

光纤感知阵列在线滑觉测试系统

刘春辉^{1,2}, 刘智超^{1,2}, 殷礼鑫^{1,2}

1. 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;
2. 长春理工大学光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室, 吉林 长春 130022)

摘要: 针对智能柔性滑觉传感中位置与速度的实时监测问题, 设计了一种监测目标位移与速度的光纤感知模块。首先, 采用温度补偿模块解决温度交叉敏感问题; 然后, 在分析传感单元应力分布仿真结果的基础上提出了“米”型 FBG 组网结构; 最后, 采用标准压力计与小球完成了位置方向与速度状态的测试, 并提出了适用该结构的目标状态解算模型。仿真结果显示, 目标轨迹平均形变量约为 0.32 μm , 衰减距离宽度约为 3.0 mm。实验针对 0.255 kg 钢制小球进行滑动测试, FBG 应力灵敏度均优于 0.0206 nm/N, FBG 中心波长偏移量可以准确确定物体所在区域位置和物体运动方向。传感模块能够实时监测物体运动状态, 智能调整物体施力大小及位姿。结果显示, 该滑觉感知系统的平面定位精度、运动角度与速度换算均符合设计要求。并且根据模型函数关系可知, 在调整传感网络中 FBG 总量时可以实现对位置、角度及速度精度的控制。综上所述, 该系统具有对检测区域内目标位置、运动状态实时监测的能力, 适用于柔性智能装配、智能仿生皮肤等技术领域。

关键词: 光纤光栅传感器; 位移监测; 状态分析; 感知阵列; 仿真分析
中图分类号: O436 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20210278

On-line slippage measurement system for optical fiber sensing array

Liu Chunhui^{1,2}, Liu Zhichao^{1,2}, Yin Lixin^{1,2}

1. School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
2. Key Laboratory of Optoelectronic Measurement and Control and Optical Information Transmission Technology of Ministry of Education, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: Aiming at the real-time monitoring of position and velocity in smart flexible sliding sensor, a fiber optic sensing module for real-time monitoring of target displacement and velocity was designed. First, the temperature compensation module was used to solve the temperature cross-sensitivity problem; then, based on the analysis of the stress distribution simulation results of the sensing unit, the "meter" type FBG network structure was proposed; finally, the standard pressure gauge and the ball were used to complete the test of the position direction and the speed state, and a target state solution model suitable for this structure was proposed. The simulation results show that the average deformation of the target trajectory is about 0.32 μm , and the attenuation distance width is about 3.0 mm. The experiment carried out a sliding test on a 0.255 kg steel ball. The FBG stress sensitivity was better than 0.0206 nm/N. The FBG center wavelength offset can accurately determine the location

收稿日期: 2021-04-28; 修订日期: 2021-06-23

基金项目: 国家自然科学基金 (61703056); 吉林省优秀青年人才基金 (20190103154 JH)

作者简介: 刘春辉, 女, 硕士生, 主要从事光纤传感、数字化装配等方面的研究。

导师简介: 刘智超, 男, 副教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事光纤传感、光谱分析及数据处理等方面的研究。

of the object and the direction of the object's movement. The sensor module can monitor the movement state of the object in real time, and intelligently adjust the force and posture of the object. The results show that the plane positioning accuracy, motion angle and speed conversion of the sliding sensor system meet the design requirements, and according to the model function relationship, it can be known that the control of accuracy of the position, angle and speed can be achieved when adjusting the total amount of FBG in the sensor network. In summary, the system has the capability of real-time monitoring of the target position and movement status in the detection area, and is suitable for technical fields such as flexible intelligent assembly and intelligent bionic skin.

Key words: fiber Bragg grating sensor; displacement monitoring; state analysis; perception array; simulation analysis

0 引言

嵌入式光纤光栅滑觉传感器现多用于智能仿生皮肤的研究^[1]。目前国内外对滑觉传感器的研究不断朝着小型化和智能化的方向发展^[2]。检测该功能的传感器大多数为电容传感器和光波导传感器^[3-7]，以上传感器存在着抗电磁干扰能力较弱、柔性不足等问题。而光纤布拉格光栅 (Fiber Bragg Grating, FBG) 体积小, 灵敏度高, 响应速度快, 近年来被广泛应用于桥梁隧道、航天航空等各个领域^[8-11]。2018 年, 钱穆云等人将二维分布式 FBG 传感阵列埋置于封装体中, 实现了触觉、滑觉信息的测量^[12]。2018 年, Nobutomo M 等人研究了采用滑差方式监测机械手的抓握控制能力^[13]。2019 年, Feng 等人设计了一种基于光纤光栅机械手指尖滑移传感器, 实现了滑移和表面粗糙度的检测^[14]。2019 年, 王彦等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^[15]。2020 年, 孙世政等人提出了一种基于光纤布拉格光栅的双层分布式传感单元, 将触觉与滑觉信号分离^[16]。许会超等人采用 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^[17]。

上述所提到的研究中大多只是对触觉信息的测量或将触觉与滑觉交叉响应分离的问题, 没有对物体整个运动状态进行监测。因此文中提出了一种在硅胶中嵌入 FBG 阵列的柔性滑觉传感器, 并增加了与应变传感器相同封装形式的温度补偿光栅, 实现了对物体运动状态的实时监测。该传感器模型通过将物体运动所产生的应力转换为 FBG 中心波长响应输出, 再对输出响应进行解算从而获取物体实时运动状态信息。

1 系统设计

1.1 系统结构设计

该系统主要由扫频激光器、耦合器、光隔离器、解调模块、温度补偿模块等组成, 如图 1(a) 所示。

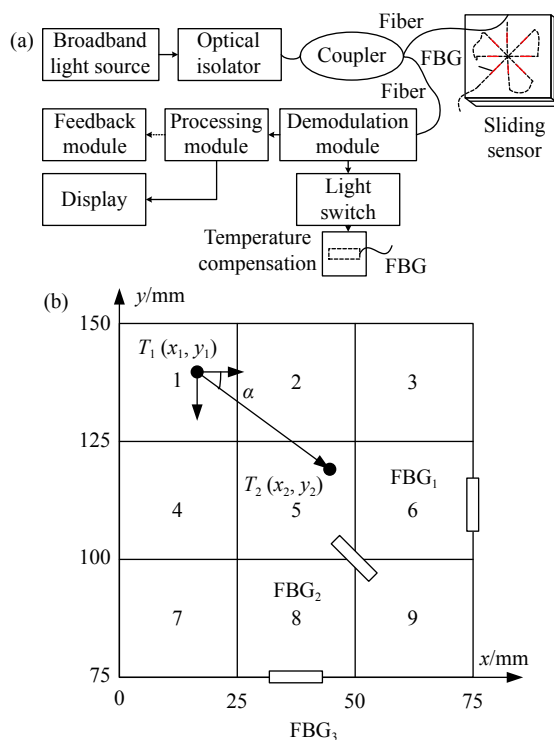


图 1 (a) 系统整体结构示意图; (b) 物体运动方向及速度
Fig.1 (a) Overall structure of the system; (b) Direction and speed of the object's movement

该测试系统是针对监测物体滑动路线的研究, 物体按一定路线在硅胶块上滑动时, 物体施加在硅胶块上的应变导致光纤光栅传感器阵列中心波长发生偏移, 解调器上位机实时显示中心波长的偏移以及物体运动时间, 文中建立光纤光栅中心波长偏移量与物体

位置之间关系,从而实现对物体滑动路线的监测。

1.2 滑动目标状态参数解算模型

FBG 的传感原理是通过光纤芯进行反射和透射,在外界环境感知应变时,反射和折射的光会发生变化,从而达到测量目的。

根据耦合理论有:

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

式中: λ_B 为反射波波长; n_e 为光纤光栅的有效折射率; Λ 为光栅周期。当光纤光栅周围应力和温度变化会引起折射率和栅距的变化,导致 FBG 波长 λ_B 的移位,满足线性关系式:

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = (\alpha + \xi)\times\Delta T + (1-P_e)\varepsilon \quad (2)$$

式中: $\Delta\lambda_B$ 为 FBG 波长变化量; α 为光纤光栅的热膨胀系数; ξ 为光纤光栅热光系数; ΔT 为温度变化; P_e 为光纤光栅弹光系数; ε 为光纤光栅轴向应变。

当环境温度发生变化时,系统中的温度补偿 FBG 产生一定的温漂补偿应力传感器温漂,因此在后续测量过程中只考虑应变所引起的中心波长的偏移。

首先对光纤光栅进行标定实验,得到每一个光纤

$$\left\{ \begin{array}{l} A_1 \rightarrow f(b_{21}, b_{31}, b_{32}) = (0.63 \ 3.5, 0, 0); \\ A_2 \rightarrow f(b_{21}, b_{31}, b_{32}) = (0.27 \ 0.32, 0.15 \ 0.18, 0.57 \ 0.59); \\ A_3 \rightarrow f(b_{21}, b_{31}, b_{32}) = (0.63 \ 0.67, -0.34 \ -0.37, -0.92 \ -0.96); \\ A_4 \rightarrow f(b_{21}, b_{31}, b_{32}) = (0.19 \ 0.25, 0, 0); A_5 \rightarrow f(b_{21}, b_{31}, b_{32}) = (0.83 \ 0.85, 0, 0); \\ A_6 \rightarrow f(b_{21}, b_{31}, b_{32}) = (0.74 \ 0.79, 0, 0); A_7 \rightarrow f(b_{21}, b_{31}, b_{32}) = (0.03 \ 0.07, 0, 0); \\ A_8 \rightarrow f(b_{21}, b_{31}, b_{32}) = (0.17 \ 0.21, 0, 0); A_9 \rightarrow f(b_{21}, b_{31}, b_{32}) = (1.54 \ 1.63, 0, 0) \end{array} \right. \quad (5)$$

如公式 (5) 所示,相邻两个 FBG 都有对应的特定比值范围,由两两相邻的 FBG 响应范围可以准确地判断出物体所在区域位置。

1.3 运动方向及速度的解算

在确定物体先后两个位置坐标之后,可以由相邻的两个位置坐标确定物体在任意两个时刻的运动轨迹以及速度。如图 1(b) 所示, T_1 时刻物体位置坐标为 (x_1, y_1) , T_2 时刻物体位置坐标为 (x_2, y_2) , 则物体运动方向与 x 轴夹角即物体运动方向:

$$\alpha = \arctan(y_2 - y_1/x_2 - x_1) \quad (6)$$

假设物体在该时刻匀速运动,则物体移动速度为:

在每一个小区域处的分辨率 K 。36 个不同的小区域分别对应 8 个不同 FBG 的分辨率。当物体在不同位置时,FBG 中心波长偏移量有不同的响应。

根据每一个 FBG 的响应正负以及响应程度,可以初步判定物体所在区域,假设物体所在图 1(b) 所示区域,该区域内有 1~9 个小区域,进一步确定物体所在位置则需要知道每一小区域处两个 FBG 的分辨率比值,任意区域皆满足关系式:

$$\Delta\lambda_m/\Delta\lambda_n = K_m/K_n = b_{mn} \quad (3)$$

$$(x_i, y_j) = f(b_{mn}, b_{m+1n}, b_{m+1n+1}) \quad (4)$$

式中: $\Delta\lambda$ 为光纤光栅传感器中心波长偏移量 (其中 $m=1,2,\dots,8$; $n=1,2,\dots,8$); K_m 表示第 m 个光纤光栅传感器在点 (x_i, y_j) 处的系数。由于光纤光栅位移监测模块中所铺设的光纤是完全对称的状态,以横轴 0~75 mm、纵轴 75~150 mm 的范围为例,该范围分为 9 个小区域,按照由左到右、由上到下的顺序分别命名为 $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6, A_7, A_8, A_9$, 设 $\Delta\lambda_2/\Delta\lambda_1 = \Delta\lambda_{21} = b_{21}$, $\Delta\lambda_3/\Delta\lambda_1 = \Delta\lambda_{31} = b_{31}$, 则测试点位置与波长响应的分布关系可表示为:

$$v = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}/(T_1 - T_2) \quad (7)$$

因此,在确定物体前后时刻位置坐标后即可得到物体的运动方向以及某一时刻物体的运动速率。

2 仿真分析

文中的传感单元采用 150 mm×150 mm×1.5 mm 硅胶进行双层封装,结合实际情况对硅胶块进行有限元分析,指导光纤应变传感器布局设计。其中硅胶块密度为 1.2 g/cm³, 杨氏模量为 1.66×10³ MPa, 泊松比为 0.486。预设一段运动轨迹并在该运动轨迹内选取

19 个测量点施加 20 N 的力进行仿真分析, 得到应力场分布情况如图 2 所示。

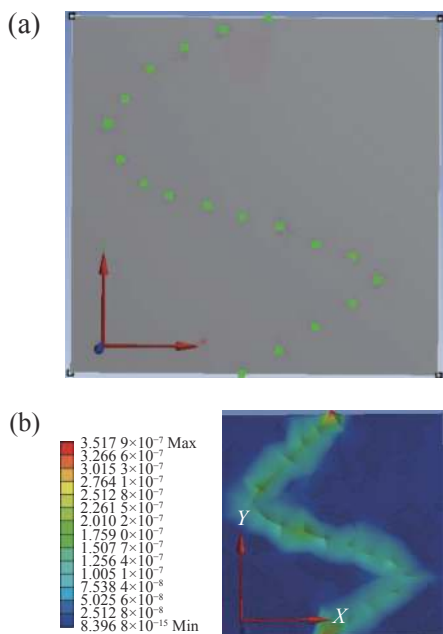


图 2 (a) 滑动物体运动轨迹; (b) 硅胶块应变场分布

Fig.2 (a) Slide object trajectory; (b) Strain field distribution of silica gel block

图 2(a) 为预设的物体运动轨迹, 该轨迹上半段为曲线运动, 下半段为直线运动。从图 2(b) 中的仿真结果可以清晰地分辨出物体的曲线与直线运动轨迹。由仿真结果可知, 硅胶受力后在 x 轴及 z 轴存在一定的位移变形量, 有实验表明, 当硅胶厚度为 1.5 mm 时其沿 x 轴的变形量最大, 约为 $0.3 \mu\text{m}$, 因此上层硅胶选用 1.5 mm 的厚度。如图 2(b) 所示, 硅胶块在受到应力时, 发生变形较大的区域分别是硅胶块边缘区域为 $3.5 \times 10^{-4} \mu\text{m}$ 以及物体运动轨迹中心处为 $2.6 \times 10^{-4} \mu\text{m}$ 。

3 实验及结果分析

3.1 标定实验以及静态位置坐标定位

滑觉传感标定实验系统如图 3(a) 所示, 该实验系统主要由解调仪、传感模块、压力计组成。解调仪最小分辨率为 0.5 pm。实验中所用光源波长解调范围为 1525~1565 nm, 最小分辨率为 0.5 pm。实验施力物体为一半径 2 mm 的金属施力杆, 受力面尺寸较小, 可看作点施力。硅胶块内铺设的 FBG 写入了 8 个不同峰

值的光栅, 每一个光栅长度为 10 mm, 光栅间距为 8 cm, 每一个光栅的反射率都能达到 90% 以上, 且边模抑制比都大于 15 dB。8 个光纤光栅传感器带宽均为 0.195 nm, 其中光纤弹光系数、光纤热光系数分别为 0.120、0.275, 泊松比为 0.17。

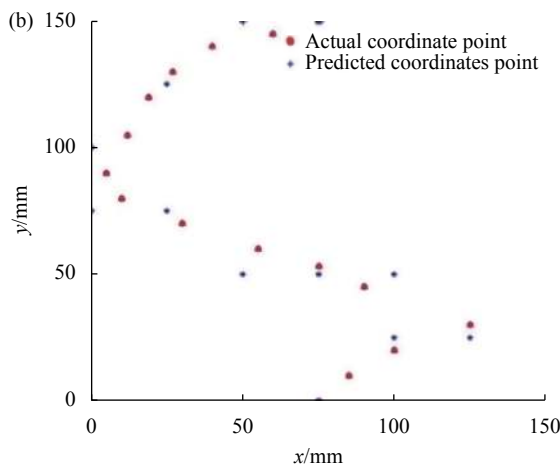
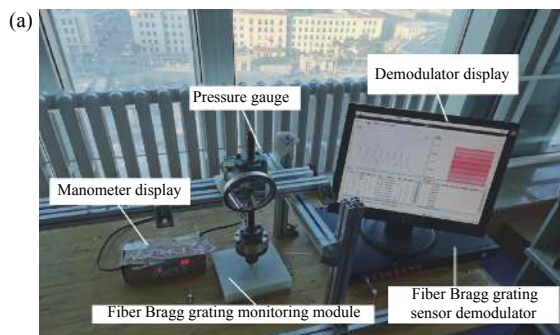


图 3 (a) 标定实验装置; (b) 静止物体位置坐标实际点与预测点对比
Fig.3 (a) Calibration experiment device; (b) The actual points and the predicted points of the static object position

实验过程中分别在 36 个小区域处施加 20 N 的力, 反复多次进行实验, 通过解调仪采集回 36 组光纤光栅中心波长偏移量值, 用 MATLAB 对实验数据进行拟合, 得到每一个光纤光栅传感器在每一个区域处的分辨率值, 完成对光纤光栅传感模块的标定。表 1 为标定实验所得每一个光纤在每一个小区域处的分辨率 k 。

按照仿真图中的轨迹点用金属施力杆模拟静止物体, 使其对硅胶块施加 20 N 的力得到如图 3(b) 所示的实际坐标点与预测坐标点对比图, 可见以该实验标定的各个 FBG 响应区域能够较准确地判断物体位置坐标。

表 1 各个区域不同 FBG 不同分辨率值

Tab.1 Different resolution values of different FBG in different regions

	k/nm								
	Area 1	Area 2	Area 3	Area 4	Area 5	Area 6	Area 7	Area 8	Area 9
FBG1	0.06	0.48	1.92	0.36	0.44	0.29	0.45	1.93	1.07
FBG2	0	0.01	0.54	0.32	0.09	0.76	0.29	0.84	0.45
FBG3	0	0.26	-0.37	0	0	0	0	0	0
FBG4	0.26	0.35	-0.97	-0.46	0.02	0	0	0	1.95
FBG5	0	0	-0.36	0	0.07	-0.46	0	0	0.39
FBG6	0	-0.17	-0.23	0	0	0	0	0	0
FBG7	0	-0.48	-0.20	9	10	0.74	-0.02	-0.04	0
FBG8	0.36	1.96	0.01	-0.19	-0.04	0	0	-0.07	0.04

3.2 运动状态监测实验

在实际轨迹监测实验中所用运动物体为 0.255 kg 的钢制小球,实验装置如图 4(a) 所示。假设物体移动

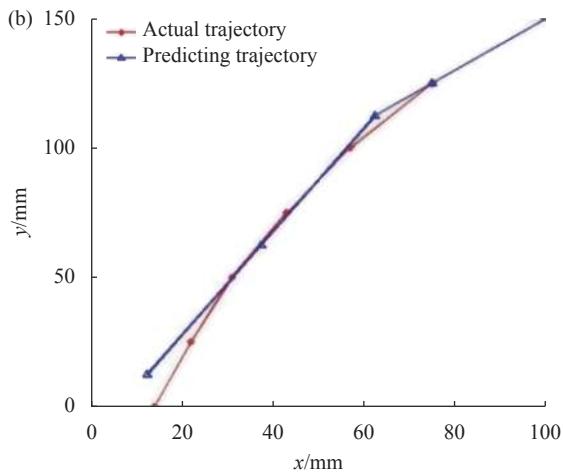
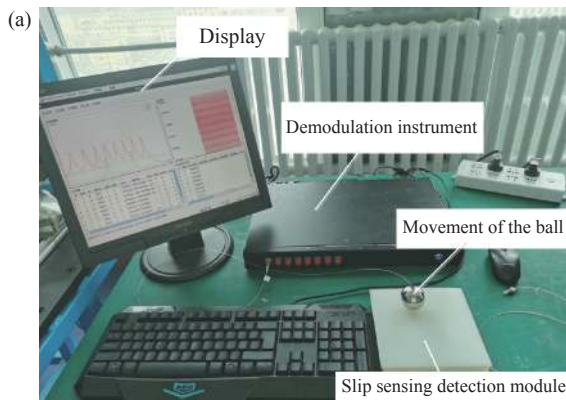


图 4 (a) 小球运动轨迹监测实验装置; (b) 小球运动实际轨迹与测量轨迹对比

Fig.4 (a) Experimental installation of monitoring small ball sports trajectory; (b) Actual trajectory comparison and measurement of small ball sports

过程中对硅胶作用力集中于点,给物体一定的初速度并使物体任意运动一段轨迹。物体在不断移动的过程中,对硅胶块的不同位置施加相同的力,使硅胶块发生一定的形变。与此同时,光纤光栅传感器产生相应的响应,通过解调仪记录物体移动时间以及光纤光栅中心波长实时偏移量。以公式 (5) 为依据,对获得的光纤光栅中心波长偏移量进行数据处理,获得铁球运动过程中实际位置坐标与预测坐标间对比图,如图 4(b) 所示。

结合标定实验与小球实验结果可知,对硅胶传感模块施加不同大小的力只是改变光纤光栅传感器响应范围以及信噪比。质量越大,压力越大,则传感器相应范围更广,其信噪比更好。由于文中是通过 FBG 间响应参数比值进行位置解算,即使重物的质量发生改变也不会对传感模块的解算精度产生影响。实验对质量为 0.255 kg 的小球进行监测,光纤光栅传感器已具有很理想的响应结果,足以证实该传感模块可应用到仿生体滑觉监测系统中。

图 4(b) 中红色为实际运动轨迹点,蓝色为预测运动轨迹,可以看出,以 6×6 来划分硅胶块,通过光纤光栅传感器的实时监测能够较准确地确定物体运动的大致路线,因此该传感组能够用来监测物体的非线性运动轨迹以及运动方向。

3.3 实验结果及误差分析

小球运动轨迹实验中选取 7 个点,确定每一个点所处区域以及具体位置坐标,并求得实际位置与测量位置间的距离误差,如表 2 所示。

实际点与测量点间的距离误差为:

表 2 小球运动轨迹以及预测轨迹

Tab.2 Ball trajectory and prediction trajectory

Actual location/mm	Section number	Measuring position/mm	Section number	Range error/mm
(14,0)	A ₁₁	(12.5,12.5)	A ₁₁	12.5
(22,25)	A ₁₁	(12.5,12.5)	A ₁₁	15.7
(31,50)	A ₂₃	(37.5,62.5)	A ₂₃	14
(43,75)	A ₂₃	(37.5,62.5)	A ₂₃	13.6
(57,100)	A ₃₅	(62.5,112.5)	A ₃₅	13.6
(75,125)	A ₄₅	(87.5,137.5)	A ₄₅	17.6
(100,150)	A ₅₅	(100,150)	A ₅₅	0

$$d_1 = \sqrt{(62.5 - 60)^2 + (137.5 - 145)^2} = 7.9 \text{ mm} \quad (8)$$

实际点与测量点间的角度误差为:

$$\alpha = \arctan[(y_2 - y_1)/(x_2 - x_1)] = 18.4^\circ \quad (9)$$

由计算结果可知,运动过程中小球实际运动位置与该系统预测位置距离最大误差为 17.6 mm,该系统预测的小球的区域位置与实际区域位置完全一致,而位置误差大小均小于所划分区域数值大小。由最后的实验结果可知,在将光纤传感模块划分为 6×6 的分辨率的情况下,可以较准确地确定物体的具体位置和运动方向,并且系统在位置角度的测量过程中可以通过调节 FBG 铺设密度来实现更准确的测量。如果想要更进一步提高位置坐标的准确度,可以以同样的粘贴方式增加 FBG 的数量或者划分成更小的区域。由于光纤光栅传感器是嵌入到硅胶中,在实际应用中可根据测量现场具体问题对硅胶的形状、大小以及厚度进行调整,实现了某些特定测量场合对传感器微型化的要求。

4 结 论

文中利用光纤光栅传感器监测物体的滑动,对光纤光栅传感组结构设计进行优化,建立了新型滑觉感知系统。仿真和实验结果表明,光纤传感模块中最大敏感位置的平均形变量约为 0.32 μm,且传感模块可准确无误地确定物体所在区域位置。目前大多数光纤光栅触觉传感器只解决单个触觉或者滑觉问题,或者是如何区别触觉与滑觉问题,而文中则是重点解决当物体存在滑觉时,监测物体实时的运动状态问题,并且完成了对滑动物体运动轨迹的监测,该传感模块有望运用到仿生体的滑觉智能传感领域。

参考文献:

- [1] Guo Y X, Li X, Kong J Y, et al. Sliding type fiber Bragg grating displacement sensor [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(1): 50-58. (in Chinese)
- [2] Mulle M, Yudhanto A, Lubineau G, et al. Internal strain assessment using FBGs in a thermoplastic composite subjected to quasi-static indentation and low-velocity impact [J]. *Composite Structures*, 2019, 215(32): 305-316.
- [3] Li Chao, Wang Yongjie, Li Fang. High stability FBG wavelength demodulation system based on F-P temperature control standard [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(1): 0122002. (in Chinese)
- [4] Zhang Xiongiong, Song Yanming, Sun Guangkai, et al. Fiber Bragg grating curvature sensor based on flexible composite matrix [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(2): 0222001. (in Chinese)
- [5] Guo Yongxing, Yang Yuehui, Xiong Li, et al. Response characteristics of fiber Bragg gratings embedded in soft materials with different Young's modulus for bending measurement [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(8): 1634-1643. (in Chinese)
- [6] Zhang Yanan, Fan Di, Shen Linyong, et al. Strain transmission and accuracy experiment on fiber Bragg grating small-diameter shape sensors [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(7): 1481-1491. (in Chinese)
- [7] Wu Nishan, Xia Li. Interrogation technology for quasi-distributed optical fiber sensing systems based on microwave photonics [J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(2): 245-263. (in Chinese)
- [8] Esequiel Mesquita, Luis Pereira, Andreas Theodosiou, et al. Optical sensors for bond-slip characterization and monitoring of RC structures[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2018, 280(1): 332-339.

- [9] Ming Xinyu, Guo Qi, Xue Zhaokang, et al. A femtosecond laser-inscribed fine-core long-period grating with low temperature sensitivity [J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(4): 737-744. (in Chinese)
- [10] Ge Ziyang, Wang Yan, Qin Nan, et al. Analysis of strain error of interface slip of FBG flexible sensor under positive pressure [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(10): 43-51. (in Chinese)
- [11] Liao Yanbiao, Yuan Libo, Tian Qian. Optical fiber sensing in China for 40 years [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3): 10-28. (in Chinese)
- [12] Qian Muyun, Yu Youlong. Tactile sensing of fiber Bragg grating based on back propagation neural network [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(8): 0806001. (in Chinese)
- [13] Skvortsov M I, Wolf A A, Dostovalov A V, et al. Distributed feedback fiber laser based on a fiber Bragg grating inscribed using the femtosecond point-by-point technique [J]. *Laser Physics Letters*, 2018, 15(3): 035103.
- [14] 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.
- [15] Wang Yan, Qin Nan, Liu Jihong, et al. Performance test of flexible sensor for temperature and pressure based on fiber Bragg grating [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(3): 93-98. (in Chinese)
- [16] Sun Shizheng, Long Yuheng, Li Jie, et al. Research on flexible tactile and sliding composite sensing based on fiber Bragg grating[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(2): 40-46. (in Chinese)
- [17] Xu Huichao, Miao Xingang, Wang Su. Flexible tactile sensor for robot based on FBG [J]. *Robot*, 2018, 40(5): 634-639, 722. (in Chinese)