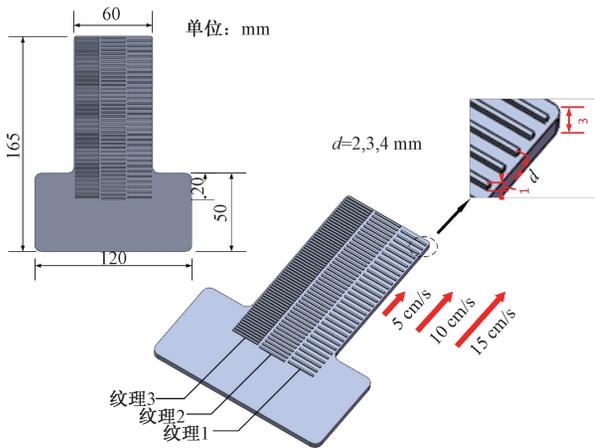


图7 平板三维结构图

Fig. 7 Three-dimensional structure drawing of flat plate

本文的第2个目标是使用传感器来区分3种不同的速度($5, 10, 15 \text{ mm/s}$)。本文的第3个目标是使用传感器识别3种不同的纹理(纹理1、纹理2、纹理3)。为了实现以上两个目标,搭建了实验平台。实验平台由电动导

轨、移动平台和夹具组成,传感器由夹具固定在电动导轨的移动平台上。将电动导轨和平板固定,利用单片机控制系统控制移动平台的速度,通过调节移动平台的速度,控制指尖传感器由3种不同的速度滑过平板上3种不同的纹理。复杂多纹理表面检测实验平台搭建如图8所示。

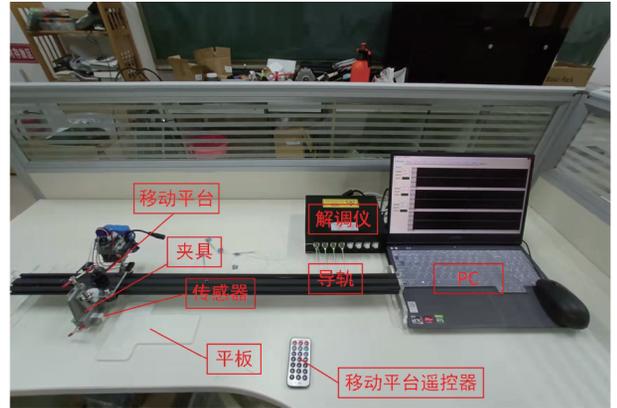
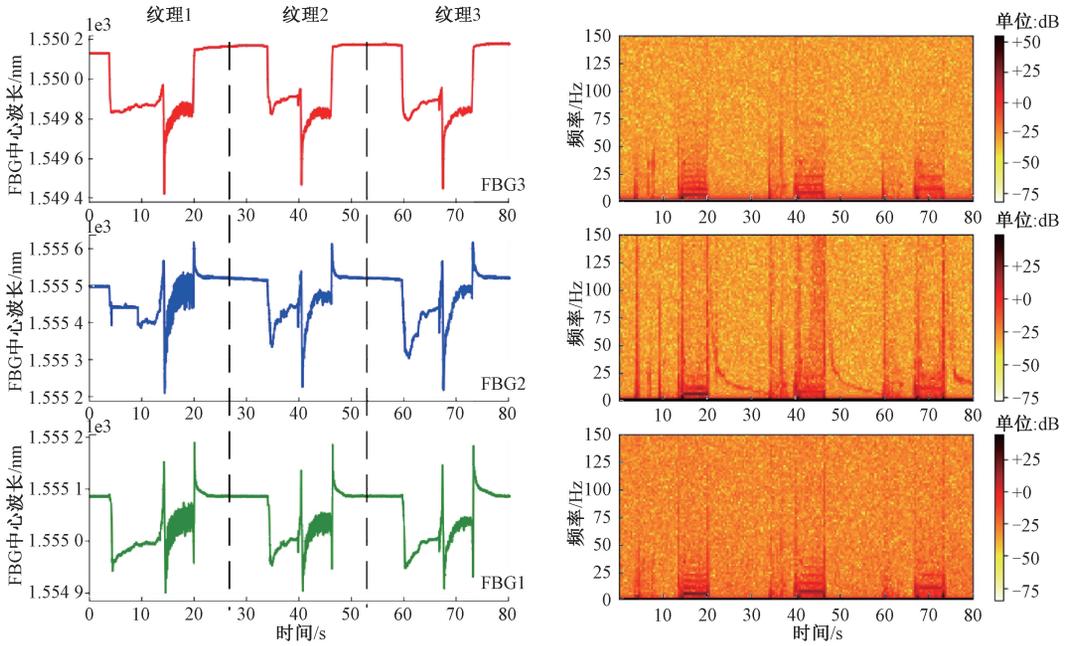


图8 复杂多纹理表面检测实验平台

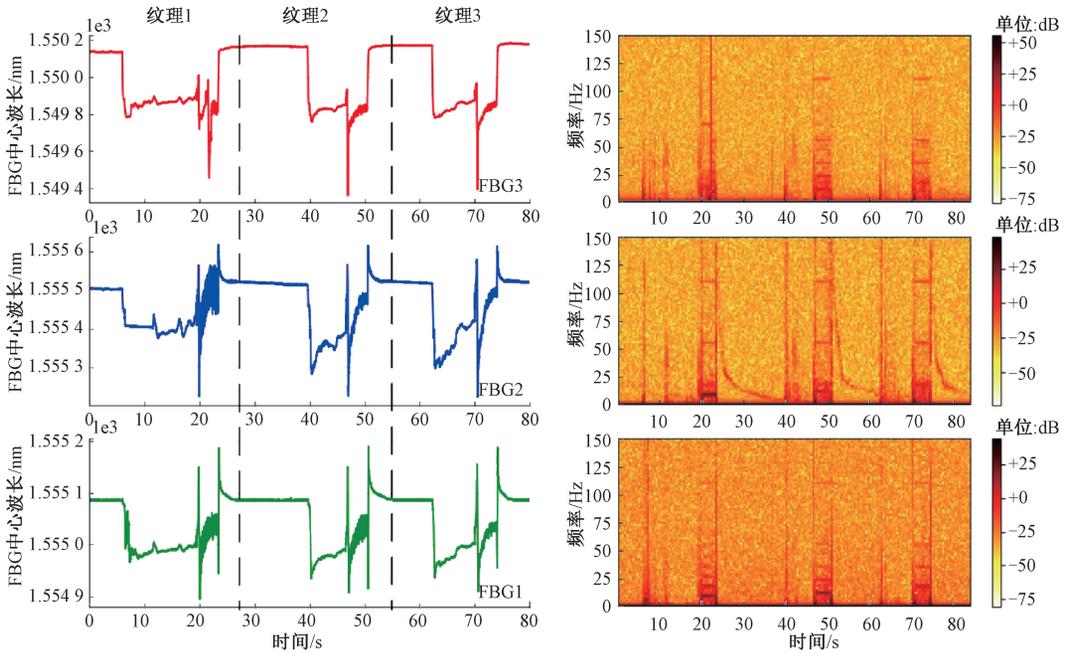
Fig. 8 Complex multi-texture surface detection experimental platform

为了实现第2和第3个目标,利用导轨上的移动平台将指尖传感器以3种滑动速度($5, 10, 15 \text{ mm/s}$)分别划过3种不同的纹理(纹理1、纹理2、纹理3),重复进行50次实验,最终取实验数据的均值。对数据进行处理,得到FBG中心波长随时间变化的时域图(图9左),再对该数据进行快速傅里叶变换处理,得到对应的时频图(图9右)。

如图9所示,时域图的横坐标为时间(s),纵坐标为FBG中心波长(nm);时频图横坐标为时间(s),纵坐标为频率(Hz)。在实验过程中,根据纹理长度与传感器滑过纹理所用的时间,即可确定传感器滑过纹理时的速度。通过观察时频图中能量条的颜色深度,可以对不同的纹理进行检测识别,当指尖传感器滑过纹理1时,能量条的颜色深度能达到 50 dB ,当指尖传感器滑过纹理2时,能量条的颜色深度能达到 40 dB ,当指尖传感器滑过纹理3时,能量条的颜色深度能达到 25 dB 。由此便能清楚的区分不同的纹理和不同的滑动接触速度。



(a) 传感器由 5 mm/s 的速度依次滑过纹理 1、纹理 2、纹理 3
 (a) The sensor slides through texture 1, texture 2 and texture 3 at a speed of 5 mm/s



(b) 传感器由 10 mm/s 的速度依次滑过纹理 1、纹理 2、纹理 3
 (b) The sensor slides through texture 1, texture 2 and texture 3 at a speed of 10 mm/s

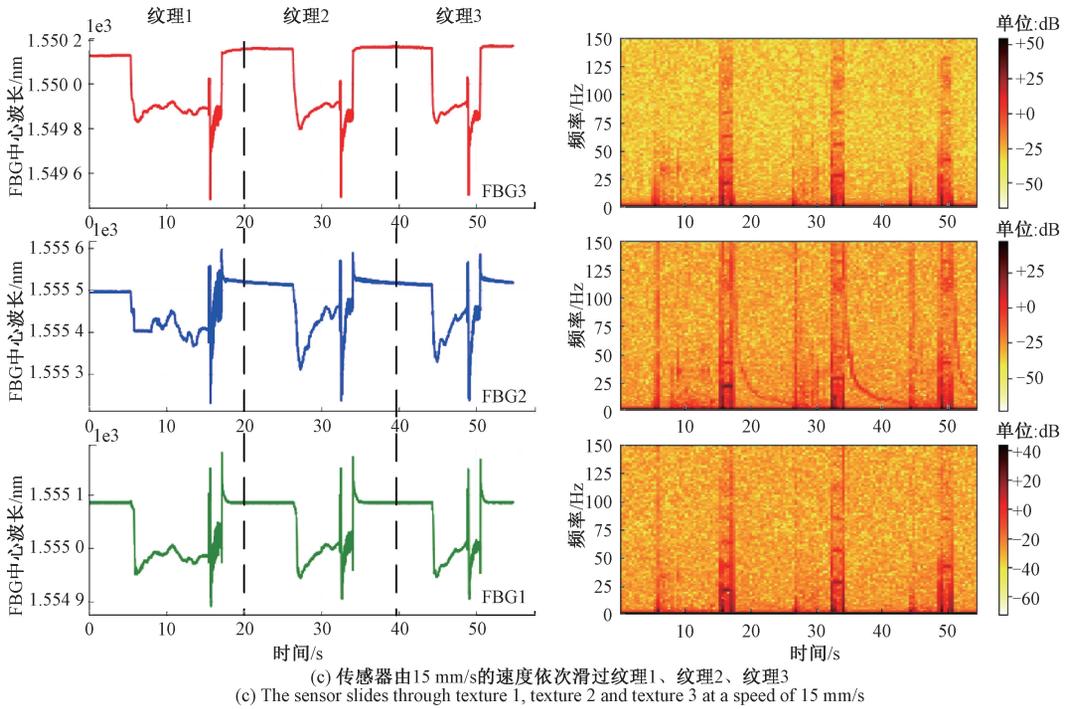


图9 时域图(左)和对应的时频图(右)

Fig. 9 Time-domain diagram (left) and corresponding time-frequency diagram (right)

4 结 论

本文设计了面向纹理识别的便携式触觉传感器,在设计过程中,作者在三维建模基础上对传感器结构进行静力学分析并优化,提高FBG对力觉信息的灵敏度。专门设计并搭建了实验平台,对传感器进行静力标定实验和复杂多纹理表面检测实验。实验结果表明:

1) 在指尖传感器中,FBG3的灵敏度最高,加载时,平均灵敏度为51.1 pm/N,线性度为0.998;卸载时,平均灵敏度为50.8 pm/N,线性度为0.998。FBG2的重复性误差和迟滞性误差最大,分别为2.35%和2.23%。该传感器具有较好的线性度、较高的灵敏度以及较好的重复性。

2) 在使用该传感器进行纹理检测时,根据传感器滑过纹理的路径长度与传感器滑过纹理所用的时间,即可确定传感器的移动速度。根据时频图中能量条的颜色深度,即可确定纹理表面的粗糙度。该传感器可快速准确地确定传感器滑过纹理表面时的速度以及能对多个纹理表面进行粗糙度对比。

总体而言,该传感器具有便于携带、抗干扰能力强、对硬件配置要求低等优势,在力触觉信息检测和纹理识别等领域具有一定的实用价值和现实意义。

参考文献

[1] GONG S, SCHWALB W, WANG Y, et al. A wearable

and highly sensitive pressure sensor with ultrathin gold nanowires[J]. *Nature Communications*, 2014, 5:1-8.

[2] LI X, FAN Y J, LI H Y, et al. Ultra-comfortable hierarchical nano-network for highly sensitive pressure sensor[J]. *ACS Nano*, 2020, 14:9605-9612.

[3] 冷明鑫,宋爱国. 机器人触觉传感器的设计及标定测试[J]. *电气电子教学学报*, 2017, 39(5):62-65.

LENG M X, SONG AI G. The design and calibration test of tactile sensor for robot [J]. *Journal of Eee*, 2017, 39(5):62-65.

[4] 谢君,鲁妍妤,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 characteristics research on he magnetic fluid tactile sensor [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(1):30-38.

[5] 赵海文,王曼菲,刘吉晓,等. 基于双电层电容的柔性触觉传感器机理研究[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(2):25-32.

ZHAO H W, WANG M F, LIU J X, et al. Mechanism study of flexible tactile sensor based on electrical double-layer capacitor [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(2):25-32.

- [6] MAHATA C, ALGADI H, LEE J, et al. Biomimetic-inspired micro-nano hierarchical structures for capacitive pressure sensor applications [J]. *Measurement*, 2019, 151:107095.
- [7] NODA K, HOSHINO K, MATSUMOTO K, et al. A shear stress sensor for tactile sensing with the piezoresistive cantilever standing in elastic material [J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2006, 127(2): 295-301.
- [8] LIU S, WANG L, FENG X, et al. Ultrasensitive 2D ZnO piezotronic transistor array for high resolution tactile imaging [J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(16): 1606346. 1-1606346. 6.
- [9] UTKU B, AHMET K. A low-cost, human-like, high-resolution, tactile sensor based on optical fibers and an image sensor [J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2018, 15(4):172988141878363.
- [10] 钱牧云,余有龙,李慧,等.基于光纤光栅的机械手指触滑觉传感研究[J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(4): 730-736.
- QIAN M Y, YU Y L, LI H, et al. Research on tactile and sliding sensing of the mechanical finger based on the fiber Bragg grating [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(4):730-736.
- [11] GUO Y X, KONG J Y, LIU H H, et al. Design and investigation of a reusable surface-mounted optical fiber Bragg grating strain sensor [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(23): 8456-8462.
- [12] ABBRACCIO J D, ALIPERTA A, ODDO C M, et al. Area FBG-based sensing skin for collaborative robotics [C]. 2019 II Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT (MetroInd4.0&IoT), IEEE, 2019.
- [13] MASSARI C, ODDO C M, SINIBALDI E, et al. Tactile sensing and control of robotic manipulator integrating fiber bragg grating strain-sensor [J]. *Front Neurorobot*, 2019, 13:8.
- [14] 王雅纯,张小栋,陆竹风,等.用于假手指尖的光纤光栅触觉力传感器研究 [J]. *仪器仪表学报*, 2021, 41(9): 124-130.

WANG Y CH, ZHANG X D, LU ZH F, et al. Research on the tactile force sensor of prosthetic hand finger based on fiber Bragg grating [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, 42(9): 124-130.

- [15] XIONG L, JIANG G ZH, GUO Y X, et al. A three-dimensional fiber Bragg grating force sensor for robot [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018: 1-8.
- [16] 王靖宵,贾月梅,冀健龙.摩擦发电微流体传感器特性的有限元仿真研究 [J]. *中国测试*, 2020, 46(6): 89-94.
- WANG J X, JIA Y M, JI J L. Finite element simulation study on sensing characteristics of triboelectric microfluid sensors [J]. *China Measurement & Test*, 2020, 46(6): 89-94.
- [17] ABD M A, PAUL R, ARAVELLI A, et al. Hierarchical tactile sensation integration from prosthetic fingertips enables multi-texture surface recognition [J]. *Sensors*, 2021, 21(13): 4324.

作者简介



张剑敏, 2021年于萍乡学院获得学士学位, 现为南昌大学硕士研究生, 主要研究方向为光纤光栅传感技术等。

E-mail: 416100210178@email.ncu.edu.cn

Zhang Jianmin received his B. Sc. degree from Pingxiang University in 2021. He is currently a master student at Nanchang University. His main research interests include fiber Bragg grating sensing technology, etc.



熊鹏文(通信作者), 2009年于中北大学获得学士学位, 2015年于东南大学获得博士学位, 现为南昌大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为机器人传感与控制技术、力触觉感知技术等。

E-mail: steven.xpw@ncu.edu.cn

Xiong Pengwen (Corresponding author) received his B. Sc. degree from North University of China in 2009 and received his Ph. D. degree from Southeast University in 2015. He is currently an associate professor and a master advisor at Nanchang University. His research interests include robot sensing and control technology, force and touch sensing technology, and etc.