

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905931

# 基于光纤布拉格光栅的柔性触滑觉复合传感研究\*

孙世政<sup>1,2</sup>, 龙雨恒<sup>1</sup>, 李洁<sup>2</sup>, 蒙志强<sup>1</sup>, 廖超<sup>1</sup>

(1. 重庆交通大学机电与车辆工程学院 重庆 400074; 2. 重庆邮电大学移通学院 智能工程学院 重庆 401520)

**摘要:**针对仿生皮肤柔性触滑觉复合传感问题,提出了一种基于光纤布拉格光栅的双层分布式传感单元。首先,研究了光纤布拉格光栅的传感机理,推导了基于参考光栅的温度补偿原理;然后,利用聚合物弹性材料对光纤布拉格光栅传感阵列进行保护性和增敏性封装,设计了双层“十字型”的分布式传感阵列单元,并对传感阵列单元压力灵敏度进行了仿真分析研究;最后,搭建实验系统平台,对柔性复合传感器进行了温度、触觉和滑觉传感实验。仿真和实验结果表明,该柔性触滑觉传感器具有良好的线性度和响应速度,温度灵敏度为 13 pm/°C,是裸光纤布拉格光栅的 1.31 倍;正向压力灵敏度为 7.289 nm/MPa,  $x$  正向和  $x$  负向剪切力灵敏度分别为 0.060 2 和 0.063 6 nm/N;由滑觉传感特征信号可以获取物体的滑动信息。该传感器有望表贴或埋置于仿生手内部,对实现仿生手触滑觉信息感知具有一定的应用价值。

**关键词:** 光纤布拉格光栅;柔性传感器;触滑觉复合传感;温度补偿

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

## Research on flexible tactile and sliding composite sensing based on fiber Bragg grating

Sun Shizheng<sup>1,2</sup>, Long Yuheng<sup>1</sup>, Li Jie<sup>2</sup>, Meng Zhiqiang<sup>1</sup>, Liao Chao<sup>1</sup>

(1. School of Mechatronics and Vehicle Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. School of Intelligent Engineering, College of Mobile Telecommunications, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 401520, China)

**Abstract:** Aiming at the flexible tactile and sliding composite sensing problem of bionic skin, a two-layer distributed sensing unit based on fiber Bragg grating is proposed. Firstly, the sensing principle of fiber Bragg grating is studied and the temperature compensation principle based on reference grating is deduced. Then, polymer elastic material is used for the protective and sensitized encapsulation of the fiber Bragg grating sensing array. The double-layer “cross” distributed sensing array unit is designed. The pressure sensitivity of the sensing array unit is studied and analyzed in simulation. Finally, an experiment system platform was established. The temperature, tactile and sliding sensing experiments on the flexible composite sensor were conducted. The results of simulation and experiment show that the flexible tactile and sliding sensor has good linearity and response speed. The temperature sensitivity of the sensor is 13 pm/°C, which is 1.31 times of that of the bare fiber Bragg grating. The positive pressure sensitivity is 8.294 nm/MPa. The  $x$  positive shear force sensitivity and  $x$  negative shear force sensitivity are 0.060 2 and 0.063 6 nm/N, respectively. The sliding information of object can be obtained from the characteristic signal of sliding sensing. The sensor is expected to be surface mounted or embedded in the bionic hand to realize the perception of tactile and sliding information of the bionic hand, which has some application value.

**Keywords:** fiber Bragg grating; flexible sensor; tactile and sliding composite sensing; temperature compensation

收稿日期: 2019-12-23 Received Date: 2019-12-23

\* 基金项目: 中国博士后科学基金面上项目(2018M633626XB)、重庆市科委基础科学与前沿技术研究项目(cstc2017jcyjAX0053)、交通工程应用机器人重庆市工程实验室开放课题(CELTEAR-KFKT-201805)资助

## 0 引言

触觉感知能力直接反映仿生体的智能化水平<sup>[1]</sup>。目前,国内外的触觉传感研究已经取得了较多的研究成果,愈发趋向于微型化、集成化和智能化。各类触觉传感器按原理主要可分为压阻式<sup>[2]</sup>、压电式<sup>[3]</sup>、电容式<sup>[4]</sup>和光学式<sup>[5]</sup>等形式,抗电磁干扰能力较弱、柔性不足、响应速度不够灵敏等问题导致各类传感器难以满足仿生体实时高精度的触觉信息检测需求,具有一定的局限性。

光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)凭借其体积小、灵敏度高、响应速度快、抗电磁干扰能力强等优点,近年来被广泛应用于桥梁隧道、航空航天、医疗卫生、水下探测各个领域<sup>[6-9]</sup>,在仿生体触觉传感方面的研究也取得了一定的进展。钱牧云等<sup>[10]</sup>利用硅橡胶作为封装材料,将二维分布式 FBG 传感阵列埋置其中,实现了触觉、滑觉信息的测量;许会超等<sup>[11]</sup>采用 3×3 FBG 传感阵列作为柔性传感元件,聚二甲基硅氧烷材料作为双层柔性基体,制作了柔性触觉传感器,实验表明在一定压力范围内,力灵敏度为 0.16 nm/N;王彦等<sup>[12]</sup>制作了基于光纤光栅的柔性传感器,采用控制变量法单一性地测试了对温度、力觉等信息的感知和响应;Song 等<sup>[13]</sup>基于 FBG 阵列提出的压力触觉传感器,获得了较好的线性度、重复性和动态响应效果;Guo 等<sup>[14]</sup>设计了一种带有 6 个 FBG 的特殊分离的弹性体结构,以实现三维力的传感;Zhuang 等<sup>[15]</sup>提出了一种基于章鱼触须模型形状传感方法,通过 FBG 标定,测量了中心波长漂移值与弯曲曲率的关系,并验证了其正确性;Feng 等<sup>[16]</sup>设计了一种基于光纤光栅机械指尖滑移传感器,提出了二阶导数算法,实现了滑移和表面粗糙度的检测。上述研究大多是针对触觉或者滑觉信息的单一测量,鲜有对触觉信息的复合传感研究,而且对环境温度带来的传感误差考虑较少。

综上所述,本文提出了一种柔性触觉传感器。该传感器利用硅橡胶作为封装材料,保护质脆的光纤光栅,增加传感元触觉感知灵敏度,将光纤光栅传感阵列埋置其中,同时设置温度补偿光栅,对触觉信息进行实时精确检测。

## 1 传感原理

FBG 是一种通过纤芯有效折射率和光栅周期改变引起光栅中心波长漂移来感知外界待测参数变化的光无源器件<sup>[17]</sup>。根据光纤耦合模理论<sup>[18]</sup>,当宽带光在光纤布拉格光栅中发生透射时,满足光纤布拉格条件的光将会被反射,其关系表达式为:

$$\lambda_B = 2n_e A \quad (1)$$

式中:  $\lambda_B$  为光纤布拉格光栅中心波长;  $n_e$  为纤芯有效折射率;  $A$  为光栅周期。

由温度、应变影响导致光栅周期和有效折射率变化而引起的波长漂移可表达为:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e)\varepsilon + (\alpha + \xi)\Delta T \quad (2)$$

式中:  $\Delta\lambda_B$  为光栅中心波长漂移量;  $P_e$  为光纤材料有效弹光系数;  $\varepsilon$  为轴向应变;  $\alpha$  为光纤材料热膨胀系数;  $\xi$  为光纤材料热光系数;  $\Delta T$  为温度变化量。

将 FBG 埋置于封装材料中,忽略封装材料各向异性,并将其视为理想粘结状态,其波长变化可表示为<sup>[19]</sup>:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B \varepsilon_z - \lambda_B \left\{ \frac{n_e^2}{2} [(P_{11} + P_{12})\varepsilon_r + P_{12}\varepsilon_z] \right\} \quad (3)$$

式中:  $P_{11}$ ,  $P_{12}$  分别为弹光系数。

由正向压力  $P$  引起光纤的径向应变  $\varepsilon_r$  和轴向应变  $\varepsilon_z$  分别为:

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} \nu_1 (1 - 2\nu_2) P \quad (4)$$

$$\varepsilon_z = -\frac{1}{E} (1 - 2\nu_2) P \quad (5)$$

式中:  $\nu_1$  为光纤材料泊松比;  $\nu_2$  为封装材料泊松比;  $E$  为封装材料弹性模量。

由此可得到,外界压力引起的聚合物封装下光栅波长漂移映射规律为:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e) \frac{1 - 2\nu_2}{E} P \quad (6)$$

## 2 传感器结构设计

### 2.1 聚合物封装仿真分析

聚合物封装是光纤光栅传感器的一种保护性、增敏性封装形式,该方式针对光纤光栅质脆的特点可以对其进行有效保护,亦可提升传感器灵敏度。传感单元采用硅胶材料进行封装,基体尺寸为 50 mm×20 mm×5 mm,采用 ANSYS 14.0 有限元分析软件对其进行仿真分析,聚合物材料弹性模量为 0.025 GPa,泊松比 0.48,热膨胀系数  $1.033 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。建模后按边长 0.5 mm 划分正六面体网格,将其底面作全约束,在其中心表面施加大小为 1 N 的正向压力,如图 1 所示,求解后得到材料的位移等值线云图如图 2 所示。



图1 均匀分布压强载荷加载

Fig.1 Uniformly distributed pressure loading

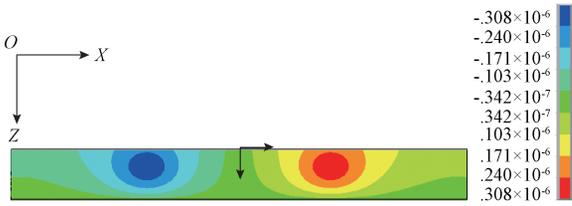


图2 有限元仿真位移等值线

Fig.2 Displacement contour of finite element simulation

从图2中可以看出,将坐标原点设置在材料表面中心,在封装材料表面中心施加均匀正向压力时,封装模型会受到x轴正向和负向的拉伸,产生大小相等,方向相反的位移,最大位移量为  $3.08 \times 10^{-7}$  m,不同埋置深度的x轴位移量如图3所示。

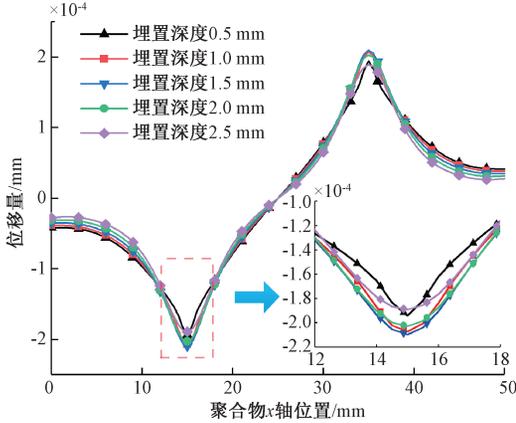


图3 不同埋置位置下封装模型x轴位移

Fig.3 The x-axis displacement of the encapsulation model for different embedding positions

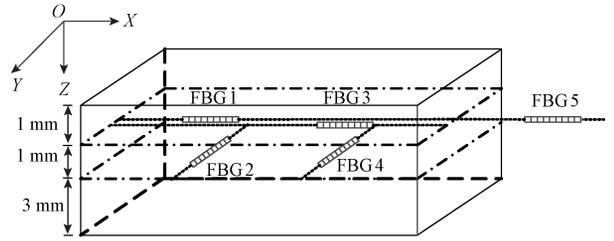
由图3可以看出,埋置深度将直接影响FBG应变大小,从而决定中心波长漂移大小。在x轴位置10~20mm范围内,埋置深度为1.5mm时,有最大x轴平均位移量,在1~2mm范围内,平均位移量差异较小,最大绝对值差值仅为  $2.763 \times 10^{-6}$  mm,此为确定传感光栅埋置深度重要依据。

### 2.2 传感阵列结构设计

为实现对触滑觉信息的实时精确感知,同时为避免光纤间交叉接触造成应力集中,导致光栅波长漂移失真,设计双层“十字型”分布式FBG传感阵列,埋置于聚合物中。根据仿真分析结果,埋置深度确定为1~2mm范围内,此外,考虑所用光纤直径和粘胶涂覆层厚度,设计双层结构埋置深度分别为1和2mm。

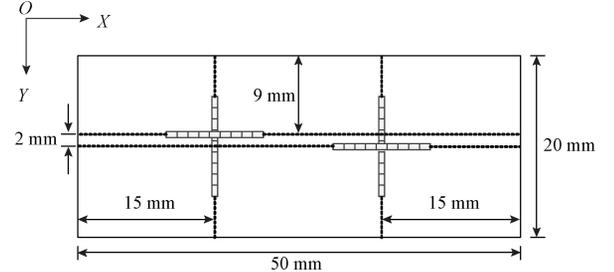
根据实际应用尺寸及空间分辨率的要求,可将传感阵列单元进行组合,以1×2阵列单元为例,该双层“十字型”阵列单元可实现对外界压力和剪切力的检测,通过对

传感阵列光栅的波长数据采样,亦能检测出滑觉信息。传感器结构如图4所示,其中FBG5为温度补偿光栅。



(a) FBG三维分布

(a) 3D distribution of FBG



(b) 1×2感光栅阵列单元俯视图

(b) Vertical view of 1×2 sensing grating array unit

图4 传感器结构

Fig.4 The sensor array

### 2.3 柔性传感器制作

本文选用弹性模量为0.025GPa,泊松比为0.48,热膨胀系数为  $1.033 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  的硅胶溶液作为封装材料;选用的光纤布拉格光栅栅区长度均为10mm,FBG1~FBG4室温下封装后中心波长依次为1544.080、1543.993、1544.107、1544.015nm,参考光栅FBG5中心波长为1543.985nm。

采用改性环氧树脂专用粘胶剂涂敷在光纤待埋置部分,浸泡于硅烷偶联剂中水解后取出干燥,固定于模具中待用<sup>[20]</sup>。配置等质量比硅胶溶液混合物,均匀搅拌后灌装入模具中固化成型,得到的FBG柔性触滑觉传感器由光纤纤芯、粘胶剂层、硅胶混合物基体组成,实物与一角硬币对比如图5所示。

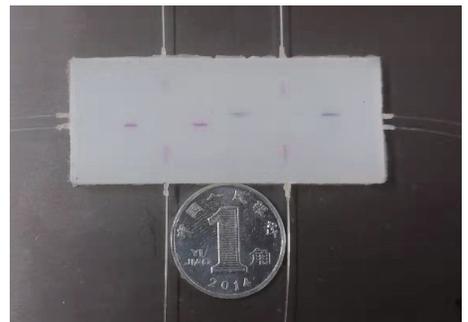


图5 FBG柔性传感器实物

Fig.5 FBG flexible sensor

### 3 实验与结果分析

构建分布式光纤光栅传感系统如图 6 所示,系统主要构成包括美国 MOI 公司生产的型号为 si255 的光纤光栅波长解调仪,其波长精度为 1 pm,FBG 柔性触觉传感器和上位机数据显示模块。解调仪自带光源模块发射出宽带光源,避免了 FBG 波长解调时的光源限制问题,当 FBG 感知外界物理量变化时,波长解调模块处理反射光信号,所需测量信息在上位机显示。



图 6 分布式光纤光栅传感系统

Fig.6 Distributed fiber grating sensing system

#### 3.1 温度传感实验

本文对 FBG 采用聚合物材料封装的形式,其温度灵敏度受封装材料热膨胀系数影响,与裸 FBG 温度性能有差异。为研究传感器温度特性,利用精度为 0.01℃ 的恒温箱开展温度传感实验设置温度范围 0℃ ~ 60℃,以 5℃ 为步长,控制温度变化,记录传感器波长漂移值。经数值分析后将数据进行线性拟合,得到如图 7 所示的温度-波长关系拟合曲线。

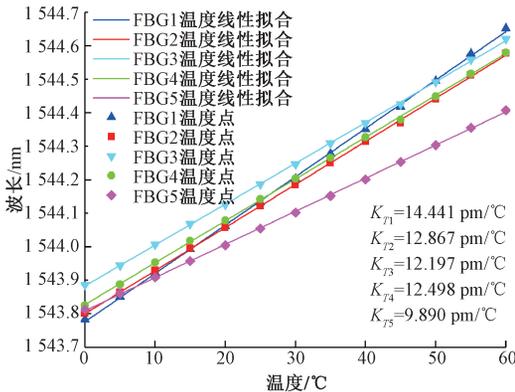


图 7 温度-波长关系拟合曲线

Fig.7 Relationship fitting curves of temperature vs. wavelength

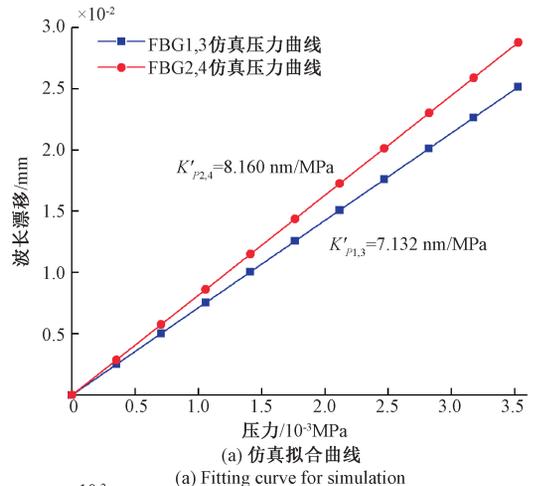
由图 7 可知,随温度变化 FBG 中心波长对应改变。

聚合物封装 FBG 温度灵敏度依次为  $K_{T1} = 14.441 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 、 $K_{T2} = 12.867 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 、 $K_{T3} = 12.197 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 、 $K_{T4} = 12.498 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ ,平均温度灵敏度  $13 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ ,参考光栅 FBG5 温度灵敏度  $9.890 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 。由于封装一致性影响和 FBG 生产刻划工艺的差异,每支 FBG 温度灵敏度略有差异,但在温度变化过程中的线性度均保持良好。将裸光栅 FBG5 与其余 FBG 对比,可以看出经聚合物封装后的 FBG 温度拟合曲线斜率明显增大,说明封装材料对 FBG 有温度增敏作用,可提升传感器温度灵敏度。

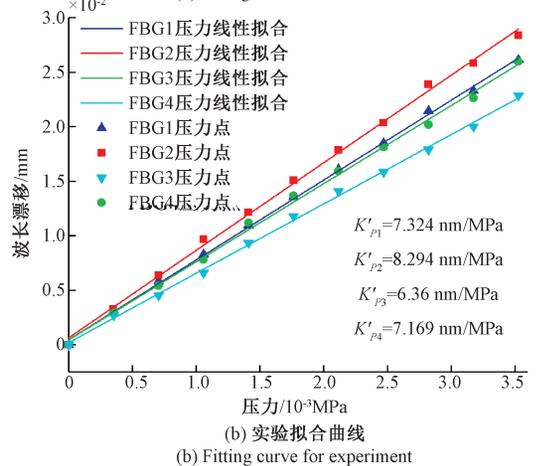
#### 3.2 压力传感实验

##### 1) 压力载荷实验

将柔性传感器放置在水平加载平台,利用标准质量砝码对其表面中心施加范围为  $0 \sim 3.527 \times 10^{-3} \text{ MPa}$  的正向压力。多次实验,将记录的各传感光栅波长漂移数据进行线性拟合,与仿真实验结果对比,得到如图 8 所示的传感光栅正向压力灵敏度拟合曲线。



(a) 仿真拟合曲线



(b) 实验拟合曲线

图 8 传感光栅正向压力灵敏度

Fig.8 Positive pressure sensitivity of the sensing grating

由图 8 可知,正向压力增大引起各 FBG 中心波长偏

移量增大,均表现出良好线性度。每支 FBG 正向压力灵敏度分别为  $K_{p1} = 7.324 \text{ nm/MPa}$ 、 $K_{p1} = 8.294 \text{ nm/MPa}$ 、 $K_{p1} = 6.361 \text{ nm/MPa}$ 、 $K_{p1} = 7.169 \text{ nm/MPa}$ ,平均灵敏度为  $7.287 \text{ nm/MPa}$ ,相关系数均在 99.73% 以上。传感单元 FBG2 和 FBG4 的压力灵敏度与有限元仿真结果一致,传感单元 FBG1 和 FBG3 的压力灵敏度与有限元仿真结果有差异,误差分别为 10.81% 和 10.25%,分析是由于封装一致性和实验操作误差导致。

## 2) 温度补偿

环境温度变化会极大地影响 FBG 传感器的传感精度,设置参考光栅以减小温度带来的传感误差。以 FBG1 为例,在上述压力测量范围内,假设环境温度变化范围在  $5^\circ\text{C}$  内时,传感器的引用误差为:

$$\gamma = \frac{|\Delta\lambda_B|_{\max}}{\lambda_{\text{BFS}}} = \frac{0.072\ 205}{0.025\ 832} = 279.52\% \quad (7)$$

式中:  $|\Delta\lambda_B|_{\max}$  为温度引起的 FBG 中心波长漂移绝对值的最大值,根据温度实验数据以及温度灵敏度拟合曲线,温度变化在  $5^\circ\text{C}$  内,FBG1 中心波长漂移的最大值为  $0.072\ 205 \text{ nm}$ ;  $\lambda_{\text{BFS}}$  为压力引起的 FBG 中心波长漂移范围,根据压力实验数据以及压力灵敏度拟合曲线,在本文实验压力范围内,FBG1 中心波长漂移范围为  $0 \sim 0.025\ 832 \text{ nm}$ 。

上述温漂范围仅为  $5^\circ\text{C}$ ,FBG1 的引用误差便达到了 279.52%,说明在进行触觉信息测量时,环境温度这一非目标参量会导致传感器的测量值的严重失真。因此设置一支只对温度敏感的参考光栅 FBG5,补偿环境温度变化引起的测量误差,补偿原理可表达为如下矩阵:

$$\begin{pmatrix} \Delta\lambda_{B1}/\lambda_{B1} \\ \Delta\lambda_{B2}/\lambda_{B2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_{T1} & K_{P1} \\ K_{T2} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta T \\ P \end{pmatrix} \quad (8)$$

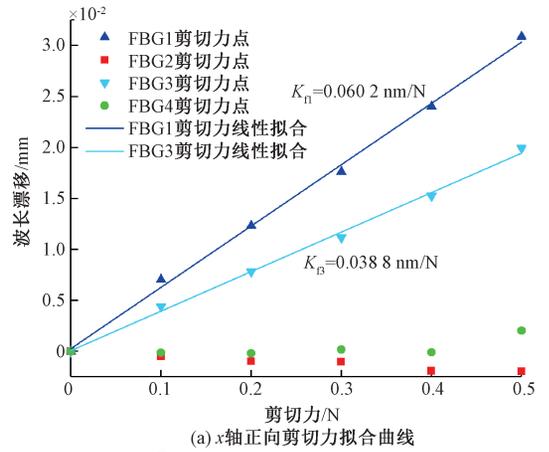
式中:  $K_{T1}$ 、 $K_{P1}$  分别为测量光栅温度和压力灵敏度;  $K_{T2}$  为参考光栅温度灵敏度。

当灵敏度系数矩阵不为零时,该方程组有解,将每支 FBG 测定后的温度灵敏度代入公式,即可实现补偿各 FBG 中心波长漂移,消除环境温度对触觉传感的影响。

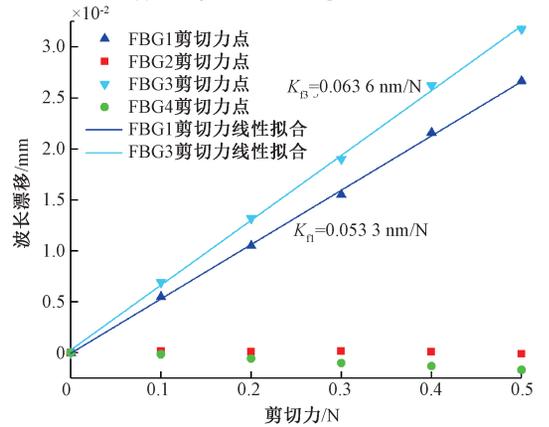
## 3.3 剪切力传感实验

将柔性传感器放置在水平加载平台,利用滑轮搭建水平剪切力加载装置施加剪切力。在  $0 \sim 0.5 \text{ N}$  剪切力范围内,于 FBG3 正上方表面位置施加  $x$  正向剪切力,FBG1 正上方表面位置施加  $x$  负向剪切力完成剪切力传感实验。多次实验,记录各传感光栅波长漂移值,经过数值分析后将数据进行线性拟合,得到如图 9 所示的传感光栅剪切力灵敏度拟合曲线。

由图 9 可以看出, $x$  轴方向剪切力增大引起 FBG1 和 FBG3 中心波长偏移量增大,呈线性关系,FBG2 和 FBG4 中心波长几乎不发生漂移。正负两个方向剪切力灵敏度



(a)  $x$ 轴正向剪切力拟合曲线



(b)  $x$ 轴负向剪切力拟合曲线

图 9 传感光栅剪切力灵敏度

Fig.9 Shear force sensitivity of the sensing grating

接近,其中  $x$  正向剪切力灵敏度为  $0.060\ 2 \text{ nm/N}$ , $x$  负向剪切力灵敏度为  $0.063\ 6 \text{ nm/N}$ ,线性相关系数均在 99.60% 以上,说明了该传感器对剪切力的响应良好。

## 3.4 滑动传感实验

在水平加载实验平台上进行滑动实验,滑块采用边长为  $20 \text{ mm}$  的标准质量立方体铜块,利用电机带动铜块匀速滑动完成滑动传感实验。物块在传感器表面沿  $x$  轴,以不同速度滑动,引起各 FBG 中心波长漂移,以  $1 \text{ kHz}$  采样频率记录并绘制 FBG 时间—波长关系曲线,如图 10 所示。

滑块在  $x$  轴方向滑动导致聚合物弹性体不同部分发生拉伸或压缩,每支 FBG 中心波长随之相应发生漂移。由图 10(a)可知,可以通过 FBG1 和 FBG3 明显分辨出滑移发生前、滑移中和滑移停止 3 个阶段。通过对比图 10(a)和(b)可以看出,滑块以不同速度沿  $x$  轴正向滑移时,每支 FBG 波长漂移趋势基本一致;利用滑动位移和滑移的时间可以推算出图 10(a)和(b)的平均滑移速度

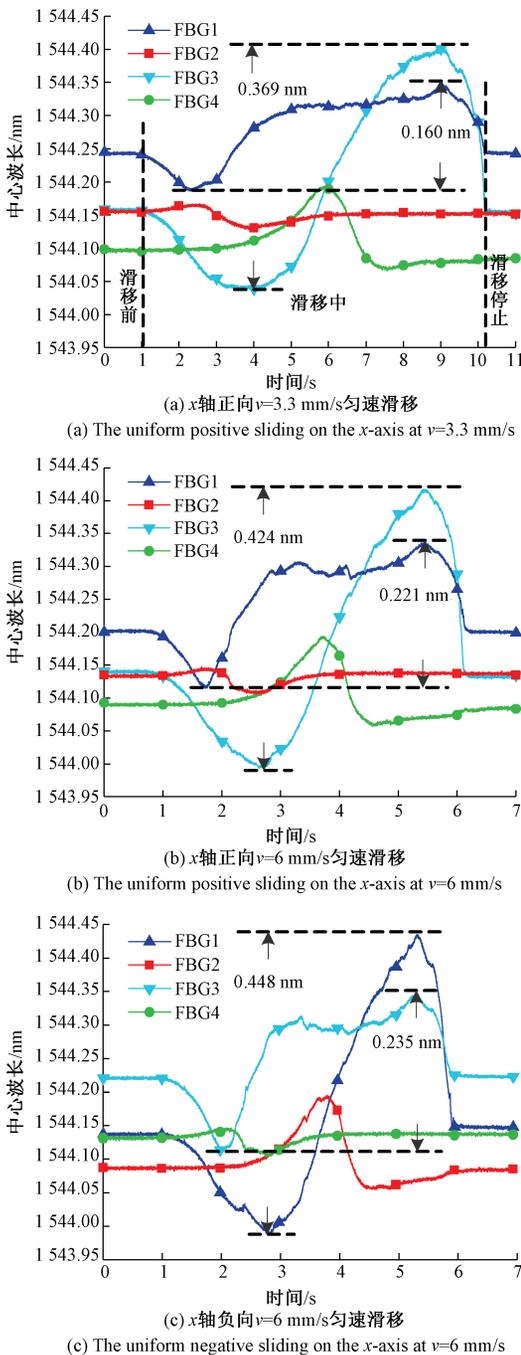


图10 滑觉传感信号

Fig.10 Signal of sliding sensing

分别约为 3.3 和 6 mm/s;FBG1 的波长漂移范围分别为 0.160 和 0.221 nm,FBG3 的波长漂移范围分别为 0.369 和 0.424 nm,说明在一定范围内滑移速度与传感器产生的应力成正比。

对比图 10(b) 和 (c),滑块分别沿  $x$  轴正反向滑动时,图 10(b) 中 FBG3 和图 10(c) 中 FBG1 的空间位置对应,在相同滑移速度下,波长漂移范围基本一致,分别为

0.424 和 0.448 nm;图 10(b) 中 FBG1 和图 10(c) 中 FBG3 的空间位置对应,波长漂移范围基本一致,分别为 0.221 和 0.235 nm。通过对比 FBG2 和 FBG4 中心波长发生漂移的时间前后可以判断物块的滑动方向,即铜块  $x$  轴正向滑动时,FBG2 波长先发生明显漂移,铜块  $x$  轴负向滑动时,FBG4 波长先发生明显漂移。

根据图 10 中铜块不同速度、不同方向滑动的对比,表明物块滑动导致各对应 FBG 波长漂移具有一致的趋势和可重复性。由于材料残余应力和环境温度变化因素,滑动前各 FBG 的初始中心波长值略有不同,本文主要采集波长的相对动态变化,即波长漂移,因此初始中心波长值略有不同对测量滑觉影响不大。实际上,可对每支 FBG 设置阈值,当滑觉特征值引起的波长漂移大于阈值时,即认为滑动发生。

## 4 结 论

本文提出了一种基于光纤光栅的柔性触觉传感器,该传感器响应速度快,可实现触觉信息的实时感知,并具有温度补偿功能。仿真和实验结果表明,传感光栅中心波长对温度、正向压力和剪切力均呈良好的线性关系,平均温度灵敏度为 13  $\mu\text{m}/^\circ\text{C}$ ,是裸 FBG 的 1.31 倍,说明聚合物封装对传感器温度参量具有增敏作用;平均压力灵敏度为 7.289  $\text{nm}/\text{MPa}$ , $x$  正向剪切力灵敏度和  $x$  负向剪切力灵敏度分别为 0.060 2 和 0.063 6  $\text{nm}/\text{N}$ ;通过研究滑觉传感特征信号,可以判断物体的滑移快慢和方向。

提高聚合物封装工艺水平,可扩大传感器的压力、剪切力检测范围。为提高该传感器滑觉传感性能,将在后续研究过程中增添一系列滑觉传感实验。此外,本文只是分别针对触觉信息进行了研究,若能解决触觉信息间的耦合解算问题,将有望应用到仿生体的触觉智能传感领域。

## 参考文献

- [1] SUNDARAM S, KELLNHOFER P, LI Y Z, et al. Learning the signatures of the human grasp using a scalable tactile glove[J]. Nature, 2019, 569(7758): 698-702.
  - [2] NGUYEN T V, TANII R, TAKAHATA T, et al. Development of a single-chip elasticity sensor using MEMS-based piezoresistive cantilevers with different tactile properties[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018, 285:362-368.
  - [3] 邢继春, 刘德春, 任文迪. 压电式触觉反馈执行器发展综述[J]. 压电与声光, 2018, 40(4):619-625.
- XING J CH, LIU D CH, REN W D. Review of

- development of piezoelectric tactile feedback actuator[J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2018, 40(4):619-625.
- [4] AHN Y, SONG S, YUN K S. Woven flexible textile structure for wearable power-generating tactile sensor array[J]. *Smart Materials and Structures*, 2015, 24(7):075002.
- [5] 赵利明, 董明利, 李红, 等. 仿生柔性触角形状感知光纤传感方法研究[J]. *激光与红外*, 2018, 48(4):509-514.
- ZHAO L M, DONG M L, LI H, et al. Research on shape sensing fiber optic sensing method of bionic flexible antenna[J]. *Laser & Infrared*, 2018, 48(4):509-514.
- [6] 刘凤超, 冯进良, 王洋, 等. 基于桥梁结构的FBG传感器温度与应变交叉敏感问题的研究[J]. *光学仪器*, 2017, 39(1):26-30.
- LIU F CH, FENG J L, WANG Y, et al. Sensitivity to temperature and strain of bridge structure of FBG sensor[J]. *Optical Instruments*, 2017, 39(1):26-30.
- [7] 曲道明, 孙广开, 李红, 等. 变形机翼柔性蒙皮形状光纤传感及重构方法[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(1):144-151.
- QU D M, SUN G K, LI H, et al. Optical fiber sensing and reconstruction method for morphing wing flexible skin shape [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(1):144-151.
- [8] XUE R F, REN B Y, HUANG J Q, et al. Design and evaluation of FBG-based tension sensor in laparoscope surgical robots[J]. *Sensors*, 2018, 18(7):2067.
- [9] BAI X H, HU M, GANG T, et al. An ultrasonic sensor composed of a fiber Bragg grating with an air bubble for underwater object detection [J]. *Optics and Laser Technology*, 2019, 112(4):467-472.
- [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] 许会超, 苗新刚, 汪苏. 基于FBG的机器人柔性触觉传感器[J]. *机器人*, 2018, 40(5):60-65, 148.
- XU H CH, MIAO X G, WANG S. A flexible tactile sensor for robot based on FBG [J]. *Robot*, 2018, 40(5):60-65, 148.
- [12] 王彦, 秦楠, 刘吉虹, 等. 基于光纤光栅的温度与压力柔性传感性能测试[J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(3):93-98.
- WANG Y, QIN N, LIU J H, et al. Performance test of temperature and pressure flexible sensor based on optical fiber Bragg grating [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(3):93-98.
- [13] SONG J X, JIANG Q, HUANG Y Y, et al. Research on pressure tactile sensing technology based on fiber Bragg grating array [J]. *Photonic Sensors*, 2015, 5(3):263-272.
- [14] GUO Y X, KONG J Y, LIU H H, et al. A three-axis force fingertip sensor based on fiber Bragg grating[J]. *Sensors and Actuators A Physical*, 2016, 249:141-148.
- [15] ZHUANG W, SUN G K, LI H, et al. FBG based shape sensing of a silicone octopus tentacle model for soft robotics[J]. *Optik*, 2018, 165:7-15.
- [16] FENG J H, JIANG Q. Slip and roughness detection of robotic fingertip based on FBG[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2019, 287:143-149.
- [17] HILL K O, MELTZ G. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15(8):1263-1276.
- [18] 吴朝霞, 吴飞. 光纤光栅传感原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- WU ZH X, WU F. Principle and application of fiber grating sensing[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011.
- [19] HILL D J, CRANCH G A. Gain in hydrostatic pressure sensitivity of coated fiber Bragg grating [J]. *Electronics Letters*, 1999, 35(15):1268-1269.
- [20] 余有龙, 胡亮. 增强光纤与封装材料粘结力的光纤埋置结构及埋置方法: CN200610037372. 7[P]. 2007-02-21.
- YU Y L, HU L. Implantation method and embedment structure to enhance cohesive force between fiber and packing material: CN200610037372. 7[P]. 2007-02-21.

## 作者简介



孙世政(通信作者), 2015年于合肥工业大学获得博士学位, 现为重庆交通大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为精密仪器与机械、智能传感技术。

E-mail: sssz091011@163.com

**Sun Shizheng** (Corresponding author)

received his Ph. D. degree in 2015 from Hefei University of Technology. Now, he is an associate professor and master student supervisor in Chongqing Jiaotong University. His main research interests include precision instruments and machinery, and smart sensor technology.