

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108102

# 用于假手指尖的光纤光栅触觉力传感器研究\*

王雅纯<sup>1</sup>, 张小栋<sup>1,2</sup>, 陆竹风<sup>1</sup>, 刘洪成<sup>1</sup>, 张腾<sup>1</sup>

(1. 西安交通大学机械工程学院 西安 710049; 2. 西安交通大学现代设计及转子轴承系统教育部重点实验室 西安 710049)

**摘要:**针对现有假手触觉测量常用的薄膜压力传感器精度不佳、线性度差、迟滞性高等问题,研究了一种可安装于假手指尖的光纤布拉格光栅触觉力传感器。首先,通过传感单元的微小化结构设计,可以将施加的外力转化为光纤承受的轴向力;进而,通过有限元对传感器结构参数进行优化,提高了光纤光栅对于压力的灵敏度;然后,围绕假手指尖应用的需求,制作了这种光纤布拉格光栅触觉力传感器;最后,对该传感器进行了性能标定、对比分析和应用抓取3个实验分析,实验结果表明:该传感器压力灵敏度为0.103 8 nm/N,线性度 $R^2$ 为0.998,重复性误差为1.32%和迟滞性误差为2.19%;与现有的薄膜压力传感器对比,该传感器的线性度和重复度都更高,迟滞性更低。

**关键词:** 光纤布拉格光栅;假手;触觉;传感器;优化

**中图分类号:** TN247 TH741 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4035

## Research on the tactile force sensor of prosthetic hand finger based on fiber Bragg grating

Wang Yachun<sup>1</sup>, Zhang Xiaodong<sup>1,2</sup>, Lu Zhufeng<sup>1</sup>, Liu Hongcheng<sup>1</sup>, Zhang Teng<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Key Laboratory of Education Ministry for Modern Design & Rotor-Bearing System, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** The thin-film pressure sensor in prosthetic tactile measurement has problems of low accuracy, poor linearity and high hysteresis. To address these issues, a tactile sensor based on the fiber Bragg grating (FBG) is studied. It can be easily installed on the fingertip. Firstly, a sensing unit is designed to convert the external force into an axial one needed by the FBG. Secondly, the finite element simulation is utilized to optimize the structure of the sensing unit. In this way, the sensitivity of pressure measurement is improved. Finally, the FBG tactile sensor is prepared and stuck to the prosthetic fingertip. Experiments on performance calibration, comparative analysis, and grasping application are carried out. Results show, for the FBG tactile sensor, the sensitivity is 0.103 8 nm/N, the linearity  $R^2$  is 0.998, the repeatability error is 1.32%, and the hysteresis error is 2.19%. Compared with the thin-film pressure sensor, the designed FBG sensor has advantages of linearity, stable repeatability, and hysteresis.

**Keywords:** fiber Bragg grating; artificial hand; tactile; sensor; optimization

## 0 引言

触觉传感器能将假手的操作信息及时的反馈给使用者,从而帮助操作者感知和获取假手的状态,能快速调整假手的控制策略,实时控制假手。智能假肢的触觉传感为精细抓取操作提供了重要帮助,极大的提高了假肢的

抓取能力。现有的触觉传感器主要有:压阻式<sup>[1-3]</sup>、磁敏式<sup>[4]</sup>、电容式<sup>[5-6]</sup>、压电式<sup>[7-8]</sup>、光电式<sup>[9-10]</sup>等。以上传感器具有动态范围大、精度高等优势,但存在单元体积较大,容易受到电磁干扰,迟滞性高,无法静态测量、处理电路复杂等问题。

光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)式触觉传感器具有:空间分辨率高,易于阵列化,不容易受到电磁

收稿日期:2021-06-15 Received Date: 2021-06-15

\* 基金项目:国家重点研发计划(2017YFB1300303)项目资助

的干扰,处理电路与传感器分开,且制作成本低、结构简单、响应快、灵敏度高、电绝缘性能好等优点<sup>[11-12]</sup>。利用光纤布拉格光栅式触觉传感器可以实现对应变、温度等各种物理量的测量。为此,将非常适合集成在假手上进行触觉检测。

目前,国内外对于光纤布拉格光栅触觉传感器的研究热点主要在将光纤埋入不同基底材料和不同阵列排布形式等方面。Abbraccio等<sup>[13]</sup>设计了一种新型大面积分布式触觉传感器系统,可以感知和定位大面积上触觉力,并将其整合到定制的人机器人前臂上。Massari等<sup>[14]</sup>设计了一种用于机器人手部的触觉传感器,将光纤嵌入柔性聚合材料中,集成在机器人手上。钱牧云等<sup>[10,15]</sup>研究了一种FBG的二维分布式传感阵列的触滑觉传感方法。北京邮电大学设计了一种可以检测三维力的FBG弹性结构<sup>[16]</sup>。以上研究初步实现了机器人手部触觉感知,但这些触觉传感器普遍存在制作工艺复杂,容易受到温度干扰,且不利于在手部集成的缺陷。

为了解决上述光纤布拉格光栅触觉传感器现存的问题,本文旨在研究一种用于假手指尖的光纤光栅触觉力传感器。通过传感单元的微小化结构设计,可以使其将施加的外力转化为光纤承受的轴向力;且拟通过有限元分析优化传感器结构尺寸参数,增加光纤触觉传感器对压力的灵敏度。最后,还将制作传感器,开展性能标定、对比分析和应用抓取等3个实验分析。

## 1 光纤光栅传感原理

根据耦合模理论可知,当宽带光在光纤布拉格光栅中传输时,会因模式耦合使得满足条件的光被反射<sup>[16]</sup>。则反射光的中心波长为:

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

式中: $\lambda_B$  光纤光栅的中心波长; $n_{eff}$  光纤光栅的有效折射率; $\Lambda$  光纤光栅的固有周期。

光纤光栅的中心波长 $\lambda_B$ 会随着光栅的有效折射率 $n_{eff}$ 和固有周期 $\Lambda$ 的变化而改变。当外界环境发生变化时,光纤光栅的有效折射率会发生改变。

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

式中: $\Delta\lambda_B$  为中心波长的偏移量; $\Delta\varepsilon$  为光纤光栅应变的变化量; $\Delta T$  为温度的变化量; $\partial n_{eff}, \partial \Lambda, \partial \varepsilon, \partial T$  为光纤光栅的有效折射率,固有周期,应变,温度的偏导。式(2)是光纤光栅的基本模型,表明温度和应变会导致光纤光栅中心波长偏移。

当温度不变化,只有应变变化时:

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

当光纤光栅产生轴向变形时,其反射光的中心波长会发生偏移,上式可简化为:

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

式中: $p_e$  为有效弹光系数,当使用特定类型的纤维, $p_e$  是一个固定值。本文采用的普通石英纤维, $p_e$  为 0.216; $\varepsilon_z$  为光纤光栅轴向应变。

## 2 结构与仿真优化

### 2.1 传感器结构设计

根据光纤光栅的传感原理对传感器结构进行设计,在设计FBG传感器时必须考虑两个主要因素。1) 光纤微弯会因波峰的高度降低产生光损失效应; 2) 啁啾效应导致布拉格信号失真。所以,为了能准确测量外力,必须设计外部零件将FBG传感器嵌入其中如图1所示,传感器结构形变引起FBG的伸长。为使得传感器顶部接收到外部法向力作用时,传感器可以沿光纤方向对称延伸,使得光纤光栅只产生轴向应变,几乎没有横向应变,本工作选择桥型结构进行传感器结构的设计<sup>[17]</sup>。

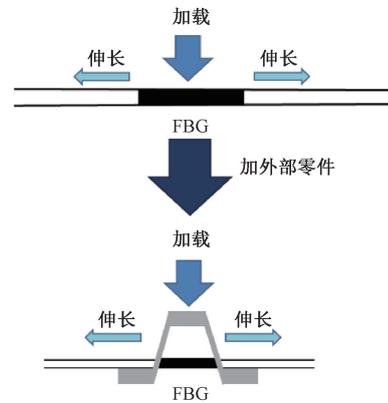


图1 光纤传感器压力检测部分设计

Fig. 1 Design of optical fiber sensor pressure detection

由于光纤光栅对温度和应力同时敏感,所以在检测外力时需设计温度补偿结构,排除检测时温度对中心波长的干扰。本文在同根光纤上加入一个参考光栅进行温度补偿,将参考光栅固定在高强度合金铜的圆管内,使得该参考光栅对温度敏感对应力不敏感。最后所设计的传感器结构如图2所示。

### 2.2 有限元结构优化及仿真

为了增加传感器对压力的灵敏度,通过有限元对其结构参数进行优化。该传感器结构优化的基本步骤如图3所示。

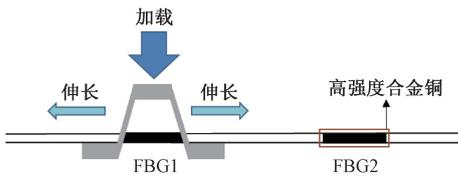


图2 传感器结构设计

Fig. 2 Sensor structure design

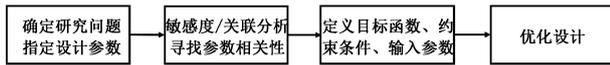


图3 优化的基本步骤

Fig. 3 The basic steps of optimization

1) 针对增加传感器压力灵敏度的问题,根据传感器结构指定设计参数,如图4所示。

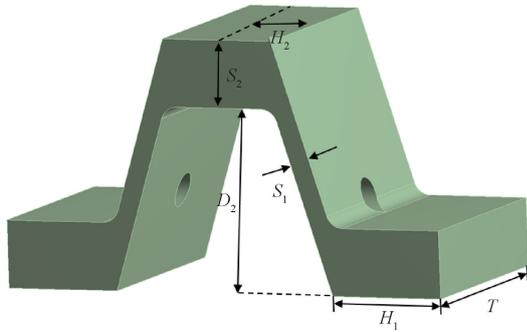


图4 优化前传感器结构

Fig. 4 Sensor structure before optimization

2) 计算出与输出( $X$ 方向最大位移)相关性/灵敏度最大的参数。

针对传感器结构的各个参数对于 $X$ 方向最大位移的影响,用 Spearman's rank correlation 方法进行相关系数计算,确定各结构参数与该结构 $X$ 方向最大位移之间的关系,从而确定对性能影响最大的结构参数。传感器结构各参数与 $X$ 方向最大位移的总体敏感度表如图5所示。

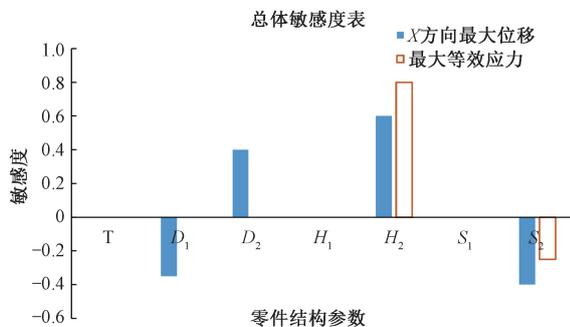


图5 总体敏感度表

Fig. 5 Overall sensitivity table

总体敏感度表是每个独立变量对特殊变量的影响程度。使用 spearman rank order correlation coefficients 方法对各结构参数的灵敏度进行计算,可以把同一时间的多种影响因素考虑到敏感度计算中。由图5结果可知底高 $D_1$ ,顶高 $D_2$ ,顶长 $H_2$ ,边宽 $S_2$ 为 $X$ 方向最大位移敏感度最大的4个参数。

3) 定义优化的目标函数、优化过程中的约束条件、输入参数。该结构的目标函数为 $X$ 方向的最大位移,约束条件为在不同结构参数下 $X$ 方向的最大位移的最大值,输入参数为底高 $D_1$ ,顶高 $D_2$ ,顶长 $H_2$ ,边宽 $S_2$ 。

4) 优化设计。本工作采用直接优化设计方法,选用基于拉格朗日的非线性规划的方法进行优化,最终确定传感器结构参数如表1所示。

表1 传感器结构参数

零件	底高 $D_1$	顶高 $D_2$	顶长 $H_2$	边宽 $S_2$
优化前	0.60	1.63	0.5	0.6
优化后	0.44	2.00	1.0	0.4

为使得传感器在应用过程具有的良好力学性能,需要材料具有高弹性极限和疲劳强度,故而选择65Mn 弹簧钢材料。其 ANSYS 材料设置相关参数如表2所示。

表2 材料的参数表

材料	弹性模量/MPa	泊松比	密度/( $g \cdot cm^{-3}$ )
65Mn 弹簧钢	$2.1 \times 10^5$	0.29	7.81
光纤	$7.3 \times 10^4$	0.17	

优化后,在该结构顶端施加10 N的正压力后,在 $X$ 方向的最大位移为1.313 2 nm,如图6所示。优化前后传感器对压力的灵敏度如图7所示。

经过优化,传感器压力灵敏度增加87%。优化后的传感器结构增大了 $X$ 方向的最大位移和最大等效应力,从而增加光纤沿 $X$ 方向的变化,最终有效提高光纤光栅压力传感部分中心波长的变化。

### 3 传感器制作

在确定了传感器结构的最优参数后,进行传感器的制作。根据假手指尖的尺寸,在实物制作过程中所用的光纤为:两个栅区的距离为10 mm,FBG的中心波长为1 550 nm和1 555 nm,各栅区长度均为2 mm,反射率都大于70%,反射带宽小于3 dB。

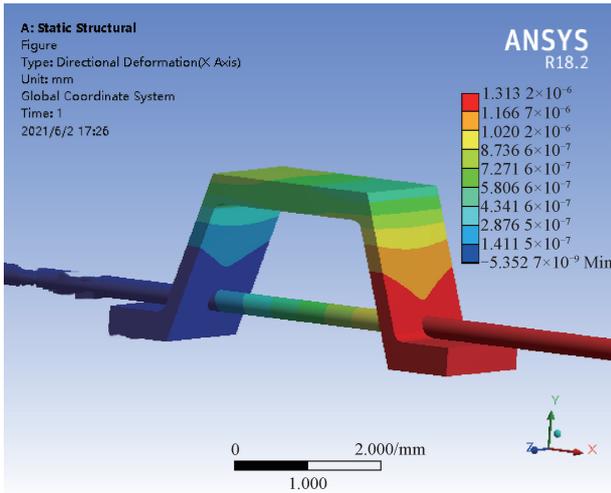


图 6 优化后传感器结构的有限元仿真

Fig. 6 Finite element simulation after optimization of small-structure

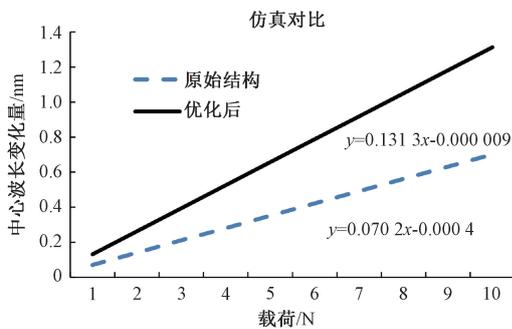


图 7 两种结构的仿真对比

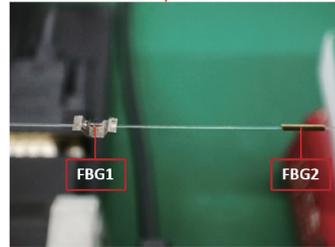
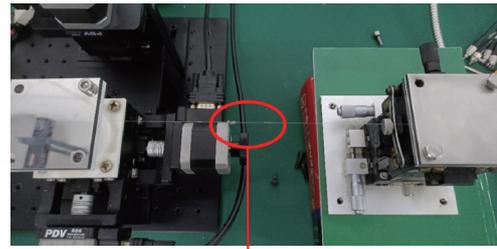
Fig. 7 Simulation comparison of two structures

制作关键过程及最终制作的光纤传感器如图 8 所示。首先,用酒精将传感器结构和光纤擦拭干净。其次,将光纤通过预紧装置进行预紧,防止其在固定过程中会因光纤弯曲、松弛,造成传感器产生误差。然后,将光纤与传感器结构依次组装好,用乐泰 406 瞬干胶进行固定。最后,将制作好的光纤通过瞬干胶固定在假手上。

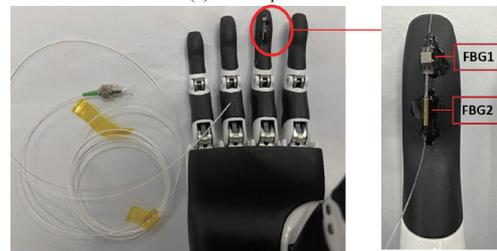
### 4 实验分析

#### 4.1 静力标定实验分析

完成传感器制作后,对其静态性能进行测试,其静力标定平台如图 9 所示。实验中采用的解调仪为 FBGS 公司的 FBGScan 904。实验环境温度保持恒定 22℃。对传感器结构施加垂直压力(Z 轴),以 1 N 为步长施加压力,从 0 N 增加到 10 N,施加面积约为 1 cm<sup>2</sup>,重复加载卸载 10 次实验,得到光栅中心波长的偏移量后,对数据进行



(a) 传感器预紧  
(a) Sensor preload



(b) 光纤传感器实物  
(b) Optical fiber sensor

图 8 传感器制作

Fig. 8 Sensor production process

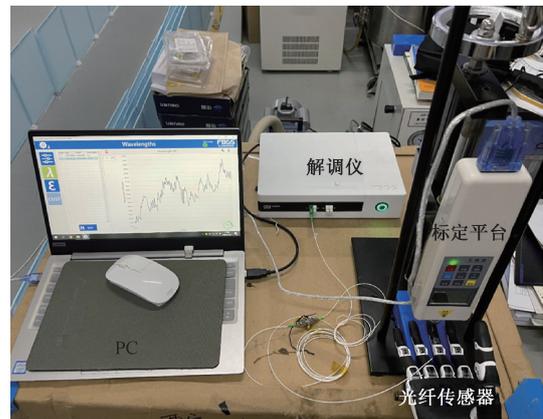


图 9 静力标定实验台

Fig. 9 Static calibration test bench

处理。图 10 为传感器加载的重复性,图 11 为传感器卸载的重复性,图 12 为传感器灵敏度,其中  $R^2$  为拟合优度的决定系数。

图 10 及 11 结果显示,传感器加载时平均灵敏度为 0.102 2 nm/N,卸载时平均灵敏度为 0.103 8 nm/N。加

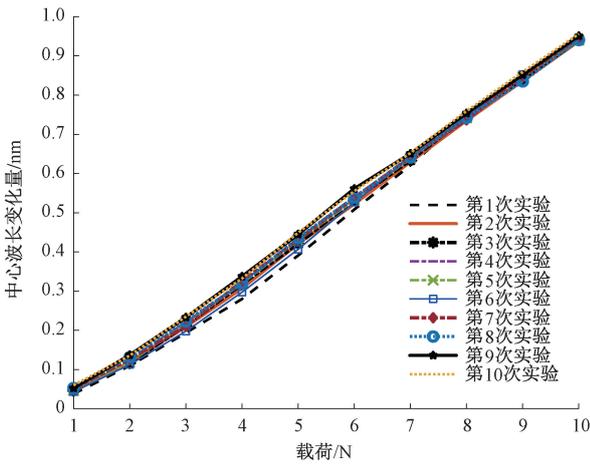


图 10 传感器加载实验

Fig. 10 Sensor loading experiment

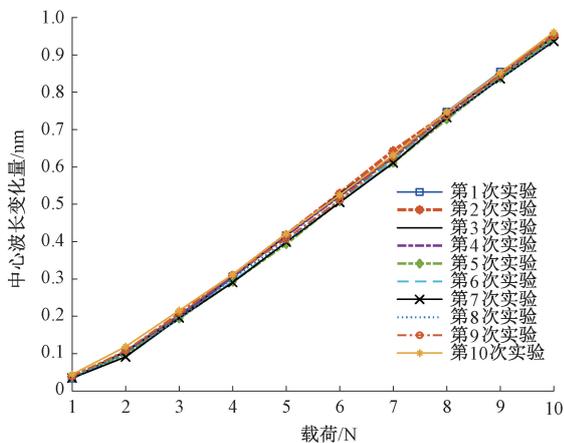


图 11 传感器卸载实验

Fig. 11 Sensor unloading experiment

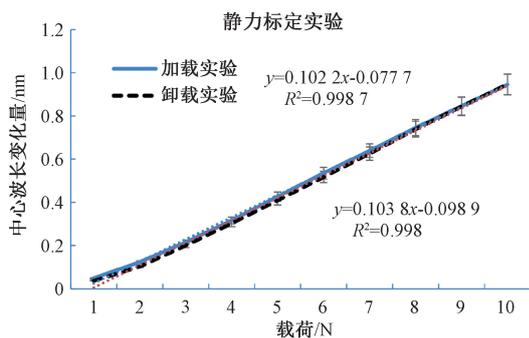


图 12 传感器灵敏度

Fig. 12 Sensor sensitivity

载过程与卸载过程的迟滞误差 2.19%,表明传感器迟滞性低。在重复误差方面,加载过程 10 次重复误差为 1.32%,卸载过程的 10 次重复误差为 1.17%,该传感器重复误差度低。根据如上结果,本工作设计的假手触觉

力传感器,其压力灵敏度 0.103 8 nm/N,加载卸载时的线性度  $R^2$  为 0.998,具有高线性度及低重复误差度。同时对比图 12 和 7,其仿真结果灵敏度为 0.131 3 nm/N,实际传感器灵敏度差值 26.5%,灵敏度降低原因是固定在假手指尖的材料为硬橡胶,在受到外部压力时有一定缓冲,其灵敏度实验结果与仿真时基本一致。

#### 4.2 薄膜压力传感器对比实验分析

为了验证所设计的光纤传感器性能,使用 Flexiforce 薄膜压力传感器进行性能对比,该传感器的量程为 0~4.4 N。为控制变量,实验过程中的环境温度同样保持恒定 22℃,实验如图 13 所示。对传感器结构施加垂直压力(Z 轴),以 0.5 N 为步长施加压力施加压力,从 0 N 增加到 4 N,施加面积约为 1 cm<sup>2</sup>,重复加载卸载 10 次实验,该薄膜压力传感器灵敏度如图 14 所示。



图 13 薄膜压力传感器静力标定实验台

Fig. 13 Static calibration test bench of the thin film pressure sensor

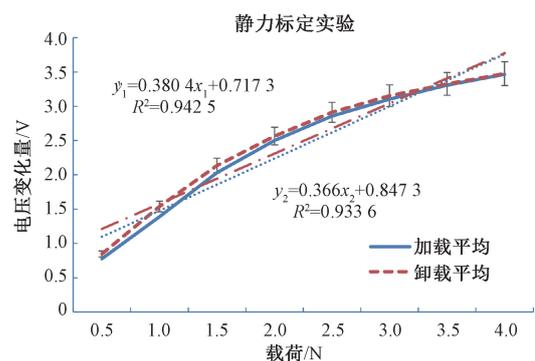


图 14 薄膜压力传感器灵敏度

Fig. 14 Film pressure sensor sensitivity

由图 14 可知,薄膜压力传感器的压力灵敏度为 0.366 V/N。对比图 12 中的光纤光栅传感器,薄膜压力传感器线性度为 0.933 6,而光纤光栅传感器线性度为 0.998,表明薄膜压力传感器线性度低于光纤传感器,

且载荷在接近传感器量程时线性度会大幅降低。对比 10 次重复误差,薄膜压力传感器为 2.87%,结果表明所设计的光纤触觉传感器重复性误差低于薄膜压力传感器。加载过程与卸载过程的迟滞误差 4.5%,表明所设计的光纤触觉传感器迟滞性低于薄膜压力传感器。

### 4.3 假手触觉力检测实验分析

为了验证传感器在实际使用时的稳定性,将光纤触觉传感器粘贴在假手指尖上,在假手抓取时,进行接触力的测试。通过实际抓取圆柱形物体如图 15 所示,实验环境温度保持恒定 22℃。采用多通道 FBG 解调仪存储抓取到放松整个过程中各 FBG 中心波长的变化情况,实验完毕后导出数据并进行分析处理。

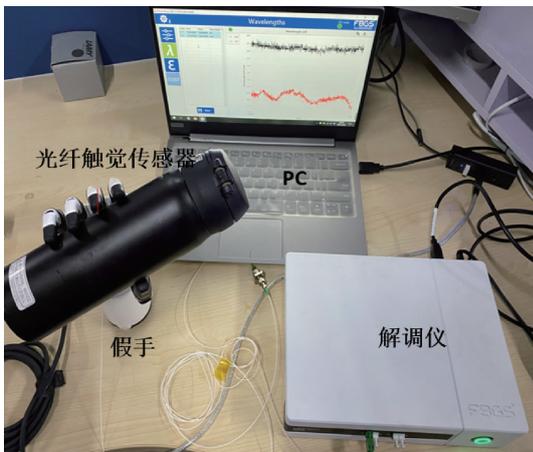


图 15 抓取实验  
Fig. 15 Crawl experiment

由图 16 和 17 可知:在假手抓取过程中,传感器触觉力检测部分 FBG1 的中心波长,会在抓取时呈现迅速上升变化趋势,表明假手指尖受到增加的正压力;在假手保持抓取时,触觉力检测部分 FBG1 的中心波长的基本稳

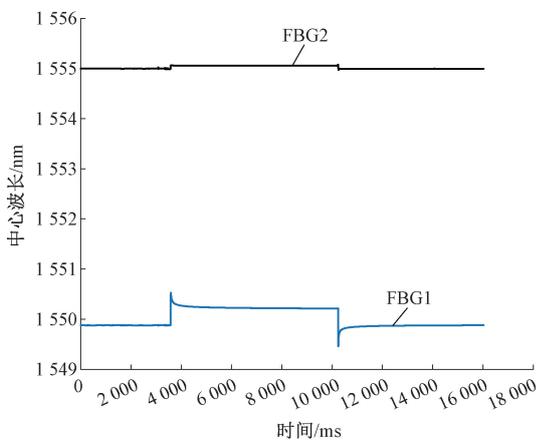


图 16 FBG 中心波长变化情况  
Fig. 16 The change of the center wavelength of the FBG

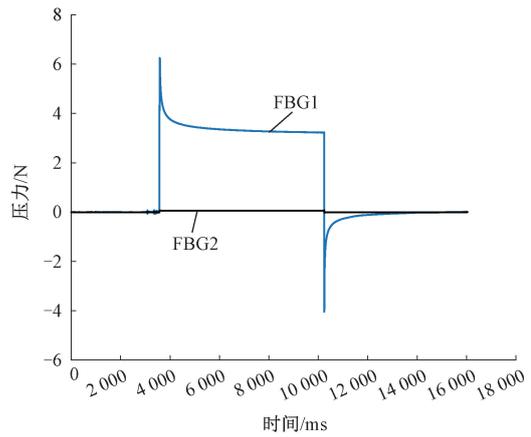


图 17 触觉力变化情况  
Fig. 17 Changes in tactile force

定不变,说明传感器稳定性好;在放下物体时,触觉力检测部分 FBG1 中心波长会迅速下降。而在假手抓取过程中,温度补偿部分 FBG2 的中心波长未发生明显变化,表明 FBG2 未受到外力的影响。

## 5 结 论

依据假手精密触觉力感知的需求,本文研究、设计与制作了一种用于假手指尖的光纤触觉传感器。通过设计传感器结构,使得所施加的外力可以通过其转换为轴向力。且通过有限元分析优化,经过优化传感器压力灵敏度增加 87%。优化后的传感器结构增大了 X 方向的最大位移和最大等效应力,提高了传感器对压力的灵敏度。通过传感器性能标定、对比分析和应用抓取等 3 个实验分析,实验结果表明:

- 1) 该传感器的压力的灵敏度为 0.103 8 mm/N,线性度为 0.998,迟滞性低迟滞误差 2.19%,重复性高重复误差 1.17%,灵敏度与仿真结果基本一致。
- 2) 与现有的薄膜压力传感器相比,所设计的光纤触觉传感器的线性度和重复度都高于薄膜压力传感器,迟滞性低于薄膜压力传感器。

接下来通过调整传感器位置和结构,有望进一步提高压力灵敏度和实现假手的多点检测。

### 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 characteristics research on the 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.
- ZGAO 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] JIANG Y, REIMER V, SCHOSSIG T, et al. Fiber optical multifunctional human-machine interface for motion capture, temperature, and contact force monitoring[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 128:106018.
- [12] 郑来芳, 张俊生, 梁海坚, 等. 基于时频混合特征提取算法的光纤传感信号识别研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(9):153-159.
- ZHENG L F, ZHANG J SH, LIANG H J, et al. Time-frequency domain based hybrid feature extraction algorithm for fiber optic sensing events recognition [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(9):153-159.
- [13] 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.
- [14] MASSARI C, ODDO C M, SINIBALDI E, et al. Tactile sensing and control of robotic manipulator integrating fiber Bragg grating strain-sensor[J]. Front Neurobot, 2019, 13:8.
- [15] 钱牧云, 余有龙. 基于逆传播神经网络的光纤布拉格光栅触觉传感[J]. 中国激光, 2017(8):223-229.
- QIAN M Y, YU Y L. Tactile sensing of fiber Bragg grating based on back propagation neural network [J]. Chinese Journal Laser, 2017(8):223-229.
- [16] 邓尚平. 基于FBG的触觉传感器及其解调系统的研究[D]. 北京:北京邮电大学, 2020.
- DENG S P. Research on FBG-based tactile sensor and its interrogation system [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2020.
- [17] HEO J S, CHUNG J H, LEE J J. Tactile sensor arrays using fiber Bragg grating sensors [J]. Sensors & Actuators A Physical, 2006, 126(2):312-327.

### 作者简介



王雅纯, 2018年于中南大学获得学士学位, 现为西安交通大学博士研究生, 主要研究方向为光纤光栅传感技术等。

E-mail: wangyachun@stu.xjtu.edu.cn

Wang Yachun received her B. Sc. degree from Central South University in 2018. She is currently a Ph. D. candidate at Xi'an Jiaotong University. Her main research interests include fiber Bragg grating sensing technology.



张小栋(通信作者), 1989年于西安交通大学获得学士学位、1992年于西安交通大学分别获得硕士学位、1996年于西安交通大学获得博士学位, 现为西安交通大学教授, 主要研究方向为智能检测诊断与控制技术、智能机器人等方面的研究。

E-mail: xdzhang@mail.xjtu.edu.cn

Zhang Xiaodong (Corresponding author) received his B. Sc. degree, M. Sc. degree and Ph. D. degree all from Xi'an Jiaotong University in 1989, 1992, and 1996, respectively. He is currently a professor at Xi'an Jiaotong University. His main research interests include intelligent detection diagnosis and control technology and intelligent robot.