

文章编号 1004-924X(2019)05-1052-08

## 软体气动驱动器弯曲变形光纤传感与形状重构

孙广开<sup>1</sup>, 曲道明<sup>1</sup>, 闫光<sup>1\*</sup>, 宋言明<sup>1</sup>, 祝连庆<sup>1,2</sup>

- (1. 北京信息科技大学 光纤传感与系统北京实验室, 北京 100016;
2. 北京信息科技大学 北京市光电测试技术重点实验室, 北京 100192)

**摘要:**为解决软体气动驱动器弯曲变形的柔性传感测量问题,提出将光纤光栅植入软体气体驱动器应变限制层进行曲率测量与形状重构的方法。建立了软体机构变形光纤传感重构算法模型,理论分析了光纤光栅光谱变化与应变限制层弯曲曲率的关系。搭建了基于光纤光栅特性的软体传感、解调及曲率标定装置,实验分析了不同曲率下光纤光栅反射光谱的特征,得出光纤光栅中心波长漂移量与弯曲变形曲率的关系,计算得出软体气动驱动器在不同弯曲状态下的曲率值,重构出软体气动驱动器的变形形状,验证了形状重构结果的正确性。实验结果表明:将光纤光栅植入软体气体驱动器应变限制层,利用光纤光栅反射光谱变化可实现软体驱动器的曲率测量与形状传感,3种弯曲状态下光纤光栅传感测量值与软体驱动器曲率标定值之间的最大误差为 2.1%。该光纤传感方法在软体气动驱动器柔性传感与闭环控制方面具有广阔的应用前景。

**关键词:** 光纤传感; 形状传感; 光纤布拉格光栅; 曲率测量; 气动驱动器; 聚酰亚胺薄膜

**中图分类号:** TN253 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20192705.1052

## Bending deformation of optical fiber sensing and shape reconstruction of soft pneumatic driver

SUN Guang-kai<sup>1</sup>, QU Dao-ming<sup>1</sup>, YAN Guang<sup>1\*</sup>, SONG Yan-ming<sup>1</sup>, ZHU Lian-qing<sup>1,2</sup>

- (1. Beijing Laboratory of Optical Fiber Sensing and System, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100016, China;
2. Beijing Key Laboratory of Optoelectronic Measurement Technology, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China)

\* Corresponding author, E-mail: 584851848@qq.com

**Abstract:** To solve the flexible sensing measurement problem of flexural bending of soft pneumatic drivers, a method of curvature measurement and shape reconstruction by embedding fiber grating into a strain limiting layer for a soft pneumatic driver was proposed. First, the relationship between the spectral characteristics of the fiber grating and bending curvature of the strain limiting layer were theoretically analyzed. Then, a device that performs soft sensing, demodulation, and curvature calibration based on the spectral characteristics of fiber grating was developed. The characteristics of the reflection spectrum of fiber grating under different curvatures were experimentally analyzed, and the

收稿日期: 2018-09-03; 修订日期: 2018-10-15.

基金项目: 教育部“长江学者与创新团队发展计划”资助项目(No. IRT\_16R07)

curve of the center wavelength shift and change in curvature of the fiber grating were calculated. Finally, the curvature values of a soft pneumatic driver under different bending states were calculated, and the deformation shape of the soft pneumatic driver was reconstructed. Results show that the curvature measurement and shape sensing of the soft pneumatic driver can be realized by changing the reflection spectrum of fiber grating embedded in the strain limiting layer. The maximum error between the measured values of the fiber grating sensing and soft pneumatic driver curvature is 2.1%. This fiber sensing method represents a promising application for soft sensing and closed-loop control of soft pneumatic drivers.

**Key words:** optical sensing; shape sensing; fiber Bragg grating; curvature measurement; pneumatic driver; polyimide film

## 1 引言

近年来,软体机器人受到工业和医疗领域的广泛关注。软体机器人由软体材料组成,可以承受大曲率的弯曲和扭转,具有无限的自由度和分布式连续变形的能力,并且可以通过形变来吸收由碰撞产生的能量,从而保障了人体的安全<sup>[1]</sup>。因此,软体机器人的研究应用发展迅速<sup>[2]</sup>。为了将软体机器人应用于高端制造和精准医疗等高精尖领域,必须实时传感监测其形状姿态和空间位置,实现闭环控制。但是现有测量方法在应用中无法满足软体机器人的测量要求<sup>[3-5]</sup>。传统的刚性传感器(编码器、金属和半导体应变计、惯性测量单元等)与软体材料相容性差,难以应用于软体机器人传感测量。基于视觉的测量系统通常用于软体机器人运动的非接触式外部测量,但是此类测量系统需要足够的空间用来安装硬件。电磁跟踪系统可以感知植入机器人内的磁跟踪线圈的位置,但是该装置会受到周围磁场的影响以及接收系统的限制。因此,需要发展一种柔性的软体机器人形状传感方法。

光纤传感器具有体积小、重量轻、灵敏度高以及响应时间短等特点,并且对磁场不敏感,具有优异的抗电磁干扰性能<sup>[6-8]</sup>。与上述传感方法相比,光纤传感方法在软体机器人的形状变形传感方面具有显著的优势。在结构变形光纤传感方面,国内外学者已经开展了一定的研究。Sareh等<sup>[9]</sup>提出了一种由光纤束组成的高度紧凑的系统,用于关节式手术机器人的多节段形状传感。Silva等<sup>[10]</sup>将光纤传感器植入专门设计的服装中,以监

测人体关节角度,评估患者的运动表现。Searle等<sup>[11]</sup>设计了一种测量微创手术中柔性机械手弯曲曲率的光纤传感系统。Xu<sup>[12]</sup>等研制了一种用于表面三维形状测量的基于柔性硅胶材料的形状传感器。该传感器通过将正交网络结构的双层光纤光栅阵列植入到软体材料中,对弯曲程度进行标定,从而实现了双向的三维形状传感。Zhao等<sup>[13]</sup>将塑料光纤埋入柔性材料中,在塑料光纤的一侧开窗,使内部反射率减小,在光的传播过程中有部分损失。不过,由于光纤与软体材料的相容性较差,现有光纤传感方法应用于软体机构变形测量时存在光谱变化不规律、重复性差等问题,严重影响测量精度。

为了解决以上问题,本文提出了一种将光纤光栅植入聚酰亚胺薄膜作为应变限制层进行软体驱动器曲率测量与形状重构的方法。聚酰亚胺材料与光纤有良好的相容性,并且具有柔性和韧性,适应硅胶材料。将光纤光栅传感器植入到双层聚酰亚胺薄膜中,形成一个具有传感功能的聚酰亚胺应变限制层,并将其集成到软体气动驱动器中,为气动驱动装置提供应变限制层的同时实现变形形状的实时传感,可解决光纤光栅光谱变化不规律、重复性差的问题,为软体机器人柔性传感提供新方法。

## 2 算法模型

本文选用光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)传感器。植入软体气动驱动器的FBG会随着应变限制层的弯曲而受到拉伸和压缩,使FBG反射中心波长发生变化。虽然温度也

是影响 FBG 中心波长漂移量的因素,但是在实验室和人体环境下,温度相对恒定。虽然在变限制层不同深度植入相同的 FBG 可以进行温度补偿,但在相对简单的实验系统下可忽略温度对于实验系统的影响。软体气动驱动器弯曲时应变限制层的内部应变可以通过几何学的方法与其弯曲曲率建立联系,而植入应变限制层的 FBG 可以通过其光谱特征与应变建立映射关系,得到 FBG 中心波长漂移与应变限制层弯曲曲率的关系,即应变限制层的弯曲曲率可以由 FBG 传感器的光谱变化来计算。软体气动驱动器模型可以通过拟合曲率的测量值来重构。

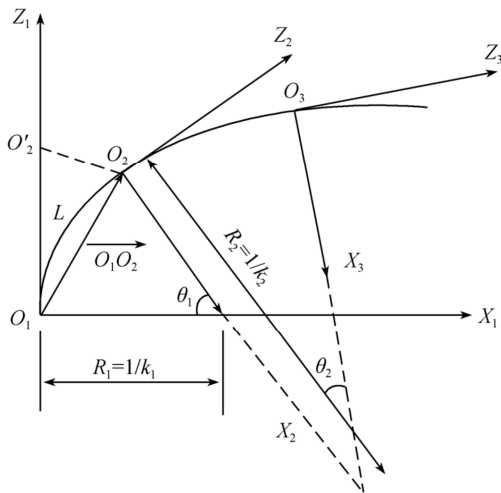


图 1 曲面重构原理

Fig. 1 Principle of surface reconstruction

根据测量的曲率值,利用插值算法对聚酰亚胺薄膜应变限制层的空间曲线进行拟合,并利用这些曲线进行三维形状的重构。重构算法采用微分思想,引入运动坐标系概念来实现柔性曲面的重构。曲面重构采用插值法进行由点到线,由线到面的建模。

利用微分学的思想,将长度一定的线段划分为若干等份,使每一份的长度均为  $L$ ,即  $O_1O_2 = O_2O_3 = L$ ,当线段弯曲后,成为若干长度为  $L$  的圆弧的组合,如图 1 中的  $O_2O_3$ 。圆弧的圆心角  $\theta_2$  由长度  $L$  和曲率  $k_2$  确定。若此时设  $O_2$  的坐标值为  $(0,0)$ ,则由重构算法可以计算得出  $O_3$  的坐标值为  $\frac{\sin \theta_2}{k_2}, \frac{1 - \cos \theta_2}{k_2}$ ,其中  $\theta_2 = Lk_2$ 。通过此种算

法完成曲面的重构,其坐标旋转矩阵为:

$$\begin{bmatrix} X_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

基于运动坐标系的理论,由传感点形成的传感面可根据图 1 重构。设原曲面沿  $(O_1, Z_1)$  方向,形变后弯曲沿  $O_1, O_2, O_3$  曲线方向,  $O_2$  点由  $O'_2$  点坐标平移旋转后得来。  $O_1O_2 = O_2O_3 = L$ ,在固定圆弧长度下,分别在曲线上的点  $O_2, O_3$  处以其切线方向建立坐标系,则对于坐标系  $X_1-Z_1$  和  $X_2-Z_2$  来说向量  $O_1O_2$  的方向和大小均不变。以  $O_1$  为原点建立的坐标系可以通过曲率  $k_1$  求得旋转角  $\theta_1$ ,以  $O_2$  为原点建立的坐标系可以通过曲率  $k_2$  求得旋转角  $\theta_2$ ,以此类推。通过旋转矩阵建立各个坐标系的关系,最终通过曲率的变化拟合出整个平面的旋转角的变化,重构出整个曲面的模型,实现软体机器人的重构和可视化。

### 3 实验

采用 3D 打印方法设计制作软体气动驱动器成型模具。采用 Ecoflex-0050 硅胶按照 1:1 的比例将 A, B 溶液混合均匀后,倒入密封好的硅胶模具中,室温下固化 4 小时后脱模。将两层 0.1 mm 厚的聚酰亚胺薄膜结合到一起,并在其中植入一根刻有 3 个 FBG 的光纤作为传感元件。将耦合了 FBG 传感器的双层聚酰亚胺薄膜置于软体机器人模型的底部,并在其表层再次覆盖与软体机器人模型材质相同的硅胶液,在室温下再次固化,形成聚酰亚胺应变限制层。硅胶液固化后能够与气体驱动器的硅胶融为一体,将聚酰亚胺薄膜包裹其中,以解决因疲劳老化发生的分层脱落的问题。聚酰亚胺薄膜距离软体机器人模型底面约 2 mm,其结构如图 2 所示。

图 2(a) 中,  $L$  为聚酰亚胺应变限制层的长度,  $L = 180 \text{ mm}$ ,  $h_1 = 70 \text{ mm}$ ,  $h_2 = 14 \text{ mm}$ , FBG 的编号从左至右依次是 FBG1, FBG2, FBG3。图 2(b) 中  $h_3 = 10 \text{ mm}$ ,  $h_4 = 40 \text{ mm}$ ,  $h_5 = 2 \text{ mm}$ ,聚酰亚胺薄膜应变限制层置于软体气动驱动器的底部。

当气体充入软体气体驱动器时,底部由于限制层的作用只发生弯曲,而没有应变限制层的顶部不仅弯曲,还受到气体作用向外膨胀。聚酰亚胺薄膜限制层的作用能够起到限制软体气体驱动

器弯曲方向的作用。因此在实验室条件下,本文只探究软体气动驱动器的单向弯曲所能带来的影响。

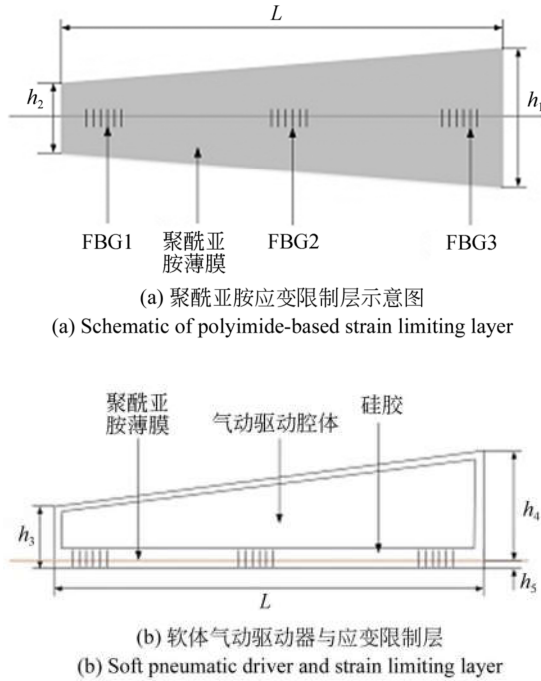


图 2 聚酰亚胺应变限制层

Fig. 2 Polyimide-based strain limiting layer

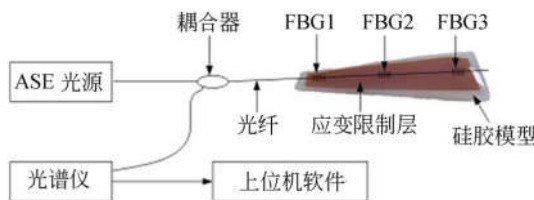


图 3 软体气动驱动器弯曲变形测试实验原理

Fig. 3 Experimental principle for bending deformation test of soft pneumatic driver

图 3 为实验装置图,主要包括硅胶软体气动驱动器、植入了 FBG 传感器的聚酰亚胺薄膜应变限制层以及 FBG 传感系统。FBG 传感系统由聚酰亚胺应变限制层、带宽光源、光谱仪和带有重构软件的上位机组成。所选的 3 根 FBG 的中心波长分别为 1 573.38,1 579.06,1 585.53 nm,采用飞秒激光写入方式,涂覆层的材料为聚酰亚胺,使 FBG 能够在弯曲拉伸时匹配聚酰亚胺应变限制层的杨氏模量,栅区长度为 10 mm,反射率为 70%,带宽 0.5 nm,响应时间为 70 ms。光源采用

型号为 Lightpromotech M1043-13 的 ASE 带宽光源,输出光谱范围为 1 529~1 605 nm,输出功率为 13 dBm,输出光平坦度小于 2 dB,接口类型为 FC/APC。采用型号为 YOKOGAWA AQ6370C 的光谱仪作为接收 FBG 反射信号的装置,其测量范围为 600~1 700 nm,波长测量精度为  $\pm 0.01$  nm,波长分辨率为 0.02 nm,功率为  $-90\sim+20$  dBm,快速测量时间为 0.2 s,跨度为 100 nm。光谱仪接收的 FBG 的反射信号被传送到上位机中并被转换成数字信号。利用上位机中的 Matlab 与 LabVIEW 联调的软件对信号进行处理并实时重构出其形状,显示 3D 视图。图 4 为实验装置的实物图。

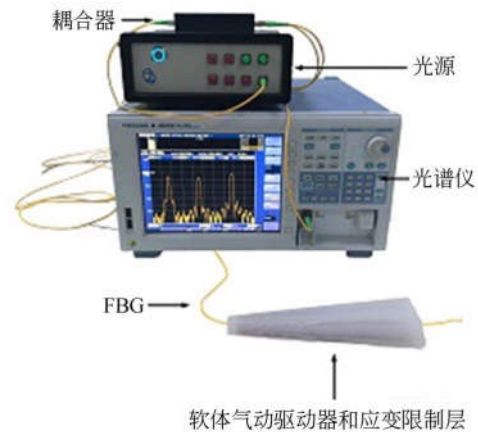


图 4 软体气动驱动器弯曲变形测试实验装置

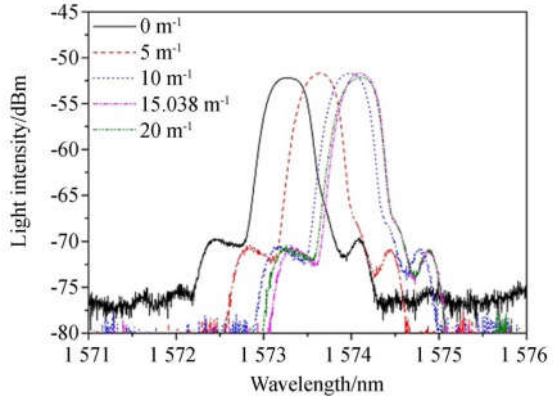
Fig. 4 Experimental setup for bending deformation test of soft pneumatic driver

## 4 实验结果分析

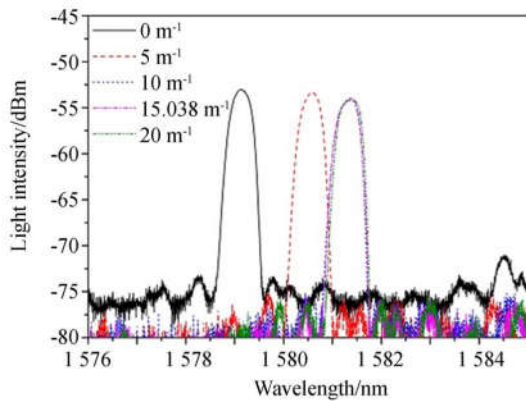
### 4.1 传感器标定

传感器标定实验采用曲率分别为 5, 10, 15.038, 20  $m^{-1}$  的铝合金半圆柱体作为标定块。将植入了聚酰亚胺应变限制层的硅胶软体气动驱动器弯曲至与标定块表面贴合的状态,并使聚酰亚胺应变限制层中的 FBG 传感器与标定块弯曲方向相同并共线。此时,将标定块曲率认定为应变限制层的弯曲曲率。实验测得光纤光栅的光谱变化,如图 5 所示,采用寻峰算法计算得到 FBG 中心波长的漂移量如表 1 所示。其中每个测量点数据测量 5 次,最大偏差值小于

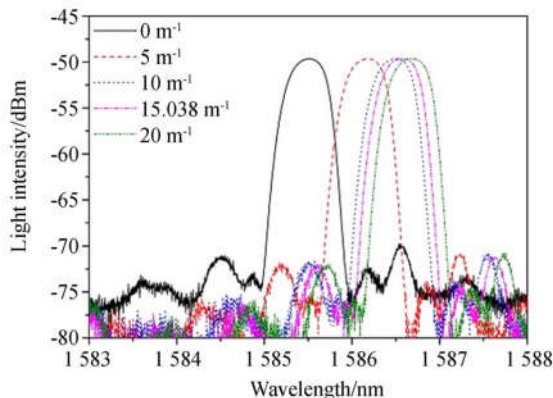
0.01 nm, 5 次测量光谱呈现相同的变化规律, 具有较好的重复性。



(a) FBG1 在不同弯曲曲率下的反射光谱  
(a) Reflection spectra of FBG1 under different curvatures



(b) FBG2 在不同弯曲曲率下的反射光谱  
(b) Reflection spectra of FBG2 under different curvatures



(c) FBG3 在不同弯曲曲率下的反射光谱  
(c) Reflection spectra of FBG3 under different curvatures

图 5 三个 FBG 在不同弯曲曲率下的反射光谱  
Fig. 5 Reflection spectra of three FBGs under different curvatures

表 1 三个 FBG 的波长漂移量

Tab. 1 Wavelength shifts of three FBGs (nm)

曲率/ $m^{-1}$	FBG1	FBG2	FBG3
0	0	0	0
5	0.368	1.464	0.664
10	0.704	2.224	0.980
15.038	0.808	2.269	1.068
20	0.840	2.296	1.164

根据表 1 所示 FBG 中心波长的漂移量, 采用线性插值算法计算得出 FBG 中心波长漂移量与软体驱动器曲率之间的关系曲线, 如图 6 所示。

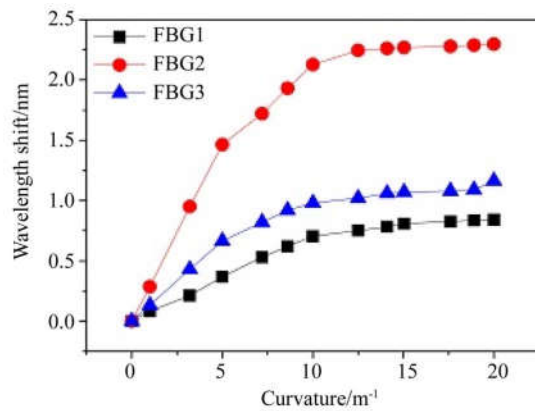


图 6 不同 FBG 的中心波长漂移量与曲率之间的关系  
Fig. 6 Relationship between center wavelength shift and curvature for different FBGs

分析图 6 可以得出, FBG 的中心波长漂移量随着软体气动驱动器弯曲曲率的增加而增大, 并呈现出非线性关系。当弯曲曲率从  $0 m^{-1}$  到  $20 m^{-1}$  时, 3 个 FBG 的中心波长漂移量分别为 0.84, 1.164, 2.296 nm。当弯曲曲率大于  $10 m^{-1}$  时, 中心波长的增长趋势逐渐变缓, 且 3 个 FBG 传感器的变化率不同, 这是因为软体气动驱动器的弯曲和拉伸引起的应变载荷分布不均匀, 载荷大小与测量位置密切相关。因此, 为了实现软体气动驱动器的形状传感, 需要在尽可能多的曲率状态下对所有 FBG 进行标定并绘制标定曲线, 以确保 FBG 传感器的中心波长漂移与弯曲曲率之间的精确转换。

### 4.2 弯曲曲率测量及应变限制层重构

在传感器标定基础上,开展软体气动驱动器变形测量实验。制备了 3 块铝合金材质的标定块,其曲率分别为 5.06, 10.02 和 15.07  $m^{-1}$ 。将软体气动驱动器放置在弯曲块的正上方,并使它紧密贴合在标定块表面,使软体气动驱动器的内表面与弯曲块的弯曲曲率相同。实验结果如表 2 所示,由表 2 可以推测出,FBG 的波长漂移是由软体气动驱动器的弯曲引起的,并且 FBG 的中心波长漂移量与软体气动驱动器的弯曲曲率密切相关。所以,FBG 传感器的中心波长漂移量可以用来实时监测软体气动驱动器的动态形变。

表 2 三个 FBG 在不同曲率下的反射光谱变化

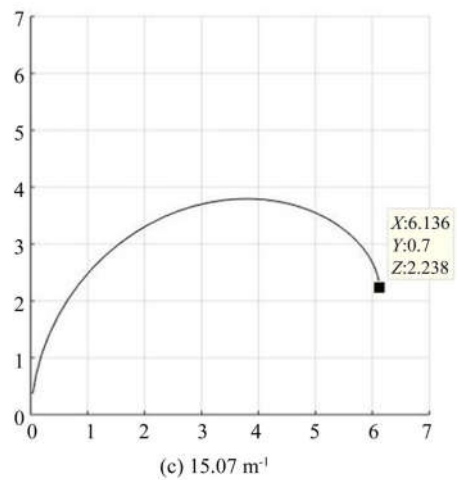
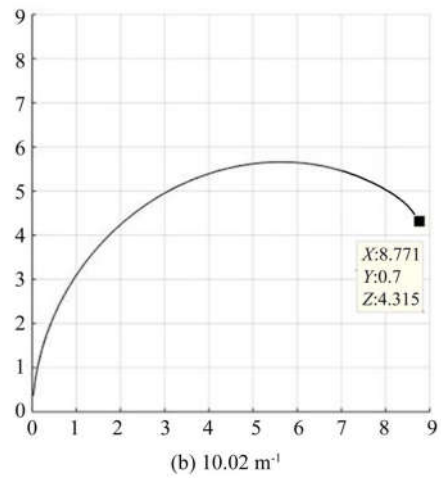
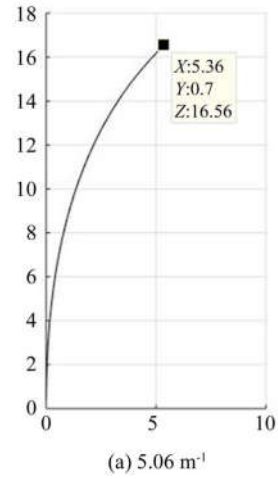
Tab.2 Reflection spectra of three FBGs under different curvatures (nm)

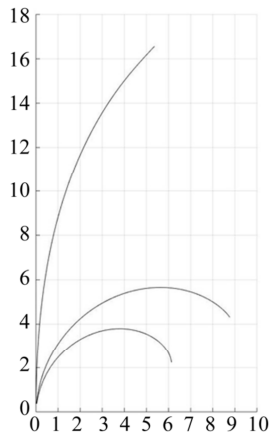
曲率/ $m^{-1}$	FBG1	FBG2	FBG3
0	1 573.520	1 579.140	1 585.512
5.06	1 573.656	1 580.584	1 586.176
10.02	1 573.968	1 581.376	1 586.500
15.07	1 574.104	1 581.416	1 586.592

实验分析得出,当软体气动驱动器的弯曲曲率由 5.06  $m^{-1}$  变化到 15.07  $m^{-1}$  时,3 根 FBG 的波长漂移量分别为 2.269, 1.068 以及 0.808 nm。软体气动驱动器的弯曲曲率与 FBG 的中心波长漂移量成正比关系。利用 FBG 中心波长漂移量和插值算法可以建立软体气动驱动器变形测量数据库,即不同的弯曲曲率与 FBG 的不同波长漂移量呈现一一对应的关系。

为了重构出聚酰亚胺薄膜应变限制层的变形形状,对软体气动驱动器模型 FBG 传感点间的弯曲曲率进行插值运算,并通过数学模型进行重构。绘制所有传感点处的坐标位置和弯曲曲率,然后将数据结合到一个呈现聚酰亚胺薄膜应变限制层形状的几何模块。插值和曲线拟合函数用于从传感点的测量数据来重构变形形状。图 7 是曲率分别为 5.06, 10.02 和 15.07  $m^{-1}$  的聚酰亚胺薄膜应变限制层的重构截面图。图 8 是由聚酰亚胺薄

膜应变限制层重构截面图以及重构软体气体驱动器的图形。图 8(a)~8(d) 分别为应变限制层在曲率为 0, 5.06, 10.02 和 15.07  $m^{-1}$  的弯曲重构图形。





(d) 三个曲率下聚酰亚胺应变限制层的截面图  
 (d) Cross section of polyimide-based strain limiting layer under three conditions

图 7 不同弯曲曲率下的聚酰亚胺应变限制层截面图  
 Fig. 7 Cross section of polyimide-based strain limiting layer under different curvatures

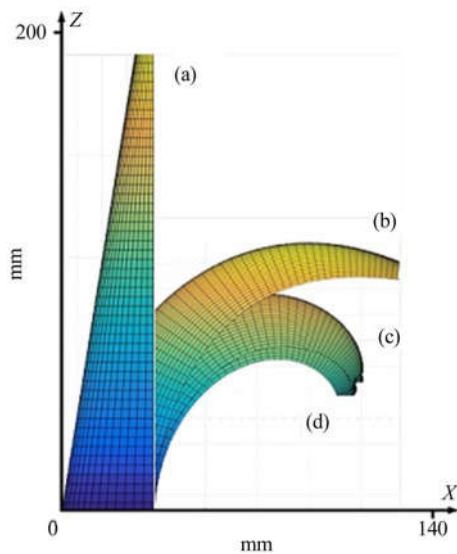


图 8 软体气体驱动器重构模型  
 Fig. 8 Reconstruction of pneumatic driver

分析图 7 数据得出,当软体气动驱动器以曲率  $5.06 \text{ m}^{-1}$  弯曲时,其弯曲终点的坐标为  $(5.36, 0.7, 16.56)$ ;当软体气动驱动器以曲率  $10.02 \text{ m}^{-1}$

弯曲时,其弯曲终点的坐标为  $(8.771, 0.7, 4.315)$ ;当软体气动驱动器以曲率  $15.07 \text{ m}^{-1}$  弯曲时,其弯曲终点的坐标为  $(6.136, 0.7, 2.238)$ 。其中,  $Y=0.7$  为软体气动驱动器在终点的半宽度,即图 2(a)中  $h_2/2=0.7 \text{ cm}$ 。

为了验证变形形状测量的准确性,将 FBG 传感器测量并重构的数据与标定块的实际曲率进行比较。由于软体气动驱动器与标定块的表面紧密贴合,可以将标定块曲率认定为应变限制层的弯曲曲率。测量数据如表 3 所示,聚酰亚胺薄膜应变限制层认定的整体弯曲曲率与 FBG 传感器之间的最大误差值为  $2.1\%$ 。

表 3 弯曲曲率的测量误差

Tab. 3 Measurement errors of bending curvature

传感器	弯曲曲率/ $\text{m}^{-1}$		
	实际值	测量值	误差/ $\%$
FBG1	5.06	4.97	1.78
FBG2	10.02	10.23	2.10
FBG3	15.07	15.37	1.59

## 5 结 论

本文提出了一种将光纤光栅植入软体气动驱动器应变限制层曲率测量与形状重构的方法。通过将光纤光栅传感器植入到双层聚酰亚胺薄膜中,形成具有辅助变形驱动和传感功能的应变限制层,实现了气动驱动装置变形形状的实时传感。实验结果表明,随着软体气动驱动器弯曲曲率的增加,FBG 传感器的中心波长漂移量单调递增,并呈非线性变化关系。传感器以中心波长漂移量与弯曲曲率关系为标定曲线。结合标定曲线和插值算法可重构出应变限制层的变形形状。软体驱动器在 3 种弯曲状态下光纤光栅传感测量值与限制层曲率标定值之间的最大误差为  $2.1\%$ 。该光纤传感方法可用于软体气动驱动器的变形传感测量与闭环控制。

## 参考文献:

- [1] LASCHI C, MAZZOLAI B, CIANCHETTI M. Soft robotics: Technologies and systems pushing the boundaries of robot abilities[J]. *Science Robotics*, 2016, 1(1):eaah3690.
- [2] ROBERTSON M A, PAIK J. New soft robots really suck: Vacuum-powered systems empower diverse

- capabilities[J]. *Science Robotics*, 2017, 2(9): ean6357.
- [3] 苑婷婷,黄鹏,李涵阳,等. 基于光学异常透射现象的光纤传感器的设计与研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2018, 38(3): 681-684.  
YUAN T T, HUANG P, LI H Y, *et al.*. Design and research for a kind of optical fiber sensor based on extraordinary optical transmission phenomenon[J]. *Spectroscopy & Spectral Analysis*, 2018, 38(3): 681-684. (in Chinese)
- [4] 沈涛,孙滨超,冯月. 马赫-曾德尔干涉集成的全光纤磁场与温度传感器[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(6): 1338-1345.  
SHEN T, SUN B CH, FENG Y. Mach-Zehnder interference all-fiber sensor for measurement of magnetic field and temperature[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(6): 1338-1345. (in Chinese)
- [5] 雷成敏,谷炎然,陈子伦,等. 高功率全光纤侧面抽运耦合器研究进展[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(7): 1561-1569.  
LEI CH M, GU Y R, CHEN Z L, *et al.*. Developments of high power all-fiber side-pumping combiner[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(7): 1561-1569. (in Chinese)
- [6] TAO T, CHEN Q, DA J, *et al.*. Real-time 3-D shape measurement with composite phase-shifting fringes and multi-view system[J]. *Optics Express*, 2016, 24(18): 20253.
- [7] 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.
- [8] YATABE K, ISHIKAWA K, OIKAWA Y. Compensation of fringe distortion for phase-shifting three-dimensional shape measurement by inverse map estimation[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(22): 6017-6024.
- [9] SAREH S, NOH Y, LI M, *et al.*. Macrobend optical sensing for pose measurement in soft robot arms[J]. *Smart Materials and Structures*, 2015, 24(12): 125024.
- [10] SILVA A S, CATARINO A, CORREIA M V, *et al.*. Design and characterization of a wearable macrobending fiber optic sensor for human joint angle determination[J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(12): 992-999.
- [11] SEARLE T C, ALTHOEFER K, SENEVIRATNE L, *et al.*. An optical curvature sensor for flexible manipulators[C]. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*. IEEE, 2013: 4415-4420.
- [12] XU L, GE J, PATEL J H, *et al.*. 3-dimensional soft shape sensor based on dual-layer orthogonal fiber Bragg grating mesh[C]//*Optical Fiber Communication Conference, Los Angeles, California, Washington, D. C.*: OSA, 2017.
- [13] ZHAO H C, JALVING J, HUANG R K, *et al.*. A helping hand: soft orthosis with integrated optical strain sensors and EMG control[J]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2016, 23(3): 55-64.

## 作者简介:



孙广开(1984—),男,河北廊坊人,博士,副教授,2007年、2010年于河北科技大学分别获得学士和硕士学位,2015年于北京航空航天大学获得博士学位,主要研究方向为智能传感、检测与机器人技术。E-mail: guangkai\_sun@buaa.edu.cn

## 通讯作者:



闫光(1979—),男,北京人,副教授,硕士生导师,2002年于东北大学获得学士学位,2007年、2013年于吉林大学分别获得硕士和博士学位,主要从事光纤光栅测控单元研制、信号采集系统设计、基于光纤光栅测控单元的结构空间载荷测量等方面的研究。Email: 584851848@qq.com