

## 柔性复合基体光纤布拉格光栅曲率传感器

张雄雄, 宋言明, 孙广开, 孟凡勇, 董明利

(北京信息科技大学 光电信息与仪器北京市工程研究中心, 北京 100192)

**摘要:** 面向生物医学智能装备和软体机器人等领域柔性机构以及高端装备和重大基础设施复杂结构的曲率测量需求, 提出一种高适应性柔性曲率传感器。通过将光纤布拉格光栅封装在硅胶基体中, 并将硅胶基体与聚氯乙烯薄片贴合, 形成基于光纤布拉格光栅的柔性硅胶曲率传感器。采用光纤传感解调系统和标准曲率标定块, 实验测得光纤光栅传感器反射谱特征及其随标定块曲率变化规律, 分析了光栅波长位移与曲率变化的关系以及传感器灵敏度与嵌入硅胶基体深度的关系。实验结果表明: 硅胶-聚氯乙烯基体的曲率传感器可以实现曲率变化实时测量, 最高灵敏度可达  $0.3292 \text{ nm/m}^{-1}$ 。随着光纤光栅嵌入深度的增加, 传感器灵敏度在  $0.2\sim 0.35 \text{ nm/m}^{-1}$  范围内逐渐增大。在多次重复测量中传感器具有较好的一致性, 可用于柔性机构和复杂结构的曲率测量。

**关键词:** 曲率传感器; 硅胶基体; PVC 基体; FBG 传感; 测量标定

**中图分类号:** TP212; TN253 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0222001

## Fiber Bragg grating curvature sensor based on flexible composite matrix

Zhang Xiongxiang, Song Yanming, Sun Guangkai, Meng Fanyong, Dong Mingli

(Beijing Engineering Research Center of Optoelectronic Information and Instruments, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China)

**Abstract:** In order to solve the curvature measurement problems of flexible mechanism such as biomedical intelligent equipment, software robots and complex structures of high-end equipment, major infrastructure, a highly adaptive curvature sensor was proposed. The fiber Bragg grating was encapsulated in the silicone rubber layer, which was fixed on the polyvinyl chloride matrix to form a flexible silicone rubber curvature sensor based on fiber Bragg grating. The fiber-optic sensor demodulation system and standard curvature calibration blocks were used to measure the characteristics of the FBG sensor's reflection spectrum and its variation with the calibration block curvature. The relationship between the FBG wavelength shift and the curvature change was analyzed, as well as the sensor sensitivity and the embedded depth of FBG. The experimental results show that the curvature sensor based on silicone-polyvinyl chloride can measure the real-time change of curvature with the highest sensitivity of  $0.3292 \text{ nm/m}^{-1}$ . With the increase of the embedded depth of fiber grating, the sensitivity of the sensor gradually increases with the range from

收稿日期: 2018-09-05; 修订日期: 2018-10-03

基金项目: 教育部“长江学者与创新团队发展计划”(IRT\_16R07); 北京市属高等学校高层次人才引进与培养计划(IDHT20170510)

作者简介: 张雄雄(1992-), 男, 硕士生, 主要从事光纤传感技术等方面的研究。Email: xiongxiang\_z@sina.cn

导师简介: 宋言明(1981-), 男, 讲师, 博士, 主要从事传感器设计、光纤传感方面的研究。Email: sym0823@163.com

0.2 nm/m<sup>-1</sup> to 0.35 nm/m<sup>-1</sup>. The sensor has good consistency in repeated measurements and can be used for curvature measurement of flexible mechanisms and complex structures.

**Key words:** curvature sensor; silicone rubber matrix; PVC matrix; FBG sensing; measuring calibration

## 0 引言

曲率传感器在各个领域有着广泛的应用:在土木工程领域用来测量混凝土结构变形及内部应力,检测大型结构、桥梁健康状况等重大基础设施以及高端装备复杂结构的曲率;也广泛应用于内窥镜、微创手术、缝隙搜救机器人、软体机器人<sup>[1-2]</sup>、智能穿戴装备<sup>[3-4]</sup>以及变构型飞行器等领域<sup>[5-6]</sup>。

针对曲率的测量,当前采用的测量方法主要分为两类:一类是利用立体相机和扫描器等外部装置进行远距离测量<sup>[7-8]</sup>;另一类是将传感器贴在被测物表面或嵌入被测物进行接触式测量。传统的测量大部分采用第一类方法测量结构的曲率和三维形状,这类方法可以达到很高的测量精度,但是存在两个问题:一是需要在测量的运动物体周围布设专用的仪器设备,在可操作范围和便携性上受到限制,难以满足智能穿戴装备、感测软体机器人等实际操作的测量要求;二是难以测量一些封闭性的和型面复杂的结构的曲率和形状。

与传统的测量方法相比,光纤传感器用光作为敏感信息的载体,用光纤作为传递敏感信息的媒质,具有光纤及光学测量的特点,在精密测量、柔性、适应性等方面具有优势,主要包括:高灵敏度,可以检测微小的形变;良好的复杂结构适应性;重量轻、体积小,长距离测量的传输损耗低,瞬间响应,抗电磁干扰。光纤布拉格光栅除了应用在温度压力的测量<sup>[9]</sup>,在变形测量中有很大的优势<sup>[10]</sup>。分布式光纤曲率传感器在较大形状变形上的应用,可以实现测量数据的高速率和大容量传输,实时测量结构变形形状。光纤传感器的上述特点和优势使其成为民用基础设施测量、软体机器人传感测量以及生物医学和航空航天等多领域应用的理想选择。

国内外学者对多种结构的光纤形状传感方法开展了一定研究。Arritt 等人使用集成光纤光栅传感器监测大型可展开空间结构的形状<sup>[11]</sup>。Payo 等人用光

纤光栅传感器测量了高柔性机械手系统的挠度<sup>[12]</sup>。Bang 等人研究了风轮机塔架变形的光纤光栅传感,实现了塔架结构模态的动态监测<sup>[13]</sup>。狄海廷等提出了利用光纤曲率传感器重建三维曲面结构<sup>[14]</sup>。沈林勇等在光纤光栅曲线重建算法中对坐标点进行了拟合<sup>[15]</sup>。基于传统干涉测量结构的曲率传感器<sup>[16]</sup>和特种光纤曲率传感器<sup>[17]</sup>通常具有更高的灵敏度,但由于其结构复杂性和制造成本高,不利于实现。A. E. James 等人设计一种光纤布拉格光栅离心嵌入的柔性硅胶曲率传感器,可实现曲率的双向测量,但是由于硅胶本身易变形的特性,使得传感器存在重复性差、测量不稳定、灵敏度低等问题,最高灵敏度仅达到 1.5 pm/m<sup>-1</sup><sup>[18]</sup>。

与前人研究不同,文中提出一种基于硅胶-聚氯乙烯基体的高适应性柔性光纤布拉格光栅 (FBG) 曲率传感器。通过将光栅嵌入硅胶基体中与聚氯乙烯贴合形成曲率传感器。进行了曲率测定研究标定实验,得出不同曲率的标定块下传感器中心波长变化量,以及传感器的灵敏度范围,分析了硅胶基体中光纤光栅深度位置变化传感器灵敏度的影响,验证了所提传感器应用于曲率测量的性能和重复一致性。

## 1 传感与测量原理

### 1.1 传感原理

当 FBG 传感器固定在变形体表面,或者嵌入柔性材料内部,变形体或者柔性材料发生变形时会引起 FBG 传感器弯曲变形。FBG 传感器弯曲变形使光栅周期产生拉伸或压缩,FBG 传感器的弯曲效应可以使光栅反射波长发生漂移。FBG 的反射波长由光栅周期决定,可以写为<sup>[19-20]</sup>:

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

式中: $\lambda_B$  为 FBG 的中心波长; $n_{\text{eff}}$  为有效折射率; $\Lambda$  为光栅周期。FBG 的弯曲将拉伸或压缩光栅周期,导致反射波长的变化。拉伸光栅将具有较长的光栅周期,导致反射峰值移动到更长的波长,而压缩光栅将

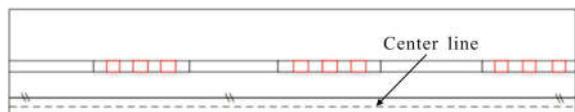
导致向较短波长的移动。FBG 传感器中心波长漂移量与弯曲曲率的关系可以用公式(2)表示:

$$k=A \cdot \Delta \lambda_B \quad (2)$$

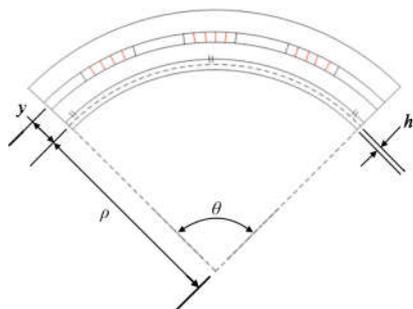
式中: $k$  为测量点的曲率; $A$  为与测量点相关的常数值。

### 1.2 测量原理

当柔性硅胶薄膜曲率传感器固定在聚氯乙烯薄片上对曲率块进行标定时,硅胶基体和嵌入的光栅随着聚氯乙烯(PVC)变形均发生弯曲,光栅在硅胶薄膜中受拉伸弯曲会引起波长漂移,如图 1(b)所示。



(a) 无弯曲状态下的曲率传感器  
(a) Free-state of the curvature sensor



(b) 弯曲状态下的曲率传感器  
(b) Bending state of the curvature sensor

图 1 基于 FBG 的曲率传感器的工作原理

Fig.1 Operating principle of the curvature sensor based on FBG

FBG 嵌入柔性硅胶层,硅胶胶合在聚氯乙烯基体上。FBG 到聚氯乙烯中心层的距离定义为  $y$ ,PVC 的中心厚度为  $h$ (实验中 PVC 厚度为 0.3 mm,而且材料在变形时厚度变化很小,所以忽略  $h$  值变化的影响),如图 1(b)所示。基于纯弯曲模型的柔性硅胶薄膜曲率传感器,当传感器如图 1(b)所示弯曲时,中性线长度,弯曲半径与弯曲角度之间的关系由下式决定:

$$L_c=\rho \cdot \theta \quad (3)$$

式中: $L_c$  为 PVC 的中心线的长度,其根据纯弯曲模型在所有曲率下总是恒定值; $\rho$  和  $\theta$  分别是中性线的半径和中心角。通常,曲率  $k$  和弯曲半径  $\rho$  具有倒数关系:

$$k=1/\rho=\theta/L_c \quad (4)$$

FBG 到 PVC 薄片中心线的距离( $y$ )导致弯曲半径略有变化,实际半径由  $\rho+y$  表示。可以在施加的曲率下获得 FBG 的长度  $L_{FBG}$ :

$$L_{FBG}=(\rho+y) \cdot \theta \quad (5)$$

$$\Delta L_{FBG}=L_c-L_{FBG}=\theta \cdot y \quad (6)$$

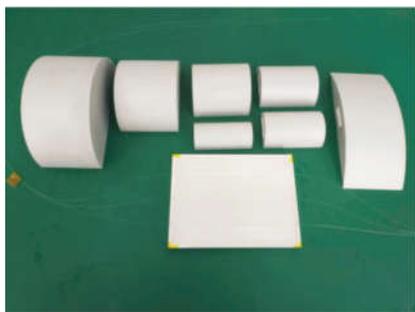
由于硅胶本身柔软的性质,在实际测量过程中,随着曲率变化,中线和 FBG 之间的距离  $y$  是变化的。所以光栅周期与弯曲角  $\theta$ (或曲率  $k$ )是不成正比关系的,需通过标定实验测定传感参数关系。

## 2 曲率传感器的制作成型

利用布拉格光栅的弯曲效应设计了一种以 PVC 薄片作基体的曲率实时传感测量的柔性薄膜传感器,选用 Smooth-On 公司的 Ecoflex 0030 型号的硅胶作为传感器材料,该型号硅胶具有以下特点:硅胶固化以后材料本身足够柔软可以自由弯曲,与测试对象紧密贴合,使得测试结果不受材料硬度影响;这种柔软的材料是弹性的能够被多次拉伸,并且可以恢复到其原始形状没有任何变形;不刺激皮肤,生物学评估可用于医疗器械。

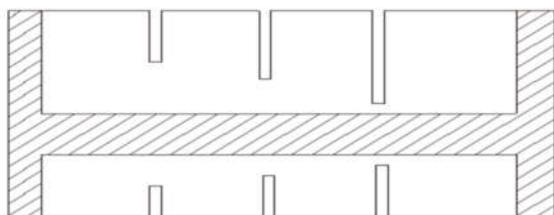
图 2(a)所示柔性硅胶薄膜曲率传感器的实物原型以及传感器的封装模具,传感器在硅胶层不同深度位置分别封装了带有三组光纤,每组光纤有三个不同波长的光栅的。为了避免因为硅胶层太薄而造成光纤之间相互干扰的影响,三根光纤在  $X$  方向等距离均匀铺设。光栅在硅胶层  $Z$  方向上的位置通过模具限位孔准确定位。

曲率传感器的成型和光纤的布设都是通过封装模具,利用高精度的加工中心成型的模具可以保证传感器中光纤布设的位置的准确性,提高了曲率传感器的测量精度,封装模具可以实现两种厚度的传感器的成型,分别是厚度为 3 mm 和 5 mm,如图 2(b)所示传感器的封装模具细节。曲率传感器成型封装过程主要包括:模具设计和加工成型,利用加工中心成型的模具精度可达 30~50  $\mu\text{m}$ ;光栅的布设固定,模具的限位孔可以保证光纤在硅胶层  $Z$  方向上的位置精度,利用光纤夹持器固定光纤;硅胶封装 FBG,将等量的 Ecoflex 0030 型号硅胶的 AB 溶液 1:1 充分均匀混合并倒入模具中实现 FBG 的封装;脱模,硅胶在 25  $^{\circ}\text{C}$  的温度下固化 4 h,曲率传感器完全固化后脱模;将封装光栅的硅胶薄膜胶合在 PVC 薄片上。



(a) 曲率传感器及其封装模具

(a) Curvature sensor and its encapsulation mould



(b) 封装模具截面示意图

(b) Section diagram of encapsulation mould

图 2 柔性硅胶薄膜曲率传感器及封装模具

Fig.2 Flexible silicone film curvature sensor and encapsulation mould

实验中, 所采用的硅胶基体尺寸为 3 mm 高, 140 mm 宽和 190 mm 长, PVC 薄片 0.3 mm 厚。FBG 由 UV(紫外曝光刻写技术)刻写技术写入。总光栅长度为 10 mm, 边模抑制为 26 dB, 反射率为 90% 以上。在测试中, 三组 FBG 封装在硅胶层的不同深度位置, 分别为 0.5、1、1.5 mm, 可以测定与验证 FBG 偏移位置和传感器灵敏度之间的关系。

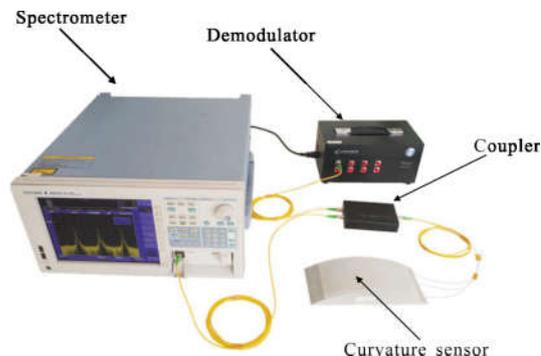
### 3 实验分析

#### 3.1 传感实验系统

图 3(a)为实验装置, 包括聚氯乙烯硅胶基体曲率传感器、标准曲率标定块、一个宽带光源、一台光纤光栅解调仪、一台光谱仪。柔性硅胶薄膜曲率传感器包括三根独立的光纤置于硅胶层不同深度位置, 每根光纤包含三个 FBG 传感器。FBG 传感器的中心波长如表 1 所示; 宽带光源型号为 Light promotech M1043-13, 光谱宽度为 1 529~1 605 nm, 光源平坦度小于 2 dB。光谱仪型号为: YOKOGAWA AQ6370C, 光纤光栅解调仪为自主研发的解调仪, 解调范围为: 1 525~1 610 nm, 解调速率为 35 kHz, 最小分辨率为:

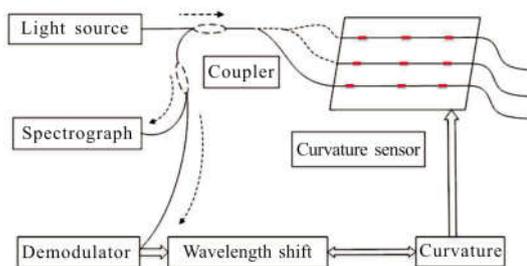
0.5 pm, 光功率探测范围为: -80~-20 dBm。

建立曲率传感器标定实验原型, 图 3(b)为传感系统原理图, 显示了柔曲率传感器在测量点的波长位移与标定试块曲率的关系。



(a) 实验装置

(a) Experimental setup



(b) 曲率传感器传感原理图

(b) Sensing schematic diagram of curvature sensor

图 3 实验装置和传感原理图

Fig.3 Experimental setup and sensing schematic diagram

表 1 传感器中心波长

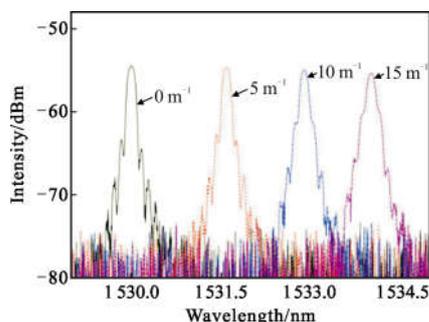
Tab.1 Center wavelength of sensors

Item	Parameters			
Fiber 1	Sensor No.	1-1	1-2	1-3
	Wavelength/nm	1 530.904 3	1 536.257 4	1 542.059 4
Fiber 2	Sensor No.	2-1	2-2	2-3
	Wavelength/nm	1 530.211 2	1 535.749 2	1 541.511 6
Fiber 3	Sensor No.	3-1	3-2	3-3
	Wavelength/nm	1 530.002 8	1 536.026 4	1 541.821 8

#### 3.2 FBG 传感器在不同标定块中波长漂移量

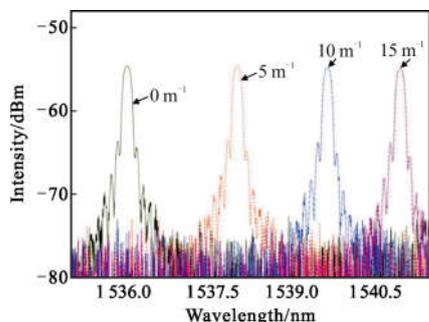
采用如图 3(a)所示的实验装置对标准曲率标定试块进行曲率测定, 使用嵌入深度为 1.5 mm 的传感

器对曲率分别为 0、5、10、15 m<sup>-1</sup> 的四个标定试块进行曲率与波长漂移关系的测定, 传感器上的三个 FBG 中心波长分别为 1 530.002 8、1 536.026 4、1 541.821 8 nm。实验中 FBG 光谱变化如图 4 所示, 随着曲率增加, FBG 反射峰逐渐向较长波长方向移动, 在 15 m<sup>-1</sup> 的曲率下 FBG3-1 总波长偏移为 4.002 3 nm, 平均灵敏度为 0.266 8 nm/m<sup>-1</sup>, FBG3-2 总波长偏移为 4.937 3 nm, 平均灵敏度为 0.329 2 nm/m<sup>-1</sup>; FBG3-3 总波长偏移为 4.290 4 nm, 平均灵敏度为 0.286 0 nm/m<sup>-1</sup>。



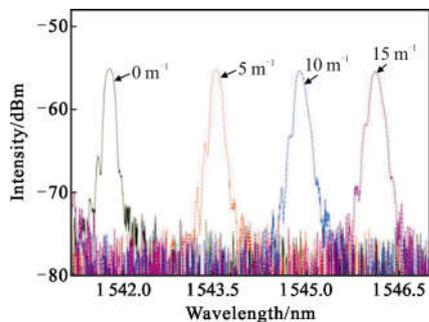
(a) FBG3-1 波长漂移

(a) Wavelength shift of FBG3-1



(b) FBG3-2 波长漂移

(b) Wavelength shift of FBG3-2



(c) FBG3-3 波长漂移

(c) Wavelength shift of FBG3-3

图 4 不同曲率标定块下 FBG 波长漂移

Fig.4 FBG wavelength shift under different curvature calibration blocks

嵌入硅胶层深度为 1.5 mm 传感器的三个 FBG 中心波长漂移量与曲率标定试块曲率关系如图 5 所示。由图 5 可知, 由于硅胶材料本身柔软的特性, 导致在测量过程中  $y$  值是一个变量, 曲率标定试块曲率与 FBG 中心波长呈非线性关系。

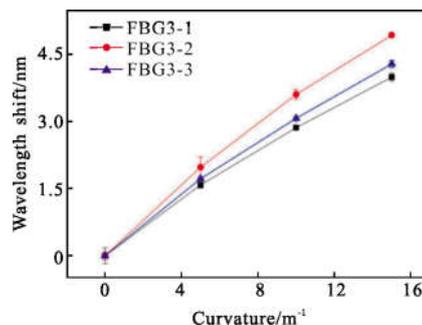


图 5 波长漂移量与标定试块曲率的关系

Fig.5 Relationship between the wavelength shift and the curvature of the calibration block

### 3.3 传感器灵敏度和 FBG 嵌入深度之间的关系

通过在同一个曲率传感器的硅胶层不同深度嵌入三组 FBG 传感器, 三组传感器对应深度分别为 0.5、1、1.5 mm。选择不同深度对应位置的 FBG1-1、FBG2-1 和 FBG3-1 三组传感器进行分析灵敏度和 FBG 嵌入深度之间的关系。

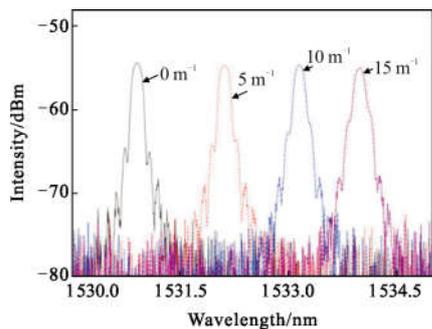
实际测得的曲率应该是  $(\rho+y)$  的倒数:

$$k=1/(\rho+y) \quad (7)$$

随  $y$  值增加, 实际测量曲率变小, 在测量相同曲率的情况下,  $y$  值越大, 光栅随硅胶的拉伸形变越大, 会产生更大的周期变化, 相应地有更大的波长漂移量, 即灵敏度变化。在传感器测量范围内, 所测标定块半径越小, 曲率越大, 实际半径  $\rho$  越小,  $y$  值影响越大, 实际标定实验中可以计算出差异。在曲率传感器的设计过程中, 通过调整 FBG 嵌入深度, 可以产生不同的灵敏度。

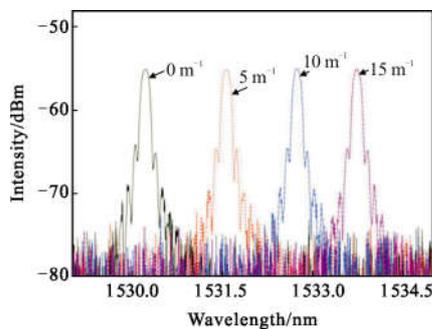
图 6 显示了深度为 0.5 mm 的 FBG1-1、1 mm 的 FBG2-1 以及 1.5 mm 的 FBG3-1 从 0~15 m<sup>-1</sup> 的反射峰值漂移。

如图 6 所示, 在相同量的弯曲曲率下, 嵌入硅胶层深度增加, 反射峰值漂移量逐渐变大。嵌入深度为 0.5 mm 的 FBG1-1、1 mm 的 FBG2-1 和 1.5 mm 的 FBG3-1 平均灵敏度分别为 0.205 5、0.234 2、0.266 8 nm/m<sup>-1</sup>。



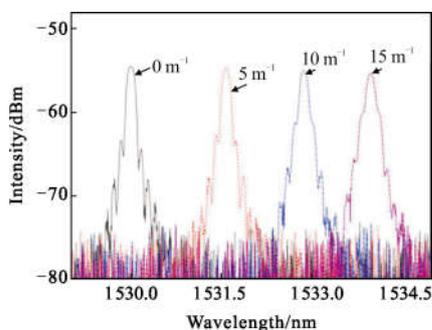
(a) FBG1-1 的波长漂移

(a) Wavelength shift of FBG1-1



(b) FBG2-1 的波长漂移

(b) Wavelength shift of FBG2-1



(c) FBG3-1 的波长漂移

(c) Wavelength shift of FBG3-1

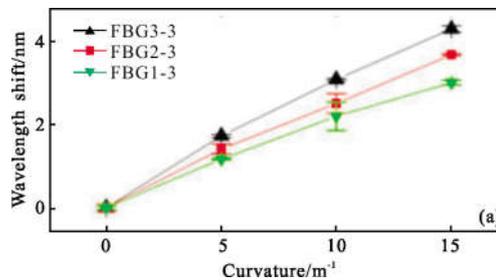
图 6 不同深度 FBG 的波长漂移

Fig.6 FBG wavelength shift at different depths

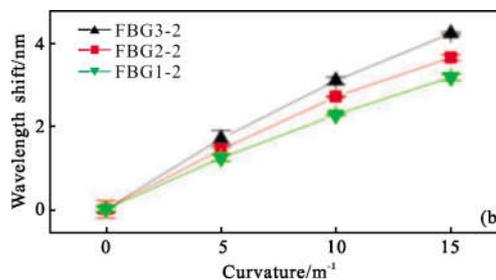
不同嵌入深度的三组 FGB 传感器中心波长漂移量与曲率标定试块曲率关系如图 7 所示。

如图所示每组不同深度但是对应位置的光栅随  $y$  值增加,中心波长漂移量变大。随着曲率的增加,不同深度的光栅中心漂移量的差值越来越大,即  $y$  值对传感器灵敏度的影响随曲率增大而增大。在相同量的弯曲曲率下,FBG 嵌入深度(即  $y$  值)影响波长漂移量,进而影响曲率传感器灵敏度。传感器灵敏

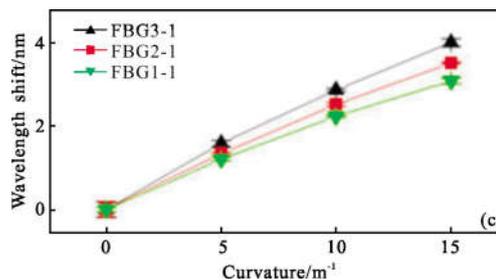
度随着  $y$  值增加而增加,当测量的曲率越大,灵敏度随  $y$  值变化越明显。在曲率传感器的设计过程中,通过调整 FBG 嵌入深度,可以产生不同的灵敏度。



(a)



(b)



(c)

图 7 不同深度 FBG 波长漂移量与标定块曲率的关系

Fig.7 Relationship between FBG wavelength shift at different depths and the curvature of calibration blocks

## 4 结论

(1) 提出一种硅胶-聚氯乙烯基体的柔性曲率传感器,具有型面适应性好,灵敏度高,抗电磁干扰等特点,五次测量实验表明传感器在重复测量实验中具有良好的一致性。

(2) 在相同的弯曲曲率下,传感器的波长漂移值取决于 FBG 的嵌入位置,而 FBG 的位置又决定了 FBG 的灵敏度。柔性硅胶薄膜曲率传感器不同嵌入深度的 FGB 中心波长漂移量不同,传感器灵敏度随着  $y$  值增加而增加,当测量的曲率越大,灵敏度随  $y$  值变化越明显。在曲率传感器的设计过程中,通过调整光栅嵌入深度,可在  $0.2\sim 0.35 \text{ nm/m}^{-1}$  范围内调节灵敏度,最高灵敏度可达  $0.3292 \text{ nm/m}^{-1}$ 。

(3) 验证了硅胶-聚氯乙烯基体的柔性曲率传感器的性能和重复一致性,在民用基础设施测量、软体机器人传感测量以及生物医学和航空航天等领域具有应用前景。

参考文献:

- [1] Song S, Li Z, Yu H, et al. Electromagnetic positioning for tip tracking and shape sensing of flexible robots [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(8): 4565-4575.
- [2] Majidi C, Kramer R, Wood R J. A non-differential elastomer curvature sensor for softer-than-skin electronics [J]. *Smart Materials & Structures*, 2011, 20(10): 105017.
- [3] Asbeck A T, Rossi S M M D, Galiana I, et al. Stronger, smarter, softer: next-generation wearable robots [J]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2014, 21(4): 22-33.
- [4] Abayazid M, Kemp M, Misra S. 3D flexible needle steering in soft-tissue phantoms using Fiber Bragg Grating sensors [C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2013: 5843-5849.
- [5] Lou Xiaoping, Chen Zhongqin, Zhuang Wei, et al. Error analysis and calibration for FBG shape reconstruction based on non-orthogonal curvatures [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(2): 386-393. (in Chinese)
- [6] Roesthuis R J, Kemp M, Dobbelsteen J J V D, et al. Three-dimensional needle shape reconstruction using an array of fiber Bragg grating sensors[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2014, 19(4): 1115-1126.
- [7] Yang Linghui, Wang Lijun, Lin Jiarui, et al. 3D coordinate measurement method based on space resection of the orthogonal cylindrical imaging camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(3): 0317001. (in Chinese)
- [8] Zhao Yalong, Liu Shouqi, Zhang Qican. 3D shape measurement accelerated by GPU [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(3): 0317003. (in Chinese)
- [9] Xu Ning, Dai Ming. Design of distributed optical fiber sensor for temperature and pressure measurement [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(4): 629-635. (in Chinese)
- [10] Xu Guoquan, Xiong Daiyu. Applications of fiber Bragg grating sensing technology in engineering[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(3): 306-317. (in Chinese)
- [11] Arritt B J, Klimcak C, Pollard E, et al. Shape determination of large deployable space structures through the use of fiber-optics with integrated fiber-Bragg's gratings[C]//SPIE, 2007, 6530: 653016.
- [12] Payo I, Feliu V, Cortázar O D. Fibre Bragg grating (FBG) sensor system for highly flexible single-link robots [J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2009, 150(1): 24-39.
- [13] Bang H J, Kim H I, Lee K S. Measurement of strain and bending deflection of a wind turbine tower using arrayed FBG sensors [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2012, 13(12): 2121-2126.
- [14] Di Haiting, Fu Yili. Three dimensional reconstruction of curved shape based on curvature fiber optic sensor[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(5): 1092-1098. (in Chinese)
- [15] Zhang Yanan, Xiao Hai, Shen Linyong, et al. Coordinate point fitting in FBG curve reconstruction algorithm [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(9): 2149-2157. (in Chinese)
- [16] Shin W, Lee Y L, Yu B A, et al. Highly sensitive strain and bending sensor based on in-line fiber Mach-Zehnder interferometer in solid core large mode area photonic crystal fiber [J]. *Optics Communications*, 2010, 283 (10): 2097-2101.
- [17] Martinezrios A, Monzonhernandez D, Salcedadelgado G, et al. Compact optical fiber curvature sensor based on concatenating two tapers [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(22): 4380-4382.
- [18] Ge J, James A E, Xu L, et al. Bidirectional soft silicone curvature sensor based on off-centered embedded fiber Bragg grating [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(20): 2237-2240.
- [19] Wang H, Zhang R, Chen W, et al. Shape detection algorithm for soft manipulator based on fiber bragg gratings[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2016, 21 (6): 2977-2981.
- [20] Payo I, Feliu V, Cortazar O D. Fibre Bragg grating (FBG) sensor system for highly flexible single-link robots [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2009, 150: 24-39.